

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK HIZLI VOLAN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİNDE KARBON FİBER ÇELİK VE TİTANYUM
ALAŞIMLARIN ETKİSİ VE ANSYS ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CENK YANGÖZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2022

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK HIZLI VOLAN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİNDE KARBON FİBER ÇELİK VE TİTANYUM
ALAŞIMLARIN ETKİSİ VE ANSYS ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CENK YANGÖZ
200022001

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Dr. Koray ERHAN

TEMMUZ 2022



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 200022001 numaralı öğrencisi Cenk YANGÖZ'ün tez çalışması, 03.08.2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

1) Tez Danışmanı: **Dr. Koray ERHAN**

2) Jüri Üyesi : **Dr. Öğretim Üyesi Bülent İMAMOĞLU**

3) Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Uğur Demir**

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Yüksek Hızlı Volan Enerji Depolama Sistemi Geliştirilmesinde Karbon Fiber Çelik ve Titanyum Alaşımların Etkisi ve Ansys Analizleri” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim (08.07.2022).

Cenk YANGÖZ



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin ve sonrasında tez çalışmamın her aşamasında özveriyle yakından ilgilenen, desteğini, değerli bilgi ve tavsiyeleriyle her zaman hissettiren kıymetli hocam Dr. Koray Erhan'a en samimi teşekkürlerimi sunuyorum. Maddi ve manevi olarak hayatımın her döneminde olduğu gibi yine yanımda olan aileme, arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim, iyi ki varsınız.

TEMMUZ 2022

Cenk YANGÖZ
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMALAR.....	iiiv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEZİN AMACI	4
3. EA HEA ARAÇLAR VE VOLAN ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİSİ	13
3.1. Elektrikli Araçlar ve Hibrit Elektrikli Araçlar	13
3.2. Volan Enerji Depolama Sistemleri	18
4. VEDS BOYUTLANDIRMA VE MALZEME SEÇİMİ	23
4.1. VEDS Boyutlandırılması	24
4.2. Malzeme Seçimi.....	26
4.2.1. İmalat Çeliği.....	26
4.2.2. Titanyum Alaşım	27
4.2.3. Karbon Fiber	28
4.3. VEDS Volan Teknik Özellikleri.....	30
4.3.1. VEDS Ø100 Çapında Volan.....	31
4.3.2. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (3mm et kalınlığı)	32
4.3.3. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (5mm et kalınlığı)	33
4.3.4. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (10mm et kalınlığı)	34
4.3.5. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (20mm et kalınlığı)	35
5. VEDS ANALİZ.....	36
5.1. Çekme Deneyi.....	38
5.2. Analiz Çıktıları	40
5.2.1. Ø100mm İmalat Çeliği Akma Noktası Gerilme Analiz.....	40
5.2.2. Ø100mm İmalat Çeliği Kopma Noktası Gerilme Analiz	42

5.2.3. Ø100mm Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme Analiz.....	44
5.2.4. Ø100mm Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme Analiz.....	46
5.2.5. Ø100mm Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme Analiz	47
5.2.6. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	49
5.2.7. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	50
5.2.8. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	52
5.2.9. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	54
5.2.10. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	56
5.2.11. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	57
5.2.12. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	59
5.2.13. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	60
5.2.14. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	62
5.2.15. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	64
5.2.16. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	65
5.2.17. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	67
5.2.18. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz	69
5.2.19. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	70
5.2.20. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analizi	72
5.2.21. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz	74
6. SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ	76
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	855

KISALTMALAR

EA	:Elektrikli Araç
HEA	:Hidro Elektrikli Araç
M/G	:Motor/Generatör
LCOE	:Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti
TED	:Termal Enerji Depolama(TSS)
BHED	:Basınçlı hava enerji depolama(CAES)
PHD	:Pompaj-Hidroelektrik Depolama(PHS)
VEDS	:Volan Enerji Depolama Sistemi
KERS	:Kinetic energy recovery system(Kinetik Enerji Depolama Sistemi)
AB	:Avrupa Birliği
SC	:Süper Kapasitör
HR	:Hafif Raylı
DC	:Doğru Akım

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri	6
Çizelge 3.1: Farklı tipteki hibrit elektrikli araçlar ve özellikleri.....	16
Çizelge 3.2: Farklı rotor malzemelerinin enerji yoğunlukları ve mekanik dayanımları	20
Çizelge 4.1: Kinetik enerji denklemi değişkenleri.....	25
Çizelge 4.2: İmalat Çeliği Yapısal Özellikleri	27
Çizelge 4.3: Titanyum Alaşım Yapısal Özellikleri.....	28
Çizelge 4.4: Karbon Fiber Yapısal Özellikleri	30
Çizelge 5.1: Statik Yapı Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri	40
Çizelge 5.2: Statik Yapı Akma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	41
Çizelge 5.3: Statik Yapı Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	42
Çizelge 5.4: İmalat Çeliği Kopma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri	43
Çizelge 5.5: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri ...	44
Çizelge 5.6: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri	45
Çizelge 5.7: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.	46
Çizelge 5.8: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri	46
Çizelge 5.9: Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	47
Çizelge 5.10: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	48
Çizelge 5.11: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	49
Çizelge 5.12: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	49
Çizelge 5.13: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	50
Çizelge 5.15: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	52
Çizelge 5.16: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	53
Çizelge 5.17: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	54
Çizelge 5.18: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	55
Çizelge 5.19: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	56
Çizelge 5.20: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	56
Çizelge 5.21: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	57
Çizelge 5.22: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	58

Çizelge 5.23: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	59
Çizelge 5.24: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	59
Çizelge 5.26: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	61
Çizelge 5.27: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	62
Çizelge 5.28: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	63
Çizelge 5.29: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	64
Çizelge 5.30: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	64
Çizelge 5.31: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	65
Çizelge 5.32: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	66
Çizelge 5.33: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	67
Çizelge 5.34: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	68
Çizelge 5.35: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	69
Çizelge 5.36: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	69
Çizelge 5.37: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	70
Çizelge 5.38: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	71
Çizelge 5.39: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	72
Çizelge 5.40: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	73
Çizelge 5.41: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri.....	74
Çizelge 5.42: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri.....	74
Çizelge 6.1: VEDS rotor malzemesine göre devir sayısı ve toplam rotor ağırlık değerleri	76
Çizelge 6.2: Farklı rotor malzemelerinin devir sayısı ve çevresel hız değerleri	77
Çizelge 6.3: VEDS volan malzemesine göre depolanan enerjiler	78
Çizelge 6.4: Farklı rotor malzemelerine göre sistemlerin karşılaştırılması	78

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Enerji Depolama Sistemleri	5
Şekil 2.2: Flybrid firmasının ürettiği volan ünitesi	7
Şekil 2.3: Kinetik enerji depolama bisiklet uygulaması	7
Şekil 2.4: Enerji-momentum kontrol sistemi konsepti	8
Şekil 2.5: Rüzgar enerjisi VEDS uygulaması	10
Şekil 2.6: Güneş enerjisi VEDS uygulaması	10
Şekil 2.7: Enerji depolama teknolojileri için toplam depolama maliyeti.....	11
Şekil 2.8: Faiz oranıyla birlikte toplam depolama maliyeti.....	11
Şekil 2.9: Volan teknolojisi, hafif raylı sistemleri uygulaması	12
Şekil 3.1: Elektrikli Araç Yapısı.....	14
Şekil 3.2: Paralel Hibrit Yapı	17
Şekil 3.3: Seri Hibrit Araç Yapısı	17
Şekil 3.4: Kombine Hibrit Yapılı Araç.....	18
Şekil 3.5: Volan Enerji Sistemi Şeması	19
Şekil 3.6: VEDS ünitesi EA ve HEA entegrasyonu	21
Şekil 3.7: Torotrak otobüs uygulaması	22
Şekil 4.1: Volan Konfigürasyonları	23
Şekil 4.2: Geometrilere farklı rotorların atalet momenti çarpanları	25
Şekil 4.3: Karbon Fiber Üretilen Bir Parça	29
Şekil 4.4: Ø100 Çaplı Volan 3D Model	31
Şekil 4.5: Ø100 Çaplı Volan Teknik Resim.....	31
Şekil 4.6: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(3mm Et kalınlık) 3D Model	32
Şekil 4.7: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(3mm et kalınlık) Teknik Resim	32
Şekil 4.8: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(5mm Et kalınlık) 3D Model	33
Şekil 4.9: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(5mm et kalınlık) Teknik Resim	33
Şekil 4.10: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(10mm Et kalınlık) 3D Model	34
Şekil 4.11: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(10mm et kalınlık) Teknik Resim.....	34
Şekil 4.12: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(20mm Et kalınlık) 3D Model	35
Şekil 4.13: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(20mm et kalınlık) Teknik Resim.....	35
Şekil 5.1: Ansys Joint Body-Ground Uygulaması	36
Şekil 5.2: Ansys Skewness Mesh Kalitesi Uygulaması.....	37
Şekil 5.3: Ansys Mesh MultiZone Uygulaması.....	37
Şekil 5.4: Ansys Döndürme Momenti Uygulaması.....	38
Şekil 5.5: Gerilme-Uzama Grafiği.....	39
Şekil 5.6: Statik Yapı Akma Noktası (Ø100mm) Dönme Hızı.....	41
Şekil 5.7: Statik Yapı Akma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli.....	42
Şekil 5.8: İmalat Çeliği Kopma Noktası (Ø100mm) Dönme Hızı	43
Şekil 5.9: İmalat Çeliği Kopma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli	44
Şekil 5.10: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı	45
Şekil 5.11: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli	45
Şekil 5.12: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı	46

Şekil 5.13: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	47
Şekil 5.14: Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	48
Şekil 5.15: Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	48
Şekil 5.16: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	49
Şekil 5.17: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	50
Şekil 5.18: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	51
Şekil 5.19: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	52
Şekil 5.20: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	53
Şekil 5.21: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	54
Şekil 5.22: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	55
Şekil 5.23: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	55
Şekil 5.24: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	56
Şekil 5.25: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	57
Şekil 5.26: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	58
Şekil 5.27: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	58
Şekil 5.28: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	59
Şekil 5.29: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	60
Şekil 5.30: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	61
Şekil 5.31: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	62
Şekil 5.32: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı	63
Şekil 5.33: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	63
Şekil 5.34: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	64
Şekil 5.35: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	65
Şekil 5.36: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	66
Şekil 5.37: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	67
Şekil 5.38: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	68
Şekil 5.39: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görsele.....	68

Şekil 5.40: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	69
Şekil 5.41: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli.....	70
Şekil 5.42: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	71
Şekil 5.43: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli.....	72
Şekil 5.44: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı.....	73
Şekil 5.45: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli.....	73
Şekil 5.46: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma	74
Şekil 5.47: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli.....	75



YÜKSEK HIZLI VOLAN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİNDE KARBON FİBER ÇELİK VE TİTANYUM ALAŞIMLARIN ETKİSİ VE ANSYS ANALİZLERİ

ÖZET

Hükümetle ve otomobil üreticileri, iklim krizin önüne geçmek amacıyla içten yanmalı araçlardaki karbon emisyonunu sifıra indirmeyi hedeflemektedir. Her geçen gün pazar payı büyüyen hibrit ve elektrikli araçların rekabet edilebilirliği artmaktadır. Otomobil üreticileri en gelişmiş teknolojik araçlar üretebilmek için büyük Ar-Ge bütçeleri ayırmayı planlanmaktadır.

HA ve EA günümüzde yaygınlaşma oranları daha önceki yıllara göre büyük bir ivme kazanmaktadır. Bununla birlikte geliştirilen teknolojiler daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Bu araçların önündeki en büyük engeller pil ve uzun menzil problemidir. Pil teknoloji araçlarda maliyetin yaklaşık 1/2, 1/3 oluşturmaktadır. Yüksek maliyetleri ve ağır bakım maliyetleri nedeniyle pil verimliliği en önem arz eden konuların başında gelmektedir. Pil verimliliği artırmak ve uzun menzil alabilmek için rejeneratif fren gibi birçok teknoloji kullanılmaktadır. Fakat bu fren teknolojisi harcadığı enerji geri kazanmada yeteri kadar verimli olmadığı bilinmektedir. Bu sebeplerin başında pilin reaksiyon sürelerinin bir takım kimyasal sebepler kaynaklanmaktadır.

Bu enerjinin daha verimli kullanılması için bir takım yan depolama sistemleri geliştirilmektedir. Bunların başında volan enerji depolama sistemi gelmektedir. Volan enerji depolama sistemi HA veya EA araçlarda frenleme esnasında elde edilen gücün volan sistemine aktarılması ve tekrar hızlanılmak istenildiğinde volandaki gücü tekerlere aktarılmasını hedefleyen bir teknolojidir.

Bu tez çalışma kapsamında VEDS tasarlanıp seçilen volan malzemesine göre akma ve kopma gerilme değerlerine bakılarak, maksimum devirleri, güvenli çalışma aralıkları, depoladığı enerji miktarları incelenmektedir. Özgün değer olarak malzemelerin volan yapısında tek veya iki malzeme aynı anda kullanılarak hibrit bir yapı elde edilerek analiz verileri elde edilmektedir. Elde edilen veriler değerlendirilip, yorumlandıktan sonra öneriler bölümde ihtiyaca göre volan seçeneği sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama Sistemleri, Hibrit Elektrikli Araçlar, Elektrikli Araçlar, Volan Enerji Depolama Sistemleri

THE EFFECT OF CARBON FIBER STEEL AND TITANIUM ALLOYS IN DEVELOPMENT OF HIGH SPEED FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM AND ANSYS ANALYSIS

ABSTRACT

The government and automakers aim to reduce carbon emissions from internal combustion vehicles to zero in order to prevent the climate crisis. The competitiveness of hybrid and electric vehicles, whose market share is increasing day by day, is increasing. Automobile manufacturers are planning to allocate large R&D budgets to produce the most advanced technological vehicles.

Today, the prevalence rates of HA and EA are gaining a great momentum compared to previous years. In addition, the developed technologies enable more efficient use. The biggest obstacles in front of these vehicles are the battery and long range problem. Battery technology accounts for about 1/2 to 1/3 of the cost in vehicles. Due to its high costs and heavy maintenance costs, battery efficiency is one of the most important issues. Many technologies such as regenerative braking are used to increase battery efficiency and to get a long range. However, it is known that this brake technology is not efficient enough to recover the energy it consumes. At the beginning of these reasons, the reaction times of the battery are due to a number of chemical reasons.

In order to use this energy more efficiently, a number of side storage systems are being developed. One of these is the flywheel energy storage system. Flywheel energy storage system is a technology that aims to transfer the power obtained during braking in HA or EA vehicles to the flywheel system and to transfer the power from the flywheel to the wheels when it is desired to accelerate again.

Within the scope of this thesis, VEDS is designed and selected according to the selected flywheel material, by looking at the yield and breaking stress values, its maximum revolutions, safe working intervals, and the amount of energy it stores are examined. Analysis data is obtained by obtaining a hybrid structure by using one or two materials at the same time in the flywheel structure of the materials as the original value. After the obtained data are evaluated and interpreted, the flywheel option is presented in the suggestions section according to the needs.

Keywords: Energy Storage Systems, Hybrid Electric Vehicles, Electric Vehicles, Flywheel Energy Storage Systems

1.GİRİŞ

Günümüzde elektrikli araçlar kapasitesi giderek artmaktadır. Birçok firma gelecek olarak gördükleri elektrikli araçlar için araştırma ve geliştirme yapmak için büyük bütçeler ayrılmaktadırlar. Rekabetin artması ve pazar payının büyüklüğü her geçen gün artmaktadır. Ayrıca birçok AB ülkesi karbon emisyonlarını azaltmak iklim krizinin önüne geçmek için içten yanmalı araçların üretimine önümüzdeki yıllarda son vererek karbon emisyonunu azaltmayı hedeflemektedirler(Carey & Steitz 2021). Bu gelişmeler elektrikli araçların içten yanmalı araçların yerini alabileceği öngörülmektedir.

Gelişmeler göz önüne alındığında, araç menzilin arttırmak için farklı teknolojilerin kullanıldığı görülmektedir. Bunların başında geri kazanımlı frenleme sistemi gelmektedir. Geri kazanımlı frenleme teknolojisinin farklı kullanım metotları bulunmaktadır. Geri kazanımlı frenleme enerjisini aracın yüksek gerilim bataryasına depolamak bunların en bilinenidir. Ancak bu uygulama bataryanın yapısı gereği çok verimli değildir. Frenleme enerjisini kısa sürede içerisinde bataryaya depolamak, bataryaların kimyasal reaksiyon neticesinde enerji depolamasından dolayı, yalnızca düşük verim değeriyle mümkün olmaktadır. Bu nedenle geri kazanımlı frenleme enerjisi depolamak üzere farklı teknolojiler geliştirilmektedir. Bu teknolojilerden önemli bir tanesi ise VEDS'dir.

Bu çalışmanın;

Giriş bölümünde; konu açıklanarak literatürdeki çalışmalar özetlenmektedir.

İkinci bölümde; enerjisi depolama teknolojisi, elektrikli araçlar topolojisi, hibrit araç topolojisi, VEDS topolojisi bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde; VEDS ünitesinin boyutları ve seçilen volan malzemeleri mekanik özellikleri bahsedilecektir.

Dördüncü bölümde; sonlu elemanlar yöntemi ile analiz programından statik analiz sonuçlarına yer verilecektir.

Beşinci bölümde; analiz sonuçlarında elde edilen VEDS yapılarının sonuçları karşılaştırılmalı analizlere yer verilecektir.

Altıncı bölümde; sonuçlar ve öneriler bahsedilecektir.

Elektrikli araçların çevreci olması ve fosil yakıtla çalışan araçlara alternatif olması daha cazip kılmaktadır. Elektrikli araçların şarj etme süreleri ve şarj istasyon ağının az olması büyük bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkelerin şarj ağlarını geliştirme ve elektrikli araçların verilen teşvikler sayesinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Birçok olumsuzluğa rağmen Elektrikli Araçlar(EA) ve Hibrit Elektrikli Araçlar(HEA) geliştirilmektedir. Bu gelişmelerin başında enerji kayıplarını en aza indirmektedir. Çalışan en verimli elektrikli aracı üretmek için birçok firma Ar-Ge çalışmalarına büyük yatırımlar ayrılmaktadırlar.

Bu gelişmeler, elektrikli araçların batarya sistemlerinin geliştirilmesi uzun menzil ve şarj istasyon ağının büyümesi yanı sıra elektrikli araçların enerji kayıplarını en aza indirmek, mevcut batarya sistemi ile en uzun menzil elde etmek çalışmalar arasındadır. İçten yanmalı araçlarda frenleme esnasında kinetik enerjinin balatalarda ve disklerde ısı olarak atılması, büyük oranda enerji kaybına sebep olmaktadır. İçten yanmalı araçlarda olduğu gibi elektrikli araçlarda en önemli enerji kayıpları araç hareket halindeyken aracı yavaşlatmak için veya durdurmak için aracın sahip olduğu kinetik enerjisi azaltmaktır. Elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme bir ölçüde geri kazanılmasına rağmen günümüzde enerjiye ihtiyacın bu kadar artması ve maliyetleri azaltmak için gösterilen büyük çaba, yeni enerji depolama sistemlerine ihtiyacı büyük ölçüde artırmaktadır.

Frenleme esnasında kaybedilen kinetik enerjisi geri kazanım için geliştirilen depolama sistemleri Ultra-kapasitör(SC) enerji depolama sistemi(UEDS) ve Volan enerji depolama sistemi(VEDS) enerji depolama için bir alternatif sunmaktadır. Gerekli maliyetler ve kullanımı açısından VEDS sistemler elektrikli araçlarda kullanılması daha çok uygun görülmektedir.

EA ve HEA enerji kayıplarını azaltmak ve uzun menzil elde etmek büyük önem arz etmektedir. Bu tez kapsamında daha önce çalışmaları yapılan VEDS, analiz programı üzerinde yapısal olarak 2 farklı yapı tasarlanmaktadır. Malzeme seçimi imalat çeliği, titanyum alaşım ve karbon fiber olarak belirlenmektedir. Özgün değeri, belirlenen malzemeleri tek malzeme olarak veya 2 farklı malzeme ile hibrit bir yapı oluşturularak, akma ve kopma noktalarındaki gerilmelerin eşdeğer maksimum RPM dönme hızları hesaplanmaktadır. Elde edilen veriler üzerinde malzeme seçimi ve hibrit yapı tasarımı etkileri incelenip yorumlanmaktadır. Değerlendirme sonucunda kullanım durumlarına bağlı olarak en verimli tasarım malzeme ilişkileri önerilmektedir.

Araştırma kapsamında bu üç malzemenin analiz programı üzerindeki kütüphanesinde sahip olduğu özellikleri ve gerçek özellikleri kıyaslanarak en doğru veriler ışında analizlere başlanılmıştır. Değer bakımında en önemli veriler akma noktası ve kopma noktası gerilme değer verileridir. Gerilme değeri karbon fiber > titanyum alaşım > imalat çeliği diye sıralanmaktadır. İmalat çeliği olarak C22 kaliteli çelik seçilmiştir. Titanyum alaşım için Ti-13Nb-13Zr karışımı alaşım seçilmiştir. Ti-13Nb-13Zr %13 Nb, 12,1 %Zr, 0,009 %N, 0,0012 %H ve diğer kalan kısmı Ti oluşturmaktadır. Karbon fiber 230 GPa gerilme değerine sahip filement seçilmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEZİN AMACI

Günümüzde EA ve HEA frenleme sırasında kaybedilen kinetik enerji minimal boyutlarda geri kazanılmaktadır. Frenleme yapıldığında starter alternatör devreye girerek aracın 12 V bataryasını doldurmaya başlamaktadır(Erhan, 2018).

Diğer bir yöntem ise 'tek pedal ile kullanma' olarak adlandırılan bir yöntemdir. Bu yöntem elektrikli araçlarda kullanılmakta ve rejeneratif fren olarak adlandırılmaktadır. Motor freni, Motor/Generatör (M/G) ünitesinden faydalanılarak aracın sahip olduğu kinetik enerjinin yüksek gerilim bataryasına depolanması prensibiyle çalışmaktadır. Gaz pedalında ayak çekildikten sonra araç otomatik olarak motor freni yapmaktadır. Bu sayede frene basmadan araç yavaşlatılmaktadır. Elektrikli aracı hızlandırmak için kullanılan elektrik motoru generatör konumuna geçerek enerjinin bir kısmını aküde depolamaktadır. Bu yapının en dezavantajlı yanı batarya yapı itibariyle kısa sürede yüksek enerjiyi depolayamamasıdır(Erhan, Aktaş & Özdemir 2014; Erhan, Varol & Özdemir 2018). EA araçlar ve HEA araçlar geleceğimizin kaçınılmaz araçları olma yolunda hızla ilerlemekteler. Yaygınlaşan hızlı şarj istasyonları sayesinde daha sorunsuz bir sürüş imkânı elde edilmektedir. Bütün bu gelişmelere rağmen EA ve HEA önündeki büyük engeller uzun menzilli ve şarj süreleri olmaktadır.

Bu yapının geri kazanılan enerjiyi depolama konusunda eksiklerinden dolayı aracın sahip olduğu kinetik enerji depolayabilmek için ultra-kapasitör ve volan gibi enerjiyi bataryaya göre kısa süre içinde depolayıp hızlı bir şekilde üzerinden atabilen alternatif enerji depolama teknolojileri kullanılmaktadır(Ostadi, 2015).

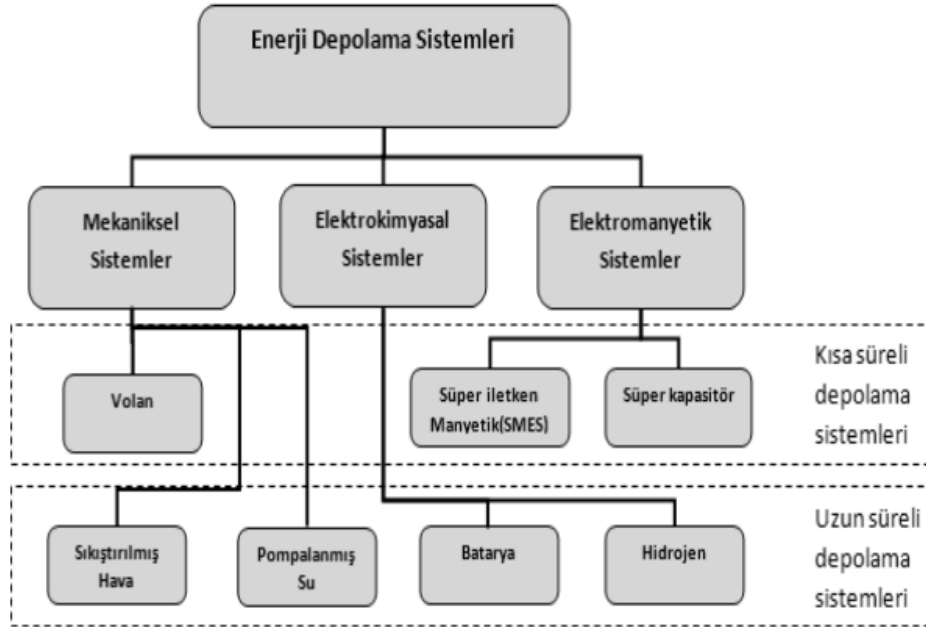
Literatür araştırmalarına bakıldığında frenleme sırasında çok büyük bir enerji kaybı ortaya çıkmaktadır(Zou, 2015). Aracı durdurmak veya yavaşlatmak istediğimizde geleneksel sistemlerde mekanik frenleme yapılmaktadır. Bu durumda aracın sahip olduğu kinetik enerji, mekanik frenlerde ısı enerjisi olarak kaybolmaktadır. Aracı durgun halden hareketli hale geçirmek istediğimizde ise frenlerde ısı olarak kaybedilen enerjiyi araca tekrar kazandırmak için ya yakıt harcanmakta ya da bataryalardan enerji çekilmektedir. VEDS bulunan araçlarda ise frenleme esnasında ortaya çıkan enerji, döner bir kütleyi harekete geçirip yüksek devirlere çıkarmakta kullanılmaktadır. Aracın

harekete geçirilmesi istendiğinde ise VEDS'de depolanan enerji, aracın hız kazanması için kullanılmaktadır. Bu sayede aracın sahip olduğu kinetik enerji ısı enerjisine dönüştürülmez ve kinetik enerji olarak VEDS'de depolanır.

Bu sistemlerin EA ve HEA sahip oldukları kinetik enerjiyi yavaşlamaya başladıklarında VEDS'e yükleyip tekrar hızlanmaya başladığında VEDS sahip olduğu enerjiyi tekrar sisteme aktarmasıyla yapılmaktadır.

Bir çalışmada şehir içten yanmalı bir motora sahip ve VEDS'e sahip şehir içi otobüs yakıt tüketiminin %18 azaldığı gözlenmektedir. Aynı çalışmada, otobüsün trafiğin sıkışık olduğu Tahran şehrinde kullanılması durumunda yakıt sarfiyatının % 28,4 azaldığı belirtilmektedir(Esfahanian ve diğerleri, 2014).

Volanlı enerji depolama sistemleri yüksek güç yoğunluğu, depolama verimliliği, şarj olma ve tekrar devreye alınması süresinin kısa olması, çevre dostu olması sebebiyle farklı uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.1: Enerji Depolama Sistemleri

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 3 ana başlıktan oluşmaktadır. Mekanik Sistemler; Volan, Sıkıştırılmış Hava, Pompalanmış Hava. Elektrokimyasal Sistemler; Batarya, Hidrojen. Elektromanyetik Sistemler; Süper iletken manyetik(SMES), Süper kapasitör.

İşleyişleri bakımından bakıldığında; Volan, Süper iletken manyetik(SMES), Süper kapasitör kısa süreli depolamalar yüksek güç yoğunluğu olan yerlerde tercih

edilmektedir. Depolanan enerji kısa sürede depolanıp kısa süre içinde tekrar sisteme gönderilir. Sıkıştırılmış hava, pompalanmış su, Batarya ve hidrojen uzun süreli depolama sistemlerinde ve enerji yoğunluğunun az olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Depolama süreleri uzun olup uzun vadede kalabilmektedir.

Çizelge 2.1'de görüldüğü elektrik depolama sistemlerinin güç seviyesi, enerji seviyesi, deşarj süreleri bakımından incelenmektedir(Nazman, 2009). Teknolojilerin arasında en avantajlı olanın belirlenmesi sürecinde maliyet, ömür, güvenilirlik, depolama sistemin boyutu, depolama kapasitesi ve çevresel etkiler gibi birçok parametre göz önüne alınmalıdır. Bu parametreler değerlendirilirken, depolama sisteminin vereceği toplam fayda göz önünde bulundurulması gereken en önemli kriterdir.

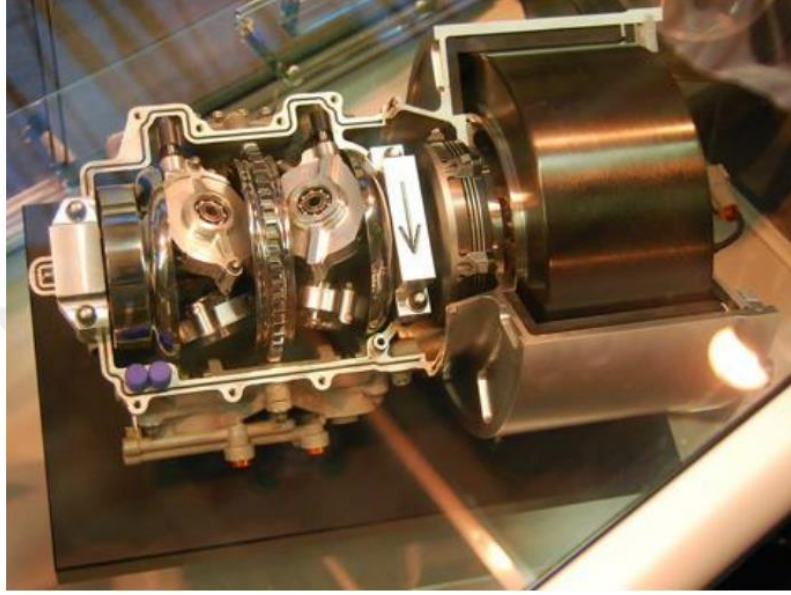
Bu bilgiler ışığında seçilen Volan enerji sistemi enerji yoğunluğu, hızlı cevap süresi, yüksek devirler çevirebilmesi bakımında ve maliyet açısından süper kapasitöre göre daha ucuz olması EA ve HEA araçlarda kinetik enerji depolama sistemi olarak kullanılması daha uygun görülmektedir.

Çizelge 2.1: Elektrik Enerjisi Depolama Sistemleri

Depolama Teknolojisi	Güç Seviyesi	Enerji seviyesi	Deşarj süreleri
Bataryalar (Pb-asit, NiCd NiMH, Li-iyon)	kW-500kW	MWh-300MWh	0,2h-8h
Volan (Flywheel)	500 kW	100kWh-100 MWh	<5 dk.
Pompalanmış su	100 MW-4000 MW	500 MWh-15 GWh	4-12 saat
Sıkıştırılmış hava	25 MW-3000 MW	200 MWh-10 GWh	1-20 saat
NaS	1 MW	1 MWh	1 saat
Süper iletken manyetik depolama	10 kW- 10 MW	10 kWh-1 MWh	1-30 dk.
Süper kapasitör	<250 kW	10 kWh	< 1 dk.
Akışlı batarya	100 kW-10 MW	1-100 MWh	10 saat

Kaynak: Nazman (2011)

VEDS ünitesi araçlara seri, paralel ve hibrit bir şekilde montaj edilebilmektedir. Flybrid, otomobil üreticileri Volvo ve Jaguar için üretim VEDS'lerini tasarlamak ve araçlara entegre etmek için prototip ürünler geliştirmektedir. Şekil 2.2'de Flybrid firması için tasarlanmış VEDS ünitesi yer almaktadır (Buchroithner, 2010; Brockbank, 2010).



