

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HABERLEŞME TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİ İÇİN ODOMETRE
SİSTEMİ TEST ALTYAPISI GELİŞTİRİLMESİ VE KONUM ALGILAMA
SİSTEMİ ALGORİTMA TASARIMI**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe ELBİR

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HABERLEŞME TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİ İÇİN ODOMETRE
SİSTEMİ TEST ALTYAPISI GELİŞTİRİLMESİ VE KONUM ALGILAMA
SİSTEMİ ALGORİTMA TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tuğçe ELBİR
(526171018)**

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa DOĞAN

TEMMUZ 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 526171018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tuğçe ELBİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "HABERLEŞME TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİ İÇİN ODOMETRE SİSTEMİ TEST ALTYAPISI GELİŞTİRİLMESİ VE KONUM ALGILAMA SİSTEMİ ALGORİTMA TASARIMI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ (Başkan)**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa DOĞAN (Danışman)
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Janset DAŞDEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **09 Haziran 2021**
Savunma Tarihi : **01 Temmuz 2021**





Yoluma ışık olan herkese...



ÖNSÖZ

Bu tezin oluşturulmasında sağladığı katkılardan ve bana gösterdiği sabırdan dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa Doğan'a teŖekkürlerimi sunuyorum. Pandemi döneminde yaşadığımız stresi tez sürecinde daha az hissetmemi sağladığı, her zaman moral ve motivasyon sağlayarak "sen yaparsın" dediği için minnettarım. Sizinle çalışmak benim için bir zevkti.

Her zaman yanımda olan canım annem ve canım babam, canım ailem iyi ki varsınız. Çalışma arkadaşlarıma da tezime vermiş oldukları katkılardan, sağladıkları imkanlardan dolayı teŖekkür ederim.

Sevgili arkadaşım Oğuzhan Memişoğlu'na hem bilgisiyle, hem de yazım aşamasındaki emeğiyle tezime vermiş olduğu mükemmel destekten dolayı teŖekkür ediyorum. İyi ki varsın.

Sevdiğimiz işleri yaptığımızda hayat çok güzel. Bir diğer teŖekkürü de seveceğim işi bulduğum ve bu alanda kendimi geliştirmekten vazgeçmediğim için kendime etmek istiyorum. Umarım bu ışık hiç sönmez.

Haziran 2021

Tuğçe ELBİR
Kontrol ve Otomasyon
Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Hipotez	4
2. HABERLEŞME TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİ	5
2.1 Sinyalizasyon Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi	5
2.2 Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemi	8
2.3 Otomasyon Seviyeleri	9
3. ODOMETRE SİSTEMİ	11
3.1 Sistem Bileşenleri	11
3.1.1 Doppler radar	11
3.1.2 Takometre	13
3.1.3 Baliz - baliz transmision modülü	15
3.1.3.1 Profibus	16
4. TEST ALTYAPISI	19
4.1 Test Sistemi Mimarisi Oluşturulması	19
4.2 Sistem Veri Yapısının Oluşturulması	20
4.3 Odometre Sistemi Test Alt Yapısı Yazılımı	20
4.4 Veri Kayıt Formatı	21
4.5 Baliz Verilerinin Zaman Senkronizasyonu	23
5. SENSÖR VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	25
5.1 Römork Verileri	26
5.1.1 Sürüş 1	26
5.1.2 Sürüş 2	26
5.1.3 Sürüş 3	27
5.1.4 Sürüş 4	27
5.1.5 Sürüş 5	27
5.1.6 Sürüş 6	28
5.2 Test Hattı Verileri	35
5.2.1 Sürüş 1	35
5.2.2 Sürüş 2	35
5.2.3 Sürüş 3	35
5.2.4 Sürüş 4	36

5.2.5 Sürüş 5.....	36
5.3 Saha Verileri.....	42
5.3.1 Sürüş 1.....	42
5.3.2 Sürüş 2.....	42
5.3.3 Sürüş 3.....	43
5.3.4 Sürüş 4.....	43
5.3.5 Sürüş 5.....	43
5.3.6 Sürüş 6.....	44
6. SENSÖR VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	57
6.1 Hareketli Ortalamalar Filtresi.....	57
6.2 Algılayıcı Birleştirme.....	61
6.3 Algoritma Testleri.....	62
6.3.1 Sürüş 1.....	62
6.3.2 Sürüş 2.....	63
6.3.3 Sürüş 3.....	65
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73



KISALTMALAR

ATO	: Otomatik tren işletimi
ATP	: Otomatik tren koruma
ATS	: Otomatik tren denetimi
BTM	: Baliz iletim modülü
CBTC	: Haberleşme tabanlı tren kontrol sistemi (Communication based train control)
GNSS	: Küresel konum belirleme sistemi
GoA	: Otomasyon seviyesi
INS	: Ataletsel navigasyon sistemi
OTK	: Odometre test kutusu
SNCF	: Fransa Ulusal Demiryolları İşletmesi
STL	: Safe Time Layer



SEMBOLLER

λ	: Dalga boyu
F_d	: Doppler frekansı
V	: Hız
ϑ	: Yansıma açısı





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : CBTC otomasyon seviyeleri.	10
Çizelge 6.1 : Baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.	63
Çizelge 6.2 : Baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.	64
Çizelge 6.3 : Baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.	64
Çizelge 6.4 : Takometre devre dışıyken baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.	65



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Tek hat jeton ve tablet örneği. (Signalhead, 2021).....	6
Şekil 2.2 : Ray devresi. (Jayanthan, 2020)	6
Şekil 2.3 : Aks Sayıcı. (RailSystem, 2021)	7
Şekil 2.4 : Sabit blok Hareketli blok hareket yetkileri.	8
Şekil 2.5 : Örnek CBTC blok diyagramı.(IEEE Vehicular Technology Society, 2004)	9
Şekil 3.1 : Radar tarafından yayılan ve alınan dalgalar.	12
Şekil 3.2 : Optik darbe üretici.	14
Şekil 3.3 : Sensör fazlarına göre yön belirlenmesi.	14
Şekil 3.4 : Profibus protokolü katmanları.....	16
Şekil 4.1 : Odometre Test Altyapısı sistem mimarisi.	20
Şekil 4.2 : Odometre test altyapısı çevrimiçi izleme ekranı.	21
Şekil 4.3 : Odometre test altyapısı kayıt ekranı.	22
Şekil 4.4 : Test altyapısı bağlantı şeması.....	23
Şekil 5.1 : Römork üzerine kurulmuş test sistemi çizimi.	25
Şekil 5.2 : Test hattı baliz metraj bilgileri.	26
Şekil 5.3 : Sürüş 1 takometre – doppler radar hız verileri.	29
Şekil 5.4 : Sürüş 2 takometre – doppler radar hız verileri.	30
Şekil 5.5 : Sürüş 3 takometre – doppler radar hız verileri.	31
Şekil 5.6 : Sürüş 4 takometre – doppler radar hız verileri.	32
Şekil 5.7 : Sürüş 5 takometre – doppler radar hız verileri.	33
Şekil 5.8 : Sürüş 6 takometre – doppler radar hız verileri.	34
Şekil 5.9 : Sürüş 1 takometre – doppler radar hız verileri.	37
Şekil 5.10 : Sürüş 2 takometre – doppler radar hız verileri.	38
Şekil 5.11 : Sürüş 3 takometre – doppler radar hız verileri.	39
Şekil 5.12 : Sürüş 4 takometre – doppler radar hız verileri.	40
Şekil 5.13 : Sürüş 5 takometre – doppler radar hız verileri.	41
Şekil 5.14 : Sürüş 1 baliz 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.....	45
Şekil 5.15 : Sürüş 1 baliz 123-122 takometre – doppler radar hız verileri.....	46
Şekil 5.16 : Sürüş 2 baliz 122-123 takometre – doppler radar hız verileri.....	47
Şekil 5.17 : Sürüş 2 baliz 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.....	48
Şekil 5.18 : Sürüş 2 baliz 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.....	49
Şekil 5.19 : Sürüş 3 baliz 122-123 takometre – doppler radar hız verileri.....	50
Şekil 5.20 : Sürüş 3 baliz 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.....	51
Şekil 5.21 : Sürüş 3 baliz 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.....	52
Şekil 5.22 : Sürüş 4 baliz 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.....	53
Şekil 5.23 : Sürüş 5 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.....	54
Şekil 5.24 : Sürüş 6 122-123 takometre – doppler radar hız verileri.....	55
Şekil 5.25 : Sürüş 6 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.....	56
Şekil 6.1 : n= 100 hareketli ortalamalar filtresi.	59
Şekil 6.2 : n= 20 hareketli ortalamalar filtresi.	60

Şekil 6.3 : Odometre algoritması akış diyagramı.	62
Şekil 6.4 : Algoritmali sürüş 1 baliz 123-120 yer değiştirme verileri.	66
Şekil 6.5 : Algoritmali sürüş 1 baliz 123-120 takometre-doppler radar hız verileri..	67
Şekil 6.6 : Algoritmali sürüş 2 baliz 120-123 yer değiştirme verileri.	68
Şekil 6.7 : Algoritmali sürüş 2 baliz 120-123 takometre-doppler radar hız verileri..	69
Şekil 6.8 : Algoritmali sürüş 3 baliz 123-120 takometre-doppler radar hız verileri..	70
Şekil 6.9 : Algoritmali sürüş 3 hesaplanan konum verileri.....	71



HABERLEŞME TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİ İÇİN ODOMETRE SİSTEMİ TEST ALTYAPISI GELİŞTİRİLMESİ VE KONUM ALGILAMA SİSTEMİ ALGORİTMA TASARIMI

ÖZET

Dünya nüfusu tarım, tıp ve teknoloji alanlarındaki gelişmeler ile endüstrileşmeye bağılı olarak hızlı bir şekilde artmaktadır. Nüfusun genel dağılımına bakıldığında kent nüfusunun dağılımda çok büyük bir payı olduğu görülmektedir. Nüfusun büyük yüzdesini elinde tutan şehirlerin ihtiyaçları da bu artışla aynı oranda artmaktadır.

Şehirlerin en büyük ihtiyacı hareketlilik, zira şehirlerin de genişlemesiyle insanlar her geçen daha fazla yol yapmaktadır. Buna bağılı olarak nüfusun hareketliliğı de geleneksel anlayıştan uzaklaşarak daha yeni çözümlere ihtiyaç duyar hale gelmektedir. Günümüzde kent içi ulaşımda en yaygın kullanılan ulaşım modu raylı sistemlerdir. Mega kentlerin neredeyse tamamında şehir içi raylı ulaşım sistemleri, toplu taşımacılıkta kentin omurgasını oluşturmaktadır. Örneğın; İstanbul'da 259,85 km uzunluğunda raylı sistem hattı mevcut olup, inőaattı devam eden hat uzunluğı 199,40 km'dir. (Metro İstanbul, 2021)

Bir raylı ulaşım sisteminin etkinliğı ve güvenilirliğı için en önemli faktörlerden biri kullanılan sinyalizasyon sistemidir. Sinyalizasyon sisteminin karakteristiğı; hattın güvenli işletilmesi ve yolcu kapasitesi gibi ana bileşenleri doğrudan etkiler. Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemi (CBTC) de bu bileşenlerin iyileştirilmesi ihtiyacıyla oraya çıkmış bir sinyalizasyon yaklaşımıdır.

Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sisteminde trenin kesin konumu devamlı olarak hesaplanmaktadır. Bu hesap trenin sürüş algortimasında, frenleme eğrilerinin oluşturulmasında ve hareket yetkisi hesabında girdi olarak kullanılmaktadır.

Konum hassasiyetinin bu denli önemli olduğu bir sistemde sensörlerden alınan verilerin en iyi şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple araçlarda farklı sensör tipleri kullanılması sistem kararlılığını arttırmaktadır. Günümüzde trenlerde takometre, doppler radar, GNSS, ivmeölçer gibi sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörler tekil olarak kullanıldığı gibi, kararlılığı arttırmak adına farklı tipte sensör kullanımı da yaygındır.

Bu çalışmada CBTC sisteminde kullanılan sensör çeşitlerinin en uygun kullanım şeklinin araştırılması üzerinedir. CBTC sisteminde kullanılan Doppler radar ve optik darbe üretici ile çeşitli hızlarda veri toplayacak bir test altyapısı oluşturulmuştur. Bu altyapıdan alınan verilerle hat ölçümleri karşılaştırılmış ve sensörlerin performansları değerlendirilmiştir. Bir sonraki adımda sensörlerin, performanslarına göre farklı işlevlerde kullanıldığı bir algoritma geliştirilerek sonuçları değerlendirilmiştir.



DEVELOPMENT OF ODOMETRY TEST ENVIRONMENT AND LOCALIZATION ALGORITHM DESIGN FOR COMMUNICATION BASED TRAIN CONTROL SYSTEMS

SUMMARY

The world population is increasing rapidly due to the developments in agriculture, medicine and technology and industrialization. Considering the general distribution of the population, it is seen that the urban population has a very large percentage in the distribution. The needs of cities that hold a large percentage of the population are increasing at the same rate with this increase.

The greatest need of cities is mobility, because with the expansion of cities, people make more and more roads every day. Accordingly, the mobility of the population moves away from the traditional understanding and needs more new solutions. Today, the most widely used mode of transportation in urban transportation is rail systems. In almost all megacities, urban rail transportation systems constitute the backbone of the city in public transportation. For example; There is a 233.5 km long rail system line in Istanbul and the length of the line under construction is 221.70 km.

One of the most important aspects for the efficiency and reliability of a rail transport system is the quality of signalization system. Characteristics of the signaling system; It directly affects the main components such as the safe operation of the line and passenger capacity. Communication Based Train Control System (CBTC) is a signaling approach that came out with the need to improve these components.

In the Communication Based Train Control System, the exact position of the train is continuously calculated. This account is used as an input in the driving algorithm of the train, in the creation of braking curves and in the calculation of the motion authority.

In a system where position accuracy is so important, the data received from the sensors must be processed in the best way. For this reason, using different types of sensors in vehicles increases system stability. Today, sensors such as tachometer, doppler radar, GNSS, accelerometer are used in trains. As these sensors are used individually, it is common to use different types of sensors to increase stability. In the use of different types of sensors, position accuracy is increased by optimizing the data received by sensor fusion algorithms.

This study is about researching the optimum use of the sensor types used in the CBTC system. With the Doppler radar and optical pulse generator used in the CBTC system, a test infrastructure has been established to collect data at various speeds. The data obtained from this library were compared with the line measurements and the performances of the sensors were evaluated. The performances of the data obtained after smoothing filters were examined. In the next step, the performance of the results was evaluated by combining the sensors.



1. GİRİŞ

Dünya nüfusu tarım, tıp ve teknoloji alanlarındaki gelişmeler ile endüstrileşmeye bağlı olarak hızlı bir şekilde artmaktadır. Nüfusun genel dağılımına bakıldığında, kent nüfusunun dağılımında çok büyük bir payı olduğu görülmektedir. Bu pay şehirde gelişen sosyoekonomik imkanlar ile gün geçtikçe artmaktadır. Artık dünya nüfusunun yarıdan fazlası kentlerde yaşamakta ve bu artışa bağlı olarak nüfusu 10 milyondan fazla olan şehirler, yani mega kentler ortaya çıkmaktadır. (Zeynep Bilgici, 2019) Nüfusun büyük yüzdesini elinde tutan şehirlerin ihtiyaçları da bu artışla aynı oranda artmaktadır. Şehirlerin en büyük ihtiyacı hareketlilik, zira şehirlerin de genişlemesiyle insanlar her geçen gün daha fazla yol yapmaktadır. Bunun yanında mesafe aynı kalsa da trafikte geçen süre de gün geçtikçe artmaktadır. Buna bağlı olarak nüfusun hareketliliği de geleneksel anlayıştan uzaklaşarak daha yeni çözümlere ihtiyaç duyar hale gelmektedir. Günümüzde kent içi ulaşımda en yaygın kullanılan ulaşım modu raylı sistemlerdir. İyi planlanmış raylı sistemlere sahip büyük şehirlerde, demiryolu ulaşımı tıkanıklık maliyetleri, tüketici maliyetleri ve trafik kazası oranları açısından açıkça avantajlıdır. (Litman, 2020) Aynı zamanda daha az tarım arazisi gerektirdiğinden demiryolları karayollarına göre daha tarım dostudur. (Oyebode, 2014) Bunu bilgiye şehirlerde de daha az alan kullanımı gerektirdiğini eklemek yanlış olmayacaktır. Bu sebeple mega kentlerin neredeyse tamamında şehir içi raylı ulaşım sistemleri, toplu taşımacılıkta kentin omurgasını oluşturmaktadır.

Şehirlerin ana amacı trafikte geçirilen sürenin azaltılarak verimin artırılmasının yanı sıra hem sürdürülebilir hem de makul fiyatlarda ulaşılabilir bir ulaşım alt yapısı oluşturmaktır. Bir raylı ulaşım sisteminin etkinliği için en önemli faktörlerden biri kullanılan sinyalizasyon sistemidir. Sinyalizasyon sisteminin karakteristiği; hattın güvenli işletilmesi ve yolcu kapasitesi gibi ana bileşenleri doğrudan etkiler. Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemi (CBTC) de bu bileşenlerin iyileştirilmesi ihtiyacıyla ortaya çıkmış bir sinyalizasyon yaklaşımıdır. Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sisteminin ana amacı trenler arasındaki zaman aralığını azaltmaktır. Bunun

için geleneksel sinyalizasyon sistemlerinin aksine hareketli blok sistemini kullanır. Bu yöntem de yolcu ve yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır.

Geleneksel sinyalizasyon sisteminde hat belirli uzunluklarda bloklara bölünmüştür. Ve bu bloklar içinde aynı anda sadece bir trene izin verilmektedir. Bu uygulama araç trafiğini olumsuz yönde etkilemektedir. Zira uzun hat bloklarında tren, bloğa girmek için bir önceki trenin bloğu terk etmesini beklemelidir. Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sisteminde hat bloklara bölünmemekte, her trenin dinamik verilerine göre hesaplanmış bir ayak izi hat üzerinde dinamik olarak takip edilmektedir. Bu ayak izi de bir sonraki tren için emniyet mesafesini oluşturmaktadır. Bu sayede trenler birbirlerine daha yakınlaşabilmekte, hat kapasitesi artırılmaktadır. Tren ayak izinin dinamik olarak takip edilmesinde en temel nokta konum belirlenmesinin doğru olarak yapılmasıdır. Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sisteminde trenin kesin konumu devamlı olarak hesaplanmaktadır. Bu hesap trenin sürüş algoritmasında, frenleme eğrilerinin oluşturulmasında ve hareket yetkisi hesabında girdi olarak kullanılmaktadır.

Konum hassasiyetinin bu denli önemli olduğu bir sistemde sensörlerden alınan verilerin en iyi şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple araçlarda farklı sensör tipleri kullanılması sistem kararlılığını arttırmaktadır. Günümüzde trenlerde takometre, doppler radar, GNSS, ivmeölçer gibi sensörler konum algılama çalışmaları için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek hızlı trenlerin yaygınlaşması ile yüksek hızlarda da konum algılama çalışmaları hız kazanmıştır. SNCF’de bir yapılan çalışmada harici bir beslemeye gerek duymayan manyetik bir sensör olan Wiegand sensörü kullanılarak yüksek hızlı odometre sistemi tasarlanmıştır. (Murillas & Poncet, 2016) Bir diğer çalışma metrol araçlarının RFID tabanlı hassas konumlandırmasıdır. Bu çalışmada tünel duvarlarına yerleştirilen etiketlerin okunmasıyla trenin hızının ve konumunun tahmini yapılmıştır. (Kostrominov, Tyulyandin, Nikitin, Vasilenko, & Osminin, 2020) Ana hat trenlerinde çalışan ERTMS sistemlerinde uydu tabanlı konum belirleme sistemleri de kullanılmaktadır. Bu sistem için sertifikasyon çalışmaları da yapılmıştır. (Manz, Becker, & Schnieder, 2016)

Konum algılama sistemlerinde sensörler, tekil olarak kullanıldığı gibi, kararlılığı arttırmak adına farklı tipte sensörlerin birlikte kullanımı da yaygındır. Farklı tipte

sensör kullanımında sensör birleştirme algoritmalarıyla alınan verilerin optimizasyonu sağlanarak konum doğruluğu arttırılmaktadır. Radar sensörünün ivme ölçer ile birleştirilmesiyle konum doğruluğunun arttırıldığı görülmüştür. (Goffaux, Wouwer, & Remy, 2006) Farklı tipte sensörlerin kullanılmasının yanı sıra yedekli şekilde iki aynı tipte sensörler de kullanılmıştır. İki teker sensörün füzyonunun kullanıldığı çalışmada herhangi bir sensörün arızası durumunda diğer sensörün hesaplamaya devam etmesiyle hatada emniyetli çalışma hedeflenmiştir. (Malvezzi, Toni, Allotta, & Colla, 2001) GPS ve IMU sensörlerinin Kalman filtresi ile birleştirilmesi ile tramvay sistemlerinde konum algılaması çalışması yapılmıştır. (Selvi, ve diğerleri, 2020) Zira tramvay sistemleri genellikle cadde tramvayı şeklinde olduğu için GPS sistemleri konum algılamasında kullanılabilir. Bunun yanında enkoder sistemleri de konum ve hız algılamada sıklıkla kullanılmaktadır. Enkoder sistemlerinin, IMU sensörleriyle birleştirilmesi sonucu trenlerde kayma kızıklama algılama problemleri de çözülebilmektedir. (Li, ve diğerleri, 2020)

İstanbul'da bulunan M2, M5 ve M7 hatlarında bulunan araçlarda konum algılama sistemi olarak her bir araç üstü bilgisayarı için bir doppler radar ve iki adet takometre kullanılmaktadır. Yine İstanbul'da bulunan M4 hattında konum algılamak için her bir araç üstü bilgisayarı için bir ivmeölçer, iki takometre ve bir adet de yaklaşım sensörü kullanılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışması kapsamında, CBTC sisteminde kullanılan konum algılama sistemi olan odometre sisteminde kullanılan çeşitli sensörlerin odometre sistemindeki performanslarının değerlendirilmesi, karşılaştırılması ve uygun bir konum algılama algoritmasının oluşturulması amaçlanmıştır.

İkinci bölümünde, CBTC sisteminin tarihsel gelişim sürecinden, işletme modellerinden, sistemin hat kapasitesine olan etkilerinden ve dünya genelinde işletilen ve planlanan hatlardan emniyet bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, odometre sisteminden, sistemin bileşenlerinden ve ilgili bileşenlerin çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde ise odometre sisteminin test edilmesi, sensörlerin performanslarının karşılaştırılması için kurulan test altyapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde kurulan test alt yapısı ile alınan veriler ve bunların işlenerek performanslarının incelenmesine yer verilmiştir.

Altıncı bölümde kullanılan algılayıcı sistemlerinin karşılaştırılması, olumlu olumsuz yönlerinin ortaya konulması ve uygulanan birleştirme algoritmasının değerlendirilmesi yapılmış ve karşılaştırma bilgileri ışığında elde edilen sonuçlar belirtilmiştir.

1.2 Hipotez

Haberleşme tabanlı tren Kontrol sistemi için hayati veri sağlayan konum belirleme sistemi odometre için farklı birçok sensör tipi kullanılmaktadır. Bu sistemde kullanılan, iki ayrı sensör incelenerek artı ve eksi yönleri belirlenerek bu algılayıcıların performanslarını özgün algılayıcı birleştirme yöntemiyle; birbirlerini tamamlayıcı şekilde optimal bir sistem ortaya konulmuştur.

2. HABERLEŞME TABANLI TREN KONTROL SİSTEMİ

Nüfusun hızlı bir şekilde artmasıyla insanların trafikte geçirdiği sürenin azaltılması ve mobilitenin artırılması şehirlerin ana amaçları haline gelmiştir. Bu ihtiyaç şehirlerde raylı sistemlerin yaygınlaşmasını ve hızlı bir şekilde gelişmesini sağlamıştır. Demiryollarının hızlı bir şekilde gelişimiyle, yüksek emniyet, ulaşım verimliliği, yüksek hizmet kalitesi ve uluslararası standartları uygulamak kaçınılmaz ihtiyaçlar haline gelmiştir. Bu ihtiyaçlar da sinyalizasyon sistemlerinde iyileştirme ihtiyacını doğurmuştur. Ulaştırma sektöründeki temel başarı faktörleri olarak sayılan hız, kapasite, güvenlik ve hizmet kalitesinin yükseltilmesi için yeni sinyalizasyon sistemleri oluşturulmuştur. Bunlardan biri de haberleşme tabanlı tren kontrolü sinyal sistemidir. Bu sinyalizasyon sisteminde ana amaç, hareketli blok sistemini kullanarak kapasitenin artırılmasını sağlamanın dışında yolculara güvenli bir taşıma hizmeti sunmaktır.

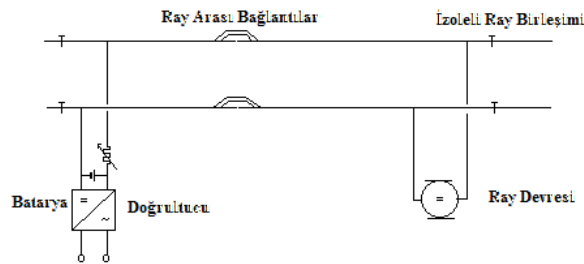
2.1 Sinyalizasyon Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi

Sinyalizasyon ihtiyacı demiryollarının tarihsel gelişimine her zaman eşlik etmiştir. Zira teker ray etkileşimi sebebiyle raylı sistem araçlarının frenleme mesafelerinin çok uzun olmaları trenlerin aslında görmeden hareket etmeleri anlamına gelmektedir. Sinyalizasyon sistemleri de bir anlamda araçlar için göz görevi görmektedir. Raylı sistemlerin ilk yıllarında bu ihtiyaç, demir yolunun belirli bölgelere bölünmesi ve bu bölgelere bir jeton ya da tablet yardımıyla girilmesiyle sağlanmaktaydı. Jeton veya tablet girilecek hatta dair bilgiler içermekteydi. (Şekil 2.1) Bu yöntem bazı bölgelerde blok başlarına görevli koyulması ve görevlilerin birbirleri ile haberleşerek bloklarda tek trenin bulunmasının sağlanması şeklinde de uygulanmaktaydı.



