

DEMİRYOLU ARAÇLARI İÇİN BÜTÜNLEŞİK NAVİGASYON SİSTEMİ

INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR RAIL VEHICLES

ÖZGE ÖNCELER

Dr. Öğr. Üyesi YAKUP ÖZKAZANÇ
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020



Aileme....

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak

hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

19 / 02 / 2020



Özge ÖNCELER

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

19.../02.../2020



ÖZGE ÖNCELER

ÖZET

DEMİRYOLU ARAÇLARI İÇİN BÜTÜNLEŞİK NAVİGASYON SİSTEMİ

Özge ÖNCELER

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Ocak 2020, 104 sayfa

Raylı ulaşım iki yüzyıldır kullanılan ve hala gelişen bir teknolojidir. Raylı sistemler, 1800’lü yıllardan günümüze, yolcu ve yük taşıma alanında en çok tercih edilen ulaşım türlerinden biri haline gelmiştir. Artan ihtiyacı karşılamak için, raylı sistemlerde trafik yönetim sistemleri gitgide önem kazanmıştır. Artan sefer sayıları ve araç hızları alınan güvenlik önlemlerinin artırılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu sebeple kullanılan Otomatik Tren Koruma (OTK) ve Otomatik Tren Operasyon (OTO) sistemleri önem kazanmıştır. Otomatik Tren Koruma ve Otomatik Tren Operasyon sistemleri raylı ulaşım trafik yönetimini daha güvenli ve daha verimli hale getirmektedir. Bu sistemlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi için raylı araçların konumlarının ve hızlarının sürekli ve güvenilir biçimde hesaplanması gerekmektedir.

Bu çalışma, raylı ulaşım araçlarında güvenilir hız ve konum tespiti için kullanılabilecek navigasyon algoritmalarının geliştirilmesini hedeflemektedir. Geleneksel sistemlerde kullanılan hız ve konum hesaplama sistemleri incelenmiş ve bu hesaplama sistemlerinin eksikleri analiz edilmiştir. Algoritmanın oluşturulması için hız ve konum hesabında kullanılan sensörler benzetim ortamında modellenmiş ve sensör füzyon teknikleri yardımı ile çoklu sensörlerden elde edilen verilerle entegre navigasyon bilgileri oluşturulmuştur.

Sensörler modellenirken araç dinamiği kaynaklı oluşabilecek hatalar, ray ve çevre koşullarının durumu, sensör ölçüm hataları ve gürültüler değerlendirilmiştir. Füzyon sonucu biriken hataları sıfırlamak için hatlarda bulunan referans bilgi noktaları (balizler) kullanılmıştır. Füzyon sonucu elde edilen sonuçlar ve sensörlerin tek başlarına verdikleri sonuçlar karşılaştırılmış ve entegre navigasyon sonuçlarının güvenilirliği benzetim ortamında gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tren konumlama, Sensör füzyon, Odometri, Navigasyon Sensörleri, Otomatik Tren Operasyonu (OTO), Otomatik Tren Koruma (OTK), Bütünleşik Navigasyon

ABSTRACT

INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR RAIL VEHICLES

Özge ÖNCELER

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

January 2020, 104 pages

Railway transportation has been used more than 200 years and it has been improved continuously. Since 1800s, rail systems have become one of the most preferred transportation types in passenger and freight transportation. In order to meet the increasing need, railway traffic management systems have become more important. For this reason, Automatic Train Protection (ATP) and Automatic Train Operation (ATO) systems have become very important.

Automatic Train Protection and Automatic Train Operation systems make rail transport traffic management safer and more efficient. For the efficient operation of these systems, the position and speed of the rail vehicles must be calculated reliably and continuously.

This study investigates the navigation algorithm for reliable speed and position determination in rail transport vehicles. The speed and position calculation systems used in conventional systems were examined and the deficiencies of these calculation systems were analyzed. For the creation of the algorithm, the sensors used in the velocity and position calculation were modeled in the simulation environment and the speed and position information were obtained by the data obtained from multiple sensors with the help of sensor fusion technique. When modeling the sensors, errors due to vehicle dynamics, condition of rail and environmental conditions, sensor bias errors and noise

were evaluated. Reference information points on the rail (balise) were used to reset the accumulated errors. The results of fusion and the results of the individual sensors were compared and observed in the simulation environment where the fusion results were more reliable.

Keywords: Train Positioning, Sensor Fusion, Odometer, Navigation Sensors, Automatic Train Operation (ATO), Automatic Train Protection (ATP), Integrated Navigation



TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşturulmasında sağladığı katkılardan dolayı tez danışmanın Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Her zaman yanımda olan ailem ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ediyorum. Çalışma arkadaşlarıma teze çalışırken vermiş oldukları destekten dolayı teşekkür ediyorum.



İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER TABLOSU	vi
TABLolar	viii
ŞEKİLLER	ix
SÖZLÜKÇE.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	4
1.2. Tezin Akışı	4
2. DEMİRYOLU NAVİGASYON SENSÖRLERİ	5
2.1. Veri Kümeleri ve Hata Bandı	8
2.1.1. Veri Kümesi 1	8
2.1.2. Veri Kümesi 2	9
2.1.3. Veri Kümesi 3	10
2.1.4. ERTMS Odometre Hata Sınırı	10
2.2. Teker Sensörü	11
2.3. Doppler Radar Sensörü.....	18
2.4. GNSS Sensörleri.....	25
2.5. İvmeölçer Sensörü	32
2.6. Baliz Sensörü.....	36
2.7. Sensörlerin Karşılaştırılması.....	37
3. KIZAKLAMA VE PATİNAJ TESPİTİ.....	39
4. RAYLI SİSTEMLER İÇİN BÜTÜNLEŞİK NAVİGASYON YÖNTEMLERİ	45

4.1.	Senaryolar	53
4.1.1.	Senaryo 1'e G6re Sens6rlerin Karşılaştırılması.....	55
4.1.2.	Senaryo 2'ye G6re Sens6rlerin Karşılaştırılması.....	57
4.1.3.	Senaryo 3'e G6re Sens6rlerin Karşılaştırılması.....	60
4.2.	Eşit Ağırlıklı Toplama Dayalı Füzyon Modeli	63
4.3.	Sens6r Karakteristiğine G6re Sabit Ağırlıklandırılmış Füzyon	73
4.4.	Sens6r Karakteristiğine G6re Uyarlamalı Ağırlıklandırılmış Füzyon	83
4.5.	Kayma (Kızaklama ve Patinaj) Algılayıcı Etkisi	92
4.6.	Füzyon Tekniklerinin Karşılaştırılması.....	93
5.	SONUÇLAR.....	98
	KAYNAKLAR	101

TABLolar

Tablo 2-1: Teker sensör hatalarının hız hatası üzerindeki etkileri	16
Tablo 2-2: Teker sensör hatalarının mesafe hatası üzerindeki etkileri.....	17
Tablo 2-3:Doppler radar hız hatası.....	24
Tablo 2-4: Sensörler ve ölçüm özellikleri	37
Tablo 2-5: Sensör Tipi ve Etkileri	38
Tablo 3-1: Kızaklama ve patinaj tespiti mimari alternatifleri	42
Tablo 4-1: SIL tanımları [36]	46
Tablo 4-2: Hataların önem ve sıklığa göre sınıflandırılması.....	46
Tablo 4-3: ALARP yöntemi-örnek risk tablosu [37]	47
Tablo 4-4: Test Senaryoları.....	54
Tablo 4-5: Senaryo 1 için elde edilen sensör ve füzyon 1 standart sapma değerleri	66
Tablo 4-6: Senaryo 2 için elde edilen sensör ve füzyon 1 standart sapma değerleri	69
Tablo 4-7: Senaryo 3 için hız hatası standart sapma değerleri.....	72
Tablo 4-8: Araç tiplerine göre yeni ve eski teker çap farkı [42].....	74
Tablo 4-9:Senaryo 1 için hesaplanan standart sapma değerleri	78
Tablo 4-10: Senaryo 2 için hesaplanan standart sapma değerleri	81
Tablo 4-11: Senaryo 3 için elde edilen standart sapma karşılaştırmaları.....	83
Tablo 4-12: Senaryo 1 için sensör ve füzyon 3 standart sapma değerleri.....	87
Tablo 4-13: Senaryo 2 için hesaplanan sensör ve füzyon 3 standart sapma değerleri	89
Tablo 4-14:Senaryo 3 için elde edilen sensör ve füzyon 3 hız hatası standart sapma değerleri.....	92
Tablo 4-15: Senaryo 1 ve 2 için, sensör ve füzyon standart sapma değerleri	96

ŞEKİLLER

Şekil 1-1: Sabit blok teknolojisi.....	1
Şekil 1-2: Sabit blok ve hareketli blok karşılaştırma	2
Şekil 2-1: Ray devresi ve sabit blok	5
Şekil 2-2: Baliz ve baliz anten yerleşimi [10].....	6
Şekil 2-3: Baliz anteni ve baliz haberleşmesi	7
Şekil 2-4: Referans hız ve konum veri kümesi 1	9
Şekil 2-5: Referans hız ve konum veri kümesi 2	9
Şekil 2-6: Referans hız ve konum veri kümesi 3	10
Şekil 2-7: ERTMS hız hata bandı 1	11
Şekil 2-8: Optik darbe sayacı çalışma mekaniği [14]	11
Şekil 2-9: Teker odometre sensörü simulasyon bloğu.....	14
Şekil 2-10: +/-%4 teker çap hatasının hesaplanan hız verisine etkisi.....	14
Şekil 2-11: +/-%4 teker çap hatasının hesaplanan mesafe verisine etkisi	15
Şekil 2-12: Kızaklama ve patinaj durumunun hız verisi üzerindeki etkisi	15
Şekil 2-13: Kızaklama ve patinaj durumunun mesafe verisi üzerindeki etkisi.....	16
Şekil 2-14: Teker sensör-hız hatalarının hata bandına göre gösterimi	17
Şekil 2-15: Teker sensör-konum hatalarının hata bandına göre gösterimi	18
Şekil 2-16: Demiryolunda Doppler radar çalışma ilkesi	20
Şekil 2-17: Doppler radar performans örneği [18]	21
Şekil 2-18: Doppler radar simulasyon bloğu	22
Şekil 2-19: Veri kümesi 1 için hata 1 ve hata 2 durumlarına göre Doppler radar hız ölçümü	23
Şekil 2-20: Veri kümesi 3 için hata 1 ve hata 2 durumlarına göre Doppler radar hız hatası	23
Şekil 2-21: Veri kümesi 1 için Doppler hız ölçüm hata karşılaştırması	24
Şekil 2-22: Veri kümesi 3 için Doppler hız ölçüm hata karşılaştırması	25
Şekil 2-23: GNSS alıcısı fonksiyonel bloklar.....	26
Şekil 2-24: GPS performansı [23]	27
Şekil 2-25: Simulasyon GPS bloğu	28
Şekil 2-26: SPS ve WAAS GPS konum ölçümleri.....	29
Şekil 2-27: GPS konum hatasının hata bantlarına göre durumu.....	29
Şekil 2-28: GPS mesafe hatası ve hata bantları-veri kümesi 3 için	30

Şekil 2-29: Veri kümesi 1 için GPS hız ölçümü	31
Şekil 2-30: Veri kümesi 3 için GPS hız ölçümü	31
Şekil 2-31: İvmeölçer çalışma prensibi ve yapısı.....	32
Şekil 2-32:İvme ölçer ölçümü-ray %0,5 eğimli	35
Şekil 2-33:İvme ölçer ölçümü-ray %1 eğimli	35
Şekil 2-34:İvme ölçer ölçümü-ray %3 eğimli	36
Şekil 2-35: Sabit baliz ve kontrol edilebilen baliz	36
Şekil 2-36: Baliz hatasının araç hızına göre değişimi [9]	37
Şekil 3-1: Hız verisine göre yapılan kayma tespit sistemi	40
Şekil 3-2: Kızaklama ve patinaj sonucu teker sensörü ve ivme ölçerden elde edilen veriler	41
Şekil 3-3: GPS ya da Doppler radarlı kayma tespit algılayıcısı	42
Şekil 3-4:İvme verisine göre çalışan kızaklama ve patinaj algılayıcısı	43
Şekil 3-5: İvme farkı ile tespit edilen kayma durumları.....	44
Şekil 4-1: Güvenli aralık ve baliz geçişleri	48
Şekil 4-2: Birleştirilmiş navigasyon çözümü [20].....	49
Şekil 4-3: Sensör füzyon teknikleri ve yardımcı sistemler	52
Şekil 4-4: Senaryo 1, 2 ve 3'te kullanılan kızaklama ve patinaj verileri	54
Şekil 4-5: Senaryo 1'e göre elde edilen sensör hız verileri	55
Şekil 4-6: Senaryo 1'e göre elde edilen sensör hız hataları ve ERTMS hız hata bandı 1	56
Şekil 4-7:Senaryo 1'e göre sensörlerin mesafe ölçümleri.....	56
Şekil 4-8: Senaryo 1'e göre elde edilen sensör mesafe ölçüm hataları ve ERTMS hata bantları.....	57
Şekil 4-9: Senaryo 2'ye göre elde edilen sensör hız ölçümleri.....	58
Şekil 4-10: Senaryo 2 için elde edilen hız sensör hataları ve ERTMS hata bandı	58
Şekil 4-11:Senaryo 2 için mesafe ölçümleri	59
Şekil 4-12: Senaryo 2 için sensörlerin mesafe ölçüm hataları ve ERTMS hata bantları	60
Şekil 4-13: Senaryo 3 için elde edilen sensör hız ölçümleri	61
Şekil 4-14: Senaryo 3 için elde edilen sensör hız ölçüm hataları ve ERTMS hata bandı	61
Şekil 4-15: Senaryo 3 için elde edilen sensörlerin mesafe ölçümleri	62
Şekil 4-16: Senaryo 3 sonucu elde edilen sensörlerin mesafe ölçüm hataları ve ERTMS hata bantları	63

Şekil 4-17: Senaryo 1 için füzyon 1 ve referans hız	64
Şekil 4-18: Füzyon 1 ile elde edilen mesafe ölçümü ve referans mesafe	65
Şekil 4-19: Senaryo 1'e göre füzyon 1 hız hatası ve ERTMS hata bandı	65
Şekil 4-20: Senaryo 1'e göre füzyon 1 mesafe hatası ve ERTMS hata bantları	66
Şekil 4-21: Senaryo 2 için füzyon 1 hız ölçümü.....	67
Şekil 4-22: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 hız hatası ve ERTMS hata bandı	68
Şekil 4-23: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçümü.....	68
Şekil 4-24: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçüm hatası ve ERTMS hata bantları	69
Şekil 4-25: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 hız ölçümü	70
Şekil 4-26: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 hız hatası ve ERTMS hata bandı	71
Şekil 4-27: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçümü.....	71
Şekil 4-28: Füzyon 1 mesafe ölçüm hatasının ERTMS hata bantlarına göre durumu ...	72
Şekil 4-29: Veri normal dağılımı [14]	74
Şekil 4-30: Senaryo 1'e göre füzyon 2'nin hız ölçümü	76
Şekil 4-31: Senaryo 1'e göre sensörlerin ve füzyon 2'nin konum ölçümleri	76
Şekil 4-32: Füzyon 2 hız hatasının hata bandına göre durumu.....	77
Şekil 4-33: Füzyon 2 mesafe ölçüm hatasının ERTMS konum hata bantlarına göre durumu	78
Şekil 4-34: Senaryo 2'ye göre füzyon 2 sonucu ölçülen hız.....	79
Şekil 4-35: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 2 hız hatası ve ERTMS hata bandı	79
Şekil 4-36: Senaryo 2 için füzyon 2 sonucu elde edilen mesafe ölçümü	80
Şekil 4-37: Senaryo 2 için füzyon 2 mesafe hatası ve ERTMS hata bantları	80
Şekil 4-38: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 hızı	81
Şekil 4-39: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 hız hatası ve ERTMS hata bandı	82
Şekil 4-40: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 mesafe ölçümü	82
Şekil 4-41: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 mesafe ölçüm hatası ve hata bantları ...	83
Şekil 4-42: Senaryo 1'e göre füzyon 3 hız ölçümü	85
Şekil 4-43: Senaryo 1'e göre füzyon 3 mesafe ölçümü.....	85
Şekil 4-44: Senaryo 1'e göre füzyon 3'ün hız ölçüm hatası	86
Şekil 4-45: Senaryo 1'e göre füzyon 3'ün mesafe ölçüm hatası.....	86
Şekil 4-46: Senaryo 2 için füzyon 3 hız ölçümü.....	87
Şekil 4-47: Senaryo 2 için füzyon 3'ün hız hatasının ERTMS hata bandına göre durumu	88

Şekil 4-48:Senaryo 2 için füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe ölçümü.....	88
Şekil 4-49: Senaryo 2 için füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe hatası ve ERTMS hata bantları.....	89
Şekil 4-50:Senaryo 3 için füzyon 3 hız ölçümü	90
Şekil 4-51:Senaryo 3 için füzyon 3 hız hatası ve ERTMS hata bandı	90
Şekil 4-52:Senaryo 3 için füzyon 3 mesafe ölçümü.....	91
Şekil 4-53:Senaryo 3 için füzyon 3 mesafe ölçüm hatası ve ERTMS hata bantları	91
Şekil 4-54:Senaryo 1 için elde edilen füzyon hız hataları.....	94
Şekil 4-55:Senaryo 2 için elde edilen füzyon hız hataları.....	95
Şekil 4-56:Senaryo 3 için elde edilen füzyon hız hataları.....	95
Şekil 4-57: Senaryo 3-Sensörlerin histogram dağılımı	96
Şekil 4-58: Senaryo 3 için hız hata dağılımı	97

SÖZLÜKÇE

Türkçe

Ağırlıklı Toplam

Ataletsel

Baliz

Bütünleştirme

Bütünlük

Devamlılık

Doğruluk

Erişilebilirlik

Hareketli Blok Teknolojisi

Hat Devresi/Ray Devresi

Kayma

Kızaklama

Otomatik Tren Koruma (OTK)

Otomatik Tren Operasyonu (OTO)

Patinaaj

Sabit Blok Teknolojisi

Teker

Tolere edilebilir

İngilizce

Weighted Sum

Inertial

Balise

Integration

Integrity

Continuity

Accuracy

Availability

Moving Block Technology

Euroloop/Track Circuit

Slip

Slide

Automatic Train Protection (ATP)

Automatic Train Operation (ATO)

Spin

Fixed Block Technology

Wheel

Tolerable

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μ = beklenen değer – ortalama

σ^2 = varyans

σ = Standart sapma

Kısaltmalar

$a_{ivmeölçer}$: ivme ölçerden ölçülen ivme değeri

a_{opt} : optik hız sensörü üzerinden elde edilen ivme değeri

ATP: Automatic Train Protection

ATO: Automatic Train Operation

DSP: Digital Signal Processing

DGPS: Differential Global Positioning System

ERTMS: European Railway Traffic Management System

ETCS: European Train Control System

ERA: European Rail Agency

GNSS: Global Navigation Satellite System

GPS: Global Positioning System

GLONASS: Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

N: teker dönüş sayısı

OTK: Otomatik Tren Koruma

OTO: Otomatik Tren Operasyonu

PPS: Precise Positioning Service/Hassas Konum Hizmeti

r: Teker Yarıçapı

SPS: Standart Positioning Service/Standart Konum Hizmeti

SIL: Safety Integrity Level

$V_{araç}$: Araç hızı

V_{Dopp} : Doppler radar hızı

$V_{füzyon}$: Füzyon hız bilgisi

V_{f1} : Füzyon Tekniği 1'e ait hız

V_{f2} : Füzyon Tekniği 2'ye ait hız

V_{f3} : Füzyon Tekniği 3'e ait hız

V_{GPS} : GPS'ten elde edilen hız

V_{OPG} : Optik Teker sensöründen ölçülen hız

V_{teker} : Teker hızı

$v_{ssd_{th}}$: Kayma ve patinaj tespiti için belirlenen eşik hız

THR: Tolerable Hazard Rate

WAAS: Wide Area Augmentation Systems

$X_{gps \text{ hata}}$ = GPS pozisyon hatası

σ_{Dopp} = Doppler radar hız verisindeki hatanın standart sapması

σ_{GPS} = GPS hız verisindeki hatanın standart sapması

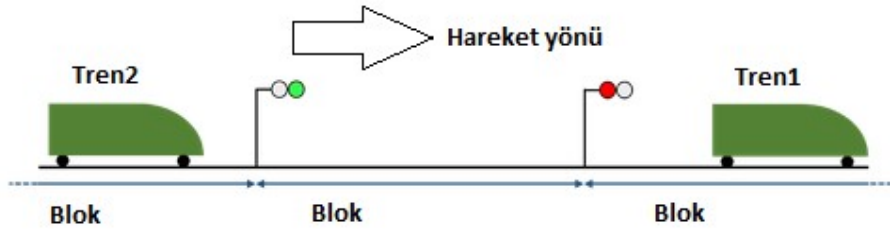
σ_{OPG} = Optik teker sensörü hız verisindeki hatanın standart sapması

1. GİRİŞ

Günümüzde raylı araçlar en çok tercih edilen ulaşım teknolojilerinden biridir. Hafif raylı araçlar, hızlı trenler, banliyö trenleri, lokomotifler, metrolar farklı teknolojilere dayanmakta ve farklı ihtiyaçlar için kullanılmaktadır. Bu araçların bazıları yolcu taşımada bazıları ise yük taşıma amaçlı kullanılmaktadır. Kullanım alanları ve teknolojileri birbirinden farklı olsa da bazı fonksiyonlar tüm raylı araçlarda ortak bir ihtiyaçtır. Konum ve hız hesabı bunlardan biridir. Bu hesabın doğru ve güvenilir bir şekilde yapılması raylı sistemlerdeki trafiğin daha verimli bir şekilde yönetilmesi ve kazaların azaltılması için çok önemlidir. Ülkelerdeki raylı sistem alt yapılarının ve araç hızlarının artması raylı ulaşım sistemlerinin kullanımını daha da arttırmaktadır. Bu durum raylı sistemlerdeki trafik kontrol sistemlerini daha önemli hale getirmektedir.

Eskiden raylı sistemlerde trafik kontrolü için görsel uyarılar, makas kontrolünü yapan görevliler ve daha az sefer sayısına izin veren “sabit blok” teknolojisi kullanılıyordu. Araç hız ve konum bilgisi sadece araç içinde sürücüyü bilgilendirme için kullanılıyordu. Sabit blok teknolojisi, hatların belli uzunluklarda bloklara ayrılması ve bir blokta sadece bir aracın bulunmasına izin vererek trafik kontrolünün sağlandığı bir yapıdır [1]. Sabit blok teknolojisinde blok mesafesi

Şekil 1-1’de gösterildiği gibi ray hattında bulunan iki sinyal kaynağı arasındaki mesafedir. Sinyaller araç bloğu terk ettiğinde değişmektedir. Bu sayede kazalar önlenmeye çalışılmaktadır.

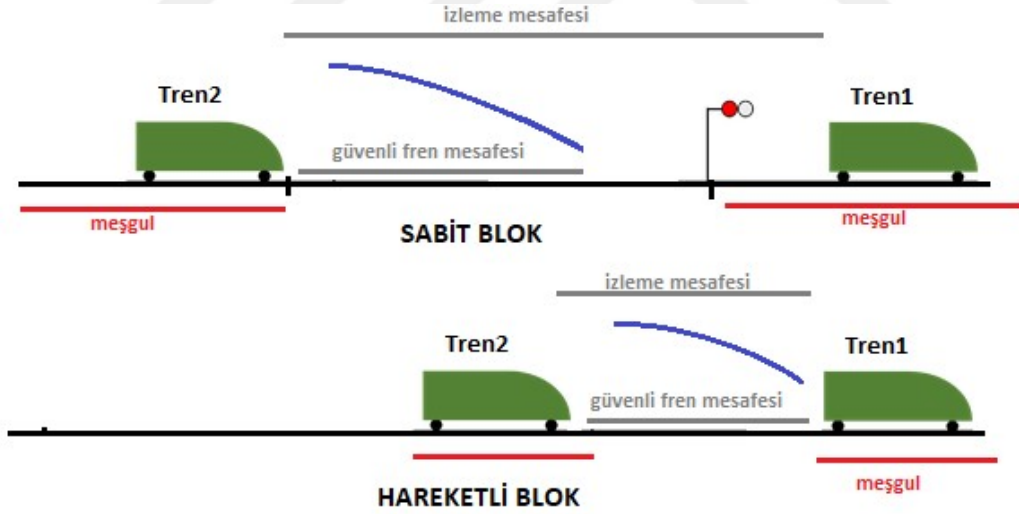


Şekil 1-1: Sabit blok teknolojisi

Sabit blok teknolojisinde sefer yoğunluğunun az olması yeni teknolojilere ihtiyacı artırmıştır. Günümüzde sinyalizasyon sistemleri raylı sistemlerdeki trafik yönetimi ve takibi için kullanılmaktadır. Sinyalizasyon sistemleri, hat sinyalizasyonu ve araç

sinyalizasyonu olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu sistemin avantajı aynı blokta birden fazla aracın seyahatine izin verilmesidir. Hat kontrol merkezleri, hatta bulunan araçların konumlarını ve hızlarını sürekli kontrol eder. Araçlar hat kontrol merkezlerine kendi konum bilgilerini “güvenli mesafe” aralıklarını ekleyerek bildirir. Hat kontrolcüsü bu bilgileri alarak bir blok içerisinde olması gereken yeterli aralıklandırmayı yaparak araç trafiğini yönetir. Buna “hareketli blok” teknolojisine denmektedir [1] [2].

Şekil 1-2’de hareketli blok ve sabit bloğun karşılaştırması yapılmaktadır. İki teknoloji için hesaplanan izleme mesafesine bakıldığında hareketli blok teknolojisine avantajı gözlenmektedir. Bu teknoloji sefer yoğunluğunun artmasına olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda, hatta bulunan araçlarının durumları ve rotaları sürekli takip edildiği için makas kontrol işlemleri hat kontrol noktalarından yapılabilmektedir. Sinyalizasyon sistemlerinin en önemli avantajı da otomatik sürüşe olanak sağlamasıdır. Bu durum, insan kaynaklı olan hataların daha aza indirilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1-2: Sabit blok ve hareketli blok karşılaştırma

“Otomatik Tren Operasyonu (OTO)” ve “Otomatik Tren Koruma (OTK)” sinyalizasyon sistemlerinin en önemli işlevleridir. OTO’nun en önemli görevi sürücülerden bağımsız, gidilen hatta en uygun hız profili ile aracın sürülmesidir. Aynı zamanda frenleme eğrilerinin hesaplanması da bu sistemin sorumluluğudur. Araçların duraklarda doğru bir şekilde ve konforlu bir frenle durması OTO’nun görevidir [3]. OTK sisteminin ise görevi güvenli bir sürüşün sağlanmasıdır. Hatta beklenmedik bir olay yaşandığında ya da

araçlardan gelen verilerde sorun olduğunda bu fonksiyon sayesinde araçlar güvenli bir şekilde durdurulmaktadır. Yani OTK sistemi güvenliği sağlarken OTO sistemi hat trafiğinin daha verimli hale getirilmesini sağlamaktadır. Bu iki sistem birbirini tamamlayarak güvenilir ve daha verimli bir ulaşım sistemi oluşturmaktadır. OTO'nun düzgün çalışıp ve OTK'nın daha az devreye alınması ile verimin artması için tren hız ve konum bilgisinin araç tarafından güvenilir biçimde üretilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda, Avrupa'da raylı ulaşım trafiğini düzenlemek ve ülkeler arası raylı ulaşımı geliştirmek için European Railway Agency (ERA) tarafından "Avrupa Raylı Trafik Yönetim Sistemi" (European Railway Traffic Management System-ERTMS) ve "Avrupa Tren Kontrol Sistemi" (European Train Control System-ETCS) oluşturulmuştur [4]. Bu sistem tren kontrolü ve trafik kontrolü olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. ERTMS, raylardaki ve araçlardaki alt yapının standartlaşması ve güvenlik kriterlerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. ERTMS standartlarında OTO ve OTK fonksiyonları belirlenmiştir. Konum ve hız belirlemede kullanılan odometre fonksiyonu da bunlardan biridir [1]. Bu standartta odometre sisteminin vermesi gereken çıktılar belirtilmiştir. Bu çıktıların en önemlileri araç hızı ve konum bilgisidir. Diğer odometre çıktıları, bu iki ana çıktıdan türetilebilecek araç ivmesi, sıfır hız bilgisi, gidilen yön ve güvenli mesafe bilgileridir [5].

Raylı sistemlerde konum ve hız hesabı, raylı sistemlerin ilk ortaya çıktığı 1800'lü yıllardan beri çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Bu amaçla kullanılan en eski sistemlerden biri teker sensörleridir (wheel sensor). Bu basit teknolojiye sahip konum ve hız hesaplama sistemi günümüzde hala en çok kullanılan sistemlerdendir. Ancak bu sistem teker çap bilgisi ve teker dönüşüne dayalı olduğu için kızaklama ve patinaj gibi durumlarda hatalı bilgi üretebilmektedir. Bu durum raylı sistemlerde daha farklı sensörlere de ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Doppler radarlar, demiryolu teknolojisinde teker sensörlerine alternatif olarak en sık kullanılan sensörlerdir. İvmeölçerler de hız ve konum bilgisi için kullanılan diğer sensörlerdir [6]. Teker sensörleri gibi bu sensörler de bazı durumlarda hatalı ölçümler yapabilmektedir. Bu durum birden fazla sensörün hız ve konum hesabında kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Aynı zamanda güvenli sürüş ihtiyacının artması ve tek sensörle elde edilen çözümlerin yetersiz kalması, birden fazla sensörün bütünleşik bir mimari içinde kullanılması ihtiyacını artırmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu tezde, güvenilir hız ve konum bilgisinin raylı araçlarda hesaplanması için uygun bir navigasyon mimarisinin oluşturulması amaçlanmıştır. Oluşturulan mimarinin verdiği sonuçlardaki hataların ERTMS/ETCS-Sistem Gereksinimleri Tanım dokümanında belirtilen hata bantlarını geçmemesi amaçlanmıştır [1]. Bu çerçevede, sensör karakteristikleri ve hata kaynakları değerlendirilmiştir. Sensör füzyon tekniği yardımı ile birden fazla sensör verisi birleştirilmiş ve daha güvenilir bir bilgi elde edilmesi hedeflenmiştir. Geleneksel sistemlerde kullanılan teker sensörleri, Doppler radarlar ve ivmeölçerlerin yanında GNSS verileri de füzyona eklenmiştir. Sensör füzyon tekniğine ek olarak, teker sensör hatalarının tespitinde kullanılabilecek “kızaklama ve patinaj tespit” ve hata sıfırlama için kullanılan balizler de değerlendirilmiştir. Bu yardımcı yöntemlerle sensör füzyon çıktısının güvenilirliği artırılmıştır.

1.2. Tezin Akışı

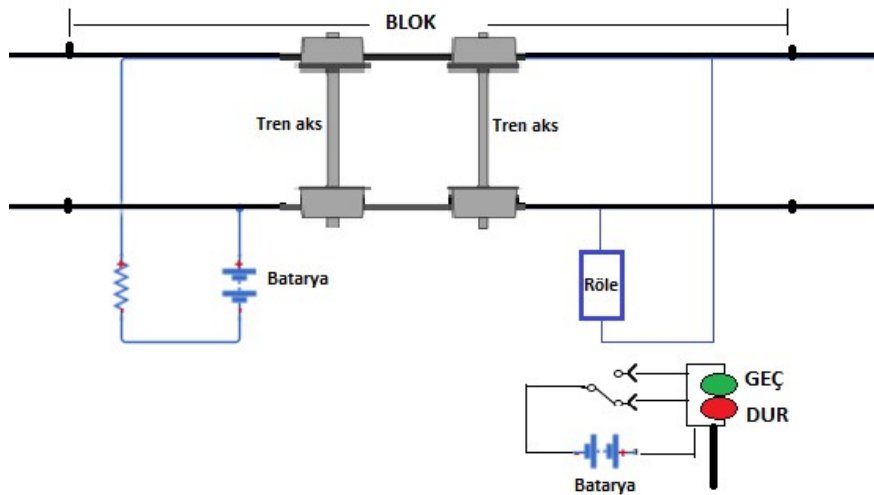
Bu tez giriş ve sonuç bölümleri ile beş ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde raylı araç teknolojileri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bunun yanında hız ve konum hesabının neden önemli olduğu anlatılmaya çalışılmıştır. İkinci ana bölümde, hazırlanması planlanan sistem mimarisinde kullanılacak sensörler incelenmiş ve modellenmiştir. Üçüncü ana bölümde kullanılması planlanan ana yöntem yardımcı olacak “kızaklama ve patinaj” tespit sistemi çalışılmıştır. Bu bölümde sistem alternatifleri benzetim ortamında oluşturulmuştur. Dördüncü ana bölümde kullanılması planlanan alternatif yöntemler incelenmiştir. İncelenen bütünleşme yöntemleri benzetim ortamında modellenmiş ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Baliz kullanımının önemi ve sonuca etkisi bu bölüm altında incelenmiştir. Ayrıca kullanılan yöntemin performans etkisinin yanında istenen güvenlik seviyesine etkisinden de bahsedilmiştir. Bütün alt parçaların birleştirilmesi benzetim ortamında yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son bölümünde, tez sonuçları özetlenmiştir.

2. DEMİRYOLU NAVİGASYON SENSÖRLERİ

Raylı sistemlerde Otomatik Tren Operasyonu (OTO) ve Otomatik Tren Koruma (OTK) sistemleri kullanılmaya başlanmadan önce konum ve hız hesabı araç üzerinde yer alan ekipmanlarla sağlanıyordu. Bu ekipmanlardan en yaygın olanı araç tekerlerine takılan ve teker dönüş sayısına göre konum ve hız hesabı yapan teker sensörleridir. Günümüzde konum ve hız hesabının doğru yapılabilmesi için araç üstü ve hat üstü ekipmanları birlikte kullanılmaktadır.

Hat üstü ekipmanlar, araç üstünde yapılan hesap için referans bilgi noktaları olarak kullanılmaktadır. Hat yapısına göre ve sinyalizasyon sisteminin seviyesine göre bu ekipmanlar farklılık göstermektedir. En yaygın şekilde kullanılan hat ekipmanları balizler ve ray devreleridir.

Ray devreleri, sinyalizasyon amaçlı kullanılan temel hat üstü ekipmanlarından biridir. Bu ekipmanlar, sabit blok sisteminin yönetiminde kullanılırlar. Ray devreleri sabit blokların meşgul ya da uygun olduğunun tespitinde kullanılmaktadır. Sabit blok geçiş bölgelerinde bulunan sinyalizasyon uyarıları bu devreler ile tetiklenmektedir. Tren olmadığında, ray devresi boş kalır ve akü tarafından sağlanan doğru akım, çalışan raylar tarafından röleye iletilir ve onu enerjilendirir. Röleye enerji verildiğinde, yeşil sinyal lambası yanar, bu da geçilen bloğun meşgul olmadığı anlamına gelmektedir. Ray devresi meşgul olduğunda röle enerjisiz kaldığı için kırmızı sinyal lambası yanacaktır [7]. Şekil 2-1 ray devresi ile sabit bloğun çalışma mantığını göstermektedir.



Şekil 2-1: Ray devresi ve sabit blok

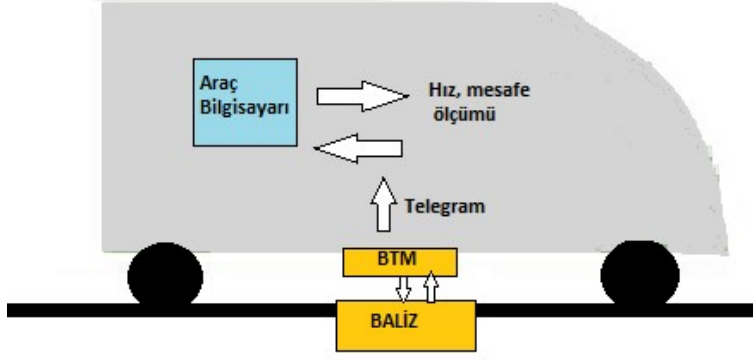
Balizler de ray devreleri gibi hat üstü ekipmanlarıdır. Araç tarafında, balizden alınan bilgiler konum ve hız hesabında referans olarak kullanılmaktadır [8]. Hareketli blok teknolojisinin kullanılmaya başlanması ile hat devreleri yerine balizler daha sık tercih edilmeye başlanmıştır. Baliz, raylı sistemlerde kullanılan ve ERTMS standardında tanımlı araç ve hat arasında iletişim sağlamak amaçlı kullanılan, sabit noktalara konumlandırılmış “hat üstü” OTO/OTK(ATO/ATP) ekipmanıdır [9]. Şekil 2-2’de hat üstü ekipmanı olan baliz ve araç üstü ekipmanı olan baliz okuyucu gösterilmiştir.



Şekil 2-2: Baliz ve baliz anten yerleşimi [10]

Balizler hat boyunca raylı araçlar için referans ve doğrulama noktaları olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise içerdikleri hat bilgileridir. Temel olarak balizler, statik konum bilgisini ve hat profil bilgilerini içerirler [9].

Şekil 2-3 baliz ve baliz anteni arasındaki haberleşmeyi göstermektedir. Baliz anteni baliz üzerinden geçerken enerjilenmekte ve baliz üzerinden hatta ait hız sınır profili, hat eğim bilgisi, baliz numarası, bir önceki baliz numarası, konum referans bilgisi gibi verileri içeren bilgi paketini araç kontrol bilgisayarına iletmektedir. Baliz anteni ve araç üstü kontrol bilgisayarı araç üstü ekipmanı olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2-3: Baliz anteni ve baliz haberleşmesi

Hız ölçümü yapan sensörlerse bir diğer araç üstü ekipmanlardandır. Bu sensörler araçtan araca farklılık göstermektedir. Hız ve konum hesabı için kullanılacak sensörler, araç tipine, aracın özelliklerine ve kullanılacağı hatta göre değişiklik göstermektedir. Raylı sistemlerde en çok kullanılan hız ve konum sensörleri teker sensörleri, Doppler radarlar ve ivme ölçerlerdir. Gelişen teknoloji ve değişen sistem bakışı ile günümüzde GNSS teknolojisi de raylı sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır.

Raylı araçlarda hız ve konum hesabı için uygun mimarinin belirlenmesinde sensör karakteristikleri önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle öncelikle sensörlerin artı ve eksilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Raylı araçlarda hız ve konum hesabını olumsuz yönde etkileyen durumlar aşağıdaki gibidir [11].

- Kayma/kızaklama ve patinaj durumları
- Tüneller ve yer altında bulunan hatlar
- Hatlarda bulunan engeller ve bozulmalar
- Araç hızının çok düşük olması
- Araç hızının çok yüksek olması
- Tekerlerde oluşan bozulmalar
- Hattaki eğimler

Sensör hataları incelenirken yapılacak karşılaştırmalarda standart sapma hesabı kullanılmıştır. Standart sapmanın hesaplanabilmesi için önce hata değişkeninin beklenen değerinin (ortalamasının) hesaplanması gerekmektedir. Standart sapma, değişiminin

kareköküdür [12]. Matematiksel olarak beklenen değer, standart sapma ve değişinti formülleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}\mu &= \text{Ortalama} \\ \sigma &= \text{Standart sapma} \\ \sigma^2 &= \text{değişinti}\end{aligned}$$

$$\mu = E(x) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = Var(x) = \frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n} \quad (2)$$

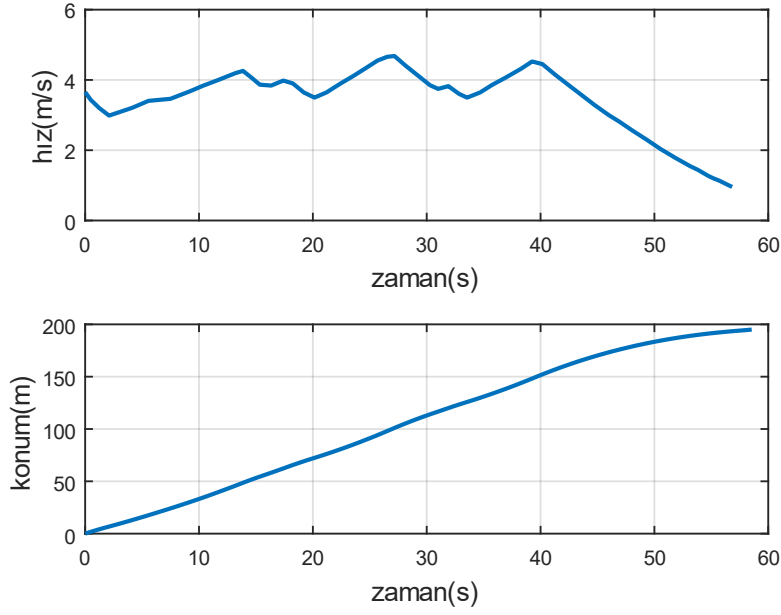
Burada verilen formüllerde x sensör sinyali, x_i ise i . sensör okumasını işaret etmektedir. Belirtilen durumların sensör ölçümleri üzerindeki etkileri, sensörler ve hata modelleri Matlab-Simulink ortamında modellenmiştir. Tüm sensörlerin karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmesinde aşağıdaki veri kümeleri ve hata bantları kullanılmıştır.

