

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YAPAY ZEKA VE ROBOTİK ANABİLİM DALI

**YER ETKİLİ HAVA ARACININ MODELLENMESİ VE YÜKSEKLİK
KONTROLÜ**

Tabarek Ahmed Taher AL MAATOQ

Danışman: Doç. Dr. Kamil ORMAN

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Dr. Öğr. Üyesi Funda AKAR
Dr. Öğr. Üyesi Kaan CAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERZİNCAN, 2024

© 2024 [Tabarek Ahmed Taher AL MAATOQ]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Kamil ORMAN danışmanlığında, Tabarek Ahmed Taher AL MAATOQ tarafından hazırlanan bu çalışma 27/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yapay Zekâ ve Robotik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Funda AKAR İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Kaan CAN İmza:

Üye : Doç. Dr. Kamil ORMAN İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun .. /.. / 2024 tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR

Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

YER ETKİLİ HAVA ARACININ MODELLENMESİ VE YÜKSEKLİK KONTROLÜ

Tabarek Ahmed Taher AL MAATOQ

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Yapay Zeka ve Robotik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kamil Orman

2024, 60 sayfa

Bu çalışmanın amacı, kanatları ile yer arasındaki aerodinamik etkileşimden yararlanarak okyanus ve deniz gibi yüzeylerde uçabilen araçları kapsamlı bir şekilde incelemek ve böyle bir aracın yükseklik kontrolünü simülasyon ortamında gerçekleştirmektir. Bu araçlar, normal uçaklara kıyasla daha verimli ve daha hızlı çalışmaları ile öne çıkmaktadır. Su yüzeyinin üzerinde bir gemi gibi hareket eden bu araçlar, gemilerin hızından çok daha yüksek hızlara ulaşabilmektedir. Ayrıca iniş ve kalkış için piste ihtiyaç duymamaları, hem su hem de kara yüzeyinde operasyonel olmalarını sağlamaktadır. Bu tür araçlarda uçuş sırasında meydana gelebilecek arızalar durumunda, yolcular için risk düzeyi normal uçaklara göre daha düşük kalmaktadır. Araç, kıyı şehirleri arasında bir ulaşım aracı olarak kullanılmasının yanı sıra askeri amaçlarla da değerlendirilebilir. Çalışmada, yer etkisinin en verimli şekilde kullanılabilmesi amacıyla geliştirilen araç modeline yükseklik kontrolü uygulanmıştır. Bu kapsamda, alçak geçiren filtre görevi gören ve sistemdeki yüksek frekanslı gürültüyü filtreleyebilme özelliğine sahip bir PI (Proportional-Integral) kontrolör test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrolörün performansını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yer Etkili Hava Aracı, Modelleme, Yükseklik Kontrolü

ABSTRACT

MODELING AND ALTITUDE CONTROL OF GROUND EFFECT AIRCRAFT

Tabarek Ahmed Taher AL MAATOQ

Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,

Department of Artificial Intelligence and Robotics

Advisor: Assoc. Prof. Kamil ORMAN

2024, 60 pages

The aim of this study is to comprehensively examine vehicles that can fly on surfaces such as oceans and seas by taking advantage of the aerodynamic interaction between their wings and the ground, and to perform the height control of such a vehicle in a simulation environment. These vehicles stand out with their more efficient and faster operation compared to normal aircraft. These vehicles, which move like a ship on the water surface, can reach speeds much higher than the speed of ships. In addition, they do not need a runway for landing and take-off, allowing them to be operational on both water and land surfaces. In case of malfunctions that may occur during flight in such vehicles, the risk level for passengers remains lower than in normal aircraft. In addition to being used as a means of transportation between coastal cities, the vehicle can also be used for military purposes. In the study, height control was applied to the developed vehicle model in order to use ground effect in the most efficient way. In this context, a PI (Proportional-Integral) controller, which acts as a low-pass filter and has the ability to filter high-frequency noise in the system, was tested. Simulation results reveal the performance of the proposed controller.

Keywords: Ground Effect Vehicle (GEV), Modeling, Altitude Control.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim süresince bana rehberlik eden, yönlendirmeleri, önerileri, eleştirileri, teşvikleri, fikirleriyle ve destekleri ile çalışmama katkıda bulunan danışmanım Doç. Dr. Kamil Orman’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bölümdeki diğer tüm öğretim üyelerine, sürekli destekleri ve özverili çalışmaları için minnettarım.

Tez sürecim boyunca bana maddi ve manevi destek sağlayan aileme, özellikle de babama, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yurttaki arkadaşlarıma, derslerimde ve araştırmalarımda yanımda olan ve bana destek olan tüm sınıf arkadaşlarıma ve zor zamanlarda bana güç verip devam etmem gerektiğini hatırlatan herkese teşekkür ederim ve çalışmamın her aşamasında manevi destekleriyle yanımda olan tüm sevdiklerime de şükranlarımı sunarım.

Son olarak azmimi pekiştiren ve başarıya ulaşmam için dolaylı olarak motivasyon sağlayan herkese de ayrıca teşekkür ederim ve bu yolda bana zorluk ve engeller çıkaranlara, bana verdikleri zarara rağmen başarıyı sürdürmem için sağladıkları motivasyondan dolayı.

Tabarek Ahmed Taher AL MAATOQ
Kasım, 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	2
1.1. Tez Planı.....	4
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	5
3.YER ETKİLİ HAVA ARAÇLARI.....	10
3.1. Yer Etkili Hava Araçlarının Özellikleri	10
3.2. Yer Etkili Hava Aracı Çeşitleri	12
3.3. Yer Etkili Hava Araçlarının Kullanım Alanları	18
3.4. Yer Etkili Hava Araçlarının Avantajları	20
4. YER ETKİSİ VE YER ETKİLİ HAVA ARAÇLARININ MODELLENMESİ	22
4.1. Yer Etkisi Nedir	22
4.2. Açıklık Baskın Yer Etkisi (SDGE)	28
4.3. Akor Baskın Yer Etkisi (CDGE).....	29
4.4. Yer Etkili Hava Araçlarının Denklemleri	31
5. YER ETKİLİ HAVA ARACININ SİMULİNK MODELİ VE YÜKSEKLİK KONTROLÜ	36
5.1. YEHA'nın Simulink Modeli	36
5.2. YEHA'nın Yükseklik Kontrolü	37
5.2.1. PI Kontrolcü	37
5.3. Simülasyon Sonuçları	38
6. SONUÇ ve TARTIŞMA	43
KAYNAKLAR	45

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Mevcut Yer Etkili Aracı Çeşitleri.....	17
---	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Ekronoplan	5
Şekil 2. X-114 deneysel prototipi.....	6
Şekil 3. Pelican Ultra Large Transport hava aracı	7
Şekil 4. Airfish-8 WIG.....	9
Şekil 5. Liberty Lifter yer etkili aracı tasarımı.....	11
Şekil 6. Açıklığın hakim olduğu yer etkisi	23
Şekil 7. Yer etkisi altında ve dışında gerçekleşen stall (Durma) açısı	26
Şekil 8. Hava aracında uçuş esnasında oluşan vortex akımları.....	30
Şekil 9. Yer etkili hava aracı simulink modeli.....	36
Şekil 10. PI Kontrolcüsü	37
Şekil 11. Yer etkili hava aracının PI denetleyici ile yükseklik kontrolüne ait blok diyagram.....	38
Şekil 12. YEHA'nın PI kontrolcü ile yükseklik kontrolünde referans ve simülasyon sunucu	38
Şekil 13. YEHA'nın yükseklik kontrolünde PI kontrolcüye ait kontrol işareti	39
Şekil 14. Yer etkisi parametresi σ 'nın yüksekliğe göre değişimi	39
Şekil 15. Kaldırma katsayısının yüksekliğe göre değişimi	40
Şekil 16. Sürüklenme katsayısının yüksekliğe göre değişimi.....	40
Şekil 17. YEHA'nın Yükseklik kontrolünde açısal hızlarının değişimi.....	41
Şekil 18. YEHA'nın Yükseklik kontrolünde doğrusal hızlarının değişimi	41
Şekil 19. YEHA'nın Yükseklik kontrolünde roll, pitch ve yaw açılarının değişimi .	42

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AR	Geometrik en boy oranı
$\widehat{AR}$	Etkin en boy oranı
C_{D_L}	Sürüklenme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
g	Yer çekimi ivmesi
h	Yükseklik
H/c	Açıklık oranı
I_x, I_y, I_z	x,y,z eksenlerine ait atalet momentleri
l	Kanat açıklığı
L	Yer etkisi altındaki kaldırma kuvveti
L_{yer}	Yer etkisi altındaki kaldırma kuvveti
m	Hava aracının kütlesi
M	Yunuslama momenti
N	Yalpalanma momenti
p, q, r	Açısal hız bileşenleri
S	Kanat yüzey alanı
T	İtme kuvveti
u, v, ω	Doğrusal hız bileşenleri
W	Ağırlık kuvveti
x, y, z	Hava aracının konumu
Y	Dönme momenti
σ	Kaldırma kuvvetindeki artışı ifade eden parametre
S_{eff}	Efektif yüzey alanı
Q_y, Q_r, Q_p	Damping etkileri
ϕ, θ, ψ	Yunuslama, yalpalama ve dönme açıları

Kısaltmalar

GEV	Ground Effect Vehicle
YEHA	Yer Etkili Hava Araç
WIG	Wig in Ground Effect Vehicle



1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisi, hava araçlarının performansını artırmak ve çeşitli operasyonel avantajlar sağlamak amacıyla sürekli olarak yenilikçi teknolojiler ve tasarım ilkeleri geliştirmektedir. Bu bağlamda, yer etkili araçlar (Ground Effect Vehicles - GEVs) ya da ekranoplanlar, aerodinamik performanslarını optimize etmek için yer etkisinden (Ground Effect) yararlanan özgün hava taşıtları olarak öne çıkmaktadır. Yer etkili hava araçları (YEHA), yüzeye yakın uçuş esnasında, kanat altındaki basınç artışı ve türbülans azalması sayesinde daha fazla kaldırma kuvveti ve yakıt verimliliği elde etmektedir. Bu tez, yer etkili hava araçlarının aerodinamik performanslarını, operasyonel avantajlarını incelemeyi ve aracın simülasyon modelini oluşturarak yükseklik kontrolünü modellemeyi amaçlamaktadır.

YEHA'lar yere yakın uçuş sırasında aerodinamik yer etkisinden faydalanan hava araçlarıdır. Yer etkisi, bir kanadın yüzeye yakın uçuşu durumunda, kanat altındaki hava basıncının artması ve indüklenmiş sürüklemenin azalması sonucu ortaya çıkar. Bu durum, özellikle deniz yüzeyi veya düz araziler üzerinde uçuş gerçekleştirildiğinde belirgin hale gelmekte ve uçakların daha az enerji tüketerek daha fazla kaldırma kuvveti üretmesini sağlamaktadır.

Yer etkili araçların tarihi, 20. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. 1960'larda Sovyetler Birliği tarafından geliştirilen ve ekranoplan olarak adlandırılan büyük yer etkili araçlar, Volga Nehri ve Hazar Denizi gibi su kütleleri üzerinde yüksek hızlarda seyahat edebilen askeri ve sivil amaçlı prototipler olarak dikkat çekmiştir. Bu araçlar, yüksek taşıma kapasitesi ve yakıt verimliliği ile mühendisler ve araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür (Wikipedia, 2020).

Aerodinamik yer etkisi, hava araçlarının yer yüzeyine yakın uçuşlarında daha yüksek kaldırma kuvveti ve daha düşük sürüklenme kuvveti üretmesine neden olan bir olgudur. Bu etki, kanat altındaki hava basıncının artması ve kanat uçlarındaki girdapların azalması sonucu ortaya çıkmaktadır. Kanat altındaki hava basıncının artışı, kanadın daha fazla kaldırma kuvveti üretmesini sağlarken, indüklenmiş sürüklemenin azalması enerji

tüketimini düşürmektedir. Bu sayede yer etkili hava araçları, daha yüksek hızlarda daha az yakıt tüketerek uçabilmektedir.

Yer etkisinin en belirgin olduğu yükseklikler, kanat açıklığının yaklaşık yarısı kadar olan mesafelerdir. Bu yüksekliklerde yer etkisi maksimum seviyeye ulaşmakta ve kanat performansı önemli ölçüde artmaktadır. Bu avantaj, özellikle deniz yüzeyinde ya da düz arazi üzerinde düşük irtifalarda uçan YEHA'lar için kritik öneme sahiptir.

YEHA'lar, aerodinamik tasarım ve performans açısından benzersiz bir sınıf oluşturmaktadır. Bu hava araçları, yer etkisi olarak bilinen aerodinamik olguyu kullanarak düşük irtifada yüksek verimlilikle uçabilmektedir.

Yer etkisi, bir hava aracının ya da kanadın yere ya da su yüzeyine yakın uçtuğunda, aerodinamik kaldırma kuvvetinde bir artış ve sürüklenmede bir azalma ile sonuçlanmaktadır. Bu etki, özellikle askeri, ticari ve insani yardım operasyonları gibi çeşitli uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır.

YEHA'ların en önemli özelliği, geleneksel uçaklara kıyasla çok yüksek verimlilik sağlamaları ve donanma gemilerine oranla daha yüksek hızlara ulaşabilmeleridir. Ayrıca su yüzeyine iniş ve kalkış yapabilmeleri de bu uçakları diğer hava araçlarından farklı kılmaktadır. YEHA'lar, özellikle kıyı kentleri arasındaki kısa mesafelerde sivil ulaşım için büyük bir potansiyele sahiptir. 1960'larda tasarlanan Rus ekranoplanları (Wikipedia, 2020) gibi yer etkili hava araçları, yenilikçi ulaşım sistemleri geliştirme arayışlarının bir ürünü olarak dikkat çekmiştir. Günümüzde, yer etkili hava araçları, gelecekte dikkate alınması gereken ve umut vadeden ulaşım araçları olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel deniz ulaşım araçlarının kabul edilebilir bir yakıt verimliliği ile 100 km/saatten daha yüksek hızlara ulaşabilen yer etkili hava araçlarının hızlarına erişmesi pek olası görünmemektedir. Hidrofoil tekneler ya da sürat tekneleri bu hızlara ulaşabilse de, bu araçlar genellikle taşımacılık amacıyla kullanılmamaktadır. Hava taşımacılığında ise iniş-kalkış pistleri, havaalanı altyapısı ve yakıt verimliliği gibi yüksek işletme maliyetleri oluşmaktadır. Ayrıca, yer etkisi sayesinde taşınabilecek faydalı yük miktarının artması da göz önünde bulundurulması gereken önemli bir etkidir.

1.1. Tez Planı

Tez planında, “literatür incelemesi” başlıklı bölümde yer etkili hava araçlarının incelenmesi, kontrolü, modellenmesi, tasarımı hakkında yapılan çalışmalardan bahsedilmiş ve örnekler sunulmuştur.