Şekil 2.1 Tek hat jeton ve tablet örneği. (Signalhead, 2021)

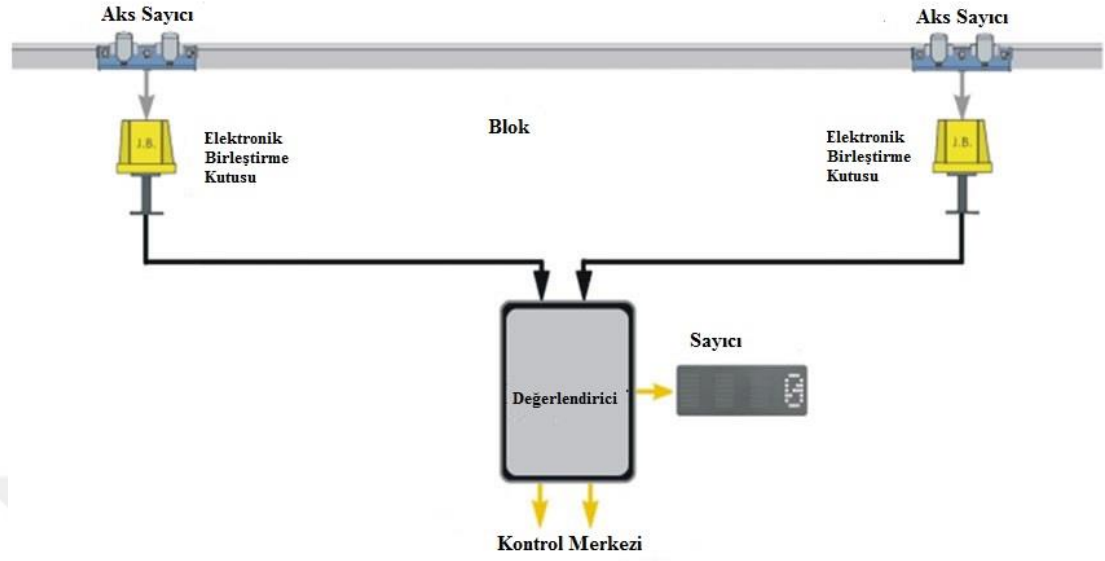
Teknolojinin gelişmesiyle tren algılama sistemleri de raylı sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. En basit ancak en yaygın olarak kullanılan tren algılama sistemi ray devresidir. Ray devresi tren algılama sisteminde hat blokları kapalı bir elektrik devresi ile çevrilmektedir. (Şekil 2.2) Devrenin enerjili olması sürekli izlenmektedir. Tren girişi ile dingillerin iletkenliğinden dolayı bu devre kısa devre olarak enerjisiz kalmaktadır. Bu sayede ilgili blokta trenin varlığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2 Ray devresi. (Jayanthan, 2020)

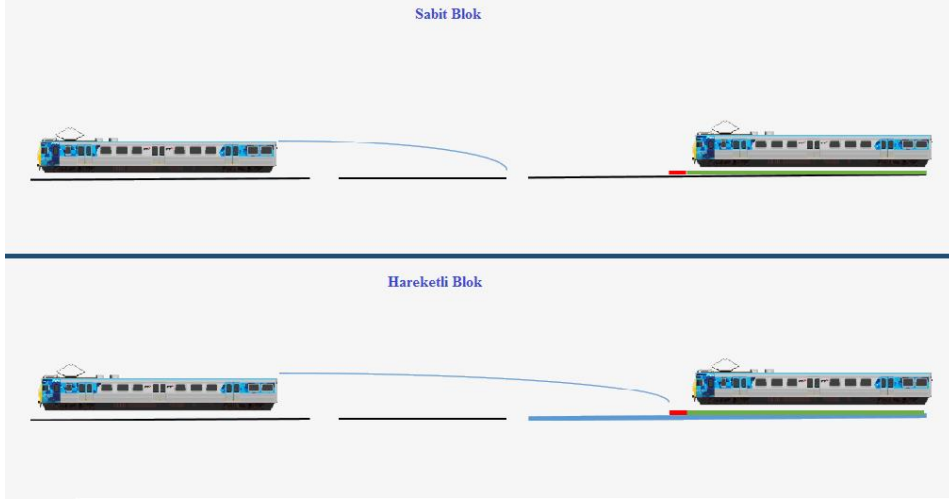
Ray devresi ile tren algılama sistemine alternatif olarak kullanılan bir diğer sistem de aks sayıcı sistemidir. Bu sistemde blokların girişleri ve çıkışlarında birer aks sayıcı bulunmaktadır. Her bir aks sayıcıda iki adet sayıcı mekanizması bulunur bu sayede trenin yönü tayin edilir. Tek yönlü tren hareketini ele alırsak bloğun başındaki aks sayıcının aksları saymasıyla ile tren varlığı anlaşılmakta ve o blok meşgul

edilmektedir. İkinci aks sayıcı da çıkan tekerleri sayacaktır. Bloğa giren aks sayısı ile çıkan aks sayısı eşit olduğunda hattın boş olduğu anlaşılacaktır. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 Aks Sayıcı. (RailSystem, 2021)

Sinyalizasyon sistemlerinin ana amacı her bir hat bloğunda sadece bir trene izin verilmesidir. Şimdiye kadar görülen tren algılama sistemleri sabit blok prensibine göre kurgulanmıştır. Bu sistemlerde hat belirli uzunluklarda bloklara bölünmüştür ve bu blok uzunlukları değişmemektedir. Blok uzunlukları hattın yapısına, ilgili bölgedeki inşai hız sınırına, bloğun platforma mesafesine göre belirlenir. Bu bağlamda çok uzun hat blokları oluşabildiği gibi kısa hat blokları da oluşmaktadır. Bu hat bloklarında tren varlığı ışıklı işaret ekipmanlarıyla sürücüye bildirilmektedir. Sürücü genel olarak kendi önündeki hat ve bir sonraki hat meşguliyetini ışık renk kodlarıyla görebilmektedir. Ancak temel sinyalizasyon prensibi olan her bir blokta tek trenin bulunması kuralı, uzun hat bloklarında operasyonel olarak aksamaları da beraberinde getirir. Bir trenin uzun bir hat bloğuna girmesi için o bloğun tamamen boşalmasını beklemesi hat kapasitesini büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu sebeple sabit blok sistemine alternatif olarak hareketli blok sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde hat boyu belirli uzunluklarda bloklara bölünmemiş olup, trenin hızına göre sanal meşguliyetler belirlenerek trenler birbirlerinden emniyetli olarak ayrılması sağlanmaktadır. Bu sayede trenler birbirlerine emniyet dahilinde yaklaşabilmekte ve operasyonel kapasite artmaktadır. (Şekil 2.4)



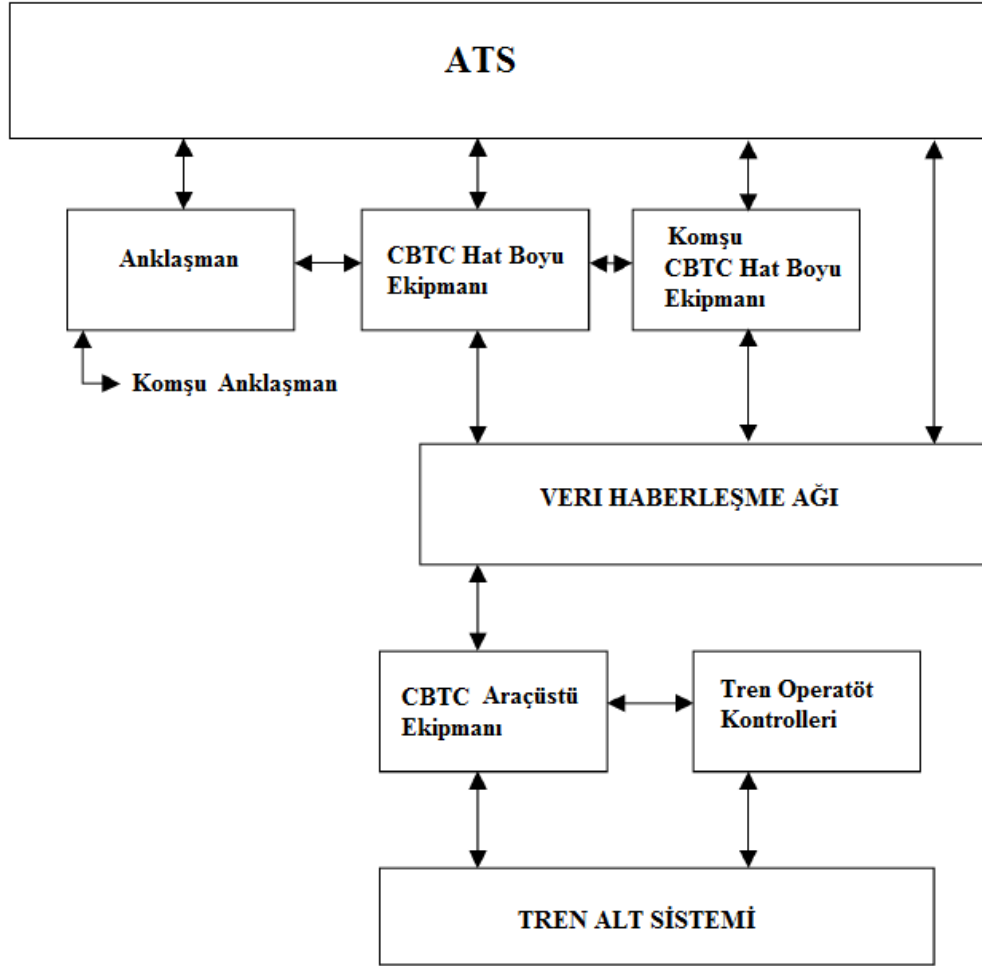
Şekil 2.4 Sabit blok Hareketli blok hareket yetkileri.

2.2 Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemi

Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemi, emniyetli tren işletmesini sağlamak amacıyla yüksek kapasiteli ve çift yönlü tren ve hat boyu haberleşmesini kullanan tren kontrol sistemidir. Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistem, hareketli blok sistemini kullanarak kapasitenin artırılmasını sağlamanın dışında yolculara güvenli bir taşıma hizmeti sunmaktadır.

IEEE 1474 standardında Haberleşme Tabanlı Tren Kontrol Sistemi, ray devrelerinden bağımsız olarak yüksek çözünürlüklü tren konumu belirleme sağlayan, sürekli, yüksek kapasiteli, çift yönlü tren-yol kenarı veri iletişimi kullanan ve otomatik tren koruma (ATP) işlevlerinin yanı sıra isteğe bağlı otomatik tren işletimi (ATO) ve otomatik tren denetimi (ATS) işlevlerini uygulayabilen tren ve yol kenarı işlemcilerinden oluşan sürekli, otomatik bir tren kontrol sistemidir. Şekil 2.5'te haberleşme tabanlı tren kontrol sisteminin örnek blok diyagramı verilmiştir. CBTC sistemi mimarisi genel olarak üç alt sistemden oluşur. Bunlar, hat boyu sistemleri, araç üstü sistemleri ve araç üstü hat boyu haberleşme sistemleridir. Hat boyu sistemleri anlaşılan ve hat boyu elemanları kontrolünü sağlamaktadır. Anlaşılan sistemi trenlerin emniyetli şekilde yol almasını sağlayan demir yolu trafiğini düzenleyen sistemdir. Hat boyu elemanlarının trenin hareketine göre ilgili pozisyona alınmasını ve izinli tren hareketi tamamlanana kadar kilitli kalmasını anlaşılan sistemleri sağlar. Aynı zamanda bu hareket boyunca başka trenlerin ilgili rotaya girmemesinin sağlanması yine anlaşılan sistemlerinin temel görevidir. Hat boyu ekipmanları makas kontrollerini ve trene verilecek hareket yetkisinin belirlenmesinde görev almaktadır. Trenin bulunduğu

konumu araç üstü ekipmanı hat boyu ekipmanına ileterek hat boyundan verilen hareket yetkisine göre yol alır. Aynı zamanda trenin konumu ATS sisteminde de izlenmektedir. Tüm tren hareketi izleme ve operatör tarafından yapılacak istekler ATS sistemi tarafından kontrol edilir.



Şekil 2.5 Örnek CBTC blok diyagramı. (IEEE Vehicular Technology Society, 2004)

2.3 Otomasyon Seviyeleri

CBTC sistemi farklı otomasyon seviyelerine göre kurgulanmaktadır. Bu otomasyon seviyeleri dört seviyeye ayrılmıştır. Bunlar GoA 1'den GoA 4'e kadardır. GoA 1 'de manuel korumalı sürüştür. GoA2 de yarı otomatik tren işletimi vardır. GoA 3 sürücüsüz tren operasyonuyken GoA 4 ile tren gözetimsiz olarak işletilmektedir. GoA derecesinin yükselmesiyle, emniyet, işlevsellik ve performans seviyeleri o derecede artmaktadır. Otomasyon seviyeleri genel özellikleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 : CBTC otomasyon seviyeleri.

Otomasyon Seviyeleri	Tren Operasyon Tipleri	Tren Harekete Başlama	Tren Durdurma	Kapı Kapatma	Aksaklık Durumunda Müdahale
GoA 1	Sürücülü ATP	Sürücü	Sürücü	Sürücü	Sürücü
GoA 2	Sürücülü ATP+ATO	Otomatik	Otomatik	Sürücü	Sürücü
GoA 3	Sürücüsüz	Otomatik	Otomatik	Tren Görevlisi	Tren Görevlisi
GoA 4	Gözetimsiz	Otomatik	Otomatik	Otomatik	Otomatik

3. ODOMETRE SİSTEMİ

3.1 Sistem Bileşenleri

3.1.1 Doppler radar

Doppler radar, Doppler-Fizeau etkisini kullanarak belirli bir konumdaki nesnenin hız verisi üreten radar çeşididir. Doppler radar gönderilen ve alınan elektromanyetik sinyaller arasındaki değişmeyi hesaplayarak nesnenin hız ve yön bilgilerini algılar.

Doppler etkisi 1842 yılında Christian Andreas Doppler tarafından ortaya atılmıştır. 1845 yılında Christophorus Ballot tarafından ses dalgaları ile test edilmiştir. 1848 yılında Hippolyte Fizeau tarafından da elektromanyetik dalgalar üzerinde test edilmiştir. Bu sebeple Doppler-Fizeau etkisi olarak da literatürde geçmektedir. Doppler radarın askeri alandan meteoroloji tahmin ve ölçümlere kadar çok geniş bir kullanım yelpazesi bulunmaktadır. II. Dünya Savaşı'nda geliştirilen yaklaşım ateşleyicisinde doğru zamanda ve doğru konumda ateşleme doppler radar kullanılarak sağlanmıştır. (F. I. Petrescu, 2014.)

Ses kaynağı hızını V_s , ses kaynağı frekansını F_0 , boşluktaki ses hızını c , gözlenenin hızını V_r ve gözlenenin frekansını F olarak kabul edersek kaynak ve gözlenen arasındaki ilişkiye göre dört durum için aşağıdaki formüller geçerli olmaktadır;

Kaynak ve gözlenen duruyorsa ($V_s = V_r = 0$)

$$F = F_0 \quad (3.1)$$

Kaynak duruyor gözlenen hareket ediyorsa ($V_s = 0$)

$$F = \left(\frac{c \pm V_r}{c} \right) F_0 \quad (3.2)$$

Gözlenen kaynağa yaklaşıyorsa “+”, gözlenen kaynaktan uzaklaşıyorsa “-” kullanılır.

Gözlenen duruyor kaynak hareket ediyorsa ($V_r = 0$)

$$F = \left(\frac{c}{c \mp V_s} \right) F_0 \quad (3.3)$$

Kaynak gözlenenden uzaklaşıyorsa “+”, kaynak gözlenene yaklaşıyorsa “-” kullanılır.

Gözlenen ve kaynak hareket ediyorsa

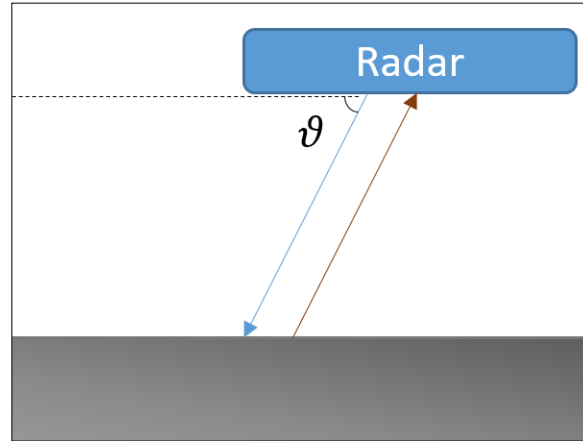
$$F = \left(\frac{c \pm V_r}{c \mp V_s} \right) F_0 \quad (3.4)$$

Pay için, gözlenen kaynağa yaklaşıyorsa “+”, gözlenen kaynaktan uzaklaşıyorsa “-” kullanılır. Payda için kaynak gözlenenden uzaklaşıyorsa “+”, kaynak gözlenene yaklaşıyorsa “-” kullanılır.

Doppler frekansı;

$$F_d = F - F_0 \quad (3.5)$$

Sistemimizde kullanılan radar, araç hızını Doppler-Fizeau etkisini kullanarak ölçmektedir. Radar yere yansıtılan 24 GHz mikro dalga yayar. Doppler etkisi gönderilen ve alınan dalgalar arasında, hız ile orantılı olan ve hız vektörü ile anten radyasyonunun yönü arasındaki açı ϑ ’ya bağlı olan bir frekans kaymasına neden olmaktadır. Radarın raya gönderdiği dalganın frekansının hesabı için denklem (3.3) kullanılacaktır. Raydan geri gelen dalganın frekans hesabında ise denklem (3.2) kullanılacaktır.



Şekil 3.1 Radar tarafından yayılan ve alınan dalgalar.

Şekil 3.1’de gösterilen radarın hızı V , radardan raya gönderilen frekans F_1 , raydan yansıyan frekans F_2 olsun.

$$F_1 = \left(\frac{c}{c \mp V \cos \vartheta} \right) F_0$$

c ışık hızı kabul edildiği için ve araç hızı ışık hızından çok küçük olduğu için $F_1 = F_0$ olarak kabul edilebilir.

$$F_2 = \left(\frac{c \pm V \cos \vartheta}{c} \right) F_0$$

$$F_d = F_2 - F_1$$

$$F_d = \left(\frac{c \pm V \cos \vartheta}{c} \right) F_0 - F_0$$

$$F_d = \left(\frac{V \cos \vartheta}{c} \right) F_0$$

λ ışığın dalga boyu olarak kabul edilirse aracın hızı formül 3.6 ile gösterilir.

$$V = \frac{\lambda F_d}{2 \cos \vartheta} \quad (3.6)$$

Formülde de görüldüğü üzere aracın hızı doppler frekansına ve kurulum açısına bağlıdır. Kullanılan radarda yüksek doğruluk amacıyla eğimölçer de bulunmaktadır. Radar trene monte edildikten sonra, aracın kalibrasyon yazılımı ile aracın eğimi ölçülür. Bu eğim hız ölçümü hesabında da doğruluk değerinin artırılması için hesaba katılır.

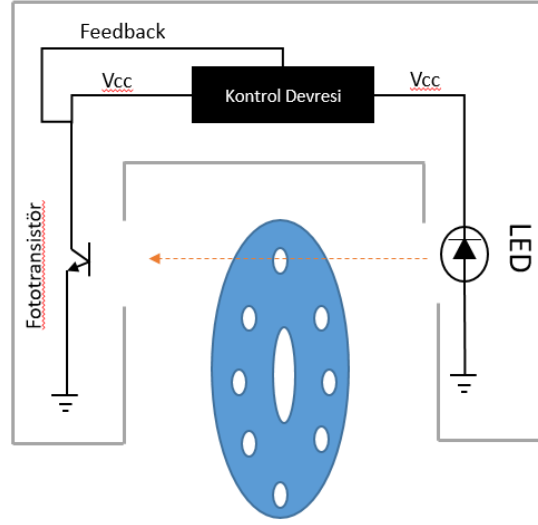
Doppler radar verileri OTK'ya standart protokolle RS485 üzerinden alınmaktadır. Bu verilerde hız, mesafe, radar kalitesi gibi bilgiler bulunmaktadır.

3.1.2 Takometre

Takometre, aksın dönme hareketini hızı ve alınan mesafeyi ölçmek için elektriksel sinyallere dönüştürmektedir.

Araç hız sensörleri genellikle endüktif veya optik sensörlerdir. En yaygın endüktif sensörler, sabit bir bobin ile çevrelenmiş bir manyetik pim üstünde bir çubuk mıknatıstan oluşur. Bu sensör, dişli bir ferromanyetik rotordan sabit bir mesafede monte edilmiştir. Rotor döndükçe ve bir diş çubuğun yakınına geldiğinde, bobindeki manyetik akı değişir. Akıdaki bu değişiklik, bobin boyunca bir voltaj darbesine neden olur. Aracın motor kontrol modülü bu voltaj darbelerini sayar ve aracın hızını hesaplar. Optik sensörler ayrıca rotor dönüşüne karşılık gelen bir frekansta darbeler üretir, ancak manyetik akıyı ölçmek yerine, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi optik sensör ya yansıyan ışığı ya da yarıklardan geçmesine izin verilen ışığı ölçer. Bir optik sensör kullanıldığında, rotorda ya optik sensörün ışık sensörleri kullanarak yansıyan ışığı algılaması için açık ve koyu işaretler ya da bir kızılötesi kaynaktan gelen ışığın

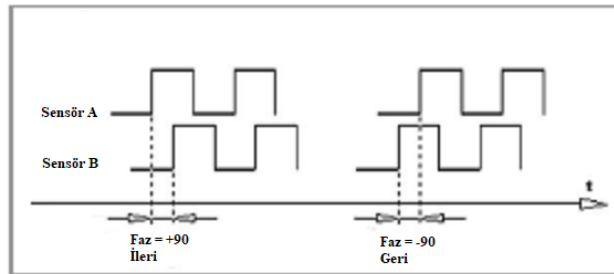
geçmesine ve diğer taraftaki bir fototransistör tarafından algılanmasına izin veren bir dizi yarıktır. (Clemson University Vehicular Electronics Laboratory , 2021)



Şekil 3.2 Optik darbe üretici.

Sistemimizde kullanılan takometre, kızılötesi aralıkta çalışan bir optik sistem üzerine inşa edilmiştir. Devir dört elektriksel olarak izole edilmiş sensöre sahiptir. Yani her bir sensör ayrı bir kanala bilgi vermektedir. Ve bu sensörler birbirlerinden bağımsızdır. Bu da darbe üreticinde her bir kanalın farklı sistemlerde kullanılabilir olmasını sağlamaktadır.

Seyahat yönünün belirlenmesi, iki sensörün sinyallerinin tanımlanmış bir faz kayması ile karşılaştırılmasıyla yapılır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi birinci sensör ile ikinci sensör arasındaki fark 90 derece ise yön ileri, -90 derece ise yön geri olarak belirlenmektedir.



Şekil 3.3 Sensör fazlarına göre yön belirlenmesi.

Takometre her bir dönüşte ikiyüz darbe üretmektedir. Alınan yok hesabında, takometre tarafından sayılan toplam darbe sayısının ikiyüze bölünmesiyle bulunan atılan tur sayısı kullanılır.

3.1.3 Baliz - baliz transmisyon modülü

Baliz, rayların arasına yerleştirilen ve ATP sisteminin bir parçası olarak kodlanmış sinyali trene gönderen elektronik bir işaretçidir. Transmisyon cihazları trene monte şekilde olup tren baliz üzerinden geçtiğinde ilgili telegramların alınmasını sağlamaktadırlar. Araç üstü sistemleri odometre sistemleri ile yaptıkları konum hesaplamalarını balizler yardımı ile düzeltmektedirler.

Balizler tipik olarak güç kaynağına ihtiyaç duymayan işaretçilerdir. Baliz, trende bulunan baliz transmisyon modülünün üzerinden geçtiği sırada yaydığı radyo frekansı ile telegram göndermeye başlamaktadır. ERTMS standartlarına uygun bir baliz 500 km/saat hızında bir trene veri gönderecek kapasitededir. RF etiketlerle karşılaştırılacak olursa, balizlerin çok daha geniş hafızasına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca balizler, konum hassasiyetinin hesaplanmasına tepe nokta değeri hesaplaması yaparak katkı sağlamaktadır.

Balizler tip olarak ikiye ayrılır. Bunlar;

- Sabit Veri Balizleri
- Değişken Veri balizleri

Sabit veri balizlerinde, hat ile ilgili sabit veriler (hat eğimi, hat metraji, sinyale olan mesafe, inşai hız kısıtı) kullanılır. Bu baliz tipinde balizde bulunan veri her trene aynı şekilde gönderilir. Balizlerin sabit değerlerle programlanması kablosuz şekilde kurulum aşamasında tek sefere mahsus olmaktadır.

Değişken veri balizlerinde, hat kenarında bulunan elektronik birimler tarafından alınan dinamik verilen kullanılır. Örneğin bir sonraki sinyalin durumunun dinamik olarak değişimi bu tip balizlerde görülebilir.

Sistemimizde sabit veri balizleri kullanılmaktadır. Bu balizlerle trenin hesaplanan konumunun düzeltilmesi sağlanmaktadır. BTM modülü trenin üzerinden geçtiği sırada aldığı baliz numarası profibus protokolü ile test bilgisayarına alınmaktadır. Alınan baliz verileri de hat haritası ile karşılaştırılarak trenin konumu belirlenmektedir.

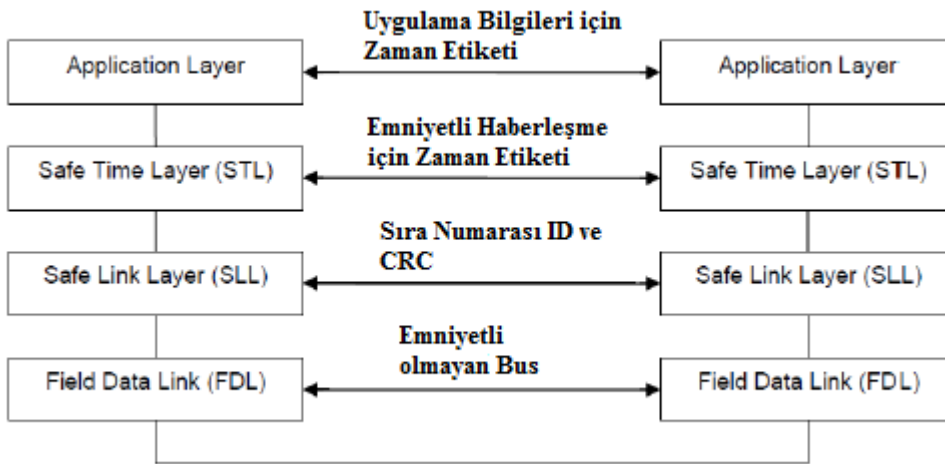
3.1.3.1 Profibus

Profibus 1989 yılında Alman Eğitim ve araştırma departmanı tarafından tanıtılmış olan bir ağ standardıdır. Profibus tedarikçi bağımsız bir standarttır yani özel bir ara birime ihtiyaç duymadan farklı ürünlerin haberleşmesine imkan vermektedir. Bu sebeple karmaşık haberleşme yapılarında sıkça kullanılmaktadır.

Sistemimizde kullanılan Profibus DP protokolü SIL4 seviyesinde noktadan noktaya haberleşme sağlamaktadır. Fiziksel katman, 2 tel bakır kabloya sahip saniyede 12 megabite kadar hızlı olan, RS-485'in genişletilmiş halidir.

Profibus haberleşme katmanları ve ilgili katmanlarda paylaşılan bilgiler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Profibus modbus gibi master-slave tipi protokoldür ancak çoklu master haberleşmesine sahiptir. Tüm cihazlar ağa katılmak için bir dizi işlem gerçekleştirmelidir. Slave cihazlar belirli bir süre içinde master ile konuşmazlarsa kendilerini emniyetli duruma alırlar. Master cihaz da tekrar haberleşebilir duruma geçebilmek için bağlanıçta belirlenen bir dizi işlem gerçekleştirmelidir.



Şekil 3.4 Profibus protokolü katmanları.

Sistemimizde BTM master olmaktadır. Zira bağlantı isteğini BTM göndermektedir. Tesr bilgisayarı da bağlantı onayını gönderecek slave cihaz olmaktadır.

Bilgisayar ve BTM arasında haberleşmenin sağlanması için aşağıda verilen adımlar gerçekleştirilmektedir.

1. Bilgisayar senkronizasyonu için STL protokolünü başlatır.

2. BTM senkronize olana kadar bekler.
3. BTM bağlantı isteği gönderir.
4. BTM bilgisayardan bağlantı isteği onayı bekler.
5. BTM Bilgisayara versiyon bilgisini gönderir.
6. Bilgisayar aynı veriyon bilgisi ile cevap verir.

Cihazla senktonizasyon sağlandığı sürece haberleşecektir. Aksi takdirde bağlantı kopacaktır.