2.1. Veri Kümeleri ve Hata Bandı

Matlab-Simulink ortamında hazırlanan sensör ve füzyon modellerinin değerlendirilmesi sırasında aşağıda verilen 3 farklı veri kümesi kullanılmıştır. Bu verilerden veri kümesi 1 ve veri kümesi 2, Ankara Metro-M2 hattında test amaçlı çalıştırılan “Hafif Raylı Araç”tan alınmıştır. Bu verilerin toplanmasında motorsuz aksa takılan teker sensörleri üzerinden okumaları kaydeden bir kayıt cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın örnekleme periyodu 0,02 saniyedir. Veri kümesi 3 ise veri kümesi 2 üzerinden hızlı tren benzetimi için türetilmiş bir veri kümesidir. Bölüm 2, 3 ve 4’ te yer alan benzetim sonuçlarında bu veriler referans veri olarak kullanılmıştır.

2.1.1. Veri Kümesi 1

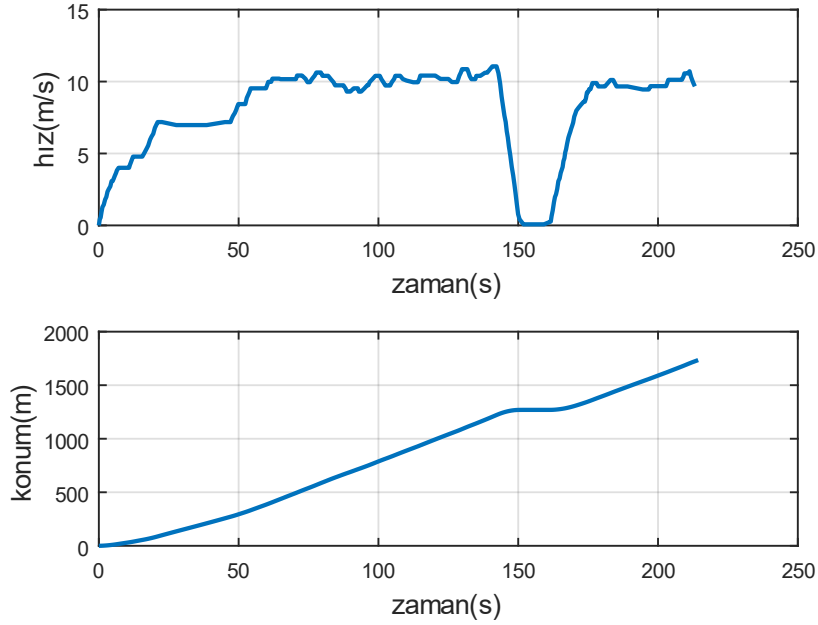
Bu veri grubu Ankara metrosunda 09.10.2017 tarihi saat 15:49-15:50 arasında kaydedilmiş 1 dakikalık bir hız ve konum verisidir. Bu veriler Şekil 2-4’te gösterilmiştir.



Şekil 2-4: Referans hız ve konum veri kümesi 1

2.1.2. Veri Kümesi 2

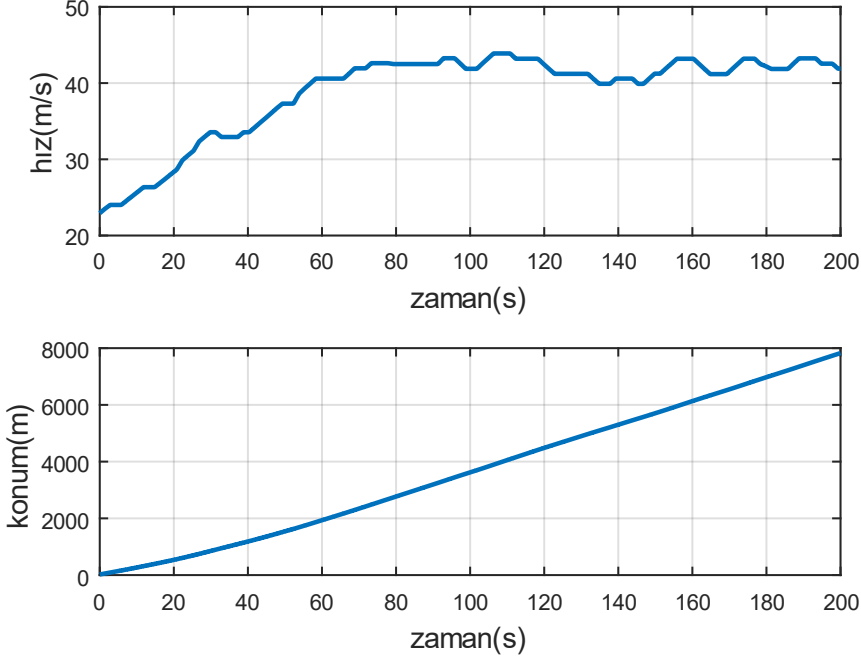
Bu veri grubu, Ankara metrosunda 19.10.2017 tarihinde saat 04:03-04:06 arasında kaydedilmiş 3 dakikalık bir hız ve konum verisidir. Bu veriler Şekil 2-5'te gösterilmiştir.



Şekil 2-5: Referans hız ve konum veri kümesi 2

2.1.3. Veri Kümesi 3

Bu veri grubu, hızlı trenlerdeki performansı da değerlendirebilmek amaçlı veri kümesi 2 üzerinden türetilmiş bir veri grubudur. Hız verisi üretilirken veri kümesi 2 üzerine 23 m/s’lik hız eklenmiş ve mevcut ivmelenme 1m/s^2 ’yi geçmeyecek şekilde artırılmıştır. Elde edilen veriler Şekil 2-6’da gösterilmiştir.

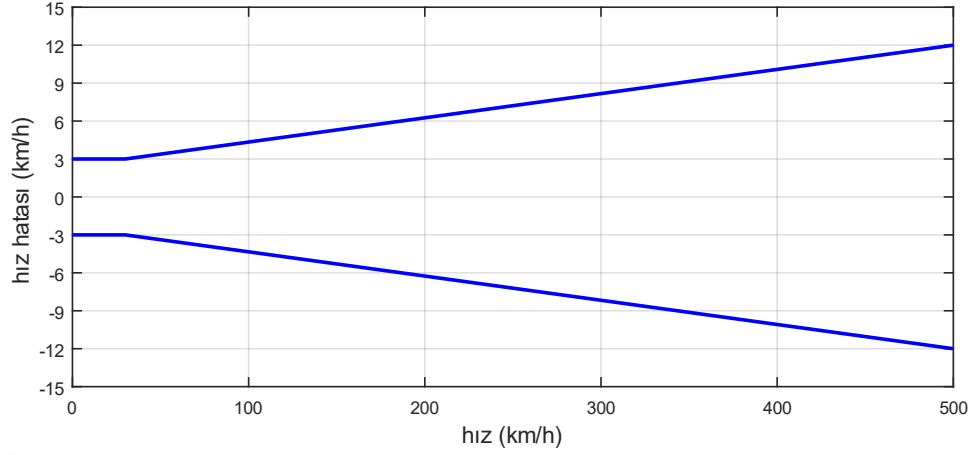


Şekil 2-6: Referans hız ve konum veri kümesi 3

2.1.4. ERTMS Odometre Hata Sınırı

ERTMS (European Rail Traffic Management System), odometre fonksiyonu için kabul edilebilir hata sınırlarını belirlemiştir. ERTMS standardına göre hız hatası araç hızı 30 km/sa’e gelene kadar 2km/sa’dan düşük, 30 km/sa ile 500 km/sa arasında 2 km/sa’dan 12 km/sa’e kadar olan orantılı bandı geçmemelidir. Pozisyon hatası ise “ $\pm 5\text{m} \pm (0.05\text{gidilen mesafe})$ ” hata bandını geçmeyecek şekilde tanımlanmıştır [13]. Hız hata profili Şekil 2-7’de gösterilmiştir.

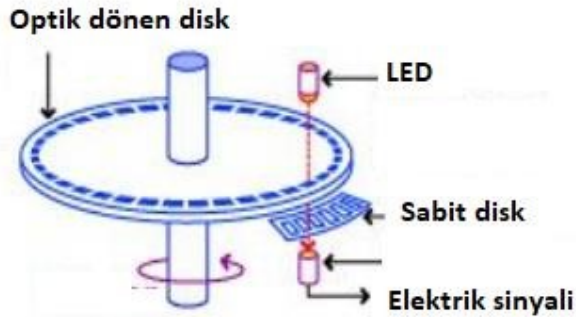
Standartta tanımlı bu hata, benzetimlerde “ERTMS hız hata bandı 1” ve “ERTMS mesafe hata bandı 1” olarak kullanılmıştır. Ek olarak bu iki hata bandı %50 düşürülerek “ERTMS hız hata bandı 2” ve “ERTMS mesafe hata bandı 2” oluşturulmuştur.



Şekil 2-7: ERTMS hız hata bandı 1

2.2. Teker Sensörü

Teker sensörleri kullanılan en eski hız ve konum belirleme teknolojisidir. Bu sensör, teker dönüş sayısına göre araç hızının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca gidilen mesafe bilgisi de bu sensör üzerinden hesaplanabilmektedir. Teker sensörlerinde dönüş frekansının hesaplanması için farklı teknolojiler kullanılabilir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, teker sensörü olarak optik darbe sayıcı kullanılmıştır. Bu tip sensörler darbeyi üretecek ve darbeyi sayacak iki ana yapıdan oluşur. Darbeyi üreten kısımda, teker hareketiyle dönen çentikli bir disk ve optik bir kaynak bulunur. Darbe sayan kısım ise fotosel ile diskin dönmesi ile oluşan optik darbelere uygun kare dalga üretir ve kare dalganın frekansı teker dönüş frekansı ile doğru orantılıdır [14].



Şekil 2-8: Optik darbe sayacı çalışma mekaniği [14]

Araç hızı ve gidilen mesafe hesabı aşağıdaki formüllere göre yapılır.

$$V_{teker} = 2\pi r f \quad (3)$$

Burada belirtilen (V_{teker}) sensörün bağlı olduğu teker hızını, (r) tekerin yarıçapını (metre), (f) ise teker sensörünün hesapladığı dönüş frekans (Hz) bilgisini vermektedir.

Gidilen mesafe hesabında, teker dönüş sayısı (N) ve teker yarıçap (r) bilgisi kullanılır. Tekerin dönüş sayısı, optik darbe sayacı tarafından üretilen darbe sayısının, disk üzerinde yer alan çentik sayısına bölünmesi ile elde edilir. Disk üzerindeki çentik sayısı ve optik darbe sayıcının ürettiği darbelerin frekansı sensör iç değişkenidir. Eşitlik (4)'de yer alan formülde (X) aracın gittiği mesafeyi, (N) ise tekerin dönüş sayısını vermektedir. Bu formülden anlaşılacağı gibi teker sensörleri ile gidilen mesafe hesabında tekerin dönüş sayısı ve tekerin çap bilgisi kullanılmaktadır.

$$X_{teker} = 2\pi r N \quad (4)$$

Teker sensörleri, kullanım kolaylığı ve dayanıklılıkları sebebiyle çok tercih edilmektedir. Ancak bu sensörler kullanılarak yapılan hesaplamalarda bazı hatalar oluşabilmektedir. Yukarıdaki eşitliklerden anlaşılacağı gibi, teker sensörleri ile yapılan hesaplamalar doğrudan teker özellikleri ile ilişkilidir. Teker çap bilgisi, hesaplamaların temelini oluşturmaktadır ve hesaplamaların doğruluğu için bu verinin doğru biliniyor olması gerekmektedir. Raylı araçlarda teker çap bilgisi düzenli olarak ölçülmekte ve güncellenmektedir. Buna rağmen teker çap bilgisinde oluşan küçük bir hata birikerek konum bilgisinde büyük bir hataya neden olabilmektedir. Eşitlik (5) ve eşitlik (6)'da teker sensörü hız ve mesafe hataları δV_{teker} ve δX_{teker} şeklinde verilmiştir.

$$\delta V_{teker} = 2\pi \delta f + 2\pi \delta r \quad (5)$$

$$\delta X_{teker} = \int \delta V_{teker} dt \quad (6)$$

Teker sensörleri, teker çap bilgisi dışında dönüş frekansı (f) ile de doğrudan ilişkilidir. Bu sensörlerin hatasız çalışabilmesi için tekerlerde kızaklama ve patinaj durumlarının yaşanmaması gerekmektedir. Eşitlik (5) teker hızında oluşacak hatanın frekans

ölçümünde ve yarıçap bilgisindeki hatadan meydana geleceğini göstermektedir. Aynı şekilde eşitlik (6) konumdaki değişikliğin hızdaki hata ile bağlantısını göstermektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi hız üzerinde sabit bir hata yaratan teker çap hatası (δr) konum üzerinde artarak büyüyen bir hataya sebep olmaktadır.

Kızaklama (slide); frenleme durumunda araç hızının teker hızından büyük olması anlamına gelmektedir. Patinaj (spin) ise ivmelenme sırasında teker hızının araç hızından daha fazla olduğu durumlarda meydana gelen olaydır [15]. Bu iki olay, ray ve teker arasındaki sürtünme katsayısında meydana gelen değişimler ve pnömatik fren sisteminin etkisi ile oluşmaktadır. Kızaklama ve patinaj durumlarına genel olarak “kayma (slip)” denmektedir. Kayma durumlarından biri yaşandığında teker dönüş sayısı (N) doğru hesaplanamamaktadır. Bu da hem hız hem de gidilen mesafe bilgisinde hataların oluşmasına yol açmaktadır. Raylı araçlar, kızaklama ve patinaj giderici sistemlere sahiptir. Ancak bu sistemlerin devreye girebilmesi için önce durumun tespit edilmesi gerekmektedir. Bu sistemler devreye girene kadar oluşan hatalar, hesaplanan hız ve konum verileri üzerinde gözlenebilmektedir. Eşitlik (5)’te gösterilen frekanstaki kayma (δf), kızaklama ve patinaj durumlarında meydana gelmektedir. Bu hata kısa süreli bir hatadır, bu yüzden teker çap hatasındaki gibi konum üzerinde büyük hatalara sebep olmaz ama hız üzerinde anlık ve büyük bir etkiye sahiptir.

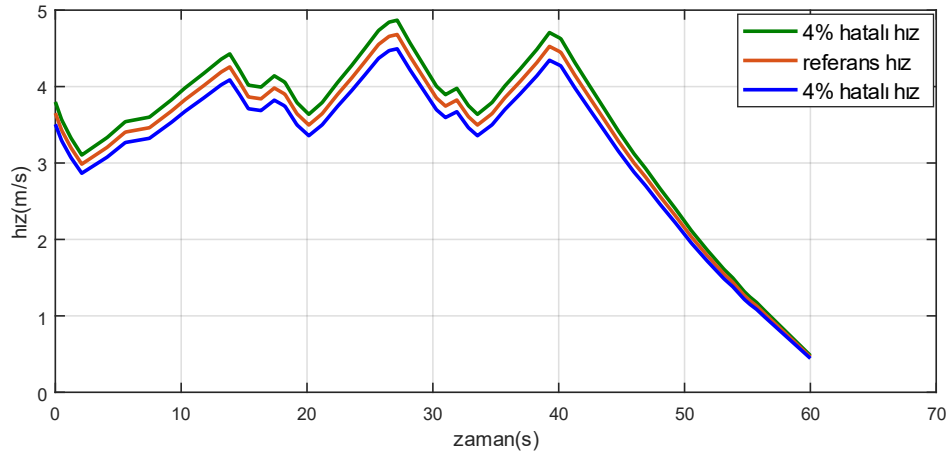
Odometri sensör karakteristiğinin incelenmesi için Şekil 2-9’da yer alan Simulink modeli oluşturulmuştur. Bu model oluşturulurken sensörün hız ve mesafe hesabı için kullandığı formüller ve değişkenler kullanılmıştır. Modelde yer alan girdilerden referans hız, modelde kullanılan ana değişkendir. Teker çapı ($2r$), kayma durumu ve teker çap hatası sensör hatası oluşturmak için kullanılmaktadır. Darbe sayısı ise sensörün iç değişkenidir ve ihtiyaca göre değiştirilebilir. Bu bölümde darbe sayısı 100 olarak kabul edilmiştir. Bu da bir tam teker dönüşünde 100 darbe üretilmesi anlamına gelmektedir. Model çıktısı olarak ise toplam dönüş sayısı, gidilen mesafe ve hız bilgisi elde edilmiştir.



Şekil 2-9: Teker odometre sensörü simülasyon bloğu

Teker sensörlerinde hatalar, sensörün sistematik hatası dışında teker çap bilgisindeki hatadan ve kayma durumlarından oluşabilmektedir. Bu nedenle bu iki parametre sensör modelinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

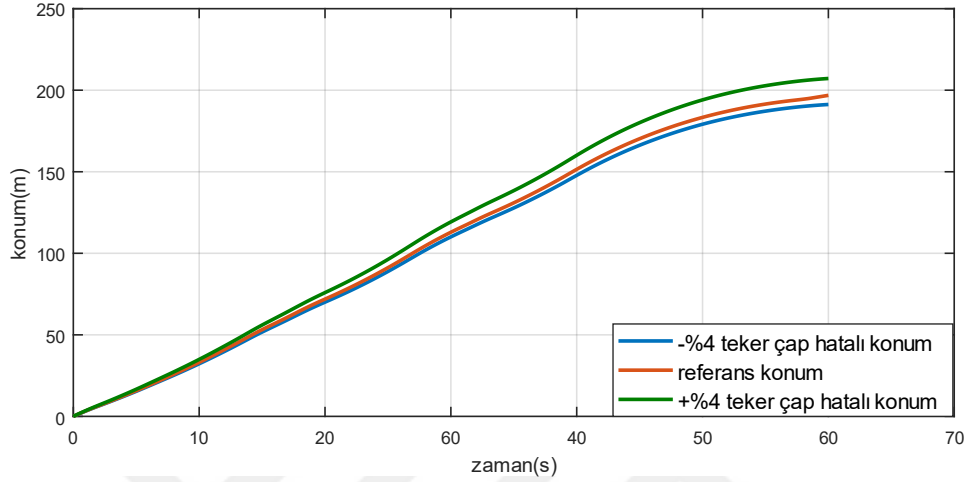
Teker çap hatasının teker hız sensörü üzerindeki etkisi Şekil 2-10 ve Şekil 2-11’de gösterilmiştir. Bu şekillerde referans olarak veri kümesi 1 kullanılmıştır. Teker çap bilgisi $+4\%$ ve -4% olacak şekilde yanlış girilmiş ve aşağıdaki sonuçlar alınmıştır. Şekil 2-10’da teker çap hatasının hız verisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Teker çap bilgisinin fazla girildiği durum, hızın fazla hesaplanmasına neden olmuştur. Teker çap bilgisinin 4% eksik girildiği durumda ise hız bilgisinin eksik hesaplanmasına neden olmuştur.



Şekil 2-10: $\pm 4\%$ teker çap hatasının hesaplanan hız verisine etkisi

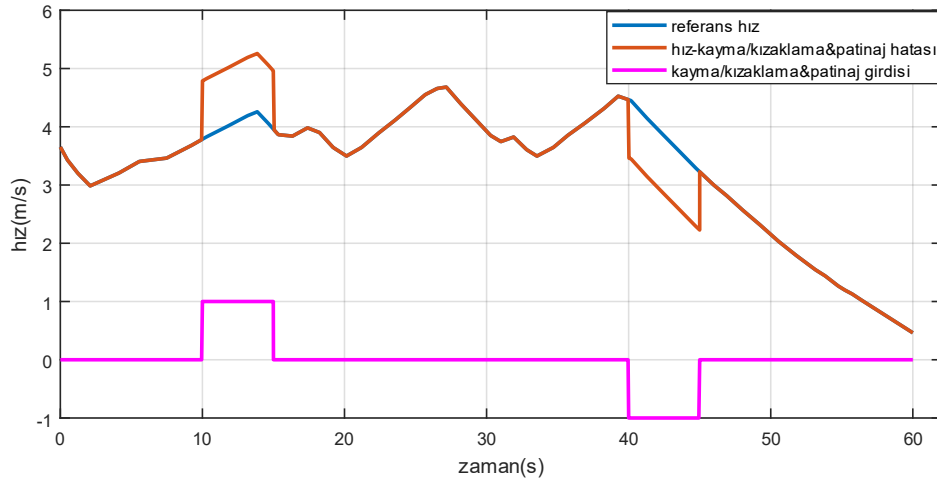
Şekil 2-11’de ise teker çap hatasının gidilen mesafe hesabı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Teker çap hatası, mesafe hesabını hız hesabına göre daha fazla etkilemiştir.

Çünkü gidilen mesafe bilgisi sürekli birbiri üzerine eklendiği için hata etkisinin zamanla arttığı görülmüştür.



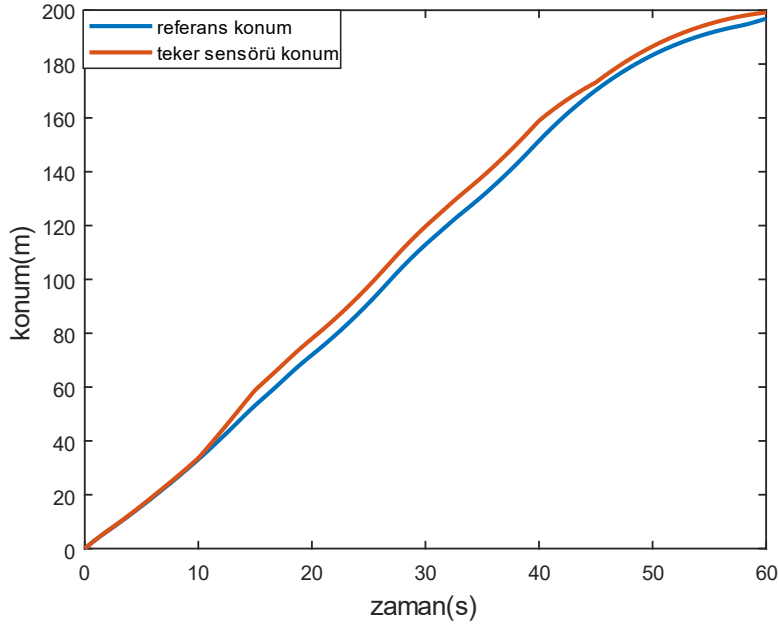
Şekil 2-11: +/-%4 teker çap hatasının hesaplanan mesafe verisine etkisi

Kızaklama ve patinaj durumunun teker sensörü üzerindeki etkileri ise Şekil 2-12 ve Şekil 2-13'te gösterilmiştir. 60 saniyelik referans hız verisinin üzerine 10-15 saniye arasında patinaj etkisini görebilmek için artı yönde bir hata eklenmiştir. Aynı şekilde kızaklama durumunu görebilmek için 40-45 saniye arasına eksi yönde bir hata eklenmiştir. Eklenen hata, Şekil 2-12'de gösterilen hız çıktısı üzerinde gözlenmektedir. Patinaj sırasında teker dönüşü arttığı için teker sensör hız verisi artmıştır. Tam tersi, kızaklama durumunda gözlenmiştir.



Şekil 2-12: Kızaklama ve patinaj durumunun hız verisi üzerindeki etkisi

Şekil 2-13'te kızaklama ve patinaj durumunun gidilen mesafe üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Teker çap hatasında olduğu gibi, bu hatada konum bilgisi üzerinde büyük bir hata gözlenmemiştir. Yaratılan hata, eksi ve artı yönde aynı büyüklükte ve aynı sürede uygulandığı için konum hatası giderek artmamıştır.



Şekil 2-13: Kızaklama ve patinaj durumunun mesafe verisi üzerindeki etkisi

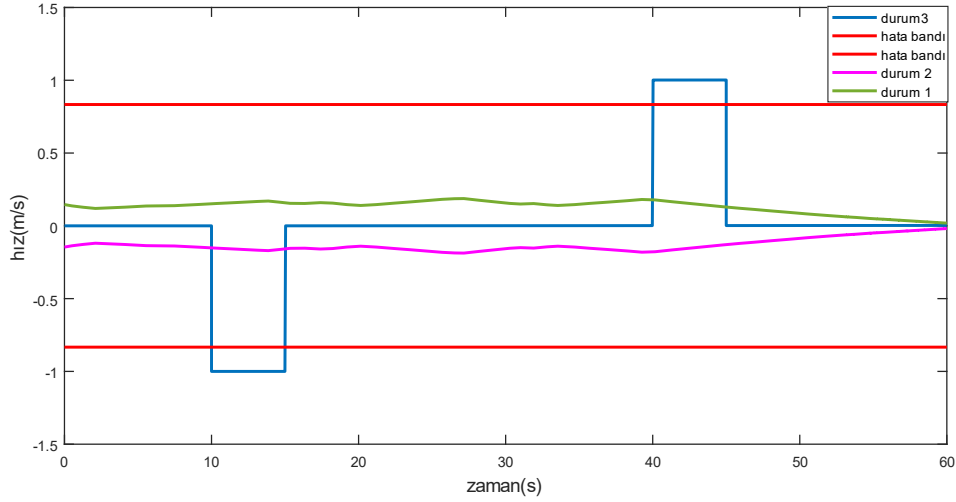
Şekil 2-13'teki hata durumunda mesafe hatasının azaldığı görülmüştür. Çünkü kızaklama ve patinaj hataları aynı büyüklükte verilmiştir ve teker çapı hatası olmadığı varsayılmıştır. Teker çap hatasından farklı olarak, kızaklama ve patinaj hatalarında hata anlık olduğu için zamanla büyümektedir. Hata yaşandıktan sonra teker sensör mesafe çıktısı üzerinde sabit bir şekilde devam etmektedir.

Yukarıda değerlendirilen sensör hatalarının karşılaştırılması için hız hatasının standart sapma verileri Tablo 2-1'de verilmiştir.

Tablo 2-1: Teker sensör hatalarının hız hatası üzerindeki etkileri

Durum	Teker çap hatası	Kayma/kızaklama zaman aralığı(s)	Patinaj zaman aralığı(s)	STD(m/s)
Durum 0	Yok	yok	yok	~0
Durum 1	+%4	Yok	Yok	0.04
Durum 2	-%4	Yok	Yok	0.04
Durum 3	Yok	10-15	40-45	0.40

Şekil 2-14'te teker çap hatası ve kayma durumundaki hız hatalarının daha önce tanımlanan ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi kayma durumları olan bölgelerde hata kabul edilebilir sınırların dışına çıktığı gözlemlenmiştir. Sadece teker çap hatasından oluşan hataların kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.



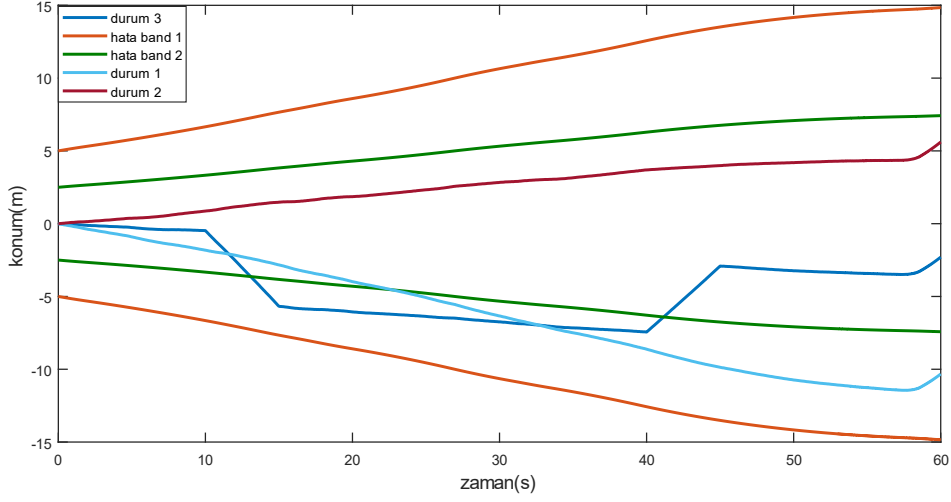
Şekil 2-14: Teker sensör-hız hatalarının hata bandına göre gösterimi

Tablo 2-2'de teker sensör mesafe ölçüm hatalarının standart sapma karşılaştırması yapılmıştır. Mesafe ölçüm hatası üzerinden yapılan standart sapma hesabı hız hatası standart sapma değerlerinden farklıdır. Mesafe hatası giderek arttığı için benztim süresi ile standart sapma değeri de artacaktır. Bu nedenle mesafe hatası üzerinden standart sapma değerlendirmesi yapılmamıştır.

Tablo 2-2: Teker sensör hatalarının mesafe hatası üzerindeki etkileri

Durum	Teker çap hatası	Kızaklama zaman aralığı(s)	Patinaj zaman aralığı(s)	STD(m)
Orjinal durum	Yok	yok	yok	3.36
Durum 1	%4	Yok	Yok	4.44
Durum 2	- %4	Yok	Yok	3.95
Durum 3	Yok	10-15	40-45	4.42

Şekil 2-15'te ise teker çap hatası ve kayma durumlarındaki konum hataları karşılaştırılmıştır. Teker çap hatasının pozisyon verisi üzerindeki etkisi ise hız verisinden farklı olarak büyük olmuştur. Elde edilen verilerin hata bandı 1'in içinde kaldığı ancak hata bandı 2'nin dışına çıktığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde kayma durumları incelendiğinde, konum hatasının üzerinde teker çap hatasına göre daha az olumsuz etkisinin olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2-15: Teker sensör-konum hatalarının hata bandına göre gösterimi

2.3. Doppler Radar Sensörü

Doppler radar demiryolu navigasyonunda kullanılan bir diğer hız sensörüdür. Doppler radar, “Doppler etkisi” ile çalışan bir hız sensörüdür. Doppler etkisi veya Doppler kayması, 1842 yılında Avusturyalı fizikçi Christian Doppler tarafından bulunmuştur. Doppler etkisi kaynağa göre hareket eden dalganın frekansındaki değişim olarak ifade edilmektedir. Yayımlanan frekans ve alınan frekans arasındaki fark Doppler frekansı olarak adlandırılır [16]. Doppler etkisi tüm dalga tiplerinde gözlemlenebilen bir etkidir (su dalgası, ses dalgası, radyo dalgası vb.). Raylı sistemlerde kullanılan Doppler radarlarda mikrodalga RF teknolojisi kullanılmaktadır. Kaynak, gözlenen ve kullanılan dalganın hızı Doppler frekansının hesaplanması için gereklidir. Doppler etkisinin formülleri aşağıdaki gibidir. Aşağıdaki formüllerde kaynak hızı v_s , gözlemci hız v_o , dalga hızı v_m , kullanılan dalganın frekansı f_m ve gözlenen dalganın frekansı f olarak kabul edilmiştir. f_d ise Doppler frekansı için kullanılmıştır.

- Kaynak ve gözlenen duruyorsa $v_s = v_o = 0$:

$$f = f_m$$

- Kaynak duruyor, gözlenen hareket ediyorsa:

$$f = \left(\frac{v_o \pm v_m}{v_m} \right) f_m \quad (7)$$

“+” gözlenen kaynağa yaklaştığı zaman, “-” ise gözlenen kaynaktan uzaklaştığında kullanılır.

- Kaynak hareket ediyor ve gözlenen duruyorsa, $v_o = 0$:

$$f = \left(\frac{v_m}{v_s \mp v_m} \right) f_m \quad (8)$$

“+” kaynak gözlenenden uzaklaştığı zaman, “-” ise kaynak gözlenene yaklaştığı zaman kullanılır.

- Kaynak ve gözlenen hareket ediyorsa:

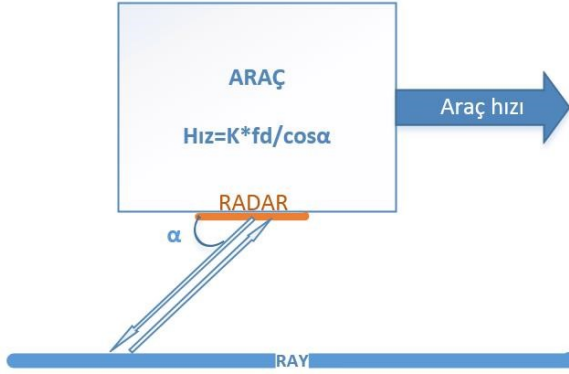
$$f = \left(\frac{v_o \pm v_m}{v_s \pm v_m} \right) f_m \quad (9)$$

Payda kullanılan “+” ve paydada kullanılan “-” kaynağın ve gözlenenin yaklaştığını, payda “-” ve paydada “+” kullanımı kaynağın ve gözlenenin uzaklaştığında kullanılır.

Sonuç olarak Doppler frekansı aşağıdaki gibidir. Doppler frekansı pozitif olduğunda gözlenen kaynağa yaklaşıyor, negatif olduğunda gözlenen kaynaktan uzaklaşıyor demektir [17].

$$f_d = f - f_m \quad (10)$$

Raylı sistemlerde kullanılan Doppler radarlar araç üzerine sabit bir şekilde monte edilir.



Şekil 2-16: Demiryolunda Doppler radar çalışma ilkesi

Radarın raya gönderdiği dalganın frekansının hesabı için eşitlik (8) kullanılacaktır, çünkü radar araç üzerinde ve araç ile hareket halindedir. Bu durumda kaynak araç, gözlenen ise raydır. Raydan geri gelen dalganın frekans hesabında ise eşitlik (7) kullanılacaktır. Bunun nedeni ise kaynağın ray, gözlenenin ise araç olmasıdır. Mikrodalganın hızı da ışık hızı olduğu için $v_m = 3 \times 10^8$ m/s'dir. Araç hızını bulmak için gönderilen ve alınan dalganın açılarının da bilinmesi gerekmektedir, bu yerleşim açısı α kabul edilmiştir.

f_1 : araçtan raya gönderilen sinyalin frekansı

f_2 : raydan araca geri saçılan sinyalin frekansı

v : araç hızı

$$f_1 = \left(\frac{v_m}{v_m \mp v \cos(\alpha)} \right) f_m \quad (11)$$

v_m ışık hızı kabul edildiği için ve araç hızı ışık hızından çok küçük olduğu için $f_1 = f_m$ olarak kabul edilebilir.

$$f_2 = \left(\frac{v_m \pm v \cos(\alpha)}{v_m} \right) f_m = \left(1 + \frac{v \cos(\alpha)}{v_m} \right) f_1 \quad (12)$$

$$f_d = f_2 - f_m \quad (13)$$

$$f_d = \frac{2 v \cos(\alpha)}{v_m} f_m \quad (14)$$

Eşitlik (14)'ten anlaşılabileceği gibi Doppler radar bir hız sensörü olarak kullanılabilir. Bu formüle bakıldığında, kullanılan parametrelerin teker yapısına ya da araç yapısına bağlı olmadığı görülmektedir. Bu yüzden Doppler radarlar teker sensörlerinin hataya girdiği durumlardan etkilenmezler. Ancak bu sensörlerin de hatalı sonuç verdiği durumlar bulunmaktadır.

Doppler radarların performansını radarın montajı, aracın gittiği hattın durumu ve hava koşulları etkilemektedir. Çünkü radarların gönderdikleri ve aldıkları dalgaların frekansı ve açısı araç hızının hesabında doğrudan kullanılmaktadır. Raylarda oluşan bozulmalar ya da kötü hava koşulları sonucu radarın gönderim ve alım yaptığı yüzeylerin kapanması sensör verisinin yanlış hesaplanmasına neden olmaktadır. Eşitlik (14) göz önüne alındığında radarların montaj açısının (α) da ray ve hava durumu kadar hesabı etkilediği görülmektedir.

Simulink ortamında hazırlanan Doppler radar modeli Şekil 2-18'de blok olarak gösterilmiştir. Bu model hazırlanırken Doppler radar üreten firmaların hata ölçüm verileri referans alınmıştır, Şekil 2-17'de referans alınan sensöre ait bilgiler verilmiştir. Doppler radar hız hatası, hesaplanan hızın “%k” kadar altında ya da üstünde olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu bilgi Deuta Werke adlı firmanın raylı sistemlerde kullanılan radar dokümanından alınmıştır. Radar yüksek çözünürlükte ölçüm yapabildiğinde hata standart sapması hız 100km/sa'in altındayken sıfır ile 0.4km/sa arasında bir değer, hız 100km/sa'den büyükse hızın %0,4 olarak verilmiştir. Bu değer düşük çözünürlükte %1 seviyesine çıkabilmektedir [18].



DRS05/1 & DRS05/2

Feature/Specification	DRS05/1 & DRS05/2
Working principle	two channel speed sensor
Determinable speed range	0.2 km/h up to max. 600 km/h
Statistical error (1 σ)	<0.4 km/h (v <100 km/h) <0.4 % (v >100 km/h)

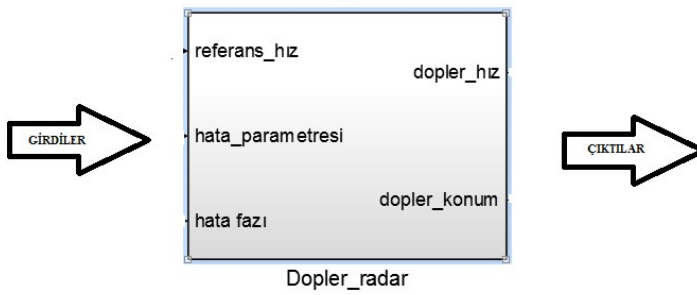
Şekil 2-17: Doppler radar performans örneği [18]

Bu bilgilerle Doppler radar hızı aşağıdaki şekilde modellenmiştir.

$$\delta V_{\text{Dopp}} = 0.01kV_{\text{ref}}(\cos(wt+\phi)) \quad (15)$$

$$V_{\text{Dopp}} = V_{\text{ref}} + \delta V_{\text{Dopp}} \quad (16)$$

Hata modeli oluşturulurken hatanın $\pm\%k$ bandında salınması için sinüsoidal dalga modeli kullanılmıştır. $w = \frac{2\pi}{T}$, $T = \text{benzetim süresi}$ olarak seçilmiştir. Sinüsoidal hatanın fazı (ϕ) her benzetimde değiştirilerek Doppler radar çıkış verisi üzerine etkisi incelenmiştir. Bu formüllerle oluşturulan Simulink modeli Şekil 2-18’de verilmiştir.

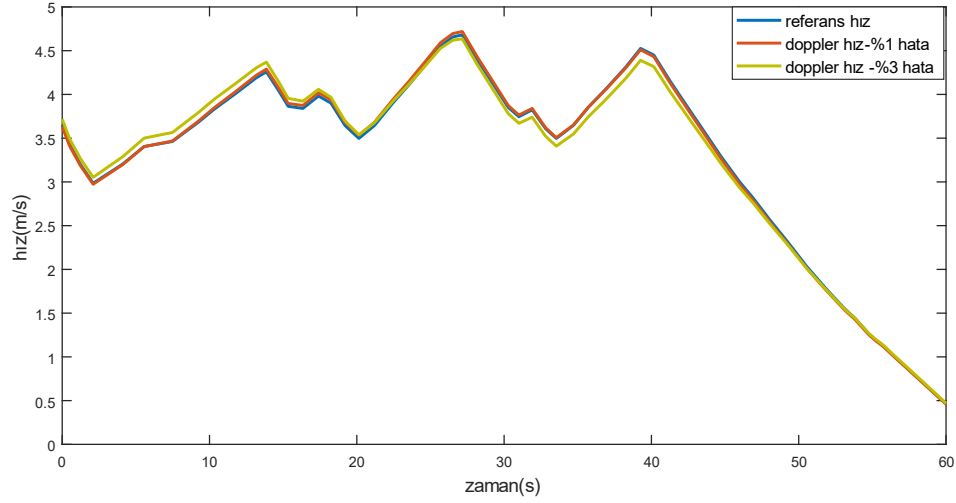


Şekil 2-18: Doppler radar simulasyon bloğu

Burada Doppler radar hatasının %1 ve %3 olduğu iki farklı hata senaryonun gerçek hız verisi üzerine etkisi görülmüştür. Bu ölçüm sırasında hız hatası sürüş hızından etkilendiği için veri kümesi 1 ve veri kümesi 3 kullanılarak iki senaryo oluşturulmuştur.

