

T. C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAFES YAPI DOLGULU İNCE CİDARLI TÜPLERİN
ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Doktora Tezi

Erhan ÇETİN

Çorum 2020

**KAFES YAPI DOLGULU İNCE CİDARLI TÜPLERİN
ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Erhan ÇETİN

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

Doktora Tezi

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU**

Çorum 2020

Erhan Çetin tarafından hazırlanan “Kafes Yapı Dolgulu İnce Cidarlı Tüplerin Çarpışma Davranışlarının Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 26/02/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

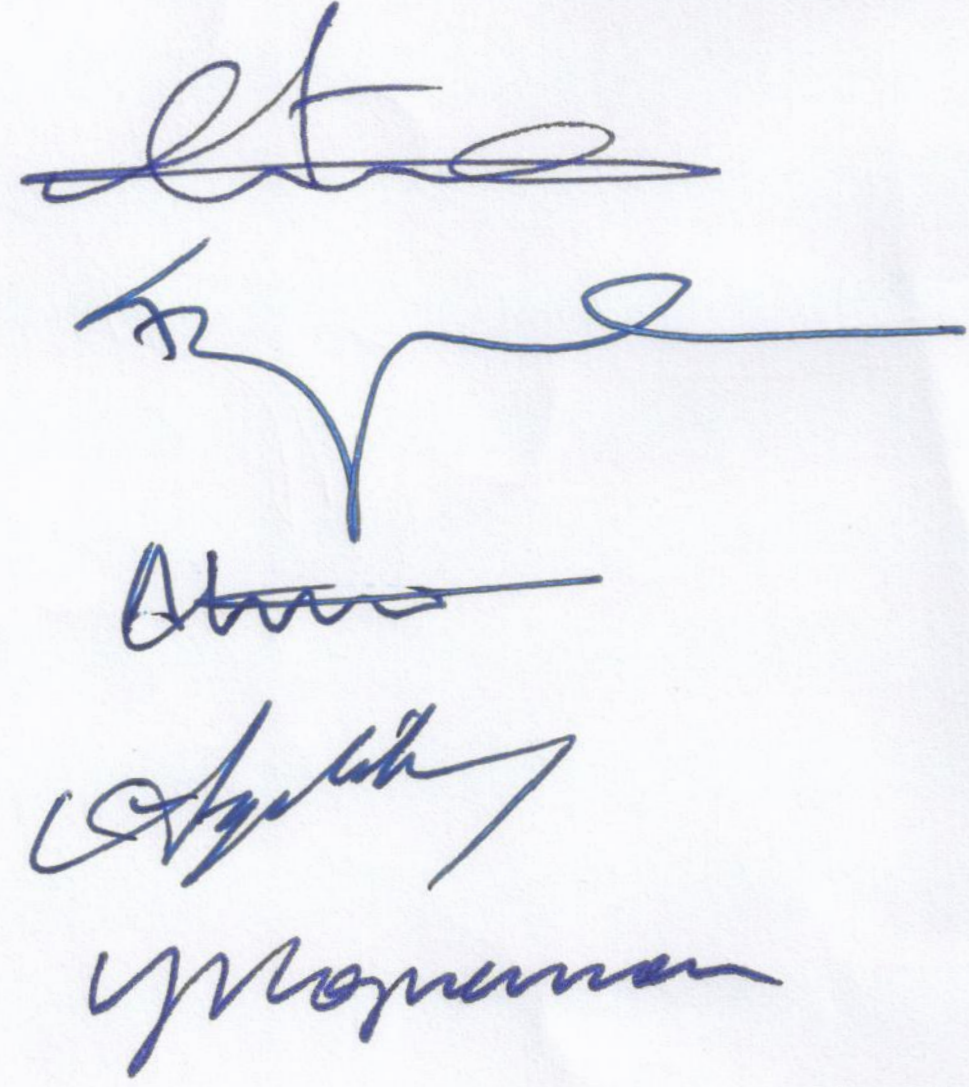
Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN

Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU


Dr. Öğr. Üyesi Öncü AKYILDIZ

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK

Dr. Öğr. Üyesi Yağmur KOPRAMAN



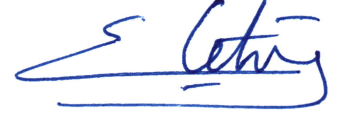
Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun .05.103/2020. tarihli ve 2020/63... sayılı kararı ile Erhan Çetin'in Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora derecesi alması onanmıştır.



Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.



Erhan ÇETİN

KAFES YAPI DOLGULU İNCE CİDARLI TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Erhan ÇETİN

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2020

ÖZET

İnce cidarlı tüpler pasif araç güvenlik sistemlerinde çarpışma enerjisi sönümleyici elemanlar olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda oldukça popüler olan metal eklemeli imalat teknolojileri ince cidarlı metal tüplerin çarpışma dayanım performanslarının daha da iyileştirilmesi için kullanılan özgün dolgu malzemeleri üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında ince cidarlı kare kesitli alüminyum 6063-T5 tüplerin içerisine dolgu malzemesi olarak iki farklı tipte kafes yapı (hacim merkezli kübik) ve (dikey elemanlara sahip hacim merkezli kübik) önerilmiş ve oluşturulan hibrit yapıların enerji sönümleme performansları aksel ve eğik yükler altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda, AlSi10Mg metal tozu kullanılarak doğrudan metal lazer sinterleme yöntemiyle üretilen kafes yapılar ince cidarlı tüplerin içerisine yerleştirilerek hibrit yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan hibrit yapılar çeşitli yüklemeler altında testlere tabi tutulmuş ve yapısal kusurlar, hasar modelleri, birim şekil değiştirme duyarlılığı, tüp ile kafes yapı arasındaki etkileşimler gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar modelleri doğrulanmıştır. Ayrıca hibrit yapıların eğik yükler altındaki enerji sönümleme performanslarını iyileştirmek için dolgu malzemesi olarak derecelendirilmiş kafes yapılar önerilmiş ve bu yapılara kütlece denk eşdeğer kalınlıklı kafes yapılar oluşturularak bu yapıların çeşitli yükler altındaki çarpışma dayanım performansları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda kafes yapı tipi, kafes eleman kalınlığı, kafes eleman düşey hücre sayısı, tüp kalınlığı,

derecelendirilmiş kafes yapıların tepe açısı ve taban çap değeri gibi birçok farklı tasarım parametresi ele alınmış ve bu yapıların enerji sönümlenme performansları çeşitli çarpışma dayanım kriterleri dikkate alınarak incelenmiştir. Bu tez çalışması, dolgu malzemesi olarak kullanılan kafes yapıların ince cidarlı tüplerin enerji sönümlenme performanslarını hem aksenel hem de eğik yükler altında kafes ve tüp arasında ilerlemeli deformasyonu teşvik edici hibrit etkileşimlerden dolayı dikkate değer ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca kafes yapı dolgulu tüplerin kafes birim hücre sayısı, kafes eleman çap değeri ve tüp kalınlığının uygun seçilmesiyle birlikte enerji sönümlenme performanslarının ciddi miktarda arttırılabildiği göstermiştir. Sonuçlar önerilen yapıların çarpışma sönümleyici uygulamaları için potansiyel adaylar olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı tüpler, Kafes yapılar, Hibrit tüpler, Çarpışma dayanımı, Sonlu elemanlar analizi

NUMERICAL INVESTIGATION OF CRASHWORTHINESS BEHAVIOUR OF LATTICE STRUCTURE FILLED THIN-WALLED TUBES

Erhan ÇETİN

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2020

ABSTRACT

Thin-walled tubes have been mostly used in passive vehicle safety systems as crash energy absorber. Metal additive manufacturing technologies, which have become very popular in recent years, enable the production of novel filler materials to further improve the crashworthiness performance of thin-walled metal tubes. In this study, two different types of lattice structures (i.e., body-centered cubic, BCC and body-centered cubic with a vertical strut, BCC-Z) were proposed as filling material in thin-walled square-section aluminum 6063-T5 tubes and the energy absorption performance of the hybrid structures were investigated using finite element method under axial and oblique loads. At this point, hybrid structures were formed by placing the lattice structures produced by direct metal laser sintering method using AlSi10Mg metal powder into the thin-walled tubes. Then, hybrid structures were tested under various loading conditions, and the nonlinear dynamic finite element model was validated by taking into account various parameters such as imperfection, damage models, strain rate sensitivity and interactions between the tube and the lattice structure. In addition, in order to enhance the energy absorption performance of hybrid structures under oblique loads, graded lattice structures were proposed and the crashworthiness performances of graded lattice structures and their uniform counterparts are compared at the same weight. At this point, the effect of lattice structure type, lattice member thickness, number of vertical lattice unit cell, tube thickness, draft angle of lattice structures and base diameter of lattice structures on the

energy absorption performance of hybrid structures were investigated by taking into account various crashworthiness criteria. This thesis study revealed that the lattice structures as filling material significantly improve the crashworthiness performance of thin-walled tubes due to hybrid interactions that promote progressive deformation between the lattice and the tube under both axial and oblique loads. In addition, the energy absorption performances of the lattice structure filled thin-walled tubes under axial loads can be considerably improved by the appropriate selection of number of lattice cell, diameter of lattice cell and tube thickness. The results revealed that the proposed structures are potential candidates for crashworthiness applications.

Keywords: Thin-walled tubes, Lattice structures, Hybrid tubes, Crashworthiness, Finite element analysis

TEŞEKKÜR

Öncelikle, keyifli ve bir o kadar da zorlu olan doktora eğitim hayatım boyunca sabırlı rehberliği ve olumlu teşvikleri için danışmanım ve çok kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU'na içtenlikle teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca tez izleme komitelerinde görüş ve önerilerini benimle paylaşan tezin ilerleme süresince yardımlarında bulunan çok değerli hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Öncü AKYILDIZ'a saygılarımı sunarım. Ayrıca öğrenme algoritmalarının geliştirilmesindeki katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Akademik çalışma hayatına başladığım yer olan Hitit Üniversitesi'ndeki değerli meslektaş ve arkadaşlarım olan Dr. Öğr. Üyesi Sertaç Samed SEYİTOĞLU'na, Arş. Gör. Mustafa Reşit HABOĞLU'na, Arş. Gör. Dr. Celal Utku DENİZ'e ve Makine Mühendisliği ile diğer bölümlerdeki tüm çalışma arkadaşlarıma her zaman destek ve tecrübelerini paylaşarak dost ellerini uzattıkları için çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, samimiyeti ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Merve TUNAY'a sonsuz teşekkür ederim.

Sabır ve şefkatle bugünkü kimliğimi kazanmam için çaba göstermiş ve her an düşüncelerinde olduğumu bildiğim babam Şerafettin ÇETİN'e, annem Huriye ÇETİN'e ve kız kardeşim Ecem ÇETİN'e destekleri ve karşılıksız sevgileri için şükranlarımı sunarım.

Ve dünyaya gelişiyle bana bambaşka duygular yaşatan, varlığıyla hayata bakış açımı değiştiren, zor zamanlarda bir gülüşüyle her şeyi tersine çeviren çok kıymetli oğlum Erhan Emir ÇETİN'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına, MUH19004.18.001 numaralı proje kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı, Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
RESİMLER DİZİNİ.....	xxiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxv
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ HİBRİT TÜPLER	10
2.1. Hücresel Dolgu Malzemeleri.....	13
2.1.1. Hücresel dolgu malzemelerinin sınıflandırılması	13
2.1.2. Kafes Yapılar	17
2.2. Tüp ve Kafes Yapıların Deformasyon Mekanizmaları	23
2.2.1. İnce cidarlı tüplerin deformasyon mekanizmaları	23
2.2.2. Kafes yapıların deformasyon mekanizmaları	31
2.3. Çarpışma Dayanım Parametreleri	34
3. SONLU ELEMENLAR (SE) MODELLERİ	38
3.1. SE Model Geometrilerinin Oluşturulması.....	39
3.1.1. Sabit kalınlıklı kafes yapı dolgulu hibrit tüplerin geometrik modellerinin oluşturulması.....	39
3.1.2. Derecelendirilmiş kafes yapı dolgulu hibrit tüplerin geometrik modellerinin oluşturulması.....	43
3.2. Yükleme ve Sınır Koşulları	47

Sayfa

3.3. Eleman Tipleri.....	50
3.4. Malzeme Modelleri ve Yapısal Kusurların Tanımlanması	50
3.5. Model Etkileşimlerinin Tanımlanması.....	56
3.6. Yakınsama Testleri.....	58
3.7. SE Modellerinin Doğrulanması.....	59
3.7.1. Deney numunelerinin üretimi	61
3.7.2. Fikstür tasarımı	65
3.7.3. Deneysel ölçüm ve sonuçlar	67
3.7.4. Deneysel ve SE analiz sonuçlarının karşılaştırılması	73
4. EKSENEL YÜKLER ALTINDAKİ HİBRİT TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ.....	80
4.1. Kafes Elemanların Hücre Sayılarının ve Çap Değerlerinin Hibrit Yapıların Çarpışma Dayanımlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi	80
4.2. Tüp Kalınlıklarının Hibrit Yapıların Çarpışma Dayanımlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi	88
4.3. Hibrit Yapıların Çarpışma Performanslarının Tahmin Edilmesi	90
5. EĞİK YÜKLER ALTINDAKİ HİBRİT TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ.....	95
5.1. EK-Hibrit ve D-Hibrit Yapıların Karşılaştırılması.....	95
5.2. D-Hibrit Yapılar ile Hibrit Yapı Bileşenlerinin Karşılaştırılması	111
5.3. Farklı Taban Çap Değerlerine Sahip D-Hibrit Yapıların Karşılaştırılması..	115
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR	128
EKLER.....	141
EK-1. Kafes yapı için örnek Python kodu	142

Sayfa

EK-2. Eksenel ve eğik yükler altındaki çeşitli yapıların çarpışma dayanım parametreleri	144
ÖZGEÇMİŞ	164



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Eksenel yükler altındaki hibrit tüplerin tasarımında dikkate alınan parametreler	41
Çizelge 3.2. Eğik yükler altındaki hibrit tüp tasarımlarında dikkate alınan tasarım parametreleri	44
Çizelge 3.3. Al6063-T5 ve AlSi10Mg malzemelerinin mekanik özellikleri	50
Çizelge 3.4. AlSi10Mg metal tozunun kimyasal bileşenleri (%).....	62
Çizelge 3.5. Kafes yapı üretim parametreleri.....	62
Çizelge 4.1. YSA test parametreleri.....	91
Çizelge 4.2. YSA için test sonuçları	91
Çizelge E2.1. Eksenel yükleme durumundaki içi boş tüp yapılar için çarpışma dayanım parametreleri	144
Çizelge E2.2. Eksenel yükleme durumundaki HMK kafes yapılar için çarpışma dayanım parametreleri	145
Çizelge E2.3. Eksenel yükleme durumundaki HMK-Z kafes yapılar için çarpışma dayanım parametreleri	146
Çizelge E2.4. Eksenel yükleme durumundaki HMK hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri	147
Çizelge E2.5. Eksenel yükleme durumundaki HMK-Z hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri	150
Çizelge E3.1. Eğik yükleme durumundaki EK-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri	153
Çizelge E3.2. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (5 mm kafes eleman taban çapı için).....	155
Çizelge E3.3. Eğik yükleme durumundaki 0,2° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması	157
Çizelge E3.4. Eğik yükleme durumundaki 0,3° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması	158

Çizelge	Sayfa
Çizelge E3.5. Eğik yükleme durumundaki 0,4° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması	159
Çizelge E3.6. Eğik yükleme durumundaki 0,5° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması	160
Çizelge E3.7. Eğik yükleme durumundaki 0,6° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması	161
Çizelge E3.8. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (4 mm kafes eleman taban çapı için).....	162
Çizelge E3.9. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (6 mm kafes eleman taban çapı için).....	163

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çeşitli enerji sönümleyici yapılar a) otomobil ve trenlerde kullanılan (Marsolek ve Reimerdes, 2004) ve b) uçaklarda kullanılan sönümleyiciler (Heimbs ve ark., 2010).....	10
Şekil 2.2. Hibrit tüplere çeşitli örnekler a) kompozit malzemeler ile kaplanarak oluşturulan hibrit tüpler (Sun ve ark., 2018) b) bal peteği ve köpük yapılarla oluşturulan kare hibrit tüpler (Husseïn ve ark., 2017) ve c) alüminyum ve polimer köpük malzemeler ile doldurulan dairesel hibrit tüpler (Kavi ve ark., 2006)	12
Şekil 2.3. Çeşitli hücreli yapı malzemelere örnekler a) bal peteği yapısı b) süngerin hücreli yapısı c) açık hücreli alüminyum köpük, Duocel (San Marchi ve ark., 2004) d) kapalı hücreli alüminyum köpük, Alporas (Andrews ve ark., 1999) ve e) insan kemiğinin hücreli yapısı	14
Şekil 2.4. Hücreli malzemelerin geometrik durumlarına göre sınıflandırılması (Wadley, 2002)	15
Şekil 2.5. Hücreli yapı malzemelere örnekler (Evans ve ark., 2001) a) rastgele ve b) periyodik	15
Şekil 2.6. Doğadaki çeşitli değişken kesit alanına sahip biyolojik yapılar a) at toynağının mikro yapısı (Kasapi ve Gosline, 1997; Liu ve ark., 2017), b) bambu gövdesindeki damarların iç yapısı (Liu ve ark., 2017) ve c) çimenin iç yapısı (Gibson, 2005)	16
Şekil 2.7. Çeşitli derecelendirilmiş hücreli yapılar a) köpük yapısı (Brothers ve Dunand, 2006) b) bal peteği yapısı (Nian ve ark., 2019) ve c) kafes yapısı (Maskery ve ark., 2016)	17
Şekil 2.8. İki boyutlu düzenli kafes yapılar a) kare, b) üçgen ve c) altıgen (Elsayed, 2010)	18
Şekil 2.9. İki boyutlu yarı düzenli kafes yapılar (Elsayed, 2010)	18
Şekil 2.10. İki boyutlu düzensiz kafes yapılar (Elsayed, 2010)	19
Şekil 2.11. Üç boyutlu çok yüzlü hücreler (Gibson ve Ashby, 1997) a) dört yüzlü (tetrahedron), b) üçgen prizma, c) dikdörtgen prizma, d) altıgen prizma, e) sekizyüzlü (octahedron), f) eşkenar dörtgen şeklinde on iki yüzlü (rombik dodekahedron), g) on iki yüzlü (dodekahedron), h) dört kare ve sekiz altıgen yüzeyden oluşan yapı (tetrakaidekahedron) ve i) yirmi yüzlü (icosahedron).....	20

Şekil	Sayfa
Şekil 2.12. Temel kübik hücre tipleri (Rehme ve Emmelmann, 2006).....	23
Şekil 2.13. Otomobillerdeki kullanılan ince cidarlı enerji sönümleyicilerin maruz kalabilecekleri yük ve deformasyon modları (Baroutaji ve ark., 2017)	24
Şekil 2.14. Eksenel yükler altındaki dairesel tüplerde görülen çeşitli deformasyon modları (Guillow ve ark., 2001) a) eksenel simetri modu (halka), b) simetrik olmayan mod (elmas) ve c) karışık deformasyon modu	25
Şekil 2.15. Alexander (1960) tarafından önerilen eksenel yükler altındaki dairesel tüplerin eksenel simetrik çökme mekanizması.....	25
Şekil 2.16. Eksenel simetrik deformasyon modu için önerilen modeller a) Grzebieta (1990) ve b) Singace ve ark. (1995), Singace ve Elsobky (1996), Wierzbicki ve ark. (1992)	27
Şekil 2.17. Temel çökme elemanları (Abramowicz ve Jones, 1984) a) Tip I ve b) Tip II	28
Şekil 2.18. Eksenel yükler altındaki kare tüplerin çeşitli deformasyon modları (Baroutaji ve ark., 2017) a) genişlemeli mod (extensional), b) simetrik mod, c) asimetrik karışık mod ve d) kompakt olmayan (non-compact) deformasyon modu.....	28
Şekil 2.19. Global eğilme modları a) dairesel tüp (Guillow ve ark., 2001) ve b) kare kesitli tüp (Abramowicz, 2003)	30
Şekil 2.20. Eğik yükler altındaki kare kesitli tüplerin deformasyon modları (Baroutaji ve ark., 2017; Nagel ve Thambiratnam, 2006)	30
Şekil 2.21. Eksenel yükler altındaki HMK kafes yapının deformasyon görüntüsü (Tsopanos ve ark., 2010).....	31
Şekil 2.22. Eğilme baskın ve çeki-bası baskın yapıların karakteristik eğrileri (Tamburrino et al., 2018)	32
Şekil 2.23. Kafes malzemelerin tipik basma davranışları a) eğilme baskın ve b) çeki-bası baskın (Gümrük, 2012)	32
Şekil 2.24. Enerji sönümleyici yapılar için a) kuvvet-yer değiştirme ve b) gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Ashby ve ark., 2000)	34
Şekil 2.25. TSE değerinin grafik üzerinde gösterimi (Langseth ve ark., 1998).....	35

Şekil	Sayfa
Şekil 2.26. İdeal bir enerji sönümleyici bir yapının kuvvet-yer değiştirme grafiği (Ahmad, 2009)	37
Şekil 3.1. Kiriş elemanlarla oluşturulmuş a) HMK ve b) HMK-Z kafes yapılar.....	39
Şekil 3.2. Örnek bir HMK kafes yapı için a) taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (Gümrük ve ark., 2013) ve b) kesişim noktalarının gösterilmesi (Gümrük, 2012).....	40
Şekil 3.3. HMK ve HMK-Z kafes yapıların tüp içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen hibrit yapıların şematik görünüşleri	41
Şekil 3.4. Literatürde yer alan ve köşelere pah kırılmış kafes yapı örnekleri a) Ushijima ve ark., (2011) b) Contuzzi ve ark., (2013) c) Al-Saedi ve ark., (2018) ve d) Maskery ve ark., (2016)	42
Şekil 3.5. Farklı hücre sayılarına sahip üç boyutlu katı HMK kafes yapılar: a) üç ($L/a = 3$), b) dört ($L/a = 4$), c) beş ($L/a = 5$), d) altı ($L/a = 6$) ve e) yedi hücreli ($L/a = 7$)	43
Şekil 3.6. Farklı hücre sayılarına sahip üç boyutlu katı HMK-Z kafes yapılar: a) üç ($L/a = 3$), b) dört ($L/a = 4$), c) beş ($L/a = 5$), d) altı ($L/a = 6$) ve e) yedi hücreli ($L/a = 7$)	43
Şekil 3.7. Kafes yapılarıdaki tepe açısının gösterimi	45
Şekil 3.8. Farklı tepe açılarında sahip D-kafes ve EK-kafes yapıların şematik gösterimi	46
Şekil 3.9. Köşelere pah kırılmış D-kafes ve EK-kafes yapıların şematik gösterimi	47
Şekil 3.10. Farklı taban çap değerlerine ve $0,5^\circ$ tepe açısına sahip kafes yapıların çap değerlerindeki değişim	47
Şekil 3.11. Katı (soldaki) ve Kiriş (sağdaki) elemanlarla modellenmiş eksenel yükler altındaki kafes yapıların sonlu elemanlar modeli	48
Şekil 3.12. Eğik yükler altındaki derecelendirilmiş hibrit yapıların sonlu elemanlar modeli.....	49
Şekil 3.13. Doğrulama testleri için kullanılan sonlu elemanlar modelinin şematik görünümü.....	49
Şekil 3.14. Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri a) Al6063-T5 ve b) AlSi10Mg	51

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. Kiriş ve katı kafes modeller için tespit edilen burkulma modları.....	53
Şekil 3.16. İçi boş tüp yapılar için sonlu elemanlar kabuk modeline yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumdaki deformasyon şekilleri.....	54
Şekil 3.17. HMK hibrit yapılar için sonlu elemanlar kiriş eleman modeline yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumdaki deformasyon şekilleri	55
Şekil 3.18. HMK hibrit yapılar için sonlu elemanlar katı eleman modeline yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumdaki deformasyon şekilleri	56
Şekil 3.19. “Hard contact” özelliği için yüzeyler arasındaki boşluk ve temas basıncı arasındaki ilişki (Dassault Systems Inc).....	57
Şekil 3.20. “Master” ve “slave” yüzeyler (Dassault Systems Inc).....	58
Şekil 3.21. Yüzeyler arasındaki “master-slave” ilişkisi (Dassault Systems Inc).....	58
Şekil 3.22. SE analizlerinde kullanılan çözüm ağlarının gösterimi	59
Şekil 3.23. Yakınsama test sonuçları a) kafes yapı ve b) içi boş tüp	59
Şekil 3.24. Eğik yüklemeler altındaki hibrit yapıların doğrulama testleri için tasarlanan fikstür.....	66
Şekil 3.25. Eksenel yükler altındaki yapıların sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması a) içi boş tüp, b) HMK yapı ve c) HMK-Z hibrit yapı	74
Şekil 3.26. Eksenel yükler altındaki boş tüp yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	75
Şekil 3.27. Eksenel yükler altındaki HMK hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	75
Şekil 3.28. Eksenel yükler altındaki HMK-Z hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	76

Şekil	Sayfa
Şekil 3.29. Eksenel ve 10° yükleme durumlarındaki yapıların sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması a) içi boş tüp, b) EK-hibrit ve c) D-hibrit yapı.....	77
Şekil 3.30. Eksenel yükleme durumundaki D-hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	77
Şekil 3.31. 10° yükleme durumundaki içi boş tüp yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	78
Şekil 3.32. 10° yükleme durumundaki EK-hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	78
Şekil 3.33. 10° yükleme durumundaki D-hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri.....	79
Şekil 4.1. Farklı hücre sayılarına sahip basit ve hibrit HMK yapıların kuvvet - yer değiştirme ve enerji - yer değiştirme grafikleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı.....	81
Şekil 4.2. Farklı hücre sayılarına sahip basit ve hibrit HMK-Z yapıların kuvvet-yer değiştirme ve enerji-yer değiştirme grafikleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı.....	82
Şekil 4.3. Farklı hücre sayılarına ve çap değerlerine sahip basit ve hibrit tüplerin ÖSE değerleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı	83
Şekil 4.4. Farklı hücre sayılarına ve çap değerlerine sahip basit ve hibrit tüplerin OÇK değerleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı	85
Şekil 4.5. Farklı hücre sayılarına ve çap değerlerine sahip hibrit tüplerin ÇKV değerleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı.....	86
Şekil 4.6. %60 deformasyona uğramış hibrit tüplerin deformasyon şekilleri.....	88
Şekil 4.7. Farklı tüp kalınlıklarına sahip hibrit tüplerin ÖSE değerleri ve deformasyon şekilleri.....	89
Şekil 4.8. HMK hibrit yapı için en uygun YSA'yı elde eden korelasyon katsayıları.....	92

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. HMK hibrit yapılar için en iyi YSA kullanılarak edilen a) ÖSE değerleri ve b) MÇK değerleri.....	92
Şekil 4.10. HMK-Z hibrit yapı için en uygun YSA'yı elde eden korelasyon katsayıları.....	93
Şekil 4.11. HMK-Z hibrit yapılar için en iyi YSA'ya göre a) ÖSE değerleri ve b) MÇK değerleri	93
Şekil 5.1. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre TSE değerleri.....	96
Şekil 5.2. Farklı yükleme açlarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre TSE değerleri	97
Şekil 5.3. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre ÖSE değerleri	99
Şekil 5.4. Farklı yükleme açlarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre ÖSE değerleri.....	100
Şekil 5.5. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre OÇK değerleri	101
Şekil 5.6. Farklı yükleme açlarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre OÇK değerleri	102
Şekil 5.7. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre BÇK değerleri	103
Şekil 5.8. Farklı yükleme açlarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre BÇK değerleri	104
Şekil 5.9. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre ÇKV değerleri	106
Şekil 5.10. D-hibrit ve EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarındaki %50 deformasyon boyundaki deformasyon şekilleri	107
Şekil 5.11. Farklı yükleme açlarına sahip EK-hibrit ve D-hibrit yapıların farklı deformasyon boylarındaki deformasyon şekilleri	108
Şekil 5.12. Hibrit tüpe etkiyen eksenel ve yatay kuvvetler ile yatay kuvvetlerin neden olduğu eğilme momentinin şematik gösterimi	109

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. İçi boş tüp, derecelendirilmiş hibrit yapı ile eşdeğer kalınlıklı hibrit yapının kuvvet – yer değiştirme grafiği ve deformasyon şekilleri.....	110
Şekil 5.14. Eksenel ve eğik yükler altındaki derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı hibrit tüplerin farklı yükleme boylarındaki deformasyon şekilleri.....	110
Şekil 5.15. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit yapılar ile hibrit yapıyı oluşturan bileşenlerin TSE değerlerinin karşılaştırılması	112
Şekil 5.16. Tüp ve kafes yapıların %50 ezilme boyundaki deformasyon şekilleri.....	114
Şekil 5.17. HMK hibrit yapıların %50 ezilme boyundaki deformasyon şekilleri.....	114
Şekil 5.18. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açlarındaki TSE değerleri	116
Şekil 5.19. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açlarındaki ÖSE değerleri	117
Şekil 5.20. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açlarındaki OÇK değerleri	119
Şekil 5.21. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açlarındaki BÇK değerleri	119
Şekil 5.22. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açlarındaki ÇKV değerleri	120
Şekil 5.23. 0,2° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri	121
Şekil 5.24. 0,3° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri	121
Şekil 5.25. 0,4° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri	121
Şekil 5.26. 0,5° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri	122

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. EOS M 290 doğrudan lazer metal sinterleme cihazı	61
Resim 3.2. Üretim sonrası kafes yapıların görüntüleri	63
Resim 3.3. Üretilen kafes yapılar: a) HMK (altta) ve HMK-Z (üstte) kafes yapı b) D-kafes (solda) ve EK-kafes yapı.....	63
Resim 3.4. Üretilen HMK ve HMK-Z kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	64
Resim 3.5. Üretilen D-kafes ve EK-kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	65
Resim 3.6. Oluşturulan çeşitli yapılar: a) boş tüp, eşdeğer kalınlıklı kafes yapılar ile bu yapılarla oluşturulan hibrit yapılar ve b) D-hibrit yapı.....	65
Resim 3.7. Üretilen fikstür ve eğimölçer ile kontrol edilmesi	66
Resim 3.8. Eksenel yükler altındaki örnek bir numunenin test görüntüsü	68
Resim 3.9. Eğik yükler altındaki örnek bir numunenin test görüntüsü.....	69
Resim 3.10. İçi boş tüp yapının farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	69
Resim 3.11. HMK hibrit tüpün farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	70
Resim 3.12. HMK-Z hibrit tüpün farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	70
Resim 3.13. Eksenel yükleme durumundaki D-hibrit yapının farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	71
Resim 3.14. 10° yükleme durumundaki içi boş tüp yapının farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	72
Resim 3.15. 10° yükleme durumundaki EK-hibrit yapının farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	72
Resim 3.16. 10° yükleme durumundaki D-hibrit yapının farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	Yapı genişliği
b	Birim hücre genişliği
L	Yapının başlangıç boyu
d_{taban}	Kafes yapının taban çap değeri
$d_{\text{üst}}$	Kafes yapının birim hücre üst çap değeri
m	Enerji sönmüleyicisinin kütlesi
C	Deformasyon hızı katsayısı
E	Elastisite modülü
G_f	Birim alan başına düşen kırılma enerjisi
R	Dinamik gerilme değerinin statik gerilme değerine oranı
α	Tepe açısı
ϵ_0	Von-Mises eşdeğer plastik birim şekil değiştirme başlangıç değeri
$\dot{\epsilon}_0$	Referans deformasyon hızı
ϵ_f	Von-Mises Eşdeğer hasar birim şekil değiştirme değeri
ϵ_c	Plastik birim şekil değiştirme kritik değeri
$\dot{\epsilon}_p$	Von-Mises eşdeğer plastik birim şekil değiştirme hızı
$\Delta\epsilon_p$	Von-Mises Eşdeğer plastik şekil değiştirme artışı
τ_k	Kritik kayma gerilmesi
μ	Sürtünme katsayısı

p	iki yüzey arasındaki temas basıncı
Δt_k	Kararlılık limiti
σ_0	Statik gerilme
ρ	Yoğunluk
σ_y	Akma gerilmesi
ν	Poisson oranı
σ_d	Dinamik gerilme
σ_{y0}	Kırılma başladığındaki akma dayanımı değeri
δ	Yer değiştirme
$F(\delta)$	δ Yer değiştirmesine karşılık gelen çarpışma kuvveti
v_0	İlk hız
θ	Yükleme açısı

Kısaltmalar

B31	İki Düğüm Noktalı Lineer Kiriş Eleman
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HMK-Z	Dikey Elemanlara Sahip Hacim Merkezli Kübik
C3D4	Dört Düğüm Noktalı Lineer Dört Yüzlü Katı Eleman
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
BÇK	Başlangıç Çarpışma Kuvveti
ÇKV	Çarpışma Kuvveti Verimliliği
ÇV	Çarpışma Verimliliği
EK	Eşdeğer Kalınlık

OÇK	Ortalama Çarpışma Kuvveti
ÖSE	Özgül Sönümlenen Enerji Miktarı
MÇK	Maksimum Çarpışma Kuvveti
R3D4	Dört Düğüm Noktalı Lineer Dörtgen Rijit Eleman
S4R	Azaltılmış İntegrasyon Noktasına Sahip 4 Düğüm Noktalı Kabuk Eleman
SE	Sonlu Elemanlar
SLE	Seçmeli Lazer Ergitme
SLS	Seçmeli Lazer Sinterleme
TSE	Toplam Sönümlenen Enerji Miktarı

1. GİRİŞ

Günümüz araç tasarımlarının vazgeçilmez özelliklerin başında güvenlik gelmektedir. Kaza sırasında anlık olarak yüksek bir çarpışma enerjisi ortaya çıkmakta ve bu enerji hem yolcu hem de kritik araç donanımlarına ciddi zararlar verebilmektedir. Bu sebeple araçlarda kaza anında ölümcül yaralanmaların önlenmesi ve deformasyonun kısıtlı bir alanda olması temin edilerek kritik araç donanımlarının hasarlardan korunması amacıyla çeşitli pasif güvenlik elemanları sıklıkla kullanılmaktadır. Çarpışma enerjisi sönmüleyicisi olarak kullanılan bu güvenlik elemanlarının başında ince cidarlı yapılar veya başka bir ifadeyle ince cidarlı tüpler gelmektedir (Baroutaji ve ark., 2017; Baykasoğlu ve ark., 2011; Heimbs ve ark., 2010; Huang ve ark., 2014, 2011; Li, 2019; Marsolek ve Reimerdes, 2004; Marzbanrad ve Ebrahimi, 2011; Meran ve ark., 2016; Ren ve Xiang, 2014; Xianfei ve ark., 2017). Bu elemanların kullanılmasındaki amaç araçlarda kazanın meydana gelebileceği muhtemel stratejik noktalara bu yapı elemanları yerleştirilerek kaza anında meydana gelen yüksek çarpışma enerjisinin kontrollü bir şekilde sönmülmesidir. Bu sayede kaza anında yolcu güvenliğinin korunması ve araç parçalarının mümkün olduğu kadar az hasar görmesi sağlanır (Abramowicz, 2003). İnce cidarlı tüplerin çarpışma dayanımlarını iyileştirmek amacıyla geçtiğimiz yıllarda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu noktada çeşitli malzemeler (alüminyum, çelik, kompozit v.b.), geometrik desenler (derecelendirilmiş, oluklu, pencereli v.b.), kesit şekilleri (kare, dairesel, altıgen v.b.) ve yarı tepe açılı (konik v.b.) yapılar gibi birçok farklı tipte yapı önerilmiştir. Önerilen bu tasarımlar ve bu tasarımların kullanıldığı uygulamalar hakkında literatürde birçok geniş kapsamlı çalışma bulunmaktadır (Abramowicz, 2003; Alghamdi, 2001; Baroutaji ve ark., 2017; Olabi ve ark., 2007; F. Xu ve ark., 2018; Yuen ve Nurick, 2008). Tüm bu yapılar dayanım, ağırlık, deformasyon şekilleri, üretim süreçleri ve maliyet gibi parametreler göz önüne alındığında birbirlerine kıyasla bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Bu gibi parametreleri dikkate alarak yeni malzemeler ve yapısal düzenlemeler ile birlikte ince cidarlı tüplerin çarpışma dayanımları dikkate değer ölçüde iyileştirilebilmektedir.

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu aksel olarak yüklenmiş ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performansları üzerine yapılan çalışmalardır. Oysaki gerçek bir çarpışma olayında sönümleyici yapılar aksel çarpışma yükünün yanı sıra farklı açılarda da yüklere maruz kalabilmektedir. Bu noktada, çarpışma yüküne bağlı olarak farklı deformasyon modları görülebilir ve bu modlar tüplerin enerji sönümleme performanslarını önemli ölçüde azaltabilmektedir (Hosseini-Tehrani ve Pirmohammad, 2007). Yapıların deformasyon karakteristikleri doğrudan yapının geometrisi ile ilgilidir ve uygun geometrik parametrelerin seçimi optimum çarpışma dayanımı performansını sağlamak için oldukça kritiktir. Bu nedenle, çeşitli yükleme koşulları altındaki tüplerin enerji sönümleme performanslarını artırmaya yönelik birçok farklı tipte yapı önerilmiştir (Abdewi ve ark., 2008; Ahmad ve ark., 2010; Ahmad ve Thambiratnam, 2009; Alkhatib ve ark., 2017; Azimi ve Asgari, 2016; Eyvazian ve ark., 2014; Liu ve ark., 2015; Nagel ve Thambiratnam, 2004a, 2004b). Bu yapılar arasında özellikle aksel ve eğik yükler altındaki üstün performanslarından dolayı konik tüpler araştırmacıların ilgisini oldukça çekmektedir. Ancak konik tüpler pratik uygulamalarda bazı dezavantajlara sahiptir. Örneğin, düşük tepe açısına sahip konik tüpler istenilen enerji sönümleme performansını sağlayamazken, yüksek tepe açılara sahip konik tüpler yer kısıtlaması nedeniyle bazı uygulamalarda kullanılamamaktadır (Baykasoğlu ve ark., 2019). Bu noktada konik tüplerin enerji sönümleme performanslarını iyileştirebilmek için genellikle tüp kalınlığını artırma yoluna gidilmektedir. Ancak tüp kalınlığını arttırmak yapının daha ağır olmasına neden olur ve bu da çarpışma verimliliğini düşüren bir etkidir. Bu problemin üstesinde gelebilmek için literatürde derecelendirilmiş (değişken duvar kalınlıklarına sahip) ince cidarlı tüpler önerilmiştir. Derecelendirilmiş tüpler aynı ağırlığa sahip konik tüplere kıyasla daha az yerleşim alanına ihtiyaç duymaktadır. Ek olarak, değişken kalınlık sayesinde ezilme periyodunun ön safhalarında global eğilme deformasyon modu engellenerek ilerlemeli burkulma ile birlikte farklı yükleme koşullarında bu yapılar oldukça başarılı enerji sönümleme performansı sunmaktadırlar (Dai ve ark., 2019; Li ve ark., 2015a; Pang ve ark., 2017; Sun ve ark., 2014; Xu ve ark., 2018; Zhang ve Zhang, 2015). Ayrıca, başlangıç çarpışma kuvveti ve çarpışma kuvveti verimliliği gibi birçok çarpışma kuvveti parametreleri ele alındığında

derecelendirilmiş tüpler, konik tüplerden daha iyi çarpışma dayanımı performansına sahiptirler.

Yukarıda bahsedilen ince cidarlı tüplerin oldukça başarılı enerji sönümlenme kapasitelerine sahip olmalarına karşın, son yıllarda, araştırmacılar tüplerin enerji sönümlenme performanslarını daha da iyileştirmeye yönelik çeşitli yöntemler uygulamışlardır (Baroutaji ve ark., 2017). Bu noktada ince cidarlı tüplerin çarpışma dayanımlarını arttırmak için kullanılan en etkili yöntemlerden birisi, bu yapıları kompozit (Babbage ve Mallick, 2005; Zhu ve ark., 2018, 2017), köpük (Fang ve ark., 2016; Hanssen ve ark., 2000; Hussein ve ark., 2017; Sun ve ark., 2010; Zarei ve Kröger, 2008; Zhang ve ark., 2015) veya bal peteği (Hussein ve ark., 2017; Paz ve ark., 2014; Yin ve ark., 2011; Zhu ve ark., 2016) gibi düşük yoğunluklu malzemeler ile güçlendirmektir. Kullanılan dolgu veya kaplama malzemeleri yapının toplam kütlelerini az miktarda arttırarak ince cidarlı tüplerin enerji sönümlenme performanslarına oldukça önemli katkılar sağlamaktadır. Bu noktada, ince cidarlı tüplerin çeşitli malzemeler ile birlikte kullanılarak enerji sönümlenme performanslarını arttırmaya yönelik literatürde bazı derleme çalışmaları bulunmaktadır (Baroutaji ve ark., 2019, 2017). Bu çalışmalardan bazıları takip eden satırlarda özetlenmiştir. Li ve ark. (2018), kare ve dairesel kesitli alüminyum tüp ve metal köpükler kullanılarak oluşturulmuş farklı tipte hibrit yapıların aksel yükler altındaki enerji sönümlenme karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma, uygun konfigürasyonlar seçilerek köpükle güçlendirilmiş hibrit yapıların enerji sönümlenme performanslarının oldukça artırılabilirliğini göstermiştir. Duarte ve ark. (2018), farklı bir teknik kullanılarak içerisine köpük yerleştirilmiş çok ince cidar kalınlığına sahip tüplerin aksel ezilme davranışlarını hem sanki-statik hem de dinamik yükler altında deneysel olarak incelemiştir. Zarei ve Kröger (2008), daha hafif ve daha verimli bir yapının elde edilebilmesi amacıyla çoklu tasarım optimizasyon tekniği kullanılarak içi boş ve köpük doldurulmuş ince cidarlı yapıların aksel darbe yükleri altındaki enerji sönümlenme performanslarını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Djamaluddin ve ark. (2015) ile Gao ve ark. (2016) yaptıkları benzer çalışmalarda içi köpük ile doldurulmuş tek ve iç içe geçirilmiş yapıların çarpışma dayanımlarını hem aksel hem de farklı yüklemelerde

nümerik olarak incelemiş ve bu hibrit yapıları optimize etmeye çalışmışlardır. Hussein ve ark. (2017), yaptıkları deneysel çalışmada içi boş kare tüp, içerisine alüminyum bal peteği doldurulmuş hibrit yapı, polimer köpük doldurulmuş hibrit yapı ve içerisine bal peteği ile köpüğün birlikte yer aldığı hibrit yapıların aksenal ezilme davranışlarını farklı hızlar altında incelemişlerdir. Hu ve ark. (2018), iç içe geçirilmiş bir veya birkaç dairesel metal tüp arasına metal köpük sıkılarak oluşturulmuş hibrit yapıların aksenal yükler altındaki enerji sönümlenme karakteristiklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Benzer bir başka çalışmada Sun ve ark. (2019a), iç içe geçirilmiş alüminyum ve karbon kompozit yapılar içerisine metal köpük konularak farklı tipte hibrit yapılar oluşturmuş ve bu yapıların aksenal yükler altındaki çarpışma dayanımları hem deneysel hem de nümerik olarak araştırmışlardır. Taherishargh ve ark. (2016), hem aksenal hem de eğilme yükleri altındaki içi boş ve içerisine köpük ile doldurulmuş hibrit yapıları deneysel olarak incelemişlerdir. Li ve ark. (2018), Sun ve ark. (2018) ile Sun ve ark. (2014) yaptıkları benzer çalışmalarda geleneksel katı köpük yapılara alternatif olarak sıvı nano köpük parçacıklarıyla güçlendirilmiş ince cidarlı çelik tüpler kullanarak farklı tipte enerji sönümleyici yapılar önermiş ve bu yapıları hem statik hem de dinamik yükler altında deneysel olarak test etmişlerdir. Sıvı nano köpük kullanılarak oluşturdukları yapılar köpük yapılara kıyasla oldukça iyi enerji sönümlenme performansı ortaya koymuştur. Zhu ve ark. (2018), alüminyum tüplerin ve bu tüplerin üzerine kompozit malzeme sarılmasıyla elde edilen hibrit yapıların çarpışma dayanımlarını hem aksenal hem de farklı yükleme açıları altında deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Benzer bir diğer çalışmada alüminyum kare tüplerin iç kısımlarına alüminyum bal peteği ve kompozit tüpler ile doldurularak hibrit yapılar elde edilmiş ve bu yapılar aksenal doğrultuda hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmiştir (Balaji ve Annamalai, 2018). Köpük yapı dolgulu ince cidarlı tüplerin enerji sönümlenme performanslarının ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmaların büyük bir bölümü eşdeğer yoğunluklu köpük yapılar ile ilgili çalışmalardır. Bu çalışmalardan farklı olarak literatürde dolgu malzemesinin sabit yoğunluklu olmayıp aksenal veya yanal yönde değişken yoğunluğa sahip olduğu çalışmalar da bulunmaktadır (Attia ve ark., 2012; Cui ve ark., 2009; Fang ve ark., 2016; Sun ve ark., 2010; Yin ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2015). Derecelendirilmiş dolgu malzemeli ince cidarlı tüplerin enerji sönümlenme performanslarının incelendiği

bu çalışmalar değişken yoğunluğa sahip dolgu malzemeli tp yapıların sabit yoğunluklu dolgu malzemeli tp yapılara göre daha iyi enerji sönümleme performanslarına sahip olduklarını göstermiştir.

İnce cidarlı tüpler ile birlikte geleneksel dolgu malzemelerinin kullanımı özellikle eğik yükler altındaki yapıların global eğilme davranışına olan meyilini arttırdığından dolayı istenen enerji sönümleme performansı sağlanamayabilmektedir (Baroutaji ve ark., 2019). Bu noktada hızla gelişen üretim teknolojilerine paralel olarak eklemeli imalat teknolojisi, karmaşık şekilli parçaların kolayca üretilmesine olanak sağlaması ile birlikte araştırmacılara özgün dolgu malzemeleri oluşturma ve geliştirme açısından çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Bunlar arasında eşdeğer kalınlıklı yapılar, derecelendirilmiş yapılar ve negatif Poisson oranına sahip yapılar gibi çeşitli tasarım konfigürasyonlarına sahip düşük yoğunluklu kafes yapılar son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Al-Saedi ve ark., 2018; Lijun ve Weidong, 2018; Maskery ve ark., 2017, 2016; Usta ve ark., 2019; Zhao ve ark., 2020). Bu noktada ince cidarlı tp yapıları sınırlı bir hacim içerisinde düşük yoğunluklu kafes yapılar ile doldurarak tp yapıların enerji sönümleme kapasiteleri önemli ölçüde arttırabilir. Kafes yapıların köpük gibi geleneksel dolgu malzemelerine göre en önemli avantajlarından birisi hücre topolojilerinin kontrol edilebilir olmasıdır. Geometrik boyutları farklılaştırılarak birçok farklı tipte kafes yapı elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında oldukça yaygın olarak kullanılan hacim merkezli kübik (HMK) ve dikey elemanlara sahip hacim merkezli kübik (HMK-Z) yapı olmak üzere iki farklı kafes yapı üzerinde durulmuştur. Bu noktada HMK ve HMK-Z kafes yapıların mekanik özellikleri, deformasyon şekilleri ve enerji sönümleme kapasiteleri üzerine yapılan ilgili çalışmalar takip eden satırlarda kısaca özetlenmiştir. Mckown ve ark. (2008), HMK ve HMK-Z kafes yapılara basma ve darbe testleri uygulayarak bu yapıların mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre basma yükü altındaki HMK-Z yapıların global eğilme davranışı eğilimi göstermesine karşın HMK yapıların ilerlemeli çökme davranışı gösterdiği grlmştir. Tsopanos ve ark. (2010), seçmeli lazer ergitme (SLE) yöntemi ile üretilen HMK kafes yapıların üretim parametrelerinin hücrelerin mekanik davranışları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu noktada lazer gücü ve lazer süresi iki ana parametre olarak belirlenmiş ve üretim parametrelerinin yapının basma

davranışları üzerinde oldukça etkili olduğu ortaya konulmuştur. Ushijima ve ark. (2011, 2013), yaptıkları çalışmalarda, çeşitli hücre boyutlarına sahip basma yükü altındaki HMK mikro kafes blokların mekanik özelliklerini hem analitik hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Gümrük ve ark. (2013), üç farklı birim hücre geometrisine sahip SLE yöntemiyle üretilmiş kafes yapılara kesme, çekme ve basma gibi çeşitli mekanik testler uygulamışlardır. Yapılan test sonuçlarına göre kafes yapının mekanik özelliklerini belirleyen iki ana unsurun hücre topolojisi ve bağlı yoğunluk olduğu görülmüştür. Gümrük ve Mines (2013), yaptıkları bir diğer çalışmada ise HMK kafes yapıların basma dayanımlarını deneysel, nümerik ve analitik olarak incelemişlerdir. Smith ve ark. (2013), basma yükü altındaki HMK ve HMK-Z hücre yapısına sahip kafes yapıların mekanik özelliklerini hem nümerik hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Mines ve ark. (2013), çekirdeği TiAl6V4 ve 316L metal tozlarından üretilmiş HMK kafes yapılar ile alt ve üst katmanı karbon fiber takviyeli kompozitten üretilmiş sandviç panellerin basma ve darbe testlerini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler neticesinde kafes yapılar ile mevcut alüminyum bal peteği yapıların mekanik davranışları kıyaslanmıştır. Karamooz Ravari ve ark. (2014), eriyik yığıma ile modelleme yöntemi kullanılarak üretilmiş HMK-Z topolojisine sahip kafes yapıların basma yükü altındaki mekanik özelliklerini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişlerdir. Maskery ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada, TiAl6V4 metal tozundan üretilmiş ve farklı birim hücrelere sahip HMK kafes yapıların mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. SLE yöntemiyle üretilen farklı boyutlardaki numunelere çekme testi uygulanmış ve bu numunelerden elde edilen sonuçlar tam dolu kesite sahip çekme numunelerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İlgili test sonuçları HMK kafes yapıların mekanik özelliklerinin birim hücre genişliğine ve birim hücre sayısına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Başka bir deneysel çalışmada (Gümrük ve ark., 2015) ise SLE yöntemiyle üretilmiş HMK kafes yapı içerisine kauçuk benzeri malzemeler sıcak halde preslenerek hibrit kompozit bir yapı elde edilmiştir. Bu çalışmada küçük birim hücre boyutlarından oluşan kompozit yapıların kompozit olmayan hücreli yapılara oranla enerji karakteristikleri ve gerilme değerlerinde büyük iyileşmeler görülmüştür. Leary ve ark. (2016), yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmada farklı hücre topolojilerine sahip kafes yapıların basma yükü altındaki mekanik özellikleri incelemişlerdir. Buna göre

farklı kafes morfolojileri ve yüzey pürüzlülüklerinin yapıların deformasyon mekanizmalarına ve hasar davranışlarına olan etkileri incelenmiştir. Ullah ve ark. (2016) basma ve kesme yükleri altındaki çeşitli kafes yapıların enerji sönümleme performansları ve hasar davranışları üzerine deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Li (2016), yaptığı çalışmada Split-Hopkinson düzeneği kullanarak HMK kafes yapıların dinamik deformasyon davranışlarını incelemiş ve bu çalışma sonunda SLE tekniği ile üretilen mikro kafes yapıların birim şekil değiştirme hızına duyarlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Josupeit ve ark. (2016) polimerik malzemeden seçmeli lazer sinterleme (SLS) yöntemi ile üretilmiş farklı tipteki kafes yapıların eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu noktada kafes yapının tipi, eleman kalınlığı ve hücre boyutu gibi parametreler ele alınmıştır. Crupi ve ark. (2017), doğrudan metal lazer sinterleme teknolojisi ile üretilmiş farklı boy/en oranlarına sahip HMK kafes yapıların mekanik davranışlarını sanki-statik yüklemeler altında deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Turner ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada ABS polimer malzemeden üretilen kafes yapılarla sandviç yapılar oluşturarak bu yapılara düşük hızlı darbe testleri uygulamış ve bu yapıların sönümledikleri enerji miktarları ile hasar mekanizmaları incelemişlerdir. Literatürde ayrıca farklı tipteki hücresel yapıların üretim yöntemleri, mekanik özellikleri, deformasyon davranışları ve enerji sönümleme kapasiteleri gibi kafes yapıların farklı özelliklerinin incelendiği çalışmalar ile ilgili çeşitli derleme yayınlar da bulunmaktadır (Dong ve ark., 2017; Mines, 2008; Rashed ve ark., 2016; Tamburrino ve ark., 2018; Xiong ve ark., 2015). Kafes yapıların mekanik özelliklerini daha da iyileştirmek için son yıllarda derecelendirilmiş yapılar oldukça ilgi çekmektedir. Maskery ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada SLS yöntemi kullanılarak üretilen eşdeğer kalınlıklı (EK) ve derecelendirilmiş (D) HMK ve HMK-Z kafes yapılara basma testi uygulamışlardır. Ayrıca bu çalışmada basma yükü farklı iki eksenle uygulanarak yapıların anizotropileri de incelenmiştir. Yapılan testler neticesinde D-kafes yapıların EK-kafes yapılara göre oldukça fazla enerji sönümledikleri görülmüştür. Maskery ve ark. (2016), yaptıkları başka bir çalışmada SLE üretim tekniği ile üretilmiş EK-kafes ve D-kafes yapıların sanki-statik yüklemeler altındaki enerji sönümleme davranışlarını incelemişlerdir. Üretilen HMK kafes yapılar hem ısı ile işlemlenmiş hem de ısı ile işlenmemiş olarak ele alınmıştır. Yapılan test sonuçları EK-kafes ve D-kafes yapıların yoğunlaşma

bölgesine kadar birbirine oldukça yakın enerji sönümleme kapasitelerinin olduğunu ancak ısı işlem görmüş D-kafes yapılarda hücrelerin ilerlemeli olarak ezildiği ve artan bir dayanım sergilediğini ortaya koymuştur. Sun ve ark. (2016) ile Ying ve ark. (2017), yaptıkları benzer çalışmada kübik ve altıgen kesitli olarak tasarladıkları EK-kafes ve D-kafes yapıların mekanik özelliklerini basma yükü altında deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalarda farklı yönlerde kalınlık değişimi olacak şekilde tasarlanan kafes yapılarıdaki mekanik özelliklerin değişimi incelenmiştir. Limmahakhun ve ark. (2017), ortopedik eklemlerde kullanılmak üzere CoCr tozundan üretilmiş EK-kafes ve D-kafes yapılar önermişlerdir. Bu çalışma ortopedik eklemlerde kullanılabilen HMK-Z kafes yapıların bağıl yoğunluklarını değiştirerek ilgili yapının rijitliğinin istenen seviyeye getirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca literatürde farklı tipteki derecelendirilmiş yapıların mekanik özellikleri, deformasyon davranışları ve enerji sönümleme kapasiteleri gibi farklı özelliklerin incelendiği derleme yayınlar da bulunmaktadır (Xu ve ark., 2018).

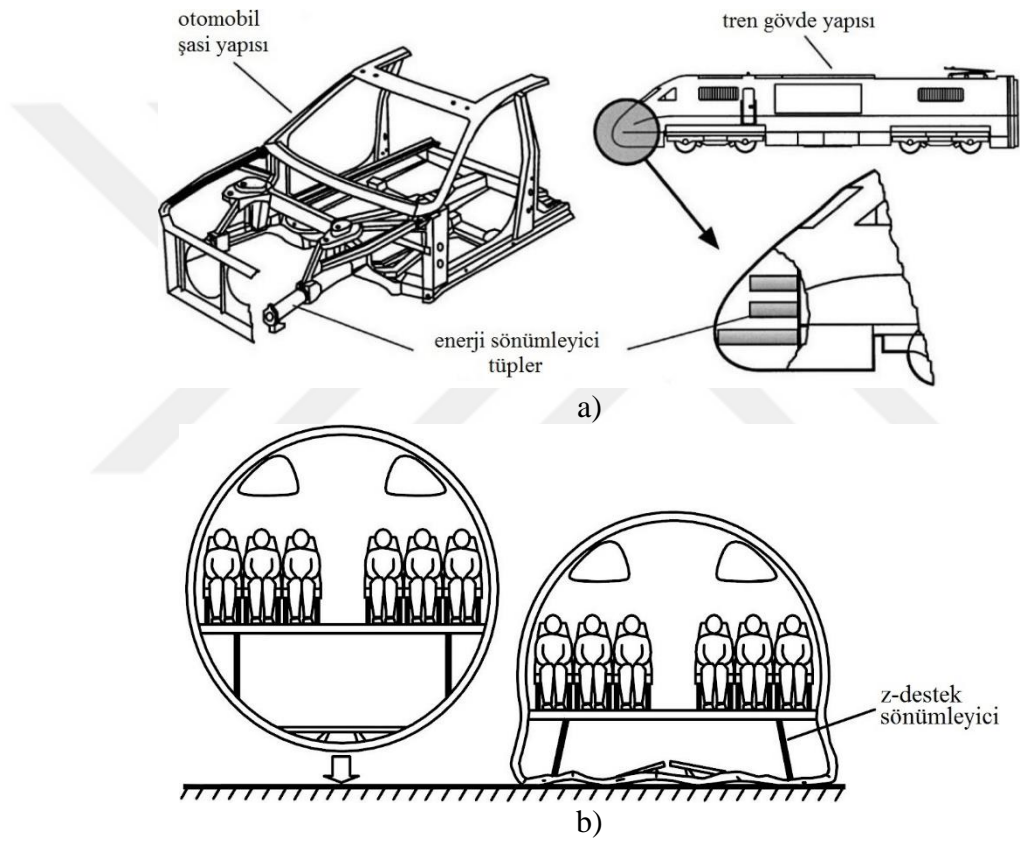
Literatür özetlerinden de görüldüğü gibi ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performanslarını arttırmak için tüp yapılar genellikle kompozit, bal peteği ya da köpük malzemeler ile birlikte kullanılmaktadır. Öte yandan, periyodik kafes yapıların oldukça umut vadeden enerji sönümleme performanslarına sahip olmalarına rağmen kafes yapıların tüp yapılar ile birlikte hibrit olarak kullanıldığı bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu noktada, kafes ve tüp yapıların etkin enerji sönüm özelliklerinden optimum şekilde kullanılarak yararlanılması ve kafes ile tüp arasındaki hibrit etkileşimlerden dolayı, ilerlemeli deformasyon temin edilerek çarpışma dayanımının en iyilemesi uygun kafes ve tüp tasarım parametrelerinin seçimi ile sağlanabilir. Bu motivasyonla, bu tez çalışmasında periyodik kafes yapılar ve bu yapıların tüp yapılarla dolgu malzemesi olarak kullanılmasıyla oluşturulan hibrit yapıların aksel ve eğik yükleme koşullarındaki çarpışma performansları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. İlk olarak doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş, çeşitli teknikler (kiriş ve katı eleman) denenmiş ve ilgili sonlu elemanlar modelleri doğrulanmıştır. Daha sonra, HMK ve HMK-Z kafes yapılarla güçlendirilmiş ince cidarlı tüplerin aksel yükler altındaki enerji sönümleme performansları ayrıntılı olarak incelenmiş, kafes yapıların

hücre sayıları ve eleman kalınlıkları ile tüp yapıların et kalınlıkları tasarım parametresi olarak ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde hibrit yapıların enerji sönümlenme kapasiteleri hibrit yapıyı oluşturan tüp ve kafes yapıların sönümledikleri toplam enerji kapasiteleri ile de karşılaştırılmıştır. Son olarak, farklı tepe açlarına sahip D-hibrit yapılar ile bu yapılara kütlece denk EK-hibrit yapılar tasarlanmış ve bu yapıların enerji sönümlenme performansları hem eksenel hem de eğik yükler altında incelenmiştir. Bu noktada, tasarım parametreleri olarak farklı taban çap değerleri ve tepe açıları ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında çeşitli çarpışma dayanımı kriterleri göz önünde bulundurularak kafes yapı dolgulu hibrit yapıların enerji sönümlenme performansları incelenmiştir. Kullanılan sonlu elemanlar modelleri eksenel ve eğik yükler altında ayrı ayrı deneysel testler ile doğrulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre D-hibrit yapıların EK-hibrit yapılara göre oldukça üstün çarpışma dayanımı performansına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca gerçekleştirilen bu tez çalışması, uygun kafes yapı parametreleri ve tüp kalınlığı seçimi ile birlikte eksenel ve eğik yükleme koşullarındaki hibrit yapıların enerji sönümlenme performanslarının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir.

2. ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ HİBRİT TÜPLER

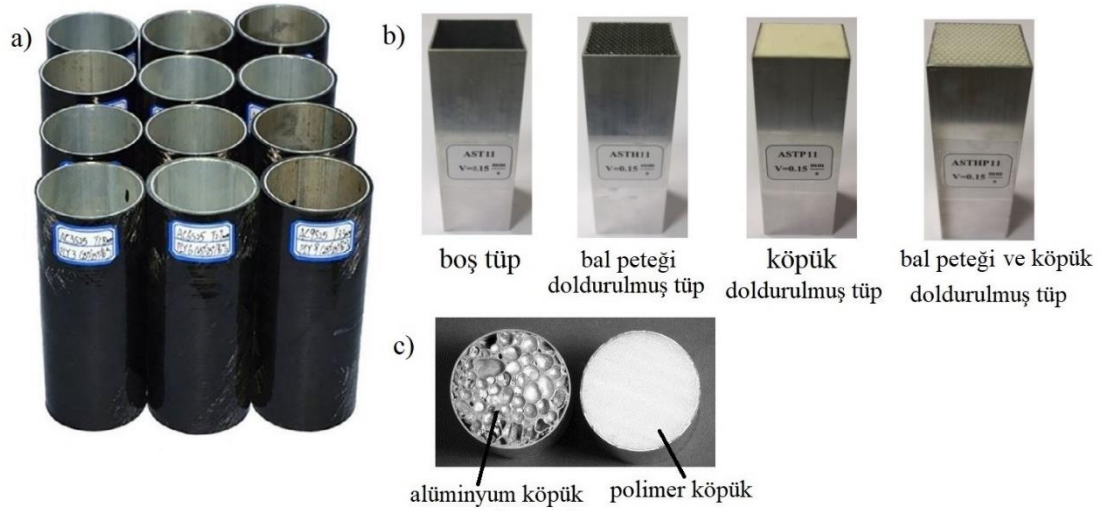
İnce cidarlı tüpler dinamik yükler altında üstün performans, uygun maliyet, yüksek verimlilik, üretim ve kurulum kolaylığı gibi avantajlarından dolayı özellikle karayolu, demiryolu ve havayolu araçlarında enerji sönmleyici olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Baroutaji ve ark., 2017). Otomobil, tren ve uçaklarda kullanılan çeşitli sönmleyici yapı örnekleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Çeşitli enerji sönmleyici yapılar a) otomobil ve trenlerde kullanılan (Marsolek ve Reimerdes, 2004) ve b) uçaklarda kullanılan sönmleyiciler (Heimbs ve ark., 2010)

İnce cidarlı tüplerin enerji sönmleme performansları kullanılan malzeme, yapı geometrisi ve yükleme şekline göre oldukça değişkenlik gösterebilir. İnce cidarlı enerji sönmleyici olarak en yaygın kullanılan yapılar alüminyum ve çelik gibi metalik yapılar ile kompozit gibi yapılardır. Kullanılan metalik ve kompozit yapıların enerji sönmleme mekanizmaları oldukça farklılık göstermektedir. Gevrek yapılı kompozit yapılar katmanlar arası ayrışma, fiber kırılması ve matris çatlaması gibi farklı

deformasyon mekanizmalarına sahipken (Robinson ve ark., 1997) sünek yapılı metalik malzemeler plastik deformasyon yoluyla enerji sönümlemektedir. Bu tez çalışmasında araçlarda enerji sönümleyici yapılar olarak yaygın şekilde kullanılmalarından dolayı metalik ince cidarlı tüpler dikkate alınmıştır. Metalik ince cidarlı tüpler gelen darbe durumuna göre, aksenal ve eğik gibi birçok farklı farklı yükleme koşullarına maruz kalabilmektedir ve bunun sonucu olarak tüplerin enerji sönümleme performansları önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu noktada, ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performanslarını artırmaya yönelik çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri tüplerin duvar kalınlıklarını arttırmaktır. Fakat bu yöntemde tüplerin enerji sönümleme kapasiteleri artarken diğer yandan düşük olması arzu edilen başlangıç çarpışma kuvveti gibi önemli çarpışma dayanım parametrelerinin de önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Ayrıca tüp kalınlığını arttırmak kaçınılmaz olarak kütleyi de arttırmaktadır. Bu gibi sebeplerden dolayı ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performanslarını çarpışma dayanımı parametreleri göz önünde bulundurarak daha da iyileştirebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem tüplerin iç veya dış kısımlarına çeşitli malzemeler ile güçlendirerek hibrit tüp adı verilen yapılar elde etmektir. Bu noktada çeşitli kaplama ve dolgu malzemeleri kullanılarak farklı tipte hibrit tüpler oluşturulabilmektedir (Şekil 2.2). Kaplama yönteminde en yaygın kullanılan kaplama malzemesi kompozitlerdir. Bu yöntemde tüplerin dış kısmına reçineden geçirilmiş fiberlerin istenen açılarda sarılması ile hibrit tüpler oluşturulmaktadır. Bu yöntemde cam, karbon ve aramid gibi farklı tip elyaf malzemeler ile termoplastik ve termoset gibi farklı reçineler kullanılarak değişik tipte hibrit tüpler oluşturulabilmektedir. Diğer yandan doldurma yönteminde ise ince cidarlı tüplerin iç kısımları dolgu malzemesi olarak polimerik köpük, metal köpük, bal peteği, mantar ve ahşap gibi çeşitli dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Dolgu malzemesi olarak kullanılabilen kafes yapı, köpük ve bal peteği gibi yapılara hücre malzemeler adı verilmektedir. Farklı tip ve yoğunluktaki dolgu malzemeleri uygun boyutlara getirilerek tüp içerisine yerleştirilmektedir. Bu dolgu malzemeleri sabit kuvvet altında büyük deformasyon boyları sayesinde ince cidarlı tüpler ile birlikte kullanılmasıyla tüplerin enerji sönümleme davranışlarını önemli ölçüde iyileştirmektedir.



