

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEYİR FÜZESİ VE KANİSTERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK TABANLI
TASARIM ENİYİLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Egemen ERÇİMEN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem ACAR

AĞUSTOS 2026

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Burak BİRGÖREN
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Cihan TEKÖĞLU
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 231511022 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Egemen ERÇİMEN'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SEYİR FÜZESİ VE KANİSTERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK TABANLI TASARIM ENİYİLEMESİ**” başlıklı tezi **29.06.2026** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Erdem ACAR**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ercan GÜRSES**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nilgün FESCİOĞLU ÜNVER
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

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.

Egemen ERÇİMEN

İMZA

ÖZET

Yüksek Lisans/Doktora Tezi

SEYİR FÜZESİ VE KANİSTERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK TABANLI TASARIM ENİYİLEMESİ

Egemen ERÇİMEN

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

Danışman: Prof. Dr. Erdem ACAR

Tarih: Ağustos 2026

Savunma ve havacılık yapılarında yüksek performans gereksinimleri devam ederken, çevresel etki, maliyet ve geri dönüştürülebilirlik gibi sürdürülebilirlik kriterlerinin tasarım sürecine dahil edilmesi giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, savunma ve havacılık uygulamalarında kullanılan kompozit yapıların sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi için sistematik bir yöntem ele alınmıştır. Çalışma kapsamında biri yer sistemi olan, kanister destek parçası, diğeri ise uçan sistem bileşeni olan seyir füzesi gövdesi olmak üzere iki farklı vaka çalışması ele alınmıştır. Her iki yapı için alüminyum, ilk üretim karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) kompozit ve mekanik, termal, kimyasal yöntemlerle geri dönüştürülmüş karbon fiber takviyeli kompozit malzeme alternatifleri değerlendirilmiştir. Yapısal performans sonlu eleman analizleri ile incelenmiş, deney tasarımı ve yanıt yüzeyi yöntemleri kullanılarak tasarım değişkenleri ile analiz çıktıları arasındaki ilişkiler modellenmiştir.

Elde edilen sonuçlar; performans, maliyet, CO₂ emisyonu, döngüsellik ve sosyal etki parametrelerinden oluşan bir sürdürülebilirlik indeksi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optimum malzeme seçiminin tasarım önceliklerine bağlı olarak değiştiğini

göstermiştir. Kanister destek parçasında geri dönüştürülmüş KFTP alternatifleri dengeli sürdürülebilirlik performansı sunarken, seyir füzesi gövdesinde kompozit malzemeler özellikle kütle azaltımı açısından belirgin avantaj sağlamıştır. Çalışma, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin savunma ve havacılık yapılarında sürdürülebilir alternatifler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik tabanlı tasarım, Tasarım eniyilemesi, Kompozit yapılar, Geri dönüştürülmüş KFTP, Sonlu elemanlar analizi, Savunma yapıları.

ABSTRACT

Master of Science/Doctor of Philosophy

SUSTAINABILITY-BASED DESIGN OPTIMIZATION

OF A CRUISE MISSILE AND CANISTER

Egemen ERÇİMEN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erdem ACAR

Date: August 2026

As high-performance requirements in defense and aerospace structures continue to increase, the integration of sustainability criteria such as environmental impact, cost, and recyclability into the design process has become increasingly important. In this study, a systematic methodology is implemented for sustainability-based design optimization of composite structures used in defense and aerospace applications. Two different case studies are investigated: a canister stiffener component representing a ground system and a cruise missile fuselage section representing an airborne system. For both structures, aluminum, virgin carbon fiber reinforced polymer composite, and mechanically, thermally, and chemically recycled carbon fiber reinforced composite material alternatives are evaluated. Structural performance is assessed using finite element analyses, while the relationships between design variables and analysis outputs are modeled through design of experiments and response surface methodology.

The obtained results are compared using a sustainability index consisting of performance, cost, CO₂ emissions, circularity, and social impact parameters. The results show that the optimum material selection changes depending on the design

priorities. For the canister stiffener, recycled CFRP alternatives provide balanced sustainability performance, while for the cruise missile fuselage, composite materials offer significant advantages especially in terms of mass reduction. The study demonstrates that recycled composite materials can be considered as sustainable alternatives for defense and aerospace structures.

Keywords: Sustainability-based design, Design optimization, Composite structures, Recycled CFRP, Finite element analysis, Defense structures.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof Dr. Erdem ACAR'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
KISALTMALAR	xix
SEMBOL LİSTESİ	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin İçeriği	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1 Sürdürülebilirlik Tabanlı Tasarım	5
2.2 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, YDD	13
2.3 Sürdürülebilir Kompozit Yapılar	15
2.3.1 Mekanik geri dönüşüm.....	16
2.3.2 Termal geri dönüşüm	17
2.3.3 Kimyasal geri dönüşüm	18
3. YÖNTEM.....	19
3.1 Malzeme Seçenekleri	21
3.2 Deney Tasarımı, DT	26
3.3 Sonlu Elemanlar Analizleri, SEA.....	26
3.4 Yanıt Yüzeyi Metodu, YYM.....	30
3.5 Sürdürülebilirlik İndeksinin Hesaplanması	33
3.5.1 Performans parametresinin hesaplanması	34
3.5.2 Çevresel etki parametresinin hesaplanması	35
3.5.3 Maliyet parametresinin hesaplanması	36
3.5.4 Döngüsellik parametresinin hesaplanması.....	37
3.5.5 Sosyal etki parametresinin hesaplanması.....	38
3.5.6 Optimizasyon yöntemi	40
4. VAKA ÇALIŞMALARI	43
4.1 Vaka Çalışması – Kanister Destek Parçası	43
4.1.1 Tasarım değişkenleri	44
4.1.2 Sonlu elemanlar analizleri.....	46
4.2 Vaka Çalışması 2– Seyir Füzesi Gövdesi	48
4.2.1 Tasarım değişkenleri	50
4.2.2 Sonlu elemanlar analizleri.....	52
5. BULGULAR.....	57
5.1 Vaka Çalışması 1 – Kanister Destek Parçası Bulguları	57
5.1.1 Eşit ağırlık senaryosu	57
5.1.2 Ekonomik ve döngüsellik ağırlıklı senaryo	60
5.1.3 Çevresel etki ağırlıklı senaryo.....	62

5.2 Vaka Çalışması 2 – Seyir Füzesi Gövdesi Bulguları.....	63
5.2.1 Eşit ağırlık senaryosu	64
5.2.2 Minimum kütle senaryosu	66
5.2.3 Performans ve çevresel etki ağırlıklı senaryo	68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Sürdürülebilirlik için tanımlanan beş sütun ve sürdürülebilirlik indeksi [4]	7
Şekil 2.2: Takviye yapılı panel geometrisi [4]	7
Şekil 2.3: Anagnostopoulou vd. vaka çalışması [5]	11
Şekil 2.4: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi kavramsal modeli [8]	14
Şekil 2.5: Mekanik geri dönüşüm ile geri kazanılmış elyaf [19]	16
Şekil 2.6: Akışkanlaştırılmış yatak piroliz adımları [22]	17
Şekil 2.7: Solvoliz yöntemi diagramı [24]	18
Şekil 3.1: Sürdürülebilirlik tabanlı tasarım akış diyagramı	19
Şekil 3.2: YYM Yüzeyi Görselleştirmesi – Alüminyum Malzeme – Takviye Elemanı Genişliği: 130mm	32
Şekil 4.1: Kanister Destek Parçalarının Kanister Üzerinde Gösterimi [30]	44
Şekil 4.2: Kanister Destek Parçası Tasarım Değişkenleri	45
Şekil 4.3: Kanister Destek Parçası Çözüm Ağı	46
Şekil 4.4: Kanister Destek Parçası Sınır Koşulları	47
Şekil 4.5: Çözüm Ağı Yakınsaması	48
Şekil 4.6: BGM-109A Tomahawk seyir füzesine ait genel kesit görünümü ve gövde bölümleri [53]	49
Şekil 4.7: Seyir Füzesi Gövdesi Tasarım Değişkenleri	50
Şekil 4.8: Seyir füzesi gövdesi sonlu elemanlar modeli	52
Şekil 4.9: Seyir füzesi gövdesi sınır koşulları	55
Şekil 4.10: Seyir füzesi gövdesi için çözüm ağı yakınsama çalışması ve seçilen çözüm ağı boyutu.	56

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Tasarım gereksinimleri [4]	8
Çizelge 2.2: Tasarım Parametreleri [4]	8
Çizelge 2.3: Malzeme değişkenleri [4]	9
Çizelge 2.4: Çalışma [5] Sonucu Yapılan Sıralama.....	12
Çizelge 3.1: Malzeme Alternatifleri Mekanik Özellikleri	24
Çizelge 3.2: Kompozit Malzeme Mekanik Özellikleri	24
Çizelge 3.3: Malzeme Sürdürülebilirlik Parametreleri	25
Çizelge 3.4: Malzeleme Seçeneklerinin Özgük Direngenlik Koruma Oranı	38
Çizelge 3.5: Malzeleme Seçeneklerinin Sosyal Etki Parametre Katsayısı	40
Çizelge 4.1: Tasarım Değişkeni Aralıkları	46
Çizelge 4.2: Seyir füzesi gövdesi tasarım değişkenleri ve değişim aralıkları.....	52
Çizelge 5.1: Eşit ağırlık senaryosu için optimum tasarım değişkenleri ve sürdürülebilirlik indeksi	58
Çizelge 5.2: Eşit ağırlık senaryosu için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri.....	59
Çizelge 5.3: Ekonomik ve döngüsellik ağırlıklı senaryo için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri.....	60
Çizelge 5.4: Çevresel etki ağırlıklı senaryo için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri.....	62
Çizelge 5.5: Seyir füzesi gövdesi için eşit ağırlık senaryosunda optimum tasarım değişkenleri ve SI değerleri.....	64
Çizelge 5.6: Seyir füzesi gövdesi için eşit ağırlık senaryosunda normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri.....	66
Çizelge 5.7: Seyir füzesi gövdesi için minimum kütle senaryosu optimizasyon sonuçları	67
Çizelge 5.8: Performans ve çevresel etki ağırlıklı senaryo için optimum tasarım değişkenleri ve SI değerleri.....	68
Çizelge 5.9: Performans ve çevresel etki ağırlıklı senaryo için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri.....	70

KISALTMALAR

ACP	: Ansys Composite PrepPost
AHP	: Analitik Hiyerarşı Süreci (Analytic Hierarchy Process)
CMH-17	: Composite Materials Handbook-17
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
DT	: Deney Tasarımı
KFTP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
KGD	: Kimyasal Geri Dönüştürülmüş
MGD	: Mekanik Geri Dönüştürülmüş
MMPDS	: Metallic Materials Properties Development and Standardization
PEEK	: Polyether Ether Ketone
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SI	: Sürdürülebilirlik İndeksi
TGD	: Termal Geri Dönüştürülmüş
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YDED	: Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi
YYM	: Yanıt Yüzeyi Metodu

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
σ_i	Gerilme
τ_{12}	Kayma gerilmesi
X_i	Elyaf dayanımı
Y_i	Matris dayanımı
S	Kayma dayanımı
E	Elastisite modülü
δ	Maksimum deformasyon
f_1	Birinci doğal frekans
m	Kütle
t_s	Dış gövde cidar kalınlığı
t_{st}	Takviye kalınlığı
h_{st}	Takviye yüksekliği
w_c	Takviye tepe genişliği
P	Performans parametresi
C	Maliyet parametresi
CO_2	Karbondioksit emisyonu
CIR	Döngüsellik parametresi
SOC	Sosyal etki parametresi
SI	Sürdürülebilirlik indeksi
w_i	Ağırlık katsayısı
R^2	Belirlilik katsayısı
$RMSE$	Kök ortalama kare hata

1. GİRİŞ

Savunma, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan yapısal sistemler; yüksek dayanım, düşük ağırlık, güvenilirlik ve zorlu çevresel koşullara dayanım gibi gereksinimler nedeniyle büyük ölçüde ileri kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Bu sistemlerin tasarım süreçleri geleneksel olarak yapısal performans ve maliyet kriterleri etrafında şekillenirken, günümüzde çevresel etkilerin ve kaynak kullanımının giderek daha fazla önem kazanması, sürdürülebilirlik kavramını mühendislik tasarımının temel bileşenlerinden biri hâline getirmiştir. Özellikle tek kullanımlık veya sınırlı ömürlü savunma sistemlerinde, tasarım aşamasında sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımların benimsenmesi hem çevresel etkiyi azaltmak hem de geleceğe yönelik daha sorumlu mühendislik çözümleri geliştirmek açısından kritik önem taşımaktadır. Bu tez çalışması, kompozit yapıların tasarımında sürdürülebilirlik kriterlerini dikkate alan bir eniyileme yaklaşımını ele almakta ve bu yaklaşımı farklı sistem seviyelerinde uygulamayı amaçlamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, savunma ve havacılık uygulamalarında kullanılan kompozit yapıların tasarım sürecine sürdürülebilirlik kriterlerini entegre eden bir tasarım eniyileme yaklaşımı ele almak ve bu yaklaşımın uygulanabilirliğini gerçekçi sistemler üzerinden ortaya koymaktır. Bu kapsamda biri uçan bir sistem olan füze yapısı, diğeri ise yer sistemi sınıfında değerlendirilen bir kanister yapısı olmak üzere iki farklı kompozit yapı ele alınmıştır. Bu iki sistem, farklı görev profilleri ve kullanım senaryolarına sahip olmalarına rağmen, birlikte değerlendirildiğinde sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımının sistem seviyesindeki etkilerinin daha kapsamlı şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Kompozit malzemeler, yüksek özgül dayanım ve özgül direngenlik gibi üstün mekanik özellikleri sayesinde savunma ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu malzemelerin üretim süreçlerinde yüksek enerji tüketimi, sınırlı geri dönüştürülebilirlik ve yaşam döngüsü sonu (end-of-life)

belirsizlikleri gibi sürdürülebilirlik açısından önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, yalnızca yapısal performansa odaklanan geleneksel tasarım yaklaşımlarının ötesine geçilmesi ve çevresel etkiyi de tasarım kararlarının bir parçası hâline getiren yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu tezde, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi yaklaşımı benimsenerek, yapısal performans kriterleri ile çevresel etki göstergeleri birlikte ele alınmaktadır. Füze yapısı için ağırlık minimizasyonu, dinamik davranış ve yapısal bütünlük gibi performansa dayalı tasarım kriterleri öncelikli olarak değerlendirilirken; kanister yapısı için uzun süreli çevresel dayanım, tekrar kullanılabilirlik ve üretim sürecine bağlı sürdürülebilirlik unsurları ön plana çıkarılmaktadır. Her iki sistem için de tasarım değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonlar belirlenerek, çok amaçlı bir eniyileme problemi tanımlanmaktadır.

Bu çalışma ile, sürdürülebilirlik kriterlerinin kompozit yapı tasarımına entegre edilmesinin, geleneksel tasarım yaklaşımlarına kıyasla yapısal performans, maliyet ve çevresel etki açısından nasıl bir denge oluşturduğunun ortaya konulması hedeflenmektedir. Böylece, savunma ve havacılık sistemlerinde sürdürülebilir kompozit yapı tasarımına yönelik sistematik ve uygulanabilir bir metodoloji ele alınmıştır.

1.2 Tezin İçeriği

Tezin ilk bölümünde, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımlarına ilişkin kapsamlı bir literatür taraması sunulmaktadır. Bu bölümde, mühendislik tasarım süreçlerinde sürdürülebilirlik kavramının gelişimi, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi yaklaşımları ve bu yaklaşımların savunma, havacılık ve uzay uygulamalarındaki yeri ele alınmaktadır. Ayrıca yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD; ing. Life Cycle Assessment, LCA) metodolojisi, çevresel etki göstergeleri ve bu göstergelerin tasarım kararlarına entegrasyonu detaylandırılmaktadır. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin geri dönüşümü, yeniden kullanım potansiyelleri ve mevcut teknolojik kısıtlar araştırılmakta ve kompozit yapıların sürdürülebilirlik açısından karşılaştığı temel zorluklar ortaya konulmaktadır.

Devam eden bölümlerde, tez kapsamında izlenen yöntem ve ele alınan sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyileme yaklaşımı tanımlanmaktadır. Bu bölümde,

kullanılan yapılar için oluşturulan sayısal modelleme stratejileri, belirlenen tasarım değişkenleri, performans kısıtları ve sürdürülebilirlik hedefleri açıklanmaktadır. Yapısal performans kriterleri ile çevresel etki göstergelerinin birlikte ele alındığı çok hedefli eniyileme problemi detaylı olarak formüle edilmektedir. Ayrıca, kullanılan analiz yöntemleri ve değerlendirme kriterleri bu bölümde sunulmaktadır.

Tezin bir sonraki bölümünde, geliştirilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla seçilen vaka çalışmaları ele alınmaktadır. Bu kapsamda, biri uçan bir sistem olan füze yapısı, diğeri ise yer sistemi olarak değerlendirilen kanister yapısı üzerinde sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi gerçekleştirilmektedir. Her iki yapı için de sistem gereksinimleri, yük durumları ve tasarım sınırları tanımlanarak, elde edilen eniyileme sonuçları detaylı şekilde sunulmaktadır. Bu vaka çalışmaları, farklı kullanım senaryolarına sahip sistemlerde sürdürülebilirlik odaklı tasarım yaklaşımının etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye imkân sağlamaktadır.

Son bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilmekte, sürdürülebilirlik kriterlerinin kompozit yapı tasarımına etkileri tartışılmaktadır. Füze ve kanister yapıları için elde edilen sonuçlar, geleneksel tasarım yaklaşımları ile karşılaştırılarak yorumlanmaktadır. Ayrıca çalışmanın savunma ve havacılık endüstrisine sağlayabileceği katkılar ortaya konulmakta ve sürdürülebilir kompozit yapı tasarımına yönelik gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımlarına ilişkin literatürde yer alan çalışmalar incelenmektedir. Mühendislik tasarım süreçlerinde sürdürülebilirlik kavramının gelişimi, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi yöntemleri ve bu yöntemlerin savunma, havacılık ve uzay sektörlerindeki çalışmalar araştırılmıştır. Ayrıca, YDD metodolojisinin kompozit yapı tasarımında nasıl kullanıldığı, çevresel etki göstergelerinin tasarım kararlarına etkisi ve bu alandaki güncel yaklaşımlar ele alınmaktadır. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin geri dönüşümü, yeniden kullanım potansiyelleri ve mevcut teknolojik sınırlamalar literatür çerçevesinde değerlendirilerek, sürdürülebilir kompozit yapı tasarımının karşılaştığı temel zorluklar ve araştırma boşlukları araştırılmıştır. Bu tarama, tez kapsamında geliştirilen yöntem ve gerçekleştirilen vaka çalışmalarının teorik altyapısını oluşturmayı amaçlamaktadır.

2.1 Sürdürülebilirlik Tabanlı Tasarım

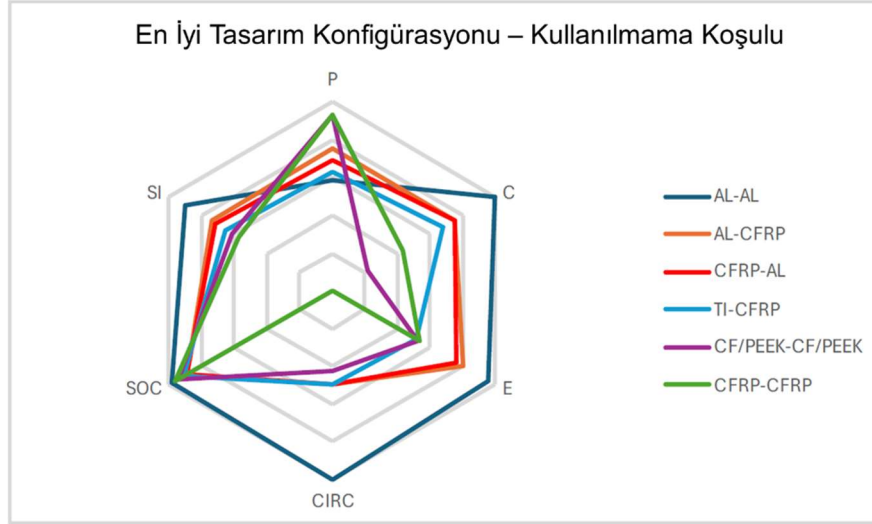
Sürdürülebilirlik tabanlı tasarım, mühendislik ürünlerinin çevresel, ekonomik ve toplumsal etkilerinin tasarım sürecinin erken aşamalarında dikkate alınmasını amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, yalnızca ürünün kullanım aşamasındaki performansını değil; hammadde temininden üretim süreçlerine, kullanım ömrü boyunca ortaya çıkan çevresel etkilere ve yaşam döngüsü sonu senaryolarına kadar uzanan geniş bir süreci kapsar [1].

Güncel mühendislik uygulamalarında sürdürülebilirlik tabanlı tasarım, YDD çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak uygulanmaktadır. Bu kapsamda enerji tüketimi, CO₂ emisyonları, maliyet ve atık oluşumu gibi çevresel etki parametreleri tasarım kararlarının şekillenirilmesi için kullanılmaktadır [2]. Özellikle yüksek performans gerektiren havacılık ve savunma uygulamalarında, sürdürülebilirlik tasarımı; ağırlık, dayanım ve güvenilirlik gibi geleneksel mühendislik kriterleri ile çevresel etki minimizasyonu arasında bir denge kurulmasını

hedeflemektedir. Bu dengeyi sağlayabilmek amacıyla çok hedefli tasarım eniyilemesi yaklaşımları kullanılmaktadır. Sürdürülebilirlik, tasarımın ikincil bir sonucu olmaktan çıkarılarak doğrudan bir tasarım girdisi hâline getirilmektedir [3].

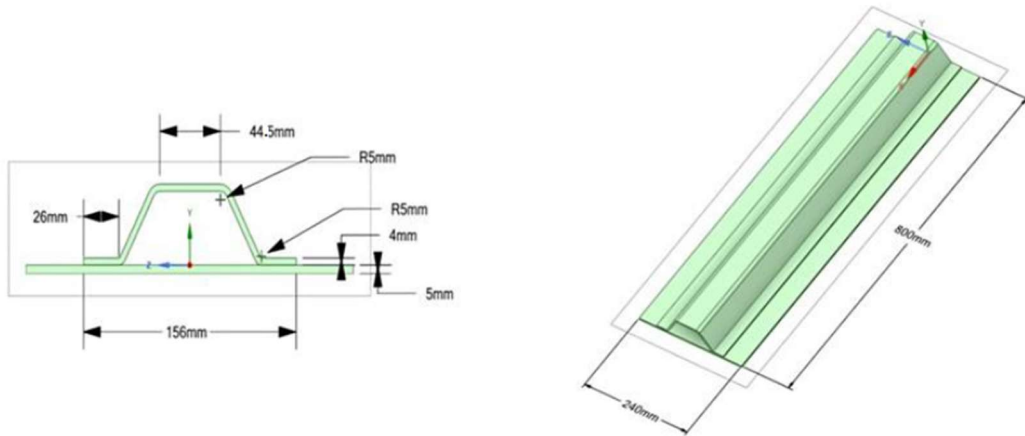
Bu çalışmanın doğrulamasının yapılmasında kullanılan, Filippatos vd. [4] yaptığı çalışmada, sürdürülebilirliğin mühendislik tasarım sürecine katılmasını amaçlayan çok kriterli bir tasarım metodolojisi kullanılmaktadır. Çalışmanın çıkış noktası, havacılık ve savunma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan geleneksel tasarım yaklaşımlarının, sürdürülebilirliği yalnızca çevresel etki veya ağırlık azaltımı ile sınırlı şekilde ele almasıdır. Yazarlar, sürdürülebilirliğin yalnızca çevresel etki minimizasyonu olarak değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu; bunun yerine mekanik performans, maliyet, çevresel etki, döngüsellik (circularity) ve sosyal etki gibi farklı boyutları kapsayan bütüncül bir çerçeveye ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır.

