

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TASARIM OPSİYONLARININ DİYAFRAMLI DARBE
SÖNÜMLEYİCİ YAPILARIN ENERJİ SOĞURMA PERFORMANSINA
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE ENİYİLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sabri Alper KESKİN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR

MART 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Sabri Alper Keskin

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TASARIM OPSİYONLARININ DİYAFRAMLİ DARBE SÖNÜMLEYİCİ YAPILARIN ENERJİ SOĞURMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE ENİYİLENMESİ

Sabri Alper KESKİN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Mart 2021

Darbe sönümleyiciler, taşıt kazalarında sırasında ortaya çıkan enerjiyi plastik deformasyona uğrayarak sönümleyen ve yolcu güvenliğini sağlayan yapılardır. Bu yapılar tren ve otomobillerin ön ve arka uçlarında konumlandırılırlar. Bu çalışma kapsamında, içerisinde diyaframlar bulunan bir darbe sönümleyicinin performansı çeşitli tasarım değişiklikleriyle iyileştirilmiştir.

Bu değişiklikler, sırasıyla darbe sönümleyicinin dış duvar ve diyafram kalınlıklarının değiştirilmesi, diyafram yerleşiminin değiştirilmesi ve darbe sönümleyiciye bir konik açı verilmesi olarak yapılmıştır. Başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) minimize etme ve özgül enerji sönümlemesini (SEA) maksimize etme, bu eniyileme problemlerinde amaç fonksiyonları olarak seçilmiştir.

Çarpma analizleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu eleman modeli, literatürdeki bir başka çalışma temel alınarak oluşturulmuş ve doğrulanmıştır. Sonlu eleman analizleri LS-DYNA sonlu eleman yazılım paketi kullanılarak yapılmıştır.

Eniyileme problemleri, vekil model tabanlı eniyileme yaklaşımıyla çözülmüştür. Her eniyileme probleminde doğrulanmış sonlu eleman modeli üzerinden deney noktaları oluşturulmuş, oluşturulan deney noktaları üzerinden tüm yöntemler kullanılarak vekil modeller yaratılmıştır. Bu vekil modellerin doğrulukları, yine doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak her eniyileme modeli için ayrı ayrı oluşturulmuş test noktalarıyla ölçülmüştür. Tüm vekil modeller için ayrı ayrı optimum tasarım değişkenleri bulunmuş ve bulunan tasarım değişkenleri sonlu eleman modellerine işlenerek analiz edilmiştir. Optimum tasarım değişkenlerinin işlendiği sonlu eleman analizi sonuçları arasından en iyi olan sonuç, ilgili eniyileme çalışmasının optimum sonucu olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, özgül enerji sönümlemesi (SEA) %69,4 yükseltilmiş, başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) %24,7 azaltılmıştır.

SEA sonuçları için dış duvar ve diyafram kalınlıklarının eniyilemesi %59,2 SEA artışı sağlarken, diyafram yerleşiminin eniyilemesi bunun üzerine %7,7'lik SEA artışıyla sonuçlanmıştır. Konik açının eniyilemesi %2,5 daha fazla SEA artışı sağlamıştır.

Dış duvar ve diyafram kalınlıklarının eniyilemesi, IPCF'de %23,4 düşüş sağlarken, diyafram yerleşiminin eniyilemesi bunun üzerine %1,3 düşüş sağlamıştır. Konik açının eniyilemesi IPCF'de daha fazla düşüğe neden olmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Darbe sönümleyici, Diyafram, Özgül enerji sönümlemesi, Başlangıç pik ezilme kuvveti.

ABSTRACT

Master of Science

STUDYING AND OPTIMIZING THE EFFECTS OF DIFFERENT DESIGN OPTIONS ON THE PERFORMANCE OF CRASH ABSORBERS WITH DIAPHRAGMS

Sabri Alper KESKİN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: March 2021

Crash absorbers are structures that are used to ensure passenger safety by absorbing the energy generated during vehicular accidents through controlled plastic deformation. These structures are commonly used in front and rear ends of trains and automobiles. In this study, the performance of a crash absorber with diaphragms was improved through various design changes.

These changes include changing the outer wall and diaphragm thickness of the crash absorber, changing the diaphragm placement and changing the crash absorber geometry by defining a taper angle. In optimization problems, initial peak crash force (IPCF) was minimized, and specific energy absorption (SEA) was maximized as objective functions.

Crash analyzes were done using finite element method. The finite element model was created and validated based on another study in the literature. Finite element analyzes were performed using LS-DYNA finite element software package.

Optimization problems were solved with a surrogate model based optimization approach. In each optimization problem, sampling points were created using the

validated finite element model, and surrogate models were created using all surrogate model methods mentioned above over the created sampling points. The accuracies of these surrogate models were measured with test points created separately for each optimization model using the validated finite element model. Optimum design variables were obtained for all surrogate models and the optimum results were verified with the finite element model. The best result obtained from these finite element analysis results was determined as the optimum result of the study.

As a result of the studies, the specific energy absorption (SEA) was increased by 69.4% and the initial peak crushing force (IPCF) was reduced by 24.7%.

Optimal tube and diaphragm dimensioning resulted in 59.2% increase, optimum diaphragm placement resulted in 7.7% more increase, and tapering resulted 2.5% further increase in SEA.

Similarly, optimal tube and diaphragm dimensioning resulted in 23.4% reduction, optimum diaphragm placement resulted in 1.3% further reduction in IPCF, whereas optimizing taper angle did not result in an extra IPCF reduction.

Keywords: Crash absorber, Diaphragm, Specific energy absorption, Initial peak crash force.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Prof. Dr. Erdem Acar ve Prof. Dr. Mehmet Ali Güler'e, çalıőmalarımda bana teknik ve manevi katkısını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Murat Altın'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma ve son olarak çalışma süresince sabrını hiç esirgemeyerek daima benimle olan değerli kız arkadaşımı çok teşekkür ederim. Ayrıca, bana sağlanan araőtırma bursu için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR	xvi
SEMBOL LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 İçi Boş Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar	3
2.2 İçlerinde Dikey Destek Yapıları Bulunduran Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar	4
2.3 Çok Tüplü Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar	7
2.4 İçlerinde Diyaframlar Bulunduran Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar	7
2.5 Darbe Sönümleyicilerin Farklı Deformasyon Şekillerinin İncelendiği Çalışmalar	9
3. ÇARPIŞMA PERFORMANSI METRİKLERİ	11
3.1 Toplam Sönümlenen Enerji	11
3.2 Özgül Enerji Sönümlenmesi	12
3.3 Maksimum Ezilme Kuvveti	12
3.4 Başlangıçtaki Pik Ezilme Kuvveti.....	12
3.5 Ortalama Ezilme Kuvveti	13
3.6 Ezilme Kuvveti Verimi.....	13
4. SONLU ELEMAN MODELİ	15
4.1 Modelde Kullanılan Tasarım.....	15
4.2 Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması.....	17
4.3 Sonlu Eleman Modelinin LS-Prepost Üzerinden Tanımlanması	20
4.3.1 Parça Tanımlaması	20
4.3.2 Kesit Özellikleri Tanımlaması	21
4.3.3 Malzeme Özellikleri Tanımlaması	22
4.3.4 Parçaların Birbirleriyle Olan Temaslarının Tanımlaması.....	24
4.3.5 Modelin Sınır Koşullarının Tanımlanması	26
4.4 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulaması	28
5. FARKLI TASARIM OPSİYONLARININ İNCELENMESİ VE ENİYİLENMESİ	31
5.1 Dış Duvar ve Diyafram Kalınlıklarının Eniyilemesi.....	32
5.1.1 Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi.....	32
5.1.2 Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi	38
5.1.3 Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi	45
5.2 Diyafram Konumlarının Eniyilemesi	49

5.3 Konik Açının Eniyilemesi	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ.....	86



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Alüminyum köpük için örnek bir basma gerilim – gerinim grafiği [25].....	6
Şekil 2.2 : Dikdörtgen kesitli dış duvar üzerindeki kalınlık parametreleri [34]	8
Şekil 2.3 : Lokal ve global deformasyona uğramış darbe sönümleyiciler [36].....	10
Şekil 2.4 : Dörtgen şekilli darbe sönümleyicilerin ezilme şekilleri [40].....	10
Şekil 3.1 : Toplam sönümlenen enerji ve başlangıçtaki pik ezilme kuvveti metriklerinin örnek bir kuvvet – deplasman grafiği üzerinde gösterimi ...	13
Şekil 4.1 : Temel darbe sönümleyici modelinin boyutları	15
Şekil 4.2 : Xu vd. [38] çalışmasında tanımlanmış olan diyafram ve dış duvar boyutları.....	16
Şekil 4.3 : Bu çalışmada kullanılan diyaframın tasarımı	16
Şekil 4.4 : Sonlu eleman modelinde tanımlanmış yapılar	17
Şekil 4.5 : Sonlu eleman ağı oluşturulmuş diyafram modeli	18
Şekil 4.6 : Toplam sönümlenen enerji metriği için yapılmış yakınsama analizi	19
Şekil 4.7 : Başlangıçtaki pik ezilme kuvveti metriği için yapılmış yakınsama analizi	19
Şekil 4.8 : *PART anahtar kelimesi arayüzü.....	20
Şekil 4.9 : *SECTION_SHELL anahtar kelimesi arayüzü	21
Şekil 4.10 : *SECTION_SOLID anahtar kelimesi arayüzü	21
Şekil 4.11 : *MAT024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY anahtar kelimesi arayüzü	22
Şekil 4.12 : Xu vd. [38] çalışmasında sunulmuş gerinim – gerilim grafiği.....	23
Şekil 4.13 : *MAT020-RIGID anahtar kelimesi arayüzü	24
Şekil 4.14 : *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE anahtar kelimesi arayüzü	25
Şekil 4.15 : *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE anahtar kelimesi arayüzü	25
Şekil 4.16 : Üst levhanın sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılan *BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesi arayüzü.....	26
Şekil 4.17 : Alt levhanın sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılan *BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesi arayüzü.....	27
Şekil 4.18: *DEFINE_CURVE anahtar kelimesi arayüzü	28
Şekil 4.19 : *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID anahtar kelimesi arayüzü	28
Şekil 4.20 : Farklı deplasman değerlerinde Xu vd. [38] sonlu eleman analizi, Xu vd. [38] deneysel modeli ve Doğrulama çalışması doğrulama modeli için görsel karşılaştırma	30
Şekil 4.21 : Doğrulama çalışması sonucunda kuvvet – deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	30
Şekil 5.1 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin SEA sonucunun gösterimi	34

Şekil 5.2 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında minimum IPCF sonucunu veren vekil modelin gösterimi	34
Şekil 5.3 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla görsel karşılaştırılması	36
Şekil 5.4 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla karşılaştırılması	36
Şekil 5.5 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	37
Şekil 5.6 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	37
Şekil 5.7 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında kullanılan tasarım değişkenleri	38
Şekil 5.8 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında 100 deney noktasıyla yapılan çalışmada maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $D = 2$ mm, (b) $D = 2,5$ mm, (c) $D = 3$ mm için gösterimi ($A = B = 6$ mm için)	41
Şekil 5.9 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında 120 deney noktasıyla yapılan çalışmada maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $D = 2$ mm, (b) $D = 2,5$ mm, (c) $D = 3$ mm için gösterimi ($A = B = 6$ mm için)	42
Şekil 5.10 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması	44
Şekil 5.11 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	44
Şekil 5.12 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında kullanılan tasarım değişkenleri	45
Şekil 5.13 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $D = 2$ mm, (b) $D = 4$ mm, (c) $D = 6$ mm için gösterimi	47
Şekil 5.14 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması	48
Şekil 5.15 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	48
Şekil 5.16 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında kullanılan tasarım değişkenleri	50
Şekil 5.17 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $LE = -30$ mm, (b) $LE = 0$ mm, (c) $LE = +30$ mm için gösterimi	52

Şekil 5.18 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında minimum IPCF sonucunu veren vekil modelin (a) $LE = -30$ mm, (b) $LE = 0$ mm, (c) $LE = +30$ mm için gösterimi	53
Şekil 5.19 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması	54
Şekil 5.20 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması	55
Şekil 5.21 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	55
Şekil 5.22 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	56
Şekil 5.23 : Konik açılı darbe sönümleyici modeli.....	57
Şekil 5.24 : Konik açı verilmemiş darbe sönümleyicilerde kullanılan diyafram modeli	57
Şekil 5.25 : Konik açının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin SEA sonucunun gösterimi	60
Şekil 5.26 : Konik açının eniyilemesi kapsamında minimum IPCF sonucunu veren vekil modelin IPCF sonucunun gösterimi	61
Şekil 5.27 : Konik açının eniyileme kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması	62
Şekil 5.28 : Konik açının eniyileme kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması	62
Şekil Ek.1 : İki tasarım değişkeni için sekiz tasarım noktasının oluşturulduğu örnek bir LHS deney tasarımı [26]	70
Şekil Ek.2 : Üç tasarım değişkeni için iki seviyede tasarım noktalarının oluşturulduğu örnek bir FFD deney tasarımı	71

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Xu vd. [34] çalışmasında elde edilmiş optimum tasarım değişkenleri ve sonuçlar	8
Çizelge 4.1 : Yakınsama analizi sonuçları	18
Çizelge 4.2 : MAT024 malzemesinde tanımları içerisinde kullanılan malzeme parametreleri.....	23
Çizelge 4.3 : Doğrulama çalışması EA ve IPCF sonuçları.....	29
Çizelge 5.1 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi çalışmasının sonuçları	33
Çizelge 5.2 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları (100 deney noktasıyla elde edilen sonuçlar)	39
Çizelge 5.3 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları (genetik algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar).....	40
Çizelge 5.4 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları (120 deney noktasıyla elde edilen sonuçlar)	43
Çizelge 5.5 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları	46
Çizelge 5.6 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları.....	51
Çizelge 5.7 : Konik açının eniyilemesi çalışmasının sonuçları	59
Çizelge Ek.1 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi için PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	75
Çizelge Ek.2 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi için RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	75
Çizelge Ek.3 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	76
Çizelge Ek.4 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	76
Çizelge Ek.5 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri.....	77
Çizelge Ek.6 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri.....	77
Çizelge Ek.7 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	78
Çizelge Ek.8 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	78

Çizelge Ek.9 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri.....	78
Çizelge Ek.10 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri.....	79
Çizelge Ek.11 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	79
Çizelge Ek.12 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	80
Çizelge Ek.13 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	80
Çizelge Ek.14 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri	80
Çizelge Ek.15 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları	81
Çizelge Ek.16 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları.....	82
Çizelge Ek.17 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları.....	83
Çizelge Ek.18 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları	84
Çizelge Ek.19 : Konik açının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları.....	85

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
SEA	: Özgöl enerji sönümlemesi (Specific energy absorption)
IPCF	: Başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (Initial peak crash force)
PCF	: Maksimum ezilme kuvveti (Peak crash force)
CFE	: Ezilme kuvveti verimi (Crash force efficiency)
RTF	: Radyal tabanlı fonksiyon
PYY	: Polinom yanıt yüzeyi
LHS	: Latin hiperküp örnekleme (Latin hypercube sampling)
FFD	: Tam faktöriyel deney tasarımı (Full factorial design)
nMaxAE	: Normalize edilmiş maksimum mutlak hata (Normalized maximum absolute error)
nMAE	: Normalize edilmiş ortalama mutlak hata (Normalized mean absolute error)
nRMSE	: Normalize edilmiş karekök ortalama hata (Normalized root mean square error)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
σ_0	Ezilme gerinimi
σ_{\square}	Yoğunlaştırma gerinimi
σ_0	Hücresel katının orijinal yoğunluğu
σ_{\square}	Hücresel katının katı fazının yoğunluğu
\square	Eksenel darbe kuvveti
\square	Kuvvet eksenindeki deplasman
\square_{\square}	Kuvvet eksenindeki maksimum deplasman
\square	Darbe sönümleyici kütlesi
$\square_{\square\square\square}$	Ortalama ezilme kuvveti
A	Darbe sönümleyici dış duvarının uzun kenar kalınlığı
B	Darbe sönümleyici dış duvarının kısa kenar kalınlığı
C_u	Darbe sönümleyici içindeki diyaframların ortak kalınlığı
C	Katı kutuya en yakında konumlanmış diyafram
D	Darbe sönümleyicinin ortasında konumlanmış diyafram
E	Katı kutuya en uzakta konumlanmış diyafram
L_C	C diyaframının konumu
L_D	D diyaframının konumu
L_E	E diyaframının konumu
α	Konik açı
$\square(\square)$	Vekil model tarafından oluşturulan tahmini sonuç
\square_{\square}	Radyal tabanlı fonksiyon parametresi
\square_{\square}	Radyal tabanlı fonksiyon sayısı
\square_{\square}	Radyal tabanlı fonksiyonlar için merkez noktası
$\square(\parallel\square - \square_{\square}\parallel)$	Merkez noktası temel alınarak oluşturulmuş radyal tabanlı fonksiyonlar
\square	Radyal tabanlı fonksiyon vekil model katsayısı
\square	Parametre sayısı
$\square_{\square\square}$	Polinom yanıt yüzey fonksiyonu parametresi
\square_{\square}	Test noktası sayısı
$\hat{\square}$	Vekil model tarafından oluşturulan tahmini sonuç
\square_{\square}	Sonlu elemanlar analizi sonucu
$\square_{\square\square\square}$	Tüm test noktalarında elde edilen en yüksek sonlu eleman sonucu
$\square_{\square\square\square}$	Tüm test noktalarında elde edilen en düşük sonlu eleman sonucu
\square	Optimizasyon sonucu bulunacak değer
$\square(\square)$	Optimizasyon kapsamında minimize edilecek fonksiyon

$h(\square)$

$\square(\square)$

\square

\square

Optimizasyon eşitlik kısıtı

Optimizasyon eşitsizlik kısıtı

Optimizasyon gevşetme değişkeni

Optimizasyon bariyer parametresi



1. GİRİŞ

Demiryolu ulaşımı 21. yüzyılın başı itibariyle alternatif ulaşım yöntemlerinin doyum noktalarına ulaşmaları ve çevreyle ilgili duyarlılıkların artması nedeniyle tekrar büyük önem kazanmıştır. Demiryoluyla yapılan seyahatler İngiltere’de 2002 yılından itibaren toplam seyahat süresi olarak %60 artış göstermiş ve en hızlı artan seyahat yöntemi olmuştur [1].

Demiryolu yolculuğunun doğasında var olan güvenliğe ve kazaları azaltmak için geliştirilmiş sistematik önlemlere rağmen, demiryolu kazaları meydana gelmekte, can ve mal kaybına neden olmaktadır. 2018 yılı içinde, AB’de önemli olarak sınıflandırılmış 1721 demiryolu kazası kayıtlara geçmiştir. Bu kazalarda toplam 885 kişi hayatını kaybetmiş, 760 kişi ağır yaralanmıştır. Can kayıpları ve ağır yaralanmalar 1980’lerden itibaren sürekli olarak azalmaktadır [2].

Can kayıpları ve ağır yaralanmalarda görülen bu azalmanın en temel nedenlerinden biri, demiryolu endüstrisinde yolcu ve sürücü güvenliğinin önemli bir tasarım hedefi haline gelmesidir. 1980’lerden itibaren ilk olarak İngiltere’de British Railways ve Fransa’da Nationale Chemins de Fer Français tarafından kullanılan trenlerin kaza güvenliklerini tanımlayabilmek için standartlar ve gereksinimler belirlenmiştir. 1990’ların ardından da Avrupa Birliği tarafından yayınlanan EN12663, EN15227 ve Technical Specification for Interoperability (TSI) gibi standartlar da, AB üye ülkeleri tarafından kullanımda olan demiryolu taşıtlarının kaza güvenliği standartlarını belirlemiştir [3].

Demiryolu taşıtlarında kazaları engellemek amacıyla sinyalizasyon, merkezi kontrol ve otomatizasyon gibi önlemler kullanılarak taşıtların rotalarının kesişmemesi sağlanmaktadır. Bu önlemlerin yanı sıra, kaza olma durumunda da kaza enerjisinin sönmülmesi için farklı önlemler kullanılmaktadır.

Darbe sönmüleyiciler, bu kullanılan önlemlerden biridir. Bu yapılar, tren vagonlarının baş ve son kısımlarında konumlandırılırlar. Plastik deformasyonla

çarpışma enerjisini sönümleyen darbe sönümleyiciler, kazalar sırasında oluşan enerjinin yolcuları etkilemesini engelleyerek güvenliği sağlarlar.

Darbe sönümleyicilerin kaza enerjisini sönümleme yetenekleri, statik veya dinamik testler kullanılarak ölçülmektedir. Bu testler, büyük ve masraflı test düzenekleri gerektiren testlerdir. Bu testlerin yapılması için darbe sönümleyicilerin üretilmesi de zaman alıcı ve pahalıdır. Bu nedenle, darbe sönümleyicilerin tasarımı ve eniyilemesinde sonlu eleman analizleri ucuz ve zaman etkin bir çözüm olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, içerisinde diyaframlar bulunan bir darbe sönümleyicinin performansı çeşitli tasarım değişiklikleriyle iyileştirilmiştir.

Çalışmada öncelikle literatür taraması sunulmuş, darbe sönümleyici tasarımlarında kullanılan farklı yaklaşımlar aktarılmıştır. Bunun ardından çarpışma performansı metriklerinin tanımlamaları yapılmış ve kullanılacak çarpışma performansı metriklerinin hangileri olacağı bilgisi sunulmuştur. Sonrasında sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve oluşturulan sonlu eleman modeli doğrulanmıştır.

Bunun ardından, diyaframlı darbe sönümleyicilerin performanslarının iyileştirilmesi için yapılan tasarım iyileştirmeleri sunulmuştur. Bu değişiklikler, sırasıyla darbe sönümleyicinin dış duvar ve diyafram kalınlıklarının değiştirilmesi, diyafram yerleşiminin değiştirilmesi ve darbe sönümleyiciye bir konik açı verilmesi olarak yapılmıştır. Çalışmada bir sonraki eniyileme probleminin tasarımında önceki bir eniyileme problemi ile elde edilen optimum tasarım değişkenlerinin kullanıldığı iteratif bir yaklaşım kullanılmıştır.

Sonrasında, çalışmanın sonuçları özetlenmiş ve gelecek çalışmalarla ilgili öneriler sunulmuştur.

Ekler kısmında, eniyileme çalışmasında kullanılan vekil model tabanlı yaklaşım tanımlanmıştır. Bu tanım içinde çalışma kapsamında kullanılacak vekil modeller ve deney tasarımı yöntemleri sunulmuştur. Sonrasında, vekil modellerin doğruluklarının ölçülmesinde kullanılan hata metrikleri sunulmuş ve her eniyileme problemi için tüm vekil modellerden elde edilen hata metrikleri gösterilmiştir. Bunun ardından, eniyileme çalışmalarının genişletilmiş sonuçları sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Darbe sönümleyicilerin çarpışma performansını artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Gao ve Wang [3], darbe sönümleme amacıyla kullanılan tüm yapıların kapsamlı bir analizini derlemiş, demiryolu taşıtlarında kullanılan darbe sönümleyiciler için teknoloji ve tasarım stratejilerindeki son gelişmeleri sunmuştur.

Darbe sönümleyicilerle ilgili yapılan literatür araştırması; içi boş darbe sönümleyicilerle ilgili çalışmalar, içlerinde dikey destek yüzeyleri bulunduran darbe sönümleyicilerle ilgili çalışmalar, çok tüplü darbe sönümleyicilerle ilgili çalışmalar, içlerinde diyaframlar bulunduran darbe sönümleyicilerle ilgili çalışmalar ve darbe sönümleyicilerin farklı deformasyon şekillerinin incelendiği çalışmalar ana başlıkları altında incelenmiştir.

2.1 İçi Boş Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar

İnce duvarlı tüpler, ucuz ve enerji emilimi açısından verimli oldukları için tren ve otomobillerde darbe sönümleme işleviyle yaygın olarak kullanılmaktadır [4–7]. İçi boş ince duvarlı tüpler, darbe sönümleyici olarak kullanılan en basit tasarımlardır. İçi boş darbe sönümleyicilerle ilgili literatür taramasında önce darbe sönümleyici kesit şeklinin (dairesel, kare, altıgen vb.) etkisini araştıran çalışmalar, daha sonra konik açıyla ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Tarlochan vd. [4] çalışmasında dairesel, kare, dikdörtgen, altıgen, sekizgen ve elips kesitlerini karşılaştırılarak çelik malzemedeki üretilmiş içi boş darbe sönümleyicilerdeki kesit şeklinin aksenal ve eğik çarpma problemlerinde çarpışma performansı incelenmiştir. Çalışma sonunda, benzer boyutlarda üretilen farklı kesitli darbe sönümleyicilerden altıgen darbe sönümleyicilerin özgül enerji emilimi (SEA) sonuçlarının diğer kesit şekilli darbe sönümleyicilerden daha yüksek oldukları ve dikdörtgen kesitli darbe sönümleyicilerin başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) sonuçlarının diğer kesit şekilli darbe sönümleyicilerden daha düşük oldukları görülmüştür.

Abolfathi ve Nia [5] çalışmasında, dairesel kesitli darbe sönümleyicilerde yarıçap, yapı kalınlığı ve yüksekliği, sürtünme katsayısı, temas alanı ve kalıp şeklindeki darbe yüzeyi ile çarpışma açısı eniyilenmiştir. Zhang ve Zhang [6] çalışmasında, eksenel simetrik kare darbe sönümleyicilerinde farklı duvar kalınlıklarının etkileri araştırılırken, Ming vd. [7] çalışmasında, kirigami modelinin içi boş darbe sönümleyicilerin tasarımında kullanımı incelenmiş ve kirigami şekil parametrelerinin çarpışmaya dayanıklılık üzerindeki etkilerini araştırılmıştır.

Literatürde konik açıyla ilgili çalışmalarda, konik açının farklı duvar kalınlıklarına bağlı olarak farklı toplam sönümlenen enerji (EA), SEA ve IPCF sonuçları oluşturduğu görülmüştür [8,9]. Görülen genel bir sonuç, konik açısının yükselişinin IPCF'yi düşürdüğü yönünde olmuştur.

Nagel ve Thambiratnam [8] çalışmasında, konik açı almamış dikdörtgen darbe sönümleyicilerinin, konik açılı dikdörtgen darbe sönümleyicilerden daha yüksek SEA sonuçları oluşmasını sağladığı görülmüştür.

Mamalis vd. [9] çalışmasında, her yüzeyde aynı konik açıya sahip dikdörtgen kesitli darbe sönümleyicilerde farklı konik açıların çarpışma performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen darbe sönümleyicilerde EA sonucunun belli bir konik açı değerine ($7,5^\circ$) kadar yükseldiği, bu değer üzerinde ise EA sonucunun düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir.

2.2 İçlerinde Dikey Destek Yapıları Bulunduran Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar

İnce duvarlı darbe sönümleyicilerde, çok hücreli bir tasarım elde etmek için yapıya dikey destekler eklenmesi de sıklıkla kullanılan bir çözümdür. Dikey destek yapıları olarak darbe sönümleyici içine yerleştirilen sünger benzeri yapılar [10–13], ince duvarlı dikey destek yüzeyleri [14–22] veya bal peteği şekilli ince duvarlı yapılar [23] kullanılmaktadır.

Sünger benzeri yapılarla ilgili çalışmalarda; Altın vd. [10] çalışmasında, çok hücreli darbe emicilerde duvar kalınlığı, tüp sayısı, konik açı, alüminyum köpük yoğunluğu ve yapıya yerleştirilen alüminyum köpük malzeme miktarı çarpışma performansı için eniyilenmiştir. Wang vd. [11] çalışmasında, içinde insan kemiğinin yapısından esinlenen dikey bir destek yapısı olan içbükey bir darbe sönümleyici tasarımı çarpışma

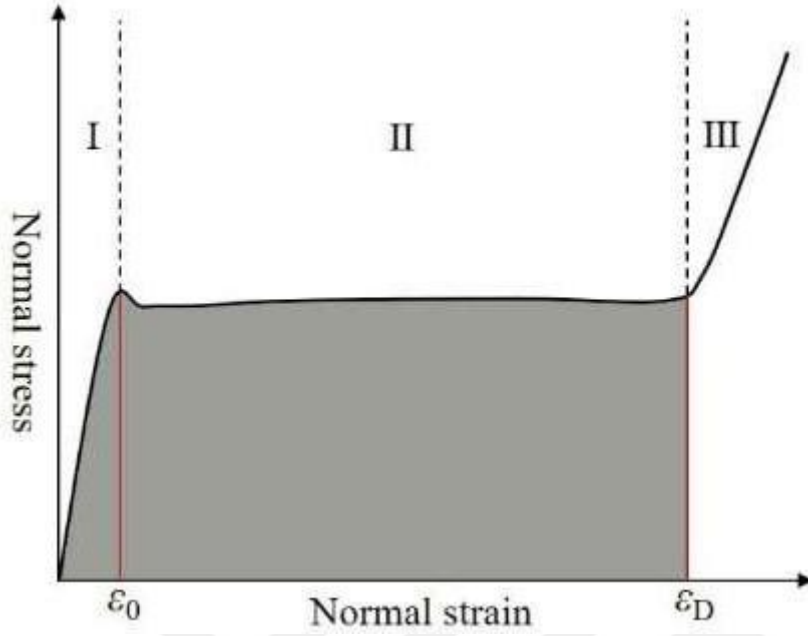
performansına etkileri incelenmiştir. Song vd. [12] çalışmasında, duvar kalınlığı, konik açısı ve köpük yoğunluğu çarpışma performansı için eniyelenmiştir. An vd. [13] çalışmasında, kare kesitli ve alüminyum köpük destekli darbe sönümleyicilerinin duvar kalınlığı çarpışma performansı için eniyelenmiştir.

İnce duvarlı dikey destek yüzeyleriyle ilgili çalışmalarda; Altın vd. [14] çalışmasında, dikey konumlandırılmış destek yüzeylerinin ve bu yüzeylerin oluşturduğu farklı kesitlerin çarpışma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Wang vd. [15] ve Xu vd. [16] çalışmalarında, hiyerarşik yapılar temel alınarak tasarlanmış dikey destek yapıları kullanılmış, bu yapıların çarpışma performansı etkileri araştırılmıştır. Xiang ve Du [17] ve Xiang vd. [18] çalışmalarında, böceklerin üst kanatlarının iç yapısından ilham alınarak yeni petek yapı formları geliştirilmiş ve bu tasarımların çarpışmaya dayanıklılık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Xie vd. [19] çalışmasında, dikey konumlandırılmış destek yüzeyleriyle yeni hücrelerin oluşturulduğu darbe sönümleyici tasarımında hücre sayısı, dış duvar kalınlıkları ve dış kenar uzunlukları parametrelerinin çarpışma performansı için eniyilmesi yapılmıştır. Qi vd. [20] çalışmasında, tek ve çok hücreli çarpışma emicilerin çarpma dayanıklılığı karşılaştırılarak farklı çarpışma açılarının etkileri incelenmiştir. Zou vd. [21] çalışmasında, dikey konumlandırılmış destek yüzeyleriyle oluşturulmuş farklı kesitlerin eksenel ve eğik çarpışma emme kabiliyeti üzerindeki etkisi araştırılmış ve dış duvarın kalınlığı, dikey destek duvarının kalınlığı ve dikey destek duvarının uzunluğu parametreleri farklı çarpışma açıları için eniyelenmiştir. Wu vd. [22] çalışmasında, yine dikey konumlandırılmış destek yüzeyleriyle oluşturulmuş farklı kesitlerin çarpışmaya dayanıklılık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, duvar kalınlığı ve köşe hücrelerinin boyutu eniyelenmiş ve beş hücreli çarpışma emicilerdeki bağlantı flanşlarının konumunun çarpışma performansına etkileri gözlemlenmiştir.

