

**6061-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDAN ÜRETİLMİŞ
GYROCOPTER PERVANELERİNİN
YORULMA DAVRAŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET ÖZER ÖZ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ ve İLERİ MALZEMELER
ANABİLİM DALI**

MERSİN

KASIM - 2020

**6061-T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDAN ÜRETİLMİŞ
GYROCOPTER PERVANELERİNİN
YORULMA DAVRAŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET ÖZER ÖZ

ORCID ID:0000-0002-7158-5195

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ ve İLERİ MALZEMELER
ANABİLİM DALI**

Danışman

Prof. Dr. Mustafa TAŞKIN

ORCID ID:0000-0003-3524-4972

II. Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ercüment TÜRKOĞLU

MERSİN

KASIM - 2020

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
- Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi

beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

26 Kasım 2020/26 November 2020

Ahmet Özer ÖZ

ÖZET

6061 T6 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDAN ÜRETİLMİŞ GYROCOPTER PERVANELERİNİN YORULMA DAVRAŞININ İNCELENMESİ

Havacılık sektöründe, yolcu sayısındaki artış, daha kısa mesafeler için ulaşım imkânı ve hava aracı tasarımlarındaki maliyeti düşürmesi sebebiyle pervaneli hava taşıtlarının üretimini hızlandırmaktadır. Havacılıkta kullanımı yeni başlayan Gyrocopter taşıtlarının yakın gelecekte potansiyeli çok yüksektir. Kısa mesafelere ulaşımı, ucuz maliyeti ve sektördeki giderleri minimize etmesi nedeniyle havacılık sektöründeki talebi her geçen gün artmaktadır. Genel itibarıyla bu hava taşıtlarındaki maliyeti en çok indirgeyen sistemler pervaneler geçmektedir. Pervanelerin çeşitli malzemelerden ve farklı tarzda üretimi, malzeme biliminin havacılık sektöründeki gelişmeleri sayesinde olmuştur ve bununla beraber birçok yenilik ve ilerleme kaydedilmiştir. Nanoteknoloji ve malzeme biliminde süregelen yeniliklerle beraber bu iki gelişen teknolojinin birleşimi sağlanmıştır. Bu çalışmada özel ekstrüzyon modeli ile üretilmiş 6061 T6 pervanelerden numuneler alınarak yorulma, çekme ve sertlik testine tabi tutulmuştur. Bu test sonuçları ve numuneler tez amacı doğrultusunda incelenmiş ve analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gyrocopter, Pervane, Malzeme, Nano,6061-T6, Ekstrüzyon

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TAŞKIN, Mersin Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE FATIGUE BEHAVIOR OF GYROCOPTER PROPELLERS PRODUCED FROM 6061 T6 ALUMINUM ALLOY

In the aviation industry, the increase in the number of passengers speeds up the production of propeller aircraft, as it reduces transportation costs for shorter distances and reduces the cost of aircraft designs. The potential of Gyrocopter vehicles, which have just started to be used in aviation, is very high in the near future. Demand in the aviation industry is increasing day by day due to its short distances, cheap cost and minimizing expenses in the sector. Demand in the aviation industry is increasing day by day due to its short distances, cheap costs and minimizing expenses in the sector. In general, propellers pass systems that reduce the cost of these aircraft the most. The production of propellers in a variety of materials and in different styles has been thanks to the advances in material science in the aviation industry, and many innovations and advances have been made. A combination of these two evolving technologies has been achieved with ongoing innovations in nanotechnology and materials science. In this study, samples were taken from 6061 T6 propellers produced with a special extrusion model and subjected to fatigue, tensile and hardness testing. These test results and samples were analyzed and analyzed for the purpose of the thesis.

Keywords: Gyrocopter, Propeller, Material, Nano, 6061-T6, Extrusion

Advisor: Prof. Dr. Mustafa TAŞKIN, Department of Metallurgical and Materials Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Öncelikle Yüksek Lisans sürem boyunca bilgi, birikim, tecrübeleri ile bana yol gösterici olan ve her daim desteğini aldığım, saygıdeğer danışman hocam Mersin Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. Mustafa TAŞKIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Gyrocopter pervanelerinin üretim aşamasında bana her daim yardımcı olan, bilgisini ve altyapı faaliyetlerini esirgemeyen başta Sn. Burcu AYDEMİR ve Sn. Cem AYDEMİR olmak üzere tüm BİLGİNER HAVACILIK A.Ş ailesine teşekkürlerimi borç bilirim.

Numune üretimi ve testler aşamasında, BERDAN CİVATA fabrikasının laboratuvarlarını kullanıma sunan başta Sn. Hasan ŞEMSİ olmak üzere tüm BERDAN CİVATA B.C. ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimine (BAP) projeye (2019-3-TP2-3704) gösterdiği finansal desteklerinden dolayı teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	ii
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Havacılık Sektöründe Kullanılan Malzemeler	2
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Havacılıkta Kullanımı	4
2.2.1. 6061 Alüminyum Alaşımın Havacılıkta Kullanımı	7
2.3. Havacılıkta Kullanılan Pervane Sistemleri	9
2.3.1 Gyrocopter Tip Pervane Sistemleri	14
2.3.1.1. Sabit Hatveli Gyrocopter Pervane Sistemi	16
2.4. Gyrocopterlerin Havacılıkta Yeri	18
2.5. Mevcut Durumda Pervane Kıyaslaması	22
2.5.1 Alüminyum rotor pal	22
2.5.2 Kompozit rotor pal	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM	29
3.1. Pervane Üretim Yöntemleri	29
3.2 Ekstrüzyon ile Pervane Üretimi	30
3.2.1 Biyet Hazırlık ve Isıtma	32
3.2.2 Ekstrüzyon Pres	34
3.2.3 Soğutma	39
3.2.4 Kesme	41
3.2.5 Isıl İşlem	42
3.3 Pervane Üzerine İşlemler	44
3.3.1 Eloksal Kaplama	44
3.3.2 Çelik Mil Güçlendirme	46
3.4. Numune Üretimi	49
3.5. Yorulma Deneyi	54
3.6. Çekme Deneyi	56
3.7. Sertlik Ölçümü	58
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	60
4.1 Mekanik İnceleme	60
4.1.1 Yorulma Dayanımı	60
4.1.2 Çekme Testi	64
4.1.3. Sertlik Testi	67
5.SONUÇLAR	68
6.ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	76

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Alüminyumun yapısal özellikleri	4
Tablo 2.2. Alüminyum ısı işlem sembolleri	7
Tablo 4.1. Yorulma deneyi ham verileri	60
Tablo 4.2. Çekme testi verileri	65
Tablo 4.3. Çekme testi verileri	66
Tablo 4.4. Sertlik testi verileri	67



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Havacılıkta kullanılan malzemelerin yüzdesel gösterimi	2
Şekil 2.2. Havacılık sektöründe kompozitin süregelen kullanımı	3
Şekil 2.3. Alüminyum alaşım oranları	6
Şekil 2.4. 6061 alüminyum alaşımlarını T6 ve T4 ısıtım işlem kıyaslaması	8
Şekil 2.5. Gyrocopter pervane mekanizması	9
Şekil 2.6. Gyrocopter iki pervaneli sistem	10
Şekil 2.7. Gyrocopter üç pervaneli sistem	10
Şekil 2.8. Pervane istasyonları	11
Şekil 2.9. Rotor pal kuvvet diagramı	11
Şekil 2.10. Pervane kaldırma kuvveti denklemi	12
Şekil 2.11. Pervane pal eksenleri	13
Şekil 2.12. Rotor kanatları için malzemelerin mukavemet ve sertlik parametreleri	15
Şekil 2.13. Sabit hatveli rotor pal	17
Şekil 2.14. Değişken hatveli rotor pal	17
Şekil 2.15. Gyrocopter uçuş vektör diagramı	18
Şekil 2.16. Gyrocopterin uçuş prensibi	19
Şekil 2.17. Gyrocopterin görünümü	21
Şekil 2.18. Gyrocopterlerde kullanılan farklı rotor pal yapıları	23
Şekil 2.19. 6061-T6 ve 6063-T5 Gerilme-Gerinim Karşılaştırılması	24
Şekil 2.20. Alüminyum alaşımların çekme dayanımı ve dayanıklılık limiti grafiği	24
Şekil 2.21. Kompozit rotor pal örneği	26
Şekil 2.22. Helikopter için geliştirilmiş kompozit rotor blade	27
Şekil 2.23. Bazı malzemelerin Dayanım-Sertlik kıyaslama grafiği	28
Şekil 3.1. Ekstrüzyon İşlem Şeması	30
Şekil 3.2. NACA 8H12 aerofil yapısı	30
Şekil 3.3. Rotor blade NACA 8H12 aerofil yapı örneği	31
Şekil 3.4. Ekstrüzyonda kullanılan çelik kalıplar	31
Şekil 3.5. Alüminyum biyet kesim makinesi	32
Şekil 3.6. Kesilmiş 6061-T6 biyet örnekleri	33
Şekil 3.7. Biyet ısıtma fırını	33
Şekil 3.8. Alüminyum biyet ısıtılması	34
Şekil 3.9. Ekstrüzyonu etkileyen bazı faktörler	34
Şekil 3.10. Rotor pal yanal kesit çizimi	35
Şekil 3.11. Ekstrüzyon düzlemi karşıdan görüntüsü	36
Şekil 3.12. Alüminyum biyete ekstrüzyon yapılması	37
Şekil 3.13. Renklendirilmiş ekstrüzyon dizaynı	37
Şekil 3.14. Ekstrüzyon sonrası transfer çarkları	38
Şekil 3.15. Aerofil yapının su havzasına aktarılması	39
Şekil 3.16. Süreç-Sıcaklık Grafiği	40
Şekil 3.17. Su soğutmadan çıkan aerofil yapı	40
Şekil 3.18. Ekstrüzyon profil kesim makinesi	41
Şekil 3.19. Isıl işlem sonrası pervane sıcaklığı	42
Şekil 3.20. Isıl İşlem Fırını	43
Şekil 3.21. Isıl işlem sonrası pervaneler	43
Şekil 3.22. Zımpara sonrası pervane görüntüsü	44
Şekil 3.23. Eloksal kaplama sonrası pervane pali	45
Şekil 3.24. Aerofil yapı tasarımı ve çelik mil boşluğu	46
Şekil 3.25. 4130 çelik mil	47
Şekil 3.26. Alüminyum ve plastik pervane kapağı	47
Şekil 3.27. İmal pervane görüntüsü	48

	Sayfa
Şekil 3.28. İmal pervane görüntüsü çeşidi	48
Şekil 3.29. Yorulma testi numune ölçüleri	49
Şekil 3.30. Numune Auto CAD çizimi	50
Şekil 3.31. Pal üzerinde numune Auto CAD çizimi	50
Şekil 3.32. Lazer Kesim Makinesi	51
Şekil 3.33. Lazer kesim başlığı	51
Şekil 3.34. Tek adet numune örneği	52
Şekil 3.35. Yan açıdan numune görüntüsü	52
Şekil 3.36. Sıralı numune görüntüsü	53
Şekil 3.37. Dokuz adet numune görüntüsü	53
Şekil 3.38. MTS Landmark dinamik test cihazı	54
Şekil 3.39. Yükleme ekipman görüntüsü	55
Şekil 3.40. Yüklenmiş numune görüntüsü	55
Şekil 3.41. Deney esnasında çatlak oluşumu	56
Şekil 3.42. Çekme testi için seçilen numune tipi ölçütleri	56
Şekil 3.43. Zwick/Roell Z250 Çekme Test Cihazı	57
Şekil 3.44. Çekme numunesi görüntüsü	58
Şekil 3.45. Rockwell sertlik ölçüm metodu	58
Şekil 3.46. Rockwell dijital sertlik ölçüm cihazı	59
Şekil 3.47. Sertlik ölçümü için çıkartılmış numune	59
Şekil 4.1. Yük/Çevrim sayısı grafiği	60
Şekil 4.2. Gerilme/Çevrim sayısı grafiği	61
Şekil 4.3. Yorulma grafiğindeki çekme sınırı ve yorulma sınırı gösterimi	62
Şekil 4.4. Yüksek ve düşük çevrim yorulma sınırı gösterimi	63
Şekil 4.5. Gerilim – gerinim grafiği	64
Şekil 4.6. Grafik üzerindeki akma ve çekme dayanımı gösterimi	65
Şekil 4.7. Sertlik ölçümünden sonra numune görüntüsü	67
Şekil 5.1. Alüminyum alaşımların çekme ve dayanıklılık karşılaştırılması	68
Şekil 5.2. Farklı sıcaklıklarda alüminyum 6061'in mekanik özellikleri	69
Şekil 5.3. Alüminyum gerilme-gerinim karşılaştırılması	70
Şekil 5.4. Farklı malzemelerin yapısallık karşılaştırılması	70

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simg	Tanım
%	Yüzde
Max.	Maksimum
RGB	Redüksiyon Gear Box
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
CNC	Computer Numerical Control
Kn	Knot
Kgf	Kilogram-kuvvet
Yy	Yüzyıl

1. GİRİŞ

Pervane sistemleri, 19. Yy başlarında geliştirilmiş ve 1900'lerin başlarında ise havacılık sektörü için kullanılmaya başlanmıştır. Pervane ve rotor blade kullanımı havacılık sektöründe hem ekonomik hem de mekanik güç sağlaması başta gelen yararları olarak bilinmektedir. Teknolojik çalışmaların ilerlemesiyle hem işlevsel hem de malzeme olarak birçok farklı çeşitte üretilmektedir. Özellikle sivil havacılık sektöründe alüminyumdan pervane kullanımı son yıllarda tekrardan artış göstermiş ve güç mekanizmalarında çok önemli bir rol oynamıştır. Son yüzyılda malzeme biliminde ki gelişmelerle yeni avantajları ortaya konulan bu pervanelerin, birkaç yıl içinde hava araçları üzerinde kullanım yüzdelerini artırmaları havacılık otoriteleri tarafından beklenmektedir.

Pervaneli hava taşıtlarına örnek olarak gösterilecek en önemli örneklerden biri de gyrocopterlerdir. Pistonlu bir motor yardımıyla hızlanarak, pervaneleri yardımıyla irtifa kazanan hava ulaşım araçları olarak havacılık sektöründe talep görmektedir. Genel itibariyle, bir adet baş üstü pervanesi, kokpit bölümü ve pistonlu bir motordan oluşmakta olup diğer hava taşıtları göz önüne alındığında daha basit denilebilecek bir yapıda kalmaktadır. Kendi içerisinde çeşitlilik gösteren kısımları olsa da genel hattı itibariyle diğer hava ulaşım araçlarından çok daha az bölüm ve yapı içermektedir. Sektörde sayıca daha az olan bu hava taşıtlarının kullanımı giderek artmakta ve artan havacılık maliyetleri göz önüne alındığında havacılık otoriteleri bu tarz hava taşıtlarına yönelmektedir. Genel olarak pervane imalatı, iyi bir mühendislik tasarımının yanında en karmaşık imalat prosedürleri ve teknikleriyle birlikte, ekstrüzyon tekniğinin de sık olarak kullanıldığı bir imalattır. Pervane imalatında kullanılan malzeme değeri birkaç ton gibi olağanüstü boyutlara ulaşabilir. Bu imalat sırasında meydana gelebilecek herhangi bir kusur pervanenin hatalı üretilmesine neden olacağından üretimin her aşaması büyük önem arz etmekte, hassas bir yaklaşım gerektirmektedir. Ayrıca pervane ve rotor pal sistemleri nem ve havaya çok yoğun olarak maruz kaldığından bunlardan ötürü birçok kuvvet ve etkinin tesiri altındadır. Bu etkileri minimuma indirip hem bakım hem ekstra üretim maliyetlerini indirmek büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı ise, 6000 serisi alüminyumdan ekstrüzyon yöntemi ile pervane üretimi ve bunun ardından birçok mekanik incelemesini yapmaktır. Bu sayede üretilen pervanelerin mekanik standartları göz önüne alınarak istenilen uçuş konfigürasyonları elde edilip edilemediği incelenecektir. İncelenen verilerin ardında pervanelerin uçuşu için belirli bir standart belirlenecek ve böylece hem gyrocopter pervanelerin ömrü artacak hem de uzun yıllar kullanılan bir pervane sistemiyle maliyeti düşürmesi sağlanacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Havacılık Sektöründe Kullanılan Malzemeler

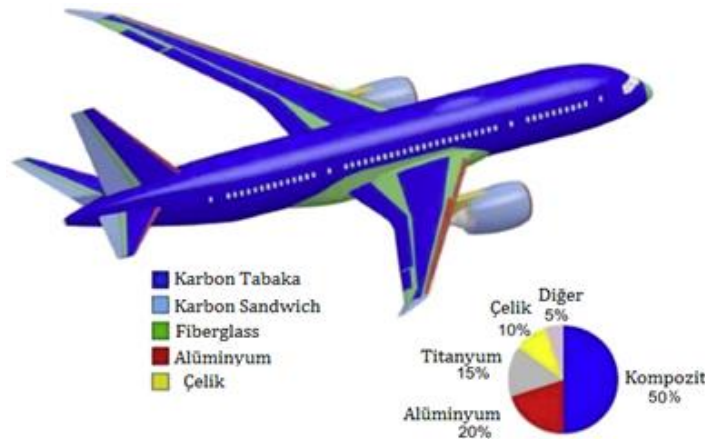
Havacılık sektörü yüksek maliyet gerektiren bir sektör olsa da yüksek sayıda yolcu taşıdığı için gerekli şartlarda maliyet göz ardı edilmektedir. Bu yüzden havacılık sektöründe önemli olan ilk nokta güvenlik noktasıdır. Ancak ilerleyen teknolojiyle birlikte hem güvenlik üst düzeyde tutulurken hem de maliyetler aşağıya çekilmeye çalışılmaktadır. Her ne kadar öncelik güvenlik ve insan yaşamı olsa da havacılık sektöründe üzerine düşünülen ikincil durum maliyettir. Bilindiği üzere hava taşıtları genel itibariyle ağır taşıtlar olarak geçmektedir. Ve hava taşıtındaki ağırlık maliyeti direk etkilemekte ve bu da havacılık otoritelerinin üstünde durduğu temel durumlardandır.

Ağırlık dezavantaj olarak düşünülmekte ve bilimsel gelişmeler neticesinde hava taşıtlarının ağırlıkları azaltılmaya çalışılmaktadır. Kullanım amacı, yolcu sayısı, maliyet miktarı, tasarım ve buna benzer birçok faktör hava taşıtlarının ağırlıklarını etkilemektedir. Ağırlık miktarının azaltılması karşımıza farklı tipte malzemeler kullanımı olarak ön plana çıkmaktadır. Havacılıkta birçok farklı malzeme kullanılsa da genel olarak kompozit, alüminyum, titanyum, çelik ve türevleri olan malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Kullanım amacına bağlı olarak değişen hava aracı malzemeleri günümüzde birçok parametre göz önüne alınarak tasarlanmaktadır. Malzeme seçimi ve kullanımı 3 ana başlık altında değerlendirilebilir.

Bunlar;

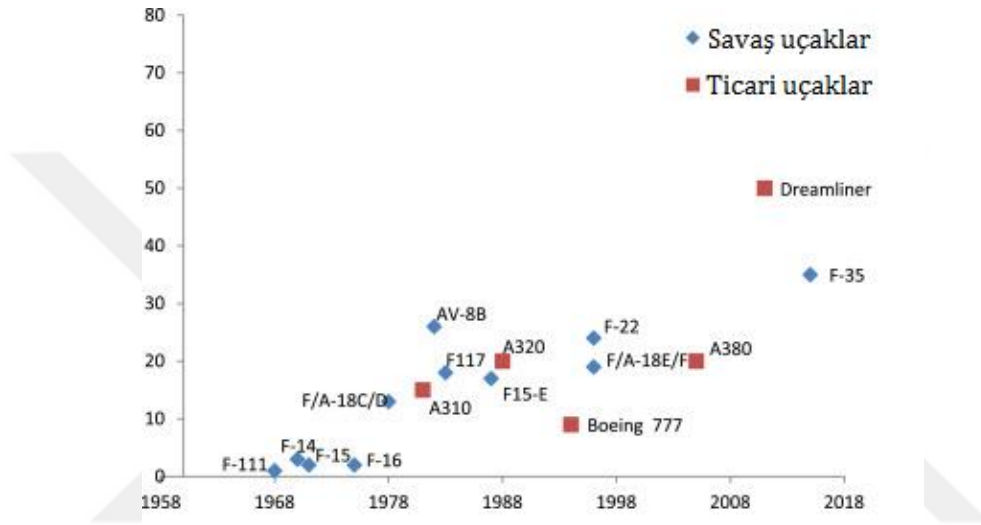
- Güvenlik
- Maliyet
- Ağırlık

Gibi ana başlıklardır.



Şekil 2.1. Havacılıkta kullanılan malzemelerin yüzdesel gösterimi [1].

Havacılık sektöründe üretimin en büyük sorunların başında ağırlık gelmektedir. Bu durumu tamamen çözmek imkânsız olsa da sorunu en aza indirmek için en uygun metariyal kompozit malzemelerdir. Modern uçak tasarımlarında kullanılan malzeme özellikleri ve fizik kuralları bir araya gelince uçakların ömürleri kullanım sıklığına göre 70 yıla kadar uzatılmış ihtiyaçlar doğrultusunda 40 yıla kadar düşürülüp kullanılmıştır [2]. Günümüzde ise havacılık ihtiyaçlarını karşılayabilmek için yeni özellikler kazandırılmış nano bileşenli kompozit malzemeler geliştirilmiştir. İleri malzeme teknolojileri sektör ihtiyacına göre performans ve maliyet önemi sektörün ihtiyaçlarına göre değişmektedir.



Şekil 2.2. Havacılık sektöründe kompozitin süregelen kullanımı [3].

Havacılık sektörünün diğer bir önemli materyali titanyum ve alaşımlarıdır. Düşük özgül ağırlıkları ve düşük sıcaklık kapasiteleri vardır [4]. Hız, titreşim ve yüksek derece sıcaklıklar gibi parametrelerin söz konusu olduğu hava aracı kısımlarında ve motor kanatçıklarında çok kullanılır. Titanyum alaşımı olarak motor ve uçak iskeleti uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sivil havacılıkta ağırlığı azaltarak yakıt tüketimini düşürmek için yeni modeller daha yüksek titanyum içerikli üretilmektedir. Sadece uçak parçaları ve çerçeveleri titanyumdan yapılmamakta aynı zamanda hava aracı motoru üreticileri de titanyum kullanmaktadır.

Titanyumun yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu, üreticilere istedikleri yüksek performans düzeylerini vermektedir. Jet motoru ve gövde parçalarının sıfırdan 600 dereceye kadar sıcaklıklara dayanması gerekir, bu da titanyumun yüksek sıcaklık performansını ideal hale getirir. Titanyumdan üretilen motor parçaları, motorun arka ucuna ön fan için diskler, bıçaklar, miller ve muhafazalar içerir. Titanyum alaşımlarının en büyük dezavantajları ağırlık ve maliyet olarak ön plana çıkmaktadır [5].

Maliyet göz ardı edilebilen havacılık projelerinde ağırlık ise çoğu zaman göz ardı edilememektir. Çünkü ağırlık uçuş yükünü olumsuz anlamda etkileyecektir. Ancak özel bölümler ve parçalar için titanyum kaçınılmaz bir fırsattır.

2.2. Alüminyum Alaşımlarının Havacılıkta Kullanımı

Bugün dünyada uçan 27.000'den fazla ticari uçak ve binlerce hafif uçak ve helikopter bulunmaktadır. Sadece yolcu uçağı için talep, bugün 15.000'den 2030'a kadar 31.500'den iki katına çıkmıştır. Alüminyum alaşımları ise, bir uçağın yüklü olmayan ağırlığının yaklaşık% 80'ini içeren birincil uçak malzemesidir. Metal korozyona karşı direnç gösterdiğinden, bazı havayolları uçaklarını boyamaz ve yüzlerce kilogram tasarrufu sağlar [6].

Uçaklardaki koltuklar gibi birçok iç donanım, ağırlıktan tasarruf sağlamak ve böylece yakıttan tasarruf etmek, emisyonları azaltmak ve uçağın yükünü arttırmak için alüminyumdan yapılmıştır. Alüminyumun hafiflik, güç ve işlenebilirlik kombinasyonu, seri üretimli ticari uçaklar için ideal bir malzemedir. Güçlü alüminyum alaşımları yüksek irtifa uçuşlarında yer alan olağanüstü baskıları ve gerilmeleri alır; alüminyum paneller soğuğu ve havayı içeride tutar. Bu tür birçok avantajlarından ötürü alüminyum 1920'lerden günümüze kadar hala havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [6-7].

Alüminyum atom numarası 13, atom ağırlığı 26.981 g/mol, ergime sıcaklığı 660 °C olan gümüşümsü renkte ve 2,7 g/cm³ olan bir metaldir. Alüminyum alaşımlar, düşük maliyetli, üretilmesi kolay ve hafif ağırlık gibi çeşitli avantajları nedeniyle hala önemli uçak yapı malzemeleri olarak kalmaktadır. Alüminyum bazlı alaşımlar ısıtılabilir ve nispeten yüksek gerilimlere yüklenebilir. Alüminyum bazlı alaşımlar, kompozitlerin kullanımının artmasından önce uçak yapıları için birincil malzemeler olmuştur [7].

Tablo 2.1. Alüminyumun yapısal özellikleri [7].