Bu doğrultuda çalışmada [4], sürdürülebilirlik beş ana sütun (pillar) altında tanımlanmıştır: mekanik performans, maliyet, çevresel etki, döngüsellik ve sosyal etki (Şekil 2.1). Bu sütunların her biri için ayrı değerlendirme metrikleri geliştirilmiş ve bu metrikler, tasarım optimizasyonu sürecinde birlikte ele alınmıştır. Mekanik performans sütunu; toplam deformasyon ve birinci doğal frekans gibi yapısal davranışı temsil eden parametreler üzerinden tanımlanırken, maliyet ve çevresel etki sütunları büyük ölçüde bileşen kütlesi ve seçilen malzemeye bağlı olarak hesaplanmaktadır. Döngüsellik ve sosyal etki sütunları ise geometriden bağımsız olarak, doğrudan malzeme özellikleri ve geri dönüşüm potansiyelleri üzerinden değerlendirilmektedir.



Şekil 2.1: Sürdürülebilirlik için tanımlanan beş sütun ve sürdürülebilirlik indeksi [4]

Çalışmanın [4] metodolojisi dört ana fazdan oluşmaktadır. İlk fazda, referans bir uçak yapısal bileşeni seçilmiş ve tasarım uzayı tanımlanmıştır. Bu aşamada geometrik parametreler, malzeme seçenekleri, yükleme koşulları ve sınır şartları belirlenmiştir. Seçilen yapı, literatürde yaygın olarak kullanılan bir takviye yapılı panel olup, hem metal hem de kompozit malzeme konfigürasyonları için değerlendirilmiştir. Bu sayede farklı malzeme sınıflarının sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenebilmiştir. Vaka çalışması olarak kullanılan takviye yapılı panel Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Takviye yapılı panel geometrisi [4]

Seçilen tasarım gereksinimleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Tasarım gereksinimleri [4]

Gereksinimler	
Yapısal	Sürdürülebilirlik
Emniyet faktörü 1.15 ve 1.5 arasında olmalıdır	Çevresel ayak izi en aza indirgenmelidir
Hasar oluşmamalıdır	Maliyet en aza indirgenmelidir
Deformasyon en aza indirgenmelidir	Sosyal etki en aza indirgenmelidir
Birinci mod frekansı maksimize edilmelidir	Döngüsellik maksimize edilmelidir

Kullanılan tasarım parametreleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2: Tasarım Parametreleri [4]

Parametrik Tasarım		
Kısıtlamalar	Değişkenler	Çıktılar
Emniyet faktörü: 1.15 ve 1.5 arasında	Yüzey kalınlığı: 3-8 mm Takviye yapısı kalınlığı: 3-8 mm Takviye tepesi genişliği: 35-55 mm	Maksimum deformasyon Birinci mod frekansı Yüzey kalınlığı Takviye yapısı kalınlığı

Çalışmanın [4] ikinci fazında, parametrik tasarım uzayı içerisinde tasarım değişkenlerinin etkilerini incelemek amacıyla deney tasarımı (ing. Design of Experiments, DOE) yaklaşımı uygulanmıştır. Merkezi kompozit tasarım ile belirlenen tasarım noktalarında sonlu elemanlar analizi yapılmış, ardından elde edilen sonuçlar kullanılarak yanıt yüzeyi metodu (ing. Response Surface Method, RSM) ile matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu modeller, tasarım değişkenleri ile sürdürülebilirlik sütunları arasındaki ilişkileri tanımlayan fonksiyonlar olarak kullanılmıştır. Böylece, yüksek hesaplama maliyeti gerektiren sonlu eleman analizlerinin yerine, hızlı değerlendirme imkânı sağlayan bir optimizasyon altyapısı oluşturulmuştur.

Aynı faz içerisinde, mekanik performans kriterleri için emniyet faktörü, deformasyon ve modal gereksinimler gibi kısıtlar tanımlanmıştır [4]. Metal malzemeler için von Mises gerilme kriteri kullanılırken, kompozit malzemeler için maksimum gerilme kriteri ve Cuntze hasar kriteri uygulanmıştır. Bu yaklaşım, sürdürülebilirlik değerlendirmesinin yapısal güvenlikten ödün vermeden gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Böylece sürdürülebilirlik, performansın yerine geçen bir kriter değil, performans ile birlikte optimize edilen bir hedef olarak ele alınmıştır.

Çalışmada [4], çevresel etki değerlendirmesi, YDD prensiplerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Hammadde üretimi, birincil imalat süreci, kullanım aşaması ve bertaraf/geri dönüşüm senaryoları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Özellikle kullanım aşamasında, bileşen kütlesinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisi dikkate alınmış ve farklı yakıt senaryoları (örneğin kerosen ve hidrojen) karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu sayede, malzeme seçiminin yalnızca üretim aşamasında değil, tüm sistem ömrü boyunca çevresel etkiyi nasıl etkilediği nicel olarak gösterilmiştir. Kullanılan malzeme konfigürasyonları Çizelge 2.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3: Malzeme değişkenleri [4]

Tasarım Konfigürasyonları		
No.	Yüzey	Takviye Yapısı
1	Alüminyum 2024 T3	Alüminyum 2024 T3
2	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (Termoset)	Alüminyum 2024 T3
3	Alüminyum 2024 T3	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (Termoset)
4	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (Termoset)	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (Termoset)
5	Ti-6Al-4V	Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (Termoset)
6	Karbon Fiber Takviyeli Termoplastik Polimer (PEEK)	Karbon Fiber Takviyeli Termoplastik Polimer (PEEK)

Döngüsellik değerlendirmesi çalışmanın [4] en özgün yönlerinden biridir. Bu kapsamda, malzemelerin geri dönüşüm sonrası elastik modülüslerindeki azalma temel alınarak bir döngüsellik indeksi tanımlanmıştır. Metal malzemeler için kapalı döngü geri dönüşüm varsayımı yapılırken, termoset ve termoplastik kompozitler için farklı geri dönüşüm senaryoları modellenmiştir. Özellikle termoset esaslı KFTP malzemelerde matrisin geri dönüştürülememesi nedeniyle ceza faktörleri uygulanmış; termoplastik matrisli kompozitlerin bu açıdan daha avantajlı olduğu gösterilmiştir. Bu değerlendirme, kompozit geri dönüşümünün tasarım aşamasında nasıl nicel bir parametre haline getirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın [4] son fazında, tüm sürdürülebilirlik sütunları normalize edilmiş ve çok kriterli karar verme (ÇKKV; ing. Multi-Criteria Decision Making, MCDM) yöntemleri kullanılarak tek bir sürdürülebilirlik indeksi elde edilmiştir. İlgili sürdürülebilirlik indeksi (SI) Eşitlik (1)’de verilmiştir.

$$SI = K_P P + K_C C + K_E E + K_{CIRC} CIRC + K_S S \quad (1)$$

Burada $P, C, E, CIRC$ ve S normalize edilmiş parametrelerdir. Sırasıyla; performans, maliyet, çevresel etki, döngüsellik ve sosyal etki. K_i ise $i = P, C, E, CIRC, S$ olmak üzere, ilgili parametrenin ağırlık katsayısıdır.

Farklı ağırlık senaryoları tanımlanarak, tasarım önceliklerinin (örneğin çevresel etki öncelikli veya maliyet öncelikli tasarım) sonuçlar üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analizler, sürdürülebilirlik kavramının tasarımcı tercihleri ile nasıl şekillendiğini ve tek bir “en iyi” çözüm yerine, farklı öncelikler için farklı konfigürasyonların daha iyi olabileceğini göstermektedir.

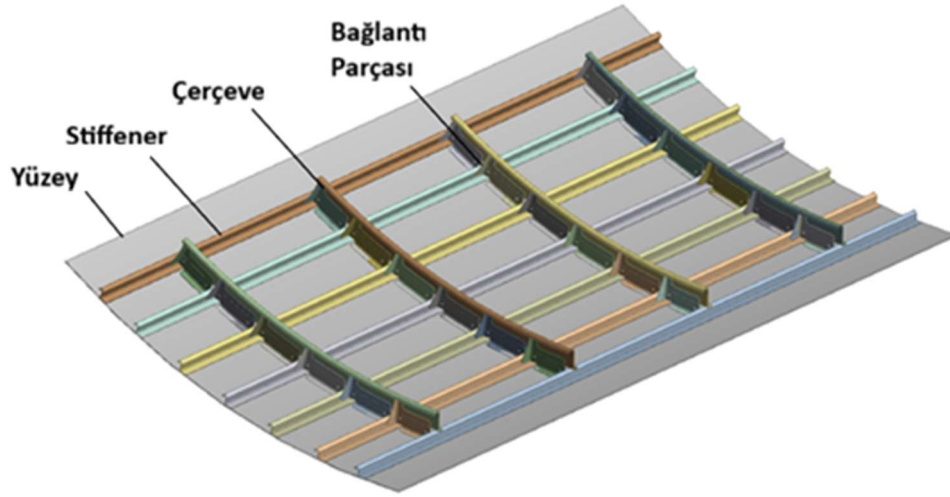
Çalışmanın [4] sonuçları, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımının geleneksel performans odaklı tasarımlara kıyasla daha dengeli ve uzun vadeli çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle kompozit malzeme seçimi ve geometrik tasarımın birlikte optimize edilmesi sayesinde, çevresel etki anlamlı ölçüde azaltılırken yapısal performansın kabul edilebilir sınırlar içinde tutulabildiği gösterilmiştir. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesinin havacılık ve savunma yapıları için uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir yöntem olduğunu güçlü biçimde ortaya koymaktadır.

Anagnostopoulou vd. [5] çalışması da havacılık sektöründe sürdürülebilirlik tabanlı tasarım çalışmalarına bir örnektir. Bu çalışmada, sürdürülebilirlik kavramı kompozit yapı tasarımında malzeme seviyesine odaklı bir şekilde ele alınmakta ve tasarım sürecinin erken aşamalarına entegre edilmektedir. Çalışmanın temel amacı, kompozit yapıların sürdürülebilirliğinin yalnızca yapısal performans veya ağırlık azaltımı üzerinden değil; malzeme üretim süreçleri, enerji yoğunluğu ve çevresel ayak izi bağlamında değerlendirilmesini sağlamaktır.

Çalışmada [5], kompozit malzemelerin çevresel etkilerinin belirlenmesinde malzeme bazlı yaşam döngüsü envanteri (ing. Life Cycle Inventory, LCI) verileri kullanılmıştır. Karbon elyaf, cam elyaf ve farklı reçine malzemeleri için enerji tüketimi, CO₂ gazı emisyonları ve kaynak kullanımı gibi çevresel etki parametreleri detaylı biçimde modellenmiştir. Bu parametreler, kompozit yapıların mekanik özellikleri ile birlikte değerlendirilerek, belirli bir yapısal gereksinimi karşılayan farklı malzeme konfigürasyonlarının sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılmasına

olarak sağlamaktadır. Böylece çalışmada, sürdürülebilirlik göstergeleri doğrudan malzeme seçimine bağlı değişkenler haline getirilmiştir.

Makalede [5] vaka çalışması olarak, uçak gövdesini temsil eden bir kompozit gövde paneli seçilmiştir (Şekil 2.3). Gövde paneli, hem mekanik performans gereksinimleri hem de malzeme ve üretim kaynaklı çevresel etkilerin birlikte değerlendirilebilmesi açısından uygun bir referans yapı olarak tercih edilmiştir. Panel geometrisi ve yükleme koşulları sabit tutulmuş; böylece sürdürülebilirlik değerlendirmesinde ortaya çıkan farklılıkların, geometrik değişimlerden ziyade malzeme seçimi, elyaf türü, matris sistemi ve kompozit mimarisi gibi tasarım parametrelerinden kaynaklanması sağlanmıştır.



Şekil 2.3: Anagnostopoulou vd. vaka çalışması [5]

Yapısal analiz tarafında ise çalışma [5], ileri düzey geometrik optimizasyon veya sistem seviyesinde çok hedefli optimizasyon yerine, belirli mekanik performans gereksinimlerini sağlayan malzeme konfigürasyonlarının değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Kompozit tabaka dizilimleri ve fiber hacim oranları, yapısal gereksinimleri sağlayacak şekilde sınırlandırılmış; sürdürülebilirlik değerlendirmesi bu kabul edilebilir tasarım uzayı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilirliği bir optimizasyon hedefi olmaktan ziyade, tasarım filtreleme ve karşılaştırma kriteri olarak kullanmaktadır.

Çalışmada [5] sürdürülebilirlik değerlendirmesinin tasarımcı tercihlerine olan duyarlılığını ortaya koymak amacıyla, birden fazla ÇKKV yöntemi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı çevresel etki kategorileri ve mekanik performans kriterleri öncelikle normalize edilmiş, ardından farklı ÇKKV yaklaşımları aracılığıyla tekil sürdürülebilirlik indekslerine dönüştürülmüştür. Kullanılan yöntemlerin her biri, kriterler arasındaki kayıp/kazançları farklı matematiksel temellere dayandırarak ele almakta; bu durum, aynı tasarım alternatiflerinin yöntemden bağımsız olarak ne ölçüde tutarlı sonuçlar verdiğinin analiz edilmesine imkân tanımaktadır.

Çalışmada [5] elde edilen sonuçlar, seçilen ÇKKV yönteminin, özellikle kriter ağırlıklarının dağılımı ve sıralama sonuçları üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bazı yöntemlerin çevresel etki göstergelerine daha duyarlı olduğu, bazılarının ise mekanik performans veya maliyet kriterlerini daha baskın hâle getirdiği gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz sayesinde çalışma, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım kararlarının tek bir karar verme metoduna bağlı kalmadan değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymakta; ÇKKV yöntem seçiminin tasarım sonuçları üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir. Farklı ÇKKV yöntemleri ile yapılan hesaplamaların sıralanışı Çizelge 2.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4: Çalışma [5] Sonucu Yapılan Sıralama

Panel	SAW	WP	TOPSIS	R-TOPSIS	Ortalama	Derece
S0	9	9	9	9	9	9
S1	8	8	6	8	6.75	7
S2	7	7	8	7	8	8
S3	6	6	7	6	6.25	6
S4	4	4	4	4	4	4
S5	5	5	5	5	5	5
S6	3	3	3	3	3	3
S7	1	1	1	1	1	1
S8	2	2	2	2	2	2

Altuntaş (2025), sürdürülebilir tasarım ilkeleri doğrultusunda PEKK/KF esaslı termoplastik kompozit bir uçak rib parçasının yeniden şekillendirilebilirlik özelliğini incelemiştir [6]. Çalışmada aynı parçaya birden fazla termoform çevrimi uygulanmış ve çevrimlerin mekanik, termal ve mikroyapısal etkileri deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çevrim sayısının artmasıyla birlikte

kristallik oranı ve elastik modülün arttığını, buna karşılık basma dayanımı ve ısı kararlılık değerlerinde azalma meydana geldiğini göstermiştir.

Çalışmada [6] yaşam döngüsü değerlendirmesi yaşam döngüsü maliyeti ve döngüsellik kriterleri birlikte ele alınmış; Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process, AHP), ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak farklı malzeme alternatifleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ilk çevrimdeki termoplastik kompozit seçeneğinin sürdürülebilirlik performansı açısından en yüksek sıralamaya sahip olduğunu, çevrim sayısının artmasıyla sürdürülebilirlik performansının kademeli olarak azaldığını ortaya koymuştur.

2.2 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, YDD

YDD bir ürünün veya sistemin çevresel etkilerinin, yaşam döngüsü boyunca nicel olarak değerlendirilmesini amaçlayan sistematik bir yöntemdir. YDD yaklaşımı, hammaddenin çıkarılmasından başlayarak üretim, kullanım, bakım ve yaşam döngüsü sonu (bertaraf veya geri dönüşüm) aşamalarına kadar tüm süreçleri kapsayan bütüncül bir bakış açısı sunar. Bu yönüyle YDD, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım çalışmalarında çevresel etkinin sezgisel değerlendirmelerden çıkarılarak ölçülebilir ve karşılaştırılabilir bir mühendislik girdisi hâline getirilmesini sağlamaktadır. Uluslararası standartlar kapsamında YDD metodolojisi; hedef ve kapsam tanımı, yaşam döngüsü envanteri, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED; ing. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) ve sonuçların yorumlanması olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır [2, 6]. Şekil 2.4'te yaşam döngüsü değerlendirme kavramsal modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi kavramsal modeli [8]

Kompozit yapıların YDD analizlerinde kompozit malzemeyi oluşturan elyaf ve matris birlikte ele alınmaktadır. Elyaf üretimi, reçine sentezi, prepreg veya infüzyon gibi imalat süreçleri; enerji sarfiyatları ve CO₂ gazı emisyonları açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle karbon elyaf üretimi, yüksek enerji gereksinimi nedeniyle kompozit yapıların çevresel ayak izinde baskın bir rol oynamaktadır. Bu nedenle kompozit yapılara yönelik YDD çalışmalarında, elyaf türü, fiber hacim oranı ve üretim yöntemi gibi parametreler çevresel etki üzerinde belirleyici faktörler olarak ele alınmaktadır [9] [10].

Havacılık ve savunma sektörü YDD uygulamalarında, kullanım aşamasının çevresel etkisi genellikle üretim ve yaşam döngüsü sonu aşamalarına göre daha fazladır. Uçan sistemlerde yapısal ağırlık, doğrudan yakıt tüketimi ve buna bağlı sera gazı emisyonları üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle birçok çalışmada, kullanım aşamasındaki emisyonlar toplam yaşam döngüsü etkisinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerin ağırlık avantajı, üretim aşamasındaki yüksek çevresel maliyetlerine rağmen, kullanım aşamasında sağladıkları yakıt tasarrufu sayesinde toplam yaşam döngüsü etkisini azaltabilmektedir [3] [11]. Bu durum, YDD'nin tek bir yaşam döngüsü fazına odaklanmak yerine, tüm fazları birlikte değerlendirmesinin önemini vurgulamaktadır.

YDD çalışmalarında önemli bir diğer teknik konu, etki değerlendirme yöntemlerinin ve fonksiyonel birimin doğru tanımlanmasıdır. Küresel ısınma potansiyeli (ing.

Global Warming Potential), kümülatif enerji talebi (ing. Cumulative Energy Demand) ve kaynak tükenmesi gibi göstergeler, havacılık ve kompozit yapı literatüründe en yaygın kullanılan YDED metrikleri arasında yer almaktadır. Fonksiyonel birimin yanlış veya eksik tanımlanması, farklı tasarım alternatifleri arasında yanıltıcı karşılaştırmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle, kompozit yapıların YDD analizlerinde fonksiyonel birim çoğunlukla “belirli bir yük taşıma kapasitesini sağlayan yapı” veya “birim görev süresi başına yapı” şeklinde tanımlanmaktadır [12]. Bu yaklaşım, çevresel etkinin doğrudan yapısal performans ile ilişkilendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Kompozit yapıların yaşam döngüsü sonu senaryoları, YDD çalışmalarında belirsizliğin en yüksek olduğu alanlardan biridir. Termoset matrisli kompozitlerin sınırlı geri dönüşüm kabiliyeti, çoğu çalışmada çevresel etki açısından dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri; geri kazanılan elyafın mekanik özelliklerindeki kayıplar nedeniyle genellikle açık döngü (open-loop) geri dönüşüm senaryoları ile modellenmektedir [13]. Buna karşılık alüminyum malzemelerin geri dönüşümünde neredeyse hiç mekanik kayıp olmadığından kapalı döngü şeklinde değerlendirilmektedir. Açık döngü, geri dönüştürülen malzemenin, ilk kullanımından farklı ve genellikle daha düşük performans gerektiren bir üründe değerlendirilmesidir. Kapalı döngü ise, geri dönüştürülen malzemenin, aynı veya eşdeğer ürünün üretiminde yeniden kullanılabilirdiği durumdur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, YDD’nin yalnızca bir değerlendirme aracı değil, aynı zamanda tasarım eniyileme süreçlerinin bir parçası olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu kapsamda YDD çıktıları, çok hedefli tasarım optimizasyonu problemlerinde hedef fonksiyon veya kısıt olarak tanımlanmakta; çevresel etki, ağırlık ve maliyet gibi geleneksel mühendislik kriterleri ile birlikte optimize edilmektedir [14].

2.3 Sürdürülebilir Kompozit Yapılar

Kompozit malzemelerin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda geri dönüştürülmesi, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de değerli elyaflarının yeniden kullanımın sağlanması açısından giderek artan bir önem taşımaktadır [15].

Kompozit atık geri dönüşüm yöntemleri genel olarak mekanik, termal ve kimyasal (solvolysis/hidrolysis) kategorilerinde sınıflandırılır; her bir yöntemin uygulanabilirlik düzeyi ve geri kazanılan elyafların mekanik özellikleri üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır [16].

2.3.1 Mekanik geri dönüşüm

Mekanik geri dönüşüm, kompozit atıkların boyutunun küçültülmesi ve fiziksel olarak işlenmesi esasına dayanır. Bu yöntemde atık kompozitler öğütme, kırma, ezme veya öğütme gibi proseslerle küçük parçalara ayrılır ve bu parçalar ya dolgu malzemesi olarak ya da daha düşük performanslı kompozitlerde takviye malzemesi olarak yeniden kullanılır. Mekanik geri dönüşümün temel avantajı, yüksek sıcaklık veya kimyasal kullanım gerektirmemesi ve diğer yöntemlere kıyasla daha düşük işlem maliyetlerine sahip olmasıdır. Ancak bu yöntemin en önemli sınırlılığı, elyafların orijinalliklerinin kaybolmasıdır. Bu yöntemle geri dönüştürülmüş elyaflar kısa ve düzensiz hale gelir, yüzey kaliteleri bozulur ve bu nedenle yeniden kullanıldıklarında mekanik özellikleri önemli ölçüde düşer (çoğu durumda %40-50 arasında dayanım korunur) [17, 18]. Şekil 2.5'te mekanik geri dönüşüm yöntemi ile geri kazanılmış karbon elyaflar gösterilmiştir.

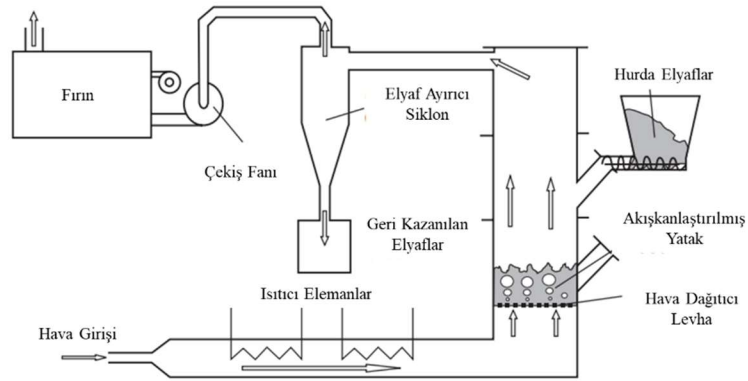


Şekil 2.5: Mekanik geri dönüşüm ile geri kazanılmış elyaf [19]

Mekanik geri dönüşüm genellikle cam elyaf takviyeli kompozit (CETK) atıkları için endüstriyel ölçekte kullanılabilir hale gelmiştir; karbon elyaf takviyeli kompozitlerin (KETK) geri dönüşümünde ise genellikle ön işleme veya termal/kimyasal süreçlerden önce boyut azaltma amacıyla uygulanmaktadır. Elyaf yapısının mekanik işlemler ile bozulması, yüksek performans gerektiren uygulamalar için geri kazanılan malzemeyi sınırlı hale getirir. Bu nedenle mekanik yöntem, yüksek performanslı elyafların geri kazanımından ziyade malzeme hacmini azaltmanın ve dolgu olarak kullanımın ekonomik bir yoludur [20].

2.3.2 Termal geri dönüşüm

Termal geri dönüşüm, kompozit matrisin termal ayrışma yoluyla yok edilmesini ve karbon veya cam elyaflarının geri kazanılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu kapsamda en yaygın termal teknik pirolizdir, burada kompozit atıklar yüksek sıcaklıkta (genellikle 400–700 °C aralığında) inert (oksijensiz) bir ortamda ısıtılır. Ayrıca, piroliz dışında da akışkanlaştırılmış yatak piroliz (fluidised bed prolysis) veya mikrodalga destekli termal ayrıştırma gibi alt gruplar bulunmaktadır. Bu işlemle organik reçine yapısı bozunur ve elyaflar ayrılır; termal ortamdaki kontrol sayesinde uzun elyaflar ve yüksek mekanik performans potansiyeline sahip lifler elde edilebilir. Termal geri dönüşüm, özellikle KFTP için uygundur çünkü karbon elyaflar yüksek termal stabiliteye sahiptir ve termal işlem sonrası orijinal elyaf mekanik modülünün büyük bir yüzdesi korunabilir. Endüstriyel uygulamalarda elde edilen liflerin mekanik özelliklerinin, ilk üretim liflere kıyasla yaklaşık %80-90 civarında korunduğu bildirilmektedir, ancak bu oran proses parametrelerine bağlıdır (sıcaklık, ısıtma süresi vb.) [21]. Şekil 2.6’da termal geri dönüşüm yöntemlerinden biri olan akışkanlaştırılmış yatak piroliz yönteminin adımları gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Akışkanlaştırılmış yatak piroliz adımları [22]

Termal geri dönüşüm ile geri kazanılmış elyaflar mekanik özelliklerini daha çok korumalarına karşın, termal geri dönüşüm yöntemlerinin işlem enerji gereksinimi mekanik geri dönüşüme kıyasla daha yüksektir. Mekanik özelliklerin daha az önemli olduğu durumlarda, maliyeti ve CO₂ salınımı daha az olan mekanik geri dönüşüm tercih edilmektedir [23].

