

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**OTOMOBİL ÖN TAMPON KİRİŞİ TASARIMINDA ISIL İŞLEM**  
**GÖRMÜŞ MALZEMELERİN KULLANIMININ ÇARPIŞMA**  
**PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ ve KİRİŞLERİN**  
**OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BURAK SERCAN KAYA**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2021**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**OTOMOBİL ÖN TAMPON KİRİŞİ TASARIMINDA ISIL İŞLEM  
GÖRMÜŞ MALZEMELERİN KULLANIMININ ÇARPIŞMA  
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ ve KİRİŞLERİN  
OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BURAK SERCAN KAYA**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2021**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**BURAK SERCAN KAYA**

## ÖZET

**OTOMOBİL ÖN TAMPON KİRİŞİ TASARIMINDA ISIL İŞLEM  
GÖRMÜŞ MALZEMELERİN KULLANIMININ ÇARPIŞMA  
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ ve KİRİŞLERİN  
OPTİMİZASYONU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
BURAK SERCAN KAYA  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR ÜYESİ İSMAİL ÖZTÜRK)**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2021**

Bu tezde önden silindirik rigid bir duvarla çarpışmaya maruz kalan ısıtım işlem görmüş malzemelerden oluşan ön tampon kirişi ve çarpışma kutusunun enerji absorpsiyonu incelenmiştir. Bu amaçla lineer olmayan sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve Radioss yazılımı ile çözülmüştür. Deney tasarımı metodu ile yaklaşık tasarım fonksiyonları oluşturulmuş ve toplam ağırlığın minimizasyonu için boyut optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Optimizasyon problemi Hyperstudy yardımı ile çözümlenerek önden çarpışma için optimum sac kalınlığı bulunmuştur. Bu çalışma ile ayrıca tampon kirişi ve çarpışma kutusunda kullanılan malzemelerin ısıtım işlem görmemiş olanları ile ısıtım işlem görmüş olan malzemelerin performans karşılaştırılması ve doğru malzeme kullanımı için tampon sistemi içinde malzeme seçim kombinasyonları yapılmış ve en iyi çarpışma performansı sağlayan seçim elde edilmeye çalışılmıştır. Çarpışma analizleriyle, ısıtım işlem görmüş malzemenin, ısıtım işlem görmemiş olan malzemeye göre avantajları vurgulanmaya çalışılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Tampon kirişi, Çarpışma Kutusu, Alüminyum Alaşım Isıtım İşlem, Çarpışma Analizi

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE USE OF HEAT-TREATED MATERIALS ON CRASH PERFORMANCE IN AUTOMOBILE FRONT BUMPER BEAM DESIGN AND OPTIMIZATION OF THE BEAMS**

**MSC THESIS**

**BURAK SERCAN KAYA**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**AUTOMOTIVE ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. İSMAİL ÖZTÜRK)**

**DENİZLİ, SEPTEMBER 2021**

In this thesis, the energy absorption of the front bumper beam and the crash box, consisting of heat treated materials subjected to collision with a cylindrical rigid wall from the front, are examined. For this purpose, a non-linear finite element model was created and solved by Radioss software. Approximate design functions were created by the experimental design method and the size optimization problem was defined for the minimization of total weight. The optimization problem was solved with Hyperstudy and optimum sheet thickness was found for frontal collision. In this study, material selection combinations were made within the bumper system to compare the performance of the materials used in the bumper beam and crash box with the non-heat treated materials and to use the correct materials and to obtain the selection that provides the best collision performance. In the analysis experiment, the advantages of heat treated material over non-heat treated material were tried to be emphasized.

**KEYWORDS:** Bumper Beam Crash Analysis; Bumper Beam Optimization; Heat Treated Materials; Vehicle Crashworthiness

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Aktif Güvenlik Önlemleri .....	2
1.1.1 ABS (Kilit Önleyici Sistem) .....	2
1.1.2 ASR ( Çekiş Patinaj Kontrol Sistem) .....	3
1.1.3 ESP (Elektronik Dengeleme Sistemi).....	3
1.1.4 EPS (Elektronik Kontrollü Direksiyon Sistemi).....	3
1.1.5 AEB (Otonom Acil Frenleme).....	4
1.2 Pasif Güvenlik Önlemleri .....	4
1.2.1 Emniyet Kemerleri.....	5
1.2.2 Hava Yastıkları .....	6
1.2.3 Darbe Emiciler (Çarpışma Kutuları).....	7
1.3 Liretatür Bilgisi .....	9
<b>2. DİNAMİK ÇARPIŞMA ANALİZİ</b> .....	<b>13</b>
<b>3. TAMPON ÇARPIŞMA ANALİZİ</b> .....	<b>15</b>
<b>4. BOYUT OPTİMİZASYONU</b> .....	<b>24</b>
4.1 ARSM (Adaptive Response Surface Method: Adaptif Tepki Yüzey Yöntemi).....	28
4.2 GRSM (Global Responce Search Method: Genel Yanıt Arama Yöntemi).....	29
4.3 SQP (Sequential Quadratic Programming: Sıralı Kuadratik Programlama) .....	30
4.4 MFD (Method of Feasible Directions: Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi).....	31
4.5 GA (Genetic Algorithm: Genetik Algoritma) .....	32
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>36</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>37</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>41</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Otomotiv Güvenlik Sistemleri .....	2
Şekil 1.2: Sürücü Emniyet Kemerini .....	5
Şekil 1.3: Arka Yolcu Emniyet Kemerini .....	6
Şekil 1.4: Araç İçi Hava Yastıkları .....	7
Şekil 1.5: Darbe Emiciler (Çarpışma Kutuları).....	7
Şekil 3.1: Çarpışma Modeli. ....	15
Şekil 3.2: Tek malzeme kullanılan tampon sistemleri. ....	16
Şekil 3.3: Malzeme Kombinasyonları Yapılmış Hibrit Tampon Sistemleri .....	17
Şekil 3.4: Tampon Kirişli ve Çarpışma Kutularının Sonlu Elemanlar Modeli ..	18
Şekil 3.5: Tek Malzeme Kullanılmış Tampon Sistemlerinin Enerji Absorbe Etme Grafiği.....	18
Şekil 3.6: Isıl İşlem Görmemiş Malzemenin Test Görselleri.....	19
Şekil 3.7: Hibrit Tampon Sistemlerinin Enerji Absorbe Etme Grafiği.....	20
Şekil 3.8: AA6063 Kullanılan Tampon Kirişli Kopma Görselleri.....	21
Şekil 3.9: AA6063-T5 Tampon Kirişli, AA6063 Çarpışma kutuları Olan Hibrit Tampon Sisteminin Çarpışma Testindeki Farklı Zaman Aralıklarındaki Görselleri. ....	22
Şekil 3.10: Tampon Sisteminde Oluşan Plastik Deformasyon ve Değerleri .....	22
Şekil 3.11: Maximum Tepki Kuvveti Değişimi .....	23
Şekil 4.1: Optimizasyon Süreç Şeması .....	26
Şekil 4.2: Adaptif Yanıt Yüzey Yöntemi Süreç Aşamaları .....	29
Şekil 4.3: Genel Yanıt Yüzey Yöntemi Süreç Aşamaları .....	30
Şekil 4.4: Sıralı Kuadratik Programlama Süreç Aşamaları.....	31
Şekil 4.5: Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi Süreç Aşamaları.....	32
Şekil 4.6: Genetik Algoritma Yöntemi Süreç Aşamaları.....	33

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 3.1: AA6063, AA6063-T5 ve AA6063-T6 için Johnson Cook değerleri	16
Tablo 3.2: AA6063, AA6063-T5 ve AA6063-T6 için Parametreler .....	16
Tablo 3.3: Hibrit Tampon Sistemlerinin Açıklamaları ve Enerji Absorbe Etme Değerleri.....	20
Tablo 4.1: Hyperstudy Hesaplama Sonuçları.....	27
Tablo 4.2: Algoritmaların Problem Çözümü için Verdiği En İyi Değerler .....	34



## SEMBOL LİSTESİ

<b>ABS</b>	:	Kilit Önleyici Sistem
<b>ASR</b>	:	Çekiş Patinaj Kontrol Sistem
<b>ESP</b>	:	Elektronik Dengeleme Sistemi
<b>EPS</b>	:	Elektronik Kontrollü Direksiyon Sistemi
<b>AEB</b>	:	Otonom Acil Frenleme
<b>FGF</b>	:	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Köpük
<b>SAE</b>	:	Spesifik Enerji Değeri
<b>NCAP</b>	:	Avrupa Yeni Araba Değerlendirme Programı
<b>AA</b>	:	Alüminyum Alaşım
<b>M</b>	:	Kütle Matrisi
<b>ü</b>	:	İvme
<b>I</b>	:	Eleman İç Kuvvetleri
<b><math>\Delta t</math></b>	:	Zaman Artım Değeri
<b>t</b>	:	Zaman
<b>L</b>	:	Sonlu Elemanlar Modeli İçindeki En Küçük Eleman Uzunluğu
<b>E</b>	:	Malzemenin Elastisite Modülü
<b>c</b>	:	Malzeme İçindeki Ses Hızı
<b><math>\rho</math></b>	:	Yoğunluk
<b>T5</b>	:	Sıcak Şekillendirme İşleminde Sonra Soğutulmuş ve Suni Yaşlandırma Yapılmış Metal Isıl İşlemi
<b>T6</b>	:	Çözeltiyeye Alma İşlemi Yapılmış ve Suni Yaşlandırma Yapılmış Metal Isıl İşlemi
<b>n</b>	:	Pekleşme Üsteli
<b>m</b>	:	Poission Oranı

<b>a</b>	:	Akma Gerilmesi
<b>b</b>	:	Gerinim Sertleşme Katsayısı
<b>ms</b>	:	Milisaniye
<b>J</b>	:	Joule
<b>ARSM</b>	:	Adaptif Tepki Yüzey Yöntemi
<b>GRSM</b>	:	Genel Yanıt Arama Yöntemi
<b>SQP</b>	:	Sıralı Kuadratik Programlama
<b>GA</b>	:	Genetik Algoritma
<b>MFD</b>	:	Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgilerini benimle paylaşan, güler yüzünü ve değerli vakitlerini benden esirgemeyen, gelecekteki meslek hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağım saygıdeğer danışman hocam Sayın . Dr. Öğr. Üyesi İsmail ÖZTÜRK' e en içten teşekkürlerimi sunarım.

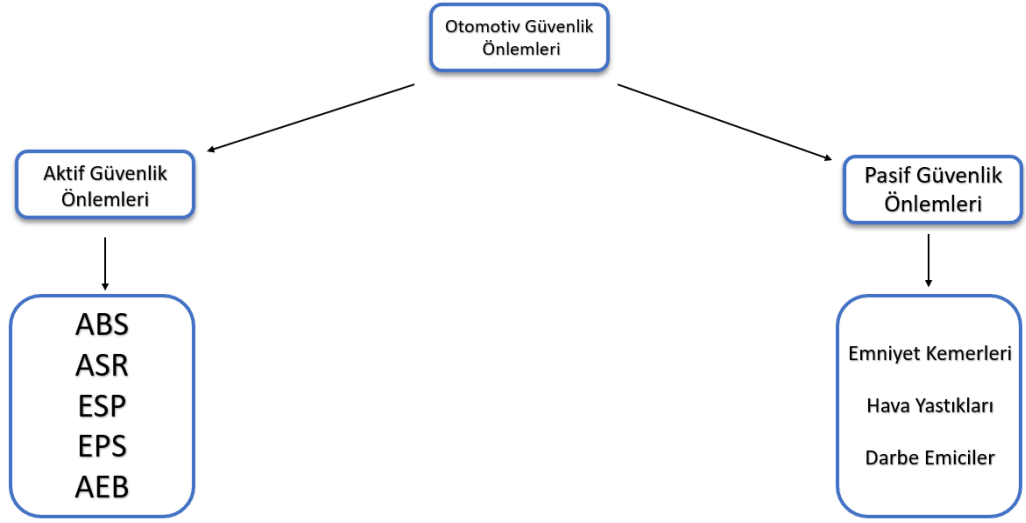
Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de her aşamasında bana yardımcı olan, sevgili eşim Duygu KAYA'ya sonsuz teşekkür ederim.

BURAK SERCAN KAYA

# 1. GİRİŞ

Ulaşımın vazgeçilmezlerinden olan otomobiller farklı sebeplerden dolayı kendi aralarında ya da diğer nesnelere etkileşimde bulunmakta ve kazalar meydana gelmektedir. Bu kazalar iki araç arasında , araç ile cansız nesne arasında ve araç ile yaya arasında olabilmektedir. Günümüzde birçok güvenlik teknolojisi geliştirilip kullanılıyor olsa bile bazen bu kazalar yine de gerçekleşebilmektedir. Kullanılan bu güvenlik önlemleri aktif ve pasif olarak iki ana başlıktan oluşmaktadır. Otomobilde bulunan güvenlik elemanları göz önüne alındığında; birincil amacı sürüş sırasında olası kazaların önlenmesi için geliştirilen aktif güvenlik sistemleri, araç güvenlik sistemlerinin bir basamağını oluştururken, diğer yandan ise aktif güvenlik sistemlerinin yeterli olmadığı ve kaçınılmaz kazaların olduğu durumlarda devreye giren pasif güvenlik sistemleri bir diğer basamağı oluşturur.