Bal peteği yapılarına örnek olarak, Zhou vd. [23] çalışmasında bal peteği şeklindeki bir iç yapı ile desteklenen darbe sönümleyicilerde dış yapının formunun ve bal peteği hücrelerinin kalınlıklarının ve şeklinin çarpışmaya dayanıklılık üzerindeki etkileri incelenmiştir.

İçlerinde dikey destek yapıları bulunduran darbe sönümleyicilerle ilgili çalışmalardan alüminyum köpük gibi hücresel bir katı yapının kullanılanlarda, ezilmenin ilerleyen aşamalarında yoğunlaşma gerinimi görülmektedir. Hücresel bir katı yapının basma gerilim – gerinim grafiği, doğrusal elastik rejim, plato rejimi ve yoğunlaştırma rejimi olarak üç farklı aşamada incelenebilir [24]. Bu üç aşama, Şekil

2.1'de Alüminyum köpük için oluşturulmuş örnek bir basma gerilim – gerinim grafiğinde gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Alüminyum köpük için örnek bir basma gerilim – gerinim grafiği [25]

Plato rejimi, ezilme gerinimi ϵ_0 ile başlar. Sıkıştırma ile hücreli yapı içerisindeki hücre duvarları birbiriyle temas eder. Yoğunlaşma gerinimi ϵ_D 'ye ulaşıldığında hücre malzeme tamamen sıkıştırılır ve bu sıkıştırma durumu gerilim – gerinim eğrisinin eğiminde dik bir artışa neden olur. Yoğunlaştırma gerinimi Eşitlik (2.1)'de gösterilen şekilde, bağıl yoğunluğun bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir [26].

$$\sigma_D = \sigma_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_D} \right) \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'de ρ_0 hücresel katının orijinal yoğunluğunu ve ρ_D hücresel katının katı fazının (hücre duvarı malzemesi) yoğunluğunu ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında darbe sönümleyici yapıları yoğunlaşma gerinimlerine ulaşmayacak şekilde kısıtlı miktarda ezilmeye maruz bırakıldıkları için yoğunlaştırma gerinimi dikkate alınan bir faktör olmamaktadır.

2.3 Çok Tüplü Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar

Tek tüplü bir tasarımın aksine çok tüplü darbe tasarımların kullanımı, ince duvarlı darbe sönümleyicilerin çarpışma performansını arttıran bir başka çözümdür [27,28].

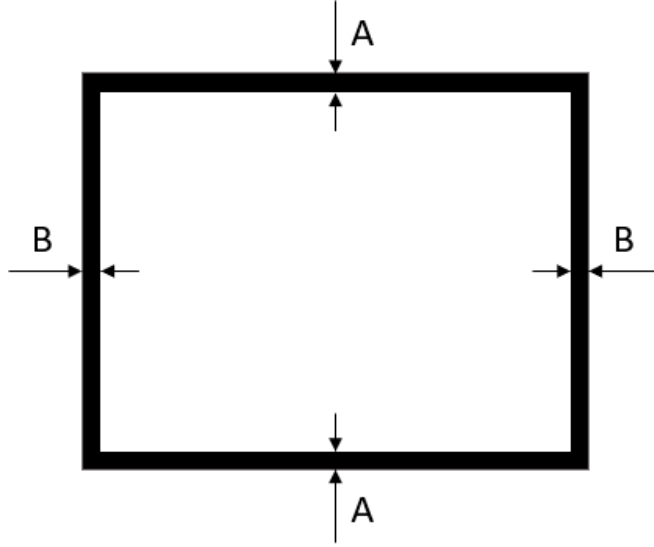
Zou vd. [27] çalışmasında, iç ve dış borular için duvar kalınlığının etkileri ve bu iki boruyu birbirine bağlayan bağlantıların kalınlığı eniyelenmiştir. Deng ve Liu [28] çalışmasında, üzerinde yanal oluklar bulunduran bir orta borulu üç tüplü bir yapı kullanılmış ve oluklu borunun kalınlığının yanı sıra genlik ve oluk sayısının etkileri incelenmiştir.

2.4 İçlerinde Diyaframlar Bulunduran Darbe Sönümleyicilerle İlgili Çalışmalar

Darbe sönümleyicilerin çarpışma performansını iyileştirmenin bir başka yolu da darbe sönümleyicilerin içine diyafram yerleştirmektir [29–34].

Dong vd. [29] çalışmasında çift tüplü bir darbe sönümleyici tasarımında diyafram sayısının, iç tüp şeklinin ve iç tüp boyutunun çarpışma performansı etkisi gözlemlenmiştir. Gao vd. [30] çalışmasında diyaframlı darbe sönümleyicilerde dış duvar kalınlığının dikey ve açılı çarpışmalarda çarpışma performansı üzerinde etkileri incelenmiştir. Peng vd. [31] çalışmasında, diyaframlar arasına monte edilmiş kılavuz raylar ve bal peteği yapıları içeren kare kesitli darbe sönümleyicilerde, petek yapının, dış duvar kalınlığının ve malzeme parametrelerinin değişmesinin darbe emiciler üzerinde yarattığı etkiler incelenmiştir. Yao vd. [32] çalışmasında, dikey ve dikey sapmalara sahip çarpışmalar altında çarpışma sönümleme yetenekleri için değiştirilmiş bir bal peteği kesitinin etkisi incelenmiştir. Xu vd. [33] çalışmasında, dikdörtgen kesitli ve diyaframlı bir darbe sönümleyicide diyafram ve dış duvar kalınlıkları için çarpışmaya dayanıklılık duyarlılık analizi ve pareto eniyilemesi yapılmıştır.

Xu vd. [34] çalışmasında dikdörtgen kesitli bir darbe sönümleyiciye diyafram eklenmesinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında üç parametre eniyelenmiştir. Bu parametreler; (i) dış duvarın uzun kenarının kalınlığı (A), (ii) dış duvarın kısa kenar kalınlığı (B), (iii) diyaframların ortak kalınlığı (C_u) olarak tanımlanmıştır. Kullanılan duvar kalınlığı parametreleri Şekil 2.2’te gösterilmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, Xu vd. çalışması [34] temel alınmıştır.



Şekil 2.2 : Dikdörtgen kesitli dış duvar üzerindeki kalınlık parametreleri [34]

Maksimum SEA ve minimum IPCF amaç fonksiyonlarına ilişkin eniyileme çalışmalarının standart formda gösterimi, Eşitlik (2.2-2.3)'te sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } -SEA(A, B, C_u) & \text{Minimize } IPCF(A, B, C_u) \\
 \text{Özellikler} & EA(A, B, C_u) \geq 70 \text{ kN} & \text{Özellikler} & EA(A, B, C_u) \geq 70 \text{ kN} \\
 & 2 \text{ mm} \leq A \leq 6 \text{ mm} & & 2 \text{ mm} \leq A \leq 6 \text{ mm} \\
 & 2 \text{ mm} \leq B \leq 6 \text{ mm} & & 2 \text{ mm} \leq B \leq 6 \text{ mm} \\
 & 2 \text{ mm} \leq C_u \leq 6 \text{ mm} & & 2 \text{ mm} \leq C_u \leq 6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Bu çalışma kapsamında, çarpışma performansının ölçülmesi için SEA ve IPCF metrikleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen optimum tasarım değişkenleri ve sonuçlar Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1 : Xu vd. [34] çalışmasında elde edilmiş optimum tasarım değişkenleri ve sonuçlar

Amaç Fonksiyonu	A (mm)	B (mm)	C _u (mm)	IPCF Sonucu (kN)	SEA Sonucu (kJ/kg)
Maksimum SEA	6,00	6,00	3,25	1176,2	25,89
Minimum IPCF	2,59	5,90	2,65	654,0	16,80

2.5 Darbe Sönümleyicilerin Farklı Deformasyon Şekillerinin İncelendiği Çalışmalar

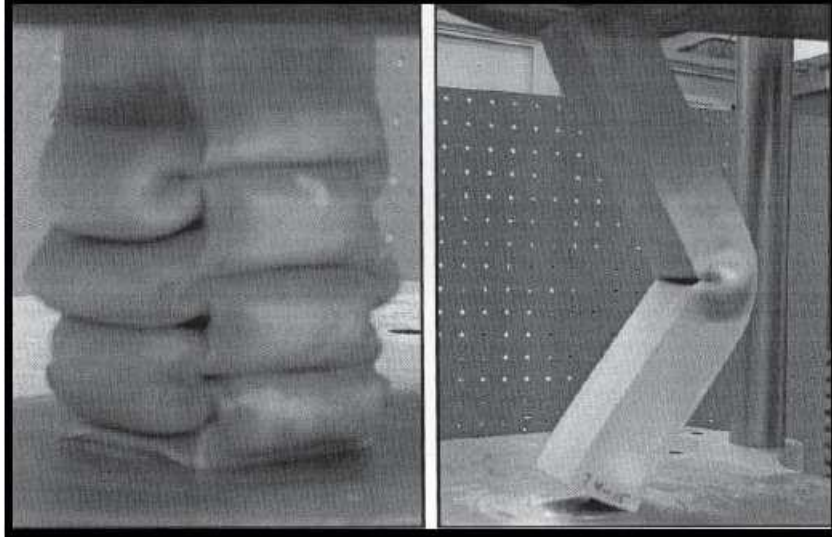
Darbe sönümleyicilerin gösterdikleri çarpışma performansları hakkında açıklamalar yapılabilmesi için, darbe sönümleyici deformasyon şekillerinin incelendiği bir dizi çalışmalar yapılmıştır [35–40].

Bu çalışmalar kapsamında, eksenel çarpışma problemlerinde gözlemlenen deformasyon şekilleri; global deformasyon ve lokal deformasyon olarak iki temel başlık altında incelenmiştir.

İnce duvarlı darbe sönümleyiciler için gözlemlenen iki temel deformasyon mekanizması eksenel ezilme ve eğilme olarak tanımlanmıştır. Darbe sönümleyicilerde oluşan global ve lokal deformasyonlar bu mekanizmalar üzerinden oluşmaktadır.

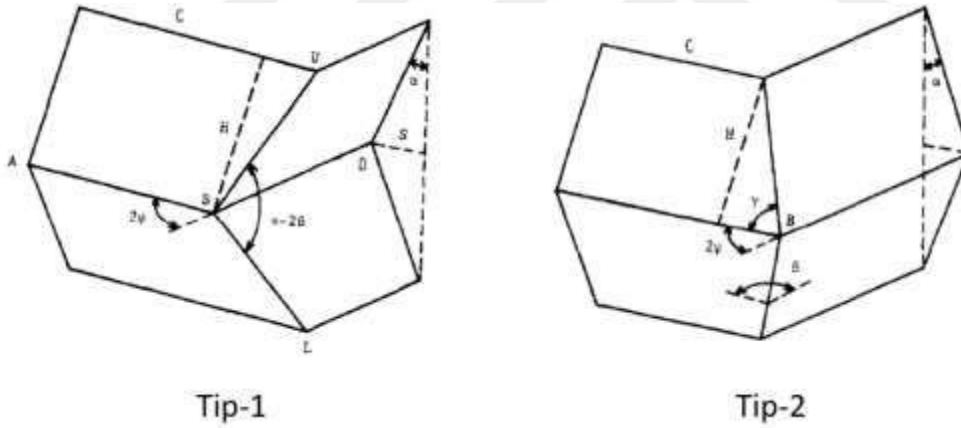
Bir darbe sönümleyicinin ezilmesi veya eğilmesi aşamasında darbe sönümleyicinin tamamında ezilme ve eğilme durumlarının oluşması global deformasyon, darbe sönümleyici üzerinde sınırlı bölgelerde sadece ezilme durumlarının görülme durumlarının oluşması lokal deformasyon olarak tanımlanmaktadır.

Lokal deformasyona uğrayan darbe sönümleyicilerin çarpışma performansları, global deformasyona uğrayan darbe sönümleyicilere göre daha yüksektir. Bunun temel nedeni olarak global deformasyon aşamasında ortaya çıkan eğilme mekanizmasının darbe sönümleme performanslarının, ezilme mekanizmasının darbe sönümleme performansından daha kötü olması gösterilmektedir. Ayrıca lokal deformasyon durumunda darbe sönümleyicinin farklı kısımlarının sırasıyla eziliyor durumda olmaları, çarpışma sırasında oluşan kuvvetlerin çarpışma geneline homojen olarak dağıtılabilmesine imkan sağlamaktadır [35]. Lokal ve global deformasyona uğramış darbe sönümleyiciler Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Lokal ve global deformasyona uğramış darbe sönümleyiciler [36]

Dörtgen kesitli darbe sönümleyicilerin lokal deformasyonu Tip – 1 ve Tip – 2 olarak tanımlanan iki farklı temel ezilme mekanizması şekliyle oluşmaktadır. Bunlar Şekil 2.4’te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Dörtgen şekilli darbe sönümleyicilerin ezilme şekilleri [40]

Tip – 1 ezilme sırasında iki yüzeyin birleştiği çizgi ezilme sırasında deformasyona uğramakta ve şeklini kaybetmektedir. Tip – 2 ezilmede ise iki yüzeyin birleştiği çizgi şeklini korumaktadır. Ezilme sırasında oluşan gerilimler bu çizgide yoğunlaştığı için, bu çizginin deformasyona uğramadığı Tip – 2 ezilmede daha yüksek ezilme kuvvetleri görülmekte ve ezilme kuvvetlerine bağlı olarak daha yüksek enerji sönümlemesi elde edilmektedir [37–40].

3. ÇARPIŞMA PERFORMANSI METRİKLERİ

Darbe sönümleyici performansının değerlendirilebilmesi için farklı metrikler kullanılmaktadır. Bu metriklerin en temeli, darbe sönümleyicinin sönümleyebildiği toplam enerji miktarıdır. Bunun yanı sıra, darbe sönümleyicilerin kütle olarak da hafif olması beklenmektedir. Bu nedenle, bir başka sık kullanılan çarpışma performansı metriği, sönümlenen enerji miktarının darbe sönümleyici kütlesine olan oranı olarak tanımlanan özgül enerji sönümlemesidir.

Çarpışmalar sırasında darbe sönümleyicilerin ezilmeye karşı koydukları kuvvetler, direkt olarak yolculara da etki etmektedir. Yolcuların hayatta kalmasını sağlayan faktörlerden biri de darbe sönümleme sırasında ortaya çıkan pik kuvvetlerin mümkün olduğunca düşük kalmasıdır. Bu nedenle darbe sönümleyici tasarımlarında pik kuvveti mümkün olduğunca düşük tutularak ortalama çarpışma kuvvetinden çok yüksek olmamasının sağlandığı konfigürasyonlar tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında toplam sönümlenen enerji ($EA - Total Energy Absorbed$), özgül enerji sönümlemesi ($SEA - Specific Energy Absorption$) ve başlangıçtaki pik ezilme kuvveti ($IPCF - Initial Peak Crash Force$) metrikleri kullanılmıştır. Bu hata metrikleri ve sıkça kullanılan bazı diğer hata metrikleri hakkında temel tanımlamalar aşağıda yapılmıştır.

3.1 Toplam Sönümlenen Enerji

Darbe sönümleme sırasında oluşan toplam sönümlenen enerji ($EA - Total Energy Absorbed$), çarpışmanın oluşturduğu kuvvet tarafından yapılan iştir. Toplam sönümlenen enerji, kuvvet – deplasman grafiği altında kalan alan olarak gösterilir. Toplam sönümlenen enerji Şekil 3.1’de kuvvet – deplasman grafiğinin altındaki taralı alan olarak gösterilmiştir.

Toplam sönümlenen enerjisinin bir başka gösterim yöntemi olarak Eşitlik (3.1) de kullanılmaktadır.

$$EA = \int_0^{\Delta} F \, d\Delta \quad (3.1)$$

Bu denklemde Δ aksel darbe kuvvetini, δ da kuvvet eksenindeki deplasmanı (ezilme miktarını) simgelemektedir. δ_{max} de maksimum deplasmanı göstermektedir.

3.2 Özgül Enerji Sönümlenmesi

Özgül enerji sönümlenmesi (SEA – *Specific Energy Absorption*), toplam sönümlenen enerjinin darbe sönümleyici kütesine olan oranıdır. Bu ifade, Eşitlik (3.2)'de gösterilmektedir.

$$SEA = \frac{EA}{\delta} \quad (3.2)$$

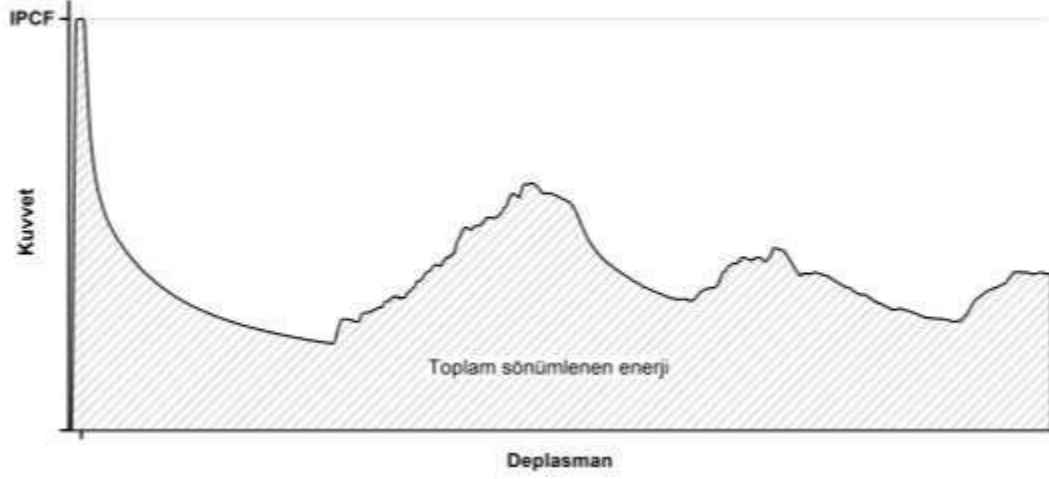
Bu eşitlikte EA toplam sönümlenen enerjiyi, δ de darbe sönümleyici kütesini simgelemektedir.

3.3 Maksimum Ezilme Kuvveti

Maksimum ezilme kuvveti (PCF – *Peak Crash Force*), darbe sönümleme sırasında oluşan en yüksek kuvveti tanımlamaktadır.

3.4 Başlangıçtaki Pik Ezilme Kuvveti

Genellikle darbe sönümlemenin başlangıcı sırasında elde edilen ezilme kuvvetleri, darbe sönümlemenin devamında oluşan ezilme kuvvetlerinden çok daha yüksek olmaktadır. Darbe sönümleme faaliyetinin başlangıcında oluşan bu yüksek kuvvet, kısa isimle IPCF (*Initial Peak Crash Force*) olarak anılır. Örnek IPCF metriği, Şekil 3.1'de verilmiş kuvvet – deplasman grafiği üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Toplam sönümlenen enerji ve başlangıçtaki pik ezilme kuvveti metriklerinin örnek bir kuvvet – deplasman grafiği üzerinde gösterimi

3.5 Ortalama Ezilme Kuvveti

Ortalama ezilme kuvveti (\bar{F}), darbe sönümleme sırasında ortaya çıkan kuvvetlerin ortalamasını temsil eder. Bu değer, kuvvet – deplasman grafiği üzerindeki kuvvet değerlerinin ortalaması alınarak veya toplam sönümlenen enerjinin (EA) maksimum deplasmana (Δ) bölünmesiyle elde edilebilmektedir. Bu ifade, Eşitlik (3.3)'te de gösterilmektedir.

$$\bar{F} = \frac{EA}{\Delta} \quad (3.3)$$

3.6 Ezilme Kuvveti Verimi

Ezilme kuvveti verimi (CFE – *Crash Force Efficiency*), darbe sönümleme sırasında ortaya çıkan ezilme kuvvetlerinin ortalamasının, darbe sönümleme sırasında ortaya çıkan ezilme kuvvetlerinin maksimumuna oranını tanımlamaktadır.

Darbe sönümleyiciler, araç çarpışmaların enerjisini plastik deformasyona uğradıkları sırada oluşturdukları kuvvetlerle sönümlerler. Darbe sönümleyicilerin oluşturduğu bu kuvvetler, aynı zamanda taşıtlardaki yolculara da etki etmektedir. Bu nedenle bu kuvvetlerin yaptıkları piklerin de mümkün olduğunca düşük olması ve anlık oluşan pik kuvvetlerin mümkün olduğunca darbe sönümleme süresince oluşan kuvvetlerin ortalamasına yakın olması istenen bir faktördür.



Ezilme kuvveti verimi (CFE) bu durumu ölçmek için sıkça kullanılan bir metriktir. Bu metrik, Eşitlik (3.4)'te gösterilmektedir.

$$CFE = \frac{\bar{F}}{PCF} \quad (3.4)$$

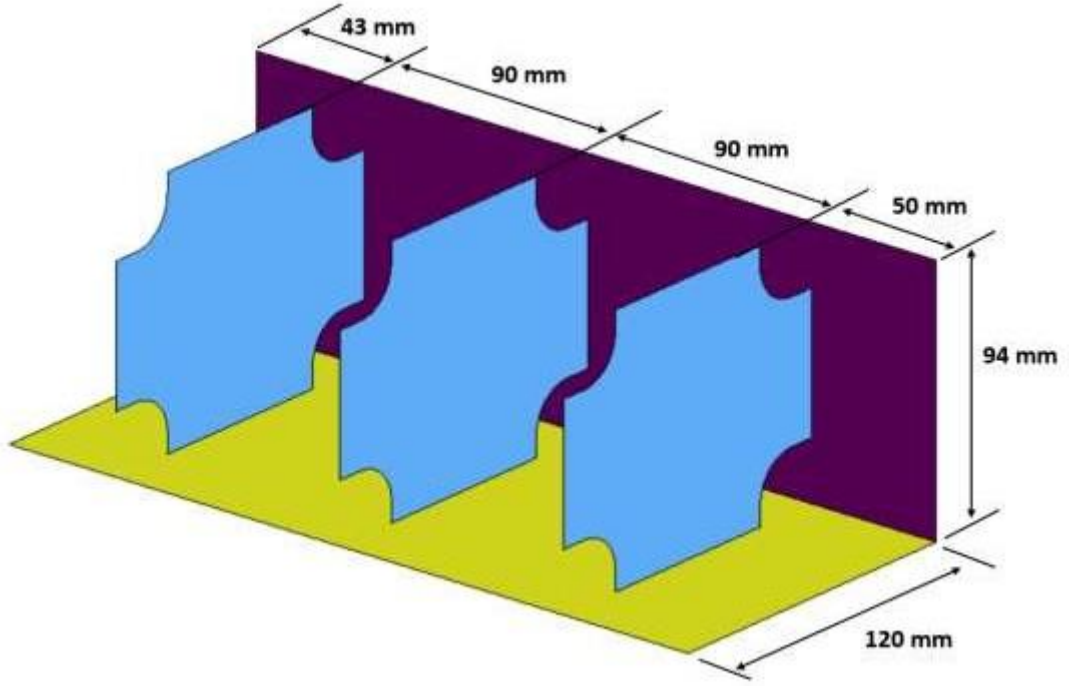
Bu eşitlik içerisinde \bar{F} ortalama ezilme kuvvetini, PCF de maksimum ezilme kuvvetini tanımlamaktadır.



4. SONLU ELEMEN MODELİ

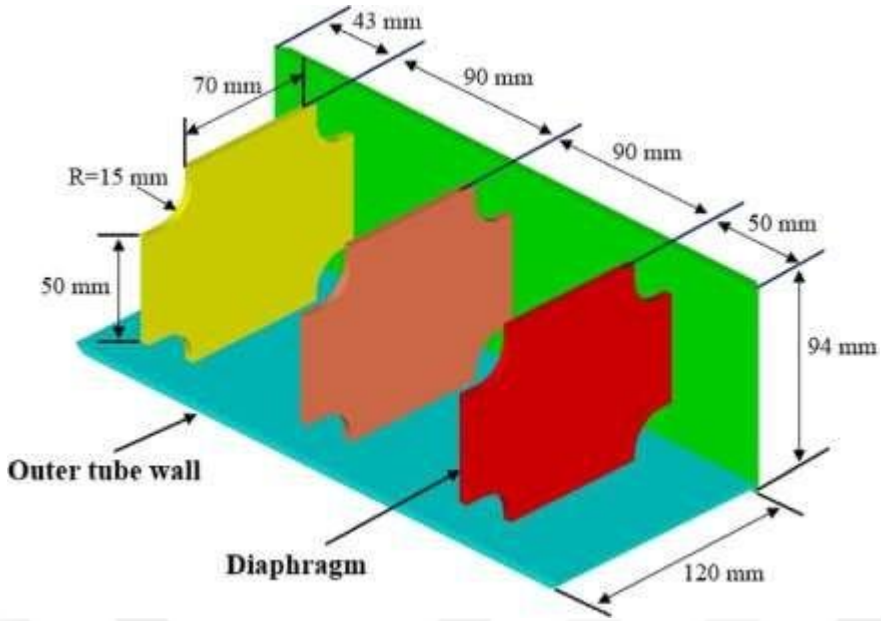
4.1 Modelde Kullanılan Tasarım

Sonlu eleman modeli, Xu vd. [34] çalışmasında tanımlanmış olan model taban alınarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinin oluşturulması için LS-Prepost programı kullanılmıştır. Bu sonlu eleman modellerinin analizleri LS-DYNA programında yapılmıştır. Sonlu eleman modelinin doğrulamasında da kullanılmış olan temel modelin boyutları Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



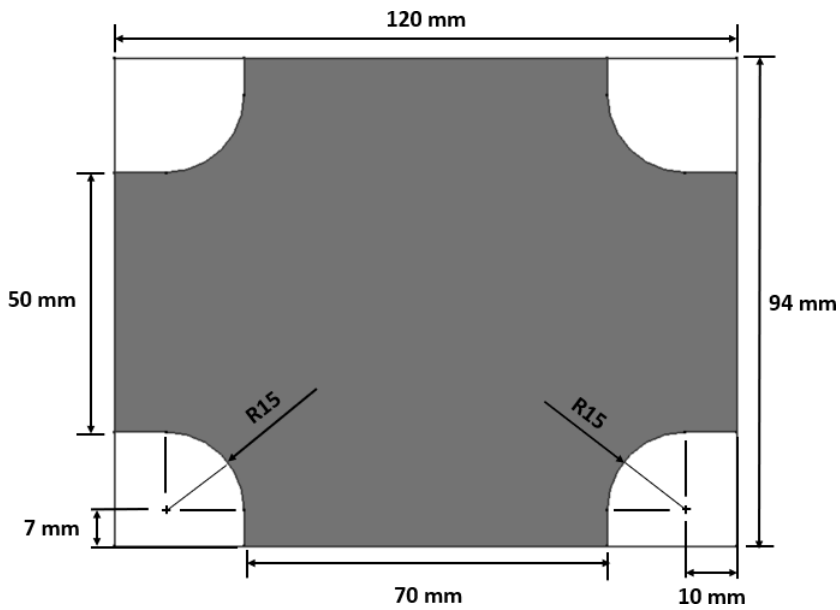
Şekil 4.1 : Temel darbe sönümleyici modelinin boyutları

Xu vd. [34] çalışması incelendiğinde, tanımlanmış diyafram ve dış duvar boyutları arasında bir uyumsuzluk tespit edilmiştir. Sadece Şekil 4.2’de gösterilen orijinal çalışmada tanımlanmış olan boyutlar kullanılarak tasarım yapıldığında, diyaframların dış duvarlara temas edemediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 : Xu vd. [34] çalışmasında tanımlanmış olan diyafram ve dış duvar boyutları

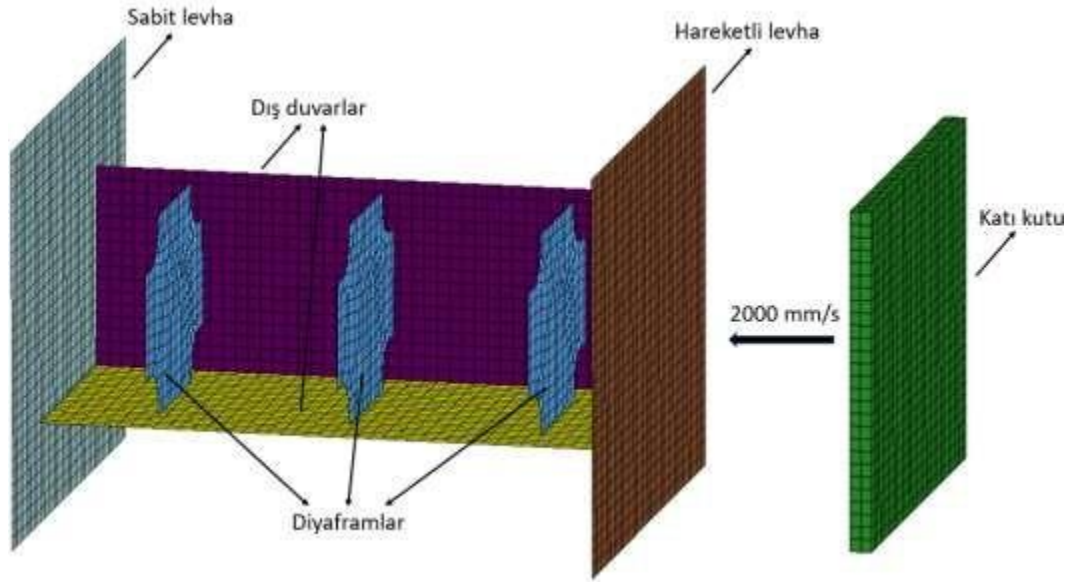
Bu uyumsuzluğun giderilebilmesi için, diyafram tasarımı hem Xu vd. [34] çalışmasında tanımlı olan ölçüleri sağlayacak, hem de de dış duvarlara temas edecek şekilde yeniden yapılmıştır. Bu yapılan diyafram tasarımında Şekil 4.2’de gösterilen diyafram ölçüleri olan kenar uzunlukları ve köşedeki Radius korunmuştur. Uyumsuzluğun giderilebilmesi için de Radius merkezleri uzun kenarlardan 10 mm, kısa kenarlardan da 7 mm içeride olacak şekilde konumlandırılmıştır. Temel modelde kullanılan diyafram tasarımı Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : Bu çalışmada kullanılan diyaframın tasarımı

Xu vd. [34] çalışmasında darbe sönümleyici yapısının üstünde ve altında olmak üzere iki adet deformasyona uğramayan rijit levha modellenmiştir. Bu levhalardan altta bulunanı tüm eksenlerde sabit olma özelliği göstermektedir. Üstte bulunan levha sadece darbe ekseninde serbest, geri kalan tüm eksenlerde sabittir. Çarpma eylemini gerçekleştirmesi amacıyla deformasyona uğramayan rijit bir katı kutu yapısı modele yerleştirilmiştir. Katı kutu, çarpışma boyunca darbe ekseninde 2000 mm/s sabit hızda hareket etmektedir. Modelde tanımlı olan yapılar Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

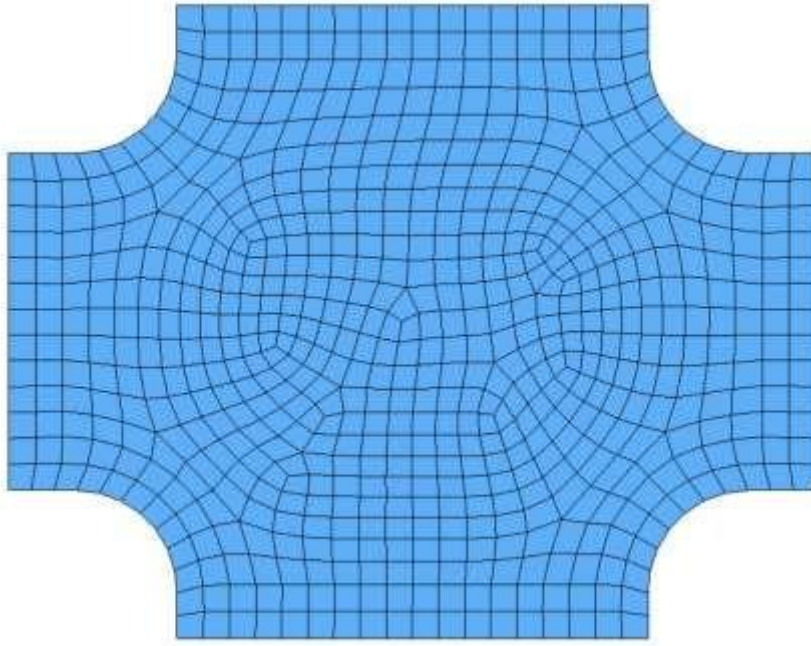
Bu çalışma kapsamında kullanılan eleman formülasyonu ve entegrasyon noktası sayısı olarak Xu vd. [34] çalışmasıyla aynı olacak şekilde Belytschko-Tsay formülasyonu ve 2 adet entegrasyon noktası kullanılmıştır. Dış duvarlar, diyaframlar ve levhaların et kalınlıkları da yine Xu vd. [34] çalışmasında tanımlanan şekilde 4 mm olarak alınmıştır.