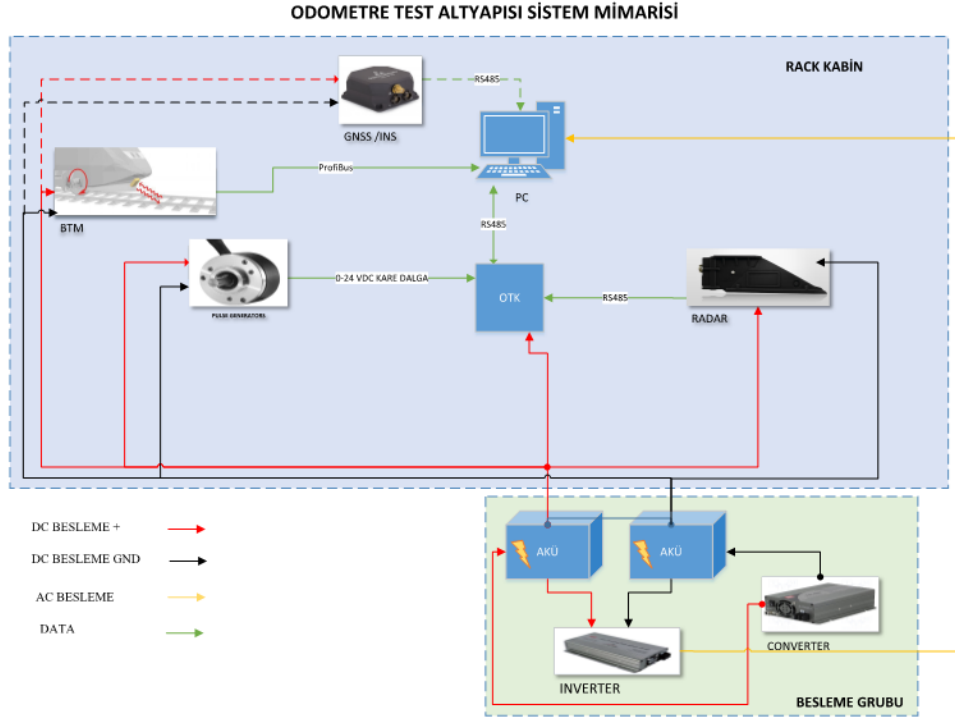
4. TEST ALTYAPISI

Test altyapısı, geliştirilen Odometre Sisteminin test edilmesi için kurulmuştur. Odometre alt sisteminin algoritması için veri oluşturulması ve algoritmanın testlerinin yapılması için kurulmuş olan test altyapısının mimarisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Sistem, algoritmanın gerçek verilerle denenmesi ve optimize edilmesi için öncelikle veri hazırlama bağlamında kullanılmıştır. Radar ve takometre verileri seri kanal üzerinden alınıp OTK üzerinden belirlenmiş bir mesaj yapısına işlenmektedir. OTK’dan mesajları 10 ms çözünürlükle veri kaçırmadan alan yazılım, bunları XML formatında kaydetmektedir. Bu veriler, algoritma geliştirilmesi faaliyetlerinde kullanılan veri kümelerini oluşturmuştur. İstenilen hız ve sürüş profilleri de bu sistem sayesinde oluşturulabilmiştir.

4.1 Test Sistemi Mimarisi Oluşturulması

Odometre test altyapısı genel hatlarıyla sensörler, güç üniteleri ve bilgisayarlardan oluşmaktadır. Altyapıda kullanılan sensörler doppler radar, baliz transmisyon modülü (BTM) ve takometredir. Sistemde ihtiyaç duyulması halinde GNSS/INS bağlantısı için altyapı vardır. Ancak hâlihazırda sistemde kullanılmamaktadır. Takometreler OTK’ya 24 VDC kare dalga şeklinde giriş yapmaktadır. OTK takometreden alınan darbeleri sayarak frekansa dönüştürmektedir. Doppler radar OTK’ya RS485 bağlantısı ile bağlanmaktadır. OTK radar bilgilerini standart protokol üzerinden almaktadır. Standart protokol, radarın hız, mesafe, kalite bilgilerini içermektedir. Test altyapısında BTM modülü bağlantısı da bulunmaktadır. BTM modülü balizlerden aldığı sinyalleri ProfiBUS protokolü ile bilgisayara göndermektedir. Test altyapısı enerji beslemesi için akü kullanılmaktadır. Bu akülerden inverter yardımıyla bilgisayar ve osiloskop gibi ekipmanların beslenmesi de sağlanmaktadır.

Her bir sensörün hat durumlarının simule edilmesi için beslemeleri anahtarlmalıdır. Bu sayede istenilen sensörün kapatılarak hata senaryolarının oluşması sağlanabilmektedir.



Şekil 4.1 : Odometre Test Altyapısı sistem mimarisi.

4.2 Sistem Veri Yapısının Oluşturulması

Odometre sisteminde kullanılacak sensörlerin veri yapıları birbirinden farklıdır. Örneğin takometreden alınan veri yalnızca kare dalga şeklindeyken, radardan alınan veri standart protokol adı verilen bir telegram şeklindedir. Bu sebeple OTK biriminde takometre verilenin, mesaj gönderim sıklığına göre belirlenen periyotlarda aldığı darbe sayısı olarak saklanması, radar verilerinin de alınan telegramı olduğu gibi saklamasına karar verilmiştir. Bu bağlamda 86 byte'lık bir veri yapısı oluşturulmuştur. Bu veriler her bir OTK çevriminde tek bir pakette toplanarak gönderilecek şekilde düzenlenmiştir. Bu veri paketi içerisinde sensör verilerinin yanı sıra mesaj sayaçları da bulunmaktadır. Bu sayede test yazılımının mesaj kaçırılmadığı da doğrulanmış olacaktır. Aynı zamanda test yazılımı da OTK'ya veri gönderim sıklığı ayarlamak için mesaj paketi gönderebilmektedir.

4.3 Odometre Sistemi Test Alt Yapısı Yazılımı

Kurulan test altyapısı ile odometre sisteminden alınan veriler bilgisayar ortamında karşılaştırılmaktadır. Bu bağlamda alınan verilerin izlenebilmesi, kaydedilebilmesi,

gerektiğinde sensör füzyon uygulamasına senaryo sağlaması amacıyla “Odometre Sistemi Test Altyapısı Yazılımı” oluşturulmuştur. Yazılım, seri kanal üzerinden yollanan veri paketlerindeki sensör verilerini işleyerek Şekil 4.2’de gösterilen ekrana yazdırmaktadır.

Şekil 4.2 Odometre test altyapısı çevrimiçi izleme ekranı.

4.4 Veri Kayıt Formatı

Odometre test altyapısının oluşturulmasındaki temel amaçlardan biri de sensörlerin karşılaştırılmasının yanı sıra algoritma oluştururken kullanılacak veri setlerinin oluşturulmasıdır. Bu kapsamda test aracı ile istenilen hızlarda ve sürüş profillerinde sürüşleri yapıp kayıtlar alınmaktadır. Bu kayıtlar veri kaçırmadan XML formatında yazılmakta ve gerektiğinde incelenmektedir. (Şekil 4.3)

izleme

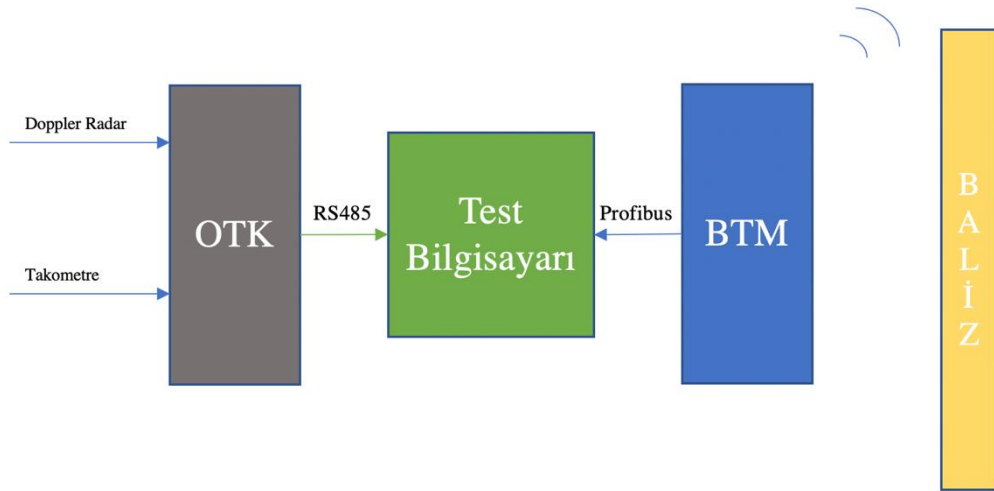
C:\Users\telbir\Desktop\0107\2109\CBTC_2020-09-21_1453

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	Y	Z
552484	7,278225	25	437,2	1400	247	6,866625	226	247	4980	22	22	22	22	21	21	21	21	+1	+1	-1	-1	160-36-110-8-0-161-22-0-0-0-22-C
552584	6,82963	35	437,4	1400	247	6,42681	236	247	4982	20	20	21	20	21	21	21	21	+1	+1	-1	-1	160-136-110-8-0-161-20-0-0-0-20-C
552684	6,673995	45	437,6	1400	247	6,069765	246	247	4983	20	20	19	20	20	19	19	20	+1	+1	-1	-1	160-236-110-8-0-161-20-0-0-0-20-C
552784	6,53667	55	437,8	1400	247	5,776805	0	247	4985	19	19	19	19	19	19	19	19	+1	+1	-1	-1	160-80-111-8-0-161-19-0-0-0-19-C
552884	6,02399	65	438	1400	247	5,557085	10	247	4987	18	18	19	18	18	19	19	18	+1	+1	-1	-1	160-180-111-8-0-161-18-0-0-0-18-C
552984	5,850045	75	438,1	1400	247	5,319055	20	247	4988	18	18	17	18	18	17	17	17	+1	+1	-1	-1	160-24-112-8-0-161-18-0-0-0-18-C
553084	5,84089	85	438,3	1400	247	5,117645	30	247	4990	17	16	17	17	16	17	17	17	+1	+1	-1	-1	160-124-112-8-0-161-17-0-0-0-16-C
553184	5,60286	95	438,5	1400	247	4,971165	40	247	4991	16	16	16	16	16	15	16	16	+1	+1	-1	-1	160-224-112-8-0-161-16-0-0-0-16-C
553284	5,373985	105	438,6	1400	247	4,87046	50	247	4992	15	16	15	15	15	16	15	15	+1	+1	-1	-1	160-68-113-8-0-161-15-0-0-0-16-C
553384	5,081025	115	438,8	1400	247	4,769755	60	247	4994	14	14	15	14	15	14	14	14	+1	+1	-1	-1	160-168-113-8-0-161-14-0-0-0-14-C
553484	4,751445	125	438,9	1400	247	4,55919	70	247	4995	14	14	13	14	13	13	13	13	+1	+1	-1	-1	160-12-114-8-0-161-14-0-0-0-14-C
553584	4,513415	135	439	1400	247	4,35778	80	247	4996	12	12	12	12	12	13	13	13	+1	+1	-1	-1	160-112-114-8-0-161-12-0-0-0-12-C
553684	4,220455	145	439,1	1400	247	4,2113	90	247	4997	11	11	12	11	12	11	12	12	+1	+1	-1	-1	160-212-114-8-0-161-11-0-0-0-11-C
553784	4,037355	155	439,3	1400	247	4,073975	100	247	4999	11	11	10	11	12	12	11	11	+1	+1	-1	-1	160-56-115-8-0-161-11-0-0-0-11-C
553884	3,854255	165	439,4	1400	247	3,945805	110	247	5000	10	10	11	10	10	10	11	11	+1	+1	-1	-1	160-156-115-8-0-161-10-0-0-0-10-C
553984	3,506365	175	439,5	1400	247	3,744395	120	247	5001	10	9	9	10	9	10	9	9	+1	+1	-1	-1	160-0-116-8-0-161-10-0-0-0-9-0-0
554084	3,359885	185	439,6	1400	247	3,53383	130	247	5002	8	9	9	8	9	9	9	9	+1	+1	-1	-1	160-100-116-8-0-161-8-0-0-0-9-0-0
554184	3,2958	195	439,7	1400	247	3,231715	140	247	5003	8	8	7	8	9	9	9	9	+1	+1	-1	-1	160-200-116-8-0-161-8-0-0-0-8-0-0
554284	3,25918	205	439,7	1400	247	2,975375	150	247	5004	8	8	9	9	10	9	9	9	+1	+1	-1	-1	160-44-117-8-0-161-8-0-0-0-8-0-0
554384	3,16763	215	439,8	1400	247	2,792275	160	247	5004	10	9	9	9	9	9	9	10	+1	+1	-1	-1	160-144-117-8-0-161-10-0-0-0-9-C
554484	3,213405	225	439,9	1400	247	2,65495	170	247	5005	9	10	10	9	10	10	10	10	+1	+1	-1	-1	160-244-117-8-0-161-9-0-0-0-10-C
554584	3,38735	235	440	1400	247	2,627485	180	247	5006	10	10	10	10	10	11	11	10	+1	+1	-1	-1	160-88-118-8-0-161-10-0-0-0-10-C

Şekil 4.3 Odometre test altyapısı kayıt ekranı.

4.5 Baliz Verilerinin Zaman Senkronizasyonu

Test altyapısı oluşturulurken karşılaşılan problemlerden biri de sensör verilerinin ortak bir zaman etiketine sahip olmamasıdır. Zira Şekil 4.4'te gösterildiği üzere doppler radar ve takometre verileri Odometre Test Kutusu tarafından RS485 protokolü ile ortak bir zaman etiketi ile alınırken, BTM tarafından alınan baliz telegramları Profibus protokolü üzerinden bilgisayara direkt olarak alınmaktadır. Bunun yanında doppler radarın algıladığı verileri kendi işlemcisinde ön işleme sürecinden geçirerek vermesinin de getirdiği zaman gecikmesi takometre ile Odometre Test Kutusunda bile aynı zaman etiketinde olmadıkları anlamına gelmektedir. Ancak yapılan testlerde bu zaman farkının göz ardı edilecek seviyede olduğu görülmüştür. Ancak BTM ile Odometre Test Kutusunun aynı zaman referansına gelmesinin şart olduğu yapılan testlerle de ortaya koyulmuştur.



Şekil 4.4 Test altyapısı bağlantı şeması.

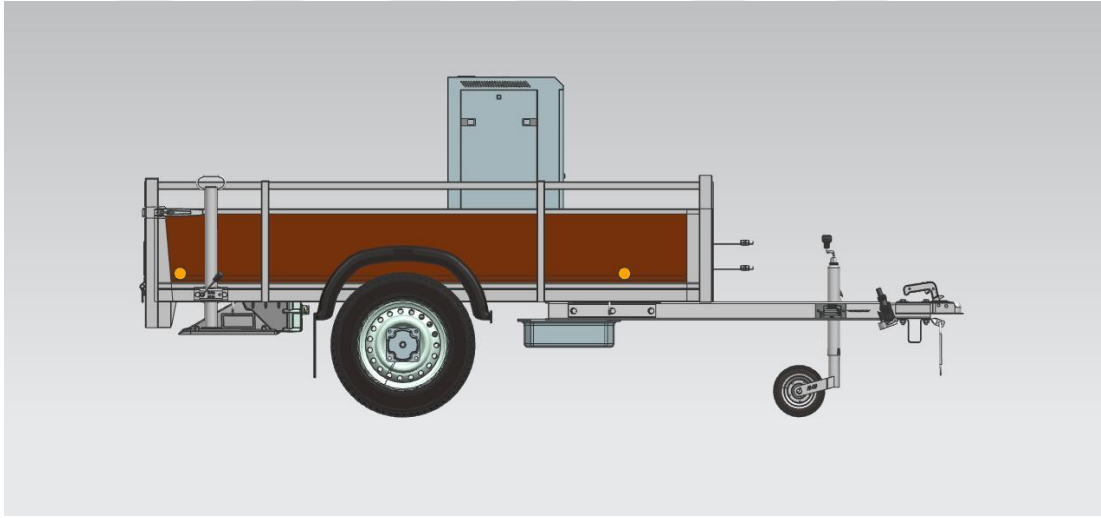
Baliz telegramı içerisinde “baliseTimestamp” isimli bir değişken bulunmaktadır. Baliz Transmisyon Modülü, bu değişkeni kendi içinde bir sayaç şeklinde kullanmaktadır. Sistemimizde her sensör verisinin baliz zaman referansına göre hizalanması için bu değişken kullanılmıştır. Test yazılımı ile profibus bağlantısı yapıldığı zaman alınan zaman etiketi Odometre Test Kutusuna gönderilmektedir. Odometre Test Kutusu tarafından alınan zaman etiketi BTM modülü ile aynı çevrim süresi ile sayılmaya devam edilmektedir. Zaman kaymalarının engellenmesi için zaman etiketi paylaşımı

on saniyelik periyotlarla tekrar edilmektedir. Bu sayede BTM ve Odometre Test Kutusu olabildiğinde paralel bir zaman etiketiyle çalışır hale gelmiştir.



5. SENSÖR VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sensör verilerinin karşılaştırılması için üç ayrı test düzeneği kurulmuştur. Bu düzeneklerin ilki römork üzerine kurulmuş test sistemidir. Römork üzerine radar, iki adet takometre ve BTM monte edilerek Şekil 5.1’de gösterildiği şekilde bir test sistemi oluşturulmuştur. Bu sistemin kurulmasındaki ana amaç, trenle yapılan testlerde oluşturulamayacak olan ya da oluşturulmasının emniyet açığı ortaya çıkaracağı düşünülen senaryoların römork sisteminde daha emniyetli bir şekilde oluşturulacak olmasıdır. Bu bağlamda römork sisteminde kurulmuş olan düzenek, daha esnek veri havuzu oluşturulmasına imkân vermiştir. Ayrıca römorkta kurulan test düzeneği bazı uç senaryoların da denenerek sensör performanslarının daha iyi bir şekilde karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

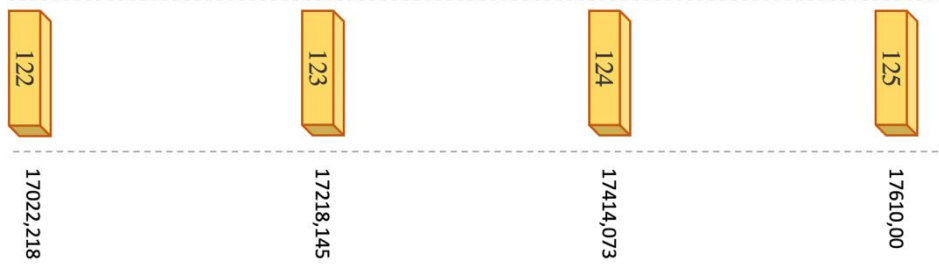


Şekil 5.1 Römork üzerine kurulmuş test sistemi çizimi.

Bir diğer test düzeneği, sensörlerin raylı sistemlerdeki performansını gözlemlemek amacıyla ana hatta bulunan bir tren üzerinde kurulmuştur. Römork üzerine kurulan sistemin ana hatta çalışan bir tren üzerine kurulmasıyla oluşturulan düzenekle sahaya göre daha yüksek hızlarla deneme yapılma imkânı sağlanmıştır.

Bir diğer test düzeneği, sensörlerin nihai olarak kullanılacağı tren üzerinde kurulmuştur. Ayrıca veri toplama işlemleri için gerçek hat verileri ve elemanları da

kullanılmıştır. Test için kullanılan hat bölgesinde bulunan baliz isimleri ve metraj bilgileri Şekil 5.2’te gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Test hattı baliz metraj bilgileri.

5.1 Römork Verileri

Römork ile yapılan testlerde sahada denenmesi mümkün olmayan senaryoların denenebilmesi sağlanmıştır. Bu senaryolarda farklı hava koşulları, yüksek hızlar, düşük hızlar ve ivmelenmeler bulunmaktadır. Bu bölümde incelenen grafikler, sensörlerin römorkla yapılan testleri sonucunda kalibrasyonu tamamlanmış durumlarını göstermektedir. Yapılan testlerde örnekleme periyodu 100 ms’dir.

5.1.1 Sürüş 1

Sürüş 1, Şekil 5.3’te gösterildiği şekilde römorkun 60 km/saat hıza çıkarılıp hızının sabitlenmesini içeren bir sürüştür. Bu testin 20 km/saat, 40 km/saat, 10 km/saat gibi varyantları da yapılmıştır. Sabit hızlarda sensör verilerinde paralelliğin söz konusu olduğu görülmüştür. İki sensör de sabit hızlarda kararlı sonuçlar göstermektedir.

5.1.2 Sürüş 2

Sürüş 2, Şekil 5.4’te gösterildiği şekilde römorkun 1 km/saat – 15 km/saat hızları arasındaki ani ivme değişiklikleri içeren bir sürüştür. Bu testin üst sınırı farklı hızlarda tutulan varyantları da yapılmıştır. Yapılan testlerde hız değişikliklerinde radarın ard arda yapılan iki farklı işaretli ivme değişimlerinde değişimi daha geç algıladığı görülmüştür. Şekil 5.4’te de hızın azaldığı ve arttığı noktalarda radar hızının takometre hızı ile farkının açıldığı görülmektedir. Bu da hız değişimlerinin olduğu sürüşlerde doppler radarın alınan yol hesabının doğru veri vermeyeceğine işaret etmektedir. Zira hız azalmaya başladığında doppler radar ölçümlerinde hızın artmaya devam ettiği

görülmektedir. Bu da alınan yol hesabında kullanılan alanda artış anlamına gelmektedir.

5.1.3 Sürüş 3

Sürüş 3, Şekil 5.5'te gösterildiği şekilde hızlanma, sabit hız ve yavaşlama içeren bir sürüştür. Bu testin üst sınırı farklı hızlarda tutulan varyantları da yapılmıştır. Sürüş 3 'e bakıldığında doppler radar verilerinde ani dalgalanmaların bulunduğu görülmüştür. Yine Sürüş 2'de görüldüğü gibi ani yavaşlama durumlarında doppler radarın geç tepki verdiği görülmüştür. Ancak yavaşlama durumundan sabit hız durumuna geçildiğinde doppler radarın tepkisinin hızlı olduğu görülmüştür. Takometre verilerinin doppler radar verilerine göre daha gürültülü olduğu da sürüşlerde açıkça görülmüştür.

5.1.4 Sürüş 4

Sürüş 4, Şekil 5.6'da gösterildiği şekilde dur kalk içeren bir sürüştür. Bu testin üst sınırı farklı hızlarda tutulan varyantları da yapılmıştır. Yapılan testlerde doppler radarın durmayı algılamasının zaman aldığı görülmüştür. Bunun sebebinin doppler radarın kendi içinde yaptığı sensor işleminin gecikmesi olduğu görülmüştür. Bu sebeple testlerde durulduktan sonra belirli bir beklenmiş hemen kalkışa geçilememiştir. Şekil 5.6 da beklenerek yapılan testlerin sonucudur. Bekleme süresinin doppler radar ile takometre verilerinin paralellenmesinin sağladığı görülmüştür. Yine yavaşlamaya geçildiğinde doppler radar tarafından ölçülen ortalama hız değerinin takometreye göre yüksek olduğu açıkça görülmüştür.

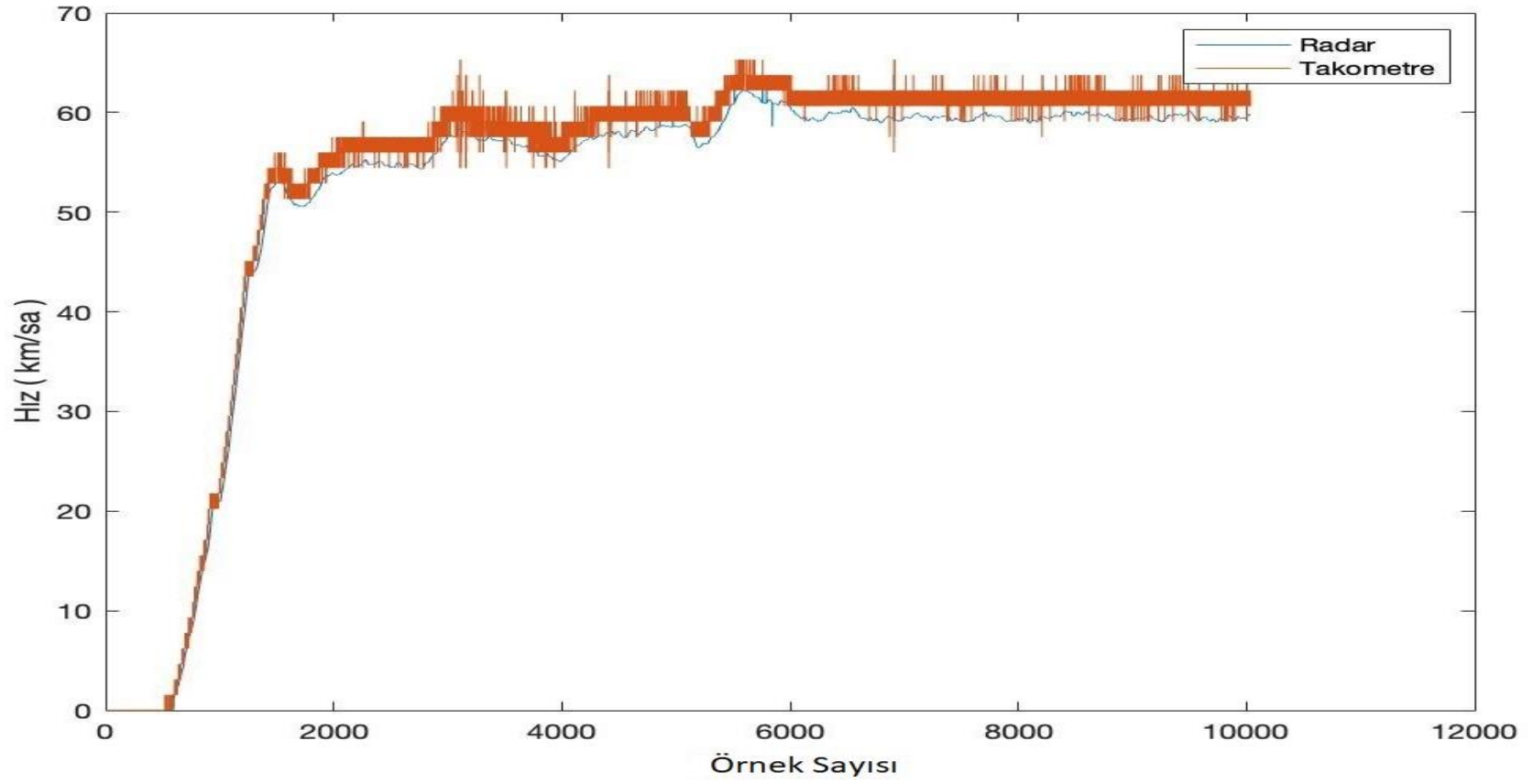
5.1.5 Sürüş 5

Sürüş 5, Şekil 5.7'de gösterildiği şekilde yön değişimi içeren bir sürüştür. Bu testin üst sınırı farklı hızlarda tutulan varyantları da yapılmış olup radarda hızın sıfır olarak algılanması için belirli bir süre geçmesi gerektiğinden dolayı yön değişimde de beklenerek yön değişikliği yapılmıştır. Yapılan testlerde ileri geri senaryolarının beklemeden yapılması ile radarın yanlış yön sonucu üretmesine sebep olduğu görülmüştür. Bu konuda radar tedarikçisi ile iletişime geçilmiş olup radarda yazılım güncellenmesi yapılması sağlanmıştır. Yapılan yazılım güncellenmesi ile radar daha kararlı sonuçlar üretmiştir. Ancak yine testlerde durulduktan sonra belirli bir süre beklenmiş hemen kalkışa geçilememiştir. Şekil 5.7 de doppler radar ve takometre verilerinin paralel sonuçlar ürettiğini gösteren bir sürüştür.

