

**MİKRO / MİNİ SINIF BİR İHA'NIN ELEKTRİKLİ İTKİ SİSTEMİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI**

Yüksek Lisans Yeterlik Tezi

Emrah YİĞİT

Eskişehir 2018

**MİKRO / MİNİ SINIF BİR İHA'NIN ELEKTRİKLİ İTKİ SİSTEMİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI**

Emrah YİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Işıl YAZAR)**

**Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Ağustos 2018**

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1508F589 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

MİKRO / MİNİ SINIF BİR İHA'NIN ELEKTRİKLİ İTKİ SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL DOĞRULANMASI

Emrah YİĞİT

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2018

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Işıl YAZAR)

Dünya çapında havacılık faaliyetlerine bakıldığında İnsansız Hava Aracı çalışmaları oldukça ilgi çekici konulardan birisi olarak görülmektedir. Ülkemizde havacılık faaliyetleri 1990'ların ortasından bugüne artan bir ivme ile ilerlemektedir. İHA faaliyetleri içerisinde de genelde itki sistemleri özelde ise elektrikli itki sistemleri çalışmaları önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemizde havacılık endüstrisine bakıldığında İHA tasarımında itki sistemleri hesaplamaları ve analizleri büyük ölçüde profesyonel anlamda dışa bağımlı haldedir. Bu noktadan hareketle bu tez çalışması kapsamında mikro / mini sınıf bir İHA için elektrikli itki sistemi tasarımı yapılmış, bu tasarımın matematik modeli oluşturulmuş, bu model büyük ölçüde MATLAB / Simulink programına aktarılmış, uygun komponentler seçilerek belirli parametre değerleri çerçevesinde simülasyonlar gerçekleştirilip matematiksel modelin sağlaması yapılmış, daha sonra tüm bu itki sistemi komponentlerini ve ölçüm enstrümantasyonunu içeren bir deney düzeneği sistemi kurulmuş, 5 farklı PWM değeri kullanılarak hem pervanesiz hem de pervaneli durum için testler yapılmış, tüm bu test sonuçları önce değerlendirilmiş sonra da MATLAB / Simulink programı ile simülasyona sokulmuş ve nihayetinde tüm bu sonuçlar karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, simülasyon ve test sonuçlarının büyük ölçüde örtüştüğünü göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: İnsansız Hava Araçları, Elektrikli İtki Sistemleri, Matematiksel Modelleme, Matlab-Simulink, Fırçasız DA Modeli, Batarya Modeli, Pervane Modeli

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION FOR THE ELECTRICAL PROPULSION SYSTEM OF A MICRO / MINI CLASS UNMANNED AERIAL VEHICLE

Emrah YİĞİT

Department of Airframe and Powerplant Maintenance
Anadolu University, Graduate School of Sciences, August 2018

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ
(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Işıl YAZAR)

When looking at the world aviation activities, the works on unmanned aerial vehicles seem like a very interesting topic. The aviation activities in our country have started to accelerate in the mid-1990s. Within the UAV activities works on the thrust systems, and in the private sector, the electrical thrust systems hold a very important place. When we look at the aviation industry of our country, the calculation and analysis of thrust systems in the design of UAVs are largely professionally outsourced. In this regard, for this thesis study a thrust system design for a micro/mini-class UAV was made and the mathematical model of this design was established. This model was then largely transferred to the MATLAB/Simulink program and by selecting the appropriate components and performing simulations within the framework of certain parameter values and a MATLAB/Simulink model was created. After that an experimental setup system including all these thrust system components and measurement instrumentation was installed. Tests were made for 5 different PWM values for both non-propeller and propeller conditions. All these test results were evaluated first and then simulated with the MATLAB/Simulink program and ultimately all these results were compared and analyzed. The results obtained at the end of the study show that the simulation and test results overlap to a great extent.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Electric Propulsion Systems, Mathematical Modelling, Matlab-Simulink, BLDCM Modelling, Battery Modelling, Propeller Modelling

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasına katkılarından dolayı; öncelikle lisansüstü akademik kariyerime başlamamı sağlayan ve biz öğrencilerine birbirinden değerli hocalarımızla çalışma ortamı yaratan değerli hocam Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a, çalışmalarım süresince ikinci danışmanlığımı yürüten hocam Dr. Öğr. Üyesi Işıl YAZAR'a ve desteğini hiç esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Yasin ŞÖHRET hocama teşekkürlerimi sunarım.

Emrah YİĞİT

Ağustos 2018

06/08/2018

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Emrah YİĞİT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLOLAR DİZİNİ.....	xvii
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Tez Çalışma Planı.....	3
1.3. Literatür Taraması.....	4
2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI.....	9
2.1. İnsansız Hava Araçları Tarihçesi.....	9
2.2. İHA Tanımı.....	16
2.3. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırması.....	19
2.4. İHA Uygulama Alanları.....	28
3. İTKİ (TAHRİK) SİSTEMLERİ.....	32
3.1. Havacılıkta Kullanılan İtki Sistemleri’ne Genel Bir Bakış.....	32
3.2 Elektrikli İtki Sistemleri.....	35
3.3 İHA’larda ve Mikro / Mini Sınıf İHA’larda Kullanılan Elektrikli İtki Sistemlerine Genel Bakış.....	37
3.3.1. Bataryalar.....	38
3.3.2. Fırçasız DA motorlar.....	39
3.3.3. Pervaneler.....	40
3.3.4. Elektronik hız kontrolcüsü (ESC).....	42
4. İHA İTKİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....	43
4.1. Matematik Modelleme.....	43

4.1.1. Batarya matematik modellemesi.....	43
4.1.2. Fırçasız DA motoru matematik modellemesi.....	44
4.1.3. Pervane matematik modellemesi.....	47
4.2. Mat-Lab Simulink Modellemesi.....	48
4.2.1. Batarya matematik modelinin Matlab-Simulink programına aktarılması.....	49
4.2.2. Fırçasız DA motorunun matematik modelinin Matlab- Simulink programına aktarılması.....	50
4.2.3. Pervane matematik modelinin Matlab-Simulink programına aktarılması.....	54
4.3. Sistem Modellemesi.....	56
5. DENEY DÜZENİĞİ VE YÖNTEM.....	58
6. TESTLER VE ÖLÇÜMLER.....	68
6.1. Pervanesiz Durumda (Yüksüz) Yapılan Test ve Ölçümler.....	68
6.1.1. 1450 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	68
6.1.2. 1400 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	71
6.1.3. 1350 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	74
6.1.4. 1300 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	77
6.1.5. 1250 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	80
6.2. Pervaneli Durumda (Yüklü) Yapılan Test ve Ölçümler.....	83
6.2.1. 1450 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	83
6.2.2. 1400 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	86
6.2.3. 1350 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	89
6.2.4. 1300 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	92

6.2.5. 1250 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları.....	95
7. MATLAB / SIMULINK UYGULAMASI HESAPLAMALARI.....	99
7.1. Matlab / Simulink Uygulamasının Hesaplamalarının ve Modelinin Sağlaması (Validasyonu).....	99
7.1.1. Pervanesiz (Yüksüz) halde Matlab / Simulink uygulaması hesaplamaları sağlaması (validasyonu).....	101
7.1.2. Pervaneli (Yüklü) halde Matlab / Simulink uygulaması hesaplamaları sağlaması (validasyonu).....	104
7.2. Matlab / Simulink Uygulamasının Hesaplamalarının ve Modelinin Deney Düzeneği İçin Simülasyonu.....	108
7.2.1. Pervanesiz (Yüksüz) halde deney düzeneği için Matlab / Simulink uygulaması hesaplamaları.....	108
7.2.2. Pervaneli (Yüklü) halde deney düzeneği için Matlab / Simulink uygulaması hesaplamaları.....	111
8. DEĞERLENDİRMELER.....	116
8.1 Pervanesiz (Yüksüz) Deney Verilerinin Değerlendirilmesi.....	116
8.2. Pervaneli (Yüklü) Deney Verilerinin Değerlendirilmesi.....	118
8.3. Pervanesiz (Yüksüz) Durumda Deney Verileri ile Matlab / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması.....	121
8.4. Pervaneli (Yüklü) Durumda Deney Verileri ile Matlab / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması.....	125
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	130
KAYNAKÇA.....	132
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. İlk modern İHA denemeleri	10
Şekil 2.2. Queen Bee İHA	11
Şekil 2.3. V1 İHA	11
Şekil 2.4. Gyrodyne, Ryan Firebee ve Northrop Chukar İHA'ları	12
Şekil 2.5. Westland Wisp ve Compass Cope İHA'ları	13
Şekil 2.6. 1980'lerin İHA'ları	14
Şekil 2.7. 1990'ların İHA'ları	15
Şekil 2.8. 2000'lerin İHA'ları	15
Şekil 2.9. Barnhart ve arkadaşlarına göre İHS sisteminin içeriği	19
Şekil 3.1. Havacılığın gelişim seyri	33
Şekil 3.2. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan motor grupları	33
Şekil 3.3. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan gaz türbinli motor grupları.....	34
Şekil 3.4. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan 'Hava Kullanmayan Motorlar' grubunun alt grupları	35
Şekil 3.5. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan 'Elektrikli İtme Sistemleri' grubunun alt grupları	36
Şekil 3.6. Pervane için bir pervane hatvesi (adımı) (pitch).....	41
Şekil 3.7. ESC için bağlama biçimi.....	42
Şekil 4.1. 3 faz eşdeğer devresinin şematik gösterimi.....	44
Şekil 4.2. Bir faz eşdeğer devresi	45
Şekil 4.3. Batarya Matlab-Simulink Modellemesi (Açık Hali).....	49
Şekil 4.4. Batarya Matlab-Simulink Modellemesi (Kapalı Hali).....	49
Şekil 4.5. Matlab-Simulink modellemesinde gerilimin okunması.....	50
Şekil 4.6. Fırçasız DA Motoru Matlab-Simulink modellemesi.....	51
Şekil 4.7. Matlab-Simulink modellemesinde akımın okunması.....	52
Şekil 4.8. Matlab-Simulink modellemesinde açısal hızın okunması.....	52
Şekil 4.9. Matlab-Simulink modellemesinde torkun (momentin) okunması.....	53
Şekil 4.10. Matlab-Simulink modellemesinde motor için gücün okunması.....	53
Şekil 4.11. Pervane Matlab-Simulink modellemesi.....	54

Şekil 4.12. Matlab-Simulink modellemesinde pervane için gücün okunması...	55
Şekil 4.13. Matlab-Simulink modellemesinde itkinin okunması.....	55
Şekil 4.14. Matlab-Simulink modellemesinde pervane için torkun (momentin) okunması.....	56
Şekil 4.15. Deney düzeneği sisteminin fiziksel modellemesi.....	56
Şekil 4.16. Matlab-Simulink modellemesinin pervanesiz (yüksüz) hali.....	57
Şekil 4.17. Matlab-Simulink modellemesinin pervaneli (yükli) hali.....	57
Şekil 5.1. Deney düzeneği iş akış şeması.....	58
Şekil 5.2. Deney düzeneği testler akış şeması.....	59
Şekil 5.3. Deney düzeneği kurulumu tamamlanmış hali.....	60
Şekil 5.4. Deney düzeneği monte edilmemiş hali ile komponentler.....	61
Şekil 5.5. Deney düzeneği monte edilmiş hali perspektif görünüş.....	62
Şekil 5.6. Deney düzeneği ESC montajı.....	62
Şekil 5.7. Deney düzeneği kullanılan batarya.....	63
Şekil 5.8. Deney düzeneği kullanılan fırçasız DA motoru.....	63
Şekil 5.9. Deney düzeneği kullanılan pervane.....	63
Şekil 5.10. Deney düzeneği batarya monte edilmiş hali.....	64
Şekil 5.11. Deney düzeneği fırçasız DA motorunun monte edilmiş hali.....	64
Şekil 5.12. Deney düzeneği fırçasız pervanenin monte edilmiş hali.....	65
Şekil 5.13. Deney düzeneği batarya şarj cihazı.....	65
Şekil 5.14. Deney düzeneği dikey kalibrasyonu.....	66
Şekil 5.15. Deney düzeneği yatay kalibrasyonu.....	66
Şekil 5.16. Deney düzeneğinin kullanıma hazır hali.....	67
Şekil 6.1. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için ivme ve titreşim.....	68
Şekil 6.2. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için tork (moment).....	68
Şekil 6.3. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için açısal hız.....	69
Şekil 6.4. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için güç.....	69
Şekil 6.5. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için gerilim.....	69
Şekil 6.6. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için akım.....	69
Şekil 6.7. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için motor verimi.....	70
Şekil 6.8. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için ivme ve titreşim.....	71
Şekil 6.9. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için tork (moment).....	71
Şekil 6.10. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için açısal hız.....	71

Şekil 6.11. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için güç.....	72
Şekil 6.12. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için gerilim	72
Şekil 6.13. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için akım.....	72
Şekil 6.14. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için motor verimi.....	72
Şekil 6.15. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için ivme ve titreşim.....	74
Şekil 6.16. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için tork (moment).....	74
Şekil 6.17. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için açısal hız.....	74
Şekil 6.18. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için güç.....	75
Şekil 6.19. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için gerilim	75
Şekil 6.20. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için akım.....	75
Şekil 6.21. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için motor verimi.....	75
Şekil 6.22. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için ivme.....	77
Şekil 6.23. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için tork (moment).....	77
Şekil 6.24. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için açısal hız.....	77
Şekil 6.25. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için güç.....	78
Şekil 6.26. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için gerilim	78
Şekil 6.27. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için akım.....	78
Şekil 6.28. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için motor verimi.....	79
Şekil 6.29. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için ivme ve titreşim.....	80
Şekil 6.30. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için tork (moment).....	80
Şekil 6.31. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için açısal hız.....	80
Şekil 6.32. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için güç.....	81
Şekil 6.33. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için gerilim	81
Şekil 6.34. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için akım.....	81
Şekil 6.35. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için motor verimi.....	82
Şekil 6.36. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için ivme ve titreşim.....	83
Şekil 6.37. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için tork (moment).....	83
Şekil 6.38. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için açısal hız.....	84
Şekil 6.39. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için güç.....	84
Şekil 6.40. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için gerilim	84
Şekil 6.41. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için akım.....	85
Şekil 6.42. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için motor verimi.....	85
Şekil 6.43. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için pervane verimi.....	85

Şekil 6.44. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için ivme.....	86
Şekil 6.45. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için tork (moment).....	86
Şekil 6.46. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için açısal hız.....	87
Şekil 6.47. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için güç.....	87
Şekil 6.48. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için gerilim	87
Şekil 6.49. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için akım.....	88
Şekil 6.50. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için motor verimi.....	88
Şekil 6.51. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için pervane verimi.....	88
Şekil 6.52. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için ivme.....	89
Şekil 6.53. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için titreşim.....	89
Şekil 6.54. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için tork (moment).....	90
Şekil 6.55. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için açısal hız.....	90
Şekil 6.56. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için güç.....	90
Şekil 6.57. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için gerilim	91
Şekil 6.58. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için akım.....	91
Şekil 6.59. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için motor verimi.....	91
Şekil 6.60. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için pervane verimi.....	91
Şekil 6.61. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için ivme.....	92
Şekil 6.62. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için tork (moment).....	93
Şekil 6.63. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için açısal hız.....	93
Şekil 6.64. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için güç ve gerilim	93
Şekil 6.65. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için akım.....	94
Şekil 6.66. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için motor verimi.....	94
Şekil 6.67. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için pervane verimi.....	94
Şekil 6.68. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için ivme ve titreşim.....	95
Şekil 6.69. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için tork (moment).....	95
Şekil 6.70. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için açısal hız.....	96
Şekil 6.71. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için güç.....	96
Şekil 6.72. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için gerilim	96
Şekil 6.73. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için akım.....	97
Şekil 6.74. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için motor verimi.....	97
Şekil 6.75. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için pervane verimi.....	97
Şekil 7.1. Matlab-Simulink modelinde kullanılan pervane karakteristikleri.....	101

Şekil 7.2. Pervanesiz durumda Matlab / Simulink gerilim sağlaması.....	102
Şekil 7.3. Pervanesiz durumda Matlab / Simulink akım sağlaması.....	102
Şekil 7.4. Pervanesiz durumda Matlab / Simulink açısal hız sağlaması.....	103
Şekil 7.5. Pervanesiz durumda Matlab / Simulink tork (moment) sağlaması....	103
Şekil 7.6. Pervanesiz durumda Matlab / Simulink güç sağlaması.....	104
Şekil 7.7. Pervaneli durumda Matlab / Simulink gerilim sağlaması.....	105
Şekil 7.8. Pervaneli durumda Matlab / Simulink akım sağlaması.....	105
Şekil 7.9. Pervaneli durumda Matlab / Simulink açısal hız sağlaması.....	106
Şekil 7.10. Pervaneli durumda Matlab / Simulink tork (moment) sağlaması.....	106
Şekil 7.11. Pervaneli durumda Matlab / Simulink gerilim sağlaması.....	107
Şekil 7.12. Pervaneli durumda Matlab / Simulink itki sağlaması.....	107
Şekil 7.13. Pervaneli durumda Matlab / Simulink yük torku sağlaması.....	108
Şekil 7.14. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu - gerilim	109
Şekil 7.15. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu - akım.....	109
Şekil 7.16. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – açısal hız.....	110
Şekil 7.17. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – tork (moment)	110
Şekil 7.18. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu - güç.....	111
Şekil 7.19. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – gerilim	112
Şekil 7.20. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – akım.....	112
Şekil 7.21. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – açısal hız.....	113
Şekil 7.22. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – tork (moment)	113
Şekil 7.23. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – güç.....	114

Şekil 7.24. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – itki.....	114
Şekil 7.25. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin Matlab / Simulink simülasyonu – yük torku.....	115
Şekil 8.1. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – akım.....	116
Şekil 8.2. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – güç.....	117
Şekil 8.3. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – tork (moment).....	117
Şekil 8.4. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – titreşim.....	117
Şekil 8.5. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – açısal hız.....	118
Şekil 8.6. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – akım.....	119
Şekil 8.7. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – güç.....	119
Şekil 8.8. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – itki.....	119
Şekil 8.9. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – tork (moment).....	120
Şekil 8.10. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – titreşim.....	120
Şekil 8.11. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – açısal hız.....	120
Şekil 8.12. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – motor verimi.....	121
Şekil 8.13. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması.....	122

Şekil 8.14. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – gerilim	123
Şekil 8.15. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – akım.....	123
Şekil 8.16. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – güç.....	124
Şekil 8.17. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – tork (moment).....	124
Şekil 8.18. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – açısal hız.....	125
Şekil 8.19. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması.....	126
Şekil 8.20. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – gerilim	127
Şekil 8.21. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – akım.....	127
Şekil 8.22. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – güç.....	128
Şekil 8.23. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – itki.....	128
Şekil 8.24. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – tork (moment).....	129

Şekil 8.25. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin Matlab – Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – açısal hız.....	129
---	-----

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. İHA Tarihçesi	16
Tablo 2.2. İHA Sınıflandırma Kriterleri	20
Tablo 2.3. Bento’ dan uyarlanan İHA Sınıflandırması.....	24
Tablo 3.1. Bazı geleneksel–elektrikli itki sistemlerinin hızları üzerinden karşılaştırılması	37
Tablo 5.1. Gövde ölçüm kapasitesi.....	61
Tablo 6.1. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için tüm değerler.....	70
Tablo 6.2. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için ivme değerleri.....	70
Tablo 6.3. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için verim değerleri.....	70
Tablo 6.4. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için tüm değerler.....	73
Tablo 6.5. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için ivme değerleri.....	73
Tablo 6.6. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için verim değerleri.....	73
Tablo 6.7. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için tüm değerler.....	76
Tablo 6.8. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için ivme değerleri.....	76
Tablo 6.9. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için verim değerleri.....	76
Tablo 6.10. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için tüm değerler.....	79
Tablo 6.11. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için ivme değerleri.....	79
Tablo 6.12. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için verim değerleri....	79
Tablo 6.13. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için tüm değerler.....	82
Tablo 6.14. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için ivme değerleri.....	82
Tablo 6.15. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için verim değerleri....	82
Tablo 6.16. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için tüm değerler.....	85
Tablo 6.17. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için ivme değerleri.....	86
Tablo 6.18. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için verim değerleri.....	86

Tablo 6.19. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için tüm değerler.....	88
Tablo 6.20. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için ivme değerleri.....	89
Tablo 6.21. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için verim değerleri.....	89
Tablo 6.22. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için tüm değerler.....	92
Tablo 6.23. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için ivme değerleri.....	92
Tablo 6.24. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için verim değerleri.....	92
Tablo 6.25. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için tüm değerler.....	94
Tablo 6.26. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için ivme değerleri.....	95
Tablo 6.27. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için verim değerleri.....	95
Tablo 6.28. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için tüm değerler.....	97
Tablo 6.29. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için ivme değerleri.....	98
Tablo 6.30. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için verim değerleri.....	98
Tablo 7.1. Sağlama için batarya parametreleri.....	99
Tablo 7.2. Sağlama için fırçasız DA motoru parametreleri.....	100
Tablo 7.3. Sağlama için pervane parametreleri.....	100
Tablo 8.1. Pervanesiz (Yüksüz) 5 farklı PWM değeri için deney verileri.....	116
Tablo 8.2. Pervaneli (Yüklü) 5 farklı PWM değeri için deney verileri.....	118
Tablo 8.3. Pervanesiz (Yüksüz) Durumda Deney Verileri ile Matlab / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması.....	122
Tablo 8.4. Pervaneli (Yüklü) Durumda Deney Verileri ile Matlab / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması.....	126

1.GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimine bağlı olarak havacılık alanında yapılan faaliyetlerde de hızlı ilerlemeler kaydedilmektedir. Bu hızlı ilerlemenin içinde İnsansız Hava Araçları (İHA) çalışmaları göreceli olarak daha önemli bir yere sahiptir. Dünya havacılık tarihinde İHA çalışmaları serüveninin başlangıcı yaklaşık olarak 150 yıl önceye dayanır. Özellikle son 20 yıl İHA çalışmaları için ayrıca parantez açılması gereken bir zaman dilimidir. Yaklaşık 150 yıllık süreçte kademeli olarak yavaş yavaş ilerleyen çalışmalar son 20 yılda büyük ivme kazanmıştır.

İHA çalışmaları serüveninin erken dönemlerinde çalışmaları tetikleyen ana başlık askeri faaliyetlerdir. Özellikle 1. ve 2. Dünya Savaşları ile 2. Dünya Savaşı sonrası çift kutuplu dünyada yaşanan soğuk savaştan kaynaklanan askeri ihtiyaçlar ve büyük dünya ülkeleri arasındaki rekabet genelde havacılığın özelde ise İHA çalışmalarının hızla gelişmesini sağlamıştır. Bu gelişmelere paralel olarak, 2. Dünya Savaşı'ndan sonra İHA çalışmalarının sivil havacılık uygulamalarındaki payı da yavaş yavaş artmaya başlamıştır. 1990'lara gelirken çift kutuplu dünyanın yıkılması ve genel olarak dünyada teknolojik gelişimin ivme kazanması ile birlikte İHA çalışmaları boyut değiştirmiştir. Büyük dünya ülkelerinin askeri caydırıcılık faaliyetleri kapsamında İHA çalışmaları gelişmeye devam ederken, öte yandan sivil havacılıktaki payı da giderek artmaya başlamıştır. Bugün de İHA çalışmalarında ve kullanım alanlarında sivil havacılık uygulamalarının payı günden güne artmaktadır. İHA'lar bugün; askeri uygulamalardan sivil uygulamalara, haberleşmeden tarım faaliyetlerine, film endüstrisinden güvenlik faaliyetlerine, ticari kullanımlardan ar-ge faaliyetlerine, meteoroloji faaliyetlerinden madencilik faaliyetlerine, arama-kurtarma çalışmalarından kamu güvenliği faaliyetlerine, çevre-doğa faaliyetlerinden gözlem çalışmalarına kadar çok geniş bir yelpazede gündelik yaşamımızla iç içedir (Finn ve Wright, 2012; Maddalon vd., 2013, Cox vd., 2004; Caner, 2013; Sarwar ve Shah, 2013).

Ülkemizde İHA çalışmaları henüz çok yenidir. 1990'ların başında yurt dışından satın alınan ilk İHA'larla başlayan Türkiye'nin İHA serüveni 1990'ların ortasında eldeki yerli imkanlarla İHA üretimi çalışmaları olarak devam etmiş, 2004 yılında devletin Savunma Sanayi Müsteşarlığı ile İHA üretimine doğrudan dahil olması ile çalışmalar ivme kazanmış ve 14 yıl gibi çok kısa bir sürede Türkiye artık kendi imkanları ile yerli İHA üreten ve bunları çeşitli ülkelere ihraç eden bir ülke konumuna gelmiştir. Kuşkusuz

kısa sürede alınan bu yol çok önemlidir ancak ülkemiz İHA çalışmaları için sıradaki hedef bu alandaki dünya devleri ile rekabet edebilir konuma gelebilmektir (Akyürek vd., 2012).

Havacılık çalışmalarının dünyada yöneldiği bir diğer önemli konu ise ‘elektrikli uçuş’tur. Havacılıkta kullanılan geleneksel itki sistemlerinde enerji elde etmenin zorluğu, dünya fosil yakıt kaynaklarının giderek azalması ve enerji elde edilirken çevreye verilen zarar göz önüne alındığında ‘elektrikli uçuş’ veya ‘elektrikli itki sistemleri’ birçok avantajından dolayı tercih edilmek istenmektedir. İHA’ların kullanım amacı ve yapısı göz önüne alındığında, bu hava araçlarında elektrikli itki sistemleri kullanma isteğine yönelimin artması daha iyi anlaşılmaktadır (Griffis vd., 2009).

Bu bağlamda bu tez çalışması kapsamında ülkemizdeki İHA çalışmalarına destek olmak amacıyla, İHA çalışmalarında çok önemli bir başlık olan ‘Elektrikli İHA İtki Sistemleri’ üzerinde durulmuştur. Sivil ve askeri uygulamalarda çok önemli bir paya sahip olan Mikro/Mini sınıfı İHA’larda itki sistemleri ve tamamlayıcı komponentlerinin matematik modeli kurulup, MATLAB / Simulink programına aktarıldı ve kurulan test düzeneği ile testleri yapıldı. Tasarım, üretim ve pazarlama aşamalarının her birinde ayrı ayrı kullanılabilecek bir komponent seçim şablonu oluşturulmaya çalışıldı.

1.2. Tezin Amacı

İHA’ların tasarım aşamalarında en önemli bölümlerden birisi itki sistemi tasarımıdır. Tasarlanacak itki sistemi İHA’ların sınıflandırmasını ya da kullanım alanlarını belirleyecek olması açısından önemlidir. Seçilecek güç kaynağı, tercih edilecek itki sistemi, kullanılacak yakıt ve tüm itki sisteminde kullanılacak yan komponentler, tasarlanan İHA’nın ağırlığına, ulaşabileceği maksimum irtifasına, maksimum uçuş menziline, havada kalış süresine doğrudan etki edecektir. Bu nedenle İHA tasarımında en önemli aşamalardan birisi olan itki sistemi tasarlanırken doğru, uyumlu, verimli komponent seçimi çok önemlidir.

Bir diğer önemli konu da hem teknolojinin gelişim seyri hem de itki sistemlerinin yakalamaya çalıştığı trendle ilişkili olarak ‘elektrikli uçuş’a yönelimdir. Bu kapsamda fosil yakıt türevleri kullanılarak gerçekleştirilen ‘geleneksel itki sistemleri’ artık yerini yavaş yavaş ‘elektrikli itki sistemleri’ne bırakmaktadır. Elektrikli itki sistemleri hem günümüz ileri teknolojik gelişim trendine daha uygundur hem de çevresel faktörler göz önüne alındığında çok daha çevre dostudur. Elektrikli itki sistemleri ayrıca kullanım

kolaylığı ve temin edilebilirlik gibi özellikleri açısından İHA çalışmalarında da (boyutuna bakılmaksızın) tercih edilmektedir.

Ek olarak ülkemizde İHA çalışmaları hem üniversitelerde hem de endüstride giderek yaygınlaşmaktadır. Son dönemde üniversitelerde akademik ve deneysel çalışmalarda İHA'lara olan ilgi, devlet teşvikleriyle birlikte hız kazanan endüstriyel faaliyetler, askeri ve sivil uygulamalarda İHA kullanımını da artırmıştır.

Tüm bu sebeplerden yola çıkarak bu tez çalışmasında Mikro / Mini sınıf bir insansız hava aracının elektrikli itki sisteminin matematiksel olarak modellenmesi ve deneysel olarak doğrulanması; üniversitelerde, endüstride ve bireysel çalışmalarda bulunan kişi ve kurumlara kılavuzluk etmeyi amaçlamaktadır. Gerek güç kaynağı, gerek ana itki sistemi gerek yan komponentler seçilirken yüzlerce farklı varyasyon yapılabilir. Hali hazırda askeri ve sivil havacılık uygulamalarında İHA tasarımı yapılırken bu varyasyonlar kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında bu varyasyonların en yaygın kullanılanlarından birisi olan Mikro / Mini sınıf bir İHA elektrikli itki sisteminin matematik modellemesini yapıp, MATLAB / Simulink ortamında aktarıldı. Daha sonra kurulan test düzeneği ile de deneysel doğrulaması gerçekleştirildi. Bu model, seçimi yapılan varyasyon için bir komponent seçim şablonu olarak kullanılabileceği gibi bu varyasyonun birçok hesaplaması da yine bu model üzerinden yapılabilecektir. Bu şekilde gerek bireysel gerek akademik gerekse de endüstriyel İHA tasarım çalışmalarında itki sistemi aşamasında hem doğru-uyumlu-verimli komponent seçimi, hem hesaplama yapılabilecek;, hem yakın varyasyonlara geçiş yaparken güvenilir bir şablon görevi görecektir; aynı zamanda uzun zaman alan bu süreçleri ciddi bir biçimde kısaltacaktır.

1.3. Tez Çalışma Planı

Tez çalışmasının ilk aşamalarında açık literatürden erişilebildiği kadarıyla yayın taraması yapılmıştır. İHA tasarımı, sınıflandırması, uygulama alanları, dünyada trend, ülkemizdeki İHA çalışmaları, havacılıkta itki sistemleri, geleneksel – yenilikçi itki sistemleri, elektrikli uçuş, elektrikli itki sistemleri, itki sistemlerinin matematik modellenmesi, MATLAB / Simulink programı ile modelleme, itki sistemleri testleri gibi konular kapsamlı olarak incelenmiştir. Sonraki aşamalarda gelişen teknoloji ile sürekli evrilen havacılık çalışmalarının önümüzdeki dönemlerde en önemli yönelimlerinden olan 'elektrikli uçuş'a paralel olarak İHA çalışmalarında kullanılan elektrikli itki sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Hem İHA çalışmalarındaki yaygınlığı hem deneysel

Çalışmalarda kullanım kolaylığı hem de temin edilebilirlik gibi özellikleri göz önüne alınarak tez çalışmasında odaklanılacak olan İHA sınıfı seçilmiştir. Daha sonra bu seçim ile birlikte kullanılacak olan elektrikli itki sistemi üzerine çalışılmış; endüstri ve niversite uygulamalarında yaygın kullanılabilecek varyasyonlarda elektrikli itki sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımın önce teorik olarak matematik modellemesi yapılmış, bu matematik model MATLAB / Simulink programı ortamına aktarılmıştır. MATLAB / Simulink programında çeşitli sağlamalar ve hesaplamalar yapılmıştır. Daha sonra uygun modellerde komponent seçimi gerçekleştirilmiştir. Satın alma aşamasından sonra teorik hesaplamalar ve matematik modelin doğrulanması amacıyla deneysel çalışmalara geçilmiş, deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneği monte edilmiş, gerekli ölçüm enstrümantasyonu bağlanmış, ilgili yazılım web sitesinden indirilip bilgisayar ortamına bağlantı sağlanmışır. Daha sonra pervanesiz ve pervaneli olarak 2 aşamada testler gerçekleştirilmiştir. Her iki aşama için de testler 5 farklı PWM (Sinyal Genişlik Modülasyonu) değer için uygulanmıştır. Bulunan sonuçlar raporlanmıştır. Deney düzeneği içinde olan komponentlerin MATLAB / Simulink ortamında simülasyonları yapılmış ve raporlanmıştır. En sonunda deney düzeneğinde elde edilen sonuçlar ile MATLAB / Simulink ortamında yapılan simülasyonların sonuçları karşılaştırılıp analiz edilmiştir (Dudhe ve Thosar, 2014; Momenzadeh vd., 2014).

1.4. Literatür Taraması

Bu alışma kapsamında öncelikle İHA konusunda kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. İHA tarihçesi, kullanım alanları, sınıflandırılması, günümüz teknolojik gelişmeleri, gelecek perspektifi gibi alt başlıklarla birlikte literatürdeki ulaşılabilen birçok kaynak incelenmiştir. Daha sonra havacılıkta kullanılan gaz trbimli ve elektrikli itki sistemleri incelenmiş, küçük boyutlu İHA'larda daha yaygın kullanılan elektrikli itki sistemleri incelemeleri üzerine yoğunlaşılmışır. Elektrikli itki sistemleri, havacılıkta bir gelecek perspektifi olarak elektrikli uçuş, yeni nesil elektrikli itki sistemleri, elektrik motorları gibi alt başlıklarla konu detaylı olarak incelendikten sonra bu tez çalışması kapsamında çalışılacak olan İHA için daha önce yapılan test çalışmaları irdelenmiş ve güncel test çalışmaları incelenmiştir. Kurulan test düzeneğindeki hesaplamaların ve sağlamaların yapılabilmesi için MATLAB / Simulink programı ile ilgili daha önce yapılan modellemeler, hesaplamalar ve diğer çalışmalar da irdelenmiştir. Literatür

taraması yapılırken dünyanın çeşitli yerlerindeki araştırma merkezleri, üniversiteler, özel kuruluşlar bünyesinde faaliyet gösteren merkezlerin çalışmalarından yararlanılmıştır.

İHA faaliyetleri ile ilgili yapılan çalışma, proje ve yayın sayısı oldukça fazladır. Yapılan çalışma ve yayınlar daha çok askeri uygulama amaçlı proje eksenlidir. Bu çalışmaları sivil uygulama amaçlı çalışma, proje ve yayınlar izlemektedir. Akademik çalışmalar ise daha çok bu çalışmaların gözlemlenerek değerlendirmesi esasına dayanır. Bu bağlamda literatürde öne çıkan belli başlı yayınlara göz atmak mümkündür.

İHA'ların sınıflandırılması konusunda hem üzerinde mutabakat sağlanan bir genel-standart sınıflandırma yoktur hem de bu konuda hazırlanan yayın sayısı çok azdır. Genelde kısmi sınıflandırmalar yapılmış ve bu sınıflandırmaların dayanakları detaylı / kapsamlı olarak aktarılmamıştır. İHA'ların sınıflandırılması çalışma yapılacak olan İHA grubunun seçimi için önemlidir. İHA'ların detaylı olarak sınıflandırılması ile ilgili olarak en kapsamlı yayınlardan birisi Bento tarafından 2008 yılında yapılmıştır. Bento çalışmasında İHA'ları çeşitli parametrelere göre kategorize etmiş ve bu kategorizasyonun sonucunda kullanım alanlarını da kategorize edilmiş bu sınıflara göre ayırmıştır. Maksimum kalkış ağırlığı, maksimum uçuş irtifası, havada kalma süresi, veri bağlantı erişim mesafesi gibi parametrelere dayalı olarak İHA'ları Mikro-Mini, Taktiksel, Stratejik ve Özel Görev olmak üzere 4 ana sınıfa ve yine aynı parametrelere göre 13 alt sınıfa ayırmıştır. Sınıflandırılan tüm bu İHA'ların kullanılan örneklerini incelemiş ve uygulama alanlarına göre örneklendirip sınıflandırma tablosuna eklemiştir. Kullanılan en küçük İHA'lardan (0,1 kg maksimum kalkış ağırlıklı, 250 m maksimum irtifalı), uzay çalışmalarında kullanılan (maksimum irtifası 30.000 m den büyük) İHA'lara kadar geniş bir yelpazede sınıflandırma yapmaya çalışmıştır (Bento, 2008).

İHA'ların sınıflandırılması konusunda yapılan bir diğer önemli çalışma ise Korchenko ve Illyash tarafından 2013 yılında yapılmıştır. Bu çalışmayı önemli kılan nokta İHA sınıflandırmasının farklı boyutlarda parametrelere göre yapılmış olmasıdır. Literatürdeki İHA'ların sınıflandırılması çalışmalarına bakıldığında, farklı parametrelere dayanan sınıflandırmaların olduğu görülür. Yapılan çalışmalar o çalışmanın gereksinimleri ve parametresi baz alınarak yapılmıştır. Korchenko ve Illyash yaptıkları bu sınıflandırma çalışmasında İHA'ları değişik parametrelere göre sınıflandırmış ve bu sınıflandırmaları hangi parametrelere göre yaptıklarını detaylı bir biçimde anlatmışlardır. Bu sınıflandırma başlıkları çok çeşitli parametrelere ve kullanım alanlarına göre olup

çeşitli çalışmalara ışık tutması açısından önemlidir. Hava aracının kullanım alanına göre, kullanılan kontrol sisteminin çeşidine göre, uçuş kurallarına göre, havada kullanılan alanın durumuna göre, hava aracının tipine göre, kanat tipine göre, kalkış ve inişteki kaldırma kuvvetinin yönüne göre, kalkış – iniş tipine göre, hava aracının motor tipine göre, yakıt sistemine göre, yakıt tankı tipine göre, yakıt sisteminden istifade sayısına göre, genel kategori (İHA maksimum kalkış ağırlığı, menzil, havada kalma süresi, çıkabileceği maksimum irtifa değerlerine göre), gerçekleştirilebilecek mesafe yarıçapına göre, uçuş irtifasına göre, fonksiyon ve uygulama alanlarına göre 16 farklı kriter baz alınarak yapılan bu çalışma literatürdeki konu ile ilgili en önemli çalışmalardan birisidir (Korchenko ve Illyash, 2013).

Yıllardır süren İHA faaliyetleri teknolojik gelişimin ivmelenmesi ile birlikte son 20 yılda belirgin hız kazanmıştır. Bu durumla birlikte yeni nesil İHA tasarımları İHA'ları daha kompleks yapılar haline getirmiştir. Böylelikle İHA'ların basit olarak bir hava aracı mı yoksa bir sistem mi olduğu tartışmalarını başlatmıştır. Bu konu da dünya İHA faaliyetleri içinde henüz dünya çapında standartlaştırılamamış konulardan biridir. Gupta ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları bir derleme çalışmasında İHA'ların bir hava aracı mı yoksa bir sistem mi olduğu tartışmalarına etraflıca değinmiştir. İHA tanımını uluslararası bir boyutta yeniden yapmaya çalışmışlar; İHA'ların hava aracı olmanın yanında yer kontrol istasyonu ve veri bağlantı aksamıyla birlikte bir bütün olarak İnsansız Hava Sistemi (İHS) olduğunu belirtmeye çalışmışlardır. Ayrıca çalışma kapsamında İHA tarihçesi verilmiş, İHS'nin tüm komponentleri ve kontrol mekanizmalarının işleyişi detaylı olarak anlatılmış, İHA sınıflandırması yapılmış ve İHA'ların uygulama alanları askeri ve sivil havacılık olarak ayrılıp detaylı biçimde aktarılmıştır (Gupta vd., 2013).

NASA Ames Araştırma Merkezi'nden Alan Hobbs'un çalışması da İHS'lerin tüm bileşenlerinin detaylı analizi bakımından önemlidir. Bu çalışmada Hobbs İHS'lerin detaylı tanımını yapmış, uzaktan kontrol ve operasyonların nasıl gerçekleştiğini detaylı olarak anlatmıştır (Hobbs, 2010). Huang ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları ve İHA'ların teknolojik gelişimini, uygulama alanlarını anlattıkları çalışmanın genelde uygulama alanları özelde ise tarım faaliyetlerini anlattıkları kısımları yine literatür tarama faaliyetleri kapsamında dikkat çekici bilgiler içermektedir (Huang vd., 2013). Lee ve Choi ise 2016 yılında yaptıkları derleme çalışmasında yine İHA'ların uygulama alanlarını detaylı olarak anlatmışlar, özelde maden endüstrisinde İHA kullanımının yaygınlaştığını

çarpıcı örneklerle anlatmışlardır (Lee ve Choi, 2016). İngiltere Savunma Bakanlığı'nın 2010 yılında yaptığı (Joint Doctrine Note 3/10, 2010) çalışmasının İHA ile ilgili kısmı da özellikle askeri havacılıkta İHA kullanımındaki detaylı sınıflandırma, terminoloji ve sistem tanılması anlamında kayda değer bir çalışmadır. Bu çalışmada özellikle terminoloji konusu detaylı ve açıklayıcı bir biçimde işlenmiş, İHA literatüründe olan kavram karmaşalarının giderilmesi ve terimlerin standartlaştırılması amacına ciddi katkılar sunmuştur (Joint Doctrine Note 3/10, 2010). Birleşik Devletler Ordusu Yol Haritası 2010-2035 çalışması kapsamında sundukları raporun İHA ile ilgili kısmı ise bu konuda yapılmış en kapsamlı çalışmalardan birisidir. Çalışma kapsamında yine İHA tanımı, detaylı sınıflandırılması anlatılmış; bununla birlikte askeri İHA çalışmaları kapsamında başat ülke olan Birleşik Devletler'in Ordusu'nun İHA faaliyetlerinde ne düzeyde olduğu, teknolojik gelişim düzeyi, kullandığı son teknoloji ve gelecek 20 yıl için hedefleri anlatılmıştır. Bu çalışma İHA gelecek perspektiflerinin belirlenmesi, İHA çalışmalarının hangi yöne gittiğinin anlaşılması bakımından oldukça önemli bir çalışmadır (Dempsey ve Rasmussen, 2010). NASA'dan Maddalon ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları bir diğer çalışma, İHA sınıflandırmasının dünya İHA standartları ile yeniden değerlendirildiği bir çalışma olması açısından önemlidir (Maddalon vd., 2013). NASA'dan bir başka önemli çalışma ise 2004 yılında Cox ve arkadaşları tarafından yapılan İHA kabiliyetlerinin değerlendirildiği çalışmadır. Bu çalışmada günümüzün en gelişmiş İHA'larının kabiliyetleri detaylı olarak anlatılmış, İHA sınıflandırması kabiliyetler üzerinden yapılmıştır. Dünya İHA çalışmalarının yönünün belirlenmesi açısından önem arz etmektedir (Cox vd., 2004).

İHA çalışmalarında bir diğer önemli konu ise sivil uygulamalarda gözetleme faaliyetlerinde yaşanan etik ve mahremiyet konusudur. Finn ve Wright 2012 yılında yaptıkları çalışmada dünyada yaşanan gündelik ve hukuki deneyimler üzerinden bu konuya değinmiş, gündelik yaşamımızda giderek hissedilebilirliği artan İHA'ların ileride yaratabileceği bu sorun hakkında önemli bilgiler vermişlerdir (Finn ve Wright, 2012). Bir başka önemli literatür araştırma konusu ise İHA tasarımlarıdır. İHA'ların tasarımları ile ilgili çok önemli yayınlar bu tez çalışması kapsamında taranmıştır. Ancak bu tez çalışmasında işlenecek olan tasarım daha çok itki sistemi tasarımı kısmıdır. Vogeltanz'ın 2015 yılında yaptığı çalışma bu bakımdan önemlidir. Vogeltanz çalışmasında bir İHA için tasarım, modelleme, analiz ve simülasyon yapmıştır. Literatürde parça parça yapılan tasarım, analiz ve simülasyonu birlikte yapmıştır. Tüm bu çalışmaların yazılım boyutunu

detaylı olarak işlemiştir. İtke sisteminin tasarımı, modellenmesi, analiz ve simülasyonları bu çalışmaya dahildir. Burada önemli olan nokta itke sisteminin modellenmesinin komple İHA sistem modellemesi içinde ele alınmasıdır. İtke sisteminin tasarımı, seçim parametrelerinin belirlenmesi noktasında oldukça faydalı bir çalışmadır (Vogeltanz, 2015). Aynı konuda bir diğer önemli çalışma da Sarwar ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışmadır. İHA sisteminin genelde komple matematik modellemesi yapılmış, özelde ise itke sisteminin matematik modellemesi gösterilmiştir. İtke sisteminin modellenmesinin genel sistem içindeki yeri ve öneminin anlaşılması açısından önemli bir çalışmadır (Sarwar ve Shah, 2013).

2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

İnsansız Hava Araçları (İHA) faaliyetleri yaklaşık yüz yıllık bir geçmişe sahiptir. Teknolojik gelişimin ivme kazandığı 90'lı yıllara paralel olarak İHA faaliyetleri de hız kazanmıştır. Başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere, Avrupa Birliği ülkeleri ve İsrail'de geçtiğimiz 20-30 yıllık periyotta İHA araştırmaları geçtiğimiz yıllara oranla çok hızlı bir artış göstermiştir. Faaliyetlere olan bu ilginin ve teknolojik gelişimin sonucu olarak İHA'lar askeri havacılık uygulamalarının yanında ticari ve sivil uygulamalarda da yoğun bir biçimde kullanılmaya başlanmış; gündelik hayatın vazgeçilmez bir unsuru olma yolunda emin adımlarla ilerlemektedir (Hobbs, 2010; Finn ve Wright, 2012; Vogeltanz, 2015; Maddalon vd., 2013; U.K. M.o.D. Joint Doctrine Note 3/10, 2010; Huang vd., 2013; Karaağaç).

2.1. İnsansız Hava Araçları Tarihçesi

Esasında İHA'ların tarihi tüm havacılık çalışmalarının tarihi ile paralel gelişim göstermiştir. İHA fikrini başlatan ve bu çalışmaların fikirsel anlamda temelini oluşturan ise tehlikeli, kirli ve insansız-sıkıcı ortamlarda hava aracı kullanma ihtiyacıdır. Tüm İHA evrimi bu fikir üzerinden ilerlemektedir (Barnhart vd., 2016). Wright Kardeşler'in denemeleri, 1. ve 2. Dünya Savaşları, 70'lerden sonraki dönemde teknolojik gelişim, 90'lardan sonra yakalanan ivme İHA çalışmalarının kilometre taşlarıdır (Keane ve Carr, 2013; Torun, 2017)

1700'lü yılların sonunda Amerika'da iç savaşta keşif amaçlı kullanılan ilk balonlar ve 1800'lü yılların ortalarında savaşlarda kullanılmaya başlanan ve bomba taşıyan insansız balonlar askeri uygulama olarak ilk İHA denemeleri olarak kabul edilmektedir (Kahveci ve Nazlı, 2017).

1.Dünya Savaşı öncesinde ve sırasında İHA çalışmalarının yönü daha çok insansız bir biçimde bombalama ve füze fırlatmaya yöneliktir. Dönemin askeri ihtiyaçları ve savaş stratejileri gereği seyir füzeleri ve bombalama geliştirme çalışmaları ön plandadır. Bu kapsamda A.B.D. Ordusu'nun 'aerial torpedo' (uçaktan bomba ve füze fırlatma) konsepti ve İngiliz Ordusu'nun 'aerial target' (havadan hedefleme) konsepti dönemin İHA çalışma perspektifi hakkında fikir vermektedir. Bu çalışmalar sonucunda A.B.D. Ordusu 'aerial torpedo' konsepti kapsamında 136 kg patlayıcı yükü ile birlikte 270 kg yük kapasiteli pilotsuz hava araçları üretebilmiş ve bu araçları Ford firmasının ürettiği 40 BG gücünde motorla hareket ettirebilmiştir. İngiliz Ordusu da 'aerial target' konsepti kapsamında 82

kg patlayıcı yük taşıma kapasiteli, uzaktan kontrol edilebilen, pilotsuz ve 35 BG gücünde bir motorla hareket ettirebildiği bir hava aracı geliştirmiştir (Austin, 2011; Keane ve Carr, 2013).

1916 yılında A.B.D. henüz daha 1. Dünya Savaşı'na dahil olmamışken, A.B.D. Donanması faaliyetleri kapsamında Elmer Sperry ile 1000 yard (yaklaşık 915 m) yüksekliğe kadar uçabilecek, insan kontrolü gerektirmeyecek bir hava aracı geliştirmesi için anlaşma imzalamıştır. 1917 yılında A.B.D.'nin savaşa dahil olması ile birlikte Sperry'ye çalışmalarını hızlandırması talimatı verilmiştir. Defalarca yaşanan başarısız testlerden sonra 1918 yılında modern anlamda ilk İHA modeli gerçekleştirilmiş oldu (Barnhart vd., 2016).



Şekil 2.1. İlk modern İHA denemeleri (Barnhart vd., 2016)

2. Dünya Savaşı yıllarına geldiğimizde dünyanın büyük ülkelerinin gelişmiş orduları İHA çalışmalarında yönünü 'target drone' (hedef İHA'ları) konseptine çevirmiştir. Burada kastedilen konsept; İHA'ların uzaktan kontrol kapasitesini ve manevra yeteneğini artırıp, hedefleme ile ilintili görev tanımlarının niteliğini ve niceliğini genişletmektir. Bu konsept çerçevesinde; 'Queen Bee' ve 'V1' hava araçları üretilmiştir. Bu çalışmalardan Queen Bee ilk dönem çalışmalarına örnek olup; toplam yük 830 kg'lara, hız 170 km/saat'e çıkmış, 104 kW'lık motor kullanılmış ve tamamen uzaktan kontrol edilebilen kontrol sistemine ulaşılmıştır.



Şekil 2.2. Queen Bee İHA (Austin, 2011)

V1 hava aracı ise bu konseptin son dönem çalışmalarına örnek olup; toplam yükte 2.150 kg'lara, hızda 640 km/saat'e ulaşılmış, otopilot mekanizması gelişmiş ve farklı itki sistemleri ile toplamda hava aracı sistemi güçlendirilmiştir (Austin, 2011).