Şekil 4.4 : Sonlu eleman modelinde tanımlanmış yapılar

4.2 Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması

Sonlu eleman ağı, katı kutuda altı yüzlü katı sonlu elemanlar (*hexahedral solid element*), diğer yapılarda dörtgen kabuk elemanlar (*quadrilateral shell element*) kullanılarak oluşturulmuştur. Diyaframların Radius kısımlarında içe doğru kademeli olarak Radius yüzeylerine paralel eğriler tanımlanmış ve ağ yapısı bu paralel eğriler üzerinden oluşturulmuştur. Bu şekilde Radius çevresindeki elemanların şekillerinin düzgün olması sağlanmıştır. Sonlu eleman ağı oluşturulmuş diyafram modeli detaylı olarak Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



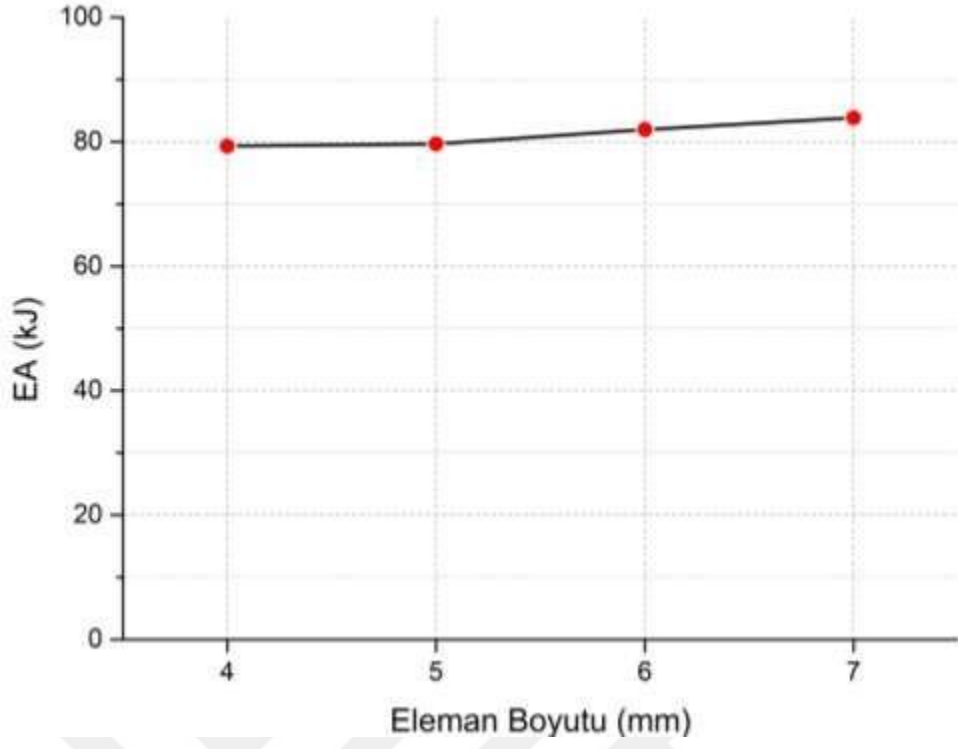
Şekil 4.5 : Sonlu eleman ağı oluşturulmuş diyafram modeli

Katı kutunun sonlu eleman ağı boyutu, Xu vd. [34] çalışmasında tanımlanan şekilde, 10 mm olarak alınmıştır. Levhalar, diyaframlar ve darbe sönümleyicinin dış duvarlarının sonlu eleman ağı boyutu, yapılmış yakınsama analiziyle belirlenmiştir. Yakınsama analizinin sonucunda, EA ve IPCF metriklerinin 4 mm’de yakınsadıkları gözlemlenmiştir. Bu nedenle, levhalar, diyaframlar ve darbe sönümleyicinin dış duvarlarının sonlu eleman ağı boyutu 4 mm olarak alınmıştır. Yapılan sonlu eleman ağı oluşturma işlemi sonucunda 16556 eleman, 17251 düğüm oluşmuştur.

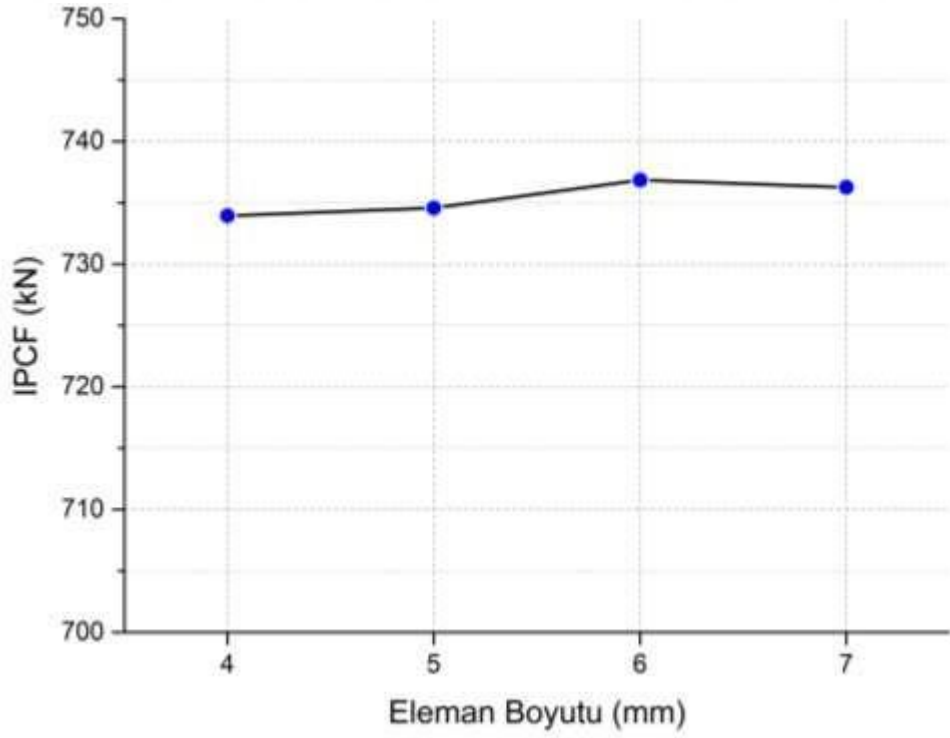
EA metriği için yapılmış yakınsama analizi Şekil 4.6’da, IPCF metriği için yapılmış yakınsama analizi Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Ayrıca her iki metrik için yapılan yakınsama analizi Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 : Yakınsama analizi sonuçları

		Sonlu eleman ağı boyutu			
		4 mm	5 mm	6 mm	7 mm
Metrik	EA (kJ)	79,3	79,7	82,0	83,9
	IPCF (kN)	734,0	735,0	736,9	736,3



Şekil 4.6 : Toplam sönümlenen enerji metriği için yapılmış yakınsama analizi



Şekil 4.7 : Başlangıçtaki pik ezilme kuvveti metriği için yapılmış yakınsama analizi

4.3 Sonlu Eleman Modelinin LS-Prepost Üzerinden Tanımlanması

Sonlu eleman ağlarıyla birlikte oluşturulmuş olan yapılar, LS-Prepost yazılımı içerisine alınarak analize hazır hale getirilmiştir. Bunun için öncelikle bu yapıların parça özellikleri tanımlanmıştır. Ardından, parça özelliği içerisinde her bir yapı için belirtilmiş olan kesit ve malzeme özellikleri sonlu eleman modeline tanımlanmıştır. Bu aşamanın ardından oluşturulmuş yapıların birbirleriyle olan teması sonlu eleman modeline tanımlanmıştır. Son olarak da yapılacak analizin sınır koşulları belirlenmiştir. LS-Prepost programı üzerinden bu adımların her biri anahtar kelimeler (*keyword*) kullanılarak yapılmaktadır. İstisnalar haricinde modelden ve model içindeki yapılardan bağımsız olarak tanımlanan bu keywordler, kendileriyle ilgili yapılara modelin oluşturulması aşamasında bağlanırlar.

Sonlu eleman modeli, Intel® Xeon® CPU E5-2687W v4 3.00 GHz işlemci ve 64 GB RAM kullanılarak analiz edilmiştir. Optimizasyon çalışmaları kapsamında yapılan sonlu eleman analizlerinin ortalama süresi 1 saat olmuştur.

4.3.1 Parça Tanımlaması

Parça tanımlaması, LS-Prepost arayüzünün en temel girdisidir. Parça tanımı kullanılarak analiz yapılacak yapılar için ayrı ayrı malzeme ve kesit özellikleri tanımlanır.

LS-Prepost arayüzü kullanılarak parça tanımlanması *PART anahtar kelimesi kullanılarak yapılır. Bu anahtar kelime içinde bulunan PID parça numarasını, SECID o parçada kullanılacak olan kesitlerin özelliklerinin tanımlandığı kesit numarasını, MID de parçada kullanılacak olan malzemenin özelliklerinin tanımlandığı malzeme numarasını tanımlamaktadır. LS-Prepost üzerinden görüntülenen bir *PART anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

*PART_(TITLE) (10)								
1	TITLE	dis_duvar_genis						
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
	1	1	2	0	0	0	0	0

Şekil 4.8 : *PART anahtar kelimesi arayüzü

4.3.2 Kesit Özellikleri Tanımlaması

LS-Prepost üzerinde kabuk elemanların kesitleri ayrı, katı elemanların kesitleri ayrı olarak tanımlanmaktadır. Kabuk elemanlarının kesit özelliklerinin tanımlanmasında *SECTION_SHELL anahtar kelimesi, katı yapıların kesit özelliklerinin tanımlanmasında da *SECTION_SOLID anahtar kelimesi kullanılmaktadır.

*SECTION_SHELL anahtar kelimesi içerisinde bulunan SECID kesit numarasını, ELFORM eleman formülasyonunu, NIP kabuk kalınlığı boyunca kullanılan entegrasyon noktası sayısını, T1’den T4’e kadar olan kısımlar da her bir elemanın ilk boğumundan dördüncü boğumuna kadar ayrı ayrı tanımlanmış et kalınlığını temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında tanımlanmış elemanlarda et kalınlığı her boğumda eşittir. LS-Prepost üzerinden görüntülenen bir *SECTION_SHELL anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.9’da gösterilmektedir.

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)								
TITLE								
dis_duvar_genis								
1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	OR/IRID	ICOMP	SETYP
	1	2	1.0000000	2	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	4.0000000	4.0000000	4.0000000	4.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Şekil 4.9 : *SECTION_SHELL anahtar kelimesi arayüzü

*SECTION_SOLID anahtar kelimesi içinde bulunan SECID ve ELFORM parametreleri, *SECTION_SHELL’deki karşılıklarıyla aynı şekilde kesit numarasını ve eleman formülasyonunu tanımlamaktadır. LS-Prepost üzerinden görüntülenen bir *SECTION_SOLID anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.10’da gösterilmektedir.

*SECTION_SOLID_(TITLE) (1)			
TITLE			
kati_kutu			
1	SECID	ELFORM	AET
	2	1	0

Şekil 4.10 : *SECTION_SOLID anahtar kelimesi arayüzü

Çalışmada *SECTION_SOLID arayüzünde tanımlı olan eleman formülasyonu olarak sabit gerilmli katı eleman kullanılmıştır.

4.3.3 Malzeme Özellikleri Tanımlaması

Çalışma kapsamında kabuk elemanlı parçalar için farklı, katı elemanlı parçalar için farklı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Kabuk elemanlı parçaların malzeme özelliklerinin tanımlanmasında *MAT024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY anahtar kelimesi, katı yapının kesit özelliklerinin tanımlanmasında da *MAT020-RIGID anahtar kelimesi kullanılmaktadır.

*MAT024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY anahtar kelimesi içerisinde MID malzeme numarasını, RO malzeme özkütlesini, E elastisite modülünü, PR Poisson oranını, SIGY de akma mukavemetini göstermektedir.

Bu malzeme anahtar kelimesi tanımlanırken kullanılan EPS ve ES parametrelerinden EPS malzemenin çekme testi sonucunda elde edilen eğrideki gerinim değerlerini, ES de bu gerinim değerlerine karşılık gelen gerilme değerlerini tanımlamaktadır. LS-Prepost üzerinden görüntülenen bir *MAT024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.11’de gösterilmektedir.

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)								
TITLE								
dis_duvar_genis_malzeme								
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	2	7.850e-06	206.00000	0.3000000	0.3350000	0.0	1.000e+21	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0051216	0.0184379	0.0655570	0.1331626	0.1700384	0.2530090	0.7938541
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.3350000	0.4075000	0.4755000	0.5835000	0.6947000	0.7719000	0.8491000	1.6020000

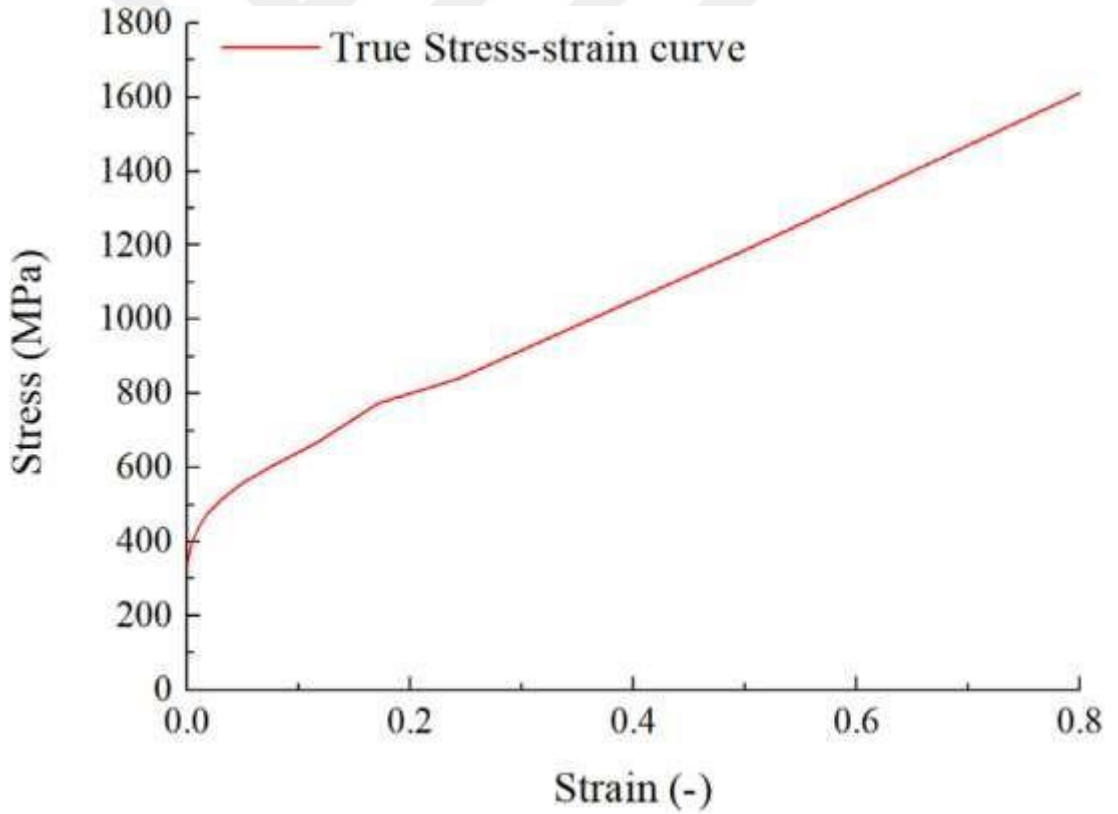
Şekil 4.11 : *MAT024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY anahtar kelimesi arayüzü

Kabuk elemanlı parçalar için kullanılan malzeme parametreleri, Xu vd. [34] çalışmasıyla aynı olacak şekilde alınmıştır. Bu parametreler Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 : MAT024 malzemesinde tanımları içerisinde kullanılan malzeme parametreleri

Malzeme parametreleri	Değerler
Özkütle	7850 kg/m ³
Elastisite modülü	206 GPa
Poisson oranı	0,3
Akma mukavemeti	0,335 GPa

Xu vd. [34] çalışmasında, malzeme için çekme testi yapılmış ve bu çekme testi sonrasında elde edilen gerilim – gerinim değeri sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan EPS ve ES parametrelerinin ilk hanesi Çizelge 4.2’de sunulmuş akma mukavemeti değerinden, diğer değerler Şekil 4.12’de gösterilen gerilim – gerinim grafiğinden alınmıştır.



Şekil 4.12 : Xu vd. [34] çalışmasında sunulmuş gerilim – gerinim grafiği

*MAT020-RIGID anahtar kelimesi içerisinde tanımlı olan MID, RO, E ve PR parametreleri, MAT024 arayüzünde olduğu gibi sırasıyla malzeme numarasını, malzeme özkütlesini, akma mukavemetini ve Poisson oranını tanımlamaktadır. Akma mukavemeti ve Poisson oranı MAT024 malzemesiyle aynı seçilmiş, malzeme

özkütlesi, MAT024 malzemesinde kullanılan özkütle değerinin yaklaşık 100 katı olarak seçilmiştir.

MAT020 malzemesi atanacak olan katı kutu üzerinde deformasyon olmayacaktır. Özkütle değerinin yüksek olarak atanmasının temel nedeni, analiz sırasında katı kutuyla temas edecek olan hareketli levhayla olan etkileşimi tanımlamaktır. Bu iki parça arasındaki yüksek özkütle farkı, hareketli levhayla olan statik çarpışmayı simüle etmesi için kullanılmıştır.

Bu malzeme anahtar kelimesi içerisinde görülen CMO parametresi, CON1 ve CON2 parametrelerini aktive eden temel parametredir. Bu parametre vasıtasıyla katı kutuya CON1 ve CON2 içinde tanımlanacak global yönlerde hareket kısıtları tanımlanmıştır.

CON1 parametresi 4 olarak seçilerek x ve y yönünde aksenal hareketin kısıtlanması, CON2 parametresi 7 seçilerek x,y ve z yönlerinde açısız hareketin sınırlandırılması sağlanmıştır.

LS-Prepost üzerinden görüntülenen bir *MAT020-RIGID anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.13'te gösterilmektedir.

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (1)								
TITLE								
kati_kutu								
1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	1	6.000e-04	206.00000	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	1.0	4	7					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Şekil 4.13 : *MAT020-RIGID anahtar kelimesi arayüzü

4.3.4 Parçaların Birbirleriyle Olan Temaslarının Tanımlaması

Parçaların birbirleriyle olan temasları, Xu vd. [34] çalışmasında belirtilen şekilde tanımlanmıştır. Katı kutu haricinde tüm parçaların birbirleri arasındaki temasları *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE anahtar kelimesiyle, katı kutuyla en üstte bulunan hareketli levha arasındaki temas

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE anahtar kelimesiyle tanımlanmıştır.

LS-Prepost'tan tanımlanan *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE ve *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE anahtar kelimeleri arayüzleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te gösterilmektedir.

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (1)

1	<u>CID</u>	<u>TITLE</u>						
	0	Single_surface						
			<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2			
2	<u>IGNORE</u>	<u>BUCKET</u>	<u>LCBUCKET</u>	<u>NS2TRACK</u>	<u>INITITER</u>	<u>PARMAX</u>	<u>UNUSED</u>	<u>CPARM8</u>
	0	200		3	2	1.0005		0
3	<u>UNUSED</u>	<u>CHKSEGS</u>	<u>PENSE</u>	<u>GRPABLE</u>				
		0	1.0	0				
4	<u>SSID</u>	<u>MSID</u>	<u>SSTYP</u>	<u>MSTYP</u>	<u>SBOXID</u>	<u>MBOXID</u>	<u>SPR</u>	<u>MPR</u>
	1	0	2	0	0	0	0	0
5	<u>FS</u>	<u>FD</u>	<u>DC</u>	<u>VC</u>	<u>VDC</u>	<u>PENCHK</u>	<u>BT</u>	<u>DT</u>
	0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	<u>SFS</u>	<u>SFM</u>	<u>SST</u>	<u>MST</u>	<u>SFST</u>	<u>SFMT</u>	<u>FSF</u>	<u>VSF</u>
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Şekil 4.14 : *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE anahtar kelimesi arayüzü

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (1)

1	<u>CID</u>	<u>TITLE</u>						
	0	Surface_to_surface						
			<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2			
2	<u>IGNORE</u>	<u>BUCKET</u>	<u>LCBUCKET</u>	<u>NS2TRACK</u>	<u>INITITER</u>	<u>PARMAX</u>	<u>UNUSED</u>	<u>CPARM8</u>
	0	200		3	2	1.0005		0
3	<u>UNUSED</u>	<u>CHKSEGS</u>	<u>PENSE</u>	<u>GRPABLE</u>				
		0	1.0	0				
4	<u>SSID</u>	<u>MSID</u>	<u>SSTYP</u>	<u>MSTYP</u>	<u>SBOXID</u>	<u>MBOXID</u>	<u>SPR</u>	<u>MPR</u>
	2	10	3	3	0	0	0	0
5	<u>FS</u>	<u>FD</u>	<u>DC</u>	<u>VC</u>	<u>VDC</u>	<u>PENCHK</u>	<u>BT</u>	<u>DT</u>
	0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20
6	<u>SFS</u>	<u>SFM</u>	<u>SST</u>	<u>MST</u>	<u>SFST</u>	<u>SFMT</u>	<u>FSF</u>	<u>VSF</u>
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000

Şekil 4.15 : *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE anahtar kelimesi arayüzü

Bu temas tanımlarında kullanılan FS ve FD parametreleri, parçalar arasındaki statik ve dinamik sürtünme katsayılarını tanımlamaktadır. Kullanılan 0,3 ve 0,2 sürtünme katsayıları Xu vd. [34] çalışmasında kullanılan değerlerle aynı alınmıştır.

4.3.5 Modelin Sınır Koşullarının Tanımlanması

Modelin sınır koşulları, Başlık 4.1’de tanımlanmış alt ve üstte bulunan levhaların hareket sınırlarının *BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesiyle, katı kutunun hareketinin *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID anahtar kelimesiyle oluşturulmasıyla tanımlanmıştır.

*BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesi içerisinde bulunan NSID parametresi bu sınır koşulunun tanımlanacağı düğüm seti numarasını, DOFX eksenel x yönünde hareket kısıtını, DOFY eksenel y yönünde hareket kısıtını, DOFZ eksenel z yönünde hareket kısıtını tanımlamaktadır. Kalan parametrelerden DOFRX açısız x yönünde hareket kısıtını, DOFRY açısız y yönünde hareket kısıtını, DOFRZ açısız z yönünde hareket kısıtını tanımlamaktadır. Bu kısıtların değerinin “1” olması ilgili yönde hareket kısıtının olduğunu, “0” olması ilgili yönde hareket kısıtının olmadığını tanımlamaktadır. LS-Prepost üzerinden tanımlanan *BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesi arayüzleri üst levha için Şekil 4.16’da, alt levha için Şekil 4.17’de gösterilmektedir.

ID	TITLE	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
1	Ust_levha	1	0	1	1	0	1	1	1

Şekil 4.16 : Üst levhanın sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılan *BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesi arayüzü

Üst levhanın sınır koşulları tanımlanırken eksenel z yönünde hareket haricinde tüm hareketler kısıtlanmıştır. Alt levhanın sınır koşulları tanımlanırken de tüm hareketler kısıtlanmıştır.

*BOUNDARY_SPC_SET_(ID) (2)								
ID	TITLE							
	Alt_levha							
1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
	2	0	1	1	1	1	1	1

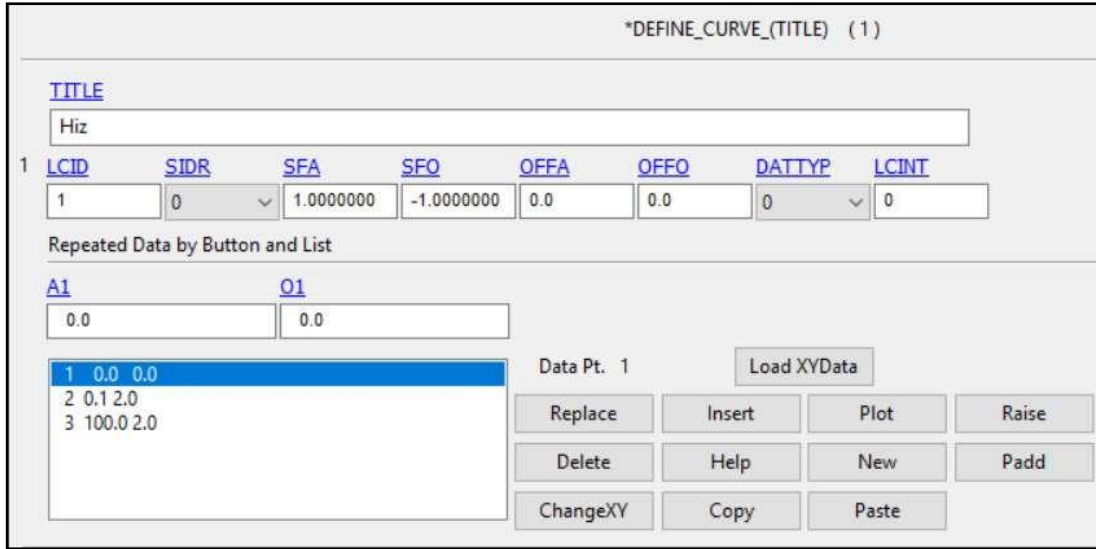
Şekil 4.17 : Alt levhanın sınır koşullarının tanımlanmasında kullanılan *BOUNDARY_SPC_SET anahtar kelimesi arayüzü

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID anahtar kelimesi içinde bulunan PID parametresi hareketin tanımlanacağı parçanın numarasını, DOF parametresi hareket yönünü tanımlamaktadır. DOF parametresinin “3” olarak seçildiği durumda hareket sadece z yönünde tanımlanmaktadır.

LCID parametresi kullanılarak katı kutunun hareket edeceği hız eğrisinin tanımlandığı eğri, *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID anahtar kelimesine atanmıştır. Bu eğri *DEFINE_CURVE anahtar kelimesiyle tanımlanmıştır. LS-Prepost üzerinden tanımlanan *DEFINE_CURVE anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.18’de gösterilmektedir.

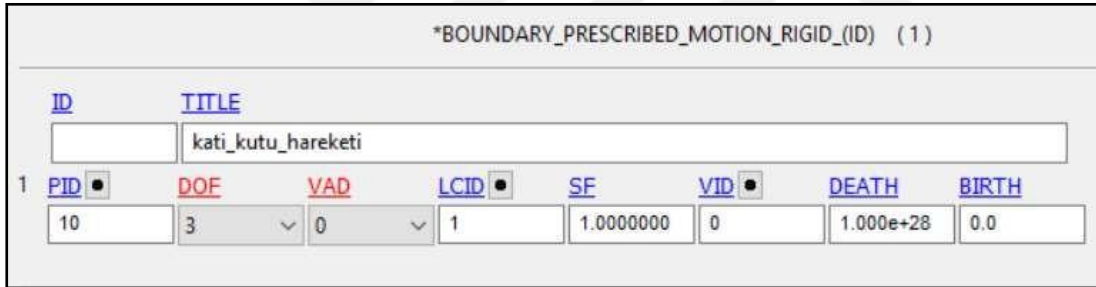
*DEFINE_CURVE anahtar kelimesi içerisinde bulunan LCID parametresi tanımlanmış eğrinin numarasını, SFA parametresi eğrinin x eksenine yapılacak ölçeklemeyi, SFO parametresi de eğrinin y eksenine yapılacak ölçeklemeyi tanımlamaktadır. Sonlu eleman analizi modelinde katı kutu yukarıdan aşağıya bir hareket yapacağı için SFO parametresi “-1” olarak tanımlanmıştır.

