
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YÜKSEK HIZDA UÇAN İNSANSIZ SİSTEMLERE EŞ ZAMANLI KONUMLANDIRMA VE HARİTALAMA TEKNİĞİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ANALİZİ

Celal Çağrı ALTINDAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Celal Çağrı ALTINDAŞ

01 / 02 / 2023

YÜKSEK HIZDA UÇAN İNSANSIZ SİSTEMLERE EŞ ZAMANLI KONUMLANDIRMA VE HARİTALAMA TEKNİĞİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Celal Çağrı ALTINDAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2023

ÖZET

Günümüz koşullarında yüksek hız ve irtifalarda uçmakta olan insansız sistemler birçok alanda farklı görevler almaktadırlar. Bu sistemler, otonom bir şekilde uçarak görevlerini yerine getirdiklerinden ötürü hem çevresini hem de bulunduğu konumunu bilmesi gerekmektedir. Bu ihtiyacı üzerlerinde bulunan Küresel Konumlandırma Sistemi, Ataletsel Ölçüm Birimi, kablosuz sinyaller gibi sensörlerden elde edilen veriler aracılığı ile karşılamaktadırlar. Bu verilerin doğru sonuçlar vermemesi durumunda otonom sistemlerin konum ve çevreyi bilme ihtiyacı için Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama yöntemleri yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntemdir. Ancak bu yöntem genellikle düşük hızlarda ve irtifalarda uçan insansız sistemler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kamera tabanlı Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama teknikleri literatür kapsamında taranıp kıyaslama gerçekleştirilerek yüksek hız ve irtifada uçabilen sistemlere gerçek hayatta uygulanabilirliği olan ORB-SLAM2.0 algoritması ile çalışılmıştır. Bunun için fotorealistik görüntü üretebilen Unreal Engine ve MATLAB Simulink benzetim ortamları aracılığı ve bilgisayar performans limitleri dahilinde benzetim testleri başarıyla koşturulmuştur. Ayrıca benzetim ortamında elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanarak ORB-SLAM 2.0 algoritmasının yüksek hız ve irtifada çalışan insansız sistemlerde uygulanabilir olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu	:	90521
Anahtar Kelimeler	:	Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama, Unreal Engine, MATLAB Simulink
Sayfa Adedi	:	90
Danışman	:	Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING TECHNIQUE FOR HIGH SPEED UNMANNED SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Celal Çağrı ALTINDAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2023

ABSTRACT

In today' conditions, unmanned systems flying at high speeds and altitudes take on different tasks in many areas. Since these systems perform their duties by flying autonomously, they need to know both their surroundings and location. They can achieve this need through data obtained from sensors such as Global Positioning System, Inertial Measurement Unit, and wireless signals. In case these data do not give accurate results, Simultaneous Positioning and Mapping methods are widely used methods for autonomous systems' need to know the location and environment. However, this method is generally used for unmanned systems flying at low speeds and altitudes. In this study, camera-based Simultaneous Positioning and Mapping techniques have been scanned and compared within the scope of the literature and analyzed through the ORB-SLAM2.0 algorithm, which can be applied to systems that can fly at high speed and altitude, in real life. Simulation tests have been successfully run using Unreal Engine which can produce photo realistic images and MATLAB Simulink within the computer performance limits. In addition, the results obtained in the simulation environment were compared with each other and it was observed that the technique could be applied in unmanned systems operating at high speed and altitude.

Science Code	:	90521
Key Words	:	Simulataneous Localisation and Mapping, Unreal Engine, MATLAB Simulink, vSLAM
Page Number	:	90
Supervisor	:	Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, akademik hayat ile ilgili tecrübelerini aktaran, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen ve her zaman desteğini hissettiren kıymetli Hocam Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE'ye, bugünlere gelmemi sağlayan ve benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan annem Nuray ALTINDAŞ, babam Mehmet Emin ALTINDAŞ ve kardeşim Mehmet Talha ALTINDAŞ'a, çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarını esirgemeyen, her türlü tecrübe aktarımı ve çalışma motivasyon desteği veren çalışma arkadaşım Şeyma CİHAN'a ve çalışmakta olduğum kurumum TÜBİTAK SAGE'deki her türlü destekleri için kıymetli yöneticilerime ve dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 5

2.1. Filtre Tabanlı Çözüm Yöntemlerine Dair Çalışmalar 5

2.2. Görsel Tabanlı Çözüm Yöntemlerine Dair Çalışmalar 7

3. TEORİK ALTYAPI 9

3.1. Kamera Tabanlı vSLAM Yaklaşım Teknikleri 10

3.1.1. MonoSLAM 11

3.1.2. Paralel takip ve haritalama (PTAM) 12

3.1.3. Yoğunluk takibi ve haritalama (DTAM) 13

3.1.4. Yarı doğrudan görsel odometri (SVO) 13

3.1.5. Yüksek çözünürlüklü görsel odometri (LSD-MonoSLAM) 14

3.1.6. ORB SLAM2.0 15

3.1.7. CNN-SLAM 16

3.1.8. Doğrudan seyrek odometri (DSO) 17

3.2. vSLAM Tekniklerinin Kıyaslamaları 18

4. BENZETİM ORTAM UYGULAMASI 19

Sayfa

4.1. ORB-SLAM2.0 Algoritmasının Uygulaması 19

4.2. Platform 20

4.2.1. Deneysel test ortam bilgileri..... 20

4.2.2. Matlab SIMULINK 2021b 20

4.2.3. Unreal Engine R4.25..... 24

4.3. Veri Seti..... 25

5. BENZETİM TEST SONUÇLARI 29

5.1. Haritalama Sonuçları 30

5.1.1. 1. Veri seti haritalama sonucu 31

5.1.2. 2. Veri seti haritalama sonucu 31

5.1.3. 3. Veri seti haritalama sonucu 32

5.1.4. 4. Veri seti haritalama sonucu 32

5.1.5. 5. Veri seti haritalama sonucu 33

5.1.6. 6. Veri seti haritalama sonucu 33

5.1.7. 7. Veri seti haritalama sonucu 34

5.1.8. 8. Veri seti haritalama sonucu 34

5.1.9. 9. Veri seti haritalama sonucu 35

5.1.10. 10. Veri seti haritalama sonucu..... 35

5.1.11. 11. Veri seti haritalama sonucu..... 36

5.1.12. 12. Veri seti haritalama sonucu..... 36

5.1.13. 13. Veri seti haritalama sonucu..... 37

5.1.14. 14. Veri seti haritalama sonucu..... 37

5.1.15. 15. Veri seti haritalama sonucu..... 38

5.1.16. 16. Veri seti haritalama sonucu..... 38

Sayfa

5.1.17. 17. Veri seti haritalama sonucu 39

5.1.18. 18. Veri seti haritalama sonucu 39

5.1.19. 19. Veri seti haritalama sonucu 40

5.1.20. 20. Veri seti haritalama sonucu 40

5.1.21. 21. Veri seti haritalama sonucu 41

5.1.22. 22. Veri seti haritalama sonucu 42

5.1.23. 23. Veri seti haritalama sonucu 42

5.1.24. 24. Veri seti haritalama sonucu 42

5.1.25. 25. Veri seti haritalama sonucu 43

5.1.26. 26. Veri seti haritalama sonucu 43

5.1.27. 27. Veri seti haritalama sonucu 44

5.1.28. 28. Veri seti haritalama sonucu 44

5.1.29. 29. Veri seti haritalama sonucu 45

5.1.30. 30. Veri seti haritalama sonucu 45

5.1.31. 31. Veri seti haritalama sonucu 46

5.1.32. 32. Veri seti haritalama sonucu 46

5.1.33. 33. Veri seti haritalama sonucu 47

5.1.34. 34. Veri seti haritalama sonucu 47

5.1.35. 35. Veri seti haritalama sonucu 48

5.1.36. 36. Veri seti haritalama sonucu 48

5.1.37. 37. Veri seti haritalama sonucu 49

5.1.38. 38. Veri seti haritalama sonucu 49

5.1.39. 39. Veri seti haritalama sonucu 50

5.1.40. 40. Veri seti haritalama sonucu 50

Sayfa

5.2. İzdüşüm Sonuçları 51

5.2.1. 100 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 52

5.2.2. 125 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 53

5.2.3. 150 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 54

5.2.4. 175 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 55

5.2.5. 200 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 56

5.2.6. 0,025 mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 57

5.2.7. 0,05 Mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları 58

5.2.8. 0,1 Mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları..... 59

5.2.9. 0,2 Mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları..... 60

5.3. Benzer Literatür Çalışmaları İle Karşılaştırma..... 60

6. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 63

KAYNAKLAR 65

EKLER..... 69

EK-1. Rota Takip Oranları Hesaplama Grafikleri 70

ÖZGEÇMİŞ 90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Görsel Tabanlı SLAM Tekniklerinin Karşılaştırılması 18

Çizelge 4.1. Benzetim Ortam Ekipmanları 23

Çizelge 4.2. Deneysel Test Veri Setleri 27

Çizelge 5.1. Deneysel Test Sonuçları 29

Çizelge 5.2. KITTI Veri Seti Rota Takip Sonuçları 61

Çizelge 5.3. KITTI Veri Seti Rota Takip Sonuçları 61

Çizelge 5.4. Çalışma Sonucu 1. Rota için Elde Edilmiş Rota Takip Sonuçları..... 62

Çizelge 5.5. Çalışma Sonucu 2. Rota için Elde Edilmiş Rota Takip Sonuçları..... 62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Kamera Tabanlı vSLAM Yaklaşım Tarihçesi 11

Şekil 3.2. MonoSLAM Akış Diyagramı 12

Şekil 3.3. PTAM Akış Diyagramı 12

Şekil 3.4. DTAM Akış Diyagramı 13

Şekil 3.5. SVO Akış Diyagramı 14

Şekil 3.6. LSD-MonoSLAM Akış Diyagramı 15

Şekil 3.7. ORB-SLAM2.0 Akış Diyagramı 16

Şekil 3.8. CNN-SLAM Akış Diyagramı 17

Şekil 3.9. DSO Akış Diyagramı 17

Şekil 4.1. ORB-SLAM 2.0 Algoritması Akış Diyagramı 19

Şekil 4.2. Benzetim Ortamına ait Simulink Modeli 21

Şekil 4.3. UAVToolbox 3D Benzetim Senaryo Konfigürasyoncusu Özellik Ekranı 22

Şekil 4.4. UAVToolbox 3D Benzetim Kamerasının Özellik Ekranı 23

Şekil 4.5. Unreal Engine ile Oluşturulan Benzetim Senaryosu 24

Şekil 4.6. Unreal Engine ile Oluşturulan Senaryoya Ait 200 mt İrtifada Örnek Kamera Görüntüsü 25

Şekil 4.7. Unreal Engine ile Oluşturulan Senaryoya Ait 20 mt İrtifada Örnek Kamera Görüntüsü 25

Şekil 4.8. Deneysel Test için Oluşturulmuş 1. Rota 26

Şekil 4.9. Deneysel Test için Oluşturulmuş 2. Rota 26

Şekil 5.1. 1. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 31

Şekil 5.2. 2. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 31

Şekil 5.3. 3. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 32

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.4. 4. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 32

Şekil 5.5. 5. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 33

Şekil 5.6. 6. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 33

Şekil 5.7. 7. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 34

Şekil 5.8. 8. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 34

Şekil 5.9. 9. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 35

Şekil 5.10. 10. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 35

Şekil 5.11. 11. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 36

Şekil 5.12. 12. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 36

Şekil 5.13. 13. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 37

Şekil 5.14. 14. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 37

Şekil 5.15. 15. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 38

Şekil 5.16. 16. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 38

Şekil 5.17. 17. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 39

Şekil 5.18. 18. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 39

Şekil 5.19. 19. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 40

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.20. 20. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 40

Şekil 5.21. 21. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 41

Şekil 5.22. 22. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 41

Şekil 5.23. 23. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 42

Şekil 5.24. 24. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 42

Şekil 5.25. 25. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 43

Şekil 5.26. 26. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 43

Şekil 5.27. 27. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 44

Şekil 5.28. 28. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 44

Şekil 5.29. 29. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 45

Şekil 5.30. 30. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 45

Şekil 5.31. 31. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 46

Şekil 5.32. 32. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 46

Şekil 5.33. 33. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 47

Şekil 5.34. 34. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 47

Şekil 5.35. 35. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.36. 36. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 48

Şekil 5.37.37. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 49

Şekil 5.38. 38. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 49

Şekil 5.39. 39. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 50

Şekil 5.40. 40. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni 50

Şekil 5.41. 100 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için..... 52

Şekil 5.42. 125 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için..... 53

Şekil 5.43. 150 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için..... 54

Şekil 5.44. 175 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için..... 55

Şekil 5.45. 200 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için..... 56

Şekil 5.46. 0,025 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için 57

Şekil 5.47. 0.05 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için 58

Şekil 5.48. 0.1 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için 59

Şekil 5.49. 0.2 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için 60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
GB	GigaByte
GHz	GigaHertz
mt	Metre
km²	Kilometrekare

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AÖB	Ataletsel Ölçüm Birimi
AHRS	Hareket Sensörü
CPU	İşlemci
DSO	Direkt Seyrek Odometri
DTAM	Yoğunluk Takibi ve Haritalama
GKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi
GPU	Ekran Kartı
G2O	Görsel Optimizasyon Tekniği
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
KKS	Küresel Konumlandırma Sistemi
LSD-MonoSLAM	Yüksek Çözünürlüklü Görsel Odometri
MATLAB	Matrix Laboratory
MAVLink	Mikro Hava Aracı Bağlantısı
NEES	Normalleştirilmiş Hata Tahmin Karesi Göstergesi
PTAM	Paralel Takip ve Haritalama
RBPF	Rao-Blackwellized Parçacık Filtresi

Kısaltmalar	Açıklamalar
RGB	Kırmızı Yeşil Mavi
RGB-D	Kırmızı Yeşil Mavi - Derinlik
RI-EKF	Sağ Değişmen Genişletilmiş Kalman Filtresi
RMSE	Karekök Ortalama Hatası
SLAM	Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama
SURF	Speeded Up Robust Features
SVO	Yarı Direkt Görsel Odometri
TERCOM	Arazi Şekil Eşleştirme
UKF	Kokusuz Kalman Filtresi
vSLAM	Görsel Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları, havacılık, robotik, savunma sanayisi gibi çeşitli alanlarda sıklıkla kullanılan, bir insan operatörü olmadan üzerine yerleştirilmiş çeşitli bilgisayarlar ve elektronik sistemler ile uçuşlar gerçekleştirebilen hava aracı tasarımlarıdır [1,2]. Düşük bütçe ve insan faktörü olmadan istenilen görevleri icra edebilmelerinden dolayı İnsansız hava araçları son yıllarda büyük önem kazanmış olup hızlı bir gelişme sürecine girmişlerdir. Bu sistemler, üzerlerine yerleştirilebilen kamera, ataletsel ölçüm birimi (AÖB), küresel konumlandırma sistemi (KKS), lidar gibi çeşitli sensörler aracılığıyla gözlem, çevre yönetim, uzaktan algılama, otonom hareket gibi alanlarda yetenekler kazanmaktadırlar. Bu yeteneklerin başarı ile icra edilebilmesi için insansız hava araçlarının hareket kabiliyetlerinin gelişmiş olması gerekmektedir. Bu nedenle, insansız hava aracı sistemlerinin bulunduğu mevcut çevreyi ve konumunu bilmesi görevini başarı ile yapabilmesi için önemli bir kriterdir [3].

İnsansız hava araçlarının mevcut konumunu kestirebilmesi için ilk akla gelen çözüm yöntemi, sistemin üzerine yerleştirilebilecek kablosuz sinyaller, KKS, AÖB gibi sensörlerdir [4-5]. İnsansız sistemler, günümüz koşullarında, kablosuz sinyaller, KKS ve AÖB sensörleri sayesinde sağlanmakta olan veriler ile mevcut konumlarını ve yönelimlerini kestirebilmektedir. Ancak bu sensörlerin konum ve yönelim kestirimi alanında avantajları olmasının yanında birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, kablosuz sinyaller ortamdaki frekans bozucu sinyaller üreten ve yayın yapan bozucuların etkisi ile hatalı veriler üretebilmektedir. Bu nedenle, kablosuz sinyallerin üretmiş olduğu çözümlerle güvenilir sonuçlar elde edilememektedir. Daha güvenilir sonuçlar elde etmek istenildiğinde, maliyet ve güvenilirlik dengesi açısından çok fazla efektif bir çözüm yöntemi olamamaktadır [6]. Benzer şekilde KKS de kablosuz sinyaller gibi hatalı veriler üretmesi sonucu efektif olamamaktadır. Ayrıca KKS kapalı ortamlarda istenilen başarım performansını gösterememektedirler. Bu nedenle, KKS sadece açık hava koşullarında daha iyi çalışabilmektedir [7]. AÖB ise hesaplamalarda oluşabilecek sapma hatalarından ötürü ise kümülatif hatalar oluşturabilmektedir [6].

Mevcut çözüm yöntemleri yukarıda bahsedilmekte olan problemler nedeniyle, insansız sistemlerin konum ve çevre bilgisi edinme gereksinimini tam olarak kapsayamamaktadır. Bu durum ise yeni bir gereksinimi ortaya çıkarmıştır. Bu gereksinimin sonucu olarak 1980'li

yılların başında Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama (SLAM) ile ilgili çalışmalar başlamıştır [8]. SLAM kavramı, ilk olarak 1986 yılında Durrant-Whyte, Cheeseman ve Crovley tarafından Kaliforniya'daki IEEE Robotik ve Otomasyon Konferansı'nda sunulmuştur.

SLAM kavramı ortaya atıldıktan sonra eş zamanlı olarak bir takım çözüm yolları ortaya konulmuş olup bu çözüm yöntemleri gelişimsel bir süreç takip etmiştir. SLAM'in hiyerarşik olarak ilk 20 yıllık tarihsel süreci Durrant–Whyte and Bailey tarafından gerçekleştirilen akademik çalışmalarda kapsamlı olarak ele alınmıştır [9, 10]. Bu süreçte, ilk olarak ana olasılıksal hesaplamalar tanımlanmıştır. Bu tanımlamaların üzerine Bayes Filtreleri temel alınarak bir takım filtre tabanlı çözüm yöntemleri ortaya konulmuştur. Bu çözüm yöntemleri, Genişletilmiş Kalman Filtresi'ne (GKF) dayalı yaklaşımlar ve Rao-Blackwellized Parçacık Filtresi (RBPF) ile maksimum olabilirlik tahminine dayalı yaklaşımlardır [9]. İlk olarak GKF ile bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu teknik, temel olarak, pozisyona dayalı tahmin et ve güncelle mantığı ile çalışmaktadır. Ortamdaki nesnelerin sisteme göre konumları hesaplanarak gidilebilecek olan rotalar tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu tahminlere göre nesnelerin konumları güncellenmiş ve sistemin pozisyonuna göre oluşan nonlineerlik konusunda çözümler geliştirilmiştir. 1990'lı yılların başlarında ise Genişletilmiş Kalman Filtreleri ile SLAM uygulaması birden fazla servo ve lidar sensör ile donatılmış robot sistemi ile denenmiştir [12]. Lidar sensör yardımı ile gerçekleştirilen bu çalışma, bu sensörlerin SLAM ile kullanılabilirlik durumunu gün yüzüne çıkarmıştır. Bir diğer filtre tabanlı SLAM çözüm yöntemi olan Rao-Blackwellized Parçacık Filtre yönteminde, Monte Carlo yöntemi kullanılarak, veri ilişkilendirme, çoklu nokta takibi gibi alanlarda çalışmalar gerçekleştirilmiştir [13]. Rao Blackwellized Parçacık Filtre yöntemi, Gaussian Olmayan Gürültü, Montemerlo gibi yöntemleri de kullanarak, birden fazla model ortam belirsizliği bulunan koşullarda Genişletilmiş Kalman Filtre yöntemlerine göre avantajlar sağlamaktadır [15]. Bu bilgiler ışığında SLAM problemine algoritmik yaklaşımlar da geliştirilmiş olup FastSLAM gibi algoritmik çözüm yöntemleri ortaya konmuştur. Bunlara ek olarak, lidar sistemler ve RBPF yöntemi ile konum kestirim işlemleri tarama eşleştirme ve seyrek matrisler oluşturarak haritalama alanlarında da çalışmalar gerçekleştirilmiştir [13,16]. Gerçekleştirilen bu çalışmalar göstermiştir ki, lidar sensörlerin çalışma prensipleri dolayısı ile yaydıkları ışın sayılarına göre 2D ve 3D olarak kategorileştirilmiş olması, SLAM çalışmalarını 2D ve 3D ortamlara taşımıştır. Ayrıca bu yaklaşım, SLAM'i mevcut halinden daha sağlam ve güvenilir hale getirmiştir [6]. Filtre tabanlı çözüm yöntemleri ile yaşanılan

bu önemli gelişmeler SLAM'i belirli bir noktaya taşımış olsa da görsel tabanlı çözüm yöntemleri alanında tam anlamı ile istenilen çözümleri üretememiştir. Bütün bu gelişmeler, SLAM probleminin filtre tabanlı olasılıksal çözüm yöntemlerinin görsel alanda yeterli olamadığını göstermiş, bu konuda 2D ve 3D haritalama gereksiniminin hayata geçirilmesini gündeme getirmiştir.

Mevcut filtre tabanlı yöntemler ve lidar sensörleri ile çalışmalara devam edilmiş olup, çevresel zorlukları olan dış ortamlarda gerçek zamanlı işletim sistemleri ile 2D ortam haritalama alanında çalışmalar yapılmıştır [14]. Lidar sensörü ve RBPF yöntemleri kullanılarak tarama-eşleme metodu ile dış ortamlarda küçük çaplı 2D haritalamalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma temel alınarak, daha geniş dış ortamlarda 2D haritalama çalışmaları gerçekleştirmiş ve GraphSLAM algoritması ortaya çıkmıştır [17]. Benzer yıllarda hem 2D SLAM hem de 3D SLAM alanında çalışmalara devam edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmalar sonucu Lidar sensör aracılığı ile 2D ve 3D görsel tabanlı HectorSLAM, GMapping, KartoSLAM, CoreSLAM, LagoSLAM gibi SLAM algoritmaları ortaya konulmuştur [14].

Ancak teknolojinin gelişmesi ile mevcut çözüm araçlarına alternatif olarak hem daha ucuz hem de daha işlevsel olan mono veyahut stereo kameralar çıkmıştır. Mevcut SLAM çözüm yöntemleri, bu kameralardan sağlanan görüntüler ile oluşturulabilecek haritalama ve konumlandırma konusunda yeterli çözümü üretememiştir. Bu kapsamda ilk olarak kamera ile sağlanan görüntüler ile yapılan vSLAM çalışması mevcut tekniklere göre sistemin hareket izleme yeteneği ve hareket kabiliyetinin arttığını, SLAM sonuçlarının önemli ölçüde geliştiğini ve daha güvenilir hale gelmiş olduğunu ortaya koymuştur [18]. Bu çalışma sonucunda, kameradan beslenen görüntü ile gelişimsel olarak ilerlemekte olan mevcut SLAM kabiliyetlerinin önemli ölçüde artırıldığı, aynı zamanda karmaşıklık ve maliyet konularında herhangi bir yekûn oluşturmadığı saptanmıştır [18].

Görsel tabanlı SLAM yöntemlerinin mevcut filtre tabanlı SLAM yöntemlerine göre çok sayıda avantajı olduğu görülmektedir. Daha modüler ve enerji tasarruflu olması, sistemlere kolay uygulanabilir olması başlıca avantajlarındandır. Görsel tabanlı kestirimler, pozisyon tabanlı kestirimlere göre daha net sonuçlar elde etmiş olup, ayrıca 3D alanda çalışılabilirliğin önünü açmıştır [19]. Yapılan çalışmalar sonucunda mono kamera, sensörler ve hareket yardımı kullanılarak 3D SLAM'in gerçekleştirilebildiği ispatlanmıştır [18-20]. 3D SLAM

performansının artırılması konusunda kullanılan geniş açılı kameralar sayesinde daha geniş görüş açıları ve görüntü ile sistemin hareketinden elde edilen model verileri konusunda iyileştirmeler yapılmış, bunun sonucunda 3D SLAM'in performansı daha da iyileştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmaların ışığında, hem daha geniş görüş açıları ile harita modeli elde etme yetenekleri geliştirilmiş, hem de daha yüksek ivme hareketleri ile sistemlerin çalışma hızlarında oluşabilecek bozulmaların iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir [18].

Bu önemli gelişmeler SLAM'i belirli bir olgunluğa eriştirmiş olsa da literatürde SLAM tekniğinin yüksek hızda uçabilen insansız sistemlerde kullandığını ya da kullanılabilir olduğunu gösteren yeteri kadar çalışmaya rastlanamamıştır. Sınırlı bilgi olmasının sebebinin yüksek hızda uçan sistemlerin hem çok yüksek maliyetli sistemler olması hem de bu sistemlerin genellikle askeri alanda kullanılmasından kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek hızda uçabilen sistemlere vSLAM tekniklerinden olan ORB-SLAM 2.0 algoritmasının MATLAB Simulink benzetim ortamı ve Unreal Engine platformu kullanılarak uygulanabilirlik analizinin benzetim ortamında gerçekleştirilmesidir. Ayrıca elde edilen bilgiler ışığında ilerleyen literatür çalışmalarına katkıda bulunmaktır.

Çalışmanın ilk bölümünde, insansız sistemlerin konumlandırma ihtiyacı için kullanılmakta olan çözüm yöntemlerinin eksik yönleri nedeniyle ortaya çıkmış olan SLAM'in gelişimsel sürecinden bahsedilmektedir. İkinci bölümünde ise SLAM'in literatürde geçmekte olan çalışmaları filtre tabanlı ve görsel tabanlı olarak sınıflandırılarak hiyerarşik olarak incelenmektedir. Üçüncü bölümde kamera tabanlı vSLAM yaklaşımları açıklanmış olup çalışmada kullanılmakta olan ORB-SLAM2.0 algoritmasının seçim nedenine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise ORB-SLAM2.0 algoritmasının uygulaması, benzetim ortamı ve kullanılmakta olan veri setleri açıklanmıştır. Beşinci bölümde benzetim testleri sonucunda elde edilmiş olan haritalama verileri ile hıza ve irtifaya göre elde edilmiş olan test sonuçlarının karşılaştırmalı sonuçlarına yer verilmiştir. Altıncı ve son bölümde ise gerçekleştirilmiş olan çalışma sonuçları, elde edilen çıkarımlar ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, SLAM konusu üzerine pek çok sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. SLAM, literatür incelemelerinde filtre tabanlı ve görsel tabanlı olmak üzere iki grup altında incelenebilmektedir. Filtre tabanlı çözüm yöntemleri altında GKF ve RBPF'ye ait yöntemler, görsel tabanlı çözüm yöntemleri altında ise 2D ve 3D haritalama konusunda vSLAM yöntemlerine ait literatür çalışmaları ele alınmaktadır. Ancak literatür incelemeleri sonucunda, yüksek hızda uçan insansız sistemlere vSLAM'in uygulanması konusunda yapılmış olan oldukça sınırlı sayıda çalışma vardır. Literatürdeki çalışmalara ait bulgular aşağıda göz önüne serilmiştir.

2.1. Filtre Tabanlı Çözüm Yöntemlerine Dair Çalışmalar

Zhang, Li, Yuan, Sun ve Zhao, 2017 yılında yayınlamış oldukları çalışmalarında [21] filtre tabanlı çözüm yöntemleri olan GKF, kokusuz kalman filtresi (UKF) ve Parçacık Tabanlı Filtre yönteminden geliştirilmiş olan FastSLAM ve uFastSLAM yöntemlerinin kıyaslamasını gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda çalışmalarında 4 yöntemin de avantaj ve dezavantajlarını açıklamışlardır. GKF'nin yüksek hesaplama karmaşıklığı alternatif olarak UKF kıyaslama içerisine dahil etmişlerdir. Doğrusal model oluşturma FastSLAM ve uFastSLAM tekniklerinin doğrusal olmayan gauss dağılımı ile çalışmakta olan GKF ve UKF yöntemlerine göre daha efektif olduğunu öne sürmüşlerdir. Bir sistem yörüngesi ve işaretçileri bulunan gauss olmayan model bir test ortamında gerçekleştirilen karşılaştırmaların sonucunda, UKF'nin 2. Dereceden Taylor açılım hesaplama özelliğinden ötürü hesaplama doğruluk oranı GKF'ye göre daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde UFastSLAM'in UKF'ye ve FastSLAM'e göre doğrusallaştırma konusunda performansının çok daha üstün olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak gauss olmayan bir model ile çalışmalarda UFastSLAM'in tahmin yeteneğinin en iyi derecede olduğunu açıkça göstermişlerdir.

Wu, Shi ve Yan, 2018 yılında yayınlamış oldukları çalışmada [22] gemilerde rehberlik, keşif, elektromanyetik önlemler gibi çok çeşitli alanlarda kolaylıklar sağlamakta olan insansız helikopterlere SLAM uygulaması ile otonom iniş kabiliyeti kazandırabilmek için Genişletilmiş Kalman Filtresi Yöntemi üzerinde geliştirmeler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, insansız helikopterin hareket modeli ve sensör verileri yardımı ile elde

edilen çevre gözlem noktaları aracılığı ile GKF yöntemi iyileştirilerek sistemin çevreye göre konumunu bulması ve otonom inişi tamamlayabilmesi için bir algoritma tasarlamışlardır. Geliştirdikleri algoritmayı çalışma kapsamında MATLAB 2014a benzetim ortamında testlere tabi tutmuşlardır. Gerçekleştirdikleri testler sonucunda insansız helikopterin otonom inişini belirli bir hata aralığında başarı ile gerçekleştirdiği belirtmişlerdir. Ancak kullandıkları algoritmanın hatalara karşı performansının yetersiz olduğunu ve ilerleyen çalışmalar için bu durumun geliştirilmesi gerektiğini çalışmalarında belirtmişlerdir.

Jurevicius, Marcinkevicius ve Šeibokas, 2019 yılında yayınlamış oldukları çalışmada [23] insansız hava araçlarının otonom uçuş sistemlerinde KKS olmayan veyahut yeterli KKS, arazi şekil eşleştirme (TERCOM) verisi gibi yönelim ve uçulmakta olan alan bilgisi sağlanamayan ortamlarda Parçacık Tabanlı Filtre ve görsel odometri kullanarak SLAM'in uygulanabilirliği üzerinde çalışmışlardır. Görsel odometri yöntemi ile parçacık tabanlı filtre yönteminin tarama ihtiyacı olacak olan alan bölgesini daraltarak hata payını indirgemiş ve bunu benzetim ortamında test etmişlerdir. Gazebo benzetim ortamında 200-300 metre yükseklikte dış çevre görüntüsü ile gerçekleştirilen benzetim testlerinde doğruluk, hız ve gürbüzlük doğrulamaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile görsel odometri ile parçacık filtre yöntemli SLAM'in çalışma kapsamında daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde ettiğini açıkça ortaya koymuşlardır.

Song, Zhang, Wu, Wang, Zhao ve Huang, 2021 yılında yayınlamış oldukları çalışmada [24] GKF yöntemi ile obje tabanlı SLAM çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda standart Genişletilmiş Kalman Filtresi ve çalışma ekibi tarafından geliştirilmiş olan RI-GKF algoritmalarını obje tabanlı modeller ile performans testlerine sokarak filtreler arasındaki farkları kıyaslamışlardır. Ayrıca olası tutarsızlıkları oluşturabilecek olan kısıtları gözlemlemek adına gerçek dünya ortamında kullanılması mümkün olmayan, sadece simülasyon ortamında kullanılabilecek olan ideal Genişletilmiş Kalman Filtresini de bu çalışmada kullanmışlardır. Bu kapsamda, öncelikle obje tabanlı SLAM problemini matematiksel yöntem ile açıklanmış olup bu açıklamalar kapsamında oluşturmuş oldukları algoritmalarını tanımlamışlardır. Kıyaslanacak algoritmalarda kullanılacak test koşulları için, kovaryans matrisi, odometri ve gözlem gürültü matrisleri belirlenmiş olup içerisinde 6 adet nesne bulunan dairesel bir çevre oluşturulmuştur. Robot bu çevre üzerinde 0.1 m/s doğrusal hızda, 40 radyan/s açısal hızda toplamda 25 tur tamamlayarak testi gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulmuş olan 3 algoritma ve test koşulları Monte Carlo benzetimi

gerçekleştirilerek robot ve çevreye ait normalleştirilmiş hata tahmin karesi göstergesi (NEES) ve karekök ortalama hatası (RMSE) ortalamaları 50 kere hesaplanmıştır. Elde edilen test verilerine göre, doğruluk ve tutarlılık parametrelerine göre RI-Genişletilmiş Kalman Filtresi'nin Genişletilmiş Kalman Filtresi'ne göre daha yüksek performansta çalıştığını ortaya koymuşlardır.

2.2. Görsel Tabanlı Çözüm Yöntemlerine Dair Çalışmalar

Munguía, Urzua, Bolea ve Grau, 2016 yılında yayınlamış oldukları çalışmada [25], hareket sensörü (AHRS), KKS ve mono kamera yardımı ile filtre tabanlı yöntem olan Genişletilmiş Kalman Filtresi Yöntemini temel alarak görsel tabanlı SLAM'in insansız hava araçlarına uygulaması üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarını görsel tabanlı yöntemler ile yapmalarının temel sebebi olarak KKS gibi sistemlerin kümülatif hatalarını gidermek bir alternatif bir sistem gerekliliği nedeniyle olduğunu belirtmişlerdir. Kameraların efektif olması, enerji tasarruflu olması, ucuz olması, gömülü sistemlere entegrasyonun kolay olması, 3D haritalama olanaklarından ötürü bu sistem gerekliliği için en iyi alternatif olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu kapsamda oluşturmuş oldukları sistemi MATLAB ortamında benzetim ve gerçek ortam testleri olmak üzere 2 farklı koşularda denemişlerdir. Benzetim ortam koşulunda yapay hareket sensörü ve KKS verileri ile gerçek zamanlı kamera görüntüleri beslenerek, gerçek ortam koşulunda ise gerçek sensörler ve kamera görüntüleri ile testler gerçekleştirilmiştir. Testler kapsamında elde edilen sonuçlar her iki test koşulunda da kısıtlar kapsamında belirli bir süre içerisinde algoritmanın istenilen sonuçları başarılı bir şekilde elde ettiği yönündedir.

Annaiyan, Olivares-Mendez ve Voos 2017 yılında yayınlamış oldukları çalışmada [26], küçük çapta insansız hava araçları ile bilinmeyen dış ortamın çevrim içi haritalanmasında görsel tabanlı SLAM ve döngü tamamlama yöntemlerinin kullanımı amacıyla stereo kamera kullanarak çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Stereo kameradan elde edilen görüntüler görsel optimizasyon tekniği (g2o) ve graph-SLAM yöntemi ile işlenmiştir. Elde edilen çıktılar, kelime torbası modeli ile görüntü sınıflandırması yapılarak döngü tamamlama yöntemi uygulanmıştır. Testler gerçek bir insansız hava aracı ile dış ortam koşullarında ağaçlarla kaplı ve açık alan olmak üzere 2 farklı test alanında gerçekleştirilmiştir. Her iki ortamda yapılan testlerde algoritmanın başarılı bir şekilde çalıştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında, insansız hava aracı üzerine yerleştirilmiş olan kamera ve elektronik donanımlı sistem dış

ortamda farklı ışık, yoğunluk, arazi koşulları gibi durumlarda test uçuşları gerçekleştirilmiş, g2o ve graph-SLAM yöntemi ile döngü tamamlama işlemi ve nihayetinde haritalama işlemlerinin başarılı bir şekilde elde edilmiş olduğu çalışmada ortaya konulmuştur.

Kaniewski ve Slowak 2018 yılında yayınlamış oldukları çalışmada [27], son yıllarda askeri alanlarda kullanımı çeşitli sebeplerle yaygınlaşmakta olan insansız hava araçlarına SLAM'in uygulanabilirliği ve avantajlı yönleri alanında yoğunlaşmışlardır. Bu kapsamda MATLAB benzetim ortamında test edebilmek parçacık tabanlı filtre yöntemi ve görsel bir teknik olan speeded up robust features (SURF) yöntemi kullanarak oluşturulmuş algoritma üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. İnsansız hava aracı, mono kamera ve AÖB bulunan benzetim modellerinde KKS verisi bulunmayan ortamlarda görüntü desteği ile SLAM tekniğini gerçekleştirmek üzere oluşturdukları sisteme 3 eksenli konum, yönelim ve hız parametreleri besleyerek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda benzetim gerçekleştirdikleri alanda bir miktar hata payı oluşsa bile insansız hava aracının uçmakta olduğu yörüngenin haritasının başarılı bir şekilde elde edildiğini açıkça belirtmişlerdir.

3. TEORİK ALTYAPI

Lemaire ve diğerleri gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında [19], vSLAM tekniğinin filtre tabanlı SLAM yaklaşımlarına kıyasla karmaşıklık yönünden bir yük oluşturmadığını, kabiliyetlerinin daha da artırılarak daha güvenilir sonuçlar elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca kamera çözümlerinin daha modüler ve ucuz maliyetli sistemler olmalarından ötürü, vSLAM yaklaşımı filtre tabanlı yaklaşımlarına göre ön plana çıkmaktadır.

vSLAM yaklaşımı, temel olarak görsel tabanlı bir algoritmadır. İnsansız sistem üzerine yerleştirilmiş olan kameradan gelmekte olan görseller üzerinde işlemler gerçekleştirerek bulunduğu bölgeye ait 3 boyutlu haritayı ve konumlandırmayı gerçekleştirmektedir. vSLAM yaklaşımının daha güvenilir olmasının bir diğer nedeniyse sensör pozisyon tahminlerini gerçekleştirmek için Hareket ile Nesne Oluşturma [29] yaklaşımını kullanmasıdır.

vSLAM yaklaşımları 2000'li yıllardan sonra ortaya çıkmış olup konu ile ilgili literatürde çalışmalar devam etmektedir. Barros, Michel, Moline, Corre, ve Carrel 2022 yılında gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında [30] vSLAM yaklaşımını ve literatürdeki vSLAM tekniklerini geniş çapta ele almışlardır. vSLAM yaklaşımı, temel olarak 3 ana başlık altında incelenmektedir. Bunları sıralamak gerekirse, harita ilkleme, takip, haritalamadır [28]. Bunlara ek olarak, harita çözünürlüğünün artırılması, işlem karmaşıklığının indirgenmesi için harita optimizasyonu ve döngü tamamlama yöntemleri de kullanılmaktadır.

Harita ilkleme, takip ve haritalama yöntemleri sonucu oluşturulacak olan haritanın ilklenmesi ve döngü tamamlamanın algılanmasında kullanılan ilk anahtar karenin oluşturulması için gerekli olan aşamadır [30]. Harita ilklemesinin tamamlanmasının ardından algoritma boyunca takip yönteminde devamlı olarak sensör pozisyon tahminleri gerçekleştirilmektedir. Bunu gerçekleştirirken mevcut görsel ve harita arasında 2D ve 3D ilişkilendirmeler yapılmaktadır [30]. Haritalama yönteminde ise, elde edilen görseller üzerinde işlemler gerçekleştirerek hesaplama ve kameranın hareketlerine göre 3D harita yapısının oluşturulmasını gerçekleştirmektedir [30]. Harita optimizasyonu, algoritmanın daha güvenilir, yüksek çözünürlüklü ve gürbüz sonuçlar elde edilmesi izdüşüm hesaplamalarındaki hataların indirgenmekte olduğu aşamadır. Döngü tamamlama, harita oluşturmak için gerekli anahtar kareleri kıyaslayarak ilk ilkleme karesini teshiş edip

döngünün tamamlandığını belirleme aşamasıdır [28]. vSLAM yaklaşımı kamera tabanlı, navigasyon tabanlı ve kırmızı yeşil mavi-derinlik (RGB-D) tabanlı yaklaşımlar ile oluşturulabilmektedir [30].

Navigasyon tabanlı vSLAM'de AÖB, KKS gibi sensörlerden beslenmekte olan veriler yardımı ile algoritma sonuçlarına girdi yapılarak çözüm iyileştirmeleri gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, navigasyon tabanlı yaklaşımlar algoritmik olarak hesaplama yükünü de artırmaktadır [30]. Bunlara ek olarak navigasyon tabanlı sistemler seyrüsefer algoritmaları içermekte olduğundan başlı başına bir çalışma konusu oluşturmaktadır. Ayrıca bu çalışmanın ana amacı, AÖB, KKS gibi navigasyon sistemlerinin verilerinin olmadığı veya navigasyon sistemlerinden beslenmekte olan verilerin sapma, sinyal bozucu etkiler ile hatalı veriler üretmesi teşhis edildiği zaman sistem üzerinde yer alan kamera sistemi ile konumlandırma ihtiyacı için alternatif bir çözüm yöntemi geliştirmektir. Bütün bu sebeplerden ötürü bu çalışmada navigasyon sistemleri konu edilmemiştir.

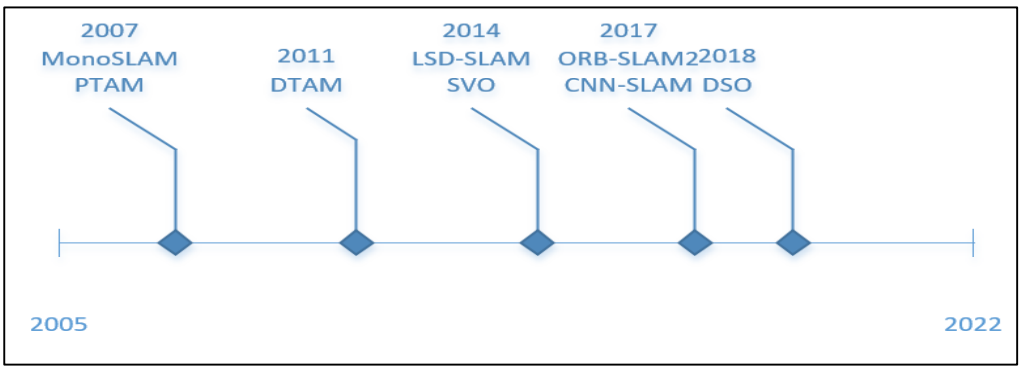
RGB-D tabanlı vSLAM yaklaşımı kırmızı yeşil mavi (RGB) kamera ve derinlik sensör verileri sayesinde kamera tabanlı vSLAM yaklaşımına ek olarak harita üzerinde derinlik bilgileri, renklendirme gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak RGB-D tabanlı vSLAM yaklaşımının bütün bu avantajlarının yanında yüksek hafıza kullanımı, güç tüketimi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar, yüksek hızda uçan insansız sistemlerde kullanılmaya uygun olmaması sebebiyle [39] bu çalışmaya konu edilmemiştir.

Sonuç olarak, kamera tabanlı, navigasyon tabanlı ve RGB-D tabanlı vSLAM yaklaşımları içinde yüksek hızda uçan insansız sistemler için kamera tabanlı vSLAM yaklaşımı seçilmiştir.