Şekil 2.2: Flybrid firmasının ürettiği volan ünitesi

Kaynak: Brockbank (2009)

Kinetik enerji depolama sistemi birçok ulaşım aracında uygulanmaktadır. Enerji depolama aktarımı mekanik veya elektronik olarak yapılması mümkün olmaktadır. Mekanik olarak direk enerji aktarımı yavaşlama esnasında kinetik enerji volan sistemine aktarılmaktadır. Kinetik enerji, generatör görevi gören bir üniteye güç elde edildikten sonra tekrar elektrik motoruna bağlı bir üniteye volana aktarılıp burada kinetik enerji depolanmaktadır. Mekanik olarak depolanan kinetik enerji, bisiklette uygulandığı zaman pedal enerjisinde %10 pedal enerjisi kazancı olduğu saptanmaktadır (Menon, 2013). Bisiklet yokuş aşağı indiği sırada frenleme yapmakta ve kinetik enerjisinin ısı enerjisi olarak harcamaktadır. Bisiklete mekanik olarak bir zincir ile bağlı olan volan sayesinde kinetik enerji deplamaktadır. Hızlanmaya geçtiği sırada depoladığı enerjii pedal enerjisi olarak tekrar destek sağlamaktadır.



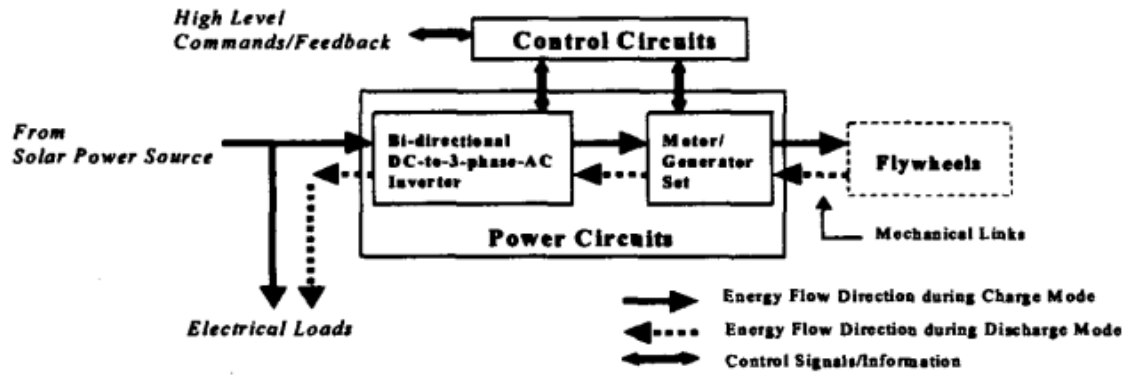
Şekil 2.3: Kinetik enerji depolama bisiklet uygulaması

Kaynak: Menon (2013)

Geçmişte volanlar, yataklama sisteminde ağır ve zayıf olduğu için enerji depolaması olarak uydulara dikkat çekemiyordu. Ancak volan sistemindeki modern gelişmeler, uydularda kullanılmasını sağlıyor(Kulkarni ve Santosa, 2009).

Araştırmacılar, hem elektrik gücü hem de tutum kontrolü sağlayabilen bir uygulamayı incelemek için VEDS'i uygulamışlardır. EOS-AMI tipi uzay aracı için NiH₂ pil ile volan arasında yapılan bir karşılaştırma, volanın daha iyi bir seçenek olacağını gösteriyor. Güneş enerjisi alanında %6.7, kütlede %35 ve hacimde %55 azaltır(Pierpnck, Decter & Spector 1997).

Küçük uydular için, yüksek sıcaklıklı süper iletken (HTS) manyetik yatak sistemini kullanan VEDS'e dayanan, uçtan uca bir enerji-momentum kontrol sistemi konsepti gösterilmiştir(Truong, Wolff & Dravid 2000).



Şekil 2.4: Enerji-momentum kontrol sistemi konsepti

Kaynak: Truong, Wolff & Dravid (2000)

15. yüzyılda Mısır gemilerinde volanlar kullanılmıştı(Genta, 2014). Bir gemideki ağ, çalışma bölgesindeki ve koşullarındaki değişiklikler nedeniyle kara şebekesinden farklıdır. Gemilerdeki güç ağı kalitesi sıklıkla geniş bir aralıkta değişir. Enerji depolama teknolojisi benimsenene kadar kabul edilemez olan yüksek güçlü ekipman nedeniyle sorun benzeri voltaj düşüşü meydana gelebilir. Bir VEDS, kesintisiz güç, darbeli güç sistemleri, toplu depolama, tek jeneratör çalışması ve karanlık başlatma özelliği gibi birçok uygulamayı destekleyebilecek gelecekteki gemiler için uygun bir alternatif olarak hareket edebilir. Gemi ağı için VEDS'e dayalı statik bir seri kompensatör modelledi ve simüle etti, bu da voltaj düşmesi problemini çözebilir. Yazarlar ayrıca, genel darbe yükü, ana jeneratör, tahrik modülü ve VEDS'i içeren bir elektrikli gemi modelini genişleten, VEDS'li ve VEDS'siz bir geminin güç sistemi üzerindeki darbe yüklerinin tepkisini de araştırmışlardır(Samineni ve diğerleri 2006). Yukarıda belirtilen

literatür, VEDS'in işleyişinin, darbe yükü ile elektrik sisteminin diğer parçaları arasında bir zırh görevi görerek, VEDS sistemi takılıyken darbe yükünün ateşlenmesi sırasında tahrik motorunu ve jeneratörü etkilemediğini ortaya koymaktadır.

Volanların, şarj hızından ve deşarj derinliğinden bağımsız olarak 1.000.000 çevrimi aşan çevrim ömürleri ile mükemmel yaşlanma özelliklerine sahip olduğu gösterilmiştir (Foley, 2015). Herhangi bir modern yüksek hızlı volandaki kritik bileşen karbon kompozittir ve kompozitlerin yorulması karmaşık bir süreçtir. Genel olarak, malzeme yorgunluğu doğrudan döngüsel yüklemeye bağlıdır. Kompozitler için, nihai yorulma sınırı (sonsuz döngüler), epoksi için çember yönünde (ana gerilim yönü) %0,6 olan bağlama matrisine bağlıdır (Talreja, 1981).

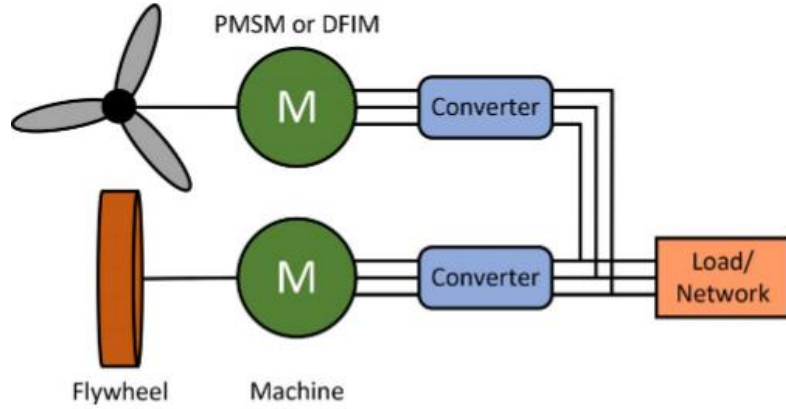
Gelişmiş elektromekanik volanlar, geleneksel olarak çok pahalı olan bileşenlere sahiptir; ancak, diğer sektörlerdeki son gelişmeler nedeniyle kilit teknolojilerin fiyatları düşüyor. Uppsala Üniversitesi'nin manyetik yataklar için yüksek hassasiyetli girdap akımı konum sensörlerini 2009'da satın alması yaklaşık 5000 USD'ye mal oldu, ancak 2015'te benzer performansa sahip bir sistemin maliyeti 60 USD'nin altındaydı. Bunun nedeni, çok katmanlı PCB'lerin yüksek hassasiyetle yeniden üretilebilmesi ve endüktif sensörlerin ucuza seri üretilmesine olanak sağlamasıdır. Güç elektroniği, elektrikli otomobil ve enerji endüstrileri tarafından her yıl maliyetlerini aşağı çekiyor. Gelişmiş kontrol için işlem gücü her yıl daha ucuz hale geliyor ve 1950'lerden beri popüler hale gelen Moore'un maliyet düşürme yasasını takip ediyor. Kompozit malzeme geliştirme, rüzgar enerjisi ve ulaşım endüstrileri tarafından kullanımı yaygınlaşmıştır.(Hedlund, 2015)

VEDS birçok alanda kullanılmaktadır. Rüzgar enerji santrallerinde, rüzgar hızına bağlı olarak akım farklılıkları oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında üretilen elektrik şebekeye verilmekte olup bazı akım dalgalanmalarında VEDS üniteleri kullanıldığı görülmektedir.

Şekil 2.5 görüldüğü üzere rüzgardan türbinine bağlı olana generatörde üretilen enerji, arada bulunan dönüştürücüler ile volana bağlı olana elektrik motoruna tahrik etmektedir. Elektrik motoru volanı belli bir devirde tutmaya çalışmaktadır. Rüzgar hızının azaldığı durumlarda, volan sahip olduğu kinetik enerjiyi kullanarak volana bağlı olan elektrik motorunu döndürerek şebekeye akım iletmektedir.

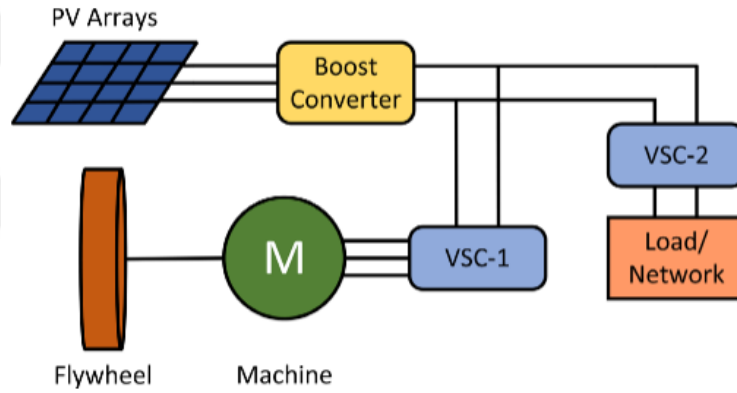
Bir diğer yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi sisteminde VEDS ünitesi kullanıldığı gözlenmektedir. Şebekeye verilen elektrik, akım kayıpları dengesizlik gibi

durumlarda VEDS ünitesi devreye girerek dengeyi sağlamaktadır. Şekil 2.6'de şema tize edilmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Rüzgar enerjisi VEDS uygulaması

Kaynak: Wiley (2021)

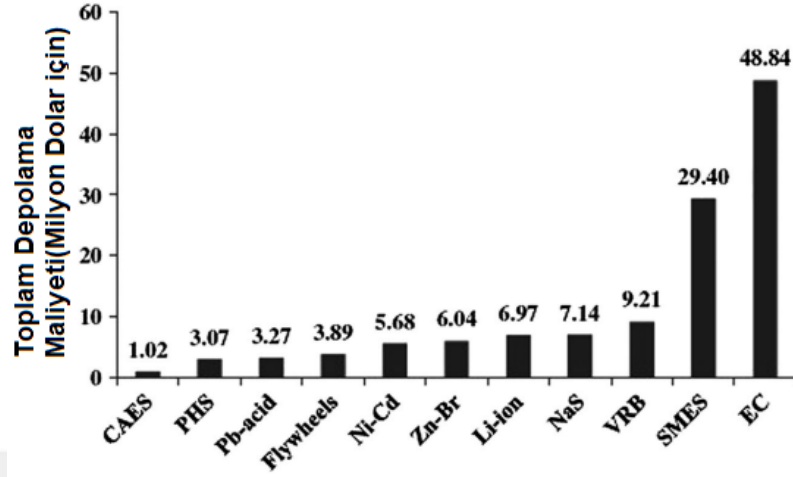


Şekil 2.6: Güneş enerjisi VEDS uygulaması

Kaynak: Wiley (2021)

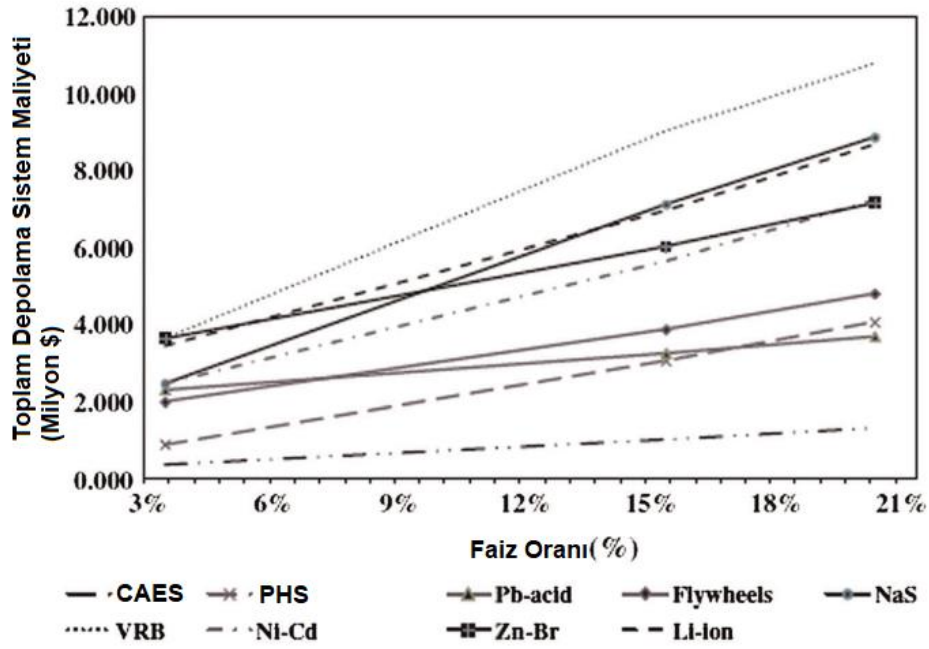
VEDS ile diğer enerji depolama sistemleri arasında maliyet&güç değerlendirme yapmak mümkündür. Bu kapsamda finansal model, sermaye depolama maliyetinin nasıl hesaplandığını açıklar. Bu bilgi, diğer finansal parametrelerle birlikte LCOE'yi hesaplayan bir formülasyona dahil edilebilir. TED hariç çeşitli enerji depolama teknolojileri için toplam depolama sistemi maliyeti, Şekil 2.8'de (Baker, 2012) faiz oranı dahil olmak üzere Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Toplam sistem depolama maliyet hesaplaması, enerji maliyeti, güç maliyeti ve tesis maliyeti dengesi gibi unsurları hesaba katar. TED toplam depolama sistemi maliyeti, Şekil 2.7'deki CAES ve PHD blokları arasına sığacaktır.

Şekil 2.7'de, bu depolama teknolojisiyle ilişkili yüksek enerji maliyeti nedeniyle süper kapasitörlerin dâhil edilmediğine dikkat etmek önemlidir. TED, Şekil 2.8'de BHED ve PHD arasında bir çizgi oluşturacaktır.



Şekil 2.7: Enerji depolama teknolojileri için toplam depolama maliyeti

Kaynak: Baker & Sundararagavan (2012)



Şekil 2.8: Faiz oranıyla birlikte toplam depolama maliyeti

Kaynak: Baker & Sundararagavan (2012)

Alberta'da hafif raylı ulaşımaya yardımcı olmak için volan teknolojisini kullanmaya çalışılmaktadır. Almanya'da Hannover'de test edilen teknolojinin farklı bir modeli

olarak kullanarak, %31'lik enerji tasarrufu ve %11'lik maliyet tasarrufu sağlayacaktır(Pell, 2016).

Hafif raylı trenleri yavaşlayıp durduğunda üretilen kinetik enerjiyi depolamak için volan teknolojisi kullanma olasılığını inceledi. HR trenleri, enerji üreten yumuşak duruşlar için trenin tekerleklerinde bulunan elektrik motorları kullanarak rejeneratif frenleme ile tasarlanmıştır. Bunun yanında bir vagonu sadece kinetik enerji üretmesi için kullanmaya başlanmaktadır. Üretilen kinetik enerji Şekil 2.9'da bulunan VEDS ünitelerinde depolanmaktadır.



Şekil 2.9: Volan teknolojisi, hafif raylı sistemleri uygulaması

Kaynak: Pell (2016)

3. EA HEA ARAÇLAR VE VOLAN ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİSİ

EA ve HEA günümüzde kullanımı büyük ölçüde artmaktadır. Bununla birlikte VEDS gibi uzun yıllardır kullanılmakta olup birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Otomotiv sektörüyle entegrasyonu geçmişten günümüze hatırı sayılır çalışmalar yapılmıştır.

3.1. Elektrikli Araçlar ve Hibrit Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar üzerinde ilk çalışmalar içten yanmalı motorlara sahip araçların öncesi 19. yüzyılın başlarında dayanmaktadır. 1990'lı yıllara kadar birçok elektrikli araç modeli geliştirilmiştir. Elektrikli araçların hayatımıza girmesini sağlayan yeni teknolojilerdir.

Günümüzde elektrikli araçlar içten yanmalı araçların yerini almaktadır. Elektrikli araçlar birçok avantajı bulunmaktadır. İçten yanmalı araçlar trafiğin kalabalık olduğu şehirlerde, dur kalk trafiğinden dolayı çok fazla yakıt sarfiyatı yapmaktadır. EA ve HEA'da ise gaz pedalına basmadıkça araçta yakıt tüketimi yapmamaktadır. Elektrikli araçların en büyük avantajı çevreci oluşlarıdır. Araç hareket halindeyken herhangi bir gaz emisyonu bulunmamaktadır.

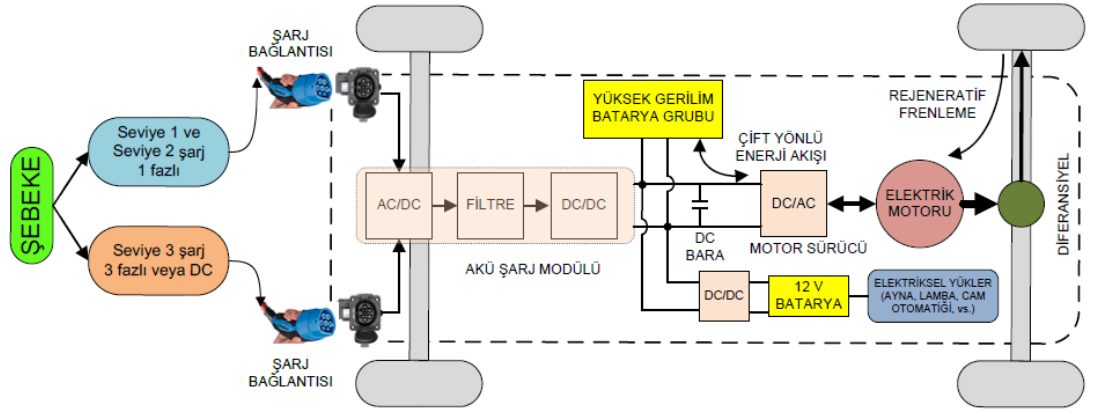
İçten yanmalı araçlara göre dezavantajları, uzun menzil ve pilleri şarj etme süreleridir. Yüksek akımlı pillere ek olarak geliştirilen volan enerji depolama sistemi, tahrik gücünden depoladığı kinetik enerjiyi, araç hızlanmaya başladığında elektrik motoruna tekrar aktarmaktadır. Volan enerjisi yüksek devirlere sahip olması önemli bir etken olarak göz önünde bulunmaktadır. Çevrim arttıkça depolanan enerji karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Yani 1 birim çevrimde depolanan enerji 1 iken 2 birim çevrimde 4 birim enerji depolanmaktadır. Yüksek dayanımlı kompozit malzemeler ve düşük kayıplı rulman geliştirilmektedir. Bu sebeplerden dolayı popüleritesini gün geçtikçe artırmaktadır.

İlk uygulamalarında mekanik enerjiyi doğrudan depolayıp gerektiğinde kinetik enerji olarak vermişken, ancak gelişen teknoloji sayesinde elektrik - mekanik dönüşümlerin yapıldığı uygulamalarla verimi artmakta ve kullanım alanları giderek yaygınlaşmaktadır.

Elektrikli araçlara geçiş sürecine kadarı yakıt deposu ve içten yanmalı motorlu araçlar bulunmaktaydı. Hibrit araçlar ise daha küçük bir yakıt deposuna sahip içten yanmalı bir

motora sahiptir. İçten yanmalı motora bağlı olarak elektrik motoru ve akü grubu tahrikine yardımcı olur. Şehir içlerinde ara hızlarda elektrik motoru tahrik sağlarken, araç süratini artırdıktan sonra içten yanmalı araç devreye girmektedir. Araç yavaşlamaya başladığında içten yanmalı motor durup elektrikli motor generatör gibi davranarak elektrik üretir ve bir kısmını bataryaya iletir.

Elektrikli araçlar ise elektrik motoru ve bataryadan oluşmaktadır. Şekil 3.1 de görüldüğü gibi içten yanmalı motoru ve bir yakıt deposu bulunmaktadır. Yakıt deposu yerine yüksek gerilim sağlayan bir bataryaya sahiptir Ayrıca aracı şebekeden beslemek için şarj modülü ve aracın tahriki dışındaki elektrik ihtiyaçları için düşük voltajlı akü bulunmaktadır (Erhan, 2013).



Şekil 3.1: Elektrikli Araç Yapısı

Kaynak: Erhan (2013)

Araç harekete halindeyken DA bara, farklı yönlerde enerji akışı olduğu bir köprü görevi görmektedir. Bu durumda, DC barasını besleyen kaynak yüksek voltajlı pildir. Alçak gerilim akü, şarj modülü ve motor sürücü devresi DC baradan beslenen alıcılardır. Düşük gerilimli bataryanın bulunma sebebi maliyetleri azaltmaktır. Araçta bulunan lambalar, küçük güçlü birçok elektrik motoru (fan motoru, ayna motoru, açılır tavan motoru, silecek motoru vb.) geleneksel araçlardan farklı olarak yüksek voltajlı akü voltajında (400 V) çalışacak şekilde üretilmektedir, bu da ekstra maliyet anlamına gelir. Bununla birlikte yüksek gerilimle temas eden motorlar araç içerisinde hayati tehlike oluşturabilmektedir. Bu gibi durumları önlemek için DC/DC kıyıcı kullanılarak yüksek DC bara voltajı 12 V'a düşürülür ve düşük voltajlı aküye bağlanır. (Erhan, 2013).

Bir araştırma sonucu göstermektedir, elektrikli araç dik bir yokuşu 72 kW'lık bir enerji harcayarak tırmanmıştır. Yokuşu inerken rejeneratif frenleme elektrikli aracın generatör

olarak çalışması sayesinde 24 kW'lık bir enerji geri kazandığı saptanmıştır(Segundo, 2011).

Gelecekte enerji yoğunluğu yüksek ve boyut olarak hafif bataryalar imal edilecek olup menzil problemleri giderilmesi öngörülmektedir. Hızlı şarj ünitelerin yaygınlığı artırılıp uzun mesafeli yollarda zaman kaybetmeden yolculuk mümkün hale gelecektir. Bu sayede elektrikli araçların kullanımı artması mümkün olması planlanmaktadır.

HEA hibrit yapısına göre farklılık göstermektedir. Aracın batarya boyutuna göre aracın kat edeceği mesafe değişmektedir. Ayrıca hibrit yapıya göre aracın bara gerilim değeri de değişmektedir. Günümüz teknolojisinde üretilen hibrit motorlar dört kategoriye ayrılmaktadır.

Mikro Hibrit sınıfı, en basit teknolojiye sahip hibrit araçtır. Araç trafikte fren yaptığında benzinli motoru otomatik olarak durduran ve benzin tüketimini azaltan bir sisteme sahiptir.

Hafif hibrit sınıfı benzinli motoru otomatik olarak durdurur ve benzin tüketimini azaltır. Benzinli motoru frenleme esnasında durdurarak aracın kaybettiği enerjiyi geri kazandırır. Ayrıca hafif hibrit sınıf sistemi, benzinli motoru destekleyen bir elektrik motoruna sahiptir.

Tam Hibrit sınıfı, bir elektrik motoru yardımıyla gezinme yeteneğinin sistemine eklendiği hafif hibrit sınıfı olarak tanımlanabilir.

Plug-in hibrit olarak bilinen fişe takılabilir hibrit sınıfı, diğer hibrit motorların tüm özelliklerine sahiptir. Şebeke enerjisi ile harici kanallardan şarj edilebilen plug-in sistemi ile diğer motorlardan ayrılır. Çizelge 2.1'de hibrit yapıya sahip araçların teknik özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 3.1: Farklı tipteki hibrit elektrikli araçlar ve özellikleri

Araç Yapısı	Gerilim(V)	Enerji Kapasitesi(kWh)	Güç (kW)
Mikro Hibrit	12	0,6-1,2	2
Hafif Hibrit	36-150	1	5-20
Tam Hibrit	200-400	1	30-50
Fişe Takılabilir Hibrit	200-400	5-20	30-100
Tam Elektrikli	200-600	10-100	30-350

Kaynak: Uri-4 (2019)

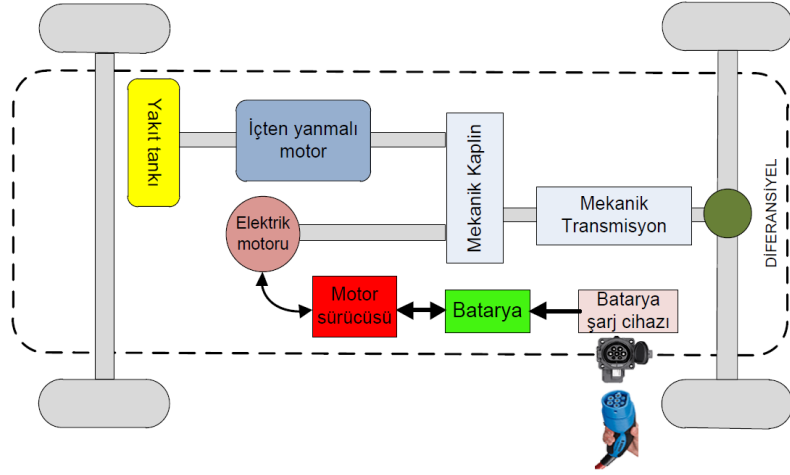
EA ve HEA avantajlarını sıralayacak olursak;

- Hareket halinde değilken enerji tüketimi olmamaktadır.
- Kalkışta maksimum momenti tekerlere ileterek en iyi performans değerlerine çıkabilmektedirler.
- Geleneksel araçlardan farklı olarak bir şanzımana bulunmamaktadır.
- Rejeneratif frenleme sayesinde enerji tasarrufu yapabilmektedir.
- Elektrikli araçlarda enerji ve güç yoğunluğu içten yanmalı araçlara nazaran daha yüksektir.
- Uzun ömürlü araçlardır, çevrim süreleri yüksektir.
- Yapı bakımından içten yanmalı araçların motorları daha karmaşık yapıdadır. Dolayısıyla daha fazla parçaya sahiptir. Elektrikli araçlarda daha az parçalı motora sahiptir dolayısıyla daha az problem yaşanabilmektedir.
- Elektrikli araçlar içten yanmalı araçlara sessiz çalışmaktadır.

Hibrit araçlar yapısal olarak seri, paralel ve birleşik olarak sınıflandırılır. Paralel hibrit yapıda içten yanmalı motor ve elektrik motoru ile birlikte aktarma organını tahrik etmektedir. Üreticiler en çok beğendiği ve tercih ettiği yapı paralel hibrit yapı olmaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi aracın hareketini sağlayan sistemler, hem elektrikli hem içten yanmalı motor olmaktadır.

İçten yanmalı araçlar hareket etmemesi halinde bile rölanti devirde çalışması gerektiği için bir yakıt sarfiyatı olmaktadır. Fakat elektrikli araçlar hareket ettiği sürece enerji sarfiyatı yapmaktadır. Hibrit araçlar sıkışık trafikte sadece elektrikli motoru kullanıldığı

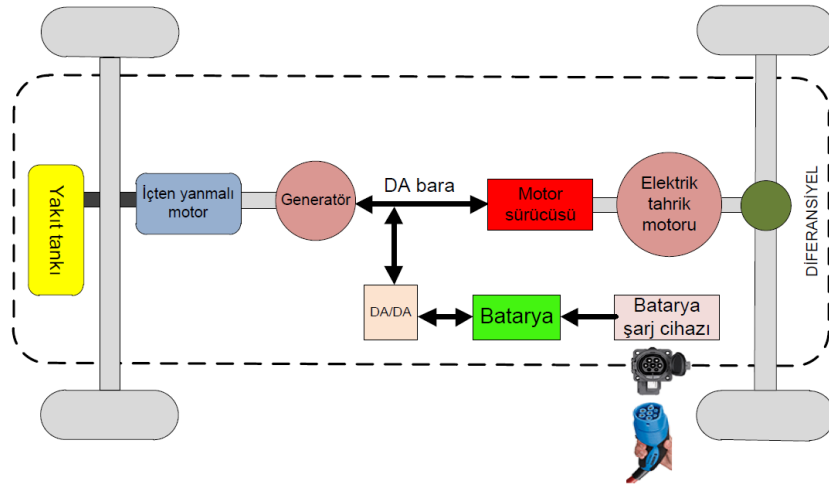
için yakıt sarfiyatının büyük ölçüde önüne geçmektedir. Araç yüksek hızlarda seyrederken ve ara hızlanmalarda elektrik motoru ek güç sağlayarak performanslı çalışmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.2: Paralel Hibrit Yapı

Kaynak: Erhan (2018)

Seri hibrit yapı, içten yanmalı motora doğrudan elektrik motoruna bağlı değildir. İçten yanmalı motor sürekli olarak en düşük yakıt tüketimi ile çalışır ve motora bağlı jeneratörü besler. Bu sayede elektrik üretimi olmaktadır. Şekil 3.3'de hibrit yapı görülmektedir.