Yoğunluk	2,70 g/cm ³	Buharlaştırma ısısı	294,0 kJ/mol.
Sıvı Hal yoğunluğu	2,375 g/cm	Elektrik direnci	26,50 nΩ•m
Ergime noktası	933,47 °K (660,32 °C)	Isıl iletkenlik	237 W/(m•K)
Kaynama noktası	2792 °K (2519 °C)	Isıl genleşme	23,1 µm/(m•K)

Alüminyum alaşımların havacılık üzerinde kullanılmasında 3 temel esas bulunmaktadır. Bunlar hafif ağırlıkta olması, yüksek dayanım göstermesi ve korozyon direnci yüksek olmasıdır. Hafif ağırlık kazanımı, alüminyum alaşımlarının kullanılması uçağın ağırlığını önemli ölçüde azaltır. Kabaca çelikten üçte bir daha hafif olan bir ağırlıkla, bir uçağın daha fazla ağırlık taşımaya veya daha fazla yakıt tasarrufu sağlamasına izin verir. Yüksek dayanım göstermesi, daha hafif ağırlığından yararlanırken diğer metallerle ilişkili dayanım kaybı olmadan daha ağır metallerin yerini almasını sağlar. Ek olarak, taşıyıcı yapılar, uçak üretimini daha güvenilir ve düşük maliyetli hale getirmek için alüminyumun gücünden yararlanabilir. Korozyon direnci yüksek olması, bir uçak ve yolcuları için, korozyon son derece tehlikeli olabilir. Bu yüzden alüminyum, korozyona ve kimyasal ortamlara karşı oldukça dirençli olup, özellikle korozif deniz ortamlarında çalışan uçaklar için değerlidir.

Kompozit malzemelerin, hava aracı üzerindeki her yerde aynı verimi sağlamaması, üretim zorluğu ve maliyeti sebebiyle günümüzde aktif olarak hava aracı ve parçası üreten şirketler için sınırlı bir oranda kullanılmaktadır. Alüminyum tercih sebepleri genel itibariyle yüksek sertlik, iyi işlenme, yüksek korozyon dayanımı, iyi kaynak yapılabilirlik, yüksek rijitlik, şekil alabilme kabiliyeti, alüminyum oksit tabakası sayesinde uzun kullanım ömrü, yüksek tokluktur. Uçakların genellikle dış yüzey, kontrol panelleri ve pervane gibi bölümlerinde kullanılırken, günümüzün gelişmiş hava taşıtlarında %20 oranında bulunurken, , gyrocopter ve benzeri kişisel kullanım gerektiren taşıtlarda bu oran %50 ye kadar çıkabilmektedir. Bir uçağın ağırlıkça % 70'i alüminyumdan oluşmaktadır. Hafif olmaları ve korozyon dirençleri sayesinde daha çok kullanılmaları havacılık sektöründe yeri doldurulamaz bir durum oluşturmuştur [8].

Ana metali alüminyum olan alaşımlara “Alüminyum Alaşımları” denir. Bunlara hafif alaşımlar da denir. Alüminyum alaşımları bakır, çinko, silisyum, magnezyum, manganez, demir, nikel, titan vb. elementleri ilave edilerek oluşturulur. Özellikleri; hafif olmaları, ısı ve elektrik iletkenlikleri, ısıl işlemlere elverişli olmaları ve bazı kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmalarıdır. Alüminyum alaşımları döküme elverişlidir. Aynı zamanda, dövme, çekme, ekstrüzyon ve haddeleme ile biçimlendirilen alüminyum alaşımları da hazırlanmaktadır [9].

Havacılık alanında en çok kullanılan alaşımlar 2024, 6061, 7075 ve bunların temperleridir. Herhangi bir uygulama için öncelikle bu alaşımlardan kullanılması düşünülebilir. Çünkü bu alaşımlar yıllardır süre gelen kullanımları ile kendilerini ispatlamışlardır ve temin edilmeleri daha kolaydır. 6061 ve 7075 alüminyum arasındaki bileşim farklılıkları kolayca görülemez. Her ikisi de magnezyum, silikon, bakır, demir, çinko, titanyum, manganez ve krom gibi aynı alaşım maddelerini içerir. Kritik ayrım, alüminyumda hangi etkenlerin olduğu değil, malzemede ne kadar olduğudur. 6061 alüminyum alaşımı 7075 malzemedan daha az çinkoya sahiptir, yani 6061 alaşımları diğer alaşımlara göre üstün kaynak kabiliyetleri ve işlenebilirlik sağlarken, 7075'in sunduğu aynı yüksek mukavemet ve stres direncine sahip değildir [10].

Çok yaygın alüminyum alaşımlarından biri olan 2024, yüksek mukavemet ve iyi işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik sergilemektedir. Bununla birlikte, korozyon direnci diğer alaşımların çoğuna kıyasla zayıf kabul edilir [10].

2024 Alaşım Limitleri	Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
	Minimum	-	-	3,8	1,2	0,3	-	-	-
	Maksimum	0,5	0,5	4,9	1,8	0,9	0,1	0,25	0,15
6061 Alaşım Limitleri	Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
	Minimum	0,4	-	0,15	0,8	-	0,4	-	-
	Maksimum	0,8	0,07	0,4	1,2	0,15	0,35	0,25	0,15
7075 Alaşım Limitleri	Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
	Minimum	-	-	1,2	2,1	-	0,18	5,1	-
	Maksimum	0,4	0,5	2	2,9	0,3	0,28	6,1	0,2

Şekil 2.3. Alüminyum alaşım oranları [11].

Genel olarak 6061, çok çeşitli genel amaçlı mekanik uygulamalar için birçokları tarafından çok yönlü ve daha çok kabul edilir ve son derece kaynaklanabilir ve uygulanabilir. Öte yandan 7075, mevcut en güçlü alüminyum alaşımlarından biridir ve 7075 alaşımları, mukavemet ve tokluk çok önemli olduğunda tipik olarak daha yüksek maliyete değer alaşımlar geçmektedir. 7075, 6061'den daha az uygulanabilir olsa da, eğer güç en önemli faktör ise 7075 muhtemelen daha iyi bir seçimdir. Kaynaklanabilir, işlenebilir ve çok yönlülük sunan bir alaşım kullanılmak istenildiğinde, 6061 alaşımı istenileni karşılayan bir alaşım durumundadır. Ancak hem işlenebilirliğe hem de yüksek mukavemete ihtiyaç duyulduğunda ve kaynak veya korozyon direncine de gereksinim duyuluyorsa, 2024 alaşımları daha iyi sonuç vermektedir. Ancak her katılan özellik maliyet artışı açısından önemli bir etken olacaktır [10-11].

Yukarıda anlatıldığı gibi, havacılık sektöründe en çok kullanılan bu üç alüminyum alaşımı ve temperleri seçim yapılırken birçok faktör göz önüne alınmaktadır. Sertlik, tokluk, ağırlık, korozyon direnci, maliyet gibi faktörler havacılık sektöründe alüminyum seçimini belirleyen etkenlerdir. Yeni geliştirilen alaşımlar çoğunlukla 6061 ile kıyaslanmaktadır. Özellikle seri imalat yapılmayan durumlarda ekonomik faktörler bir miktar göz ardı edilerek daha pahalı ancak daha güvenilir veya daha yüksek mukavemetli alaşımların kullanılması yoluna gidilebilir. Ancak maliyet her zaman önemli bir etken olacaktır.

2.2.1. 6061 Alüminyum Alaşımın Havacılıkta Kullanımı

Hafiflik, düşük sıcaklık direnci, yüksek mukavemet ve düşük maliyet; 6000 serisi alüminyum alaşımlarını kullanmak için en başlıca sebeplerdir. Örneğin 6061 ve 6063 nispeten düşük mukavemete sahiptir, ancak mükemmel süneklik gösterirler ve genellikle yapısal gövde bileşenleri, cıvatalar, kapı ve pencere kirişleri için kullanılırlar. 6061, ana alaşım elementleri olarak magnezyum ve silikon içeren çöktürme ile sertleştirilmiş bir alüminyum alaşımdır. Pervane amaçlı kullanılan 6000 serisi alüminyum alaşımları çok yaygın olarak ekstrüze edilir. Genel amaçlı kullanım için en yaygın alüminyum alaşımlarından biridir [10].

6000 serisi alüminyumda havacılıkta en çok kullanılan alüminyum 6061 ve 6063 geçmektedir. Alüminyum 6061 daha fazla ekstrüze edilmesinden dolayı genellikle pervane sistemleri için kullanılmaktadır. Alüminyum 6061, 1935 yılında geliştirilmiştir [12]. İyi mekanik özelliklere sahiptir, iyi kaynaklanma özelliği sergiler ve çok yaygın olarak ekstrüze edilirler. 6000 serisi alüminyumlar havacılık için ne kadar kullanışlı olsalar da genellikle temperlenerek mekanik özellikleri artırılır ve bu şekilde kullanılırlar. 6061 alüminyum alaşımlarının en çok kullanılan temperleri 6061-T6 ve 6061-T4 olarak geçmektedir [12].

Tablo 2.2. Alüminyum ısıtım işlem sembolleri [13].

Temper İşareti	İşlem
O	Tavlama
T1	Sıcak şekillendirme, doğal yaşlandırma
T4	Çözündürme
T5	Sıcak şekillendirme, yapay yaşlandırma
T6	Çözündürme, yapay yaşlandırma

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin artırılması genel olarak 3 başlıkta yapılır. Bu işlemler; çözeltiye alma, su verme, yaşlandırma geçmektedir. Çözeltiye alma ısıtım işlemi malzemenin solvüs eğrisi üzerindeki bir sıcaklığa ısıtıldıktan sonra, hızla bu sıcaklıktan soğutulması ile aşırı doymuş katı eriyik yapısı oluşturulur. Hızlı soğutma yani su verme işlemi çözünen elementlerin çözeltide kalmasını sağlamaktadır. Su verme esnasında ortaya çıkan gerilimin daha sonra parçanın kullanımında boyutsal kararlılık ve yorulma dayanımı gibi özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir [14].

Kullanılacak su verme yöntemi parçanın ağırlığı, geometrisi ve beklenen özelliklerine göre belirlenir. Su verme sonrasında çözeltide kalan çözünen elementler, oda sıcaklığında yavaşça çökelmeye başlarlar [14].

Bir süre sonra bazı alaşımlar oda sıcaklığında oldukça sertleşebilirler. Buna doğal yaşlanma adı verilir. Suni yaşlandırma olarak anılan işlem ise döküm parçaların 100-200 °C gibi sıcaklıklarda tutulması ile yaşlandırmanın hızlandırılmasıdır. Yaşlandırma sıcaklığında süre arttıkça yavaş yavaş çökelti yapısı oluşur ve sertlik maksimum değerine doğru artar. Daha fazla yaşlandırmaya devam edilirse sertlik düşmesinin görüldüğü aşırı yaşlanma durumu ortaya çıkar [14].

T6 ve T4 temperleri arasındaki fark yaşlandırma farkıdır. T6 ısıtılmasında alüminyum yapay olarak yaşlandırılırken, T4 ısıtılmasında doğal yaşlandırma söz konusudur. Bu yaşlandırma ise malzemede ki mekanik özelliklerin değişmesinde büyük rol oynamaktadır. Yapay yaşlandırma yapılmasıyla mukavemetin artması havacılık için önemli bir faktördür. Bu yüzden mukavemet gerektiren yerlerde T6 temperi, T4 temperine göre daha çok kullanılmaktadır [15].

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (brinel) min-max
0	103-228	55-124	26	30
T4	110-140	180-230	24	65
T6	240-270	260-310	20	95

Şekil 2.4. 6061 alüminyum alaşımlarını T6 ve T4 ısıtılma işlem kıyaslaması [16].

Farklı alüminyum ısıtılma işlemleri, malzemede ki çökeltilerin boyutunu ve dağılımını kontrol eder. Tane sınır boyutları da değişir, ancak çökeltiler kadar mukavemet üzerinde bir etkisi yoktur. Tane boyutları, strese bağlı olarak büyüklük miktarları değiştirebilir ve nanometre kadar küçük tanelere sahip olabilir. Ancak tipik olarak birkaç mikrometre ile yüzlerce mikrometre çapındadır. Demir, manganez ve krom sekonder fazları genellikle metariyal olarak inklüzyon olarak oluşur.

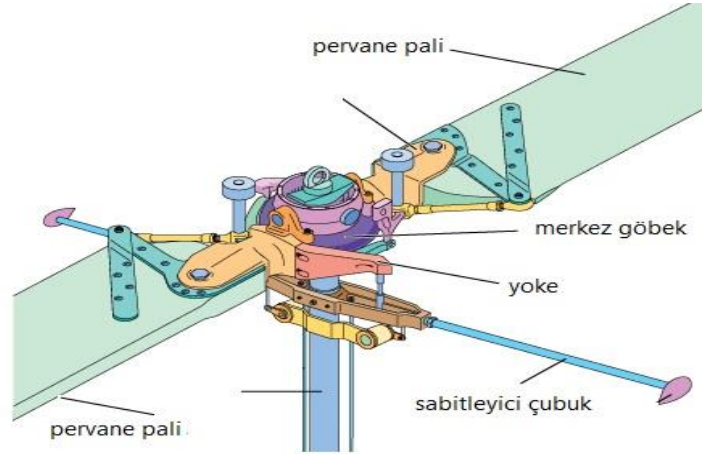
Alüminyum alaşımlarındaki tane boyutları büyük ölçüde işleme tekniklerine ve ısıtılma işlemine bağlıdır. Strese tabi tutulan farklı malzeme kesitleri tane boyutunda büyüklük farklılıklarına neden olabilir. Bazı özel olarak işlenmiş alüminyum alaşımları yüzlerce nanometre olan tane çaplarına sahiptir, ancak çoğu birkaç mikrometreden yüzlerce mikrometreye kadar değişmektedir [8].

En saf haliyle alüminyum, yapısal kullanım için çok yumuşak ve reaktiftir. Bununla birlikte, 6061-T6 alaşımı gibi alaşımları, dayanıklı ürünlerin üretiminde yapısal olarak daha güçlü ve daha kullanışlı olmasını sağlar. Alüminyum 6061, silikon ve magnezyum içeriği

nedeniyle son derece çok yönlü ısıyla işlenebilir bir alüminyum alaşımıdır. 6061, alüminyumun iyi kalitelerinin çoğuna sahip olmasının yanı sıra çok çeşitli mekanik ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir. 6061 bahsedilen birçok özellikten ötürü havacılık sektörüne çok sık kullanılan bir malzeme geçmektedir. Ekstrüzyon edilmesinden dolayı pervane sistemlerinde kullanılır ancak daha çok uçak yapılarında, gövde bileşenlerinde, tüp ve boru bağlantılarında ve uçak hücum kenarı yüzeylerinde günümüzde bile kullanılmaktadır.

2.3. Havacılıkta Kullanılan Pervane Sistemleri

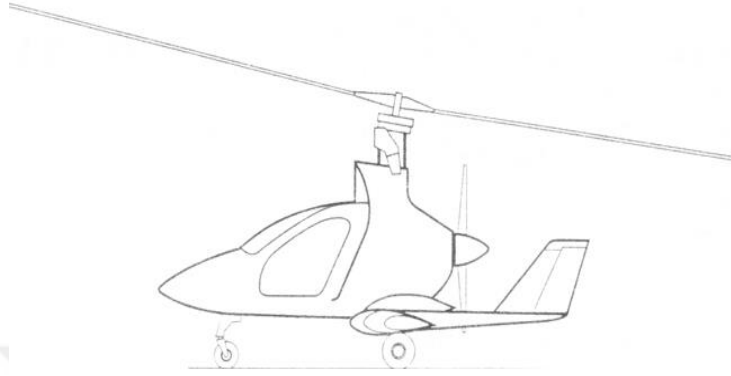
Bir hava aracı pervanesi, dönme enerjisini, dönme düzlemine yaklaşık olarak dik olan itme kuvveti oluşturan itme kuvvetine dönüştüren aerodinamik bir cihazdır. Dönme enerjisi, bir piston, gaz türbini motoru veya sınırlı uygulamalarda bir elektrik motoru tarafından üretilebilir. Bir pervane, birçok hafif hava aracında olduğu gibi doğrudan bir piston motoruna veya jet motoruna bağlı bir RGB ile çalıştırılabilir. Bu durumda, RGB motorun yüksek dönme hızını pervane çalışması için daha uygun olana dönüştürür. Pervane sistemlerinde öncelikli amaç taşıma kuvvetini oluşturmaktır. Bu kuvvet helikopter ve benzeri hava araçlarında havada tutunmayı sağlayan en önemli bileşen olarak kullanılmaktadır. Pervaneler yalnızca 770 km/s veya 420 kn/saat'in altındaki subsonik hava hızlarında kullanım için uygundur. Çünkü bu hızın üstünde pal ucu hızı ses hızına yaklaşır ve yerel süpersonik akış yüksek sürtünme, gürültü ve pervane yapısal sorunlarına neden olur [17].



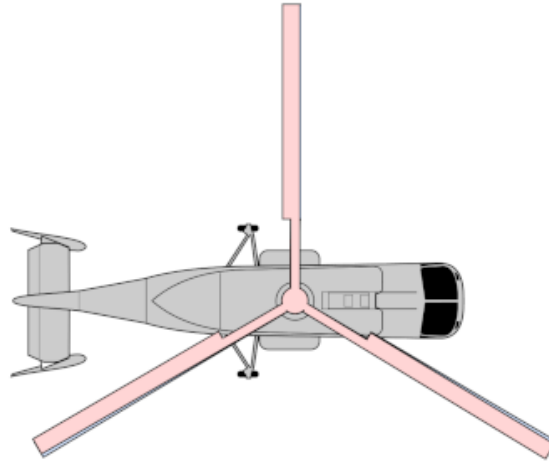
Şekil 2.5. Gyrocopter pervane mekanizması [18].

Pervane ve motor sistemi tasarımları büyük farklılıklar gösterir. Pistonlu motorlardaki ahşap pervanelerden, türbin motorlarındaki tamamen geri hatveli sabit hız pervanelerine kadar değişir. Bu pervane sistemlerinin her biri, hava aracına gerekli kaldırma gücü üretmenin benzer temel işlevine sahiptir, ancak farklı kontrol ve operasyonel gereksinimleri vardır. Pervane,

merkezi bir göbek tarafından yerinde tutulan birkaç palden oluşur. Pervane göbeği kanatları yerinde tutar ve bir pervane mili ve bir şanzıman vasıtasıyla motora bağlanır. Büyük turboprop uçaklardaki modern pervanelerde tipik olarak 4 ila 6 pal bulunur ancak gyrocopter pervaneleri 2 pal olarak üretilmektedir [17].



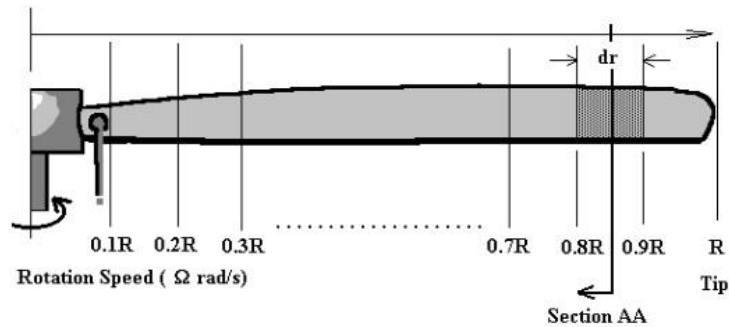
Şekil 2.6. Gyrocopter iki pervaneli sistem [19].



Şekil 2.7. Gyrocopter üç pervaneli sistem [20].

Bir pervanenin performansını tahmin etmenin nispeten basit bir yöntemi, Blade Element Teorisinin kullanılmasıdır. Bu yöntemde pervane, uzunluk boyunca birkaç bağımsız bölüme ayrılmıştır. Her bölümde, 2B kesit kaldırma ve kesit tarafından üretilen itme ve tork ile sürüklenme içeren bir kuvvet dengesi uygulanır. Aynı zamanda eksenel ve açısal momentum dengesi uygulanır. Ortaya çıkan itme ve tork değerleri pervanenin genel performansını tahmin etmek için toplanabilir. Teori, belirli bir seyir hızı için pal eğimi ayarını optimize etme veya bir pervane için uygun değer pal sağlamlığını belirleme gibi karşılaştırmalı çalışmalar için çok yararlı bulunmuştur. Yukarıdaki sınırlamalar göz önüne alındığında, çok çeşitli çalışma koşulları

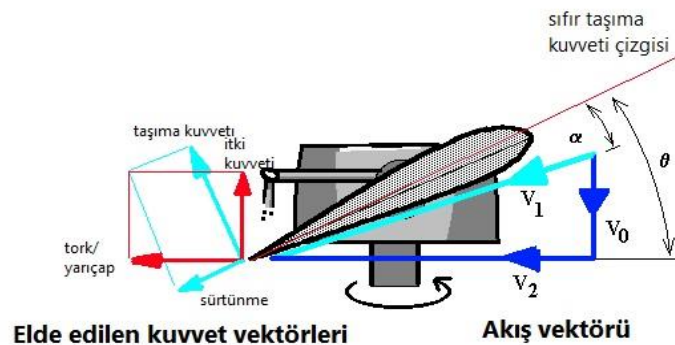
altında pervaneler için iyi birinci dereceden itme, tork ve verimlilik tahminleri elde etmek için mevcut en iyi araçtır [21].



Şekil 2.8. Pervane istasyonları [21].

Bir rotor kanadı, ayrı sayıda bölüme gösterildiği gibi alt bölümlere ayrılabilir. Her bölüm için, her biri için sadece eksenel ve açisal hız bileşenleri olduğu ve diğer bölümlerden indüklenen akış girişinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı yapılırsa, akış bağımsız olarak analiz edilebilir. Böylece yukarıda gösterilen AA bölümünde, bıçak üzerindeki akış aşağıdaki bileşenlerden oluşacaktır[21].

$\mathbf{V}_0$ --- rotor diskinde aksel akış $\mathbf{V}_2$ --- teğetsel akış hızı vektörü
 $\mathbf{V}_1$ --- V_1 --- kesit yerel akış hızı vektörü, $\mathbf{V}_0$ ve $\mathbf{V}_2$ vektörlerinin toplamı



Şekil 2.9. Rotor pal kuvvet diagramı [21].

Bir rotor pali, kolektif, döngüsel ve pal bükülmesinin bir kombinasyonu olacak belirli bir geometrik eğim açısına (θ) ayarlanacaktır. Yerel hız vektörü kesit üzerinde bir akış açısı oluşturacaktır. Bölümün kaldırılması ve sürüklenmesi standart 2-B aerofil özellikleri kullanılarak hesaplanabilir. Rotor diskine normal ve paralel olan kaldırma ve sürüklenme

bileşenleri hesaplanabilir. Böylece, bir tek elemandan tüm rotorun itme ve tork katkısı bulunabilir [21].

Ayar açısı (θ) ile karşılaştırıldığında itme ve kaldırma yönleri arasındaki açı (φ) farkı, yerel bir akış açısı (α) üretir [20].

$$\alpha = \theta - \varphi$$

Bağlantısıyla;

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{V_0}{V_2} \right) \approx \frac{(V_i + V_c)}{V_2} = \frac{(V_i + V_c)}{\Omega r}$$

Şekil 2.10. Pervane kaldırma kuvveti denklemi [21].

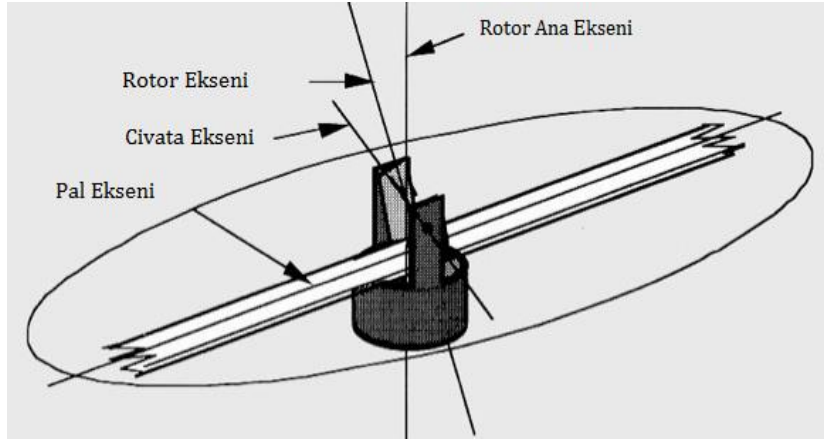
$V_0 = V_i + V_c$, bu denklemde V_i rotorun indüklediği akış hızı ve V_c helikopter dikey tırmanma hızı olarak tanımlanmaktadır. İndüklenen ve tırmanma hızları rotor hızına kıyasla küçük olduğundan, $V_1 \approx V_2 = \Omega r$ geçmektedir. Böylece, rotor pal elemanının temel itme kuvveti şöyle yazılabilir [21];

$$L \cos(\varphi) = L = \frac{1}{2} \rho \cdot V_2 \cdot C(l) \cdot C(B)$$

Burada ρ hava yoğunluğu, C bıçak kordu ve φ için küçük açı yaklaşımları kullanılır. Taşıma kuvvetini oluşturan alan, devreyi kaplayan pal sayısı (B) ile çarpılan eleman alanı olacaktır ve kaldırma katsayısının hücum açısı (α) ile doğrusal olduğu varsayılabilir [21].

Yukarıda gösterilen formül grubuyla hesaplanan taşıma kuvveti pervanenin taşıma limitini belirleyecektir. Pervanenin taşıma miktarını bilmek hangi hava aracına ne ölçekte pervane dizaynı yapılacağını bilgisini verir. Böylece farklı hava taşıtlarına farklı nitelikte gerekli olan pervane tasarımları oluşacaktır. Helikopter, ses altı hava taşıtları ve gyrocopter gibi farklı hava taşıtlarına farklı dizaynda pervane tasarımı gereksinimi buradan gelmektedir [21].

Özetlemek gerekirse Blade Element Teorisi pervane palasının pala kökünden ucuna kadar sonsuz sayıda çok ince genişliklere sahip profillere bölünebileceğini kabul eder. Pal elemanı teorisine göre yan yana getirilerek birleştirilmiş çok sayıda profil bir düzlem içinde bir merkez etrafında döndürüldüğünde itme /çekme kuvveti üretebilecek bir pal meydana getirir. Pal en iyi tasarım hızında dönerken, her bir pal elemanı kendisinin en iyi hücum açısında itme/çekme kuvveti üretecek şekilde tasarlanır.