3.1. Kamera Tabanlı vSLAM Yaklaşım Teknikleri

Kamera tabanlı vSLAM yaklaşımı 2 boyutlu görüntüler üzerinde görüntü işleme tekniği ile gerçekleştirilmektedir. Bu görüntüler mono veyahut stereo kameralar ile sağlanmaktadır. Mono kamera ile çalışan vSLAM algoritmaları, güç tüketimi, kalibrasyon kolaylığı düşük bütçe gibi avantajlar sağlasa da [40], hesaplama karmaşası ve yüksek hata payı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Stereo kameralar mono kameralı çözüm yöntemlerinin içermekte olduğu dezavantajların önüne geçmektedir [30]. Kamera tabanlı vSLAM

yaklaşımları görsel özellik tabanlı ve doğrudan olmak üzere iki metot içermektedir. Görsel özellik tabanlı metot, kamera görüntülerinden anahtar kare olarak isimlendirilen tanımlayıcı harita noktaları elde etmektedir. Bu anahtar kareler ile hem görüntüler üzerinde karşılaştırmalar gerçekleştilir hem de kamera pozisyon tahmini yapılarak takip ve matris yapıda haritalama gerçekleştirilir. Bu sebeple bu yöntem gömülü sistem uygulamalarına uygundur [30]. Doğrudan metot, görüntü piksel yoğunluklarını kullanarak fotometrik hataları indirgemeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemle matris tabanlı haritanın yanında yoğunluk, yarı yoğunluk haritalar elde etme imkanı olmaktadır. Ancak gerçekleştirilen işlem karmaşıklığı matris yapı kullanmakta olan görsel özellik tabanlı metoda göre daha fazla olduğundan ötürü gerçek zamanlı işlemlere uygun değildir [41]. Son 20 yıllık süreçte geliştirilmiş olan kamera tabanlı vSLAM teknikleri hiyerarşik olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

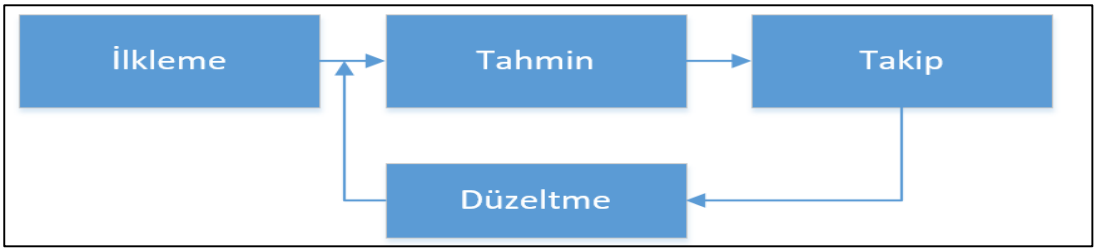


Şekil 3.1 Kamera Tabanlı vSLAM Yaklaşım Tarihçesi

3.1.1. MonoSLAM

MonoSLAM algoritması, 2007 yılında Davidson, Reid, Molton ve Stasse [31] tarafından ortaya atılmıştır [30]. Algoritma mono kameralı bir sistem ile koşmakta olup akış diyagramı aşağıdaki Şekil 3.2'deki gibidir. MonoSLAM algoritması, ilkleme aşamasında kameradan gelmekte olan ilk görüntüyü harita oluşturulması için referans olarak kullanmaktadır. Bunun ardından harita oluşturma aşamasında Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanarak tahmin ve takip aşamasında kamera görüntüsünden anahtar kareler üreterek gürültü filtreleri ile harita üzerinde düzeltmelerde bulunmaktadır. Ancak MonoSLAM algoritması harita oluşturmak için ne optimizasyon teknikleri ne de döngü tamamlama tekniği kullanmamaktadır [30]. Optimizasyon ve döngü tamamlama tekniklerinin kullanılmamış olması hem elde edilen

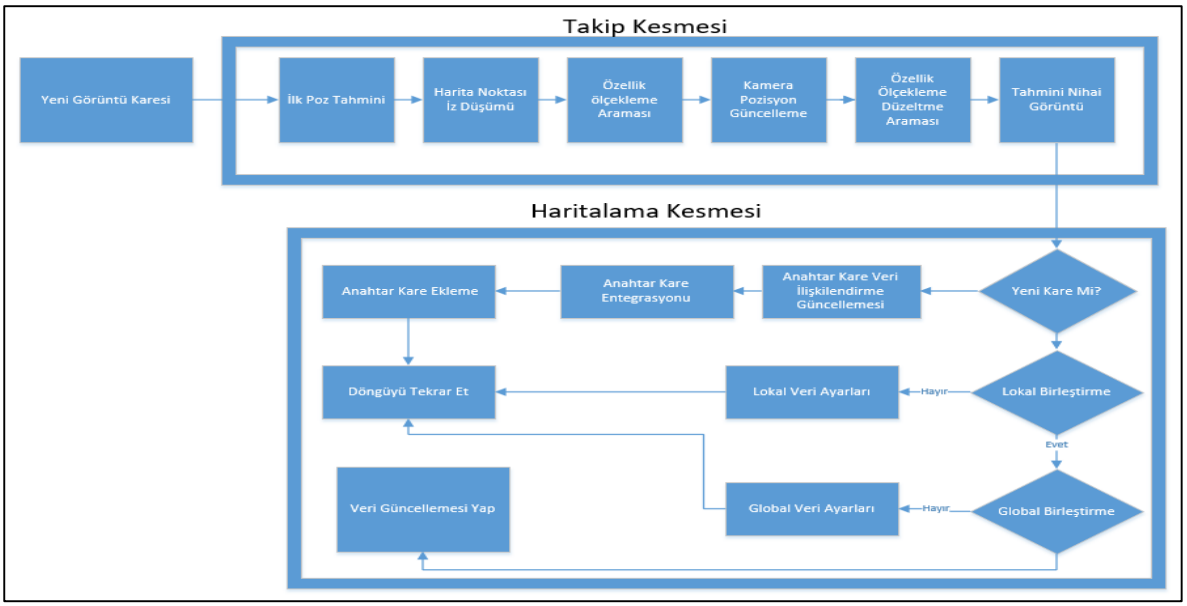
haritanın daha yüksek çözünürlüklü ve güvenilir sonuç vermesine hem de çevrenin büyüklüğüne göre algoritma karmaşıklığının artmasına neden olmaktadır.



Şekil.3.2 MonoSLAM Akış Diyagramı

3.1.2. Paralel takip ve haritalama (PTAM)

PTAM algoritması temel olarak takip ve haritalama olmak üzere 2 ayrı kesmenin paralel koşmasıyla konumlandırma ve haritalaması mantığı üzerine ile çalışmaktadır. Takip kesmesinde, kamera üzerinden gelmekte olan her görüntü üzerinde poz tahmini ve iz düşümü hesaplanmakta, ardından kamera pozisyonuna göre iz düşüm üzerindeki hata payının indirgenebilmesi için ölçekleme gerçekleştirilerek anahtar kare hesaplanmaktadır [30]. Haritalama kesmesinde ise öncelikle ilk görüntü ile oluşturulacak olan harita ilklendirmesi gerçekleştirilir. Ardından takip kesmesinde hesaplanmış anahtar kareler daha önceki kareler ile işlenerek harita noktalama hesaplamaları gerçekleştirilmektedir [30]. PTAM algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

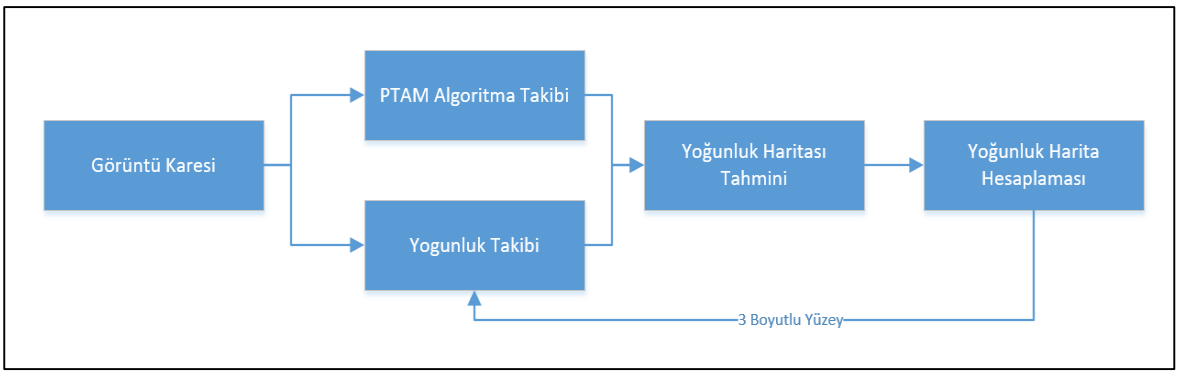


Şekil 3.3. PTAM Akış Diyagramı

PTAM algoritması optimizasyon teknikleri kullanmaktadır. Ayrıca harita oluştururken büyük verilerde anahtar kareleri işlemleme kapasitesine sahiptir. Ancak bu özelliklerin yanı sıra veri ayarlamaları gerçekleştirebilmek için algoritma yüksek hesaplama karmaşıklığına sahiptir [30]. PTAM algoritmasında döngü tamamlama tekniği kullanılmamaktadır. Güç tüketimi yüksek olduğundan her gömülü sisteme uygun olmayan bu algoritma ilkleme aşamasında da kullanıcı arayüz ihtiyacı duymaktadır [30].

3.1.3. Yoğunluk takibi ve haritalama (DTAM)

Doğrudan metot ile çalışmakta olan DTAM algoritması, ilk olarak Newcombe, Lovegrove, ve Davison'un gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarında [32] önerilmiştir. Bu algoritma, Yoğunluk takibi ve yoğunluk haritalaması olmak üzere 2 parça olarak ele alınmaktadır. Yoğunluk haritalaması aşamasında kamera görüntüsündeki derinlik hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Takip aşamasında, DTAM tekniğinin hesapladığı hareket parametreleri ve ilgili düzeltmeler kamera ve güncel anahtar kare üzerinde uygulanarak hatalar kompanse edilmektedir [30]. DTAM algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



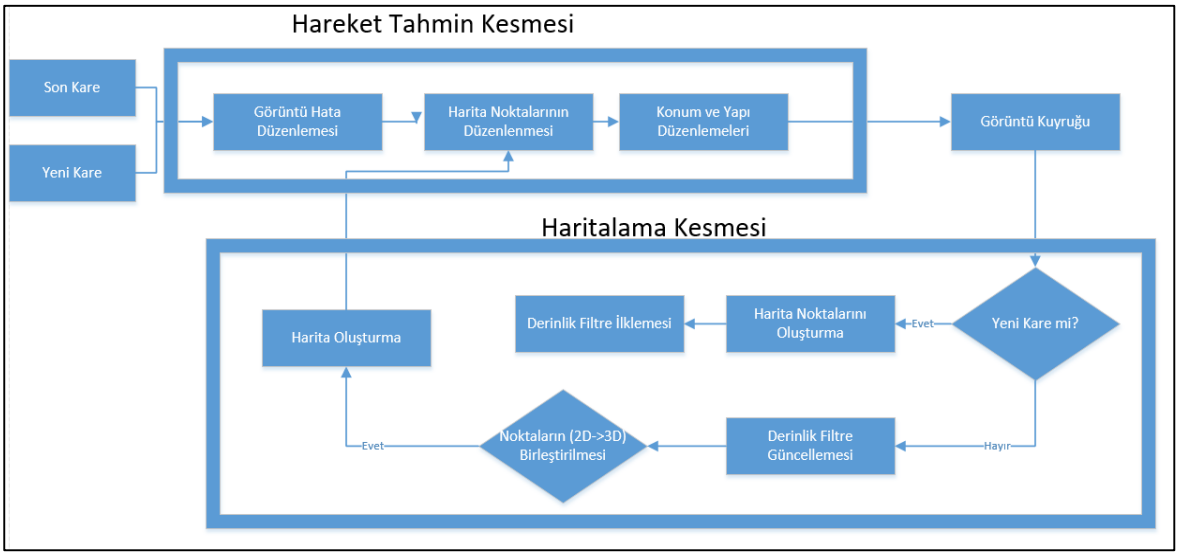
Şekil 3.4.DTAM Akış Diyagramı

DTAM, oluşturmuş olduğu yoğunluk haritası ile detaylı ve net sonuçlar elde edebilmektedir. Ancak bu verilerin hesaplanması ve işlenmesi için yüksek işlem kapasitesi ve gerçek zamanlı sistemlerde işlemcinin (CPU) yanı sıra GPU ihtiyacı da bulunmaktadır. Bunun yanı sıra optimizasyon ve döngü tamamlama teknikleri DTAM'da kullanılmamaktadır [30].

3.1.4. Yarı doğrudan görsel odometri (SVO)

SVO Algoritması PTAM gibi 2 ana kesme ile çalışmaktadır. Bu kesmeler, hareket tahmini ve haritalama kesmeleridir. Hareket tahmininde temel amaç fotometrik hataların en aza indirgenmesidir. Haritalamada ise derinlik filtreleri sonucu elde edilen 2 boyutlu kareler minimum belirsizliğe eriştikten sonra 3 boyutlu harita noktaları oluşturulmaktadır [30]. SVO'nun akış diyagramı Şekil 3.5'teki gibidir.

SVO Algoritması tıpkı DTAM gibi optimizasyon ve döngü tamamlama aşamasını kullanmamaktadır. Ayrıca, SVO algoritması düşük çözünürlükte haritalar elde edebilmesi sebebiyle düşük ölçekli alanların haritalamalarında kullanılabilmektedir. Bu nedenle düşük güç tüketimli gömülü sistemlerde tercih edilmektedir [30].



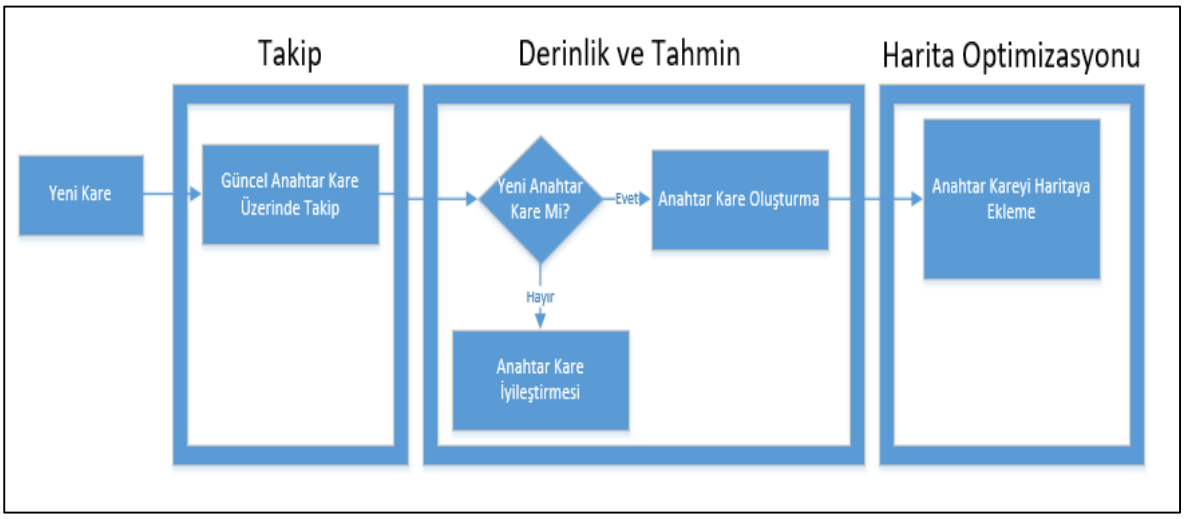
Şekil 3.5. SVO Akış Diyagramı

3.1.5. Yüksek çözünürlüklü görsel odometri (LSD-MonoSLAM)

Doğrudan metot kullanmakta olan LSD-MonoSLAM algoritması, yarı yoğunluklu haritalama algoritmasıdır [33]. Bu algoritma takip, derinlik ve tahmin ve harita optimizasyonu olmak üzere 3 ana başlık içermektedir. Takip aşamasında kamera konumundan kaynaklı fotometrik hatalar indirgenmektedir. Derinlik ve tahmin aşamasında algoritma tarafından yeni bir anahtar kare algılanması durumunda bu anahtar kare ile derinlik haritası ilklenmektedir. Mevcut anahtar kare ile devam edilirse derinlik haritasında

düzeltmeler gerçekleştirilmektedir. Harita optimizasyonu aşamasında ise anahtar karelerde elde edilen harita noktaları Pose-Graph tekniği ile derinlik haritasına eklenmektedir [30]. Şekil 3.6'da LSD-MonoSLAM Algoritmasına ait akış diyagramı verilmiştir.

LSD-MonoSLAM Algoritması optimizasyon ve döngü tamamlama tekniklerini kullanarak büyük ölçekli harita oluşturmalarda kullanılmaktadır. LSD-MonoSLAM, Pose-Graph tekniği kullanmasından ötürü PTAM, ORB-SLAM2.0 algoritmalarına göre daha düşük doğrulukta sonuçlar üretmektedir [34].



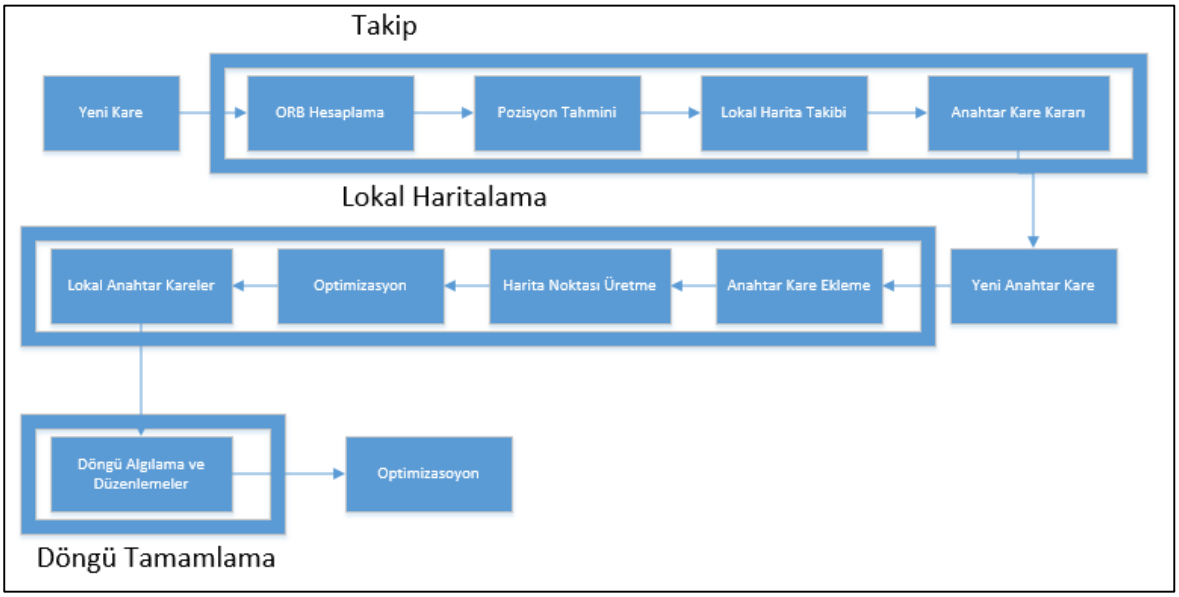
Şekil 3.6. LSD-MonoSLAM MonoSLAM Akış Diyagramı

3.1.6. ORB SLAM 2.0

Görsel özellik tabanlı bir algoritma olan ORB SLAM2 algoritması, takip, lokal haritalama ve döngü tamamlama olmak üzere 3 paralel kesme ile koşmaktadır. Takip kesmesinde, kameradan gelen görüntüler üzerinde ORB tekniği ile anahtar kare oluşturma, pozisyon tahminleri ve kamera konumundan dolayı oluşabilecek olan iz düşüm tahmin hatalarını indirgemektedir. Bu işlemlerin ardından elde edilen anahtar kareler lokal haritalama kesmesine iletilmektedir. Lokal haritalama kesmesinde, anahtar kareler üzerinden 3 boyutlu harita noktaları elde edilmekte olup gerekli optimizasyonların ardından harita oluşturulmaktadır. Döngü tamamlama kesmesinde, haritası oluşturulmakta olan bölgenin için kullanılmakta olan anahtar kareler ile uçulmakta olan çevrenin döngüsünün tamamlandığının teşhisi gerçekleştirilmektedir. Döngü tamamlama algılandıktan sonra haritalama sürecinde oluşabilecek kümülatif hata durumlarının optimizasyonları

gerçekleştirilmektedir [30]. Şekil 3.7'de ORB SLAM2.0 Algoritmasına ait akış diyagramı verilmiştir.

ORB SLAM2.0 Algoritması mono ve stereo gibi farklı kamera yaklaşımları, döngü tamamlama ve optimizasyon tekniklerini kullanmaktadır [30]. Farklı kamera yaklaşımları, döngü tamamlama ve optimizasyon tekniklerinin kullanılması daha güvenilir ve yüksek çözünürlükte sonuçlar elde etmesine imkan vermektedir. Bunlara ek olarak, literatürde gömülü sistem platformlarında ORB SLAM 2.0 ile gerçekleştirilen çalışmalar bulunmaktadır [35].

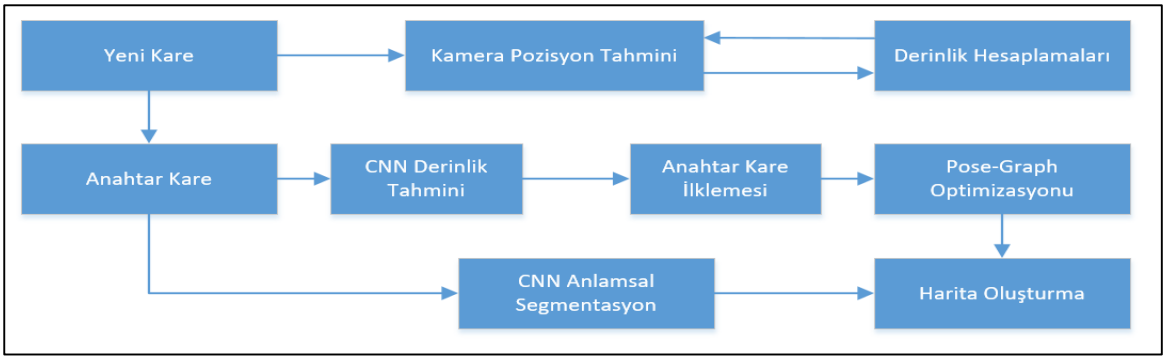


Şekil 3.7. ORB SLAM2.0 Akış Diyagramı

3.1.7. CNN-SLAM

CNN-SLAM, evrişimsel sinir ağı tabanlı ilk SLAM çalışmasıdır [35]. Bu algoritma temel olarak 2 farklı iletişim hattı üzerinde gerçekleştirilmektedir. İlk iletişim hattı, gelmekte olan her yeni görüntü karesini işleme alarak kamera konum tahminleri ve derinlik hesaplamaları gerçekleştirerek anahtar kareler arasında olabilecek olan fotometrik hataları indirgemek için kullanılmaktadır. İkinci iletişim hattı, anahtar kareleri CNN yöntemi ile derinlik tahmin hesaplamaları yaparak anlamlandırmaları gerçekleştirmektedir. Bu işlemlerin ardından Pose-Graph optimizasyonu ile konum tahmini ve harita oluşturma gerçekleştirilmektedir [30]. Şekil 3.8'de CNN SLAM Algoritmasına ait akış diyagramı verilmektedir.

CNN SLAM algoritması döngü tamamlama ve optimizasyon tekniklerini kullanmaktadır. Bu algoritma, CPU ve GPU mimarisine sahip gerçek zamanlı sistemlerde çalışmaktadır [30].

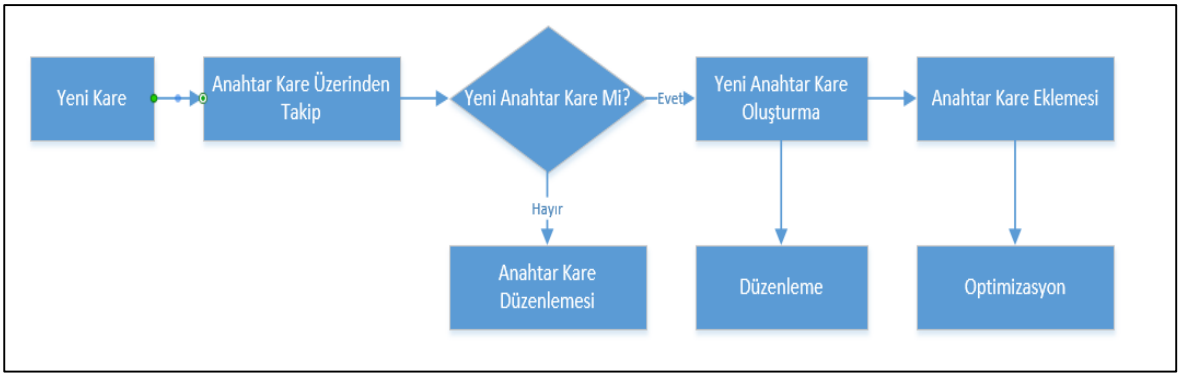


Şekil 3.8. CNN-SLAM Akış Diyagramı

3.1.8. Doğrudan seyrek odometri (DSO)

Doğrudan metot kullanmakta olan DSO algoritması, Doğrudan yanlaşım ve matris yapı oluşturma tekniklerinin birleşimi ile çalışmaktadır [37]. Bu algoritma temel olarak her yeni kare üzerinde derinlik hesaplama işlemleri gerçekleştirerek anahtar kareler üzerinde en fazla yoğunlukta harita noktası bulunan anahtar kareyi kullanarak haritalamayı gerçekleştirmektedir. Gürbüzlüğünün artırılması için optimizasyon noktasında zaman ve lens bozulmaları gibi kayıplar yaşayabilmektedir [30]. Şekil 3.9'da DSO Algoritması'na ait akış diyagramı verilmektedir.

Döngü tamamlama ve optimizasyon kullanılmayan DSO algoritmasında döngü tamamlama ve Pose-Graph optimizasyon tekniğinin kullanımına yönelik çalışmalarda gerçekleştirilmektedir [38].



Şekil 3.9. DSO Akış Diyagramı

3.2. vSLAM Tekniklerinin Kıyaslamaları

Yukarıda, literatürde yer almakta olan 8 adet vSLAM tekniği açıklanmıştır. Ayrıca bu tekniklerin haritalama mantıkları, harita çözünürlük artırma özellikleri, gömülü sistem uygulamaları gibi avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Görsel Tabanlı SLAM Tekniklerinin Karşılaştırılması

	MonoSLAM	PTAM	DTAM	SVO	LSD Mono SLAM	ORB SLAM2.0	CNN SLAM	DSO
Haritalama	Görüntü Tabanlı	Görüntü Tabanlı	Doğrudan	Hibrit	Doğrudan	Görüntü Tabanlı	Doğrudan	Doğrudan
Harita Tipi	Matris	Matris	Yoğunluk	Matris	Yarı Yoğunluk	Matris	Yarı Yoğunluk	Matris
Optimizasyon	Yok	Var	Yok	Yok	Var	Var	Var	Yok
Döngü Tamamlama	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Var	Yok
Gömülü Sistem Çalışmaları	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok

8 adet vSLAM algoritması temel olarak görsel tabanlı 3 boyutlu haritalama işlemini birbirlerinden farklı yöntemler kullanarak başarı ile gerçekleştirmektedir. 8 adet SLAM algoritması ortak olarak ilkleme, takip ve haritalama tekniklerini kullanarak harita oluşturmaktadır. Bu algoritmalar içerisinde optimizasyon teknikleri ve döngü tamamlama teknikleri kullanılan LSD-MonoSLAM, ORB-SLAM2.0 ve CNN-SLAM algoritmalarının ön plana çıktığı görülmektedir. Her ne kadar aynı işlemleri gerçekleştiriyor olsalar bile, LSD-MonoSLAM, algoritması ORB-SLAM2.0 ve CNN-SLAM algoritmalarına göre daha düşük çözünürlüklü haritalar elde etmektedir [34]. CNN-SLAM algoritması için literatür kapsamında gömülü sistemler üzerinde gerçekleştirilen bir çalışma bulunmamaktadır.

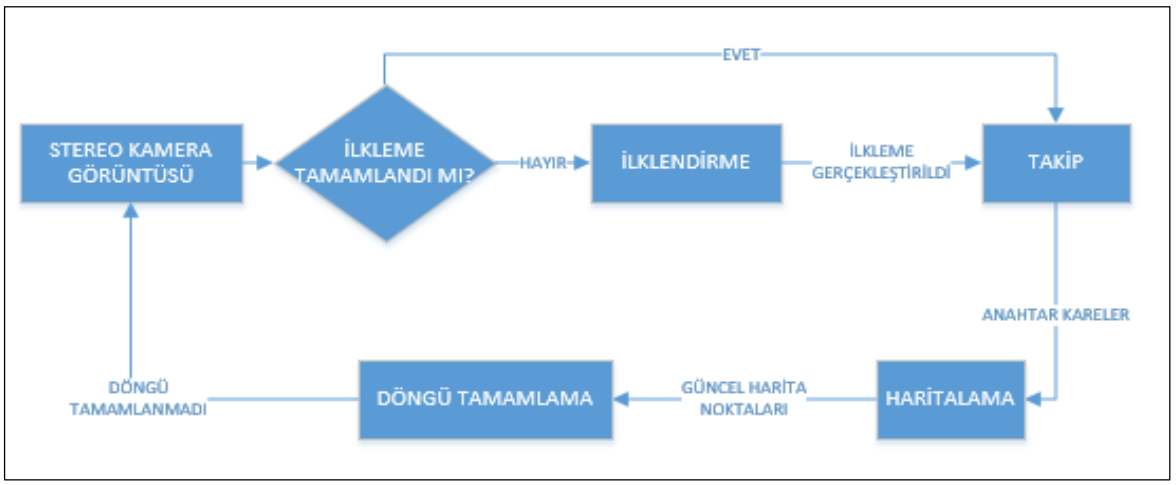
Bütün özellik durumları göz önüne alındığında, görüntü özellik tabanlı olması, literatürde gömülü sistemler ile çalışmalarının bulunması, temel yöntemlerin yanında harita çözünürlüğü ve hata paylarını indirgemek üzere optimizasyon ve döngü tamamlama tekniklerinin kullanılabilir olmasından ötürü görüntü tabanlı vSLAM yaklaşımı olan ORB-SLAM2.0 algoritması bu çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir.

4. BENZETİM ORTAM UYGULAMASI

Yüksek hız ve irtifada uçmakta olan insansız sistemler için kamera tabanlı eş zamanlı konumlandırma ve haritalama yaklaşımlarından olan ORB-SLAM2.0 algoritmasının benzetim ortamında uygulaması ve koşturulması icin gerekli platforma ait bilgiler Bölüm 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.

4.1. ORB-SLAM 2.0 Algoritmasının Uygulaması

Gerekli kıyaslamalar sonucu seçilmiş olan ORB-SLAM2.0 [42] algoritmasının çalışmalar için gerçekleştirilmiş olan uygulamasına ait akış diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Mono kamera ile görüntü üzerinde derinlik hesaplamaları doğru bir şekilde hesaplanamamasından ve sapmalar oluşturabileceğinden ötürü bu çalışmada stereo kamera tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. ORB-SLAM 2.0 Algoritması Akış Diyagramı

ORB-SLAM2.0 algoritması bu çalışmada literatürdeki bilgiler ışığında dört ana metot altında ele alınmıştır. Bunlar, ilkleme, takip, haritalama ve döngü tamamlamadır. Görsel özellikler ile çalışmakta olan bu sistem öncelikle stereo kameradan gelmekte olan görüntü ile harita oluşturmak için gerekli olan ilklemeyi gerçekleştirerek başlangıç konumuna göre 3 boyutlu harita noktalarını oluşturarak harita oluşumu ve döngü tamamlamayı algılayabilmek için anahtar kareyi oluşturmaktadır. İlkleme tamamlandıktan sonra takip aşamasında stereo kameradan gelen görüntüleri üzerinde ORB hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Hesaplama tamamlandıktan sonra pozisyon tahmini ve olası iz düşüm hatalarının indirgemeleri gerçekleştirilerek elde edilen harita noktalarının anahtar kare olup

olmadığı teşhis edilmektedir. Bu anahtar kareler üzerinden haritalama metodunda 3 boyutlu yol noktaları oluşturularak optimizasyonları gerçekleştirilmektedir. Döngü tamamlama metodunda ise elde edilen anahtar kareler eşleştirme tekniğiyle uçulmakta olan rotanın bir döngü oluşturup oluşturmadığı kestirilmeye çalışılmakta ve anahtar kareler üzerinde oluşabilecek kümülatif hatalar indirgenmektedir. Döngü teşhis edildiğinde o bölgeye ait haritanın oluştuğu teşhis edilerek harita oluşturma ve konumlandırma tamamlanmaktadır.

4.2. Platform

ORB-SLAM2.0 algoritması kullanılarak oluşturulmuş olan benzetim sisteminin testleri ve analizlerini gerçekleştirmek için işletim sistemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmakta olan Windows işletim sistemli test bilgisayarı tercih edilmiştir. Test bilgisayarının sistem özellikleri Bölüm 4.2.1'de verilmiştir. Bu test bilgisayarında benzetim ortamı olarak kullanılmakta olan MATLAB SIMULINK 2021b sürümü Bölüm 4.2.2'de detaylarıyla açıklanmıştır. Benzetim ortamı için kullanılmakta olan benzetim senaryosu Unreal Engine R4.25 sürümlü oyun motoru ile hazırlanmıştır ve Bölüm 4.2.3'te detayları verilmiştir.

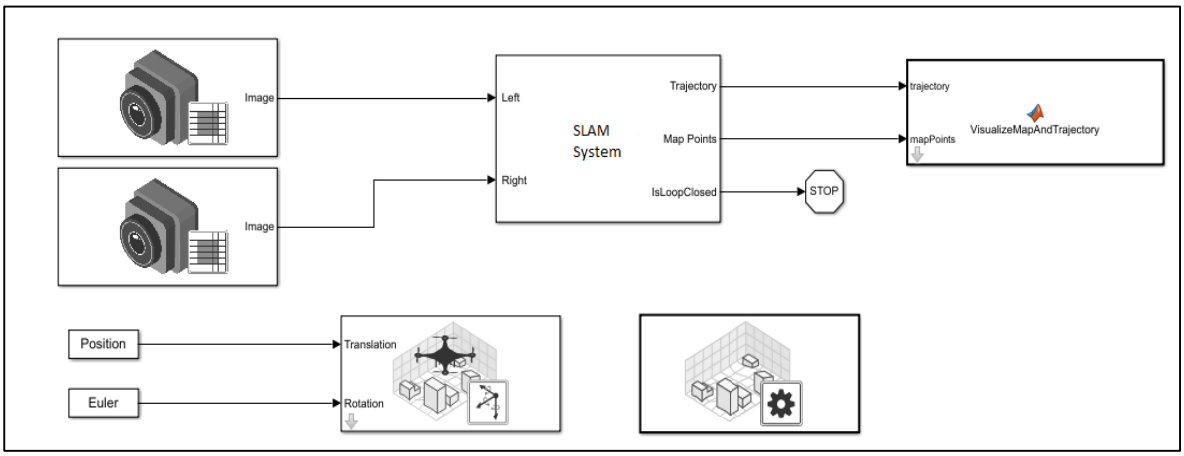
4.2.1. Deneysel test ortam bilgieri

Benzetim testlerinde hem işlem kapasitesi hem grafik kart isterleri olduğundan dolayı bu testlerin gerçekleştirilmesi için NVIDIA Quadro P620 ekran kartı, 16 GB RAM, Intel Core i7-10750H 2.6 GHz 64 bit işletim sistemli Windows10 platformu kullanılmaktadır. Deneysel testler MATLAB ve Unreal Engine uygulamaları ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim testlerinde insansız sistem benzetimlerini gerçekleştirmek için MATLAB R2021b sürümü ve Simulink UAVToolbox kütüphanesi kullanılmaktadır. Benzetim ortamını oluşturmak için de UAV Toolbox kütüphanesi ile uyumlu olan Unreal Engine v4.25 kullanılmaktadır.

4.2.2. MATLAB SIMULINK 2021b

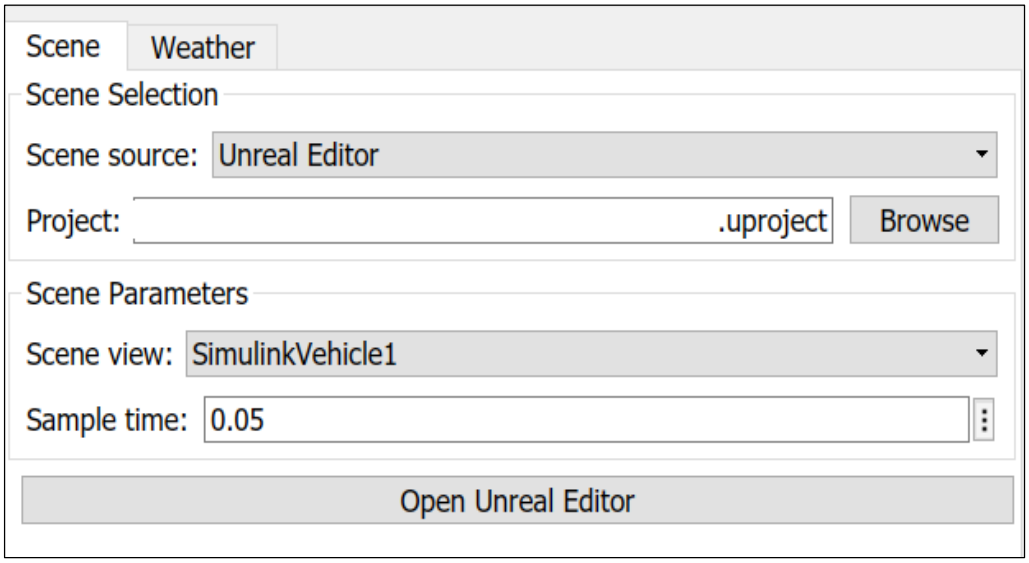
MATLAB, MathWorks firması tarafından geliştirilmiş yüksek seviye programlama dili imkanı sunan benzetim ve matematiksel işlemler gerçekleştirme imkanı sunan bir platformdur. MATLAB 2020b ve üzeri sürümlerinde Windows, MAC ve Linux platformlarında insansız hava araçları ile Simulink üzerinden benzetim testleri gerçekleştirilebilmesi için UAVToolbox kütüphanesi kullanıma açılmıştır. UAV Toolbox

kütüphanesi, temel olarak insansız hava araçları için algoritmalar, görev kontrolcüleri tasarlamak ve bunların benzetim ve gerekli test faaliyetlerini gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca benzetim ve testleri gerçekleştirmek için gerekli senaryo tasarımları için Unreal Engine v4.25 desteği sunmaktadır. İki uygulama arasındaki haberleşme platformu arka planda mikro hava aracı bağlantısı (MavLink) üzerinden gerçekleştirilmekte ve bunun için herhangi bir ekstra ayar gerekmemesi için MATLAB gerekli uygulamaları gerçekleştirmektedir. Bu imkan sayesinde benzetim senaryoları hem fotorealistik hem de 3 boyutlu platform imkanı sunmaktadır. UAV Toolbox, Simulink ile algoritma geliştirme, MAVlink, 3 boyutlu benzetim ekipmanları, sensör ve senaryo modelleme ve animasyon eklentileri imkanları sunmaktadır. Bu eklentiler ile deneysel test ortamı için oluşturulmuş Simulink benzetim ortamı Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Benzetim Ortamına ait Simulink Modeli

Simulink benzetim ortamı ile Unreal Engine R4.25 sürümlü oyun motoru arasında gerekli haberleşme işlemlerini sağlayan, istenilen senaryonun uyumlu bir şekilde çalışması için gerekli Şekil 4.3'de yer alan MATLAB Simulink UAVToolbox platformundan elde edilmiş olan "3D Benzetim Senaryo Konfigürasyoncusu" eklentisinin ayarlanması gereken parametreleri bulunmaktadır. Bu benzetim testinde benzetim senaryosu Unreal Engine R4.25 üzerinden özel olarak oluşturulduğu için düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Bu düzenlemeler, "Senaryo Kaynağı : Unreal Editor", "Proje İsmi : oluşturulmuş olan projenin .uproject uzantılı dosyasının bulunduğu dosya konumu" olarak seçilmelidir. Senaryo Parametrelerinde yer almakta olan "Senaryo Görüntüsü : Benzetim Senaryosunda Yer Alan Cihaz" ve "Örnekleme Zamanı : Oluşturulmuş olan veri setinin örnekleme zamanı" şeklindedir.

