KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İZMİT KÖRFEZİNDEKİ KABUK DEFORMASYONLARININ FARKLI GNSS TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ

MUHAMMED ALİ GÜVENALTIN

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İZMİT KÖRFEZİNDEKİ KABUK DEFORMASYONLARININ FARKLI GNSS TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ

MUHAMMED ALİ GÜVENALTIN

Prof. Dr. Aydın ÜSTÜN **Danışman, Kocaeli Üniv.**	**.....**
Doç. Dr. Orhan KURT **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	**.....**
Doç.Dr. Sefa YALVAÇ **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.02.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında, İzmit körfez çevresinde gerçekleşen kabuk deformasyonları farklı GNSS teknikleri ile irdelenmiştir. Bu tekniklerin birbirleri ile tutarlılığı, tamamlayıcı yönleri ve kullanılabilirlikleri sunulmuştur.

Kocaeli Üniversitesi'neki eğitim ve çalışma sürem boyunca, bana kattığı her şey için kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Aydın Üstün'e en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak yanımda olan kıymetli aileme, özellikle bu çalışmayı hazırlarken bana gösterdikleri sabırlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma 117Y155 nolu TUBITAK projesi ile desteklenmiştir.

Ocak– 2021 Muhammed Ali GÜVENALTIN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. JEODİNAMİK ARAŞTIRMALAR İÇİN YÜKSEK GNSS TEKNOLOJİLERİ 6
1.1. Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonları (CORS) 7
1.2. Uluslararası, Ulusal ve Bölgesel GNSS Ağları 7
1.2.1. Uluslararası GNSS ağları 7
1.2.1.1. IGS (International GNSS Service) 8
1.2.1.2. EUREF Permanent Network (EPN) 10
1.2.2. Ulusal GNSS ağları 11
1.2.2.1. TUSAGA-Aktif (CORS-TR) 11
1.2.3. Bölgesel GNSS ağları 13
1.2.3.1. Kocaeli Üniversitesi sabit GNSS ağı 13
1.3. Statik Ölçüler 15
1.4. Gerçek Zamanlı Kinematik Ölçüler (GZK) 15
1.5. GNSS Gözlemlerinin Analizi ve Koordinat Zaman Serileri 16
1.5.1. Alıcıdan bağımsız veri değişimi (RINEX) 17
1.5.2. GAMIT/GLOBK 18
1.5.3. Track 20
2. İZMİT KÖRFEZİNDE YÜZEY DEFORMASYONLARI 21
2.1. Yerkabuğu Deformasyonu 21
2.2. Anadolu Plakası ve Tektonik Özelliklerine Genel Bakış 21
2.3. İzmit Körfezinde Zemin Durumuna Bağlı Olası Deformasyonlar 23
2.3.1. Alüvyal topraklar 23
2.3.2. Sıvılaşma 24
2.3.3. Zemin mekaniği ve yapılaşma 25
3. GNSS İLE DEFORMASYON ANALİZİ 26
3.1. Deformasyon İzleme Ağları 26
3.2. Deformasyonların Belirlenmesi 27
3.3. Dengeleme ve Güven Ölçütleri 28
3.3.1. Tüm iz minimum yöntemiyle serbest ağ dengelemesi 29
3.3.2. Güvenirlik ölçütleri ve Baarda testi 31
3.4. Datum Dönüşümü 32
3.5. Deformasyonların Tespiti ve Nokta Hızları 33
3.5.1. Zaman serilerinin oluşturulması 33
3.5.2. Hız haritalarının oluşturulması 33
4. İZMİT KÖRFEZİNDEKİ DEFORMASYONLARIN İZLENMESİ 35
4.1. Yer Kontrol Noktalarının Statik GNSS Ölçüleri ile Deformasyon Analizi 35
4.1.1. 1. GNSS kampanyası (2009) 35
4.1.2. 2. GNSS kampanyası (2018) 39

4.1.3. 3. GNSS kampanyası (2020) 42
4.1.4. Periyot ölçülerinin deformasyon analizi 45
4.2. Sürekli Çalışan GNSS İstasyonarında Deformasyon Analizi 51
4.2.1. TUSAGA-Aktif istasyonlarının izlenmesi 53
4.2.2. ISU ve Gölcük Belediyesi CORS istasyonları 60
4.2.3. Kocaeli Üniversitesi GNSS istasyonları 64
4.3. Yer Kontrol Noktalarının GZK ile İzlenmesi 72
4.4. Farklı GNSS Tekniklerinin Karşılaştırılması 76
5. SONUÇ 78
KAYNAKLAR 80
EKLER 87
ÖZGEÇMİŞ 102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Şekil 1.1 Bina çatısına demir direk ile tesis edilmiş GNSS anteni (a) ve Topcon NET-G5 marka/modelli multi GNSS ölçüm yapabilen GNSS alıcısı (b-üstte sarı), sürekli çalışabilmesi için gerekli donanım ve ekipmanla birlikte (altta akümülatör, aktarım kabloları vb.). 8
Şekil 1.2. IGS referans istasyonlarının dağılımı 9
Şekil 1.3. EUREF referans istasyonlarının konumları 11
Şekil 1.4. TUSAGA-Aktif istasyonlarının konumları 12
Şekil 1.5. Kocaeli Üniversitesi GNSS Ağı 14
Şekil 2.1. Litosferik yerkabuğu deformasyonu ve yapısal sınıflama 21
Şekil 2.2. Türkiye ve yakın çevresinin tektonik durumu ve fayların konum 22
Şekil 2.3. İzmit körfezi jeolojik haritası ve toprak türleri 23
Şekil 2.4. Sıvılaşma öncesi ve sonrası zemin etkisi 24
Şekil 3.1. Şekil 3.1. (a): Beton pilye olarak inşa edilmiş TUTGA noktası (b): Kayalık üzerine işaret edilmiş TUTGA notkası 27
Şekil 3.2. Üç boyutlu uzayda iki farklı koordinat sistemi ile ifade edilen P noktası için datum dönüşümünün geometrik yorumu 32
Şekil 3.3. Çalışma kapsamında kullanılan zaman serilerinden bir örnek. 1: çözüme giren ölçü (gün) sayısı, 2: günlük çözüme ait konum bileşenini ortalamaya göre konumu, 3: konumun (ölçünün) standart sapması, 4: kollokasyon yaklaşımı ile filtrelenmiş konum, 5: ölçülerin trendi, 6: Bayes filtresi için gidiş kestirimi, 7: Optimum bayes kestirimi. 34
Şekil 3.4. Hız vektörünün yata bileşenleri ve hata elipsi parametreleri (solda), düşeydeki hız vektörü ve hata parametresi (sağda). 34
Şekil 4.1. (a): Zemine tesis edilmiş G2331729 no'lu yer kontrol noktası ve GNSS alıcısı ile statik oturumda ölçüm anı. (b): Beton pilye olarak tesis edilmiş G23A0003 no'lu kontrol noktası ve ölçüm anı. 36
Şekil 4.2. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi fotogrametrik harita yer kontrol noktalarının dağılımı 37
Şekil 4.3. 1.GNSS kampanyasında dengelenmiş yatay koordinatlar için hata elipsleri ve düşey koordinat bileşeni için standart sapma büyüklükleri (aşağı-yukarı yönlü oklar). 38
Şekil 4.4. 2. GNSS kampanyasında ölçülen noktaların dağılımı 39
Şekil 4.5. 2.GNSS kampanyasında dengelenmiş yatay koordinatlar için hata elipsleri ve düşey koordinat bileşeni için standart sapma büyüklükleri (aşağı-yukarı yönlü oklar). 40
Şekil 4.6. 1. ve 2. GNSS kampanyaları analizleri sonucunda elde edilen deformasyon değerleri 42
Şekil 4.7. 3. GNSS kampanyası ile ölçümü yapılan (mor renkler) ve yapılamayan (kırmızı) yer kontrol noktalarının dağılımı 43
Şekil 4.8. 3.GNSS kampanyasında dengelenmiş yatay koordinatlar için hata elipsleri ve düşey koordinat bileşeni için standart sapma büyüklükleri (aşağı-yukarı yönlü oklar). 43
Şekil 4.9. Ölçümü yapılan noktaların zamana bağlı kuzey-güney yönde değişimleri 46

Şekil 4.10. Ölçümü yapılan noktaların zamana bağlı doğu-batı yönde değişimleri 47
Şekil 4.11. Ölçümü yapılan noktaların zamana bağlı yukarı-aşağı yönde değişimleri. 48
Şekil 4.12. Noktaların topografyadaki konumları (altta) ve akarsu ya da nehirlere yakınlığı (üstte). 50
Şekil 4.13. Noktaların düşey yöndeki hızları ile yüksekliklerinin ilişkisi (solda) ve akarsu yakınlıklarının ilişkisi (sağda) 50
Şekil 4.14. İzmit körfezi ve çevresinde gözlem yapan CORS istasyonları (kurumlarla birlikte) 53
Şekil 4.15. TUSAGA-Aktif istasyonlarının ITRF2014 sistemine göre yatay hız vektörleri (mm/yıl). 55
Şekil 4.16. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT istasyonu sabit alındığında yatay hız vektörleri (mm/yıl) 55
Şekil 4.17. IZMT istasyonu zaman serisi (ITRF2014 referans sisteminde mutlak) 57
Şekil 4.18. IZMT istasyonu zaman serisi (IZMT sabit şekilde) 58
Şekil 4.19. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT'ye göre yataydaki hızları (mm/yıl) 59
Şekil 4.20. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT'ye göre düşeydeki hızları (mm/yıl) 59
Şekil 4.21. ISU ve Gölcük Belediyesine ait istasyonların IZMT'ye göre yatay yönlerdeki hızları (mm/yıl) 61
Şekil 4.22. ISU ve Gölcük Belediyesine ait istasyonların IZMT'ye göre düşey yöndeki hızları (mm/yıl) 61
Şekil 4.23. ISUU istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak) 62
Şekil 4.24. GGOL istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak) 63
Şekil 4.25. KOU GNSS Ağı istasyonlarının IZMT'ye göre yatay yönlerdeki hızları (mm/yıl) 65
Şekil 4.26. KOU GNSS Ağı istasyonlarının IZMT'ye göre düşey yöndeki hızları (mm/yıl) 66
Şekil 4.27. KOUM istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak) 67
Şekil 4.28. KSBS istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak). 68
Şekil 4.29. KBBB istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak). 69
Şekil 4.30. KDHF istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak) 70
Şekil 4.31. KMYO istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak). 71
Şekil 4.32. GZK yöntemiyle ölçülen noktalar, kullanılan sabit istasyonlar ve oluşturdukları bazlar. 72
Şekil 4.33. G2331662 noktasında GZK zaman serileri. Düşey bileşen penceresinde gezici alıcı uzaklığı (D) gösterilmiştir. 74
Şekil 4.34. G2331915 noktasında GZK zaman serileri. Düşey bileşen penceresinde gezici alıcı uzaklığı (D) gösterilmiştir. 75
Şekil 4.35. G2331731 noktasında GZK zaman serileri. Düşey bileşen penceresinde gezici alıcı uzaklığı (D) gösterilmiştir. 75
Şekil 4.36. CORS istasyonları ve yer kontrol noktalarının yıllık hızları (yukarda yatay hızlar, aşağıda düşey hızlar olmak üzere). 77

