CHLADNI DENEYİ DESENLERİNDEN ESİNLENİLMİŞ İNCE CİDARLI DARBE SÖNÜMLEYİCİLERİN ÇARPIŞMA PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Muhammed Said EMRE

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CHLADNI DENEYİ DESENLERİNDEN ESİNLENİLMİŞ İNCE CİDARLI DARBE SÖNÜMLEYİCİLERİN ÇARPIŞMA PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Muhammed Said EMRE
0009-0006-1357-7927

Doç. Dr. Emre İsa ALBAK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Muhammed Said EMRE tarafından hazırlanan ‘’CHLADNI DENEYİ DESENLERİNDEN ESİNLENİLMİŞ İNCE CİDARLI DARBE SÖNÜMLEYİCİLERİN ÇARPIŞMA PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Emre İsa ALBAK

Başkan : Doç. Dr. Emre İsa ALBAK İmza
0000-0001-9215-0775
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ İmza
0000-0003-1790-6987
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre DEMİRCİ İmza
0000-0002-1968-0291
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
../../….

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04/01/2024

Muhammed Said EMRE

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı Tarih	Öğrencinin Adı-Soyadı Tarih
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans

İNCE CİDARLI YAPILARIN ÇARPIŞMA PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Muhammed Said EMRE

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Emre İsa ALBAK

İnce cidarlı yapılar otomotiv sektöründe pasif güvenlik elemanları olarak yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Bu yapılardan araç üzerinde hafiflik sağlamasının yanında yüksek darbe enerjisi sönümleme yeteneği de sergilemesi beklenilmektedir. Bu beklentileri sağlayabilmek adına otomotiv sektörü araştırmacıları yeni kesit geometrileri ve malzemeler üzerinde araştırmalar yapmaktadır. Özellikle son yirmi yıl içerisinde geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler, alüminyum alaşımları, kompozitler, polimerler ve köpük bazlı yapıları malzeme alanındaki yenilikler olarak söyleyebiliriz. Kesit geometrileri geliştirilmesi üzerine çalışmalarda ise doğa önemli bir esin kaynağı olmuştur. Ernst Florens Friedrich Chladni (1756 - 1827), fizik ve müzik alanında önemli çalışmalar yapmış on sekiz ve on dokuzuncu yüzyıl içerisinde yaşam sürmüş önemli bir bilim insanıdır. Chladni, çalışmalarında ince metal plakalar üzerine kum taneleri serpmiş ve yanında keman çalarak titreşimler üretmiştir. Kum tanelerinin frekans değişimlerine bağlı olarak metal plaka üzerinde geometrik desenler ortaya koyduğunu gözlemlemiştir. Bu çalışma kapsamında, Chladni figürlerinden esinlenilerek tasarımları yapılmış olan 17 farklı dairesel dış duvara sahip geometrinin ve enerji sönümleme kapasiteleri, en büyük çarpışma kuvveti ve çarpışma kuvveti verimi sonlu elemanlar metoduyla incelenmiştir. Chladni'den esinlenilerek tasarlanan 1 mm et kalınlıklı geometrilere AA6061 malzeme ataması yapılmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde hareketli bir üst duvar, darbe emici yapı ve sabit bir alt duvar bulunmaktadır. Hareketli rijit duvarın hızı 5,75 m/s olarak belirlendikten sonra çarpışmanın 60 mm boyunca devam etmesi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinin doğruluğunun arttırılması için eleman yakınsama analizleri yapılmış olup, en uygun eleman boyutu olarak 0,8 mm belirlenmiştir. Tasarımları yapılan 17 farklı kesit geometrisinin çarpışma performansları sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilmiştir. Yapılan tasarımlar arasından en iyi darbe emicinin seçilebilmesi için çok kriterli bir karar verme yöntemi olan COPRAS yöntemi kullanılmıştır. COPRAS yöntemi ile 23,78 kJ'lık enerji sönümleme, 44,69 kN'luk maksimum çarpışma kuvveti ve 0,887 çarpışma kuvveti verimine sahip olan model alternatifler içinden en iyisi olarak seçilmiştir. En iyi alternatif olarak seçilen geometriye GWO optimizasyonu uygulanmıştır. Optimizasyon sonucunda %6,6 seviyelerinde enerji emilim değerlerinde iyileştirme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı yapılar, chladni, optimizasyon, copras, çarpışma, enerji emilimi
2024, vii + 52 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

Crashworthiness Optimization of Thin Walled Structure

Muhammed Said EMRE

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Associate Professor Dr. Emre İsa ALBAK

Thin-walled structures are widely preferred as passive safety elements in the automotive industry. These structures are expected to provide lightness on the vehicle as well as exhibit high impact energy absorption ability. In order to meet these expectations, automotive industry researchers are conducting research on new cross-section geometries and materials. We can say that high-strength steels, aluminum alloys, composites, polymers and foam-based structures developed especially in the last twenty years are innovations in the field of materials. Nature has been an important source of inspiration in studies on the development of section geometries. Ernst Florens Friedrich Chladni (1756 - 1827) was an important scientist who lived in the eighteenth and nineteenth centuries and carried out important studies in the fields of physics and music. In his works, Chladni sprinkled grains of sand on thin metal plates and produced vibrations by playing the violin next to him. He observed that sand grains formed geometric patterns on the metal plate depending on frequency changes. Within the scope of this study, the geometry of 17 different circular outer walls, inspired by Chladni figures, and their energy absorption capacities, maximum collision force and collision force efficiency were examined with the finite element method. AA6061 material assignment was made for 1 mm wall thickness geometries designed inspired by Chladni. The prepared finite element model includes a movable upper wall, shock absorbing structure and a fixed lower wall. After the speed of the moving rigid wall was determined as 5.75 m/s, the collision was allowed to continue for 60 mm. Element convergence analyzes were performed to increase the accuracy of finite element analyses, and 0.8 mm was determined as the most appropriate element size. The crash performances of 17 different cross-section geometries were obtained as a result of finite element analyses. The COPRAS method, a multi-criteria decision-making method, was used to select the best shock absorber among the designs. With the COPRAS method, the model with 23.78 kJ energy absorption, 44.69 kN maximum collision force and 0.887 collision force efficiency was chosen as the best among the alternatives. GWO optimization was applied to the geometry selected as the best alternative. As a result of the optimization, an improvement of 6.6% in energy absorption values was achieved.

Key words: Thin walled structure, chladni, optimization, copras, crashworthiness, energy absorption

2024, vii + 52 pages.

TEŞEKKÜR

Tüm hayatım boyunca her zaman desteklerini esirgemeyen değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sürecinde gerek yön göstericiliği gerek bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında yüksek katkılarından dolayı değerli danışmanım Doç. Dr. Emre İsa Albak hocama saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitim süresince desteklerinden dolayı POSITIVE DESIGN ekibine de teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Said EMRE
04/01/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1.İnce Cidarlı Yapıların Gelişimi 3
2.2.İnce Cidarlı Yapıların Sınıflandırılması 5
2.2.1.Dairesel Kesitli 5
2.2.2.Kare ve Dikdörtgen Kesitli 6
2.2.3. Üçgen, Beşgen, Altıgen Sekizgen ve İçbükey Çokgen Yapılar 9
2.3.İnce Cidarlı Çok Hücreli Yapılar 12
2.4. Ernst Florens Friedrich Chladni 14
3. MATERYAL ve YÖNTEM 18
3.1. Chladni Deneyinden Esinlenilmiş Yapılar(CDY) 18
3.2. Çarpışma Değerlendirme Kriterleri 20
3.3. Sonlu Elemanlar Modeli 21
3.4. Sonlu Elemanlar Modeli Doğrulama 22
3.5. Copras Yöntemi 23
3.6. Latin Hiperküp Yöntemi (LHS) 24
3.7. Radial Temelli Fonksiyonlar (RBF) 25
3.8. Gri Kurt Optimizayon Algortiması (GWO) 26
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 28
4.1. Chladni Deneyinden Esinlenilmiş Yapıların Sonlu Eleman Sonuçları 28
4.2. COPRAS Sonuçları 39
4.3. LHS Modelleme 40
4.4. RBF Modelleme 43
4.5. Optimizasyon ve Doğrulama 44
5. SONUÇ 46
KAYNAKLAR 48
ÖZGEÇMİŞ 52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
S_{+i}	Faydalı COPRAS kriteri
S_{-i}	Faydalı olmayan COPRAS kriteri
U_i	COPRAS alternatif tercih sırası
λ_i	Bilinmeyen interpolasyon katsayısı
$\emptyset$	RBF temel fonksiyon
$\|\|x - x_i\|\|$	Öklid uzaklığı
R^2	Korelasyon katsayısı

Kısaltmalar	**Açıklama**
İCY	İnce cidarlı yapılar
CDY	Chladni deneyinden esinlenilmiş yapılar
EE	Enerji emilimi
SEE	Spesifik enerji emilimi
MÇK	Maksimum çarpışma kuvveti
OÇK	Ortalama çarpışma kuvveti
FE	Sonlu elemanlar
LHS	Latin hiperküp yöntemi
RBF	Radyal temelli fonksiyonlar
GWO	Gri kurt optimizasyon algoritması
TD1	Dörtlü dairenin çapı
TD2	İkili dairenin çapı
TD3	Dış ve orta duvarlar et kalınlığı
TD4	Yarım daireler et kalınlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	İnce cidarlı yapıların tarihsel gelişimi.....	4
Şekil 2.2.	Doğadan esinlenilen dairesel kesitli İCY çalışmaları.....	5
Şekil 2.3.	Dairesel kesitli geometrilerle yapılan çalışma içerikleri..	6
Şekil 2.4.	Kare veya dikdörtgen kesitli İCY çalışma örnekleri.....	8
Şekil 2.5.	Kare ve dikdörtgen kesitli geometrilerle yapılan çalışma içerikleri.....	9
Şekil 2.6.	Çokgen kesitli İCY çalışma örnekleri.....	10
Şekil 2.7.	Çokgen kesitli geometrilerle yapılan çalışma içerikleri...	12
Şekil 2.8.	İnce cidarlı çok hücreli yapıların çalışma alanları.....	13
Şekil 2.9.	Chladni figürleri-I.....	16
Şekil 2.10.	Chladni figürleri-II.....	17
Şekil 3.1.	Chladni figürlerinden esinlenilerek tasarlanan geometriler.....	19
Şekil 3.2.	Sonlu elemanlar modeli.....	21
Şekil 3.3.	AA6061 malzeme gerçek gerilme – gerçek gerinim eğrisi.....	22
Şekil 3.4.	Sonlu elemanlar modeli doğrulama.....	23
Şekil 3.5.	Gri kurt hiyerarşisi.....	27
Şekil 4.1.	Chladni deneyinden esinlenilmiş yapıların sonlu eleman sonuçları.....	28
Şekil 4.2.	Çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri(a).....	32
Şekil 4.3.	Chladni'den esinlenilen modellerin çarpışma kuvveti sonuçları.....	35
Şekil 4.4.	Chladni'den esinlenilen modellerin ortalama çarpışma kuvveti sonuçları.....	36
Şekil 4.5.	Chladni'den esinlenilen modellerin çarpışma kuvveti verimi sonuçları.....	37
Şekil 4.6.	Chladni'den esinlenilen modellerin toplam enerji sönümleme sonuçları.....	38
Şekil 5.1.	Optimizasyon sonrası ulaşılan geometri.....	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 4.1.	COPRAS girdileri	39
Çizelge 4.2.	COPRAS sonuçları	40
Çizelge 4.3.	LHS veri seti	41
Çizelge 4.4.	LHS veri seti	42
Çizelge 4.5.	PCF ve EA için RBF metamodelleri R2 değerleri	44
Çizelge 4.6.	GWO yöntemi sağlamlık tablosu	45
Çizelge 4.7.	Optimizasyon ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması	45

1. GİRİŞ

Son yıllarda endüstriler, enerji tüketimini azaltma ve karbon ayak izini düşürme hedefleri doğrultusunda yoğun bir çaba sarf etmektedir. Bu çerçevede, otomotiv ve havacılık gibi yüksek teknoloji gerektiren sektörler, özellikle yolcu güvenliğini artırmak ve aynı zamanda aracın ağırlığını azaltmak amacıyla yüksek enerji sönümleme yeteneklerine sahip malzemelerin kullanımı üzerine araştırmalarını hızlandırmıştır. Bu bağlamda, yeni malzemelerin keşfi ve farklı kesit geometrilerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Son iki düzine yılda, üçüncü nesil yüksek mukavemetli çelikler, kompozitler, polimerler, köpükler ve alüminyum alaşımları gibi malzemelerde yapılan araştırmalar, sektördeki ihtiyaçlara uygun çözümler sunmaya yönelik önemli adımlar atılmıştır (Yao ve ark., 2023).

Ayrıca, doğadan ilham alarak türetilen yeni kesit geometrileri, bu malzemelerin performansını artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bal petekleri, tropikal ağaç gövdeleri (Gholamhossein ve ark.,2022) ve origami (Zhou ve ark.,2022) gibi doğal yapılar, araştırmacılara ilham kaynağı olmuş ve ince cidarlı yapılar geliştirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmalar, ince cidarlı yapıların geleneksel otomotiv malzemelerine önemli bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Yüksek enerji sönüm kapasitesi, kontrollü deformasyon yetenekleri ve düşük yoğunlukları sayesinde, bu yeni malzemeler ve kesit geometrileri, sürdürülebilir ve güvenli ulaşımın önündeki engelleri aşmada önemli bir rol oynamaktadır (Yao ve diğ., 2023). Bu bağlamda, endüstrinin bu yenilikçi yaklaşımları benimsemesi, hem çevresel etkiyi azaltma hem de teknolojik gelişmeleri teşvik etme konusunda kritik bir adımdır.

Ernst Florens Friedrich Chladni (1756 - 1827), fizik ve müzik alanında önemli çalışmalar yapmış on sekiz ve on dokuzuncu yüzyıl içerisinde yaşam sürmüş önemli bir bilim insanıdır. Chladni, çalışmalarında ince metal plakalar üzerine kum taneleri serpmiş ve yanında keman çalarak titreşimler üretmiştir. Kum tanelerinin frekans değişimlerine bağlı olarak metal plaka üzerinde geometrik desenler ortaya koyduğunu gözlemlemiştir.

Chladni'nin figürleri insanlığa halen ilham vermekte farklı sektörlerde esin kaynağı olarak kullanılmaya devam etmektedir.

Bu tez kapsamında Chladni ortaya koyduğu figürlerinden esinlenerek tasarlanan 17 farklı dairesel dış duvara sahip geometrinin en büyük çarpışma kuvveti, ortalama çarpışma kuvveti, çarpışma kuvveti verimi ve enerji sönümleme yetenekleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri sonrasında çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan COPRAS ile ideal model belirlenmiştir. COPRAS uygulamasıyla belirlenen tasarıma tek kriterli optimizasyon uygulanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde literatürdeki ince cidarlı darbe emici yapıların gelişim süreci, uygulamadaki tipleri ve üretim yöntemlerinden bahsedilecektir.

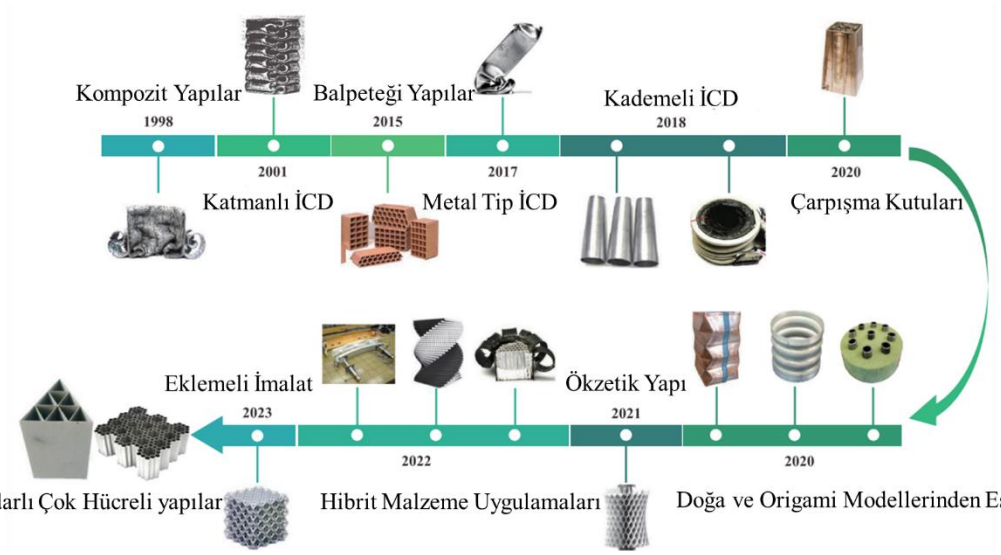
2.1.İnce Cidarlı Yapıların Gelişimi

Bilim ve teknolojideki hızlı ilerlemeler nedeniyle otomotiv, demiryolu, denizcilik ve havacılık dahil birçok endüstri önemli bir gelişme yaşamıştır. Yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltma konusundaki artan sosyoekonomik ve siyasi baskılara yanıt olarak, bu endüstriler çabalarını artırmaktadır. Hafif malzemelerin, örneğin alüminyum alaşımları, yüksek mukavemetli çelikler, kompozitler, polimerler ve köpükler gibi, kullanımına yönelik olarak hafifletici çözümler önerilmektedir.

Bu gelişmelere rağmen, geliştirilmiş güvenlik performansını sağlama çabası kritik bir odak noktası olmaya devam etmektedir. Yeni hafif malzemelerin uygulanmasının amacı ağırlığı azaltmak olsa da, yapıların yeterli enerjiyi emebilme ve çarpışma dayanıklılığı seviyelerini sürdürebilme konusunda emin olmak önemlidir, böylece kazalarda yolcu ve yük güvenliği garanti altına alınabilir. Bu zorluğa yanıt olarak, hafif malzemelerden yapılmış çeşitli türde ince cidarlı yapılar ortaya çıkarılmıştır. Bunlar arasında levhalar, tüpler, sandviçler, petekler ve örgüler bulunmaktadır. Bu yapılar, çarpışmalar sırasında kinetik enerjiyi soğurarak çarpışma güvenliği sağlayan etkili bileşenler olarak görev yapmaktadır.

Bu yapılar ve malzemeleri ele alan bir dizi inceleme literatürde bulunmaktadır. Bunlar arasında metalik katlanabilir ince cidarlı yapılar, kompozit yapılar, çoklu malzeme karışımı yapılar, fonksiyonel dereceli katmanlandırılmış yapılar ve malzemeler, ince cidarlı dalgalı ve origami yapılar, biyo-ilhamlı yapılar ve malzemeler, ökzetik yapılar, çarpışma kutularında kullanılan yapılar ve malzemeler ile gözenekli malzemeler bulunmaktadır.