Katı kutunun hareketi, 100 ms boyunca 2 mm/ms (2000 mm/s) hızda olacak şekilde tanımlanmıştır. Hareket sonucunda Xu vd. [34] çalışmasında tanımlanmış şekilde 200 mm toplam deplasman oluşmaktadır. Hareket, modelde bozulmaları engellemek amacıyla başlangıç anında durma noktasından 0,1 ms içinde hedef sabit hız olan 2 mm/ms’ye ulaşmayı sağlamaktadır.



Şekil 4.18: *DEFINE_CURVE anahtar kelimesi arayüzü

LS-Prepost üzerinden tanımlanmış *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID anahtar kelimesi arayüzü Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



Şekil 4.19 : *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID anahtar kelimesi arayüzü

4.4 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulaması

Sonlu eleman modelinin doğrulaması, Xu vd. [34] çalışmasında sunulmuş deneysel model üzerinden yapılmıştır. Deneysel modelde, sonlu eleman modelinde tanımlanmış olan boyutlar ve malzeme parametreleriyle bir darbe sönümleyici üretilmiştir. Üretilen bu darbe sönümleyici 1200 mm/s sabit hızda hareket eden bir hidrolik pres tarafından 200 mm ezilerek toplam sönümlenen enerji miktarları, başlangıçtaki pik ezilme kuvveti değerleri, kuvvet – deplasman grafikleri ve ezilme sırasında farklı aşamalarda deformasyon görüntüleri yine Xu vd. [34] çalışmasında sunulmuş sonlu eleman modeliyle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında analiz edilmiş sonlu eleman modeli, Xu vd. [34] çalışmasında sunulmuş deneysel model ve sonlu eleman modeli sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Doğrulama çalışmasının EA ve IPCF sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

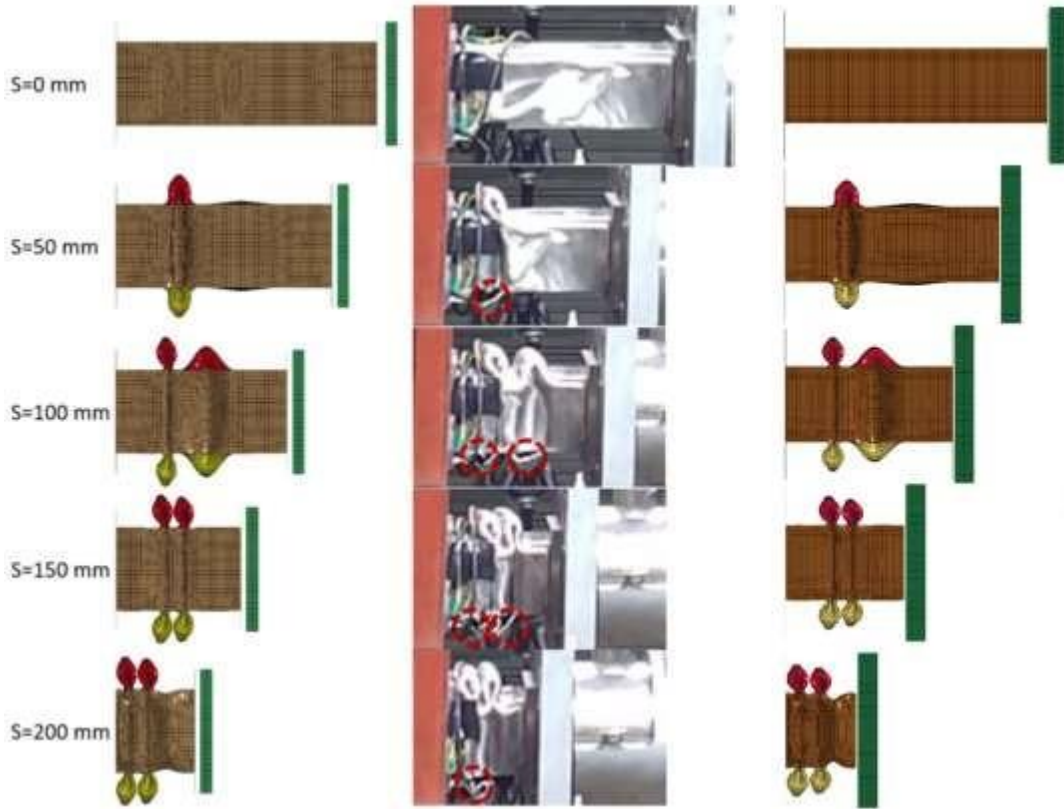
Çizelge 4.3 : Doğrulama çalışması EA ve IPCF sonuçları

Sonuçlar	Deformasyon mesafesi (mm)	IPCF (kN)	IPCF Farkı (%)	EA (kJ)	EA Farkı (%)
Xu vd. [34] deneysel sonuçlar	200	702,9	-	78,2	-
Xu vd. [34] sonlu eleman sonuçları	200	697,9	%0,7	75,8	%3,0
Doğrulama çalışması sonlu eleman sonuçları	200	734,0	%4,2	79,3	%1,5

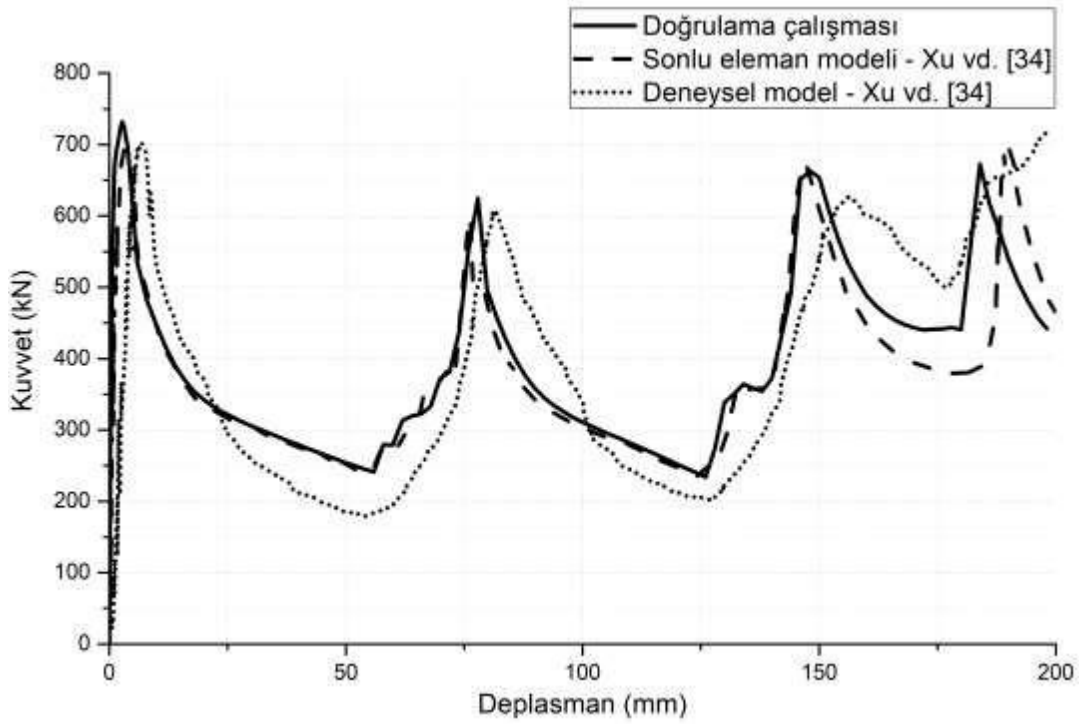
Doğrulama çalışmasında Xu vd. [34] deneysel sonuçlarına yakın EA ve IPCF sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmayla deneysel çalışma arasındaki en büyük fark, %4,2'lik farkla IPCF sonucunda görülmüştür. Aradaki bu farkın sonlu eleman modelinin doğrulanabilmesi için kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Doğrulama çalışması sonucu yapılmış görsel karşılaştırma ve kuvvet – deplasman grafikleri karşılaştırılması Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de gösterilmektedir.

Görsel karşılaştırmada bu çalışmada kullanılan modelin ezilme görüntüsünün Xu vd. [34] çalışmasında gözlemlenmiş sonlu eleman modeli ve deneysel modelin ezilme görüntüsüne benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.20'deki deneysel model üzerinde çizilmiş kırmızı çemberler deneysel modelde kullanılan kaynaklardaki yırtılmaları göstermektedir. Şekil 4.21'de sunulmuş kuvvet – deplasman grafiğinde 150 mm deplasman sonrasında görülen sonlu eleman modelleriyle deneysel model arasındaki farklılığın nedeninin kaynaklardaki yırtılmalar olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.20 : Farklı deplasman değerlerinde Xu vd. [34] sonlu eleman analizi, Xu vd. [34] deneysel modeli ve Doğrulama çalışması doğrulama modeli için görsel karşılaştırma



Şekil 4.21 : Doğrulama çalışması sonucunda kuvvet – deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

5. FARKLI TASARIM OPSİYONLARININ İNCELENMESİ VE ENİYİLENMESİ

Model doğrulamasının ardından, farklı çarpışma emici tasarımları için eniyileme çalışmaları yapılmıştır. Darbe sönümleyicinin çarpışma performansını eniyilemek için dış duvar kalınlıklarının, diyaframların kalınlıklarının ve konumlarının ve konik açının tasarım değişkenleri olarak alındığı bir vekil model tabanlı eniyileme çalışması yürütülmüştür.

Her tasarım değişkeninin çarpışma performansı üzerindeki etkisi, bir dizi eniyileme problemi çözülerek değerlendirilmiş ve sonuçlar doğrulama modeli sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, bir sonraki optimizasyon probleminin tasarımında önceki bir optimizasyon probleminden elde edilen optimum tasarım değişkenlerinin kullanıldığı iteratif bir yaklaşım kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında vekil model oluşturmak için polinom yanıt yüzey (*response surface methodology*) ve radyal tabanlı fonksiyon (*radial basis function*) modelleri kullanılmıştır. Polinom yanıt yüzey (PYY) modelleri olarak ikinci derece, üçüncü derece ve dördüncü derece modeller, radyal tabanlı fonksiyon (RTF) modelleri olarak ince levha, Gauss ve çoklu karesel modeller kullanılmıştır.

Vekil modellerin açıklamaları Ek 1'de, hata metriklerinin açıklamaları ve her eniyileme problemi için hesaplanmış hata metriği değerleri Ek 2'de, her eniyileme problemi için tüm vekil modeller kullanılarak elde edilen eniyileme sonuçları Ek 3'te sunulmuştur.

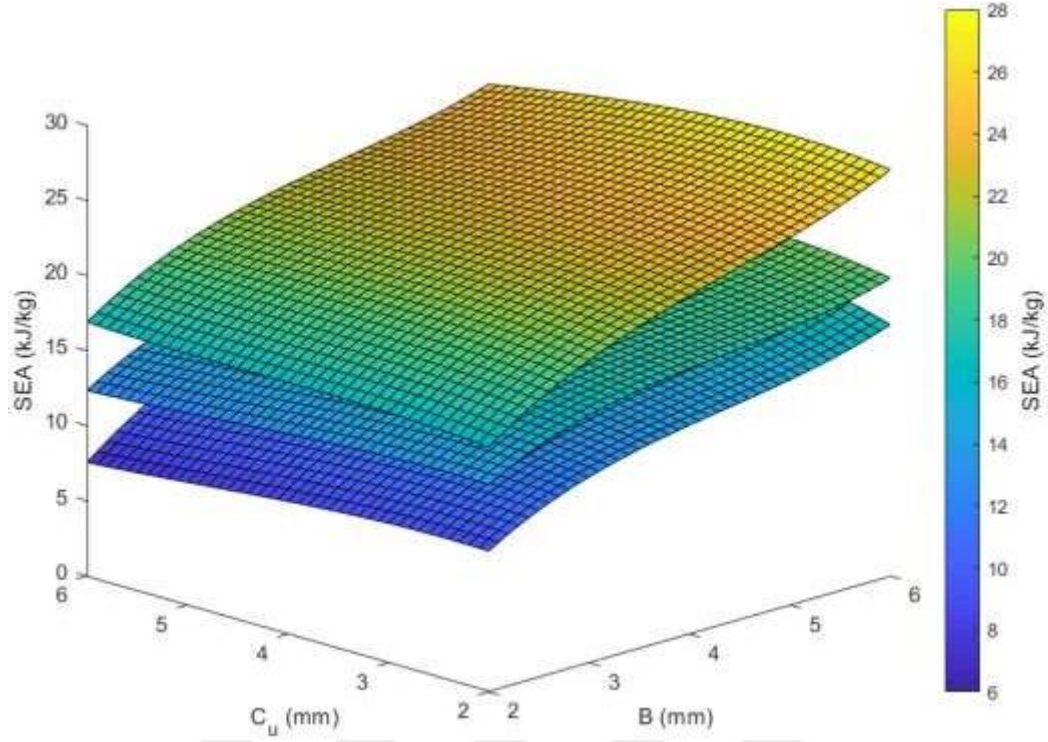
Eniyileme algoritmalarında MATLAB yazılımı içinde ön tanımlı olan ve *interior-point algorithm* kullanarak eniyileme yapan *fmincon* fonksiyonu kullanılmıştır.

Eniyileme algoritmaları, deney noktaları üzerinden üretilen vekil modeller üzerinde kullanılmış ve her vekil modelden optimum tasarım parametreleri ve eniyileme sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar “eniyileme sonuçları” olarak tanımlanmıştır. Eniyileme algoritmasından elde edilen tasarım parametreleri, doğrulanmış sonlu elemanlar modeli içine tanımlanmış ve bu sonlu eleman analizi sonuçları “sonlu

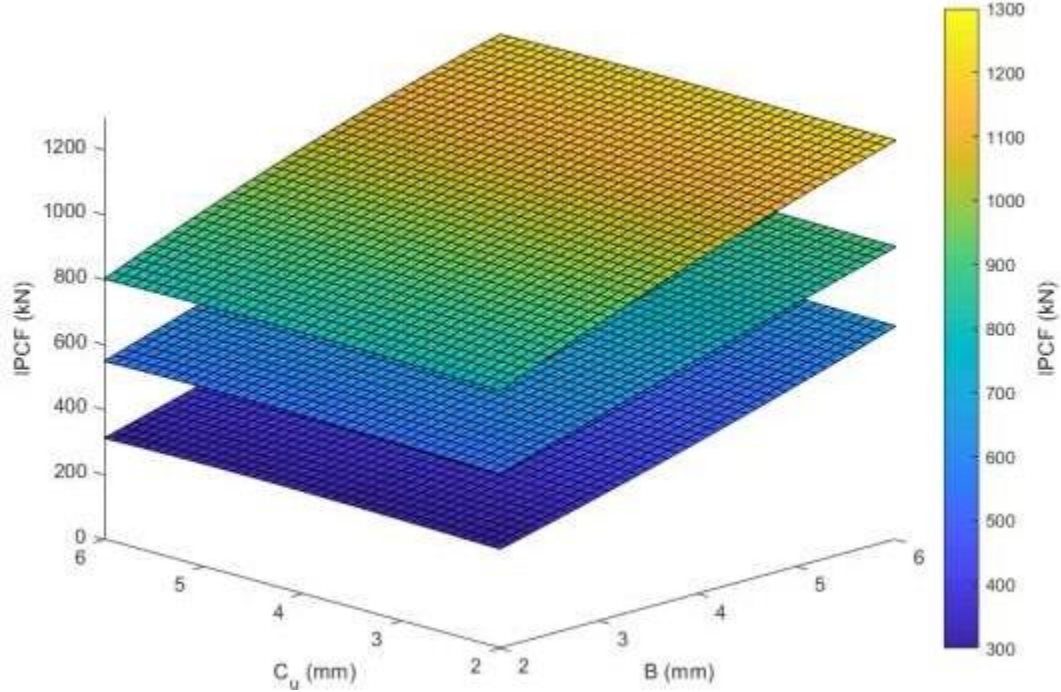
Çizelge 5.1 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi çalışmasının sonuçları

		Amaç fonksiyonları	
		Maksimum SEA	Minimum IPCF
Tasarım parametreleri	A (mm)	6,00	2,00
	B (mm)	6,00	4,90
	C _u (mm)	2,95	6,00
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1229,6	561,0
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1224,9	562,3
	IPCF hatası (%)	%0,4	%0,2
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	27,44	15,99
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	27,85	17,15
	SEA hatası (%)	%1,5	%7,3
	EA eniyileme sonucu (kJ)	169,4	70,0
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	170,8	73,8
	EA hatası (%)	%0,8	%5,4
	Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	%59,2	%23,4

Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA ve minimum IPCF sonucunu veren vekil modeller Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Elde edilen eniyileme sonuçlarının bu vekil modeller üzerinde görülen optimum noktalar olduğu görülmektedir. Maksimum SEA sonucunun Şekil 5.1’de görülen optimum sonuç olduğu gözlemlenmiştir. Minimum IPCF sonucu, eniyilemenin EA sınırına takılmasından dolayı Şekil 5.2’de gösterilen en düşük IPCF sonucu olmamıştır.



Şekil 5.1 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin SEA sonucunun gösterimi



Şekil 5.2 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında minimum IPCF sonucunu veren vekil modelin gösterimi

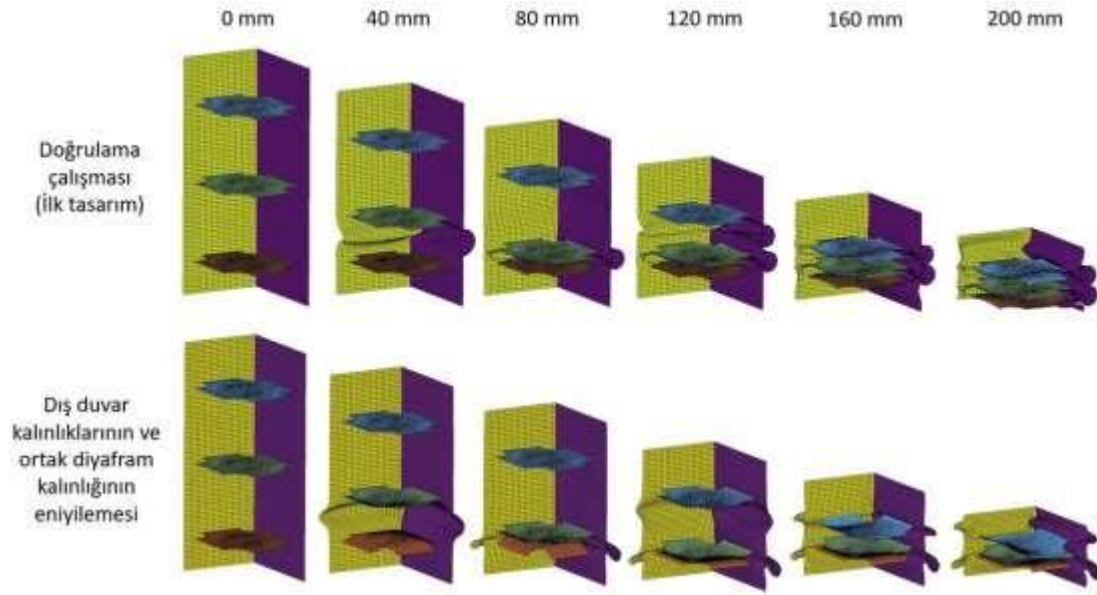
Maksimum SEA amaç fonksiyonu için yapılan çalışmalarda duvar kalınlığı değerleri (A ve B) tasarım uzayının üst sınırında yer almıştır. Benzer şekilde, diyafram kalınlıklarındaki (C_u) artış, tasarım uzayının alt kısmında daha yüksek SEA sonuçlarının oluşmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, bu artış aynı zamanda daha yüksek çarpışma emici yapının maliyetiyle birlikte gelmekte ve 2,95 mm'lik optimum sonuçtan sonra SEA sonuçlarını düşürmektedir.

Minimum IPCF amaç fonksiyonu için yapılan çalışmalarda, duvar kalınlığı değerlerindeki artışın IPCF sonuçlarını yükselttiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, diyafram kalınlık değerlerinin IPCF tepkisi üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.

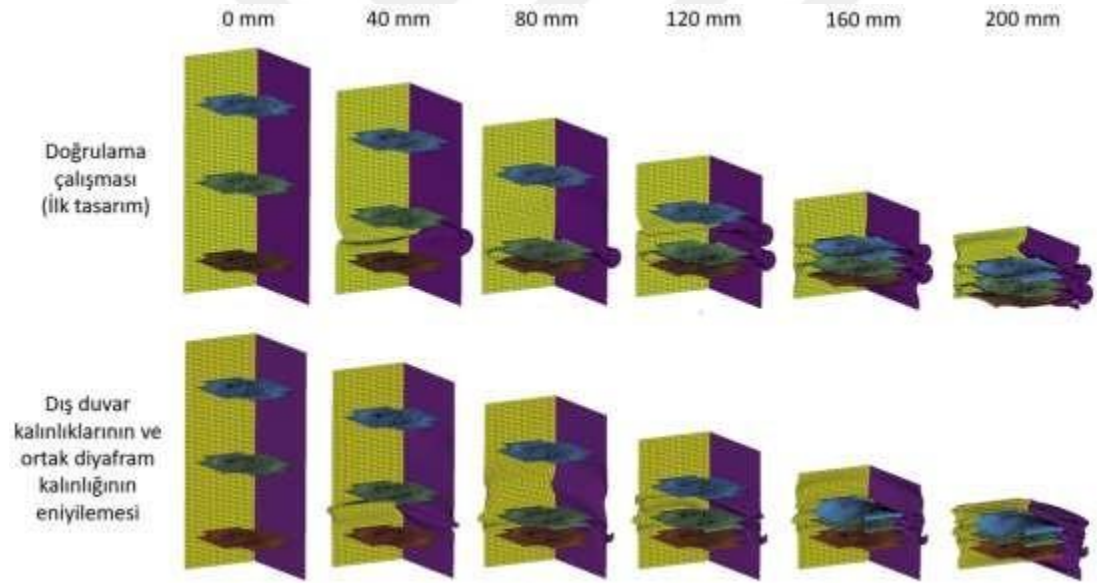
Optimum sonuçların deformasyon görüntülerinin doğrulama çalışmasında elde edilenlerle karşılaştırılması maksimum SEA amaç fonksiyonu için Şekil 5.3'te, minimum IPCF amaç fonksiyonu için Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Bunlara ek olarak doğrulama çalışmasıyla yapılan kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırmaları, maksimum SEA amaç fonksiyonu için Şekil 5.5'te, minimum IPCF amaç fonksiyonu için Şekil 5.6'da sunulmuştur.

Maksimum SEA amaç fonksiyonu için yapılan çalışmalarda değişen duvar ve diyafram kalınlıklarının deformasyon şeklini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Değişen kalınlıklar ve deformasyon şekli nedeniyle kuvvet – deplasman grafiğinde ciddi miktarda artış gözlemlenmiştir. Deformasyon şekli değişikliği nedeniyle oluşan pik sayısının azaldığı gözlemlenmiştir.

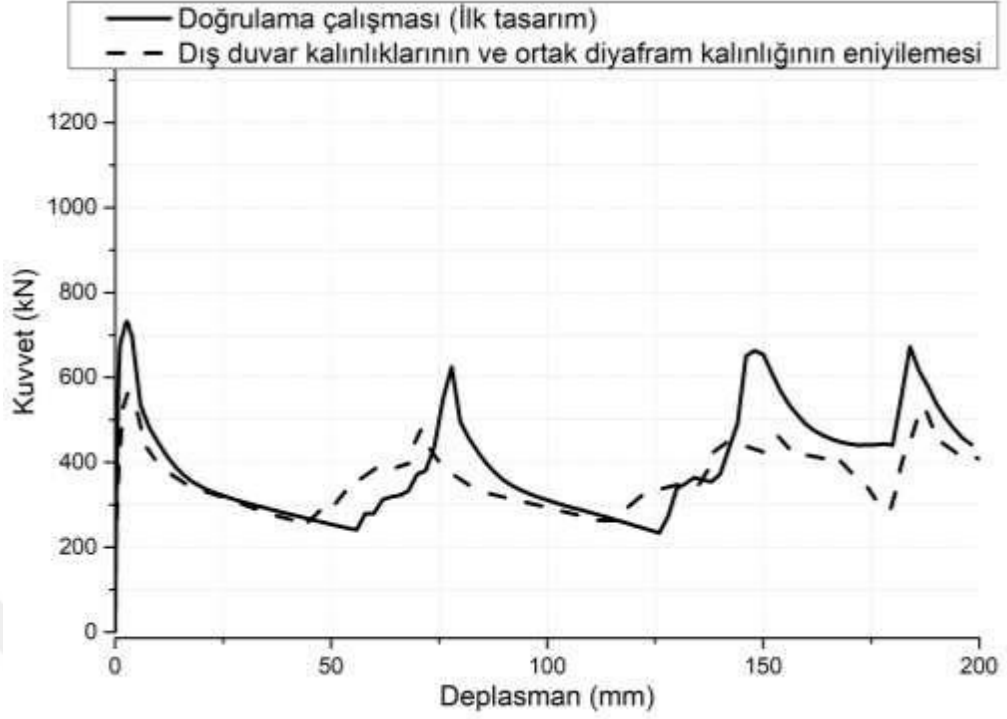
Minimum IPCF amaç fonksiyonu için yapılan çalışmalarda da değişen duvar ve diyafram kalınlıklarının deformasyon şeklini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Değişen kalınlıklar ve ilk katlanma bölgesinde oluşan deformasyon değişikliği, kuvvet – deplasman grafiğinin ilk pikinin azalmasını sağlamıştır.



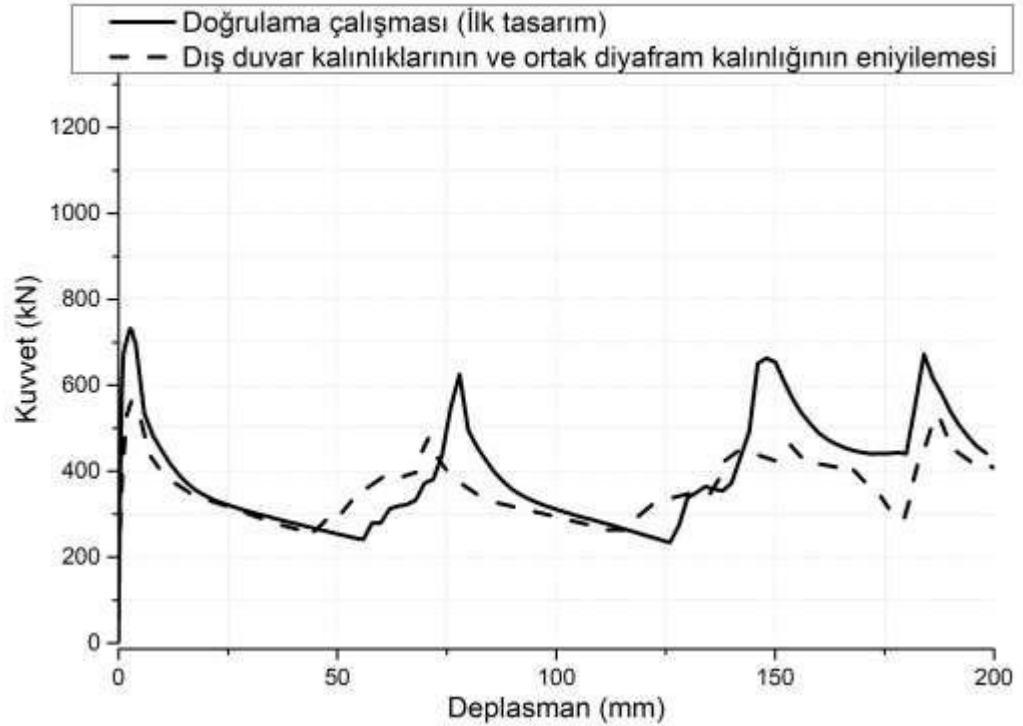
Şekil 5.3 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla görsel karşılaştırılması



Şekil 5.4 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla karşılaştırılması



Şekil 5.5 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

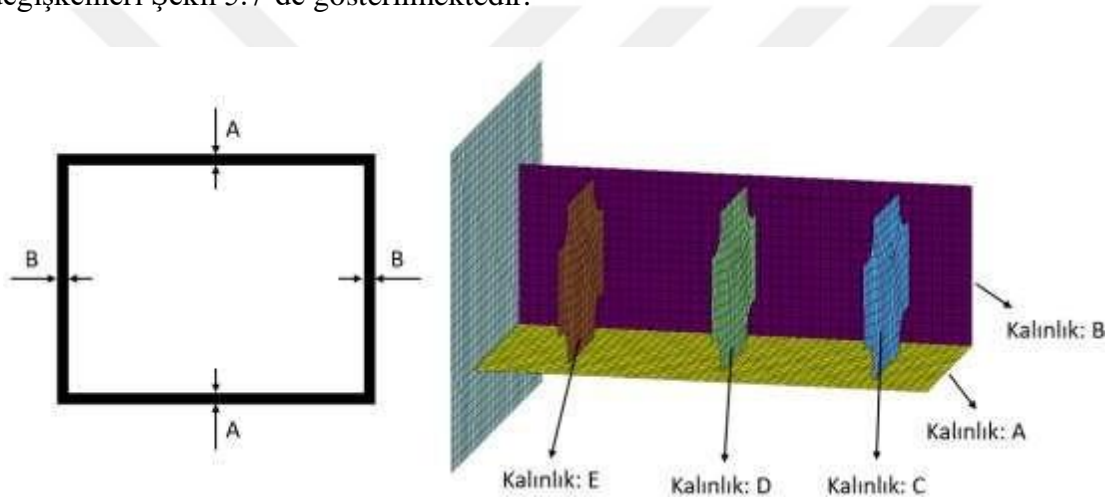


Şekil 5.6 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun doğrulama çalışması sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

5.1.2 Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi

Bunun ardından dış duvar kalınlıklarının ve diyafram kalınlıklarının etkisi birlikte incelenmiştir. Bir önceki çalışmada diyafram kalınlık değerlerinin IPCF tepkisi üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunun gözlemlenmesi nedeniyle bu çalışma kapsamında sadece maksimum SEA eniyileme çalışması yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında beş parametre eniyilenmiştir. Bu parametreler; (i) dış duvarın uzun kenarının kalınlığı (A), (ii) dış duvarın kısa kenar kalınlığı (B), (iii) katı kutuya en yakında konumlandırılmış diyaframın (C) kalınlığı, (iv) darbe sönümleyicinin ortasında konumlandırılmış diyaframın (D) kalınlığı ve (v) katı kutuya en uzakta konumlandırılmış diyaframın (E) kalınlığı olarak tanımlanmıştır. Kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında kullanılan tasarım değişkenleri

Eniyileme çalışmasında Latin hiperküp örnekleme kullanılarak oluşturulmuş toplam 100 adet deney noktası kullanılmıştır. Eniyileme çalışmalarında kullanılan amaç fonksiyonu Eşitlik (5.3)’te standart formda gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} & \square\square\square && \square, \square, \square, \square, \square \\ & \square\square\square && -SEA(\square, \square, \square, \square, \square) \\ \text{Ö}\square\square\square\square\square && EA(\square, \square, \square, \square, \square) \geq 70\square\square && (5.3) \\ && 2\square\square \leq \square \leq 6\square\square \\ && 2\square\square \leq \square \leq 6\square\square \\ && 2\square\square \leq \square \leq 6\square\square \end{aligned}$$

$$2 \square \square \leq \square \leq 6 \square \square$$

$$2 \square \square \leq \square \leq 6 \square \square$$

Bu çalışmanın sonuçları, Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. Çalışma sonucunda, doğrulama çalışması üzerinden görülen SEA iyileşmesi %59,2’den %55,7’ye düşüş göstermiştir.