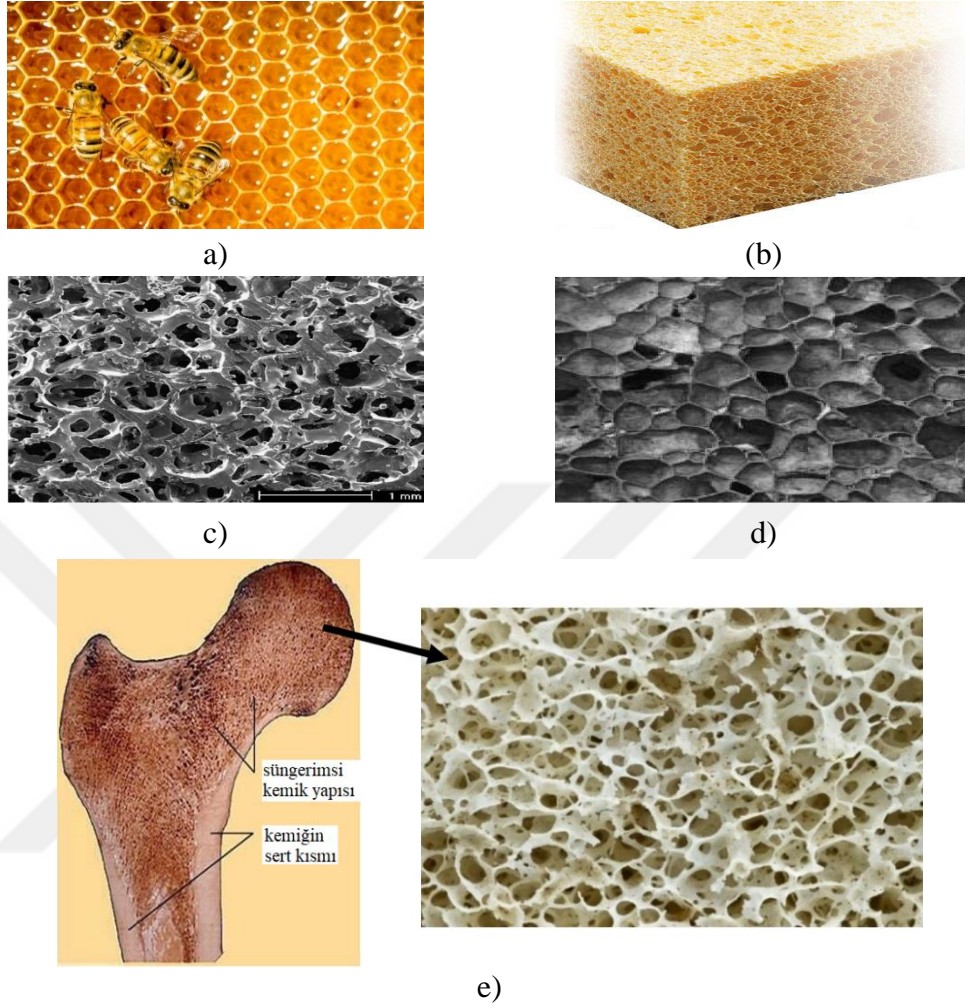
Şekil 2.2. Hibrit tüplere çeşitli örnekler a) kompozit malzemeler ile kaplanarak oluşturulan hibrit tüpler (Sun ve ark., 2018) b) bal peteği ve köpük yapılarla oluşturulan kare hibrit tüpler (Hussein ve ark., 2017) ve c) alüminyum ve polimer köpük malzemeler ile doldurulan dairesel hibrit tüpler (Kavi ve ark., 2006)

Sabit yoğunluklu köpük yapı dolgulu ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performanslarının oldukça iyi olmasına rağmen maksimum çarpışma dayanımı performansı veren en başarılı yapılar değildirler. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda aksenal ya da eksene dik doğrultuda yoğunluğun değiştiği ve derecelendirilmiş köpük yapı adında yeni tipte dolgu malzemeleri önerilmiştir. Bu yapılar enerji sönümleyici tüplerin maruz kalacağı yükün duruma göre istenilen doğrultuda derecelendirilerek sabit yoğunluklu hibrit yapılara göre oldukça üstün bir enerji sönümleme performanslarına sahip olabilmektedirler (An ve ark., 2015; Li ve ark., 2015b; Sun ve ark., 2010). Bu tez kapsamında literatürde yer almayan kafes yapı dolgulu ince cidarlı tüpler üzerine odaklanılmış ve ilgili kafes yapılar derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı olarak tüplerin içerisine yerleştirilerek farklı yükleme koşulları altındaki çarpışma dayanım performansları birçok tasarım parametresi dikkate alınarak detaylı olarak incelenmiştir.

2.1. Hücresel Dolgu Malzemeleri

2.1.1. Hücresel dolgu malzemelerinin sınıflandırılması

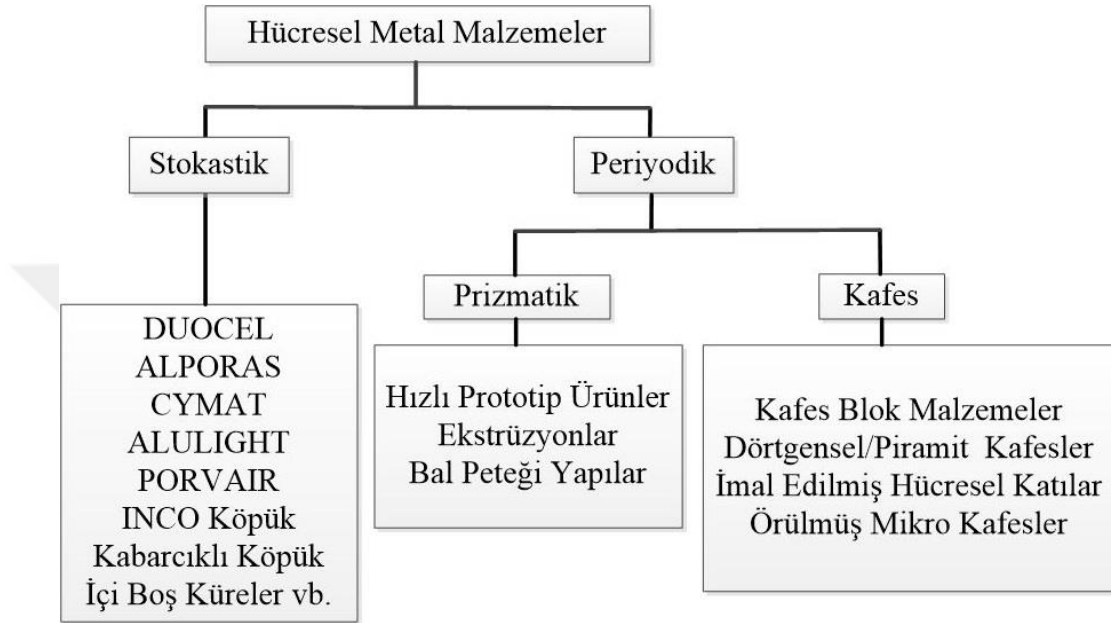
Tanım olarak bir malzemenin içindeki boşluğun hacmi, o malzemeyi oluşturan katı malzemenin hacminden göreceli olarak daha fazla olan malzemelere hücresel malzemeler denilmektedir. Hücresel malzemeler yalıtım, paketlenme, enerji sönümlenme (Jin ve ark., 2015; Ozdemir ve ark., 2016; Sun ve ark., 2016) ve sandviç yapıların dolgu malzemesi olarak kullanılması (Liu ve Wang, 2015; Wei ve ark., 2015) gibi birçok uygulama alanına sahiptirler. Bununla birlikte hücresel malzemeler sınıfına giren polimerik köpüklerden imal edilen tek kullanımlık çay ve kahve bardakları gündelik yaşamda adından sıkça söz ettirmektedir. Bu gibi sebeplerle gerek endüstride gerekse günlük yaşamda hücresel malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Ayrıca düşük yoğunluğa sahip hücresel yapılar dolgu malzemesi olarak darbe enerjisi sönümlenme uygulamaları için umut vadeden bir yapı olarak göze çarpmaktadır (Banhart, 2001; Sun ve Li, 2018). Hücresel malzemelerin toplam yoğunluğunun hücresel malzeme içerisindeki katı malzemenin yoğunluğuna oranı olan izafi yoğunluk kavramı hücresel malzemelerin en önemli parametrelerinin başında gelmektedir. İstenilen mekanik özellikleri sağlamak kaydıyla malzeme içerisindeki boşlukları artırarak izafi yoğunluğu oldukça düşük seviyelere getirmek ve dolayısıyla ilgili yapıyı olabildiğince hafifletmek mümkündür. İzafi yoğunluğu 0,001 olan ultra hafif malzemeler buna en güzel örnektir. Polimerik malzemeler 0,05-0,2 izafi yoğunluğuna sahipken, doğadaki birçok yumuşak dokulu ağaç 0,15-0,40 izafi yoğunluklarına sahiptir. İzafi yoğunluğu 0,3'ten daha fazla olan yapılar ise hücresel malzemeler tanımından çıkıp, boşluklar içeren/gözenekli katı malzemeli yapılar sınıfına girmektedir (Gibson ve Ashby, 1997). Hücresel yapıların imalatı sırasında ergimemiş metal vb. üretim kusurlarının yanı sıra, hücre topolojisinin doğal bir sonucu olarak birçok hücresel malzeme anizotrop özellik göstermektedir. Bazı yapılar düzlem dışı yüklemelerde oldukça iyi enerji sönümlenme ve yapısal yük taşıma yeteneğine sahip iken, düzlem içi yükleme durumlarında nispeten daha başarısız kalmaktadır (Gümrük, 2012). Bal peteği yapılar bu duruma en güzel örnektir. Şekil 2.3'te doğal ve yapay yollarla üretilen çeşitli hücresel yapıları malzemeler gösterilmiştir.



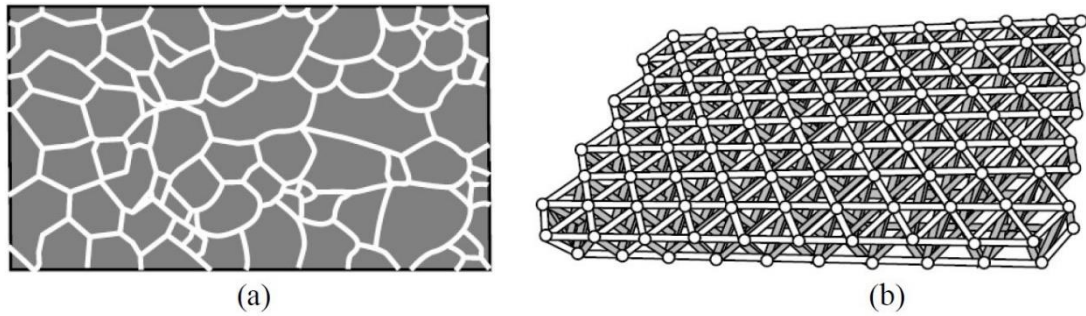
Şekil 2.3. Çeşitli hücresel yapılı malzemelere örnekler a) bal peteği yapısı b) süngerin hücresel yapısı c) açık hücreli alüminyum köpük, Duocel (San Marchi ve ark., 2004) d) kapalı hücreli alüminyum köpük, Alporas (Andrews ve ark., 1999) ve e) insan kemiğinin hücresel yapısı

Wadley (2002), hücresel yapılı malzemeleri geometrik durumlarına göre rastgele (stokastik) ve periyodik olmak üzere iki ana kategoride toplamıştır (Şekil 2.4). Rastgele ve periyodik hücresel malzemelerin şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Köpüksü malzemeler gibi rastgele yapılı malzemeler mükemmel termal ve akustik özellikler gösterirken, iki boyutlu bal peteği ve üç boyutlu kafes yapılar gibi periyodik yapılar ise oldukça iyi mukavemet, rijitlik ve enerji sönmüleme gibi mekanik özelliklere sahiptir (Gibson ve Ashby, 1997). Bir hücresel malzemenin periyodik olarak nitelenmesi için bir birim hücre geometrisinin yan yana veya üst üste düzenli olarak dizilmesi gerekmektedir. Periyodik yapıların rastgele yapılara göre en büyük

üstünlüğü üretim sırasında hücre geometrisinin (topolojisi) kontrol edilebilir olmasıdır (Fleck ve ark., 2010). Bu özelliği ile periyodik yapı malzemeler birçok farklı uygulama alanlarında kullanılabilir (Jin ve ark., 2015; Maloney ve ark., 2012; Vasiliev ve ark., 2012, 2001; Vasiliev ve Razin, 2006).

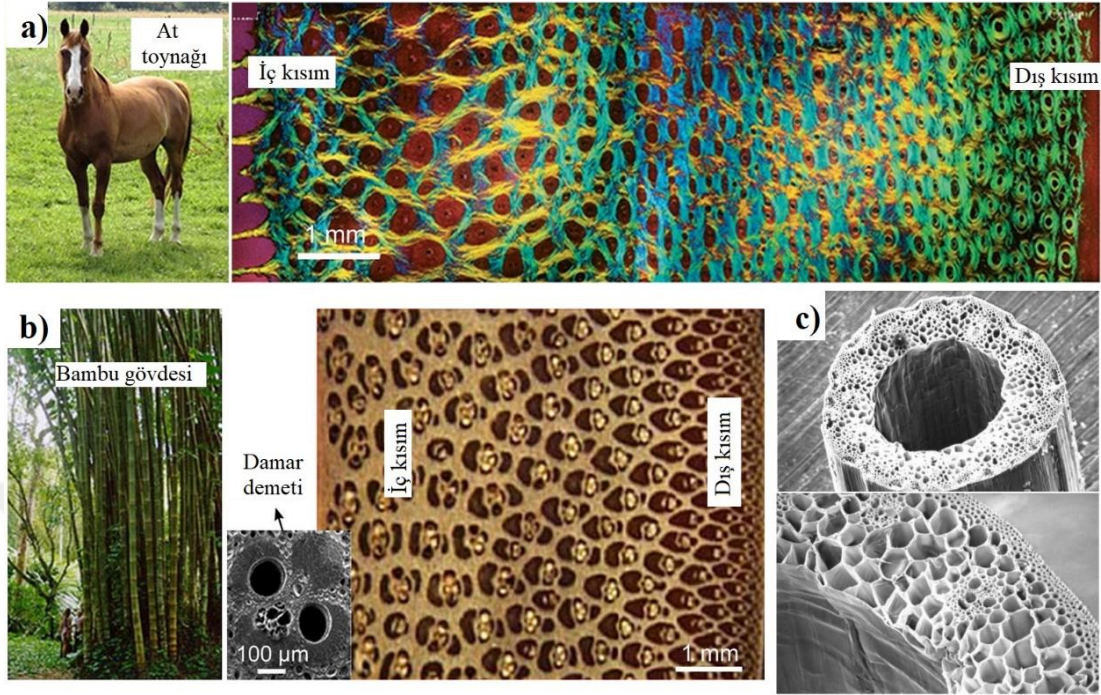


Şekil 2.4. Hücresel malzemelerin geometrik durumlarına göre sınıflandırılması (Wadley, 2002)



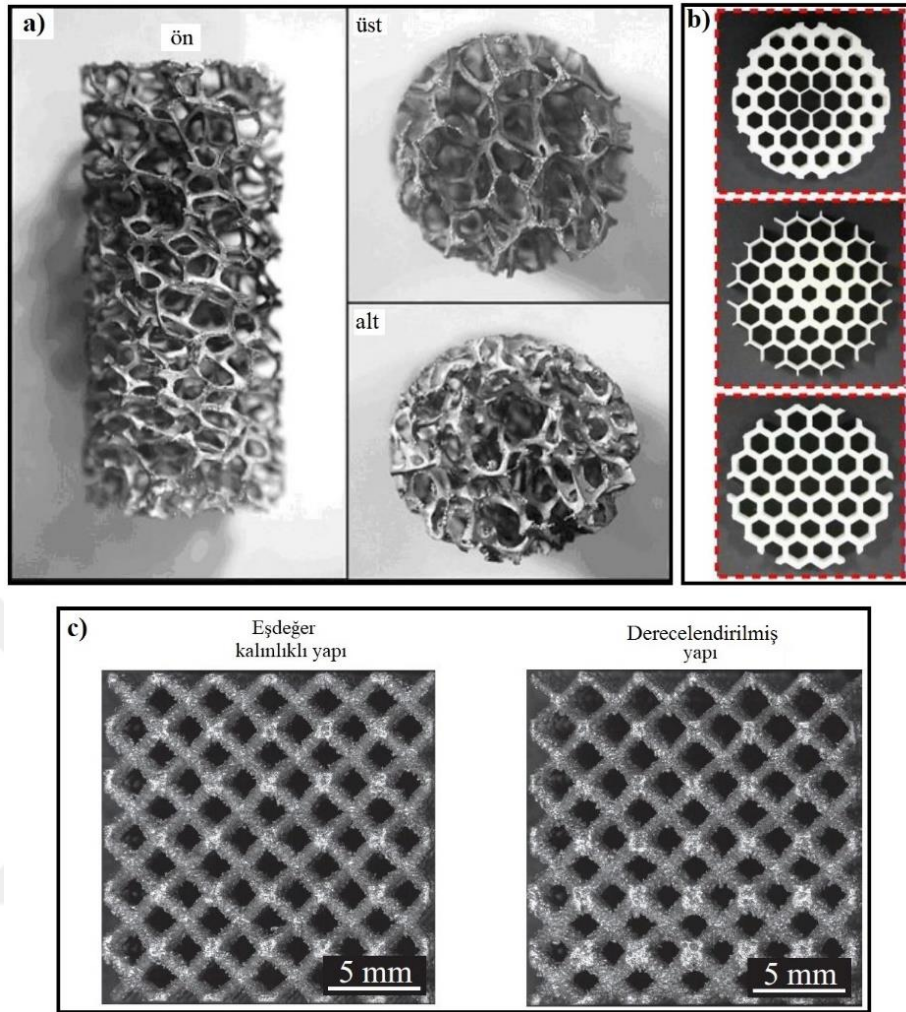
Şekil 2.5. Hücresel yapı malzemelere örnekler (Evans ve ark., 2001) a) rastgele ve b) periyodik

Birçok farklı formlarda olabilen hücre malzemeler yapı içerisinde homojen kesit dağılımlarına sahip oldukları gibi gelişen teknolojiyle birlikte değişken kesit alanlarına sahip yapılar da elde edilebilmektedir. Bu noktada doğadan ilham alınarak (Şekil 2.6) hücresel yapı içerisinde farklı özellik, şekil ve boyutlara sahip ve derecelendirilmiş hücresel yapılar adı verilen malzemeler oluşturulabilmektedir.



Şekil 2. 6. Doğadaki çeşitli değişken kesit alanına sahip biyolojik yapılar a) at toynağının mikro yapısı (Kasapi ve Gosline, 1997; Liu ve ark., 2017), b) bambu gövdesindeki damarların içyapısı (Liu ve ark., 2017) ve c) çimenin iç yapısı (Gibson, 2005)

Derecelendirilmiş hücre malzemeler uygulama alanlarına bağlı olarak istenen özelliklerde üretilebilmesinden dolayı homojen yapı malzemelere göre üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bu tip yapılar içerisinde en yaygın kullanılan derecelendirilmiş yapılar; köpük, bal peteği ve kafes yapılarıdır. Bu tip derecelendirilmiş yapıların gözenekleri, çap değerleri, hücre duvar ve genişlikleri değiştirilerek farklı doğrultularda farklı mekanik özellikler göstermeleri sağlanabilmektedir. Değişken kesit alanına sahip çeşitli derecelendirilmiş yapılar Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi derecelendirilmiş yapılar istenilen mekanik özelliklere göre farklı doğrultularda kesit değişikliklerinin olduğu yapılarıdır. Bu tez çalışmasında periyodik hücre malzemeler sınıfına giren eşdeğer kalınlıklı ve derecelendirilmiş kafes yapılar üzerinde durulmuştur.

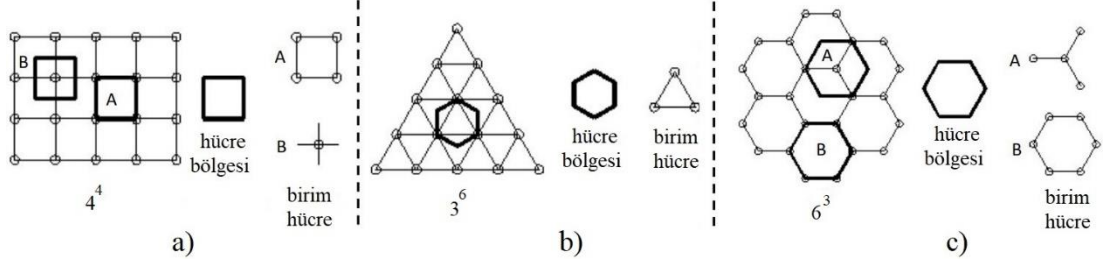


Şekil 2.7. Çeşitli derecelendirilmiş hüresel yapılar a) köpük yapı (Brothers ve Dunand, 2006) b) bal peteği yapı (Nian ve ark., 2019) ve c) kafes yapı (Maskery ve ark., 2016)

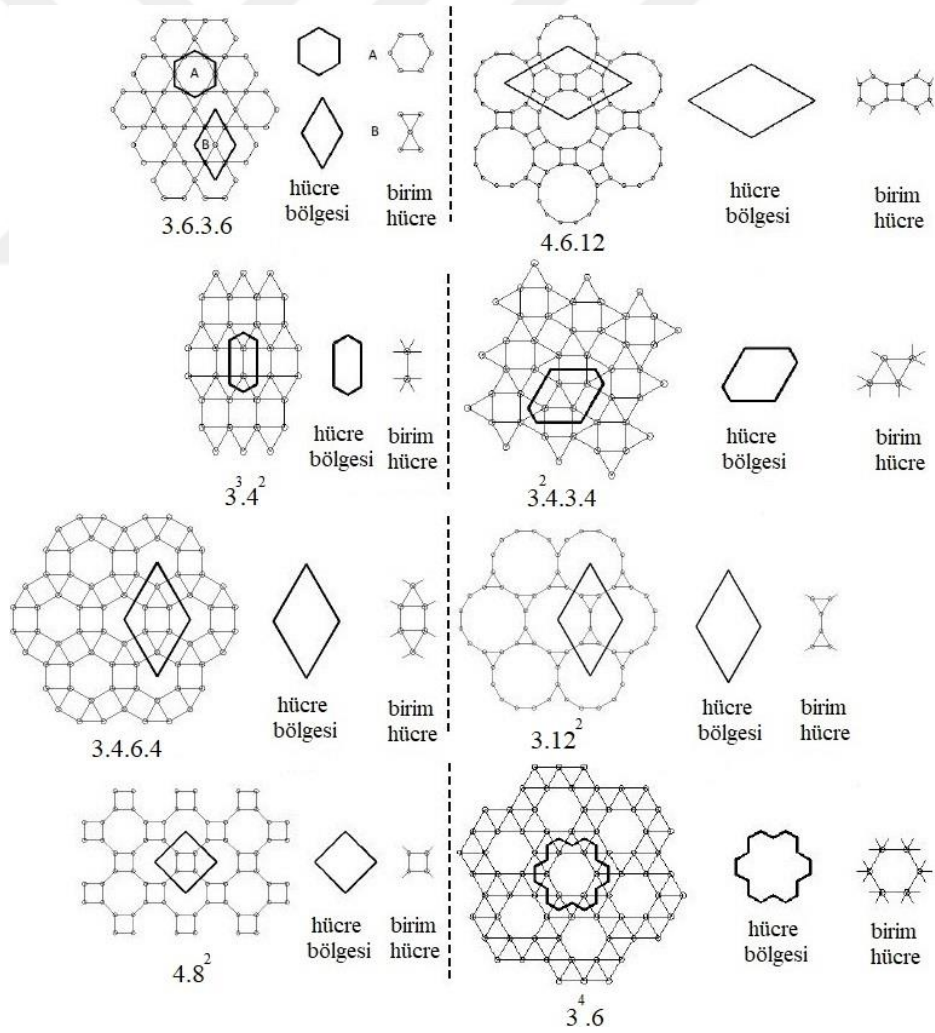
2.1.2. Kafes Yapılar

Periyodik hüresel malzemeler sınıfına giren kafes yapılar genel olarak düzlemsel (iki boyutlu) ve uzaysal (üç boyutlu) kafes yapılar şeklinde iki sınıfa ayrılabilir. Düzlemsel kafes yapı topolojileri genellikle düzenli, yarı düzenli ve düzensiz olmak üzere sınıflandırılabilir. Düzenli bir kafes yapı Şekil 2.8’den de görülebileceği gibi sadece üçgen, kare veya altıgen şeklinde düzenli çokgenlerden oluşur. Düzenli ve yarı düzenli kafes yapılarıdaki düğüm noktalarının bağlantıları kullanılarak kafes yapılar sınıflandırılmıştır. Cundy ve Rolett (1961), bir düğüm noktası etrafındaki düzenli çokgen sayılarını kullanarak “Schlafli sembolleri” adını verdikleri bir yöntemle kafes

yapıları adlandırmışlardır. Örneğin Şekil 2.8'deki 4^4 gösterimi her bir düğüm noktası etrafında 4 adet kare olduğu anlamını taşıırken, 3^6 gösterimi düğüm noktaları etrafında 6 adet üçgenlerin var olduğunu gösterir.

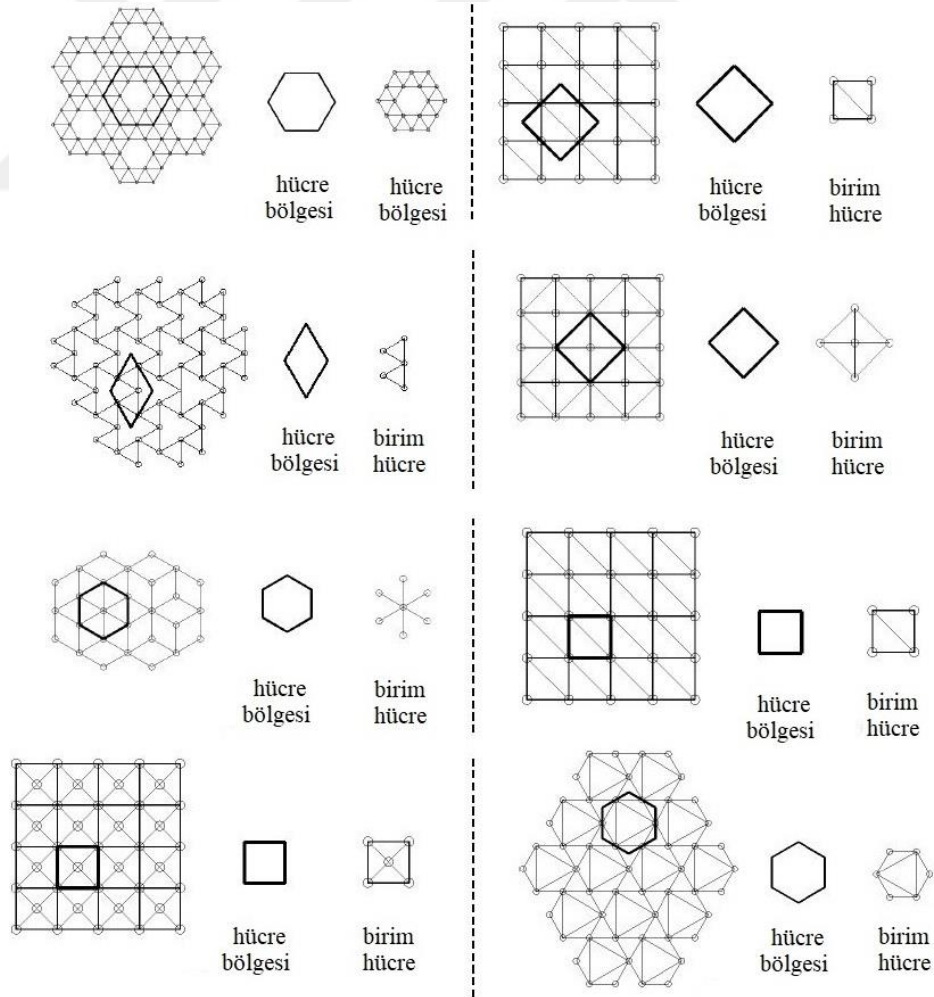


Şekil 2.8. İki boyutlu düzenli kafes yapılar a) kare, b) üçgen ve c) altıgen (Elsayed, 2010)



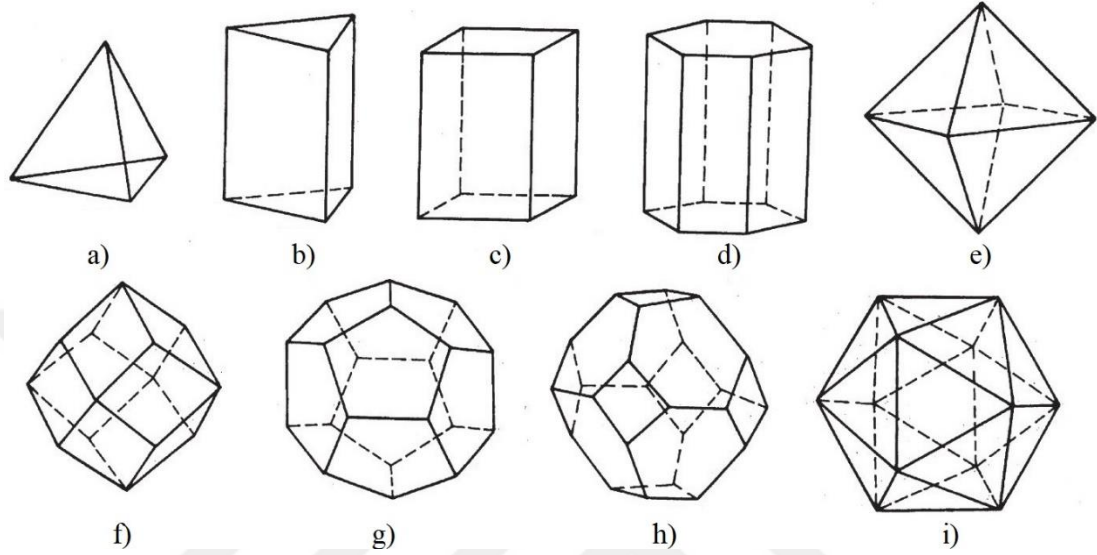
Şekil 2.9. İki boyutlu yarı düzenli kafes yapılar (Elsayed, 2010)

İki boyutlu yarı düzenli kafes yapılar ise birden fazla tipte düzenli çokgenlerden oluşmaktadır. Şekil 2.9'da sekiz farklı tipte yarı düzenli kafes yapılar gösterilmiştir. Yarı düzenli kafes yapılar da düzenli yapılar gibi Schläfi sembolleri ile gösterilebilmektedir. Örneğin Şekil 2.9'daki 3.12^2 gösterimi her bir düğüm noktası etrafında 1 adet üçgen ve 2 adet onikigen olduğu anlamını taşıırken, $3^3.4^2$ gösterimi düğüm noktaları etrafında 3 adet üçgenlerin ve 2 adet karenin var olduğunu göstermektedir. Burada dikkat edilirse yarı kararlı kafes yapıların kararlı kafes yapılardan farkının birden fazla tipte düzenli dörtgenin olduğu görülmektedir. Düzenli ve yarı düzenli kafes yapılarda kafes yapı içerisindeki tüm düğüm noktalarının bağlandığı eleman sayısı aynıdır. Bu kısıtlar kaldırıldığında ise sonsuz sayıda iki boyutlu kafes topolojileri oluşturulabilir. Düzensiz kafes yapı örnekleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. İki boyutlu düzensiz kafes yapılar (Elsayed, 2010)

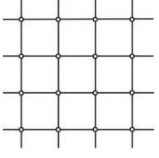
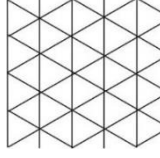
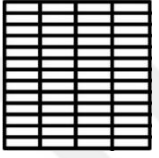
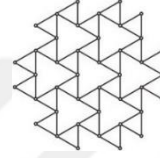
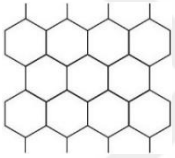
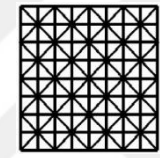
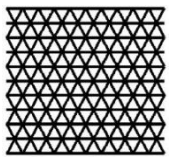
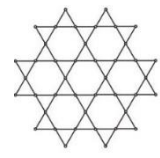
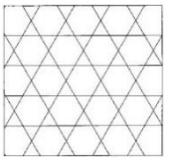
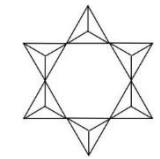
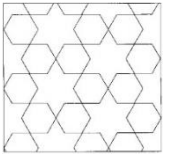

Uzaysal kafes yapılar ise çok yüzlü cisimlerden oluşmaktadır ve Şekil 2.11’de gösterilen dokuz temel çok yüzlü cisim kullanılarak farklı üç boyutlu kafes yapılar elde edilebilir.





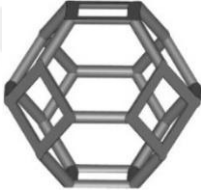
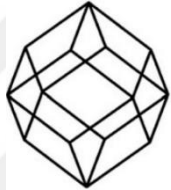
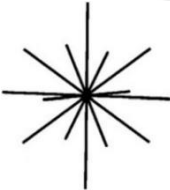
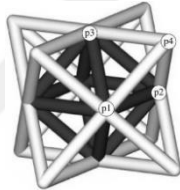



Şekil 2.11. Üç boyutlu çok yüzlü hücreler (Gibson ve Ashby, 1997) a) dört yüzlü (tetrahedron), b) üçgen prizma, c) dikdörtgen prizma, d) altıgen prizma, e) sekizyüzlü (octahedron), f) eşkenar dörtgen şeklinde on iki yüzlü (rombik dodekahedron), g) on iki yüzlü (dodekahedron), h) dört kare ve sekiz altıgen yüzeyden oluşan yapı (tetrakaidekahedron) ve i) yirmi yüzlü (icosahedron)

Çizelge 2.1 ve 2.2’de literatürde yaygın olarak kullanılan kafes yapılardan örnekler gösterilmiştir. Farklı topolojilere sahip kafes yapıların her biri diğerine göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Deshpande ve Fleck (2001), sandviç yapılarda çekirdek malzemesi olarak kullanılan dörtyüzlü (tetrahedral) yapıların kullanılan plakalarla ile oldukça uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Kagome kafes yapılar ise üstün izotropi özelliklerinin yanı sıra plastik burkulma gibi modlara karşı daha yüksek dirence sahiptir (Wang ve ark., 2003). Dörtyüzlü ve sekizyüzlü yapıların birleşiminden oluşan ve sekizli kafes (octet-truss) olarak adlandırılan yapıların üretimleri zor olmasına karşın uzama davranışları oldukça iyidir (Deshpande ve ark., 2001).

Çizelge 2.1. Literatürde yaygın olarak kullanılan iki boyutlu kafes topolojileri

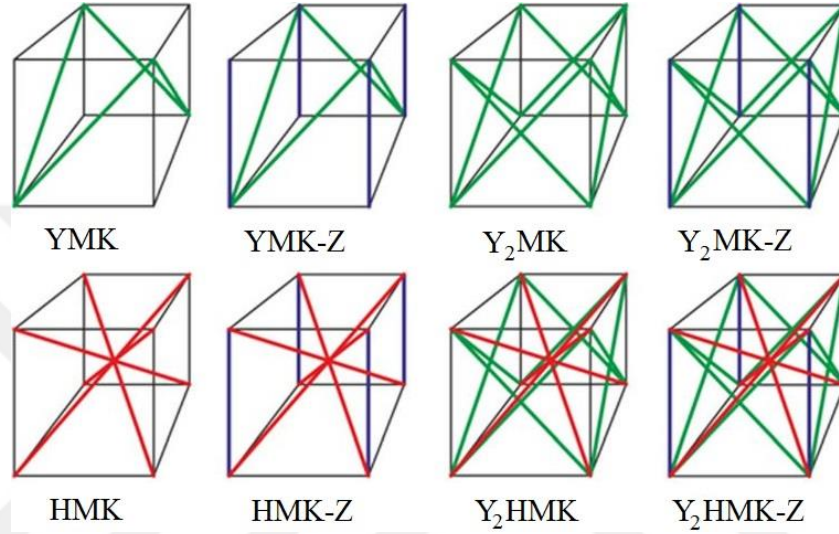
İki Boyutlu Kafes Topolojileri					
Hücre geometrisi	Hücre Adı	Referans	Hücre geometrisi	Hücre Adı	Referans
	Kare hücre	(Hutchinson ve Fleck, 2006)		Üçgen hücre	(Fleck ve ark., 2010)
	Dikdörtgen hücre	(Hayes ve ark., 2004)		Üçgen-üçgen hücre	(Hutchinson ve Fleck, 2006)
	Bal peteği hücre	(Fleck ve ark., 2010)		Kare süper hücreler ile düzenlenmiş üçgen hücre	(Hayes ve ark., 2004)
	Altıgen süper hücreler ile düzenlenmiş üçgen hücre	(Hayes ve ark., 2004)		Kagome hücre	(Hutchinson ve Fleck, 2006)
	Üçgen ve altıgen hücre	(Christensen, 2000)		Çift katlı Kagome hücre	(Hutchinson ve Fleck, 2006)
	Yıldız ve altıgen hücre	(Christensen, 2000)		Negatif Poisson oranına sahip yapı	(Lorato ve ark., 2010)

Çizelge 2.2. Literatürde yaygın olarak kullanılan üç boyutlu kafes topolojileri

Üç Boyutlu Kafes Topolojileri					
Hücre geometrisi	Hücre Adı	Referans	Hücre geometrisi	Hücre Adı	Referans
	Basit köpük hücre modeli	(Ashby, 2006)		Weaire-Phelan hücreleri	(Kusner ve Sullivan, 1996)
	Kelvin hücreleri	(Lucci ve ark., 2014)		Çevresel kübik dizilim	(Fischer, 2007)
	Radyal kübik dizilim	(Fischer, 2007)		Octet-truss (dörtüzlü ve sekizyüzlü birleşimi)	(Deshpande ve ark., 2001)
	Üç boyutlu Warren kafes	(Doyoyo ve Hu, 2006)		Gyroid	(Maskery ve ark., 2018)
	Kagome	(Gautam ve ark., 2018)			

Çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak birçok farklı izafi yoğunluk ve buna bağlı olarak farklı birim kafes yapılar elde edilebilmektedir. Tasarım ve üretim kolaylığı açısından literatürde sıklıkla Şekil 2.12’de gösterilen temel kübik hücreli kafes yapılar kullanılmaktadır. Bu yapılardan bazılarında (YMK-yüzey merkezli kübik) yapıyı oluşturan teller 45° açı ile yüzeylerde köşegen boyunca yerleşirken, bazı yapılarda (HMK-hacim merkezli kübik) ise hacim merkezine doğru $35,3^\circ$ açı yapmaktadır.

İsimlendirme yapılırken dikey tel bulunduran kübik yapıların isminin yanına “z” harfi eklenir. Örneğin şekilde tek yüzey çaprazlarına sahip yapılar YMK, dikey elemanlara sahip YMK yapılar ise YMK-Z olarak adlandırılmaktadır. Bu tez çalışmasında literatürde en sık kullanılan temel kübik yapılar olan HMK ve HMK-Z birim hücrelerinden oluşan periyodik kafes yapılar üzerinde durulmuştur.



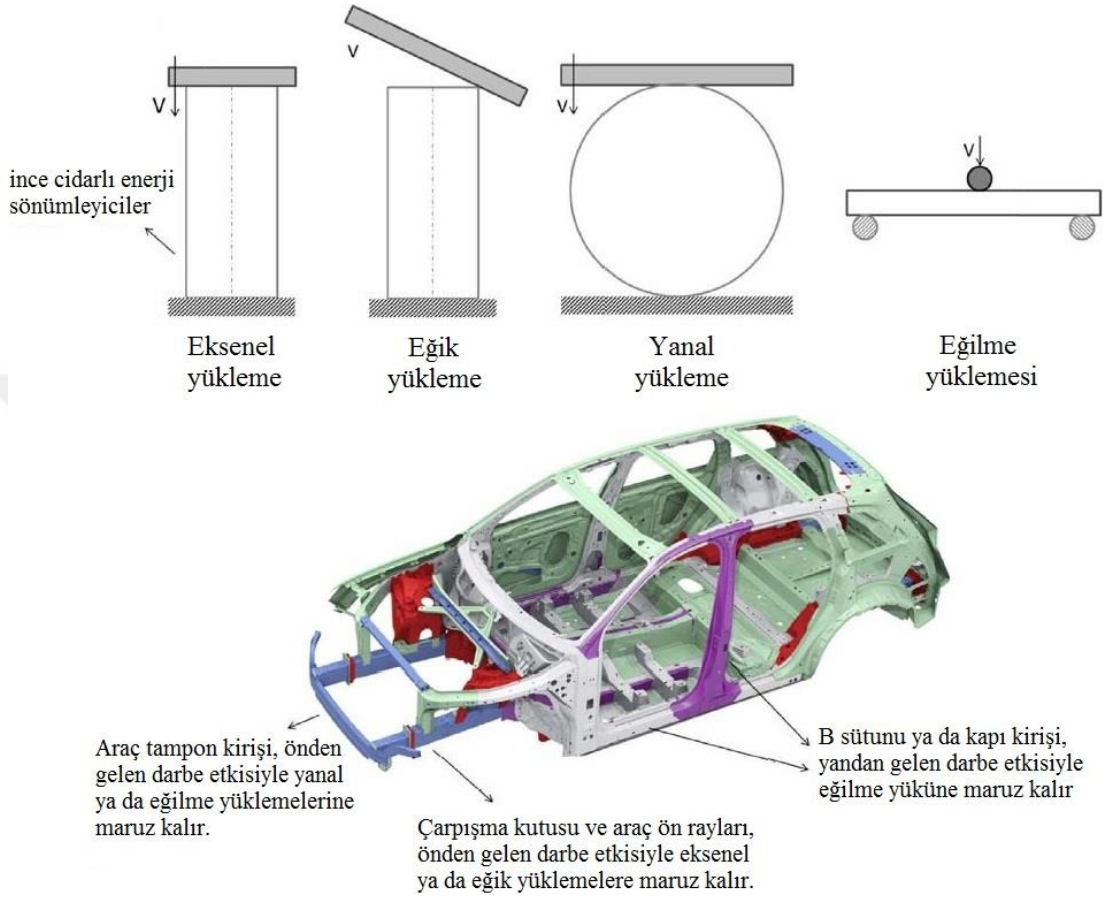
Şekil 2.12. Temel kübik hücre tipleri (Rehme ve Emmelmann, 2006)

2.2. Tüp ve Kafes Yapıların Deformasyon Mekanizmaları

2.2.1. İnce cidarlı tüplerin deformasyon mekanizmaları

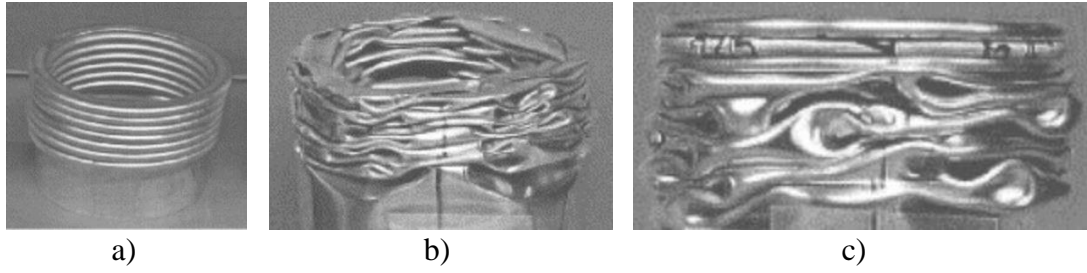
İnce cidarlı sönümleyici tüpler darbe sırasında aksenal, eğik, yanal ve eğilme yükleri gibi birçok farklı yükleme durumlarına maruz kalabilmektedir (Şekil 2.13) ve bu yükleme durumlarından her biri, darbe sırasında enerji sönümleyici tüplerin bir ya da birden fazla deformasyon modu göstermesine sebebiyet verir. Aksenal yükleme durumu ince cidarlı tüplerin en çok maruz kaldıkları yükleme durumudur. Tüplerin aksenal olarak ezilmesi oldukça sabit bir yük altında gerçekleşir ve aksenal yükleme durumundaki tüpler yanal yüklemelere göre oldukça fazla özgül sönümleme kapasitelerine sahiptirler (Alghamdi, 2001). Bunun temel nedeni, aksenal yüklemeye maruz tüplerde tüp malzemesinin büyük bir kısmının enerji sönümleme işlemine katılmasıdır. Aksenal olarak yüklenen ince cidarlı tüpler geometrik şekil açısından

kare, dairesel, üçgen veya çokgen gibi farklı tipleri mevcuttur. Ayrıca bu yapılar tek hücre yapılı, çoklu hücre yapılı, düz veya konik gibi formlarda da olabilirler.



Şekil 2.13. Otomobillerdeki kullanılan ince cidarlı enerji sönmüleyicilerin maruz kalabilecekleri yük ve deformasyon modları (Baroutaji ve ark., 2017)

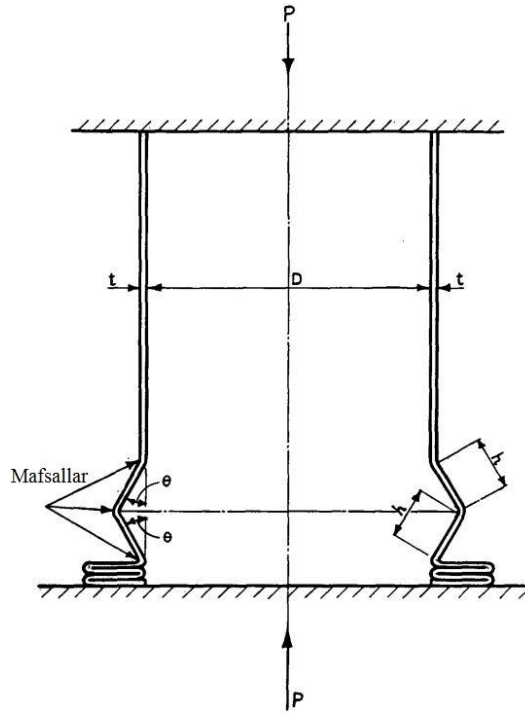
Eksenal yüklemeye maruz dairesel tüplerde üç temel deformasyon modu gözükür. Bu modlar, Şekil 2.14'ten de görüldüğü gibi, aksenal simetri modu (halka), simetrik olmayan mod (elmas) ve karışık deformasyon modudur. Dairesel tüplerin çap/kalınlık (D/t) ve uzunluk/kalınlık (L/t) oranları aksenal ezilme sırasında meydana gelen deformasyon modları üzerinde önemli rol oynamaktadır (Guillow ve ark., 2001). Genel olarak, D/t oranı 80'den büyük olması durumunda elmas modu görülürken, D/t oranı 50'den az ve L/t oranı 2'den küçük olması durumunda ise halka modu gözlemlenir. Ayrıca D/t oranı 50'den küçük ve L/t oranı 2'den büyük olması halinde ise karışık deformasyon modu görülür (Lu ve Yu, 2003).



Şekil 2.14. Eksenel yükler altındaki dairesel tüplerde görülen çeşitli deformasyon modları (Guillow ve ark., 2001) a) eksenel simetri modu (halka), b) simetrik olmayan mod (elmas) ve c) karışık deformasyon modu

Eksenel yüklemeye maruz dairesel tüplerin çarpışma mekanizmalarını incelemek için literatürde birçok teorik çalışma bulunmaktadır. Alexander (1960) yaptığı çalışmada eksenel yüklemeye maruz dairesel tüplerin eksenel simetrik çökme mekanizmasını Şekil 2.15'teki gibi tanımlamıştır. Eksenel simetrik deformasyon moduna sahip dairesel tüpün OÇK değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$OÇK = K\sigma_0 t^{1.5} \sqrt{D} \quad (2.1)$$



Şekil 2.15. Alexander (1960) tarafından önerilen eksenel yükler altındaki dairesel tüplerin eksenel simetrik çökme mekanizması

Burada K ve σ_0 sırasıyla malzeme sabiti ve akma gerilimidir. Ayrıca Şekil 2.15'teki H , plastik yarı dalga boyudur ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$H = C\sqrt{Dt} \quad (2.2)$$

Burada D ve C sırasıyla dairesel tüpün çap değeri ve malzeme sabitidir.

Abramowicz ve Jones (1986, 1984), Alexander (1960)'ın önerdiği model üzerinde bazı değişiklikler yapmış ve simetrik deformasyon modu için aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$\frac{O\check{C}K}{M_0} = \frac{25,23\sqrt{D/t} + 15,09}{0,86 - 0,568\sqrt{t/D}} \quad (2.3)$$

Buradaki M_0 ifadesi tüpün plastik momentini ifade eder ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

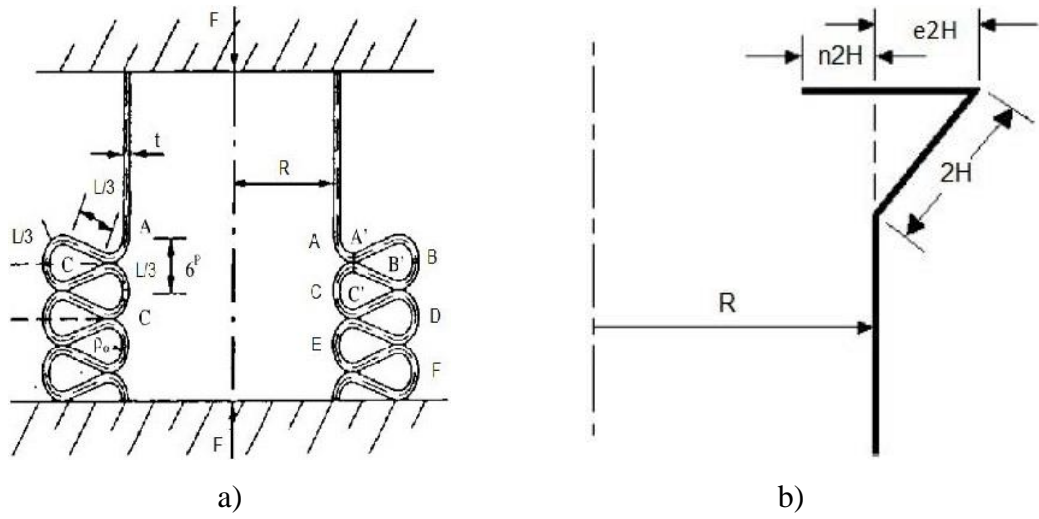
$$M_0 = \left(\frac{1}{4}\right)\sigma_0 t^2 \quad (2.4)$$

Abramowicz ve Jones (1986, 1984) simetrik olmayan deformasyon modu için ise aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$\frac{O\check{C}K}{M_0} = 86,14\left(\frac{D}{t}\right)^{0,33} \quad (2.5)$$

Grzebieta (1990) ve Wierzbicki ve ark., (1992) çeşitli deformasyon modelleri önermişlerdir. Bu modeller Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Wierzbicki ve ark. (1992) önerdikleri modelleri aşağıdaki gibi formüle etmişlerdir.

$$\frac{O\check{C}K}{M_0} = A_{N1}\sqrt{\frac{D}{t}} + A_{N2} \quad (2.6)$$



Şekil 2.16. Eksenel simetrik deformasyon modu için önerilen modeller a) Grzebieta (1990) ve b) Singace ve ark. (1995), Singace ve Elsobky (1996), Wierzbicki ve ark. (1992)

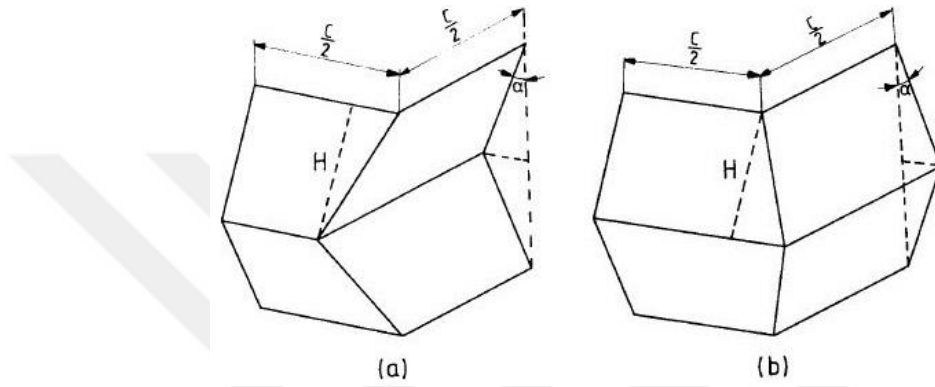
Burada A_{N1} ve A_{N2} lob sayısının bir fonksiyonu olan sabitlerdir. Singace ve ark. (1995) ile Singace ve Elsobky (1996), Wierzbicki ve ark. (1992)'nin çalışmasını genişletmişler ve simetrik ile simetrik olmayan deformasyon moduna sahip tüpler için aşağıdaki formülleri oluşturmuşlardır.

$$\frac{O\check{C}K}{M_0} = 22,27 \sqrt{\frac{D}{t}} + 5,632 \quad (2.7)$$

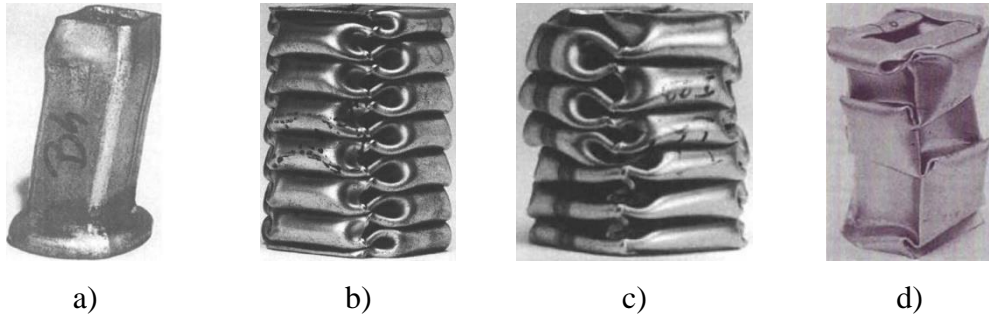
$$\frac{O\check{C}K}{M_0} = \frac{\pi}{3} N + \frac{2\pi^2}{N} \tan\left(\frac{\pi}{2N}\right) \frac{D}{t} \quad (2.8)$$

Eksenel yükler altındaki kare kesitli tüplerde ise deformasyonların daha çok köşe noktalarına yakın yerlerde yoğunlaştığından dolayı dairesel tüplere göre yapısal verimliliği bir miktar daha düşüktür (Tang ve ark., 2013). Dairesel tüplere benzer olarak kare tüplerin kesit boyutları da deformasyon modlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Kare tüplerin deformasyon modları genişlik/kalınlık (b/t) oranına bağlı olarak farklılık gösterir. Şekil 2.17'de gösterilen iki temel çökme elemanı kullanılarak teorik olarak dört farklı çökme modu teorik olarak tahmin edilmektedir. Bu modlar

genişlemeli (extensional) mod, simetrik mod, asimetrik karışık mod ve kompakt olmayan (non-compact) deformasyon modudur. $b/t < 7,5$ olması durumunda genişlemeli mod, $b/t > 40,8$ olması durumunda genişlemesiz mod, $7,5 \leq b/t \leq 40,8$ olması durumunda asimetrik karışık mod ve $b/t \approx 100$ durumunda ise kompakt olmayan deformasyon modu görülür. Kare kesitli ince cidarlı tüplerde görülen bu deformasyon modları Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Temel çökme elemanları (Abramowicz ve Jones, 1984) a) Tip I ve b) Tip II



Şekil 2.18. Eksenel yükler altındaki kare tüplerin çeşitli deformasyon modları (Baroutaji ve ark., 2017) a) genişlemeli mod (extensional), b) simetrik mod, c) asimetrik karışık mod ve d) kompakt olmayan (non-compact) deformasyon modu

Farklı deformasyon modlarına sahip ince cidarlı kare tüplerin OÇK değerini tahmin etmek üzere literatürde bazı teorik modeller geliştirilmiştir (Abramowicz ve Jones, 1986, 1984). Deformasyon moduna bakılmaksızın eksenel yüklenmiş kare tüplerin OÇK değeri Wierzbicki ve Abramowicz (1983) tarafından aşağıdaki gibi türetilmiştir.

$$O\check{C}K = 9,56\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} \quad (2.9)$$

Abramowicz ve Jones (1986), bu denkleme Eş. 2.10'daki gibi pekleşme etkisini dahil ederek simetrik deformasyon moduna sahip kare tüplerin OÇK değerini veren denklemi Eş. 2.11'deki gibi türetmişlerdir.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_y \sigma_u}{1+n}} \quad (2.10)$$

$$O\check{C}K = 13,06\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} \quad (2.11)$$

Burada σ_y , σ_u ve n sırasıyla akma gerilmesi, maksimum gerilme ve pekleşme üstelidir. Genişlemeli deformasyon moduna sahip kare tüplerin OÇK değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$O\check{C}K = 8,16\sigma_0 b^{1/2} t^{3/2} + 2,04\sigma_0 t^2 \quad (2.12)$$

Öte yandan asimetrik karışık moda sahip kare tüplerin OÇK değerini hesaplamak için ise iki farklı denklem türetilmiş ve bu denklemler aşağıda verilmiştir.

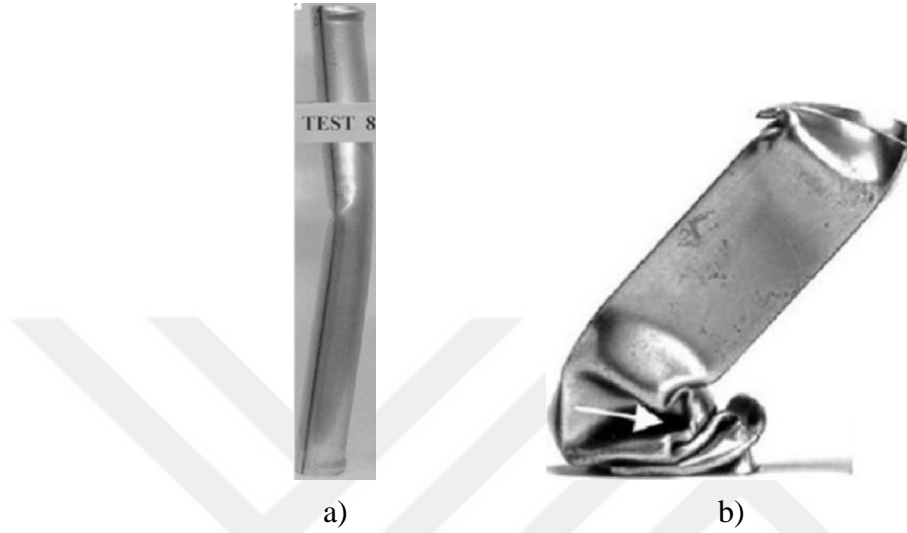
$$O\check{C}K = 10,73\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} + 0,79\sigma_0 b^{2/3} t^{4/3} + 0,51\sigma_0 t^2 \quad (2.13)$$

$$O\check{C}K = 11,48\sigma_0 b^{1/3} t^{5/3} + 0,44\sigma_0 b^{2/3} t^{4/3} + 0,26\sigma_0 t^2 \quad (2.14)$$

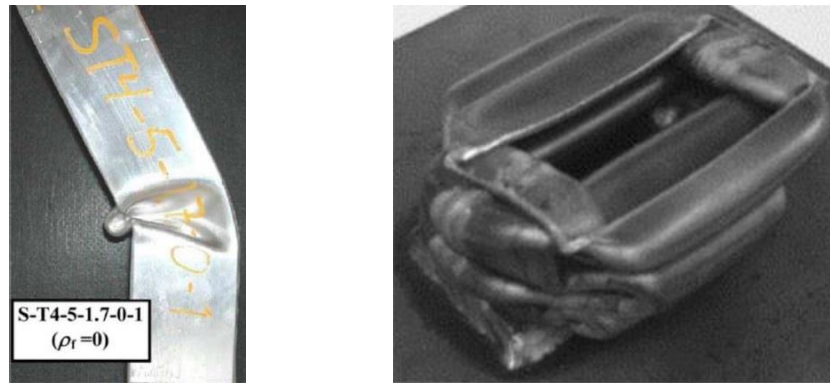
Simetrik mod ve asimetrik deformasyon modu birbirine yakın OÇK değerlerine sahipken genişlemeli deformasyon moduna sahip kare tüplerin OÇK değerleri diğer modlara göre oldukça fazla olmaktadır. Bunun nedeni genişlemeli deformasyon modunun sadece kalın kare tüplerde görülmesidir.

Öte yandan, ince cidarlı tüplerde L/D ve D/t oranlarına bağlı olarak global eğilme deformasyon modu da görülebilir (Guillow ve ark., 2001). Bu deformasyon modu oldukça verimsiz bir moddur ve enerji sönmüleyici yapıların tasarımları yapılırken bu

moddan kaçınılması gerekir. Çünkü global eğilme modu nispeten kararsızdır ve enerji sönümleyici yapının verimliliğini oldukça düşürür. Global eğilme modu hem dairesel hem de kare tüplerde görülebilir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Global eğilme modları a) dairesel tüp (Guillow ve ark., 2001) ve b) kare kesitli tüp (Abramowicz, 2003)

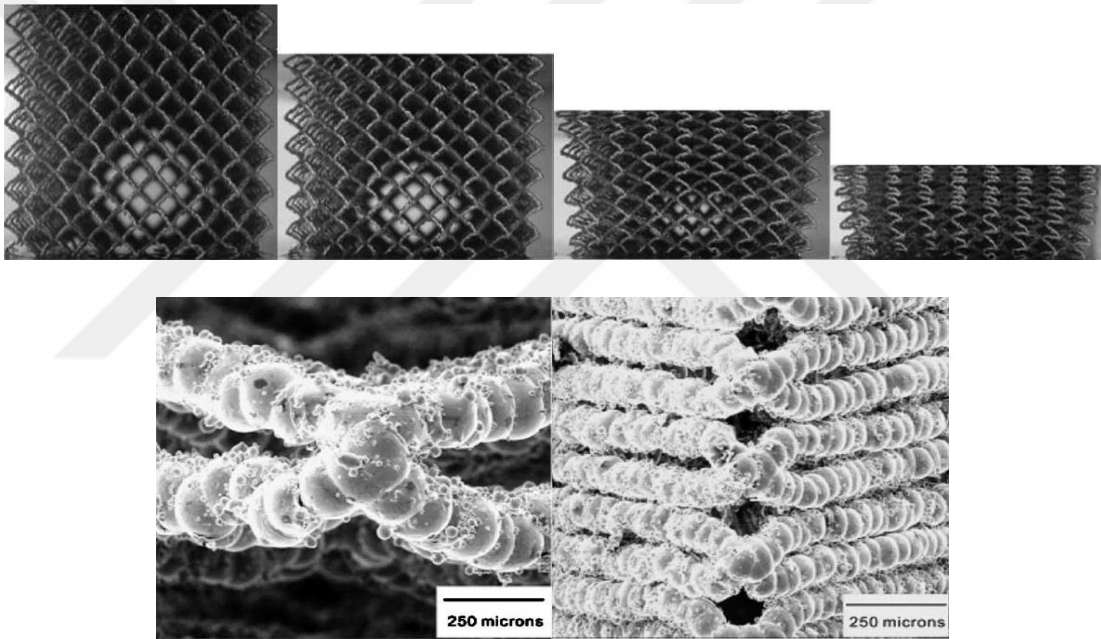


Şekil 2.20. Eğik yükler altındaki kare kesitli tüplerin deformasyon modları (Baroutaji ve ark., 2017; Nagel ve Thambiratnam, 2006)

Diğer yandan araçlarda enerji sönümleyici olarak kullanılan tüp yapılar 30° 'ye kadarki eğik yükleme durumlarına karşı dayanacak şekilde tasarlanmalıdır (Reyes ve ark., 2004b). Genellikle eğik yükler tüpleri bir miktar ilerlemeli burkulmanın ardından global eğilme moduna zorlamaktadır. Şekil 2.20'de eğik yükler altındaki kare kesitli tüplerin deformasyon modları görülmektedir.