Şekil 2.1, enerji emilimine odaklanan hafif yapılar ve malzemeler üzerine bazı önemli incelemeleri içeren bir zaman çizelgesini sunmaktadır. Şekilde, ince cidarlı yapıların tarihsel evrimini ortaya koyarak, basitten karmaşığa, tek malzemeden çoklu malzemeye ve hatta tamamen pasiften etkin adaptasyona geçişleri gösterir. Bu evrim, enerji emilim performanslarında önemli bir artışa neden olmuştur. Özellikle, mono-hücreden multi-hücre konfigürasyonuna geçiş belirgin bir şekilde görülmektedir; bazı ince cidarlı yapıların biyolojik özelliklerden ilham aldığı ve belirli gözenekli malzemelerde düzenli mikro-/meso-yapıların bulunduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2.1. İnce cidarlı yapıların tarihsel gelişimi

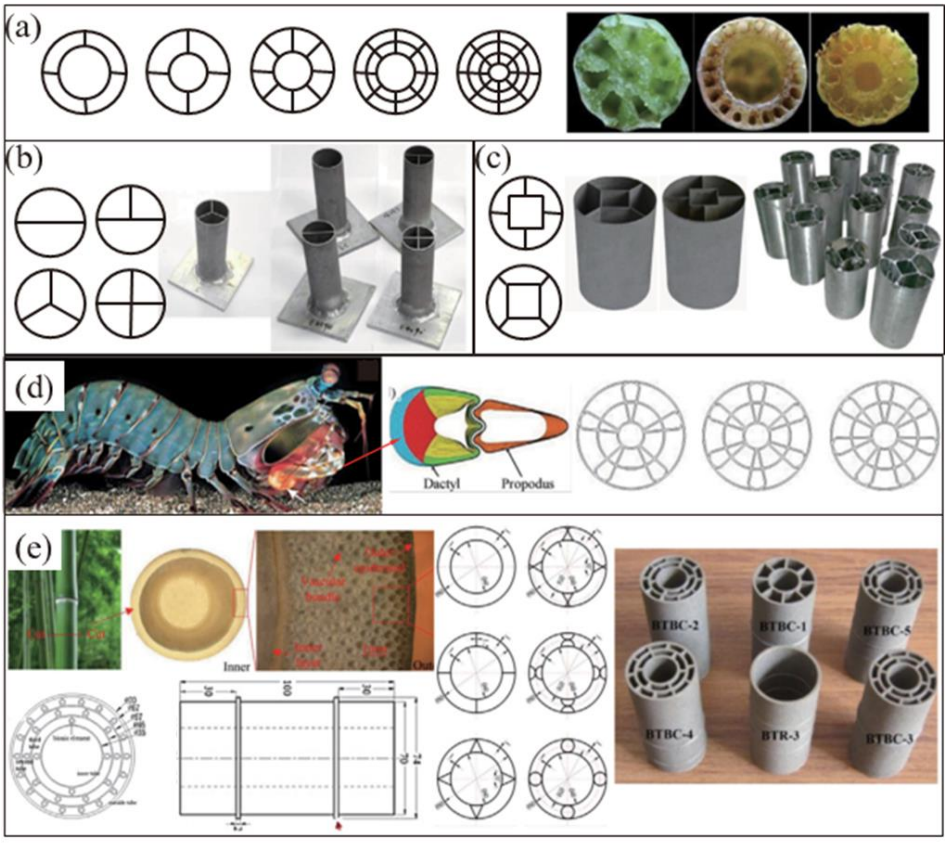
Bu yapılar ve malzemeler, dış ince duvarlara sahip birbirine bağlı kaburgaların varlığı ile karakterize edilir ve topluca ince cidarlı çok hücreli yapılar ve malzemeler (İCD) olarak adlandırılır. Kapsamlı karşılaştırmalı çalışmalar, ince cidarlı yapıların daha yüksek özgül enerji emilimi ve daha istikrarlı çarpışma tepkileri sergilediğini doğrulamıştır. Ancak, mevcut bilgilerin bolluğuna rağmen, yazarların bilgisine göre, çeşitli ince cidarlı yapıların enerji emilim davranışlarına odaklanan kapsamlı bir inceleme eksikliği olduğu dikkate değerdir.

2.2.İnce Cidarlı Yapıların Sınıflandırılması

Geleneksel metal ince ince çok hücreli yapılar, dış kesit şekillerine göre dairesel kesitli, kare ve dikdörtgen kesitli olmak üzere üç alt türe ayrılabilir. Bu bölümde ince cidarlı yapılar, geometrik özelliklerine göre üç kategoriye ayrılmıştır.

2.2.1.Dairesel Kesitli

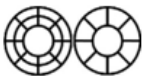
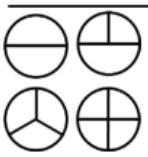
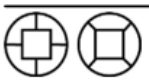
Tang ve ark.(2013), dairesel kesitli ince cidarlı çok hücreli yapılar üzerine bir araştırma yaptı. Dairesel profillerin enerji emiliminde kare profillere göre daha verimli olduğu gözlemine dayanarak çalışmalarında radyal örgülerle birbirine bağlanmış dairesel profillerden oluşan yeni bir çok hücreli sütun tipi tanıttı. Ardından, yapısal rijitliği artırmak için profil içinden birbirine bağlı ek yapılar tasarlandı. Bu sayede iç ve dış sütunların etkisi incelendi. Şekil 2.2'de tasarlanan profiller verilmiştir.



Şekil 2.2. Doğadan esinlenilen dairesel kesitli ince cidarlı yapı çalışmaları

Zhang ve Zhang (2014), tek, çift, üçlü ve dörtlü hücreli dairesel profiller üzerine deneysel çalışmalar yaptı. Deneysel çalışmalarla birlikte ezilme direncini öngörmek için analitik modeller geliştirdi.

Chen ve ark. (2019) ile Bigdeli ve Nouri (2019), dış dairesel ve iç kare kesitli yapılar üzerinde ezilme testleri gerçekleştirdi, parametrik analizler yaptı ve analitik modeller oluşturdu. Huang ve Xu (2019), tavus mantus karidesi(odontodactylus scyllarus'un dactyl clubs) yapısının yüksek enerji emilim performansından ilham alarak, eksenel ve eğik darbeler altında ezilme davranışlarını inceledi. Bunun yanında bambu ağacı gibi işlevsel biyonik yapılardan ilham alınarak, dairesel kesitli bir dizi karmaşık ince cidarlı yapı tasarlandı ve üretildi (Zou ve ark., 2016). Şekil 2.3, dairesel kesitli ince cidarlı yapıların tipik örneklerini özetlemektedir.

Geometri	Yükleme Tipi	Yükleme Hızı	Malzeme	Metot	Araştırma İçeriği
	Eksenel Eğilme	Yarı Statik Dinamik	AA-6060-T4 AlMg0.5F22 Steel 316L	– Simülasyon – Optimizasyon – Deneysel	– Et kalınlığı – Katman sayısı – Her bir katmandaki rib sayısı – Ölçü
	Eksenel	Yarı Statik	AA-6061-O	– Deneysel – Simülasyon – Teori	Hücre sayısı
	Eksenel	Yarı Statik	AA-6061-O	– Deneysel – Simülasyon – Teori – Optimizasyon	– Et kalınlığı – Rib konumu – Ölçü
	Eksenel	Dinamik	AA-6063-T5	– Simülasyon – Optimizasyon	– Biyonik rip şekli – Biyonik rip sayısı – Kalınlık – Ölçü

Şekil 2.3. Dairesel kesitli geometrilerle yapılan çalışma içerikleri

2.2.2.Kare ve Dikdörtgen Kesitli

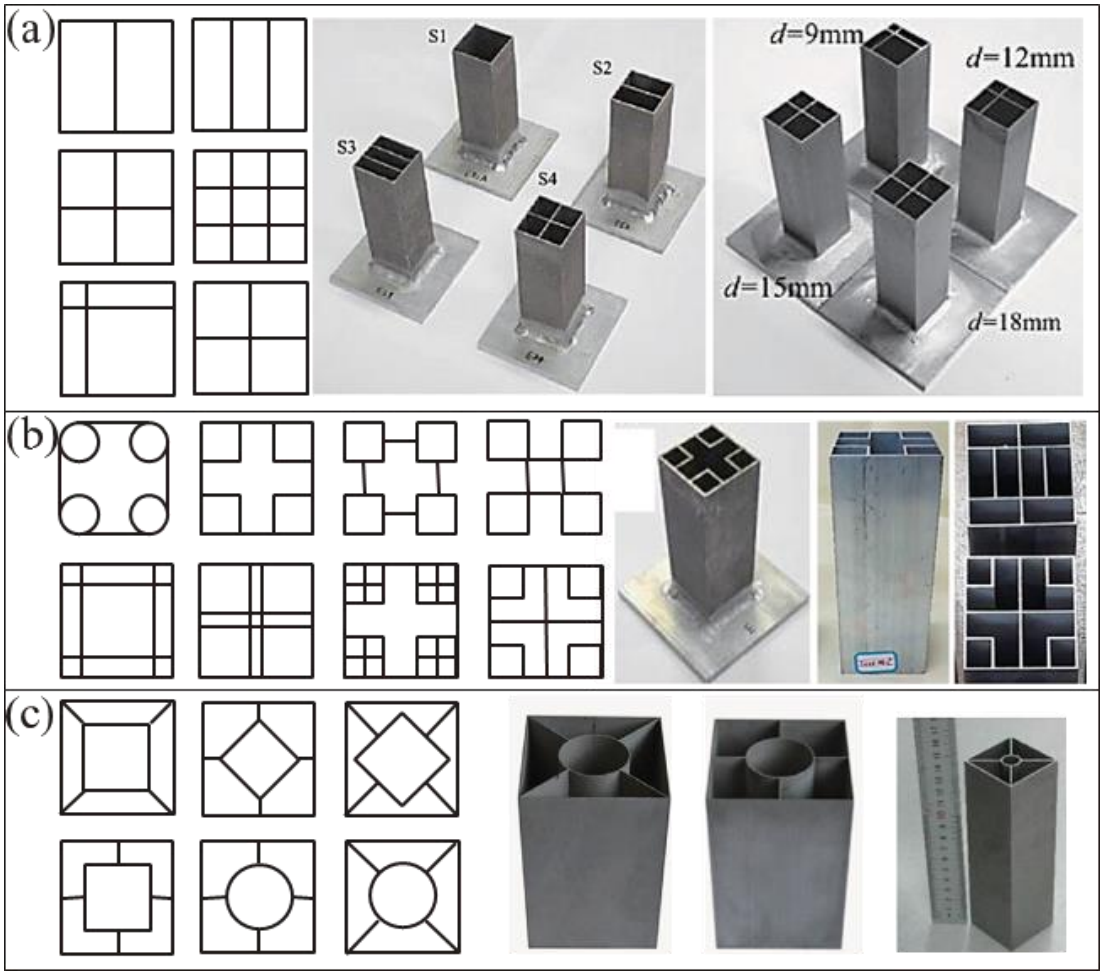
Metalik ince cidarlı çok hücreli yapılar içerisinde kare veya dikdörtgen kesitli yapılar önemli bir yer tutar. Bundaki sebebi uygun maliyet ve diğer yapısal elemanlarla kolay entegrasyon olarak söylenebilir. İnce cidarlı yapıların kare kesitli versiyonlarına yönelik öncü araştırmalar Chen ve Wierzbicki (2001) tarafından gerçekleştirildi. Çalışmaları, eksenel ezilmeye maruz kalan prizmatik ince cidarlı profillerde ortalama çarpışma

kuvveti için basit bir analitik çözüm sağladı ve teorik bir temel oluşturdu. $n \times n$ kare ince cidarlı yapıların eksenel yüklemeye maruz kaldığı durumlar için yapılan çalışmalar sistemli bir şekilde enerji emilim mekanizmalarını ortaya çıkardı(Liu ve ark., 2018).

X.Zhang ve H.Zhang (2015), dört hücreli örnekler üreterek yapısal uyumluluk, deformasyonun tetiklenmesi ve topolojik değişkenlik gibi konulara çözüm getirdi. Abdullahi ve Gao (2020) geleneksel kare profillerin enerji emilimini artırmak için Voronoi diyagramlarını kullanarak rastgele hücre boyutlarına sahip yeni bir çok hücreli tüp yapısı önerdi. Niknejad ve ark. (2016) bir alüminyum (Al) kare tüpe 26 farklı türde iç kaburga ekledi ve yarı statik yanal basma testleri gerçekleştirdi.

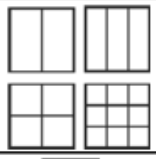
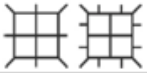
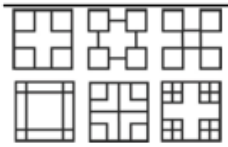
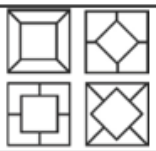
Üç noktalı eğilmeye maruz kalan $m \times n$ kare ince cidarlı yapılar için öncü denilebilecek sayısal ve analitik çalışmalar Zhang ve ark. (2016) ve Zuo ve ark. (2019) tarafından yapıldı. Dikdörtgen ince cidarlı yapılar için Gu ve ark. (2017) eksenel çarpışmaya maruz kalan eşit olmayan üç hücreli profiller üzerine bir çalışma rapor etti.

Kare veya dikdörtgen ince cidarlı çok hücreli yapıların başka bir uygulama türü, Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Lee ve Wierzbicki (2001), profillerin köşelerine malzeme eklenmesinin daha fazla enerji emilimine yol açtığını keşfetmiştir. Bu bilgi üzerine, Kim (2002), dört köşe hücresine sahip kare sütunları geliştirmiştir ve bu tür ince cidarlı yapıyı sayısal olarak inceleyen ilk araştırmacı olmuştur. Ardından, Nia ve Parsapour (2013), eksenel çarpışma davranışları üzerine sayısal ve analitik çalışmalar gerçekleştirmiştir. X.Zhang ve H.Zhang (2013) ise üretmiş olduğu numunelerle deneysel ve sayısal bulgularla uyumlu yeni bir konstitütif eleman yöntemi önermiştir.



Şekil 2.4. Kare veya dikdörtgen kesitli İCY çalışma örnekleri

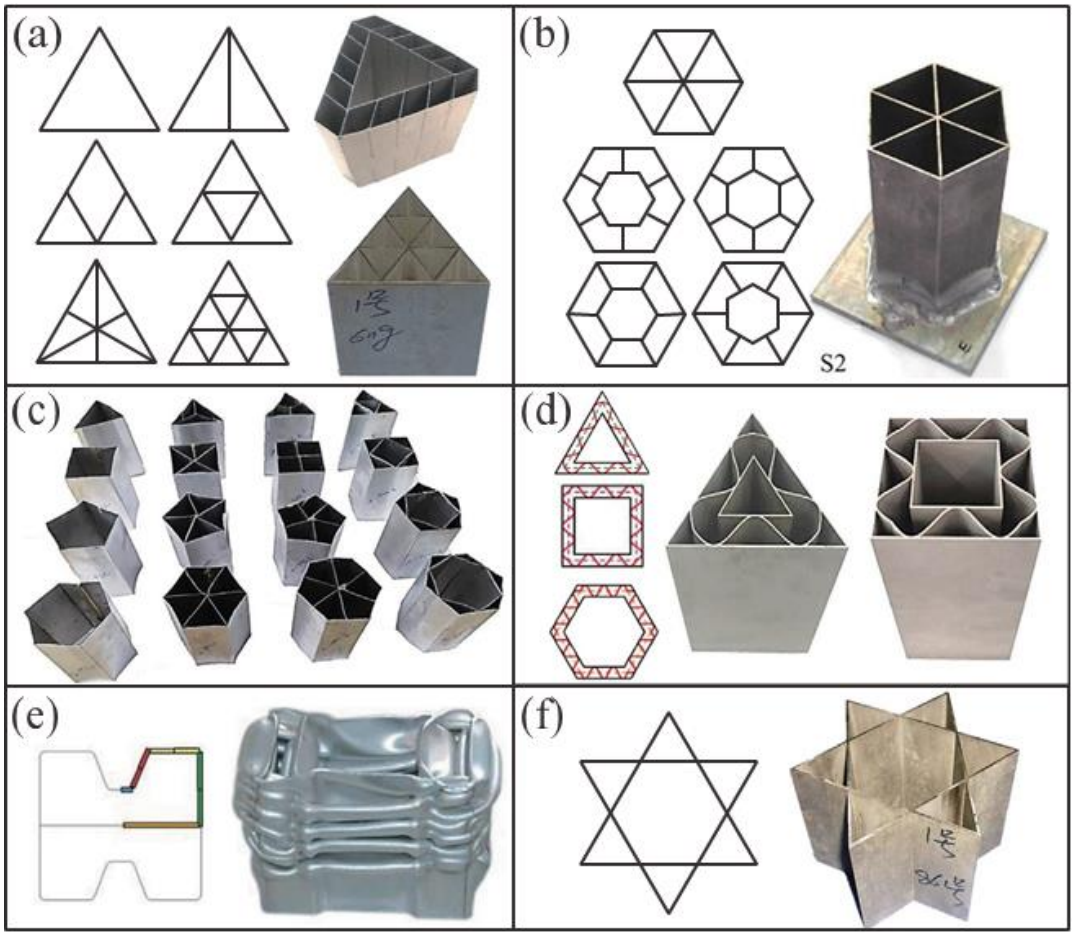
Gu ve ark. (2017) çalışmalarında köşe güçlendirmesi olan kare profiller üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Eksenel kuvvet altında yarı-statik ve dinamik basma testleri gerçekleştirmiş, köşe hücre boyutu ve bağlantı duvarlarının konumu üzerindeki detaylı etkileri incelemiştir. Son zamanlarda, Güler ve ark. (2021) köşe hücresine sahip bir kare profil için sayısal bir model geliştirmiş ve malzeme hasarının doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamıştır. Şekil 2.5, kare ve dikdörtgen kesitli ince cidarlı yapıların tipik örneklerini özetlemektedir.

Geometri	Yükleme Tipi	Yükleme Hızı	Malzeme	Metot	Araştırma İçeriği
	Eksenel Eğilme	Yarı statik Dinamik	AA-1100-O AA-6061-T4 AA-6063-T5 AA-6063-T6 AA-6106-T7 Yumuşak çelik	Deneysel Simülasyon Teori Optimizasyon	Hücre sayısı Ölçü Rip yönelimi
	Eksenel	Yarı statik	AA-6061-O	Deneysel Simülasyon Teori	Topoloji Tetik tipi
	Eksenel	Yarı statik	AA-1200	Deneysel Simülasyon	Kesit konfigürasyonu Rip konumu Tavlama etkisi
	Eksenel	Yarı statik Dinamik	AA-1060 AA-6061-T6 AA-6063-T7 AA-6063-T5 AA-6061-O	Deneysel Simülasyon Teori Optimizasyon	Kesit tipi Et kalınlığı Köşe hücre ölçüsü Rip konumu Ölçü
	Eksenel	Yarı statik Dinamik	AA-5083O-P AA-6060 St37	Deneysel Simülasyon Teori Optimizasyon	Kesit konfigürasyonu Rip konumu Et kalınlığı Ölçü
	Eksenel	Yarı statik	AA-6061-O	Deneysel Simülasyon Teori Optimizasyon	Et kalınlığı Rip konumu

Şekil 2.5. Kare ve dikdörtgen kesitli geometrilerle yapılan çalışma içerikleri

2.2.3. Üçgen, Beşgen, Altıgen Sekizgen ve İçbükey Çokgen Yapılar

Üçgen kesitli ince cidarlı çok hücreli yapılar üzerine sınırlı sayıda araştırma bulunduğunu belirtmek gerekir. İlgili erken araştırmalar, elastik stabilite ve maksimum yük üzerine odaklanan Krolak ve ark. (2007) tarafından gerçekleştirildi. Çalışmalarında basma testleri ve analitik modeller geliştirdiler. Üçgen ince cidarlı yapıların eksenel ve açışal yüklemelere maruz kaldığı durumlar için analitik modeller geliştirmeye yönelik başlıca çalışmalar Tan ve ark. (2014) tarafından yürütüldü. Şekil 2.6'da üçgen ince cidarlı yapıların tipik kesit konfigürasyonları gösterilmektedir.



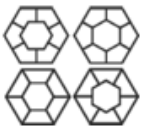
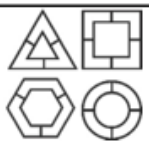
Şekil 2.6. Çokgen kesitli İCY çalışma örnekleri

Pentagonal ince cidarlı çok hücreli yapıların çarpışma özellikleri üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunsa da, altıgen ince cidarlı yapılar üzerine geniş kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. 2001 yılında Honda, Insight adlı yeni hibrit yolcu aracının ön yan rayları için karmaşık altıgen ekstrüde kesit elemanları kullanmıştır (K. Fukuo ve ark.,2001). X.Zhang ve H.Zhang (2015), altıgen numuneler üretmiş ve eksenel basma yükü altındaki ince cidarlı yapıların enerji emilim sınırlarını incelemiştir. Fang ve ark. (2015) çift katmanlı konfigürasyona sahip yeni bir tasarım ile çarpışma dayanımı analizi yapmış ve performanslarını eksenel ve açışal yüklemeler altında incelemiştir. Kaburga konumunun etkisi incelenmiş ve en uygun konfigürasyon belirlenmiştir.

