



Akıllı Telefon IMU ve GNSS Entegrasyonu ile Harmonik Hareketlerin İzlenmesi

CANEREN GÜL, TAYLAN ÖCALAN

YTÜ İNŞAAT FAKÜLTESİ HARİTA MÜHENDİSLİĞİ

TUJK 2021

İçerik



- * Çalışmanın amacı ve kullanılan ekipmanlar
- * Literatürde bazı çalışmalar
- * Akıllı telefonda Ataletsel Ölçü Birimleri (Inertial Measurement Units, IMU)
- * Bağıl ve PPP GNSS çözümlerinde gürültü süreçlerinin tanımlanması ve giderilmesi: Kalman Süzgeci ve Butterworth süzgeç
- * İvmeölçer gürültülerinin analizi
- * GNSS ve IMU koordinat çerçevelerinin lokal çerçevede statik hizalanması
- * GNSS / IMU entegrasyonu ile harmonik hareketlerin izlenmesi
- * Sonuçlar



Çalışmanın Amacı

- GNSS çözümlerinde gürültülerin giderilmesi: Kalman Süzgeci ve Butterworth süzgeç
- GNSS / IMU entegrasyonunun cm mertebesinde harmonik hareketleri izlemede performansı

*0.5 Hz 2 cm ve 5 cm; 1 Hz 2 cm ve 5 cm; 2 Hz 2 cm.

*Jeodezik alıcı için bant geçirgen süzgeç (0.1 Hz – 4 Hz)

*Akıllı telefon için yüksek geçirgen süzgeç (0.1 Hz)

*GNSS verilerinin değerlendirilmesi: RTKLIB

Literatürde Yer Alan Bazı Çalışmalar



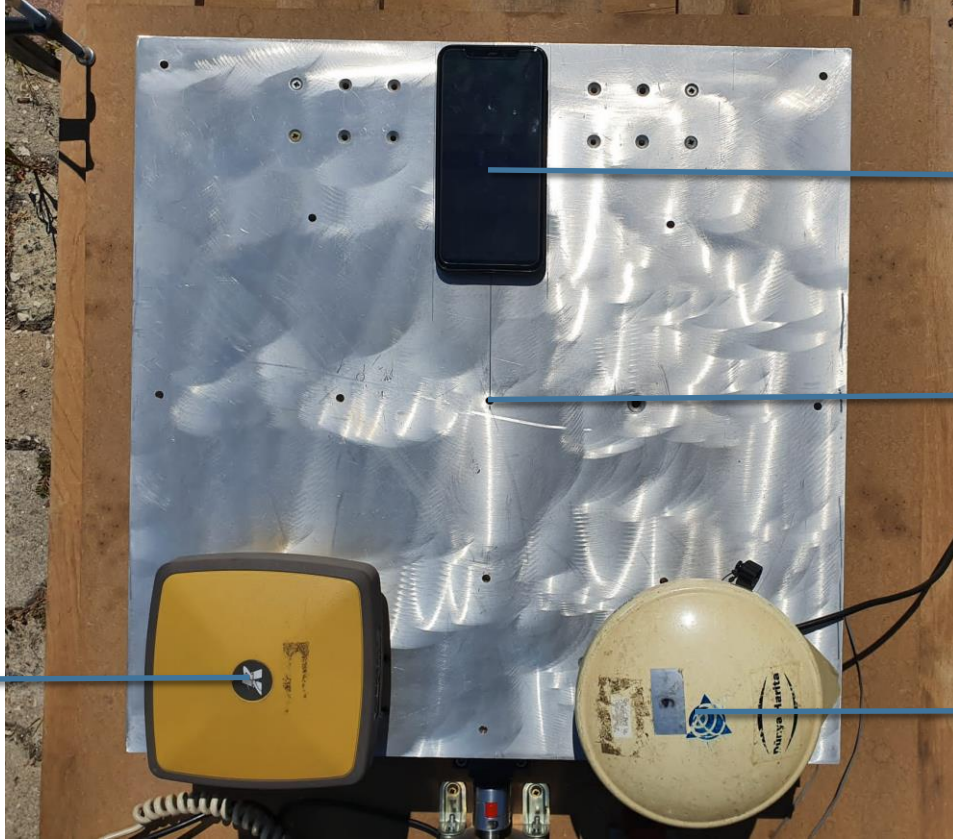
GNSS Çözümlerinde Düşük Frekansta Gürültülerin Süzgeçlenmesi

- Chan, W. S., Xu, Y. L., Ding, X. L., Xiong, Y. L., & Dai, W. J. (2006). **Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions.** *Journal of Surveying Engineering*, 132(3), 108-117. **Bant geçirgen süzgeç seçim şeması:** İlgilenilen frekansın beşte biri ve beş katı.
- Yigit, C. O., & Gurlek, E. (2017). **Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures.** *Geomatics, natural hazards and risk*, 8(2), 893-904. **Butterworth yüksek geçirgen süzgeç: 0.20 Hz**
- Paziewski, J., Sieradzki, R., & Baryla, R. (2019). **Detection of structural vibration with high-rate precise point positioning: case study results based on 100 Hz multi-GNSS observables and shake-table simulation.** *Sensors*, 19(22), 4832. **Butterworth yüksek geçirgen süzgeç: 0.5 Hz**
- Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Bezcioglu, M., & Dindar, A. A. (2020). **Investigating the effects of ultra-rapid, rapid vs. final precise orbit and clock products on high-rate GNSS-PPP for capturing dynamic displacements.** *Structural Engineering and Mechanics*, 73(4), 427-436. **Butterworth yüksek geçirgen süzgeç: 0.15 Hz**

GNSS / IMU Entegrasyonu ile Sismik Hareketlerin İzlenmesi

- Saunders, J. K., Goldberg, D. E., Haase, J. S., Bock, Y., Offield, D. G., Melgar, D., ... & Mattioli, G. S. (2016). **Seismogeodesy using GPS and low-cost MEMS accelerometers: Perspectives for earthquake early warning and rapid response.** *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(6), 2469-2489.
- Geng, J., Wen, Q., Chen, Q., & Chang, H. (2019). **Six-degree-of-freedom broadband seismogeodesy by combining collocated high-rate GNSS, accelerometers, and gyroscopes.** *Geophysical Research Letters*, 46(2), 708-716.
- Li, G., Long, C., & Wang, F. (2020). **Synchronizing and Integrating Android Multi-GNSS/accelerometer Sensors to Capture Broadband Vibrations at Sub-centimeter Resolution.** In *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)* (pp. 3612-3625).
- Xin, S., Geng, J., Zeng, R., Zhang, Q., Ortega-Culaciati, F., & Wang, T. (2021). **In-situ real-time seismogeodesy by integrating multi-GNSS and accelerometers.** *Measurement*, 179, 109453.

Kullanılan Ekipmanlar



Xiaomi Mi8 Akıllı Telefon

BCM47755 Çift Frekans GNSS Çipi (1 Hz; GPS ve Galileo için L1/E1+L5/E5)
InvenSense ICM 20690 Cayro + İvmeölçer (100 Hz)
ak09911 Manyetometre (100 Hz)

Tek Eksenli Sarsma Tablası

YEDEK – TOPCON Hiper SR
Jeodezik Sınıf Alıcı (10 Hz; GPS +
GLONASS)

Trimble NETR9 Jeodezik Sınıf Alıcı (20 Hz; GPS + GLONASS)



Akıllı Telefonda Ataletsel Sensörler

→ Mikro-Elektro-Mekanik Sensörler (MEMS)

→ Cayro, İvmeölçer ve Manyetometre (~5-10\$ Maliyet)

3.1 GYROSCOPE SPECIFICATIONS

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 1.8 V, VDDIO = 1.8 V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	3
	FS_SEL=1		±500		°/s	3
	FS_SEL=2		±1000		°/s	3
	FS_SEL=3		±2000		°/s	3
	FS_SEL=5		±31.25		°/s	3
	FS_SEL=6		±62.5		°/s	3
	FS_SEL=7		±125		°/s	3
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	3
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=5		1048.6		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=6		524.3		LSB/(°/s)	3
	FS_SEL=7		262		LSB/(°/s)	3

En Düşük Anlamlı Bit:

$13.3231 \times 10^{-5} \text{ rad/s/LSB}$

Cayro Gürültü Yoğunluğu (10 Hz'de):

$6.9800 \times 10^{-5} \text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$

Yerin Dönme Oranı:

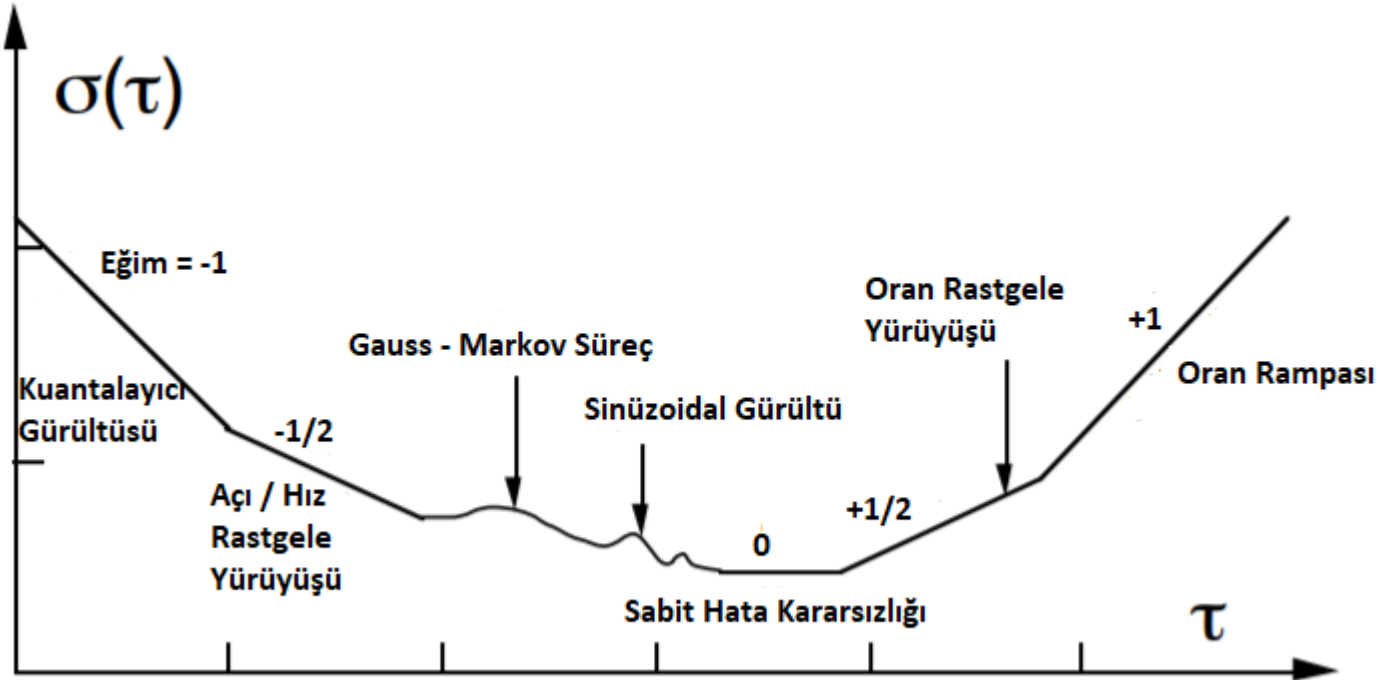
$7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