Doppler radar modelinin veri kümesi 1 için verdiği hız verilerinin karşılaştırması Şekil 2-19’da verilmiştir. Veri kümesi 1 için kullanılan hata modelleri aşağıdaki gibidir.

- $\delta V_{\text{Dopp1}} = 0.01V_{\text{ref}}(\sin(wt + \phi_1))$, $\phi_1 = 1.8\pi$, $T=60$ sn
- $\delta V_{\text{Dopp2}} = 0.03V_{\text{ref}}(\sin(wt + \phi_2))$, $\phi_1 = 0.2\pi$, $T=60$ sn

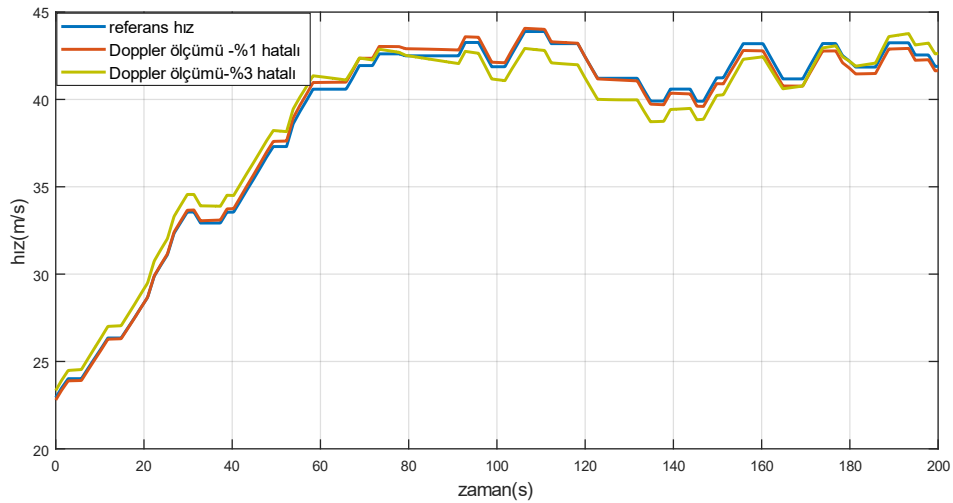


Şekil 2-19: Veri kümesi 1 için hata 1 ve hata 2 durumlarına göre Doppler radar hız ölçümü

Doppler radarın çıktısı gerçek hız verisinden %k kadar farklı olduğu için benzetim sonucu elde edilen hız verileri referans hızı takip eden bir hata bandı içinde kalmıştır.

Şekil 2-20'de Doppler radarın hız ölçüm karşılaştırmaları veri kümesi 3 için incelenmiştir. Veri kümesi 3 için kullanılan hata modelleri aşağıdaki gibidir.

- $\delta V_{Dopp1} = 0.01 V_{ref}(\sin(\omega t + \phi_1))$, $\phi_1 = 1.8 \pi$, $T = 200$ sn
- $\delta V_{Dopp2} = 0.03 V_{ref}(\sin(\omega t + \phi_2))$, $\phi_2 = 0.2 \pi$, $T = 200$ sn



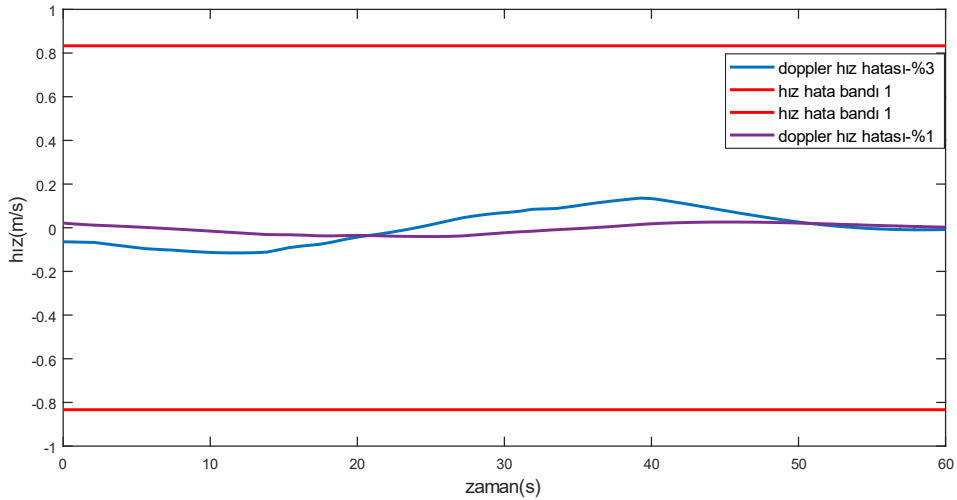
Şekil 2-20: Veri kümesi 3 için hata 1 ve hata 2 durumlarına göre Doppler radar hız hatası

Hata yüzdesinin ve kullanılan referans hızın ölçüm üzerindeki etkileri Tablo 2-3'teki standart sapma verileri üzerinden anlaşılmaktadır. Doppler radarın hatası ölçülecek hızdan etkilenmektedir. Bu durumdan dolayı Doppler radarlar düşük hızlarda iyi sonuçlar verirken yüksek hızlarda hata miktarlarının arttığı gözlenmiştir.

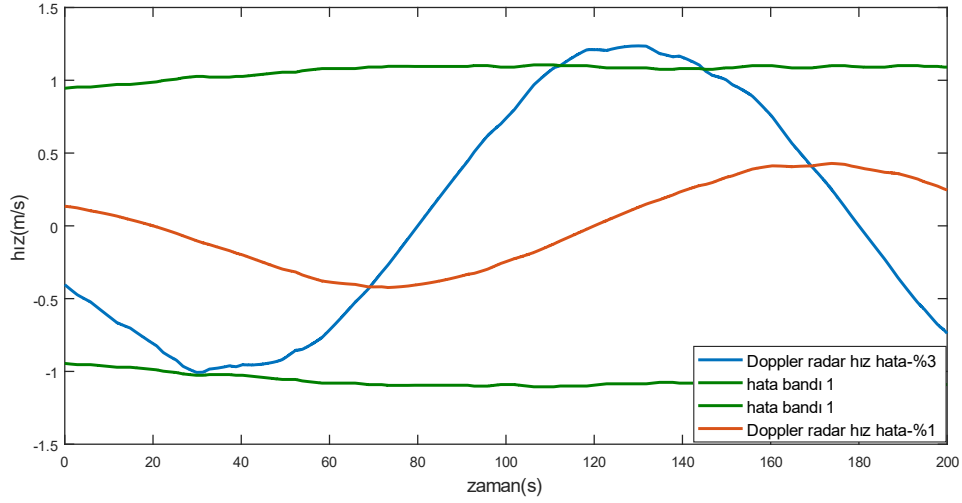
Tablo 2-3:Doppler radar hız hatası

Veri kümesi	Hata yüzdesi	Hata fazı	T(sn)	STD(m/s)
Veri kümesi 1	%1	1.8π	60	0.02
Veri kümesi 1	%3	0.2π	60	0.08
Veri kümesi 3	%1	1.8π	200	0.29
Veri kümesi 3	%3	0.2π	200	0.79

Şekil 2-21 ve Şekil 2-22, Doppler radar hız ölçümlerinin ERTMS hız hata bandı 1'e göre durumlarının göstermektedir. Bu şekiller de Tablo 2-3'te çıkan sonuçlarla örtüşmektedir. Veri kümesi 1 kullanılarak yapılan benzetim sonucunda, iki hız hatasının da hata bandı içerisinde kaldığı görülmüştür. Ancak veri kümesi 3 ile yapılan benzetim sonucunda, %3'lük hataya sahip olan ölçümün belli noktalarda hata bandını geçtiği görülmüştür.



Şekil 2-21: Veri kümesi 1 için Doppler hız ölçüm hata karşılaştırması



Şekil 2-22: Veri kümesi 3 için Doppler hız ölçüm hata karşılaştırması

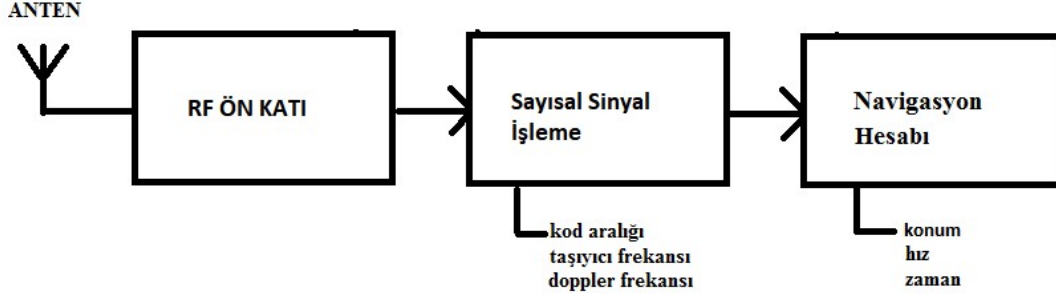
Doppler radarın modelinde gösterilmek istenen, sensör herhangi bir dış etken yüzünden veri kaybetmediğinde hatasının düşük yüzdeli olduğu ve ölçüm verisinin gerçek hız verisinden çok uzaklaşmadığıdır. Ancak hız hatası hız verisi ile orantılı olduğu için yüksek hızlarda artan bir hataya sahip olduğu gözlenmiştir. Hata araç hızından etkilense bile ölçüm sonuçları çoğunlukla hata bandı içerisinde kaldığı için raylı sistemlerde en çok tercih edilen hız sensörlerindendir.

2.4. GNSS Sensörleri

Uydu tabanlı navigasyon sistemlerinde, GNSS navigasyon sinyalleri uydulardan uydu alıcılarına gelir ve uydu alıcıları bu bilgileri konum hesabında kullanır. Küresel uydu tabanlı konumlama sistemleri (GNSS) küresel bir kapsama alanına sahiptir. Avrupa'da Galileo, ABD'de GPS, Rusya'da GLONASS, Çin'de Beidou kullanımda olan küresel navigasyon sistemleridir [19].

Uydu sinyalleri gerçek zamanlı verileri taşımaktadır. Herhangi bir uydunun yayını sayısız alıcı tarafından diğer alıcılarla etkileşim olmadan alınabilir. Uydu tabanlı navigasyonda ana mantık gönderilen ve alınan sinyal arasındaki zaman ya da faz farkının ölçülmesidir. Navigasyon uydusundan gelen sinyalleri alabilmek için bir GNSS alıcısına ihtiyaç vardır. GNSS alıcıları Şekil 2-23'te gösterildiği gibi üç ana bloktan oluşmaktadır. Radyo frekans alıcısı, uydudan gelen sinyalleri alarak dijital sinyale dönüştürmektedir. Sayısal Sinyal

İşleme bloğu yerel olarak üretilen sinyalleri uydu sinyalleri ile ilişkilendirerek izlenene ait “kod aralığı”, “taşıyıcı frekansı”, “Doppler frekansı” gibi verileri sağlar. Navigasyon işleme bloğu da bu verilere dayanarak pozisyon, hız ve zaman verilerini üretir [4], [20].



Şekil 2-23: GNSS alıcısı fonksiyonel bloklar

Günümüzde, uydu tabanlı navigasyon sistemleri birçok alanda kullanılmaktadır. Hız, konum ve zaman bilgileri bu sistemler üzerinden yüksek doğruluk oranı ile hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir bu nedenle birçok uygulamada GNSS tabanlı sistemler kullanılmaktadır. Raylı sistemlerde ise GNSS kullanımı ise tartışılan bir konudur.

GNSS veri performansı 4 ana kriter ile değerlendirilebilir [19], [21].

- Doğruluk (Accuracy): Alıcının ölçümü ile gerçek ölçümün birbirine yakın olması
- Bütünlük (Integrity): Güven eşliğini sağlaması ve hata durumlarını tespit edebilmesi
- Devamlılık (Continuity): Sistemin kesintisiz çalışabilme yeteneği
- Erişilebilirlik (Availability): Sistemin doğruluk, bütünlük ve devamlılık kriterlerini sağlayabilme yüzdesi

Doğruluk ve bütünlük açısından GNSS çıktılarının geleneksel navigasyon sistemlerine göre üstünlükleri vardır. Raylı araçlar, yer altından, tünellerden, ormanlardan, kanyonlardan ve dağlık arazilerden sıklıkla geçmektedir. GNSS verileri bu arazilerde devamlılık ve dolayısıyla erişilebilirlik konularında yeterli değildir. Bu durum da GNSS verilerinin performansını düşürmektedir. Bu sebeple GNSS verilerinin tek başına raylı sistemlerde kullanılması güvenlik açısından problem yaratabilmektedir.

2009 yılında Avrupa’da raylı sistemler alanında araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmak için “Shift2Rail” organizasyonu kurulmuştur [22]. Bu organizasyonun desteklediği çalışmalardan biri de “Güvenli Tren Konumlama” çalışmasıdır. Bu

çalışmanın amacı GNSS teknolojisinden yararlanarak ERTMS'te kullanılacak gürbüz (robust) ve daha düşük maliyetli konumlama sistemleri geliştirmektir.

Bu tez kapsamında oluşturulmaya çalışılan mimarinin bir parçası olarak GPS almaçları seçilmiştir. GPS iki tip veri sağlayabilmektedir; Standart Konumlama Servisi (SPS) ve Hassas Konumlama Servisi (PPS). PPS, ABD askeri ve müttefikleri tarafından kullanıldığı için bu mimari kapsamında SPS verileri esas alınmıştır. SPS'te taşıyıcı sinyal olarak L1 frekansı kullanılmaktadır.

$$L1=1575,42\text{MHz}$$

GPS verilerinde birden fazla nedenden hata oluşabilmektedir. Atmosferik hatalar ve alıcı kalitesi en etkili hatalardır. SPS konum performansı, Amerika GPS ofisinin 2001'deki ölçümlerine göre 15 metre olarak belirtilmiştir. %95'lik oranla konum bilgisi 15 metre yarıçaplı dairenin içerisinde tespit edilebilmektedir. Standart GPS performansının yetmediği durumlarda WAAS ve DGPS gibi destek sistemleriyle GPS verisinin kesinliği artırılabilir. WAAS (Wide Area Augmentation System) Avrupa kıtası üzerinde hizmet veren uydu tabanlı bir GPS destek sistemidir ve hatası 3 metreden küçüktür. DGPS (Differential GPS) istasyonu ise kullanıcılar tarafından konumlandırıldığı konum civarında 3-30 km'lik bir alanda hizmet vermektedir ve hatası 1 metreden küçüktür [23].



Şekil 2-24: GPS performansı [23]

GPS'in hız hatası ise 0.3 m/s olarak alınmıştır [24]. Bu hata, araç hızından bağımsızdır. Araç çok düşük hızlarda gittiğinde bu hata etkili bir şekilde görülürken hız arttıkça hatanın etkisi azalmaktadır.

Bu kapsamda GPS verilerinin modellenmesi gerekmektedir. GPS hatası, “beyaz gürültü” ve sistematik hata olarak modellenmiştir. Bu çalışmada GPS hatası olarak beyaz gürültü ve 100 saniye periyotlu sinüsoidal olarak değişen sistematik hatanın toplamı şeklinde modellenmiştir. GPS hız ve konum verileri, birbirinden bağımsız olarak ölçülebilmektedir. Bu nedenle hız ve konum hata modelleri ayrı ayrı modellenmiştir.

Konum hatası için sinüsoidal dalganın tepe noktasının büyüklüğü için iki durum incelenmiştir. Kullanılan konum hata modelleri aşağıdaki gibidir.

- SPS hata modeli:

$$X_{\text{gps hata}} = (7.5 \sin(2\pi f t + \phi)) + w_1$$

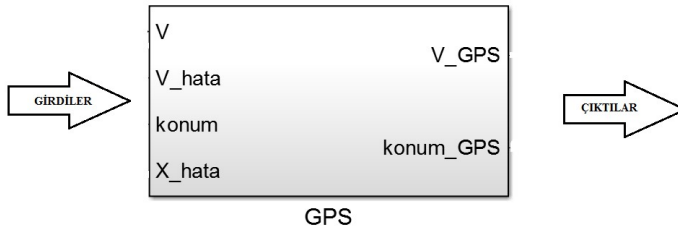
w_1 : “0” ortalama beyaz gürültü, $\sigma=1$ metre, $f=0.01$ Hz

- WAAS hata modeli:

$$X_{\text{gps hata}} = (1.5 \sin(2\pi f t + \phi)) + w_2$$

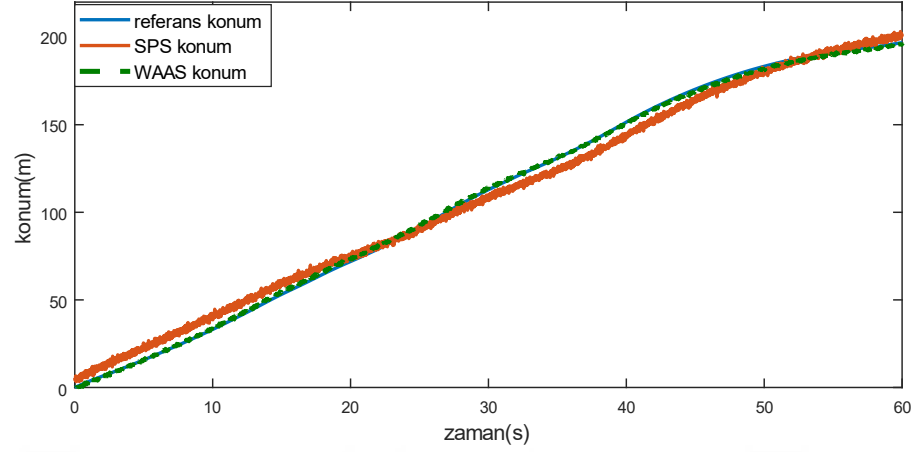
w_2 : “0” ortalama beyaz gürültü, $\sigma=0.15$ metre, $f=0.01$ Hz

Şekil 2-25’te GPS Simulink bloğu gösterilmiştir. Bu model, referans hız ve konum bilgisi üzerine hız ve konum hatalarını ekleyerek GPS hızı ve konum bilgisini vermektedir.



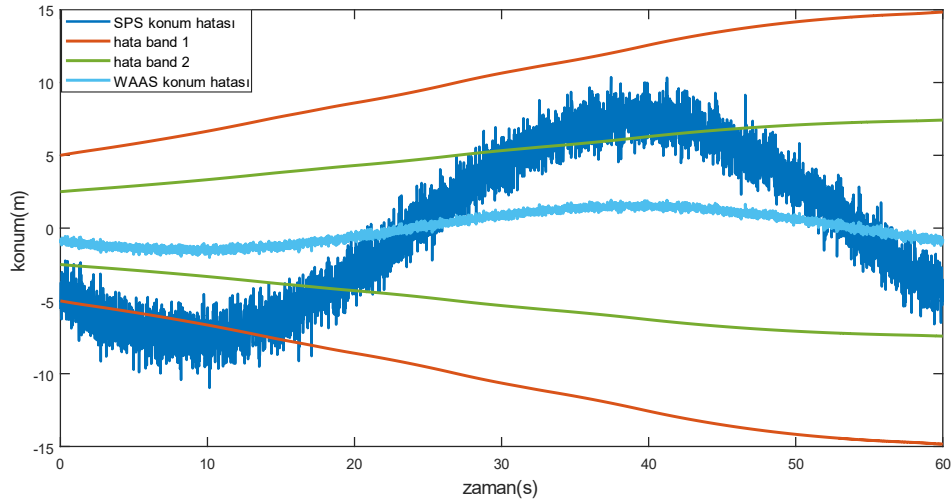
Şekil 2-25: Simulasyon GPS bloğu

SPS hatası ve WAAS hatasına göre elde edilen GPS konum verileri Şekil 2-26’da gösterilmiştir. Bu benzetim sonuçları elde edilirken veri kümesi 1 kullanılmıştır.



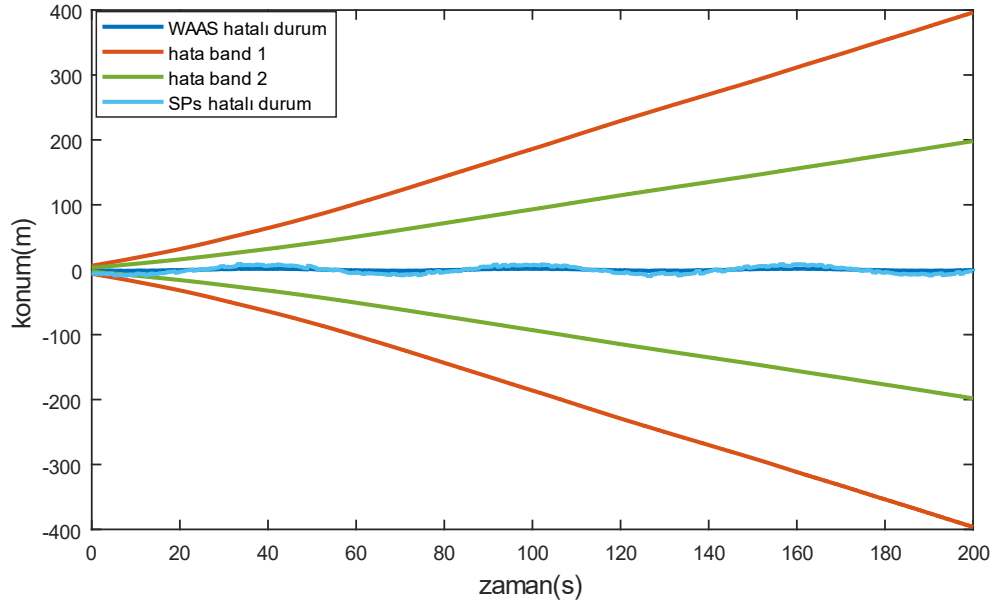
Şekil 2-26: SPS ve WAAS GPS konum ölçümleri

Şekil 2-27’de GPS konum ölçüm SPS hatası ve WAAS hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve ERTMS mesafe hata bandı 2’ye göre durumları gösterilmiştir. 2001 senesi GPS verileri referans alınarak hazırlanan SPS hata modelinin ERTMS hata bandı 1’in içinde kaldığı ancak ERTMS hata bandı düşürüldüğünde (ERTMS hata bandı 2) sınırları geçtiği görülmüştür. Günümüz GPS sensörleri referans alınarak hazırlanan WAAS hata modelinin ise iki hata bandında da sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. ERTMS hata bandı gidilen mesafe ile doğru orantılı artarken GPS hatası tanımlanan sınırlar içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2-27: GPS konum hatasının hata bantlarına göre durumu

Şekil 2-28’de GPS mesafe ölçüm hatasının veri kümesi 3’e göre durumu gösterilmiştir. ERTMS mesafe hata bantlarının gidilen mesafe ile orantılı olarak artmasından dolayı veri kümesi 3’te hata bantlarının da genişlediği görülmüştür. GPS mesafe ölçüm hatası ise araç hızından bağımsız olduğu için aracın hızlı gittiği durumda hata bantlarının içinde kalmıştır.



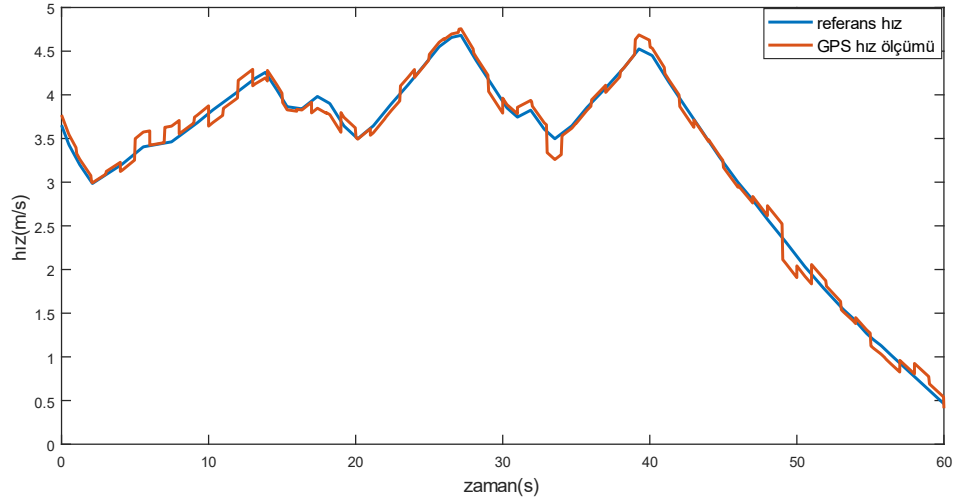
Şekil 2-28: GPS mesafe hatası ve hata bantları-veri kümesi 3 için

- GPS Hız hatası:

$$\delta V_{\text{gps}} = w$$

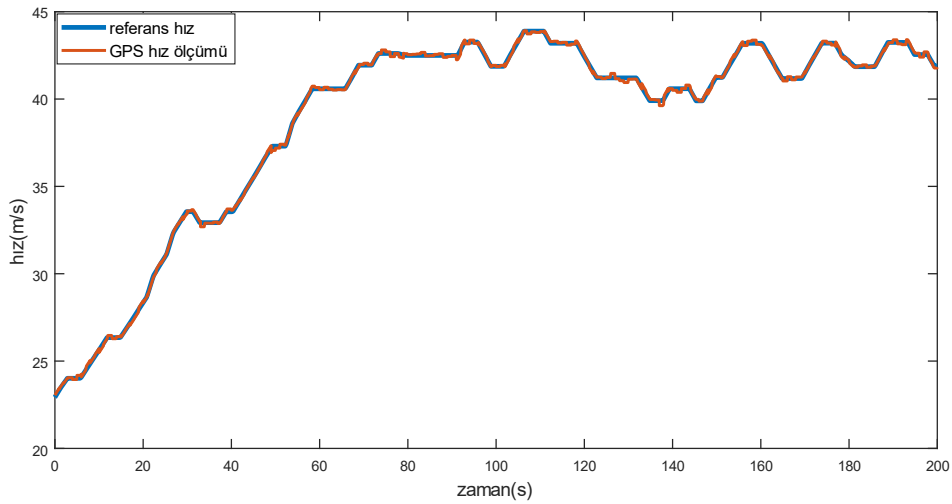
w: beyaz gürültü, “0” ortalamalı, , $\sigma=0.1$ m/s

GPS hız hatasının araç hızı ile ilişkisini göstermek için iki adet benzetim yapılmıştır. İlk benzetimde veri kümesi 1 kullanılmıştır. Şekil 2-29’da GPS hız ölçümünün veri kümesi 1’e ait hızla karşılaştırılması gösterilmiştir. Burada kullanılan referans hız düşük değerlerde olduğu için GPS hatasının etkisi gözlenmiştir.



Şekil 2-29: Veri kümesi 1 için GPS hız ölçümü

Referans alınan GPS hatası hız ile orantılı değişmediğinden araç hızı arttıkça bu sensörün hata etkisi azalacaktır. Şekil 2-30'da veri kümesi 3 için yapılan benzetim sonucu gösterilmektedir. GPS hız hata modeli aynı olduğu için, bu ölçümde hız hatası referans hızı göre çok küçük kalmıştır. ERTMS hız hata bandı da araç hızı ile orantılı olduğu için, GPS hız verisinin yüksek hızlarda hata bandından çıkma olasılığı düşük hızlara göre daha düşüktür.



Şekil 2-30: Veri kümesi 3 için GPS hız ölçümü

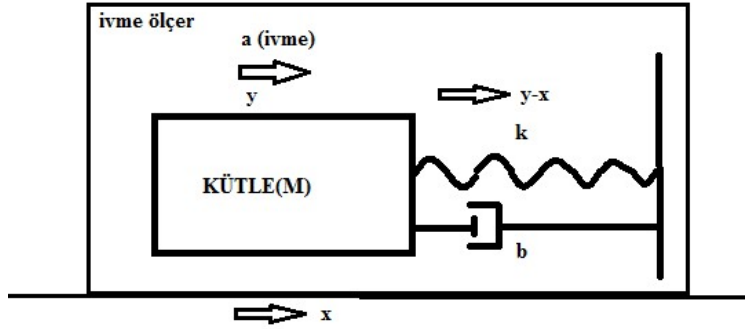
Yukarıdaki değerlendirmelerden anlaşılacağı gibi GPS sensörü yüksek kesinlikli bir hız ve konum sensörüdür. GPS verileri erişilebilir olduğunda doğruluk oranları yüksek sonuçlar vermektedir. Günümüzde kullanılan GPS alıcıları çok gelişmiş olduğundan

verilerin doğruluk seviyeleri de artmıştır. Ancak sensör verilerine erişim problemi, raylı sistemlerde GPS alıcılarının tek başına kullanılmasına engel teşkil etmektedir. Tünel, kanyon gibi coğrafyalarda GPS destekleyici sensörlerin kullanılması gereklidir.

2.5. İvmeölçer Sensörü

İvmeölçerler ataletsel (inertial) sensörlerdir. Raylı sistemlerde kullanılan ivmeölçerler, mekanik titreşimi elektriksel sinyale dönüştüren elektromekanik cihazlardır. Raylı sistemlerde hareket tek yönde olduğundan tek eksenli ivmeölçerler kullanılmaktadır [25]. Matematiksel olarak araç ivmesinden araç hız ve mesafe bilgisi türetilabilmektedir. Ancak ivmeölçerlerin tek başlarına hız ve konum hesabında kullanılması birçok hataya sebep olabilmektedir.

Şekil 2-31’de ivmeölçer kütle (m), yay (k) ve sürtünme (b) şeklinde modellenmiştir. Bu tip ivmeölçerler temel mekanik kurallarına göre çalışmaktadır.



Şekil 2-31: İvmeölçer çalışma prensibi ve yapısı

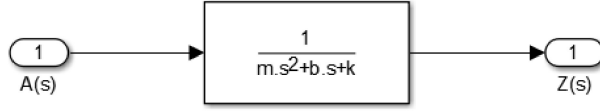
Aşağıdaki eşitlik (17)’nin hesabı için, ivmeölçerin takılı olduğu platformun konumu x , ivme ölçer içinde yer alan kütlenin konumu ise y olacak şekilde belirlenmiştir. Sürgü ve yay üzerindeki konum değişikliği $y-x$ şeklindedir. İvmeölçerin takılı olduğu platforma uygulanan kuvvet de (F) şeklinde tanımlanmıştır.

$$m\ddot{y} + b(\dot{y} - \dot{x}) + k(y - x) = 0 \quad (17)$$

$$z = y - x$$

$$m\ddot{z} + m\ddot{x} + b\dot{z} + kz = 0 \quad (18)$$

İvmeölçerlerde kütlenin ivmeölçer içerisindeki konumu, düşük frekansta ivme ile orantılıdır. Bu oran, yay katsayısı ile verilir.



$$a = \ddot{z} + \frac{b}{m} \dot{z} + \frac{k}{m} z \quad (19)$$

Ancak, ivmeölçer eğimli bir yüzeyde durduğunda yerçekiminden dolayı gerçek ivmeye pozitif ya da negatif yönde yerçekimi kuvveti de eşlik etmektedir. Bu durumda eşitlik sıfır yerine etkili olan yerçekimi kuvvetine eşitlenmektedir. θ , ivmeölçerin bulunduğu yüzeyin eğimini göstermektedir.

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = -m\ddot{x} \pm mg \sin \theta \quad (20)$$

Bu nedenle ivmeölçerler eğimli bir yüzeyde hareketsiz durduğunda bile yerçekimi etkisinden dolayı sıfır yerine $g \sin \theta$ büyüklüğünde bir ivme ölçmektedir [26]. Bu ölçüm araç hareketinin ivmesi olmadığından dolayı bir hataya neden olmaktadır. Bu da ivmeölçerlerin eğimli yerlerde hatasının artmasına sebep olur. Bu nedenden dolayı, yüksek eğimli yerlerde ivmeölçerler hız ve konum hesabında kullanılmak istendiğinde jiroskop gibi ekipmanlarla birleştirilerek hız ve konum hesabında kullanılmaktadır. Ancak jiroskop ve ivmeölçer entegrasyonu karmaşık bir teknoloji olup, ataletsel navigasyon sistemi olarak adlandırılır [27].

Raylı sistemlerde eğim ne kadar düşük tutulmaya çalışılsa da raylar dönüş kurplarına, eğimlere ve bozukluklara sahiptir. Raylar tasarlanırken olabilecek maksimum eğim bazı durumlara göre belirlenmektedir. Rayın hangi tip araçlar için kullanılacağı bu eğimin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Yük trenlerinin ve lokomotiflerin çalıştığı hatlarda izin verilen eğim miktarları, ana hat trenlerinin ve metroların çalıştığı hatlara göre daha düşüktür.

İvmeölçerlerde meydana gelen hatalar sadece eğim yüzünden olmamaktadır. İvmeölçerler aynı diğer sensörler gibi sistematik hatalara da sahiptir. Ama bu hatalar,

gelişen teknoloji ile düşük seviyelerdedir ve demiryolu uygulamalarında eğim kaynaklı hataya kıyasla ihmal edilebilir niteliktedir.

Hız ve konum hesabında ivme verisinin kullanılıyor olması matematiksel olarak sorunsuz gözükse de tümlev işlemi sonucu oluşan hatalar da ivmeölçer üzerinden elde edilen verilerin doğruluğunu etkilemektedir. İntegral işlemi ile elde edilen hız ve konum bilgilerinin doğru hesaplanabilmesi için öncelikle başlangıç durum bilgisinin doğru biliniyor olması gerekmektedir. Ayrıca tümlev her adımda önceki veriyi kullandığı için adım adım hatalar birikerek artmaktadır. Bu durum belli bir süre sonra hız ve konum bilgisindeki hatanın çok büyümesine neden olacaktır.

Bu nedenlerden dolayı ivmeölçerler, diğer sensörlerden farklı olarak hız ve konum hesabında yalnızca destekleyici bir sensör olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan mimaride ivmeölçerler yalnızca kızaklama ve patinaj tespit sisteminin oluşturulmasında kullanılacaktır.

Matlab-Simulink'te ivmeölçer verisi olarak referans hız verisinden elde edilen ivme verisi ve hata modelinin toplamı kullanılmıştır. Referans hızdan veri elde edilirken 100 Hz, örnekleme frekansı olarak kullanılmıştır. Hata modeli sistematik hata ve beyaz gürültüden oluşmaktadır. Beyaz gürültü, 100 Hz ile değişen ve standart sapma (σ) değeri $50\mu\text{g}$ olacak şekilde modellenmiştir [28]. Sistematik hata olarak ise raydaki eğim modellenmiştir. Raydaki eğim yüzünden meydana gelen hata ise sinüs fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Gidilen yolun belli bir kısmında eğim maksimum seviyeye ulaşmaktadır ve bu süreçte eğim zamanla artmakta ya da azalmaktadır. Bu nedenle yol eğimi kaynaklı hata sinüsoidal dalga şeklinde modellenmiştir. Sinüs dalgasının periyodunun belirlenmesi ise gidilen mesafe ve hıza bağlıdır.

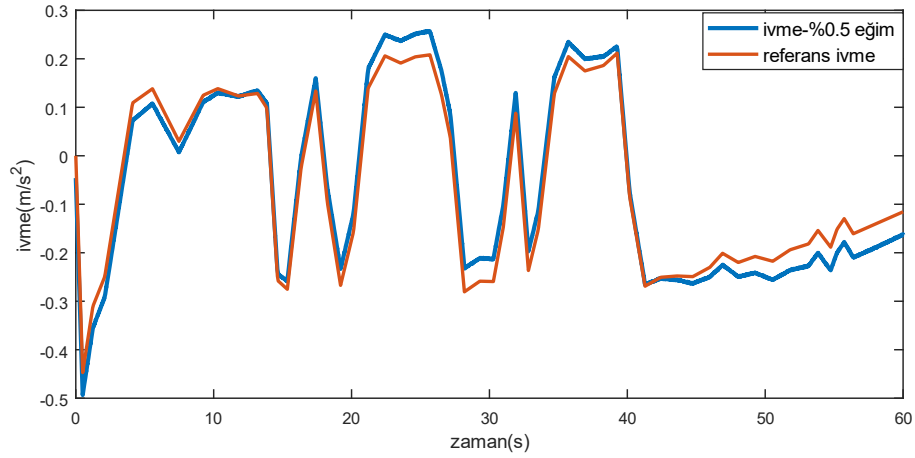
$$w_n = \text{beyaz gürültü, } 0 \text{ ortalamalı, } \sigma = 50 \mu\text{g, } f = 100\text{Hz})$$

$$\theta = \text{maksimum mutlak eğim miktarı(radyan olarak)}$$

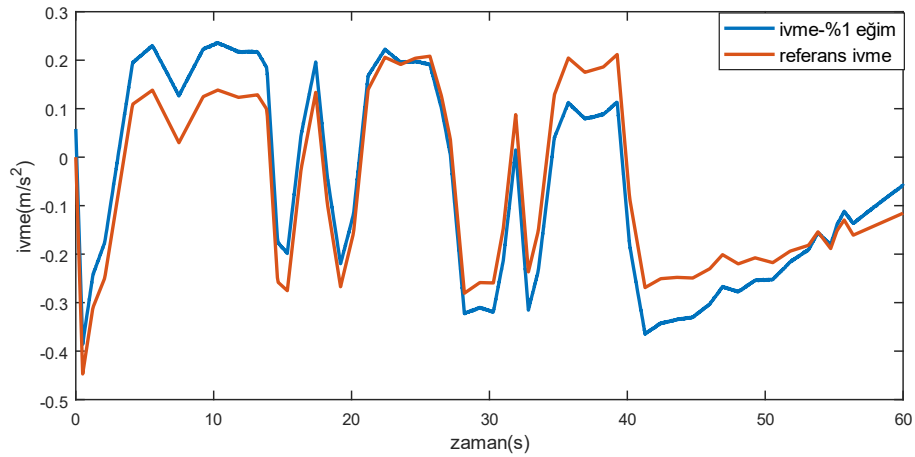
$$g = \text{yer çekimi ivmesi, } 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$e_a = g \sin(\theta) \sin(2\pi f t + \phi) + w_n \quad (21)$$

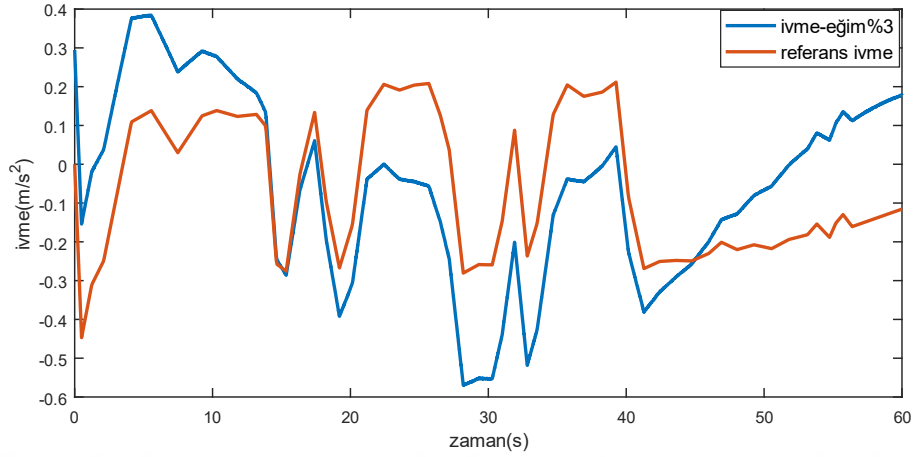
Şekil 2-32, Şekil 2-33 ve Şekil 2-34, ivmeölçer verisinin raydaki eğimden ve beyaz gürültüden nasıl etkilendiği göstermektedir. Üç farklı eğim değerinde ivmeölçer verilerinin hata durumları gösterilmiştir. İlk iki durumda eğim değerleri %1'in altında olduğu için ivme üzerindeki hata kabul edilebilir seviyededir. Ancak eğim %3 seviyelerine çıktığında ve araç gerçek ivmesi düşük olduğu durumda ivmeölçer verisi doğruluğunu büyük oranda kaybetmektedir. %3 eğim, raylı sistemler için büyük sayılabilecek bir eğimdir ve kullanılan referans ivme verisi küçük olduğu için fark hissedilir seviyede görülmüştür. Beyaz gürültü etkisinin ise eğim hatası yanında çok küçük kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 2-32:İvme ölçer ölçümü-ray %0,5 eğimli



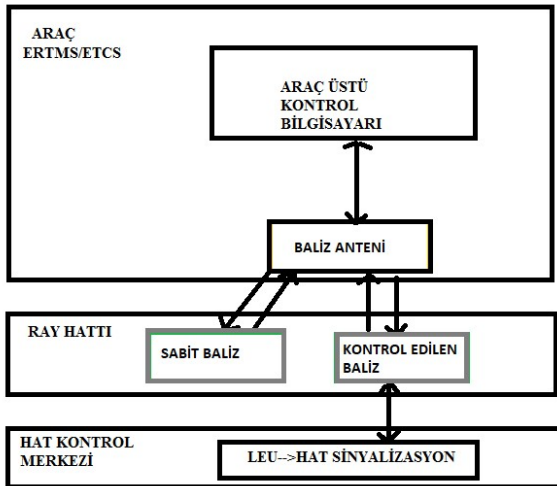
Şekil 2-33:İvme ölçer ölçümü-ray %1 eğimli



Şekil 2-34:İvme ölçer ölçümü-ray %3 eğimli

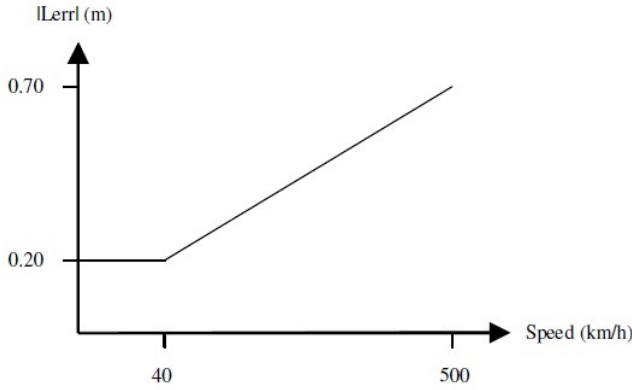
2.6. Baliz Sensörü

Balizler, hat boyunca belli aralıklarla konumlandırılan hat üstü ekipmanlarıdır. Aracın baliz ile haberleşebilmesi için bir “araç üstü” ekipmanı olan baliz antenine ihtiyaç vardır. Baliz ve baliz antenleri arasında mesaj paketleri kablosuz olarak iletilmektedir. Raylı sistemlerde sabit balizler ve kontrol edilebilen balizler olmak üzere iki adet baliz tipi kullanılmaktadır [9]. Sabit balizlerden alınabilen veriler belli periyotlar halinde yüklenmektedir ve statiktir. Kontrol edilebilen balizler ise hat kontrol merkezleri ile özel bir arayüz ile haberleşen dinamik balizlerdir.