Şekil 2.11. Pervane pal eksenleri [22].

Pervaneli veya rotor sistemli hava taşıtlarında pal sayısı, hava taşıtının kullanım amacına, hava taşıtının ağırlığına, motor dizaynına, güç ve itki değerine ve hava taşıtının performansı gibi birçok önemli bileşene bağlıdır. Helikopter gibi ağır hava taşıtlarında 4 veya 6 pal varken gyrocopter gibi ağırlığı düşük hava taşıtlarında genellikle 2 adet bulunmaktadır. 4 veya 6 pal bulunduran hava taşıtlarında paller tersinir çalışma özelliğine sahiptir.

Bu özellik, kalkış esnasında bu palleri ters yönde maksimum açı olmak üzere eğer ve bu sayede yere en yüksek hava basıncı uygulanarak havalanmaya başlar. Yani daha kısa sürede efektif bir kalkış sağlamaktadır [23].

Ağır hava taşıtlarında rotor palleri dönme yönüne çalıştığı zaman, hava taşıtının gövdesi de o yönde dönmek ister. Ancak bu durum pervanenin istikamet alabilmesi için çok istenilen bir durum değildir.

Bu yüzden kuyruklarında ana pervaneden çok küçük ve ona dik ikinci bir pervane daha taşırlar. Bu pervanenin amacı, helikopterin kendi çevresinde dönmesini engellemektir. Etki-tepki ilkesi gereği, gövdeye uygulanan tepki kuvveti, helikopter yerdeyken yer ile sürtünme nedeniyle gövdeyi döndüremez.

Ancak helikopter havalandığında bu kuvvet, gövdeyi ters yönde döndürecektir. Bu yüzden, gövdenin dönmesi gereken yöne ters yönde bir kuvvetle bu tepki kuvveti dengelenmelidir. Bunun için kuyruk pervanesinin oluşturduğu itme kullanılır [23]. Kuyruk pervanesi için ayrı bir motor kullanılmaz fakat ana motordan bir mil yardımıyla çalıştırılır.

2.3.1. Gyrocopter Tip Pervane Sistemleri

Gyrocopter rotor kanatları, herhangi bir rotor taşıtının sadece en ilgi çekici kısmı değil, aynı zamanda uçuş güvenliği ve performansı için de en önemlisidir. Gyrocopterlerin serbest dönen rotor bıçakları, kendisini diğer tüm uçaklardan ayıran şeydir. Gyroplane rotor kanatları, helikopterlerde bulunanlara benzerken, bazı önemli farklılıklar vardır [24].

Gyroplanes rotorları, helikopterlerde kullanılanlardan daha küçük kord ve daha uzun açıklıklı olma eğilimindedir. Bir gyroplane üzerindeki rotorun otomatik rotasyonda olması gerektiğinden, sadece taşıma kuvveti üretmek için yeterli alana değil, aynı zamanda rotorun da dönmesi için yeterli enerjiye sahip olması gerekir. Bir gyroplane rotor kanadı tipik olarak bir helikopter rotor kanadının üst ve alt arasında daha simetrik olduğu bir kanat hava folyosu gibi şekillenir. Bunun nedeni bir gyrocopter rotorun kaldırma amaçlı olması ve bir helikopter kanatlarının ise aslı durma verimliliği için tasarlanmasıdır [24].

Gyroplane rotor bıçakları plastik, kumaş, ahşap, metal ve kompozitlerden yapılmıştır. Bu malzemeler birçok farklı tipte rotor sisteminde ve farklı imalat yöntemleriyle kullanılmıştır. Bunun tersine, tasarım aynı zamanda kullanılacak malzemeler üzerinde belirli kısıtlamalar getirir ve böylece malzeme seçimi için kriterler belirler. Başka bir deyişle, malzeme seçimi, kavramsal tasarım ilkesi ve üretim yöntemi gerçek bir durumda birbirinden bağımsız olarak düşünülemez. Bir hava aracı rotor palleri üretilmeden önce birçok faktör göz önüne alınır. Helikopter gibi yüksek hızlar tutunma ve kargo gibi durumlar var ise maliyet göz ardı edilebilirken, gyrocopter gibi daha düşük konseptli tasarımlar için maliyet önemli etkidir. İlk değerlendirmenin yapılabileceği en önemli malzeme özellikleri şunlardır [24]:

- Özgül Ağırlık (G / cm^3)
- Dayanım Sınırı (N / mm^2)
- Esneklik Modülü (Kn / m^2)
- Yorulma Dayanımı
- Esneklik Modülü

Geleneksel uçak malzemesi alüminyumunun uygun malzeme özellikleri vardır, ancak uçak mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan üretim teknikleri çok pahalıdır. Bu nedenle alüminyum, yalnızca rotor kanatları makine yapımı yarı işlenmiş parçalardan monte edilebiliyorsa düşünülebilir. Titanyum maliyeti nedeniyle bir malzeme olarak göz ardı edilmektedir.

Parametre Materyal	Özgöl Ağırlık γ g/cm ³	Dayanım Limiti σ_B N/mm ²	Esneklik modülü E kN/mm ²	Kopma Mukave. σ_B/γ km	Özgöl esneklik modülü E/γ 10 ³ km	Yorulma Dayanımı $\pm\sigma_A$ 10 ⁷ N/mm ²
Çelik St 52	7.85	520	210	6.6	2.7	60
Alaşımlı Çelik 1.7735.4	7.85	680	210	8.7	2.7	70
Alüminyum AlZnMgCu	2.7	480	70	18	2.6	40
Alüminyum AlMg5 (weldable)	2.7	236	70	8.7	2.6	20
Titanyum alaşımı 3.7164.1	4.5	900	110	20	2.4	—
Fibre glass/epoxy* Kompozit	1.7	420	15	24.7	0.9	35
Carbon fibre/ epoxy* Kompozit	1.4	550	44	39	3.1	100
Aramide fibre/ epoxy* Kompozit	1.25	450	24	36	1.9	—
Tahta	0.38	Yakl. 65	Yakl. 8	Yakl. 17	Yakl. 2.1	Yakl. 20
Tahta/epoxy*	0.58	Yakl. 75	Yakl. 11	Yakl. 13	Yakl. 1.9	Yakl. 35

Şekil 2.12. Rotor kanatları için malzemelerin mukavemet ve sertlik parametreleri [25].

Yukarıda ki tabloya bakıldığında, ağırlığa bağlı olarak dayanım limiti, mukavemet ve yorulma gibi özelliklerin ön plana çıktığı iki farklı materyal görülmektedir. Bunlardan birisi kompozit olurken diğeri alüminyumdur. Alüminyumun özgül ağırlığının düşük olması ve maliyet düşüklüğü titanyumdan daha ön plana çıkarmaktadır. Havacılık sektöründe maliyet göz ardı edilebiliyor olsa da ağırlık önemli bir kazanım olucaktır.

Alüminyum ile kompozit malzemeler kıyaslandığında ise kompozit malzemelerin açıkça ön planda olduğu görülmektedir. Ancak maliyet ve onarım zorluğu, pervane üretiminde kompozitlerin dezavantajları olarak geçmektedir. Ek olarak havadaki baloncuk ve nem oranı, kompozitlerin yorulma ömürlerine olumsuz etki göstermektedir. Pervane ve rotor pal sistemleri de bu tür durumlara çok fazla maruz kaldığından dolayı, hava araçlarında daha komplike yerler için tercih edilmektedirler.

Alüminyumun korozyon direncinin çok iyi olması da alüminyumun tercih sebeplerindendir. Tam bu noktada helikopter rotor pal ve gyrocopter rotor pal arasındaki fark ortaya çıkmaktadır. Üretilcek pervane sisteminin malzeme seçimi ve tasarımını en çok maliyet etkilemektedir.

Maliyeti göz ardı edebilen her üretici firma kompozit malzemeye ve avantajlarına yönelirken, maliyetin göz ardı edilmediği üretici kısımlarda ise alüminyum ön plandadır. Bu yüzden helikopter ve benzeri hava taşıtlarında kompozit kullanımı yaygınken, gyrocopter ve daha kişisel kullanımlı hava taşıtlarında ise alüminyum kullanılmaktadır.

Kullanılan pervane sistemleri birkaç farklı tipte bulunmaktadır. Bu farklı sistemler hava taşıtlarının kullanım amacına, boyutuna ve kullanım amacına bağlıdır. Örneğin helikopterler havada asılı durabiliyorken, gyrocopterler duramamaktadır [26].

Helikopterler dikey kalkış yapmaktayken gyrocopterler ise ileriye doğru hızlanarak havalanan hava taşıtlarıdır [26]. Bu ve buna benzer birçok faktör pervane sisteminin ne tipte olacağını etkiler. Başlıca pervane tipleri şunlardır:

- Sabit Hatveli Pervaneler
- Yerde Ayarlanabilir Pervaneler
- Değişken Hatveli Pervaneler
- Sabit Hız Pervaneleri
- Tersinir Pervaneler

Gyrocopter pervaneleri Sabit hatveli pervaneler grubuna girmektedir. Uçuş boyunca pervaneler veya rotor pallerinin açısı değişmez. Yön verme işini ise rotor pallerin bağlanmış olduğu ana gövde kısmı yapmaktadır [26].

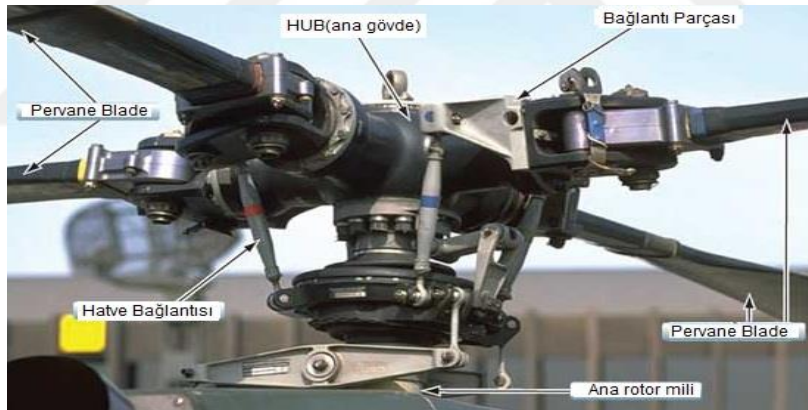
2.3.1.1. Sabit Hatveli Gyrocopter Pervane Sistemi

Pal açısı veya pervaneye yapılan kanat eğimine sahip pervane, sabit hatveli pervane olarak sınıflandırılır. Pervane üretildikten sonra, bıçak açısı değiştirilemez. Sabit hatveli pervaneler genellikle tek parça olup alüminyum alaşımı veya ahşaptan yapılmıştır. Bu pervaneler, iletim hızlarında en iyi verimi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Hem motor hem de uçak hızının belirli bir koşul kümesine uyarlar [17]. Bu koşullarda yapılacak herhangi bir değişiklik hem pervaneyi hem de motor verimliliğini azaltır. Pervanelere uçuş süresince açı vermenin birçok farklı nedeni ve yöntemi vardır. Ancak bunlar helikopter gibi daha komplike tasarım gerektiren hava araçlarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.13. Sabit hatveli rotor pal.

Yani bu tarz pervanelerde belirli bir uçuş aralığı mevcuttur. Bu uçuş aralığı dışında yapılan uçuşlar hem pervane pallerine hem de motora zarar verir. Sabit hatve pervaneler düşük hız, güç, rakım veya menzilli uçaklarda kullanılır [17].

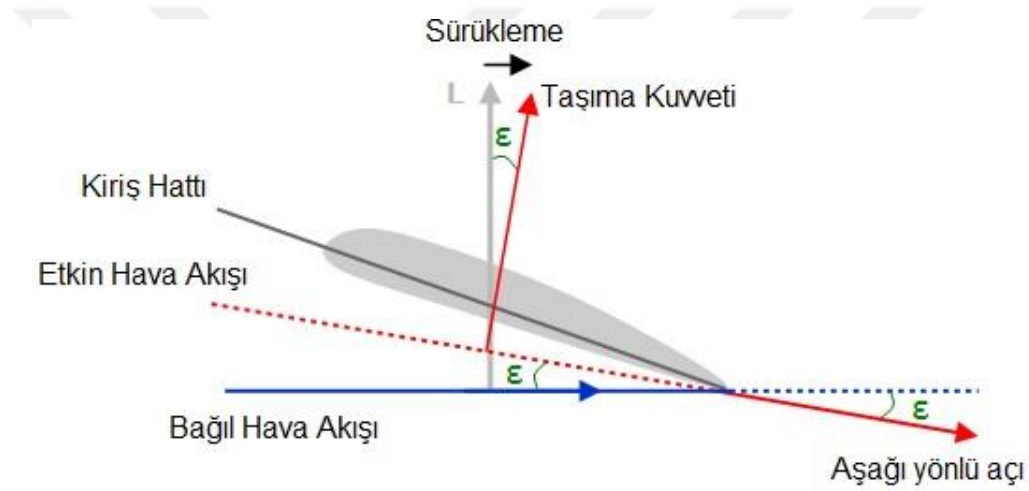


Şekil 2.14. Değişken hatveli rotor pali [27].

Birçok tek motorlu uçak, üzerinde sabit hatve pervanelere sahiptir ve sunduğu avantajlar arasında basit kullanım ve daha az masraf bulunmaktadır. Bu pervaneler, uçuş sırasında pilotun kontrol girişi gerektirmez. Gyrocopter pervaneleri pilotun el kumandası yardımıyla sağa ve sola yatay eğim gösterirler. Bu yatış da gyrocopterin sağ ve sola doğru manevra yapmasına izin vermektedir. Ancak bu sistemin rotor pallerin açısı ile ilgili bir alakası bulunmamaktadır. Rotorların bağlı olduğu hub (gövde) adı verilen parçanın hareketi ile sağlanmaktadır.

2.4. Gyrocopterlerin Havacılıkta Yeri

Gyrocopter, helikopter benzeri bir ana rotor sistemine sahip olan, kuyruk rotoru olmayan, çok düşük süratlerde uçabilen fakat helikopter gibi askıda kalamayan bir hava aracıdır. Gyrocopterin helikopterden farklı olarak en belirgin özelliği, ana rotor sisteminin helikopterde olduğu gibi bir sürücü şaft tarafından çevrilmemesidir. Gyrocopterde ana rotor sisteminin dönmesini tıpkı bir rüzgârgülünde olduğu gibi ileri hareket ile oluşan hava akımı sağlar. Gyrocopterler helikopterden önce icat edilmiştir fakat askıda kalma özelliği olmamasından dolayı helikopterin icadı ile popülerliğini kaybetmiştir. Yani helikopterlerin gelişmesinde büyük öneme sahip olmuş hava taşıtlarıdır [28].



Şekil 2.15. Gyrocopter uçuş vektör diagramı [29].

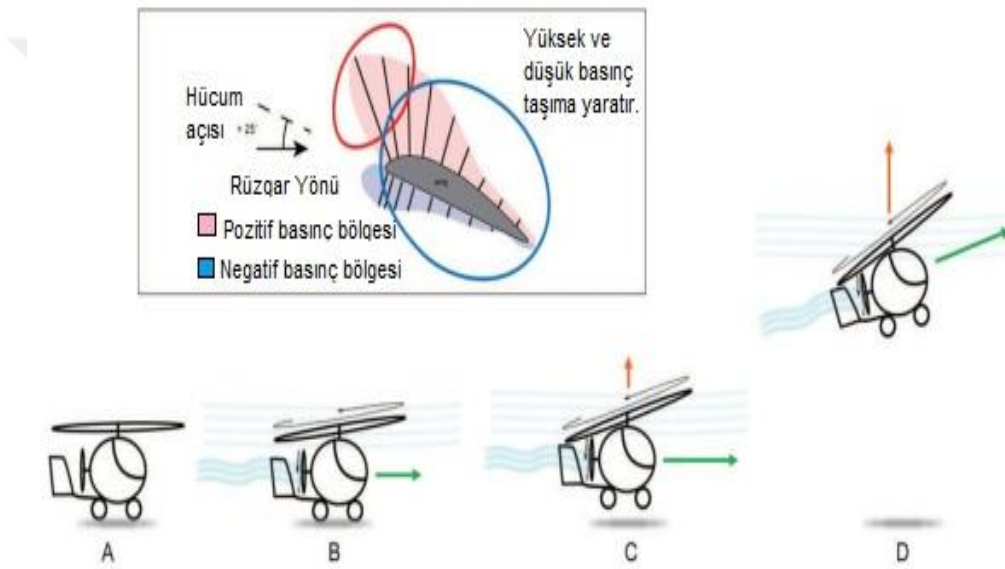
Gyrocopter, serbest dönen bir rotor vasıtasıyla kaldırma sağlayan bir uçaktır. Motorlu bir rotoru olan bir helikopterden farklı olarak, bir taşıtın rotoru, hava taşıtı ilerledikçe rotor kanatlarına hava yükü nedeniyle uçuşta döner. Bir gyrocopterin serbest eğirme rotoru, kuyruk rotoru gibi bir anti-tork cihazına ihtiyaç duymaz, çünkü güç verilen bir rotorla ilişkilendirilecek tork yükü yoktur [28].

En yaygın gyroplane konfigürasyonları, iniş takımlarına sahip bir uçak iskeleti, genel olarak iki veya üç bıçağa sahip tek bir rotor, itici veya çekici konfigürasyonunda bir itme motoru ve pervane ve bir uçak tarzı kuyruk düzeneğinden oluşur. Lövy ve uçuş kontrolleri esasen geleneksel bir hava taşıtınıninkiyle aynı şekilde çalışır. Performansı artırmak için tasarıma bir kanat dâhil edilebilir. Helikopterler ve gyrocopterler arasındaki temel fark, motorlu uçuşta, bir gyroplane rotor sisteminin oto rotasyonda çalıştığıdır. Diğer bir deyişle, rotor, bıçakları

döndürmek ve yukarıdan hava çekmek için motor gücü kullanmak yerine bıçakların içinden akan havanın bir sonucu olarak serbestçe döner.

Otomatik döndürme sırasında, rotor bıçaklarının dönmesini sağlayan kuvvetlerin yanı sıra, uçağı havada tutmak için taşıma kuvveti yaratılır. Aerodinamik olarak, normal uçuşta bir gyrocopterin rotor sistemi, bir motor çıkış ileri otorotatif iniş sırasında bir helikopter rotoru gibi çalışır. Kalkıştan önce gyrocopter rotoru önce gerekli kaldırma kuvvetini oluşturmak için yeterli bir rotor hızına ulaşmalıdır [26].

Çok temel gyrocopterlerde bu, pallerin başlangıçta elle döndürülmesi ile gerçekleştirilir. Uçak daha sonra rotor diski arkaya yatırılarak konumlandırılır ve böylece sistemden geçen hava akışı, onu uçuş için gerekli hıza hızlandırır.



Şekil 2.16. Gyrocopterin uçuş prensibi [30].

Daha gelişmiş gyrocopterlerde, rotoru döndürmek için mekanik, elektriksel veya hidrolik olarak tahrik edilen bir prerotator kullanılır. Bu tür prerotatörlerin sadece zeminde kullanılabileceğine dikkat edilmelidir, çünkü oluşturdıkları tork gyrocopterin alt takımı ve yüzey arasındaki sürtünme ile aşılmalıdır. Çok az durumda, rotoru önceden döndürmek için rotor kanatlarının uçlarına monte edilen jetler kullanılmıştır. Birçok prerotatör, uçuş için gerekli olan rotor hızının sadece bir kısmını elde edebilir; geri kalanı taksi ile veya kalkış yolu sırasında kazanılır. Bununla birlikte, bazı prerotator sistemleri, rotor hızını bir "atlama" veya dikey kalkış ve hızlanma profili aracılığıyla sürdürmek için yeterli ataletle sahip uçuş için gereken hızdan daha fazla rotor hızına ulaşacak kadar sağlamdır [31].

Gyrocopterlerin belirli standart teknik özellikleri yoktur. Kullanım amacı ve buna bağlı olarak motor tasarımı teknik özelliklerin çoğunu belirlemektedir.

Ancak gyrocopterlerin çalışma prensibi olarak 4 veya 6 pistonlu bir motor takıldığı için teknik özellikleri çıkarılabilmektedir. Helikopterlerde yüksek güç gerektiren bir turboshaft motor kullanıldığından, pistonlu motorlara ziyade daha yüksek standartların olması kaçınılmazdır. Gyrocopterlerin bazı teknik özellikleri şunlardır [30] :

- Ağırlık: 270-330 Kg
- Beygir Gücü: 80-115 Hp
- Kalkış Hızı Min. : 40 Km/Sa
- Maximum Hızı: 150-200 Km/Sa
- Azami İrtifa: 3500-3700 Metre
- Menzil: 160 Km
- Seyir Süresi: 1,5 Saat
- Yüklü Ağırlık Max: 550 Kg

İstisnai özellikleri nedeniyle gyrocopterin, polis operasyonları, sınır kontrolü, sahil güvenlik, acil durum yönetimi veya tarımsal amaçlar gibi görevlerde kullanım potansiyeli yüksektir. Gyrocopterlerin dünyadaki en güvenli hava taşıtlarından biri olduğu düşünülmektedir. Baskı üreten pervane başarısız olursa, döner kanat oto rotasyonda kalır. Bu, pilotun gyrocopteri yavaş ve güvenli bir şekilde indirmesini sağlar. Aslında, gyrocopter acil bir duruma inmesi, normal şartlar altında iniş yapmakla aynı prosedürdür [28].

İyi kullanım özelliklerine ek olarak gyrocopterin işletme ve bakım maliyetleri, özellikle bir helikopterle karşılaştırıldığında çok daha düşüktür. Gyrocopterler helikopterin minimize edilmiş hali olarak düşünülür. Ancak bu durum tam tersidir. Helikopterler gyrocopterlerin büyütülmüş, geliştirilmiş ve daha işlevsel sebepler için tasarlanmış halidir. İlk olarak gyrocopterler tasarlanmış ancak kullanım amacı doğrultusunda büyütülerek helikopter haline getirilmiştir [28].

Helikopterlerin birçok avantajının olması şuan onları daha yaygın hava taşıtları yapmasına karşı gyrocopterlerinde birçok avantajları mevcuttur. Ancak hem sivil havacılıkta hem de askeri havacılıkta işlev olarak konumlandırılmamış olması onlar adına en büyük dezavantaj geçmektedir.

Gyrocopterlerin başlıca avantajları şunlardır [32]:

- Yapıları basittir, bakımı kolaydır, arıza yapacak parça sayısı çok azdır.
- Ana rotor, motor tarafından döndürülmez, ileri hareket ile oluşan rüzgâr tarafından çevrilir. (Sürekli oto rotasyon)
- Uçuş emniyetini direkt etkileyen elektrik, hidrolik, pnömatis sistemler yoktur.
- Ana rotor sürekli "otorotasyon" durumunda olduğundan motor arızasında helikopterde olduğu gibi pilotun gecikmesizin otorotasyona giriş kumandasına ihtiyaç duymaz. Rotor süzülüş esnasında tıpkı bir "rüzgârgülü" gibi dönüşüne devam eder.
- İniş yeri Delta kanatlı çok hafif hava araçlarının ihtiyaç duyacağı mesafe gibi uzun değildir. İniş pistleri çok kısadır.
- Helikopterlerin, üstten kanat uçakların ve motorlu çoğu hava taşıtının uçamadığı rüzgârlı havalarda uçuş yapabilirler.
- İniş esnasında sabit kanatlı hava araçlarında ciddi problem olan yan rüzgârı gyrocopterler için rüzgârı baştan alındığında avantaja dönüşür.
- İki palli yapısı sayesinde taşıma, park etme ve depolaması kolaydır.



Şekil 2.17. Gyrocopterin görünümü.

2.5. Mevcut Durumda Pervane Kıyaslaması

Gyrocopterler için birçok farklı malzeme ve farklı tipte rotor pal sistemi olsa da dinamik yükler altında yorulma dayanımı, özgül ağırlık ve kopma mukavemeti gibi parametreler göz önüne alındığında iki farklı tip malzemeden üretilmiş pervane sistemi göz önüne çıkmaktadır. Aerofil şekli olarak kullanılan modellemeler de farklılık göstermektedir ve bu konuya tezin diğer bölümlerinde yer verilecektir.

Birçok malzeme denenmiş ve kullanılmış olmasına rağmen iki tarz pervane tipi yaygın ve günümüzde dâhil kullanılmaktadır. Bu iki tip pervane sistemlerinin (rotor pal) avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak bu seçenekler kullanım amacı, proje maliyeti ve alt yapı gibi durumlara bakılarak değerlendirmektedir. Örneğin, kullanım amacı daha düşük sürat ve seyir gerektiren bir durumda yorulma direncinde yüksek değerlere bakılmaya ihtiyaç duyulmazken, daha spesifik tarzda hava aracı üretimi yapılan projelerde pervane sistemi için ekstra maliyet durumu istenmez. Bu ve bunun gibi birçok durum gyrocopterlere monte edilen pervane sistemlerini belirlemede etkili olmaktadır. 1920'lerden günümüze kadar uzanan gyrocopterlerde en yaygın kullanılan rotor paller şunlardır [32].