Yer Etkili Hava Araçları başlıklı 3. bölümde ise yer etkili hava araçlarının yapısal özellikleri, farklı yer etkili hava aracı çeşitleri ve uygulamaları hakkında bilgiler sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde yer etkili hava araçlarının kullanan alanları ve diğer araçlara kıyasla avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

4. bölümde ise yer etkisi ve bu etkinin oluşumu ve hava aracı üzerindeki etkilerinden bahsedilmiş ve bu etkiler dikkate alınarak yer etkili hava aracının modelini oluşturmak adına matematiksel denklemleri elde edilmiştir.

Yer etkili hava aracının simulink modeli ve yükseklik kontrolü bölümünde ise; aracın yerden yüksekliğini control etmek için MATLAB/Simulink ortamında araca ait denklemler kullanılarak simülasyon modeli oluşturulmuş ayrıca elde edilen model kullanılarak PI denetleyici ile aracın yükseklik kontrolü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Sonuç ve tartışma bölümünde ise tez çalışması kapsamında oluşturulan yer etkili hava aracının Simulink modeli üzerinde PI kontrolcü ile yapılan yükseklik kontrolüne ait grafikler yorumlanmış ve modelin etkinliği hakkında bilgi verilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Yer etkisi teorisinin temelleri, 1920'lerde Alman fizikçi Carl Wieselsberger tarafından atılmıştır. Wieselsberger, yer etkisinin uçakların uçuş dinamikleri üzerindeki önemli etkilerini tanımlayan ilk kişi olarak tanınmaktadır. Bu çalışmalarıyla yer etkisinin nasıl çalıştığını incelemiş ve bu konudaki ilk bulgularını "Wing Resistance near the Ground" başlıklı çalışmasıyla 1922 yılında yayınlamıştır (Wieselsberger, C., 1922) Yer etkisi olgusuna dair fikirler bu dönemde şekillenmeye başlamış ve 1920'lerin Nisan ayında ilk araçların sunumu yapılmıştır.

Yer etkisi altındaki hava aracı (WIG – Wing In Ground) konseptine dair ilk bilgiler, Finlandiyalı mühendis Toivo Kaario tarafından ortaya konmuştur. Kaario, WIG aracını yaratmış ve bu tür araçlar bu isimle anılmaya başlamıştır. 1935 yılında ise Ram ve İsveçli mühendis Troeing, bu fikri daha ileriye taşımışlardır. Ancak bu gelişmeleri takip eden bir sessizlik dönemi olmuştur. WIG araçları, Rusların Karadeniz üzerinden ağır askeri teçhizat taşımayı amaçladıkları 1960'lara kadar kayda değer bir ilerleme kaydetmemiştir .



Şekil 1 Ekronoplan (The magazine Old Machine Press2019)

WIG aracının gerçek anlamda uygulanması, 1960'larda Sovyet bilim adamı Rostislav Alexeyev tarafından gerçekleştirilmiştir.

Alexeyev, WIG araçlarının üretiminde öncü bilim insanı olarak kabul edilmektedir 1967 yılında Batılı istihbarat kaynakları, uydu görüntüleri aracılığıyla Hazar Denizi'nde, uzun kuyruklu ve kısa kanatlı çok büyük bir aracın varlığını tespit etmiştir. Başlangıçta tuhaf bir araç olarak değerlendirilen bu yapı, daha sonra yaklaşık 90 metre uzunluğunda ve 550 ton ağırlığında, çok büyük bir amfibi uçak olarak tanımlanmıştır. Bu uçak, Hazar Denizi üzerinde normal bir uçağın hızına benzer muazzam bir hızla hareket etmekteydi (Paek, C. S., 2006).

"Hazar Canavarı" olarak adlandırılan ekranoplan, eski Sovyetler Birliği tarafından tasarlanmış olup, başlangıçta Batı dünyasının habersiz olduğu, yalnızca askeri amaçlar için gizlice geliştirilen bir projeydi. Şekil 1'de verilen bu devasa WIG (Wing-In-Ground) aracı, 1966 yılında Sovyetler Birliği tarafından üretilmiş ve "Hazar Canavarı" veya "Ekranoplan" olarak adlandırılmıştır. Döneminin en büyük hava araçlarından biri olan bu araç, yaklaşık 550 tonluk ağırlığıyla günümüzde de dikkate değer bir mühendislik başarısı olarak kabul edilmektedir (<https://tr.wikipedia.org/wiki/Ekranoplan>).

Sovyetler Birliği, bu aracın geliştirilmesine önemli bir bütçe ayırmış ve çalışmalar, 1991 yılında Sovyetler Birliği'nin dağılmasına kadar sürdürülmüştür. Ekranoplan teknolojisinin ortaya çıkışı ve gelişimi, diğer ülkelerin de bu tür araçlara olan ilgisini artırmıştır. İlk olarak Almanya, Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Avustralya, Japonya ve Singapur gibi ülkeler bu teknolojiye yatırım yapmaya başlamışlardır.



Şekil 2 X-114 deneysel prototipi (https://en.wikipedia.org/wiki/RFB_X-114)

Ekranoplan teknolojisinin geliştirilmesinde Alman mühendisler de önemli bir rol oynamıştır. Almanya'da, 1964 yılında H. Fischer ve A. Lippisch öncülüğünde başlatılan araştırmalar, Şekil 2'de verilen X-114 ve X-113 gibi deneysel versiyonların geliştirilmesiyle yeniden canlanmıştır. (https://en.wikipedia.org/wiki/RFB_X-114). Bu çalışmalar, ekranoplan teknolojisinin gelecekteki potansiyelini ortaya koymuş ve diğer ülkeler için de yol gösterici olmuştur.

Amerika Birleşik Devletleri, yer etkili hava araçları üzerine yapılan araştırmalar konusunda Sovyetler Birliği'ni takip eden bir diğer önemli aktör olmuştur. Hazar Canavarı olarak bilinen ekranoplanı ilk kez 1967 yılında gözlemleyen mühendis Stephen Hooker, büyük ölçekli bir WIG aracı üretme çabalarını başlatmış ve bu amaçla kendi şirketini kurarak üretim ve geliştirme faaliyetlerine girişmiştir. Hooker'ın geliştirdiği bu devasa araç, Wing Ship olarak da adlandırılmıştır. (Paek, C. S., 2006). Amerika Birleşik Devletleri'nde WIG araçlarına yönelik araştırmalar, teknolojinin potansiyelini değerlendirmek amacıyla hız kesmeden devam etmiştir.



Şekil 3 Pelican Ultra Large Transport hava aracı

(<https://www.startupselfie.net/2024/02/29/airfish-8-wing-in-ground-effect-aircraft/>)

Son dönemde, Boeing şirketi de WIG araçları üzerindeki çalışmalarını kamuoyuna duyurmuştur. Boeing'in tanıttığı WIG model uçak, Pelican Ultra Large Transport adıyla anılmakta olup, Şekil 3'te gösterilen bu model, gelecekteki hava ve deniz taşımacılığında önemli bir rol üstlenmesi beklenen bir araç olarak öne çıkmaktadır (startupsselfie.net magazine, 2024).

Boeing'in planlarına göre, Pelican Ultra Large Transport, yerden 20 feet yükseklikte seyredecek şekilde tasarlanmıştır ve bu özelliğiyle şimdiye kadar uçmuş en büyük hava araçlarından biri olma potansiyeline sahiptir. Araç, 150 metre kanat açıklığına sahip olacak ve 1.400 ton gibi devasa bir yük taşıma kapasitesi sunacaktır. Bu özellikleriyle, Pelican Ultra Large Transport hem uçaklarla hem de gemilerle rekabet edebilecek nitelikte bir araç olarak tasarlanmıştır.

WIG araçları, sivil ve rekreasyonel amaçlarla daha küçük boyutlarda geliştirilmekte olup, 1980'li yıllardan buyana sürekli olarak sergilenmekte ve geliştirilmektedir. Bu süreçte, Polonya'da da yer etkili konvoylar üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Orso'daki Havacılık Enstitüsü'nde, yer etkili uçak tasarımına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmakta ve bu konu üzerine birçok makale yayımlanmaktadır.

Özellikle hafif ve yüksek kanatlı yer etkili uçakların tasarımına yönelik çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu tür uçaklar, düşük hızlı rüzgar tüneline test edilmekte ve aerodinamik performansları değerlendirilmektedir, Gdańsk Teknoloji Üniversitesi'nde, küçük boyutlu bir ekranoplan (yer etkili araç) geliştirilmesine yönelik bir proje yürütülmektedir. Bu projenin temel amacı, deniz kuvvetlerine destek sağlamak olarak belirlenmiştir.

Proje direktörü Profesör Miroslav K., Gemi İnşa Fakültesi Mekanik Kompozitler ve Askeri Teknolojiler Bölümü'nden Jerijk ile birlikte, bu projenin devlet güvenliğini artırmaya katkı sağlayacak bir çözüm ve platform geliştirmeyi hedeflediğini belirtmektedir. Projenin idari direktörü Dr. Marek Chudnicki, prototip oluşturma sürecinde birkaç önemli varsayımda bulunduklarını ve bu araçların kıyıya yakın su alanlarında belirli görevleri yerine getirmek üzere tasarlandığını eklemektedir. Araç, su yüzeyinden kalkışı ve minimum irtifa ile uçuşu ve belirli ağırlıkta faydalı yükler taşıyarak kalkış yapabilmesi amacıyla turboprop motor ve uzaktan kumanda ile

donatılacaktır (Gerik ve ark., 2024, <https://pg.edu.pl/en/news/2024-01/worlds-first-small-unmanned-ground-effect-plane-being-created-gdansk-university-technology>).

Sivil ulaşımda WIG araçlarının geliştirilmesi konusunda çalışmalar yürüten ülkelerden biri de Singapur'dur. Singapur'da, sivil WIG araçları yaratmayı amaçlayan projeler kapsamında, Airfish-8 Wing-in-Ground Effect aracı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (<https://newatlas.com/aircraft/airfish-8-wing-in-ground-effect>).

ST Mühendislik tarafından geliştirilen bu araç, geleneksel tekne ve gemilerden üç kat daha hızlı olacak ve geleneksel uçaklardan 2, 3 kat daha fazla yakıt tasarrufu sağlayarak ideal bir ulaşım aracı haline gelecektir.



Şekil 4 Airfish-8 WIG (<https://newatlas.com/aircraft/airfish-8-wing-in-ground-effect>)

YEHA'ları umut verici bir gelecek beklemekte ve yer etkili hava araçlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar dünya genelinde devam etmektedir, özellikle Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Doğu Asya ülkeleri ve Avustralya'da bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmektedir.

Bu araçların umut verici bir geleceğe sahip olduğu öngörülmektedir, çünkü bilgi teknolojileri ve yapay zekâ çağında yaşadığımız bu dönemde, önümüzdeki yıllarda küresel ölçekte yaygın bir ulaşım aracı haline gelmeleri beklenmektedir. Ayrıca yapay zekâ destekli yazılımların ve kontrol algoritmalarının yaygınlaşması ile önümüzdeki yıllarda tüm dünyada yaygınlaşan bir ulaşım aracı olacağı tahmin edilmektedir

3. YER ETKİLİ HAVA ARAÇLARI

3.1 Yer Etkili Hava Araçlarının Özellikleri

Yer etkili hava araçları (YEHA), yüzeye çok yakın uçabilen ve bu özellikleri sayesinde özellikle su yüzeyine yakın operasyonlarda büyük avantajlar sağlayan araçlardır. YEHA'lar, uçuş sırasında yüzey ile kanat arasında oluşan hava yastığından faydalanarak daha az sürüklenme ve daha fazla kaldırma kuvveti elde ederler. Bu özellikleriyle, kapalı denizlerde faaliyet gösteren gemi ve deniz uçaklarına alternatif bir çözüm sunar. YEHA'lar, verimli ve yüksek hızlı ulaşım sağlamak amacıyla hem sivil hem de askeri alanlarda kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. GEV'ler, düşük en-boy oranına sahip kanatları ile yer etkisini en üst düzeyde kullanarak özellikle kısa mesafeli deniz taşımacılığı ve keşif görevleri gibi uygulamalarda büyük potansiyel taşır.

Bu tez çalışması, YEHA'ların dinamik ve aerodinamik özelliklerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, doğru bir matematiksel modelin geliştirilmesi, bu araçların performansını optimize etmek ve güvenli bir şekilde çalışmalarını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

YEHA'ların dinamik performansı, yüzeye olan yakınlık nedeniyle oluşan aerodinamik kuvvetlerden büyük ölçüde etkilenir. Yüzeye yakın uçuş sırasında, aracın altında bir hava yastığı oluşur ve bu durum kaldırma kuvvetini artırırken sürüklemeyi azaltır. Bununla birlikte, yüzeye çok fazla yaklaşılması, hava akışının bozulmasına ve kontrol sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, YEHA'ların dinamiklerini doğru bir şekilde temsil eden matematiksel modellerin geliştirilmesi, bu araçların hem güvenli hem de verimli bir şekilde çalıştırılmasını sağlamak için gereklidir. Ayrıca yükseklik kontrolü, YEHA'ların verimli ve güvenli çalışması açısından kritik bir bileşendir.

Yüzey üzerinde sabit ve optimum bir yüksekliğin korunması, performans ve güvenlik açısından önem taşır. Yüksekliğin çok fazla azalması durumunda, aracın altındaki hava akışı bozulabilir ve istenmeyen aerodinamik etkiler ortaya çıkabilir. Yüksekliğin fazla artması ise yer etkisinin azalmasına ve yakıt verimliliğinin düşmesine yol açar. Bu

nedenle, YEHA'ların optimum yüksekliği koruyabilmesi için gelişmiş yükseklik kontrol stratejilerine ihtiyaç vardır (Al. Maatoq, T.A.T. ve Orman, K. 2023).



Şekil 5 *Liberty Lifter yer etkili aracı tasarımı* (<https://newatlas.com/military/darpas-liberty-lifter-x-plane-gets-a-face-lift/>)

Şekil 5'te en son tasarlanan yer etkili araçlar için önerilen formun bir çizimini gösterilmektedir. Aurora Flight Sciences şirketinin DARPA için geliştirdiği ve kanat-yer etkisi kullanarak toplu kaldırma sağlayan son derece verimli bir X-uçağı olan Liberty Lifter deniz üzerinde askeri amaçlı ağır kaldırma taşımacılığı için tasarlanmıştır.

2022'den beri bu hava aracı üzerinde çalışan DARPA, C-17 Globemaster III nakliye uçağının kargo hacmine sahip ancak 100 ton kargo taşıyabilen nispeten ucuz bir deniz uçağı geliştirme projesi olan Liberty Lifter'ı geliştirmektedir. Ayrıca aracın 6.500 nm (7.500 mil, 12.000 km) feribot menziline sahip olması beklenmektedir. (<https://newatlas.com/military/darpas-liberty-lifter-x-plane-gets-a-face-lift/>).

3.2 Yer Etkili Hava Aracı Çeşitleri

YEHA'lar, çeşitli türleri bulunan bir araç sınıfıdır. Bu araçlar başlangıçta yalnızca askeri amaçlar için tasarlanmıştı; ancak, tarihsel süreçte ve uzun yıllar boyunca sürekli bir gelişim göstermişlerdir. Özellikle son yıllarda bu araçlar, dikkate değer bir evrim geçirmiştir.