Şekil 2-35: Sabit baliz ve kontrol edilebilen baliz

Balizler konum üzerinde biriken hataları sıfırlamak için kullanılsa da araçlar baliz üzerinden geçerken okuma hatası yapabilirler. Balizler üzerinden okunan konum ve zaman bilgisinde baliz lokasyon hatası yer almamaktadır.



Şekil 2-36: Baliz hatasının araç hızına göre değişimi [9]

Şekil 2-36'da gösterilen “Lerr” lokasyon hatasını ifade etmektedir ve “FFFIS for Eurobalise” dokümanında hıza bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır, bu değer hayati olmayan hesaplamalar için geçerlidir. Hayati hesaplamalarda baliz lokasyon hatası maksimum ± 1 metre olarak kabul edilmektedir [9].

2.7. Sensörlerin Karşılaştırılması

Raylı sistemlerde kullanılan sensörlerin yapıları, avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Tablo 2-4, sensörlerin ölçüm yeteneklerini göstermektedir. Teker sensörü, dönüş sayısından mesafe bilgisini ölçerken, dönüş frekansı üzerinden hız bilgisini de hesaplamaktadır. GPS servisi hız ve konum bilgisini birbirinden bağımsız şekilde paylaşmaktadır. Doppler radar ise sadece hız sensörüdür. Gidilen mesafe bilgisi bu bilgi üzerinden türetilmektedir.

Tablo 2-4: Sensörler ve ölçüm özellikleri

	Teker sensörü	Doppler Radar	GPS	İvme ölçer
İvme	-	-	-	+
Hız	+	+	+	-
Mesafe	+	-	+	-

Bu incelemeler sonucu sensör ölçüm hassasiyetleri ile ilgili olarak Tablo 2-5 oluşturulmuştur. Tablo 2-5'te raylı sistemlerde yaşanabilecek durumların sensörler üzerinde etkisi olup olmadığı EVET/HAYIR şeklinde gruplandırılmıştır [28] [29] [30].

Tablo 2-5: Sensör Tipi ve Etkileri

Sensör tipi Durumlar	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	İvme ölçer
Tekerdeki bozulma	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR
Teker ray sürtünme katsayısı	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR
Pnömatik fren sistemi performansı	EVET	HAYIR	HAYIR	HAYIR
Hava koşulları (kar, yağmur vb.)	EVET	EVET	EVET	HAYIR
Raylardaki bozulma	EVET	EVET	HAYIR	EVET
Ray eğimi	HAYIR	HAYIR	HAYIR	EVET
Tüneller, kanyonlar vb.	HAYIR	HAYIR	EVET	HAYIR
Düşük hız ($0.5 < V_{\text{ARAÇ}} < 50 \text{ km/sa}$)	HAYIR	EVET	HAYIR	HAYIR
Yüksek hız ($V_{\text{ARAÇ}} > 50 \text{ km/sa}$)	HAYIR	HAYIR	HAYIR	HAYIR

3. KIZAKLAMA VE PATİNAJ TESPİTİ

Teker hızı ve araç hızı arasında fark meydana gelmesi raylı sistemlerde sık karşılaşılan bir sorundur. Teker hızının araç hızından farklı olmasına genel olarak kayma (slip) denmektedir. Teker hızının araç hızından fazla olduğu durumlar patinaj (spin), teker hızının araç hızından küçük olduğu durumlar ise kızaklama (slide) olarak adlandırılır. Kızaklama ve patinaj durumlarının yaşanmasındaki en büyük neden teker ve ray arasındaki sürtünmedir [31]. Teker ray arası sürtünme kuvveti azaldığında, araç frenliyorsa kızaklama meydana gelir. Araç hareket ediyor ise, sürtünme kuvvetinin azlığı patinaj durumunun yaşanmasına sebep olmaktadır.

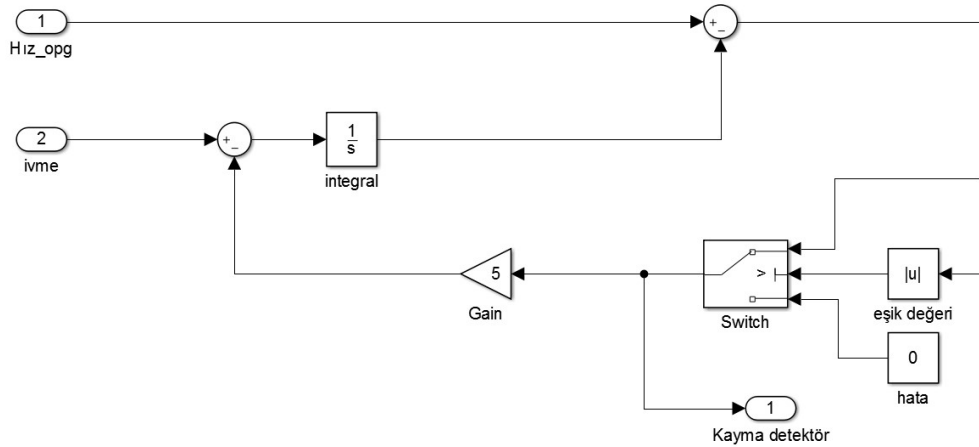
Raylı araçlarda kızaklama ve patinaj durumlarının önlenmesi birçok açıdan fayda sağlamaktadır. Kızaklama ve patinaj durumları teker şeklinin bozulmasına neden olmaktadır. Bunun yanında raylarda eskime, araç motorunda ve fren sisteminde bozulmalara da neden olabilmektedir. Bu durumlar sürüş konforunu bozulmasına ve bakım ihtiyacının artmasına neden olur. Aynı zamanda bu durumların yaşanması, araç hızının doğru tayin edilememesine de neden olmaktadır. Raylı sistemlerde sıklıkla kullanılan teker sensörleri kızaklama ve patinaj durumlarında hızı doğru tespit edememektedir. Tekerde oluşacak hatalar dışında bu olayın yaşanması motor ve fren sistemlerine de zarar vermektedir. Bu yüzden kızaklama ve patinaj durumunun fark edilmesi ve önlenmesi gerekmektedir.

Teker ve araç hızı arasındaki farkın anlaşılması için teker sensörlerinin kullanılması gerekmektedir. Raylı sistemlerde araç hızının doğru tespit edilmesi için teker sensörleri motorsuz ve frensiz akslara konulmaya çalışılır. Ancak bu durum her zaman mümkün değildir. Lokomotif gibi araçlarda cer ve fren ihtiyacı yüksek olduğundan boş aks bulunmamaktadır. Boş akslar üzerinden araç hızı okunabilse bile motorlu ve frenli akslara da teker sensörü konularak hareket ve fren durumlarının araçta oluşturduğu kızaklama ve patinaj durumlarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Kızaklama ve patinaj durumlarının tespiti için hızda oluşan fark, ivmede oluşan fark ya da konum verisinde oluşan hata kullanılabilir [28]. Bu tez kapsamında hızda oluşan hata ve ivmede oluşan hata üzerinden kızaklama ve patinaj durumu tespit yöntemleri incelenmiştir. Bunun temel nedeni ise Bölüm 2’de yapılan teker sensör analizidir. Oluşturulan Matlab modelinde hız üzerinde meydana gelen hata daha etkili bir

şekilde gözlenmektedir. Konum hatası, ani bir şekilde artış göstermediği için, kızaklama ve patinaj durumlarının konum hatası ile tespitinin verimsiz olduğuna karar verilmiştir. Matlab-Simulink'te tasarlanan hız üzerinden kızaklama ve patinaj tespit mekanizması Şekil 3-1'de gösterildiği gibidir. Bu modelde araç üzerinde yer alan ivmeölçer üzerinden elde edilen hız bilgisi ve motorlu aksa takılan teker sensörünün hız verisi kullanılmıştır. İvmeölçer üzerinden hız hesabında tümlev hatasının büyümemesi için ivme verisi üzerinden elde edilen hız verisi bir geri besleme döngüsü ile kontrol edilmektedir. Kızaklama ya da patinajın meydana gelip gelmediğini anlamak için de bu iki hız verisi arasındaki farkın “eşik değeri”den büyük ya da küçük olma durumu kullanılmaktadır. Eğer hız farkının mutlak değeri eşik değerinden büyükse bu durum kayma (kızaklama ya da patinaj) olarak değerlendirilmektedir. Hız farkı eşik değerden küçükse kayma durumu sıfır olarak kabul edilebilir. Ayrıca bu modelde ivmeölçer hatasının büyümemesi için kullanılan geri besleme döngüsü, kayma ya da patinaj durumları yaşandığında kırılmaktadır. Bu şekilde ivmeölçer hız verisi üzerinde kayma hatasının görülmesi önlenmektedir.

Şekil 3-1'de ivme ölçer ve optik darbe sayıcı kullanılarak oluşturulan kızaklama ve patinaj tespit yöntemi gösterilmiştir. Belirtilen yöntem ile kızaklama ve patinaj tespiti, ivmeölçer hatası yüksek olmadığı durumlarda kullanılabilir.



Şekil 3-1: Hız verisine göre yapılan kayma tespit sistemi

$v_{araç}$, ivmeölçer üzerinden elde edilen veri ile hesaplanan araç hızını, v_{opg} ise teker sensörden okunan hızı ifade etmektedir. $v_{ssd_{th}}$ ise kayma olması için belirtilen eşik değeri ifade etmektedir. Araç hızı ve teker hızı arasındaki farkın işareti (pozitif ya da negatif

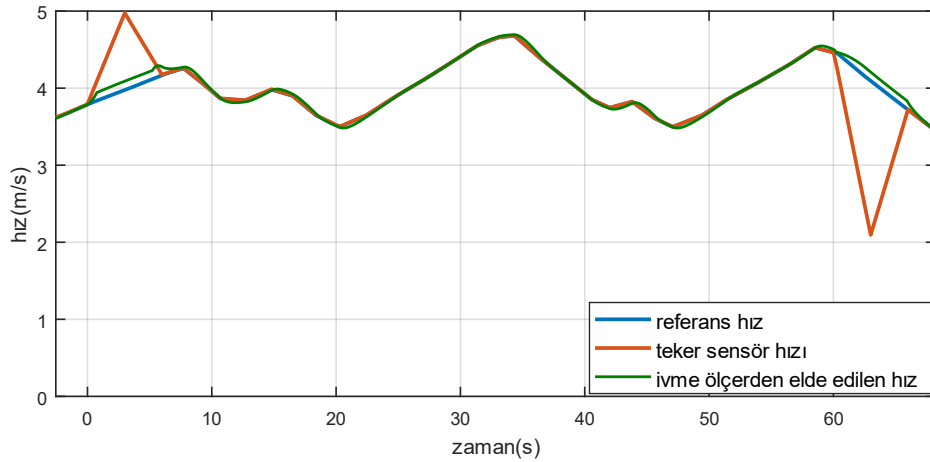
olması), kızaklama ya da patinaj olduğuna dair bilgi vermektedir. Bu fark, pozitif olduğunda patinaj, negatif olduğunda ise kızaklama şeklinde adlandırılmaktadır.

$$|v_{araç} - v_{opg}| > v_{ssd_{th}} \rightarrow \text{kayma (slip)} \quad (22)$$

$$v_{araç} - v_{opg} > v_{ssd_{th}} \rightarrow \text{kızaklama (slide)} \quad (23)$$

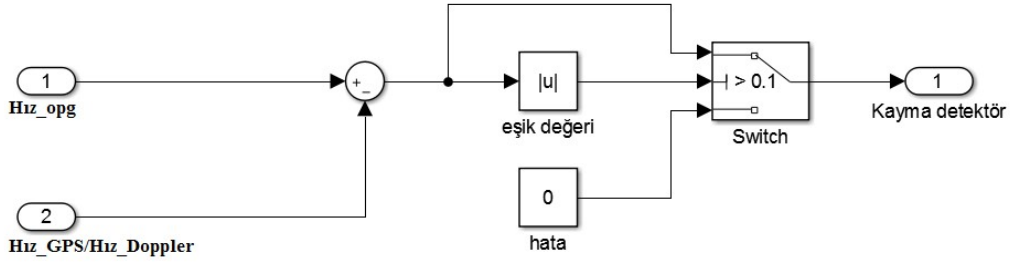
$$v_{araç} - v_{opg} < v_{ssd_{th}} \rightarrow \text{patinaj (spin)} \quad (24)$$

Şekil 3-2, ivmeölçer verisi hatasız kabul edilerek elde edilmiştir. Bu durumda ivmeölçer hem kızaklama ve patinaj tespitinde hem de araç hızının doğru hesaplanmasında kullanılmıştır. İvmeölçer hız verisinin bozulmaması için kullanılan ve Şekil 3-1’de gösterilen geri besleme döngüsü, kızaklama ve patinaj durumlarında açılmıştır. Bu da teker hız sensöründeki hatanın ivmeölçer üzerinden elde edilen hız verisini etkilemesini önlemiştir. Geri besleme döngüsünün kısa süreli kesilmesi, ivmeölçer hız bilgisinde kabul edilebilir seviyede bir hataya neden olmuştur.



Şekil 3-2: Kızaklama ve patinaj sonucu teker sensörü ve ivme ölçerden elde edilen veriler

Hat eğiminin yüksek olduğu bir durumda yapılan ivmeölçer hataları ise daha büyüktür, bunun nedeni Bölüm 2’de incelenen ivmeölçer karakteristiğidir. İvmeölçer yerine Doppler radar ya da GPS hız verisi kullanılarak aynı algılayıcı uygulanabilir. Şekil 3-3’te Doppler radar ya da GPS referans olarak kullanılarak hazırlanabilecek kayma tespit yöntemi gösterilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi Şekil 3-2’den farklı olarak geri besleme döngüsüne ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 3-3: GPS ya da Doppler radarlı kayma tespit algılayıcısı

Hız verisi üzerinden oluşturulacak alternatif kızaklama ve patinaj algılayıcısı Tablo 3-1’de belirtilen durumlara göre tasarlanabilir.

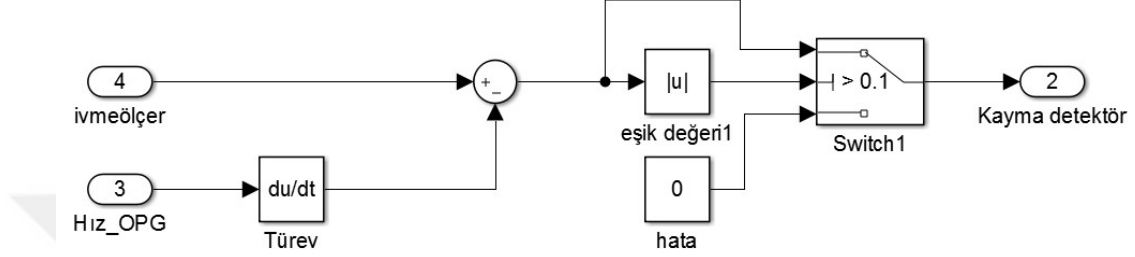
Tablo 3-1: Kızaklama ve patinaj tespiti mimari alternatifleri

Sensör 1	Sensör 2	Avantaj	Dezavantaj
Motorlu ve frenli aksa takılan teker sensörü	Motorsuz ve frensiz aksa takılan teker sensörü	Tek tip sensör	Motorsuz aks olmadığı durumda çalışmaz
Motorlu ve frenli aksa takılan teker sensörü	İvme ölçer	Ucuz	Yüksek eğimli bölgelerde hataya neden olabilir
Motorlu ve frenli aksa takılan teker sensörü	Doppler radar	Yüksek hızlarda etkili	Pahalı ve düşük hızlarda hata oranı yüksek
Motorlu ve frenli aksa takılan teker sensörü	GPS	Ucuz ve hata oranı düşük	Erişilebilirlik ve devamlılık sorunu var.

Tablo 3-1’de incelenen alternatif yöntemlerdeki ortak nokta kullanılacak teker sensörüdür. Bu sensörün motor ve fren sistemi olan bir tekere takılması kayma durumlarının tespiti için mecburidir. Tespit sisteminde kullanılacak referans sensör ise hedeflenen performans kriterlerine göre değişiklik gösterebilmektedir.

Kayma durumlarının tespiti ivme üzerindeki değişikliklerin tespiti ile de yapılabilmektedir. Bu amaçla kullanılan sistemlerde, teker hız sensörü(motorlu ve frenli aksa yer alan) ve ivmeölçer kullanılmıştır. İvme verisi üzerinden yapılacak kızaklama ve

patinaj tespiti, hız üzerinden yapılan sistem gibi farklı şekilde yapılabilir. Şekil 3-4'te ivme üzerinden yapılabilecek tespit sistemi gösterilmiştir. İvmeölçer verisi yerine sistemde kullanılmış ve kayma durumlarından etkilenmeyen Doppler, GPS ya da boş aksa takılan teker sensörü aynı işlem için kullanılabilir. Bunun için sensör hız verileri üzerinden ivme ölçümü yapıp fark kontrol edilmelidir.

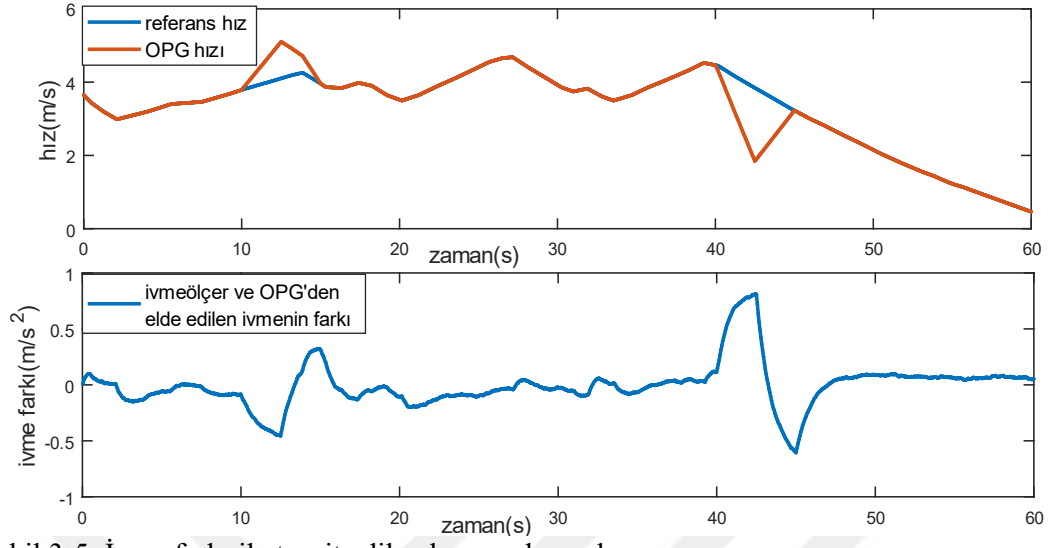


Şekil 3-4:İvme verisine göre çalışan kızaklama ve patinaj algılayıcısı

$$|a_{ivmeölçer} - a_{opg}| > a_{ssd_{th}} \rightarrow kayma \quad (25)$$

$a_{ivmeölçer}$, ivmeölçerin ölçtüğü ivme verisini ifade ederken, a_{opg} ise teker sensörü üzerinden hesaplanan ivme verisini ifade etmektedir. Hız verisi kullanılarak uygulanan yöntem, ivme verisi ile de benzer şekilde uygulanmaktadır.

İvmeölçer üzerinden ölçülen ivme verisi ile kızaklama ve patinaj gerçekleşen tekerin ivme verileri karşılaştırıldığında normal olmayan zıplamalar görülmüştür. Şekil 3-5'te teker sensör hız verisinden elde edilen ivme ile ivmeölçerin ölçtüğü ivme verilerinin farkı gösterilmiştir. Kayma durumlarında ivme ve hız değişimleri Şekil 3-5 üzerinden gözlenebilmektedir.



Şekil 3-5: İvme farkı ile tespit edilen kayma durumları

4. RAYLI SİSTEMLER İÇİN BÜTÜNLEŞİK NAVİGASYON YÖNTEMLERİ

Sensör füzyon tekniği, 1980’li yıllardan bu yana robotik ve uzay çalışmalarında aktif bir şekilde kullanılagelmiştir. Bu teknik günümüzde, doğruluğu yüksek ucuz çözümler sunmasından dolayı otomotiv ve raylı sistem teknolojilerinde de kullanılmaktadır [32]. Raylı sistemlerde araç teknolojileri farklılık göstermektedir. Farklı teknolojilere sahip araçlar, farklı platformlarda ve farklı gereksinimlere göre kullanılmaktadır. Sensör verilerinin birleştirilmesi için birçok yöntem vardır. Bu yöntemler belirlenirken gereksinimler ve imkanlar değerlendirilmelidir. En iyi mimariyi belirlemek için doğruluk, dayanıklılık, güvenlik, maliyet gibi alanlardaki getiri-götürülerin incelenmesi gerekmektedir.

Raylı sistemlerde kullanılan sensörler ve bu sensörlerin karakteristikleri Bölüm 2’de detaylı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda sensörlerin artıları ve eksileri belirlenmiştir. Bu bölümde sensör karakteristikleri kullanılarak güvenilir hız ve konum bilgisi için kullanılan sensör füzyon teknikleri anlatılacaktır.

Farklı sensör ölçümü verilerinin iyi olduğu ve kötü olduğu noktalar bulunmaktadır. OTK ve OTO sistemlerinin düzgün çalışabilmesi için konum ve hız bilgisinin düzgün hesaplanıyor ve hat üstü ekipmanlarına hız ve konum bilgilerinin bildiriliyor olması gerekmektedir. Sensör füzyonunda amaç tek bir sensör ile elde edilen verinin başka sensörler yardımı ile desteklenip doğru, devamlılığa sahip ve erişilebilir bir sonuç vermesini sağlamaktır. Ayrıca birden fazla sensör kullanmak OTK emniyet gereklerini sağlayabilmek için de gereklidir. OTK emniyet gerekleri, CENELEC 50126 standardında güvenlik bütünlük seviyesi (Safety Integrity Level-SIL) olarak tanımlanmıştır [33].

Olasılıksal güvenlik yaklaşımı birçok alanda olduğu gibi raylı sistemlerde de kullanılmaktadır. Raylı sistemlerde OTK’nın ana amacı kazaları önlemektir, ancak kazaların tamamen önlenmesi sağlanamamış ve hala kazalar meydana gelmektedir. Bu yüzden EN 50216 [33], EN 50128 [34] ve EN 50129 [35] raylı sistemler için olasılıksal bir güvenlik yaklaşımı geliştirmiştir. Bu yaklaşıma göre SIL(Safety Integrity Level) hesabı için “Tehlikeli arıza oranı” (the rate of dangerous failure) ve “tolere edilebilir bozulma oranı” (the rate of tolerable hazard rate) kullanılmaktadır [36] .

Tolere edilebilir bozulma oranı (Tolerable Hazard Rate-THR), bir ekipmanın neden olabileceği tehlikeli olayların oranı olarak tanımlamaktadır. Bu değer tasarım sırasında belirlenen bir eşik değerdir. Tehlikeli arıza oranı (the rate of dangerous failure) ise ekipmanın neden olduğu tehlikeli bozulma oranıdır. Yani bir ekipmanın güvenli sayılabilmesi için tehlikeli bozulma oranının tolere edilebilir bozulma oranından düşük olması gerekmektedir [37]. Tablo 4-1’de SIL ve THR arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Tablo 4-1: SIL tanımları [36]

Tehlikeli arıza oranı (saatte)	Tolere Edilebilir Bozulma Oranı(THR)	SIL
$< 10^{-10}$	$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$	4
$\geq 10^{-10}$ to $0.3 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$	3
$\geq 0.3 \cdot 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$	$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$	2
$\geq 10^{-7}$ to $0.3 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$	1

THR değeri tasarım sırasında belirlenmesi gereken bir değerdir ve 3 farklı yöntem ile belirlenebilmektedir. Üç yöntemden biri olan ALARP yöntemine göre THR belirlenirken oluşan bozulmanın oluşma sıklığı ve bozulmanın önem sınıfı belirlenmelidir. SIL yaklaşımına göre bozulma hayati risk taşıyan bir hataya neden oluyorsa bunun oluşma sıklığının azaltılması gerekmektedir. Tablo 4-2, hataların sınıflandırılması için ALARP yöntemine göre hazırlanmıştır [38].

Tablo 4-2: Hataların önem ve sıklığa göre sınıflandırılması

Hata sınıfı	Örnek	Önem seviyesi
Minör hata (Insignificant)	Küçük yaralar	4
Majör hata (Marginal)	Büyük yaralar	3
Kritik hata (Critical)	1 ölüm	2
Felaketli hata (Catastrophic)	10’den fazla ölüm	1
Oluşma sıklığı (frekansı)	Yılda meydana gelme oranı	Kategori
Sık (frequent)	10^{-1}	A
Olası (probable)	10^{-2}	B
Nadiren (occasional)	10^{-3}	C
Az (remote)	10^{-4}	D
Olası olmayan	10^{-5}	E
İnanılmaz	10^{-6}	F

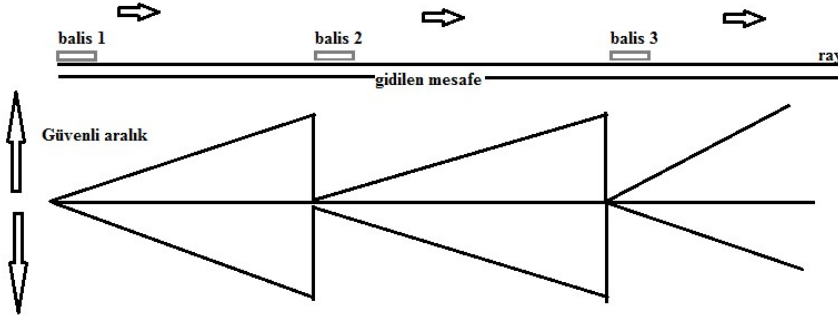
Tablo 4-3'te örnek bir ALARP tablosu verilmiştir. Bu tabloda “T” ile ifade edilen bölgeler tolere edilebilir (tolerable), “I” ile ifade edilen bölgelerse tolere edilemeyen (intolerable) risk bölgelerini ifade etmektedir. “N” ise ihmal edilebilir (negligiable) risk bölgesini ifade etmektedir. SIL hesabı için gerekli olan THR (Tolerable Hazard Rate) bu ve benzeri yöntemlerle belirlenmektedir.

Tablo 4-3: ALARP yöntemi-örnek risk tablosu [37]

Frequency					
A	T	I	I	I	
B	T	T	I	I	
C	T	T	T	I	
D	N	T	T	T	
E	N	N	N	T	T
F	N	N	N	T	T
	IV Insignificant	III Marginal	II Critical	I Catastrophic	0 Desastrous

OTK sistemi kaza oluşmasını önleyici güvenli bir sistemdir. Odometri ve hız hesabı da OTK sisteminin bir parçasıdır ve OTK fonksiyonlarının düzgün çalışabilmesi için önem taşımaktadır. OTK sistemi bulunduğu konumu ve araç hız bilgisini hat üstü ekipmanlara iletmektedir. Hat üstü ekipmanları hattaki tüm araçlardan aldıkları verilere ve hat durumuna göre her araca hareket yetkisi vermektedir. Araç üzerinde yer alan OTK sistemleri ise bu hareket yetkilerini kullanarak doğru frenleme eğrilerini hesaplamalıdır. Bu nedenle odometre sistemi güvenli OTK sistem tasarımının önemli bir parçasıdır. OTK sistemi SIL seviyesine sahip bir sistemdir. SIL gereksinimlerini sağlayabilmesi için alt parçalarının da buna uygun bir performansta çalışması gerekmektedir. OTK sistemi için güvenlik kadar doğruluk da önemlidir. Bu nedenle hata oranlarını en kötü duruma göre hesaplayarak güvenli aralık hesabının gerçekleştirilmesi gerekmektedir [39]. Güvenli aralık, son geçilen balize göre aracın bulunduğu konumdaki belirsizliği tanımlanmaktadır. Güvenli aralık bilgisi odometre sistemi hatasını ve balizden geçerken oluşabilecek okuma hatalarını içerecek şekilde hesaplanmaktadır [1].

Şekil 4-1’de güvenli aralığın balizlerden geçerken sıfırlanması gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında balizler, hata sıfırlama noktaları olarak kabul edilmiştir.



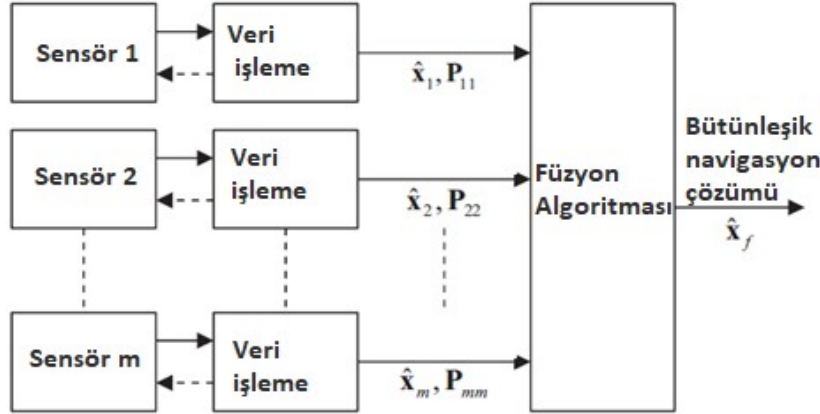
Şekil 4-1: Güvenli aralık ve baliz geçişleri

Sinyalizasyon sisteminin doğru çalışabilmesi için, iki baliz arası mesafede, odometre sonucunun hata bandı içerisinde kalması gerekmektedir. Bu sebeple araç üstü sinyalizasyon ekipmanları sürüş boyunca güvenli aralık hesaplamalarını yaparak hat üstü ekipmanlara bildirmektedir. Bu şekilde hat trafiği doğru bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Güvenli aralığın büyüklüğü hat kapasitesi ve trafiğini doğrudan etkilemektedir. Günümüzde kullanılan hareketli blok sistemi, güvenli aralığın düzgün hesaplanıp hat üstü ekipmanlara düzgün aktarılması ile sağlanabilmektedir. Hat üstü sinyalizasyon ekipmanları, güvenli aralık bilgisini kullanarak hat trafiğini yönetmektedir. Hatta bulunan araçlara hareket yetkisi bu bilgilere göre verilmektedir [1]. Bu sebeple güvenli aralık hesabı hem güvenli sürüşü hem de hat trafik kapasitesini doğrudan etkilemektedir.

Sensör füzyon ve baliz kullanımı, OTK SIL gereksinimlerini yakalamak için önem taşımaktadır. Çünkü farklı teknolojilerin birleşmesi ile ortak nedenli arızalar düşürülmektedir. SIL gereksinimlerinin sağlanabilmesi için birden fazla sistemin kullanılması zorunludur [8]. Birden fazla sensör kullanmak erişilebilirlik ve güvenilirliği tek sensör kullanımına oranla arttırmaktadır. Her sensör, kendi güvenli aralık bilgisine sahiptir ve bu güvenlik aralık bilgisi sensörün doğruluğu ile ilgilidir. Doğruluğu artırmak için güvenli aralık bilgisinin daraltılması gerekmektedir. SIL hesabında ise doğruluktan daha çok hataların neden olacağı risk durumlarına bakılmaktadır. Her sensör kendi “bütünlük” değerine sahiptir ve bu değerler SIL hesabında kullanılmaktadır. Bu nedenle SIL hesabı için, aynı anda birden fazla sensör kullanımı, sensörler birbirinden bağımsız olduğu durumda hata oranını düşürmektedir [39]. Bu durumda, istenen hata oranlarında ulaşmak için birbirinden bağımsız sensörlerin füzyon algoritmasında kullanılması gerektirmektedir.

Sensör füzyonu için birbirinden farklı navigasyon sensörlerinden alınan hız ve konum bilgileri birleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen her sensör mesafe ve/veya hız ölçme yeteneğine sahiptir. Bu sensörlerin hataları hata kovaryans matrisleri ile karakterize edilmektedir.

Şekil 4-2’de gösterilen şemada m adet vektörel sensör verisinin füzyonu gösterilmektedir. $\hat{x}_i$ sensör çıktısını, $\hat{x}_f$ ise füzyon sonucu elde edilen değeri ifade etmektedir. P_{ii} ise i. sensörün hata kovaryans matrisini ifade etmektedir. $\hat{x}_f$ ’in hesaplanması için ağırlıklandırılmış en küçük kareler (weighted least-squares) kombinasyonu kullanılmıştır [20].



Şekil 4-2: Birleştirilmiş navigasyon çözümü [20]

Eşitlik (26)’da sensörlere ait ölçümleri içeren vektör (x) ve hata vektörü (e) gösterilmiştir.

$$x = H\tilde{x} + e \quad (26)$$

Eşitlik (26)’da belirtilen hatayı minimize etmek için en küçük kareler toplamı yöntemi kullanılmıştır [40].

$$\sum_{i=1} e_i^2 = (x - H\tilde{x})^T (x - H\tilde{x}) \quad (27)$$

En küçük kareler toplamı yönteminde, hatanın kareler toplamı minimize edilmek istendiğinden eşitlik (27)'nin türevi sıfıra eşitlenerek $\tilde{x}$ tahmin edilmiştir ve eşitlik (28)'de $\hat{x}$ gösterilmiştir.

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T x \quad (28)$$

($\hat{x}$), eşitlik (26) ve eşitlik (28) birleştirilerek eşitlik (29)'da gösterildiği hali almıştır.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= (H^T H)^{-1} H^T (H\tilde{x} + e) \\ &= \tilde{x} + (H^T H)^{-1} H^T e \end{aligned} \quad (29)$$

($\hat{x}$) vektörüne ait değişinti eşitlik (30)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} var(\hat{x}) &= E((\hat{x} - \tilde{x})(\hat{x} - \tilde{x})^T) \\ &= E((H^T H)^{-1} H^T e)((H^T H)^{-1} H^T e)^T \\ &= (H^T H)^{-1} H^T E(ee^T) (H^T H)^{-1} H^T \end{aligned} \quad (30)$$

Eşitlik (31), füzyon sonucunun hata kovaryans matrisi ve yapılan sensör ölçümleri ile ilişkisini göstermektedir. Burada yer alan P matrisi hata vektörü (e)'ye ait kovaryans matrisini göstermektedir. Füzyon sonucu $\hat{x}_f$ ile ifade edilmiştir [41].

$$\hat{x}_f = (H^T P^{-1} H)^{-1} H^T P^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$H = \begin{pmatrix} I_n \\ I_n \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix}, \quad I_n = nxn \text{ birim matris}$$

Hata kovaryans matrisi olarak tanımlanan (P) eşitlik (32)'de verilmiştir. Bu matris, simetrik bir matristir. Köşegeninde yer alan elemanlar ise sensör hatalarının değişintisidir. Köşegende yer almayan elemanlar ise sensör çıktı hatalarının korelasyonudur [20].

$$P = \begin{pmatrix} var(OPG) & cov(OPG, doppler) & cov(OPG, GPS) \\ cov(doppler, OPG) & var(doppler) & cov(doppler, GPS) \\ cov(GPS, OPG) & cov(GPS, OPG) & var(GPS) \end{pmatrix} \quad (32)$$

Bu çalışma kapsamında 3 adet sensör ölçümü kullanılmış ve kullanılan sensör ölçümlerinin birbirinden bağımsız olduğu bilinmektedir. Bu durumda iki sensör arasında korelasyon olmadığı kabul edilerek eşitlik (32), eşitlik (33) formatına getirilmiştir. P_{ii} (σ_{ii}^2) skaler bir değer almıştır.