$7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s} < 13.3231 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

Gürültü Süreçlerinin Tanımlanması: Allan Varyansı



→ Allan sapması eğrileri ve tipik gürültü süreçleri (IEEE-952, 1997)

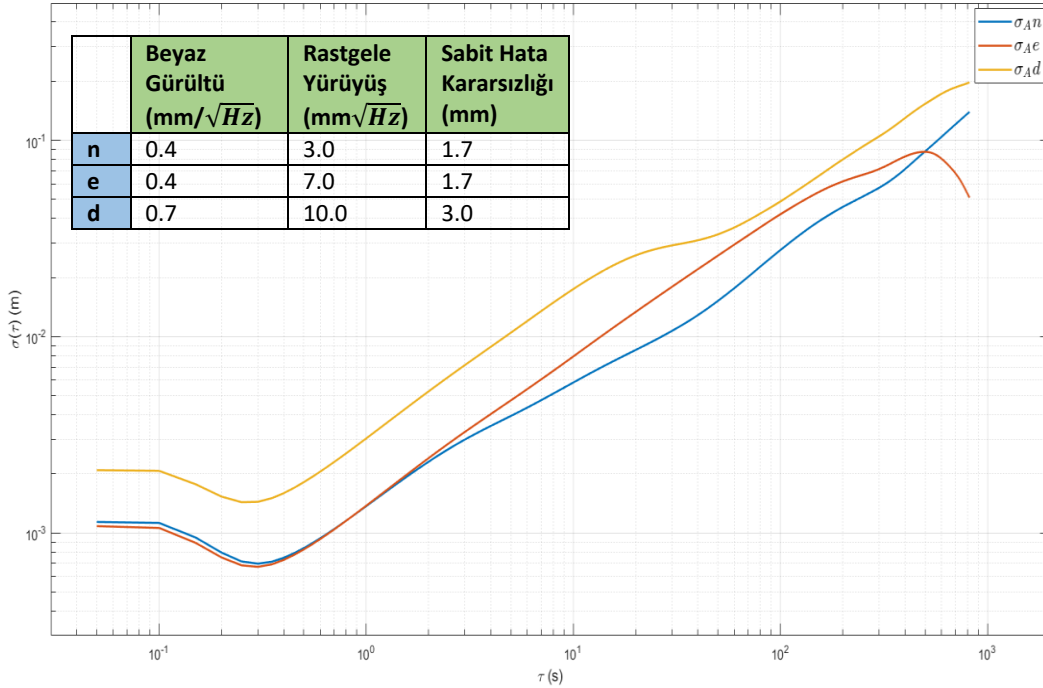


GNSS Çözümlerinde Gürültü Süreçlerinin Tanımlanması: Allan Varyansı

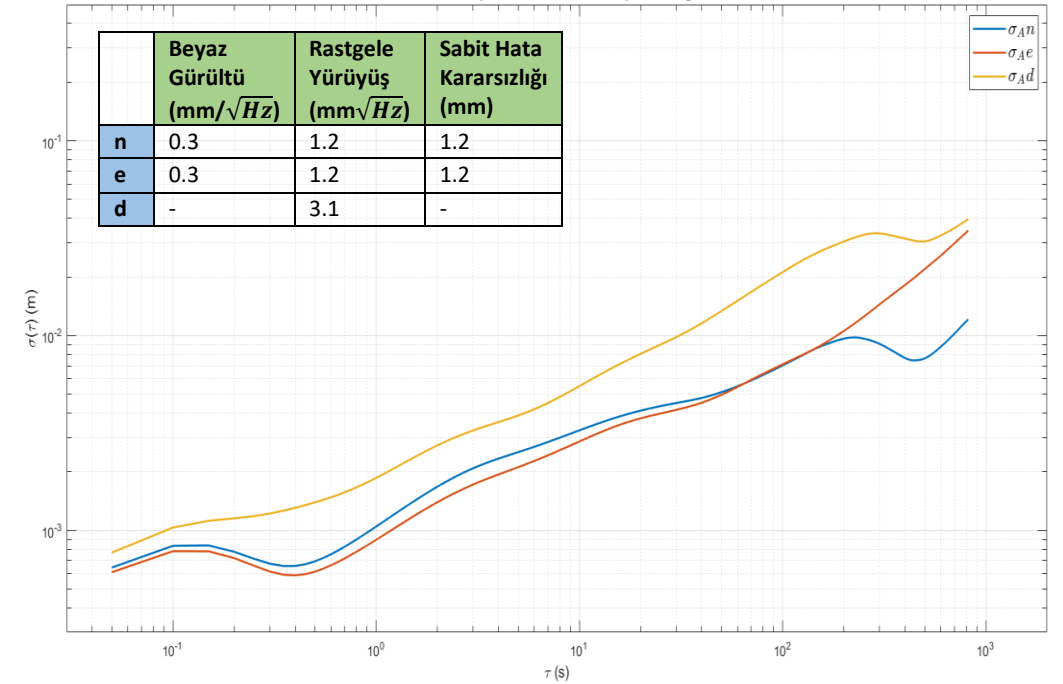


→ Trimble NETR9 Bağıl çözümlerin ve PPP çözümlerinin Allan sapması eğrileri:

NETR9 Bağıl Çözümlerin Allan Sapması Eğrileri



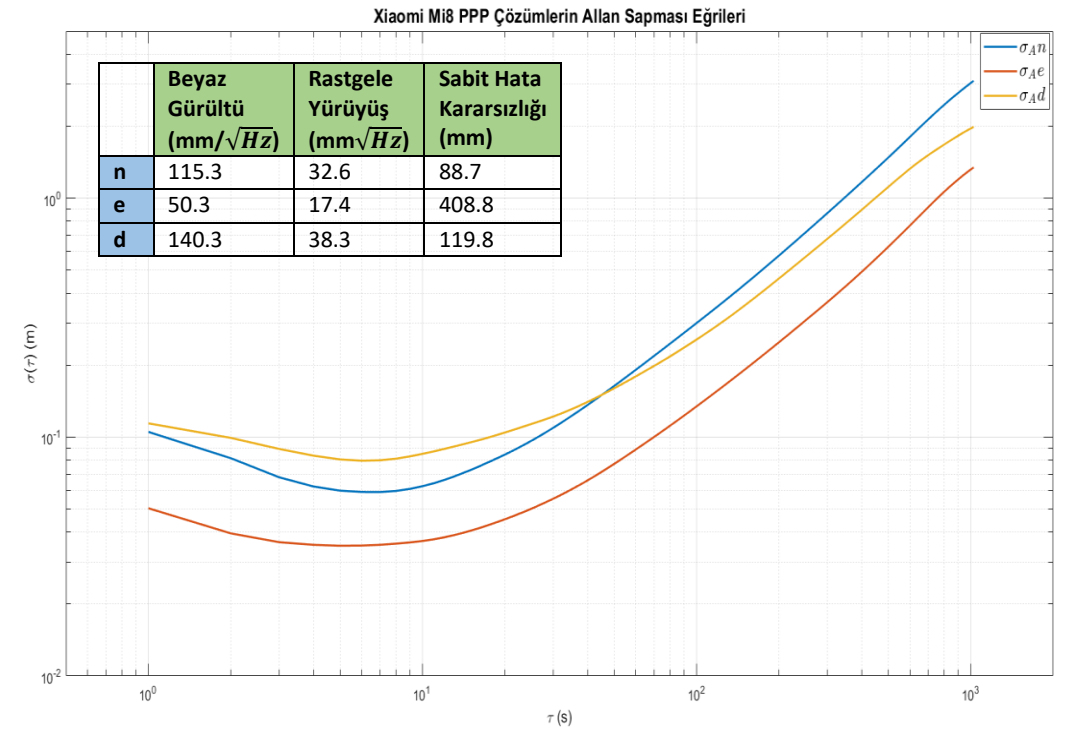
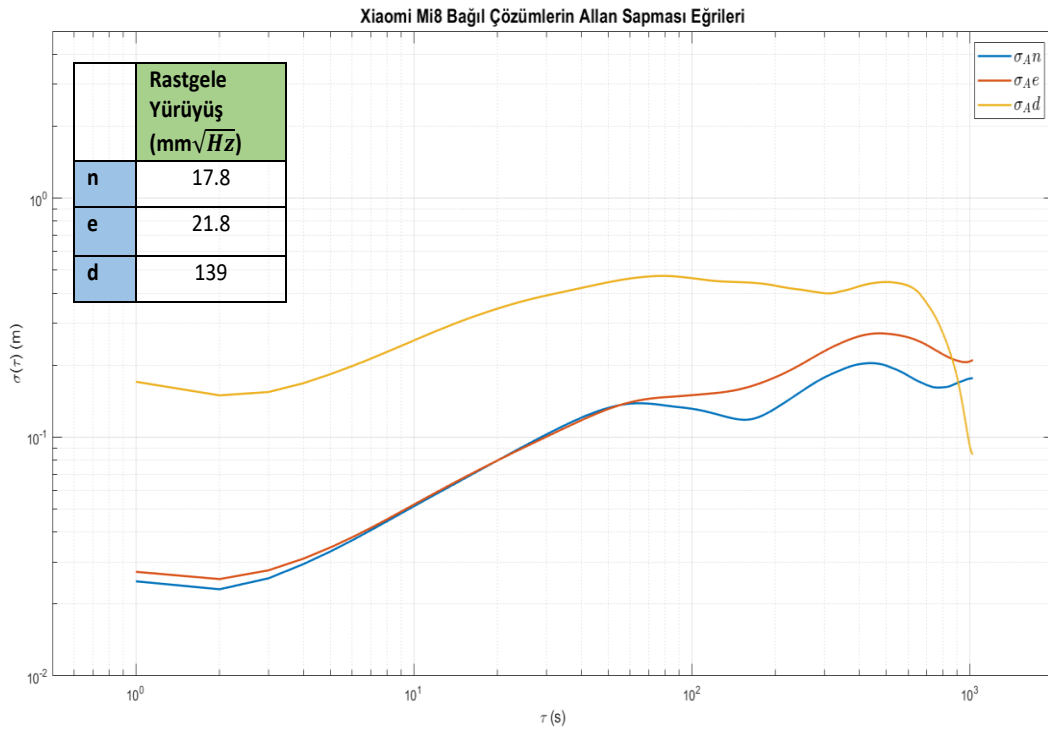
NETR9 PPP Çözümlerin Allan Sapması Eğrileri