Teknolojik açıdan tasarım ve üretim aşamalarından itibaren, YEHA'lar birçok farklı form ve işlev kazanmıştır. Her bir model, belirli amaçlar ve çevresel koşullar için özel olarak tasarlanmıştır. Önümüzdeki yıllarda, bu araçların yaygınlaşması ve hayatımızın önemli bir parçası haline gelmesi, hatta geleneksel uçaklar ile rekabet edebilme potansiyeline sahip olması beklenmektedir. Bu bağlamda, YEHA'ların en önemli türleri aşağıda ele alınmıştır.

Ekranoplanlar: Sovyetler Birliği döneminde askeri amaçlarla geliştirilen ilk yer etkili araçlar arasında yer alır. Bu araçlar, yer etkisi adı verilen aerodinamik bir olgudan yararlanarak su yüzeyine çok yakın uçan büyük kanatlı taşıtlardır. Genellikle "deniz kazıyıcıları" veya "kanatlı gemiler" olarak anılan ekranoplanlar, uçak ve deniz taşıtlarının özelliklerini birleştirerek su üzerinde yüksek hızda seyahat edebilirler.

Yer etkisini kullanarak kaldırma kuvvetini artırırken sürüklemeyi azaltmayı başarırlar. Bu özellikleri, ekranoplanları hızlı füze fırlatıcıları veya açık deniz devriye botları gibi çeşitli askeri uygulamalar için uygun hale getirmiştir. (<https://tr.wikipedia.org/wiki/Ekranoplan>)

X-113 ve X-114: İlk kez Alman mühendisler tarafından geliştirilen planörlerdir. Bu araçlar üzerindeki araştırmalar, 1964 yılında H. Fischer ve A. Lippisch tarafından yürütülmüştür. Fischer ve Lippisch, bu planörlerin deneysel bir versiyonunu geliştirerek, yer etkisi teknolojisinin potansiyelini araştırmışlardır. Bu planörler, yer etkisi prensiplerinin aerodinamik performans üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla tasarlanmış olup, yer etkili araçlar konusunda önemli bir adım olarak kabul edilirler (https://en.wikipedia.org/wiki/RFB_X-114).

AirFish 3 (AF3) : Yirminci yüzyılın sonunda geliştirilen, yer etkisi altında çalışabilen küçük ve iki koltuklu bir WIG (Wing-In-Ground) aracıdır. Yaklaşık 1 ila 2 metre yükseklikte su yüzeyine yakın seyreden AF3, yüksek manevra kabiliyetine ve kolay kullanım özelliklerine sahiptir. Bu nitelikleri, AF3'ü hem eğlence amaçlı kullanım için ideal bir araç haline getirmekte hem de daha büyük su taşıtlarının pilotaj eğitimi için uygun bir eğitim aracı olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır (Rozhdestvensky, K. V., 2006).

Yer Etkisi Altındaki Kanat (WIG): Su yüzeyinden 150 metreden daha yüksek olmayan irtifalarda, yüzeye yakın uçarken kaldırma kuvvetinin önemli ölçüde arttığı "yer etkisi" olarak bilinen aerodinamik bir olgudan yararlanarak çalışır. Bu araçlar, tipik olarak kanatlı uçaklara benzer bir tasarıma sahip olmakla birlikte, su yüzeyine çok yakın mesafelerde uçmak üzere tasarlanmıştır. WIG araçları, sakin su yüzeylerinde yüksek hızlarda seyahat edebilme yetenekleriyle öne çıkar ve bu özellikleri sayesinde deniz devriyesi, arama kurtarma operasyonları ve askeri uygulamalar gibi çeşitli alanlarda etkin bir şekilde kullanılabilirler (Rozhdestvensky, K. V., 2006).

Hoverkraft: Araç ile zemin arasında oluşan hava yastığı üzerinde yüzerek kara, su, çamur, buz ve diğer düz yüzeylerde seyahat edebilen ve güneş enerjisi yada diğer yakıt türleri ile çalışan çok amaçlı araçlardır. Bu araçlar, büyük pervaneler veya itici sistemlerle hareket ettirilir ve havayı aracın altında hapseden bir yapı ile desteklenir. Bu araçlar amfibi askeri operasyonlarda, bataklık veya sular altında kalan bölgelerde arama ve kurtarma görevlerinde, ayrıca kıyı ortamlarında yolcu ve kargo taşımak amacıyla sivil feribotlar olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Boeing Pelican ULTRA: 2000'li yılların başında Boeing Phantom Works tarafından incelenen ve yer etkili sabit kanatlı bir uçak olarak önerilen bir proje sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu uçak, başlangıçta askeri kullanım için büyük kapasiteli bir nakliye aracı olarak tasarlanmış olup, yer etkisinden yararlanarak yüksek verimlilikte yük taşıma kapasitesine sahip olmayı hedeflemiştir. Daha sonra Boeing Pelican ULTRA'nın, dünyanın en büyük kargo merkezlerine hizmet verecek şekilde tasarlanması düşünülmüştür (https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_Pelican)

Hidrofiller: Gövdesini su yüzeyinin üzerine yükselterek hızı artıran, sürtünmeyi azaltan ve yakıt verimliliğini artıran su altı kanatları (folyolar) ile donatılmış gemilerdir. Bu gemiler, su yüzeyinde çalışırken yüksek hızlarda yüzeye yakın uçtuklarında yer etkisi olarak bilinen bir aerodinamik olgunun da etkisini kullanabilirler. Hidrofoiller, yolcu feribotları, askeri devriye botları ve yüksek hızlı gezi tekneleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmakta olup, deniz taşıtları arasında verimliliği ve performansı ile öne çıkarlar (<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrofoil>).

Airfish-8 WIG: Airfish-8, Wigetworks tarafından geliştirilen, Tip A sınıfı bir yer etkisi altındaki kanat (WIG) tipi deniz aracıdır. Bu araç, suya iniş ve kalkış için özel olarak tasarlanmış olup, pist ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır (Rozhdestvensky, K. V., 2006). Lojistik, taşımacılık, turizm ve deniz devriye operasyonları gibi geniş bir yelpazede kullanım alanı bulunan Airfish-8, modern deniz araçları arasında dikkat çekici bir yenilik olarak öne çıkmaktadır (Ship Technology, 2024).

WIG deniz aracı, iki mürettebatın yanı sıra sekiz yolcu kapasitesine sahiptir ve 360 kilogramlık bir bagaj kapasitesi sunmaktadır. Kabin, 4 metre uzunluğunda ve 1,4 metre genişliğindedir ve müşterinin talebine göre altı veya sekiz koltuklu olacak şekilde düzenlenebilir. Koltuklar, arka kısımda yer alan bagaj bölümüne açılan bir boşluk ile ayrılmış iki sıra halinde konumlandırılmıştır. Mürettebat ve yolcu koltukları arasındaki ana erişim kapısı, aracın temel giriş noktası olup, karşı tarafında bir acil çıkış kapısı bulunmaktadır.

İlk prototip olan AF8-001, 1990'lı yıllarda Airfoil Development (AFD) tarafından geliştirilmiş ve inşa edilmiştir. Bu prototip, 2004 yılında Wigetworks tarafından satın alınarak yenilenmiş ve 2007 yılında Singapur'da, 2008'de ise Tayland'da kapsamlı deniz denemelerine tabi tutulmuştur. 2010 yılında Lloyd's Register tarafından yapılan denetimlerde, Airfish-8 WIG deniz aracı, "100A1 WIG, MCH Tip A Yolcu Sınıfı" sertifikası ile ödüllendirilmiş ve uluslararası deniz taşımacılığı standartlarına uygun hale getirilmiştir.

Üretim öncesi ilk Airfish-8, Ekim 2015'te ilk uçuşunu gerçekleştirmiştir. İkinci üretim öncesi deniz aracı ise Kasım 2016'da ilk uçuşunu başarıyla tamamlamıştır. Bu aracın uluslararası statüsü, Mart 2017'de Malezya'nın Langkawi Uluslararası Yat Sicili'ne kaydedilmesiyle tescillenmiş ve "M/Y Airfish Voyager" adıyla kayıt altına alınmıştır. Bu gelişmeler, Airfish-8'in yenilikçi tasarımı ve geniş kullanım alanları ile deniz taşımacılığında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir (<https://www.ship-technology.com/projects/airfish-8-wig-craft/?cf-view>).

Yüzey Etkili Gemiler (SES): Yüzey etkili gemiler (SES-Surface Effect Ship), yer etkisi altındaki kanat (WIG) ile aynı prensip doğrultusunda hareket edebildiğinden benzer özellikler taşır. Bu gemi türü, kaldırma kuvvetini artırmak amacıyla yer etkisi ilkelerini kullanmaktadır. Yer etkisi, geminin su yüzeyine yakın bir konumda hareket etmesini ve dolayısıyla su ile gemi gövdesi arasında bir hava yastığı oluşmasını sağlar. Bu hava yastığı, geminin kaldırma ve stabilite sağlama özelliklerini artırarak, daha düşük sürüklenme ile su yüzeyinde kaymasını mümkün kılar (https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_effect_ship).

Aerobotlar: Aerobotlar, uçak ve deniz taşıtlarının prensiplerini birleştiren, yüksek hızda hareket edebilen gemilerdir. Bu araçlar, tipik olarak aerodinamik bir gövde tasarımına sahiptir ve yüksek hızlarda kaldırma kuvveti üretmek amacıyla kanat profili şeklindeki yapıları kullanırlar. Aerobotların bu özellikleri, onları hidrodinamik ve aerodinamik prensipleri verimli bir şekilde bir araya getirerek daha hızlı ve etkili bir seyir aracı haline getirmektedir (<https://en.wikipedia.org/wiki/Aerobot>).

Pegasus Sınıfı Hoverkraft: Pegasus sınıfı hoverkraftlar, Sovyetler Birliği tarafından geliştirilen, hem kara hem de su üzerinde ağır yük taşıyabilen büyük ölçekli askeri nakliye araçlarıdır. Bu araçlar, yüksek hız ve verimlilik elde edebilmek amacıyla yer etkisi ilkelerinden yararlanmışlardır. Pegasus sınıfı hoverkraftlar, hem operasyonel esneklik sağlamaları hem de yer etkisi sayesinde sürtünmeyi minimize ederek yüksek hızlara ulaşmaları nedeniyle dikkat çekici bir mühendislik başarısıdır (https://en.wikipedia.org/wiki/Pegasus-class_hydrofoil).

Deniz Sıyırıcıları (Sea skimmers): Deniz sıyırıcıları, su yüzeyinin hemen üzerinde yer etkisi modunda çalışacak şekilde tasarlanmış küçük ve hafif teknelerdir. Bu araçlar, genellikle yarış veya kişisel ulaşım gibi eğlence amaçlı kullanılmakta olup, düşük sürtünme ve yüksek hız avantajları sunan yer etkisi prensiplerinden faydalanmaktadır. Deniz sıyırıcıları, hafif yapıları ve aerodinamik tasarımları sayesinde hız ve manevra kabiliyeti açısından etkili performans sergilemektedir (Rozhdestvensky, K. V., 2006).

Ekranoplan like pelican wings (WIG) : Ekranoplan tipindeki pelikan kanatları (WIG), yer etkisinden faydalanarak su yüzeyine yakın irtifada uçan bir tür insansız hava aracıdır. Gdańsk Teknoloji Üniversitesi'nde inşa edilmekte olan bu küçük araç, dünyada bu boyut ve tipteki ilk örneklerden biri olacaktır (Gerik ve ark., 2024, <https://pg.edu.pl/en/news/2024-01/worlds-first-small-unmanned-ground-effect-plane-being-created-gdansk-university-technology>).

Proje, Gdańsk Teknoloji Üniversitesi, Jarosław Dąbrowski Askeri Teknoloji Üniversitesi ve Hava Kuvvetleri Teknoloji Enstitüsü'nün oluşturduğu bir konsorsiyum tarafından yürütülmektedir. Projenin geliştirilmesi için birkaç milyon zloti tutarında kaynak toplanmış olup, Ulusal Araştırma ve Geliştirme Merkezi tarafından finanse edilen savunma programının bir parçası olarak uygulanmaktadır. Hedeflenen nihai prototipin 2026 yılında test aşamasına hazır hale geleceği belirtilmiştir.

Tablo 1 Mevcut Yer Etkili Hava Aracı Çeşitleri

No	İsim	Yıl	Ülke/Üretici firma	Amaç
1	Ekranoplans	1960	Rusya	Askeri amaçlı
2	X-113 X-114	1964	Almanya /RFB	Eğlence amaçlı
3	Ram 902	1984	Çin /CSSRC	Ölçek
4	Volga 2	1986	Rusya/SDPP	Eğlence amaçlı
5	Airfish 3	1990	Almanya /F.F	Eğlence amaçlı
6	Jorg 6	1991	Almanya /Jorg	Eğlence amaçlı
7	Hoverwing	1997	Almanya/T.T	Eğlence amaçlı
8	Galmaegy 4	2002	Korea//KORDI	Ölçek
9	Pelicing Ultra Large Transpor	2002	USA/ Boeing	Askeri amaçlı
10	Airfish-8 WIG	2025	Singapura	Sivil amaçlı
11	Küçük Feribot Ekranoplan	2026	Polonya	Askeri amaçlı

Tablo -1’de mevcut üretilmiş bulunan yer etkili hava araçlarının üretim yılı ve üretildikleri ülkeri gösterilmektedir.

3.3 Yer Etkili Hava Araçlarının Kullanım Alanları

YEHA'ların çok yönlülüğü ve verimliliği, bu araçları geleneksel hava araçlarının sınırlamalarla karşılaşabileceği ortamlarda çeşitli roller için uygun kılmaktadır. YEHA'lar, yüksek hız, yakıt verimliliği ve çeşitli arazilerde çalışma yetenekleri gibi benzersiz özellikleri sayesinde birçok farklı uygulama sunmaktadır.

Aşağıda, yer etkili hava araçlarının bazı dikkate değer uygulama alanları ve kullanımları sıralanmaktadır (Al. Maatoq, T.A.T. ve Orman, K. 2023):

a) Sivil kullanım

Taşımacılık, Lojistik ve Kargo Taşımacılığı: YEHA teknolojisi, ağır yüklerin su yüzeyinde ve düz arazilerde hızlı ve verimli bir şekilde taşınmasını mümkün kılmaktadır. Bu özellik, YEHA'ları, gelişmiş altyapının bulunmadığı bölgelerde yük taşımacılığı için ideal bir seçenek haline getirmektedir.

Yolcu Taşımacılığı: YEHA'lar, yüksek hızlı feribot olarak işlev görebilirler, bu da onları geleneksel teknelere kıyasla daha hızlı seyahat süreleri sunan ve uçaklara göre daha az altyapı gerektiren bir alternatif yapmaktadır. Bu nitelikleri, özellikle kısa mesafeli yolculuklarda verimlilik sağlamaktadır.

b) Askeri kullanımlar

Askeri, Savunma ve Birlik Dağıtımı: YEHA teknolojisi, kıyı ve nehir ortamlarında birliklerin ve teçhizatın hızlı bir şekilde konuşlandırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu özellik, hareketliliği artırmakta ve askeri operasyonlarda sürpriz unsuru oluşturmaktadır.