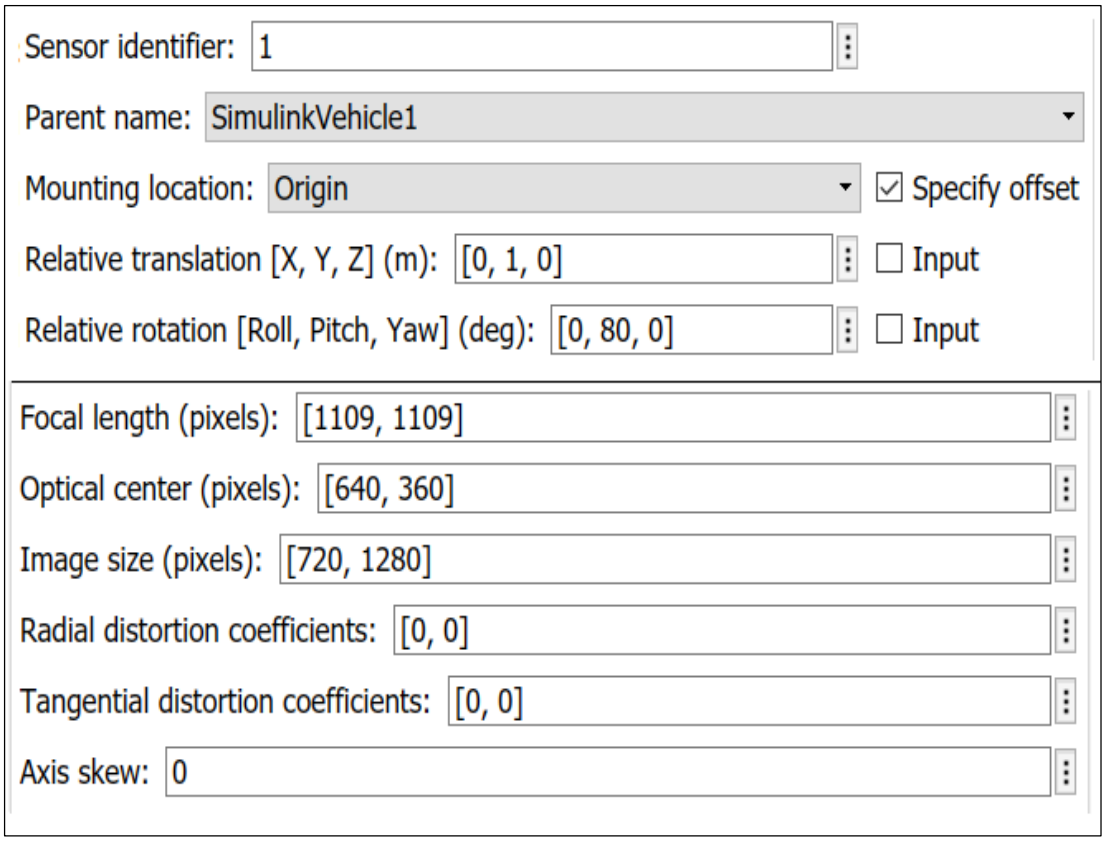


Şekil 4.3. UAVToolbox 3D Benzetim Senaryo Konfigürasyoncusu Özellik Ekranı

Unreal Engine R4.25 oyun motoru üzerinden gelmekte olan benzetim senaryosu kamera görüntülerinin algoritmaya beslenmesi için Şekil 4.4'de yer alan MATLAB Simulink UAVToolbox platformundan elde edilmiş olan "3D Benzetim Kamerası" eklentisinin ayarlanması gereken parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler eklenti üzerinde 2 ayrı ekranda yer aldığından ötürü tek bir şekil üzerinde birleştirilmiştir. Kullanılan parametre değerleri algoritmanın ve test bilgisayarının performans olarak sorunsuz çalışabildiği değerler olarak seçilerek kullanılmıştır. Bu şekilde yer alan "Sensör Tanımlayıcısı: İnsansız sistem üzerinde bulunan sol kamera için 1, sağ kamera için 2", "Ebeveyn İsmi: Benzetim Ortamında bulunan insansız sistem" olarak seçilmiştir. Kameranın bulunduğu konum, yerleşim çevrimi ve yönelim bilgileri de ofset belirle butonuna tıklanarak aktifleştirilebilmektedir. Kameralar insansız sistemin merkez noktasına yerleştirilmiştir. Merkez noktası konum ve yönelim ofset ayarlamalarında X, Y ve Z ekseninde 0,0,0 değerlerini ifade etmektedir. Kameraların ikisininde merkez noktasından aynı görüntüyü görmemesi için Y ekseninde 1'er metre ofset tanımlanmıştır. Yerleşim yönelimleri kamera kardanının bakacağı pozisyonu tanımlamaktadır. Yalpalama, yunuslama ve dönme eksenlerinde kardan açısı ayarlanabilmektedir. Yukarıdan kamera görüntüsü alındığından ötürü yunuslama açısında aşağıya bakması için 80 derece ofset tanımlanmıştır.

Kameranın görüntü boyutu işlem kapasite değeri için MATLAB dökümantasyonlarında yer alan standart değerler göz önüne alınmıştır [43]. Bu sebeple benzetim testlerinde odak

uzaklığı 1109x1109, optik merkez 640x360 ve görüntü boyutu 720x1280 piksel ve geri kalan parametreler 0 olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.4. UAVToolbox 3D Benzetim Kamerasının Özellik Ekranı

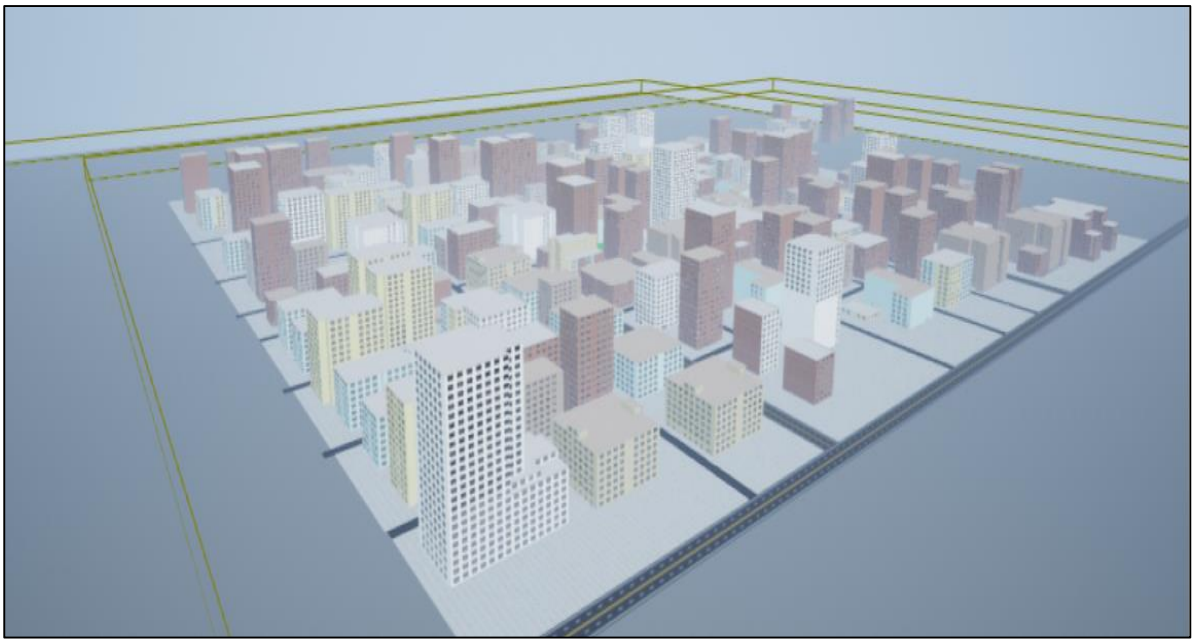
Simulink benzetim ortamında kullanılmakta olan kamera, insansız sistem, senaryo gibi bütün UAVToolbox eklentileri ve bu eklentilerin benzetim ortamındaki kullanmakta olan işlevsellikleri Çizelge 4.1.'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.1. Benzetim Ortam Ekipmanları

Ekipmanlar	Benzetim Senaryosu İçin Kullanım Alanları
Kameralar	Senaryo içerisinde istenilen yörüngede uçan insansız sistem üzerinde yer alan ve algoritmanın ihtiyaç duyduğu stereo görüntüyü algoritmaya istenilen periyotta iletmek için kullanılmakta olan ekipmandır.
İnsansız Sistem	Senaryoda benzetim uçuşu gerçekleştiren test ekipmanıdır.
Benzetim Senaryosu	Unreal Engine v4.25 ile oluşturulan fotorealistik senaryonun MATLAB Simulink ile uyumlu koşması için kullanılmakta olan ekipmandır.
MATLAB Sistem Bloğu	vSLAM ORB-SLAM2.0 algoritmasının eş zamanlı olarak koşması için kullanılmaktadır.
Harita Görselleştirme Bloğu	Test esnasında algoritma çıktısı olarak elde edilen konumlandırma bilgilerini ve haritanın noktalarının görselleştirilmesi için kullanılmaktadır.
Konum ve Yönelim Veri Seti	Benzetim senaryosunda insansız hava aracının planlanmış rotada uçması için önceden hazırlanmış olan yol noktaları veri setidir.

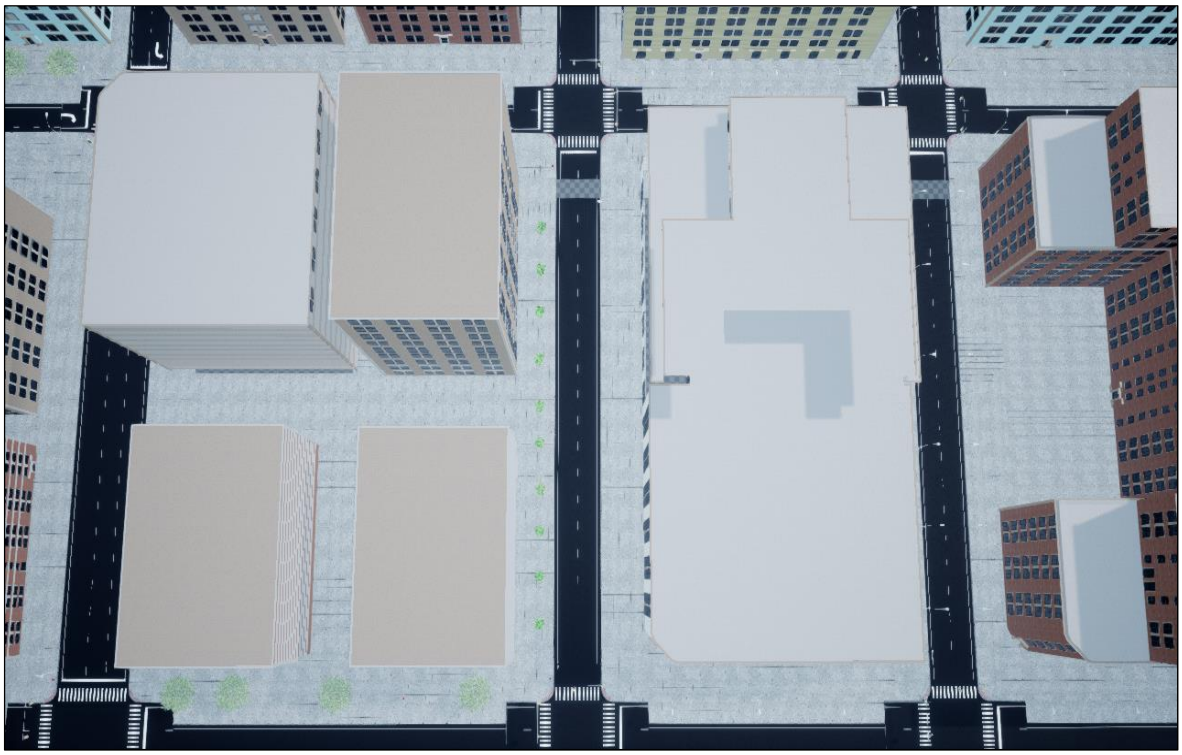
4.2.3. Unreal Engine R4.25

Unreal Engine sanal oyun geliştirme motorudur. UAVToolbox ile birlikte gelen uyumluluk özelliği ile Matlab Simulink'te eş zamanlı bir şekilde benzetim senaryosu koşulabilmektedir. Unreal Engine'nin çalışmalarda avantaj olarak bir özelliği ise fotorealistik yani gerçekçi bir benzetim ortamı oluşturulabilmesidir. Bu özellik sayesinde deneysel ortamlardaki benzetim senaryolarının hata payı azaltılabilmektedir. Unreal Engine v4.25 oyun motoru yardımı ile yaklaşık 0,5 km^2 boyutunda, 0-80 metre yükseklik aralıklarında binalar, ana yollar, ışıklandırma sistemleri, ağaçlar gerçek hayattaki yerleşim yerlerinde bulunmakta olan nesneler kullanılarak bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Oluşturulan benzetim senaryosuna ait bir örnek kesit Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Unreal Engine ile Oluşturulan Benzetim Senaryosu

Deneysel test ortamında beslenmekte olan görüntülere ait örnek kesitler ise Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ile verilmiştir.



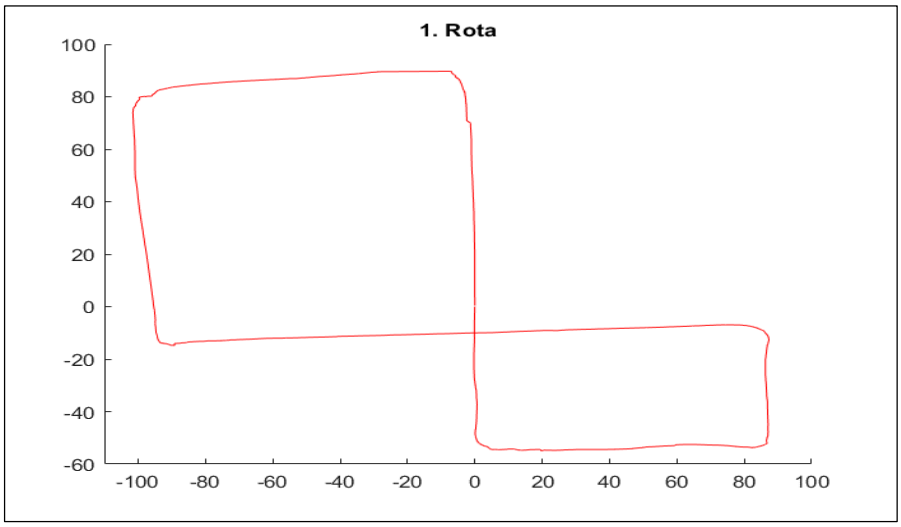
Şekil 4.6. Unreal Engine ile Oluşturulan Senaryoya Ait 200 mt İrtifada Örnek Kamera Görüntüsü



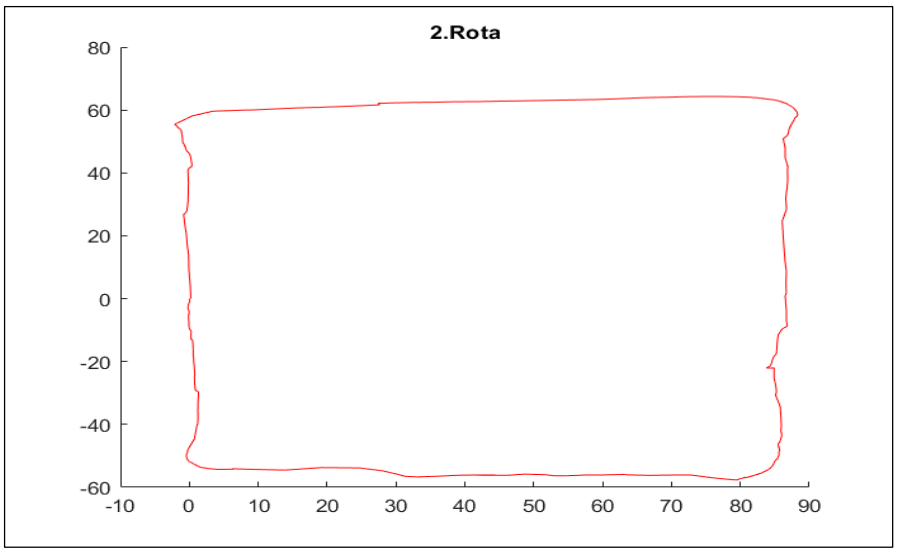
Şekil 4.7. Unreal Engine ile Oluşturulan Senaryoya Ait 20 mt İrtifada Örnek Kamera Görüntüsü

4.3. Veri Seti

Benzetim ortamında gerçekleştirilmiş olan deneysel testler için oluşturulmuş olan veri setleri kullanılmakta olan bilgisayar performansı ve benzetim senaryosunda yer almakta olan yerleşke modellerinin yüksekliği, senaryo boyutu gibi limitlemelerinden dolayı 0,025 - 0,2 Mach hız ile 100 mt - 200 mt irtifa aralığında oluşturulmuştur. Bu testlerde kullanılmakta olan veri setleri, 1.Rota olarak isimlendirilmiş 6 dönemeçten oluşan daha karmaşık bir uçuş rotası ile 2.Rota olarak isimlendirilmiş 4 dönemeçten oluşan düz bir rota olmak üzere 2 farklı rota üzerinden planlanmıştır. Bu rotalar Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8.Deneysel Test için Oluşturulmuş 1. Rota



Şekil 4.9. Deneysel Test için Oluşturulmuş 2. Rota

Oluşturulmuş olan veri setlerinde, konum verileri zaman, x, y ve z eksen bilgilerini, yönelim verileri ise zaman, yuvarlanma, yunuslama ve dönme açı değerlerinden oluşmaktadır. Bu veri setlerinde yer almakta olan zaman bilgileri, Simulink için gerekli örnekleme zaman değeri olan 0,05 saniyelik periyotları şeklinde aritmetik artacak şekilde tanımlanmıştır.

Konum bilgileri, x, y ve z eksen bilgilerini içermektedir. Konum için gerekli olan x, y ve z eksen bilgileri rota, irtifa ve hız faktörleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Gerekli hız değerlerinin sağlanabilmesi için 1 saniyelik periyotlar üzerinde aşağıdaki Denklem 4.1 dikkate alınarak konum bilgileri oluşturulmuştur.

$$x^2 + y^2 + z^2 = \sqrt{hız} \tag{4.1}$$

Yönelim bilgileri yuvarlanma, yunuslama ve dönme açı değerleri ise gerekli hız değerleri göz önünde bulundurularak ve uçuş test rotası korunarak oluşturulmuştur. Ancak oluşturulmuş olan rotalar düz bir doğrultuda olmadığından sadece dönme noktalarında algoritmanın doğru bir şekilde koşabilmesi için dönüşlerde hız en düşük veri seti hızı olan 0,025 Mach'a düşmektedir. Sonuç olarak 2 farklı rota ve 20 farklı hız irtifa bilgisi içeren veri setleri olmak üzere toplamda, deneysel testler için 40 adet test veri seti oluşturulmuştur. Her bir rota için oluşturulmuş veri setlerinin detaylı bilgileri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneysel Test Veri Setleri

Rota Numarası	Hız (Mach)	Hız (mt/s)	Hız (km/h)	İrtifa (mt)	Yol Noktası Sayısı	Süre (Sn)	Rota
1.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	100	1997	99,8	1
2.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	125	1997	99,8	1
3.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	150	1997	99,8	1
4.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	175	1997	99,8	1
5.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	200	1997	99,8	1
6.Veri Seti	0,05	17	61,2	100	1119	55,9	1
7.Veri Seti	0,05	17	61,2	125	1119	55,9	1
8.Veri Seti	0,05	17	61,2	150	1119	55,9	1
9.Veri Seti	0,05	17	61,2	175	1119	55,9	1
10.Veri Seti	0,05	17	61,2	200	1119	55,9	1

Çizelge 4.2. (Devam) Deneysel Test Veri Setleri

11.Veri Seti	0,1	34	122,4	100	716	35,75	1
12.Veri Seti	0,1	34	122,4	125	716	35,75	1
13.Veri Seti	0,1	34	122,4	150	716	35,75	1
14.Veri Seti	0,1	34	122,4	175	716	35,75	1
15.Veri Seti	0,1	34	122,4	200	716	35,75	1
16.Veri Seti	0,2	68	244,8	100	498	24,85	1
17.Veri Seti	0,2	68	244,8	125	498	24,85	1
18.Veri Seti	0,2	68	244,8	150	498	24,85	1
19.Veri Seti	0,2	68	244,8	175	498	24,85	1
20.Veri Seti	0,2	68	244,8	200	498	24,85	1
21.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	100	1201	60	2
22.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	125	1201	60	2
23.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	150	1201	60	2
24.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	175	1201	60	2
25.Veri Seti	0,025	8,5	30,6	200	1201	60	2
26.Veri Seti	0,05	17	61,2	100	701	35	2
27.Veri Seti	0,05	17	61,2	125	701	35	2
28.Veri Seti	0,05	17	61,2	150	701	35	2
29.Veri Seti	0,05	17	61,2	175	701	35	2
30.Veri Seti	0,05	17	61,2	200	701	35	2
31.Veri Seti	0,1	34	122,4	100	491	24,5	2
32.Veri Seti	0,1	34	122,4	125	491	24,5	2
33.Veri Seti	0,1	34	122,4	150	491	24,5	2
34.Veri Seti	0,1	34	122,4	175	491	24,5	2
35.Veri Seti	0,1	34	122,4	200	491	24,5	2
36.Veri Seti	0,2	68	244,8	100	307	15,3	2
37.Veri Seti	0,2	68	244,8	125	307	15,3	2
38.Veri Seti	0,2	68	244,8	150	307	15,3	2
39.Veri Seti	0,2	68	244,8	175	307	15,3	2
40.Veri Seti	0,2	68	244,8	200	307	15,3	2

5. BENZETİM TEST SONUÇLARI

MATLAB Simulink ve Unreal Engine'den oluşmakta olan benzetim ortamında deneysel testlere başlanmadan önce Çizelge 4.2'de detayları verilmiş olan 40 adet veri seti 5 kere test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kapsamında rota takip oranları arasında belirsizlikten ötürü oluşan sapmalar hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 5.1'de rota takip oran değeri ile birlikte verilmiştir. Ardından deneysel testler için veri setleri sırasıyla MATLAB Simulink ortamındaki benzetim senaryosuna yüklenerek MATLAB üzerinden çalıştırılmış olup, son aşama olarak ise Unreal Engine Senaryo Editörü aracılığı ile benzetim senaryosu tetiklenerek deneysel testler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilmiş olan testlerin sonuçları Çizelge 5.1.'de verilmiş olup elde edilen haritalama sonuçları Şekil 5.1 ile Şekil 5.40 arasında elde edilen izdüşüm verilerinin hız ve irtifaya göre performans kıyaslamaları Şekil 5.41 ile Şekil 5.49 arasında verilmiştir. Bu şekillerde yer alan haritalarda başarım kriterleri olan döngü tamamlamanın gerçekleştirilmiş olduğu, rotanın başarı ile takip edildiği ve önceden planlanmış olan 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt irtifaların korunarak benzetim uçuşunun gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

Çizelge 5.1. Deneysel Test Sonuçları

Rota Numarası	Rota	İrtifa Takibi (mt)	Rota Takip Oranı (%)	RMSE (mt)	Döngü Tamamlama
1.Veri Seti	1	100	98,33 ± 0,37	5.32	BAŞARILI
2.Veri Seti	1	125	98,89 ± 0,25	3,53	BAŞARILI
3.Veri Seti	1	150	98,67 ± 0,29	4,23	BAŞARILI
4.Veri Seti	1	175	98,03 ± 0,43	6,27	BAŞARILI
5.Veri Seti	1	200	97,43 ± 0,57	8,18	BAŞARILI
6.Veri Seti	1	100	95,02 ± 1,06	15,78	BAŞARILI
7.Veri Seti	1	125	96,87 ± 0,69	9,78	BAŞARILI
8.Veri Seti	1	150	95,93 ± 0,9	12,81	BAŞARILI
9.Veri Seti	1	175	98,14 ± 0,41	5,91	BAŞARILI
10.Veri Seti	1	200	97,3 ± 0,59	8,6	BAŞARILI
11.Veri Seti	1	100	97,79 ± 0,49	7,04	BAŞARILI
12.Veri Seti	1	125	97,7 ± 0,50	7,31	BAŞARILI
13.Veri Seti	1	150	97,51 ± 0,55	7,93	BAŞARILI
14.Veri Seti	1	175	97,14 ± 0,63	9,11	BAŞARILI
15.Veri Seti	1	200	96,96 ± 0,67	9,67	BAŞARILI
16.Veri Seti	1	100	98,5 ± 0,33	4,77	BAŞARILI
17.Veri Seti	1	125	98,7 ± 0,28	4,14	BAŞARILI
18.Veri Seti	1	150	98,03 ± 0,43	6,26	BAŞARILI
19.Veri Seti	1	175	98,3 ± 0,37	5,41	BAŞARILI

Çizelge 5.1. (Devam) Deneysel Test Sonuçları

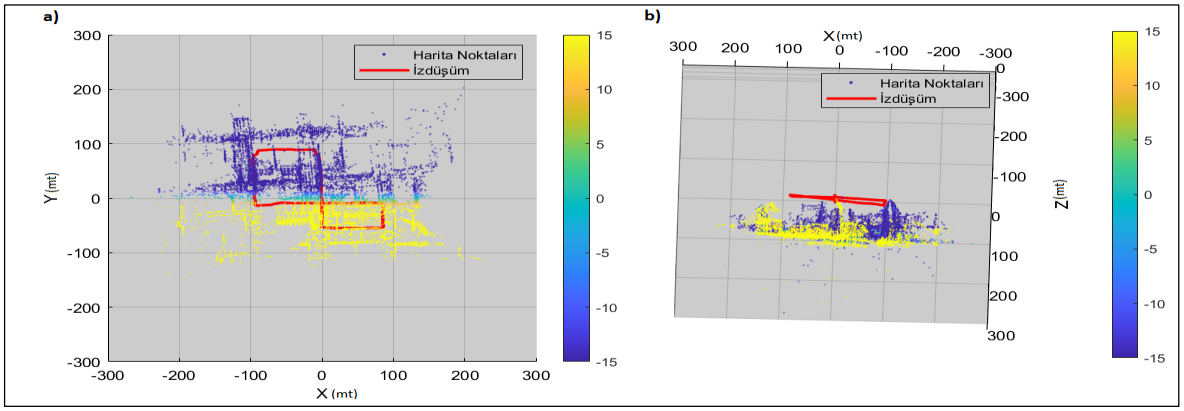
20.Veri Seti	1	200	97,83 ± 0,48	7,1	BAŞARILI
21.Veri Seti	2	100	99,71 ± 0,06	0,92	BAŞARILI
22.Veri Seti	2	125	98,32 ± 0,37	5,34	BAŞARILI
23.Veri Seti	2	150	97,7 ± 0,51	7,31	BAŞARILI
24.Veri Seti	2	175	99,17 ± 0,18	2,64	BAŞARILI
25.Veri Seti	2	200	99,1 ± 0,19	2,87	BAŞARILI
26.Veri Seti	2	100	97,92 ± 0,46	6,62	BAŞARILI
27.Veri Seti	2	125	98,25 ± 0,38	5,57	BAŞARILI
28.Veri Seti	2	150	97,39 ± 0,57	8,3	BAŞARILI
29.Veri Seti	2	175	99,01 ± 0,21	3,15	BAŞARILI
30.Veri Seti	2	200	98,79 ± 0,26	3,85	BAŞARILI
31.Veri Seti	2	100	97,86 ± 0,47	6,81	BAŞARILI
32.Veri Seti	2	125	97,76 ± 0,49	7,13	BAŞARILI
33.Veri Seti	2	150	98,1 ± 0,42	6,05	BAŞARILI
34.Veri Seti	2	175	98,67 ± 0,29	3,59	BAŞARILI
35.Veri Seti	2	200	98,93 ± 0,23	3,4	BAŞARILI
36.Veri Seti	2	100	98,95 ± 0,23	3,35	BAŞARILI
37.Veri Seti	2	125	98,38 ± 0,35	5,16	BAŞARILI
38.Veri Seti	2	150	98,73 ± 0,28	4,04	BAŞARILI
39.Veri Seti	2	175	99,08 ± 0,2	2,98	BAŞARILI
40.Veri Seti	2	200	99 ± 0,21	3,18	BAŞARILI

Benzetim testlerinin sonucunda elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma verileri MATLAB pcplayer eklentisi yardımıyla 3 boyutlu olarak Bölüm 5.1'de her bir veri seti için sırasıyla X-Y ve X-Z koordinat ekseni üzerinde olmak üzere hem kuş bakışı hem irtifa profilini gözlemlemek amacıyla verilmektedir. Aynı benzetim testlerinin sonucunda farklı irtifa ve hızlarda elde edilmiş olan izdüşümlerinin X-Y koordinat ekseni üzerinde hıza ve irtifaya göre orijinal rota ile kıyaslamaları ise Bölüm 5.2'de verilmektedir.

5.1. Haritalama Sonuçları

Görsellerde kullanılmakta olan kırmızı çizgi kamera görüntüleri üzerinden elde edilmiş görüntülerin algoritma koşturulması sonucu elde edilen izdüşümünü, mavi ve sarı noktalar ise ile kamera görüntüleri üzerinden elde edilmiş görüntülerin algoritma koşturulması sonucu elde edilen 3D harita noktalarını göstermektedir. X ve Y koordinat ekseni üzerinde metre mertebesinde çözünürlükle verilmiş olan görsellerde uçulan rotanın algoritma sonucu elde edilen izdüşümü ve haritalama verileri kuş bakışı olarak, X ve Z koordinat ekseni üzerinde ise irtifa profili metre mertebesinde çözünürlükle görselleştirilmektedir.

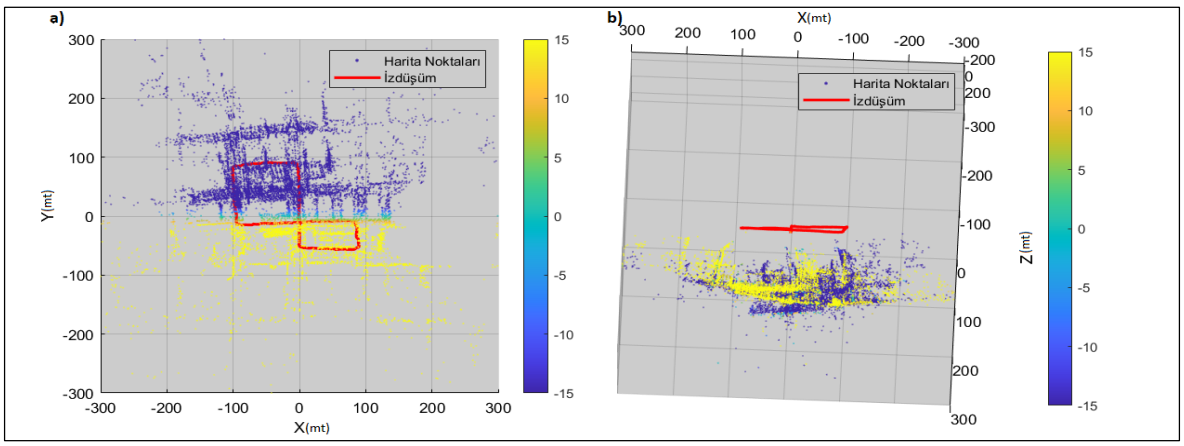
5.1.1. 1.Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.1. 1. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

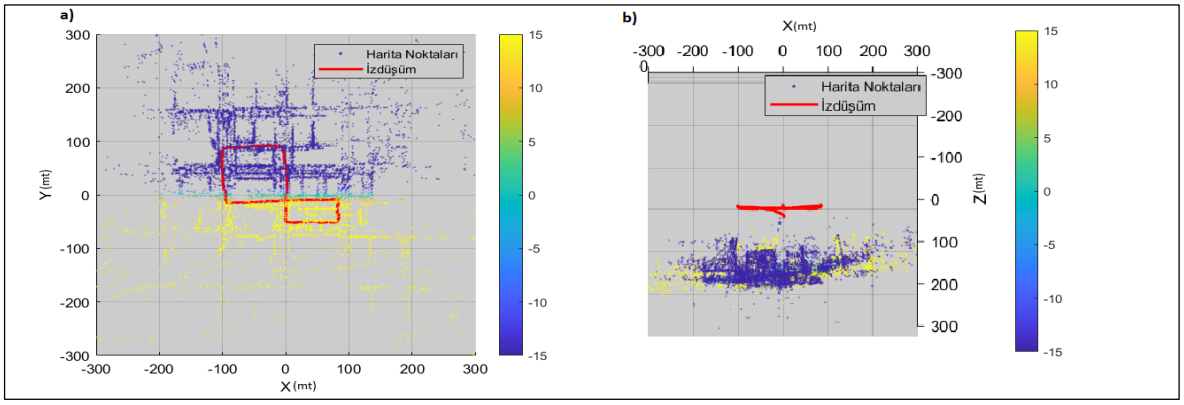
5.1.2. 2. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.2. 2. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

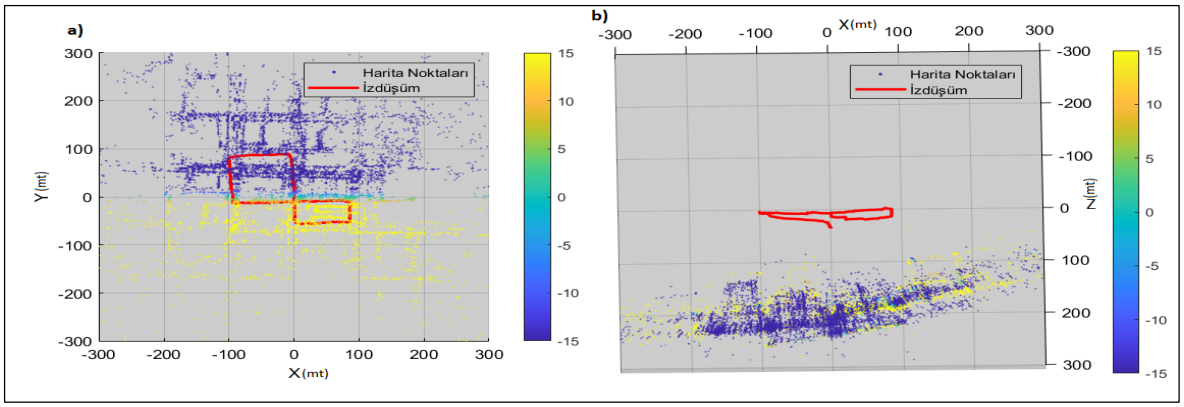
5.1.3. 3. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.3. 3. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

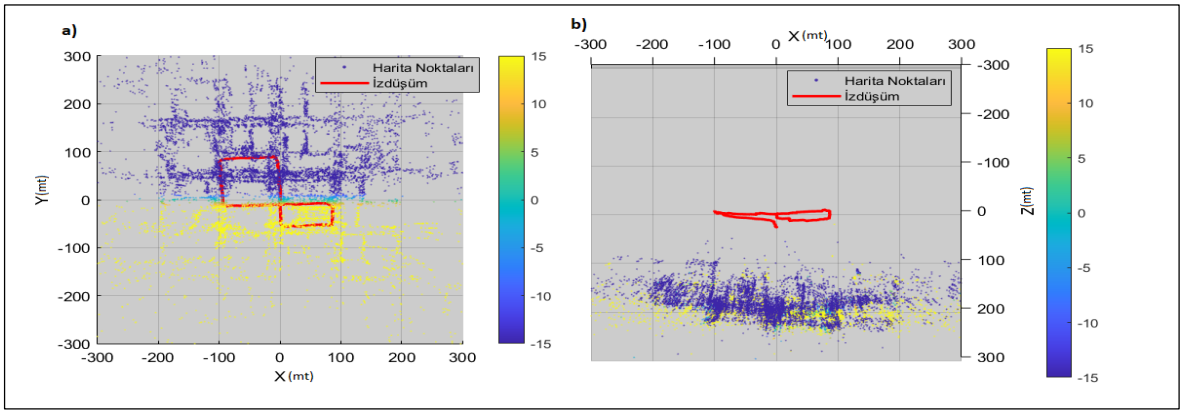
5.1.4. 4. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.4. 4. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

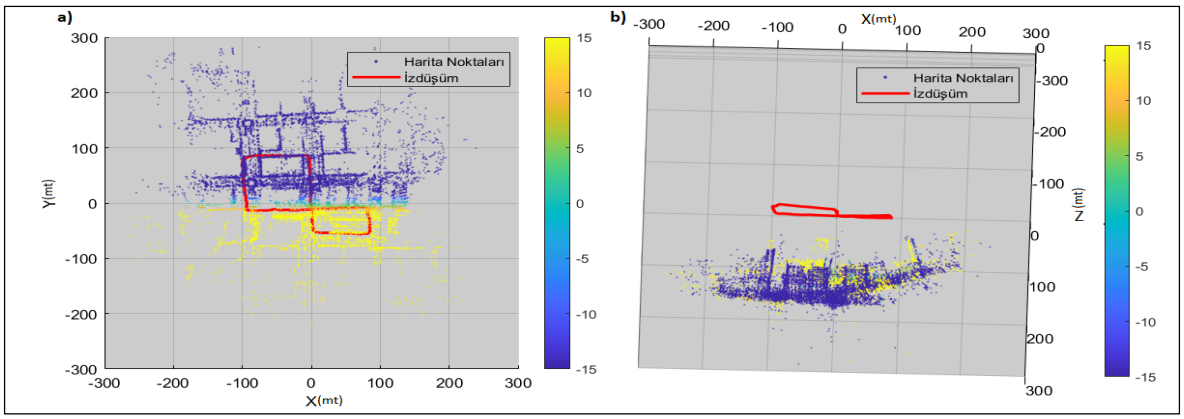
5.1.5. 5. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.5. 5. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

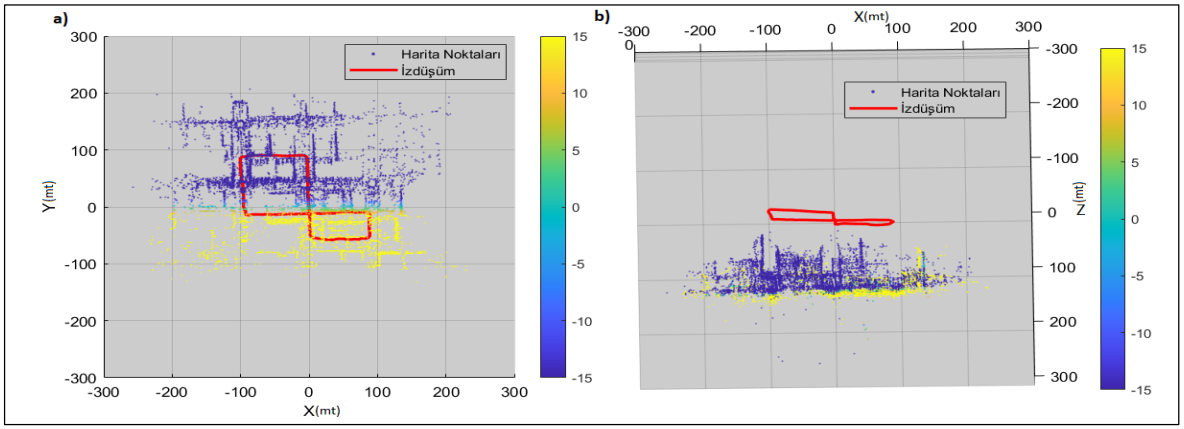
5.1.6. 6. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.6. 6. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

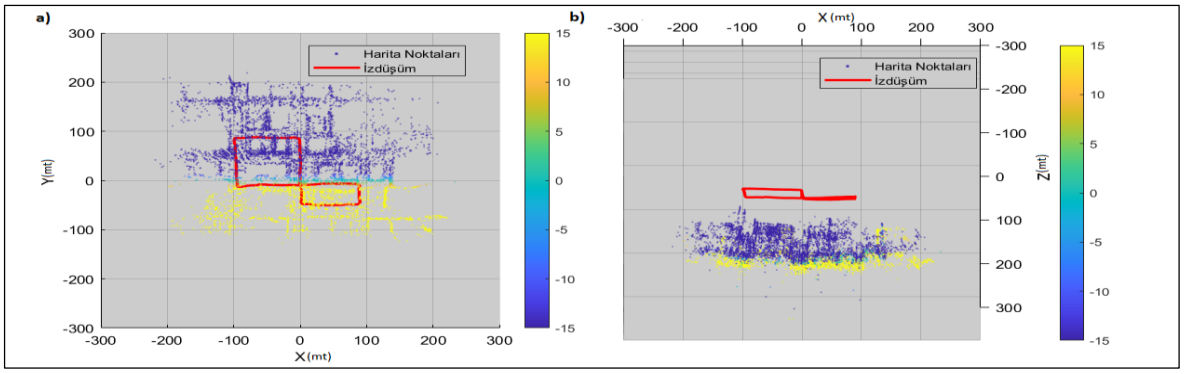
5.1.7. 7. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.7. 7. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

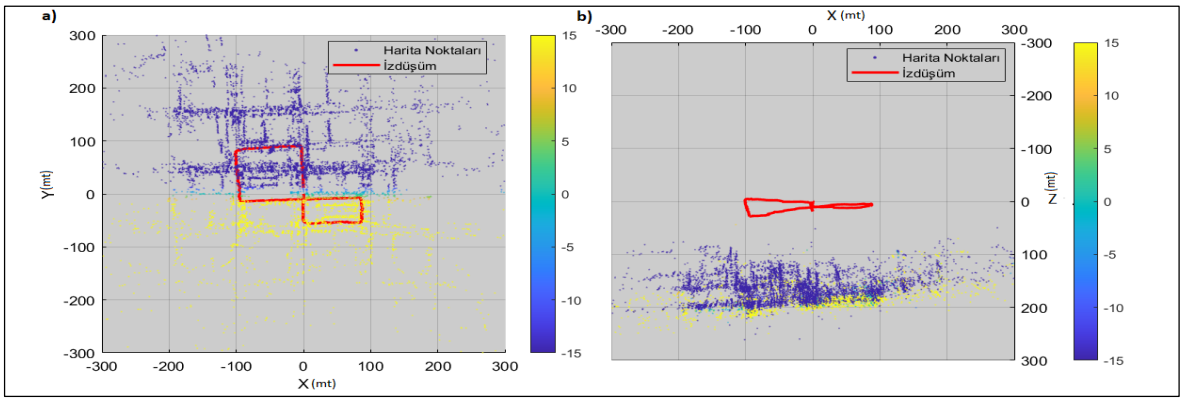
5.1.8. 8. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.8. 8. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

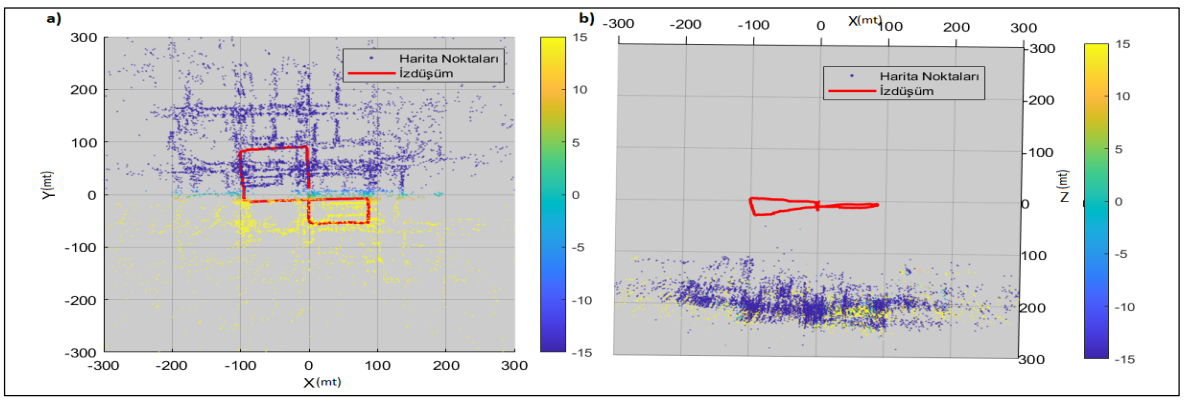
5.1.9. 9. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.9. 9. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

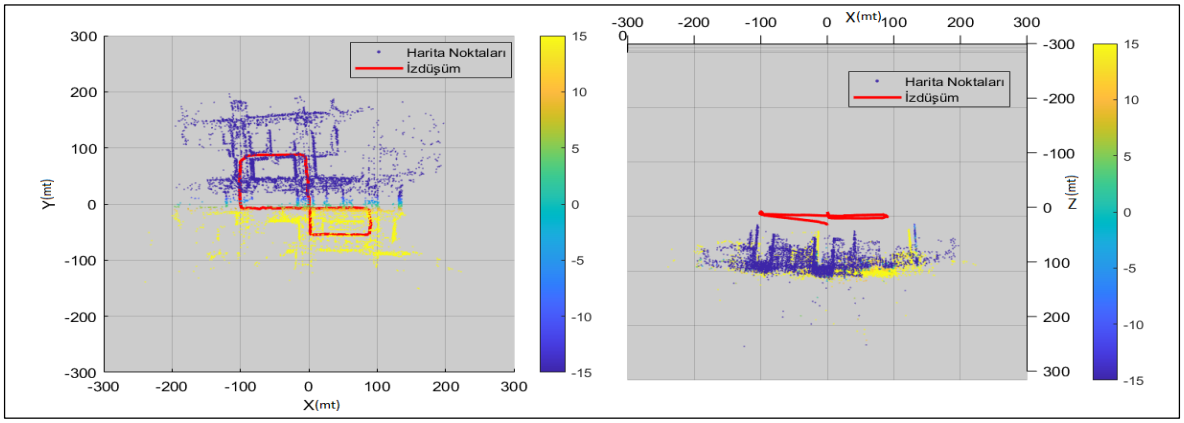
5.1.10. 10. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.10. 10. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