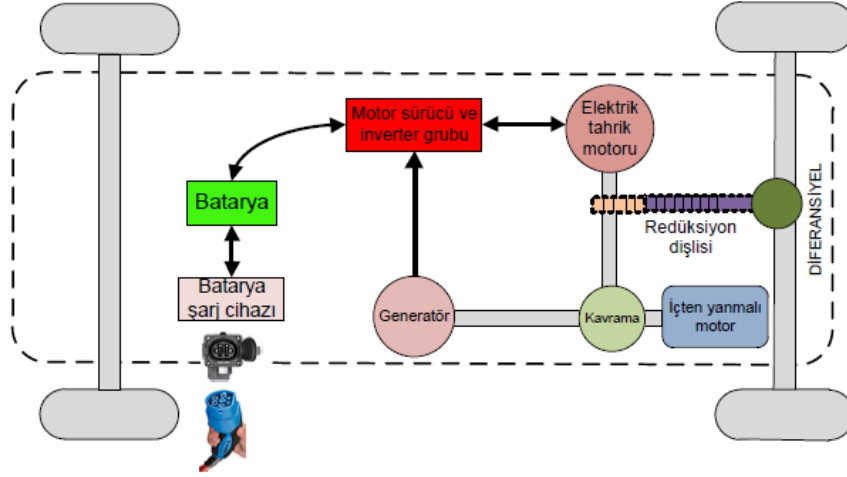


Şekil 3.3: Seri Hibrit Araç Yapısı

Kaynak: Erhan (2018)

Bu yapıda aracın hareketini sağlayan başka bir çekiş/tahrik elektrik motoru bulunmaktadır. Üretilen elektrik hem aracın akü grubuna yüklenir hem de enerji hareketi sağlayan motora aktarılır. Seri-paralel yani birleşik yapıda, içten yanmalı

motor tek başına aracın sürüş gücünü etkiler. Şekil 3.4'de seri-paralel yapı görülmektedir.



Şekil 3.4: Kombine Hibrit Yapılı Araç

Kaynak: Erhan (2018)

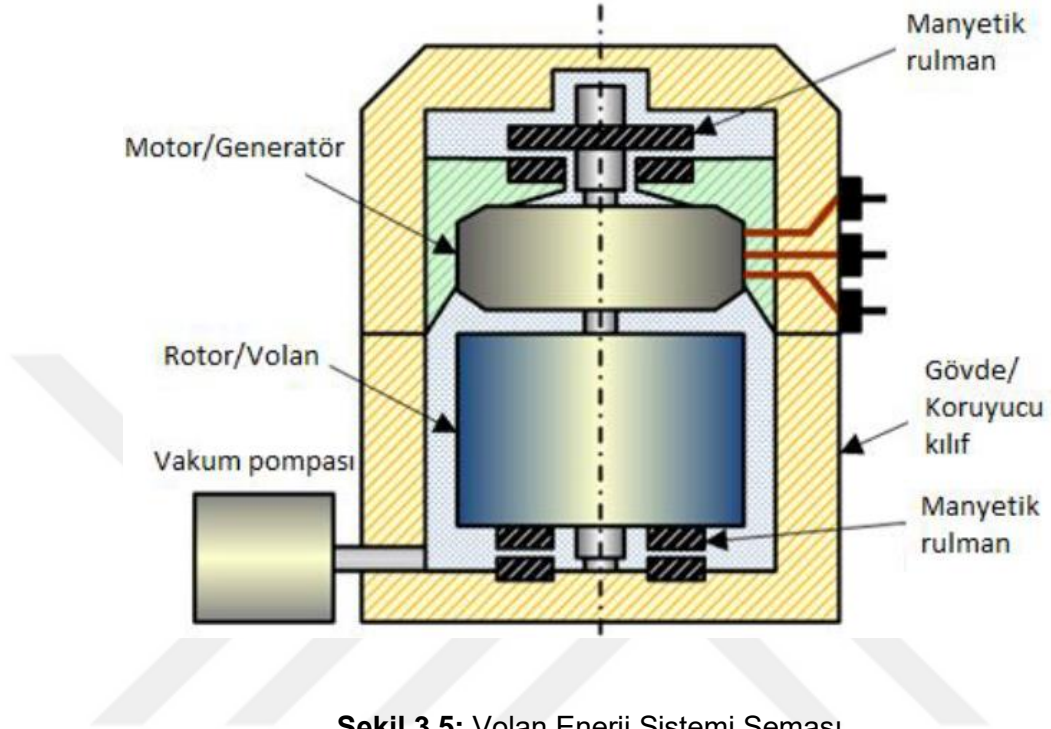
İkinci durumda, içten yanmalı motor, aracın tahrikinden ayrılabilir ve elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini üretmek için bağımsız olarak çalışabilir. Bu durumda elektrik motoru aracı tek başına hareket ettirir. Üçüncü durum, araç yüksek güce ihtiyaç duyduğunda hem elektrik motorunun hem de içten yanmalı motorun gücü tahrik sistemine iletmesidir.

3.2. Volan Enerji Depolama Sistemleri

Volan sistemi yüksek hızlarda dönen bir kütle oluşturulması ve bu kütlede sahip olduğu kinetik enerji depolama sistemini esas almaktadır. Rotor kısmının devir kazanması sayesinde döner kütle enerji depolanmaktadır. Şekil 3.5 volan enerji sisteminin şeması verilmektedir(Segundo, 2011).

Volan seçimi iki şekilde yapılmaktadır. İlk olarak döner kütlede oldukça ağır seçilir fakat kütlede dönüş hızı 10000 devir/dakika'yı geçmemektedir. Depolanan enerjinin büyüklüğü kütlede ağırlığı ile doğru orantılıdır. Bu sistemler paralel olarak bağlanır ve şebeke bazlı santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır. 2011 yılından bu yana Amerika'nın çeşitli bölgelerinde faaliyet gösteren çok sayıda VEDS tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin kurulu gücü 60 MW'ın üzerindedir. Benzer şekilde, Kanada'nın 2014 yılında kurulmuş bir depolama tesisi bulunmaktadır. (Akhil ve diğerleri, 2013; Elzinga ve diğerleri, 2014).

EA ve HEA'larda kullanılan VEDS üniteleri, enerji aktarımına göre farklı tipleri vardır. En çok bilinen VEDS ünitesi Flybrid firmasının ürettiği mekanik CVT ile enerji aktarımı sağlayan sistemlerdir. Bu sistemin enerjisi, aracın aksına CVT yardımıyla VEDS ünitesinde depolanmaktadır. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi Flybrid firmasının ürettiği CVT aktarımlı VEDS ünitesi görülmektedir(Segundo, 2011).



Kaynak: Segundo (2011)

İkinci yapıda döner kütle hafif seçilmektedir. Rotor malzeme seçimi istenilen devir sayısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. VEDS'in depoladığı enerji ağırlığı kadar hızıyla da orantılıdır. Hız arttıkça depoladığı enerji hızının karesi kadar artmaktadır. Bu tip VEDS'lerin üretimi oldukça önemli ve ileri teknoloji gerekmektedir. Kullanım alanlarına bakıldığında genellikle uzay ve havacılık, elektrikli araç ve savunma sanayi uygulamalarında görülmektedir.

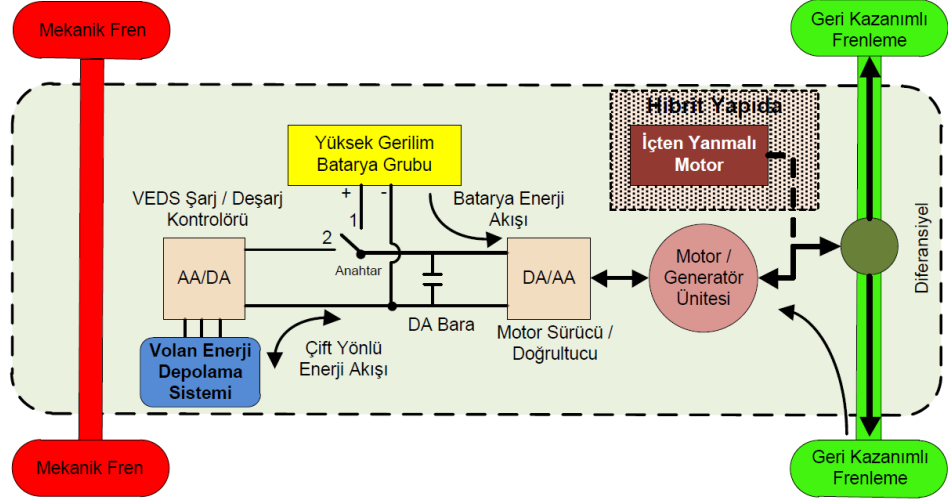
VEDS rotorları farklı malzemelerden yapılmaktadır. Enerji yoğunlukları ve mekanik dayanımlarına göre malzemelerin seçimini Çizelge 3.2' de görülmektedir(Genta, 1960). Deneysel olarak incelenen demir-çelik malzemelerinde 50.000 devir/dakika ya kadar çıkılmıştır. Üst devirlerde kompozit malzeme kullanılmaktadır. Rotorun yüksek devirlere çıkması esnasında malzemedeki oluşan merkezkaç kuvveti artmaktadır ve malzeme üzerinde aşırı bir gerilme oluşturmaktadır. Merkezkaç kuvvetine yenik düşen malzemeler dağılmaktadır. Dağılan malzemeler risk teşkil etmektedir.

VEDS ünitesi Şekil 3.6 görüldüğü gibidir. Elektrikli araçlarda temel enerji kaynağı yüksek gerilim bataryasıdır. Batarya gelen enerji araç durmak istediğinde M/G ünitesi generatör olarak görev almaktadır ve çift yönlü enerji akışı oluşmaktadır. Aracın kinetik enerjisi M/G ünitesi ile elektrik enerjisine dönüştürülerek D/A baraya aktarılmaktadır. Elektronik anahtar yardımıyla (SSR), aracın hareketi için yüksek gerilim bataryası ve geri kazanımlı frenleme enerjisinin depolanması için VEDS ünitesi arasında seçim yapılmalıdır. Böylece geri kazanımlı frenleme enerjisi bataryaya değil VEDS ünitesine yönlendirilmektedir.

Çizelge 3.2: Farklı rotor malzemelerinin enerji yoğunlukları ve mekanik dayanımları

Materyal	Mekanik kuvvet (N/mm ²)	Enerji Yoğunluğu(Wh/kg)
Döküm demir	150	5
Karbonlu çelik (Fe 34)	340	12
Cam elyafli destekli plastik (keçe)	400	28
Alaşımli çelik (30 NiCrMo12)	1000	38
Ağaç (kayın)	120	36
Alüminyum Alaşım (2024)	450	46
Alüminyum Alaşım (Ergal 65)	600	61
Magnezyum Alaşım	320	61
Titanyum alaşım (ZK 60)	1150	63
Maryaşlandırma çeliği	1900	66
Ağaç (ceviz)	220	78
Ağaç (maun)	160	86
Çelik Tel (DP 0.38)	3000	110
Bor elyafli plastik	1400	180
Cam elyafli destekli plastik (çok yönlü)	1300	180
Grafit elyafli plastik (çok yönlü)	1300	230
Kevlar elyafli plastik (çok yönlü)	1200	240
E-cam (lif)	3500	390
Grafit (lif)	2800	390
Bor (lif)	4000	420
Kevlar 29 ve 49 (lif)	2700	480
S-cam (lif)	4800	530
Kevlar T-950 (lif)	2850	550
Kuvars (lif)	6800	730
Bor-grafit alaşım (lif)	6000	840
Al ₂ O ₃ (fleman)	21000	1440
B ₄ C (fleman)	14000	1500
SiC (fleman)	20000	1800
Grafit (fleman)	21000	2500

Kaynak: Genta (1960)

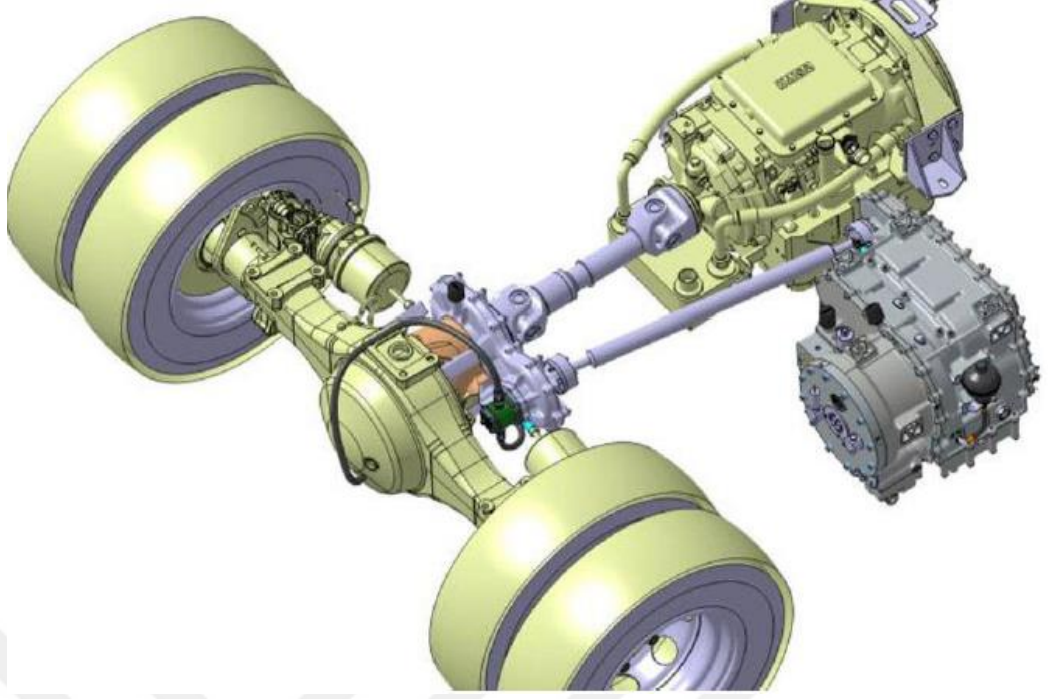


Şekil 3.6: VEDS ünitesi EA ve HEA entegrasyonu

Kaynak: Erhan (2018)

Torotrak sistemi ilk olarak FIA'nın Formula 1 araçlarında kinetik enerji geri kazanım sistemine kullanıma izin vermeye başladığı zaman dikkat çekmeye başlamıştır. Daha sonra, iki F1 takımı bu sistemi kullanması için lisans verildi, fakat ilerleyen yıllarda bu sistem efektif olarak kullanılmadığına inanılmamaktadır. Volan sistemi, maliyet, ağırlık ve boyut dahil olmak üzere elektrikli hibrit sistemlere göre avantajları olduğu bilinilmektedir (Abuelsamid, 2009).

Bu gelişmelere izleyen yıllarda Jaguar XJ model araç için KERS tabanlı bir sistem üzerinde çalışılmaya başlanmaktadır. Bu araç torotrak donanımlı ilk binek bir sedan olma ünvanını da barındırmaktadır. Sistemin daha büyük ölçekli versiyonlarının toplu taşımada test edildiğini bilinmektedir. Sistemin yaklaşık yüzde 40 yakıt verimliliği iyileştirmesi sağladığı iddia edilmektedir (Url-1). Şekil 3.7'deki otobüs uygulamasında, CVT ünitesi volan dışında farklı bir ağırlık ünitesi olarak görülmektedir.

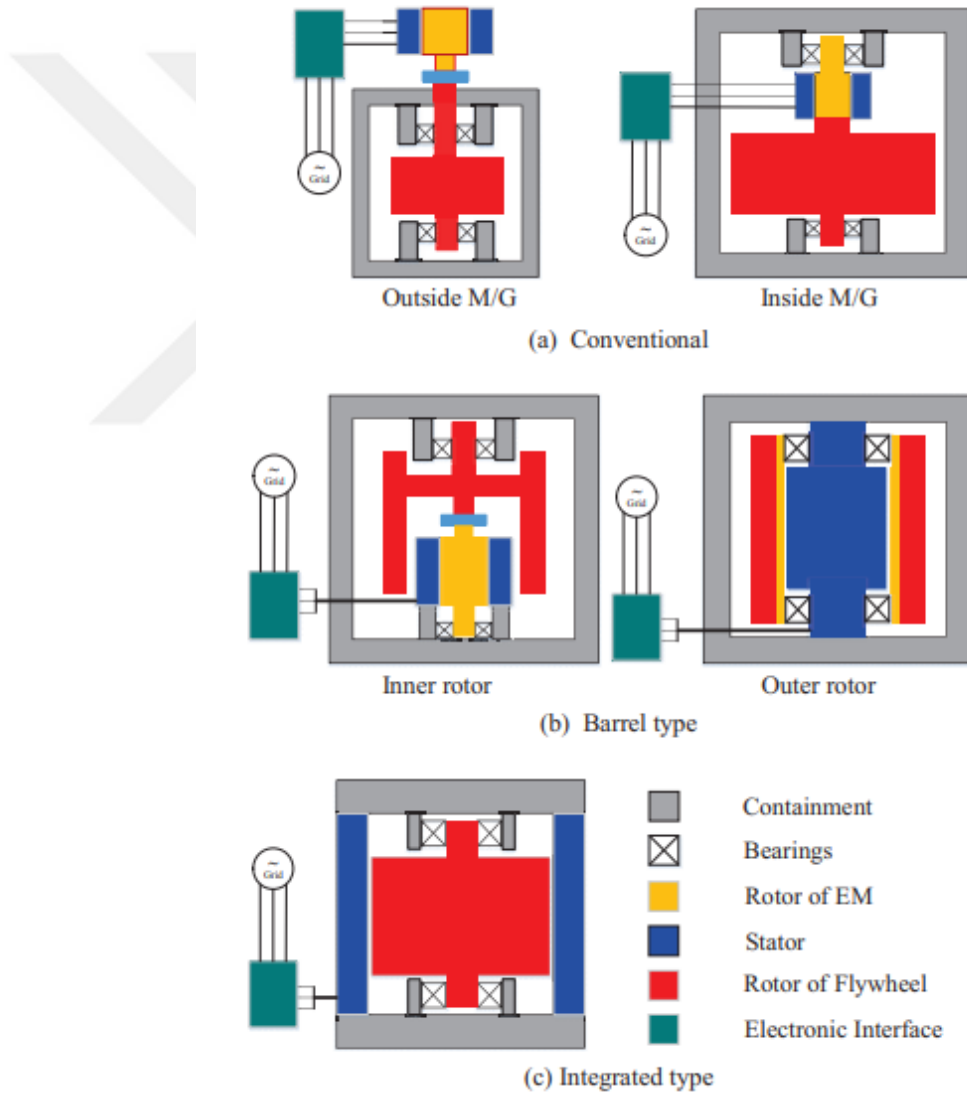


Şekil 3.7: Torotrak otobüs uygulaması

Kaynak: Abuelsamid (2009)

4. VEDS BOYUTLANDIRMA VE MALZEME SEÇİMİ

Tipik VEDS temel olarak volan (rotor), motor/jeneratör (M/G), güç elektroniği sistemi, yataklama, kontrolörler ve muhafaza yapısından oluşur (Ragned, 2013). Mevcut uygulamalarda, Şekil 4.1 'de (Bernard, 2003; Stephen, 2013), gösterildiği gibi bir volan enerji depolama sistemi için üç ana konfigürasyon vardır. Her konfigürasyonda, makine bir motor olarak çalıştığında, güç dönüştürme sistemi aracılığıyla elektriği dönüştürür ve volan rotoruna bir tork uygular. Tork / Rotor atalet oranına bağlı olarak volan rotoru hızını maksimum hıza kadar belirli bir oranda artırarak istenilen kinetik enerjiyi depolar. Ardından, kinetik enerji bekleme modunda tutulur.



Şekil 4.1: Volan Konfigürasyonları

Kaynak: Yulong (2017)

Depolanan enerji gerektiğinde, makine bir jeneratör olarak çalışır ve depolanan kinetik enerjiyi güç elektroniği ara yüzü aracılığıyla elektriğe dönüştürür. Şekil 4.1'de bildirilen ilk konfigürasyona "geleneksel tasarım" veya "katı silindir" denir, M/G, volanın rotor aerodinamik sürtünme kaybını azaltmak için genellikle düşük basınçta tutulan muhafaza muhafazasının dışına veya içine yerleştirilebilir.

M/G ve enerji depolama rotoru, mekanik bir kuplaj veya bir şaftı paylaşarak tamamen ayrılır ve bağlanır. Volan rotoru, kinetik enerjinin çoğunun depolandığı geniş çaplı bir bölüme sahiptir. M/G dış konfigürasyonu genellikle, M/G'nin nispeten düşük hızda çalıştığı ve M/G rotorundan gelen ısının hızlı bir şekilde uzaklaştırılması gereken bazı FES sistemlerinde kullanılır, örneğin endüksiyon makineleri gibi.

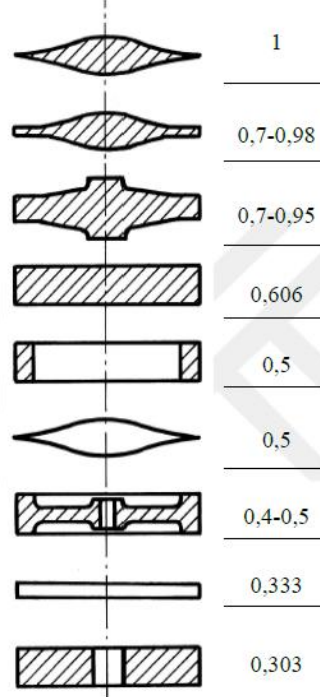
İkinci konfigürasyon, kullanılan 'varil' veya 'içi boş silindir' tipi olarak adlandırılır. Bu tasarım kompakt sonuçlar verir ve enerjiyi merkezinde hafif bir göbeğe sahip bir kompozit halkada depolayan kompozit rotor volanı için bazı avantajlar sağlar. Ancak, enerji depolama açısından bu çözüm, izotropik çelik rotor volanı için verimli bir tasarıma sahip değildir.

Üçüncü konfigürasyon, rotorun elektromanyetik ve enerji depolama parçalarının birleştirildiği bir 'entegre tasarım' dır. Entegre tasarım, muhafaza yapısının ağırlığını en aza indirebilir. Bununla birlikte, iki dezavantajı da vardır: birincisi, tork üretiminin elektromanyetik malzemeye ihtiyaç duymasındır, bu nedenle kompozit volan rotorları için pek uygun değildir; ikincisi, muhafaza muhafazasının güvenliğinin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğidir.

4.1. VEDS Boyutlandırılması

Şebeke uygulamalarında kullanılan VEDS, düşük devir (10000 devir/dakika) ve büyük kütle yapılarına (150-1500 kg) sahiptir. Araç uygulamalarında kullanılan VEDS, düşük kütleli rotorlar (10-50 kg) ve yüksek devirlere (60000 rpm) ulaşabilen yapılardır. VEDS döner kütle kısmı farklı geometrilere sahip olabilir. Bu yapıların başında içi dolu silindirik rotorlar gelmektedir. Katı silindirik bir kütle için eylemsizlik momenti, içi boşaltılan çember eylemsizlik momentinin yarısıdır. Ancak kolayca dengelenebildiğinden, yüksek hızlarda rezonans olasılığı düşük ve yüksek hızlarda patlama ve parçalanma olasılığı düşük olduğundan katı bir kütle tercih edilir. Şekil 4.2'de farklı geometrilere hava rotorların şeması aşağıdaki gibidir.

Atalet momenti bakımında bakıldığında içi dolu olan döner kütlelerin en az momenti sahip olduğu şekilde de görüldüğü gibidir. Tercih edilen geometri atalet momenti düşük olan yapıya göre tasarlanıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Geometrinin yüksek devirlere çıkabilmesi için malzemesinde de farklı bir yapı tasarlanmıştır. Tercih edilen malzeme İmalat çeliği, titanyum alaşım ve karbon fiber malzemelerdir.



Şekil 4.2: Geometrileri farklı rotorların atalet momenti çarpanları

Kaynak: Erhan (2018)

Belli bir devirde dönen Volan kütlesi kinetik enerji depolamaktadır. VEDS enerji depolama değişkenlere bağlı olarak değişmektedir. Volan kütlesi, volan yarıçapı, dönüş momenti gibi değişkenlerden oluşmaktadır.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2 \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1: Kinetik enerji denklemi değişkenleri

I	Eylemsizlik momenti (kg.m ²)
w	Açısal hız (rad/s)
m	Kütle (kg)
r	Yarıçap (m)

VEDS ünitesi boyutlandırılmasında kullanılan parametreler Şekil 4.2'de görüldüğü gibi atalet momenti katsayısına bakılarak geometri seçimi yapılmıştır. Tezin özgün değeri

olarak bir volanda maksimum devir sayısına ulaşmayı en uygun geometri seçimi analiz sonuçlarına bağlı olarak itarasyonlarına bakılmıştır. Çap seçiminde ve kütlede kayıp olmadan en uygun çap seçimi yapılmıştır.

İlk olarak bu üç malzeme tek başlarına çıkabilecekleri maksimum devir sayıları incelenmiştir. İnceleme parametreleri volan kütlelerinin RPM olarak dönüşü sırasında gösterdiği tepkileri malzemenin yapısal özelliklerine göre gösterdiği tepki değerlerine bakılmıştır.

4.2. Malzeme Seçimi

Malzeme seçimi VEDS tasarımında oldukça önemli bir aşamadır. Tasarlanan sistemin rotor hızı ve depolanmak istenen enerji değeri, rotor malzemesi ile doğrudan ilişkilidir. Burada dikkat edilecek temel seçim kriterleri sistemin kullanılacağı uygulama ve depolanmak istenen enerji miktarı ile toplam sistem maliyeti olmaktadır. Bu çalışma kapsamında 3 farklı temel malzeme ile (imalat çeliği, titanyum alaşım, karbon fiber) 2 çeşit hibrit rotor yapısı ele alınmaktadır (imalat çeliği – karbon fiber, titanyum alaşım – karbon fiber).

4.2.1. İmalat Çeliği

İmalat çeliği yapı çeliği olarak kullanılan bir malzemedir. En çok kullanılan malzeme olması yanı sıra işlenmesi diğer çeliklere göre daha kolaydır. Bu gibi etkenler yapı çeliği seçiminde büyük rol oynamaktadır. Yapı çeliğinin sahip olduğu özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Uygun akma sınırı ve çekme dayanımı
- Uygun darbe dayanımı
- Gevrek kırılmalara karşı dayanımı
- İyi kaynaklanabilirlik
- İyi şekillenebilirlik
- İyi işlenebilirlik

Karbon miktarı düşük olan alaşım içermeyen fosfat(P) ve azot(N) olmak üzere, üretim hammaddelerinden ve üretim yönteminden kaynaklanan mangan(Mn), Silisyum(Si), Bakır(Cu) ve Kükürt(S) elementleri içeren ve sıcak şekillendirilmiş, normalize edilmiş bazende soğuk çekilmiş olan özellikle çekme dayanımları ve akma sınırları göz önünde bulundurarak endüstriyel ve yapısal çalışmalarda kullanılan çeliklerdir(Kurtoğlu, 2018).

İmalat Çeliği Ansys program veriler yapısal özellikleri Çizelge 4.2'de görüldüğü gibidir;

Çizelge 4.2: İmalat Çeliği Yapısal Özellikleri

Yoğunluk	7850,0 kg/m ³
Young's Modülü	2e+11 Pa
Poisson Oranı	0,3000
Hacim Modülü	1,6667e+11 Pa
Kayma Modülü	7,6923e+11 Pa
Termal Genleşme Katsayısı	1,2e-05 1/°C
Akma Gerilmesi	2,5e+08 Pa
Kopma Gerilmesi	4,6e+08 Pa
Çekme Gerilmesi	2,05e+08 Pa
Isı İletkenliği	60,500 W/m·°C
Özgül Isı	434,00 J/kg·°C

4.2.2. Titanyum Alaşım

Titanyum (Ti), atom numarası 22 olan kimyasal bir elementtir. Hafif, yüksek mukavemetli, parlak, korozyona dayanıklı bir metaldir. Titanyum, demir, alüminyum, vanadyum, molibden gibi elementlerle alaşım yapabilir. İyi mukavemet ve hafifliğe sahip olan bu alaşım askeri ve birçok alanda (jet motorları, füzeler, uzay araçları) kullanılmaktadır.

Metalik bir element olan titanyum, mukavemet/ağırlık oranı açısından en dikkat çekici özelliğidir. Saf titanyum tamamen esnektir. Titanyum (bazı ısıtma işlem görmüş çelikler kadar olmasa da) oldukça serttir, antimanyetiktir ve zayıf bir ısı iletkenidir. Titanyum alaşımları dört şekilde oluşturulur.

Ticari olarak saf alaşımlı titanyum, 240 ila 550 MPa arasında değişen güçlere sahiptir. Aynı zamanda saflık ne kadar çok değişirse, o kadar çok mukavemet farklılıklarına neden olur (özellikle ara yer atomlarının ve demirin etkisiyle). Alaşımdaki elementlerin oranı arttıkça, ticari olarak saf titanyumun mukavemet artışı plastik deformasyon ile elde edilebilir. Paladyum ilavesinin bazı koşullar altında korozyon direnci üzerinde olumlu bir etkisi vardır, ancak mekanik özellikler üzerinde hiçbir etkisi yoktur.

Alfa titanyum alaşımları, mikro yapılarında yüksek oranda α fazı içerir. Alfa alaşımları, yüksek sıcaklık dayanımının gerekli olduğu veya yüksek sürünme direncinin gerekli olduğu uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Mukavemeti ve sürünme direnci 500 ila 600 C arasındaki sıcaklıklarda korunur, ancak ısıtma işlemle arttırılamaz. (Url-3).

$\alpha - \beta$ titanyum alaşımları tavllanmış durumda veya çözelti ısıtma işlem görmüş ve yaşlandırılmış koşullarda kullanılabilir. Isıtma işleminden sonra mukavemet, tavlama koşuluna göre %50-100 oranında artar ve bu alaşımlar tavlendiğinde yüksek mukavemet/yoğunluk oranı ve mükemmel kırılma tokluğu gösterirler.

Tek fazlı beta alaşımlarının çok iyi şekillendirilebilme özellikleri vardır. Bununla birlikte, termal stabilitesi zayıftır ve yüksek sıcaklıkta kullanım için uygun değildir. Bu şekilde çok iyi dayanım elde edilir. Düşük yaşlandırma sıcaklıklarıyla süneklik ve tokluk oldukça düşer. Genellikle yaylarda esnekliğin gerektiği durumlarda kullanılır. Oda sıcaklığı mukavemeti 1372-1666 MPa'ya çıkabilmektedir(Url-3, 2019). Titanyum Alaşım Ansys program veriler yapısal özellikleri Çizelge 4.3'de görüldüğü gibidir;

Çizelge 4.3: Titanyum Alaşım Yapısal Özellikleri

Yoğunluk	4620,0 kg/m ³
Young's Modülü	9,6e+10 Pa
Poisson Oranı	0,36000
Hacim Modülü	1,1429e+11 Pa
Kayma Modülü	3,5294e+10 Pa
Termal Genleşme İzontrapik Sekant Katsayısı	9,4e-06 1/°C
Akma Gerilmesi	9,3e+08 Pa
Kopma Gerilmesi	1,07e+09 Pa
Çekme Gerilmesi	9,0e+08 Pa
İzotropik Termal İletkenlik	21,900 W/m.°C
Özgül Isı Sabit Basınç	522,00 J/kg.°C
İzotropik Direnç	1,7e-06 ohm.m

Titanyum alaşım malzemesinin birçok yapısal özelliği tabloda görülmektedir. Bu malzemenin seçiminde imalat çeliğine göre akma ve kopma gerilmeleri daha yüksektir. İmalat çeliğine göre daha dayanıklı bir malzemedir. İmalat çeliğine göre yoğunluğu az ve daha hafif bir malzemedir.

4.2.3. Karbon Fiber

Karbon Fiber olarak ya da Karbon Elyaf olarak bilinen, 40 yıllık bir gelişim süreci, sonucunda ortaya çıkan bir materyaldir. Pek çok alanda kendine yer bulan karbon fiber; otomotiv, uzay ve havacılık sektörü gibi birçok sektörde uzun yıllardır kullanılmaktadır.