Silah ve Askeri Malzeme Taşıma: YEHA'lar, silah ve ağır askeri teçhizatın taşınmasında, askeri personelin taşınmasında ve amfibi savaş bileşenlerinin taşınmasında kullanılabilir. Ayrıca, bu araçlar füze fırlatma, keşif ve devriye gezileri gibi askeri görevlerde de etkili bir şekilde kullanılabilir.

Gözetleme ve Keşif: Sensörler ve kameralarla donatılmış YEHA'lar, kıyı alanları ve büyük su kütleleri üzerinde alçak irtifada gözetleme yapma kapasitesine sahiptir. Bu yetenek, aracın daha az tespit edilebilir kalmasını sağlayarak değerli istihbarat elde edilmesine katkıda bulunur.

Arama ve Kurtarma: YEHA'ların yüksek hızlarda seyahat edebilme yetenekleri, bu araçları kıyı ve selden etkilenen bölgelerdeki arama ve kurtarma operasyonları için ideal bir seçenek haline getirmektedir.

c) Turizm ve Rekreasyon

Eğlence Tekneleri: YEHA'lar su yüzeylerinde yüksek hızda seyahat imkânı sunarak benzersiz bir eğlence deneyimi sağlamaktadır. Bu araçlar, su üzerinde dinamik ve hızlı bir seyahat sunarak rekreasyonel faaliyetlere katkıda bulunabilirler.

Eko-Turizm: YEHA'lar, alçak irtifa ve düşük gürültü seviyeleri ile çalışarak, hassas ekolojik alanlarda yaban hayatını rahatsız etmeden turlar düzenleme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, eko-turizmin gelişimine ve korunmasına önemli katkılarda bulunur.

İnsani Yardım ve Afet Yardımı: YEHA'lar, altyapının hasar gördüğü afet bölgelerine hızlı bir şekilde malzeme, tıbbi yardım ve kurtarma personeli ulaştırabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, sel bölgeleri ve diğer erişilemeyen alanlardan insanları tahliye etme konusunda etkili bir çözüm sunabilirler.

d) Ticari Uygulamalar

Yüksek Hızlı Feribot Hizmetleri: Kıyı şehirleri ve adalar arasında yüksek hızda ve verimli ulaşım sağlama kapasitesine sahiptir. Bu, geleneksel feribotlara kıyasla yolculuk sürelerini önemli ölçüde kısaltma avantajı sunar. Ayrıca, YEHA'lar, kıyı ve iç su yolları boyunca hizmet veren güzergâhlar için alternatif bir taşımacılık çözümü sunar, böylece karayolu ve demiryolu taşımacılığına olan bağımlılığı azaltır.

Bilimsel Araştırma ve Deniz ve Çevre Çalışmaları: YEHA'lar, minimum ekolojik etkiyle kıyı ve deniz ortamlarında anketler yürütme ve veri toplama amacıyla kullanılabilir. Bu

araçlar, çevresel değişikliklerin izlenmesi ve ekosistemlerin korunması açısından değerli veriler sağlar.

İklim İzleme: YEHA'lar, hava durumunu ve deniz koşullarını gerçek zamanlı olarak izlemek üzere sensörlerle donatılabilir. Bu, iklim değişikliği ve hava-deniz etkileşimleri hakkında kapsamlı veri toplama ve analiz yapma imkanı sunar.

Kıyı Gözetleme: YEHA'lar, kaçakçılık ve izinsiz balıkçılık gibi yasa dışı faaliyetleri önlemek amacıyla kıyı bölgelerinde devriye görevi üstlenebilir. Bu araçlar, kıyı güvenliğini sağlama ve denetim işlevlerini destekleme kapasitesine sahiptir.

Sınır Güvenliği: Özellikle zorlu arazi koşullarına sahip bölgelerde sınırların izlenmesi ve güvenliğinin sağlanması amacıyla YEHA'lar kullanılabilir. Bu kullanım, sınır bölgelerinde etkin bir güvenlik ve denetim sağlar.

3.4 Yer Etkili Hava Araçlarının Avantajları

Yer Etkili Hava Araçları enerji açısından oldukça verimlidir. Yakıt tüketimleri yük taşıma kapasitesi ve hızları söz konusu olduğunda diğer hava ve su araçlarına kıyasla daha azdır (Rozhdestvensky, 2006, Ghafoor, 2015).

1-Yer Etkili Hava Araçların Su Araçlarına Kıyasla Avantajları

Amfibi Performansı: Yer etkili hava araçları, amfibi operasyonlarda sahillerden yükleme ve boşaltma yapma yeteneğine sahiptir. Bu araçlar, gemiler gibi su üzerinde yük taşıyabilirken, uçaklar gibi pistlerden iniş ve kalkış yapabilecek şekilde tasarlanabilir. Bu özellik, yer etkili hava araçlarına çok yönlülük kazandırır ve çeşitli operasyonel senaryolarda kullanılabilirliklerini artırır.

Görünmezlik: Yer etkili hava araçları, alçak irtifalarda ve yüksek hızlarda seyahat etmeleri nedeniyle askeri uygulamalarda gizlilik ve görünmezlik avantajı sunar. Bu özellik, radar ve diğer algılama sistemlerinden kaçma yeteneklerini artırarak, askeri operasyonlarda stratejik bir avantaj sağlar.

Hız: Yer etkili hava araçları, diğer deniz araçlarına kıyasla önemli bir hız avantajına sahiptir. Bu hız, uzun mesafelerde hızlı hareket etmeyi ve operasyonel sürekliliği desteklemeyi mümkün kılar, böylece çeşitli deniz ve hava taşıma görevlerinde verimlilik sağlar.

2-Yer Etkili Hava Araçların Uçaklara Kıyasla Avantajları

Yük Taşıma Kapasitesi: Bir hava aracının verimliliği, yük taşıma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Yer etkili hava araçları, yüksek kaldırma/sürüklenme oranına sahip olmaları sayesinde daha fazla yük taşıma kapasitesine ulaşabilirler. Bu özellik, araçların etkinliğini artırarak, özellikle ağır yük taşıma gerektiren görevlerde avantaj sağlar.

Bakım ve Arıza: Yer etkili hava araçları, alçak irtifada ve su üzerinde uçuş kapasitesine sahip olmaları nedeniyle, herhangi bir motor arızasında suya güvenli bir şekilde iniş yapabilirler. Bu durum, büyük kazaların ve arızaların meydana gelme ihtimalini azaltarak, bakım ve güvenlik açısından önemli bir avantaj sağlar.

Kalkış ve İniş Kapasitesi: Uçaklarda kalkış ve iniş esnasında faydalı yük taşıma kapasitesi önemli bir kısıtlama oluşturabilir. Buna karşın, yer etkili hava araçları, kalkış ve iniş süreçlerinde bu konuda nispeten daha avantajlıdır. Bu avantaj, özellikle kısıtlı veya zorlu operasyonel koşullarda kullanım verimliliğini artırır.

4. YER ETKİSİ VE YER ETKİLİ HAVA ARAÇLARININ MODELLENMESİ

4.1 Yer Etkisi Nedir

Yer etkisi, yere yakın hareket eden bir yüzeyin (sabit yüzey) aerodinamik kaldırma ve sürüklenme özelliklerini etkileyen bir aerodinamik olgudur. Bu etki, iniş sırasında pilotun uçakta "yüzme" hissiyatını yaşamasına neden olabilirken, kalkış sırasında ise çarpışma hızını geçici olarak azaltabilir. Kalkış esnasında pilot, yer etkisinin varlığında uçağı güvenli bir seyir hızına ulaşana kadar hızlandırarak pist üzerinde uçuşunu sürdürebilir (Rozhdestvensky, K. V., 2006).

Yer etkisini ilk kez keşfeden kişi, Lotus ekibinde çalışan Colin Chapman olarak bilinmektedir. Yer etkisi, esasen, bir aracın alt takımında ya da tabanında Venturi etkisinin çok özel bir şekilde kullanılmasına dayanmaktadır ve büyük ölçüde akışkanlar dinamiğine bağlıdır ([https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_\(cars\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_(cars))). Yer etkisi, uçak kanadının yere yakın olduğu durumlarda, kanadın yatay yüzeylerinin kaldırma özellikleri üzerinde olumlu bir etki yaratır. Bu durum, hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı uçaklar için geçerlidir. Yer etkisi, kanat ucunda meydana gelen hava akışını da etkiler. Kanadın alt kısmından üst kısmına doğru oluşan hava akışı, kanat ucu girdabı olarak adlandırılır. Bu girdaplar, enerjinin kaybolmasına neden olur ve bu kayıp, uçak için sürüklenme olarak ifade edilir.

Ancak, YEHA'lar su yüzeyine yaklaştıkça, kanatlarda girdapların tam olarak oluşması için yeterli alan kalmaz ve bu girdaplar su yüzeyi tarafından dışarı doğru itilir. Bu durum, kanadın efektif en boy oranının geometrik en boy oranından daha yüksek olmasına yol açar (Şekil 6) (Abramowski, T., 2007). Abramowski'nin 2007 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, yer etkisi altındaki havafolyelerinin sayısal araştırması yapılmıştır. Bu araştırma, teorik ve uygulamalı mekanik alanlarında önemli katkılar sunmuştur.



Şekil 6 Açıklığın hakim olduğu yer etkisi (Abramowski. T, 2007)

Yer etkisi, kanadın ürettiği kaldırma kuvvetinde bir artış meydana getirir. Bu artış, özellikle kaldırma/sürüklenme oranını iyileştiren ve oluşturulan indüklenmiş sürüklenme miktarındaki azalmadan kaynaklanır. Çoğu durumda, bu artan kaldırma kuvveti, kanat tarafından üretilen kaldırma kuvvetinin doğrudan bir artışıyla desteklenir.

İndüklenmiş sürüklenmedeki azalma, kanadın ürettiği kaldırma kuvvetinin bir fonksiyonu olarak kanat ucunda meydana gelir (Abramowski, T., 2007). Yere yakın bir mesafede, kanadın altındaki basınç her zaman üstündeki basınçtan daha yüksek olduğundan, kanat havada hareket ettiğinde oluşan kanat ucu girdaplarının şekli değişir.

Hava akışı dışarıya doğru itildiğinde, yere yakın girdaplar dairesel olmaktan ziyade eliptik bir hale gelir. Bu durum, kanadın efektif en-boy oranının geometrik en-boy oranından daha büyük olmasına neden olur ve bu da indüklenmiş sürüklemeyi azaltır. Böylece, kaldırma kuvveti artarken, herhangi bir motor gücü ayarı için hava hızı da artırılır.

Kaldırma kuvveti üzerindeki doğrudan etki, kanadın altındaki havanın yere yakınlığı nedeniyle sıkıştırılması ve bunun sonucunda hem yukarı hem de aşağı yönlü akışlarda bir tampon etkisi oluşması ile ortaya çıkar. Bu etki, kanadın kirişi ile orantılıdır ancak etkisinin derecesi, kanadın alt yüzeyinin profiline bağlıdır. Eğer bu alt yüzey belirgin

şekilde dışbükeyse ve hücum açısı küçükse, bu durumda kaldırma kuvveti üzerindeki etki sonuçta negatif olabilir (Abramowski, T., 2007).

Yer etkisi altındaki bir kanadın geliştirilmiş kaldırma/sürüklenme oranı, belirli bir miktardaki kaldırma kuvvetinin, serbest havada gerekli olandan daha düşük bir hücum açısında üretilmesini sağlar. Bu durum, kanat altındaki hava akışının yere yakın olması nedeniyle oluşan sıkışmadan kaynaklanır ve bu da kanadın kaldırma kuvvetini artırırken indüklenen sürüklemeyi azaltır. Bu etkinin uçak performansı üzerindeki önemi, özellikle iniş ve kalkış sırasında belirginleşmektedir.

1738 yılında Hollandalı-İsviçreli matematikçi Daniel Bernoulli, basınç ve hız arasındaki temel ilişkiyi tanımladığı *Hydrodynamica* adlı eserini yayımlamıştır. Bu eser, akışkan dinamiği teorisinde önemli bir erken ilerleme olarak kabul edilmektedir. Bernoulli, bu çalışmasında, bir akışkanın hızı arttıkça basıncının azaldığını ifade eden, günümüzde Bernoulli ilkesi olarak bilinen prensibi ortaya koymuştur. Bu ilke, daha sonra Leonhard Euler tarafından türetilen bir denklemle nicel olarak ifade edilmiştir.

Genellikle Bernoulli Denklemi olarak adlandırılan bu denklem, akan bir akışkan içindeki bir akım çizgisi boyunca iki noktadaki basınç, yoğunluk ve hız arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Burada, yer etkisinin aerodinamik üzerindeki etkilerini ve Bernoulli ilkesi ile olan ilişkisi akademik bir çerçevede ele alınmıştır. (<https://skybrary.aero/articles/ground-effect>)

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (1)$$

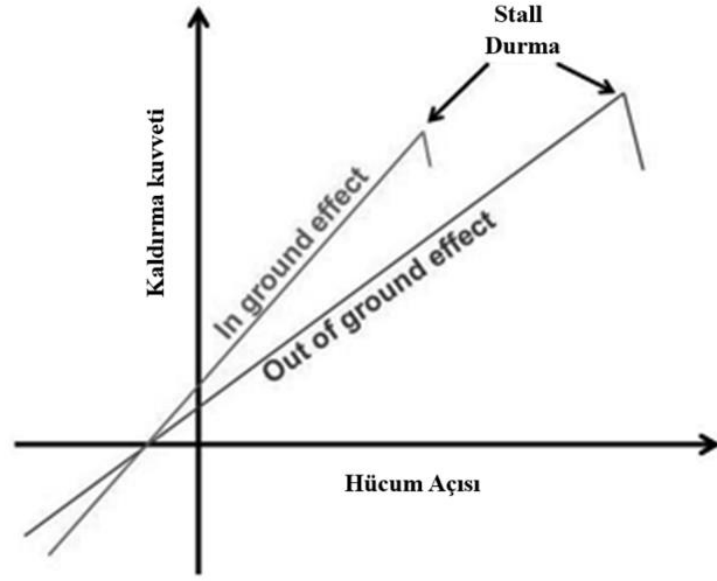
Sir George Cayley, modern havacılık alanında uçuşun dört temel aerodinamik kuvvetini (ağırlık, kaldırma, sürüklenme ve itme) ve bu kuvvetlerin birbirleriyle olan ilişkilerini tanımlayan ilk kişi olarak kabul edilmektedir. (https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aerodynamics). Cayley, aynı zamanda modern sabit kanatlı uçak konseptini geliştiren öncü isimlerden biridir.