GNSS Çözümlerinde Gürültü Süreçlerinin Tanımlanması: Allan Varyansı



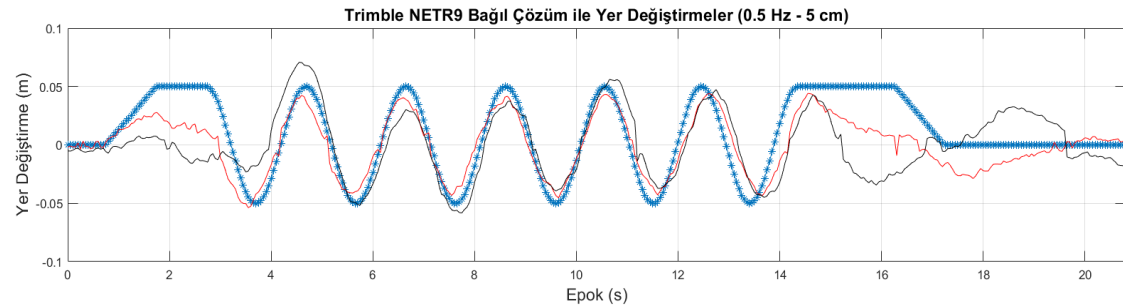
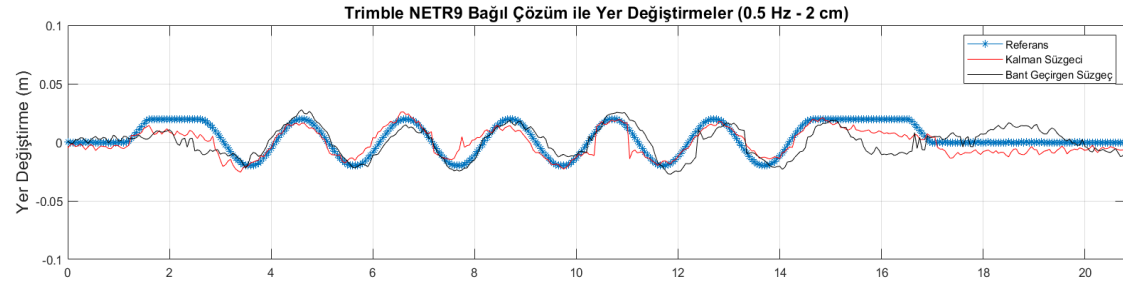
→ Xiaomi Mi8 Bağlı çözümlerin ve PPP çözümlerinin Allan sapması eğrileri:



GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



Trimble NETR9 Bağıl Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç: 0.5 Hz



Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 2cm	4	0.01

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 2cm	3	0.02

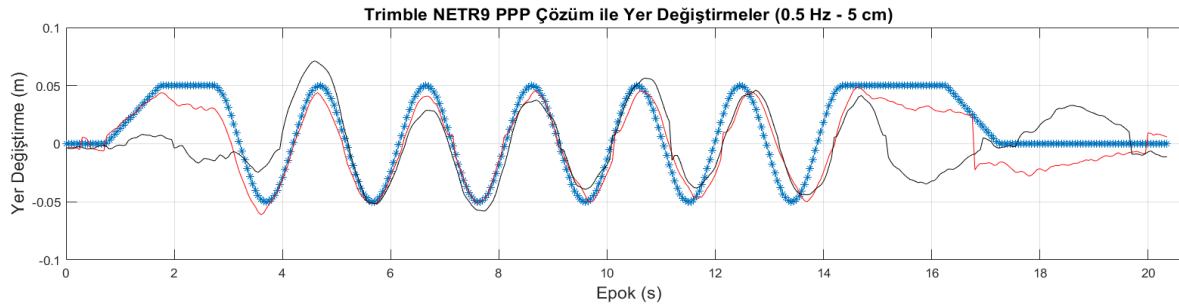
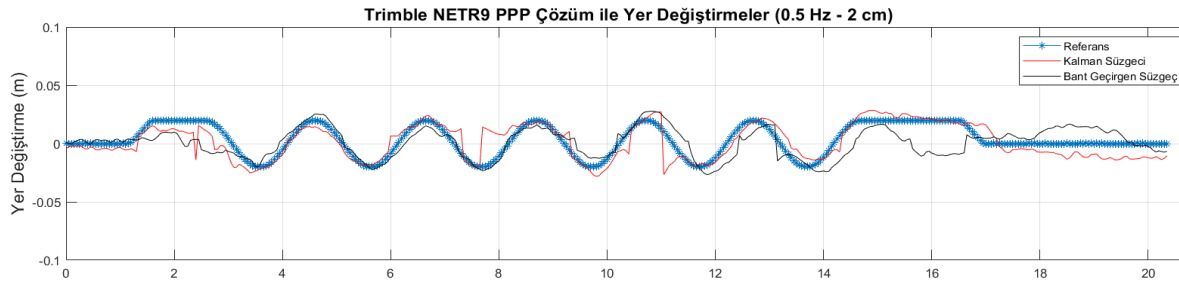
Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 5cm	10	0.01

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 5cm	4	0.02

GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



Trimble NETR9 PPP Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç: 0.5 Hz



Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 2cm	2	0.01

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 2cm	1	0.03

Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 5cm	5	0

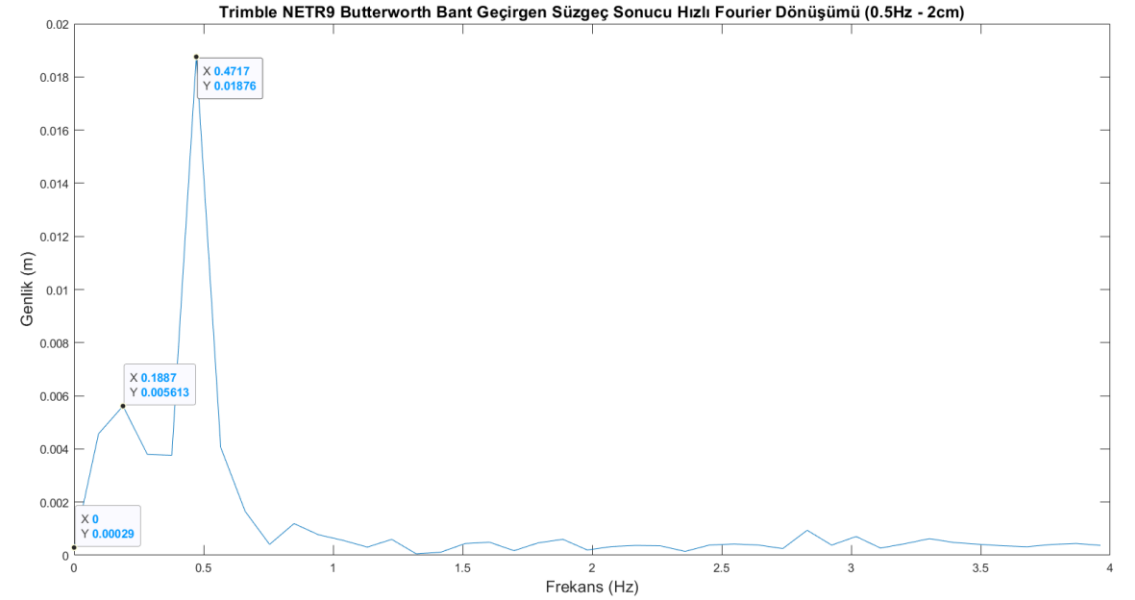
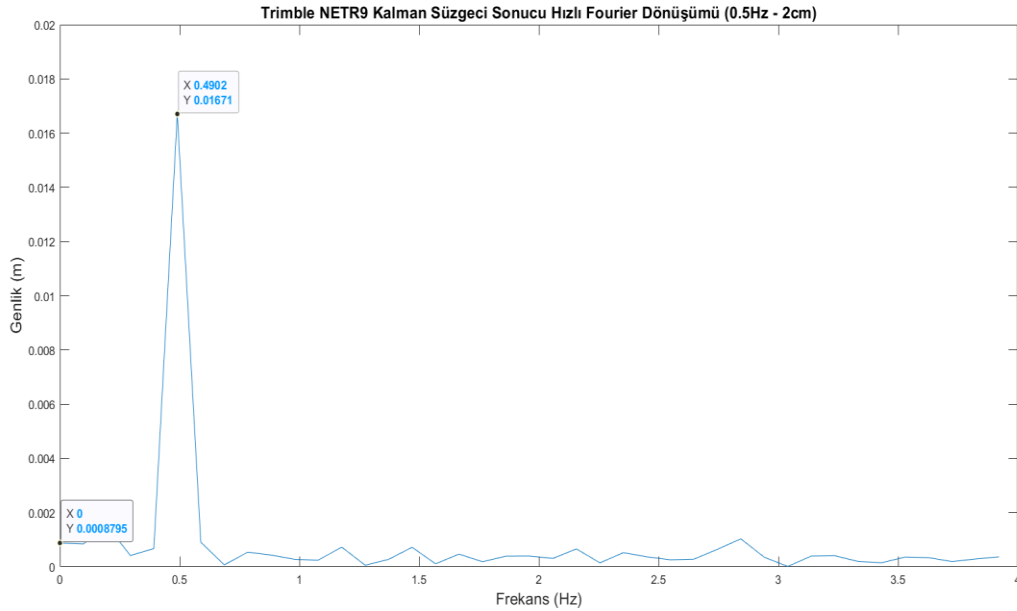
Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 5cm	4	0.01

GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



→ Trimble NETR9 Bağlı Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç

Fourier Spektrumları: 0.5 Hz 2 cm

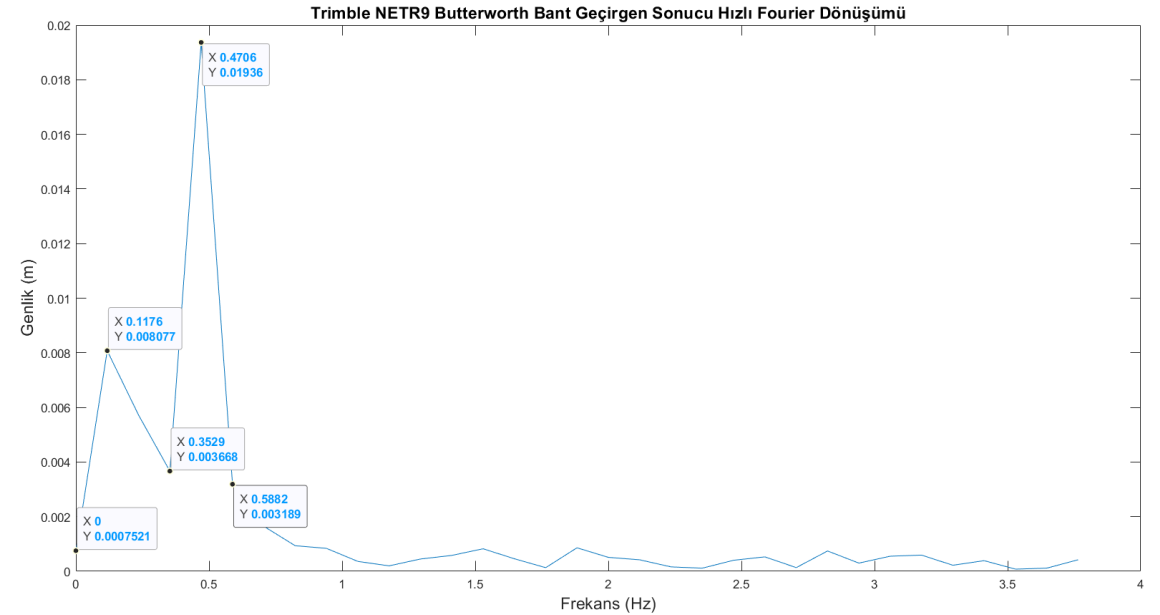
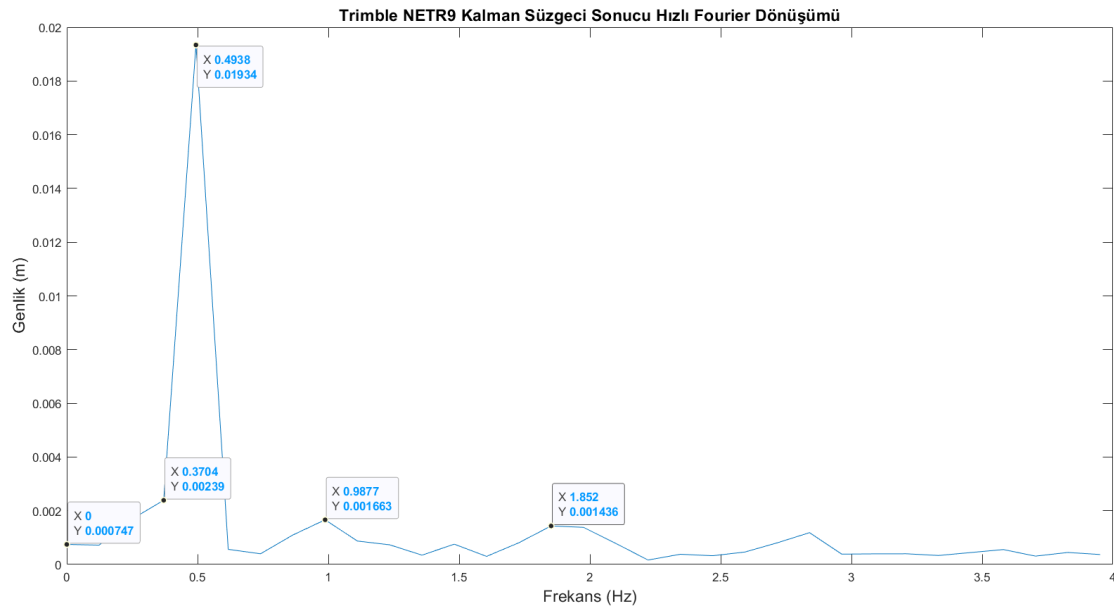


GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



→ Trimble NETR9 PPP Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç

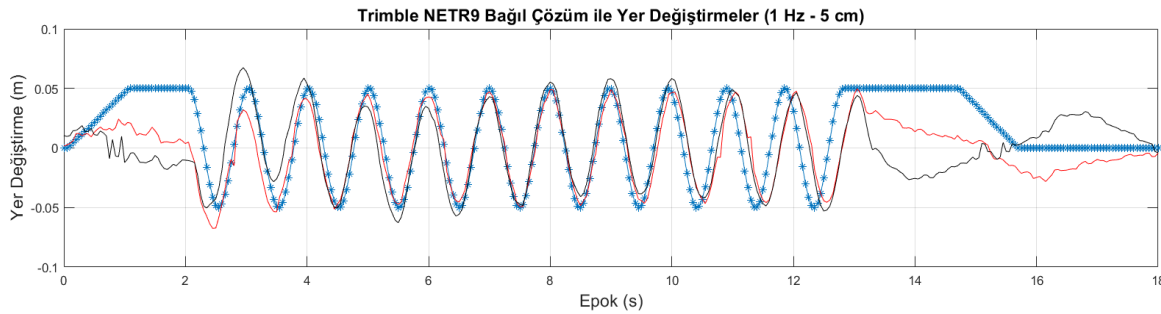
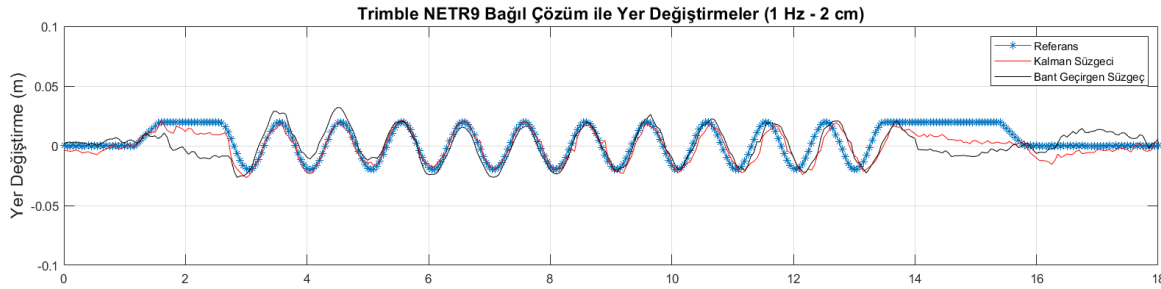
Fourier Spektrumları: 0.5 Hz 2 cm



GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



Trimble NETR9 Bağlı Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç: 1 Hz



Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 2cm	1	0.01

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 2cm	2	0.01

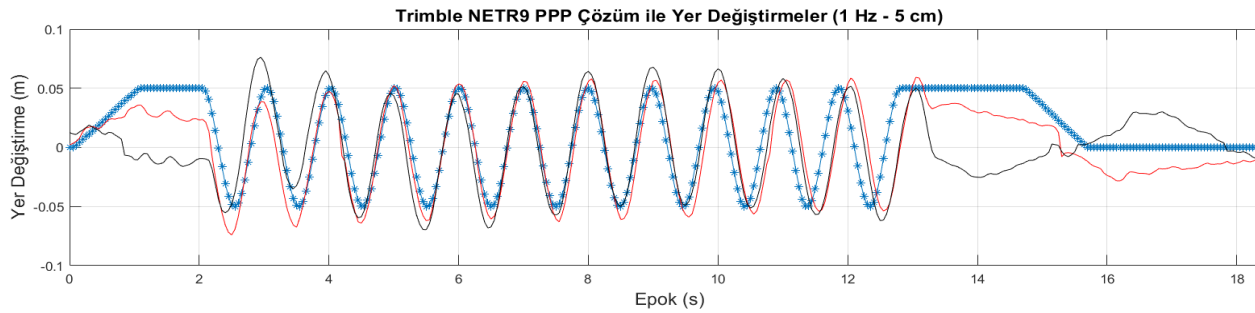
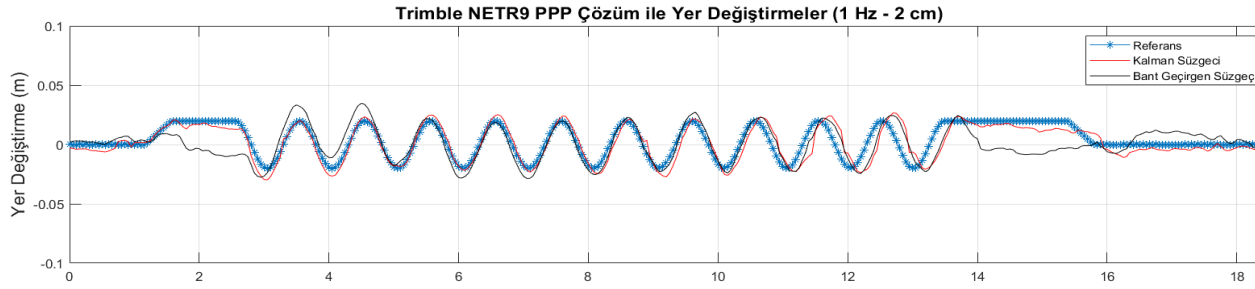
Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 5cm	5	0

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 5cm	2	0

GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



Trimble NETR9 PPP Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç: 1 Hz



Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 2cm	4	0.01

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 2cm	5	0.01

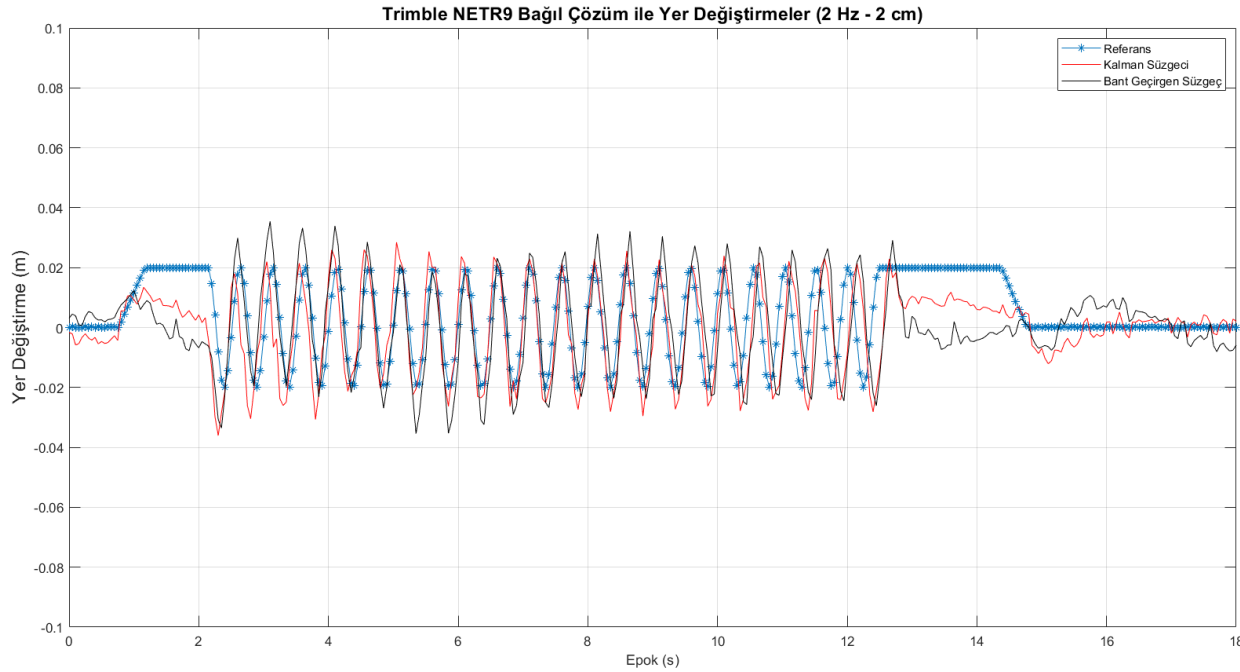
Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 5cm	9	0