- Alüminyum rotor pal
- Kompozit rotor pal

2.5.1. Alüminyum rotor pal

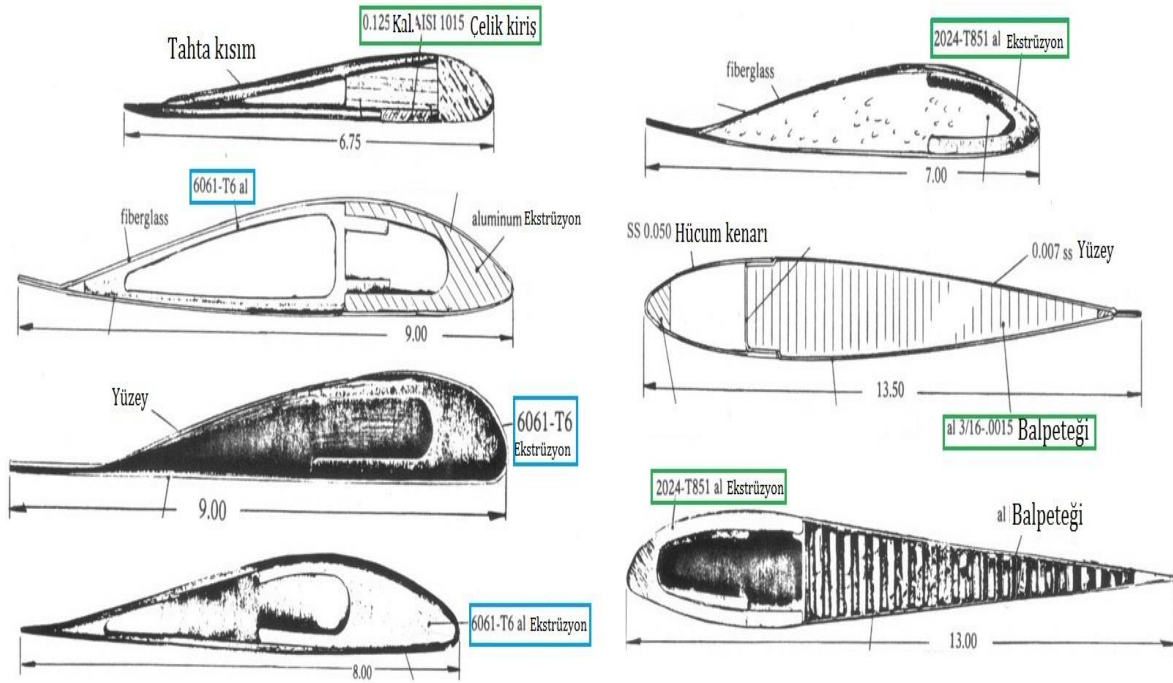
Gyrocopterler, helikopterlerden önce yapımına başlanmış fakat farklı sebeplerden dolayı helikopterler daha yaygın hale gelirken gyrocopterler istedikleri etkiyi yaratamamıştır.

Ancak 1900'lerin başından beri gyrocopterler havacılık sektöründe bulunmaktadır. İlk gyrocopterlerde, kumaş ve tahta parçası rotor bladerler kullanılmıştır. Ancak tahtanın havadaki nemi kendine çekip ağırlaşması ve kumaş parçalarının da havada yıpranması çok etkili bir pervane yöntem olarak sektörde barınmamıştır. Bu yüzden daha uzun uçuş sürelerine uygun ve efektif pervane sistemi geliştirilmiştir. Öncelik olarak çelik rotor paller kullanılmış fakat çelik materyalinin özgül ağırlığı yüksek olduğu için alüminyum rotor paller üretilmiştir [28].

Alüminyum kullanılmasının birçok farklı sebebi bulunmaktadır. Ancak en önemli faktör, ağırlığın düşük olmasıyla birlikte mukavemet, dayanım, esneklik gibi parametrelerin yüksek olmasıdır. Yani hava taşıtında ağırlıktan kazanç sağlanırken kuvvet yönünden de artış olmaktadır. Bu durum alüminyumu diğer metallerden ayıran en önemli özelliklerin başında gelir. [28].

Alüminyum rotor palleri birçok farklı seriden olabilirler. En yaygın kullanılanlardan birkaçı 2024-T4, 2024-T6, 6061-T6, 6063-T5, 7075-T6'dır. Bu alüminyum alaşımları farklı özellikleriyle ön plana çıkmasına karşın ekstrüzyon ile seri üretimde ve korozyon direnci bakımından ön planda olmasından dolayı 6000 serisi alüminyum alaşımları git gide daha fazla kullanılmıştır [33]. Günümüzde sivil havacılık sektöründe en çok kullanılan alüminyum alaşımları 2024, 6061, 7075 olsalar dâhil malzeme bilimi ve teknolojinin gelişmesiyle kişisel hava aracı tasarımları artmış bu yüzden düşük maliyetli hava araçları yaygınlaşmıştır [10].

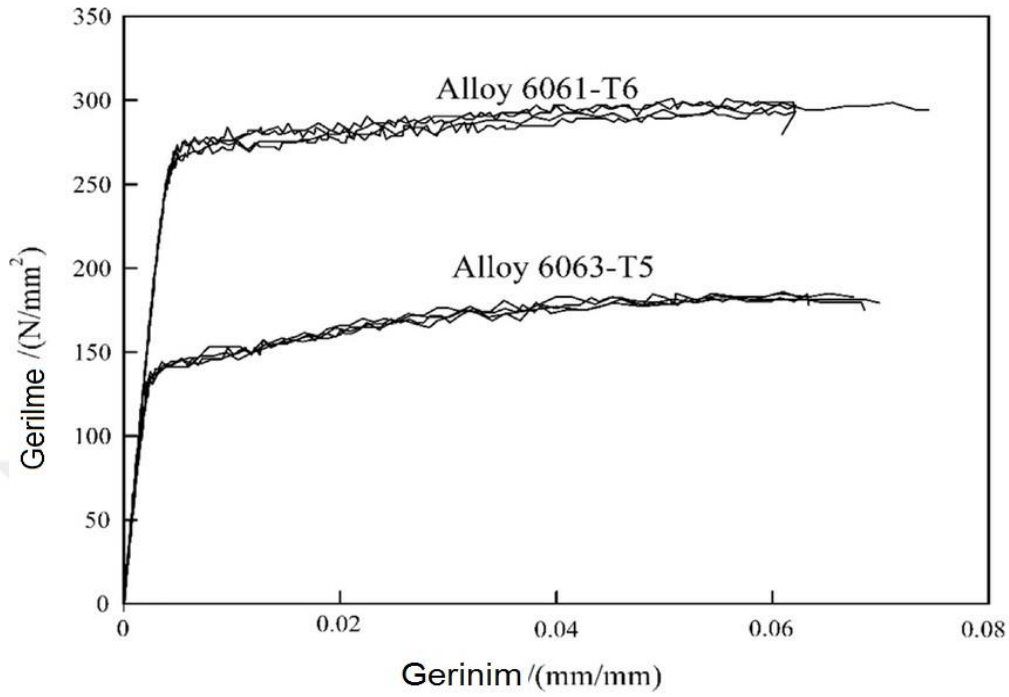
Bu tip hava araçlarının başında gelen gyrocopterler de ise alüminyum çok sık kullanılmaktadır. Gyrocopterler için rotor pal üretimi az önceki bahsedilen sebeplerden ötürü genellikle 6000 serisi alüminyumdan yapılmakta ve minimize hava taşıtları için önemli verim arz etmektedir.



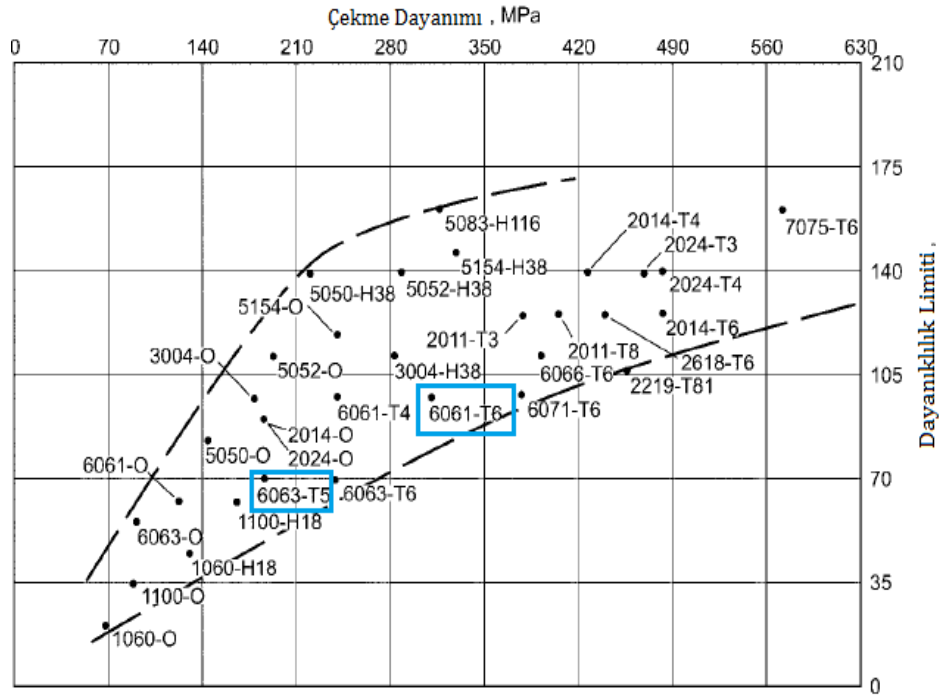
Şekil 2.18. Gyrocopterlerde kullanılan farklı rotor pal yapıları [34].

6000 serisi alüminyumda iki farklı alaşım ön plana çıkmaktadır. Bunlar 6061 ve 6063'tür. 6061 alaşımında daha önce bahsedildiği gibi T6 temperi mekanik özellikleri bakımından daha güçlü olduğu için ön plana çıkarken 6063 alüminyum alaşımı T5 temperiyle birlikte birçok özelliğini geliştirmiştir [35]. Bu iki alüminyum alaşımının rotor pal için avantajları, korozyon dirençlerinin yüksek olması ve ekstrüze edilebilir olmasıdır. Rotor pal veya pervane sistemleri herhangi motor aksamı gerektirmedikinden sıcaklık ile ilgili bir parametreleri yoktur.

Ancak yükseldikçe havanın soğuması ve nem gibi faktörler korozyona maruz bırakacağı için bu tarz pervane sistemlerinde korozyon direnci önemlidir.



Şekil 2.19. 6061-T6 ve 6063-T5 Gerilme-Gerinim Karşılaştırılması [36].



Şekil 2.20. Alüminyum alaşımların çekme dayanımı ve dayanıklılık limiti grafiği [37].

Şekil 2.19. ve şekil 2.20.' de gösterildiği gibi 6061-T6 alüminyum alaşımı mekanik parametreler bakımından 6063-T5 e kıyasla daha iyi konumdadır. 6063 ekstrüzyon olarak daha kolay ekstrüze olmasına karşın mekanik ve mukavemet gererken yerlerde 6061-T6 alüminyum alaşımının daha iyi olması sebebiyle, gyrocopterlerin rotor pal üretimlerinde günümüzde 6061 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Mevcut durumda gyrocopter veya buna benzer hava taşıtlarının pervane ve rotor pal sistemleri için alüminyum alaşımları kullanılan durumlarda bu yaygın olarak 6061-T6 olmaktadır.

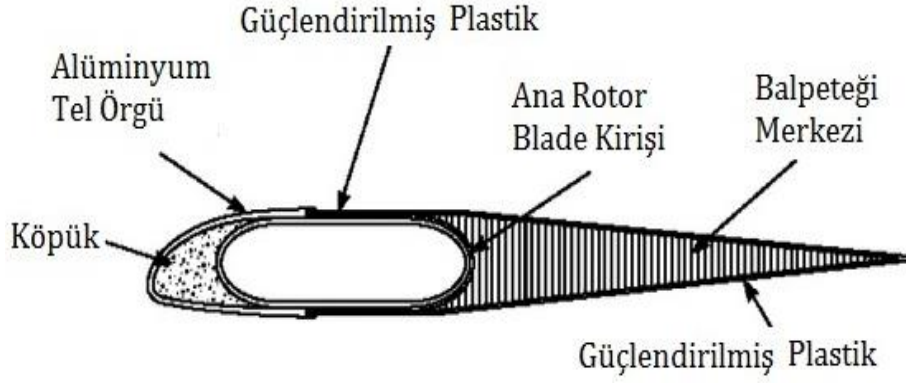
2.5.2. Kompozit rotor pal

Ana rotor palleri bir helikopterin hayati bir parçasıdır, çünkü bir helikopterin tüm ağırlığını desteklemekle sorumludurlar. Örneğin, manevralar yapılırken rotor kanatları üzerindeki kuvvetler daha da artabilir, 1.5G'de yukarı çekmek, rotorun helikopterin ağırlığının 1.5 katını desteklemesi gerektiği anlamına gelir. İlk helikopter rotor kanatları lamine ahşap ve kumaştan yapılmıştır [38].

Rotor pallerini oluşturmak için ahşap kullanmanın en büyük dezavantajlarından biri, ahşabın rotor palinin kütlesini değiştiren nemi emmesidir. Helikopter tipi daha geniş ölçekli hava araçlarında metal alaşımları kullanılmış fakat uzun süreli kullanım ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde yetersiz kalmıştır [10]. Bu yüzden devreye kompozit rotor paller girmiştir. Bunlarda günümüzde helikopterler için en fazla kullanılan pervane bileşenleridir.

Rotor kanadı tasarımında radikal ilerleme, kompozit malzemelerin, örneğin cam elyaf takviyeli plastiklerin (GFRP) yapısı ve temeli nedeniyle mümkün olmuştur. Bunlar, her ikisi de elde edilen malzemenin özelliklerini ve özelliklerini belirleyen polimerik bir matris içinde dağılmış cam elyaflardan oluşur [38]. Matris, birtakım işlevlere sahiptir, birincisi lifleri birbirine bağlamak gibi, herhangi bir dış gerilmenin onlara iletilmesini ve dağıtılmasını sağlar. Ek olarak, sünek, nispeten yumuşak ve oldukça yüksek bir plastisiteye sahip olan matris, lifler arasındaki çatlak ilerlemesini önlemek için ikinci rolünü oynayabilmektedir [39].

Rotor kanatları, hem operasyonel hem de çevresel olarak son derece zorlu koşullara maruz kalır. Yaklaşık 200 m/s'lik (480mph) dönme ucu hızları ve uçuş sırasında "çarpma", hem nemde hem de sıcaklıkta aşırı uçlarla birleştirilir. İkincil olarak -40 °C ila + 90 °C arasında değişebilir [20]. Bu nedenle, verimli ve etkili rotor kanatları için bir dizi spesifik malzeme özelliği gereklidir. Bu mülk gereksinimlerini karşılayan kompozitler yapılabilir. Kompozit yapıların en büyük avantajlarından biri de farklı tipte koşullarda çalışabilmesi ve korozyon göstermemeleridir. Bu iki özelliğin yanında çok yüksek mukavemet göstermeleri havacılık için aranan özelliklerin başında gelmektedir.



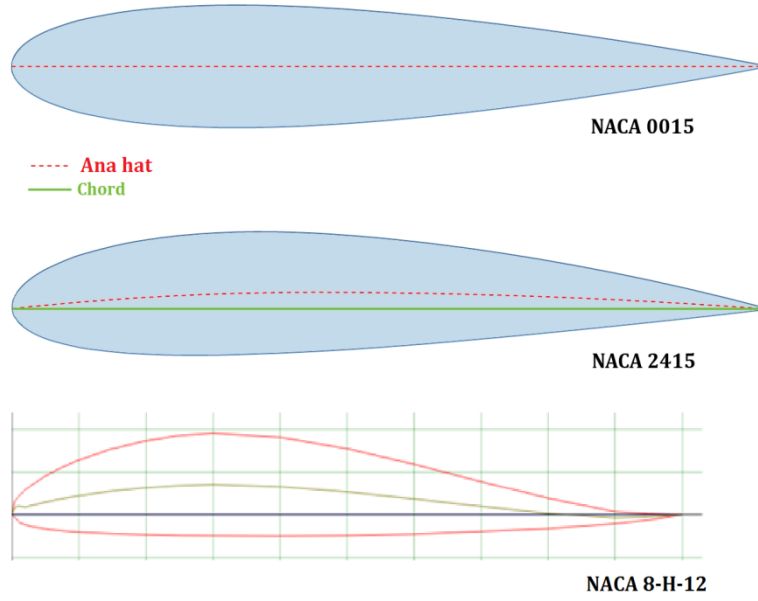
Şekil 2.21. Kompozit rotor pal örneği [40].

Bu daha sonra kapatılır, malzemeyi istenen şekil ve şekle ezerek harici bir hidrolik basınç uygulanır. Sertleştirme, basıncın korunduğu ve sıcaklığın yavaş yavaş 125 ° C'ye çıkarıldığı bilgisayar kontrollü bir işlemle tamamlanır. Son olarak, bıçak yapısı iki bileşenli bıçak katmanları arasına petek çekirdeğinin basit bir şekilde yapışması ile tamamlanır [8]. Bu üretim şeması elyaf takviyeli kompozit rotor paller için basit bir tanım niteliğindedir. Sonradan gelişen sistemlerde birçok yeni özellik ve takviye ortaya çıkmıştır.

Buna ek olarak, karmaşık pallerin işlenmesi ve imalatı çok daha kolaydır, yapıştırıcılarla birleştirilir, perçinleme ve montajı basitleştirme ihtiyacını ortadan kaldırır ve metallere göre çok daha ucuz takımlar kullanılarak üretilebilir. Mukavemet ve kimyasal etkisizlikleri de rotor kanatlarında kullanım için oldukça arzu edilir kılmaktadır.

Bu nedenle, GFRP'ler gibi kompozit malzemeler, hafiflik, üretim kolaylığı, göreceli ucuzluk ve mukavemet gibi metallere göre birçok avantaj sunar. Bununla birlikte, GFRP'lerin büyük bir dezavantajı vardır; sertlikten yoksunlar, helikopter rotor bıçaklarının gerektirdiği hayati bir özelliktir [41]. Bu sorunun çözümü, karbon fiber takviyeli plastik adı verilen başka bir kompozit malzemede yatmaktadır.

Bu malzemelerde kullanılan yüksek mukavemetli bileşen elyaflar poliakrilonitril, zift ve suni ipek malzemeden imal edilir ve sonuç olarak tüm takviye edici elyaf malzemelerin en yüksek spesifik modülüne sahiptir. Diğer pek çok arzu edilen özellik ve karakteristik, çelik veya alüminyumdan dört ila altı kat daha iyi olan mukavemet-yoğunluk oranları da dâhil olmak üzere kompozitlerin kullanılmasıyla elde edilir. Bazı kompozitlerin spesifik modülü, çelik ve alüminyumunkinden çok daha büyüktür ve metal eşdeğerlerinden %45 daha hafif olan kompozit pale yol açar [35].

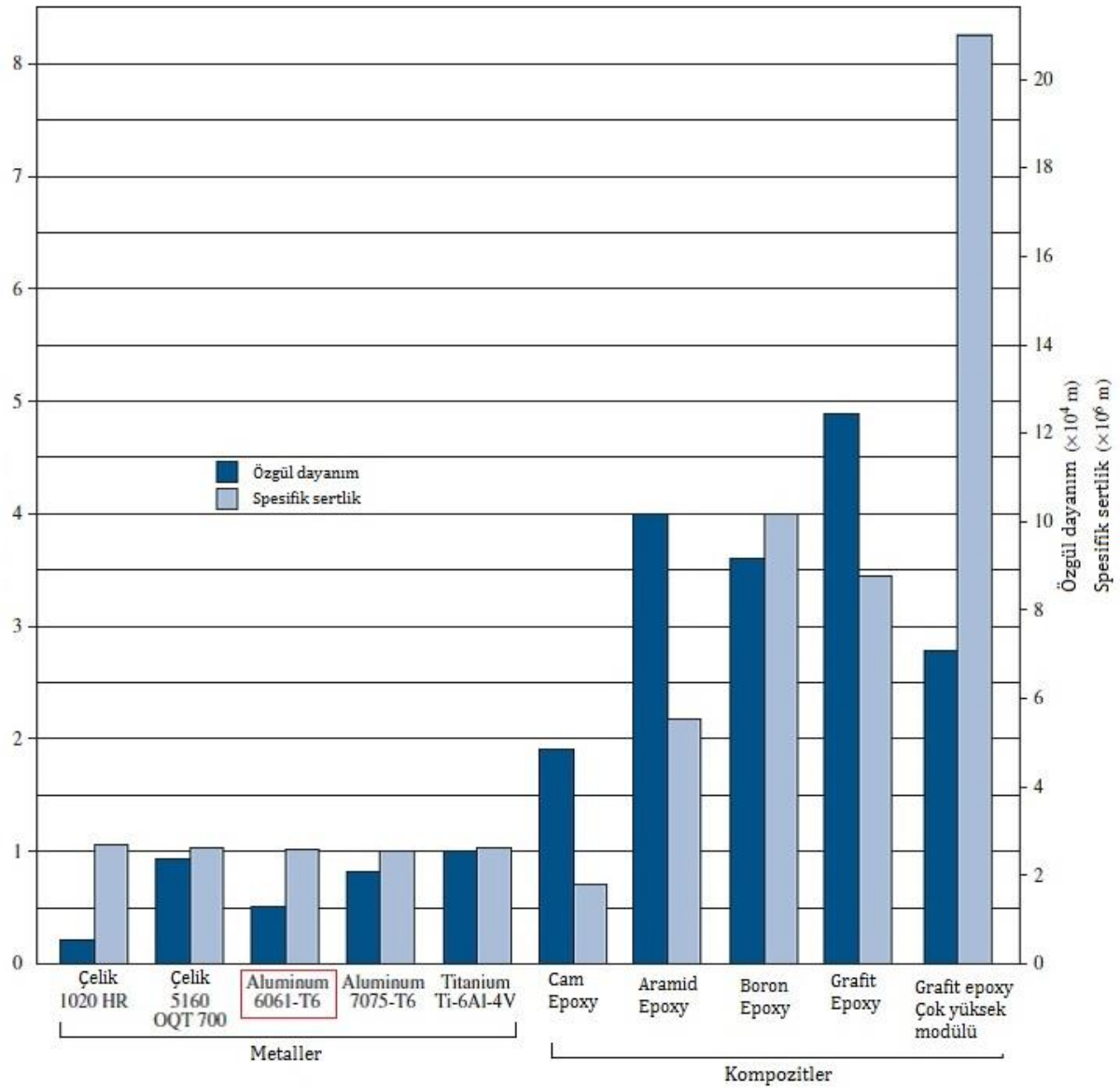


Şekil 2.22. Farklı aerofil yapıların kıyaslaması [42].

Kompozit rotor pallerin temel prensibi her malzemenin iyi özelliğini içeriğine katması, istenmeyen özelliği ise dışarda bırakmasıdır. Bu sebepten farklı tipte malzemelerin iyi özellikleri bir araya gelerek kompozitlerin oluşturur. Oluşan bu kompozit havacılık sektöründe sadece rotor bladelerde değil tüm tasarımlarda yerini almaktadır.

Şekil 2.7.' de gösterildiği üzere günümüz uçak teknolojisinin %50 sini kompozit malzemeler kapsamaktadır. Tüm hava aracı tasarımlarının kompozitten yapılmamasının en önemli sebebi ise maliyettir. Kompozit malzeme üretimi birçok yönden kazandırmasına karşı maliyet açısından yüksek bir maliyet gerektirmektedir. Her hava aracı özelliği ile maliyet hesabı farklı olduğundan dolayı her sistem için kompozit malzeme üretimi değişmektedir. Bu sebeple helikopter gibi daha büyük tasarımlarda kompozit vazgeçilmez bir tasarım olmuşken gyrocopter gibi daha minimize durumlarda kendilerine yer bulamazlar.

Kompozit rotor pallerin ikincil dezavantajları ise bakım durumudur. Havacılık sektöründe belirli uçuş saatine veya gereklilik durumuna göre bakım yapılması gerektiğinden kompozit parçaların bakım işlemi zor ve maliyetlidir. Alüminyum alaşımlı rotor pallerde pervane üstünde kolayca bakım işlemi yapılabilirken kompozit paller farklı sebeplerden dolayı hasara maruz kaldıklarında bakım işlemi sadece bölgesel yapılmakta ve ekstra maliyet gerektirmektedir.



Şekil 2.23. Bazı malzemelerin Dayanım-Sertlik kıyaslama grafiği [43].

Şekil 2.23.'de görüldüğü gibi kompozit malzemeler dayanım-sertlik gibi mekanik özellikler açısından rakip malzemelere göre oldukça iyi durumdadırlar. Bu yüzden havacılık sektöründe kompozit malzeme kullanımı günden güne yaygınlaşmaktadır. 2000 yılından bugüne gyrocopterlerin üretimi günden güne artış göstermekte ve bu üretimdeki artış pervane pal üretimini de artırmaktadır. Bu nedenle bahsedilen birçok sebepten dolayı alüminyum pervane palleri de gyrocopterlerde kullanım göstermektedir.

Bu çalışmada alüminyum pervane palleri üretilip yorulma davranışlarıyla, uçuş konfigürasyonları karşılaştırılarak optimum uçuş performansı öngörülmektedir. Böylece pervanelerin hangi aralıkta daha az yorulma gösterdiği gözlenerek malzemenin ömrü artırılacak ve maliyet düşürülecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Pervane Üretim Yöntemleri

En temel haliyle "Ekstrüzyon", metalin belirli güç yardımıyla itilerek ve kalıp içinden geçirilmesi ve yeniden şekillendirilmesi anlamına gelmektedir. Ekstrüzyon denildiğinde çoğunlukla alüminyuma yapılan muamele anlaşılabilir, metalürji sektöründe birçok farklı metale uygulanmaktadır [44]. Alüminyum ekstrüzyonu, alüminyumun bir kalıp içinde şekillendirilmiş bir hücre boyunca zorlanması ile malzemeye şekil verilmesinin tarifidir.

Her sistemde olduğu gibi pervane ve rotor blade sistemlerinde de birçok farklı tipte üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler, malzemenin cinsi, mekanik özelliklerine katkısı, üretim kolaylığı, teknolojik gelişmeler, hava aracının büyüklüğü ve maliyet gibi birçok farklı sebepten dolayı geliştirilmiştir.