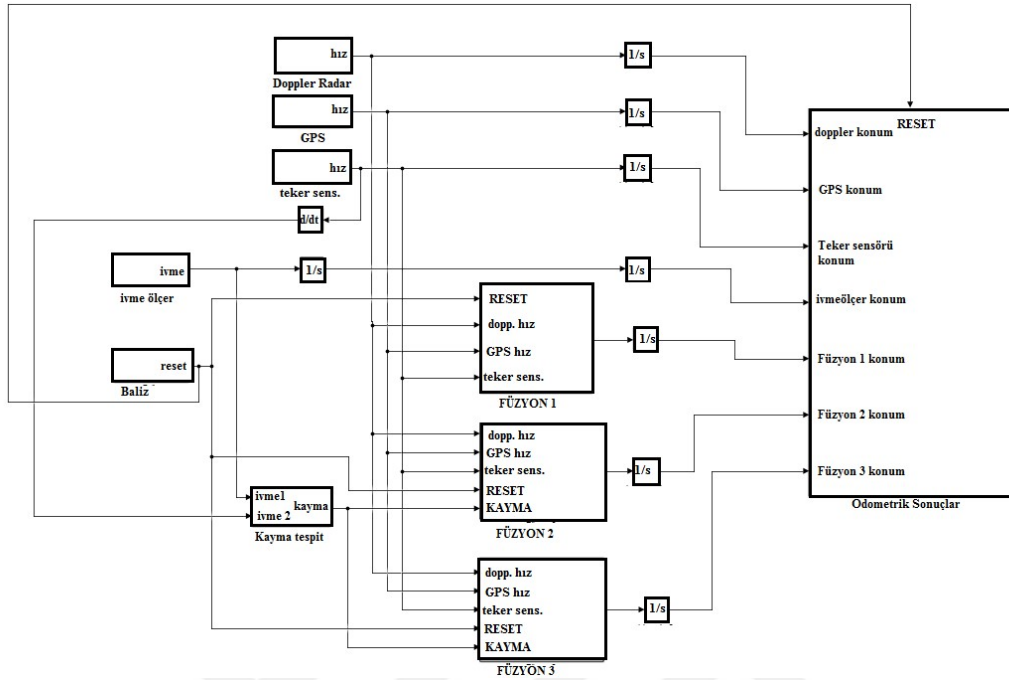
$$P = \begin{pmatrix} \text{var}(OPG) & 0 & 0 \\ 0 & \text{var}(doppler) & 0 \\ 0 & 0 & \text{var}(GPS) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{OPG}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Dopp}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{GPS}^2 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Kovaryans matrisi köşegen ve H matrisi birim matris olduğundan dolayı eşitlik (31) eşitlik (34) formatını almaktadır.

$$(H^T P^{-1} H)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^m P_{ii}^{-1} \right)^{-1}$$

$$\hat{x}_f = (H^T P^{-1} H)^{-1} H^T P^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \left(\sum_{i=1}^m P_{ii}^{-1} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ii}^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} \quad (34)$$

Bu çalışma kapsamında, sensör verilerinin birleştirilerek değerlendirilmesinde üç yöntem değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 4-3'te Simulink üzerinde hazırlanan model gösterilmektedir. “Füzyon 1” olarak belirtilen blok, eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyon tekniğini, “Füzyon 2” olarak belirtilen blok sensör incelemesi sonucu modellenen sensör karakteristiğine göre sabit ağırlıklandırılan füzyon tekniğini, “Füzyon 3” olarak belirtilen blok ise sensör karakteristiğine dayalı uyumlu ağırlıklandırılmış füzyon tekniğini belirtmektedir. Kullanılan yöntemlerin test edilmesi için “Veri Kümesi 2” ve “Veri Kümesi 3” referans bilgi olarak kullanılmıştır. Füzyonda kullanılacak sensörler Bölüm 2’de incelenen teker optik hız sensörü, Doppler radar ve GPS’tir. Füzyon 2 ve Füzyon 3 tekniklerinde Füzyon 1’den farklı olarak kayma (kızaklama ve patinaj) tespiti yardımcı sistem olarak kullanılmıştır. Kayma (kızaklama ve patinaj) tespit kısmında ivmeölçer verisi yardımcı veri olarak kullanılmıştır. Baliz birimi de hata sıfırlama için kullanılmıştır.



Şekil 4-3: Sensör füzyon teknikleri ve yardımcı sistemler

Şekil 4-3'te gösterilen 3 füzyon tekniğinde, sensörleri ağırlıklandırmak için eşitlik (31) kullanılmış fakat farklı hata kovaryans matrisleri (P) ile yöntemlerin birbirinden farklılaşması sağlanmıştır.

Füzyon tekniklerine göre hata kovaryans (P) matrisleri değişiklik göstermektedir.

- Füzyon 1 olarak adlandırılan “Eşit Ağırlıklı Toplama Dayalı Füzyon” tekniğinde, sensör hatalarının eşit mertebede olduğu varsayılarak hata kovaryans matrisi yerine aşağıdaki kovaryans matrisi kullanılmıştır.

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (35)$$

Füzyon 2 ve Füzyon 3'te ise sensör ağırlıklandırılması gerçekçi sensör hata modellerine dayandırılmıştır. Kullanılan sensörler birbirinden bağımsız olarak seçildiği için eşitlik (33), hata kovaryans matrisi olarak kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}\hat{x}_f &= \left(\sum_{i=1}^m P_{ii}^{-1} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ii}^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \\ &= \left(\frac{1}{\sigma_{OPG}^2} + \frac{1}{\sigma_{Dopp}^2} + \frac{1}{\sigma_{GPS}^2} \right)^{-1} \left(\frac{x_1}{\sigma_{OPG}^2} + \frac{x_2}{\sigma_{Dopp}^2} + \frac{x_3}{\sigma_{GPS}^2} \right)\end{aligned}\quad (36)$$

Eşitlik (36)'da elde edilen sonuç üzerinden Füzyon 2 ve 3'te kullanılacak füzyon eşitliği, eşitlik (37) elde edilmektedir.

V_{f2} = füzyon 2 hız formülü

V_{f3} = füzyon 3 hız formülü

$$V_{f2/f3} = \left(\frac{\sigma_{OPG}^2 \sigma_{Dopp}^2 V_{GPS} + \sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2 V_{dopp} + \sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2 V_{OPG}}{\sigma_{OPG}^2 \sigma_{Dopp}^2 + \sigma_{OPG}^2 \sigma_{GPS}^2 + \sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2} \right) \quad (37)$$

V_{f2} ve V_{f3} 'ü elde etmek için aynı eşitlik kullanılmaktadır. Bu iki füzyon arasındaki fark, standart sapma değerlerinin sabit ve değişken olmasıdır. Füzyon 2'de önceden tanımlanmış standart sapma değerleri kullanılırken Füzyon 3'te ölçüm sırasından oluşturulan hata vektörü üzerinden elde edilen standart sapma değerleri kullanılmaktadır.

4.1. Senaryolar

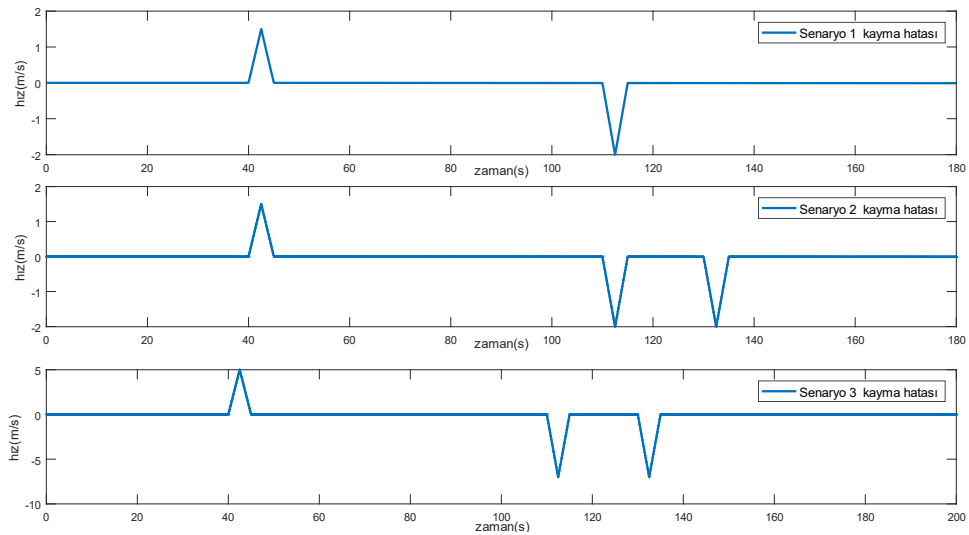
Sensör füzyon algoritmalarının benzetimleri sırasında Tablo 4-4'teki üç senaryo kullanılmıştır. Senaryo 1, senaryo 2'ye göre daha az hatalı sensör verilerini içermektedir. Senaryo 2, tünel durumunun GPS verisi ve füzyon tekniklerine etkisinin gözlenmesi için tünel durumu içermektedir. Tünel durumunda GPS üzerinden meydana gelen veri kaybı benzer şekillerde diğer sensörlerde de yaşanabilecek bir olaydır. GPS verisinin elde edilme yönteminden ve doğasından dolayı veri kaybı gözlenme olasılığı yüksek olduğu için senaryo 2'de veri kaybı tünel geçişi olarak modellenmiştir. Benzer veri kaybı durumu, raylar ıslak ya da karlı olduğunda Doppler radarda da yaşanabilmektedir [8]. Senaryo 3 ise senaryo 2'deki benzer hata oranlarına sahiptir. Ancak bu senaryoda tünel durumu bulunmamaktadır. Senaryo 3'ün senaryo 1 ve 2'den temel farkı, kullanılan

referans hız verisidir. Senaryo 3 kapsamında veri kümesi 3 referans veri olarak kullanılmıştır.

Tablo 4-4: Test Senaryoları

Senaryo	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Sensörler			
Veri Kümesi	Veri Kümesi 2	Veri Kümesi 2	Veri Kümesi 3
Teker sensörü	Teker çap hatası: %1 Kızaklama/patinaj: Şekil 4-4/1	Teker çap hatası: %4 Kızaklama/patinaj: Şekil 4-4/2	Teker çap hatası: %4 Kızaklama/patinaj: Şekil 4-4/3
Doppler radar	%1, T=600s	%3, T=600s	%3, T=600s
GPS	$\pm 0.1\text{m/s}$ Tünel yok	$\pm 0.3\text{m/s}$ Tünel var- 300. Metre ile 450. Metre arası	$\pm 0.2\text{m/s}$ Tünel yok

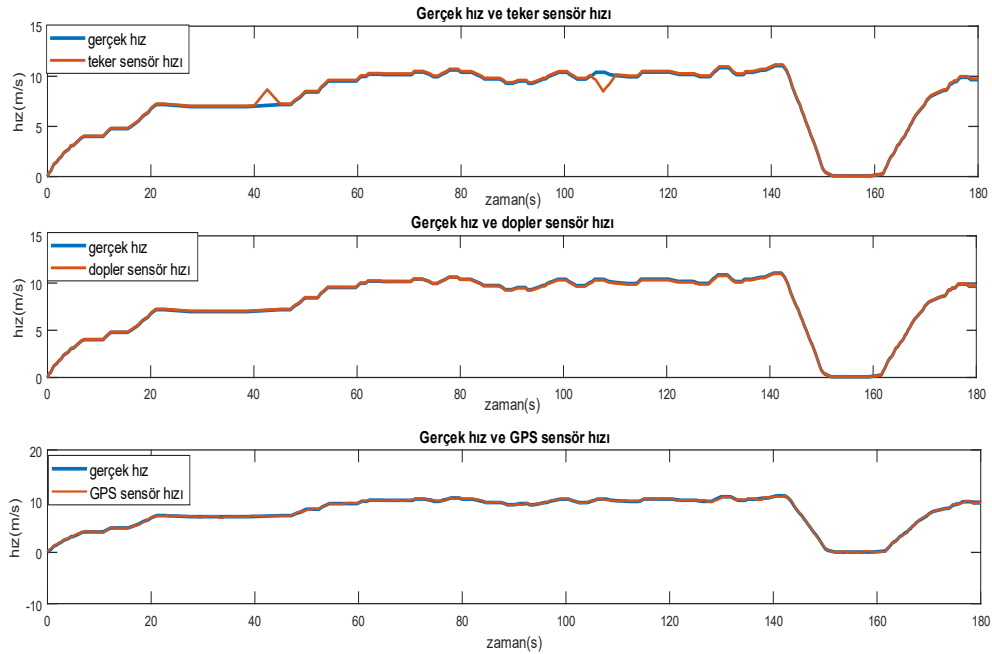
Şekil 4-4, senaryo 1, 2 ve 3 için tanımlanmış olan kızaklama ve patinaj durumlarını zaman profili üzerinde göstermektedir.



Şekil 4-4: Senaryo 1, 2 ve 3'te kullanılan kızaklama ve patinaj verileri

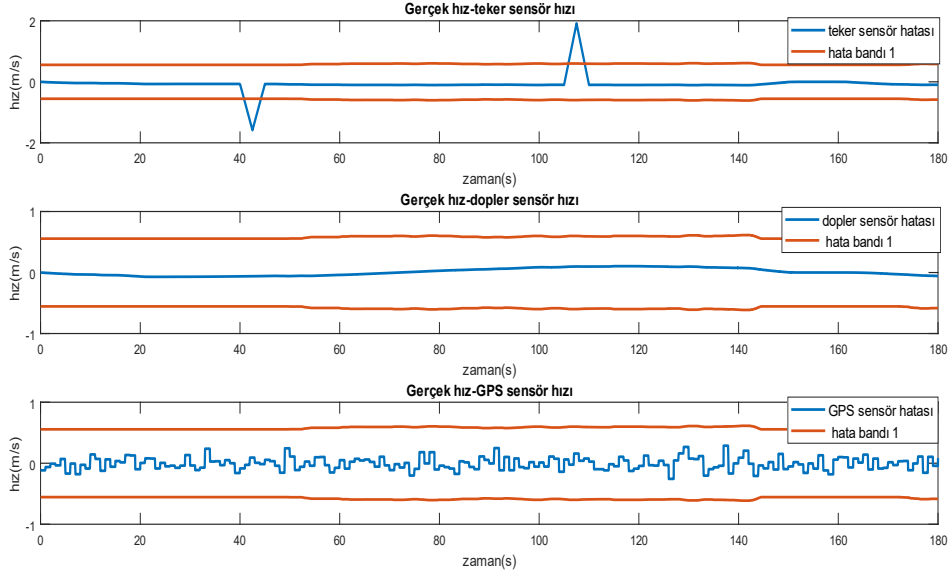
4.1.1. Senaryo 1'e Göre Sensörlerin Karşılaştırılması

Senaryo 1 sonucu elde edilen sensör hız ölçüm bilgileri Şekil 4-5'te verilmiştir. Bu şekilde sensör hız ölçümlerinin referans hız verisine göre durumları gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi teker sensöründe meydana gelen kayma durumu, sensör ölçümünün referans hızdan uzaklaşmasına neden olmuştur. Ancak bu durum kısa süreli hataya neden olmuştur. Doppler radar ve GPS ölçüm sonuçları ise, modellenen hatalar küçük olduğu için referans veriye yakın sonuçlar vermiştir.



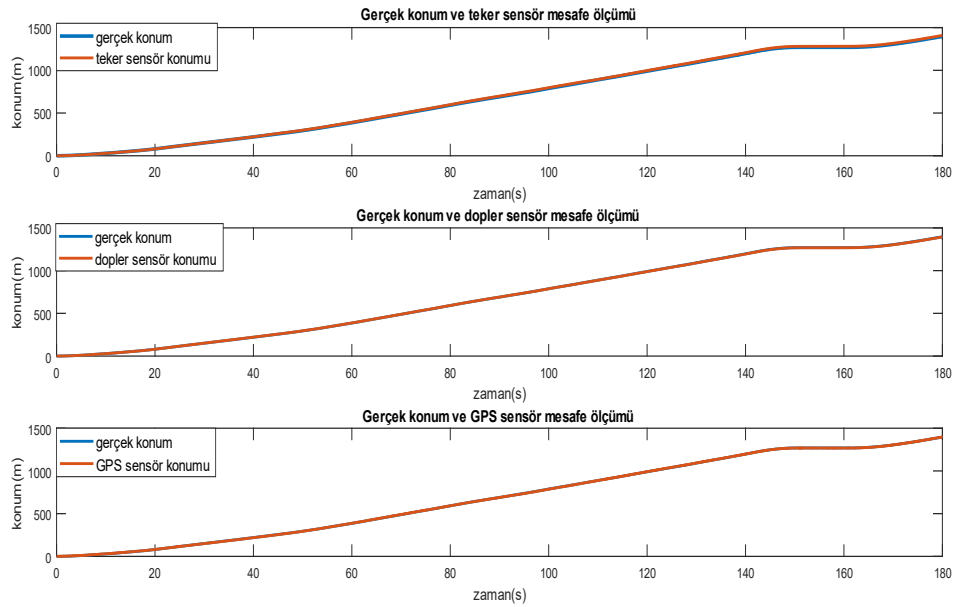
Şekil 4-5: Senaryo 1'e göre elde edilen sensör hız verileri

Şekil 4-6'da, senaryo 1 sonucu elde edilen sensör hız ölçüm hatalarının ERTMS hata bandına göre durumları gösterilmiştir. Teker sensörü hız hatası dışında hataların hata bandının içinde kaldığı gözlenmiştir. Teker sensör hız hatasının ise anlık olarak bandın dışına çıktığı görülmüştür.



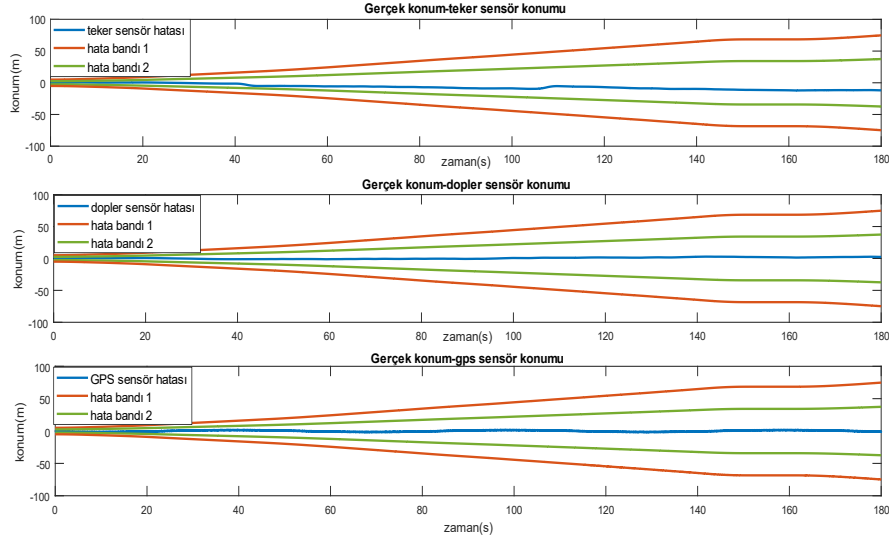
Şekil 4-6: Senaryo 1'e göre elde edilen sensör hız hataları ve ERTMS hız hata bandı 1

Şekil 4-7'de senaryo 1 için elde edilen sensör mesafe ölçümleri gösterilmiştir. Bu şekilde referans mesafe ve sensör ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Senaryo 1'deki hata oranları düşük olduğu için ölçüm sonuçları referansa yakın çıkmıştır.



Şekil 4-7: Senaryo 1'e göre sensörlerin mesafe ölçümleri

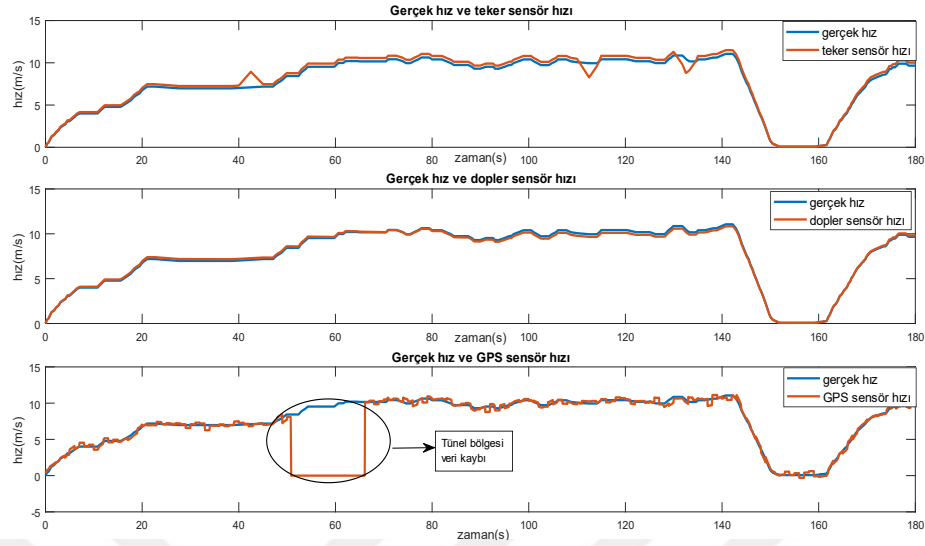
Şekil 4-8’de sensör mesafe ölçüm hatalarının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve ERTMS mesafe hata bandı 2’ye göre durumları gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi mesafe ölçüm hataları hata bantlarının içinde kalmıştır. Hız ölçüm hatasından farklı olarak teker sensörü üzerinden elde edilen mesafe ölçümünde kayma hatası etkili olmamıştır. Bunun nedeni ise kayma hatalarının hız üzerinden gösterdiği anlık etkinin mesafe ölçümü üzerinde önemli bir hataya neden olmamıştır.



Şekil 4-8: Senaryo 1’e göre elde edilen sensör mesafe ölçüm hataları ve ERTMS hata bantları

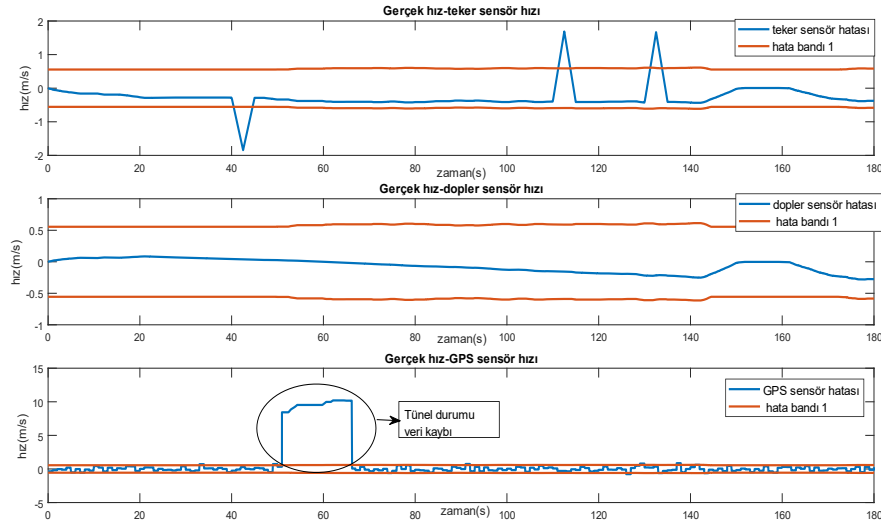
4.1.2. Senaryo 2’ye Göre Sensörlerin Karşılaştırılması

Şekil 4-9’da senaryo 2 için elde edilen sensör hız ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Sensör hız ölçüm sonuçlarının senaryo 1’e göre daha çok referans veriden uzaklaştığı görülmüştür. GPS verisi üzerinde tünelden dolayı yaşanan veri kaybı da aşağıda görülmektedir. Veri kaybı olarak gösterilen bölgede sensör üzerinden yanlış veya doğru veri alınmamaktadır. Gösterim, veri kaybını ifade etmektedir.



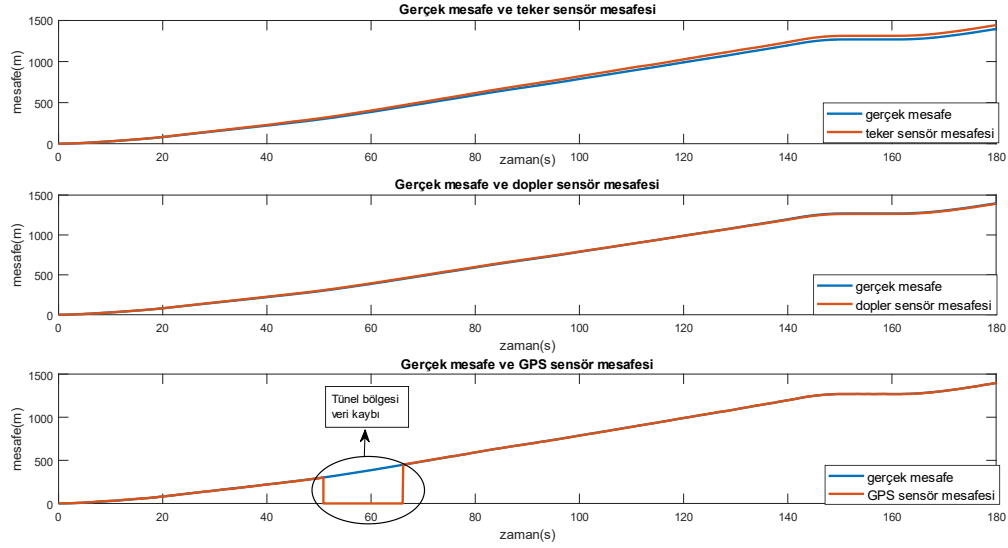
Şekil 4-9: Senaryo 2'ye göre elde edilen sensör hız ölçümleri

Şekil 4-10'da sensör hız ölçüm hatalarının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Bu şekile bakıldığında Doppler ölçümünün senaryo 2'de de hata bandı içerisinde kaldığı görülmektedir. Kayma durumlarından dolayı teker sensör hız ölçüm sonucu bazı noktalarda hata bandı dışına çıkmıştır. GPS hız ölçümü ise tünel durumundan etkilenmiştir. GPS sensörü, tünel gibi bölgelerde çıkış vermemektedir. Aşağıdaki işaretli bölge gösterim içindir. Bu bölge dışında GPS üzerinden elde edilen hız ölçüm hatasının hata bandından çıkmadığı görülmüştür.



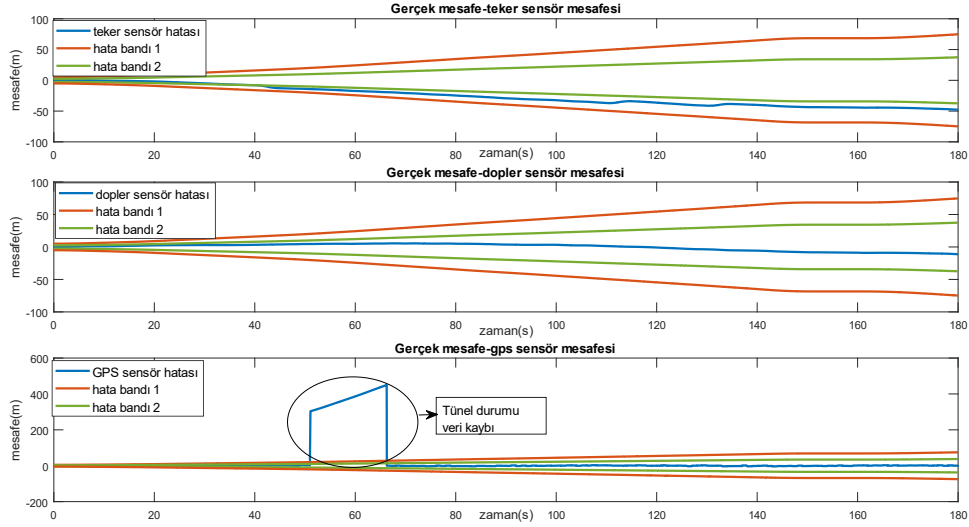
Şekil 4-10: Senaryo 2 için elde edilen hız sensör hataları ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-11’de sensörlerin mesafe ölçümleri gösterilmiştir. GPS hız verisinde olduğu gibi mesafe ölçüm verisi üzerinde de tünel geçişi gösterilmiştir. Bu bölgede GPS’ten veri alınmamaktadır.



Şekil 4-11:Senaryo 2 için mesafe ölçümleri

Şekil 4-12’de sensörlerin mesafe ölçüm hatalarının hata bantlarına göre durumu gösterilmiştir. Bu şekil üzerinden bakıldığında senaryo 1’den farklı olarak teker sensörü mesafe ölçümünün teker sensör hatasından etkilendiği görülmüştür. Bu durumun nedeni, senaryo 2’de belirlenen teker çap hatasıdır. Teker çap hatası, kayma hatasından farklı olarak anlık bir hata değildir. Ölçüm boyunca birikerek mesafe ölçüm hatasına neden olmaktadır. Doppler mesafe hatası bu senaryoda da hata bantlarının içinde kalmıştır. GPS sensörü ise veri kaybı dışında hata bantları içinde kalmıştır. Bu durum GPS sensörünün tünel içinde sinyal kaybetmesinden dolayı oluşmaktadır. GPS, veri kaybı olmayan bölgelerde düşük ölçüm hatasına sahip bir sensördür.

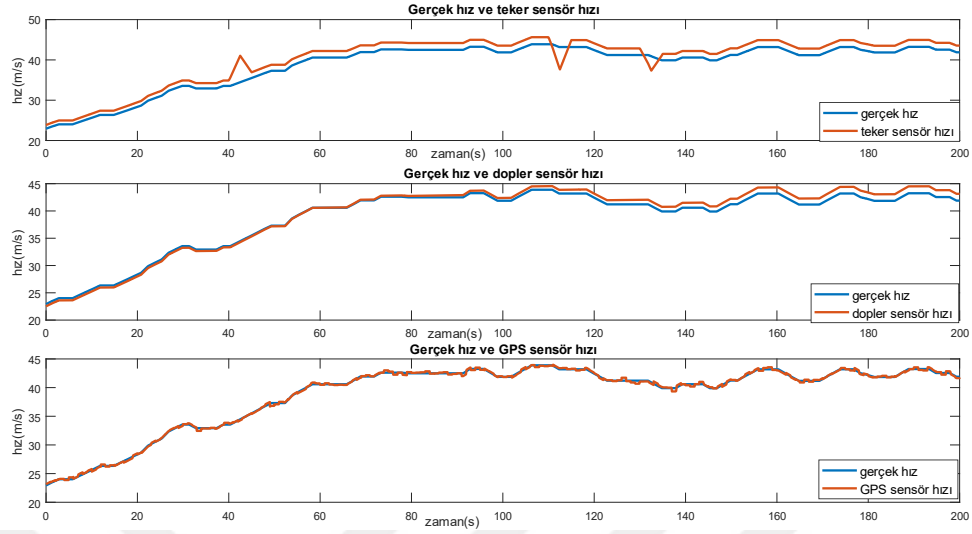


Şekil 4-12: Senaryo 2 için sensörlerin mesafe ölçüm hataları ve ERTMS hata bantları

4.1.3. Senaryo 3'e Göre Sensörlerin Karşılaştırılması

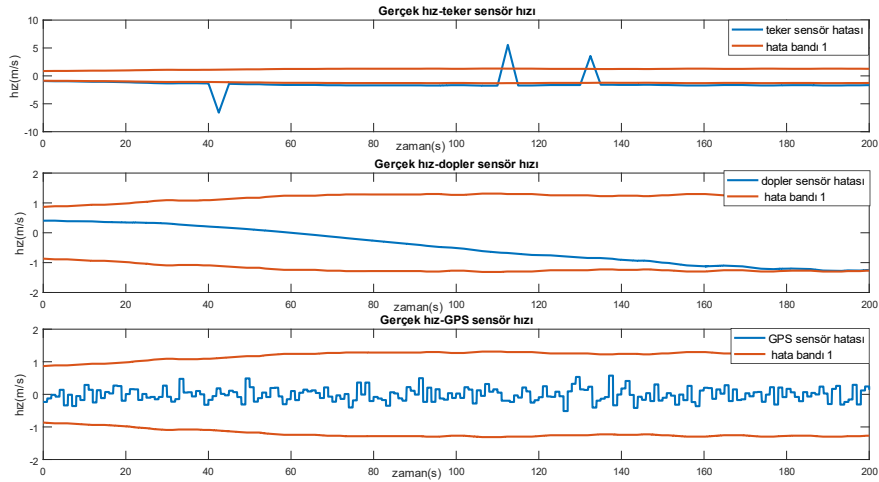
Senaryo 3'te ilk iki senaryodan farklı olarak veri kümesi 3 referans olarak kullanılmıştır. Veri kümesi 3, veri kümesi 2'ye göre daha yüksek hız bilgilerini içermektedir. Ayrıca hız verileri daha yüksek olduğu için kullanılan kayma hatası da daha yüksek hız hatalarına neden olmuştur. Senaryo 2'de tanımlanan tünel durumu bu senaryoda değerlendirilmemiştir.

Şekil 4-13'te senaryo 3 sonucu elde edilen sensör hız ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu senaryodaki teker sensör ve Doppler radar hata yüzdesi senaryo 2'den farklı olmamasına rağmen hatanın daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu durum teker sensör ve Doppler radar hatalarının ölçüm hızına bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan GPS hız verisinin ise referans hızdan çok uzaklaşmadığı ve yüksek hızdan etkilenmediği görülmüştür.



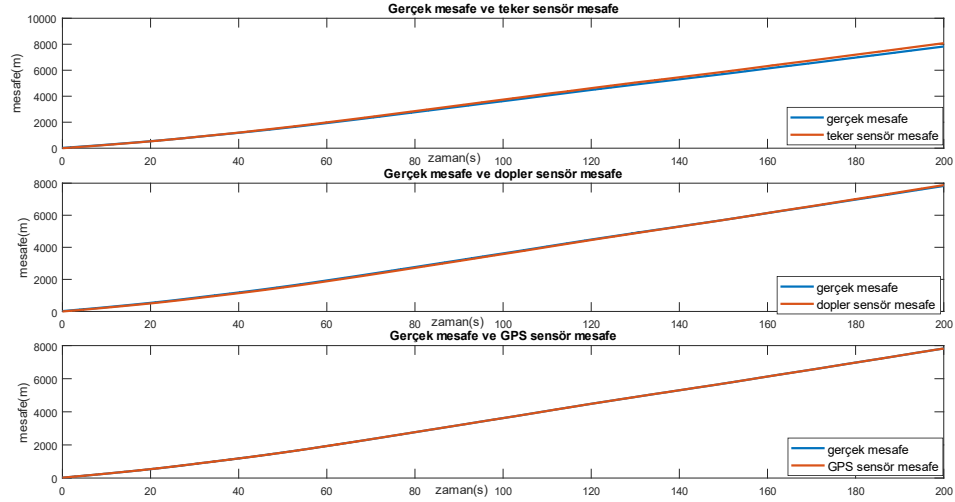
Şekil 4-13: Senaryo 3 için elde edilen sensör hız ölçümleri

Şekil 4-14’te sensör hız hatalarının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Teker sensör üzerinden elde edilen hız hatasının hata bandı sınırında olduğu ve kayma durumları sırasında hata bandını geçtiği gözlenmiştir. Doppler radar hız hatası ise zamanla hata bandını aşma seviyesine gelmiştir. Beklendiği gibi GPS hız hatası ölçüm değerinden etkilenmemiştir.



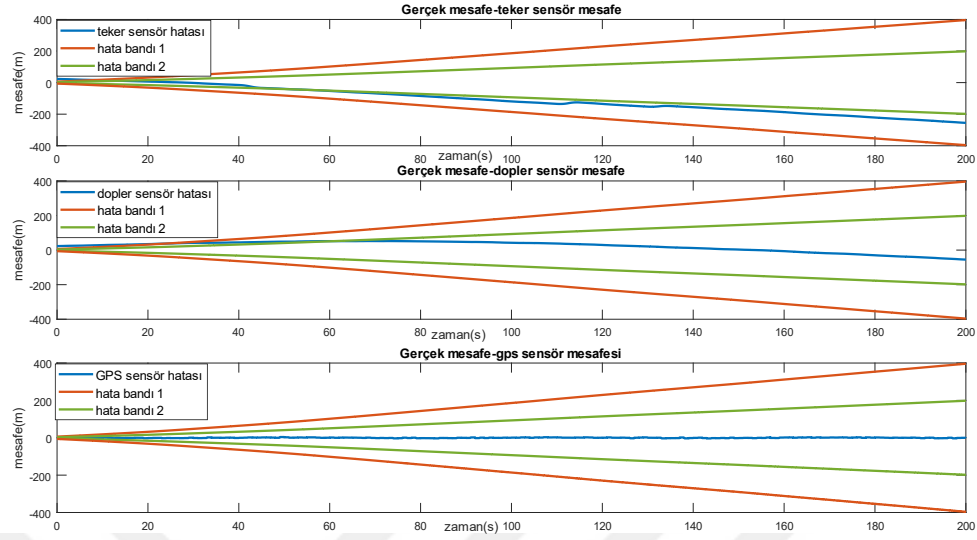
Şekil 4-14: Senaryo 3 için elde edilen sensör hız ölçüm hataları ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-15'te senaryo 3 için sensörlerin yapmış olduğu mesafe ölçümleri verilmiştir. Ölçülen mesafe uzun olduğu için hatalar bu şekil üzerinden net bir şekilde gözlenmemektedir.



Şekil 4-15: Senaryo 3 için elde edilen sensörlerin mesafe ölçümleri

Şekil 4-16'da ise mesafe ölçüm hatalarının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2'ye göre durumları gösterilmiştir. Bu şekil hız ölçüm sonuçlarını doğrular niteliktedir. Beklendiği gibi teker sensör verisi hata bandı 2'nin sınırında ölçüm sonuçları vermiştir. Doppler radar ise hata bandının dar olduğu fakat araç hızının yüksek olduğu bölgede hata bandı sınırında sonuçlar vermiştir. GPS verisi de beklendiği gibi ölçüm hızından etkilenmemiştir.



Şekil 4-16: Senaryo 3 sonucu elde edilen sensörlerin mesafe ölçüm hataları ve ERTMS hata bantları

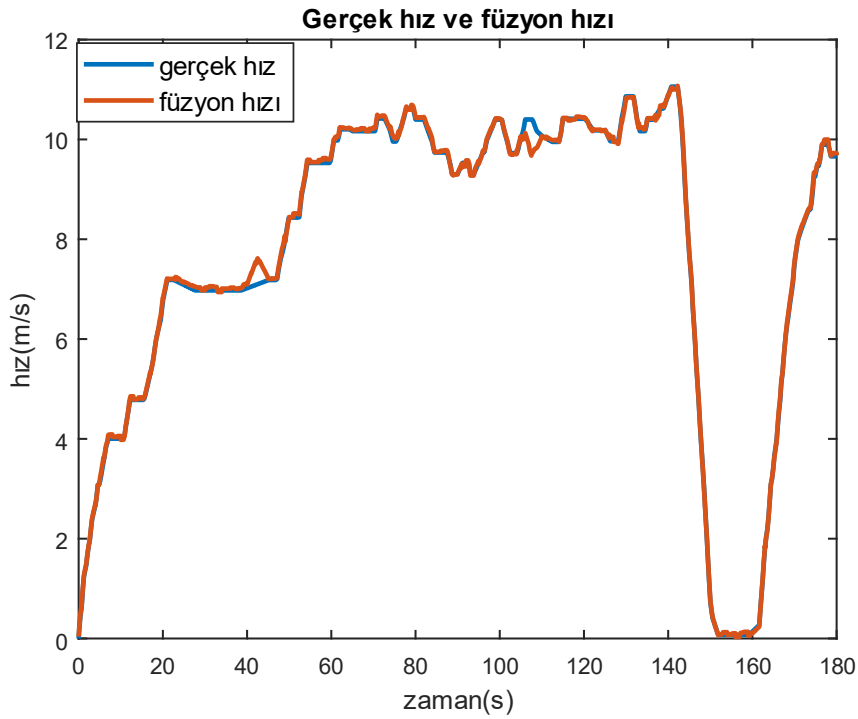
4.2. Eşit Ağırlıklı Toplama Dayalı Füzyon Modeli

Eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyon bilinen en temel birleştirme yöntemidir. Bu yöntemde, birden fazla sensörden alınan veriler toplanıp sensör sayısına bölünerek ortalama sonuç elde edilmektedir. Eşitlik (38), eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyon için kullanılan hız eşitliğini göstermektedir. Bu eşitlik, eşitlik (34) üzerinden eşitlik (35)'te verilen P matrisi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte yer alan payda kullanılan sensör sayısını ifade etmektedir. Bu yöntem, sensör hataları birbirinden farklı zamanlarda ortaya çıkan sensörlerde kullanıldığında sensör hatasının çok büyümemesine olanak sağlamaktadır. Teker sensörü, Doppler radar ve GPS sensörleri düşünüldüğünde, sensörlerin farklı karakteristiklerinden ve birbirinden bağımsız olmalarından dolayı bu yöntem realizasyonu basit ve etkili bir sensör birleştirme yöntemidir.

$$V_{f1} = \frac{V_{OPG} + V_{Dopp} + V_{GPS}}{3} \quad (38)$$

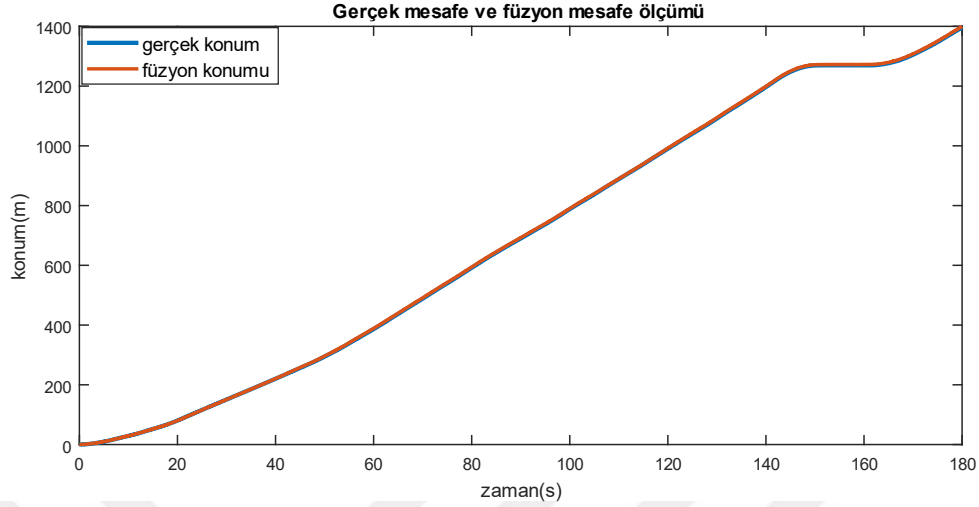
Senaryo 1

Senaryo 1 için elde edilen sensör ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak 4.1.1’de gösterilmiştir. Bu senaryoya göre elde edilen füzyon 1 sonuçları ise aşağıda gösterilmiştir. Senaryo 1’de hata yüzdeleri fazla olmadığı için elde edilen füzyon sonucu bazı sensör verilerine kıyasla daha kötü çıkmıştır. Şekil 4-17’de füzyon 1 yöntemi sonucunda elde edilen hız verisinin referans hıza göre durumu gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi füzyon sonucu en çok kayma durumundan etkilenmiş, bu durum dışında referans hız bilgisini takip etmiştir.