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 5cm	9	0

GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



Trimble NETR9 Bağıl Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç: 2 Hz



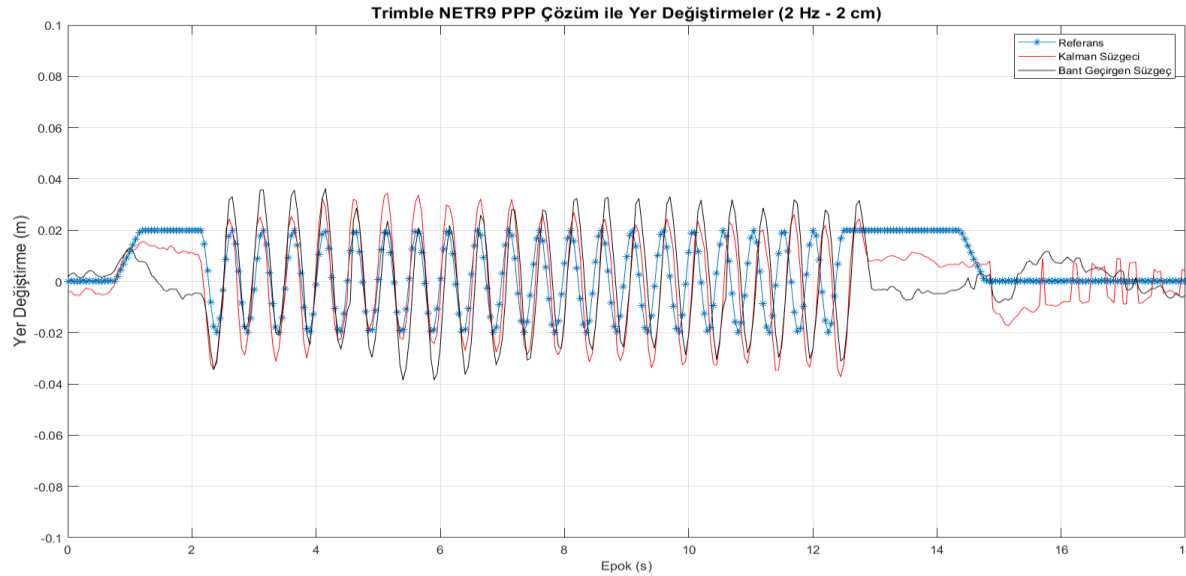
Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
2Hz 2cm	4	0

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
2Hz 2cm	5	0

GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



Trimble NETR9 PPP Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Bant Geçirgen Süzgeç: 2 Hz



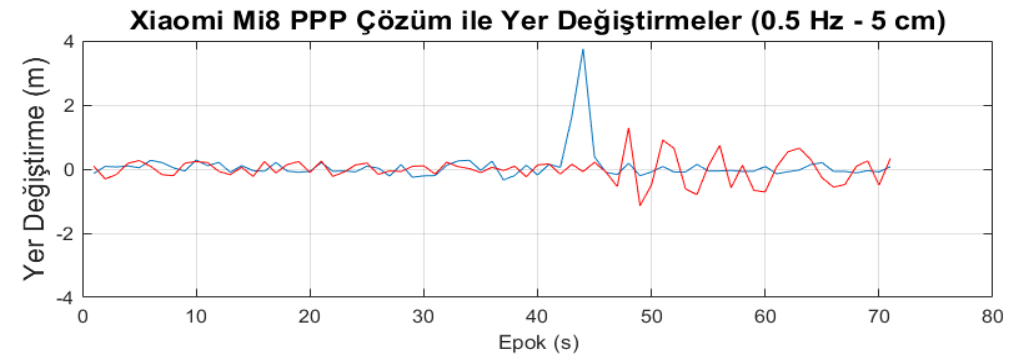
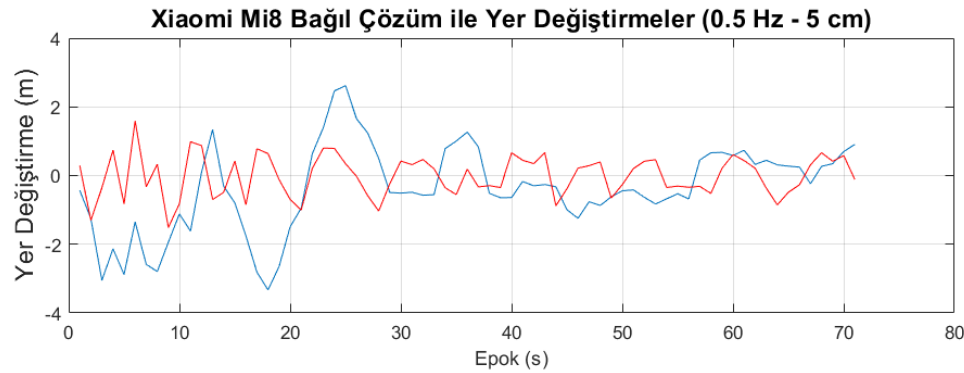
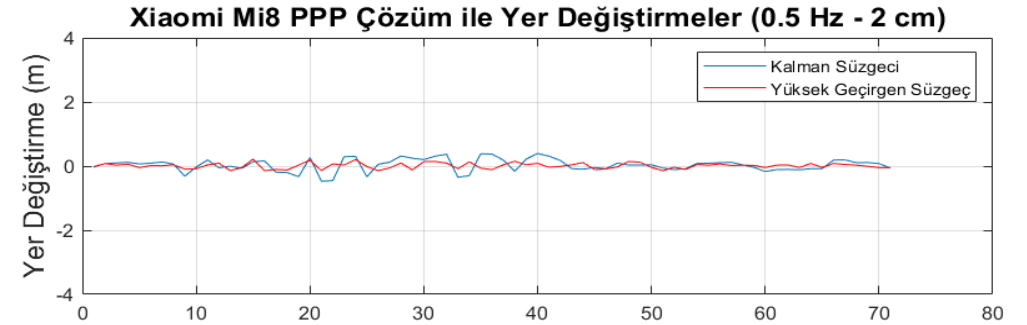
Kalman Süzgeci		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
2Hz 2cm	10	0

Bant Geçirgen Süzgeç		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
2Hz 2cm	11	0

GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



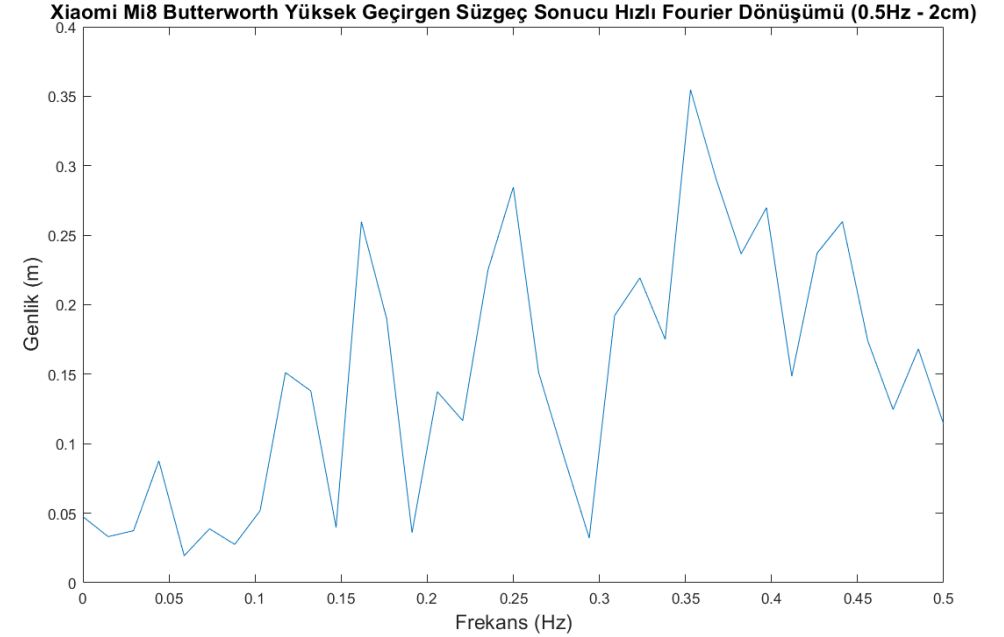
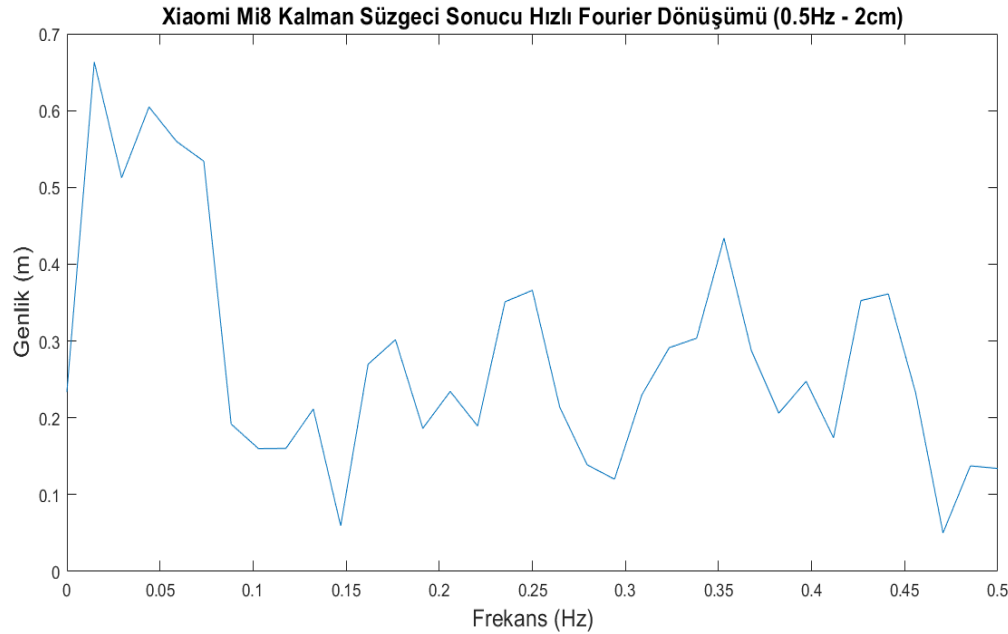
→Xiaomi Mi8 Bağlı ve PPP Çözümlerde Kalman Süzgeci ve Butterworth Yüksek Geçirgen Süzgeç: 0.5 Hz