Eğer malzeme ahşap ise ve gyrocopter pervanesi yapılmak isteniyorsa başka, kompozit ve helikopter için kullanılacak ise başka üretim yöntemi gereklidir. Genel itibarıyla gyrocopter alüminyum pervane üretimi, farklı birkaç yöntemle uygulanmaktadır. Bunlardan birkaçı şunlardır [43];

- Ekstrüzyon
- CNC İşleme
- Haddeleme
- Vakum İnfüzyonu
- Enjeksiyon Kalıplama
- Döküm

Günümüzde en çok kullanılan rotor pal sistemlerini alüminyum ve kompozit olarak geçmektedir. Kompozitin birçok avantajı olmasına karşın maliyet ve hafiflik yönünden alüminyum alaşımlarının kullanılması oldukça yaygındır. Rotor pal ve pervane sistemlerinde ise en çok kullanılan alüminyum alaşımı 6061'dir.

6061 alüminyum alaşımlarının, ekstrüzyon ile üretiminin kolay olması, korozyon direncinde ki yükseklik ve mukavemet gibi özelliklerinden ötürü çok fazla tercih edilmektedir. Bu çalışmada seri üretim kolaylığı ve parça başına düşen maliyet hesabı gibi durumlardan dolayı ekstrüzyon ile pervane üretimi yapılmıştır.

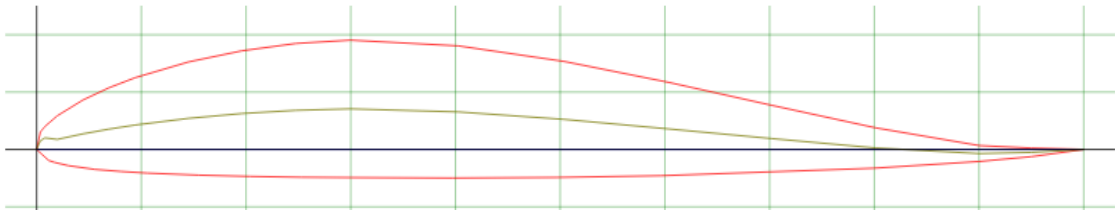
3.2. Ekstrüzyon ile Pervane Üretimi

Ekstrüzyon ile pervane üretimi, genel itibariyle kalıp içerisinde alüminyum alaşımın geçirilmesi ve istenilen kalıp şeklinde bir rotor blade elde edilmesi şeklindedir. Bu yöntem alüminyum ekstrüzyon için hem düşük maliyetli hem de seri üretimi yüksek bir yöntemdir. Ekstrüzyon ile üretimde üretim şeklini belirleyen kısım kalıp parçalarıdır. Bu kalıp parçaları çıkış ürününe istenilen şeklin verilmesini sağlar. Kalıplar takım çeliğinden üretilmekte ve bu üretim yüksek maliyet gerektirmektedir.



Şekil 3.1. Ekstrüzyon İşlem Şeması [45].

Çeliğin, alüminyumdan yüksek mukavemet ve sertlik gibi özellikler göstermesi nedeniyle alüminyum ekstrüzyonlarında takım çeliği kullanılmaktadır. Takım çelikleri, önce bilgisayar destekli tasarım işlemi, ardında CNC taşlama ve ısıtım işlemi gibi aşamalardan geçtikten sonra alüminyum ekstrüzyonunda kullanılır. Bilgisayar destekli tasarım, kullanılacak rotor blade aerofil yapısını koordinatlar sayesinde programa aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.2. NACA 8H12 aerofil yapısı [46].

Bu tasarım, CNC makinesi için referans kodu vermekte ve buradan aldığı komuta göre işlem yapmaktadır. Aerofil tasarımın takım çeliğin işlenmesinden sonra ısıtım işlem uygulanarak çeliğin hem sertliği artırılabilir hem de gerilim giderme uygulanabilir.

Yapılacak ekstrüzyon için NACA 8H12 aerofil yapısı tercih edilmiştir. Bu aerofil yapı askeri ve sivil helikopterler için yüksek kaldırma kuvveti amacıyla tasarlanmış ancak yetersiz gelmiştir. Bu nedenle gyrocopterler için yüksek aerodinamik verim içermektedirler. Aerodinamik verim taşıma kuvvetinin, sürüklenme kuvvetine oranı olarak düşünülebilir. Bu aerofil yapısı, helikopterler için orta verim sağlarken, gyrocopterler için yüksek verim sağlamaktadır.



Şekil 3.3. Rotor blade NACA 8H12 aerofil yapı örneği.



Şekil 3.4. Ekstrüzyonda kullanılan çelik kalıplar.

Ekstrüzyon ile üretimde birçok farklı işlem basamağı bulunmaktadır. Bu çalışmada alüminyum rotor paller sıcak ekstrüzyon yöntemi ile üretilmesi tercih edildi. Bu üretimde, alüminyum 6061 alaşımı sağladığı birçok avantajdan dolayı kullanıldı. Sıcak ekstrüzyon ile rotor blade üretimi 5 işlem basamağında gerçekleştirildi. Bunlar;

- Biyet Hazırlık ve Isıtma
- Ekstrüzyon Pres
- Soğutma
- Kesme
- Isıl İşlem

3.2.1. Biyet Hazırlık ve Isıtma

Biyetler pervane malzemesinin şekil almamış halidir. Kalıptan geçirildikten sonra rotor blade görüntüsüne ulaşacaktır. Biyetler çap genişliklerinde ve uzunluklarda bulunabilirler. Bu yüzden ekstrüzyon edilmeden önce istenilen boyuta ayarlanmalıdırlar. Gyrocopter için üretilecek pervane bladeleri 9 inç (22,86 cm) çapında ayarlanmış ve kesme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.5. Alüminyum biyet kesim makinesi.

Gyrocopter pervanesi üretimi için alüminyum biyetler 196,8 inç (500 cm) ve 9 inç (22,86 cm) olarak ölçeklendirildi. Bu ölçeklendirme üretilmek istenilen pervanenin uzunluğuna ve aerofil yapısına göre yapıldı. Biyet çapı ve uzunluğu rotor bladelerinin çapı ve uzunluğu değildir. Ekstrüzyon kalıbına girecek olan biyetler, minimum ölçeklendirme yapılarak hazırlandı.



Şekil 3.6. Kesilmiş 6061-T6 biyet örnekleri.

Uzunluk bakımından 196,8 inç ve çap olarak 9 inç olarak kesilen alüminyum biyetler diğer aşama ısıtılırlar. Bu ısıtma işlemi alüminyum malzemenin kalıptan geçebilmesi için yapılmaktadır. Farklı malzemelerin farklı sıcaklıkları bulunmaktadır. Alüminyum için bu ısıtma sıcaklığı 350 ile 500 °C arasında değişmektedir. Malzemenin saflığı büyük önem arz eder. Yükleme masasından fırın içerisine yüklenen biyetler, ilk olarak ön ısıtma reyonundaki baca gazlarının fan aracılığıyla yeniden kullanılması sonucu takribi 250°C ye kadar ısıtıldı.



Şekil 3.7. Biyet ısıtma fırını.



Şekil 3.8. Alüminyum biyet ısıtılması.

Ardından, temel ısıtma bölümünde kontrollü nozzle ateşleyiciler ile yaklaşık 450°C ye ısıtıldı. Fırın sıcaklığı, kapasitesine göre 4-5 bölgede, biyet yüzeyine aracısız temas eden termokupllar ile ölçüm yapılarak sıcaklığın doğruluğundan emin olundu.

3.2.2. Ekstrüzyon Pres

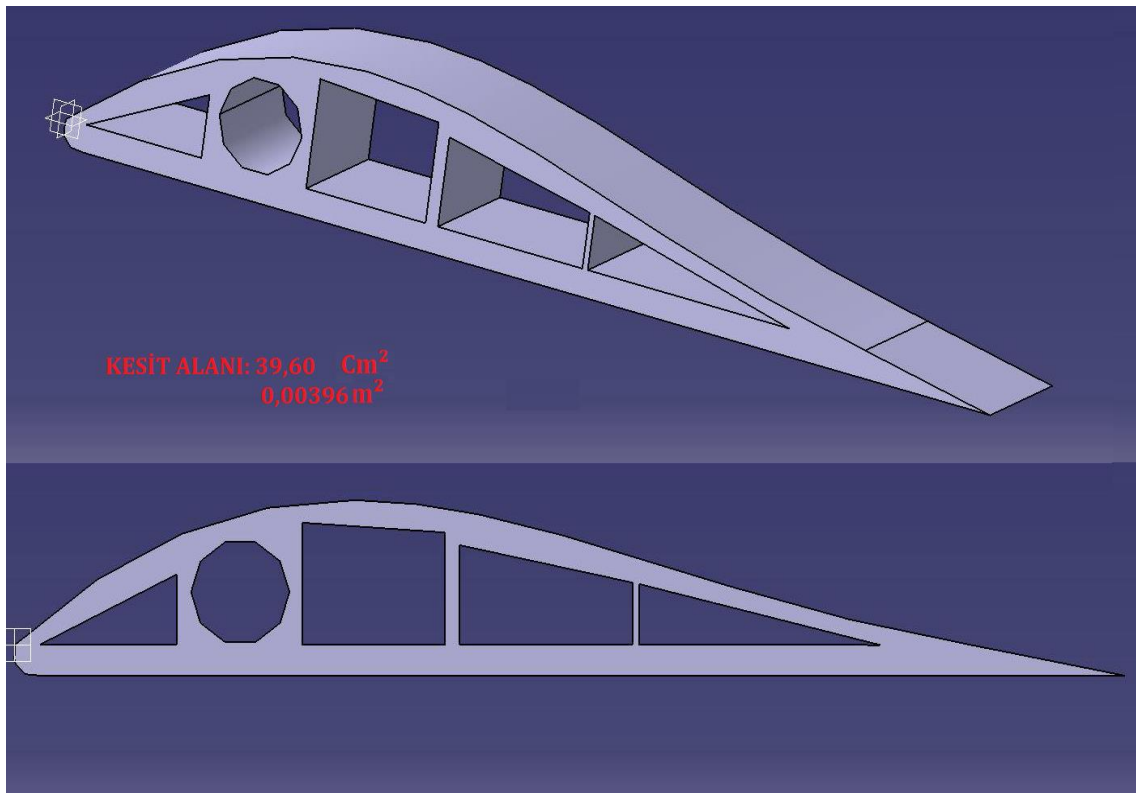
Ekstrüzyon ile pervane üretiminde ilk aşamada istenilen uzunluk ve çap ayarına göre kesim işlemi yapılan biyetler ardından ekstrüzyona girmeden önce fırınladı. Bu iki işlem sonrasında yeni basamak olan ekstrüzyon pres işlemidir. Ekstrüzyon pres işlemi belirlenmiş hız ve basınç değerleriyle, alüminyum biyeti kalıptan geçirme sürecidir. Ekstrüzyon için gerekli olan hız ve basınç değerlerini belirlemek için ekstrüzyon oranı hesaplanır. Bu oran, alüminyum biyet kesiti/ rotor blade kesiti olarak bulunmaktadır. Yani ekstrüzyon öncesi yanal kesitin, ekstrüzyon sonrası yanal kesite bölümü olarak açıklanabilir.



Şekil 3.9. Ekstrüzyonu etkileyen bazı faktörler.

Ekstrüzyon sürecinin istenilen ürünü verebilmesi açısından birkaç önemli faktör vardır. Bu faktörler ekstrüzyonun kalitesini belirler. Malzeme seçiminiz alüminyum 6061 olması ve bu alüminyum alaşımının ekstrüzyon uygulamalarında yüksek verim vermesi açısından alaşım saflığı ile rotor bladeleri etkileyecek bir durum söz konusu değildir. Biyet sıcaklığımızın da alüminyum için ideal aralık olan 350-500°C olmasından dolayı biyet sıcaklığımızda ürün kalitemiz açısından ideal seçim olarak belirlenmiştir. Geriye kalan ekstrüzyon sıcaklık ve hız faktörleri ise ürün kalitemizi etkileyecek parametrelerdir.

Daha önceden bahsedildiği gibi ekstrüzyon hız ve basınç bilgisini ekstrüzyon oranı belirlemektedir. Farklı ekstrüzyon oranlarına göre hız ve basınç değişmektedir.

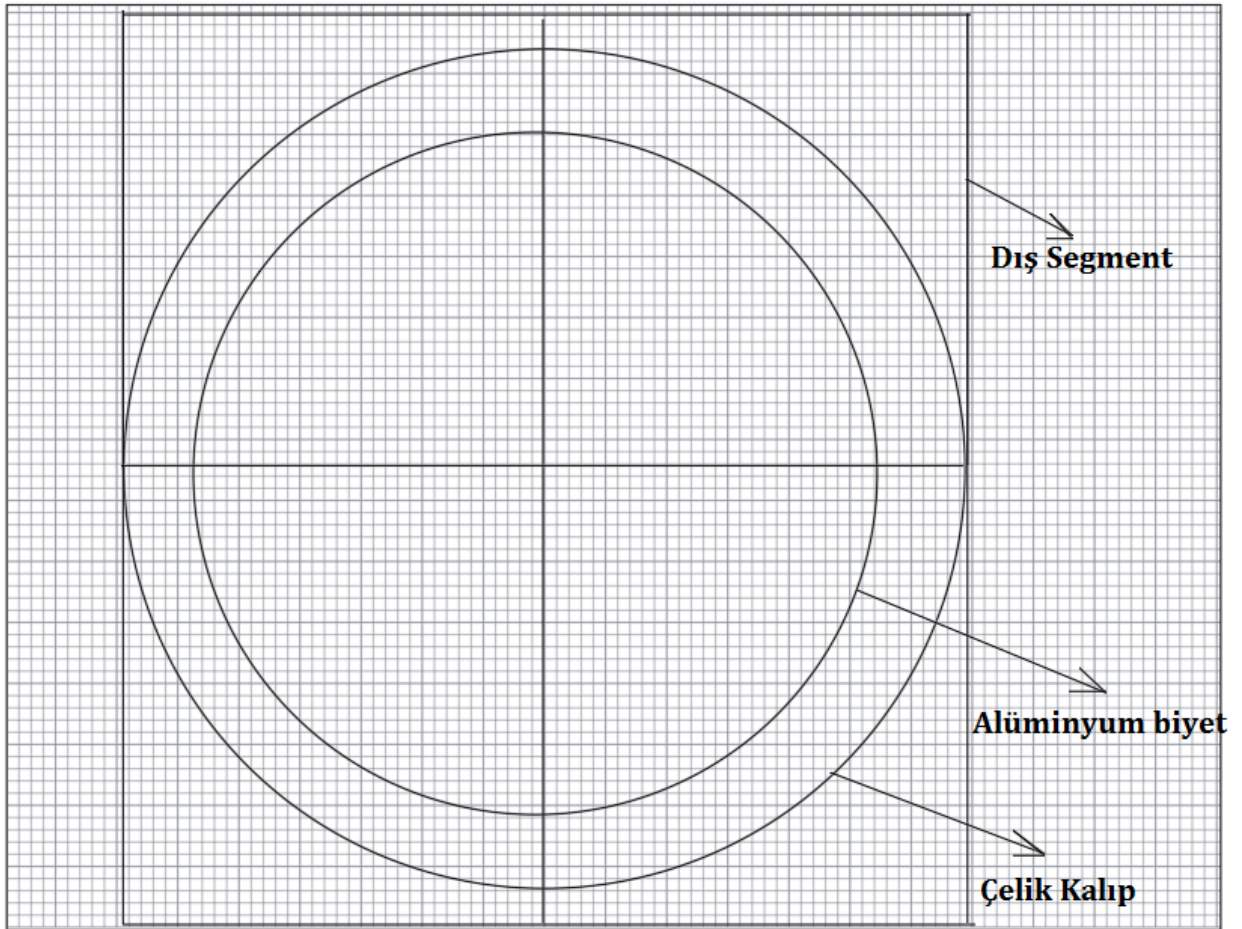


Şekil 3.10. Rotor pal yanıl kesit çizimi.

Üretilcek rotor blade AutoCAD programında 3 boyutlu çizildi ve yanıl alanı 39,60 cm² veya 0,00396 m² olarak hesaplandı. Daha öncede kesim işlemi yapılan alüminyum biyetin boyu 5 metre ve yarıçapı 11,43 cm olarak belirlenmişti. Bu ebatlar baz alınarak yapılan yanıl alan hesabına göre 410,43 cm² ve 0,04 m² olarak hesaplandı. Ekstrüzyon oran formülü temel alınarak yapılan oranlamada 10:1 oranı elde edildi. Yukarıda elde edilen 10:1 oranı ekstrüzyon oranı olarak yüksek bir oran değildir. Uzun alüminyum biyetten, profil üretimi yapılma işleminde bu olağan bir durumdur. Yapılan hesaplamalar sonucu ekstrüzyon oranı 10:1 olarak kabul edildi ve ekstrüzyon hız değeri ve basınç kuvveti bu orana göre kullanıldı.

Ekstrüzyonda alüminyum biyeti kalıba iten kısma ram veya koç denir. Ekstrüzyon hızından kast ise bu başlığın alüminyum biyeti itiş hızıdır.

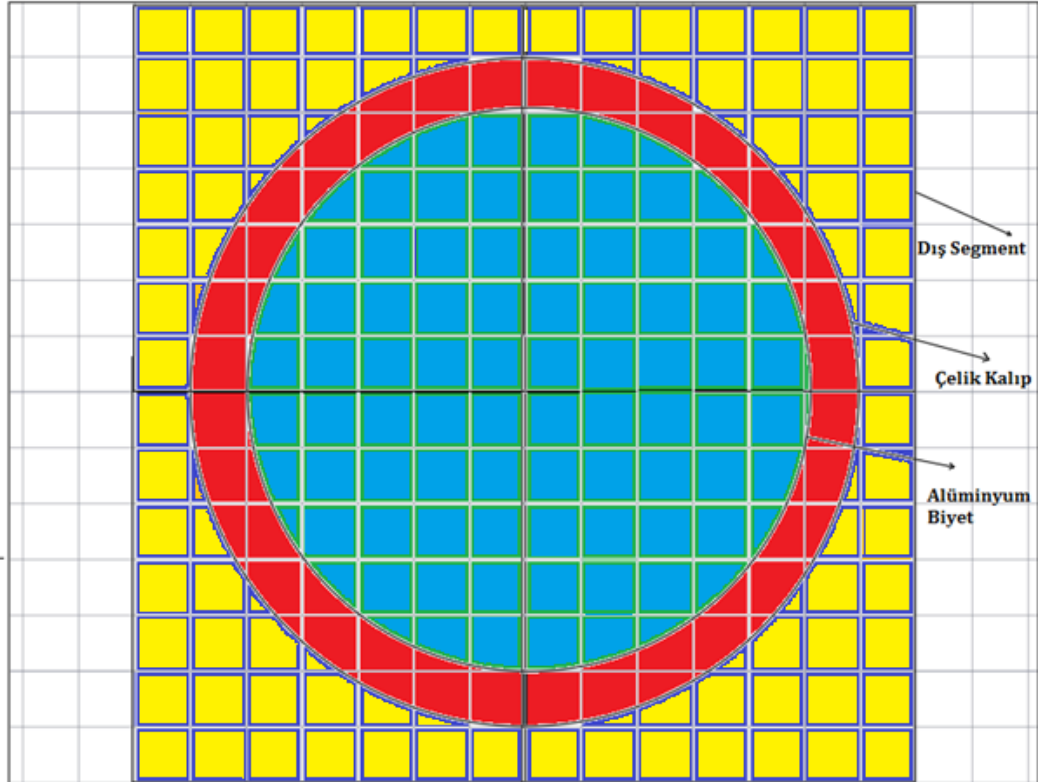
Ekstrüzyon ram hızı 0,4 m / s olarak belirlendi. Aynı ram başlığının alüminyum biyeti, kalıba itiş kuvveti ise 950 MPa olarak belirlendi. Uzun alüminyum ekstrüzyonlarında kuvvetin yüksek hızın ise düşük olması istenmektedir. Bu iki faktör ekstrüzyonun sonucunda oluşacak hataları asgariye indirir ve ekstrüzyon kalitesini artırır.



Şekil 3.11. Ekstrüzyon düzlemi karşıdan görüntüsü.



Şekil 3.12. Alüminyum biyete ekstrüzyon yapılması.



Şekil 3.13. Renklendirilmiş ekstrüzyon dizaynı.

Yukarıda gösterilen renkli ekstrüzyon çiziminde, sarı kısım makinenin kalıp yerleştirilen kısmını göstermektedir. Kırmızı bölge ise şekil 3.13.' de gösterilmiş, aerofil yapıya sahip ve ekstrüzyonda kullanılan kalıp kısmını göstermektedir.

Mavi kısım ise daha önceden belirlenmiş şartta kesim işlemi uygulanmış alüminyum 6061 biyeti göstermektedir. Şekil 3.14.' de görüldüğü gibi alüminyum biyet çapı, çelik kalıp çapından küçüktür. Farklı tipte üretilen ekstrüzyon işlemlerinde durum değişebilir. Alüminyum biyet, kalıp içerisinde önceden CNC ile işlenmiş aerofil bölümden geçerken, diğer kısımlardan geçememekte ve böylece istenilen şekle uygun alüminyum aerofil yapılar elde edilmektedir. Şekilde gösterilen biyet ve kalıp şekli değişiklik gösterebilmektedir. Daha kenarlı ve komplike kalıplar üretilirken aerofil yapılar için dairesel kalıplar mevcuttur.



Şekil 3.14. Ekstrüzyon sonrası transfer çarkları.

Ekstrüzyon işlem süresi hız ve basınca göre değişiklik göstermektedir. Kısa ve küçük profiller hızlı üretim tercih edilirken büyük ve aerofil yapılar yavaş üretim tercih edilmektedir. Bu çalışmada yapılan ekstrüzyon işlemi için yavaş üretim tercih edildi ve işlem yaklaşık birkaç dakika sürdü.

Ekstrüzyona giren alüminyum biyet çıktıktan sonra pervanenin temel yapısını oluşturdu. Ancak istenilen ölçülere göre nispeten daha uzun ve çaplı olduğundan kesim işlemi yapılması gerekti. Bu yüzden çıkış sıcaklığı yüksek olan bu pervanelere önce soğutma işlemi uygulandı.

3.2.3. Soğutma

Ekstrüzyondan sonra soğutma işlemi kalıp içerisinde geçirildikten sonra verilen şekilde katılaşması, deforme olmaması ve bozulmaması için yapılmaktadır. Alüminyum ekstrüzyon uygulamaları için iki farklı yöntem mevcuttur.

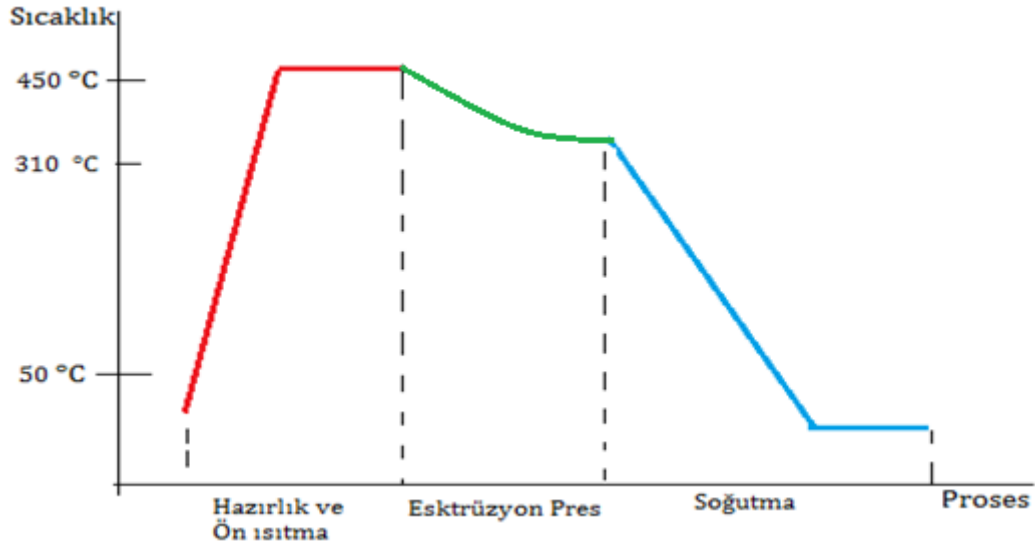
Bunlar birisi su ile soğutma iken diğeri hava ile soğutmadır. Bu çalışmada su ile soğutma tercih edildi. Su ile soğutma, ekstrüzyon işlemi biter bitmez, aerofil yapı hızlıca su havzasına aktarıldı. Bu süreçte aerofil yapı hala istenilen uzunlukta değildi. Ancak su ile soğutma işlemi bittikten sonra istenilen boyuta getirildi.

Ekstrüzyondan çıkan aerofil yapının sıcaklığı yaklaşık 310 °C olarak ölçüldü. Bu süreçte istenilen sıcaklık değeri ise 50 °C'nin altı olarak karar verildi. Bu süreç, yüzeyin yüksek kalitede olması ve aerofil yapının verilen şekilde sertleşmesi için yapıldı.



Şekil 3.15. Aerofil yapının su havzasına aktarılması.

Soğutma işlemi her ekstrüzyon işlemine yapılmaktadır ancak sıcaklık değeri ve süreç değişiklik göstermektedir. Likit soğutma işlemlerinde sıvı azot kullanılabilir. Su ile soğutma sürecinde önemli noktalardan biri, kontrollü soğutmadır. Havacılık için kullanılacak malzemelerin soğutulması hızlı yapılmamaktadır. Hızlı soğutma işlemleri boyuna kısa parçalar için tercih edilirken, rotor blade gibi yüzey sertliği önemli parçalarda süreyi uzatarak soğutma tercih edilmektedir. Bu sebeplerden ötürü soğutma işlemi yapılırken kontrollü soğutma uygulandı. Bu kontrollü uygulama sayesinde çatlak ve bozulmaların oluşumu engellendi.



Şekil 3.16. Süreç-sıcaklık grafiği.