2.2.2. Kafes yapıların deformasyon mekanizmaları

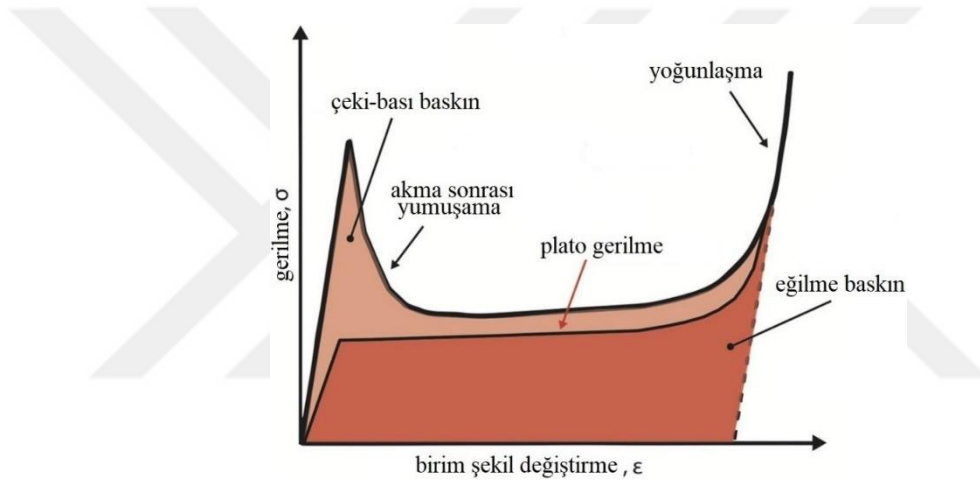
Kafes yapılar farklı üretim teknikleri ile üretilmesinin sonucu olarak farklı karakteristiklere sahip olabilmektedir. Ayrıca bir kafes yapıyı oluşturan malzemenin cinsi kadar o yapının topolojisi de ilgili yapının mekanik karakteristiklerini önemli ölçüde farklılaştırmaktadır. Farklı topolojilere sahip kafes yapılar farklı deformasyon mekanizmalarının oluşmasına sebebiyet verse de genel olarak kafes yapıların tipik bazı karakteristikleri olduğu söylenebilir. Aksenal yükler altındaki HMK kafes yapının farklı ezilme boylarındaki deformasyon görüntüsü Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



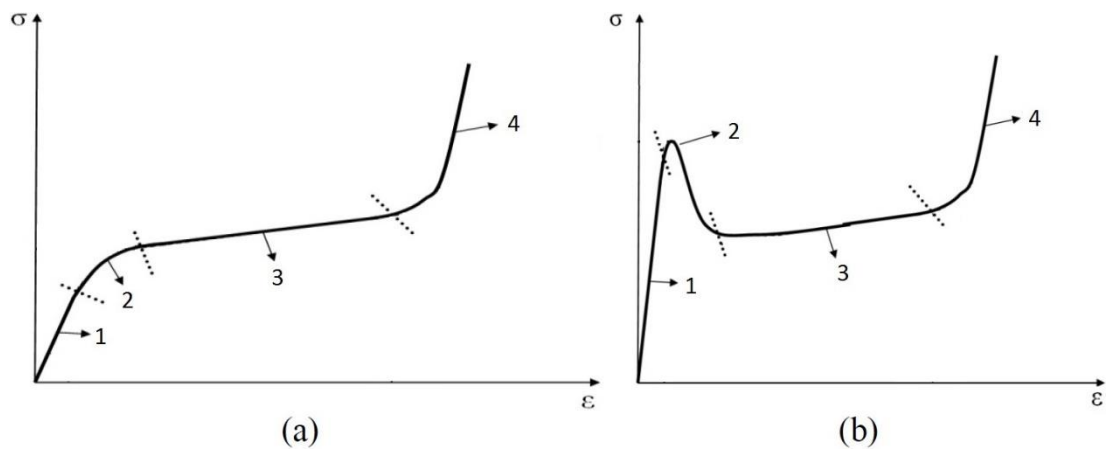
Şekil 2.21. Aksenal yükler altındaki HMK kafes yapının deformasyon görüntüsü (Tsopanos ve ark., 2010)

Kafes yapıların deformasyon karakteristikleri genel olarak tüm hücresel malzemelerin karakteristiklerine benzemektedir. Genel olarak hücresel malzemelerde eğilme mekanizması baskın ve çeki-bası mekanizması baskın olmak üzere iki tip gerilme davranışı ortaya çıkmaktadır (Ashby, 2006). Eğilme baskın davranışa sahip yapılar genellikle açık hücreli veya rastgele hücreli yapılarda görülürken çeki-bası davranışı daha çok kapalı hücreli ya da bazı durumlarda açık hücreli periyodik yapılarda gözlenir. Belirli bir bağıl yoğunluk değeri için çeki-bası baskın yapılarda her zaman eğilme baskın yapılara göre daha yüksek mukavemet görülmektedir (Şekil 2.22 ve

2.23). Hem çeki-bası hem de eğilme baskın yapılarda bazı durumlarda gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, hücre kenarlarının yerleşmesinden dolayı önce bir miktar küçük iniş çıkışlar yapabilmektedir. Ardından eğri elastik bölgeye girerek yükselir. Eğilme baskın ya da çeki-bası baskın yapı olmasına bağlı olarak eğrinin pik yaptığı değer değişmektedir. Çeki-bası baskın mekanizmalarda hücre duvarları burkuluncaya kadar eğri yükselişini sürdürürken eğilme baskın yapılarda eğri daha düşük değerlerde kalmaktadır. Ardından eğri hemen hemen sabit bir gerilme değerinde devam ederken, tüm hücre duvarları üst üste yığılmasından sonra yoğunlaşma başlar (Şekil 2.21) ve yoğunlaşma bölgesinde gerilme hızlı bir artış gösterir.



Şekil 2.22. Eğilme baskın ve çeki-bası baskın yapıların karakteristik eğrileri (Tamburrino et al., 2018)



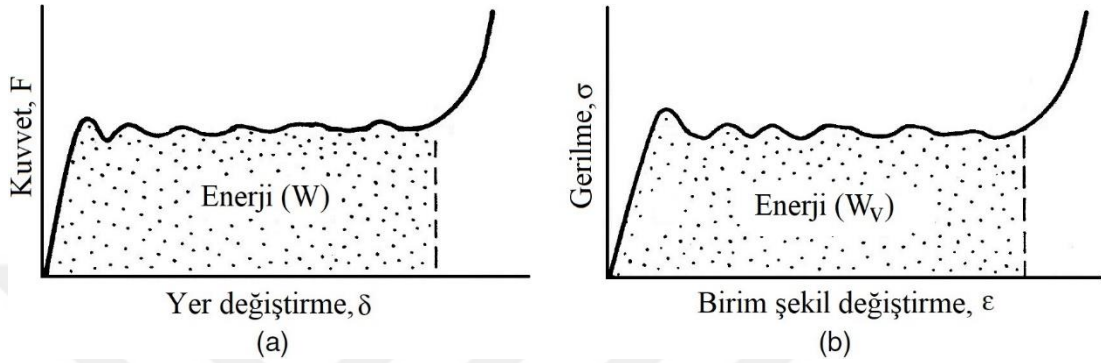
Şekil 2.23. Kafes malzemelerin tipik basma davranışları a) eğilme baskın ve b) çeki-bası baskın (Gümrük, 2012)

Eğilme baskın hücresele yapıların gerilme birim şekil değiştirme eğrileri 4 farklı bölgede incelenir (Şekil 2.23a). 1 numaralı bölgede yapı elastik davranış gösterir ve bu bölge “elastik bölge” adını alır. 1 numaralı bölgenin sonundan itibaren hücre duvarlarının eğilmesi neticesinde hücresele malzeme içerisinde deformeasyonlar meydana gelerek hücre duvarları akmaya başlar ve eğri lineer olmayan bir artış gösterir. Bu bölgeye “elastik-plastik yükleme bölgesi” denilmektedir. 2 numaralı bölgenin bitiminden itibaren ise “kararlı çökme bölgesi” (3 numaralı bölge) adını alan bölge başlamaktadır ve bu bölgede hücresele malzemeyi oluşturan hücreler ardı ardına çökmesiyle birlikte hücresele malzeme sıkışmaya başlar. Kararlı çökme bölgesi tüm hücrelerin birbirine temas edinceye kadar sürer. Birçok malzeme için bu bölgede gerilme sabit veya çok az bir artış eğilimi gözlenir. Tüm hücre duvarlarının birbirine temas etmesi ile birlikte yapı “yoğunlaşma bölgesine” (4 numaralı bölge) girmiş olur ve bu bölgede gerilme hızlı bir artış gösterir.

Çeki-bası mekanizması baskın yapılarda ise deformeasyon özellikle yüklemenin başlangıcında çeki-bası gerilmeleri neticesinde hücre duvarlarının burkulması ile hücrelerin yığılmaya başlaması şeklinde gerçekleşir. Çeki-bası mekanizması baskın yapılarda (Şekil 2.23b) gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri eğilme mekanizması baskın yapılarda olduğu gibi 4 bölümde incelenir. Çeki-bası baskın yapılarda gerilme başlangıçta hızlı bir yükseliş göstererek pik değerine ulaşır. “Elastik bölge” (1 numaralı bölge) adını alan bölgede gerçekleşen bu hızlı yükseliş çok düşük birim şekil değiştirme değerlerinde gerçekleşir. Pik değerinden sonra hücre duvarlarında meydana gelen burkulmaların etkisiyle gerilme değeri ani bir düşüş gösterir. Bu bölgeye “elastik plastik yükleme bölgesi” denilmektedir. Bu bölgeden sonra ise “kararlı çökme bölgesi” (3 numaralı bölge) başlar. Bu bölgede eğilme mekanizması baskın yapılardaki gibi düz bir eğriden ziyade birçok inişli çıkışlı eğri gözlenebilir. Kararlı çökme bölgesinin ardından tüm hücre duvarlarının temasıyla birlikte “yoğunlaşma bölgesi” başlar.

Hücresele malzemeler gibi sönümleyici olarak kullanılan yapılardan yoğunlaşma bölgesine erişinceye kadar olabildiğince düz bir kuvvet-yer değiştirme ya da gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine sahip olmaları beklenir. Şekil 2.24’ten de görüldüğü

gibi kuvvet ya da gerilmenin altında kalan alan sönümlenen enerji olarak tanımlanır. Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan “faydalı enerji (W)” iken, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan “birim hacimdeki enerji miktarı (W_v)” olarak adlandırılır (Ashby ve ark., 2000).



Şekil 2.24. Enerji sönümleyici yapılar için a) kuvvet-yer değiştirme ve b) gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Ashby ve ark., 2000)

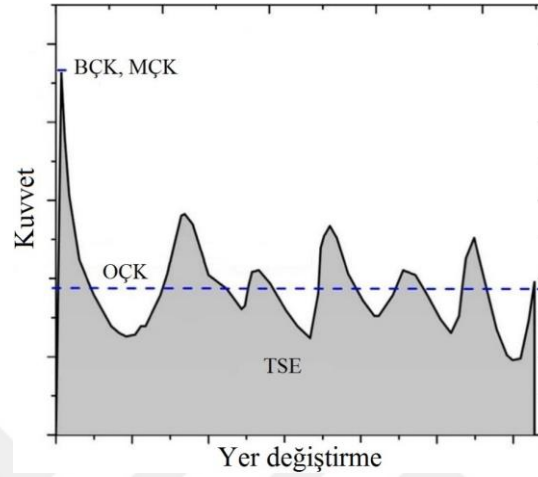
2.3. Çarpışma Dayanım Parametreleri

Yapıların enerji sönümlenme performansları çeşitli parametrelere bağlı olarak değerlendirilir ve yapıların çarpışma dayanımlarının incelenmesi amacıyla en çok kullanılan performans parametreleri şunlardır: Toplam sönümlenen enerji miktarı, özgül sönümlenen enerji miktarı, ortalama çarpışma kuvveti, maksimum çarpışma kuvveti, başlangıç çarpışma kuvveti, çarpışma kuvveti verimliliği ve çarpışma verimliliği. Bu parametreler çarpışma performansları incelenecek ilgili yapıların kuvvet-yer değiştirme cevabından türetilmektedir. Çarpışma dayanım parametreleri aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

Toplam sönümlenen enerji (TSE), çarpışma kuvvetinin yaptığı iş olarak tanımlanabilir ve TSE aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir:

$$TSE = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta \quad (2.15)$$

Burada $F(\delta)$, δ yer değişirmesine karşılık gelen o anki çarpışma kuvvetidir. Yapıların tipik kuvvet – yer değişirme eğrisi Şekil 2.25'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kuvvet-yer değişirme eğrisinin altında kalan alan TSE'yi göstermektedir.



Şekil 2.25. TSE değerinin grafik üzerinde gösterimi (Langseth ve ark., 1998)

Enerji sönümleyici yapılar için en önemli karakteristiklerinden birisi de özgül sönümlenen enerji (SE) değeridir. SE, birim kütle başına düşen enerji miktarı olarak tanımlanır ve sönümlenen enerji miktarının ilgili yapının kütlesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$\text{SE} = \frac{TSE}{m} \quad (2.16)$$

Burada m ilgili enerji sönümleyicisinin kütlesini ifade eder. Ağırlık azaltmanın oldukça önemli olduğu uygulamalar için yapıların enerji sönümleme kapasitesini değerlendirmek açısından SE oldukça önemli bir çarpışma dayanım parametresidir. SE değeri genellikle enerji sönümleyici bir yapı için ağırlık verimliliğinin bir göstergesi olarak kullanılır ve enerji sönümleyici bir yapının SE değerinin yüksek olması o yapının verimli bir enerji sönümleme performansına sahip olduğunu göstermektedir (Zarei ve Krger, 2008).

Ortalama arpışma kuvveti (OK), sönümlenen enerji miktarının ezilme boyuna oranı olarak ifade edilir.

$$O\check{C}K = \frac{TSE}{\delta} \quad (2.17)$$

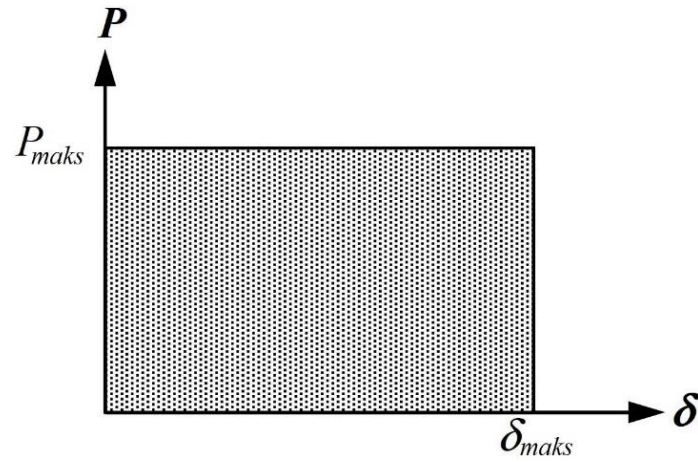
OÇK değeri enerji sönümleyici yapılar için deformasyon boyunca sönümleyebildiği enerji miktarının bir göstergesidir. Maksimum çarpışma kuvveti (MÇK), yapının deformasyon sırasındaki maksimum ezilme kuvveti değeridir. Tüp yapılarda MÇK genellikle ezilmenin başlangıcında meydana geldiği gibi bazı yapılarda (fonksiyonel derecelendirilmiş, konik uçlu vb.) yoğunlaşma bölgesinde de olabilmektedir. Yolcu güvenliğinin sağlanması ve araç hasarını en aza indirebilmek açısından MÇK büyük önem taşımaktadır (Hou ve ark., 2011). Maksimum yolcu güvenliğinin sağlanabilmesi için hem OÇK hem de MÇK değerlerinin yolcuların yaralanma eşik değerleri olarak belirlenen limitlerin altında olması büyük önem taşımaktadır.

İnce cidarlı tüp yapıların çarpışma cevabına bakıldığında genellikler ezilme boyunca salınımlar yaptığı görülür ve kuvvet-yer değiştirme grafiğindeki eğrinin ilk pik yaptığı kuvvet değeri başlangıç çarpışma kuvveti (BÇK) olarak tanımlanır. Aşırı yüksek BÇK değeri ani ivme değişikliklerine sebebiyet vereceğinden dolayı istenmeyen bir durumdur ve bu değer olabildiğince düşük olması istenir.

Çarpışma kuvveti verimliliği (ÇKV) çarpışma kuvvet değerlerinin yararlı bir ölçüsüdür ve ortalama çarpışma kuvvetinin maksimum çarpışma kuvvetine oranı olarak tanımlanır.

$$\check{C}KV = \frac{O\check{C}K}{M\check{C}K} \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklemden de görüldüğü gibi ÇKV değerinin hem çarpışma kuvvetinin hem de sönümlenen enerji miktarının birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayan bir verim ifadesidir. İdeal bir enerji sönümleyici yapı için ÇKV değeri mümkün olduğunca “1” değerine yakın olmalıdır (Şekil 2.26). Burada çarpışma kuvveti veriminin fazla olması, gerçekleşen çarpışma enerjisinin verimli bir şekilde sönümlendiği anlamına gelmektedir (Guler ve ark., 2010; Sun ve ark., 2014).



Şekil 2.26. İdeal bir enerji sönümleyici bir yapının kuvvet-yer değiştirme grafiği (Ahmad, 2009)

Bir çarpışma işleminde, kinetik darbe enerjisini sönümleyebilmek için darbe sönümleyici yapının sadece belirli bir kısmı harcanabilir. Çarpışma sırasında kullanılacak enerji miktarı darbe verimliliğinin bir göstergesidir ve ÇV değeri, ezilme boyunun numunenin başlangıçta boyuna (L) bölünmesiyle elde edilir.

$$CV = \frac{\delta}{L} \quad (2.19)$$

İdeal bir durumda verimli bir çarpışma durumu için numune boyunun tamamın sönümleme işlemi boyunca kullanılması gerekir, ancak pratikte her zaman bu değer 1'in altındadır.

3. SONLU ELEMANLAR (SE) MODELLERİ

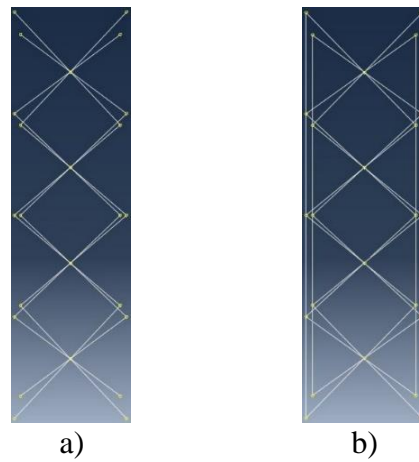
SE yöntemi günümüzde yapısal mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan önemli bir araçtır. Doğrusal olmayan SE yöntemi özellikle büyük plastik deformasyonları içeren problemlerin çözümünde sıklıkla tercih edilmekte ve geleneksel yöntemlere göre çok daha fazla ayrıntılı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Benzer şekilde, SE analizi parametrik çalışmaları verimli bir şekilde gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılmakta ve zaman alıcı fiziksel test sayısının azaltılmasına veya tamamen ortadan kalkmasına katkı sağlamaktadır. Enerji sönmüleyici yapıların dinamik çarpışma cevabı için sayısal hesaplamaların yapılabilirdiği çok sayıda lineer olmayan dinamik SE kodu kullanan program bulunmaktadır. LS-DYNA, ABAQUS, RADIOSS, ADINA, PAM-CRASH ve CRASH CAD bunlardan bazılarıdır. Bu tez kapsamında ABAQUS/Explicit programı kullanılmıştır. ABAQUS, yapısal analiz, ısı transferi, akustik ve birleşik termal-elektrik analizi gibi geniş alanlarda problemleri benzetebilen çok yönlü ve oldukça güçlü bir mühendislik simülasyon programıdır. ABAQUS/Explicit ise açık bir dinamik sonlu elemanlar formülasyonu kullanan özel amaçlı bir analiz paketidir. Bu analiz yöntemi darbe ve patlama problemleri gibi kısa süreli dinamik olayların modellenmesi için oldukça uygundur. Ayrıca değişen temas koşullarını da içeren ve yüksek derecede doğrusal olmayan problemler için de çok etkilidir. ABAQUS/Explicit, her bir artışta bir çiftli denklem sistemini çözmeden (veya global bir katılık matrisi olmadan) çözümü küçük zaman aralıklarıyla bir sonraki iterasyona aktarma yöntemini kullanarak problemi çözmektedir. Bu prosedürün doğru sonuçlar üretebilmesi için zaman adımlarının yeterince küçük olması gerekir. Bu nedenle analizler tipik olarak binlerce zaman adımı gerektirmektedir. SE ile bir problemin doğru şekilde çözümlenebilmesi için zaman adımının kararlılık limitinin altında olması gerekmektedir aksi takdirde nümerik olarak kararsızlıklar ortaya çıkar (Nagel, 2005). Kütle ölçeklendirme kullanarak veya çözüm ağını olabildiğince homojen hale getirerek zaman adımları arttırılabilir ve böylece etkili şekilde problemler çözülebilir. ABAQUS/Explicit, analiz boyunca kararsızlık sınırı aşmayacak şekilde zaman adımlarını otomatik olarak ayarlamaktadır.

3.1. SE Model Geometrilerinin Oluşturulması

İnce cidarlı tüp, kafes ve hibrit yapıların model geometrilerini oluşturabilmek için farklı programlar kullanılmıştır. Üç boyutlu katı kafes yapı geometrileri için SOLIDWORKS, bir boyutlu kiriş kafes yapı geometrileri için MATLAB ve ince cidarlı tüp geometrilerinin oluşturulması için ise ABAQUS programları kullanılmıştır. SOLIDWORKS ve MATLAB programında oluşturulan kafes yapılar daha sonra analiz için ABAQUS modelleri ile birleştirilmiştir. Hibrit modellerin geliştirilmesi süresinde, kafes yapılar kusursuz düzgünlükte ideal geometrik yapılar olarak modellenmiştir.

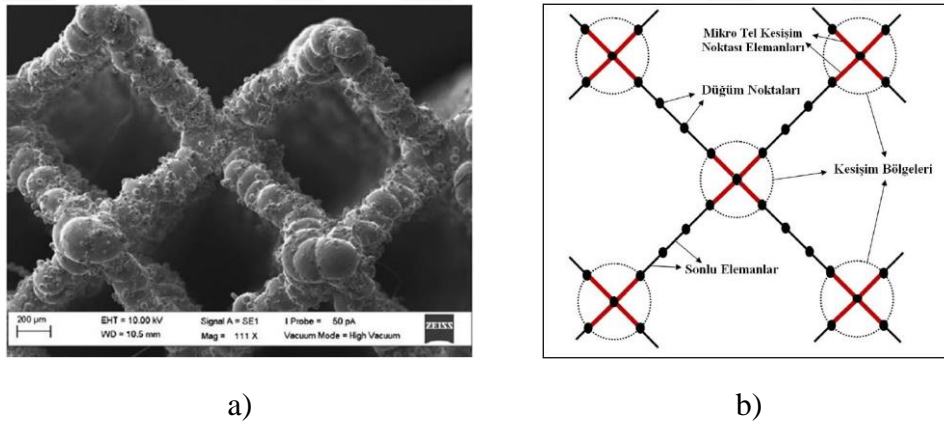
3.1.1. Sabit kalınlıklı kafes yapı dolgulu hibrit tüplerin geometrik modellerinin oluşturulması

Eksenel yükler altındaki hibrit yapıların çarpışma dayanımlarını incelemek üzere HMK ve HMK-Z olmak üzere iki farklı tipte kafes yapısı dikkate alınmıştır. SE kafes yapı modellerinde hem kiriş elemanlar hem de üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır. Kiriş elemanların köşe noktaları ve bu noktaların birbirine bağlandığı elemanlar yazılan bir program ile MATLAB’de oluşturulmuş ve ilgili koordinatlar Python kodu (EK-1) aracılığıyla ABAQUS programı içerisine dahil edilmiştir. Kiriş elemanlar kullanılarak oluşturulan HMK ve HMK-Z kafes yapılar Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kiriş elemanlarla oluşturulmuş a) HMK ve b) HMK-Z kafes yapılar

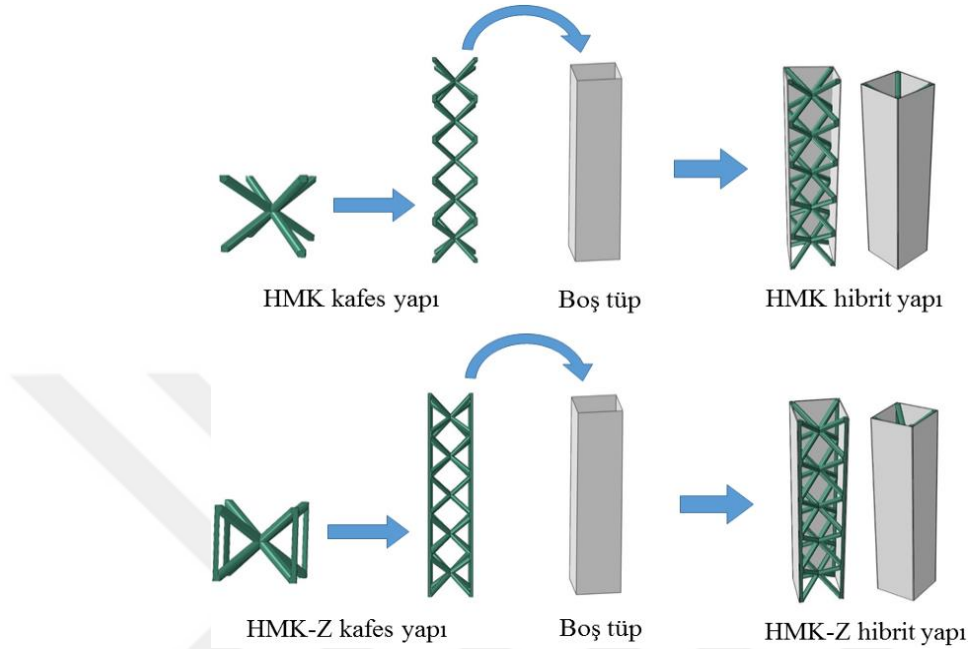
Kiriş modeller katı modeller ile kıyaslandığında hesaplama zamanı oldukça az olan basit modellerdir. Fakat kiriş elemanlar özellikle kesişim noktalarındaki (Şekil 3.2) malzeme yığılmasını tanımlayamadığından dolayı bazı dezavantajlara sahiptir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için literatürde bazı çözümler önerilmiştir. Labeas ve Sunaric (2010), kesişim bölgesinde yer alan elemanların çap değerlerini %40 daha fazla tanımlayarak ilgili bölgede malzeme yoğunluğu oluşturmaya çalışmışlardır. Luxner ve ark. (2005), ise aynı problemi giderebilmek amacıyla kesişim bölgelerindeki elemanların elastisite modülü değerlerini 1000 kat fazla tanımlama yoluna gitmişlerdir. Benzer olarak Gümrük ve Mines (2013), kesişim noktalarının elastisite modülü değerlerini diğer elemanlara göre %50 daha fazla tanımlayarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu tez çalışmasında ise Labeas ve Sunaric'in yöntemine benzer olarak kesişim bölgesinde yer alan elemanların çap değerlerini diğer elemanlara göre belirli bir miktarda (%50) daha fazla tanımlama yoluna gidilmiştir. Bu değer birçok deneme sonucunda deneysel test sonuçları ile kıyaslanarak elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Örnek bir HMK kafes yapısı için a) taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (Gümrük ve ark., 2013) ve b) kesişim noktalarının gösterilmesi (Gümrük, 2012)

Diğer yandan üç boyutlu katı elemanlar SOLIDWORKS programında oluşturulmuştur. Eksenel yükler altındaki HMK ve HMK-Z kafes yapılarının eleman kalınlıkları ve hücre sayıları ile tüp yapılarının duvar kalınlıklarının çarpışma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu noktada kafes elemanları için beş farklı çap değeri ve beş farklı hücre sayısı ile üç farklı tüp kalınlığı ele alınmıştır. Önerilen

yapıların şematik görünüşleri ve tasarım parametreleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.



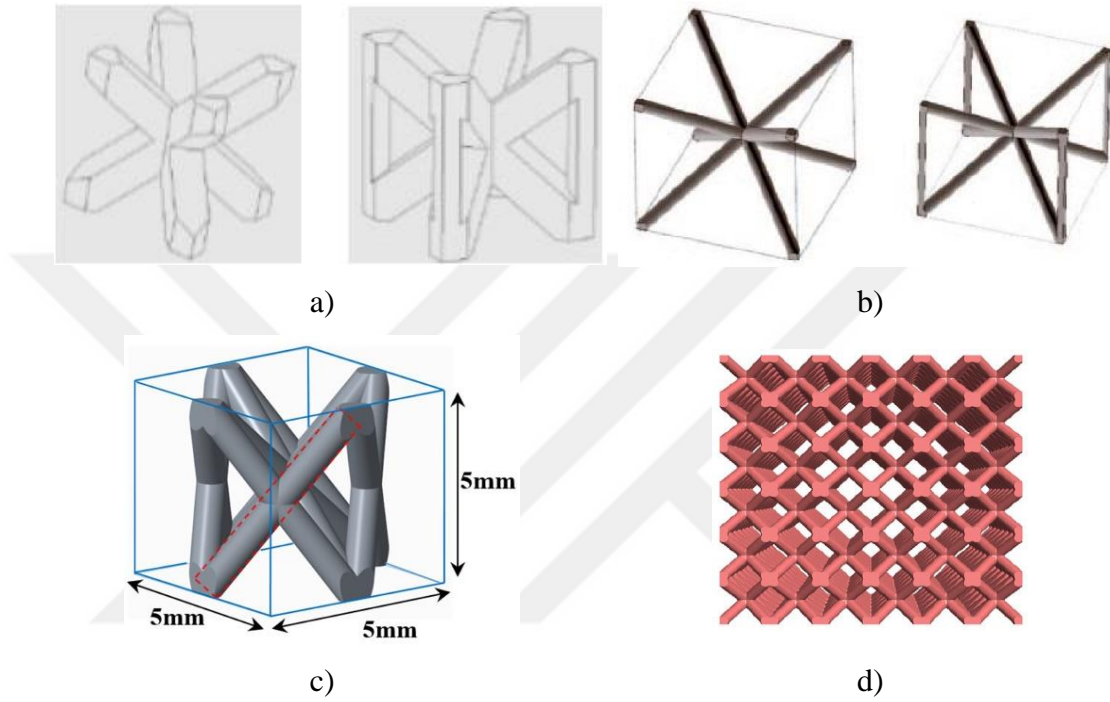
Şekil 3.3. HMK ve HMK-Z kafes yapıların tüp içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen hibrit yapıların şematik görünüşleri

Çizelge 3.1. Eksenel yükler altındaki hibrit tüplerin tasarımında dikkate alınan parametreler

Parametreler	Seviyeler				
	1	2	3	4	5
Yapı tipi	HMK	HMK-Z	Boş Tüp	HMK-Hibrit	HMK-Z Hibrit
Hücre sayısı	3	4	5	6	7
Kafes elemanların çap değeri	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
Tüp kalınlığı	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	-	-

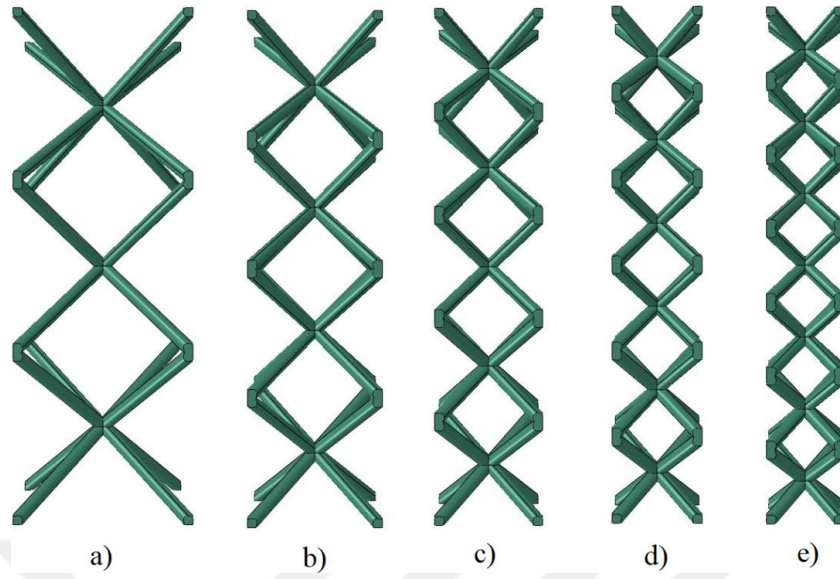
Tüm yapıların başlangıç boyları sabit ve 120 mm olarak seçilmiştir. Önerilen HMK ve HMK-Z kafes yapılar ile tüplerin geometrik olarak uyumlu olabilmeleri açısından tüp yapılar kare olarak tasarlanmıştır. Ayrıca ilgili kafes yapıların kare tüp içerisine tam olarak oturabilmeleri için literatürdeki yapılara (Li ve ark., 2014; Al-Saedi ve ark., 2018; Contuzzi ve ark., 2013) benzer olarak birim hücrelerin köşelere pah kırılmıştır

(Şekil 3.4). Daha sonra ilgili birim hücreler dikey yönde çoğaltılarak kafes yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan kafes yapılar, tüp yapıların orta yüzey (mid-surface) sonlu elemanlar formülasyonu dikkate alınarak tüp yapı içerisine yerleştirilmiş ve böylece hibrit yapılar oluşturulmuştur.

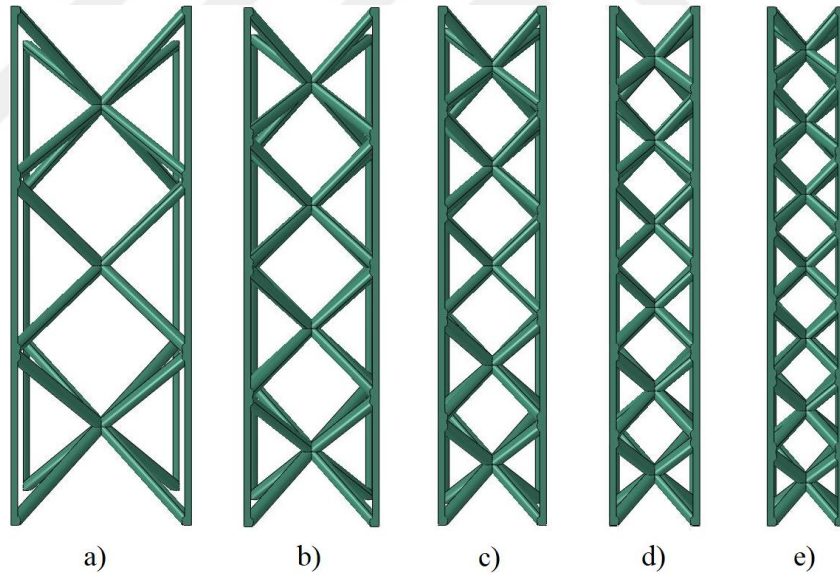


Şekil 3.4. Literatürde yer alan ve köşelere pah kırılmış kafes yapı örnekleri a) Ushijima ve ark., (2011) b) Contuzzi ve ark., (2013) c) Al-Saedi ve ark., (2018) ve d) Maskery ve ark., (2016)

Hücre sayısına bağlı olarak beş farklı boy/en oranı (L/a) belirlenmiştir. Burada üç, dört, beş, altı ve yedi hücreli yapıların genişlikleri sırasıyla 40, 30, 24, 20 ve 17,14 mm ve tüplerin boyları 120 mm olduğu dikkate alındığında, önerilen hibrit yapıların boy/en oranlarının sırasıyla 3, 4, 5, 6 ve 7 olduğu görülebilir. Farklı boy/en oranlarına sahip üç boyutlu katı HMK ve HMK-Z kafes yapı modelleri Şekil 3.5 ve 3.6'da gösterilmiştir. Burada L yapıların başlangıç boyu ve a yapıların genişliğidir.



Şekil 3.5. Farklı hücre sayılarına sahip üç boyutlu katı HMK kafes yapılar: a) üç ($L/a = 3$), b) dört ($L/a = 4$), c) beş ($L/a = 5$), d) altı ($L/a = 6$) ve e) yedi hücreli ($L/a = 7$)



Şekil 3.6. Farklı hücre sayılarına sahip üç boyutlu katı HMK-Z kafes yapılar: a) üç ($L/a = 3$), b) dört ($L/a = 4$), c) beş ($L/a = 5$), d) altı ($L/a = 6$) ve e) yedi hücreli ($L/a = 7$)

3.1.2. Derecelendirilmiş kafes yapı dolgulu hibrit tüplerin geometrik modellerinin oluşturulması

Eğik yükler altındaki hibrit yapıların çarpışma dayanımı performansları üç aşamada incelenmiştir. İlk bölümde, farklı tepe açlarına sahip derecelendirilmiş HMK kafes

yapılar ile aynı ağırlığa sahip eşdeğer kalınlıklı HMK kafes yapılar dikkate alınmış ve bu iki yapının enerji sönümleme performansları farklı yükleme açıları ele alınarak karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde, hibrit yapıların TSE değerleri, hibrit yapıyı oluşturan tüp ve kafes yapıların ayrı ayrı sönümledikleri TSE değerlerinin toplamı ile kıyaslanmıştır. Son bölümde ise, farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların çarpışma dayanım performansları incelenmiştir. Bu noktada dört farklı yapı tipi, beş farklı tepe açısı ve üç farklı taban açı değeri ele alınmıştır. Eğik yükler altındaki kafes yapılar beş birim hücreli yapılardan seçilmiştir. Ayrıca tüplerin duvar kalınlıkları 0,5 mm ve tüm yapıların boyları ise sabit ve 120 mm'dir. Yapıların farklı yüklemeler altındaki enerji sönümleme performanslarını inceleyebilmek için 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° ve 30° olmak üzere yedi farklı yükleme açısı (θ) dikkate alınmıştır. Hibrit tüp tasarımlarında dikkate alınan tasarım parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

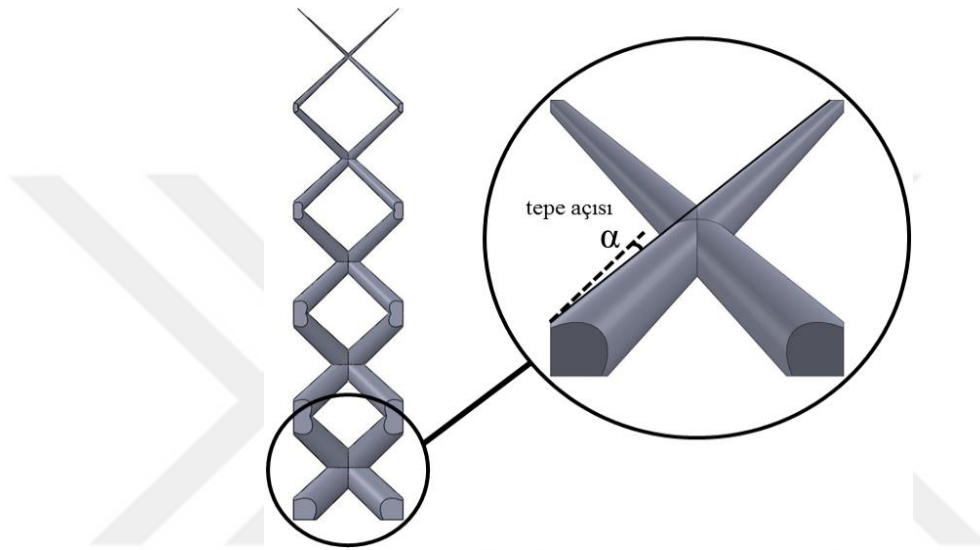
Çizelge 3.2. Eğik yükler altındaki hibrit tüp tasarımlarında dikkate alınan tasarım parametreleri

Parametreler	Seviyeler						
	1	2	3	4	5	6	7
Yapı tipi	Tüp	HMK kafes	D-hibrit yapı	EK-hibrit yapı	-	-	-
Kafes elemanın tepe açısı (α)	0,2°	0,3°	0,4°	0,5°	0,6°	-	-
Kafes elemanın taban çap değeri	4 mm	5 mm	6 mm	-	-	-	-

Şekil 3.7'de tepe açısı şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kafes elemanın tepe açısının değerine göre birim hücredeki elemanların çap değerleri taban çapından başlayarak azalmaktadır. Bir üst birim hücreye geçildiğinde ise o birim hücrenin başlangıç taban çap değeri bir alt birim hücrenin üst çap değeri olarak alınmış ve kafes yapı boyunca yapının kesit alanı sürekli olarak azalmıştır. Taban çap değerine ve tepe açısına bağlı olarak kafes yapının çap değerlerinin değişimi Eş. 3.1 ile hesaplanabilir.

$$d_{üst} = d_{taban} - \tan(\alpha)2b\sqrt{3} \quad (3.1)$$

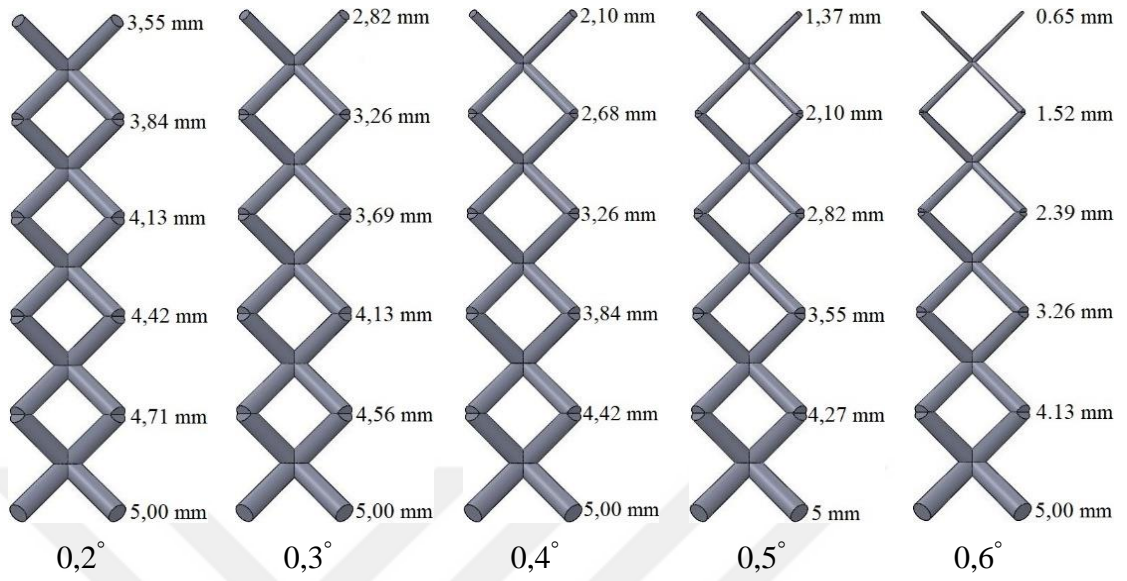
Burada α tepe açısını, b birim hücre genişliğini, d_{taban} kafes yapının taban çap değerini ve $d_{üst}$ ise kafes yapının birim hücre üst çap değerini vermektedir. EK-hibrit ve D-hibrit yapıların enerji sönmüleme performanslarının birbirleriyle kıyaslanabilmeleri için her iki tip yapının da aynı kütlede olması büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla farklı tepe açlarına sahip D-kafes yapılar tasarlanarak kütle değerleri hesaplanmış ve bu D-kafes yapılara kütlece eşdeğer EK-kafes yapılar tasarlanmıştır.



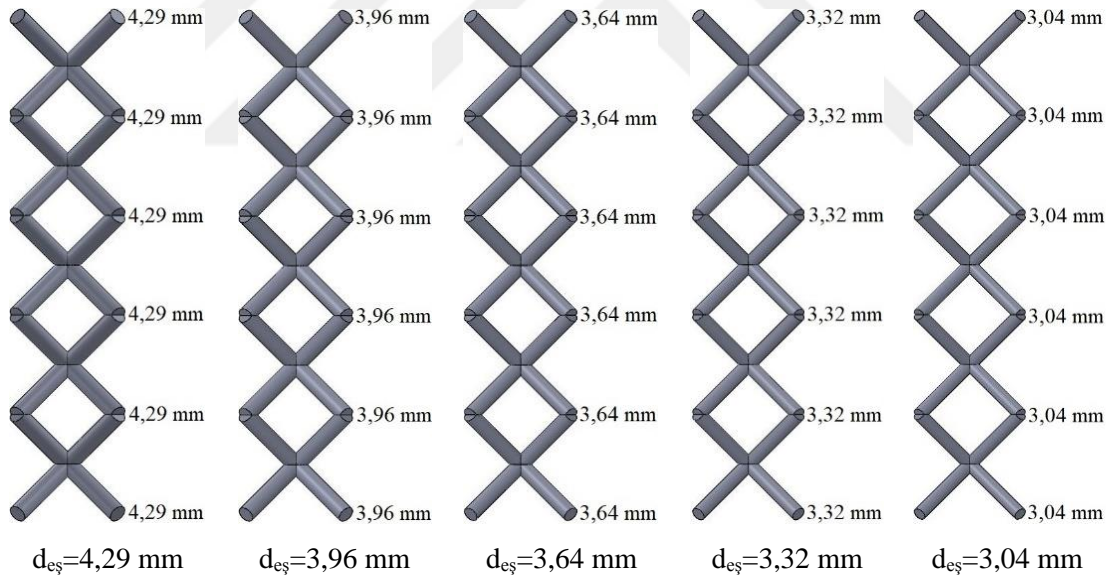
Şekil 3.7. Kafes yapıdaki tepe açısının gösterimi

D-kafes yapının tepe açısı arttıkça uç kısmın kesit alanı azalmakta ve buna paralel olarak ilgili yapının kütlesi de azalmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen D-kafes yapıların kütlesi hesaplandıktan sonra aynı kütleli veren ve taban çapı ile en uç kısmın çap değeri aynı olan EK-kafes yapılar oluşturulmuştur. Şekil 3.8'de farklı tepe açlarına sahip D-kafes yapılar ve bu yapılara kütlece eşdeğer EK-kafes yapıların şematik gösterimi verilmiştir. Kafes yapıların tüp yapıların içerisine tam olarak yerleştirilebilmesi için tüm D-kafes ve EK-kafes yapıların köşelere pah kırılmıştır (Şekil 3.9). Bu tez çalışması kapsamında ayrıca farklı taban çap değerlerine sahip D-hibrit yapıların çarpışma dayanım performansları da incelenmiştir. Bu kapsamda sadece beş hücreli kafes yapılar ele alınmış ve üç farklı taban çap değeri seçilmiştir (Şekil 3.10). Ardından oluşturulan EK-kafes ve D-kafes yapılar, içi boş tüplerin içerisine yerleştirilmesiyle EK-hibrit ve D-hibrit yapılar elde edilmiştir.

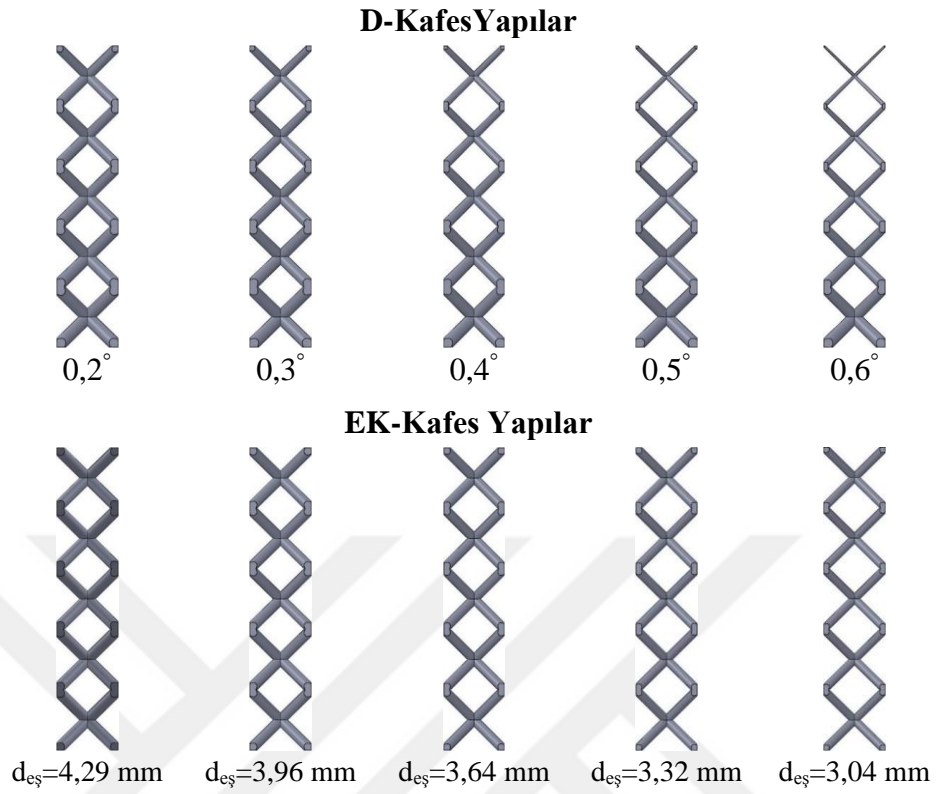
D-Kafes Yapılar



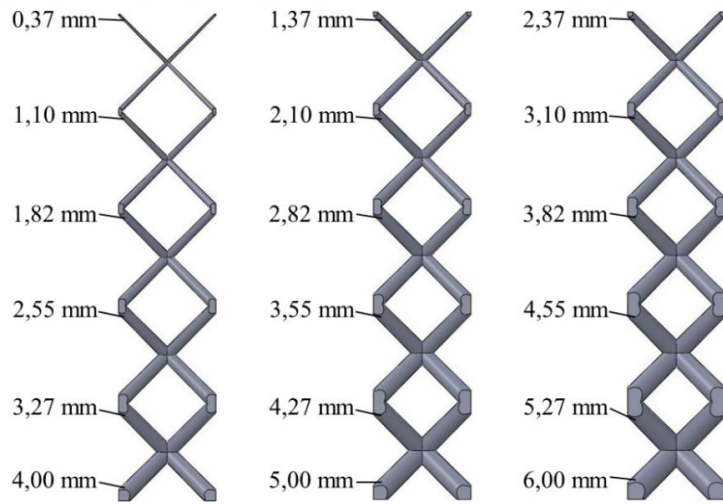
EK-Kafes Yapılar



Şekil 3.8. Farklı tepe açılına sahip D-kafes ve EK-kafes yapıların şematik gösterimi



Şekil 3.9. Köşelere pah kırılmış D-kafes ve EK-kafes yapıların şematik gösterimi

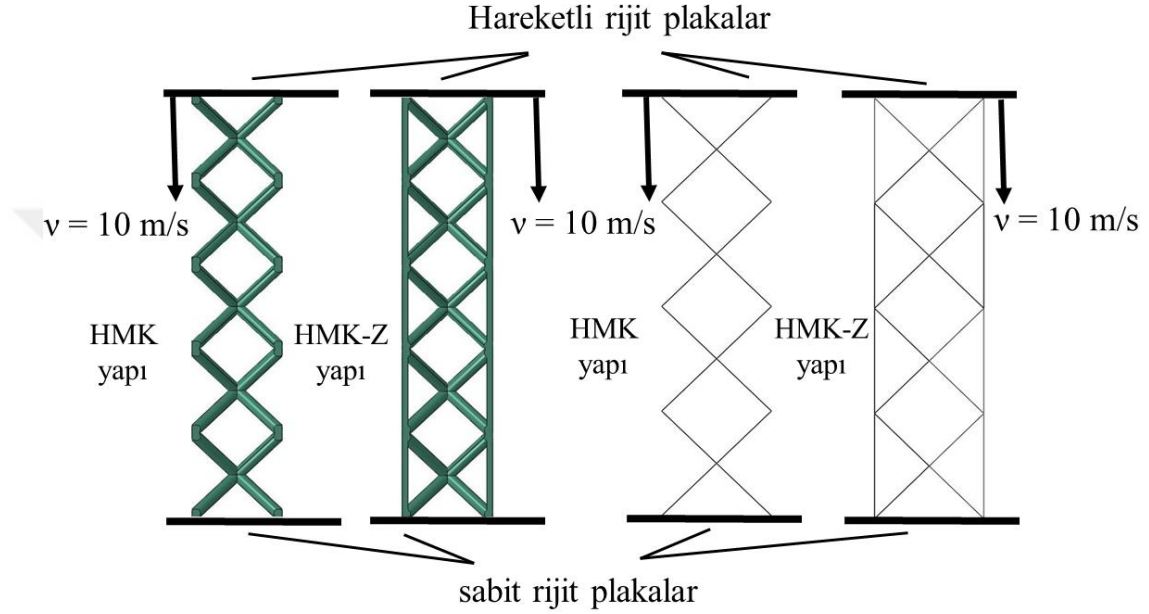


Şekil 3.10. Farklı taban çap değerlerine ve $0,5^\circ$ tepe açısına sahip kafes yapıların çap değerlerindeki değişim

3.2. Yükleme ve Sınır Koşulları

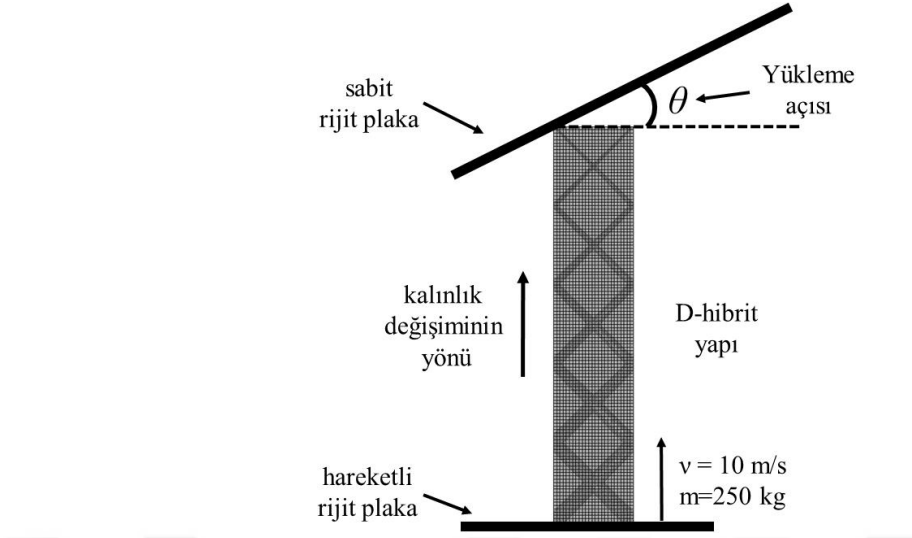
Analizlerde tüm yapılar hareketli ve sabit rijit plakalar arasında konumlandırılmış ve 10 m/s ilk hıza (v_0) ve 250 kg'lık kütleyle sahip hareketli plaka sadece dikey yönde hareket

edecek şekilde kısıtlanırken, sabit plaka ise tüm yönlerde dönme ve yer değiştirmelere kapatılmıştır (Baykasoglu ve Cetin, 2015; Hou ve ark., 2011). Eksenel ve eğik yükler altındaki yapıların yükleme ve sınır koşulları Şekil 3.11 ve 3.12’de gösterilmiştir. Derecelendirilmiş hibrit yapılar Şekil 3.12’den de görüldüğü gibi ince olan uç kısımları eğik yüzeye sahip rijit plaka tarafına konumlandırılmıştır.

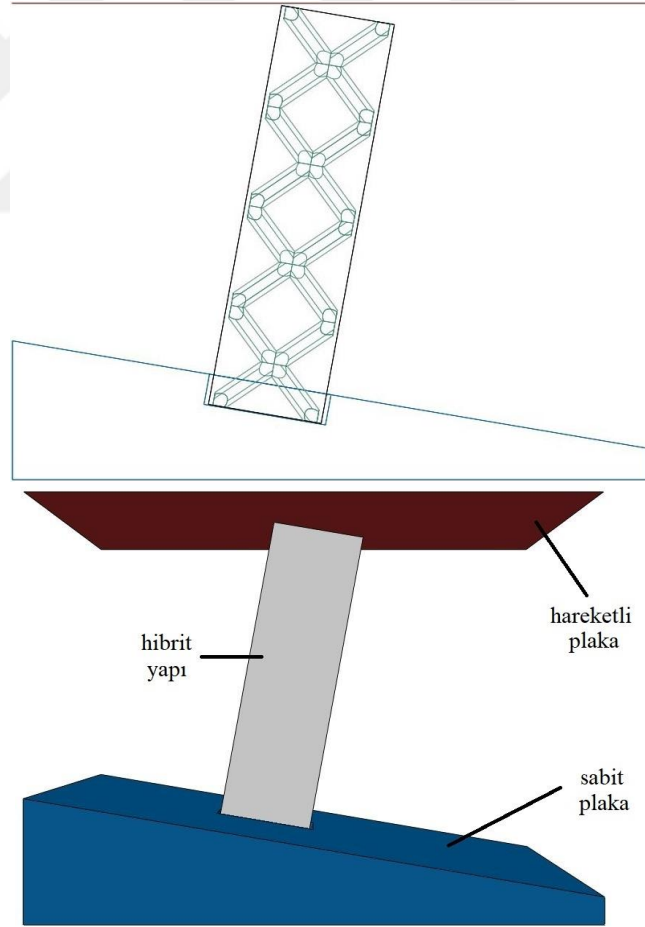


Şekil 3.11. Katı (soldaki) ve kiriş (sağdaki) elemanlarla modellenmiş eksenel yükler altındaki kafes yapıların sonlu elemanlar modelleri

Öte yandan eğik yükler altındaki yapıların doğrulama testleri için fikstür kullanılmış ve ilgili fikstür içerisine kanal açılarak teste tabi tutulacak hibrit yapı bu kanal içerisine yerleştirilmiştir. Dolayısıyla eğik yükler altındaki sonlu elemanlar modelinin doğrulama işleminde Şekil 3.12’den farklı olarak bu sınır koşullarının da sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar modellerinde kullanılan iki boyutlu sabit rijit plaka yerine doğrulama testlerinde üç boyutlu rijit plaka kullanılmış ve deney koşullarına uygun olarak içerisine bir kanal açılmıştır. Bu noktada SOLIDWORKS programında tasarlanan fikstür SE modeli içerisine dahil edilmiştir. Ardından test koşullarına uygun sınır koşulları oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Eğik yükler altındaki doğrulama testleri için oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Eğik yükler altındaki derecelendirilmiş hibrit yapıların sonlu elemanlar modeli



Şekil 3.13. Doğrulama testleri için kullanılan sonlu elemanlar modelinin şematik görünümü

3.3. Eleman Tipleri

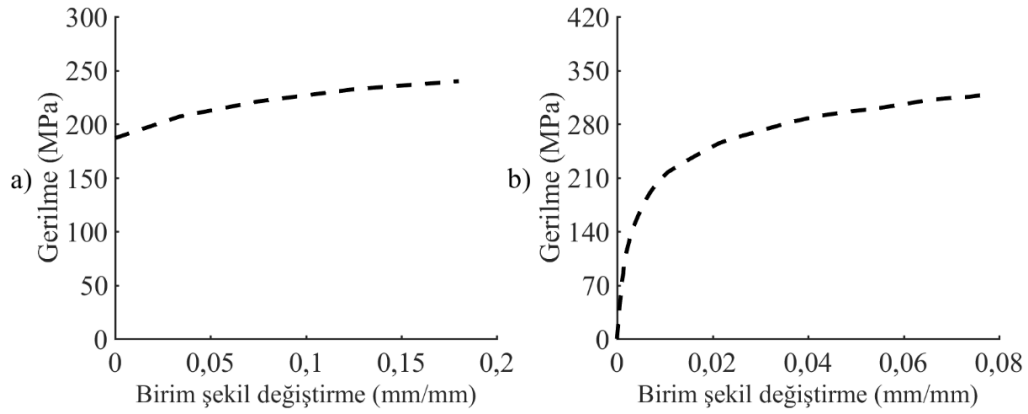
Bu çalışmada hareketli ve sabit rijit plakaları modellemek için dört düğüm noktalı lineer dörtgen eleman tipi (R3D4) kullanılırken, tüp yapıları modellemek için dört düğüm noktalı azaltılmış integrasyonlu kabuk eleman (S4R) kullanılmıştır. Kafes yapıların sayısal benzetimleri için ise bir boyutlu kiriş elemanlar ve üç boyutlu katı elemanlar olmak üzere iki farklı tipte eleman kullanılmıştır. Kafes yapıların katı elemanlar ile modellenmesinde dört düğüm noktalı dört yüzlü elemanlar (C34R) kullanılırken kiriş elemanlar ile modellenmesinde ise iki düğüm noktalı lineer elemanlar (B31) kullanılmıştır. Öte yandan, ön test sonuçları dikkate alınarak kiriş elemanlar sadece doğrulama testlerinde kullanılmıştır.

3.4. Malzeme Modelleri ve Yapısal Kusurların Tanımlanması

Bu tez çalışmasında tüpler için kare profile sahip Al6063-T5 malzeme ve kafes yapılar için ise AlSi10Mg malzeme kullanılmıştır. Al6063-T5 (Karagiozova ve ark., 2005; Baykasoğlu ve ark., 2019) ve AlSi10Mg (Zhang ve ark., 2018) malzemelerinin mekanik özellikleri ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafiği sırasıyla Çizelge 3.3 ve Şekil 3.14’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Al6063-T5 ve AlSi10Mg malzemelerinin mekanik özellikleri

Malzeme	E (GPa)	σ_y (MPa)	ρ (kg/m ³)	ν
Al6063-T5	68,2	187	2700	0,33
AlSi10Mg	69,3	160	2670	0,3



Şekil 3.14. Gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri a) Al6063-T5 ve b) AlSi10Mg

Malzemelerin plastik özelliklerini modellemek için izotropik pekleşme ile birlikte J2 kriteri olarak da bilinen Von-Mises akma kriteri kullanılmıştır. Ayrıca analizlerde kullanılan malzemelerin birim şekil değiştirme duyarlılığını (strain rate sensitivity) modelleyebilmek için literatürden elde edilen iki farklı tip model kullanılmıştır. Bu noktada, ABAQUS programına bu modeli tanıtmak için “rate dependent” seçeneği kullanılmıştır. Al6063-T5 malzemesinin birim şekil değiştirme duyarlılığını modelleyebilmek için aşağıdaki Cowper-Symonds aşırı gerilme üs kuralı kullanılmıştır.

$$R = 1 + \left(\dot{\epsilon}_p / D \right)^n, \quad \sigma_d \geq \sigma_0 \quad (3.2)$$

Burada, $\dot{\epsilon}_p$ Von-Mises eşdeğer plastik birim şekil değiştirme hızı, R dinamik gerilme (σ_d) değerinin statik gerilme (σ_0) değerine oranı, D ve n ise malzeme sabitleridir. Bu çalışmada D ve n sabitleri literature uygun olarak sırasıyla 128800 ve 4 olarak alınmıştır (Baykasoglu ve Cetin, 2015; Karagiozova ve ark., 2005; Karagiozova ve Alves, 2008). Öte yandan, AlSi10Mg malzemesi için birim şekil değiştirme duyarlılığını modelleyebilmek için Johnson-Cook eşitliği kullanılmıştır.

$$R = 1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0), \quad \sigma_d \geq \sigma_0 \quad (3.3)$$

Burada, C ve $\dot{\varepsilon}_0$ sırasıyla deformasyon hızı katsayısı ve referans deformasyon hızıdır ve bu değerler sırasıyla 0,02 ve 0,001 s⁻¹ olarak alınmıştır (Zhang ve ark., 2018).

Önerilen yapıların enerji sönümlenme performansı çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi malzeme hasarlarından önemli derecede etkilenebilmektedir. Bu nedenle hasar modelleri kullanılmıştır ve bu modeller elemanların integrasyon noktalarında Von Mises eşdeğer plastik birim şekil değiştirme değerine dayanan plastik modeller ile birlikte kullanılır. Simülasyonlarda bir elemanın hasarı w hasar parametresi ile kontrol edilen bir birikimli hasar modeli kullanılmıştır. Burada w aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$w = \frac{\varepsilon_0 + \sum \Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (3.4)$$

Burada ε_0 Von-Mises eşdeğer plastik birim şekil değiştirme başlangıç değeri, $\Delta \varepsilon_p$ eşdeğer plastik şekil değiştirme artışı ve ε_f eşdeğer hasar birim şekil değiştirme değeridir. w parametresi hasar değişkenidir ve 0 ile 1 arasında farklılık gösterir. w sıfır olduğunda hasar başlar ve $(1-w)\sigma_0$ bağıntısına göre malzemenin akma dayanımı azalmaktadır. w değeri “1” değerine ulaştığında ise o eleman çözüm ağından silinir.

Plastik birim şekil değiştirme kritik değerine, ε_c , ulaştığında hasar başlar ve aşağıdaki bağıntıya göre hasar ilerler.