2.3.3 Kimyasal geri dönüşüm

Kimyasal geri dönüşümde, kompozit malzemede bulunan polimer reçine çözücüler veya reaktif kimyasallar kullanarak moleküler seviyede ayrıştırılır. Reçine, solvoliz veya hidrolisis gibi reaksiyonlarla çözünür ve elyaf matristen ayrılır. Solvoliz, uygun çözücü, sıcaklık ve reaksiyon süresi ile matrisin depolimerizasyonunu sağlar. Hidrolisis ise su veya süperkritik akışkanlar altında reçineyi parçalama yeteneğine sahiptir. Kimyasal yöntemlerin en önemli avantajı, elyafların uzunluğunu ve dolayısıyla mekanik performans potansiyelini koruma kapasitesidir. Kimyasal geri dönüşüm ile elde edilen elyaflar, lif yönelim ve boyu korunarak üretildiklerinde, mekanik özellikler açısından termal pirolizden daha yüksek seviyelerde koruma sağlayabilir (yaklaşık olarak %90-95 aralığında) ve bu nedenle yüksek performans gerektiren uygulamalarda en çok tercih edilen yöntemdir [21].

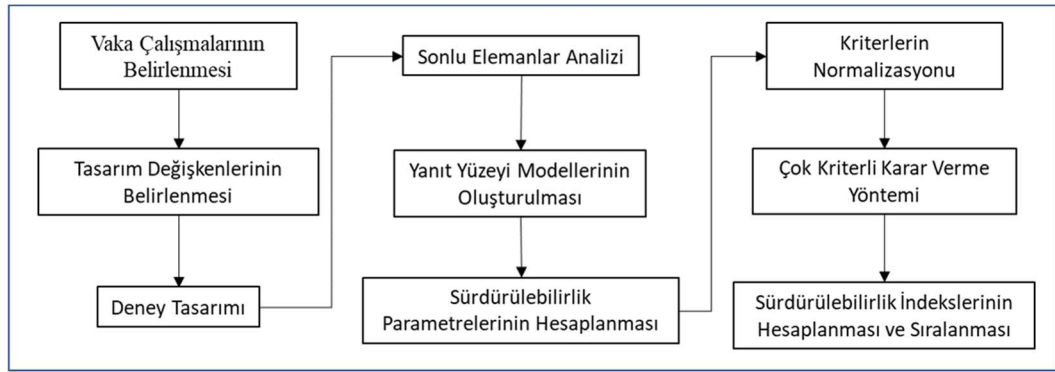
Kimyasal süreçlerin dezavantajı, çoğu zaman çevresel ve ekonomik maliyetlerdir. Kullanılan çözücülerin geri kazanımı, işlenmesi ve atık su yönetimi gibi ek süreçler gerektirir; bu da yöntemin uygulanabilirliğini etkiler. Ayrıca, ticari ölçekli uygulamaların yaygınlaşması halen araştırma ve geliştirme gerektirmektedir. Şekil 2.7’de kimyasal bir dönüşüm yöntemi olan solvoliz yöntemi adımları gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Solvoliz yöntemi diagramı [24]

3. YÖNTEM

Bu bölüm, tez kapsamında ele alınan sürdürülebilirlik tabanlı tasarım ve değerlendirme metodolojisini açıklamaktadır. Söz konusu yöntemin adımları ve mantıksal sıralaması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Sürdürülebilirlik tabanlı tasarım akış diyagramı

Çalışma, öncelikle vaka çalışmalarının belirlenmesi ile başlamaktadır. Bu aşamada, tez kapsamında incelenecek yapısal sistem seçilmekte, uygulama alanı, yükleme koşulları ve kullanım senaryoları tanımlanmaktadır. Vaka çalışmasının doğru seçilmesi, hem mühendislik analizlerinin gerçekçi olmasını hem de sürdürülebilirlik değerlendirmelerinin anlamlı sonuçlar üretmesini sağlamaktadır [25].

Bir sonraki adımda, geometrik ve malzeme değişkenlerinin belirlenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu aşama, tasarım uzayının tanımlandığı kritik bir adımdır. Panel kalınlıkları, destekleyici geometrileri, yerleşim aralıkları gibi geometrik parametreler ile birlikte, kullanılan malzemelere ait elastik özellikler, yoğunluk ve çevresel etki verileri tasarım değişkenleri olarak ele alınmaktadır. Böylece hem yapısal performansı hem de sürdürülebilirlik metriklerini etkileyen tüm temel parametreler analiz sürecine dahil edilmektedir.

Tanımlanan değişkenler doğrultusunda deney tasarımı yaklaşımı uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında deney tasarımı, fiziksel deneylere değil, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal analizlere dayanmaktadır. Deney tasarımı

sayesinde çok boyutlu tasarım uzayı sistematik ve verimli bir şekilde örneklenmekte, sınırlı sayıda analizle değişkenlerin çıktılar üzerindeki etkileri yakalanabilmektedir. Bu yöntem, hem hesaplama maliyetini düşürmekte hem de istatistiksel olarak anlamlı bir veri seti oluşturulmasına olanak tanımaktadır. [26].

Deney tasarımı ile belirlenen tasarım noktaları için statik yapısal ve modal sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmektedir. Sonlu elemanlar analizleri aracılığıyla, her bir konfigürasyonun yapısal davranışı detaylı olarak incelenmekte; gerilme, deplasman, doğal frekans ve emniyet faktörü gibi performans kriterleri hesaplanmaktadır.

Sonraki aşamada, elde edilen yapısal analiz sonuçlarına kullanılarak YYM oluşturulmaktadır. Bu noktada, performans çıktıları ile tasarım değişkenleri arasındaki ilişkiler belirgin hale gelmektedir. Ara değerler yakınsanarak, çok sayıda konfigürasyonun hızlı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün kılınmaktadır.

Elde edilen YYM verileri kullanılarak, her bir konfigürasyon için bir performans parametresi hesaplanmaktadır. Performans parametresi, istenilen emniyet faktörüne sahip konfigürasyonların deplasman değerleri ve ilk mod frekansları kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yapısal performans analizlerine ek olarak, çalışmanın sürdürülebilirlik boyutunu oluşturan yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmektedir. Böylece yalnızca mühendislik performansına odaklanan geleneksel yaklaşımların ötesine geçilerek, tasarımların yaşam döngüsü boyunca yarattığı çok boyutlu etkiler nicel olarak değerlendirilmektedir. YDD kapsamında tüm malzeme alternatifleri için kütleye bağlı maliyet, çevresel etki, döngüsellik ve sosyal etki parametreleri hesaplanmaktadır. YYM ile elde edilen kütle değerleri ile tüm tasarım konfigürasyonları için hesaplama yapılmaktadır.

Elde edilen tüm çıktılar, farklı ölçek ve birimlere sahip olduklarından dolayı, parametrelerin normalize edilmektedir. Normalizasyon işlemi, performans, çevresel ve ekonomik göstergelerin eşdeğer şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Normalizasyon sonrasında, çok sayıda kriterin eş zamanlı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla ÇKKV yöntemi uygulanmaktadır. ÇKKV yaklaşımı sayesinde, farklı sürdürülebilirlik boyutlarını temsil eden kriterler bütüncül bir

çerçevede ele alınmakta ve tasarım konfigürasyonları arası karşılaştırmalar sistematik bir şekilde yapılabilmektedir [27,28].

Bu sürecin çıktısı olarak, her bir tasarım konfigürasyonu için sürdürülebilirlik indeksi hesaplanmaktadır. Sürdürülebilirlik indeksi, yapısal performans ile çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri tek bir skaler değerde göstermekte ve tasarımların genel sürdürülebilirlik seviyesini temsil etmektedir. Bu indeks, mühendislik tasarım sürecinde karar vericilere açık ve karşılaştırılabilir bir metrik sunmaktadır.

Son aşamada ise, hesaplanan sürdürülebilirlik indeksleri kullanılarak konfigürasyonların karşılaştırılması ve sıralanması gerçekleştirilmektedir. Bu adım, en uygun tasarım çözümlerinin belirlenmesini ve sürdürülebilirlik açısından en iyi konfigürasyonların ortaya konulmasını sağlamaktadır.

3.1 Malzeme Seçenekleri

Çalışma kapsamında, her iki vaka çalışması için, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım değerlendirmesi amacıyla beş farklı malzeme alternatifi incelenmiştir. Seçilen malzemeler; mevcut tasarımdaki alüminyum 6061-T6, ilk üretim ve farklı geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak elde edilmiş karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) kompozit malzemelerden oluşmaktadır.

Çalışmada kullanılan malzeme alternatifleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Alüminyum 6061-T6
2. İlk üretim karbon fiber takviyeli polimer kompozit (İÜ-KFTP)
3. Mekanik geri dönüştürülmüş KFTP (MGD-KFTP)
4. Termal geri dönüştürülmüş KFTP (TGD-KFTP)
5. Kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP (KGD-KFTP)

Alüminyum 6061-T6, savunma ve havacılık yapılarında yaygın olarak kullanılan geleneksel mühendislik malzemelerinden biri olması nedeniyle referans malzeme olarak seçilmiştir. Alüminyum alaşımları; üretim kolaylığı, düşük maliyet, yüksek geri dönüştürülebilirlik ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle kanister ve benzeri yer

sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle mevcut geri dönüşüm altyapısının gelişmiş olması, alüminyumun döngüsellik açısından avantajlı bir malzeme olmasını sağlamaktadır.

İlk üretim KFTP malzeme, yüksek mukavemet ve özgül direngenlik özellikleri sayesinde 5 alternatif arasında en yüksek mekanik performansa sahip malzemedir. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, özellikle ağırlık azaltımının kritik olduğu savunma ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük yoğunlukları sayesinde önemli kütle avantajı sağlarken, yüksek elastik modülüs ve dayanım değerleri sayesinde yapısal performansı artırabilmektedirler [31,32]. Ancak karbon fiber üretim süreçlerinin yüksek enerji tüketimine sahip olması ve termoset esaslı kompozitlerin geri dönüşüm zorlukları, bu malzemelerin sürdürülebilirlik açısından önemli dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenle ilk üretim KFTP malzemeler çalışmada yüksek performanslı ancak çevresel etkisi nispeten yüksek bir malzeme alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın temel amaçlarından biri, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin mühendislik yapılarında kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Bu kapsamda üç farklı geri dönüşüm yöntemini temsil eden KFTP alternatifleri değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki olan mekanik geri dönüştürülmüş KFTP (MGD-KFTP), kompozit atıkların fiziksel olarak parçalanması ve yeniden kullanılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde elyaf boyları önemli ölçüde kısalmakta ve mekanik özelliklerde belirgin düşüşler meydana gelmektedir. Buna rağmen mekanik geri dönüşüm yöntemi düşük enerji ihtiyacı ve düşük işlem maliyeti nedeniyle çevresel açıdan avantaj sağlayabilmektedir. Düşük performanslı ancak çevresel etkisi daha düşük malzeme alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

Termal geri dönüştürülmüş KFTP (TGD-KFTP), piroliz benzeri yüksek sıcaklık prosesleri kullanılarak elde edilen geri kazanılmış karbon fiberleri temsil etmektedir. Bu yöntemde polimer matris termal olarak ayrıştırılmakta ve karbon fiberlerin önemli bir kısmı korunabilmektedir. Mekanik geri dönüşüme kıyasla daha yüksek mekanik özelliklerin korunabilmesi nedeniyle, termal geri dönüşüm yöntemi yapısal uygulamalar açısından daha avantajlı kabul edilmektedir. Ancak işlem sırasında kullanılan yüksek sıcaklıklar enerji tüketimini artırmakta ve proses maliyetini

yükseltmektedir. TGD-KFTP, performans ve sürdürülebilirlik arasında daha dengeli bir çözüm olarak değerlendirilmiştir.

Kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP (KGD-KFTP) ise solvoliz ve benzeri kimyasal geri dönüşüm süreçleri ile elde edilen geri kazanılmış karbon fiberleri temsil etmektedir. Kimyasal geri dönüşüm yöntemleri, karbon fiberlerin mekanik özelliklerini en yüksek seviyede koruyabilen yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem sayesinde geri kazanılmış elyaflar ilk üretim karbon fiberlere yakın elastik özellikler göstermektedir [20]. Bununla birlikte kimyasal geri dönüşüm süreçleri daha karmaşık işlem adımları, kimyasal kullanımı ve daha yüksek maliyet gereksinimleri içermektedir. Bu nedenle KGD-KFTP, yüksek performanslı ve sürdürülebilirliği artırılmış bir kompozit alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

Kompozit malzemelerin modellenmesinde simetrik ve yarı-izotropik davranış elde edilmesi amacıyla tüm kompozit konfigürasyonlarda aynı laminat dizilimi kullanılmıştır. Bu kapsamda $[0/45/-45/90]_{2s}$ tabaka dizilimi tercih edilmiştir. Bu dizilim sayesinde farklı yük yönlerinde dengeli mekanik davranış elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca simetrik laminat yapısı sayesinde eğilme-bükülme bağlaşımı azaltılarak daha kararlı yapısal davranış sağlanmıştır [33].

Çalışmada kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler literatür kaynaklarından elde edilmiştir. Alüminyum malzemeye ait özellikler, Metalik Malzemelerin Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Standardizasyonu (Metallic Materials Properties Development and Standardization, MMPDS) [34] standardından alınırken, ilk üretim KFTP özellikleri Composite Materials Handbook [35] (CMH-17) kaynaklarından elde edilmiştir. Geri dönüştürülmüş KFTP malzemelerine ait mekanik özellikler ise geri dönüşüm teknolojileri üzerine gerçekleştirilen güncel literatür çalışmalarından alınmıştır [13, 19]. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kompozit malzemeler için verilen mekanik özellikler tek yönlü serimi ifade etmektedir.

Çizelge 3.1: Malzeme Alternatifleri Mekanik Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk [kg/m ³]	Elastik Modül [GPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Kayma Modülü [GPa]
Alüminyum 6061-T6	2770	68.9	276	26
İÜ-KFTP	1540	209	1979	5.5
MGD KFTP	1500	80	800	2.3
TGD KFTP	1520	165	1450	3.4
KGD KFTP	1530	180	1750	4.2

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan tek yönlü kompozit malzemelere ait ortotropik elastik özellikler ile gerilme ve gerinim sınırları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Kompozit Malzeme Mekanik Özellikleri

Özellik	Yön	İlk Üretim KFTP	KGD- KFTP	TGD- KFTP	MGD- KFTP
Elastisite modülü (GPa)	x	209	180	165	80
Elastisite modülü (GPa)	y	9,45	9,45	9,45	9,45
Elastisite modülü (GPa)	z	9,45	9,45	9,45	9,45
Poisson oranı	xy	0,27	0,29	0,31	0,33
Poisson oranı	yz	0,40	0,42	0,44	0,45
Poisson oranı	xz	0,27	0,29	0,31	0,33
Kayma modülü (GPa)	xy	5,5	4,2	3,4	2,3
Kayma modülü (GPa)	yz	3,9	3,1	2,6	2,0
Kayma modülü (GPa)	xz	5,5	4,2	3,4	2,3
Çekme dayanımı (MPa)	x	1979	1750	1450	800
Çekme dayanımı (MPa)	y	26	26	26	26
Çekme dayanımı (MPa)	z	26	26	26	26
Basma dayanımı (MPa)	x	893	750	650	450
Basma dayanımı (MPa)	y	139	139	139	139
Basma dayanımı (MPa)	z	139	139	139	139
Kayma dayanımı (MPa)	xy	100	70	45	40
Kayma dayanımı (MPa)	yz	50	40	25	20
Kayma dayanımı (MPa)	xz	100	70	45	40
Çekme gerinimi sınırı	x	0,0092	0,0082	0,0072	0,0052
Çekme gerinimi sınırı	y	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031
Çekme gerinimi sınırı	z	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031
Basma gerinimi sınırı	x	0,0053	0,0050	0,0045	0,0035
Basma gerinimi sınırı	y	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172
Basma gerinimi sınırı	z	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172
Kayma gerinimi sınırı	xy	0,016	0,015	0,014	0,013
Kayma gerinimi sınırı	yz	0,014	0,013	0,012	0,011
Kayma gerinimi sınırı	xz	0,016	0,015	0,014	0,013

Burada, x eksenli lif doğrultusunu, y ve z eksenleri ise liflere dik enine doğrultuları göstermektedir.

Sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde kullanılmak üzere malzemelere ait CO₂ emisyonu ve maliyet parametreleri belirlenmiş ve Çizelge 3.3’de sunulmuştur. Bu parametreler, çalışma kapsamında gerçekleştirilen sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde çevresel ve ekonomik etki göstergeleri olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.3: Malzeme Sürdürülebilirlik Parametreleri

Malzeme	CO ₂ Emisyonu [kgCO ₂ /kg]	Maliyet [\$USD/kg]
Alüminyum 6061-T6	10	4.5
İÜ-KFTP	29	35
MGD KFTP	9	18
TGD KFTP	11	20
KGD KFTP	13	23

CO₂ emisyon katsayıları, malzemelerin üretim süreçleri sırasında ortaya çıkan sera gazı emisyonlarını içermektedir. Özellikle karbon fiber üretimi yüksek enerji gereksinimine sahip bir proses olduğundan, ilk üretim KFTP malzemelerin CO₂ emisyon değerleri geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksektir. Geri dönüştürülmüş KFTP malzemelerde ise, mevcut karbon elyafların yeniden kullanılması sayesinde üretim kaynaklı çevresel etkinin azaltılması mümkün olmaktadır. Geri dönüşüm yöntemi değiştikçe kullanılan enerji miktarı ve işlem süreçleri de değişmektedir. Mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri için farklı CO₂ emisyon değerleri elde edilmektedir.

Maliyet parametresi ise malzemelerin birim kütle başına üretim maliyetlerini temsil etmektedir. İlk üretim karbon fiber kompozit malzemeler yüksek performans avantajı sağlamakla birlikte, karbon fiber üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle ekonomik açıdan dezavantaj oluşturmaktadır. Geri dönüştürülmüş KFTP malzemeler ise geri kazanılmış elyaf kullanımı sayesinde daha düşük maliyetli alternatifler sunabilmektedir. Bununla birlikte geri dönüşüm teknolojisinin karmaşıklığına bağlı olarak maliyet seviyeleri değişiklik göstermektedir. Özellikle kimyasal geri dönüşüm yöntemleri daha yüksek işlem maliyetine sahipken, mekanik geri dönüşüm yöntemleri nispeten daha düşük maliyetli çözümler sunmaktadır.

Çalışmada kullanılan maliyet ve CO₂ emisyon değerleri, kompozit yaşam döngüsü değerlendirmesi ve geri dönüşüm teknolojileri üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmalarından elde edilmiştir [9, 10, 13, 21]. Bu literatür çalışmalarından elde edilen değerler, hammadde çıkarımı, parça üretimi, kullanım koşulu ve berteraf senaryolarını kapsayıcı, beşikten-mezara (İng. cradle-to-grave) niteliktedir. Bu değerler, ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilen sürdürülebilirlik indeksi hesaplamalarında kullanılmıştır.

3.2 Deney Tasarımı, DT

Tez kapsamında, vaka çalışmalarının farklı geometrik parametreler altında göstereceği yapısal ve sürdürülebilirlik davranışlarını sistematik şekilde inceleyebilmek amacıyla deney tasarımı yaklaşımı kullanılmıştır. Deney tasarımı yöntemi, çok sayıda tasarım değişkeninin sistem performansı üzerindeki etkilerini sınırlı sayıda analiz ile değerlendirmeye olanak sağlayan istatistiksel tabanlı bir yöntemdir [36, 37]. Özellikle parametrik tasarım çalışmalarında, değişkenler arasındaki etkileşimlerin anlaşılması ve optimizasyon sürecine uygun veri setlerinin oluşturulması açısından yaygın olarak kullanılmaktadır.

Vaka çalışması yapılarında kullanılan geometrik değişkenlerin yapısal performans, kütle, maliyet ve çevresel etki üzerindeki etkilerinin doğrudan incelenebilmesi amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde belirlenen tasarım değişkenlerinin farklı kombinasyonları sistematik şekilde analiz edilerek tasarım uzayı örneklenmiştir.

Her iki vaka çalışması için belirlenen üç tasarım değişkeni üç farklı seviyede değerlendirilmiştir. Her bir malzeme alternatifi için toplam deney sayısı $3^3 = 27$ şeklinde hesaplanmıştır. Deney tasarımı kapsamında kullanılan tasarım değişkenleri ve değişim aralıkları 0sunulmuştur.

3.3 Sonlu Elemanlar Analizleri, SEA

Vaka çalışmalarında ele alınan yapıların, yapısal davranışlarının değerlendirilmesi amacıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, parametrik tasarım süreci boyunca oluşturulan tüm geometrik ve malzeme konfigürasyonları için uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ile bir veri havuzu oluşturulmuştur. Sonlu

elemanlar yöntemi, karmaşık geometrilere ve farklı malzeme davranışlarına sahip mühendislik yapılarının sayısal olarak analiz edilmesini sağlar [38, 39]. Bu çalışma kapsamında da farklı malzeme alternatiflerinin yapısal performans üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla detaylı sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tüm analizler ANSYS 2024 R2 [40] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapının geometrik modeli parametrik olarak oluşturulmuş ve deney tasarımı kapsamında belirlenen tüm tasarım noktaları için otomatik olarak güncellenmiştir. Her iki vaka çalışmasında ele alınan yapılar, ince cidarlı yapı karakteristiğine sahip olduğu için, modelleme sırasında SHELL181 eleman tipi kullanılmıştır. SHELL181 elemanı, dört düğüm noktasına sahip, hem membran hem de eğilme davranışını temsil edebilen bir kabuk elemanıdır. Özellikle ince cidarlı kompozit ve metalik yapıların analizinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Metalik yapı analizlerinde alüminyum 6061-T6 lineer elastik izotropik malzeme olarak modellenmiştir. Kompozit malzemeler için ise ortotropik malzeme tanımları kullanılmıştır. Kompozit laminat dizilimleri ve modellenmesi ANSYS ACP (Pre) modülü ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm kompozit konfigürasyonlarda simetrik ve yarı-izotropik davranış elde edilmesi amacıyla $[0/45/-45/90]_{2s}$ tabaka dizilimi kullanılmıştır.

Modeller üzerinde hem statik yapısal hem de modal analizler uygulanmıştır. Statik analizler sonucunda maksimum toplam deformasyon, gerilme dağılımları ve emniyet faktörleri elde edilmiştir. Modal analizler ile ise yapının birinci doğal frekans değerleri hesaplanmıştır. Birinci doğal frekans parametresi özellikle titreşim davranışı açısından önemli bir kriter olarak değerlendirilmiştir. Düşük doğal frekans değerleri, yapıların operasyonel yükler altında rezonans riskini artırabileceğinden dolayı tasarım değerlendirmelerinde önemli rol oynamaktadır.

Kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğünün değerlendirilmesi amacıyla farklı kompozit hasar kriterleri kullanılmıştır. Bu kapsamda Hashin, Tsai-Hill ve Tsai-Wu kriterleri hesaplanmıştır. Hashin kriteri; fiber çekme, fiber basma, matris çekme ve matris basma hasar modlarını ayrı ayrı değerlendirebilmesi nedeniyle kompozit yapılarda yaygın olarak kullanılan bir hasar kriteridir [42]. Tsai-Hill kriteri daha

genel bir enerji tabanlı yaklaşım sunarken, Tsai-Wu kriteri çekme ve basma davranışlarını farklı şekilde ele alabilen gelişmiş bir etkileşim kriteridir [43, 44]. Analizlerde üç yöntemle de hesaplamalar yapılmış ve hesaplanan en düşük emniyet faktörü esas alınmıştır. Bu kriterlerin birlikte değerlendirilmesi sayesinde kompozit yapıların farklı yükleme durumları altındaki hasar davranışları daha kapsamlı şekilde incelenebilmiştir.