Şekil 3.16.' da gösterilen süreç grafiğinde ısıtma işlemi hızlı yapılırken soğutma işlemi yavaş ve zaman kontrollü yapıldı. Bu sebepten ötürü istenilen yüzey kalitesine ulaşıldı.



Şekil 3.17. Su soğutmadan çıkan aerofil yapı.

Su ile soğutma işleminden sonra aerofil yapının sıcaklığı 50 °C'nin altına düştükten sonra sıradaki işlem, pervaneyi son kez ebatlandırmaktır. Bunun için kesme işlemi yapılır.

3.2.4. Kesme

Kesme işlemi, ekstrüzyona giren alüminyum biyetin, pervaneye dönüştükten sonra istenilen uzunlukta elde edilmesidir. Bu işlem için öncelikli olarak istenilen uzunluk belirlendi. Belirlenen pervane uzunluğu 4,1 m'dir. Bu belirlenen pal uzunluğu yüksek hızlarda verim veren gyrocopter pal uzunluğu olarak kabul edilmektedir. Bu aşama ürettiğimiz pervanemizin uzunluğu 410 cm genişliği ise 18 cm'dir.



Şekil 3.18. Ekstrüzyon profil kesim makinesi.

Ekstrüde edilmiş aerofil yapının her iki ucundan tutucular tutturuldu. Ardından düz olduğundan emin olmak için ayar yapıldı. Ardından bu iki tutturucuyla germe işlemi yaparak malzemenin kesim işlemi için hazır hale getirildi. Ve ekstrüzyona giren 5m'lik alüminyum biyet 4,1 m olarak kesim tamamlandı.

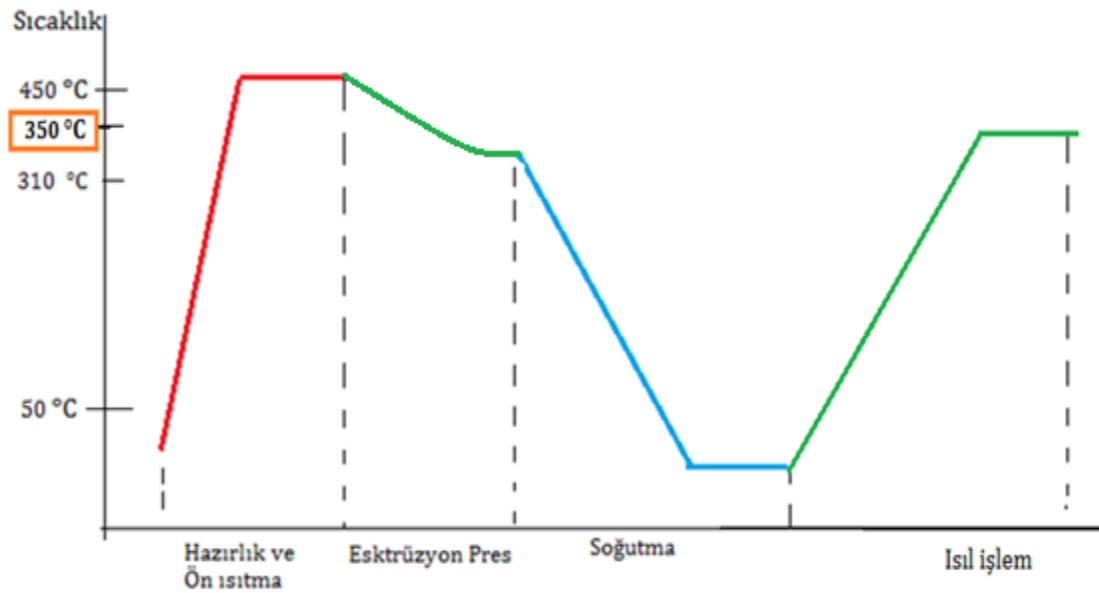
Bu sayısal değerler hava aracı için istenilen taşıma kuvvetine ve ağırlığına gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Ancak gyrocopter gibi daha minimize hava araçları için üretilen pervane palleri için ortalama uzunluk 4 metredir.

Gyrocopter pervaneleri genel olarak belirlenmiş bir uzunluk ölçüsü yoktur. Ancak sektörde kullanımı minimum 3.50 m ile maksimum 4.5 metre arasında değişmektedir.

3.2.5. Isıl İşlem

Alüminyum malzemeler ekstrüzyon ile üretimi gerçekleştirildikten sonra istenilen şekilde kalmaları için ekstra olarak ısıtılma maruz kalırlar. Bu ısıtılmalarda kontrollü olarak istenilen sıcaklığa getirildikten sonra yapay veya suni olarak yaşlandırma yapılmaktadır.

Pervaneler, istenilen boyutta kesildikten sonra yukarıda anlatılan ısıtılma uygulandı. Ardından pervane pallerine yapay yaşlandırma yapıldı. Isıtılma prosesi, pervanenin 6 saat boyunca 350 °C sıcaklığa kadar kontrollü olarak ısıtılmasıyla gerçekleştirildi. Pervane palleri uçuşta birçok kuvvete maruz kalacağından dolayı yaşlandırma ısıtılma işlemi uygulanarak mukavemet artırılması sağlandı.



Şekil 3.19. Isıtılma sonrası pervane sıcaklığı.

Isıtılma sonrası sıcaklıkları 350 °C ye çıkan pervane palleri 6 saat boyunca ısıtıldıktan sonra oda sıcaklığına herhangi başka bir işlem yapmadan ulaşmaktadır. Bu süreç, alüminyum pervanemizin uçuş boyunca maruz kalacağı kuvvetlere karşı direnç kazanmasını sağladı.



Şekil 3.20. Isıl İşlem Fırını.



Şekil 3.21. Isıl işlem sonrası pervaneler.

3.3. Pervane Üzerine İşlemler

Ekstrüze edilmiş pervaneler, havacılık uygulamalarında kullanılması için ekstradan birkaç uygulamaya daha tabi tutulurlar. Bu uygulamalar pervanenin bazı mekanik özelliklerini artırmak ve uçuş süresini maksimuma çıkarmak için yapılır. Alüminyumdan ekstrüze ederek eldi ettiğimiz pervanelere havacılık standartları gereği iki ekstra uygulama yapıldı. Bunlar;

- Eloksal Kaplama
- Çelik Mil Güçlendirme

Üretilen pervanenin mekanik özelliklerini geliştirmek için bu iki uygulama aynı pervaneye uygulandı. Bu uygulamalar haricinde birçok farklı durum söz konusu olabilmektedir. Ekstrüze pervanenin gyrocopterlerde kullanılması için bu iki ekstra özellik seçildi. Bu iki özellik aynı pervane üzerine uygulandı.

3.3.1. Eloksal Kaplama

Eloksal kaplama pervane yüzeyini korozyona dayanıklı bir duruma getirmek için uygulanmaktadır. Üretilen pervane, gyrocopter için kullanımda yüksek nem ve hava koşullarına maruz kalacağı için korozyona ekstra dayanıklı olması gerekmektedir. Bu sebeplerden ötürü eloksal kaplama tercih edildi. Eloksal kaplama yapmadan önce yüzey çizgilerini ve hasarlarını gidermek için zımpara kâğıdı ile zımparalama işlemi yapıldı.



Şekil 3.22. Zımpara sonrası pervane görüntüsü.

Zımpara işlemi yapıldıktan sonra eloksal işlemine geçildi. Eloksal işlemi genel itibariyle alüminyum rotor pallerinin elektrolit banyosuna batırılması ve içinden akım geçirilerek belirli kalınlıklarda kaplama tabakası oluşur.

Pervane palimiz için eloksal kaplama yapımında sülfürik asit kullanıldı. Sülfürik asidin sıcaklığı 18 °C olarak ayarlandı. Eloksal havuzu içerisinden geçirilen voltaj değeri 15 volt, amper değeri ise 1200 amper girildi.



Şekil 3.23. Eloksal kaplama sonrası pervane pali.

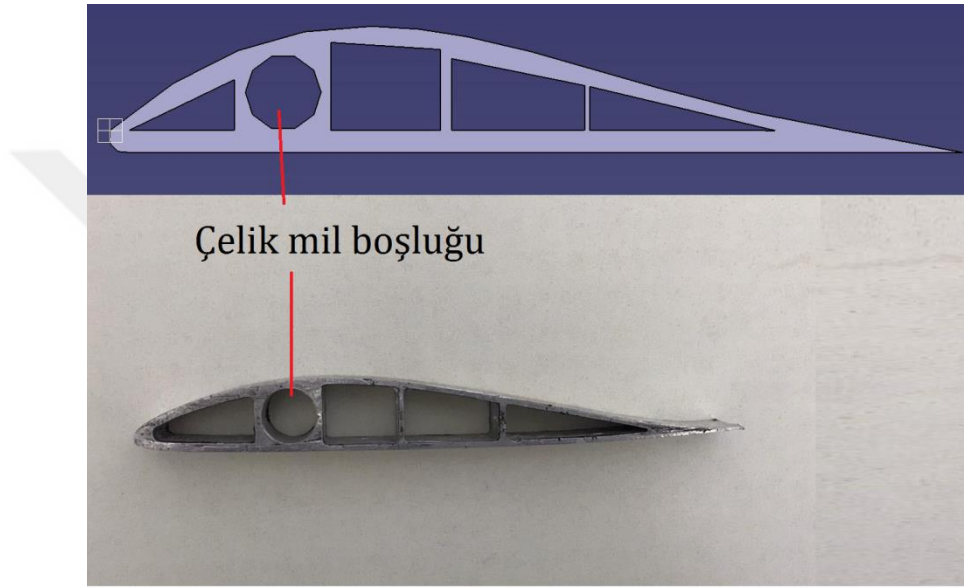
Alüminyum pervane palinin eloksal kaplama maliyetini düşürmek amacıyla yatay eloksal havuzu tercih edildi. Eloksal kaplama işlemi yaklaşık 30 dakika sürdü. Bu süreden sonra eloksal banyosundan çıkan pervane pal incelenmek amacıyla tespit banyosuna aktarıldı. Bu banyolarda bulunun 90 °C de saf suda 45 dakika bekletilme işlemi uygulandı.

Ardından pervane üzerinde 5 mikron kalınlığında eloksal kaplama oluştu. Pervane boyama gibi işlemler genellikle eloksal kaplama sonrasında yapılmaktadır. Ancak üretilen pervane için öncelik olmadığından boyama işlemi yapılmadı.

3.3.2. Çelik Mil Güçlendirme

Ekstrüzyon ile üretilen pervaneye gyrocopter için 4,1 metre olarak kesim işlemi uygulandı. Bu uzunluk sonucunda pervanenin uçuşta maruz kaldığı kuvvetlerden ötürü kopma veya kırılma yaşamayası ve uçuş esnasında sarkma yapmaması yani rijitlik durumunun artması için çelik mil ile güçlendirme yapıldı.

Pervane palleri için çelik güçlendirilmesi yapmak amacıyla ekstrüze edilmeden önce pervane aerofil yapısı olan NACA 8H12 de çapı 1,6 mm olan bir dairesel boşluk bırakıldı.



Şekil 3.24. Aerofil yapı tasarımı ve çelik mil boşluğu.

Bu çelik mil boşluğunun çapı 1,5 cm olarak tasarlandı. Ancak pervane pal uzunluğu 4,1 m iken mil uzunluğu 80 cm'dir. Çeliğin, alüminyumun içinde dayanıklılık katmasından dolayı bu malzeme olarak 4130 çeliği seçildi. Bu çeliklerin yüksek çekme dayanımı ve yüksek tokluk özelliklerinden dolayı pervane palleri için güçlendirme işleminde tercih edildi.

Pervanenin uçuşta merkezkaç kuvvetinden ötürü kök kısmından kopma yaşamaması amacıyla çelik güçlendirme işlemi, pervane palinin kök kısmına yapıldı. Kök kısmı yaklaşık 80 cm boyunca çelik mil ile güçlendirildi. Ekstrüzyondan çıkışı dolayısıyla pervanenin uç kısmı boşluklu yapıya aittir. Ancak uç kısmına güçlendirme yapılmamaktadır. Pervaneye hasar verebilecek hayvan veya yabancı madde girişi ihtimaline karşın pervanenin diğer kısmı için kapak temini yapıldı.



Şekil 3.25. 4130 çelik mil.



Şekil 3.26. Alüminyum ve plastik pervane kapağı.

Plastik ve alüminyum kapaklar, uçuş ve balans testleri dışında pervane pallerine takılı durumda bulunurlar.



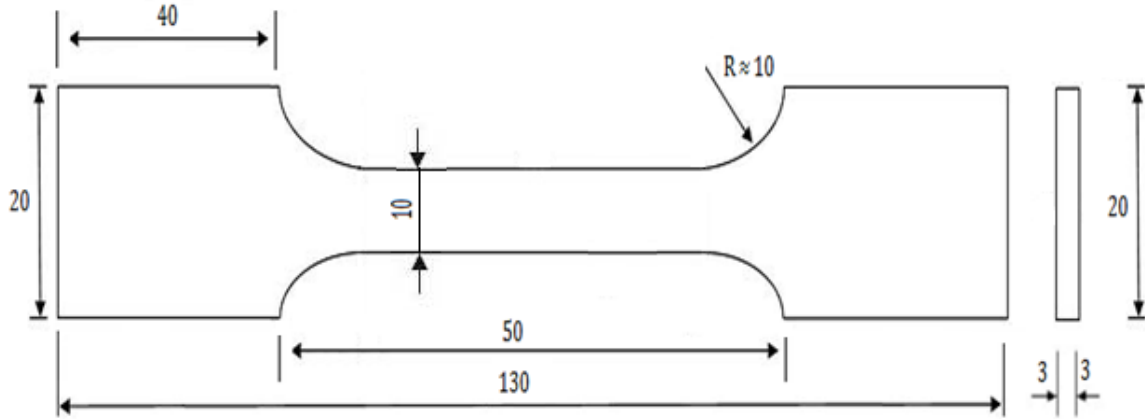
Şekil 3.27. İmal edilmiş pervane görüntüsü.



Şekil 3.28. Ekstrüze edilmiş pervanelerin görüntüsü.

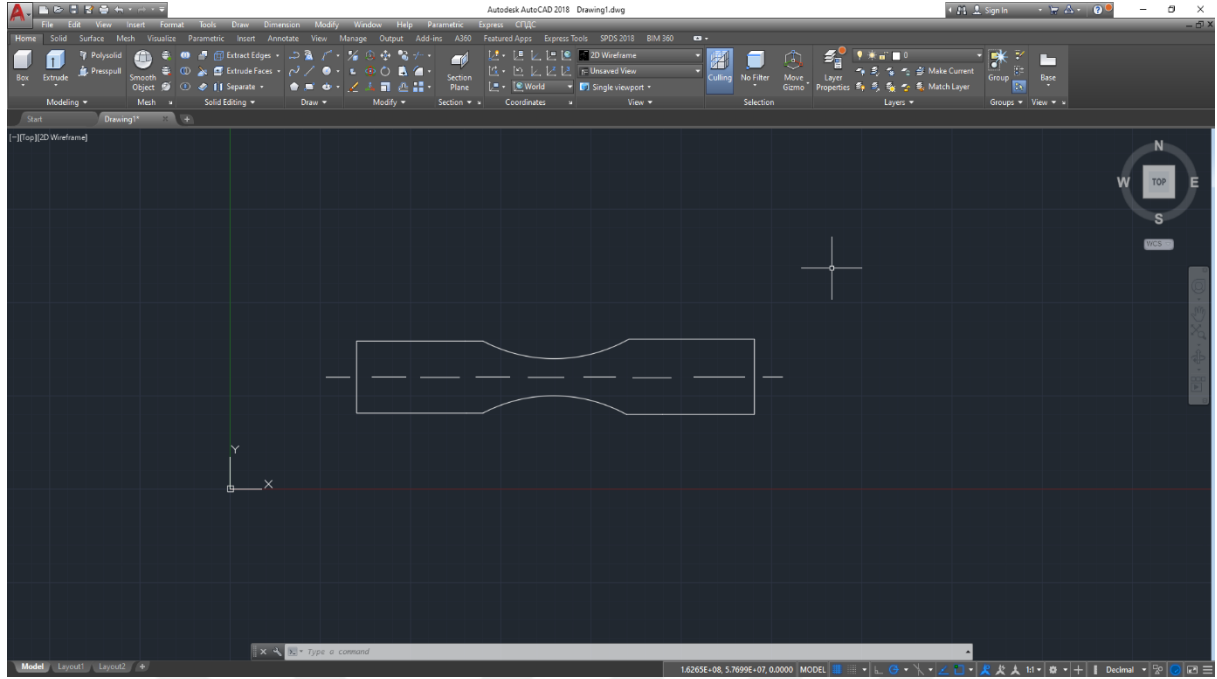
3.4. Numune Üretimi

Numune üretimi yapmak için öncelikle numune standartları belirlendi. Numune standartları, yorulma testi yapılacak Karabük Üniversitesi Margem laboratuvarları tarafından alındı. Şekil 3. 30.' de gösterilen ölçüler, yorulma testine girecek tek bir adet numunenin ölçüleri olarak verilmiştir.

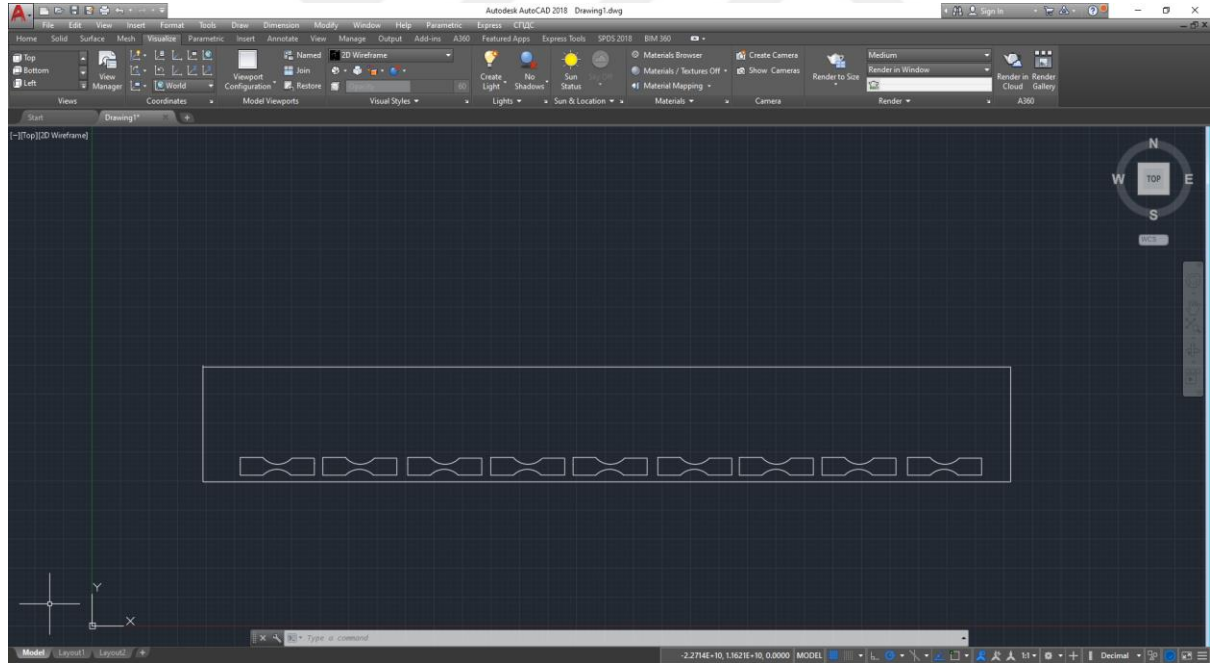


Şekil 3.29. Yorulma testi numune ölçüleri.

Şekil 3. 30.' De gösterilen numune standart ölçülerine uygun numune çizimi Auto CAD programında yapıldı. Yorulma testleri için 9 adet numune gerekli olduğunda çizim hem tekli hem de pervane üzerinde yatak biçimde toplu olarak gerçekleştirildi.



Şekil 3.30. Numune Auto CAD çizimi.



Şekil 3.31. Pal üzerinde numune Auto CAD çizimi.

Ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş pervaneden numune üretimi GÜRBÜZ TREYLER A.Ş tesisinde Lasermark 4000 lazer kesim makinası ile yapılmıştır. Numunelerin eksiksiz ve hatasız bir şekilde üretimi yapılması için lazer kesim tercih edilmiştir. Bu işlem 4Kw volt ile ve 15 dakikada sorunsuz bir şekilde gerçekleştirildi.



Şekil 3.32. Lazer kesim makinesi.



Şekil 3.33. Lazer kesim başlığı.

Numune işlemi lazer kesim yapıldığından dolayı hatasız bir şekilde üretim gerçekleştirildi bu sebepten ötürü, üretimden sonra herhangi bir talaş giderme veya zımpara gibi işleme tabi tutulmadı. Yüksek güç ve sıcaklıkta kesim yapıldığından ötürü numuneler kesim işlemi bittikten 1 saat sonra çıkartıldı.

Numuneler pal üzerinden yatay olarak kesim yapılarak üretildi. Bu açıdan pervane palinin her bölgesinden numune örneği çıkartılarak homojen bir dağılım gerçekleştirildi.



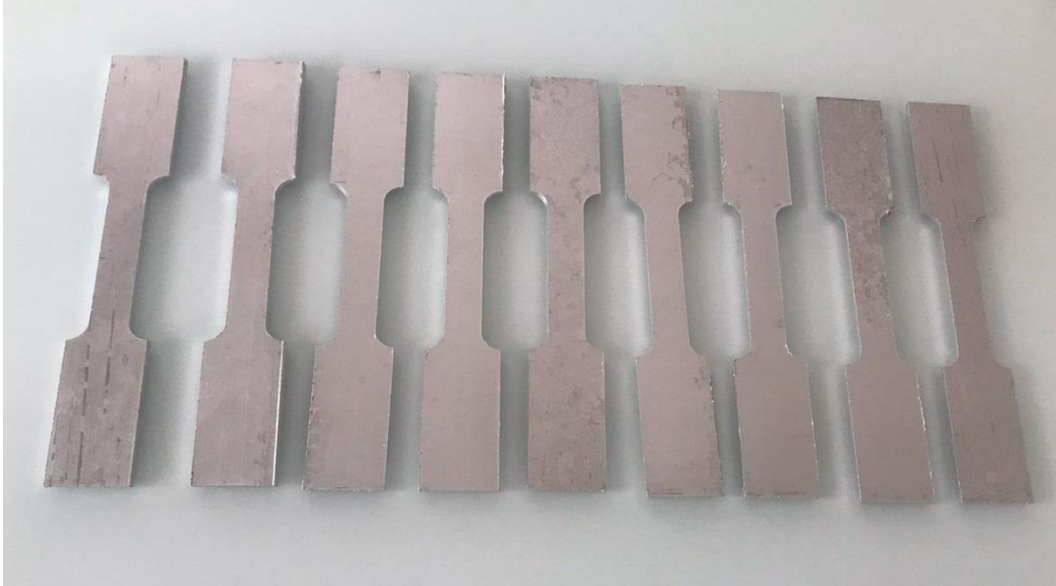
Şekil 3.34. Tek adet numune örneği.



Şekil 3.35. Yan açıdan numune görüntüsü.



Şekil 3.36. Sıralı numune görüntüsü.



Şekil 3.37. Dokuz adet numune görüntüsü.

3.5. Yorulma Deneyi

Ekstrüzyon yöntemiyle alüminyum 6061-T6'dan üretilen pervane pallerini gyrocopterler için kullanım amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kullanılacak pervaneler uçuş esnasında birçok farklı dinamik yüke maruz kalacaktır. Ayrıca pervaneler uçuş esnasında birçok kez titreşim ve salınım hareketine maruz kalmaktadır.

Yük ve uçuş hareketleri sebebiyle pervane pallerinin, bu yük ve hareketler altında malzemenin yorulma ömrünü oluşturmak, kritik noktalarını belirlemek ve dinamik yükler altında davranışlarını gözlemleyebilmek amacıyla yorulma testleri yapılmıştır.

Bu testler ile hangi yük aralığında uçuş gerçekleştirilse, üretilen pervane palleri daha verimli olacak ve buna bağlı uçuş konfigürasyonumuzu belirleyecektir.

Daha önceden pervane pallerinden alınan 9 adet numune, Karabük Üniversitesi Margem Laboratuvarında yorulma testlerine tabi tutuldu.



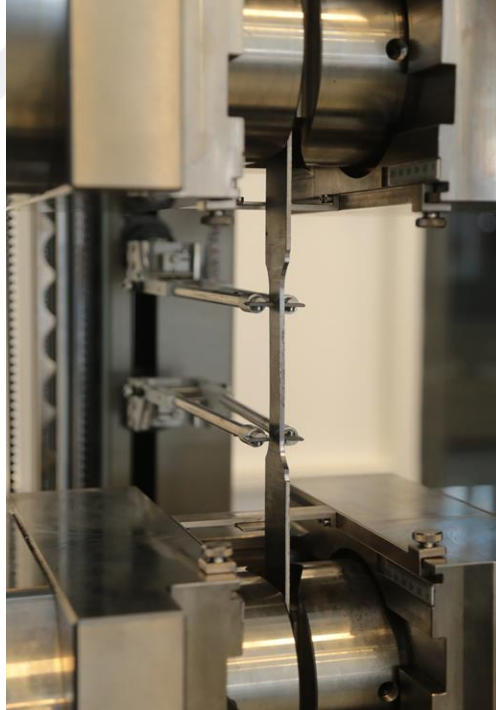
Şekil 3.38. MTS Landmark dinamik test cihazı.

Numuneler MTS Landmark dinamik test cihazında, yorulma testleri gerçekleştirildi. Deneyler, TS EN ISO 13674-1 kalitesince ve 26 °C sıcaklıkta, %35 nem altında gerçekleştirildi.



Şekil 3.39. Yükleme ekipman görüntüsü.