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. IGS tarafından servis edilen dosyaların formatları 10
Tablo 1.2. Topcon NET-G5 Teknik Özellikleri 14
Tablo 1.3. GAMIT Analiz parametreleri 19
Tablo 3.1. Jeodezik ağların türüne göre datum parametreleri ve parametreleri belirleyen ölçüler 30
Tablo 4.1. Uyuşumsuz ölçülerin ayıklanması öncesi ve sonrası dengeleme sonuçları 38
Tablo 4.2. GNSS kampanyasında dengelenmiş ölçülere ait en düşük, en yüksek ve ortalama standart sapma değerleri 39
Tablo 4.3. 2.GNSS kampanyasında dengelenmiş ölçülere ait en düşük, en yüksek ve ortalama standart sapma değerleri 40
Tablo 4.4. 1. ve 2. GNSS kampanyları arasında ölçümleri yapılan noktalarda meydana gelen deformasyonlar 41
Tablo 4.5. 3.GNSS kampanyasında dengelenmiş ölçülere ait en düşük, en yüksek ve ortalama standart sapma değerleri 43
Tablo 4.6. 2. ve 3. GNSS kampanyları arasında ölçümleri yapılan noktalarda meydana gelen deformasyonlar 44
Tablo 4.7. 1. ve 3. GNSS kampanyları arasında ölçümleri yapılan noktalarda meydana gelen deformasyonlar 44
Tablo 4.8. İlk ve son epok itibariyle elde edilen konum değişimlerinden ortalama hız kestirimleri 49
Tablo 4.9. GAMIT/GLOBK ile değerlendirilen ve hızları incelenen, deformasyonların tespitinde kullanılan GNSS ağına ait CORS istasyonlarının özeti 51
Tablo 4.10. Analizde kullanılan TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları 55
Tablo 4.11. ISU ve GGOL istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları 60
Tablo 4.12. KOU GNNS Ağı istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları 64
Tablo 4.13. G2331662 noktasının sabit istasyonlar ve TUSAGA-Aktif sistemiyle yapıtığı 120 ölçünün standart sapmaları 73
Tablo 4.14. G2331915 noktasının sabit istasyonlar ve TUSAGA-Aktif sistemiyle yapıtığı 120 ölçünün standart sapmaları 74
Tablo 4.15. G2331731 noktasının sabit istasyonlar ve TUSAGA-Aktif sistemiyle yapıtığı 120 ölçünün standart sapmaları 74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

N	:	Normal Denklemler Matrisi
V_i	:	Düzeltmeler Matrisi
A	:	Katsayılar Matrisi
l_i	:	Ölçüler Matrisi
P_{ll}	:	Ağırlık Matrisi
Q_{ll}^{-1}	:	Ters Ağırlık Matrisi
X	:	Bilinmeyenler Matrisi
G	:	Moore-Penrose Özel Matrisi
T_i:	:	Test Değeri
q	:	Test Tablo Değeri
$\underline{R}$	:	Dönüklük Matrisi
$\underline{I}$	:	Birim Matris
ε	:	X ekseni yönünde dönüklük
Ψ	:	Y ekseni yönünde dönüklük
ω	:	Z ekseni yönünde dönüklük
t_x	:	X ekseni yönünde öteleme
t_y	:	Y ekseni yönünde öteleme
t_z	:	Z ekseni yönünde öteleme
Δ	:	Ölçek Faktörü
CorrXY	:	X ve Y eksenleri arasındaki kofaktör değeri
CorrXZ	:	X ve Z eksenleri arasındaki kofaktör değeri
CorrYZ	:	Y ve Z eksenleri arasındaki kofaktör değeri
σ_X	:	X yönündeki standart sapma
σ_Y	:	Y yönündeki standart sapma
σ_Z	:	Z yönündeki standart sapma
m_0	:	Karesel Ortalama Hata

Kısaltmalar

CORS	:	Continuously Operating Eeference Station (Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonları)
DGPS	:	Diferansiyel GPS
EUREF	:	Europen Reference Frame (Avrupa Referans Çerçevesi)
FES	:	Finite Element Solutions
GAMIT	:	GNSS at MIT
GLOBK	:	Global Kalman Filter
GLONASS	:	Globalnaya navigatsionnaya sputnikova (Global Navigation Satellite System)
GNSS	:	Global Navigation Satellite System (Küresel Uydu Navigasyon Sistemi)
GPS	:	Global Positiong System
GZK	:	Gerçek Zamanlı Kinematik
HGM	:	Harita Genel Müdürlüğü
Hz	:	Hertz

IAG	:	International Association of Geodesy (Uluslararası Jeodezi Birliği)
IGS	:	International GNSS Service
IRNSS	:	Indian Regional Navigation Satellite System (Hindistan Bölgesel Navigasyon Sistemi)
ITRF	:	International Terrestrial Reference Frame (Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi)
KAF	:	Kuzey Anadolu Fayı
NMEA	:	National Marine Electronics Association (Ulusal Denizcilik Elektronik Birliği)
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi)
PPP	:	Precise Point Positioning (Hassas Nokta Belirleme)
QZSS	:	Quasi-Zenith Satellite System (Quasi-Zenith Uydu Sistemi)
RINEX	:	Receiver Independent Exchange Format (Alıcı Bağımsız Değişim Formatı)
RMS	:	Root Mean Square (Karesel Ortalama Hata)
RTCM	:	Radio Technical Commission for Maritime Services (Deniz Hizmetleri Radyo Teknik Komisyonu)
RTK	:	Reak Time Kinematic (Gerçek Zamanlı Kinematik)
SuGAr	:	Sumatran GPS Array (Sumatra GPS Dizisi)
TEC	:	Total Electron Content
TKGM	:	Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü
TUSAGA	:	Türkiye Ulusal GNSS Ağı
UTC	:	Universal Time Coordinated (Eş Güdümlü Evrensel Zaman)
VMF1	:	Vienna Mapping Functions (Viyana Haritalama Fonksiyonları)
VRS	:	Virtual Reference Station (Sanal Referans İstasyonu)

İZMİT KÖRFEZİNDEKİ KABUK DEFORMASYONLARININ FARKLI GNSS TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ

ÖZET

İzmit Körfezi Kuzey Anadolu Fayı (KAF), jeomorfolojik özellikleri, zemin mekaniği ve insan etkisi nedeniyle yatay ve düşey yönde deformasyona uğramaktadır. Konuma bağlı olarak deformasyon hızının birkaç cm'nin üzerine çıkma potansiyeli vardır. Bu çalışmada farklı GNSS teknikleri bölgede meydana gelen deformasyonları izlemek üzere kullanılmıştır. GZK yöntemlerinin deformasyon izlemede kullanılabilirliği de bu tezde cevabı aranan sorulardan biridir.

İzmit Körfezi ve çevresindeki CORS istasyonlarından elde edilen günlük çözümlere ilişkin zaman serileri, KAF'ın belirleyici olduğu tektonik süreçleri ortaya çıkarmıştır. Yerelleştirilmiş konum hızları, KAF dışında kıyı bölgeleri için zemin çökmelerinin varlığına işarettir. 11 yılda 3 kampanya ile ölçülen yer kontrol noktaları, deformasyonların konumsal çözünürlüğünü arttırmıştır. Kampanya ölçülerinin dengeleme sonuçları, 1 cm'den daha iyi duyarlılıkla yerel deformasyon izleme ağının kurulabileceğini göstermiştir. GZK tekniğinde benzer duyarlılık seviyelerine sabit istasyona yakın kinematik (gezici) istasyonlar sayesinde ulaşılabileceği anlaşılmıştır. Bir deformasyon izleme bölgesinde, CORS istasyonlarına ek olarak gerçekleştirilecek kampanya ve GZK gözlemleriyle deformasyonların konumsal ve zamansal ölçeğinin iyileştirilebileceği kanıtlanmıştır.

İzmit Körfezi'ndeki düşey deformasyon nedenleri, jeomorfolojik, zemin mekaniği, insan etkisi ile ilişkilendirilmiştir. Çökme hızlarının topoğrafik yükseklik ve akarsulara yakınlık dereceleriyle ilişkisi korelasyonu (Pearson katsayısı) sırasıyla %24 ve %45'tir. Hesaplanan değerler, deformasyon nedenlerini doğrudan açıklamamakla birlikte soz konusu çevresel faktörlerin çökmeler üzerinde etkili olduğunu işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: CORS, Deformasyon, GNSS, İzmit Körfezi, Zemin Çökmesi.