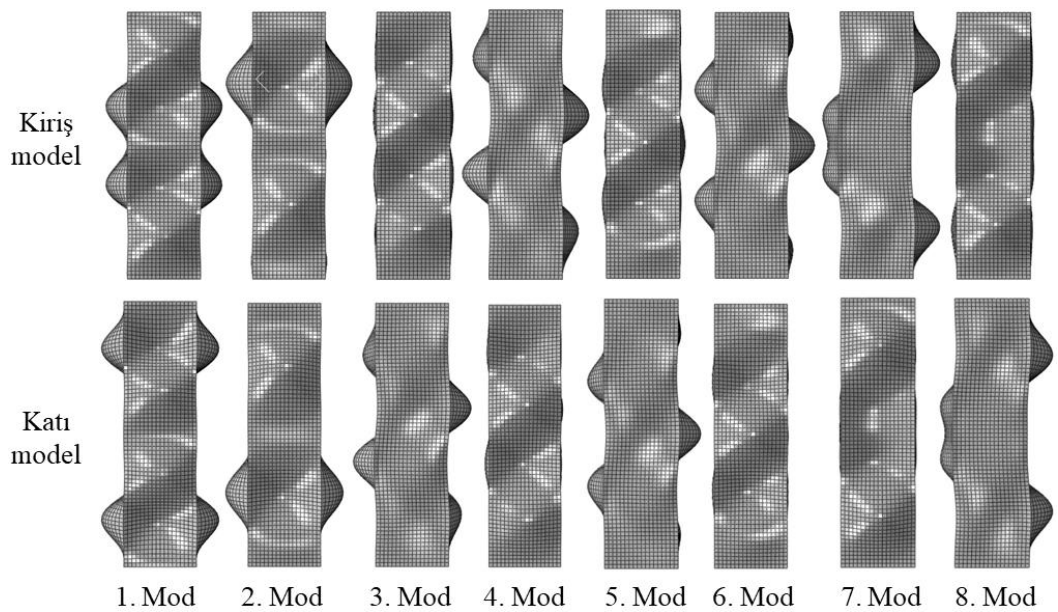
$$\dot{w} = \frac{L \dot{\varepsilon}_p \sigma_{y0}}{2G_f} \quad (3.5)$$

Burada L elemanların karakteristik boyu, σ_{y0} kırılma başladığındaki akma dayanımı değeri ve G_f birim alan başına düşen kırılma enerjisidir. G_f değeri aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$G_f = \int_{\varepsilon_h}^{\varepsilon_g} L \sigma_0 d\varepsilon_p \quad (3.6)$$

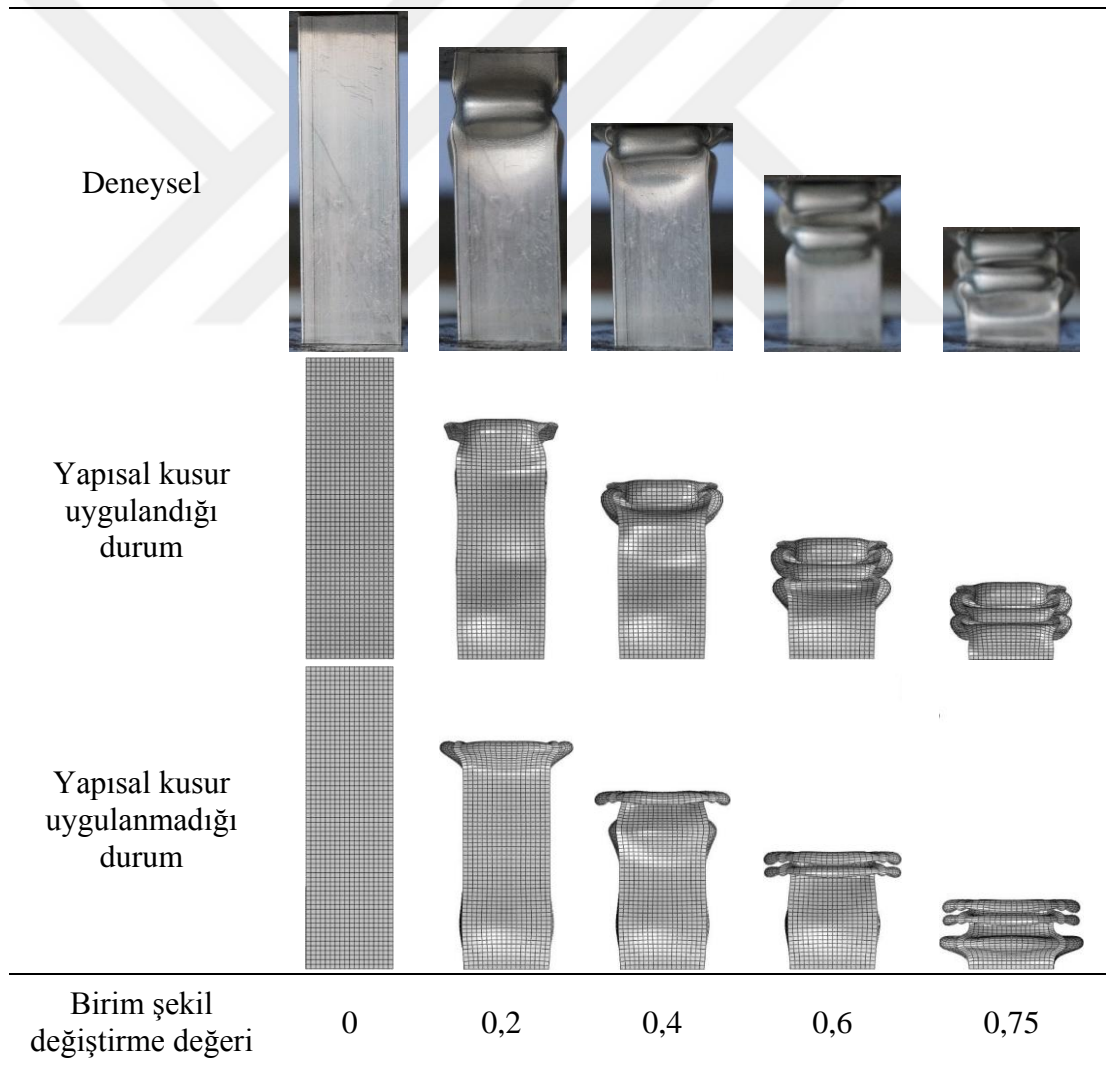
Burada ε_g ve ε_h malzeme sabitleri olup sırasıyla 0,08 ve 0,0075 olarak alınmıştır (Zhang ve ark., 2018).

Başlangıç geometrik yapısal kusurlar özellikle aksenal yüklemelerde tüplerin çarpışma dayanımları açısından oldukça önemlidir. Gerçek numunelerde yapısal kusurların dağılımlarını ölçebilmek oldukça zordur. Bu noktada, çarpışma analizlerine geçmeden önce burkulma analizleri yapılarak kusurların etkisi yapıların burkulma modlarının belirli oranları dikkate alınarak modellere dâhil edilmiştir. (Karagiozova ve ark., 2005; Nagel ve Thambiratnam, 2006; Shakeri ve ark., 2007; Song ve Guo, 2013; Song ve ark., 2013). Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz ön denemelerinde deneysel test sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının tutarlı olmadığı görülmüş ve bu durumun deformasyon modlarının uyumsuzluğundan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Yapısal kusur uygulanmadığında sonlu elemanlar analizindeki tüp ve hibrit yapıların deformasyon şekillerinin halkalar şeklinde olduğu ve bu durumun deneysel deformasyon şekilleri ile uyumsuz olduğu gözlemlenmiştir. Bu noktada ABAQUS programı içerisindeki yapısal kusur tanımlama (imperfection) seçeneği kullanılarak Şekil 3.15'ten de görülebileceği gibi farklı burkulma modları elde edilmiş ve bu burkulma modlarının değişik oranları dikkate alınarak kusurların etkisi tanımlanmaya çalışılmıştır.

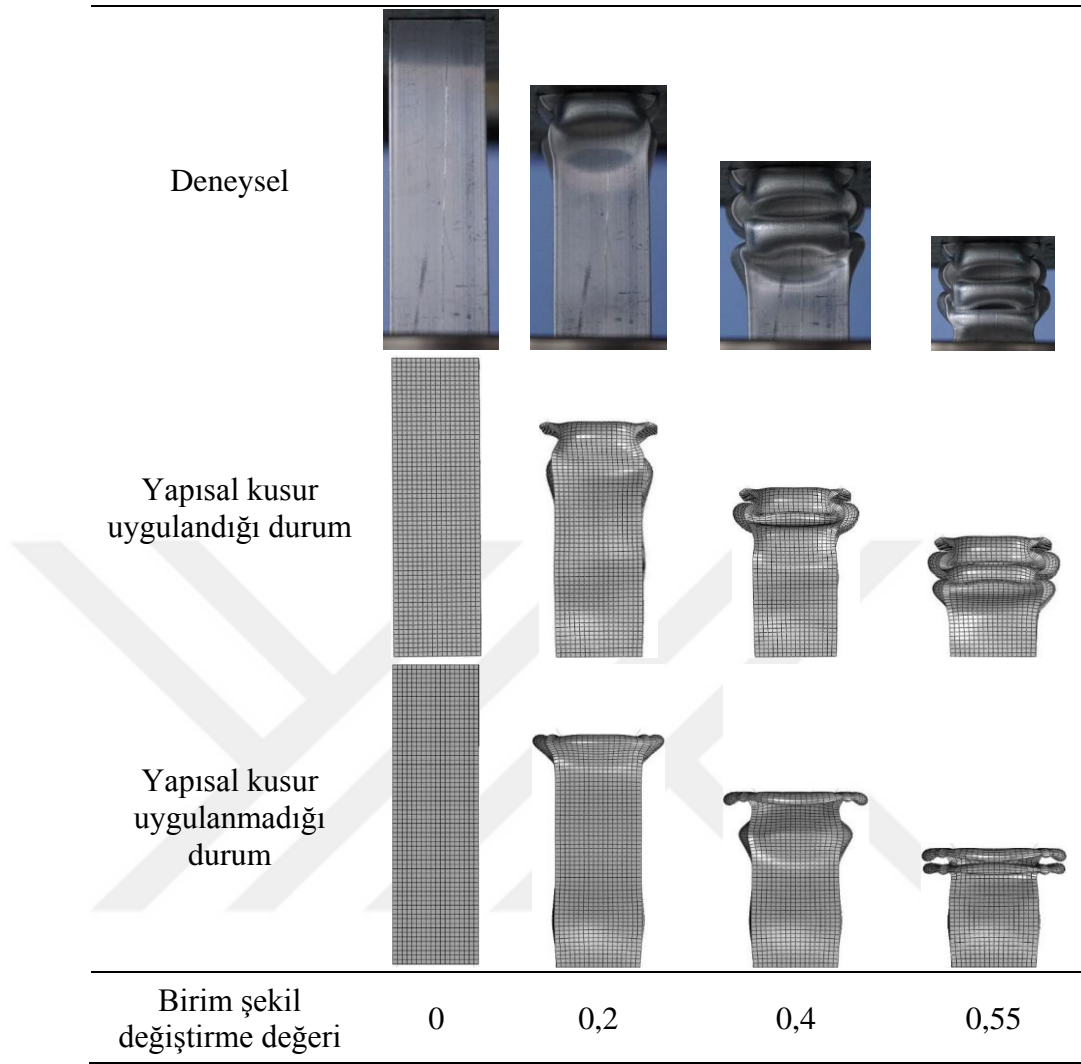


Şekil 3.15. Kiriş ve katı kafes modeller için tespit edilen burkulma modları

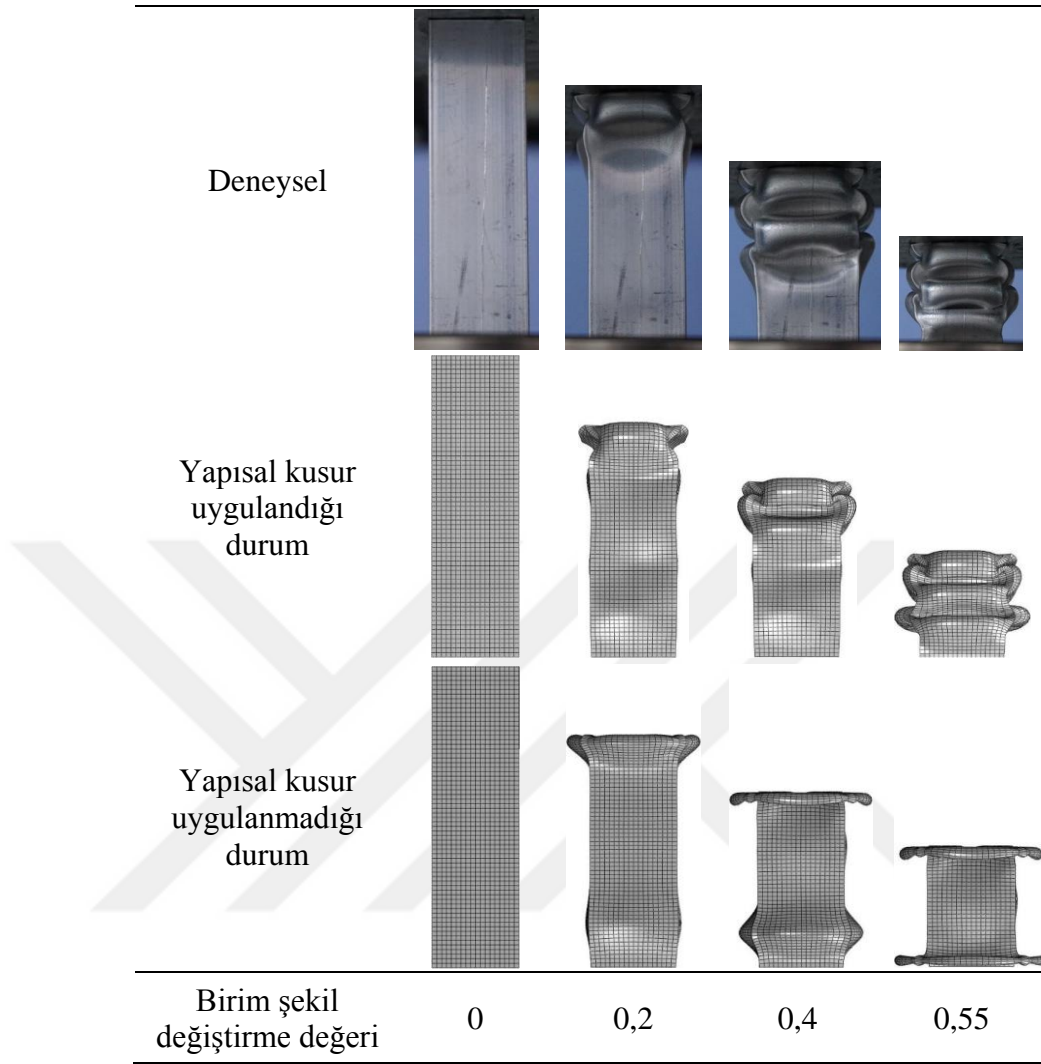
Elde edilen burkulma modları arasından deneysel sonuçlar ile en tutarlı sonuçların elde edilmesine olanak sağlayan modun ilk mod olduğu görülmüş ve burkulma mod değeri tüp kalınlığının %2'si olarak belirlenerek sayısal modellere dahil edilmiştir. Kabuk eleman modeli kullanılarak oluşturulan içi boş tüp ve hibrit yapıların sonlu elemanlar modellerine yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlardaki deformasyon şekilleri sırasıyla Şekil 3.16-3.18'de gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi yapısal kusurların kullanılmadığı durumlarda her üç yapı için de halkalar şeklinde deformasyonlar olduğu buna karşın yapısal kusurların kullanıldığı durumlarda ise yapıların deneysel gözlemlere oldukça yakın deformasyon şekillerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.16. İçi boş tüp yapılar için sonlu elemanlar kabuk modeline yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumdaki deformasyon şekilleri



Şekil 3.17. HMK hibrit yapılar için sonlu elemanlar kiriş eleman modeline yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumdaki deformasyon şekilleri

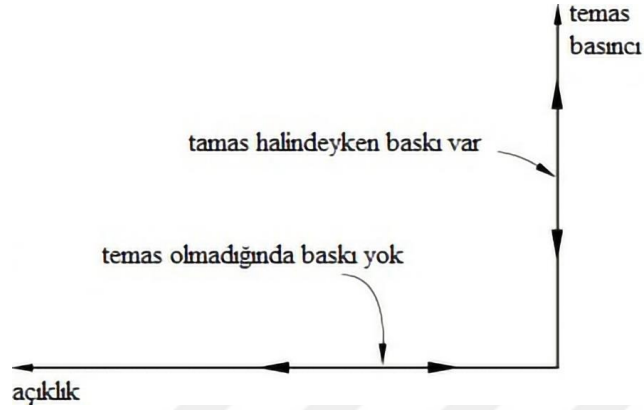


Şekil 3.18. HMK hibrit yapılar için sonlu elemanlar katı eleman modeline yapısal kusur seçeneğinin uygulandığı ve uygulanmadığı durumdaki deformasyon şekilleri

3.5. Model Etkileşimlerinin Tanımlanması

Rijit plakalar, boş tüp ve hibrit yapılar arasındaki temas durumları için genel temas (general contact) algoritması kullanılmıştır. Bu model algoritması yapıların ezilme sırasındaki teğetsel ve normal doğrultudaki davranışlarını tanımlamaktadır. Normal doğrultudaki temas durumu için “hard contact” seçeneği kullanılmıştır. Bu özellik herhangi iki yüzey arasında temas olması durumunda devreye girerek temas basıncı oluşturur ve iki yüzey arasında boşluk olduğunda ise etkisiz kalır. Yüzeyler arasındaki

boşluk ve temas basıncı arasındaki ilişkiyi gösteren “hard contact” özelliği Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



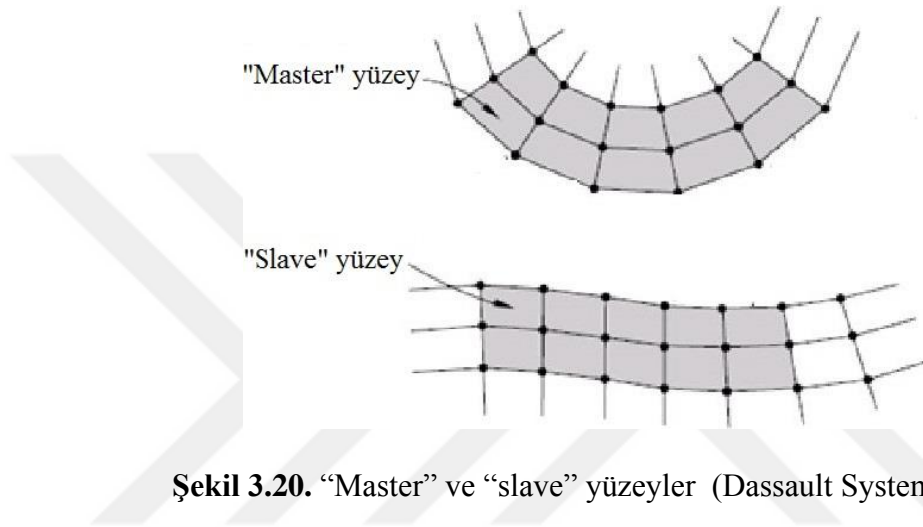
Şekil 3.19. “Hard contact” özelliği için yüzeyler arasındaki boşluk ve temas basıncı arasındaki ilişki (Dassault Systems Inc)

Diğer yandan teğetsel yönde temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme ise ABAQUS programında Coulomb sürtünme modeli kullanılarak modellenmiştir. İlgili model yüzeyler arasındaki sürtünme davranışını bir sürtünme katsayısı kullanarak karakterize eder. Yüzeyler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan gerilme değeri kritik kayma gerilmesi (τ_k) değerine ulaşıncaya kadar sıfırdır ve kritik kayma gerilmesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

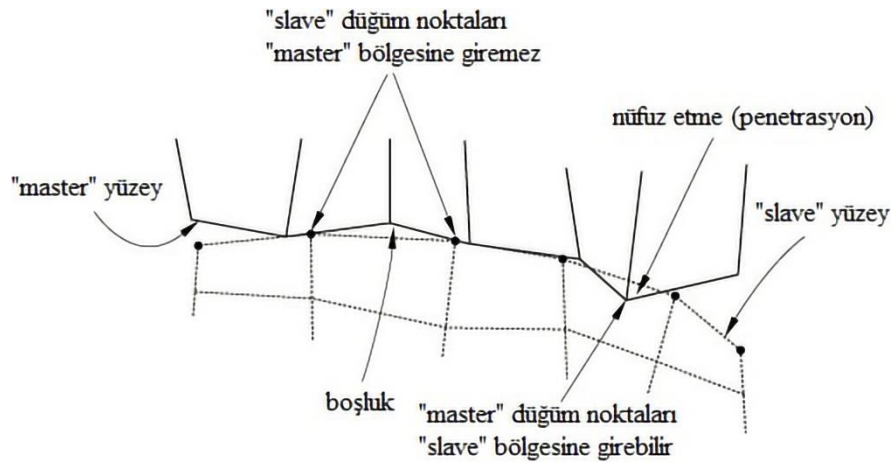
$$\tau_k = \mu p \quad (3.7)$$

Burada μ sürtünme katsayısı ve p iki yüzey arasındaki temas basıncıdır. Sürtünme katsayısının sıfır olması, yüzeylerin sürtünmesiz olduğu ve birbirleri üzerinde serbestçe kaymakta oldukları anlamına gelmektedir. Bu çalışmada sürtünme katsayısı 0,25 olarak seçilmiştir (Baykasoglu ve Cetin, 2015). Bu sürtünme katsayısı ilgili modele “penalty” formülasyonu ile tanıtılmıştır (Dassault Systems Inc, 2014). “Penalty” temas algoritması “general contact” modeli ile oldukça uyumlu çalışan bir algoritmadır. Diğer yandan, hareketli rijit plaka ile deforme olan yapılar arasında “master-slave” ilişkisi tanımlanmıştır (Şekil 3.20). Buradaki amaç deformasyon esnasında deforme olan yapıların rijit plakanın içerisine geçmesini (penetre olmasını) önlemektir. Bu nedenle rijit plakaların ezilen yapılarla temas halinde olan yüzeyleri

“master” olarak seçilirken, deformasyona uğrayan yapıların rijit plakalarla temas eden yüzeyleri ise “slave” olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.21’de “master-slave” ile kurulan temas ilişkisi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi “slave” olarak seçilen yüzeyler “master” olarak seçilen yüzeyler içerisine geçememektedir. Ayrıca, hareketli rijit plaka ve deforme olan yapılar arasındaki göreceli hareketi engellemek için rijit plaka ve bu plakaya temas eden yüzeyler “tie” komutu ile birbirine bağlanmıştır.



Şekil 3.20. “Master” ve “slave” yüzeyler (Dassault Systems Inc)

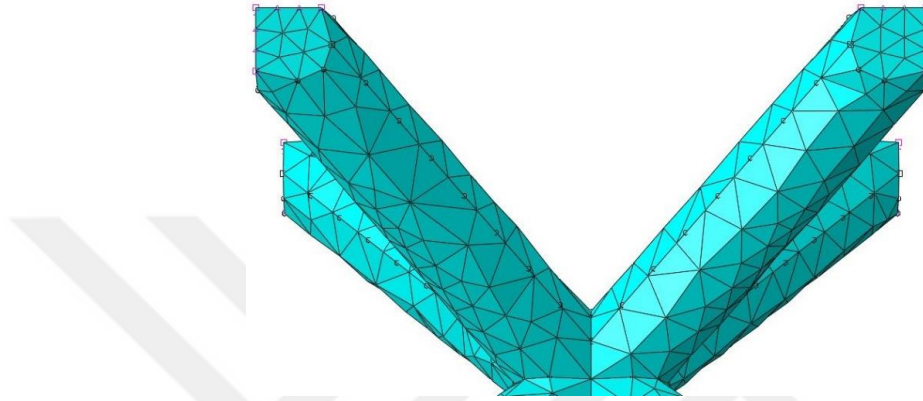


Şekil 3.21. Yüzeyler arasındaki “master-slave” ilişkisi (Dassault Systems Inc)

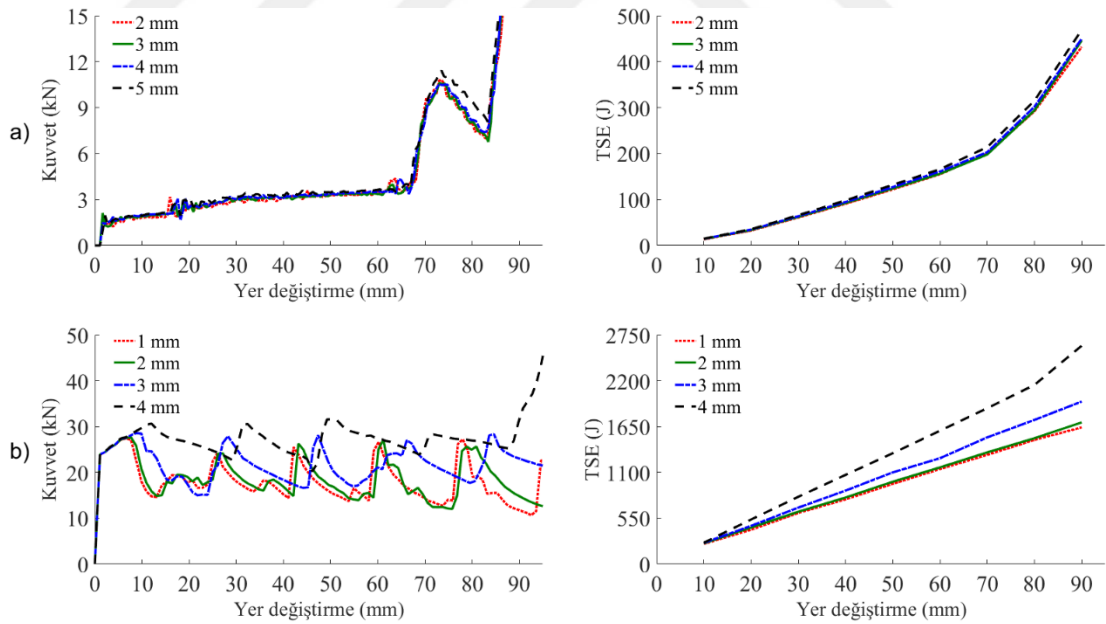
3.6. Yakınsama Testleri

Yakınsama testleri için boş tüp ve kafes yapılar ayrı ayrı olarak farklı çözüm ağı (mesh) değerlerinde analize tabi tutulmuş ve her bir çözüm ağı değerine bağlı olarak kuvvet - yer değiştirme ve enerji - yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Kafes

yapıların modellenmesinde kabul edilebilir sonuçlar elde edebilmek için literatüre (Tripathy ve Lu, 2017) uygun olarak kalınlık boyunca 3 eleman kullanılmıştır (Şekil 3.22). Yakınsama testi sonucuna göre eleman boyutları kafes yapı için 2 mm ve tüp için 1 mm olarak seçilmiştir. Boş tüp ve kafes yapılara uygulanan yakınsama testi sonuçları Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.22. SE analizlerinde kullanılan çözüm ağlarının gösterimi



Şekil 3.23. Yakınsama test sonuçları a) kafes yapı ve b) içi boş tüp

3.7. SE Modellerinin Doğrulanması

Literatür incelendiğinde deformasyona uğrayan yapıların düşük hızlı darbe yükleri ve sanki-statik yükler altındaki deformasyon modlarının oldukça yakın olduğu ve atalet

etkisinin sınırlı olduğu görülmektedir (Al Galib ve Limam, 2004; Alghamdi, 2001; Baykasoglu ve Tunay Cetin, 2015; Jones, 1989). Ayrıca bu çalışmada kullanılan alüminyum alaşımlarının birim şekil değiştirme hızına duyarlılığı oldukça düşüktür (Nikkhah ve ark., 2019; Xu ve ark., 2018; Yong Zhang ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2015). Bu nedenlerden dolayı bu tez çalışmasındaki eksenel ve eğik yükler altındaki yapıların deneysel testleri sanki-statik yükleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu noktada doğrulama testleri için ABAQUS/Explicit kodları kullanılmıştır. Açık (eksplisit) kodlar sanki-statik ezilme cevaplarını benzetmek için kullanılabilmesine rağmen problemi çözebilmek için çok küçük zaman adımlarının kullanılması gerekmektedir ve bu nedenle sanki-statik problemlerin çözümü pratikte oldukça zaman alıcıdır. Sanki-statik şartları sağlamak koşulu ile bu sorunun üstesinden gelebilmek için aşağıda verilen çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

- Atalet ve hız etkilerinin ihmal edilebilir olması koşulu ile simülasyon hızını arttırmak
- Zaman adımını arttırabilmek için kütleleri arttırmak
- Zaman adımını problemlerinden kaçınmak için yoğunluğu arttırmak

Yukarıdaki yöntemleri kullanırken eğri cevabındaki yüksek salınımlardan kaçınmak için başlangıç yükleme koşullarının dikkatli seçilmesi ve sisteme düzgün bir şekilde dahil edilmesi gerekmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen yapay işlemlerin ardından en büyük problem sanki-statik testlerin geçerliliğidir. Bu noktada literatürde sanki-statik testlerin geçerliliği konusunda birkaç kriter bulunmaktadır.

- Simülasyon esnasında toplam kinetik enerjinin toplam şekil değiştirme enerjisine oranı %5'ten az olmalıdır.
- Yapıların kuvvet - yer değiştirme cevapları yükleme hızından bağımsız olmalıdır.

Bu noktada doğrulama testleri için literatüre uygun olarak (Baroutaji ve ark., 2015; Gümrük ve Mines, 2013; Santosa ve ark., 2000; Zhang ve ark., 2015) SE modeli için yapay bir hız profili tanımlanmıştır. Atalet etkilerini minimuma indirebilmek ve eğri cevabındaki salınımları engelleyebilmek için 15 ms'lik bir yükleme zamanı

belirlenerek yumuşak bir temas sağlanmış ve bu sürenin ardından 2 m/s sabit bir hızla analizler gerçekleştirilmiştir. Öte yandan önerilen sonlu elemanlar modellerinin doğruluğunun test edilebilmesi amacıyla deneysel test sonuçlarının sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu noktada tüp ve kafes yapılar kullanılarak elde edilen hibrit yapılar eksenel ve eğik yüklere maruz bırakılmıştır.

3.7.1. Deney numunelerinin üretimi

Kafes yapıların üretimi 30 µm parçacık boyutuna sahip AlSi10Mg metal tozları kullanılarak EOS M 290 doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Resim 3.1'de EOS M 290 DMLS cihazına ait bir fotoğraf görülmektedir.



Resim 3.1. EOS M 290 doğrudan lazer metal sinterleme cihazı

Kullanılan AlSi10Mg metal tozunun kimyasal bileşenleri ve kafes malzeme üretiminde kullanılan üretim parametreleri sırasıyla Çizelge 3.4 ve 3.5'te gösterilmiştir.

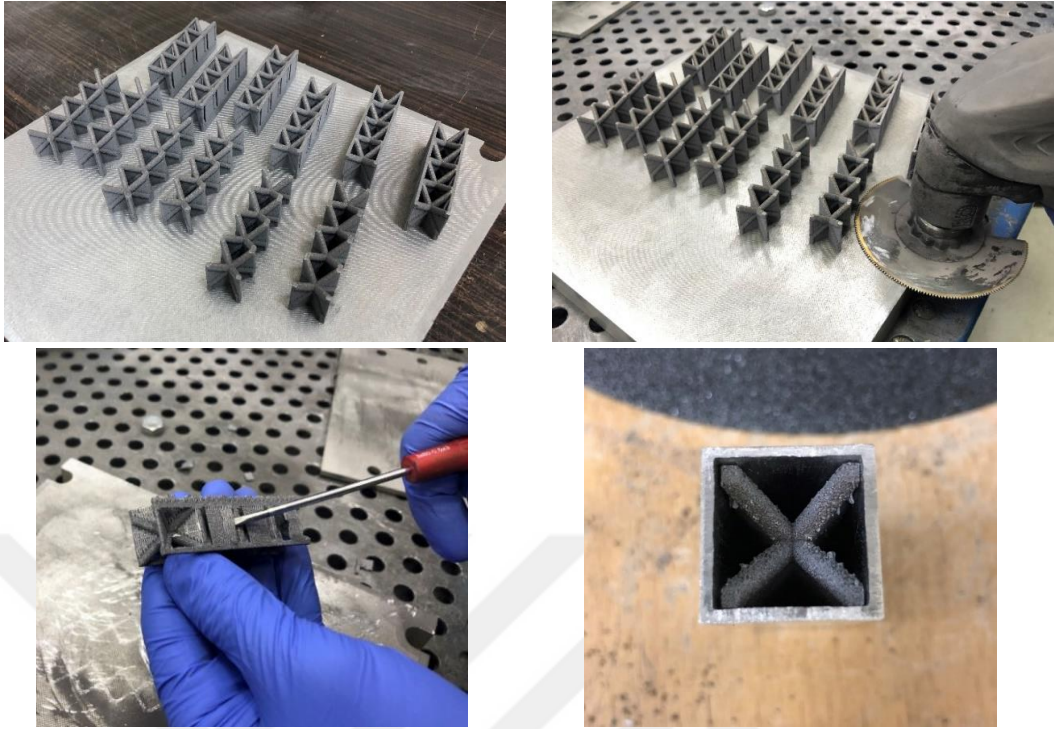
Çizelge 3.4. AlSi10Mg metal tozunun kimyasal bileşenleri (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
9-11	<0,55	<0,05	<0,45	0,2-0,45	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	<0,15	Geri kalan

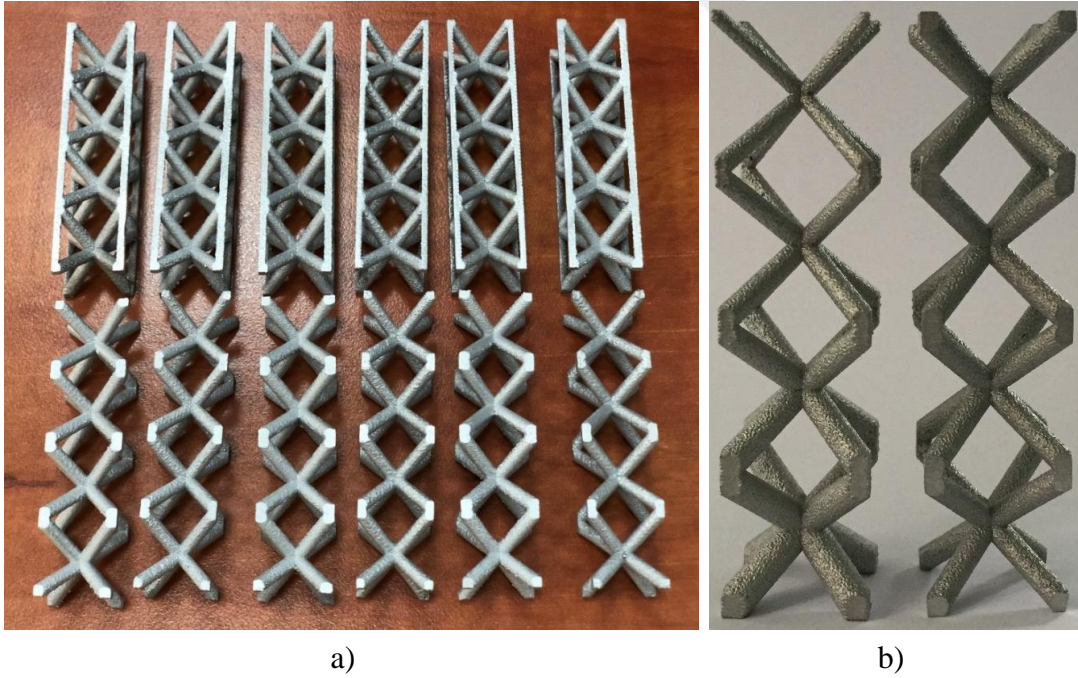
Çizelge 3.5. Kafes yapı üretim parametreleri

Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama aralığı (mm)	Katman kalınlığı (mm)
370	1300	0,19	0,03

Al6063-T5 malzemesinden satın alınan kare tüpler $20 \times 20 \text{ mm}^2$ dış boyutlara, 1,5 mm et kalınlığına ve 66 mm yüksekliğe sahiptir. DMLS yöntemi ile üretilen parçalar kusursuz geometriler olmayıp yapısında çeşitli pürüzler barındırmaktadır. Bu nedenle kafes yapıların kare tüplerin içerisine rahatça girebilmesi için tüpler ile kafes yapılar arasında toplamda 0.5 mm'lik bir boşluk olacak şekilde tasarlanmış ve buna göre kafes malzemelerin taban alanları $16,5 \times 16,5 \text{ mm}^2$ olarak belirlenmiştir. HMK ve HMK-Z kafes yapılar 4 hücreli, $16,5 \times 16,5 \text{ mm}^2$ taban alanına, 3 mm çap değerine ve 66 mm yüksekliğe sahip olacak şekilde üretilmiştir. Diğer yandan D-kafes yapılar ise 4,25 taban çapına sahiptir ve çap değeri uç kısma doğru gidildikçe sürekli olarak azalmaktadır. Resim 3.2'den de görüldüğü gibi numuneler bir plaka üzerinde üretilmektedir ve üretilmesi istenen parçaların geometrilerine bağlı olarak bazı noktalarında destek elemanlarının kullanılması gerekebilmektedir. Bu sebeple kafes yapılar için destek elemanlar kullanılmış ve üretimlerinin tamamlanmasından sonra ilgili destek parçaları sökülüştür. Destek elemanlarının da temizlenmesinin ardından üretilen kafes yapıların tüp içerisine sorunsuz girebilmeleri için kafes yapıların kenarları zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen kafes numuneler Resim 3.3'te gösterilmiştir.



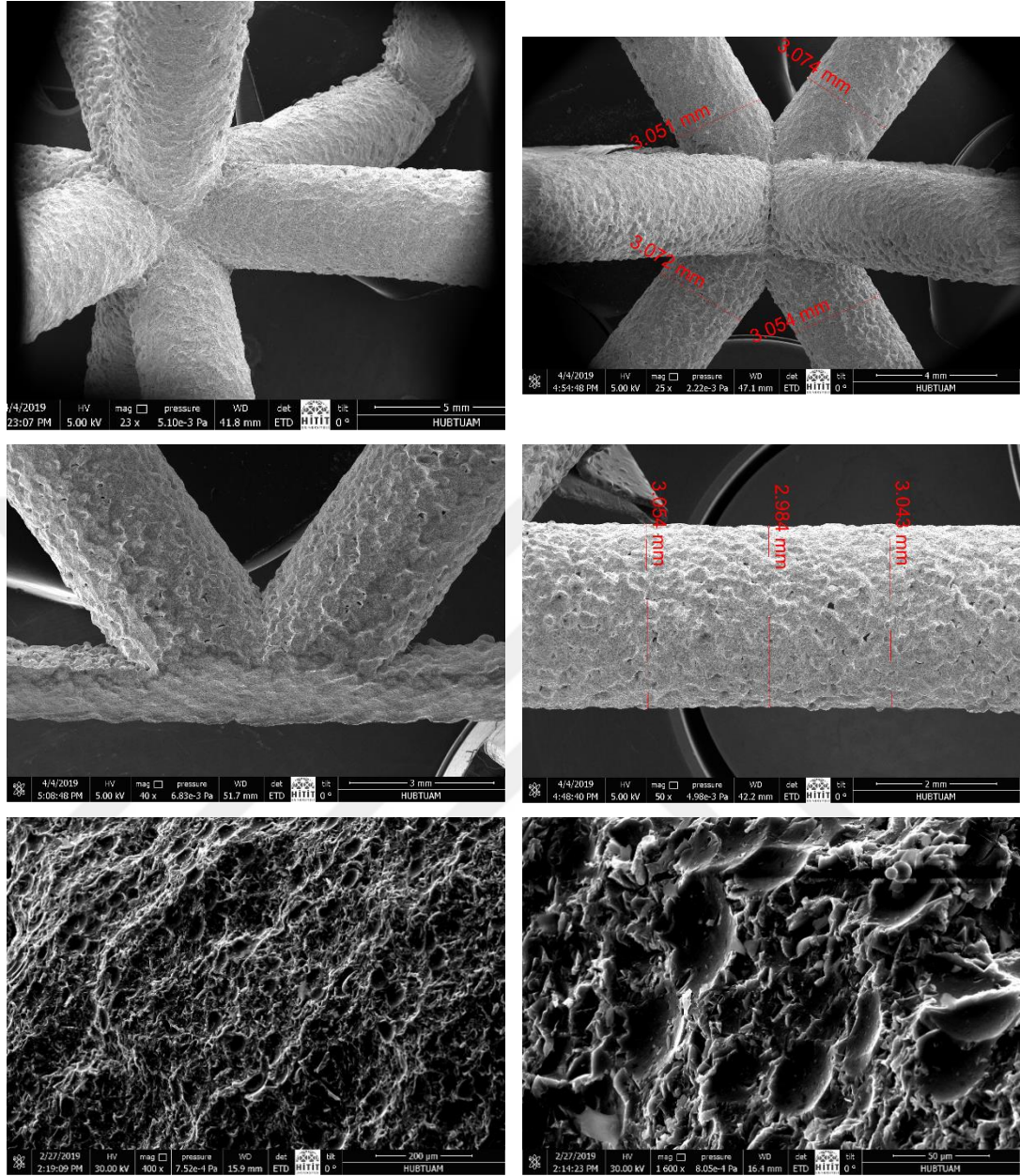
Resim 3.2. Üretim sonrası kafes yapıların görüntüleri



a)

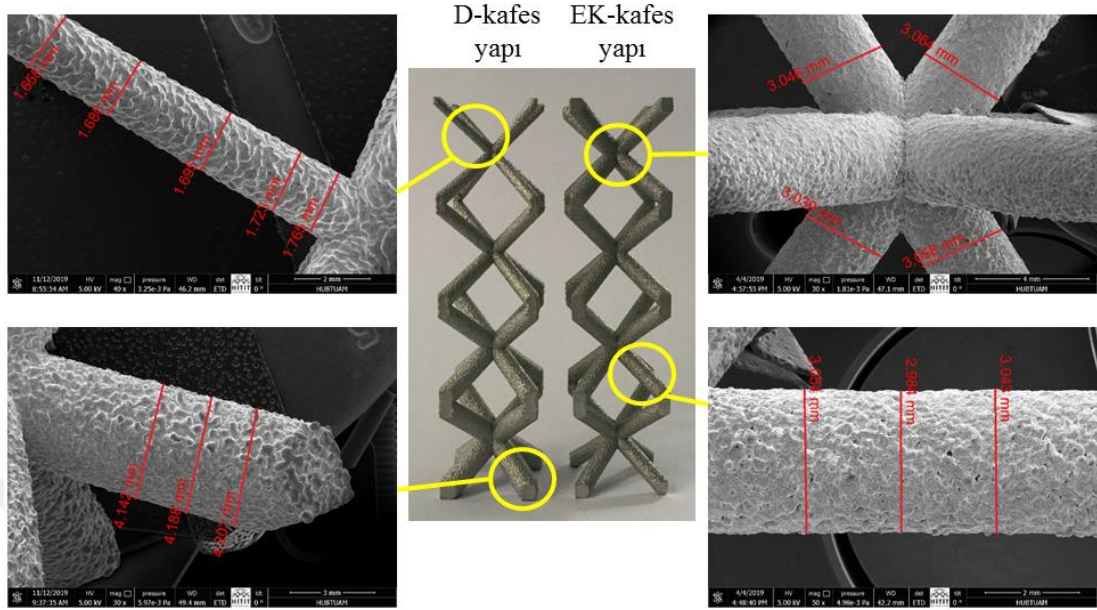
b)

Resim 3.3. Üretilen kafes yapılar: a) HMK (altta) ve HMK-Z (üstte) kafes yapı
b) D-kafes (solda) ve EK-kafes yapı

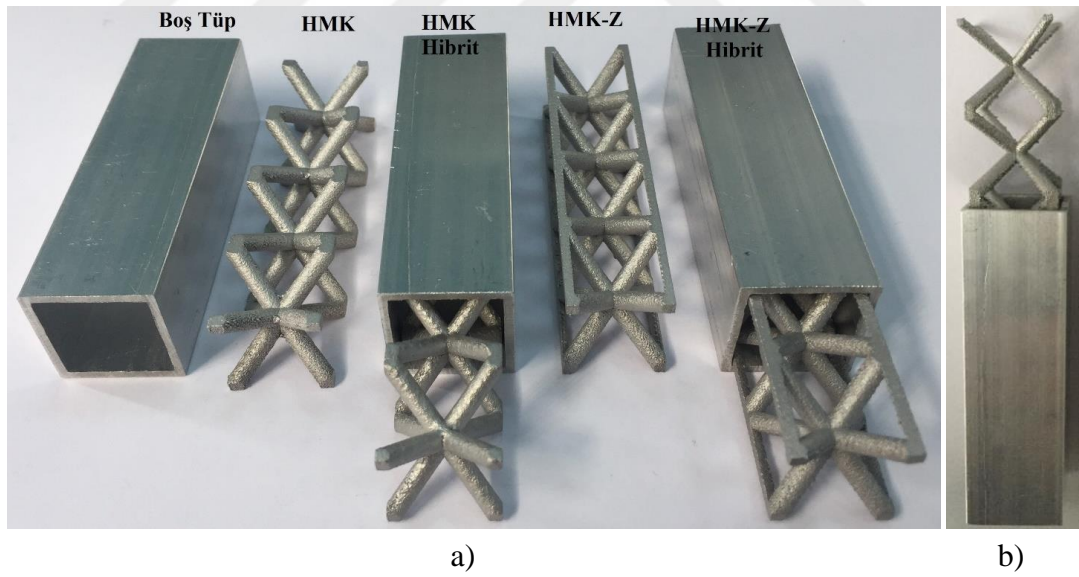


Resim 3.4. Üretilen HMK ve HMK-Z kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Üretimden kaynaklanan hataların incelenmesi ve numunelerin tasarlanan boyutlarda üretilip üretilmediğinin kontrol edilmesi amacıyla kafes yapılar taramalı elektron mikroskobu vasıtasıyla incelenmiştir. Üretimi tamamlanan kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Resim 3.4 ve 3.5'te gösterilmiştir. Daha sonra ilgili kafes yapılar tüplerin içerisine yerleştirilmiş ve böylece hibrit yapılar elde edilmiştir. Oluşturulan hibrit yapılar Resim 3.6'da gösterilmiştir.



Resim 3.5. Üretilen D-kafes ve EK-kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

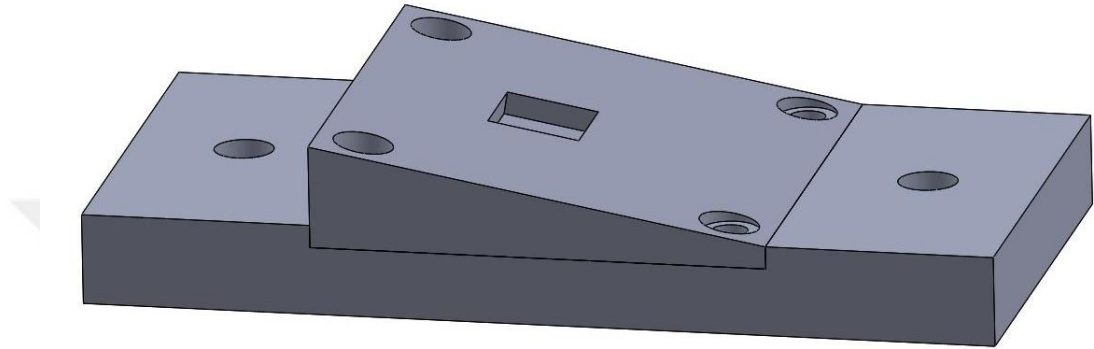


Resim 3.6. Oluşturulan çeşitli yapılar: a) boş tüp, eşdeğer kalınlıklı kafes yapılar ile bu yapılarla oluşturulan hibrit yapılar ve b) D-hibrit yapı

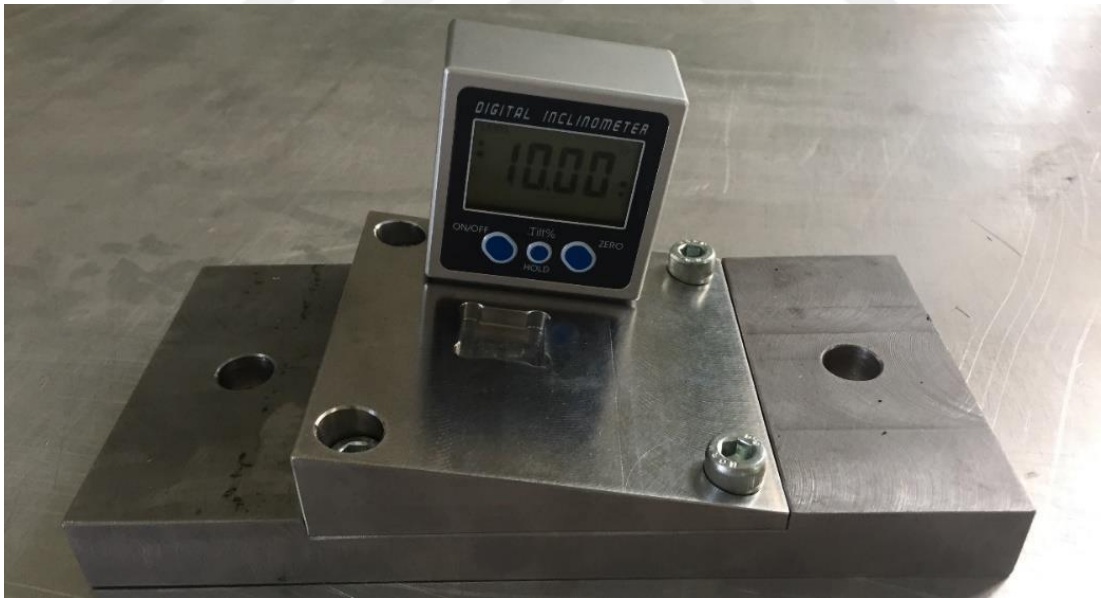
3.7.2. Fikstür tasarımı

Eğik yükler altındaki EK-hibrit ve D-hibrit modellerin deneysel olarak doğrulanmasında eğik yükleme koşullarının oluşturabilmesi için Şekil 3.24'teki fikstür

tasarlanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi hibrit yapıların deformasyon sırasında fikstür üzerinden kaymaması için fikstür üzerine bir kanal açılmış ve bu kanal tüp boyutları göz önünde bulundurularak sıkı geçme olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen fikstürün eğim açısı bir eğimölçer vasıtasıyla kontrol edilmiş ve istenen eğim değerine sahip olduğu görülmüştür (Resim 3.7).



Şekil 3.24. Eğik yüklemeler altındaki hibrit yapıların doğrulama testleri için tasarlanan fikstür

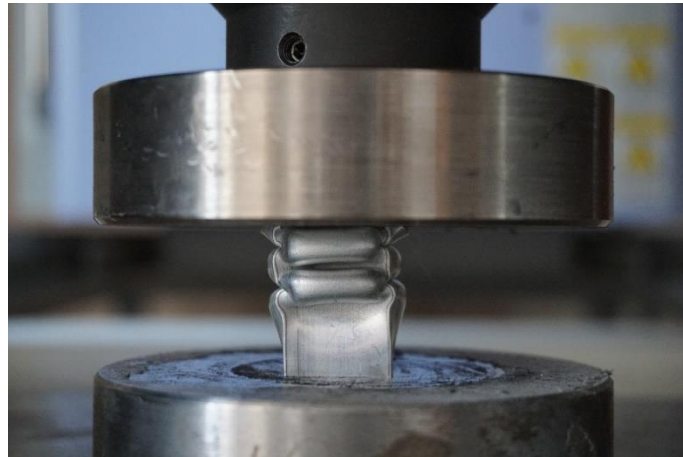
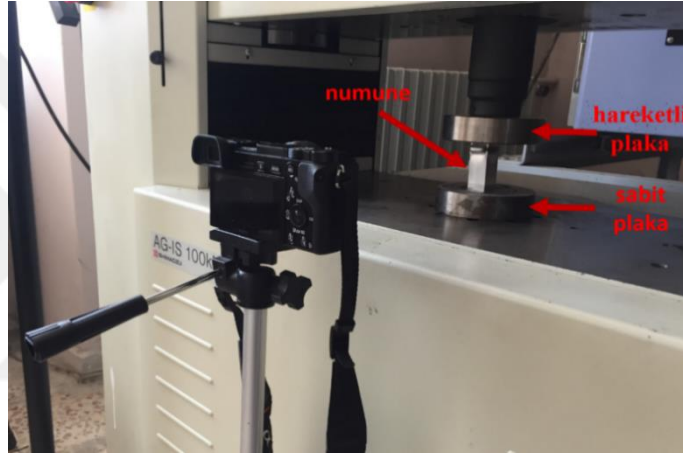


Resim 3.7. Üretilen fikstür ve eğimölçer ile kontrol edilmesi

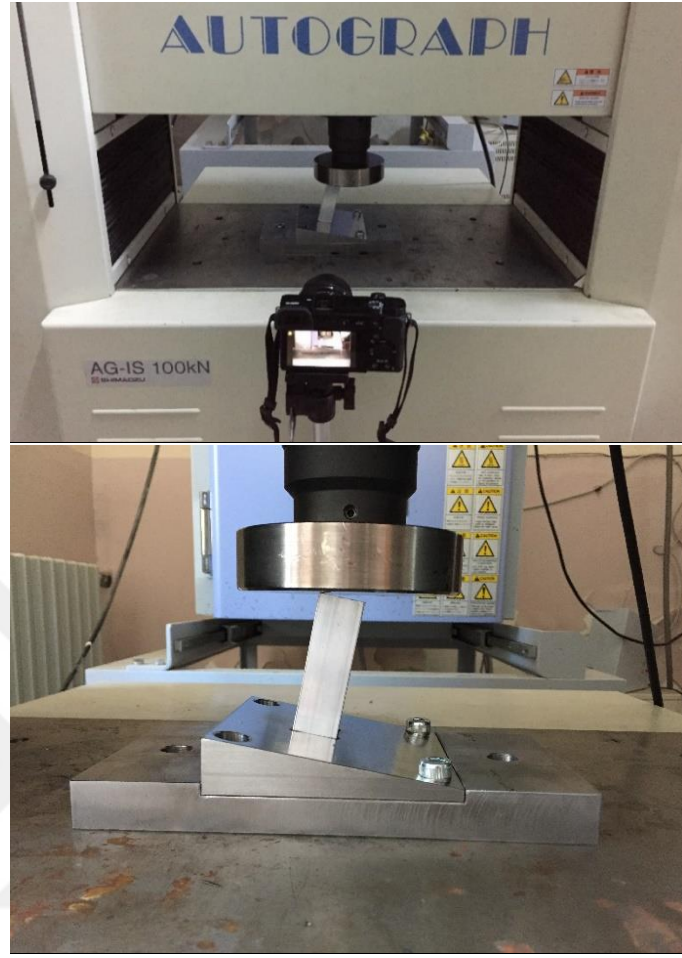
3.7.3. Deneysel ölçüm ve sonuçlar

Tüp ve kafes yapılar ile oluşturulan hibrit yapıların eksenel ve eğik yükler altındaki deneysel testleri sanki-statik yükler altında 100 kN kapasiteli Shimadzu Autograph AG-IS test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Eksenel yüklemeye maruz bırakılacak hibrit yapılar hareketsiz alt tabla üzerine yerleştirilmiş ve üst tabla numune üzerine temas edinceye kadar yaklaştırılmıştır. Temas gerçekleşince kuvvet ve yer değiştirme değerleri sıfırlanarak test başlatılmıştır. Eğik yükleme durumlarında ise D-hibrit ve EK-hibrit yapılar fikstür üzerindeki kanal içerisine yerleştirilmiştir. Ayrıca hareketli olan üst plakanın aşağı doğru hareketi sırasında fikstürün kenarlara kaymaması için fikstürün alt tablası zemine civatalar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Testler literatüre (Wu ve ark., 2016; Hu ve ark., 2018; Sun ve ark., 2019) uygun olarak 2 mm/dk. hız ile gerçekleştirilmiştir. 66 mm'lik numune boyu için şekil değiştirme hızı 10^{-4} s^{-1} mertebesinde gerçekleşmiştir. Zamana bağlı kuvvet ve yer değiştirme değerleri deney cihazı ile senkronize olarak çalışan bir yazılım ile 20 veri/sn örnekleme hızında kaydedilmiştir. Deney numunelerinin test sırasında gerçekleşen deformasyon görüntüleri ise üçayak üzerine sabitlenmiş bir fotoğraf makinası vasıtasıyla kayıt altına alınmıştır. Eksenel ve eğik yükler altındaki numunelerin deneysel test görüntüleri Resim 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir.

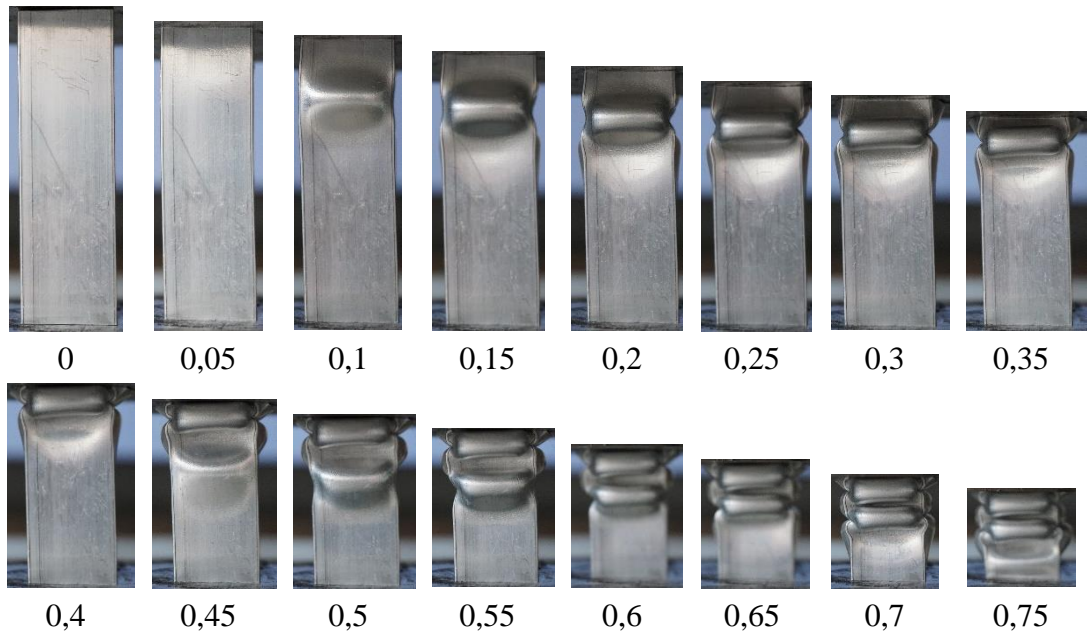
Eksenel yükleme altındaki ve içi boş tüp, HMK hibrit ve HMK-Z hibrit numunelerinin farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri sırasıyla Resim 3.10-12'de verilmiştir. Deformasyon görüntülerine bakıldığında her üç yapının da başlangıç deformasyonun hareketli olan üst plaka tarafında olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca içi boş tüpün hibrit yapılara göre daha geç deformasyon boyunda yoğunlaşma bölgesine girdiği açıkça görülmektedir. Bunun sebebi boş tüplerin iç kısımlarındaki boşluğu kullanarak katlanmak suretiyle ezilebilmesidir. Boş tüpün içerisine kafes yapılar yerleştirildiğinde ise tüpün içerisinde az boşluk kaldığından dolayı hücreler birbirine daha erken temas etmekte ve dolayısıyla yoğunlaşma daha erken başlamaktadır. HMK ve HMK-Z hibrit yapılar kıyaslandığında ise HMK-Z hibrit yapının HMK hibrit yapıya göre daha geç yoğunlaşarak daha fazla ÇV değerine sahip olduğu gözlemlenmektedir.



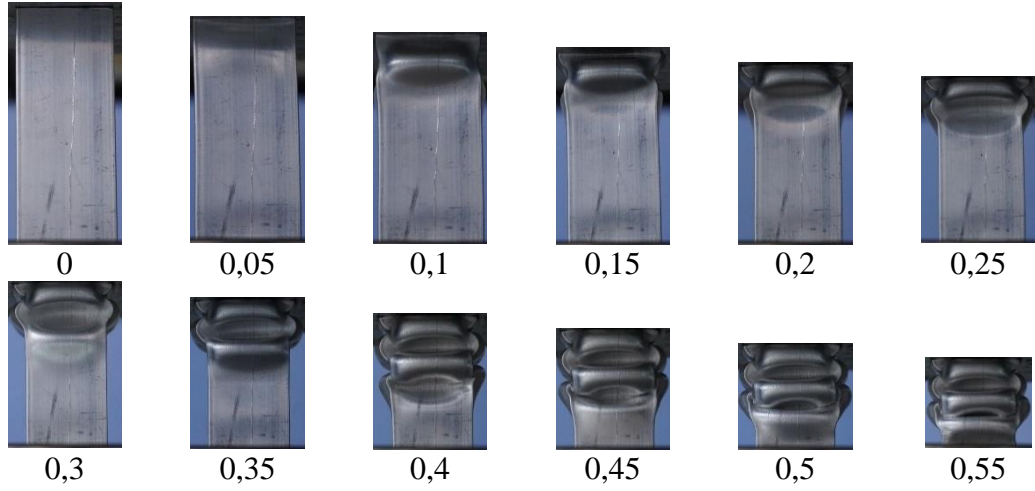
Resim 3.8. Eksenel yükler altındaki örnek bir numunenin test görüntüsü



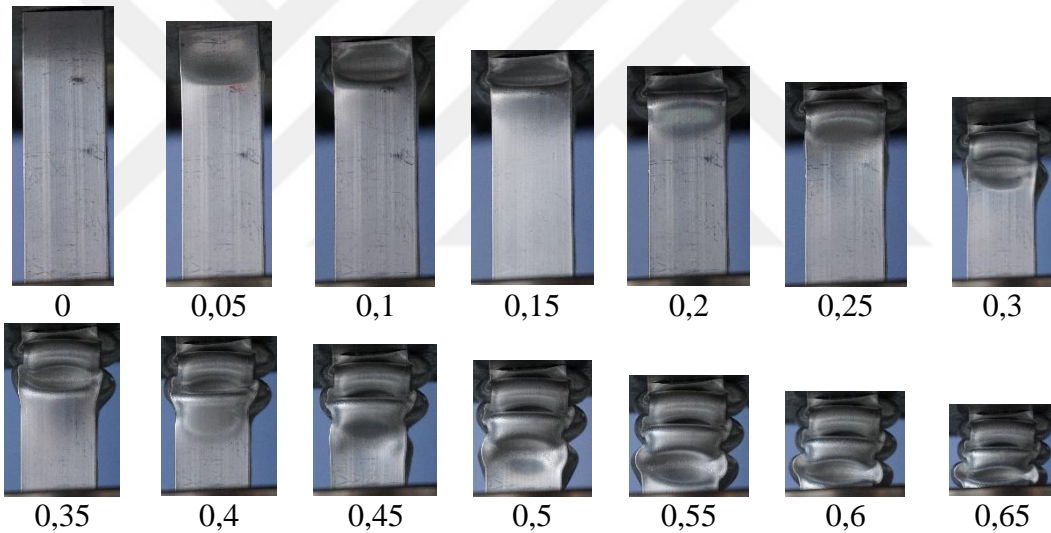
Resim 3.9. Eğik yükler altındaki örnek bir numunenin test görüntüsü



Resim 3.10. İçi boş tüp yapının farklı birim şekil değıştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri



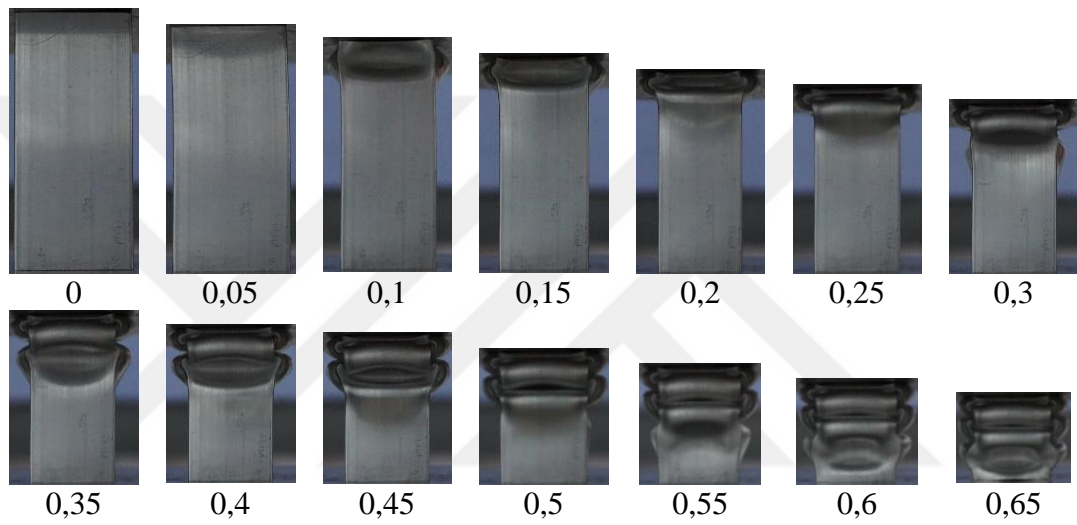
Resim 3.11. HMK hibrit tütün farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri



Resim 3.12. HMK-Z hibrit tütün farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri

EK-hibrit ve D-hibrit yapılar ise hem aksenal hem de eğik yükler altında testlere tabi tutulmuşlardır. Aksenal yükler altındaki D-hibrit yapıların deformasyon görüntüleri Resim 3.13'te verilmiştir (EK-hibrit yapıların deformasyon görüntüleri ise Resim 3.11'de verilmişti). Resimler incelendiğinde her iki tip hibrit yapının da yükün uygulandığı hareketli üst plaka tarafından deformasyona başladığı görülmektedir. Bununla birlikte hem EK-hibrit, hem de D-hibrit yapıların içi boş tüplere göre (Resim 3.10) daha az deformasyon boyuna sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi deformasyon sırasında içi boş tüpler içerisindeki boşluğu kullanarak deforme

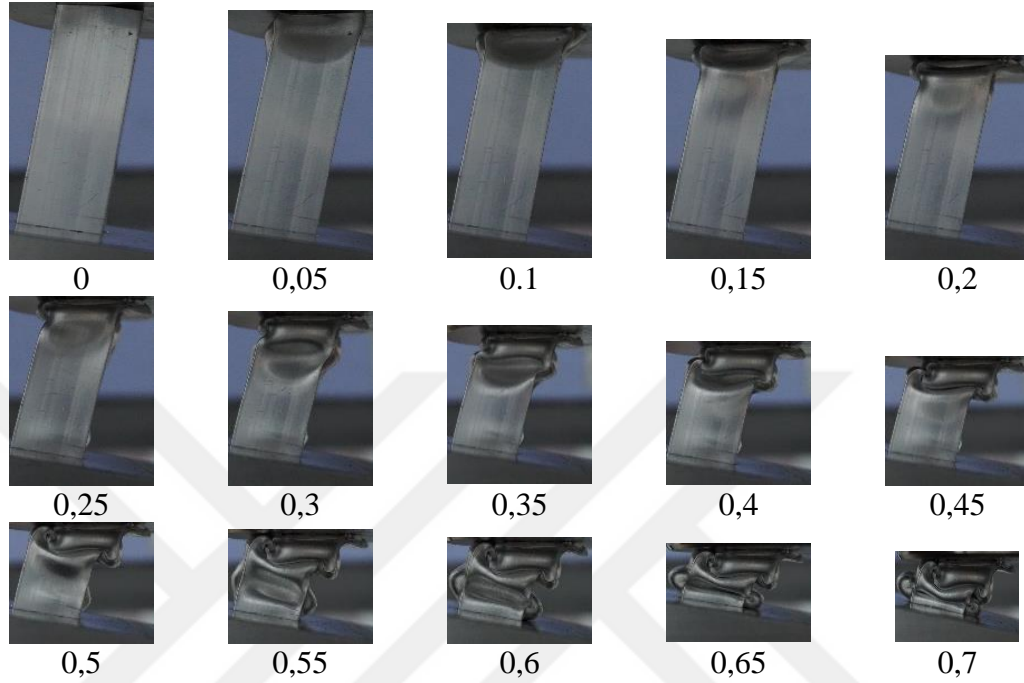
olabilirken, içine dolgu malzemesi yerleştirildiğinde tüp içerisindeki boşluğun azalması neticesinde hibrit yapının daha erken deformasyona uğramasıdır. Eksenel yükleme durumundaki EK-hibrit ve D-hibrit yapılar karşılaştırıldığında ise D-hibrit yapıların EK-hibrit yapılardan daha fazla deformasyon boyuna sahip olduğu görülmektedir. Buna göre aynı kütleli iki farklı tipteki hibrit yapılardan D-hibrit yapıların EK-hibrit yapılara göre daha fazla enerji sönümleyerek daha verimli yapılar olduğu söylenebilir.