Pek çok çalışma konveks çokgen şekilli ince cidarlı çok hücreli yapıların kesit şekli evriminin enerji emilim performansı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Örneğin, Nia ve Parsapour (2014), üçgen, kare, altıgen ve sekizgen kesitlere sahip ince cidarlı yapı örnekleri üretmiş ve bunların eksenel yükleme altındaki enerji emilim performanslarını karşılaştırmışlardır. Pirmohammad ve Marzdashti (2016) ayrıca üçgen, kare ve altıgen gibi çeşitli kesit konfigürasyonlarına sahip, her biri farklı uzunluk ölçeklerine sahip çokgen ince cidarlı yapıların çarpışma davranışına dair çalışmış, açısal yükleme altındaki performanslarını incelemişlerdir.

Wen ve ark. (2020) eksenel yükleme altındaki çokgen tek ve çift katmanlı ince cidarlı darbe emicilerin enerji emilim özelliklerini rapor etmiş ve buna uygun bir analitik model geliştirmişlerdir. Ardından, Kannan ve Rajkumar (2020) ile. Hou ve ark. (2022) çokgen ince cidarlı darbe emicilerin enerji emilim özellikleri ve deformasyon davranışları üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma yarı-statik eksenel bası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bahsedildiği gibi, metal ince cidarlı prizmatik yapılardaki enerji emilim davranışı, köşelerin etrafındaki yoğun deformasyona güçlü bir şekilde dayanmaktadır. Bu, daha fazla köşenin enerji emilim performansını artırmak için avantajlı olabileceğini göstermektedir. Hanssen(2014) ve ark. alüminyum ekstrüzyonların eksenel çarpışma sırasında ortalama kuvveti tahmin etmek için SSFE (basitleştirilmiş süper katlanma elemanı) teorisinin potansiyel kullanımını araştırdılar. İnce cidarlı yapıların enerji emilimini iyileştirmek için Hong ve ark. (2014) yıldız şeklinde bir ince cidarlı darbe emicilerin üzerinde eksenel bası testleri gerçekleştirdi ve buna dayalı klasik süper katlanma elemanı teorisine dayalı bir analitik model geliştirdi. Bu alt bölümde bahsedilen bazı tipik ince cidarlı darbe emiciler Şekil 2.7'de özetlenmiştir.

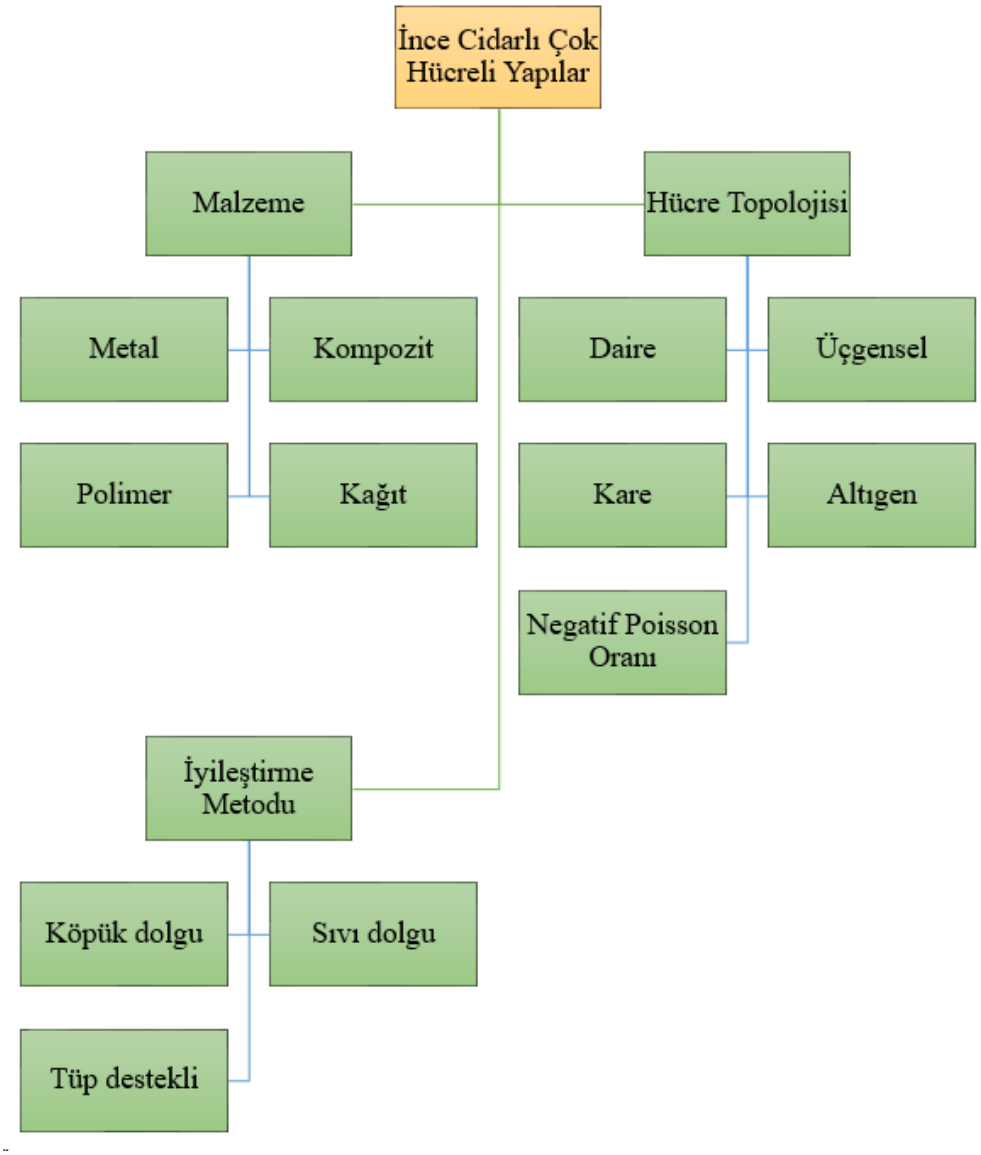
Geometri	Yükleme Tipi	Yükleme Hızı	Malzeme	Metot	Araştırma İçeriği
	Eksenel Oblik	Yarı statik	AA-6060-T4 Q235	– Deneysel – Simülasyon – Teori – Optimizasyon	– Hücre sayısı – Ölçü – Et kalınlığı – Yükleme açışı
	Eksenel Oblik	Dinamik	AA-6061	– Deneysel – Simülasyon – Teori	– Rip konumu – Yükleme açışı
	Oblik	Yarı statik	AA-6060-T4	– Simülasyon	– Kesit konfigürasyonu – Yükleme açışı – Ölçü
	Eksenel	Yarı statik	Q235	– Teori – Simülasyon	– Hücre sayısı – Ölçü

Şekil 2.7. Çokgen kesitli geometrilerle yapılan çalışma içerikleri

2.3.İnce Cidarlı Çok Hücreli Yapılar

İnce cidarlı çok hücreli yapıların enine yöndeki boyutu, diğer yönlerdekinden önemli ölçüde büyük olduğunda ve birçok hücre mevcut olduğunda yapı ince cidarlı çok hücreli yapı haline gelir. Bu, önceki bölümlerde bahsedilen ince cidarlı yapılar için sınıflandırma yönteminin ince cidarlı çok hücreli için hala geçerli olduğu anlamına gelir.

Sünek metaller, ince cidarlı çok hücreli malzemelerin en yaygın olarak kullanılan temel malzemeleridir. İnce cidarlı çok hücreli yapılar gibi, hücrelerin konfigürasyonu da metalik çok hücreli darbe emicilerin çarpışma performansını etkileyen temel bir faktördür. Çeşitli hücre topolojilerine sahip metalik ince cidarlı çok hücreli darbe emicilerin mekanik özellikleri üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmüştür, bunlar arasında daire, üçgen, kare, altıgen ve ökzetik geometriler bulunmaktadır. Bu araştırmalar, basma testleri, sayısal simülasyonlar ve teorik analizleri içermekte olup, bunlardan bazıları Şekil 2.8'de sunulmuştur.



Şekil 2.8. İnce cidarlı çok hücreli yapıların çalışma alanları

Hafif köpük malzemelerin metalik ince cidarlı çok hücreli malzemelere eklenmesi, özellikle köpük ile hücresel duvarlar arasındaki olumlu sinerjik etkilerden kaynaklanan etkili bir strateji olarak kabul edilir (H. Mozafari ve ark., 2016). Ayrıca, metalik ince cidarlı darbe emicilerin enerji emilim performansını artırmak için başka çeşitli yöntemler de uygulanmıştır. Bu yöntemler, yapısal gradyan (Zhu ve Chen, 2011), hiyerarşik düzenlemeler (Chen ve ark., 2016) veya tübüler takviye (Zhou ve ark., 2017) gibi ince cidarlı çok hücreli yapılara entegre edilen unsurları içermektedir.

2.4. Ernst Florens Friedrich Chladni

Ernst Florens Friedrich Chladni 30 Kasım 1756'da Wittenberg, Almanya'da doğmuştur ve akustik ve titreşim alanlarında öncü olacak çalışmalar yapmıştır. Chladni, eğitimli bir ailenin mensubuydu. Büyük dedesi Georg Chladni (Chladenius, 1637–92), Banská Bystrica (Neusohl) şehrinde bir gymnasiumda ve Protestan şehri Wittenberg'de bir üniversitede teoloji alanında eğitim gördü ve Macaristan Krallığı'na bağlı bir maden kasabası olan Kremnica'dan 4 km uzakta bir kilisenin Protestan rektörlüğünü üstlendi. Chladni'nin amcası Justus Georg Chladni (Chladenius, 1701–65), Wittenberg Üniversitesi'nde hukuk profesörüydü. Başka bir amca olan Johann Martin Chladni (1710–59), bir teolog ve tarihçiydi ve Erlangen Üniversitesi ile Leipzig Üniversitesi'nde profesördü.

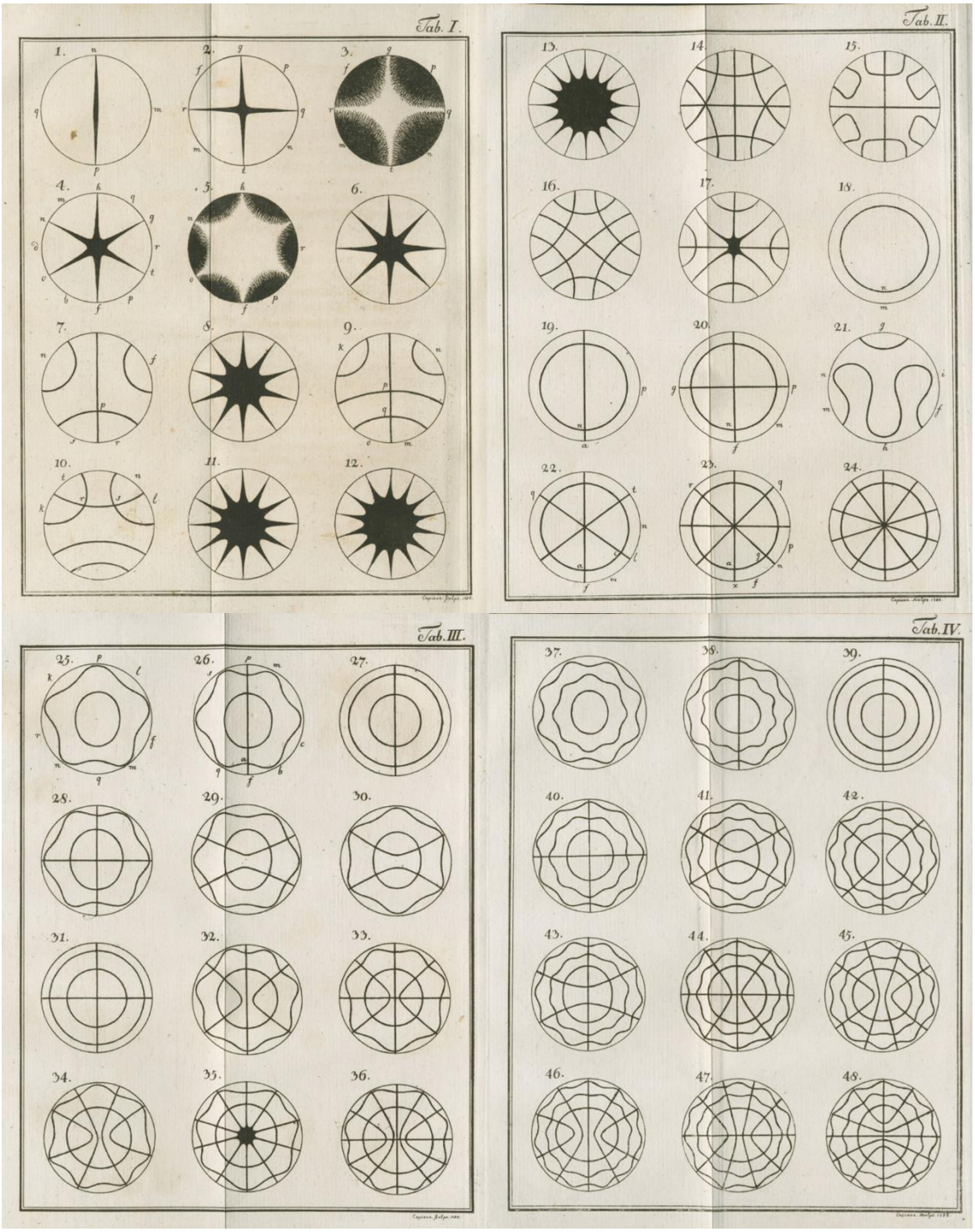
Ernst Florens Friedrich'ın kız kardeşi bebekken hayatını kaybetti ve tek çocuk olarak büyüdü. Chladni evde eğitim aldı; babası oldukça katı, hatta despot bir yetiştirme tarzına sahipti. Ernst Friedrich, izin almadan çalışma odasını terk edemezdi; bahçeye bile annesi eşliğinde gidebilirdi; ve hiçbir arkadaşı olmasına izin verilmiyordu. 7 yaşında bilimsel kitaplar okumaya başlamış, yıldızları ve haritaları incelemiş, gizlice Hollandaca öğrenmiş ve denizci olma hayalleri kurmuştu.

Evde deneyimlediği sıkı eğitim Grimma'da da devam etti. Diğer öğrenciler gibi yurtta kalmasına izin verilmedi. Bunun yerine, bir öğretmeninin dairesinde yaşamak zorundaydı. Bu sayede sürekli gözetim altındaydı. Tıp alanındaki ilgisine rağmen babası onay vermedi ve Ernst Friedrich'in bir hukuk kariyerine yönelmesini istedi.

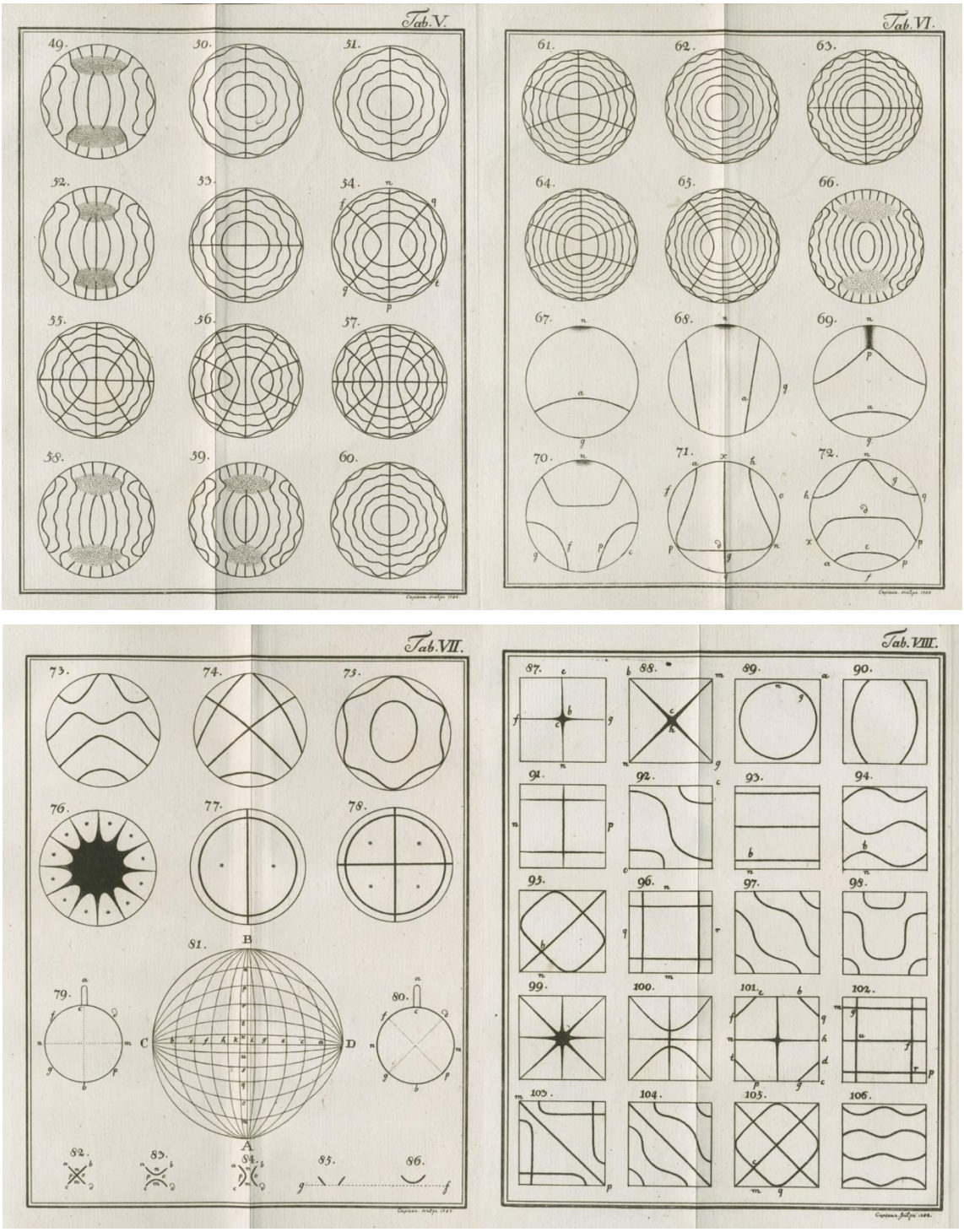
1776'dan itibaren Chladni, Leipzig Üniversitesi'nde hukuk ve felsefe alanlarında, aynı zamanda matematiksel ve fiziksel coğrafya, fizik, biyoloji ve geometri gibi konularda eğitim aldı ve 1781'de felsefe derecesi, 1782'de hukuk derecesi kazandı. Bu dönemde soyadını Chladenius'tan Chladni'ye değiştirdi. Wittenberg'e döndüğünde, babası onun için bir hukuk pozisyonu ayarladı.

Babanın 1782'deki ölümünden sonra Chladni'nin hayatı temel bir değişim geçirdi. Üvey annesine karşı sorumluluk hissetti ve bu da onun Wittenberg'de kalmak için temel motivasyonu oldu. 1784 yılında Wittenberg Üniversitesi'nde matematik profesörlerinden biri öldü ve Chladni boşalan pozisyon için başvuruda bulundu. 1783-1792 yılları arasında dersler verdi. 1784'ten itibaren geometri ve matematik coğrafya konularında ve 1786'dan itibaren gerçek araştırma alanı olan akustik konusunda dersler vermeye devam etti.