Leonardo da Vinci'nin notlarında, sabit kanatlı, havadan ağır bir uçuş makinesine dair çizimler ve açıklamalar bulunmasına rağmen, bu notlar da Vinci'nin ölümünden sonra düzensiz ve dağınık bir halde kaldı. Dolayısıyla, da Vinci'nin aerodinamik konusundaki başarıları, teknolojinin da Vinci'nin ilerlemelerini yakalayana dek tam anlamıyla anlaşılamadı ve yeniden keşfedilmedi. 19. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, havadan ağır uçuşun gerçekleştirilmesine yönelik iki temel sorun belirlenmişti. İlk sorun, düşük sürtünme ile yüksek kaldırma kapasitesine sahip aerodinamik kanatların geliştirilmesiydi. İkinci sorun ise, sürekli uçuşu sağlamak için gereken gücün nasıl temin edileceği idi.

Bu dönemde, modern akışkan dinamiği ve aerodinamiğin temelleri atılmış ve bu alanda bilime daha az eğilimli olan bazı meraklılar, çeşitli uçan makineleri denemiş, ancak çok az başarı elde edebilmişlerdir (https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aerodynamics#Antiquity_to_the_19th_century).

Hücum Açısı

Sabit kanatlı bir hava aracının yer etkisi altında maruz kaldığı hücum açısı, belirli bir kaldırma kuvveti miktarı için kanadın stall (durma) noktasına gelmeden önce gereken hücum açısının azalmasına neden olur (Şekil 7). Bu azalmanın boyutu, kanadın profil yapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilir, ancak genellikle birkaç derece olabilir. Ayrıca, serbest havada elde edilen kaldırma katsayısına kıyasla, kanadın yer etkisi altında sahip olduğu maksimum kaldırma katsayısındaki herhangi bir azalma, bu farkı daha da etkileyebilir.



Şekil 7 Yer etkisi altında ve dışında gerçekleşen stall (Durma) açısı
(<https://skybrary.aero/articles/ground-effect>)

Yer etkisi altında ve dışında gerçekleşen stall açısındaki fark, genel olarak şu şekilde tasvir edilebilir: Bir kanadın yer etkisine girmesi, kaldırma kuvvetini artırdığı için, belirli bir hücum açısının maksimum kaldırma kuvvetine serbest havadakinden daha düşük bir hücum açısında ulaşması beklenir. Ancak, bu durum aynı zamanda, azalan sürtünme nedeniyle maksimum kaldırma kuvvetinin serbest havadakinden daha düşük olacağı anlamına gelir.

Yer etkili araçlarla ilgili aerodinamik çalışmalar, özellikle yer etkisinin belirli koşullar altında pozitif bir etki yaratabileceği konusunda önemli bulgular sunmaktadır. 2007 yılında Abramowski tarafından yayımlanan makale bu konuya önemli katkılar sağlamaktadır (T. Abramowski, 2007). Söz konusu makalede, belirli aerodinamik koşullar altında yer etkisinin pozitif bir kaldırma kuvveti artışı sağladığı savunulmaktadır. Makaleye göre, bu olumlu etki, kanat profiline basınç tarafının mümkün olduğunca düz olması ve hücum açısının pozitif olması durumunda ortaya çıkar.

Bu şartlar sağlandığında, kanat ve zemin arasındaki hava akışı optimize edilerek kaldırma kuvveti artırılabilir. Ancak, kanat profiline alt yüzeyinin dışbükey olması veya hücum açısının çok düşük ya da negatif olması durumunda, kanat altındaki hava akışında bir

Venturi etkisi meydana gelir. Venturi etkisi, kanat ile zemin arasındaki yüksek hızlı ve düşük basınçlı havanın kanadı aşağıya doğru çekmesiyle sonuçlanır. Bu durum, kaldırma kuvvetinde bir azalmaya neden olabilir ve yer etkisinden kaynaklanan avantajlar kaybolabilir.

Abramowski tarafından gerçekleştirilen sayısal deneyler, bu aerodinamik fenomeni nicel olarak analiz etmiş ve kaldırma kuvveti artışının belirli bir denklemle ifade edilebileceğini göstermiştir. Abramowski'nin deneysel bulgularına göre, yer etkisi altındaki kaldırma kuvveti artışı şu denklemle açıklanabilir (Abramowski, T., 2007):

$$L = \left(1 + \frac{C}{h} \right) L_0 \quad (2)$$

Burada L :Yer etkisi altındaki toplam kaldırma kuvvetini, L_0 : Yer etkisi olmaksızın (serbest akımda) oluşan kaldırma kuvvetini, C : Yer etkisinin büyüklüğünü belirleyen bir katsayıyı, h : Kanat veya yüzeyin yerden yüksekliğini ve b ise kanat açıklığını ifade etmektedir.

Denklem, kanadın yüzeye yakınlaştıkça kaldırma kuvvetinin nasıl arttığını nicel olarak göstermektedir. Yüksekliği azaldıkça (h küçüldükçe) $\frac{h}{b}$ oranı düşer ve bu durum, yer etkisinden kaynaklanan kaldırma kuvveti artışını daha belirgin hale getirir.

Bu çalışma, yer etkisi aerodinamiğinin temel prensiplerine ışık tutarken, özellikle kanat geometrisi ve hücum açısının yer etkisi üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Yer etkili araçların tasarımında, bu faktörlerin dikkatlice optimize edilmesi, performans artışı sağlayabilir ve yer etkisinin avantajlarından tam anlamıyla faydalanılmasına olanak tanır.

4.2 Açıklık Baskın Yer Etkisi (SDGE)

Açıklık Baskın Yer Etkisi (SDGE), kanat yüksekliği ve açıklık oranı (h/b) ile yakından ilişkilidir. Toplam sürüklenme, profil sürüklemesi ve indüklenen sürüklemenin toplamıdır. Profil sürüklemesine yüzey sürtünmesi ve akış ayrılması katkıda bulunurken, indüklenen sürüklenme, sonlu kanatlarda kanat ucunda meydana gelen bir "sızıntı" nedeniyle oluşur ve bu durum kanat verimliliğini azaltan girdapların oluşmasına yol açar.

SDGE'de, sınır etkileri nedeniyle bu girdapların gücü azalır. Bunun sonucunda, kanat ucunun daha yüksek bir en-boy oranına sahip olduğu gözlemlenir. Bu durum, kanadın etkin en-boy oranının ($\widehat{AR}$) geometrik en-boy oranı (AR) ile karşılaştırıldığında indüklenen sürüklenme oranında bir azalmaya yol açmasına neden olur.

SDGE, ilk olarak Wieselsberger tarafından incelenmiştir (Wieselsberger, C., 1922). Bu teoremin geliştirilmesinde, Wieselsberger'in yanı sıra diğer araştırmacıların yöntemleri de, zeminin kanat üzerindeki etkilerinin, aynı kanat etrafındaki akışın neden olacağı etkilerle aynı olduğu varsayımına dayanır. Bu bağlamda, yer düzleminin karşı tarafında simetrik olarak yerleştirilen bir görüntü kanadının varlığı kabul edilir. Wieselsberger'in modeli, yere yakınlık nedeniyle indüklenen sürüklemenin azalmasını ve bu sayede kaldırma kuvvetindeki artışı öngörmektedir.

Weisselsberger tarafından ilk kez sunulan bu çalışmada, uçağın yere yakınlığının neden olduğu sürüklenmenin azaldığı varsayılarak kaldırma kuvvetindeki artış bir parametre (σ) ile hesaplanmıştır (Wieselsberger, C., 1922).

$$\sigma = \frac{1 - 0.66 \frac{h}{l}}{1.05 + 3.7 \frac{h}{l}} \quad (3)$$

Burada h , uçağın su yüzeyi üzerindeki yüksekliğini temsil eder ve l , kanat açıklığını temsil eder ($h/l = 1/15$ 'ten $h/l = 1/2$ 'ye kadar geçerlidir). Zemin etkisi oluştuğunda artan en boy oranı ($\widehat{AR}$) şu şekilde tanımlanır (Wieselsberger, C., 1922):

$$AR = \frac{l^2}{S} \quad ve \quad \widehat{AR} = \frac{AR}{1 - \sigma} \quad (4)$$

$$C_{D_L} = (1 - \sigma) \frac{C_L^2}{\pi \widehat{AR}} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{2\pi}{1 + \frac{2}{\widehat{AR}}} \alpha + C_{L0} \quad (6)$$

Burada S :Kanatın platform alanı (kanat yüzey alanı), $\widehat{AR}$: Yer etkisini dikkate alarak düzeltilmiş kanat oranıdır. AR : Kanat oranını ifade eder ve kanadın aerodinamik verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. l : Kanat açıklığı (span), yani kanadın bir ucundan diğer ucuna kadar olan mesafeyi ifade etmektedir. σ :Yer etkisi faktörü veya yer yakınlığı katsayısı olarak adlandırılan bir terimdir. Bu katsayı, kanadın yer yüzeyine yakınlığını ve yer etkisinin büyüklüğünü temsil eder. α :Hücum açısı (attack angle), kanat profili ile gelen hava akımı arasındaki açıyı temsil eder. C_L : Kaldırma katsayısıdır ve kanat açıklığı, hücum açısı gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir. C_{L0} : Sıfır hücum açısında (yani kanat ve hava akımı paralel olduğunda) elde edilen kaldırma katsayısını ifade etmektedir.

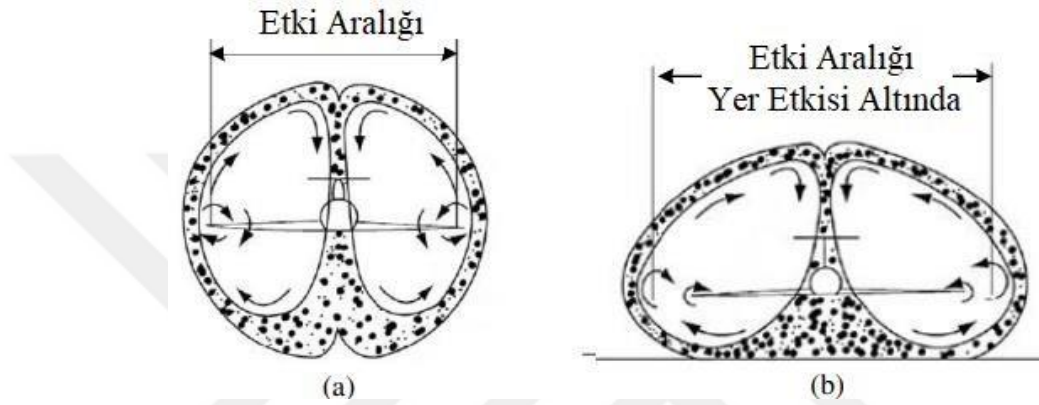
4.3 Akor Baskın Yer Etkisi (CDGE)

Akor Baskın Yer Etkisi (CDGE), kanat profilinin alt yüzeyiyle ilgilidir. Tasarımcılar, giriş ağırlıklı zemin etkisini iyileştirmek amacıyla kanat profilinin alt tarafının düz olması gerektiğini belirlemişlerdir. Bu durum, aracın tasarım sürecinde kanat profili seçilirken özellikle göz önünde bulundurulmuş bir faktördür. Söz konusu etkinin tüm aracın geometrisiyle yakından ilişkili olması nedeniyle modellenmesi oldukça karmaşıktır. Bu bağlamda, kaldırma kuvvetinin hesaplanmasında GE parametresi kullanılabilir.

CDGE çalışmalarında temel parametrelerden biri yükseklik-kiriş (H/c) oranıdır. Burada H yüksekliği, zemin yüzeyi ile araç gövdesi arasındaki mesafeyi ifade eder. Kaldırma kuvvetindeki artış, düşük yükseklikte meydana gelen hava yastığı etkisine bağlı olarak

statik basınçtaki yükselmeden kaynaklanmaktadır. Bu çarpma etkisi, kaldırma kuvvetinin artmasına yol açar.

Şekil 8’de verilen yer etkisinin olmadığı (a) ve yer etkisinin olduğu (b) kanat profilleri arasındaki farklar dikkat çekicidir. Teorik olarak, yükseklik sıfıra yaklaştıkça hava akışının durmasına ve basınç katsayısının birlik değerine ulaşarak maksimum statik basıncın oluşmasına neden olur.



Şekil 8 Hava aracında uçuş esnasında oluşan vortex akımları (Rozhdestvensky, K. V., 2006).

Rozhdestvensky, aşırı zemin etkisi $[H/c \leq 0.1]$, varlığında sonsuz açıklığa sahip düz plaka durumu için tahminde bulunmuştur (benzer kanat profili kullanılmıştır) C_l ve C_m için kapalı formda bir çözüm, ince kanat profili teorisinin bir modifikasyonu ile elde edilebilir ve ilgili formüller şu şekilde verilmiştir (Rozhdestvensky, K. V., 2006):

$$C_L = \frac{\alpha}{H} \quad (7)$$

$$C_{Lm} = \frac{\alpha}{3H} \quad (8)$$

Bu denklem, hücum açısı ile moment katsayısı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Kanadın yerden yüksekliği ve hücum açısı arttıkça moment katsayısı da değişecektir.

Denklem (8)'de kaldırma moment katsayısı hücum kenarına göre alınır(C_{Lm}). Denklem (7) ve (8)'in aynı zamanda basınç merkezi ile ilgili bir sorunu da beraberinde getirdiği

unutulmamalıdır. Basınç merkezinin akorun üçte biri civarında olduğunu ifade etmektedir. Yerden uzaklaşılma olduğunda aerodinamik analiz sırasında bu durumun dikkate alınması gerekir.

4.4 Yer Etkili Hava Araçlarının Denklemleri

Yer etkisini dikkate alarak bir hava aracının hareket ve moment denklemlerini oluşturmak oldukça karmaşık bir süreçtir. Yer etkisi, hava aracı yere yaklaştıkça aerodinamik kuvvetler ve momentler üzerinde belirgin değişikliklere neden olur. Bu etkiler dikkate alındığında hava aracının dinamikleri hem matematiksel hem de fiziksel olarak daha karmaşık hale gelir.

Bu denklemler, hava aracı dinamiklerini ve yer etkisinin aerodinamik kuvvetler üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde tanımlar. Bu denklemler, yer etkisini göz önünde bulundurarak hava aracının daha doğru bir şekilde modellenmesine yardım edecektir.

YEHA'lar yere yakın hareket ederken yer etkisini kullanarak kaldırma verimliliğini ve aerodinamiği arttıracaktır. Bu tür araçların hareket ve moment denklemleri oluşturulurken klasik hava aracı aerodinamiği ilkeleri yer etkisiyle uyarlanarak ele alınır.

Hareket Denklemleri:

Newton'un ikinci yasası ve Euler açılarının kullanıldığı her eksendeki denklemler oluşturulur (Roskam. J, 2003).