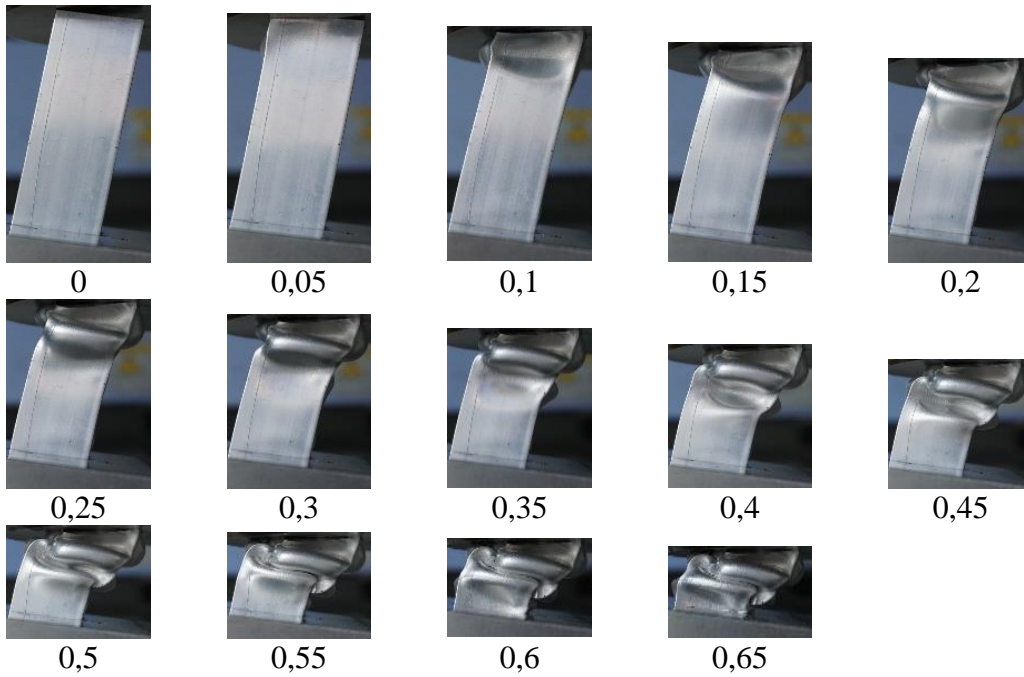
Resim 3.13. Eksenel yükleme durumundaki D-hibrit yapının farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon görüntüleri

10° eğik yükleme altındaki içi boş tüp ve hibrit yapıların deformasyon görüntüleri Resim 3.14-3.16'da gösterilmiştir. Resimlerden fikstür üzerindeki kanal içerisine oturtulan hibrit yapıların eğik yükleme koşullarında kanal içerisinden çıkmadıkları ve hareketli olan üst kısımdan deformasyonların başladıkları görülmektedir. Ayrıca 10° yükleme açısındaki deformasyon şekilleri incelendiğinde eksenel yükleme durumunda olduğu gibi içi boş tüp yapının da hem EK-hibrit hem de D-hibrit tüpten daha fazla deformasyon boyuna sahip olduğu görülmektedir. Deformasyon görüntülerine bakıldığında içi boş tüp yapının yaklaşık 46,2 mm'ye kadar enerji sönümlemeye devam edebilirken hibrit yapılar yaklaşık 42,9 mm'ye kadar deforme olabilmektedir. 10° yükleme açısındaki EK-hibrit ve D-hibrit yapıların deformasyon görüntüleri incelendiğinde ise önemli bir farklılık gözlemlenmemiş olup, her iki yapının da aynı

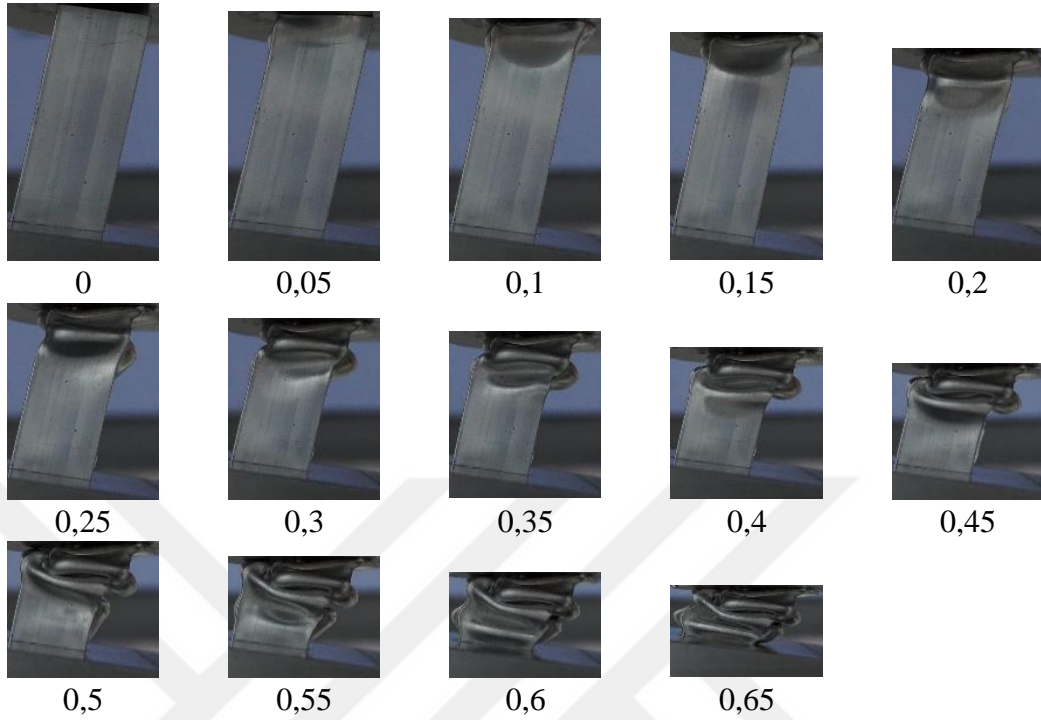
birim şekil değıştirme değęerlerinde benzer deformasyon şekillerine sahip olduğu görölmektedir.



Resim 3.14. 10° yüklenme durumundaki içi boş tüp yapının farklı birim şekil değıştirme değęerindeki deformasyon görüntüleri



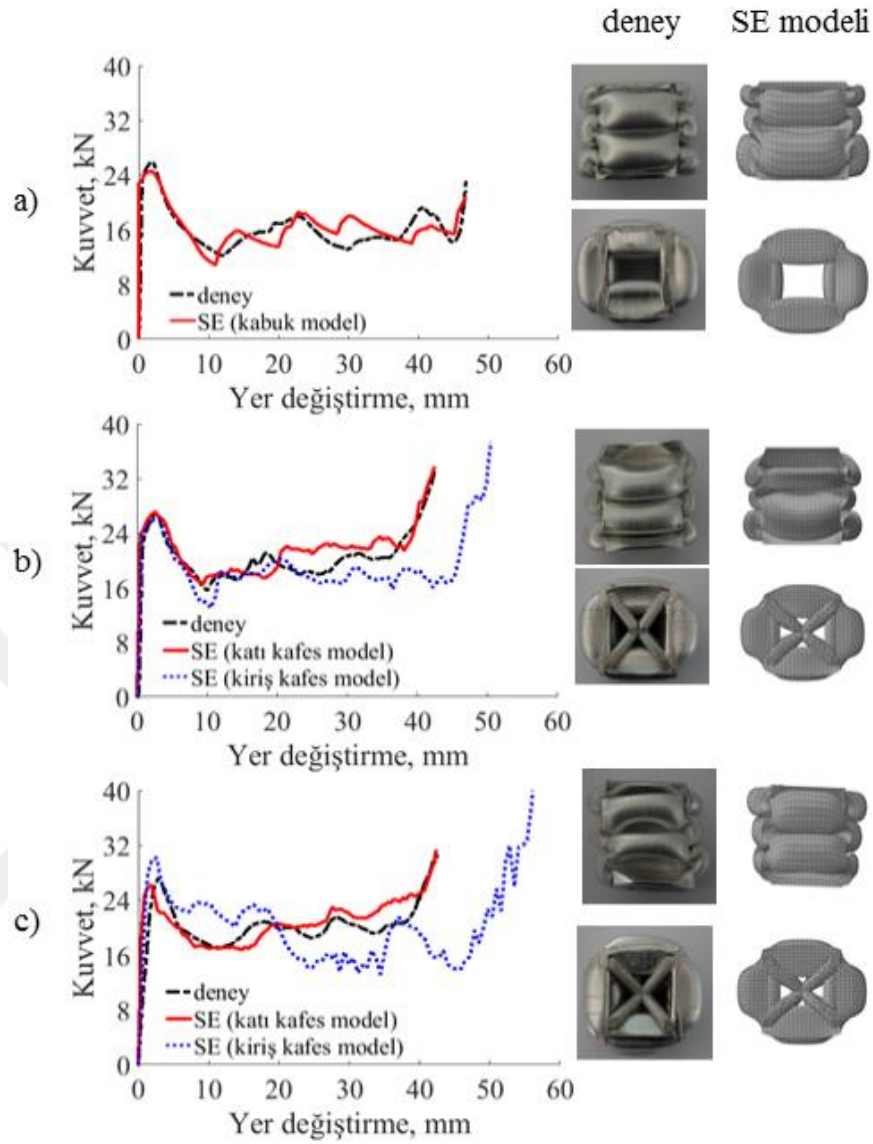
Resim 3.15. 10° yüklenme durumundaki EK-hibrit yapının farklı birim şekil değıştirme değęerindeki deformasyon görüntüleri



Resim 3.16. 10° yüklemeye durumundaki D-hibrit yapının farklı birim şekil değıştirme değeriindeki deformasyon görüntüleri

3.7.4. Deneysel ve SE analiz sonuçlarının karşılaştırılması

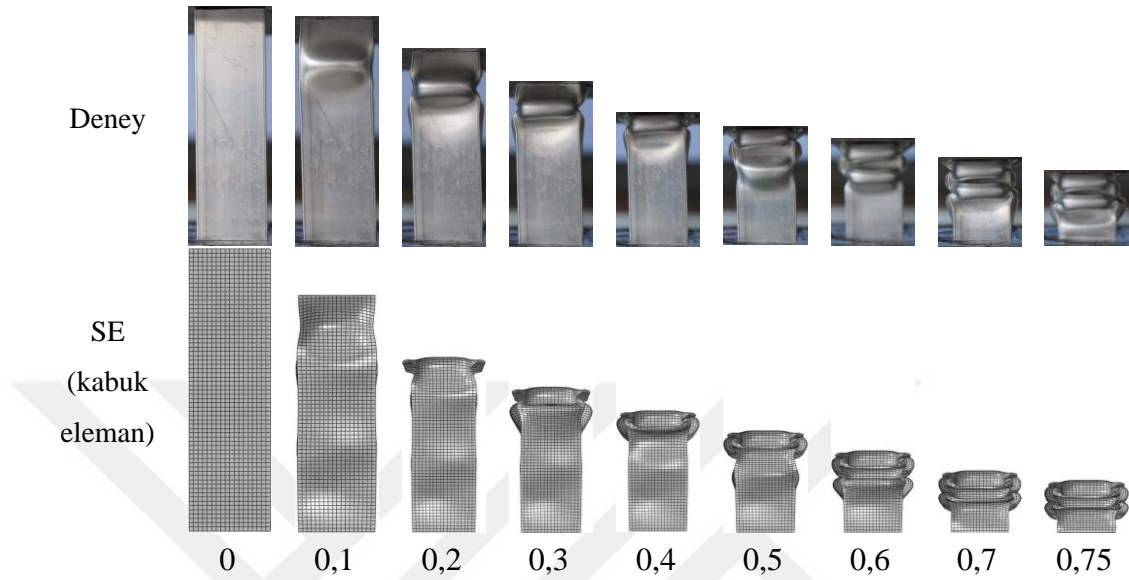
Eksenel yüklemeye koşullarındaki içi boş tüp, HMK ve HMK-Z hibrit yapıların statik yükler altındaki kuvvet - yer değıştirme cevapları SE analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Buna göre HMK ve HMK-Z kafes yapıların kiriş elemanlar ile modellenmesinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında özellikle yoğunlaşma bölgesini yeterince iyi tahmin edemediği görülmektedir. Öte yandan kafes yapıların katı elemanlar ile modellenmesinden elde edilen sonuçlar ise elastik, elastik-plastik, kararlı çökme ve yoğunlaşma bölgeleri açısından deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer olarak ince cidarlı tüplerin kabuk elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçları da deneysel sonuçlar ile oldukça benzer sonuçlar vermiştir. İçi boş tüp ve hibrit yapılar için sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark MÇK ve TSE değeri açısından sırasıyla %5,2 ve %5,5'in altında olduğu hesaplanmıştır.



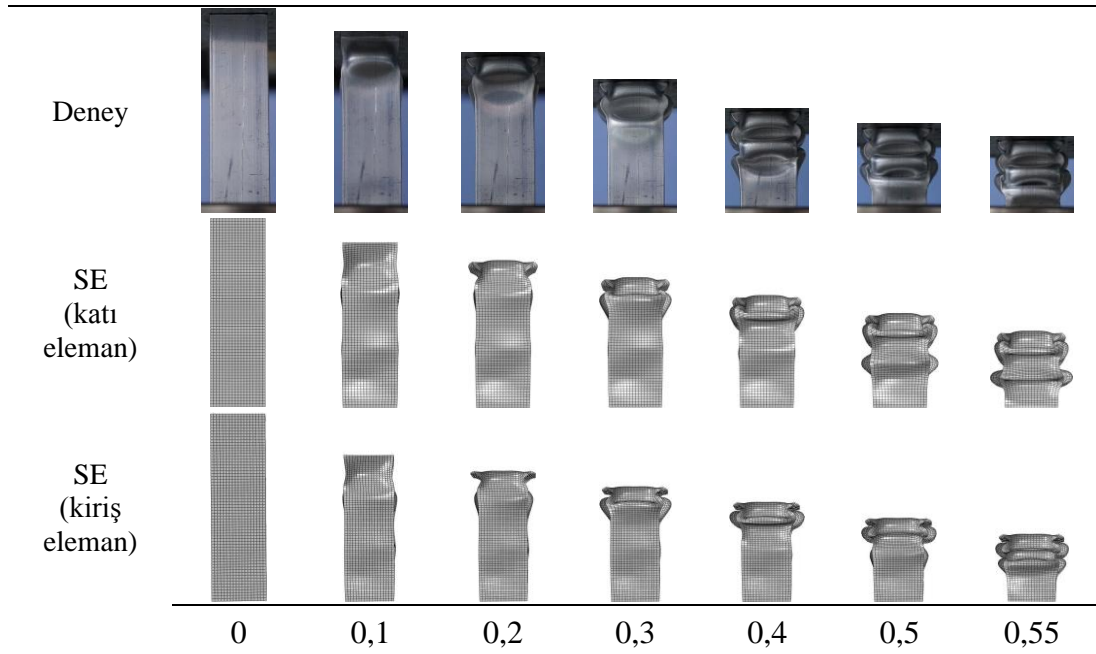
Şekil 3.25. Eksenel yükler altındaki yapıların sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması a) içi boş tüp, b) HMK yapı ve c) HMK-Z hibrit yapı

Gerçekleştirilen içi boş tüp, HMK hibrit ve HMK-Z hibrit yapıların deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri sırasıyla Şekil 3.26-3.28’de gösterilmiştir. Deformasyon şekilleri incelendiğinde tüp yapıların modellenmesinde kullanılan kabuk elemanların ve kafes yapıların modellenmesinde kullanılan katı eleman modellerinin deneysel deformasyon görüntüleri ile oldukça uyumlu oldukları gözlenirken kiriş eleman modelleri ise hibrit yapılardaki özellikle yoğunlaşma bölgesini iyi tahmin edemediği görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 3.28’deki kiriş eleman sonuçlarına bakıldığında

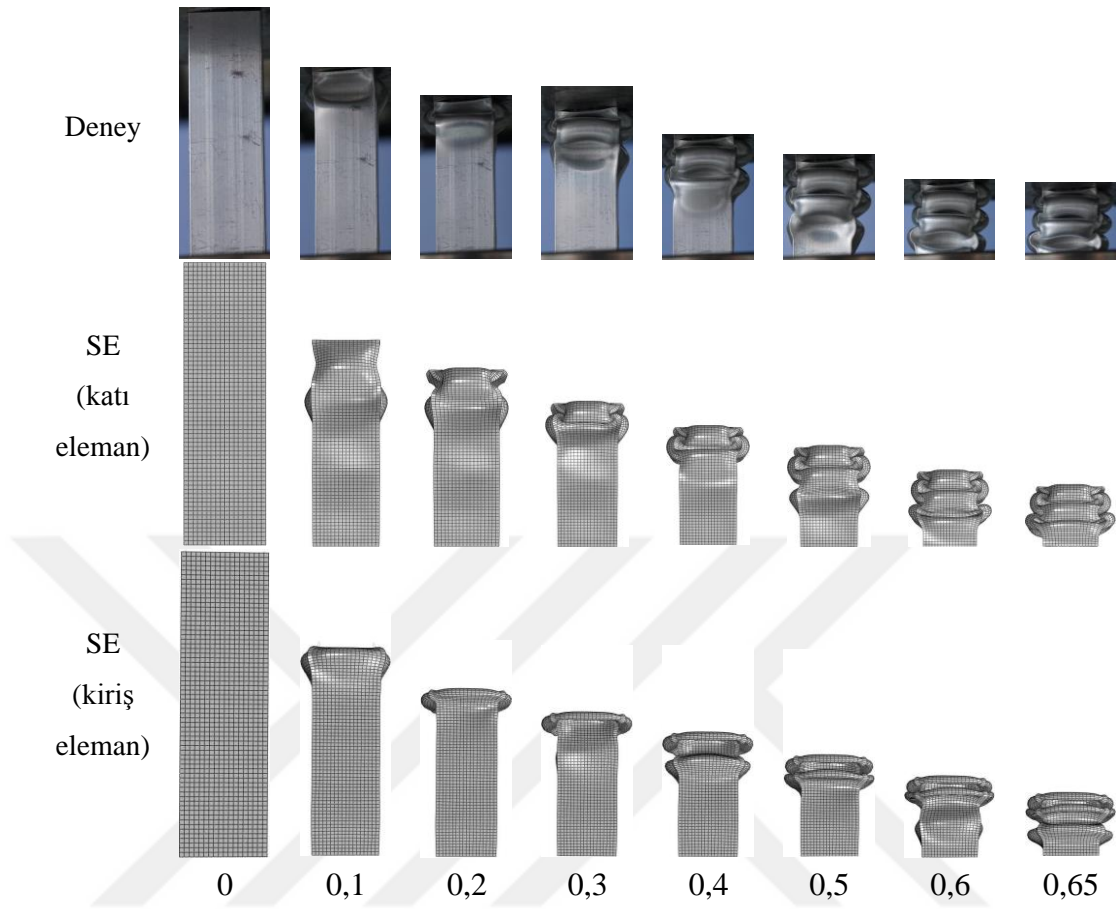
özellikle 0,1 ve 0,2 birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri deneysel sonuçlar ile oldukça uyumsuz olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.26. Eksenel yükler altındaki boş tüp yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri

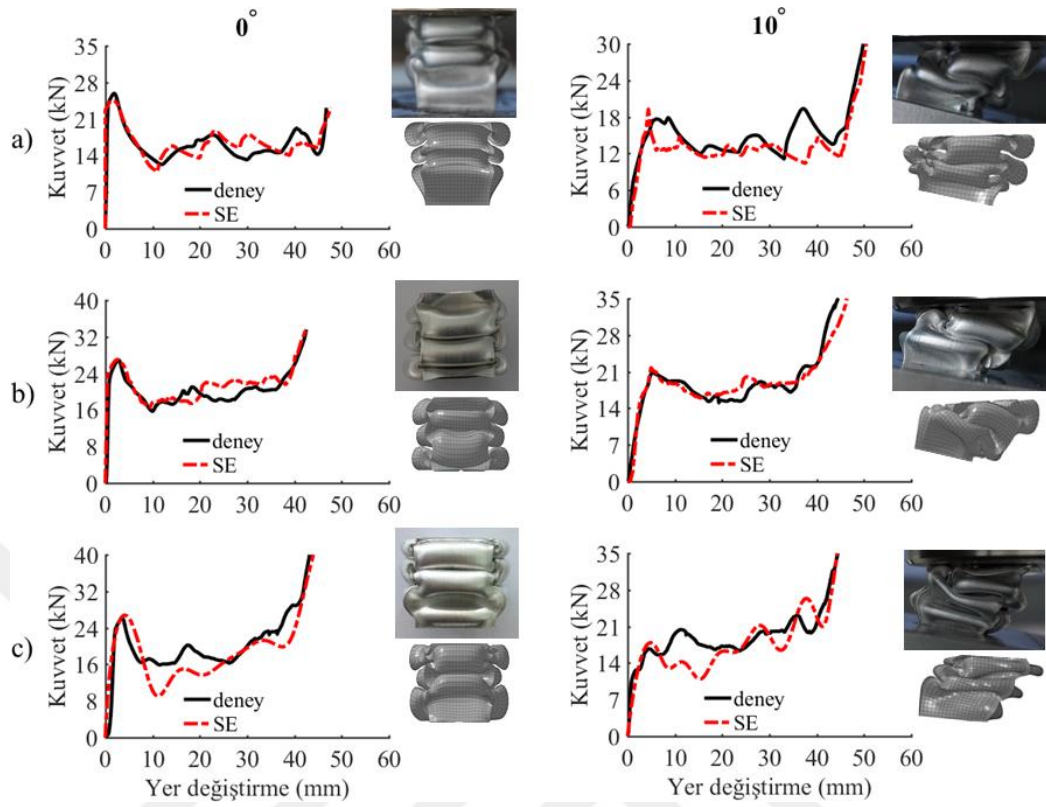


Şekil 3.27. Eksenel yükler altındaki HMK hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri

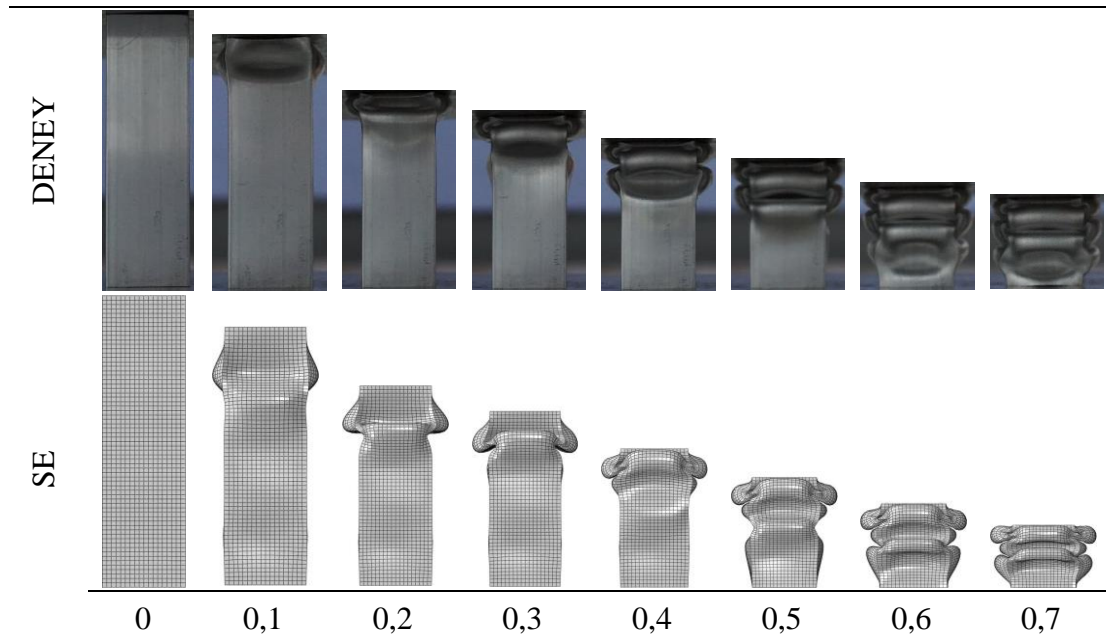


Şekil 3.28. Eksenel yükler altındaki HMK-Z hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değıştirme değeriindeki deformasyon şekilleri

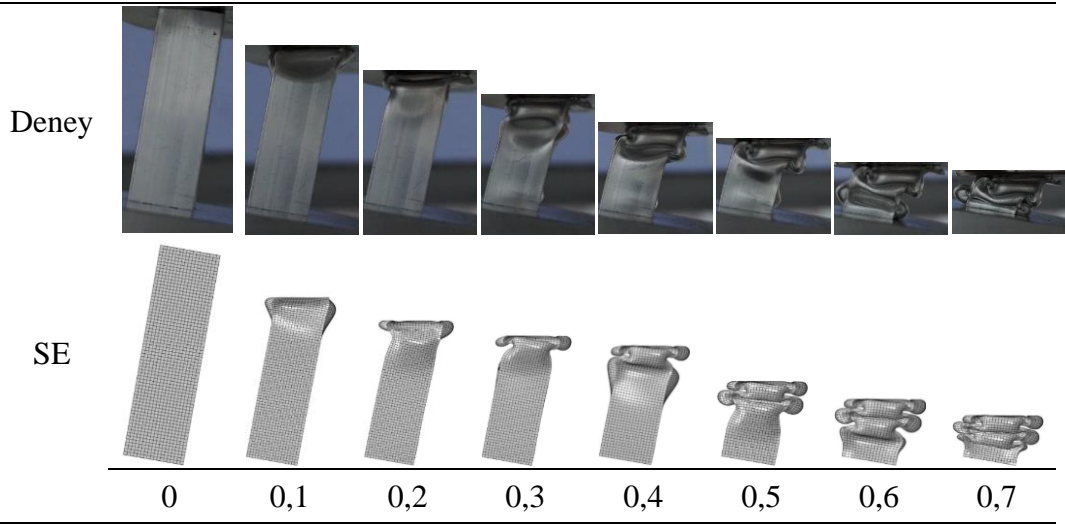
Sonuç olarak hem içi boş hem de hibrit yapıların enerji sönümlenme performansını hesaplayabilmek için kullanılan kabuk ve katı sonlu elemanlar modellerinin oldukça güvenilir sonuçlar verdiği açıkça ortaya konmuştur. Diğer yandan kiriş eleman modellerinin deneysel sonuçlarla olan uyumsuzluğundan dolayı doğrulama testleri dışındaki analizlerde kiriş eleman modeli kullanılmamıştır. Eksenel ve 10° eğik yükleme koşullarındaki içi boş tüp, EK-hibrit ve D-hibrit yapıların sanki-statik yükler altındaki kuvvet – yer değıştirme cevapları SE analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve Şekil 3.29’da gösterilmiştir. Şekil 3.29’da hem eksenel hem de 10° yükleme durumlarında SE sonuçlarının elastik, elastik-plastik, kararlı çökme ve yoğunlaşma bölgeleri açısından deneysel sonuçlar ile oldukça tutarlı oldukları görülmektedir.



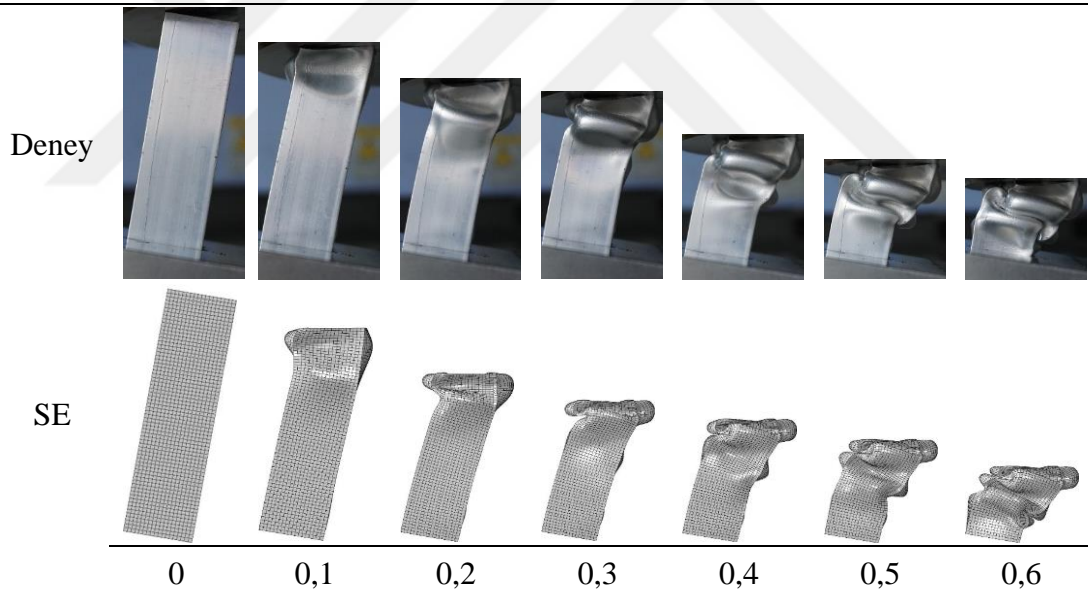
Şekil 3.29. Eksenel ve 10° yükleme durumlarındaki yapıların sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması a) içi boş tüp, b) EK-hibrit ve c) D-hibrit yapı



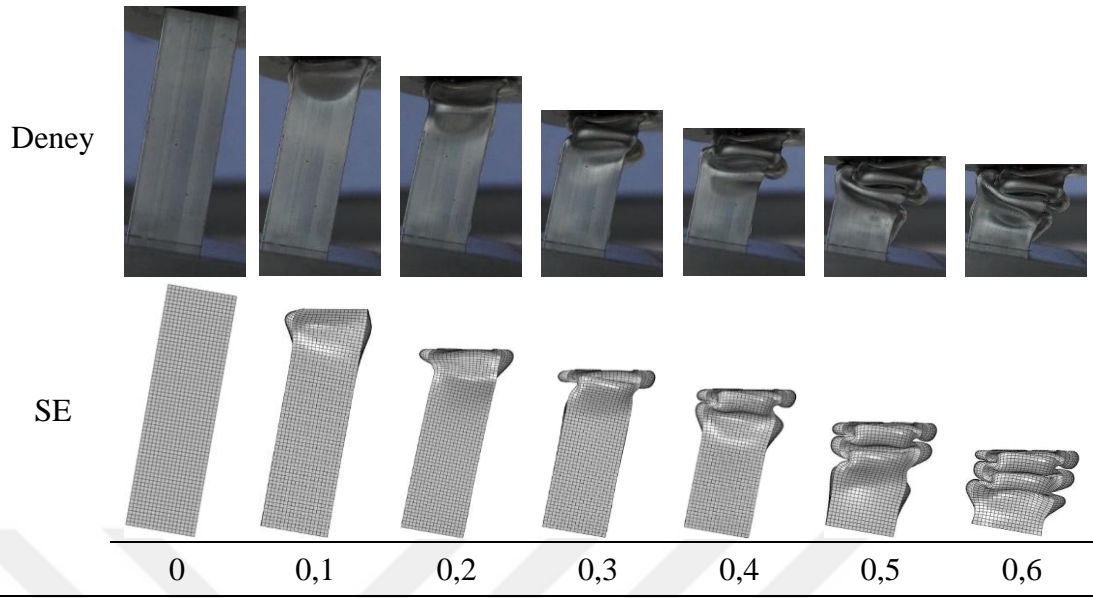
Şekil 3.30. Eksenel yükleme durumundaki D-hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri



Şekil 3.31. 10° yükleme durumundaki içi boş tüp yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değıştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri



Şekil 3.32. 10° yükleme durumundaki EK-hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değıştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri



Şekil 3.33. 10° yükleme durumundaki D-hibrit yapının deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre farklı birim şekil değıştirme değerlerindeki deformasyon şekilleri

Eksenel ve 10° yükleme durumlarındaki içi boş tüp, EK-hibrit ve D-hibrit yapıların deneysel ve SE deformasyon şekilleri Şekil 3.30-3.33'te gösterilmiştir. Eksenel yükleme durumundaki içi boş tüp ve EK-hibrit yapıların deneysel ve SE deformasyon görüntüleri Şekil 3.26 ve 3.27'de verildiğinden dolayı eksenel yükleme durumu için burada sadece D-hibrit yapının deformasyon şekillerine yer verilmiştir. İlgili deformasyon görüntüleri incelendiğinde deneysel ve SE deformasyon görüntülerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

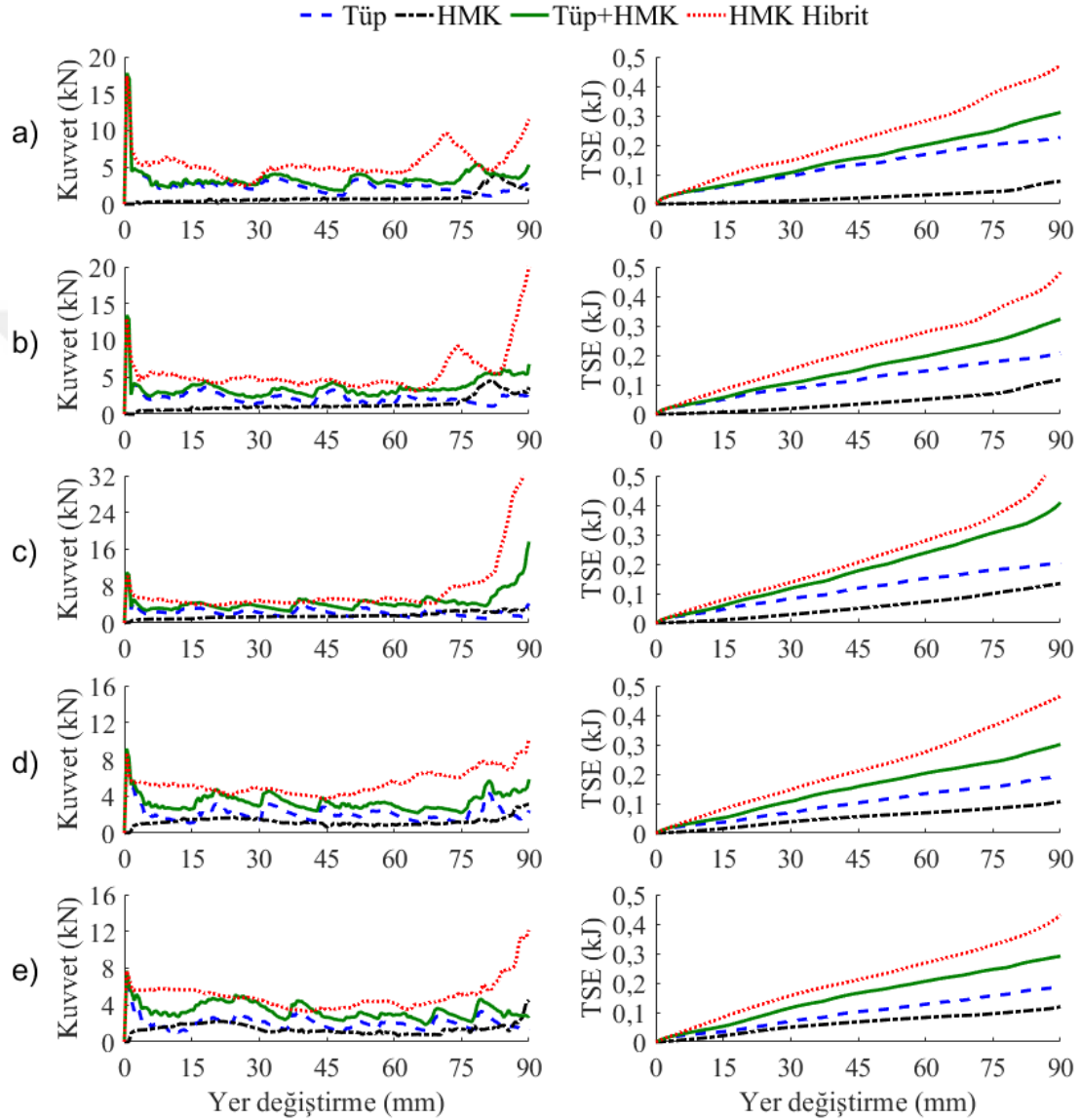
4. EKSENEL YÜKLER ALTINDAKİ HİBRİT TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

4.1. Kafes Elemanların Hücre Sayılarının ve Çap Değerlerinin Hibrit Yapıların Çarpışma Dayanımlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi

İçi boş tüplerin, basit kafes yapıların, hibrit tüplerin ve tüp ile kafes yapıların toplamalarının kuvvet - yer değiştirme ve enerji - yer değiştirme eğrileri 3 mm kafes çap değeri ve 0,5 mm tüp kalınlığı için Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi HMK yapılar dikey eleman içermediğinden dolayı kuvvet yer değiştirme eğrileri az sayıda pik içerir ve bu özelliği ile HMK yapılar köpük yapılara oldukça benzerlik gösterirler (Gibson ve Ashby, 1997). Ayrıca HMK yapılar nispeten düz bir eğriye sahip olduğundan dolayı HMK kafes yapı ile içi boş tüplerin toplamı olan eğri de tüp yapının kuvvet - yer değiştirme karakteristiğine benzemektedir. Bir birim hücre ezildiğinde yük transferi diğer birim hücreye geçmektedir ve bu geçiş sırasında birim hücre sayısına bağlı olarak kuvvet değerinde ani düşüşler olmaktadır. Yani büyük birim hücreli yapılarda kuvvet düşüşü daha keskin olurken, küçük birim hücre boyutuna sahip yapılarda nispeten daha düzgün kuvvet dağılımı görülür. Bu nedenle HMK hibrit tüpteki birim hücre sayısı arttıkça daha düzgün bir ezilme eğrisi gözlemlenir. Ayrıca, HMK hibrit tüpler ile tüp ve kafes yapıların ayrı ayrı sönmüledikleri enerji miktarlarının toplamaları kıyaslandığında da HMK hibrit tüplerin sönmüledikleri enerji değerlerinin görece oldukça fazla olduğu görülmektedir. Çünkü hibrit yapılar oluşturmak, bu yapıyı oluşturan tüp ve kafes yapıların hem ilerlemeli deformasyon davranışlarını hem de global eğilme dirençlerini iyileştirmektedir.

3 mm çap değeri ve 0,5 mm tüp kalınlığı için içi boş tüp, HMK-Z kafes yapı, içi boş tüp ile HMK-Z kafes yapının toplamı ve HMK-Z hibrit tüpün enerji sönmüleme karakteristikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den de görüldüğü gibi HMK-Z yapılar dikey eleman barındırdıklarından dolayı enerji sönmüleme kapasiteleri HMK yapılara göre daha yüksektir. Benzer olarak, HMK-Z hibrit tüpler tüm birim hücre sayıları açısından HMK hibrit tüplerden daha iyi enerji sönmüleme

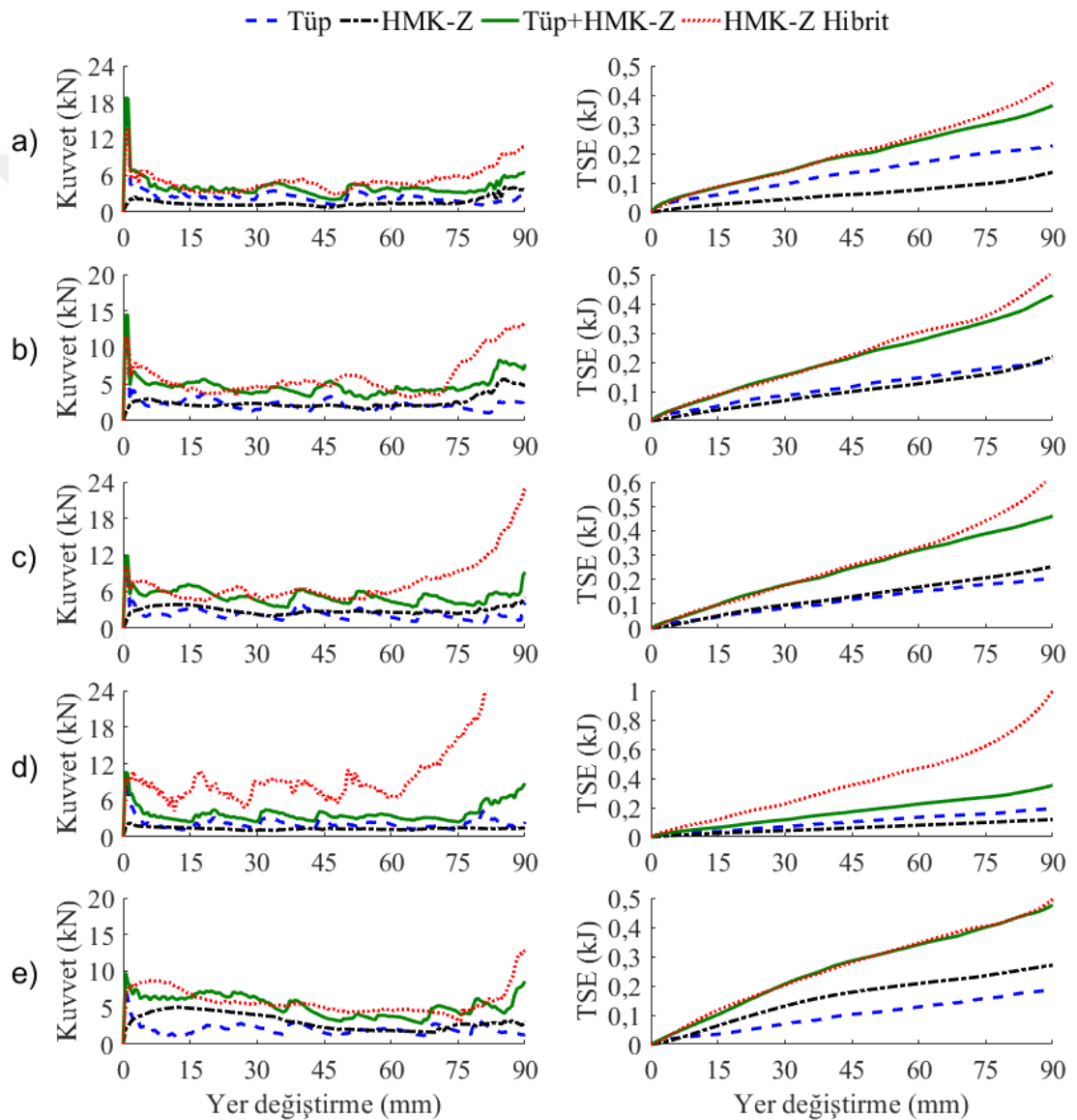
kapasitesine sahiptir. Örneğin, 3 mm eleman çapına sahip 3, 4, 5, 6 ve 7 hücreli HMK-Z hibrit tüpler HMK hibrit tüplere göre sırasıyla %36,8; %40,2; %57,7; %121,5 ve %27,5 daha fazla TSE değerine sahiptir.



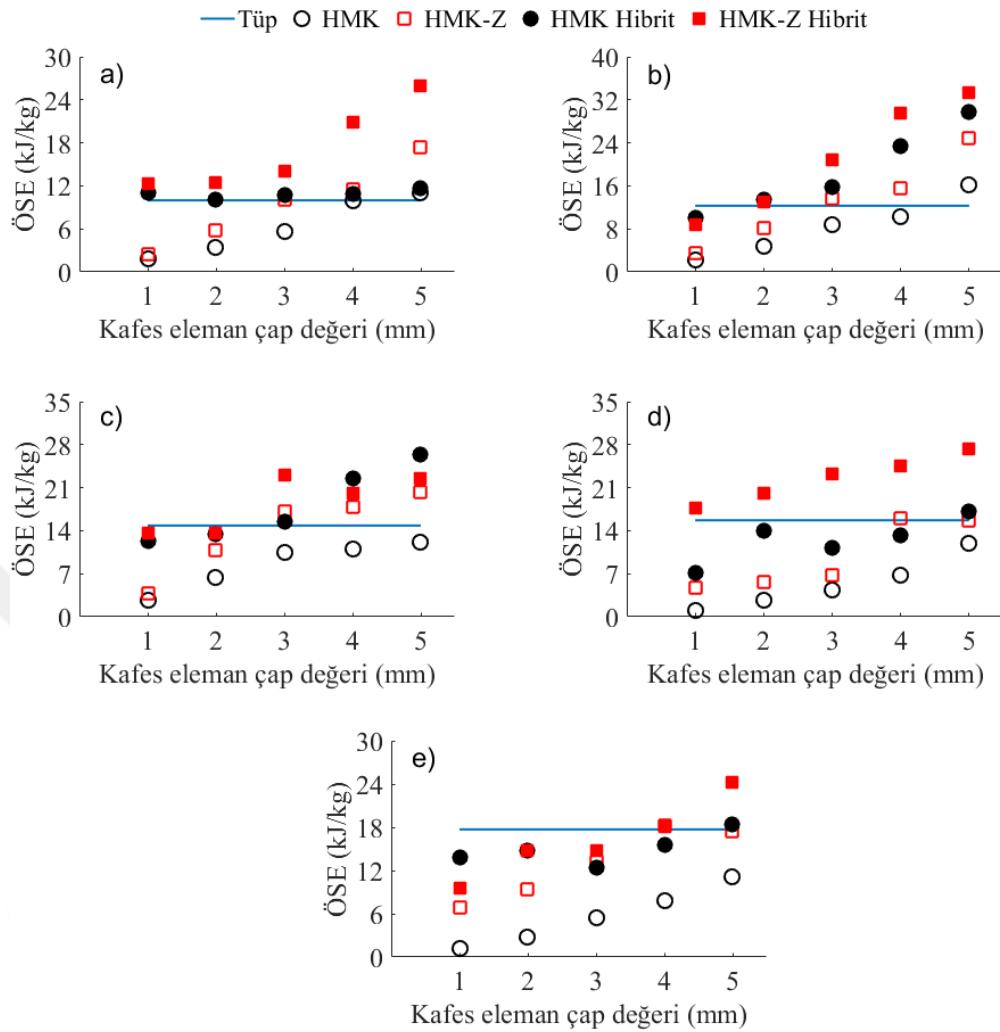
Şekil 4.1. Farklı hücre sayılarına sahip basit ve hibrit HMK yapıların kuvvet - yer değiştirme ve enerji - yer değiştirme grafikleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı

Herhangi bir yapıdaki elemanın kalınlığının artması sönümlediği enerjinin de artmasını sağlamaktadır fakat eleman kalınlığının artmasıyla birlikte yapının kütlesi de artmaktadır (Çizelge E2.1-E2.5). Bu nedenle yapıların enerji sönümleme performansları ele alındığında TSE değerleri kadar ÖSE değerleri de oldukça

önemlidir. Bununla birlikte TSE ve buna bağlı olarak ÖSE değerleri hesaplanırken yapıların ezilme boyları, yoğunlaşma bölgesinin başlangıcı olarak dikkate alınmıştır. Burada hibrit tüplerin tüp ve kafes yapılara göre daha erken yoğunlaşma bölgesine girdiklerinden dolayı bu yapılara göre daha düşük ÇV değerlerine sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı çap değerlerine sahip basit ve hibrit tüplerin ÖSE değerleri 0,5 mm tüp kalınlığı için Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı hücre sayılarına sahip basit ve hibrit HMK-Z yapıların kuvvet-yer değiştirme ve enerji - yer değiştirme grafikleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı

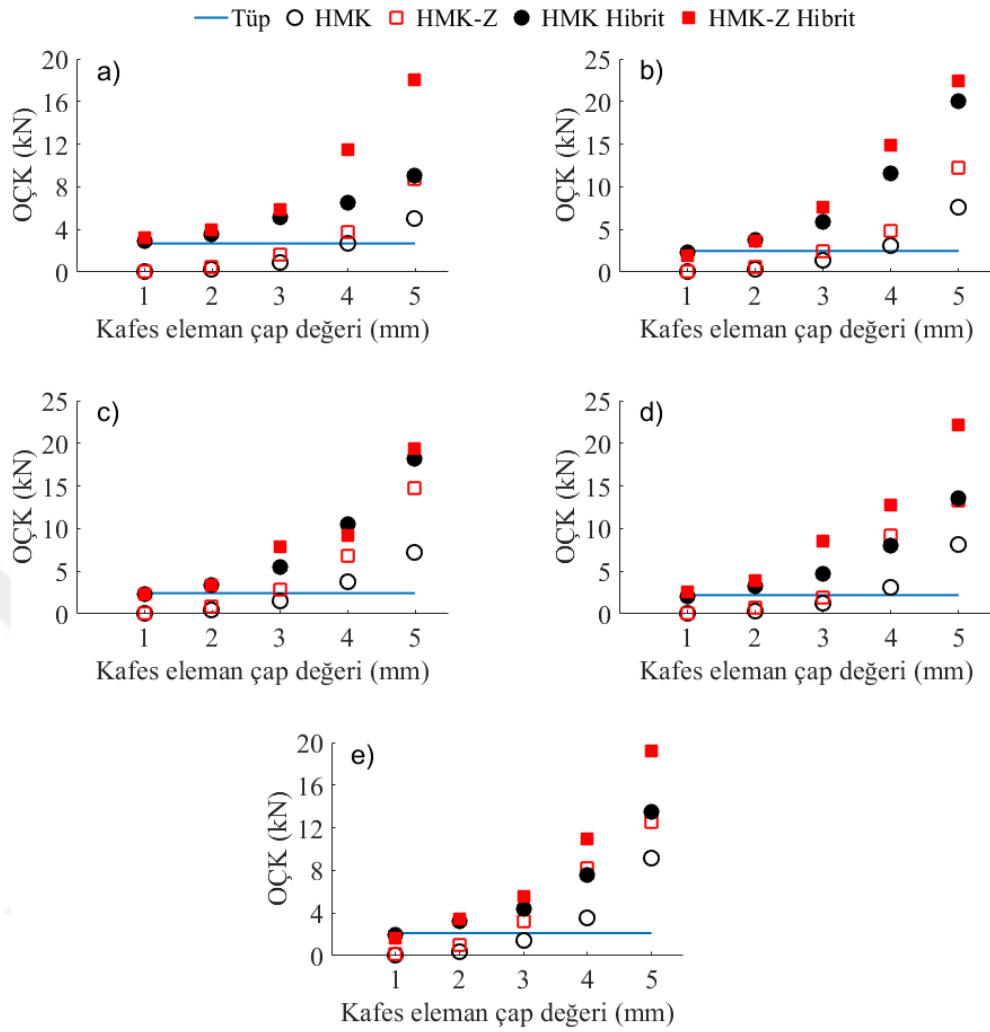


Şekil 4.3. Farklı hücre sayılarına ve çap değerlerine sahip basit ve hibrit tüplerin ÖSE değerleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı

Şekil 4.3'ten de görüldüğü gibi boş tüplerin boy/en oranı arttıkça tüplerin ÖSE değerleri de artmaktadır çünkü farklı boy/en oranına sahip tüpler birbirlerine yakın TSE değerlerine sahipken, boy/en oranı arttıkça yapıların kütlesi azalmakta ve dolayısıyla TSE değerleri artmaktadır. Basit HMK ve HMK-Z kafes yapıların çap değerlerinin artmasıyla birlikte ÖSE değerleri de artmaktadır. Ayrıca beklendiği gibi HMK-Z kafes yapılar HMK kafes yapılara göre daha fazla TSE değerine sahiptir. Örneğin 2 mm kafes eleman çap değeri için 3, 4, 5, 6 ve 7 hücreli HMK-Z yapılar HMK yapılara göre sırasıyla %67,6; %66,9; %69,3; %105,5 ve %244,9 daha fazla ÖSE değerine sahiptir. Şekil 4.3'den de açıkça görüldüğü gibi çap değeri 1-3 mm aralığında içi boş tüplerin enerji sönmüleme kapasiteleri kafes yapılara göre önemli ölçüde daha fazladır. Bu nedenle bu aralık için (1-3 mm çap değeri) hibrit tüplerin

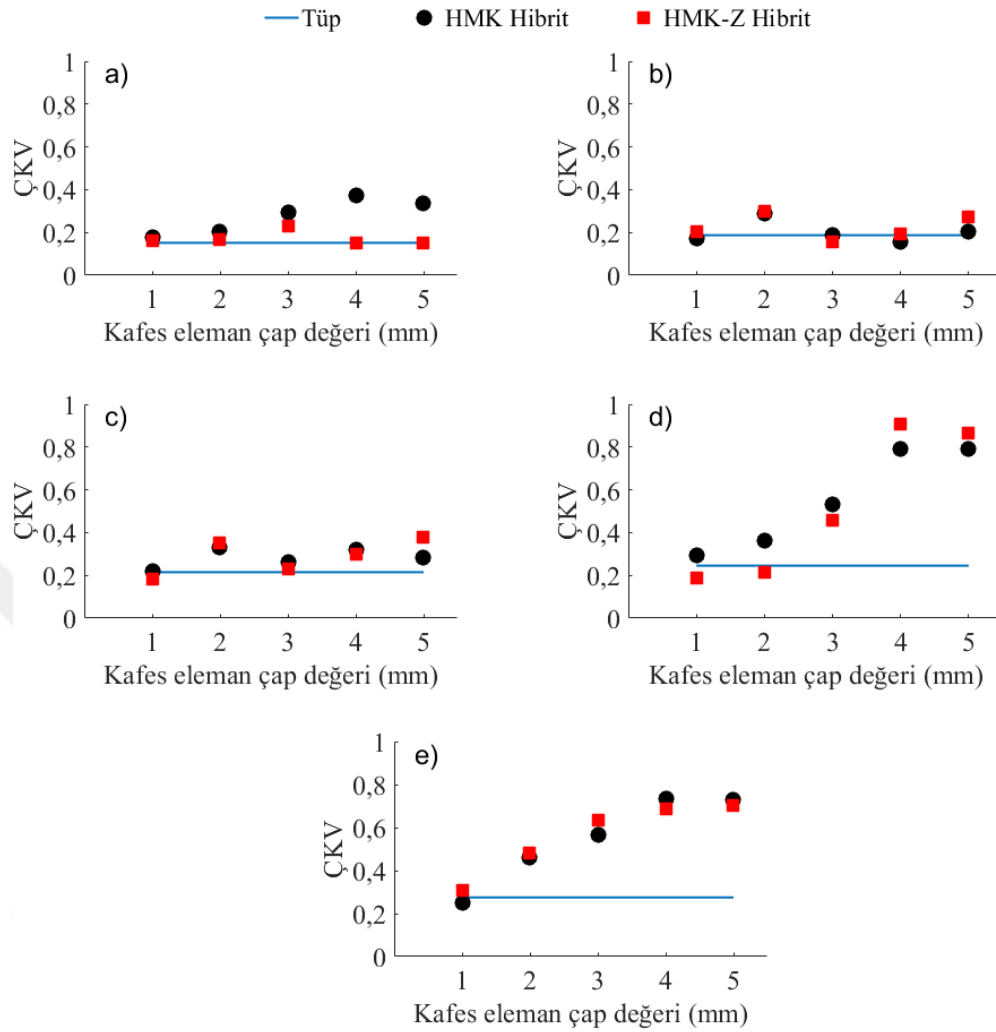
enerji sönümlenme davranışı daha çok tüp tarafından kontrol edilmektedir ve kafes yapı hibrit tüplerin enerji sönümlenme davranışına tüpe nazaran oldukça az etki etmektedir. Diğer yandan daha yüksek çap değerleri için kafes yapılar hibrit tüplerin enerji sönümlenme performanslarında daha dominant olmaktadır ve Şekil 4.3'ten de görüldüğü gibi 3 mm den daha kalın kafes yapılar için hibrit tüplerin ÖSE değerlerinde oldukça iyileşme gözlemlenmektedir. Ayrıca hibrit tüp içerisindeki kafes yapının hücre sayısı arttıkça hibrit tüpün ÖSE değerleri de artmaktadır fakat yüksek hücre sayısı ve eleman kalınlığı söz konusu olduğunda istenen enerji sönümlenme performansı elde edilememektedir. Bunun en önemli sebebi bu yapıların belirli bir ilerleyici deformasyonun ardından global eğilme davranışına meyilli olmasıdır (Şekil 4.6). Özellikle 7 hücreli hibrit tüplerde global eğilme davranışına olan eğilimin fazla olmasından dolayı sınırlı bir iyileşme görülmektedir. Bu nedenle yapısal parametrelerin uygun seçilimi ile birlikte hibrit tüplerin enerji sönümlenme verimleri optimize edilebilir. Burada tüp kalınlığının da enerji sönümlenme konusunda oldukça önemli bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Tüp kalınlığının yapıların enerji sönümlenme performanslarına olan etkileri sonraki satırlarda tartışılmıştır.

Şekil 4.4'te 0,5 mm tüp kalınlığına ve farklı boy/en oranlarına sahip basit ve hibrit tüplerin OÇK değerleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kafes elemanların çap değerlerinin artması genellikle hem basit hem de hibrit tüplerin OÇK değerlerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Örneğin, 4 mm eleman çap değerine ve 4 birim hücreye sahip HMK ve HMK-Z hibrit tüpler, 3 mm çap değerine sahip olan hibrit tüplere göre sırasıyla %98,5 ve %96,4 daha fazla OÇK değerine sahiptir. Öte yandan, özellikle yüksek boy/en oranına sahip hibrit tüplerde görülen global eğilme durumu hibrit tüplerin enerji sönümlenme performanslarını olumsuz yönde etkilemekte ve bu da hibrit tüplerin enerji sönümlenme performanslarının daha da iyileşmesine engel olan bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.4. Farklı hücre sayılarına ve çap değerlerine sahip basit ve hibrit tüplerin OÇK değerleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı

ÖSE değerlerine benzer olarak, içi boş tüplerin OÇK değerleri özellikle 1-3 mm kafes eleman çap değerine sahip kafes yapılardan önemli ölçüde daha fazladır. Bu nedenle bu aralıktaki kafes eleman çap değerine sahip hibrit tüplerin enerji sönümlenme performansları baz alındığında tüp yapılar kafes yapılara göre oldukça baskın karakterdedir. Diğer yandan kafes eleman kalınlığı arttıkça kafes yapı, tüp yapıya nazaran daha dominant etkiye sahip olmaktadır. Ancak yüksek boy/en oranı ve kalın kafes elemanlara sahip hibrit tüplerin global eğilme davranışına olan eğilimi de artmaktadır (Şekil 4.6).

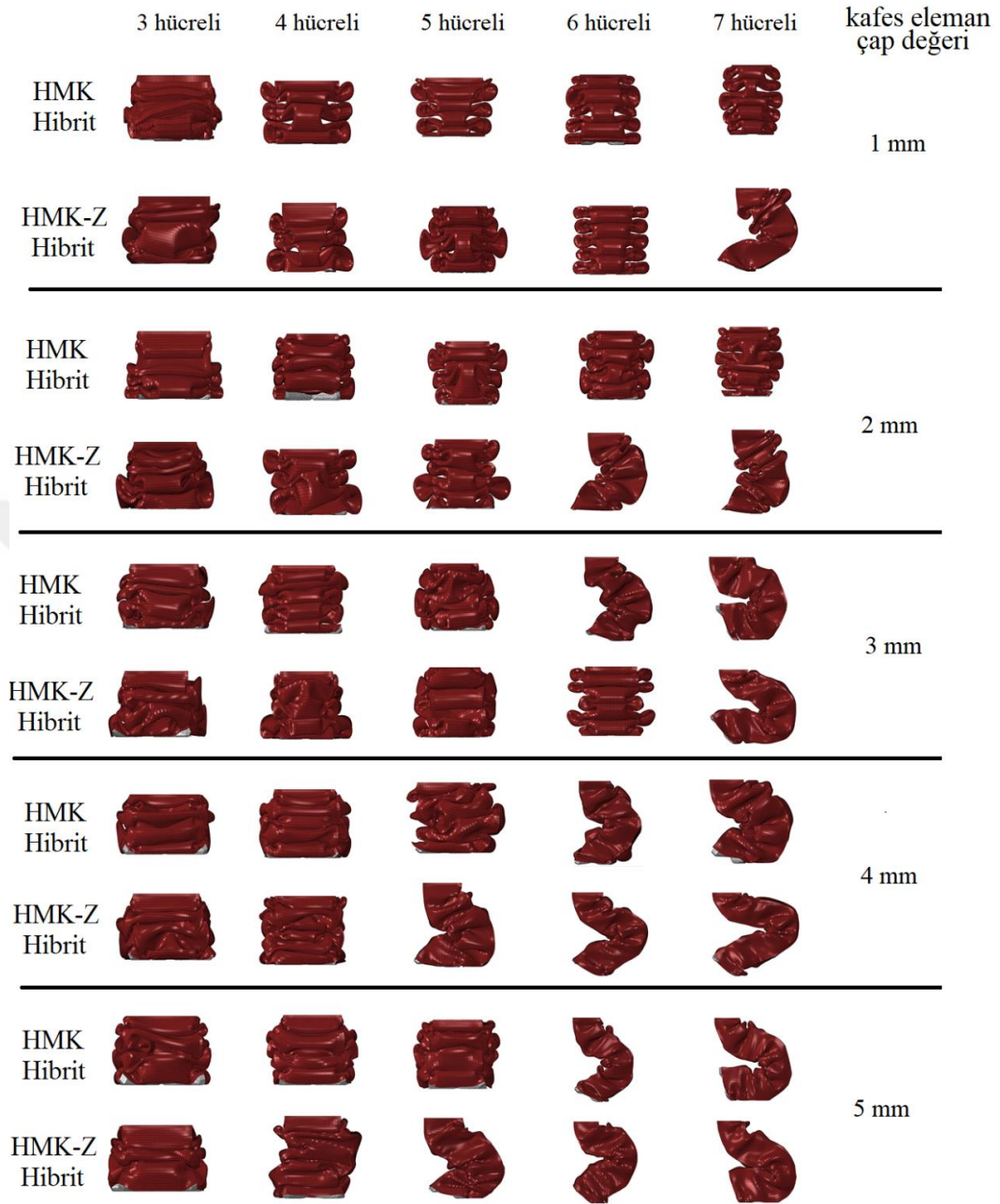


Şekil 4.5. Farklı hücre sayılarına ve çap değerlerine sahip hibrit tüplerin ÇKV değerleri: a) 3, b) 4, c) 5, d) 6 ve e) 7 hücreli yapı

Şekil 4.5'te 0,5 mm tüp kalınlığına sahip içi boş ve hibrit tüplerin farklı L/a oranları için ÇKV değerleri verilmiştir. Eleman kalınlığı sadece kafes yapılar için geçerli olduğundan dolayı boş tüp için ÇKV değerleri her bir grafikte sabit olarak görülmektedir. Ayrıca L/a oranı arttıkça tüplerin ÇKV değerleri de artmaktadır. Çünkü L/a oranı arttıkça tüplerin OÇK değerlerinde fazla bir değişim olmazken MÇK değerleri azalmaktadır. Normalde bir yapı başka bir yapı ile doldurulduğunda daha rijit bir yapı ortaya çıkar ve bu nedenle yapının MÇK değerlerinde artış görülür ve bu da yapının ÇKV değerinin daha az olmasına neden olur. Ancak Şekil 4.5'ten de açıkça görüldüğü gibi kafes yapılar ile güçlendirilmiş tüplerin ÇKV değerleri yüksek OÇK değerlerinden dolayı birçok durum için oldukça kabul edilebilir seviyelerdedir. Diğer yandan hibrit tüplerin eleman kalınlığının ve hücre sayısının artmasıyla birlikte

yapının daha erken yoğunlaşmaya başlamasından ya da global eğilmeden dolayı ezilme boyları tüplere nazaran daha az olmaktadır. Buna bağlı olarak ÇKV değerleri de verimli ezilme mesafesi dikkate alınarak hesaplandığından dolayı yüksek L/a değerlerinde tüplere göre daha yüksek ÇKV değerleri görülmektedir. Ek olarak, ilerleyici burkulma deformasyon modundan sonra bazı durumlarda global eğilme gözlemlenebilir ve bu da OÇK ve ÇKV değerlerini önemli ölçüde düşürmektedir.