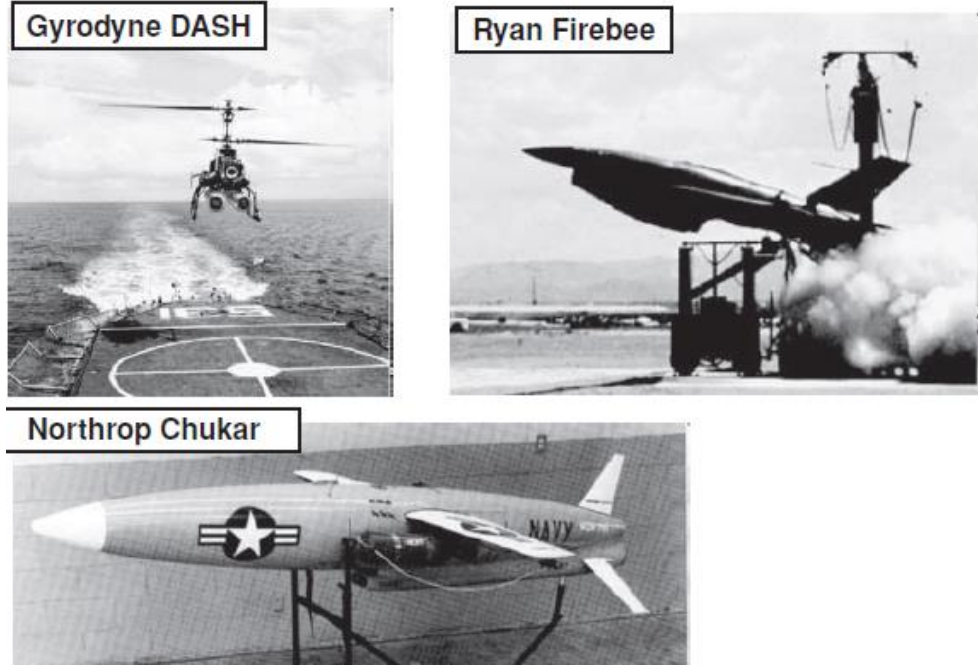


Şekil 2.3. V1 İHA (Austin, 2011)

1950'ler boyunca İHA sistemlerinde gelişmeler normal seyrinde devam etmiş, hedef İHA'ları konseptine devam edilmiş, uzaktan kontrol sistemleri daha da geliştirilmiş, hedefleme çalışmalarında ilerleme kaydedilmiş, itki sistemlerinde farklı konsept denemeleri yapılmıştır (Austin, 2011).

1960'lara gelindiğinde itki sistemlerindeki teknolojik gelişime paralel olarak daha gelişmiş itki sistemleri İHA'larda kullanılmaya başlanmıştır. Bununla beraber hedef menzilleri daha uzamıştır. Kamera sistemlerinin de kullanılmaya başlaması ile daha küçük hedeflerin gözetlenmeye başlanması İHA gelişim seyrinde çok önemli bir adımdır. Çünkü 60'ların İHA'ları ile birlikte daha yüksek irtifalara ulaşılmış, yaygın gözetleme ve fotoğraf çekme kabiliyetleri elde edilmiştir. Bu dönemin simge İHA'larından birisi Nortrop Chukar isimli hava aracıdır. Jet tahrikli olan bu hava aracı uzaktan kontrol sistemi hassas olduğu için 'düşman ülkelerin radar sistemlerinin gözetlenmesi, hedeflenmesi ve çökertilmesi' amacıyla tasarlanmış ve kullanılmıştır. Dönemin bir diğer simge

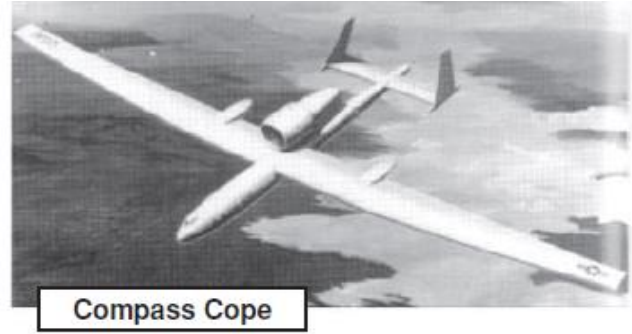
İHA'larından olan Gyrodyne Dash isimli İHA, helikopter tasarımıyla muharebe meydanlarında doğrudan kullanılan ilk İHA'dır. Uzaktan kontrol sistemi hassas ve yüksek kapasiteli olup, nükleer silah taşımaya elverişli yapısıyla dikkat çekmiştir. Ryan Firebee isimli İHA ise roket görünümlü tasarımıyla ve hızıyla ön plana çıkması için üretilmiş, 'düşman ülkelerin radar sistemlerini şaşırtmak' amacıyla kullanılmıştır (Austin, 2011).



Şekil 2.4. Gyrodyne, Ryan Firebee ve Northrop Chukar İHA'ları (Austin, 2011)

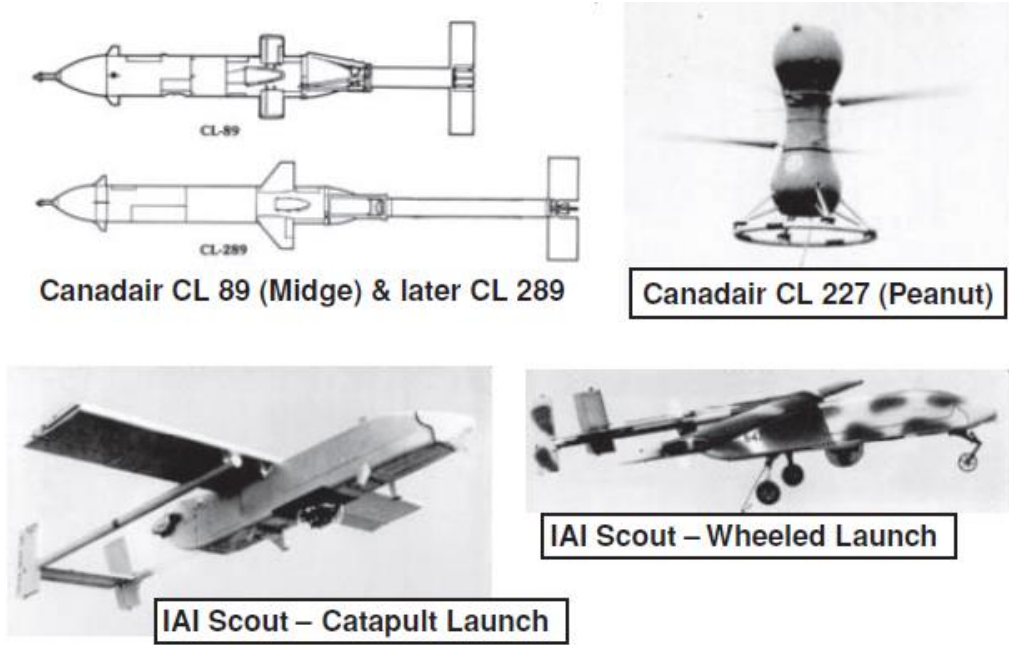
1970'ler dünyada soğuk savaşın en üst düzeye taşındığı yıllardır. Bu yıllarda İHA çalışmalarının gelişim seyrini etkileyen en önemli faktör de soğuk savaş olmuştur. Özellikle uzaktan gözetleme, denetleme, istihbarat konuları ön plana çıkmış; kısa mesafe ve uzun mesafe gözetim için tasarlanan İHA'lar kendi kategorilerinde derinleşmeye başlamıştır. Özellikle bu dönemde ilk defa İHA'ları sınıflandırma ihtiyacı olmuş, özellikle küçük boyutlu İHA'ların kullanımdaki avantajlarından dolayı tasarımlarına ve kullanımlarına ağırlık verilmeye çalışılmıştır. Bu dönemde gözetlemenin yanında misyonu sorunsuz tamamlayıp geri üsse dönme yani 'hayatta kalma' konsepti açığa çıkmıştır. Özellikle Sovyetler Birliği ve A.B.D. arasında soğuk savaş döneminde ciddi bir konu haline gelen casusluk – karşı casusluk faaliyetleri, İHA kullanımını ön plana çıkarmış, 'görevi tamamlayıp geri dönebilme' bu yüzden önemli hale gelmiştir. Bu dönem öne çıkan İHA'lardan birisi Compass Cope isimli hava aracıdır. Amerikan Ordusu Hava Kuvvetleri'nin tasarladığı ve ürettiği Compass Cope özellikle yüksek irtifası ve

uzun havada kalış süresi ile ön plana çıkmıştır. Deneme uçuşlarında ulaştığı irtifa 16.770 m'dir, havada kalış süresi 20 saattir. Bir diğer öne çıkan hava aracı ise Westland Wisp isimli hava aracıdır. Westland Wisp'in en önemli özelliği dikey kalkış yapabiliyor olmasıdır. Uzaktan kumanda ve otopilot özelliği ile manevra kabiliyeti oldukça kuvvetli olduğundan özellikle kısa mesafe – özel görevlerde kullanılmıştır. Otopilot mekanizması jiroskop ile dengelenmiş olduğundan imha edilmeden geri dönme özelliği yüksektir.



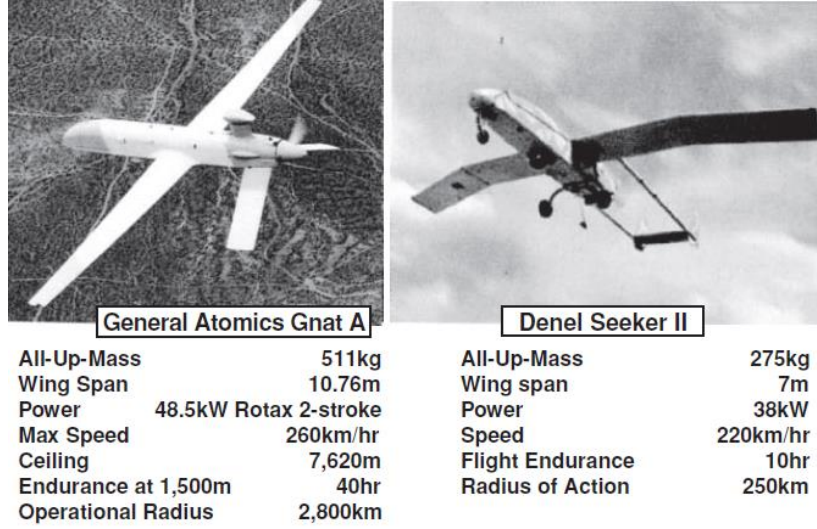
Şekil 2.5. Westland Wisp ve Compass Cope İHA'ları (Austin, 2011)

1980 li yıllara geldiğimizde İHA çalışmalarında hala askeri uygulamaların ağırlığı hissedilmekle beraber; operasyon alanı çapının genişletilmesi, taşınabilecek faydalı yük ağırlığının artırılması temel gündemler olmuştur. Bu dönem öne çıkan simge çalışmalardan birisi olan Canadair CL 89 önceleri istihbarat faaliyetlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış, sonra operasyon alanı çapı, kullandığı gözetleme kamerasının gelişkinliği, paraşüt ve hava yastığı gibi özellikleri sürekli gelişmek suretiyle 90'lar ve 2000'ler boyunca gelişimini sürdürmüştür. 80'lerde yapılan versiyonu otopilot kontrolü ve navigasyon kontrolü açısından 80'lerin en gelişkin İHA'larından birisidir. Sonraki dönem ileri versiyonlarında gövde iskelet çapı ve kanat açıklığı genişletilmiş ve hızı 740 km/saat'lere kadar yükseltilebilmiştir. Canadair CL 227 dikey kalkış yapabilen döner kanatlı hava aracı, özellikle kısa mesafe gözetim ve imha özellikleri ile dikkat çekmiştir. Bir diğer kayda değer İHA ise IAI Scout serisi İHA'lardır. Bu İHA'ların öne çıkmasına sebep olan özellikleri ise kontrol sistemlerindeki hassasiyet ve emniyettir.



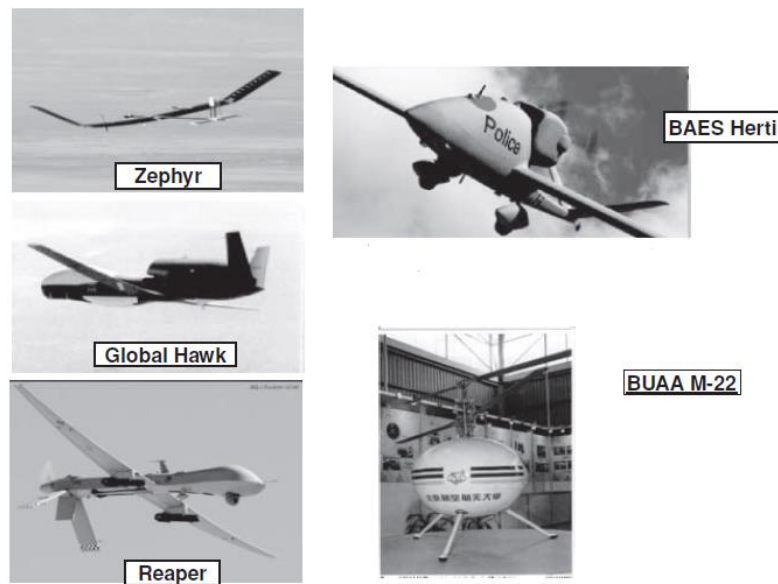
Şekil 2.6. 1980'lerin İHA'ları (Austin, 2011)

1990'larda GPS sistemlerinin ve uydu üzerinden haberleşme teknolojisinin gelişimi ile İHA'ların uzaktan kumanda kontrol, otopilot ve navigasyon sistemleri hassasiyeti zayıf, sabit, veri girişi sınırlı düzeneklerden daha profesyonel düzeneklere geçiş yapmıştır. Dijital uçuş kontrol sistemlerine geçişle özellikle pozisyonlamada daha hassas değerlere ulaşılmıştır. 90'lı yıllar yüksek teknolojik gelişmelerle birlikte İHA çalışmalarının büyük bir ivme gösterdiği, İHA sınıflandırmasının profesyonel anlamda yapılmaya başlandığı, İHA kullanım alanlarının çok boyutlu döneme geçiş yaptığı dönemdir. Özellikle uzun menzilli, yüksek irtifalı ya da uzun havada kalış süreli hava araçlarının tasarlandığı ve sınıflandırmanın artık çok boyutluluğa geçtiği dönem de yine bu dönemdir. Bu dönem öne çıkan İHA'lardan General Atomic Gnat isimli hava aracı çok gelişkin sensör sistemine sahip olup yüksek hassasiyet ve hızda gözetleme özelliğiyle ön plana çıkmış ve 90'ların ortasında Bosna ve Hırvatistan semalarında ileri derece gözetleme görevlerinde aktif kullanılmıştır. Denel Seeker II hava aracı ise digital kontrol sistemi kullanımı ve hassasiyeti ile ön plana çıkmıştır (Austin, 2011).



Şekil 2.7. 1990'lerin İHA'ları (Austin, 2011)

2000'lere geldiğimizde İHA'ların görev çeşitlilikleri, uygulama alanları çeşitlenmiş ve ticari uygulamaların toplam içindeki oranı oldukça artmıştır. Bu yılların temel hedefi yüksek kabiliyetli, havada kalış süresi çok uzun, toplam faydalı yük oranı yüksek hava araçları geliştirmektir. Global Hawk ve Zephyr kategorik olarak yüksek irtifa ve uzun havada kalış sınıfı İHA'lara örnektir. NASA'nın atmosfer üstü çalışmalarında kullanılan grupta değerlendirilebilirler. Reaper, BAES Herti ve BUAA M-22 İHA'ları hem irtifa hem de havada kalma süreleri ile ön plana çıkarlarken aynı zamanda gelişkin operatör sistemleri ile hızlı veri transferi gerçekleştirebilmektedir (Austin, 2011; Dempsey ve Rasmussen, 2010).



Şekil 2.8. 2000'lerin İHA'ları (Austin, 2011)

2010'lerden günümüze İHA çalışmalarının öne çıkan başlıkları; sivil uygulamalarda yaygınlaşma, güçlü uzaktan kumanda / otopilot sistemleri, farklı / avantajlı itki sistemi kullanımları olarak sıralanabilir. Bu ve benzeri başlıklar kapsamında özellikle gelişmiş devletler İHA çalışmalarına milyon dolarları bulabilen bütçeler ayırmışlardır. İHA'ların kontrol sistemlerindeki otonominin gelişkinliğine göre sınıflandırma ve kullanım alanları değişkenlik göstermektedir (Rudol, 2011).

Tablo 2.1. İHA Tarihçesi (Keane ve Carr, 2013 ile Barnhart vd., 2016 den uyarlanmıştır)

DÖNEM	İNSANLI HAVA ARACI	İNSANSIZ HAVA ARACI
II. Dünya Savaşı Öncesi	Pistonlu motor kullanımı	İlk insansız araçlar
	Çift kanatlı ve tek kanatlı uçaklar	İlk insansız hava araçları
II. Dünya Savaşı	Pistonlu motor gelişimi	Savaşlarda ilk defa kullanım
	Yapıların, iskeletlerin gelişimi	İlk 'drone'lar
	İlk jetler	
1950'ler	Turbojetlerin gelişimi	Sistemsal gelişimin olgunlaşması
	Malzemelerin kullanımındaki gelişim	
	Ses üstü sistemin gelişmesi	
1960'lar	Turbofanların gelişimi	Savaşta doğrudan kullanım
	İlk kompozit kullanımları	
	Kompleks analog sistemler	
1970'ler	İlk digital sistemler	İlk gelişkin savaş İHA'ları
	İlk kontrollü uçuş	İlk araştırma çalışmalarında kullanım
		İlk taktiksel İHA'lar
1980'ler	Ticari uygulamalarda yaygın kullanım	İlk seyir füzeleri
	Kompozit kullanımındaki gelişim	Taktiksel İHA'larda gelişim
	Komple digital sistem kullanımı	
1990'lar	Kobalt kürlenmiş kompozit kullanımı	Savunma Sanayi İleri proje ürünleri
	Yönetici' olarak pilotlar	
2000'lerden günümüze	Elektrikli uçuşa yönelim	Atmosfer üstü çalışmalar
		Kullanım alanlarının çeşitlenmesi

2.2. İHA Tanımı

İHA çalışmaları uzun yıllar akademik ve uygulama boyutunda ilerlemiştir. Ancak 1980'lerden sonra teknolojik gelişime paralel olarak İHA çalışmalarının da boyutu değişmiş ve 'İHA sektörü'nün oluşması ile yeni ihtiyaçlar doğmuştur. Bu bağlamda aynı

zamanda çalışma / araştırma başlıkları da değişmiştir. Terimlerin, tanımlamaların standart hale getirilmesi; tüm bu çalışma başlıklarının derlenmesi; sınıflandırma, detaylandırmalar akademinin ve İHA endüstrisinin daha anlaşılabilir ilerleyebilmesi için zorunlu hale gelmiştir.

İHA'lar ilgili yapılan çalışmalar ivmeli olarak ilerlese de bu hava aracı sistemleri için yapılmış standart bir tanımlama literatürde halen bulunmamaktadır. Genel anlamı ile bakıldığında üzerinde ortaklaşmış bir tanımlama yapmak gerekirse; hava aracının üzerinde bir insan pilotajına ihtiyaç duyulmaksızın yapılan, kesintisiz uçuşlarda kullanılan hava araçları şeklinde tanımlanmaktadırlar. Kontrol; uzaktan kumanda yardımıyla veya otomatik olarak yapılır. Ancak her durumda hava aracı insansız olmak zorundadır (Gupta vd., 2013; Lee ve Choi, 2016; Korchenko ve Illyash, 2013; Bento, 2008).

Daha detaylı olarak incelendiğinde Gupta ve arkadaşları çalışmalarında; İHA çalışmaları giderek genişlediği için artık 'hava aracı' ifadesi yerine 'sistem' ifadesini kullanmışlardır. Sistem tanımlaması hava aracının kendisini, kontrol sistemlerini ve veri bağlantı sistemlerinin tamamını içermektedir. Sistem tanımlamasının detayına indiğimizde bu kompleks sistemler şu alt sistemleri içermek zorundadır: Çoklu hava araçları, kontrol sisteminin muhafaza edildiği kapalı / açık alan, görev tanımına giren kapalı / açık alan, fırlatma / kalkış ve bekleme alanı, yer veri terminali, uzaktan kumanda izleme terminali, misyona göre faydalı yük modülleri, hava veri röleleri ve muhtelif kalkış, bekleme, yer destek ekipmanları (Gupta vd., 2013).

İHA'larla ilgili literatürde en detaylı bilgileri içerisinde barındıran kaynaklar; gelişmiş ülkelerin genelkurmay, hava kuvvetleri, deniz kuvvetleri ve savunma bakanlıkları bünyesinde hazırlanan çalışmalardır. Bu çalışmalar kapsamında yapılan tanımlamalar farklı bir boyutta değerlendirilmelidir. Bu çalışmalarda askeri uygulamalar esas alındığından tanımlamalar da ona göre şekillenmiştir. Birleşik Krallık Savunma Bakanlığı'nın belirli periyotlarda yaptığı çalışmaları incelediğimizde İHA tanımı, İHS tanımı ve farklarını görmek mümkündür. Bu çalışmalarda İHA; üzerinde herhangi bir insan operatörü taşımayan, uzak mesafeden çeşitli fonksiyonlarla kumanda edilen, üzerinde ölümcül ya da ölümcül olmayan yük taşıyabilen, işlevi tekrar edilebilir hava araçlarıdır. İHS ise İHA tanımındaki tüm komponentleri, iş ağını, gerekli ekipmanı, personeli ve alanı ifade eder (Joint Doctrine Note 3/10, 2010).

Bununla birlikte askeri çalışmalarda kullanılan tanımlamalar ülkeden ülkeye farklılık da gösterebilmektedir. Birleşik Krallık Savunma Bakanlığı'nın bir diğer ileri yayınında ise aynı tanımlamaya bir ek yapılmış ve seyir (kruz) füzeleri ile havadan fırlatmalı (balistik) füzeler İHA tanımlaması içinden çıkarılmıştır. Birleşik Krallık dışındaki gelişmiş ülkelerde halen kruv ve balistik füzeleri İHA sayılmaktadır (Joint Doctrine Note 2/11, 2011).

İHS'yi ilk tanımlayan ülke olan A.B.D. ve bağı kurumlarıdır. İHA tanımı sadece bütün sistemin içinde sadece hava aracının kendisine denir. Onun dışında tüm bileşenlerle birlikte tamamı 'sistem' tanımına girer ve İHS'yi oluşturur. A.B.D. ordusunun askeri havacılık konusundaki çalışmalarında öne çıkan tanımlamada ise temel kriter işlevdir. Yani bir bileşenin, komponentin ya da ekipmanın İHS tanımlamasının içine girebilmesi işlevi ile doğrudan ilişkilidir. Hava aracı, insan faktörü, kontrol faktörü, misyon faktörü, görüntüleme sistemi, iletişim sistemi / mimarisi, kullanımla ilgili tüm lojistikler entegre halde İHS'ni oluşturur (Dempsey ve Rasmussen, 2010).

Literatürde birçok yayında İHA tanımlaması farklı kriterlere göre yapılmıştır. Kimi yayında kullanılan İHA uygulama alanına göre İHS sayılmış; kimi yayında otopilot sistemi baz alınıp sistemin büyüklüğüne göre İHA'lar İHS sayılmış, bazı yayınlarda ise gerçekleştirilecek operasyonun niceliğine göre sistem tanımlaması yapılmış ve sistem İHS sayılmıştır. Bununla birlikte artık drone ya da İHA tanımları literatürde daha dar kapsamlı anlamlar ifade etmekte, İHS tanımlaması ise sistemin bütününe kapsamaktadır. (Austin, 2011).

Literatürde yapılan İHA-İHS tanımlamaları çok çeşitli olsa da belli başlı konular ve başlıklar üzerinde mutabakat sağlanmıştır. Bunlar en temel sistem bileşenleri olup bir İHS'yi tanımlamaya yetecek niteliktedir.

Barnhart ve arkadaşları tarafından yapılan İHS tanımı bu anlamda kapsayıcıdır. Şekil 2.9. da görülen maddelerin her biri toplamda İHS'yi oluşturacak gerekli ve yeterli birimlerin tümüdür.



Şekil 2.9. Barnhart ve arkadaşlarına göre İHS sisteminin içeriği (Barnhart vd., 2016)

2.3. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırması

İHA'ların sınıflandırılması konusu halen tartışılmakta olan bir konudur. Çeşitli kriterler göz önüne alınarak yapılan birçok sınıflandırma çeşidi bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı yapılan akademik çalışmalarda standart bir İHA sınıflandırması bulunmamaktadır. Çok farklı tanımlamalar ve sınıflandırmalar olsa da aslında temel alınan özellikler benzerdir (Gupta vd., 2013; Joint Doctrine Note 2/11, 2011).

Farklı kriterlere göre yapılan onlarca sınıflandırma vardır ve bu sınıflandırmalar sınıflandırmayı yapanların ihtiyaçlarına göre belirlenmiştir. Bunlardan belli başlı olanlarını detaylı olarak incelediğimizde 16 başlık altında toplandığını görebiliriz (Korchenko ve Illyash, 2013) :

Tablo 2.2. İHA Sınıflandırma Kriterleri (Korchenko ve Illyash, 2013)

No	Sınıflandırma Kriteri
1	Hava aracının kullanım alanına göre sınıflandırma
2	Kullanılan kontrol sisteminin çeşidine göre sınıflandırma
3	Uçuş kurallarına göre sınıflandırma
4	Havada kullanılan alanın durumuna göre sınıflandırma
5	Hava aracının tipine göre sınıflandırma
6	Kanat tipine göre sınıflandırma
7	Kalkış ve inişteki kaldırma kuvvetinin yönüne göre sınıflandırma
8	Kalkış – iniş tipine göre sınıflandırma
9	Hava aracının motor tipine göre sınıflandırma
10	Yakıt sistemine göre sınıflandırma
11	Yakıt tankı tipine göre sınıflandırma
12	Yakıt sisteminden istifade sayısına göre sınıflandırma
13	Fonksiyon ve uygulama alanlarına göre sınıflandırma
14	Kat edilebilecek mesafe yarıçapına göre sınıflandırma
15	Uçuş irtifasına göre sınıflandırma
16	Genel kategori (İHA maksimum kalkış ağırlığı, menzil, havada kalma süresi, çıkabileceği maksimum irtifa değerlerine göre) sınıflandırma

Bu parametrelerin tamamı çeşitli uygulamalarda elde edilmiş deneyimlere göre oluşturulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi spesifik ihtiyaçlar doğrultusunda belli kriter ve parametrelere göre hazırlanmıştır. Bu bağlamda her bir sınıflandırma başlığının detayına indiğimizde durum daha net anlaşılacaktır:

1) Hava aracının kullanım alanına göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmada temel alınan askeri ve sivil uygulamalar ayrımıdır. En genel anlamda yapılan sınıflandırmalardan birisidir. 30-40 yıl öncesine kadar İHA çalışmalarında sivil veya ticari kullanımdan bahsetmek söz konusu değildir. Hemen hemen tüm çalışmalar askeri uygulamalara yöneliktir. Ancak son 30-40 yıl ile birlikte özellikle 2000’li yıllar sonrası için bakıldığında sivil uygulamalar kullanımda çok ciddi bir paya sahiptir. Bu sınıflandırma biçimi askeri ve sivil uygulamaların yanı sıra diğer bir kullanım alanı olarak da anti-terör uygulamalarını da ele almaktadır. Bu uygulamalar karakteristiğine bakıldığında tam olarak sivil ya da askeri uygulama olarak tanımlanamadığı için zaman zaman üçüncü bir uygulama çeşidi olarak ele alınır. Askeri uygulamalara da biraz detaylı olarak bakıldığında kara, hava ve deniz uygulamaları olarak 3 bölümde incelenmektedir.

2) Kullanılan kontrol sisteminin çeşidine göre sınıflandırma: İHA'ların kontrol sistemleri denildiğinde İHA'ları diğer hava araçlarından ayıran önemli bir özelliktir. Bu kritere göre yapılan sınıflandırmalara bakıldığında, İHA'ların tarihsel ve teknolojik gelişimi de göz önüne alınarak kontrol sistemlerinin çeşitleri sıralanabilir: Bunlardan ilki; bir yer kontrol merkezinden başlayarak belli bir mesafeye kadar operatör yardımı ile kontrol edilen uygulamalardır ve “doğrudan kontrol” olarak adlandırılır. Bir diğer sınıflandırma olan “gözlenen kontrol” de ise İHA otonom olarak hareket edebilir, bir pilotun kısmen ya da tamamen müdahalesine maruz kalabilir veya bir takım komutlarla gözlemlenebilir hareket sağlayabilir. Üçüncü olarak ise “uyumsuz - otonom kontrol” başlığı incelenebilir. Pilotsuz ve otonom hareket önceden yapılan ön-programlama ile sağlanır. Uyumsuzluk ile anlatılmak istenilen ise uçuş esnasında bu ön-programlamanın sınırlarının dışına çıkılamamasıdır. Programlanan uçuş başladıktan sonra harekette stratejik bir değişiklik yapılamaz ya da uçuş esnasında gerçekleşen dış etkenlere uyum sağlanamaz. Dördüncü başlık olarak ise “uyumlu – otonom kontrol” sistemine bakıldığında herhangi bir operatör müdahalesi olmadan, tam entegre İHA kontrol sistemi ile kontrol sağlanır. Böylelikle dış etkenlere ya da yeni uygulamalara uyumluluk mümkün olmuş olur.

3) Uçuş kurallarına göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmada, İHA 3 bölümde incelenmektedir: ‘Görerek uçuş kuralları’ , ‘Aletli / Enstrümantasyona dayalı uçuş kuralları’ ve ‘Görerek-Aletli uçuş kuralları’. Eğer uçuş gün ışığından faydalanılan zaman diliminde bir pilotun denetimi altında yapılıyorsa ‘görerek uçuş’ olarak adlandırılır. Bir diğer uçuş olan ‘Enstrümantasyona dayalı uçuş’ta ise oto-pilot kontrol sistemi devrededir ve uçuş gece gibi gün ışığından faydalanılamayan zamanlarda da gerçekleştirilir. İstisnai olarak uçuşun havalanma gibi ilk kısımları görerek uçuşta, asıl uçuş ise enstrümantasyona dayalı uçuşta değerlendirilebilir. Bu tip uçuşlar da 3. grup olarak adlandırılabilir. Uçuş kurallarına göre yapılan sınıflandırmalarda önemli bir husus ise bu sınıflandırmanın kontrol sisteminin niteliğine, ülkelerin ulusal sivil havacılık standartlarına ve uluslararası standart ve gereksinimlere göre farklılıklar gösterebilmesidir.

4) Havada kullanılan alanın durumuna göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmada temel esas hava kullanım durumudur. ‘Bölünmüş / ayrılmış’ ve ‘bölünmemiş / ayrılmamış’ alan olarak 2 bölümde değerlendirilebilir. Burada kastedilen uçuş esnasında kullanılan hava alanın niteliğidir. Ayrılmış hava alanı tanımına giren alanlar; yasaklı ya da kısıtlanmış alanlar ile İHA'ların özel kullanımları için belirlenen alanlardır. Ayrılmamış hava

alanlarına göre sınıflandırırken ise kastedilen; izinli, lisanslı, belirli bir sistem dahilinde yapılan ve hava trafik kontrol sistemine dahil uçuşların olduğu alanlardır.

5) Hava aracının tipine göre sınıflandırma: Çok basit bir sınıflandırma biçimidir. Hava araçlarının tiplerine göre yapılan bir sınıflandırmadır. Uçak, helikopter, döner ya da sabit kanat gibi İHA'nın kategorik olarak tipine göre yapılan sınıflandırma biçimidir.

6) Kanat tipine göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmada kanat tipi esas alınır. 'Sabit kanat' ve 'sabit olmayan (döner) kanat' tipi olarak 2 bölümde incelenir. Genellikle uçak ve helikopter tipindeki İHA'lar tasarlanırken sabit kanat tercih edilir. Değişken kanat kategorisi incelendiğinde bu kategorinin kendi içinde 3 alt başlığa ayrıldığı görülür. Bunlar, uçuş esnasında değişebilen kanat büyüklüğü, kanat pozisyonu ve kanat formudur.

7) Kalkış ve inişteki kaldırma kuvvetinin yönüne göre sınıflandırma: İHA'ların kalkış ve iniş esnasında kullandığı yön durumu baz alınarak da sınıflandırma yapılmıştır. Kalkışta iki seçenekli olarak dikey ve yatay olarak sınıflandırmak mümkündür. İniş sırasında ise daha fazla seçenekli bir sınıflandırma yapılabilir. Dikey, yatay, durmaksızın, direkt, paraşüt ve tüm bu seçeneklerin kombinasyonu olarak yapılan iniş örnek olarak verilebilir.

8) Kalkış – iniş tipine göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmayı iki aşamada incelemek gerekir. Kalkış tipine göre sınıflandırma için kriterleri; iniş-kalkış pisti olan standart bir hava alanı, gemi güvertesi, su yüzeyi, elle start vererek, start kurulum sistemi kullanarak şeklinde sıralamak mümkündür. İniş tipine göre sınıflandırma kriterleri ise; iniş-kalkış pisti olan standart hava alanı, su yüzeyi, güverte, çoklu iniş, standart olmayan iniş şeklinde sıralanabilir.

9) Hava aracının motor tipine göre sınıflandırma: Literatürde yapılan en yaygın sınıflandırmalardan biriside kullanılan motor tipine göre yapılan sınıflandırmalardır. Bu sınıflandırma çeşidi çok yaygın olarak kullanılmakta olup, en yaygın kullanılan ilk 3 sınıflandırma tipi içinde gösterilebilir. İHA'larda kullanılan motorlar en geniş çerçevede ele alınırsa; gaz türbinli motorlar, elektrik motorları ve pistonlu motorlar olarak sıralanabilir. Ancak bu haliyle yapılan değerlendirmeler çok yüzeysel kalacağından alt sınıflandırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz türbinli motorlu İHA'ları; turboşaft, turboprop, turbojet, ramjet, scramjet, pulsejet kullanımı ile birlikte alt başlıklara ayrılabilir, bu alt başlıklardan bazıları daha alt başlıklara ayrılabilir. Elektrik motorları da

yine motorda kullanılan akım çeşidine göre ya da motorun tipine göre alt başlıklara ayrılabilir.

10) Yakıt sistemine göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmada temel esas alınan kullanılan yakıt sisteminin niteliğidir. Birinci grup yakıt sistemi olarak ‘fabrikada üretim sırasında yakıt doldurulan, pilotsuz, tek kullanımlık İHA’lar’ incelenebilir. İkinci bir başlık olarak ise ‘yer istasyonundan, gemi güvertesinden veya başka bir yerden yakıt ikmali yapmaya uygun’ yakıt sistemi kullanan İHA’lar gösterilebilir.

11) Yakıt tankı tipine göre sınıflandırma: Burada iki çeşit yakıt tankı tipi mevcuttur. ‘Temel yakıt tankı’ olan İHA’lar birinci tip; ‘temel yakıt tankının yanında ekstra yakıt tankı’ olan İHA’lar da ikinci tip olarak sınıflandırılabilir.

12) Yakıt sisteminden istifade sayısına göre sınıflandırma: Burada baz alınan kriter İHA’nın yapacağı göreve göre yakıt sistemini kaç defa kullanacağını sayıdır çünkü bu sayı değişkendir. Bu değişkenliğe göre sınıflandırma yapılır.

13) Fonksiyon ve uygulama alanlarına göre sınıflandırma: Bu sınıflandırma biçimi İHA’ya atfedilen fonksiyonu ya da İHA’nın kullanıldığı alanı baz alır. Bu sınıflandırmalarda askeri - sivil, uçak - helikopter tipi veya benzeri herhangi bir ayrım gözetilmeksizin sadece fonksiyon veya uygulama alanı baz alınır.

14) Kat edilebilecek mesafenin yarıçapına göre sınıflandırma: Oldukça yüzeysel yapılmış bir sınıflandırma olup; kat edilecek mesafenin yarıçap değeri baz alınarak yapılır. Uzun mesafe, orta mesafe, kısa mesafe ve yakın mesafe olarak 4 kategoriye ayrılabilir.

15) Uçuş irtifasına göre sınıflandırma: Düşük, orta ve yüksek irtifa olmak üzere 3 kategoride incelenen bir sınıflandırmadır. Kendi içinde alt başlıklara ayrılrsa da irtifa mesafesini dikkate aldığı görülmektedir.

16) Literatürde yer alan sınıflandırmalar içinde en çok kullanılan ve en işlevli olan sınıflandırma olarak kabul edilir. İHA’nın maksimum kalkış kütlesi, kat edilebileceği mesafe, havada kalma süresi, çıkabileceği maksimum irtifa baz alınarak yapılan sınıflandırmadır. Bu parametrelerin biri ya da birkaçı için yapılabilir. Bu şekilde yapılan sınıflandırmalar, toplam İHA sınıflandırma çalışmalarının günümüzde çoğunu oluşturur. Bu kriterlerin sınıflandırmada sıkça tercih edilmesinin sebebi; İHA uygulamaları nazarında; gözlemlenebilir, ölçülebilir ve fonksiyonel / operasyonel özellikler olmasıdır.

Bu kriterlere göre yapılan sınıflandırmalar geniş bir çerçeveden incelendiğinde Mikro / Mini İHA'lar, Taktiksel İHA'lar, Stratejik İHA'lar ve Özel Görev İHA'lar olarak 4 ana gruba ayrılabilir. Daha sonra bu ana grupları çeşitli kriterlere göre (maksimum kalkış kütlesi, gerçekleştirebileceği mesafe, havada kalma süresi, çıkabileceği maksimum irtifa) alt gruplara ayırmak mümkündür (Korchenko ve Illyash, 2013).

Günümüzde literatürde yapılan modern araştırmalara, özel sektör raporlarına, gelişmiş ülkelerin askeri çalışmalarına göz atıldığında görülen hemen hemen tüm profesyonel sınıflandırmalar 16. Maddedeki sınıflandırma grubuna girmektedir. Bu sınıflandırma metodunun tercih edilmesinin sebepleri; pratikteki kullanım alanlarını detaylı göstermesi, eğitim ve ticari faaliyetlerde kolayca kullanılabilmesidir. Bu sınıflandırma tipinde en çok kullanılan değerlendirme kriterleri ise şu şekilde özetlenebilir (Gupta vd., 2013);

- Ağırlık (Gros kalkış ağırlığı + Faydalı yük ağırlığı)
- Operasyon (uçuş) irtifası
- Havada kalma süresi
- Veri toplanabilecek uzaklık
- Kullanım alanı (kullanım amacı)
- İHS tarafından gerçekleştirilen görev

Bento tarafından Avrupa İnsansız Hava Sistemleri Kurumu (EUROUVS)'nun yaygın kullanılan kriterleri baz alarak yaptığı çalışmadan esinlenerek yapılan sınıflandırma Tablo 2.3. deki gibidir (Bento, 2008). Bento'nun bu çalışması oldukça kapsamlı bir sınıflandırma çalışmasıdır. Çalışma teknolojik gelişimin seyrine bakarak henüz tamamlanmamıştır. Teknolojik gelişim ilerledikçe, İHA çeşitleri ile ilgili daha toparlayıcı faaliyetler araştırıldıkça bu tablo gelişecek ve genişleyecektir (Bento, 2008).

Tablo 2.3. Türkçeleştirilirken büyük ölçüde Bento'nun orijinal tablosuna sadık kalınmıştır.

Tablo 2.3. Bento'dan uyarlanan İHA Sınıflandırması (Bento, 2008)

	Kategori (Sınıf)	Maks. Kalkış Ağırlığı (kg)	Maks. Uçuş İrtifası (m)	Havada Kalma (Seyir) Süresi (saat)	Veri Bağlantı Mesafesi (km)	Örnek	
						Görevler	Sistemler
Mikro / Mini İHA'lar	Mikro	0.10	250	1	<10	Keşif, Görüntüleme, Bina Gözetimi	Black Widow, Microstar, Microbat, FanCopter, QuattroCopter, Mosquito,
	Mini	<30	150-300	<2	<10	Film ve Yayın Endüstrisi, Tarımsal Faaliyetler, Çevre Kirliliği Ölçümleri, Bina Gözetimi, Elektronik Harp	Mikado, Aladin, Tracker, DragonEye, Raven, Pointer II, Carolo C40 / P50, Skorpio, R-Max
Taktiksel İHA'lar	Yakın Mesafe	150	3.000	2 - 4	10 - 30	Arama-Kurtarma, Keşif-Gözetleme- Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Mayın Tarama	Observer I, Phantom, Copter 4, Mikado, RoboCopter 300, Pointer, Camcopter, Aerial
	Kısa Mesafe	200	3.000	3 - 6	30-70	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme- Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Mayın Tarama	Scorpi 6/30, Luna, SilverFox, EyeView, Firebird, R- Max Agri/Photo, Hornet, Raven, Phantom,
	Orta Mesafe	150-500	3.000- 5.000	6 - 10	70-200	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme- Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Mayın Tarama	Hunter B, Mücke, Aerostar, Sniper, Falco, Armor X7, Smart UAV, UCAR, Eagle Eye +, Alice,
	Uzun Mesafe	-	5.000	6 - 13	200-500	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme- Hedef Tespiti,	Hunter, Vigilante 502

Tablo 2.3. (Devam) Bento 'dan uyarlanan İHA Sınıflandırması (Bento, 2008)

Taktiksel İHA'lar	Seyir Süreli	500-1.500	5.000-8.000	12 - 24	>500	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme-Hedef Tespiti, Elektronik Harp	Aerosonde, Vulture II Exp, Shadow 600, Searcher II, Hermes 450S/450T/700
	Orta İrtifa, Uzun Seyir	1.000-1.500	5.000-8.000	24-48	>500	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme-Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Silah Teslimi	Skyforce, Hermes 1500, Heron TP, MQ-1 Predator, Predator-IT, Eagle-1/2, Darkstar
Stratejik İHA'lar	Yüksek İrtifa, Uzun Seyir	2.500-12.500	15.000-20.000	24-48	>2.000	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme-Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Muhabere İrtibatı (İletişim Bağlantısı), Havaalanı Güvenliği	Global Hawk, Raptor, Condor, Theseus, Helios, Predator B/C, Libellule, EuroHawk, Mercator, SensorCraft,
Özel Görev İHA'ları	Öldürücü	250	3.000-4.000	3 - 4	300	Anti-radar, Anti-gemi, Anti-hava aracı, Anti-altyapı	MALI, Harpy, Lark, Marula
	Tuzağa Düşüren	250	50-5.000	<4	0-500	Hava - Denizde Tuzak Faaliyetleri	Flyrt, MALD, Nulka, ITALD, Chukar
	Stratosferik (Çok Büyük)	Sınıflandırma Devam Ediyor	20.000-30.000	>48	>2.000	-	Pegasus
	Egzo - Stratosferik (Çok Daha Büyük)	Sınıflandırma Devam Ediyor	>30.000	Sınıflandırma Devam Ediyor	Sınıflandırma Devam Ediyor	-	MarsFlyer, MAC-1

Mikro / Mini İnsansız Hava Araçları:

En yaygın kullanılan sınıflandırma çeşidine olarak boyutsal anlamda en küçük ve kompakt İHA grubudur. Boyutlarının uygunluğu sebebi ile hem akademik çalışmalarda deney-test uygulamalarında hem de endüstride prototip-test uygulamalarında çok yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu gruptaki İHA'lar Mikro ve Mini olarak iki grupta incelenebilir. Özellikle Mini gruptaki İHA'larda irtifada 300 metreye kadar çıkılabilmektedir. Bir diğer önemli sınıflandırma kriteri olan kalkış ağırlığına bakıldığında Mikro sınıf uygulamalarda 100 gr, Mini sınıf uygulamalarda ise yaklaşık 30 kg değerlerine ulaşılmaktadır. Her iki sınıf İHA içinde havada kalış süresi birbirine yakın olup 0-2 saat mertebelerindedir. Mikro sınıf İHA'lar genellikle sadece gözlem, gözetleme görevlerinde kullanılırken Mini sınıf İHA'ların kullanım alanları daha geniş bir yelpazeye sahiptir. Gündelik uygulamalardan trafik uygulamalarında, görüntülü ve sesli kayıt ve gözlem uygulamalarında, meteorolojide hava tahmini ölçümlerinde, film endüstrisinde set uygulamalarında bu uygulamalar sıkça göze çarpmaktadır. Tüm bu avantajlarının yanında boyutlarının küçük olması otonom kontrolün sağlanması noktasında bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Çünkü uzaktan kontrolün sağlanabilmesi için gereken boyutlarda enstrümantasyon bulma zorluğu yaşanmaktadır. Bununla birlikte Mikro / Mini sınıf İHA'lar 'Drone Endüstrisi' ismi ile genel endüstride ve havacılık sektöründe hızla payını artırmaktadır. Özellikle günden güne yeni tasarımların boyutu küçülmekte ve çok daha kompakt yapılar üretilebilmekte, böylelikle gündelik hayatta İHA'ların görünürlüğü ve kullanılabilirliği hızla artmaktadır (Bento, 2008).

Taktiksel İnsansız Hava Araçları:

Taktiksel İHA'lara çoğunlukla sivilden çok askeri uygulamalarda rastlanır. Bu sınıf İHA'ları alt gruplarına ayırırken veri bağlantı mesafesi ve bununla paralel olarak kat edebileceği / gerçekleştirebileceği mesafe dikkate alınır. Yaygın olarak kabul gören Avrupa İnsansız Hava Sistemleri Kurumu (EUROUVS) 'ndan esinlenerek yapılmış olan hemen tüm sınıflandırmalarda mesafe menziline göre altı gruba ayrılma görülür. Tabi mesafe menzili arttıkça maksimum kalkış ağırlığı, ulaşılacak maksimum irtifa, ve havada kalma süresi artar. Taktiksel İHA sınıfında 3000-8000 metre arasında irtifaya çıkabilen, 150-1500 kg arasında kalkış ağırlığına sahip, 2-48 saat arasında havada kalabilme özelliğine sahip İHA'lar yer almaktadır. Taktiksel İHA sınıfında veri bağlantı kalitesini artırmak için ya da mesafe menzili uzadıkça haberleşme problemi yaşanmaması

için uydu bağlantısı da kullanılır. Kullanım alanları oldukça geniş olup başlıca kullanım alanlarına bakılacak olursa; askeri uygulamalarda Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif-Gözetleme-Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Silah Teslimi, Muhabere İrtibatı (İletişim Bağlantısı) ve sivil uygulamalarda maden tetkik arama çalışmaları, havalimanları güvenliği, arazi arama – kurtarma çalışmaları başlıca alanlar olarak sıralanabilir (Korchenko ve Illyash, 2013; Bento, 2008).

Stratejik İnsansız Hava Araçları:

Bazı tanımlamalarda (SİHA) olarak da geçen bu İHA sınıfı, ‘Yüksek İrtifa - Uzun Havada Kalışlı İHA’lar’ şeklinde de adlandırılır. Genel olarak İHA’ların boyutları büyüdükçe, havada kalış süresi – irtifası - yük kapasitesi artmaktadır. Stratejik İHA’larda ulaşılabilecek maksimum kalkış ağırlığı 12,5 tonlara (12.500 kg lara) kadar çıkabilmektedir. Maksimum uçuş irtifası 20 km (20.000 m) değerlerini görebilmektedir. Bir diğer önemli sınıflandırma kriteri olan veri link mesafe aralığı ise 2000 km lere kadar çıkabilmektedir. Stratejik İHA’larla taşınabilen faydalı yük fazladır. Yüksek irtifalı, uzun menzil gerektiren işlerde tercih edilmektedir ve askeri – sivil stratejik görevlerde tercih edilmektedir (Korchenko ve Illyash, 2013; Bento, 2008).

2.4. İHA Uygulama Alanları

İlk İHA çalışmalarının başlangıcından günümüze kadar gelinen süreçte İHA yatırımlarının ve İHA pazar payının çoğu askeri uygulamalar için ayrılmıştır. Her ne kadar son 20 yıllık süreçte sivil uygulamaların alanları ve İHA çalışmalarındaki payı artsa da askeri uygulamalar her zaman pay olarak ağırlığını koymuştur. Bu askeri faaliyetler en genel anlamda denetim, gözetim ve istihbarat faaliyetleri şeklindedir. Başta hava, kara ve deniz olmak üzere tüm askeri alt birimler çeşitli başlıklar altında İHA teknolojisinden faydalanmaktadır. Bu faaliyet alanlarına nükleer, kimyasal, biyolojik ve radyoaktif faaliyetler de dahildir.

Özellikle kirli, riskli ve tehlikeli alanlarda İHA kullanımı son yıllarda büyük artış göstermiştir. 1990’ların başında Körfez Savaşı ile birlikte bu alanlara yönelik tedbirler artmıştır. Nükleer, kimyasal ve biyolojik silahların geliştirilmesi ve kullanım tehdidi ile birlikte İHA kullanımının önemi artmıştır.

Askeri faaliyetlerdeki belli başlı kullanım alanları literatürde şu başlıklar altında incelenmektedir:

- Arama - Tarama çalışmaları,
- Özellikle mayın bulma faaliyetleri,
- Yön bulma çalışmaları,
- Savaşta düşman takibi ve aktiviteleri gözetleme çalışmaları,
- Barış zamanında genel durum gözetim çalışmaları,
- Anlık olarak sahada hedef belirleme çalışmaları,
- Askeri meteoroloji çalışmaları (anlık hava tahmin çalışmaları, kapalı hava şartlarında yön belirleme çalışmaları)
- Genel askeri faaliyetlerde rota belirleme çalışmaları,
- Radyo sinyal iletimi çalışmaları,
- Genel askeri faaliyetlerde ve savaş durumlarında hasar belirleme çalışmaları,
- Genel saha strateji belirleme çalışmaları,
- Savaşta ve barışta, anlık ve genel istihbarat çalışmaları,
- Casusluk – karşı casusluk çalışmaları,
- Helikopter, uçak ve her türlü hava aracının kullanıldığı pistlerin ve çevresinin güvenliği çalışmaları,
- Hareket kabiliyeti sebebiyle istenilen her durumda jammer olarak kullanılma,
- Sabit ve hareketli radar kullanımı çalışmaları,
- Özellikle denizcilikte rota belirleme, konum belirleme, hava durumu tahmin ve merkezle irtibat çalışmaları
- Savaşta ve barışta düşman lojistiğinin anlık ve genel olarak belirlenme çalışmaları (Gupta vd., 2013).