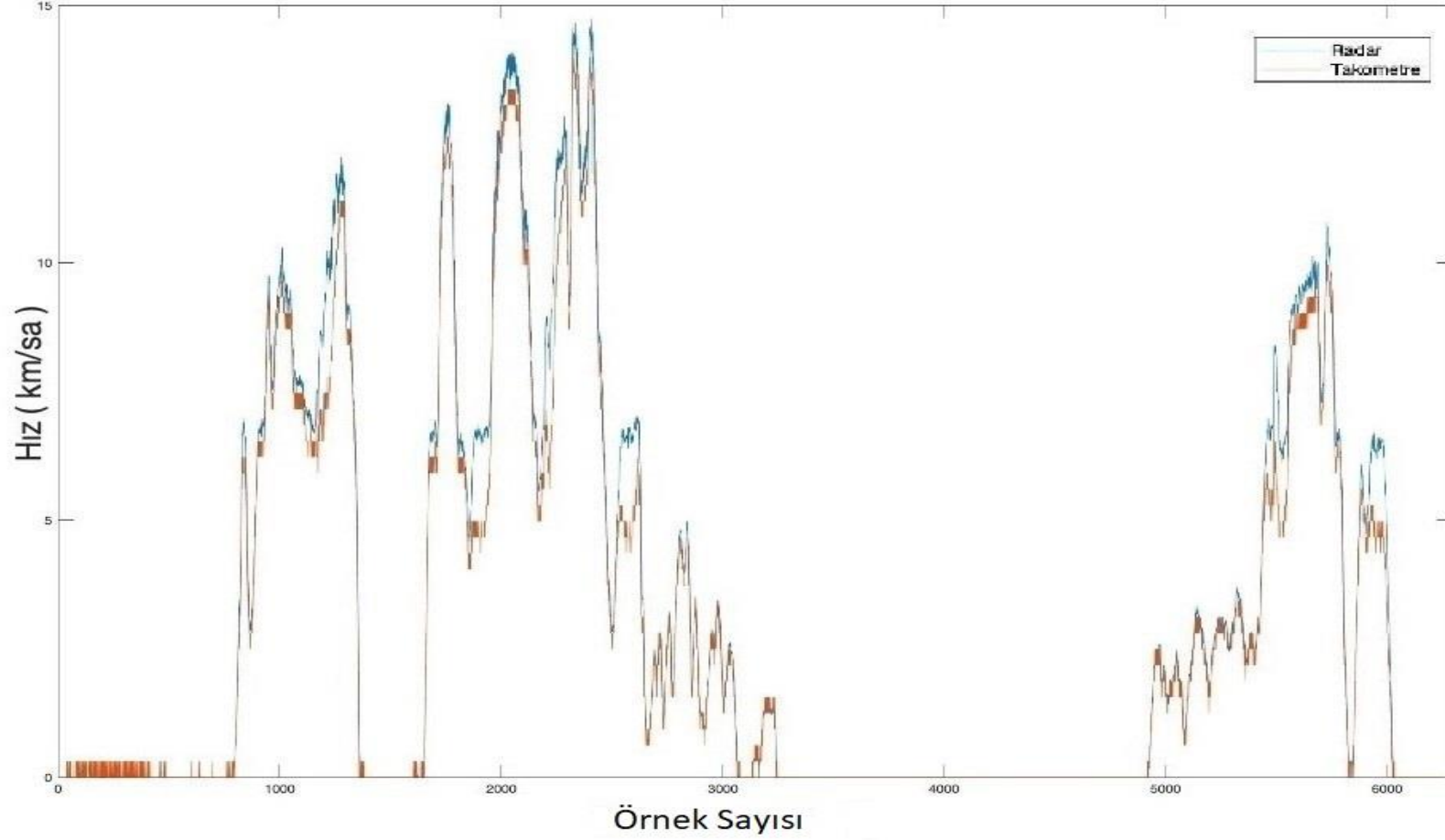
5.1.6 Sürüş 6

Sürüş 6, Şekil 5.8’de gösterildiği şekilde yüksek hızlar sonrasında dur kalk içeren bir sürüştür. Bu testte römorkun durma ve kalkma hareketleri radarda hızın sıfır olarak algılanması için belirli bir süre geçmesi gerektiğinden dolayı beklenerek yapılmıştır. Görüldüğü üzere doppler radarın yavaşlamaya olan tepkisi takometreye göre daha geç alınmıştır. Çok hız değişimi olan sürüşlerde iki sensörün ölçümlerinin sapmaya başladığı görülmüştür. Bu verilerin hangisinin daha kararlı olduğu alınan yol ölçümleri ile belirlenecektir. Ayrıca diğer sürüşlerde de görüldüğü gibi takometre verilerinde gürültü oranı fazladır.

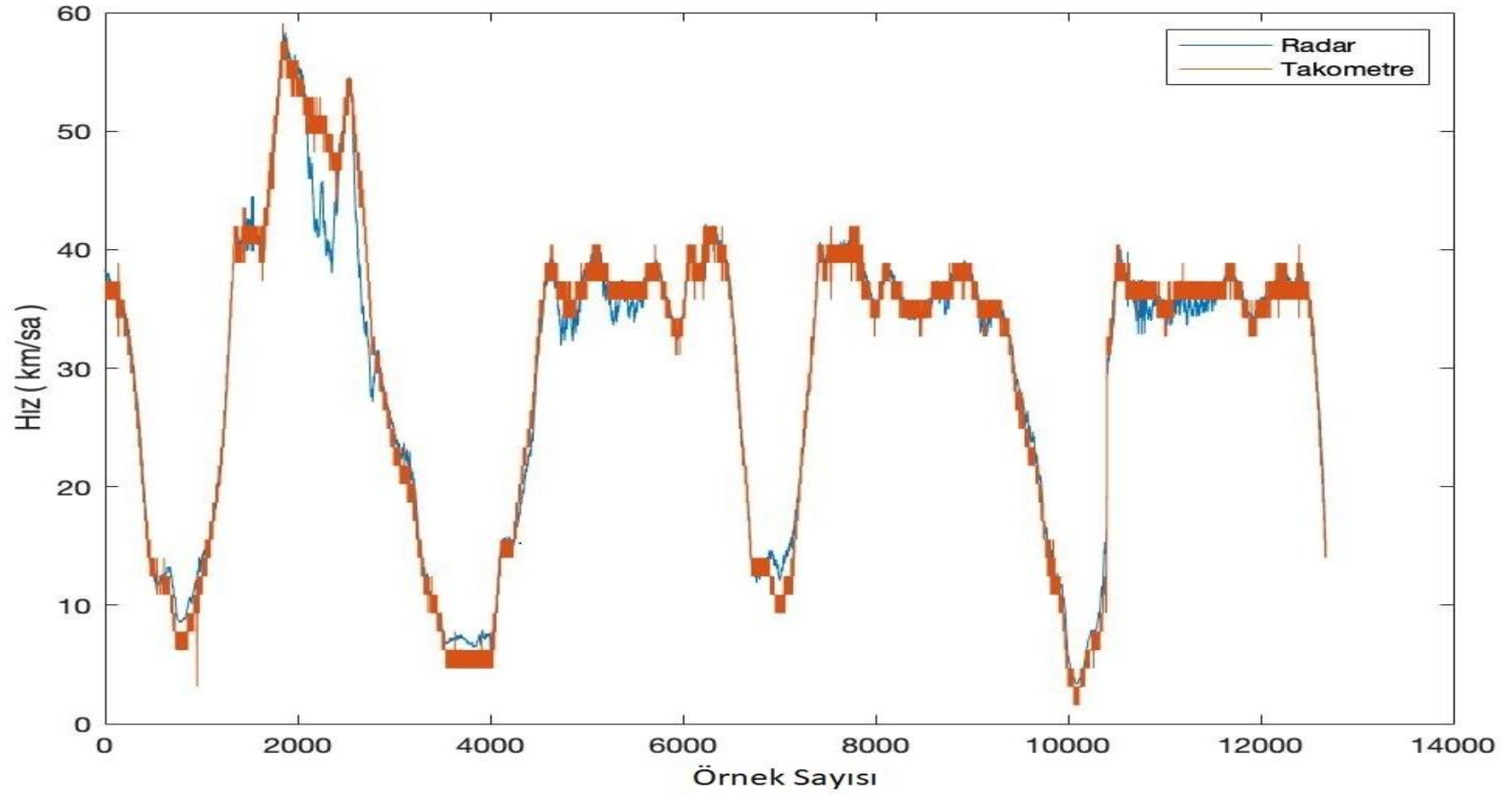




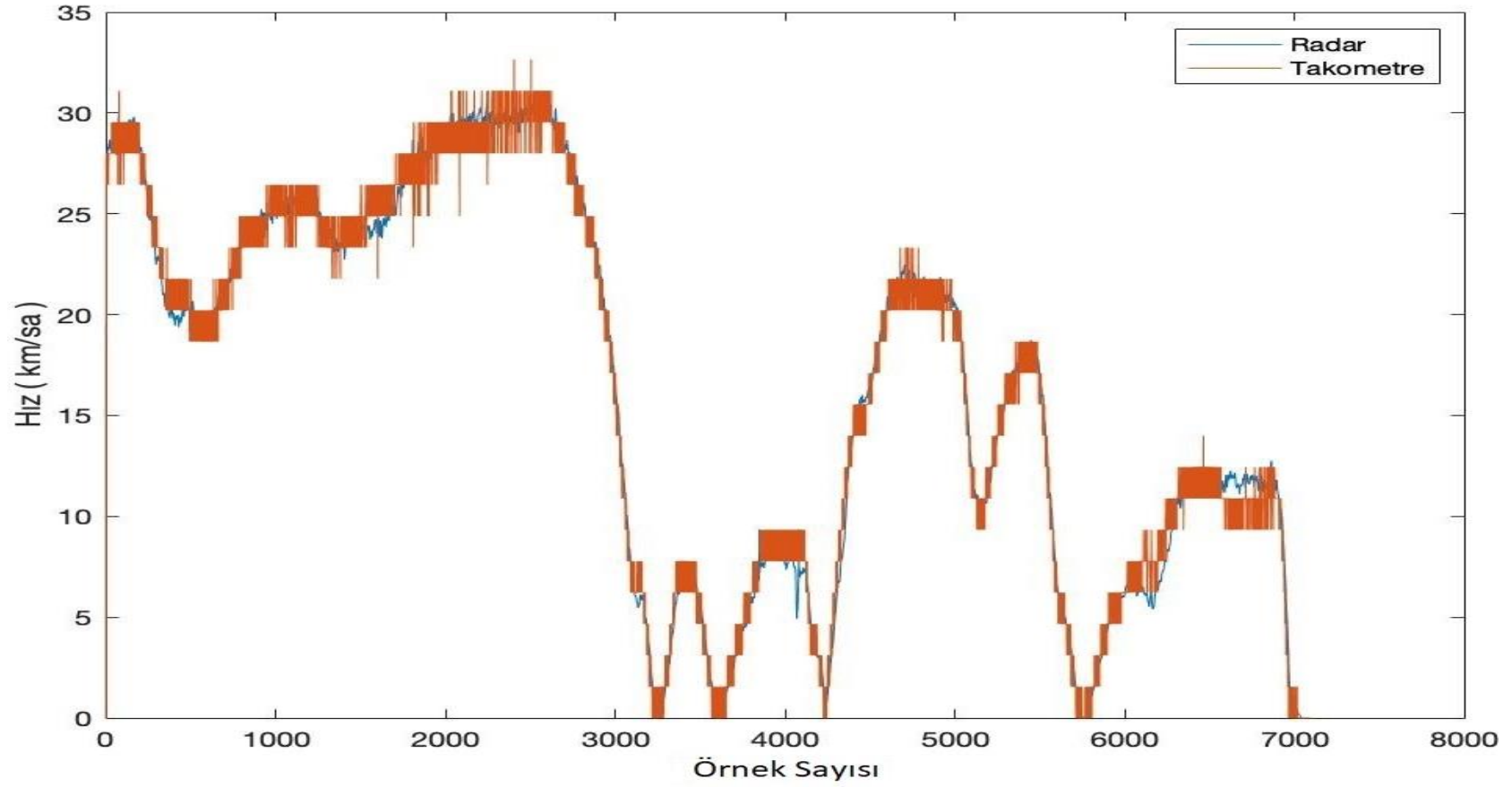
Şekil 5.3 Sürüş 1 takometre – doppler radar hız verileri.



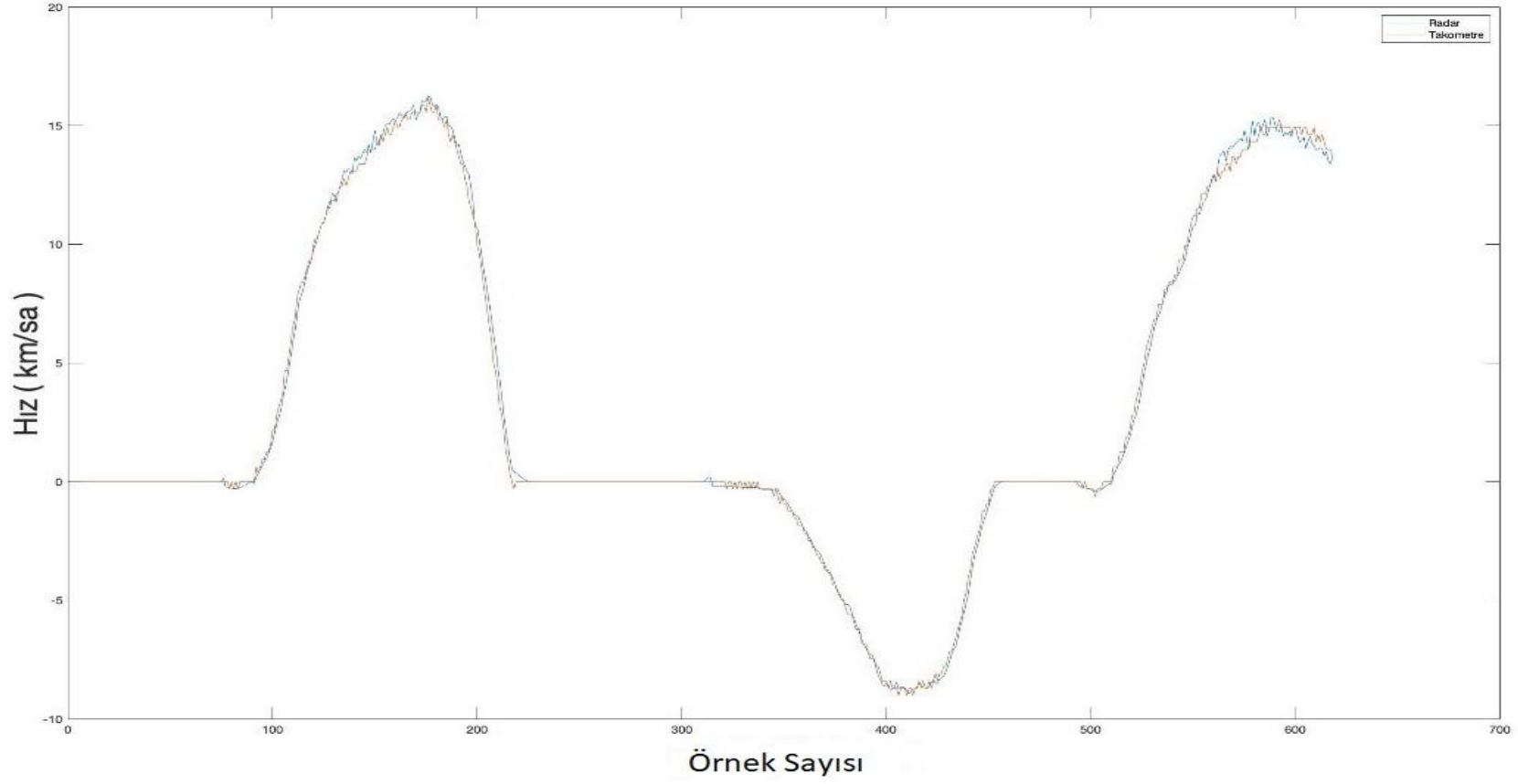
Şekil 5.4 Sürüş 2 takometre – doppler radar hız verileri.



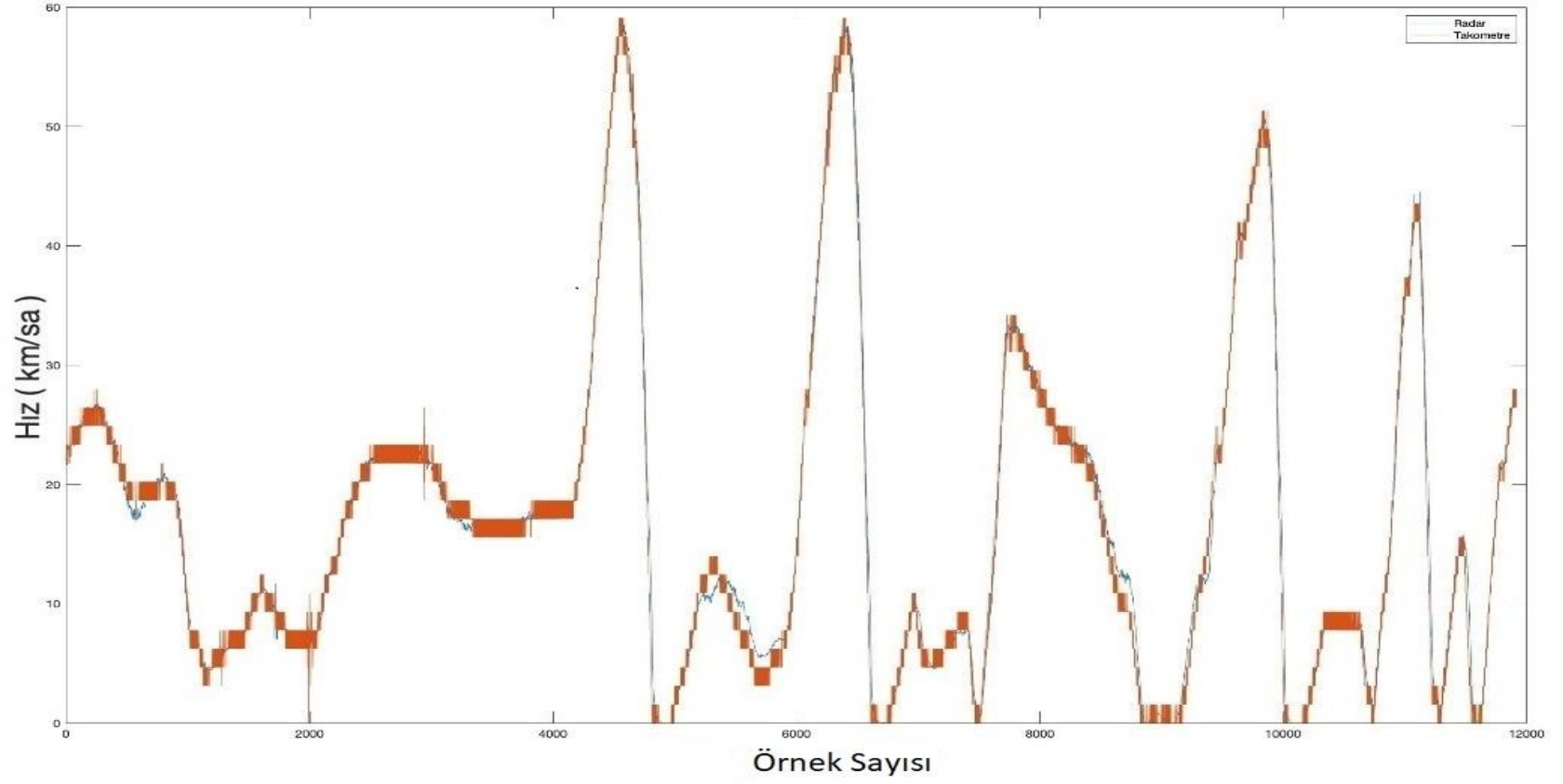
Şekil 5.5 Sürüş 3 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.6 Sürüş 4 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.7 Sürüş 5 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.8 Sürüş 6 takometre – doppler radar hız verileri.

5.2 Test Hattı Verileri

Test hattı belirli uzunluklarda işaretlenerek teste başlanmıştır. Trenin hassas duruşunu sağlamak sahada zor olduğundan duruşlarda tekrar bu referans noktalarına olan mesafe ölçülerek aracın gerçekte kaç metre gittiği hesaplanmıştır. Yapılan testlerde örnekleme periyodu 100 ms'dir.

5.2.1 Sürüş 1

Dur kalk yapılarak 220 metrelik bir parkurda sürüş yapılmıştır. Doppler radar verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 228.7861 metre, takometre verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 224.5866 metredir. İlgili hız zaman grafiği Şekil 5.9'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde radarın düşük hızlarda ölçüm yapamadığı görülmektedir. Aynı zamanda hız değişimine karşı tepkisinin takometreye göre daha yavaş olduğu da açıkça görülmektedir. Bu da alınan yol hesabında doppler radarın hesabının daha büyük olmasına sebep olmaktadır. Takometre verisinin gerçek mesafeye daha yakın olduğu açıktır.

5.2.2 Sürüş 2

Sürüş 2, 220 metrelik bir parkurda trenin kayma durumuna geçmesi sağlanarak yapılmıştır. Doppler radar verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 225.6428 metre, takometre verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 202.4769 metredir. İlgili hız zaman grafiği Şekil 5.10'te verilmiştir. Grafikte trenin kayma durumunda tekerin duracağı için takometrenin hız ölçümü yapamadığı ancak doppler radarın ölçüm almaya devam edildiği görülmektedir. Dolayısıyla alınan yol hesabında doppler radar verilerinin gerçeğe daha yakın sonuç ürettiği görülmüştür. Bu sürüşle kayma kızıklama durumunda doppler radarın açıkça daha avantajlı olduğu görülmüştür.

5.2.3 Sürüş 3

Sürüş, düşük ivme değişken hız ile yapılmıştır. Sürüş mesafesi 360 metredir. Doppler radar verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 361.6024 metre, takometre verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 359.8925 metredir. İlgili hız zaman grafiği Şekil 5.11'te verilmiştir. Sürüş 3'te, römorkla yapılan sürüşlerde de belirtildiği gibi sabit hızda iki sensörün de birbirlerine paralel sonuçlar ürettiği görülmüştür.

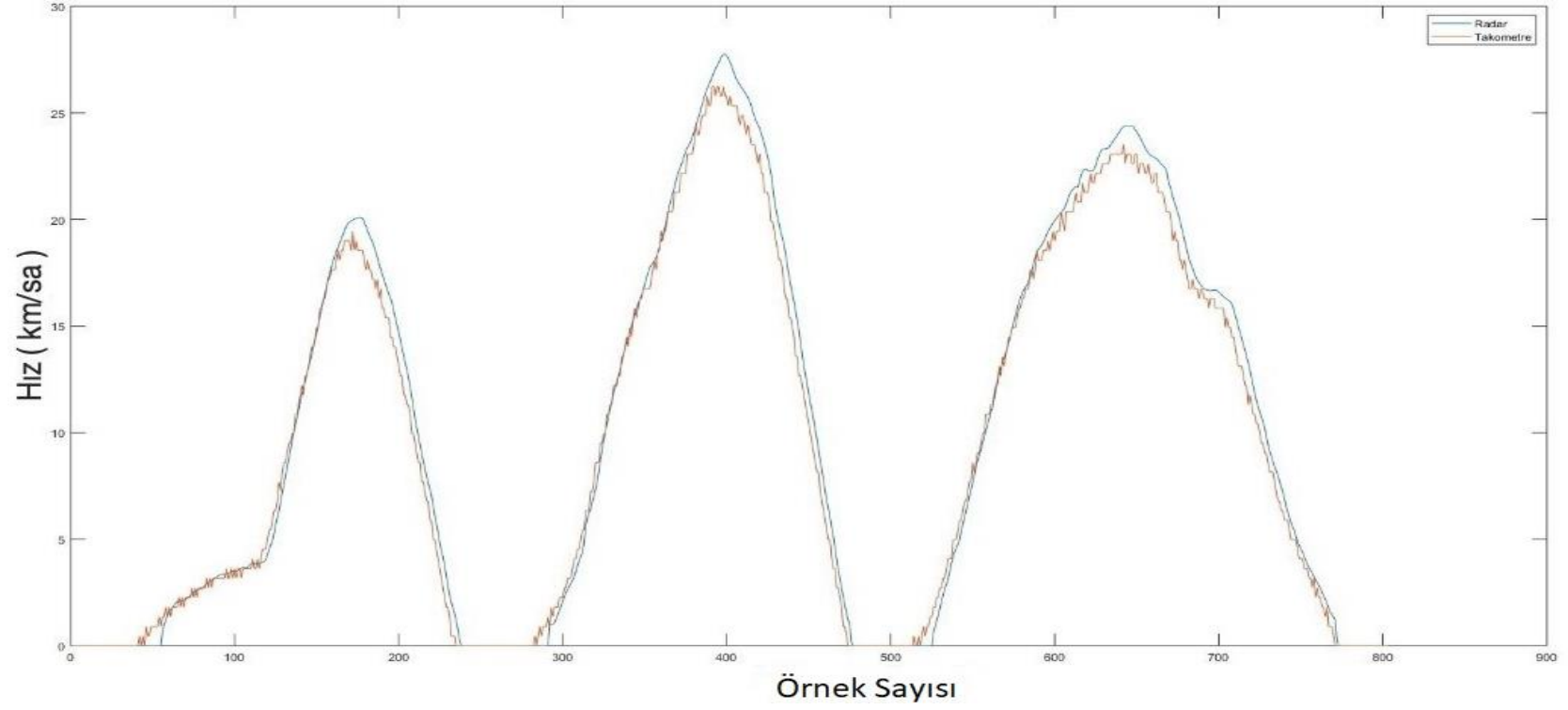
Ancak takometrede gürültünün daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Yine de alınan yol hesabında takometre verilerinin gerçek mesafeye daha yakın olduğu görülmüştür.

5.2.4 Sürüş 4

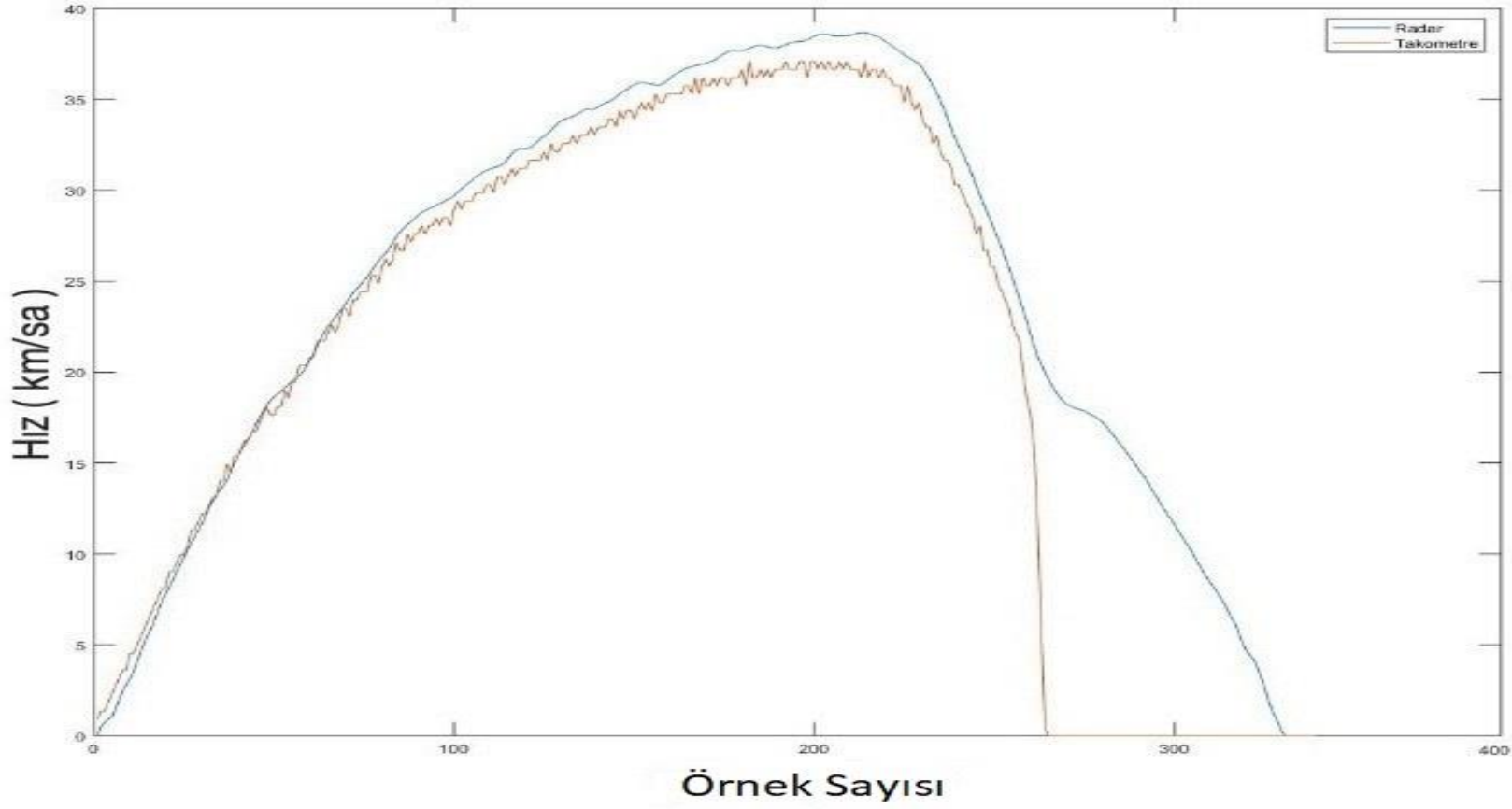
Sürüş, düşük ivme sonrası sabit hız ile yapılmıştır. Sürüş mesafesi 360 metredir. Doppler radar verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 363.7137 metre, takometre verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 361.8687 metredir. İlgili hız zaman grafiği Şekil 5.12'da verilmiştir. Doppler radar için ivme değişiminin değerinin önemi bu sürüş ile anlaşılmaktadır. Zira bir önceki sürüşte daha yüksek bir ivme varken iki sensörün farkı artmışken, bu sürüşte daha düşük ivme ile iki sensörün ölçümlerinin daha yakın olduğu görülmüştür.