Analizlerde her bir kriter için hasar indeksi hesaplanmış ve buna karşılık gelen emniyet faktörü değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en düşük emniyet faktörü tasarımın kritik değeri olarak kabul edilmiştir. Hashin hasar kriterine ait fiber çekme, fiber basma, matris çekme ve matris basma hasar modları sırasıyla Eşitlik (2)-(5)'te verilmiştir [42].

$$F_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \quad (2)$$

$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \quad (3)$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \quad (4)$$

$$F_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\left(\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right)\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2\right) \quad (5)$$

Tsai-Hill hasar kriteri Eşitlik (6)'da sunulmuştur.

$$FI = \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{XY} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \quad (6)$$

Tsai-Wu hasar kriterine ait temel Eşitlik ve katsayı tanımları ise Eşitlik (7)-(13) arasında verilmiştir [43, 44].

$$FI = F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + F_{66}\tau_{12}^2 \quad (7)$$

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_t}\right) - \left(\frac{1}{X_c}\right) \quad (8)$$

$$F_2 = \left(\frac{1}{Y_t}\right) - \left(\frac{1}{Y_c}\right) \quad (9)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_{tX_c}} \quad (10)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_{tY_c}} \quad (11)$$

$$F_{66} = 1/S^2 \quad (12)$$

$$F_{12} = -\left(\frac{1}{2}\right)\sqrt{F_{11}F_{22}} \quad (13)$$

Eşitliklerde yer alan σ_{11} fiber doğrultusundaki normal gerilmeyi, σ_{22} fiber doğrultusuna dik normal gerilmeyi ve τ_{12} düzlem içi kayma gerilmesini ifade etmektedir. X_t ve X_c sırasıyla fiber doğrultusundaki çekme ve basma dayanımlarını, Y_t ve Y_c ise fiber doğrultusuna dik yöndeki çekme ve basma dayanımlarını göstermektedir. S , S_{12} ve S_{23} kayma dayanımlarını ifade ederken, F_1 , F_2 , F_{11} , F_{22} , F_{12} ve F_{66} Tsai-Wu kriterinde kullanılan malzeme dayanım katsayılarıdır. Hesaplanan hasar indeksinin $FI < 1$ olması güvenli bölgeyi, $FI = 1$ olması hasarın başlangıcını ve $FI > 1$ olması ise hasar oluşumunu göstermektedir.

Her iki vaka çalışmasında yapılan sonlu eleman analizlerinin doğruluğunu artırmak amacıyla çözüm ağı yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı boyutunun analiz sonuçları üzerindeki etkisini [45] incelemek amacıyla farklı eleman boyutları kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Özellikle maksimum deformasyon ve gerilme değerlerinin çözüm ağı yoğunluğuna bağlı değişimi incelenmiş ve belirli bir çözüm ağı yoğunluğundan sonra sonuçların yakınsadığı gözlemlenmiştir. Hesaplama süresi ve çözüm doğruluğu birlikte değerlendirilerek optimum çözüm ağı yapısı belirlenmiş ve tüm analizlerde aynı çözüm ağı kullanılmıştır. Böylece elde edilen sonuçların çözüm ağından bağımsız olması sağlanmıştır.

Çözüm ağı yakınsama çalışmasına ek olarak, oluşturulan sonlu eleman ağ yapılarının kalitesini değerlendirmek amacıyla çözüm ağı kalite kriterleri incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerinde elde edilen sonuçların doğruluğu yalnızca eleman sayısına değil, aynı zamanda eleman geometrisinin kalitesine de doğrudan bağlıdır. Özellikle ince cidarlı yapılarda kullanılan kabuk elemanlarında bozulmuş eleman geometrileri, gerilme dağılımlarında gerçekçi olmayan sonuçlara neden olabilmektedir [46].

Çözüm ağı kalite değerlendirmesinde ANSYS yazılımı içerisinde yer alan “Eleman kalitesi (ing. Element quality)” ve “En boy oranı (ing. Aspect Ratio)” kriterleri kullanılmıştır. “Eleman kalitesi” parametresi, eleman geometrisinin ideal eleman formuna ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. Bu parametre 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 1’e yakın değerler daha kaliteli eleman geometrisini temsil etmektedir.

“En boy oranı” parametresi ise eleman kenar uzunlukları arasındaki oranı ifade etmekte ve elemanın ne kadar uzamış/bozulmuş olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek “en boy oranı” değerleri, kabuk elemanlarında çözüm hassasiyetini olumsuz etkileyebilmektedir.

Literatürde dört düğümlü kabuk elemanları için önerilen maksimum en-boy oranının 5 olduğu görülmüştür [57]. Eşitlik (14)’te gösterilen, ANSYS tarafından tanımlanan eleman kalitesi bağıntısı kullanılarak bu en-boy oranına karşılık gelen eleman kalitesi 0,385 olarak hesaplanmıştır [40].

$$Q = \frac{2r}{r^2 + 1} \quad (14)$$

Burada, Q eleman kalitesi değeri, r ise en boy oranı olarak tanımlanmaktadır.

Çalışmada minimum eleman kalitesi için 0,385 değeri kabul sınırı olarak benimsenmiştir. Maksimum en-boy oranının 5’i aşması veya minimum eleman kalitesinin 0,385’in altına düşmesi durumunda ilgili bölgelerde çözüm ağı yeniden oluşturulacak ve bu kriterleri sağlamayan ağ yapısı analizlerde kullanılmayacaktır.

3.4 Yanıt Yüzeyi Metodu, YYM

YYM, çok değişkenli mühendislik problemlerinde giriş değişkenleri ile sistem çıktıları arasındaki ilişkinin yaklaşık matematiksel fonksiyonlar ile temsil edilmesini sağlayan bir yöntemdir [47, 48]. Özellikle yüksek hesaplama maliyetine sahip sonlu eleman analizleri ile birlikte kullanıldığında, optimizasyon süreçlerinde önemli ölçüde hesaplama verimliliği sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak, tasarım değişkenleri ile yapısal performans çıktıları arasındaki

ilişkileri temsil eden yaklaşık matematiksel modeller oluşturulmuştur. Böylece optimizasyon sürecinde her iterasyonda yeniden sonlu eleman analizi gerçekleştirilmesi ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde hem hesaplama süresi önemli ölçüde azaltılmış hem de parametrik tasarım uzayını sürekli biçimde temsil edilebilmiştir.

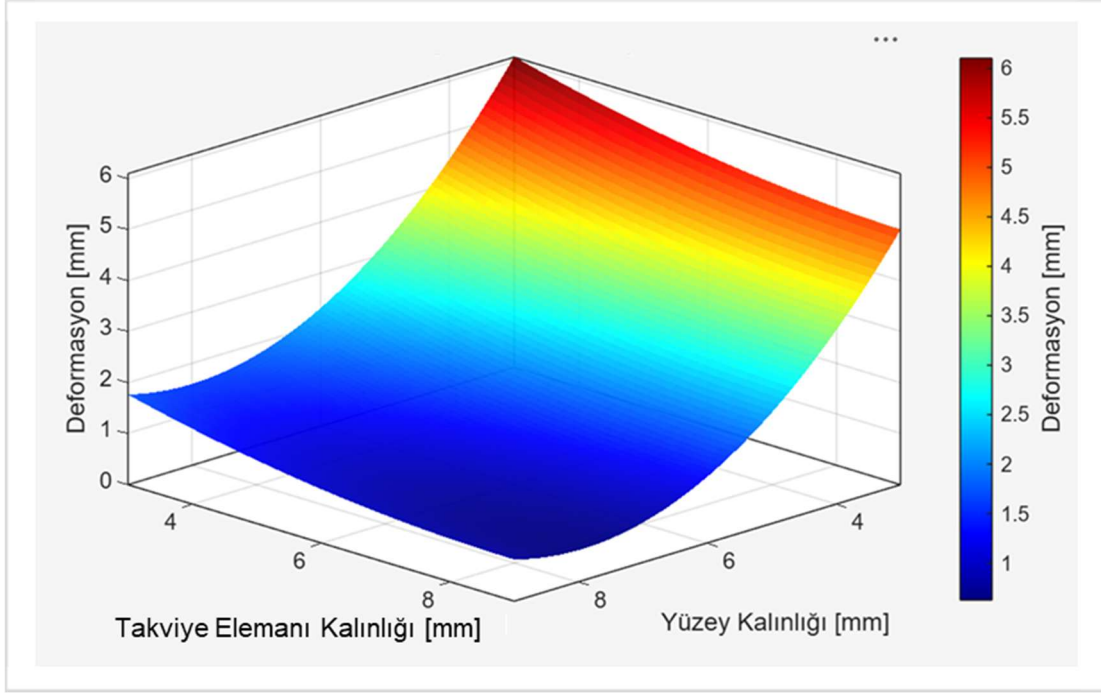
Sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen kütle, deformasyon ve birinci doğal frekans parametreleri için YYM modelleri oluşturulmuştur. Kütle için oluşturulan YYM modeli kullanılarak CO₂ salınımı, maliyet ve döngüsellik parametreleri için de tepki yüzeyleri oluşturulmuştur.

Yanıt yüzeyi modellerinin oluşturulmasında ikinci dereceden kuadratik regresyon yaklaşımı kullanılmıştır. Kuadratik yanıt yüzeyi modeli, tasarım değişkenlerinin yalnızca doğrusal etkilerini değil, aynı zamanda değişkenler arası etkileşimleri ve doğrusal olmayan davranışları da temsil edebilmektedir. Kullanılan genel kuadratik yanıt yüzeyi modeli Eşitlik (15)'de gösterilmiştir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (15)$$

Burada y ilgili yanıt değişkeni, x_i tasarım değişkenleri ve β ise regresyon katsayıları olarak tanımlanmaktadır. Model katsayıları, deney tasarımı analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak, MATLAB 2025a [49] ortamında regresyon analizi ile hesaplanmıştır.

Şekil 3.2'de, birinci vaka çalışmasında, alüminyum malzeme için takviye elemanı genişliğinin 130 mm olarak sabit tutulduğu durumda elde edilen kuadratik yanıt yüzeyi modeli gösterilmektedir. Grafik, yüzey kalınlığı ve takviye elemanı kalınlığı değişkenlerinin yapısal deformasyon davranışı üzerindeki etkisini görsel olarak ortaya koymakta ve YYM yaklaşımının parametrik tasarım uzayını sürekli şekilde temsil edebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.2: YYM Yüzeyi Görselleştirmesi – Alüminyum Malzeme – Takviye Elemanı Genişliği: 130mm

YYM modellerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla istatistiksel uygunluk kriterleri incelenmiştir. Bu kapsamda, belirleme katsayısı (R^2) ve hata ölçütleri değerlendirilmiştir. Oluşturulan modellerin tümünde oldukça yüksek korelasyon seviyeleri elde edilmiştir. Elde edilen en düşük R^2 değeri yaklaşık 0.98 seviyesinde hesaplanmış olup, bu durum oluşturulan yanıt yüzeyi modellerinin sonlu eleman analiz sonuçlarını yüksek doğrulukla temsil edebildiğini göstermektedir. Ayrıca tahmin edilen sonuçlar ile sonlu eleman analizlerinden elde edilen gerçek sonuçlar arasında yapılan karşılaştırmalarda hata seviyelerinin oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir.

YYM yaklaşımı sayesinde ise tasarım uzayının sürekli bir matematiksel temsilinin elde edilmesi mümkün olmuş ve optimizasyon algoritmaları çok daha hızlı şekilde çalıştırılabilmiştir. Ayrıca yanıt yüzeyi modelleri sayesinde tasarım değişkenlerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri daha açık şekilde incelenebilmiştir. Örneğin yüzey kalınlığının deformasyon üzerindeki baskın etkisi veya takviye elemanı genişliğinin doğal frekans üzerindeki etkisi parametrik olarak gözlemlenebilmiştir.

3.5 Sürdürülebilirlik İndeksinin Hesaplanması

Kanister destek yapısının sürdürülebilirlik performansının değerlendirilebilmesi amacıyla bir sürdürülebilirlik indeksi (SI) tanımlanmıştır. Bu indeks, yapısal performans, çevresel etki ve ekonomik göstergeleri tek bir değerlendirme parametresi altında birleştirerek farklı tasarım alternatiflerinin doğrudan karşılaştırılabilmesini sağlamaktadır. Böylece yalnızca mekanik performansa dayalı geleneksel mühendislik yaklaşımının ötesine geçilerek, sürdürülebilirlik kriterlerinin de tasarım sürecine dahil edilmesi amaçlanmıştır.

Sürdürülebilirlik indeksi hesaplamasında çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada ÇKKV yöntemi olarak ağırlıklı toplam yöntemi (Weighted Sum Method – WSM) tercih edilmiştir. Bu yöntemde her sürdürülebilirlik parametresine belirli bir ağırlık katsayısı atanmakta ve toplam sürdürülebilirlik skoru normalize edilmiş parametrelerin ağırlıklı toplamı şeklinde elde edilmektedir. Kullanılan sürdürülebilirlik indeksi Eşitlik (16)'te gösterilmiştir.

$$SI = \sum w_i P_i, \quad i \in \{P, C, EI, CIR, SOC\} \quad (16)$$

Burada, P, C, EI, CIR ve SOC sırasıyla normalize edilmiş performans, maliyet, çevresel etki, döngüsellik ve sosyal etki parametreleridir. Sürdürülebilirlik değerlendirmesinde kullanılan parametreler farklı fiziksel anlamlara ve farklı birimlere sahip olduğundan, parametrelerin doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Bu nedenle sürdürülebilirlik indeksi hesaplanmadan önce tüm parametreler normalize edilmiştir. Çalışmada min–max normalizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde tüm parametreler 0 ile 1 arasında ölçeklendirilmiş ve ortak bir şekilde değerlendirilebilmiştir. Kullanılan normalizasyon Eşitlik (17)'te gösterilmiştir.

$$P_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (17)$$

Burada, x_i parametrenin gerçek değeri, x_{min} parametrenin minimum değeri x_{max} parametrenin maksimum değeri ve P_i parametrenin normalize edilmiş değeri olarak tanımlanmıştır.

Daha yüksek olması istenen parametrelerde, normalize edilmiş değerin artması tasarımın daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Buna karşılık deformasyon, maliyet ve CO₂ emisyonu gibi düşük olması tercih edilen parametrelerde ters normalizasyon uygulanmıştır. Böylece daha düşük gerçek değerlere sahip tasarımlar daha yüksek normalize skor alacak şekilde değerlendirilmiştir.

3.5.1 Performans parametresinin hesaplanması

Sürdürülebilirlik indeksinin hesaplanmasında kullanılan performans parametresi, tasarım alternatiflerinin yapısal yeterliliğini temsil etmek amacıyla tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kanister destek yapısının performansı, sonlu eleman analizlerinden elde edilen iki temel çıktı üzerinden değerlendirilmiştir: deformasyon ve birinci doğal frekans. Bu iki parametre, yapının hem statik hem de dinamik davranışını temsil ettiği için performans değerlendirmesinde birlikte ele alınmıştır [50].

Deformasyon değeri, yapının uygulanan yükler altında ne ölçüde yer değiştirdiğini göstermektedir. Daha düşük deformasyon değerleri, yapının daha direngen davrandığını ve uygulanan yükleri daha sınırlı şekil değişimi ile taşıyabildiğini ifade etmektedir. Bu nedenle deformasyon, kanister destek yapısının statik direngenlik performansının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılmıştır. Özellikle kanister gibi taşıma ve muhafaza görevi gören yapılarda, aşırı deformasyonların önlenmesi hem yapısal bütünlük hem de sistem içerisindeki diğer bileşenlerle olan geometrik uyum açısından önem taşımaktadır.

Birinci doğal frekans ise yapının dinamik davranışını temsil eden temel parametrelerden biridir. Doğal frekans değerinin yüksek olması, yapının titreşim yükleri altında daha direngen bir dinamik karaktere sahip olduğunu ve düşük frekanslı uyarımlara karşı daha dayanıklı davranabileceğini göstermektedir. Bu nedenle birinci doğal frekansın yüksek olması tasarım açısından avantajlı kabul edilmiştir. Kanister yapılarının taşıma, depolama ve operasyonel kullanım sırasında titreşim yüklerine maruz kalabileceği dikkate alındığında, doğal frekans değerinin performans parametresine dahil edilmesi yapının dinamik yeterliliğinin değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Performans parametresinin hesaplanmasında deformasyon ve birinci doğal frekans değerleri öncelikle normalize edilmiştir. Deformasyon düşük olması istenen bir parametre olduğu için ters normalizasyon uygulanmış; böylece daha düşük deformasyon değerlerine sahip tasarımlar daha yüksek normalize skor almıştır. Birinci doğal frekans ise yüksek olması istenen bir parametre olduğundan, doğrudan normalizasyon yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu sayede her iki parametre de 0 ile 1 arasında aynı ölçeğe getirilmiş ve birlikte kullanılabilir hale getirilmiştir.

Normalize edilmiş deformasyon ve doğal frekans değerleri kullanılarak toplam performans parametresi Eşitlik (18) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_p = \frac{P_\delta + P_f}{2} \quad (18)$$

Burada P_p performans parametresini P_δ normalize edilmiş deformasyon değerini ve P_f normalize edilmiş birinci doğal frekans değerini göstermektedir. Bu yaklaşımda deformasyon ve doğal frekansın performans üzerindeki etkileri eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmiştir. Böylece yalnızca deformasyonu düşük olan veya yalnızca doğal frekansı yüksek olan tasarımlar yerine, iki kriter açısından da dengeli performans gösteren alternatiflerin öne çıkması sağlanmıştır.

3.5.2 Çevresel etki parametresinin hesaplanması

Çevresel etki parametresi, tasarım alternatiflerinin üretim kaynaklı çevresel yükünü temsil etmek amacıyla tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında çevresel etki göstergesi olarak CO₂ emisyonu dikkate alınmıştır. CO₂ emisyonu, malzeme üretimi sırasında ortaya çıkan sera gazı etkisini temsil eden yaygın bir çevresel performans göstergesidir ve farklı malzeme alternatiflerinin çevresel açıdan karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Kanister destek yapısı için çevresel etki değerlendirmesi, her bir tasarım konfigürasyonunun kütlesi ve ilgili malzemeye ait birim CO₂ emisyon katsayısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda, geometrik tasarım değişkenlerinin çevresel etki üzerindeki etkisi doğrudan yapısal kütle üzerinden hesaba katılmıştır. Kalınlık veya takviye elemanı genişliği arttıkça kullanılan malzeme miktarı da artmakta, buna bağlı olarak toplam CO₂ emisyonu yükselmektedir. Bu nedenle

çevresel etki parametresi yalnızca malzeme seçimine değil, aynı zamanda geometrik tasarım kararlarına da bağlıdır.

Her bir tasarım alternatifi için toplam CO₂ emisyonu Eşitlik (19) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$EI = me_{CO_2} \quad (19)$$

Burada EI , toplam CO₂ emisyon miktarını, m parça kütlesini ve e_{CO_2} malzemenin birim kütle başına CO₂ emisyon katsayısını temsil etmektedir. Bu ifade sayesinde farklı malzeme ve geometri kombinasyonları için çevresel etki değeri nicel olarak hesaplanabilmiştir.

CO₂ emisyonu, düşük olması tercih edilen bir parametredir. Bu nedenle sürdürülebilirlik indeksi hesaplamasında çevresel etki parametresi ters normalizasyon yöntemiyle değerlendirilmiştir. Böylece daha düşük CO₂ emisyonuna sahip tasarım alternatifleri daha yüksek normalize çevresel etki skoru alacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Normalize edilmiş çevresel etki parametresi Eşitlik (20) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_{EI} = \frac{EI_{max} - EI}{EI_{max} - EI_{min}} \quad (20)$$

Burada P_{EI} normalize edilmiş çevresel etki skorunu, EI ilgili tasarım konfigürasyonuna ait CO₂ emisyon değerini, EI_{min} ve EI_{max} ise tasarım uzayı içerisindeki minimum ve maksimum CO₂ emisyon değerlerini göstermektedir. Bu formülasyon ile en düşük emisyonu sahip tasarım 1'e yakın değer alırken, en yüksek emisyonu sahip tasarım 0'a yakın değer almaktadır.

3.5.3 Maliyet parametresinin hesaplanması

Sürdürülebilirlik indeksinin ekonomik boyutunu temsil etmek amacıyla maliyet parametresi tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında maliyet hesabı, her bir tasarım konfigürasyonunun yapısal kütlesi ve kullanılan malzemeye ait birim kütle maliyeti dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece geometrik değişkenlere bağlı olarak değişen malzeme miktarının toplam maliyet üzerindeki etkisi değerlendirme sürecine dahil edilmiştir.

Her bir tasarım alternatifi için maliyet parametresi Eşitlik (21) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$C = mc_m, \quad P_C = \frac{C_{max} - C}{C_{max} - C_{min}} \quad (21)$$

Burada C toplam maliyet değerini, m yapısal kütleyi ve c_m ise ilgili malzemenin birim kütle başına maliyet katsayısını temsil etmektedir. P_C normalize edilmiş maliyet skorunu, C ilgili tasarım konfigürasyonunun maliyetini, C_{min} ve C_{max} ise tasarım uzayı içerisindeki minimum ve maksimum maliyet değerlerini göstermektedir.

3.5.4 Döngüsellik parametresinin hesaplanması

Döngüsellik parametresi, malzemelerin geri dönüşüm sonrası yeniden kullanılabilirlik potansiyelini temsil etmek amacıyla tanımlanmıştır. Geleneksel sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde çevresel etki yoğunlukla CO₂ emisyonu veya enerji tüketimi gibi göstergeler üzerinden ele alınmaktadır. Döngüsellik parametresi malzemenin yaşam döngüsü sonunda ne ölçüde tekrar değerlendirilebildiğini ifade etmektedir. Bu nedenle döngüsellik, özellikle geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin geleneksel malzemelerle karşılaştırılmasında önemli bir kriter olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada döngüsellik parametresinin tanımı, malzemenin geri dönüşüm sonrasında mekanik özelliklerini koruma kabiliyeti üzerinden yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş bir malzemenin tekrar yapısal uygulamalarda kullanılabilmesi için yalnızca geri kazanılabilir olması yeterli değildir; aynı zamanda geri dönüşüm sonrasında belirli bir mekanik performansı da koruması gerekmektedir. Bu nedenle döngüsellik değerlendirmesinde, geri dönüşüm sonrası özgül direngenlik değerinin geri dönüşüm öncesindeki değerine oranı esas alınmıştır. Eşitlik (22)'de döngüsellik parametresinin hesaplanması gösterilmiştir.

$$P_{CIR} = \frac{E'_{rec}}{E'_{vir}} \quad (22)$$

Burada P_{CIR} döngüsellik parametresini, E'_{rec} geri dönüştürülmüş malzemenin özgül direngenliğini, E'_{vir} ise ilk üretim malzemenin özgül direngenliğini göstermektedir. Bu yaklaşım sayesinde geri dönüştürülmüş malzemenin, ilk üretim malzemeye

kıyasla yapısal performansını ne ölçüde koruyabildiği nicel olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada kullanılan malzeme alternatiflerinin özgül direngenliklerini koruma oranları Çizelge 3.4’de verilmiştir [21]. Alüminyum geri dönüşümünde mekanik özellik kayıpları kompozit malzemelere kıyasla daha sınırlı olduğundan, bu malzeme döngüsellik açısından referans seviyede değerlendirilmiştir. Buna karşılık KFTP malzemelerde geri dönüşüm yöntemi, elde edilen elyaf kalitesi ve mekanik özellik korunumu üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Mekanik geri dönüştürülmüş KFTP için döngüsellik değeri daha düşük kabul edilmiştir. Çünkü mekanik geri dönüşüm sürecinde karbon elyaflar önemli ölçüde kısalmakta ve yönlenme düzeni bozulmaktadır. Bu durum, geri dönüştürülmüş malzemenin direngenlik ve dayanım özelliklerinde belirgin azalmaya neden olmaktadır. Termal geri dönüşüm yönteminde ise elyaflar mekanik yönleme kıyasla daha yüksek oranda korunabildiği için döngüsellik değeri daha yüksek tanımlanmıştır. Kimyasal geri dönüşüm yönteminde elyaf özelliklerinin en yüksek oranda korunabilmesi nedeniyle en yüksek KFTP döngüsellik değerlerinden biri elde edilmiştir.