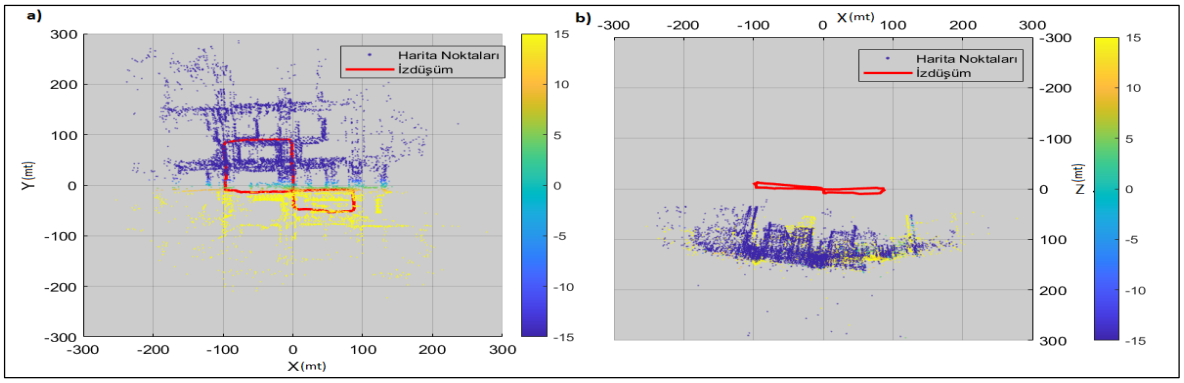
5.1.11. 11. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.11. 11. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

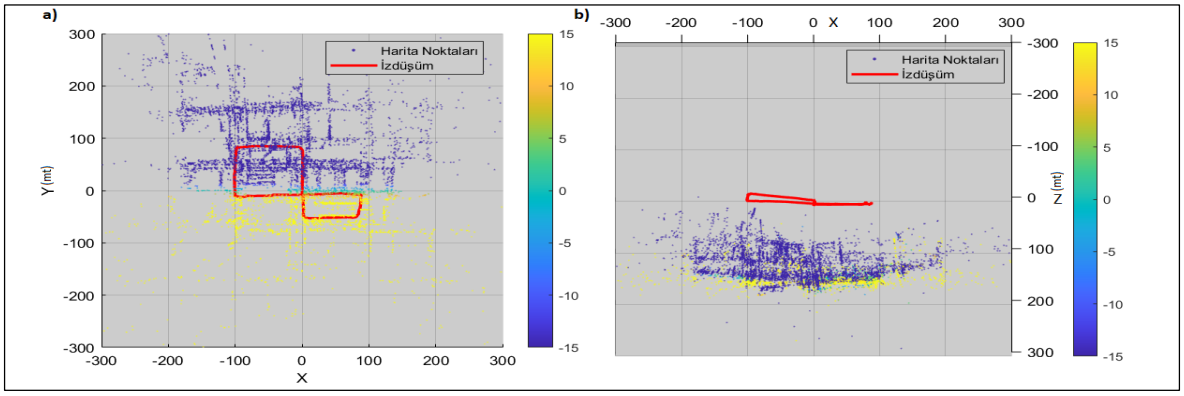
5.1.12. 12. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.12. 12. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

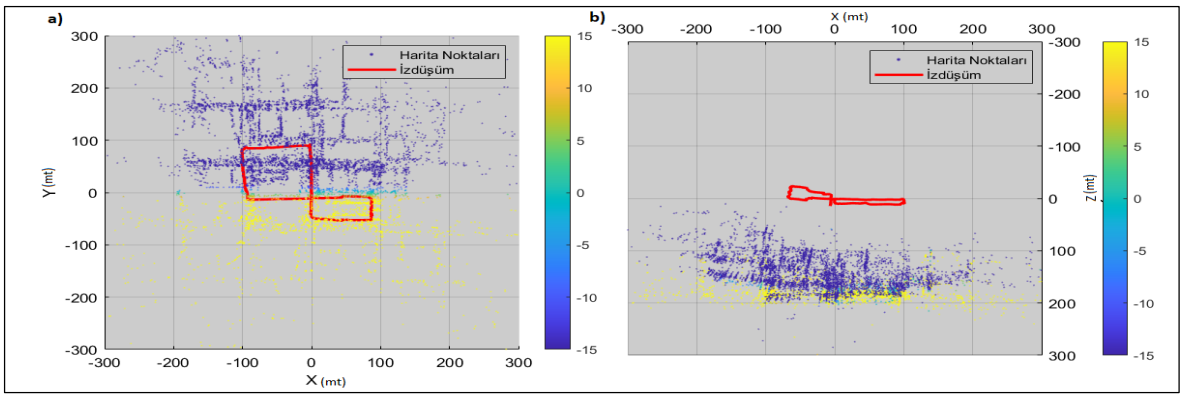
5.1.13. 13. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.13. 13. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

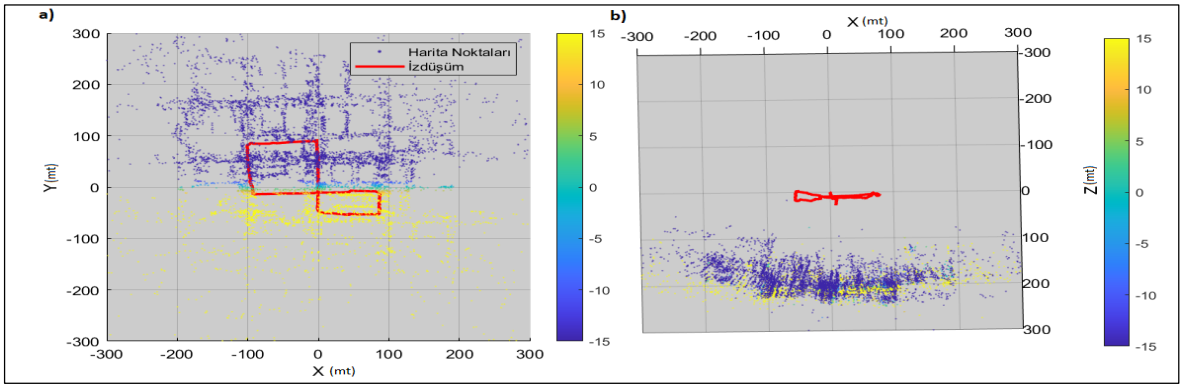
5.1.14. 14. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.14. 14. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

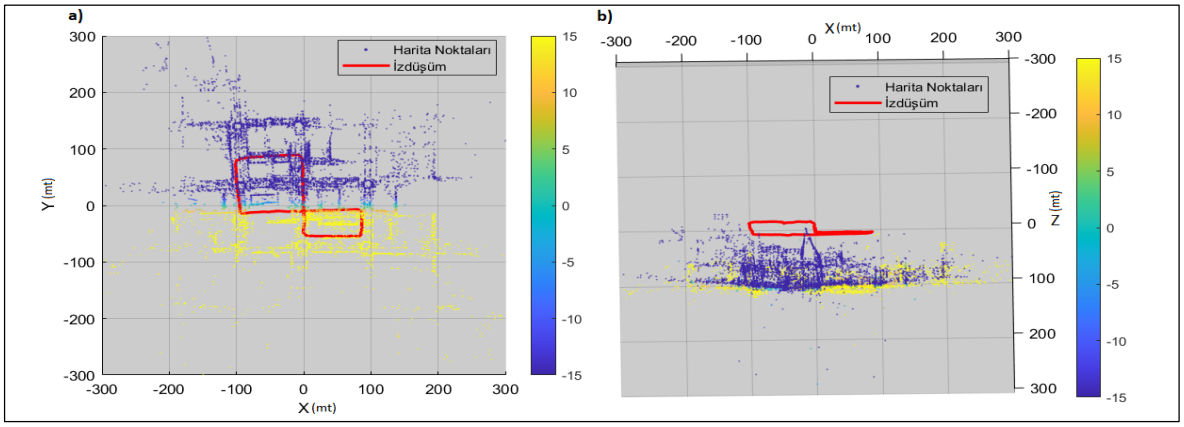
5.1.15. 15. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.15. 15. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

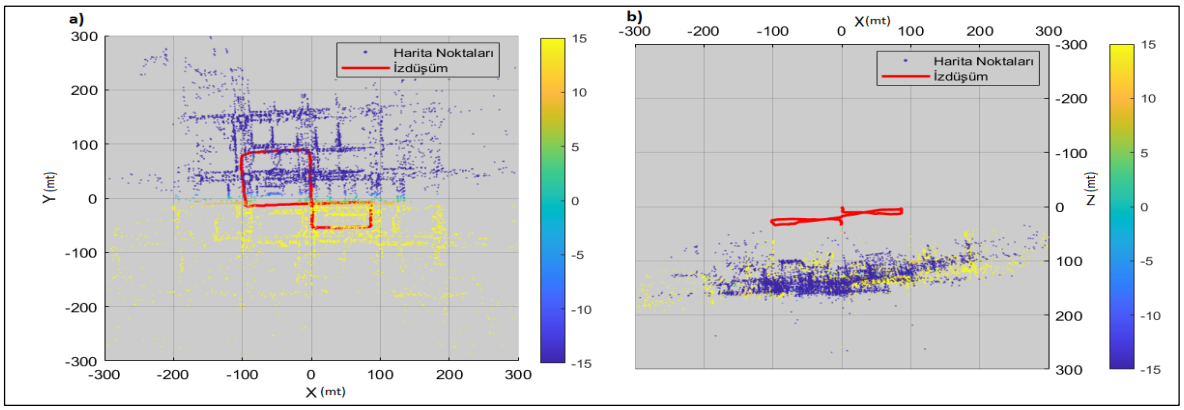
5.1.16. 16. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.16. 16. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

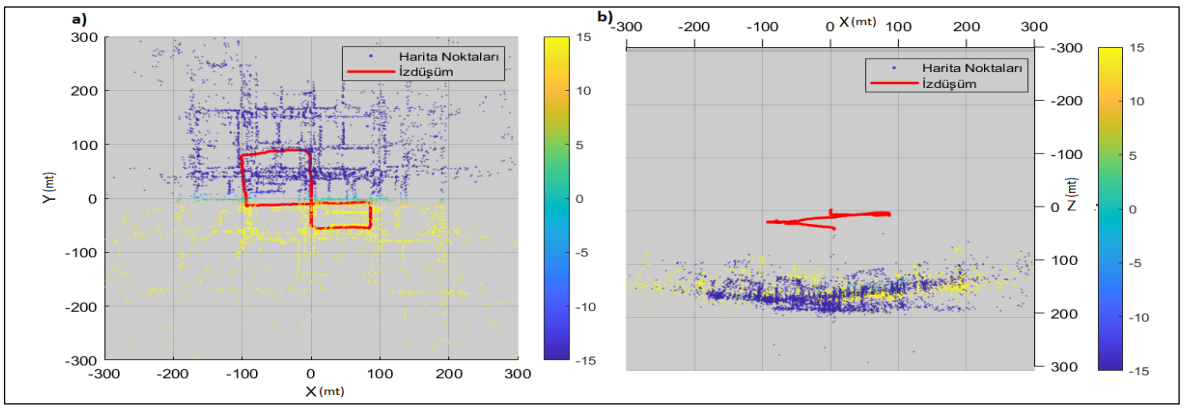
5.1.17. 17. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.17. 17. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

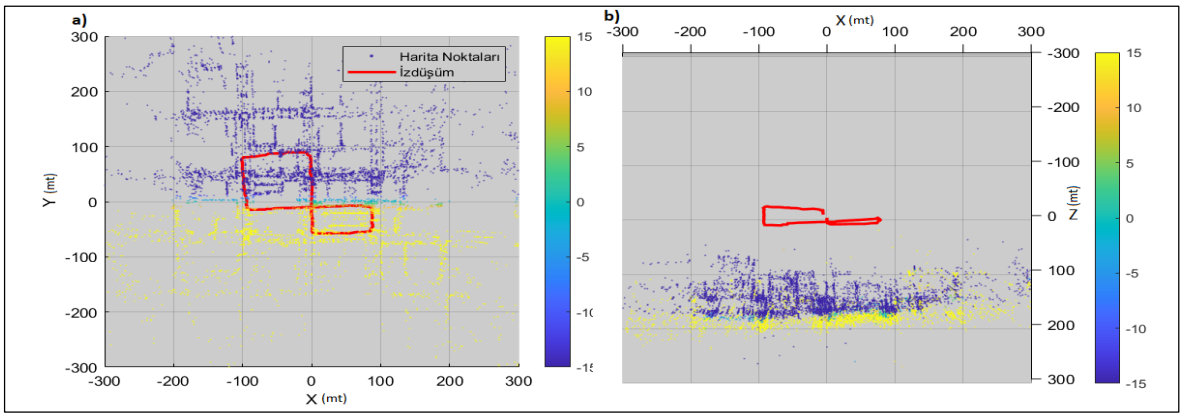
5.1.18. 18. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.18. 18. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

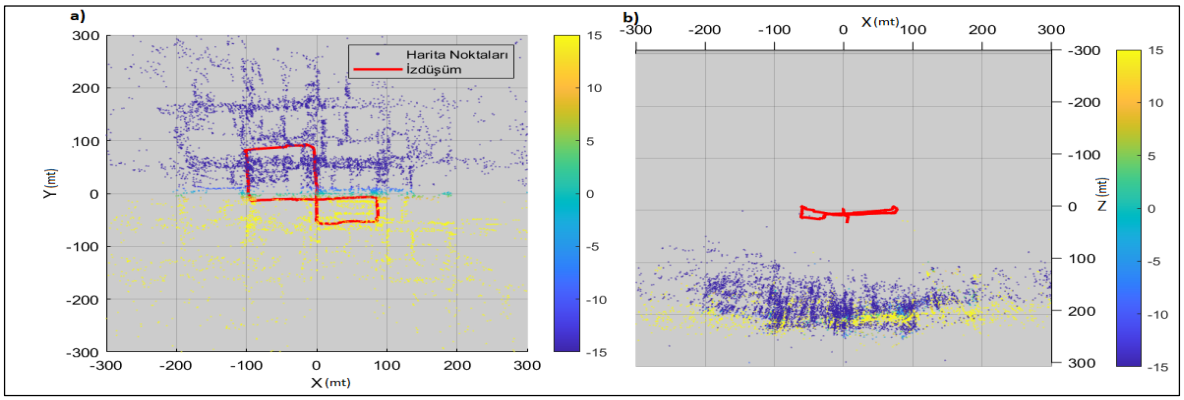
5.1.19. 19. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.19. 19. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

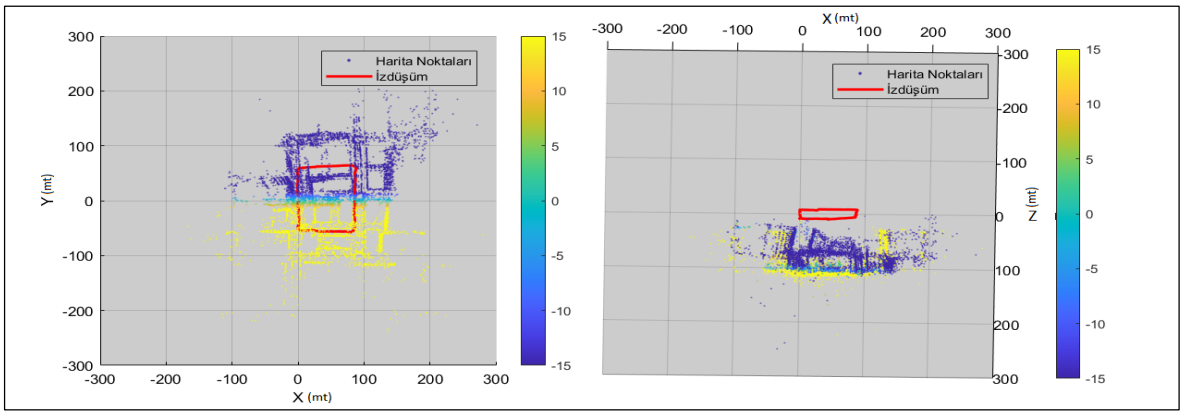
5.1.20. 20. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.20. 20. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

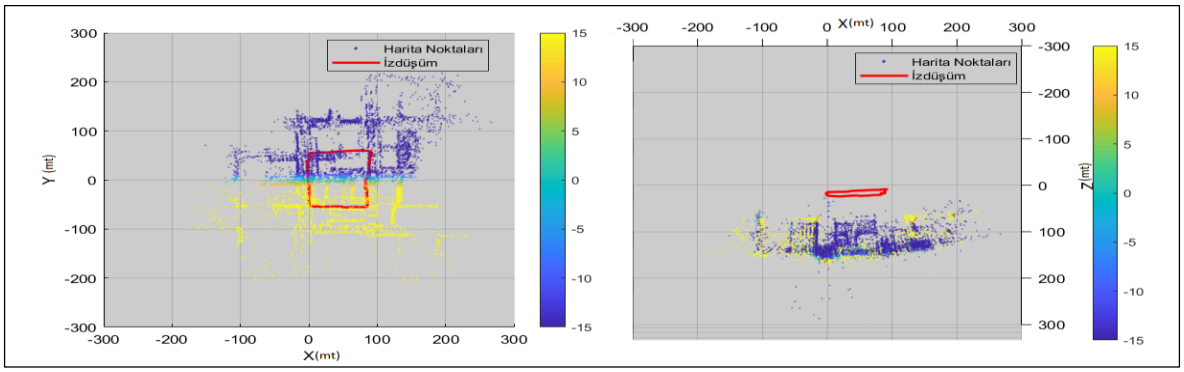
5.1.21. 21. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.21. 21. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

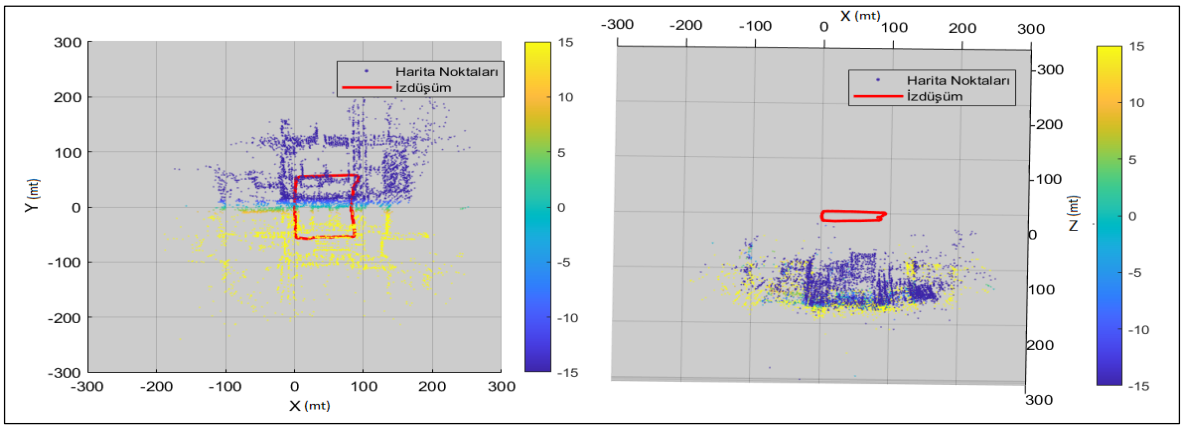
5.1.22. 22. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.22. 22. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

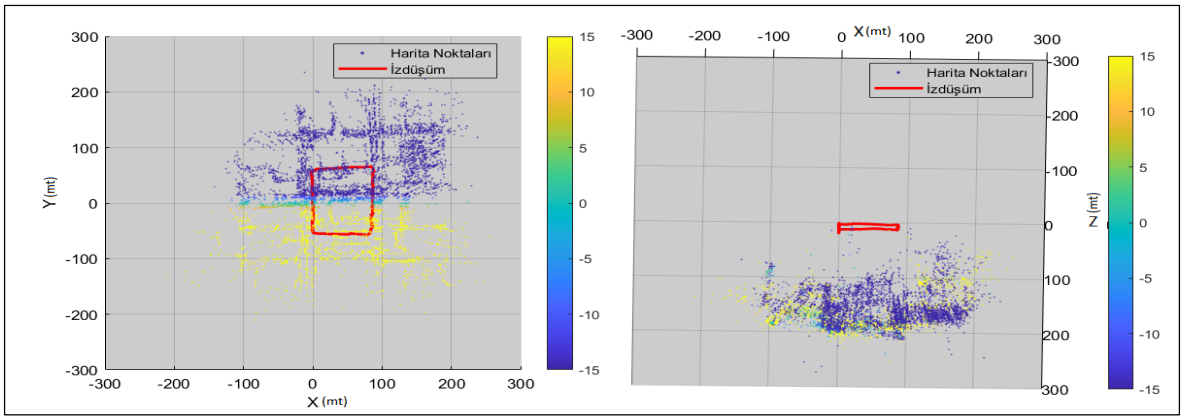
5.1.23. 23. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.23. 23. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

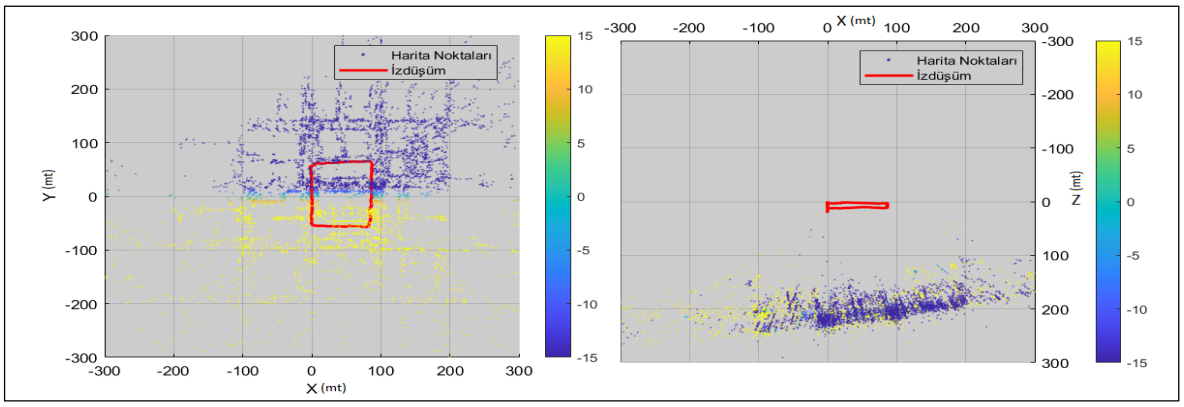
5.1.24. 24. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.24. 24 Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

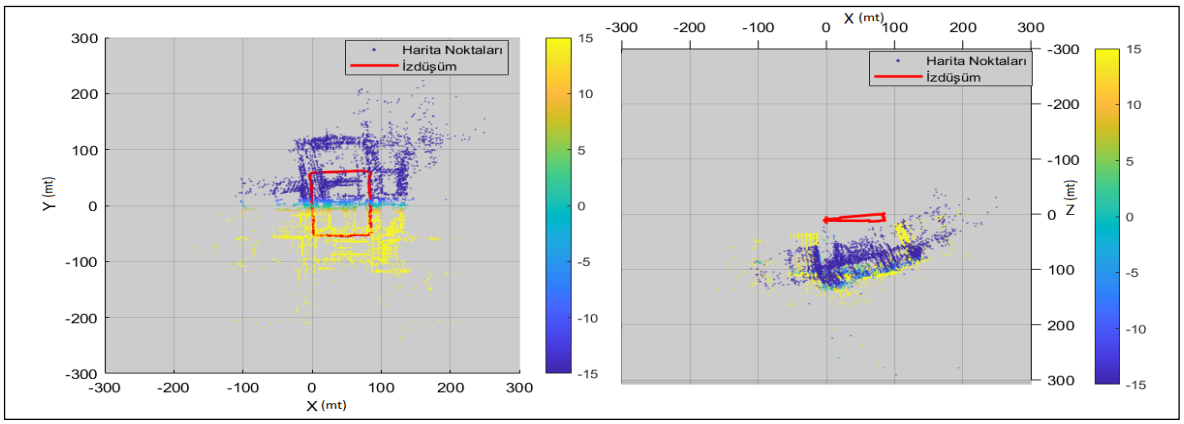
5.1.25. 25. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.25. 25. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,025 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

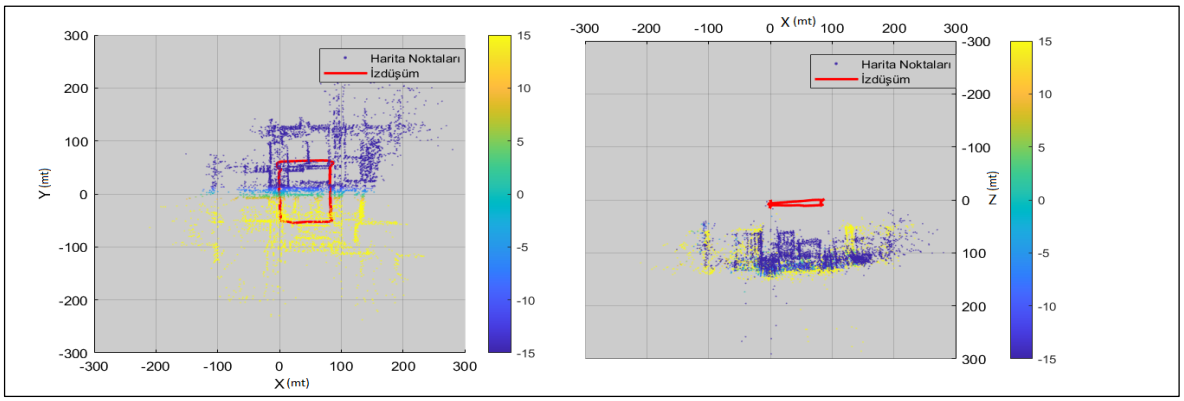
5.1.26. 26. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.26. 26. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

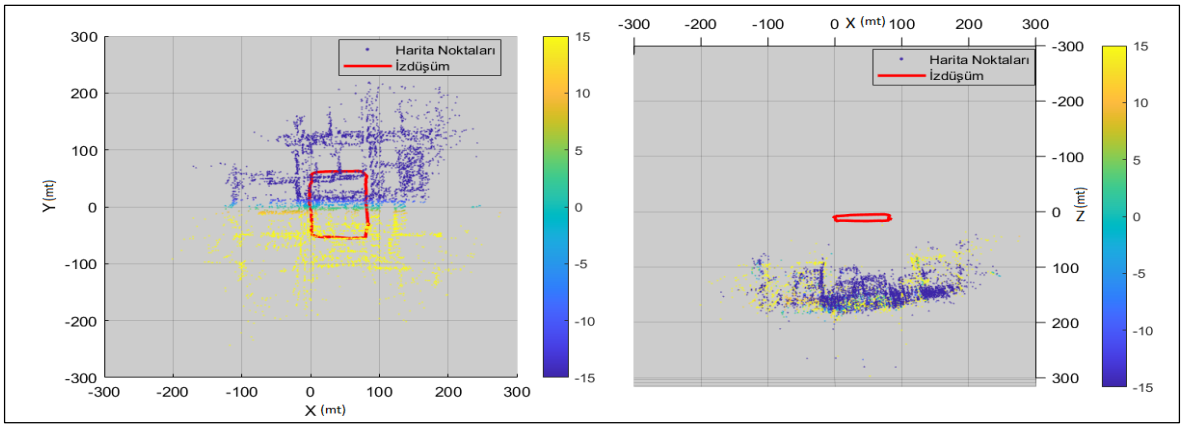
5.1.27. 27. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.27. 27. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

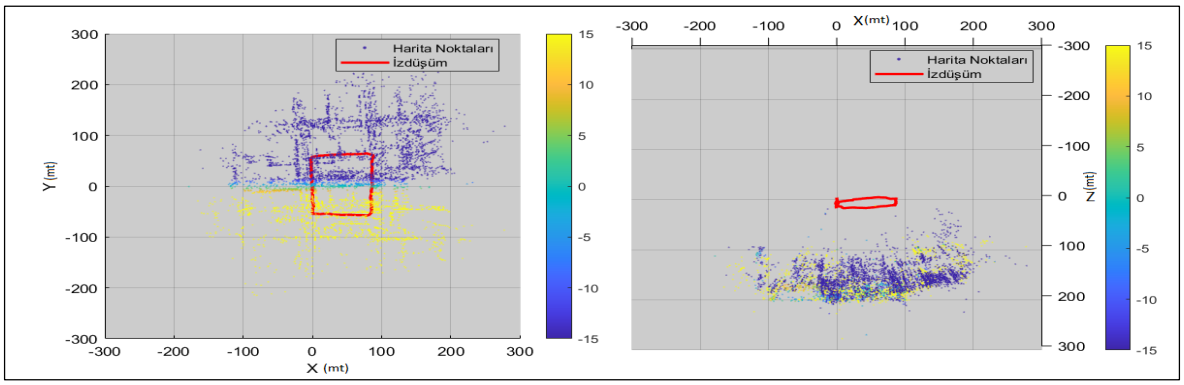
5.1.28. 28. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.28. 28. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

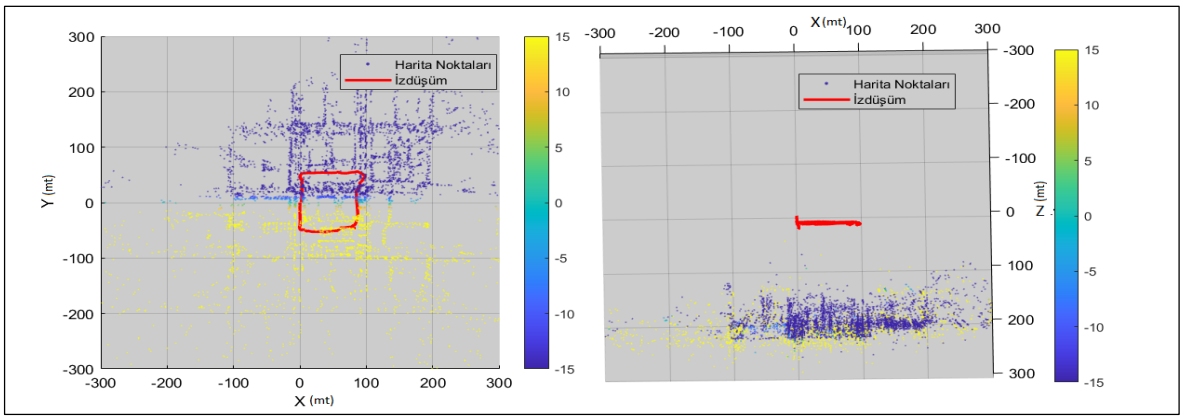
5.1.29. 29. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.29. 29. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

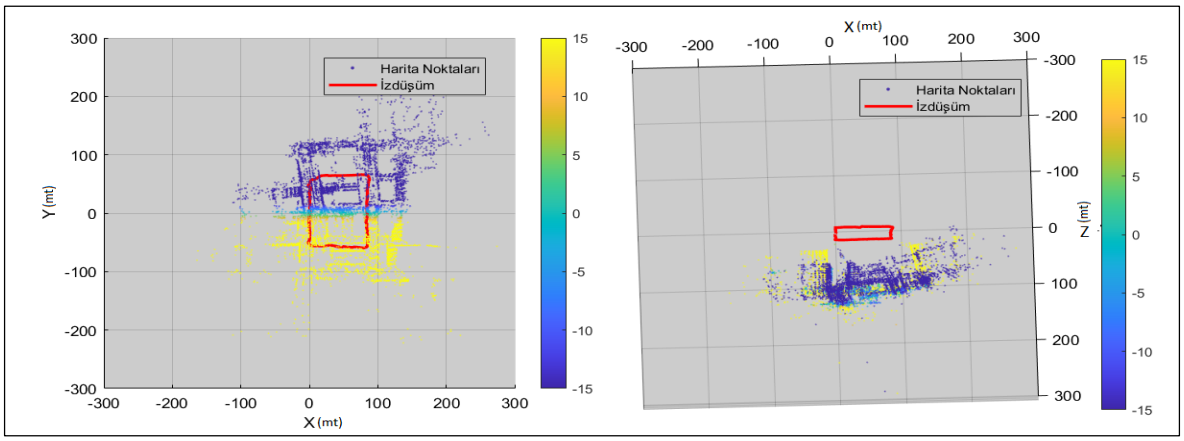
5.1.30. 30. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.30. 30. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,05 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

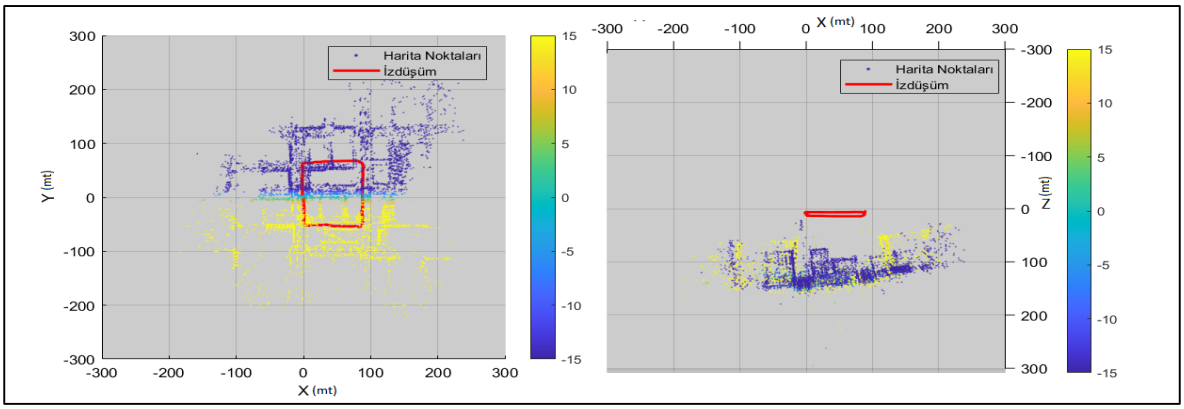
5.1.31. 31. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.31. 31. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

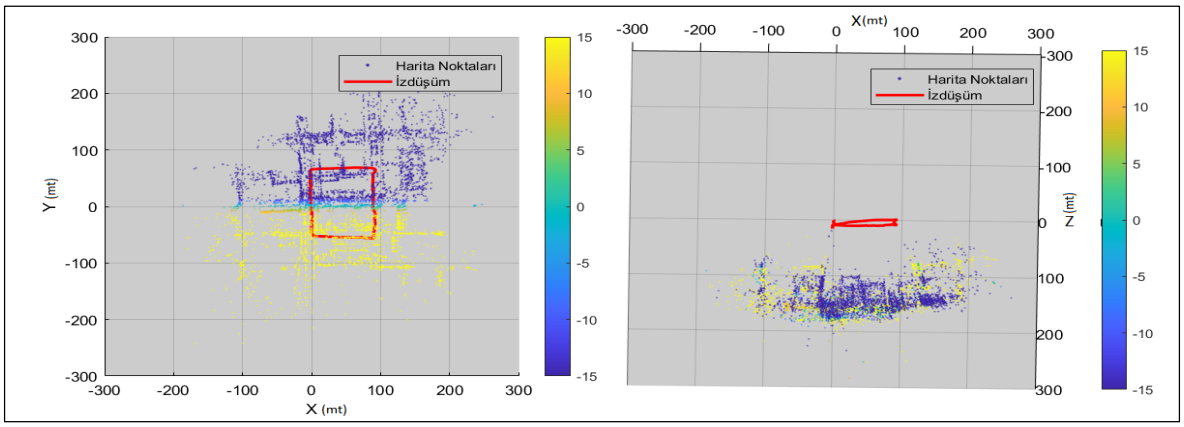
5.1.32. 32. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.32. 32. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

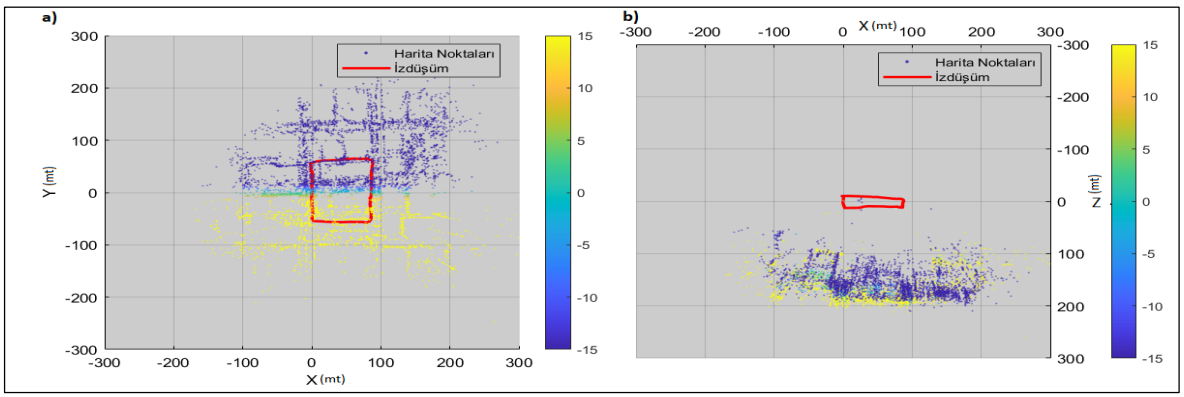
5.1.33. 33. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.33. 33. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

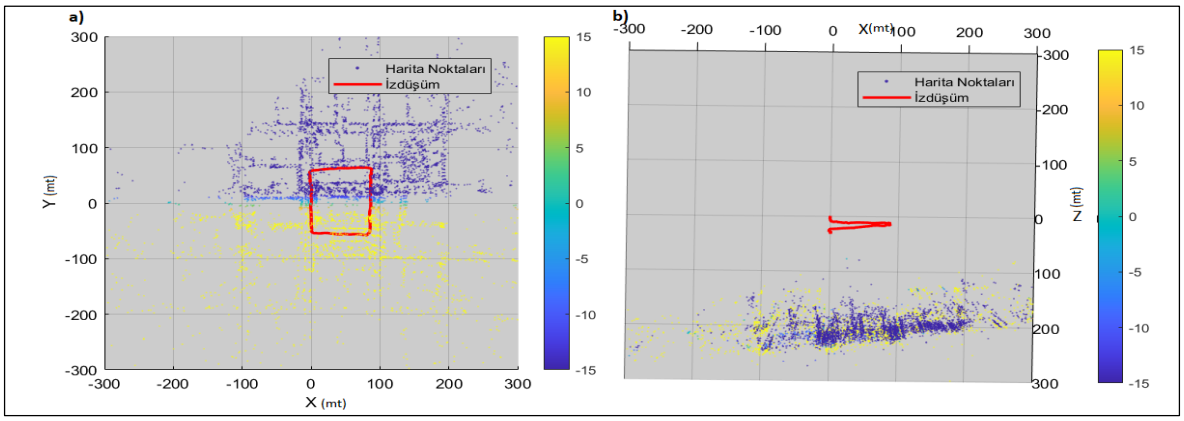
5.1.34. 34. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.34. 34. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

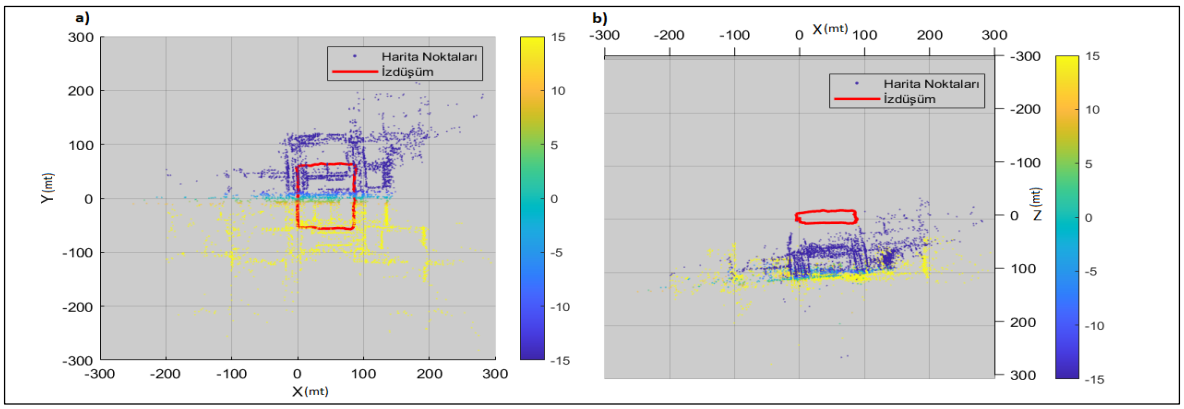
5.1.35. 35. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.35. 35. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,1 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

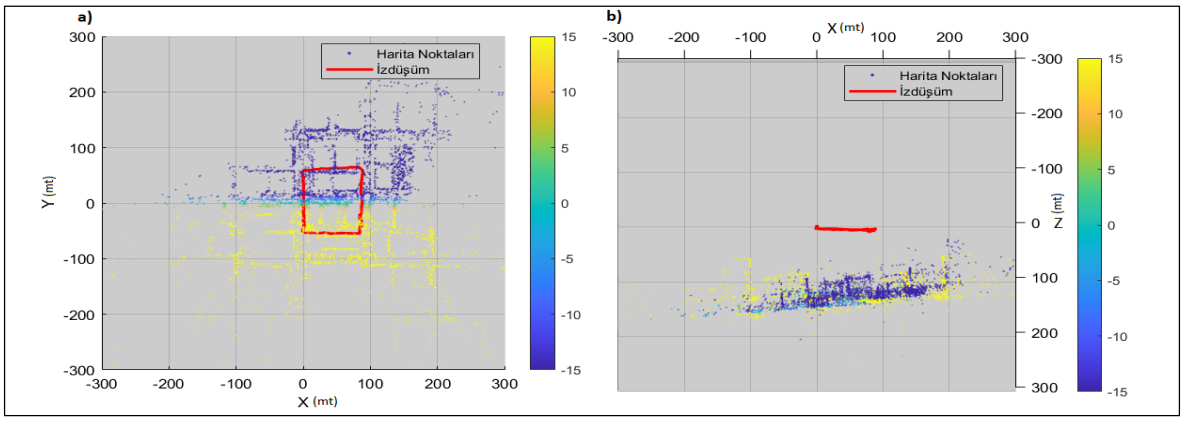
5.1.36. 36. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.36. 36. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 100 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 100 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