MONITORING CRUSTAL DEFORMATIONS BY THE DIFFERENT GNSS TECHNIQUES IN IZMIT BAY

ABSTRACT

Izmit Bay has horizontal and vertical deformation due to North Anatolian Fault (NAF), geomorphological features, soil mechanics and antropologic.There is a potential for the deformation velocity to exceed a few cm depending on the location. In this study, different GNSS techniques were used to monitor deformations in the region. Also, the usability of RTK methods in deformation monitoring is one of the questions those answers are sought in this thesis.

Time series of daily solutions obtained from Izmit Bay and its surrounding CORS stations revealed the tectonic processes in which the NAF is determinant. Localized location velocities indicate the presence of subsidence in coastal areas outside the NAF. Ground control points, measured with 3 campaigns in 11 years, have increased the spatial resolution of deformations. The adjustment results of the campaign measures with a sensitivity better than 1 cm have shown that a local deformation monitoring network can be established. It has been understood that similar sensitivity levels can be achieved by using RTK technique if rover is close to base station. It has been proved that the spatial and temporal scale of deformations can be improved by campaign and RTK observations to be carried out in addition to CORS stations in a deformation monitoring zone.

The causes of vertical deformation in Izmit Bay have been associated with geomorphology, soil mechanics and human influence. The correlation (Pearson coefficient) of sedimentation velocities with topographic elevation and their proximity to streams is 24% and 45%, respectively. Although the calculated values do not directly explain the causes of deformation, they indicate that the environmental factors in question are effective on the collapses.

Keywords: CORS, Deformation, GNSS, İzmit Bay, Ground Subsidence.

GİRİŞ

Yerkabuğu, çeşitli doğal ve doğal olmayan süreçlerden dolayı sürekli bir deformasyon geçirir. Kabuktaki değişiklikler volkanik aktivite, deprem, çökme ve heyelan gibi anlık kırılmalar şeklinde ortaya çıkabileceği gibi uzun zamana yayılan tektonik, hidrojeolojik, jeomorfolojik, jeoteknik, iklim değişikliği, mevsimsel veya antropolojik etkenlere bağlı olarak belirli bir trend altında sürekli hareket biçiminde gerçekleşebilir. 1980'lerin başından itibaren küresel konum belirleme ve navigasyon sistem(ler)i (eski adı GPS, şimdi GNSS); tektonik hareketler, kabuk deformasyonu, depremler, tsunamiler, volkanlar, deniz seviyesinin yükselmesi ve diğer jeofiziksel süreçlerin mekanik özelliklerinin anlaşılmasına katkıda bulunmuştur (Bock ve diğ., 2019). Yerkabuğunda meydana gelen değişimler yatay ve düşey konum bileşenleri yardımıyla izlenmektedir. Deformasyon araştırmasının amacı, konumsal hareketin yönünü ve hızını üç boyutlu olarak belirlemek ve hareket vektörünün sistematik ve sistematik olmayan olaylara verdiği tepkiyi ölçmektir. Düzensiz yerkabuğu davranışlarını, incelenen GNSS teknikleriyle, sistematik olanlardan ayırmak için yüksek duyarlıklı jeodezik ölçülere ihtiyaç vardır.

Jeodezik gözlemler mekansal ve zamansal ölçekte yer kabuğundaki değişiklikleri ortaya çıkarmak, uygun bir referans sisteminde deformasyonun izlerini haritalandırmak için kullanılır. Bu açıdan jeodezik çalışmalar deformasyonun sadece nedenlerini açıklamaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda birbirinden çok farklı disiplinlere olası sonuçları hakkında fikirler verir.

Uzun süreli kabuk deformasyonlarının izlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri GNSS tekniğidir. Yöntem farklı ölçüm ve izleme tekniklerine dayalı model yaklaşımlarıyla deformasyonun kinematik özelliklerinin anlaşılmasını sağlamaktadır. Deformasyon belirli bir alanda sürekli bile olsa etkileri sadece gözlem yapılan noktalarda tespit edilir. Deformasyon alanının genişliğine ve büyüklüğüne bağlı olarak GNSS noktaların sayısı, dağılımı, gözlem penceresi zaman aralığı ve ölçme tekrarı (kampanya sıklığı) ve benzeri faktörler yöntemin etkinliğinde kısıtlayıcı olabilir. Ancak aynı parametreler sonuçların istatistiksel anlamlılığını ve dolayısıyla başarısını arttırmak için de kullanılabilir. Örneğin sürekli bir GNSS istasyonunda birkaç milimetre düzeyinde yatay hız bileşeni doğruluğuna ulaşmak için ne kadarlık

bir zaman diliminde gözlem yapmak veya gerçek zamanlı GNSS konum ölçmelerinde yükseklik bileşeninde konum doğruluğunu santimetre düzeyinde tutabilmek için baz istasyonlara olan uzaklık ne olmalıdır soruları akla gelir. Buna ilişkin değerlendirmeler aslında deformasyon izleme çalışmasının başarısını belirleyecek parametrelerdir. Bu tez çalışmasında, bir deformasyon bölgesinde olası GNSS tekniği senoryolarının deformasyonun hangi özelliklerini ne kadarlık bir başarı ile tespit edilebileceği sorularına cevap aranmaktadır.

Bu çalışmada incelenen GNSS tekniklerinden biri yer kontrol noktalarının farklı periyotlarda ölçülüp statik modeller altında dengelenmesi ve karşılaştırılmasıdır. Bir diğeri ise bölge çevresindeki sürekli ölçüm yapan istasyonların zaman serilerinin incelenmesi ve gözlem süresi içinde hızlarının tespit edilmesidir. Statik ve kinematik değerlendirme yöntemleri ile, nokta konum ve hızlarının, istasyonun yakın çevresini içine alan jeolojik, jeofiziksel, jeomorfolojik ve diğer çevresel olaylara tepkileri araştırılmıştır. Farklı gözlem ve değerlendirme tekniklerinin birbirleriyle tutarlılık durumu ele alınmıştır. Ayrıca TUSAGA-Aktif sistemine ve yakın CORS istasyonlarına bağlanarak GZK tekniğiyle yapılan kısa süreli kinematik ölçülerin deformasyon izlemede kullanılabilirliği irdelenmiştir.

Deformasyon alanındaki bir noktanın bu alanın dışındaki referans noktaya göre statik anlamda (diferansiyel) yer değiştirme vektörü veya kinematik anlamda hız vektörü belirlenebilir. Bu nedenle yüzey deformasyonlarının izlenmesinde konumsal ve zamansal çözünürlük kavramları anlam kazanır. Zamansal çözünürlük, belirli bir zaman dilimindeki ölçülerin tekrar sayıları veya onların aralıkları ile açıklanır. Yersel uygulamalarda nokta ile ilgili fiziksel erişim, altyapı ve gözlem yapma sorunları zamansal çözünürlüğü kısıtlayan unsurlardır. Jeodezik deformasyon ağlarında zamansal çözünürlük ile ilgili sorunları sürekli gözlem istasyonları ile çözmek mümkündür. Öte yandan bu istasyonların kurulum ve işletim maliyetleri yüzünden deformasyon çalışmasının yapılacağı bölgede çoğu zaman sınırlı sayıda kalmakta veya hiç kullanılmamaktadır. Bu durumda konumsal çözünürlük sorunundan söz edilir. Özellikle deformasyon bölgesinde nokta sıklaştırmasına gidilerek buna çözüm getirilebilir.

CORS ağları ile çoğu zaman bölgesel çözümler elde edilebilmektedir. Bu istasyonlar aynı zamanda referans koordinat sistem tanımlamada önemli rol oynarlar. Günümüz itibarıyla 157 istasyona ulaşan TUSAGA-Aktif ağı 2009'dan beri ülkemizde sadece Türkiye Ulusal Referans Sistemini tanımlamakla kalmaz, jeodezik alıcılara ülke

sınırları içinde gerçek zamanlı güvenilir konum bilgisi servisi sağlar (Bakıcı ve diğ., 2017, Ögütçü ve Sermet, 2019, Bayrak ve diğ., 2015). Aynı ağ, Türkiye ve yakın çevresini içine alan tektonik plaka hareketlerinin izlenmesinde de kullanılır (Bayrak ve diğ., 2015). Benzer şekilde, örneğin bir deprem ülkesi olarak bilinen Japonya'da GEONET isimli 1300'den fazla istasyona sahip CORS ağı bu alandaki araştırmalara önemli veri kaynağı olmaktadır (Tsuji ve diğ., 2013). Başka bir örnek, Sumatra adası Hint-Avustralya ve Asya plakaları arasında yitim kuşağında yer alan Endonezya ile verilebilir. Sumatra fayı ve volkanik aktiviteler sebebiyle tektonik hareketlerin yoğun olduğu bir bölgedir. SuGAr isimli CORS ağına ait 49 adet sürekli gözlem yapan istasyon ile sürekli hareketler ve sismik aktiviteler detaylı izlenebilmektedir (Mcloughlin ve diğ., 2011). NOAA tarafından yönetilen ABD'nin tüm CORS ağları Amerika kıtasını daha seyrek bir ağ yapısı ile kapsarken (Snay ve diğ., 2008), Amerika'nın güneyindeki meşhur San Andreas Fayının çevresinde ise MAGNET, PANGA, SCGN gibi bölgesel ağlarla bu özel alana yoğunluk kazandırılmıştır (Murray ve diğ., 2019).

CORS istasyonları deprem, tsunami, volkanizma, zeminde sıvılaşma, yeraltı sularında hızlı değişim, heyelan vb yer tehlikelerine karşı kritik bölgelerde gerçek zamanlı jeodezik konum değişimleri izleyebilmektedir. Bu yöntem 2018 yılında gerçekleşen Kilauea yanardağının patlamasının etkilerini yüzeyde konum değişimi olarak gözlenmesini sağladı (Murray ve diğ., 2019). Bir başka çalışmada ise 2016 yılında Japonyada gerçekleşen Mw=7'lik Kumamoto depremi gözlenmiştir. 1 Hz'lik kayıda sahip toplam 39 GNSS istasyonu yakın çevredeki 100 Hz'lik ivmeölçerlerin kayıtlarıyla ilişkilendirilmiştir (Dahmen ve diğ., 2020).