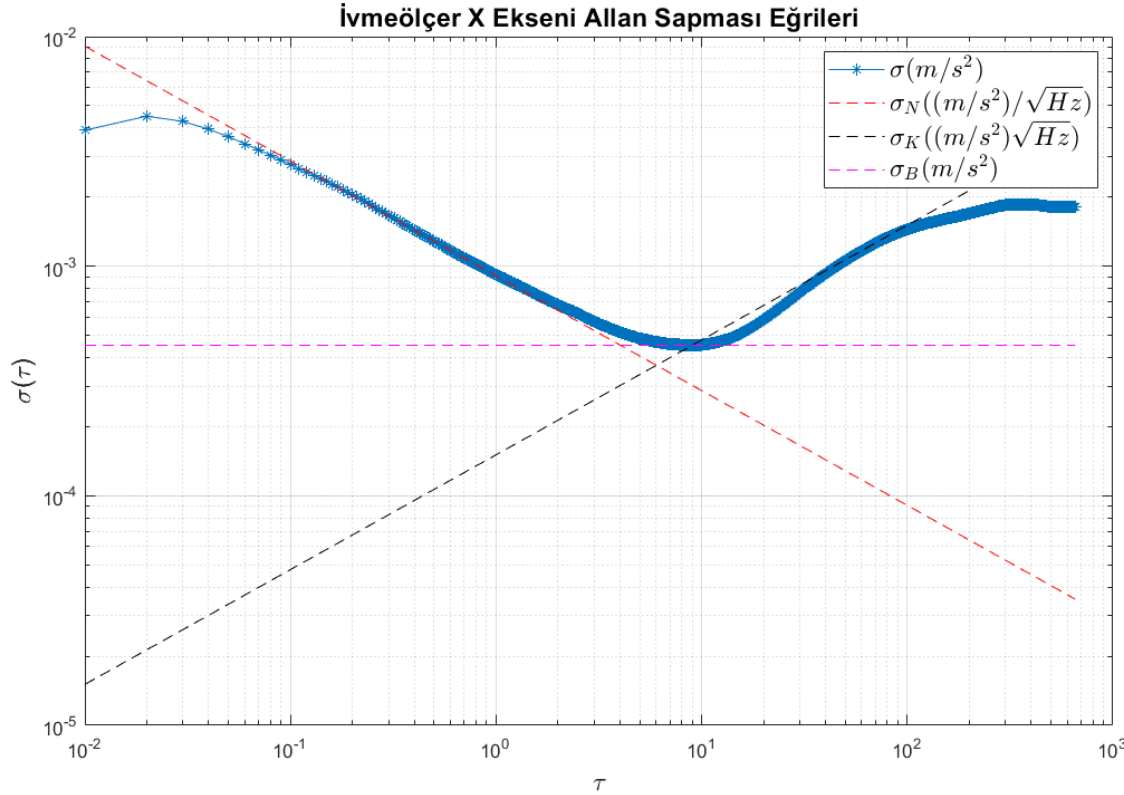
GNSS Ölçülerinde Gürültü Süreçlerinin Giderilmesi



→Xiaomi Mi8 Bağlı ve PPP Çözümlerde Hızlı Fourier Dönüşümü



İvmeölçer Gürültülerinin Analizi



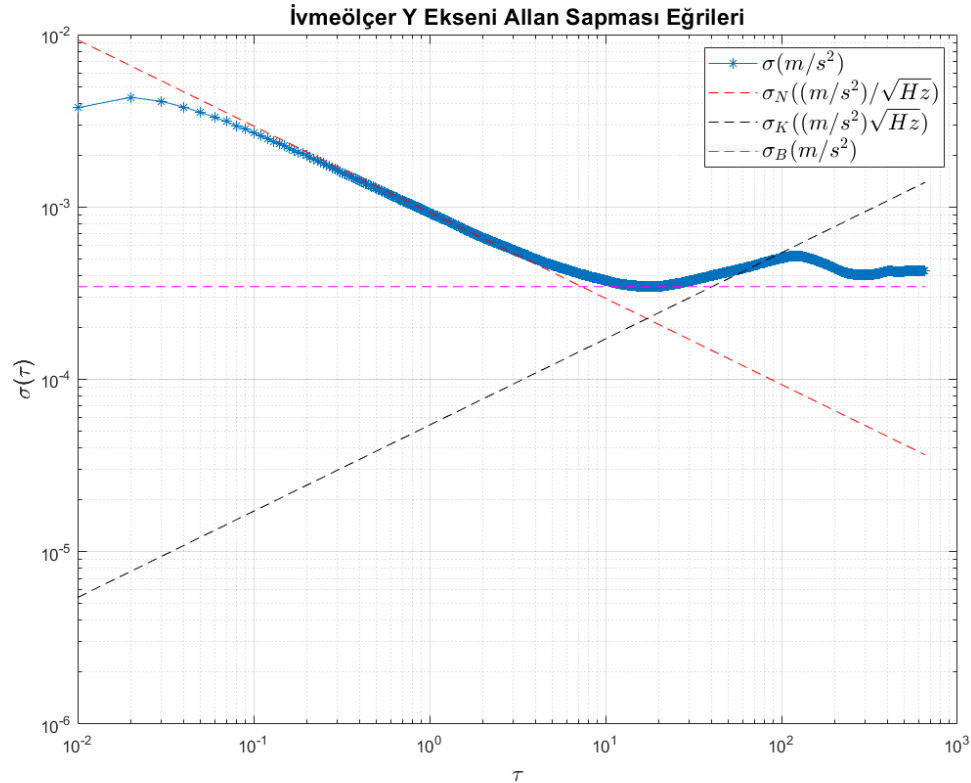
X Eksenli Allan Sapmaları:

Hız Rastgele Yürüyüşü: $0.91 (mm/s^2)/\sqrt{Hz}$

Oran Rastgele Yürüyüşü: $0.26 (mm/s^2)\sqrt{Hz}$

Sabit Hata Kararsızlığı: $0.68 mm/s^2$

İvmeölçer Gürültülerinin Analizi



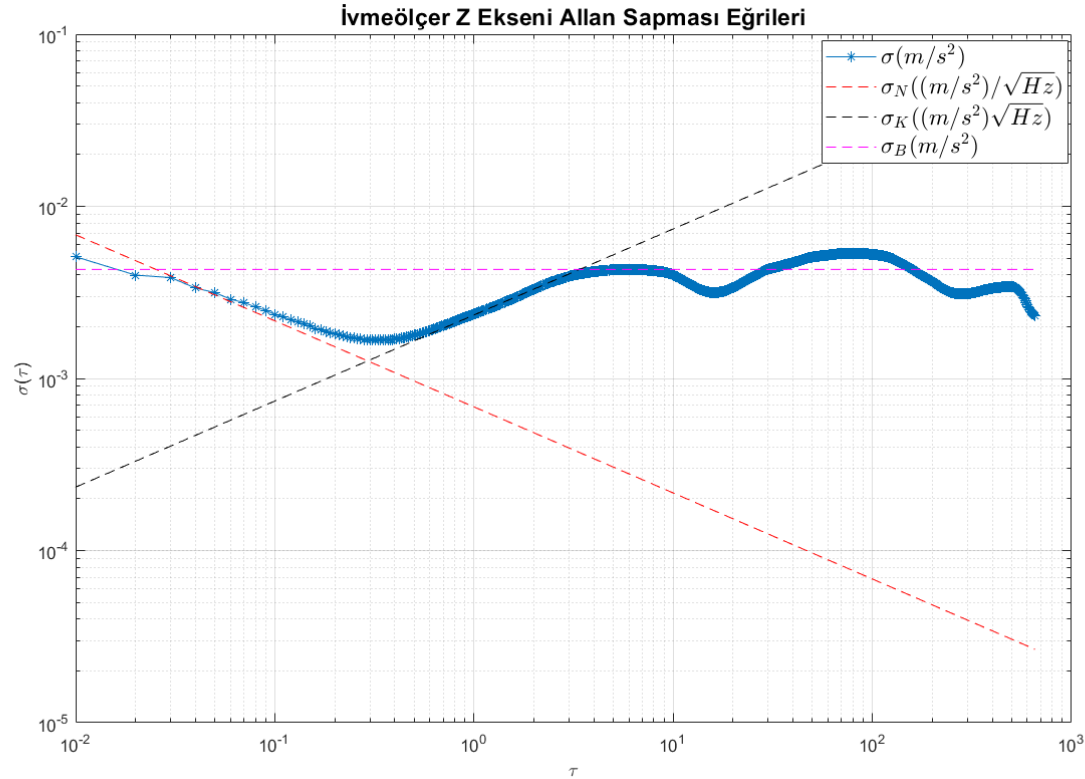
Y Eksenli Allan Sapmaları:

Hız Rastgele Yürüyüşü: $0.93 (mm/s^2) / \sqrt{Hz}$

Oran Rastgele Yürüyüşü: $0.09 (mm/s^2) \sqrt{Hz}$

Sabit Hata Kararsızlığı: $0.5 mm/s^2$

İvmeölçer Gürültülerinin Analizi



Z Eksenli Allan Sapmaları:

Hız Rastgele Yürüyüşü: $0.68 (mm/s^2) / \sqrt{Hz}$

Oran Rastgele Yürüyüşü: $4 (mm/s^2) \sqrt{Hz}$

Sabit Hata Kararsızlığı: $6.5 mm/s^2$

IMU Koordinat Çerçevesinin Lokal Çerçeveye Statik Hizalanması



→ Tekil Değer Ayırıştırması (Markley, 1988):

$$L(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i |b_i - Ar_i|^2$$

$$L(A) = 1 - \sum_{i=1}^n a_i b_i^T Ar_i = 1 - \text{iz}(AB^T)$$

$$B = \sum_{i=1}^n a_i b_i r_i^T \longrightarrow B = USV^T$$

$$U_+ = U[\text{diag}(1, 1 \det(U))]$$

$$V_+ = V[\text{diag}(1, 1 \det(V))]$$

L(A): Kayıp fonksiyonu

A: Referans çerçeveden sensör çerçevesine dönüşüm matrisi

a: Ağırlıklandırma

b: Sensör çerçevesinde ölçüler

r: Referans çerçevesinde ölçüler

n: Ölçü sayısı

GNSS ve IMU Koordinat Çerçevelerinin Statik Hizalanması: Referans Vektörler



→ WGS84 Referans Normal Gravite Hesabı:

$$g = \frac{g_e(1+k\sin^2(\varphi))}{\sqrt{1-e^2\sin^2(\varphi)}}$$

g : Normal gravite değeri

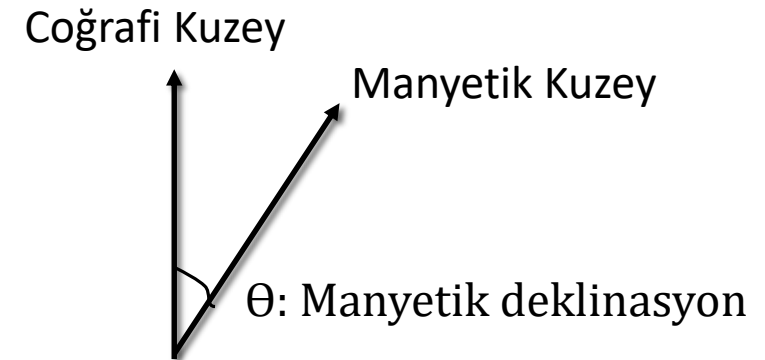
g_e : Ekvatorda normal gravite

k : Normal gravite sabiti

e : Birinci eksentrisite

φ : İstenen enlem

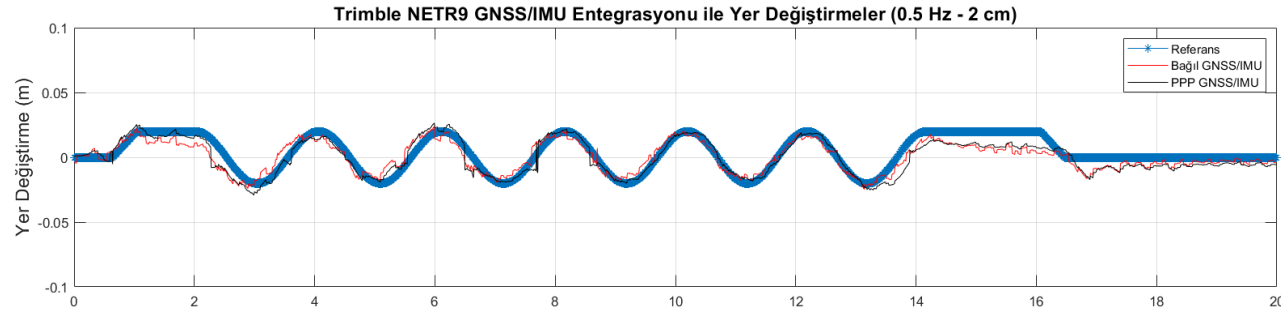
→ Referans Manyetik Alan Vektörü: Uluslararası Jeomanyetik Referans Çerçevesi (IGRF) 13



GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri

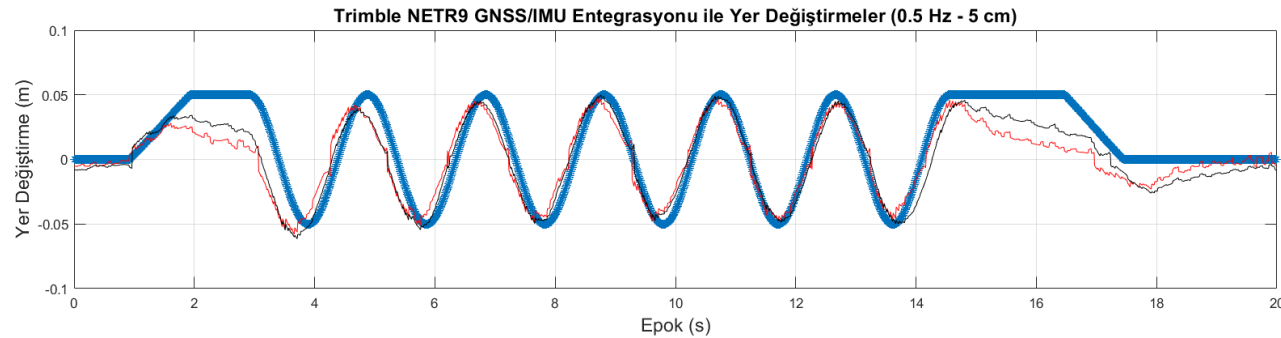


→ Trimble NETR9 Bağıl ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu: 0.5 Hz



Bağıl GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 2cm	3	0.02

PPP GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 2cm	2	0.02



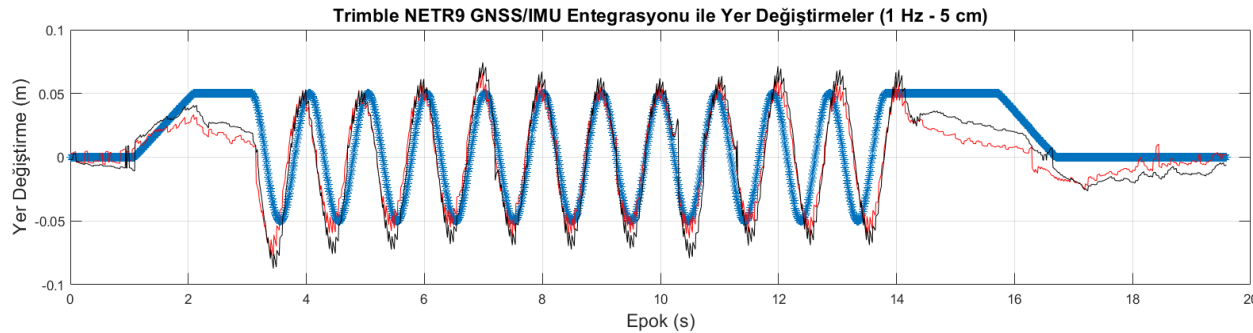
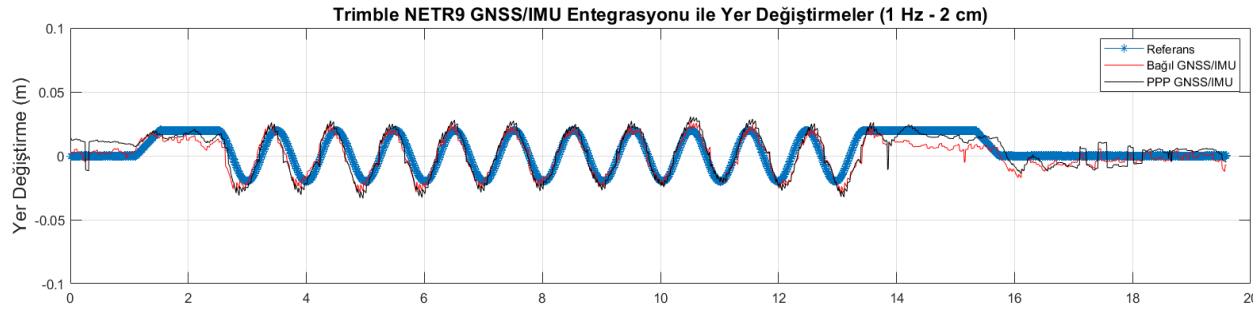
Bağıl GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 5cm	8	0

PPP GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
0.5Hz 5cm	4	0

GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri



→ Trimble NETR9 Bağıl ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu: 1 Hz



Bağıl GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 2cm	2	0.02

PPP GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 2cm	6	0.02

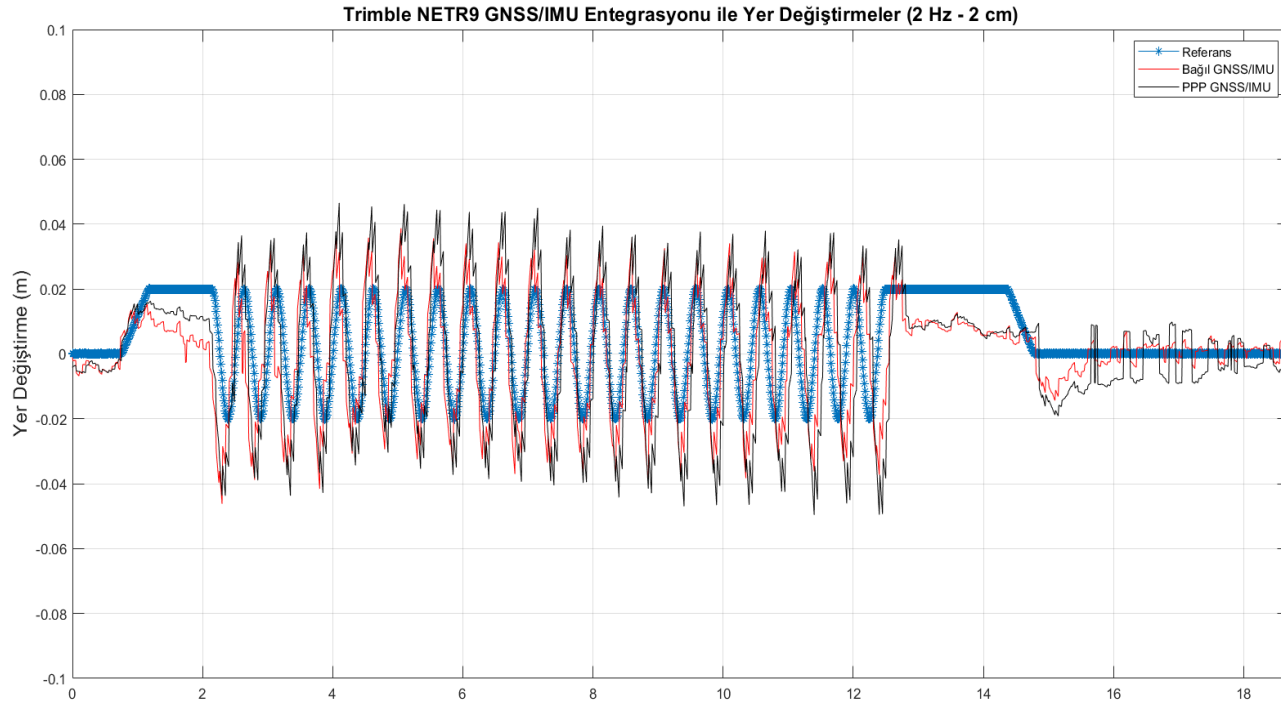
Bağıl GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 5cm	2	0.01

PPP GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
1Hz 5cm	15	0.01

GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri



→ Trimble NETR9 Bağıl ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu: 2 Hz



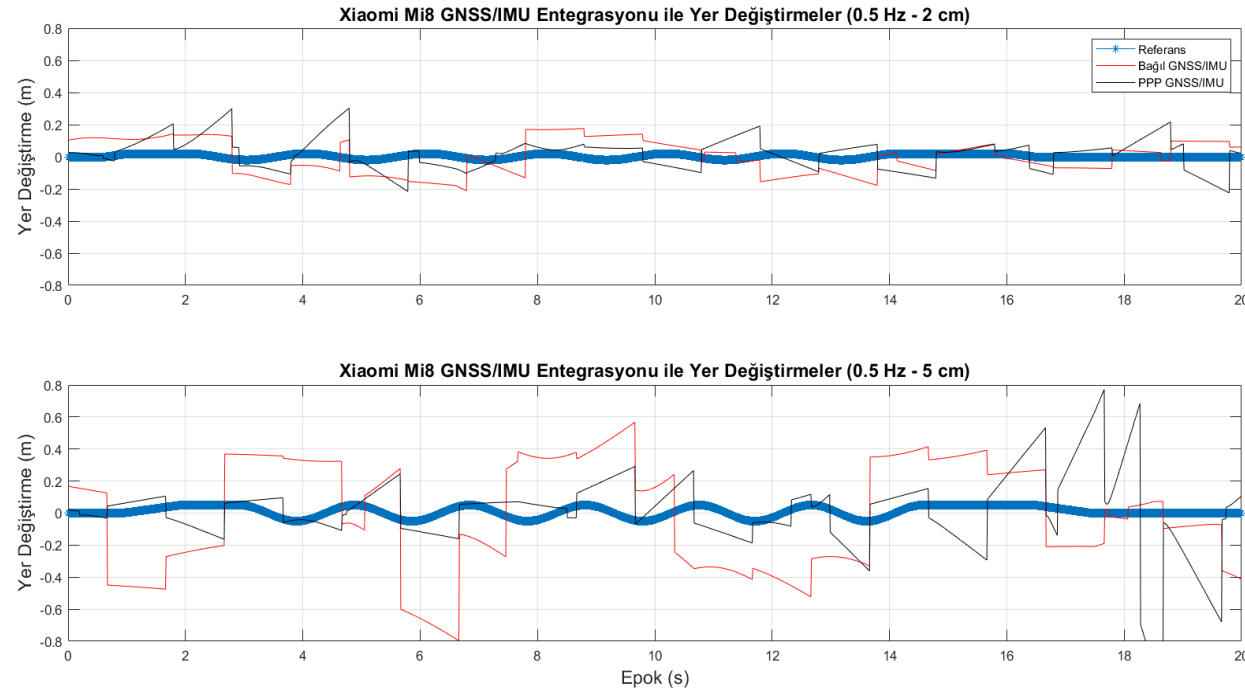
Bağıl GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
2Hz 2cm	9	0.02