5.2.5 Sürüş 5

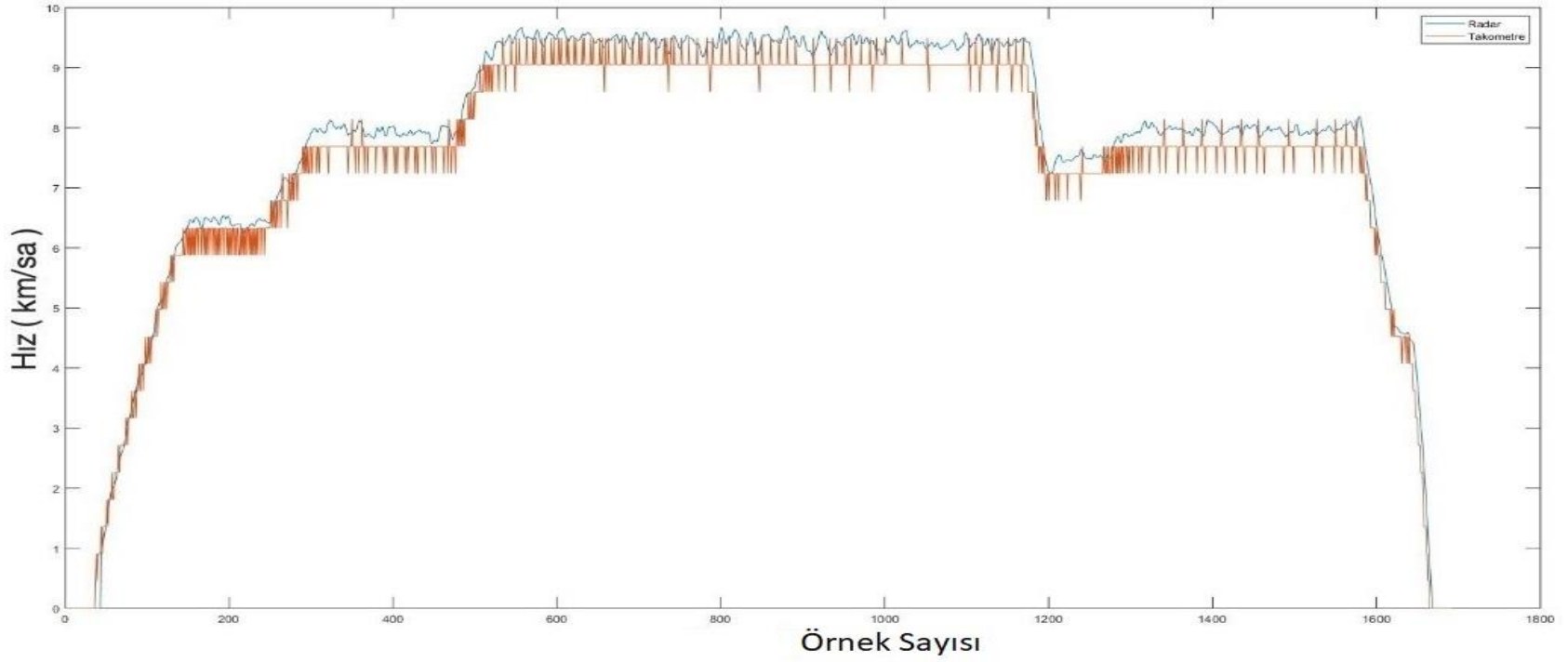
Sürüş 5, maksimum ivme hız ile yapılmıştır. Sürüş mesafesi 350 metredir. Doppler radar verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 358.2351 metre, takometre verileri ile yapılan hesaplamalara göre alınan yol 355.7712 metredir. İlgili hız zaman grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir. Sürüş 5 grafiğinde de görüldüğü üzere doppler radar, takometreye göre hızı ve konumu daha büyük hesaplamaktadır. Doppler radar için ivme değişiminin alınan yol hesabındaki ve hız hesaplanmasındaki etkisi bu sürüşte de açıkça görülmektedir. İvme değişimi ne kadar fazla ise sensörlerin arasındaki uyum o kadar azalmaktadır.



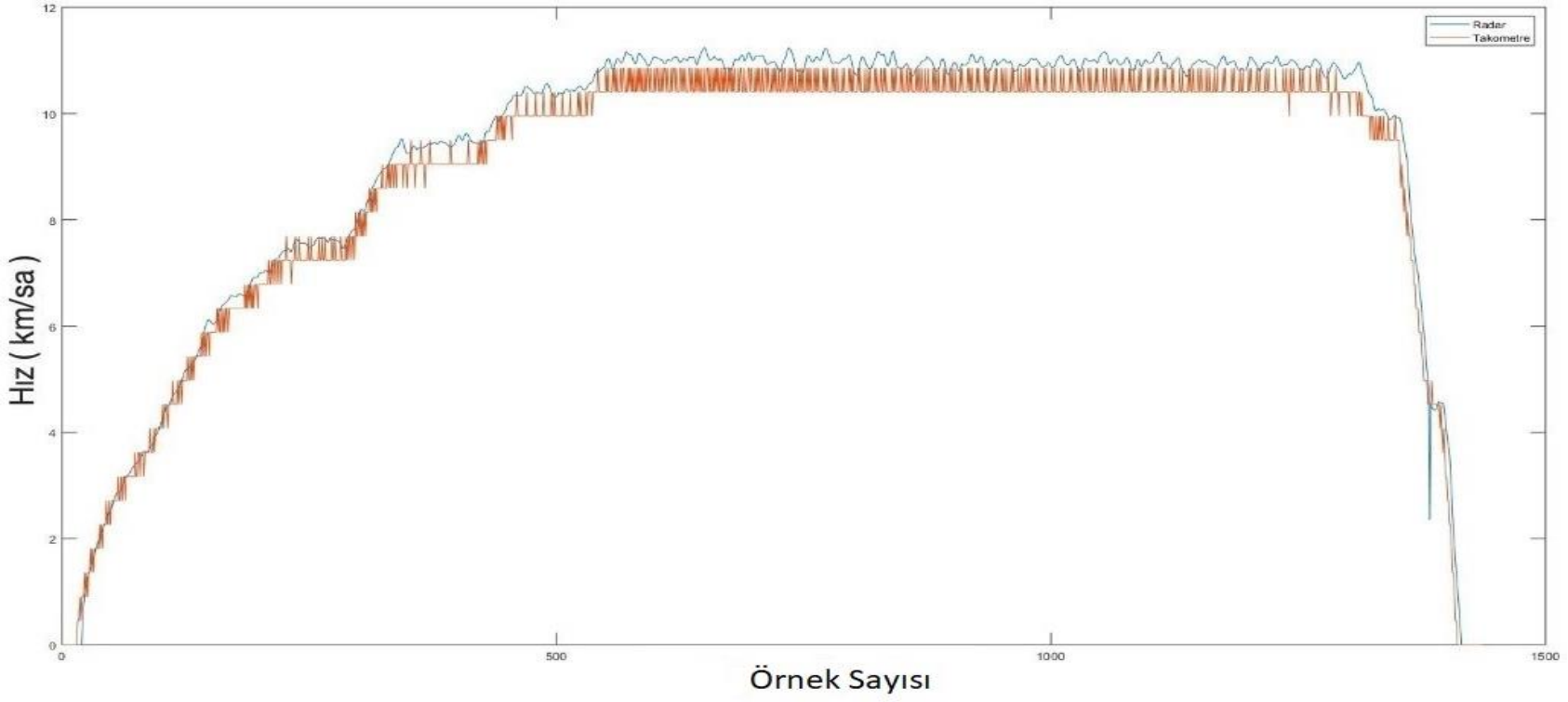
Şekil 5.9 Sürüş 1 takometre – doppler radar hız verileri.



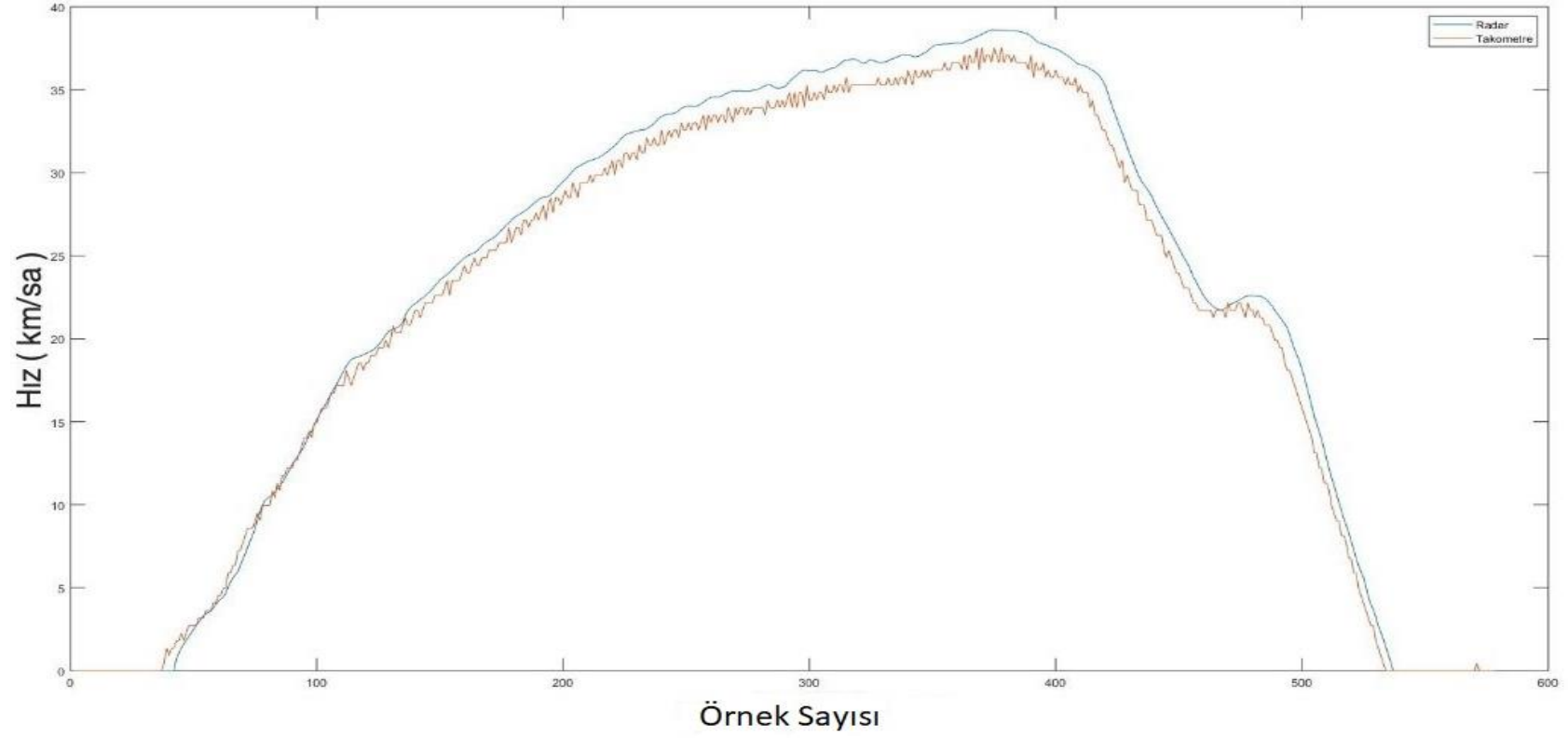
Şekil 5.10 Sürüş 2 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.11 Sürüş 3 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.12 Sürüş 4 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.13 Sürüş 5 takometre – doppler radar hız verileri.

5.3 Saha Verileri

Saha testlerinde daha önceki başlıkta anlatıldığı üzere 122 ve 125 numaralı balizler arasında testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde örnekleme periyodu 100 ms'dir.

5.3.1 Sürüş 1

Sürüş 1 verileri, 123 ve 124 numaralı balizler arasında ivme değişimi minimumda tutulmaya çalışılarak yapılan sürüşten alınmaktadır.

Şekil 5.14'de gösterilen grafikte, 195.928 m olduğu bilinen 123 ve 124 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.6384 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 197.8665 m olarak hesaplanmıştır. Burada ivme değişimi az olduğu için iki sensör verisinin de birbirlerine yakın değerler aldığı görülmüştür. Ancak takometredeki gürültünün fazla olduğu dikkat çekmektedir.

5.3.2 Sürüş 2

Sürüş 2 verileri, 122 ve 125 numaralı balizler arasında ivme değişimi minimumda tutulmaya çalışılarak yapılan sürüşten alınmaktadır.

Şekil 5.15'de gösterilen grafikte, 195.9270 m olduğu bilinen 122 ve 123 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.5988 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 197.0097 m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.16'da gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 122 ve 123 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 196.2193 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 197.5053 m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.17'de gösterilen grafikte, 195.928 m olduğu bilinen 123 ve 124 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 196.2193 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 199.3876 m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.18'de gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 124 ve 125 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.5196 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 197.4004 m olarak hesaplanmıştır.

Burada ivme değişimi az olduğu için iki sensör verisinin de birbirlerine yakın değerler aldığı görülmüştür. Alınan yol hesabında takometre verilerinin gerçek değere çok

yakın değerler aldığı grlmtr. Ancak takometredeki gürültünün fazla olduğu dikkat çekmektedir.

5.3.3 Sr 3

Sr 3 verileri, 122 ve 125 numaralı balizler arasında hız, 10 km/saat sabit tutulmaya çalışılarak yapılan srten alınmaktadır.

Şekil 5.19'te gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 122 ve 123 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.7968 m hesaplanmıken iken doppler radar verileri ile 198.9843 m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.20'te gösterilen grafikte, 195.928 m olduğu bilinen 123 ve 124 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.7836 m hesaplanmıken iken doppler radar verileri ile 197.6923 m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.21'te gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 124 ve 125 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.6912 m hesaplanmıken iken doppler radar verileri ile 197.3135 m olarak hesaplanmıştır.

Daha nceki srlerde alınan ölçümlere paralel olarak ivme değişimi az olduğu, sabit hızlı bir sr olduğu için iki sensör verisinin de birbirlerine yakın değerler aldığı grlmtr. Alınan yol hesabında takometre verilerinin gerçek değere çok yakın değerler aldığı grlmtr. Ancak takometredeki gürültünün fazla olduğu dikkat çekmektedir.

5.3.4 Sr 4

Sr 5 verileri, 124 ve 125 numaralı balizler arasında hız, 10 km/saat hızdan 5 km/saat hıza düşülerek yapılan srten alınmaktadır.

Şekil 5.22'da gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 124 ve 125 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.5988 m hesaplanmıken iken doppler radar verileri ile 199.6514 m olarak hesaplanmıştır.

5.3.5 Sr 5

Sr 5 verileri, 124 ve 125 numaralı balizler arasında hız, 5 km/saat hızdan 10 km/saat hıza çıkılarak yapılan srten alınmaktadır.

Şekil 5.23'de gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 124 ve 125 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.9684 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 198.8707 m olarak hesaplanmıştır.

Sürüş 4 ve 5'te ivme değişimde iki sensör verilerinin paralelliğinin ve alınan yol hesabındaki farkının açıldığı görülmüştür. Takometre verilerinin ivme değişimine göre gözle görülür bir değişim göstermediği ancak doppler radarda gerçek değerden uzaklaştığı görülmüştür.

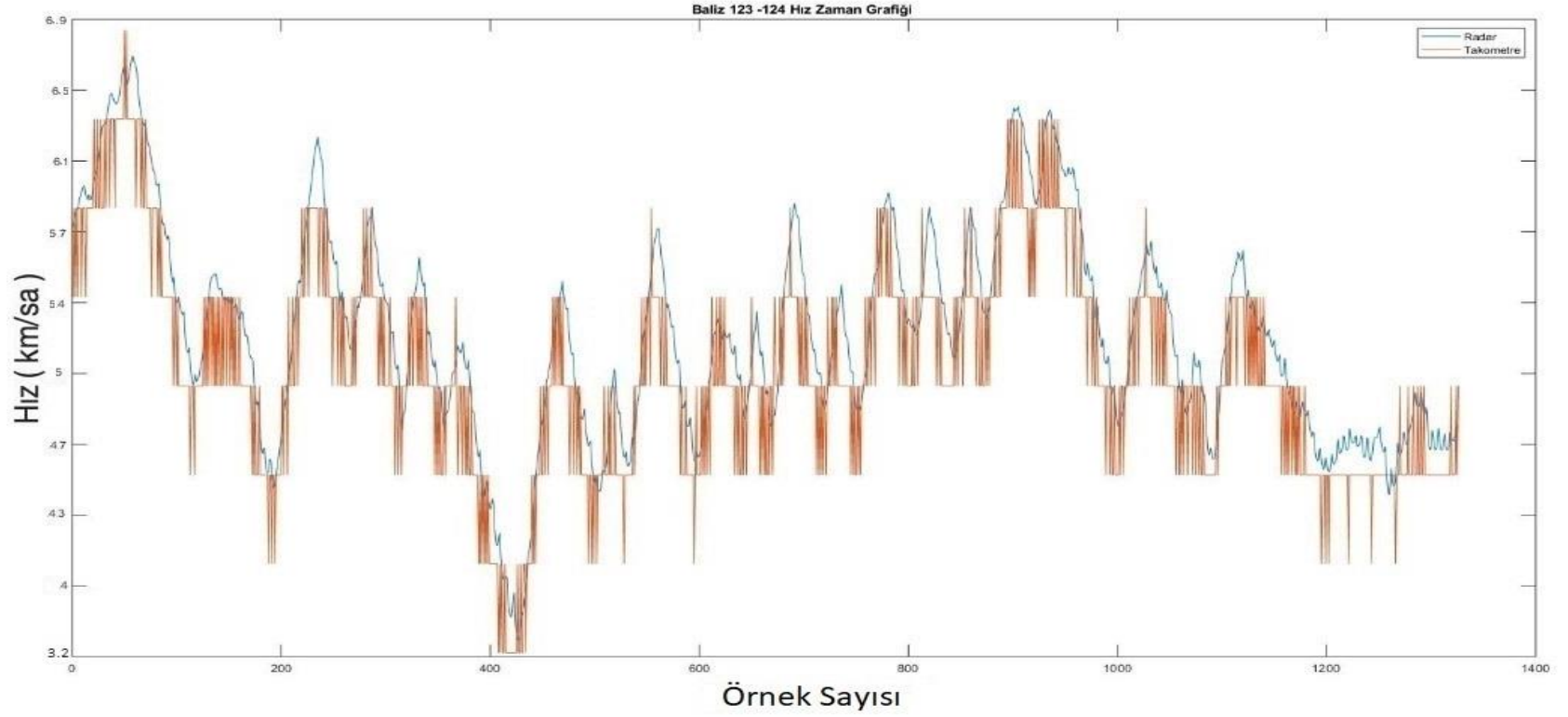
5.3.6 Sürüş 6

Sürüş 6 verileri, 122 ve 124 numaralı balizler arasında hız, ortalama 10 km/saat hızla yapılan sürüşten alınmaktadır.

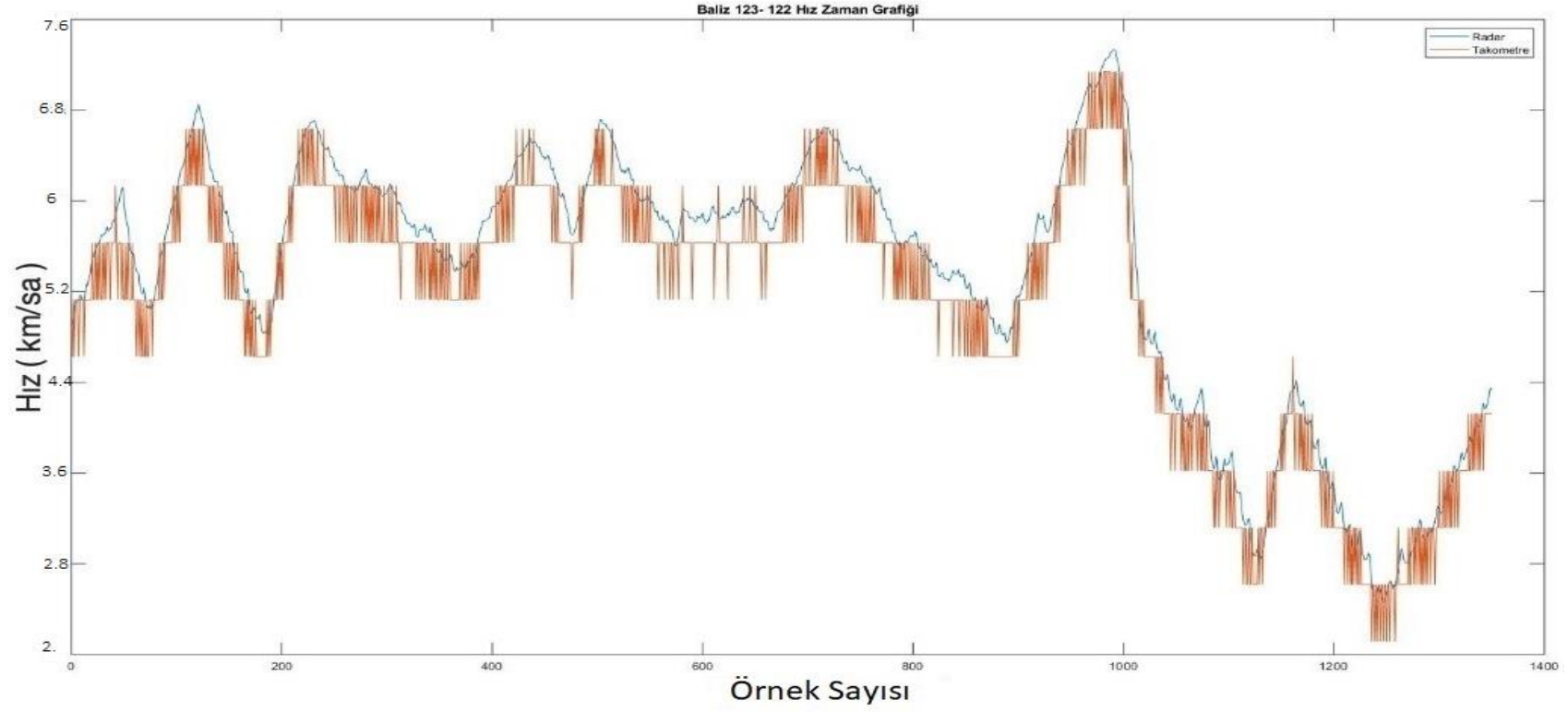
Şekil 5.24'de gösterilen grafikte, 195.927 m olduğu bilinen 122 ve 123 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.9156 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 198.8407 m olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.25'da gösterilen grafikte, 195.928 m olduğu bilinen 123 ve 124 numaralı balizler arası mesafe takometre verileri ile 195.7572 m hesaplanmışken iken doppler radar verileri ile 197.6080 m olarak hesaplanmıştır.

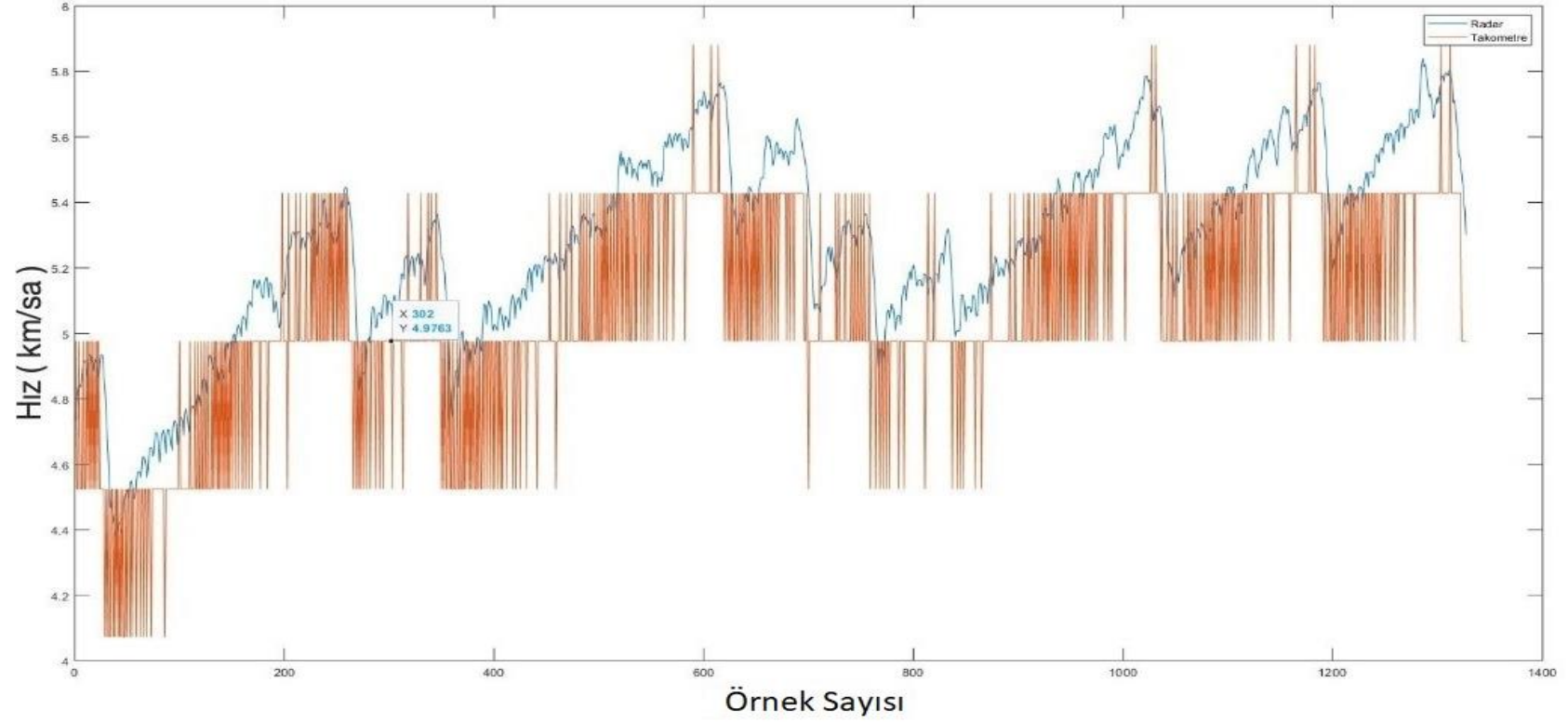
Sürüş 6'da, sabit hız sağlanmaya çalışıldığı için ölçümlerin paralel olması beklenen bir sonuçtur. Ancak içi sensör arasındaki farkın açılması da öncesinde sahip olunan hız sebebiyle oluşmaktadır. Yani doppler radarın hız ölçüm hatasının birikerek arttığı görülmüştür.