Şekil 4-17: Senaryo 1 için füzyon 1 ve referans hız

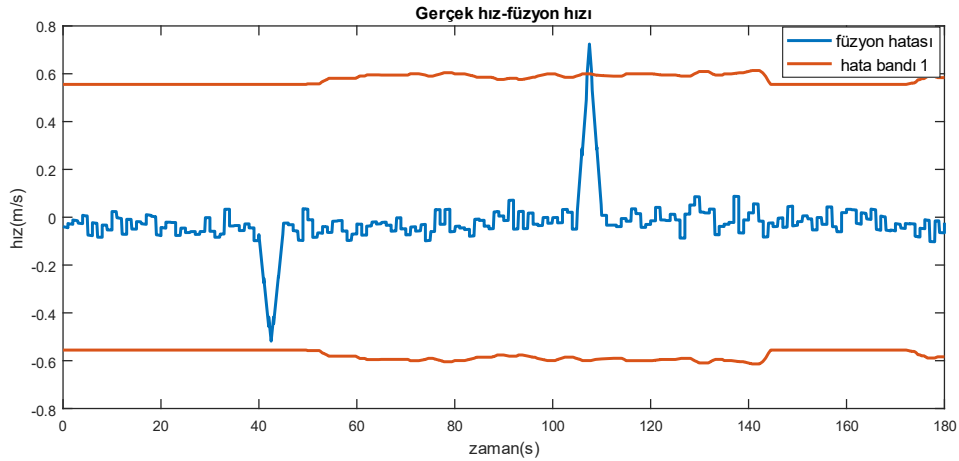
Şekil 4-18’de, füzyon 1 sonucunda elde edilen mesafe ölçümü gösterilmiştir. Bu ölçüm sonucuna bakıldığında mesafe ölçümünün üzerinde hızdaki kayma durumunun etkisinin yok denecek kadar az olduğu görülmektedir.



Şekil 4-18: Füzyon 1 ile elde edilen mesafe ölçümü ve referans mesafe

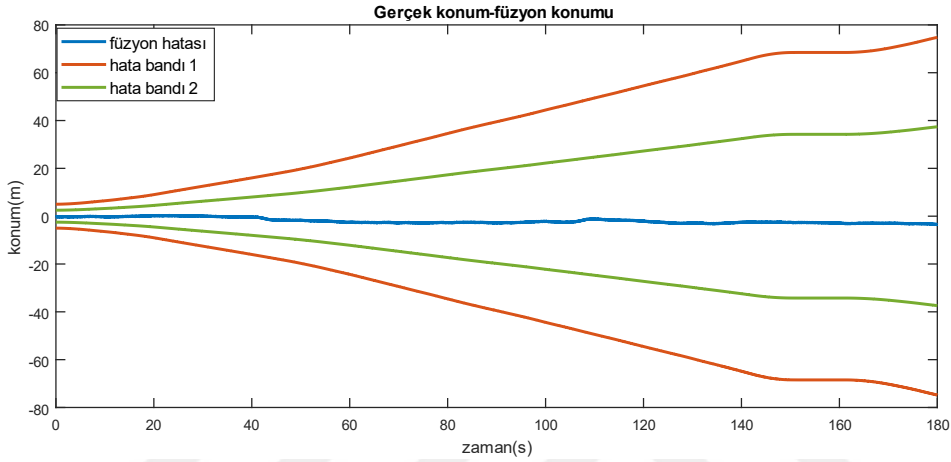
Gidilen mesafe uzun olduğu için sensör ölçümlerindeki hatalar bu ölçümlerde iyi gözlenememektedir. Bu yüzden ölçüm hatalarının ERTMS hata bantlarına göre durumları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4-19’da füzyon 1 sonucu elde edilen hız verisindeki ölçüm hatasının ERTMS hız hata bandı 1’e göre durumu gösterilmiştir. Senaryo 1 şartları zorlayıcı olmamasına rağmen füzyon sonucu elde edilen hızın hata bandı dışına çıktığı görülmüştür. Teker hız sensörü (OPG) ölçümü ile kıyaslandığında ise kayma durumunun etkisinin füzyon 1’de azaldığı görülmüştür. Bu durum beklenen bir durumdur. Çünkü füzyon 1 sonucunda her sensör eşit ağırlıklı bir şekilde sonuca etki etmiştir ve diğer sensörlerde kayma hatası görülmediği için füzyon 1 sonucunda bu hatanın etkisi azalmıştır.



Şekil 4-19: Senaryo 1’e göre füzyon 1 hız hatası ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-20’de ise füzyon sonucu elde edilen mesafe hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2’ye göre durumu gösterilmiştir. Füzyon mesafe ölçüm hatasının iki hata bandının da içinde kaldığı görülmüştür. Bu durum beklenen bir durumdur, çünkü füzyon hızı anlık olarak teker kayma durumundan etkilense bile bu durum mesafe ölçüm verisi üzerinde hız ölçümüne kıyasla küçük bir etkiye neden olmuştur.



Şekil 4-20: Senaryo 1'e göre füzyon 1 mesafe hatası ve ERTMS hata bantları

Tablo 4-5’te sensör ve füzyon ölçümlerinin referans veriye göre standart sapma verilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Bu verilerde eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyonun hatayı azalttığı ancak en iyi ölçüm veren sensöre oranla daha kötü sonuç verdiği gözlenmiştir. Tablo 4-5’te verilen standart sapma değerlerinin yukarıdaki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

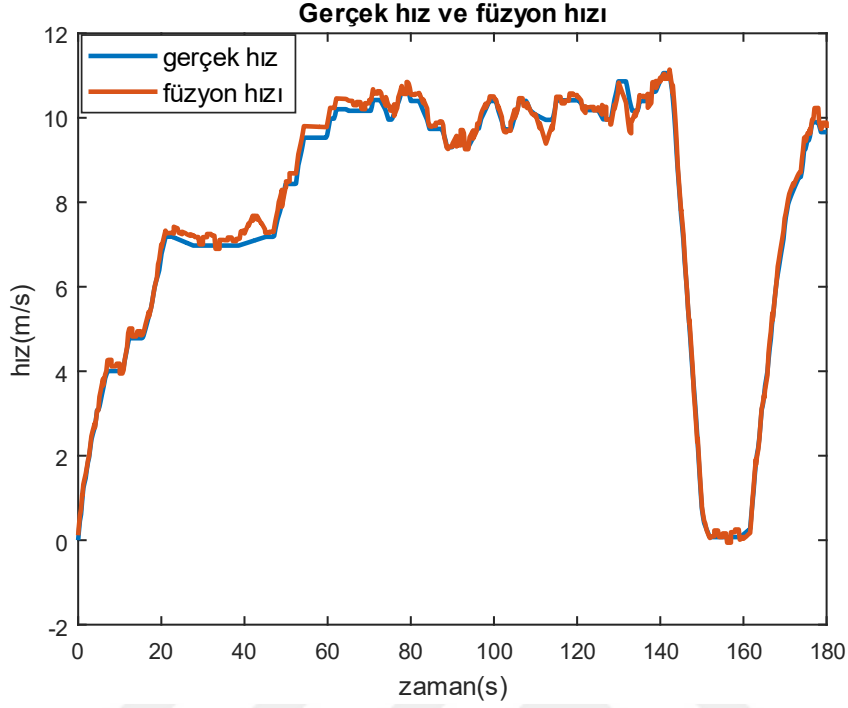
Tablo 4-5: Senaryo 1 için elde edilen sensör ve füzyon 1 standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 1
Hız standart sapma (m/s)	0.24	0.04	0.10	0.083

Senaryo 2

Senaryo 2, Senaryo 1’e göre hata oranlarının daha yüksek olduğu durumları içermektedir. Ayrıca Senaryo 1’den farklı olarak tünel durumu da değerlendirilmiştir.

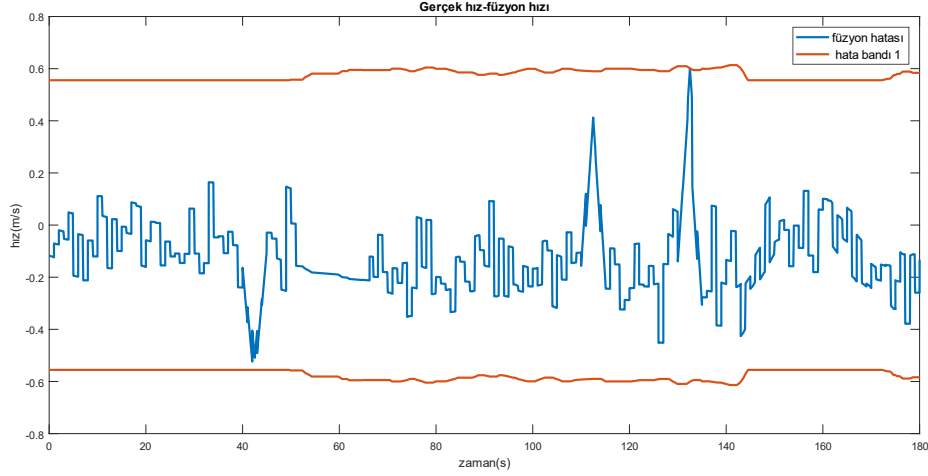
Şekil 4-21’de Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 hız verisi gösterilmiştir. Bu şekilde füzyon 1 hız verisinin referans veriden çok uzaklaşmadığı görülmüştür. Ancak senaryo 1’e göre hatanın arttığı gözlenmiştir



Şekil 4-21: Senaryo 2 için füzyon 1 hız ölçümü

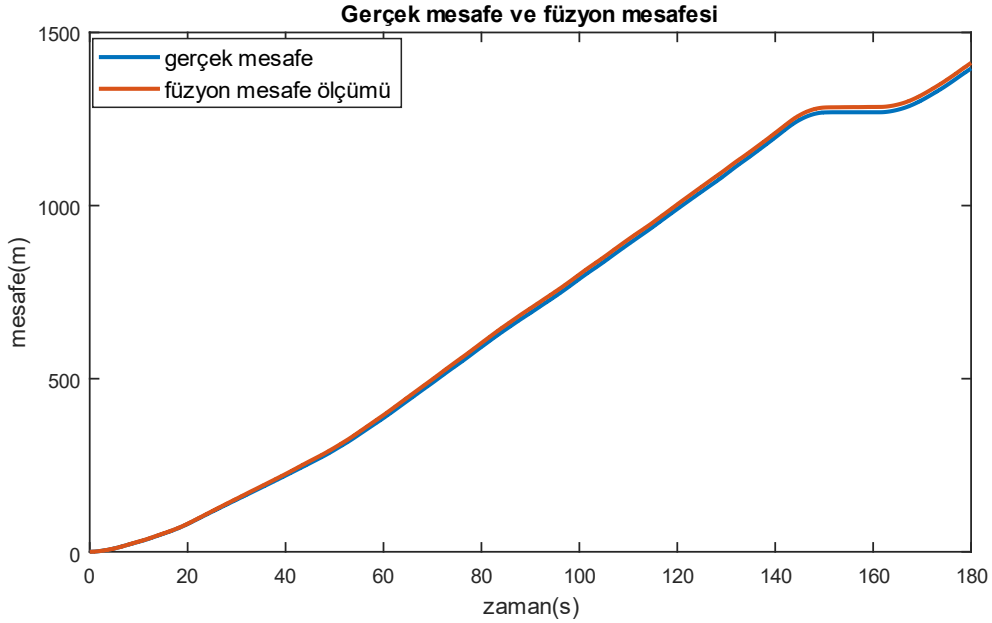
Şekil 4-22’de füzyon 1 hız hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Senaryo 1’den farklı olarak buradaki hataların daha fazla olduğu görülmüştür. Senaryo 1’e benzer şekilde, kayma durumlarında hata bandı dışına çıkmalar meydana gelmiştir. Senaryo 2’de yer alan tünel bölgesi sırasında yaşanan GPS sinyali sırasında füzyon formülü eşitlik (39)’te verildiği şekline dönüşmüştür.

$$V_{f1} = \frac{V_{OPG} + V_{Dopp}}{2} \quad (39)$$



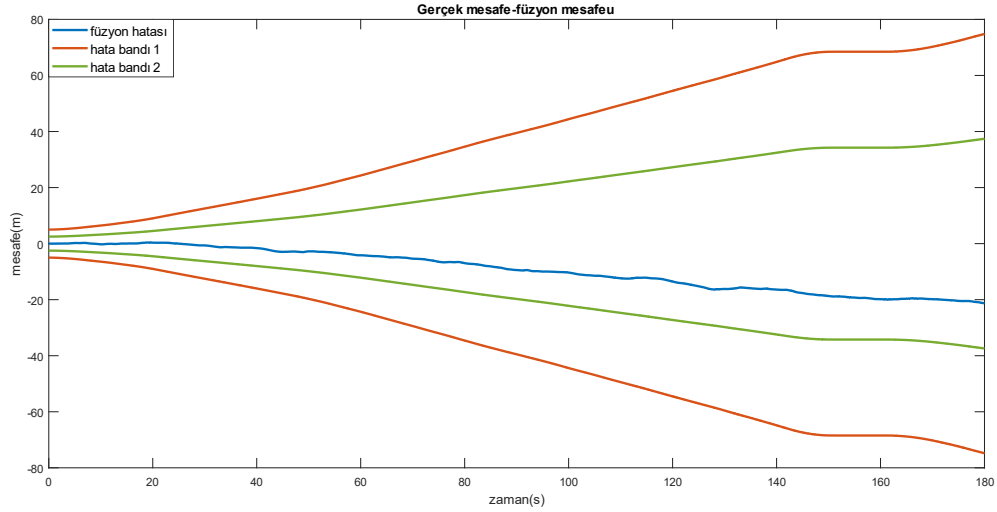
Şekil 4-22: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 hız hatası ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-23'te senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçümü ve referans mesafe bilgisi gösterilmiştir.



Şekil 4-23: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçümü

Şekil 4-24'te füzyon 1 mesafe hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2'ye göre durumu gösterilmiştir. Buradan da anlaşılabileceği gibi füzyon 1 sonucu hata bandı içerisinde kalmıştır. Ancak elde edilen sonuç senaryo 1'e kıyasla daha kötü çıkmıştır.



Şekil 4-24: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçüm hatası ve ERTMS hata bantları

Tablo 4-6'da Senaryo 2'ye göre yapılan benzetim sonuçlarından elde edilen standart sapma verileri yer almaktadır. Bu veriler grafikler üzerinden gözlenen sonucu desteklemektedir. Senaryo 1'e oranla elde edilen standart sapma verilerinde büyüme meydana gelmiştir. Senaryo 2'de GPS üzerinden veri kaybı yaratılmıştır, ancak sensör füzyon sırasında GPS üzerinden veri gelmediği için füzyon diğer sensörlerle yapılmıştır. Bu durum da füzyon 1 sonucunun veri kaybından etkilenmesini önlemiştir. GPS erişilebilirlik problemi meydana gelmesine rağmen füzyon tekniği bu durumdan kötü etkilenmemiştir. Bu durum füzyon yöntemlerinin erişilebilirliği arttırdığını göstermektedir.

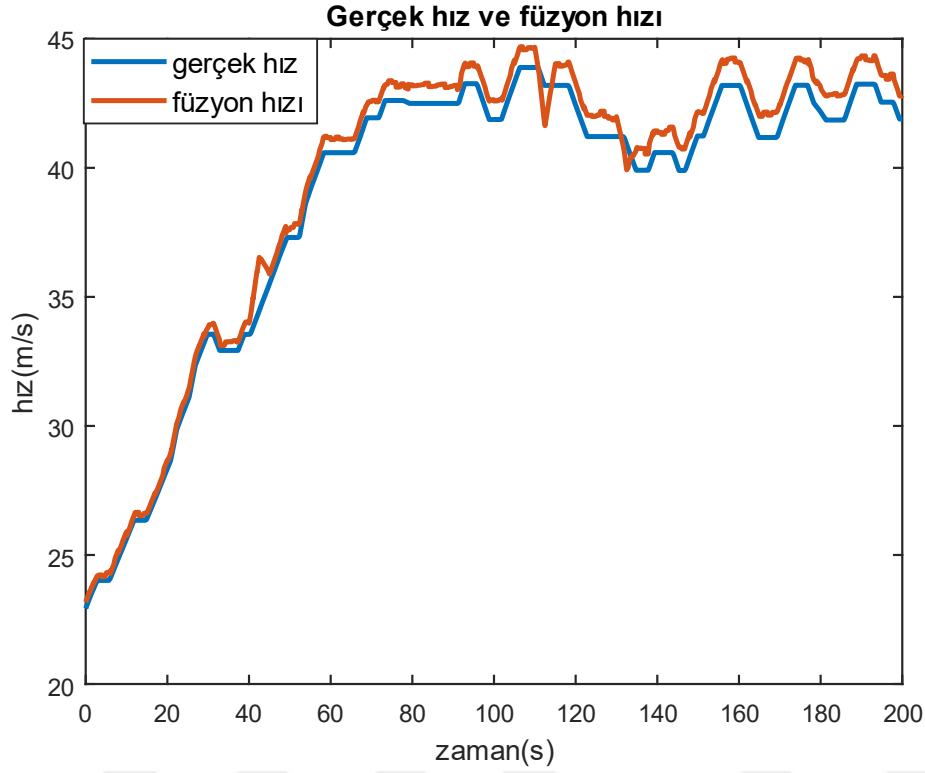
Tablo 4-6: Senaryo 2 için elde edilen sensör ve füzyon 1 standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 1
Hız standart sapma(m/s)	0.33	0.11	2.67	0.14

Senaryo 3

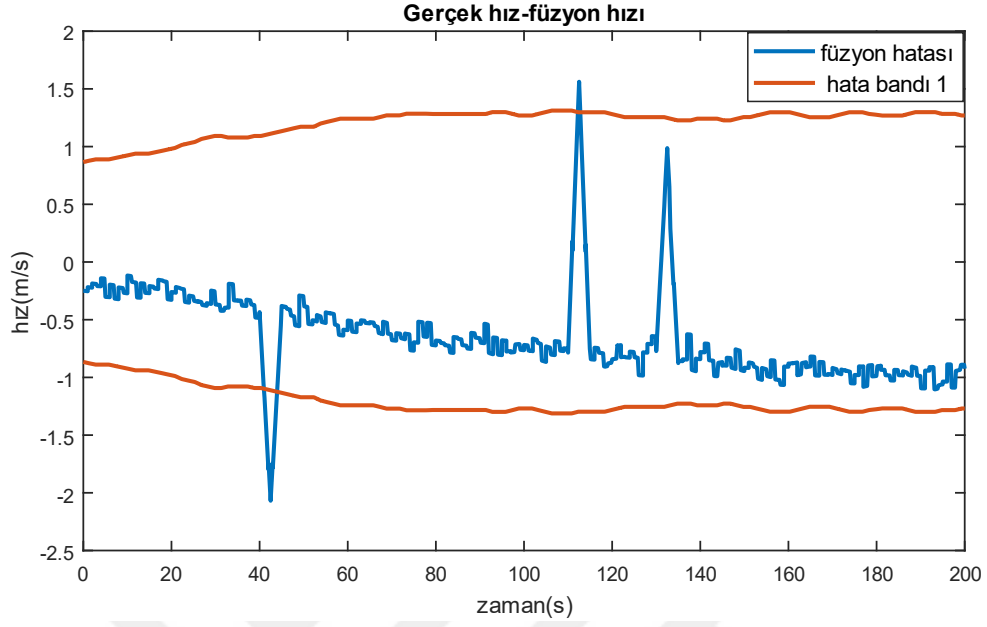
Bu senaryoda referans olarak veri kümesi 3 kullanılmıştır. Amaç, ölçüm hızının füzyon 1 üzerine etkisini gözlemlemektir.

Şekil 4-25'te füzyon 1 için elde edilen hız ölçüm verisi gösterilmiştir. Teker sensörü ve Doppler radar hızı ölçüm hızından etkilendiği için füzyon 1 sonucu elde edilen hız ölçümünün de ölçüm hızından etkilendiği görülmüştür.



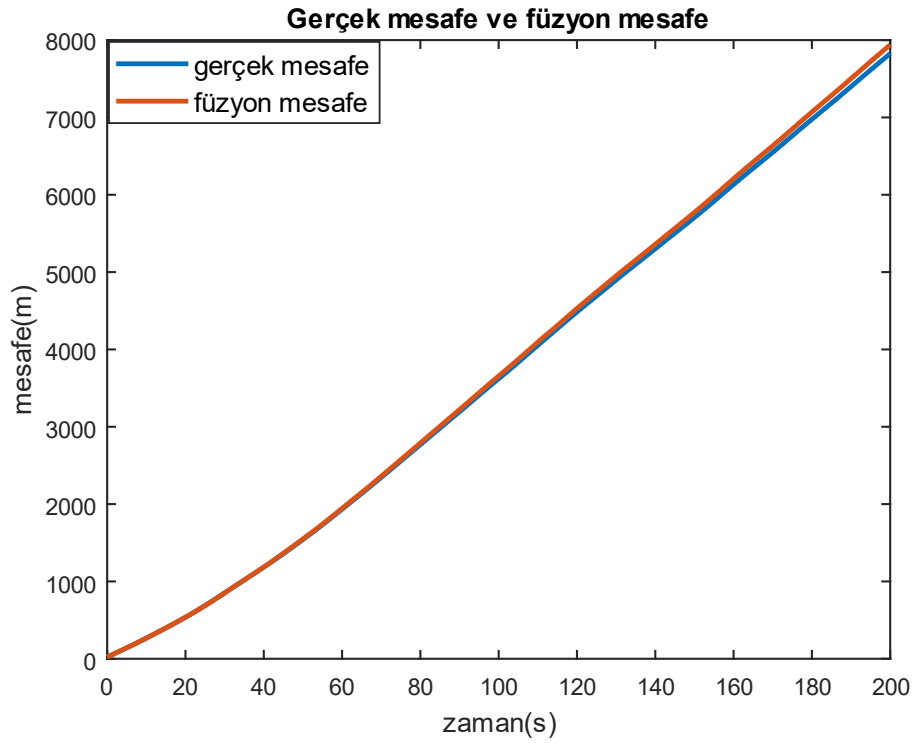
Şekil 4-25: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 hız ölçümü

Şekil 4-26’da füzyon 1 hız hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Füzyon 1 hız hatası kayma durumlarında anlık olarak hata bandının dışına çıkmıştır, bunun dışında ise hata bandının içinde kalmıştır. Hız hatası senaryo 3’te diğer senaryolara göre artmış olsa da kayma durumları dışında hata bandı içinde kalmıştır. Bunun nedeni ise hata bantlarının araç hızına bağlı şekilde değişmesidir.



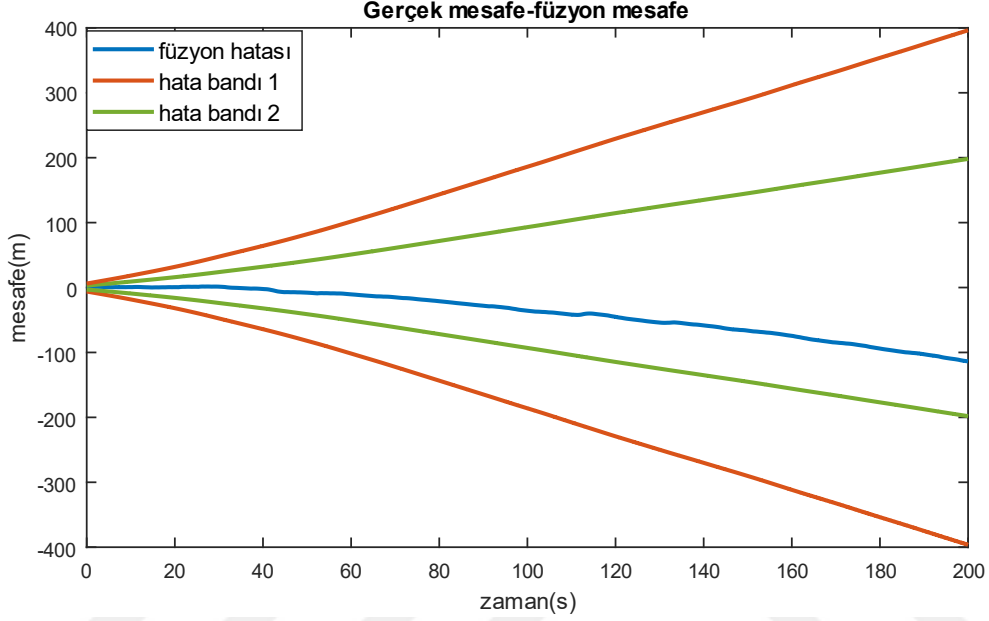
Şekil 4-26: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 hız hatası ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-27’de senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçüm verisi gösterilmiştir.



Şekil 4-27: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 1 mesafe ölçümü

Şekil 4-28’de füzyon 1 sonucu elde edilen mesafe ölçüm hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2’ye göre durumu gösterilmiştir. Sensör verilerinden farklı olarak füzyon 1 sonucu hata bandı içerisinde kalmıştır.



Şekil 4-28: Füzyon 1 mesafe ölçüm hatasının ERTMS hata bantlarına göre durumu

Tablo 4-7’de senaryo 3 için elde edilen hız standart sapma verileri gösterilmiştir. Bu verilere bakıldığında diğer senaryolardan farklı olarak en iyi sonucun GPS verisine ait olduğu gözlenmiştir. Teker sensör ölçümü ve Doppler radar, ölçüm hızından etkilendiği için standart sapma değerlerinde de büyüme meydana gelmiştir. Füzyon 1 sonucu, teker sensörü ve Doppler radar hız ölçümünden daha iyi sonuç verirken GPS’ten daha kötü bir sonuç vermiştir.

Tablo 4-7: Senaryo 3 için hız hatası standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 1
Hız standart sapma(m/s)	1.03	0.58	0.20	0.40

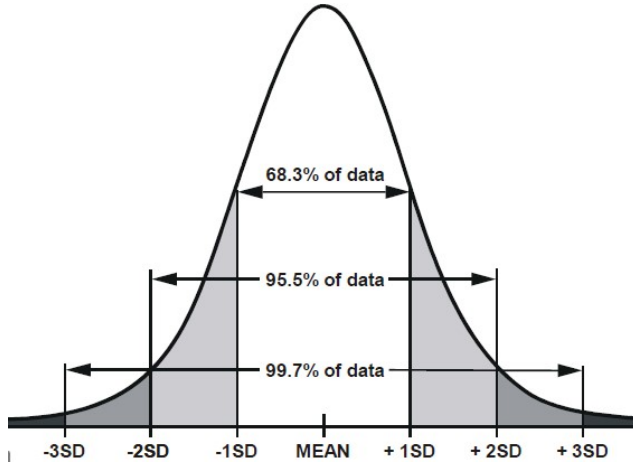
4.3. Sensör Karakteristiğine Göre Sabit Ağırlıklandırılmış Füzyon

Sensörlerin karakteristikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu farklar sensörün karakteristiğinden ve ölçülmesi güç çevre faktörlerden meydana gelmektedir. Performansı yüksek olan bir sensörün tek başına kullanılması erişilebilirlik ve yedeklilik açısından uygun değildir. Bunu sağlayabilmek için füzyon 1’de üç sensör kullanılarak daha erişilebilir bir sonuç elde etmek hedeflenmiştir. Ancak kullanılan sensörlerin performanslarına bakılmaksızın eşit ağırlıklandırma ile birleştirilmesi elde edilen sonucun kullanılan iyi performanslı sensörden uzaklaşmasına neden olmuştur. Füzyon 2’de, füzyon 1’den farklı olarak kullanılan katsayıların belirlenmesinde gerçek sensör karakteristiklerinin etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla katsayılar sensör karakteristikleri incelenerek belirlenmiştir.

Bölüm 2’de füzyonda kullanılacak sensörler detaylı şekilde incelenmiştir. Bu bölümde kullanılan sensör hata modelleri, füzyon 2 için kullanılacak sensör katsayıların belirlenmesinde kullanılmıştır.

Sensör hataları sistematik hataları ve rastgele hataları içermektedir. Rastgele hatalar “0” ortalamalı beyaz gürültü olarak modellenmiştir. Beyaz gürültü olarak tanımlanan rastgele hatalar sistematik hataların yanında küçük kalmaktadır. Sensör firmaları, sistematik hatalarını ve rastgele hataları yaptıkları testlerle belirlemekte ve bir hata aralığı bilgisi paylaşmaktadır. Çevre koşulları ise bu hatalar gibi kolay tanımlanamamaktadır. Kızaklama ve patinaj durumları, hava koşulları sonucu sensör ölçümünün bozulması ve verilerin erişilebilirliğinin kaybolması sistematik hata şeklinde tanımlanamamaktadır. Bölüm 2’de sensör katalogları üzerinden elde edilen sistematik hatalar ve en çok yaşanan çevresel etkilere dayalı ölçüm hataları modellenmiştir. Bu füzyonda modellenen hatanın standart sapma bilgisi füzyon katsayılarının belirlenmesinde kullanılacaktır.

Hatanın standart sapması(σ), hatanın dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Hatanın normal dağılımı, hatanın ortalaması ve hatanın dağılımını içermektedir. Normal dağılıma göre $\pm\sigma$ dağılımın %68,3’lük kısmını kapsamaktadır. $\pm 3\sigma$ değeri ise normal dağılımda %99.7’lik alanı kapsamaktadır [14].



Şekil 4-29: Veri normal dağılımı [14]

Sensör ölçüm hatalarının standart sapma verileri, sensörlerin karakteristiğini yansıtmaktadır. Standart sapma değerleri, verinin olması gereken değerden ne kadar uzaklaştığına dair bilgi verdiği için bu değerler sensör katsayısının ayarlanmasında oldukça etkilidir. Bu yüzden eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyondan farklı olarak burada eşitlik (37) kullanılmıştır. Füzyon 2 için, eşitlik (37)'deki katsayıların hesaplanmasında sensör hatalarının standart sapmalarının belirlenmesi gerekmektedir. Konum bilgisi ise hesaplanan hız bilgisi üzerinden tümlev işlemi ile hesaplanacaktır.

- Optik darbe sayıcı hatası teker çapının yanlış girilmesinden ve kayma durumlarının yaşanması sonucu meydana gelmektedir. Kayma durumu anlık olarak yaşandığı için normal dağılım ile karakterize edilmesi uygun bulunmamıştır. Teker çap hatası ise raylı araçlar için tanımlanan limitler ile tanımlanabilir.

Yeni teker ile aşınmış teker farkı Tablo 4-8'de verilmiştir. Tablo 4-8'dan anlaşılabacağı gibi aşınmamış teker ve aşınmış teker arasında %7,5'tan daha fazla farka izin verilmemektedir. Bu çalışmada bu değer $\pm\%4$ olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4-8: Araç tiplerine göre yeni ve eski teker çap farkı [42]

Araç tipi	Yeni teker çapı(mm)	Aşınmış teker çapı(mm)
Yük treni	920	850
Lokomotif	1016	930

Gerçek ölçüm değerinde meydana gelebilecek maksimum $\pm 4\%$ 'lük hata dağılımı $\pm 3\sigma$ hata bandına karşılık geldiği varsayılmıştır. Bu bilgiler kullanılarak optik hız sensörü hız hatasının standart sapması eşitlik (40)'da verildiği gibi kabul edilmiştir.

$$\sigma_{OPG} = \frac{(0.04 V_{OPG})}{3} m/s \quad (40)$$

- Doppler radar hatası $\pm 1\%$ 'lik sensör hatasından oluşmaktadır. Bu hatanın yanında çevre koşullarının değişmesi sensörün hataya girmesine neden olabilecektir. Katsayı hesaplanırken sensör veri kaybı göz ardı edilmiştir. Bu bilgilere göre Doppler radar hız hatasının standart sapması eşitlik (41)'de verildiği gibi alınmıştır.

$$\sigma_{Dopp} = \frac{(0.01 V_{doppler})}{3} m/s \quad (41)$$

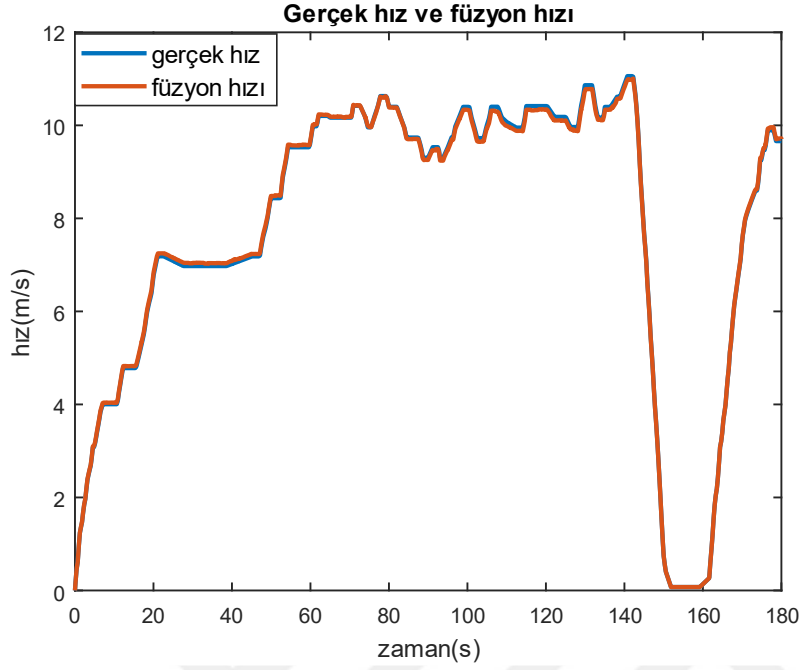
- GPS hatası bölüm 2'de ölçüm değerinden bağımsız olarak yayılımı ± 0.3 m/s olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu yüzden GPS standart sapma değeri için eşitlik 'deki değer kullanılmıştır.

$$\sigma_{GPS} = \frac{0.03}{3} m/s \quad (42)$$

Ayrıca füzyon 1'den farklı olarak füzyon 2 ve füzyon 3'te kayma algılayıcısı kullanılmıştır. Bu algılayıcının füzyon formülleri üzerindeki etkisi 4.5 bölümünde detaylandırılmıştır.

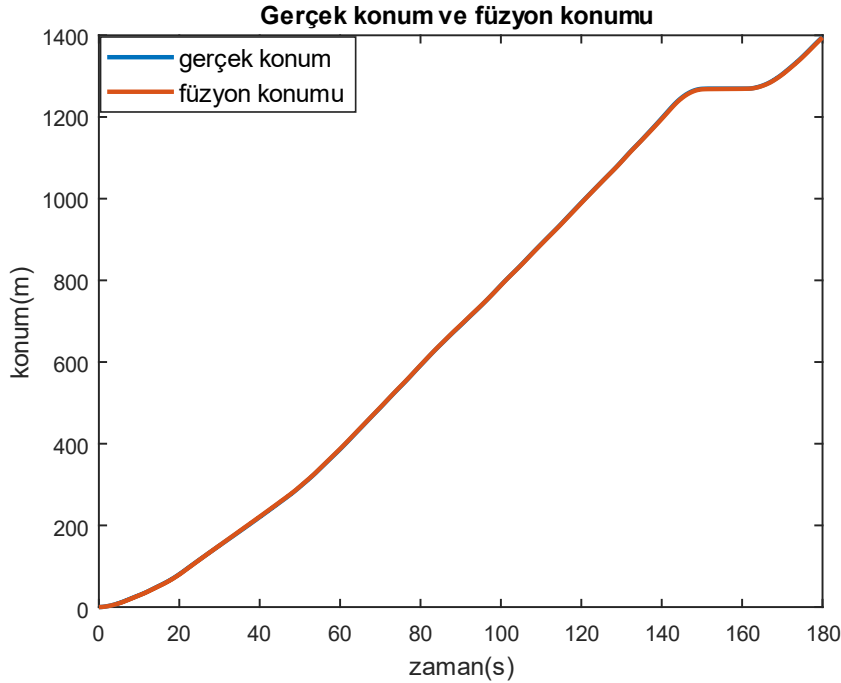
Senaryo 1

Füzyon 2 sonucu elde edilen hız verisinin referans hıza göre durumu Şekil 4-30'da gösterilmiştir. Senaryo 1'de sensör ölçüm hataları çok olmadığı için ve kayma tespit sistemi ile kayma durumlarında teker sensör verisinin etkisi füzyondan çıkarıldığı için füzyon 1'de meydana gelen hız hatası füzyon 2'de meydana gelmemiştir.



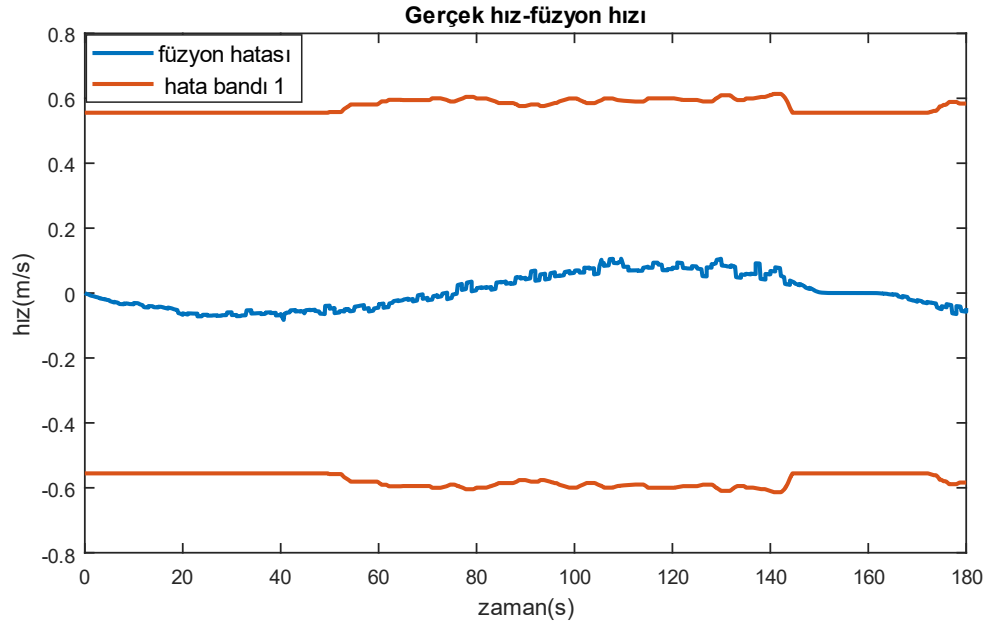
Şekil 4-30: Senaryo 1'e göre füzyon 2'nin hız ölçümü

Aynı şekilde Şekil 4-31'de füzyon 2 sonucu hesaplanan mesafe bilgisinin gerçek mesafe ölçümüne göre durumu verilmiştir. Bu ölçüm sonucu da Füzyon 1'de olduğu gibi referansa çok yakın çıkmıştır.