Farklı hücre sayılarına ve eleman kalınlıklarına sahip hibrit tüplerin %60 deformasyon boyundaki deformasyon şekilleri 0,5 mm tüp kalınlığı için Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi genellikle 3 ve 4 birim hücreye sahip yapılarda yerel burkulma modu gözlemlenirken 5, 6 ve 7 birim hücreye sahip yapılarda ise hem yerel burkulma hem de global eğilme modları birlikte görülmektedir. Ek olarak, 1 ve 2 mm eleman çap değerine sahip 7 hücreli HMK hibrit tüplerde sadece yerel burkulma modu gözlemlenirken, HMK-Z hibrit tüplerde ise hem yerel hem de global eğilme modları birlikte görülmektedir. Diğer yandan, Şekil 4.6'dan boy/en oranı arttıkça özellikle kalın elemanlara sahip hibrit tüplerde global eğilme davranışına olan meyilin arttığı açıkça görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi eleman kalınlığından bağımsız olarak 3 ve 4 hücreli hibrit tüplerde yerel burkulma modu gözlemlenmiştir. Ek olarak, L/a oranı arttıkça HMK-Z hibrit tüplerin global eğilme moduna olan eğilimin de arttığı görülmektedir ve bu nedenle 7 hücreli tüm HMK-Z yapılar global eğilme moduna sahiptir. Ayrıca, HMK-Z hibrit tüpler dikey eleman barındırdıklarından dolayı HMK hibrit tüplere göre daha erken global eğilmeye uğramaktadır. Farklı hücre sayılarına sahip hibrit tüplerin deformasyon şekillerine bakıldığında en fazla global eğilmenin 7 hücreli yapılarda olduğu oldukça açıktır. Bu noktada global eğilmeyi engelleyerek yapıların daha fazla enerji sönümlemesinin sağlayabilmek için yapıların tüp kalınlıkları artırılabilir. Bu noktada 3 farklı tüp kalınlığına sahip ($t=0,5; 1$ ve $1,5$ mm) 7 hücreli HMK ve HMK-Z hibrit tüplerin enerji sönümleme performansları incelenmiştir.

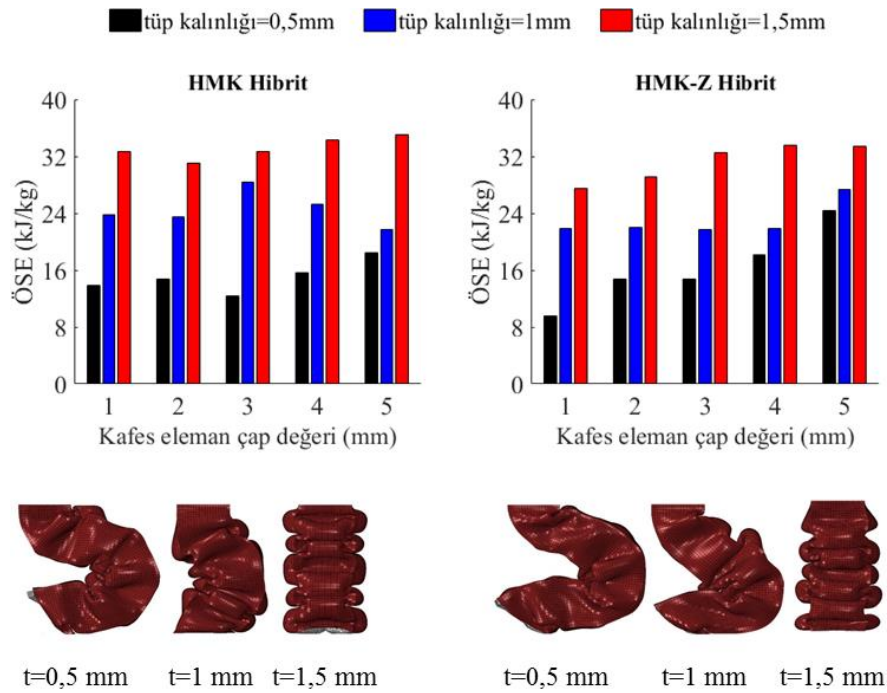


Şekil 4.6. %60 deformasyona uğramış hibrit tüplerin deformasyon şekilleri

4.2. Tüp Kalınlıklarının Hibrit Yapıların Çarpışma Dayanımlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi

Şekil 4.7’de farklı tüp kalınlıkları ve çap değerleri için hibrit tüplerin ÖSE değerleri ve deformasyon şekilleri verilmiştir. Şekle göre tüm durumlar için tüp kalınlıkları arttıkça ÖSE değerleri de artmaktadır. Ayrıca deformasyon şekillerinden tüp kalınlıklarının artması yapıların global eğilme direncini arttırdığını ve böylece

yapıların daha fazla enerji sönümlemesine katkı sağladıkları görülmüştür. Özellikle düşük tüp kalınlığına sahip hibrit tüplerin enerji sönümleme kapasiteleri global eğilmenin etkisi ile diğer yapılara nazaran daha azdır ve hibrit tüpteki tüp kalınlığının artırılmasıyla birlikte hibrit tüplerin enerji sönümleme kapasiteleri de artmaktadır. Örneğin 1,5 mm tüp kalınlığına ve 1 mm çap değerine sahip 7 hücreli HMK-Z hibrit tüp 0,5 mm tüp kalınlığına sahip yapı ile kıyaslandığında 8,2 kat daha fazla enerji sönümlediği görülmüştür. Ayrıca özellikle yüksek çap değerlerine sahip hibrit tüplerin enerji sönümleme kapasiteleri, bu yapıları oluşturan tüp ve kafes yapıların ayrı ayrı toplamlarından da oldukça fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, 5 mm çap değerine ve 1,5 mm tüp kalınlığına sahip HMK ve HMK-Z hibrit tüplerin TSE değerleri hibrit tüpü oluşturan bileşenlerin ayrı ayrı toplamlarından sırasıyla %25,9 ve %10,5 daha yüksektir. 0,5; 1 ve 1,5 mm et kalınlığı için içi boş ve hibrit tüplerin tüm enerji sönümleme parametreleri Çizelge E2.1-E2.5'te verilmiştir. Sonuç olarak, tüp kalınlığının hibrit tüplerin enerji sönümleme performansları açısından önemli bir parametre olduğu ve uygun tüp ve kafes yapı kalınlıklarının ayarlanması ile birlikte ince cidarlı tüplerin enerji sönümleme performanslarının oldukça artırılacağı görülmüştür.



Şekil 4.7. Farklı tüp kalınlıklarına sahip hibrit tüplerin ÖSE değerleri ve deformasyon şekilleri

4.3. Hibrit Yapıların Çarpışma Performanslarının Tahmin Edilmesi

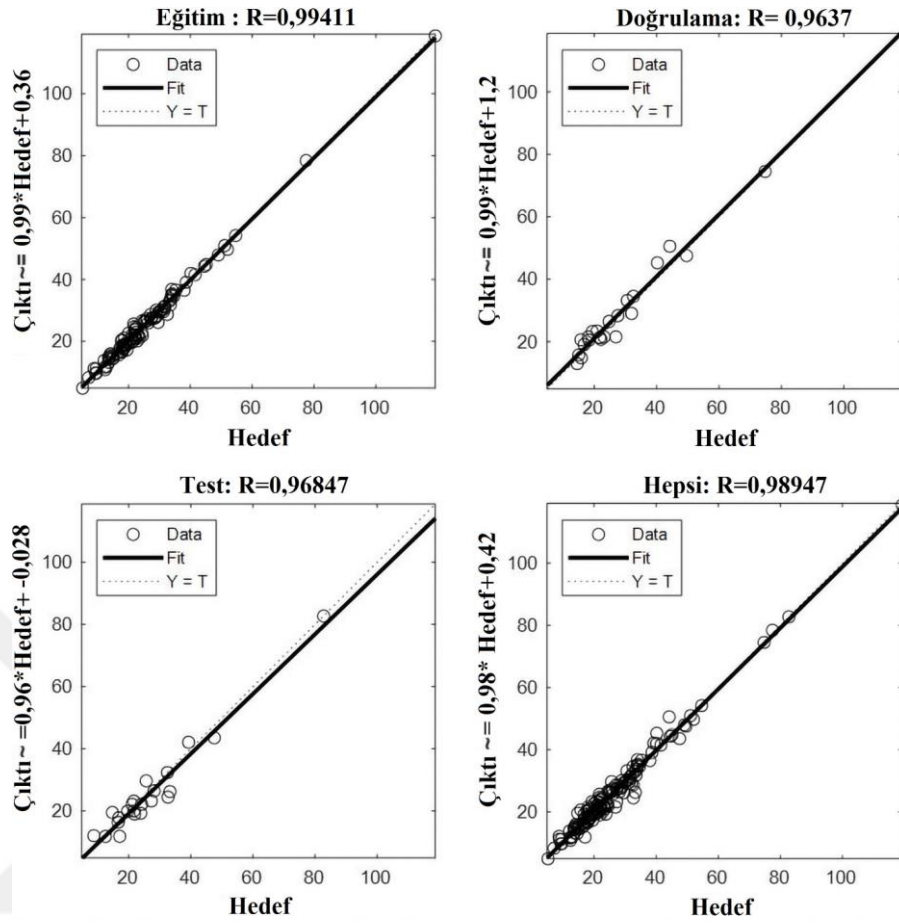
Her bir durum için deneysel ölçümler ve sayısal simülasyonlar yapmak yüksek maliyet ve zaman nedeniyle uygun olmadığı için tahmin yöntemlerinin kullanımı literatürde giderek artmaktadır. Bu tez çalışmasında aksel yükler altındaki kafes yapı dolgulu ince cidarlı tüplerin çarpışma dayanım parametreleri yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak tahmin edilmiştir. YSA'lar çok yüksek tahmin kabiliyetleri nedeniyle çarpışma dayanım parametrelerini de içeren endüstriyel süreçlerin tahmin edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Baykasoğlu ve Baykasoğlu, 2017). YSA'lar beyindeki biyolojik nöronlar gibi birbirine paralel çalışan ve lineer olmayan hesaplamalar da yapabilen birimlerdir. YSA'nın çalışması sırasında tüm girdi verileri aşamalı olarak girdi nöronlarına (düğüm noktalarına) beslenir. Giriş verileri YSA'nın diğer bölümlerine bağlantılar (katsayılara bağlı olarak) ile birlikte yayılır. Bu yayılma işlemi gerçekleşirken ilgili veriler ortak düğümlerde birleştirilir ve önceden tanımlanmış hesaplama prosedürlerine göre güncellenir. Bu süreç YSA'yı uygun bir öğrenme algoritması kullanarak eğitmek için tekrarlanır. Çıkış nöronlarından (düğümler) elde edilen sonuçlar (tahminler), özel uygulamalar için kullanılacak sayısal sonuçları ortaya koyar. Pratik uygulamalar için YSA'ları tasarlamak ve kullanmak için birçok yazılım platformu vardır. Bu çalışmada aksel darbe yükü altındaki kafes yapı dolgulu kare tüplerin çarpışma dayanım parametrelerini tahmin etmek için kullanılacak uygun bir genelleştirilmiş ileri beslemeli YSA geliştirmek için MATLAB YSA eklentisi (MATLAB's Neural Network Tool Box) kullanılmıştır. TSE, ÖSE, OÇK ve MÇK değerleri için sonlu eleman simülasyon sonuçları kullanılarak veri setleri üretilmiştir. Buradaki nihai amaç, girdi değişkenlerini (kafes birim hücre sayısı, kafes eleman çap değeri ve tüp et kalınlığı) çıkış değişkenlerine (TSE, ÖSE, OÇK ve MÇK) bağlayan iyi eğitilmiş bir YSA oluşturmaktır. Yüksek eğitim performansı elde etmek için uygun bir YSA konfigürasyonunun (gizli katman sayısı ve her bir gizli katmandaki nöron sayısı) belirlenmesi gerekir. Bu konuda optimum YSA konfigürasyonlarını belirlemek için evrensel olarak kabul edilmiş bir uygulama olmamakla birlikte genellikle optimum konfigürasyonların belirlenmesinde deneme-yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan YSA test parametreleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. YSA test parametreleri

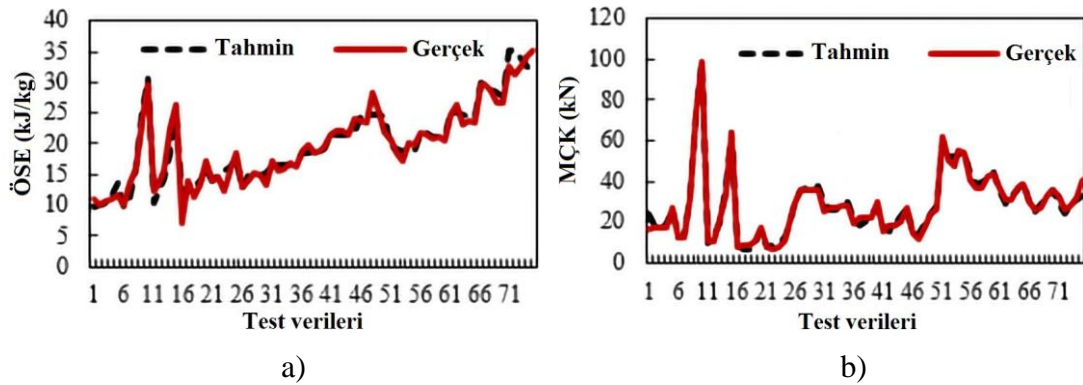
Gizli katman sayısı:	1; 2; 3
Gizli katmandaki nöron sayısı:	2; 4; 6; 8
YSA yapısı:	Genelleştirilmiş ileri besleme

Çizelge 4.2. YSA için test sonuçları

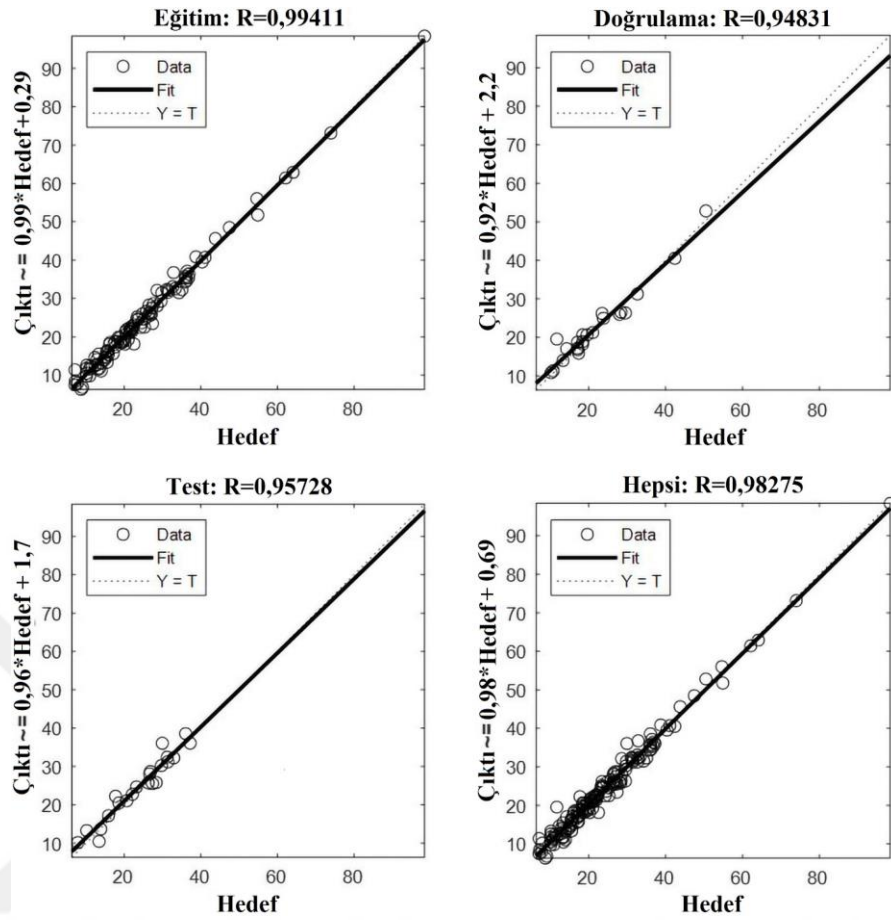
Test	Gizli katman sayısı	Gizli katmandaki nöron sayısı	HMK için R değeri	HMK-Z için R değeri
1	1	2	0,89254	0,87521
2	1	4	0,91232	0,90521
3	1	6	0,93337	0,93254
4	1	8	0,96847	0,95728
5	2	2	0,95622	0,93687
6	2	4	0,92511	0,92478
7	2	6	0,94251	0,92631
8	2	8	0,95311	0,92657
9	3	2	0,94511	0,94368
10	3	4	0,89219	0,88365
11	3	6	0,88365	0,87659
12	3	8	0,90011	0,88254



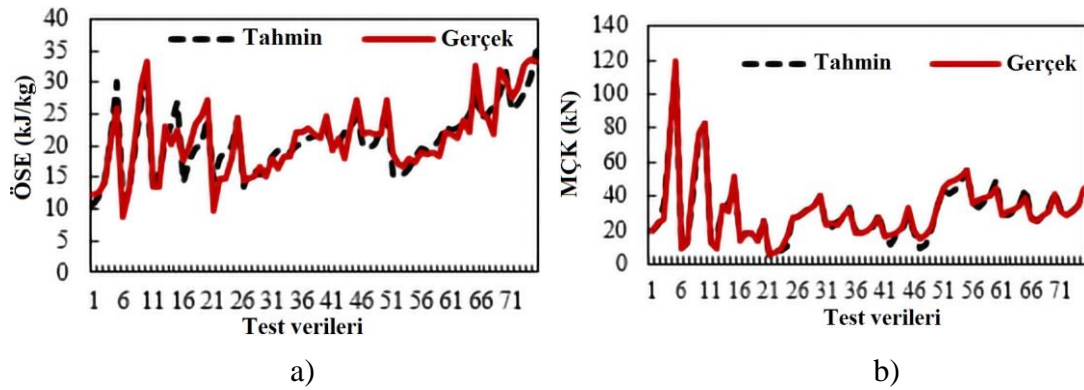
Şekil 4.8. HMK hibrit yapı için en uygun YSA'yı elde eden korelasyon katsayıları



Şekil 4.9. HMK hibrit yapılar için en iyi YSA kullanılarak edilen a) ÖSE değerleri ve b) MÇK değerleri



Şekil 4.10. HMK-Z hibrit yapı için en uygun YSA'yı elde eden korelasyon katsayıları



Şekil 4.11. HMK-Z hibrit yapılar için en iyi YSA'ya göre a) ÖSE değerleri ve b) MÇK değerleri

Seçilmiş olan YSA konfigürasyonunu eğitmek için YSA uygulamalarında çokça ve verimli olarak kullanılan Levenberg-Marquardt eğitim algoritmaları kullanılmıştır. Verilerin %70'i eğitim %15'i doğrulama ve %15'i test olarak ayrılmıştır. 15 bağımsız çalıştırmadan sonra bu testlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. En

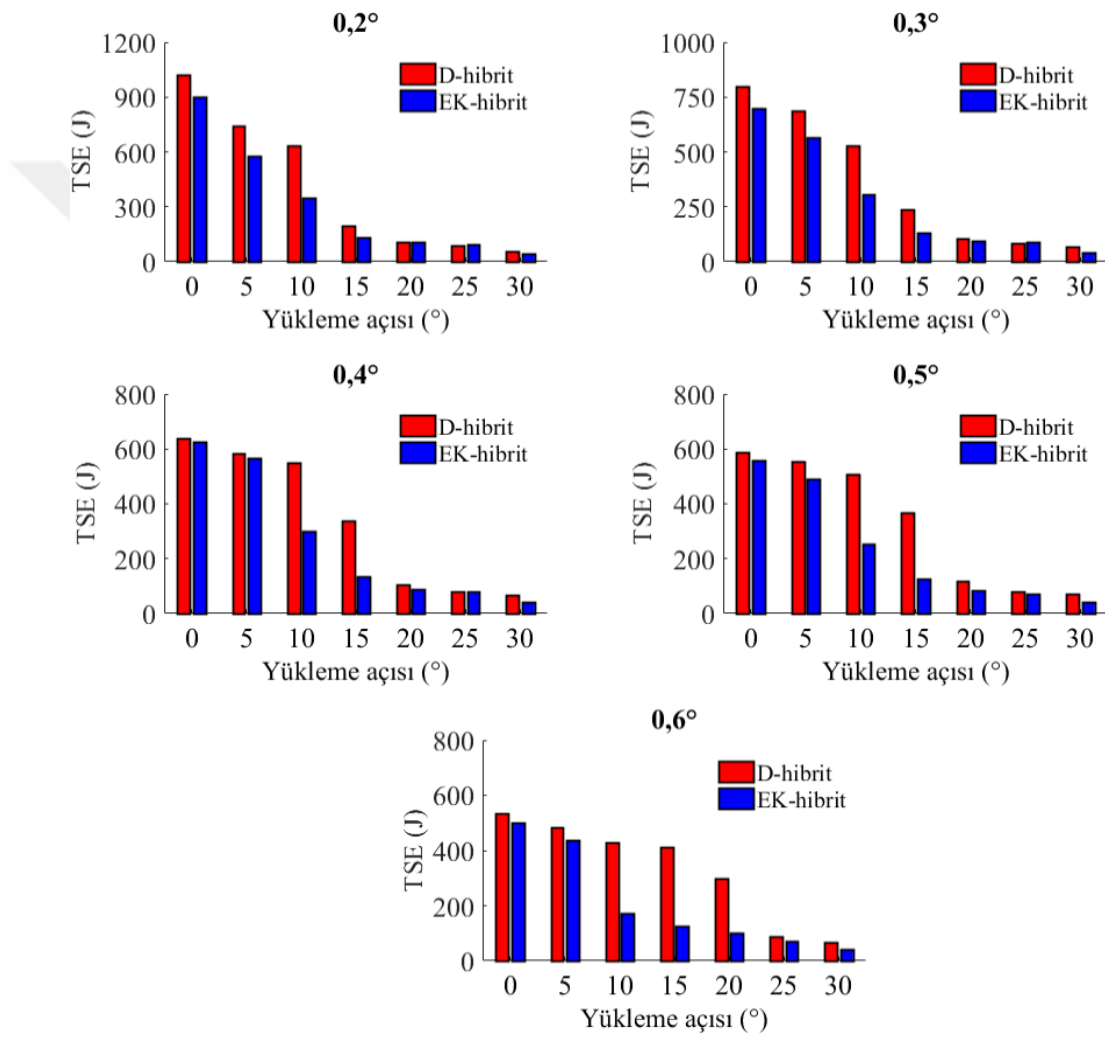
iyi test sonucu HMK için $R= 0,96847$ ve HMK-Z için $R=0,95728$ olarak elde edilmiştir. En uygun YSA yapısı için hesaplama sonuçları Şekil 4.8-4.11'de gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde gerçek ve tahmini sonuçlar arasında önemli ölçüde yüksek korelasyon olduğu görülmektedir. Şekil 4.8-4.11'de sadece ÖSE ve MÇK değerleri gösterilmiş olup benzer şekilde YSA algoritması TSE, OÇK ve BÇK gibi çeşitli çarpışma dayanım parametrelerini tahmin etmekte oldukça etkin bir yöntemdir. Ayrıca hesaplama maliyeti nedeniyle sınırlı sayıdaki çarpışma parametresi kullanılarak oluşturulan çalışma uzayı YSA algoritması kullanılarak oldukça genişletilebilmekte ve böylece YSA yaklaşımı eksenel ve eğik yükler altındaki kafes yapı dolgulu ince cidarlı yapıların enerji sönümleme performanslarını optimize etmek için en uygun tasarım değişkenlerini bulmada kullanılabileceği görülmüştür.

5. EĞİK YÜKLER ALTINDAKİ HİBRİT TÜPLERİN ÇARPIŞMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

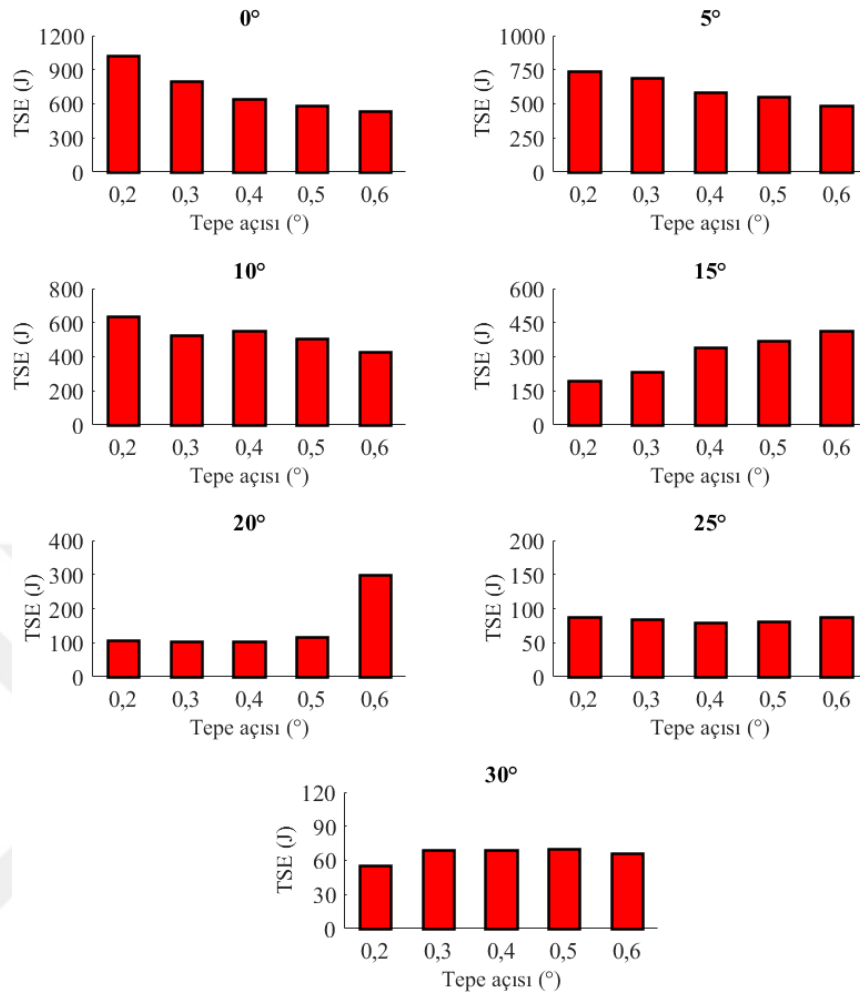
5.1. EK-Hibrit ve D-Hibrit Yapıların Karşılaştırılması

Bu bölümde, ince cidarlı tüplerin içerisine dolgu malzemesi olarak farklı tepe açılarına sahip derecelendirilmiş (D) kafes yapılar ile aynı ağırlığa sahip eşdeğer kalınlıklı (EK) kafes yapılar önerilmiş ve bu iki yapının enerji sönümlenme performansları farklı yüklemeye açıları ele alınarak karşılaştırılmıştır. Farklı tepe açılarına sahip D-hibrit ve EK-hibrit yapıların farklı yüklemeye açılarına göre TSE değerleri ile farklı yüklemeye açılarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açılarına göre TSE değerleri sırasıyla Şekil 5.1 ve 5.2’de verilmiştir. Burada TSE değerleri hibrit yapıların yoğunlaşma bölgesinin başlangıcı olarak kabul edilmiştir fakat farklı yüklemeye açılarına sahip hibrit yapılarda yoğunlaşma görülmediğinden dolayı bu yüklemeye açılarında daha fazla deformasyona uğrayabilen D-hibrit yapıların ÇV değerleri esas alınarak EK-hibrit yapıların da aynı ÇV değerine kadar sönümledikleri enerji miktarları dikkate alınmıştır. Ayrıca D-kafes yapılarda sabit taban çap değeri kabul edildiğinden dolayı tepe açısı arttıkça yapının toplam kütlelerinin de azaldığı göz önüne alınmalıdır. EK-kafes yapılar D-kafes yapılar ile eşdeğer kütleye sahip olduğundan dolayı aynı durum hibrit yapılar için de geçerlidir ve dolayısıyla tepe açısı arttıkça hem D-hibrit hem de EK-hibrit yapıların sönümledikleri toplam enerji miktarları azalmaktadır. Şekil 5.1’den de görüldüğü gibi hem D-hibrit hem de EK-hibrit yapılar için yüklemeye açısı arttıkça hibrit yapıların sönümledikleri toplam enerji miktarları azalmaktadır. Bunun başlıca sebebi yüklemeye açısı arttıkça yapıların bir miktar yerel burkulmanın ardından eğimli yüzey üzerinde kaymaya başlamasıdır. Eğimli yüzey üzerindeki kayma durumu yüklemeye açısı arttıkça daha erken başlamakta ve dolayısıyla eğim açısının artmasıyla birlikte hibrit yapıların enerji sönümlenme performansları da azalmaktadır. Yüklemeye açısı belirli bir kritik değerin üzerine çıktığında ise sönümlenen TSE miktarı ani olarak düşebilmektedir. Bu noktada Şekil 5.2’de farklı yüklemeye açılarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açılarına göre TSE değerleri karşılaştırılmıştır. Şekilde eksenel yüklemeye durumu için tepe açısı arttıkça sönümlenen enerji miktarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca yüklemeye açısı arttıkça farklı tepe açılarına sahip D-hibrit yapılar arasındaki TSE farkının azalmaya başladığı ve kritik yüklemeye açısı değerinden sonra

ise düşük tepe açısına sahip hibrit yapıların diğer yapılara göre oldukça iyi enerji sönümleme performansına sahip olduğu görülmektedir. Örneğin 20° yükleme durumunda en fazla enerji sönümleyen hibrit yapının $0,6^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapı olduğu görülmektedir. Yükleme durumu 20° 'nin üzerine çıkartıldığında ise ilgili yapı diğer yapılar gibi eğik düzlem üzerinde kaymakta ve TSE değeri önceki yükleme durumlarına göre oldukça düşmektedir.



Şekil 5.1. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre TSE değerleri



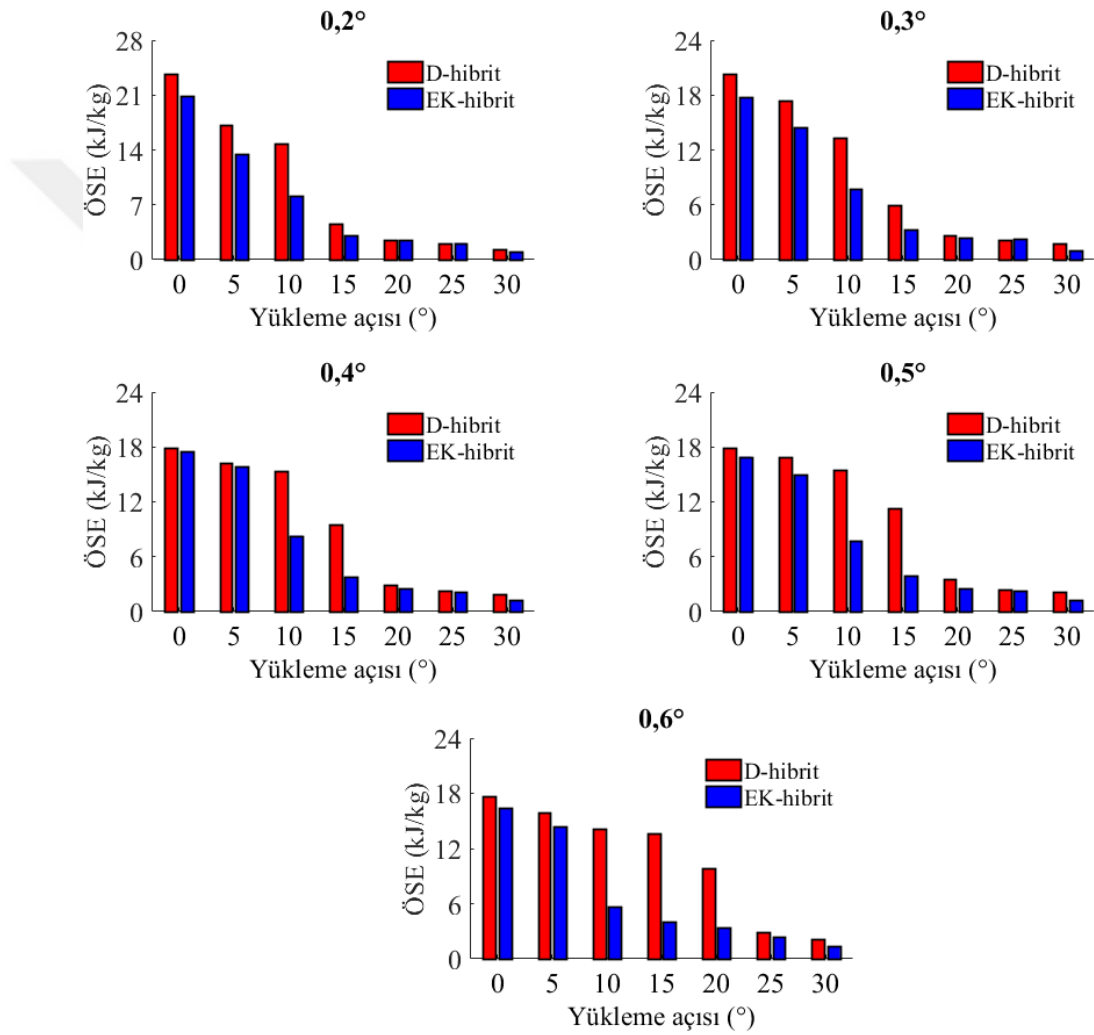
Şekil 5.2. Farklı yüklenme açılara sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre TSE değerleri

EK-hibrit ve D-hibrit yapılar kendi aralarında kıyaslandığında ise tüm D-hibrit yapıların EK-hibrit yapılardan daha fazla enerji sönümledikleri görülmektedir. Yüklenme açısı arttıkça D-hibrit ve EK-hibrit yapıların sönümledikleri enerji miktarı arasındaki fark da artmaktadır. Bunun sebebi EK hibrit ve D-hibrit yapıların farklı kritik yüklenme açlarına sahip olmasıdır. Şekil 5.10'daki deformasyon görüntüleri incelendiğinde EK-hibrit ve D-hibrit yapılar için farklı kritik yüklenme açıları olduğu gözlemlenmekte ve bu kritik yüklenme açısından daha büyük yüklenme açılarında ise hibrit yapıların enerji sönümleme performanslarında ani düşüşler olduğu görülmektedir. Örneğin 0,5° tepe açısına sahip D-kafes yapının kritik yüklenme açısı 15° iken aynı kütleye sahip EK-hibrit yapının kritik yüklenme açısı 5°'dir. Bu da 0,5° tepe açısına sahip D-hibrit yapının EK-hibrit yapıya göre 15° yüklenme durumunda

yaklaşık 3 kat daha fazla enerji sönümlemesine neden olmaktadır. D-hibrit yapıların uç çap değerleri EK-hibrit yapılara göre daha az olduğundan dolayı D-hibrit yapılar kolayca yerel deformasyona uğrayarak daha fazla enerji sönümleyebilirken EK-hibrit yapılar eğimli yüzey üzerinde kayma eğilimine geçmektedir. Yükleme açısının belirli bir değerinden sonra ise her iki yapı için de yaklaşık benzer TSE değerleri görülmektedir. Şekil 5.10'dan da görüldüğü gibi tepe açısı $0,2^\circ$ olan D-hibrit yapılar 10° yükleme açısında EK-hibrit yapılara göre daha fazla deformasyona uğrayabilirken, özellikle 15° 'den daha büyük yükleme açılarında ise hem D-hibrit hem de EK-hibrit yapılar eğik yüzey üzerinde deformasyona uğramaksızın kayarak ilerlemekte ve yaklaşık benzer deformasyonlara sahip olmaktadır.

D-kafes yapıların taban çap değeri sabit olduğundan dolayı tepe açısı arttıkça uç çap değeri azalmakta ve dolayısıyla artan tepe açılarında hibrit yapıların kütleleri azalmaktadır (Çizelge E3.1 ve E3.2). EK-hibrit yapılar ise D-hibrit yapılar ile aynı kütleye sahip olarak tasarlandıklarından dolayı aynı durum EK-hibrit yapılar içinde geçerlidir. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açlarına göre ÖSE değerleri ile farklı yükleme açlarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre ÖSE değerleri sırasıyla Şekil 5.3 ve 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.3 ve 5.4 incelendiğinde ÖSE grafiklerinin TSE grafiklerine oldukça benzer olduğu görülmektedir. Düşük yükleme açıları için tepe açısı arttıkça hibrit yapıların ÖSE değerleri genel olarak azalmaktadır. Ancak yükleme açısı arttıkça uç çap kısmı daha ince olan hibrit yapı uç kısımdan deforme olarak daha fazla enerji sönümleyebilirken kalın uçlu hibrit yapılar bir miktar enerji sönümledikten sonra eğimli yüzey üzerinden kaymaktadır (Şekil 5.10) ve dolayısıyla ÖSE değerleri D-hibrit yapılara kıyasla daha düşük kalmaktadır. Örneğin 20° yükleme açısı için en fazla ÖSE değerine sahip yapının uç kesit alanı en düşük olan $0,6^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapının olduğu görülmektedir. Bunun nedeni $0,6^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapı $88,6$ mm deformasyon boyuna kadar enerji sönümleyebilirken, $0,2^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapı $44,8$ mm'ye kadar deforme olmaktadır. 20° yükleme açısından sonra ise tüm yapılar eğimli yüzey üzerinden kayarak düşük bir enerji sönümleme performansı göstermektedir. D-hibrit yapılar ile EK-hibrit yapıların ÖSE değerleri karşılaştırıldığında ise D-hibrit yapıların üstünlüğü göze çarpmaktadır. Özellikle kritik

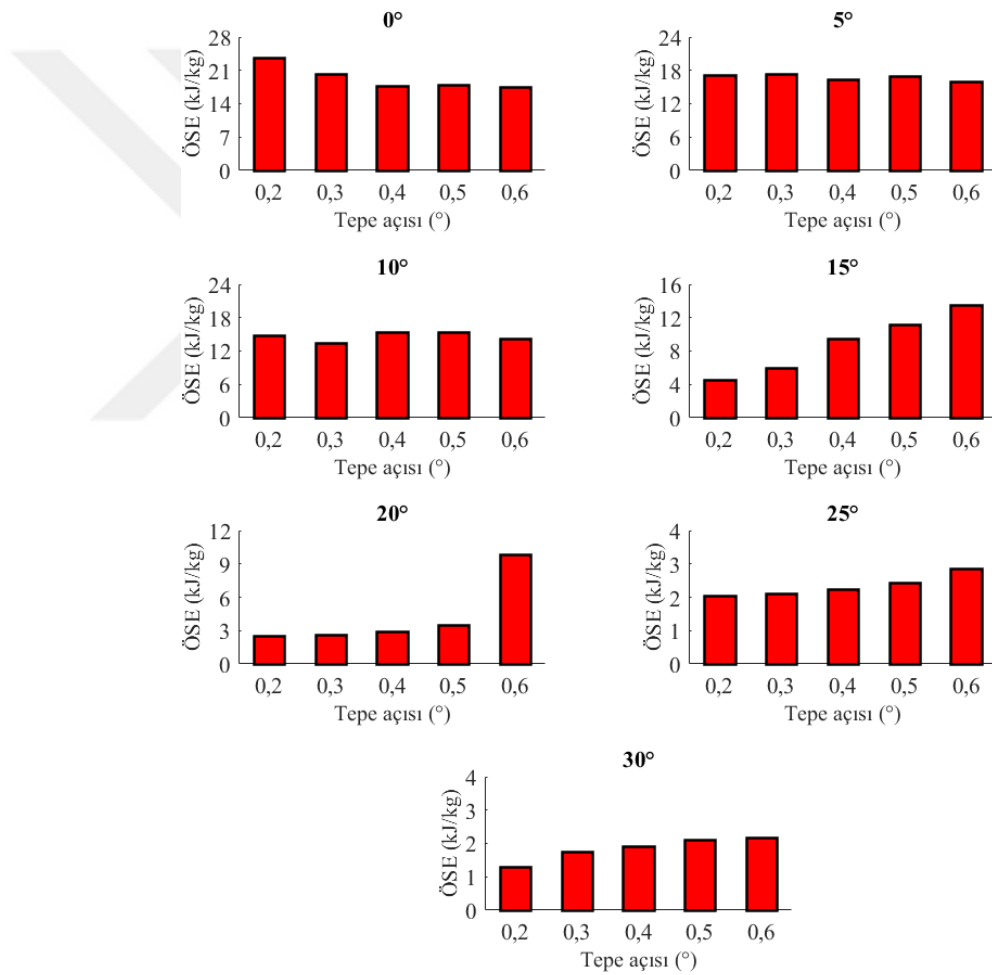
yükleme açısından sonraki durumlarda D-hibrit yapılar EK-hibrit yapılardan oldukça fazla ÖSE değerine sahiptir. Örneğin 15° yükleme durumundaki $0,6^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapının ÖSE değeri EK-hibrit yapının yaklaşık 3,3 katıdır. Her iki yapı için kritik yüklemeye açısından sonraki yüklemeye durumlarında yapılar az miktarda yerel burkulmanın ardından eğik düzlem üzerinde kaymakta ve bu nedenle enerji sönümleme performansları bu açı değerleri için birbirlerine yakın olmaktadır.



Şekil 5.3. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yüklemeye açlarına göre ÖSE değerleri

Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yüklemeye açlarına göre OÇK değerleri ile farklı yüklemeye açlarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açlarına göre OÇK değerleri sırasıyla Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. OÇK değerleri hesaplanırken hibrit yapıların ezilme boyları oldukça

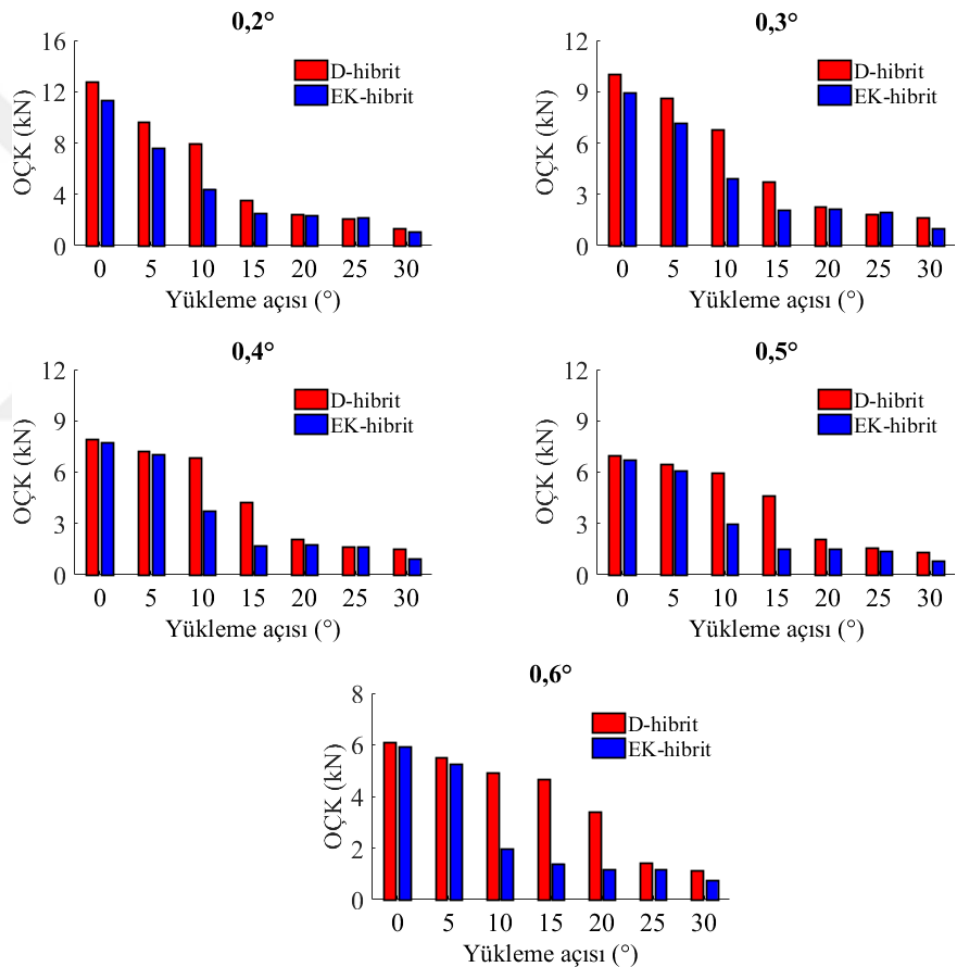
önemlidir. Burada aksel yükleme durumundaki hibrit yapılar için yoğunlaşma bölgesi kriter olarak alınmış ve bu bölgeye kadar sönmülebildikleri enerji değeri ezilme boyuna bölünerek OÇK değerleri elde edilmiştir. Yükleme açıları arttığında ise hibrit yapılar belirli bir ezilme boyuna kadar deforme olmakta ve yoğunlaşma göstermeden eğimli yüzey üzerinden kaymaktadırlar. Bu gibi yoğunlaşmanın görülmediği yüksek yükleme açılarında ise daha fazla deformasyon boyuna sahip D-hibrit yapıların deformasyon boyu esas alınarak EK-hibrit yapıların bu deformasyon boylarındaki enerji değerleri dikkate alınmıştır (Çizelge E3.1 ve E3.2).



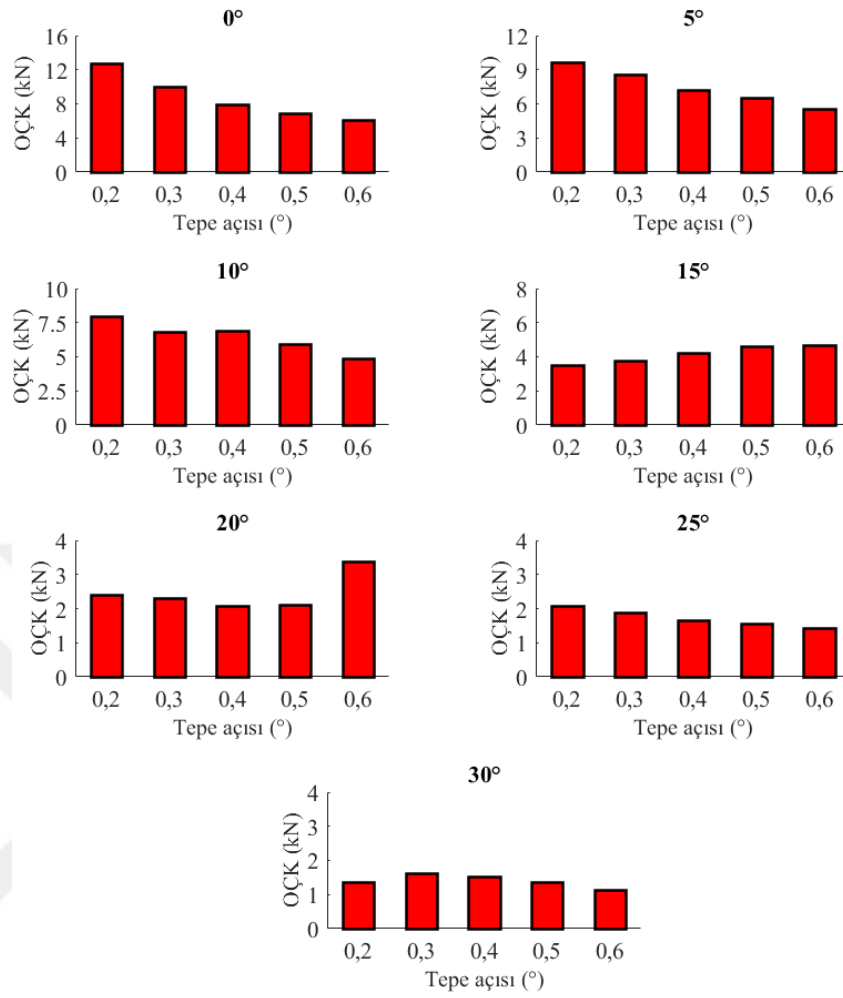
Şekil 5.4. Farklı yükleme açılarına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açılarına göre ÖSE değerleri

Şekil 5.5 ve 5.6 incelendiğinde D-hibrit yapıların tepe açısı arttıkça hem D-hibrit hem de bu yapıya karşılık gelen EK-hibrit yapıların OÇK değerlerinin azaldığı görülmektedir. EK-hibrit ve D-hibrit yapılar karşılaştırıldığında ise düşük yükleme

açılarında hibrit yapılar birbirilerine yakın OÇK değerleri gösterirken belirli bir yükleme açısı değerine kadar yükleme açısı arttıkça D-hibrit yapıların OÇK değerleri EK-hibrit yapılardan oldukça fazla olmaktadır. Özellikle tepe açısı değeri arttıkça D-hibrit yapılar aynı ezilme boyu değeri için EK-hibrit yapılardan daha fazla enerji sönümleyebildiklerinden dolayı D-hibrit yapılar EK-hibrit yapılara göre oldukça fazla OÇK değerine sahiptir. Örneğin 15° yükleme durumundaki $0,5^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapının OÇK değeri aynı kütleye sahip EK-hibrit yapının OÇK değerinin yaklaşık 3 katıdır.

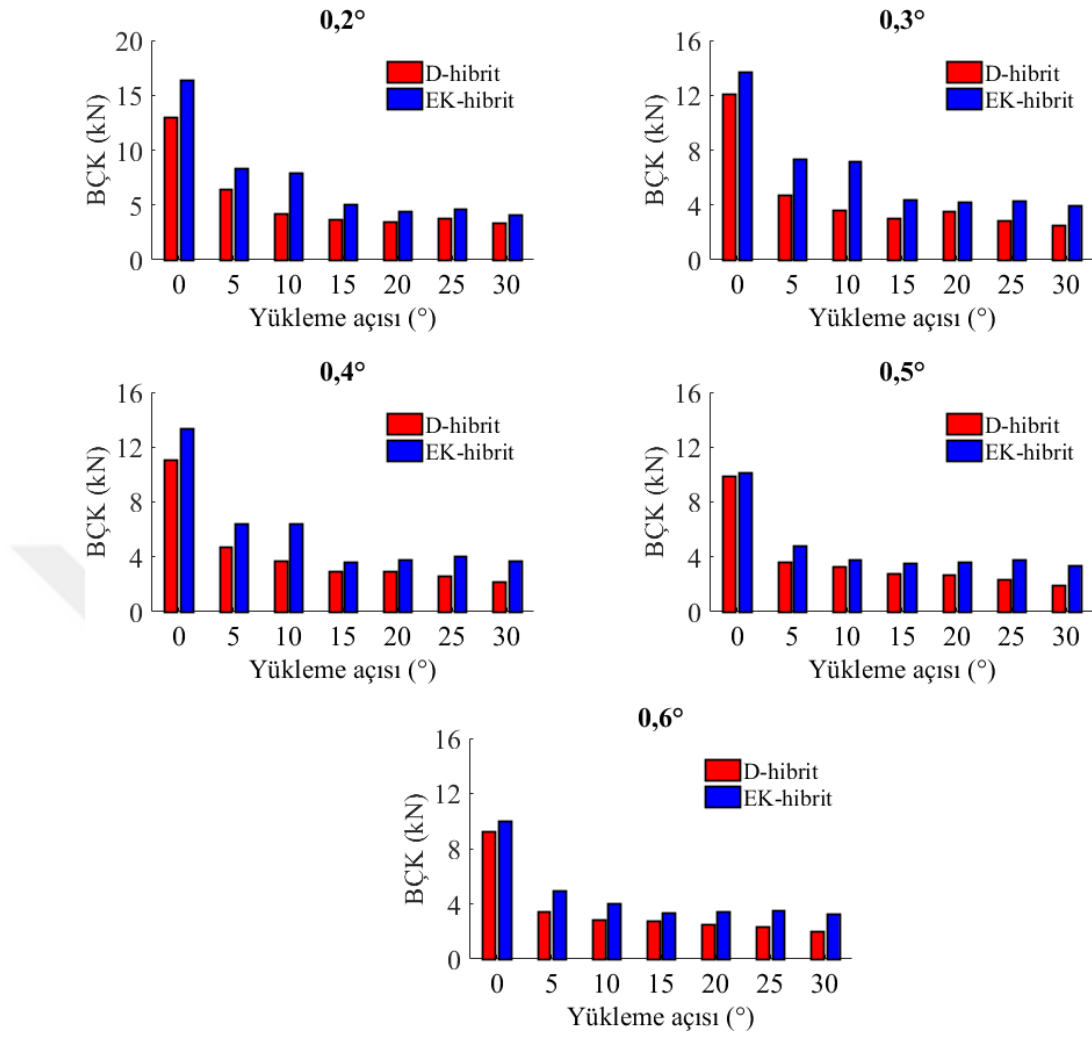


Şekil 5.5. Farklı tepe açılına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açılına göre OÇK değerleri



Şekil 5.6. Farklı yüklem açılara sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açılına göre OÇK değerleri

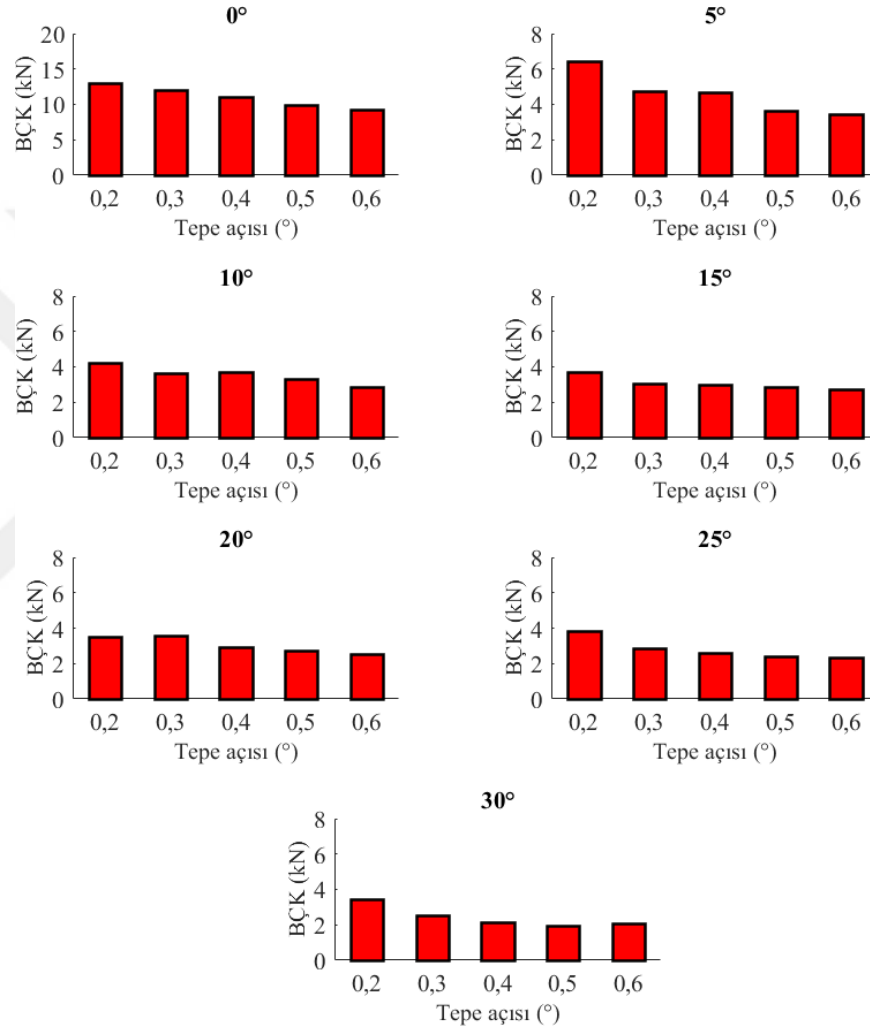
Yapıların çarpışma dayanım performansları incelenirken önemli kriterlerden birisi de BÇK değeridir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi enerji sönmüleyici yapılardan hem yolcu güvenliği hem de araçların kritik donanımlarının görebileceği zarar açısından BÇK değerinin olabildiğince düşük olması istenir. Şekil 5.7 ve 5.8’de farklı tepe açılına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yüklem açılına göre BÇK değerleri ile farklı yüklem açılına sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açılına göre BÇK değerleri verilmiştir.



Şekil 5.7. Farklı tepe açılara sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açılarında göre BÇK değerleri

Şekil 5.7 ve 5.8'de görüldüğü gibi tüm durumlar için EK-hibrit yapıların BÇK değerlerinin D-hibrit yapılardan daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm yükleme açıları göz önüne alındığında hem D-hibrit hem de EK-hibrit yapılar için en fazla BÇK değerinin eksenel yükleme durumunda olduğu açıkça göze çarpmaktadır. Eğik yüklemenin başlamasıyla birlikte kuvvet değerleri ani bir düşme göstermiştir ve diğer yükleme durumları için birbirlerine yakın BÇK değerleri görülmektedir. Şekil 5.8'e bakıldığında ise eksenel yükleme durumunda en fazla BÇK değerine sahip yapının en kalın uç çap değerine sahip olan 0,2° tepe açılı hibrit yapı, en düşük BÇK değerine sahip yapının ise en ince uç çap değerine sahip 0,6° tepe açılı hibrit yapının olduğu görülmektedir. BÇK değerinin düşük olması özellikle eğik yükleme durumlarında yapının daha erken deformasyona başlamasını ve böylece daha fazla enerji

sönümleyebilmesini sağlamaktadır. Eğik yükleme durumlarında BÇK değerinin fazla olması ilk temas anında deformasyonu zorlaştırmakta ve bazı durumlarda ise çok az bir deformasyon sonrası hibrit yapının eğik yüzey üzerinde kayması ile birlikte yapıların enerji sönümlenme performanslarının oldukça düşmesine sebebiyet vermektedir.

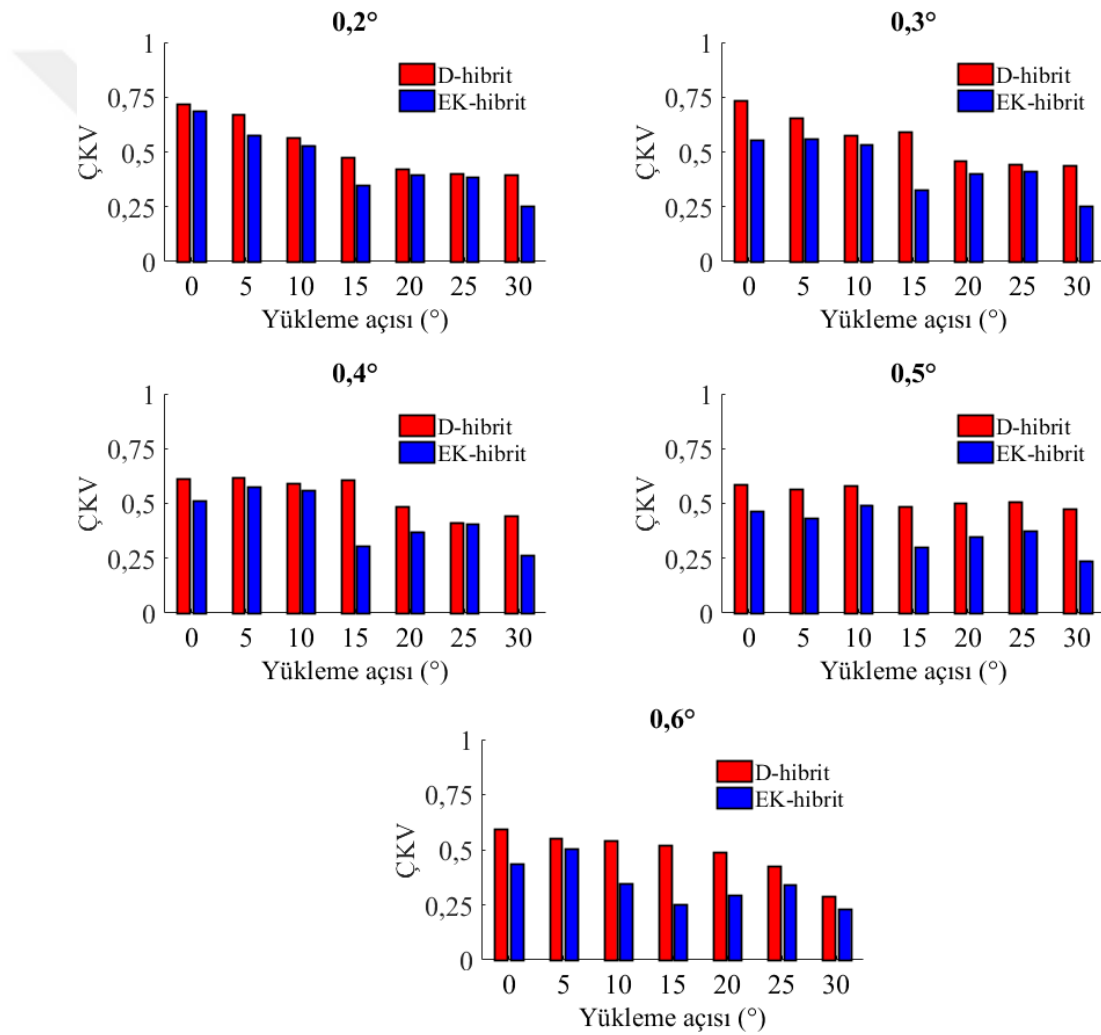


Şekil 5.8. Farklı yükleme açılarında sahip D-hibrit yapıların değişen tepe açılarında göre BÇK değerleri

BÇK değerinin düşük olmasının yanı sıra çarpışma uygulamalarında kullanılan yapıların deformasyon sırasında olabildiğince fazla enerji sönümleyebilmesi ve maksimum çarpışma kuvvetinin de kabul edilebilir düzeyde olması beklenir. Bu noktada hem sönümlenen enerjinin hem de maksimum çarpışma kuvvetinin birlikte kullanıldığı ÇKV değeri büyük önem kazanmaktadır. Farklı tepe açılarında sahip D-

hibrit ve EK-hibrit yapıların farklı yüklemeye açılarına göre ÇKV değerleri Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm yüklemeye durumları için D-hibrit yapılar EK-hibrit yapılara göre daha verimli yapılar olduğu söylenebilir. Yüklemeye açısı arttıkça sönümlenen enerji miktarına bağlı olarak hem EK-hibrit hem de D-hibrit yapıların ÇKV değerleri genel olarak azalmaktadır. Bazı durumlarda D-hibrit yapıların ÇKV değerleri ile EK-hibrit yapıların ÇKV değerleri arasındaki fark aniden artmaktadır. Bu durum EK-hibrit yapıların kritik yüklemeye açısı nedeniyle sönümledikleri enerji miktarının aniden düşmesi ile açıklanabilir (Şekil 5.10). Örneğin 15° yüklemeye durumundaki $0,4^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapının ÇKV değeri, bu yapıya eşdeğer kütleli EK-hibrit yapının ÇKV değerinden oldukça fazladır. Burada her iki yapının da maksimum çarpışma kuvveti değeri birbirlerine yakın olmasına rağmen sönümledikleri enerji miktarları arasında büyük fark vardır ve bu da ÇKV değerleri arasında fark oluşturmaktadır. Şekil 5.10'da D-hibrit ve EK-hibrit yapıların farklı yüklemeye açılarında %50 ezilme boyundaki deformasyon şekilleri görülmektedir. Deformasyon şekillerine bakıldığında 0° ve 5° yüklemeye açılarındaki hibrit yapılarda genel olarak yerel burkulmalar görülürken yüklemeye açısının artmasıyla birlikte bazı yapılar enerji sönümlenmeye devam edebilirken bazı yapılar eğimli yüzey üzerinde kayma eğilimi göstermektedir. Bu da her bir yapı için farklı kritik yüklemeye açısının olduğunu göstermektedir. Örneğin $0,2^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapının kritik yüklemeye açısı 10° iken $0,6^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının kritik yüklemeye açısı 20° 'dir. 20° yüklemeye açısından daha fazla yüklemeye açılarındaki ise tüm D-hibrit ve EK-hibrit yapıların oldukça az miktarda enerji sönümledikleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi aksel yüklemeye durumlarında kütlece fazla olan kalın uçlu yapılar daha erken yoğunlaşırken uç kesit alanı ince $0,5^\circ$ ve $0,6^\circ$ tepe açılı hibrit yapılar ise enerji sönümlenmeye devam edebilmektedir. Ayrıca aksel yüklemeye durumundaki $0,2^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit yapıya eşdeğer EK-hibrit yapının belirli bir yerel burkulmanın ardından global eğilmeye uğradığı ve dolayısıyla enerji sönümlenme performansının diğer yapılara kıyasla daha düşük olduğu söylenebilir. Tüm deformasyon şekilleri için D-hibrit yapıların kritik yüklemeye açıları EK-hibrit yapılardan fazla olduğu söylenebilir. Bu da D-hibrit yapıların EK-hibrit yapılara göre daha fazla enerji sönümlenmelerine olanak tanır. Şekil 5.11'de ise $0,4^\circ$ tepe açısına sahip D-hibrit ve buna eşdeğer EK-hibrit yapıların farklı yüklemeye açılarındaki

deformasyon şekilleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi özellikle 20° yükleme açısına kadar D-hibrit yapıların ilerleyen deformasyon boylarında EK-hibrit yapılara göre daha fazla enerji sönümleyebildikleri görülürken 20° yükleme açısından sonrası ise her iki yapının da enerji sönümleme performansları düşüş göstermiştir. Özellikle 10° yükleme durumundaki D-hibrit yapı 80 mm deformasyon boyunda enerji sönümlemeye devam ederken, EK-hibrit yapının özellikle 60 mm deformasyon boyundan sonra kayma eğilimine geçerek enerji sönümleme performansı oldukça düşmüştür.