Karbon fiberin en önemli özelliği, çelikten 4.5 kat daha hafif ve 3 kat daha mukavemetli yüksektir. Spor otomobillerin şase ve birçok parçasında kullanılan karbon, daha hafif ama daha sağlam otomobil üretmek için en iyi malzeme olarak gösteriliyor. Bu materyalin özellikleri(Değirmenci, 2018);

- Düşük yoğunluk
- Hafiflik
- Korozyon direnci
- Kolay üretim yöntemi
- Düşük sürtünme katsayısı

- Yüksek mukavemet olarak sayılabilir.

Karbon fiberin kullanıldığı alanlar ise;

- Havacılık sektörü
- Elektronik araç gereçleri
- Uzay araçları
- Spor malzemeleri
- Otomotiv
- Denizcilik
- İş Ekipmanları olarak sayılabilir.

Karbon Fiber çeşitliliği, hammaddeye ve üretim şekline göre farklılık barındırmaktadır. Sınıflandırılma yapılırken bu özellikler dikkate alınmaktadır. Karbon Fiberin üretiminde; orlon, naylon, katran ve diğer kimyasallar ile bir araya gelerek oluşmaktadır. Karbon fiberin oluşması için kimyasal ve mekanik işlem gerektirmektedir. Prekürsör uzun tellere veya liflere çekilir ve daha sonra oksijen ile temas keserek, çok yüksek bir sıcaklığa ısıtılmaktadır. Oksijen olmadığından dolayı lif yanma riski ortada kalkar. Yüksek sıcaklık, karbondaki atomların çoğunun dışarı atılmasına sağlayarak fiberdeki atomların şiddetli titreşmesine olanak sağlamaktadır. Bu sürece karbonizasyon denir. Uzun, sıkıca oluşan bir lif bırakır.



Şekil 4.3: Karbon Fiber Üretilen Bir Parça

Kaynak: Değirmenci (2018)

Karbon fiber üreten ülkeler; Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, İngiltere, Almanya, İran, Fransa, Macaristan, Tayvan ve Türkiye'dir(Değirmenci, 2018). Türkiye dünya da en çok üretim yapan 3. Ülke konumundadır. Karbon Fiber Ansys program veriler yapısal özellikleri Çizelge 4.4'de görüldüğü gibidir;

Çizelge 4.4: Karbon Fiber Yapısal Özellikleri

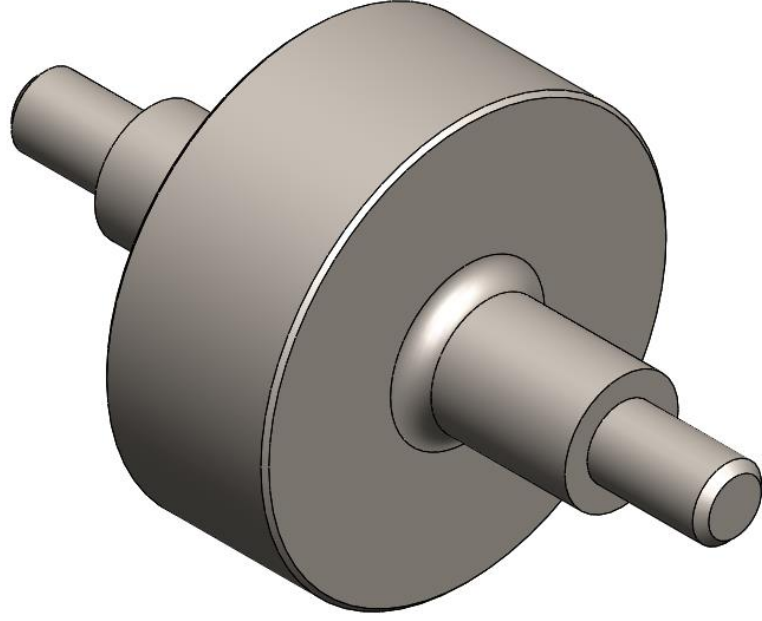
Yoğunluk	1800,0 kg/m ³
Young Modülü X Eksen	2,3e+11 Pa
Young Modülü Y Eksen	2,3e+10 Pa
Young Modülü Z Eksen	2,3e+10 Pa
Poisson Oranı XY	0,20000
Poisson Oranı YZ	0,40000
Poisson Oranı XZ	0,20000
Kayma Modülü XY	9e+09 Pa
Kayma Modülü YZ	8,2143e+09 Pa
Kayma Modülü XZ	9e+09 Pa

Karbon Fiber birçok yapısal özelliği yukarıdaki tablodaki gibidir. Karbon fiber özelliği olarak çok yüksek gerilmelere dayanabilen özel üretim bir malzemedir. Yoğunluğu az olmasından dolayı çok hafif bir malzemedir.

4.3. VEDS Volan Teknik Özellikleri

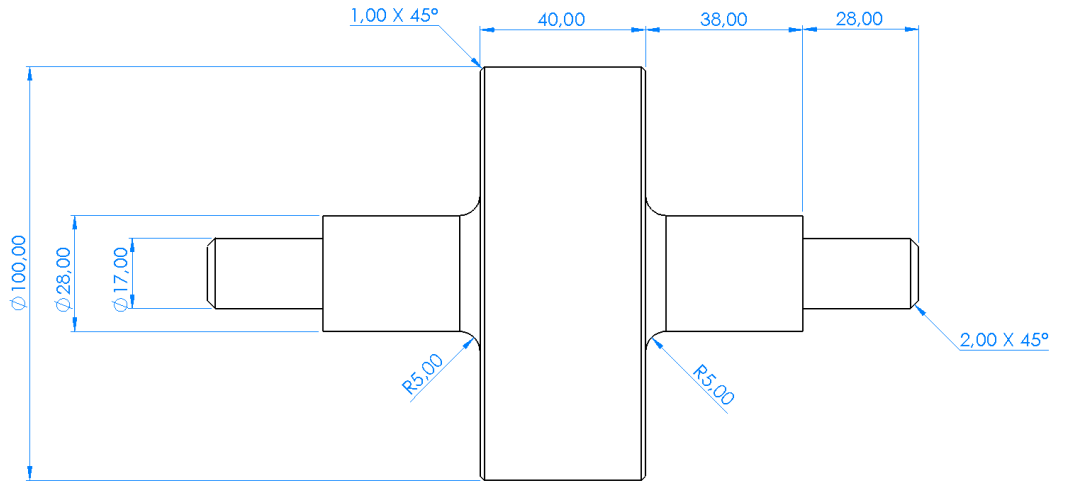
Volan seçiminde dikkat edilen parametreler şekil 4.2'de tablodaki veriler ışığında oluşturulmuştur. Volan tasarımı Solidworks programı vasıtasıyla tasarlanmıştır. Tasarımda iki farklı boyutlandırma kullanılmıştır. Dış çapı Ø100 olan bir volan sistemi kullanılmıştır. Gerilimleri azaltılması için keskin köşelere radyus ve pah işlemleri yapılmıştır. Hazırlanan tasarımda hibrit yapı üzerine et kalınlıkları 3mm,5mm,10mm,20mm olan hibrit yapılar oluşturulmuştur.

4.3.1. VEDS Ø100 Çapında Volan



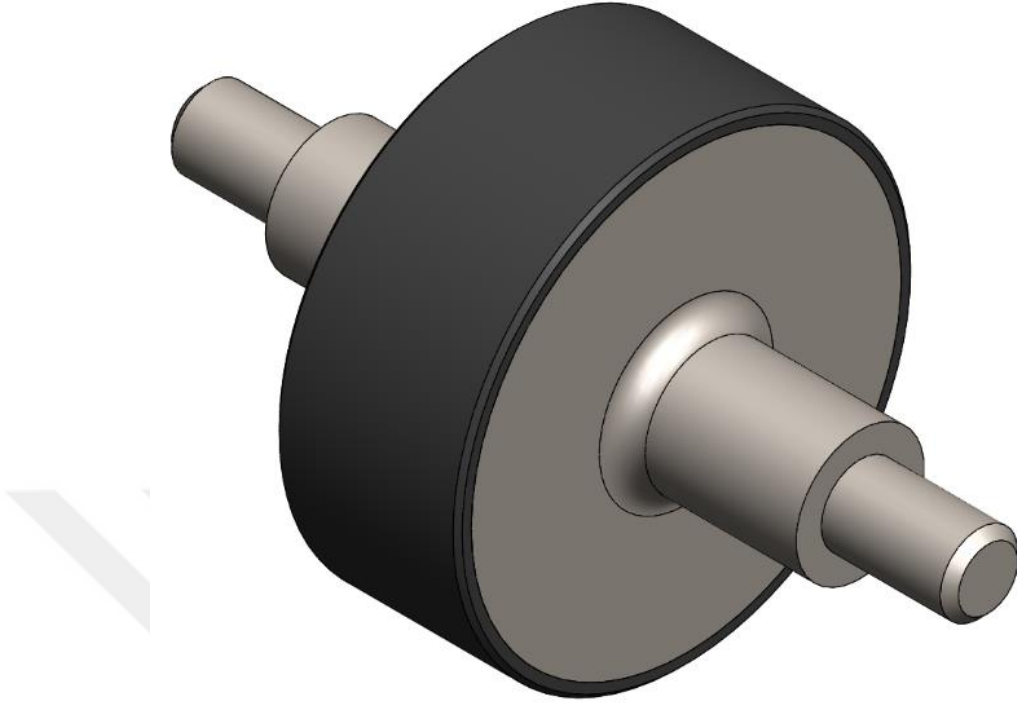
Şekil 4.4: Ø100 Çaplı Volan 3D Model

Ø100 çapında dolu malzemeden CNC tornada işlenerek istenilen boyutlara getirilen volan teknik resmi Şekil 4.4'de görülmektedir. Ø17 çapı rulman yeri, Ø28 rulman iç bileziği dayanacağı yer olarak tasarlanmıştır. VEDS boyutuna göre toplam uzunluk 172mm' dir.



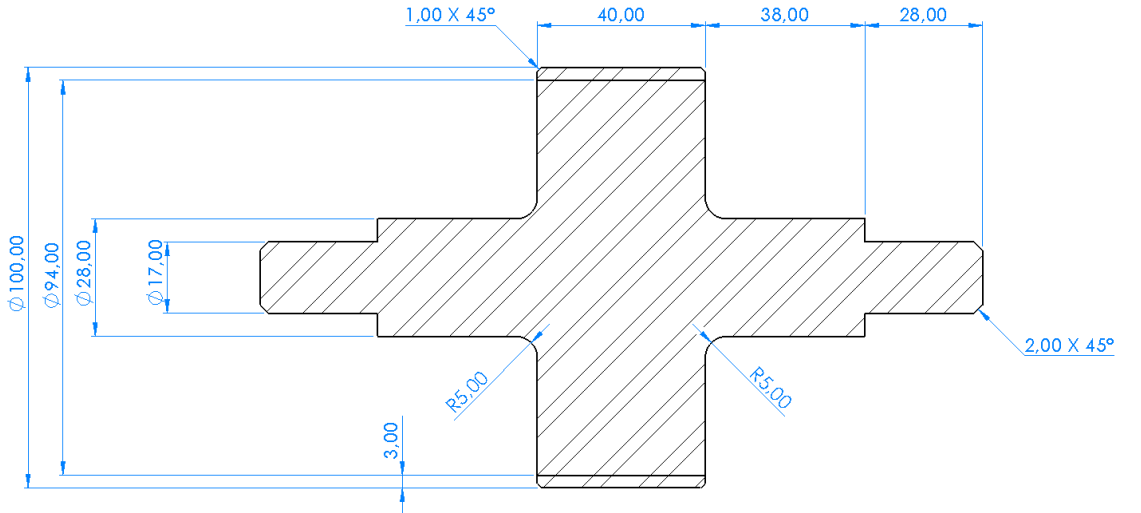
Şekil 4.5: Ø100 Çaplı Volan Teknik Resim

4.3.2. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (3mm et kalınlığı)



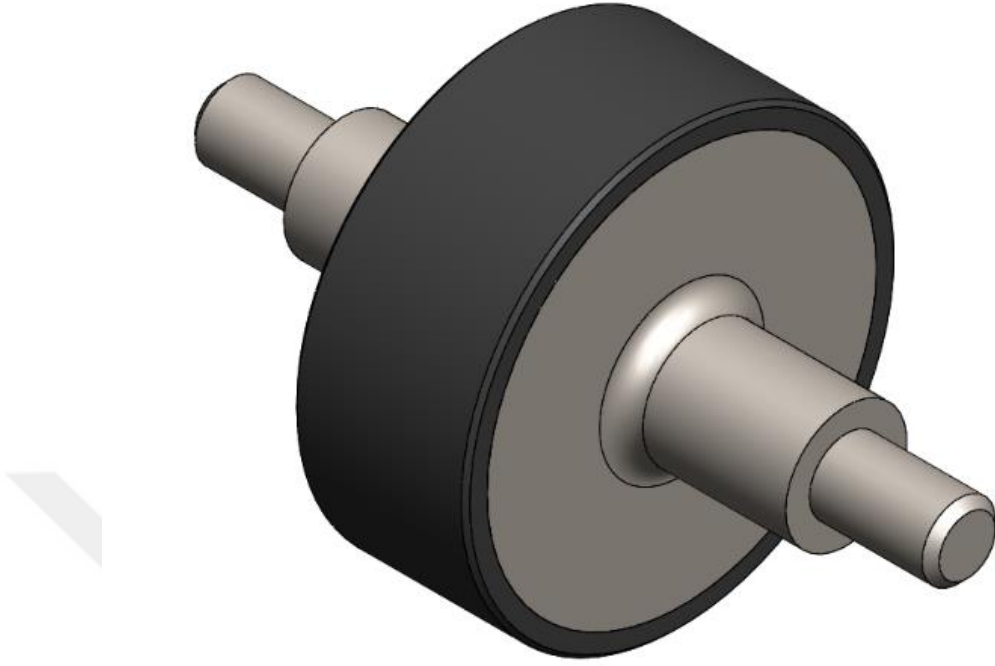
Şekil 4.6: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(3mm Et kalınlık) 3D Model

Ø94 mm çaplı dolu malzeme Cnc torna ile istenilen boyutlara getirilmiştir. Ø94 mm çaplı yüzeye 3mm kalınlığında karbon fiber malzeme sarılarak birleştirilmiştir. Ø100 çapında hibrit volan(3mm et kalınlığı) teknik resmi Şekil 4.6'da görülmektedir.



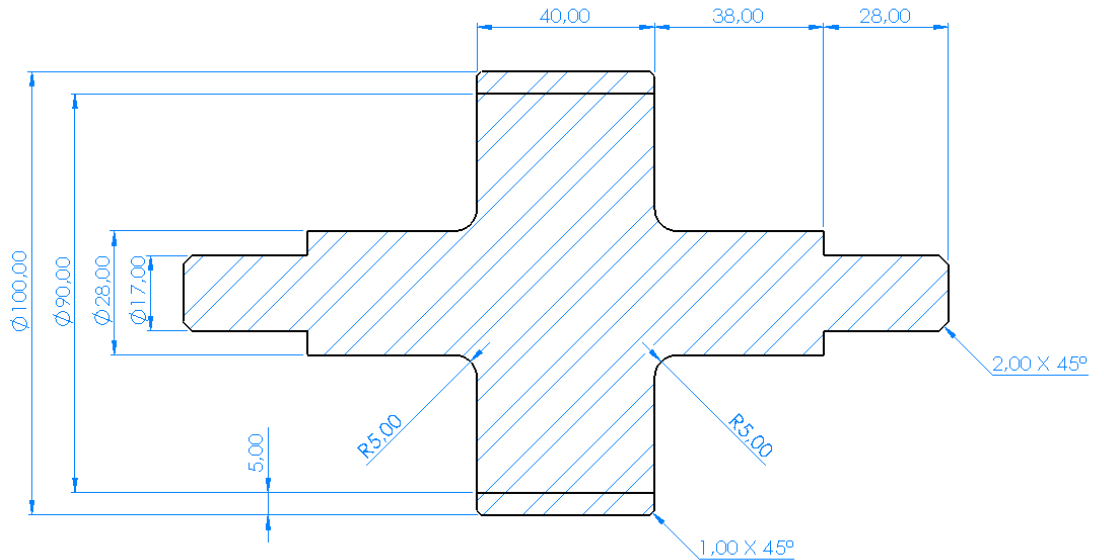
Şekil 4.7: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(3mm et kalınlık) Teknik Resim

4.3.3. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (5mm et kalınlığı)



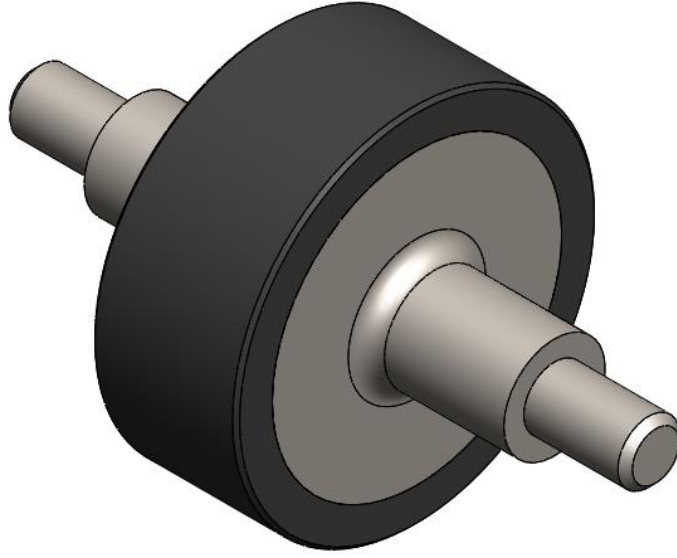
Şekil 4.8: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(5mm Et kalınlık) 3D Model

Ø90 mm çaplı dolu malzeme Cnc torna ile istenilen boyutlara getirilmiştir. Ø90 mm çaplı yüzeye 5mm kalınlığında karbon fiber malzeme birleştirilmiştir. Ø100 çapında hibrit volan(5mm et kalınlığı) teknik resmi Şekil 4.8'de görülmektedir.



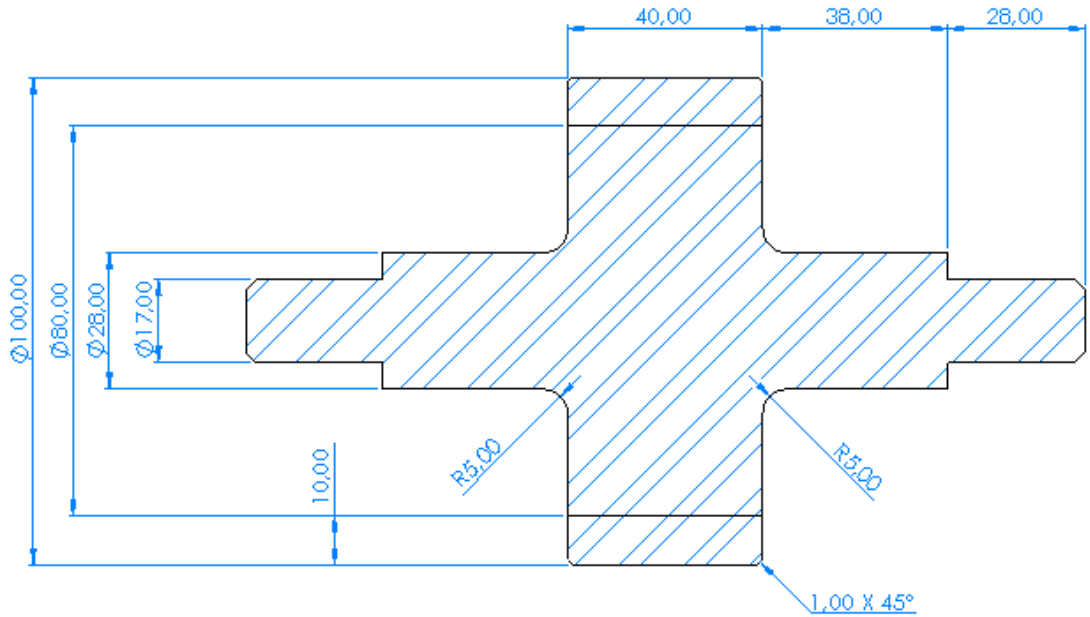
Şekil 4.9: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(5mm et kalınlık) Teknik Resim

4.3.4. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (10mm et kalınlığı)



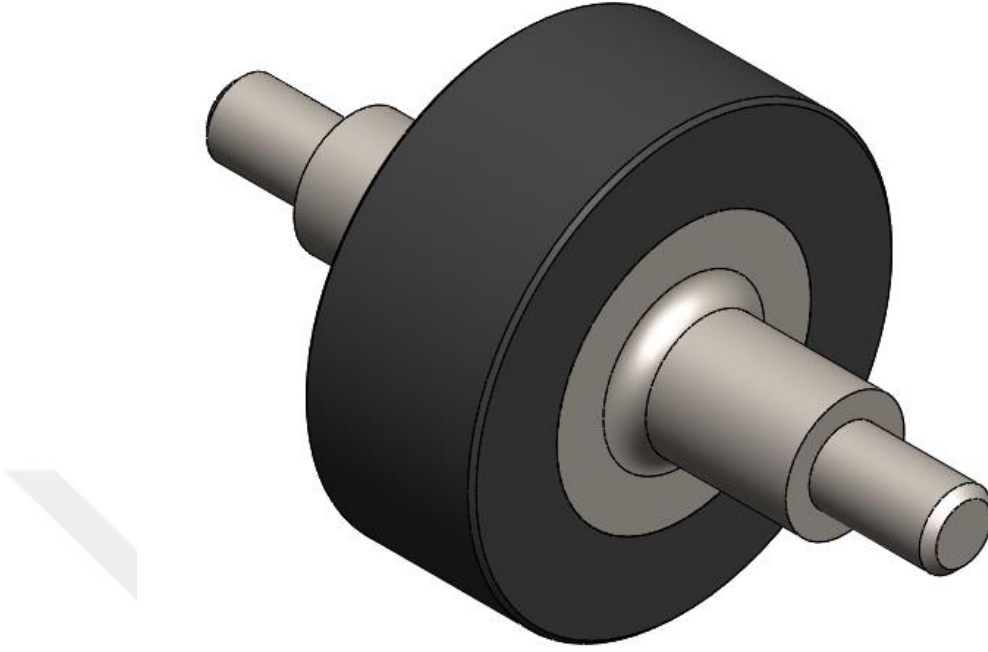
Şekil 4.10: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(10mm Et kalınlık) 3D Model

Ø80 mm çaplı dolu malzeme Cnc torna ile istenilen boyutlara getirilmiştir. Ø80 mm çaplı yüzeye 10mm kalınlığında karbon fiber malzeme birleştirilmiştir. Ø100 çapında hibrit volan(10mm et kalınlığı) teknik resmi Şekil 4.10'da görülmektedir.



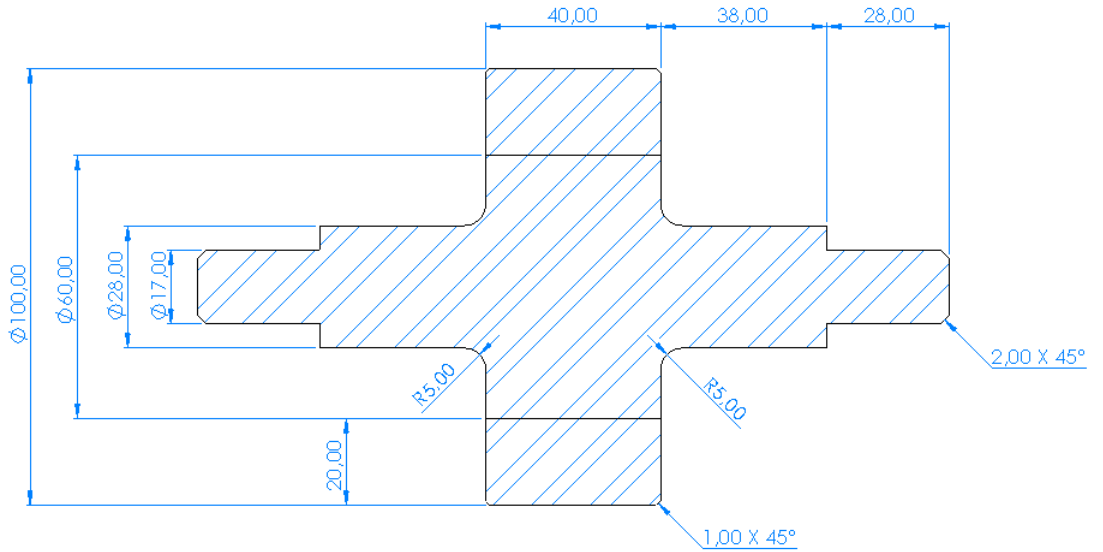
Şekil 4.11: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(10mm et kalınlık) Teknik Resim

4.3.5. VEDS Ø100 Çapında Hibrit Volan (20mm et kalınlığı)



Şekil 4.12: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(20mm Et kalınlık) 3D Model

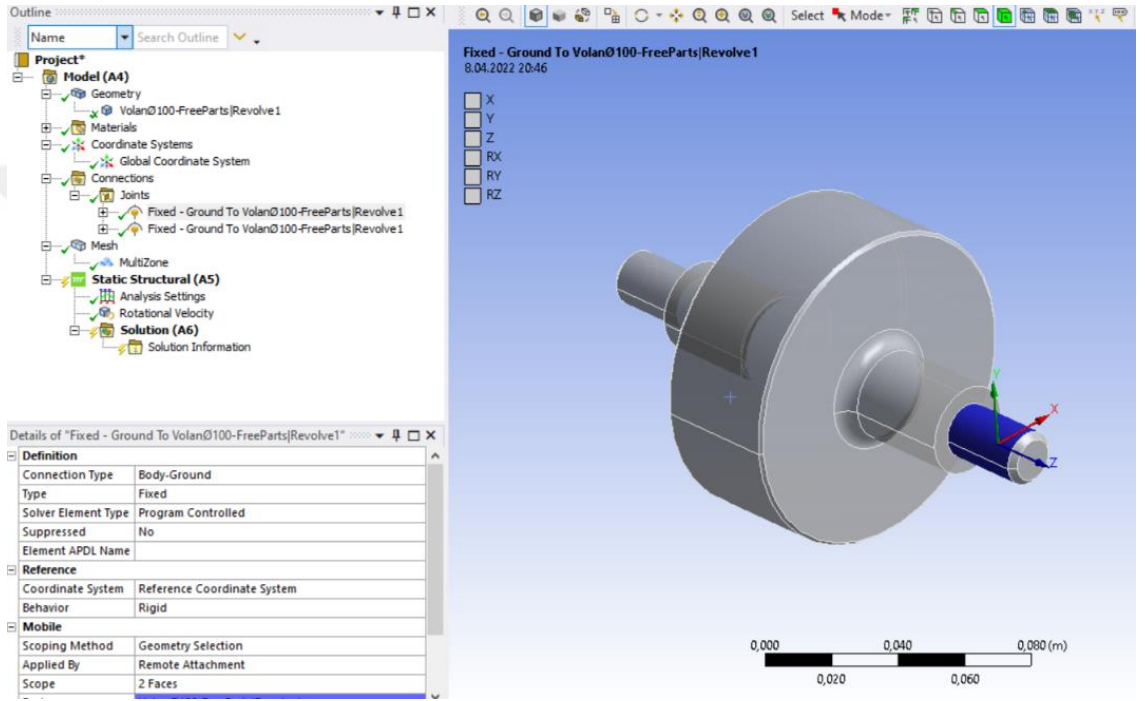
Ø60 mm çaplı dolu malzeme Cnc torna ile istenilen boyutlara getirilmiştir. Ø60 mm çaplı yüzeye 20mm kalınlığında karbon fiber malzeme birleştirilmiştir.Ø100 çapında hibrit volan(20mm et kalınlığı) teknik resmi Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.13: Ø100 Çaplı Hibrit Volan(20mm et kalınlık) Teknik Resim

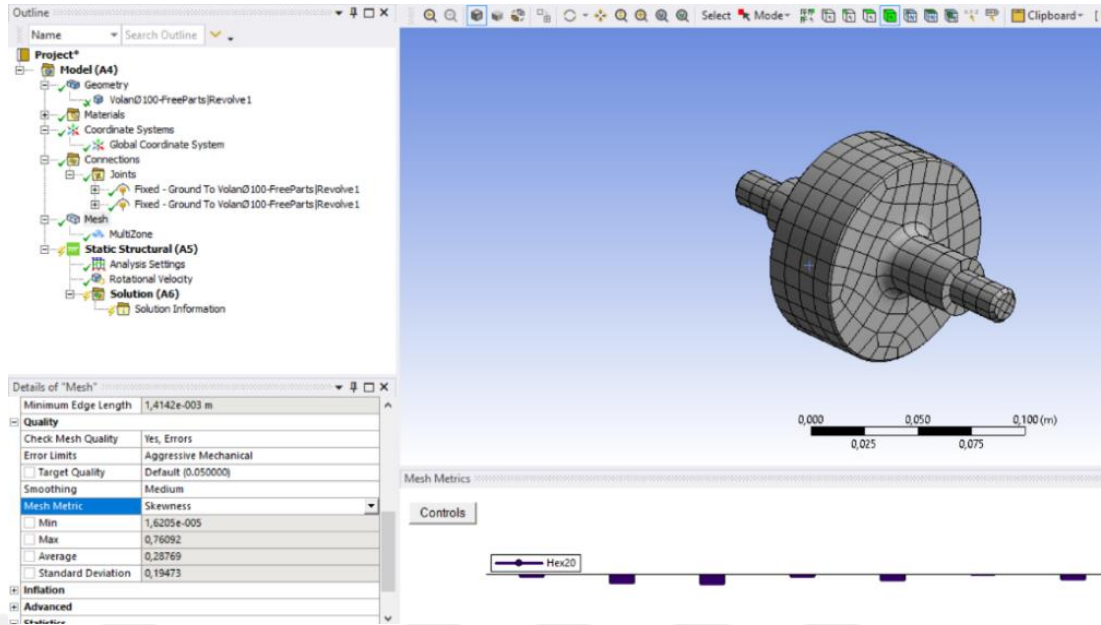
5. VEDS ANALİZ

Analiz çıktıları Ansys programı kullanılarak elde edilmektedir. Seçilen malzemeler Ansys kütüphanesinden çekilmektedir. Volan her iki ucundan yataklamaları yapılarak, volan Z ekseninde dönmesine izin verilmektedir. Bunu yapmak için Ansys programında birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada tercih edilen yöntem Joint komutuyla Body-Ground yani volan ile yer arasında bir bağıntı seçilerek yataklamalar yapılmaktadır. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi Ansys programında uygulaması bulunan volan gösterilmektedir.