Kazanın meydana gelmesini önlemeye yönelik olarak kullanılan sistemler aktif güvenlik sistemi olarak adlandırılmaktadır. ABS (Kilit Önleyici Sistem), ASR (Çekiş Patinaj Kontrol Sistem), ESP (Elektronik Dengeleme Sistemi) gibi frenleme sistemleri, hız kontrolü ve sürücü uyarıcı sistemlerinin oluşturduğu gelişmiş sürücü yardım sistemleri aktif araç güvenlik sistemleri kapsamına girmektedir. Aktif güvenlik önlemleri, kazanın oluşmaması için , taşıt kontrolünü algılayan, frenleme performansını iyileştiren , kazadan olabildiğince kaçınmak için geliştirilen uyarı ve kontrol sistemlerini içerir. Pasif güvenlik önlemleri ise kaza anında sürücü ve araçta oluşabilecek hasarların en aza indirgenmesi için , araçta kullanılan parçaların malzeme ve tasarımsal yapısındaki iyileştirmelerdir. Bu iki ana başlık aşağıda detaylandırılmıştır (Arslan 2021).



Şekil 1.1 : Otomotiv Güvenlik Önlemleri Şeması

## 1.1 Aktif Güvenlik Önlemleri

Aktif güvenlik önlemleri kazanın meydana gelme olasılığını düşüren sistemlerdir, yani kaza anından öncesi ile ilgili sistemlerdir. Aktif güvenlik sistemleri, ABS, ASR, ESP, EPS ve AEB sistemlerinden oluşmaktadır.

### 1.1.1 ABS (Kilit Önleyici Sistem)

ABS'nin görevi, ani frenleme sırasında tekerleklerin kilitlemesini önlemektir. Bu sistem, ani frenleme sırasında oluşan tekerlek devri ile taşıt hızı arasında oluşan uyumsuzluk sebebi ile tekerleklerin bloke olmasını önler. Tüm frenleme şartlarında, sürücünün direksiyon hakimiyetini kaybetmeden ve taşıtın dengesi bozulmadan optimum frenleme sağlamış olur (Megep 2021).

### **1.1.2 ASR ( Çekiş Patinaj Kontrol Sistem)**

ASR sisteminin çalışma mekanizması, bir üst başlıkta detaylandırılan ABS sistemi ile çok benzerdir. ASR ve ABS sistemleri bütünleşik çalışır. Her ikisi de yol ile lastik arasındaki doğrusal kuvvetin sürtünme eşiğini aşmamasını ve tekerleklerin kayma yapmadan hareketlerine devam etmesine amaçlar. ABS sistemi frenleme sırasında devreye girer iken, ASR sistemi tam tersine ani kalkış ve hızlanmalarda devreye girer. ASR, tahrik tekerlerindeki algılayıcılardan edindiği patinaj uyarısı sonrası, öncelikle patinajı durdurmak için fren sistemi çalıştırılır ve moment düşürülür. Taşıtın hızlı kalkış esnasında patinaj yapması önlenmiş olur (Lexus 2021).

### **1.1.3 ESP (Elektronik Dengeleme Sistemi)**

ABS ve ASR güvenlik sistemleri taşıtın kalkışlarda ve frenlemelerde kazaya karşı güvenliğini arttırsa da, tüm yol ve sürüş şartlarında güvenliğin tam olarak sağlanması gerekmektedir. Yalnızca kalkış ve duruşlarda değil, taşıt hareket halindeyken de benzer bir güvenlik sisteminin devrede olması gerekir. Bu sistem kuşkusuz ESP sistemidir. ESP sürücünün hareketlerine göre taşıtın tepkisini ölçüp yönlendirmesini kontrol altında tutan bir sistemdir. ESP sistemi ile aracın istenmeyen şekilde kayması, savrulması gibi kontrol dışı hareketleri önlenmiş olur(Otorapor 2021).

### **1.1.4 EPS (Elektronik Kontrollü Direksiyon Sistemi)**

Hidrolik direksiyon sistemlerinden farklı olarak elektronik kontrollü bir servo motoru kullanan bu sistemde araç yön kontrolü için direksiyona uygulanan tork, direksiyon simit açısı, taşıt hızı gibi gerekli veriler elektronik kontrol ünitesinde (ECU) toplanır. Elektronik kontrol ünitesi bu verileri kontrol algoritmaları ile değerlendirir ve çıkış sinyali üreterek elektrik motorunun torkunu ayarlar. EPS sistemi yüksek sürüş hızlarında direksiyonu sertleştirerek, park manevralarında ise hafifleterek sürüş güvenliğini önemli oranda artırır (Honda 2021).

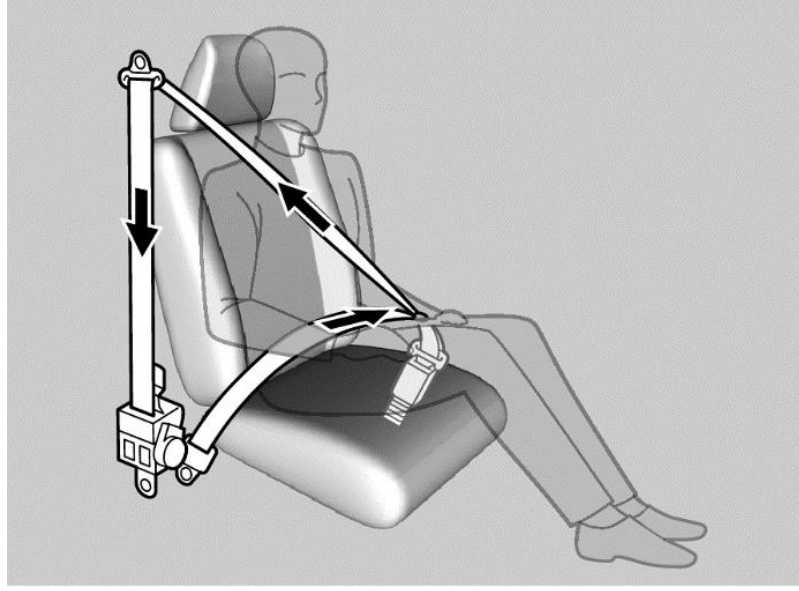
### **1.1.5 AEB (Otonom Acil Frenleme)**

Sürücünün yetersiz veya geç bir hamle ile frenleme yapması sebebiyle hava ve yol şartlarından kaynaklı veya diğer trafik unsurlarının hareketlerine bağlı olarak meydana gelen kazalara yönelik üreticiler ya tamamen kazayı önleyici ya da kaza şiddetini en aza indirmeye yardımcı olacak çeşitli teknolojiler geliştirmişlerdir. AEB sistemi bunlardan biridir, tehlikeli durumları önceden fark edip sürücüyü uyararak kazayı önlememeyi ve kaçınılmaz haldeki çarpışmalarda hasarı en aza indirmek için taşıtın çarpışma hızını düşürmeyi amaçlar (Euroncap 2021).

## **1.2 Pasif Güvenlik Önlemleri**

Pasif güvenlik sistemleri kaza anında ve kaza sonrasında yolcuların yaralanmalarını ve hayati risklerini en aza indirmek için tasarlanan güvenlik elemanlarıdır. Pasif güvenlik sistemleri, aktif güvenlik sistemlerinin kazayı önleyemediği durumlarda devreye girer. Pasif güvenlik sistemleri 1980'li yıllardan itibaren aktif güvenlik sistemlerinin yetersiz kalması sebebi ile kazalarda yaşanan ölüm ve yaralanmaları önlemek üzere geliştirilmeye başlanmıştır (Kılıç 2018).

### 1.2.1 Emniyet Kemerleri



Şekil 1.2 : Sürücü Emniyet Kemerleri (Hondacarindia 2016)

Emniyet kemerleri , sürücüyü önden çarpışma anında koruyan materyallerden biridir. Çarpışma anında yolcuların emniyet kemeri kullanmaması halinde, çok kısa zaman aralıklarında gerçekleşen kazalarda yolcuların ve sürücülerin çarpma hızlarını koruyarak, aracın ön göğüs kısmı olarak nitelendirilen bölüme, direksiyona ve aracın ön camına insan vücuduna zarar verecek şekilde çarpması muhtemeldir ve bu durum ölümcül etkiler taşımaktadır. Emniyet kemerleri, pasif güvenlik sistemlerinde en yaygın kullanıma sahiptir. Bu kemerler, çarpışma esnasında yolcunun oturma pozisyonunda en az zarar göreceği bölgeden yolcuyu sarak, çarpışma etkisinin en az şekilde yolcuya iletilmesini sağlar. Emniyet kemeri yolcuyu sarması nedeniyle, yolcuların çarpışma anında koltuklarında ayrılıp, kafa ve omurilik yaralanmalarına karşı önleyici role sahiptir.





**Şekil 1.3** : Arka Yolcu Emniyet Kemerleri(Aydinlik 2016)

### **1.2.2 Hava Yastıkları**

Hava yastıklarının temel görevi, seyir esnasında yaşanan çeşitli taşıt kazalarında taşıt içerisindeki yolcuların vücutlarını darbe, ezilme, saplanma vb. zararlardan ve olumsuz etkilerden korumaktır. Ani gelişen kazalarda taşıt içerisindeki yolcuların maruz kaldığı yüksek tonajlı darbe kuvvetleri ölümcül etkiye sahiptir ve hava yastıkları tarafından absorbe edilir. Hava yastıklarında 1968 yılında gaz kaynağı olarak geliştirilen sodyum azid içeren tüpler kullanılmaktadır. Darbe sensörü belirli bir hızın üzerindeki (genellikle 20-25 km/h) kazalarda anında çarpmayı algılar ve aracın hava yastığı tüpüne bir uyarı gönderir. Hava yastığı tüpü içerisinde bulunan sodyum azid sinyalle oluşan küçük kıvılcımla çözünür ve ardından azot gazı yastıkları şişirir. Hava yastıkları temelde ; ince naylon yastık, şişirme ünitesi ve darbe sensörlerinden oluşur. Günümüz teknolojisindeki araçlarda sürücü ve yolcular için birkaç türde hava yastığı kullanılmaktadır. Direksiyon simidinin hemen altında konumlandırılmış olan sürücü hava yastığı, ön torpido üzerinde konumlandırılmış olan yolcu hava yastığı, koltuk başlarının yanında bulunan yan darbe hava yastığı ve diğer birkaç farklı türde hava yastığı kullanılmaktadır.



**Şekil 1.4 :**Araç İçi Hava Yastıkları , (Heeycar 2021)

Pasif güvenlik sistemlerinden olan hava yastığı ve emniyet kemerleri , yolcu güvenliğini artırmak amacıyla birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Emniyet kemerlerinin, hava yastığı sistemleriyle birlikte kullanılmasıyla araç içerisindeki yolcuların güvenlik seviyeleri de üst düzeye çıkarılmıştır. Bu iki sistemin aynı anda bir arada kullanılıyor olması, yapılan araştırmaların neticesinde, kaza anında oluşabilecek ölümcül etkileri %61 oranında azaldığını göstermektedir (Bean ve diğ. 2009).

### **1.2.3 Darbe Emiciler (Çarpışma Kutuları)**

Darbe emiciler taşıtların ön tamponlarında yer alırlar ve kaza anında darbe emiciler taşıta olabildiğince düzgün bir yavaşlama ivmesi sağlamalıdır. Günümüzde üretilen darbe emiciler eskinin ağır gövdeleri yerine uzay kafes sistemine göre tasarlanan yüksek dayanımlı profillerden oluşmaktadır. Ön tampon yapı elemanları, yolcuların hayati tehlikesini önlemeye yönelik olarak taşıt çarpışma kuvvetlerini yolcu kabineye ulaşmadan büyük ölçüde sönmüleyecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu tasarımlar darbe emicilerin kesitleri, ön tampon şaşıye bağlanma biçimleri, sac kalınlıkları gibi faktörlere bağlıdır ve özellikle boyuna uzanan darbe emici parçaları akordion biçiminde deforme olarak enerji absorbe etmek üzere tasarlanmaktadır.



**Darbe Emiciler (Çarpışma Kutuları)**

**Şekil 1.5 :** Darbe Emiciler (Çarpışma Kutuları), (Candemir 2020)

Darbe emiciler (Çarpışma Kutuları), araçlarda farklı konumlarda kullanılmaktadır, kapı panellerinin iç kısımlarında, A ve B sütunlarında, arka tamponun iç kısımlarında ve otomobillerin ön tarafında tampon sistemi olarak adlandırılan bölgede tampon ve şasi arasında yer almaktadır. Kaza araştırmaları istatistikle göre meydana gelen kazaların büyük bir çoğunluğu otomobillerin önden çarpışmaya maruz kaldığını gösterdiğinden, otomobillerin ön bölümünde konumlandırılan çarpışma kutuları yolcu güvenliği açısından çok daha büyük bir role sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle araştırmalar, otomobilin ön bölümünde bulunan darbe emiciler (Çarpışma Kutuları) üzerinde yoğunlaşmıştır.