X Eksen ileri yönlü hareketi, Y eksen yanal hareketi ve Z eksen ise dikey hareketi ifade etmektedir. (Rozhdestvensky. K., 2006)

$$m\ddot{x} = T - D \quad (9)$$

$$m\ddot{y} = Y \quad (10)$$

$$m\ddot{z} = L - W \quad (11)$$

Genel Hareket Denklemleri:

YEHA'lar, 6 serbestlik derecesine sahiptir: 3 doğrusal (X, Y, Z eksenleri boyunca) ve 3 açısal (roll, pitch, yaw açıları) olarak ifade edilmiştir. Bu hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Kornev. N & Matveev. K,2009):

X eksenli boyunca hareket:

$$m\ddot{u} = T - D + mg \sin \theta - L_{yer}\theta \quad (12)$$

Y eksenli boyunca hareket:

$$m\ddot{v} = Y \quad (13)$$

Z eksenli boyunca hareket:

$$m\ddot{w} = L_{yer} - W + \cos \theta \quad (14)$$

Burada: T İtici kuvvetini, D Sürüklenme kuvvetini, L_{yer} Yer etkisi altındaki kaldırma kuvvetini, $W = mg$: Ağırlık kuvvetini, u, v, w ise sırasıyla X, Y ve Z eksenleri boyunca hız bileşenlerini ifade etmektedir.

Açısal Hareket Denklemleri (Kornev. N & Matveev. K,2009):

Roll momenti (X eksenli etrafında):

$$I_x \ddot{p} = M_x \quad (15)$$

Pitch momenti (Y eksenli etrafında):

$$I_y \ddot{q} = M_y \quad (16)$$

Yaw momenti (Z eksenli etrafında):

$$I_z \ddot{r} = M_z \quad (17)$$

Bu denklemlerde; p, q, r sırasıyla roll, pitch ve yaw açısal hızlarını, I_x, I_y, I_z eksenel atalet momentlerini, M_x, M_y, M_z ise X, Y ve Z eksenleri etrafındaki momentleri ifade etmektedir.

Kuvvet Denklemleri (Kornev. N & Matveev. K,2009):

$$\dot{u} = vr - \omega q - g \sin \theta + \frac{F_x}{m} \quad (18)$$

$$\dot{v} = ur + \omega p + g \cos \theta \sin \phi + \frac{F_y}{m} \quad (19)$$

$$\dot{\omega} = uq + vp + g \cos \theta \cos \phi + \frac{F_z}{m} \quad (20)$$

Moment Denklemleri:

Yer etkisini dikkate alarak moment denklemlerini oluşturmak, bu araçların stabilitesini ve manevra kabiliyetini anlamak açısından önemlidir. Yer etkisi, özellikle kanat ucu vortekslerinin azalması ve indüklenmiş sürüklemenin düşmesi nedeniyle hava aracı üzerinde momentlerin daha dengeli bir şekilde dağılmasını sağlar. (Anderson, J.D. 2007). Bu denge, araç yere yakın uçarken daha stabil ve kontrollü bir uçuş sağlar.

Yer etkisi, kanat ucundaki girdapları ve indüklenmiş sürüklenme kuvvetini azaltarak kaldırma kuvvetini artırır. Ancak, bu etkinin momentler üzerindeki etkisi daha karmaşık bir yapıdadır. Ve bu etkiyi aşağıdaki denklemlerde görebiliriz (Raymer. D.P. 1992).

Roll Momenti Denklemleri (L):

$$L = I_x \dot{p} + (I_{xz} - h_y p S_{eff}) \dot{r} + Q_r + \text{Aeroelastik Momentler} \quad (21)$$

Burada I_x ; x eksenini etrafındaki eylemsizlik momentidir, $\dot{p}$; roll açısal ivmesidir, I_{xz} çapraz eylemsizlik momentidir (roll ve yaw arasındaki etkileşim), h_y yer etkisi altındaki moment koludur, p rho p hava yoğunluğudur, S_{eff} efektif yüzey alanıdır (yer etkisi altındaki değişimler göz önünde bulundurularak hesaplanır) ve Q_{roll} roll eksenini üzerindeki damping etkisidir (Raymer. D.P. 1992).

Yer etkisi, roll momentini azaltarak daha stabil bir uçuş sağlar, çünkü kanat uçlarındaki vortekslerin etkisi azalır.

Pitch Momenti Denklemleri (M):

$$M = I_y \dot{q} + (h_z p \mathcal{S}_{eff} c) Q_p + \text{Yer Etkisi Momentleri} \quad (22)$$

Burada I_y ; y eksenini etrafındaki eylemsizlik momentidir, $\dot{q}$ pitch açısal ivmesidir, h_z yer etkisi altındaki moment koludur, c kanat kord uzunluğudur ve Q_p pitch eksenini üzerindeki damping etkisini belirtmektedir (Raymer. D.P. 1992).

Yer etkisi, özellikle pitch momentini üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kanat altındaki hava yastığı etkisi (cushion effect) pitch stabilitesini artırır ve araç daha az burun aşağı veya yukarı eğilim gösterir.

$$N = I_z \dot{r} + (I_{xz} h_y p \mathcal{S}_{eff} c) \dot{p} + Q_y + \text{Yer Etkisi Asimetrik Momentleri} \quad (23)$$

Burada I_z ; z eksenini etrafındaki eylemsizlik momentidir, $\dot{r}$ yaw açısal ivmesidir ve Q_y yaw eksenini üzerindeki damping etkisini ifade etmektedir (Raymer. D.P. 1992).

Yaw momentini yer etkisinden dolayı daha stabil hale gelir, çünkü indüklenmiş sürüklenme kuvveti azalır ve araç daha düz bir yönelim sergiler.

$$\dot{p} = \left[\begin{array}{l} (I_y I_z - I_z^2 - I_{xz}^2) q r + I_z L \\ + I_{xz} (I_x + I_y + I_z) p q + I_{xz} N \end{array} \right] / I_x I_z - I_{xz}^2 \quad (24)$$

$$\dot{q} = [(I_z - I_x) p r - I_{xz} (p^2 - r^2) + M] / I_y \quad (25)$$

$$\dot{r} = \left[\begin{array}{l} (I_x^2 - I_x I_y + I_{xz}^2) p q + I_{xz} L \\ - I_{xz} (I_x - I_y + I_z) q r + I_x N \end{array} \right] / I_x I_z - I_{xz}^2 \quad (26)$$

Kinematik Denklemler:

YEHA'nın kinematik denklemleri, aracın yer etkisi altındaki hareketini detaylı bir şekilde analiz etmek için oluşturulur. Kinematik denklemler, aracın hız, ivme ve konum

değişimlerini yer etkisiyle birlikte dikkate alır. Bu denklemler, aracın üç boyutlu uzayda hareketini ve yönelimini tanımlar.

Burada p, q, r sırasıyla roll, pitch ve yaw açısal hızlarıdır. Bu denklemler aracın yönelim değişimlerini tanımlar (Raymer. D.P. 1992).

Yer etkisi, aracın yere yakın uçuş durumunda, aerodinamik kuvvetleri değiştirerek, aracın kinematiği üzerinde doğrudan etkili olur. Yer etkisinin dikkate alındığı durumlarda, aracın kaldırma kuvveti artarken, indüklenmiş sürükleme azalır. Bu değişiklikler aracın hız bileşenlerine ve dolayısıyla konum denklemlerine yansır.

$$\dot{\phi} = p + (r \cos \phi + q \sin \phi) \tan \theta \quad (27)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \quad (28)$$

$$\dot{\psi} = (r \cos \phi + q \sin \phi) / \cos \theta \quad (29)$$

Yörünge Denklemleri :

$$\dot{x}_g = u \cos \theta \cos \psi + (\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) + \omega (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \quad (30)$$

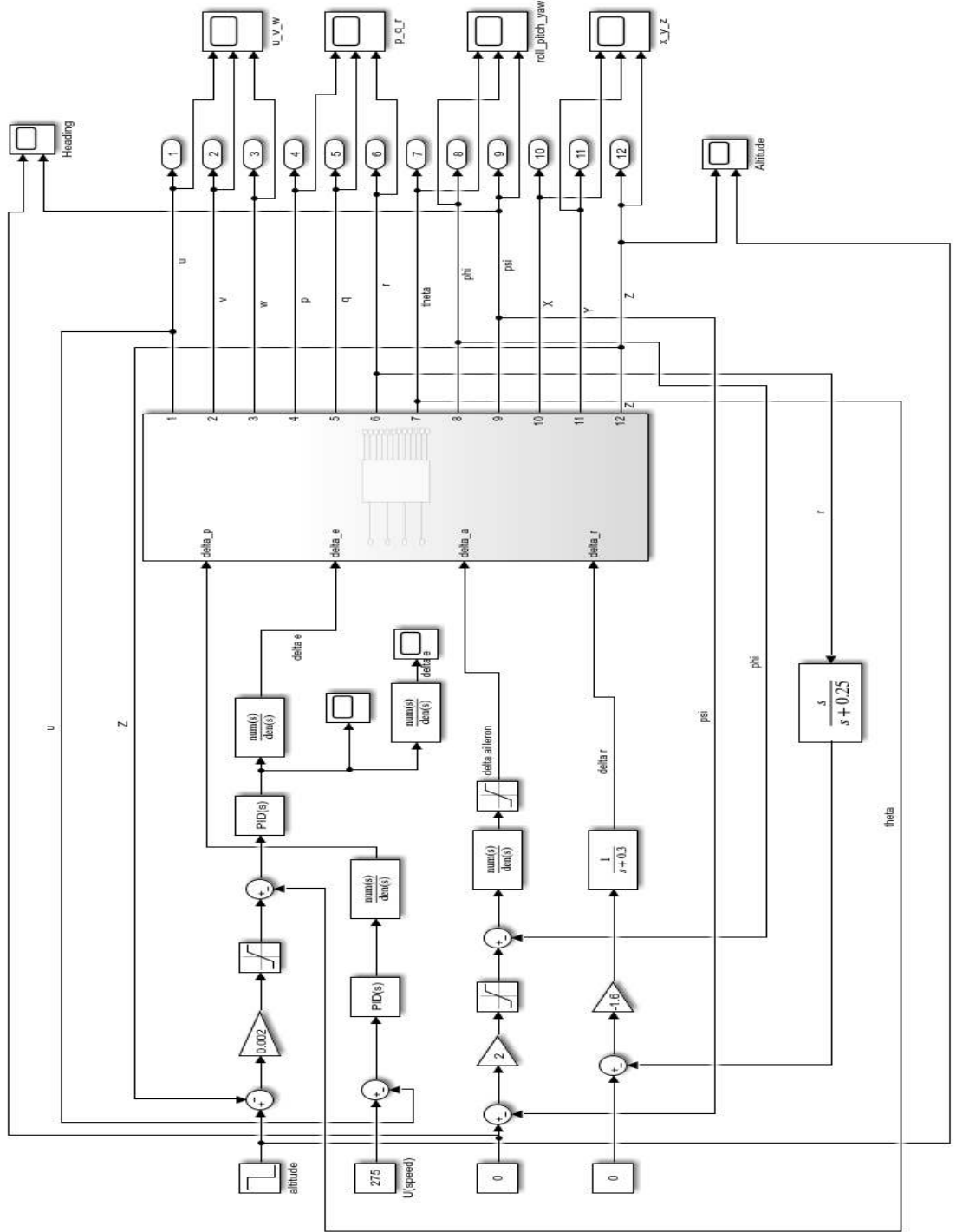
$$\dot{y}_g = u \cos \theta \sin \psi + v (\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) + \omega (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \quad (31)$$

$$-\dot{h}_g = -u \sin \theta + u \sin \phi \cos \theta + \omega \cos \phi \cos \theta \quad (32)$$

Yer etkili hava aracının yörünge denklemleri, yer etkisini içeren aerodinamik katsayıların belirlenmesi ve bunların yukarıdaki doğrusal ve açısal hareket denklemlerine entegrasyonu ile çözülür. Bu denklemler, aracın belirli bir başlangıç durumundan (pozisyon, hız ve yönelim) başlayarak, zamana bağlı olarak nasıl hareket ettiğini belirlemek için sayısal yöntemlerle çözülür.

5. YER ETKİLİ HAVA ARACININ SİMULİNK MODELİ VE YÜKSEKLİK KONTROLÜ

5.1 YEHA'nın Simulink Modeli



Şekil 9 Yer etkili hava aracı simulink modeli (<https://github.com/samberg96/aircraft-flight-controller/tree/main>)

Şekil 9’da YEHA’nın denklemleri kullanılarak ayrıca Denklem (3)’te verilen kaldırma kuvvetindeki artışı ifade eden parametre (σ) yer etkisinin de dikkate alınarak hazırlanan YEHA’nın yükseklik ve hız kontrolüne ait MATLAB/Mimulink modeli sunulmuştur.

5.2 YEHA’nın Yükseklik Kontrolü

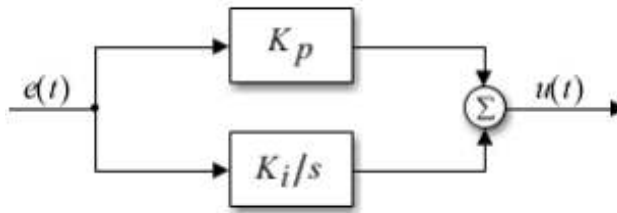
5.2.1 PI Kontrolcü

PI, endüstriyel kontrol sistemlerinde hatayı elemine etme ve hız bakımından yaygın olarak kullanılan en uygun kontrol tekniklerinden biridir ve ayrıca otonom araçlar ve insansız araç uygulamalarında kullanılmıştır (Orman ve Derdiyok, 2015, Orman K. ve ark., 2016, Orman K, 2022).

Denetleyicinin şematik modeli Şekil 10 ‘da gösterilmiştir. PI denetleyicisinin genel ifadesi şu şekildedir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) \quad (33)$$

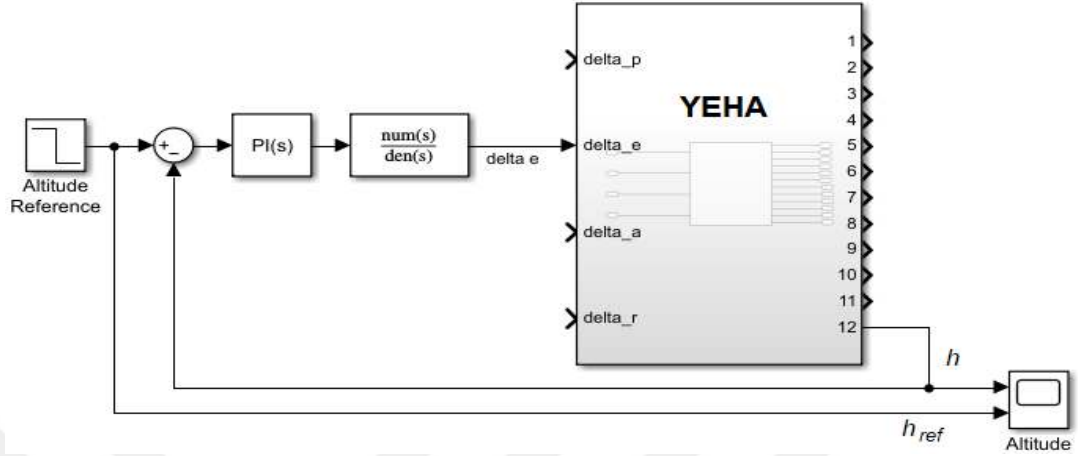
Burada $e(t)$ kontrol edilmek istenilen değişkene ait hata işaretini, $u(t)$ kontrol işaretini K_p oransla kazanç sabitini, K_i ise integral kazanç sabitini ifade etmektedir.