İHA'ların bir diğer önemli uygulama alanı ise sivil uygulamalardır. Bilinenin aksine sadece askeri uygulamalarda kullanılmamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri hükümetinin askeri alanlar dışında İHA kullanımına olan kısıtı kaldırması ile birlikte İHA endüstrisi hızla gelişmiştir (Gupta vd., 2013). İHA kullanımı günden güne yaygınlaşmakta olup, teknolojik gelişim ile birlikte gündelik hayatımızda da yerini almaktadır. Sivil havacılıkta da askeri havacılık uygulamalarında olduğu gibi İHA'ların birçok tercih sebebi vardır. Yine risk ve tehlike içeren uygulamalar ile uzun zaman alan (örn. 50-100 saat), insan istihdamının verimli olmadığı alanlarda İHA kullanımı avantajları sebebi ile tercih edilir. Çok yakın geçmişte kullanılmaya başlanılan yeni teknolojilerle birlikte gündelik hayatımızın hemen her alanında, sosyal medya

uygulamalarının oluşturulmasında (facebook, instagram, twitter vs.), kullandığımız başlıca temel internet hizmetlerinde (Google, yandex, mail uygulamaları vs.) İHA'lerden faydalanılmaktadır.

Sivil uygulamalarda İHA kullanımı da oldukça geniş olup literatürde aşağıdaki başlıklarda incelenmektedir:

- Bilimsel çalışmalarda,
- Atmosfer ve uzay araştırmaları çalışmalarında,
- Özellikle doğal yaşam, canlı- cansız doğal hayatın bilimsel ve genel amaçlarla gözlemlenmesi çalışmalarında,
- Çevre çalışmalarında,
- Akademik çalışmalarda çok yaygın alanlarda (kent planlama, mimari, laboratuvar, botanik vs.)
- Tarım alanlarının korunması, işlenmesi ve gözlemlenmesi çalışmalarında,
- Hayvancılık çalışmalarında,
- Ormancılık çalışmalarında, orman ekimi, gözlemlenmesi ve güvenliği ile ilgili çalışmalarda,
- Balıkçılık alanları belirleme ve gözetleme çalışmalarında,
- Anlık ve genel meteoroloji çalışmalarında,
- Doğal afet ve deprem gibi acil durumlarda acil görevlerde (özellikle yangınla mücadele çalışmaları, okyanuslarda kasırga oluşumu gözlemlenme çalışmaları, volkan patlama takip çalışmaları vs.),
- Madencilik ve yer altı çalışmalarının çeşitli kademelerinde,
- Arama – tarama - kurtarma çalışmalarında,
- Ticari amaçlı kullanımlarda,
- Kısa mesafe kargo ve taşımacılık çalışmalarında,
- Film endüstrisinde set çalışmalarında,
- Özellikle son dönem belgesel çekim çalışmalarında,
- Genel fotoğrafçılık çalışmalarında,
- Özel havacılık fotoğrafçılığı çalışmalarında,
- Genel kara trafik gözetleme çalışmalarında,
- Özel hava trafiği gözetleme çalışmalarında,
- Kamu düzenini ve güvenliğini ilgilendiren çalışmalarda,

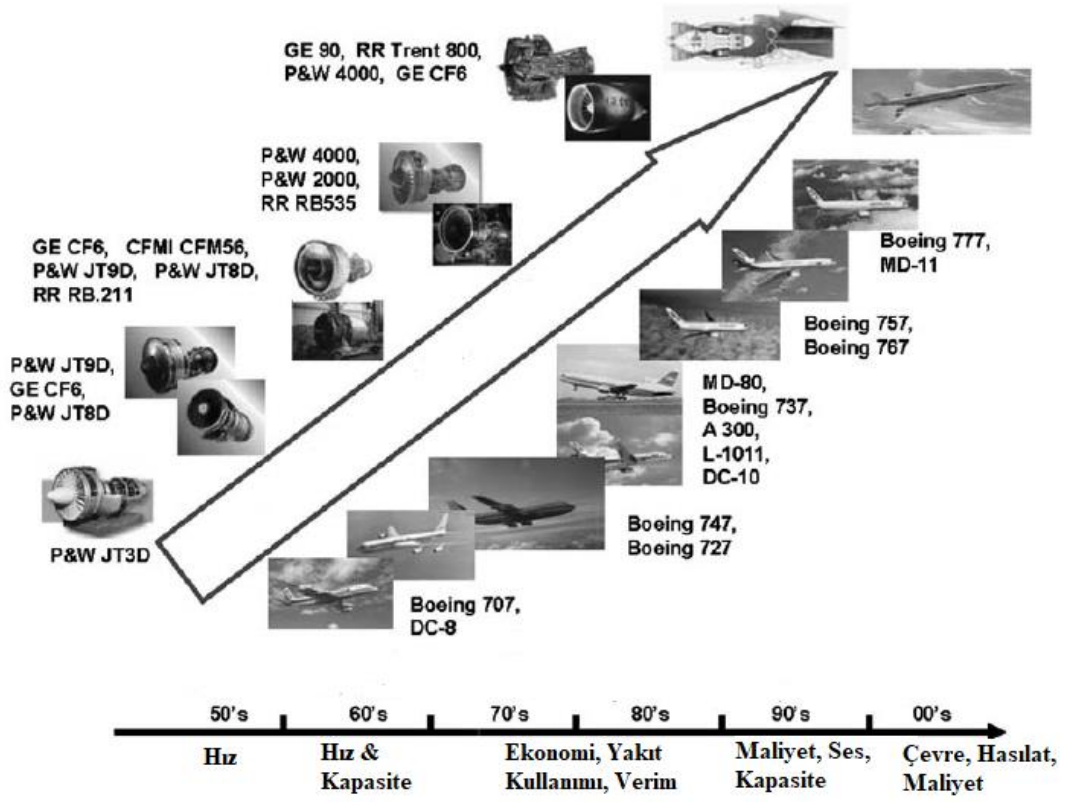
- Özellikle savaş ve barış dönemlerinde sınır güvenliği ile kaçakçılıkla mücadele çalışmalarında,
- Petrol ve doğalgaz boru hatlarının güvenliği ve işleyiş sürekliliği için gözetleme ve gözlemeleme çalışmalarında.

3. İTKİ (TAHRİK) SİSTEMLERİ

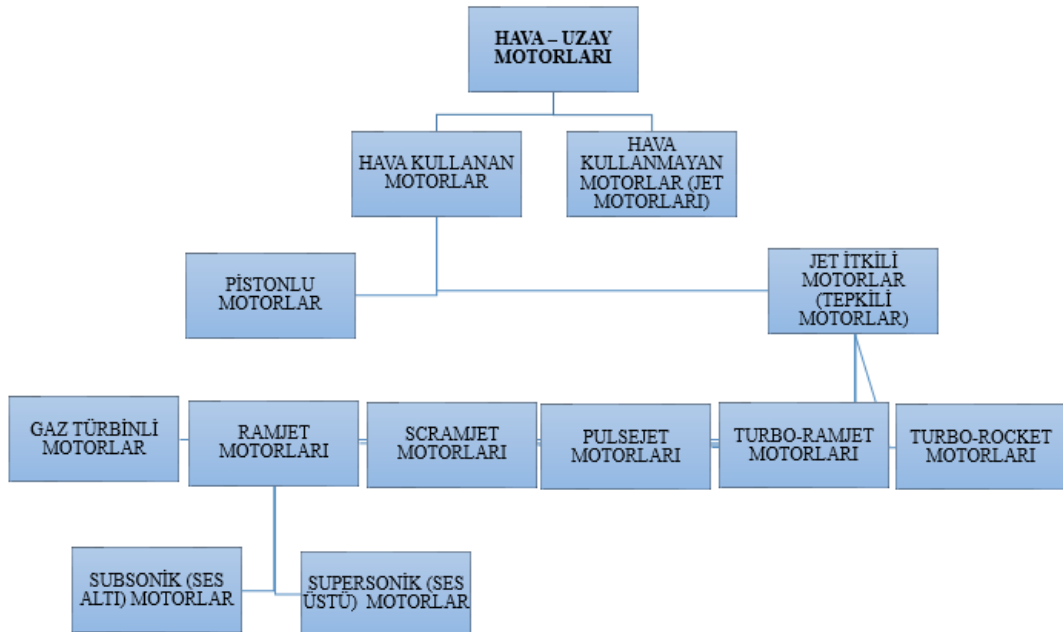
3.1. Havacılıkta Kullanılan İtki Sistemleri'ne Genel Bir Bakış

İtki sistemleri, bir bütün olarak havacılık sistemlerine bakıldığında en önemli alt sistem olarak sayılmaktadır. Havacılığın genel olarak gelişimi büyük ölçüde itki sistemlerinin gelişimi üzerinden gözlemlenmektedir. İtki sistemleri geliştikçe, diğer alt sistemler de itki sistemlerinin gelişimine göre şekillenmektedir. Havacılıkta kullanılan itki sistemleri yıllar geçtikçe, teknolojik gelişimin seyrine göre hem çeşitlenmiş hem de zenginleşmiştir. İtki sistemlerinin performansı ve verimliliği noktasında gelişimi, hava araçları için belli noktalarda fazlaca önem taşımaktadır. Havacılığın gelişim seyri incelendiğinde, yıllar geçtikçe daha fazla faydalı yük taşıyarak daha uzun mesafeleri daha hızlı kat edebiliyor olmak, itki sisteminin gelişkinliğiyle doğru orantılı olarak ilerlemektedir. 1950'lerde havacılık sisteminin gelişimini sürükleyen en temel parametre hız iken; 1960'larda hız&kapasite; 1970'lerde ve 1980'lerde ekonomiklik, yakıt kullanımı & verimlilik; 1990 larda maliyet, ses, kapasite; 2000'lerde çevre, hasılat, maliyet ön plana çıkmaktadır. Bu gelişim seyrine bakıldığında ilgili parametrelerin birçoğunun itki sistemleri ile ilgili olduğu görülmektedir. (Sehra ve Whitlow, 2004; Martinez-Sanchez ve Pollard, 1998; Urs ve Vezzini, 2015; Litt vd., 2004)

NASA'nın önümüzdeki 25 yıllık perspektifine bakıldığında öne çıkan hedeflerin 5 başlık altında incelenmesi mümkündür. Bunlar; güvenli uçuş, emisyon azaltılması, gürültü azaltılması, mobilite ve kapasite olarak sıralanabilir. Güvenli uçuş anlamında hedeflenen ölümcül kaza oranını düşürmektir. Emisyon azaltılmasında kastedilen hedef 2 türdür. Birincisi NO_x emisyonunu 10 yıl içinde %70, 25 yıl içinde %80 oranında azaltmaktır. İkinci olarak ise hedeflenen CO₂ emisyonunu 10 yıl içinde %25, 25 yıl içinde %50 oranında azaltmaktır. Gürültü azaltılması da başka bir hedef olup, 10 yıl içinde 10 desibel, 25 yıl içinde 20 desibel azaltılması hedeflenmektedir. Kapasite artırımı hedefi 1997 yılındaki seviyeyi üçe katlamaktır. Son olarak mobilite hedefi kapsamında; şehirlerarası uçuş süresini 10 yıl içerisinde yarıya, 25 yıl içinde 2/3 oranında düşürmek, kıtalararası uçuş süresini 25 yıl içerisinde yarı yarıya düşürmek amaçlanmaktadır. NASA'nın bu perspektifi de yine elektrikli uçuşa yönelimin sebeplerini göstermesi bakımından önemlidir (Sehra ve Whitlow, 2004; Dempsey ve Rasmussen, 2010)



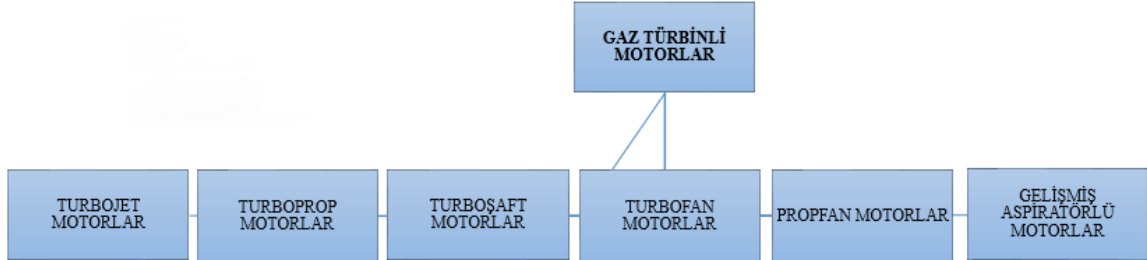
Şekil 3.1. Havacılığın gelişim seyri (Sehra ve Whitlow, 2004)



Şekil 3.2. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan motor grupları (El Sayed, 2017)

Havacılıkta geleneksel anlamda en yaygın olarak bilinen ve kullanılan itki sistemi ‘gaz türbinli itki sistemleri’ olarak isimlendirilen gruptur. ‘Gaz türbinli itki sistemleri’, genellikle bu ismi ile değil, yaygın bilinen ismi olan ‘Gaz türbinli motorlar’ ismi ile anılırlar. Yanma ile açığa çıkmış ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve Brayton çevrimine göre çalışan motor çeşitleridir. Havanın emilip sıkıştırılması, sıkıştırılmış havanın yakıt ile yakılması sonucu ortaya çıkan çok yüksek basınç ve sıcaklıktaki gazın enerjisinin, türbinler kanalıyla mekanik güce dönüştürülmesi ile çevrimi tamamlayan makinalardır. Hava alığı, kompresör, yanma odası, türbin ve nozul bölümlerinden oluşur.

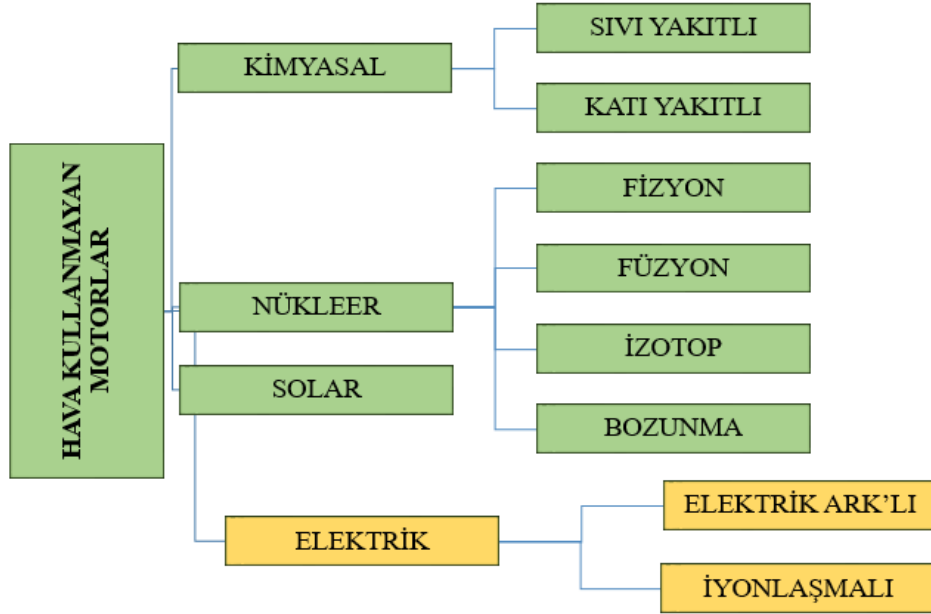
Gerçekte Gaz Türbinli Motorlar, havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan motor tipleri içinde bir alt grup olarak geçmektedir. Ancak yaygın kullanım ve bilinirliğinden dolayı geleneksel itki sistemleri ile özdeşleşmişlerdir. Havacılığın ilk yıllarından beri kademeli olarak geliştirilmiş ve en başından beri havacılığın geleneksel itki sistemi olarak özdeşleşmiştir. Gaz Türbinli Motorlarda kendi içinde altı alt başlık halinde incelenir.



Şekil 3.3. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan gaz türbinli motor grupları (El Sayed, 2017)

Bununla birlikte günümüz şartları ve teknolojik gelişim, geleneksel itki sistemlerinin yerini alternatif itki sistemlerine devretmektedir. Günümüz havacılık şartlarında ihtiyaçlar ve teknolojik gelişimi düşünüldüğünde, genel olarak ‘Hava Kullanmayan Motorlar’ grubu özel olarak da elektrikli itki sistemleri sahip olduğu avantajlardan dolayı geleneksel itki sistemlerine karşı üstünlük sağlamaya başlamıştır. Otomotiv, denizcilik ve son dönemlerde havacılık çalışmalarında elektrikli itki sistemleri trend konulardan birisi haline gelmiştir. Dünyadaki fosil yakıt rezervleri giderek azalmakta ve çok da uzak olmayan bir gelecekte tükenme ihtimali ile karşı karşıyadır. Bu nedenle her ne kadar geleneksel itki sistemleri gibi pratikte yaygın biçimde uygulanabilir olmasa da havacılık çalışmalarında ve de özellikle İHA çalışmalarında hem araştırılmaya

hem de uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. Bunun yanında kimyasal, nükleer ve solar itki sistemleri de alternatif itki sistemi çalışmalarında yoğun ilgi çeken konulardır (Oleson, 2004).



Şekil 3.4. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan 'Hava Kullanmayan Motorlar' grubunun alt grupları (El Sayed, 2017)

3.2. Elektrikli İtki Sistemleri

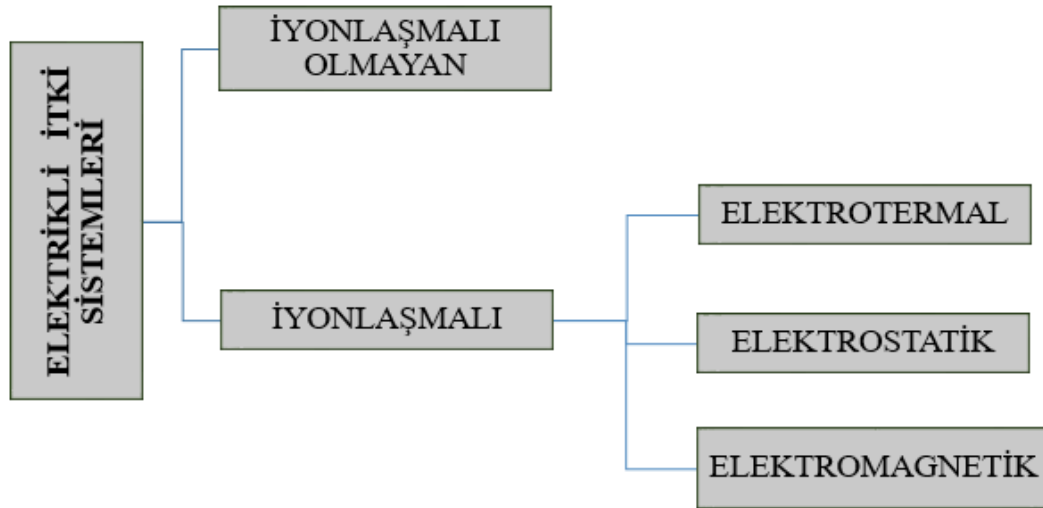
NASA'nın önümüzdeki 25 yıl perspektifinde odaklandığı konular; güvenliğin artırılması, gürültü ve emisyon değerlerinin azaltılması, hava taşımacılığında kabiliyet ve mobilitenin artırılması olarak belirlenmiştir. Bunlardan düşük emisyon ve düşük ses hedefleri, özellikle "çevrenin korunması" için düşünülmüş hedeflerdir. (Sehra ve Whitlow, 2004; Dempsey ve Rasmussen, 2010). Bu sebeplerden dolayı geleneksel itki sistemlerine alternatif itki sistemleri arayışı her zaman devam etmektedir. Airbus'a göre hava trafiğinin önümüzdeki 15 yıl içinde ikiye katlanacağı düşünülürse, konunun önemi daha fazla anlaşılmaktadır. Yakıt tasarrufu (çok daha düşük yakıt tüketimi) ve düşük emisyon konusu öncelikli olarak önem taşımaktadır. (Hepperle, 2012). Bir diğer önemli konu ise petrol kaynaklarının sınırlı olması ve yakın gelecekte tükenecek olmasıdır (Parker ve Fedder, 2016; Martinez, 1995; Dudzinski vd., 2007; Gur ve Rosen, 2009; Kuhn ve Sizmann, 2012).

Alternatif itki sistemleri arayışında ise öne çıkan çalışmaların çoğu elektrikli uçuş / elektrikli itki sistemleri başlıklarında yoğunlaşmaktadır. Elektrikli uçuş oldukça fazla

avantajı olmasına ve yeni bir teknoloji olmamasına rağmen uzun yıllardır çeşitli nedenlerden dolayı etkin bir biçimde kullanılamamaktadır. 1940’lardan beri süregelen çalışmalar asıl ivmeyi son yıllarda yakalamıştır (Price vd., 2006).

Geleneksel itki sistemlerinde temel alınan, sıvı yakıtların (nadiren gaz yakıtlarda kullanılır) parçalanarak enerji elde edilmesidir. Burada piston sistemi ya da gaz türbinli itki sistemleri kullanılır. Elde edilen mekanik enerji, itkiye dönüştürülür. Elektrikli itki sistemlerinde ise enerjinin üretilmesi sürecinin niteliği ve niceliği belirgin bir biçimde değişmektedir. Elektrikli itki sistemleri ile en temelde hedeflerden biri yüksek egzoz hızlarına çıkmaktır. (Urs ve Vezzini, 2015; Jahn ve Choueiri, 2001)

Elektrikli itki sistemlerinin sınıflandırılması ile ilgili olarak belirgin bir kabul olmamakla birlikte aşağıdaki yapılmış olan genel sınıflandırma yaygın olarak kabul görmektedir:



Şekil 3.5. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan ‘Elektrikli İtki Sistemleri’ grubunun alt grupları (Sheth, 2014)

İyonlaşmalı olmayan grup elektrikli itki sistemlerinde, tıpkı uydu ağında olduğu gibi uzun iletken kablolar şeklinde elektrik enerji – kinetik enerji dönüşümü sağlayarak çalışır. Uzay ya da roket çalışmaları üzerinde yaygın olarak çalışılmaktadır.

Pratikte kullanım karşılığı daha fazla olan alt grup, iyonlaşmalı gruptur. Elektrotermal itki sistemlerinde itici güç, yakıtın termal ve elektriksel süreçlerden geçmesi ile elde edilip uygun bir nozul vasıtasıyla kullanılır. Arcjet ve resistojet uygulamaları elektrotermal elektrikli itki sistemlerine örnektir. Elektrostatik elektrikli itki

sistemlerinde ise iyonlaşmış partiküller ve elektrostatik kuvvet ilişkisi uygulaması ile itici güç ivmelenmesi gerçekleşir. Tüm iyon ve bazı hall etkili uygulamalar bu grup için örnek sayılabilir. Son olarak elektromanyetik elektrikli itki sistemlerine baktığımızda, itici gücün elektrik ve manyetik saha arasındaki etkileşim altında ivmelendiği söylenilebilir. Manyeto Plazma Dinamik (MPD) uygulamaları ve bazı hall etkili uygulamalar da bu gruba örnek olarak gösterilebilir. (Sheth, 2014)

Tüm bu bilgiler ışığında bazı geleneksel itki sistemi örnekleri ile elektrikli itki sistemi örnekleri hızları üzerinden gelişkinlikleri mukayese edildiğinde elektrikli itki sistemlerinin genel anlamda yerini daha iyi anlamamız mümkündür:

Tablo 3.1. Bazı geleneksel–elektrikli itki sistemlerinin hızları üzerinden karşılaştırılması (El Sayed, 2017)

İtki Sistemi	Hız (m/s)
Helikopter tarzı rotor	30 a kadar
Pervane	30-200
Aspiratörlü-aspiratörsüz fan ya da propfan	100-300
Turbofan	200-600
Turbojet (deniz seviyesi, statik)	350-600
Turbojet (M=2, 36.000 ft; yaklaşık 600 m/s)	900-1.200
Ramjet (M=2, 36.000 ft; yaklaşık 600 m/s)	900-1.200
Ramjet (M=4, 36.000 ft; yaklaşık 1.200 m/s)	1.800-2.400
Katı yakıtlı roket	1.500-2.600
Sıvı yakıtlı roket	2.000-3.500
↓pratikte yaygın olmayan - pratikte yaygın olan↑	
Nükleer roket (som nüveli reaktör)	9.000-10.000
Nükleer roket (füzyon reaktör)	25.000
Solar (Güneşsel)	20.000
Arc	6.000
Plazma - iyon	90-30.000.000
Foton	300.000.000

3.3. İHA’larda ve Mikro / Mini Sınıf İHA’larda Kullanılan Elektrikli İtki Sistemlerine Genel Bakış

Geleneksel olarak itki sistemlerinde kullanılan tüm alt sistemlerin birçoğu aynı zamanda İHA çalışmalarında da uygulanmakta ya da gelecekte uygulanması planlanmaktadır. Dolayısıyla İHA’larda kullanılan itki sistemlerine bakıldığında

kategorik anlamda sadece İHA'lar için kullanılan bir 'sistem' tanımlaması yoktur. Bununla birlikte komponent ya da alt sistem bazında uygulamalar mevcuttur.

Bu tez çalışması kapsamında mikro / mini sınıf bir İHA'nın elektrikli itki sisteminin incelenmesi hedeflenmiştir. Mikro / mini sınıf İHA'larda hem uygulama hem de deneysel çalışmalarda birçok avantajı ve kullanım kolaylığından dolayı batarya-motor-pervane grubu yaygın olarak tercih edilir.

3.3.1. Bataryalar

Batarya sistemleri hava araçları için hem temel güç kaynağı hem de yardımcı güç kaynağı olarak kullanılır. Günümüzde ki çalışmalar temel güç kaynağı olarak yaygınlaşması yönündedir ancak hali hazırda uygulamalarda daha çok yardımcı güç kaynağı olarak kullanılır. Motoru ve APU'yu başlatmada, ayrıca bakımda / uçuş öncesi kontrollerde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Urs ve Vezzini, 2015; Young vd., 2013).

Aynı zamanda batarya sistemleri bir çeşit portatif kaynaktır. Enerji depolamada ya da dönüştürmede kullanılır. Ya enerji doğrudan depolanır ya da kimyasal enerji elektrokimyasal prensiplere göre elektrik enerjisine dönüşür. (Hepperle, 2012; Bakker, 2010; Gomadam vd., 2002).

Batarya sistemleri bir veya genellikle daha fazla hücreden meydana gelir. Anot, katot, elektrolit, elektriksel bağlantılar, ayırıştırıcı gibi kısımlardan oluşur. Özellikle havacılıktaki kullanımını dikkate aldığımızda batarya sistemlerini birincil ve ikincil batarya sistemleri şeklinde altı kısımlara ayırmak gerekir. Birincil batarya sistemlerinde hücreler yeniden şarj edilebilir değildir ve tepkimeye giren madde tükendiğinde yerini alır. Örnek olarak gümüş-çinko, lityum-sülfürdioksit, lityum-karbonmonoflorür ve lityum-tiyoniklorür verilebilir. İkincil batarya sistemleri ise şarj edilebilirdir. Örnek olarak gümüş-çinko, nikel-kadmiyum ve nikel-hidrojen verilebilir (Erdoğan vd., 2009; Gao vd., 2002; Jackey vd., 2013; Cai ve White, 2009)

Bataryalarda değer aralıkları amper-saat kapasitelerine ve nominal gerilimlerine göre ölçülür. Nominal gerilim değerleri batarya üzerinde ne kadar sayıda hücre olduğuna ve ne çeşit hücre kullanıldığına göre değişir. Amper-saat ise kapasite belirtir. Sıcaklık, kullanım ömrü ve akıtma durumu olup olmadığına göre değişebilir. Çeşitli parametrelere göre bu değer 3-65 Ah arasında olabilmektedir.

Havacılık çalışmalarının çeşitli kademelerinde batarya sistemlerinin birçok çeşidi kullanılabilir. İHA çalışmalarında da güç kaynağı olarak bu batarya sistemleri kullanılmaktadır. Batarya sistemleri çok geniş bir yelpazede sınıflandırılıp alt gruplara ayrılabilir ancak lityum-iyon batarya grubunun İHA çalışmalarında özel bir yeri bulunmaktadır. Ek olarak lityum-iyon batarya grubu tüm batarya sistemleri içinde baskın bir yere sahiptir. Sahip olduğu birçok avantajından dolayı batarya pazarındaki payı giderek artmaktadır. Lityumun bağlanma yeteneğinden ve özellikle yüksek performansından dolayı lityum-iyon batarya grubu tercih edilmektedir. (Bakker, 2010; Kumar, 2014)

Lityum hücrelerinin kullanılmasının temel avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek gerilim elde edilmesi
- Yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu elde edilmesi
- Sıcaklık olarak geniş bir çalışma aralığı
- Yüksek güç yoğunluğu elde edilmesi
- Uzun raf ömrüne sahip olması (Linden ve Reddy, 2002)

3.3.2. Fırçasız DA motorlar

Elektrikli bir sistem tasarımı yapılırken motor seçimi önemli bir faktördür. Doğru Akım (DA) Motorları çeşitli avantajlarından dolayı Alternatif Akım (AA) motorlarına nazaran havacılık uygulamalarında daha çok tercih edilirler. DA Motorları daha geniş bir spektrumda güç ayarlamasına olanak vermesi, daha az rotor ısınması, kalıcı mıknatıslanma sağlanabilmesi gibi özelliklerinden dolayı AA Motorlarına göre daha yaygın olarak tercih edilirler. (Fehrenbacher vd., 2011; Cao vd., 2012; Krykowski ve Hetmanczyk 2013)

Fırçasız DA Motorlar sahip oldukları birçok avantajdan dolayı tıptan askeri uygulamalara, otomotivden havacılığa kadar çok yaygın alanda kullanılırlar. Fırçasız DA Motorlarda sistem genel anlamda 3 bölümden oluşur: Güç dönüşümü yapan invertörler, Fırçasız DA Motor – yük bölümü ve hız – tork – akım kontrolünün yapıldığı bölüm. (Lee ve Ehsani, 2003).

Fırçasız DA Motorları kontrol devresinin kompleks olması ve diğer motor tiplerine kıyasla göreceli olarak maliyetinin fazla olmasına rağmen aşağıdaki

avantajlarından dolayı tercih edilirler (Aydoğdu ve Bayer; Fehrenbacher vd., 2011; Toliyat ve Gopalarathnam, 2002; Bayraktar ve Balık, 2015; Thirugnanam vd., 2012):

- Yapısından dolayı Fırçalı DA Motorlarına göre daha az bakım gerektirir, bu da bakım maliyetlerinin azalmasına sebep olur,
- Daha yüksek hız değerlerine ulaşılabilir,
- Yine yapısında fırça ve kollektör bulunmadığı için boyutsal anlamda küçüktür ve daha küçük endüvi yüzeyi ile eşdeğer moment elde edilebilir,
- Fırçalarının olmaması sebebiyle fırçaların neden olduğu karbon tozunu içermezler,
- Hız / Tork ayarlanması daha kolay kontrol edilebilir,
- Hız kontrolü yaparken ayar aralıkları daha geniştir,
- Fırça üzerinden gerçekleşen gerilim düşümü yoktur,
- Çıkış gücü daha yüksektir,
- Dış ve iç yapısı boyutsal anlamda daha kompakttır,
- Elektromanyetik kuvvetler daha düşüktür,
- Verimleri göreceli olarak daha yüksektir,
- Çok kolay soğutulabilirler,
- Çalışma ortamı güvenilirdir,
- Çalışma ortamı göreceli olarak çok daha sessizdir,
- Fırçalı DA Motorlarında gerekli olan uyarma akımına ihtiyaç duymazlar,

3.3.3. Pervaneler

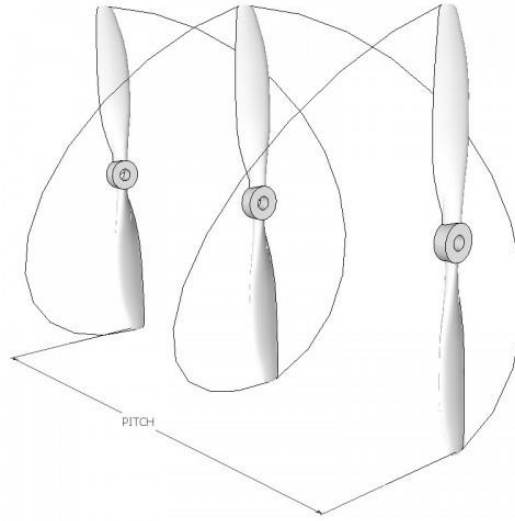
Pervaneleri çeşitli parametrelere göre sınıflandırmak mümkündür. Pervane seçimi hava aracının performansı açısından önemlidir. Kalkış, yükseliş, yüksek hız ve iniş gibi tüm aşamaları doğrudan etkileyen bir sistem komponentidir. Pervaneler için genel kabul görmüş bir sınıflandırma olmamakla beraber büyük pervane markalarının web sitelerini incelediğimizde; pitch (hatvesine göre), ağırlıklı üretildiği malzemeye göre, tasarlanırken ve üretim esnasında yapılan montaja göre pervane çeşitleri şu şekilde sıralanabilir (Ostler vd., 2009; Adkins ve Liebeck 1994; Speas, 2006):

- Sabit hatveli pervaneler,
- Yere göre ayarlanabilir hatveli pervaneler,
- Hatvesinin pozisyonu ayarlanabilen pervaneler,

- Hatvesi doğrudan pilot vasıtasıyla ayarlanabilen pervaneler,
- Hatvesi sabit hızı sağlayıp koruyacak şekilde tasarlanan pervaneler,
- Hatvesi komple her duruma göre ayarlanabilen pervaneler,
- Ters hatve durumuna göre ayarlanabilen pervaneler,
- Beta Kontrollü (kanat açısı ayarlanabilir) pervaneler.

Şekilde temsili bir resim ile pervane hatvesi görülmektedir. Kanat çapına, kanat açısına, kanat profil tasarımına göre değişmekle birlikte pervanenin bir tam tur hatvesi şekildeki gibidir.

Anlaşıldığı üzere pitch (hatve) yani pervane adımı sınıflandırma üzerinde oldukça etkili bir parametredir. Kullanım, test, kontrol, modelleme ve ölçüm gözlemlene kolaylığı açısından standart İHA ve akademik çalışmalarda sabit hatveli pervaneler yaygın olarak kullanılırlar (Speas, 2006).



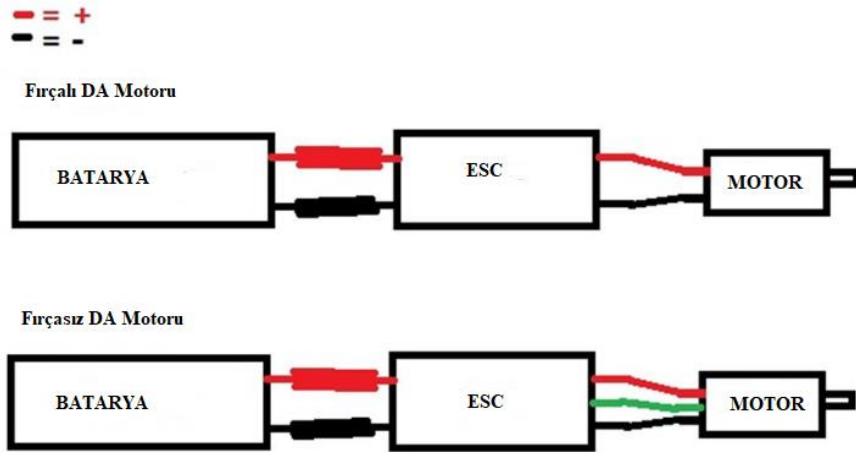
Şekil 3.6. Pervane için bir pervane hatvesi (adımı) (pitch)

Sabit hatveli pervane kullanımının uygulamada ve test çalışmalarındaki en önemli kullanım kolaylığı ve avantajlarından birisi motor üreticisi firmalar tarafından oluşturulan ‘pervane yük eğrileri’dir. Bu eğriler gündelik endüstri uygulamalarında yapılan deneyimlerle oluşturulmuştur. Yaygın kullanılan motorlar ve bu motorlarla oldukça uyumlu çalışan sabit hatveli pervanelerin birlikte çalıştırılmasıyla elde edilen datalar eğri haline getirilmiş ve motor firmaları tarafından katalog bilgisi halinde kullanıcıların hizmetine sunulmuştur. Bu eğrilerde motorun en spesifik verilerinden olan hız ve güç ile pervanenin en spesifik değerlerinden olan yine hız, güç ve verim değerleri

karşılıklı olarak görülebilir ve tasarım ya da komponent seçimi gibi işlemlerde kolaylıkla kullanılabilir (Speas, 2006).

3.3.4. Elektronik hız kontrolcüsü (ESC – Electronic speed controller)

Bataryalar ve elektrik motorları bağlanırken aralarında kullanılan üniteye ESC denilir. Bataryayı doğrudan elektrik motoruna bağlamak motorun istenilen performansta çalışmamasına neden olabilir, hatta kısa devre yapmasına da sebep olabilir. Bu durumlarda ESC kullanmak gerekir.



Şekil 3.7. ESC için bağlama biçimi

ESC'ler temel olarak sistemin hızını, pervanenin dönüş yönünü kontrol etmede kullanılırlar. ESC'ler elektrik motoruna giden gerilime doğrudan müdahale ederek hız ve yön kontrolü yaparlar. Ancak bunu lineer düzenleme ile yapmanın zorluklarından ve verimsizliklerinden dolayı, endüstride kullanılan ESC'lerin çoğunluğu bu müdahaleyi PWM (Pulse Width Modulation – Sinyal Genişlik Modülasyonu) metodu ile yaparlar. Bu metoda göre elektrik motoruna giden giriş akımı çok hızlı bir biçimde açılıp – kapatma işlemine tabi tutulur. Bu şekilde giren akımın yüzdesi / oranı üzerinden sistemdeki hız (RPM) ve diğer istenen kontroller sağlanmış olur (Yoon, 2015).

4. İHA İTKİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

4.1. Matematik Modelleme

Matematik model bir fiziksel sistemin davranışlarını temsil eden denklemler bütünüdür. Fiziksel sistemlerin analiz edilmeleri ve denetlenmeleri için yapılan tasarımların temelini de matematik modeller oluşturur. Sistemdeki değişkenler tanımlanır. Sonra bu değişkenler matematik modeldeki denklemlerle fizik kuralları çerçevesinde ilişkilendirilir ve model tamamlanmış olur. Bu modeller vasıtası ile sistemler kontrol edilir, gereken analizler gerçekleştirilebilir.

4.1.1. Batarya matematik modellemesi

Bu tez çalışmasında daha önce detaylı olarak belirtilen avantajlarından dolayı Lityum-iyon batarya grubundan bir batarya kullanılmıştır. Lityum-iyon bataryalardan elde edilen enerjinin çoğu genellikle elektrik motorlarında güç kaynağı olarak ya da hava araçlarında aviyonik sistemin etkin hale getirilmesinde kullanılır. Lityum-iyon tipi bataryalar için şarj vedeşarj (yükleme ve boşalma) durumları için karakteristik denklemleri ve kullanılan değişkenlerin karşılıkları aşağıdaki gibidir (Xu vd., 2016):

$$\text{Deşarj: } E = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (4.1)$$

$$\text{Şarj: } E = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (4.2)$$

E: Batarya gerilimi (V)

E_0 : Batarya sabit gerilimi (V)

R: İç direnç (ohm)

i: Batarya akımı (A)

K: Polarizasyon sabiti (V/Ah)

Q: Batarya kapasitesi (Ah)

i^* : Filtrelenmiş batarya akımı (A)

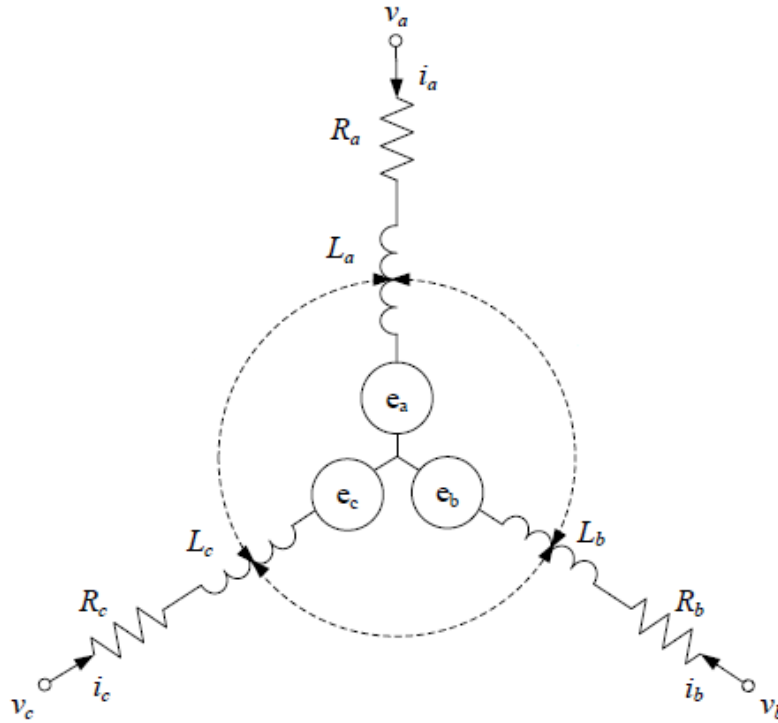
it: Gerçek batarya şarjı (Çekilmiş kapasite) (Ah)

A: Üssel gerilim (V)

B: Üssel kapasite (1/Ah)

4.1.2. Fırçasız DA motoru matematik modellemesi

Bir Fırçasız DA Motoru için; iç direnci R , endüktansı L olan 3 fazlı stator sargılarının bağlantısı şekildeki gibidir. Motor çalışmaya başladığında sargılarda oluşan zıt E.M.K. (elektromotor kuvvet); hıza ve rotorun konumuna göre değişen bir kaynağa dönüşür. Böylelikle Şekil 4.1. deki faz eşdeğer devresine dönüşür (Atan, 2007; Dalcalı, 2013).



Şekil 4.1. 3 faz eşdeğer devresinin şematik gösterimi (Dalcalı, 2013)

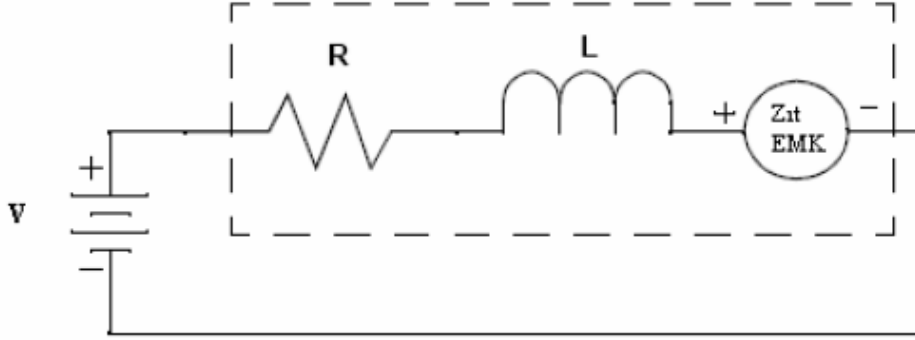
$V_{a,b,c}$: Statorun a, b, c fazlarındaki gerilim değerleri

$i_{a,b,c}$: Statorun a, b, c fazlarındaki akım değerleri

$R_{a,b,c}$: Faz sargılarındaki direnç değerleri

$e_{a,b,c}$: Endüklenen zıt EMK kuvvetleri

$L_{a,b,c}$: Faz sargılarındaki endüktans değerleri



Şekil 4.2. Bir faz eşdeğer devresi (Atan, 2007)

Eşdeğer devredeki A fazı için elde edilen değer aşağıdaki gibidir:

$$V_a = i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_a \quad (4.3)$$

Bu eşitliği tüm sargılar için yazarsak, M sargılar arasındaki karşılıklı endüktansları ifade etmek üzere aşağıdaki denklemleri elde edilmiş olur:

$$L_a = L_{a0} - M$$

$$L_b = L_{b0} - M \quad (4.4)$$

$$L_c = L_{c0} - M$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Yeni oluşan zıt EMK'nın değeri başta konuma, rotor hızına, manyetik alanın şiddetine ve bobinin sargı sayısına göre değişir. Sayılan son iki parametre motorun sabit parametrelerinden olduğu için λ ile gösterilir.

$$\lambda(\Theta) = \begin{cases} 0 < \Theta \leq \frac{\pi}{6} & \rightarrow \lambda_{\max} \frac{6\Theta}{\pi} \\ \frac{\pi}{6} < \Theta \leq \frac{5\pi}{6} & \rightarrow \lambda_{\max} \\ \frac{5\pi}{6} < \Theta \leq \frac{7\pi}{6} & \rightarrow 6\lambda_{\max} \left(1 - \frac{\Theta}{\pi}\right) \\ \frac{7\pi}{6} < \Theta \leq \frac{11\pi}{6} & \rightarrow \lambda_{\max} \\ \frac{11\pi}{6} < \Theta \leq 2\pi & \rightarrow 6\lambda_{\max} \left(\frac{\Theta}{\pi} - 2\right) \end{cases} \quad (4.6)$$

Zıt EMK değeri; konum, açısal hız ve zıt EMK sabiti (λ) değerine bağlıdır. Diğer fazların aralarında 120° konum farkı olduğundan, fazlarda meydana gelecek zıt emk değeri de 120° faz farklı olarak aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} e_a &= \omega \lambda(\Theta) \\ e_b &= \omega \lambda\left(\Theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$e_c = \omega \lambda\left(\Theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Fırçasız DA Motorunun ürettiği anlık güç, zıt EMK ile faz sargılarından geçen akımın çarpımına eşit değerdedir. Bu güç aynı zamanda motorun statorundan rotoruna aktarılan güçtür. Sürtünme kayıpları bu güçten çıkarılınca motor milinden elde edilen net güce ulaşılır. Fırçasız DA Motorlarında sürtünme kayıpları ihmal edilebilir. Sonuçta güç değeri aşağıdaki denklem bağıntısı ile elde edilir: (Atan, 2007; Dalcı, 2013).

$$P_e = i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c \quad (4.8)$$

Akımdaki değişim ise aşağıdaki şekildedir:

$$i(\Theta) = \begin{cases} 0 < \Theta \leq \frac{\pi}{6} & \rightarrow 0 \\ \frac{\pi}{6} < \Theta \leq \frac{5\pi}{6} & \rightarrow I_{\max} \\ \frac{5\pi}{6} < \Theta \leq \frac{7\pi}{6} & \rightarrow 0 \\ \frac{7\pi}{6} < \Theta \leq \frac{11\pi}{6} & \rightarrow -I_{\max} \\ \frac{11\pi}{6} < \Theta \leq 2\pi & \rightarrow 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Altı farklı konuma bağlı olan akım ve zıt EMK, üç faz değeri için ayrı ayrı denkleme işlenirse güç ve bağıntıları aşağıdaki hale dönüşür:

$$P_e = i_a \cdot \lambda_a \cdot \omega + i_b \cdot \lambda_b \cdot \omega + i_c \cdot \lambda_c \cdot \omega \quad (4.10)$$

$$P_e = 2 \cdot \lambda_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \omega \quad (4.11)$$

Güç ile bağlantılı olarak oluşacak moment ise aşağıdaki denklemler ile hesaplanır:

$$P_e = T_e \cdot \omega \quad (4.12)$$

$$T_e = 2 \cdot \lambda_{\max} \cdot I_{\max} \quad (4.13)$$

Dönmeyi oluşturan moment; sabit ivme ile atalet momentinin çarpımının, sürtünme katsayısı ile hızın çarpımının ve sisteme bağlı olan tanımlı yükten gelen momentin toplamına eşittir: (Atan, 2007; Dalcı, 2013).

$$T_e = J_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + T_L \quad (4.14)$$

Ek olarak deneysel hesaplamalardan çıkan sonuçlarla oluşturulan aşağıdaki iki bağıntı da matematik model hesaplamalarında kullanılır; tork sabiti K_T ile akımın çarpımı Tork (moment) değerini verirken, zıt EMK sabiti K_e ile açısal hızın çarpımı da elektromotor kuvvetin (EMK) bulunmasını sağlar: (Atan, 2007; Dalcı, 2013).

$$e = K_e \cdot \omega \quad (4.15)$$

$$T_e = K_T \cdot i \quad (4.16)$$

4.1.3. Pervane matematik modellemesi

Pervane matematik modelinde yine sabit hatveli pervaneler grubunun kullanıldığı da dikkate alınarak kullanılan model denklemleri ve bu model denklemleri oluşturulurken kullanılan parametrelerin açıklaması aşağıdaki gibidir (Serokhvostov ve Churkina, 2011).

$$C_T = \frac{T_p}{\rho n^2 d^4} \quad (4.17)$$

$$C_P = \frac{P_p}{\rho n^3 d^5} \quad (4.18)$$

$$J = \frac{V}{nd} \quad (4.19)$$

$$\eta = \frac{C_T J}{C_P} \quad (4.20)$$

C_T : Pervane itki katsayısı

C_P : Pervane güç katsayısı

T_p : Pervane itkisi (N)

P_p : Pervane gücü (W)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m³)

V : Sonsuz hava hızı (m/s)

n : Pervane dönüş hızı (m/s) (Uygulamada yaygın kullanım birimi RPM'dir)

d : Pervane çapı (m)

J : Gelişmiş oran

η : Pervane verimi

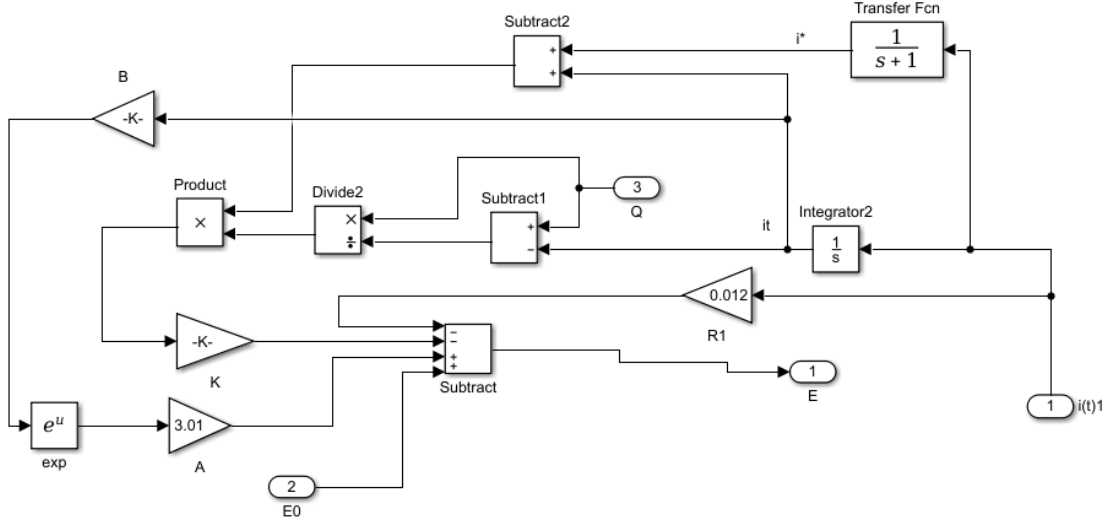
4.2. MATLAB / Simulink Modellemesi

MATLAB programı genellikle mühendislik ve pozitif bilim uygulamalarında kullanılan bir programdır. Aynı zamanda bir programlama dilidir ve matris tabanlı bir çalışma sistemine sahip bir yazılımdır. Sayısal hesaplama, programlama, optimizasyon, istatistik gibi analizlerin yapılabilmesinin yanında 2D ve 3D (2 ve 3 boyutlu) grafik görüntülenmesine de olanak sağlayan bir programdır (Klee, 2005).