Darbe emiciler (Çarpışma Kutuları), otomobillerin ön kısmından, yan kısımlardan A ve B sütunlarından ve arka kısımdan çarpışma gerçekleşmesi sonucunda açığa çıkan kinetik enerjiyi, lokal burkulmalar sonucu akordion görevi görüp, kendi üzerlerine katlanması ile şekil değiştirme enerjisine dönüştürmektedir. Bu nedenle yolcularda ve sürücülerde oluşabilecek zararları çarpışma enerjisini sönmüleyerek en aza indirmeye görevine sahiptir.

### 1.3 Literatür Bilgisi

Artan taşıt sayısı ile birlikte ölümlü ve yaralanmalı kazalardaki yüksek hızlı artış güvenliği önem derecesinde ilk sıralara yükseltmiştir. Daha güvenli araçların tasarlanıp dizayn edilmesi keyfi bir durum olmaktan çıkıp zorunluluk haline gelmiştir. Bu doğrultuda günümüzde, özellikle taşıtların ve darbe sönümleme parçalarının çarpışma performanslarını belirlemek ve iyileştirmek için otomotiv firmalarında ve otomotiv üzerine çalışmalar yapan araştırma merkezlerinde çarpışma analizleri ile ilgili etkili çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, çarpışma esnasında meydana çıkan enerjinin sürücü ve yolculara minimum zarara uğrayacak şekilde yapı tarafından sönümlenmesini sağlayacak optimum tasarımları gerçekleştirmektir.

Bu çalışmada , araçların önden çarpışması durumunda çarpışma enerjisini emerek deformasyonun sürücü ve yolcu bölgesine ilerlemesini azaltan pasif güvenlik sistemlerinden, tampon kirişi ve arkasında bulunan çarpışma kutusu analizi ve optimizasyonu yapılmıştır. Tampon ve darbe emiciler Catia yazılımında modellenmiş, Hypermesh yazılımında sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve Radioss yazılımında dinamik çarpma testleri yapılmıştır. Boyut optimizasyonu için Hyperstudy yazılımında deney tasarımı metodu ile optimizasyon modeli oluşturulup çözdürülmüştür.

Aracın önden çarpışması sonucunda önündeki deformasyonun iç bölgelere , yolcu kabinine doğru ilerlemesi istenmeyen bir durumdur. Bu tür kazalarda aracın kinetik enerjisinin dengeli ve sürekli bir biçimde sönümlenmesi ile atalet etkileri azalır ve yolcu kabinine ilerleyebilecek deformasyonlar engellenmektedir. Çarpışma esnasında oluşan bu enerjinin önemli bir miktarını , tampon kirişinin arkasında yer alan çarpışma kutuları absorbe etmektedir. Çarpışma kutuları, aracın sahip olduğu kinetik enerjiyi, plastik deformasyona uğrayarak önemli oranda sönümler. Çarpışma kutularının, enerji sönümleme özelliğine önem verilerek tasarlanmaları sonucunda, çarpışma esnasında akordion gibi katlanarak olumsuz etkileri indirgemektedir. Önden çarpışma esnasında ilk darbeyi alan tampon kirişinden sonra çarpışma kutuları üzerinde belli bir kısmı absorbe edilir. Bu enerji absorpsiyonu , çarpışma kutularının katlanarak plastik deformasyona uğraması sonucunda meydana gelir.

Darbe emiciler (Çarpışma Kutuları), çarpışma esnasında çarpışma performansını etkileyen burkulma davranışı önemli bir parametre olmasından dolayı çarpışma kutularının geometrik tasarımları, çarpışma sonrasında lokal burkulmaların oluşabileceği şekilde dizayn edilmiştir. Çarpışma kutularının geometrik tasarımı için yapılan çalışmalar arasında enerji yutucunun kesit geometrisinin çarpışma performansına olan etkilerinin de incelenmesi yer almaktadır ( Alghamdi 2001). Bu çalışmada , çarpışma kutuları silindirik çarpışma kutuları, konik çarpışma kutuları, çokgen çarpışma kutuları ve diğer şekildedeki çarpışma kutuları şeklinde sınıflandırmıştır , darbe öncesi darbe sonrası durumları incelenmiştir.

Yapılan bu çalışmada, çarpışma performans kriterleri ele alındığında altıgen kesitli olan çarpışma kutuları daha yüksek performans sergiledikleri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çarpışma kutuları için yapılan çalışmalarda genellikle, dairesel kesitli ve kare kesitli olan çarpışma kutuları bulunmaktadır. Bunun en nedenleri ise otomobillerde kullanılacak olan bu parçaların imalatı için daha hızlı ve ucuz bir metot olan ekstrüzyon yöntemi ile bu parçaların üretilmesidir. Fakat güvenlik standartlarının günden güne artması ve taşıtlardaki güvenlik beklentilerinin çoğalması ile birlikte soğuk şekil verme yöntemi sayesinde üretilen farklı kesitlerdeki çarpışma kutularının kullanımının arttığı da gözlemlenmiştir.

Tampon ve çarpışma kutularının sönümlenme özellikleri dikkate alınıp tasarlandığı takdirde, çarpışmadan doğacak olumsuz etkiler minimuma indirgenir. Önden çarpışma sırasında ilk darbeyi alan tampon ve daha sonra çarpışma kutuları üzerinde enerjinin belli bir kısmının absorpsiyonu sağlanır. Enerjinin absorbe edilmesi, darbe emicilerin katlanarak plastik deformasyona uğraması sayesinde gerçekleşir. İlk çarpışma sırasında tampon deforme olup belirli bir miktar enerjiyi absorbe eder ve hemen ardından çarpışma kutuları deformasyona uğramaya başlar, eksenel yönde gelen tepki kuvveti en yüksek değerine ulaşır, daha sonra tepki kuvvetleri ortalama bir değer etrafında salınmaya başlar. Bu sırada tasarlanan çarpışma kutularının yapısı yerel burkulmalar ile iç içe katlanarak kısalır (Nakazawa ve diğ. 2005).

Çarpışma sırasında enerji absorpsiyon miktarını artırmak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır fakat bu çalışmalar ağırlığı azaltmak için yapılan tasarımlar ve kompozit malzeme kullanımı ile ilgilidir.

Alüminyum alaşım malzemeden oluşan bir tampon kirişinin, içi boş ve içi alüminyum fonksiyonel derecelenmiş köpük (FGF) ile doldurulmuştur , hem bileşen hem de tam araç seviyesinde darbe testleri yapılmıştır , çalışmanın optimizasyon amacı olarak spesifik enerji dikkate (SAE) alınarak, tepe darbe kuvveti ve duvar kalınlığını iyileştirme çalışmaları yapılmıştır (Xiao ve diğ. 2015). Tampon kirişi ve çarpışma kutusu tasarımında, Avrupa yeni araba değerlendirme programı (Euro NCAP) çarpışma testi baz alınarak testler gerçekleştirilmiştir ve daha iyi performans elde etmek için tampon sisteminden tasarımsal iyileştirme yapılmıştır. Test hesaplama süresini azaltmak için tüm araç gövdesinin davranışları taklit edilmiştir. Çarpışma kutusunun sac kalınlığının artırılması daha iyi çarpışma performansı göstermesinde etkilidir fakat ağırlığında artmasına sebep olmaktadır. Dairesel kesitli çarpışma kutularının daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Tanlak 2014).

Tampon sisteminde, geçmişten günümüze kadar farklı malzemeler kullanılmış. Alaşımların son zamanlarda kullanımı önemli oranda artmıştır. Alüminyum alaşımlar geleneksel çeliklere göre daha hafif ve daha iyi darbe etkisine sahiptir. Tampon kirişi ve çarpışma kutularında, tasarımın değişmesi, iç omurga eklenmesi, çarpışma esnasında enerji absorbe etmesinde, önemli iyileşmeler göstermektedir. Geleneksel çelik kullanımı yerine, alüminyum alaşım kullanıp tampon sistemini tasarlamak ve

optimum et kalınlığını optimize etmek, tampon sisteminde % 25'e kadar hafifletme meydana getirebilir (Dengfeng ve diğ. 2017).

Alüminyum alaşımdan imal edilmiş kare kesitli çarpışma kutularının yük altındaki davranışını incelemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Hem statik hem de dinamik olarak test edilen numuneler için temel değişkenler et kalınlığı ve çarpışma hızı olarak seçilmiş olup dinamik testlerde, 8-20 m/s aralığında değişen hızlara sahip 56 kg kütleli ağırlık kullanılmıştır. Dinamik testler sonucunda darbe enerjisi ile kalıcı eksenel yer değiştirme arasında neredeyse doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Bu deneyde 2,5 mm et kalınlığında sadece simetrik deformasyon biçimleri gözlemi yapılırken daha az et kalınlıklarında simetrik ya da simetrik ve asimetrik kombinasyonu modlar da gözlemlenmiştir. Enerji emiliminin simetrik olduğu durumlarda daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu emilim ezilme sırasında meydana gelen katlanmanın simetrik ya da asimetrik oluşu ile doğrudan alakalıdır (Langseth ve diğ. 1996).

Geleneksel tasarımlardan daha iyi enerji absorbe yeteneğine sahip tasarımlar ile tampon kirişi ve çarpışma kutusu darbe analizleri yapılmış ve avantajları belirtilmiştir. Bal peteği tasarımına sahip AA3003-H18 alaşımdan oluşturulmuş tampon kirişi kullanılmış ve geleneksel tasarıma göre üstünlüğu vurgulanmıştır (Acar ve diğ. 2020). Üç homojen sac metal kiriş (AA6061-T6, AA2024-T351, ve DP 800) ve bu malzemelerin farklı kombinasyonlarının punta kaynağıyla birleştirilmesiyle tasarlanmış altı hibrit sac metal kirişin çarpışma performansı karşılaştırılmıştır. Kirişlerin spesifik enerji absorpsiyon (SEA) ve tepe ezilme kuvveti (PCF) değerleri Euro NCAP tam genişlik rijit bariyer test simülasyonları ile karşılaştırılmış ve seçilen hibrit kirişin tek ve çok amaçlı optimizasyon çalışmaları yapılmıştır (Öztürk 2020). Alüminyum alaşım ve çelik malzemenin kombinasyonları kullanılan çarpışma kutularının, Euro NCAP önden çarpışma testleri sırasında, katlanma davranışları, plastik deformasyonları ve enerji absorbe etme performansları sonlu elemanlar metodu kullanılarak iyileştirme çalışması yapılmıştır (Estrada ve diğ. 2017).

Diğer araştırmacıların yaptığı çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada aşığındaki hususlar dikkate alınmış ve benzer çalışmalara katkıda bulunulmuştur;

-Tampon kirişi ve çarpışma kutularında, farklı ısıl işlem görmüş alüminyum malzemelerin kombinasyonu yapılmış ve enerji absorpsiyon yeteneklerini incelenmiştir.

-Isıl işlem görmüş ve görmemiş aynı alüminyum malzemelerin çarpışma performansları karşılaştırılmıştır.

-Rigid silindirik bir duvar ile 10 m/s hızla tampon kirişinin tam orta kısmından çarpışma gerçekleştirilmiş ve darbe performansı incelenmiştir.

-Tasarlanan tampon sisteminin optimizasyon amaç fonksiyonu , maximum hafifletme amacı ile optimum enerji absorpsiyonudur.

Çarpışma esnasında tampon kirişi ve çarpışma kutularının plastik deformasyonu sırasında oluşan tepki kuvvetinin yüksek olması, absorbe edilen enerji miktarının fazla olduğu anlamına gelmektedir, fakat çarpışmanın başında oluşan ilk tepki kuvvetinin yüksek olması, yolcu ve sürücüler için olumsuz etkiler doğurmaktadır. Bu yüzden ikincil darbeyi alan ve tampon sisteminin şaseye bağlantı noktası olan çarpışma kutularında daha sünek, katlanma yeteneği yüksek malzemeler seçilmektedir. Bu çalışmada, farklı ısıl işlemler görmüş ve ısıl işlem görmemiş alüminyum alaşım olan bir malzeme kullanılmış bir tampon sistemi içeren modeller çözülmüş, sonuçlar karşılaştırılmış ve boyut optimizasyonu ile optimum et kalınlığı değeri örnek çarpışma simülasyonu için bulunmuştur.