Şekil 10 PI Kontrolcüsü

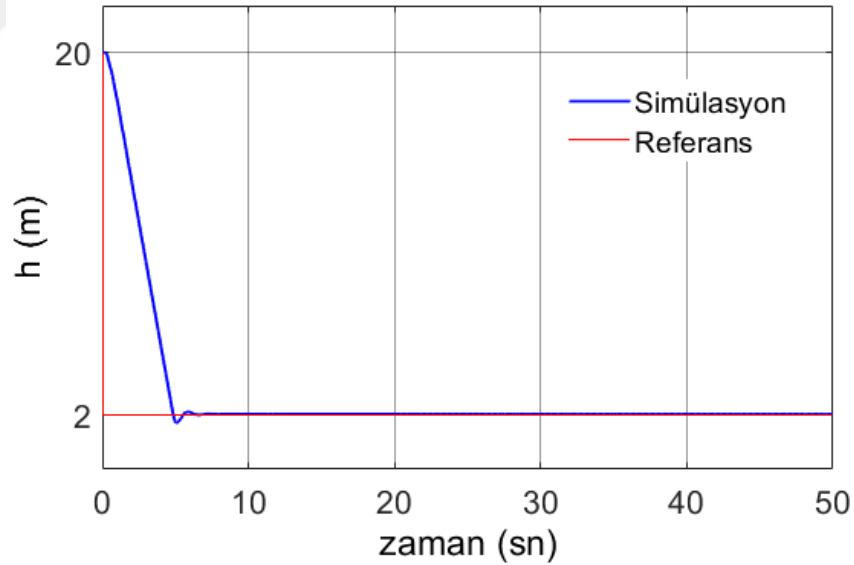
Bu tez çalışması kapsamında kullanılan PI denetleyicinin K_p ve K_i parametreleri denme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

Şekil 11’de ise YEHA simülasyon modelinde; YAHA’nın PI kontrolcü ile yükseklik kontrolünün blok diyagram kısmına ait gösterim verilmiştir.



Şekil 11 Yer etkili hava aracının PI denetleyici ile yükseklik kontrolüne ait blok diyagram

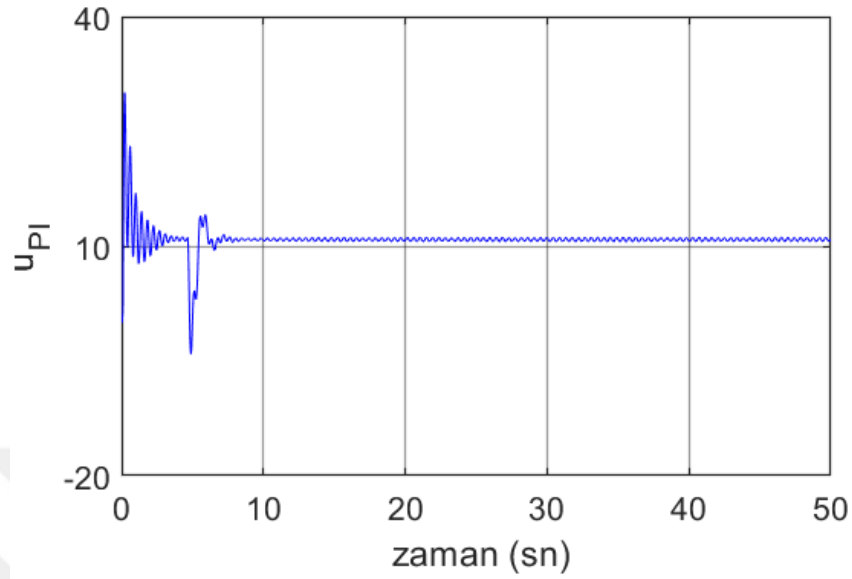
5.3 Simülasyon Sonuçları



Şekil 12 YEHA’nın PI kontrolcü ile yükseklik kontrolünde referans ve simülasyon sonucu

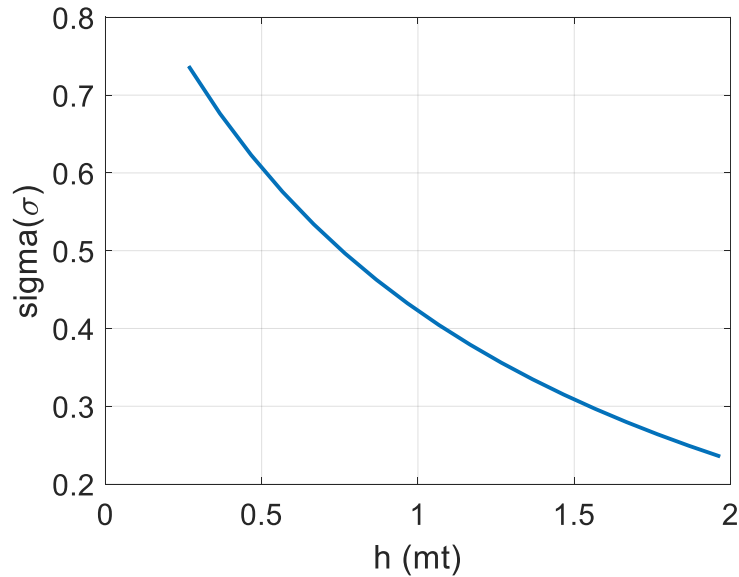
Şekil 12, yer etkisinin olduğu alan olarak belirlenen yükseklik aralığında YEHA’nın yükseklik değişimi hareketini göstermektedir. PI kontrolcüsü, referansa ulaşma ve yörünge takibindeki hatayı ortadan kaldırma açısından başarılı sonuçlar vermiştir.

Şekil13'te PI kontrolcüye ait kontrol işareti $u(t)$ 'nin değişimi sunulmuştur. Kontrol işaretinde referansa eriştikten sonra ufak salınımlar olduğu gözlemlenmiştir.

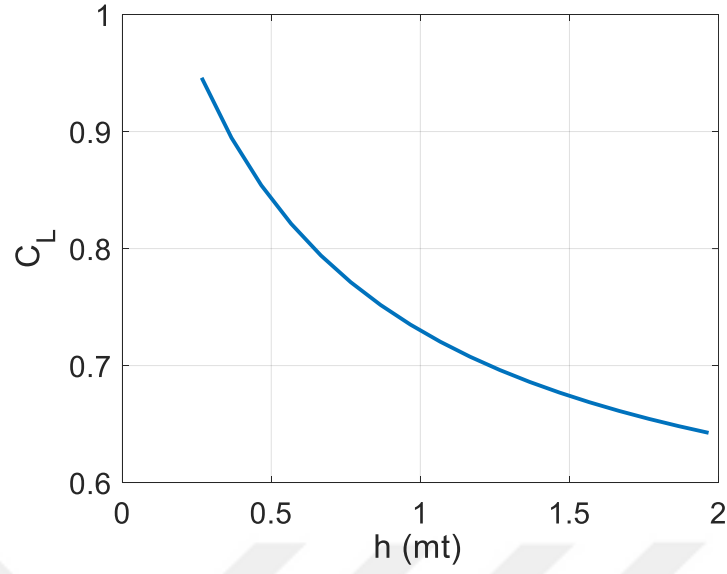


Şekil 13 YEHA'nın yükseklik kontrolünde PI kontrolcüye ait kontrol işareti

Şekil 14'te ise Denklem (3)' de verilen σ yer etkisi parametresinin yüksekliğe göre değişimi gösterilmektedir. Belirlenen aralıkta YAHE'nın yükseklik değeri azaldıkça yer etkisi parametresi σ değeri de artmaktadır.

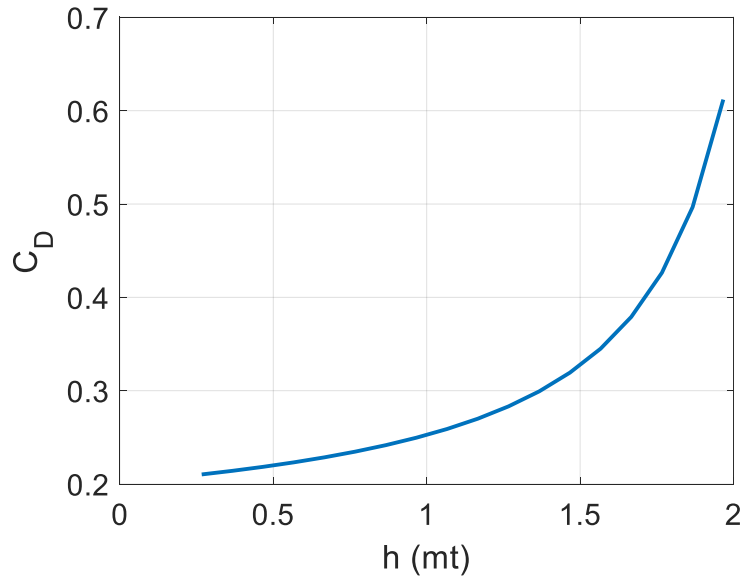


Şekil 14 Yer etkisi parametresi σ 'nın yüksekliğe göre değişimi

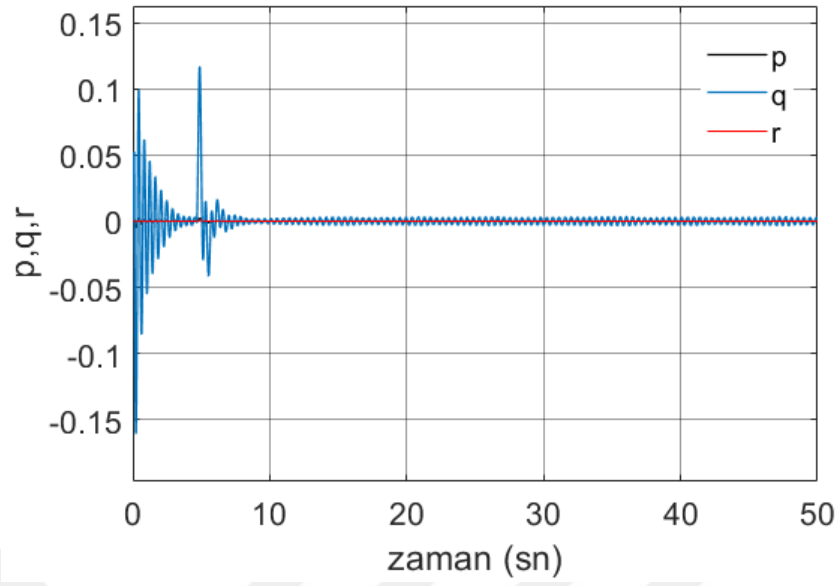


Şekil 15 Kaldırma katsayısının yüksekliğe göre değişimi

Şekil 15 ve Şekil 16’da ise Denklem (5) ve Denklem (6)’te verilen kaldırma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısı (C_D) değerlerini belirlenen aralıktaki yüksekliğe göre değişimi sunulmuştur. Belirlenen aralıkta yükseklik değeri azaldıkça kaldırma katsayısı (C_L) değeri artmakta ve sürüklenme katsayısı (C_D) değeri azalmaktadır.

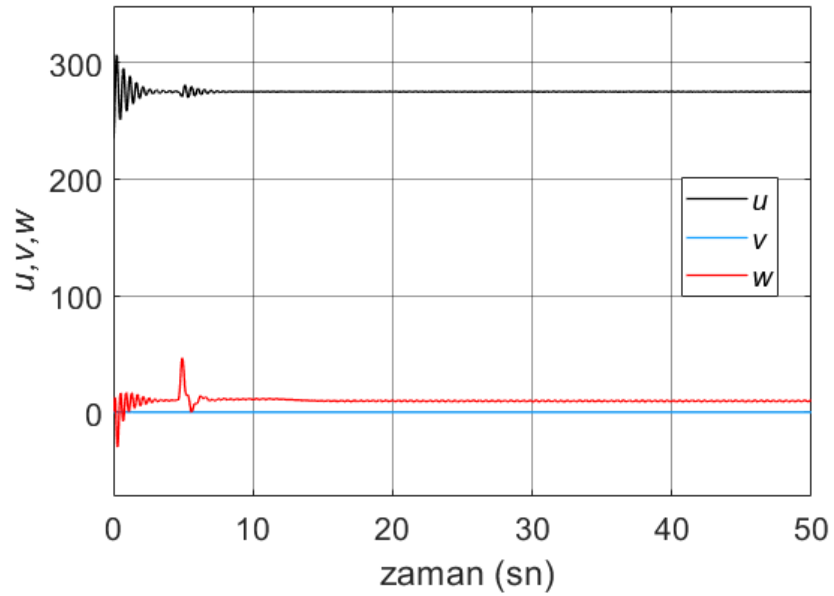


Şekil 16 Sürüklenme katsayısının yüksekliğe göre değişimi



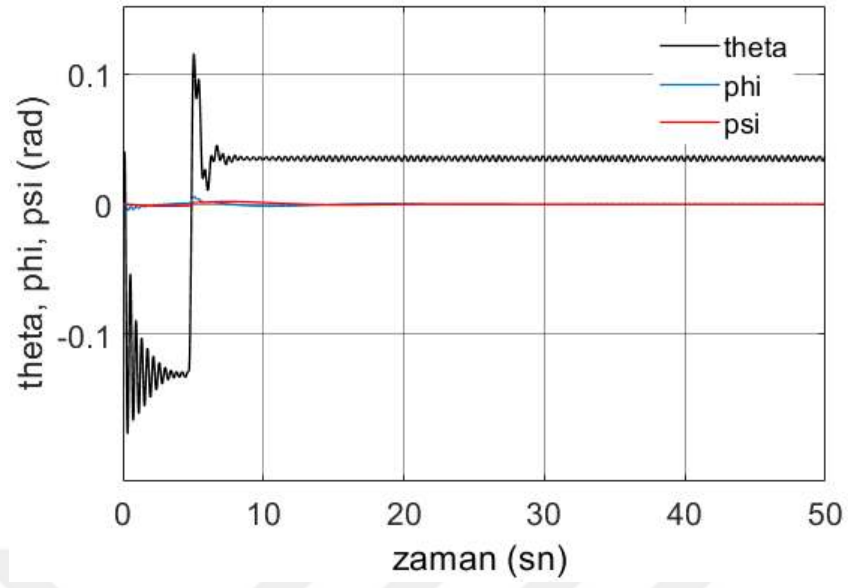
Şekil 17 YEHA'nın Yükseklik kontrolünde açısız hızlarının değışimi

Şekil 17'de YEHA'nın açısal hızları p , q ve r 'nin belirlenen simülasyon aralığındaki değışimi gösterilmektedir. Hava aracının yüksekliği azalırken Pitch açısının etkin rol oynadığı görölmektedir.



Şekil 18 YEHA'nın Yükseklik kontrolünde doğrusal hızlarının değışimi

Şekil 18'de ise YEHA'nın x , y ve z eksenlerindeki doğrusal hızları olan u , v ve w 'nin değışimi görölmektedir.