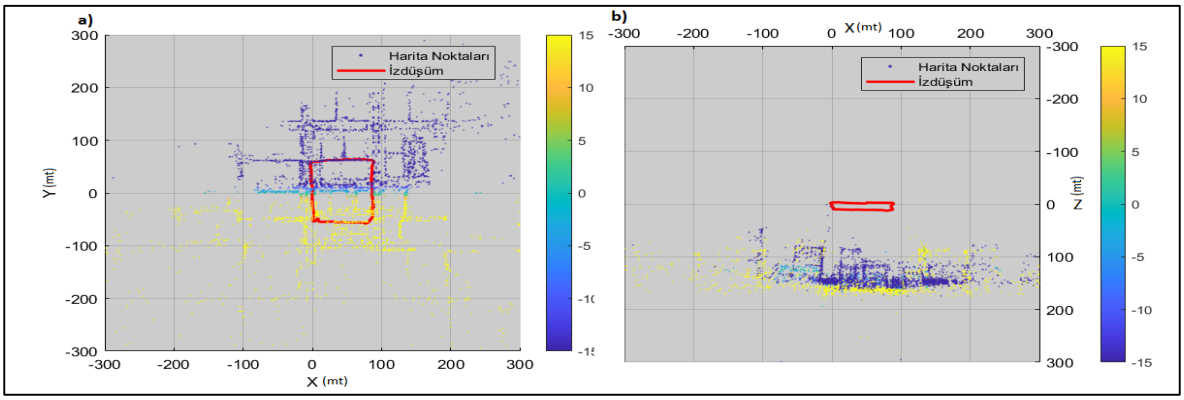
5.1.37. 37. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.37. 37. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 125 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 125 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

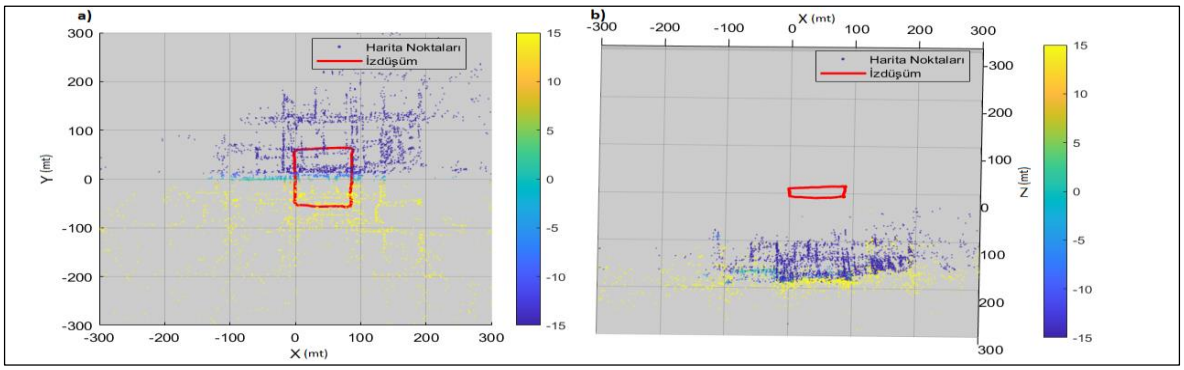
5.1.38. 38. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.38. 38. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 150 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 150 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

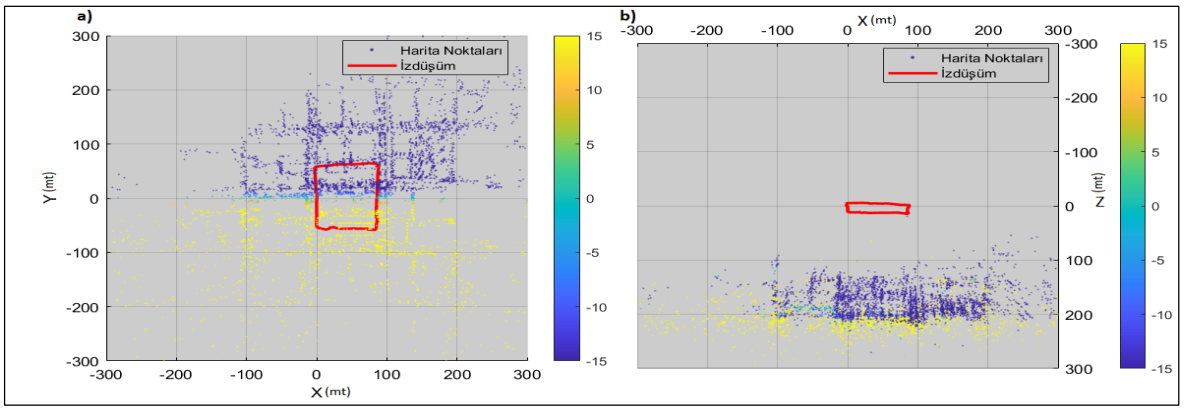
5.1.39 39. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.39. 39. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 175 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 175 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

5.1.40 40. Veri seti haritalama sonucu



Şekil 5.40. 40. Veri Seti Benzetim Testi Haritalama Görseli a) X-Y Koordinat Ekseni, b) X-Z Koordinat Ekseni

0,2 Mach hız ve 200 metre irtifa ile oluşturulmuş veri setinin benzetim testinin koşturulması sonucu elde edilmiş olan haritalama ve konumlandırma görselleri incelendiğinde haritalamanın ve döngü tamamlamanın başarıyla gerçekleştirildiği, 200 metre irtifa değerinin korunarak benzetim testinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

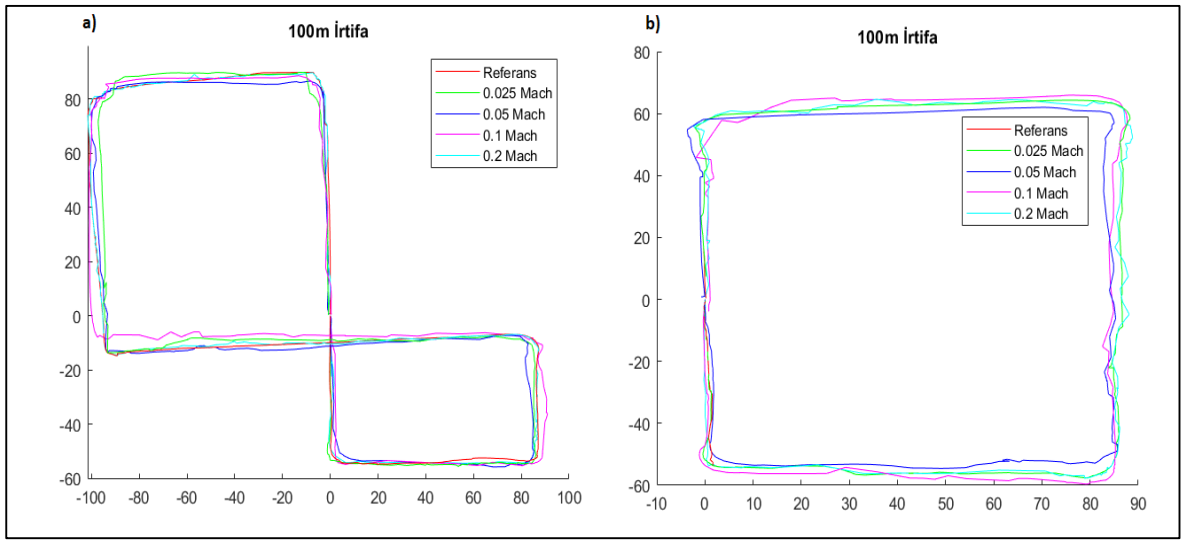
5.2. İzdüşüm Sonuçları

Elde edilen test sonuçları incelendiğinde, Z koordinat ekseni üzerinde yer almakta olan irtifa değerleri gerçekleştirilen benzetim test veri setindeki irtifa değeri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu nedenle rota takip oranları X-Y koordinat ekseni gerçekleştirilmiştir. X-Y koordinat eksenindeki haritalama verileri hıza ve irtifaya göre orijinal rota kıyaslamaları gerçekleştirilerek görselleştirilmiştir. Z koordinat ekseni kıyaslamaya eklenmediğinden, bu kıyaslamalarda elde edilen izdüşüm verileri ile uygun referans rota değerleri 2D olarak kullanılmıştır. X-Y koordinat eksenindeki izdüşüm noktaları kullanılarak bir çokgen elde edilmiş olup bu çokgenlerin kapsamakta oldukları alanlar referans rota izdüşüm noktaları ile elde edilen çokgenlerin (1.Rota ve 2.Rota için) kapsamakta olduklar alanlar ile benzerlik oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamada MATLAB polyshape [44] metodu kullanılarak hesaplanmış alanlar arasındaki kesişim kümeleri arasındaki fark değerleri her bir veri seti için tek tek hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucu elde edilen veriler EK-1'de görsel olarak verilmiştir. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.3'de yer almakta olan rota takip sonuçları bu yöntem ile hesaplanmış olan bu değerlerdir.

Ayrıca elde edilen izdüşüm sonuçları, MATLAB ortamında RMSE yöntemi ile de hesaplanmıştır. Elde edilmiş izdüşüm verilerinin sayısı algoritma hesaplamalarından ötürü orijinal rotadan farklılar göstermiştir. 2D izdüşüm verilerinin referans rota ile eşit sayıda olması için öncelikle interpolasyon gerçekleştirilmiştir. İnterpolasyonun ardından 2D iz düşüm verileri RMSE yöntemi ile Denklem 4.2'de yer alan formül kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buradaki referans matris benzetim testlerindeki kullanılmış olan referans rotasının izdüşümünü, hesaplanan matris benzetim testi sonucu ORB-SLAM 2.0 algoritmasının hesaplamış olduğu rotanın izdüşümünü göstermektedir. Bu yöntemle elde edilenhesaplama sonuçları Çizelge 5.1'de metre olarak verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{mean((referans\ matris - hesaplanan\ matris)^2)}{n}} \tag{4.2}$$

5.2.1. 100 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

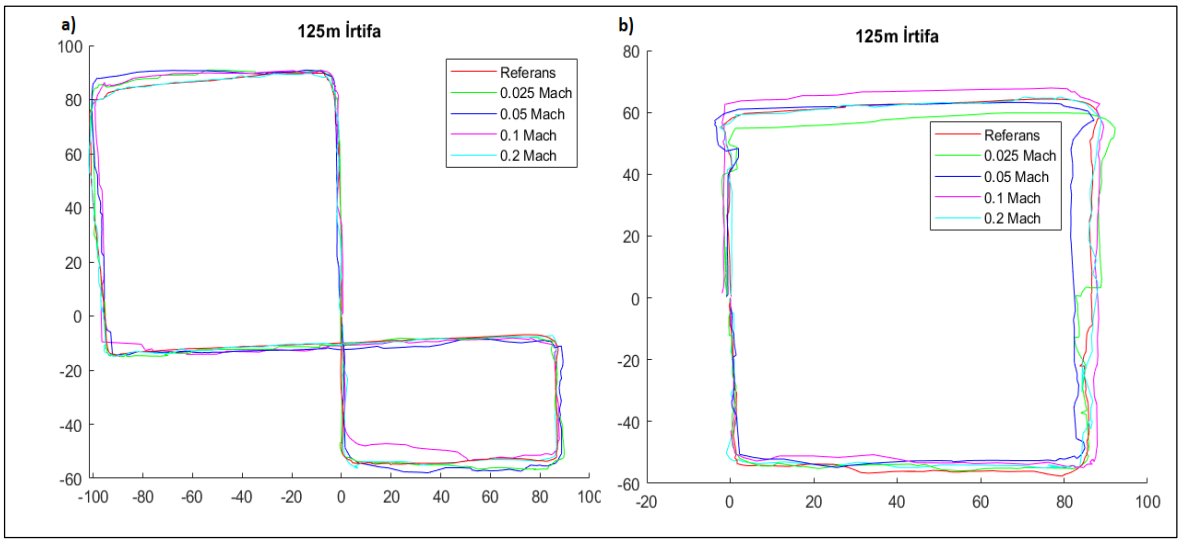


Şekil 5.41. 100 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.41 a'da 1. Rota'ya ait 100 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,33, 0,05 Mach'ta %95,02, 0,1 Mach'ta %97,79 ve 0,2 Mach'ta % 98,5 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.41 b'de 2. Rota'ya ait 100 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %99,71, 0,05 Mach'ta %97,92, 0,1 Mach'ta %98,21 ve 0,2 Mach'ta % 98,95 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.2. 125 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

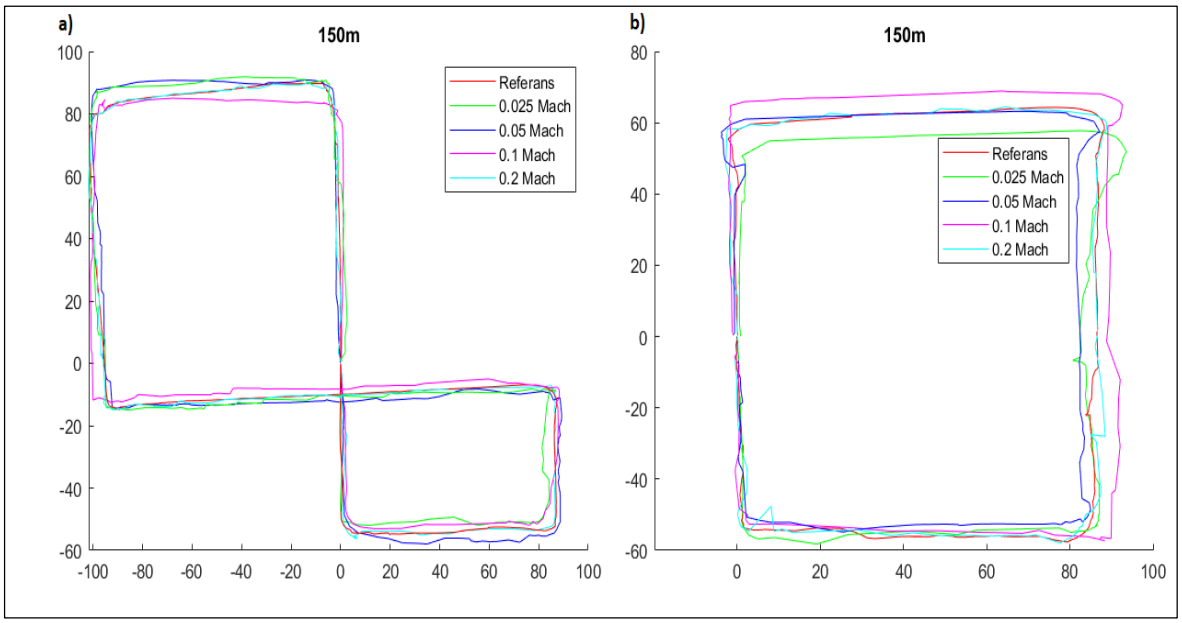


Şekil 5.42. 125 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.42 a'da 1. Rota'ya ait 125 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,89, 0,05 Mach'ta %96,87, 0,1 Mach'ta %97,7 ve 0,2 Mach'ta % 98,7 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.42 b'de 2. Rota'ya ait 125 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,32, 0,05 Mach'ta %98,25, 0,1 Mach'ta %97,76 ve 0,2 Mach'ta % 98,38 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.3. 150 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

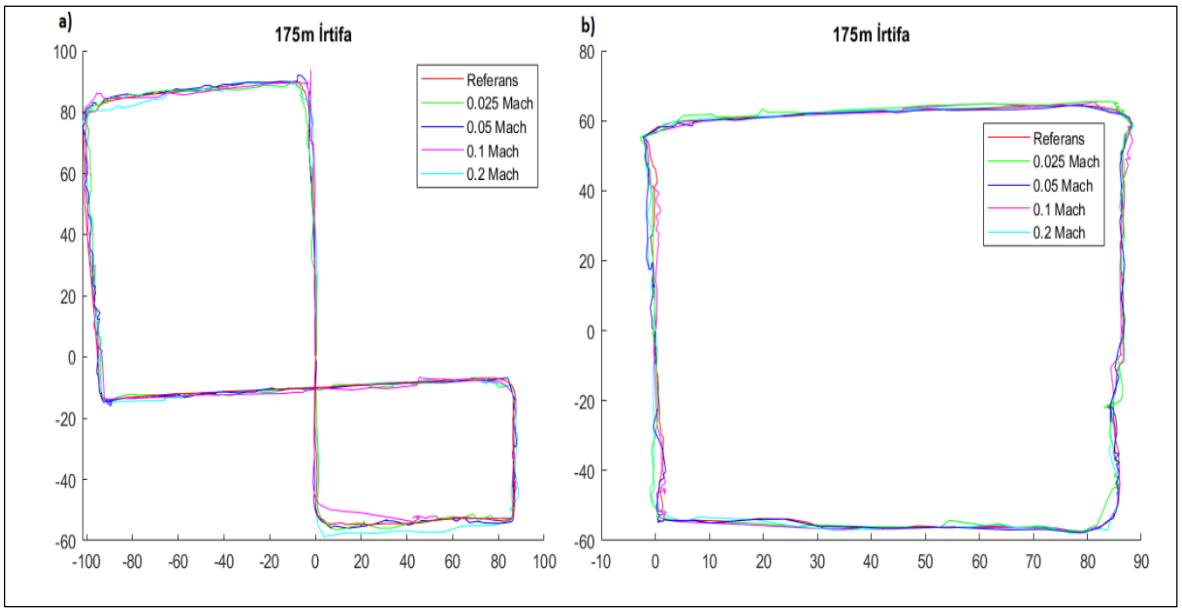


Şekil 5.43. 150 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.43 a'da 1. Rota'ya ait 150 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,67, 0,05 Mach'ta %95,93, 0,1 Mach'ta %97,51 ve 0,2 Mach'ta %98,03 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.43 b'de 2. Rota'ya ait 150 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %95,8, 0,05 Mach'ta %97,39, 0,1 Mach'ta %98,1 ve 0,2 Mach'ta %98,73 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.4. 175 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

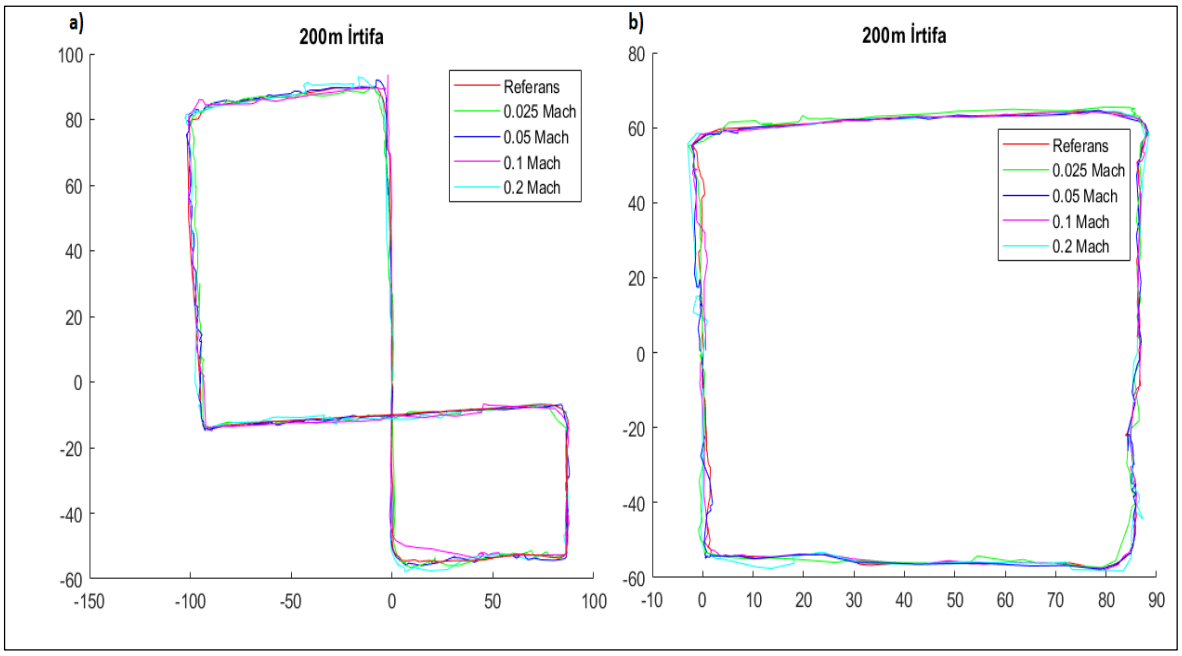


Şekil 5.44. 175 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.44 a'da 1. Rota'ya ait 175 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,03, 0,05 Mach'ta %98,14, 0,1 Mach'ta %97,14 ve 0,2 Mach'ta %98,3 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.44 b'de 2. Rota'ya ait 175 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,7, 0,05 Mach'ta %99,01, 0,1Mach'ta %98,67 ve 0,2Mach'ta %99,08 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.5. 200 mt irtifa ve farklı hızlarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

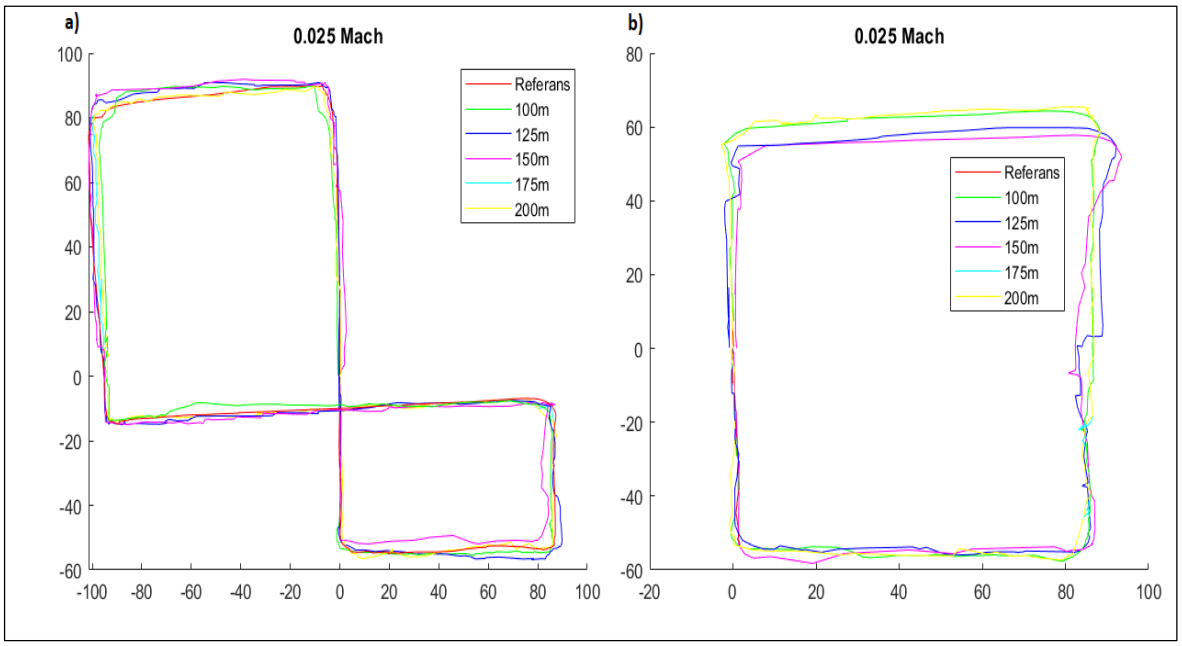


Şekil 5.45. 200 mt İrtifada İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.45 a'da 1. Rota'ya ait 200 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %97,43, 0,05 Mach'ta %97,3, 0,1 Mach'ta %96,96 ve 0,2 Mach'ta %97,83 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.45 b'de 2. Rota'ya ait 200 mt'de gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 0,025 Mach, 0,05 Mach, 0,1 Mach ve 0,2 Mach izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 0,025 Mach'ta %98,61, 0,05 Mach'ta %98,79, 0,1 Mach'ta %98,93 ve 0,2 Mach'ta %99 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.6. 0,025 mach hız ve farklı irtifalarda 1.rota ve 2.rota için izdüşüm sonuçları

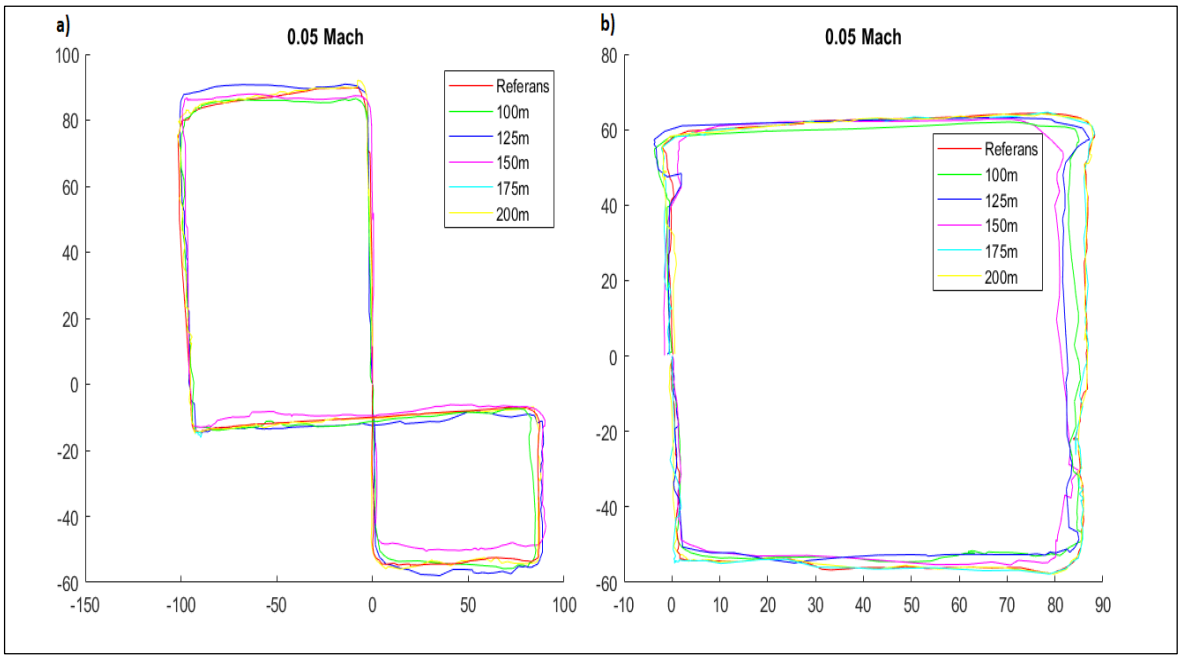


Şekil 5.46. 0,025 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.46 a'da 1. Rota'ya ait 0,025 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %98,33, 125 mt'de %98,89, 150 mt'de %98,67, 175 mt'de % 98,03 ve 200 mt'de % 97,43 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.46 b'de 2. Rota'ya ait 0,025 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %99,71, 125 mt'de %98,32, 150 mt'de %95,8, 175 mt'de % 98,7 ve 200 mt'de % 98,61 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.7. 0,05 mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

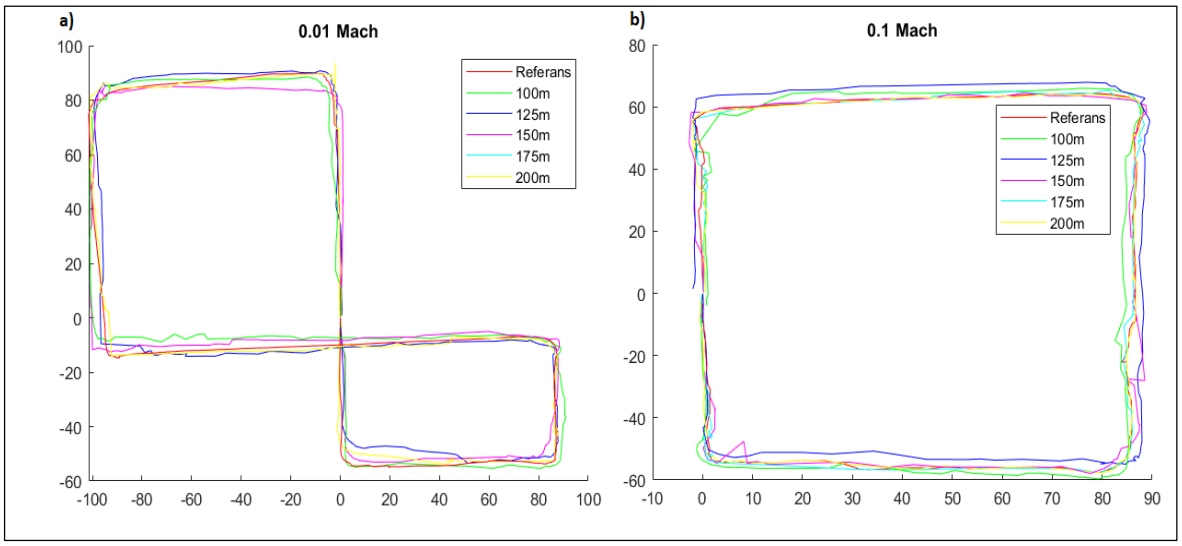


Şekil 5.47. 0,05 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.47 a'da 1. Rota'ya ait 0,05 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %95,02 125 mt'de %96,87, 150 mt'de %95,93, 175 mt'de % 98,14 ve 200 mt'de %97,3 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.47 b'de 2. Rota'ya ait 0,05 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %97,92, 125 mt'de %98,25, 150 mt'de %97,39, 175 mt'de %99,01 ve 200 mt'de %98,79 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.8. 0,1 mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota için izdüşüm sonuçları

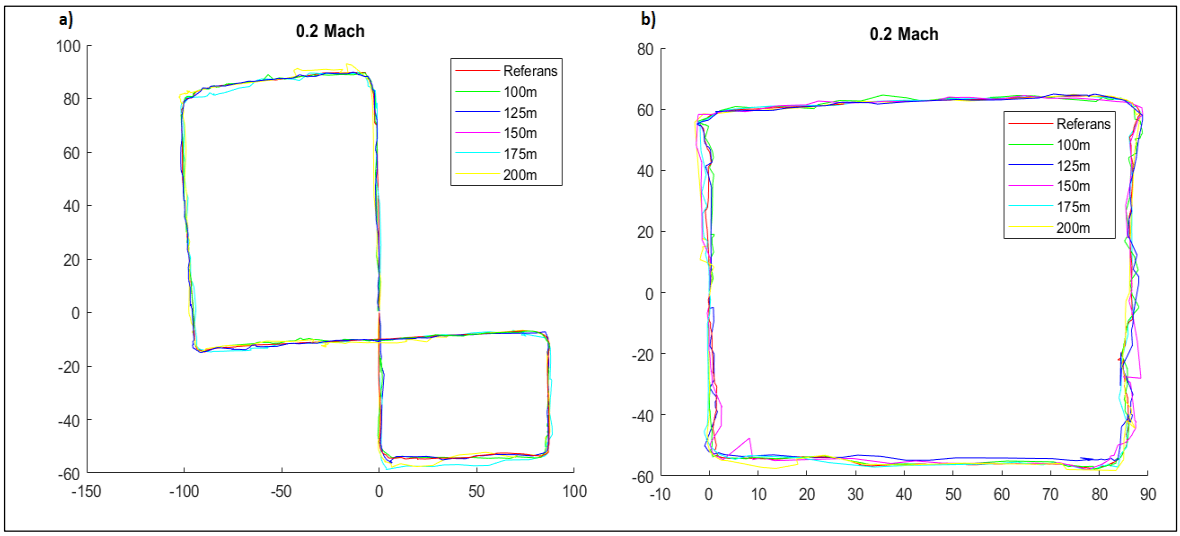


Şekil 5.48. 0,1 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.48 a'da 1. Rota'ya ait 0,1 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %97,79, 125 mt'de %97,7, 150 mt'de %97,51, 175 mt'de %97,14 ve 200 mt'de %96,96 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.48 b'de 2. Rota'ya ait 0,1 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %98,21, 125 mt'de %97,76, 150 mt'de %98,1, 175 mt'de %98,67 ve 200 mt'de %98,93 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.2.9. 0,2 mach hız ve farklı irtifalarda 1. rota ve 2. rota izdüşüm sonuçları



Şekil 5.49. 0,2 Mach Hızda Farklı İrtifalar için İzdüşüm Kıyaslamaları a) 1.Rota için, b) 2.Rota için

Şekil 5.49 a'da 1. Rota'ya ait 0,2 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.8'de yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkca gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %98,5, 125 mt'de %98,7, 150 mt'de %98,03, 175 mt'de %98,3 ve 200 mt'de %97,83 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

Şekil 5.49 b'de 2. Rota'ya ait 0,2 Mach gerçekleştirilen benzetim testleri sonucunda Şekil 4.9'da yer alan referans rota ile 100 mt, 125 mt, 150 mt, 175 mt ve 200 mt izdüşüm verileri incelendiğinde dönemeç noktalarında rota takibinde farklılaşmalar olsa da rotanın %90'ın üzerinde bir başarıyla doğru bir şekilde takip edildiği açıkça gözlemlenmektedir. Hesaplamalar sonucu 100 mt'de %98,95, 125 mt'de %98,38, 150 mt'de %98,73 175 mt'de %99,08 ve 200 mt'de %99 başarı ile rota takip oranlarına ulaşılmıştır.

5.3. Benzer Literatür Çalışmaları ile Karşılaştırma

Andersson ve Baerveldt 2018 yılında KITTI'nin veri setleri kullanarak otonom mobil araç ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında ORB-SLAM2.0 algoritması kullanmışlardır [45]. ORB-SLAM2.0 algoritmasını Yaklaşık 5 mt/s - 25 mt/s hız aralığında gerçekleştirilmiş olan

testlerde algoritmanın çalışma performansını ortaya koymuşlardır. Testler sonucu elde edilen rota takip ortanına ilişkin yaklaşık test sonuçları Çizelge 5.2.'deki gibidir.

Çizelge 5.2. KITTI Veri Seti Rota Takip Sonuçları

KITTI Veri Seti	Hız (mt/s)	Rota Takip Oranı (%)
0	5	99,2
0	10	99,2
0	15	98,4
1	15	98,4
1	20	98
1	25	97

Nobis, Papanikolaou, Betz ve Lienkamp 2020 yılının sonlarında hazır veri seti olan KITTI'nin veri setleri ve bu çalışma için üretilmiş olan veri setleri kullanarak otonom mobil araç ile gerçekleştirdikleri çalışmalarında ORB-SLAM2.0 algoritmasını kullanmışlardır [46]. KITTI verileri ile koşulmakta olan testlerde CPU olarak Intel Xeon E3-1270 v5 kullanmışlardır. ORB-SLAM2.0 algoritması ile 6 mt/s - 42 mt/s hızlarda testler gerçekleştirilmiş algoritmanın çalışma performansını ortaya koymuşlardır. Yazarlar gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda ORB-SLAM2.0 algoritmasının daha yüksek hızlarda da çalıştırılabilir olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır [46]. Testler sonucu elde edilen rota takip oranına ilişkin test sonuçları Çizelge 5.3'deki gibidir.

Çizelge 5.3. KITTI Veri Seti Rota Takip Sonuçları

KITTI Veri Seti	Hız (mt/s)	Rota Takip Oranı(%)
1	21	99,7
1	37	95,18
1	42	93,88
7	6	99,96
7	12	99,92
7	18	99,77
7	24	99,56
9	10	99,97
9	20	99,64
9	25	99,57
9	36	99,34

Yüksek hızlarda uçmakta olan insansız sistemler için ORB-SLAM2.0 algoritmasının uygulanabilirlik analizi için gerçekleştirilen bu çalışmada 8,5 mt/s (30,6 km/h) ile 68 mt/s (244,6 km/h) hız aralığında, 100 mt – 200 mt aralığındaki farklı irtifalarda rota takip sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'teki gibidir.

Çizelge 5.4. Çalışma Sonucu 2.Rota için Elde Edilmiş Rota Takip Sonuçları

1.Rota	8,5 mt/s (30,6 km/h)	17 mt/s(61,2 km/h)	34 mt/s(122,4 km/h)	68 mt/s(244,8 km/h)
100 m	%98,33	%95,02	%97,79	%98,5
125 m	%98,89	%96,87	%97,7	%98,7
150 m	%98,67	%95,93	%97,51	%98,03
175 m	%98,03	%98,14	%97,14	%98,3
200 m	%97,43	%97,3	%96,96	%97,83

Çizelge 5.5. Çalışma Sonucu 2.Rota için Elde Edilmiş Rota Takip Sonuçları

2.Rota	8,5 mt/s (30,6 km/h)	17 mt/s(61,2 km/h)	34 mt/s(122,4 km/h)	68 mt/s(244,8 km/h)
100 m	%99,71	%97,92	%97,86	%98,95
125 m	%98,32	%98,25	%97,76	%98,38
150 m	%97,7	%97,39	%98,1	%98,73
175 m	%99,17	%99,01	%98,67	%99,08
200 m	%99,1	%98,79	%98,93	%99

Bu çalışmalar her ne kadar benzer irtifada ve benzer platformlarda gerçekleştirilmemiş olsa da benzer hızlar için dış mekan rota takip benzerlik verileri kıyaslanmıştır. Literatürde yer almakta olan çalışmaların ilkinde [45], mobil araç platformu ile dış mekan deneysel testleri için 5 mt/s ile 25 mt/s aralığındaki KITTI veri seti ile gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen rota takip oranlarına ilişkin veriler %99,2 ile % 97 aralığındadır. Mobil araç platformu ile dış mekan deneysel testlerini içeren ikinci çalışmada [46], 6 mt/s ile 42 mt/s aralığındaki KITTI veri seti ile gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen rota takip oranlarına ilişkin veriler %99,96 ile % 93,88 aralığındadır. İnsansız sistem ile gerçekleştirilmiş olan çalışma sonucu 8,5 mt/s ile 68 mt/s hız aralığında, 100 mt – 200 mt aralığındaki benzetim testleri sonucu elde edilen rota takip oranlarına ilişkin veriler %99,71 ile %95,02 aralığındadır. Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'teki detaylı olarak verilen sonuçlar incelendiğinde platformlar ve irtifa değerleri farklı olsa da ORB-SLAM2.0 algoritması ile elde edilen rota takip sonuçlarının birbileri ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar arasında oluşan farklılıkların yer platformunda gitmekte olan mobil araç ile uçmakta olan insansız sistem farklılığı, gerçekleştirilen benzetim ortam farklılığı, farklı yükseklik profillerinde ve takip edilen rotaların farklı olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İnsansız sistemler gerçekleştirmekte oldukları otonom görevler esnasında çevreyi ve bulunduğu konumu bilme ihtiyacı duymaktadırlar. Bu kapsamda insansız sistemlerin üzerlerine yerleştirilmiş sensörler ve kablosuz sinyaller aracılığı ile bu ihtiyacı karşılayabilen çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Ancak, bu çözüm yöntemleri çevresel etkilere maruz kalması durumunda yanlış sonuçlar üretebilmektedir. Bu gibi durumlar karşısında alternatif çözüm yöntemleri üretebilmek için literatür çalışmaları incelendiğinde, eş zamanlı konumlandırma ve haritalama tekniğinin yaygınlıkla kullanılan bir yöntem olduğu görülmüştür. Ancak, bu yöntemin genellikle savunma alanında kullanılmakta olan yüksek hız ve irtifada görev yapan insansız sistemler üzerinde kullanımına dair literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Yüksek hız ve irtifada uçan insansız sistemler için yukarıda bahsedilen probleme çözüm olarak eş zamanlı konumlandırma ve haritalama tekniği uygulanmaktadır. Eş zamanlı konumlandırma ve haritalama teknikleri literatürde ilk olarak filtre tabanlı teknikler ile bu problemin çözümüne katkıda bulunmuştur. Devam eden çalışmalar sonucunda gelişimsel bir süreç takip ederek filtre tabanlı yöntemlere göre hem maliyet hem çözünürlük değeri yüksek sonuçlar üretmesi gibi avantajlı çözümler üretebilen görsel tabanlı eş zamanlı konumlandırma ve haritalama teknikleri ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, görsel tabanlı eş zamanlı konumlandırma ve haritalama tekniğinin benzetim ortamında uygulanabilirlik analizi incelenmiştir. Literatürde kullanılmakta olan 8 adet kamera tabanlı eş zamanlı konumlandırma ve haritalama teknikleri bu kapsamda literatür çalışmaları üzerinden incelenerek karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı çalışmakta olan gömülü sistemlerde kullanımı, ilkleme, haritalama, konumlandırma, optimizasyon, döngü tamamlama ve mono stereo gibi farklı kameralar ile kullanım imkanı sunması sebebiyle ORB-SLAM2.0 algoritması 8 yöntem arasında öne çıkmaktadır. Bu kapsamda ORB-SLAM2.0 algoritması Unreal Engine R4.25 ile oluşturulmuş benzetim senaryosu ile MATLAB R2021b sürümü ve Simulink benzetim ortamında UAVToolbox eklentileri kullanılarak bu çalışma için oluşturulmuş olan veri setleriyle koşturulmuştur.

Benzetim testleri için oluşturulmuş olan veri setlerinde bilgisayar performans limitlemeleri ve oluşturulmuş olan benzetim senaryosundaki bina modellemelerinin 80 mt boyutlarına

kadar ulaşmasından ötürü irtifa olarak 25’er metre artış oranlarıyla 100 mt ile 200 mt aralığında, hız olarak ise sürekli iki kat artırılarak 0,025 Mach ile 0,2 Mach aralığında veri setleri oluşturulmuştur. Bu testler sonucunda hız ve irtifa arttıkça dönemeç noktalarında küçük sapmaların oluştuğu gözlemlense de tüm benzetim senaryolarında rota takip oranının %95’in üzerinde bir takip oranıyla orijinal rotayı takip ettiği saptanmıştır. Benzetim testlerinde test başarım kriterleri olan haritalamanın oluşturulması, döngü tamamlamanın gözlemlenmesi, rota ve irtifa takibinin başarıyla gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca literatürde daha önce gerçekleştirilmiş çalışma sonuçları ile kıyaslamalar gerçekleştirildiğinde sonuçların tutarlı olduğu ve çalışma sonuçlarında belirtildiği üzere ORB-SLAM2.0’ın daha yüksek hızlarda da çalıştırılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ORB-SLAM2.0 algoritmasının yüksek hız ve irtifalarda başarıyla çalıştığı belirlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda ORB-SLAM2.0 algoritmasının gerçek zamanlı gömülü sistemler üzerinde koşturulması ve diğer vSLAM algoritmaları ile farklı çalışmalar gerçekleştirilebilir. Ayrıca performans açısından daha güçlü bilgisayar kullanımının işlem kapasitesini artıracağı ve veri seti oluşturulurken karşılaşılan sınırlamaların aşılmasında yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.

2. Cracknell, A. P. (2017). UAVs: regulations and law enforcement. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 3054-3067.

3. Rieke, M., Foerster, T., Geipel, J., Prinz, T. (2011). High-precision positioning and real-time data processing of UAV systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1/C22), 119-124.

4. Huang, B., Liu, J., Sun, W., Yang, F. (2019). A robust indoor positioning method based on Bluetooth Low Energy with separate channel information. *Sensors*, 19(16), 3487.

5. Liu, J., Chen, R., Chen, Y., Pei, L., Chen, L. (2012). iParking: An intelligent indoor location-based smartphone parking service. *Sensors*, 12(11), 14612-14629.