Başlangıçta, Chladni, farklı sınır koşullarında çubukların ve tellerin enine titreşimlerini araştırdı ve keman yayını mekanik uyarım aracı olarak kullandı. Bu yaklaşımın ilhamı, Bach'ın biyografi yazarı Nicolaus Forkel'in cam harmonikası üzerine bir yayınından geldi. Ses desenlerini anlama temel konsepti Georg Christoph Lichtenberg'in eserlerinin incelenmesinden elde edildi. 1787'de "Ses Teorisi Üzerine Keşifler" adlı kitapta çalışmalarını paylaşan Chladni, deneylerinde inceltilmiş bir metal plakanın üzerine ince kum tanecikleri serpmiş ve metal plakanın yanında keman çalarak çeşitli frekansta titreşimler oluşturmuştur. (Ullmann, 2007). Chladni yaptığı deneylerde farklı frekans bantlarında kum tanelerinin metal yüzey üzerinde farklı geometrik desenler ürettiğini gözlemiştir. Chladni'nin figürleri, titreşim frekansları ile üretilen sesin perdesi arasındaki ilişkiyi gösterdi. Bu çalışma, ses dalgaları ve rezonansın temel prensiplerini anlamanın temelini attı. Chladni'nin en önemli başarılarından biri, tez kapsamında da esin kaynağı olan ‘’Chladni figürleri’’ olarak bilinen figürlerin keşfedilmesidir. ‘’Akustiğin babası’’ olarak da bilinen Chladni onsekizinci yüzyılın sonlarına doğru titreşim üzerine yaptığı çalışmalarla akustik alanındaki gelişmelerin de yolunu açtı. Chladni figürlerinden bazıları Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Chladni figürleri -I



Şekil 2.10. Chladni figürleri - II

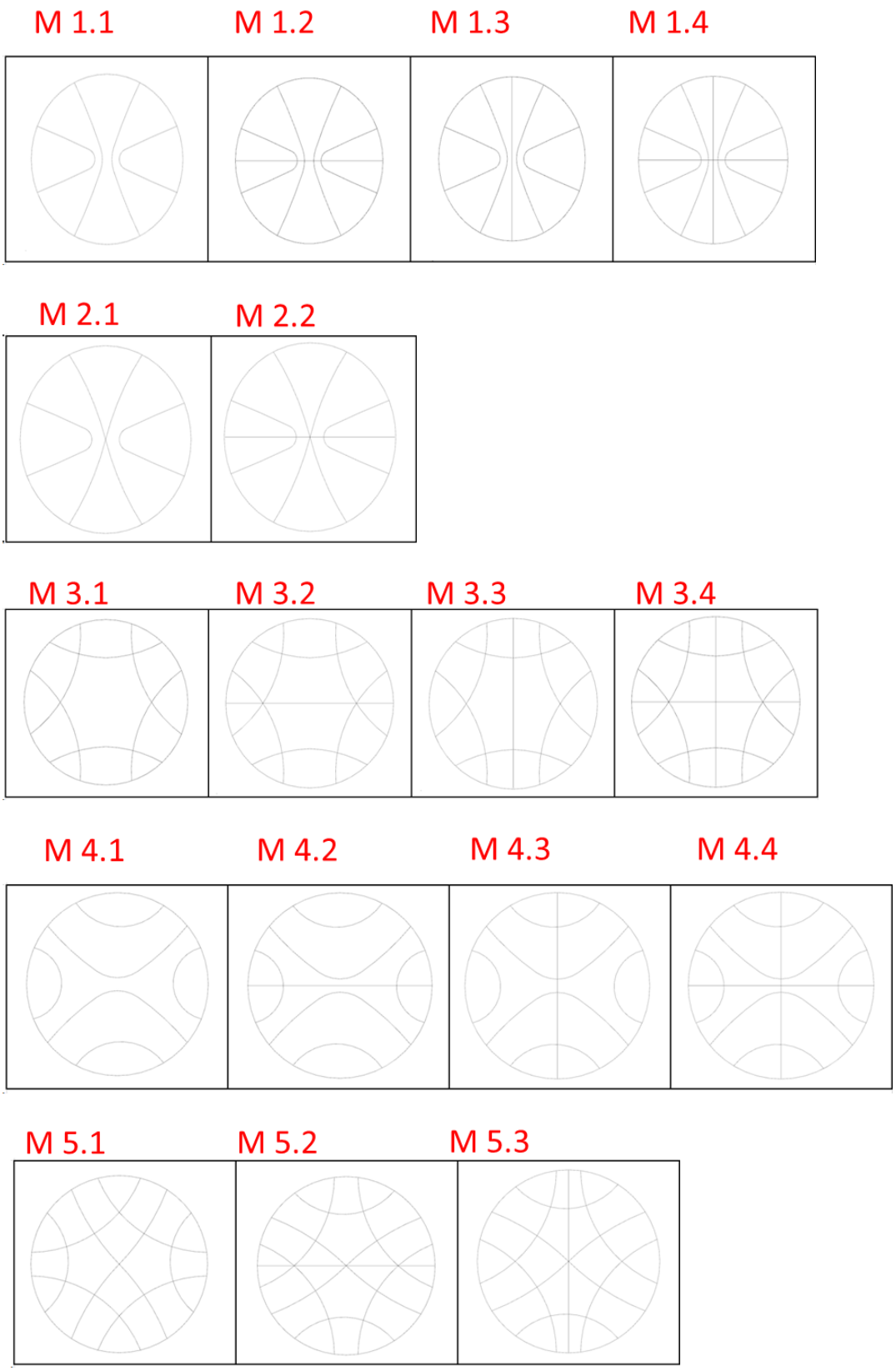
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında Chladni figürlerinden esinlenerek tasarlanmış ince cidarlı darbe emicilerin çarpışma kriterleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi sonrasında çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan COPRAS ile en iyi model seçilmiştir. En iyi modelin seçimi sonrasında ise optimizasyon çalışması yapılmıştır. İnce cidarlı darbe emicilerin dış çapları 40 mm ve boyları 100 mm olarak belirlenmiştir. Tasarlanan 17 farklı dairesel dış duvara sahip geometrilere 1 mm et kalınlığı atanmıştır. Çalışmada çarpışma değerlendirme kriterleri olarak en büyük çarpışma kuvveti, çarpışma kuvveti verimi ve enerji sönümleme kapasiteleri seçilmiştir. Çarpışma değerlendirme sonuçları COPRAS'a girdi olarak verilmiştir. COPRAS parametreleri literatürden alınmıştır. Optimizasyon çalışması için sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir. Bu tez çalışmasında optimizasyon süreci 3 adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda Latin hiperküp örnekleme (LHS) yöntemi ile deney setinin oluşturulması, ikinci adımda oluşturulan deneyi seti ile amaç ve kısıt fonksiyonları için meta modellerin oluşturulması, son adımda ise belirlenen amaç ve kısıt şatlarında gri kurt optimizasyon (GWO) yöntemi ile optimizasyonun gerçekleştirilmesidir.

3.1. Chladni Deneyinden Esinlenilmiş Yapılar(CDY)

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulan tasarımlarda ilham kaynağı olarak Chladni geometrileri seçilmiştir. Chladni deneyinden 5 farklı temel kesit geometrisi belirlenmiştir. Belirlenen kesitlerden 17 farklı geometri tasarlanmıştır. Esinlenilen kesit geometrilerinin dış çapları 40 mm ve boyları 100 mm olarak belirlenmiştir.

Chladni'den esinlenilerek tasarlanan 1 mm et kalınlıklı geometrilere AA6061 malzeme ataması yapılmıştır. Chladni'nin çalışmalarından esinlenilerek tasarlanan modellerde geometrik formlar simetrik ve merkezleri belli olan yaylar olacak şekilde kurgulanmıştır. Geometriler matematiksel olarak belirlendikten sonra, daha sonra enine, boyuna ve hem enine hem boyuna bağlantılarla birleştirilerek çarpışma performanslarının arttırılması amaçlanmıştır. Şekil 3.1'de 17 farklı geometrik modelin görselleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Chladni figürlerinden esinlenilerek tasarlanan geometriler

3.2. Çarpışma Değerlendirme Kriterleri

Darbe emicilerin çarpışmaya dayanıklılık karakterlerini değerlendirebilmek için performans kriterlerinin genel hatlarını belirlemek önem arz eder. Darbe emicilerin çarpışma dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılan ölçütleri toplam enerji emilimi (EA), spesifik enerji emilimi (SEA), maksimum çarpışma kuvveti (PCF), ortalama çarpışma kuvveti (MCF) ve çarpışma kuvveti verimi (CFE) olarak özetleyebiliriz (Albak, E.İ., 2020).

Darbe emici yapıların çarpışma değerlendirme kriterlerinden ilki kuvvet-yer değiştirme eğrisinin entegrasyonuyla hesaplanan toplam enerji emilimidir. Bu formülde *F* çarpışma kuvvetini ifade ederken *d* ise toplam yer değiştirmeyi gösterir. Bu çalışmada 60 mm olarak belirlenmiştir.

$$EA = \int_0^d F(x)dx \tag{3.1}$$

Spesifik enerji emilimi ise çarpışma enerjisinin sönümüyle ilişkili diğer bir kriterdir. Spesifik enerji emilimi (SEA), darbe emici yapıların birim kütlesi başına emilen enerjiyi ifade etmektedir. Bu formülde *m* darbe emici yapının kütlesini göstermektedir.

$$SEA = \frac{EA}{m} \tag{3.2}$$

Tüm çarpışma süresince ortaya çıkan en büyük çarpışma kuvvetini gösteren maksimum çarpışma kuvveti darbe emicilerin dayanımında önemli bir parametredir. Maksimum çarpışma kuvvetinin yüksek olması kontrolsüz bir deformasyon ve yolcular için tehlike ortaya çıkması anlamına gelmektedir. Ortalama çarpışma kuvveti (MCF), darbe emici yapıların ortalama çarpışma dayanıklılığını ifade eder ve şu şekilde hesaplanır:

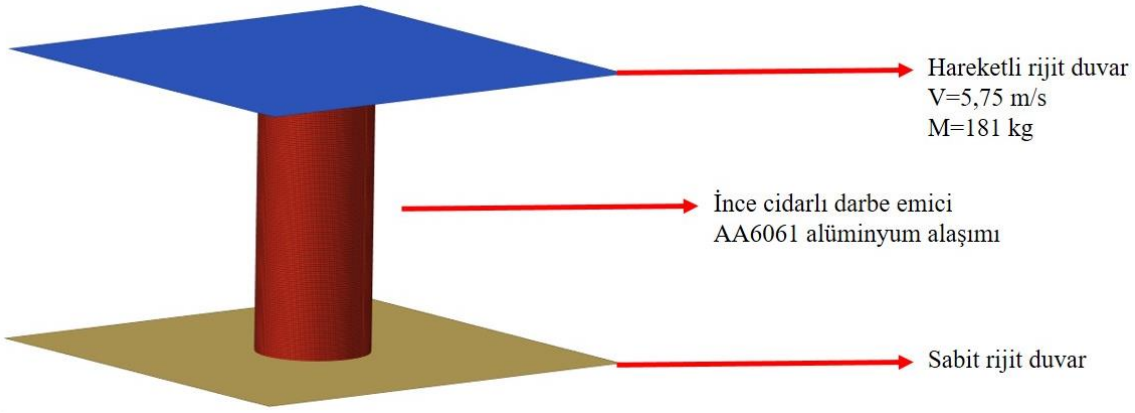
$$MCF = \frac{EA}{d} \tag{3.3}$$

Çarpışma kuvveti verimi(CFE), ortalama çarpışma kuvvetinin maksimum çarpışma kuvvetine bölünmesiyle elde edilir. Çarpışma kuvveti veriminin yüksek oluşu enerji emiliminin de iyi olduğu anlamına gelir.

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \tag{3.4}$$

3.3. Sonlu Elemanlar Modeli

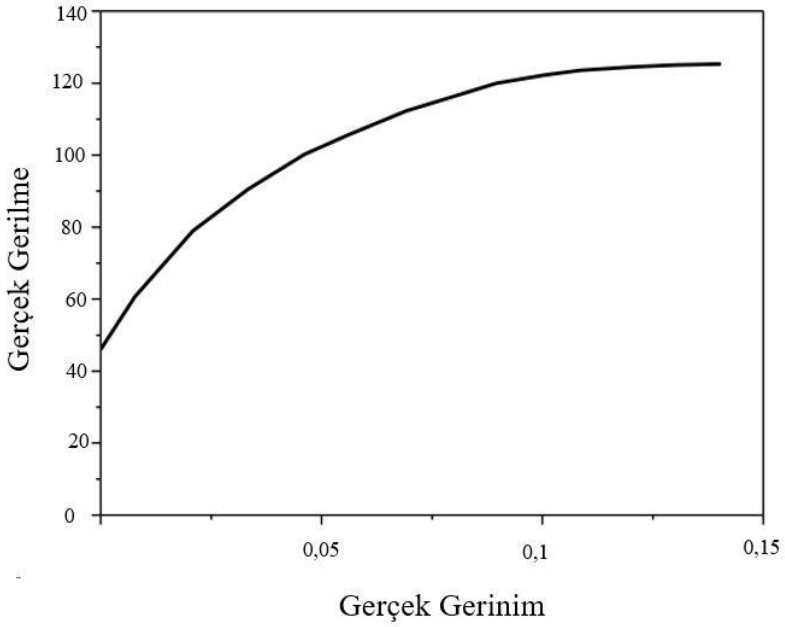
Darbe emici boyunca deformasyona maruz bırakılan ince cidarlı yapıların çarpışma davranışı, doğrusal olmayan sonlu elemanlar (FE) kodlarından Radioss kullanılarak simüle edilmiştir. Hazırlanan sonlu elemanlar modeli hareketli bir üst duvar, darbe emici yapı ve sabit bir alt duvar olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Darbe emici yapı, altı serbestlik derecesinde sınırlandırılmış alt rijit duvarın merkezine yerleştirilmiştir. θ=0 çarpma açısı ve Vo = 5750 mm/s hızıyla hareket eden 181 kg ağırlığındaki hareketli rijit duvar darbe emici yapıları 60 mm boyunca deforme etmektedir.



Şekil 3.12. Sonlu elemanlar modeli

Hareketli ve sabit rijit duvarlar, Radioss'taki rijit duvar tanımı kullanılarak modellenmiş ve herhangi bir malzeme ve eleman tanımı yapılmamıştır. Darbe emici yapılara dört düğümlü kabuk eleman formülasyonu ile ağ yapısı tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinin doğruluğunun arttırılması için eleman yakınsama analizleri yapılmış olup, en uygun eleman boyutu olarak 0,80 mm belirlenmiştir. Çarpışma süresince ağ

yapılarında girişim olmaması adına kendine temas etmeye izin veren kontak modeli açılmıştır. Global olarak 0,20 sürtünme katsayısı atanmıştır. (F. Tarlochan ve ark.,2013). AA6061 malzeme tanımı yapılan darbe emici yapılara izotropik elastoplastik malzeme kartı olan MAT36 atanmıştır.

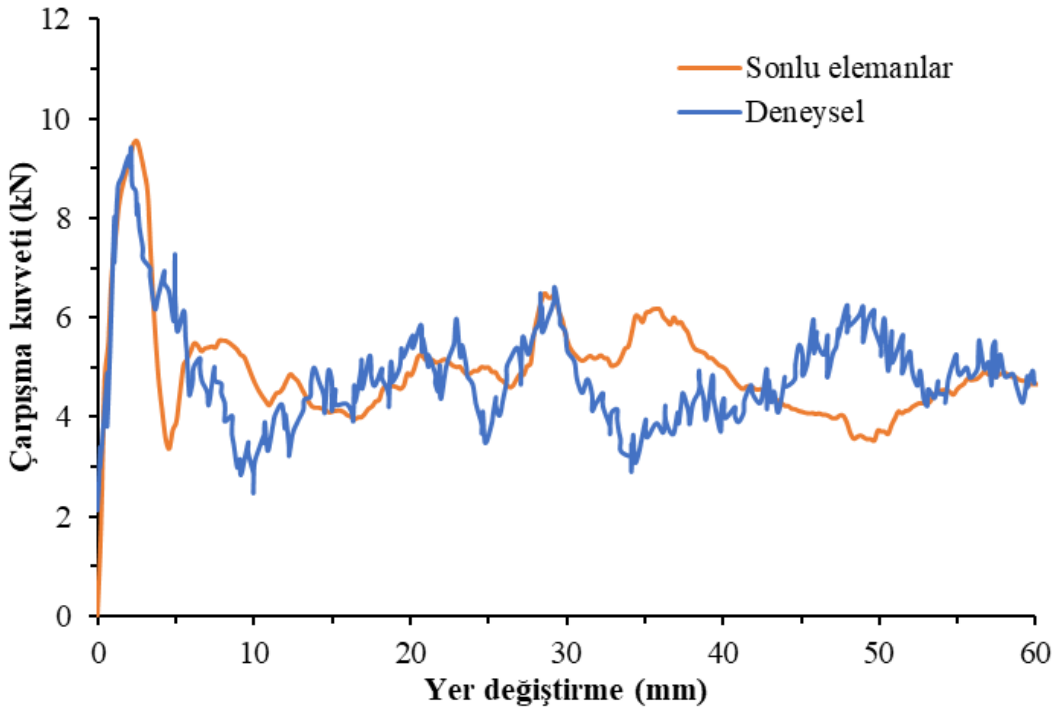


Şekil 3.13. AA6061 malzeme gerçek gerilme – gerçek gerinim eğrisi

3.4. Sonlu Elemanlar Modeli Doğrulama

Bu çalışmada sonlu elemanlar modelinin doğrulaması literatürden referans alınarak yapılmıştır. Li, ve ark. (2019) üç farklı tipte deney numunelerine düşen ağırlık darbe testi uygulamışlardır. Deney sistemindeki düşen ağırlığın kütlesi 181 kg ve çarpma hızı ise 5750 mm/s olarak belirlenmişti. Testlerde kullanılan numunelere eşdeğer sonlu elemanlar modelleri hazırlandı ve test düzeneğinde kullanılan parametrelerle sonlu eleman analizleri gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalar ile sonlu eleman analiz sonuçlarının kıyaslaması ilk olarak deformasyon modları üzerinden yapıldı. Kıyaslamalar sonucunda sonlu eleman analizleri sonuçları ile deneysel çalışmalarda ortaya çıkan katlanma davranışlarının birbiriyle uyumlu olduğu gözlendi.

Katlanma modlarının yanında çarpışma kuvveti-yer değiştirme sonuçları da model doğrulamada önem arz etmektedir. Çarpışma kuvveti-yer değiştirme sonuçları da test sonuçlarıyla korelasyon göstermiştir. Eğri üzerindeki dalgalanmalar deneysel çalışmadan elde edilen eğrinin dalgalanmalarıyla uyum göstermektedir. Sonlu eleman analizleri ve deneysel çalışmalardan elde edilmiş çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Sonlu eleman modeli doğrulama

3.5. Copras Yöntemi

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan COPRAS bu tez çalışmasında Chladni'den esinlenilerek tasarlanan 17 farklı ince cidarlı yapıdan ideal tasarımın seçilmesi için kullanılmıştır (Zavadskas ve ark., 2008). COPRAS metodu uygulama kolaylığından dolayı çok kriterli karar verme durumlarında sıklıkla tercih edilir (Albak ve ark., 2021). COPRAS yöntemi aşağıda verilen adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Karar matrisi(X):

$$\boldsymbol{X}=[x_{ij}]_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

İlgili matriste x_{ij}, i. alternatifin j. göstergesinin değerini verir. m ve n ise sırasıyla alternatif ve göstergelerin sayısını ifade eder.

Adım 2: Karar matrisinin normalizasyonu:

$$\boldsymbol{R}=[r_{ij}]_{mn} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (3.6)$$

normalizasyon, farklı birimlere sahip olan veri setlerini aynı ölçek üzerinde ifade etmek için kullanılan bir veri işleme yöntemidir.