GNSS alıcısı, sinyal aldığı GPS uydularıyla arasındaki pseudorange, taşıyı-faz, doppler etkileri, sinyal-gürültü bilgisi vb. verileri kaydeder. Yüksek duyarlıklı konum belirleme için yazılımlar (bkz: GAMIT/GLOBK, Bernese vb.) ikili farklar (Double Differences) yöntemiyle çözüm yaparken, PPP (Precise Point Positioning) ile çözüm yapan web tabanlı servisler de (AUSPOS, OPUS vb.) giderek popülerlik kazanmaktadır (Bahadır ve Üstün, 2014). Yazılımlar ve değerlendirme teknikleri farklı olsa da santimetre altı yüksek duyarlıklı jeodezik GNSS uygulamalarında deformasyon izleme sonuçları genellikle birbirleriyle tutarlıdır. Doğu İtalya'nın Adriatik Denizi kıyısında, Palano ve diğ. (2020) kuzey batıdan güney doğuya doğru yerleştirilen toplamda 37 adet off/onshore (deniz yüzeyi ve karada) GNSS istasyonu ile bölgenin zamana bağlı konum değişikliklerini izlemiştir. Verileri toplamda (en erken) 1998 yılından 2017'ye kadar olan GNSS istasyonlarının ham gözlem

dosyaları 4 farklı kurum tarafından, temelde 6 farklı değerlendirme tekniği ile işleyerek 3 boyutta kesin koordinatlar, zaman serileri ve hızları analiz edilmiştir. GNSS gözlem dosyalarının analiz edilmesinde kullanılan bilimsel amaçlı yazılımlardan 3ü'nün (Bernese, GAMIT/GLOBK, GIPSY) karşılaştırıldığı çalışmada tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

Sabit istasyonlardan elde edilen düzeltme verileriyle GZK olarak bilinen gerçek zamanlı gezici alıcıda yüksek doğrulukta koordinat değerleri üretebilmektedir. Klasik GZK tekniği, koordinatı iyi bilinen tek bir sabit istasyonla alıcı arasında oluşan baz çözümüne dayanmaktadır. Bu sebeple sabit ile gezici arasındaki mesafe 15-20 km ile sınırlıdır (Kahveci 2009). BÖHHY Klasik GZK ile aplikasyon yapılacağında sabit ve alıcı arasındaki mesafenin 5 km'nin altında olması şartını sunuyor. Diferansiyel GPS olarak bilinen bu yöntemin günümüz örneği (GZK) daha yüksek konum doğruluğu sağlar (Wanniger, 2002).

Doğu Marmara (İzmit) Körfezi bu saydığımız yüzey deformasyon özellikleri arasında farklı büyüklüklerde izler barındıran yerküredeki özel bölgelerden biridir. Özellikle 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinin ardından bölge yerkabuğunun üzerindeki hareketler, Kocaeli (İzmit) Körfezi ve çevresini dünyanın ve ülkemizin jeodezik ve jeofizik alanlarında önemli çalışma bölgelerinden biri hâline getirmiştir (Pekçetinöz ve diğ., 2008, Youd ve diğ., 2009, Balkıs, 2012, Livaoglu ve diğ., 2019, Sümer ve diğ., 2020). Jeomorfolojik olarak incelendiğinde bölgenin kuzey ve güneyindeki farklı boylar ve debilerdeki birçok akarsunun birleşme yeri olduğu görülmektedir. Bu özellik körfezin çevresindeki yüzeyin alüvyal toprak olmasında önemli pay sahibidir (Alvar ve Yaltırak, 2020). Alüvyal topraklı zeminler kaya zeminlere göre daha yumuşak olduğundan, olası deprem ya da asismik kaymalarda konum değişiminin görece yüksek miktarda olmasını tetiklemektedir (Zhang ve diğ., 2019). İzmit Körfezi, liman ve deniz taşımacılığı sayesinde Avrupa'ya yakınlığının da etkisiyle birçok sanayi ve fabrikaya ev sahipliği yapmaktadır. Bu bileşenler ile, bölgede büyük yapılar, liman inşaları, ve kentleşmenin artmasıyla çok katlı binalar, alt ve üst yapı inşaları, nüfus ve bina yoğunluğu çoğalmıştır. Dayanıklılığı yetersiz ve sıvılaşma ihtimali yüksek alüvyal alanlar zeminde deformasyon olasılığını arttırmaktadır (Erener ve diğ., 2018).

Çalışma kapsamında Doğu Marmara (İzmit) Körfezi çevresindeki yüzey deformasyonları farklı GNSS teknikleri ile analiz edilecektir. Literatürde hemen hemen sadece Kuzey Anadolu Fayının hareketini belirlemek üzere yapılan

çalışmlardan farklı olarak bölgenin hem yatay hem de düşey deformasyonları araştırılacaktır. Farklı veri toplama ve değerlendirme yöntemleri aşağıda listelenmiştir: i) Zeminde çivi ya da beton pilye olarak bulunan yer kontrol noktaları 3 farklı GNSS kampanyasında ölçülmüştür (2009, 2018 ve 2020). Toplanan statik veriler, önce kendi kampanya ölçüsü olarak dengelenip kesin koordinatlar ve ardından periyotlar arasındaki farklar yardımıyla yatay ve düşeydeki değişimleri buna bağlı hızlar hesaplanacaktır. ii) Çalışma alanını çevreleyen CORS istasyonların 2016'dan 2020 yılına kadar olan günlük gözlem dosyaları GAMIT/GLOBK ile analiz edilecek, elde edilen sonuçların zaman serileri oluşturulacaktır. Koordinat zaman serileri yatay ve düşeydeki hızlarını (trendi) hesaplanmak üzere kullanılacak ayrıca yıllar içindeki mevsimsel salınımları da araştırılacaktır. iii) Kampanya ölçülerinin yapıldığı yer kontrol noktalarından bazıları GZK yöntemleri ile de ölçülmüştür. GZK uygulaması farklı uzaklıkta CORS istasyonlarına bağlanılarak analiz edilecektir. Ayrıca TUSAGA-Aktif sistemine bağlanarak Ağ-RTK tekniğinin deformasyon izlemedeki etkisi araştırılacaktır. Her bir tekniğin İzmit Körfezi ve çevresinde meydana gelen deformasyonları izleme başarısı değerlendirilecektir.

Bu değişimlerin sebepleri araştırılacak, bölgenin genel tektonik hareketi, zeminin sağlamlığı, bina yoğunlukları ve sıvılaşma ile ilişkileri incelenecektir.

1. JEODİNAMİK ARAŞTIRMALAR İÇİN YÜKSEK DUYARLIKLI GNSS TEKNOLOJİLERİ

Küresel uydu seyrüsefer sistemi yani GNSS (Global Navigation Satellite System); konum ve zaman bilgisi taşıyan elektromanyetik sinyallerin yeryüzündeki GNSS alıcısına iletilmesini sağlayan teknolojidir. Temelde konum bilgisi, sinyalin uydudan alıcıya ulaşana kadar geçen zamanın ışık hızı ile çarpılması sonucu gerçekleşir.

Amerika Birleşik Devletleri tarafından askeri alanda kullanmak amacıyla geliştirilen GPS ya da diğer adıyla NAVSTAR GPS, GNSS sistemlerinin öncüsüdür. Yeryuvarı çevresinde farklı yörüngelere yerleştirilmiş, işler durumda 31 GPS uydusu konum hizmeti vermektedir (Logsdon, 1992). GPS'nin devreye girmesini Rusya Uzay Savunma Güçleri Komutanlığı tarafından, GLONASS (Globalnaya navigatsionnaya sputnikova: Global Navigation Satellite System) küresel kullanıma açılması takip etmiştir. Böylece GPS'den sonra ikinci işler hale gelmiş uydu konumlandırma sistemi olmuştur. Yörüngede aktif 24 uydusuyla kullanıcılarına doğrudan ya da GPS uydularıyla eş zamanlı (Multi GNSS) olmak üzere hizmet vermektedir (Chatre ve Hegarty, 2008). GALİLEO ise, Avrupa Birliği tarafından GPS ve GLONASS'a alternatif olması amacıyla oluşturulmuştur. Toplamda 30 adet aktif uydusuyla sivil kullanıcıyı hedefleyen başta ulaşım ve altyapı olmak üzere, navigasyon ve bilgi teknolojisi servis sağlayıcısıdır. Avrupadaki karayolu ve demiryollarını daha güvenli ve efektif hâle getirmek önemli görevleri arasındadır (URL-1). GNSS sistemlerine farklı ülkeler tarafından yenileri eklenmeye devam etmektedir. QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) Japonya'nın, BeiDou Çin'in ve IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) Hindistan'ın geliştirdikleri jeodezik uydu sistemleridir.

GNSS teknolojilerinin ortaya çıktığı, 1980'li yılların başından bu yana, yeryuvarındaki birçok doğal ve antropojenik süreçler sonucunda meydana gelen; tektonik hareketler, kabuk deformasyonu, depremler, tsunamiler, volkanlar, deniz seviyesinin yükselmesi, iklim değişikliği ve hidroloji alanını kapsayan çeşitli bilimsel uygulamalara katkıda bulunmuştur (Bock ve diğ., 2019). Jeodezik ölçümleri farklı teknikler ile gerçekleştirmek mümkündür. Bunlar jeodezik çalışmanın hedefine, gerektirdiği hassasiyete, ihtiyaç duyulan zaman ölçeğine göre şekillenmektedir.