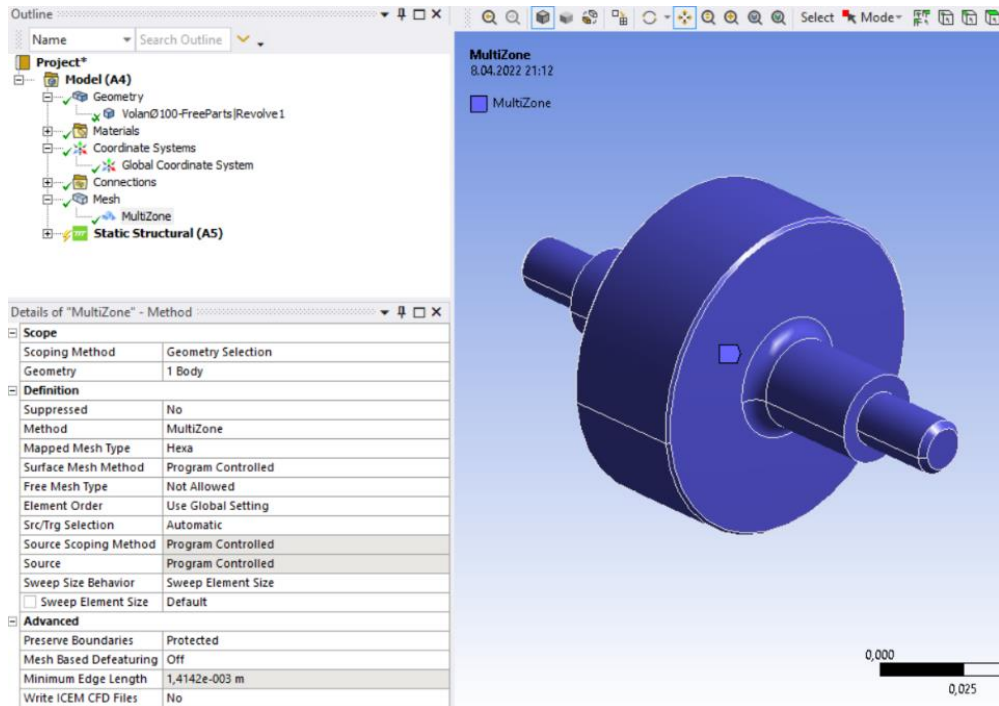
Şekil 5.1: Ansys Joint Body-Ground Uygulaması

Analiz yapılırken analiz çıktılarının daha verimli alınması için mesh seçimi çok önemlidir. Mesh kalitesini, yapılan analizin birçok faktörü etkilemektedir. Mesh süresini etkileyen mesh Nodes ve Element sayısı artıkça analiz süreleri artmaktadır. Mesh kalitesini kontrol etmek için Quality bölümünde Mesh Metric'de bulunan mesh kontrol yolları bulunmaktadır. Literatürde Skewness değerinin 0.9 altında kaldığı durumlarda kalitenin iyi olduğu bilinmektedir. Şekil 5.2'de Ansys programında uygulaması bulunmaktadır.



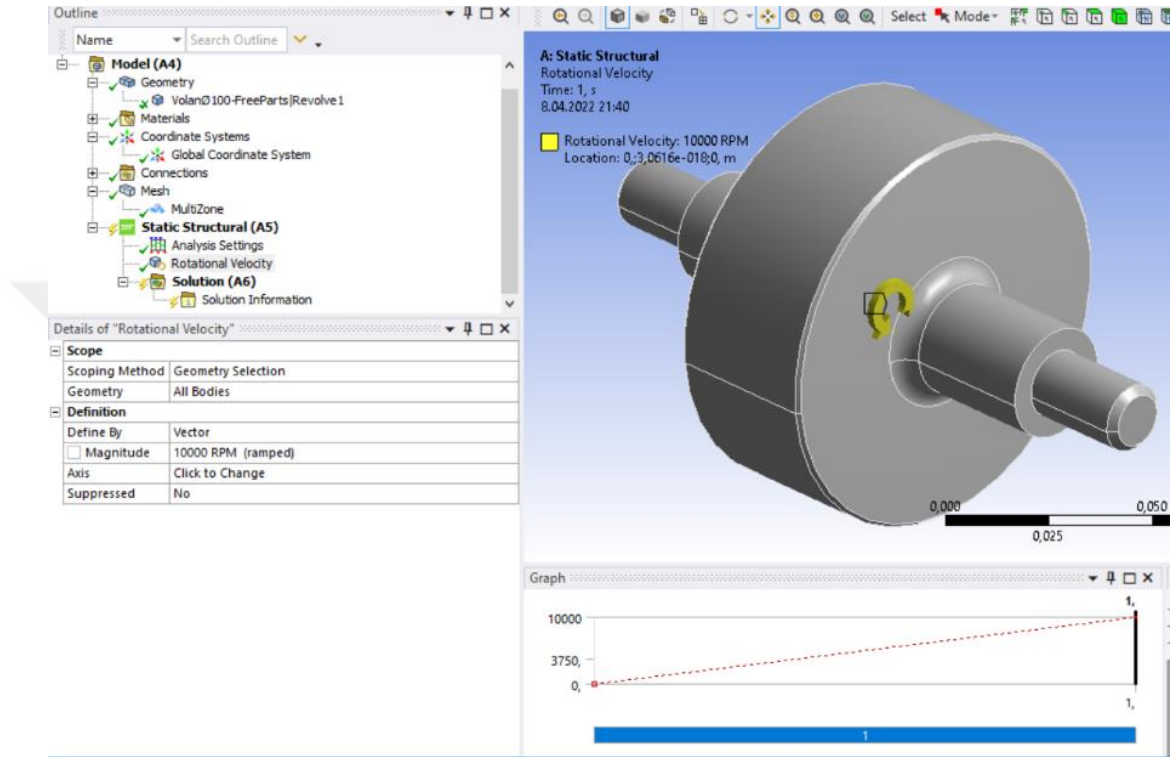
Şekil 5.2: Ansys Skewness Mesh Kalitesi Uygulaması

Bu uygulamada mesh kalitesini skewness değeri 0,76092 gibi bir değere tekabül etmektedir. Mesh kalitesi artırmak için bir metot seçilmiştir. Seçilen metot MultiZone metodudur. MultiZone metodu genellikle silindirik parçalarda uygulanan silindirin her bir elementini eşit bir şekilde oluşturmasına sağlamaktadır. Her bir element eşit bir şekilde ve aynı geometrilerde olduğu için Skewness değerini düşürmektedir. Şekil 5.3'de Ansys uygulaması bulunmaktadır.



Şekil 5.3: Ansys Mesh MultiZone Uygulaması

Volan için birçok aşama tamamlandıktan sonra volan merkezinden döndürme merkezi seçilmektedir. Döndürme momenti için birim sistemi RPM olarak değiştirilmektedir. Ansys Rotantional Velocity en büyük dış çapın yüzeyleri seçilerek merkez elde edilmektedir. Rotantional Velocity girilen RPM değerleri statik olarak 1 sn içinde girilen değere çıkıp göstereceği tepkileri ölçmek istenmektedir. Şekil 5.4'de Ansys programında uygulaması bulunmaktadır.



Şekil 5.4: Ansys Döndürme Momenti Uygulaması

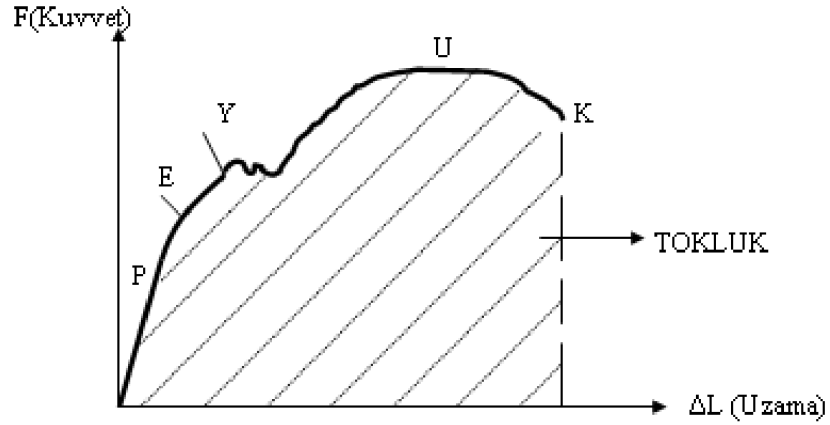
Döndürme momentimi maksimum belirlerken seçilen malzemelerin statik özellikleri dikkate alınmaktadır. Statik özellikleri olarak dikkate alına elastik, kopma gerilme değerleri sınır noktalar olarak alınmaktadır. Gerilmelerin maksimum değerleri belirlenmesi için Çekme Deneyi verileri incelenmiş olup, elastik bölgeye geçtikten sonra çıkabileceği maksimum değer Ansys programı içerisindeki kütüphanede bulunmaktadır.

5.1. Çekme Deneyi

Malzemelerde rijit olmadığı kuvvet altında deforme olup, şekil ve boyut değişiklikleri göstermektedir. Malzeme özelliklerini anlamak için birçok mekanik test yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan en önemli olan yöntem "çekme deneyi" yöntemidir.

Çekme testinin amacı; elastik ve plastik bölgelerde malzemelerin statik yük altındaki tepkilerini hesaplamaktır. Standartlara uygun olarak test için seçilen dairesel veya dikdörtgen test çubukları; Çekme tertibatına bağlanarak aksenal ve değişken kuvvetler uygulanır.

Çekme test cihazı, yatay veya dikey olarak konumlandırılmış numune çubuklarını tutan çenelerin hareketi ile bu iki boyutu ölçen birimlerden oluşur. Çenelerden biri sabit bir hızda hareket ettirilerek, test parçasına değişen miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve karşılık gelen uzama değeri kaydedilir.



Şekil 5.5: Gerilme-Uzama Grafiği

Kaynak: (Url-2, 2021)

Düşük kuvvet seviyesinde uzama miktarı ile kuvvet ile doğru orantılı olmaktadır. Malzeme elastik bölgededir; kuvvet kaldırılınca uzama ilk noktasına geri gelmektedir. Bu uzama **P** noktasına kadar elastik davranmaya devam etmektedir. Elastik davranış **E** “Elastik Limiti” noktasında sona erer. **E** den sonra kalıcı; yani plastik deformasyonlar başlar. Kuvvet azaltıldığında lineer fonksiyona paralel bir yol izler. Ancak kuvvetin sıfır olduğu yerde deformasyon artık sıfır olmaz, belirli bir plastik deformasyon kalır(Url-2, 2021).

Malzeme yüklenmeye devam edilirse **Y** noktasında akar. Akma noktasında kuvvet aynı iken büyük miktarda plastik deformasyon oluşur. Akan malzeme “çalışma sertleşmesi” ne uğrar ve daha mukavemetli hale geçerek daha fazla kuvvet alabilir konuma gelir. Bu malzeme üzerindeki kuvvet daha da arttırılarak **U** noktasına ulaşılır. **U** noktası “maksimum gerilme” noktası olup, burada malzeme kesitinde lokal daralmalar başlar. Buna malzemenin “boyun vermesi” denmektedir. Boyun vermede malzemenin çalışma sertleşmesine uğramasına sebep olmatadır. Malzeme daha fazla gerilmeye maruz kalabilir, ancak boyun bölgesinde kesit alanı daraldığından taşıdığı net kuvvet azalır.

Numune genellikle kontrolsüz bir şekilde **K** noktasına gelir ve orada kopa gerçekleşmektedir.

Kuvvet – uzama eğrisinin altındaki alan, o numuneyi ayrıştırmak için gereken enerjiye eşittir; sertlik denir. Kuvvet-uzama eğrisi daha sonra yeniden ölçeklenir. Uzamalar, malzemenin ilk uzunluğuna bölünür ve "birim – uzamaya" dönüştürülür. Benzer şekilde, "gerilme" hesaplamak için kuvvet numunenin ilk kesit alanına bölünür ve dikey eksen yeniden ölçeklenir. Malzeme kırılana kadar önemli ölçüde deformasyona uğramışsa "sünek", hafif deforme olmuşsa "kırılgan" bir yapıya sahiptir.

5.2. Analiz Çıktıları

Analiz çalışmasını iki aşamada incelenmektedir. İlk olarak malzemenin akmaya başladığı bölge olan Y bölgesi, ikinci olarak U bölgesi olan kopma bölgesi verileri baz alınarak analiz sonuçlarına ulaşılmaktadır.

Bölüm 4.2 malzeme özellikleri verilmektedir ve seçilen malzemeler sırasıyla imalat çeliği, titanyum alaşımı, karbon Fiber(230 GPa)'dir. Bu malzemelerin akma sınırı olan Y bölgesi için akma noktası verileri imalat çeliği için 250 MPa, Titanyum alaşım 930 MPa, karbon fiber 230 GPa'dır. Kopma noktası için U bölgesi olarak verileri imalat çeliği için 460 MPa, Titanyum alaşım 1070 MPa, Karbon Fiber 230 GPa'dır. Karbon fiber malzeme için akma noktası bulunmadığı için akma ve kopma noktası verileri aynı olmaktadır.

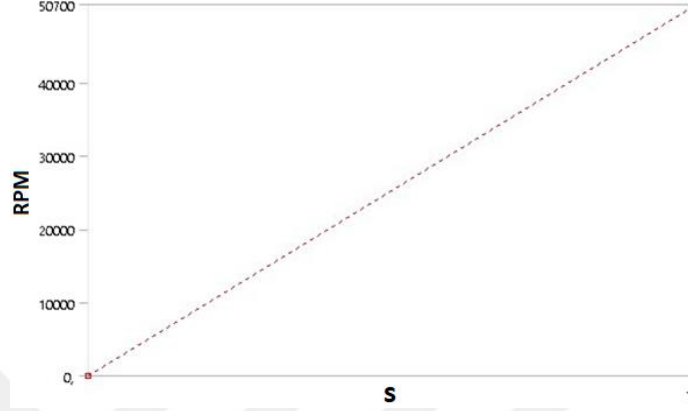
Analizler her bir malzeme için tek tek akma ve kopma noktası gerilmeleri baz alınarak çıkabileceği maksimum devir sayısı(RPM) hesaplanmaktadır. İlk olarak Ø100 çapında malzeme için ve ardından hibrit tasarımda 3mm,5mm,10mm,20mm karbon fiber kaplama analizleri elde edilmektedir. Analizlerde bakılan verilerde maksimum gerilme değerleri ve maksimum gerilmeye maruz bırakılan bölge ekstra görsellerle gösterilmektedir. Gerilmeler incelendiğinde volanın plastik şekil değiştirmeye uğramış olup olmadığı belirlemek için Equivalent (von-Mises) gerilme yöntemi kullanılmaktadır.

5.2.1. Ø100mm İmalat Çeliği Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.1: Statik Yapı Akma Noktası Gerilim (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	50700 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	1 Gövde
Ağırlık	2,9203 kg

Çizelge 5.1 görüldüğü gibi imalat çeliğinin statik yapısı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmaktadır. İmalat çeliğinin ağırlığı 2,903 kg'dır. İmalat çeliği akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.6'da görüleceği gibi 50700 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliğinin akma sınırına karşılık gelmektedir.

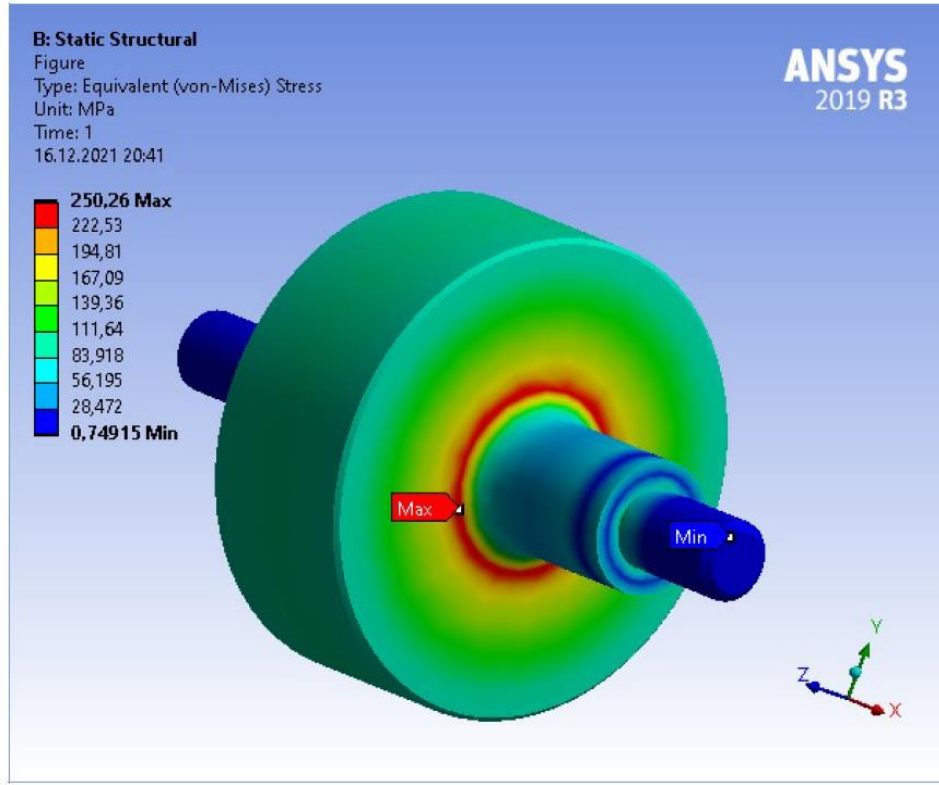


Şekil 5.6: Statik Yapı Akma Noktası (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi 1 saniye için akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 250 MPa, ortalama gerilme 106,51 MPa ve minimum gerilme 0,75 MPa'dır.

Çizelge 5.2: Statik Yapı Akma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1	0,74915	250,26	106,51



Şekil 5.7: Statik Yapı Akma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

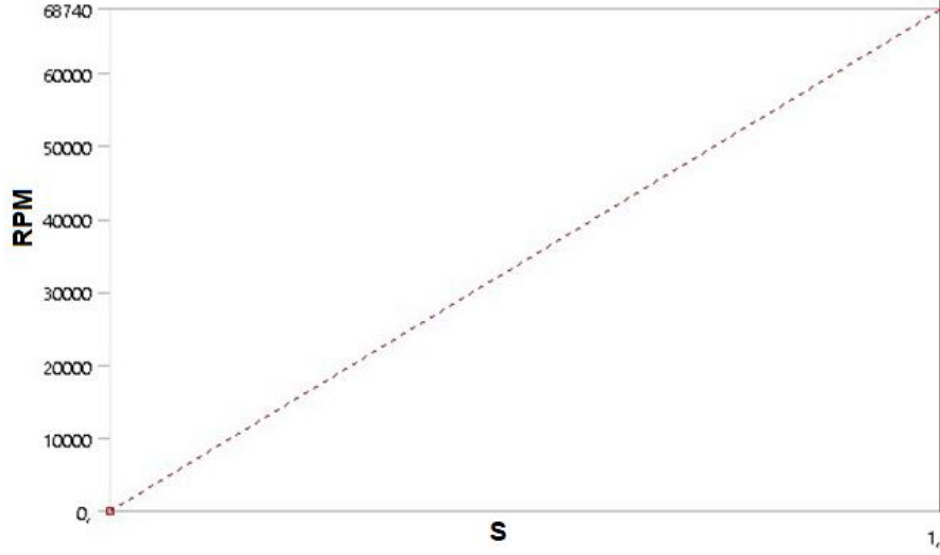
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.7'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.2. Ø100mm İmalat Çeliği Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.3: Statik Yapı Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	68740 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	1 Gövde
Ağırlık	2,903kg

Çizelge 5.3'de görüldüğü gibi imalat çeliğinin statik yapısı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmaktadır. İmalat çeliğinin ağırlığı 2,903 kg'dır. İmalat çeliği kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.8'de görüleceği gibi 68740 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliğinin kopma sınırına karşılık gelmektedir.

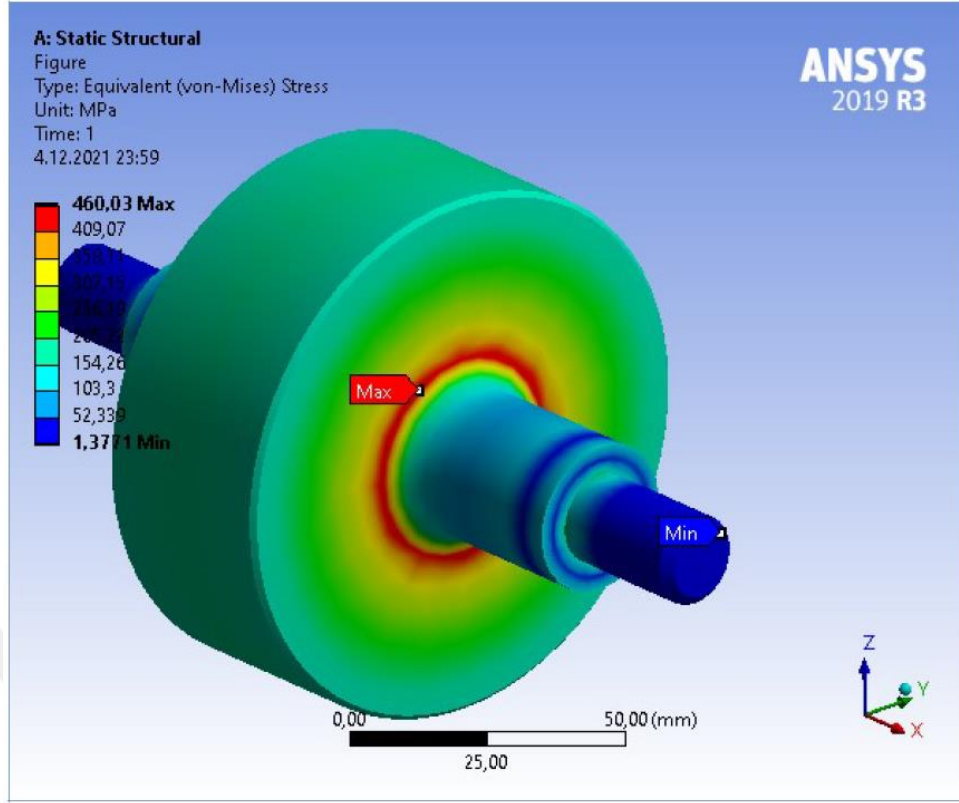


Şekil 5.8: İmalat Çeliği Kopma Noktası (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.4: İmalat Çeliği Kopma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,3771	460,03	195,79

Çizelge 5.4'de görüldüğü gibi 1 saniye için kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 460 MPa, ortalama gerilme 195,79 MPa ve minimum gerilme 1,3771 MPa'dır.



Şekil 5.9: İmalat Çeliği Kopma Noktası (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

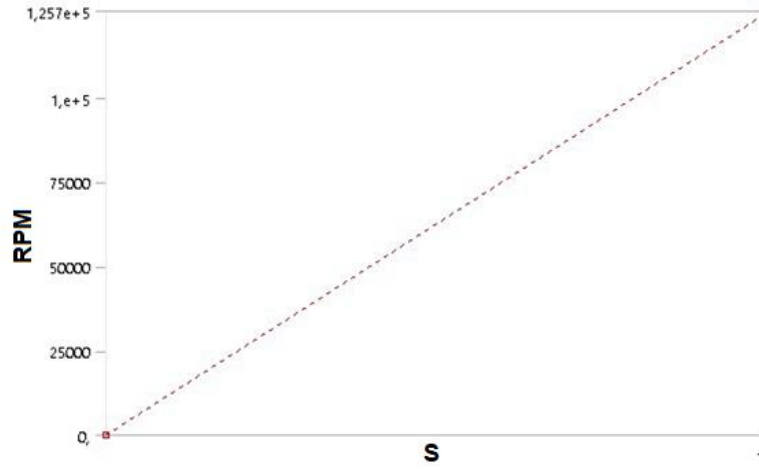
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.9'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.3. Ø100mm Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.5: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	125700 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	1 Gövde
Ağırlık	1,7187 kg

Çizelge 5.5'de görüldüğü gibi titanyum alaşım statik yapısı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmaktadır. İmalat çeliğinin ağırlığı 1,7187 kg'dır. Titanyum alaşım akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.10'da görüleceği gibi 125700 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım akma sınırına karşılık gelmektedir.

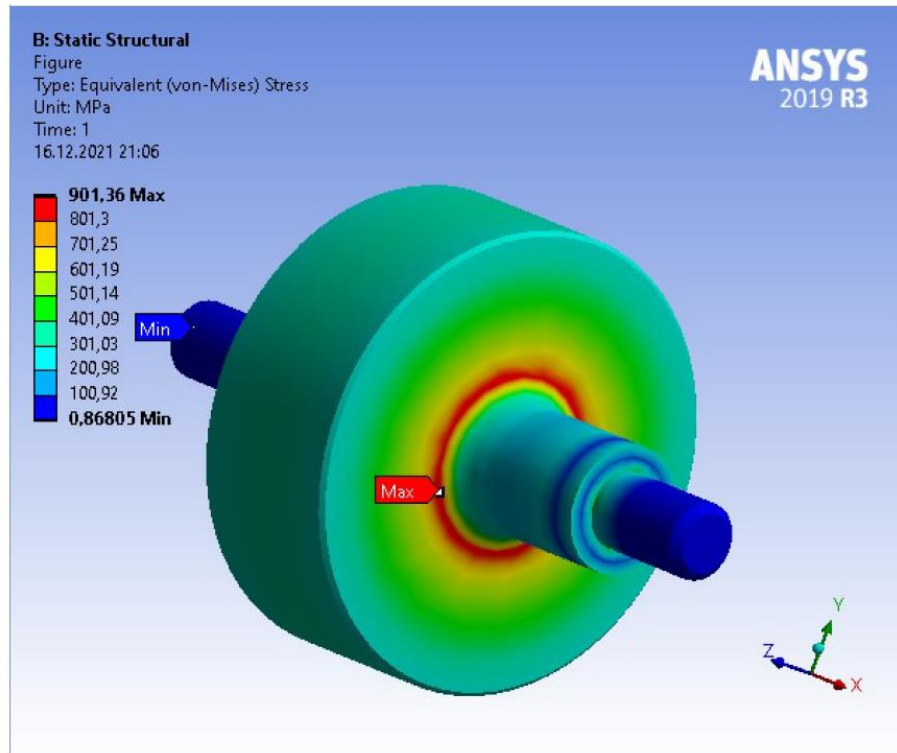


Şekil 5.10: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.6: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	0,86805	901,36	380,1

Çizelge 5.6'da görüldüğü gibi 1 saniye için kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 900 MPa, ortalama gerilme 380,1 MPa ve minimum gerilme 0,87 MPa'dır.



Şekil 5.11: Titanyum Alaşım Akma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görşeli

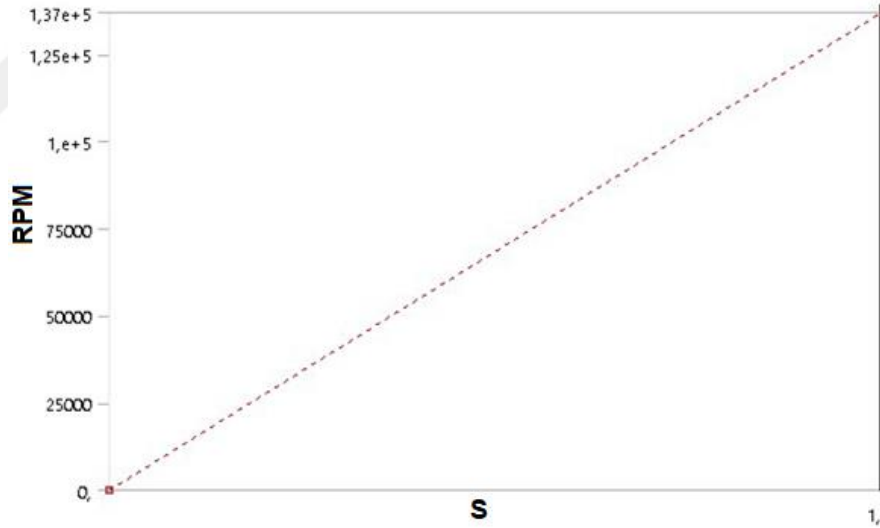
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.11'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.4. Ø100mm Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.7: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	137000 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	1 Gövde
Ağırlık	1,7187 kg

Çizelge 5.7'de görüldüğü gibi titanyum alaşım statik yapısı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmaktadır. Titanyum alaşım ağırlığı 1,7187 kg'dır. Titanyum alaşım kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.12'de görüleceği gibi 137000 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım kopma sınırına karşılık gelmektedir.

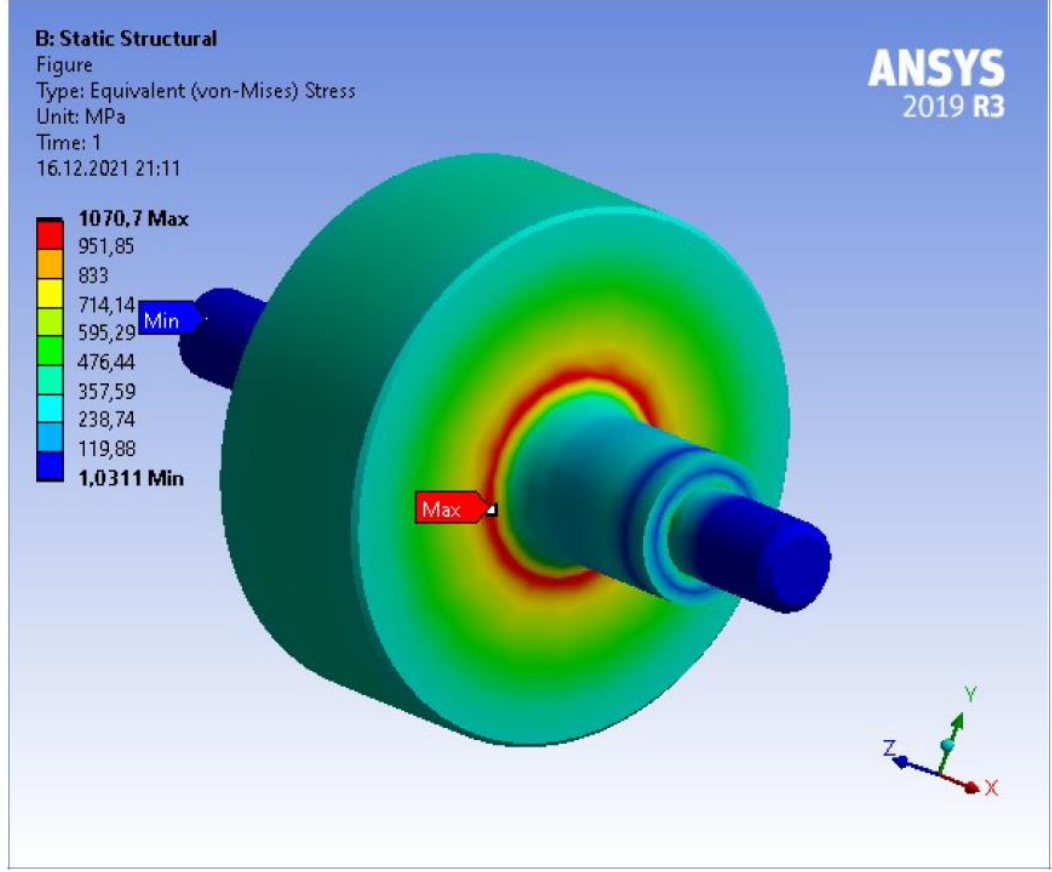


Şekil 5.12: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.8: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,0311	1070,7	451,51

Çizelge 5.8'de görüldüğü gibi 1 saniye için kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 1070 MPa, ortalama gerilme 451,51 MPa ve minimum gerilme 1,0311 MPa'dır.



Şekil 5.13: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görşeli

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.13'de görölmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görölmektedir.