Adım 3: Her bir kritere atanan ağırlık katsayısı ile normalize edilen matrisin çarpımıyla ağırlıklandırılmış normalize matrisin oluşturulması:

$$\boldsymbol{D}=[d_{ij}]_{mn} = r_{ij}\ x\ w_j \quad (3.7)$$

Adım 4: Maliyet ve fayda kriterlerine ait değerlerin hesaplanması:

$$S_{+i} = \sum_{i=1}^{m} d_{+ij} \quad (3.8)$$

$$S_{-i} = \sum_{i=1}^{m} d_{-ij} \quad (3.9)$$

Bu formülasyonda ise S_{+i} faydalı, S_{-i} faydalı olmayan kriterlerin toplamını verir.

Adım 5: Son olarak ise performans indeksi (U_i) hesaplanması ve sıralamaların elde edilmesi:

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} x\%100 \quad (3.10)$$

U_i değerleri sıralanarak alternatiflerin tercih sırası atanır.

3.6. Latin Hiperküp Yöntemi (LHS)

Latin hiperküp örnekleme yöntemi, belirlenen tasarım uzayında verimli bir şekilde temsil etmek ve deneylerin eşit şekilde dağıtılmasını sağlamak için mühendislik

optimizasyonlarında kullanılır. LHS'nin mühendislik alanındaki optimizasyon problemlerinde kullanılmasının bazı nedenleri şunlardır:

- ***Tasarım uzayında etkin örnekleme:*** Mühendislik problemleri genellikle çok sayıda tasarım değişkeni içerir. Yüksek doğruluklu metamodeller elde etmek için LHS, bu tasarım uzayını etkin bir şekilde örneklemek için kullanılabilir.
- ***Tasarım uzayında homojen dağılım:*** LHS, deney setini noktalarını rastgele seçmek yerine, tasarım uzayını homojen bir şekilde bölerek seçer. Bu, optimizasyon algoritmalarının tüm tasarım uzayını kapsamasını ve önemli bölgelere daha fazla odaklanmasına olanak tanır.
- ***Daha az deneme ile daha doğru metamodeller***: LHS, diğer rastgele örnekleme yöntemlerine göre daha az deneme ile daha iyi sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu, optimizasyon sürecinin daha kısa olmasını ve işlem yükünün az olmasını sağlar.

LHS'nin bu avantajları yöntemi mühendislik optimizasyonu problemlerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Bu teknik, tasarım sürecini iyileştirmek ve en uygun çözümleri daha hızlı bir şekilde bulmak için kullanılan önemli bir araçtır.

3.7. Radial Temelli Fonksiyonlar (RBF)

Mühendislik alanındaki optimizasyon problemlerinde optimum tasarım değişkeninin elde edilmesi için çok sayıda iterasyonun denenmesi gerekmektedir. Mühendislik alanındaki optimizayon problemlerinde yüksek sayıda iterasyon hem çok uzun süreler gerektirmekte hem de iterasyon için gerekli analiz veya testler maliyetli olurken hazırlık süreçleri de uzun olmaktadır. Bu nedenle metamodelleme yöntemleri, tekrarlanan analiz veya testlerden kaçınmak ve optimizasyon sürecini hızlandırmak için kullanılır. Metamodeller, gerçek sistemin davranışını basitleştirilmiş bir model olarak temsil eder. Bu model, gerçek sistemin karmaşıklığını azaltarak, analiz veya testlerin daha hızlı ve daha az maliyetli bir şekilde yapılmasını sağlar.

RBF, çok boyutlu enterpolasyon yöntemlerinden biridir ve yüksek hesaplama maliyetli sayısal simülasyonlar içeren mühendislik problemi yanıtlarını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Acar, 2015). RBF, gerçek değeri aşağıdaki fonksiyonla hesaplar:

$$r_{RBF}(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \emptyset(\|x - x_i\|) \quad (3.11)$$

burada *x*, girdi değişkenlerinin vektörü, *n*, örnekleme noktalarının sayısı, x_i, i'inci örnekleme noktasındaki girdi değişkenlerinin vektörüdür. λ_i, bilinmeyen interpolasyon katsayısı, $\emptyset$ temel fonksiyon ve $\|x - x_i\|$, öklid uzaklığıdır. RBF yönteminde çok tercih edilen temel fonksiyonlar aşağıda verilmiştir (Yin ve ark., ,2016a).

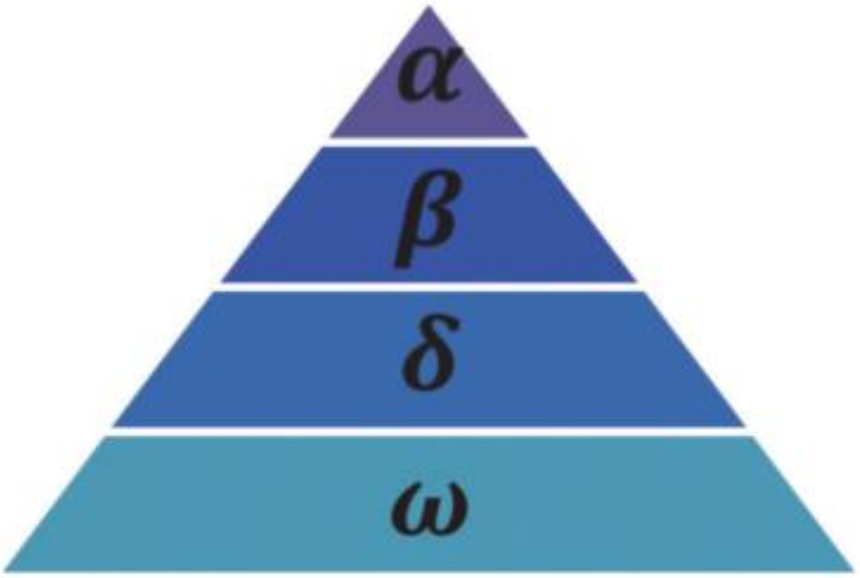
$$\phi_r = \exp(-cr^2) \text{ (Gaussian)}$$
$$\phi_r = \sqrt{r^2 + c^2} \text{ (Multi-quadratic)}$$
$$\phi_r = \frac{1}{\sqrt{r^2 + c^2}} \text{ (Inverse multi-quadratic)}$$
$$\phi_r = d^2 ln(cr^2) \text{ (Thin plate)}$$

burada, *d* öklid mesafesidir ve *c* kullanıcı tanımlı bir sabittir.

3.8. Gri Kurt Optimizayon Algortiması (GWO)

Gri kurt optimizasyon algoritması (GWO), 2014 yılında Mirjalili tarafından literatüre kazandırılan ve doğadaki gri kurtların avlanma davranışını ve sosyal liderliğini taklit eden bir meta sezgisel optimizasyon algoritmasıdır (Mirjalili ve ark.,2014).

Yöntemin ilham kaynağı gri kurtların doğadaki liderlik yeteneği ve avlanma davranışıdır. Kurtlar dört ana sınıfa ayrılır: alfa (α), beta (β), delta (δ) ve omega (ω). Bu kategoriler sosyal hiyerarşiye ve sürüdeki her kurdun becerisine göre belirlenir. Gri kurdun hiyerarşisi Şekil 5'te verilmiştir. Alfa kurtlar sürüye hâkim olan ve sürüyü yöneten kurtlardır. GWO yöntemi: avı takip etmek, çevrelemek ve saldırmak olmak üzere üç temel adımdan oluşur.



Şekil 3.15. Gri kurt hiyerarşisi (Mirjalili ve ark., 2014).

Alfa olan kurtlar baskın, sürüye hükmeden ve lider kurtlarıdır. Beta kurtlar alfa kurtların sürü içerisindeki yardımcılığını yapan, alfa kurtlar ile omega ve delta kurtlar ile ilişimini sağlayan kurt grubudur. Omega kurtlar sürünün hiyerarşisinde en altta bulunan kurt grubudur. Avlanma sırasında beslenme hakkı en sonda gelen kurt grubudurlar. Delta kurtlar ise omega kurtlardan bir üst grupta ve sürüyü tehlikelere karşı uyarmakla görevlidirler. Hiyerarşik düzen içerisinde sadece omega kurtlara hükmedebilirler.

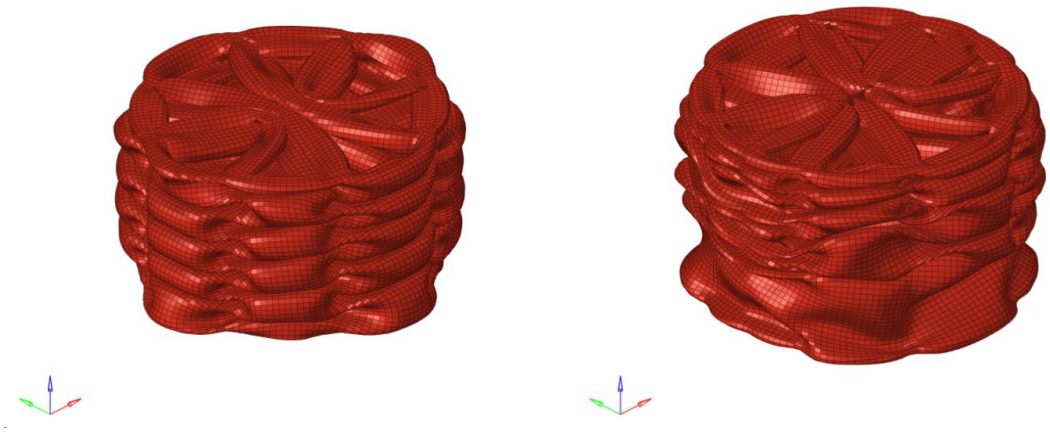
Gri kurtların avlanma stratejisinde öncelikle avın yeri tanımlanır ve alfa kurdun liderliğinde avı kuşatırlar. Gri kurtların avlanma taktiğinde alfa, beta ve delta kurtların avın yeri konusunda daha iyi bilgi sağladığı varsayılır. Bundan dolayı gri kurt optimizasyonunun matematiksel modelinde de ilk üç en iyi çözüm alfa, beta ve omega olarak belirtilir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

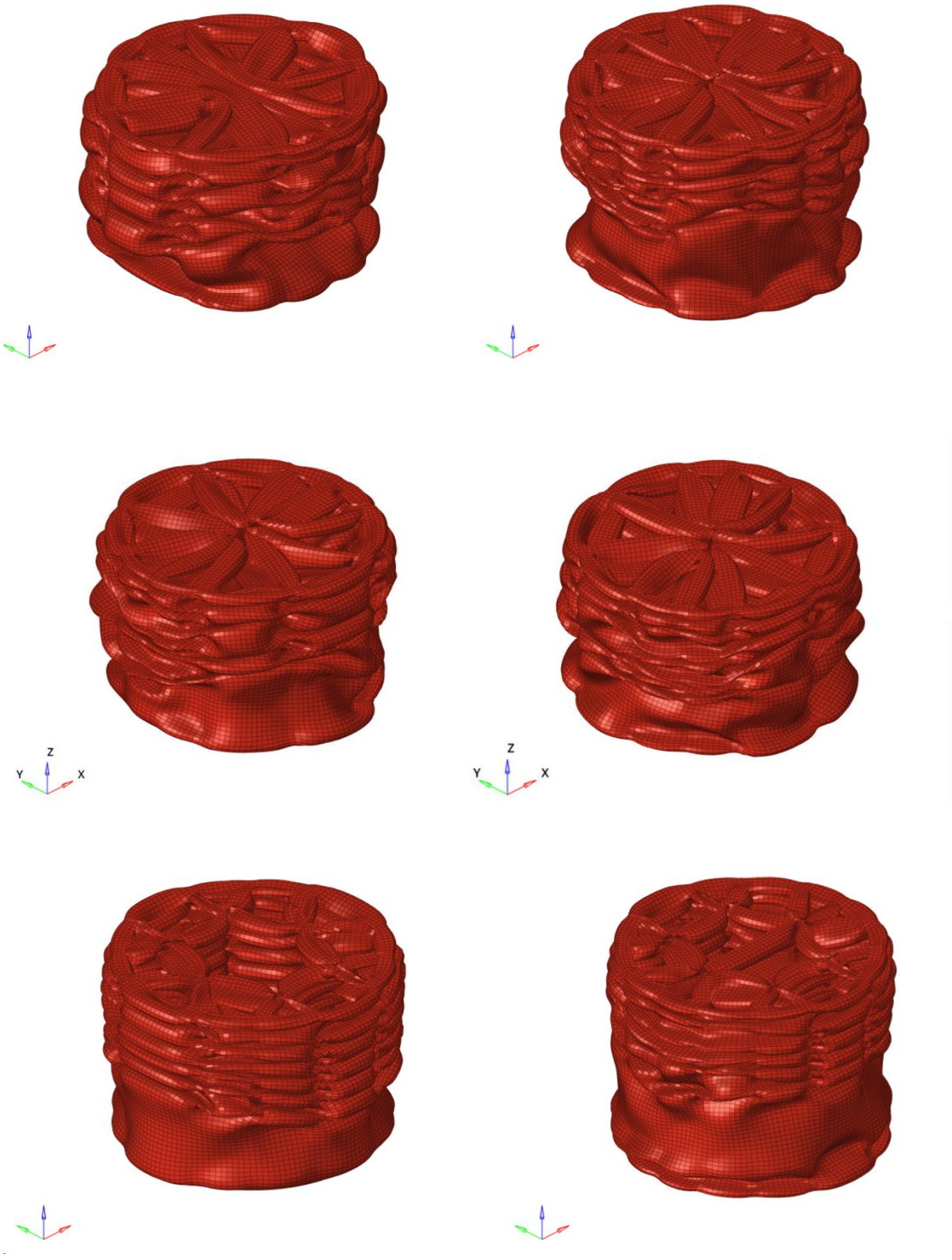
Tez çalışmasının ilk aşamasında Chladni'nin deneylerinden esinlenilerek tasarlanmış modellerin sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinden en büyük çarpışma kuvveti, ortalama çarpışma kuvveti, çarpışma kuvveti verimi ve enerji sönümleme kapasiteleri sonuçları raporlanmıştır.

4.1. Chladni Deneyinden Esinlenilmiş Yapıların Sonlu Eleman Sonuçları

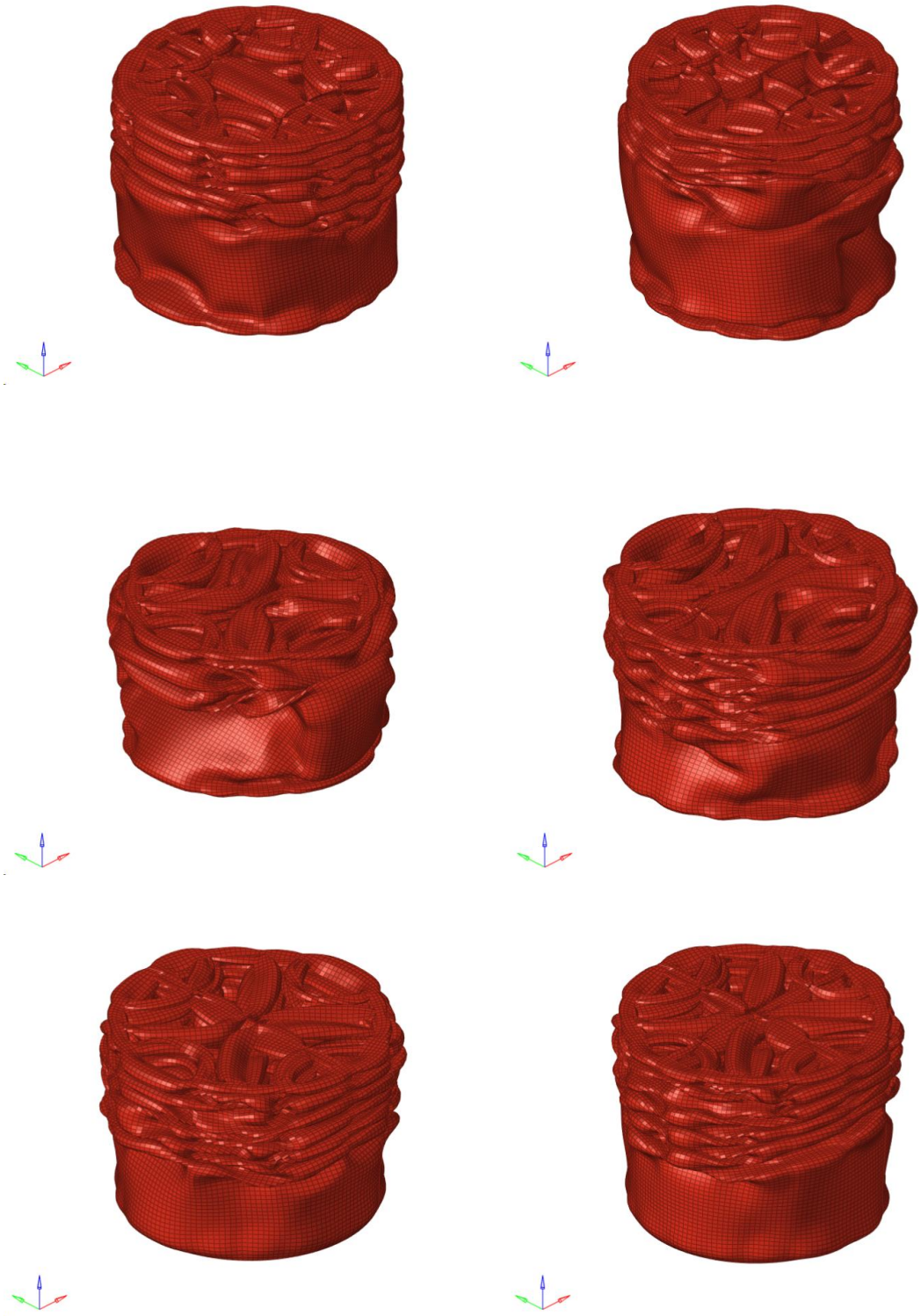
Darbe emicilerin deforme oluş şekli ve katlanma sayıları yapıların çarpışma performansının değerlendirilmesinde önem arz eder. (Li ve ark., 2017). Yapılan analiz çalışmalarının sonuçlarında temel modellerin kontrollü bir katlanma davranışı sergilemiştir. Ancak sonlu eleman modellerinden dört numaralı grubun ilk tasarımı bu durumun dışına çıkmaktadır. Darbe sönümleyen yapıların kademeli ve düzgün katlanma modu sergilemesi çarpışma kriterlerini olumlu olarak etkiler.