PPP GNSS / IMU		
Hareket	Genlik RMS (mm)	Frekans RMS (Hz)
2Hz 2cm	17	0

GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri



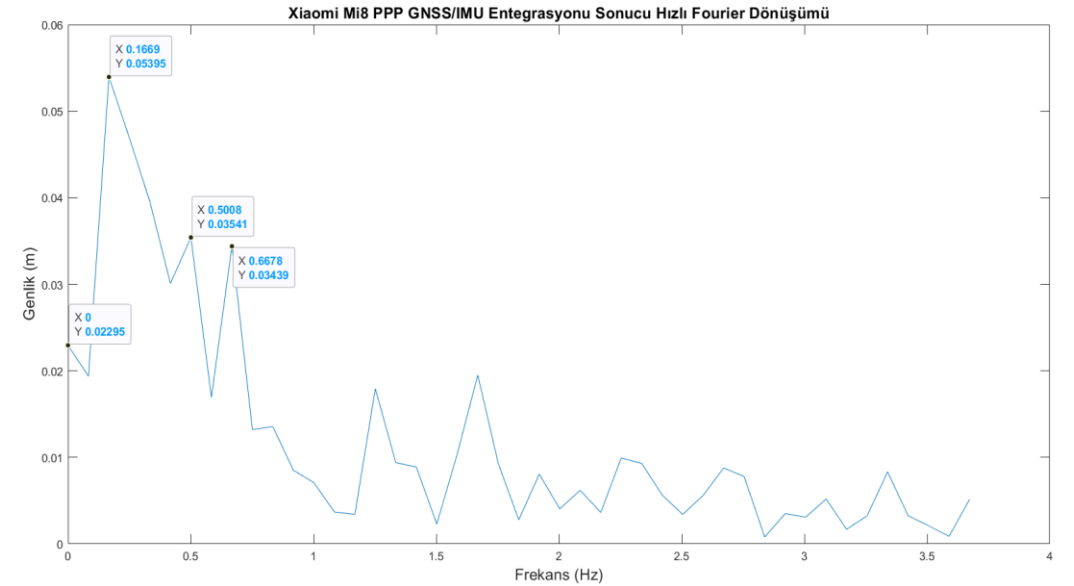
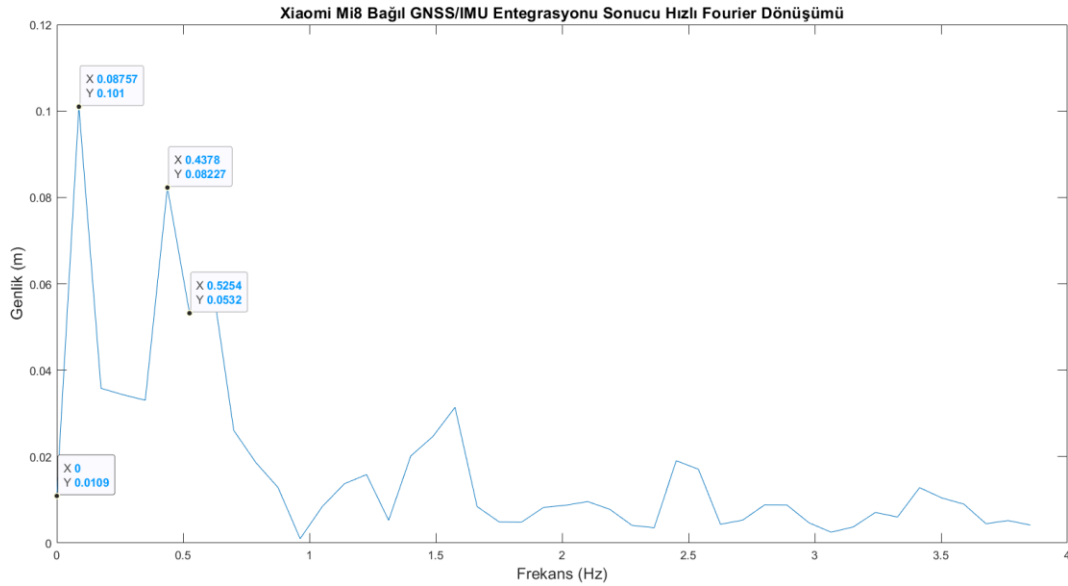
→ Xiaomi Mi8 Bağlı ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu: 0.5 Hz



GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri



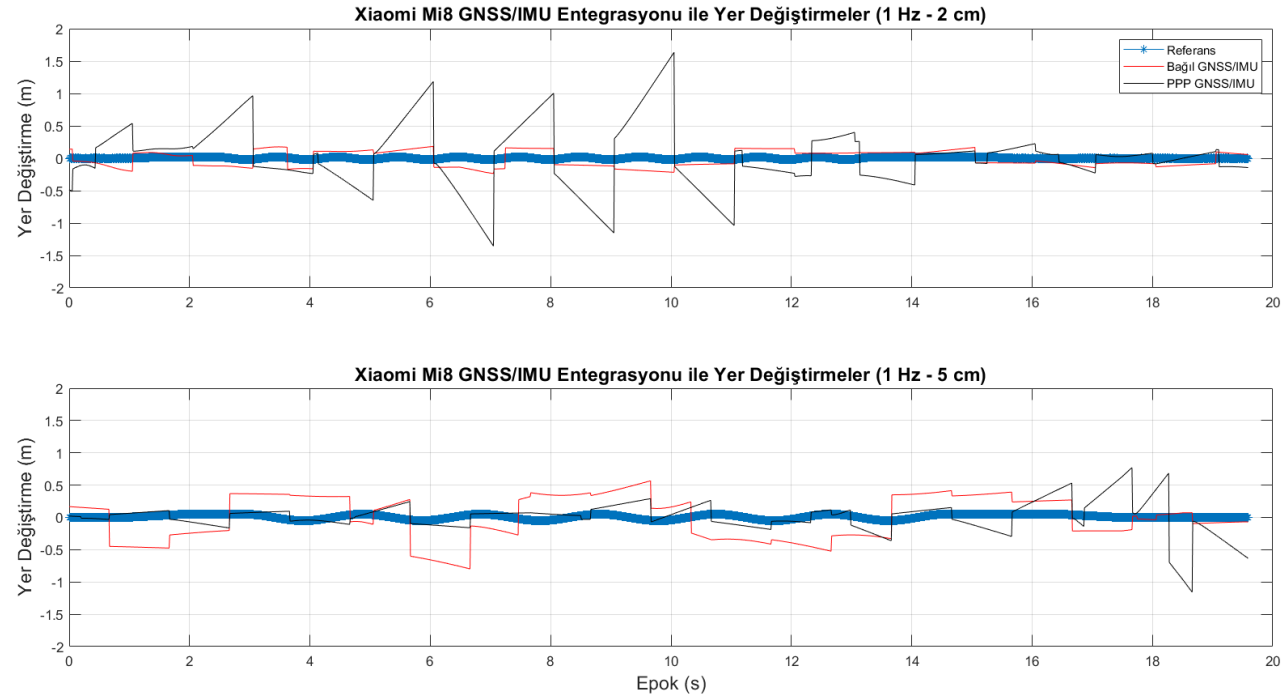
→ Xiaomi Mi8 Bağlı ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu Fourier Spektrumu: 0.5 Hz 2 cm



GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri



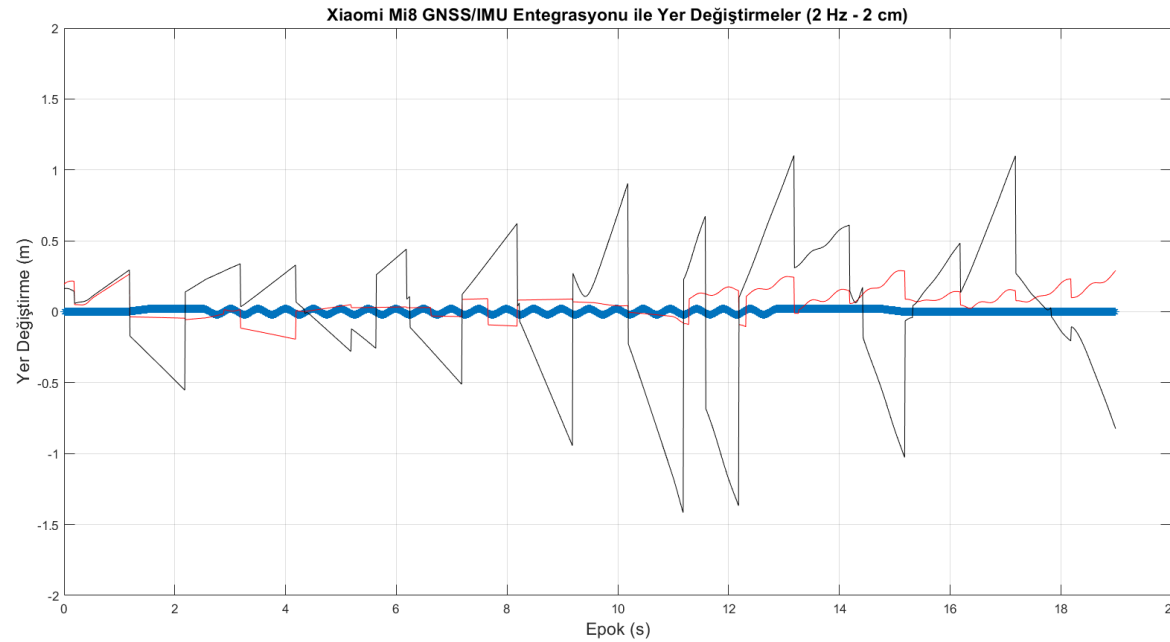
→ Xiaomi Mi8 Bağlı ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu: 1 Hz



GNSS / IMU Entegrasyonu: Harmonik Hareket Deneyleri



→ Xiaomi Mi8 Bağlı ve PPP GNSS / IMU Entegrasyonu: 2 Hz



Sonuçlar



- Trimble NETR9 GNSS çözümlerinde rastgele yürüyüş süreçleri
- Jeodezik alıcı için Kalman Süzgeci, sayısal süzgeçlere alternatif olabilir
- Xiaomi Mi8 çözümlerinde dm – m mertebesinde sapmalar
- GNSS / IMU entegrasyonu bağıl GNSS gözlemleri ile 0.5 Hz 2 cm ve 5 cm, 1 Hz 5 cm hareketlerinde 1 – 3 mm iyileşme, 1 Hz 2 cm'de 1 mm, 2 Hz 2 cm'de ise 5 mm kötüleşme
- GNSS / IMU entegrasyonunda PPP GNSS gözlemleri ile genel olarak 2 – 7 mm kötüleşme
- Frekanslarda genel olarak 0 - 0.02 Hz sapma, ancak düşük frekansta bileşenler söz konusudur



Dinlediğiniz için teşekkürler!

Caneren Gül: cgul@yildiz.edu.tr

Taylan Öcalan: tocalan@yildiz.edu.tr