1.1. Sürekli Çalışan Referans İstasyonları (CORS)

Klasik anlamda GNSS ile deformasyon izleme tekniği, belirli noktaların tekrarlı kampanya ölçümlerinin yapılmasına ve bu verilerin periyodik analizine dayanır. Nokta kümesinin zaman içerisindeki konumsal değişiminden hareketle onların hızından da söz etmek mümkün hâle gelir. Ortaya çıkarılan hızların da, deformasyona etki eden birden fazla etmen yüzünden zamana bağlı olduğu düşünülürse, yüzeyde ya da yerkabuğunda deformasyonun kritik sonuçlar doğuracağı bölgelerde sürekli ölçüm yapan GNSS istasyonlarından yararlanmak kaçınılmaz olmuştur (Bock ve diğ., 2019). CORS istasyonlarının kaydettiği veriler jeodezik uygulamalarda temel veri kaynağıdır.

CORS istasyonlar alıcı ve anten ile entegre çalışmaktadır(Şekil 1.1). Antenin temel görevi uydulardan yayınlanan sinyalleri toplamaktır. Başka bir deyişle, elektromanyetik dalga enerjisini işlenebilir (anlaşılabilir) elektrik akımına dönüştürerek alıcıya iletir. Yeryüzünde sağlam bir zemin üzerine tesis edilen istasyonlardan toplanan ölçüler sayesinde üç boyutlu kesin koordinatlar günlük olarak hesaplanır ve noktanın bulunduğu yüzeyin hareketi ile ilgili bilgi edinilir. Deformasyon belirli bir alanda sürekli bile olsa etkileri sadece gözlem yapılan noktalarda tespit edilir. Bu durum anlamlı deformasyonlara sahip geniş alanların CORS istasyonlarından kurulu bir ağ tarafından izlenmesine yol açmıştır. CORS ağının belli baz uzunluğu ve ölçüm süresi ölçütleri altında toplanmış veriler GNSS'in başlıca hata kaynakları olan tam sayı bilinmeyeni ve atmosferik etkilerin giderilmesi gibi avantajları beraberinde getirmektedir. Sabit GNSS ağları ile yeryuvarının tamamı, kıtalar, ülkeler ya da tektonik olarak anlamlı değişimlerin olduğu bölgeleri izlenmektedir (Liu ve diğ., 2017, Eren ve diğ. 2009, Bock ve diğ., 2019). Analiz sırasında birbirinden bağımsız olarak kurulan GNSS ağlarındaki istasyonların verilerinin RINEX gibi standart veri değişim formatıyla bir arada analizi mümkündür. Bu kolaylık farklı kurumların işbirliğine olanak sağlar ve jeodezik ölçümler gerektiğinde daha geniş ya da değişken ağ geometrisi ile gerçekleştirilebilir.

1.2. Uluslararası, Ulusal ve Bölgesel GNSS Ağları

1.2.1. Uluslararası GNSS ağları

Jeodezi, üç boyutlu ve zaman değişkenli uzayda, yeryuvarının bir bölümünün ya da tamamının haritaya aktarılması ile ilgilenmektedir (Üstün, 1996). Sürekli ölçüm yapan istasyonlar bu tanımın 4. boyutu zaman eksenini de karşılamış olur. Kıtaları

birbirine bağlayarak yeryuvarının tamamını jeodezik olarak ölçmenin ve zaman ile ilişkilendirmenin günümüz teknolojisindeki karşılığı ise uluslarası GNSS ağlarıdır. Bu ağların en geniş çaplı örneklerinden IGS sadece yerküreye dağılmış istasyonları izlemekle kalmayıp aynı zamanda bu alandaki konumsal ürün gereksinimlerini karşılamak üzere kullanıcılara servis vermektedir.



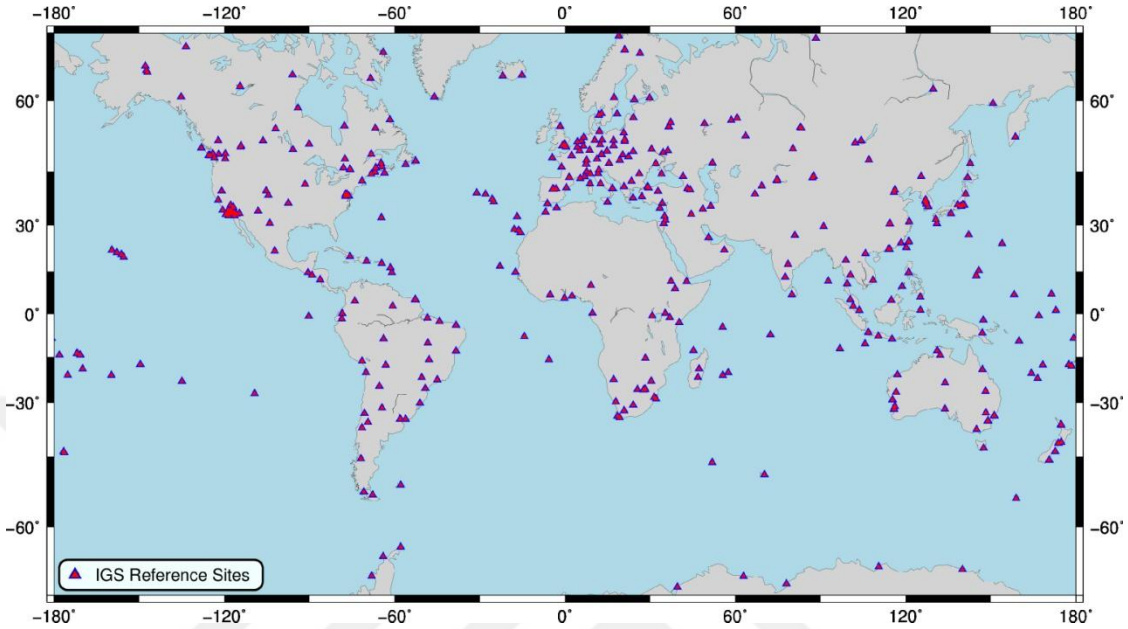
(a) (b)

Şekil 1.1. Bina taşıyıcı kolonuna tesis edilmiş GNSS anteni (a) ve multi GNSS ölçüm yapabilen GNSS alıcısı (b-üst rafta), Alıcının sürekli çalışabilmesi için gerekli donanım (akümülatör, aktarım kabloları vb.) (b-alt rafta).

1.2.1.1. IGS (International GNSS Service)

GNSS uyduları ortaya çıktığı yıllardan itibaren bölgesel ve küresel ölçekte birçok araştırmaya altyapı sağlamıştır. GNSS sistemlerin gelişmesiyle bu alanda ortak standartları belirleme gereksinimi doğmuştur. 1993'te IAG (International Association of Geodesy) tarafından Uluslararası GPS Servisi (International GPS Service for Geodynamics, IGS) adıyla resmen tanındı. Çeşitli jeodezik ve jeofizik çalışmalara altyapı ve destek sağlamak için 1 Ocak 1994 yılında kurum olarak işletilmeye başlandı (Zumberge ve diğ., 1994). Sonraları GNSS sistemlerinin çoğalması ve GPS'den sonra GLONASS sistemlerine de hizmet vermeye başlamasıyla adı International GNSS Servisi olarak güncellendi. 1994 yılından beri IGS misyonunu, açık erişim ile temel küresel referans çerçevesinde yüksek kaliteli GNSS veri ürünleri sağlamak biçiminde tanımlamaktadır. Bu katkısıyla bilimsel, eğitimsel ve

ticari uygulamalar için ilgili alanlarda altyapı desteği vermektedir. Yer bilimleri araştırmaları için gerekli ham ve türetilmiş veri ürünlerini kullanıcılara sunmak için IGS yerküreye dağılmış Şekil 1.2'de görülen CORS gözlem istasyonlarını işletir.



Şekil 1.2. IGS referans istasyonlarının dağılımı

IGS CORS istasyonlarının kesin koordinatları ve hızlarını Uluslararası Yersel Referans Sistemi (ITRF: International Terrestrial Reference Frame) çerçevesinde elde edip yayınlamaktadır (Boucher ve Altamimi, 1989). Bu ürünler; GNSS uydu efemerisleri, yeryuvarı dönme parametreleri, istasyon koordinatları ve hızları, zenit (başucu) troposferik gecikme kestirimleri, global iyonosfer haritaları şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca jeodinamik analizler ile; ITRF'i geliştirmek, yerkabuğundaki (plaka hareketlerini) deformasyonları belirlemek, yeryuvarının dönüşünü izlemek, troposfer ve iyonosferi izlemek, daha alçak yörüngeli yer gözlem uyduların yörüngelerini belirmek gibi misyonlara da sahiptir (URL-2).

IGS tarafından servis edilen farklı veri türleri, verilere özel dosya formatlarında sunmaktadır. Örneğin gözlem dosyaları, meteorolojik ve navigasyon dosyaları RINEX dosya formatındadır (Gurtner ve Mader, 1990). Bu dosya formatındaki veriler ayrıca geliştirilen özel bir sıkıştırma yöntemi olan Hatanaka formatı ile sıkıştırılıp saklanmaktadır (Hatanaka, 2008). Hassas yörünge efemeris bilgilerinin saklandığı dosya formatı ise SP3'tür (Spofford ve Remondi, 2003). Bu dosyalar daha küçük dosya boyutlarıyla depolanması ve işlenmesi amacıyla Tablo 1.1'deki gibi standart şekillerde isimlendirilmektedir.