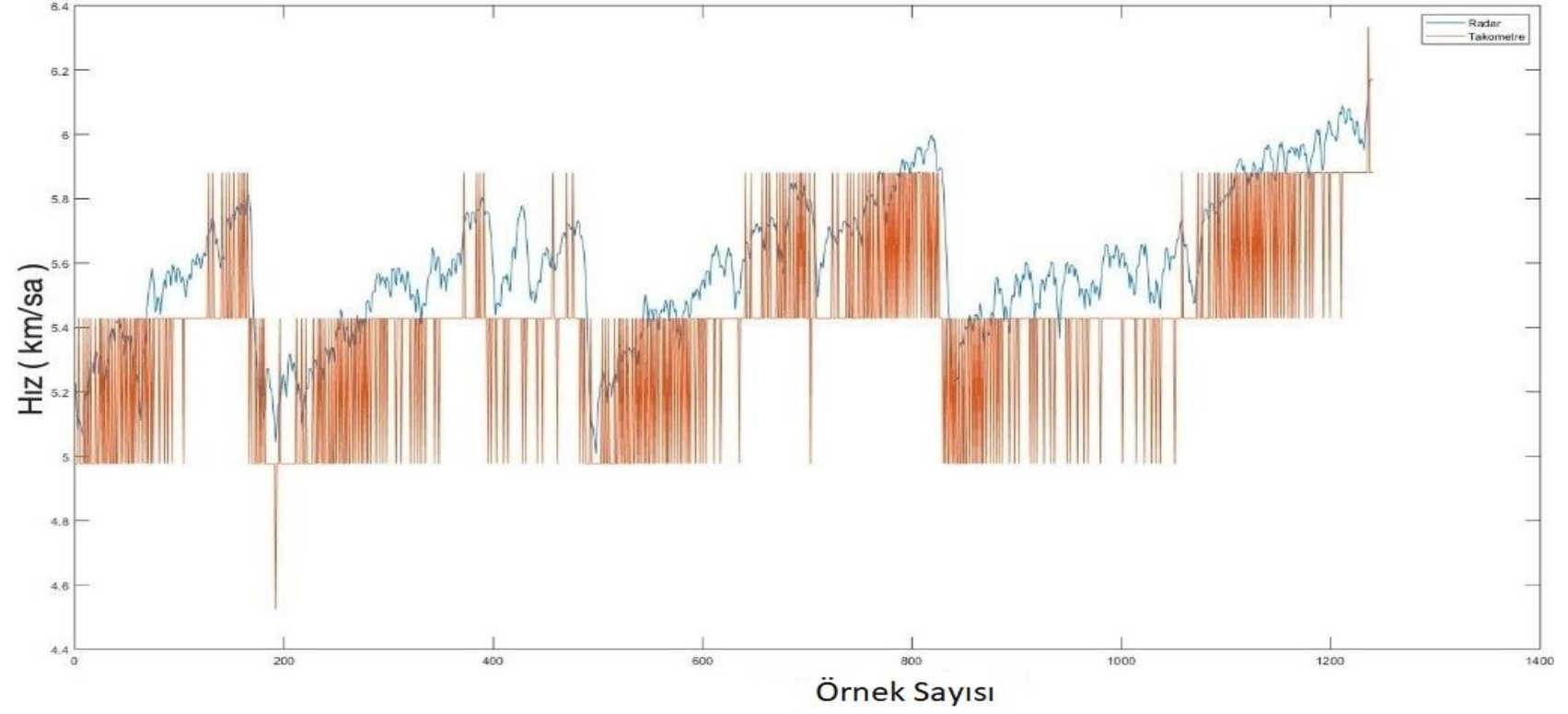
Şekil 5.14 Sürüş 1 baliz 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.



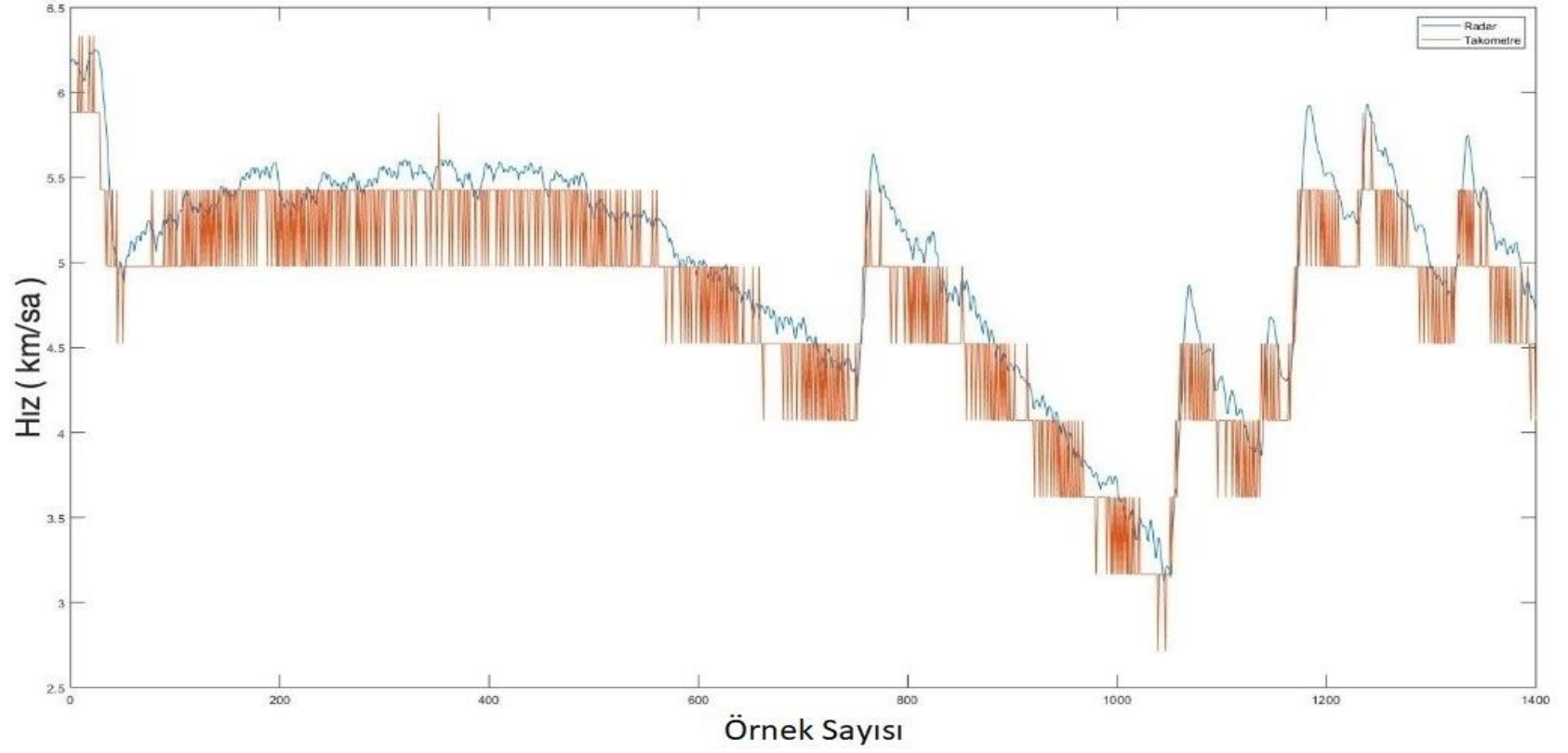
Şekil 5.15 Sürüş 1 baliz 123-122 takometre – doppler radar hız verileri.



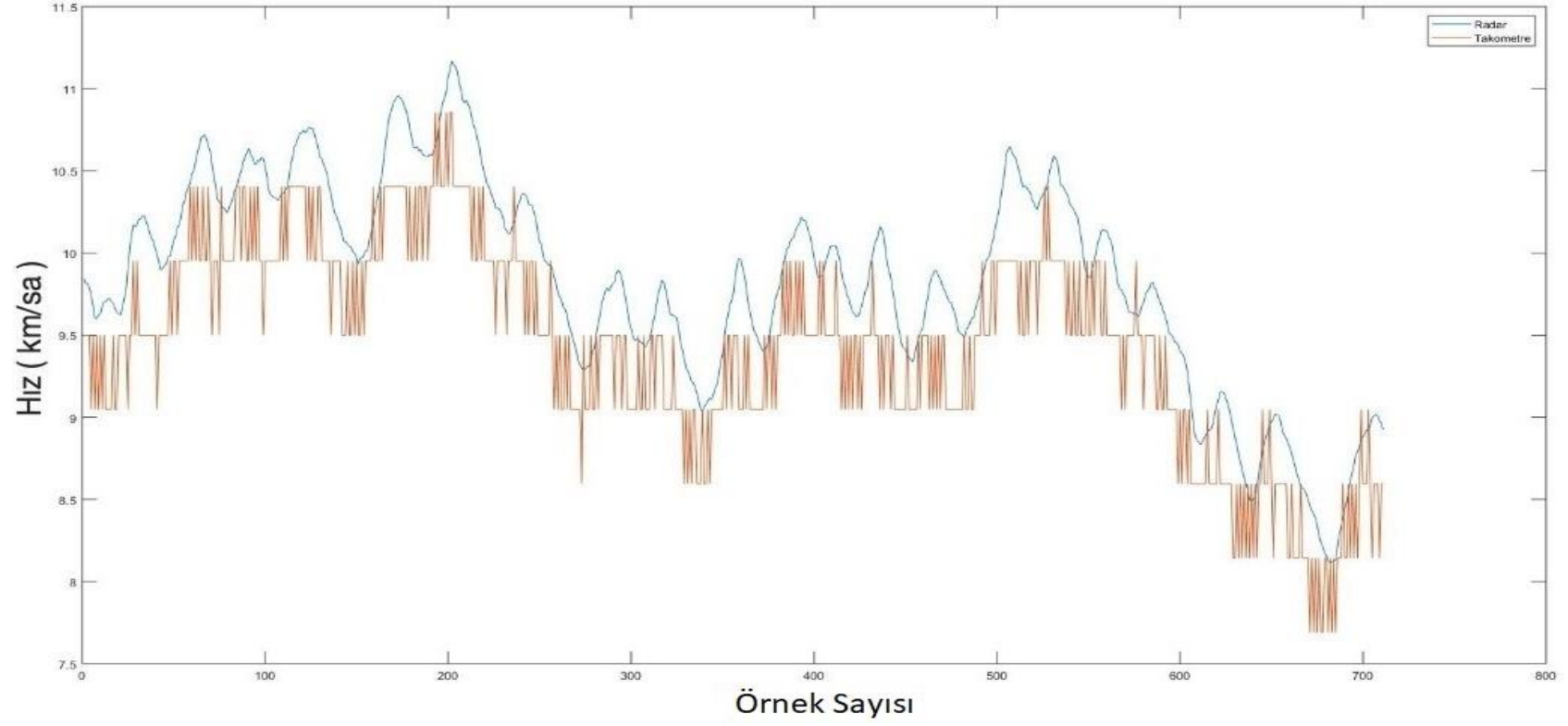
Şekil 5.16 Sürüş 2 baliz 122-123 takometre – doppler radar hız verileri.



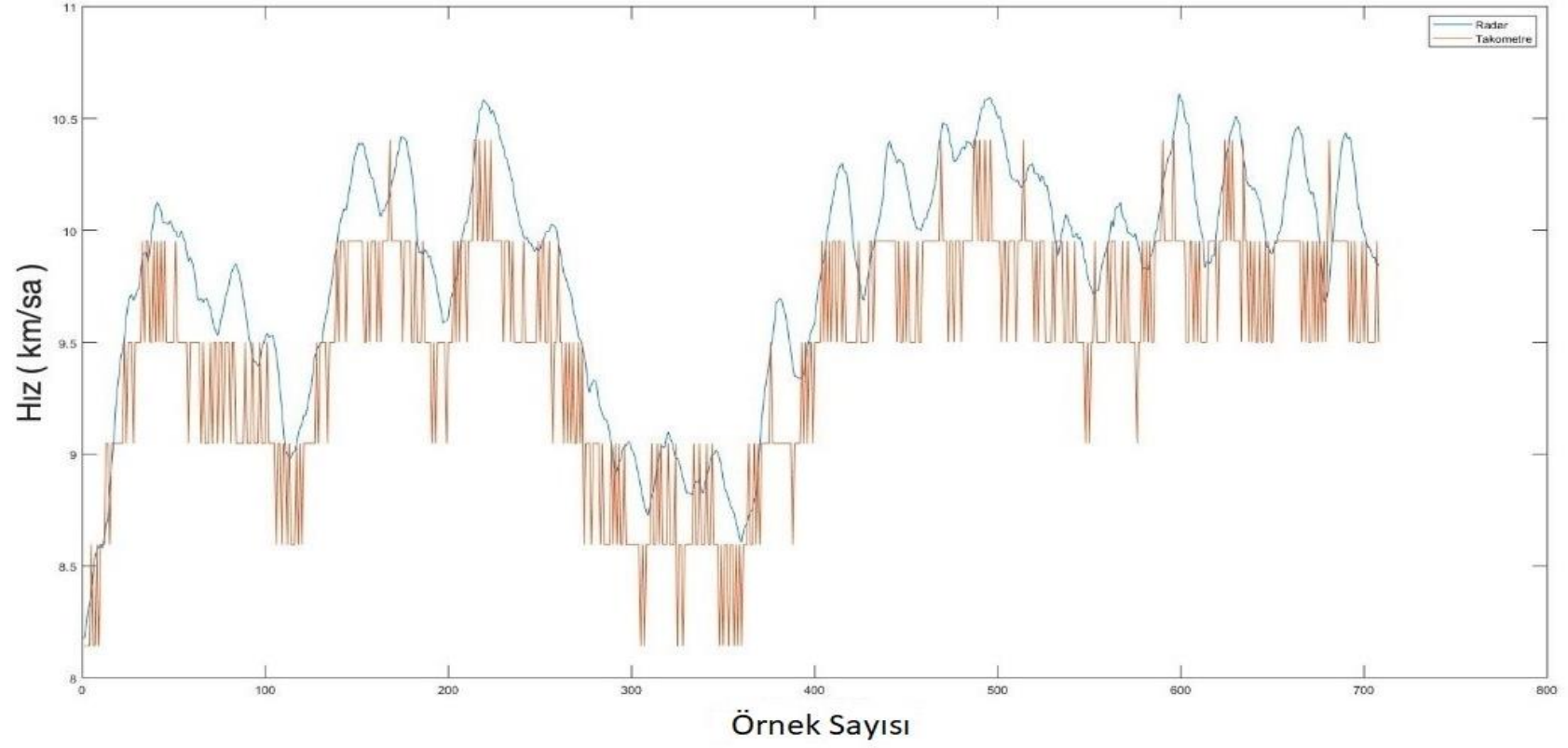
Şekil 5.17 Sürüş 2 baliz 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.



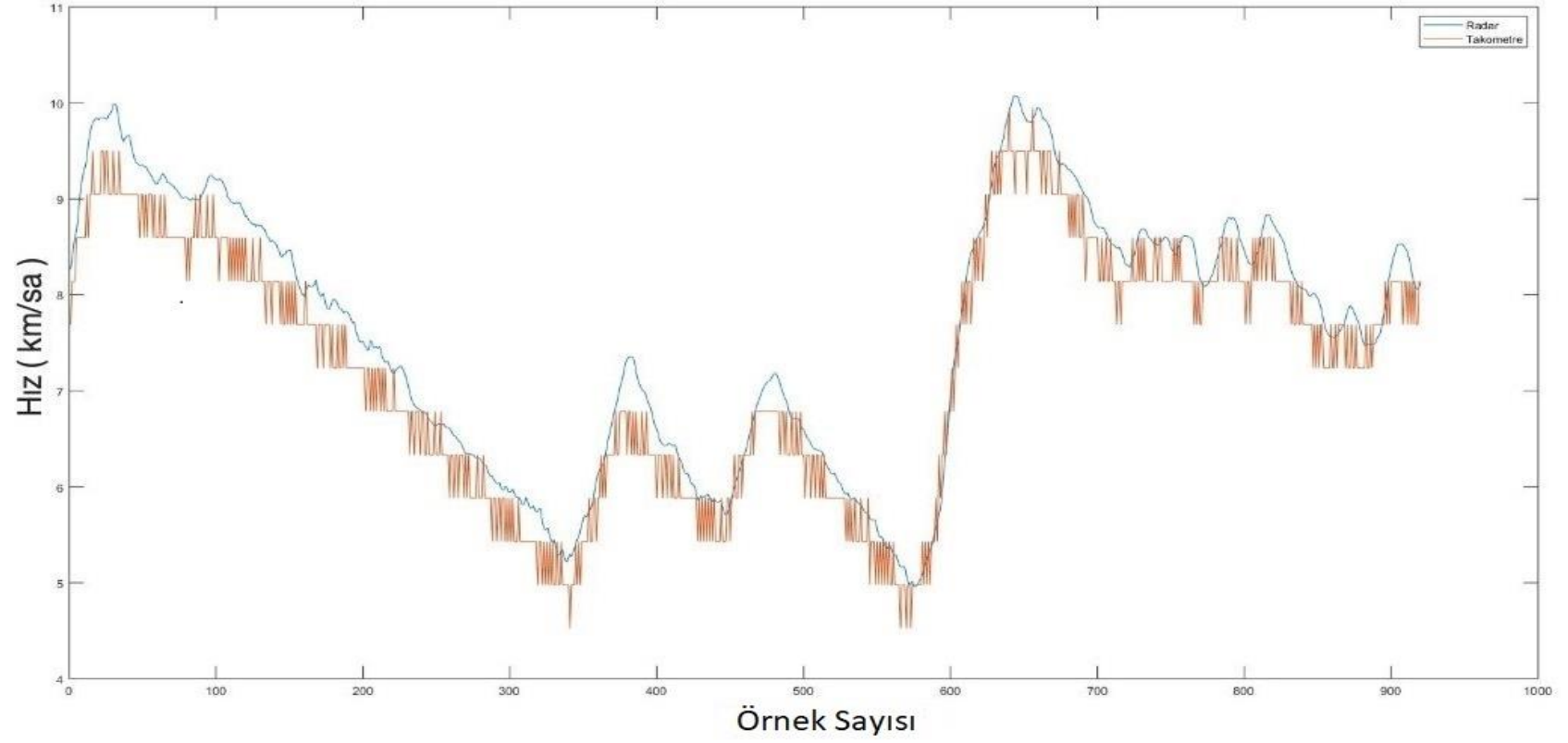
Şekil 5.18 Sürüş 2 baliz 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.



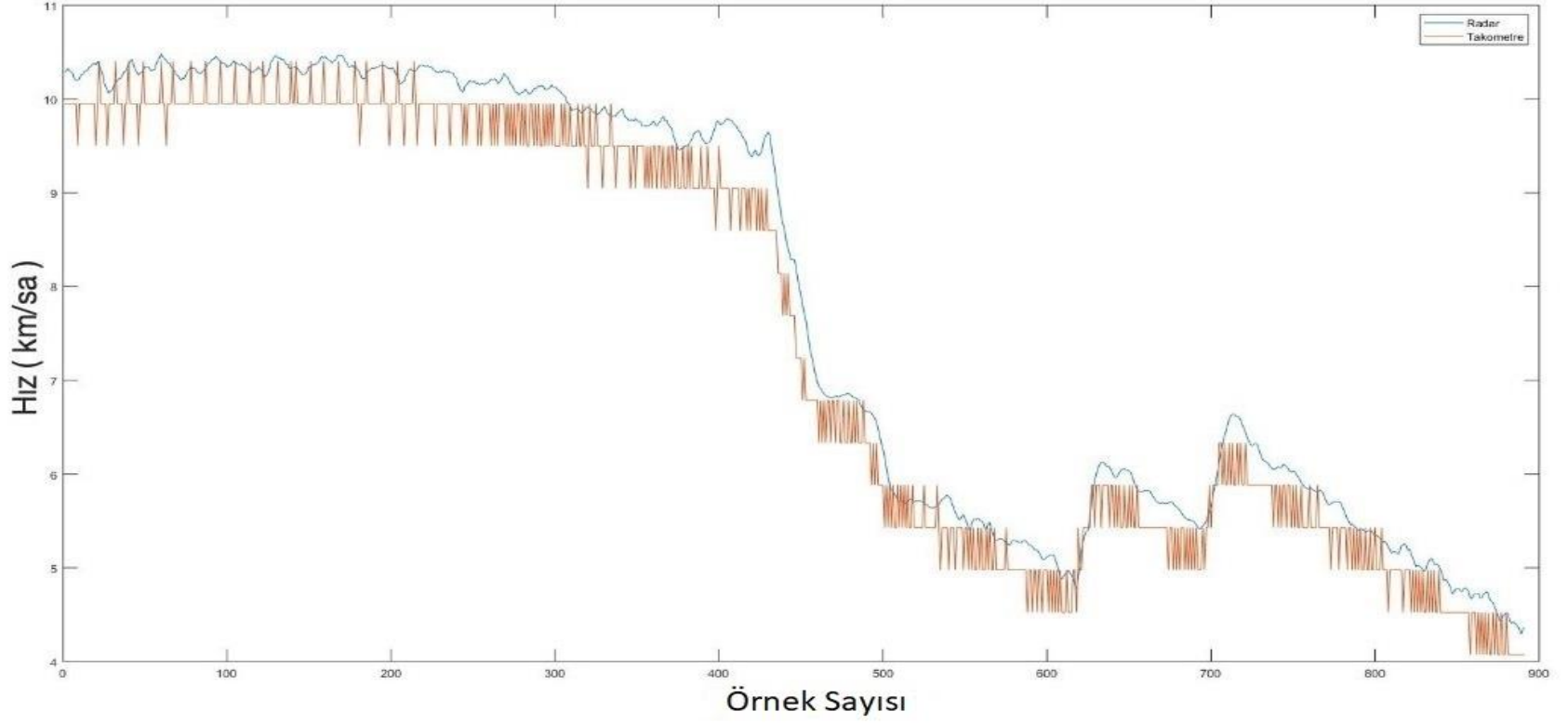
Şekil 5.19 Sürüş 3 baliz 122-123 takometre – doppler radar hız verileri.



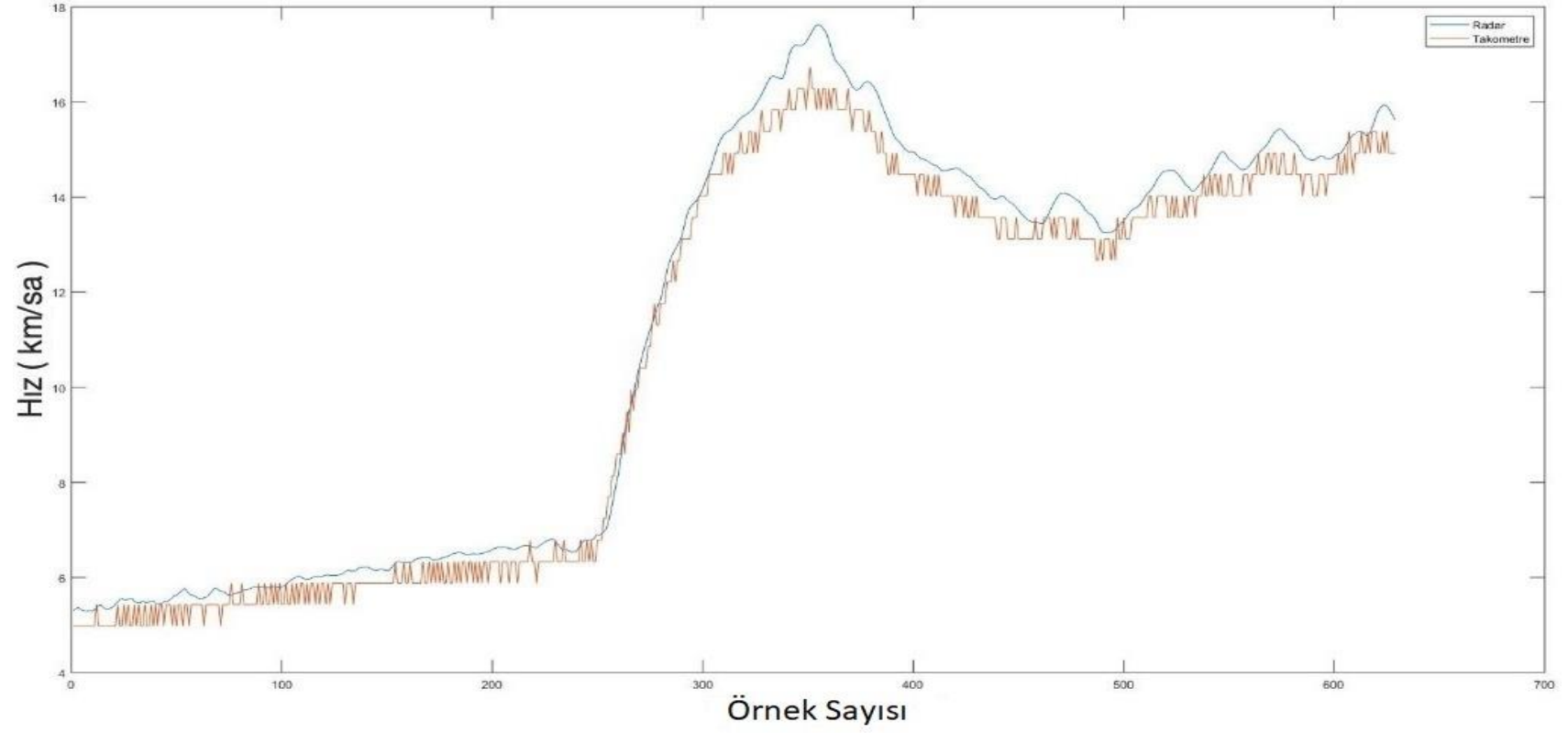
Şekil 5.20 Sürüş 3 balız 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.



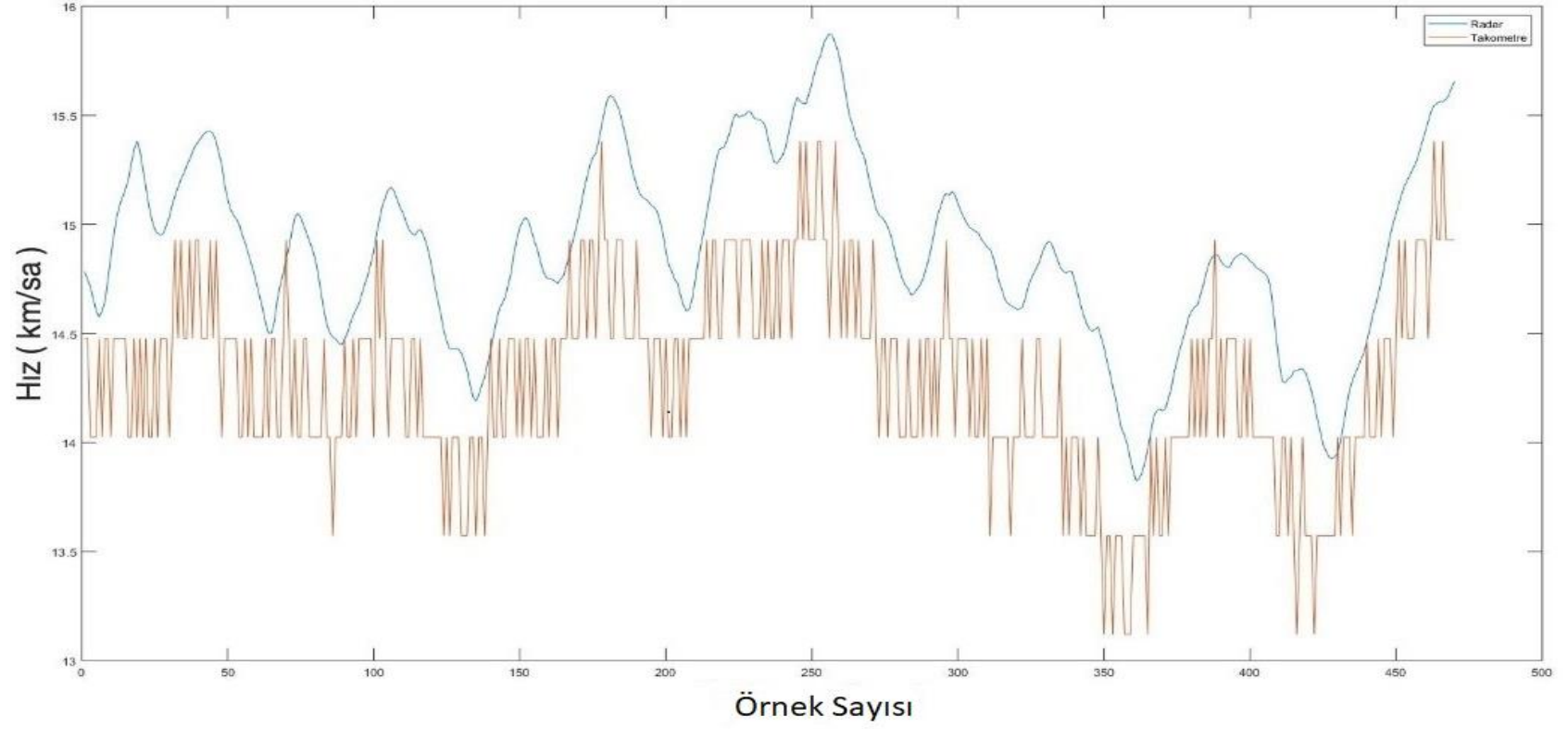
Şekil 5.21 Sürüş 3 balız 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.