Şekil 19 YEHA'nın Yükseklik kontrolünde pitch, roll ve yaw açılarının değişimi

Şekil 19'da YEHA'nın açısal eksenlerini ifade eden θ , ϕ ve ψ açılarının simülasyon sürecince değişimleri verilmiştir.

6. SONUÇ ve TARTIŞMA

YEHA'nın yükseklik kontrolü için oluşturulan simulink modeli bu çalışma için oldukça uygun çalışma imkânı sunmuştur. PI denetleyici hava aracının yüksekliğini kontrol etme açısından başarılı sonuçlar vermiştir. YEHA 20 mt yüksekliğe sabit hızla uçarken belirlenen referans yükseklik olan 2 mt yüksekliğe erişme zamanı 7 saniye civarındadır. Referansa eriştikten sonra ise hata oluşmamış ve kontrolcü hem referansa erişme süresi hem de hatayı elemine etmesi bakımından başarılıdır. Aracın açısal ve doğrusal hızlarına ait grafiklerde de görüleceği üzere kontrolcü aracı referans yüksekliğe ulaştırmak için ani değişim anlarında salınımlı çıktılar üretmiş referansa eriştikten sonra ise referans değerinde tutmak için Şekil 13'te de görüleceği gibi ufak genlikli salınımlar içeren bir kontrol işareti üretmiştir. Bu durum kontrolcünün çabasını göstermektedir.

Kontrol yaklaşımı açısından elde edilen YEHA modelinin geliştirilebilir olması üst düzey kontrol algoritmalarının da test edilebilmesi bakımından önemlidir. Bu çalışmanın devamında MATLAB/Simulink modeli oluşturulan YEHA'nın fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve uçuş dinamiklerine göre en uygun üst düzey kontrol algoritmaları ile test edilmesi hedeflenmektedir.

Diğer taraftan YEHA'ların geleceği, çeşitli dinamiklerin etkileşimiyle şekillenecektir. Öncelikle, bu araçların sağladığı enerji verimliliği ve düşük çevresel etki, şehirlerarası ulaşımında ve lojistikte önemli bir avantaj sunabilir. Elektrikli ve hibrit motor teknolojilerinin ilerlemesi, bu araçların sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarını kolaylaştıracaktır.

Teknolojik yenilikler, otonom sistemlerin entegrasyonu ve yapay zekâ ile desteklenen navigasyon kontrol sistemlerinin gelişimiyle daha da hızlanacaktır. Bu, hem güvenliği artıracak hem de hava trafiğinin daha verimli yönetilmesine olanak tanıyacaktır. Lojistik açısından trafik yoğunluğunu azaltma potansiyeli, yer etkili hava araçlarını çekici kılmaktadır. Ulaşım sürelerinin kısalması, ağır yüklerin daha kısa sürelerde taşınması gibi ekonomik faydalar sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, acil durum müdahale görevlerinde ve

askeri alanlarda da ülke savunması bakımından özellikle üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizin mavi vatan görevlerinde büyük destekler sunabilirler.

Ancak, bu teknolojilerin geniş çapta benimsenmesi için güvenlik, düzenleme ve altyapı gibi zorlukların aşılmasını gerektirmektedir. Hava sahası yönetimi ve hava trafiği kontrol sistemlerinin güncellenmesi, yeni nesil hava araçlarının entegrasyonu için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, bu araçların otonom uçuşları için mevcut kontrol yöntemlerinin test edilmesi ve yapay zekâ destekli kontrol algoritmalarının geliştirilmesi de önem arzirmektedir.

Sonuç olarak, yer etkili hava araçları, gelecekte ulaşımın ve lojistiğin şekillenmesinde önemli bir rol oynayacaktır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu araçların potansiyeli, günlük yaşamımızda devrim yaratma kapasitesine sahip. Sürdürülebilir, verimli ve güvenli bir ulaşım sistemi için bu araçların gelişimi açısından özellikle kontrolüne yönelik çalışmaların artması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abramowski, K. (1984). Aerodynamic Ground Effect and its Influence on Wing Performance. *Journal of Aerodynamic Engineering*.
- Abramowski, K. (2007). Numerical investigation of airfoil in ground proximity. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 45(2), 425-436.
- Advance Research Projects Agency (1994). Wingship Investigation Volume 1-Final Report, ARPA Report, 30 September 1994. Mellow, C. (1996, December/January).
- AL Maatoq, T. A. T, & Orman, K. (2023) ,“Yer Etkili Hava Araçlarının İncelenmesi”, Modern Elektrik Teknolojileri: Tasarım, Optimizasyon ve Güvenlik II, Prof. Dr. Eyyüp GÜLBANDILAR, Editör, BİDGE Yayınları, Ankara, ss.5-19, 2023
- AL Maatoq, T. A. T, & Orman, K. (2024) “ Modeling and Altitude Control of the Ground Effect Vehicle”. *7th International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences (ICANAS 2024)*, Antalya, Türkiye, 17 - 20 Nisan 2024, cilt.7, ss.238-245
- Alexeyev, Km, (2019).The magazine Old Machine Press.ekranoplan caspian sea monster.
- Anderson, J. D. (1978). "Introduction to Flight". *McGraw-Hill Education*.
- Anderson, J.D. (2007). Fundamentals of Aerodynamics. *McGraw-Hill*.
- Anderson, J.D., (2016)Introduction to Flight, *McGraw-Hill*, 8th Edition, [Source for the lift/drag ratio in ground effect and its influence on aircraft performance].
- Anh, T. H., Binh, N. T., & Song, J. W. (2021). In-ground-effect model based adaptive altitude control of rotorcraft unmanned aerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 794-801.
- Belavin, N. I., (1968). Letauschie Suda-ekranoplan. *Katera I Yakhty* no. 15.
- Bernoulli, D., *Hydrodynamica*, (1738). [Original publication where Bernoulli introduced his principle on fluid pressure and velocity].
- Cherrington, M. (2004). "Feature: Flight unseen". *Amherst Magazine*. Amherst College
- Cole, W. (2002). Phantom Works: The Pelican-A Big Bird for the Long Haul. *Boeing Frontiers*, Volume 1, Issue 5. Retrieved June 28, 2006, from http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2002/september/i_pw.html 9 Ibid.
- Cui, E., & Zhang, X. (2010). Ground effect aerodynamics. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 1(Part 3), 245-256.

- Díaz-Téllez, J., Guerrero-Castellanos, J. F., Pouthier, F., Marchand, N., & Durand, S. (2023). In-Ground-Effect Disturbance-Rejection Altitude Control for Multi-Rotor UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 109(2), 27.
- Emirler, M. T. (2015). *Advanced Control Systems for Ground Vehicles (Doctoral dissertation, PhD Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey)*.
- Euler, L., (1757). Opera Omnia: Series 2, Volume 12. [Work on fluid dynamics where the Bernoulli Equation is derived]. S/24
- Gerigk, M., Lipiński, K., & Chodnicki, M. (2024). Development of a Control System for an Autonomous Seaplane. *26th International Symposium RET "Research – Education – Technology"*, Stralsund, Germany
- Ghafoor A., (2015), "Wing In Ground Effect Vehicle: Modelling And Control" Master Thesis, METU, Ankara, Turkiye .
- Guy, N., 2003. "Flying ships: Pelican crossing. We look at Boeing's unusual concept for a giant wing-in-ground-effect aircraft, the Pelican project from Phantom Works". Features. *Flight International*. No. 4889. Los Angeles, California
- Hirdaris, S. Guerrier, M. (2009). "Technology Developments in Ground Effect Craft", 2nd Annual Ship Tech Dubai Release, 8–9 November.
- Hooker S., (1982) Wingships: Prospect for High-Speed Oceanic Transport, Jane's All the World's Surface Skimmers, Jane's Information Group, Coulsdon, UK.
- Ji, H., Yan, J., Zhao, Y., Zhu, Y., Wang, J., & Zuo, D. (2021). Control system design for WIG aircraft on the wavy water surface. *In 2021 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)* 567-571.
- Ken. K., (2002). "Plane of future sits on design board". South Florida Sun-Sentinel. Knight-Ridder/Tribune.
- Kolewe, B., Drewelow, W., Dewitz, D., & Lampe, B. (2010). MARSPEED-Modelling and Real Time Simulating the Motion of a Wing-in-Ground-Effect Vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(20), 184-189.
- Kornev. N. , & Matveev. K. (2003). Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles. *In 41st Aerospace sciences meeting and exhibit* (p. 600).
- Mei, Y., Su, S., Shan, X., Yu, P., & Wang, H. (2022). High Precision Height Control for Wing-in-Ground Crafts. *International Journal of Aerospace Engineering*.

- Moller, H.J. (2000). The Influence of Ground Effect on Aerodynamic Characteristics of Wing-in-Ground Effect Vehicles. *Journal of Aircraft*.
- Nebylov, A. & Nebylov, V. , (2007). New design methods and results for automatically controlled WIG. DOI:10.13009/EUCASS2019-174
- Nebylov, A.V., Alexander, R., Sukrit, S. (2007) "Comparative Analysis of Design Variants for Low Altitude Flight Parameters Measuring System", *17th IFAC Symposium for Automatic Control*, part 1, vol. 17, pp. 663-668.
- Ni, J., Hu, J., & Xiang, C. (2021). A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(4), 1084-1100.
- Nonaka, K. , & Sugizaki, H. (2011, June). Integral sliding mode altitude control for a small model helicopter with ground effect compensation. *In Proceedings of the 2011 american control conference* (pp. 202-207). IEEE.
- Orman, K. (2022). Design of a Memristor-Based 2-DOF PI Controller and Testing of Its Temperature Profile Tracking in a Heat Flow System. *IEEE ACCESS*, vol.10, no.10,98384-98390.
- Orman, K. Başçı, A. Derdiyok, A. (2016). Speed and Direction Angle Control of Four Wheel Drive Skid-Steered Mobile Robot by Using Fractional Order PI Controller. *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol.22, no.5, 14-19.
- Orman, K. Derdiyok, A. (2015). Kalman Filtresi ile PI Kontrolün Mikro İnsansız Hava Aracı'nın Gerçek Zamanlı Yörünge Takibine Uygulanması. *TOK'15 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı Pamukkale Üniversitesi* , (Denizli, Turkey), 598-602.
- Paek, C. S. (2006). "The viability of commercializing Wing-In-Ground (WIG) craft in connection with technical, economic and safety aspects followed by IMO legislation" Master Thesis, Malmö, Sweden .
- Papadopoulos, C., Mitridis, D., Yakinthos, K. (2022). Conceptual design of a novel unmanned ground effect vehicle (ugev) and flow control integration study. *Drones*, 6(1), 25.
- Patria, D. , Rossi, C. , Fernandez, R. A. S. , Dominguez, S. (2021). Nonlinear control strategies for an autonomous wing-inground-effect vehicle. *Sensors*, 21(12), 4193.

- Placek, R., Ruchała, P., & Stryczniewicz, W. (2017). “ Ground Effect Influence on the Aerodynamic Characteristics of Ultralight High-wing Aircraft–Wind Tunnel Tests. ” *Journal of KONES*, 24(2), 183-190.
- Pua’at, A. A. , Matdaud, Z. , Zhahir, A. , Ahmad, M. T. , & Hassan, A. (2019, October). Case Study on Aerodynamics Stability of Bixel Wing-In-Ground Effect Craft. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 642, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- Raymer, D.P. (1992). Aircraft Design: A Conceptual Approach. AIAA Education Series.
- Reeves J.M.L, (May 1993). The case for surface effect research, platform applications and development opportunities. *NATO–AGARD fluid mechanics panel (FMP) symposium in long range and long range endurance operation of aircraft, session 1A*, paper no. 4, 24–27.
- Retrieved June 28, 2006, from http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2002/september/i_pw.html 9 Ibid
- Roskam. J, (2003) "Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls". DAR corporation.
- Rozhdestvensky K.V, (1997). Ekranoplans—the GEMs of fast water transport, *Institute of Marine Engineering*, London, Vol.109, part 1, 47–74.
- Rozhdestvensky, K. V. (2006). Wing-in-ground effect vehicles. *Progress in aerospace sciences*, 42(3), 211-283.
- Rozhdestvensky, K.V., (2006). “Wing in Ground Effect Vehicles”, *Progress in Aerospace Science*, vol. 42, pp. 211-283.
- Shabani, R., Nalcaci, G., Leblebicioglu, M. K., & Ermis, M. (2020, July). Cost Function Determination for a WIG in Predefined Path and Height Using Conjugate Gradient Method. In *2020 IEEE 6th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)* (pp. 172-177). IEEE.
- Sharf, I., Nahon, M., Harmat, A., Khan, W., Michini, M., Speal, N., ... & Wang, T. (2014, May). Ground effect experiments and model validation with Draganflyer X8 rotorcraft. In *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1158-1166). IEEE.

- Tofa, M. M. (2011). Resistance of Wing in Ground Effect Craft Model During Take-off (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).
- Wieselsberge, C. (1922). "Wing Resistance near the Ground", *NACA TM* No. 77.
- Wikipedia (2020). Ekranoplan. 16.11.2023 tarihinde <https://tr.wikipedia.org/wiki/Ekranoplan> adresinden alınmıştır.
- Young, L.Y. (2010). "Speech at the Christening of the Wing-In-Ground Craft, Airfish 8-001", Harbor and Port Authority of Singapore Press Release for the Christening of M/V Airfish8, April. 162
- Yun, L., Bliault, A., Doo, J. (2010). "WIG Craft and Ekranoplan", Springer MARIC, vol.1

İNTERNET KAYNAKLARI

- <http://www.hovercraft.com>, (Last Accessed on July 01, 2015)
- <http://www.wingship.com>, (Last Accessed on June 07, 2015).
- <https://aerospaceglobalnews.com/news/top-5-ekranoplans-understanding-wig-craft/>
- <https://airpowerasia.com/2020/12/26/wing-in-ground-effect-flight-in-an-ekranoplan/>
- <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA361836.pdf>
- <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/hovercraft/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_Pelican
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_\(cars\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_(cars))
- https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aerodynamics
- https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aerodynamics#Antiquity_to_the_19th_century
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrofoil>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_effect_ship
- <https://github.com/samberg96/aircraft-flight-controller/tree/main>
- <https://newatlas.com/aircraft/airfish-8-wing-in-ground-effect>
- <https://newatlas.com/military/darpas-liberty-lifter-x-plane-gets-a-face-lift/>
- <https://pg.edu.pl/en/news/2024-01/worlds-first-small-unmanned-ground-effect-plane-being-created-gdansk-university-technology>
- <https://skybrary.aero/articles/ground-effect>

<https://study.gov.pl/news/worlds-first-small-unmanned-ground-effect-plane-being-created-gdansk-university-technology>

<https://tr.wikipedia.org/wiki/Ekranoplan>

<https://www.airwar.ru/enc/sea/km1.html>

<https://www.engineeringnews.co.za/article/us-company-developing-innovative-wing-in-ground-effect-craft-using-siemens-software-2022-08-03>

<https://www.ship-technology.com/projects/airfish-8-wing-craft/?cf-view>

<https://www.startupselfie.net/2024/02/29/airfish-8-wing-in-ground-effect-aircraft/>