Çizelge 3.4: Malzeleme Seçeneklerinin Özgül Direngenlik Koruma Oranı

Malzeme	Özgül Direngenlik Koruma Oranı
Alüminyum 6061-T6	1
İÜ-KFTP	0.8
MGD KFTP	0.5
TGD KFTP	0.9
KGD KFTP	0.95

3.5.5 Sosyal etki parametresinin hesaplanması

Sosyal etki parametresi, malzeme üretim süreçlerinin ve tedarik zinciri faaliyetlerinin oluşturabileceği sosyal etkileri temsil etmek amacıyla tanımlanmıştır. Sürdürülebilirlik değerlendirmesi yalnızca yapısal performans, maliyet ve çevresel etki ile sınırlı değildir; kullanılan malzemelerin üretim süreçlerinde ortaya çıkan iş sağlığı ve güvenliği, çalışma koşulları, kaynak kullanımı ve tedarik zinciri etkileri gibi sosyal boyutların da dikkate alınması gerekmektedir [51]. Bu nedenle sosyal etki

parametresi, sürdürülebilirlik indeksine dahil edilerek değerlendirme yaklaşımının daha bütüncül hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında sosyal etki parametresinin belirlenmesinde literatürde yer alan sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarından yararlanılmıştır. Özellikle alüminyum ve kompozit yapıların karşılaştırıldığı YDD çalışmalarında, kompozit malzeme alternatiflerinin kümülatif sosyal etki göstergelerinde alüminyum yapılara kıyasla yaklaşık %24–36 oranında azalma sağlayabileceği belirtilmektedir [52]. Bu doğrultuda, alüminyum malzeme sosyal etki saçısından referans malzeme olarak kabul edilmiş ve sosyal etki katsayısı 1.0 olarak alınmıştır. İlk üretim KFTP malzeme için ise literatürde belirtilen sosyal etki azalımı dikkate alınarak 0.75 katsayısı kullanılmıştır.

Ostojic ve Traverso tarafından yapılan sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesinde, alüminyum bileşenlerin kompozit alternatiflere göre daha yüksek sosyal etki göstermesinin temel nedeni, alüminyum tedarik zincirindeki kritik süreçlerdir [52]. Çalışmada özellikle boksit madenciliği, alüminyum üretimi ve levha imalatı sosyal etki açısından başlıca sıcak noktalar olarak belirlenmiştir. Bu süreçlerde işçiler ve yerel topluluklar için daha yüksek sosyal risklerin oluşması nedeniyle, alüminyumun toplam sosyal etki değeri kompozit yapılara kıyasla daha olumsuz sonuç vermektedir.

Geri dönüştürülmüş KFTP malzemeler için sosyal etki katsayısı daha düşük seviyede tanımlanmıştır. Bunun temel nedeni, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin ilk üretim karbon fiber üretimine kıyasla daha az birincil hammadde kullanımı ve daha sınırlı üretim süreci gerektirmesidir. Geri dönüşüm yoluyla mevcut karbon elyafların yeniden değerlendirilmesi, hammadde çıkarımı ve enerji yoğun üretim süreçlerine olan ihtiyacı azaltabileceğinden, sosyal etki açısından daha avantajlı bir durum oluşturmaktadır. Bu nedenle mekanik, termal ve kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP malzemeler için sosyal etki katsayısı 0.6 olarak kabul edilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5: Malzeleme Seçeneklerinin Sosyal Etki Parametre Katsayısı

Malzeme	Sosyal Etki Parametre Katsayısı
Alüminyum 6061-T6	1
İÜ-KFTP	0.75
MGD KFTP	0.6
TGD KFTP	0.6
KGD KFTP	0.6

Sosyal etki parametresinin hesaplanması Eşitlik (23)'de gösterilmiştir.

$$SOC = ms_m \quad , \quad P_{SOC} = \frac{SOC_{max} - SOC}{SOC_{max} - SOC_{min}} \quad (23)$$

Burada, SOC sosyal etki değerini, m yapısal kütle ve s_m ise ilgili malzemeye ait sosyal etki katsayısını temsil etmektedir. P_{SOC} normalize edilmiş sosyal etki skorunu, SOC_{min} ve SOC_{max} ise tasarım uzayı içerisindeki minimum ve maksimum sosyal etki değerlerini göstermektedir.

3.5.6 Optimizasyon yöntemi

Sürdürülebilirlik indeksinin hesaplanması için gerekli olan yapısal performans, maliyet, CO₂ emisyonu, döngüsellik ve sosyal etki parametreleri tanımlandıktan sonra, kanister destek yapısı için optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonun temel amacı, belirlenen tasarım değişkenleri sınırları içerisinde en yüksek sürdürülebilirlik indeksine sahip tasarım konfigürasyonlarının elde edilmesidir.

Optimizasyon sürecinde yapısal uygunluğun sağlanabilmesi amacıyla emniyet faktörü kısıtı da tanımlanmıştır. Bu sayede emniyet faktörü 2.5'den küçük olan konfigürasyonların, sürdürülebilirlik indeksleri yüksek olsa bile optimum çözüm olarak seçilmesi engellenmiştir.

Hesaplama, MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Gradyan tabanlı yerel optimizasyon algoritması olan “fmincon” kullanılmıştır. “fmincon”, sürekli tasarım değişkenlerine ve kısıtlara sahip doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. Bu çalışmada sürdürülebilirlik indeksi, YYM modelleri üzerinden hesaplandığından, amaç fonksiyonu sürekli ve

türevlenebilir bir yapıdadır. Bu nedenle fmincon algoritması, tanımlanan optimizasyon problemi için uygun bir çözüm yöntemi olarak değerlendirilmiştir.

Bununla birlikte, gradyan tabanlı yerel optimizasyon algoritmaları başlangıç noktasına duyarlı olabilmektedir. Global optimum yerine yerel optimum noktalara yakınsayabilmektedir. Bu durumun etkisini azaltmak amacıyla çok başlangıçlı optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Bu kapsamda optimizasyon işlemi, tasarım uzayı içerisinde rastgele seçilen 20 farklı başlangıç noktasından başlatılmıştır. Her bir başlangıç noktası için “fmincon” algoritması çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son aşamada, kısıtları sağlayan çözümler arasından en yüksek sürdürülebilirlik indeksine sahip tasarım optimum çözüm olarak seçilmiştir.

Optimizasyon işlemi her bir malzeme alternatifi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda alüminyum, ilk üretim KFTP, mekanik geri dönüştürülmüş KFTP, termal geri dönüştürülmüş KFTP ve kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP için ayrı YYM modelleri kullanılmış ve her malzeme için optimum geometrik konfigürasyon belirlenmiştir. Böylece her malzeme kendi mekanik özellikleri, yoğunluğu, maliyeti ve CO₂ emisyon katsayısı doğrultusunda değerlendirilmiş; malzeme alternatifleri arasında adil ve sistematik bir karşılaştırma yapılmıştır.

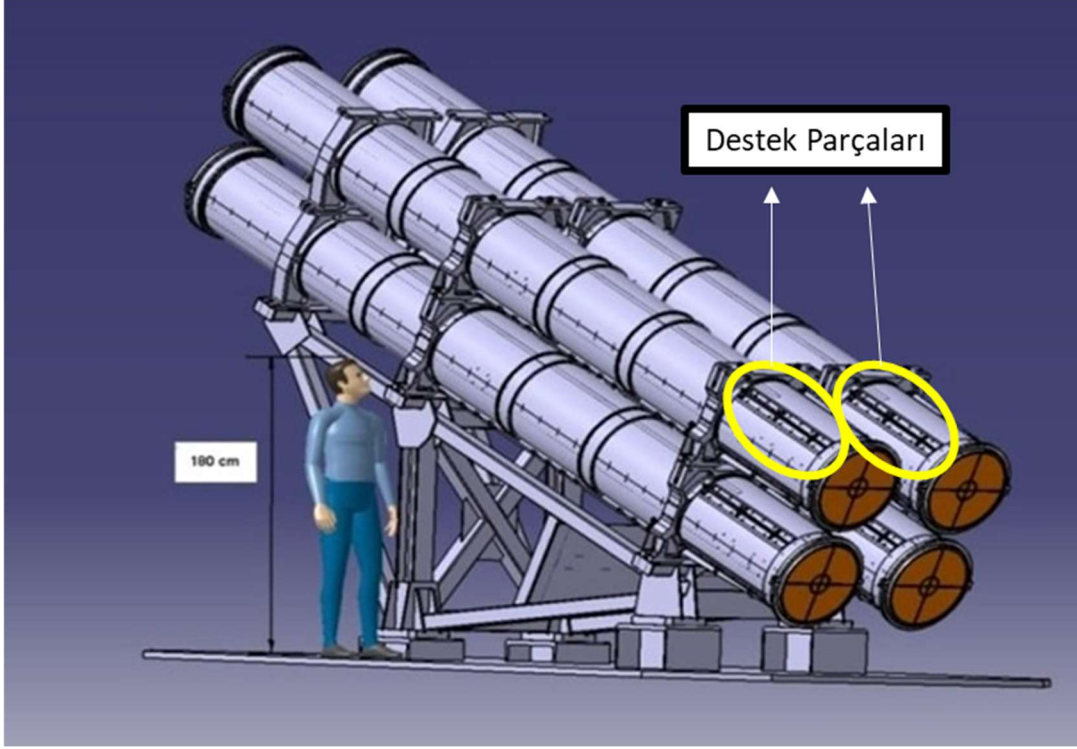
4. VAKA ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, yöntem bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyileme metodolojisinin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla iki farklı vaka çalışması ele alınmıştır. Vaka çalışmaları, farklı görev profillerine ve kullanım koşullarına sahip savunma ve havacılık yapılarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Bu kapsamda, yer sistemi bileşeni olarak bir seyir füzesi kanister destek parçası ile uçan sistem bileşeni olarak bir seyir füzesi gövde bölümü incelenmiştir.

Her iki yapı için tasarım değişkenleri tanımlanmış, sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş, deney tasarımı ve yanıt yüzeyi metodu kullanılarak matematiksel modeller oluşturulmuştur. Farklı malzeme alternatifleri için sürdürülebilirlik indeksi hesaplanmıştır. Böylece geliştirilen yöntemin, farklı yapısal gereksinimlere ve sürdürülebilirlik önceliklerine sahip sistemler üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

4.1 Vaka Çalışması – Kanister Destek Parçası

Çalışmasının ilk vaka çalışması kapsamında, füze sistemlerinde kullanılan bir kanister yapısına ait destek elemanı (ing. Stiffener) incelenmiştir (Şekil 4.1). Kanister sistemleri; füzenin taşınması, depolanması, korunması ve lançer görevi görmesi açısından savunma sistemlerinin önemli yapısal bileşenlerinden biridir. Bu yapılar, uzun süreli çevresel yüklemelere, taşıma sırasında oluşan mekanik zorlamalara, titreşim yüklerine ve çeşitli operasyonel koşullara maruz kalmaktadır. Dolayısıyla kanister yapılarında kullanılan malzemelerin yalnızca mekanik performans açısından değil; maliyet, çevresel etki, dayanıklılık ve geri dönüştürülebilirlik açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir [29].



Şekil 4.1: Kanister Destek Parçalarının Kanister Üzerinde Gösterimi [30]

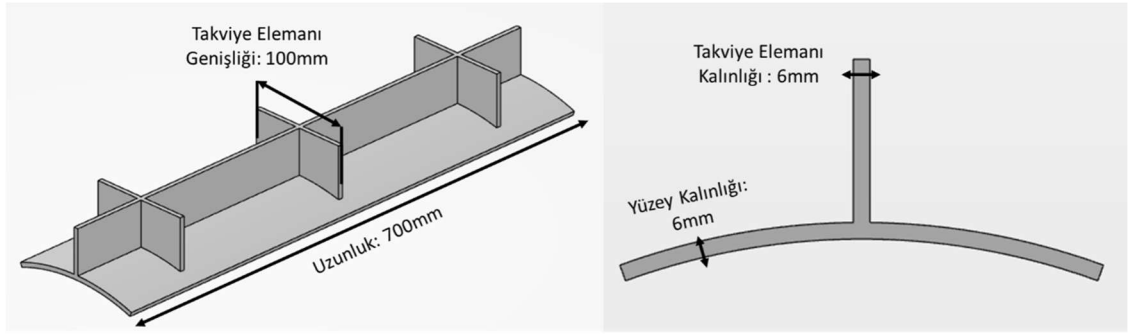
Kanister sistemleri, uçan sistemlere kıyasla daha düşük seviyede kritik aerodinamik gereksinimlere sahip olduklarından dolayı, sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin uygulanabilirliğinin araştırılması için uygun aday yapılar olarak değerlendirilmektedir. Füze gövdesi veya uçuş kontrol yüzeyleri gibi uçuş kritik yapılarda ağırlık, darbe dayanımı ve yorulma davranışı çok daha kısıtlayıcı tasarım gereksinimleri oluştururken; kanister gibi yer sistemlerinde sürdürülebilirlik kriterlerinin tasarıma entegrasyonu daha uygulanabilir hale gelmektedir.

İncelenen yapı, geleneksel olarak alüminyum alaşımlarından üretilen bir bileşendir. Sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımı kapsamında, aynı geometrik ve yapısal gereksinimleri sağlayabilecek alternatif kompozit malzeme çözümleri değerlendirilmiştir. Böylece geleneksel metalik yapı ile ilk üretim ve geri dönüştürülmüş kompozit alternatifleri arasında çok kriterli bir sürdürülebilirlik karşılaştırması yapılması amaçlanmıştır.

4.1.1 Tasarım değişkenleri

Kanister destek yapısının sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi kapsamında, yapısal davranış ve sürdürülebilirlik performansı üzerinde önemli olan üç geometrik tasarım değişkeni belirlenmiştir. Bu değişkenler; kanister yüzey kalınlığı, takviye

elemanı kalınlığı ve genişliğidir. Belirlenen parametreler, yapının direngenliğini, deformasyon davranışı, doğal frekansı ve toplam kütlesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Aynı zamanda bu parametreler, kullanılan malzeme miktarını doğrudan etkilediğinden maliyet ve çevresel etki gibi sürdürülebilirlik kriterleri açısından da kritik öneme sahiptir. Seçilen değişkenler ve vaka çalışması geometrisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Kanister Destek Parçası Tasarım Değişkenleri

Kanister yüzey kalınlığı, yapının genel eğilme direngenliğini belirleyen temel parametrelerden biridir. Yüzey kalınlığının artırılması, yapının deformasyon direncini artırırken aynı zamanda toplam kütlede artışa neden olmaktadır. Benzer şekilde takviye elemanı kalınlığı da özellikle lokal direngenlik ve yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olmaktadır. Takviye elemanı genişliği ise yapının yük dağılım karakteristiğini değiştirmekte ve panel davranışı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle seçilen üç parametre birlikte değerlendirildiğinde, yapının hem yapısal performansını hem de sürdürülebilirlik göstergelerini temsil edebilecek uygun bir tasarım uzayı oluşturmaktadır.

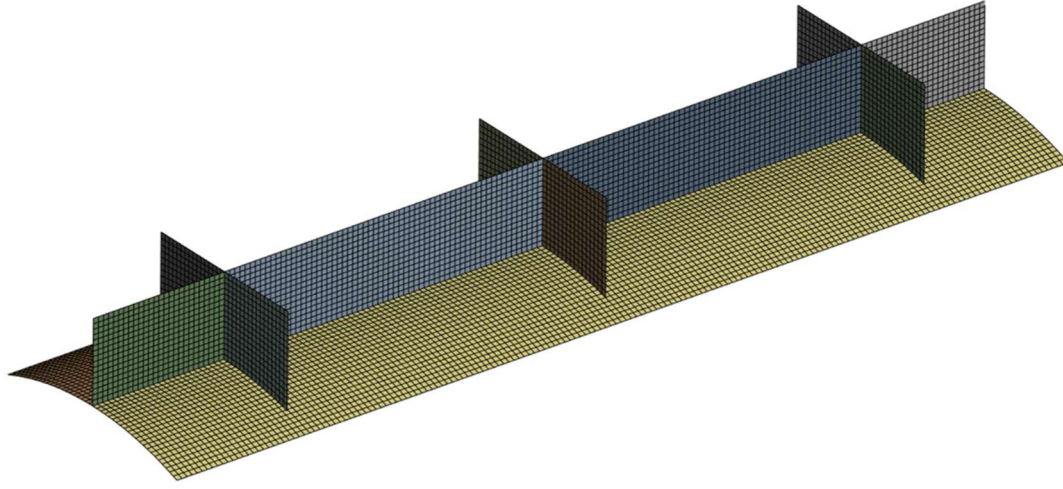
Kanister destek yapısı için yapılan deney tasarımı kapsamında kullanılan tasarım değişkenleri ve değişim aralıkları Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Belirlenen alt ve üst limitler; üretilebilirlik, yapısal uygulanabilirlik ve analiz kararlılığı göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Düşük kalınlıklarda analizlerin yakınsamama problemleri ve çok yüksek kalınlıklarda meydana gelebilecek gereksiz kütle artışı dikkate alınarak uygun tasarım aralıkları belirlenmiştir.

Çizelge 4.1: Tasarım Değişkeni Aralıkları

	Yüzey Kalınlığı [mm]	Takviye Elemanı Kalınlığı [mm]	Takviye Elemanı Genişliği [mm]
Değişim Aralığı	3-9	3-9	100-160

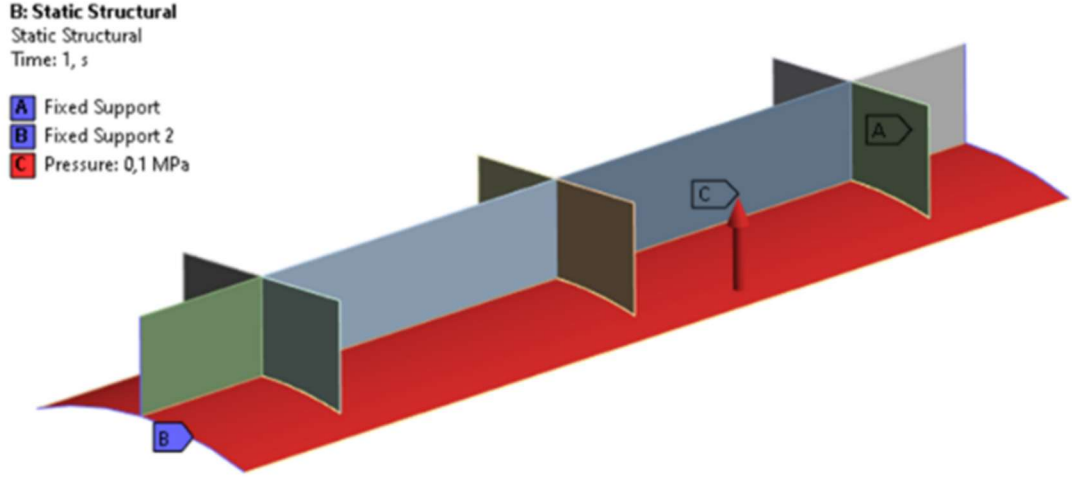
4.1.2 Sonlu elemanlar analizleri

Kanister destek yapısı analizlerinde kullanılan çözüm ağı görüntüsü Şekil 4.3’de sunulmuştur.



Şekil 4.3: Kanister Destek Parçası Çözüm Ağı

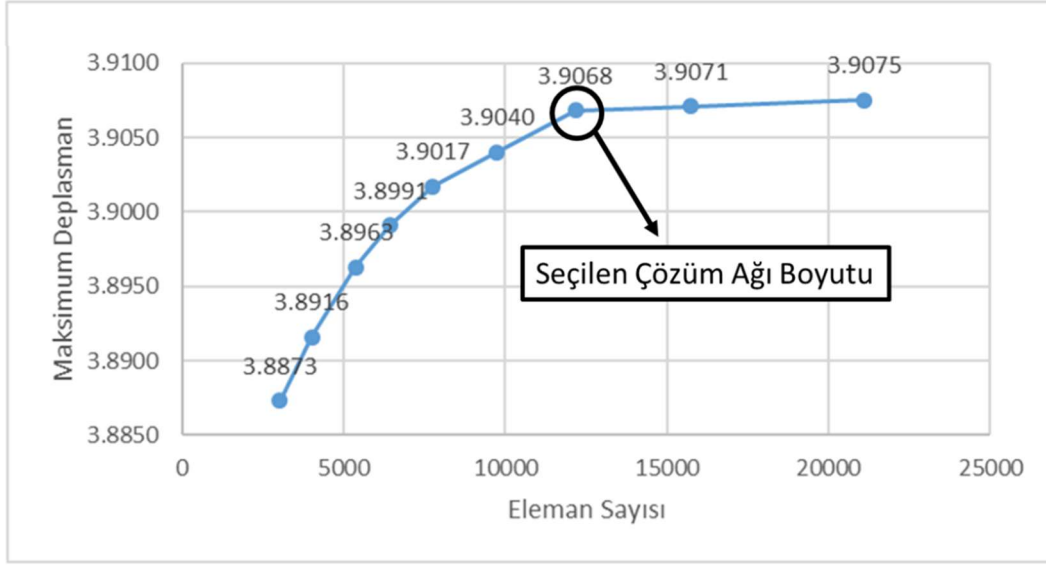
Yapının sınır şartları ve yükleme koşulları, kanister sisteminin gerçek çalışma koşullarını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Şekil 4.4’de gösterildiği gibi, yapının her iki ucu sabitlenerek, kanister üzerindeki dikmelere bağlı olduğu yüzeyler simule edilmiştir. Yükleme durumu olarak ise yapının alt yüzeyine 0.1 MPa basınç yükü uygulanmıştır.



Şekil 4.4: Kanister Destek Parçası Sınır Koşulları

Kanister destek parçası için uygulanan yükleme durumu, gemi üzerindeki kanister/lançer yapısının maruz kalabileceği çevresel ve operasyonel etkileri temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Gemi üstü yapılar, dalga kaynaklı gemi hareketleri, platform ivmeleri, rüzgâr etkileri ve operasyonel titreşimler nedeniyle farklı yönlerde dinamik yüklemelere maruz kalabilmektedir. Deniz yapıları ve gemi üstü sistemler için yapısal risk oluşturabilecek çevresel yükler; dalga, rüzgâr, akıntı ve benzeri doğal etkilerden kaynaklanan yüklerdir [41]. Çalışmada, söz konusu etkilerin kanister destek parçası üzerindeki birleşik etkisini temsil edecek şekilde, 0.1 MPa büyüklüğünde düzgün yayılı eşdeğer basınç yükü uygulanmıştır. Bu yük, belirli bir gemi veya görev profiline ait doğrudan ölçülmüş bir yük değeri olarak değildir. Farklı malzeme ve geometrik konfigürasyonların aynı koşullar altında karşılaştırılabilmesini sağlayan ön tasarım seviyesinde temsili bir yükleme kabulü olarak kullanılmıştır.