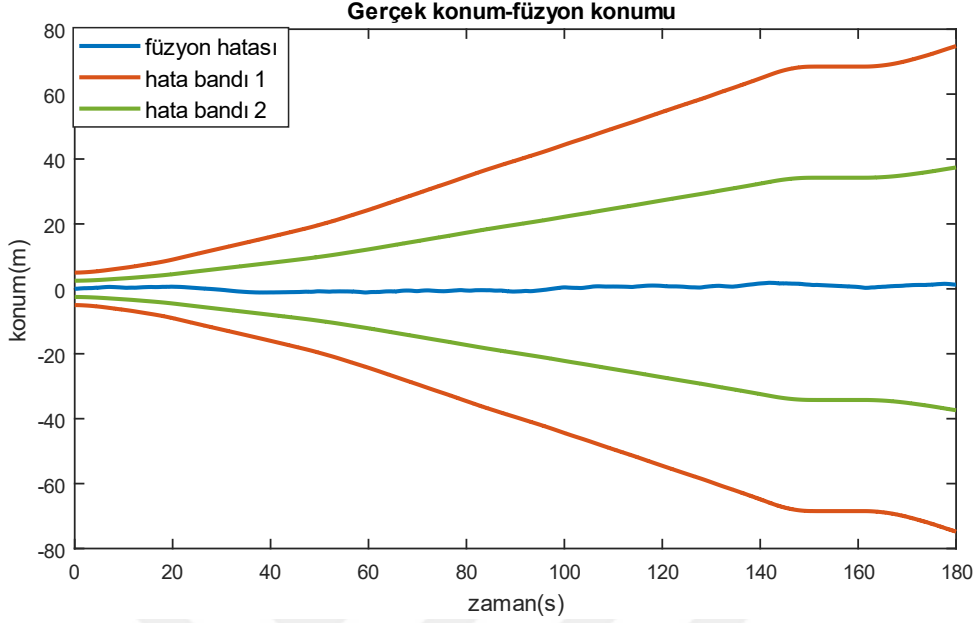
Şekil 4-31: Senaryo 1'e göre sensörlerin ve füzyon 2'nin konum ölçümleri

Ölçülen Füzyon 2 sonuçlarındaki hataları daha iyi gözleyebilmek için hataların hata bandına göre durumları aşağıda gösterilmiştir. Şekil 4-32’de Füzyon 2 sonucu elde edilen hız ölçüm hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu verilmiştir. Hız hatası hata bantlarının içinde kaldığı görülmüştür. Füzyon 1 ile karşılaştırıldığında bu füzyon tekniğinin teker kayma durumundan etkilenmediği ve bu nedenle anlık hata bandı dışına çıkma durumlarının yaşanmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4-32:Füzyon 2 hız hatasının hata bandına göre durumu

Şekil 4-33’te Füzyon 2 mesafe ölçüm hatasının hata bandına göre durumu verilmiştir. Mesafe ölçüm hatasının da ERTMS konum hata bantları içinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 4-33: Füzyon 2 mesafe ölçüm hatasının ERTMS konum hata bantlarına göre durumu

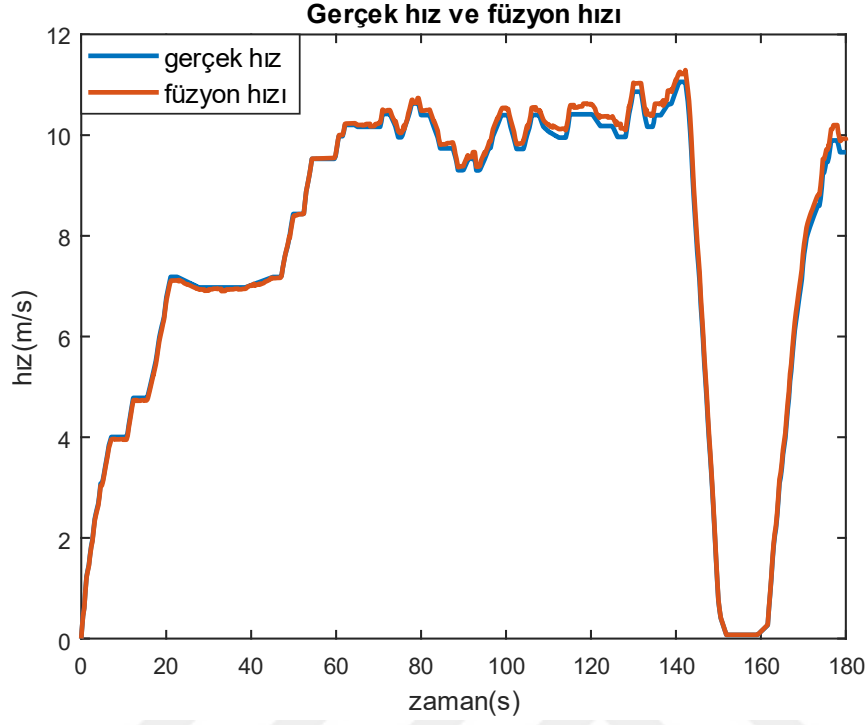
Tablo 4-9, senaryo 1 sonucu elde edilen hız ölçümlerin hata karakteristiğini göstermektedir. Bu tabloda verilen standart sapma değerleri incelendiğinde füzyon sonucunun hatalı ölçümlerden Füzyon 1'e göre daha az etkilendiği görülmektedir.

Tablo 4-9: Senaryo 1 için hesaplanan standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 2
Hız standart sapma(m/s)	0.24	0.04	0.1	0.032

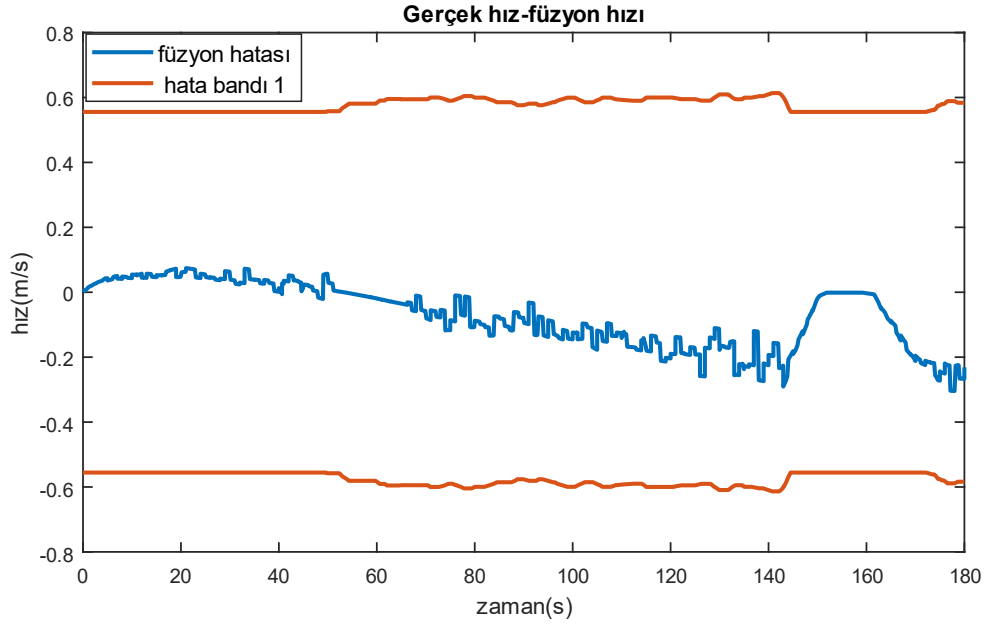
Senaryo 2

Şekil 4-34'te senaryo 2 için yapılan hız ölçüm sonucu görülmektedir. Senaryo 2'deki şartlar senaryo 1'den daha zorlu olduğu sensör ölçüm sonuçları üzerinden anlaşılabilmektedir. Bu durum füzyon 2 sonucu üzerinde de senaryo 1'e göre daha fazla gözlenmiştir. Senaryo 2 sırasında GPS verisi üzerinde oluşan veri kaybının füzyon sonucunu etkilememesi için oluşan veri kaybı tespit edilip füzyon formülündeki GPS standart sapma değeri sonsuza çekilmiştir. Bu işlem sonucu GPS katsayı sıfırlanırken diğer sensörlerin ağırlığı artmıştır.



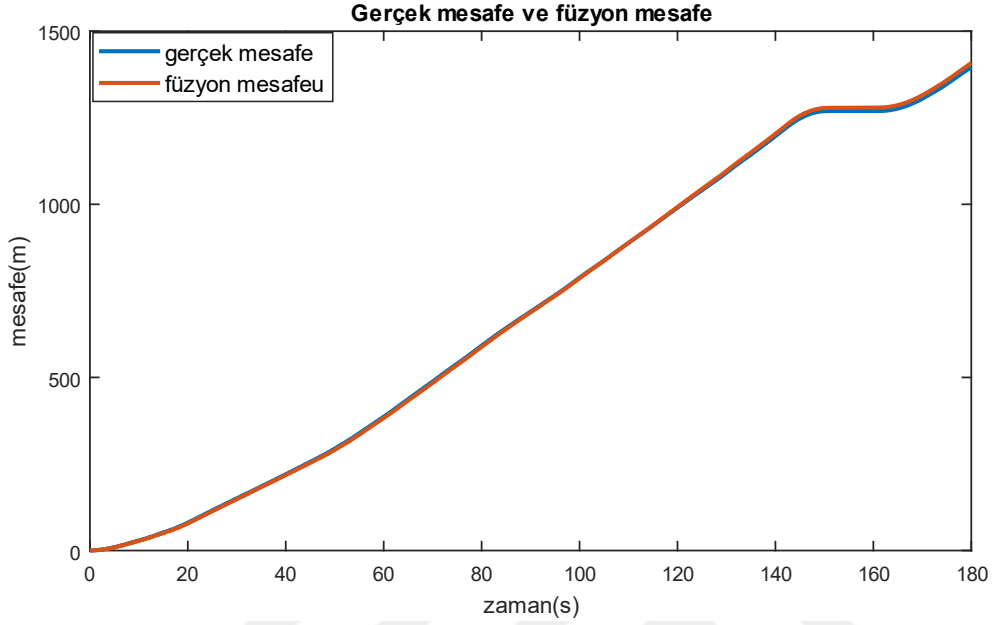
Şekil 4-34: Senaryo 2'ye göre füzyon 2 sonucu ölçülen hız

Şekil 4-35'te elde edilen füzyon hız hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Ölçüm sonucunun senaryo 2 için de hata bandı içinde kaldığı görülmüştür.



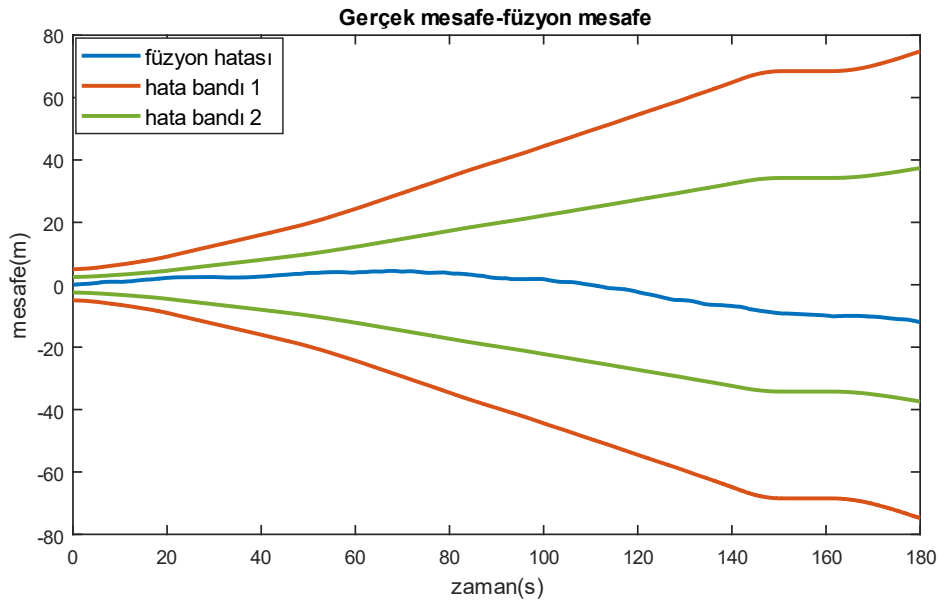
Şekil 4-35: Senaryo 2 için elde edilen füzyon 2 hız hatası ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-36'da füzyon 2 sonucu elde edilen mesafe ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4-36: Senaryo 2 için füzyon 2 sonucu elde edilen mesafe ölçümü

Şekil 4-37'de füzyon 2 sonucu elde edilen mesafe hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2'ye göre durumları gösterilmiştir. Bu sonuç da hata bandı içerisinde kalmıştır.



Şekil 4-37: Senaryo 2 için füzyon 2 mesafe hatası ve ERTMS hata bantları

Bu değerlere bakıldığında füzyon performansı daha iyi bir şekilde gözlenmektedir.

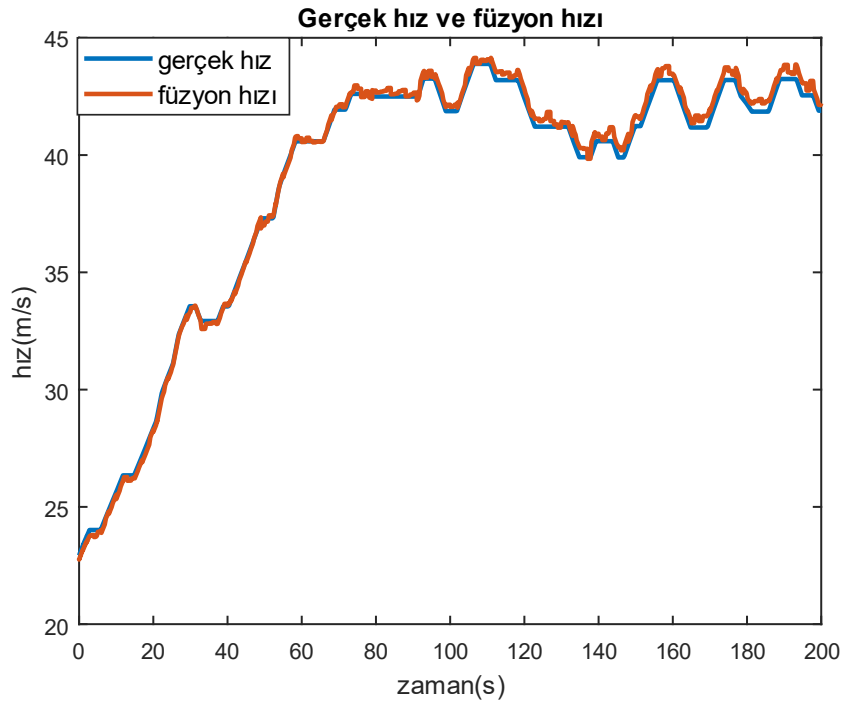
Tablo 4-10, elde edilen ölçümler sonucu hesaplanan standart sapma değerlerini içermektedir. Bu değerlere bakıldığında füzyon performansı daha iyi bir şekilde gözlenmektedir.

Tablo 4-10: Senaryo 2 için hesaplanan standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 2
Hız standart sapma(m/s)	0.32	0.11	2.67	0.09

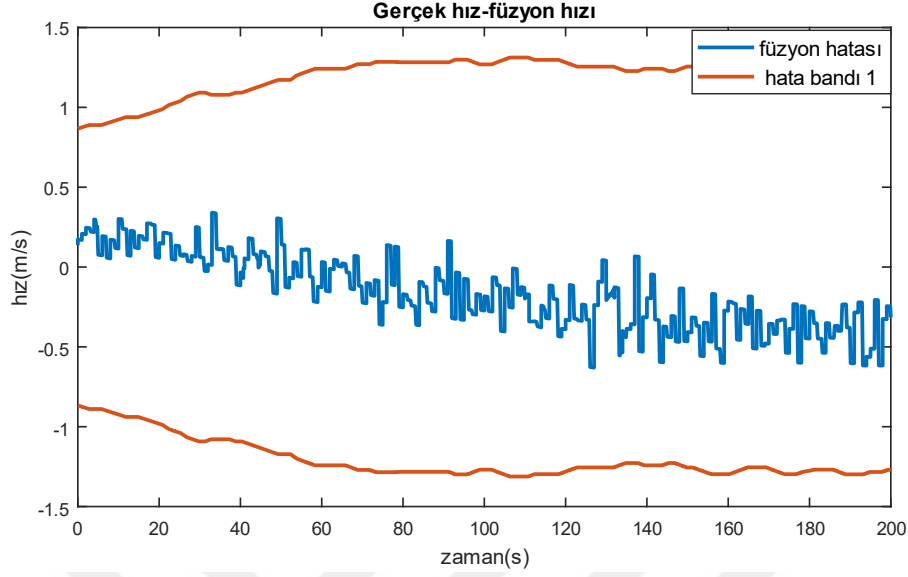
Senaryo 3

Şekil 4-38’de senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 hız ölçümü gösterilmektedir. Senaryo 1 ve senaryo 2’den farklı olarak referans hız yüksek bir hız olduğu için füzyon 2’deki hatanın arttığı gözlenmiştir.



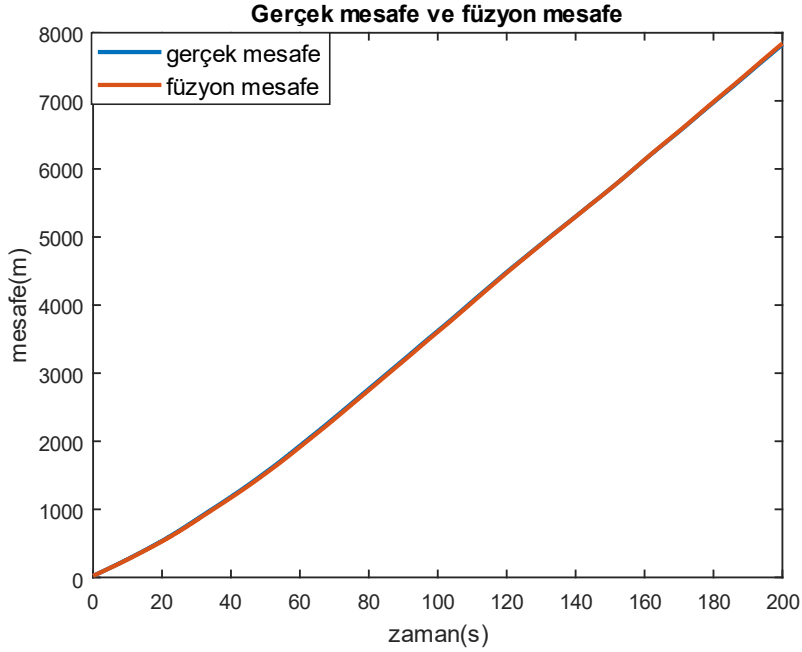
Şekil 4-38:Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 hızı

Şekil 4-39’da füzyon 2 hız hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Hata diğer iki senaryoya göre artmış olsa da hala ERTMS hata bandının içindedir. Çünkü hata bandı da ölçüm hızına göre değişmektedir.



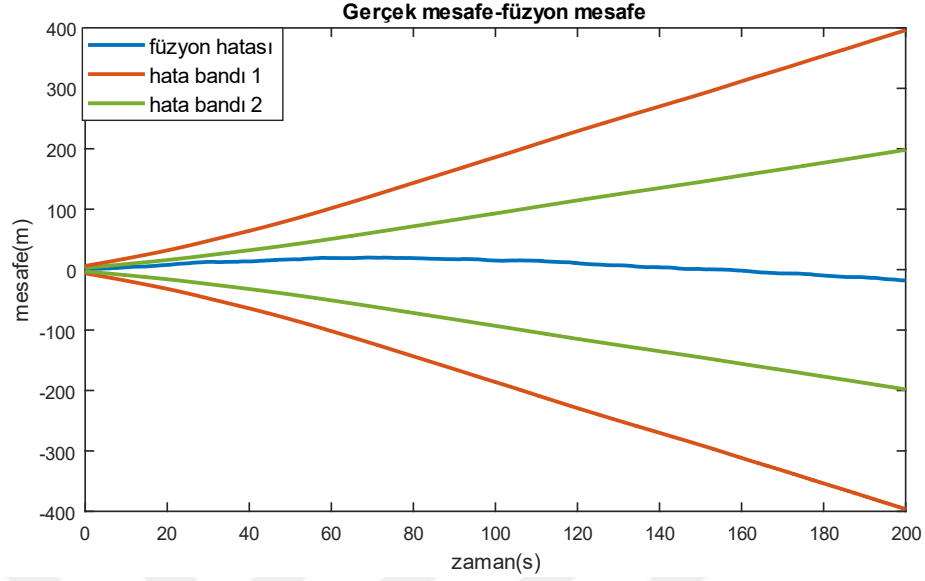
Şekil 4-39:Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 hız hatası ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-40’da senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 mesafe ölçümü verilmiştir.



Şekil 4-40:Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 mesafe ölçümü

Şekil 4-41’de mesafe ölçüm hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2’ye göre durumu gösterilmiştir. Füzyon 2 sonucu elde edilen ölçümün hata bandı içerisinde kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4-41: Senaryo 3 için elde edilen füzyon 2 mesafe ölçüm hatası ve hata bantları

Tablo 4-11’de sensörler ve füzyon 2 sonucu elde edilen hız hatasına ait standart sapma değerleri verilmiştir. Bu bilgiler de yukarıda elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Diğer senaryolardan farklı olarak Doppler ölçüm performansı bu senaryoda azalmıştır. GPS performansı ise diğer sensörlere göre daha iyi sonuç vermiştir. Füzyon sonucu ise beklendiği gibi en iyi sonuç veren sensöre yakın bir sonuç vermiştir.

Tablo 4-11: Senaryo 3 için elde edilen standart sapma karşılaştırmaları

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 2
Hız standart sapma(m/s)	1.03	0.58	0.2	0.24

4.4. Sensör Karakteristiğine Göre Uyarlamalı Ağırlıklandırılmış Füzyon

Füzyon 1 ve füzyon 2’de olduğu gibi bu füzyon tipinde de amaç erişilebilirlik ve doğruluğu artırmaktır. Her sensörün her koşulda doğru sonuç vermesi beklenemez. Sensör karakteristiğine göre uyarlamalı ağırlıklandırılmış füzyon tekniğinde esas amaç, doğruluğu azalmış ya da erişilebilirliği düşmüş bir sensör verisinin füzyon sonucu üzerindeki etkisini azaltmaktır. Bu yüzden bu füzyon sırasında sensör verileri ağırlıklandırılırken sensör karakteristiğini yansıtan ve sensör hatasına göre dinamik hesaplanan “standart sapma” verileri kullanılmıştır.

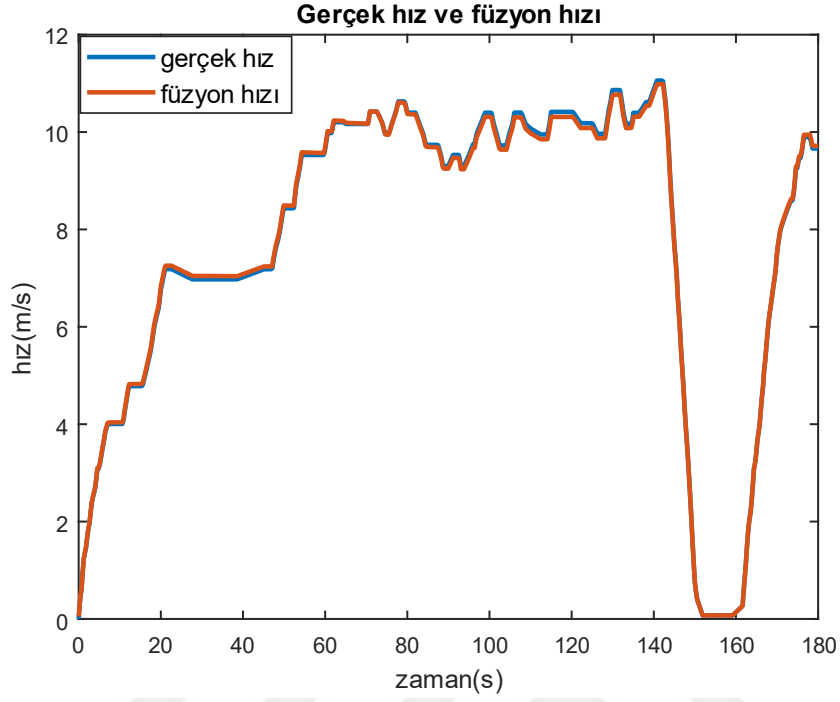
Bu kısımda senaryo 1, senaryo 2 ve senaryo 3 üzerinden değerlendirme yapılacaktır. Bu füzyon tipinde de sensör karakteristiğine bağlı füzyon yapıldığı için kullanılan füzyon formülü olarak eşitlik (37) kullanılmıştır. Füzyon 3'te füzyon 2'den farklı olarak her sensör ölçüm verisine göre uyarlamalı katsayılar füzyon formülünde kullanılmıştır. Bu katsayılar hesaplanırken 10 ölçümde bir güncellenen standart sapma değerleri sensör katsayılarının hesabında kullanılmıştır. Füzyon sırasında bir sensörün katsayısı füzyondaki diğer sensörlerin performansına göre değişmektedir. Bu amaçla sensör katsayıları, değişen standart sapma değerlerine göre güncellenerek füzyon sonuçları elde edilmiştir.

Standart sapma değerlerinin 10 ölçümde bir güncellenebilmesi için referans bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden benzetim sırasında referans hız verisi olarak bir önceki döngüde hesaplanan füzyon sonucu kullanılmıştır. Raylı araçlar büyük ağırlıkları nedeniyle küçük ivmelerle hareket etmektedir. Sensör verileri ise ortalama 50Hz gibi bir frekansta güncellenmektedir. Bu döngü süresinde araç hızlarında dramatik değişiklikler meydana gelmemektedir. Bu nedenle füzyon 3 sırasında referans hız olarak bir önceki döngüde hesaplanan hız verisi kullanılmıştır. Benzetime başlama anında hız sıfır olduğu için belli bir gecikme sonrası yöntem istenildiği gibi çalışmaktadır. Ayrıca başlangıç katsayısı olarak sensörlere eşit ağırlık verilmiştir.

Füzyon 3'te de füzyon 2'de kullanılan kızaklama ve patinaj algılayıcısı kullanılmıştır. Bu algılayıcısı füzyon formülü üzerine etkisi 4.5 numaralı başlığı altında anlatılmıştır.

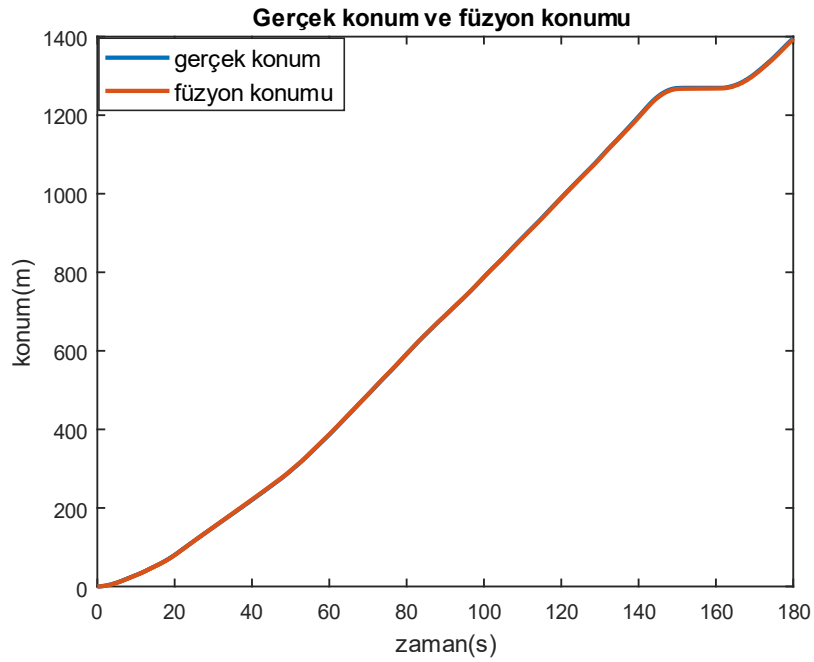
Senaryo 1

Şekil 4-42'de füzyon 3 tekniği sonucu elde edilen hız ölçüm sonucunun referans hıza göre durumu verilmiştir. Füzyon 2'ye benzer şekilde bu sonuçta kayma tespit sistemi sayesinde kayma durumundan etkilenmemiştir.



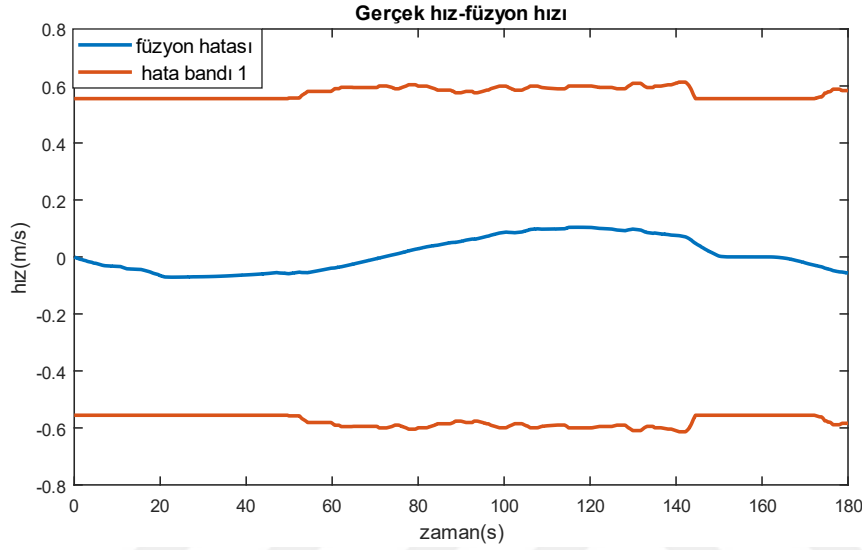
Şekil 4-42: Senaryo 1'e göre füzyon 3 hız ölçümü

Şekil 4-43'te füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe ölçüm sonucu verilmiştir. Bu sonucun da referans mesafe bilgisini takip ettiği görülmüştür.



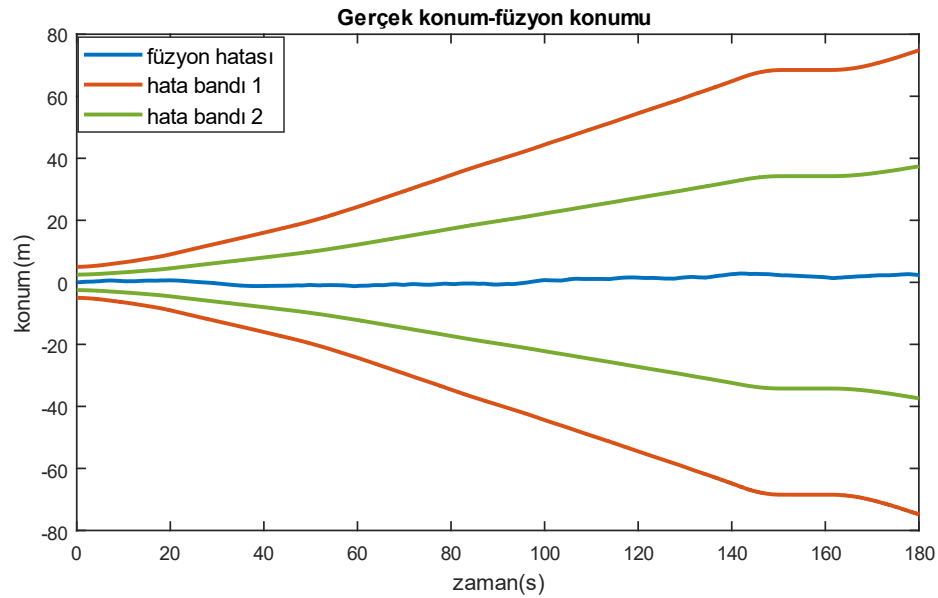
Şekil 4-43: Senaryo 1'e göre füzyon 3 mesafe ölçümü

Hataların daha iyi gözlenebilmesi için Şekil 4-44'te füzyon 3 sonucu elde edilen hız ölçüm hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Sonucun hata bandı içerisinde kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4-44:Senaryo 1'e göre füzyon 3'ün hız ölçüm hatası

Şekil 4-45'te füzyon 3 mesafe ölçüm hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2'ye göre durumları gösterilmiştir. Ölçüm hatasının hata bantlarının içinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 4-45:Senaryo 1'e göre füzyon 3'ün mesafe ölçüm hatası

Tablo 4-12, ölçüm sonuçlarında referans veriye göre oluşan hatalarının standart sapma değerlerini göstermektedir. Bu değerlere göre en iyi sonucu Doppler radar vermektedir. Doppler radardan sonra en iyi sonuç ise sensör karakteristiğine göre uyarlamalı ağırlıklandırılmış füzyon sonucuna aittir.

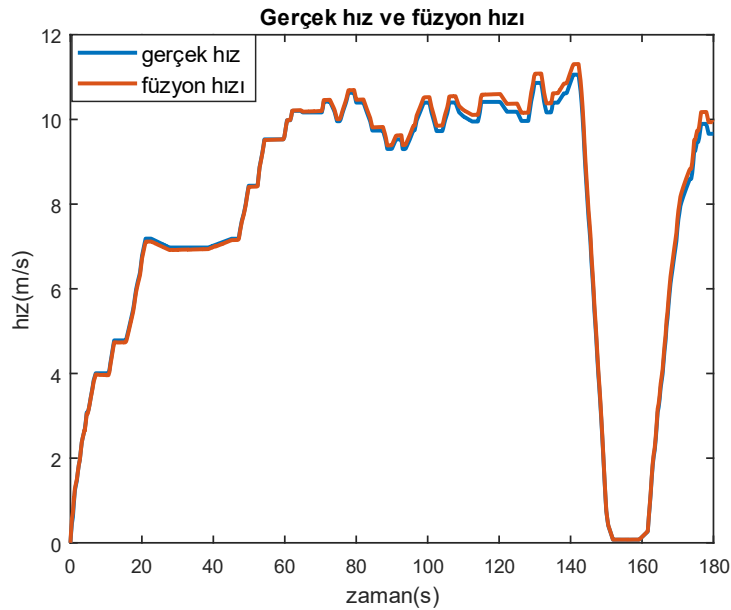
Tablo 4-12: Senaryo 1 için sensör ve füzyon 3 standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 3
Hız standart sapma(m/s)	0.24	0.04	0.1	0.033

Senaryo 2

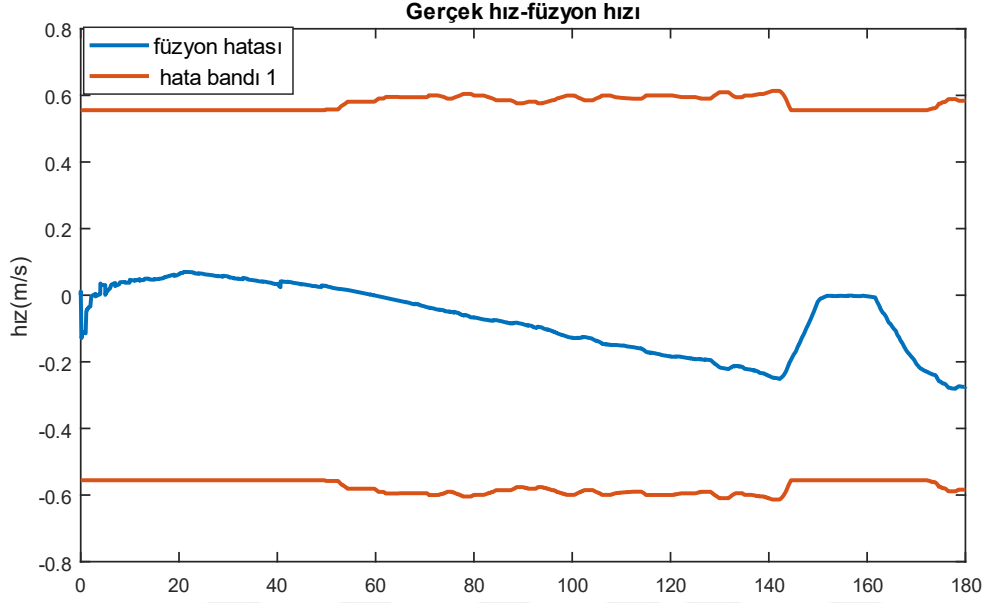
Bu senaryoda senaryo 1'e göre hata oranları artırılmıştır. GPS verisi üzerinde oluşan veri kaybının füzyon sonucunu etkilememesi için oluşan veri kaybı tespit edilip füzyon formülündeki GPS standart sapma değeri sonsuza çekilmiştir. Bu işlem sonucu GPS katsayı sıfırlanırken diğer sensörlerin ağırlığı artmıştır.

Şekil 4-46'da füzyon 3 sonucu elde edilen hız ölçümü gösterilmektedir. Füzyon 1'den farklı olarak kayma durumu etkileri füzyon 3'te gözlenmemiştir. GPS sinyal kaybı da sensör füzyon sonucunu olumsuz etkilememiş tünel bölmesinde ölçülen hızın referans hızı takip ettiği görülmüştür.



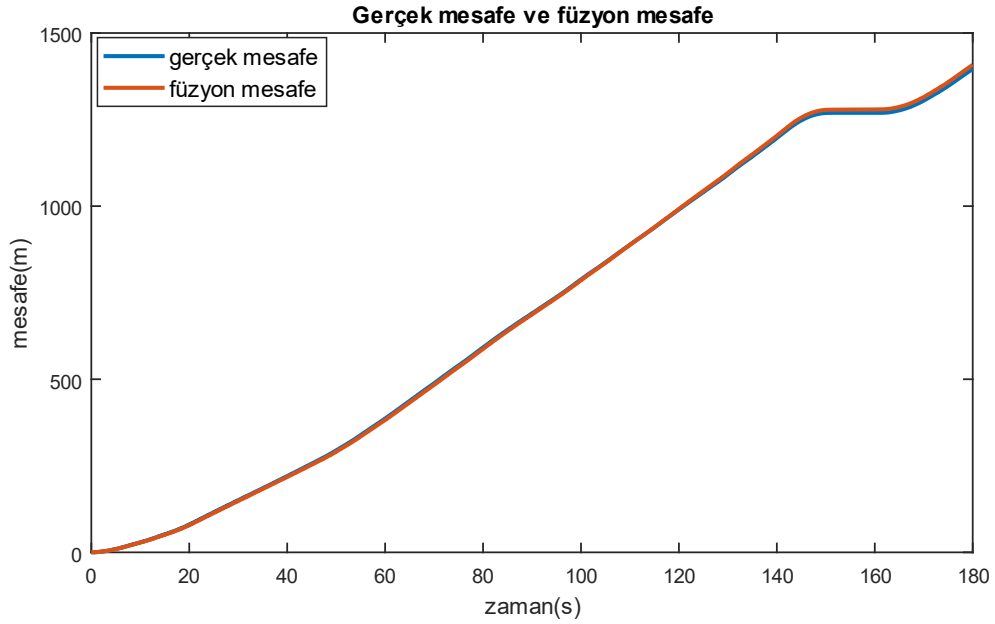
Şekil 4-46: Senaryo 2 için füzyon 3 hız ölçümü

Şekil 4-47’de füzyon 3 hız hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Ölçülen hız verisinin hata bandının dışına çıkmadığı gözlenmiştir.