Tablo 1.1. IGS tarafından servis edilen dosyaların formatları

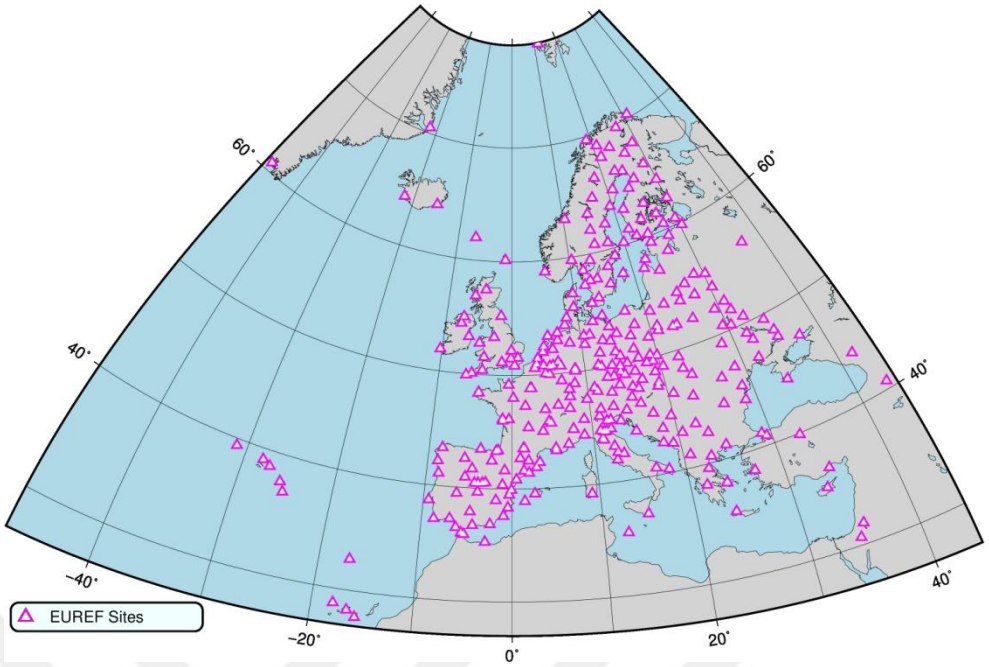
Veri Türü	**Formatı**
RINEX Gözlem Dosyası	ssssdddf.yyd.Z
Navigasyon Mesaj Dosyası	ssssdddf.yyn.Z
Meteorolojik Bilgi Dosyası	ssssdddf.yym.Z
Özet Dosya	ssssdddf.yys.Z
Uydu ve Alıcı Saat Bilgileri	igswwwwd.clk.Z
Yeryuvarı Dönme Parametreleri	igswwwwd.erp.Z
Hassas Efemeris Dosyası (Final)	igswwwwd.sp3.Z

*****ssss: 4-karakterli istasyon kodu, ddd: yılın günü, f: dosya sıra numarası (günlük dosyalar için "0"), yy: yılın son iki basamağı, ww: Yılbaşından itibaren hafta sayısı, wwww: GPS haftası, d: haftanın günü (Pazar 0'dan Pazartesi 6ya kadar olmak üzere)

1.2.1.2. EUREF Permanent Network (EPN)

Uluslararası Jeodezi Birliği'nin (IAG: International Association of Geodesy) Avrupa kıtası için kurulmuş alt komisyonlarından biri olan EUREF, Avrupa kıtasındaki jeodezik çalışmalara altlık olmayı ve bölgeye ait jeodezik referans sisteminin geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. EPN ağı 30'dan fazla Avrupa ülkesinde 100'den fazla üniversite, araştırma enstitüsü gibi kurumun katkısıyla oluşan gönüllü bir federasyonun ürünüdür. Avrupa çapında ortak ve standart bir referans koordinat sistemi olan ETRS89'u iyileştirmek ve devamlılığını sağlamak için Avrupa Parlamentosunun da onayı ve direktifleriyle hizmetini sürdürmektedir (Boucher ve Altamimi, 1989, McCarthy, 1989). ETRS89, Avrupa kıtasına yayılan 200'den fazla çalışan CORS istasyonundan elde edilen gözlemlerle hesaplanmış koordinat referans gerçekleşmesidir (Şekil 1.3). Artan GNSS hizmetleri birçok kullanıcıyı Avrupa ve yakın çevresinde ETRS89'u sıkça kullanılmaya yöneltmektedir (URL-3).

EPN ağından elden edilen veriler, ETRS89'un belirlenmesinde kilit rol üstlenmesinin yanı sıra, yerkabuğu deformasyonlarının ve deniz seviyesinin izlenmesi, atmosferik parametrelerin tespiti ve sayısal hava tahmini gibi çok çeşitli bilimsel uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca değişen kullanıcı ihtiyaçlarına ve GNSS ortamına yanıt olarak EUREF, çalışma grupları ve pilot projeler aracılığıyla yeni uygulamaların ve ürünlerin geliştirilmesi için çalışmaktadır (URL-3).



Şekil 1.3. EUREF referans istasyonlarının konumları

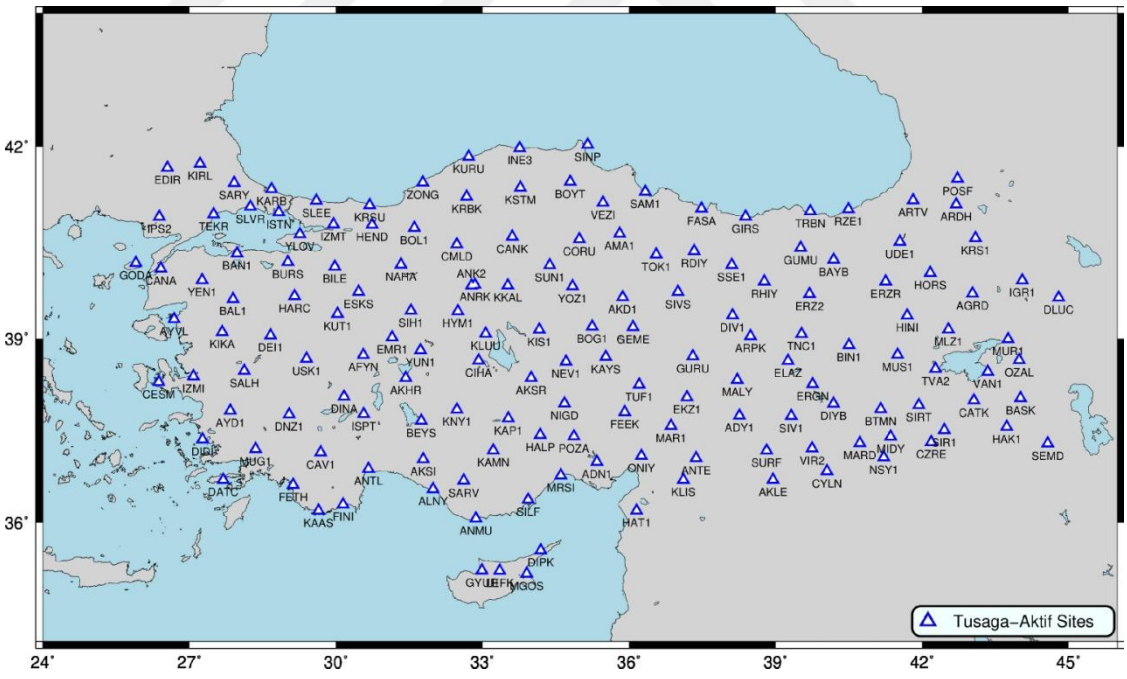
1.2.2. Ulusal GNSS ağları

1.2.2.1. TUSAGA-Aktif

TUSAGA-Aktif, Türkiye'de TUBITAK, HGM, TKGM ortaklığında İstanbul Kültür Üniversitesi yürütücülüğünde hayata geçirilmiş ulusal ölçekte bir GNSS ağıdır. Ülke genelinde 24 saat statik ve gerçek zamanlı hizmet vermek üzere tasarlanmıştır. Ağın görevi ülke savunması ve kalkınmasına destek sağlamak amacıyla, harita ve harita bilgilerinin üretilmesi için referans sistemi oluşturmak ve son kullanıcılara bu ağa dayalı koordinat düzeltme verisi sunmaktır. 8 Mayıs 2006 tarihinde kurulumuna başlanmış ve Mayıs 2009 tarihinde servis sağlamaya başlamıştır. TUSAGA-Aktif ülkemiz ve KKTC genelinde konuşlanmış 158 sabit GNSS istasyonundan oluşur (Şekil 1.4). Kontrol Merkezi Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'ndedir. İstasyonda kullanılan jeodezik alıcı ve anten sistemi GPS, GLONASS ve GALILEO sistemi gibi GNSS sistemlerinin verilerini eş zamanlı toplayabilme becerileri vardır. TUSAGA-Aktif sisteminin 4 temel bileşini; GNSS uyduları, sürekli gözlem yapan GNSS istasyonları, sistem kontrol merkez(ler)i ve kullanıcı tarafında DGPS ve GZK özelliklerine sahip, faz ve kod ölçülerini okuyabilecek nitelikte tek veya çift frekanslı jeodezik GNSS alıcılarıdır.

Kesintisiz bir biçimde uydulardan alınan sinyaller ile kesin koordinatları önceden bilinen belirlediği sabit GNSS istasyonları kontrol merkezine internet üzerinden bağlı

alıcılara gerçek zamanlı düzeltme sağlar (URL-4). Bu tekniğe VRS (Virtual Reference Station) yani sanal referans istasyonu tekniği denir (Landau ve diğ., 2002). Arazide ölçüm yapan gezici bir GNSS alıcısının, ölçüm esnasında bağlı olduğu CORS ağının (en az 3 istasyonlu) veri merkezi ile anlık olarak yaptığı veri alış-veriş tekniği işleyişini açıklar. Bu teknikte, veri merkezine gönderilen gezici alıcı yaklaşık koordinat bilgisi (NMEA formatında), sanal bir referans alıcının konumuymuş gibi aktarılır. CORS istasyonlarının sürekli ölçümleriyle bölge için düzeltme değerleri hesaplayan merkezde, sanal referansa göre konumun düzeltmesi bulunur ve RTCM (yaygın olarak GSM hatları ile aktarılabilir) veri formatında alıcıya geri gönderilir. Düzeltme alıcı konum bilgisine eklenerek santimetre doğruluğunda yeni konum elde edilir. Gezicinin yaklaşık koordinatları 1 metre ile 10 metre arasında değişen bir doğrulukla pseudorange gözlemlerine dayalı olarak tek nokta konumlaması ile hesaplanmak yeterlidir. Bu durumda yaklaşık koordinatlı sanal referans istasyonu ile gezici alıcı arasında, çok kısa bir baz vektörü oluşmaktadır. Kısa baz uzunluğu sanal referans istasyonu ile gezici arasındaki düzeltmelerin yüksek doğrulukla kestirilmesini kolaylaştırır (Landau ve diğ., 2002).