Kanister destek parçası üzerinde gerçekleştirilen analizlerin doğruluğunu artırmak amacıyla yapılan çözüm ağı yakınsama çalışması sonucunda, değerlendirilen ve seçilen çözüm ağı boyutu Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Çözüm Ağı Yakınsaması

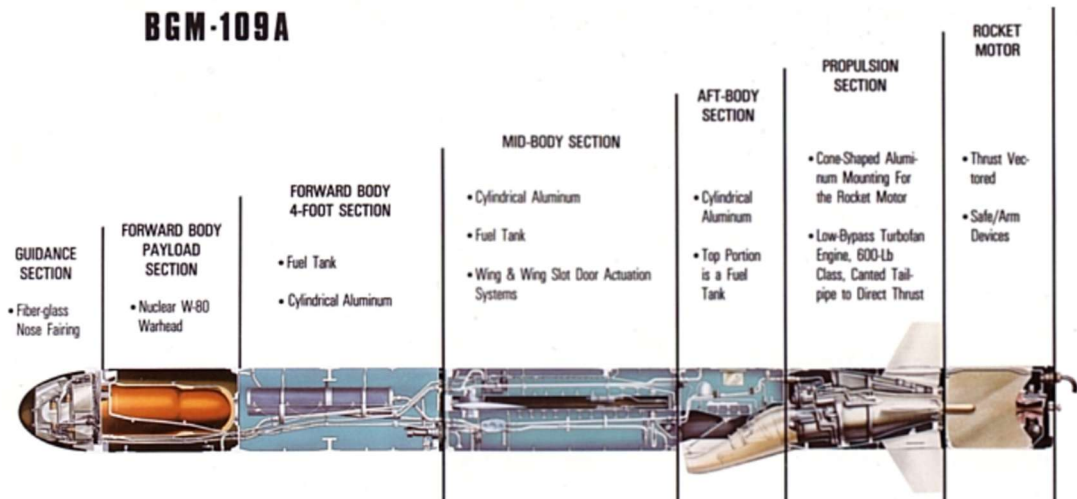
Çözüm ağı yakınsaması yanı sıra yapılan çözüm ağı kalitesi değerlendirmesinde, Bölüm 3.3’te sunulan, “eleman kalitesi” ve “en boy oranı” değerleri incelenmiştir. Kullanılan çözüm ağı yapısında ortalama “eleman kalitesi” değeri yaklaşık 0.94 olarak elde edilmiştir. Minimum “eleman kalitesi” değeri ise kritik bölgelerde yaklaşık 0.78 seviyesinde kalmış ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde değerlendirilmiştir. “En boy oranı” değerinin ise yaklaşık 1.5 olduğu, maksimum “en boy oranı” değerinin lokal bölgelerde yaklaşık 2.8 olduğu görülmüştür. Bu değerlerin, ince cidarlı yapılar için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu değerlendirilmiştir.

4.2 Vaka Çalışması 2– Seyir Füzesi Gövdesi

Tez kapsamında ele alınan ikinci vaka çalışması olarak seyir füzesi gövdesi seçilmiştir. Seyir füzesi gövdesi, uçan sistemler içerisinde yapısal performans gereksinimlerinin yüksek olduğu, ağırlık azaltımının sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu ve farklı malzeme alternatiflerinin karşılaştırılması açısından uygun bir yapısal bileşen olması nedeniyle bu çalışmaya dahil edilmiştir. Kanister destek parçası yer sistemi sınıfında değerlendirilen bir yapı iken, seyir füzesi gövdesi doğrudan uçuş koşullarına maruz kalan bir sistem bileşenidir. Bu nedenle iki farklı vaka çalışmasının birlikte ele alınması, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımının hem yer sistemleri hem de uçan sistemler üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Seyir füzesi gövdesi, aerodinamik dış formu taşımasının yanında sistem içerisindeki alt bileşenlerin korunması, yapısal yüklerin taşınması ve uçuş boyunca oluşan mekanik zorlamalara karşı bütünlüğün sağlanması açısından kritik bir görev üstlenmektedir. Bu tür yapılarda düşük ağırlık, yeterli direngenlik, yüksek dayanım ve uygun dinamik davranış temel tasarım gereksinimleri arasında yer almaktadır. Özellikle uçan sistemlerde yapısal kütlede sağlanacak azalma; menzil, faydalı yük kapasitesi, yakıt tüketimi ve genel sistem verimliliği üzerinde olumlu etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle seyir füzesi gövdesi, sürdürülebilirlik odaklı malzeme seçimi ve tasarım eniyilemesi için uygun bir mühendislik problemi sunmaktadır.

Seyir füzesi gövdeleri genel olarak yönlendirme bölümü, yakıt tankı/gövde bölümü, orta gövde, arka gövde, tahrik bölümü ve motor bölümü gibi farklı yapısal ve fonksiyonel alt bölümlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada, Şekil 4.6’da gösterilen seyir füzesi kesit görünümündeki yakıt tankı ve gövde bölümlerine benzer nitelikte silindirik bir gövde kesiti vaka çalışması olarak seçilmiştir. Seçilen bu bölüm, hem yapısal yük taşıma görevi üstlenmesi hem de füze iç hacminin korunması açısından kritik bir gövde elemanını temsil etmektedir. Bu nedenle ilgili gövde bölümü, malzeme seçimi ve sürdürülebilirlik tabanlı tasarım eniyilemesi açısından uygun bir referans yapı olarak değerlendirilmiştir.

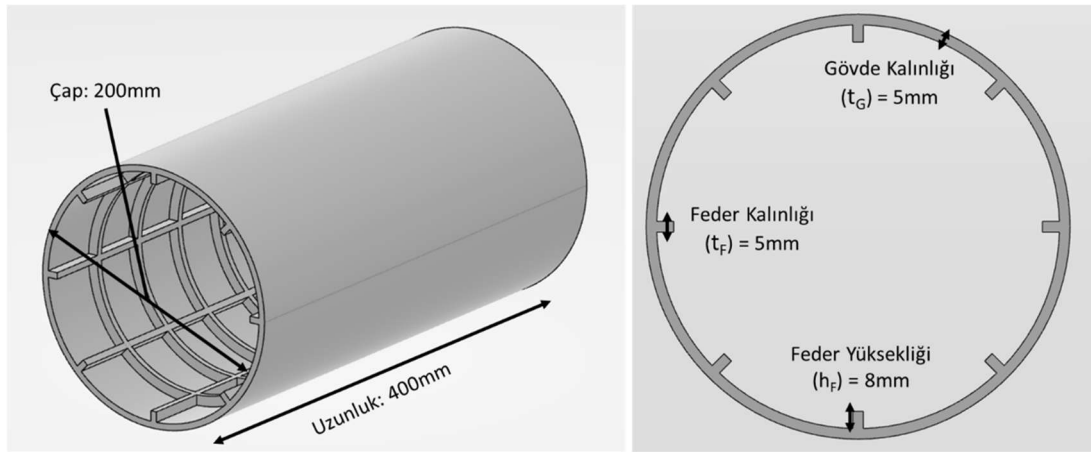


Şekil 4.6: BGM-109A Tomahawk seyir füzesine ait genel kesit görünümü ve gövde bölümleri [53]

Bu vaka çalışmasının seçilmesindeki önemli nedenlerden biri, seyir füzesi gövdesinin hem metalik hem de kompozit malzemelerden üretime uygun bir yapı olmasıdır. Geleneksel olarak alüminyum alaşımları, işlenebilirlik, üretim kolaylığı, maliyet avantajı ve yapısal güvenilirlik nedeniyle havacılık ve savunma yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte karbon fiber takviyeli polimer kompozitler, yüksek özgül direngenlik ve özgül dayanım özellikleri sayesinde uçan sistemlerde önemli ağırlık avantajı sağlayabilmektedir. Bu durum, aynı yapısal gereksinimleri karşılayan alüminyum ve kompozit gövde alternatiflerinin sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılmasına imkân vermektedir.

4.2.1 Tasarım değişkenleri

Seyir füzesi gövdesi vaka çalışması kapsamında, yapının geometrik özelliklerinin hem yapısal performans hem de sürdürülebilirlik göstergeleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç temel tasarım değişkeni belirlenmiştir. Bu değişkenler; dış gövde cidar kalınlığı (t_G), iç feder kalınlığı (t_F) ve iç feder yüksekliğidir (h_F). Seçilen parametreler, silindirik gövde yapısının direngenliği, yük taşıma kapasitesi, deformasyon davranışı, doğal frekansı ve toplam kütlesi üzerinde doğrudan etkili olduğundan tasarım değişkeni olarak değerlendirilmiştir. Seyir füzesi gövdesi üzerinde, tasarım değişkenleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Seyir Füzesi Gövdesi Tasarım Değişkenleri

Dış gövde cidar kalınlığı, seyir füzesi gövdesinin genel yapısal direngenliğini belirleyen en temel geometrik parametrelerden biridir. Cidar kalınlığının artırılması, gövdenin eğilme ve burulma direngenliğini artırmakta, uygulanan yükler altında oluşan deformasyonları azaltmaktadır. Bununla birlikte cidar kalınlığındaki artış,

yapının toplam kütlesini de doğrudan artırmaktadır. Uçan sistemlerde kütle artışı sistem performansını olumsuz etkileyebileceğinden, dış gövde cidar kalınlığının uygun şekilde belirlenmesi kritik öneme sahiptir [54]. Bu nedenle cidar kalınlığı bir tasarım değişkeni olarak seçilmiştir.

İç feder kalınlığı, gövde içerisinde yer alan takviye elemanlarının yük taşıma kabiliyetini ve lokal direngenlik katkısını temsil etmektedir. Federlerin daha kalın seçilmesi, gövde kesitinin lokal stabilitesini ve direngenliğini artırabilmekte, özellikle basınç, eğilme veya dinamik yükler altında yapının daha kararlı davranmasını sağlamaktadır. Ancak feder kalınlığındaki artış da kullanılan malzeme miktarını yükseltmekte ve buna bağlı olarak kütle, maliyet ve CO₂ emisyonu değerlerini artırmaktadır.

İç feder yüksekliği ise federlerin gövde iç yüzeyinden merkeze doğru uzanma miktarını ifade etmektedir. Feder yüksekliği, silindirik gövdenin kesit direngenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha yüksek federler, gövdenin eğilme ve burulma davranışına daha fazla katkı sağlayarak deformasyonların azaltılmasına ve doğal frekans değerlerinin artırılmasına yardımcı olabilir. Bununla birlikte feder yüksekliğinin artması, hem iç hacim kullanımını etkileyebilmekte hem de yapısal kütlerde artışa neden olmaktadır.

Seçilen üç tasarım değişkeni birlikte değerlendirildiğinde, seyir füzesi gövdesinin temel yapısal davranışını temsil edebilecek uygun bir parametrik tasarım uzayı oluşturulmuştur. Dış gövde cidar kalınlığı genel kabuk davranışını belirlerken, iç feder kalınlığı ve iç feder yüksekliği gövdenin iç direngenlik seviyesini kontrol etmektedir. Böylece hem dış kabuk yapısının hem de iç takviye elemanların performans üzerindeki etkileri aynı çalışma kapsamında incelenebilmiştir.

Deney tasarımı kapsamında her bir tasarım değişkeni üç farklı seviyede değerlendirilmiştir. Dış gövde cidar kalınlığı ve iç feder kalınlığı için 3–8 mm aralığı, iç feder yüksekliği için ise 6–12 mm aralığı kullanılmıştır. Bu aralıklar, yapının üretilebilirliği, geometrik uygulanabilirliği ve beklenen yapısal performans gereksinimleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Çok düşük kalınlık ve feder yüksekliği değerleri yapısal direngenliği yetersiz bırakabileceğinden, çok yüksek değerler ise gereksiz kütle artışına neden olabileceğinden, seçilen aralıkların hem yapısal hem de

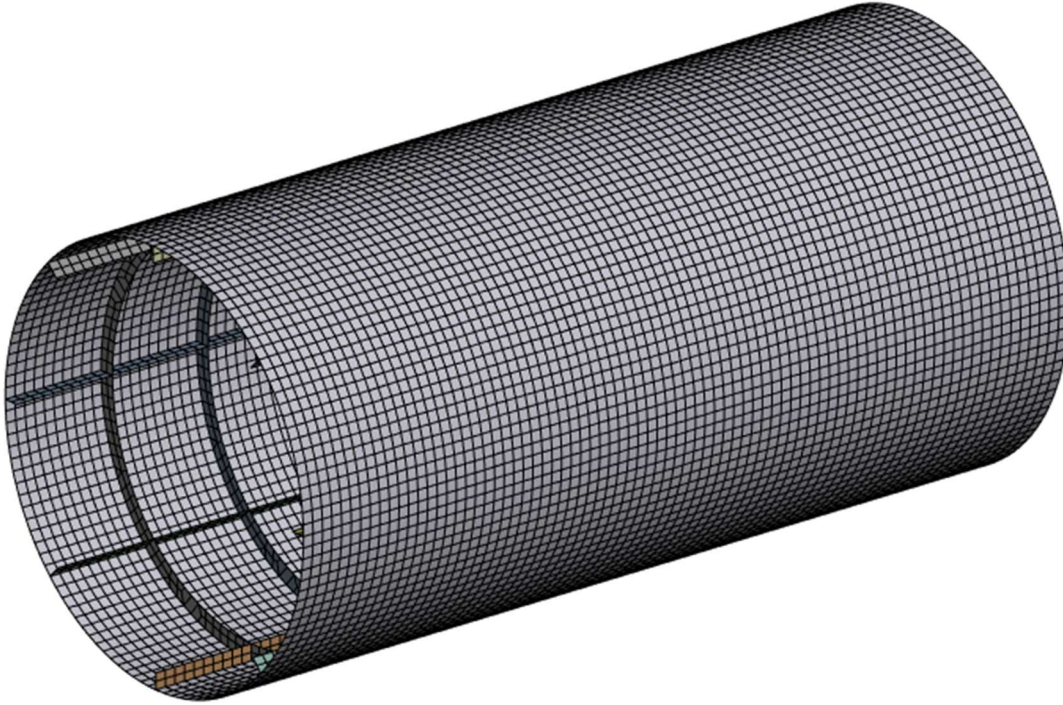
sürdürülebilirlik açısından anlamlı bir tasarım uzayı oluşturması hedeflenmiştir. Tasarım değişkeni aralıkları Çizelge 4.2 'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2: Seyir füzesi gövdesi tasarım değişkenleri ve değişim aralıkları

	Dış gövde cidar kalınlığı [mm]	İç feder kalınlığı [mm]	İç feder yüksekliği [mm]
Değişim Aralığı	3-8	3-8	6-12

4.2.2 Sonlu elemanlar analizleri

Seyir füzesi gövdesi sonlu eleman analizleri için oluşturulan çözüm ağı yapısına ait görünüm Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8: Seyir füzesi gövdesi sonlu elemanlar modeli

Sınır koşulları ve yükleme durumu, seyir füzesi gövdesinin uçuş sırasında maruz kalabileceği temsili eğilme etkilerini modellemek amacıyla belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan gövde modeli, açık kaynaklı seyir füzesi kesitlerinden yararlanılarak oluşturulan 200 mm çaplı temsili bir gövde bölümüdür. Tomahawk füzesi, vaka çalışmasında kullanılan seyir füzesi mimarisinin ve genel gövde oranlarının için referans olarak kullanılmıştır. Kullanılan füzenin kütle ve uzunluğu Tomahawk füzesinin, çapı 200mm olacak şekilde ölçeklendirilmiş halidir. CSIS

Missile Threat veritabanında Tomahawk/Gryphon türevi için uzunluk 6.4 m, gövde çapı 0.52 m ve fırlatma ağırlığı 1470 kg olarak verilmektedir [55].

Bu değerlere göre referans uzunluk/çap oranı $\left(\frac{L}{D}\right)_{ref} = \frac{6.4}{0.52} = 12.31$ olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan temsili gövde çapı 0.2 m olduğundan, aynı uzunluk/çap oranı korunarak model için toplam temsili füze uzunluğu $L_{model} = 12.31 * 0.2 = 2.46 m$ olarak belirlenmiştir.

Temsili füze kütlesi ise geometrik benzerlik kabulüyle hacim oranı üzerinden ölçeklendirilmiştir. 200 mm çaplı temsili gövde için yaklaşık kütle $m_{model} = 1470kg * \left(\frac{0.2m}{0.52m}\right)^3 = 85.8kg$ olarak hesaplanmıştır.

Uçan sistemlerde manevra sırasında oluşan ataletsel etkiler, yük katsayısı yaklaşımı ile temsil edilebilmektedir. Yük katsayısı genel olarak yapıya etkiyen yükün ağırlığa oranı olarak tanımlanmakta ve manevra sırasında yapının maruz kaldığı ek yük seviyesini ifade etmektedir. Füze ve roket gövdelerinde ön tasarım aşamasında gövdenin kiriş benzeri bir yapı olarak ele alınması, kesme kuvveti ve eğilme momenti dağılımlarının hesaplanması açısından yaygın bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda gövde boyunca oluşan yükler, kesit yöntemi veya basitleştirilmiş kiriş teorisi kullanılarak iç kuvvetlere ve momentlere dönüştürülebilmektedir [56].

Bu çalışma kapsamında yanal manevra etkilerini temsil etmek amacıyla 10g değerinde bir yük katsayısı kabul edilmiştir. Eşdeğer yanal kuvvet, seçilen gövde kesitine aktarılan temsili sistem kütlesi ve manevra yük katsayısı kullanılarak Eşitlik (24) kullanılarak 8416 N olarak hesaplanmıştır:

$$F = m_s n g \quad (24)$$

Burada F eşdeğer yanal kuvveti, $m_s = 85.8 kg$, yüklemeye esas alınan kütleyi, $n = 10$, manevra yük katsayısını ve $g = 9.81 m/s^2$ yerçekimi ivmesini göstermektedir. Bu kuvvet, gövde kesitinde oluşabilecek kesme etkisini temsil etmek amacıyla sonlu eleman modelinde iki uç bölgesine eşdeğer yanal kuvvet olarak uygulanmıştır. Bunun yanında, aynı yükleme durumunda gövde üzerinde oluşabilecek global eğilme etkisini temsil etmek amacıyla eşdeğer eğilme momenti de tanımlanmıştır. Seçilen gövde bölümünün orta gövde bölgesini temsil ettiği kabul edilerek moment kolu,

ölçeklendirilmiş füze uzunluğunun yarısı olarak alınmıştır. Uygulanan eşdeğer moment Eşitlik (25) kullanılarak 10352 Nm olarak hesaplanmıştır.

$$M = F \frac{L_{model}}{2} \quad (25)$$

Burada M eşdeğer eğilme momenti, $F = 8416 \text{ N}$, eşdeğer yanal kuvveti ve $L_{model} = 2.46 \text{ m}$, füze uzunluğunu temsil etmektedir.

ANSYS modelinde kesme yükü ve eğilme momenti birlikte uygulanmıştır. Böylece analizlerde yalnızca saf eğilme durumu değil, kesme kuvveti ve eğilme momentinin birlikte etkili olduğu birleşik yükleme durumu temsil edilmiştir. Bu yaklaşım, seyir füzesi gövdesinin uçuş sırasında karşılaşılabileceği global yapısal yüklerin ön tasarım seviyesinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Sınır koşulu olarak modelin orta bölgesinde “uzaktan yer değiştirme koşulu (ing. Remote displacement)” tanımlanmış ve tüm yer değiştirme bileşenleri sıfır olacak şekilde kısıtlanmıştır. Ancak bu kısıt “şekil değiştirebilir (ing. Deformable)” davranışta uygulanmıştır. Böylece orta bölgenin tamamen sabit bir ankastre bağlantı gibi davranması engellenmiş, yüklerin gövde cidarı ve iç federler üzerine dağıtılmış şekilde aktarılması sağlanmıştır.

Analizlerde ayrıca “atalet giderme (ing. Inertia relief)” seçeneği aktif hale getirilmiştir. “Atalet gideme” yaklaşımı, özellikle uçan sistemler gibi serbest cisim davranışı gösteren yapılarda dış yüklerin ataletsel etkilerle dengelenmesini sağlayarak yapının tamamen ankastrelenmesine gerek kalmadan statik çözüm yapılmasına olanak tanımaktadır.

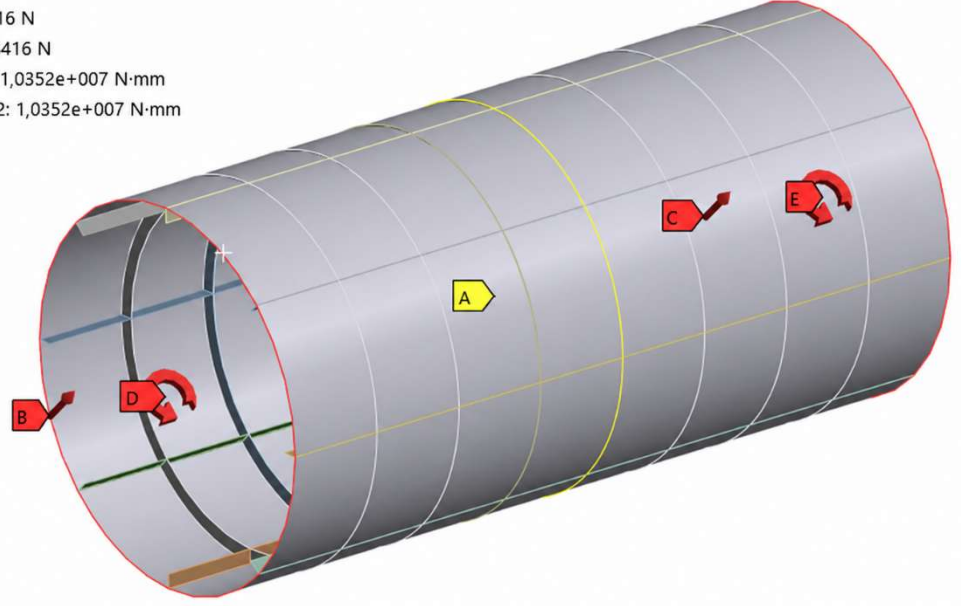
Kullanılan sınır koşulları, orta bölgedeki şekil değiştirebilir yer değiştirme tanımı ve iki uçtan uygulanan eşdeğer kuvvet/moment yükleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Bu modelleme yaklaşımı sayesinde farklı malzeme ve geometrik konfigürasyonların aynı birleşik kesme-eğilme yükleme koşulları altında deformasyon, emniyet faktörü ve dinamik davranış açısından karşılaştırılması mümkün hale getirilmiştir.

B: Static Structural

Static Structural

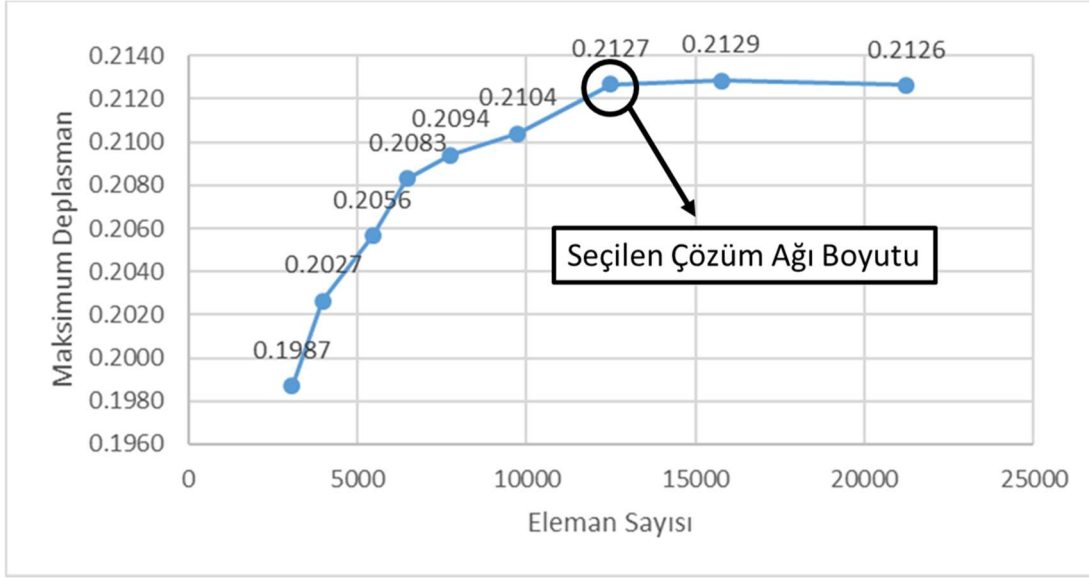
Time: 1, s

- A** Remote Displacement
- B** Force: 8416 N
- C** Force 2: 8416 N
- D** Moment: 1,0352e+007 N·mm
- E** Moment 2: 1,0352e+007 N·mm



Şekil 4.9: Seyir füzesi gövdesi sınır koşulları

Analiz sonuçlarının çözüm ağı yoğunluğundan bağımsız hale geldiğini göstermek amacıyla çözüm ağı yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda farklı eleman boyutları için analizler tekrarlanmış ve seçilen referans çıktıdaki değişim incelenmiştir. Eleman boyutu küçüldükçe sonuçların belirli bir değere yakınsadığı gözlemlenmiş, ancak çok küçük eleman boyutlarında hesaplama maliyetinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Bu nedenle çözüm doğruluğu ve hesaplama süresi birlikte değerlendirilerek optimum çözüm ağı boyutu seçilmiştir. Çözüm ağı yakınsama çalışmasına ait grafik Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10: Seyir füzesi gövdesi için çözüm ağı yakınsama çalışması ve seçilen çözüm ağı boyutu.