6. Aulinas, J., Petillot, Y., Salvi, J., Lladó, X. (2008). The SLAM problem: a survey. *Artificial Intelligence Research and Development*, 363-371.

7. Liu, J., Chen, R., Pei, L., Guinness, R., Kuusniemi, H. (2012). A hybrid smartphone indoor positioning solution for mobile LBS. *Sensors*, 12(12), 17208-17233.

8. Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Leonard, J. J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309-1332.

9. Bailey, T., Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), 108-117.

10. Durrant-Whyte, H., Bailey, T. (2006), "Simultaneouslocalizationandmapping: Part I,". *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), 99-110.

11. Leonard, J. J., Durrant-Whyte, H. F. (1991, November). *Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot.* International Conference on Intelligent Robot and Systems, Osaka, Japan, 1442-1447.

12. Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Leonard, J. J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309-1332.

13. Särkkä, S., Vehtari, A., Lampinen, J. (2007). Rao-Blackwellized particle filter for multiple target tracking. *Information Fusion*, 8(1), 2-15.

14. Santos, J. M., Portugal, D., Rocha, R. P. (2013, October). *An evaluation of 2D SLAM techniques available in robot operating system.* IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), Linköping, Sweden, 1-6.

15. Montemerlo, M. S. (2003). *FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem with unknown data association*, Master's Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 119-121.

16. Lu, F., Milios, E. (1997). Globally consistent range scan alignment for environment mapping. *Autonomous Robots*, 4, 333-349.

17. Thrun, S., Montemerlo, M. (2006). The graph SLAM algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6), 403-429.

18. Davison, A. J., Cid, Y. G., Kita, N. (2004). Real-time 3D SLAM with wide-angle vision. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(8), 868-873.

19. Lemaire, T., Berger, C., Jung, I. K., Lacroix, S. (2007). Vision-based slam: Stereo and monocular approaches. *International Journal of Computer Vision*, 74(3), 343-364.

20. Şimşek, B. (2022). *İnsansız hava araçlari için monoküler kamera kullanılarak iç mekânda konumlama ve haritalama*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 34-51.

21. Zhang, F., Li, S., Yuan, S., Sun, E., Zhao, L. (2017, July). *Algorithms analysis of mobile robot SLAM based on Kalman and particle filter*. 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), Kunming, China, 1050-1055.

22. Wu, P., Shi, Z., Yan, P. (2018, July). *Improved EKF-SLAM algorithm of unmanned helicopter autonomous landing on ship*. 37th Chinese Control Conference (CCC), Wuhan, China, 5287-5292.

23. Jurevičius, R., Marcinkevičius, V., Šeibokas, J. (2019). Robust GNSS-denied localization for UAV using particle filter and visual odometry. *Machine Vision and Applications*, 30(7), 1181-1190.

24. Song, Y., Zhang, Z., Wu, J., Wang, Y., Zhao, L., Huang, S. (2021). A right invariant extended kalman filter for object based slam. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 1316-1323.

25. Annaiyan, A., Olivares-Mendez, M. A., Voos, H. (2017, June). *Real-time graph-based SLAM in unknown environments using a small UAV*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL USA, 1118-1123.

26. Munguía, R., Urzua, S., Bolea, Y., Grau, A. (2016). Vision-based SLAM system for unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 16(3), 372.

27. Kaniewski, P., Słowak, P. (2018). Simulation and Analysis of Particle Filter Based SLAM System. *Annual of Navigation*, (25), 137-153.

28. Taketomi, T., Uchiyama, H., Ikeda, S. (2017). Visual SLAM algorithms: A survey from 2010 to 2016. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 9(1), 1-11.

29. Özyeşil, O., Voroninski, V., Basri, R., Singer, A. (2017). A survey of structure from motion. *Acta Numerica*, 26, 305-364.

30. Macario Barros, A., Michel, M., Moline, Y., Corre, G., Carrel, F. (2022). A comprehensive survey of visual slam algorithms. *Robotics*, 11(1), 24.

31. Davison, A. J., Reid, I. D., Molton, N. D., Stasse, O. (2007). MonoSLAM: Real-time single camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(6), 1052-1067.

32. Newcombe, R. A., Lovegrove, S. J., Davison, A. J. (2011, November). *DTAM: Dense tracking and mapping in real-time.* International Conference on Computer Vision , Barcelona, Spain, 2320-2327.

33. Engel, J., Schöps, T., Cremers, D. (2014). *LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM.* 13th European Conference, Zurich, Switzerland, 834-849.

34. Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M., Tardos, J. D. (2015). ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5), 1147-1163.

35. Abouzahir, M., Elouardi, A., Latif, R., Bouaziz, S., Tajer, A. (2018). Embedding SLAM algorithms: Has it come of age?. *Robotics and Autonomous Systems*, 100, 14-26.

36. Tateno, K., Tombari, F., Laina, I., Navab, N. (2017, July). *Cnn-slam: Real-time dense monocular slam with learned depth prediction.* In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA, 6243-6252.

37. Engel, J., Koltun, V., Cremers, D. (2017). Direct sparse odometry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(3), 611-625.

38. Gao, X., Wang, R., Demmel, N., Cremers, D. (2018, October). *LDSO: Direct sparse odometry with loop closure.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2198-2204.

39. Canovas, B., Rombaut, M., Nègre, A., Pellerin, D., Olympieff, S. (2020, January). *Speed and memory efficient dense RGB-D SLAM in dynamic scenes.* International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, USA, 4996-5001.

40. Davison, A. J., Reid, I. D., Molton, N. D., Stasse, O. (2007). MonoSLAM: Real-time single camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(6), 1052-1067.

41. Boikos, K., Bouganis, C. S. (2016, August). *Semi-dense SLAM on an FPGA SoC.* 26th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL), Lausanne, Switzerland, 1-4.

42. Mur-Artal, R., Tardós, J. D. (2017). Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and rgb-d cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), 1255-1262.

43. İnternet : Mathworks. Simulation 3D Camera Erişim adresi: https://www.mathworks.com/help/uav/ref/simulation3dcamera.html Son Erişim Tarihi:22.11.2022

44. İnternet : Mathworks. Polyshape Erişim adresi : https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyshape.html Son Erişim Tarihi:22.11.2022

45. Andersson, M., Baerveldt, M. (2018). *Simultaneous localization and mapping for vehicles using ORB-SLAM2.* Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 27-38.

46. Nobis, F., Papanikolaou, O., Betz, J., Lienkamp, M. (2020, September). *Persistent map saving for visual localization for autonomous vehicles: An orb-slam 2 extension.* Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte-Carlo, Monaco, 1-9.

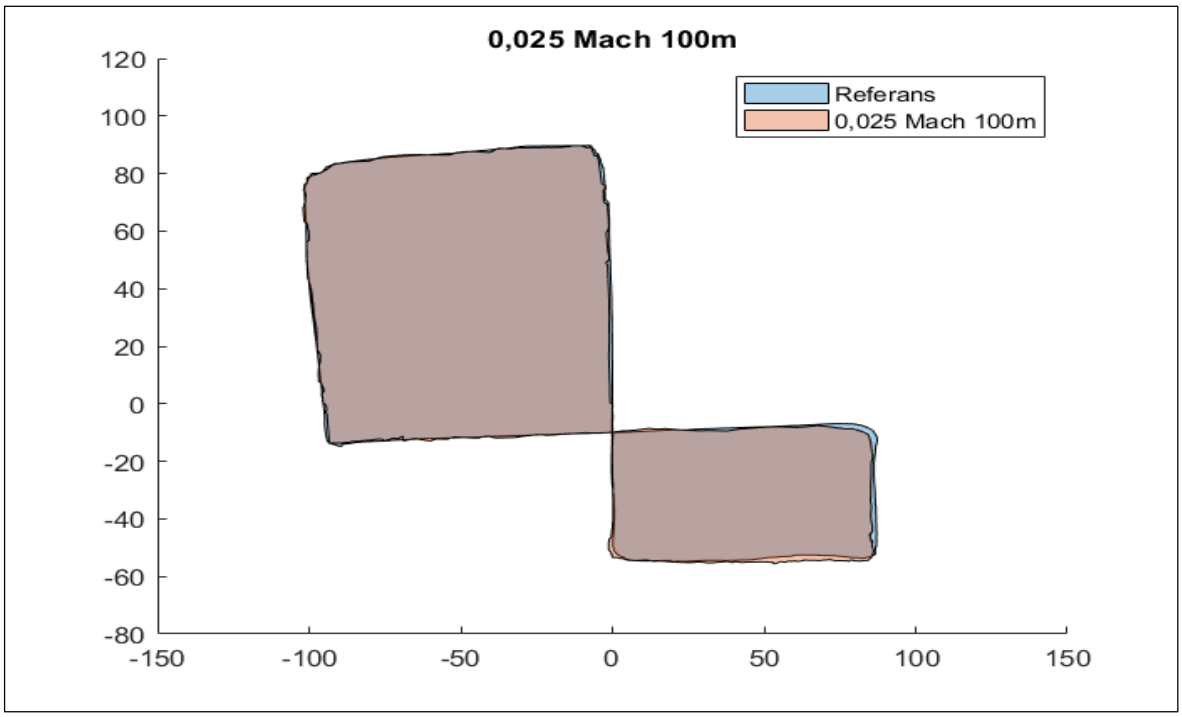
47. Şimşek, B., Bilge, H. Ş. (2021). A Novel Motion Blur Resistant vSLAM Framework for Micro/Nano-UAVs. *Drones*, 5(4), 121.

48. Altındaş, C. Ç., Bilge, H. Ş. İnsansız Sistemlerde Görsel Eş Zamanlı Haritalama ve Konumlandırma Tekniğinin Simulink Ortamında Uygulanabilirlik Analizi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* (Kabul: 30 Kasım 2022)

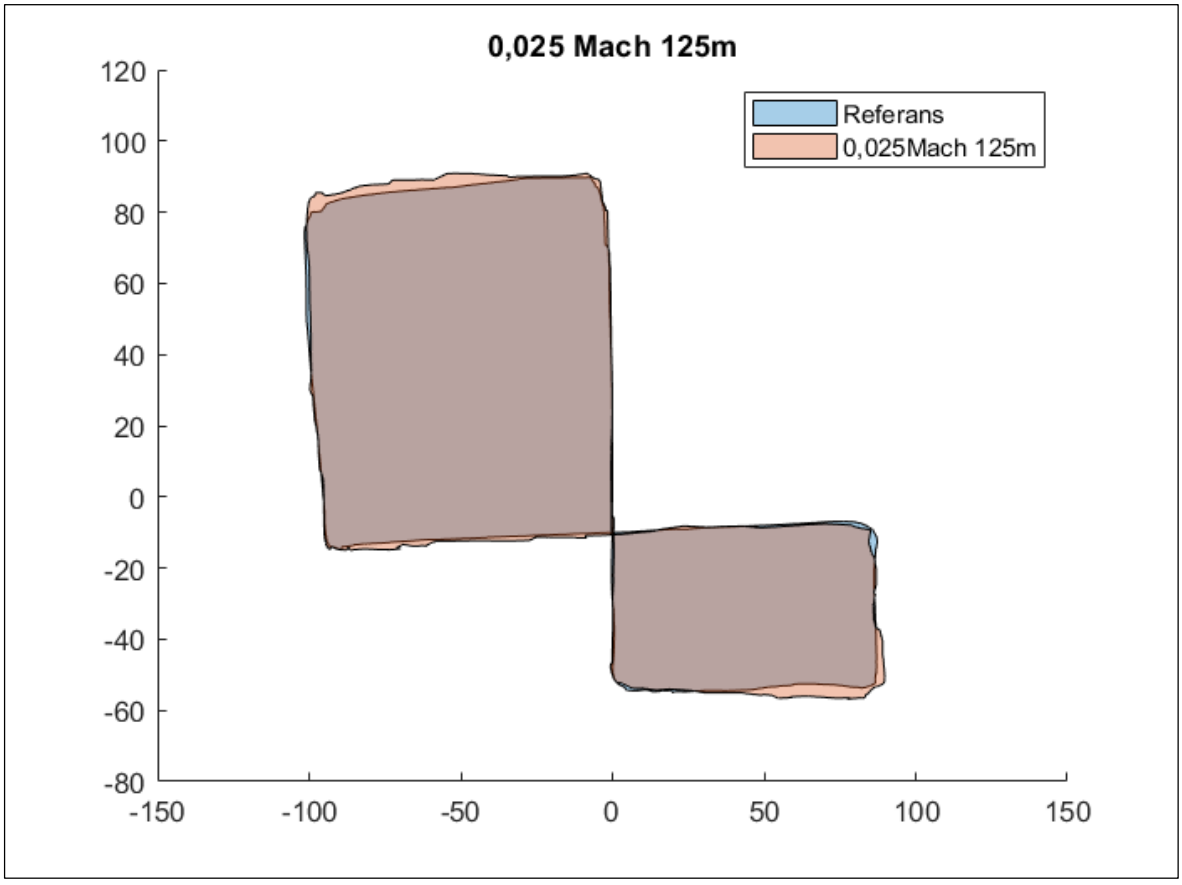
49. Altındaş, C. Ç., Bilge, H. Ş. (2022, 20-23 Aralık). *Orb-Slam2.0 Tekniğinin Matlab Simulink Ortamında Uavtoolbox Kütüphanesi Kullanılarak Uygulanabilirlik Analizi*. 1st International Conference on Engineering, Konya, 479-483.