Çalışma sonucu üçüncü seviye PYY modeli kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları (100 deney noktasıyla elde edilen sonuçlar)

		Amaç fonksiyonu
		Maksimum SEA
Tasarım parametreleri	A (mm)	6,00
	B (mm)	6,00
	C (mm)	6,00
	D (mm)	2,00
	E (mm)	2,00
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1292,1
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1228,2
	IPCF hatası (%)	%5,2
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	28,27
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	27,23
	SEA hatası (%)	%3,7
	EA eniyileme sonucu (kJ)	189,9
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	169,3
	EA hatası (%)	%10,8
Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	%55,7	

Ardından aynı vekil modeller, genetik algoritma (*genetic algorithm*) kullanılarak yeniden eniyilenmiş ve bu yapılan çalışma sonucunda iyileşme görülmemiştir. Bu çalışmanın sonuçları Çizelge 5.3’te gösterilmektedir. Genetik algoritma kullanılarak yapılmış eniyileme sonucunda, temel çalışma üzerinden görülen SEA iyileşmesi %59,2’den %50,7’ye düşüş göstermiştir. Genetik algoritma kullanılarak yapılan eniyileme sonucunun, *interior-point* algoritması kullanılarak yapılan eniyileme sonucundan daha kötü olarak bulunmasının nedeni olarak MATLAB’de genetik algoritma kullanarak eniyilemeyi sağlayan *ga* fonksiyonunun standart parametrelerinin kullanılması gösterilmektedir. Kullanılan parametrelerin

değiştirilmesi durumunda, genetik algoritma kullanılarak yapılan eniyileme sonuçlarının iyileşebileceği yorumu yapılmaktadır.

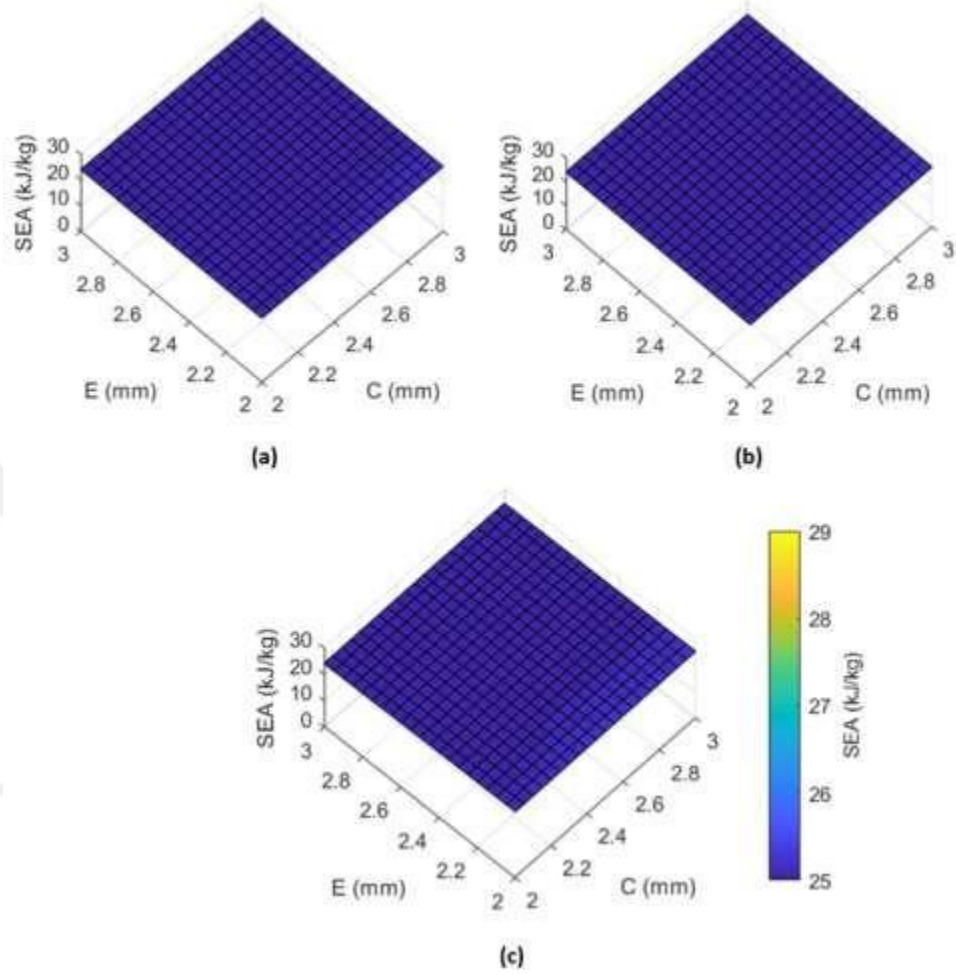
Çizelge 5.3 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları (genetik algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar)

		Amaç fonksiyonu
		Maksimum SEA
Tasarım parametreleri	A (mm)	6,00
	B (mm)	6,00
	C (mm)	6,00
	D (mm)	4,56
	E (mm)	2,00
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1292,8
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1227,0
	IPCF hatası (%)	% 5,4
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	26,77
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	26,36
	SEA hatası (%)	% 1,5
	EA eniyileme sonucu (kJ)	187,4
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	168,8
	EA hatası (%)	% 9,9
	Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	% 50,7

Bu düşüşlerin temel nedeni olarak vekil model oluşturmada kullanılan 100 deney noktası sayısının, lokal bir bölgede yoğunlaşmış optimizasyon sonuçlarını göstermek için yeterli olmaması gösterilmektedir. Şekil 5.8’de görülen gerçekçi olmayan SEA sonuçları bu çıkarımı desteklemektedir.

Bu sonuçların alınmasının ardından, daha önceki çalışmalarda optimum SEA sonuçlarını veren A ve B değişkenleri için 5 mm ve 6 mm arasında, C, D ve E değişkenleri için ise 2 mm ve 3 mm arasına Latin hiperküp örnekleme kullanılarak oluşturulmuş 20 deney noktası eklenmiştir. Bu ekleme sonrasında aynı amaç fonksiyonu kullanılarak eniyileme çalışması yenilenmiştir. Yenilenen çalışmanın sonucu Çizelge 5.4’te gösterilmektedir. Çalışma sonucunda, doğrulama çalışması üzerinden görülen SEA iyileşmesi %59,2’den %60,2’ye yükselmiştir. Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlıklarının eniyilendiği çalışma üzerinden %1 ek iyileşme görülmüştür.

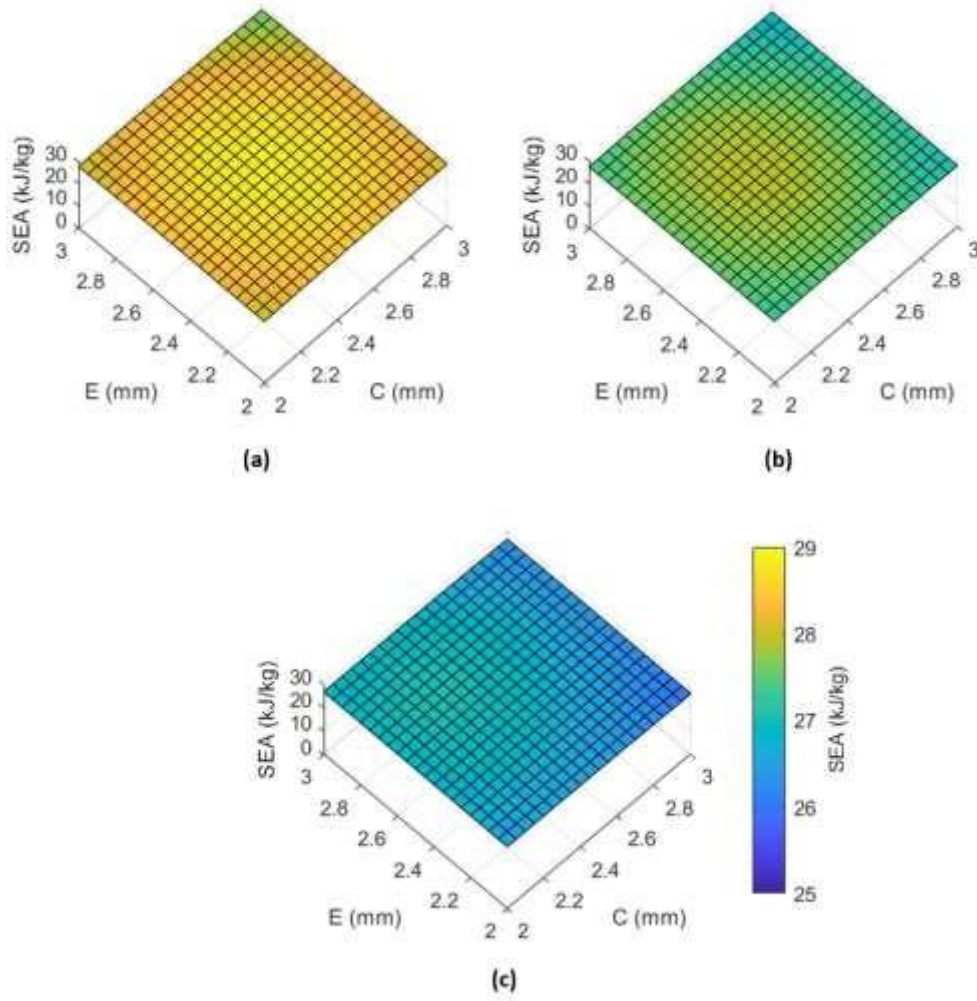
Çalışma sonucu çoklu karesel RTF modeli kullanılarak elde edilmiştir. Tüm vekil modeller kullanılarak elde edilmiş genişletilmiş eniyileme sonuçları Çizelge Ek.16'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında 100 deney noktasıyla yapılan çalışmada maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $D = 2$ mm, (b) $D = 2,5$ mm, (c) $D = 3$ mm için gösterimi ($A = B = 6$ mm için)

Çalışma kapsamında üretilen vekil modellerin hata metrikleri Çizelge Ek.3 ve Çizelge Ek.4'te gösterilmektedir. Eniyileme sonuçlarının sonlu eleman analizlerinden elde edilen hata yüzdelerinin, EA, SEA ve IPCF yanıtları için çoklu karesel RTF ile elde edilen nMAE hatalarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil model Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Elde edilen eniyileme sonucunun vekil model üzerinde görülen optimum nokta olduğu bulunmuştur.



Şekil 5.9 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında 120 deney noktasıyla yapılan çalışmada maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $D = 2$ mm, (b) $D = 2,5$ mm, (c) $D = 3$ mm için gösterimi ($A = B = 6$ mm için)

Katı kutuya en yakın ve en uzak konumlandırılmış diyaframların (C ve E) kalınlık değerlerinin artması, tasarım uzayının alt kısmında SEA metriğinin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, kalınlık değerlerinin artırılması sonucu darbe sönümleyici kütlesi de artmaktadır. Artan kütlenin, C için 2,46 mm ve E için 2,47 mm optimum sonuçtan sonra SEA tepkilerini azalttığı gözlemlenmektedir. D diyaframın kalınlığının artmasının, SEA'yı olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu diyaframın kalınlık değeri tasarım uzayının alt sınırında (2,00 mm) bulunmuştur.

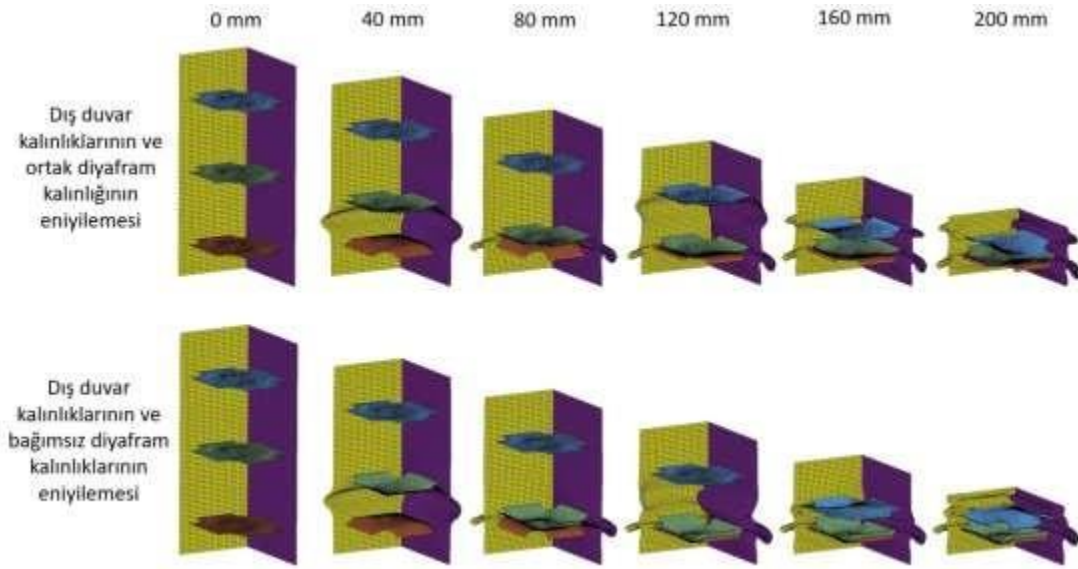
Dış duvar kalınlığının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen görsel sonuçlarının bir önceki çalışmada elde edilenlerle karşılaştırılması Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Buna ek olarak bir önceki çalışmayla yapılan kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırması Şekil 5.11'de sunulmuştur.

D diyaframının kalınlık değerinin azalması sonucu olarak C ve D diyaframları arasındaki deformasyon Şekli deęiŐmiŐtir. Değişen deformasyon Şekli sonucu bu bÖlgedeki deformasyon sonucu elde edilen pik kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir.

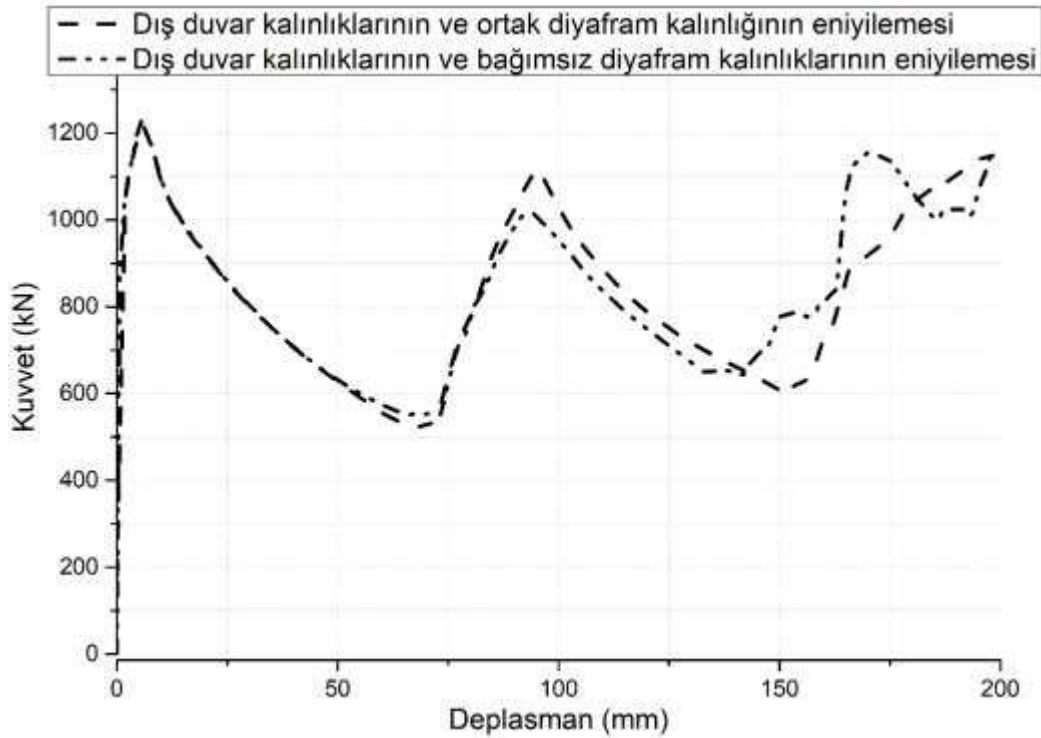
Benzer Şekilde C diyaframının kalınlık değerinin azalması sonucu bu diyaframla üst levha arasındaki deformasyon Şekli deęiŐmiŐ, bu bÖlgedeki deformasyon sonucu bir Önceki problemde oluşan pik kuvvetine benzer bir pik kuvvet daha hızlı Şekilde oluşmuştur.

Çizelge 5.4 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları (120 deney noktasıyla elde edilen sonuçlar)

		Amaç fonksiyonu
		Maksimum SEA
Tasarım parametreleri	A (mm)	6,00
	B (mm)	6,00
	C (mm)	2,46
	D (mm)	2,00
	E (mm)	2,47
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1230,5
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1230,0
	IPCF hatası (%)	%0,1
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	28,84
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	28,04
	SEA hatası (%)	%2,8
	EA eniyileme sonucu (kJ)	171,8
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	168,0
	EA hatası (%)	%2,2
	Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	%60,2



Şekil 5.10 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması



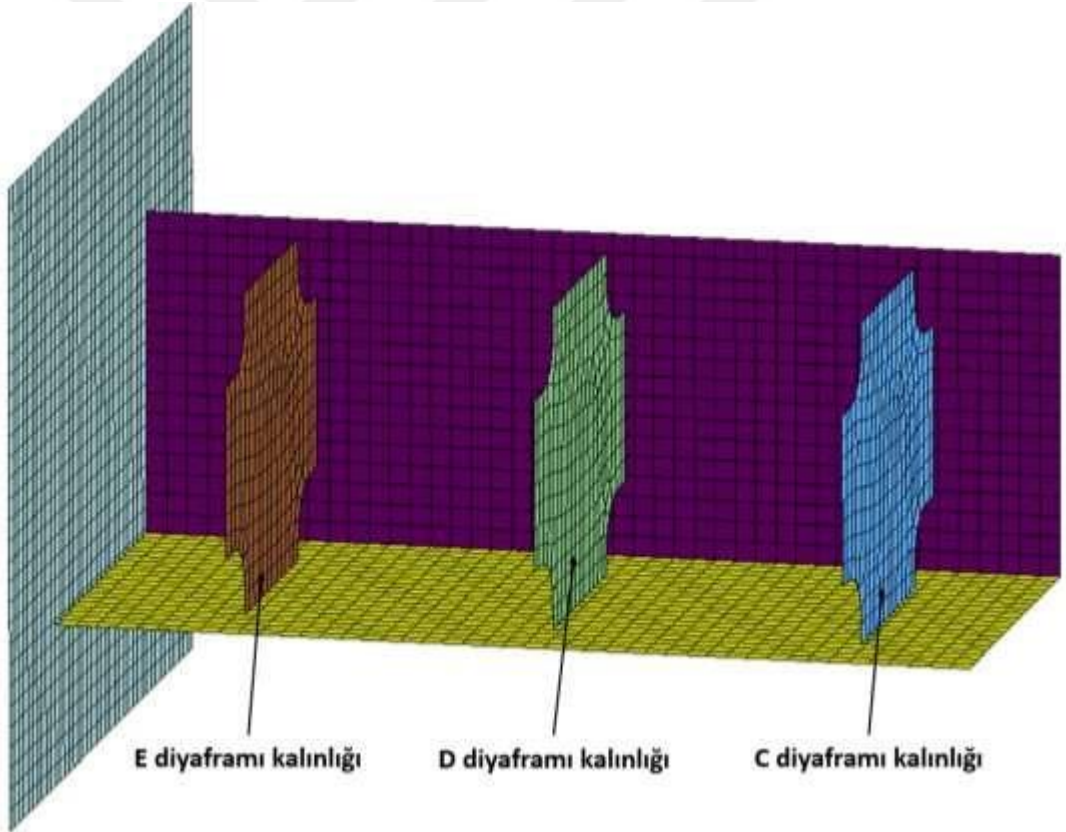
Şekil 5.11 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

5.1.3 Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi

Son olarak, her diyaframın kalınlık değerlerinin ayrı ayrı tanımlanmasının çarpışma performansına etkileri incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, bir önceki çalışmaya benzer şekilde sadece maksimum SEA eniyileme çalışması yapılmıştır. Darbe sönümleyicinin modellenmesinde, daha önceki çalışmaların optimum SEA sonucunu veren dış duvarın uzun (A) ve kısa (B) kenarları değerleri olan 6 mm değerleri kullanılmıştır.

Kullanılan tasarım değişkenleri; (i) katı kutuya en yakında konumlandırılmış diyaframın (C) kalınlığı, (ii) darbe sönümleyicinin ortasında konumlandırılmış diyaframın (D) kalınlığı, (iii) katı kutuya en uzakta konumlandırılmış diyaframın (E) kalınlığı olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.12 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında kullanılan tasarım değişkenleri

Eniyileme çalışmasında 57 adet deney noktası kullanılmıştır. Bu deney noktalarının 30’u Latin hiperküp örnekleme ve 27’si tam faktöriyel tasarım kullanılarak

üretiştir. Eniyileme alışmalarında kullanılan amaç fonksiyonu Eşitlik (5.3)'te standart formda gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 & \square\square\square \quad \square, \square, \square \\
 & \square\square\square \quad -SEA(\square, \square, \square) \\
 & \ddot{O}\square\square\square\square\square \quad EA(\square, \square, \square) \geq 70 \\
 & \square\square 2\square\square \leq \square \leq 6 \quad (5.3) \\
 & \square\square \\
 & 2\square\square \leq \square \leq 6\square\square \\
 & 2\square\square \leq \square \leq 6\square\square \\
 & \square = 6.00\square\square \\
 & \square = 6.00\square\square
 \end{aligned}$$

Bu alışmanın sonuçları, Çizelge 5.5'te gösterilmektedir. alışma sonucunda, doğrulama çalışması üzerinden görülen SEA iyileşmesi %60,2'den %60,3'e yükselmiştir. Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilendiği çalışma üzerinden %0,1 ek iyileşme görülmüştür.

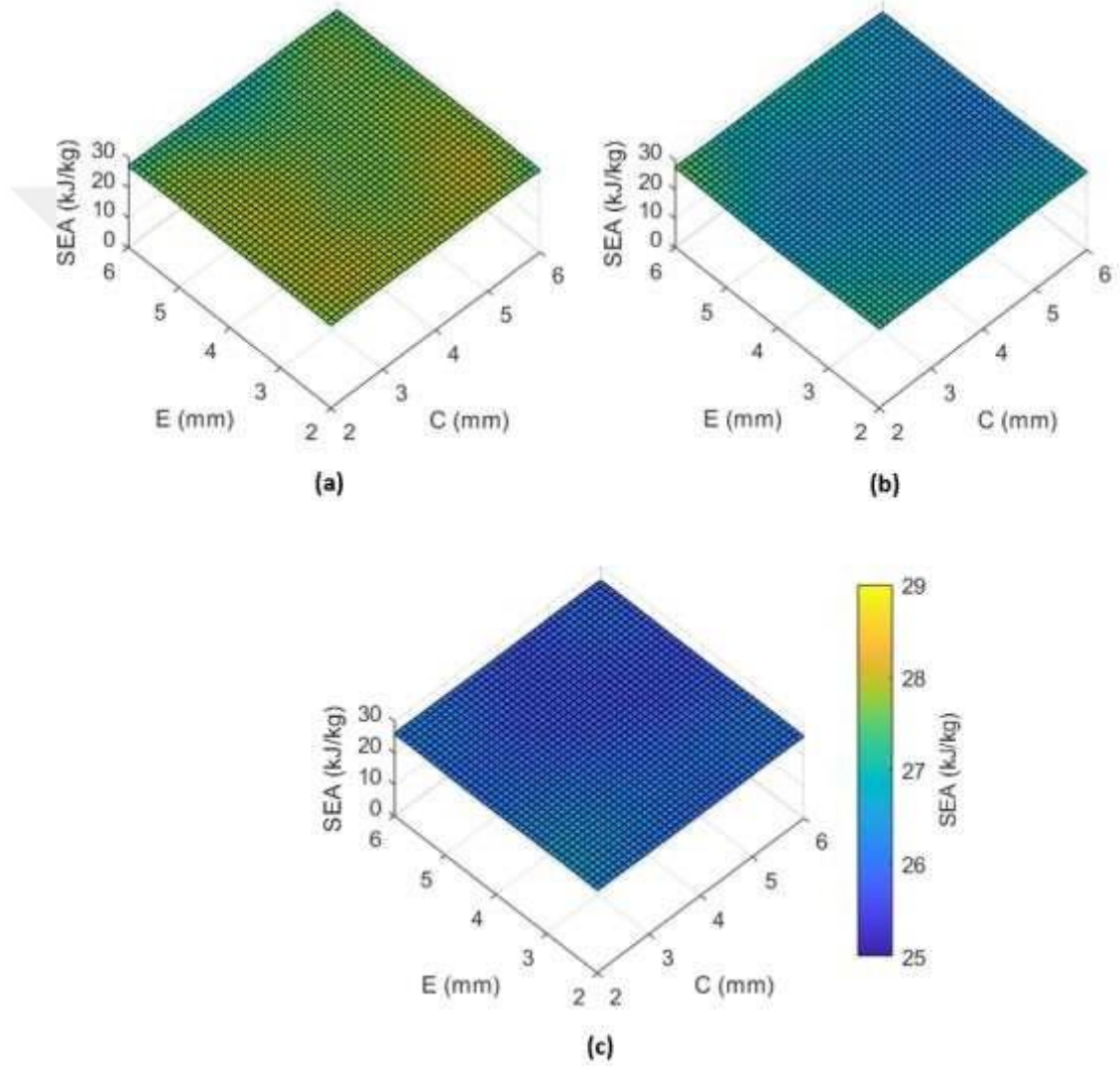
Çalışma sonucu ince levha RTF modeli kullanılarak elde edilmiştir. Tüm vekil modeller kullanılarak elde edilmiş genişletilmiş eniyileme sonuçları izelge Ek.17'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.5 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları

Tasarım parametreleri	C (mm)	Amaç fonksiyonu
		Maksimum SEA
	D (mm)	2,62
	E (mm)	2,00
		2,47
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1240,4
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1230,5
	IPCF hatası (%)	%0,8
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	27,96
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	28,05
	SEA hatası (%)	%0,3
	EA eniyileme sonucu (kJ)	168,1
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	168,4
	EA hatası (%)	%0,2
	Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	%60,3

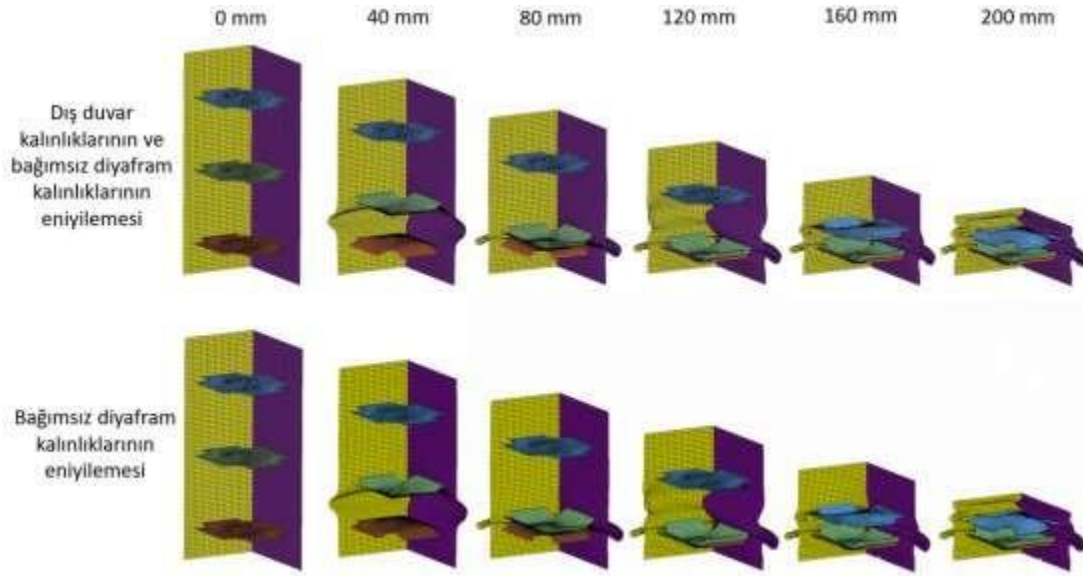
Çalışma kapsamında üretilen vekil modellerin hata metrikleri Çizelge Ek.5 ve Çizelge Ek.6'da gösterilmektedir. Eniyileme sonuçlarının sonlu eleman analizlerinden elde edilen hata yüzdelerinin, EA, SEA ve IPCF yanıtları için ince plaka RTF ile elde edilen nMAE hatalarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil model Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Elde edilen eniyileme sonucunun vekil model üzerinde görülen optimum nokta olduğu bulunmuştur.