İlk aşamada numuneler için gerekli olan yükler minimum 0.55 kN ile maximum 2.5 kN yük aralığı olarak belirlendi. Ardından tüm yük değerleri ise 0.55 kN, 1 kN, 1.35 kN, 1,5 kN, 2 kN, 2,5 kN olarak tercih edildi.



Şekil 3.40. Yüklendiği numune görüntüsü.

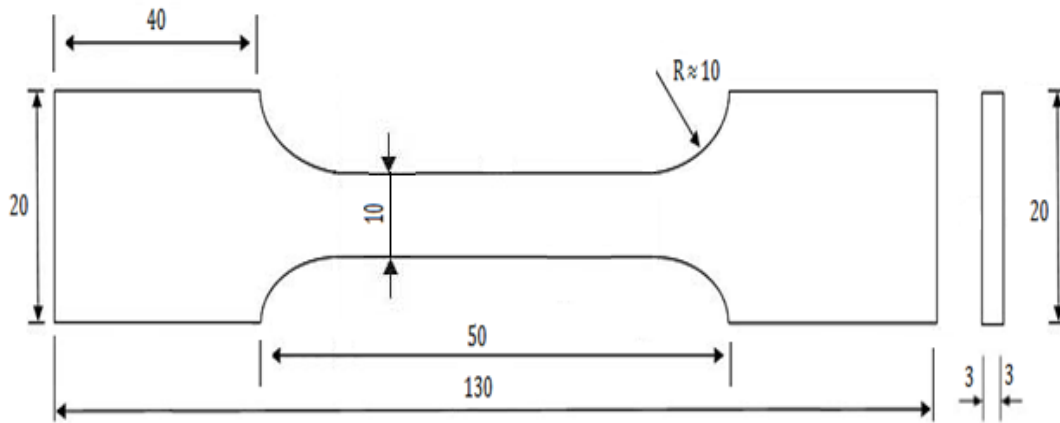


Şekil 3.41. Deney esnasında çatlak oluşumu.

Yorulma deneyleri toplam 7 adet ana ve 2 adet yedek olmak üzere toplam 6 farklı dinamik yük altında gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerin deney toplam süresi 170 saattir. Deneylerin sonunda şekil 3.42.'de ve şekil 3.43.'de gösterilen çatlaklar oluşmuştur.

3.6. Çekme Deneyi

Pervane bıçaklarından tekrardan üretilen numuneler, çekme dayanımlarının ölçülmesi ve karşılaştırılması için çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testinin yapılabilmesi amacıyla istenilen formda ve test cihazına uygun ebatta numuneler işlenmiştir. Çekme testine girecek olan numune ölçütleri şekil 3.44.'de gösterilmiştir.



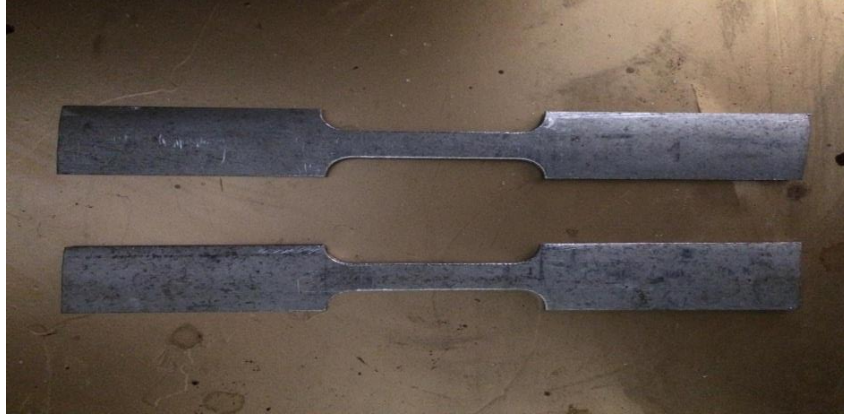
Şekil 3.42. Çekme testi için seçilen numune tipi ölçütleri.

Çekme testi sonuçlarının istenilen doğruluk derecesinde elde edilebilmesi için 3 adet test numunesi çıkartılmıştır ve bu hazırlanan numunelerin çekme testleri BERDAN CİVATA şirketinin laboratuvarında bulunan Zwick marka Roell Z250 model çekme cihazında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tüm çekme testleri 23°C de ve %39 nem oranında gerçekleştirilmiştir. Deney hızı 0.33 mm/sn. olarak belirlenmiştir. Test işlemi TS EN ISO 6892-1 METHOD B standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Test cihazı Şekil 3. 45.' De ve test numunesi şekil 3. 46.'da verilmiştir.



Şekil 3.43. Zwick/Roell Z250 Çekme Test Cihazı.



Şekil 3.44. Çekme numunesi görüntüsü.

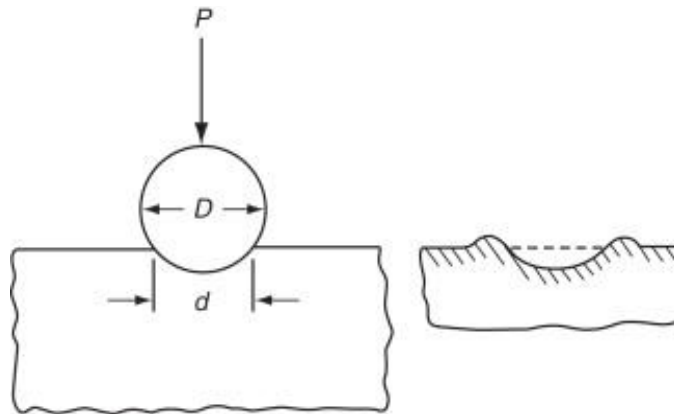
Test sonuçları bilgisayar ortamına uyarlanarak ham veri elde edilmiştir. Aynı ham veriler doğrultusunda, gerilim-gerinim grafiği, uzama miktarı ve oranı, elastik modülleri hesaplanmıştır.

3.7. Sertlik Ölçümü

Sertlik, farklı cinsten malzemelerin plastik bozulmaya karşı direnç gösterebilme becerisidir. Genel tabiriyle sertlik ölçümü, numuneye belirlenmiş miktarda bir yük ile başka bir malzeme eliyle yük uygulanması ile ölçülmektedir. Uygun olarak seçilen sert uç, belirli bir yük altında malzemeye batırıldığında üstünde bir emare bırakacaktır. Genel itibariyle malzemenin sertliği, ortaya çıkan emarenin iriliği ile ters orantılıdır.

Birçok farklı sertlik ölçüm yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada numunelerin sertlik ölçümü yapılması için Rockwell sertlik deneyi yöntemi seçilmiştir.

Rockwell sertlik yönteminde, çelik bilye 1/16 inç uzunluğunda ve 100 kgf yük olacak şekilde ölçüm gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.45. Rockwell sertlik ölçüm metodu [47].

Pervane bıçaklarından üretilmiş numunelerin sertlik ölçümleri BERDAN CİVATA kalite laboratuvarındaki Galileo dijital sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 3.46. Rockwell dijital sertlik ölçüm cihazı.

Sertlik ölçümünün sağlıklı sonuç verebilmesi adına her numuneden, numuneyi ikiye bölecek şekilde merkezden geçen bir çizgi boyunca eşit aralıkta 3 adet ölçümleme yapılmıştır.



Şekil 3.47. Sertlik ölçümü için çıkartılmış numune.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Mekanik İnceleme

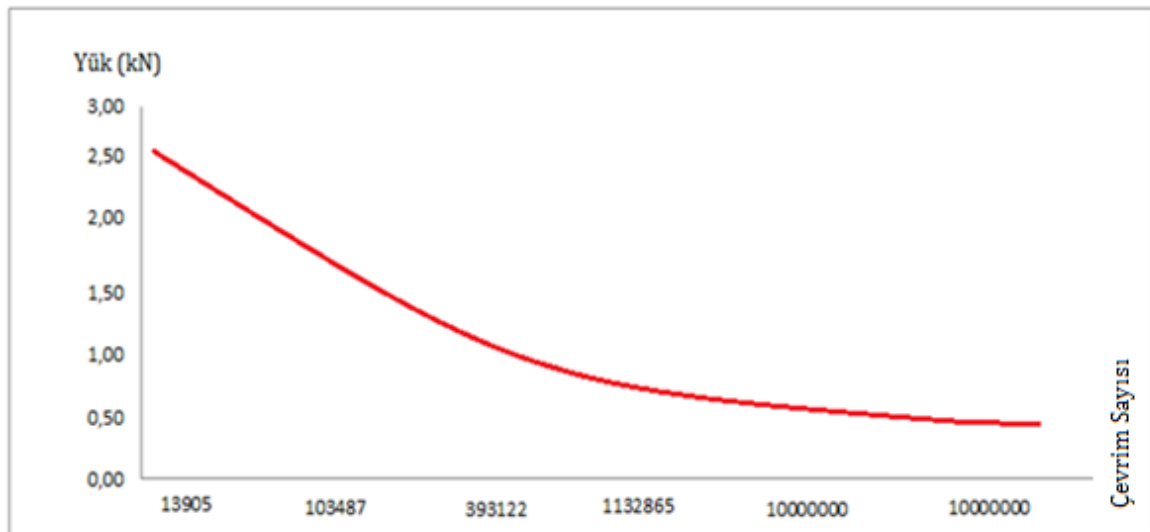
4.1.1. Yorulma Dayanımı

Dokuz adet numunenin, 0.55kN- 2.50 kN yük aralığında yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan ham veri tablosu aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Bu tablo yük-çevrim sayısı durumunu gösteren tablodur.

Tablo 4.1. Yorulma deneyi verileri

Dinamik Yük	± 0.55 kN	± 1.0 kN	± 1.35 kN	± 1.5 Kn	± 2.0 kN	± 2.50 kN
Çevrim Sayısı	10 x 10 ⁶	10 x 10 ⁶	1132865	393122	103487	13905

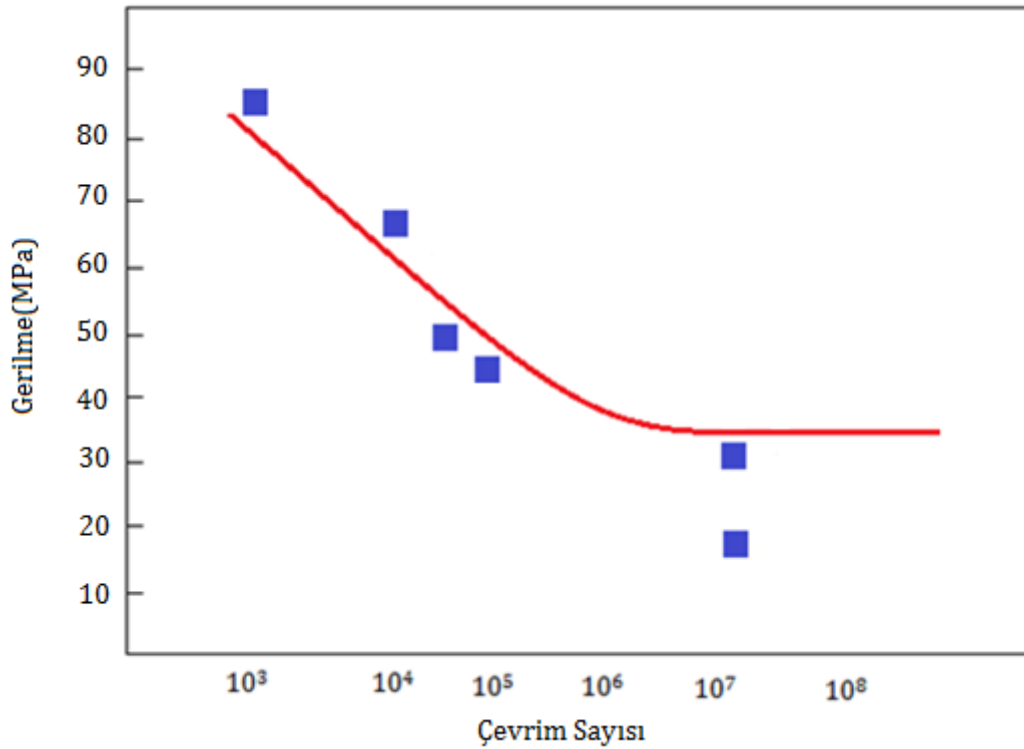
Tablo 4.1.' de deneyler sonucunda elde edilen verilerden çıkartılan yorulma grafiği, şekil 4. 1.' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yük/Çevrim sayısı grafiği.

Şekil 4. 2.' de gösterildiği gibi 2,5 kN'dan 0,55 kN'a dinamik yük altında gerçekleştirilen deneylerde çevrim sayısı, logaritmik bir artış göstermektedir. Bu artış 10×10^6 çevirme sayısında sabit kalmakta ve sonsuz yorulma ömrünün oluştuğunu göstermektedir.

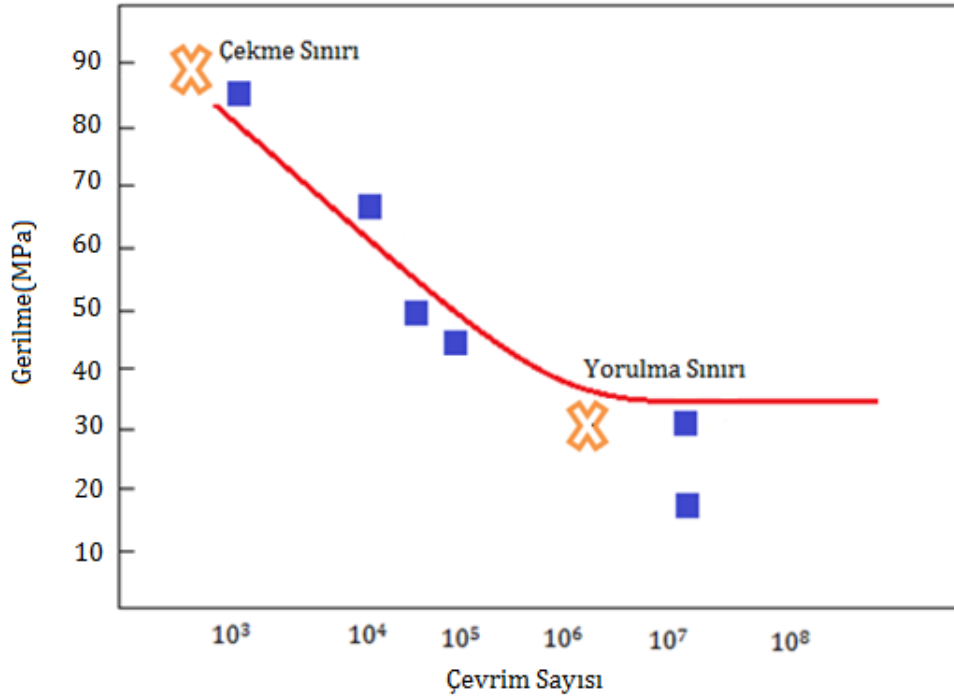
Numune üretimi gerçekleştirildikten sonra numune ölçütleri bilgisayar ortamına aktarılarak örnek çizimi yapıldı ve bu sayede numunelerin alanları hesaplandı. Bilgisayar ortamında yapılan hesaplama işleminde numune alanı, 30.510 mm^2 olarak ortaya konmuştur. Bu hesaplamayla birlikte $\text{MPa} = \text{kN/mm}^2$ eşitliği kullanılarak gerilme/çevrim grafiği elde edilmiştir. Bu grafik şekil 4. 2.'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Gerilme/Çevrim sayısı grafiği.

Şekil 4.2.'de verilen yorulma grafiğinde iki önemli bölge ortaya çıkmaktadır. Bu bölgeler, maksimum güç dayanımı ve yorulma sınırı olarak adlandırılmaktadır. Çekme dayanımı, tek çevrimde hasar oluşturmak için gereken gerilme seviyesi olarak tanımlanmıştır. Bu bölgede malzememiz yüksek gerilimlere maruz kalmaktadır.

Şekil 4. 3.'de verilen grafikte pervane pallerinin maksimum güç dayanım seviyesi yaklaşık 81 MPa olarak görülmektedir. Bu gerilme seviyesi ve üstü bir değerde malzemede yüksek miktarda hasar oluşturmaktadır. Bu sebeple pervane bıçaklarının üzerine etki edebilecek maksimum gerilme seviyesi 81 MPa olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.3. Yorulma grafiğindeki çekme sınırı ve yorulma sınırı gösterimi.

Pervane bıçaklarının yorulma dayanımı şekil 4.3.'de verilmiştir. Bu sınır malzeme üzerinde hasar oluşturmada sonsuz sayıda çevrim uygulanabileceğini göstermiştir. Bu değer yaklaşık 30 MPa olarak görülmektedir. Pervane bıçaklarının 30 MPa altında bir değerde uzun süreli çalışma göstereceği ortaya çıkmaktadır. Bu değer diğer tüm etkenlerden bağımsız olarak yorulma ömrünün, neredeyse sonsuz olduğunu gösteren gerilme seviyesidir. Yorulma sınırı bölgesinde numuneler yüksek miktarda çevrime maruz kalmıştır. Bu yüzden yorulma sınırı bölgesi aynı zamanda yüksek çevrim yorulması değeri olarak belirlenmekte ve I. bölge olarak şekil 4.4 gösterilmektedir.

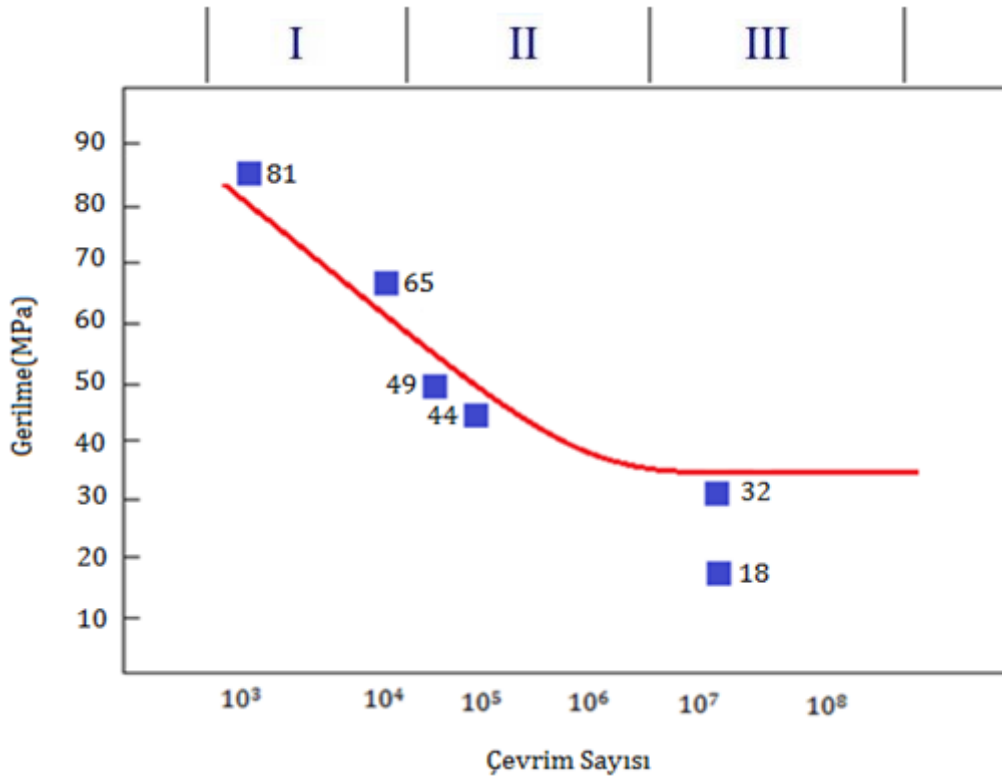
Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi yorulma grafiğinde hasar oluşumu maksimum 81 MPa ile başlamaktadır. I. bölgede hızlı hasar oluşumu gözlenmektedir. Bu hasar oluşumu pervanenin üzerinde kırılmayla sonlanmaktadır. Şekil 4.4.'de grafik gösteriminde II. Bölgede olarak gösterilen aralıkta numunenin hızlı bir şekilde hasar oluşma aralığı 81-65 MPa olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tavır istenmeyen bir durum oluşturduğundan dolayı pervanenin bu basınç aralığında uzun süreli çalışması olağan görülmemektedir.

Şekil 4.4. te yüksek çevrim yorulması, II. bölge olarak gösterilmektedir. Pervane üzerine daha düşük basınç etkisi bırakmasında dolayı daha uzun süreli kullanım elde edilmektedir. Bu aralık, şekil 4.4.'de gibi 65-32 MPa olarak görülmektedir.

Bu basınç aralığında numune üzerinde hasar oluşma miktarı yavaşlamaktadır. Bu aralık daha uzun süreli kullanımı temin edebilmektedir ancak numune üzerinde hasar oluşumunu

engellememektedir. Bu nedenle pervanenin kullanım miktarı artmasına rağmen belirli bir süre sonrasında hasara bağlı sebepten ötürü kullanıma mani olacaktır.

Pervanenin yorulmaya bağlı uzun ömürlü olması için gerekli gerilme değeri şekil 4. 2. ve şekil 4.3.'de açıkça görülmektedir. Şekil 4.4.'te gösterilen III. Bölge numune için sonsuz yorulma ömrünü ifade etmektedir. III. bölgenin aralık değerleri 32 MPa ve altı olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Bu basınç değerinde veya daha düşük bir değerde, harici başka bir sebebe bağlı olmaksızın, yorulma ömrü sonsuz olduğu ispatlanmaktadır. Bu yorulma aralığında, pervanenin yorulma ömrü sonsuz olduğu düşünülmektedir. Numune üzerinde göz ardı edilebilecek oranda hasar oluşmasına rağmen bu dislokasyonlar ilerleyen dönemde kırılmalar veya çatlaklar oluşturmayacaktır.



Şekil 4.4. Yüksek ve düşük çevrim yorulma sınırı gösterimi.

Yorulma deneyine ait sonuçlardan oluşturulmuş grafikler pervanenin çalışma boyunca maruz kaldığı basınç değerlerine karşı yorulma ömrünü göstermiştir. Bu grafik sonuçlarında, üretilen pervanenin kullanım ömrü boyunca maruz kalması gereken maksimum ve minimum basınç değerini megapascal cinsinden belirtmektedir.

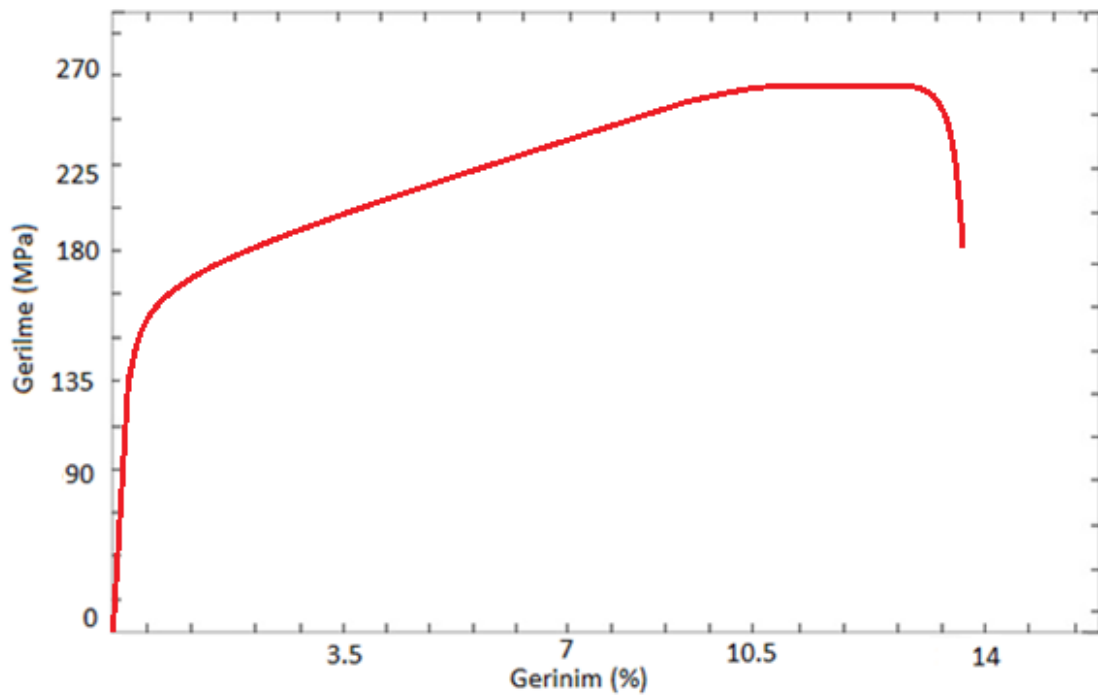
Bu maksimum ve minimum basınç aralıkları, pervanenin kullanım konfigürasyonlarını ortaya koymakta büyük kazanım sağlamaktadır. Bu sayede pervanelerin, yorulma hasarı oluşmadan uzun süreli kullanımı için gerekli basınç değerleri kanıtlanmış olmaktadır.

4.1.2. Çekme Testi

Tüm çekme testi numuneleri, çekme cihazında bulunan çenelere sorunsuz bağlanabilmesi açısından köpek kemiği formatında hazırlandı. Hazır olan numuneler cihaza bağlandıktan sonra, 23°C sabit ortam sıcaklığı ve 15mm/dk. çekme hızında testler gerçekleştirildi. Numuneler test öncesi 50 mm boy ve 30.510 mm² kesit alanına sahip bulunmaktadır. Test sonrası numunelerde boy değişimi 56.763 mm oluşmuştur.

Test sonuçları program yardımıyla analiz edilerek malzemeye ait elastisite modülü, yüzde cinsinden uzama miktarı, maksimum kuvvet dayanımı, akma ve çekme dayanımları bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Pervaneden üretilmiş numunelerin çekme testi grafiği şekil 4. 5.'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Gerilim – gerinim grafiği.

Şekil 4.5.' de verilen gerilim-gerinim grafiği incelendiğinde gerilme basıncının logaritmik bir artış sağladığı, basınçtaki biraz artış itibariyle maksimum çekme dayanımına ulaştığı ve ardından numunelerde kopma yaşandığı gözlemlenmektedir.