Bu tez çalışmasında MATLAB programının hesaplamalar özelliğini kullanmakla birlikte kullanılan bir diğer özelliği de simülasyon (benzetim) özelliğidir. Simulink, multi-disiplinli sistemlerin simülasyonunu gerçekleştirir. Model tasarımı için blok diagramları kullanılır. Simulink sistemi ile simülasyon, kod oluşturma, test sistemlerinin doğrulanması gerçekleştirilebilir. Blok kütüphanesi modellemeler için hazırlanmış olup oldukça zengindir.

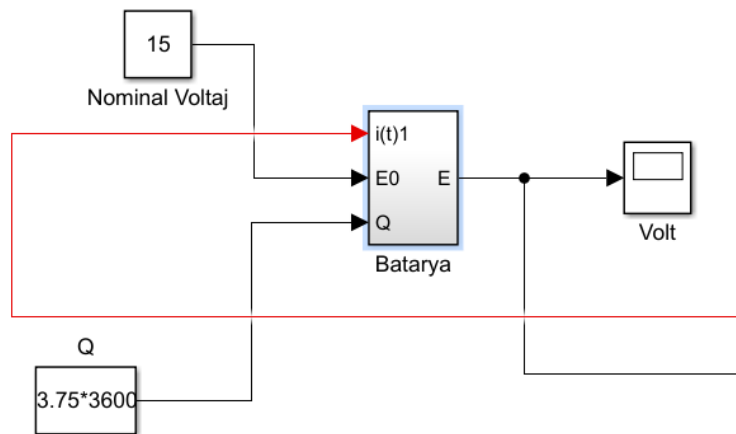
4.2.1. Batarya matematik modelinin MATLAB / Simulink programına aktarılması

Bu tez çalışmasının testlerinde kullanılan ve Bölüm 4 te belirtilen Lityum-İyon tipi batarya deşarjı için matematik model bağıntıları, MATLAB / Simulink programının esasları çerçevesinde aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.3. Batarya MATLAB / Simulink Modellemesi (Açık Hali)

Kullanım kolaylığı ve sadelik açısından, batarya firmalarının müşterileri ile yaygın olarak paylaştığı değerler de göz önüne alınarak, sanayideki pratik uygulamalarda hesaplara etkiyen ve sistemi değiştiren en temel parametreleri baz alarak Simulink modeli sadeleştirilmiştir:

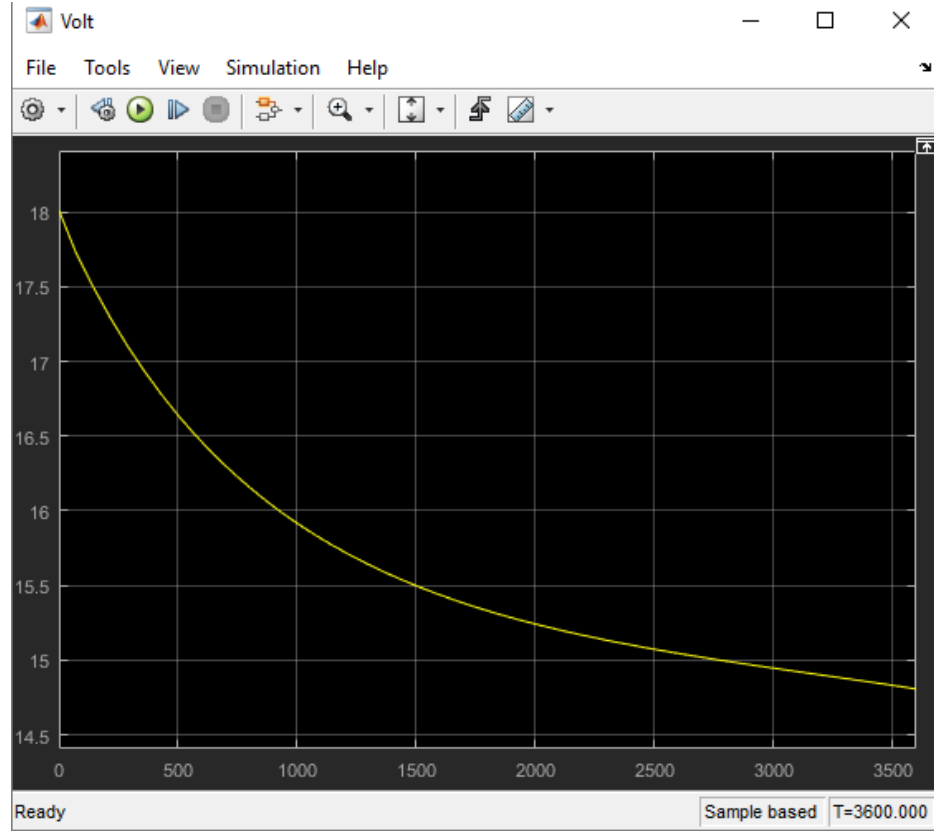


Şekil 4.4. Batarya MATLAB / Simulink Modellemesi (Kapalı Hali)

Burada sisteme giren başlangıç gerilim değeri ve batarya kapasitesi ile sistemde kullanılan akım değerleri en sık değişen parametreler olup hesaplamaları

kolaylaştırmıştır. Şekil 4.4. deki sistem Batarya MATLAB / Simulink modelinin bir parçası olup kırmızı ve siyah hatlar Fırçasız DA Motoruna bağlanmaktadır.

Bu modelleme sonucunda sisteme aktarılan gerilim değeri V cinsinden görüntülenebilmektedir. Aşağıdaki grafikte görüntülenebilen gerilim değeri temsili bir biçimde görülmektedir:



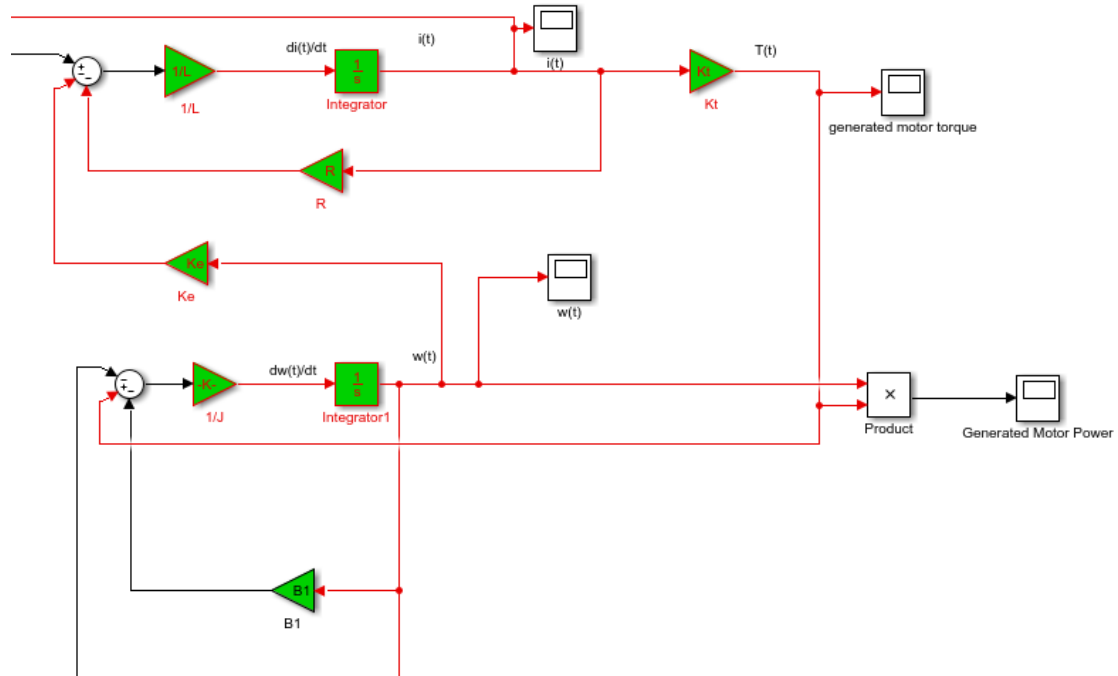
Şekil 4.5. MATLAB / Simulink modellemesinde gerilimin okunması

4.2.2. Fırçasız DA motorunun matematik modelinin MATLAB / Simulink programına aktarılması

Bu tez çalışmasının testlerinde kullanılan ve Bölüm 4.1.2. de belirtilen Fırçasız DA tipi elektrik motoru için matematik model bağıntıları, MATLAB / Simulink programının esasları çerçevesinde programa aktarılmıştır (Philip ve Meenakshy2012; Laxminarayana ve Tarakalyani 2013; Mondal vd., 2015).

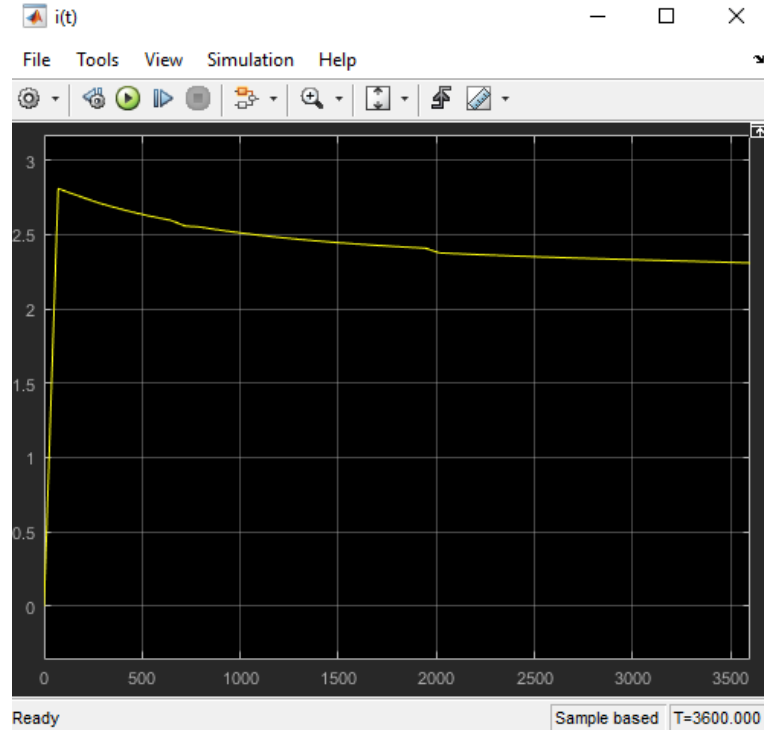
Elektrik motoru için yapılan bu Simulink modellemesi ile sistem hem yüklü hem de yüksüz test için uygundur. Yani bölüm 4.1.2. de matematik modellemesinde

bahsedilen sisteme bağlı olan tanımlı yükün (T_L) bağlı olduğu ve olmadığı iki durumda da hesaplama ve raporlama yapılabilmektedir.

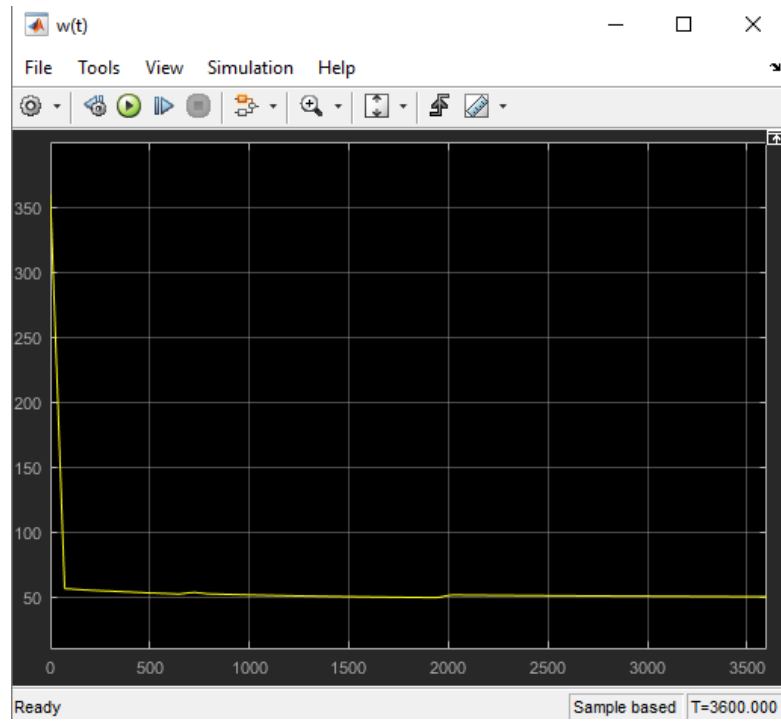


Şekil 4.6. *Fırçasız DA Motoru MATLAB / Simulink modellenmesi*

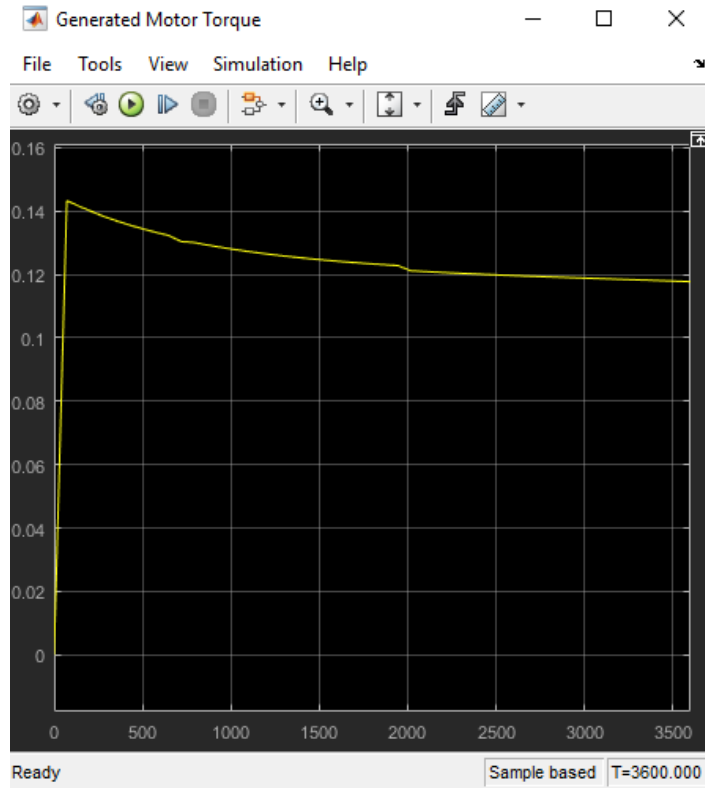
Fırçasız DA elektrik motoru Simulink modellemesi sonucunda; sistemde kullanılan akım değeri (A), elektrik motoru için açısal hız değeri (rad/s) (istenilirse RPM olarak da), elektrik motorunda üretilen moment (tork) değeri (Nm) ve elektrik motoru gücü değeri (W) görüntülenebilmektedir. Aşağıdaki grafiklerde görüntülenebilen akım, tork, açısal hız ve güç değerleri temsili bir biçimde görülmektedir:



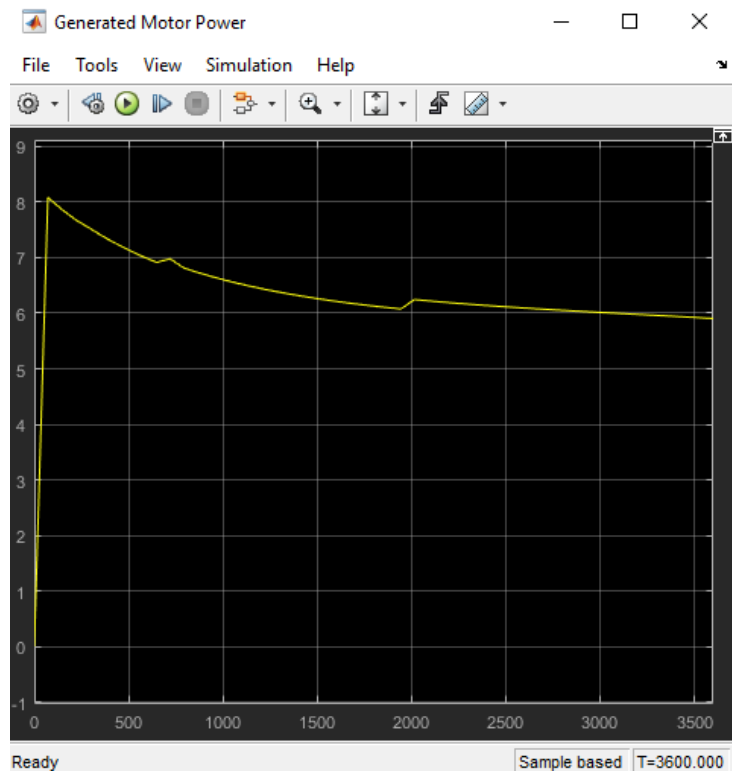
Şekil 4.7. MATLAB / Simulink modellemesinde akımın okunması



Şekil 4.8. MATLAB / Simulink modellemesinde açısal hızın okunması



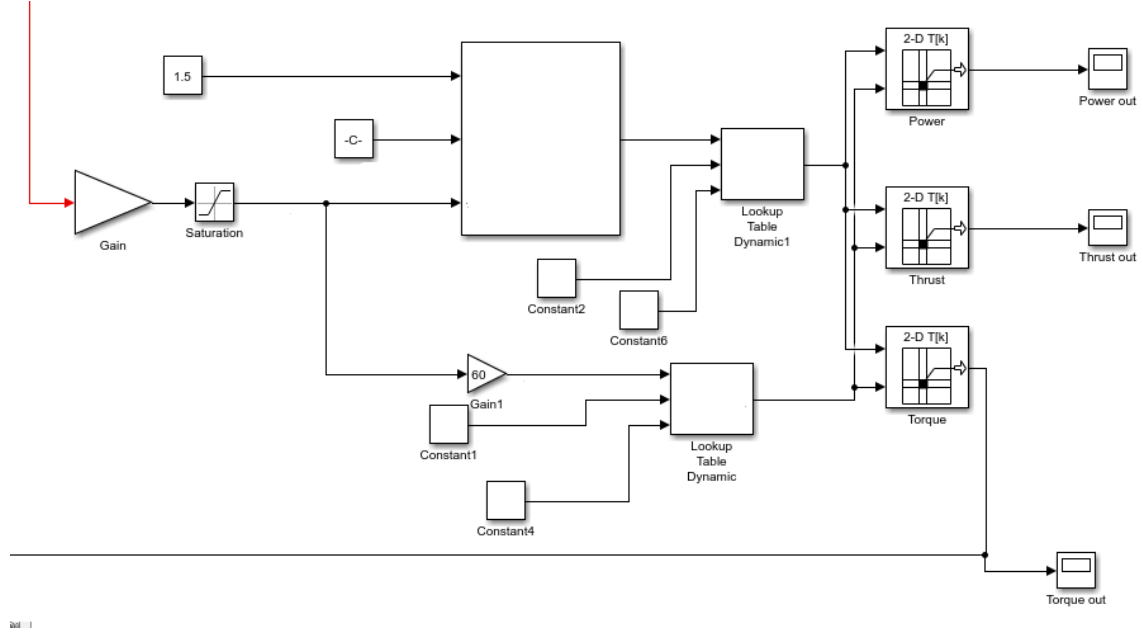
Şekil 4.9. MATLAB / Simulink modellemesinde torkun (momentin) okunması



Şekil 4.10. MATLAB / Simulink modellemesinde motor için gücün okunması

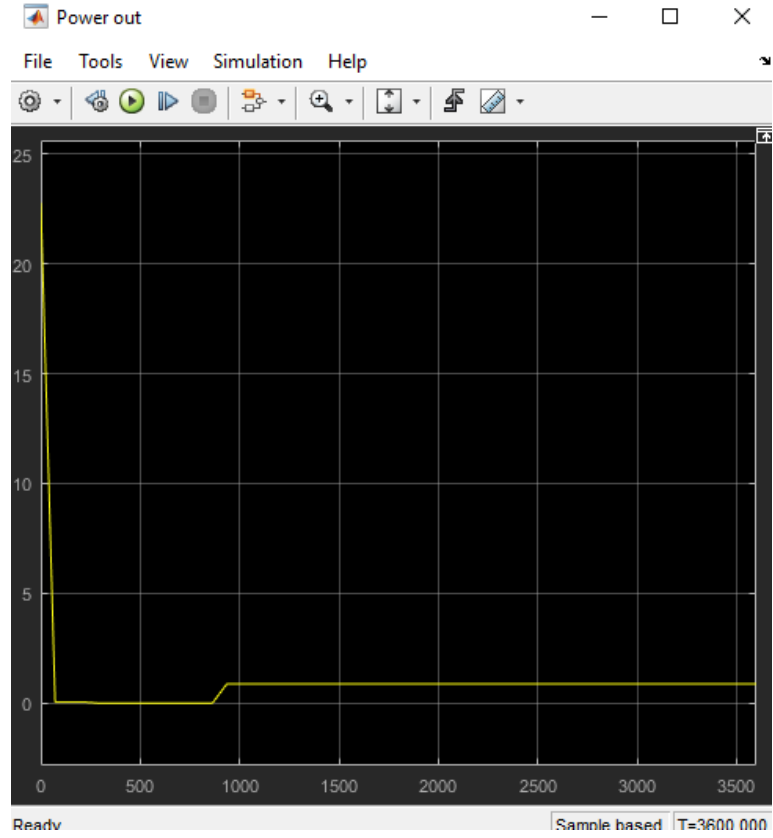
4.2.3. Pervane matematik modelinin MATLAB / Simulink programına aktarılması

Bu tez çalışmasının testlerinde kullanılan ve Bölüm 4 te belirtilen Sabit Hatveli tip pervane için matematik model bağıntıları, MATLAB / Simulink programının esasları çerçevesinde programa aktarılmıştır.

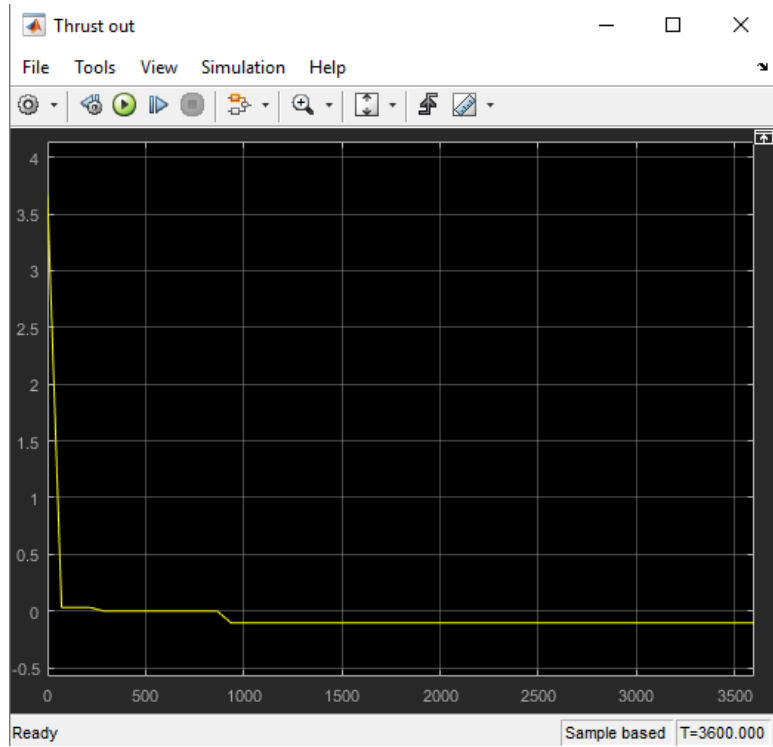


Şekil 4.11. Pervane MATLAB / Simulink modellemesi

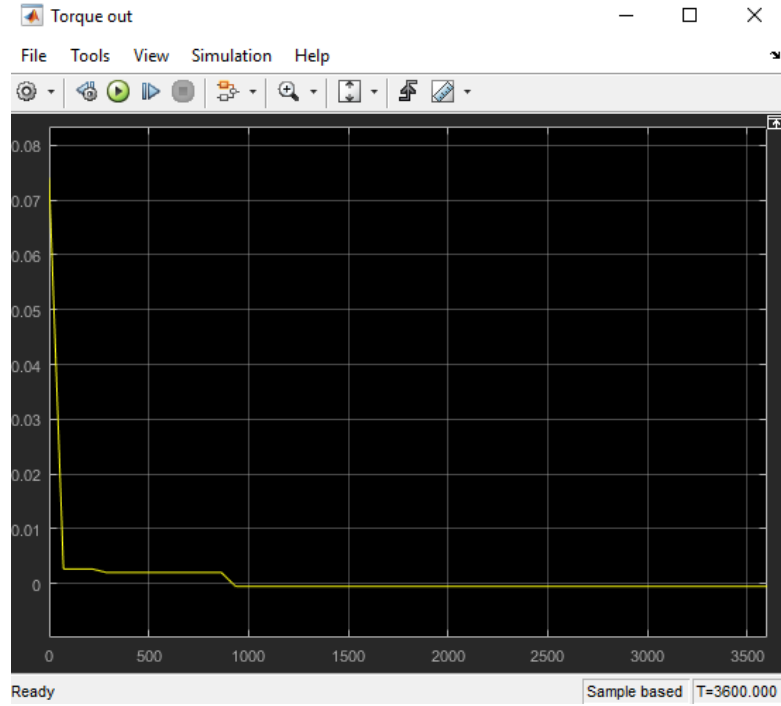
Sabit hatveli pervane Simulink modellemesi sonucunda; pervane sistematığı içinde elde edilen itki değeri (N), güç değeri (W) ve moment (tork) değeri (Nm) görüntülenebilmektedir. Aşağıdaki grafiklerde görüntülenebilen itki, tork ve güç değerleri temsili bir biçimde görülmektedir:



Şekil 4.12. MATLAB / Simulink modellemesinde pervane için gücün okunması



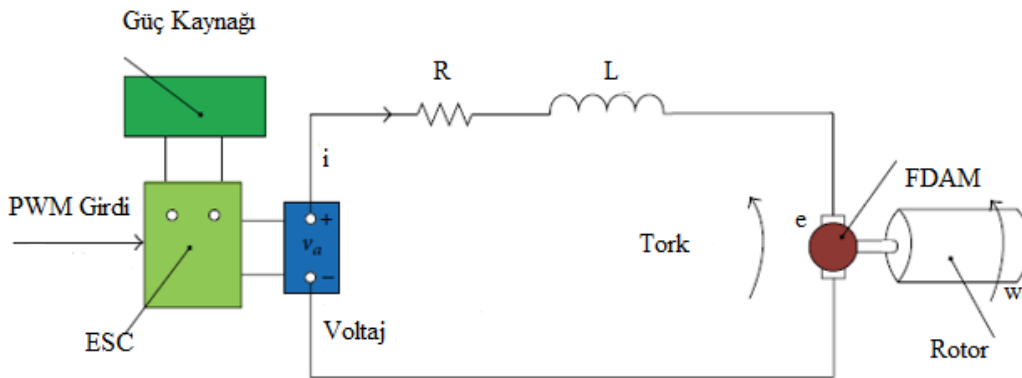
Şekil 4.13. MATLAB / Simulink modellemesinde itkinin okunması



Şekil 4.14. MATLAB / Simulink modellemesinde pervane için torkun (momentin) okunması

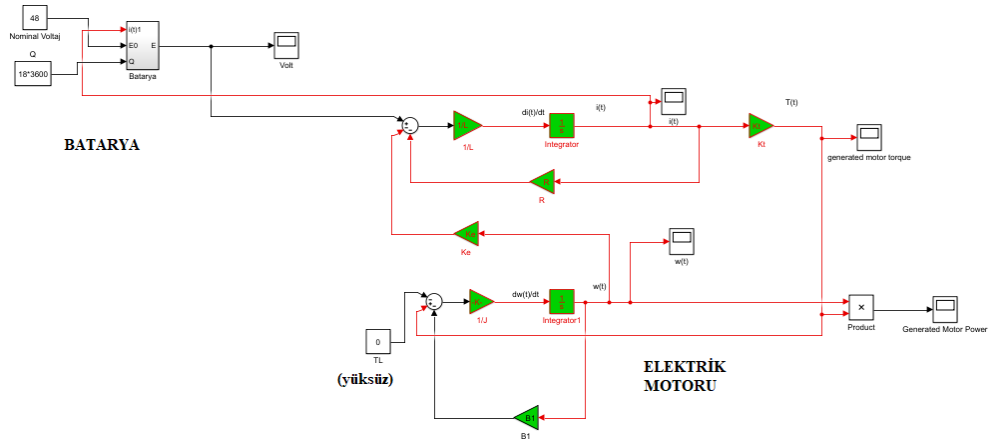
4.3. Sistem Modellemesi

Bu tez çalışması kapsamında matematik modellenmesi, model sağlanması ve deneysel doğrulanması yapılacak sistemin fiziksel modeli Şekil 4.15. deki gibidir. Test sistemi kapsamında kurulması düşünülen deney seti; güç kaynağı olarak bir lityum-iyon batarya, bu bataryaya bağlı ve bataryanın performansının kontrol edileceği bir elektronik hız kontrolcüsü (ESC), bir fırçasız doğru akım elektrik motoru (FDAM) ve bu elektrik motorunun şaftına (miline) bağlı bir sabit hatveli pervane den oluşmaktadır. Fırçasız DA Motorundan pervaneye geçerken aynı mile bağlı olarak hareket edildiğinden dolayı açısal hızın değerinin değişmeyeceği kabul edilmiştir.

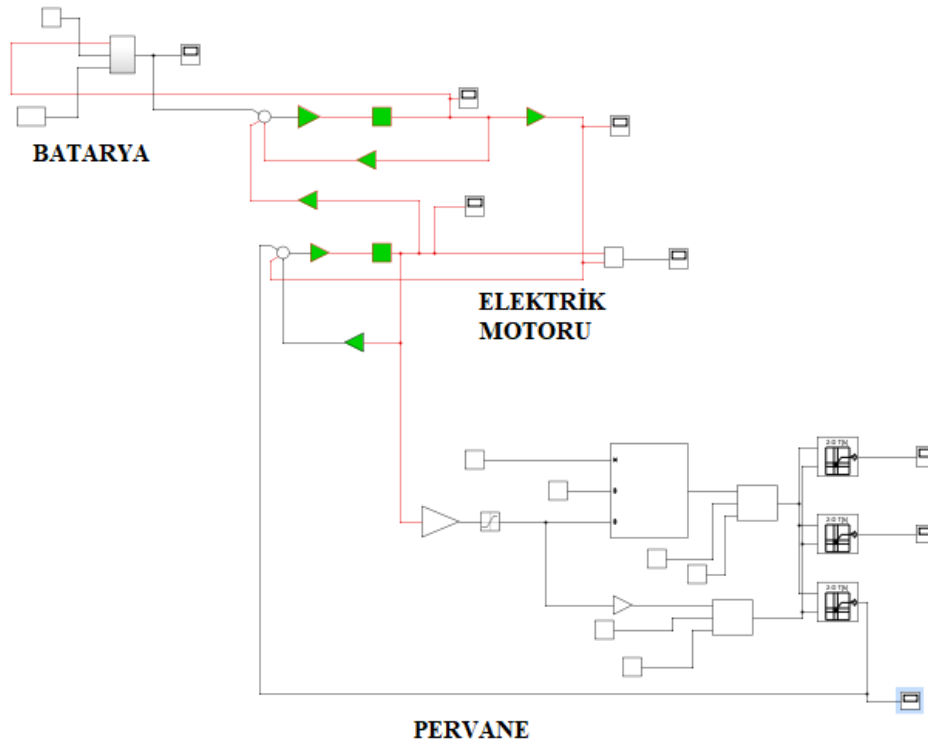


Şekil 4.15. Deney düzeneği sisteminin fiziksel modellemesi (Xiang vd., 2015)

Matematik modelleme büyük ölçüde bu fiziksel modele göre MATLAB / Simulink programına aktarılıp simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simulink programında da Fırçasız DA Motorundan pervaneye geçiş yine aynı mile bağlı olduğu için açısal hız üzerinden yapılmıştır. MATLAB / Simulink modelinde elektronik hız kontrolcüsü (ESC) bulunmamaktadır.



Şekil 4.16. MATLAB / Simulink modellemesinin pervanesiz (yüksüz) hali

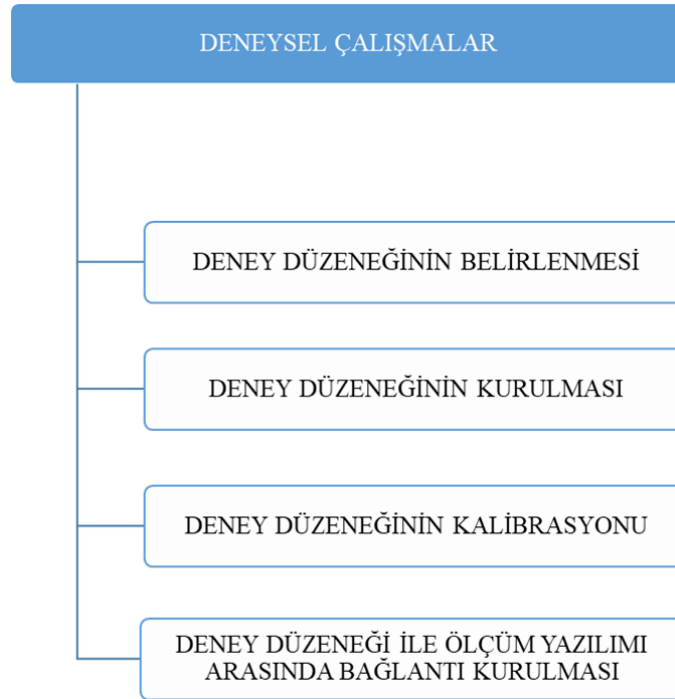


Şekil 4.17. MATLAB / Simulink modellemesinin pervaneli (yükli) hali

5. DENEY DÜZENEGİ VE YÖNTEM

‘Orta Sınıf Bir İnsansız Hava Aracının Elektrikli İtici Sisteminin Matematik Modellemesi ve Deneysel Doğrulanması’ isimli tez çalışması kapsamında; sayısal ve fiziksel model oluşturulduktan sonra bu modellerin deneysel olarak doğrulanması için deney düzeneği kurma safhasına geçilmiştir. Verilerin toplanarak modelin doğrulanması için yapılacak olan testleri gerçekleştirmek amacıyla kurulan deney düzeneği bu kısımda anlatılacaktır.

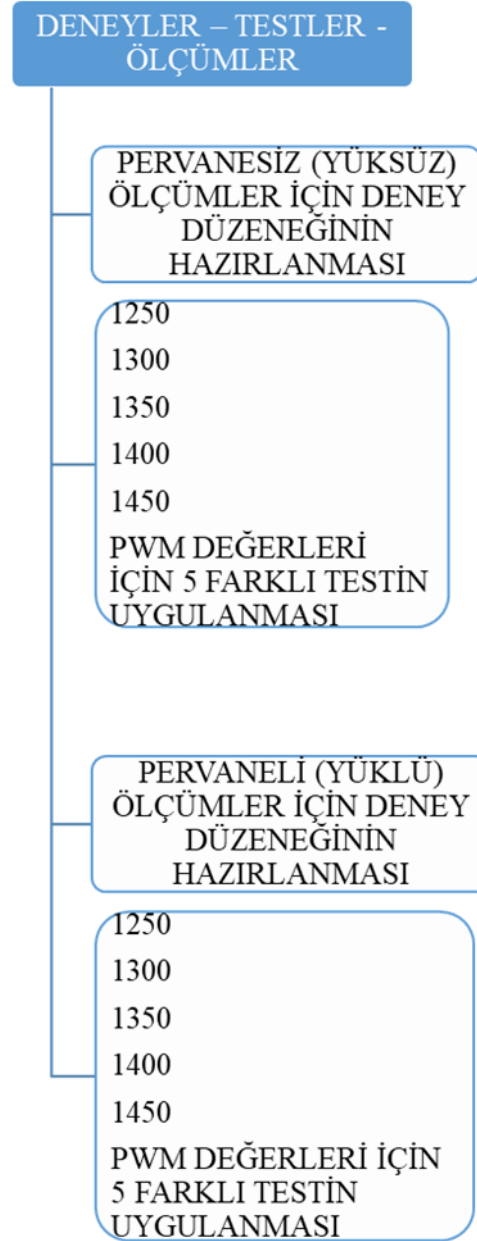
Deney düzeneğinin belirlenmesi, uygun komponentlerin seçilmesi, bunların doğru montaj yapılması, kalibrasyonu önemlidir. Uygun ölçüm enstrümantasyonunun seçilip bağlanması da doğru veri ölçümü açısından son derece kritiktir. Son olarak da yapılan ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarılması için uygun yazılım ile bağlantı kurulması büyük önem taşımaktadır (Samuel ve Lin, 2015).



Şekil 5.1. Deney düzeneği iş akış şeması

Deney düzeneği kurulduktan sonra yapılacak ölçüm ve testler iki grupta toplanmaktadır. Birincisi pervane takılı olmadığı durumda yani yüksüz yapılacak testler, ikincisi de pervanenin takılı olduğu durumda yani yüklü olarak yapılacak olan testlerdir. Her iki grup test de (1250-1300-1350-1400-1450) olmak üzere 5 farklı PWM değerine

göre yapılmıştır. Seçilen yazılım ile ilişkili olarak başlangıç PWM değeri 1500 dür. Deney düzeneğinin kapasitesi sebebiyle kullanılacak olan PWM değerleri sınırları 1250-1450 arası olarak seçilmiştir.



Şekil 5.2. Deney düzeneği testler akış şeması

Deney düzeneğinin en önemli komponentlerinden birisi, sistemin gövdesi – iskeleti de sayılabilecek olan temel düzenektir. Tüm komponentler bu gövdenin üzerine bağlanmıştır. Ayrıca ölçüm enstrümantasyonu, elektronik kart okuyucu ve kalibrasyon

aparatlarının bağlanacağı yerler de gövdede bulunmaktadır. Tüm bağlantılar ve montaj yapıldıktan sonra gövde, istenilen yere istenilen pozisyonda sabitlenebilir. Portatif montaj özelliğine sahip olması pozisyon değişimini kolay yapabilmesini sağlar.



Şekil 5.3. Deney düzeneği kurulumu tamamlanmış hali

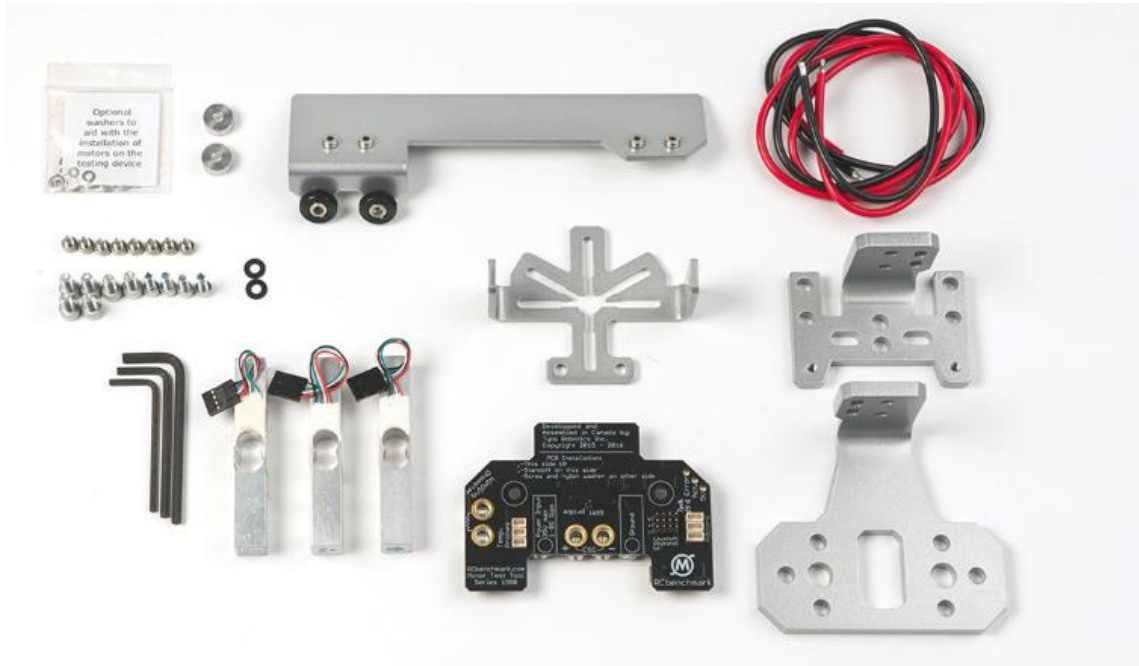
Gövdenin özellikleri, kapasitesi ve yetenekleri şu şekilde sıralanabilir:

- Batarya kapasite ve performans testleri yapılabilir
- Motor karakteristik testlerinin tamamı yapılabilir
- Pervane karakteristik testlerinin tamamı yapılabilir
- USB ile bilgisayar bağlantısı sağlanabilir
- ESC elle (manuel) kontrolü sağlanabilir
- Ek olarak 3 tane servo giriş (port) mevcuttur
- 3 tane I2C bağlantı girişi mevcuttur
- 3 tane sıcaklık ölçüm girişi mevcuttur (isteğe bağlı kullanılabilir)
- Çıktılar CSV uzantılı olarak kaydedilebilir
- Test dataları otomatik olarak kaydedilebilir
- Güçlü komut dizini oluşturma yeteneğine sahiptir

- Kalibrasyon donanımı mevcuttur
- Güvenlik akış kesicileri / şalteri / sviçi mevcuttur.

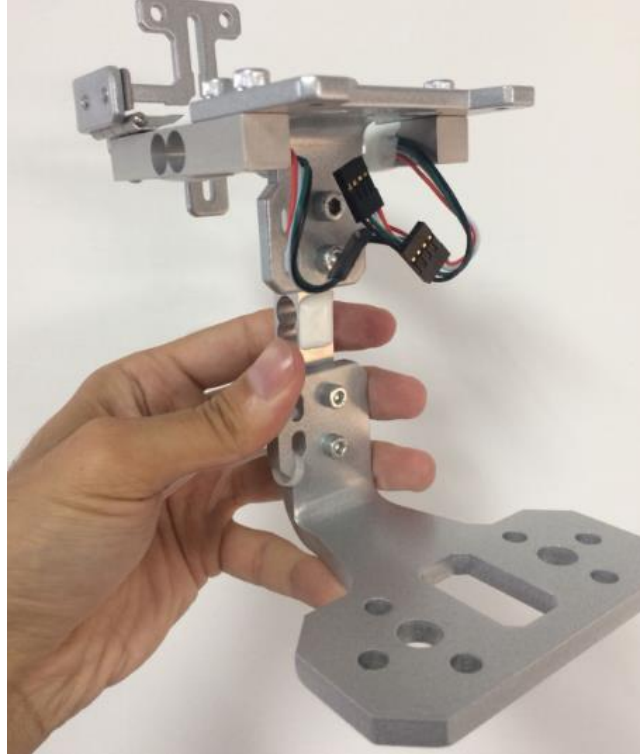
Tablo 5.1. Gövde ölçüm kapasitesi

ÖLÇÜM YAPILABİLECEK PARAMETRE	ÖLÇÜM KAPASİTESİ
GERİLİM	0-35 V
AKIM	40 A (maksimum)
GÜÇ	0-1400 W
İTKİ	(+/-)5 kg
MOTOR HIZI	100.000 RPM
MOMENT (TORK)	(+/-) 1,5 Nm
DİRENÇ	0,003-240 ohm
İVME	-



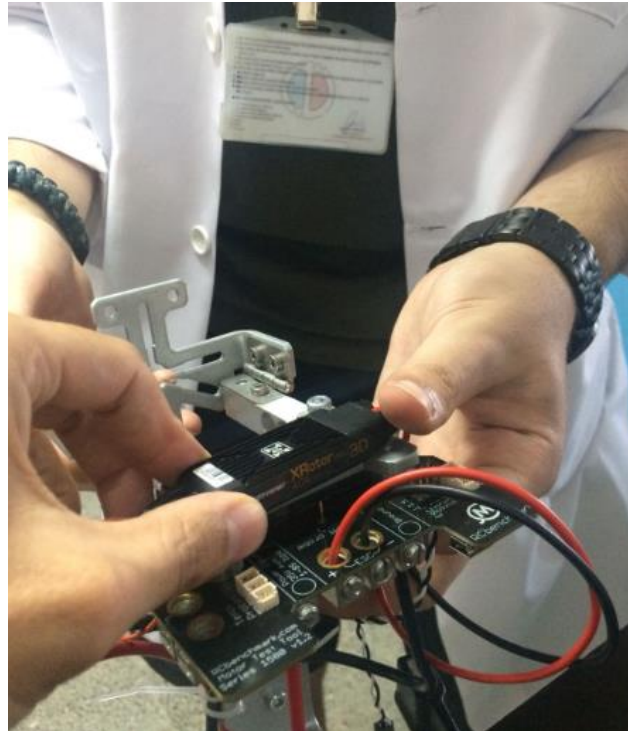
Şekil 5.4. Deney düzeneği monte edilmemiş hali ile komponentler

Yukarıda gövde / iskelet için resmi verilen tüm parçalar sırası ile dikkatlice monte edilmiştir. Temel mekanik düzenek parçaları, baskılı devre kartı, yük hücreleri ve bağlantı kabloları sırası ile montaj yapılmıştır.



Şekil 5.5. Deney düzeneği monte edilmiş hali perspektif görünüş

Daha sonra oluşan gövdenin üzerine elektronik hız kontrolcüsü (ESC) monte edilmiştir.



Şekil 5.6. Deney düzeneği ESC montajı

Sonrasında sisteme batarya, elektrik motoru ve pervanenin montajı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Deney düzeneği kullanılan batarya



Şekil 5.8. Deney düzeneği kullanılan fırçasız DA motoru



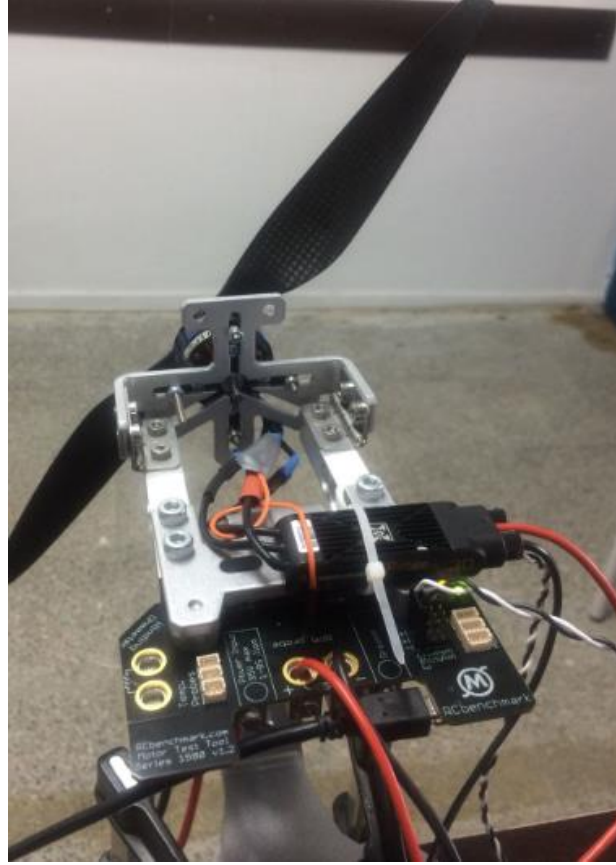
Şekil 5.9. Deney düzeneği kullanılan pervane



Şekil 5.10. *Deney düzeneği batarya monte edilmiş hali*



Şekil 5.11. *Deney düzeneği fırçasız DA motorunun monte edilmiş hali*



Şekil 5.12. Deney düzeneği fırçasız pervanenin monte edilmiş hali



Şekil 5.13. Deney düzeneği batarya şarj cihazı

Bu montajlar tamamlandıktan sonra cihazın kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon kılavuzuna uygun bir şekilde dikey ve yatay sabitlemeler yapıp, gerekli ağırlıklar uygulanıp yazılım üzerinden kalibrasyon tamamlanmıştır.