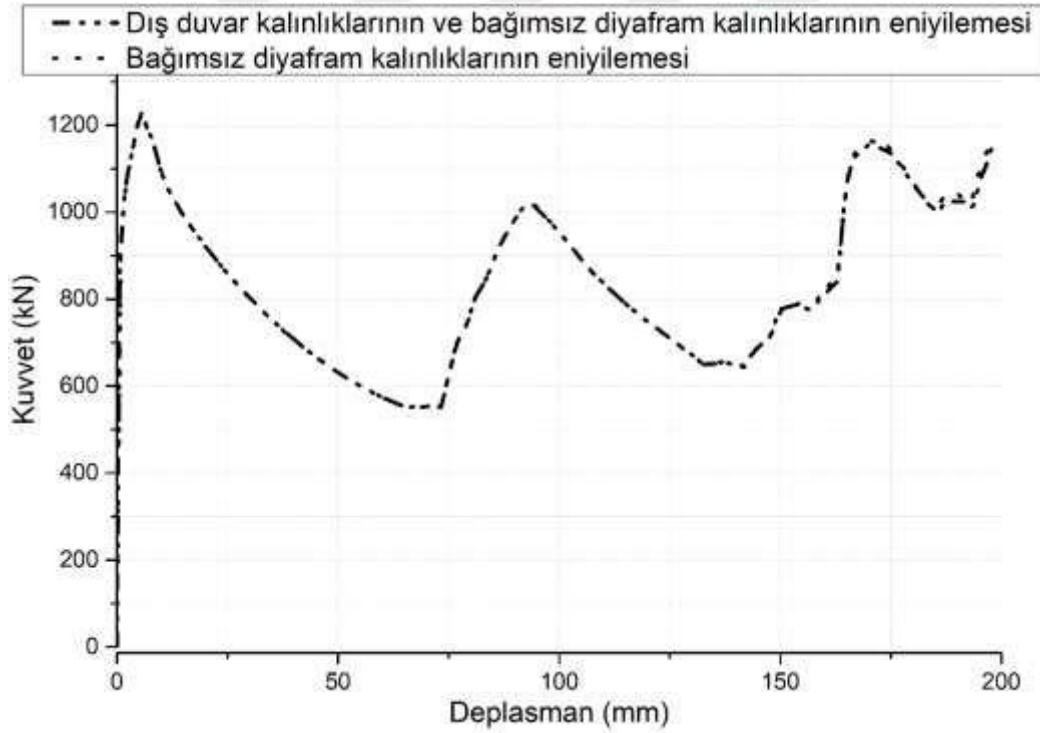


Şekil 5.13 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $D = 2$ mm, (b) $D = 4$ mm, (c) $D = 6$ mm için gösterimi

Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen görsel sonuçlarının ve kuvvet – deplasman grafiklerinin bir önceki çalışmada elde edilenlerle karşılaştırılması Şekil 5.14'te ve Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Şekil 5.14 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması



Şekil 5.15 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

Yapılan çalışma sonrasında elde edilen vekil model, görsel karşılaştırma ve kuvvet-deplasman grafiği karşılaştırmasının sonucunda, bir önceki çalışma kapsamında yapılmış yorumların bu çalışma için de geçerli olacağı sonucuna varılmıştır. C

diyaframının kalınlığının artması, bir önceki çalışmada en sonda ortaya çıkan kuvvet pikinde oluşan kuvvet miktarının küçük miktarda artmasına neden olmuştur.

Görülen iyileşmeye rağmen, her diyafram için ayrı ayrı alınmış optimum kalınlık değerlerinin mevcut darbe sönümleyici geometrisine direkt olarak bağlı olduğu yorumu yapılmıştır. Ayrı diyafram kalınlık değerlerinin kullanılması, daha sonraki bölümlerde tartışılacak olan darbe sönümleyici geometrisindeki değişikliklerle yanıltıcı sonuçlar yaratacaktır. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalarda ortak diyafram kalınlığı değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

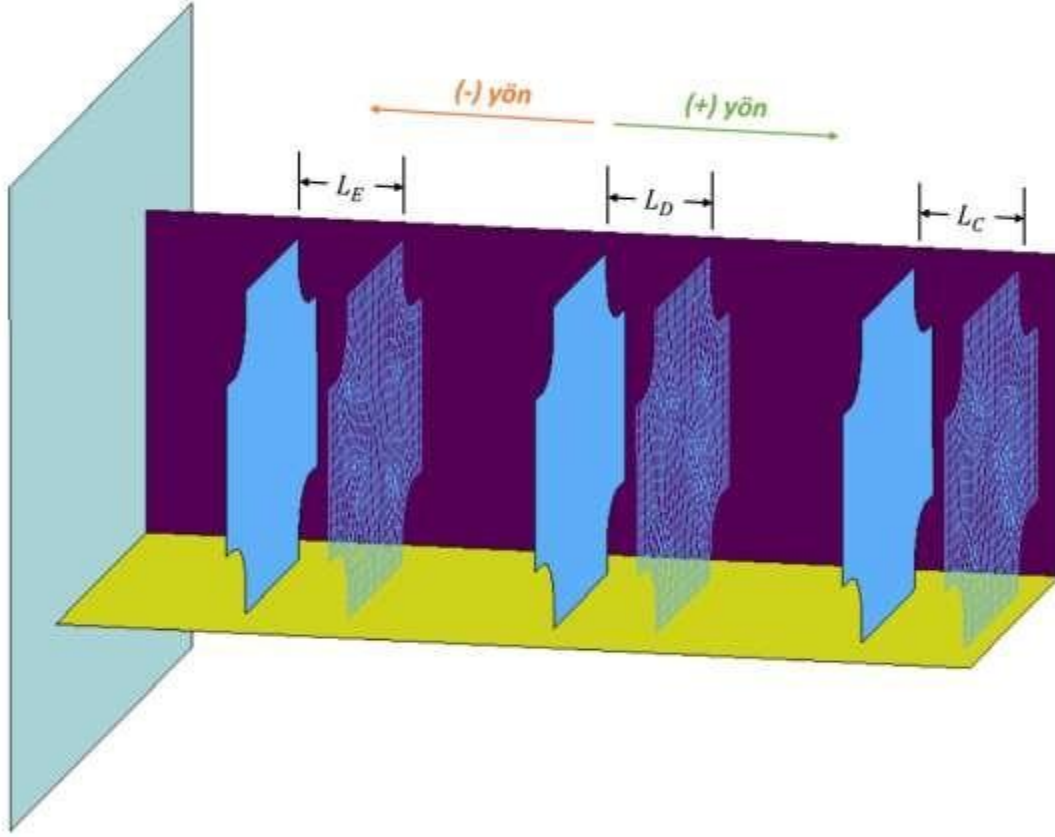
5.2 Diyafram Konumlarının Eniyilemesi

Bunun ardından, diyaframların darbe sönümleyici içerisinde yukarı ve aşağı kaydırılmasının SEA ve IPCF metriklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında maksimum SEA ve minimum IPCF amaç fonksiyonları için ayrı ayrı eniyileme çalışmaları yapılmıştır.

Kullanılan tasarım değişkenleri; (i) katı kutuya en yakında konumlandırılmış diyaframın (C) konumu (L_C), (ii) darbe sönümleyicinin ortasında konumlandırılmış diyaframın (D) konumu (L_D), (iii) katı kutuya en uzakta konumlandırılmış diyaframın (E) konumu (L_E) olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan tasarım değişkenleri Şekil 5.16'da gösterilmektedir.

Eniyileme çalışmalarında, dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi sonrasında ilgili amaç fonksiyonu için elde edilen dış duvar kalınlıkları (A, B) ve ortak diyafram kalınlığı (C_u) değeri kullanılmıştır.

Diyaframlar, (+) ve (-) yönlerde en fazla 30 mm kaydırılmıştır. Sınır en altta bulunan E diyaframıyla alt plaka arasında en az 10 mm mesafe bırakabilmek için 30 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 5.16 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında kullanılan tasarım değişkenleri

Eniyileme çalışmasında 57 adet deney noktası kullanılmıştır. Bu deney noktalarının 30'u Latin hiperküp örnekleme ve 27'si tam faktöriyel tasarım kullanılarak üretilmiştir. Eniyileme çalışmaları Eşitlik (5.5-5.6)'da standart formda gösterilmektedir.

$$\begin{array}{ll}
 \square\square\square & \square_\square, \square_\square, \square_\square \\
 \square\square\square & -SEA(\square_\square, \square_\square, \square_\square) \\
 \square\square\square & EA(\square_\square, \square_\square, \square_\square) \geq 70 \square\square \\
 \square\square & -30 \square\square \leq \square_\square \leq +30 \square\square \\
 \square\square & -30 \square\square \leq \square_\square \leq +30 \square\square \quad (5.5) \\
 \square\square & -30 \square\square \leq \square_\square \leq +30 \square\square \\
 \square\square & \square = 6,00 \square\square \\
 \square\square & \square = 6,00 \square\square \\
 \square\square & \square = 2,05 \square\square
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ll}
 \square\square\square & \square_\square, \square_\square, \square_\square \\
 \square\square\square & IPCF(\square_\square, \square_\square, \square_\square) \\
 \square\square\square & EA(\square_\square, \square_\square, \square_\square) \geq 70 \square\square \\
 \square\square & -30 \square\square \leq \square_\square \leq +30 \square\square \\
 \square\square & -30 \square\square \leq \square_\square \leq +30 \square\square \quad (5.6) \\
 \square\square & -30 \square\square \leq \square_\square \leq +30 \square\square \\
 \square\square & \square = 2,00 \square\square \\
 \square\square & \square = 4,90 \square\square \\
 \square\square & \square = 6,00 \square\square
 \end{array}$$

Bu çalışmanın sonuçları, Çizelge 5.6'da gösterilmektedir. Çalışma sonucunda, ilk tasarımdan maksimum SEA amaç fonksiyonunda görülen iyileşme %59,2'den %66,9'a yükselmiş, minimum IPCF amaç fonksiyonunda görülen iyileşme %23,4'ten %24,7'ye yükselmiştir. Çalışma sonucunda SEA için için dış duvar diyafram kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi çalışmasından %7,7 iyileşme, IPCF için dış duvar diyafram kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi çalışmasından %1,3 iyileşme görülmüştür.

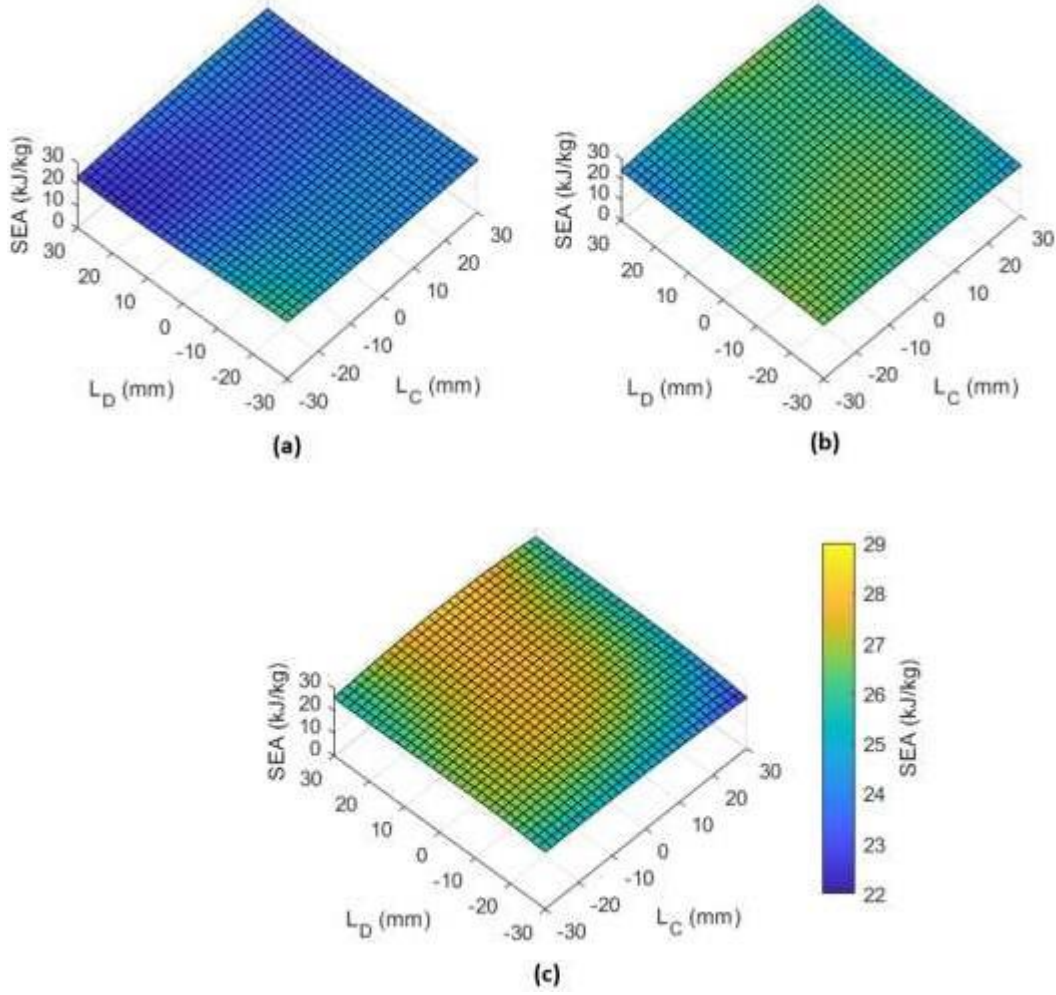
Çizelge 5.6 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasının sonuçları

		Amaç fonksiyonları	
		Maksimum SEA	Minimum IPCF
Tasarım parametreleri	L _C (mm)	+2,67	-0,13
	L _D (mm)	+30,00	-0,13
	L _E (mm)	+30,00	-0,13
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1235,9	523,8
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1239,0	553,0
	IPCF hatası (%)	%0,3	%5,3
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	28,26	16,26
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	29,21	16,95
	SEA hatası (%)	%3,3	%4,2
	EA eniyileme sonucu (kJ)	173,3	70,0
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	179,1	72,9
	EA hatası (%)	%3,4	%4,1
	Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	%66,9	%24,7

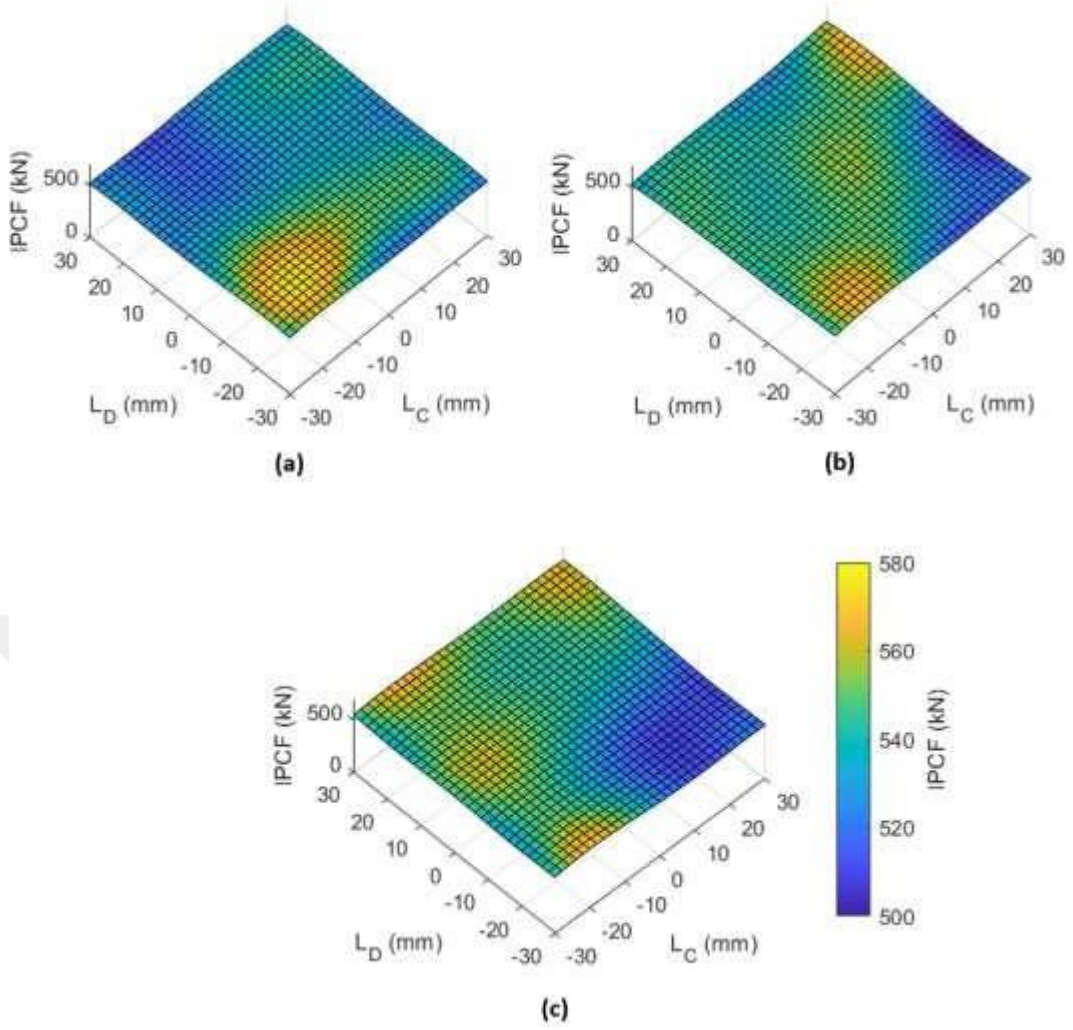
Maksimum SEA sonucu üçüncü seviye PYY, minimum IPCF sonucu Gauss RTF modeli kullanılarak elde edilmiştir. Tüm vekil modeller kullanılarak elde edilmiş genişletilmiş eniyileme sonuçları Çizelge Ek.18'de gösterilmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen vekil modellerin hata metrikleri maksimum SEA amaç fonksiyonu için Çizelge Ek.7 ve Çizelge Ek.8'de, minimum IPCF amaç fonksiyonu için Çizelge Ek.9 ve Çizelge Ek.10'da gösterilmektedir. Eniyileme sonuçlarının sonlu eleman analizlerinden elde edilen hata yüzdelерinin, tüm yanıtlarda maksimum SEA amaç fonksiyonu için üçüncü seviye PYY ve minimum IPCF amaç fonksiyonu için Gauss RTF ile elde edilen nMAE hatalarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Diyafam konumlarının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA ve minimum IPCF sonucunu veren vekil modeller Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de gösterilmektedir. Maksimum SEA sonucunun şekil Şekil 5.17’de görülen optimum sonuç olduğu gözlemlenmiştir. Minimum IPCF sonucu, eniyilemenin hemen başında EA sınırına takıldığı için Şekil 5.18’de gösterilen en düşük IPCF sonucu olmamıştır.



Şekil 5.17 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin (a) $L_E = -30$ mm, (b) $L_E = 0$ mm, (c) $L_E = +30$ mm için gösterimi



Şekil 5.18 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında minimum IPCF sonucunu veren vekil modelin (a) $L_E = -30$ mm, (b) $L_E = 0$ mm, (c) $L_E = +30$ mm için gösterimi

Maksimum SEA amaç fonksiyonu için yapılan çalışmalarda katı kutuya uzakta olan diyaframların (D ve E) darbeye daha yakın konumlandırılmasının daha yüksek SEA metriklerinin oluşmasını sağladığı görülmüştür. Ancak, darbeye en yakın diyafram için (C) bu durum gözlemlenmemiştir.

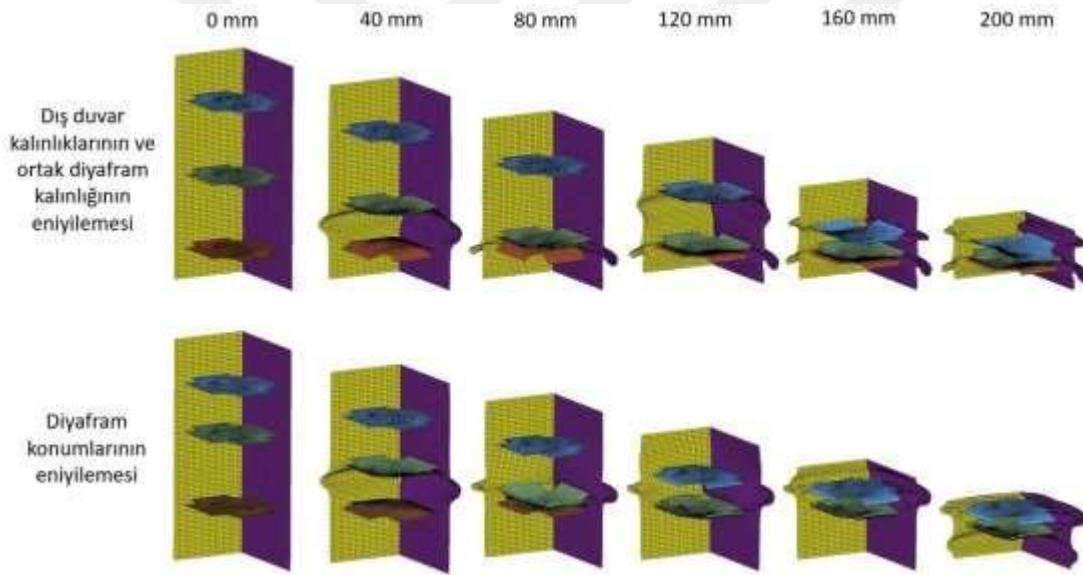
Minimum IPCF amaç fonksiyonu için yapılan çalışmalarda diyaframları birbirinden daha uzağa taşınmasının biraz daha düşük IPCF tepkileri ürettiği bulunmuştur. Bununla birlikte, EA ve IPCF değerlerinin korelasyonlu olduğu ve önceki çalışmanın EA değerinin zaten 70 kJ'lik optimizasyon kısıtlamasında olduğu düşünüldüğünde; bu çalışmanın bir sonucu olarak IPCF'de yüksek bir düşüş gözlenmemesi normal karşılanmıştır.

Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA ve minimum IPCF eniyilemesi görsel sonuçlarının bir önceki çalışmada elde edilenlerle

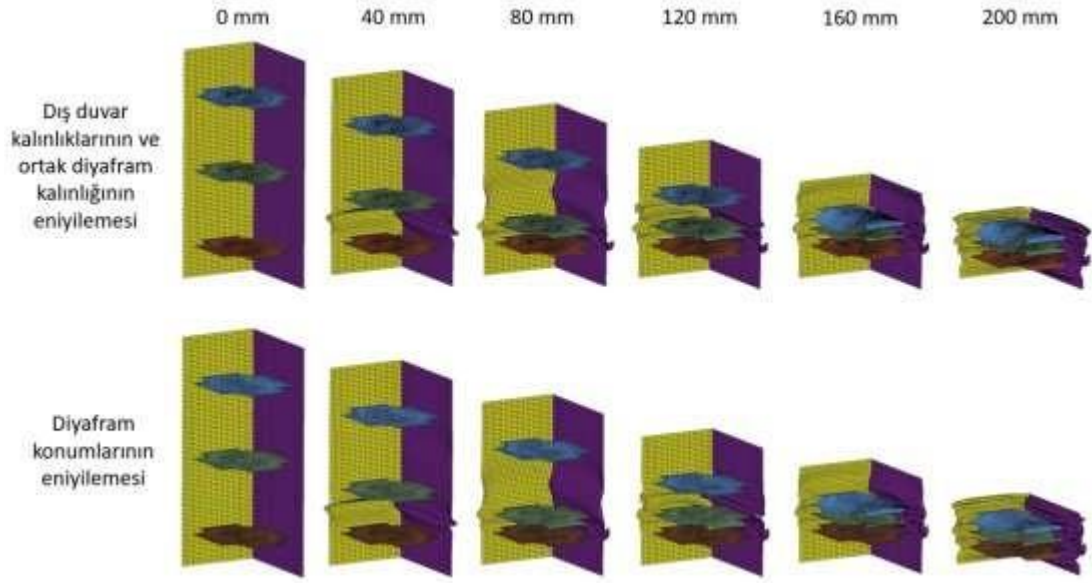
karşılaştırılması Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de gösterilmektedir. Bunlara ek olarak kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırmaları, maksimum SEA amaç fonksiyonu için Şekil 5.21’de, minimum IPCF amaç fonksiyonu için Şekil 5.22’de sunulmuştur.

Maksimum SEA amaç fonksiyonu için yapılan çalışmada, C diyaframıyla D diyaframı arasındaki mesafenin azalması, o bölgedeki deformasyonun şeklinin değişmesine neden olmuş ve oluşan pik kuvveti azaltmıştır. D diyaframı ve E diyaframının darbe yönüne taşınmış olması nedeniyle kuvvet – deplasman grafiğinde C ile D diyaframı arasında oluşan ezilme sırasında meydana gelen pik kuvvetten sonraki kuvvet azalmasının, bir önceki çalışmadan aynı bölgede görülen azalmadan daha hafif olmuştur.

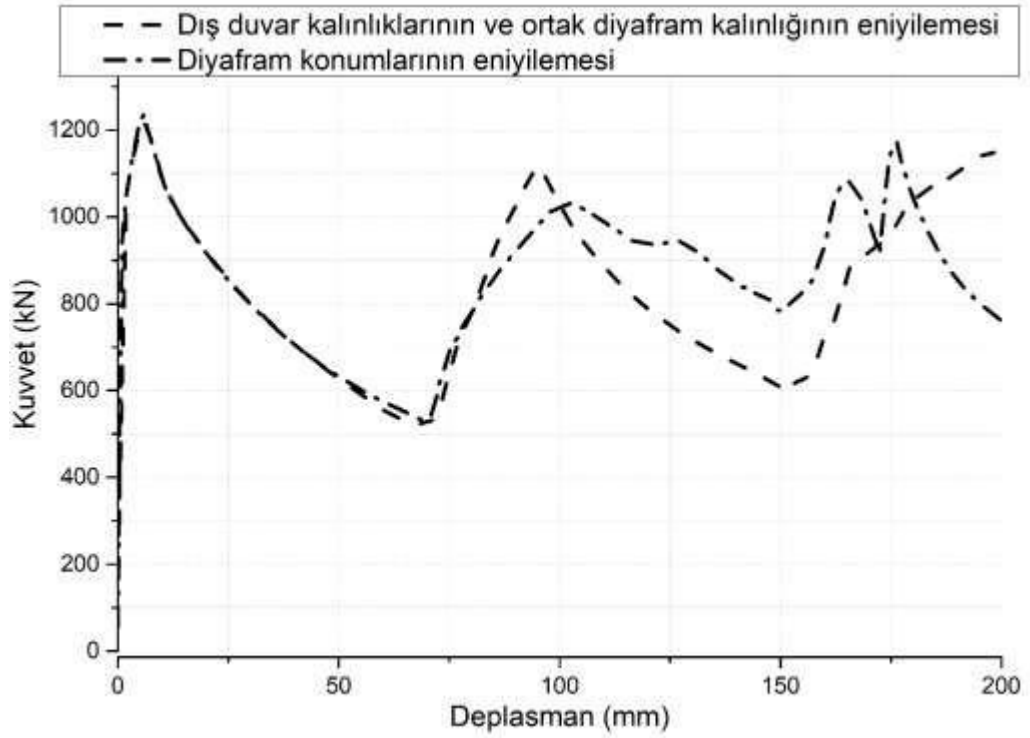
Minimum IPCF amaç fonksiyonu için yapılan çalışmada, diyaframların aşağı kaymış olması IPCF sonucunu düşürmüştür.



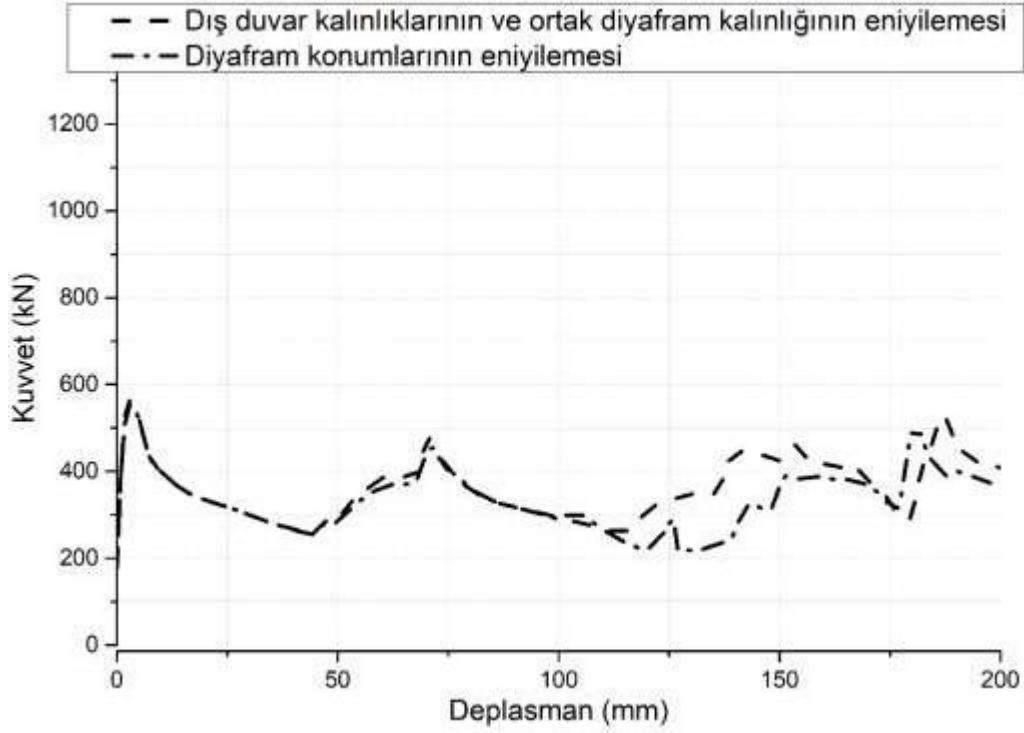
Şekil 5.19 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması



Şekil 5.20 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması



Şekil 5.21 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

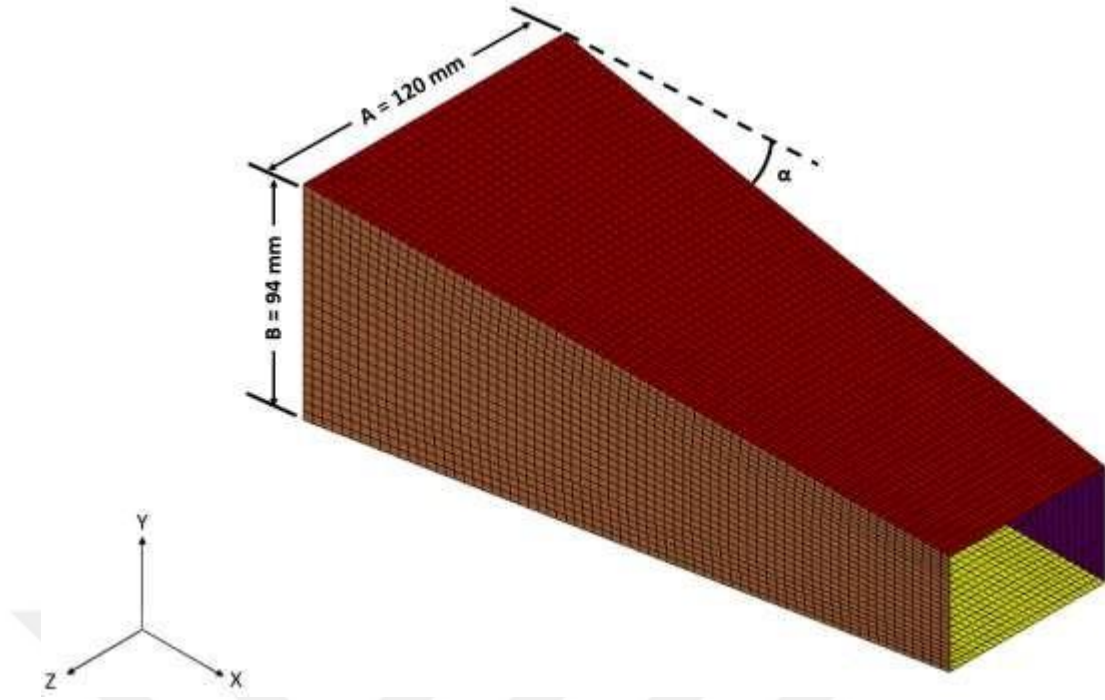


Şekil 5.22 : Diyafram konumlarının eniyilemesi kapsamında elde edilen minimum IPCF eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

5.3 Konik Açının Eniyilemesi

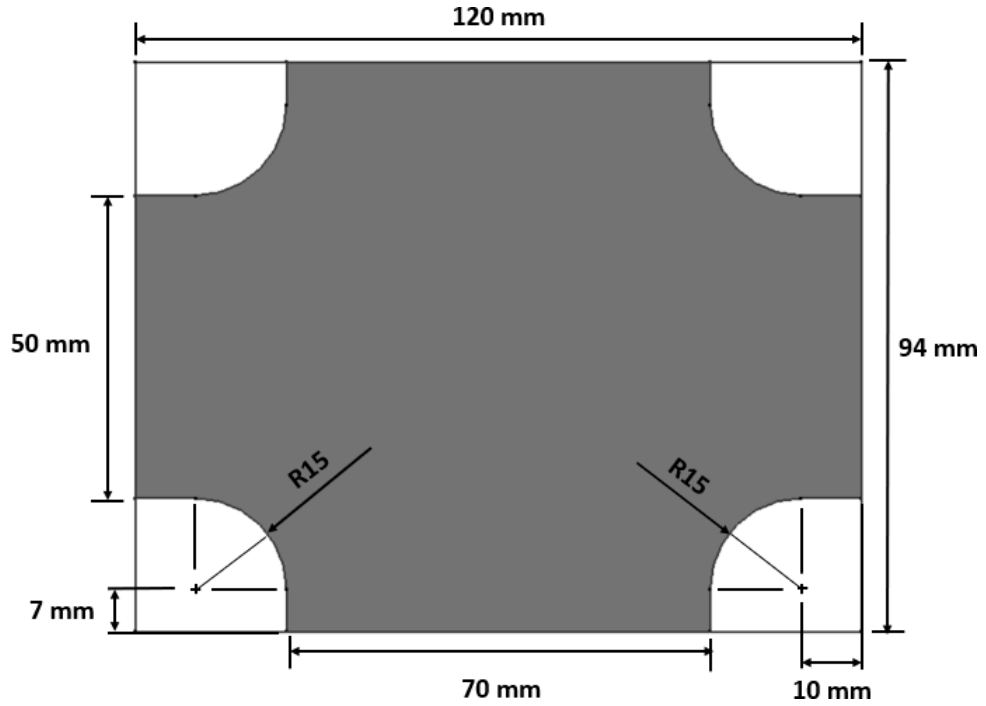
Son olarak, darbe sönümleyiciye konik açı vermenin SEA ve IPCF metriklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında maksimum SEA ve minimum IPCF amaç fonksiyonları için ayrı ayrı eniyileme çalışmaları yapılmıştır. Eniyileme, sadece konik açı (α) olmak üzere tek değişkenli olarak yapılmıştır. Konik açı verilmiş darbe sönümleyici modeli Şekil 5.23'te gösterilmiştir.