Şekil 5.9. Farklı tepe açılına sahip D-hibrit ve buna kütlece denk EK-hibrit yapıların farklı yükleme açılına göre ÇKV değerleri

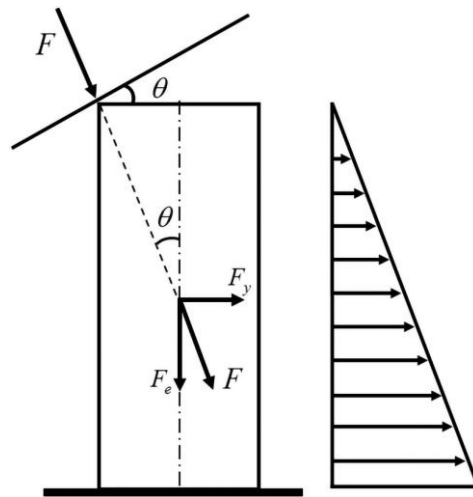
Tepe Açısı (D-hibrit yapılar)	Yapı Tipi	Yükleme Açısı						
		0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
0,2°	EK- hibrit							
	D- hibrit							
0,3°	EK- hibrit							
	D- hibrit							
0,4°	EK- hibrit							
	D- hibrit							
0,5°	EK- hibrit							
	D- hibrit							
0,6	EK- hibrit							
	D- hibrit							

Şekil 5.10. D-hibrit ve EK-hibrit yapıların farklı yüklem açlarındaki %50 deformasyon boyundaki deformasyon şekilleri

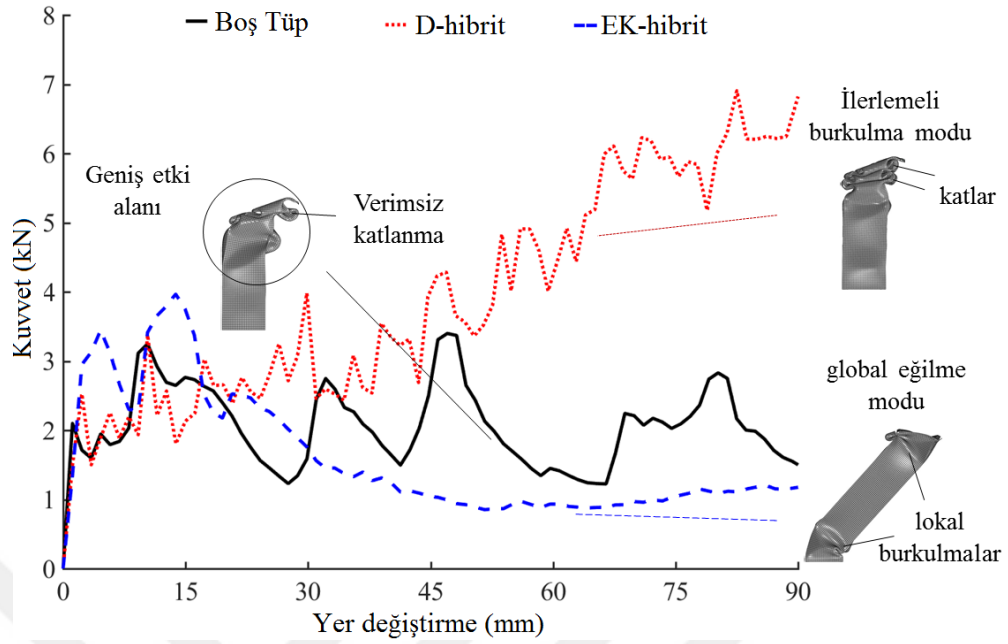
Yükleme Açısı	Yapı Tipi	Deformasyon Boyu								
		0 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm
0°	EK Hibrit									
	D Hibrit									
10°	EK Hibrit									
	D Hibrit									
20°	EK Hibrit									
	D Hibrit									
30°	EK Hibrit									
	D Hibrit									

Şekil 5.11. Farklı yüklemeye açılara sahip EK-hibrit ve D-hibrit yapıların farklı deformasyon boylarındaki deformasyon şekilleri

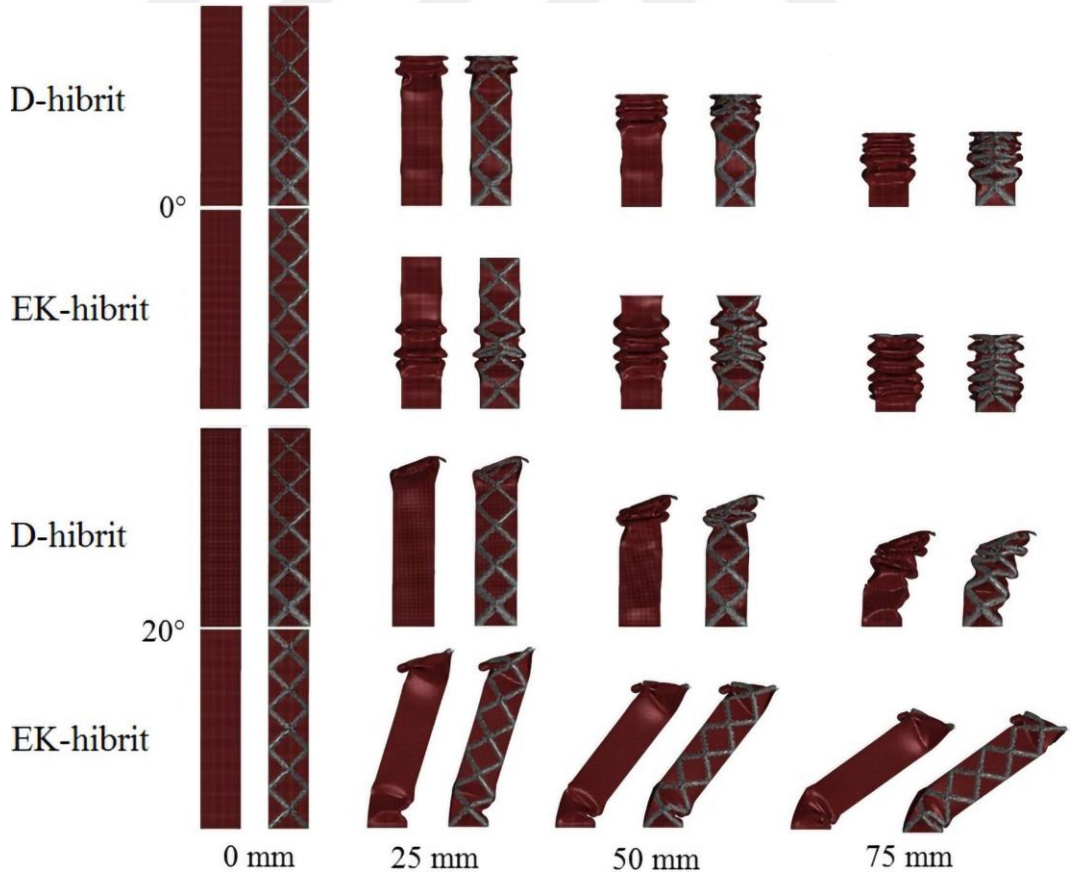
Eksenel yükler altındaki hibrit yapılar sadece eksenel kuvvetlere maruz kalırken, açılı yükler altındaki yapılar hem eksenel hem de yatay kuvvetlerin etkisi altındadır. Şekil 5.12’de θ yükleme açısı için hibrit yapı eksenini boyunca etkileyen eksenel (F_e ($F_e = F \cos(\theta)$)) ve yatay kuvvetler (F_y ($F_y = F \sin(\theta)$)) ile yatay kuvvetlerin neden olduğu eğilme momenti şematik olarak gösterilmiştir. F_e ve F_y hibrit yapının sırasıyla ilerlemeli burkulma ve global eğilmesine neden olmaktadır. Bu noktada θ açısının artması F_y kuvvetini arttırırken F_e kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır ve bu değişim deformasyon modunun ilerlemeli burkulma modundan global eğilme moduna dönüşmesine neden olmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi eğilme momenti hibrit yapı boyunca lineer olarak artmakta ve yapının alt ucunda maksimum değere ulaşmaktadır. Derecelendirilmiş yapıların avantajı bu noktada ortaya çıkmaktadır. Tüplerin açılı yükleme koşullarında ortaya çıkan ve yatay kuvvetlerin neden olduğu eğilme momentinin artışı yönünde derecelendirilmiş kafes yapı ile doldurulması ile birlikte hibrit yapının rijitliği de aynı yönde derecelendirilmiş olmakta ve bu durum hem eksenel kuvvetin etkisiyle üst kısımdan başlayarak yapının ilerlemeli deformasyona yatkınlığını arttırırken, ezilme süresinde yüksek eğilme momentlerine maruz kalan tüpün alt kısmında istenmeyen deformasyonların engellenmesine ve böylece malzemenin optimum kullanılmasına olanak sağlar.



Şekil 5.12. Hibrit tüpe etkiyen eksenel ve yatay kuvvetler ile yatay kuvvetlerin neden olduğu eğilme momentinin şematik gösterimi



Şekil 5.13. İçi boş tüp, derecelendirilmiş hibrit yapı ile eşdeğer kalınlıklı hibrit yapının kuvvet – yer değiştirme grafiği ve deformasyon şekilleri



Şekil 5.14. Eksenel ve eğik yükler altındaki derecelendirilmiş ve eşdeğer kalınlıklı hibrit tüplerin farklı yüklenme boylarındaki deformasyon şekilleri

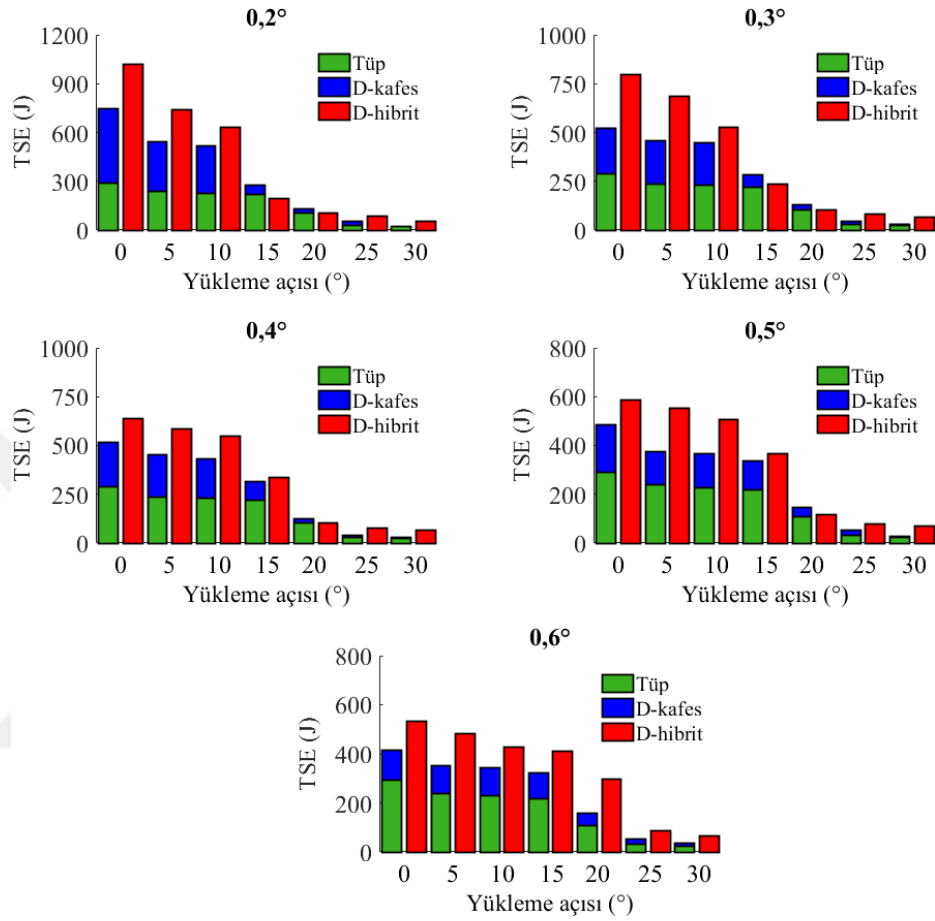
Şekil 5.13'te 20° yükleme durumu için $0,6^\circ$ tepe açısına sahip derecelendirilmiş hibrit tüp, eşdeğer kalınlıklı hibrit tüp ile boş tüpün kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi derecelendirilmiş hibrit yapının rijitliği deformasyon boyunca artmaktadır. Böylece bu yapılar hem daha düşük başlangıç çarpışma kuvvetine sahip olur hem de global eğilme olmaksızın daha stabil ilerlemeli burkulma deformasyon modu gösterir. Şekil 5.13'teki deformasyon şekillerine bakıldığında eşdeğer kalınlıklı hibrit tüp global eğilme moduna sahipken derecelendirilmiş hibrit yapı lokal burkulmalar ile birlikte katlanarak ilerlemeli deformasyon modu gösterir.

Derecelendirilmiş hibrit yapıların özellikle eğik yükler altında tüp ve sabit kalınlıklı hibrit yapılara göre daha iyi çarpışma dayanım performansı göstermelerinin bir diğer nedeni ezilme işlemi süresince hibrit yapı ile kafes yapı arasındaki ortak etkileşimlerdir. Hibrit yapı içerisindeki derecelendirilmiş kafes yapı bir tetikleme mekanizması gibi çalışarak dereceli yapısından dolayı hibrit yapının yan yüzeyleri ile kademeli olarak temas geçerek ilerlemeli burkulma moduna katkı sağlamaktadır. Şekil 5.14'te 20° yükleme durumu için $0,6^\circ$ tepe açısına sahip derecelendirilmiş hibrit tüp ile eşdeğer kalınlıklı hibrit tüpün deformasyon şekilleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi eşdeğer kalınlıklı hibrit tüpler ortaya çıkan yüksek eğilme momentleri nedeniyle kolayca global eğilmeye uğrayarak deforme olmaktadır. Diğer yandan kesit şekillerinden de açıkça görülebileceği gibi derecelendirilmiş hibrit yapılar tüp ile kafes yapının ortak etkileşimleri ile tetiklenen lokal burkulmalardan dolayı eşdeğer kalınlıklı hibrit tüplere göre daha stabil ve lokal şekilde ilerlemeli deformasyona uğramakta ve bu deformasyon modu yapının enerji sönmleme performansını ciddi ölçüde arttırılmasına neden olmaktadır.

5.2. D-Hibrit Yapılar ile Hibrit Yapı Bileşenlerinin Karşılaştırılması

Önceki bölümde D-hibrit yapıların aksenal ve eğik yükler altındaki enerji sönmleme performansları incelenmiş ve D-hibrit yapıların hem aksenal hem de eğik yükler altında daha fazla enerji sönmledikleri görülmüştü. Bu bölümde ise HMK hibrit yapının sönmlediği enerji miktarları ile hibrit yapıyı oluşturan tüp ve HMK kafes

yapının ayrı ayrı sönümledikleri enerji miktarları karşılaştırılmış ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Farklı tepe açlarına sahip D-hibrit yapılar ile hibrit yapıyı oluşturan bileşenlerin TSE değerlerinin karşılaştırılması

Şekle göre HMK hibrit yapıların TSE değerlerinin hibrit yapıyı oluşturan tüp ve kafes yapıların toplam TSE miktarından genellikle daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Burada 0,2° tepe açısına sahip hibrit yapının TSE değerinin yapıyı oluşturan bileşenlerin toplam TSE değerinden düşük olduğu görülmüştür. Burada HMK hibrit yapının kritik yüklem açısının 10° olduğu ve bu yüklem açısından sonra hibrit yapının sönümlediği enerji miktarının ani düşüş gösterdiği görülmüştür. Diğer yandan içi boş tüp yapı ise 15° yüklem açısına kadar enerji sönümlenmeye devam etmekte bu açıdan sonraki yüklem değerlerinde performansı düşmektedir (Şekil 5.16). Bu nedenle 10° yüklem açısına kadar HMK hibrit yapının sönümlediği enerji miktarı tüp ve kafes yapının sönümledikleri toplam enerji miktarından fazla iken 15° yüklem

açısında bileşenlerin TSE değerleri hibrit yapının TSE değerinden fazla olmaktadır. Aynı yükleme durumu için artan tepe açılarında hibrit yapıların TSE değerlerinde olduğu gibi tüp ve kafes yapının ayrı ayrı TSE değerlerinin toplamında da azalma görülmektedir. Şekil 5.16 ve 5.17’de tüp ve farklı tepe açılara sahip HMK kafes ile HMK hibrit yapıların %50 ezilme boyundaki deformasyon şekilleri gösterilmektedir. Şekillere bakıldığında 10° yükleme açısına kadar her üç yapının da enerji sönmleme performanslarının iyi olduğu, 10° yükleme açısından sonra ise özellikle düşük tepe açısına sahip kafes ve hibrit yapıların eğik düzlem üzerinde kayma eğilime girdiği ve bu nedenle enerji sönmleme performanslarının düştüğü görülmektedir. Şekil 5.16’den yüksek tepe açısına sahip HMK kafes yapıların ince olan uç kısımlardan rahatça deforme olabildiği diğer yandan düşük tepe açısına sahip kalın uçlu kafes yapıların deforme olmakta zorlandığı ve bu yüzden diğer yapıdan daha erken kayma eğilimine geçtiği görülmektedir. Şekilden içi boş tüp yapının kritik yükleme açısının 15° olduğu görülmektedir. $0,2^\circ$ tepe açısına sahip kafes yapı tüp yapının içerisine yerleştirildiğinde ise Şekil 5.17’de görüldüğü gibi hibrit yapının enerji sönmleme performansı içi boş yapıya göre daha düşük olmaktadır. 15° yükleme durumundaki tüp yapının enerji sönmleme performansının kendi başına $0,2^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapıdan daha fazla olduğu Şekil 5.15’teki grafikten de görülmektedir. Hibrit yapının performansının tüp yapıdan daha düşük olmasının sebebi içerisine yerleştirilen kafes yapının kritik yükleme açısının üzerinde bir yükleme durumunda hibrit yapının iç çeperlerine baskı yaparak hibrit yapının deformasyon şeklini bozmasıdır. Tüp, HMK kafes ve hibrit yapıların çarpışma dayanım performans değerleri ayrıntılı olarak Çizelge E3.3-E3.7’de gösterilmiştir.

Yapı Tipi	Yükleme Açısı						
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Tüp							
HMK (0,2°)							
HMK (0,3°)							
HMK (0,4°)							
HMK (0,5°)							
HMK (0,6°)							

Şekil 5.16. Tüp ve kafes yapıların %50 ezilme boyundaki deformasyon şekilleri

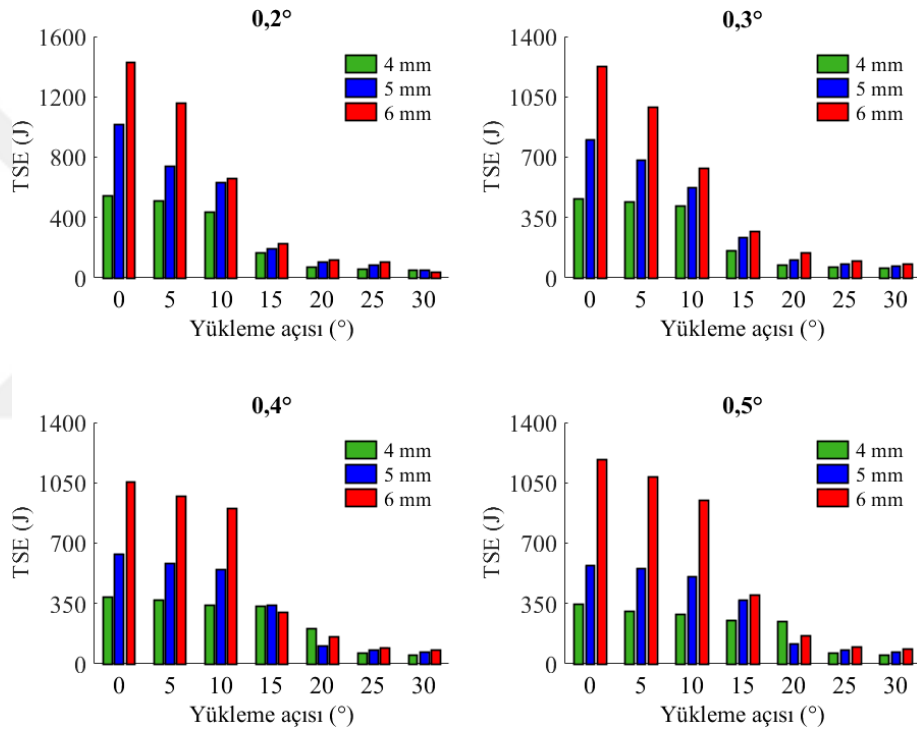
Yapı Tipi	Yükleme Açısı						
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
HMK Hibrit (0,2°)							
HMK Hibrit (0,3°)							
HMK Hibrit (0,4°)							
HMK Hibrit (0,5°)							
HMK Hibrit (0,6°)							

Şekil 5.17. HMK hibrit yapıların %50 ezilme boyundaki deformasyon şekilleri

5.3. Farklı Taban Çap Değerlerine Sahip D-Hibrit Yapıların Karşılaştırılması

Bundan önceki bölümlerde taban çap değeri sabit ve 5 mm olan hibrit yapıların farklı yükleme açılarındaki enerji sönümleme davranışları incelenmişti. Bu bölümde ise farklı taban çap değerine sahip yapıların enerji sönümleme performansları araştırılmıştır. Bu kapsamda üç farklı taban çap değeri (4 mm, 5 mm ve 6 mm), dört farklı tepe açısı ($0,2^\circ$; $0,3^\circ$; $0,4^\circ$ ve $0,5^\circ$) ve yedi farklı yükleme durumu ele (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° ve 30°) alınmıştır. Şekil 5.18'de farklı taban çap değerlerine ve tepe açılara sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarında TSE değerleri gösterilmiştir. Şekle genel olarak bakıldığında aynı tepe açısı değeri için artan yükleme açılarında tüm hibrit yapıların TSE değerlerinin azaldığı görülmektedir. Aynı yükleme açıları ele alındığında ise özellikle artan yükleme açılarında hibrit yapının tepe açısı arttıkça TSE miktarı da artmaktadır. Örneğin 4 mm taban çapına ve $0,5^\circ$ tepe açılı hibrit yapının 15° yükleme durumundaki TSE değeri $0,2^\circ$ tepe açılı hibrit yapının TSE değerinden oldukça fazladır. Bunun nedeni $0,2^\circ$ tepe açılı hibrit yapı 55 mm'ye kadar enerji sönümleyebilirken $0,5^\circ$ tepe açılı hibrit yapı 85 mm'ye kadar sönümleyebilmektedir. Aynı hibrit yapılar için şekle bakıldığında $0,2^\circ$ tepe açılı hibrit yapının kritik yükleme açısının 10° olduğu buna karşın $0,5^\circ$ tepe açılı hibrit yapının kritik yükleme açısının ise 20° olduğu görülmektedir. Benzer durumlar farklı taban çap değerine sahip yapılar içinde geçerlidir. Örneğin 5 mm taban çapına ve $0,3^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının kritik yükleme açısı 10° iken $0,5^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının kritik yükleme açısı 15° 'dir. Bu durum yapıların tepe açı değerleri arttıkça kritik yükleme açılarının da arttığını göstermektedir. Farklı taban çaplarına sahip hibrit yapıları kıyasladığımızda ise genel olarak 6 mm taban çapına sahip hibrit yapıların TSE değerleri diğer hibrit yapılara göre daha fazla olmaktadır. Tüp yapının dış boyutları sabit olduğundan dolayı eksenel yükleme durumu için 6 mm taban çapına sahip hibrit yapılar 4 ve 5 mm taban çapına sahip yapılara göre daha erken yoğunlaşmaktadır. Buna rağmen 6 mm taban çap değerine sahip hibrit yapı yoğunlaşma bölgesine girinceye kadar sönümlendiği enerji miktarları 4 ve 5 mm taban çaplarına sahip hibrit yapılara göre daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte artan yükleme açılarında bazı durumlar için 6 mm taban çap değerine sahip hibrit yapıların TSE değerleri daha düşük taban çap değerine sahip yapıların TSE değerlerinden daha az olabilmektedir. Örneğin 4 mm taban çap değerine ve $0,4^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının TSE değeri 6 mm taban çapına sahip yapının

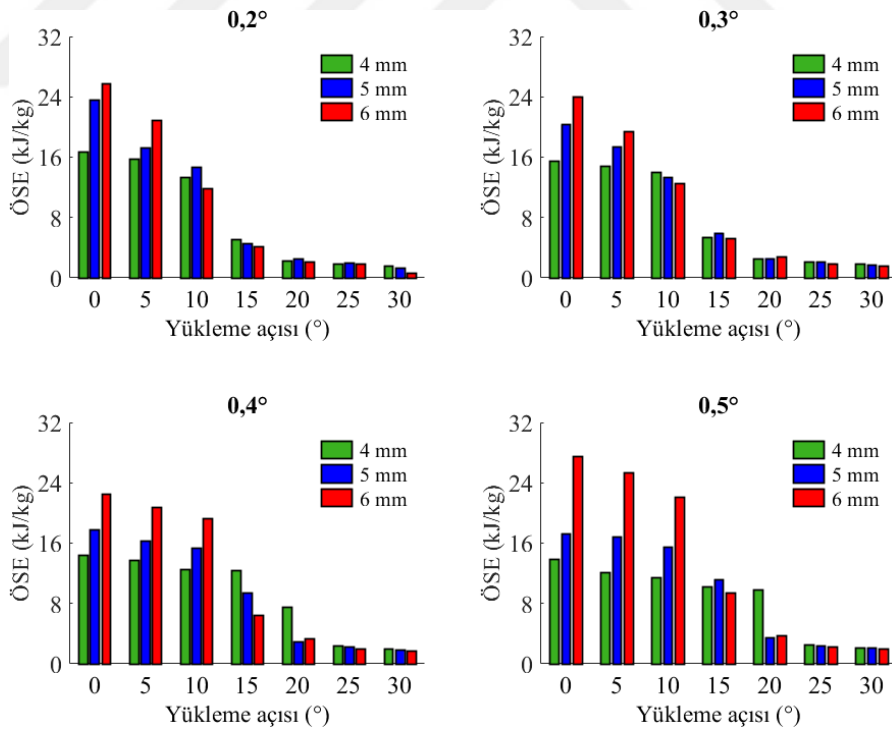
TSE değerinden daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi grafikten de görülebileceği gibi $0,4^\circ$ tepe açısına ve 6 mm taban çapına sahip hibrit yapının kritik yüklemeye açısı 10° iken, 4 mm taban çapına sahip hibrit yapının kritik yüklemeye açısı 15° olmasıdır. Bunun sonucu olarak 6 mm taban çapına sahip hibrit yapının TSE değeri 10° 'lik yüklemeye açısından sonra ani olarak düşüş gösterirken 4 mm taban çapına sahip hibrit yapının TSE değeri 15° 'den sonra düşüş göstermektedir. Bu durum 4 mm taban çapına sahip hibrit yapının uç kesitinin 6 mm taban çapına sahip hibrit yapının uç kesitine göre daha küçük olması ve dolayısıyla kolayca deforme olabilmesi ile ilgilidir.



Şekil 5.18. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açılara sahip hibrit yapıların artan yüklemeye açılarındaki TSE değerleri

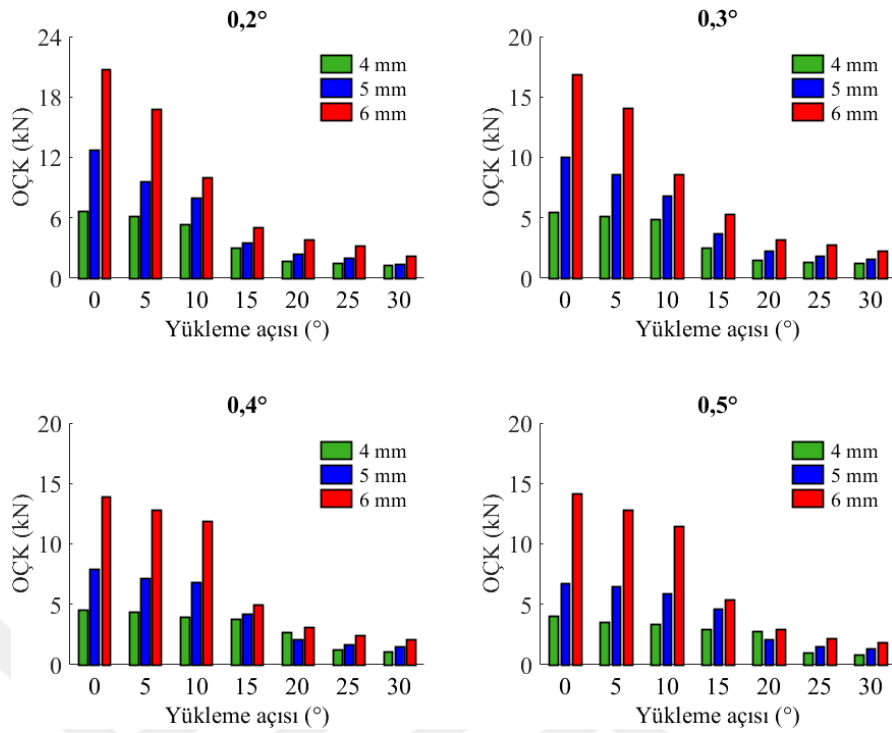
Sabit tüp uzunluğu için taban çap değeri arttıkça doğal olarak yapıların kütlelerinde de artış olmaktadır (Çizelge E3.2, E3.8 ve E3.9). Yapıların artan kütle miktarı ile sönmüledikleri enerji miktarı arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için ÖSE büyük önem arz etmektedir. Şekil 5.19'da farklı taban çap değerlerine ve tepe açılara sahip hibrit yapıların artan yüklemeye açılarındaki ÖSE değerleri gösterilmiştir. Şekil 5.19'da hibrit yapıların her bir taban çap değeri için yüklemeye açısı arttıkça ÖSE değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte kritik yüklemeye açısı değerine göre bazı

yapıların ÖSE değerlerinde ani düşüşler görülmektedir. Örneğin 4 mm taban çapına ve $0,2^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının kritik yükleme açısı değeri 10° iken $0,5^\circ$ tepe açılı yapının kritik yükleme açısı 20° 'dir. Farklı taban çaplarına sahip her bir hibrit yapının kritik yükleme açıları değişebilmekte ve dolayısıyla farklı açı değerlerindeki ÖSE değerleri ani düşüşler gösterebilmektedir. Kütlesi diğerlerinden daha fazla olan 6 mm taban çapına sahip hibrit yapılar kritik yükleme açısına daha erken ulaşmalarından dolayı bazı durumlar için daha düşük kesit alanlı 4 ve 5 mm taban çapına sahip hibrit yapılardan daha düşük ÖSE değerine sahip olabilmektedir. Örneğin 6 mm taban çapına ve $0,4^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının ÖSE değeri hem 4 mm hem de 5 mm taban çapına sahip hibrit yapılardan daha düşüktür. Bunun nedeni aynı tepe açısı için taban çap değeri daha düşük olan hibrit yapının uç kesit alanının da daha az olması nedeniyle kalın uca sahip yapılardan daha fazla deformasyon boyuna sahip olabilmesidir. Burada 4, 5 ve 6 mm taban çapına sahip hibrit yapıların deformasyon boyları sırasıyla yaklaşık 87, 80 ve 60 mm'dir.

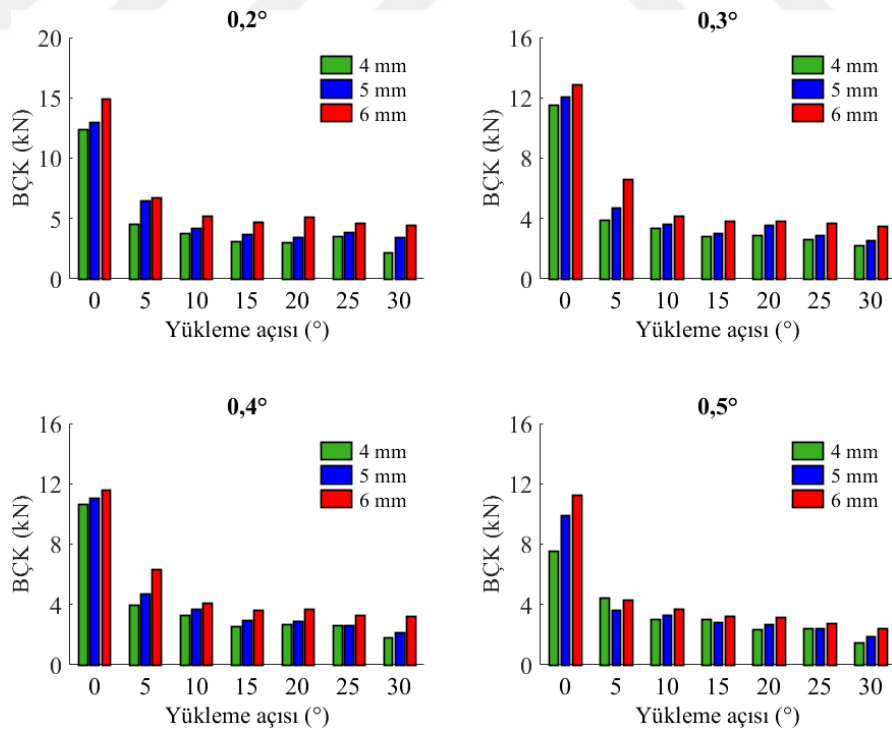


Şekil 5.19. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki ÖSE değerleri

Şekil 5.20’de farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki OÇK değerleri gösterilmiştir. Diğer grafiklerde olduğu gibi OÇK grafiklerinde de her bir hibrit yapı için artan yükleme açılarında OÇK değerleri azalmaktadır. Bunun başlıca nedeni yükleme açısının artmasıyla birlikte deformasyon boyunun azalması ile birlikte sönümlenen enerji miktarının azalmasıdır. Özellikle kritik yükleme açısının aşılmasıyla birlikte sönümlenen enerji miktarı da ani olarak düşmekte ve dolayısıyla OÇK değeri de ani düşüş göstermektedir. Aynı yükleme açı değeri için ise hibrit yapıların tepe açlarının artmasıyla birlikte sönümledikleri enerji miktarına bağlı olarak OÇK değerleri de genellikle azalmaktadır. Farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların her biri farklı deformasyon boylarına sahip olabilmektedir. Bu durum OÇK değerinin hesaplanmasında doğrudan ilişkilidir. Örneğin 6 mm taban çapına ve $0,2^\circ$ tepe açısına sahip hibrit yapının eksenel yükleme durumundaki ezilme boyu 68,7 mm iken 4 mm taban çapına sahip hibrit yapının ezilme boyu 82,4 mm’dir. Bunun nedeni 4 mm çap değerine sahip hibrit yapının uç çap değerinin 6 mm çap değerine sahip hibrit yapıya kıyasla oldukça az olması ve özellikle eksenel yükleme durumlarında kalın uçlu yapıların daha erken yoğunlaşmaya başlamasıdır. Bu duruma rağmen en fazla OÇK değerine sahip yapılar tüm tepe açıları ve yükleme durumları için 6 mm taban çapına sahip yapılar olduğu görülmüştür. Ancak bazı durumlarda 5 mm taban çap değerine sahip yapıların OÇK değerleri 4 mm taban çap değerine sahip hibrit yapıların OÇK değerlerine göre daha düşük olabilmektedir. Örneğin 20° yükleme durumundaki $0,5^\circ$ tepe açısına ve 4 mm taban çapına sahip hibrit yapıların OÇK değerleri, 5 mm taban çapına sahip hibrit yapıların OÇK değerlerine göre daha fazladır. Burada 4 mm taban çapına sahip hibrit yapının kritik yükleme açısı 20° iken 5 mm taban çapına sahip hibrit yapının kritik yükleme açısı 15° ’dir. Bu durum sönümledikleri enerji miktarları arasında önemli bir fark oluşturmaktadır.

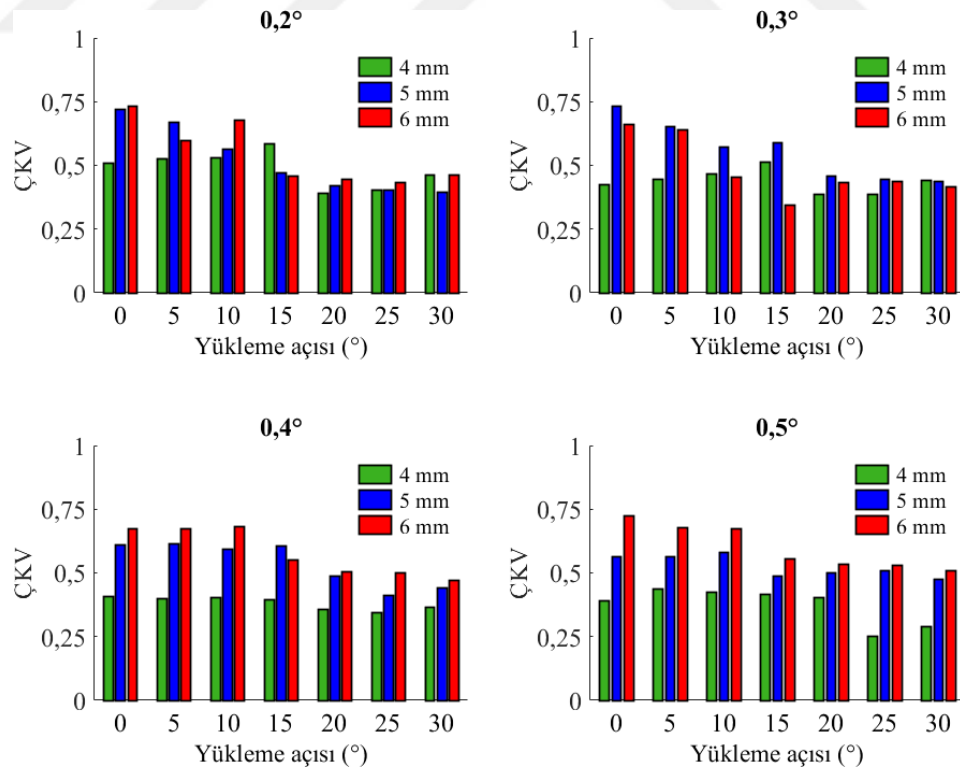


Şekil 5.20. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki OÇK değerleri

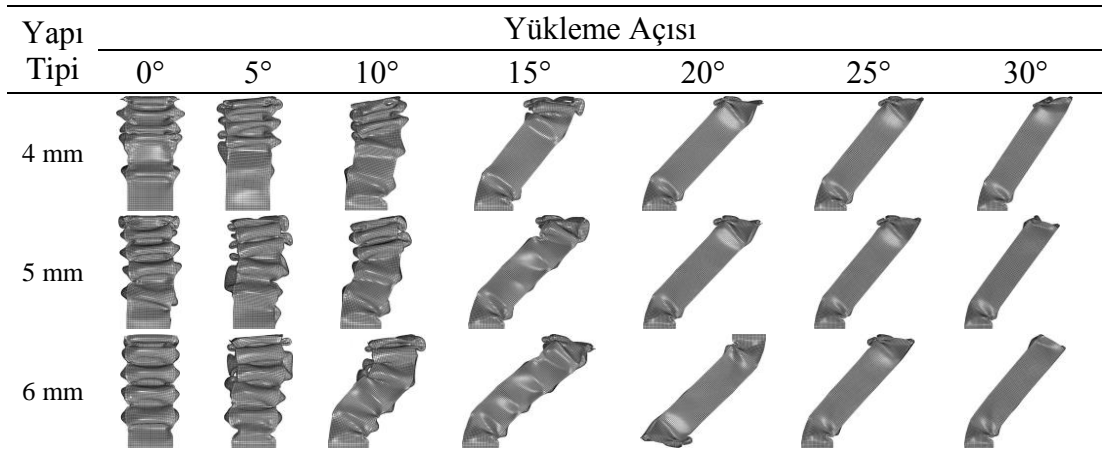


Şekil 5.21. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki BÇK değerleri

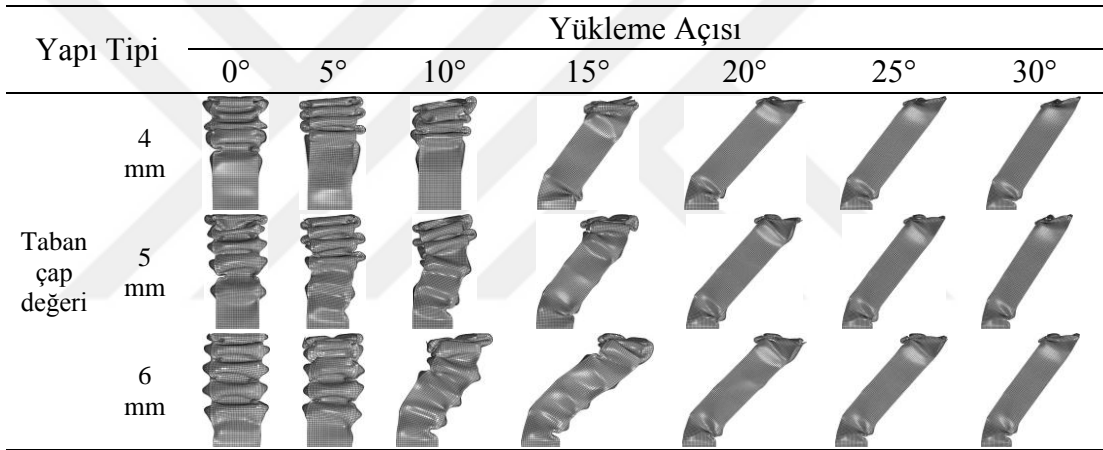
Şekil 5.21’de farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki BÇK değerleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en fazla BÇK değerleri eksenel yükleme durumunda görülürken eğik yükleme durumlarında ise BÇK değerleri eksenel yükleme durumuna göre oldukça düşüktür. Bununla birlikte yükleme açısı arttıkça BÇK değeri azalmaktadır. Kafes yapıların tepe açıları arttıkça uç kısımları incelmektedir. Bu noktada 4, 5 ve 6 mm taban çap değerine sahip hibrit yapıların uç çap değerleri sırasıyla 2,55; 3,55 ve 4,55 mm’dir. Uç çap değerleri de hibrit yapılardaki başlangıç çarpışma kuvvet değeri ile doğrudan ilişkilidir. Şekilden de görüldüğü gibi 6 mm taban çap değerine sahip hibrit yapıların BÇK değerleri 4 ve 5 mm taban çap değerine sahip hibrit yapılardan daha fazla olmaktadır. Şekil 5.22’de farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki ÇKV değerleri gösterilmiştir. ÇKV değerlerine bakıldığında genel olarak 0° yükleme durumundan artan yükleme durumlarına geçildikçe ÇKV değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum yükleme açısı arttıkça yapıların sönmüledikleri enerji miktarlarının düşmesi ile açıklanabilir.



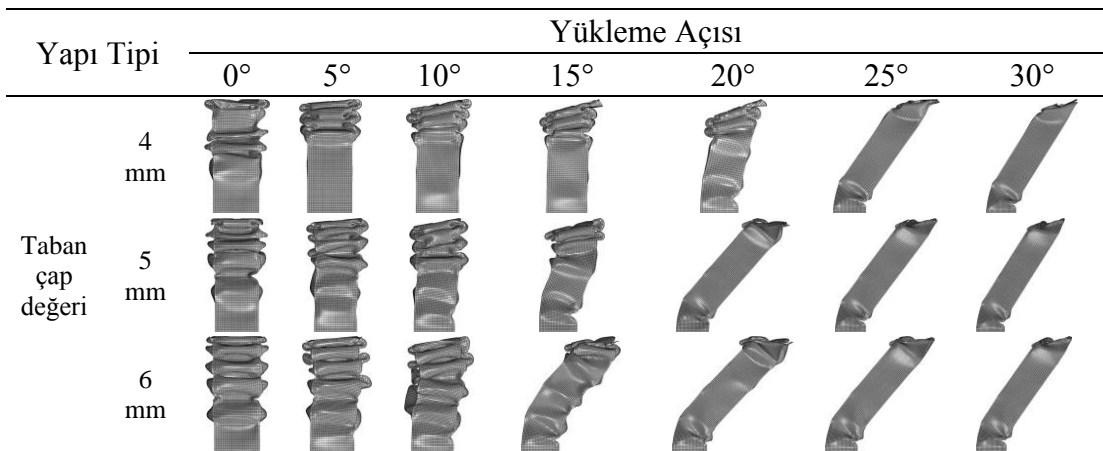
Şekil 5.22. Farklı taban çap değerlerine ve tepe açlarına sahip hibrit yapıların artan yükleme açılarındaki ÇKV değerleri
























Şekil 5.23. 0,2° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri



Şekil 5.24. 0,3° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri



Şekil 5.25. 0,4° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri

Yapı Tipi	Yükleme Açısı						
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
4 mm							
5 mm							
6 mm							

Şekil 5.26. 0,5° tepe açısına ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri

0,2°; 0,3°; 0,4° ve 0,5° tepe açılara ve farklı taban çap değerlerine sahip hibrit yapıların %50 ezilme boylarındaki deformasyon şekilleri sırasıyla Şekil 5.23-5.26'da gösterilmiştir. Deformasyon şekillerinden de görüldüğü gibi tüp yapının kapladığı hacim sabit olduğundan dolayı içerisine konulan kafes yapının hacmi arttıkça hibrit yapı özellikle aksel yüklemeye durumunda daha erken yoğunlaşmaktadır. Örneğin Şekil 5.23'teki aksel yüklemeye durumundaki 6 mm taban çapına sahip hibrit yapı %50 deformasyon boyunda yoğunlaşma bölgesine yakın olduğu gözlenirken, 4 mm taban çapına sahip hibrit yapı ise enerji sönmlemeye devam etmektedir. Eğik yüklemeye durumlarında da 0,2° tepe açısına sahip hibrit yapılar içerisinden taban çap değeri fazla olan yapının diğer yapılardan daha önce eğimli düzlem üzerinden kaymaya başladığı ve taban çap değeri küçük olan hibrit yapılara kıyasla enerji sönmleme performansının daha erken düştüğü görülmektedir. Örneğin 10° yüklemeye durumundaki 0,2° tepe açısına ve 6 mm taban çapına sahip hibrit yapı eğimli yüzey üzerinden kaymaya başlarken, 4 mm taban çapına sahip hibrit yapı enerji sönmlemeye devam etmektedir. Tüp yapı içerisindeki kafes yapının tepe açısı arttıkça hibrit yapıların kritik yüklemeye açısı da artmakta ve dolayısıyla hibrit yapılar daha fazla deformasyon boyuna ulaşabilmektedir. Örneğin 0,2° tepe açısına ve 4 mm taban çap değerine sahip hibrit yapının kritik yüklemeye açısı 10° iken, 0,4° tepe açısına sahip hibrit yapının kritik yüklemeye açısının 20° olduğu görülmektedir. Bu da aynı taban çap değerine sahip hibrit yapıların tepe açıları arttıkça daha uzun deformasyon boylarına kadar enerji sönmleyebilmektedir. Kritik yüklemeye açısı aynı tepe açısına ve farklı

taban çapları sahip hibrit yapılar arasında da farklılık göstermektedir. Örneğın 0,4° tepe açısına ve 4 mm taban çapına sahip hibrit yapının kritik yükleme açısı 20° iken, 5 ve 6 mm taban çapına sahip yapılarda ise bu aç 15° dir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kafes yapı dolgulu ince cidarlı tüplerin çarpışma davranışları doğrulanmış sonlu elemanlar modelleri kullanılarak aksenal ve eğik yükler altında incelenmiştir. İlk olarak doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş, çeşitli teknikler (kiriş ve katı eleman) denenmiş ve ilgili sonlu elemanlar modelleri doğrulanmıştır. Daha sonra, HMK ve HMK-Z kafes yapılarla güçlendirilmiş ince cidarlı tüplerin aksenal yükler altındaki enerji sönümlenme performansları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Burada içi boş tüp, HMK kafes yapı, HMK-Z kafes yapı, HMK hibrit ve HMK-Z hibrit yapı olmak üzere toplam beş farklı yapı dikkate alınmıştır. Önerilen yapıların kafes eleman kalınlıkları ve hücre sayıları ile ince cidarlı tüp yapıların duvar kalınlıkları dikkate alınarak aksenal yükleme altındaki yapıların çarpışma dayanımı performansları incelenmiştir. Son olarak, farklı tepe açılara sahip D-hibrit yapılar ile bu yapılara kütlece denk EK-hibrit yapılar tasarlanmış ve bu yapıların enerji sönümlenme performansları hem aksenal hem de eğik yükler altında incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı tepe açılara sahip D-kafes yapılar ve bu kafes yapılara kütlece denk EK-kafes yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapılar ince cidarlı tüplerin içerisine yerleştirilerek D-hibrit ve EK-hibrit tüpler elde edilmiştir. Beş farklı tepe açısı ele alınarak yedi farklı yükleme açısı altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ayrıca D-hibrit tüplerin enerji sönümlenme kapasiteleri, hibrit tüp bileşenleri olan tüp ve kafes yapıların enerji sönümlenme kapasitelerinin ayrı ayrı toplamları ile de karşılaştırılmıştır. Ek olarak bu bölümde farklı taban çap değerlerine sahip kafes yapıların enerji sönümlenme performansları incelenmiştir.

Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sunulmuştur.

- Hibrit yapılar oluşturmanın tüplerin enerji sönümlenme performanslarını arttırmada oldukça etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. Bunun temelde 2 nedeni bulunmaktadır. Birincisi, hibrit yapı oluşturmak yapıların global eğilme dirençlerini oldukça arttırmaktadır. İkincisi ise, tüp ve kafes yapı etkileşimleri deformasyon modlarını istenilen şekilde tetikleyerek tüplerin enerji

sönümleme performansları oldukça arttırmaktadır. Böylece uygun tüp ve kafes yapı parametrelerinin belirlenmesiyle birlikte oldukça umut vadeden sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

- Eksenel yükleme altındaki kafes yapıların hücre sayıları arttıkça taban alanları azalmakta ve bu durum eksenel yükleme altındaki yapıları global burkulmaya meyilli hale getirmektedir. Düşük hücre sayısına sahip hibrit tüplerde genellikle ezilme boyunca tamamen ilerlemeli burkulma modu gözlemlenirken, hücre sayısı arttıkça hem yerel burkulma hem de global eğilme modu görülmektedir. Özellikle 7 hücreli kafes yapıların deformasyon şekilleri incelendiğinde ise global eğilme davranışı nedeniyle yapıların enerji sönümleme performansının oldukça düştüğü görülmektedir. Bu durum kafes yapı hücre sayısının hibrit tüplerin enerji sönümleme performansları açısından oldukça önemli bir parametre olduğunu ortaya konmuştur.
- Düşük tüp kalınlıklarına (örneğin 0,5 mm) ve yüksek boy/en oranına sahip (örneğin 7 hücreli hibrit yapı) hibrit tüpler global eğilmeye uğrayarak enerji sönümleme performansları oldukça düşerken artan duvar kalınlıklarında bu durum giderilerek hibrit tüplerin daha fazla enerji sönümlemesi sağlanabilmektedir. Bu da tüp kalınlıkların hibrit tüplerin enerji sönümleme performansları dikkate alındığında oldukça önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.
- Eksenel yükleme altındaki hibrit tüplerin sönümlendiği enerji miktarı, hibrit tüpleri oluşturan tüp ve kafes yapı bileşenlerinin sönümledikleri enerji miktarlarından oldukça fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç, tüp ve kafes yapıların ilerleyen deformasyonlar sırasında burkulma ve eğilme davranışları açısından birbirlerine katkıda bulunarak hibrit tüplerin bileşenlerinden daha fazla enerji sönümleyebildiklerini göstermiştir.
- HMK ve HMK-Z kafes yapılar ele alındığında HMK-Z kafes yapıların dikey eleman bulundurmasından dolayı HMK kafes yapılara göre daha fazla enerji

sönümleyebildikleri sonucuna varılmıştır. Ancak bu kafes yapılar tüp yapıların içerisine konularak hibrit tüpler elde edildiğinde HMK-Z hibrit tüpün HMK hibrit tüpe göre enerji sönümleme parametreleri dikkate alındığında istenmeyen burkulmalardan dolayı beklenen düzeyde iyileşme gösteremediği görülmüştür.

- Eksenel yükleme altındaki kafes yapıların eleman kalınlıkları dikkate alındığında eleman kalınlıklarının da artması genellikle enerji sönümleme performansını olumlu etkilemektedir ancak bazı durumlarda 4 ve 5 mm eleman kalınlığına sahip yapıların global eğilme davranışı nedeniyle enerji sönümleme performanslarının oldukça düştüğü görülmüştür. Bu durum kafes eleman kalınlıklarının hibrit tüplerin enerji sönümleme davranışları açısından oldukça önemli bir parametre olduğu ortaya koymuştur.
- Eğik yükler altındaki D-hibrit tüpler ile EK-hibrit tüpler karşılaştırıldığı D-hibrit tüplerin enerji sönümleme performanslarının EK-hibrit tüplere göre oldukça iyi olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle BÇK değerleri ele alındığında tüm yükleme durumları için D-hibrit tüplerin BÇK değerlerinin EK-hibrit tüplere göre daha düşük olduğu görülmüş ve bu da D-hibrit tüplerin aynı kütleye sahip EK-hibrit tüplere göre daha üstün bir çarpışma dayanımı performansı sağlamaktadır.
- Eğik yükler altındaki hibrit yapılar incelendiğinde yükleme açısı arttıkça yapıların sönümledikleri enerji miktarlarının azaldığı ve özellikle kritik yükleme açıları aşıldığında yapıların enerji sönümleme performanslarının ciddi ölçüde düştüğü görülmüştür.
- Tepe açısı arttıkça hibrit tüplerin deformasyon boylarının arttığı görülmektedir. Yükleme açısına bağlı olarak düşük tepe açısına sahip hibrit tüpler eğik yüzey üzerinden kayarak daha az enerji sönümlerken yüksek tepe açısına sahip hibrit tüpler daha fazla deformasyon boyu sayesinde daha fazla enerji sönümleyebilmektedirler.

- Kafes elemanların taban çap değerleri incelendiğinde ise aynı tepe açısına sahip yapılar içerisinde taban çapı büyük olan yapının daha fazla enerji sönümlendiği görülmektedir. Bununla birlikte özellikle düşük tepe açısına ve yüksek taban alanına sahip hibrit tüpler artan yükleme açılarında düşük taban alanına sahip yapılara göre daha düşük ezilme boyu nedeniyle enerji sönümleme performansı açısından dezavantajlı duruma düşebilmektedir.

İleriki çalışmalarda çarpışma dayanımı uygulamalarında kullanılmak üzere önerilen HMK ve HMK-Z kafes yapılardan farklı olarak değişik topolojilere sahip kafes yapılar ince cidarlı tüplerin içerisine dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Çeşitli tüp ve kafes yapı parametreleri dikkate alınarak teorik modeller oluşturulabilir. Ayrıca daha küçük birim hücre boyutları ile birlikte yan yana ve üst üste çok sayıda kafes yapı oluşturularak bu yapıların çarpışma dayanımı performansları incelenebilir. Ek olarak tüp ve kafes yapı malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından farklı tipte malzemeler (titanyum vs.) ile birlikte bu yapıların verimlilikleri artırılabilir. Optimum enerji sönümleyici yapılar elde edebilmek adına derecelendirilmiş kafes yapılara uygun olarak ince cidarlı tüp yapılar da derecelendirilebilir. Ayrıca, özellikle eğik yükler altındaki başarılı performanslarından dolayı sıklıkla kullanılan konik tüplerin içerisine dolgu malzemesi olarak konik tüpe uygun tasarlanan kafes yapıların yerleştirilmesiyle elde edilecek hibrit yapıların çarpışma dayanım performansları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abdewi, E.F., Sulaiman, S., Hamouda, A.M.S., Mahdi, E., 2008. Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes. *Thin-Walled Struct.* 46, 320–332.
- Abramowicz, W., 2003. Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-Walled Struct.* 41, 91–107.
- Abramowicz, W., Jones, N., 1984. Dynamic axial crushing of circular tubes. *Int. J. Impact Eng.* 2, 263–281.
- Abramowicz, W., Jones, N., 1986. Dynamic progressive buckling of circular square tubes 4, 243–270.
- Ahmad, Z., Thambiratnam, D.P., 2009. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Comput. Struct.* 87, 186–197.
- Ahmad, Z., Thambiratnam, D.P., Tan, A.C.C., 2010. Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading. *Int. J. Impact Eng.* 37, 475–488.
- Al-Saedi, D.S.J., Masood, S.H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., Ponnusamy, P., 2018. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Mater. Des.* 144, 32–44.
- Al Galib, D., Limam, A., 2004. Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes, *Thin-Walled Structures*.
- Alexander, J.M., 1960. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Q. J. Mech. Appl. Math.* 13, 10–15.
- Alghamdi, A.A.A., 2001. Collapsible impact energy absorbers: An overview. *Thin-Walled Struct.* 39, 189–213.
- Alkhatib, S.E., Tarlochan, F., Eyvazian, A., 2017. Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes. *Eng. Struct.* 150, 674–692.
- An, X., Gao, Y., Fang, J., Sun, G., Li, Q., 2015. Crashworthiness design for foam-filled thin-walled structures with functionally lateral graded thickness sheets. *Thin-Walled Struct.* 91, 63–71.
- Ashby, M.F., 2006. The properties of foams and lattices. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* 364, 15–30.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., 2000. *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth–Heinemann,

Boston.

- Attia, M.S., Meguid, S.A., Nouraei, H., 2012. Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns. *Finite Elem. Anal. Des.* 61, 50–59.
- Azimi, M.B., Asgari, M., 2016. A new bi-tubular conical-circular structure for improving crushing behavior under axial and oblique impacts. *Int. J. Mech. Sci.* 105, 253–265.
- Babbage, J.M., Mallick, P.K., 2005. Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum-composite hybrid tubes. *Compos. Struct.* 70, 177–184.
- Balaji, G., Annamalai, K., 2018. Crushing response of square aluminium column filled with carbon fibre tubes and aluminium honeycomb. *Thin-Walled Struct.* 132, 667–681.
- Banhart, J., 2001. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Prog. Mater. Sci.* 46, 559–632.
- Baroutaji, A., Arjunan, A., Niknejad, A., Tran, T., Olabi, A.-G., 2019. Application of Cellular Material in Crashworthiness Applications: An Overview, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier Ltd.
- Baroutaji, A., Gilchrist, M.D., Smyth, D., Olabi, A.G., 2015. Analysis and optimization of sandwich tubes energy absorbers under lateral loading. *Int. J. Impact Eng.* 82, 74–88.
- Baroutaji, A., Sajjia, M., Olabi, A.G., 2017. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Struct.* 118, 137–163.
- Baykasoğlu, A., Baykasoğlu, C., 2017. Multiple objective crashworthiness optimization of circular tubes with functionally graded thickness via artificial neural networks and genetic algorithms. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 231, 2005–2016.
- Baykasoğlu, C., Baykasoğlu, A., Tunay Çetin, M., 2019. A comparative study on crashworthiness of thin-walled tubes with functionally graded thickness under oblique impact loadings. *Int. J. Crashworthiness* 24, 453–471.
- Baykasoglu, C., Cetin, M.T., 2015. Energy absorption of circular aluminium tubes with functionally graded thickness under axial impact loading. *Int. J. Crashworthiness* 20, 95–106.
- Baykasoğlu, C., Sünbuloğlu, E., Bozdağ, S.E., Aruk, F., Toprak, T., Mugan, A., 2011. Railroad passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *Int. J. Crashworthiness* 16, 319–329.

- Christensen, R.M., 2000. Mechanics of cellular and other low-density materials. *Int. J. Solids Struct.* 37, 93–104.
- Contuzzi, N., Campanelli, S.L., Casavola, C., Lamberti, L., Meccanica, D., Management, M., Bari, P., Japigia, V., 2013. Manufacturing and Characterization of 18Ni Marage 300 Lattice Components by Selective Laser Melting 3451–3468.
- Crupi, V., Kara, E., Epasto, G., Guglielmino, E., Aykul, H., 2017. Static behavior of lattice structures produced via direct metal laser sintering technology. *Mater. Des.* 135, 246–256.
- Cui, L., Kiernan, S., Gilchrist, M.D., 2009. Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials. *Mater. Sci. Eng. A* 507, 215–225.
- Cundy, H., Rolett, A.P., 1961. *Mathematical models*. Oxford:Clarendon Press.
- Dai, M., Ying, L., Ma, H., Chen, S., Hu, P., 2019. Comparative study on thin-walled structures with function graded strength and tapered angle. *Int. J. Crashworthiness* 24, 257–271.
- Dassault Systems Inc, 2014. *Abaqus User's Manuel Ver. 6.13*. Lowell, MA.
- Deshpande, V.S., Fleck, N.A., 2001. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending. *Int. J. Solids Struct.* 38, 6275–6305.
- Deshpande, V.S., Fleck, N.A., Ashby, M.F., 2001. Effective properties of the octet-truss lattice material 49, 1747–1769.
- Djamaluddin, F., Abdullah, S., Ariffin, A.K., Nopiah, Z.M., 2015. Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions. *Thin-Walled Struct.* 87, 1–11.
- Dong, G., Tang, Y., Zhao, Y.F., 2017. A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. *J. Mech. Des.* 139, 100906.
- Doyoyo, M., Hu, J.W., 2006. Multi-axial failure of metallic strut-lattice materials composed of short and slender struts. *Int. J. Solids Struct.* 43, 6115–6139.
- Duarte, I., Krstulović-Opara, L., Vesenjak, M., 2018. Axial crush behaviour of the aluminium alloy in-situ foam filled tubes with very low wall thickness. *Compos. Struct.* 192, 184–192.
- Eyvazian, A., K. Habibi, M., Hamouda, A.M., Hedayati, R., 2014. Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes. *Mater. Des.* 54, 1028–1038.
- Fang, J., Gao, Y., An, X., Sun, G., Chen, J., Li, Q., 2016. Design of transversely-

graded foam and wall thickness structures for crashworthiness criteria. *Compos. Part B Eng.* 92, 338–349.

- Fischer, T., 2007. Rationalising bubble trusses for batch production. *Autom. Constr.* 16, 45–53.
- Fleck, N.A., Deshpande, V.S., Ashby, M.F., 2010. Micro-architected materials: Past, present and future. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 466, 2495–2516.
- Gao, Q., Wang, L., Wang, Y., Guo, F., Zhang, Z., 2016. Optimization of foam-filled double ellipse tubes under multiple loading cases. *Adv. Eng. Softw.* 99, 27–35.
- Gautam, R., Idapalapati, S., Feih, S., 2018. Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling. *Mater. Des.* 137, 266–275.
- Gibson, L.J., Ashby, M.F., 1997. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Grzebieta, R.H., 1990. An alternative method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to an axial crush load. *Thin-Walled Struct.* 9, 61–89.
- Guillow, S.R., Lu, G., Grzebieta, R.H., 2001. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 43, 2103–2123.
- Guler, M.A., Cerit, M.E., Bayram, B., Gerçeker, B., Karakaya, E., 2010. The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading. *Int. J. Crashworthiness* 15, 377–390.
- Gümrük, R., 2012. Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Gümrük, R., Mazlum, U., Mines, R.A.W., 2015. Compressive mechanical behaviours of hybrid composite materials based on micro lattice structure and rubberlike materials. *Rubber Chem. Technol.* 88, 147–162.
- Gümrük, R., Mines, R.A.W., 2013. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *Int. J. Mech. Sci.* 68, 125–139.
- Gümrük, R., Mines, R.A.W., Karadeniz, S., 2013. Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Mater. Sci. Eng. A* 586, 392–406.
- Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., 2000. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Int. J. Impact Eng.* 24, 475–507.
- Hayes, A.M., Wang, A., Dempsey, B.M., McDowell, D.L., 2004. Mechanics of linear

cellular alloys. *Mech. Mater.* 36, 691–713.