Şekil 5.14. Deney düzeneği dikey kalibrasyonu



Şekil 5.15. Deney düzeneği yatay kalibrasyonu

Deney düzeneğine web sitesinden indirilen yazılım yüklenmiş, gerekli ayarlar yapılmıştır. Yazılım aracılığıyla tüm cihazlar ve komponentler cihaza tanıtılmış, deney koşullarının seçimleri sistemden yapılmış, güvenli testler için kullanılacak ve ölçülecek tüm değerler için sınırlamalar seçilmiş ve deney düzeneği kullanılabilir hale getirilmiştir.



Şekil 5.16. Deney düzeneğinin kullanıma hazır hali

6. TESTLER VE ÖLÇÜMLER

6.1. Pervanesiz Durumda (Yüksüz) Yapılan Test ve Ölçümler

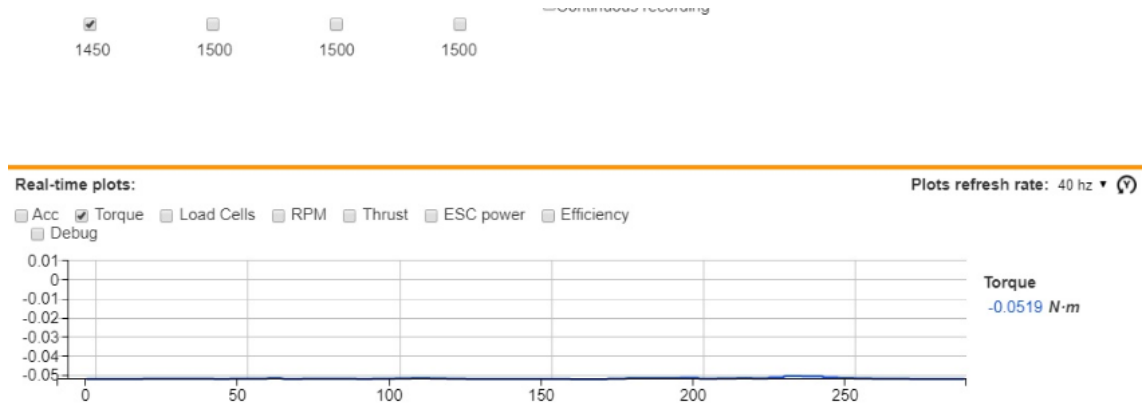
Daha önce de bahsedildiği gibi deney düzeneğinin kurulumu gerçekleştirildikten sonra yapılacak ölçüm ve testler iki grupta toplanmaktadır. Birinci grup testler pervane takılı olmadığı durumda yani yüksüz yapılacak testlerdir. Bu grup testler (1250-1300-1350-1400-1450) olmak üzere 5 farklı PWM değerine göre yapılmıştır. Seçilen yazılım ile ilişkili olmak kaydıyla başlangıç PWM değeri 1500 dür. 1500 değerinden 1000 değerine doğru gidildikçe tüm performans değerleri artmaktadır. Tekrar belirtmekle birlikte deney düzeneğinin kapasitesi sebebiyle kullanılacak olan PWM değerleri sınırları 1250-1450 arası olarak seçilmiştir.

6.1.1. 1450 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1450 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



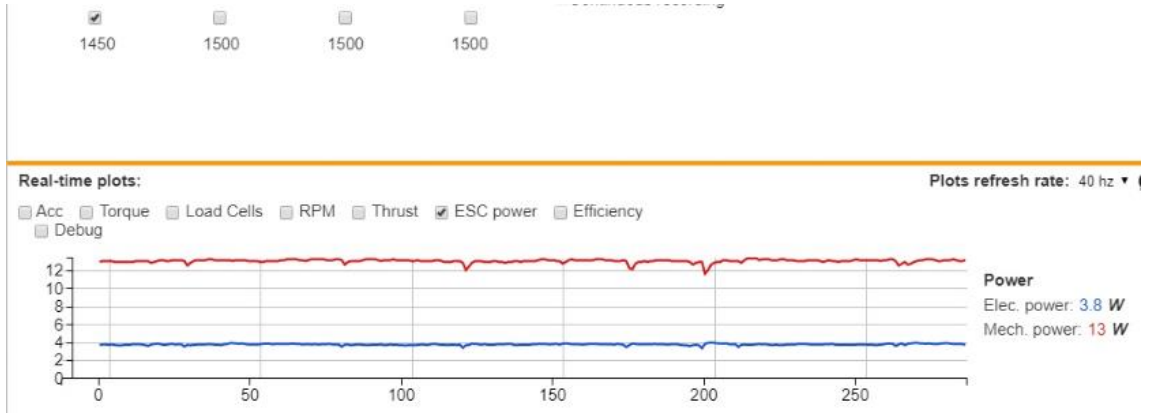
Şekil 6.1. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için ivme ve titreşim



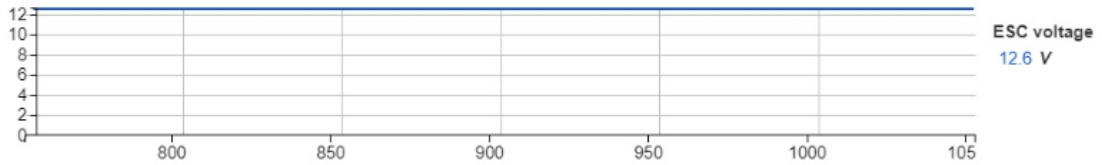
Şekil 6.2. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için tork (moment)



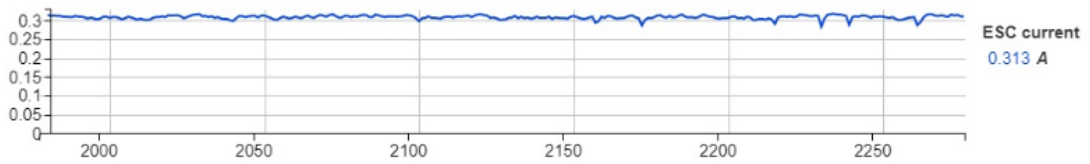
Şekil 6.3. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için açısal hız



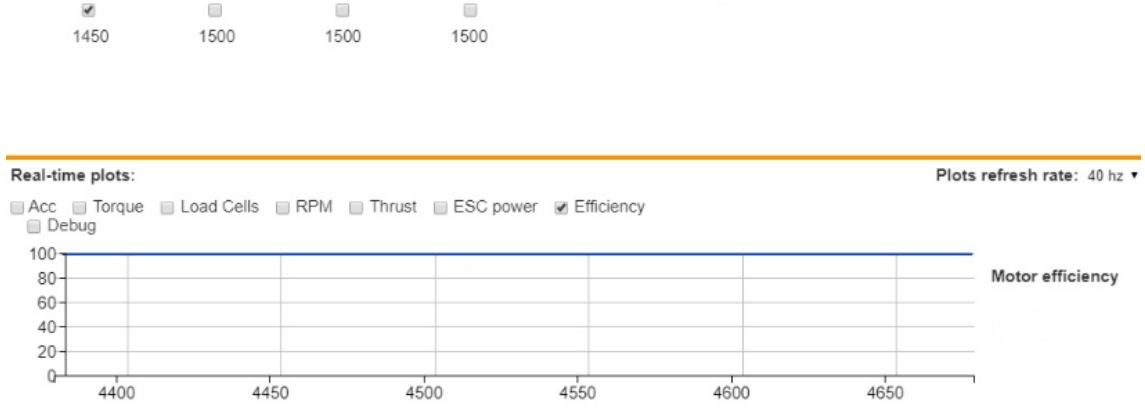
Şekil 6.4. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için güç



Şekil 6.5. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.6. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için akım



Şekil 6.7. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için motor verimi

Tablo 6.1. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1450	12,62	0,29	3	0,051	0,2	252
2	1450	12,61	0,31	4	0,052	0,2	253
3	1450	12,61	0,31	4	0,052	0,2	249
4	1450	12,61	0,31	4	0,052	0,2	254
5	1450	12,61	0,32	4	0,051	0,2	256
6	1450	12,60	0,31	4	0,051	0,2	255
7	1450	12,60	0,31	4	0,051	0,2	255
8	1450	12,60	0,31	4	0,051	0,2	254
9	1450	12,60	0,31	4	0,051	0,2	253
10	1450	12,60	0,30	4	0,051	0,2	254
	Toplam	126,06	3,08	39	0,513	2	2535
	Ortalama	12,606	0,308	3,9	0,0513	0,2	253,5

Tablo 6.2. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için ivme değerleri

İVME (g)		
X	Y	Z
-0,174	0,066	-0,936

Tablo 6.3. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için verim değerleri

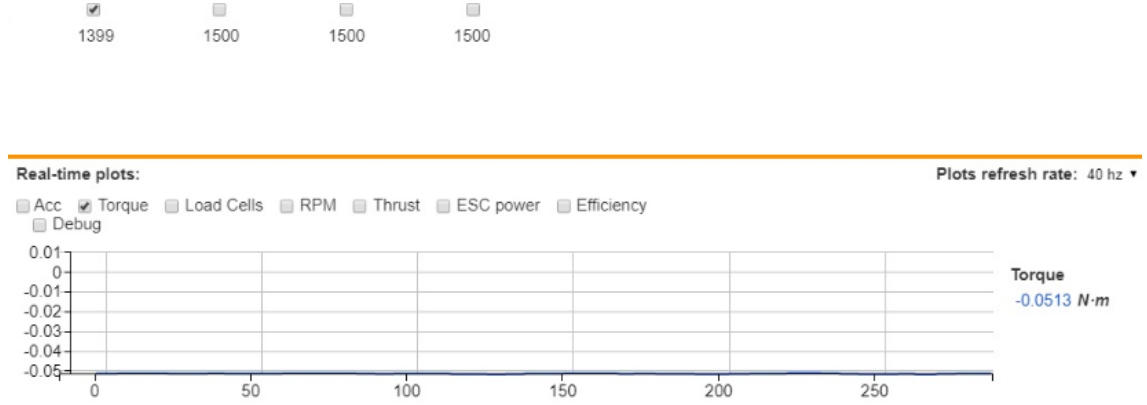
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
96%	0,310	0,001

6.1.2. 1400 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

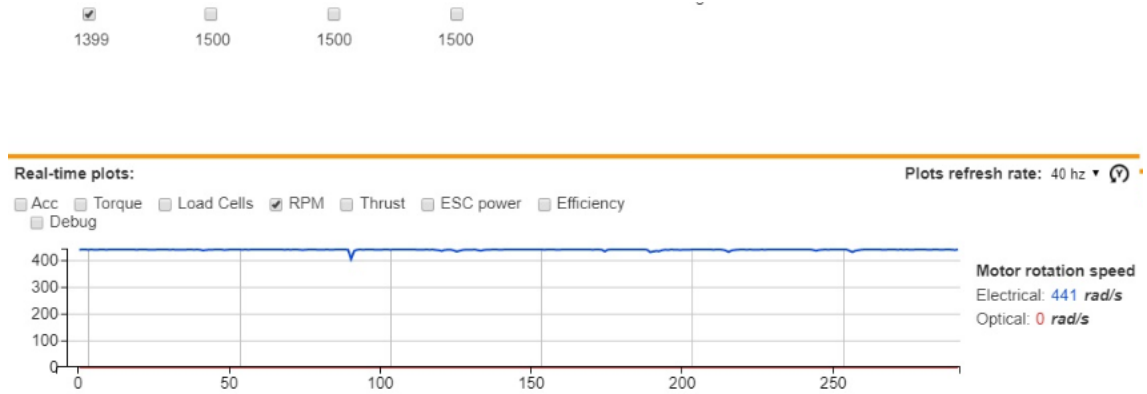
1400 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



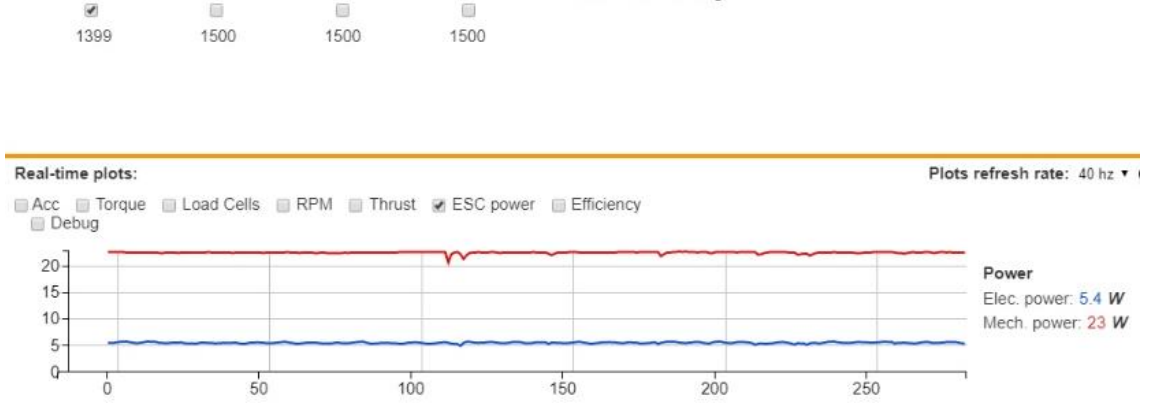
Şekil 6.8. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için ivme ve titreşim



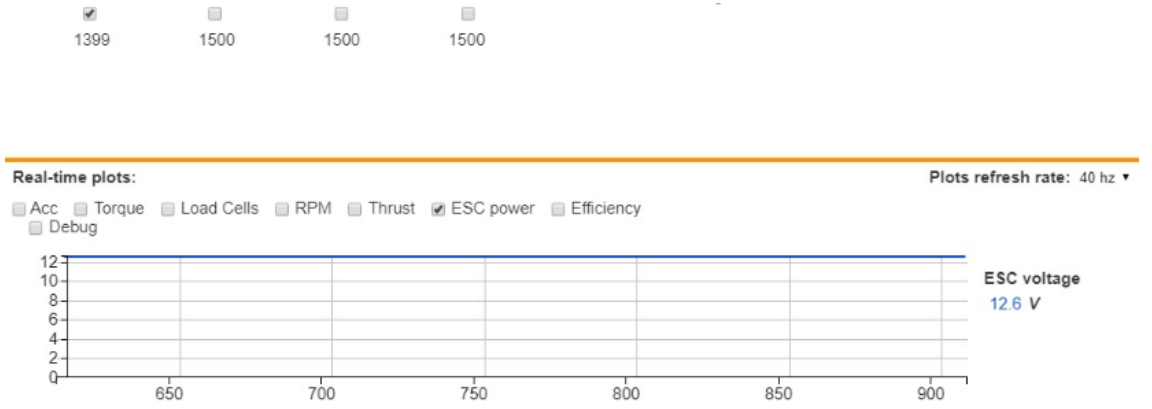
Şekil 6.9. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için tork (moment)



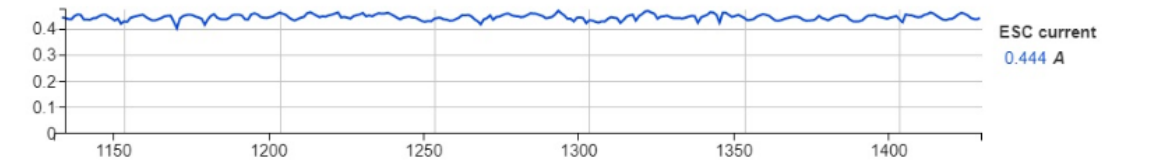
Şekil 6.10. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için açısal hız



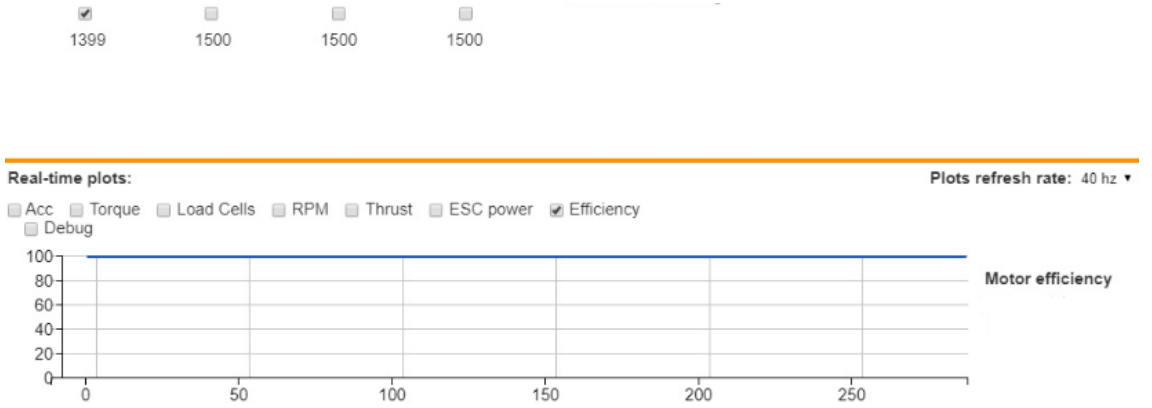
Şekil 6.11. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için güç



Şekil 6.12. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.13. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için akım



Şekil 6.14. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için motor verimi

Tablo 6.4. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1400	12,56	0,44	5	0,051	0,3	440
2	1400	12,58	0,45	6	0,051	0,3	441
3	1400	12,58	0,42	5	0,051	0,3	441
4	1400	12,57	0,45	6	0,051	0,3	441
5	1400	12,57	0,46	6	0,051	0,3	442
6	1400	12,57	0,46	6	0,051	0,3	441
7	1400	12,57	0,45	6	0,051	0,3	440
8	1400	12,57	0,44	5	0,051	0,3	441
9	1400	12,57	0,46	6	0,051	0,3	441
10	1400	12,56	0,45	6	0,051	0,3	441
	Toplam	125,7	4,48	57	0,510	3	4409
	Ortalama	12,57	0,448	5,7	0,051	0,3	440,9

Tablo 6.5. Pervanesiz durumda 1400 PWM değeri için ivme değerleri

İVME (g)		
X	Y	Z
0,162	-0,043	-0,979

Tablo 6.6. Pervanesiz durumda 1450 PWM değeri için verim değerleri

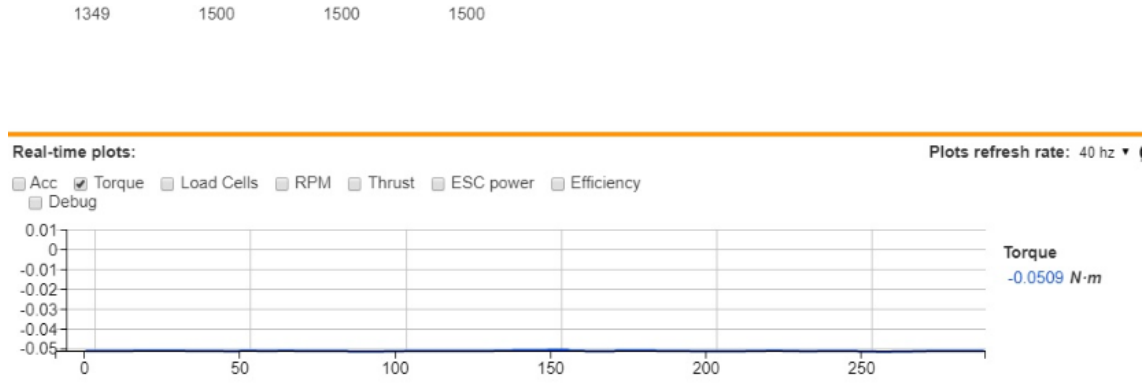
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
97%	0,168	0,674

6.1.3. 1350 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1350 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



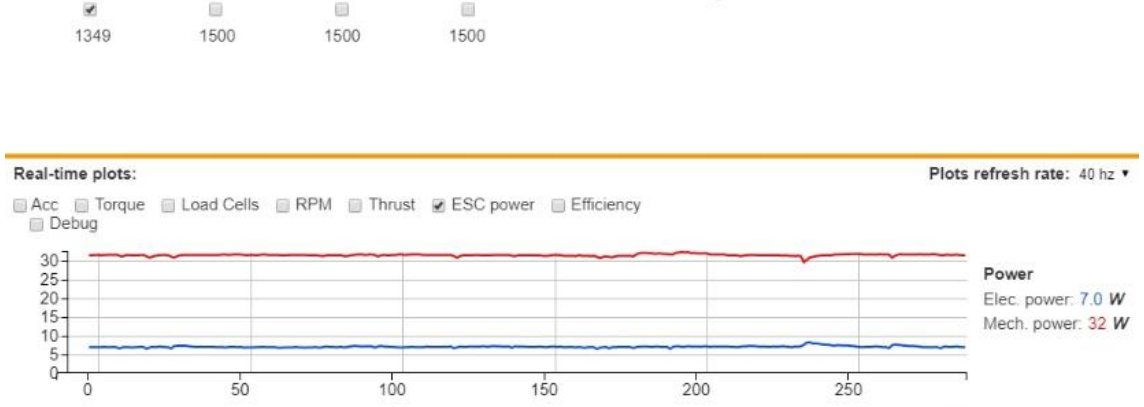
Şekil 6.15. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için ivme ve titreşim



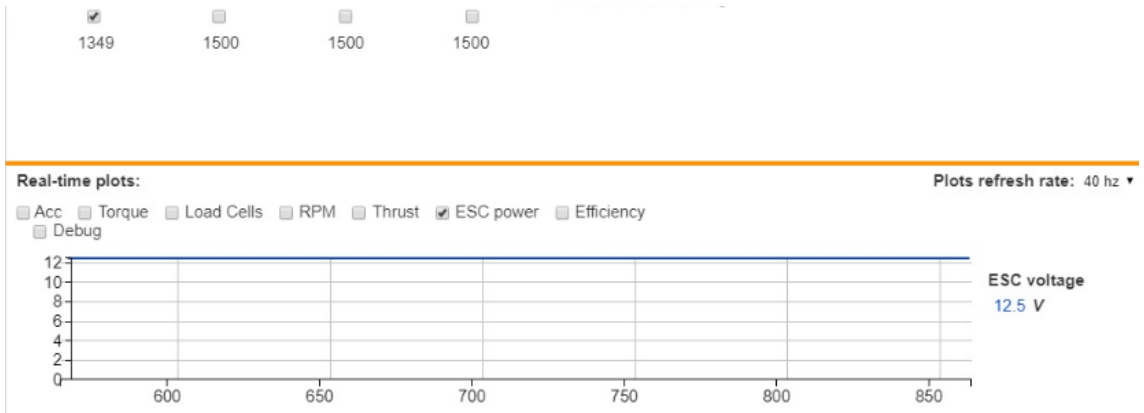
Şekil 6.16. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için tork (moment)



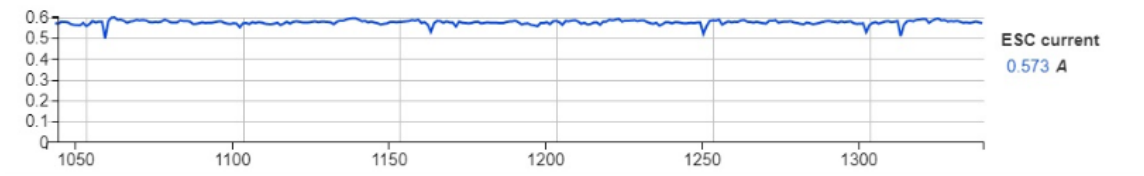
Şekil 6.17. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için açısal hız



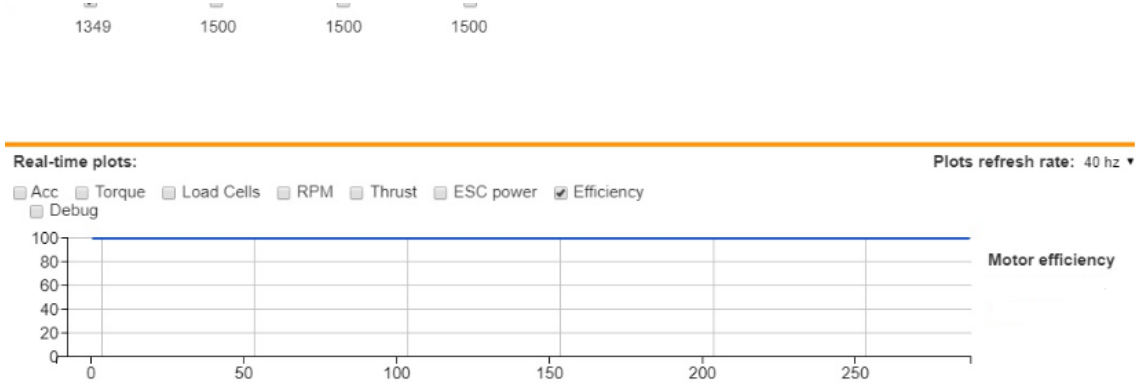
Şekil 6.18. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için güç



Şekil 6.19. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.20. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için akım



Şekil 6.21. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için motor verimi

Tablo 6.7. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1350	12,55	0,58	7	0,051	0,4	620
2	1350	12,54	0,59	7	0,051	0,4	623
3	1350	12,54	0,58	7	0,051	0,4	623
4	1350	12,54	0,58	7	0,051	0,4	622
5	1350	12,53	0,59	7	0,051	0,4	623
6	1350	12,53	0,58	7	0,051	0,4	622
7	1350	12,53	0,58	7	0,051	0,4	618
8	1350	12,52	0,58	7	0,051	0,4	624
9	1350	12,52	0,57	7	0,051	0,4	622
10	1350	12,52	0,57	7	0,051	0,4	624
	Toplam	125,32	5,8	70	0,510	4	6221
	Ortalama	12,532	0,58	7	0,051	0,4	622,1

Tablo 6.8. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için ivme değerleri

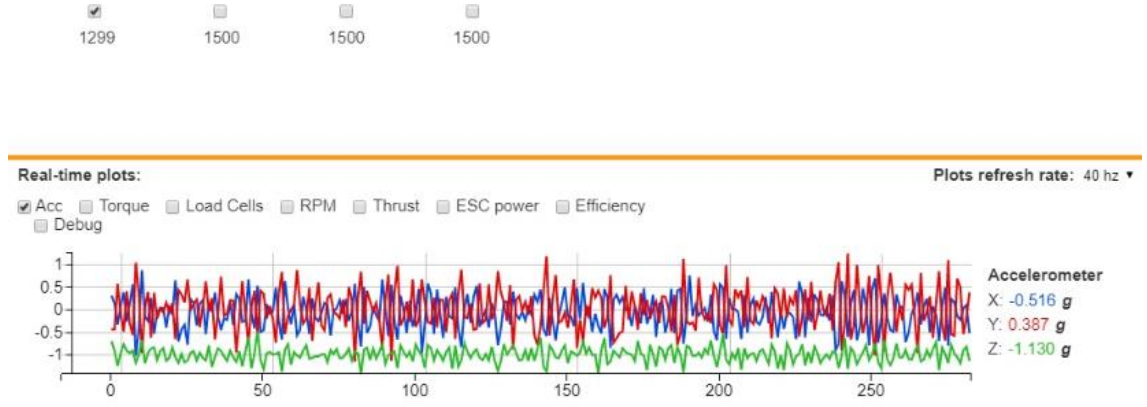
İVME (g)		
X	Y	Z
-0,188	0,238	-0,920

Tablo 6.9. Pervanesiz durumda 1350 PWM değeri için verim değerleri

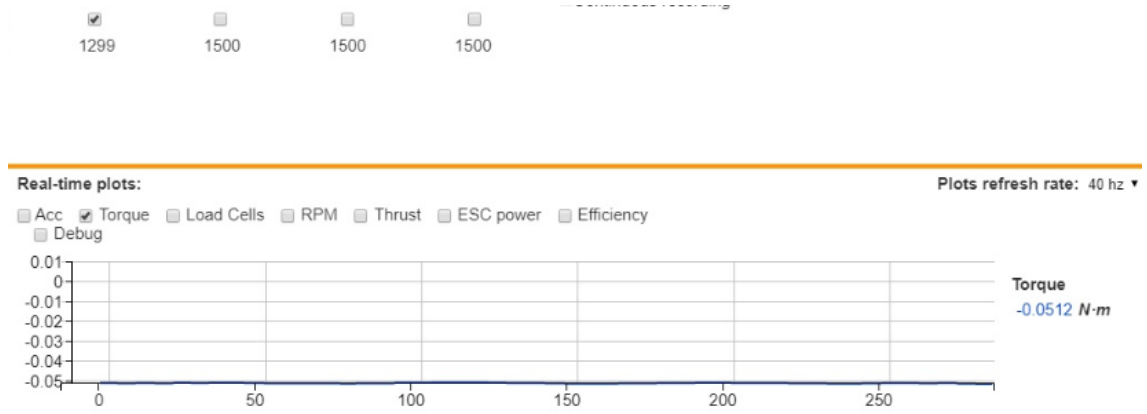
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
98%	0,119	0,548

6.1.4. 1300 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1300 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



Şekil 6.22. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için ivme



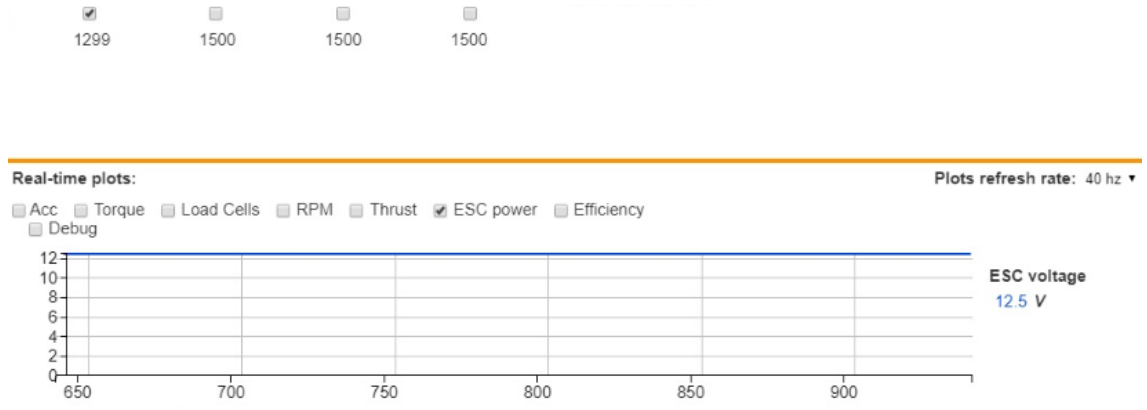
Şekil 6.23. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için tork (moment)



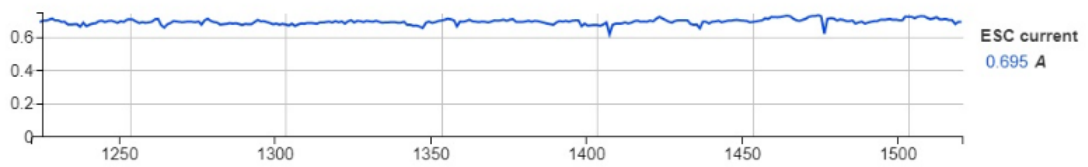
Şekil 6.24. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için açısal hız



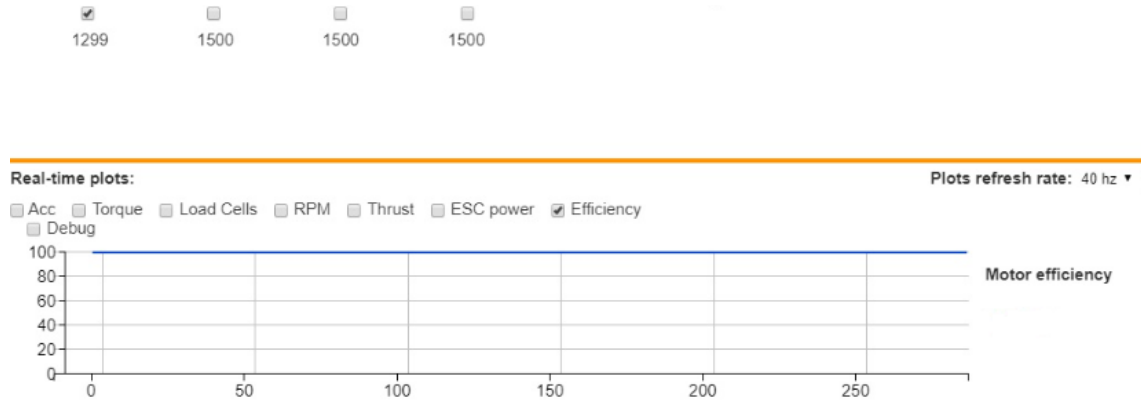
Şekil 6.25. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için güç



Şekil 6.26. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.27. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için akım



Şekil 6.28. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için motor verimi

Tablo 6.10. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1300	12,51	0,71	9	0,051	0,5	805
2	1300	12,50	0,69	9	0,051	0,5	804
3	1300	12,50	0,68	8	0,051	0,5	798
4	1300	12,50	0,69	8	0,051	0,5	804
5	1300	12,50	0,71	9	0,051	0,5	804
6	1300	12,49	0,69	8	0,051	0,6	803
7	1300	12,49	0,69	8	0,051	0,5	804
8	1300	12,49	0,71	8	0,051	0,5	804
9	1300	12,49	0,69	9	0,051	0,6	804
10	1300	12,48	0,70	8	0,051	0,5	802
	Toplam	124,95	6,96	84	0,510	5,2	8032
	Ortalama	12,495	0,696	8,4	0,051	0,52	803,2

Tablo 6.11. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için ivme değerleri

İVME (g)		
X	Y	Z
-0,516	0,387	-1,130

Tablo 6.12. Pervanesiz durumda 1300 PWM değeri için verim değerleri

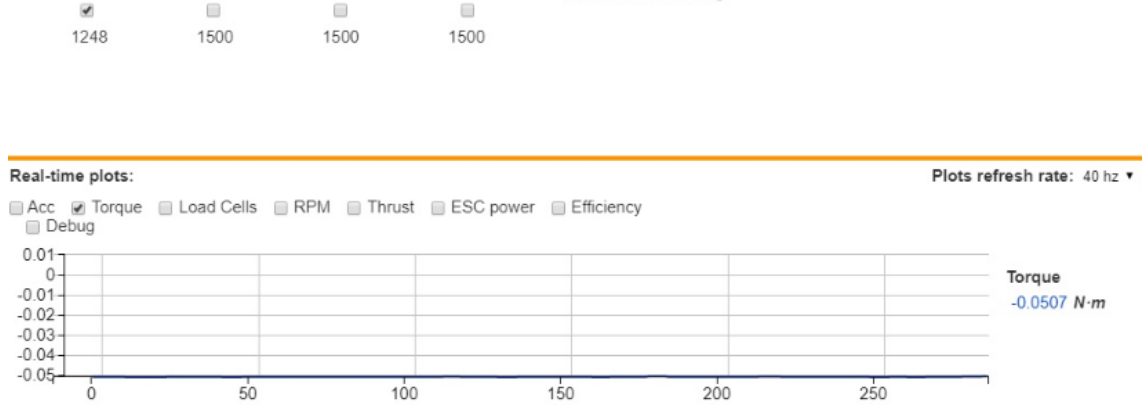
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
98%	0,0921	0,447

6.1.5. 1250 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1250 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



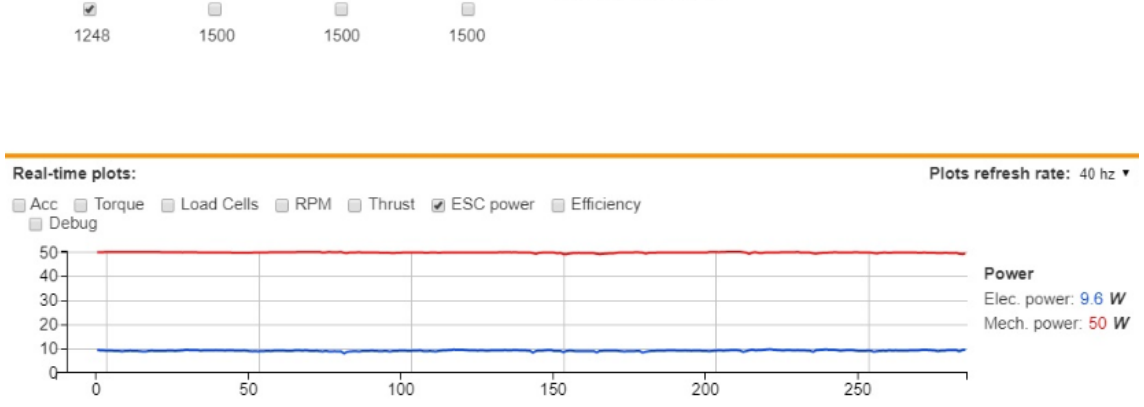
Şekil 6.29. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için ivme ve titreşim



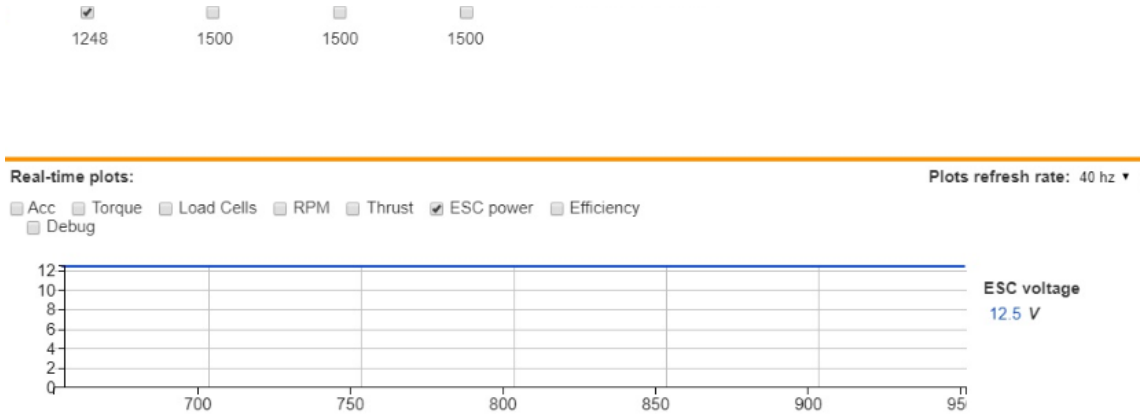
Şekil 6.30. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için tork (moment)



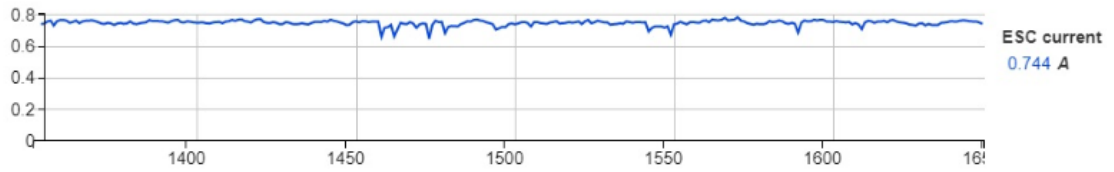
Şekil 6.31. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için açısal hız



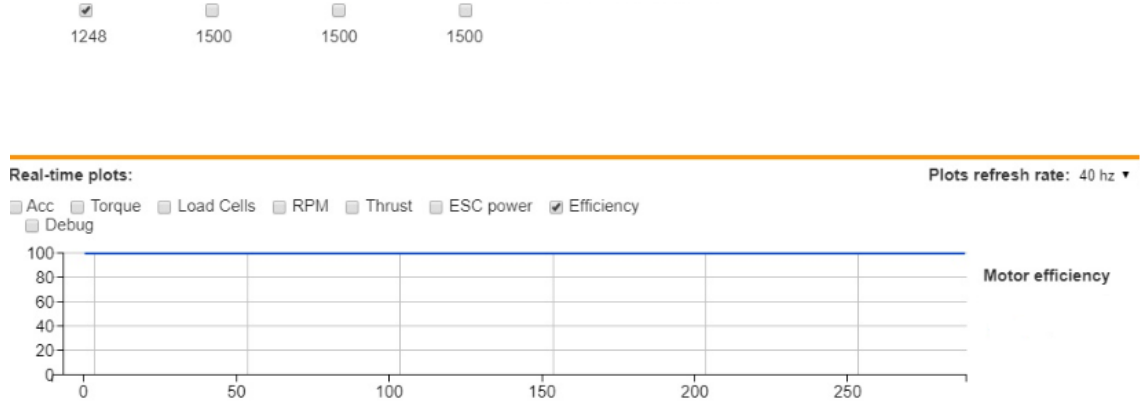
Şekil 6.32. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için güç



Şekil 6.33. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.34. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için akım



Şekil 6.35. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için motor verimi

Tablo 6.13. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1250	12,47	0,78	9	0,051	0,7	985
2	1250	12,47	0,71	9	0,051	0,7	981
3	1250	12,46	0,76	9	0,051	0,7	985
4	1250	12,46	0,77	9	0,051	0,7	984
5	1250	12,46	0,66	9	0,051	0,7	979
6	1250	12,46	0,78	9	0,051	0,7	981
7	1250	12,45	0,75	10	0,051	0,8	984
8	1250	12,45	0,76	9	0,051	0,7	983
9	1250	12,45	0,76	9	0,051	0,7	979
10	1250	12,45	0,77	10	0,051	0,7	984
	Toplam	124,58	7,5	92	0,510	7,1	9825
	Ortalama	12,458	0,75	9,2	0,051	0,71	982,5

Tablo 6.14. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için ivme değerleri

İVME (g)		
X	Y	Z
0,174	0,230	-0,971

Tablo 6.15. Pervanesiz durumda 1250 PWM değeri için verim değerleri

MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
98%	0,0764	0,417

6.2. Pervaneli Durumda (Yüklü) Yapılan Test ve Ölçümler

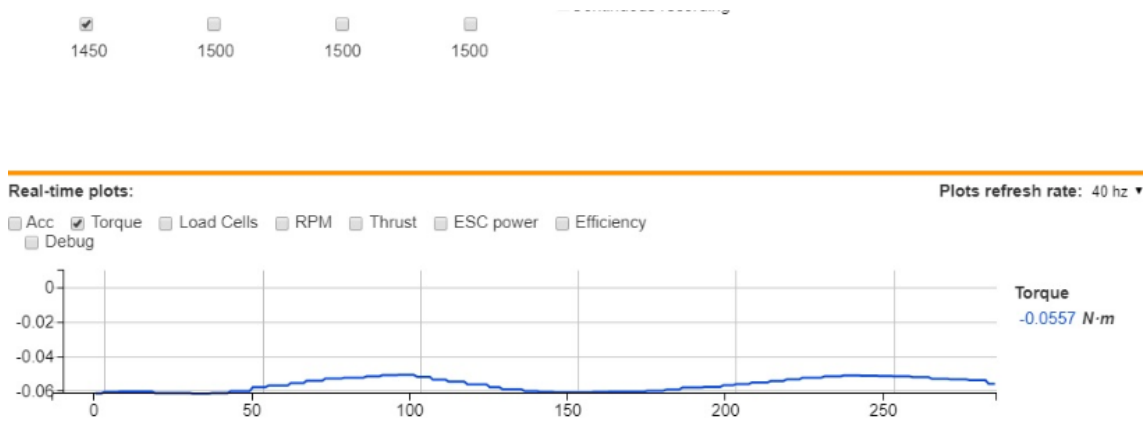
Bu grup testler de yine (1250-1300-1350-1400-1450) olmak üzere 5 farklı PWM değerine göre yapılmıştır. Seçilen yazılım ile ilişkili olmak kaydıyla başlangıç PWM değeri 1500 dür. Tekrar belirtmekle birlikte deney düzeneğinin kapasitesi sebebiyle kullanılacak olan PWM değerleri sınırları 1250-1450 arası olarak seçilmiştir.