Eniyileme çalışmalarında, dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi sonrasında ilgili amaç fonksiyonu için elde edilen dış duvar kalınlıkları (A, B), ortak diyafram kalınlığı (C_u) değeri ve diyaframların konum parametreleri olarak (L_C , L_D , L_E) diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasının ilgili amaç fonksiyonu için elde edilen konum parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 5.23 : Konik açılı darbe sönümleyici modeli

Darbe sönümleyici geometrisi üzerine konik açı eklendiğinde, darbe sönümleyici içinde bulunan diyaframların geometrisinin değişmesi gerekmektedir. Bundan önceki çalışmalarda kullanılan diyafram modeli, Şekil 5.24'te gösterilmektedir.



Şekil 5.24 : Konik açı verilmemiş darbe sönümleyicilerde kullanılan diyafram modeli

Konik açılı darbe sönümleyicilerde diyaframlar tasarlanırken aşağıdaki yaklaşım benimsenmiştir;

- Xu vd. [34] çalışmasında tanımlanmış olan, diyaframın kenar uzunluklarının darbe sönümleyici dış duvarlarının kesit uzunluklarına olan oranı aynı tutulmuştur.
 - Bu durumda, diyaframın uzun kenarının dış duvarın uzun kenarına olan oranı 7/12,
 - Diyaframın kısa kenarının dış duvarın kısa kenarına olan oranı 50/94 olarak tanımlanmıştır.
- Diyafram köşelerinde açılmış olan Radiusların boyutları, kısa dış duvarın kesit uzunluğuna bağlı olarak değişecek şekilde oranlanmıştır.

10 mm ve 7 mm'lik Radius sonrası uzantıları için bir oranlama yapılmamıştır. Bu uzunluklar, yukarıda tanımlı oranlarla oluşan diyaframları dış duvara temas ettirebilmek için serbest bırakılmıştır.

Eniyileme çalışması için üst sınır 10° olarak belirlenmiştir. 10° konik açı üzerinde yapılan çalışmalarda, doğrulanmış sonlu eleman modellerinin üzerinde hatalar görülmeye başlanmış ve tutarsız sonuçlar alınmıştır.

Eniyileme çalışmaları, tam faktöriyel tasarım kullanılarak üretilmiş 11 adet deney noktasıyla yapılmıştır. Deney noktaları konik açının olmadığı (0°) sonuçla başlamış ve maksimum konik açı (10°) değerine kadar 1° aralıklarla oluşturulmuştur. Eniyileme çalışmaları Eşitlik (5.7-5.8)'de standart formda gösterilmektedir.

$$\frac{\text{□□□}}{\text{□□□}} = \frac{\text{□}}{\text{□}} \quad (5.7)$$

$$\frac{\text{□□□}}{\text{□□□}} = \text{SEA}(\text{□})$$

$$\frac{\text{□□□}}{\text{□□□}} = \frac{\text{□}}{\text{□}} \quad (5.8)$$

$$\frac{\text{□□□}}{\text{□□□}} = \text{IPCF}(\text{□})$$

$$\begin{aligned} \text{Ö} & \text{EA}(\alpha) \geq 70 \\ 0^\circ \leq \alpha & \leq 10^\circ \\ \alpha & = 6,00 \\ \alpha & = 6,00 \\ \alpha_{\text{ö}} & = 2,95 \\ \alpha_{\text{ö}} & = +2,67 \\ \alpha_{\text{ö}} & = +30,00 \\ \alpha_{\text{ö}} & = +30,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ö} & \text{EA}(\alpha) \geq 70 \\ 0^\circ \leq \alpha & \leq 10^\circ \\ \alpha & = 2,00 \\ \alpha & = 4,90 \\ \alpha_{\text{ö}} & = 6,00 \\ \alpha_{\text{ö}} & = -0,13 \\ \alpha_{\text{ö}} & = -0,13 \\ \alpha_{\text{ö}} & = -0,13 \end{aligned}$$

Bu çalışmanın sonuçları, Çizelge 5.7’de gösterilmektedir. Çalışma sonucunda, doğrulama çalışmasından maksimum SEA amaç fonksiyonunda görülen iyileşme %66,9’dan %69,4’e yükselmiştir. Çalışma sonucunda SEA için diyafram konumları eniyilemesi çalışmasından %2,5 iyileşme görülmüştür.

Çizelge 5.7 : Konik açının eniyilemesi çalışmasının sonuçları

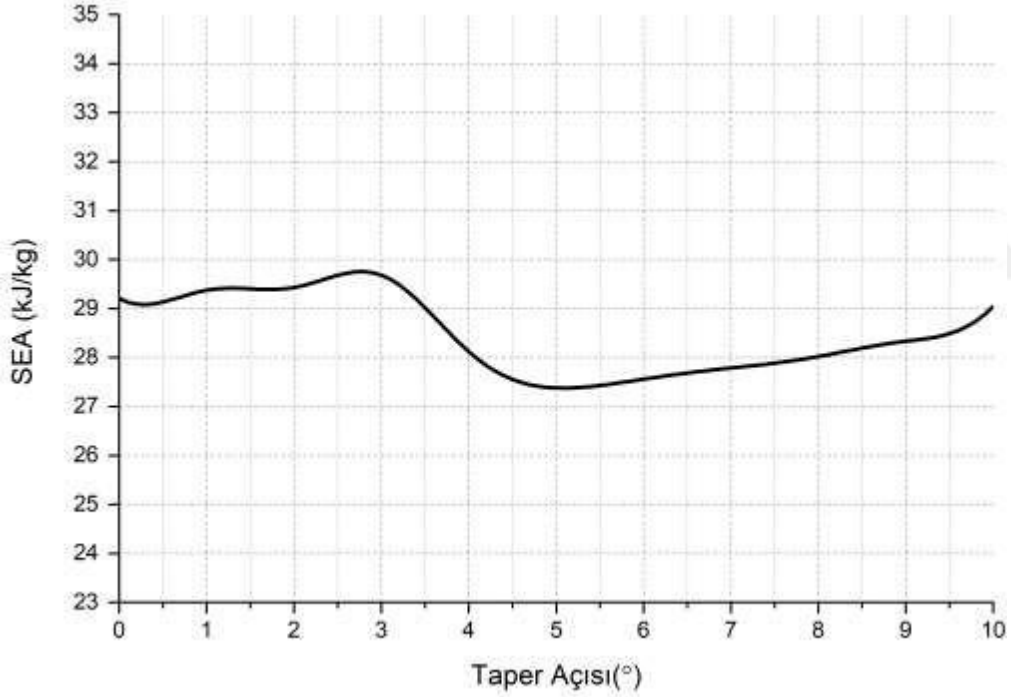
Tasarım parametresi	α (°)	Amaç fonksiyonları	
		Maksimum SEA	Minimum IPCF
		2,77°	0,00°
Sonuçlar	IPCF eniyileme sonucu (kN)	1178,5	553,0
	IPCF sonlu eleman analizi sonucu (kN)	1180,4	553,0
	IPCF hatası (%)	%0,2	%0,0
	SEA eniyileme sonucu (kJ/kg)	29,75	16,95
	SEA sonlu eleman analizi sonucu (kJ/kg)	29,64	16,95
	SEA hatası (%)	%0,4	%0,0
	EA eniyileme sonucu (kJ)	169,8	72,9
	EA sonlu eleman analizi sonucu (kJ)	169,2	72,9
	EA hatası (%)	%0,4	%0,0
	Doğrulama çalışmasından iyileşme oranı (%)	%69,4	%24,7

Minimum IPCF amaç fonksiyonunda IPCF için diyafram konumları eniyilemesi çalışmasından iyileşme görülmemiştir. Bu çalışma kapsamında minimum IPCF amaç fonksiyonunda iyileşme görülmemesinin temel nedeni, önceki çalışmada elde edilen EA değeri olan 72,9 kJ değerinin, 70 kJ’lük eniyileme sınırına çok yakın olmasıdır. Eniyileme algoritması bu küçük aralık içerisinde daha iyi sonuçları oluşturamamış,

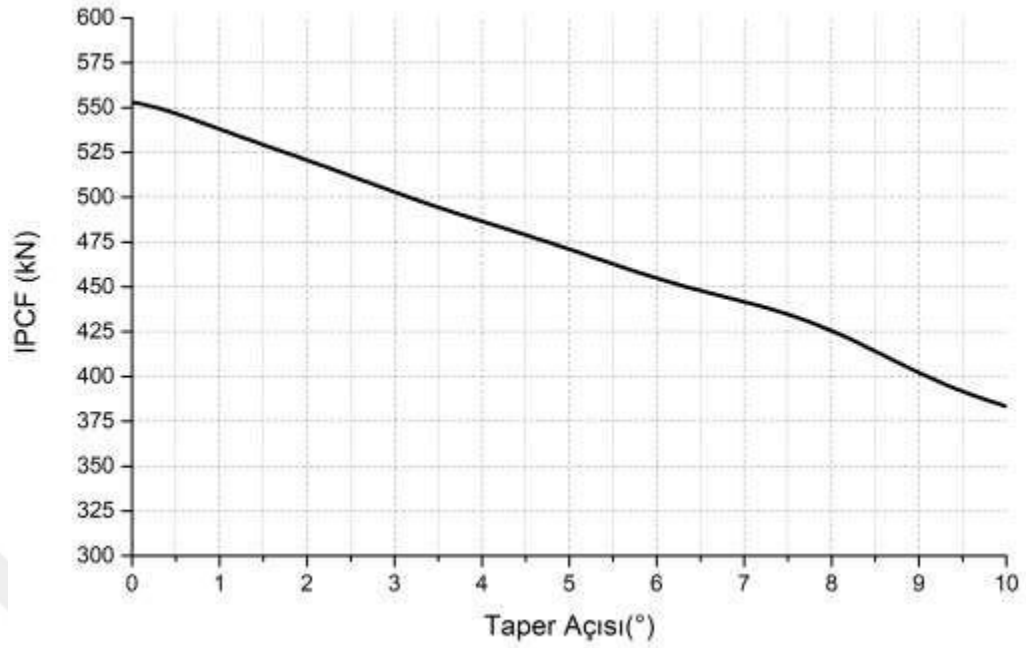
oluşan diğer aday optimumların sonlu eleman analizi sonuçları 70 kJ değerinin altında kalmıştır.

Maksimum SEA sonucu çoklu karesel RTF kullanılarak elde edilmiştir. Minimum IPCF sonucunu ise Gauss RTF oluşturmuştur. Tüm vekil modeller kullanılarak elde edilmiş genişletilmiş eniyileme sonuçları Çizelge Ek.19’de gösterilmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen vekil modellerin hata metrikleri maksimum SEA amaç fonksiyonu için Çizelge Ek.11 ve Çizelge Ek.12’de, minimum IPCF amaç fonksiyonu için Çizelge Ek.13 ve Çizelge Ek.14’te gösterilmektedir. Eniyileme sonuçlarının sonlu eleman analizlerinden elde edilen hata yüzdelerinin, maksimum SEA amaç fonksiyonu için çoklu karesel RTF ve minimum IPCF amaç fonksiyonu için Gauss RTF ile elde edilen nMAE hatalarından daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.25 : Konik açının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA sonucunu veren vekil modelin SEA sonucunun gösterimi

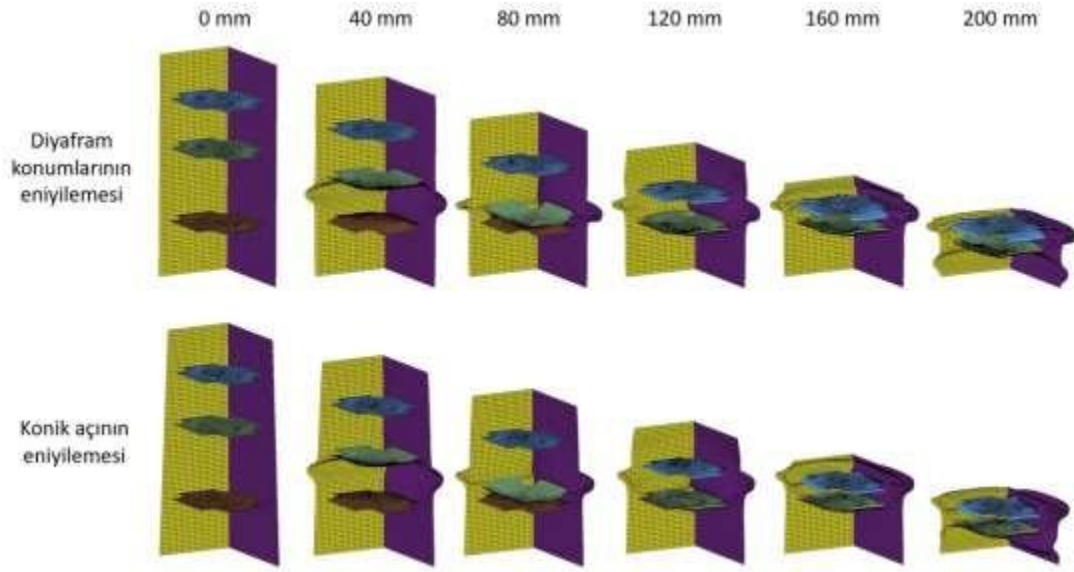


Şekil 5.26 : Konik açının eniyilemesi kapsamında minimum IPCF sonucunu veren vekil modelin IPCF sonucunun gösterimi

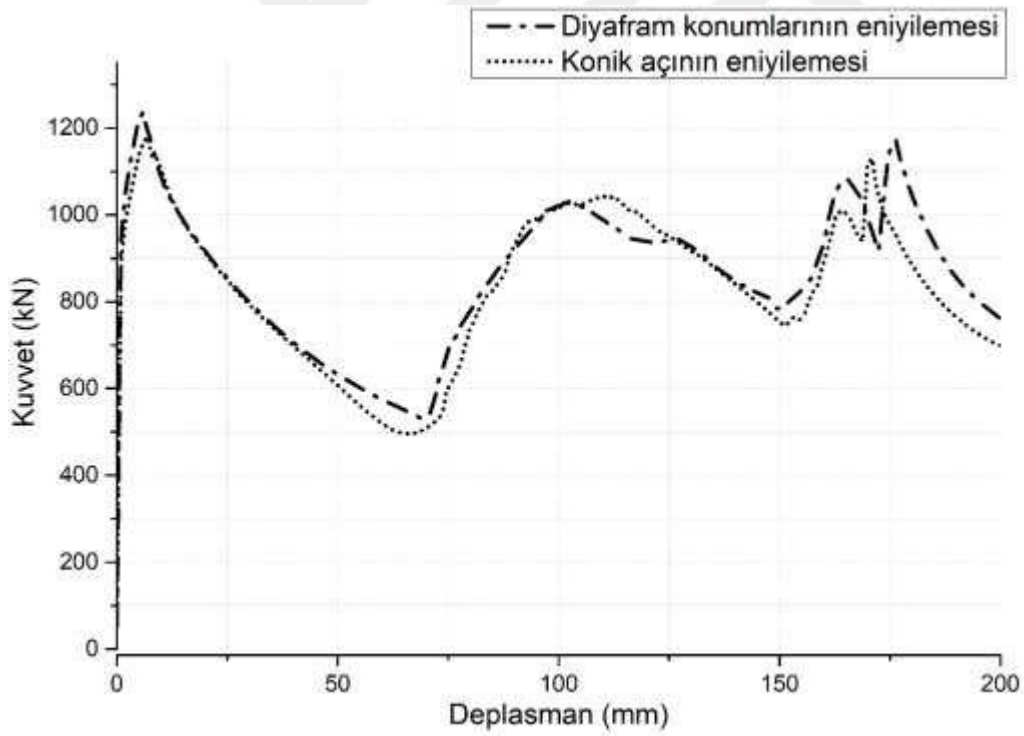
Konik açının eniyilemesi kapsamında maksimum SEA ve minimum IPCF sonucunu veren vekil modeller Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da gösterilmektedir. Maksimum SEA sonucunun şekil Şekil 5.25’da görülen optimum sonuç olduğu gözlemlenmiştir. Minimum IPCF sonucu, eniyilemenin hemen başında EA sınırına takıldığı için Şekil 5.26’da gösterilen en düşük IPCF sonucu olmamıştır.

Konik açının artması çarpışma emicinin kütesini azaltmakta ve tasarım uzayının alt kısmında SEA sonucunu yükseltmektedir. Ancak, optimum değer olan 2,77° açılarından sonra konik açının artışıyla SEA metriğinin azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, konik açısının artmasıyla IPCF tepkisinin azaldığı görülmüştür.

Konik açının eniyileme kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi görsel sonucunun ve kuvvet – deplasman grafiğinin bir önceki çalışmada elde edilenlerle karşılaştırılması Şekil 5.27’de ve Şekil 5.28’de gösterilmektedir. Burada, darbe sönümleyici tasarımına konik açısı eklenmesinin katı kutuya en uzakta olan diyaframla (E) alt plaka arasındaki deformasyonun şeklinin değişmesine neden olduğu görülmektedir. Deformasyon şeklinin değişimi, son katlanmada oluşan kuvvet – deplasman sonuçlarının bir önceki eniyileme probleminde görülen kuvvet – deplasman sonuçlarına benzer şekilli ve daha düşük kuvvete sahip halde olmasına yol açmıştır.



Şekil 5.27 : Konik açının eniyileme kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla görsel karşılaştırılması



Şekil 5.28 : Konik açının eniyileme kapsamında elde edilen maksimum SEA eniyilemesi sonucunun bir önceki eniyileme sonucuyla kuvvet – deplasman grafiği karşılaştırılması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, içerisinde diyaframlar bulunan bir darbe sönümleyicinin performansı çeşitli tasarım değişiklikleriyle iyileştirilmiştir. Bu değişiklikler, sırasıyla darbe sönümleyicinin dış duvar ve diyafram kalınlıklarının değiştirilmesi, diyafram yerleşiminin değiştirilmesi ve darbe sönümleyiciye bir konik açı verilmesi olarak yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, özgül enerji sönümlenmesi (SEA) %69,4 yükseltilmiş, başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) %23,4 azaltılmıştır. Darbe sönümleyiciye yapılan tüm tasarım değişikliklerinin özgül enerji sönümlenmesi (SEA) üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Dış duvar ve diyafram kalınlıklarının eniyilemesi %59,2 SEA artışı sağlarken, diyafram yerleşiminin eniyilemesi bunun üzerine %7,7'lik SEA artışıyla sonuçlanmıştır. Konik açının eniyilemesi ekstra %2,5 SEA artışı sağlamıştır.

Dış duvar ve diyafram kalınlıklarının eniyilemesi, IPCF'de %23,4 düşüş sağlarken, diyafram yerleşiminin eniyilemesi bunun üzerine %1,3 düşüş sağlamıştır. Konik açının eniyilemesi IPCF'de daha fazla düşüşe neden olmamıştır.

Başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) ile toplam sönümlenen enerji (EA) yanıtları arasında pozitif bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. İlk başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) eniyileme çalışmasından sonra, toplam sönümlenen enerji (EA) sonucunun 70 kJ eniyileme kısıtlamasına çok yakın olması nedeniyle daha sonra yapılan eniyileme çalışmalarında yüksek başlangıçtaki pik ezilme kuvveti (IPCF) düşüşü gözlemlenmemiştir.

Bu problemin üstesinden gelmek için, minimum IPCF hedef fonksiyonu için aynı tasarım değişkenleri kullanılarak gelecekte çok değişkenli bir eniyileme probleminin yürütülebileceği değerlendirilmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri ve deformasyon görüntüleri, deneysel bir durumu simüle etmektedir. Aynı parametreler kullanılarak üretilebilecek darbe sönümleyicilerin test sonucu elde edilebilecek kuvvet-deplasman

grafikleri ve deformasyon görüntülerinin üretim sırasında ortaya çıkabilecek hatalar veya malzeme kusurları nedeniyle bu çalışma sonucu elde edilen sonuçlardan farklılıklar gösterebileceği yorumu yapılmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Department for Transport.**, (2020). Rail Factsheet - December 2019. *UK Department for Transport* .
- [2] **European Railway Agency.**, (2018). Report on Railway Safety and Interoperability in the EU. *Publications Office of the European Union*, Luxembourg.
- [3] **Gao, G., Wang, S.**, (2019). Crashworthiness of passenger rail vehicles: a review, *Int. J. Crashworthiness* 24(6), 664–76.
- [4] **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 Struct.* 71, 7–17.
- [5] **Abolfathi, M., Alavi Nia, A.**, (2018). Optimization of energy absorption properties of thin-walled tubes with combined deformation of folding and circumferential expansion under axial load, *Thin-Walled Struct.* 130, 57–70.
- [6] **Zhang, X., Zhang, H.**, (2016). Crush resistance of square tubes with various thickness configurations, *Int. J. Mech. Sci.* 107, 58–68.
- [7] **Ming, S., Zhou, C., Li, T., Song, Z., Wang, B.**, (2019). Energy absorption of thin-walled square tubes designed by kirigami approach, *Int. J. Mech. Sci.* 157–158(157–158), 150–64.
- [8] **Nagel, G.M., Thambiratnam, D.P.**, (2004). Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading, *Int. J. Crashworthiness* 9(4), 389–99.
- [9] **Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Kostazos, P.K., Hassiotis, G.**, (2001). Finite element simulation of the axial collapse of thin-wall square frusta, *Int. J. Crashworthiness* 6(2), 155–64.
- [10] **Altin, M., Acar, E., Güler, M.A.**, (2018). Foam filling options for crashworthiness optimization of thin-walled multi-tubular circular columns, *Thin-Walled Struct.* 131(131), 309–23.
- [11] **Wang, C.Y., Li, Y., Zhao, W.Z., Zou, S.C., Zhou, G., Wang, Y.L.**, (2018). Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure, *Int. J. Mech. Sci.* 138–139, 489–501.
- [12] **Song, X., Sun, G., Li, G., Gao, W., Li, Q.**, (2013). Crashworthiness optimization of foam-filled tapered thin-walled structure using multiple surrogate models, *Struct. Multidiscip. Optim.* 47(2), 221–31.
- [13] **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.
- [14] **Altin, M., Kılınçkaya, Ü., Acar, E., Güler, M.A.**, (2019). Investigation of combined effects of cross section, taper angle and cell structure on crashworthiness of multi-cell thin-walled tubes, *Int. J.*

- [15] **Wang, Z., Li, Z., Shi, C., Zhou, W.**, (2019). Mechanical performance of vertex-based hierarchical vs square thin-walled multi-cell structure, *Thin-Walled Struct.* 134, 102–110.
- [16] **Xu, X., Zhang, Y., Chen, X., Liu, Z., Xu, Y., Gao, Y.**, (2019). Crushing behaviors of hierarchical sandwich-walled columns, *Int. J. Mech. Sci.* 161–162.
- [17] **Xiang, J., Du, J.**, (2017). Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb structure under axial impact loading, *Mater. Sci. Eng. A* 696, 283–9.
- [18] **Xiang, J., Du, J., Li, D., Scarpa, F.**, (2017). Numerical analysis of the impact resistance in aluminum alloy bi-tubular thin-walled structures designs inspired by beetle elytra, *J. Mater. Sci.* 52(22), 13247–60.
- [19] **Xie, S., Yang, W., Li, H., Wang, N.**, (2017). Impact characteristics and crashworthiness of multi-cell, square, thin-walled, structures under axial loads, *Int. J. Crashworthiness* 22(5), 503–17.
- [20] **Qi, C., Yang, S., Dong, F.**, (2012). Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading, *Thin-Walled Struct.* 59, 103–19.
- [21] **Zou, X., Gao, G., Dong, H., Xie, S., Chen, G., Tan, T.**, (2017). Crashworthiness analysis and structural optimisation of multi-cell square tubes under axial and oblique loads, *Int. J. Crashworthiness* 22(2), 129–47.
- [22] **Wu, S., Zheng, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G., Li, Q.**, (2016). On design of multi-cell thin-wall structures for crashworthiness, *Int. J. Impact Eng.* 88, 102–17.
- [23] **Zhou, H., Xu, P., Xie, S.**, (2017). Composite energy-absorbing structures combining thin-walled metal and honeycomb structures, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit* 231(4), 394–405.
- [24] **Gibson, L.J., Ashby, M.F.**, (1997). *Cellular Solids*. Cambridge University Press.
- [25] **Wang, N., Maire, E., Chen, X., Adrien, J., Li, Y., Amani, Y., Hu, L., Cheng, Y.**, (2019). Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams, *Mater. Charact.* 147, 11–20.
- [26] **Hutchinson, J.W., Gibson, L., Ashby, M.F., Wadley, H.N.G.**, (2000). *Metal Foams*. Elsevier.
- [27] **Zou, X., Gao, G. jun., Dong, H. peng., Li, J., Zhou, X. sai., Chen, W., Guan, W. yuan.**, (2017). Crushing analysis and multi-objective optimization of bitubular hexagonal columns with ribs, *J. Cent. South Univ.* 24(5), 1164–73.
- [28] **Deng, X., Liu, W.**, (2019). Experimental and numerical investigation of a novel sandwich sinusoidal lateral corrugated tubular structure under axial compression, *Int. J. Mech. Sci.* 151, 274–87.

- [29] **Dong, H. peng., Gao, G. jun., Xie, S. chao., Li, J.,** (2015). Collision performance of bitubular tubes with diaphragms, *J. Cent. South Univ.* 22(9), 3657–65.
- [30] **Gao, G., Dong, H., Tian, H.,** (2014). Collision performance of square tubes with diaphragms, *Thin-Walled Struct.* 80, 167–177.
- [31] **Peng, Y., Deng, W., Xu, P., Yao, S.,** (2015). Study on the collision performance of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles, *Thin-Walled Struct.* 94, 663–72.
- [32] **Yao, S., Xiao, X., Xu, P., Qu, Q., Che, Q.,** (2018). The impact performance of honeycomb-filled structures under eccentric loading for subway vehicles, *Thin-Walled Struct.* 123, 360–70.
- [33] **Xu, P., Shang, Y., Jiang, S., Yao, S., Xu, K., Xing, J., Zhao, H., Chen, Z.,** (2020). Theoretical development and multi-objective optimisation of a double-tapered rectangular tube with diaphragms, *Int. J. Crashworthiness.*
- [34] **Xu, P., Xu, K., Yao, S., Yang, C., Huang, Q., Zhao, H., Xing, J.,** (2019). Parameter study and multi-objective optimisation of an axisymmetric rectangular tube with diaphragms for subways, *Thin-Walled Struct.* 136, 186–99.
- [35] **Jones, N.,** (2012). Dynamic Progressive Buckling. Structural Impact 2nd ed., *Cambridge University Press*, pp. 377–424.
- [36] **Back, P.-E.,** (2010). *Deformation behaviour of an energy absorber*(yüksek lisans tezi). Luleå University of Technology,.
- [37] **Abramowicz, W.,** (2003). Thin-walled structures as impact energy absorbers, *Thin-Walled Struct.* 41(2–3), 91–107.
- [38] **Lu, G., Yu, T.,** (2003). Thin-walled members under transverse loading. Energy Absorption of Structures and Materials, *Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC*, Cambridge, pp. 114–43.
- [39] **Mcgregor, I.J., Meadow, D., Scott, C., Seeds, A.,** (1993). Impact performance of aluminium structures. In: Jones, N., Wierzbicki, T., (Eds.), *Structural crashworthiness and failure*, *Taylor & Francis*, pp. 333–66.
- [40] **Hayduk, R.J., Wierzbicki, T.,** (1984). Extensional collapse modes of structural members, *Comput. Struct.* 18(3), 447–58.
- [41] **Acar, E., Guler, M.A., Gerçeker, B., Cerit, M.E., Bayram, B.,** (2011). Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, *Thin-Walled Struct.* 49(1), 94–105.
- [42] **Trichon, S., Bonte, M., Ponthot, J.-P., van den Boogaard, T.,** (2007). Aspects of Approximate Optimisation: Overcoming the Curse of Dimensionality and Design of Experiments. Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Miami, Florida, U.S.A.
- [43] **Goel, T., Thakur, S., Haftka, R.T., Shyy, W., Zhao, J.,** (2008). Surrogate model-based strategy for cryogenic cavitation model validation and sensitivity evaluation, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 58(9), 969–1007.