## 2. DİNAMİK ÇARPIŞMA ANALİZİ

Otomotiv endüstrisinde her alanda kullanılan ürünlerin geliştirme aşamalarında yoğun bir şekilde sonlu elemanlar metodu ve analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Birçok yazılım içinde kullanılan yöntemlerden biride dinamik çarpışma analizleridir. Bu yazılımlar çarpma analizleri için implisit (kapalı) ve eksplisit (açık) zaman entegrasyonu yöntemini kullanmaktadırlar.

$$M \ddot{u} = P - I \quad (2.1)$$

Burada;

P: dış kuvvetleri,

I: eleman iç kuvvetleri,

M: kütle matrisini,

$\ddot{u}$ : ivmeyi

İfade etmektedir. t zamanı anında ivme değeri;

$$\ddot{u}_{(t)} = (M)^{-1}(P - I)_{(t)} \quad (2.2)$$

Merkezi farklar yöntemi ile ivme, zaman alanında entegre edilerek hız büyüklüğü hesaplanır;

$$\dot{u}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{u}_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{\left(\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)}\right)}{2} \ddot{u}_{(t)} \quad (2.3)$$

Düğüm noktalarındaki yer değiştirme değerleri ise;

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \cdot \dot{u}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} \quad (2.4)$$

denklemleri ile hesaplanır.

İlk aşamada eşitliğin sağlanması ile ivmeler bulunur. İvmelerin bulunması ile sonraki adımlarda hız ve yer değiştirmeler hesaplanabilir. Hesaplanan değerlerin doğruluğu açısından zaman artım değeri ( $\Delta t$ )'nin oldukça küçük seçilmesi



gerekmektedir. Böylece küçük zaman artımları için ivme değerinin sabit olduğu kabul edilebilir. Zaman artım değeri ne kadar küçük alınırsa, çözüm süresi o kadar artar. Ancak her bir adımdaki çözüm işlemi için denklem takımı çözümü gerçekleştirilmez. Bu nedenle her bir adım için çözüm kısa sürer. Hesaplama süresi daha çok eleman kuvvetlerinin hesaplanmasına harcanır.

Zaman artım değerinin seçimi çözümün kararlılığı açısından ve daha hassas değerler almak için önemlidir. Bunun için aşağıdaki eşitlikten yararlanılır ve çoğunlukla yazılım tarafından belirlenir:

$$\Delta t_{\text{kararlı}} = L/c \quad (2.5)$$

L: sonlu elemanlar modeli içindeki en küçük eleman uzunluğu,

c: malzeme içindeki ses hızı.

Seçilen  $\Delta t$  değeri  $\Delta t$  kararlı değerinden küçük veya eşit olmalıdır. Burada c ses hızı malzemenin karakteristik bir özelliği olup;

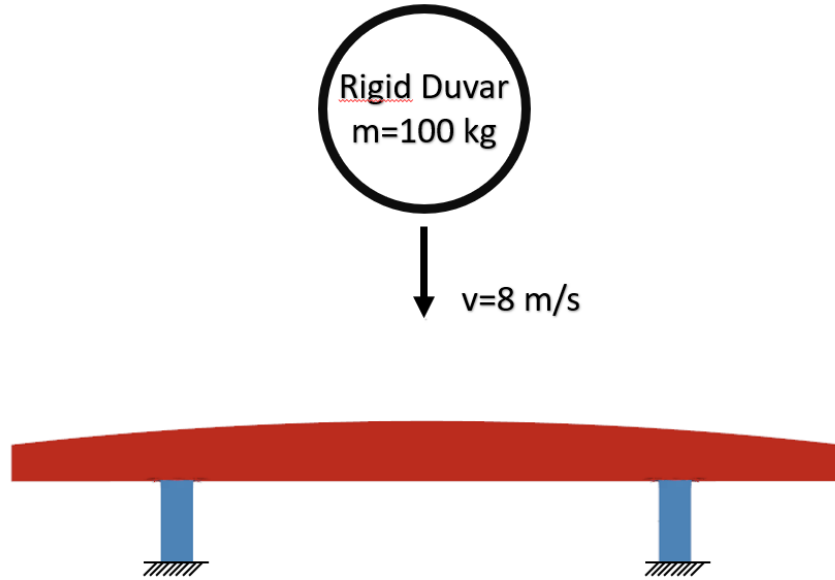
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

denklemleri ile hesaplanır (E: malzemenin elastisite modülü,  $\rho$ : yoğunluk)

Yer değiştirme değerlerinin hesaplanmasının ardından gerilme ve gerilme değerleri bulunur. Eleman iç kuvvetleri (I) bulunduğundan sonra  $t+\Delta t$  zaman artımı yapılır ve bir sonraki adım çözülür.

### 3. TAMPON ÇARPIŞMA ANALİZİ

Tampon kirişi ve çarpışma kutularının enerji absorpsiyon kapasitelerini hesaplamak amacı ile tampon kirişini oluşturan içyapı ve ona bağlı arkasındaki iki çarpışma kutusunun geometrisi yüzey olarak modellenmiştir. Sınır şartı olarak, çarpışma kutuları aracın gövdesine bağlı oldukları bölgeden sabitlenmiştir. Hareketli rigid silindir şeklindeki bir kütle modele belirli bir hızda çarptırılmıştır. Tampon kirişini ortalayacak şekilde çarpışma modeli oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Çarpışma modeli şartları için, tampon kirişinin tam orta noktasından, karşıdan gelen 8m/s hıza sahip rigid silindirik bir duvar, sac kalınlığı 2mm olan tampon sistemi modeline çarpması şeklinde ele alınmıştır. Şekil 3.1’de çarpışma modeli görülmektedir..



Şekil 3.1: Çarpışma Modeli

Modellenen tampon sisteminde kullanılan malzeme, otomotiv endüstrisinde sıklıkla tercih edilen AA6063 alaşımıdır. Bu alüminyum alaşımın 3 farklı biçimi ele alınmıştır. Isıl işlem görmemiş olan AA6063 ve farklı ısıl işlemlere maruz kalmış AA6063-T5, AA6063-T6 alaşımları seçilmiştir(T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış , T6: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış).Bu çalışmada kullanılan malzemelerin, Johnson Cook malzeme modeli ve hasar kriteri parametreleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir(Estrada ve diğ. 2019), (Varas ve diğ. 2009), (Juan ve diğ. 2020).

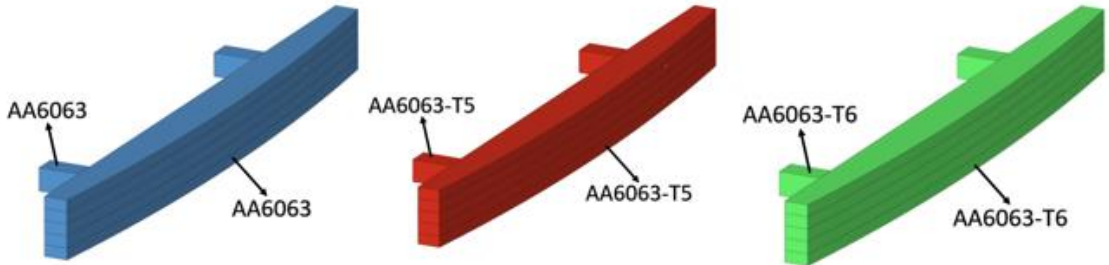
**Tablo 3.1:** AA6063, AA6063-T5 ve AA6063-T6 için Johnson Cook değerleri.

Malzeme Özellikleri	AA6063	AA6063-T5	AA6063-T6
Yoğunluk (ton/mm <sup>3</sup> )(q)ç	$2.7 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-9}$
Elastisite modülü (GPa) (E)	69	69	68.9
Poisson oranı (m)	0.3	0.33	0.33
Akma gerilmesi (MPa) [a]	60	176.45	261.2
Gerinim sertleşme katsayısı (MPa) [b]	260	63.99	126.8
Pekleşme üsteli [n]	0.43	0.07	0.301

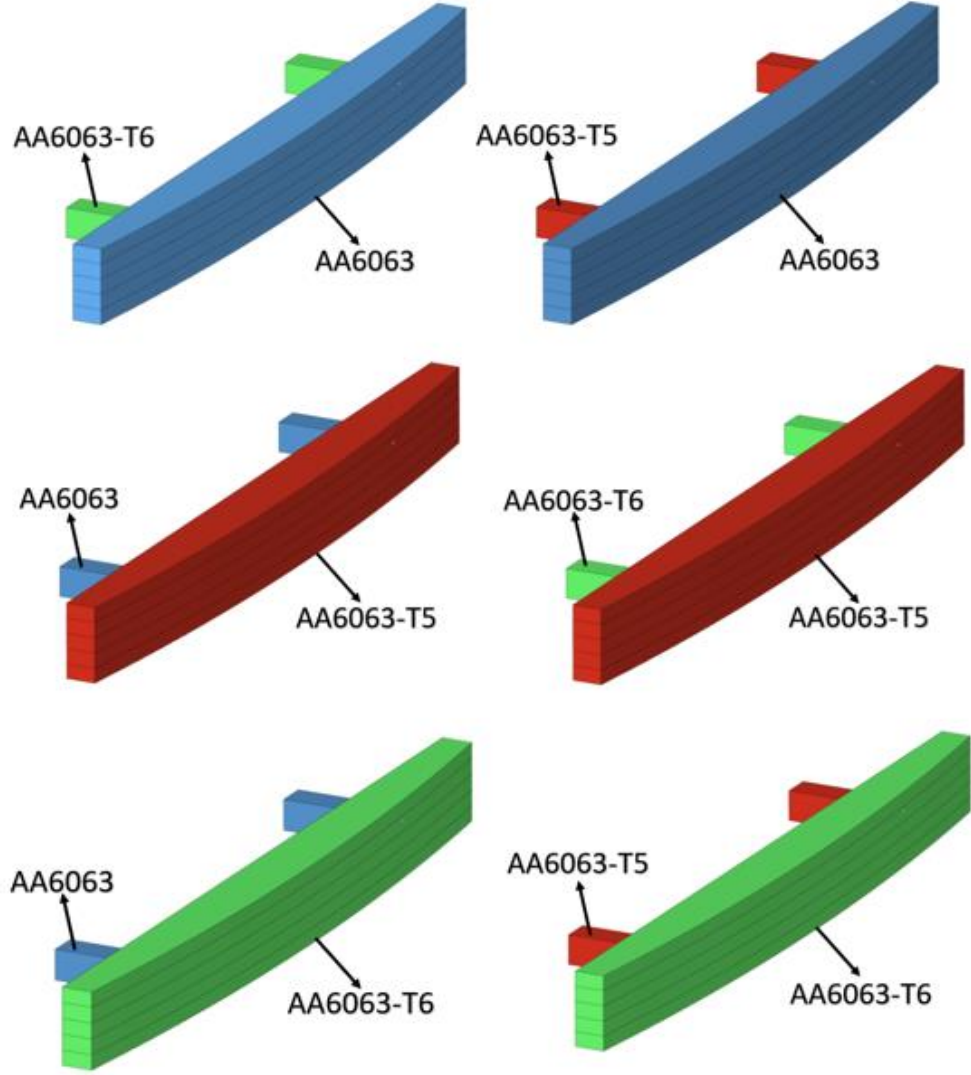
**Tablo 3.2:** AA6063, AA6063-T5 ve AA6063-T6 için Parametreler

Failure Değerleri	AA6063	AA6063-T5	AA6063-T6
D1	0.074	0.07413	-0.77
D2	0.89	0.0892	1.45
D3	-2.44	-2.441	-0.47

Isıl işlem görmüş malzemelerin kullanımının çarpışma performansına olan etkisini belirleyebilmek amacı ile aşağıda verilen Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te görsellenen malzeme kombinasyonları, tasarlanan tampon sistemi modeline uygulanmış ve aynı sınır şartlarında çözümlenerek sonuçlar elde edilmiştir.



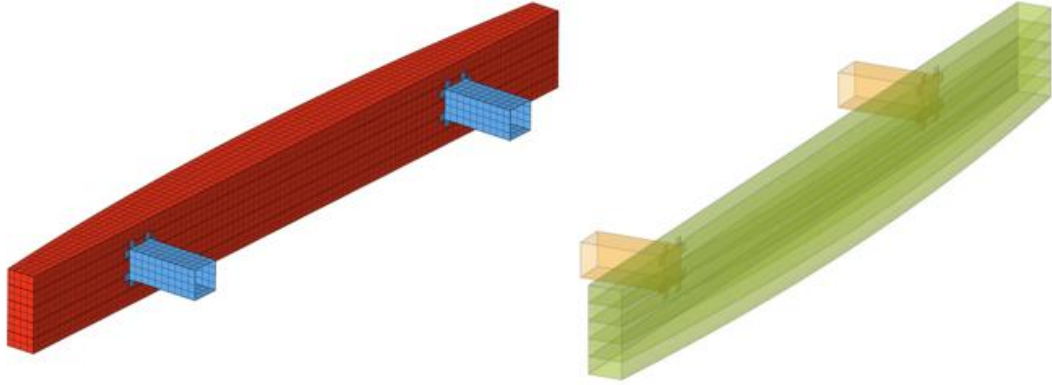
**Şekil 3.2:** Tek malzeme kullanılan tampon sistemleri.



Şekil 3.3: Malzeme Kombinasyonları Yapılmış Hibrit Tampon Sistemleri.