Şekil 1.4. TUSAGA-Aktif istasyonlarının konumları

TUSAGA-Aktif GZK hizmeti yanında sabit istasyonlarda kaydedilen GNSS gözlemlerini de kullanıcılarına sunmaktadır. Veriler takip eden gününde standart RINEX formatında ftp veya http bağlantılar üzerinden paylaşılmaktadır. Bu sayede hem jeodezik hem de başta jeodinamik olmak üzere bilimsel ve diğer hizmet üreten

kuruluşlara ülke ölçeğinde eşsiz veri kaynağı sağlamaktadır. Günlük 30 saniye kayıt aralıklı veriler ücretsiz, 1Hz'lik olanlar ise belirli bir ücret karşılığında dağıtılmaktadır. Bu standart servis bedellerine ek, ülke sınırları içinde meydana gelen bir deprem sonrasında belirli bir çapta deprem bölgesi çevresindeki 1Hz frekanslı istasyon verileri en kısa sürede ücretsiz paylaşıma açılmaktadır (URL-5).

1.2.3. Bölgesel GNSS ağları

Dünyanın sismik olarak aktif birçok alanında kurulan mikro GNSS ağları ile sismik aktivitelerin öncesi, oluşumu ve sonrası detaylı izlenmektedir. Ayrıca ivmeölçerler ve GNSS alıcılarının entegre edildiği modellerle ile GNSS ağları ve sismik ağların entegresi ile daha detaylı ve hızlı analizler hedeflenmektedir(Murray ve diğ., 2019). Ayrıca Jeomorfolojik yapısıyla birçok nehirin birleşme noktası olması ve yakınındaki bölgelerde alüvyal toprak zeminler dikkat çekmektedir.

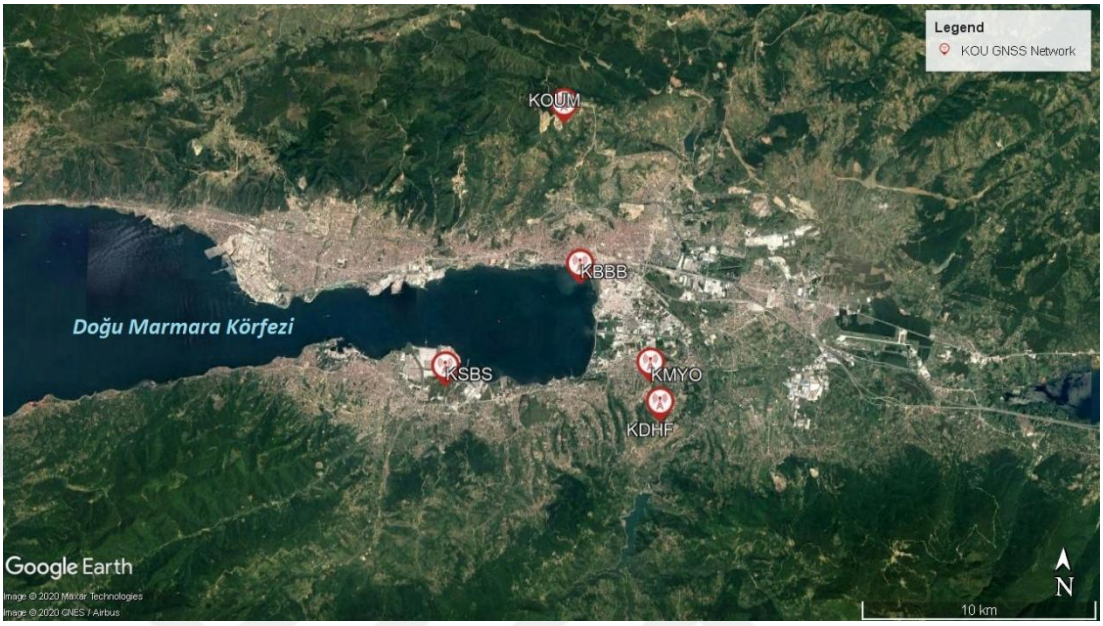
1.2.3.1. KOU GNSS ağı

Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü tarafından TUBITAK ve Kocaeli Büyükşehir Belediyesi ortaklığında "Çok Bandlı InSAR ve GNSS Tekniği ile Doğu Marmara (İzmit Körfezi) Düşey Yönlü Yer Değiştirmelerin İzlenmesi, Zemin Çökmeleri ile Bina Yoğunluğu ve Sıvılaşma İlişkisinin Araştırılması" isimli proje kapsamında Doğu Marmara Körfezi çevresine tesis edilen 5 sabit GNSS istasyonunun oluşturduğu GNSS ağıdır. İzmit segmenti, Kuzey Anadolu Fayının tektonik açıdan aktif kollarından biridir. 1999 İzmit ve Düzce depremleri bu gerçekliğin en önemli sismik sonuçlarındandır.

Kocaeli ilinin gelişen sanayi ve iş olanakları nüfusa paralel olarak bölgedeki büyük ölçekli yapıların da artmasına sebep olmuştur (Garipağaoğlu ve Uzun, 2014). Yapılaşmanın dayanıklılığı yetersiz ve sıvılaşma ihtimali yüksek alüvyal alanların yayılmasıyla birlikte zeminde olası deformasyonları tetiklemesi beklenmektedir. Sonuç olarak uzun ve kısa dönemli deformasyonların izlenmesi ihtiyacıyla, bölge yakınındaki GNSS istasyon ağının sıklaştırılması gereksinimi doğmuştur. 2018 yılının sonunda tesis edilen KOUM ve KSBS istasyonlarını 2020 yılının ilk çeyreğinde KBBB, KMYO ve KDHF takip etmiştir (Şekil 1.5).

İstasyonların yönetimi ve analizi Kocaeli Üniversitesi Harita Mühendisliği tarafından yürütülmektedir. Hedeflenen jeodezik ve sismolojik çalışmalara katkıları

doğrultusunda seçilen Topcon NET-G5 modeline ait teknik özellikler Tablo 1.2.'de listelenmiştir.



Şekil 1.5. Kocaeli Üniversitesi GNSS ağı

Tablo 1.2. Topcon NET-G5 teknik özellikleri (URL-6)

GNSS Ölçmeleri	❖ 452 Kanallı Evrensel İzleme Teknolojisi ❖ GPS, GLONASS, QZSS, SBAS, Galileo, BeiDou ile MultiGNSS İzleme ❖ Harici CR-G5 Anteni
Konum Doğruluğu	❖ Statik/Hızlı Statikte; H: 3mm + 0.4 ppm V: 5mm + 0.5 ppm ❖ Precision Statikte; H: 3mm + 0.1 ppm V: 3.5mm + 0.4 ppm ❖ GZK (L1 + L2)'de; H: 5mm + 0.5 ppm V: 10mm + 0.8 ppm
Veri ve Hafıza	❖ SD/SDHC 32 GB yenilenebilir hafıza kartı ❖ 1-100Hz aralığında kayıt imkânı ❖ TPS, RTCM, SC104, MSM, CMR/CMR+, BINEX, RINEX formatlarında veri transferi ve kayıt
Bağlantılar	❖ Entegre HSPA+ ❖ Bluetooth v2.0 + EDR ❖ Wi-Fi ❖ RS-232 Serial Ports ❖ USB ❖ Ethernet (PoE Class 3) ❖ NTRIP (Client, Caster ve Server) ❖ TCP/IP ve FTP ❖ Web Arayüz
Çevresel Koşullar	❖ -40ºC ile +80ºC arasında çalışabilme ❖ Toz ve Su geçirmezlik belgesi IP67 ❖ Nem'e karşı %100 korumalı ❖ 2 metreye kadar sert yüzeye düşmede koruma (IEC60068)

1.3. Statik Ölçüler

Uydularla konum belirleme teknikleri mutlak ve göreceli (rölatif) olmak üzere ikiye ayrılır. Mutlak yöntemler temelde, kod ölçüleriyle en az 4 konum uydusundan gelen sinyalin seyahat süresinin ışık hızıyla ölçeklendirilerek uydu-alıcı arası uzunlukların hesabını ve uzay geriden kestirme yöntemini kullanır (Şerbetçi ve Atasoy, 1990, Kahveci, 2009). Mutlak konum genelde navigasyon, denizcilik ya da benzeri yüksek doğruluk gerektirmeyen alanlarda kullanılsa da, son zamanlarda gelişen PPP (Precise Point Postioning) tekniği jeodezik anlamda yüksek konum doğruluğu kazandırmıştır (Liu ve diğ., 2017, Bahadır ve Üstün, 2014)

Göreceli (rölatif) yöntem, koordinatları bilinen bir noktaya göre hedef nokta konumunu belirler. Başka bir deyiş ile iki nokta arasındaki vektörel baz belirlenmektedir. Aynı anda ölçüm yapan iki alıcıda toplanan kod ve faz gözlemlerinin uydu efemeris (uydu konum) bilgileri, uydu ve alıcı saat hataları, varsa modelden hesaplanan yoksa göz ardı edilen iyonosferik etkinin ve genellikle ölçü anında kestirilen troposfer gecikmelerin hesaba katılmasıyla gözlem noktasının kesin konumu elde edilmektedir. Yüksek duyarlık aranan çalışmalarda uzun süreli gözlemler, taşıyıcı faz belirsizliğinin çözümünü kolaylaştırmakta ve konum doğruluğunu iyileştirmektedir (Raquet, 1998, Mekik, 2001, Kahveci ve Yıldız, 2012) VRS gibi gerçek zamanlı düzeltmeler alan kinematik yöntem (GZK) de yine göreceli ölçüm tekniği prensibiyle çalışır.