Çözüm ağı yakınsama çalışmasına ek olarak, seçilen sonlu eleman ağının kalite değerleri de kontrol edilmiştir. Bir önceki vaka çalışmasında tanımlanan “eleman kalitesi” ve “en boy oranı” kriterleri bu model için de değerlendirilmiştir. Seyir füzesi gövdesi modelinde, silindirik dış cidar ve iç feder birleşim bölgeleri nedeniyle eleman kalitesinde lokal değişimler oluşmakla birlikte, genel çözüm ağı kalitesinin kabul edilebilir seviyede kaldığı görülmüştür.

Seçilen çözüm ağı yapısında ortalama eleman kalitesi değeri 0.92 olarak elde edilmiştir. Minimum eleman kalitesi değeri ise feder-gövde birleşim bölgelerinde yaklaşık 0.63 seviyesine düşmüştür. Bu bölgelerde geometrik geçişler ve feder bağlantıları nedeniyle daha düşük kalite değerleri oluşması beklenen bir durumdur. Ancak minimum değerlerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması nedeniyle çözüm ağı yapısının analizler için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Ayrıca seçilen çözüm ağı için ortalama en boy oranı değeri yaklaşık 2.15, maksimum en boy oranı değeri ise lokal bölgelerde yaklaşık 3.40 olarak elde edilmiştir. Maksimum değerler özellikle feder uçları ve cidar-feder bağlantı bölgelerinde görülmüştür. Buna rağmen genel çözüm ağı dağılımı incelendiğinde elemanların büyük çoğunluğunun düzenli ve dengeli bir geometriye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle seçilen çözüm ağı boyutu uygun kabul edilmiştir.

5. BULGULAR

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen sürdürülebilirlik tabanlı tasarım ve optimizasyon yaklaşımı sonucunda elde edilen bulgular sunulmaktadır. Öncelikle kanister destek parçası vaka çalışmasına ait optimizasyon sonuçları değerlendirilmiş, ardından seyir füzesi gövdesi vaka çalışması için elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Her iki vaka çalışmasında da farklı malzeme alternatifleri; yapısal performans, maliyet, çevresel etki, döngüsellik ve sosyal etki parametreleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçların yalnızca tek bir tasarım önceliğine bağlı kalmadan değerlendirilebilmesi amacıyla farklı ağırlık senaryoları uygulanmış ve sürdürülebilirlik indeksinin seçilen ağırlık katsayılarına duyarlılığı incelenmiştir. Böylece malzeme seçimi ve geometrik tasarım kararlarının, farklı sürdürülebilirlik öncelikleri altında nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.,

5.1 Vaka Çalışması 1 – Kanister Destek Parçası Bulguları

Kanister destek parçası vaka çalışması kapsamında, farklı sürdürülebilirlik önceliklerinin malzeme seçimi ve optimum tasarım değişkenleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, eşit ağırlık senaryosu başta olmak üzere farklı ağırlık katsayıları kullanılarak elde edilen optimizasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

5.1.1 Eşit ağırlık senaryosu

Kanister destek parçası için ilk olarak tüm sürdürülebilirlik parametrelerinin eşit öneme sahip olduğu, eşit ağırlık senaryosu değerlendirilmiştir. Bu senaryoda performans, maliyet, çevresel etki, döngüsellik ve sosyal etki parametrelerinin her biri aynı ağırlık katsayısı ile çarpılmıştır $w_P = 0.2$, $w_C = 0.2$, $w_{EI} = 0.2$, $w_{SOC} = 0.2$, $w_{CIR} = 0.2$. Böylece herhangi bir kriterin baskın hale gelmediği, daha dengeli bir değerlendirme yaklaşımı oluşturulmuştur. Eşit ağırlık senaryosu, farklı malzeme alternatiflerinin genel sürdürülebilirlik performansını karşılaştırmak için referans bir durum olarak ele alınmıştır.

Bu senaryoda her bir malzeme alternatifi için sürdürülebilirlik indeksi maksimize edilmiş ve optimum geometrik tasarım değişkenleri elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen yüzey kalınlığı, takviye elemanı kalınlığı, takviye elemanı genişliği, kütle ve sürdürülebilirlik indeksi değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Eşit ağırlık senaryosu için optimum tasarım değişkenleri ve sürdürülebilirlik indeksi

Malzeme	Yüzey Kalınlığı [mm]	Takviye Elemanı Kalınlığı [mm]	Takviye Elemanı Genişliği [mm]	Kütle [kg]	SI
KGD-KFTP	6.864	3.402	100.2	1.624	0.8021
TGD-KFTP	7.206	4.086	102.1	1.745	0.7980
Alüminyum	3.012	6.289	100.0	2.116	0.7511
İÜ-KFTP	3.002	3.695	100.0	0.927	0.6892
MGD-KFTP	7.102	7.903	100.0	2.058	0.6774

Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek sürdürülebilirlik indeksinin kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP malzemesi ile elde edildiği görülmektedir. KGD-KFTP için optimum tasarımda sürdürülebilirlik indeksi 0.8021 olarak hesaplanmıştır. Bu malzemeyi 0.7980 sürdürülebilirlik indeksi ile termal geri dönüştürülmüş KFTP takip etmektedir. Alüminyum ise 0.7511 değeri ile üçüncü sırada yer almıştır.

Elde edilen sonuçlar, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin dengeli bir sürdürülebilirlik değerlendirmesi altında avantajlı hale gelebildiğini göstermektedir. Özellikle KGD-KFTP ve TGD-KFTP alternatiflerinin ilk iki sırada yer alması, bu malzemelerin yapısal performans, çevresel etki ve döngüsellik kriterleri arasında dengeli bir performans göstermesinden kaynaklanmaktadır. KGD-KFTP, kimyasal geri dönüşüm yöntemi sayesinde geri kazanılan elyaf özelliklerini yüksek oranda koruyabilmekte ve bu nedenle performans ile döngüsellik açısından güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. TGD-KFTP ise KGD-KFTP’ye oldukça yakın bir SI değeri elde etmiş ve termal geri dönüşüm yönteminin de sürdürülebilir yapısal uygulamalar için rekabetçi bir seçenek olduğunu göstermiştir.

Alüminyum malzeme, eşit ağırlık senaryosunda üçüncü sırada yer almıştır. Alüminyumun bu senaryoda en büyük avantajları, düşük maliyeti ve yüksek döngüsellik değeridir. Gelişmiş geri dönüşüm altyapısı ve düşük birim maliyet alüminyumunu ekonomik ve döngüsel açıdan öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte,

alüminyumun kütlesinin kompozit alternatiflere göre daha yüksek olması, performans ve bazı çevresel göstergeler açısından sınırlayıcı etki oluşturmuştur.

İlk üretim KFTP, en düşük kütle değerine sahip olmasına rağmen eşit ağırlık senaryosunda dördüncü sırada yer almıştır. Bu sonuç, yalnızca ağırlık avantajının sürdürülebilirlik değerlendirmesinde tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. İÜ-KFTP'nin düşük kütlesi yapısal ve çevresel bazı avantajlar sağlasa da, yüksek birim maliyeti ve karbon fiber üretiminden kaynaklanan yüksek CO₂ emisyonu sürdürülebilirlik indeksini sınırlandırmıştır. Bu durum, yüksek performanslı kompozit malzemelerin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilirken üretim kaynaklı çevresel ve ekonomik etkilerinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Mekanik geri dönüştürülmüş KFTP ise bu senaryoda en düşük sürdürülebilirlik indeksine sahip malzeme olmuştur. MGD-KFTP'nin düşük sıralaması, mekanik geri dönüşüm sürecinde elyaf özelliklerinin daha fazla bozulması ve buna bağlı olarak yapısal performansın sınırlanması ile ilişkilidir. Mekanik geri dönüşüm çevresel etki ve maliyet açısından avantaj sağlayabilse de, yapısal performans ve döngüsellik değerlerinin düşük kalması genel SI değerini olumsuz etkilemiştir.

Normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Eşit ağırlık senaryosu için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri

Malzeme	P	C	SOC	EI	CIR	SI
KGD-KFTP	0.6141	0.6798	0.9024	0.8643	0.95	0.8021
TGD-KFTP	0.6061	0.7080	0.8834	0.8925	0.9	0.7980
Alüminyum	0.2892	1.0000	0.6028	0.8636	1	0.7511
İÜ-KFTP	0.1544	0.7363	0.9758	0.7795	0.8	0.6892
MGD-KFTP	0.4670	0.6835	0.8342	0.9025	0.5	0.6774

Bu çizelge, malzemelerin toplam SI değerlerinin hangi parametrelerden etkilendiğini daha detaylı şekilde göstermektedir. KGD-KFTP ve TGD-KFTP'nin yüksek SI değerleri, tek bir kriterde aşırı üstün olmalarından değil, birden fazla kriterde dengeli sonuçlar vermelerinden kaynaklanmaktadır. Alüminyum maliyet ve döngüsellik açısından güçlü iken, kompozit malzemeler özellikle ağırlık ve performans odaklı kriterlerde avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle eşit ağırlık senaryosu, geri

dönüştürülmüş kompozitlerin kanister destek parçası gibi yer sistemi yapılarında sürdürülebilir alternatifler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

5.1.2 Ekonomik ve döngüsellik ağırlıklı senaryo

Kanister destek parçası için ikinci olarak ekonomik ve döngüsellik kriterlerinin daha yüksek öneme sahip olduğu ağırlık senaryosu değerlendirilmiştir. Bu senaryo kapsamında ağırlık katsayıları performans, maliyet, çevresel etki, sosyal etki ve döngüsellik parametreleri için sırasıyla $w_P = 0.1$, $w_C = 0.35$, $w_{EI} = 0.1$, $w_{SOC} = 0.1$, $w_{CIR} = 0.35$ olarak tanımlanmıştır. Böylece maliyet ve döngüsellik parametrelerine daha yüksek ağırlık verilerek, ekonomik açıdan uygulanabilir ve yaşam döngüsü sonunda malzeme değerini koruyabilen tasarımların öne çıkarılması amaçlanmıştır.

Bu senaryo, özellikle savunma sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılan ekonomik uygulanabilirlik ve malzeme döngüsellliği gereksinimlerini temsil etmektedir. Kanister gibi yer sistemi yapılarında ağırlık azaltımı önemli olmakla birlikte, uçan sistemlere kıyasla sistem performansı üzerindeki etkisi daha sınırlı kalabilmektedir. Buna karşılık üretim maliyeti, tekrar kullanılabilirlik, bakım kolaylığı ve yaşam döngüsü sonu geri kazanım potansiyeli bu tür yapılarda daha baskın tasarım kriterleri haline gelebilmektedir. Bu senaryo kapsamında hesaplanan normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3: Ekonomik ve döngüsellik ağırlıklı senaryo için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri

Malzeme	P	C	SOC	EI	CIR	SI
Alüminyum	0.2892	1.0000	0.6028	0.8636	1	0.8755
KGD-KFTP	0.1062	0.8437	1.0000	0.9827	0.95	0.8367
TGD-KFTP	0.070	0.8579	0.9860	0.9979	0.9	0.8206
İÜ-KFTP	0.1544	0.7363	0.9758	0.7795	0.8	0.7287
MGD-KFTP	0.2966	0.7309	0.8702	0.9328	0.5	0.6408

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ekonomik ve döngüsellik ağırlıklı senaryoda en yüksek sürdürülebilirlik indeksinin alüminyum malzeme ile elde edildiği görülmektedir. Alüminyumun SI değeri 0.8755 olarak hesaplanmış ve bu değer diğer malzeme alternatiflerinin üzerinde gerçekleşmiştir. Bu sonucun temel nedeni, alüminyumun hem maliyet hem de döngüsellik kriterlerinde güçlü bir performans

göstermesidir. Alüminyum, düşük birim malzeme maliyeti ve gelişmiş geri dönüşüm altyapısı sayesinde bu senaryoda belirgin bir avantaj elde etmiştir.

KGD-KFTP ve TGD-KFTP malzemeleri bu senaryoda sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer almıştır. KGD-KFTP'nin 0.8367, TGD-KFTP'nin ise 0.8206 SI değerine ulaşması, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin ekonomik ve döngüsellik kriterleri baskın olduğunda dahi alüminyuma yakın sonuçlar verebildiğini göstermektedir. Özellikle KGD-KFTP'nin yüksek döngüsellik katsayısı ve sosyal etki parametresindeki avantajı, toplam SI değerini olumlu yönde etkilemiştir. TGD-KFTP ise çevresel etki ve maliyet parametrelerinde güçlü sonuçlar vermesine rağmen, döngüsellik değerinin KGD-KFTP'ye göre bir miktar düşük olması nedeniyle üçüncü sırada kalmıştır.

İlk üretim KFTP bu senaryoda dördüncü sırada yer almıştır. İÜ-KFTP, düşük kütle avantajına sahip olmasına rağmen yüksek üretim maliyeti ve ilk üretim karbon fiber üretiminden kaynaklanan çevresel etkiler nedeniyle ekonomik ve döngüsellik ağırlıklı değerlendirmede geri planda kalmıştır. Bu durum, yüksek performanslı kompozit malzemelerin özellikle maliyetin öncelikli olduğu tasarım senaryolarında her zaman en avantajlı seçenek olmayabileceğini göstermektedir.

MGD-KFTP ise bu senaryoda en düşük SI değerini elde etmiştir. Mekanik geri dönüşüm yöntemi, maliyet açısından avantajlı bir alternatif sunmasına rağmen, geri dönüşüm sonrası mekanik özelliklerin belirgin şekilde azalması nedeniyle döngüsellik parametresinde düşük değer almaktadır. Bu durum, MGD-KFTP'nin toplam sürdürülebilirlik indeksini sınırlandırmıştır. Dolayısıyla yalnızca geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, sürdürülebilirlik açısından tek başına yeterli olmamakta; geri dönüşüm sonrası malzeme kalitesi ve yapısal kullanılabilirlik de kritik rol oynamaktadır.

Bu senaryonun sonuçları, sürdürülebilirlik indeksinin ağırlık katsayılarına duyarlı olduğunu açık şekilde göstermektedir. Eşit ağırlık senaryosunda geri dönüştürülmüş kompozit alternatifleri ilk sıralarda yer alırken, maliyet ve döngüsellik kriterleri önceliklendirildiğinde alüminyum en avantajlı malzeme haline gelmiştir.

5.1.3 Çevresel etki ağırlıklı senaryo

Kanister destek parçası için son olarak çevresel etki kriterinin daha yüksek öneme sahip olduğu ağırlık senaryosu değerlendirilmiştir. Bu senaryoda temel amaç, malzeme seçimi ve geometrik tasarım kararlarının CO₂ emisyonu odaklı bir sürdürülebilirlik değerlendirmesi altında nasıl değiştiğini incelemektir. Bu kapsamda ağırlık katsayıları performans, maliyet, çevresel etki, sosyal etki ve döngüsellik parametreleri için sırasıyla $w_P = 0.2$, $w_C = 0.1$, $w_{EI} = 0.4$, $w_{SOC} = 0.2$, $w_{CIR} = 0.1$ olarak tanımlanmıştır. Böylece çevresel etki parametresi sürdürülebilirlik indeksi üzerinde baskın kriter haline getirilmiş, ancak yapısal performans ve sosyal etki gibi diğer kriterlerin etkisi tamamen ihmal edilmemiştir.

Bu senaryo, özellikle karbon ayak izinin azaltılmasının öncelikli olduğu tasarım durumlarını temsil etmektedir. Kompozit ve metalik malzemelerin çevresel etkileri yalnızca birim kütle başına CO₂ emisyon katsayılarına bağlı değildir; aynı zamanda optimum tasarım sonucunda ortaya çıkan yapısal kütleye de bağlıdır. Bu nedenle düşük emisyon katsayısına sahip ancak daha ağır bir tasarım ile daha yüksek emisyon katsayısına sahip ancak daha hafif bir tasarım arasında doğrudan bir denge oluşmaktadır. Çevresel etki ağırlıklı senaryo için hesaplanmış sürdürülebilirlik göstergeleri Çizelge 5.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Çevresel etki ağırlıklı senaryo için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri

Malzeme	P	C	SOC	EI	CIR	SI
TGD-KFTP	0.5723	0.7216	0.8927	0.9020	0.90	0.8160
KGD-KFTP	0.5553	0.7040	0.9169	0.8818	0.95	0.8126
MGD-KFTP	0.4597	0.6864	0.8364	0.9044	0.50	0.7396
Alüminyum	0.2892	1.0000	0.6028	0.8636	1.00	0.7238
İÜ-KFTP	0.1545	0.7363	0.9758	0.7795	0.80	0.6915

Elde edilen sonuçlara göre, çevresel etki ağırlıklı senaryoda en yüksek sürdürülebilirlik indeksi termal geri dönüştürülmüş KFTP malzemesi ile elde edilmiştir. TGD-KFTP için hesaplanan SI değeri 0.8160 olup, bu malzeme çevresel etkinin önceliklendirildiği durumda en avantajlı alternatif olarak öne çıkmıştır. Bu sonucun temel nedeni, TGD-KFTP’nin hem düşük CO₂ emisyonu açısından güçlü bir performans göstermesi hem de yapısal performans ve döngüsellik kriterlerinde dengeli değerler elde etmesidir.

KGD-KFTP ise 0.8126 SI değeri ile ikinci sırada yer almıştır. TGD-KFTP ve KGD-KFTP arasındaki fark oldukça sınırlıdır. Bu durum, her iki geri dönüşüm yönteminin de çevresel etki öncelikli değerlendirmelerde rekabetçi sonuçlar verebildiğini göstermektedir.

MGD-KFTP, bu senaryoda üçüncü sıraya yükselmiştir. Mekanik geri dönüşüm yöntemi, yapısal performans ve döngüsellik açısından termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla daha zayıf olsa da, çevresel etki bakımından avantajlı sonuçlar verebilmektedir. Çevresel etkinin yüksek ağırlıkla değerlendirildiği bu senaryoda MGD-KFTP'nin alüminyumun önüne geçmesi, ağırlık katsayılarının malzeme sıralaması üzerindeki etkisini göstermektedir.

Alüminyum bu senaryoda dördüncü sırada yer almıştır. Alüminyum, maliyet ve döngüsellik açısından güçlü bir malzeme olmasına rağmen, çevresel etki kriterinin baskın hale geldiği durumda geri dönüştürülmüş KFTP alternatiflerinin gerisinde kalmıştır.

İlk üretim KFTP ise bu senaryoda en düşük sürdürülebilirlik indeksine sahip malzeme olmuştur. İÜ-KFTP düşük kütle avantajına sahip olmasına rağmen, karbon fiber üretiminin yüksek enerji gereksinimi ve buna bağlı CO₂ emisyonu nedeniyle çevresel etki ağırlıklı değerlendirmede dezavantajlı hale gelmiştir. Bu durum, ilk üretim kompozit malzemelerin yalnızca ağırlık avantajı üzerinden değil, üretim kaynaklı çevresel etkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Genel olarak çevresel etki ağırlıklı senaryo sonuçları, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin CO₂ emisyonunun azaltılmasının öncelikli olduğu tasarım durumlarında önemli avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle TGD-KFTP ve KGD-KFTP alternatiflerinin birbirine yakın ve yüksek SI değerleri elde etmesi, geri dönüşüm yöntemlerinin sürdürülebilir kompozit yapı tasarımında dikkate değer bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

5.2 Vaka Çalışması 2 – Seyir Füzesi Gövdesi Bulguları

Bu bölümde, seyir füzesi gövdesi vaka çalışması için gerçekleştirilen sürdürülebilirlik tabanlı optimizasyon sonuçları sunulmaktadır. Kanister destek parçasından farklı olarak bu vaka çalışması uçan bir sistem bileşenini temsil

ettiğinden, elde edilen sonuçlar özellikle kütle, yapısal performans ve çevresel etki ilişkisi açısından değerlendirilmiştir.

5.2.1 Eşit ağırlık senaryosu

Seyir füzesi gövdesi için, Kanister destek parçasında olduğu gibi, ilk olarak tüm sürdürülebilirlik parametrelerinin eşit öneme sahip senaryo değerlendirilmiştir. Bu senaryoda performans, maliyet, çevresel etki, sosyal etki ve döngüsellik parametrelerinin her biri sürdürülebilirlik indeksi içerisinde aynı ağırlık katsayısı ile hesaplanmıştır. Böylece herhangi bir kriterin baskın hale gelmediği, genel sürdürülebilirlik performansını değerlendirmeye yönelik dengeli bir karşılaştırma yapılmıştır. Eşit ağırlık senaryosu için kullanılan ağırlık katsayıları $w_P = 0.2$, $w_C = 0.2$, $w_{EI} = 0.2$, $w_{SOC} = 0.2$, $w_{CIR} = 0.2$ şekilde tanımlanmıştır.

Bu senaryo kapsamında her bir malzeme alternatifi için sürdürülebilirlik indeksi maksimize edilmiş ve emniyet faktörü kısıtını sağlayan optimum geometrik konfigürasyonlar elde edilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen dış gövde cidar kalınlığı, iç feder kalınlığı, iç feder yüksekliği, kütle ve sürdürülebilirlik indeksi değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5: Seyir füzesi gövdesi için eşit ağırlık senaryosunda optimum tasarım değişkenleri ve SI değerleri

Malzeme	Gövde Cidar Kalınlığı [mm]	İç Feder Kalınlığı [mm]	İç Feder Yüksekliği [mm]	Kütle [kg]	SI
KGD-KFTP	4.042	3.022	12.001	1.738	0.8246
TGD-KFTP	4.473	3.116	10.246	1.889	0.8039
Alüminyum	4.561	3.457	11.853	3.504	0.7677
İÜ-KFTP	3.334	3.004	12.002	1.482	0.7382
MGD-KFTP	6.912	3.616	11.346	2.761	0.6395

Elde edilen sonuçlara göre, eşit ağırlık senaryosunda en yüksek sürdürülebilirlik indeksi kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP malzemesi ile elde edilmiştir. KGD-KFTP için hesaplanan SI değeri 0.8246 olup, bu malzeme tüm alternatifler arasında en dengeli sürdürülebilirlik performansını göstermiştir. KGD-KFTP’nin yüksek sıralaması, özellikle çevresel etki, sosyal etki ve döngüsellik parametrelerinde güçlü değerlere sahip olmasıyla ilişkilidir.

TGD-KFTP, 0.8039 SI değeri ile ikinci sırada yer almıştır. Termal geri dönüştürülmüş KFTP, çevresel etki parametresinde en yüksek değerlere yakın bir sonuç elde etmiş ve döngüsellik açısından da güçlü bir alternatif olarak öne çıkmıştır. KGD-KFTP'ye kıyasla performans parametresi daha düşük olmasına rağmen, düşük çevresel etki ve kabul edilebilir kütle değeri sayesinde toplam sürdürülebilirlik indeksi yüksek kalmıştır.

Alüminyum malzeme, eşit ağırlık senaryosunda üçüncü sırada yer almıştır. Alüminyumun maliyet ve döngüsellik parametrelerinde güçlü değerlere sahip olması SI değerini olumlu yönde etkilemiştir. Ancak alüminyum optimum konfigürasyonunun kütlesi 3.504 kg olarak elde edilmiş ve bu değer kompozit alternatiflere kıyasla daha yüksek kalmıştır.

İÜ-KFTP, en düşük kütleyle sahip malzeme alternatifi olmasına rağmen eşit ağırlık senaryosunda dördüncü sırada yer almıştır. Bu durum, yalnızca düşük kütlenin sürdürülebilirlik değerlendirmesi için yeterli olmadığını göstermektedir. İlk üretim KFTP'nin düşük kütle avantajı bulunmasına rağmen, yüksek üretim maliyeti ve karbon fiber üretiminden kaynaklanan çevresel etkiler sürdürülebilirlik indeksini sınırlandırmıştır. Bu nedenle İÜ-KFTP genel sürdürülebilirlik değerlendirmesinde geri dönüştürülmüş KFTP alternatiflerinin gerisinde kalmıştır.

MGD-KFTP ise bu senaryoda en düşük sürdürülebilirlik indeksine sahip malzeme olmuştur. Mekanik geri dönüşüm yöntemi çevresel etki açısından belirli avantajlar sağlasa da, geri dönüşüm sonrası mekanik özelliklerin daha fazla azalması yapısal performans parametresini olumsuz etkilemiştir. MGD-KFTP için optimum tasarımda dış gövde cidar kalınlığının diğer malzemelere kıyasla daha yüksek çıkması, malzemenin düşük direngenlik ve dayanım özelliklerini telafi etmek için daha fazla malzeme kullanımına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu da SI değerinin düşmesine neden olmuştur.