Şekil 4.1. Chladni deneyinden esinlenilmiş yapıların sonlu eleman sonuçları



Şekil 4.1. Chladni deneyinden esinlenilmiş yapıların sonlu eleman sonuçları(devamı)



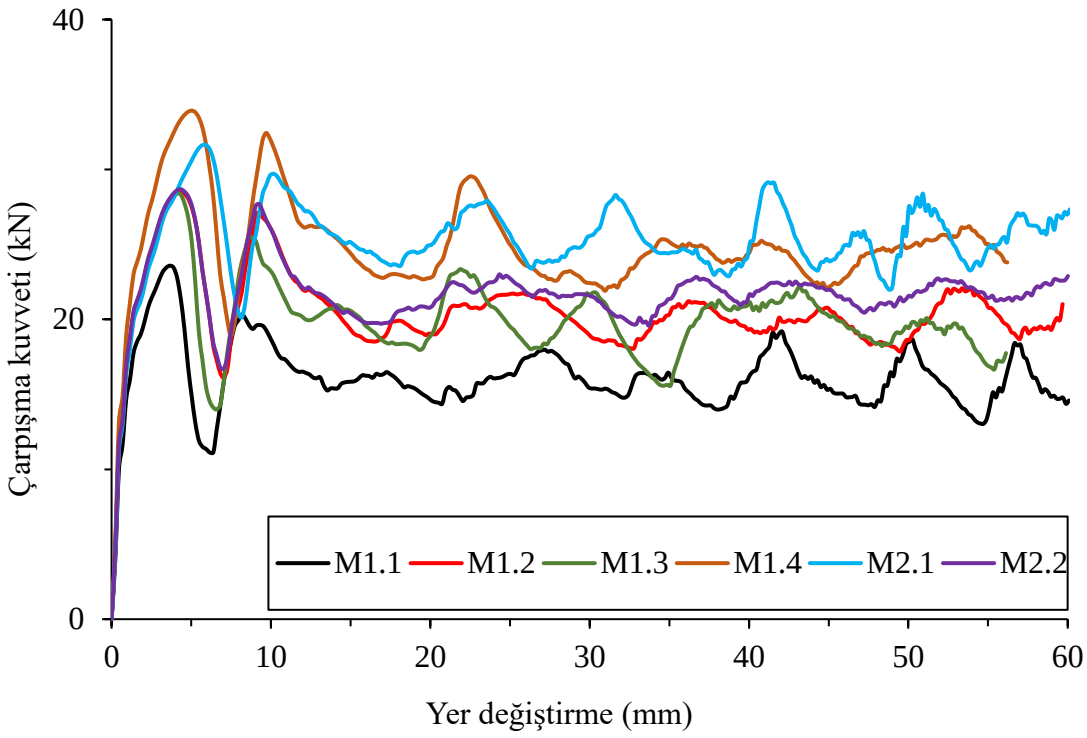
Şekil 4.1. Chladni deneyinden esinlenilmiş yapıların sonlu eleman sonuçları(devamı)



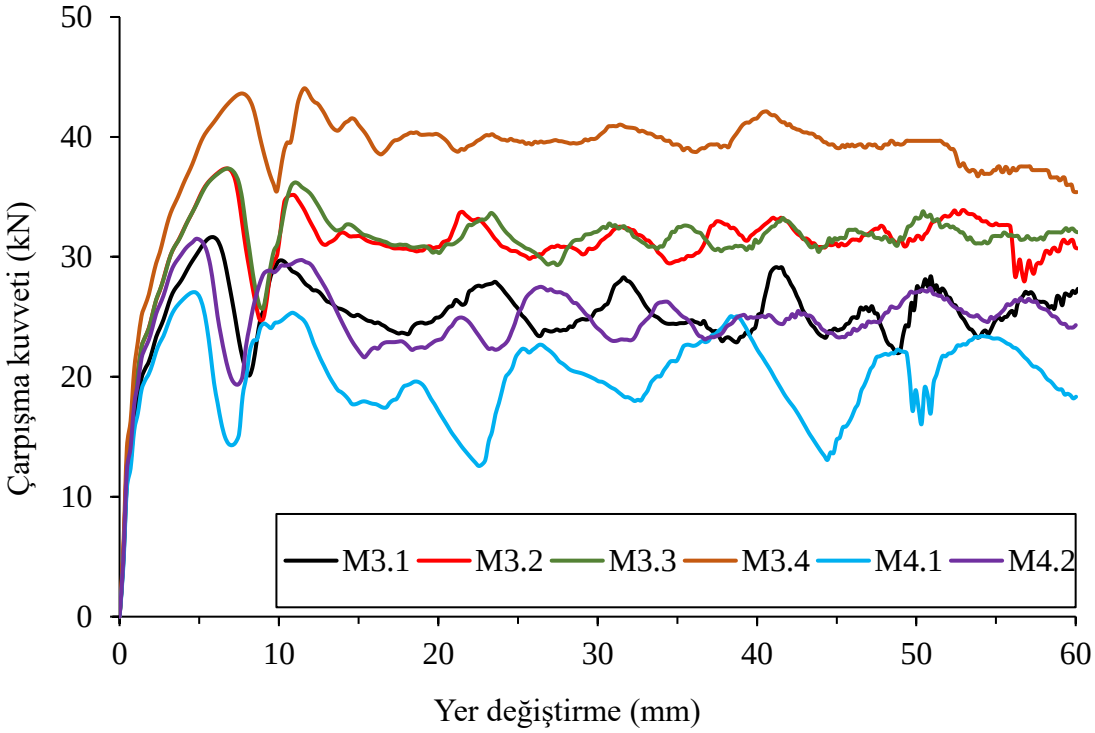
Şekil 4.1. Chladni deneyinden esinlenilmiş yapıların sonlu eleman sonuçları(devamı)

Sonlu eleman analizlerinin sonucunda ortaya çıkan kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.2'de sunulmuştur. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri değerlendirildiğinde her bir analiz

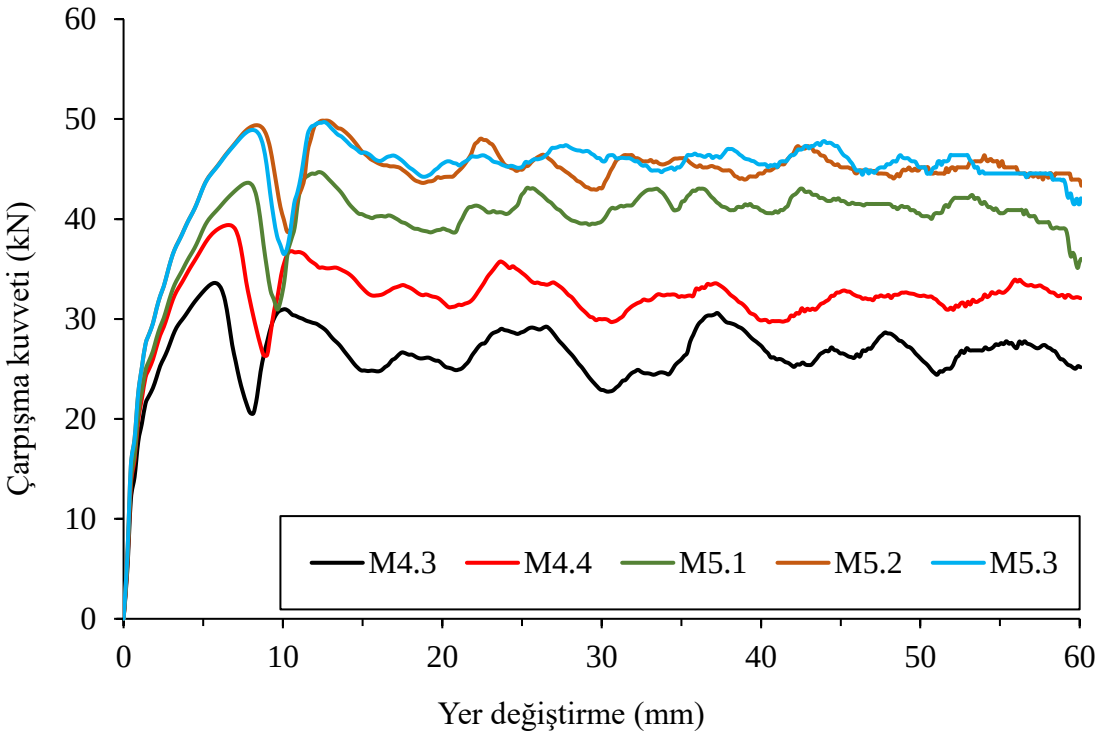
modelinde ortak olarak gözlenen durum deformasyonun ilk anlarında kuvvet değerinin tepe değerine ulaşması, sonrasında hızlı bir düşüş ve son olarak dengeli bir kuvvet saçılımı sergilemesidir. İnce cidarlı darbe emicilerin tasarımlarına bağlı olarak hücre sayısında ortaya çıkan artışla kuvvet-yer değiştirme eğrileri de yukarı yönlü olarak ötelenmiştir. Bu kapsamda ince cidarlı darbe emicilerin enerji emilim kabiliyetinin iyileştiğini söyleyebiliriz.



Şekil 4.2. Çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri(a)

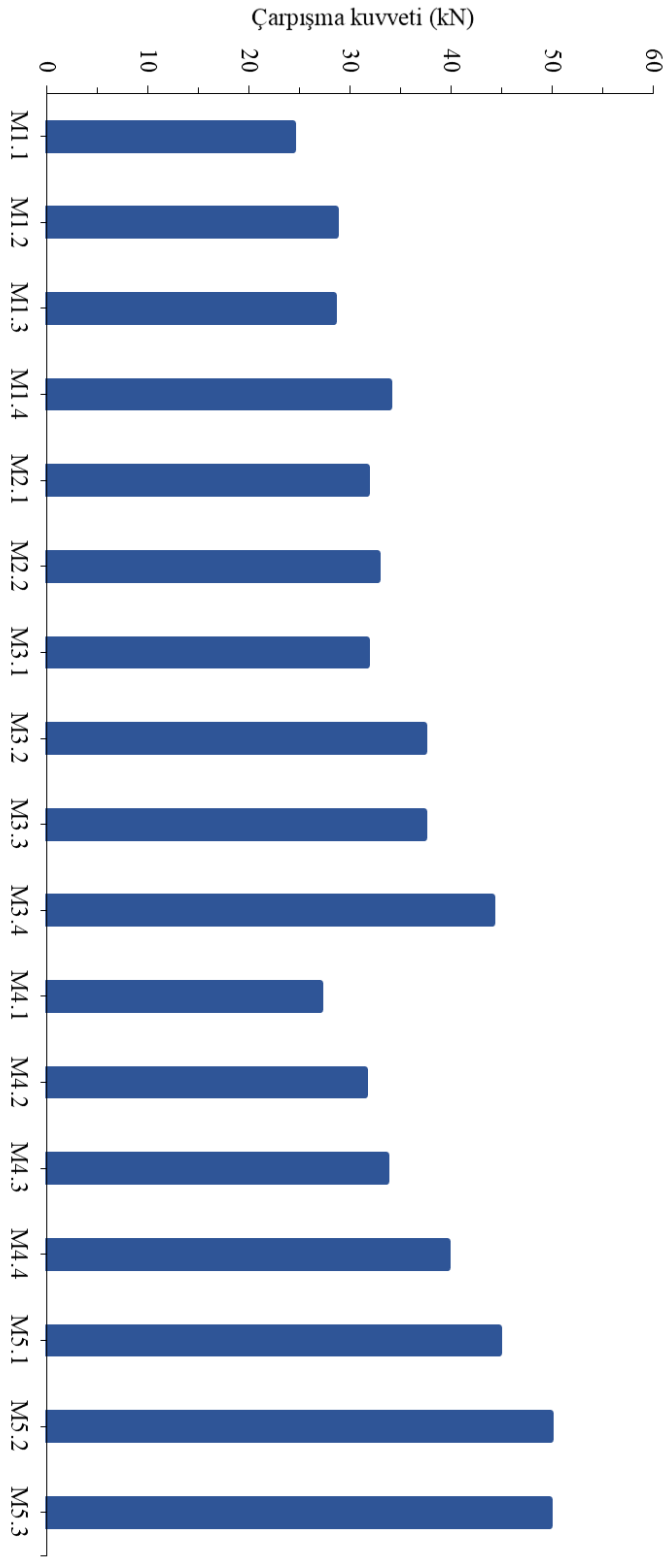


Şekil 4.2. Çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri(b)

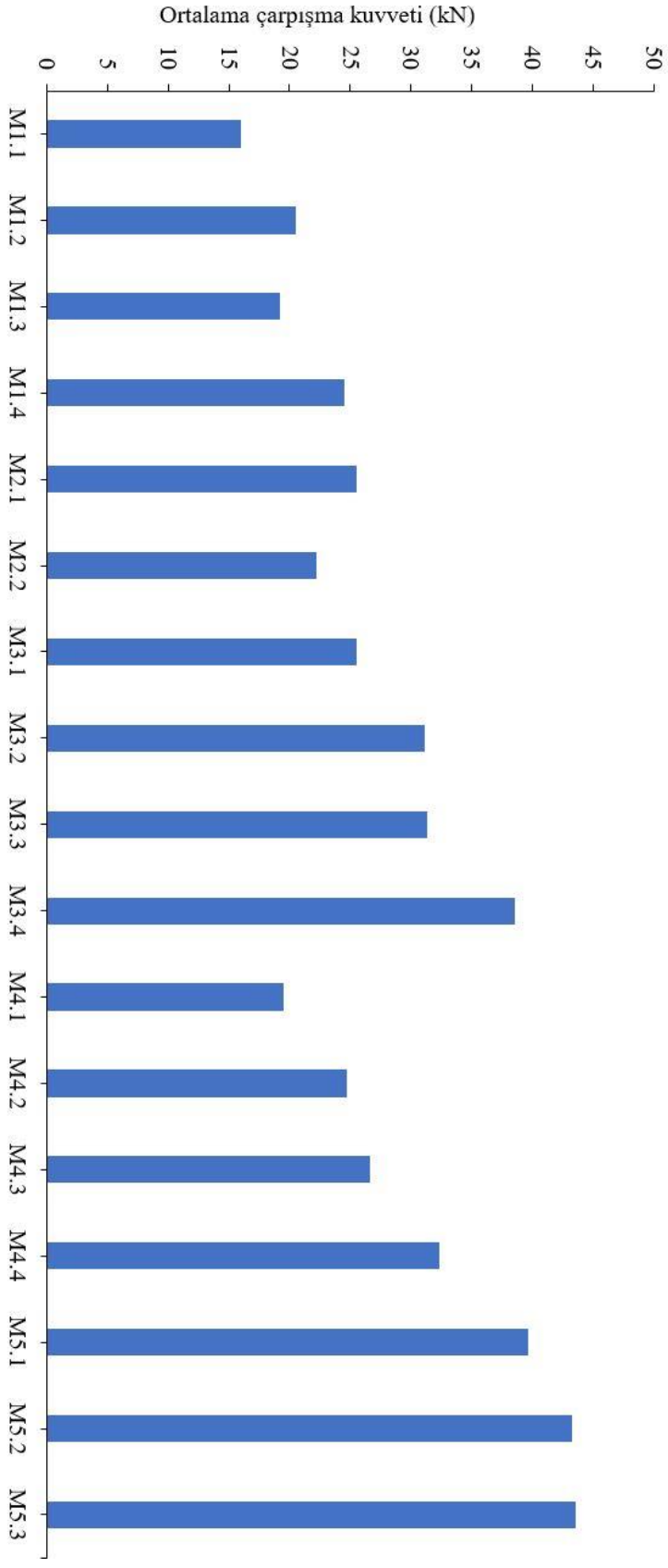


Şekil 4.2. Çarpışma kuvveti-yer değiştirme eğrileri(c)

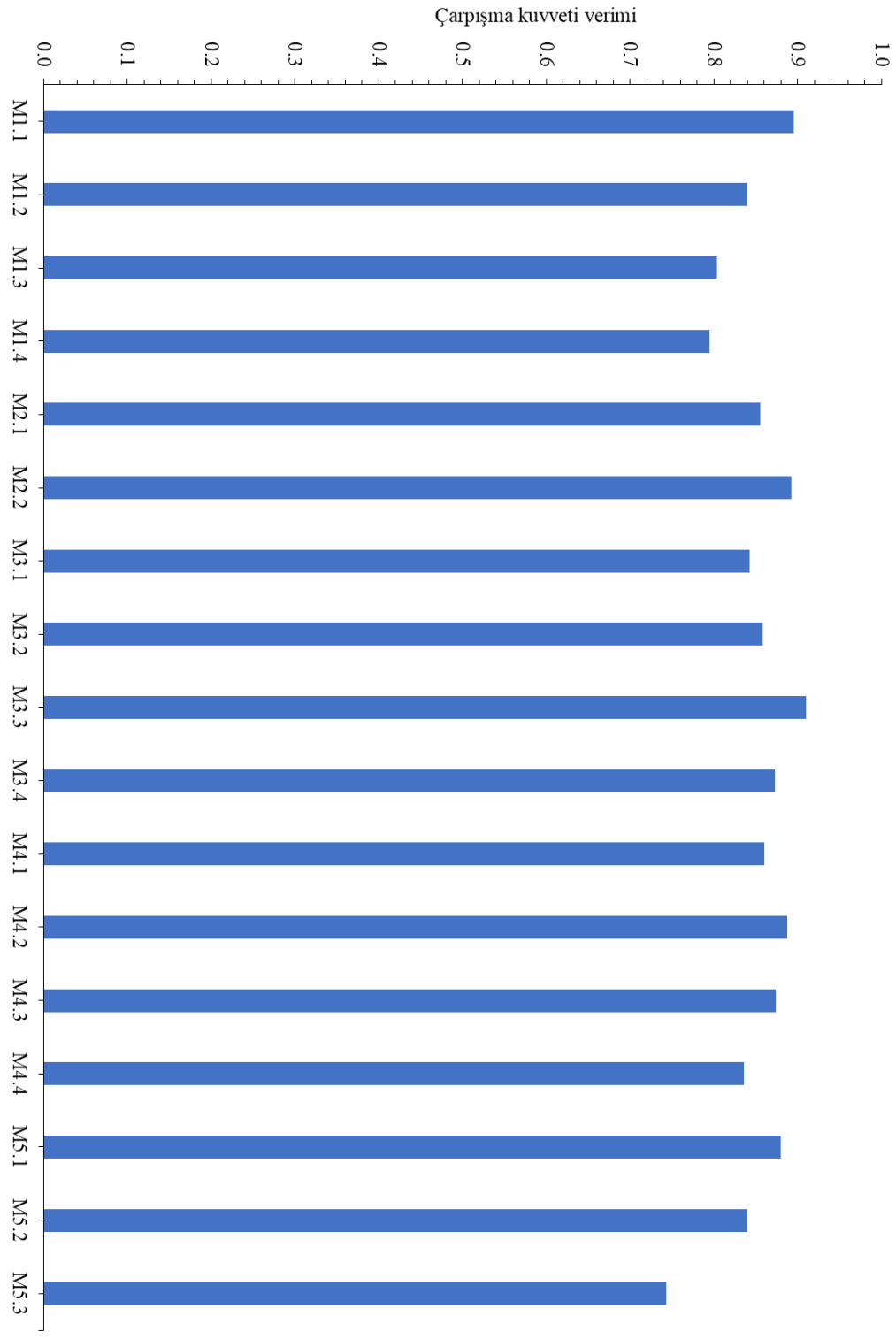
Darbe emici yapıların çarpışma performansı kriterlerinin değerlendirilmesinde kullanılan diğer ölçütler maksimum çarpışma kuvveti, çarpışma kuvveti verimi, enerji ve spesifik enerji emilimidir. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de sonlu eleman analizleri sonucunda ortaya koyulmuş değerler verilmiştir. Darbe emicilerin görevlerini daha etkili olarak sağlaması için yüksek enerji emilimi ve çarpışma kuvveti veriminin yanında düşük maksimum çarpışma kuvveti değerine sahip olması gereklidir. En büyük çarpışma kuvveti grafiği değerlendirildiğinde, M1.2 kodlu analiz modelinden başlayarak M2.2, M3.2 ve M5.2 kodlu sonlu eleman modellerinin kendinden sonra gelen modellerden daha yüksek maksimum çarpışma kuvveti değeri verdiği gözlenmiştir. Ancak M4.2 kodlu sonlu eleman modeli bu durumu M4.3'e karşı göstermemiştir. Grafikleri incelediğimizde hücre sayısındaki artışa bağlı olarak en büyük çarpışma kuvveti değerinde de yükseliş olduğunu söyleyebiliriz. Bu durumun sebebini hücre sayısındaki artışa bağlı olarak yapısal rijitliğin de artışı olarak açıklayabiliriz. Çarpışma kuvveti verimi grafiğini incelediğimizde artan hücre sayısıyla verimin de artış trendi sergilediğini söyleyebiliriz. M1.2 kodlu model en büyük çarpışma kuvveti değerinde M1.4 kodlu modelin gerisinde iken çarpışma kuvveti veriminde aynı verim değerini sağlamıştır. Buna aksi yönde bir örnek ise M5.2 ve M5.3 arasında gözlenmiştir. Daha yüksek çarpışma kuvveti veren M5.2 çarpışma kuvveti veriminde M5.3'ün gerisinde kalmıştır. Bundaki sebep olarak M5.3'ün ortalama çarpışma kuvveti değerinde daha üstün performans sergilemesi söylenebilir. Sonlu eleman analizleri sonucunda en yüksek çarpışma kuvveti verimi M5.1 kodlu modelde ortaya çıkmıştır. Darbe emicinin kısa adımlı ve düzenli bir katlanma modu sergilemesi bunun sebebi olarak söylenebilir. Spesifik enerji emilimi değerleri ise en büyük çarpışma kuvveti ve çarpışma kuvveti verimi grafiklerine paralel bir sonuç vermiştir. İnce cidarlı yapıların tasarımlarındaki iç destek hücrelerinin artışına paralel olarak spesifik enerji emilimleri de artış göstermiştir. En yüksek enerji sönümleme kabiliyeti çarpışma kuvveti veriminde olduğu gibi M5.1 kodlu sonlu eleman modelinde ortaya çıkmıştır.