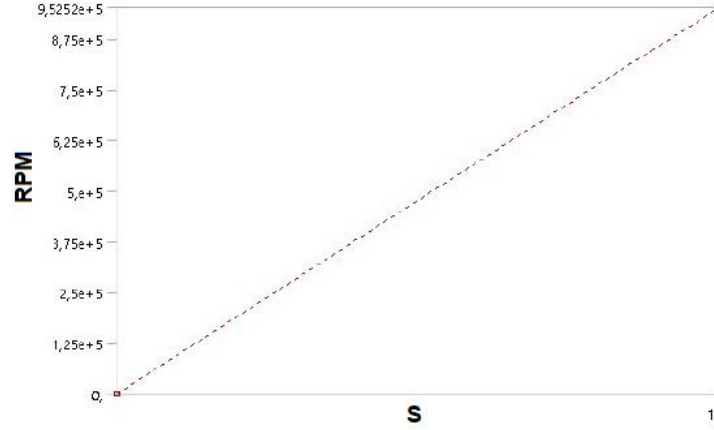
5.2.5. Ø100mm Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.9: Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	952520 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	1 Gövde
Ağırlık	0,66962 kg

Çizelge 5.9'da göröldüğü gibi karbon fiber statik yapısı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmaktadır. Karbon fiber ağırlığı 0,66962 kg'dır. Karbon fiber kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.14'de

görülebileceği gibi 952520 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer karbon fiber kopma sınırına karşılık gelmektedir.

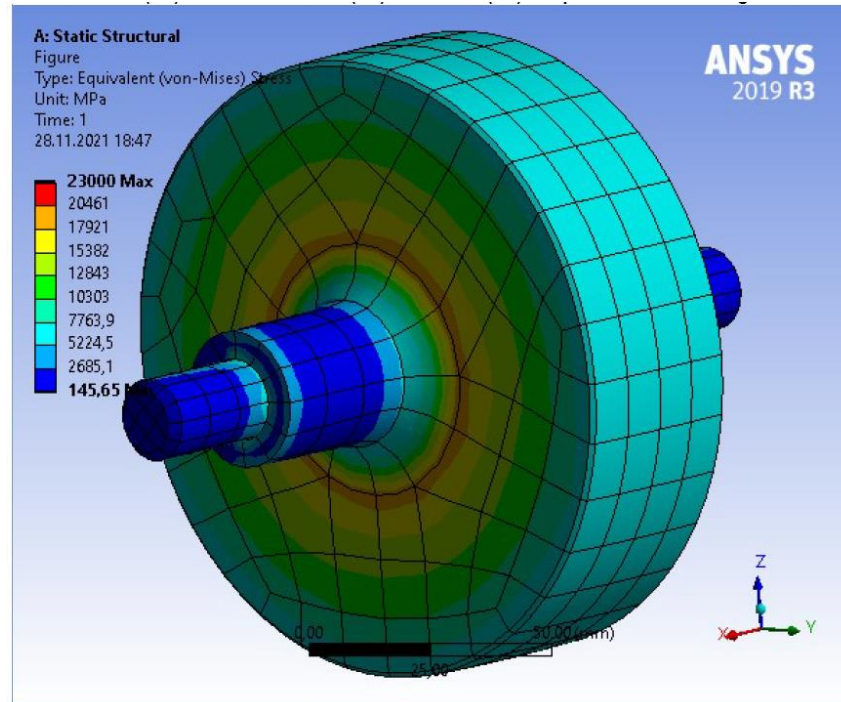


Şekil 5.14: Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.10: Titanyum Alaşım Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	145,65	23000	8675,8

Çizelge 5.10'da görüldüğü gibi 1 saniye için kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 23000 MPa, ortalama gerilme 8675,8 MPa ve minimum gerilme 145,65 MPa'dır.



Şekil 5.15: Karbon Fiber Kopma Noktası Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görşeli

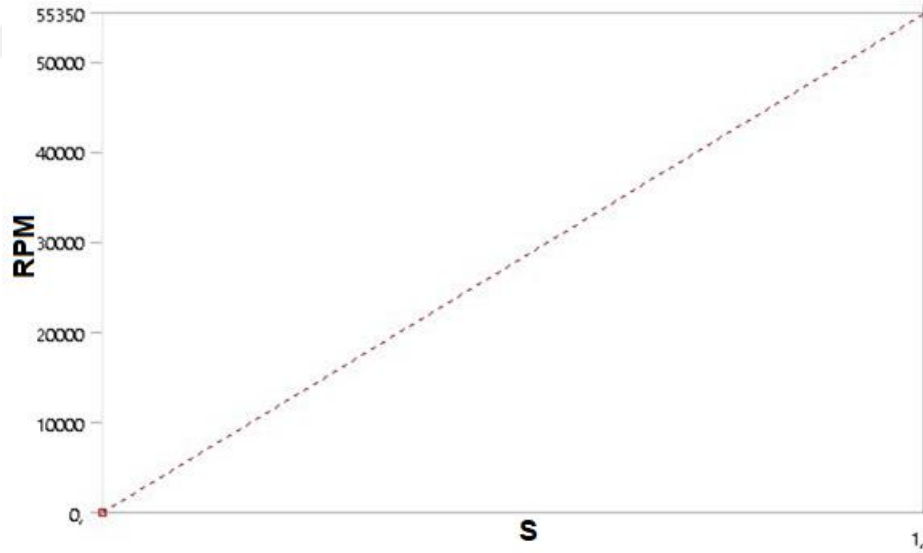
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.15'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.6. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.11: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	55350 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği: 2,6373 kg, karbon fiber:0,065 kg

Çizelge 5.11'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,6373 kg, karbon fiber 0,065 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 2,7023 kg'dır. İmalat çeliği akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.16 'da görüleceği gibi 55350 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği akma sınırına karşılık gelmektedir.

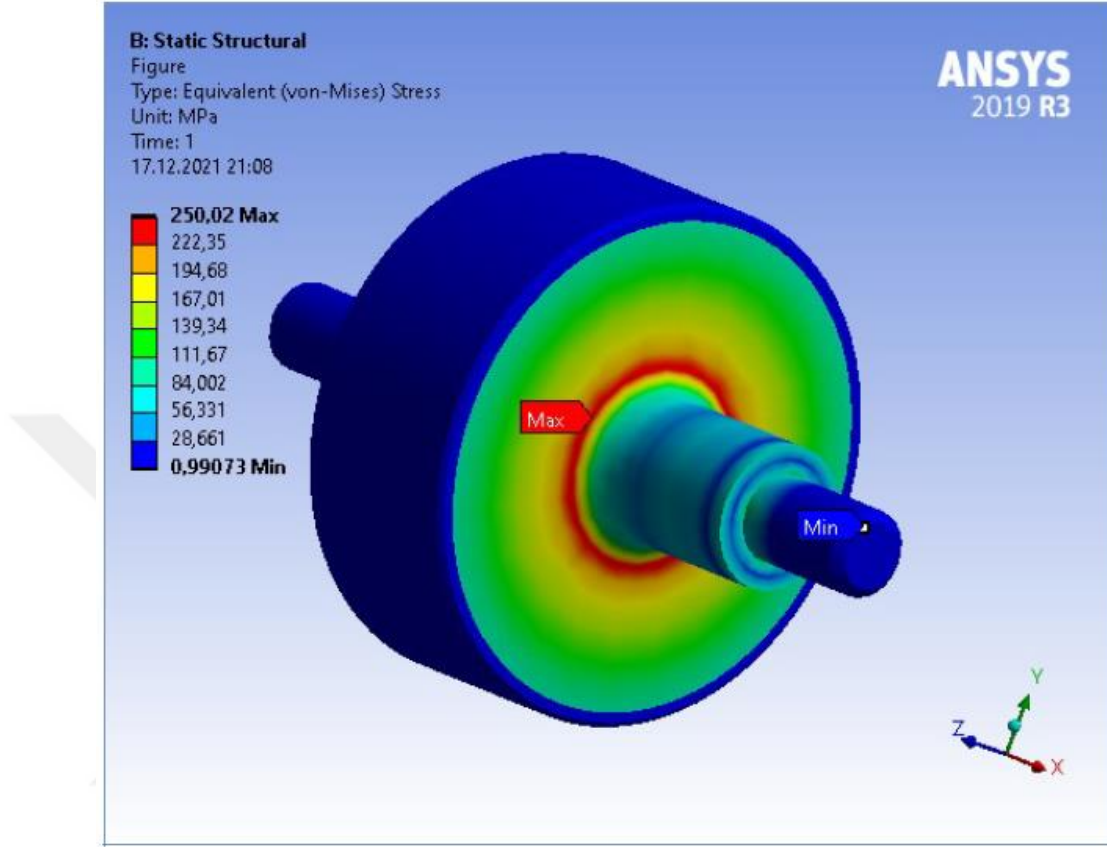


Şekil 5.16: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.12: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	0,99073	250,02	71,424

Çizelge 5.12'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 250 MPa, ortalama gerilme 71,424 MPa ve minimum gerilme 0,99073 MPa'dır.



Şekil 5.17: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

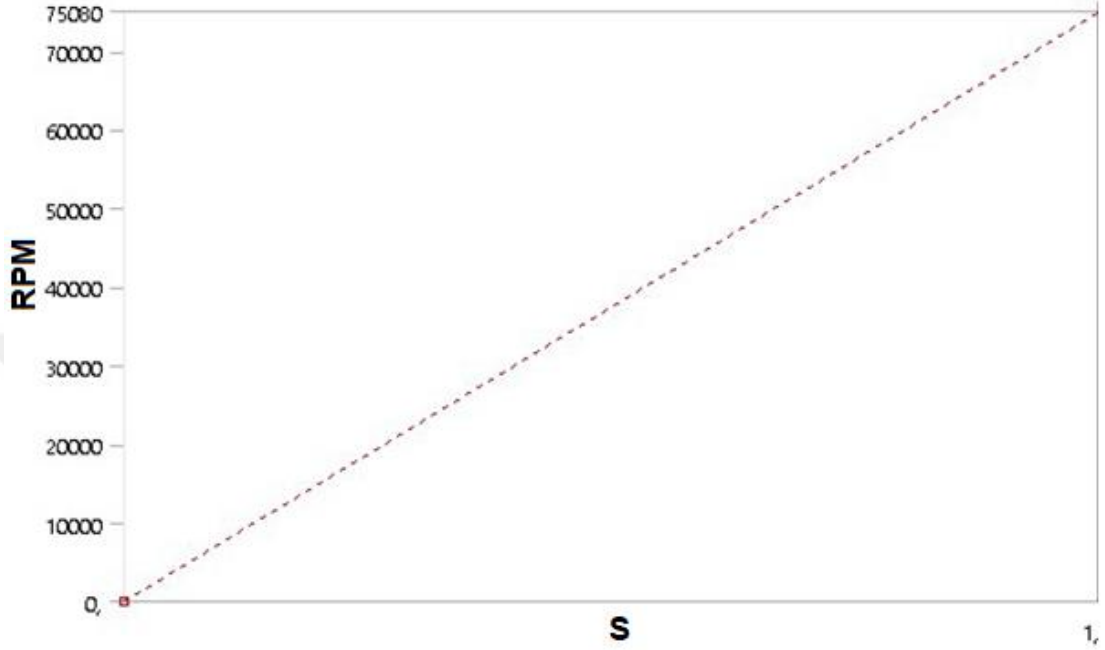
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.17'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.7. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.13: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	75080 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği: 2,6373 kg, Karbon fiber: 0,065 kg

Çizelge 5.13'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,6373 kg, karbon fiber 0,065 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 2,7023 kg'dır. . İmalat çeliği kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.18'de görüleceği gibi 75080 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği kopma sınırına karşılık gelmektedir.



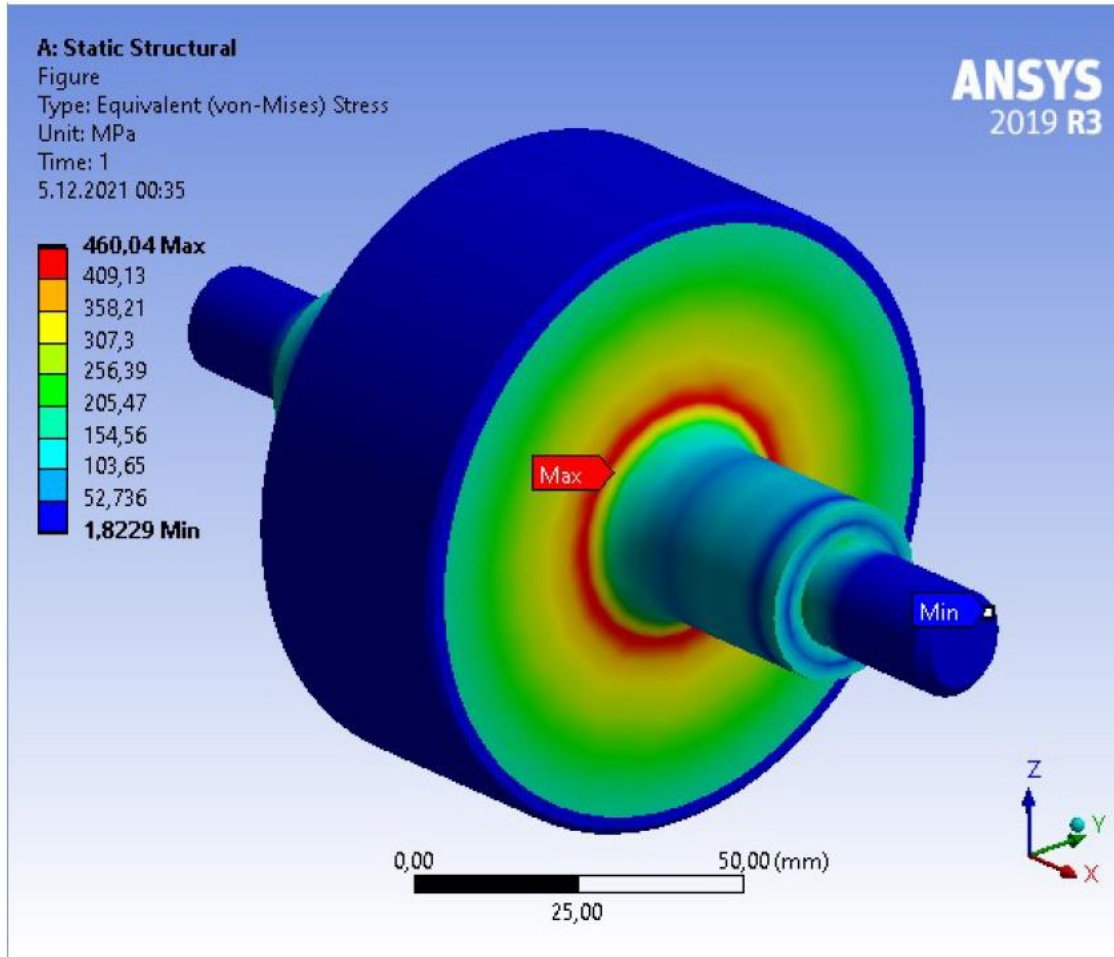
Şekil 5.18: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.14: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,8229	460	131,42

Çizelge 5.14'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 460 MPa, ortalama gerilme 131,42 MPa ve minimum gerilme 1,8229 MPa'dır.

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.19'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.



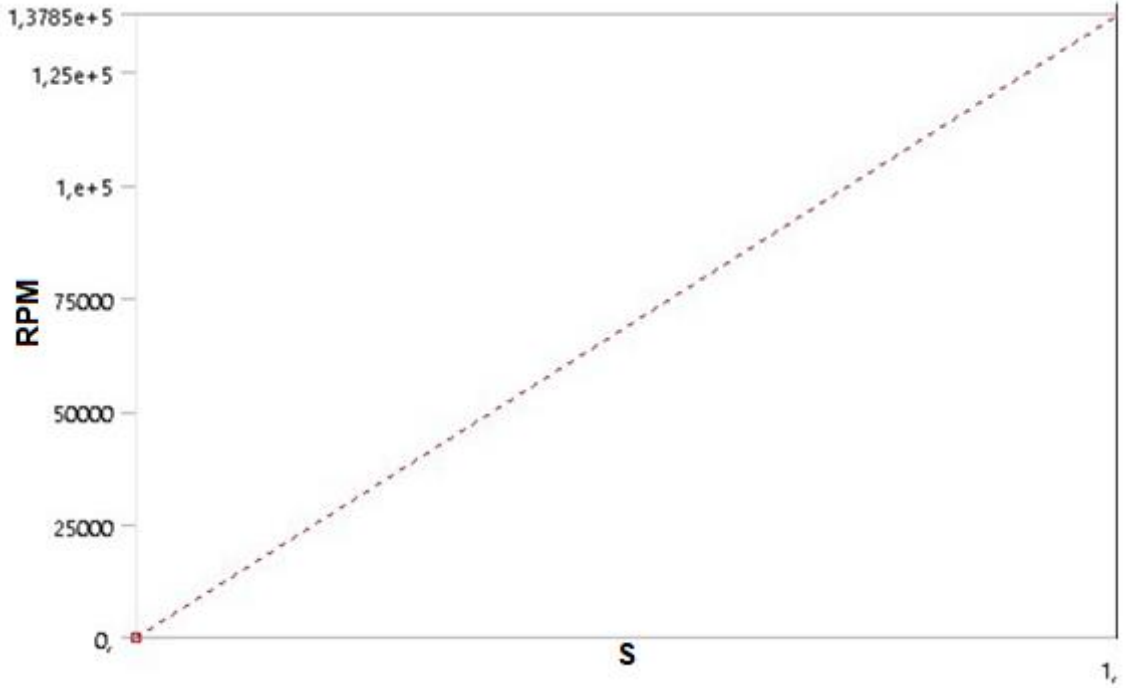
Şekil 5.19: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görself

5.2.8. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.15: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	137850 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:1,5521kg, Karbon fiber:0,06508 kg

Çizelge 5.15'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. Titanyum alaşım 1,5521 kg, karbon fiber 0,06508 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,6173 kg'dır. Titanyum alaşım akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.20'de görüleceği gibi 137850 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım akma sınırına karşılık gelmektedir.



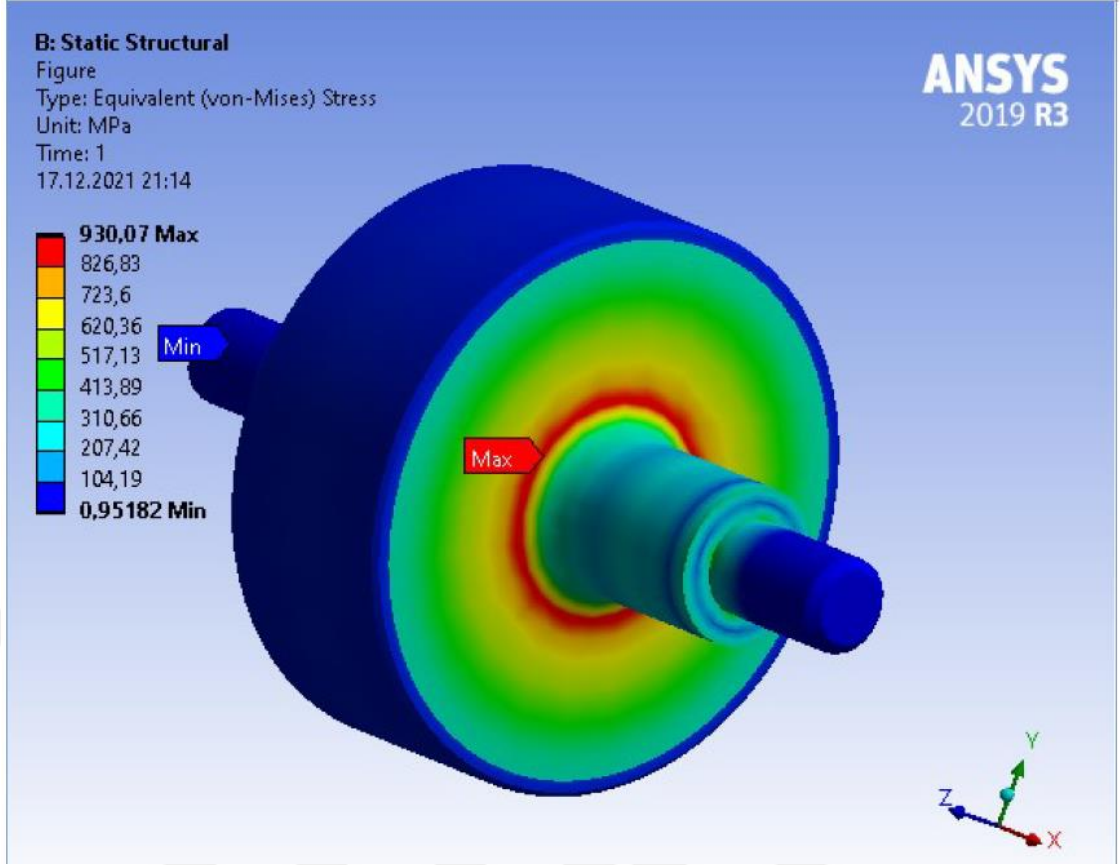
Şekil 5.20: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.16: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	0,95182	930,07	286,18

Çizelge 5.16'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının Titanyum alaşım akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 930,07 MPa, ortalama gerilme 286,18 MPa ve minimum gerilme 0,95182 MPa'dır.

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.21'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.



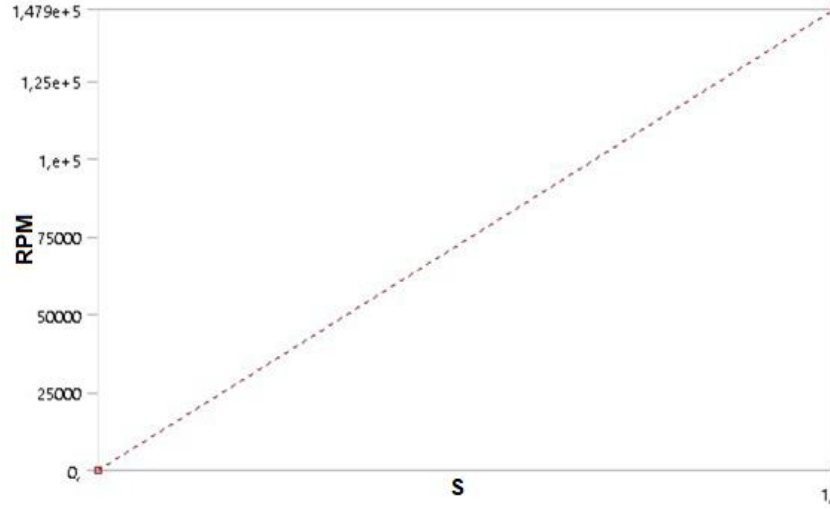
Şekil 5.21: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

5.2.9. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(3mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.17: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	147900 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:1,5521kg, Karbon Fiber:0,06508 kg

Çizelge 5.17’de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. Titanyum alaşım 1,5521 kg, karbon fiber 0,06508 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,6173 kg’dır. Titanyum alaşım kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.22’de görüleceği gibi 147900 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım kopma sınırına karşılık gelmektedir.

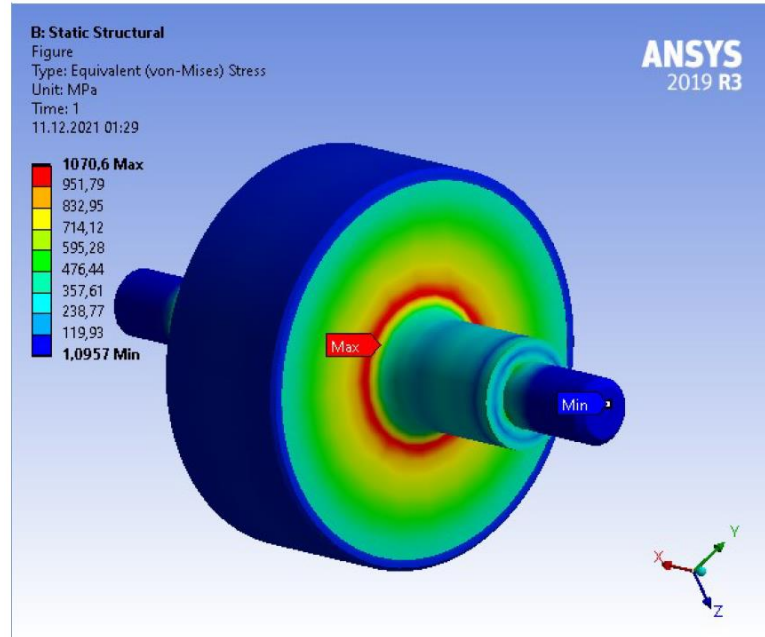


Şekil 5.22: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.18: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,0957	1070,6	329,43

Çizelge 5.18'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının titanyum alaşım kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 1070,6 MPa, ortalama gerilme 329,43 MPa ve minimum gerilme 1,0957 MPa'dır.



Şekil 5.23: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

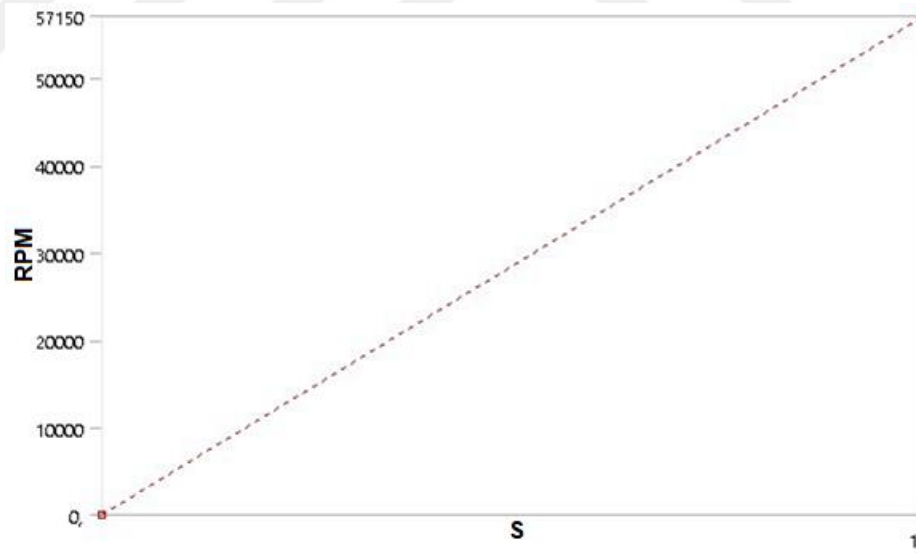
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.23'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.10. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.19: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	57150 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği:2,4568kg, Karbon Fiber:0,1066 kg

Çizelge 5.19'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,4568 kg, karbon fiber 0,1066 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 2,5634 kg'dır. İmalat çeliği akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.24'de görüleceği gibi 57150 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği akma sınırına karşılık gelmektedir.

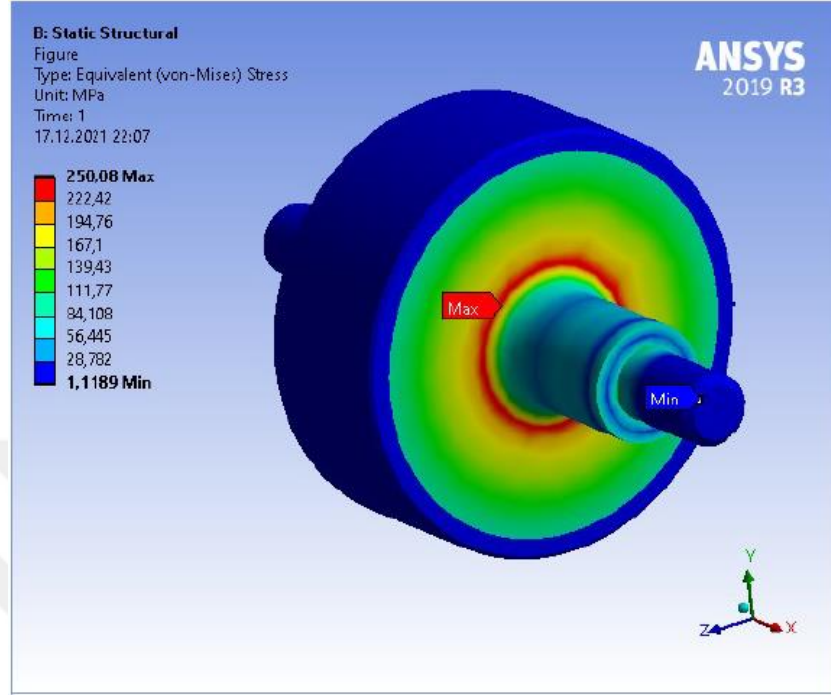


Şekil 5.24: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.20: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,1189	250,08	71,857

Çizelge 5.20'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 250 MPa, ortalama gerilme 71,857 MPa ve minimum gerilme 1,1189 MPa'dır.



Şekil 5.25: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görself

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.10'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

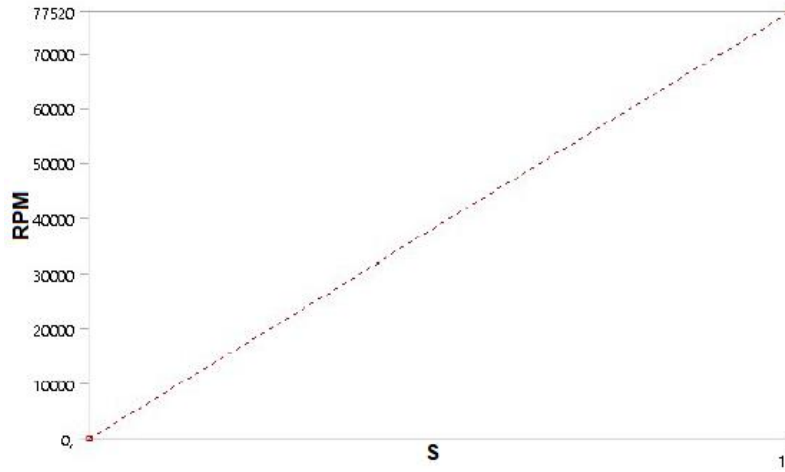
5.2.11. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.21: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	77520 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği:2,4568kg, Karbon Fiber:0,1066 kg

Çizelge 5.21'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,4568 kg, karbon fiber 0,1066 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 2,5634 kg'dır. İmalat çeliği kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz

sonucu dönme hızı Şekil 5.26'de görüleceği gibi 77520 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği kopma sınırına karşılık gelmektedir.

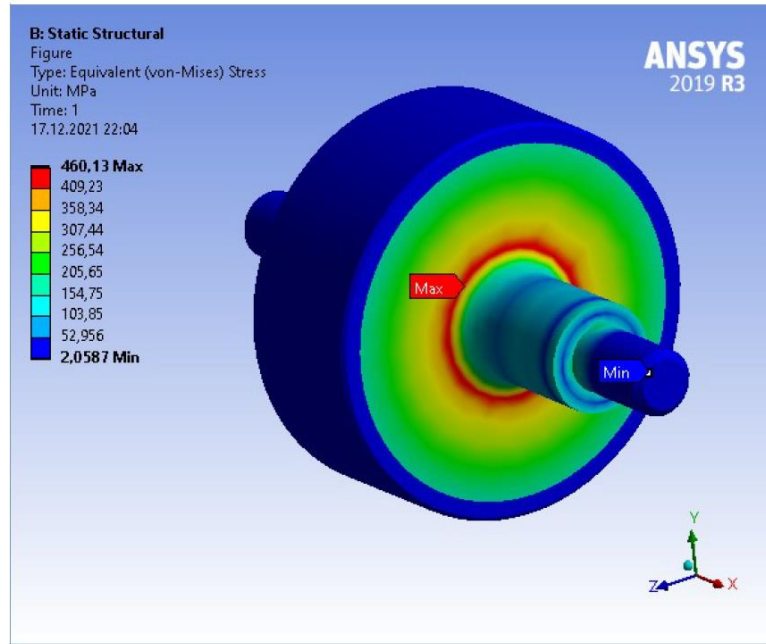


Şekil 5.26: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.22: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	2,0587	460,13	132,21

Çizelge 5.22'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 460,13 MPa, ortalama gerilme 132,21 MPa ve minimum gerilme 2,0587 MPa'dır.