Numunelerin hepsi aynı çekme dayanımı ve kopma sınırına ulaşmıştır. Akma ve çekme dayanımları aşağıdaki tablo 4.2.' de ayrı ayrı gösterilmektedir.

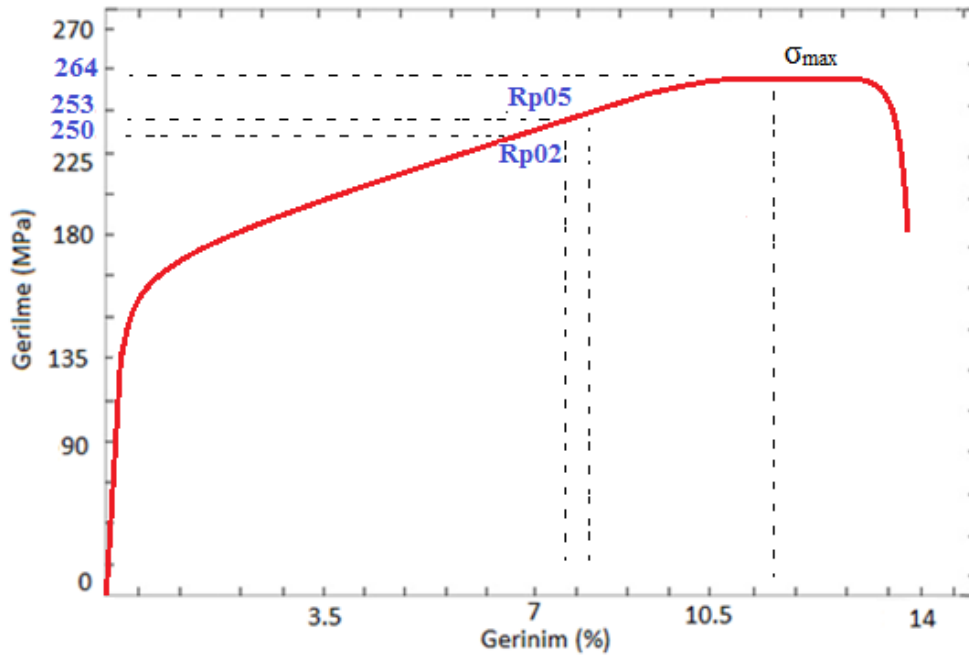
Tablo 4.2. Çekme testi verileri.

Numune Kodu	Akma Dayanımı %0.2 (MPa)	Akma Dayanımı %0.5 (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
A.1	250	253	264
AA 6061-T4	110-140	130-160	180-230
AA 6061-T6	215-290	240-275	260-310

Numunelerin % 0.2 ve % 0.5 uzama miktarındaki kalıcı akma değerleri şekil 4. 6.' de gösterilmektedir. Çekme testi çalışmasında kullanılan 6061-T6 alaşımının belirgin bir akma göstermemesinden dolayı, % 0.2'likve % 0.5'lik plastik uzamaya tekabül eden gerilme değeri, akma mukavemeti olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.2.'de gösterildiği üzere üretilmiş numunelerin %0.2 ve %0.5 akma dayanımları daha önceden elde edilmiş 6061-T6 alüminyum alaşım limitleri içerisinde olduğu görülmektedir. Aynı şekilde numunenin çekme dayanımı da 264 MPa olarak ölçülmüş ve alüminyum 6061 T6 temper limitleri içerisinde. Her iki mekanik özelliğin değerleri de, T4 temperinin limitlerini geçmektedir.

Şekil 4.6.'de görsel olarak verilen grafikte, σ_{max} değeri numunenin ulaşabileceği maksimum çekme dayanımını ifade etmektedir. Rp02 ve Rp05 tabirleri ise %0.2 ve %0.5'lik gerilme değerindeki akma mukavemetini göstermektedir.

**Şekil 4.6.** Grafik üzerindeki akma ve çekme dayanımı gösterimi.

Tablo 4.3. Çekme testi verileri

Numune Kodu	Yüzde Uzama (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Kuvvet Dayanımı (kN)
A.1	%13	85	9.105
AA 6061-T6	%12-25	68,3	-

Tablo 4.3.'de gösterilen çekme testi verileri ile alüminyum 6061-T6 verileri kıyaslandığında uzama miktarı %13 olan numune standartlar dahilinde görülmektedir. Elastisite modülü, 85 GPa olan numunenin değerleri gerçek standartların oldukça üstünde olduğunu görülmektedir. Bu yüksek değer üretilen numunenin, uygulana gerilme sonucunda şekil değişiminin düşük miktarda kalacağını göstermektedir. Bu durum pervane sistemleri için istenilen bir özellik olduğundan pervanenin kullanımına pozitif katkı sağlayacaktır.

Numunelere uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen tüm veriler tablo 4.2 ve tablo 4.3.'de verilmiştir. Bu tablodaki veriler gözlemlendiğinde çekme dayanımı 264 MPa, elastisite modülü 85 MPa ve maksimum kuvvet dayanımı 9.105 kN olduğu görülmektedir.

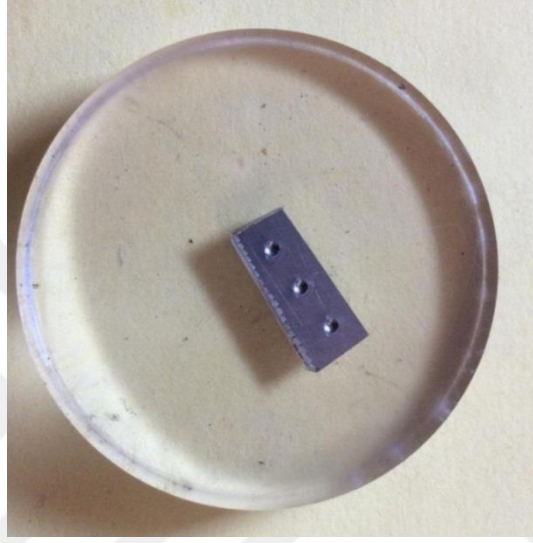
Bu üç mekanik özellik, pervanenin için önemli olan uçuş konfigürasyonlarıdır. Bu mekanik özelliklerin ölçüsü, alüminyum için gerekli olan standart değer aralığının içinde yer almaktadır. Değer aralıkları dışında yer alan mekanik özellikler kullanım sırasında dislokasyon gösterebilecektir. Havacılık emniyeti açısından pervanelerde herhangi bir kusur görülmesi risk olacağı için bu değer aralıklarının standartlar dâhilinde olması gerekmektedir.

Bu değerlerin istenilen aralık içerisinde yer alması, üretilen pervanenin uçuş standartları için istenilen bütün özellikleri taşıdığını kanıtlamaktadır. Böylece pervane bıçaklarının belirlenecek değer aralığında uçmasıyla birlikte herhangi bir dislokasyon, hasar veya tahribat gözlemlenmeyecektir.

Kullanım sırasında hasar veya kusur gibi durumları göstermeyecek olan pervaneler daha uzun süreli kullanım imkânı sunmaktadır. Bu açıdan, imal edilmiş olan pervaneler istenilen mukavemet aralığında kullanıldığı takdirde yüksek kullanım ömrüne sahip olabileceği ispat edilmiştir.

4.1.3. Sertlik Testi

Sertlik testleri, numune yüzeyindeki ağırlık merkezinden geçecek şekilde çizilen farazi bir istikamet çizgisi üzerinden eşit aralıklı olmak üzere 3 noktadan alınmıştır. Sertlik testleri toplam 3 numune üzerinde uygulanmıştır. Alınan ölçülerden en büyüğü ve en küçüğü hesaplandıktan sonra değerlerin ortalaması alınarak numune sertliği ölçülendirilmiştir. Test sonrası numune yüzeyinde oluşan görüntü şekil 4.7.' de verilmiştir.



Şekil 4.7. Sertlik ölçümünden sonra numune görüntüsü.

Tablo 4.4. Sertlik testi verileri

Numune Kodu	Sertlik Değeri Rockwell	Sertlik Değeri Brinell	Sertlik Değeri Vickers
1	51(HRB)	90(HB)	95(HV)
2	52(HRB)	90(HB)	95(HV)
3	52(HRB)	90(HB)	95(HV)

Yapılan sertlik testi sonrası çıkan verilerde numunelerin sertlik değerleri ortalaması 90 HB olmaktadır. Bu değer alüminyum 6061-T6 değerinin standart ölçülerine oldukça yakın bir değer olarak görülmektedir. Yapılan ısıt işlemler neticesinde sertlik değeri yukarıda gösterilen tablodaki değerde tutulmuştur. Bunun nedeni ise pervanenin uçuş konfigürasyonu için aşırı sertlik istenmeyen bir durumdur. Bu değerlerden ötürü, üretilen pervanenin sertlik değeri bakımından daha önce üretilmiş alüminyum 6061-T6 ile benzerlik göstermektedir. Bu değer pervanenin uçuş emniyeti açısından orta-yumuşak bir sertlik geçmektedir. Pervane palleri uçuş boyunca birçok hareketi gerçekleştirmek istediğinden aşırı sertlik istenmeyen bir durumdur. Bu sebeplerden ötürü, çıkan orta yumuşak değer uçuş emniyeti açısından uygundur.

çevrim sayısı boyunca hasarsız bir şekilde çalışabilmesi olduğundan dolayı, yapılan yorulma testlerinde sonsuz ömür yorulmasına sahip olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, sonsuz yorulma ömrüne sahip pervane bıçağı üretiminde başarı sağlandığı görülmektedir.

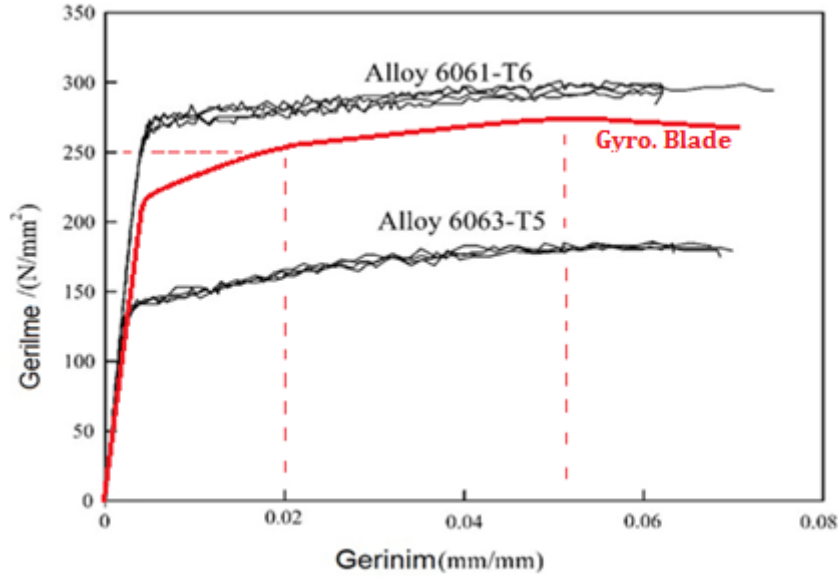
Yapılan çekme test grafikleri incelendiğinde, üretilen pervanenin çekme ve akma dayanımları açısından daha önceki çalışmalarla belirlenmiş değer aralıklarından sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı Sıcaklıklarda Alüminyumun Mekanik Özellikleri			
Alaşım ve Temper	Sıcaklık	Maksimum Çekme Dayanımı	% 0.2 Akma Dayanımı
AL 6061-T6 Al 6061-T651	-195	415 (60)	325 (47)
	-80	338 (49)	290 (42)
	0	325 (47)	283 (41)
	24	310 (45)	275 (40)
	23	264	250
	100	290 (42)	262 (38)
	150	235 (34)	215 (31)
	205	130 (19)	103 (15)
	250	52 (7.5)	35 (5)
	315	32 (4.6)	19 (2.7)
	370	21 (3)	12 (1.8)

Şekil 5.2. Farklı sıcaklıklarda alüminyum 6061'in mekanik özellikleri [48].

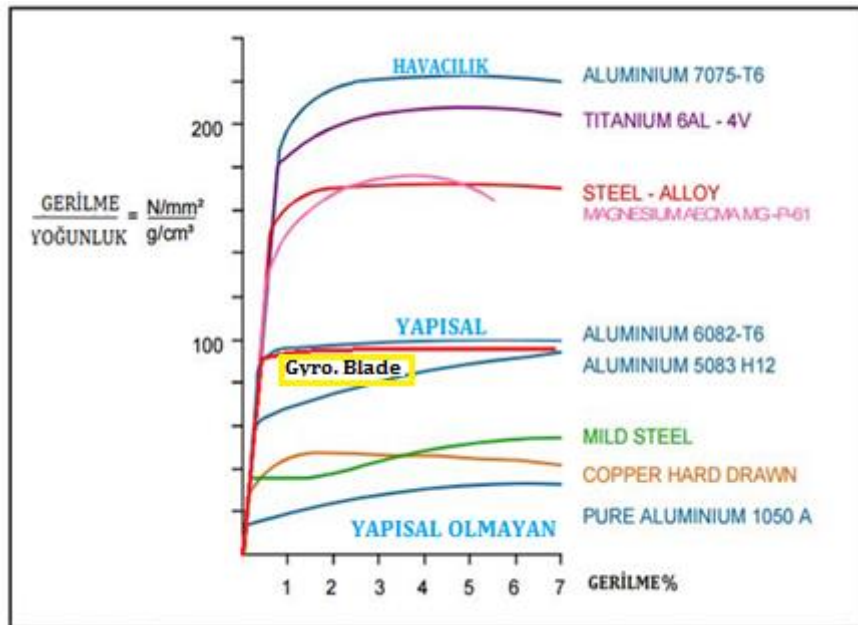
Şekil 5.2.'de gösterilen alüminyumun farklı çekme ve akma dayanımı sonuçları incelendiğinde üretilen pervanenin kullanımı açısından herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Bu bilgiler ışığında uçuş boyunca maruz kalacağı çekme dayanımı yenebilecek güçte olduğu anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, üretilen pervanenin yorulma dayanımı gibi çekme dayanımında da uçuş için engel teşkil edecek herhangi bir durum ile karşılaşmamaktadır.

Bu veriler literatür sonuçları ile kıyaslandığında nominal aralıklarda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Alüminyum gerilme-gerinim karşılaştırılması [41].

Şekil 5.3. 'de 6061-T6, 6063- T5 alüminyumlarının ve üretilen gyrocopter pervanesinin gerilme-gerinim karşılaştırılması görülmektedir. Üretilen pervanenin gerilme değeri daha önceden elde edilen 6061-T6 alüminyumun gerilme değerine çok yakın değerde olduğu görülmektedir. Bu değerler bize, gyrocopter pervanesinin uçuş için gerekli çekme mukavemetini sağladığı görülmektedir. Pervanenin uçuş konfigürasyonları açısından çekme ve akma değerleri herhangi bir engel teşkil etmemektedir.



Şekil 5.4. Farklı malzemelerin yapısallık karşılaştırılması [49].

Şekil 5.4.' de verilen çizgi grafik incelendiğinde farklı malzemelerin yapısalılık durumu görülmektedir. Yapısalılık durumu pervanenin havacılık standartları için kullanılıp kullanılamayacağını göstermektedir. Grafik incelendiğinde üretilen pervanenin “yapısal özellik” bölümünde olduğu görülmektedir. Bu özellik pervanenin kullanımı açısından büyük önem arz etmektedir.

Grafik, pervanenin gövde, kanat gibi yapısal sistemlerde kullanılabilecek durumda olduğunu göstermektedir. Buradan çıkacak sonuçla beraber üretilen pervane pallerinin kullanıma uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen birçok testlerle birlikte, düşük maliyetli, kolay imal edilebilen ve uçuş emniyetine uygun pervane üretiminin mümkün olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada, üretilen gyro bıçaklarının mekanik özellikleri açısından uygulamada kullanılabileceği görülmüştür.

6. ÖNERİLER

Sonuç bölümünde belirtilen bilgiler doğrultusunda, diğer çalışmalarda faydalı olabilecek ve dikkate alınabilecek önerilerden bazıları şunlardır:

1. Tane boyutunun ve ekstrüzyon oranının mekanik özelliklere etkileri incelenebilir.
2. Kullanım sonrası yapıda oluşacak ya da oluşabilecek hasarlar incelenebilir.
3. Aerofil yapısındaki değişime bağlı mekanik özellikler incelenebilir.
4. Yapılan bu çalışmanın modellenmesi çıkartılabilir.

KAYNAKLAR

- [1].Grzesik, W. (2008). Advanced Machining Processes of Metallic Materials Theory, Modelling, and Applications.
- [2]. Yılmaz, U., EVCİ. C. (2015). Havacılık ve Savunma Sektöründe Kompozit Malzemelerin Geleceği. Savunma Bilimleri Dergisi, 14, (2), 77-109.
- [3].Slaytona, R., Spinardib, G. (2016). Radical innovation in scaling up: Boeing's Dreamliner and the challenge of socio-technical transitions. Technovation, 47,47-58.
- [4].Baylan, O. (2015). Titanyum özellikleri. 3 Nisan 2020 tarihinde, <https://www.metaluzmani.com/malzeme-menu/250-2/> adresinden erişildi.
- [5].Harrison, T. (2019). Titanyum ve Havacılık Endüstrisi. 15 Aralık 2019 tarihinde, <https://tmstitanium.com/titanium-and-the-aerospace-industry> adresinden erişildi.
- [6].Airbus, S.A.S., COMPANY. (2004). Küresel Pazar Tahmini. 11 Ağustos 2020 tarihinde, <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html> adresinden erişildi.
- [7].Starke, E. A., Staley, J. T., (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft, Progress in Aerospace Sciences, (3), 131-172.
- [8].Kumar, D. (2013). Design and Analysis of Composite Rotor Blades for Active/Passive Vibration Reduction. Yayımlanmamış doktora tezi, Boeing Company, Chicago.
- [9].Arslan, Y. B. (2016). Alüminyum Alaşımları, Tanıtılması ve Özellikleri. 12 Nisan 2020 tarihinde <http://www.demircelik.com.tr/mobil/haber.asp?id=8748> adresinden erişildi.
- [10]. Yurdakul, M., Özbay, O., Tansel Y., (2002). Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17 (2), 1-23.
- [11]. Ekambaram, S., Murugan, N. (2015). Synthesis and Characterization of Aluminium Alloy AA6061-Alumina Metal Matrix Composite, International Journal of Engineering and Technology, (55),1-3.
- [12].Davis, J.R. (2001). Alloying: Understanding the Basics, ASM International, (1),310-416.
- [13].Dağdelen, E., Ulus, A. (2016). Aluminum Sheet Production: Heat Treatment of Aluminium and Temper Designations of Aluminium Alloys, 18th International Metallurgy & Materials Congress (ss. 1-4). Congress Center.
- [14].Heat Treating ASM Handbook Committee (1991). Heat Treating of Aluminum Alloys, ASM Handbook.
- [15].Eser, A., Gökçil, E., Akdı, S., Bir, Y. (2015). Alüminyum İşlem Alaşımlarının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırma Sıcaklık Ve Sürelerinin İncelenmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, (ss. 1-7). İstanbul Fuar Merkezi.
- [16].International, G. (2016). 6061 Aluminum: Get to Know its Properties and Uses. 15 Kasım 2019 tarihinde, <https://www.gabrian.com/6061-aluminum-properties/> adresinden erişildi.
- [17].Yükselen, M. A. (2015). Pervane Teorisi. 15 Kasım 2019 tarihinde <https://web.itu.edu.tr/yukselen/Uck351/11-%20Pervane%20teorisi.pdf> adresinden erişildi.
- [18].Encyclopaedia, B. (2011). Helicopters, Principles of flight and operation. 15 Kasım 2019 tarihinde <https://www.britannica.com/technology/helicopter/Helicopters> adresinden erişildi.

- [19].Parham, D. (2017). Hawk Gyroplane. 23 Kasım 2019 tarihinde <http://www.buildagyrocopter.com/groen-brothers-hawk-gyroplane> adresinden erişildi.
- [20].Johnson, D. (2020). Micron-3 Coaxial Helicopter. 6 Şubat 2019 tarihinde, <https://www.bydanjohnson.com/chopper-town-circular-exploring-two-rotary-winged-aircraft-1-helo-1-gyro/> adresinden erişildi.
- [21].Srinivas, A. (1995). Blade-Element Analysis for Rotors. 18 Ocak 2020 tarihinde <http://www.aerodynamics4students.com/propulsion/blade-element-rotor-theory.php> adresinden erişildi.
- [22].Australian Sports Rotorcraft Association (2019). Gyro explained. 15 Ocak 2020 <https://www.asra.org.au/gyroplanes/gyro-explained/gyro-explained/gyro-aerodynamics> adresinden erişildi.
- [23].Federal Aviation Administration (2019). Helicopter Flying Handbook: Chapter 11; Helicopter Emergencies and Hazards. Handbooks & Manuals of FAA.
- [24].Thomson, D.G., Houston, S., (2008). Advances in understanding autogyro flight dynamics, 64th American Helicopter Society Annual Forum, (ss. 15-86) Montreal, Canada.
- [25].Hau, E. (2006). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer, 13 (2), 312-478.
- [26].Hitchens, F. (2015). Propeller Aerodynamics: The History, Aerodynamics & Operation of Aircraft Propellers. Andrews UK Limited, Luton, (1), 20- 135.
- [27].Flight, L. (2010). Helicopter Flight Training. 4 Mart 2020 tarihinde <https://www.danubewings.com/rigid-rotor-system/> adresinden erişildi.
- [28].Harris, D. (2011). Introduction to Autogyros, Helicopters, and Other V/STOL Aircraft: Helicopters. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, 52-814.
- [29].Kämpf, P. (2017). Aviation. 12 Kasım 2019 tarihinde <https://aviation.stackexchange.com/questions/39403/why-dont-plane-wings-start-at-the-front-of-a-plane-and-end-at-the-back> adresinden erişildi.
- [30].Ameglio, L., Durufle, F., Jacobs, G. and Cavern, C. (2016). Light airborne platforms for Monitoring Minesand Minerals. 12 Nisan 2020 tarihinde <https://www.ecagroup.com/media-file/2926-eca-group-light-airborne-platforms-for-monitoring-mines-and-minerals.pdf> adresinden erişildi.
- [31].F. A. Administration (2011) Rotorcraft Flying Handbook. Pentagon Publishing. Snellville, GA 30039, 74-282.
- [32].Hitchens, F. (2015). Propeller Aerodynamics: The History, Aerodynamics & Operation of Aircraft Propellers. Andrews UK Limited, Luton, 20- 135.
- [33].Zhang, X., Chen, Y., Hu, J. (2018) Recent advances in the development of aerospace materials. Progress in Aerospace Sciences, 97 (2) , 22-34.
- [34].Hollmann, M. (2017). Designing Gyrocopter Rotor Blades. 11 Haziran 2019 tarihinde <http://www.buildagyrocopter.com/designing-gyrocopter-rotor-blades/> adresinden erişildi.
- [35].Williams, C. J., Starke, A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems, Acta Materialia ,(19), 5775-5799.

- [36].Wang, Y.Q., Wang, Z.X., Yin, F.X. ve diğerleri. (2016). Experimental study and finite element analysis on the local buckling behavior of aluminium alloy beams under concentrated loads. *Thin-Walled Structures*,105, 44-56.
- [37].Sundström, R. (2018). High cycle fatigue properties of extruded 6060-T6, 6063-T6 and 6082-T6, Granparksvägen 10, Södertälje,17- 99.
- [38].Council, N.R. (1991). Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology. National Academies Press, 33-91.
- [39].William, D., Callister, Jr., David, G. (2018). Rethwisch. Materials Science and Engineering: An Introduction, Wiley, 23 (2), 237-491.
- [40].Dalli, U., Yuksel, S. (2010). Identification of Flap Motion Parameters for Vibration Reduction in Helicopter Rotors with Multiple Active Trailing Edge Flaps, IOS Press.
- [41].Chawla, K. (2013). Composite Materials: Science and Engineering. Springer; New York City,(3), 17-164.
- [42].Design, U. (2018). Design Concepts for Smaller Aircraft. 12 Kasım 2019 tarihinde <https://ultralightdesign.wordpress.com/about/> adresinden erişildi.
- [43].Mott, R. L. (2013). Student DVD for Machine Elements in Mechanical Design, Pearson.
- [44].Saif, M. (2020). What is Extrusion Process: Working, Types, Applications, Advantages 3 Ağustos 2020 tarihinde <https://www.theengineerspost.com/types-of-extrusion/> adresinden erişildi.
- [45].Extrusion, V. (2019). Aluminum Extrusion Manufacturing 101: Understanding Extrusion Die Types. 11 Ekim 2019 tarihinde <https://vitexextrusions.com/aluminum-extrusion-die-types/> adresinden erişildi.
- [46].Tools, A. (2015). NACA 8-H-12 Airfoil. 22 Haziran 2020 tarihinde <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n8h12-il> adresinden erişildi.
- [47].Wright, R.N. (2011). Wire Technology, Process Engineering and Metallurgy, Butterworth-Heinemann.
- [48].Material, W. (2020). 6061 Aluminum Alloy. 22 Ocak 2020 tarihinde <https://www.theworldmaterial.com/al-6061-t6-aluminum-alloy/> adresinden erişildi.
- [49]. Training in Aluminium Application Technologies. (2005). The mechanical properties of aluminum. 18 Aralık 2019 tarihinde <https://aluminium-guide.com/en/mexanicheskie-svoystva-deformiruemyx-alyuminievyx-splavov/> adresinden erişildi.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ahmet Özer Öz

Doğum Tarihi :21.01.1994

E-mail :aoozer33@gmail.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Uçak, Gövde-Motor Bakım	Kocaeli Üniversitesi	2012-2017
Yüksek Lisans			
Doktora			

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

- 1.
- 2.
- 3.