6.2.1. 1450 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

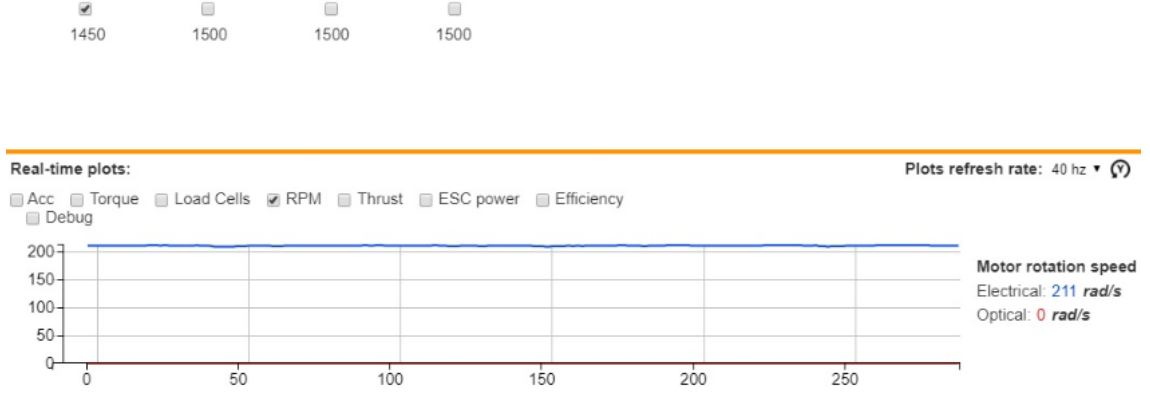
1450 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



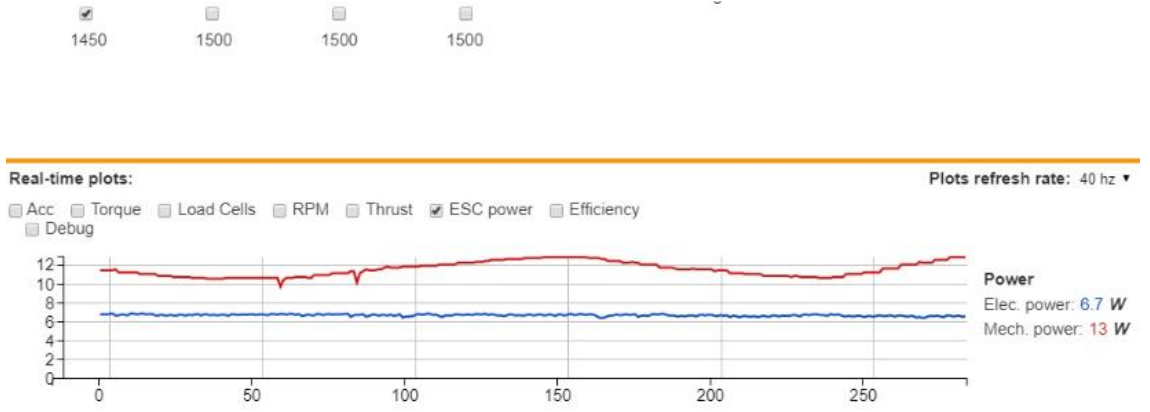
Şekil 6.36. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için ivme ve titreşim



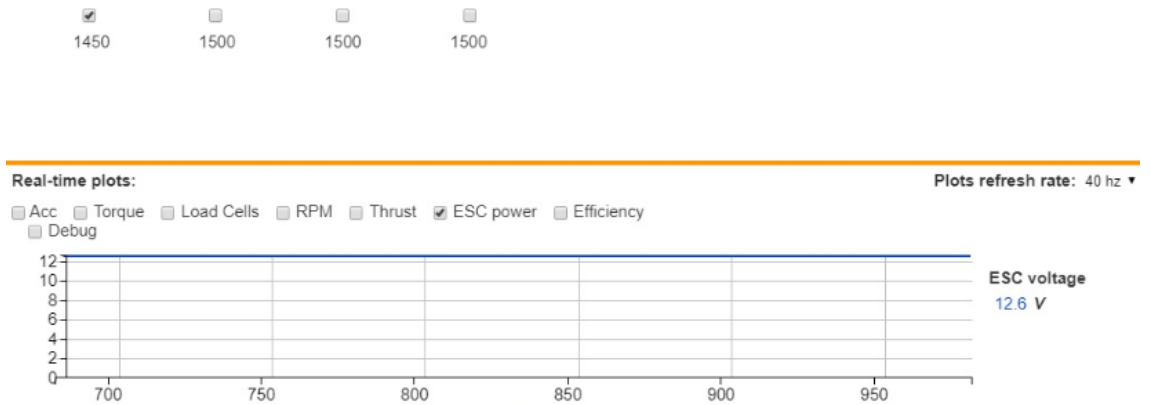
Şekil 6.37. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için tork (moment)



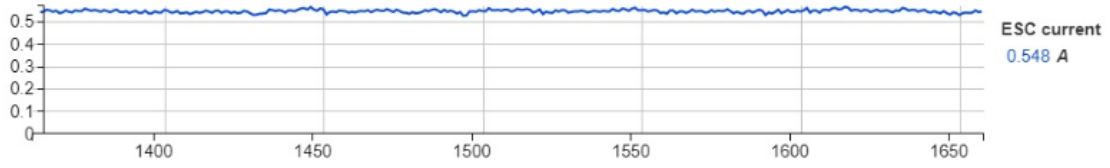
Şekil 6.38. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için açısal hız



Şekil 6.39. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için güç



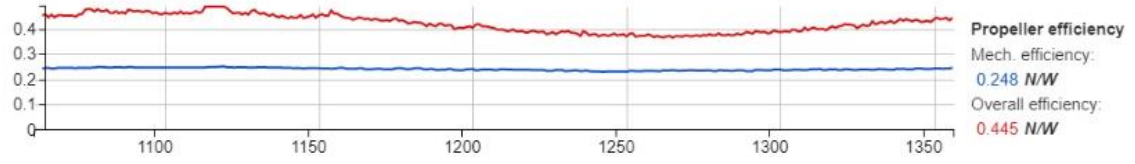
Şekil 6.40. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.41. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için akım



Şekil 6.42. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için motor verimi



Şekil 6.43. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için pervane verimi

Tablo 6.16. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1450	12,62	0,54	7	0,143	0,052	0,4	212
2	1450	12,61	0,56	7	0,452	0,056	0,4	209
3	1450	12,60	0,55	7	0,508	0,054	0,4	211
4	1450	12,60	0,54	7	0,571	0,053	0,4	211
5	1450	12,60	0,56	7	0,525	0,061	0,4	211
6	1450	12,59	0,54	7	0,547	0,061	0,4	212
7	1450	12,59	0,56	7	0,761	0,059	0,4	211
8	1450	12,59	0,54	7	0,619	0,061	0,4	211
9	1450	12,58	0,56	7	0,704	0,057	0,4	210
10	1450	12,58	0,55	7	0,715	0,058	0,4	210
	Toplam	125,96	5,50	70	5,545	0,572	4	2108
	Ortalama	12,596	0,55	7	0,5545	0,0572	0,4	210,8

Tablo 6.17. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için ivme değerleri

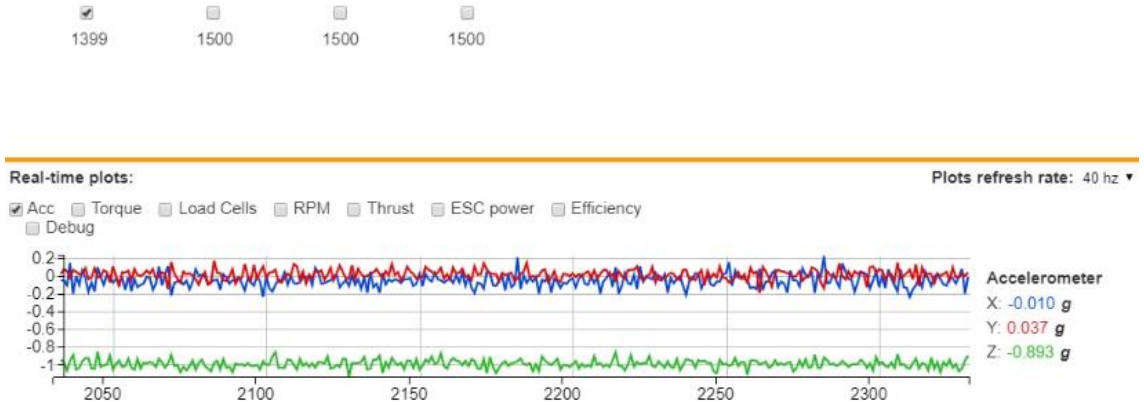
İVME (g)		
X	Y	Z
-0,074	-0,033	-0,975

Tablo 6.18. Pervaneli durumda 1450 PWM değeri için verim değerleri

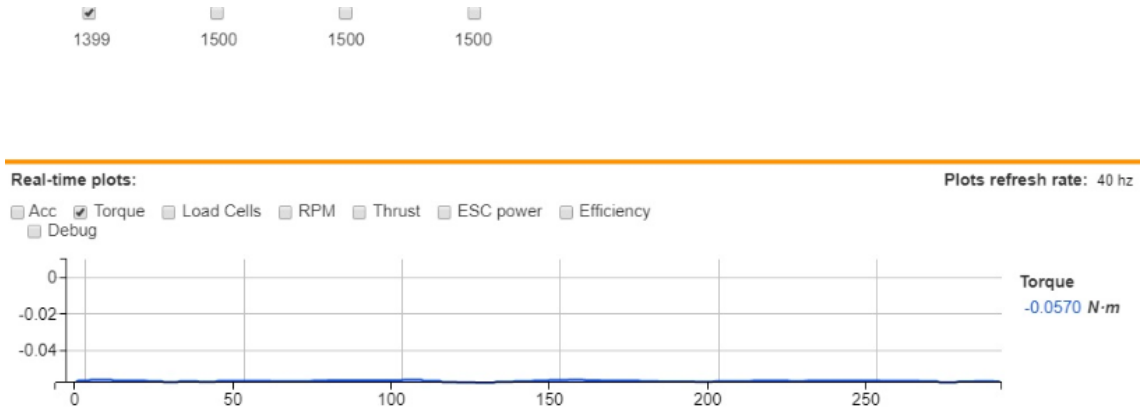
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
96%	0,248	0,445

6.2.2. 1400 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

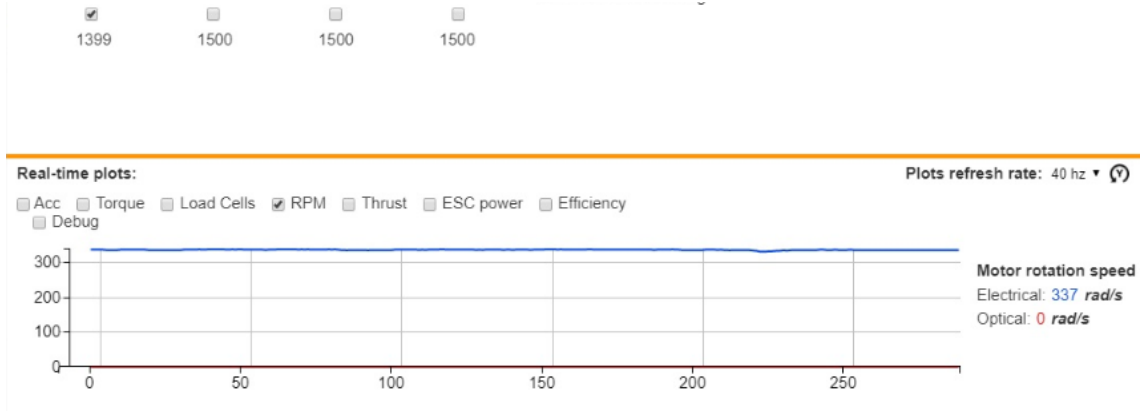
1000 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



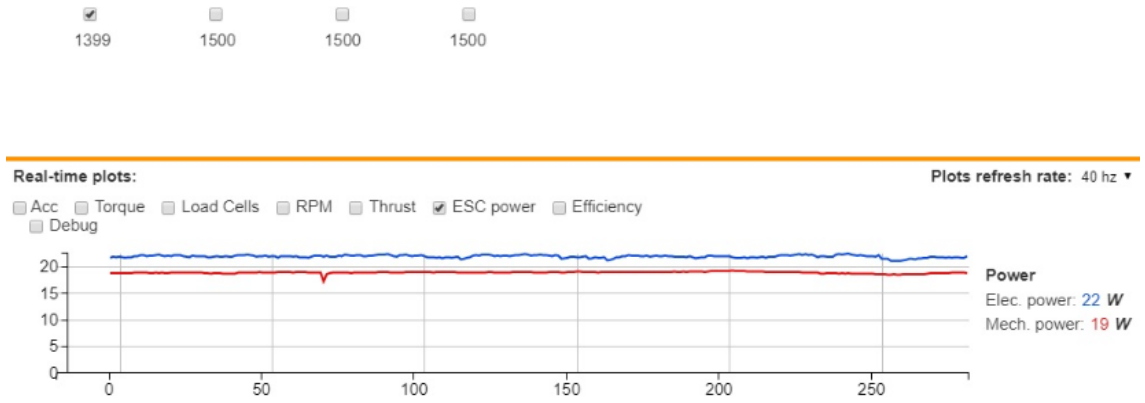
Şekil 6.44. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için ivme



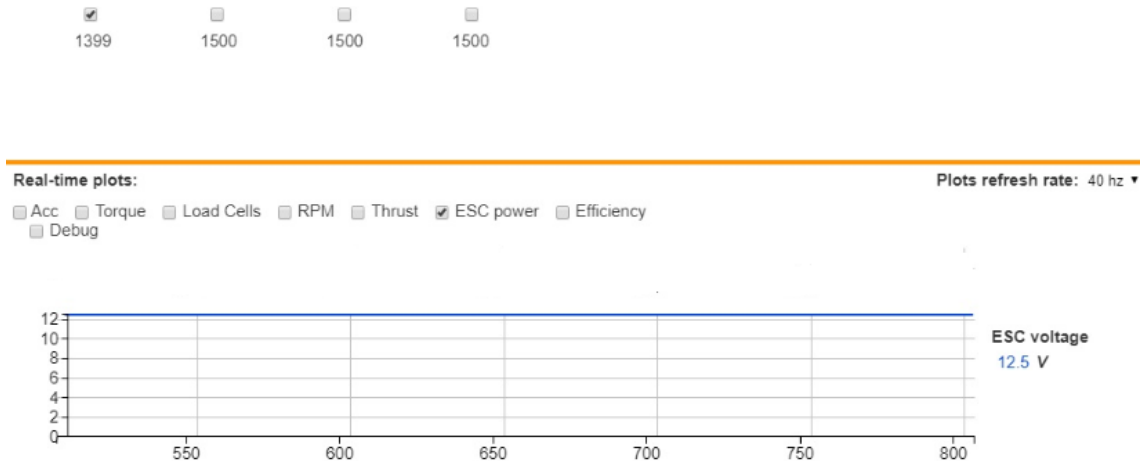
Şekil 6.45. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için tork (moment)



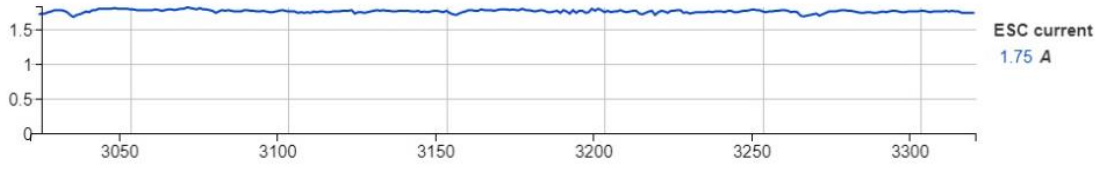
Şekil 6.46. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için açısal hız



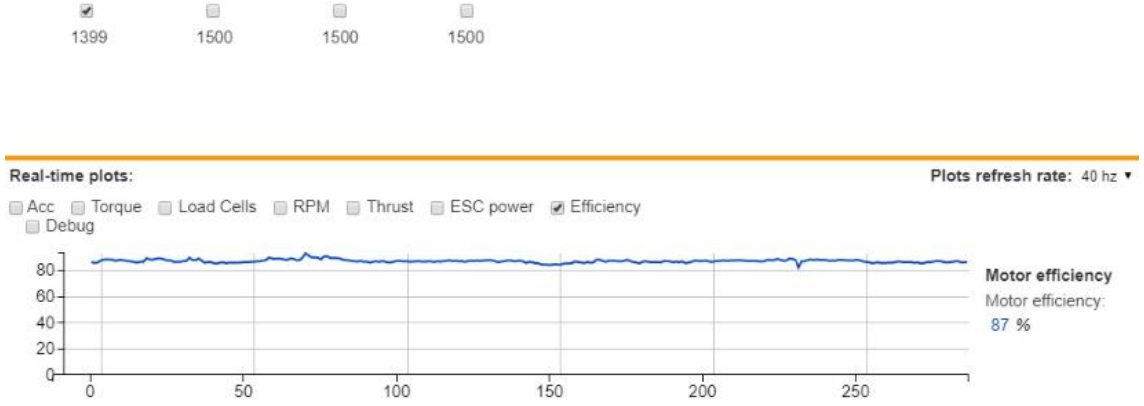
Şekil 6.47. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için güç



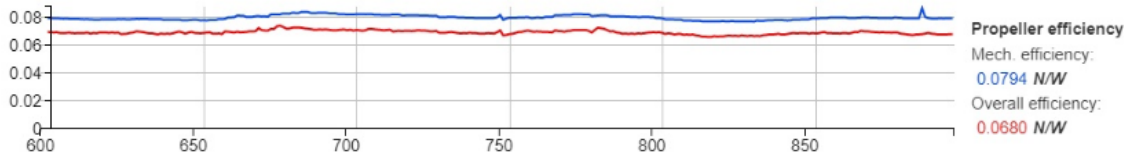
Şekil 6.48. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.49. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için akım



Şekil 6.50. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için motor verimi



Şekil 6.51. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için pervane verimi

Tablo 6.19. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1400	12,56	1,81	23	1,861	0,057	0,4	337
2	1400	12,53	1,80	22	1,964	0,058	0,4	338
3	1400	12,52	1,74	22	2,007	0,057	0,4	337
4	1400	12,51	1,79	22	2,317	0,058	0,4	337
5	1400	12,49	1,78	22	2,218	0,057	0,4	337
6	1400	12,49	1,76	22	2,335	0,058	0,5	337
7	1400	12,48	1,79	22	2,362	0,057	0,4	336
8	1400	12,44	1,75	22	2,099	0,057	0,4	334
9	1400	12,41	1,77	22	2,241	0,057	0,4	335
10	1400	12,40	1,77	22	2,176	0,057	0,4	333
	Toplam	124,83	17,76	221	21,58	0,573	4,1	3361
	Ortalama	12,483	1,776	22,1	2,158	0,0573	0,41	336,1

Tablo 6.20. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için ivme değerleri

İVME (g)		
X	Y	Z
-0,010	0,037	-0,893

Tablo 6.21. Pervaneli durumda 1400 PWM değeri için verim değerleri

MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
87%	0,0798	0,068

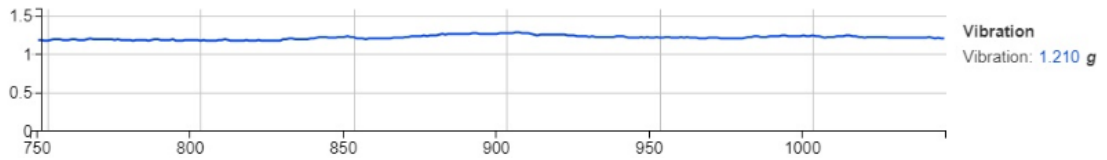
6.2.3. 1350 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1350 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:

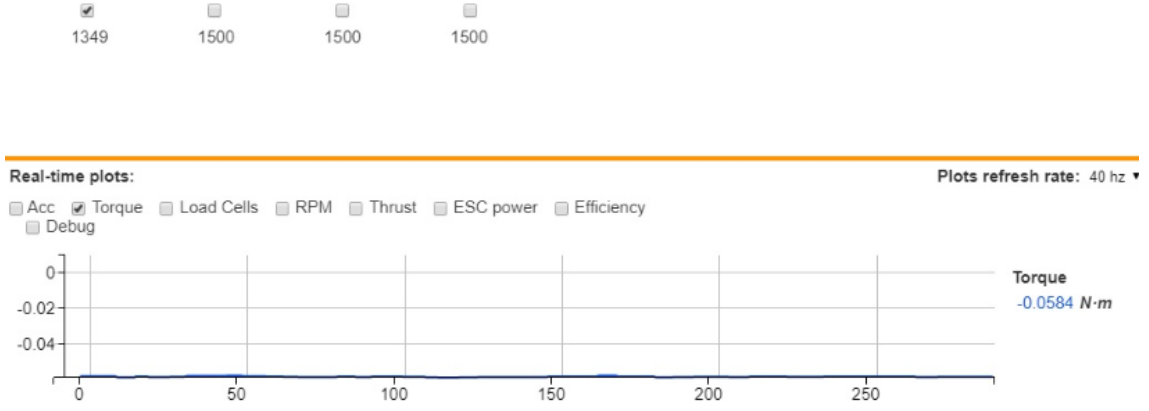
1349 1500 1500 1500



Şekil 6.52. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için ivme



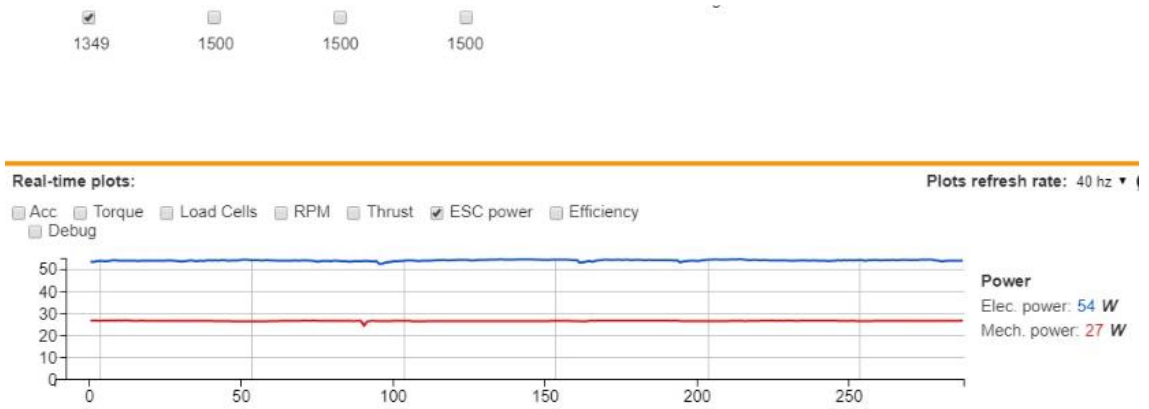
Şekil 6.53. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için titreşim



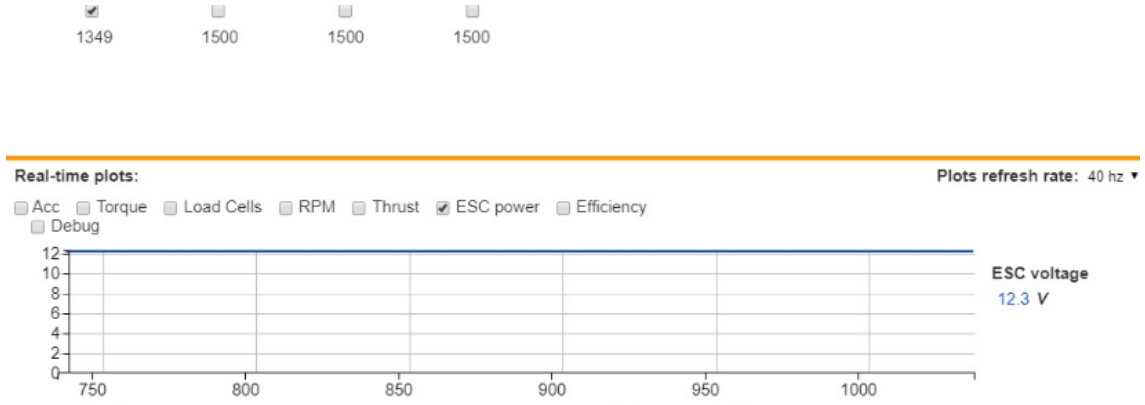
Şekil 6.54. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için tork (moment)



Şekil 6.55. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için açışal hız



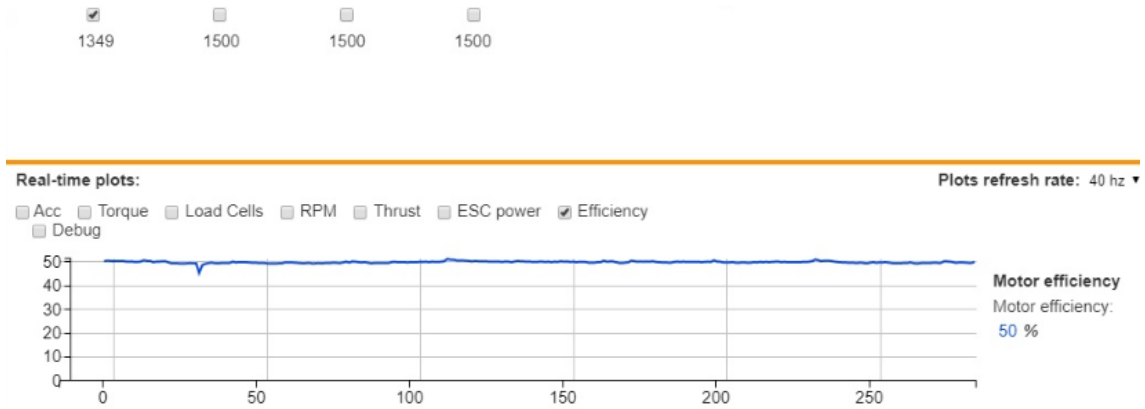
Şekil 6.56. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için güç



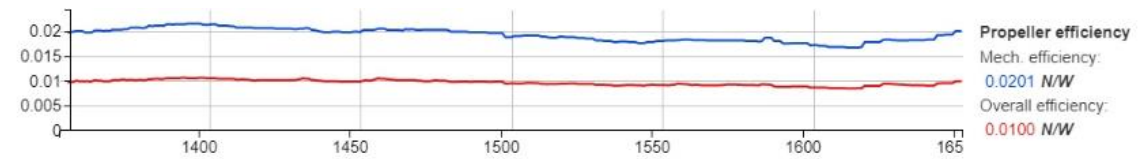
Şekil 6.57. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.58. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için akım



Şekil 6.59. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için motor verimi



Şekil 6.60. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için pervane verimi

Tablo 6.22. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1350	12,46	4,67	58	4,254	0,059	1,4	468
2	1350	12,37	4,47	55	4,437	0,058	1,1	463
3	1350	12,35	4,53	55	4,405	0,058	1,0	463
4	1350	12,32	4,40	56	4,475	0,058	1,1	458
5	1350	12,30	4,45	54	4,489	0,058	1,0	458
6	1350	12,28	4,43	55	4,479	0,059	1,0	459
7	1350	12,26	4,44	54	4,515	0,058	1,1	457
8	1350	12,24	4,44	54	4,533	0,058	1,1	458
9	1350	12,21	4,39	54	4,571	0,059	1,0	457
10	1350	12,18	4,38	54	4,592	0,058	1,0	455
	Toplam	122,97	44,6	549	44,750	0,583	10,8	4596
	Ortalama	12,297	4,46	54,9	4,475	0,0583	1,08	459,6

Tablo 6.23. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için ivme değerleri

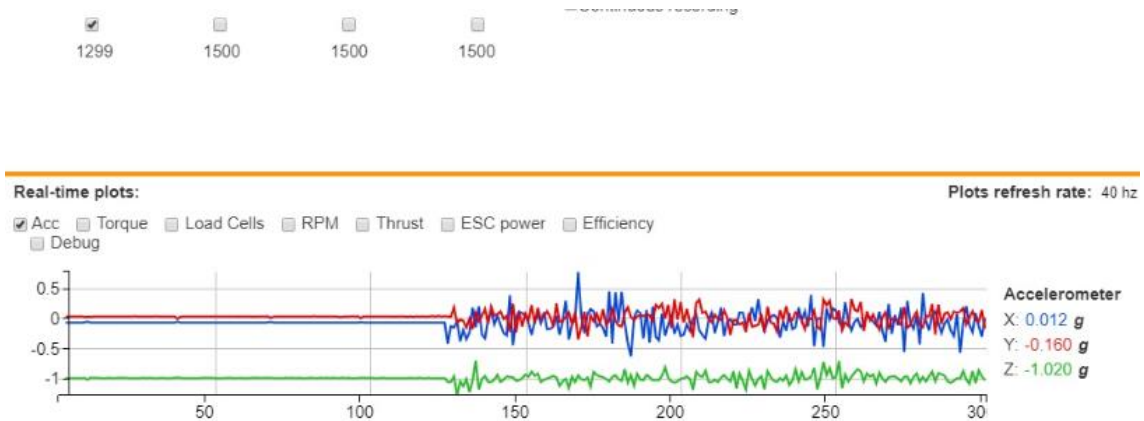
İVME (g)		
X	Y	Z
-0,086	-0,168	-1,140

Tablo 6.24. Pervaneli durumda 1350 PWM değeri için verim değerleri

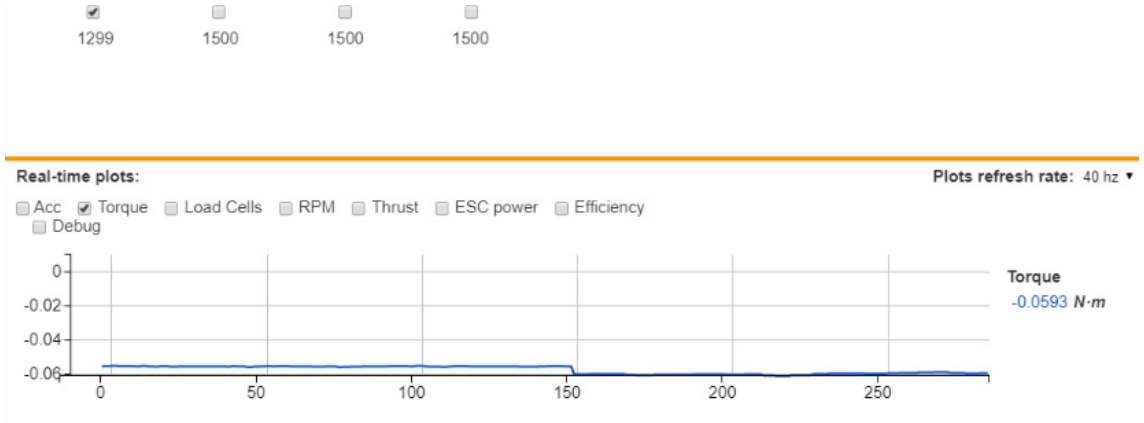
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
50%	0,0201	0,010

6.2.4. 1300 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1300 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



Şekil 6.61. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için ivme



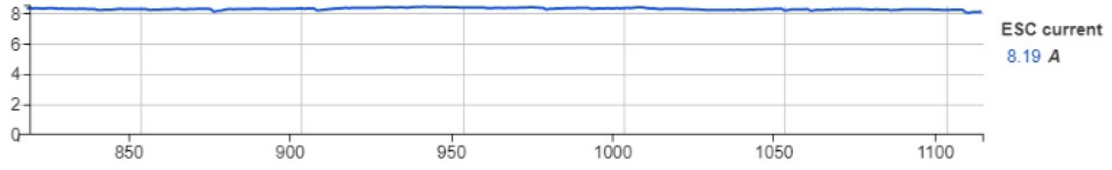
Şekil 6.62. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için tork (moment)



Şekil 6.63. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için açılmal hız

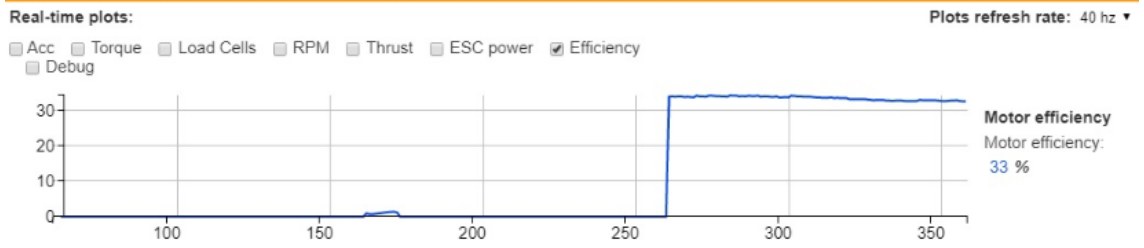


Şekil 6.64. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için güç ve gerilim

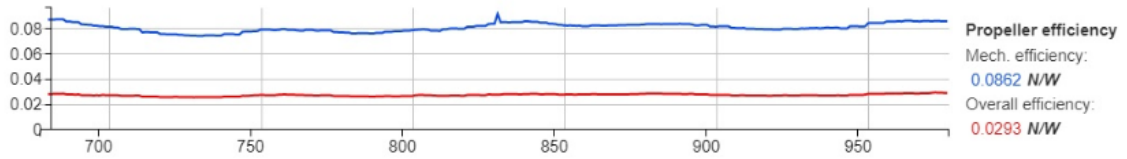


Şekil 6.65. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için akım

1299 1500 1500 1500



Şekil 6.66. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için motor verimi



Şekil 6.67. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için pervane verimi

Tablo 6.25. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1300	12,31	8,83	109	6,532	0,061	1,3	577
2	1300	12,24	8,62	105	6,546	0,059	1,5	563
3	1300	12,21	8,64	105	6,585	0,061	1,5	560
4	1300	12,16	8,35	101	6,577	0,059	1,4	564
5	1300	12,13	8,42	102	6,565	0,059	1,3	564
6	1300	12,10	8,30	100	6,612	0,060	1,5	559
7	1300	12,07	8,09	98	6,602	0,060	1,4	559
8	1300	12,04	8,34	100	6,617	0,060	1,4	554
9	1300	12,02	8,21	98	6,621	0,061	1,4	550
10	1300	11,99	8,32	100	6,612	0,060	1,3	550
	Toplam	121,27	84,12	1018	65,869	0,600	14	5600
	Ortalama	12,127	8,412	101,8	6,5869	0,06	1,4	560

Tablo 6.26. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için ivme değerleri

İVME (g)		
X	Y	Z
0,012	-0,16	-1,020

Tablo 6.27. Pervaneli durumda 1300 PWM değeri için verim değerleri

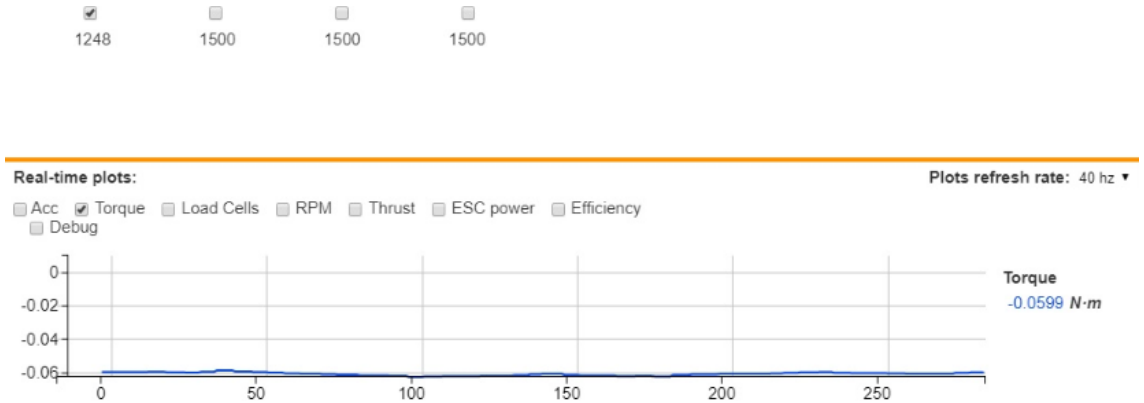
MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
34%	0,0862	0,0293

6.2.5. 1250 PWM değeri için yapılan testler, ölçümler ve sonuçları

1250 PWM değeri için yapılan test sonucunda ölçülen değerler aşağıdaki gibidir:



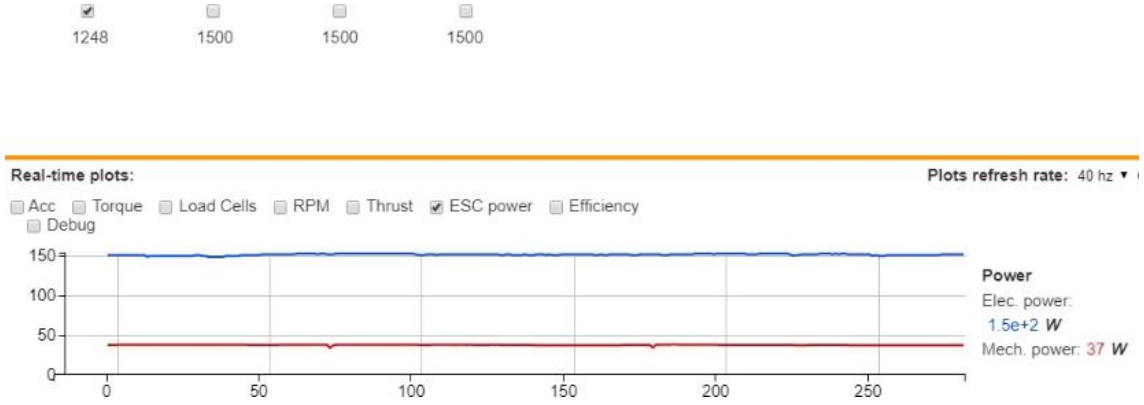
Şekil 6.68. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için ivme ve titreşim



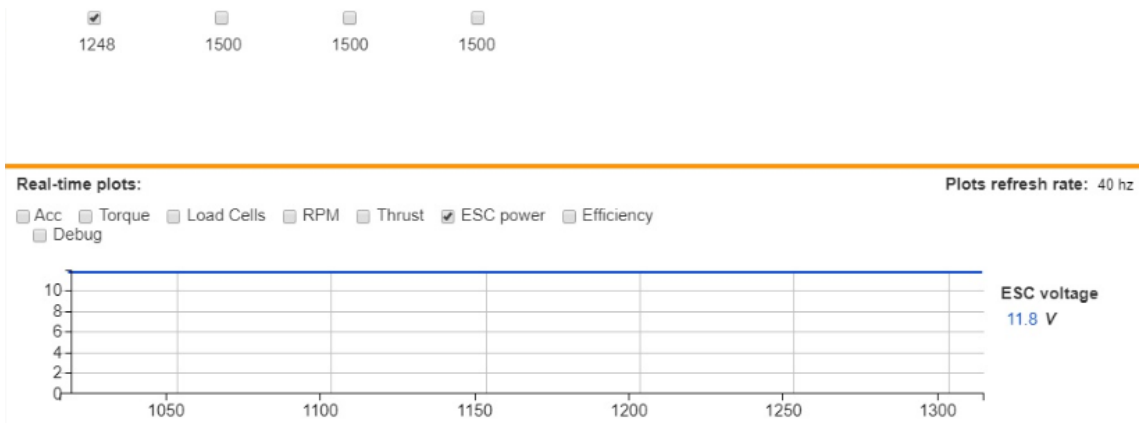
Şekil 6.69. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için tork (moment)



Şekil 6.70. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için açısal hız



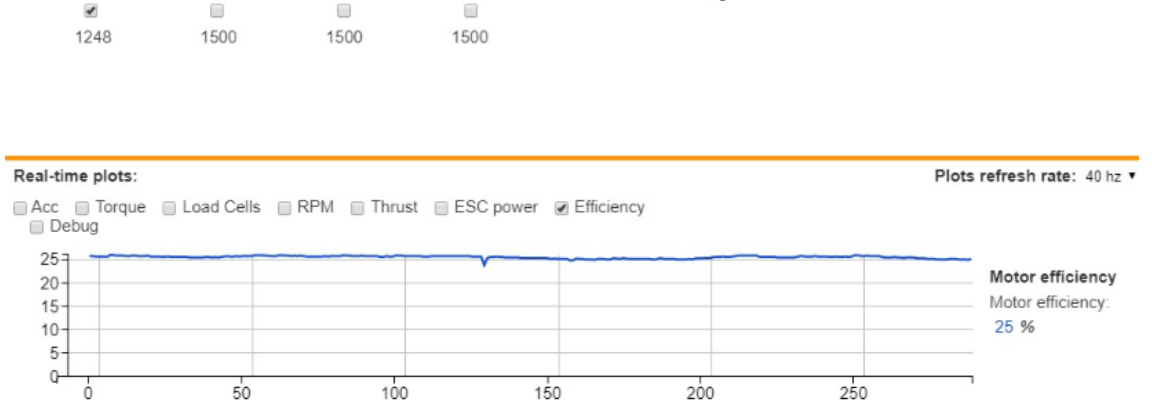
Şekil 6.71. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için güç



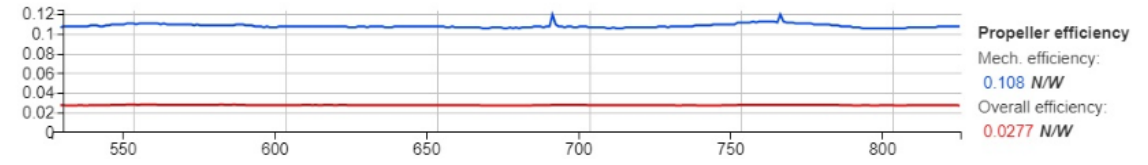
Şekil 6.72. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için gerilim



Şekil 6.73. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için akım



Şekil 6.74. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için motor verimi



Şekil 6.75. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için pervane verimi

Tablo 6.28. Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için tüm değerler

ÖRNEKLEM NO	ESC (PWM)	VOLTAJ (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1	1250	12,09	13,84	167	7,777	0,060	1,3	638
2	1250	12,02	13,20	159	7,889	0,060	1,4	630
3	1250	11,98	13,01	156	7,932	0,060	1,4	626
4	1250	11,93	12,83	153	7,789	0,061	1,3	623
5	1250	11,88	12,93	153	8,325	0,062	1,2	616
6	1250	11,84	12,81	152	8,384	0,061	1,2	615
7	1250	11,80	12,50	147	8,201	0,061	1,2	617
8	1250	11,77	12,67	149	8,316	0,062	1,2	610
9	1250	11,70	12,43	145	8,059	0,060	1,1	609
10	1250	11,65	12,43	145	8,128	0,061	1,2	609
	Toplam	118,66	128,65	1526	80,800	0,608	12,5	6193
	Ortalama	11,866	12,865	152,6	8,08	0,0608	1,25	619,3

Tablo 6.29. *Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için ivme değerleri*

İVME (g)		
X	Y	Z
-0,625	0,422	-1,140

Tablo 6.30. *Pervaneli durumda 1250 PWM değeri için verim değerleri*

MOTOR VERİMİ	PERVANE VERİMİ (N/W)	
	Mekanik	Toplam
25%	0,108	0,0277

7. MATLAB / SIMULINK UYGULAMASI HESAPLAMALARI

Bu tez çalışması kapsamında MATLAB / Simulink uygulaması ile yapılan hesaplamalar iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada yapılan tüm matematik modellemelerin deney düzeneğinden bağımsız olarak pervanesiz ve pervaneli durumlar için sağlaması (validasyonu) yapılmıştır. İkinci aşamada ise deney düzeneğinden elde edilen test verileri ile MATLAB / Simulink programında simülasyon yapılmış, pervanesiz ve pervaneli durumlar için sonuçlar karşılaştırılmıştır.

7.1. MATLAB / Simulink Uygulamasının Hesaplamalarının ve Modelinin Sağlaması (Validasyonu)

MATLAB / Simulink sisteminin sağlaması yapılırken Tablo 7.1. deki batarya parametreleri kullanılmıştır. Burada bataryanın tamamen tükeneyeceği varsayımı yapılmıştır.

Tablo 7.1. Sağlama için batarya parametreleri (Xu vd., 2016)

E: Batarya gerilimi (V)	48
E_0 : Batarya sabit gerilimi (V)	55
R: İç direnç (ohm)	0,012
i: Batarya akımı (A)	max 17,39
K: Polarizasyon sabiti (V/Ah)	0,0327
Q: Batarya kapasitesi (Ah)	18
i^* : Filtrelenmiş batarya akımı (A)	max 17,39
i_t : Gerçek batarya şarjı (Çekilmiş kapasite) (Ah)	max 14,17
A: Üssel gerilim (V)	3,01
B: Üssel kapasite (1/Ah)	1,53

Sağlama yapılırken Fırçasız DA Motor olarak Tablo 7.2. deki parametrelere sahip bir elektrik motoru kullanılmıştır.

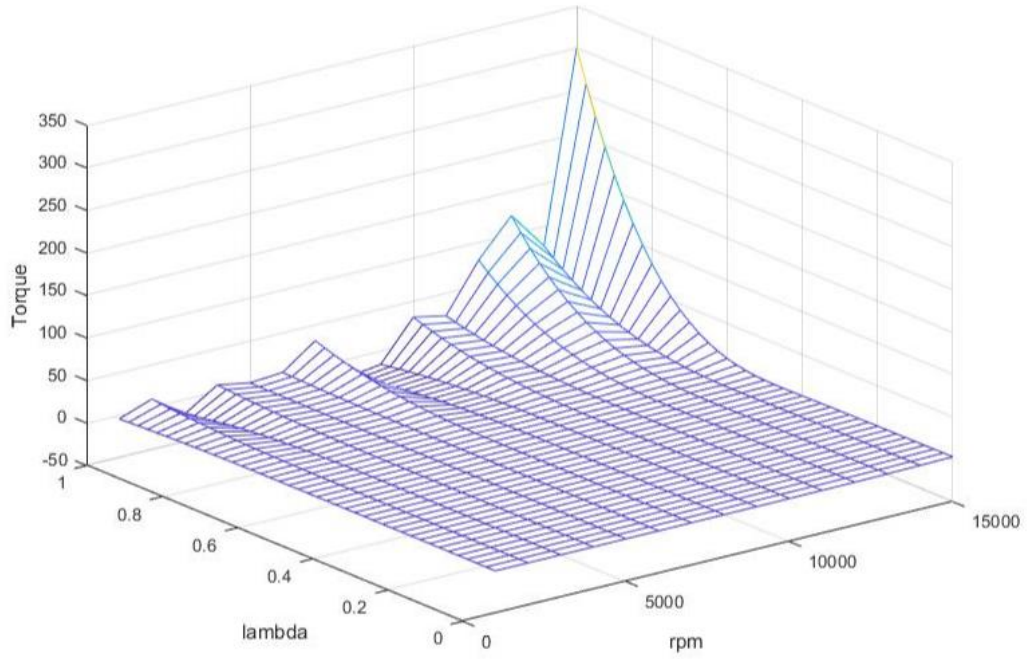
Tablo 7.2. *Sağlama için fırçasız DA motoru parametreleri (Maxon EC Motor)*

K_T	Tork (moment) sabiti	Nm/A	0,131
J_m	Atalet (Eylemsizlik) torku (momenti)	kgm ²	0,0000181
B	Sürtünme katsayısı	Nm/(rad/s)	0,002493
R	Direnç	ohm	6,89
L	Endüktans	H	0,00585
K_e	Zıt EMK sabiti	V/(rad/s)	0,131
P	Güç	W	70
T_e	Tork (moment)	Nm	0,134
w (y)	Açısal hız (yüksüz)	rad/s	360,2
w (n)	Açısal hız (nominal)	rad/s	265,9
i (y)	akım (yüksüz)	A	0,0481
i (n)	akım (nominal)	A	0,936
V	Nominal voltaj	V	48

Sağlama yapılırken kullanılan pervane parametreleri de Tablo 7.3. deki gibidir. Belirtilen değerler doğrudan simülasyona girilmiş, belirtilmeyen değerler için de bir pervane markasının sabit hatveli pervane modellerinden (15-4) lük bir modeli için hesaplanmış değerlerden yararlanılmış, MATLAB / Simulink uygulamasının Look-Up özelliği kullanılarak önce detaylı olarak tablolaştırılmış sonra da otomatik okunması sağlanmıştır.

Tablo 7.3. *Sağlama için pervane parametreleri*

d	Pervane çapı	m	0,381
V	Sonsuz hava hızı	m/s	1,5
ρ	Hava yoğunluğu	kg/m ³	1,1792
T_P	Pervane itkisi	N	Hesaplanmış değerler bir pervane web sitesinden alınmış ve MATLAB / Simulink programında tablolaştırılmıştır
C_T	İtki Katsayısı	-	
P_P	Pervane gücü	W	
C_P	Güç katsayısı	-	
J	Gelişmiş oran	-	
η	Verim	-	
n	Pervane hızı	rad/s	

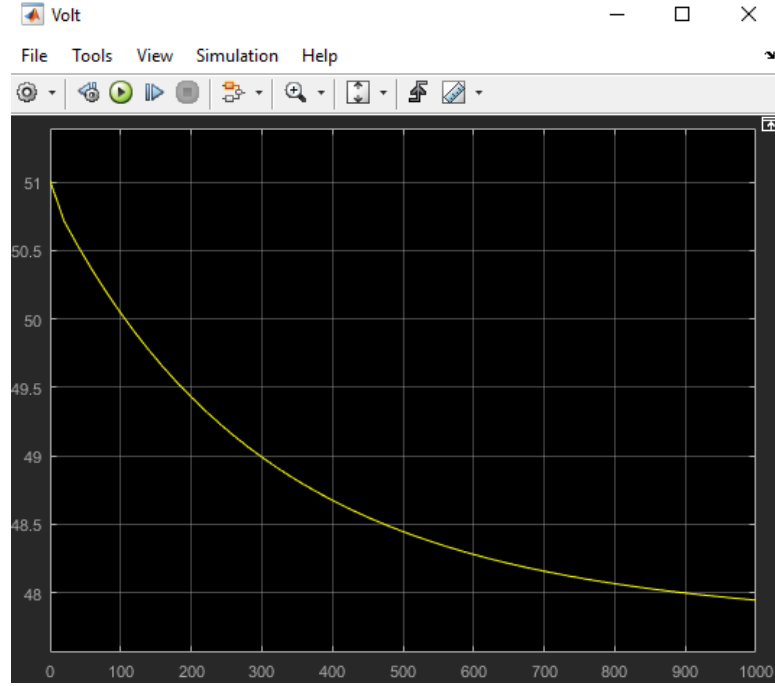


Şekil 7.1. MATLAB / Simulink modelinde kullanılan pervane karakteristikleri - limitleri

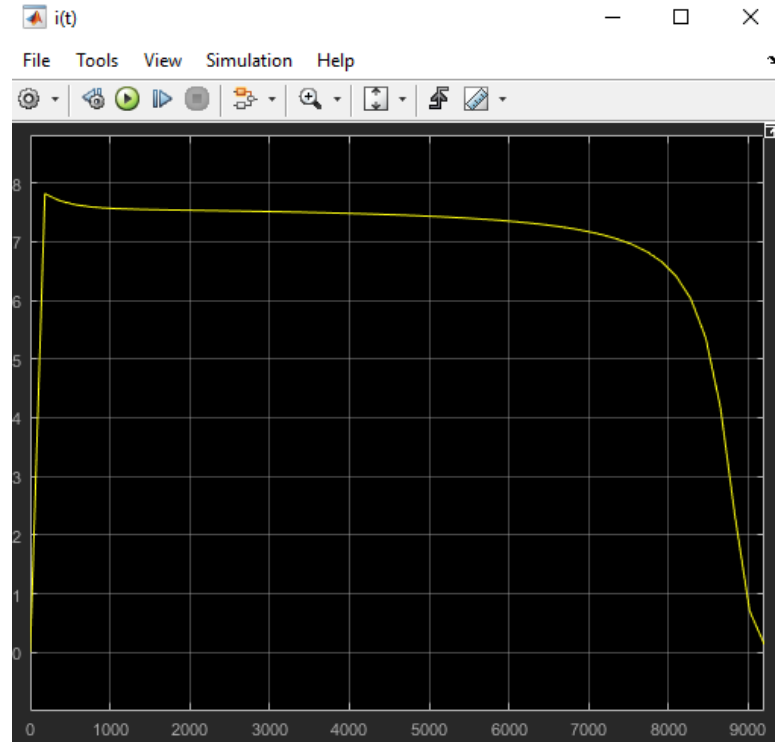
7.1.1. Pervanesiz (Yüksüz) halde MATLAB / Simulink uygulaması hesaplamaları sağlama (validasyonu)

Pervanenin takılı olmadığı durum matematik modellemesinde yüksüz durum olarak belirtilmiştir. Bu durum Tork (moment) hesaplamasına T_L olarak belirtilen yük torku (momenti) sıfır olarak yansıtılmıştır. Parametreler tablosundan okunan bazı değerlerin de yüksüz halleri okunup mukayese edilmelidir.

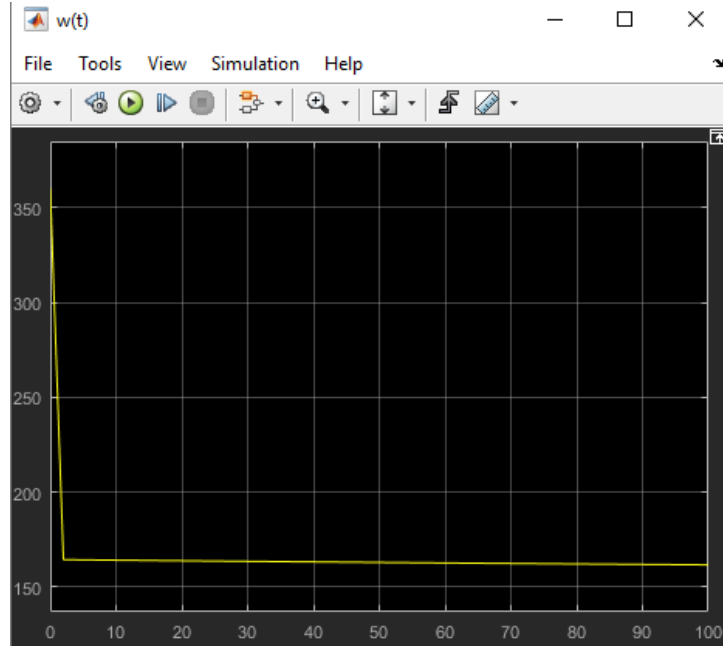
Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Bulunan sonuçlar kataloglardan derlenen parametrelerin sınırları içinde veya yakın değerlerdedir.