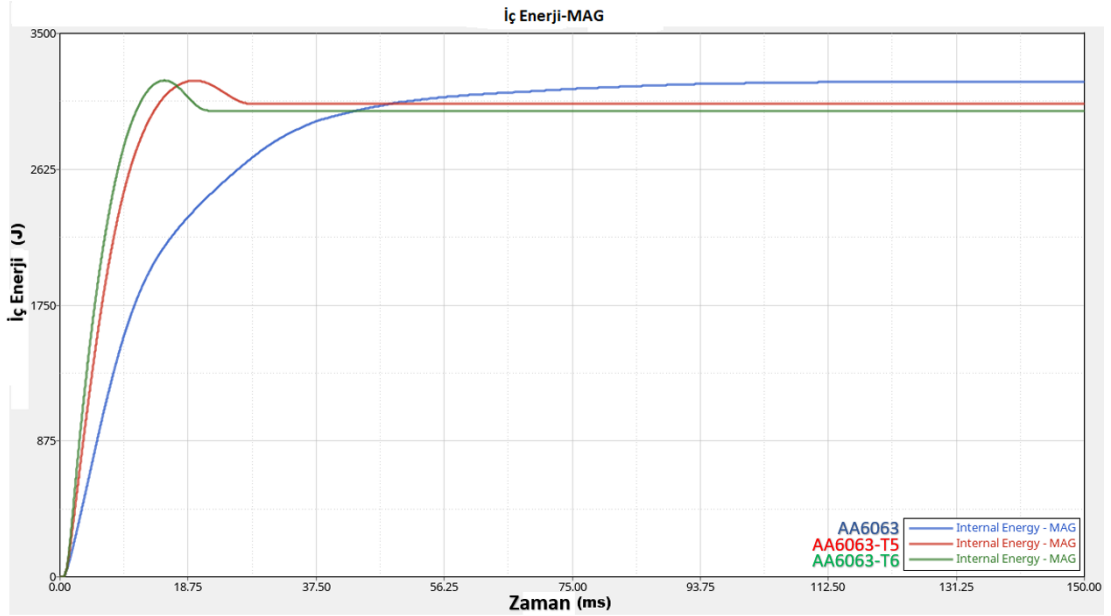
Tampon kirişi ve çarpışma kutularının modelleri, sac malzemeden belirli et kalınlıklarında yapıldığından geometrik modelleri Catia yazılımında yüzey olarak oluşturulmuştur ve geometriler Hypermesh ortamına transfer edilerek burada elemanlara ayırma ve sınır şartlarının verilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her bir çarpma modeli Radioss yazılımında çözdürülerek sonuçlar elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar modelinde toplam 5862 kabuk eleman ve 5475 düğüm noktası mevcuttur. Şekil 3.4'te sonlu elemanlar modeli görülmektedir. Her bir analiz için çözüm aralığı 150 milisaniye olarak belirlenmiştir. Toplam 150 ms için AMD 3.2 GHz, 8 GB RAM donanımında çözüm süresi yaklaşık 9 dakikadır.



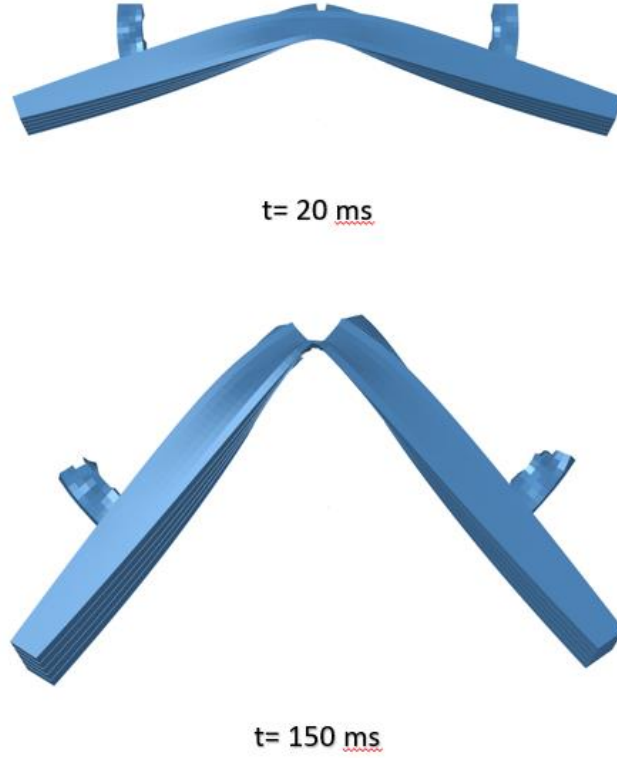
**Şekil 3.4 :** Tampon Kirişi ve Çarpışma Kutularının Sonlu Elemanlar Modeli

Tampon sistemi için, her biri 2mm sac kalınlığında olacak şekilde ayrı ayrı tek tip AA6063 alaşımı kullanılmış ve daha sonra AA6063 alaşımının kombinasyonları analiz için kullanılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 3.5'te tek malzeme kullanılmış tampon sistemlerinin enerji absorbe etme analiz değerlerinin grafikleri verilmiştir.



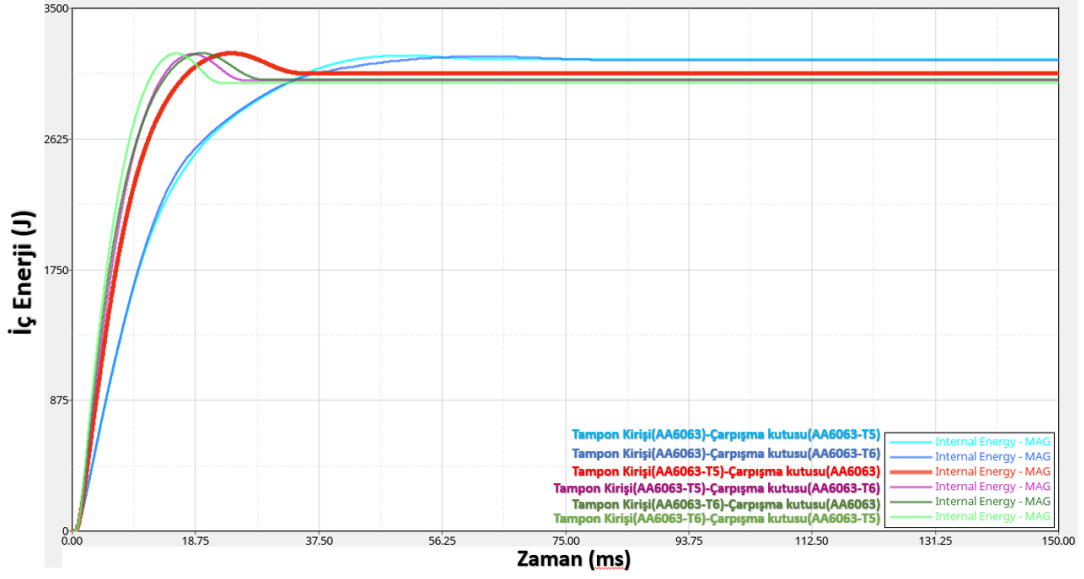
**Şekil 3.5 :** Tek Malzeme Kullanılmış Tampon Sistemlerinin Enerji Absorbe Etme Grafiği

Yukarıda verilen grafikte mavi (AA6063) renkli malzemenin  $t=150$  ms'de enerji absorbe ettiği değer 3188 joule'dür. Kırmızı (AA6063-T5) renkli malzemenin 3045 joule ve yeşil (AA6063-T6) malzemenin enerji absorbe ettiği değer 3002 joule'dür. Fakat AA6063 alaşımının ısı işlem görmemiş olması ve daha sünek bir malzeme olmasından kaynaklı olarak, çarpışma analizi sonucunda analizin başarısız olmasına ve tampon kirişinin kopmasına sebep olmuştur. Aşağıdaki Şekil 3.6 'da başarısız olan analiz sonucunun görseli bulunmaktadır.



**Şekil 3.6 :** Isıl İşlem Görmemiş Malzemenin Analiz Görselleri

Şekil 3.6'da AA6063 alaşımların kombinasyonları uyarlanmış hibrit tampon sistemlerinin enerji absorbe etme analiz grafik değerleri verilmiştir.



Şekil 3.7 : Hibrit Tampon Sistemlerinin Enerji Absorbe Etme Grafiği

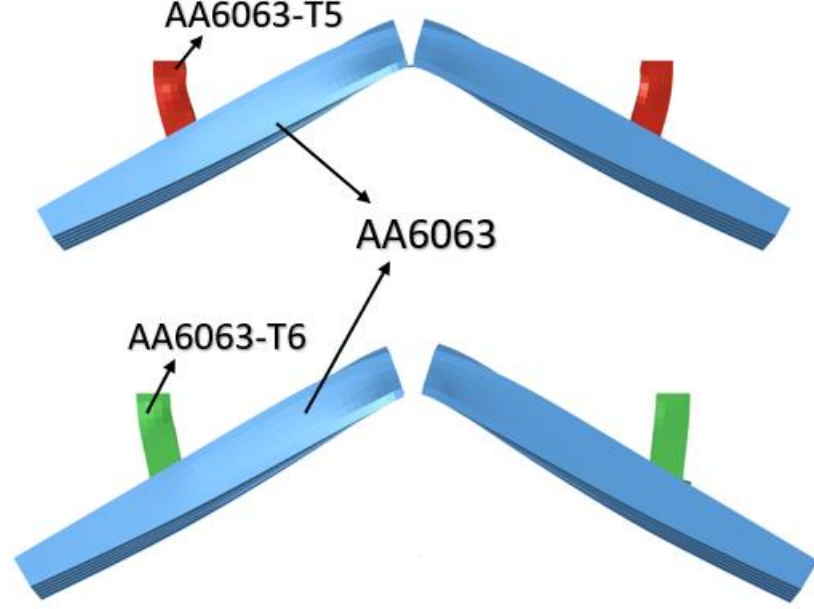
Yukarıdaki grafikte verilen renklerin açıklaması ve analiz sonucunda enerji absorbe ettiği değerler aşağıdaki Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 : Hibrit Tampon Sistemlerinin Açıklamaları ve Enerji Absorbe Etme Değerleri

Renk	Tampon Kirişi	Çarpışma Kutusu	Enerji Absorbe Etme Değeri (J)
Turkuaz	AA6063	AA6063-T5	3157 (Kopma Görüldü)
Mavi	AA6063	AA6063-T6	3154 (Kopma Görüldü)
Kırmızı	AA6063-T5	AA6063	3066
Pembe	AA6063-T5	AA6063-T6	3018
Koyu Yeşil	AA6063-T6	AA6063	3023
Açık Yeşil	AA6063-T6	AA6063-T5	3000

Tampon kirişinde ısıl işlem görmemiş AA6063 malzeme kullanılması durumunda enerji absorpsiyon değeri yüksek çıkmasına rağmen, çarpma analizi sonunda tampon kirişinde kopma meydana gelmektedir. Tampon kirişinin kopması, istenilen bir sonuç olmadığı için AA6063 malzeme kullanılan tampon kirişi çarpma

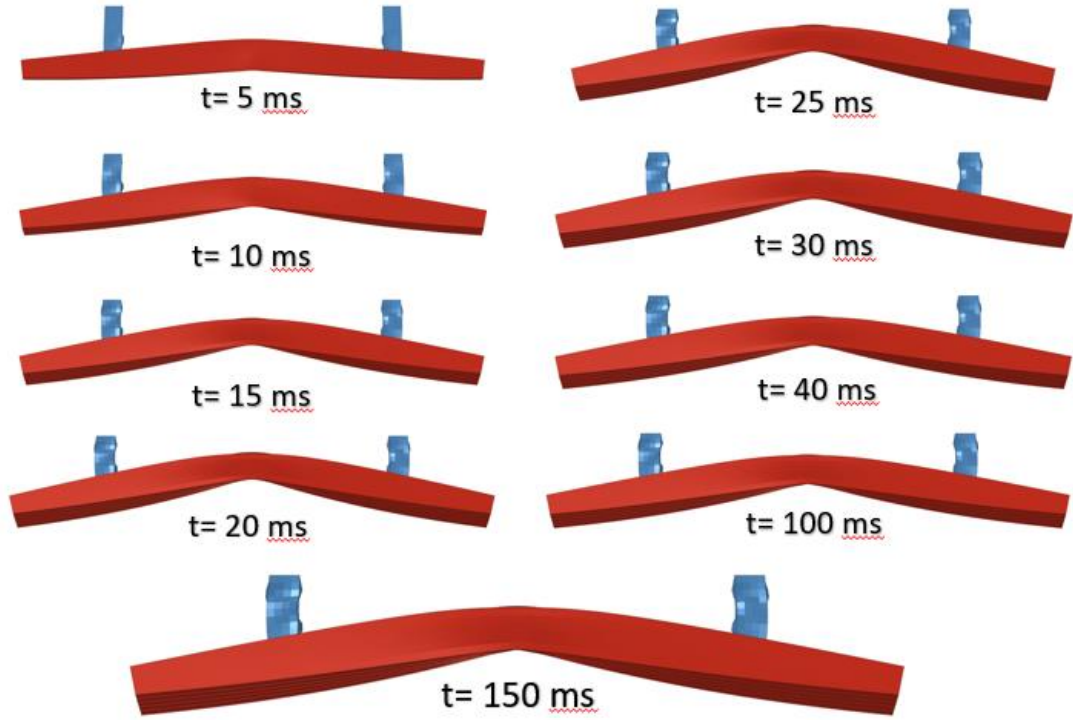
analizinde başarısız olmuştur. Şekil 3.8’de tampon kirişinin analiz anında kopma görselleri bulunmaktadır.