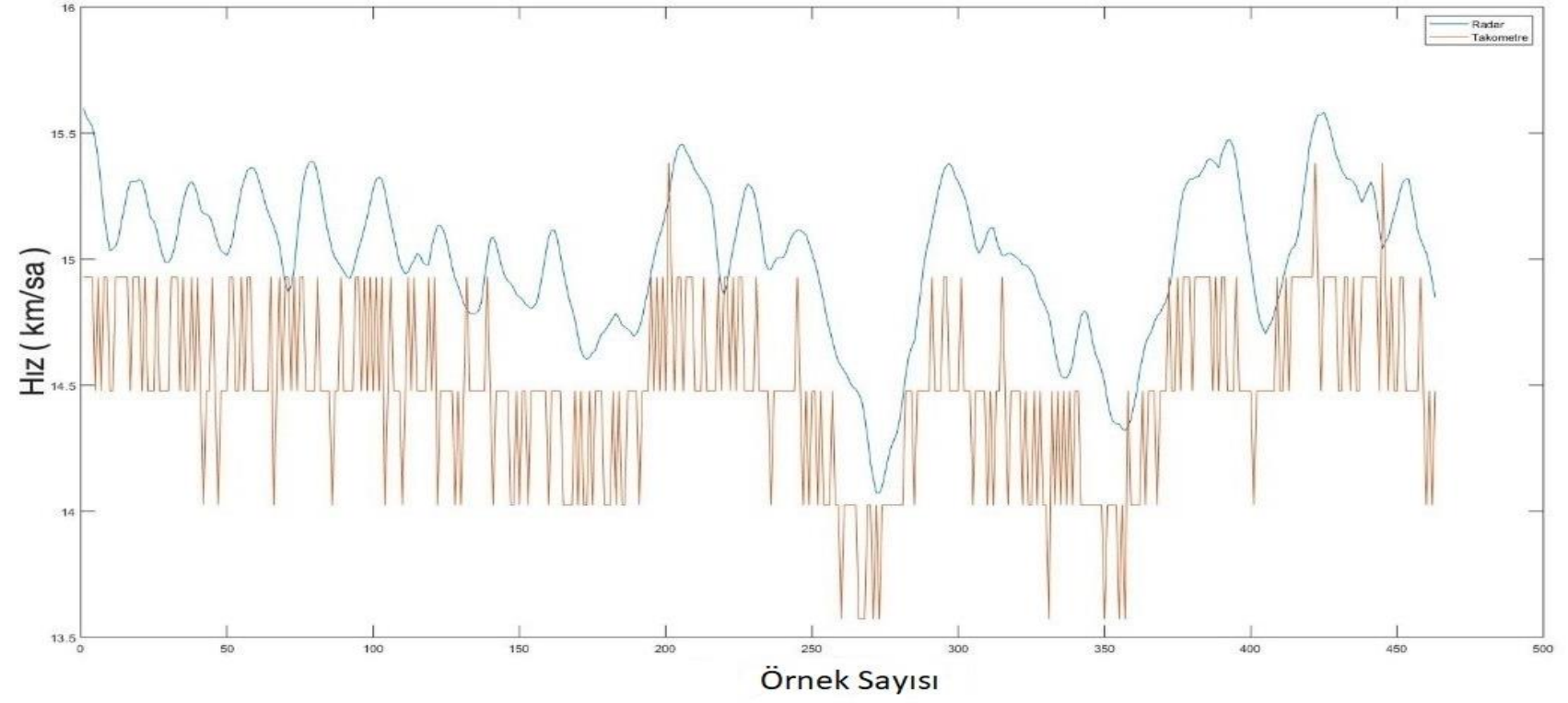
Şekil 5.22 Sürüş 4 balız 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.23 Sürüş 5 124-125 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.24 Sürüş 6 122-123 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 5.25 Sürüş 6 123-124 takometre – doppler radar hız verileri.

6. SENSÖR VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sensör verileri incelendiğinde, her iki sensörün de artı ve eksi yönlerinin bulunduğu görülmüştür. Takometre verilerinin, yer değişimi hesaplama konusunda doppler radara göre daha doğru bilgi sağladığı sonucu çıkarılmıştır. Değişken hızlı sürüşlerde, hız değişimlerine karşı takometrenin tepkisinin hızlı olduğu görülürken, doppler radarın hız değişimlerine karşı tepkisinin daha geç alındığı görülmüştür.

Doppler radarın düşük hızlarda ölçüm yapamadığı düşük hızlarda yapılan sürüşlerde de görülmüştür.

Dur kalk içeren senaryoların incelendiği römork testlerinde radarın durmayı algılaması için bekleme süresi gerektirdiği görülmüştür. Bu sebeple testlerde durduktan sonra yaklaşık yirmi saniye beklenerek kalkış yapılmıştır.

Hızlı yön değişiklikleri içeren sürüşlerde radarın yön değişikliğini algılamasının zaman aldığı görülmüştür. Bunun alınan yol hesabında hataya sebep olacağı görülmüştür.

Yapılan sürüşlerde, trenin kayma durumunda tekerin duracağı için takometrenin hız ölçümü yapamadığı ancak doppler radar ile ölçüm almaya devam edildiği görülmüştür.

6.1 Hareketli Ortalamalar Filtresi

Teknolojinin gelişmesiyle insanoğlunun ihtiyaçlarında da değişiklikler olmuştur. Bu ihtiyaçlar, barınma, güvenlik, eğlence gibi birçok alanda görülen değişikliklerle kendini göstermektedir. Otonomi ve insanın çevresini algılama isteği bu değişikliklerin başındadır. Bu ihtiyaçlar için de olmazsa olmaz cihazlar sensörler olmuştur. Bu bağlamda insanlar etraflarını sensörlerle örmektedir. Sensör teknolojisi, son yıllarda çok gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Sensör çeşitliliği de bu paralelde artmaktadır. Yine de ideal bir sensör tanımlanamamaktadır. Ancak sensör verileri işlenerek alınan verilerin ideale yaklaştırılması da mümkündür. Bu adımda devreye filtreler girmektedir. Filtreler sensörlerde gürültünün yok edilmesi için

uygulanan yöntemlerdendir. Bu yöntemler çok basit şekilde uygulanabildiği gibi karmaşık yapılara da sahip olabilirler.

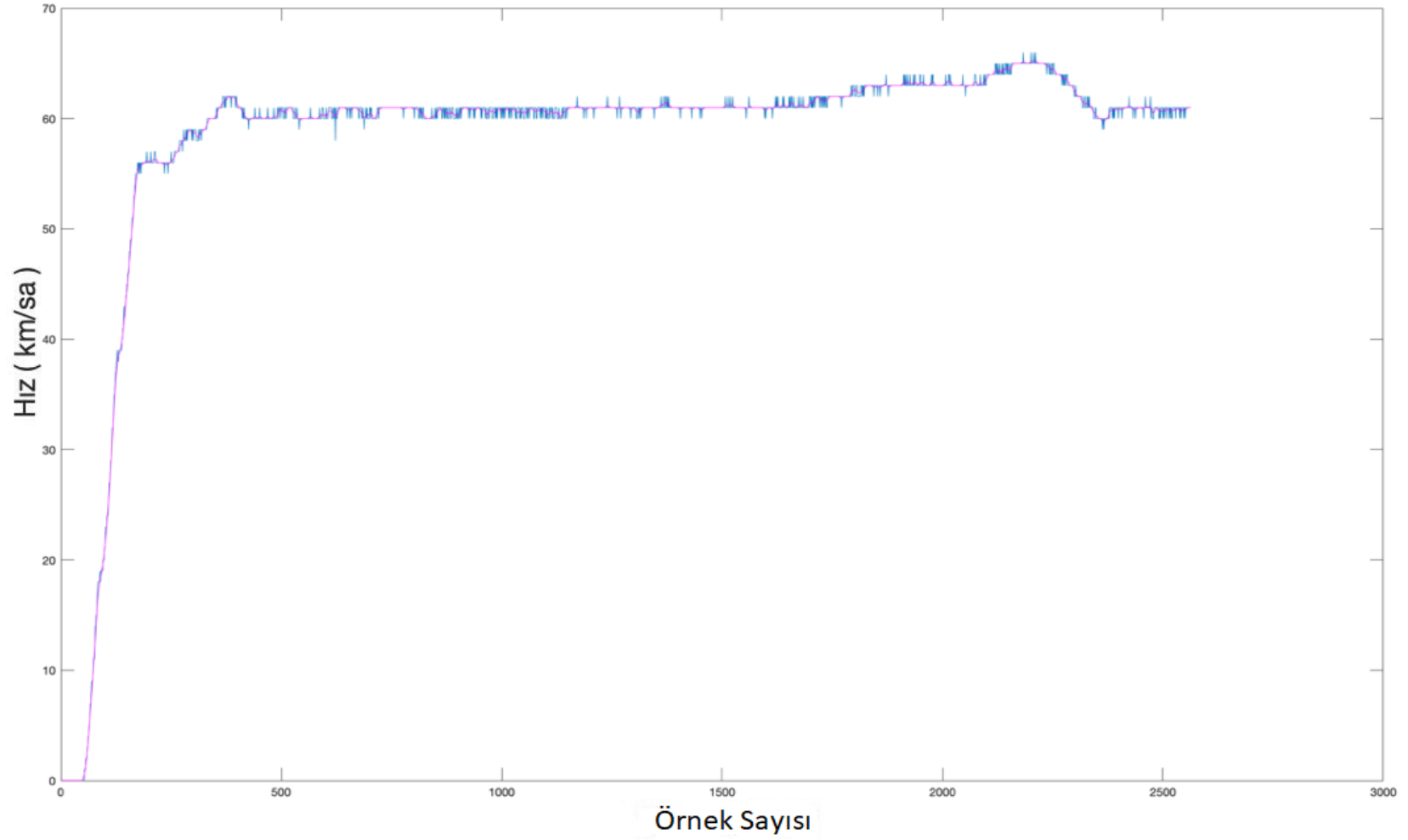
Sistemimizde radar ve takometreden alınan veriler incelendiğinde yüksek gürültü içerdiği görülmüştür. Bu gürültülerin düzleştirilmesi için Hareketli Ortalamalar filtresi kullanılması kararlaştırılmıştır.

Hareketli ortalama filtresi örneklemeli veri dizilerinin düzgünleştirilmesinde sıklıkla kullanılan basit bir alçak geçiren sonlu dürtü yanıt filtresidir. L adet örnekleminin ortalamasının alınarak tek bir çıktı oluşturulmasını sağlamaktadır. Hareketli Ortalama filtresi basit bir alçak geçiren filtre olup bilim insanları ve mühendisler tarafından sıklıkla ölçümlerdeki gürültülerin yok edilmesinde kullanılmaktadır.

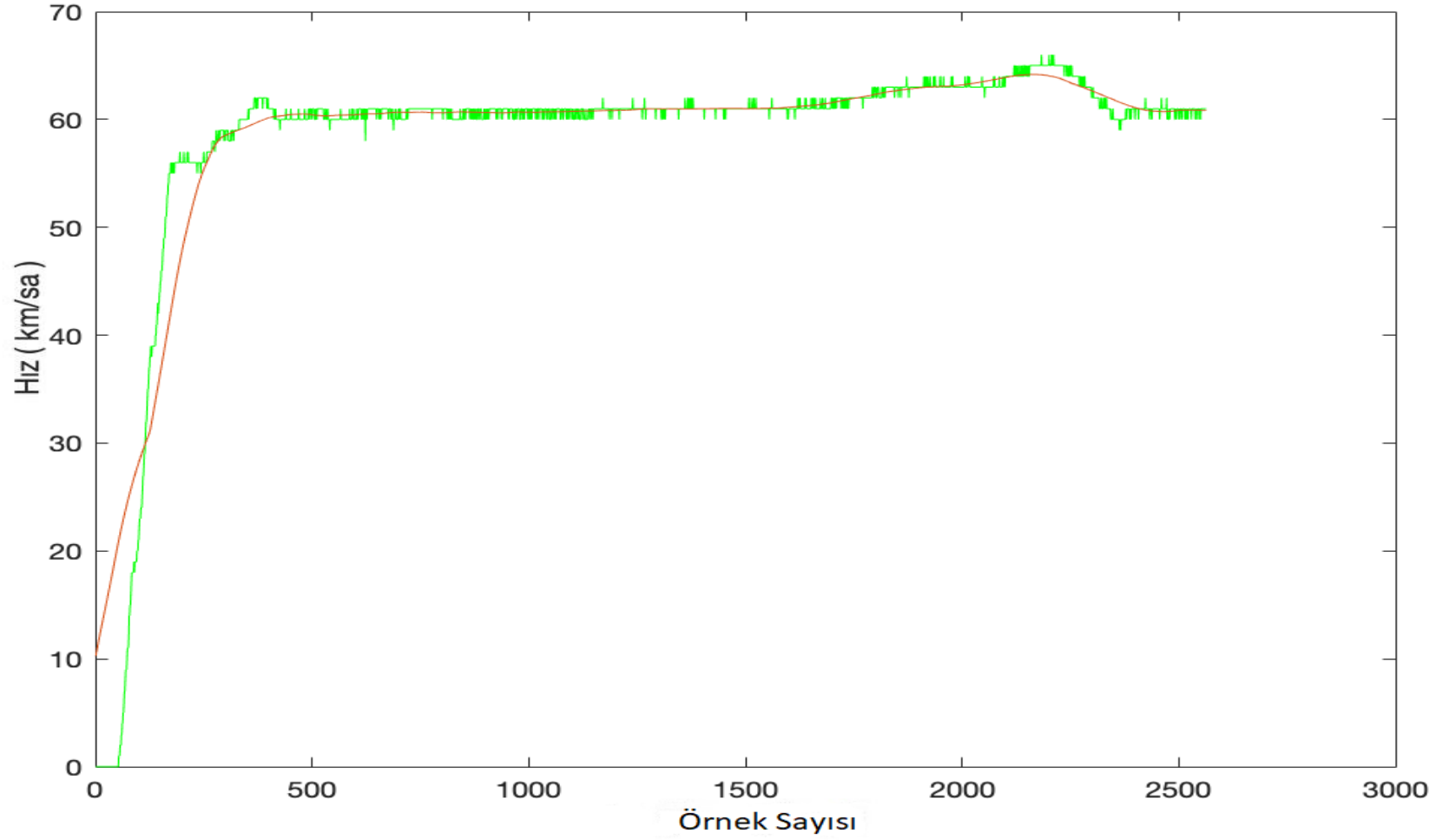
Hareketli ortalama filtresi geçmiş ölçümlerin belirli saydakilerinin ortalamasını almaktadır. Bu methodda her yeni veri alındığında veri kümesindeki en eski veri silinir ve kalan verilerin ortalaması alınır. Bu sebeple filtrenin adında hareketli ifadesi bulunmaktadır. n örnekli özyineli hareketli ortalamalar (6.1) denklemi ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + \frac{x_k - x_{k-n}}{n} \quad (6.1)$$

Hareketli ortalamalar filtresi ölçümlerdeki gürültünün yok edilmesinde kullanılmaktadır. Ne kadar veri kullanılırsa gürültünün yok edilme performansı bir o kadar da artmaktadır. Ancak çok veri kullanımı zaman gecikmesini de beraberinde getireceği için değişimlerin yakalanması zorlaşacaktır. Az veri kullanımı verideki değişimleri daha iyi yakalarken, gürültünün yok edilme performansı düşük olmaktadır. Bu sebeple veri sayısının belirlenmesi ölçümün karakteristiği ile uygun olmalıdır. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de hareketli ortalamalar filtresi uygulanmış hız grafikleri göstermektedir. Burada 100 veri kullanıldığında gürültünün azaldığı açıkça görülmektedir. Ancak 20 veri kullanılan filtrede hız azaldığında okunan değerlerin daha doğru olduğu ve hızdaki değişimlerin daha net fark edildiği görülmektedir.



Şekil 6.1 $n= 100$ hareketli ortalamalar filtresi.



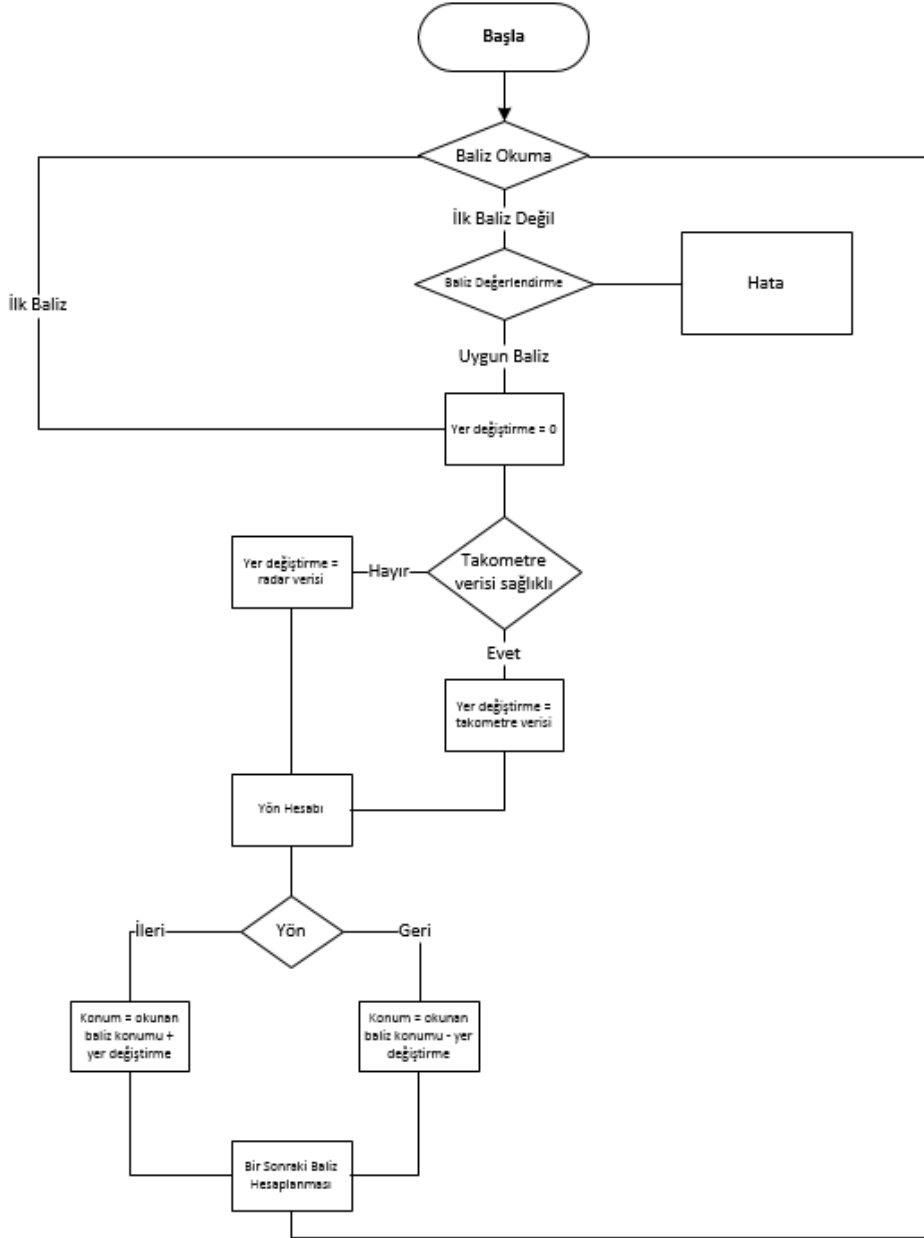
Şekil 6.2 $n=20$ hareketli ortalamalar filtresi.

6.2 Algılayıcı Birleştirme

Gürültü yok etmenin yanı sıra sensör verilerinin yüksek doğruluğa ulaştırılması üzerine çok çalışılan bir konudur. Sensör teknolojisi her ne kadar ilerlemiş olsa da her koşulda kararlı çalışan tek bir sensör bulunmamaktadır. Bunun yerine birçok sensörden alınan verilerin özel algoritmalarla işlenmesiyle oluşan sistemler kurulmaktadır. Bu sayede sensörlerin farklı koşullardaki eksikleri başka sensörler tarafından kapatılmış olmaktadır. Sensörlerden alınan verilen özel yöntemlerle birbirini tamamlamasına sensör füzyon diğer adıyla sensör birleştirme denir.

Sensör birleştirme sistemlerinin ortak paydası ve temel amacı, farklı sensörlerden ölçümler almaları ve bir veya daha istenen bilginin (gizli, yani dolaylı olarak gözlemlenen bir miktar olabilir) tahmin etmesi veya çıkarmasıdır.

Sensörlerin değerlendirilmesi sonucunda yer değiştirme hesaplanmasında takometre verilerinin daha doğru veri sağladığı görülmüştür. Bu sebeple alınan yolun hesaplanmasında takometre verilerinin ana kaynak olmasına karar verilmiştir. Bunun yanında takometrenin, raylı sistemlerde sık sık yaşanan kayma durumunda yanlış konum sonucu verebileceği de görülmüştür. Bu noktada da radar verilerinin ikincil algılama sistemi olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca doppler radarın, takometre arızaları durumunda da son hesaplanan konum üzerine kendi verileri ile hesaplama yapmaya devam etmesi ile sisteme mantıklı çıkarım yaparak hesaplama (dead reckoning) özelliği de katılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda oluşturulan algoritma kodu test alt yapısı yazılımına entegre edilmiştir. Oluşturulan algoritmanın akış diyagramı Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3 Odometre algoritması akış diyagramı.

6.3 Algoritma Testleri

6.3.1 Sürüş 1

Sürüş 1, hız değişimi minimumda tutulmaya çalışılarak yapılmıştır. Bu sürüşte tüm sensörler devrededir. Sürüş yönü 120 numaralı balizden 123 numaralı balize doğrudur. Algoritmada bulunan yön fonksiyonu sensörlerden alınan yön bilgilerine göre nihai yön bilgisi oluşturmakta ve bu yön bilgisi baliz üzerinden geçtikten sonra alınan mesafeye göre konumun azalarak ya da artarak ilerleyeceğini belirlemektedir. Burada

yön, +1 olarak belirlenmiş olup alınan mesafe baliz konumu ile toplanarak konum güncellemesi yapılmıştır. Yapılan testlerde örnekleme periyodu 100 ms'dir.

Sürüşte hız değişimi mümkün olduğunda düşük tutulmaya çalışılmıştır. Şekil 6.5'te görüldüğü üzere takometre verilerinin filtrelenmesi ile hız ölçümlerindeki gürültü azaltılmıştır. Ayrıca iki sensör verisinin de ölçümlerinin paralelliği dikkat çekmektedir. Zira ivme değişimi minimumdur. Şekil 6.4'te görüldüğü üzere ilk baliz okuma dahil her bir baliz okumasında alınan yol hesabı sıfırlanmaktadır. Bu sayede hatanın birikerek artması engellenmiş olmaktadır. Bu sürüşte balizler hata toleransı içinde yerleştirilmiştir.

6.3.2 Sürüş 2

Sürüş 2, hız değişimi içermektedir. Bu sürüşte tüm sensörler devrededir. Sürüş yönü 123 numaralı balizden 120 numaralı balize doğrudur. Algoritmada bulunan yön fonksiyonu ile yön -1 olarak belirlenmiş olup alınan mesafe baliz konumundan çıkarılarak konum güncellemesi yapılmıştır. Yapılan testlerde örnekleme periyodu 100 ms'dir.

Sürüşte ivme değişiminin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 6.7'de görüldüğü üzere takometre verilerinin filtrelenmesi ile hız ölçümlerindeki gürültü azaltılmıştır. Ayrıca iki sensör verisinin de ölçümlerinin ivme değişimine göre birbirlerinin önüne geçmesi dikkat çekmektedir. Her bir ivme değişimi sensörlerin farklarını değiştirmektedir. Şekil 6.6'da görüldüğü üzere ilk baliz okuma dahil her bir baliz okumasında alınan yol hesabı sıfırlanmaktadır. Bu sayede hatanın birikerek artması engellenmiş olmaktadır. Bu sürüşte balizler hata toleransı içinde yerleştirilmiştir. Bu sebeple bir sonraki beklenen balizin numarasının daha gerideki bir konumda bekleyeceği hesaplanmıştır.

Algoritmada birincil algılayıcı sistem olarak kullanılan takometre ile alınan ölçümler sonucu aşağıda verilmiştir. **Çizelge 6.1**'de görüldüğü üzere 3. satırda son kullanılan konum verisi 4. satırda bilinen konum değerine göre güncellenmiştir. Burada sapmanın yaklaşık olarak yarım metre olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1 : Baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.

Baliz Algılama Biti	Hesaplanan Konum Değeri
0	17416,38

0	17415,83
0	17415,28
1	17414,07
0	17413,53
0	17412,98

Sürüşün devamı incelendiğinde **Çizelge 6.2**'de görüldüğü üzere sapma değerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 6.2 : Baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.

Baliz Algılama Biti	Hesaplanan Konum Değeri
0	17219,53
0	17218,95
0	17218,37
1	17218,15
0	17217,56
0	17216,98

Çizelge 6.3 incelendiğinde konum hesabının beklenenden ileride hesaplandığı görülmüştür. Okunan balizle konum değeri bilinen değerine atanıp hesap yapmaya devam edilmiştir.

Çizelge 6.3 : Baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.

Baliz Algılama Biti	Hesaplanan Konum Değeri
0	17023,86
0	17023,35
0	17022,85
1	17022,22
0	17021,72
0	17021,22

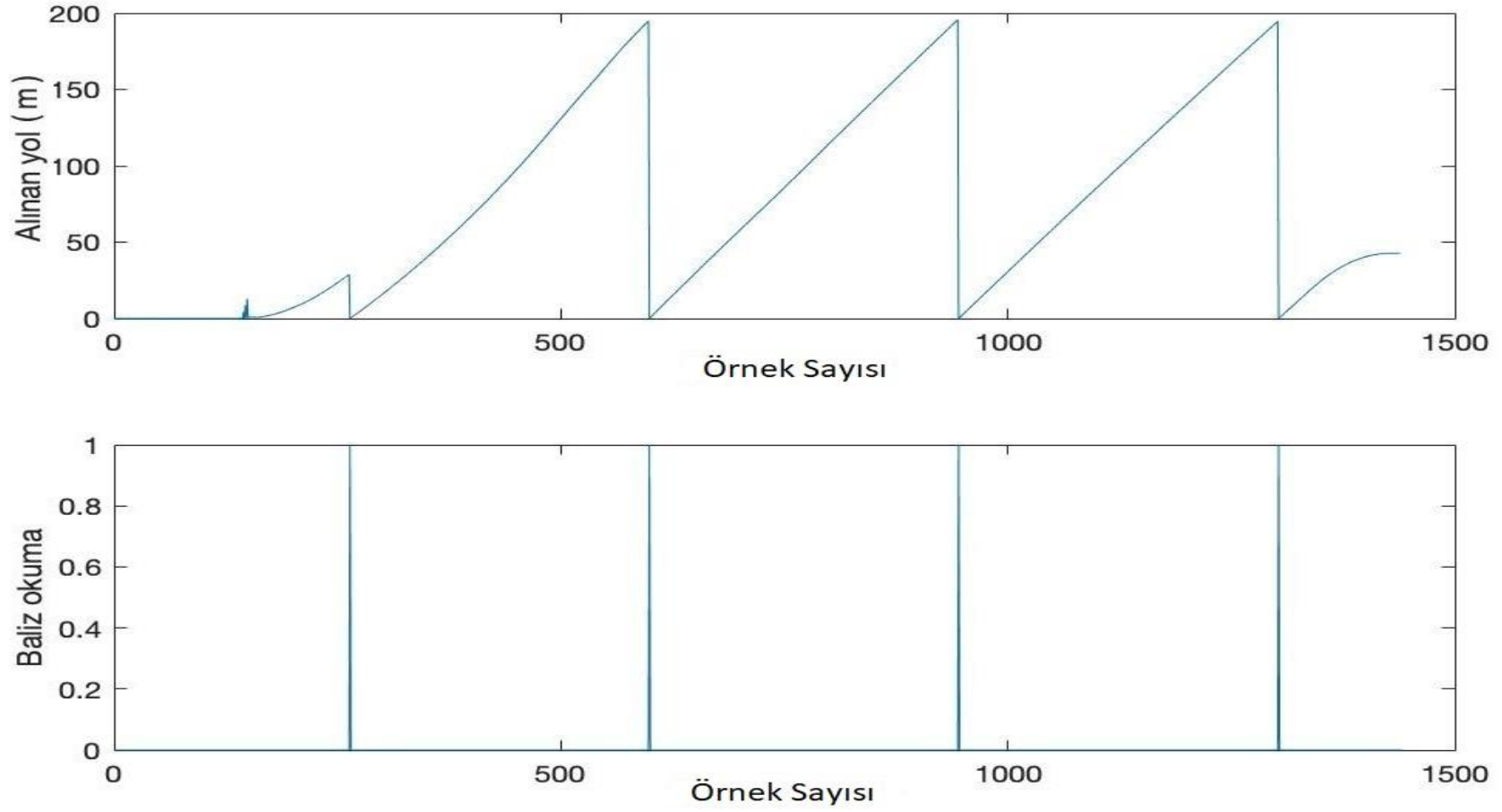
6.3.3 Sürüş 3

Sürüş 3'te, hız değişimi minimumdur. İlk baliz okunduktan sonra takometreler Şekil 6.8'de hız grafiklerinde gösterildiği şekilde çıkarılmıştır. Bu sayede ikincil algılama sisteminin devreye alınması test edilmiştir. Sürüş yönü 120 numaralı balizden 123 numaralı balize doğrudur. Algoritmada bulunan yön fonksiyonu ile yön +1 olarak belirlenmiş olup alınan mesafe baliz konumu ile toplanarak konum güncellemesi yapılmıştır. Şekil 6.9'da gösterildiği üzere ilk baliz sonrası konum yön fonksiyonu doğrultusunda hesaplanmıştır. Yapılan testlerde örnekleme periyodu 100 ms'dir.