EKLER

EK-1. Rota takip oranları hesaplama grafikleri

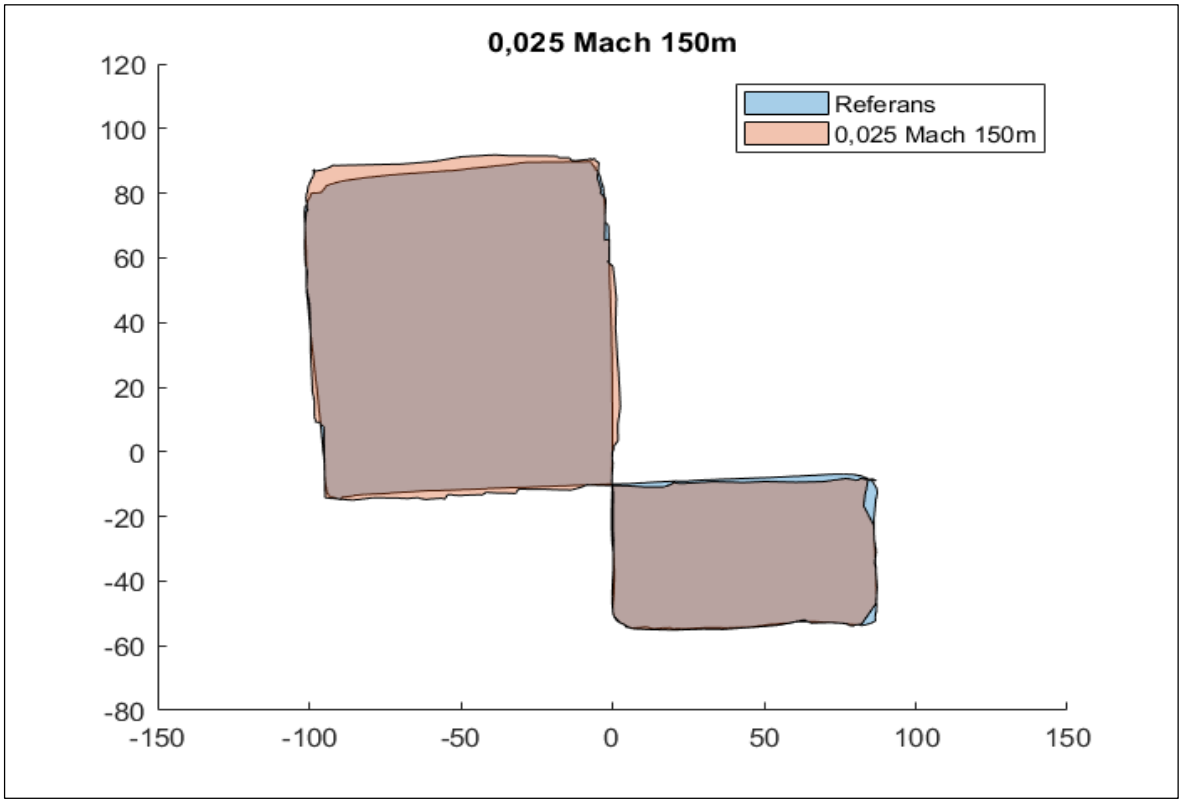


Şekil 1.1. 1.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

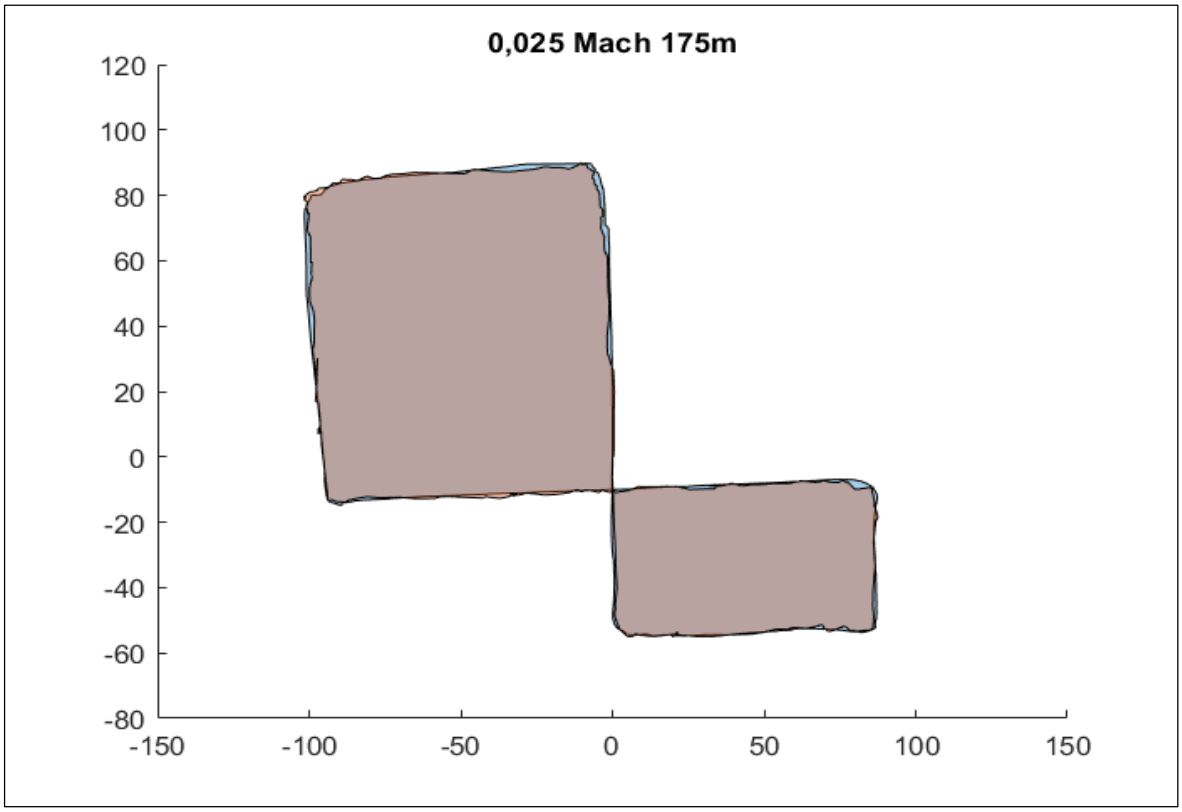


Şekil 1.2. 2.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

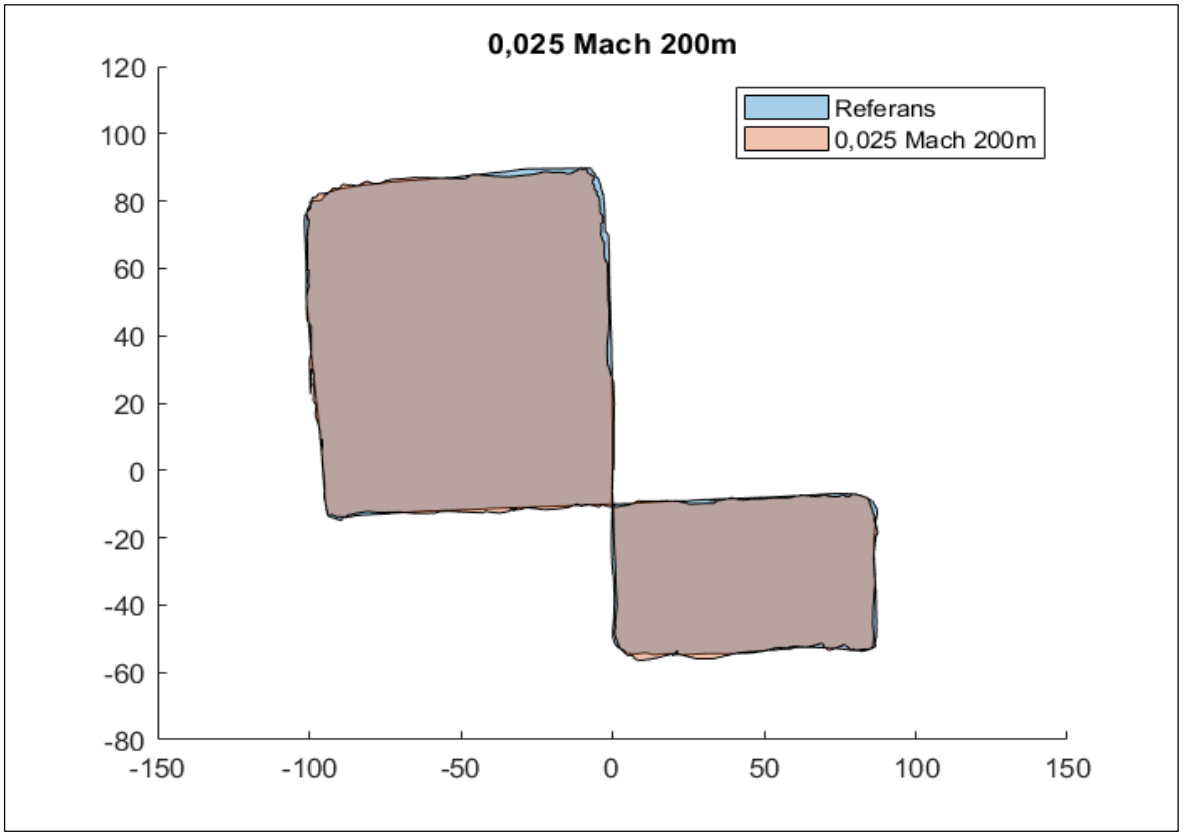


Şekil 1.3. 3.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

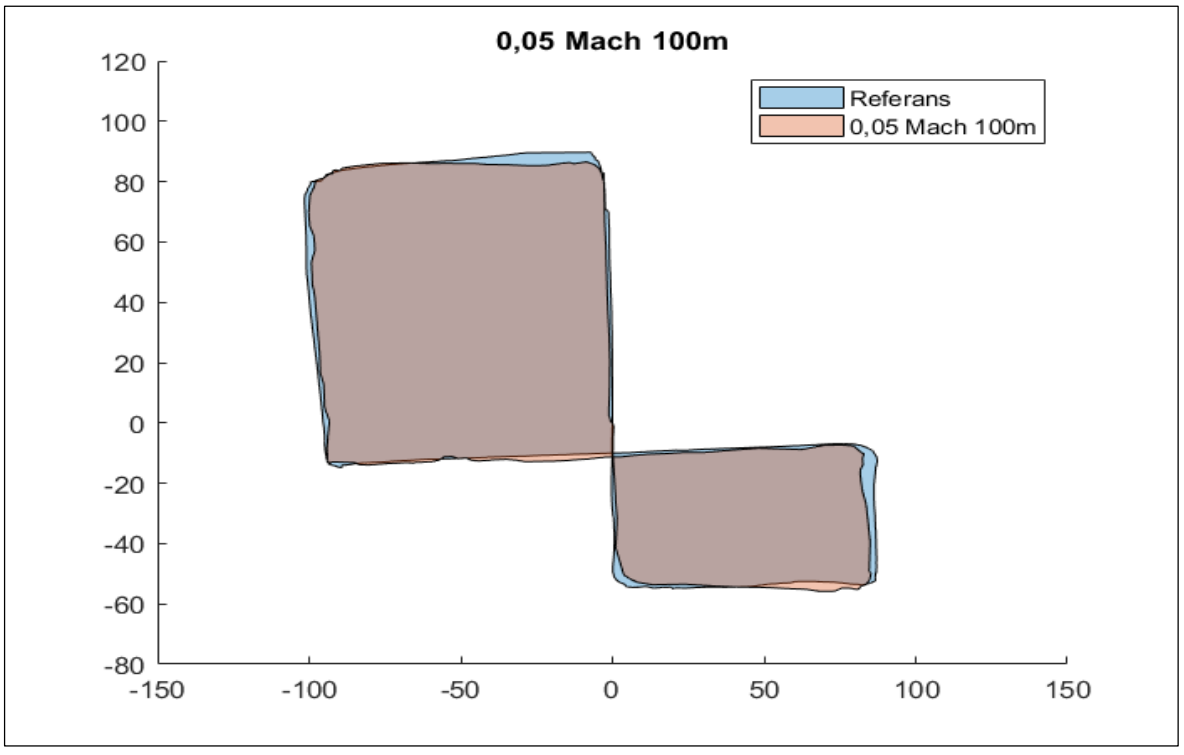


Şekil 1.4. 4.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

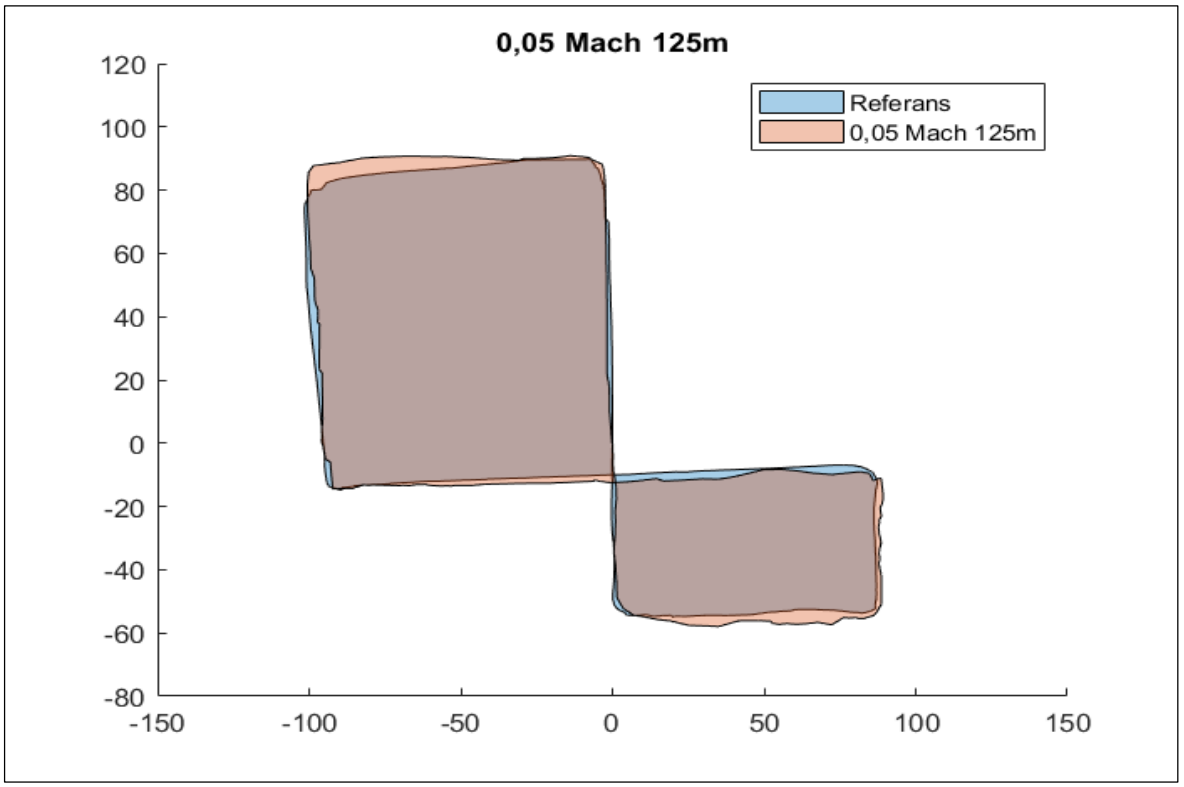


Şekil 1.5. 5.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

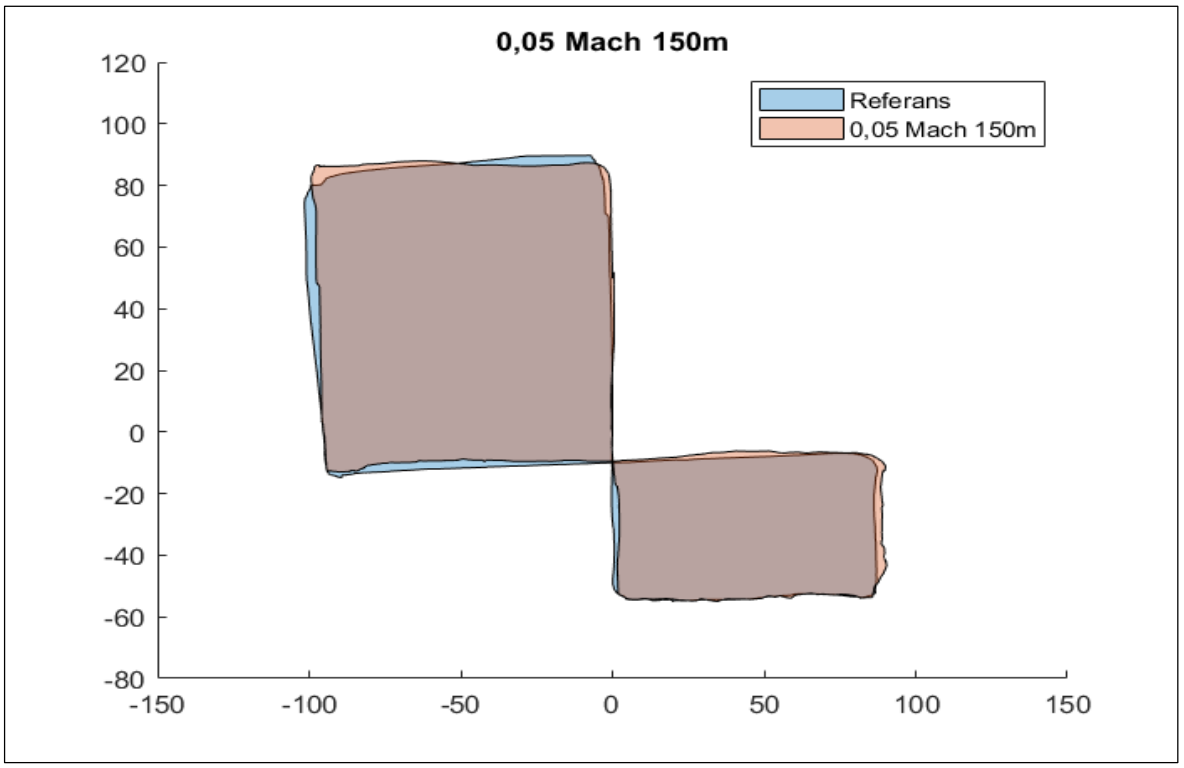


Şekil 1.6. 6.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

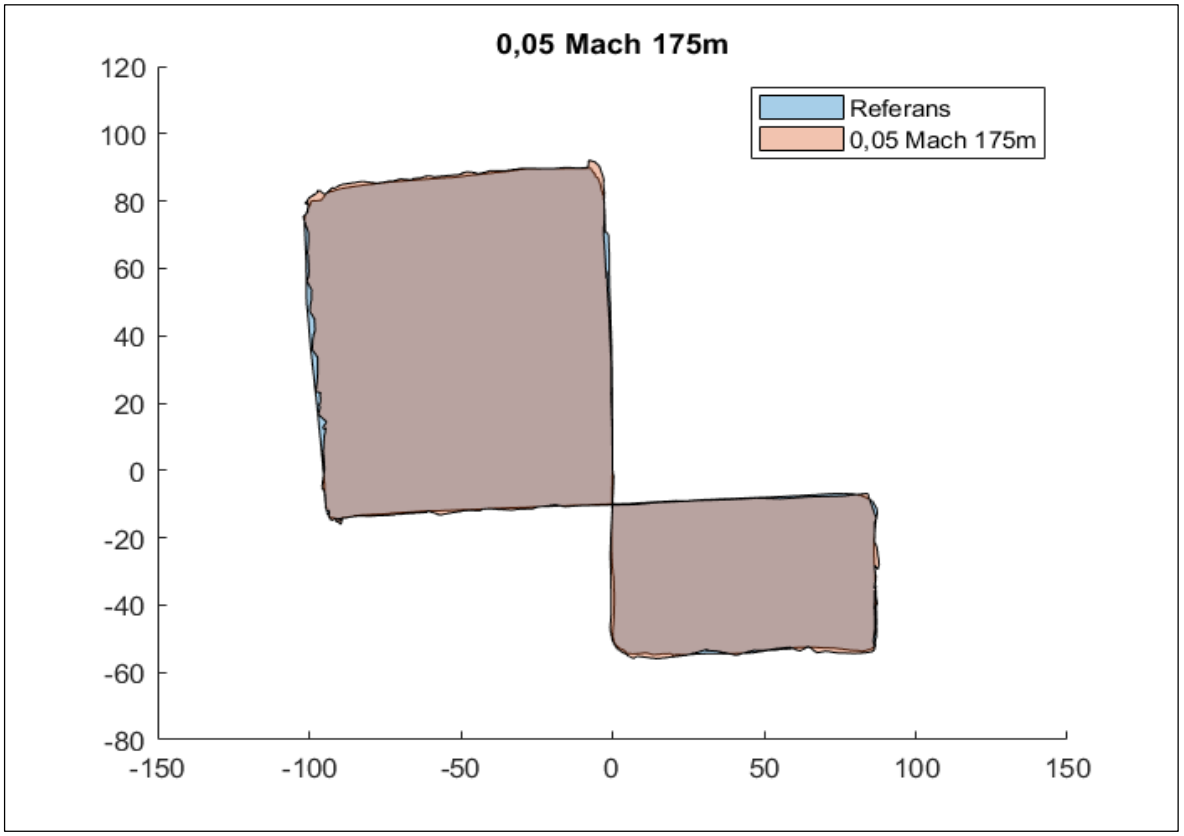


Şekil 1.7. 7.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

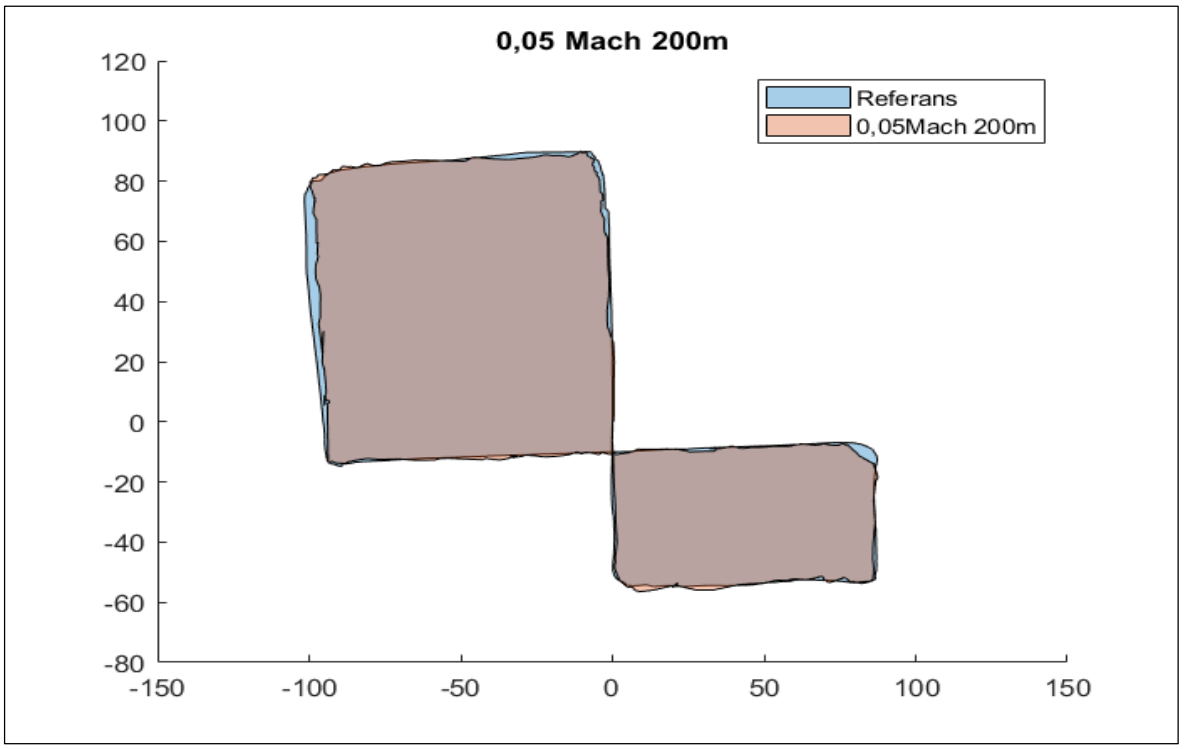


Şekil 1.8. 8.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

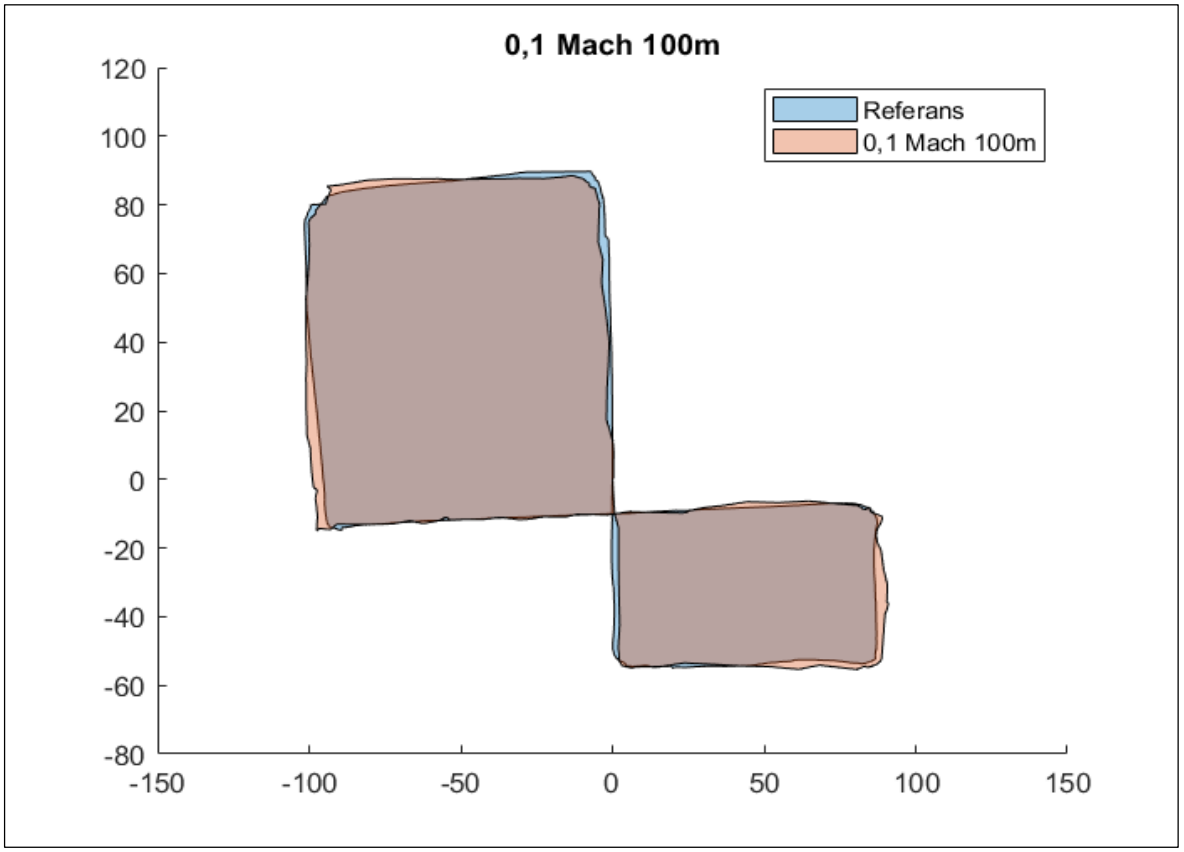


Şekil 1.9. 9.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

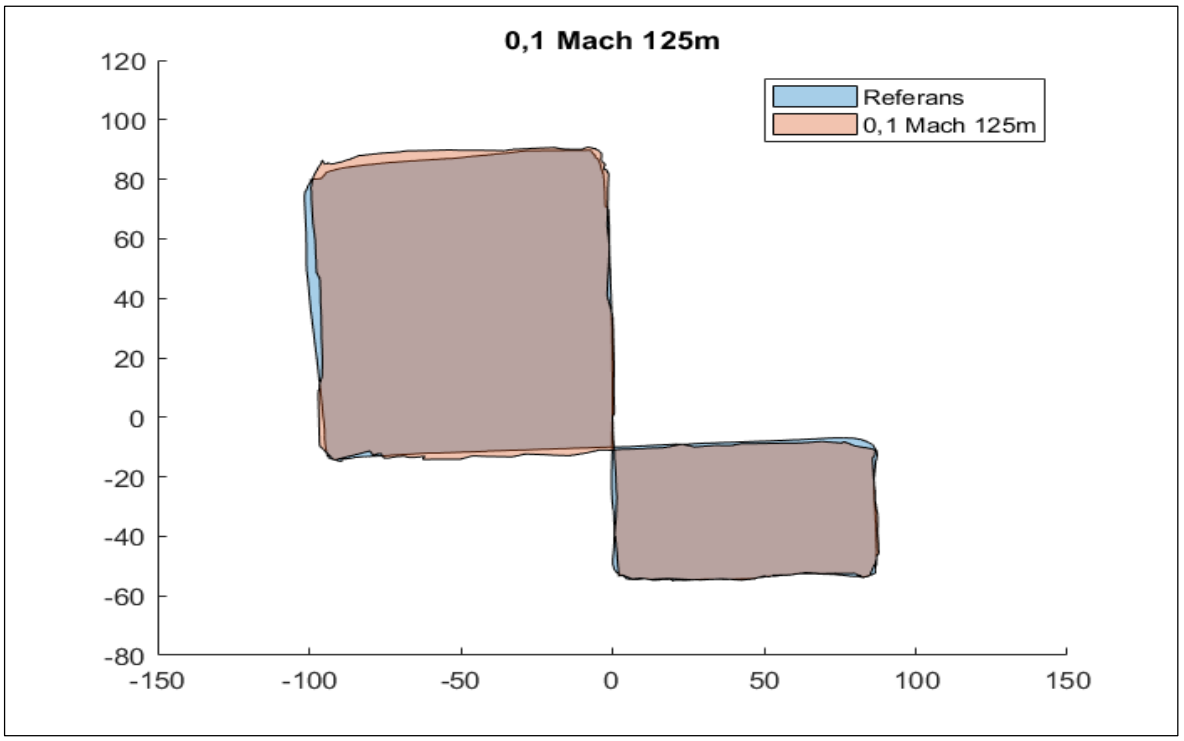


Şekil 1.10. 10.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

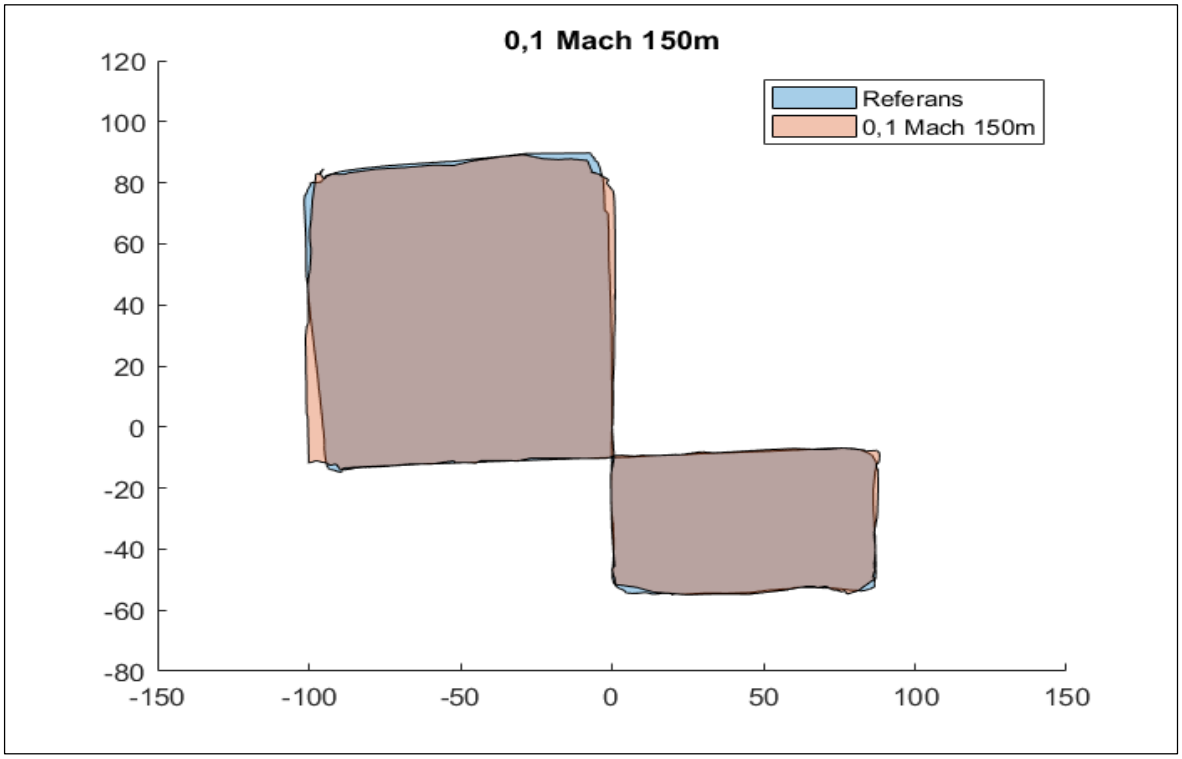


Şekil 1.11. 11.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

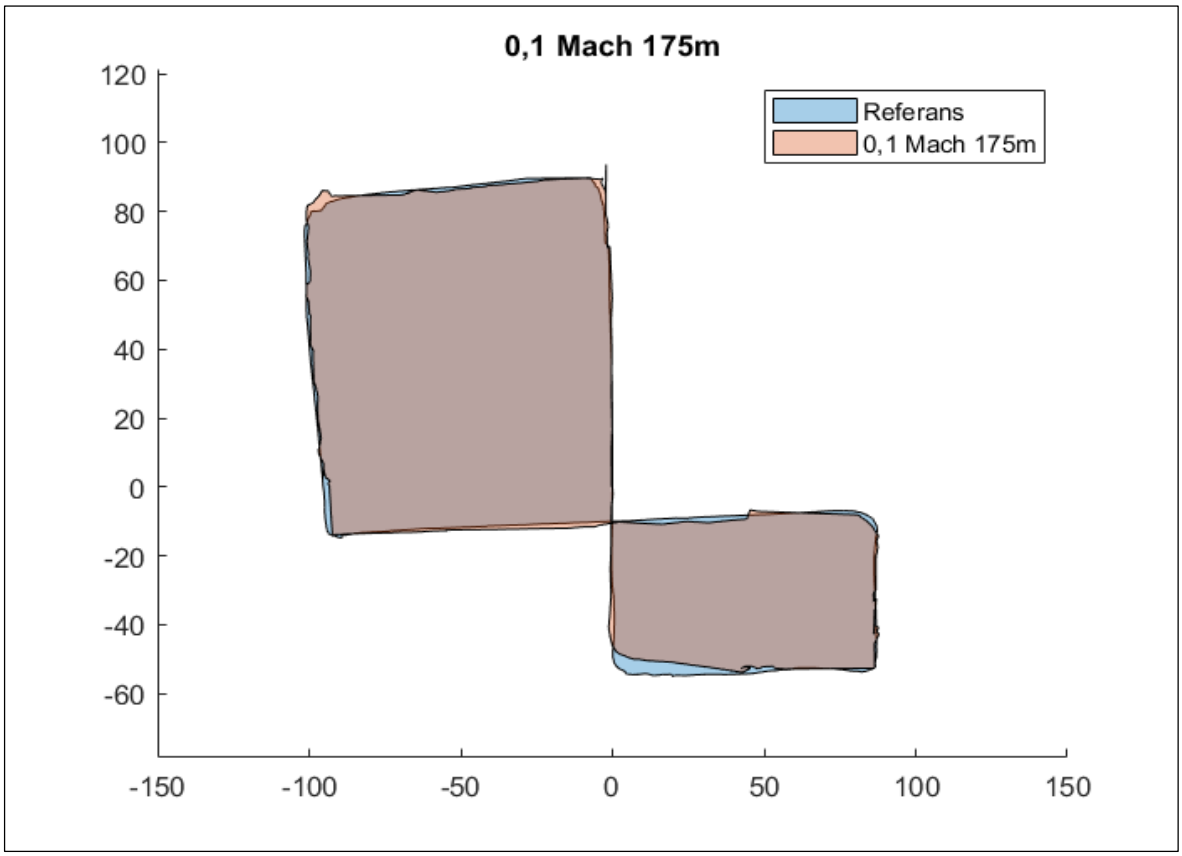


Şekil 1.12. 12.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

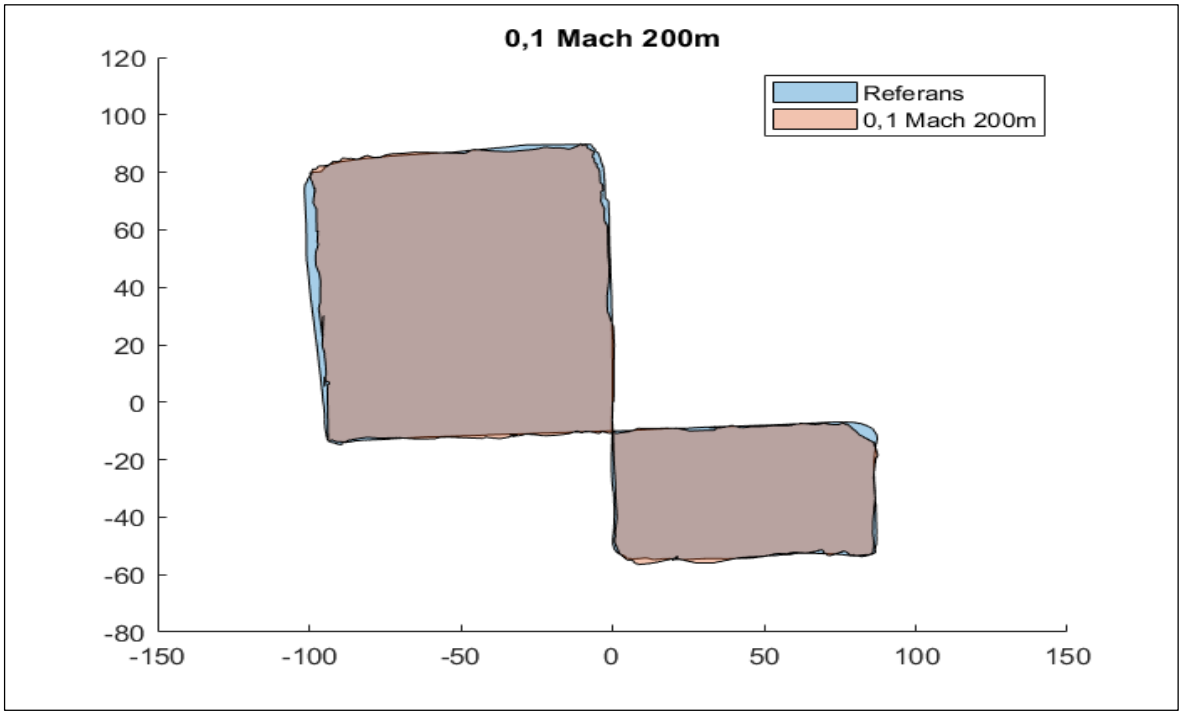


Şekil 1.13. 13.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

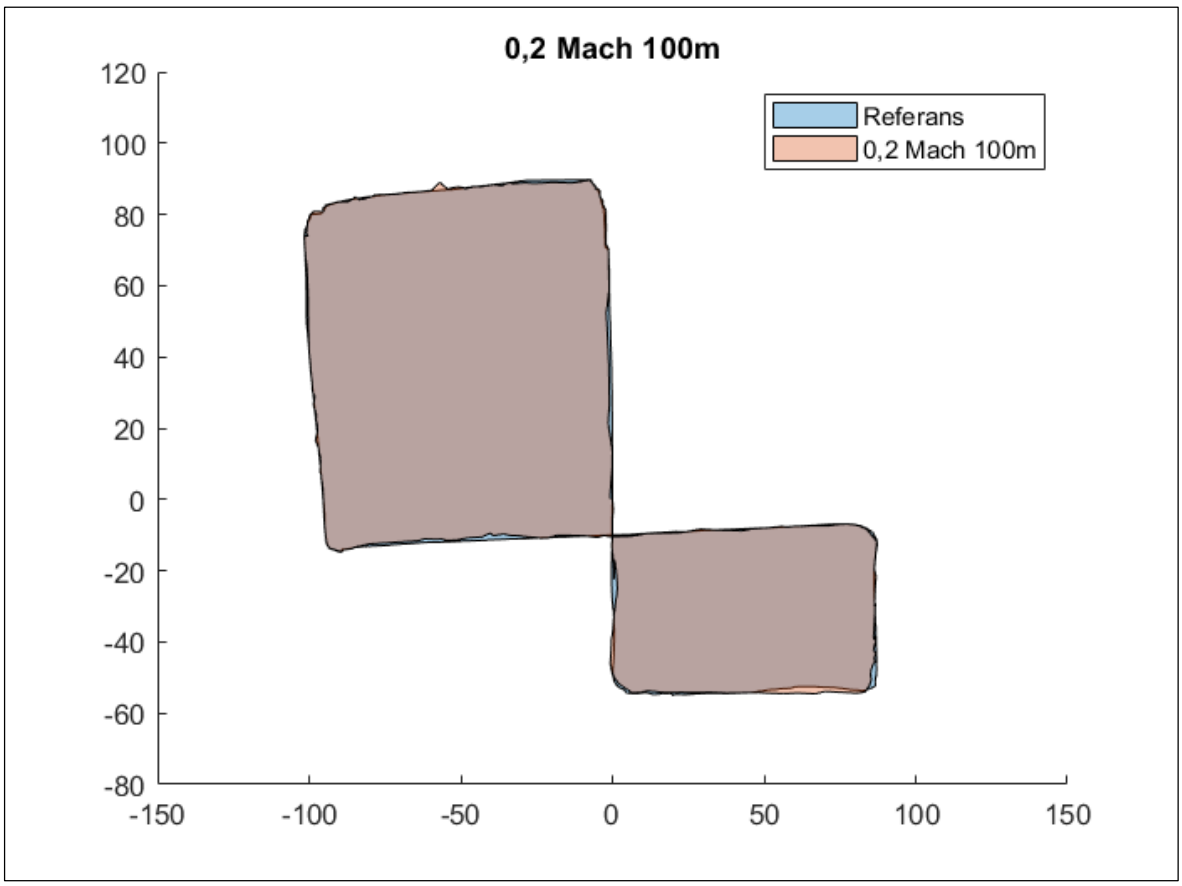


Şekil 1.14. 14.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

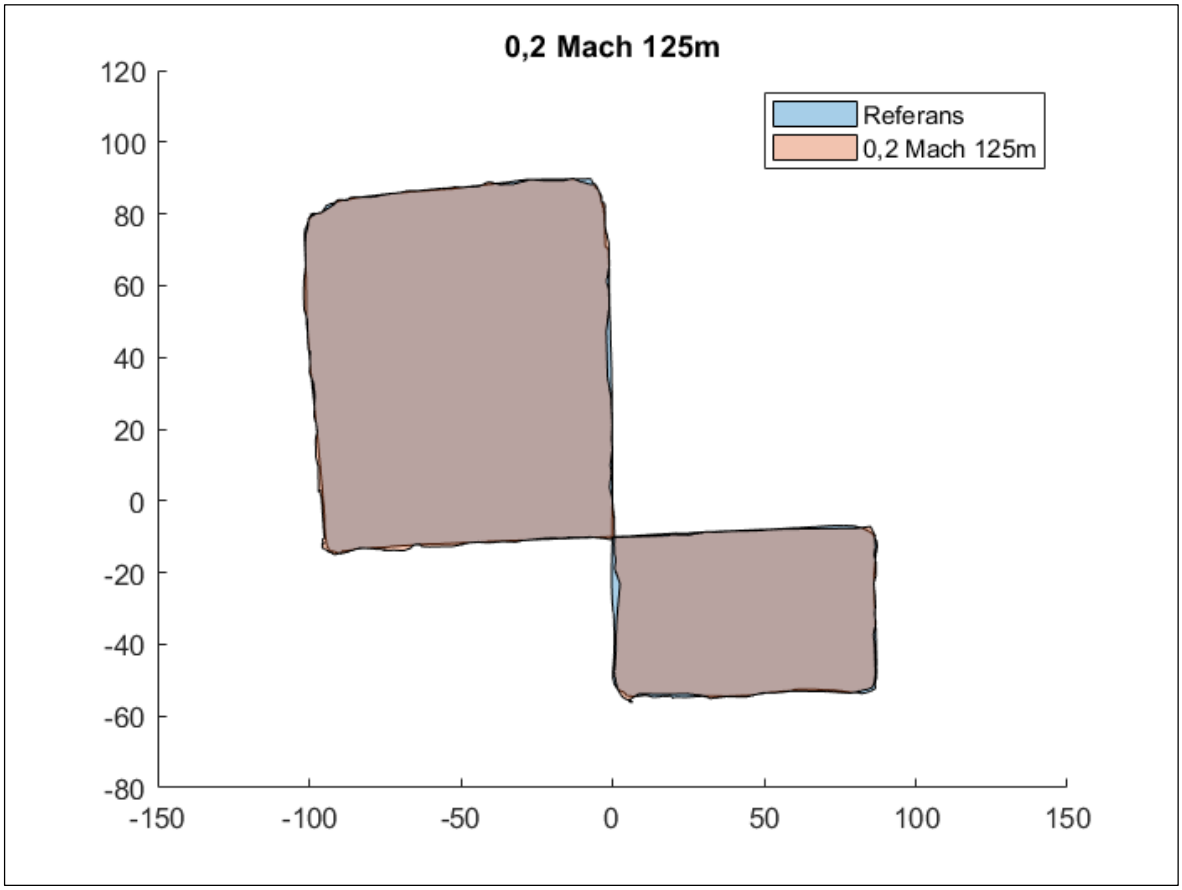


Şekil 1.15. 15.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

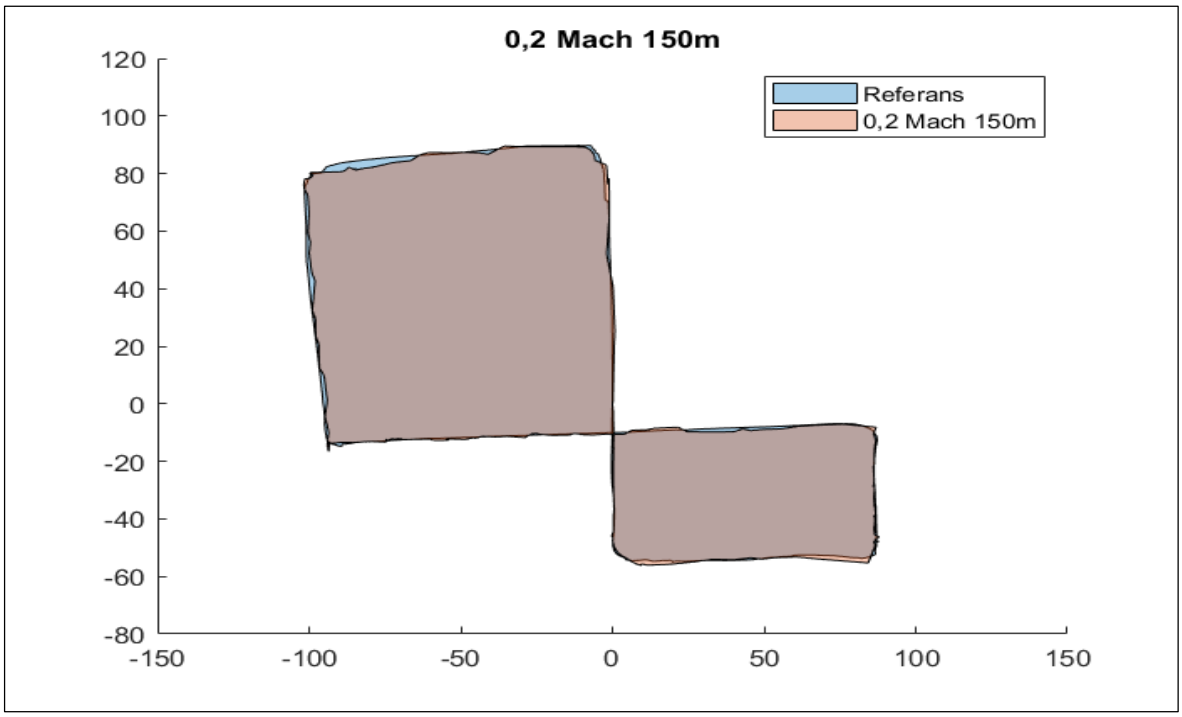


Şekil 1.16. 16.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

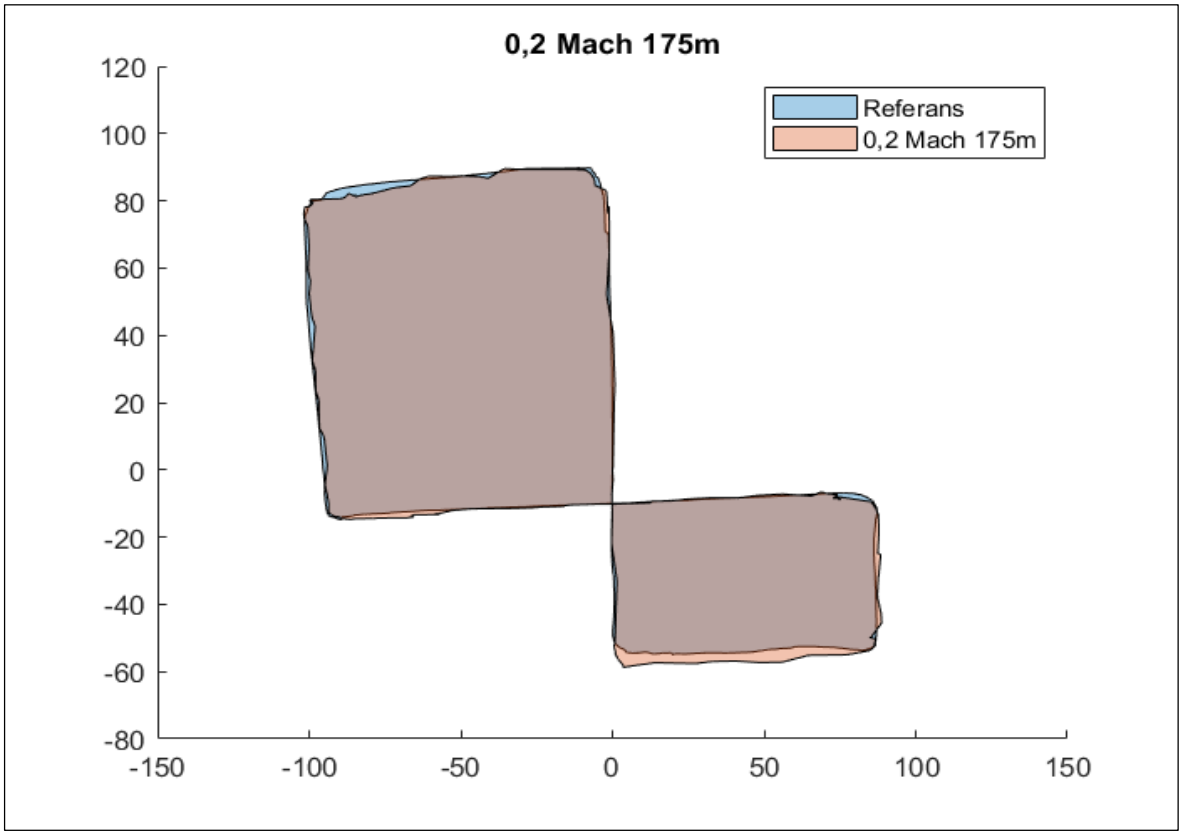


Şekil 1.17. 17.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

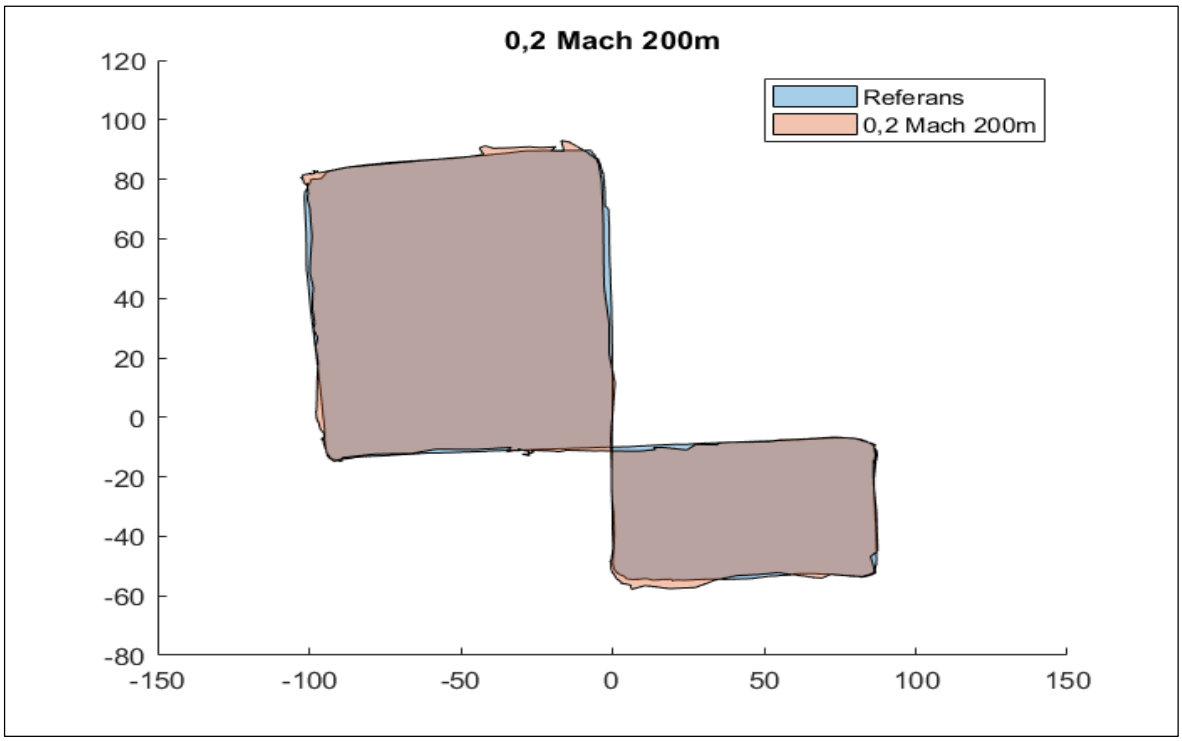


Şekil 1.18. 18.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

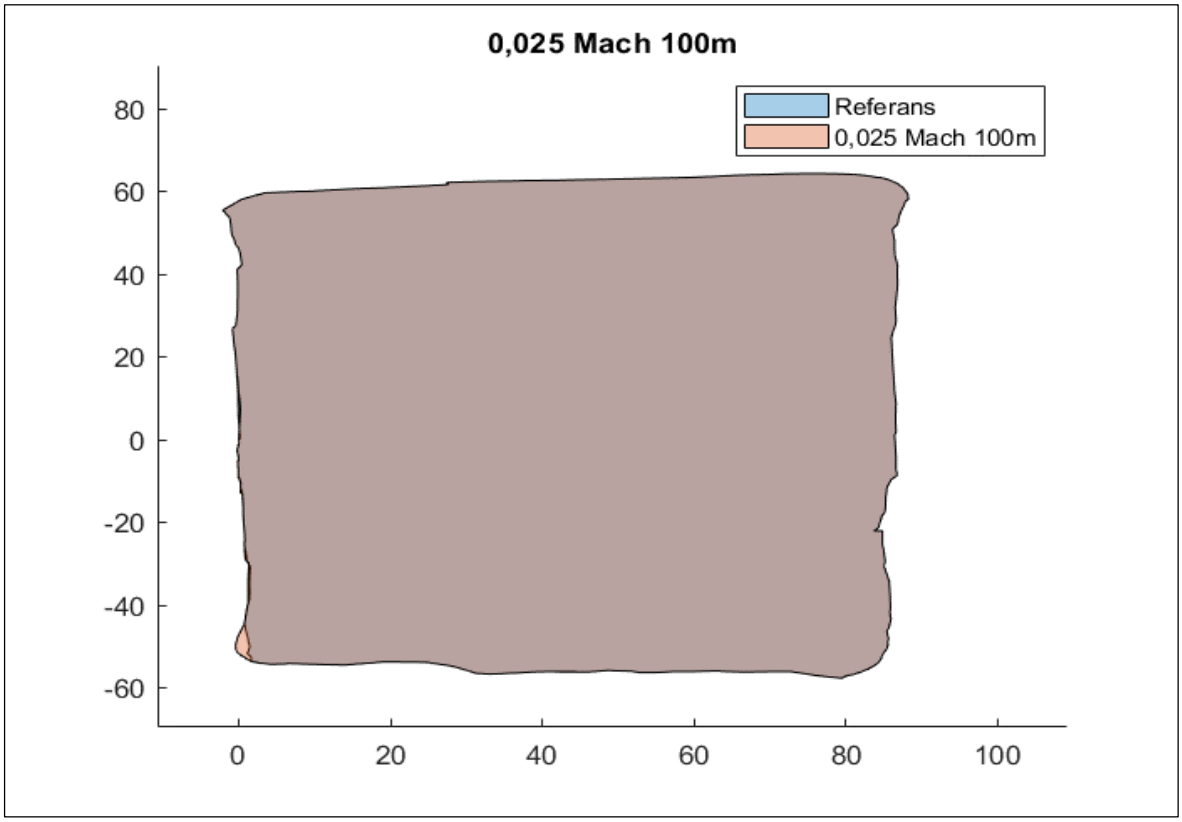


Şekil 1.19. 19.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

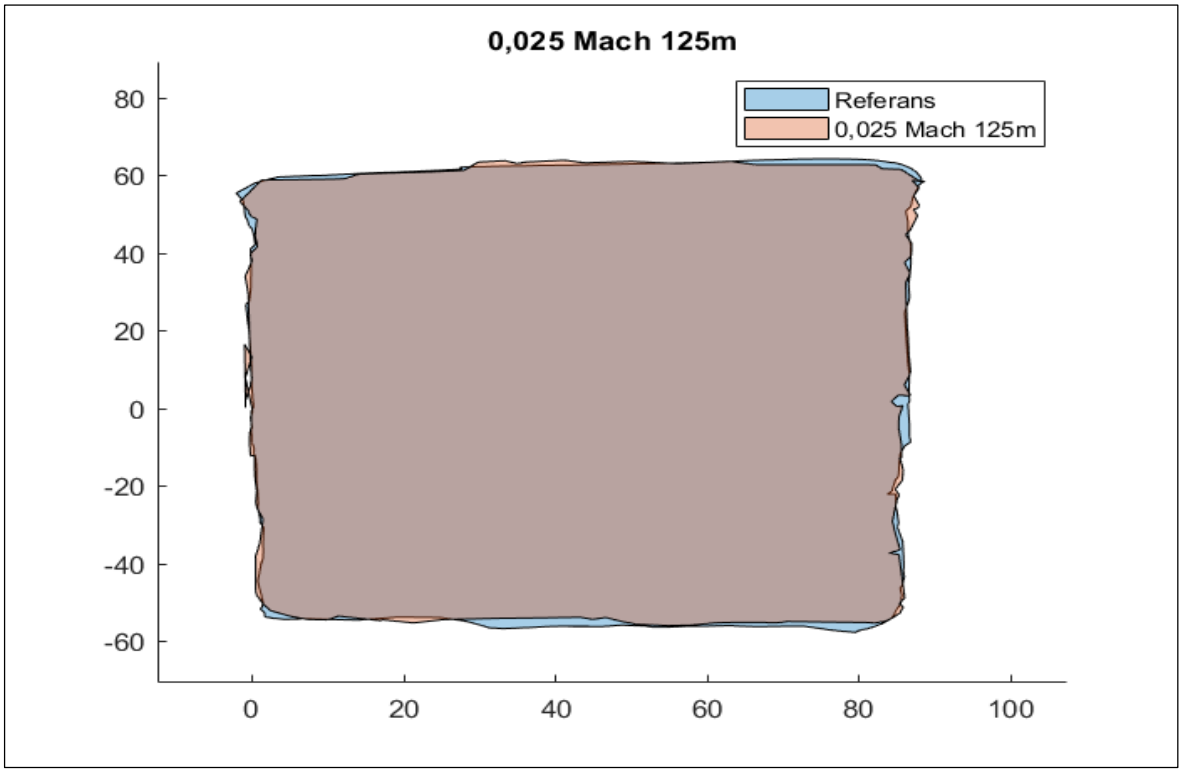


Şekil 1.20. 20.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

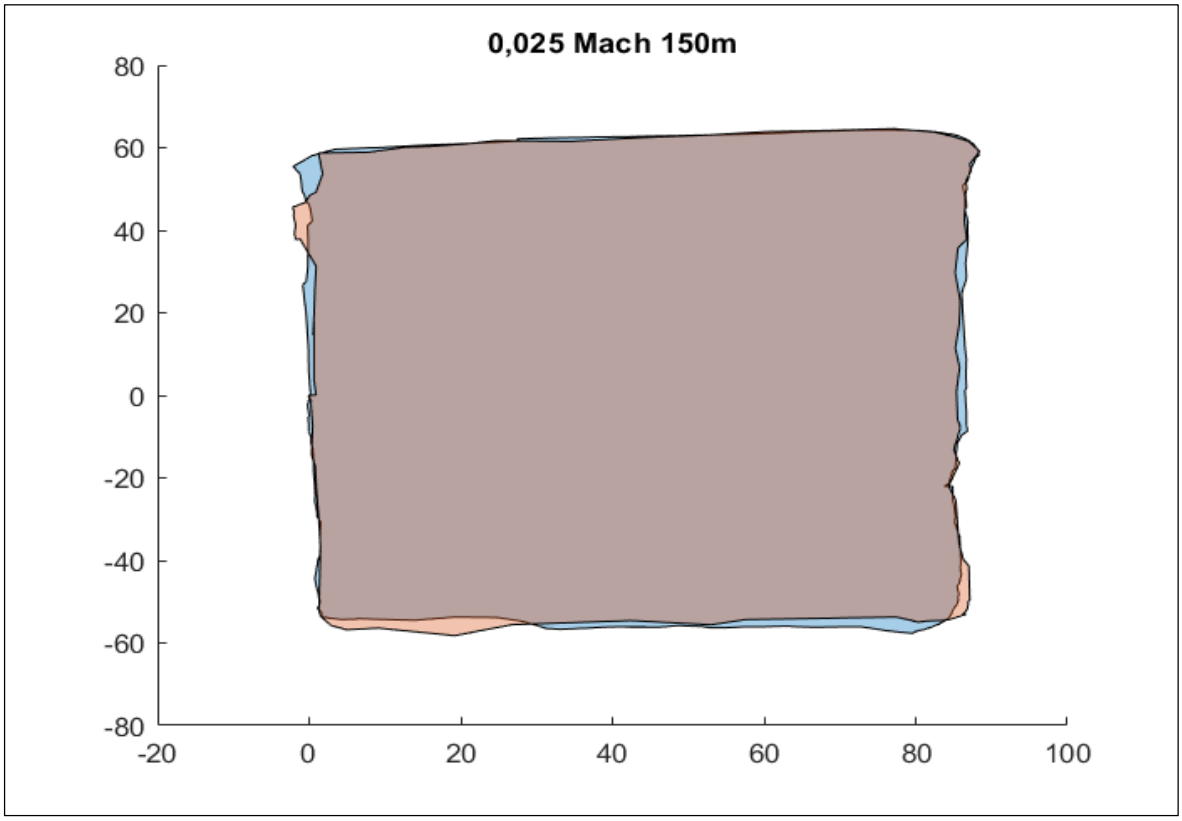


Şekil 1.21. 21.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama *Grafiği*