Şekil 3.8 : AA6063 Kullanılan Tampon Kirişi Kopma Görselleri

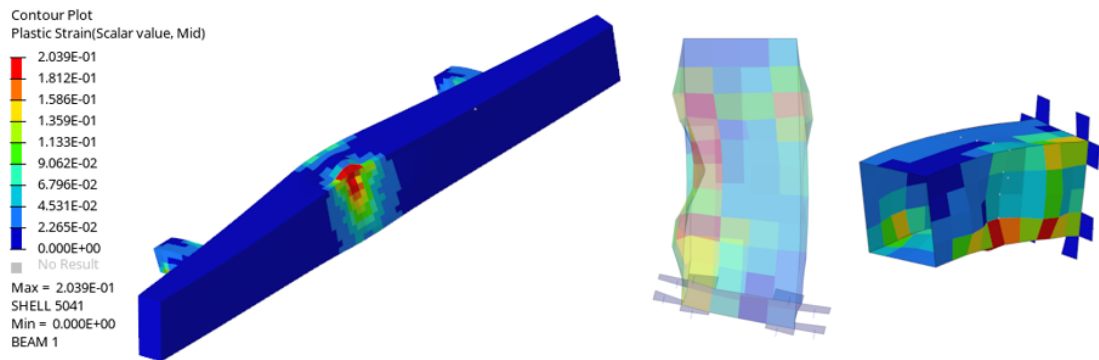
Tüm tampon sistemlerinin çarpışma analizi sonucunda, enerji absorbe etme performansları ve plastik deformasyonlarına bakıldığı zaman , tampon kirişinde AA6063-T5, çarpışma kutularında AA6063 kullanılan hibrit tampon sistemi en sağlıklı değeri göstermiştir. Bu hibrit tampon sisteminin en sağlıklı değeri göstermesinin nedenlerinden birkaçı , çarpışma kutularında daha sünek ve katlanabilen malzemelerin tercih edilmesi,diğer bir sebebi ise ısıtılmış olan AA6063-T5 alaşımının daha sert ve dayanıklı olmasıdır. En sağlıklı sonuçlar veren hibrit tampon sisteminin, analiz esnasında farklı zaman aralıklarındaki görselleri Şekil 3.9’de verilmiştir.





**Şekil 3.9 :** AA6063-T5 Tampon Kirişli, AA6063 Çarpışma kutuları Olan Hibrit Tampon Sisteminin Çarpışma Analizindeki Farklı Zaman Aralıklarındaki Görselleri

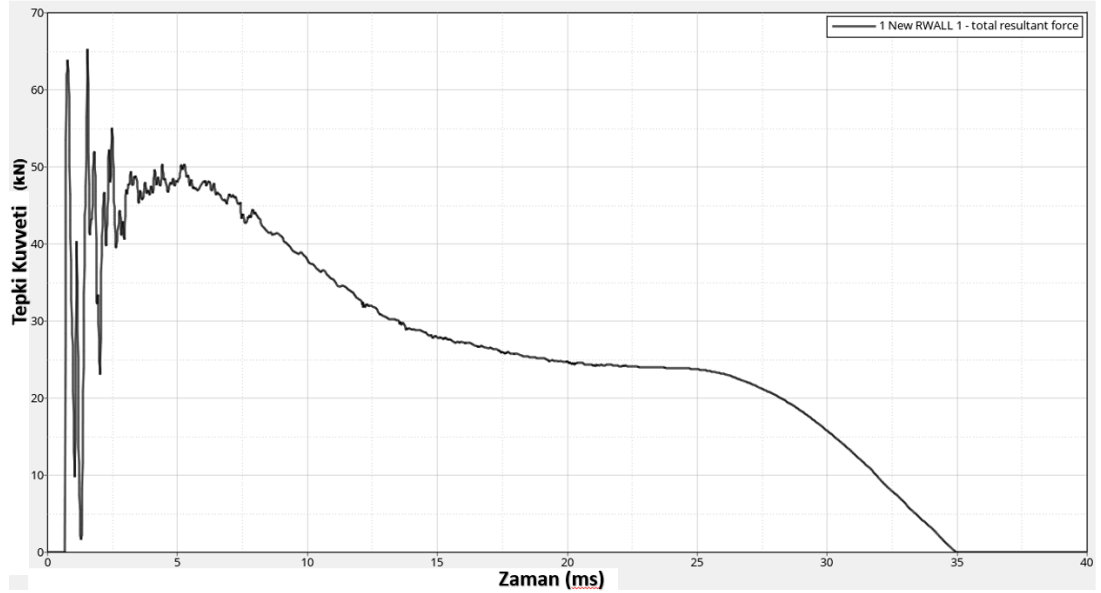
Şekil 3.10’da tampon kirişi ve çarpışma kutularında t=15. ms’de darbeye bağlı oluşan plastik deformasyon görünmektedir. Farklı zaman aralıklarında rigid duvarın tampon sistemi üzerinde etkisi de değişkenlik göstermektedir. Tampon kirişi ve çarpışma kutularında oluşan plastik deformasyonun görseli ve değerleri aşağıda verilmiştir.



t=15ms

**Şekil 3.10 :** Tampon Sisteminde Oluşan Plastik Deformasyon ve Değerleri

Çarpışma esnasında oluşan plastik deformasyon ile birlikte bir tepki kuvveti ortaya çıkmaktadır. Bu tepki kuvvetinin büyüklüğü çarpılan nesnenin malzemesinin sertliği ve boyutları ile doğru orantılıdır. Tampon sisteminde, tepki kuvvetinin oluşmasının en büyük nedeni malzemenin sertlik seviyesidir. Çarpışmadan dolayı araçta oluşan yüksek tepki kuvvetlerinin araç içindeki sürücü ve yolcular üzerinde olumsuz etkileri söz konusudur. Bu nedenle, bu tür kazalarda oluşan maksimum tepki kuvvetlerinin düşük olması istenilir. Ancak bu durum maksimum enerji absorpsiyonu isteği ile ters düşmektedir. Çünkü tepki kuvveti-zaman eğrisi altında kalan alan toplam absorbe edilen enerji değerini verir. Bu tür yapılarda istenilen tepki kuvvet değişimi, çok yüksek değerler yerine belirli bir ortalama kuvvet etrafında salınım gösteren eğri formudur. Ele alınan analizde, analiz süresi boyunca tepki kuvveti değişim grafiği Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 : Maximum Tepki Kuvveti Değişimi

Maksimum tepki kuvveti yaklaşık  $t=3$  ms civarında ve çarpışma kutularının yerel burkulmalara başladığı ana denk gelmektedir, değeri yaklaşık 65000 N'dur. Tepki kuvveti  $t=35$  ms'den sonra analiz sonuna kadar 0 (sıfır) N'dur. Bu makalede tüm araç modeli kullanılmamıştır, sadece tampon sistemi modellenmiştir. Tüm araç çarpışma modellerinde tepki kuvvetinin yanında insan iç organlarının belirli ivme değerlerine kadar dayanabildiği dikkate alınırsa, maksimum ivme değeri de güvenlik açısından düşünülmesi gereken diğer bir kriterdir.

## 4. BOYUT OPTİMİZASYONU

Sayısal çözüm, boyut optimizasyon yöntemlerinin temeli bilgisayar ve basit yöntemler çok eskiden de bilinmesine rağmen yaygın olarak kullanılmamıştır. Çünkü sayısal çözüm yöntemleri temelde yüksek matematik işlemlerini çok sayıda basit aritmetik işlemlere dönüştürür. Dolayısıyla sayısal çözümler çok sayıda basit aritmetik operasyonlar içermekte olup bu işlemlerin elle veya mekanik hesaplayıcılar kullanılarak yapılması çok zaman alıcı ve yorucu bir işlemdir. Dolayısıyla, bilgisayar alanındaki gelişmeler sayısal çözüm yöntemlerinin yaygınlaşmasını ve gelişmesini de beraberinde getirmiştir.

Mühendislik tasarımı iteratif bir işlemdir. Yapılan tasarım genelde analiz sonuçlarına göre değiştirilmek istenir. Bu değişiklikler kalınlık, yuvarlatma ve parçanın diğer boyutlarında yapılabilir. Fakat düzeltme işlemi elle yapıldığında çoğunlukla çok fazla insan gücü isteyen ve yanlış yapma ihtimali yüksek olan 15 çalışmalardır. Bu sebeple de bu tür hesaplamalar için bilgisayarda çalıştırılan döngüsel algoritmalar yazılmıştır. Yeniden tasarım süresi boyunca yapmak istediğimiz şey, tasarımın dayanım, rijitlik, kararlılık ve maliyet açısından en uygun hale getirilmesidir. Bu işleme optimizasyon denir. Optimum tasarımda, öngörülmüş gereksinimlere yanıt veren en uygun tasarımdır. Geçmişte çalışmaların büyük bölümü, sabit konfigürasyonlu modellerden ibaret olan yapısal optimizasyonda yapılmıştır. Klasik olarak, yapısal optimizasyon, geometride herhangi bir değişikliğe yol açmadan modelin et kalınlığı ve büyüklüklerinde ki değişikliklerle yapısal kütlenin azaltılması olarak düşünülmüştür. Bununla birlikte, tasarım işleminde, yapının geometrisinde değişiklik yapmayla da kütlenin azaltılabileceği fark edilmiştir. Bu düşünce, tasarımda kalınlığın sadece tek tasarım değişkeni olup, bu kalınlığın gerekli en ince sınıra gelmesi ya da üretim işlemi için zorunlu olan boyut sınırına ulaştığından dolayı kütle azaltılmasının daha fazla yapılamadığı durumlar halinde oldukça çekici görünmüştür. Bahsedilen işlem, dış sınırları veya sınır ve dâhili kesim yerlerini karakterize eden değişkenleri tasarım etmenlerine eklemektir. Buna şekil optimizasyonu denir. Bu eklemeler, yeterli bir sonlu eleman modelinin nasıl korunacağı, genel şekli tam olarak tanımlayan

kriterlerin bulunması, gerçek tasarım sonuçları için öncelik sınırlayıcılarının nasıl verileceği gibi diğer problemlere hitap edilmesi gereksinimine yol açmaktadır. Optimizasyon geometrik ya da sonlu eleman temelli olabilir. Geometrik temelli optimizasyonda, parça boyutları optimizasyon parametresi olarak seçilir ve sınır şartları parçanın geometrisine bağlı olarak verilir. Sonlu eleman tabanlı optimizasyonda ise, optimizasyon parametreleri modeldeki düğüm noktalarına ve elemanlara bağlı olarak tanımlanır ve sonlu fiziksel özellikler, malzeme özellikleri ve giriş kesitleri optimize edilir. Sonlu elemanlar yöntemi ile birçok alanda tasarlanan malzemeler optimize edilir. Otomotiv alanının üretim gereçleri, araç tamir bakım malzemeleri, araçlarda kullanılan motor içi ve motor dışı malzemelerin üretiminde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Sadece ısıya maruz kalan parçalar değil, yolcu koltuğu ayağı gibi yüksek oranda ısı değişimi olmayan, sürtünme etkisi gözlemlenmeyen parçalarda da bu yöntem ile optimize edilmiştir (Aydınler 2018).