- Heimbs, S., Strobl, F., Middendorf, P., Guimard, J.M., 2010. Composite crash absorber for aircraft fuselage applications. *WIT Trans. Built Environ.* 113, 3–14.
- Hosseini-Tehrani, P., Pirmohammad, S., 2007. Collapse study of thin-walled polygonal section columns subjected to oblique loads. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* 221, 801–810.
- Hou, S., Han, X., Sun, G., Long, S., Li, W., Yang, X., Li, Q., 2011. Multiobjective optimization for tapered circular tubes. *Thin-Walled Struct.* 49, 855–863.
- Hu, D., Wang, Yongzhen, Song, B., Wang, Yifan, 2018. Energy absorption characteristics of a foam-filled tri-tube under axial quasi-static loading: experiment and numerical simulation. *Int. J. Crashworthiness* 23, 417–432.
- Huang, H., Hu, S., Abdel-Aty, M., 2014. Indexing crash worthiness and crash aggressivity by major car brands. *Saf. Sci.* 62, 339–347.
- Huang, H., Siddiqui, C., Abdel-Aty, M., 2011. Indexing crash worthiness and crash aggressivity by vehicle type. *Accid. Anal. Prev.* 43, 1364–1370.
- Hussein, R.D., Ruan, D., Lu, G., Guillow, S., Yoon, J.W., 2017. Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb. *Thin-Walled Struct.* 110, 140–154.
- Hutchinson, R.G., Fleck, N.A., 2006. The structural performance of the periodic truss. *J. Mech. Phys. Solids* 54, 756–782.
- Jin, M., Hu, Y., Wang, B., 2015. Compressive and bending behaviours of wood-based two-dimensional lattice truss core sandwich structures. *Compos. Struct.* 124, 337–344.
- Jones, N., 1989. *Structural Impact*. Cambridge University Press.
- Josupeit, S., Delfs, P., Menge, D., Schmid, H., 2016. Manufacturability and Mechanical Characterization of Laser Sintered Lattice Structures. In: *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication*. pp. 2077–2086.
- Karagiozova, D., Alves, M., 2008. Dynamic Elastic-Plastic Buckling of Structural Elements : A Review. *Appl. Mech. Rev.* 61, 1–26.
- Karagiozova, D., Nurick, G.N., Chung Kim Yuen, S., 2005. Energy absorption of aluminium alloy circular and square tubes under an axial explosive load. *Thin-Walled Struct.* 43, 956–982.
- Karamooz Ravari, M.R., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., Rezaei, R., 2014.

- Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *Int. J. Mech. Sci.* 88, 154–161.
- Kusner, R., Sullivan, J.M., 1996. Comparing the Weaire-Phelan equal-volume foam to Kelvin's foam. *Forma* 11, 233–242.
- Labeas, G.N., Sunaric, M.M., 2010. Investigation on the static response and failure process of metallic open lattice cellular structures. *Strain* 46, 195–204.
- Langseth, M., Hopperstad, O.S., Hanssen, A.G., 1998. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. *Thin-Walled Struct.* 32, 127–150.
- Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., Qian, M., Easton, M., Brandt, M., 2016. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Mater. Des.* 98, 344–357.
- Li, A., 2019. Optimization of composite structures for crashworthiness. Delft University of Technology, PhD Thesis.
- Li, G., Xu, F., Sun, G., Li, Q., 2015a. A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading. *Int. J. Impact Eng.* 77, 68–83.
- Li, G., Zhang, Z., Sun, G., Huang, X., Li, Q., 2015b. Comparison of functionally-graded structures under multiple loading angles. *Thin-Walled Struct.* 94, 334–347.
- Li, M., Li, J., Barbat, S., Baccouche, R., Lu, W., 2018. Enhanced filler-tube wall interaction in liquid nanofoam-filled thin-walled tubes. *Compos. Struct.* 200, 120–126.
- Li, P., 2016. Simulating the dynamics deformation behaviour of selective laser melted stainless steel microlattice structures. In: *Proc. of the 2nd Intl. Conf. on Progress in Additive Manufacturing*. Singapur, pp. 469–474.
- Li, P., Wang, Z., Petrinic, N., Siviour, C.R., 2014. Deformation behaviour of stainless steel microlattice structures by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A* 614, 116–121.
- Li, Z., Chen, R., Lu, F., 2018. Comparative analysis of crashworthiness of empty and foam-filled thin-walled tubes. *Thin-Walled Struct.* 124, 343–349.
- Lijun, X., Weidong, S., 2018. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments. *Int. J. Impact Eng.* 111, 255–272.
- Limmahakhun, S., Oloyede, A., Sitthiseripratip, K., Xiao, Y., Yan, C., 2017. Stiffness and strength tailoring of cobalt chromium graded cellular structures for stress-

- shielding reduction. *Mater. Des.* 114, 633–641.
- Liu, Y., Wang, L., 2015. Enhanced stiffness, strength and energy absorption for co-continuous composites with liquid filler. *Compos. Struct.* 128, 274–283.
- Liu, Z., Hao, W., Xie, J., Lu, J., Huang, R., Wang, Z., 2015. Axial-impact buckling modes and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes with sinusoidal patterns. *Thin-Walled Struct.* 94, 410–423.
- Lorato, A., Innocenti, P., Scarpa, F., Alderson, A., Alderson, K.L., Zied, K.M., Ravirala, N., Miller, W., Smith, C.W., Evans, K.E., 2010. The transverse elastic properties of chiral honeycombs. *Compos. Sci. Technol.* 70, 1057–1063.
- Lu, G., Yu, T., 2003. *Energy absorption of structures and materials*. Elsevier.
- Lucci, F., Della Torre, A., von Rickenbach, J., Montenegro, G., Poulidakos, D., Dimopoulos Eggenschwiler, P., 2014. Performance of randomized Kelvin cell structures as catalytic substrates: Mass-transfer based analysis. *Chem. Eng. Sci.* 112, 143–151.
- Luxner, M.H., Stampfl, J., Pettermann, H.E., 2005. Finite element modeling concepts and linear analyses of 3D regular open cell structures. *J. Mater. Sci.* 40, 5859–5866.
- Maloney, K.J., Fink, K.D., Schaedler, T.A., Kolodziejska, J.A., Jacobsen, A.J., Roper, C.S., 2012. Multifunctional heat exchangers derived from three-dimensional micro-lattice structures. *Int. J. Heat Mass Transf.* 55, 2486–2493.
- Mamalis, A.G., Robinson, M., Manolakes, D.E., Demosthenous, G.A., Ioannidis, M.B., Carruthers, J., 1997. Crashworthy capability of composite material structures. *Compos. Struct.* 37, 109–134.
- Marsolek, J., Reimerdes, H.G., 2004. Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns. *Int. J. Impact Eng.* 30, 1209–1223.
- Marzbanrad, J., Ebrahimi, M.R., 2011. Multi-Objective Optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks. *Thin-Walled Struct.* 49, 1605–1615.
- Maskery, I., Aboulkhair, N.T., Aremu, A.O., Tuck, C.J., Ashcroft, I.A., Wildman, R.D., Hague, R.J.M., 2016. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si₁₀-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A* 670, 264–274.
- Maskery, I., Aremu, A.O., Simonelli, M., Tuck, C., Wildman, R.D., Ashcroft, I.A., Hague, R.J.M., 2015. Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Selectively Laser Melted Parts with Body-Centred-Cubic Lattices of Varying cell size. *Exp.*

Mech. 1–12.

- Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Hague, R., 2017. An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures. *J. Cell. Plast.* 53, 109–133.
- Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A.O., Panesar, A., Williams, C.B., Tuck, C.J., Wildman, R.D., Ashcroft, I.A., Hague, R.J.M., 2018. Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer (Guildf)*. 152, 62–71.
- Mckown, S., Shen, Y., Brookes, W.K., Sutcliffe, C.J., Cantwell, W.J., Langdon, G.S., 2008. The quasi-static and blast loading response of lattice structures 35, 795–810.
- Meran, A.P., Baykasoglu, C., Mukan, A., 2016. Development of a design for a crash energy management system for use in a railway passenger car. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J Rail Rapid Transit* 230, 206–219.
- Mines, R.A.W., 2008. On the characterisation of foam and micro-lattice materials used in sandwich construction. *Strain* 44, 71–83.
- Mines, R.A.W., Tsopanos, S., Shen, Y., Hasan, R., McKown, S.T., 2013. Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores. *Int. J. Impact Eng.* 60, 120–132.
- Nagel, G., 2005. *Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes*. Queensland University of Technology.
- Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P., 2004a. Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading. *Int. J. Crashworthiness* 9, 389–399.
- Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P., 2004b. A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 46, 201–216.
- Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P., 2006. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. *Int. J. Impact Eng.* 32, 1595–1620.
- Nikkhah, H., Baroutaji, A., Olabi, A.G., 2019. Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading. *Thin-Walled Struct.* 142, 132–148.
- Olabi, A.G., Morris, E., Hashmi, M.S.J., 2007. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Thin-Walled Struct.* 45, 706–726.

- Ozdemir, Z., Hernandez-Nava, E., Tyas, A., Warren, J.A., Fay, S.D., Goodall, R., Todd, I., Askes, H., 2016. Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments. *Int. J. Impact Eng.* 89, 49–61.
- Pang, T., Li, Y., Kang, H., Sun, G., Fang, J., Li, Q., 2017. On functionally-graded crashworthy shape of conical structures for multiple load cases. *J. Mech. Sci. Technol.* 31, 2861–2873.
- Paz, J., Díaz, J., Romera, L., Costas, M., 2014. Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of GFRP honeycomb-filled energy absorption devices. *Finite Elem. Anal. Des.* 91, 30–39.
- Rashed, M.G., Ashraf, M., Mines, R.A.W., Hazell, P.J., 2016. Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Mater. Des.* 95, 518–533.
- Ren, Y., Xiang, J., 2014. Crashworthiness uncertainty analysis of typical civil aircraft based on Box-Behnken method. *Chinese J. Aeronaut.* 27, 550–557.
- Reyes, A., Hopperstad, O.S., Langseth, M., 2004. Aluminum foam-filled extrusions Subjected to oblique loading: experimental and numerical study. *Int. J. Solids Struct.* 41, 1645–1675.
- Santosa, S.P., Wierzbicki, T., Hanssen, A.G., Langseth, M., 2000. Experimental and numerical studies of foam-filled sections. *Int. J. Impact Eng.* 24, 509–534.
- Shakeri, M., Mirzaeifar, R., Salehghaffari, S., 2007. New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes under axial impact load. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 221, 869–885.
- Singace, A.A., Elsobky, H., 1996. Further experimental investigation on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. *Int. J. Solids Struct.* 33, 3517–3538.
- Singace, A.A., Elsobky, H., Reddy, T.Y., 1995. On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes. *Int. J. Solids Struct.* 32, 3589–3602.
- Smith, M., Guan, Z., Cantwell, W.J., 2013. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *Int. J. Mech. Sci.* 67, 28–41.
- Song, J., Guo, F., 2013. A comparative study on the windowed and multi-cell square tubes under axial and oblique loading. *Thin-Walled Struct.* 66, 9–14.
- Song, J., Zhou, Y., Guo, F., 2013. A relationship between progressive collapse and initial buckling for tubular structures under axial loading. *Int. J. Mech. Sci.* 75, 200–211.

- Sun, C.N., Choy, S.Y., Leong, K.F., Wei, J., 2016. Design and Fabrication of Functionally Graded Components by Selective Laser Melting. In: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Sun, F., Lai, C., Fan, H., 2016. In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures. *Jmade* 100, 280–290.
- Sun, G., Li, G., Hou, S., Zhou, S., Li, W., Li, Q., 2010. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures. *Mater. Sci. Eng. A* 527, 1911–1919.
- Sun, G., Wang, Z., Yu, H., Gong, Z., Li, Q., 2019. Experimental and numerical investigation into the crashworthiness of metal-foam-composite hybrid structures. *Compos. Struct.* 209, 535–547.
- Sun, G., Xu, F., Li, G., Li, Q., 2014. Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness. *Int. J. Impact Eng.* 64, 62–74.
- Sun, Y., Li, Q.M., 2018. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling. *Int. J. Impact Eng.* 112, 74–115.
- Sun, Y., Li, Y., Zhao, C., Wang, M., Lu, W., Qiao, Y., 2018. Crushing of circular steel tubes filled with nanoporous-materials-functionalized liquid. *Int. J. Damage Mech.* 27, 439–450.
- Sun, Y., Xu, J., Zhao, C., Penghui Li, Yibing Li, 2014. Exploring a New Candidate of Energy Absorber: Thin-walled Tube Structures Filled with Nanoporous Material Functionalized Liquid. In: IRCOBI Conference 2014. pp. 578–586.
- Taherishargh, M., Vesenjask, M., Belova, I. V., Krstulović-Opara, L., Murch, G.E., Fiedler, T., 2016. In situ manufacturing and mechanical properties of syntactic foam filled tubes. *Mater. Des.* 99, 356–368.
- Tamburrino, F., Graziosi, S., Bordegoni, M., 2018. The Design Process of Additively Manufactured Mesoscale Lattice Structures: A Review. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 18, 040801.
- Tang, Z., Liu, S., Zhang, Z., 2013. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. *Thin-Walled Struct.* 62, 75–84.
- Tripathy, L., Lu, W.F., 2017. Evaluation of axially-crushed cellular truss structures for crashworthiness. *Int. J. Crashworthiness* 8265, 1–17.
- Tsopanos, S., Mines, R. a. W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W.J., Brooks, W., Sutcliffe, C.J., 2010. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice

Structures. *J. Manuf. Sci. Eng.* 132, 041011.

- Turner, A.J., Al Rifaie, M., Mian, A., Srinivasan, R., 2018. Low-Velocity Impact Behavior of Sandwich Structures with Additively Manufactured Polymer Lattice Cores. *J. Mater. Eng. Perform.* 27, 2505–2512.
- Ullah, I., Brandt, M., Feih, S., 2016. Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures. *JMADE* 92, 937–948.
- Ushijima, K., Cantwell, W., Mines, R., Tsopanos, S., Smith, M., 2011. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *J. Sandw. Struct. Mater.* 13, 303–329.
- Ushijima, K., Cantwell, W.J., Chen, D.H., 2013. Prediction of the mechanical properties of micro-lattice structures subjected to multi-axial loading. *Int. J. Mech. Sci.* 68, 47–55.
- Usta, F., Ertaş, O.F., Atalp, A., Türkmen, H.S., Kazancı, Z., Scarpa, F., 2019. Impact behavior of triggered and non-triggered crash tubes with auxetic lattices. *Multiscale Multidiscip. Model. Exp. Des.* 2, 119–127.
- Vasiliev, V. V., Barynin, V.A., Razin, A.F., 2012. Anisogrid composite lattice structures - Development and aerospace applications. *Compos. Struct.* 94, 1117–1127.
- Vasiliev, V. V., Razin, A.F., 2006. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. *Compos. Struct.* 76, 182–189.
- Vasiliev, V.V., Barynin, V.A., Rasin, A.F., 2001. Anisogrid lattice structures – survey of development and application. *Compos. Struct.* 54, 361–370.
- Wadley, B.H.N.G., 2002. Cellular Metals Manufacturing. *Adv. Eng. Mater.* 4, 726–733.
- Wang, J., Evans, A.G., Dharmasena, K., Wadley, H.N.G., 2003. On the performance of truss panels with Kagome cores. *Int. J. Solids Struct.* 40, 6981–6988.
- Wei, K., He, R., Cheng, X., Pei, Y., Zhang, R., Fang, D., 2015. Fabrication and heat transfer characteristics of C/SiC pyramidal core lattice sandwich panel. *Appl. Therm. Eng.* 81, 10–17.
- Wierzbicki, T., Abramowicz, W., 1983. On the crushing mechanics of thin-walled structures. *J. Appl. Mech. Trans. ASME* 50(4a), 727–734.
- Wierzbicki, T., Bhat, S.U., Abramowicz, W., Brodtkin, D., 1992. Alexander revisited — A two folding elements model of progressive crushing of tubes. *Int. J. Solids Struct.* 29, 3269–3288.

- Wu, S., Li, G., Sun, G., Wu, X., Li, Q., 2016. Crashworthiness analysis and optimization of sinusoidal corrugation tube. *Thin-Walled Struct.* 105, 121–134.
- Xianfei, Z., Yunwen, F., Xiaofeng, X., Qiang, Q., 2017. Evaluate the crashworthiness response of an aircraft fuselage section with luggage contained in the cargo hold. *Int. J. Crashworthiness* 22, 347–364.
- Xiong, J., Mines, R., Ghosh, R., Vaziri, A., Ma, L., Ohrndorf, A., Christ, H.J., Wu, L., 2015. Advanced Micro-Lattice Materials. *Adv. Eng. Mater.* 17, 1253–1264.
- Xu, F., Zhang, X., Zhang, H., 2018. A review on functionally graded structures and materials for energy absorption. *Eng. Struct.* 171, 309–325.
- Xu, X., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, F., Wang, C.H., 2018. Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns. *Compos. Struct.* 194, 36–48.
- Yin, H., Wen, G., Fang, H., Qing, Q., Kong, X., Xiao, J., Liu, Z., 2014. Multiobjective crashworthiness optimization design of functionally graded foam-filled tapered tube based on dynamic ensemble metamodel. *Mater. Des.* 55, 747–757.
- Yin, H., Wen, G., Hou, S., Chen, K., 2011. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes. *Mater. Des.* 32, 4449–4460.
- Ying, S., Sun, C., Fai, K., Wei, J., 2017. Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Mater. Des.* 131, 112–120.
- Yuen, S.C.K., Nurick, G.N., 2008. The Energy-Absorbing Characteristics of Tubular Structures With Geometric and Material Modifications: An Overview. *Appl. Mech. Rev.* 61, 020802.Çi
- Zarei, H.R., Kröger, M., 2008. Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *Thin-Walled Struct.* 46, 214–221.
- Zhang, X., Zhang, H., 2015. Relative merits of conical tubes with graded thickness subjected to oblique impact loads. *Int. J. Mech. Sci.* 98, 111–125.
- Zhang, Yuwu, Liu, T., Ren, H., Maskery, I., Ashcroft, I., 2018. Dynamic compressive response of additively manufactured AlSi10Mg alloy hierarchical honeycomb structures. *Compos. Struct.* 195, 45–59.
- Zhang, Y., Lu, M., Sun, G., Li, G., Li, Q., 2015. On functionally graded composite structures for crashworthiness. *Compos. Struct.* 132, 393–405.
- Zhang, Yong, Wang, J., Wang, C., Zeng, Y., Chen, T., 2018. Crashworthiness of bionic fractal hierarchical structures. *Mater. Des.* 158, 147–159.

- Zhao, M., Zhang, D.Z., Liu, F., Li, Z., Ma, Z., Ren, Z., 2020. Mechanical and energy absorption characteristics of additively manufactured functionally graded sheet lattice structures with minimal surfaces. *Int. J. Mech. Sci.* 167, 105262.
- Zhu, G., Li, S., Sun, G., Li, G., Li, Q., 2016. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases. *Thin-Walled Struct.* 109, 377–389.
- Zhu, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G., Li, Q., 2017. On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes. *Compos. Struct.* 175, 58–69.
- Zhu, G., Sun, G., Yu, H., Li, S., Li, Q., 2018. Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading. *Int. J. Mech. Sci.* 135, 458–483.



EKLER



EK-1. Kafes yapı için örnek Python kodu

```
# -*- coding: mbcs -*-
from part import *
from material import *
from section import *
from assembly import *
from step import *
from interaction import *
from load import *
from mesh import *
from optimization import *
from job import *
from sketch import *
from visualization import *
from connectorBehavior import *
mdb.models['Model-1'].Part(dimensionality=THREE_D, name='Part-1', type=DEFORMABLE_BODY)
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].ReferencePoint(point=(1.0,0.0,0.0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,0,0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,0,-16.5))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,16.5,0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,16.5,-16.5))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,33,0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,33,-16.5))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,49.5,0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,49.5,-16.5))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,66,0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(0,66,-16.5))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(16.5,0,0))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].DatumPointByCoordinate(coords=(16.5,0,-16.5))
-----
```

```

mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].WirePolyLine(mergeWire=OFF,meshable=ON,
points=((mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[2],
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[22]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[3],
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[22]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[4],mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[22]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[4],mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[23]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[5],mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[22]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[5],mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[23]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[6],mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[23]),
(mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[6],mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[24]),
-----
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].datums[25])))
mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].Set(edges=mdb.models['Model-1'].parts['Part-1'].edges.getSequenceFromMask(['#ff'],),,
name='Wire-1-Set-1')
mdb.models['Model-1'].parts.changeKey(fromName='Part-1', toName='BCC

```

EK-2. Eksenel ve eğik yükler altındaki çeşitli yapıların çarpışma dayanım parametreleri

Çizelge E2.1. Eksenel yükleme durumundaki içi boş tüp yapılar için çarpışma dayanım parametreleri

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
Boş Tüp	3	–	0,5	261 343	97	26,20	9,97	2,69	17,78	0,15
Boş Tüp	4	–	0,5	243 307	98	19,80	12,29	2,48	13,27	0,19
Boş Tüp	5	–	0,5	235 789	97	15,90	14,83	2,43	11,29	0,22
Boş Tüp	6	–	0,5	208 788	95	13,30	15,70	2,20	8,96	0,25
Boş Tüp	7	–	0,5	201 858	95	11,40	17,71	2,12	7,71	0,28
Boş Tüp	3	–	1	955 555	103	53,10	18,00	9,28	36,52	0,25
Boş Tüp	4	–	1	855 420	101	40,20	21,28	8,47	27,67	0,31
Boş Tüp	5	–	1	828 651	97	32,40	25,58	8,54	22,73	0,38
Boş Tüp	6	–	1	771 195	98	27,20	28,35	7,87	20,42	0,39
Boş Tüp	7	–	1	732 856	96	23,50	31,19	7,63	19,49	0,39
Boş Tüp	3	–	1,5	1 791 760	98	80,70	22,20	18,28	54,68	0,33
Boş Tüp	4	–	1,5	1 587 920	97	61,20	25,95	16,37	47,01	0,35
Boş Tüp	5	–	1,5	1 706 770	97	49,60	34,41	17,60	36,68	0,48
Boş Tüp	6	–	1,5	1 588 930	97	41,80	38,01	16,38	30,13	0,54
Boş Tüp	7	–	1,5	1 548 860	96	36,20	42,79	16,13	28,26	0,57

Çizelge E2.2. Eksenel yükleme durumundaki HMK kafes yapılar için çarpışma dayanım parametreleri

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK	3	1	–	3 251,32	111	1,72	1,89	0,03	0,30	0,10
HMK	3	2	–	23 286,1	97,5	6,73	3,46	0,24	1,46	0,16
HMK	3	3	–	83 055,8	93	14,80	5,61	0,89	4,04	0,22
HMK	3	4	–	254 906	93	25,70	9,92	2,74	16,23	0,17
HMK	3	5	–	428 641	86	39,10	10,96	4,98	16,76	0,30
HMK	4	1	–	3 864,23	108,5	1,71	2,26	0,04	0,25	0,14
HMK	4	2	–	32 122,1	97	6,63	4,84	0,33	1,64	0,20
HMK	4	3	–	127 297	92	14,40	8,84	1,38	6,10	0,23
HMK	4	4	–	254 141	82	24,80	10,25	3,10	6,90	0,45
HMK	4	5	–	607 072	80	37,50	16,19	7,59	31,27	0,24
HMK	5	1	–	4 564,88	104	1,70	2,69	0,04	0,31	0,14
HMK	5	2	–	41 438,2	95	6,52	6,36	0,44	1,61	0,27
HMK	5	3	–	146 929	95	14,10	10,42	1,55	3,07	0,50
HMK	5	4	–	262 244	70	24	10,93	3,75	8,49	0,44
HMK	5	5	–	436 162	60	35,80	12,18	7,27	9,19	0,79
HMK	6	1	–	1 801,61	60	1,68	1,07	0,03	0,10	0,31
HMK	6	2	–	17 490,1	60	6,42	2,72	0,29	0,45	0,65
HMK	6	3	–	60 182,9	50	13,70	4,39	1,20	1,73	0,70
HMK	6	4	–	157 809	50	23,10	6,83	3,16	4,41	0,72
HMK	6	5	–	408 509	50	34,20	11,94	8,17	10,46	0,78
HMK	7	1	–	1 859,33	60	1,67	1,11	0,03	0,09	0,34
HMK	7	2	–	17 304,4	50	6,31	2,74	0,35	0,55	0,63
HMK	7	3	–	72 921,8	50	13,40	5,44	1,46	2,22	0,66
HMK	7	4	–	175 562	50	22,30	7,87	3,51	5,35	0,66
HMK	7	5	–	364 346	40	32,50	11,21	9,11	13,75	0,66

Çizelge E2.3. Eksenel yükleme durumundaki HMK-Z kafes yapılar için çarpışma dayanım parametreleri

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK-Z	3	1	–	4 777,69	110	1,97	2,43	0,04	0,30	0,15
HMK-Z	3	2	–	44 459,3	104	7,67	5,80	0,43	1,47	0,29
HMK-Z	3	3	–	169 498	100	16,80	10,09	1,69	5,05	0,34
HMK-Z	3	4	–	334 063	89	29,10	11,48	3,75	8,40	0,45
HMK-Z	3	5	–	769 772	88	44,20	17,42	8,75	17,99	0,49
HMK-Z	4	1	–	6 766,57	110	1,95	3,47	0,06	0,34	0,18
HMK-Z	4	2	–	60 914,3	101	7,54	8,08	0,60	1,96	0,31
HMK-Z	4	3	–	225 318	92	16,40	13,74	2,45	5,67	0,43
HMK-Z	4	4	–	436 644	90	28	15,59	4,85	10,50	0,46
HMK-Z	4	5	–	1 050 960	86	42,10	24,96	12,22	18,46	0,66
HMK-Z	5	1	–	7 431,78	102,5	1,93	3,85	0,07	0,24	0,30
HMK-Z	5	2	–	79 795	98	7,41	10,77	0,81	2,16	0,38
HMK-Z	5	3	–	271 639	94	16,90	17,08	2,89	5,89	0,49
HMK-Z	5	4	–	480 747	70	27	17,81	6,87	8,19	0,84
HMK-Z	5	5	–	814 612	55	40,10	20,31	14,81	18,38	0,81
HMK-Z	6	1	–	9 135,67	100	1,92	4,76	0,09	0,32	0,29
HMK-Z	6	2	–	40 673,2	60	7,27	5,59	0,68	1,32	0,51
HMK-Z	6	3	–	103 519,7	55	15,50	6,68	1,88	2,18	0,87
HMK-Z	6	4	–	414 516	45	25,90	16,00	9,21	10,54	0,87
HMK-Z	6	5	–	597 231	45	38	15,72	13,27	20,58	0,64
HMK-Z	7	1	–	13 107	110	1,90	6,90	0,12	0,77	0,15
HMK-Z	7	2	–	67 476,1	65	7,14	9,45	1,04	1,61	0,64
HMK-Z	7	3	–	196 786	60	15,00	13,12	3,28	5,05	0,65
HMK-Z	7	4	–	451 453	55	24,80	18,20	8,21	11,29	0,73
HMK-Z	7	5	–	626 953	50	35,90	17,46	12,54	22,12	0,57

Çizelge E2.4. Eksenel yükleme durumundaki HMK hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK Hibrit	3	1	0,5	306 374	105	27,92	10,97	2,92	16,29	0,18
HMK Hibrit	3	2	0,5	332 227	93	32,93	10,09	3,57	17,65	0,20
HMK Hibrit	3	3	0,5	440 008	86,5	41,00	10,73	5,09	17,37	0,29
HMK Hibrit	3	4	0,5	566 120	86,5	51,90	10,91	6,54	17,54	0,37
HMK Hibrit	3	5	0,5	759 705	84	65,30	11,63	9,04	27,04	0,33
HMK Hibrit	4	1	0,5	218 315	97	21,51	10,15	2,25	13,01	0,17
HMK Hibrit	4	2	0,5	356 228	95	26,43	13,48	3,75	12,91	0,29
HMK Hibrit	4	3	0,5	539 551	92,5	34,20	15,78	5,83	31,46	0,19
HMK Hibrit	4	4	0,5	1 040 930	90	44,60	23,34	11,57	73,95	0,16
HMK Hibrit	4	5	0,5	1 706 180	85	57,30	29,78	20,07	98,42	0,20
HMK Hibrit	5	1	0,5	217 973	97	17,60	12,38	2,25	10,14	0,22
HMK Hibrit	5	2	0,5	300 629	90	22,42	13,41	3,34	10,18	0,33
HMK Hibrit	5	3	0,5	466 088	85	30,00	15,54	5,48	20,99	0,26
HMK Hibrit	5	4	0,5	899 397	85	39,90	22,54	10,58	32,86	0,32
HMK Hibrit	5	5	0,5	1 360 330	75	51,70	26,31	18,14	64,09	0,28
HMK Hibrit	6	1	0,5	200 007	95	28,11	7,12	2,11	7,22	0,29
HMK Hibrit	6	2	0,5	275 210	84	19,72	13,96	3,28	9,05	0,36
HMK Hibrit	6	3	0,5	302 318	65	27,00	11,20	4,65	8,73	0,53
HMK Hibrit	6	4	0,5	483 849	60	36,40	13,29	8,06	10,20	0,79
HMK Hibrit	6	5	0,5	812 026	60	47,50	17,10	13,53	17,05	0,79
HMK Hibrit	7	1	0,5	181 136	92	13,07	13,86	1,97	7,86	0,25
HMK Hibrit	7	2	0,5	261 405	80	17,71	14,76	3,27	7,11	0,46
HMK Hibrit	7	3	0,5	305 658	70	24,80	12,32	4,37	7,72	0,57
HMK Hibrit	7	4	0,5	526 486	70	33,70	15,62	7,52	10,21	0,74
HMK Hibrit	7	5	0,5	808 969	60	43,90	18,43	13,48	18,43	0,73

Çizelge E2.4. Eksenel yükleme durumundaki HMK hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri (devamı)

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK Hibrit	3	1	1	711 483	96	54,82	12,98	7,41	28,56	0,26
HMK Hibrit	3	2	1	835 095	95	59,83	13,96	8,79	35,95	0,24
HMK Hibrit	3	3	1	1 040 990	92	67,90	15,33	11,32	36,22	0,31
HMK Hibrit	3	4	1	1 184 010	88	78,80	15,03	13,45	35,94	0,37
HMK Hibrit	3	5	1	1 230 620	78	92,20	13,35	15,78	36,04	0,44
HMK Hibrit	4	1	1	716 302	94	41,91	17,09	7,62	25,26	0,30
HMK Hibrit	4	2	1	726 494	89	46,83	15,51	8,16	26,88	0,30
HMK Hibrit	4	3	1	865 724	86	54,60	15,86	10,07	27,36	0,37
HMK Hibrit	4	4	1	1 108 070	81	65,00	17,05	13,68	27,99	0,49
HMK Hibrit	4	5	1	1 254 220	72	77,70	16,14	17,42	27,65	0,63
HMK Hibrit	5	1	1	647 190	94	34,10	18,98	6,89	19,23	0,36
HMK Hibrit	5	2	1	777 669	90	38,92	19,98	8,64	21,97	0,39
HMK Hibrit	5	3	1	857 795	83	46,50	18,45	10,33	22,10	0,47
HMK Hibrit	5	4	1	1 063 570	73	56,40	18,86	14,57	22,50	0,65
HMK Hibrit	5	5	1	1 333 640	67	68,20	19,55	19,91	29,55	0,67
HMK Hibrit	6	1	1	619 441	93	28,88	21,45	6,66	15,46	0,43
HMK Hibrit	6	2	1	743 245	86	33,62	22,11	8,64	18,25	0,47
HMK Hibrit	6	3	1	904 231	80	40,90	22,11	11,30	18,60	0,61
HMK Hibrit	6	4	1	1 073 800	67	50,30	21,35	16,03	20,34	0,79
HMK Hibrit	6	5	1	1 486 400	60,5	61,40	24,21	24,57	27,35	0,90
HMK Hibrit	7	1	1	599 354	92	25,17	23,81	6,51	14,24	0,46
HMK Hibrit	7	2	1	699 631	85	29,81	23,47	8,23	11,69	0,70
HMK Hibrit	7	3	1	1 046 150	80	36,90	28,35	13,08	17,72	0,74
HMK Hibrit	7	4	1	1 155 160	67	45,80	25,22	17,24	24,48	0,70
HMK Hibrit	7	5	1	1 217 350	60	56,00	21,74	20,29	25,77	0,79

Çizelge E2.4. Eksenel yükleme durumundaki HMK hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri (devamı)

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK Hibrit	3	1	1,5	1 702 440	101	82,42	20,66	16,86	62,11	0,27
HMK Hibrit	3	2	1,5	1 608 170	96	87,43	18,39	16,75	50,47	0,33
HMK Hibrit	3	3	1,5	1 647 800	90,5	95,50	17,25	18,21	47,44	0,38
HMK Hibrit	3	4	1,5	2 148 550	89	106,40	20,19	24,14	54,86	0,44
HMK Hibrit	3	5	1,5	2 362 470	83	119,80	19,72	28,46	54,62	0,52
HMK Hibrit	4	1	1,5	1 374 370	93	62,91	21,85	14,78	41,08	0,36
HMK Hibrit	4	2	1,5	1 454 230	89	67,83	21,44	16,34	36,40	0,45
HMK Hibrit	4	3	1,5	1 561 260	86	75,60	20,65	18,15	37,19	0,49
HMK Hibrit	4	4	1,5	1 809 180	81	86,00	21,04	22,34	42,38	0,53
HMK Hibrit	4	5	1,5	2 029 090	73	98,70	20,56	27,80	43,78	0,63
HMK Hibrit	5	1	1,5	1 269 350	94	51,30	24,74	13,50	36,87	0,37
HMK Hibrit	5	2	1,5	1 472 370	91	56,12	26,24	16,18	31,21	0,52
HMK Hibrit	5	3	1,5	1 475 850	84	63,70	23,17	17,57	31,38	0,56
HMK Hibrit	5	4	1,5	1 745 190	75	73,60	23,71	23,27	36,76	0,63
HMK Hibrit	5	5	1,5	1 994 390	67	85,40	23,35	29,77	38,72	0,77
HMK Hibrit	6	1	1,5	1 290 510	94	43,48	29,68	13,73	29,93	0,46
HMK Hibrit	6	2	1,5	1 427 050	90	48,22	29,59	15,86	26,45	0,60
HMK Hibrit	6	3	1,5	1 584 840	84	55,50	28,56	18,87	27,19	0,69
HMK Hibrit	6	4	1,5	1 726 310	71	64,90	26,60	24,31	32,91	0,74
HMK Hibrit	6	5	1,5	2 038 080	60	76,00	26,82	33,97	36,02	0,94
HMK Hibrit	7	1	1,5	1 236 140	92	37,87	32,64	13,44	33,34	0,40
HMK Hibrit	7	2	1,5	1 322 330	88	42,51	31,11	15,03	26,51	0,57
HMK Hibrit	7	3	1,5	1 619 060	85	49,60	32,64	19,05	28,39	0,67
HMK Hibrit	7	4	1,5	2 004 840	70	58,50	34,27	28,64	31,49	0,91
HMK Hibrit	7	5	1,5	2 408 910	70	68,70	35,06	34,41	40,34	0,85

Çizelge E2.5. Eksenel yükleme durumundaki HMK-Z hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri

Hücre tipi	L/a oranı	Kafes eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK-Z Hibrit	3	1	0,5	346 615	109	28,17	12,30	3,18	19,53	0,16
HMK-Z Hibrit	3	2	0,5	423 557	105,5	33,87	12,51	4,01	23,86	0,17
HMK-Z Hibrit	3	3	0,5	601 921	102	43,00	14,00	5,90	25,89	0,23
HMK-Z Hibrit	3	4	0,5	1 156 870	101	55,30	20,92	11,45	74,77	0,15
HMK-Z Hibrit	3	5	0,5	1 824 980	101	70,40	25,92	18,07	119,26	0,15
HMK-Z Hibrit	4	1	0,5	192 211	100	21,75	8,84	1,92	9,37	0,21
HMK-Z Hibrit	4	2	0,5	355 276	99	27,34	12,99	3,59	12,11	0,30
HMK-Z Hibrit	4	3	0,5	756 545	100	36,20	20,90	7,57	49,10	0,15
HMK-Z Hibrit	4	4	0,5	1 413 010	95	47,80	29,56	14,87	77,46	0,19
HMK-Z Hibrit	4	5	0,5	2 060 190	92	61,90	33,28	22,39	82,75	0,27
HMK-Z Hibrit	5	1	0,5	241 500	106	17,83	13,54	2,28	12,41	0,18
HMK-Z Hibrit	5	2	0,5	317 451	95	23,31	13,62	3,34	9,48	0,35
HMK-Z Hibrit	5	3	0,5	735 266	94	31,80	23,12	7,82	34,03	0,23
HMK-Z Hibrit	5	4	0,5	860 069	94	42,90	20,05	9,15	30,75	0,30
HMK-Z Hibrit	5	5	0,5	1 260 310	65	56,00	22,51	19,39	51,10	0,38
HMK-Z Hibrit	6	1	0,5	270 220	107	15,22	17,75	2,53	13,63	0,19
HMK-Z Hibrit	6	2	0,5	411 455	104	20,57	20,00	3,96	18,41	0,21
HMK-Z Hibrit	6	3	0,5	669 639	78	28,80	23,25	8,59	18,76	0,46
HMK-Z Hibrit	6	4	0,5	960 824	75	39,20	24,51	12,81	14,15	0,91
HMK-Z Hibrit	6	5	0,5	1 399 960	63	51,30	27,29	22,22	25,65	0,87
HMK-Z Hibrit	7	1	0,5	126 961	80	13,30	9,55	1,59	5,16	0,31
HMK-Z Hibrit	7	2	0,5	274 417	80	18,54	14,80	3,43	7,12	0,48
HMK-Z Hibrit	7	3	0,5	389 679	70	26,40	14,76	5,57	8,75	0,64
HMK-Z Hibrit	7	4	0,5	654 862	60	36,20	18,09	10,91	15,86	0,69
HMK-Z Hibrit	7	5	0,5	1 149 330	60	47,30	24,30	19,16	27,28	0,70

Çizelge E2.5. Eksenel yükleme durumundaki HMK-Z hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri (devamı)

Hücre tipi	L/a oranı	Hücresel eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK-Z Hibrit	3	1	1	800 052	107	55,07	14,53	7,48	26,95	0,28
HMK-Z Hibrit	3	2	1	900 035	103	60,77	14,81	8,74	29,76	0,29
HMK-Z Hibrit	3	3	1	1 049 530	98	69,90	15,01	10,71	32,57	0,33
HMK-Z Hibrit	3	4	1	1 377 520	93	82,20	16,76	14,81	33,95	0,44
HMK-Z Hibrit	3	5	1	1 460 730	84	97,30	15,01	17,39	40,15	0,43
HMK-Z Hibrit	4	1	1	751 207	105	42,15	17,82	7,15	22,32	0,32
HMK-Z Hibrit	4	2	1	781 520	97,5	47,74	16,37	8,02	23,57	0,34
HMK-Z Hibrit	4	3	1	1 031 270	93	56,60	18,22	11,09	22,59	0,49
HMK-Z Hibrit	4	4	1	1 242 100	83	68,20	18,21	14,97	28,72	0,52
HMK-Z Hibrit	4	5	1	1 820 100	77,5	82,30	22,12	23,49	31,74	0,74
HMK-Z Hibrit	5	1	1	760 445	106	34,33	22,15	7,17	17,77	0,40
HMK-Z Hibrit	5	2	1	908 768	101	39,81	22,83	9,00	18,68	0,48
HMK-Z Hibrit	5	3	1	1 059 370	88,5	48,30	21,93	11,97	19,60	0,61
HMK-Z Hibrit	5	4	1	1 254 580	80	59,40	21,12	15,68	22,49	0,70
HMK-Z Hibrit	5	5	1	1 793 700	75	72,50	24,74	23,92	27,55	0,87
HMK-Z Hibrit	6	1	1	564 332	95	29,12	19,38	5,94	15,74	0,38
HMK-Z Hibrit	6	2	1	727 451	91	34,47	21,10	7,99	16,63	0,48
HMK-Z Hibrit	6	3	1	762 594	80	42,70	17,86	9,53	17,93	0,53
HMK-Z Hibrit	6	4	1	1 230 250	71	53,10	23,17	17,33	21,79	0,80
HMK-Z Hibrit	6	5	1	1 767 410	66	65,20	27,11	26,78	33,73	0,79
HMK-Z Hibrit	7	1	1	554 446	98	25,40	21,83	5,66	19,44	0,29
HMK-Z Hibrit	7	2	1	675 963	86	30,64	22,06	7,86	14,23	0,55
HMK-Z Hibrit	7	3	1	835 810	75	38,50	21,71	11,14	17,10	0,65
HMK-Z Hibrit	7	4	1	1 056 113	70	48,30	21,87	15,09	21,16	0,71
HMK-Z Hibrit	7	5	1	1 622 780	65	59,40	27,32	24,97	34,58	0,72

Çizelge E2.5. Eksenel yükleme durumundaki HMK-Z hibrit tüpler için çarpışma dayanım parametreleri (devamı)

Hücre tipi	L/a oranı	Hücresel eleman çapı (mm)	Tüp kalınlığı (mm)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
HMK-Z Hibrit	3	1	1,5	1 524 370	103	82,67	18,44	14,80	44,58	0,33
HMK-Z Hibrit	3	2	1,5	1 489 110	96	88,37	16,85	15,51	47,56	0,33
HMK-Z Hibrit	3	3	1,5	1 634 040	91	97,50	16,76	17,96	49,59	0,36
HMK-Z Hibrit	3	4	1,5	1 957 500	89	109,80	17,83	21,99	52,03	0,42
HMK-Z Hibrit	3	5	1,5	2 148 920	84	124,90	17,21	25,58	54,67	0,47
HMK-Z Hibrit	4	1	1,5	1 203 070	94	63,15	19,05	12,80	35,32	0,36
HMK-Z Hibrit	4	2	1,5	1 276 110	90	68,74	18,56	14,18	38,00	0,37
HMK-Z Hibrit	4	3	1,5	1 465 910	88	77,60	18,89	16,66	38,64	0,43
HMK-Z Hibrit	4	4	1,5	1 632 640	79	89,20	18,30	20,67	40,22	0,51
HMK-Z Hibrit	4	5	1,5	2 281 380	76	103,30	22,08	30,02	44,21	0,68
HMK-Z Hibrit	5	1	1,5	1 116 820	93	51,53	21,67	12,01	28,18	0,43
HMK-Z Hibrit	5	2	1,5	1 208 670	90	57,01	21,20	13,43	31,38	0,43
HMK-Z Hibrit	5	3	1,5	1 581 800	87	65,50	24,15	18,18	32,45	0,56
HMK-Z Hibrit	5	4	1,5	1 687 280	79	76,60	22,03	21,36	33,95	0,63
HMK-Z Hibrit	5	5	1,5	2 929 740	76	89,70	32,66	38,55	39,27	0,98
HMK-Z Hibrit	6	1	1,5	1 110 290	93	43,72	25,40	11,94	26,29	0,45
HMK-Z Hibrit	6	2	1,5	1 200 670	89	49,07	24,47	13,49	25,10	0,54
HMK-Z Hibrit	6	3	1,5	1 244 950	82	57,30	21,73	15,18	28,97	0,52
HMK-Z Hibrit	6	4	1,5	2 164 870	74	67,70	31,98	29,26	30,57	0,96
HMK-Z Hibrit	6	5	1,5	2 413 920	70	79,80	30,25	34,48	41,54	0,83
HMK-Z Hibrit	7	1	1,5	1 046 800	95	38,10	27,48	11,02	31,43	0,35
HMK-Z Hibrit	7	2	1,5	1 259 010	90	43,34	29,05	13,99	28,35	0,49
HMK-Z Hibrit	7	3	1,5	1 667 970	80	51,20	32,58	20,85	31,32	0,67
HMK-Z Hibrit	7	4	1,5	2 045 310	75	61,00	33,53	27,27	34,25	0,80
HMK-Z Hibrit	7	5	1,5	2 405 130	65	72,10	33,36	37,00	45,11	0,82

Çizelge E3.1. Eğik yükleme durumundaki EK-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri

Hücre tipi	L/a oranı	Denk tepe açısı (°)	Tüp kalınlığı (mm)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	BÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇK V
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	0	898 647	79,44	43,10	20,85	11,31	16,41	16,41	0,69
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	5	579 458	76,13	43,10	13,44	7,61	8,36	13,14	0,58
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	10	349 273	78,60	43,10	8,10	4,44	7,98	8,36	0,53
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	15	135 014	53,80	43,10	3,13	2,51	5,03	7,23	0,35
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	20	107 151	44,71	43,10	2,49	2,40	4,49	6,06	0,40
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	25	92 553,6	42,41	43,10	2,15	2,18	4,69	5,66	0,39
EK-Hibrit	5	0,2	0,5	4,29	4,29	30	45 471,7	40,19	43,10	1,06	1,13	4,14	4,48	0,25
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	0	700 770	78,25	39,40	17,79	8,96	13,69	16,16	0,55
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	5	567 928	79,46	39,40	14,41	7,15	7,34	12,70	0,56
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	10	306 726	77,53	39,40	7,78	3,96	7,20	7,40	0,53
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	15	131 002	62,91	39,40	3,32	2,08	4,40	6,31	0,33
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	20	95 595,9	44,71	39,40	2,43	2,14	4,24	5,34	0,40
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	25	88 442,4	44,76	39,40	2,24	1,98	4,31	4,80	0,41
EK-Hibrit	5	0,3	0,5	3,96	3,96	30	41 717,9	41,36	39,40	1,06	1,01	3,96	3,96	0,25
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	0	627 290	80,95	35,90	17,47	7,75	13,39	15,05	0,52
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	5	568 213	80,89	35,90	15,83	7,02	6,40	12,13	0,58
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	10	298 424	79,64	35,90	8,31	3,75	6,46	6,70	0,56
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	15	136 305	80,24	35,90	3,80	1,70	3,66	5,57	0,30
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	20	89 211,4	50,42	35,90	2,48	1,77	3,80	4,74	0,37
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	25	78 920,1	48,18	35,90	2,20	1,64	4,02	4,02	0,41
EK-Hibrit	5	0,4	0,5	3,64	3,64	30	43 339,4	44,82	35,90	1,21	0,97	3,68	3,68	0,26
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	0	557 544	83,16	32,90	16,95	6,70	10,82	14,44	0,46
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	5	491 278	80,98	32,90	14,93	6,07	4,82	14,02	0,43
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	10	252 944	85,67	32,90	7,69	2,95	3,84	5,97	0,49
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	15	127 776	83,41	32,90	3,88	1,53	3,53	5,07	0,30
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	20	83 380,8	54,95	32,90	2,53	1,52	3,63	4,33	0,35
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	25	73 481,8	51,64	32,90	2,23	1,42	3,80	3,80	0,37
EK-Hibrit	5	0,5	0,5	3,32	3,32	30	42 240,3	51,73	32,90	1,28	0,82	3,40	3,40	0,24

Çizelge E3.1. Eğik yükleme durumundaki EK-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (devamı)

Hücre tipi	L/a oranı	Denk tepe açısı (°)	Tüp kalınlığı (mm)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	BÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	0	500 703	84,32	30,40	16,47	5,94	13,55	13,55	0,44
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	5	437 478	83,29	30,40	14,39	5,25	4,96	10,42	0,50
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	10	171 741	86,95	30,40	5,65	1,98	4,03	5,70	0,35
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	15	124 528	88,35	30,40	4,10	1,41	3,37	5,57	0,25
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	20	102 962	88,35	30,40	3,39	1,17	3,45	3,97	0,29
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	25	72 595,4	60,78	30,40	2,39	1,19	3,51	3,51	0,34
EK-Hibrit	5	0,6	0,5	3,04	3,04	30	43 034,7	57,39	30,40	1,42	0,75	3,25	3,25	0,23

Çizelge E3.2. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (5 mm kafes eleman taban çapı için)

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Tüp kalınlığı (mm)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	BÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	0	1 019 930	79,78	43,10	23,66	12,78	13,03	17,77	0,72
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	5	742 474	77,18	43,10	17,23	9,62	6,47	14,37	0,67
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	10	635 715	79,47	43,10	14,75	8,00	4,20	14,14	0,57
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	15	195 089	55,04	43,10	4,53	3,54	3,74	7,48	0,47
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	20	108 235	44,86	43,10	2,51	2,41	3,50	5,71	0,42
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	25	88 270,2	42,55	43,10	2,05	2,07	3,85	5,13	0,40
D-Hibrit	5	0,2	0,5	5	3,55	30	55 461,9	40,24	43,10	1,29	1,38	3,43	3,48	0,40
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	0	801 094	79,74	39,40	20,33	10,05	12,11	13,66	0,74
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	5	687 020	79,57	39,40	17,44	8,63	4,72	13,17	0,66
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	10	527 262	77,60	39,40	13,38	6,79	3,61	11,83	0,57
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	15	236 547	63,17	39,40	6,00	3,74	3,04	6,35	0,59
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	20	103 605	44,82	39,40	2,63	2,31	3,56	5,02	0,46
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	25	83 768,6	44,77	39,40	2,13	1,87	2,88	4,20	0,45
D-Hibrit	5	0,3	0,5	5	2,82	30	68 909,1	42,47	39,40	1,75	1,62	2,56	3,70	0,44
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	0	640 747	80,90	35,90	17,85	7,92	11,06	12,94	0,61
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	5	585 222	81,20	35,90	16,30	7,21	4,71	11,67	0,62
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	10	551 114	80,16	35,90	15,35	6,88	3,70	11,57	0,59
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	15	339 703	80,25	35,90	9,46	4,23	2,99	6,96	0,61
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	20	104 783	50,67	35,90	2,92	2,07	2,94	4,23	0,49
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	25	80 264,5	48,31	35,90	2,24	1,66	2,63	4,00	0,42
D-Hibrit	5	0,4	0,5	5	2,10	30	68 852,4	45,44	35,90	1,92	1,52	2,17	3,42	0,44
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	0	570 146	84,82	32,90	17,33	6,72	10,89	11,89	0,57
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	5	556 548	85,59	32,90	16,92	6,50	3,62	11,53	0,56
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	10	510 046	85,89	32,90	15,50	5,94	3,34	10,20	0,58
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	15	369 929	80,29	32,90	11,24	4,61	2,83	9,44	0,49
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	20	116 438	55,12	32,90	3,54	2,11	2,72	4,20	0,50
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	25	80 698,8	51,74	32,90	2,45	1,56	2,40	3,06	0,51
D-Hibrit	5	0,5	0,5	5	1,37	30	69 999,1	51,77	32,90	2,13	1,35	1,92	2,83	0,48

Çizelge E3.2. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (5 mm kafes eleman taban çapı için)
(devamı)

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Tüp kalınlığı (mm)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	BÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	0	515 909	87,83	30,40	16,97	5,87	10,24	10,24	0,57
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	5	484 155	87,79	30,40	15,93	5,51	3,48	9,98	0,55
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	10	431 083	87,67	30,40	14,18	4,92	2,84	9,05	0,54
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	15	413 079	88,32	30,40	13,59	4,68	2,75	8,94	0,52
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	20	300 184	88,56	30,40	9,87	3,39	2,53	6,91	0,49
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	25	87 380,8	61,03	30,40	2,87	1,43	2,34	3,35	0,43
D-Hibrit	5	0,6	0,5	5	0,65	30	66 361	58,09	30,40	2,18	1,14	2,05	3,96	0,29

Çizelge E3.3. Eğik yükleme durumundaki 0,2° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Kütle (gr)
Boş Tüp	5	-	-	-	0	293 113	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	5	240 492	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	10	230 192	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	15	220 353	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	20	108 150	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	25	33 562,6	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	30	24 035,3	15,90
HMK	5	0,2	5	3,55	0	457 578	27,20
HMK	5	0,2	5	3,55	5	306 163	27,20
HMK	5	0,2	5	3,55	10	289 894	27,20
HMK	5	0,2	5	3,55	15	55 937,8	27,20
HMK	5	0,2	5	3,55	20	26 719,4	27,20
HMK	5	0,2	5	3,55	25	21 543,9	27,20
HMK	5	0,2	5	3,55	30	12 874,7	27,20
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	0	750 691	43,10
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	5	546 655	43,10
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	10	520 086	43,10
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	15	276 291	43,10
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	20	134 869	43,10
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	25	55 106,5	43,10
HMK+Tüp	5	0,2	5	3,55	30	36 910	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	0	1 019 930	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	5	742 474	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	10	635 715	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	15	195 089	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	20	108 235	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	25	88 270,2	43,10
HMK Hibrit	5	0,2	5	3,55	30	55 461,9	43,10

Çizelge E3.4. Eğik yükleme durumundaki 0,3° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Kütle (gr)
Boş Tüp	5	-	-	-	0	293 113	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	5	240 492	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	10	230 192	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	15	220 353	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	20	108 150	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	25	33 562,6	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	30	24 035,3	15,90
HMK	5	0,3	5	2,82	0	233 238	23,40
HMK	5	0,3	5	2,82	5	221 601	23,40
HMK	5	0,3	5	2,82	10	217 852	23,40
HMK	5	0,3	5	2,82	15	65 350,7	23,40
HMK	5	0,3	5	2,82	20	22 015,5	23,40
HMK	5	0,3	5	2,82	25	14 618,1	23,40
HMK	5	0,3	5	2,82	30	10 041,7	23,40
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	0	526 351	39,30
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	5	462 093	39,30
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	10	448 044	39,30
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	15	285 703,7	39,30
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	20	130 165,5	39,30
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	25	48 180,7	39,30
HMK+Tüp	5	0,3	5	2,82	30	34 077	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	0	801 094	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	5	687 020	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	10	527 262	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	15	236 547	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	20	103 605	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	25	83 768,6	39,30
HMK Hibrit	5	0,3	5	2,82	30	68 909,1	39,30

Çizelge E3.5. Eğik yükleme durumundaki 0,4° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Kütle (gr)
Boş Tüp	5	-	-	-	0	293 113	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	5	240 492	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	10	230 192	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	15	220 353	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	20	108 150	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	25	33 562,6	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	30	24 035,3	15,90
HMK	5	0,4	5	2,10	0	226 026	20,00
HMK	5	0,4	5	2,10	5	212 458	20,00
HMK	5	0,4	5	2,10	10	201 647	20,00
HMK	5	0,4	5	2,10	15	97 104,8	20,00
HMK	5	0,4	5	2,10	20	17 205,7	20,00
HMK	5	0,4	5	2,10	25	7 918,2	20,00
HMK	5	0,4	5	2,10	30	5 682,21	20,00
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	0	519 139	35,90
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	5	452 950	35,90
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	10	431 839	35,90
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	15	317 457,8	35,90
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	20	125 355,7	35,90
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	25	41 480,8	35,90
HMK+Tüp	5	0,4	5	2,10	30	29 717,51	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	0	640 747	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	5	585 222	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	10	551 114	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	15	339 703	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	20	104 783	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	25	80 264,5	35,90
HMK	5	0,4	5	2,10	30	68 852,4	35,90

Çizelge E3.6. Eğik yükleme durumundaki 0,5° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Kütle (gr)
Boş Tüp	5	-	-	-	0	293 113	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	5	240 492	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	10	230 192	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	15	220 353	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	20	108 150	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	25	33 562,6	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	30	24 035,3	15,90
HMK	5	0,5	5	1,37	0	193 993	17,00
HMK	5	0,5	5	1,37	5	137 233	17,00
HMK	5	0,5	5	1,37	10	136 511	17,00
HMK	5	0,5	5	1,37	15	117 929	17,00
HMK	5	0,5	5	1,37	20	41 228,1	17,00
HMK	5	0,5	5	1,37	25	20 964,3	17,00
HMK	5	0,5	5	1,37	30	4 426,51	17,00
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	0	487 106	32,90
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	5	377 725	32,90
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	10	366 703	32,90
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	15	338 282	32,90
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	20	149 378,1	32,90
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	25	545 26,9	32,90
HMK+Tüp	5	0,5	5	1,37	30	28 461,81	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	0	570 146	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	5	556 548	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	10	510 046	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	15	369 929	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	20	116 438	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	25	80 698,8	32,90
HMK Hibrit	5	0,5	5	1,37	30	69 999,1	32,90

Çizelge E3.7. Eğik yükleme durumundaki 0,6° tepe açısına sahip D-hibrit yapıların bileşenleri ile kıyaslanması

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Kafes eleman taban çapı	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Kütle (gr)
Boş Tüp	5	-	-	-	0	293 113	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	5	240 492	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	10	230 192	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	15	220 353	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	20	108 150	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	25	33 562,6	15,90
Boş Tüp	5	-	-	-	30	24 035,3	15,90
HMK	5	0,6	5	0,65	0	122 406	14,50
HMK	5	0,6	5	0,65	5	114 743	14,50
HMK	5	0,6	5	0,65	10	113 511	14,50
HMK	5	0,6	5	0,65	15	102 078	14,50
HMK	5	0,6	5	0,65	20	51 734,5	14,50
HMK	5	0,6	5	0,65	25	21 811,8	14,50
HMK	5	0,6	5	0,65	30	14 627,9	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	0	415 519	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	5	355 235	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	10	343 703	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	15	322 431	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	20	159 884,5	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	25	55 374,4	14,50
HMK+Tüp	5	0,6	5	0,65	30	38 663,2	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	0	515 909	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	5	484 155	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	10	431 083	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	15	413 079	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	20	300 184	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	25	87 380,8	14,50
HMK Hibrit	5	0,6	5	0,65	30	66 361	14,50

Çizelge E3.8. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (4 mm kafes eleman taban çapı için)

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Tüp kalınlığı (mm)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	BÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	0	546 958	82,37	32,70	16,73	6,64	10,44	13,01	0,51
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	5	515 524	83,75	32,70	15,77	6,16	4,60	11,63	0,53
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	10	437 746	81,23	32,70	13,39	5,39	3,77	10,11	0,53
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	15	168 449	55,18	32,70	5,15	3,05	3,15	5,21	0,59
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	20	74 201,5	42,60	32,70	2,27	1,74	3,03	4,45	0,39
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	25	62 602,1	40,30	32,70	1,91	1,55	3,54	3,82	0,41
D-Hibrit	5	0,2	0,5	4	2,55	30	52 085,1	40,18	32,70	1,59	1,30	2,20	2,80	0,46
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	0	461 128	84,54	29,70	15,53	5,45	11,56	12,83	0,43
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	5	441 252	86,02	29,70	14,86	5,13	3,94	11,49	0,45
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	10	417 037	84,91	29,70	14,04	4,91	3,41	10,50	0,47
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	15	162 322	64,47	29,70	5,47	2,52	2,83	4,88	0,52
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	20	76 571,7	50,67	29,70	2,58	1,51	2,89	3,89	0,39
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	25	63 454,2	47,12	29,70	2,14	1,35	2,65	3,47	0,39
D-Hibrit	5	0,3	0,5	4	1,82	30	56 677,4	46,07	29,70	1,91	1,23	2,20	2,78	0,44
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	0	390 390	86,17	27,10	14,41	4,53	10,69	11,04	0,41
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	5	374 807	86,04	27,10	13,83	4,36	3,99	10,89	0,40
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	10	340 764	85,10	27,10	12,57	4,00	3,33	9,85	0,41
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	15	335 944	87,89	27,10	12,40	3,82	2,54	9,62	0,40
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	20	205 280	74,87	27,10	7,57	2,74	2,67	7,64	0,36
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	25	66 815,1	51,76	27,10	2,47	1,29	2,66	3,73	0,35
D-Hibrit	5	0,4	0,5	4	1,10	30	54 819,6	50,70	27,10	2,02	1,08	1,84	2,94	0,37
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	0	347 537	86,52	25,09	13,85	4,02	10,27	10,27	0,39
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	5	305 689	85,51	25,09	12,18	3,58	4,49	8,18	0,44
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	10	288 097	86,34	25,09	11,48	3,34	3,03	7,87	0,42
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	15	256 859	85,96	25,09	10,24	2,99	3,01	7,13	0,42
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	20	246 859	89,12	25,09	9,84	2,77	2,38	6,82	0,41
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	25	64 618,6	64,89	25,09	2,58	1,00	2,46	3,97	0,25
D-Hibrit	5	0,5	0,5	4	0,37	30	54 732,8	65,03	25,09	2,18	0,84	1,47	2,89	0,29

Çizelge E3.9. Eğik yükleme durumundaki D-hibrit yapılar için çarpışma dayanım parametreleri (6 mm kafes eleman taban çapı için)

Hücre tipi	L/a oranı	Tepe açısı (°)	Tüp kalınlığı (mm)	Kafes eleman taban çapı (mm)	Kafes eleman üst çapı (mm)	Yükleme açısı (°)	TSE (mJ)	Ezilme boyu (mm)	Kütle (gr)	ÖSE (kJ/kg)	OÇK (kN)	BÇK (kN)	MÇK (kN)	ÇKV
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	0	1 427 920	68,73	55,40	25,77	20,78	14,90	28,26	0,74
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	5	1 159 860	68,82	55,40	20,94	16,85	6,78	28,15	0,60
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	10	659 871	65,76	55,40	11,91	10,04	5,22	14,75	0,68
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	15	230 003	45,62	55,40	4,15	5,04	4,77	10,92	0,46
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	20	122 457	32,14	55,40	2,21	3,81	5,12	8,49	0,45
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	25	104 997	32,13	55,40	1,90	3,27	4,63	7,49	0,44
D-Hibrit	5	0,2	0,5	6	4,55	30	38 388	17,24	55,40	0,69	2,23	4,47	4,79	0,47
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	0	1 226 530	72,73	50,90	24,10	16,86	11,86	25,54	0,66
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	5	992 169	70,29	50,90	19,49	14,12	6,59	21,98	0,64
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	10	638 037	73,89	50,90	12,54	8,63	4,16	19,02	0,45
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	15	271 017	50,97	50,90	5,32	5,32	3,88	15,39	0,35
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	20	145 051	45,75	50,90	2,85	3,17	3,86	7,33	0,43
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	25	99 573,4	35,61	50,90	1,96	2,80	3,70	6,39	0,44
D-Hibrit	5	0,3	0,5	6	3,82	30	82 409,5	35,60	50,90	1,62	2,31	3,48	5,55	0,42
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	0	1 055 280	75,89	46,80	22,55	13,91	11,64	20,66	0,67
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	5	974 054	76,00	46,80	20,81	12,82	6,34	18,99	0,67
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	10	902 711	76,03	46,80	19,29	11,87	4,14	17,42	0,68
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	15	303 365	60,47	46,80	6,48	5,02	3,63	9,06	0,55
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	20	156 852	50,36	46,80	3,35	3,11	3,68	6,16	0,51
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	25	97 395,8	40,23	46,80	2,08	2,42	3,29	4,83	0,50
D-Hibrit	5	0,4	0,5	6	3,10	30	83 521,5	40,20	46,80	1,78	2,08	3,22	4,38	0,47
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	0	1 186 110	83,71	43,00	27,58	14,17	11,25	19,58	0,72
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	5	1 089 120	84,83	43,00	25,33	12,84	4,31	18,86	0,68
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	10	951 114	82,87	43,00	22,12	11,48	3,75	17,04	0,67
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	15	403 828	75,25	43,00	9,39	5,37	3,27	9,65	0,56
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	20	163 846	54,88	43,00	3,81	2,99	3,14	5,56	0,54
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	25	100 858	45,96	43,00	2,35	2,19	2,77	4,13	0,53
D-Hibrit	5	0,5	0,5	6	2,37	30	87 175,9	45,96	43,00	2,03	1,90	2,44	3,71	0,51

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÇETİN, Erhan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum yeri ve tarihi : Bakırköy, 20.02.1987
 Medeni hali : Bekâr
 E-posta :erhancetin87@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Hitit Üniversitesi	2013
Lisans	Trakya Üniversitesi	2010
Lise	İsmail Rüştü Olcay Y.D.A.L	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-...	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Cetin, E., Baykasoğlu, C., 2017. Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen hücresel yapıların basma davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, XV.Türkiye Abaqus Kullanıcılar Toplantısı, 2-3 Kasım, İstanbul, pp. 145-146.
2. Cetin, E., Baykasoğlu, C., 2019. Energy absorption of thin-walled tubes enhanced by lattice structures, International Journal of Mechanical Sciences, 157-158, pp. 471-484. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.049>

3. Cetin, E., Baykasoğlu, C., Baykasoğlu, A., 2019. Predicting energy absorption parameters of aluminum lattice structures filled tubes via artificial neural networks, The International Aluminium-Themed Engineering And Natural Sciences Conference (IATENS'19), 4-6 Ekim, İstanbul, pp. 532-536.
4. Cetin, E., Baykasoğlu, C., 2019. Kafes yapı dolgulu hibrit tüplerin enerji sönümleme performanslarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmesi, XVII. Türkiye Abaqus Kullanıcılar Toplantısı, 7-8 Kasım, İstanbul, pp. 97.
5. Baykasoğlu, A., Baykasoğlu, C., Cetin, E., 2020. Multi-objective crashworthiness optimization of lattice structure filled thin-walled tubes, Thin-Walled Structures, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106630>