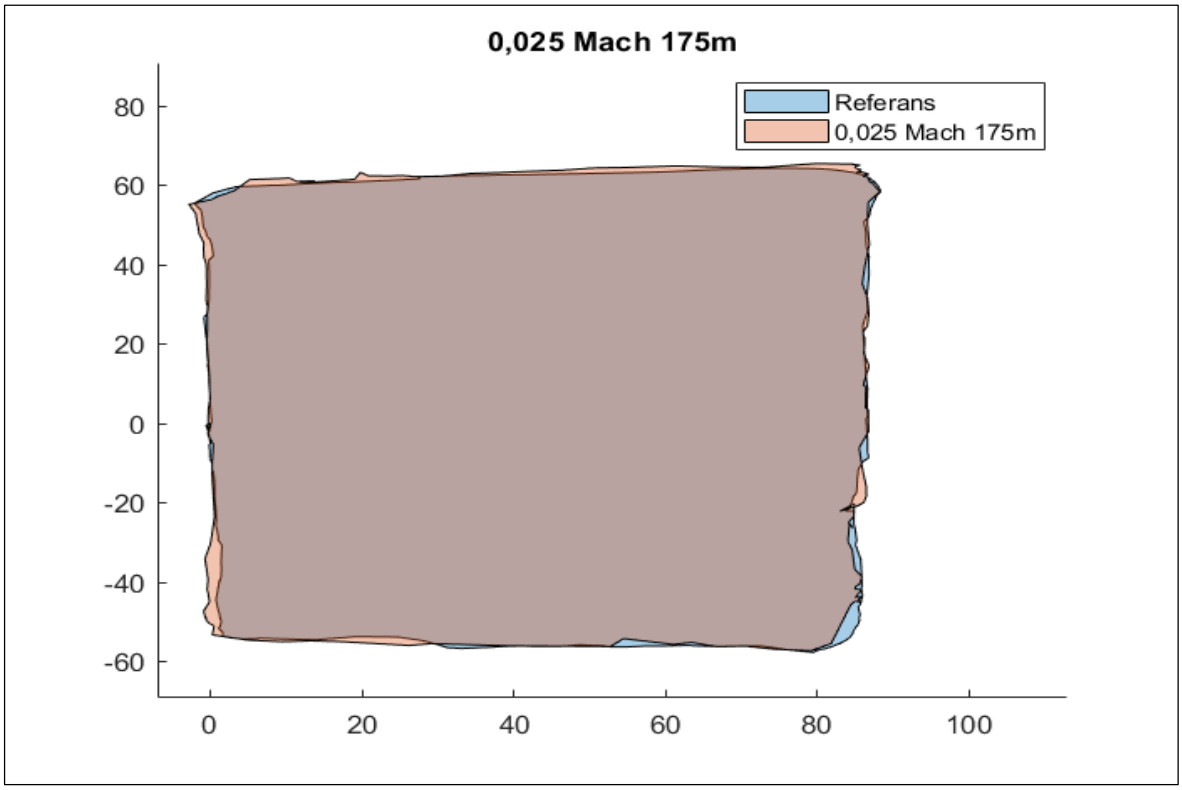


Şekil 1.22. 22.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

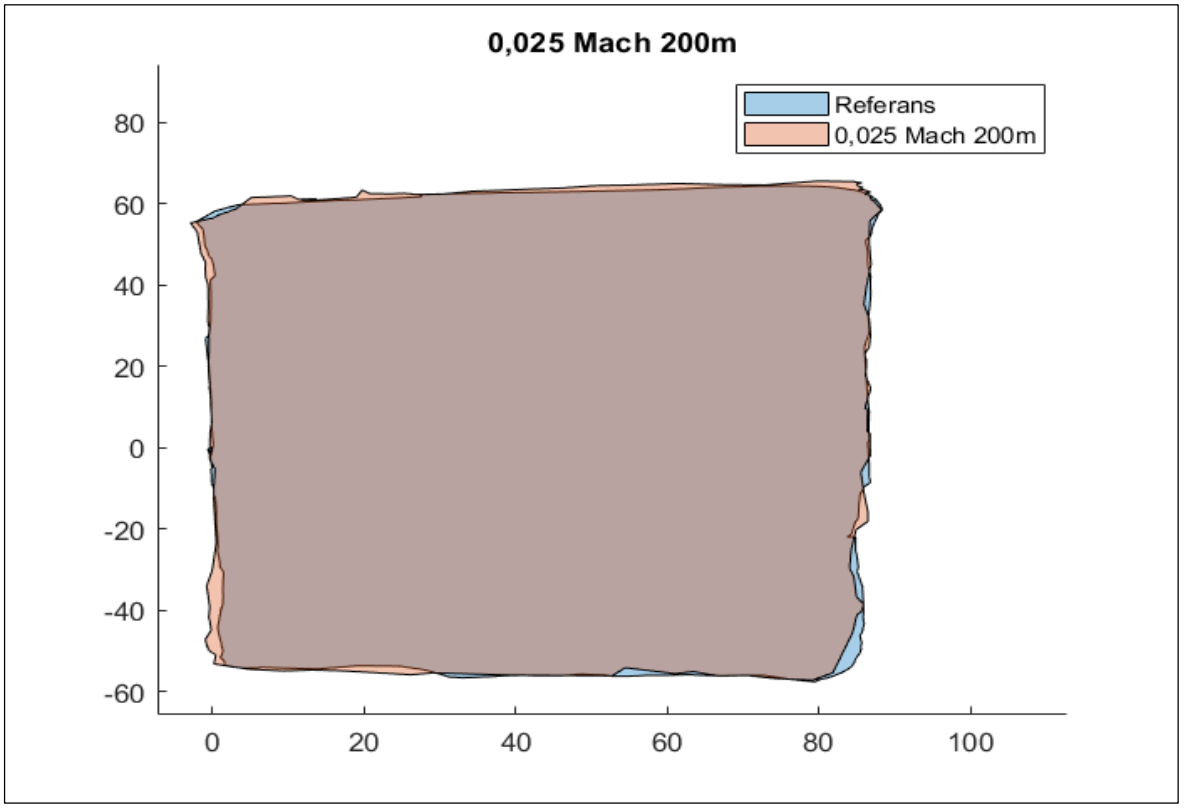


Şekil 1.23. 23.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

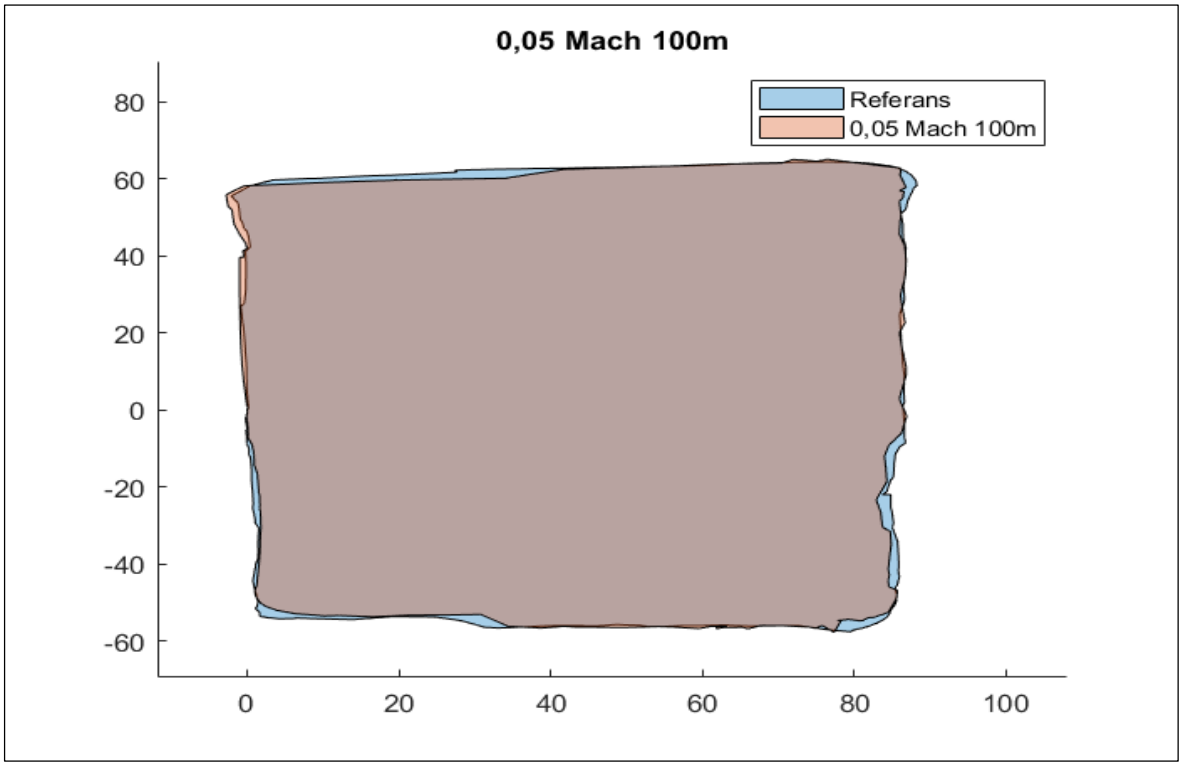


Şekil 1.24. 24.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

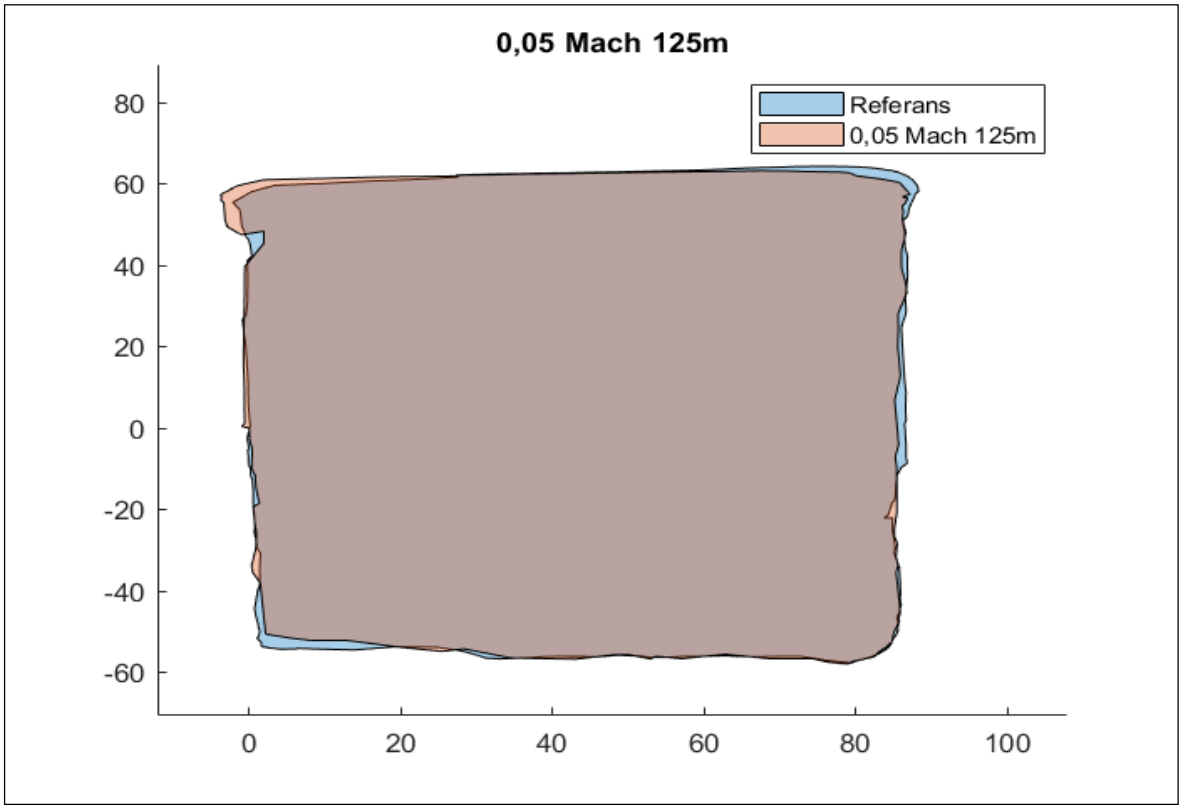


Şekil 1.25. 25.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

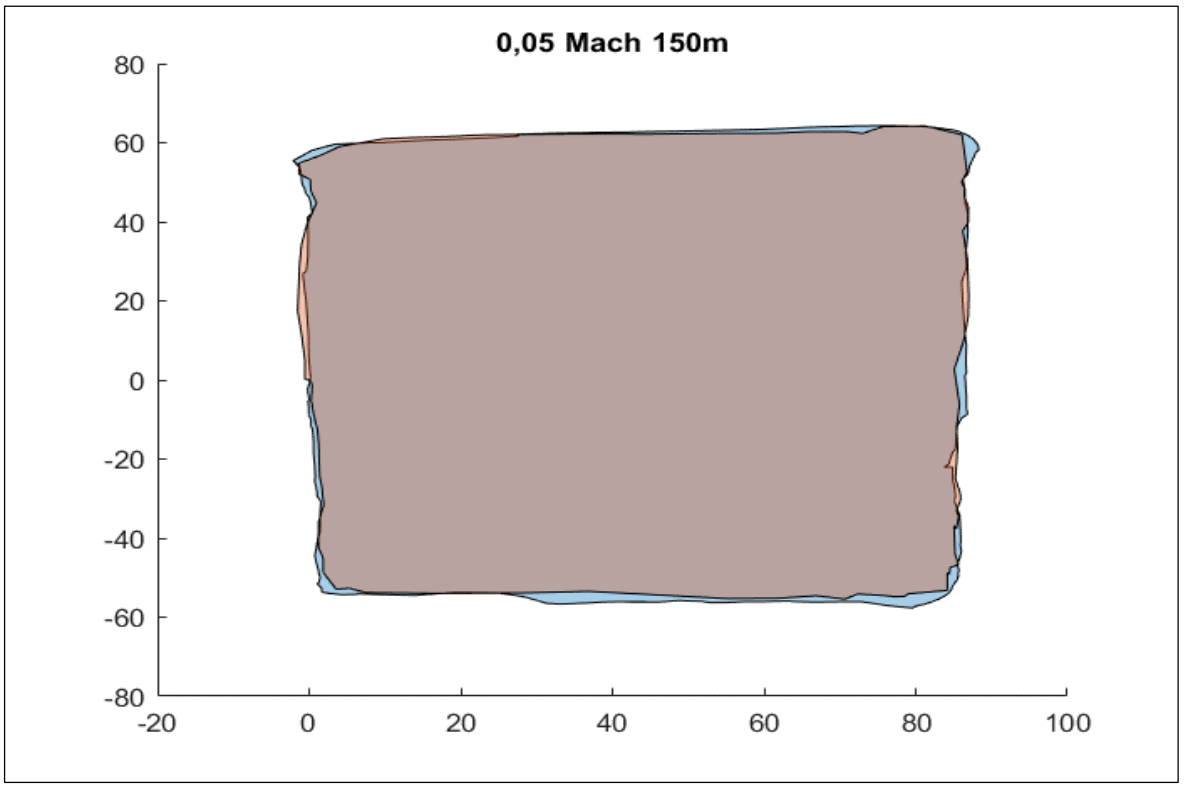


Şekil 1.26. 26.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

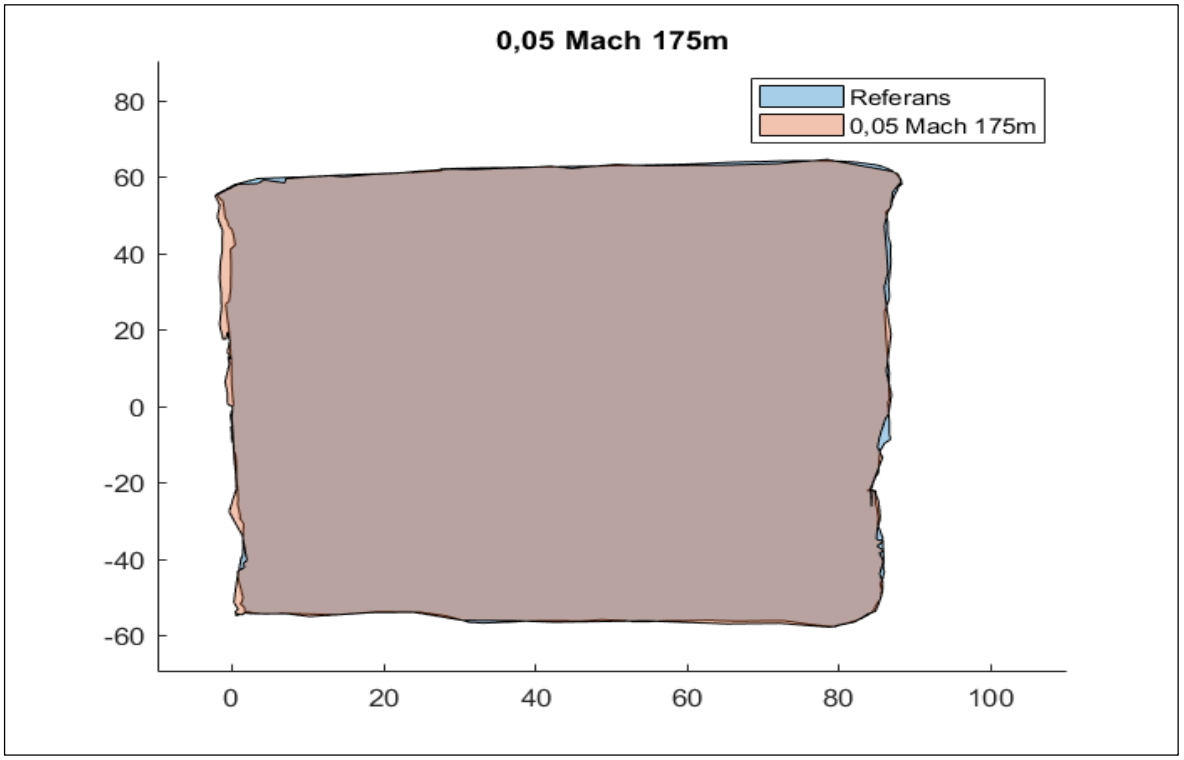


Şekil 1.27. 27.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

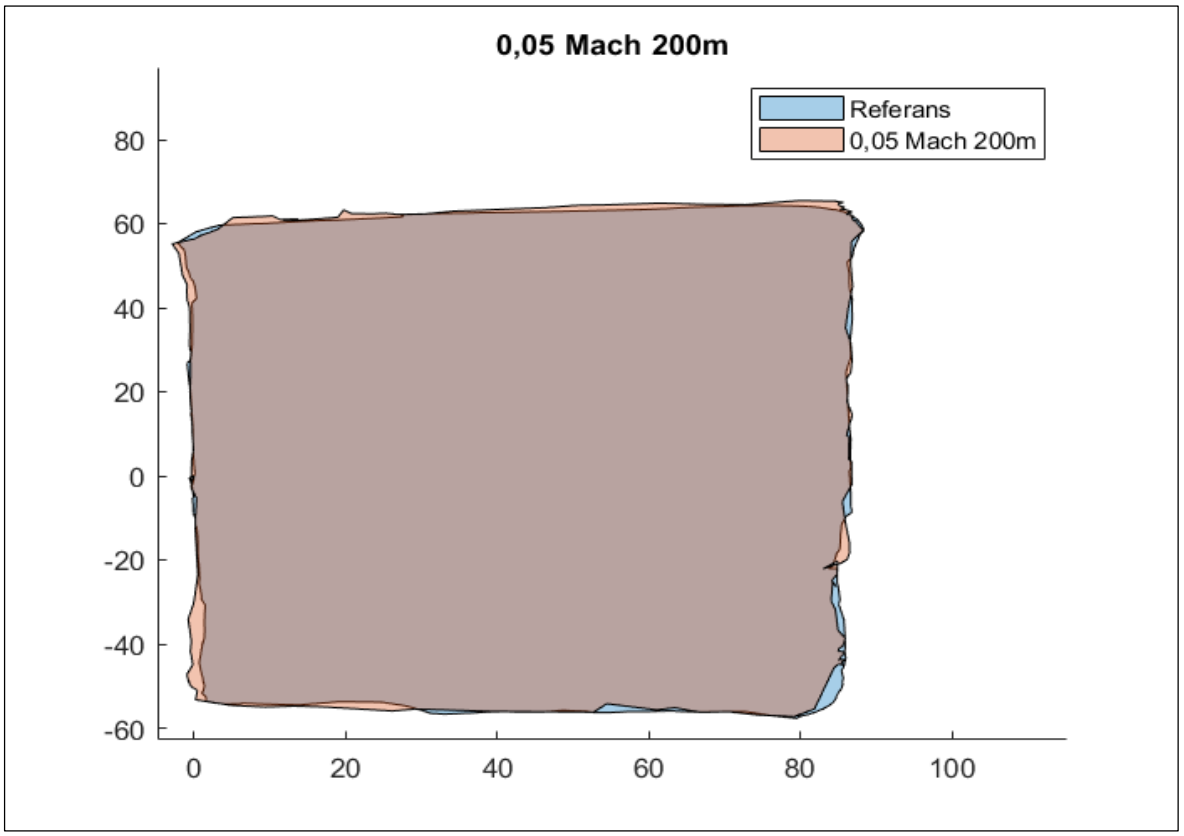


Şekil 1.28. 28.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

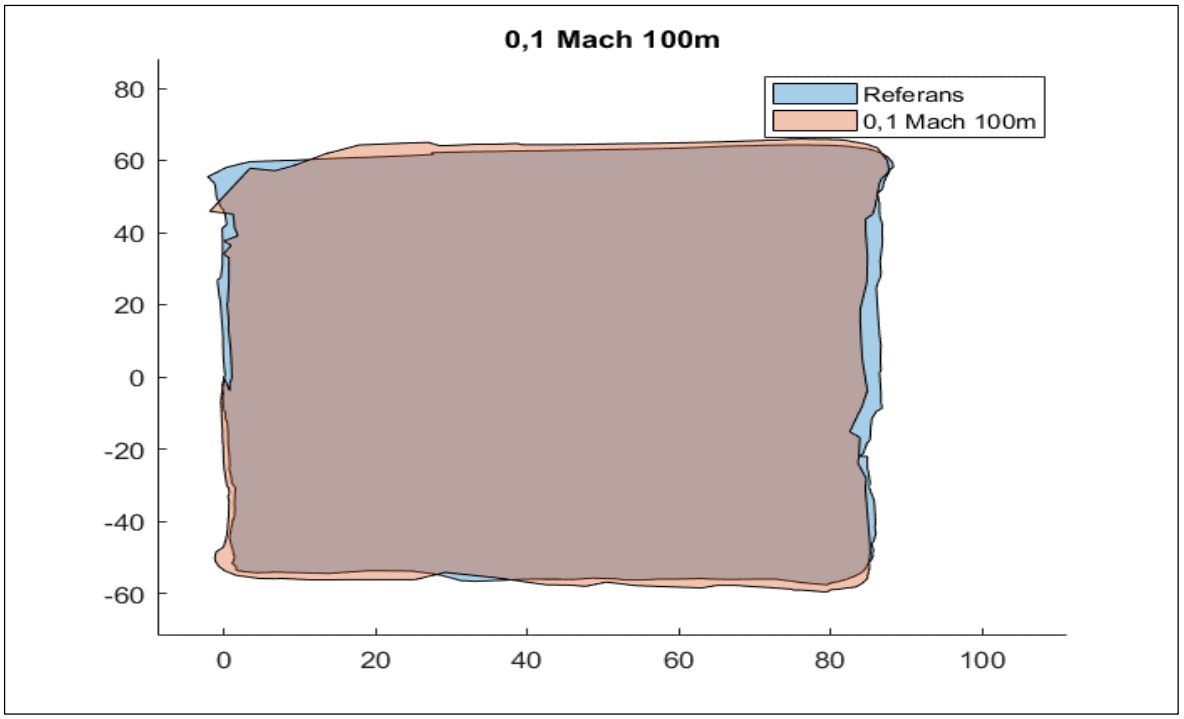


Şekil 1.29. 29.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

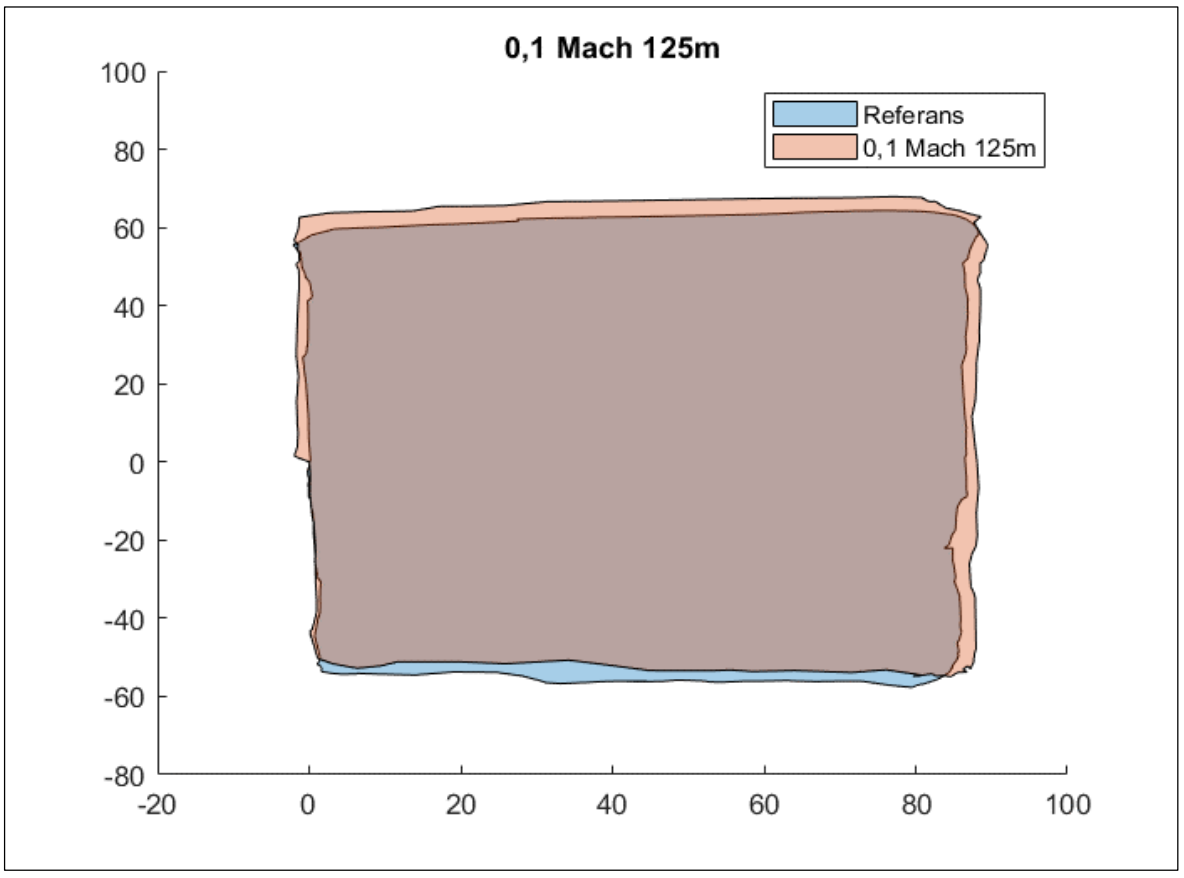


Şekil 1.30. 30.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

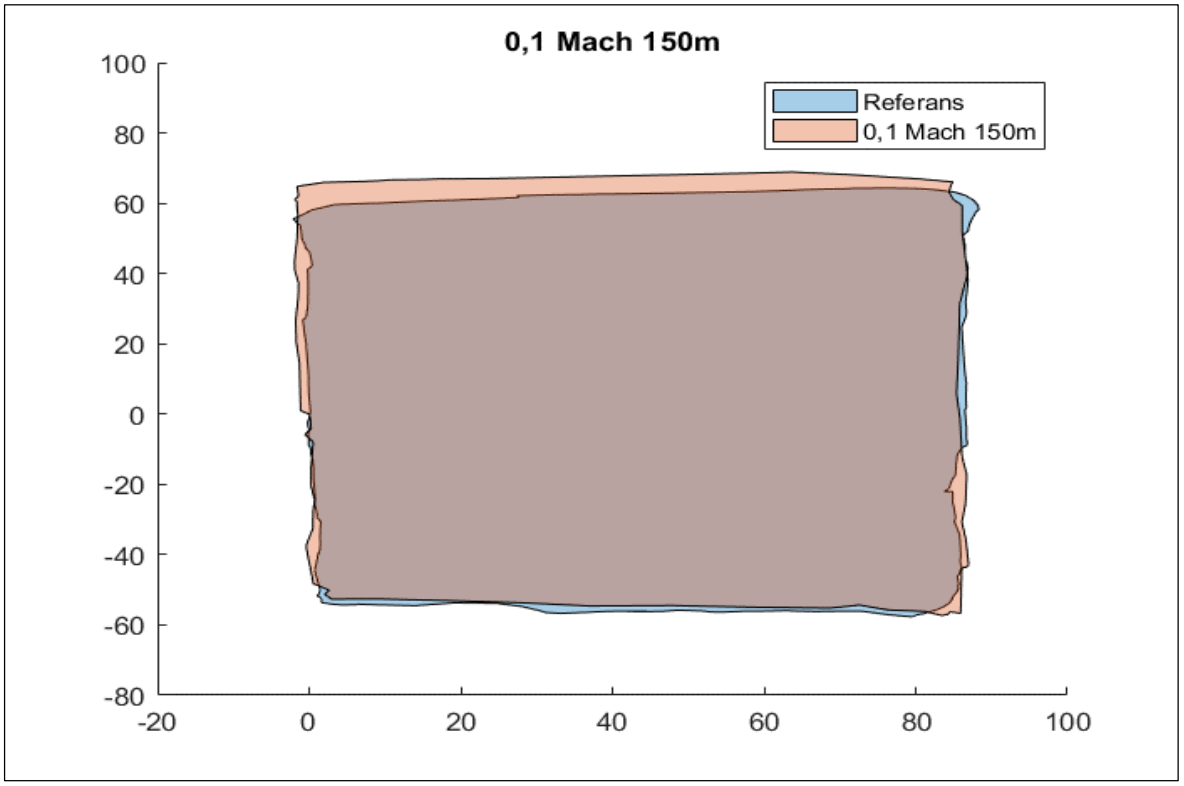


Şekil 1.31. 31.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

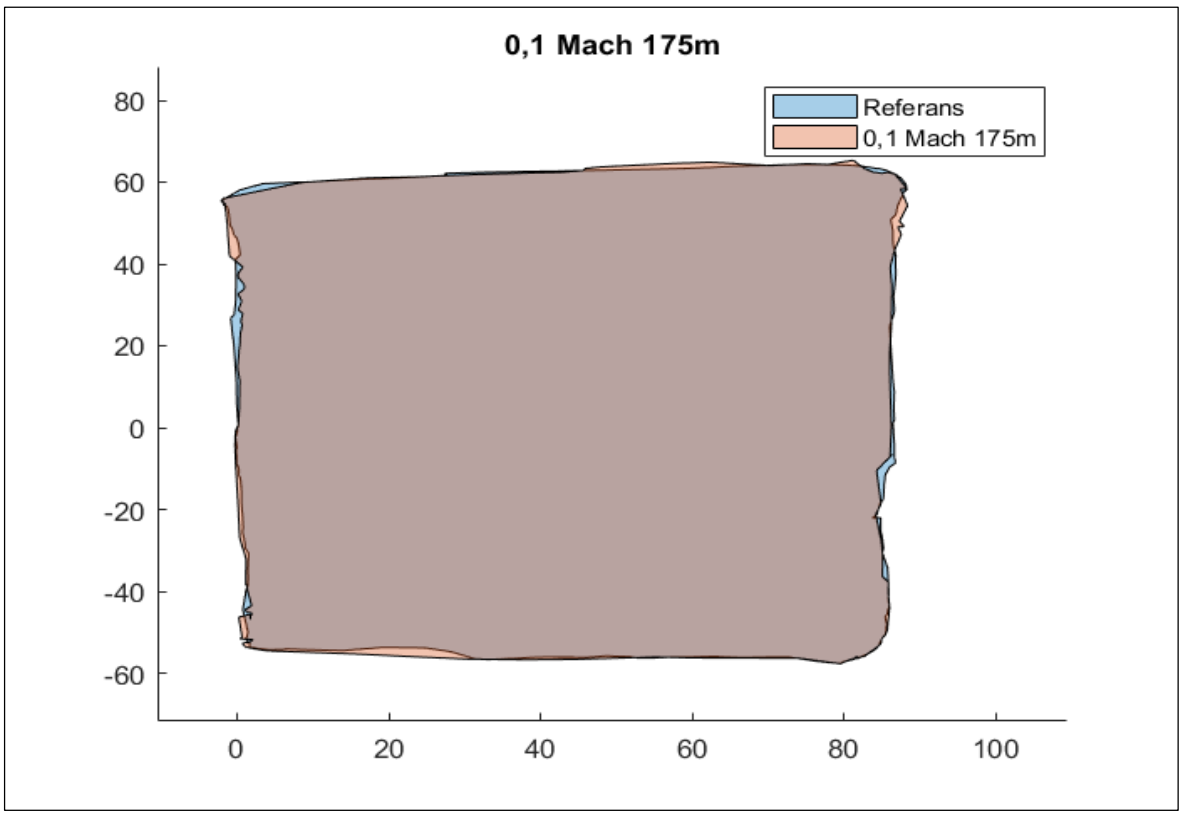


Şekil 1.32. 32.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

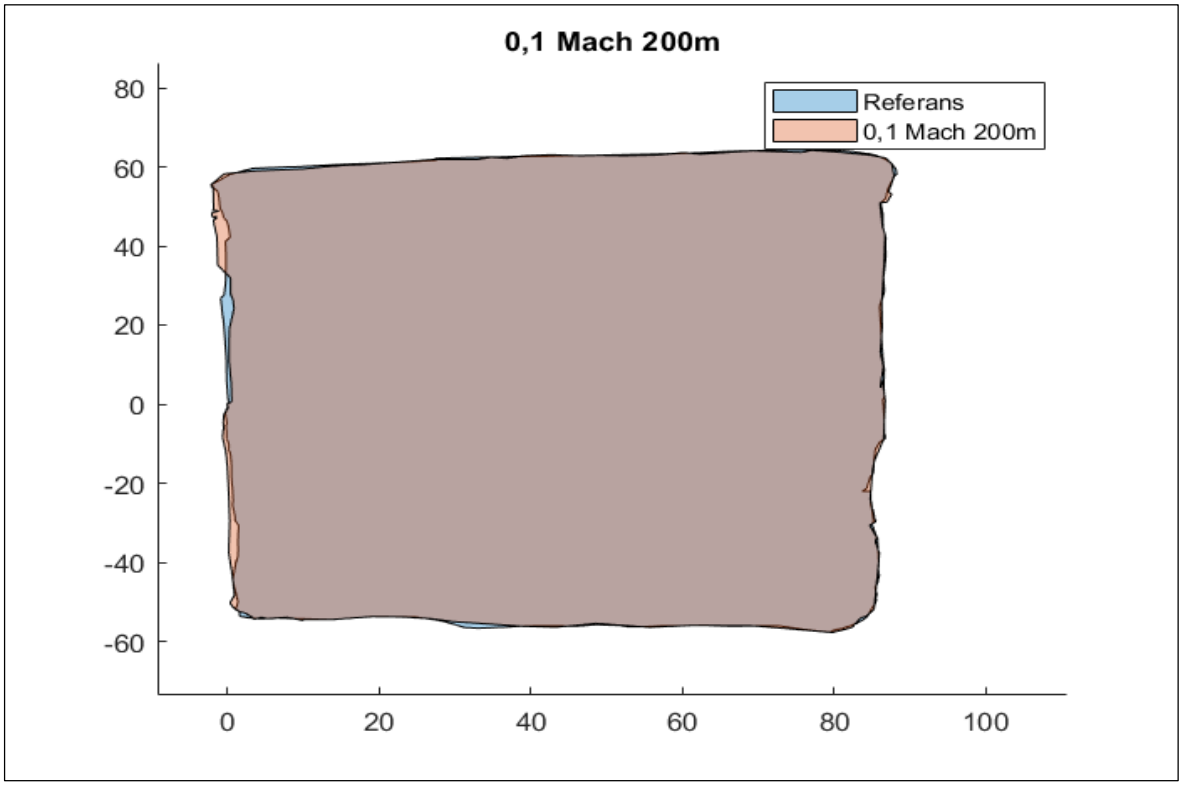


Şekil 1.33. 33.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

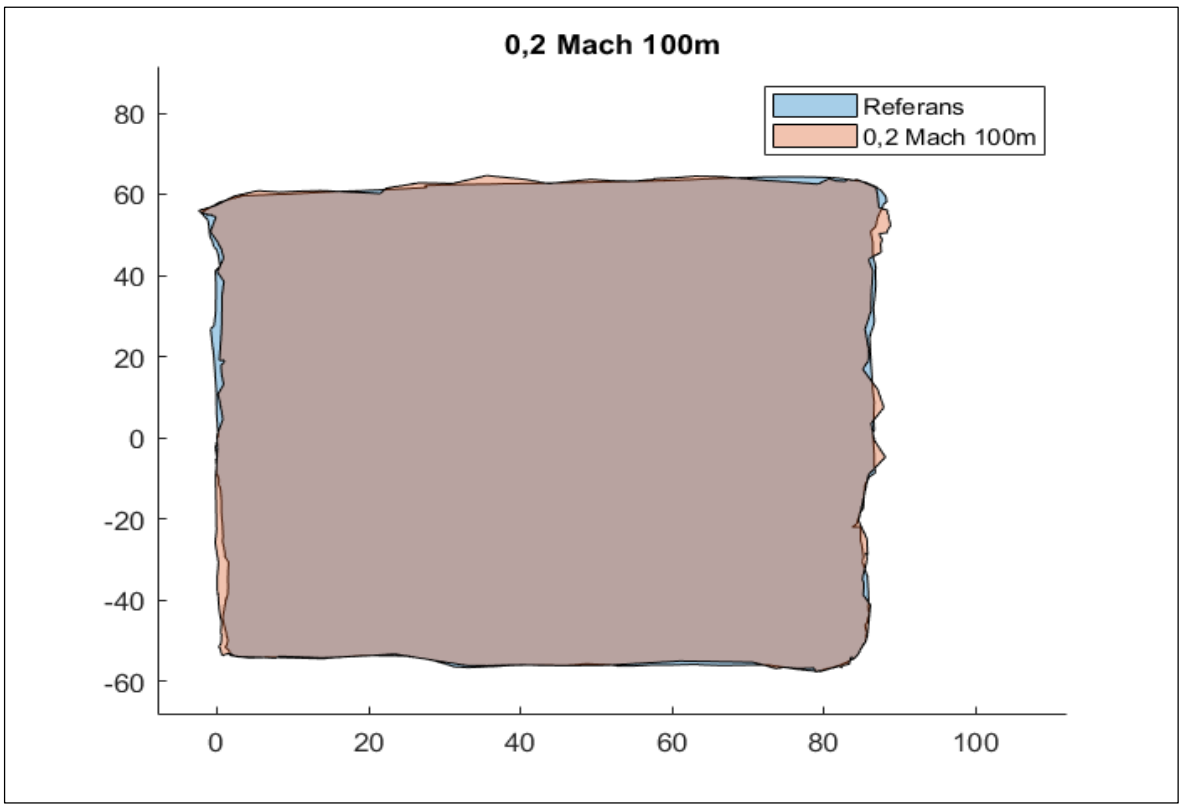


Şekil 1.34. 34.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

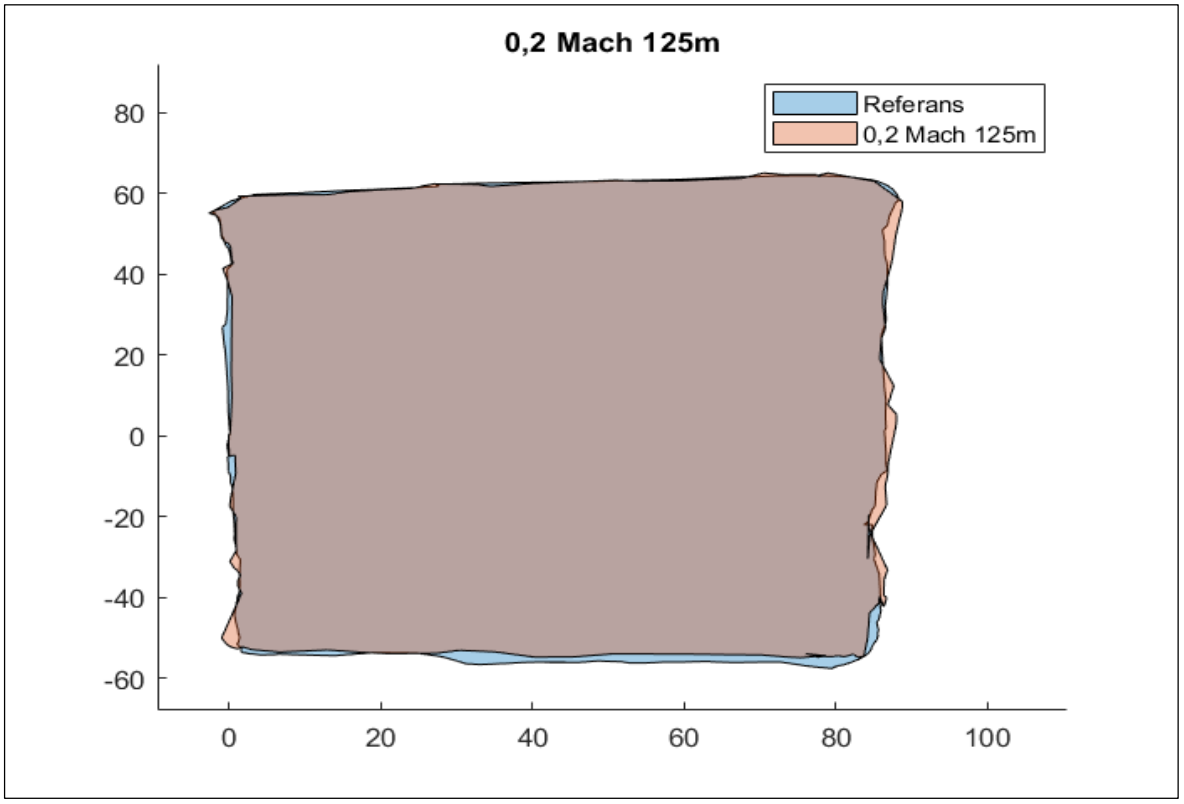


Şekil 1.35. 35.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

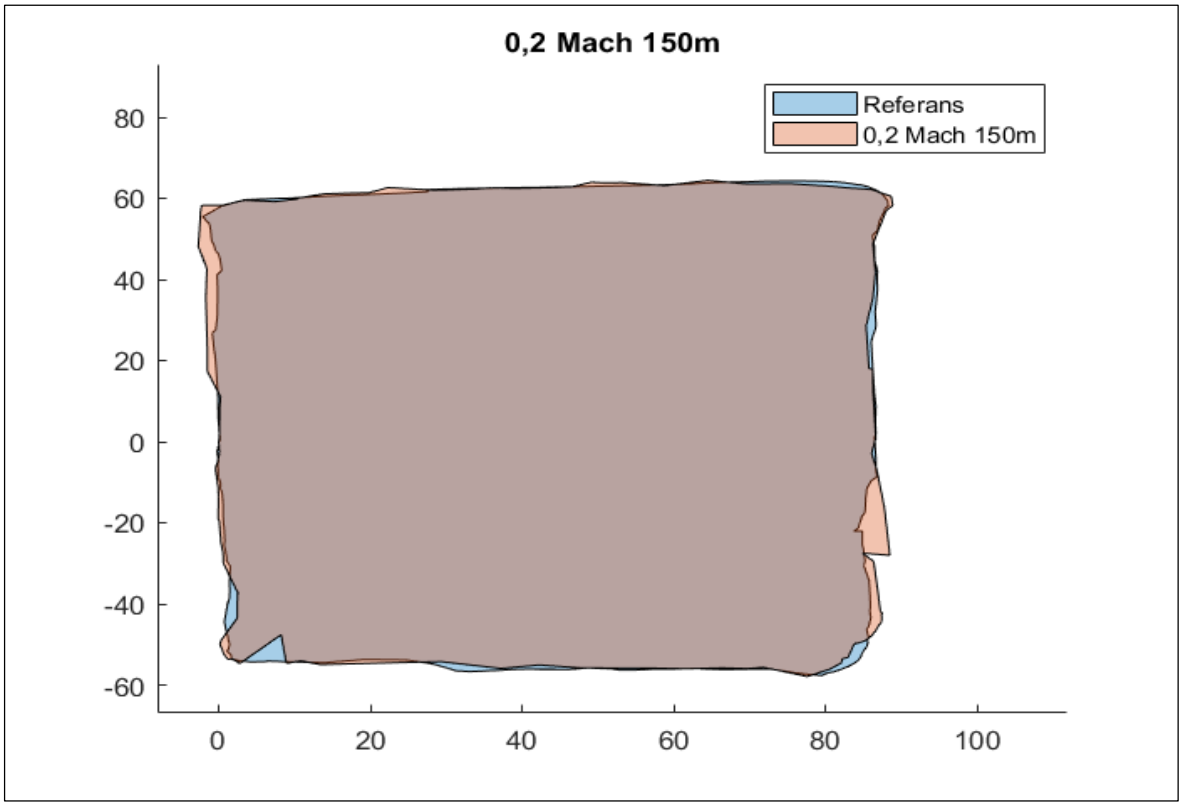


Şekil 1.36. 36.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri

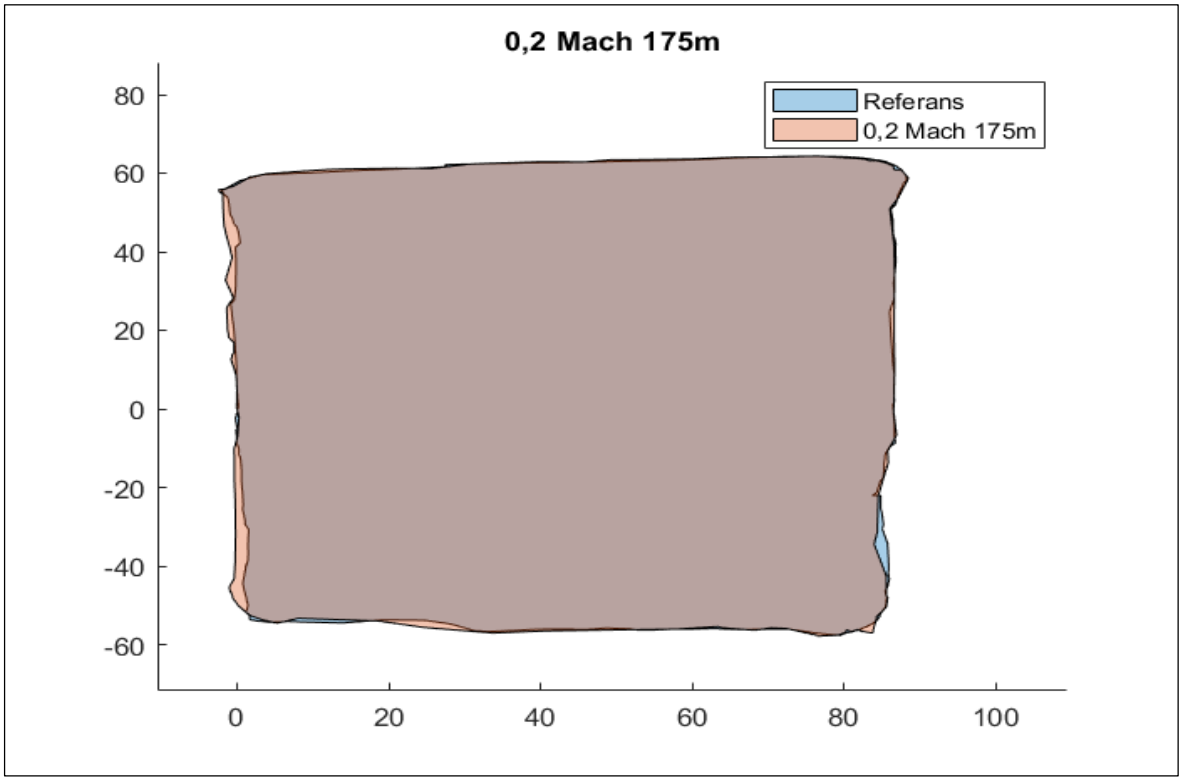


Şekil 1.37. 37.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

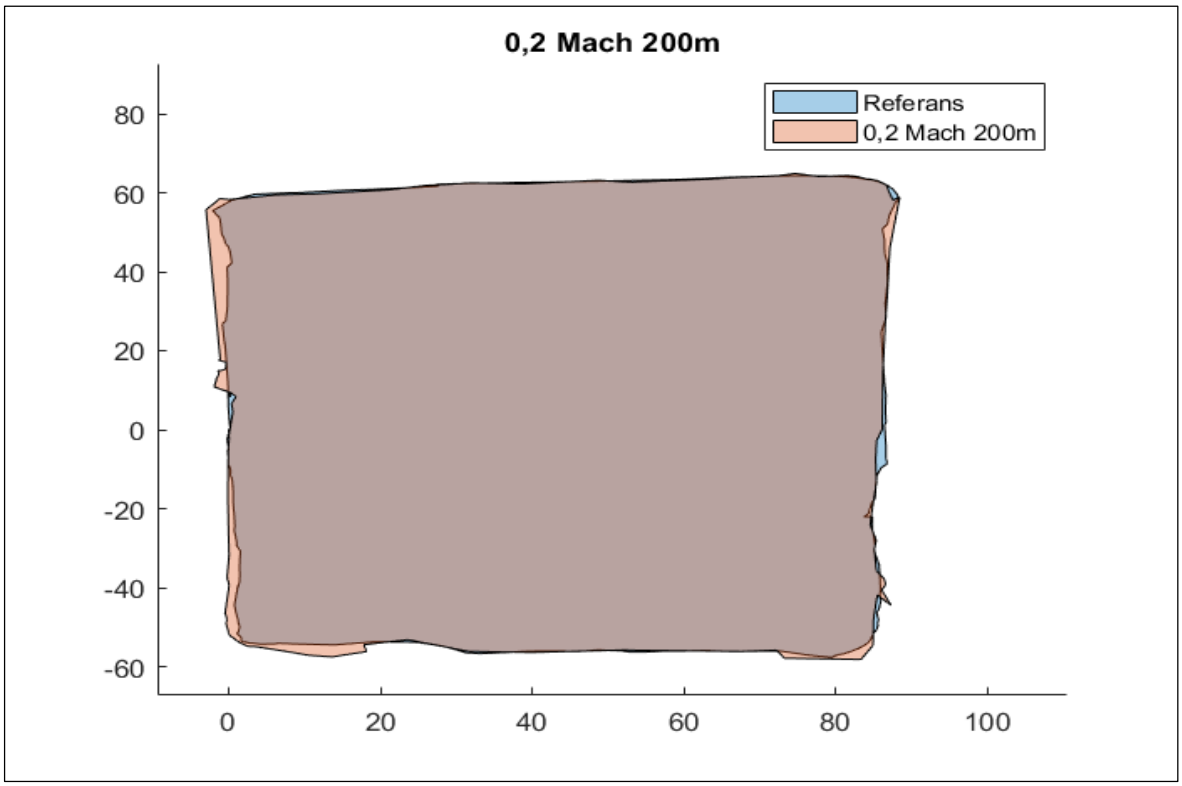


Şekil 1.38. 38.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği

EK-1. (Devam) Rota takip oranları hesaplama grafikleri



Şekil 1.39. 39.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği



Şekil 1.40. 40.Veri Seti Benzetim Testi İzdüşümünün Referans Rota ile Hesaplama Grafiği



Gazili olmak ayrıcalıktır