- [44] **Nejadseyfi, O., Geijselaers, H.J.M., van den Boogaard, A.H.**, (2019). Evaluation and assessment of non-normal output during robust optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.* 59(6), 2063–76.
- [45] **TYAN, M., LEE, J.W.**, (2019). Efficient multi-response adaptive sampling algorithm for construction of variable-fidelity aerodynamic tables, *Chinese J. Aeronaut.* 32(3), 547–58.
- [46] **Herten, J. van der., Steenkiste, T. Van., Couckuyt, I., Dhaene, T.**, (2017). Surrogate Modelling with Sequential Design for Expensive Simulation Applications. Computer Simulation, *InTech*, Rijeka, Hrvatistan, pp. 173–92.
- [47] **Buhmann, M.D.**, (2003). Radial Basis Functions. *Cambridge University Press*.
- [48] **Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C.M.**, (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th Edition.
- [49] **MathWorks.**, (2016). Constrained Nonlinear Optimization Algorithms, *MathWorks Doc.*, 1–15.
- [50] **The MathWorks, I.**, (2020). Choosing the Algorithm. MATLAB Help Center.
- [51] **Byrd, R.H., Hribar, M.E., Nocedal, J.**, (1999). An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming, *SIAM J. Optim.* 9(4), 877–900.
- [52] **Byrd, R.H., Gilbert, J.C., Nocedal, J.**, (2000). A trust region method based on interior point techniques for nonlinear programming, *Math. Program.* 89(1), 149–85.
- [53] **Waltz, R.A., Morales, J.L., Nocedal, J., Orban, D.**, (2006). An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps, *Math. Program.* 107(3), 391–408.
- [54] **Steihaug, T.**, (1983). The Conjugate Gradient Method and Trust Regions in Large Scale Optimization, *SIAM J. Numer. Anal.* 20(3), 626–37.

EKLER

EK 1: Vekil model tabanlı eniyileme

EK 2: Vekil modellerde hatalar

EK 3: Eniyileme alışmaları genişletilmiş sonuçları



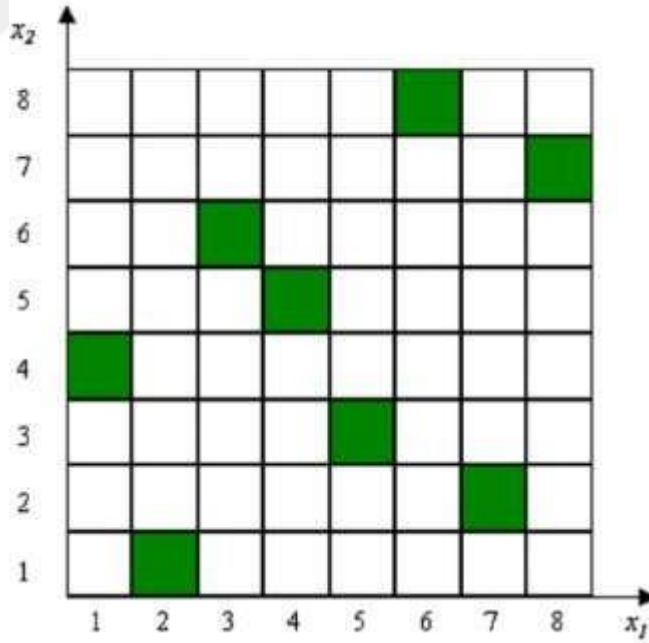
EK 1: VEKİL MODEL TABANLI ENİYİLEME

Çalışmada eniyileme çalışmaları vekil model tabanlı bir yaklaşımla yapılmıştır. Doğrulanmış sonlu elemanlar modeli kullanılarak deney noktaları ve test noktaları oluşturulmuştur. Oluşturulan deney noktaları üzerinden Radyal tabanlı fonksiyon (RTF) ve Polinom yanıt yüzey modelleri (PYY) tabanlı vekil modeller oluşturulmuştur.

Deney Tasarımı Yöntemleri

Deney noktaları ve test noktaları için deney tasarımı Latin hiperküp örnekleme (LHS – *Latin hypercube sampling*), tam faktöriyel deney tasarımı (FFD – *Full factorial design*) yöntemleri ayrı ayrı ve birlikte kullanılarak yapılmıştır.

LHS yönteminde deney uzayı tanımlı nokta sayısı kadar eşit bölüme ayrılır. Her bir ardışık adımda, rastgele bir deney tasarımı örneği üretilir. Yalnızca değişkenlerin her birinin içinde bulunduğu bölümlerin herhangi birinin önceki örnekle örtüşmediği durumda deney tasarımı uygun olarak kabul edilir. Şekil Ek.1'deki yeşil hücreler, örnek bir LHS deney tasarımını göstermektedir.



Şekil Ek.1 : İki tasarım değişkeni için sekiz tasarım noktasının oluşturulduğu örnek bir LHS deney tasarımı [41]

FFD yönteminde deney uzayı, her bir tasarım değişkeni için olası değer (seviye) sayısı tanımlanır ve deney tasarımı tasarım değişkenlerinin bu seviyelerle olan

Eşitlik (Ek.1)'de gösterilmekte olan $\varphi(\omega)$ vekil model tarafından oluşturulan tahmini sonucu, φ_0 radyal tabanlı fonksiyon parametresini, φ_1 radyal tabanlı fonksiyon sayısını, $\varphi(\|\omega - \omega_0\|)$ ω_0 merkez noktası temel alınarak oluşturulmuş radyal tabanlı fonksiyonları tanımlamaktadır [47]. İnce levha RTF Eşitlik (Ek.2)'de, gauss RTF Eşitlik (Ek.3)'te, çoklu karesel RTF Eşitlik (Ek.4)'te gösterilmektedir.

$$\varphi(\omega) = \omega^2 \log(\omega^2) \quad (\text{Ek.2})$$

$$\varphi(\omega) = \omega^{-\omega^2} \quad (\text{Ek.3})$$

$$\varphi(\omega) = \sqrt{\omega^2 + \omega^2} \quad (\text{Ek.4})$$

Polinom yanıt yüzey modelleri olarak ikinci derece, üçüncü derece ve dördüncü derece modeller kullanılmıştır. Kullanılan polinom yanıt yüzey fonksiyonlarının temel formülasyonu, Eşitlik (Ek.5)'te gösterilmektedir.

$$\varphi(\omega) = \varphi_0 + \sum_{\omega=1}^{\varphi} \varphi_{\omega} \omega^{\omega} + \sum_{\omega=1}^{\varphi} \varphi_{\omega} \omega^{\omega^2} + \sum_{\omega=1}^{\varphi-1} \sum_{\omega=\omega+1}^{\varphi} \varphi_{\omega} \varphi_{\omega} \omega^{\omega} + \dots \quad (\text{Ek.5})$$

Eşitlik (Ek.5)'de gösterilmekte olan $\varphi(\omega)$ vekil model tarafından oluşturulan tahmini sonucu, φ parametre sayısını tanımlamaktadır. φ_0 , φ_{ω} ve φ_{ω} ise MATLAB üzerinden en küçük kareler yöntemi kullanılarak yapılan model regresyonu sonucunda elde edilen polinom yanıt yüzey fonksiyonu parametrelerini tanımlamaktadır [48].

Eniyileme Algoritmaları

Çalışma kapsamında eniyileme, *interior – point* algoritması kullanılarak yapılmıştır. Benzer çalışmalarda, bu algoritma haricinde *Sequential Quadratic Programming* (SQP) algoritması, *active – set* algoritmaları veya *genetic algorithm* kullanılabilir [49].

Çalışma kapsamında kullanılan *interior – point* algoritması, kısıtlı ve lineer olmayan eniyileme için ilk olarak kullanılması önerilen algoritmadır. İç nokta algoritmaları, düşük bellek kullanımı ve büyük problemleri hızlı bir şekilde çözme yeteneği, tüm iterasyonlarda sınırları karşılama ve NaN veya sonsuz sonuçlarından geri çıkabilme kabiliyetleri avantajlarını sunmaktadır. Bu nedenle bu algoritmanın ilk olarak

kullanılması ve algoritma kullanılarak yapılan eniyilemenin başarısız olması durumunda SQP ve *active-set* algoritmalarının kullanılması önerilmektedir [50–52].

Standart bir kısıtlı eniyileme problemi Eşitlik (Ek.6)'te gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \\
 & \text{s.t.} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq 0
 \end{aligned}
 \tag{Ek.6}$$

Interior – point algoritmasında, standart kısıtlı eniyileme problemi, bariyer parametresi $\mu > 0$ durumunda Eşitlik (Ek.7)'teki şekilde değiştirilmektedir.

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \\
 & \text{s.t.} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{c}(\mathbf{x}) + \mu = 0
 \end{aligned}
 \tag{Ek.7}$$

Gevşetme değişkeni (μ) sayısı, eşitsizlik kısıtı (\mathbf{c}) sayısıdır. Gevşetme değişkenleri, $\ln(\mu)$ sınırını korumak için pozitif olarak tanımlanmıştır. μ sıfıra yaklaştığında, minimum μ minimum \mathbf{c} 'ye yaklaşmalıdır.

Eşitlik (Ek.7)'te gösterilen değiştirilmiş problem, çözümü daha zor eşitsizlik kısıtlı problemden çözümü daha kolay olan eşitlik kısıtlı probleme indirgenmektedir.

Ardından, eniyileme algoritması indirgenmiş problemi lineer yaklaşımla çözmekte, problemin bir iterasyonda lokal olarak konveks özellik göstermemesi durumunda eşlenik gradyan yöntemiyle ilgili iterasyon geçilmektedir [53,54].

Çalışma kapsamında kullanılan algoritmanın lokal minimumları optimizasyon sonucu olarak sunmasının engellenmesi amacıyla eniyileme çalışması çoklu başlangıç noktası kullanılarak yapılmıştır.

EK 2: VEKİL MODELLERDEKİ HATALAR

Vekil modellerin doğruluğu, rastgele seçilen test noktalarında vekil modellerin performansı değerlendirilerek hesaplanmıştır. Her vekil model, Latin hiperküp örnekleme kullanılarak oluşturulmuş 20 test noktasıyla değerlendirilmiştir.

Vekil modellerin hatalarının ölçülebilmesi için normalize edilmiş maksimum mutlak hata (nMaxAE – *Normalized maximum absolute error*), normalize edilmiş ortalama mutlak hata (nMAE – *Normalized mean absolute error*) ve normalize edilmiş karekök ortalama hata (nRMSE – *Normalized root mean square error*) metrikleri kullanılmıştır. Kullanılan hata metriklerinin formülleri Eşitlik (Ek.8-Ek.10)'da gösterilmektedir.

$$\text{nMaxAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{test}}} |\hat{y}_i - y_i|}{n_{\text{test}} \times (\max_{i=1}^{n_{\text{test}}} y_i - \min_{i=1}^{n_{\text{test}}} y_i)} \quad (\text{Ek.8})$$

$$\text{nMAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{test}}} |\hat{y}_i - y_i|}{n_{\text{test}} \times (\max_{i=1}^{n_{\text{test}}} y_i - \min_{i=1}^{n_{\text{test}}} y_i)} \quad (\text{Ek.9})$$

$$\text{nRMSE} = \frac{1}{n_{\text{test}}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{\text{test}}} \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n_{\text{test}}}} \quad (\text{Ek.10})$$

Bu hata metriklerinde n_{test} parametresi, test noktası sayısını temsil etmektedir. Her bir i test noktası için \hat{y}_i vekil model tarafından oluşturulan tahmini sonucu, y_i de test noktasının sonlu elemanlar analizi sonucunu temsil etmektedir. $\max_{i=1}^{n_{\text{test}}} y_i$ ve $\min_{i=1}^{n_{\text{test}}} y_i$ ise tüm test noktalarında elde edilen en yüksek ve en düşük sonlu eleman analizi sonuçlarını temsil etmektedir.

Yukarıda tanımlanmış hata metrikleri, bu çalışma için oluşturulan tüm vekil modeller için hesaplanmış ve aşağıda sunulmuştur.

Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının birlikte eniyilemesi çalışmasında tüm vekil modeller için oluşturulmuş hata metrikleri Çizelge Ek.1 ve Çizelge Ek.2'de gösterilmektedir. Vekil modellerin sonlu eleman analizi sonuçlarını uygun şekilde takip ettikleri sonucuna varılmıştır.



Çizelge Ek.1 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi için PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,05	0,04	0,03
	nMaxAE	0,10	0,09	0,14
	nRMSE	0,05	0,05	0,05
SEA	nMAE	0,08	0,07	0,06
	nMaxAE	0,20	0,17	0,25
	nRMSE	0,10	0,09	0,09
IPCF	nMAE	0,02	0,02	0,01
	nMaxAE	0,09	0,09	0,08
	nRMSE	0,03	0,03	0,02

Çizelge Ek.2 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi için RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,03	0,08	0,03
	nMaxAE	0,09	0,26	0,09
	nRMSE	0,04	0,10	0,04
SEA	nMAE	0,05	0,13	0,05
	nMaxAE	0,16	0,35	0,15
	nRMSE	0,07	0,16	0,07
IPCF	nMAE	0,01	0,11	0,01
	nMaxAE	0,07	0,27	0,07
	nRMSE	0,02	0,13	0,02

Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında tüm vekil modeller için oluşturulmuş hata metrikleri Çizelge Ek.3 ve Çizelge Ek.4'da gösterilmektedir. Dördüncü derece PYY modeli haricindeki vekil modellerin sonlu eleman sonuçlarını uygun şekilde takip ettikleri gözlemlenmiştir. Kullanılan değişken sayısının fazla olması nedeniyle dördüncü derece PYY modelinin oluşturulması için gerekli parametre sayısı artmış ve kullanılan deney noktası sayısı bu parametrelerin belirlenmesi için yetersiz kalmıştır.

Çizelge Ek.3 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,09	0,14	0,93
	nMaxAE	0,22	0,28	4,55
	nRMSE	0,10	0,14	1,33
SEA	nMAE	0,11	0,15	1,60
	nMaxAE	0,22	0,32	8,48
	nRMSE	0,11	0,16	2,35
IPCF	nMAE	0,09	0,14	0,51
	nMaxAE	0,25	0,30	1,37
	nRMSE	0,10	0,15	0,59

Çizelge Ek.4 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,09	0,14	0,10
	nMaxAE	0,25	0,31	0,25
	nRMSE	0,11	0,16	0,11
SEA	nMAE	0,12	0,21	0,13
	nMaxAE	0,23	0,40	0,26
	nRMSE	0,13	0,22	0,13
IPCF	nMAE	0,10	0,15	0,09
	nMaxAE	0,28	0,41	0,26
	nRMSE	0,12	0,18	0,11

Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında tüm vekil modeller için oluşturulmuş hata metrikleri Çizelge Ek.5 ve Çizelge Ek.6’te gösterilmektedir. Vekil modellerin IPCF sonuçlarını EA ve SEA metriklerinden daha yüksek hata metrikleriyle takip ettikleri gözlemlenmiştir.

Çizelge Ek.5 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,09	0,07	0,08
	nMaxAE	0,21	0,20	0,28
	nRMSE	0,10	0,08	0,10
SEA	nMAE	0,09	0,07	0,08
	nMaxAE	0,21	0,20	0,28
	nRMSE	0,10	0,08	0,10
IPCF	nMAE	0,14	0,14	0,15
	nMaxAE	0,45	0,47	0,46
	nRMSE	0,18	0,19	0,20

Çizelge Ek.6 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasında RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,10	0,13	0,07
	nMaxAE	0,38	0,65	0,19
	nRMSE	0,14	0,20	0,08
SEA	nMAE	0,09	0,12	0,06
	nMaxAE	0,35	0,60	0,18
	nRMSE	0,13	0,19	0,08
IPCF	nMAE	0,07	0,14	0,06
	nMaxAE	0,93	0,82	0,99
	nRMSE	0,21	0,24	0,22

Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında vekil modeller için oluşturulmuş hata metrikleri maksimum SEA çalışması için Çizelge Ek.7 ve Çizelge Ek.8’de, minimum IPCF çalışması için Çizelge Ek.9 ve Çizelge Ek.10’da gösterilmektedir. Vekil modellerin sonlu eleman analizi sonuçlarını uygun şekilde takip ettikleri sonucuna varılmıştır.

Çizelge Ek.7 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,20	0,20	0,22
	nMaxAE	0,71	0,60	0,77
	nRMSE	0,25	0,24	0,29
SEA	nMAE	0,20	0,20	0,22
	nMaxAE	0,71	0,60	0,77
	nRMSE	0,25	0,24	0,29
IPCF	nMAE	0,20	0,11	0,14
	nMaxAE	0,64	0,32	0,54
	nRMSE	0,25	0,14	0,20

Çizelge Ek.8 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,17	0,15	0,15
	nMaxAE	0,63	0,65	0,53
	nRMSE	0,23	0,24	0,20
SEA	nMAE	0,17	0,15	0,15
	nMaxAE	0,63	0,65	0,53
	nRMSE	0,23	0,24	0,20
IPCF	nMAE	0,10	0,23	0,24
	nMaxAE	0,49	0,65	0,71
	nRMSE	0,16	0,32	0,31

Çizelge Ek.9 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,16	0,17	0,19
	nMaxAE	0,49	0,51	0,49
	nRMSE	0,21	0,22	0,24
SEA	nMAE	0,16	0,17	0,19
	nMaxAE	0,49	0,51	0,49
	nRMSE	0,21	0,22	0,24
IPCF	nMAE	0,15	0,15	0,12
	nMaxAE	0,34	0,31	0,31
	nRMSE	0,18	0,18	0,15

Çizelge Ek.10 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,16	0,22	0,17
	nMaxAE	0,51	0,86	0,47
	nRMSE	0,22	0,30	0,21
SEA	nMAE	0,16	0,22	0,17
	nMaxAE	0,50	0,86	0,47
	nRMSE	0,22	0,30	0,21
IPCF	nMAE	0,09	0,24	0,10
	nMaxAE	0,27	0,91	0,38
	nRMSE	0,12	0,36	0,13

Konik açının eniyilemesi çalışmasında tüm vekil modeller için oluşturulmuş hata metrikleri maksimum SEA çalışması için Çizelge Ek.11 ve Çizelge Ek.12’de, minimum IPCF çalışması için Çizelge Ek.13 ve Çizelge Ek.14’te gösterilmektedir. Vekil modellerin sonlu eleman analizi sonuçlarını uygun şekilde takip ettikleri sonucuna varılmıştır.

Çizelge Ek.11 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,06	0,05	0,04
	nMaxAE	0,28	0,22	0,23
	nRMSE	0,08	0,07	0,06
SEA	nMAE	0,14	0,11	0,10
	nMaxAE	0,68	0,54	0,55
	nRMSE	0,21	0,16	0,15
IPCF	nMAE	0,02	0,01	0,01
	nMaxAE	0,04	0,03	0,02
	nRMSE	0,02	0,01	0,01

Çizelge Ek.12 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında maksimum SEA eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,02	0,06	0,02
	nMaxAE	0,15	0,33	0,14
	nRMSE	0,05	0,10	0,04
SEA	nMAE	0,06	0,15	0,05
	nMaxAE	0,35	0,70	0,34
	nRMSE	0,11	0,22	0,11
IPCF	nMAE	0,00	0,03	0,00
	nMaxAE	0,02	0,21	0,01
	nRMSE	0,01	0,05	0,01

Çizelge Ek.13 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş PYY modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İkinci derece PYY	Üçüncü derece PYY	Dördüncü derece PYY
EA	nMAE	0,05	0,05	0,04
	nMaxAE	0,11	0,11	0,12
	nRMSE	0,05	0,05	0,05
SEA	nMAE	0,08	0,08	0,07
	nMaxAE	0,18	0,17	0,21
	nRMSE	0,10	0,10	0,09
IPCF	nMAE	0,01	0,01	0,01
	nMaxAE	0,02	0,01	0,02
	nRMSE	0,01	0,01	0,01

Çizelge Ek.14 : Konik açının eniyilemesi çalışmasında minimum IPCF eniyilemesi için oluşturulmuş RTF modelleri üzerinden elde edilen hata metrikleri

Çarpışma performansı metriği	Hata metriği	İnce levha RTF	Gauss RTF	Çoklu karesel RTF
EA	nMAE	0,02	0,06	0,02
	nMaxAE	0,07	0,25	0,05
	nRMSE	0,03	0,08	0,03
SEA	nMAE	0,05	0,11	0,04
	nMaxAE	0,12	0,39	0,11
	nRMSE	0,06	0,14	0,05
IPCF	nMAE	0,00	0,04	0,01
	nMaxAE	0,02	0,19	0,04
	nRMSE	0,01	0,06	0,01

EK 3: ENİYİLEME ÇALIŞMALARINI GENİŞLETİLMİŞ SONUÇLARI

Çizelge Ek.15 : Dış duvar kalınlıklarının ve ortak diyafram kalınlığının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları

Vekil Model	Amaç Fonksiyonu	A (mm)	B (mm)	C _u (mm)	IPCF Eniyileme Sonucu (kN)	IPCF Analiz Sonucu (kN)	IPCF Hatası (%)	SEA Eniyileme Sonucu (kJ/kg)	SEA Analiz Sonucu (kJ/kg)	SEA Hatası (%)	EA Eniyileme Sonucu (kJ)	EA Analiz Sonucu (kJ)	EA Hatası (%)
İnce levha RTF	Maksimum SEA	6,00	6,00	3,00	1238,3	1226,6	1,0	27,58	27,66	0,3	170,8	169,9	0,5
	Minimum IPCF	2,00	4,96	4,43	565,2	556,7	1,5	17,51	17,52	0,1	70,0	69,8	0,3
Gauss RTF	Maksimum SEA	5,86	5,94	2,41	1305,5	1200,0	8,8	28,75	27,39	4,8	175,4	162,1	7,6
	Minimum IPCF	2,00	5,22	4,31	534,2	586,2	8,9	17,07	18,22	6,8	70,0	74,0	5,8
Çoklu karesel RTF	Maksimum SEA	6,00	6,00	2,97	1237,3	1226,7	0,9	27,57	27,73	0,6	170,6	170,2	0,2
	Minimum IPCF	2,00	4,84	4,37	554,7	544,8	1,8	17,75	16,92	4,7	70,0	66,4	5,2
İkinci derece PYY	Maksimum SEA	6,00	6,00	3,52	1227,4	1226,1	0,1	26,45	26,74	1,1	167,0	167,3	0,2
	Minimum IPCF	2,00	5,16	6,00	588,2	581,1	1,2	15,94	17,24	8,2	70,0	76,0	8,6
Üçüncü derece PYY	Maksimum SEA	6,00	6,00	2,95	1229,6	1224,9	0,4	27,44	27,85	1,5	169,4	170,8	0,8
	Minimum IPCF	2,00	4,90	6,00	561,0	562,3	0,2	15,99	17,15	7,3	70,0	73,8	5,4
Dördüncü derece PYY	Maksimum SEA	6,00	5,57	2,58	1201,2	1192,9	0,7	28,09	26,21	6,7	165,6	154,1	7,0
	Minimum IPCF	2,00	4,99	5,12	567,6	562,5	0,9	16,92	17,45	3,2	70,0	72,4	3,4

Çizelge Ek.16 : Dış duvar kalınlıklarının ve bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları

Vekil Model	Amaç Fonksiyonu	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	IPCF Eniyileme Sonucu (kN)	IPCF Analiz Sonucu (kN)	IPCF Hatası (%)	SEA Eniyileme Sonucu (kJ/kg)	SEA Analiz Sonucu (kJ/kg)	SEA Hatası (%)	EA Eniyileme Sonucu (kJ)	EA Analiz Sonucu (kJ)	EA Hatası (%)
İnce levha RTF	Maksimum SEA	6,00	5,68	2,47	2,00	2,49	1199,0	1204,3	0,4	28,43	27,37	3,7	166,4	160,5	3,5
Gauss RTF	Maksimum SEA	5,84	6,00	3,27	2,92	2,00	1149,3	1201,9	4,4	28,19	25,43	9,8	168,8	152,7	9,6
Çoklu karesel RTF	Maksimum SEA	6,00	6,00	2,46	2,00	2,47	1230,5	1230,0	0,1	28,84	28,04	2,8	171,8	168,0	2,2
İkinci derece PYY	Maksimum SEA	6,00	6,00	2,88	2,00	2,00	1227,2	1229,7	3,5	28,12	27,96	0,6	170,1	167,5	1,6
Üçüncü derece PYY	Maksimum SEA	6,00	6,00	2,44	2,00	2,00	1284,5	1229,6	4,5	28,72	28,00	2,5	174,5	168,8	4,4
Dördüncü derece PYY	Maksimum SEA	*													

*Yüksek hata metriklerinden dolayı Dördüncü derece PYY algoritması kullanılarak sonuç alınmamıştır.

Çizelge Ek.17 : Bağımsız diyafram kalınlıklarının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları

Vekil Model	Amaç Fonksiyonu	C (mm)	D (mm)	E (mm)	IPCF Eniyileme Sonucu (kN)	IPCF Analiz Sonucu (kN)	IPCF Hatası (%)	SEA Eniyileme Sonucu (kJ/kg)	SEA Analiz Sonucu (kJ/kg)	SEA Hatası (%)	EA Eniyileme Sonucu (kJ)	EA Analiz Sonucu (kJ)	EA Hatası (%)
İnce levha RTF	Maksimum SEA	2,62	2,00	2,47	1240,4	1230,5	0,8	27,96	28,05	0,3	168,1	168,4	0,2
Gauss RTF	Maksimum SEA	2,15	2,29	2,23	1321,7	1227,3	7,7	29,70	27,48	7,5	177,1	164,2	7,3
Çoklu karesel RTF	Maksimum SEA	2,00	2,00	3,51	1229,8	1229,7	0,0	27,83	27,86	0,1	168,0	168,2	0,1
İkinci derece PYY	Maksimum SEA	2,00	2,00	2,00	1227,0	1228,7	0,1	27,76	27,60	0,6	164,5	163,6	0,6
Üçüncü derece PYY	Maksimum SEA	2,00	2,13	2,00	1228,1	1228,9	0,1	27,74	27,53	0,7	164,6	163,4	0,8
Dördüncü derece PYY	Maksimum SEA	2,00	2,79	5,45	1229,6	1228,0	0,1	28,02	27,35	2,4	174,7	170,5	2,4

Çizelge Ek.18 : Diyafram konumlarının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları

Vekil Model	Amaç Fonksiyonu	L _C (mm)	L _D (mm)	L _E (mm)	IPCF Eniyileme Sonucu (kN)	IPCF Analiz Sonucu (kN)	IPCF Hatası (%)	SEA Eniyileme Sonucu (kJ/kg)	SEA Analiz Sonucu (kJ/kg)	SEA Hatası (%)	EA Eniyileme Sonucu (kJ)	EA Analiz Sonucu (kJ)	EA Hatası (%)
İnce levha RTF	Maksimum SEA	+0,61	+29,43	+30,00	1237,3	1238,3	0,1	28,63	28,73	0,3	175,6	176,2	0,3
	Minimum IPCF	+3,50	+19,45	-8,85	529,0	533,0	0,8	16,26	15,58	4,2	70,0	67,0	4,3
Gauss RTF	Maksimum SEA	0,00	0,00	0,00	1226,1	1226,1	0,0	27,85	27,85	0,0	170,8	170,8	0,0
	Minimum IPCF	-0,13	-0,13	-0,13	523,8	553,0	5,3	16,26	16,95	4,2	70,0	72,9	4,1
Çoklu karesel RTF	Maksimum SEA	+0,15	+30,00	+30,00	1237,2	1237,3	0,0	28,63	28,65	0,1	175,6	175,7	0,1
	Minimum IPCF	+5,42	+17,18	-10,12	532,0	535,1	0,6	16,27	15,56	4,4	70,0	66,9	4,4
İkinci derece PYY	Maksimum SEA	+4,49	+30,00	+27,55	1229,6	1238,7	0,7	27,04	28,05	3,8	165,8	172,0	3,8
	Minimum IPCF	*											
Üçüncü derece PYY	Maksimum SEA	+2,67	+30,00	+30,00	1235,9	1239,0	0,3	28,26	29,21	3,3	173,3	179,1	3,4
	Minimum IPCF	*											
Dördüncü derece PYY	Maksimum SEA	-7,94	-18,58	+0,39	1235,0	1232,2	0,2	27,62	26,96	2,4	169,4	165,3	2,4
	Minimum IPCF	+19,43	-2,84	+30,00	523,7	530,2	1,2	16,27	14,79	9,1	70,0	63,6	9,1

*Eniyileme algoritması, İkinci derece ve Üçüncü derece PYY modellerinde minimum IPCF sonucu oluşturmamıştır.

Çizelge Ek.19 : Konik açının eniyilemesi çalışmasının genişletilmiş sonuçları

Vekil Model	Amaç Fonksiyonu	α (°)	IPCF Eniyileme Sonucu (kN)	IPCF Analiz Sonucu (kN)	IPCF Hatası (%)	SEA Eniyileme Sonucu (kJ/kg)	SEA Analiz Sonucu (kJ/kg)	SEA Hatası (%)	EA Eniyileme Sonucu (kJ)	EA Analiz Sonucu (kJ)	EA Hatası (%)
İnce levha RTF	Maksimum SEA	2,78	1179,3	1180,8	0,1	29,74	29,62	0,4	169,7	169,0	0,4
	Minimum IPCF	0,33	552,3	549,6	0,5	16,45	16,18	1,6	70,0	69,0	1,5
Gauss RTF	Maksimum SEA	9,65	897,9	844,3	6,4	30,84	28,80	6,6	144,0	134,9	6,3
	Minimum IPCF	0,00	553,0	553,0	0,0	16,95	16,95	0,0	72,9	72,9	0,0
Çoklu karesel RTF	Maksimum SEA	2,77	1178,5	1180,4	0,2	29,75	29,64	0,4	169,8	169,2	0,4
	Minimum IPCF	0,27	546,6	550,6	0,7	16,37	16,21	1,0	70,0	69,2	1,2
İkinci derece PYY	Maksimum SEA	0,00	1247,5	1239,0	0,7	29,91	29,21	2,3	182,8	179,1	2,0
	Minimum IPCF	0,31	547,4	549,6	0,4	16,49	16,18	1,9	70,0	69,0	1,4
Üçüncü derece PYY	Maksimum SEA	0,89	1227,6	1221,0	0,5	29,45	29,32	0,4	176,4	175,8	0,4
	Minimum IPCF	0,35	547,9	549,2	0,2	16,45	16,12	2,0	70,0	68,7	1,9
Dördüncü derece PYY	Maksimum SEA	1,22	1219,6	1213,4	0,5	29,72	29,25	1,6	176,5	173,8	1,5
	Minimum IPCF	0,36	547,9	548,9	0,2	16,46	16,11	2,1	70,0	68,6	2,0