Taşıt tasarım sürecinde minimum maliyetli ürünler üretmek için tasarım aşamasında optimum tasarım çalışmaları yapılarak prototip imalatı ve test işlemleri minimize edilir. Yapısal optimizasyon yöntemleri kullanılarak, ilk tasarım adımlarında ortaya çıkan modellerin optimum geometrileri belirlenir ve minimum maliyetli ürünler elde edilir. Ürünlerin optimum tasarımı için boyut, şekil, topoloji ve topografya optimizasyonu vb. sayısal optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Bu çalışmada, tampon ve darbe emici ağırlığının minimizasyonu için sac malzemenin optimum et kalınlığının bulunması amacıyla boyut optimizasyonu yöntemi uygulanmıştır. Genel bir optimizasyon problemi şu şekilde ifade edilebilir:

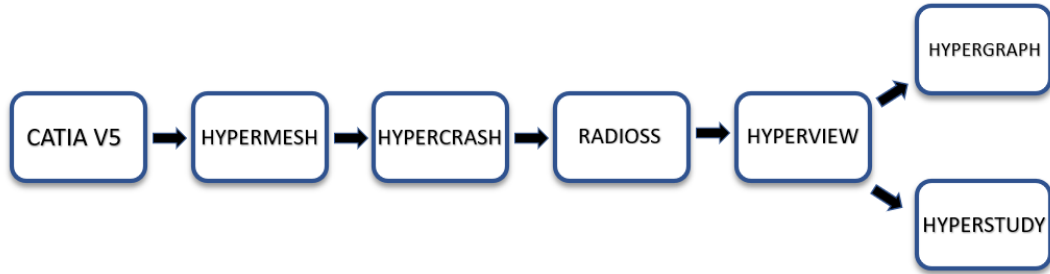
Amaç fonksiyonu :  $f(x)$

Kısıtlayıcı fonksiyonlar:  $G_i(x)=0 \quad i=1,\dots,m_e$

$G_i(x) \leq 0 \quad i=m_e+1,\dots,m$

$x_l \leq x \leq x_u$

Geliştirilen klasik optimizasyon yöntemlerinin uygulanması için amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı fonksiyonların analitik olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Ancak çarpışma problemi gibi lineer olmayan analizler için bu fonksiyonların çıkarılması imkânsızdır. Bu tür problemler için Deney Tasarımı yöntemi ile parametrelerin alt ve üst sınırları arasında sistematik olarak belirlenen deney sayısı kadar çözüm yapılır ve elde edilen sonuçlardan tasarım parametrelerine bağlı olarak eğri veya yüzey uydurma yöntemi ile analitik fonksiyonlar oluşturulur. Bu fonksiyonlar optimizasyon problemi tanımında kullanılır ve uygun bir yöntem ile çözülür. Aşağıda Şekil 4.1’de tasarım sürecinden , optimizasyon sürecine kadar olan adım şeması verilmiştir.



Şekil 4.1: Optimizasyon Süreç Şeması

Bu çalışmada, en iyi performans sağlayan ısıtma işlem görmüş AA6063-T5 alaşım kullanılan tampon kirişi ve ısıtma işlem görmemiş AA6063 alaşım kullanılan çarpışma kutuları ele alınmıştır. Hyperstudy yazılımında, tampon kirişi ve çarpışma kutuları için 25 farklı et kalınlığı kombinasyonu oluşturulmuştur. Enerji absorpsiyon değeri , tepki kuvveti ve toplam kütle hesaplanmıştır. Tablo 4.1’de bu değerler listelenmiştir.

**Tablo 4.1 : Hyperstudy Hesaplama Sonuçları**

<b>Adım Sayısı</b>	<b>Tampon Kirişi Et Kalınlığı (mm)</b>	<b>Çarpışma Kutusu Et Kalınlığı (mm)</b>	<b>Tampon Sistemi Toplam Kütlesi (Kg)</b>	<b>Toplam İç Enerji (J)</b>	<b>Tepki Kuvveti (kN)</b>
1	1.00	1.00	1.59	1865.15	29.97
2	1.00	1.50	1.64	2087.22	29.97
3	1.00	2.00	1.68	2291.55	29.97
4	1.00	2.50	1.73	2514.38	29.96
5	1.00	3.00	1.78	2698.62	29.96
6	1.50	1.00	2.34	2996.57	60.14
7	1.50	1.50	2.38	2965.74	48.72
8	1.50	2.00	2.43	3080.79	46.25
9	1.50	2.50	2.48	3133.96	46.25
10	1.50	3.00	2.53	3170.28	46.25
11	2.00	1.00	3.09	2851.98	64.33
12	2.00	1.50	3.13	2843.74	66.75
13	2.00	2.00	3.18	3065.94	65.30
14	2.00	2.50	3.23	3057.22	63.89
15	2.00	3.00	3.28	3050.84	63.89
16	2.50	1.00	3.83	2835.21	91.92
17	2.50	1.50	3.88	2802.73	81.97
18	2.50	2.00	3.93	3166.89	81.97
19	2.50	2.50	3.98	3022.88	81.97
20	2.50	3.00	4.03	3015.70	81.97
21	3.00	1.00	4.58	2751.18	109.77
22	3.00	1.50	4.63	2784.00	103.22
23	3.00	2.00	4.68	3088.04	100.47
24	3.00	2.50	4.73	3005.91	100.45
25	3.00	3.00	4.77	2996.14	100.45

Tampon kiriş ve çarpışma kutularında , 2mm et kalınlığı tanımlandığı zaman enerji absorpsiyon değeri yaklaşık olarak 3066 joule, tepki kuvveti yaklaşık olarak 65 kN ve tampon sisteminin kütlesi 3.186 kg'dır. Enerji absorpsiyon yeteneğini artırmak ve tampon sisteminde toplam ağırlığı düşürmek ters orantılıdır. Bu nedenle belirlenen enerji absorpsiyon değeri ve kütle azaltımı için çeşitli algoritmalar kullanılarak istenilen aralıklarda optimum değerler elde edilmiştir.

Bu çalışmada, Hyperstudy yazılımında kullanılan algoritmalar sırasıyla aşağıda verilmiştir;

-ARSM (Adaptive Response Surface Method: Adaptif Yanıt Yüzey Yöntemi)

-GRSM (Global Responce Surface Method: Global Yanıt Yüzey Yöntemi)

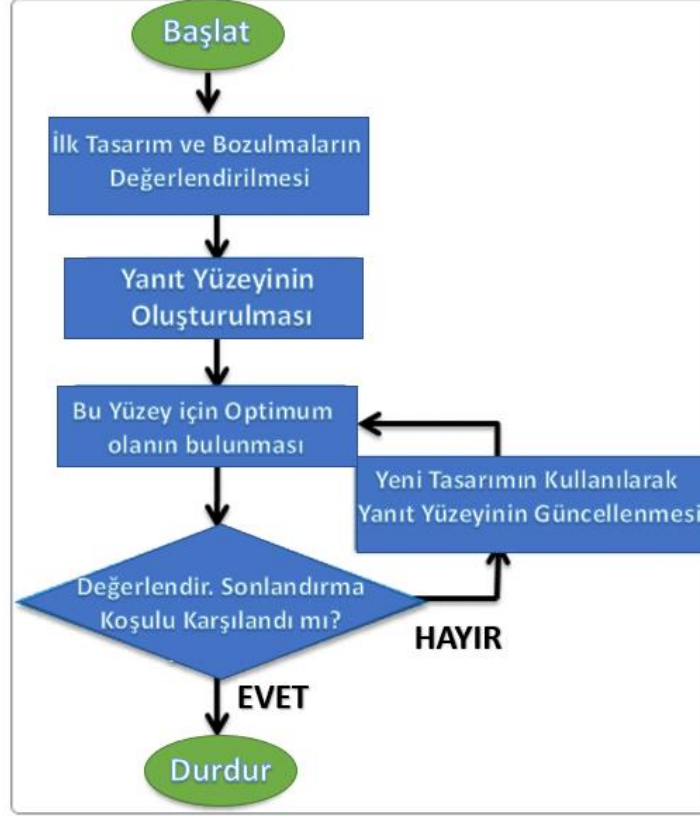
-SQP (Sequential Quadratic Programming: Sıralı Kuadratik Programlama)

-MFD (Method of Feasible Directions: Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi)

-GA (Genetic Algorithm: Genetik Algoritma)

#### **4.1 ARSM (Adaptive Response Surface Method: Adaptif Yanıt Yüzey Yöntemi)**

Adaptif yanıt yüzey yönteminin oluşturduğu ilk yanıt yüzeyi bir lineer regresyon polinomudur, daha sonra bu yüzey üzerinde optimum noktayı bulur ve tam simülasyonla doğrular. Yanıt yüzeyinden çıkış yanıtı değerleri ve tam simülasyon değerleri yakın değilse; Adaptif yanıt yüzey yöntemi, yeni değerlendirme ile yüzeyi günceller ve bu güncellenmiş yüzeyde optimumu değeri bulur. Bu döngü, yakınsama kriterlerinden biri karşılanana kadar tekrarlanır (Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Adaptive Response Surface Method, 2019).

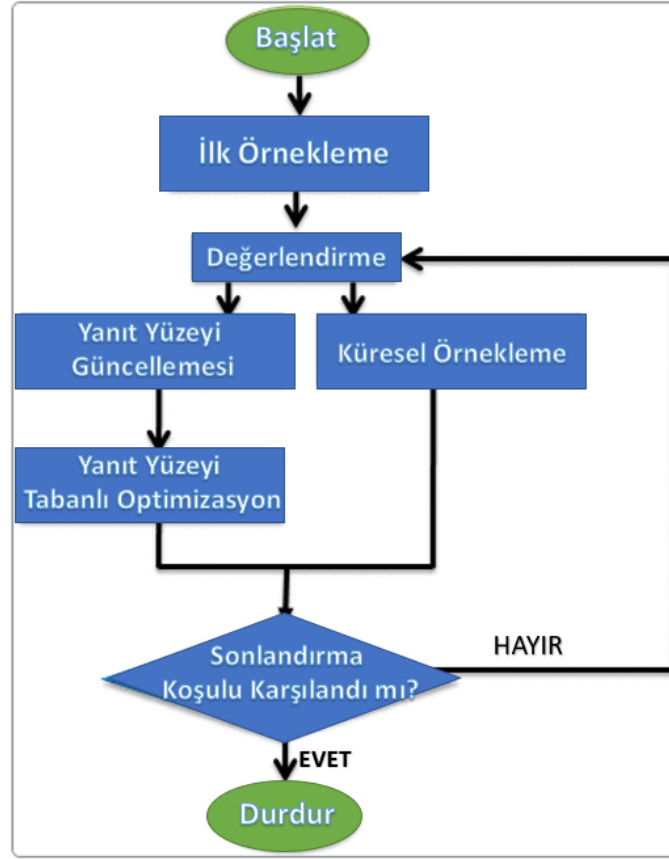


Şekil 4.2 : Adaptif Yanıt Yüzey Yöntemi Süreç Aşamaları

#### 4.2 GRSM (Global Responce Surface Method: Global Yanıt Yüzey Yöntemi)

Global Yanıt Yüzey Yöntemi, yanıt yüzeyi tabanlı bir yaklaşımdır. Her yineleme sırasında, yanıt yüzeyi tabanlı optimizasyon birkaç tasarım oluşturur. Yerel arama yeteneği ve global arama yeteneği arasında iyi bir denge sağlamak için global olarak ek tasarımlar oluşturulur. Tepki yüzeyi, modele daha iyi uyum sağlamak için yeni oluşturulan tasarımlarla uyarlanabilir şekilde güncellenir (Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods. Global Responce Search Method, 2019).

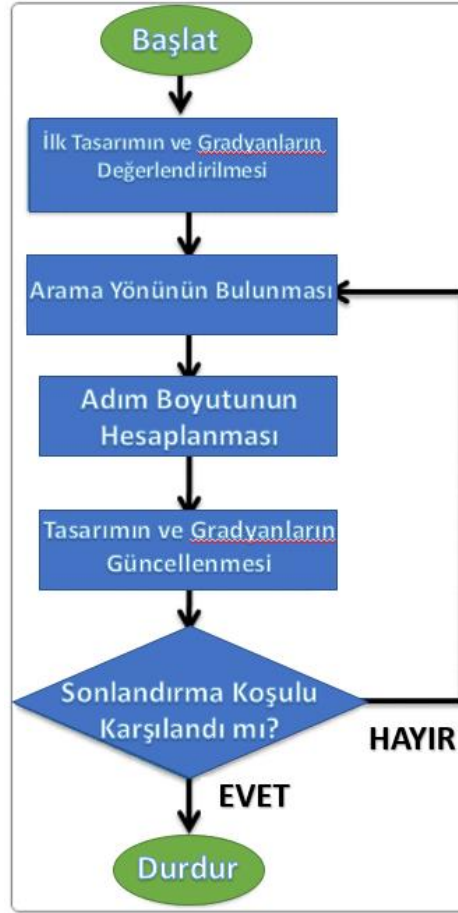




Şekil 4.3: Genel Yanıt Yüzey Yöntemi Süreç Aşamaları

### 4.3 SQP (Sequential Quadratic Programming: Sıralı Kuadratik Programlama)

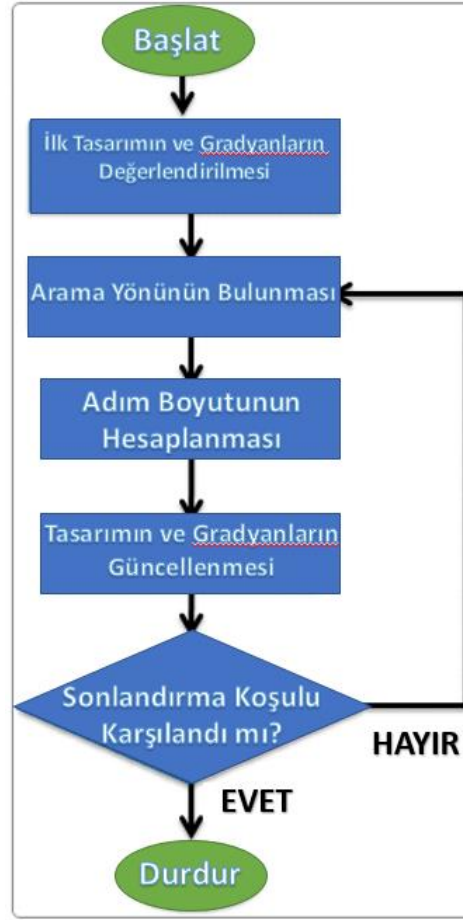
Gradyan tabanlı yinelemeli bir optimizasyon yöntemidir ve bazı teorisyenler tarafından doğrusal olmayan problemler için en iyi yöntem olarak kabul edilir. HyperStudy'de, Sıralı Kuadratik Programlama, mühendislik problemlerine uyacak şekilde daha da geliştirilmiştir(Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Sequential Quadratic Programming, 2019).