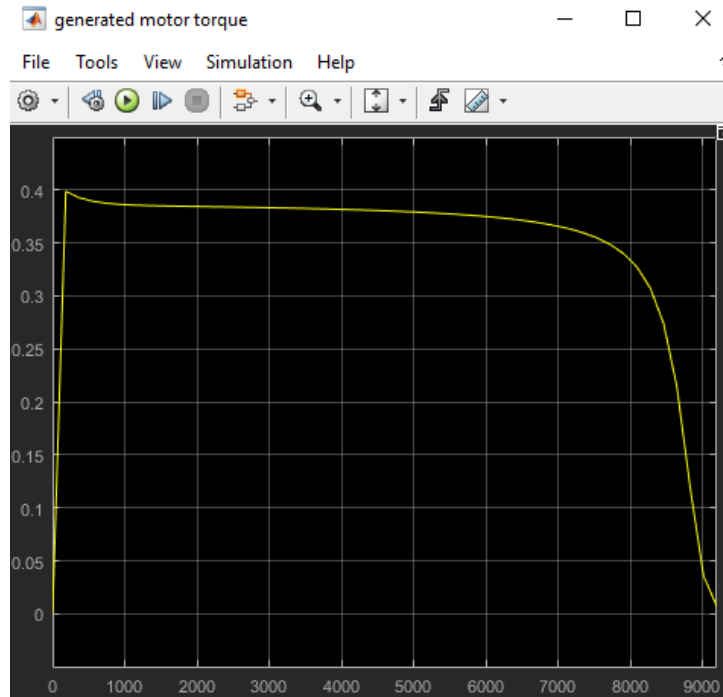
Şekil 7.2. Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink gerilimi sağlaması



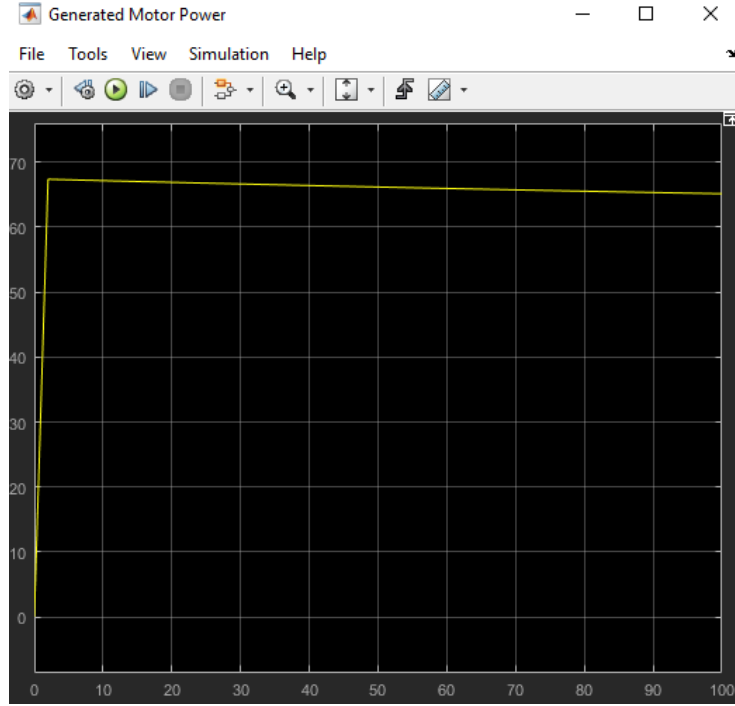
Şekil 7.3. Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink akım sağlaması



Şekil 7.4. Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink açısal hız sağlaması



Şekil 7.5. Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink tork (moment) sağlaması

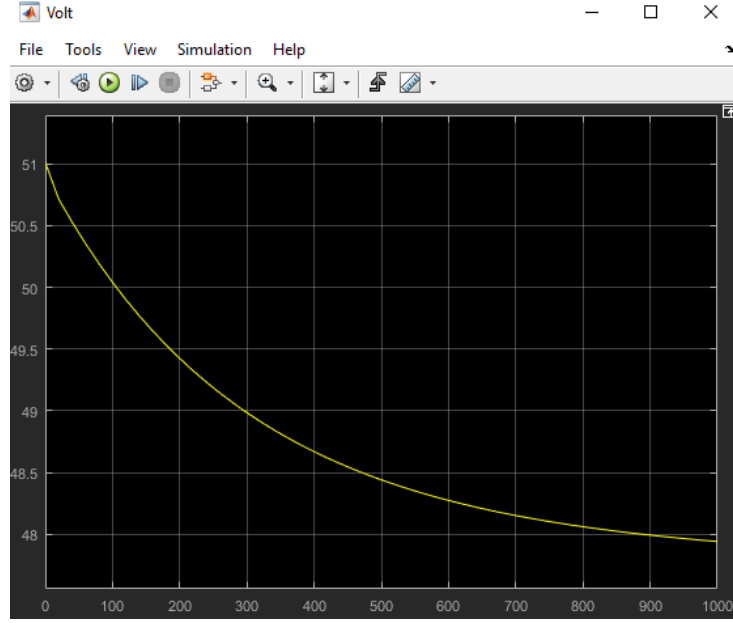


Şekil 7.6. Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink güç sağlaması

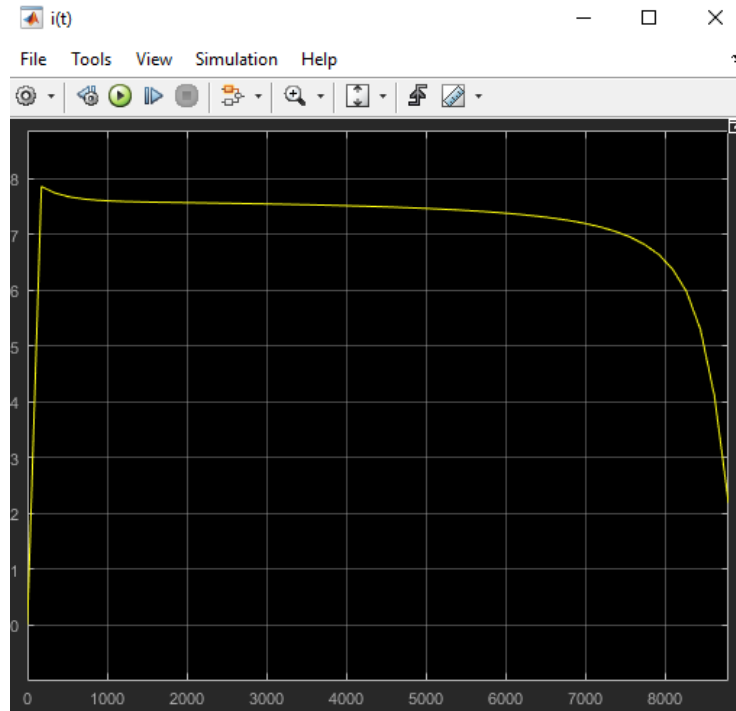
7.1.2. Pervaneli (Yüklü) halde MATLAB / Simulink uygulaması hesaplamaları sağlaması (validasyonu)

Pervanenin takılı olduğu durum matematik modellemesinde yüklü durum olarak belirtilmiştir. Bu durumda Tork (moment) hesaplamasına T_L olarak belirtilen yük torku (momenti) dahil edilmiştir. Parametreler tablosundan okunan bazı değerlerin de yüksüz olmayan halleri okunup mukayese edilmelidir.

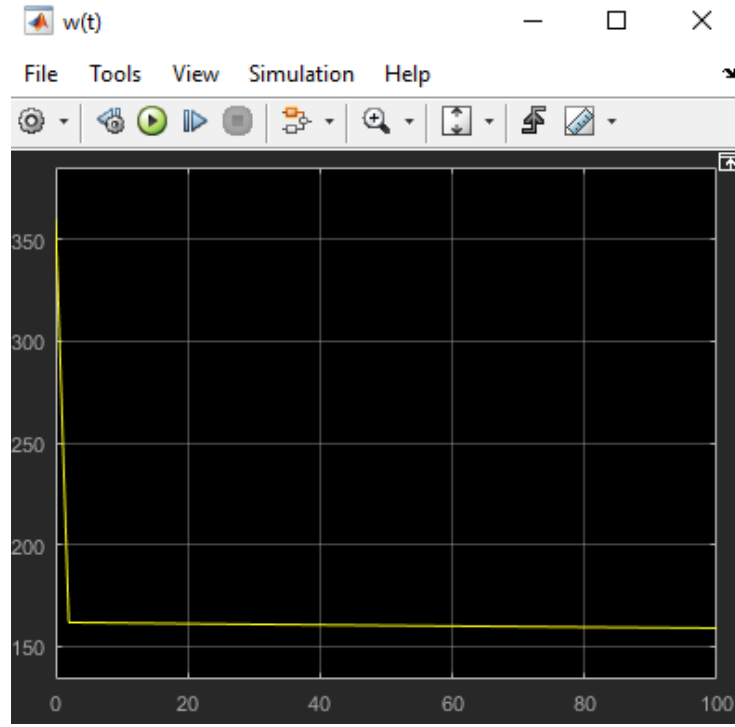
Pervaneli durumda MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Bulunan sonuçlar kataloglardan derlenen parametrelerin sınırları içinde veya yakın değerlerdedir.



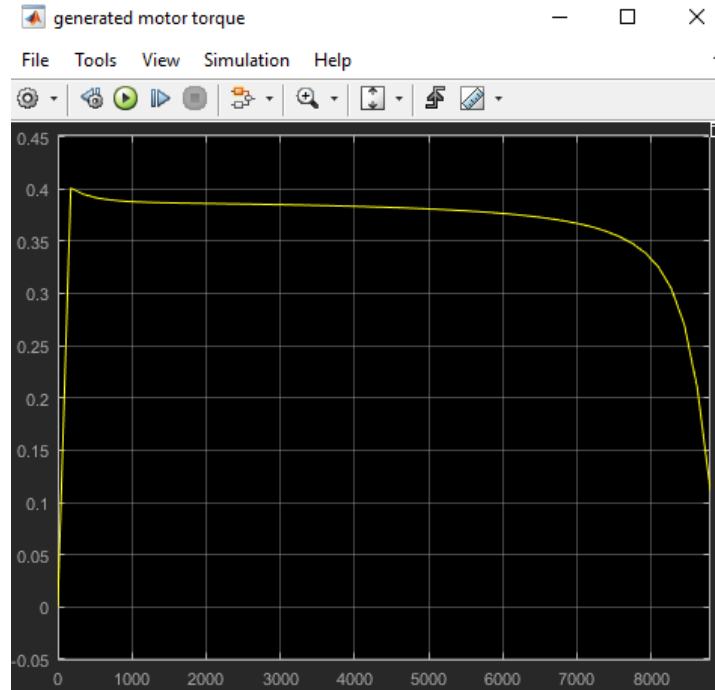
Şekil 7.7. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink gerilim sağlaması



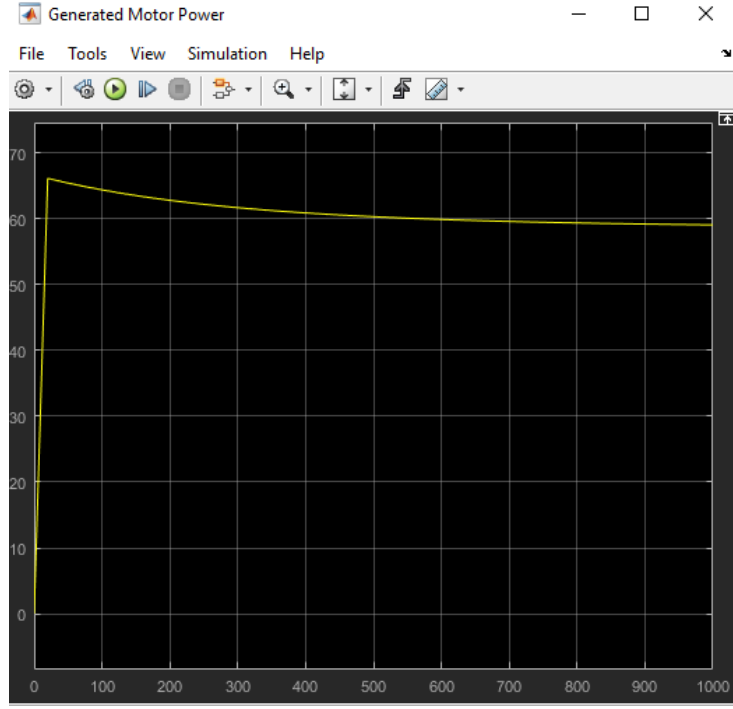
Şekil 7.8. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink akım sağlaması



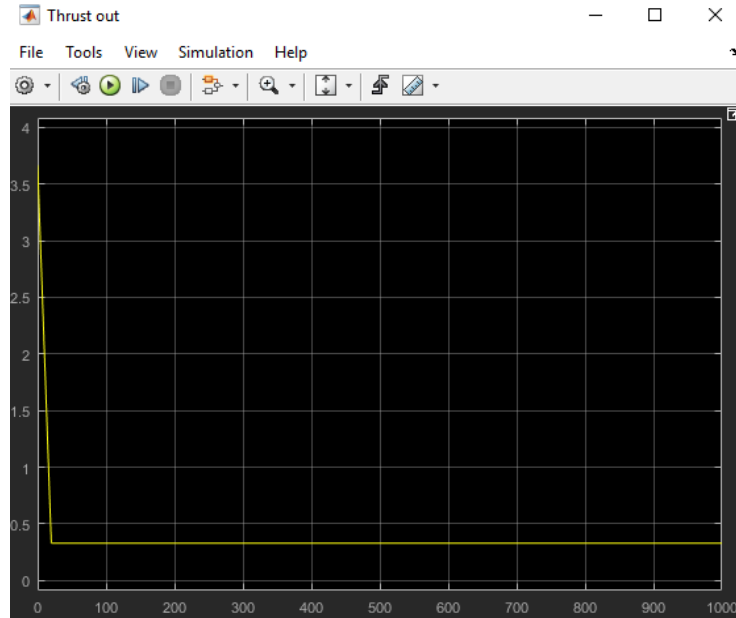
Şekil 7.9. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink açısal hız sağlaması



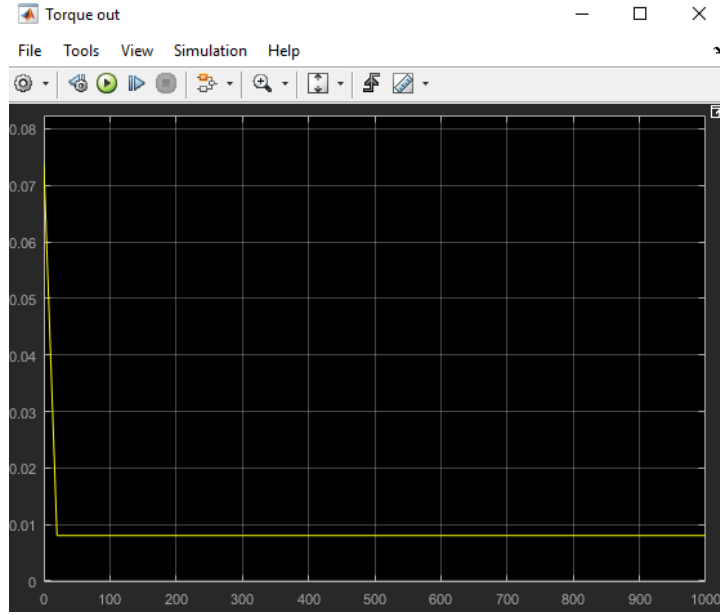
Şekil 7.10. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink tork (moment) sağlaması



Şekil 7.11. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink gerilim sağlaması



Şekil 7.12. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink itki sağlaması



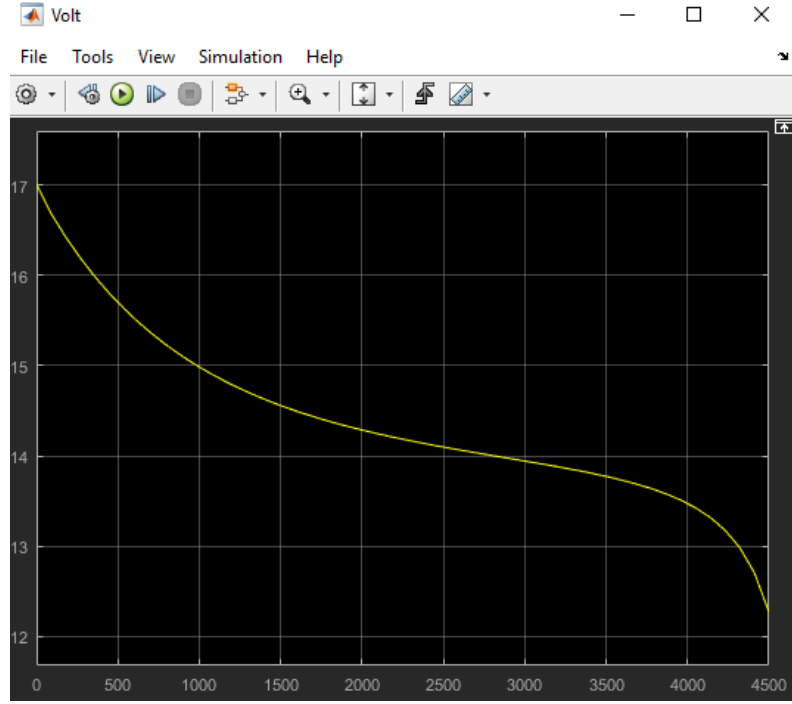
Şekil 7.13. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink yük torku sağlaması

7.2. MATLAB / Simulink Uygulamasının Hesaplamalarının ve Modelinin Deney Düzeneği İçin Simülasyonu

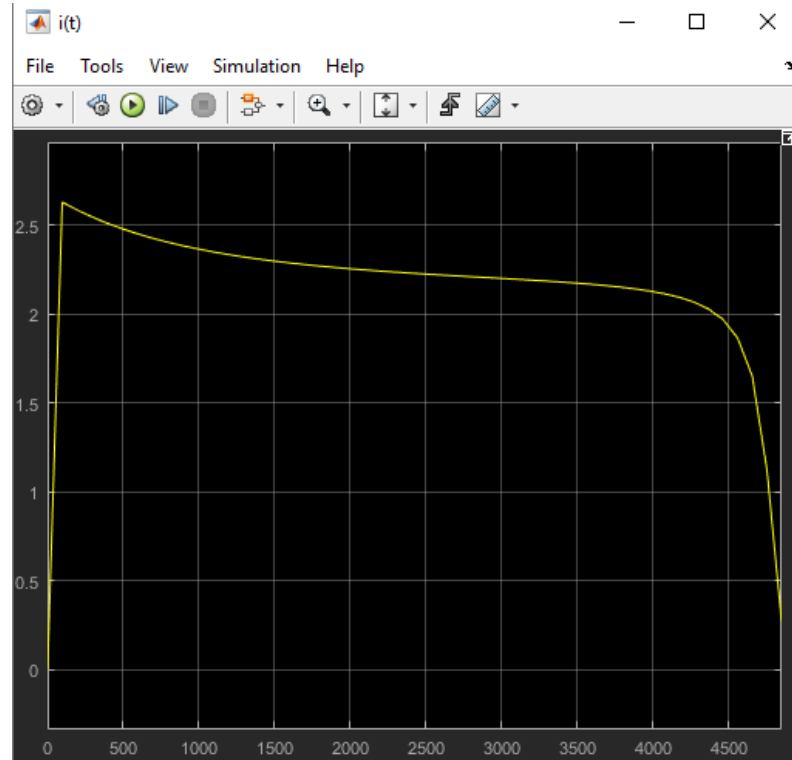
MATLAB / Simulink uygulamasıyla yapılacak olan ikinci aşama deney düzeneği ile yapılan testlerle ilgilidir. Bu testlerin sonuçlarının MATLAB / Simulink model simülasyonumuzla ne derece uyumlu olduğunun belirlenebilmesi için simülasyon gerçekleştirilmiştir. ESC siz durumda yaptığımız simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.

7.2.1. Pervanesiz (Yüksüz) halde deney düzeneği için MATLAB / Simulink uygulaması hesaplamaları

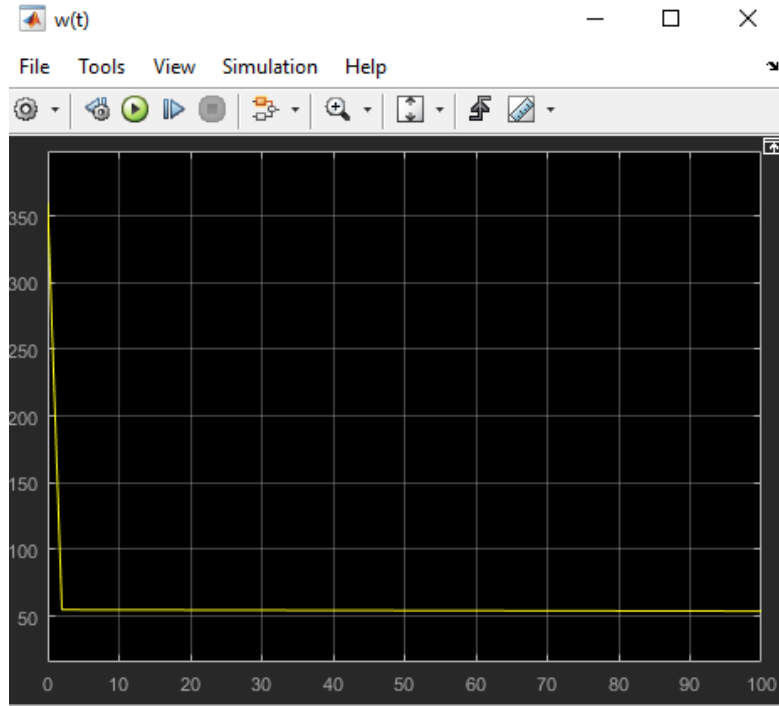
Pervanesiz testlerde pervane takılı durumda olmadığına şaft (mil) yüksüz olarak dönmektedir. Bu durumda yük torku (momenti) sıfır olarak belirtilmiştir. Pervanesiz durumda MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyonundan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Bulunan sonuçlar deney düzeneğinden elde edilen test sonuçları parametrelerin sınırları içinde veya yakın değerlerdedir.



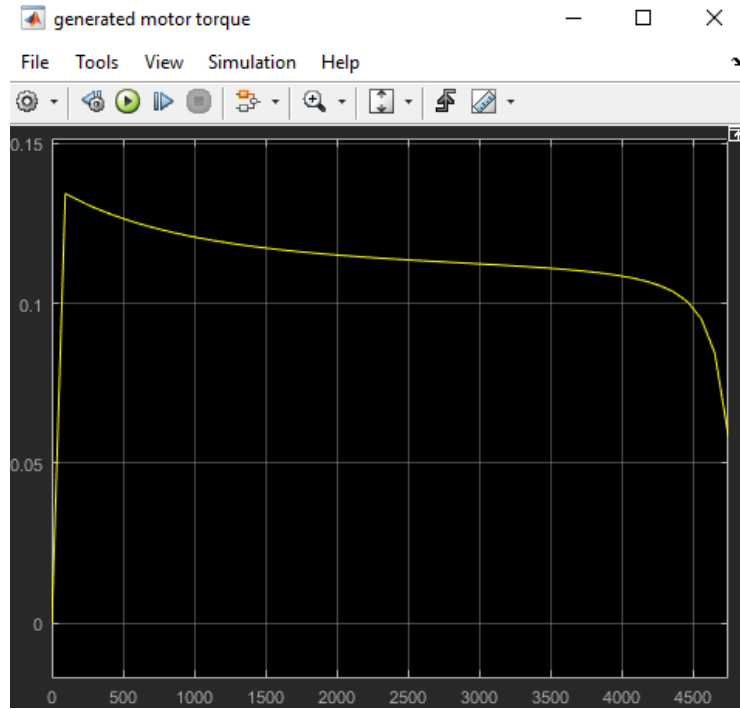
Şekil 7.14. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu - gerilim



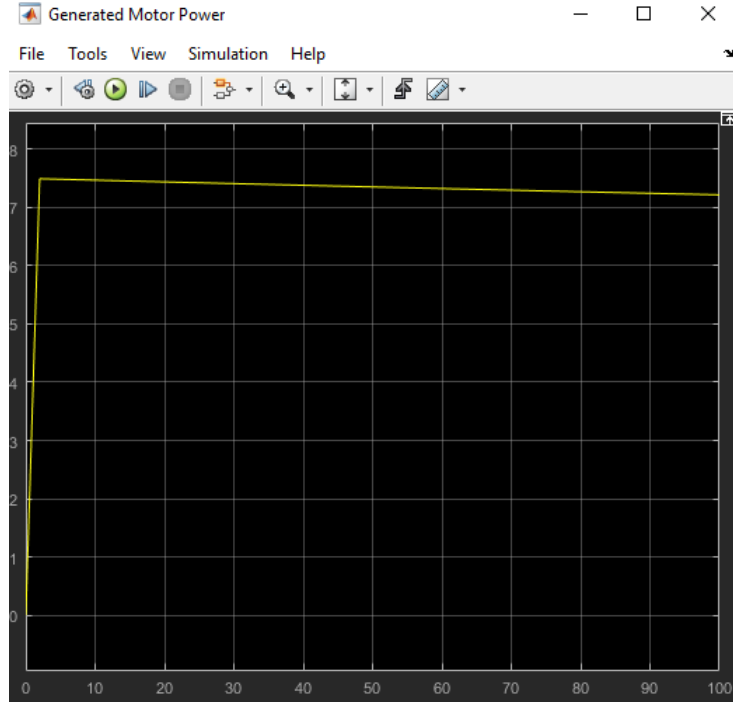
Şekil 7.15. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu - akım



Şekil 7.16. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu – açısal hız



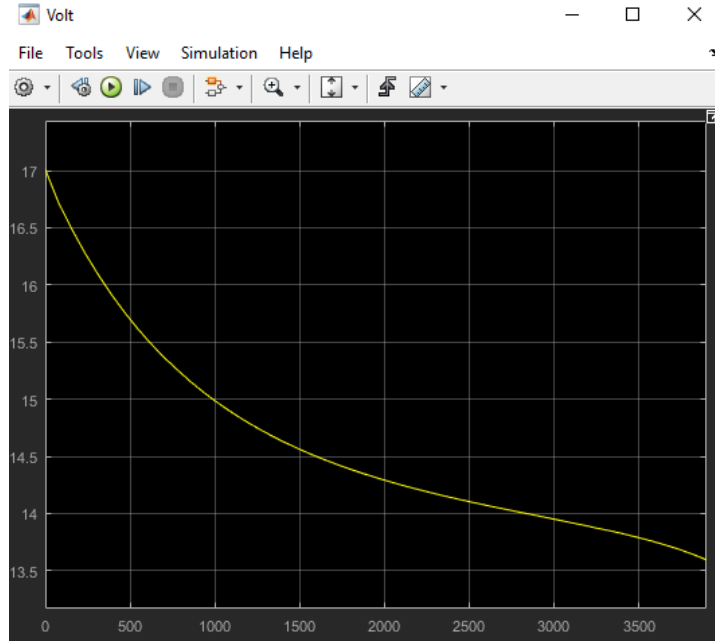
Şekil 7.17. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu – tork (moment)



Şekil 7.18. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu – güç

7.2.2. Pervaneli (Yüklü) halde deney düzeneği için MATLAB / Simulink uygulaması hesaplamaları

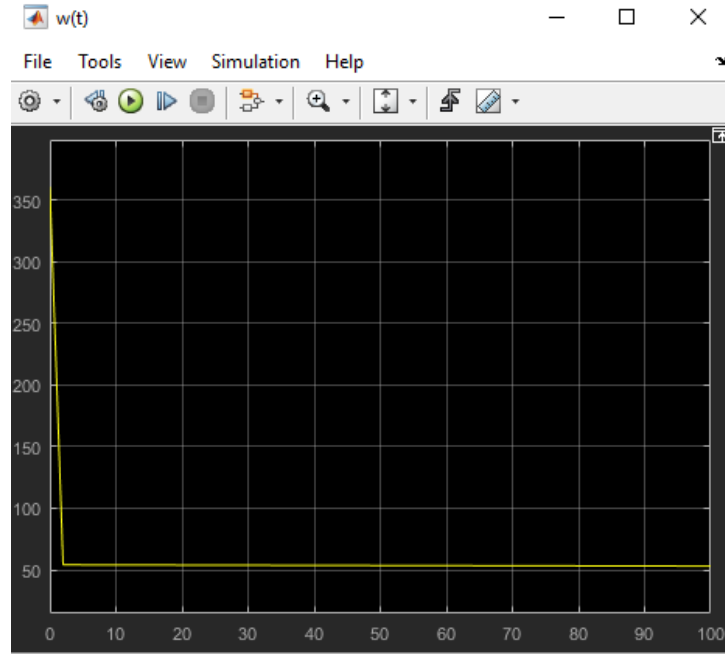
Pervaneli testlerde pervane takılı durumda olup şaft (mil) yüklü olarak dönmektedir. Bu durumda pervaneden gelen tork yük torku olarak elektrik motorunun performansına etki etmektedir. Pervaneli durumda MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Bulunan sonuçlar deney düzeneğinden elde edilen test sonuçları parametrelerin sınırları içinde veya yakın değerlerdedir.



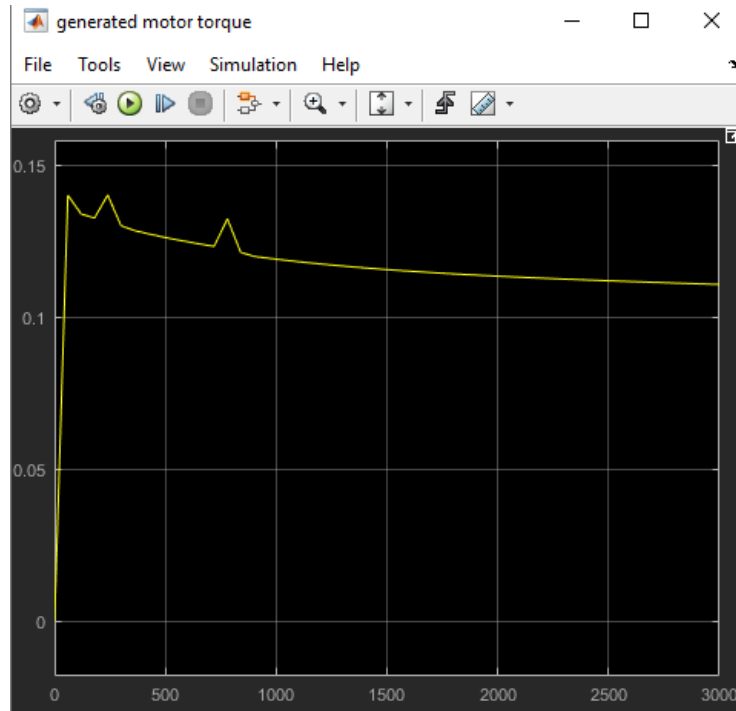
Şekil 7.19. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu - gerilim



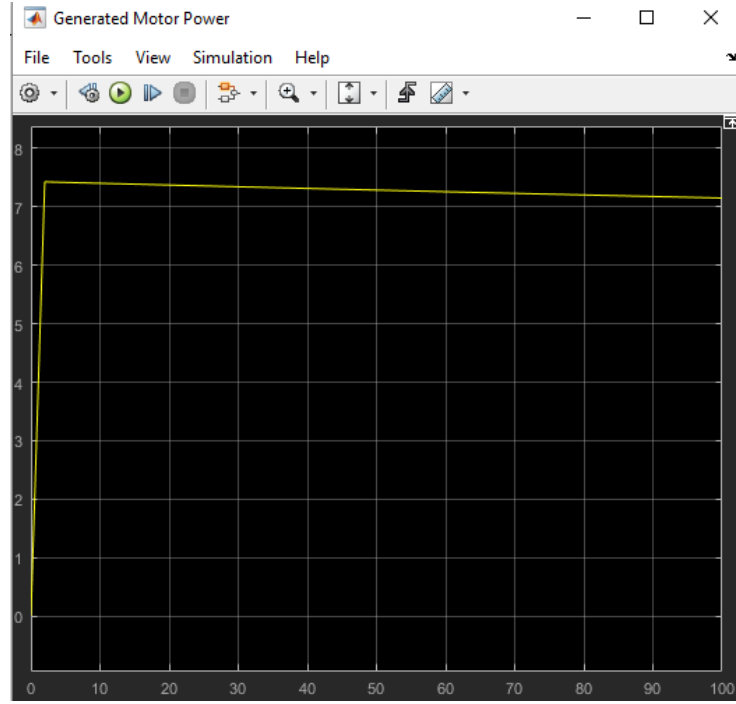
Şekil 7.20. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu - akım



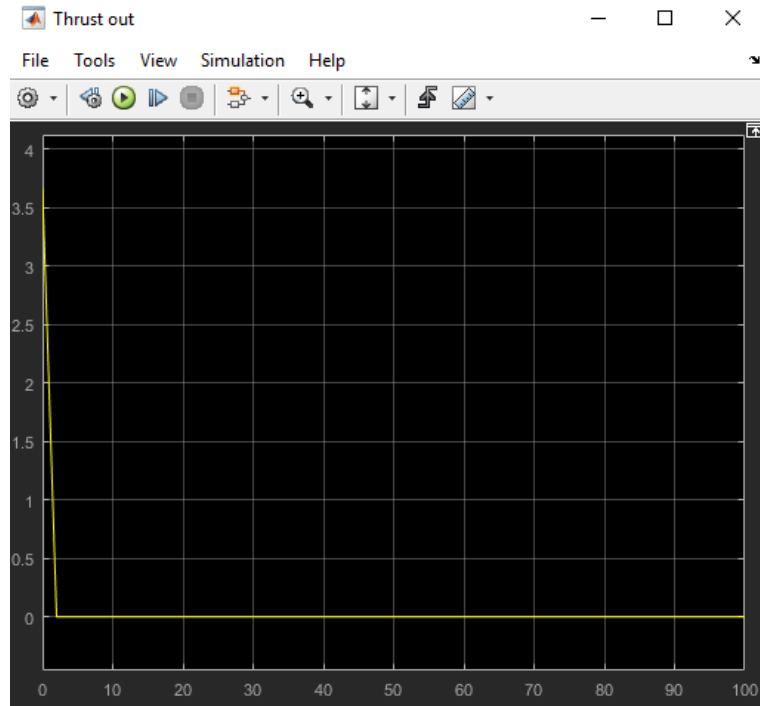
Şekil 7.21. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu – açısai hız



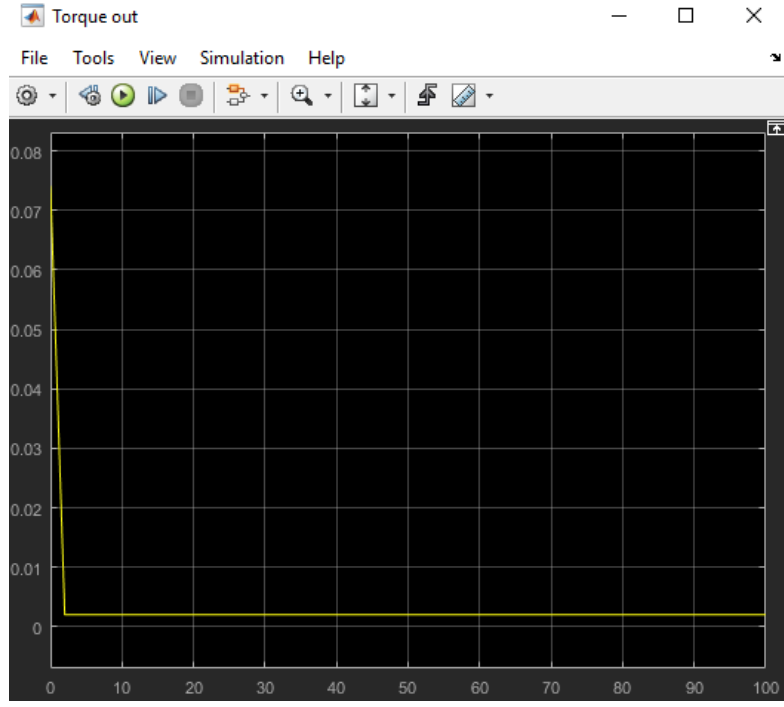
Şekil 7.22. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu – tork (moment)



Şekil 7.23. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu - güç



Şekil 7.24. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu - itki



Şekil 7.25. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin MATLAB / Simulink simülasyonu – yük torku

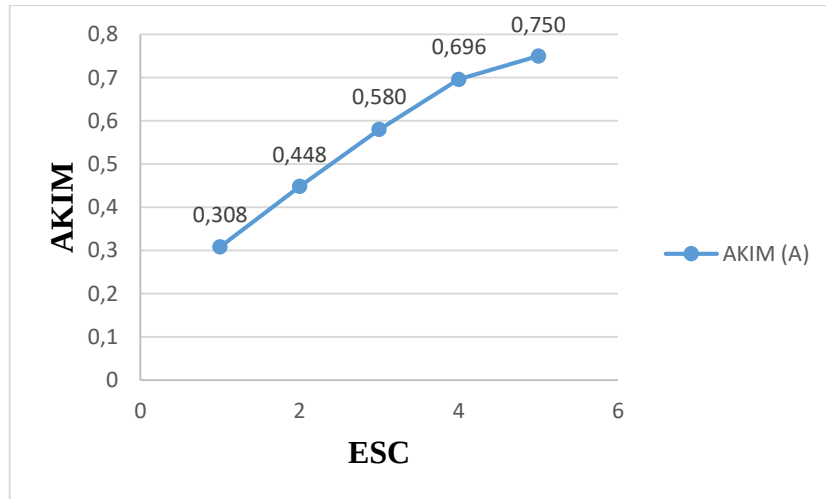
8. DEĞERLENDİRMELER

8.1. Pervanesiz (Yüksüz) Deney Verilerinin Değerlendirilmesi

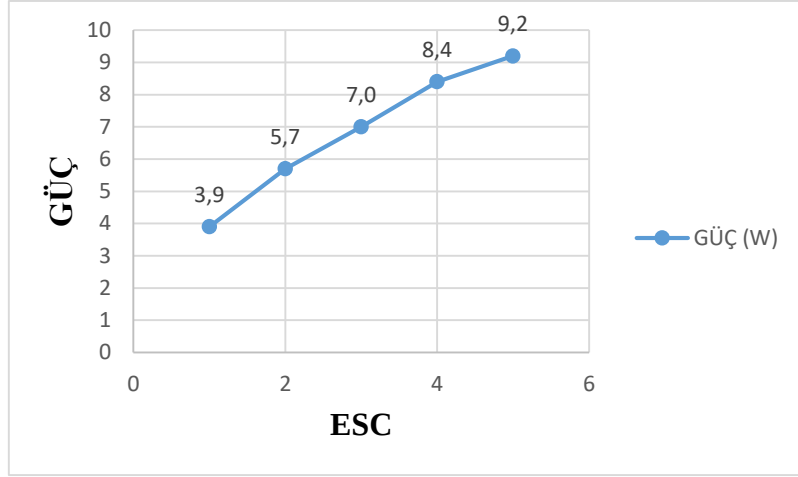
Pervanenin takılı olmadığı yüksüz durumda yapılan testlerin sonucu aşağıdaki tablo ve grafiklerdeki gibidir. Beş farklı PWM değeri için yapılan testler olabildiğince sabit gerilim değerlerinde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Test verileri incelendiğinde çekilen akım değerinin, kullanılan güç değerinin, sistem titreşiminin ve elektrik motoru milinin açısal hızının düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yüksüz çalışıldığı için tork (moment) değerindeki değişim çok küçük olup virgülden sonra dördüncü basamakta hissedilmektedir.

Tablo 8.1. Pervanesiz (Yüksüz) 5 farklı PWM değeri için deney verileri

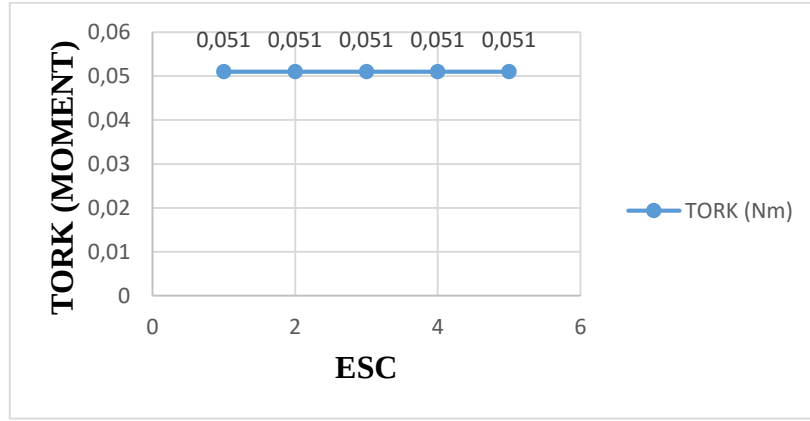
ESC (PWM)	GERİLİM (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1(1450)	12,606	0,308	3,9	0,051	0,20	253,5
2(1400)	12,570	0,448	5,7	0,051	0,30	440,9
3(1350)	12,532	0,580	7,0	0,051	0,40	622,1
4(1300)	12,495	0,696	8,4	0,051	0,52	803,2
5(1250)	12,458	0,750	9,2	0,051	0,71	982,5



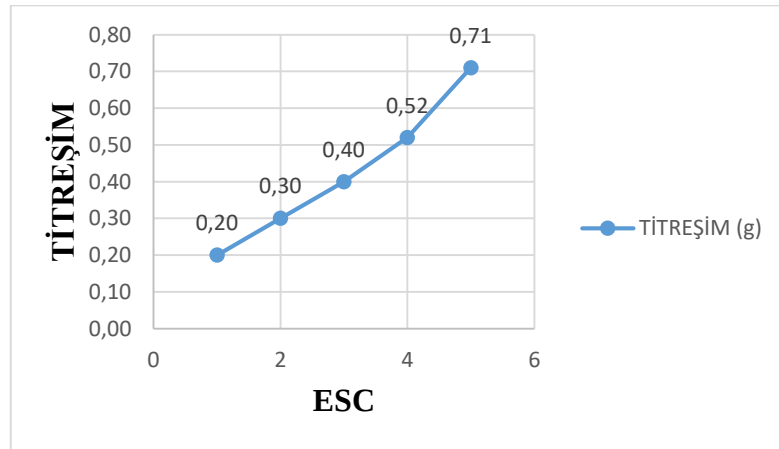
Şekil 8.1. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - akım



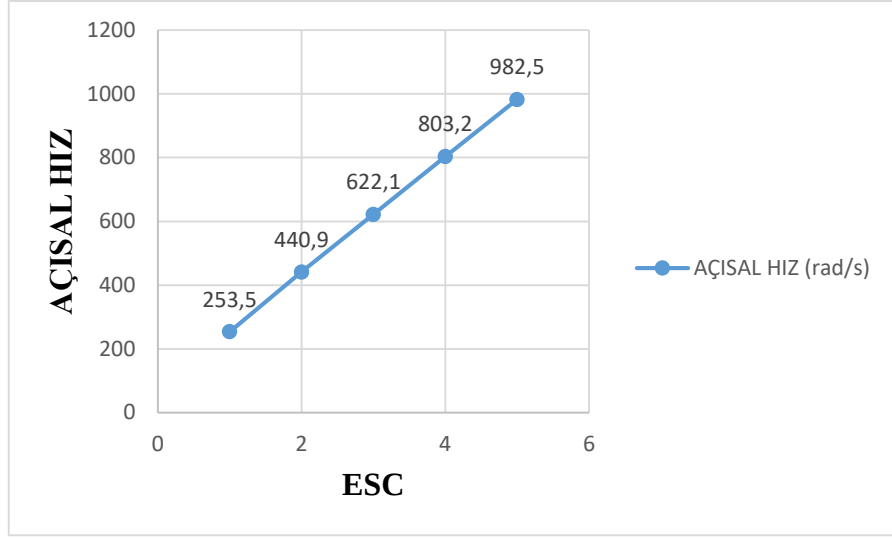
Şekil 8.2. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - güç



Şekil 8.3. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – tork (moment)



Şekil 8.4. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - titreşim



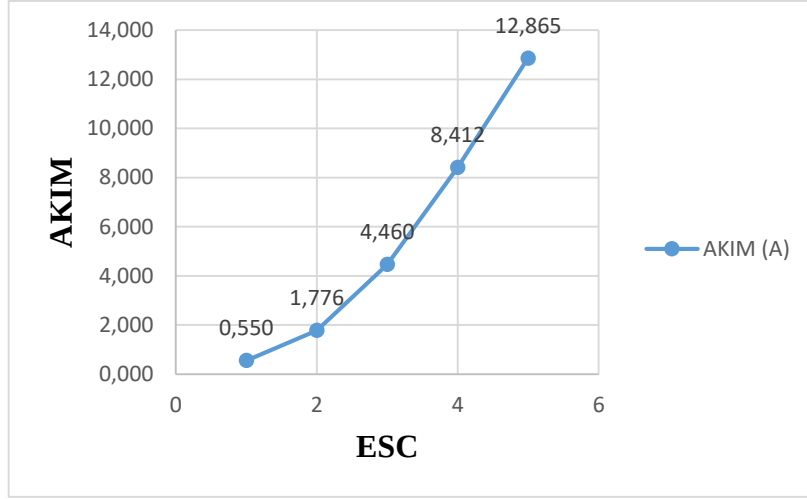
Şekil 8.5. Pervanesiz durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – açısai hız

8.2. Pervaneli (Yüklü) Deney Verilerinin Değerlendirilmesi

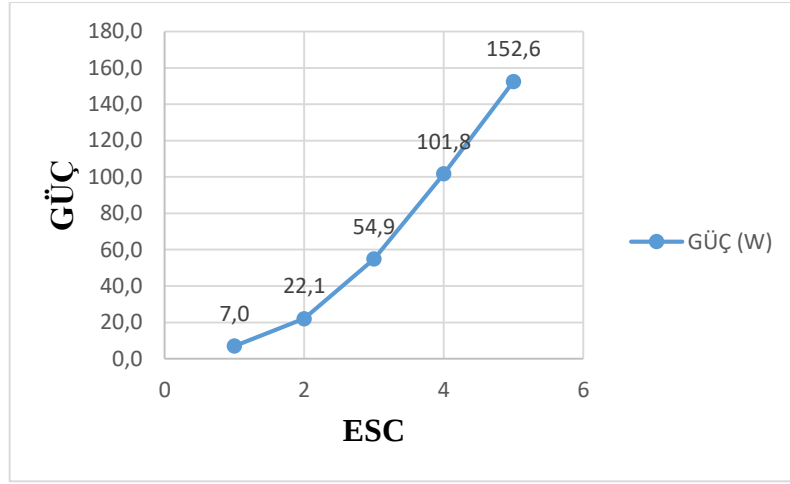
Pervanenin takılı olduğu yüklü durumda yapılan testlerin sonucu aşağıdaki tablo ve grafiklerdeki gibidir. Beş farklı PWM değeri için yapılan testler sabit gerilim değerlerinde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Test verilerini incelediğimizde çekilen akım değerinin, kullanılan güç değerinin pervanesiz duruma göre daha ivmeli bir artış sergilediği görülmüştür. İtke değeri, sistem titreşiminin ve elektrik motoru milinin açısai hızının düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yüklü çalışıldığı için tork (moment) değerinde artış gözlemlenmiştir.