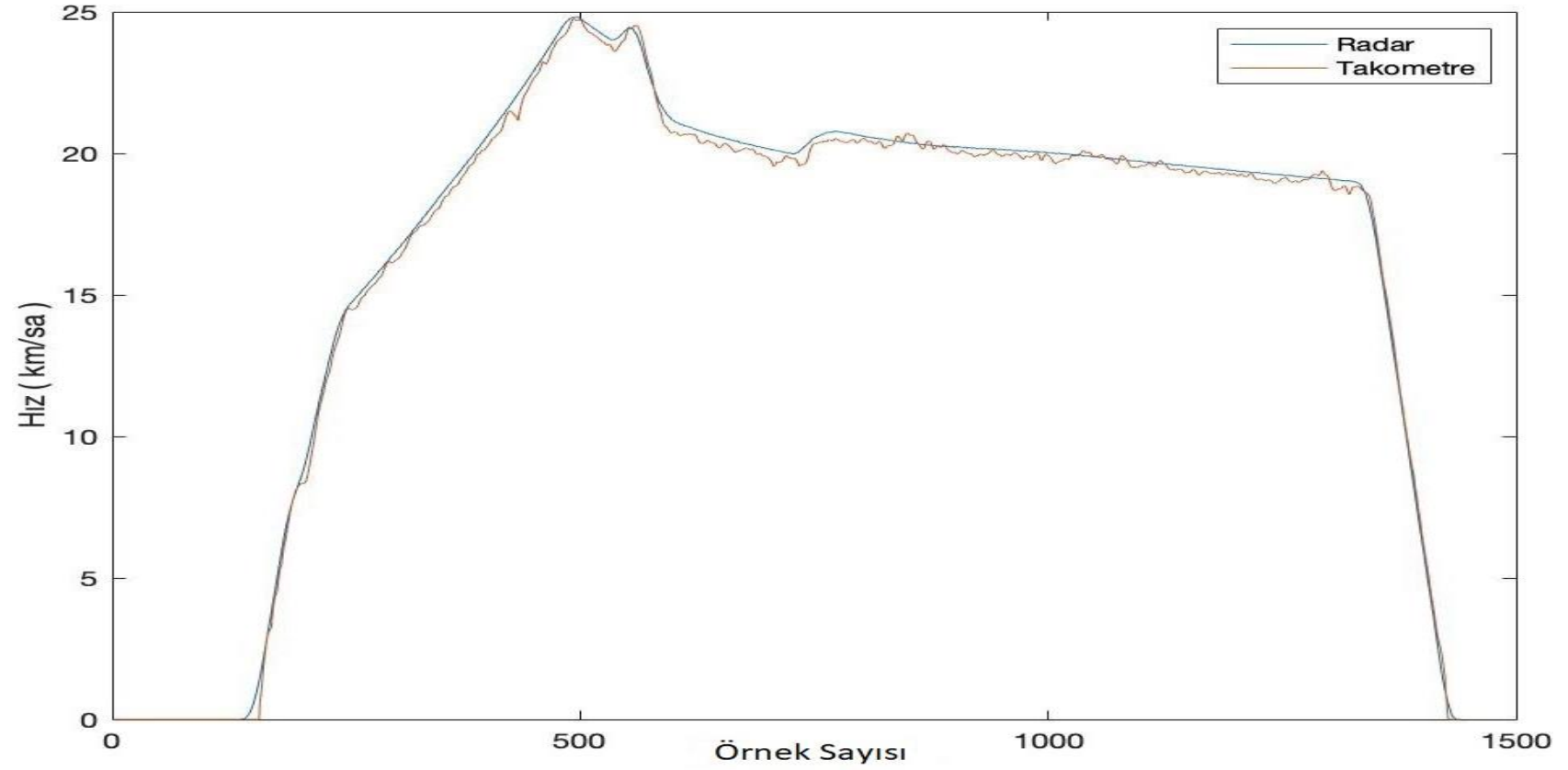
Çizelge 6.4 : Takometre devre dışıyken baliz okumaya bağlı konum güncelleme verisi.

Baliz Algılama Biti	Hesaplanan Konum Değeri
0	17214,54987
0	17215,08632
0	17215,62189
1	17218,145
0	17218,68057
0	17219,21626

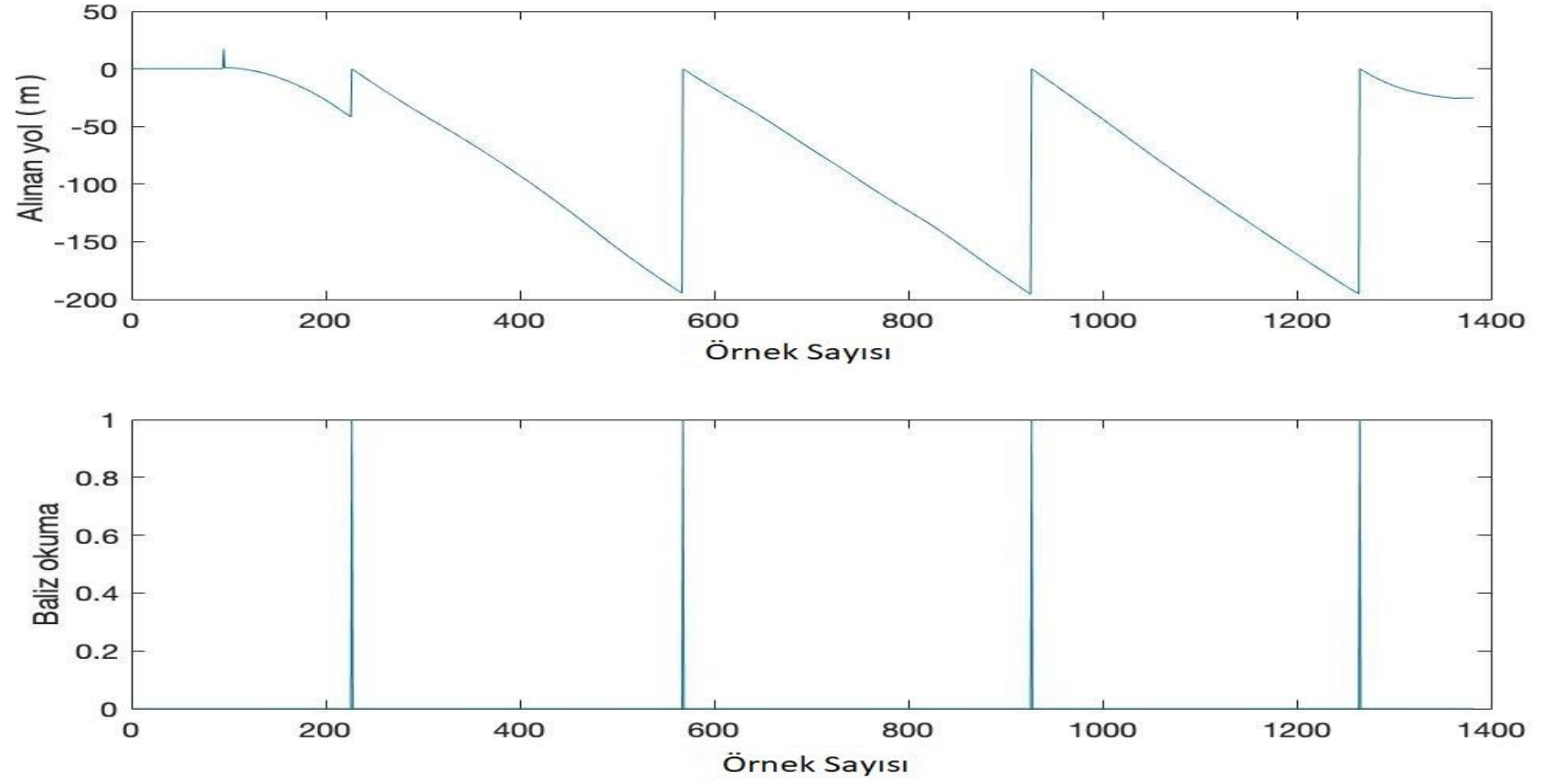
Çizelge 6.4 'te gösterilen konum güncelleme verisi takometrelerin devre dışı olmaları durumunda radarın birincil algılayıcı olarak devam ettiği sürüşten alınmıştır. Burada hesaplanan değerdeki sapmanın daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum arıza durumu olarak değerlendirildiği için radardan alına verideki sapma kabul edilebilir olarak sayılmaktadır.



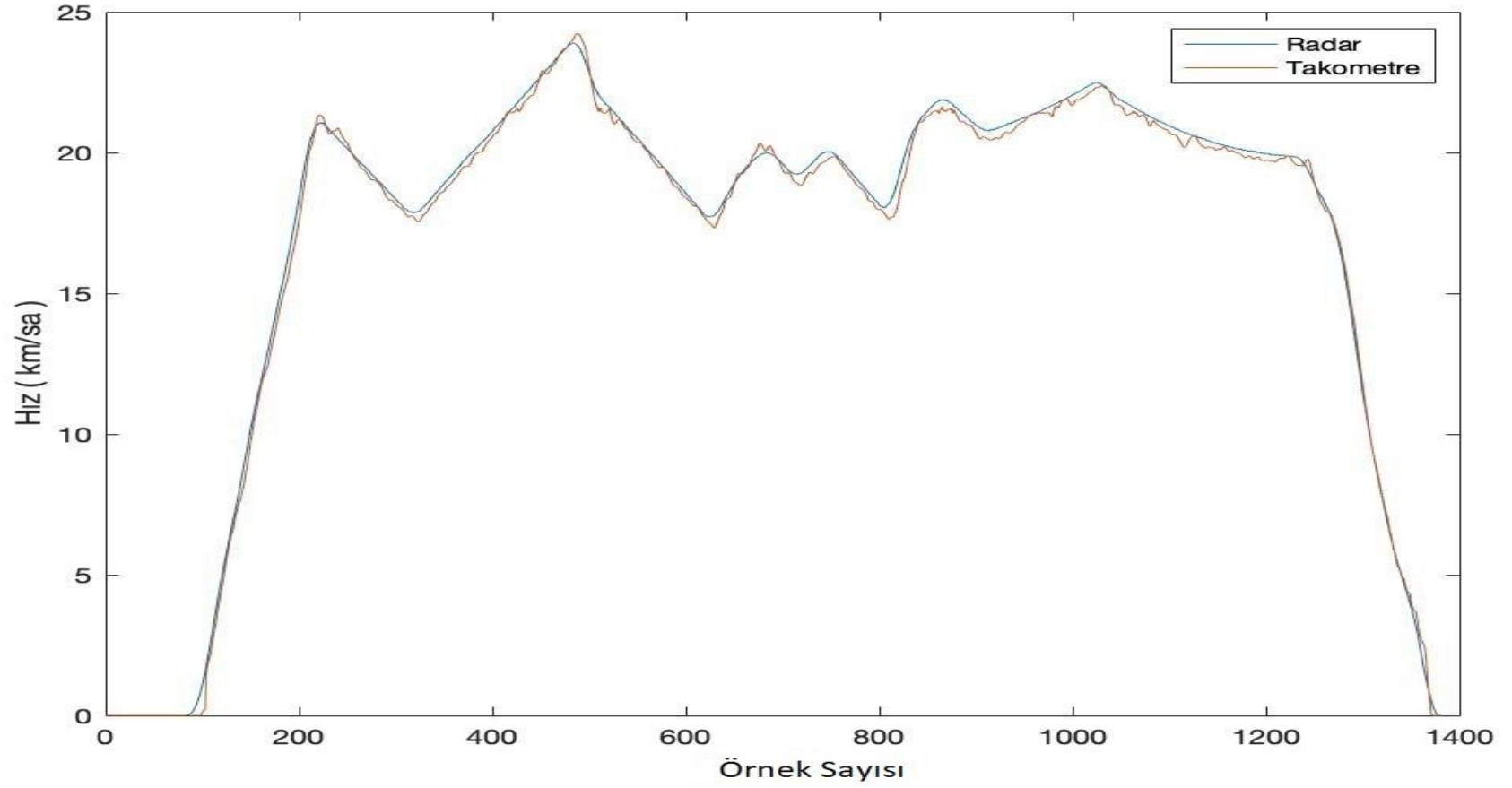
Şekil 6.4 Algoritmali sürüş 1 baliz 123-120 yer değiştirme verileri.



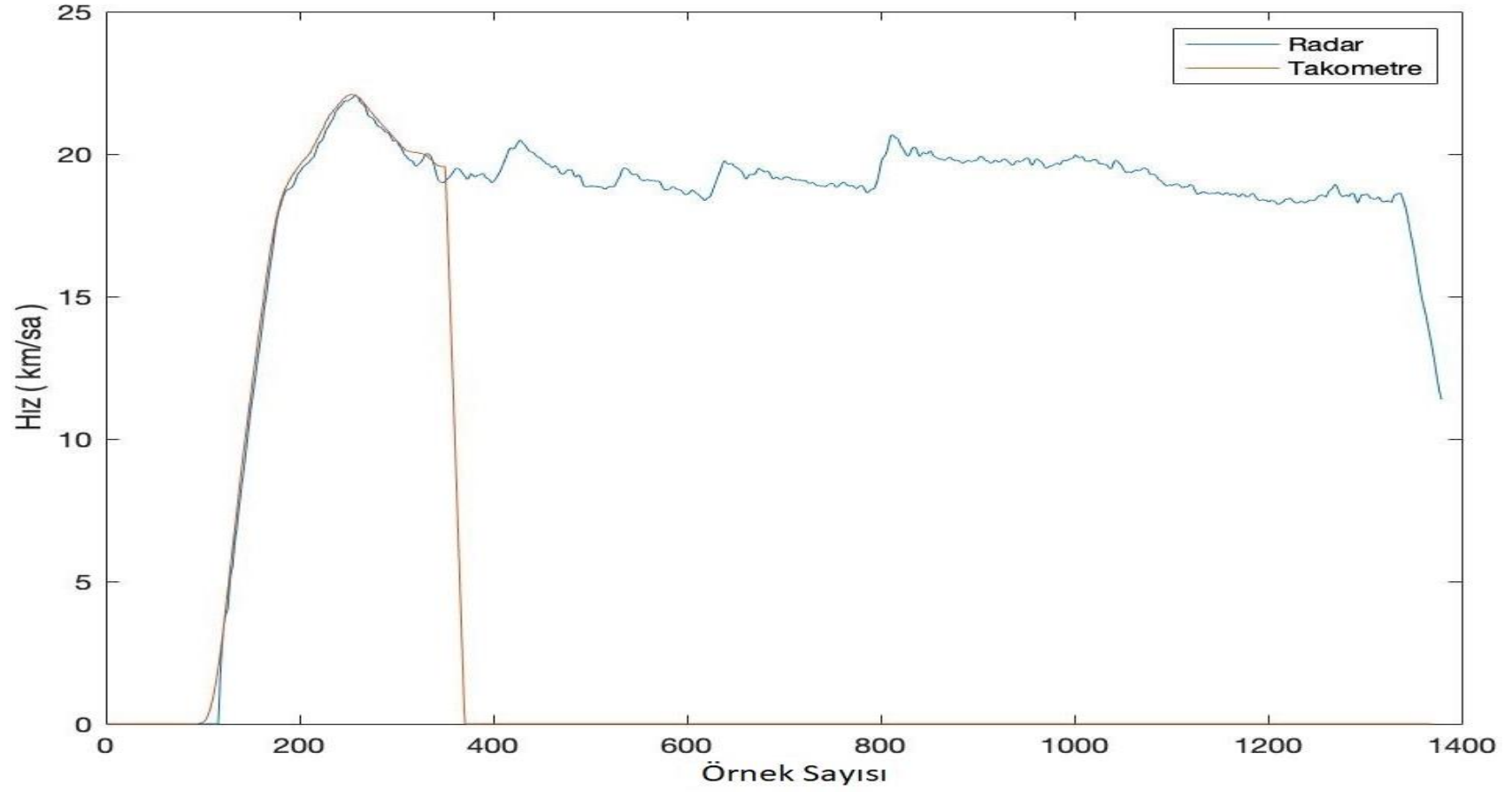
Şekil 6.5 Algoritmali sürüş 1 baliz 123-120 takometre – doppler radar hız verileri.



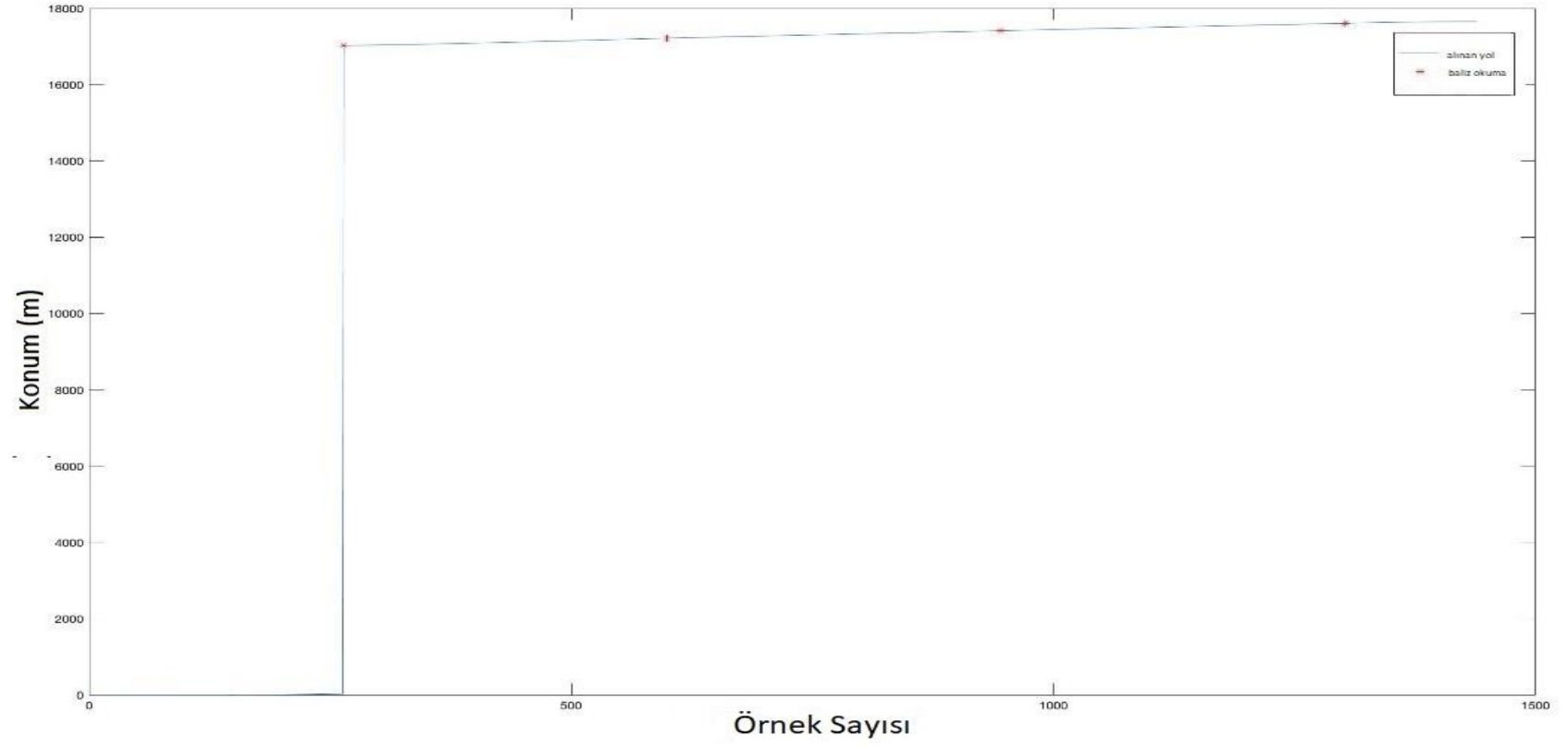
Şekil 6.6 Algoritmali sürüş 2 baliz 120-123 yer değiştirme verileri.



Şekil 6.7 Algoritmali sürüş 2 baliz 120-123 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 6.8 Algoritmali sürüş 3 baliz 123-120 takometre – doppler radar hız verileri.



Şekil 6.9 Algoritmali sürüş 3 hesaplanan konum verileri.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Odometre test altyapısı, römork sistemi, test treni ve sistemde kullanılacak şekli ile test edilmiştir. Yapılan testlerde römork sisteminin sahada projenin başlangıç zamanlarında denenemeyecek senaryoları oluşturma konusundaki katkılarının büyük olduğu görülmüştür. Zira hattın hazır olması, trenlerin hazır olması gibi parametrelerin değişkenliğinin yanı sıra elektrifikasyon sistemlerinin devreye alınması gibi konular saha testlerinde ciddi gecikmelerle ilerlemektedir. Ayrıca, farklı çevre koşullarının denenebilmesi de römork ile mümkün hale gelmiştir. Römork sistemi ile karlı, yağmurlu havada, yüksek hızlarda, düşük hızlarda sürüşler yapılabilmektedir.

Odometre sisteminin, sensör performanslarının karşılaştırılması bağlamında önemli katkılar sağladığı görülmüştür. Bu bağlamda sisteme farklı sensör arayüzlerinin implemente edilmesinin sistemin verimini arttıracak olduğu görülmüştür. Sisteme ivme ölçer sensörünün eklenmesine karar verilmiş ve gerekli yazılım ve donanım eklemeleri yapılmıştır.

Yapılan testlerde doppler radarın hız ve yön değişimlerine tepkisinin düşük olduğu ancak takometrenin hız ve yön değişimlerine tepkisinin yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca hızlı yavaşlama içeren senaryolarda radarın verilerinde ciddi sapmalar olduğu görülmüştür. Bu sebeple algoritmada birincil algılayıcı sistem olarak takometrenin kullanılmasına karar verilmiştir. Doppler radarın takometre arızası ya da kayma durumlarında görev alması hem sistemin hatada emniyetli durumda kalınmasını sağlamakta hem de daha kararlı verilerin oluşmasını sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında odometre sistemi elemanlarından doppler radar ve takometre performanslarının karşılaştırılmasına imkân veren odometre test alt yapısı oluşturulmuş, test altyapısı ile çeşitli testler yaparak sensörlerin performansları karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlara göre elde bulunan sensörlerin uygun şekilde kullanılacağı bir algoritma tasarlanmış ve test altyapısıyla farklı senaryolarda testleri yapılmıştır. Bu bağlamda odometre sisteminde takometre verilerinin birincil algılayıcı olarak kullanılarak, hata durumunda doppler radardan faydalanılmasının daha kararlı konum belirlenmesi sağladığı görülmüştür.

Doppler radarda hız ölçümü frekans farkına dayalı olarak hesaplandığı için çözünürlüğün öneminin büyük olduğu görülmüştür. Daha sonraki çalışmalarda daha yüksek çözünürlüğe sahip doppler radar kullanımıyla doppler radarın da birincil

algılayıcı olarak kullanılacağı Kalman filtresi tabanlı konum algılama algoritması tasarlanabilecektir.



KAYNAKLAR

- Clemson University Vehicular Electronics Laboratory . (2021, Ocak). *Vehicle Speed Sensor*. Clemson University Vehicular Electronics Laboratory : <https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/sensors/vehicle-speed.html> adresinden alındı
- F. I. Petrescu. (2014.). *A New Doppler Effects*.
- Goffaux, G., Wouwer, A. V., & Remy, M. (2006). ROBUST FILTERING TECHNIQUES APPLIED TO TRAIN POSITIONING. *IFAC Proceedings Volumes* (s. 297-302). Mons: IFAC.
- Hostettler, R. (2018, Kasım). Basics of Sensor Fusion. Department of Electrical Engineering and Automation Aalto University, Finland.
- IEEE Vehicular Technology Society. (2004). *1474.1 Standard for Communication Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*,. IEEE.
- Jayanthan, R. (2020, Ocak). *Track Circuit*. Jayan's Web: https://jayan.tripod.com/go/railway/2_trackcct.htm adresinden alındı
- Kim, P. (2010). *Kalman Filter for Beginners*. A-JIN Publishing.
- Kostrominov, A., Tyulyandin, O. N., Nikitin, A., Vasilenko, M. N., & Osminin, A. T. (2020). RFID-Based Navigation of Subway Trains. *020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)* (s. 1-6). Varna: IEEE.
- Li, B., Zhang, C., Ye, C., Lin, W., Yu, X., & Meng, L. (2020). A Robust Odometry Algorithm for Intelligent Railway Vehicles Based on Data Fusion of Encoder and IMU. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (s. 2749-2753). Singapore: IEEE.
- Litman, T. (2020). *Rail Transit In America A Comprehensive Evaluation of Benefits*. Victoria: Victoria Transport Policy Institute.
- Malvezzi, M., Toni, P., Allotta, B., & Colla, V. (2001). Train speed and position evaluation using wheel velocity measurements. *001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556), 2001* (s. 220-224). Como: IEEE.
- Manz, H., Becker, U., & Schnieder, E. (2016). Enabling Certification of Satellite Based Localization in Railways by Combination of Redundant Sensors and Map Matching. *IFAC-PapersOnLine* (s. 178-183). IFAC (International Federation of Automatic Control).
- Metro İstanbul. (2021, Mayıs). *Hatlarımız*. Metro İstanbul: <https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/TumHatlarimiz> adresinden alındı

- Murillas, D. H., & Poncet, L. (2016). Safe odometry for high-speed trains. *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)* (s. 244-248). Birmingham: IEEE.
- Oyebode, O. (2014). Comparative Benefits of Resuscitating Railway as a Mode of National Transport. *National Civil Engineering Conference (NICE)* (s. 76-86). LAGOS: Nigerian Institution of Civil Engineers (NICE).
- RailSystem. (2021, Ocak). *Axle Counter*. RailSystem: <http://www.railsystem.net/axle-counter/> adresinden alındı
- Selvi, D., Meli, E., Allotta, B., Rindi, A., Capuozzo, A., & Rucher, L. (2020). Feasibility Analysis of Positioning and Navigation Strategies for Railway and Tramway Applications. *IFAC-PapersOnLine*, 15680-15686.
- Signalhead. (2021). *Token (railway signalling)*. Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Token_\(railway_signalling\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Token_(railway_signalling)) adresinden alındı
- Zeynep Bilgici, E. B. (2019, Mart 28). <http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/dergimiz/dunya-nufusu>. Tübitak Bilim Genç: <http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/dergimiz/dunya-nufusu> adresinden alındı