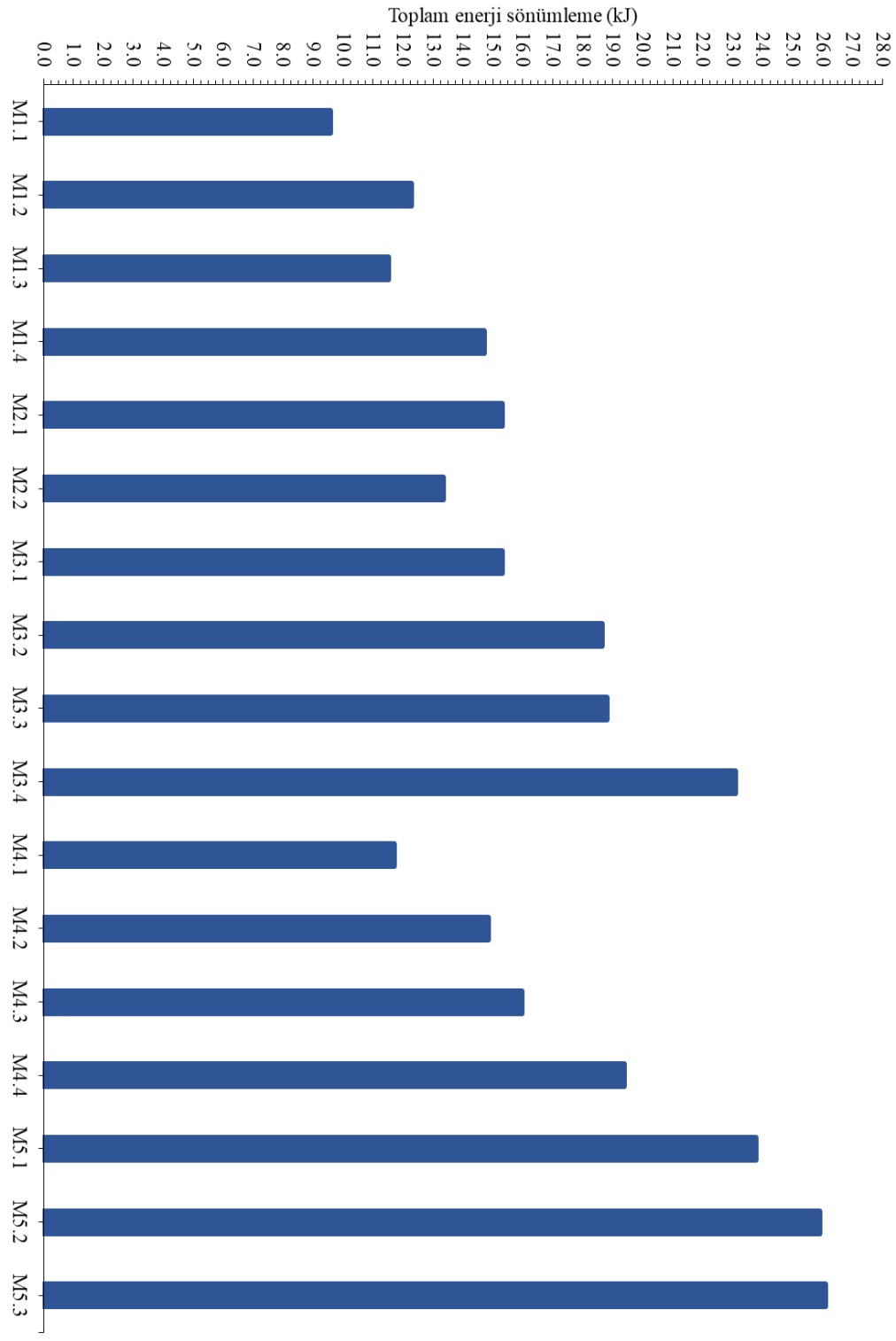
Şekil 4.3. Chladni'den esinlenilen modellerin çarpışma kuvveti sonuçları



Şekil 4.4. Chladni'den esinlenilen modellerin ortalama çarpışma kuvveti sonuçları



Şekil 4.5. Chladni'den esinlenilen modellerin çarpışma kuvveti verimi sonuçları



Şekil 4.6. Chladni'den esinlenilen modellerin toplam enerji sönümleme sonuçları

4.2. COPRAS Sonuçları

Bu tez kapsamında Chladni'den esinlenilerek tasarlanan darbe emicilerden ideal olan tasarım COPRAS ile seçilmiştir. On yedi farklı tasarıma ait sonlu elemanlar analizlerinden en büyük çarpışma kuvveti, çarpışma kuvveti verimi, enerji ve spesifik enerji emilimi değerleri elde edilmiştir. Sonrasında bu değerlere ağırlıklandırma uygulanmıştır. Literatürden PCF, SEA, EA ve CFE için sırasıyla 0,333, 0,333, 0,167 ve 0,167 ağırlıklandırma değerleri alınmıştır (Zhu ve diğ., 2023). Ağırlıklandırmanın ardından sıralama matrisi ve performans indeksi belirlenmiştir (Çizelge 4.1). COPRAS yöntemiyle, 23,78 kJ'lık enerji sönümleme, 44,69 kN maksimum çarpışma kuvveti ve 0,887 çarpışma kuvveti verimine sahip olan model en iyi alternatif olarak seçilmiştir. (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1. COPRAS girdileri

ağırlıklandırma	0,333	0,167	0,333	0,167
min veya max	min	max	max	max
	PCF	EA	SEA	CFE
M1.1	24,36925	9,583899	0,129233	0,655464
M1.2	28,54459	12,29816	0,144752	0,718068
M1.3	28,38734	11,53252	0,135741	0,677093
M1.4	33,92105	14,71481	0,153663	0,722993
M2.1	31,6284	15,30921	0,185386	0,806723
M2.2	32,76113	13,34161	0,156042	0,678732
M3.1	31,6284	15,30921	0,185386	0,806723
M3.2	37,35192	18,64933	0,199714	0,832145
M3.3	37,36659	18,80961	0,201431	0,838967
M3.4	44,05516	23,10252	0,221713	0,874
M4.1	27,04358	11,70243	0,148508	0,721208
M4.2	31,49885	14,85039	0,165741	0,785763
M4.3	33,6039	15,97991	0,178347	0,792562
M4.4	39,61151	19,38936	0,193121	0,815814
M5.1	44,69368	23,78457	0,229803	0,886948
M5.2	49,84046	25,90852	0,226671	0,866382
M5.3	49,70122	26,1026	0,228369	0,875317

Çizelge 4.2. COPRAS sonuçları

Model	S+	S-	1/S-	Qi	Ui	Sıralama
M1.1	0,027664	0,013391	74,67777	0,055156	0,854116	13
M1.2	0,031684	0,015685	63,75433	0,055154	0,854094	14
M1.3	0,029758	0,015599	64,10747	0,053358	0,826283	17
M1.4	0,034098	0,01864	53,6493	0,053848	0,833866	15
M2.1	0,038913	0,01738	57,53819	0,060094	0,930593	7
M2.2	0,033012	0,018002	55,54878	0,053461	0,827872	16
M3.1	0,038913	0,01738	57,53819	0,060094	0,930593	7
M3.2	0,042699	0,020525	48,72149	0,060635	0,938962	6
M3.3	0,043062	0,020533	48,70235	0,060991	0,944472	5
M3.4	0,048159	0,024208	41,30823	0,063366	0,981255	4
M4.1	0,031786	0,01486	67,29291	0,056559	0,875849	12
M4.2	0,036265	0,017309	57,77483	0,057534	0,890944	11
M4.3	0,038361	0,018465	54,15564	0,058298	0,90277	10
M4.4	0,042208	0,021766	45,94222	0,059121	0,915521	9
M5.1	0,049587	0,024559	40,71809	0,064576	1	1
M5.2	0,050213	0,027387	36,51333	0,063655	0,985727	3
M5.3	0,05062	0,027311	36,61562	0,064099	0,992608	2

4.3. LHS Modelleme

Bu tez çalışmasında, tasarım uzayında homojen ve verimli bir dağılım oluşturduğu için deney seti oluşturma aşamasında Latin hiperküp yöntemi tercih edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında 4 adet tasarım değişkeni bulunmaktadır. Bunlar, dörtlü dairenin çapı (TD1), ikili dairenin çapı (TD2), dış ve orta duvarlar et kalınlığı (TD3) ve yarım daireler et kalınlığıdır (TD4). Genellikle tasarım değişkeni sayısının en az 10 katına sahip bir deney seti oluşturmanın uygun olacağı ön görülmektedir. Bu nedenle LHS yöntemi ile 40 adet deney noktasından oluşan bir deney seti oluşturulmuştur. LHS yöntemi 0-1 arasında normalize edilmiş değerler elde edilmiştir. Daha sonrasında tez çalışmasındaki tasarım aralıklarına bu normalize değerler uyarlanmıştır. Çizelge 4.3'te LHS veri set verilmiştir. LHS deney setinde modellerin daha gerçekçi oluşturulması için yuvarlatma işlemi yapılmıştır. Çizelge 4.4'de de LHS deney setine göre gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleriyle elde edilen çarpışma performansı sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.3. LHS veri seti

Deney no	Normalize LHS veri seti				Tasarım değişkeni LHS veri seti			
	TD1	TD2	TD3	TD4	TD1	TD2	TD3	TD4
LHS 1	0,550	0,100	0,600	0,400	26,200	14,400	1,100	0,900
LHS 2	0,900	0,375	0,100	1,000	27,600	15,500	0,600	1,500
LHS 3	0,125	0,825	0,100	0,100	24,500	17,300	0,600	0,600
LHS 4	0,975	0,650	0,600	0,100	27,900	16,600	1,100	0,600
LHS 5	0,150	0,675	0,000	0,600	24,600	16,700	0,500	1,100
LHS 6	0,400	0,500	1,000	0,800	25,600	16,000	1,500	1,300
LHS 7	0,800	0,200	0,400	0,200	27,200	14,800	0,900	0,700
LHS 8	0,675	0,900	0,300	0,800	26,700	17,600	0,800	1,300
LHS 9	0,550	0,800	0,700	1,000	26,200	17,200	1,200	1,500
LHS 10	0,350	0,450	0,900	0,900	25,400	15,800	1,400	1,400
LHS 11	0,200	0,775	0,300	0,300	24,800	17,100	0,800	0,800
LHS 12	0,300	0,375	0,700	0,400	25,200	15,500	1,200	0,900
LHS 13	0,225	0,425	0,500	0,200	24,900	15,700	1,000	0,700
LHS 14	0,400	0,725	0,800	0,500	25,600	16,900	1,300	1,000
LHS 15	0,150	0,100	0,500	0,400	24,600	14,400	1,000	0,900
LHS 16	0,850	0,925	0,300	0,300	27,400	17,700	0,800	0,800
LHS 17	0,950	0,000	0,800	1,000	27,800	14,000	1,300	1,500
LHS 18	0,250	0,325	0,100	0,500	25,000	15,300	0,600	1,000
LHS 19	0,775	0,050	0,800	0,400	27,100	14,200	1,300	0,900
LHS 20	0,050	0,475	1,000	0,700	24,200	15,900	1,500	1,200
LHS 21	0,700	0,725	0,200	0,100	26,800	16,900	0,700	0,600
LHS 22	0,750	0,850	0,700	0,300	27,000	17,400	1,200	0,800
LHS 23	0,050	0,550	0,700	0,900	24,200	16,200	1,200	1,400
LHS 24	0,025	0,750	0,400	0,700	24,100	17,000	0,900	1,200
LHS 25	0,200	0,575	0,400	0,300	24,800	16,300	0,900	0,800
LHS 26	0,850	0,700	0,900	0,900	27,400	16,800	1,400	1,400
LHS 27	0,300	0,025	0,900	0,500	25,200	14,100	1,400	1,000
LHS 28	0,600	0,525	0,800	0,600	26,400	16,100	1,300	1,100
LHS 29	0,600	0,300	0,400	0,600	26,400	15,200	0,900	1,100
LHS 30	0,625	0,350	0,000	0,200	26,500	15,400	0,500	0,700
LHS 31	0,425	0,950	0,500	0,100	25,700	17,800	1,000	0,600
LHS 32	0,500	0,225	0,500	0,600	26,000	14,900	1,000	1,100
LHS 33	0,525	0,525	0,300	0,000	26,100	16,100	0,800	0,500
LHS 34	0,950	0,250	0,900	0,500	27,800	15,000	1,400	1,000
LHS 35	0,075	0,600	0,600	0,700	24,300	16,400	1,100	1,200
LHS 36	0,450	1,000	0,600	0,800	25,800	18,000	1,100	1,300
LHS 37	0,825	0,175	0,200	0,000	27,300	14,700	0,700	0,500
LHS 38	0,675	0,950	0,100	0,800	26,700	17,800	0,600	1,300
LHS 39	0,350	0,125	0,200	0,200	25,400	14,500	0,700	0,700
LHS 40	0,875	0,225	0,200	0,700	27,500	14,900	0,700	1,200

Çizelge 4.4. LHS veri seti

Deney no	Tasarım değişkenleri				Deney sonuçları				
	TD1 (mm)	TD2 (mm)	TD3 (mm)	TD4 (mm)	PCF (kN)	MCF (kN)	CFE (-)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)
LHS 1	26,20	14,40	1,10	0,90	43,24	38,73	0,90	2,32	22,68
LHS 2	27,60	15,50	0,60	1,50	46,16	38,77	0,84	2,33	21,72
LHS 3	24,50	17,30	0,60	0,60	20,46	16,44	0,80	0,99	16,24
LHS 4	27,90	16,60	1,10	0,60	37,45	29,78	0,80	1,79	19,47
LHS 5	24,60	16,70	0,50	1,10	73,52	62,85	0,85	3,77	24,87
LHS 6	25,60	16,00	1,50	1,30	68,87	61,49	0,89	3,69	25,64
LHS 7	27,20	14,80	0,90	0,70	28,90	24,36	0,84	1,46	17,49
LHS 8	26,70	17,60	0,80	1,30	48,30	41,43	0,86	2,49	22,17
LHS 9	26,20	17,20	1,20	1,50	62,80	57,12	0,91	3,43	25,42
LHS 10	25,40	15,80	1,40	1,40	70,03	61,12	0,87	3,67	25,82
LHS 11	24,80	17,10	0,80	0,80	31,18	26,81	0,86	1,61	19,76
LHS 12	25,20	15,50	1,20	0,90	46,84	41,55	0,89	2,50	23,19
LHS 13	24,90	15,70	1,00	0,70	34,38	30,04	0,87	1,80	20,71
LHS 14	25,60	16,90	1,30	1,00	57,94	48,41	0,84	2,91	24,31
LHS 15	24,60	14,40	1,00	0,90	39,69	34,89	0,88	2,09	22,19
LHS 16	27,40	17,70	0,80	0,80	33,16	27,83	0,84	1,67	19,57
LHS 17	27,80	14,00	1,30	1,50	68,42	50,86	0,74	3,05	21,16
LHS 18	25,00	15,30	0,60	1,00	30,02	26,37	0,88	1,59	20,30
LHS 19	27,10	14,20	1,30	0,90	51,39	44,53	0,87	2,67	23,30
LHS 20	24,20	15,90	1,50	1,20	65,65	57,53	0,88	3,46	25,40
LHS 21	26,80	16,90	0,70	0,60	24,72	19,43	0,79	1,17	17,16
LHS 22	27,00	17,40	1,20	0,80	43,76	38,44	0,88	2,31	21,58
LHS 23	24,20	16,20	1,20	1,40	60,51	55,52	0,92	3,34	25,96
LHS 24	24,10	17,00	0,90	1,20	44,89	40,05	0,89	2,41	23,17
LHS 25	24,80	16,30	0,90	0,80	34,00	29,55	0,87	1,78	20,57
LHS 26	27,40	16,80	1,40	1,40	70,08	60,87	0,87	3,66	24,67
LHS 27	25,20	14,10	1,40	1,00	56,33	49,01	0,87	2,94	24,19
LHS 28	26,40	16,10	1,30	1,10	61,65	52,67	0,85	3,17	25,32
LHS 29	26,40	15,20	0,90	1,10	43,03	39,60	0,92	2,38	23,36
LHS 30	26,50	15,40	0,50	0,70	21,69	16,82	0,78	1,01	16,55
LHS 31	25,70	17,80	1,00	0,60	31,94	25,28	0,79	1,52	17,90
LHS 32	26,00	14,90	1,00	1,10	46,89	42,65	0,91	2,56	24,11
LHS 33	26,10	16,10	0,80	0,50	24,71	20,14	0,81	1,21	17,69
LHS 34	27,80	15,00	1,40	1,00	56,47	49,13	0,87	2,95	23,23
LHS 35	24,30	16,40	1,10	1,20	60,81	54,25	0,89	3,25	24,55
LHS 36	25,80	18,00	1,10	1,30	58,75	51,82	0,88	3,11	24,97
LHS 37	27,30	14,70	0,70	0,50	22,01	16,17	0,73	0,97	15,45
LHS 38	26,70	17,80	0,60	1,30	40,43	33,45	0,83	2,01	20,34
LHS 39	25,40	14,50	0,70	0,70	26,33	21,86	0,83	1,31	18,71
LHS 40	27,50	14,90	0,70	1,20	40,27	36,78	0,91	2,21	22,73

4.4. RBF Modelleme

PCF ve EA değerlerini analitik olarak oluşturmak büyük deformasyonlar ve doğrusal olmayan temaslar içerdiği için zordur ve yüksek çözüm süresi gerektirmektedir. Bu nedenle, amaç ve kısıtlama fonksiyonlarını elde etmek için çarpışmaya dayanıklılık optimizasyonunda sıklıkla metamodeller kullanılır (Yin ve ark., 2016b Chen ve ark., 2019). Bu çalışmada RBF yöntemi çarpışma optimizasyonu problemlerinde yüksek doğruluklu modeller sunduğu için amaç ve kısıt fonksiyonlarının oluşturulmasında kullanılmıştır (Fang ve ark., 2005).

RBF modelinin yüksek doğrulukla oluşturulması için parametrelerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında temel fonksiyonlar ve LHS parametre değeri için bir döngü kurulmuştur. Oluşturulan metamodelin veri setini doğru temsil ettiğini ölçmek için k katmanlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Veri seti "k" eşit parçaya bölerek, her bir parça için tek tek doğrulama verisi oluşturup işlemde bulunmaktadır. Böylece her veri noktası en az bir kez doğrulama verisi olarak kullanılmış olmaktadır. Bu tez çalışmasında k değeri "5" alınmıştır. PCF ve EA için oluşturulan en iyi temsile sahip RBF metamollerde temel fonksiyon "Multi-quadratic" iken PCF ve EA için LHS parametre değeri sırasıyla 0,16 ve 0,26 dır.