Tablo 8.2. Pervaneli (Yüklü) 5 farklı PWM değeri için deney verileri

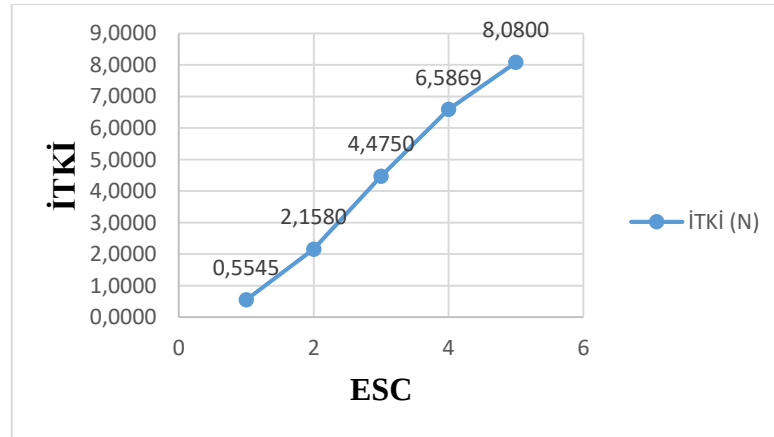
ESC (PWM)	GERİLİM (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	TİTREŞİM (g)	AÇISAL HIZ (rad/s)	MOTOR VERİMİ
(1)1450	12,596	0,550	7,0	0,5545	0,0572	0,40	210,8	96%
(2)1400	12,483	1,776	22,1	2,1580	0,0573	0,41	336,1	87%
(3)1350	12,297	4,460	54,9	4,4750	0,0583	1,08	459,6	50%
(4)1300	12,127	8,412	101,8	6,5869	0,0600	1,59	560,0	34%
(5)1250	11,866	12,865	152,6	8,0800	0,0608	1,21	619,3	25%



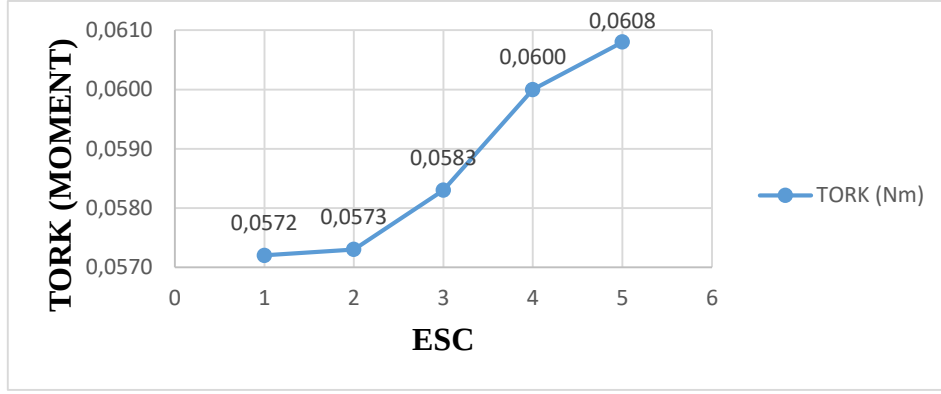
Şekil 8.6. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - akım



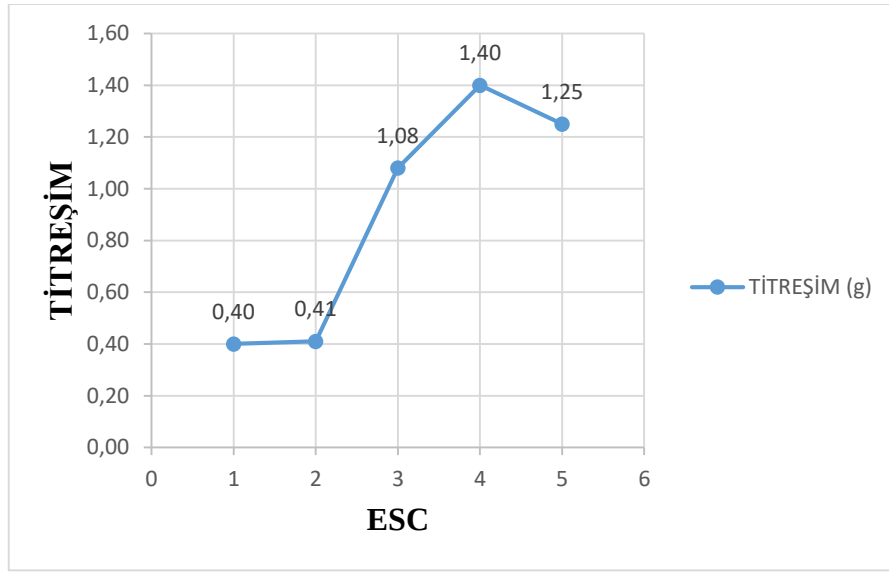
Şekil 8.7. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - güç



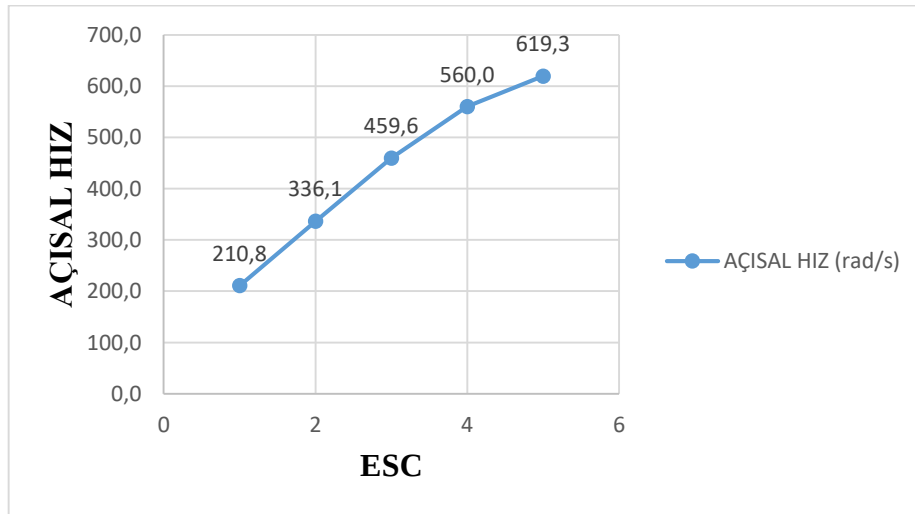
Şekil 8.8. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - itki



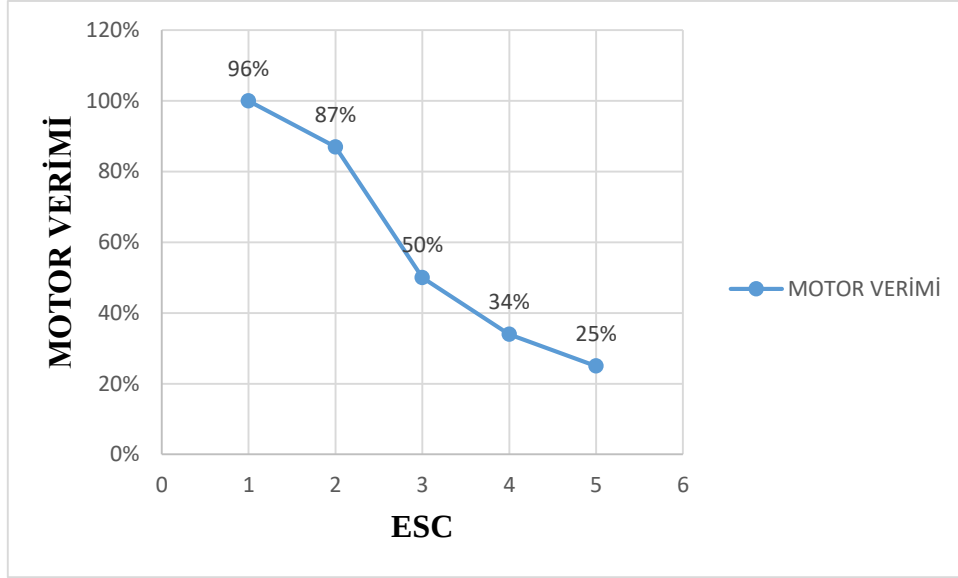
Şekil 8.9. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – tork (moment)



Şekil 8.10. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi - titreşim



Şekil 8.11. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – açısız hız



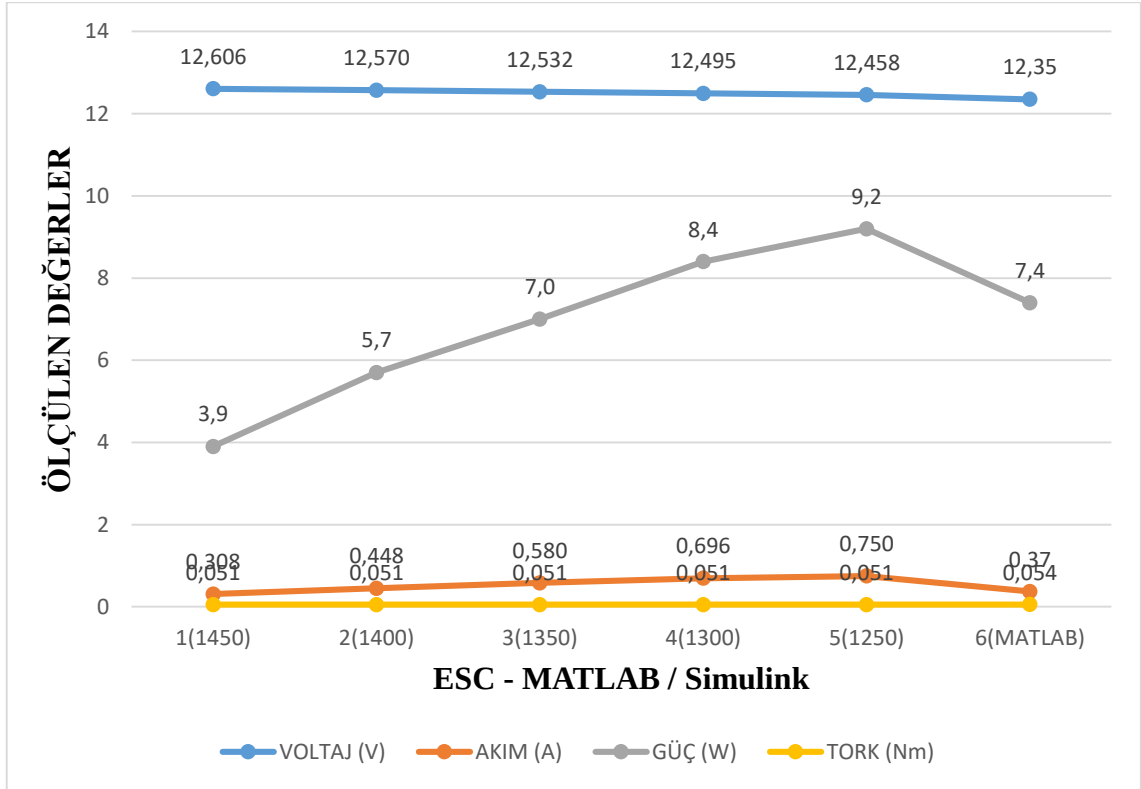
Şekil 8.12. Pervaneli durumda Deney düzeneğinin verilerinin ESC değerleri ile değişimi – motor verimi

8.3. Pervanesiz (Yüksüz) Durumda Deney Verileri ile MATLAB / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması

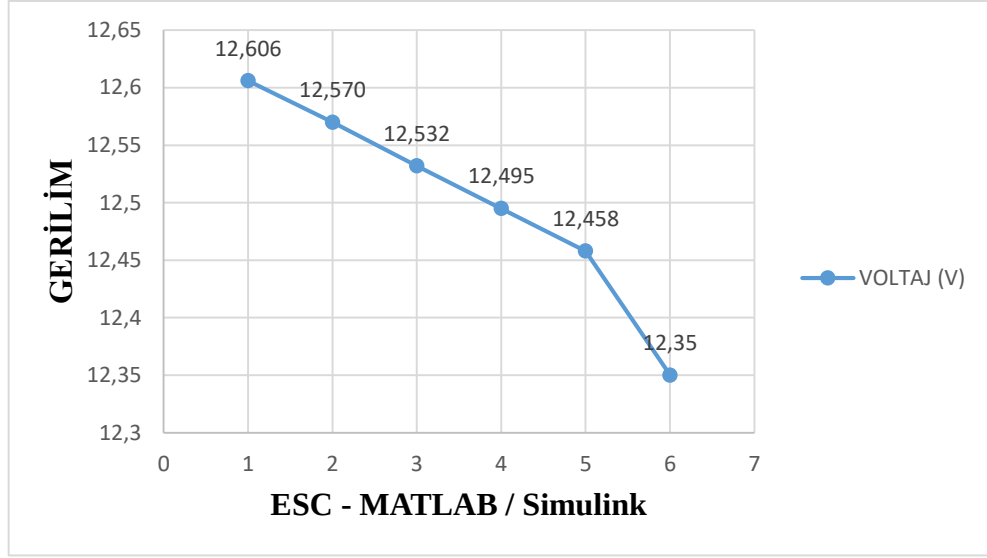
Pervanesiz durumda deney düzeneği ile yapılan test sonuçları ile MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Deney düzeneği, eldeki imkanlar dahilinde olabildiğince kalibre edilmiş halde çalıştırılmaya özen gösterilmiştir. Her farklı PWM değeri için yapılan deney tekrarları olabildiğince 12-12,5 V sınırları içerisinde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Aşağıda pervanesiz durumda yapılan test sonuçları ile MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyon sonuçlarının karşılaştırıldığı kapsamlı grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde yatay eksenin ilk 5 değeri beş farklı PWM değerlerini, 6. eksen ise MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyon sonuçlarını ifade etmektedir. MATLAB / Simulink uygulamasında ESC kullanılmadığı için, simülasyon uygulamasında bataryanın performansını kontrol etmek mümkün olmamış, çıkan sonuçların farklı zaman aralıklarında değerlendirilmesi gerekmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin sonucunda mukayese sonuçları kabul edilebilir sınırlar çerçevesinde ya da bu sınırlara yakın olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 8.3. Pervanesiz (Yüksüz) Durumda Deney Verileri ile MATLAB / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması

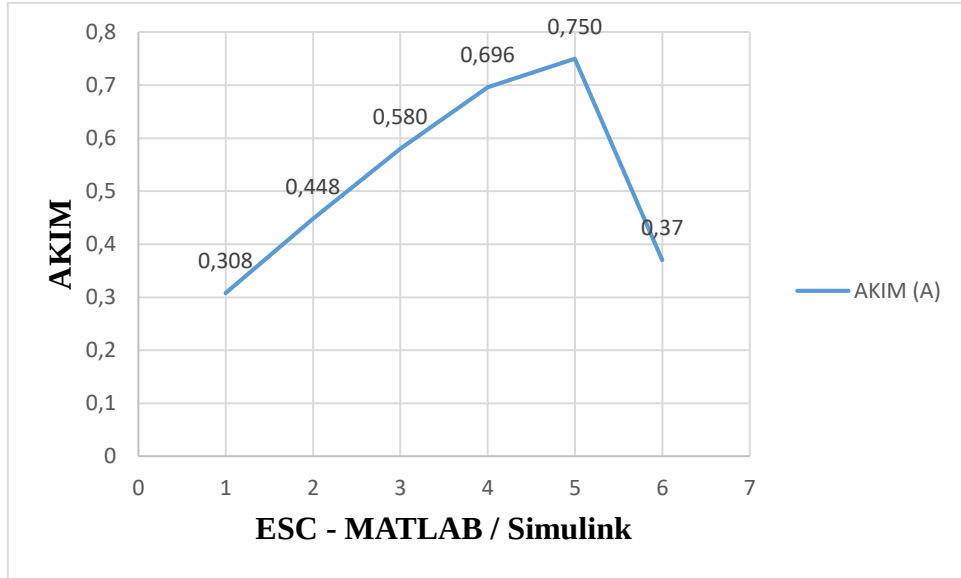
ESC (PWM)	GERİLİM (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	TORK (Nm)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1(1450)	12,606	0,308	3,9	0,051	253,5
2(1400)	12,570	0,448	5,7	0,051	440,9
3(1350)	12,532	0,580	7,0	0,051	622,1
4(1300)	12,495	0,696	8,4	0,051	803,2
5(1250)	12,458	0,750	9,2	0,051	982,5
6(MATLAB)	12,35	0,37	7,4	0,054	354



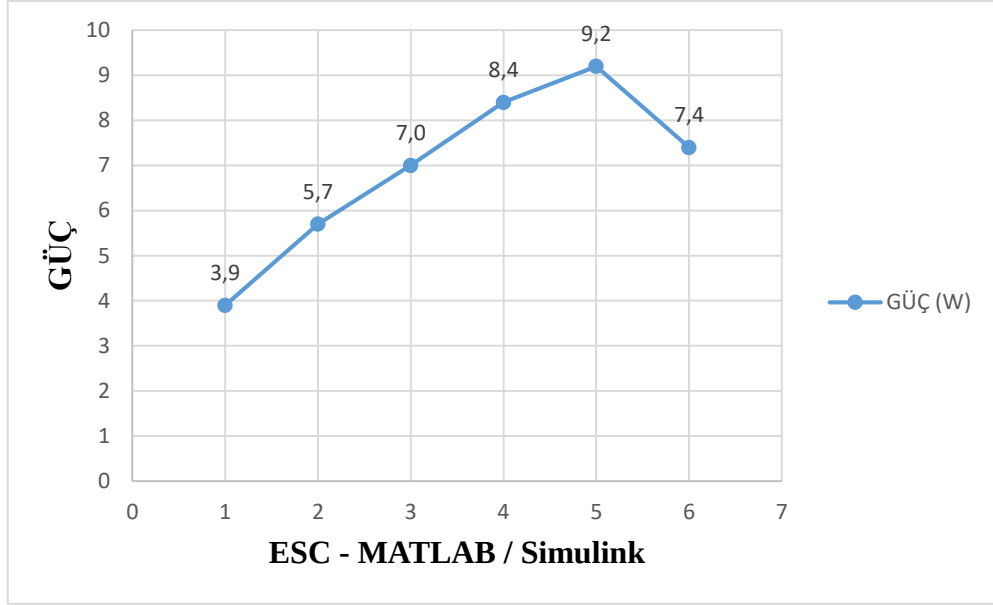
Şekil 8.13. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması



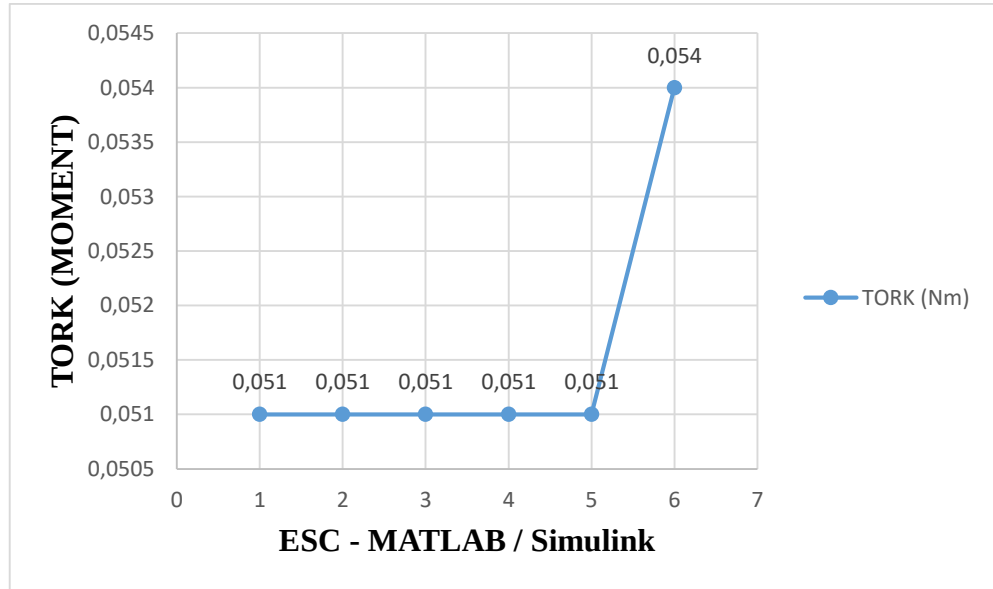
Şekil 8.14. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması - gerilim



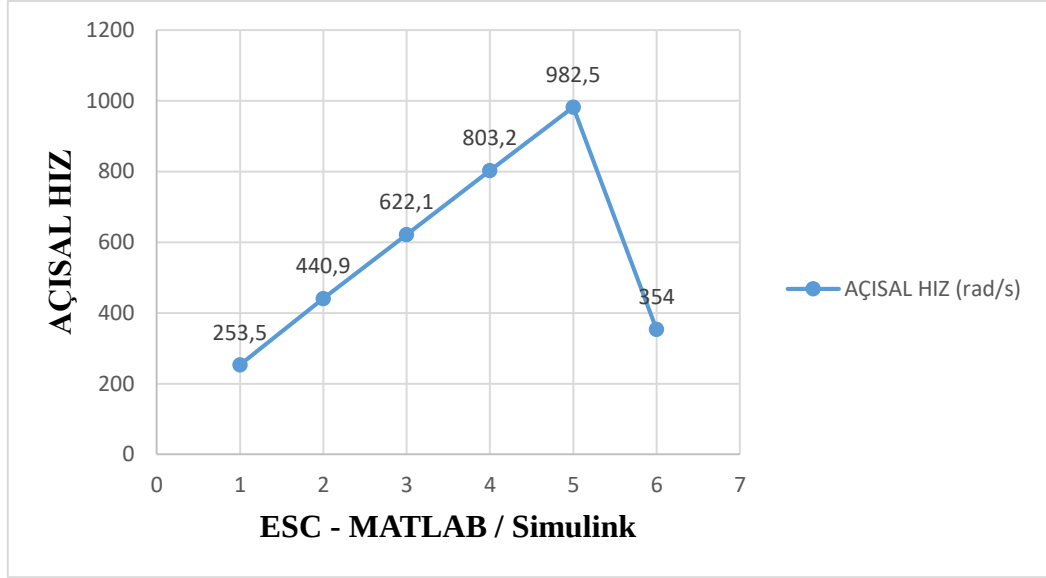
Şekil 8.15. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması - akım



Şekil 8.16. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması - güç



Şekil 8.17. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – tork (moment)



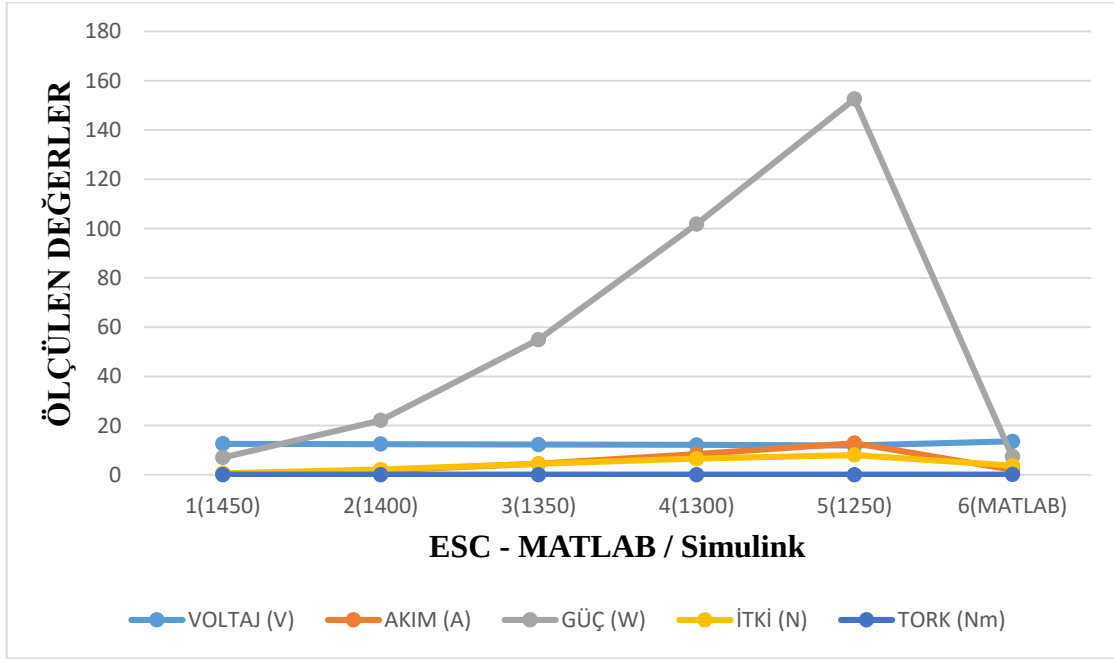
Şekil 8.18. Pervanesiz durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – açısal hız

8.4. Pervaneli (Yüklü) Durumda Deney Verileri ile MATLAB / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması

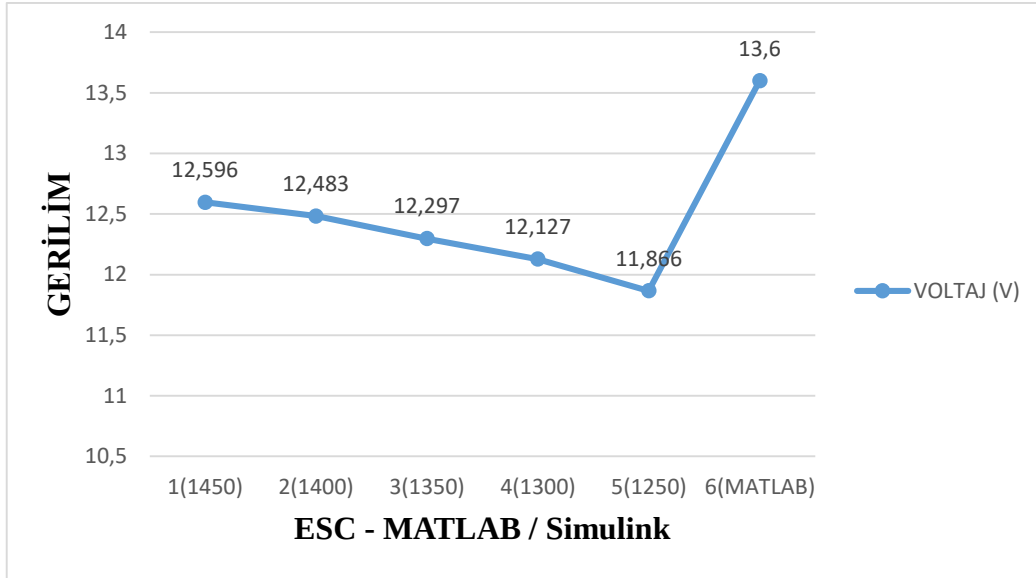
Pervaneli durumda deney düzeneği ile yapılan test sonuçları ile MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Deney düzeneği, eldeki imkanlar dahilinde olabildiğince kalibre edilmiş halde çalıştırılmaya özen gösterilmiştir. Her farklı PWM değeri için yapılan deney tekrarları olabildiğince 12-12,5 V sınırları içerisinde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Aşağıda pervanenin takılı olduğu durumda yapılan test sonuçları ile MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyon sonuçlarının karşılaştırıldığı kapsamlı grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde yatay eksenin ilk 5 değeri beş farklı PWM değerlerini, 6. eksen ise MATLAB / Simulink uygulamasının simülasyon sonuçlarını ifade etmektedir. MATLAB / Simulink uygulamasında ESC kullanılmadığı için, simülasyon uygulamasında bataryanın performansını kontrol etmek mümkün olmamış, çıkan sonuçların farklı zaman aralıklarında değerlendirilmesi gerekmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin sonucunda mukayese sonuçları kabul edilebilir sınırlar çerçevesinde ya da bu sınırlara yakın olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 8.4. Pervaneli (Yüklü) Durumda Deney Verileri ile MATLAB / Simulink Programı Verilerinin Karşılaştırılması

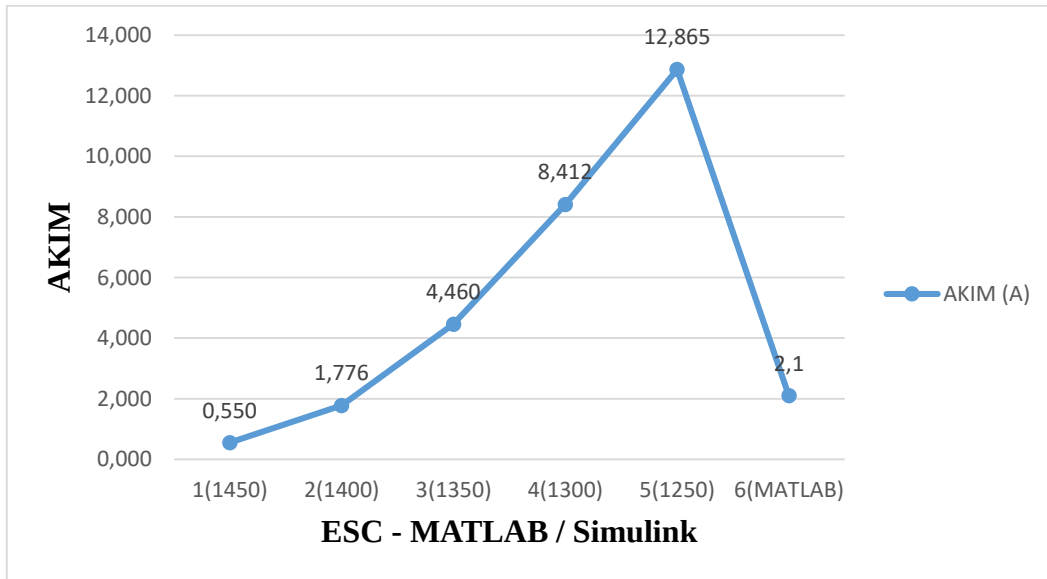
ESC (PWM)	GERİLİM (V)	AKIM (A)	GÜÇ (W)	İTKİ (N)	TORK (Nm)	AÇISAL HIZ (rad/s)
1(1450)	12,596	0,550	7,0	0,5545	0,0572	210,8
2(1400)	12,483	1,776	22,1	2,1580	0,0573	336,1
3(1350)	12,297	4,460	54,9	4,4750	0,0583	459,6
4(1300)	12,127	8,412	101,8	6,5869	0,0600	560,0
5(1250)	11,866	12,865	152,6	8,0800	0,0608	619,3
6(MATLAB)	13,6	2,1	7,4	3,7	0,12	365



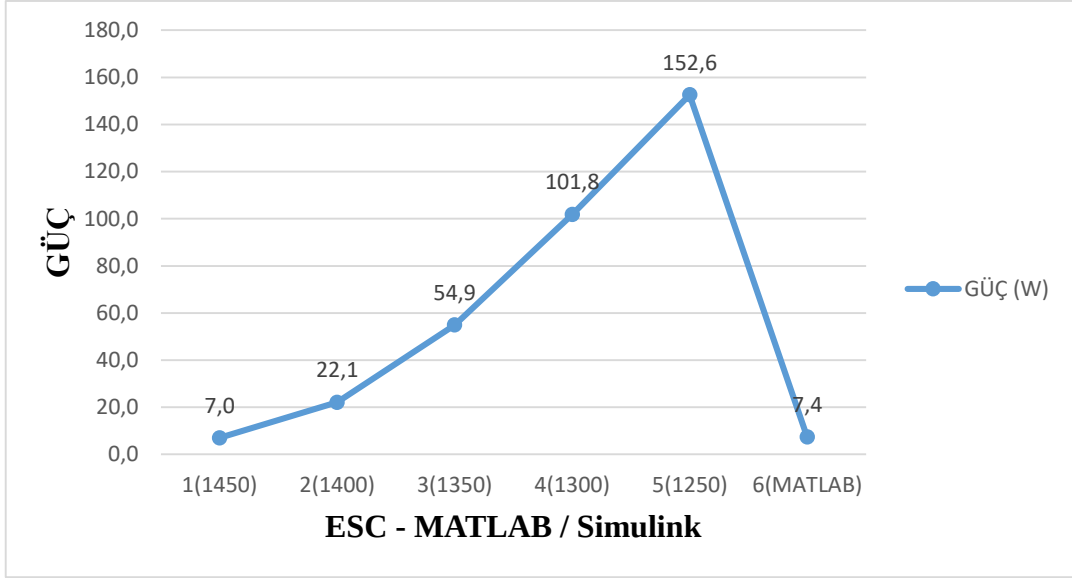
Şekil 8.19. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması



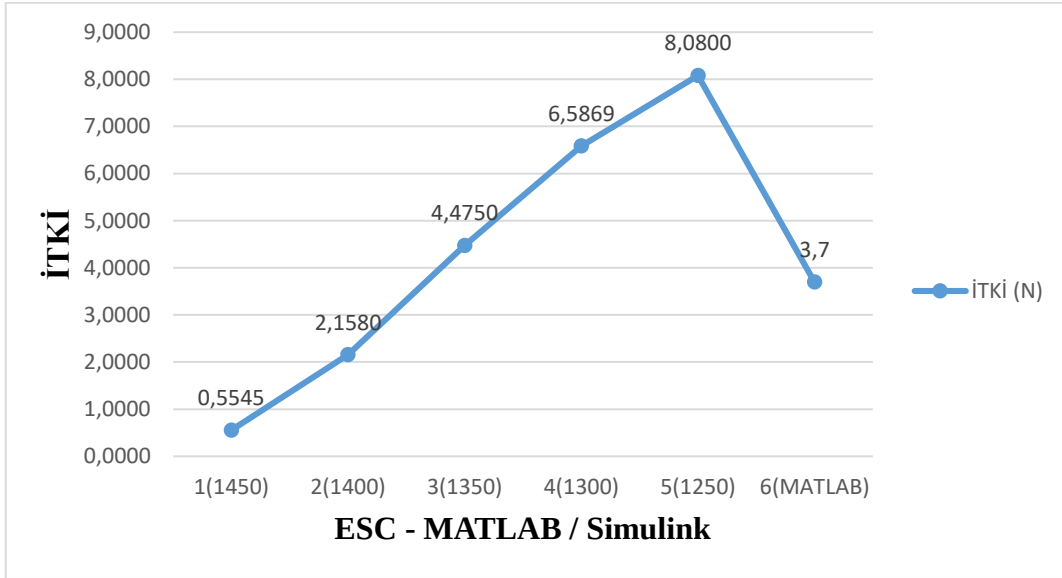
Şekil 8.20. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması - gerilim



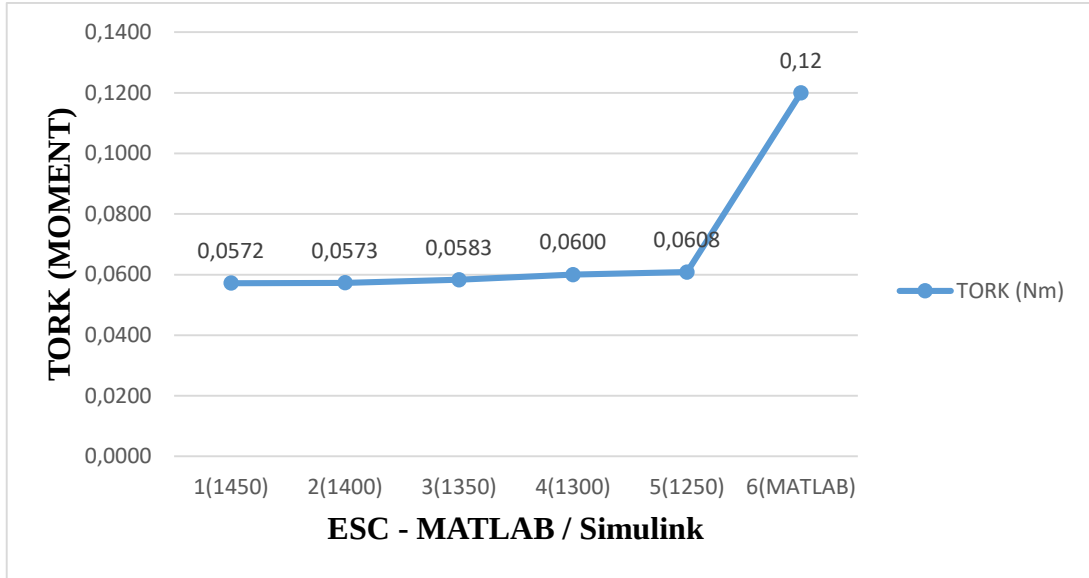
Şekil 8.21. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması - akım



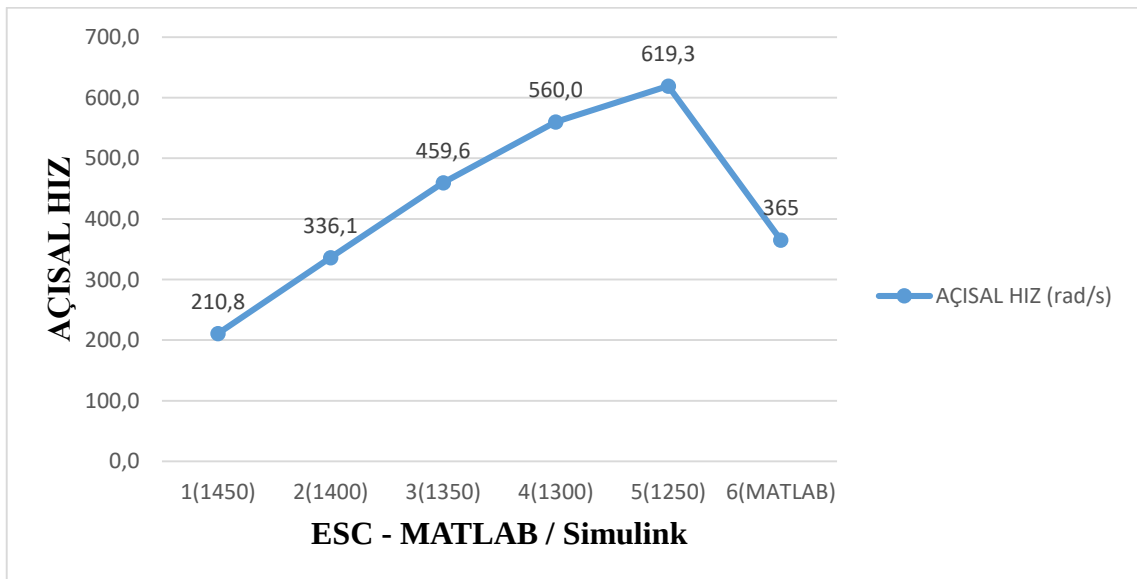
Şekil 8.22. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – güç



Şekil 8.23. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması - itki



Şekil 8.24. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – tork (moment)



Şekil 8.25. Pervaneli durumda farklı ESC değerlerinde Deney düzeneği verilerinin MATLAB / Simulink sonuçları ile karşılaştırılması – açısal hız

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemiz, havacılık faaliyetlerinin ve endüstrisinin gelişimine bakıldığında hızla gelişen seyir gözlenmektedir. 1990'ların ortalarından itibaren yakalanan ivme bugün de devam etmektedir. Bugün ülkemiz, savunma sanayi faaliyetleri itibariyle kendine %100 yetme noktasında hızla ilerleyen, son 20 yılda yerlilik oranını artırmış bir ülkedir.

Bugün dünyada havacılık faaliyetlerinin en ilgi çekici konularından birisi İnsansız Hava Aracı çalışmalarıdır. A.B.D., Avrupa Birliği ve İsrail, İHA teknolojisi / endüstrisi çalışmalarında dünyada başı çekmektedir. Ülkemiz, bu ülkelerin hemen ardından gelen grupta yer almakta olup, gelişimini hızla sürdürmektedir.

İHA ar-ge faaliyetlerinin içinde, İHA tasarımı ile birlikte en önemli iki konudan birisi, bu tez çalışmasının da konusu olan 'İHA İtki Sistemleri'dir. İHA İtki Sistemlerinde süreç detayları tez çalışmasında da belirtildiği üzere giderek artan bir oranla elektrikli itki sistemlerine evrilmektedir. Ülkemizde giderek artan İHA çalışmaları içinde elektrikli itki sistemlerinin çalışılması oldukça önemlidir.

Tez çalışması boyunca gerek literatür taramalarında, gerek havacılık – uçak –uzay fakültelerine konu ile ilgili olarak yapılan sayısız ziyarette, gerekse de İHA imalatı yapan şirketlerin imalathanelerine yapılan teknik gezilerde görüldüğü kadarıyla havacılık endüstrisinin 'İtki Sistemlerinin Tasarımı ve Hesaplamaları' konusunda yerlilik oranı oldukça düşüktür. Bu tez çalışmasının konusunun önemi ülkemiz havacılığının bu alanının bahsedilen çerçevede düşünüldüğünde bir kez daha görünmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında mikro / mini sınıf bir İHA için itki sistemi tasarımı yapılmış, bu tasarımın matematik modeli oluşturulmuş, bu model büyük ölçüde MATLAB / Simulink programına aktarılmış, uygun komponentler seçilerek belirli parametre değerleri çerçevesinde simülasyonlar gerçekleştirilip MATLAB / Simulink modelinin sağlaması yapılmıştır. Daha sonra tüm bu itki sistemi komponentlerini ve ölçüm enstrümantasyonunu içeren bir deney düzeneği sistemi kurulmuş, 5 farklı PWM değeri için hem pervanesiz hem de pervaneli durum için testler yapılmış, tüm bu test sonuçları önce değerlendirilmiş sonra da MATLAB / Simulink programı ile simülasyona sokulmuş ve nihayetinde tüm bu sonuçlar karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

Bulunan sonuçlar büyük ölçüde simülasyon ve test sonuçlarının örtüştüğünü göstermektedir. Deney düzeneği ile yapılan testlerin sonuçlarına etkiyen birçok faktör

bulunmaktadır. Tekraren belirtmekte fayda olmakla birlikte, cihaz kalibrasyonu testlere başlanmadan önce mutlaka çok dikkatli yapılmalıdır. Bu durum test sonuçlarının hassasiyetini belirlemektedir. Test düzeneği komponentlerinin çalışma aralığı değerleri de test sonuçlarının hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. İlerleyen aşamalarda MATLAB / Simulink modeline ESC matematik modeli de eklenmesi, böylelikle güç aktarımının kontrolü sağlanıp daha kontrollü sonuçlar elde edilmesi planlanmaktadır. Yine ilerleyen süreçlerde mikro / mini sınıfın dışında daha büyük boyutlu İHA'lar için elektrikli itki sistemi hesaplamaları ve testleri yapılabilecek çalışmalar arasındadır.

Bu konuda yapılan faaliyetlerin gelişmesi, ülkemiz havacılık endüstrisinin zaten sınırlı olan kaynaklarını ülke dışına aktarmaması ve itki sistemi tasarım ve hesaplamalarında dışa bağımlılığımızın azaltması açısından oldukça önemlidir.

KAYNAKÇA

- Adkins, C. N., & Liebeck, R. H. (1994). Design of optimum propellers. *Journal of Propulsion and Power*, 10(5), 676-682.
- Akyürek, S., Yilmaz, M. A., & Taşkıran, M. (2012). İnsansız Hava Araçları Muharebe Alanında ve Terörle Mücadelede Devrimsel Dönüşüm. *Bilge Adamlar Stratejik Araştırmalar Merkezi Yayınları, İstanbul*, 2.
- Atan, Ö. (2007). Fırçasız DA motorunun Modellenmesi ve PWM Yöntemiyle Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van*.
- Austin, R. (2011). *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment* (Vol. 54). John Wiley & Sons.
- Aydoğdu, Ö., & Bayer, M. PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı. *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Selçuk Üniversitesi, Konya*.
- Bakker, D. (2010). Battery Electric Vehicles: Performance, CO2 emissions, lifecycle costs and advanced battery technology development. *Copernicus Institute University of Utrecht*.
- Bayraktar, H., & Balık, H. (2015). The Control of Brushless DC Motors. *International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering (IJEMME)*, 5(2), 919-932.
- Bento, M. D. F. (2008). Unmanned aerial vehicles: an overview. *Inside GNSS*, 3(1), 54-61.
- Cai, L., White, R. E. (2009). Mathematical Modeling of a Lithium Ion Battery. In *Proceedings of the COMSOL Conference*.
- Caner, E. (2013). İnsansız Hava Araçları. Milli Güvenlik ve Askerî Bilimler Akademik Dergisi. The Journal of National Security and Military Sciences. Sonbahar/Fall 2013, Cilt/Volume 1, Sayı/No 1, 213-241
- Cao, W., Mecrow, B. C., Atkinson, G. J., Bennett, J. W., & Atkinson, D. J. (2012). Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA). *IEEE transactions on industrial electronics*, 59(9), 3523-3531.

- Cox, T. H., Nagy, C. J., Skoog, M. A., Somers, I. A., & Warner, R. (2004). Civil UAV Capability Assessment.
- Dalcalı, A. (2013). Rotatif Krayojenik Soğutucular İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı Ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi. Ankara.
- Dempsey, M. E., & Rasmussen, S. (2010). Eyes of the army—US Army roadmap for unmanned aircraft systems 2010–2035. *US Army UAS Center of Excellence, Ft. Rucker, Alabama*, 9.
- Dudhe, S. S., & Thosar, A. G. (2014). Mathematical Modelling and Simulation of Three Phase BLDC Motor using Matlab/Simulink. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 7(5), 1426.
- Dudzinski, L. A., Pencil, E. J., & Dankanich, J. W. (2007, September). Electric Propulsion Requirements and Mission Analysis Under NASA's In-Space Propulsion Technology Project. In *IEPC-2007-354, 30th International Electric Propulsion Conference*.
- El-Sayed, A. F. (2017). *Aircraft propulsion and gas turbine engines*. CRC Press.
- Erdoğan, O., Vural, B., & Uzunoglu, M. (2009, June). A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading. In *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on* (pp. 383-386). IEEE.
- Fehrenbacher, J., Stanley, D. L., Mary, E., & Honchell, J. (2011). Electric motor & power source selection for small aircraft propulsion.
- Finn, R. L., & Wright, D. (2012). Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review*, 28(2), 184-194.
- Gao, L., Liu, S., & Dougal, R. A. (2002). Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. *IEEE transactions on components and packaging technologies*, 25(3), 495-505.
- Gomadam, P. M., Weidner, J. W., Dougal, R. A., & White, R. E. (2002). Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems. *Journal of power sources*, 110(2), 267-284.

- Griffis, C., Wilson, T., Schneider, J., & Pierpont, P. (2009). Unmanned Aircraft System Propulsion Systems Technology Survey.
- Gupta, S. G., Ghonge, M. M., & Jawandhiya, P. M. (2013). Review of unmanned aircraft system (UAS). *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2(4), pp-1646.
- Gur, O., & Rosen, A. (2009). Optimizing electric propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Journal of aircraft*, 46(4), 1340-1353.
- Hepperle, M. (2012). Electric flight-potential and limitations. *German Aerospace Centre, Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Germany*.
- Hobbs, A. (2010). Unmanned aircraft systems. In *Human Factors in Aviation (Second Edition)* (pp. 505-531).
- Huang, Y., Thomson, S. J., Hoffmann, W. C., Lan, Y., & Fritz, B. K. (2013). Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(3), 1-10.
- Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Gazzarri, J., Huria, T., & Ceraolo, M. (2013). *Battery model parameter estimation using a layered technique: an example using a lithium iron phosphate cell* (No. 2013-01-1547). SAE Technical Paper.
- Jahn, R. G., & Choueiri, E. Y. (2001). Electric propulsion.
- Kahveci, M., & Nazlı, C. A. N. (2017). İnsansız Hava Araçları: Tarihçesi, Tanımı, Dünyada Ve Türkiye'deki Yasal Durumu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4), 511-535.
- Karaağaç, C. Uçan Robotlar: Geleceğin Askeri Harekât Ortamında İnsansız Hava Aracı Sistemleri.
- Keane, J. F., & Carr, S. S. (2013). A brief history of early unmanned aircraft. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 32(3), 558-571.
- Klee, A. (2005). Development of a motor speed control system using matlab and simulink, implemented with a digital signal processor.

- Korchenko, A. G., & Illyash, O. S. (2013, October). The generalized classification of unmanned air vehicles. In *Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD), 2013 IEEE 2nd International Conference* (pp. 28-34). IEEE.
- Krykowski, K., & Hetmańczyk, J. (2013). Constant current models of brushless DC motor. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 3(1), 19-24.
- Kuhn, H., & Sizmann, A. (2012). Fundamental prerequisites for electric flying. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV.
- Kumar, A. (2014). *Battery Modeling and its Dynamics for the application in Renewable Energy Systems* (Doctoral dissertation).
- Laxminarayana, Y., & Tarakalyani, S. (2013). Modeling and Simulation of Bldc Motor for Aiding and Opposing Loads. *IOSR J. Electr. Electron. Eng*, 7(4), 9-67.
- Lee, B. K., & Ehsani, M. (2003). Advanced simulation model for brushless dc motor drives. *Electric power components and systems*, 31(9), 841-868.
- Lee, S., & Choi, Y. (2016). Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry. *Geosystem Engineering*, 19(4), 197-204.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of Batteries*. 3rd. McGraw-Hill.
- Litt, J. S., Simon, D. L., Garg, S., Guo, T. H., Mercer, C., Millar, R., ... & Jensen, D. T. (2004). A survey of intelligent control and health management technologies for aircraft propulsion systems. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 1(12), 543-563.
- Maddalon, J. M., Hayhurst, K. J., Koppen, D. M., Upchurch, J. M., Morris, A. T., & Verstynen, H. A. (2013). Perspectives on unmanned aircraft classification for civil airworthiness standards.
- Marshall, D. M., Barnhart, R. K., Hottman, S. B., Shappee, E., & Most, M. T. (2016). *Introduction to unmanned aircraft systems*. Crc Press.
- Martinez, I. (1995). Aircraft Propulsion, Thermal and mechanical Limitations In Jet Engines.

- Martinez-Sanchez, M., & Pollard, J. E. (1998). Spacecraft electric propulsion-an overview. *Journal of propulsion and power*, 14(5), 688-699.
- MoD, U. K. (2011). Joint Doctrine Note 2/11 the UK Approach to Unmanned Aircraft Systems. *UK MoD The Development, Concepts and Doctrine Centre, SWINDON, Wiltshire*, 30.
- Momenzadeh, M. M., Ahmed, A. F., & Tolba, A. (2014). Modelling and simulation of the bldc electric drive system using simulink/matlab for a hybrid vehicle. *Paderborn, Germany*.
- Mondal, S., Mitra, A., & Chattopadhyay, M. (2015, March). Mathematical modeling and simulation of Brushless DC motor with ideal Back EMF for a precision speed control. In *Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Note, J. D. (2013). 3/10,“. *Unmanned Aircraft Systems: Terminology, Definitions and Classification*”, *Joint Doctrine Note 3/10, Ministry of Defense UK*.
- Oleson, S. (2004, December). Electric Propulsion Technology Development for the Jupiter Icy Moon Orbiter Project. In *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*(p. 3449).
- Ostler, J. N., Bowman, W. J., Snyder, D. O., & McLain, T. W. (2009). Performance flight testing of small, electric powered unmanned aerial vehicles. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1(3), 155-171.
- Parker, R., & Fedder, G. (2016). Aircraft engines: a proud heritage and an exciting future. *The Aeronautical Journal*, 120(1223), 131-169.
- Philip, P., & Meenakshy, K. (2012). Modelling Of Brushless DC Motor Drive Using Sensored And Sensorless Control (back EMF zero crossing etection).
- Price, M., Raghunathan, S., & Curran, R. (2006). An integrated systems engineering approach to aircraft design. *Progress in Aerospace Sciences*, 42(4), 331-376.
- Rudol, P. (2011). *Increasing autonomy of unmanned aircraft systems through the use of imaging sensors* (Doctoral dissertation, Linköping University Electronic Press).

- Samuel, A., & Lin, Y. (2015). Airvolt Aircraft Electric Propulsion Test Stand. In *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* (p. 4108).
- Sarwar, S., & Shah, S. F. (2013). Mathematical Modelling of Unmanned Aerial Vehicles. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 32(4), 615-622.
- Sehra, A. K., & Whitlow Jr, W. (2004). Propulsion and power for 21st century aviation. *Progress in Aerospace Sciences*, 40(4-5), 199-235.
- Serokhvostov, S. V., & Churkina, T. (2011, September). One useful propeller mathematical model for mav. In *International Micro Air Vehicle conference and competitions 2011 (IMAV 2011)*, 't Harde, The Netherlands, September 12–15, 2011. Delft University of Technology and Thales.
- Sheth, V. (2014). Spacecraft Electric Propulsion—A review. *International Journal Of Research In Aeronautical And Mechanical Engineering*, 2(9), 43-55.
- Speas, R. B. (2006). The Functional Application of the Propeller Load Curve for Fixed Pitch Propellers.
- Thirugnanam, K., Saini, H., & Kumar, P. (2012, June). Mathematical modeling of li-ion battery for charge/discharge rate and capacity fading characteristics using genetic algorithm approach. In *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012 IEEE* (pp. 1-6). IEEE.
- Toliyat, H. A., & Gopalarathnam, T. (2002). AC machines controlled as DC machines (Brushless DC machines/electronics). *The power electronics handbook*.
- Torun, A. (2017). İnsansız Hava Aracı (İHA) Sektörü Ve İHA Fotogrametrisinin Ölçme Bağlamında Konumlandırılması The Sector of Unmanned Aerial Systems and Positioning UAS Photogrammetry Regarding Surveying Discipline.
- Urs, M., Vezzini, A. (2015). Electric Flight history, state of the art and first applications. EVS28 KINTEX, Korea, May 3-6, 2015.
- Vogeltanz, T. (2016). A survey of free software for the design, analysis, modelling, and simulation of an unmanned aerial vehicle. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(3), 449 514.

- Xiang, C., Wang, X., Ma, Y., & Xu, B. (2015). Practical modeling and comprehensive system identification of a BLDC motor. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Xu, G., Liu, L., & Zhang, X. (2016). Modeling and Performance Analysis for Low Altitude Electric UAVs.
- Yoon, M. (2015). On driving signal of electronic speed controller for small multi-rotor helicopter. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(11), 456-459.
- Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., & Strunz, K. (2013). Electric vehicle battery technologies. In *Electric vehicle integration into modern power networks* (pp. 15-56). Springer, New York, NY.