Şekil 5.27: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

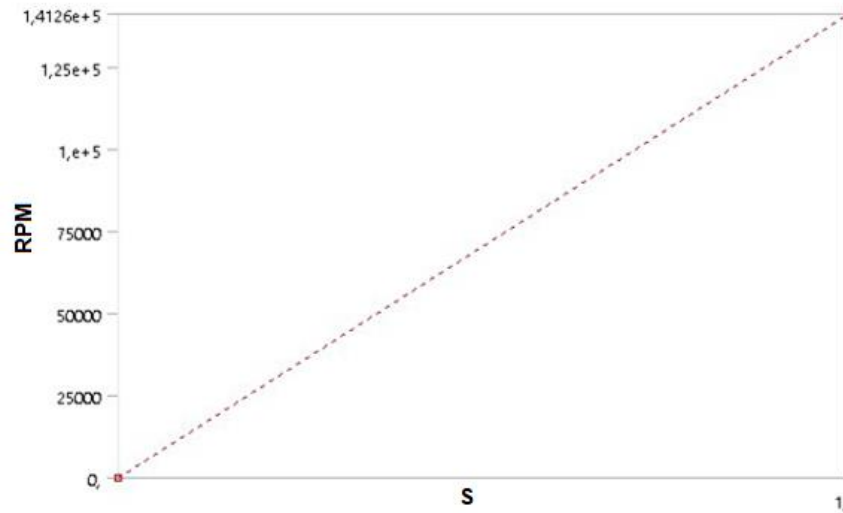
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.27'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.12. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.23: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	141260 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:1,4459 kg Karbon fiber:0,10666 kg

Çizelge 5.23'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. Titanyum alaşım 1,4459 kg, karbon fiber 0,10666 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,5526 kg'dır. Titanyum alaşım akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.28'de görüleceği gibi 141260 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım akma sınırına karşılık gelmektedir.

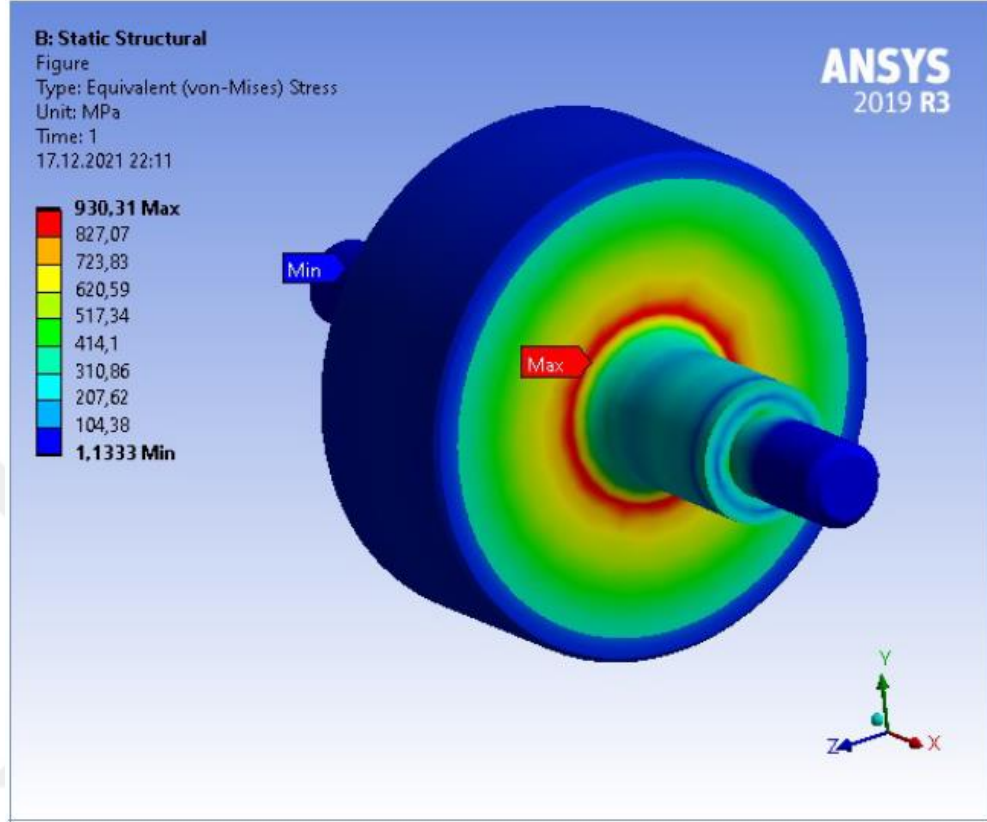


Şekil 5.28: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.24: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,1333	930,31	291,4

Çizelge 5.24'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının Titanyum alaşım akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 930,31 MPa, ortalama gerilme 291,4 MPa ve minimum gerilme 1,1333 MPa'dır.



Şekil 5.29: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

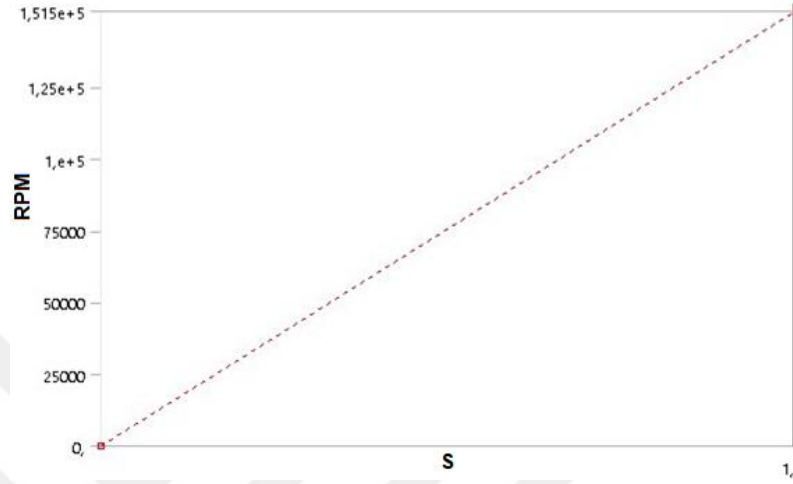
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.29'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.13. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(5mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.25: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	151500 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:1,4459kg, Karbon Fiber:0,10666 kg

Çizelge 5.25'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. Titanyum alaşım 1,4459 kg, karbon fiber 0,10666 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,5526 kg'dır. Titanyum alaşım kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.30'da görüleceği gibi 151500 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım kopma sınırına karşılık gelmektedir.

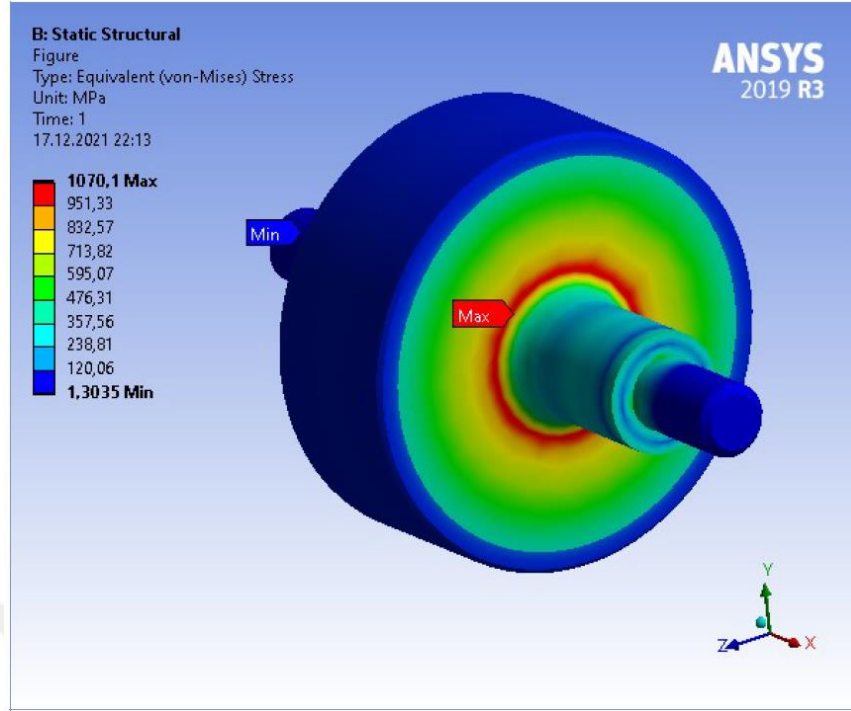


Şekil 5.30: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.26: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,3035	1070,1	335,17

Çizelge 5.26 'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının titanyum alaşım kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 1070,1 MPa, ortalama gerilme 335,17 MPa ve minimum gerilme 1,3035 MPa'dır.



Şekil 5.31: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

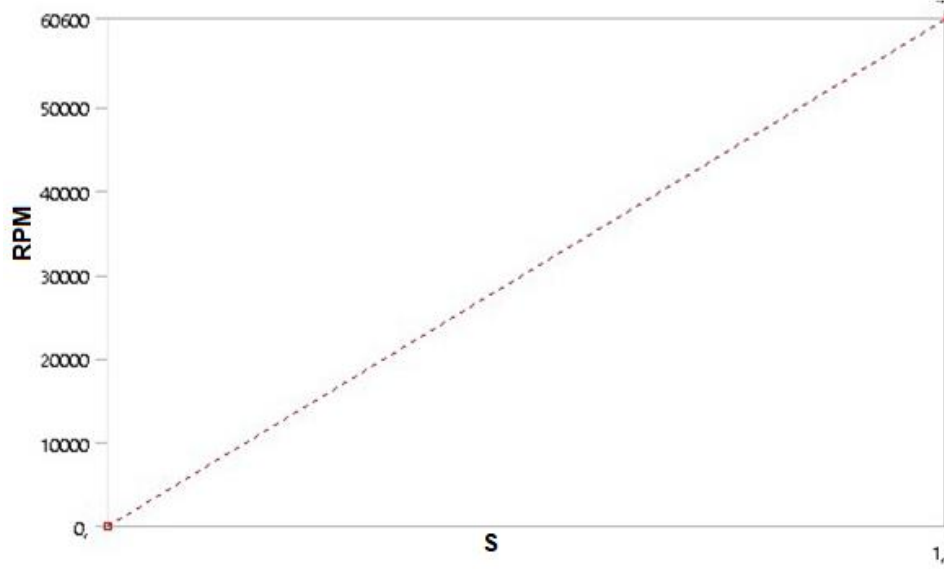
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.31’da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.14. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.27: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	60600 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği:2,0388kg, Karbon Fiber:0,20256 kg

Çizelge 5.27 ‘de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,0388 kg, karbon fiber 0,20256 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 2,2413 kg’dır. İmalat çeliği akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.32’de görüleceği gibi 60600 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği akma sınırına karşılık gelmektedir.

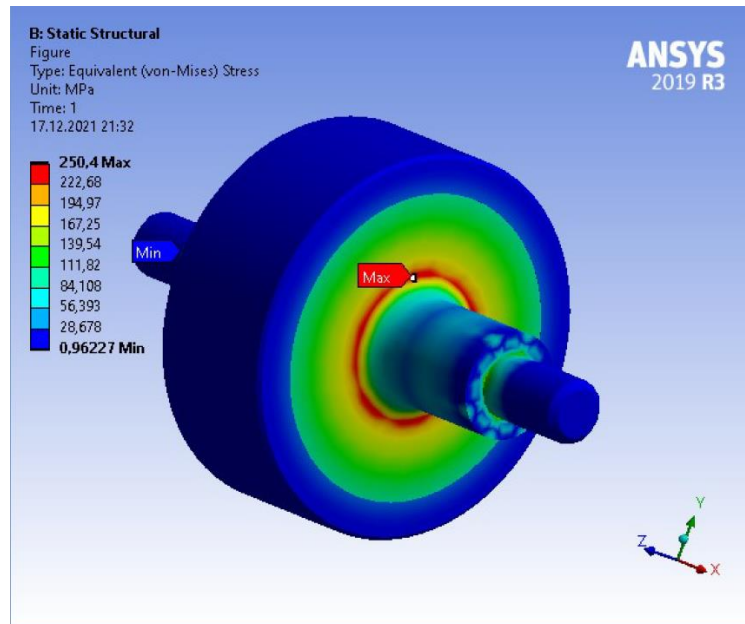


Şekil 5.32: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.28: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	0,96227	250,4	80,433

Çizelge 5.28’de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 250,4 MPa, ortalama gerilme 80,433 MPa ve minimum gerilme 0,96277 MPa’dır.



Şekil 5.33: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görşeli

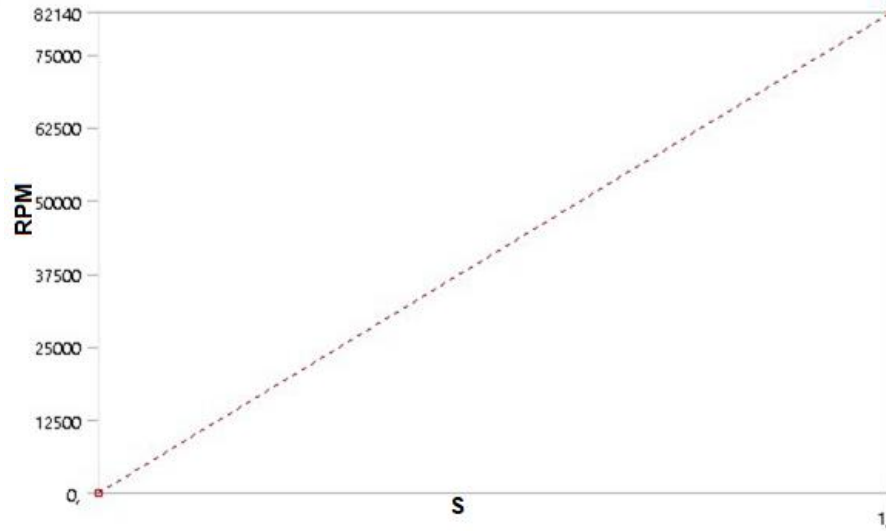
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.33'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.15. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.29: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	82140 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği:2,0388kg, Karbon Fiber:0,20256 kg

Çizelge 5.29 'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,0388 kg, karbon fiber 0,20256 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 2,2413 kg'dır. İmalat çeliği kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.34'de görüleceği gibi 77520 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği kopma sınırına karşılık gelmektedir.

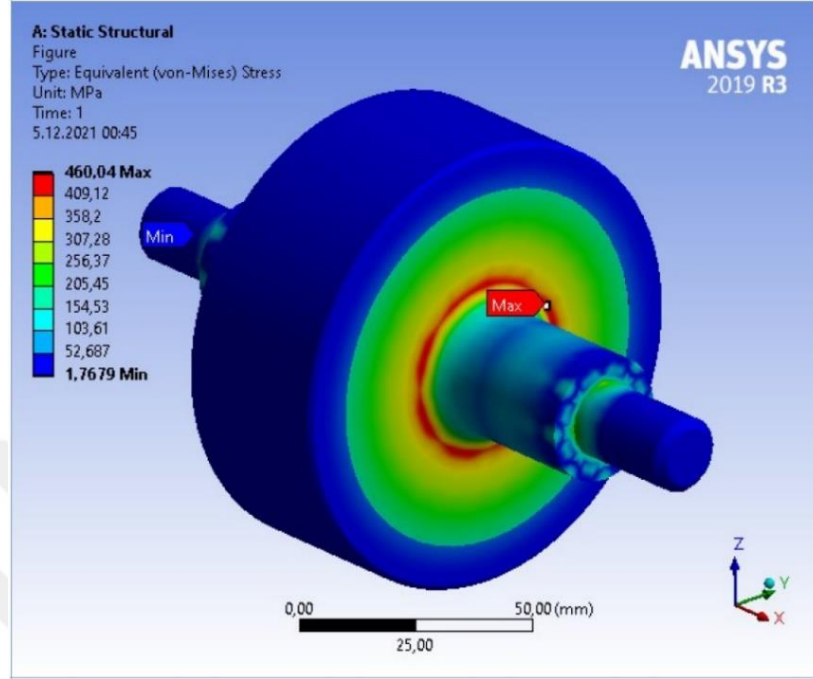


Şekil 5.34: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.30: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,7679	460,04	147,77

Çizelge 5.30 'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 460,04 MPa, ortalama gerilme 147,77 MPa ve minimum gerilme 1,7679 MPa'dır.



Şekil 5.35: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.35'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

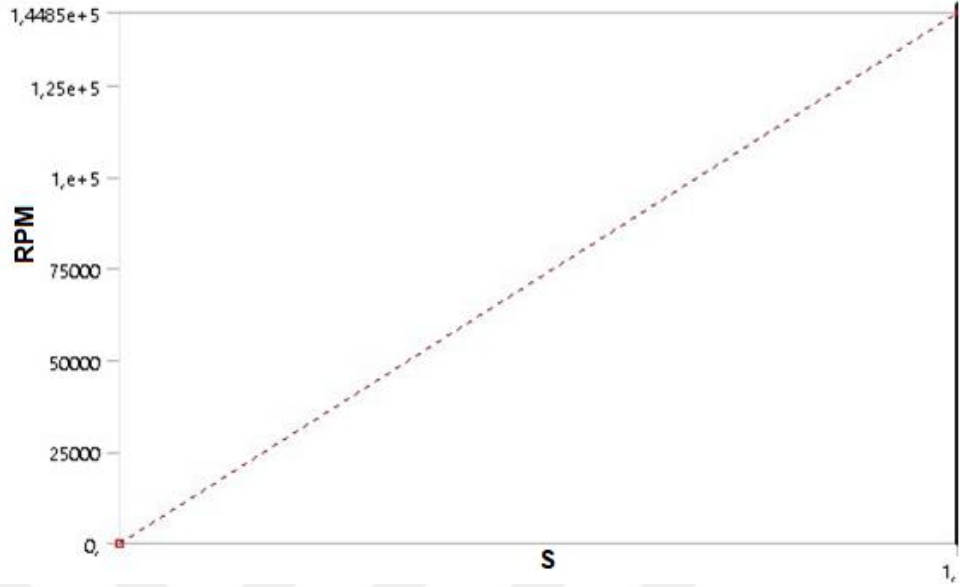
5.2.16. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.31: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	144850 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:1,1999 kg Karbon fiber:0,20256 kg

Çizelge 5.31 'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur Titanyum alaşım 1,1999 kg, karbon fiber 0,20256 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,4025 kg'dır. Titanyum alaşım akma sınırı gerilme değerine bağlı

olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.36'de görüleceği gibi 144850 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım akma sınırına karşılık gelmektedir.

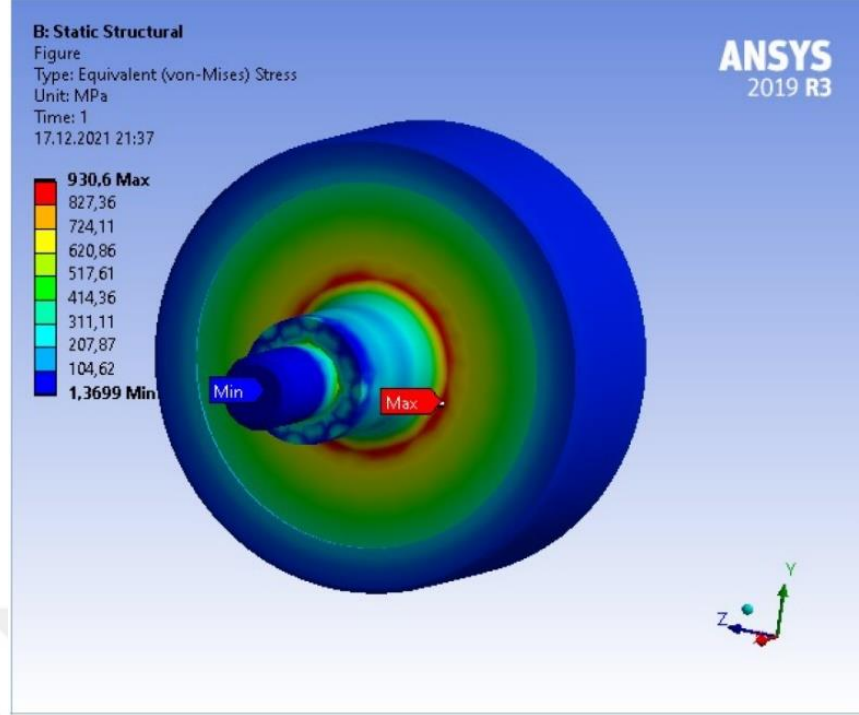


Şekil 5.36: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.32: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,3699	930,6	323,57

Çizelge 5.32'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının Titanyum alaşım akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 930,6 MPa, ortalama gerilme 323,57 MPa ve minimum gerilme 1,3699 MPa'dır.



Şekil 5.37: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

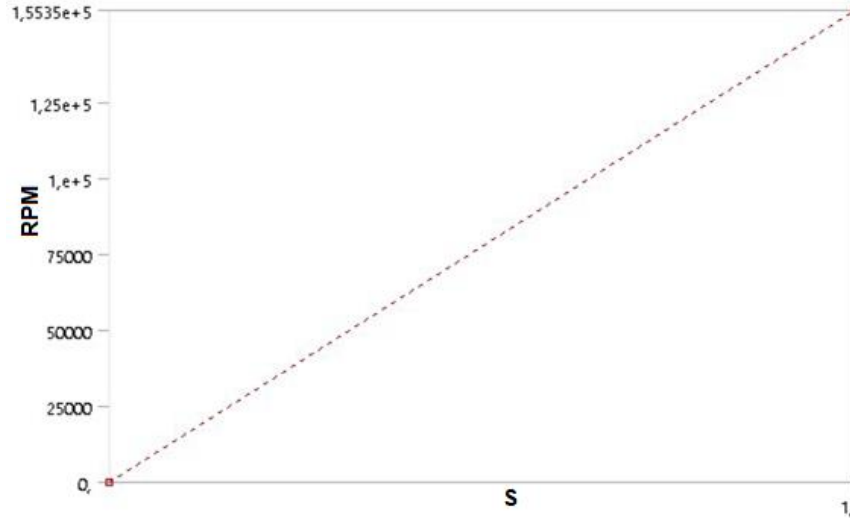
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.37’de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.17. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(10mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.33: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	155350 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:1,1999kg, Karbon Fiber:0,2056 kg

Çizelge 5.33 ‘de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur Titanyum alaşım 1,1999 kg, karbon fiber 0,20256 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,4025 kg’dır. Titanyum alaşım kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.38’de görüleceği gibi 155350 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım kopma sınırına karşılık gelmektedir.

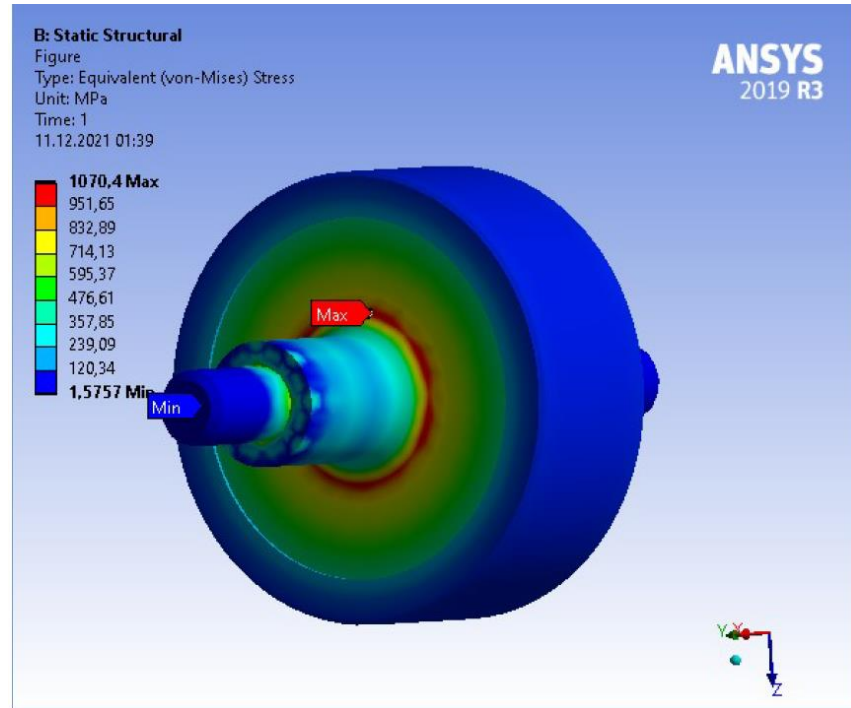


Şekil 5.38: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.34: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,5757	1070,4	372,18

Çizelge 5.34'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının titanyum alaşım kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 1070,4 MPa, ortalama gerilme 372,18 MPa ve minimum gerilme 1,5757 MPa'dır.



Şekil 5.39: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

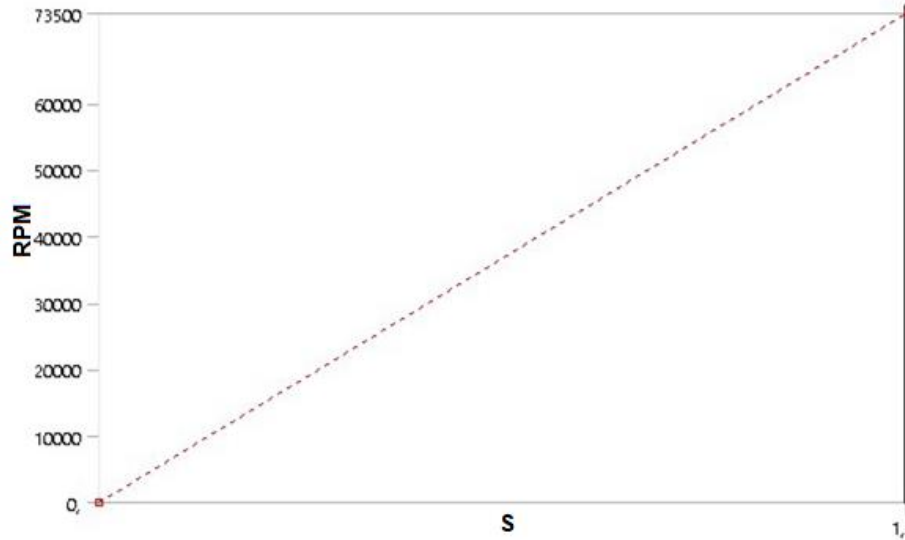
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.39'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.18. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.35: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	73500 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği:1,3306kg, Karbon Fiber:0,36097 kg

Çizelge 5.35 'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 1,3306 kg, karbon fiber 0,36097 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,7115 kg'dır. İmalat çeliği akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.40'de görüleceği gibi 73500 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği akma sınırına karşılık gelmektedir.

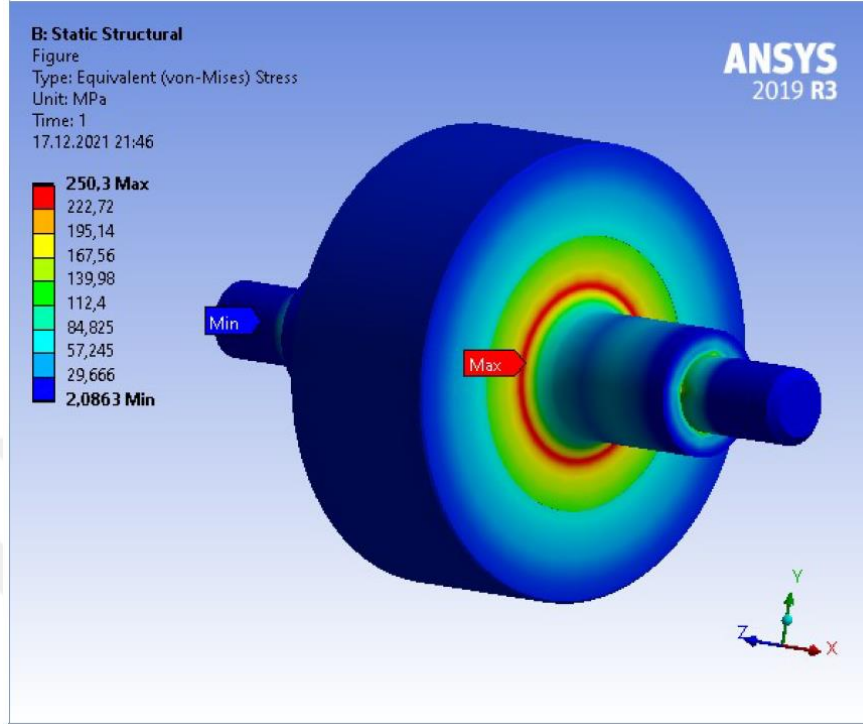


Şekil 5.40: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.36: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	2,0863	250,3	74,118

Çizelge 5.36'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 250,3 MPa, ortalama gerilme 74,118 MPa ve minimum gerilme 2,0863 MPa'dır.



Şekil 5.41: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.41'da görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

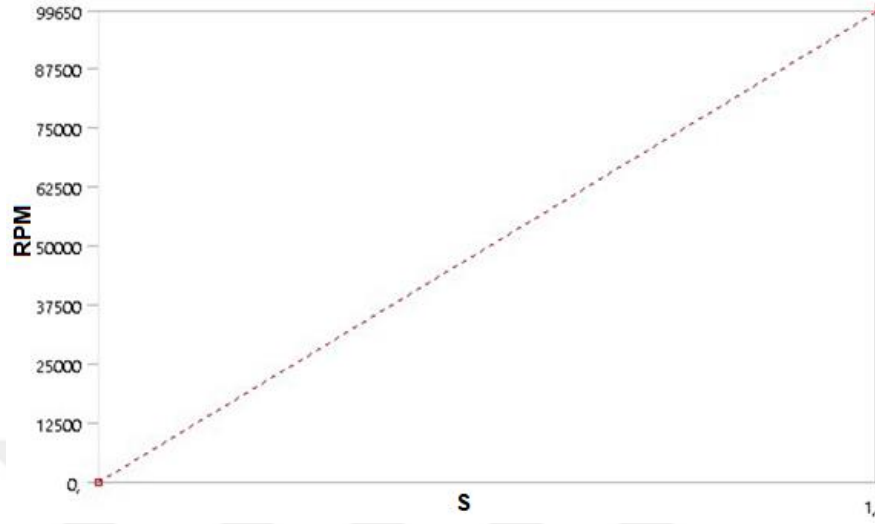
5.2.19. Ø100mm İmalat Çeliği-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.37: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	96650 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	İmalat çeliği:1,3306kg, Karbon Fiber:0,36097 kg

Çizelge 5.37'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur. İmalat çeliğinin 2,0388 kg, karbon fiber 0,20256 kg hibrit yapı ağırlığı

toplamda 1,7115 kg'dır. İmalat çeliği kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.42'de görüleceği gibi 96650 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer imalat çeliği kopma sınırına karşılık gelmektedir.