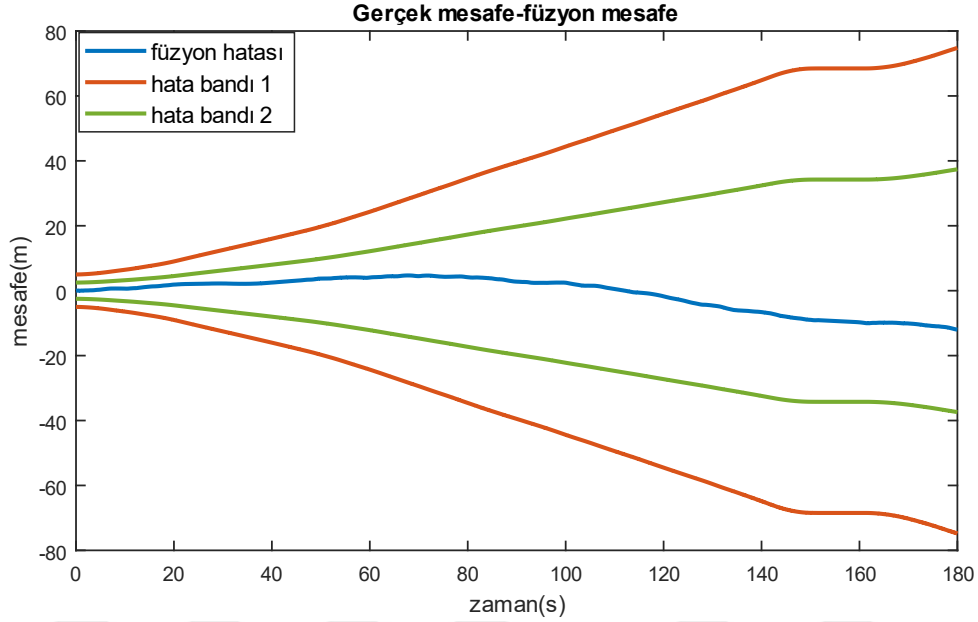
Şekil 4-47: Senaryo 2 için füzyon 3'ün hız hatasının ERTMS hata bandına göre durumu

Şekil 4-48’de füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4-48: Senaryo 2 için füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe ölçümü

Şekil 4-49’da mesafe hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2’ye göre durumu gösterilmiştir. Mesafe hatasının hata bandından çıkmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4-49: Senaryo 2 için füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe hatası ve ERTMS hata bantları

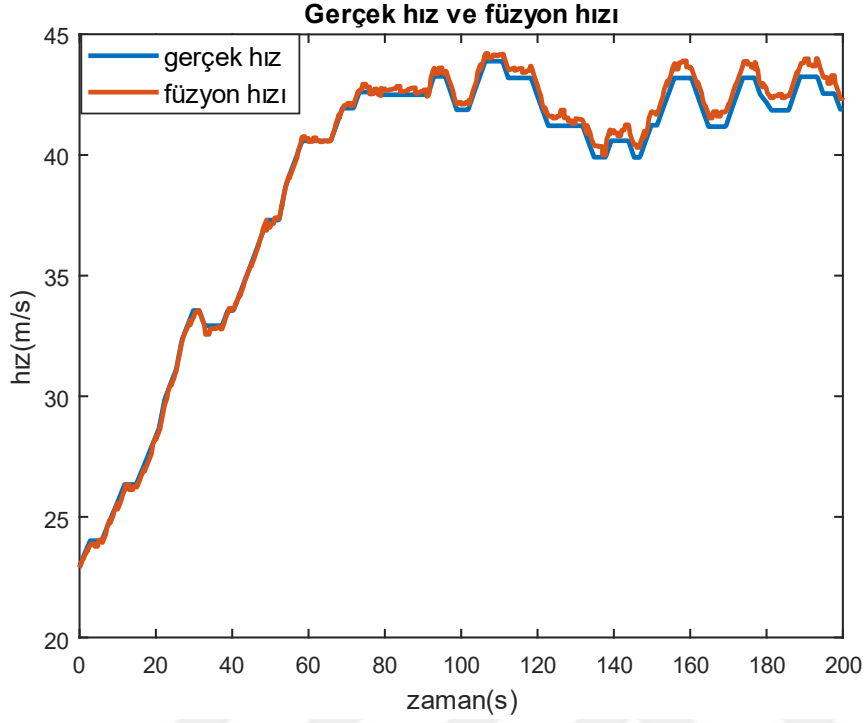
Tablo 4-13’te senaryo 2 için yapılan standart sapma hesaplarının sonuçları verilmiştir. Bu verilerin yukarıdaki grafiklerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Füzyon sonucunun en iyi değeri verdiği bu tablo üzerinden görülmektedir. Füzyon sonucu, veri kaybından etkilenmediği için erişilebilirliği daha yüksek bir sonuçtur. Bu durumda Doppler radar yerine füzyonun tercih edilmesi için önemli bir sebeptir.

Tablo 4-13: Senaryo 2 için hesaplanan sensör ve füzyon 3 standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 3
Hız standart sapma(m/s)	0.33	0.11	2.67	0.10

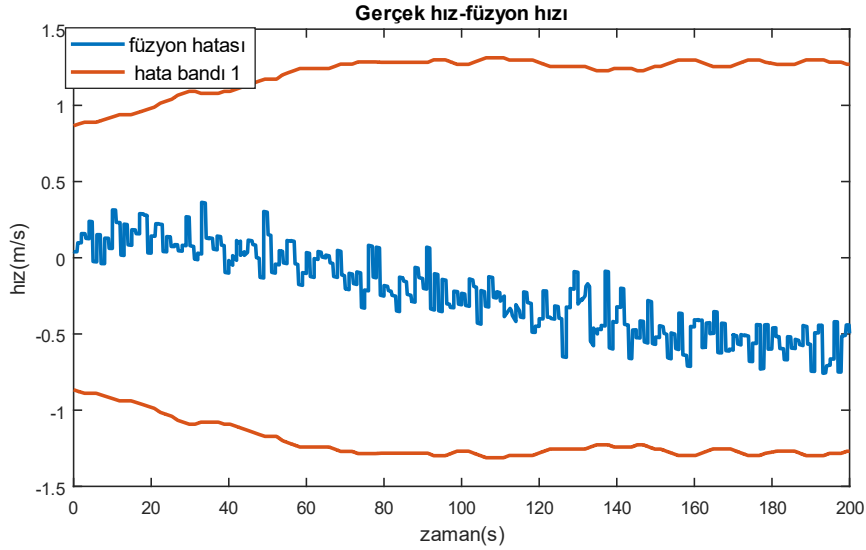
Senaryo 3

Şekil 4-50’de Senaryo 3 için elde edilen Füzyon 3 hız ölçümü gösterilmiştir. Sensör ölçümlerine göre füzyon sonucunun daha iyi olduğu görülmüştür.



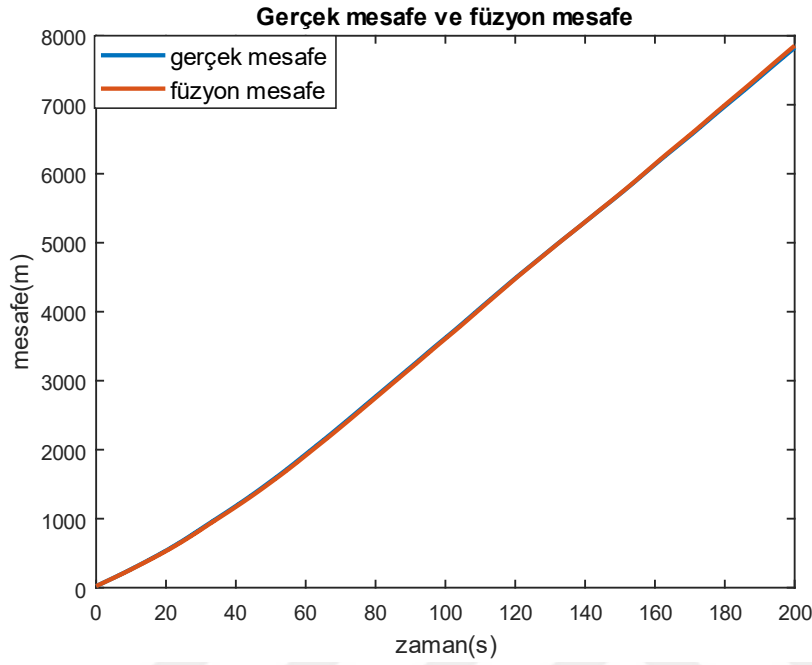
Şekil 4-50: Senaryo 3 için füzyon 3 hız ölçümü

Şekil 4-51’de Füzyon 3 hız hatasının ERTMS hız hata bandına göre durumu gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi füzyon sonucu hata bandının içinde kalmıştır.



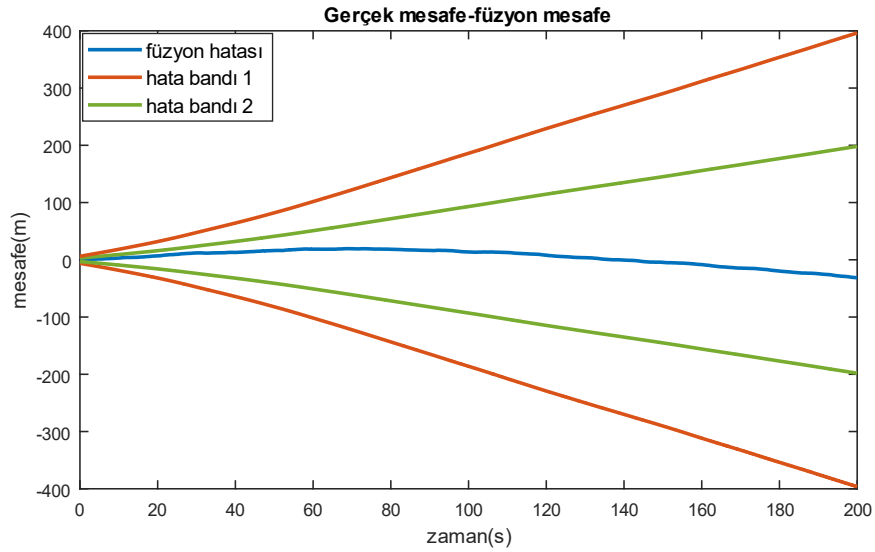
Şekil 4-51: Senaryo 3 için füzyon 3 hız hatası ve ERTMS hata bandı

Şekil 4-52’de Füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe ölçümü verilmiştir.



Şekil 4-52:Senaryo 3 için füzyon 3 mesafe ölçümü

Şekil 4-53’te Füzyon 3 sonucu elde edilen mesafe ölçüm hatasının ERTMS mesafe hata bandı 1 ve hata bandı 2’ye göre durumları gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi füzyon sonucu hata bantlarının içinde kalmıştır.



Şekil 4-53:Senaryo 3 için füzyon 3 mesafe ölçüm hatası ve ERTMS hata bantları

Tablo 4-14'te sensörler ve füzyon 3 sonucu elde edilen hız hatalarına ait standart sapma değerleri gösterilmiştir. Bu değerlerde yukarıda sonuçlarla uyumludur. Beklendiği gibi en iyi sonucu GPS alması vermiştir. Füzyon sonucu ise en iyi sonuç veren GPS'e yakın bir sonuç vermiştir.

Tablo 4-14: Senaryo 3 için elde edilen sensör ve füzyon 3 hız hatası standart sapma değerleri

	Teker sensörü	Doppler radar	GPS	Füzyon 3
Hız standart sapma(m/s)	1.03	0.58	0.2	0.27

4.5. Kayma (Kızaklama ve Patinaj) Algılayıcı Etkisi

Sensör verilerinin birleştirilmesi aynı zamanda hatalı sonuç veren sensörün tespit edilmesine de olanak sağlamaktadır. Bu durum elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğunu arttırmaktadır.

Eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyondan farklı olarak füzyon 2 ve füzyon 3 tekniğinde kayma (kızaklama ve patinaj) tespit sistemi kullanılmıştır. Üçüncü bölümde detayları anlatılan algılayıcının kullanılma amacı ise kızaklama ya da patinaj durumlarında teker sensör verilerinin füzyon verisini etkilememesidir. Bu amaçla ivmeölçer yardımcı sensör olarak kullanılmıştır.

Kayma (kızaklama ve patinaj) tespit sistemi teker hızı ile araç arasında hız farkı olduğunda uyarı vermekte ve teker sensörünün füzyona etkisini sıfırlamaktadır. Bu sayede füzyon içerisinde hesaplanan sensör katsayıları diğer sensörlerin sonuçlarına göre güncellenmektedir. Bu da sistemde büyük bir kayma veya patinaj durumu yaşandığında güvenilir hız ve konum bilgisinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Normal sürüş senaryosu ve kayma durumlarında hesaplanan sensör katsayıları aşağıdaki gibidir.

Normal sürüş durumunda;

$$OPG \text{ katsayısı} = \frac{(\sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2)}{\sigma_{OPG}^2 \sigma_{Dopp}^2 + \sigma_{OPG}^2 \sigma_{GPS}^2 + \sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2} \quad (43)$$

$$\text{Doppler katsayısı} = \frac{(\sigma_{OPG}^2 \sigma_{GPS}^2)}{\sigma_{OPG}^2 \sigma_{Dopp}^2 + \sigma_{OPG}^2 \sigma_{GPS}^2 + \sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2} \quad (44)$$

$$\text{GPS katsayısı} = \frac{(\sigma_{OPG}^2 \sigma_{Dopp}^2)}{\sigma_{OPG}^2 \sigma_{Dopp}^2 + \sigma_{OPG}^2 \sigma_{GPS}^2 + \sigma_{Dopp}^2 \sigma_{GPS}^2} \quad (45)$$

Kayma (kızaklama ve patinaj) durumunda;

$$\text{OPG katsayısı} = 0$$

$$\text{Doppler katsayısı} = \frac{(\sigma_{GPS}^2)}{\sigma_{GPS}^2 + \sigma_{Dopp}^2}$$

$$\text{GPS katsayısı} = \frac{(\sigma_{Dopp}^2)}{\sigma_{Dopp}^2 + \sigma_{GPS}^2}$$

Senaryolarda yol eğimi %1 seviyesinden kabul edildiği için kayma tespit sistemi doğru sonuçlar vermiştir. Ancak eğim yüksek olduğunda bu tespit sistemi doğru çalışmamaktadır. Eğimin yüksek olduğu ve teker sensöründen başka sensörlerin bulunduğu sistemlerde, kayma (kızaklama ve patinaj) tespit sistemi diğer sensör verileri kullanılarak da yapılabilir.

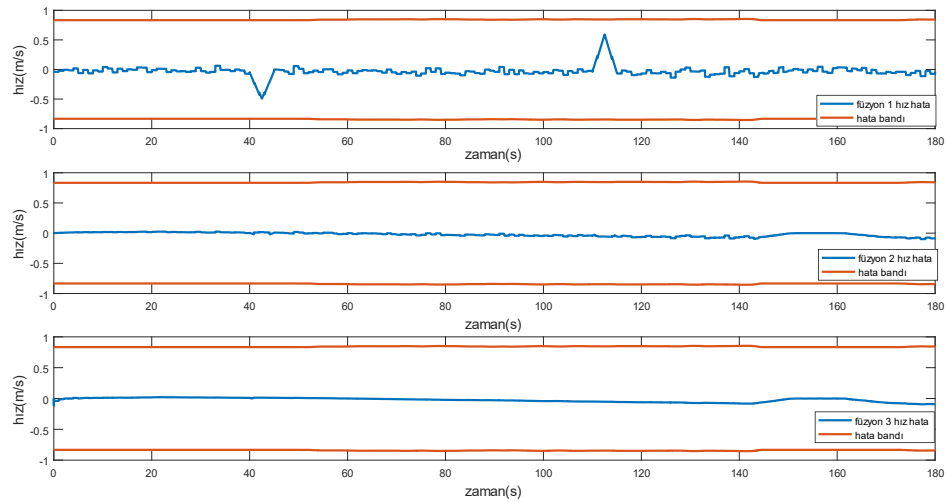
4.6. Füzyon Tekniklerinin Karşılaştırılması

Üç farklı senaryo için üç farklı sensör füzyon tekniği değerlendirilmiştir. Senaryolar sensör verilerinin etkilenebileceği durumları gözleyebilmek için oluşturulmuştur. Farklı referans hızlar, veri kaybı, kayma durumu ve farklı hata oranlarının sensör çıktılarına etkisi gözlenmiştir. Farklı senaryolara karşı füzyon tekniklerinin tepkileri incelenmiştir.

Sensör ve füzyon ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde sensör karakteristiğine göre ağırlıklandırma ile yapılan füzyon sonuçlarının eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyona göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Özellikle senaryo 2 ve senaryo 3'te bu fark daha iyi gözlenmiştir. Çünkü senaryo 2, hata oranlarının yüksek olduğu ve veri kayıplarının yaşandığı durumları içermektedir. Senaryo 3 ise daha yüksek hızlara sahip referans veri ile yapıldığı için sensör performanslarında düşmelere sebep olmuştur. Bu da eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyonun direk etkilenmesine neden olmuştur. Ayrıca kayma (kızaklama ve patinaj) tespit sistemi füzyon 1 sırasında kullanılmadığı için, kayma (kızaklama ve

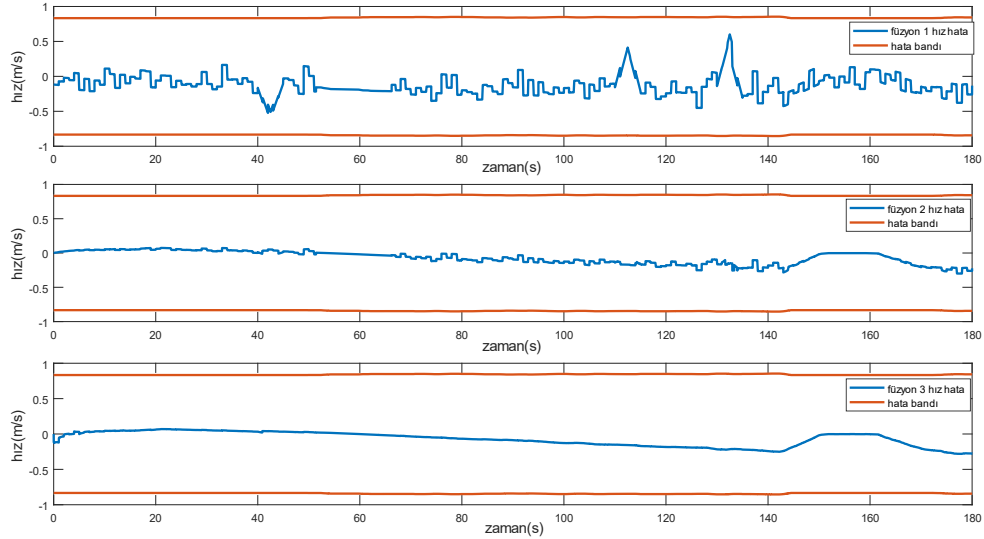
patinaj) durum etkileri de eşit ağırlıklı toplama dayalı füzyonda gözlenmiştir. Değerlendirilen senaryolar göz önüne alındığında füzyon 1, sensörler farklı zamanlarda hataya girdiğinde kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Ancak sensörler aynı anda arızaya girebilir ya da aynı koşullardan etkilenebilir. Bu durumlarda elde edilen sonuçlar istenen kriterleri sağlayamayacaktır. Füzyon 2 ve füzyon 3 ise oluşturulan hata senaryolarından daha az etkilenmektedir. Bu iki füzyon tipinde de kayma (kızaklama ve patinaj) tespit sistemi kullanıldığı için teker sensör kayma hatasının etkisi elimine edilmiştir. Senaryo 2’de oluşturulan veri kaybının sensör füzyon çıktılarına olumsuz etkilemediği gözlenmiştir. Çünkü füzyon teknikleri veri kaybı yaşandığında ilgili sensörü devreden çıkartarak diğer sensörler yardımı ile istenen sonucu elde etmektedir. Bu sonuçlar, füzyon tekniklerinin doğruluğu ve erişilebilirliği arttırdığını göstermektedir. Ölçüm hızının sensörleri ve dolayısı ile füzyon sonuçlarını etkilediği gözlenmiştir. Senaryo 3 sırasında füzyon 2 ve füzyon 3’e ait sonuçlarının en iyi sonucu veren GPS ölçümüne yaklaştığı gözlenmiştir. Ancak füzyon 1, diğer senaryolarda olduğu gibi ortalama bir sonuç vermiştir.

Şekil 4-54’te senaryo 1 için elde edilen füzyon hatalarının ERTMS hız hata bandına göre durumları sırayla verilmiştir. Senaryo 1 zorlayıcı bir senaryo olmadığından beklendiği gibi tüm füzyon sonuçları hata bandının içinde kalmıştır. Teker sensörünü hata bandı dışına çıkaran kayma durumu füzyon 1’de küçülmüş füzyon 2 ve 3’te ise elimine edilmiştir.



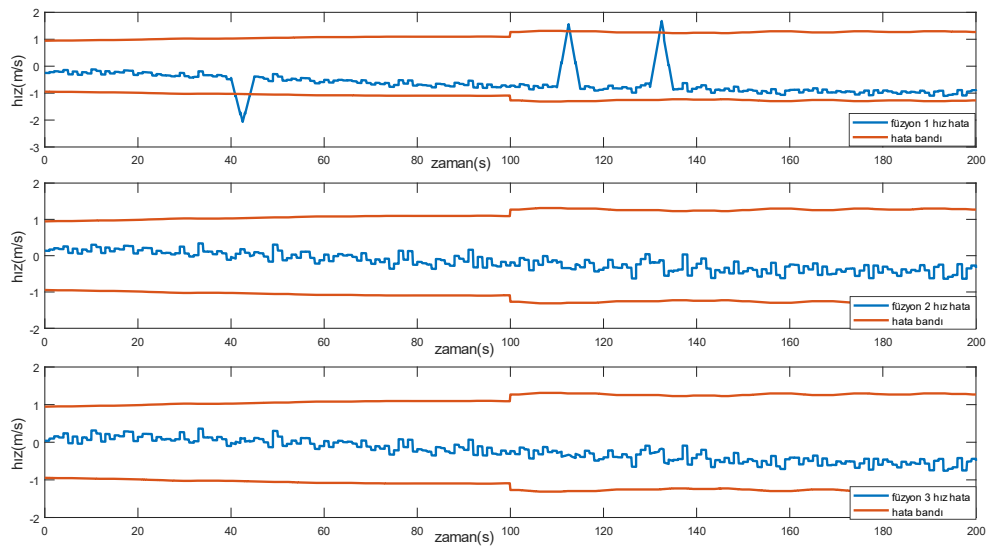
Şekil 4-54: Senaryo 1 için elde edilen füzyon hız hataları

Şekil 4-55'te senaryo 2 için elde edilen füzyon hız hataları gösterilmiştir. Buradaki hata oranları senaryo 1'den daha fazla olmasına rağmen füzyon sonuçları iyi sonuçlar vermiş ve hata bandı dışına çıkmamıştır.



Şekil 4-55:Senaryo 2 için elde edilen füzyon hız hataları

Şekil 4-56'da senaryo 3 için elde edilen füzyon hız hatalarının karşılaştırması verilmiştir. Bu senaryoda kullanılan referans veri, yüksek hızlara sahip olduğu için oluşan hata miktarı büyümüştür. Füzyon 1'deki kayma durumu sonucun hata bandı dışına çıkmasına neden olmuştur. Diğer füzyon sonuçları ise hata büyümesine rağmen hata bandı da büyüdüğü için bandın içinde kalmışlardır.



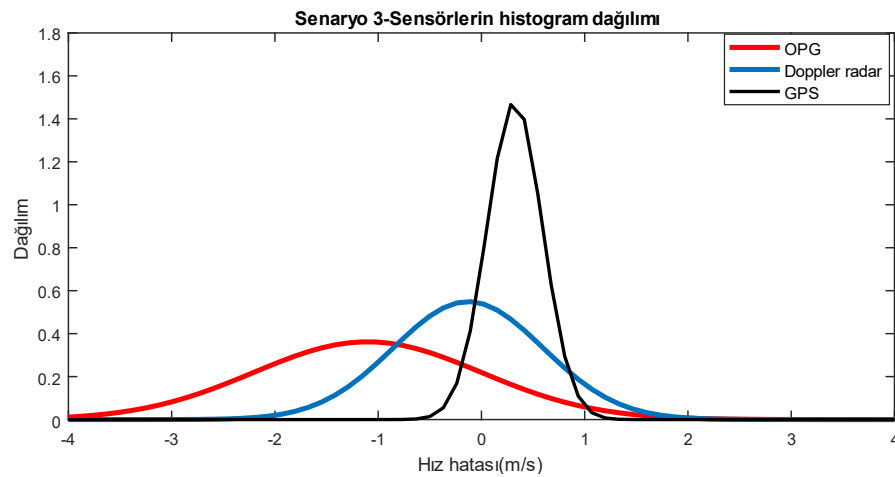
Şekil 4-56:Senaryo 3 için elde edilen füzyon hız hataları

Tablo 4-15, yapılan benzetim sonuçlarının özetidir. Füzyon 2 ve füzyon 3, hem füzyon 1 hem de füzyonda yer alan sensörlerden daha iyi sonuç vermişlerdir. Senaryo 2 ve Senaryo 3'te hata büyüklükleri aynı olmasına rağmen Doppler radar sonucu ölçüm hızından etkilenmiştir ve senaryo 3'te beklendiği gibi hatası büyümüştür. Aynı şekilde teker sensör hatası da ölçüm hızından olumsuz etkilenmiştir. Öte yandan GPS sensörü ölçüm hızından etkilenmediği için senaryo 3'te en iyi sonucu vermiştir.

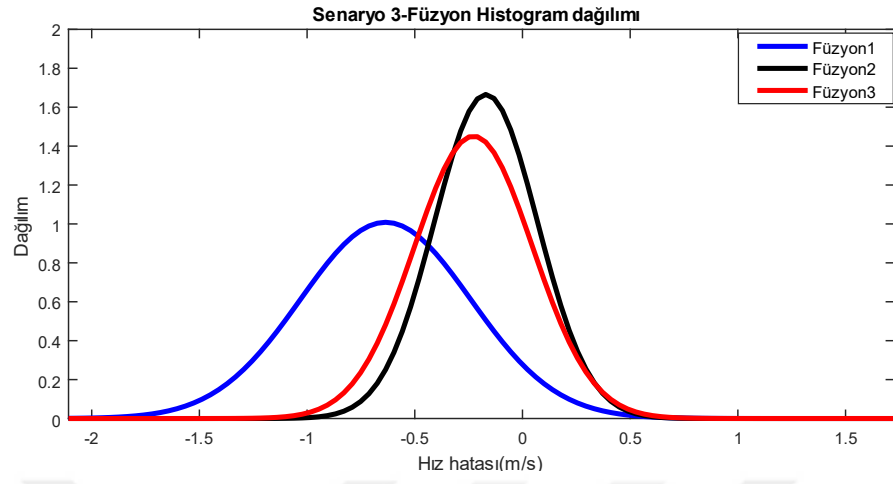
Tablo 4-15: Senaryo 1 ve 2 için, sensör ve füzyon standart sapma değerleri

Hız verileri için yapılan standart sapma hesapları(m/s)			
	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Teker sensörü	0.24	0.33	1.03
Doppler radar	0.04	0.11	0.58
GPS	0.1	2.67	0.2
Füzyon 1	0.083	0.14	0.4
Füzyon 2	0.032	0.09	0.24
Füzyon 3	0.033	0.1	0.27

Şekil 4-57'de senaryo 3 sonucu elde edilen sensör hız hatalarının histogram dağılımı gösterilmektedir. Benzer şekilde Şekil 4-58'de senaryo 3 için oluşturulmuş füzyon hız hatalarının histogramları gösterilmiştir. Füzyon 2 ve füzyon 3'ün hata dağılımı GPS verisine yakın çıkarken füzyon 1'in hata dağılımı sensörlerin hata dağılımlarının ortasında çıkmıştır.



Şekil 4-57: Senaryo 3-Sensörlerin histogram dağılımı



Şekil 4-58: Senaryo 3 için hız hata dağılımı

5. SONUÇLAR

Sinyalizasyon sistemleri, raylı sistemlerin kontrolü ve verimliliği için kritik önemde sistemlerdir. Araç tipi ne olursa olsun farklı standartlar aynı amaca hizmet edecek kurallar ve gereksinimlerle araç trafiğinin ve güvenliğinin sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu tez kapsamında hem OTO hem de OTK sistemleri için gerekli olan hız ve konum veri hesabında kullanılan odometre sistem mimarisi ve algoritma tasarımı incelenmiştir. Odometre alt sistemi bir navigasyon sistemidir ve bu tez kapsamında birden fazla sensör kullanılarak oluşturulmuştur.

Kullanılan sensörler, tek başlarına mesafe ve/veya hız bilgisi üretebilen sensörlerdir. Teker sensörü, Doppler radar ve ivmeölçer raylı sistemlerde yaygın olarak kullanılan sensörlerdir. Bu sensörlerin yanında navigasyon sistemlerinde yaygın kullanılan GNSS teknolojisi de raylı sistem hız sensörü olarak incelenmiştir. Bu yaklaşım son yıllarda ERA tarafından desteklenen bir yaklaşımdır [21] [43] [44].

Teker sensörü, Doppler radar, ivmeölçer ve GPS farklı durumlarda farklı sonuçlar verebilen sensörlerdir. Birbirinden bağımsız olarak teker/ray koşullarından, araç hızından, hava ve dış ortam koşullarından etkilenebilmektedirler. Özellikle hat koşullarında meydana gelen değişiklikler sensör sonuçlarını etkileyebilmektedir. Hat ve teker arası sürtünme azalması ya da artması, hava koşulları sonucu hatta engellerin oluşması, hattaki eğimler, tekerlerin ya da rayların bozulması sensörlerde farklı etkilere neden olabilmektedir. Bunun yanında veri bütünlüğünün sağlanamaması, ölçüm hızları ve sensör karakteristiklerinden dolayı oluşan hatalar sensör performansını etkilemektedir. Bu durumlar bölüm 2’de detaylı bir biçimde incelenmiştir. Bu inceleme sonucu edilen sensör performans bilgileri, farklı hat ve farklı araç tipleri için oluşturulabilecek sistem mimarileri için girdi olarak kullanılabilir. Aynı zamanda sensör füzyon yaklaşımlarında dikkat edilmesi gereken noktalar bu bölümde belirlenmiştir.

Bölüm 3’te, bölüm 2’deki sensör karakteristiği bilgileri kullanılarak kayma (kızaklama ve patinaj) tespit sistemi alternatifleri oluşturulmuştur. Bu sistem, teker sensör verilerinin kızaklama ve patinajdan etkilendiği durumlarda yanlış hız ve konum verisi hesabının önüne geçilmesinde kullanılmıştır. Bunun dışında bu tespit sistemi, tahrik ve fren sisteminin düzgün çalışabilmesi ve teker/ray bozulmalarının önlenmesi için de kullanılması gereken bir sistemdir. Bu nedenle bölüm 3’te oluşturulan sistemin çıktıları,

tahrik ve fren alt sistemlerini uyarmak ve gerekli önlemlerin alınması için de kullanılabilir. Yardımcı sistem olarak oluşturulan bu tespit sistemi, bölüm 4'te oluşturulan mimaride kullanılmıştır.

Bölüm 4 ise ana yöntemin anlatıldığı ve oluşturulan mimarinin farklı üç senaryo ile incelendiği bölümdür. Bu bölümde sensör füzyon teknikleri ve yardımcı sistemler incelenerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, birden fazla sensör kullanmanın gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca bu bölümde güvenlik seviyesi ve güvenli aralık hesabı da incelenmiştir. Bu incelemeler, birden fazla sensör kullanmanın erişilebilirliği ve doğruluğu artırmanın dışında OTK'da hedeflenen güvenlik seviyesine ulaşmak için de gerekli olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda, balizler yardımı ile biriken hataların sıfırlanmasının güvenli aralığın büyümesini engellendiği görülmüştür.

Bölüm 4'te, incelenen üç sensör füzyon tekniği göz önüne alındığında füzyon sonuçlarının bazı sensör sonuçlarından daha kötü sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Füzyon 1 kullanılan sensörlerden eşit şekilde etkilendiği için her zaman en iyi sonuç veren sensörden daha kötü bir sonuç vermektedir. Füzyon 2 ve füzyon 3'te ise sonuç en iyi sonuç veren sensöre yakın bir değer vermektedir.

Odometre sisteminin bir görevi olan güvenli aralık hesabı, hat yoğunluğunun azaltılması için çok önemlidir. Verilerin uygun bir şekilde birleştirilerek güvenli aralık bilgisini küçültmesi bu nedenle önemlidir. Veriler uygun şekilde birleştirilmediğinde en kötü sonuç veren sensör, hesaplanan güvenli aralık bilgisini büyötmektedir ve hareketli blok yöntemi ile oluşturulan blok uzunluğu artmaktadır. Bu durumda sefer sayılarının azalmasına ve verimliliğin düşmesine neden olmaktadır. Güvenli aralık bilgisini küçöltmek için, güvenli aralık bilgisi düşük olan tek bir sensör ile hız ve konum hesabını yapmak ise OTK'nın en önemli hedefi olan güvenlik seviyesinin yakalanamamasına neden olmaktadır.

Bu nedenlerden dolayı, hedeflenen sistem performansına ulaşabilmek için kullanılan sensörlerin seçimi, kullanılan füzyon tekniği ve kullanılan hata tespit sistemleri odometre sistemi için önemlidir. Uygun füzyon tekniği ve hata tespit sistemleri ile elde edilen sonuçlar hem güvenli aralığı küçöltmekte hem de hedeflenen hata oranına ulaşılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında odometre mimarisinin nasıl oluşturulacağı incelenmiştir. Bu incelemeler sonucu, uygun sistem mimarisinin oluşturulabilmesi için önce hat ve araç gereksinimlerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bu gereksinimlere dayanarak sensör kısıtlarının ortaya konması ve kullanılması planlanan sensörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra seçilen sensörlerin artı ve eksi yönlerine göre ihtiyaç duyulan yardımcı sistemler belirlenmelidir. Doğruluk performans gereksiniminin ve güvenlik performans gereksiniminin aynı anda yakalanabilmesi için gerekli olan füzyon tekniği kullanılarak odometre mimarisinin oluşturulması gerektiği anlaşılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] European Railway Agency, “System Requirements Specification Chapter 5 Procedures,” *ETCS Baseline 3 Release 2*, pp. 1–43, **2015**.
- [2] Soler and Farooq, “Radio Communication for Communications-Based Train Control (CBTC): A tutorial and Survey,” *IEEE Commun. Surv.*, vol. 19, pp. 1377–1402, **2017**.
- [3] B. Bienfait, P. Zoetardt, and B. Barnard, “Automatic Train Operation : the Mandatory Improvement for ETCS Applications,” *Asp. 2012 Irse*, pp. 1–10, 2012.
- [4] “Making the railway ERTMS — Making the railway system work better for society,” pp. 1–4, **2016**.
- [5] E. E. U. G. VERSIONS, “Odometer FFFIS,” no. 02, pp. 1–30, **1998**
- [6] M. Malvezzi, G. Vettori, B. Allotta, L. Pugi, and A. Ridolfi, “A localization algorithm for railway vehicles based on sensor fusion between tachometers and inertial measurement units,” vol. 228, no. 4, pp. 431–448, **2014**.
- [7] S. E. Interoperable, “The ERTMS / ETCS signalling system,” p. 58, **2013**.
- [8] F. Elbahhar and M. Heddebaut, “Advanced Train Positioning/Communication System,” *Mod. Railw. Eng.*, **2018**.
- [9] T. Approval, “FFFIS for Eurobalise,” no. 3, pp. 1–157, **2012**.
- [10] RailSystem, “Balise,” **2015**.
[Online]. Available: <http://www.railsystem.net/balise/>.
- [11] J. Otegui, A. Bahillo, I. Lopetegi, and L. E. Diez, “A Survey of Train Positioning Solutions,” *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 20, pp. 6788–6797, **2017**.
- [12] L. A. Klein, *Sensor and Data Fusion*, SECOND. Bellingham, Washington USA: SPIE—The International Society for Optical Engineering, **2018**.
- [13] C. C. Grant, “Performance Requirements for Interoperability,” pp. 35–47, 2013.
- [14] L. Astec Corporation, “Manual Pulse Generators Information,” **2019**.
Available: https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/operator_interfaces/manual_pulse_generators.

- [15] RailSystem, “Rolling Stock Terms,” **2015**.
Available: <http://www.railsystem.net/rolling-stock-terms/>.
- [16] F. I. Petrescu, *A New Doppler Effects*, vol. 74, no. 2. **2014**.
- [17] Y. T. Chan and F. L. Jardine, “Target Localization and Tracking From Doppler-Shift Measurements,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 15, no. 3, pp. 251–257, **1990**.
- [18] P. Stra, B. Gladbach, and G. Phone, “DEUTA » DEUTA Sensors- Robustness , self-diagnosis and reliability !« Self-diagnosis,” vol. 49, no. July, **2018**.
- [19] “What is GNSS?,” **2017**.
Available: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>.
- [20] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, 2nd ed. LONDON: Artech House, **2013**.
- [21] L. Lo Presti, *GNSS for Rail Transportation Challenges and Opportunities*. Torino: Springer, **2018**.
- [22] Shift2rail, “Innovation Programme 2 IP2 Research and Innovation Activities,” **2014**.
Available: <https://shift2rail.org/research-development/ip2/>.
- [23] G. Chomik, *Global Navigation Satellite Systems and Their Evolution*, vol. 27, no. 2. **2015**.
- [24] B. H.-W. H. L. E. Wasle, *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. **2008**.
- [25] J. Stow and E. Andersson, “Handbook of Railway Vehicle Dynamics,” *Handb. Railw. Veh. Dyn.*, **2011**.
- [26] O. Heirich and B. Siebler, “Onboard Train Localization with Track Signatures : Towards GNSS Redundancy,” **2014**.
- [27] D. Titterton and J. Weston, “Strapdown inertial navigation technology - 2nd edition - [Book review,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 20, no. 7, pp. 33–34, **2005**.
- [28] K. Kim, S. H. Kong, and S. Y. Jeon, “Slip and Slide Detection and Adaptive Information Sharing Algorithms for High-Speed Train Navigation Systems,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 6, pp. 3193–3203, **2015**.

- [29] M. Malvezzi, G. Cocci, and A. Tarasconi, "Design of experiment for the validation of ATP/ATC odometry algorithms," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 88, pp. 449–458, **2006**.
- [30] F. Feng, "Doppler radar speed measurement on board ," no. June, **2013**.
- [31] G. Barna, "Control System of Wheel Slide Protection Devices for Rail Vehicles Meeting the Requirements of European Normative Documents System Sterowania Układów," *Proc. 13th Int. Conf. Qual. Saf. Ecol. Transp.*, pp. 11–18, **2011**.
- [32] A. Acharya, S. Sadhu, and T. K. Ghoshal, "Train localization and parting detection using data fusion," *Transp. Res. Part C*, vol. 19, no. 1, pp. 75–84, **2011**.
- [33] CENELEC STANDARTS, "EN 50126-The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety," **1999**.
- [34] CENELEC STANDARTS, "EN 50128-Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems," **2011**.
- [35] CENELEC STANDARTS, "EN 50129-Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling," **2018**.
- [36] P. Wigger, "Experience with Safety Integrity Level (SIL) Allocation in Railway Applications," pp. 1–16, **2001**.
- [37] H. Schäbe, "Different Principles Used for Determination of Tolerable Hazard Rates," **2001**.
- [38] C. Timms, "Determination of safety integrity levels taking into account ALARP - Cost benefit analysis," *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, no. 151, pp. 805–819, **2006**.
- [39] F. L. E.Druet, O. Bilenne, M. Massar, F. Meers, "Interval Based State Estimataion for Safe Train Positioning," no. 2, p. 8, **2006**.
- [40] Ake Björck, *Numerical methods for LS Problem*. siam, **1996**.
- [41] Bekkeng, "Data fusion , estimation and control," **2016**.
- [42] E. Standard and R. Stock, "Esr 0331 wheel and axles reference manual," pp. 1–63, **2013**.

- [43] GSA-European Global Navigation Satellite Systems Agency, “EGNOS and GALILEO for RAIL Increased Safety , Lower Costs,” **2018**.
- [44] M. C. Rfi and S. N. Trenitalia, ““ The ERSAT Galileo Game Changer ,”” **2018**





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 14/02/2020

Tez Başlığı / Konusu: DEMİRYOLU ARAÇLARI İÇİN BÜTÜNLEŞİK NAVİGASYON SİSTEMİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 103 sayfalık kısmına ilişkin, 14/02/2020 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

19/02/2020

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Özge Önceler
Öğrenci No: N16224480
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Programı: Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Dr. Öğr. Üyesi YAKUP ÖZKAZANÇ
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özge Önceler
Doğum Yeri : Isparta
Doğum Tarihi :12.06.1992
Medeni Hali : Bekar
Yazışma Adresi : Ayrancı mahallesi, Güteryüz sokak no:16-4 Çankaya / ANKARA
Telefon : 0505 889 52 17
Elektronik Posta : oncelerozge@gmail.com
Yabancı Dil : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lise (2006-2010)	: Erbakır Fen Lisesi – Denizli	Ortalama: 89.5/100
Lisans (2010-2015)	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	Ortalama: 3.21/4.00

İŞ TECRÜBESİ

2013-yaz stajı	: Halk Enerji
2014-yaz stajı	: Aselsan-SST-İnsansız Sistemler Sistem Mühendisliği
2015- Nisan-Temmuz	:(Aday mühendis) Aselsan-UGES
2015- Temmuz-halen	: (Mühendis) Aselsan-UGES/ Sistem Tasarım Mühendisi