Metamodellerin doğruluğunu incelmek için farklı yaklaşımlar vardır. Bu çalışmada korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile metamodeller incelenecektir (Uluslu, 2022). Korelasyon katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y})}{\sum(y_i - \tilde{y})} \tag{4.1}$$

burada, y_i deneysel olarak saptanmış değerler, $\hat{y}$ regresyon eşitliğinden hesaplanmış değerler ve $\hat{y}$ deneysel verilerin ortalamasıdır. Çizelge 4.5'te PCF ve EA'nın R^2 değerleri verilmiştir. R^2 değerini 1'e yakın olması modelin yüksek doğruluğa sahip olduğunu gösterir. PCF ve Ee için değerler 1'e çok yakın ve yüksek doğruluklu olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.5. PCF ve EA için RBF metamodelleri R^2 değerleri

	K fold 1	K fold 2	K fold 3	K fold 4	K fold 5	Ortalama
PCF	0,9905	0,9206	0,9629	0,9887	0,9716	0,9669
EA	0,9880	0,9831	0,9771	0,9551	0,9740	0,9755

4.5. Optimizasyon ve Doğrulama

Bu tez çalışmasında elde edilen en iyi yapının optimum tasarımını elde etmek için GWO algoritması kullanılmıştır. GWO mühendislik problemlerinin optimizasyon problemlerinden sıklıkla tercih edilmektedir (Albak ve ark., 2021).

Bu tez çalışmasında darbe emicilerin toplam enerji sönümleme miktarını veren ve yüksek olması beklenen EA indikatörü maksimize edilmek istenen amaç faktörü olarak tanımlanmıştır (Huang ve Xu, 2019). Yüksek PCF değeri ise yaralanma ve ölümlere neden olduğu için düşük olması istenir (Qiu ve ark.,2015). Bu çalışmada tasarımın ilk durumdan ne kadarlık bir iyileştirme yapıldığını en iyi modelin ilk durumundaki PCF değeri kısıt olarak tanımlanmıştır. Tasarım değişkeni olarak ise 2 adet boyut ve 2 adet et kalınlığı olmak üzere 4 adettir. Bunlar, dörtlü dairenin çapı (TD1), ikili dairenin çapı (TD2), dış ve orta duvarlar et kalınlığı (TD3) ve yarım daireler et kalınlığıdır (TD4). Tez çalışmasındaki optimizasyon problemi aşağıdaki gibi formalize edilebilir:

$$\begin{cases} min[EA(TD1, TD2, TD3, TD4)] \\ const\ [PCF(TD1, TD2, TD3, TD4)] \\ s.t. \begin{cases} 24{,}0 < TD1 < 28{,}0 \\ 14{,}0 < TD2 < 18{,}0 \\ 0{,}50 < TD3 < 1{,}50 \\ 0{,}50 < TD4 < 1{,}50 \end{cases} \end{cases} \tag{4.2}$$

GWO yönteminde ajan sayısı 30 ve maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak seçilen GWO nun sağlamlığını kontrol etmek için optimizasyon işlemi 25 kez tekrar edilmiş ve sonuçları incelenmiştir. 25 kez tekrar edilen optimizasyonun istatiksel sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde GWO'nun yüksek oranda tekrar edilebilir olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. GWO yöntemi sağlamlık tablosu

	En iyi	En kötü	Ortalama	Standart sapma
EA (kJ)	2,434134487	2,340983577	2,428204720	0,02064039
PCF (kN)	43,99791377	43,99994383	43,99954006	0,00043619

GWO yöntemi ile yapılan optimizasyon sonunu elde edilen optimum değerler ve bu değerlerin sonlu elemanlar ile kıyaslanması Çizelge 4.7'de verilmiştir. Optimizasyon sonucunun verdiği değer ile sonlu elemanlar analizi sonucun oluşsan değerler arasında en fazla %0,62 hata vardır ve çok yüksek doğruluğa sahiptir.

Çizelge 4.7. Optimizasyon ve sonlu elemanlar analizi karşılaştırması

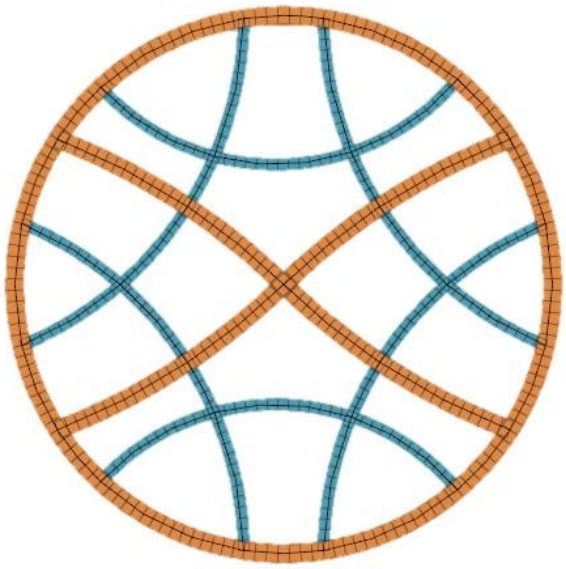
	Tasarım değişkenleri				Çarpışma indikatörleri	
	TD1 (mm)	TD2 (mm)	TD3 (mm)	TD4 (mm)	EA (kJ)	PCF (kN)
Opt.	26,5	15,2	0,86	1,16	2,43	43,99
SEA	26,5	15,2	0,86	1,16	2,42	43,72
% hata	-	-	-	-	-0,41%	-0,62%

Optimizasyon öncesi ilk durumunda PCF ve EA değerleri sırasıyla 43,5 ve 2,27 dir. İlk tasarımlı ile aynı PCF değerinin kısıt olarak alındığı optimizasyon sonuncunda ise seçilen tasarım değişkeni aralığında PCF ve EA değerleri sırasıyla 43,99 ve 2,42'dir. Bu sonuçlara göre ilk tasarıma göre aynı PCF değerinde EA da %6,6'dır ve EA değeri geliştirilmiştir. Optimize edilen yapı bir çok farklı yapı içerisinden seçilmesi, daha önce yapılan çalışmalara bakılarak yapılması ve doğadan esinlenilmesi nedeniyle optimum yapıya yakın olduğu için optimizasyon sonucu elde edilen iyileştirme seviyelerindedir.

5. SONUÇ

İnce cidarlı yapılar otomotiv sektöründe pasif güvenlik elemanları olarak yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Bu yapılardan araç üzerinde hafiflik sağlamasının yanında yüksek darbe enerjisi sönümleme yeteneği de sergilemesi beklenilmektedir. Bu beklentileri sağlayabilmek adına otomotiv sektörü araştırmacıları yeni kesit geometrileri ve malzemeler üzerinde araştırmalar yapmaktadır. Özellikle son yirmi yıl içerisinde geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler, alüminyum alaşımları, kompozitler, polimerler ve köpük bazlı yapıları malzeme alanındaki yenilikler olarak söyleyebiliriz. Kesit geometrileri geliştirilmesi üzerine çalışmalarda ise doğa önemli bir esin kaynağı olmuştur. Ernst Florens Friedrich Chladni (1756 - 1827), fizik ve müzik alanında önemli çalışmalar yapmış on sekiz ve on dokuzuncu yüzyıl içerisinde yaşam sürmüş önemli bir bilim insanıdır. Chladni, çalışmalarında ince metal plakalar üzerine kum taneleri serpmiş ve yanında keman çalarak titreşimler üretmiştir. Kum tanelerinin frekans değişimlerine bağlı olarak metal plaka üzerinde geometrik desenler ortaya koyduğunu gözlemlemiştir. Bu çalışma kapsamında, Chladni figürlerinden esinlenilerek tasarımları yapılmış olan 17 farklı dairesel dış duvara sahip geometrinin ve enerji sönümleme kapasiteleri, en büyük çarpışma kuvveti ve çarpışma kuvveti verimi sonlu elemanlar metoduyla incelenmiştir. Chladni'den esinlenilerek tasarlanan 1 mm et kalınlıklı geometrilere AA6061 malzeme ataması yapılmıştır. Malzeme modeli olarak ise elasto-plastik malzeme kartı (M36_PLAST_TAB) seçimi yapılmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde hareketli bir üst duvar, darbe emici yapı ve sabit bir alt duvar bulunmaktadır. Hareketli rijit duvarın hızı 5,75 m/s olarak belirlendikten sonra çarpışmanın 60 mm boyunca devam etmesi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinin doğruluğunun arttırılması için eleman yakınsama analizleri yapılmış olup, en uygun eleman boyutu olarak 0,8 mm belirlenmiştir. En iyi olarak seçilen tasarıma optimizasyon çalışması uygulanmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak GWO algoritması kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında darbe emicilerin toplam enerji sönümleme miktarını veren ve yüksek olması beklenen EA indikatörü maksimize edilmek istenen amaç faktörü olarak tanımlanmıştır. Yüksek PCF değeri ise yaralanma ve ölümlere neden olduğu için düşük olması istenir (Qiu et al., 2015). Bu çalışmada tasarımın ilk durumdan ne kadarlık bir iyileştirme yapıldığını en iyi modelin ilk durumundaki PCF değeri kısıt olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon öncesi

ilk durumunda PCF ve EA değerleri sırasıyla 43,5 ve 2,27 dir. İlk tasarımlı ile aynı PCF değerinin kısıt olarak alındığı optimizasyon sonuncunda ise seçilen tasarım değişkeni aralığında PCF ve EA değerleri sırasıyla 43,99 ve 2,42'dir. Bu sonuçlara göre ilk tasarıma göre aynı PCF değerinde EA da %6,6'dır ve EA değeri geliştirilmiştir. Optimize edilen yapı bir çok farklı yapı içerisinden seçilmesi, daha önce yapılan çalışmalara bakılarak yapılması ve doğadan esinlenilmesi nedeniyle optimum yapıya yakın olduğu için optimizasyon sonucu elde edilen iyileştirme seviyelerindedir.



Şekil 5.1. Optimizasyon sonrası ulaşılan geometri

KAYNAKLAR

Acar, E. (2015). Increasing automobile crash response metamodel accuracy through adjusted cross validation error based on outlier analysis. International journal of crashworthiness, 20(2), 107-122.

Abdullahi, H. S., & Gao, S. (2020). A novel multi-cell square tubal structure based on Voronoi tessellation for enhanced crashworthiness. Thin-Walled Structures, 150, 106690.

Al Antali, A., Umer, R., Zhou, J., & Cantwell, W. J. (2017). The energy-absorbing properties of composite tube-reinforced aluminum honeycomb. Composite Structures, 176, 630-639.

Albak, E. I., Solmaz, E., & Öztürk, F. (2021). Optimal design of differential mount using nature-inspired optimization methods. Materials Testing, 63(8), 764-769.

Albak, E. İ. (2020). Effects of sections added to multi-cell square tubes on crash performance. Materials Testing, 62(5), 471-480.

Altin, M., Güler, M. A., & Mert, S. K. (2017). The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes. International journal of mechanical sciences, 131, 368-379.

Bai, J., Meng, G., Wu, H., & Zuo, W. (2019). Bending collapse of dual rectangle thin-walled tubes for conceptual design. Thin-Walled Structures, 135, 185-195.

Bigdeli, A., & Damghani Nouri, M. (2019). Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical with internal networking. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 26(19), 1644-1660.

Chen, Q., Shi, Q., Signetti, S., Sun, F., Li, Z., Zhu, F., ... & Pugno, N. M. (2016). Plastic collapse of cylindrical shell-plate periodic honeycombs under uniaxial compression: experimental and numerical analyses. International Journal of Mechanical Sciences, 111, 125-133.

Chen, T., Zhang, Y., Lin, J., & Lu, Y. (2019). Theoretical analysis and crashworthiness optimization of hybrid multi-cell structures. Thin-Walled Structures, 142, 116-131.

Chen, W., & Wierzbicki, T. (2001). Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption. Thin-Walled Structures, 39(4), 287-306.

Fang, H., Rais-Rohani, M., Liu, Z., & Horstemeyer, M. F. (2005). A comparative study of metamodeling methods for multiobjective crashworthiness optimization. Computers & structures, 83(25-26), 2121-2136.

Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zheng, G., & Li, Q. (2015). Dynamic crashing behavior of new extrudable multi-cell tubes with a functionally graded thickness. International Journal of Mechanical Sciences, 103, 63-73.

Faraz, M. R., Ahmadi, H., Liaghat, G., Vahid, S., Razmkhah, O., & Tarafdar, A. (2022). Energy absorption assessment of bio-mimicked hybrid Al/PP sandwich tube: Experimental and Numerical Investigation. Thin-Walled Structures, 181, 110116.

Faraz, M. R., Ahmadi, H., Liaghat, G., Vahid, S., Razmkhah, O., & Tarafdar, A. (2022). Energy absorption assessment of bio-mimicked hybrid Al/PP sandwich tube: Experimental and Numerical Investigation. Thin-Walled Structures, 181, 110116.

Fukuo, K., Fujimura, A., Saito, M., Tsunoda, K., & Takiguchi, S. (2001). Development of the ultra-low-fuel-consumption hybrid car–INSIGHT. JSAE review, 22(1), 95-103.

Hong, W., Fan, H., Xia, Z., Jin, F., Zhou, Q., & Fang, D. (2014). Axial crushing behaviors of multi-cell tubes with triangular lattices. International Journal of Impact Engineering, 63, 106-117.

Huang, H., & Xu, S. (2019). Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. Thin-Walled Structures, 144, 106333.

Huang, H., & Xu, S. (2019). Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. Thin-Walled Structures, 144, 106333.

Jin, M., Hou, X., Yin, G., Yao, R., Gao, J., & Deng, Z. (2022). Improving the crashworthiness of bio-inspired multi-cell thin-walled tubes under axial loading: Experimental, numerical, and theoretical studies. Thin-Walled Structures, 177, 109415.

Kannan, I. V., & Rajkumar, R. (2019). Deformation and energy absorption analysis of simple and multi-cell thin-walled tubes under quasi-static axial crushing. International Journal of Crashworthiness.

Khanchehzar, P., Niknejad, A., & Amirhosseini, S. G. (2016). Influences of different internal stiffeners on energy absorption behavior of square sections during the flattening process. Thin-Walled Structures, 107, 462-472.

Kim, H. S. (2002). New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency. Thin-Walled Structures, 40(4), 311-327.

Krolak, M., Kowal-Michalska, K., Mania, R., & Swiniarski, J. (2007). Experimental tests of stability and load carrying capacity of compressed thin-walled multi-cell columns of triangular cross-section. Thin-walled structures, 45(10-11), 883-887.

Li, Z., Ma, W., Hou, L., Xu, P., & Yao, S. (2020). Crashworthiness analysis of corrugations reinforced multi-cell square tubes. Thin-Walled Structures, 150, 106708.

Marvin, U. B. (1996). Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) and the origins of modern meteorite research. Meteoritics & Planetary Science, 31(5), 545-588.

Marvin, U. B. (1996). Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) and the origins of modern meteorite research. Meteoritics & Planetary Science, 31(5), 545-588.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. Advances in engineering software, 69, 46-61.

Mozafari, H., Khatami, S., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., & Guglielmino, E. (2016). Finite element analysis of foam-filled honeycomb structures under impact loading and crashworthiness design. International journal of crashworthiness, 21(2), 148-160.

Nia, A. A., & Parsapour, M. (2013). An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes. Thin-Walled Structures, 68, 26-34.

Pirmohammad, S., & Marzdashti, S. E. (2016). Crushing behavior of new designed multi-cell members subjected to axial and oblique quasi-static loads. Thin-Walled Structures, 108, 291-304.

Qiu, N., Gao, Y., Fang, J., Feng, Z., Sun, G., & Li, Q. (2015). Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases. Finite Elements in Analysis and Design, 104, 89-101.

Shen, W., Gu, X., Jiang, P., Hu, J., Lv, X., & Qian, L. (2017). Crushing analysis and multiobjective optimization design for rectangular unequal triple-cell tubes subjected to axial loading. Thin-Walled Structures, 117, 190-198.

Song, Z., Ming, S., Du, K., Zhou, C., Wang, Y., Xu, S., & Wang, B. (2022). Energy absorption of metal-composite hybrid tubes with a diamond origami pattern. Thin-Walled Structures, 180, 109824.

Song, Z., Ming, S., Du, K., Zhou, C., Wang, Y., Xu, S., & Wang, B. (2022). Energy absorption of metal-composite hybrid tubes with a diamond origami pattern. Thin-Walled Structures, 180, 109824.

Tang, Z., Liu, S., & Zhang, Z. (2013). Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. Thin-Walled Structures, 62, 75-84.

Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S., & Khalid, K. (2013). Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. Thin-Walled Structures, 71, 7-17.

Tran, T., Hou, S., Han, X., Tan, W., & Nguyen, N. (2014). Theoretical prediction and crashworthiness optimization of multi-cell triangular tubes. Thin-Walled Structures, 82, 183-195.

Ullmann, D. (2007). Life and work of EFF Chladni. The European Physical Journal Special Topics, 145(1), 25-32.

Uluslu, A. (2022). Farklı örnekleme yöntemlerinin yapay sinir ağlarında performansının karşılaştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 412-428.

Wang, Z., Li, Z., & Zhang, X. (2016). Bending resistance of thin-walled multi-cell square tubes. Thin-Walled Structures, 107, 287-299.

Wang, Z., Liu, J., & Yao, S. (2018). On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tubes. Composites Part B: Engineering, 132, 17-27.

Yang, L., Yue, M., Li, Z., Shen, T., & Chongqing postdoctoral research project. (2020). An investigation on the energy absorption characteristics of a multi-cell hexagonal tube under axial crushing loads. Plos one, 15(6), e0233708.

Yao, R., Pang, T., Zhang, B., Fang, J., Li, Q., & Sun, G. (2023). On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects. Thin-Walled Structures, 189, 110734.

Yao, R., Pang, T., Zhang, B., Fang, J., Li, Q., & Sun, G. (2023). On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects. Thin-Walled Structures, 189, 110734.

Yin, H., Fang, H., Wang, Q., & Wen, G. (2016a). Design optimization of a MASH TL-3 concrete barrier using RBF-based metamodels and nonlinear finite element simulations. Engineering Structures, 114, 122-134.

Yin, H., Fang, H., Wen, G., Wang, Q., & Xiao, Y. (2016b). An adaptive RBF-based multi-objective optimization method for crashworthiness design of functionally graded multi-cell tube. Structural and Multidisciplinary Optimization, 53, 129-144.

Yin, H., Wen, G., Bai, Z., Chen, Z., & Qing, Q. (2020). Theoretical prediction and crashworthiness optimization of multi-cell polygonal tubes. Journal of Sandwich Structures & Materials, 22(2), 190-219.

Zhang, X., & Zhang, H. (2013). Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression. Thin-Walled Structures, 68, 156-163.

Zhang, X., & Zhang, H. (2014). Axial crushing of circular multi-cell columns. International Journal of Impact Engineering, 65, 110-125.

Zhang, X., & Zhang, H. (2015). Some problems on the axial crushing of multi-cells. International Journal of Mechanical Sciences, 103, 30-39.

Zhu, H. X., & Chen, C. Y. (2011). Combined effects of relative density and material distribution on the mechanical properties of metallic honeycombs. Mechanics of Materials, 43(5), 276-286.

Zou, M., Xu, S., Wei, C., Wang, H., & Liu, Z. (2016). A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo. Thin-Walled Structures, 101, 222-230.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammed Said EMRE
Doğum Yeri ve Tarihi : Kastamonu, 28.03.1996
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bafra Fen Lisesi
Lisans : Bursa Teknik Üniversitesi-Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :Positive Design

İletişim (e-posta) : 502125013@ogr.uludag.edu.tr

Yayınları : Emre M.S., & Albak E.İ. (2023) Copras yöntemiyle ideal ince cidarlı darbe emici yapı seçimi. 6.International Hasankeyf Scientific Research and Innovation Congress, 18-19 Kasım, Batman, Türkiye.