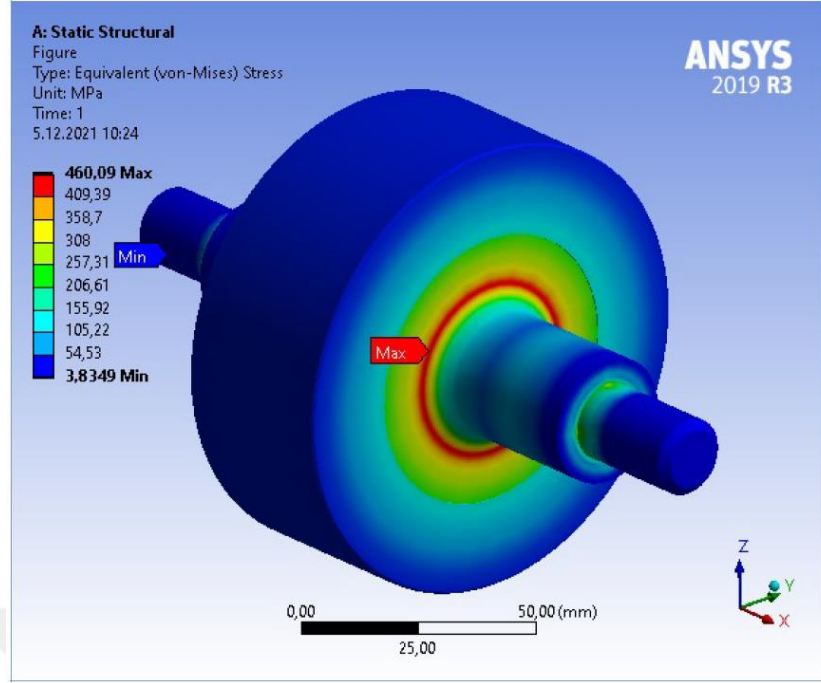


Şekil 5.42: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.38: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	3,8349	460,09	136,24

Çizelge 5.38'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının imalat çeliğinin kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 460,09 MPa, ortalama gerilme 136,24 MPa ve minimum gerilme 3,8349 MPa'dır.



Şekil 5.43: İmalat Çeliği-Karbon Fiber Hibrit Yapı İmalat çeliği Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

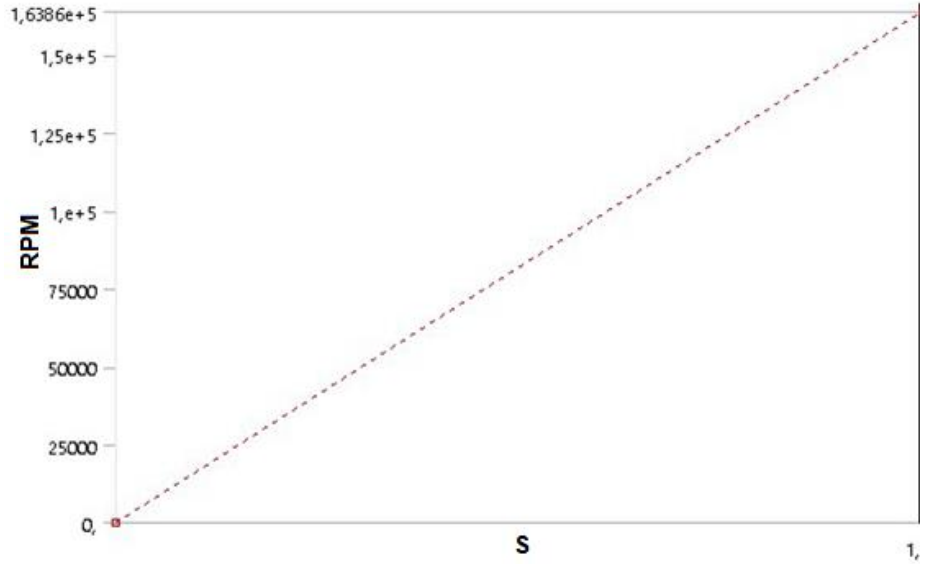
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.43'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir

5.2.20. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Akma Noktası Gerilme Analizi

Çizelge 5.39: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	163860 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:0,79485 kg Karbon fiber:0,36097 kg

Çizelge 5.39'da görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur Titanyum alaşım 0,79485 kg, karbon fiber 0,36097 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,1558 kg'dır. Titanyum alaşım akma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.44'de görüleceği gibi 163860 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım akma sınırına karşılık gelmektedir.

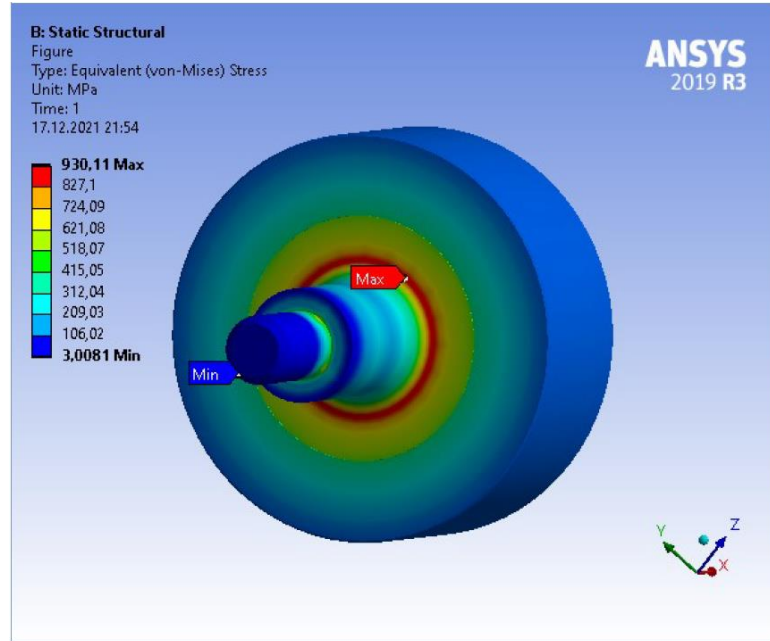


Şekil 5.44: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Dönme Hızı

Çizelge 5.40: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	3,0081	930,11	310,81

Çizelge 5.40'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının Titanyum alaşım akma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 930,11 MPa, ortalama gerilme 310,81 MPa ve minimum gerilme 3,0081 MPa'dır.



Şekil 5.45: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Akma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Görseli

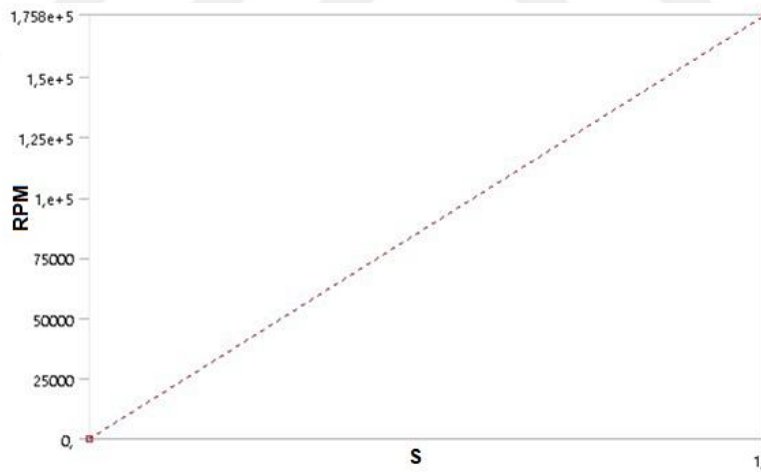
Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.45'de görülmektedir. Volan eşdeğer gerilme akma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görülmektedir.

5.2.21. Ø100mm Titanyum Alaşım-Karbon Fiber(20mm) Hibrit Yapı Kopma Noktası Gerilme Analiz

Çizelge 5.41: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Analiz Verileri

Çevre Sıcaklığı	22 C°
Miktar	175800 RPM
Tanımlı	Vektör
Geometri	2 Gövde
Ağırlık	Titanyum alaşım:0,79485kg, Karbon Fiber:0,36097 kg

Çizelge 5.41'de görüldüğü gibi statik yapı ve oda koşulları sıcaklığı baz alınarak bir analiz koşturulmuştur Titanyum alaşım 0,79485 kg, karbon fiber 0,36097 kg hibrit yapı ağırlığı toplamda 1,1558 kg'dır. Titanyum alaşım kopma sınırı gerilme değerine bağlı olarak analiz sonucu dönme hızı Şekil 5.46'de görüleceği gibi 175800 RPM değerine ulaşmaktadır. Bu değer titanyum alaşım kopma sınırına karşılık gelmektedir.

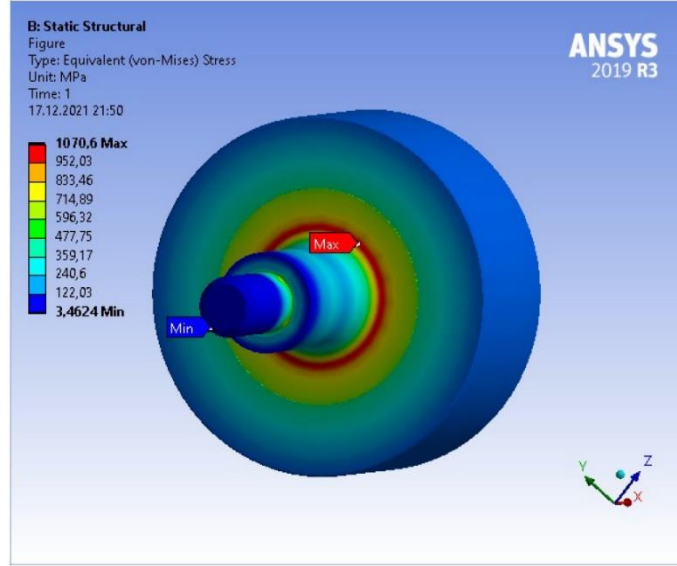


Şekil 5.46: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma

Çizelge 5.42: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme (Ø100mm) Eşdeğer Gerilme Verileri

Zaman[s]	Minimum [MPa]	Maksimum[MPa]	Ortalama[MPa]
1,	1,4624	1070,6	357,76

Çizelge 5.42'de görüldüğü gibi 1 saniye için hibrit yapının titanyum alaşım kopma noktasındaki maksimum gerilme değerine göre elde edilen maksimum gerilme 1070,4 MPa, ortalama gerilme 357,76 MPa ve minimum gerilme 1,4624 MPa'dır.



Şekil 5.47: Titanyum Alaşım-Karbon Fiber Hibrit Yapı Titanyum Alaşım Kopma Noktasına Göre Gerilme ($\varnothing 100\text{mm}$) Eşdeğer Gerilme Görself

Equivalent (von-Mises) gerilme yönteminde incelenen bir figür Şekil 5.47'de görölmektedir. Volan eşdeğer gerilme kopma sınırı verilerinde maksimum ve minimum maruz kaldığı bölgeler gösterilmektedir. Volan radyus başlangıç çizgisinde maksimum eşdeğer gerilme maruz kaldığı görölmektedir

6. SİSTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ

Farklı rotor malzemeleri için yapılan karşılaştırma tablosu Çizelge 6.1'de verilmektedir. İmalat çeliği akma ve kopma gerilmesi açısından değerlendirildiğinde en düşük değere sahiptir. Fakat ağırlık olarak bakıldığında en yüksek ağırlığa sahiptir. Titanyum alaşım ise imalat çeliğine oranla %58,85 ağırlıkta olmasına rağmen akma ve kopma dayanım değerleri hemen hemen eşittir. Karbon fibere baktığımızda ise rotor ağırlığı en düşük olan materyaldir. Karbon fiber, imalat çeliğine oranla %23 ağırlıkta, titanyum alaşıma göre ise %39 ağırlıktadır. Ancak dayanımı en yüksek olan malzeme karbon fiberdir. Materyalin fiziki yapısı itibariyle akma noktası bulunmamaktadır. Karbon fiberin bu özelliği, maliyetinin yüksek olmasına rağmen dayanımını üst noktalara çıkarmaktadır. Bu nedenle mobilite uygulamalarında oldukça verimlidir. Çünkü ağırlık kazancından ötürü oldukça tercih edilebilir.

Hibrit yapıda ise kullanılan malzemenin yüzdesine bağlı olarak, toplam sistem ağırlığı değişkenlik tablosu Çizelge 6.1'de gösterilmektedir. Karbon fiber kalınlığı arttıkça rotor toplam ağırlığı azalmaktadır. Bunun yanında karbon kalınlığı arttıkça volanın dayanabileceği maksimum devir artmakta, fakat maliyeti de belli oranda artmaktadır. İmalat çeliği – karbon fiber hibrit yapı ve titanyum alaşım – karbon fiber hibrit yapı için durumlar benzerdir.

Çizelge 6.1: VEDS rotor malzemesine göre devir sayısı ve toplam rotor ağırlık değerleri

Malzeme	Akma Gerilmesi (RPM)	Kopma Gerilmesi (RPM)	Toplam rotor ağırlığı (kg)
İmalat çeliği	50700	68740	2,9203
Titanyum alaşım	125700	137000	1,7187
Karbon Fiber(230 GPA)	-	952500	0,66962
Hibrit Yapı			
İmalat çeliği-3mm Karbon fiber	55350	75080	2,7023 (İ:%97,6 K:%2,4)
İmalat çeliği-5mm Karbon fiber	57150	77520	2,5634 (İ:%95,8 K:%4,2)
İmalat çeliği-10mm Karbon fiber	60600	82140	2,2413 (İ:%91 K:%9)
İmalat çeliği-20mm Karbon fiber	73500	99650	1,7115 (İ:%77,7 K:%22,3)
Titanyum alaşım- 3mm Karbon fiber	137580	147900	1,6173 (T:%96 K:%4)
Titanyum alaşım- 5mm Karbon fiber	141260	151500	1,5526 (T:%93,1 K:%6,9)
Titanyum alaşım- 10mm Karbon fiber	144850	155350	1,4025 (T:%85,5 K:%14,5)
Titanyum alaşım- 20mm Karbon fiber	163860	175800	1,1558 (T:%68,8 K:%31,2)

K: Karbon oranı

Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere VEDS rotor malzemelerine göre akma ve kopma gerilmeleri, RPM ve km/h cinsinden verilmektedir. Farklı rotor materyallerinin dayanımları devir sayılarına ve çevresel hızlarına göre verilmektedir. Yapı itibarıyla karbon fiber materyal en yüksek devir sayısına ulaşabildiği için, çevresel hızı yaklaşık olarak 18000 km/h olmaktadır. En düşük devir sayılı imalat çeliği rotorun çevresel hızı 1300 km/h hıza eşdeğerdir. Hibrit yapıda ise karbon fiber kalınlığına bağlı olarak çevresel hız değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 6.2: Farklı rotor malzemelerinin devir sayısı ve çevresel hız değerleri

Malzeme	Akma Gerilmesi (RPM)	Akma Gerilmesi (km/h)	Kopma Gerilmesi (RPM)	Kopma Gerilmesi (km/h)
İmalat çeliği	50700	955,67	68740	1295,72
Titanyum alaşım	125700	2369,4	137000	2582,4
Karbon Fiber(230 GPA)	-	-	952500	17954,2
Hibrit Yapı				
İmalat çeliği-3mm Karbon fiber	55350	1043,32	75080	1415,22
İmalat çeliği-5mm Karbon fiber	57150	1077,25	77520	1461,22
İmalat çeliği-10mm Karbon fiber	60600	1142,28	82140	1548,3
İmalat çeliği-20mm Karbon fiber	73500	1385,44	99650	1878,36
Titanyum alaşım- 3mm Karbon fiber	137580	2593,32	147900	2787,85
Titanyum alaşım- 5mm Karbon fiber	141260	2662,7	151500	2855,7
Titanyum alaşım- 10mm Karbon fiber	144850	2730,36	155350	2928,28
Titanyum alaşım- 20mm Karbon fiber	163860	3088,7	175800	3313,75

Çizelge 6.3'de VEDS rotor malzemelerine göre depolanan kinetik enerji değerleri Wh cinsinden verilmektedir. Denklem 4.1'de verildiği şekilde, dönen kütlelerin üzerinde depolanan kinetik enerji, hızın karesi ile orantılı iken, ağırlık ile lineer olarak değişmektedir. İmalat çeliğinde kopma noktası gerilmesine bağlı eşdeğer rotor geometrisi için depolanan enerji 26 Wh 'dir. Titanyum alaşım için depolanan enerji değeri imalat çeliğinin yaklaşık iki katına eşdeğerdir. Karbon fiber rotor için ise kopma gerilmesine ulaşan devir sayısı oldukça yüksek olduğundan, depolanan enerji çok ciddi bir biçimde artmaktadır. Depolanan enerji açısından bakıldığında, imalat çeliği ile karbon fiber arasında yaklaşık olarak 45 kat, titanyum alaşım göre ise 19 kat fark görülmektedir. Devir sayısı açısından bakıldığında, karbon fiber rotor, imalat çeliğine göre 14 kat, titanyum alaşımına göre 7 kat daha hızlı dönmektedir. Hibrit yapıda depolanan enerji, imalat çeliği – karbon fiber rotor kalınlığına bağlı olarak 29 Wh ile 32 Wh arasında, titanyum alaşım – karbon fiber kalınlığına bağlı olarak ise 67-68 Wh arasında değişmektedir.

Çizelge 6.3: VEDS volan malzemesine göre depolanan enerjiler

Malzeme	Akma Gerilmesi (RPM)	Depolanan Enerji (Wh)	Kopma Gerilmesi (RPM)	Depolanan Enerji (Wh)
İmalat çeliği	50700	14,29	68740	26,27
Titanyum alaşım	125700	51,7	137000	61,42
Karbon Fiber(230 GPA)	-	-	952500	1156,63
Hibrit Yapı				
İmalat çeliği-3mm Karbon fiber	55350	15,76	75080	29
İmalat çeliği-5mm Karbon fiber	57150	15,94	77520	26,33
İmalat çeliği-10mm Karbon fiber	60600	15,67	82140	28,8
İmalat çeliği-20mm Karbon fiber	73500	17,6	99650	32,32
Titanyum alaşım- 3mm Karbon fiber	137580	58,28	147900	67,35
Titanyum alaşım- 5mm Karbon fiber	141260	59	151500	67,85
Titanyum alaşım- 10mm Karbon fiber	144850	56	155350	64,44
Titanyum alaşım- 20mm Karbon fiber	163860	59,1	175800	68

Çizelge 6.4'de görüldüğü gibi farklı rotor malzemeleri için materyal maliyetleri ve imalat maliyeti, enerji depolama kapasitesi, toplam sistem ağırlığı ve maksimum devir sayısı değişkenlik göstermektedir. Farklı rotorların imalat maliyeti ve malzeme maliyeti, 1 ile 5 arasında Likert ölçeği ile derecelendirilmektedir. Bu ölçeklendirme sisteminde 1 en düşük maliyeti 5 ise en yüksek maliyeti belirtmektedir. İmalat çeliği malzeme ve işleme kolaylığı açısından 1, titanyum alaşım 2, imalat çeliği – karbon fiber hibrit yapısı 3, titanyum alaşım – karbon fiber hibrit yapısı 4 ve karbon fiber 5 olarak tespit edilmektedir.

Çizelge 6.4: Farklı rotor malzemelerine göre sistemlerin karşılaştırılması

VEDS cinsi	Maksimum Devir (RPM)	İmalat Maliyeti	Malzeme Maliyeti	Enerji Depolama Kapasitesi (Wh)	Toplam rotor ağırlığı (kg)
İmalat çeliği	68740	1	1	26,27	2,9203
Titanyum alaşım	137000	2	2	61,42	1,7187
İmalat çeliği-20mm Karbon fiber	99650	3	3	32,32	1,7115
Titanyum alaşım- 20mm Karbon fiber	175800	4	4	68	1,1558
Karbon Fiber(230 GPA)	952500	5	5	1156,63	0,66962

Kopma noktası gerilmelerine eşdeğer maksimum devir sayılarına bakılarak karşılaştırma tablosu hazırlanmaktadır. Likert ölçeğine bağlı olarak bir sıralama yapılmaktadır. İmalat çeliği ile yapılan rotor en ağır rotor olması yanı sıra devir sayısı, imalat maliyeti, malzeme maliyeti, enerji depolama kapasitesi en az olan malzemedir. Karbon fiber ise tam tersi olarak görülmektedir. En büyük karbon fiber kalınlığa sahip olan hibrit yapılar değerlendirmeye alınmaktadır. Aynı zamanda karbon kalınlığı en büyük olan rotor hibrit yapıdaki en hafif rotor olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, bir araca bütünleşmiş edilebilecek boyutlarda bir VEDS tasarımı, farklı özelliklerdeki malzemeler için gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda araç içi boyutları dikkate alınarak simülasyonlarda 100mm çapında bir rotor üzerinde çalışılmaktadır. Seçilen rotor çapı mobiliteyi etkilemeyecek bir biçimde düşünülmektedir. Analizlerde farklı mekanik özelliklere sahip materyaller kullanılmaktadır. Bu sayede farklı malzemeler için dayanım, maksimum enerji yoğunluğu, maliyet, üretim kolaylığı gibi kriterler karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmektedir. Özgün değer olarak rotor yapısının tek bir materyal olarak değil, farklı iki malzeme kullanılarak hibrit bir yapı şeklinde kullanılması için analizler gerçekleştirilmektedir. Bu sayede dayanımı yüksek olan malzemelerin mukavemeti avantajı ile maliyeti uygun olan materyallerin üretim kolaylığı ve maliyet avantajları aynı sistem içerisinde kullanılabilir. Simülasyonlarda, endüstride sıkça kullanılan malzemelerden imalat çeliği ve titanyum alaşım maliyet avantajı nedeniyle tercih edilmişken, karbon fiber malzeme ise yüksek çekme dayanım değerleri nedeniyle tercih edilmektedir. Metal üzerine karbon fiber katman entegrasyonu ise hibrit yapıyı temsil etmektedir.

Hibrit yapılar üretim zorluğu ve maliyet bakımından karşılaştırıldığında, karbon fiber malzeme kalınlığı arttıkça üretim zorluğu ve maliyet de artmaktadır. Ancak dayanım değerleri artmaktadır. Bu durum, artan devir sayısı ile orantılı şekilde depolanan enerjinin de artması anlamına gelmektedir. Düşük devir sayısının (50000 rpm'ye kadar) yeterli olduğu uygulamalarda imalat çeliği tek başına yeterli iken, daha yüksek devir sayılarına çıkmak istendiğinde titanyum alaşım veya imalat çeliği-karbon fiber hibrit yapısı tercih edilebilir. Çizelge 6.1'e bakıldığında, titanyum-karbon fiber hibrit yapısının kullanımının tercih edilmesi imalat teknikleri göz önüne alındığında çok tercih edilebilir olarak görülmemektedir. Bunun nedeni, titanyum alaşımın tek başına kullanılması durumunda 125000 devir/dakika değerlerine ulaşabilmesidir. Daha yüksek devirler için hibrit yapının üretim ve maliyet zorluklarına katlanmaktansa, doğrudan karbon fiber yapının tercih edilebilir olmasıdır.

Kullanım alanları geniş olan VEDS'ler, uzay, askeri teknolojiler, şebeke bazlı çalışmalar, elektrikli araçlar vb. alanlarda görülmektedir. Sonuç olarak karbon fiber hafiflik açısından ve dayanabileceği devir sayısı bakımında en çok tercih edilebilecek malzemeli rotor olarak gözlenmektedir. Fakat imalat maliyeti ve malzeme maliyeti bakımdan yüksek olması, tercih edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Karbon fiberli rotor genel olarak, uzay,

askeri teknolojiler gibi alanlarda maliyetin ikinci planda tutulmasından dolayı tercih etmek pek mümkündür. İmalat çelikli rotor devir sayısı ve ağırlık olarak avantajlı bulunmamaktadır. Fakat üretim ve malzeme maliyeti olarak uygun olduğundan şebek bazlı alanlarda kullanılması mümkün görülmektedir.

Tez kapsamında incelenen EA ve HEA araçlar için düşünülen ve özgün değer olarak sunulan hibrit yapı, devir sayısına ve ağırlığa olumlu açıdan katkı sağladığı görülmektedir. Maliyeti göz önünde tutulan, performans istenilen otomobillerde titanyum alaşım – karbon fiber kullanılması uygun görülmektedir. Yakıt tasarrufu düşünülen, performans ikinci planda tutulan EA ve HEA araçlarda ise imalat çeliği – karbon fiber kullanılması uygun görülmektedir.



KAYNAKLAR

Akhil A., Huff G., Currier B., Kaun B. C., Rastler M., Chen S. B., Cotter A. L., Bradshaw D. T. & Gauntlett W. D.(2013). DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, SANDIA Report, SANDIA2013- 5131, 1-150.

Baker E & Sundararagavan S.(2012). Evaluating energy storage technologies for wind power integration. Solar Energy; 86:2707–2717.

Brockbank, C. & Greenwood, C.(2010). Fuel Economy Benefits of a Flywheel & CVT Based Mechanical Hybrid for City Bus and Commercial Vehicle Applications, SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2(2), 115-122.

Brockbank C.(2009). Application of a Variable Drive to Supercharger & Turbo Compounder Applications, SAE Technical Paper, 2009-01-1465.

Buchroithner A., Brandstatter A. & Recheis M.(2017). Mobile Flywheel Energy Storage Systems: Determining Rolling Element Bearing Loads to Expand Possibilities, IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, 12(3), 83-94.

Elzinga D., Heinen S., Munuera L. & Remme U.(2014). Energy Storage Technology Roadmap, International Energy Agency, IEA-2014, 1-46.

Erhan K., Aktas A. & Özdemir E.(2014). Analysis of a Hybrid Energy Storage System Composed from Battery and Ultra-capacitor, 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, Uşak, Türkiye, 18-20 Haziran

Erhan K., Varol G. & Özdemir E.(2018). Regenerative Braking System Improvement for Electric Vehicle, 3rd EJONS Conference, Mardin, Türkiye, 21-22 Nisan 2018.

Erhan K., Ayaz M. & Özdemir E.(2013). Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Güç Kalitesi Üzerine Etkileri, Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Esfahanian M., Safaei A., Nehzati H., Esfahanian V. & Tehrani M. M.(2014). Matlab Based Modeling, Simulation and Design Package for Electric, Hydraulic and Flywheel Hybrid Powertrains of a City Bus, International Journal of Automotive Technology, 15(6), 1001-1013.

- Foley.**(2013). I. Williams Hybrid Power—Flywheel Energy Storage, Presentation, . Available online: http://www.ukintpress-conferences.com/uploads/SPKPMW13R/d1_s1_p2_ian_foley.pdf (accessed on 25 June 2015).
- Genta G.**(1960). Kinetic Energy Storage, 1, Butterworths, Cambridge, Great Britain.
- Genta G.**(2014). Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems. Kinetic Energy Storage, United Kingdom: Butterworth-Heinemann;
- H. C. Stephen.**(2013).Design methodologies for advanced flywheel energy storage, PhD Dissertation, Dept. Mech. Eng., The Univ. of Texas at Austin, USA.
- John Wiley** (2021). Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects, India
- Koray Erhan.**(2018). Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Volan ve Ultrakapasitör teknolojilerinin kullanımının incelenmesi ve Volan Enerji Depolama Ünitesinin prototip üretimi, Kocaeli, Türkiye.
- Kulkarni S, Santoso S.**(2009). Impact of pulse loads on electric ship power system: with and without flywheel energy storage systems. In 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, IEEE; 2009, 568–573.
- Magnus Hedlund *, Johan Lundin, Juan de Santiago, Johan Abrahamsson ve Hans Bernhoff** (2015), Flywheel Energy Storage for Automotive Applications, Sweden.
- MAZMAN M.**(2009). Enerji Depolama Teknolojileri (Energy Storage Technologies), Kimya Mühendisliği Dergisi (Journal of Chamber of Chemical Engineers), Sayı 173, sayfa 10-13.
- Mazman M.**(2011). “Yenilenebilir Enerji İçin Elektrik Enerjisi Depolama Teknolojileri” (Energy Storage Technologies for Renewable Energy), Enerji Dünyası, Sayı:85, sayfa;66-72.
- N. Bernard, H. B. Ahmed, B. Multon, and C. Kerzreho**, “Flywheel energy storage systems in hybrid and distributed electricity generation,” in Proc. PCIM, May 2003, pp. 121–130.

Ostadi A. & Kazerani M.(2015). A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery–Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 60(10), 4449-4460.

Pei Yulong, Andrea Cavagnino, Silvio Vaschetto, Chai Feng & Alberto Tenconi.(2017). Flywheel energy storage systems for power systems application, International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP) , 492-495.

Pieronek TJ, Decker DK & Spector VA.(1997). Spacecraft flywheel systems-benefits, and issues. In Proceedings of the IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 1997, IEEE; 1997, 2, 589–593

Samineni S, Johnson BK, Hess HL & Law JD.(2006). Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for voltage sag correction. IEEE Trans Ind Appl. 42(1):42-52.

Segundo H. B. S.(2011). Energy Storage Systems Integration PV Power Plants, PhD Thesis, University of Polytechnic Catalunya, Department of Electrical Engineering, Spain.

Talreja, R. Fatigue of composite materials: Damage mechanisms and fatigue-life diagrams. Proc. R. Soc. London Ser. A 1981, 378, 461–475.

Truong LV, Wolff FJ & Dravid NV.(2000). Simulation of flywheel electrical system for aerospace applications. In Collection of Technical Papers. 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)(Cat. No. 00CH37022), IEEE; 1, 601–608.

Zou Z., Cao J., Cao B. & Chen W.(2015). Evaluation Strategy of Regenerative Braking Energy for Supercapacitor Vehicle, ISA Transactions, 55, 234- 240.

İnternet Kaynakları

Ahmet Kurtoğlu.(2018). Yapı Çeliği ve Özellikleri. Adres: <https://malzemebilimi.net/yapi-celikleri-ve-ozellikleri.html>

Carey & Steitz.(2021). <https://www.reuters.com/business/retail-consumer/eu-proposes-effective-ban-new-fossil-fuel-car-sales-2035-2021-07-14/>

M. Ragheb & M. T. Tung.(2013). Kinetic energy flywheel energy storage, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, [Online]. Adres: http://www.astf-st.se/index_htm_files/7_FES

Rich Pell.(2016). Researchers in Canada are building on a project in Germany to use a flywheel to store energy in light rail systems, eenewseurope. Adres: <https://www.smart2zero.com/en/flywheel-technology-could-help-store-energy-in-light-rail/>

Sam Abuelsamid.(2009). Torotrak mechanical flywheel KERS, likely coming to next Jaguar XJ, SAE. Adres: <https://www.autoblog.com/2009/04/24/sae-2009-torotrak-mechanical-flywheel-kers-likely-coming-to-ne/>

Serdar Değirmenci. (2018). Karbon Fiber Nedir, Özellikleri Nelerdir?, Gezegen Teknoloji Dergisi. Adres: <https://egezegeen.com/teknoloji/karbon-fiber-nedir-ozellikleri-nedir/#:~:text=Karbon%20fiber%2C%20%C3%A7elikten%204.5%20kat,en%20iyi%20malzeme%20olarak%20g%C3%B6steriliyor.>

Url -1 <http://www.torotrak.com> alındığı tarih: 20.02.2022.

Url-2.(2021). <https://makina.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2021/10/2Cekme.pdf> alındığı tarih: 15.03.2022.

Url-3.(2019).<https://www.meetyoucarbide.com/tr/structure-and-classification-of-titanium-alloys/> alındığı tarih: 11.05.2022.

Url-4.(2019).<https://www.koalay.com/blog/detay/hibrit-araba-nedir> alındığı tarih: 5.06.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Öğrenim Durumu:

- **Lisans** :2018, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2022, İstanbul Gedik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