Eşit ağırlık senaryosu için hesaplanan normalize parametre değerleri ve sürdürülebilir indeksleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6: Seyir füzesi gövdesi için eşit ağırlık senaryosunda normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri

Malzeme	P	C	SOC	EI	CIR	SI
KGD-KFTP	0.4054	0.7994	0.9911	0.9774	0.95	0.8246
TGD-KFTP	0.3289	0.8174	0.9762	0.9968	0.9	0.8039
Alüminyum	0.4693	0.9970	0.5875	0.8447	1	0.7677
İÜ-KFTP	0.4490	0.7024	0.9798	0.7601	0.8	0.7382
MGD-KFTP	0.1336	0.7201	0.8905	0.9539	0.5	0.6395

Normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri incelendiğinde, KGD-KFTP ve TGD-KFTP'nin yüksek SI değerlerinin tek bir kriterdeki üstünlükten değil, birden fazla parametrede dengeli sonuçlar vermelerinden kaynaklandığı görülmektedir. KGD-KFTP özellikle sosyal etki, çevresel etki ve döngüsellik açısından yüksek değerlere sahipken; TGD-KFTP çevresel etki parametresinde en yüksek değeri elde etmiştir. Alüminyum maliyet ve döngüsellik açısından güçlü olmasına rağmen sosyal etki ve kütleye bağlı göstergelerde daha düşük performans göstermiştir.

5.2.2 Minimum kütle senaryosu

Seyir füzesi gövdesi için ikinci senaryo olarak minimum kütle odaklı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda sürdürülebilirlik indeksi doğrudan amaç fonksiyonu olarak kullanılmamış, bunun yerine uçan sistemlerde kütlenin kritik bir tasarım parametresi olması nedeniyle yapısal kütlenin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Optimizasyon sürecinde tüm malzeme alternatifleri için emniyet faktörünün $SF > 2.5$ koşulunu sağlaması zorunlu tutulmuş ve bu kısıt altında en düşük kütleye sahip geometrik konfigürasyonlar belirlenmiştir.

Bu yaklaşımın kullanılmasının temel nedeni, seyir füzesi gövdesi gibi uçan sistemlerde gereksiz yapısal direngenlik veya aşırı kalınlık artışının sistem performansı açısından her zaman avantajlı olmamasıdır. Tüm konfigürasyonlar belirlenen emniyet faktörü koşulunu sağladığında, yapısal performansı daha fazla artırmak çoğu durumda kütle artışına neden olmakta ve bu durum menzil, faydalı yük kapasitesi ve genel uçuş performansı açısından olumsuz sonuçlar oluşturabilmektedir. Bu nedenle bu senaryoda, yeterli yapısal güvenliği sağlayan en hafif tasarım alternatiflerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Optimizasyon sonucunda elde edilen tasarım değişkenleri ve kütle değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7: Seyir füzesi gövdesi için minimum kütle senaryosu optimizasyon sonuçları

Malzeme	Gövde Cidar Kalınlığı [mm]	İç Feder Kalınlığı [mm]	İç Feder Yüksekliği [mm]	Kütle [kg]
İÜ-KFTP	3.6439	3	6	1.4783
KGD-KFTP	4.2219	3	6	1.6754
TGD-KFTP	4.8247	3.0054	6.0736	1.8893
MGD-KFTP	7.1416	4.2373	6.9634	2.7158
Alüminyum	4.708	3.8362	6.7452	3.4738

Sonuçlar incelendiğinde, minimum kütle senaryosunda en düşük kütle değerinin ilk üretim KFTP malzemesi ile elde edildiği görülmektedir. İÜ-KFTP için optimum kütle 1.4783 kg olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, ilk üretim KFTP’nin yüksek özgül direngenlik ve özgül dayanım özellikleri sayesinde emniyet faktörü kısıtını daha düşük malzeme kullanımı ile sağlayabildiğini göstermektedir.

KGD-KFTP ve TGD-KFTP sırasıyla ikinci ve üçüncü en hafif alternatifler olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, geri dönüştürülmüş KFTP malzemelerin mekanik özelliklerindeki belirli azalmaya rağmen, alüminyuma kıyasla önemli ağırlık avantajı sunabildiğini göstermektedir. Özellikle KGD-KFTP, İÜ-KFTP’ye yakın kütle değerine sahip olması nedeniyle minimum kütle odaklı uçan sistem tasarımlarında potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

MGD-KFTP için optimum kütle 2.7158 kg olarak elde edilmiştir. Mekanik geri dönüşüm sonrası malzeme özelliklerinin daha fazla azalması nedeniyle emniyet faktörü kısıtının sağlanabilmesi için daha yüksek cidar ve feder boyutlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum, MGD-KFTP’nin kütle açısından KGD-KFTP ve TGD-KFTP alternatiflerine göre daha geride kalmasına neden olmuştur.

Alüminyum ise bu senaryoda en yüksek kütle değerine sahip malzeme olmuştur. Her ne kadar alüminyum yapısal güvenlik koşulunu sağlayabilse de, yoğunluğunun kompozit malzemelere göre daha yüksek olması nedeniyle minimum kütle hedefinde dezavantajlı kalmıştır. Bu sonuç, uçan sistemlerde kompozit malzeme kullanımının ağırlık azaltımı açısından belirgin bir avantaj sağladığını göstermektedir.

Genel olarak minimum kütle senaryosu, seyir füzesi gövdesi gibi uçan sistem bileşenlerinde malzeme seçiminin yalnızca sürdürülebilirlik indeksi üzerinden değil, görev performansını doğrudan etkileyen kütle kriteri üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu senaryo sonucunda İÜ-KFTP en hafif tasarım alternatifi olarak öne çıkarken, KGD-KFTP ve TGD-KFTP gibi geri dönüştürülmüş kompozit alternatifleri de alüminyuma kıyasla önemli kütle avantajı sağlamıştır.

5.2.3 Performans ve çevresel etki ağırlıklı senaryo

Seyir füzesi gövdesi için üçüncü senaryo olarak performans ve çevresel etki kriterlerinin önceliklendirildiği, ancak aynı zamanda kütle üst sınırının tanımlandığı bir optimizasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Bu senaryoda amaç, yalnızca en yüksek sürdürülebilirlik indeksine sahip tasarımı elde etmek değil; uçan sistemler için kritik öneme sahip olan kütle azaltımı için de uygun bir çözüm belirlemektir. Optimizasyon probleminde emniyet faktörü kısıtına ek olarak, toplam yapısal kütlenin 3 kg değerini aşmaması şartı tanımlanmıştır.

Bu senaryo kapsamında ağırlık katsayıları performans, maliyet, çevresel etki, sosyal etki ve döngüsellik parametreleri için sırasıyla $w_P = 0.35$, $w_C = 0.1$, $w_{EI} = 0.35$, $w_{SOC} = 0.1$, $w_{CIR} = 0.1$ olarak kullanılmıştır. Böylece yapısal performans ve CO₂ emisyonu kriterleri ön plana çıkarılırken, maliyet, sosyal etki ve döngüsellik parametreleri de değerlendirme dışında bırakılmamıştır. Alüminyum malzeme için $SF > 2.5$ ve 3 kg kütle sınırlarına uygun bir çözüm elde edilemediğinden, bu senaryoda alüminyum alternatifi değerlendirme dışında kalmıştır.

Optimizasyon sonucunda elde edilen dış gövde cidar kalınlığı, iç feder kalınlığı, iç feder yüksekliği, kütle ve sürdürülebilirlik indeksi değerleri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8: Performans ve çevresel etki ağırlıklı senaryo için optimum tasarım değişkenleri ve SI değerleri

Malzeme	Gövde Cidar Kalınlığı [mm]	İç Feder Kalınlığı [mm]	İç Feder Yüksekliği [mm]	Kütle [kg]	SI
KGD-KFTP	7.17	3.50	12.00	2.999	0.7821
TGD-KFTP	7.45	3.12	11.86	2.999	0.7742
İÜ-KFTP	3.33	3.00	12.00	1.482	0.6714
MGD-KFTP	7.56	3.27	11.20	2.999	0.6040

Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek sürdürülebilirlik indeksinin KGD-KFTP malzemesi ile elde edildiği görülmektedir. KGD-KFTP için hesaplanan SI değeri 0.7821 olup, performans, çevresel etki ve döngüsellik kriterleri arasında en dengeli sonucu vermiştir. Bu senaryoda KGD-KFTP'nin kütlesi 3 kg sınırına oldukça yakındır.

TGD-KFTP, 0.7742 SI değeri ile ikinci sırada yer almıştır. TGD-KFTP'nin KGD-KFTP'ye oldukça yakın sonuç vermesi, termal geri dönüştürülmüş kompozit malzemenin çevresel etki açısından güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir. Özellikle çevresel etki parametresinde yüksek normalize değer elde etmesi, bu senaryoda TGD-KFTP'nin toplam sürdürülebilirlik indeksini olumlu yönde etkilemiştir. Ancak KGD-KFTP'nin daha yüksek döngüsellik değeri ve performans parametresindeki avantajı, genel sıralamada KGD-KFTP'nin öne geçmesini sağlamıştır.

İÜ-KFTP ise bu senaryoda en düşük kütleyle sahip malzeme olmasına rağmen üçüncü sırada yer almıştır. İlk üretim KFTP için optimum kütle 1.4823 kg olarak hesaplanmış ve bu değer diğer kompozit alternatiflere kıyasla oldukça düşük kalmıştır. Ancak İÜ-KFTP'nin yüksek malzeme maliyeti ve üretim kaynaklı CO₂ emisyonu, çevresel etki ve maliyet parametrelerinde dezavantaj oluşturmuştur. Bu nedenle düşük kütle avantajına rağmen toplam sürdürülebilirlik indeksi KGD-KFTP ve TGD-KFTP'nin gerisinde kalmıştır.

MGD-KFTP ise bu senaryoda en düşük SI değerine sahip malzeme olmuştur. Çevresel etki parametresi diğer alternatiflere göre avantajlı olsa da, düşük döngüsellik değeri ve sınırlı yapısal performansı nedeniyle sürdürülebilirlik indeksinde geride kalmıştır.

Bu senaryo kapsamında hesaplanan normalize edilmiş sürdürülebilirlik parametreleri Çizelge 5.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9: Performans ve çevresel etki ağırlıklı senaryo için normalize edilmiş sürdürülebilirlik göstergeleri

Malzeme	P	C	SOC	EI	CIR	SI
KGD-KFTP	0.7519	0.5627	0.8670	0.8026	0.95	0.7821
TGD-KFTP	0.6588	0.6361	0.8670	0.8662	0.9	0.7742
İÜ-KFTP	0.4490	0.7024	0.9798	0.7601	0.8	0.6714
MGD-KFTP	0.2090	0.6851	0.8670	0.9305	0.5	0.6040

Normalize edilmiş göstergeler incelendiğinde, KGD-KFTP'nin yüksek SI değerinin özellikle performans ve döngüsellik parametrelerinden kaynaklandığı görülmektedir. TGD-KFTP ise çevresel etki parametresinde daha yüksek değer almasına rağmen, performans ve döngüsellik açısından KGD-KFTP'nin gerisinde kalmıştır.

Bu senaryo, uçan sistemlerde kütle sınırı tanımlanmasının malzeme seçimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Alüminyumun 3 kg kütle sınırı altında uygun çözüm sağlayamaması, kompozit malzemelerin seyir füzesi gövdesi gibi ağırlığa duyarlı yapılarda önemli avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, yalnızca düşük kütleli tasarım elde etmek yeterli değildir. Çevresel etki, performans ve döngüsellik kriterleri birlikte değerlendirildiğinde geri dönüştürülmüş kompozit malzemeler, özellikle KGD-KFTP ve TGD-KFTP öne çıkmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, savunma ve havacılık yapılarında kullanılabilecek sürdürülebilirlik tabanlı bir tasarım ve değerlendirme yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı vaka çalışması ele alınmıştır: yer sistemi olarak kanister destek parçası ve uçan sistem seyir füzesi gövdesi. Her iki yapı için de alüminyum, ilk üretim KFTP, mekanik geri dönüştürülmüş KFTP, termal geri dönüştürülmüş KFTP ve kimyasal geri dönüştürülmüş KFTP malzeme alternatifleri karşılaştırılmıştır. Yapısal performans sonlu eleman analizleri ile değerlendirilmiş, deney tasarımı ve YYM yöntemleri kullanılarak tasarım uzayı modellenmiş ve farklı sürdürülebilirlik önceliklerine göre optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, malzeme seçiminin yalnızca yapısal performans veya kütle azaltımı üzerinden değerlendirilmesinin yeterli olmadığını göstermektedir. Kanister destek parçası vaka çalışmasında eşit ağırlık senaryosunda kimyasal ve termal geri dönüştürülmüş KFTP alternatifleri öne çıkarken, maliyet ve döngüsellik kriterlerinin önceliklendirildiği senaryoda alüminyumun daha avantajlı hale geldiği görülmüştür. Bu durum, sürdürülebilirlik değerlendirmesinde kullanılan ağırlık katsayılarının malzeme sıralamasını doğrudan etkileyebildiğini göstermektedir. Seyir füzesi gövdesi vaka çalışmasında ise kompozit malzemelerin, özellikle ağırlığa duyarlı uçan sistemlerde alüminyuma kıyasla önemli kütle avantajı sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, ilk üretim KFTP'nin düşük kütlesine rağmen yüksek maliyet ve CO₂ emisyonu nedeniyle her durumda en sürdürülebilir çözüm olmadığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılan temel yönü, sürdürülebilirlik tabanlı tasarım yaklaşımının savunma sistemlerine ait iki farklı yapısal seviyede uygulanmasıdır. Literatürde sürdürülebilirlik çalışmaları çoğunlukla sivil havacılık bileşenleri veya genel kompozit malzeme karşılaştırmaları üzerinde yoğunlaşırken, bu tezde hem yer sistemi hem de uçan sistem yapıları aynı metodoloji ile değerlendirilmiştir. Geri dönüştürülmüş KFTP malzemeler yalnızca çevresel

avantajları açısından değil; yapısal performans, maliyet, döngüsellik ve sosyal etki kriterleriyle birlikte çok kriterli bir değerlendirme çerçevesinde ele alınmıştır. Bu yönüyle çalışma, geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin savunma ve havacılık yapılarında potansiyel kullanımını değerlendirmek için sistematik bir yöntem sunmaktadır.

Bununla birlikte çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, kullanılan CO₂ emisyonu, maliyet, döngüsellik ve sosyal etki katsayıları literatürden alınan genel değerler üzerinden tanımlanmıştır. Bu nedenle sonuçlar, belirli bir üretim tesisi, tedarik zinciri veya gerçek endüstriyel proses için birebir yaşam döngüsü analizi sonucu olarak değerlendirilmemelidir. Ayrıca geri dönüştürülmüş KFTP malzemeler için kullanılan mekanik özellikler literatür verilerine dayalı temsili değerlerdir; gerçek malzeme özellikleri geri dönüşüm prosesi, elyaf uzunluğu, matris sistemi ve üretim yöntemine bağlı olarak değişebilir. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan yükleme ve sınır koşulları da ön tasarım seviyesinde karşılaştırmalı değerlendirme yapmak amacıyla tanımlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen metodolojinin deneysel malzeme verileri ve daha detaylı yaşam döngüsü değerlendirmeleri ile desteklenmesi faydalı olacaktır. Özellikle geri dönüştürülmüş KFTP malzemelerin gerçek üretim süreçlerinden elde edilen mekanik ve çevresel verilerle modellenmesi, sonuçların güvenilirliğini artıracaktır. Ayrıca üretim yöntemi, bağlantı detayları, hasar toleransı, yorulma davranışı ve çevresel yaşlanma etkileri gibi ek parametrelerin modele dahil edilmesi, yöntemin endüstriyel uygulanabilirliğini güçlendirebilir. Bunun yanında, farklı ÇKKV yöntemleri ve farklı ağırlıklandırma stratejileri kullanılarak sonuçların karar verme yöntemine duyarlılığı daha kapsamlı şekilde incelenebilir.

Sonraki araştırmalarda, sürdürülebilirlik değerlendirmesinin kapsamı genişletilerek çevresel etki göstergeleri CO₂ emisyonunun yanı sıra, su tüketimi, asidifikasyon, ozon oluşumu ve hava kirleticisi emisyonları gibi farklı yaşam döngüsü etki kategorileri de değerlendirmeye dahil edilebilir. Bunun yanında, yapısal performans değerlendirmesinde maksimum deplasman ve doğal frekansa ek olarak yapının rijitliğini daha genel biçimde temsil eden rijitlik katsayısı ya da uyumluluk (İng. compliance) gibi parametreler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **World Commission on Environment and Development.** (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- [2] **ISO 14040.** (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- [3] **Ashby, M. F.** (2013). *Materials and the environment: Eco-informed material choice*. Butterworth-Heinemann.
- [4] **Filippatos, A.; Markatos, D.; Theochari, A.; Pantelakis, S.** (2025). *Integrating Sustainability in Aircraft Component Design: Towards a Transition from Eco-Driven to Sustainability-Driven Design*. *Aerospace* 2025, 12, 140. <https://doi.org/10.3390/aerospace12020140>
- [5] **Aikaterini A. Anagnostopoulou., et al.** (2024). *A Robust Sustainability Assessment Methodology for Aircraft Parts: Application to a Fuselage Panel*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.07421>
- [6] **Altuntaş, M.** (2025). *Bir uçak kompozit yapısal bileşenin sürdürülebilirlik odaklı tasarımı* [Yüksek lisans tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi].
- [7] **ISO.** (2006). *ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- [8] **ecoinvent.** (2025). *Life Cycle Assessment (LCA)* [Web sayfası]. Ecoinvent. <https://ecoinvent.org/life-cycle-assessment/>
- [9] **Das, S.** (2011). *Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 268–282. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0264-z>
- [10] **Duflou, J. R., Deng, Y., Van Acker, K., & Dewulf, W.** (2012). *Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study*. *MRS Bulletin*, 37(4), 374–382. <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.60>
- [11] **Scelsi, L., Bonner, M., Hodzic, A., Soutis, C., Scaife, R., & Ridgway, K.** (2011). *Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment*. *Express Polymer Letters*, 5(3), 209–217.
- [12] **Guinée, J. B., et al.** (2011). *Life cycle assessment: Past, present, and future*. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90–96.
- [13] **Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A.** (2015). *Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties*. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99.

- [14] **Jeswiet, J., & Kara, S.** (2008). *Carbon emissions and CESTM in manufacturing*. CIRP Annals, 57(1), 17–20.
- [15] **Pimenta, S., & Pinho, S. T.** (2011). *Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook*. Waste Management, 31(2), 378–392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>
- [16] **Qureshi, J.** (2022). *A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites*. Sustainability, 14(24), 16855. <https://doi.org/10.3390/su142416855>
- [17] **Demski, S., Misiak, M., Majchrowicz, K. et al.** (2024). *Mechanical recycling of CFRPs based on thermoplastic acrylic resin with the addition of carbon nanotubes*. Sci Rep 14, 11550 <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62594-y>
- [18] **Pickering, S. J.** (2006). *Recycling technologies for thermoset composite materials—Current status*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(8), 1206–1215. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>
- [19] **Chen, P.-Y.; Feng, R.; Xu, Y.; Zhu, J.-H.** (2023) *Recycling and Reutilization of Waste Carbon Fiber Reinforced Plastics: Current Status and Prospects*. Polymers 2023, 15, 3508. <https://doi.org/10.3390/polym15173508>
- [20] **Giorgini, L., Benelli, T., Brancolini, G., Mazzocchi, L., & Leonardi, C.** (2020). *Recovery and reuse of carbon fibre and acrylic resin from thermoplastic composites used in aerospace applications*. Waste Management, 102, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.028>
- [21] **Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., & Jørgensen, J. K.** (2021). *Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s*. Journal of Composites Science, 5(1), 28. <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>
- [22] **S.J. Pickering,** (2010) *Thermal methods for recycling waste composites*, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, <https://doi.org/10.1533/9781845697662.2.65>.
- [23] **Witik, R. A., Teuscher, R., Michaud, V., Ludwig, C., & Manson, J. A. E.** (2013). *Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 49, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.009>
- [24] **Roksana Muzyka, et al.** (2024). *Solvolysis and oxidative liquefaction of the end-of-life composite wastes as an element of the circular economy assumptions*, Journal of Cleaner Production, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143916>.
- [25] **National Aeronautics and Space Administration.** (2016). *NASA Systems Engineering Handbook (NASA SP-2016-6105 Rev2)*. NASA.

- [26] **Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H.** (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (3rd ed.). Springer.
- [27] **Triantaphyllou, E.** (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer.
- [28] **Hwang, C. L., & Yoon, K.** (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer.
- [29] **Jahan, A., & Edwards, K. L.** (2015). *Multi-Criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design*. Butterworth-Heinemann.
- [30] **MilliSavunma.com.** *ATMACA Gemisavar Füzesi*. Erişim adresi: <https://www.millisavunma.com/atmaca-gemisavar-fuzesi/>
- [31] **Daniel, I. M., & Ishai, O.** (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). Oxford University Press.
- [32] **Barbero, E. J.** (2018). *Introduction to Composite Materials Design* (3rd ed.). CRC Press.
- [33] **Gibson, R. F.** (2016). *Principles of Composite Material Mechanics* (4th ed.). CRC Press.
- [34] **Battelle Memorial Institute.** *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-17)*. Columbus (OH): Battelle Memorial Institute; 2021.
- [35] **CMH-17.** *Composite Materials Handbook*. Warrendale (PA): SAE International.
- [36] **Montgomery, D. C.** (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
- [37] **Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G.** (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery* (2nd ed.). Wiley.
- [38] **Bathe, K. J.** (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- [39] **Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z.** (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [40] **ANSYS, Inc. (2024).** *ANSYS Mechanical User's Guide, Release 2024 R2*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc.
- [41] **American Bureau of Shipping.** *Guidance Notes on Dynamic Loading Approach and Direct Analysis for High Speed Craft*. ABS, 2003.
- [42] **Hashin, Z. (1980).** *Failure criteria for unidirectional fiber composites*. Journal of Applied Mechanics, 47(2), 329–334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
- [43] **Jones, R. M. (1999).** *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- [44] **Tsai, S. W., & Wu, E. M. (1971).** *A general theory of strength for anisotropic materials*. Journal of Composite Materials, 5(1), 58–80. <https://doi.org/10.1177/002199837100500106>

- [45] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis (4th ed.)*. Wiley.
- [46] Reddy, J. N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis (2nd ed.)*. CRC Press.
- [47] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (4th ed.)*. Wiley.
- [48] Khuri, A. I., & Cornell, J. A. (1996). *Response Surfaces: Designs and Analyses (2nd ed.)*. Marcel Dekker.
- [49] MathWorks. (2025). *MATLAB (Version R2025a)* [Computer software]. Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc.
- [50] Qatu, M. S. (2004). *Vibration of Laminated Shells and Plates*. Elsevier.
- [51] Charter, M., & Tischner, U. (Eds.). (2001). *Sustainable Solutions: Developing Products and Services for the Future*. Greenleaf Publishing.
- [52] Ostojic S, Traverso M. *From aluminium to composites: A comparative social life cycle assessment of automotive lightweight components*. J Clean Prod. 2025;492:144884.
- [53] Air Power Australia. *Tomahawk Subtypes*. Erişim adresi: <https://www.airspacepower.net/Tomahawk-Subtypes.html>
- [54] Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design (4th ed.)*. Butterworth-Heinemann.
- [55] Center for Strategic and International Studies (CSIS). *Tomahawk. Missile Threat*. Erişim adresi: <https://missilethreat.csis.org/missile/tomahawk/>
- [56] Newlands, R., Heywood, J., & Lee, D. *Rocket Vehicle Loads and Airframe Design*. AspireSpace, 2012. Erişim adresi: <https://www.aspirespace.org.uk/downloads/Rocket%20vehicle%20loads%20and%20airframe%20design.pdf>
- [57] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). *Fracture-Critical System Analysis for Steel Bridges*. NCHRP Research Report 883. Washington, DC: The National Academies Press.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Egemen Erçimen
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.05.1999 / Kadıköy
E-posta : eercimen@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2026, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2023- Devam Ediyor	Roketsan A.Ş.	Mekanik Tasarım Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ercimen, E., & Acar, E. (2026).** *Sustainability-based design optimization of a cruise missile canister.* In *Proceedings of the 22nd European Conference on Composite Materials (ECCM22)*, 21-25 June 2026, Oslo, Norway.