Şekil 4.4 : Sıralı Kuadratik Programlama Süreç Aşamaları

#### 4.4 MFD (Method of Feasible Directions: Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi)

Uygulanabilir Yönler Metodunun arkasındaki temel ilke, uygun bir tasarımdan, iyileştirilmiş bir uygulanabilir tasarıma geçmektir, bu nedenle amaç fonksiyonu azaltılmalıdır ve yeni tasarım noktasındaki kısıtlamalar ihlal edilmemelidir(Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Method of Feasible Directions, 2019).



Şekil 4.5 : Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi Süreç Aşamaları

#### 4.5 GA (Genetic Algorithm: Genetik Algoritma)

Genetik Algoritma, bir tasarım popülasyonunun (bir nesil) yaratılmasıyla başlar. Bu tasarımlar daha sonra uygunluklarına göre sıralanır. Uygunluk, bir tasarımın ne kadar iyi olduğunun bir ölçüsüdür ve kısıt ihlali ve amaç fonksiyonu değerlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Seçilen tasarımlar daha sonra, tipik olarak çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerin uygulanması yoluyla yeniden üretilir. Bu süreçten doğan bireyler (çocuklar) bir sonraki neslin üyeleri olurlar. Bu süreç, bir popülasyonun evrimi optimal çözüme yakınsayana kadar birçok nesil için tekrarlanır(Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Genetic Algorithm, 2019).



Şekil 4.6 : Genetik Algoritma Yöntemi Süreç Aşamaları

Optimizasyon probleminde amaç toplam kütlenin minimizasyonu ve kısıtlar olarak da maksimum tepki kuvveti ve absorbe edilen enerji alınmıştır. Hyperstudy’de yukarıdaki 5 algoritma kullanılarak , belirlenen sınır şartları dahilinde optimize edilip sonuçlar elde edilmiştir. Belirlenen sınır şartları, toplam enerjinin en az 3000 joule olması, tepki kuvvetinin en fazla 70 kN olması amaçlanmıştır. Kısıtların sınır değerleri tüm araç modeli incelenmediğinden keyfi olarak seçilmiştir. Aşağıda verilen Tablo 4.2’de, problem çözümü için kullanılan 5 algoritmanın, problem çözümü için oluşturduğu en iyi değerler listelenmiştir.

**TABLO 4.2 : Algoritmaların Problem Çözümü için Verdiği En İyi Değerler**

<b>Problem Çözümü için Kullanılan Algoritmanın Adı</b>	<b>Tampon Kirişi Et Kalınlığı (mm)</b>	<b>Çarpışma Kutusu Et Kalınlığı (mm)</b>	<b>Tampon Sistemi Toplam Kütlesi (Kg)</b>	<b>Toplam İç Enerji (J)</b>	<b>Tepki Kuvveti (kN)</b>
ARSM (Adaptive Response Surface Method: Adaptif Yanıt Yüzey Yöntemi)	1.37	1.90	2.24	3010.80	44.09
GRSM (Global Responce Surface Method: Global Yanıt Yüzey Yöntemi)	1.16	2.99	2.03	2986.16	33.16
SQP (Sequential Quadratic Programming: Sıralı Kuadratik Programlama)	1.17	3.00	2.04	2999.54	33.55
MFD (Method of Feasible Directions: Uygulanabilir Yönergeler Yöntemi)	1.17	3.00	2.04	2999.17	33.54
GA (Genetic Algorithm: Genetik Algoritma)	1.16	2.99	2.03	2985.15	33.15

Bu optimizasyon probleminin çözümü için optimum et kalınlığı tampon kirişi için 1.17 mm ve çarpışma kutusu için 3.00 mm bulunmuştur. Bu kalınlık değeri için çarpışma kutuları ile birlikte ön tampon sisteminin kütlesi istenilen kısıtları sağlayacak şekilde toplam 2.049 kg olarak hesaplanmıştır. İstenilen kısıtlar ile birlikte en iyi değerleri SQP ve MFD algoritmaları vermiştir. Bu iki algoritmanın problem çözümü için verdiği değerler birbirlerine çok yakındır.

Deney sonucu sonunda minimum ağırlığa sahip ancak istenilen miktarda enerji absorbe edebilen ve kritik maksimum tepki kuvvetinin altında kalabilen tampon kirişi ve çarpışma kutularının optimum et kalınlığı belirlenmiştir. Benzer yaklaşım tüm araç için çarpışma modelleri tanımlanarak gerçekleştirilebilir. Ancak tüm araç modelinde eleman sayıları çok fazla olacağından optimizasyon tasarım parametrelerine bağlı olarak Deney Tasarımı yöntemi ile gerçekleştirilecek analiz sayılarının da fazla olacağı düşünülerek bu tür çözümler için yüksek kapasiteli bilgisayar donanımlarının gerekeceği açıktır. Uzun süren bu tür analizler için uygun çözüm ortamları Yüksek Performanslı Çözüm Merkezleridir.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada araçlarda güvenlik elemanlarından birisi olan tampon kirişi ve çarpışma kutuları modelleri tasarlanmış, çarpışma analizleri yapılmış, ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş malzemelerin kullanıldığı tampon sisteminin çarpışma performansları incelenmiştir. Tampon sistemleri, tampon kirişi ve çarpışma kutularında kullanılan malzemeler çeşitli kombinasyonlar uygulanarak hibrit tampon sistemleri oluşturulmuştur. Silindirik rigid duvara, tam orta noktadan tampon sistemi çarpıştırılmış, analiz sonuçları verilmiştir. Isıl işlem görmüş malzemenin çarpışma performansı, ısıl işlem görmemiş malzemeye göre daha iyi çarpışma performansı gösterdiği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca düşük araç ağırlıkları için minimum ağırlık için optimum sac et kalınlığı belirlenmiştir. Uygulanan yöntem tüm araç modeli için daha yüksek hesaplama kapasitesine sahip alt yapıda çözdürülerek gerçek çarpışma şartları göz önüne alınabilir.

## 6. KAYNAKLAR

Acar E., Yilmaz B., Güler M. A., Altin M., “Multi-fidelity crashworthiness optimization of a bus bumper system under frontal impact”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42-493 ,(2020).

Alghamdi A.A.A., “Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview”, *ThinWalled Structures*, (39), 189, (2001).

Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Adaptive Response Surface Method, (2019).

Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Genetic Algorithm, (2019).

Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods. Global Response Search Method, (2019).

Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Method of Feasible Directions, (2019).

Altair Hyperstudy, Help Documents, Optimization Methods, Sequential Quadratic Programming, (2019).

Arslan Y., Aktif ve Pasif Güvenlik Sistemleri, (3 Ağustos 2021), <http://gazi.edu.tr/posts/download?id=116879>, (2021).

Aydiner Ş.S., “Optimization of passenger seat leg's via finite element method”, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2018).

Bean J.D., Kahane C.J., Mynatt M., Rudd R.W., Rush C.J., Wiacek C. “Fatalities in Frontal Crashes Despite Seat Belts and Air Bags – Review of All CDSCases”, *Office of Vehicle Safety National Highway Traffic Safety Administration*, Washington, DC 20590, (2009).

Candemir Ş., Çarpışma Kutuları, (3 Ağustos 2021), <https://www.ceyrekmuhendis.com/carpisma-kutulari/>, (2020).



Dengfeng, W., Kefang, C., “Optimizing the design of automotive S-rail using grey relational analysis coupled with grey entropy measurement to improve crashworthiness” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56-1539-1553, (2017).

Estrada Q., Szwedowicz D., Rodriguez-Mendez D., Elías-Espinosa A., Silva-Aceves M., Bedolla-Hernández J., Gómez-Vargas J., Oscar A., “Effect of radial clearance and holes as crush initiators on the crashworthiness performance of bi-tubular profiles”, *Elsevier*, (140), 43-59, (2019).

Estrada Q., Szwedowicz D., Silva-Aceves J., Majewski T., Vergara-Vazquez J., Rodriguez-Mendez A., “Crashworthiness behavior of aluminum profiles with holes considering damage criteria and damage evolution”, *International Journal of Mechanical Sciences*, (131–132), 716-791 (2017).

<https://honda.com.tr/otomobil/sozluk/eps>, (27 Temmuz 2021).

<https://otorapor.com/abs-ve-esp-nedir--farklari-nelerdir>, (27 Temmuz 2021).

<https://www.aydinlik.com.tr/arka-koltukta-emniyet-kemeri-takmayana-92-tl-ceza>, (3 Ağustos 2021), (2016).

<https://www.euroncap.com/tr/araç-guevenliği/oeduellerin-açiklaması/otonom-acil-frenleme-aeb>, (3 Ağustos 2021).

<https://www.heeycar.com/tr/haberler/32-hava-yastigi-airbag-nedir-hava-yastigi-bizinasil-korur.aspx>, (5 Ağustos 2021).

<https://www.hondacarindia.com/ownersmanual/webom/eng/jazz/2016/details/106278046-2382>, (2 Ağustos 2021).

<https://www.lexus.com.tr/discover-lexus/lexus-otomobilleri-hakkinda-hersey/asr-anti-patinaj-sistemi>, (29 Temmuz 2021).

[http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Fren%20Yardımcı%20Sistemleri.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Fren%20Yardımcı%20Sistemleri.pdf), (1 Ağustos 2021).

Juan, C., Sepideh, A., Alejandro, M., Juan, P., “Cutting parameter optimization of Al-6063-O using numerical simulations and particle swarm optimization”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [doi.org/10.1007/SPRINGER\\_CROSSMARK\\_POLICY](https://doi.org/10.1007/SPRINGER_CROSSMARK_POLICY), (2020).

Kılıç E., Araçlardaki Aktif ve Pasif Güvenlik Sistemleri, (27 Temmuz 2021), <https://www.muhendis.tv/araclardaki-aktif-ve-pasif-guvenlik-sistemleri>, (2018).

Langseth M., Hopperstad O.S., “Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin-Walled Aluminum Extrusions”, *Journal of Impact Engineering*, (18), 949, (1996).

Li Z., Yu Q., Zhao X., Yu M., Shi P. and Yan C., “Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body”, *Advances in Mechanical Engineering*, (8), 1-21, (2017).

Nakazawa Y., Tamura K., Yoshida M., Takagi K., Kano M., “Development of Crash-Box For Passenger Car With High Capability For Energy Absorption. 8.International Conference On Computational Plasticity”, *Semantic Scholar*, Barcelona, Spain. 7997053, (2005).

Osorio-Pinzon J.C., Abolghasem S., Maranon A., Casas-Rodriguez J.P., “Cutting parameter optimization of Al-6063-O using numerical simulations and particle swarm optimization”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (111), 2507–2532, (2020).

Öztürk İ., “Design and optimisation of hybrid material bumper beams under impact loading”, *International Journal of Crashworthiness*, DOI:10.1080/13588265.2020.1858626, (2020).

Sun G., Tian J., Liu T., Yan X., Huang X., “Crashworthiness optimization of automotive parts with tailor rolled blank”, *Elsevier Engineering Structures*, (169), 201-215, (2018).

Tanlak N., “Shape Optimization of Thin-Walled Tubes Under High-Velocity Axial and Transverse Impact Loadings”, *Researchgate.publication*, DOI:10.13140 (2014).

Varas D., Zaera R., Lopez-Puente J., “Numerical Modeling of the Hydrodynamic Ram Phenomenon”, *International Journal of Impact Engineering*, (36), 363-374, (2009).

Wang D., Zhang S., Wang C., Zhang C., “Structure-material-performance integration lightweight optimisation design for frontal bumper system”, *International Journal of Crashworthiness*, (23:3), 311-327, (2018).

Wang C., Wang W., Zhao W., Wang Y., Zhou G., “Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system”, *Elsevier Composites Part B: Engineering*, (153), 78-96, (2018).

Xiao Z., Fang J., Sun G., Li Q., “Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam, Advances in Engineering Software”, *Elsevier*, 10.1016, (2015).

Zahedan N., Ahmadi H., Atashafrooz S., & Baghaeian M., “Experimental and numerical investigation on bending strength of the vehicle bumper beam with internal stiffeners”, *International Journal of Crashworthiness*, DOI:10.1080/13588265.2020.1767015 , (2020).