Statik ölçme yöntemleri, 20 km'den daha uzun bazlara sahip ağlarda, güvenilir ve yüksek duyarlık elde etmek için kullanılır. Koordinat kalitesini arttırmak için alıcı uydu geometrisinin gözlem süresince değişmesi beklenir ki, bu süre çoğu zaman 4 saatin üzerinde anlam kazanır (Dixon ve diğ., 1997). Her ne kadar gözlem süresi kadar olumlu etki yaratmasa da son teknoloji CORS istasyonlarında 100 Hz'e (Saniyede 100 kayıt) kadar çıkabilen veri kayıt sıklığı alıcının sensör becerisine olumlu katkı sağlamıştır (Murray ve diğ., 2019).

1.4. Gerçek Zamanlı Kinematik (GZK) Ölçüler

Diferansiyel GNSS (DGNSS) tekniği gerçek zamanlı konum belirleme tekniklerinden klasik olanıdır. Gezici istasyonun koordinatlarının koordinatları sabit istasyona göre belirlenmesi işlemi olarak özetlenir. DGNSS yönteminde koordinatlar kod (pseudorange) ölçüleri ile metre düzeyinde kestirilmektedir(Kahveci, 2009). Gelişen teknoloji kod ölçülerinin yanı sıra taşıyıcı faz ölçülerinin de gerçek zamanlı olarak

alıcıya iletilmesini olanaklı duruma getirmiştir. DGNSS ile karşılaştırıldığında çok yüksek konum doğruluğu avantajı kazandıran bu ölçme tekniği, tek veya çok referans istasyona dayalı olarak sırasıyla GZK veya Ağ-GZK (aynı zamanda VRS ağı) olarak bilinir (Wanniger, 2002).

Klasik teknikte, sabit ve gezici alıcılar çift frekanslıdır. Alıcılar arasında düzeltme verileri radyo dalgalarıyla taşınmaktadır. Buna bağlı donanımlarda radyo alıcı ve vericileri bulunmaktadır. Düzeltme verileri RTCM formatında taşınır. Yöntemin kullanım alanı genişledikçe daha fazla referans istasyona gereksinim duyulur ve 90'lı yılların sonuna doğru bu tür ağların kurulması fikri kabul görmüştür (Raquet, 1998).

Ağ-GZK yöntemi ile tek bir alıcıya olan mesafe kısıtına çözüm getirilmiştir. Ayrıca alıcılarda radyo modem yerine GSM şebekeleri üzerinden veri transferinin olanaklı hale gelmesi, alıcıların ek donanım maliyetini ortadan kaldırmıştır. Günümüzde internet altyapısını kullanan CORS ağları veri iletim problemine tümüyle çözüm getirmiştir. Bu ağlarla kazanılan bir diğer önemli başarı iyonosfer ve troposferik etkilerin en aza indirilmesidir. Klasik yönteme göre çok daha uzun bazlarda (50-100km) çalışma becerisi kazanılmıştır (Kahveci, 2009). İnal ve diğ. (2014) Ağ-GZK'nın daha düşük ortalama hata ile konum bilgisi ürettiğini göstermektedir.

1.5. GNSS gözlemlerinin analizi ve koordinat zaman serileri

GNSS sistemlerinde alıcı ve uydular arasındaki kod ve faz ölçüleri alıcının markasına göre ikili (binary) formatta kaydedilip depolanmaktadır. Doğal format gözlem dosyaları yapılacak analize, kullanılacak yazılıma ya da talep edilen dosyalama sistemine göre okutulabilir, dönüştürülebilir ya da özel sıkıştırma işlemiyle depolanabilir.

Günlük kayıtlara dayalı çözümler için GNSS analiz yazılımların standartlarına uygun isimlendirme önem taşır. Tablo 1.3 ile bu çalışmada statik değerlendirme için tercih edilen yazılım ve dengeleme parametrelerine yer verilmiştir. Dengeleme işleminin sonuçları tabloda verilen parametrelerden çok meta data olarak bilinen alıcı, anten modeli, anten yüksekliği vb istasyona ve ölçü anına özgü bilgilere bağımlıdır. Özellikle anten faz merkezi gibi teknik özelliklere ve dış merkezlik parametrelerine özel önem verilmelidir. Değerlendirme yazılımları kullanıcı tarafından girilen bu bilgilerin doğruluğunu esas alır ve dengeleme işlemi sırasında hataların düzeltilmesi olanağı yoktur.

Bir GNSS ağının statik gözlemlerin değerlendirilmesi ve istasyonlar arasındaki baz vektör bileşenlerin çözümü, Tablo 1.3 ile verilen parametreler göz önüne alınarak gerçekleştirilir. Ağ dengelemesine geçmeden önce çoğu yazılım baz vektör bileşenlerinin uzunluk ve varyans-kovaryans bilgilerinin kestirilmesi işlemini yapar. Ağın tüm tüm bazları bu şekilde değerlendirildikten sonra istasyonların yaklaşık konumları dikkate alınarak dengeleme işlemi yapılır. Değerlendirme ağın ölçü epoğuna atfedilen dengelenmiş koordinatları ve onların varyans-kovaryans bilgilerinin bulunması ile sonuçlanır. Ağın koordinat sistemi için bölgeyi geniş ölçekte kuşatan IGS istasyonları tercih edilmelidir. Bu işlem ya yerel jeodezik ağa bu istasyonlardan koordinat taşınmasıyla veya bu noktaların da içinde yer aldığı dengeleme işlemi sonucunda benzerlik dönünüşümüyle olanaklı kılınabilir.

Her bağımsız statik oturumun çözümünden elde edilen koordinatlar ölçü zamanı ile ilişkilendirilmiş yeni bir gözlem şeklinde değerlendirilebilir. Eğer statik oturum (veya kampanya) ölçüleri düzenli olarak tekrarlanıyorsa, koordinat bileşenlerinin zaman serileri oluşturulabilir. Bu şekilde üretilen veri miktarı arttıkça zaman serisinde anlamı sonuçlar gözlenir. Zaman serisinde günlük çözümler milimetre bandında değişimler göstereceğinden, yüzey deformasyonlarının 3 boyutlu olarak izlenmesinde çok güvenilir bir bilgiye ulaşılmış olur. Bu sonuçlar araştırma konusunu ilgilendiren yer bilimlerinin farklı disiplinleri açısından eşsizdir.

1.5.1. Alıcıdan bağımsız veri değişimi (RINEX)

GNSS verisi toplayan alıcıların firmaya özel ikili dosya formatının alıcıdan bağımsız değişim formatları RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ve BINEX (BINary EXchange) formatları kullanılmaktadır. İlk kez W. Gurtner tarafından 1989 yılında yayımlanmıştır. Revizyon gereksinimlerine ve eklemelere uğrayan formatın ikinci versiyonu 1993'de kullanıma sunulmuştur. Ham dosyalardan elde edilen RINEX dosyaları; kod taşıyıcı faz, Doppler ölçüleri ile GNSS'ten gelen sinyal-gürültü gözlemlerini içermektedir. GPS, GLONASS, Galileo, Beidou'nun yanı sıra SBAS (Satellite Based Augmentation System) teknolojisi verileri RINEX formatında saklanabilmektedir. RINEX formatının esnek yapısı GPS, GLONASS ve Galileo sistemlerindeki farklı band aralığındaki yeni gözlem kodlarıyla kolayca genişletilebilmektedir. RINEX 3.0 ve sonraki versiyonlar çoklu GNSS sistemine uyumlu olduğundan, yeni model alıcılarda söz konusu esneklik daha fazla sağlanabilmiştir (Gurtner, 1994).

1.5.2. GAMIT/GLOBK

GNSS verilerinin, jeodezik anlamda tanımlanmış referans gerçekleşmelerinde (örn. ITRF2005, ITRF2014 vb) anlamlı ürüne dönüşmesi için birçok parametrenin (uydu yörünge bilgileri, uydu-alıcı saat bilgileri, anten faz merkezi değerleri, yeryuvarı dönüklük parametreleri atmosferik etkiler vb.) dâhil edildiği sayısal analizlerden geçirilmelidir. Tüm parametrelerin hesaba katıldığı bir değerlendirme sonucunda alıcının küresel jeodezik referans sistemlerinin birinde tanımlı gerçek konumundan söz edilir. Ticari yazılımlara göre yukarıdaki kısıtları yerine getirebilen, akademik ve bilimsel araştırmalar için ücretsiz, açık kaynak kodlu değerlendirme yazılımları bulunmaktadır. GAMIT/GLOBK jeodezi alanında çalışan araştırmacıların tercih ettiği yaygın bir GNSS değerlendirme yazılımıdır (Herring ve diğ. 2018).

GAMIT/GLOBK, MIT ve SIO ortaklığıyla geliştirilen kapsamlı bir GNSS analiz yazılımıdır. GAMIT (GNSS at MIT), faz verilerini işleyerek, yeryüzündeki GNSS istasyonlarının ve yeryuvarı etrafındaki uydu yörüngelerinin konumunu, atmosferik gecikme hatalarını ve yeryuvarının dönüklük parametrelerinin hesaplanmasını sağlar. GLOBK (Global Kalman Filter), ise ilk hedefi GNSS, VLBI ve SLR deneyleri gibi çeşitli jeodezik çözümleri birleştirmek ve günlük çözümlerin geniş ölçekte sunulmasını ve istasyon hızlarının daha sağlıklı elde edilmesini sağlayan bir Kalman filtresi yazılımıdır (URL-7).

GAMIT ile yapılan değerlendirmeler farklı analiz ve dengeleme parametreleri sunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan genel parametreler Tablo 1.3'teki gibidir.

30 saniye gözlem aralıklı RINEX dosyaları, uygun dizinleme ile GAMIT analizine hazır hâle getirilir. GAMIT'in değerlendirme stratejisi tablolar kısmında gerekli güncellemeler (istasyona ait anten bilgilerinin tespiti, analizi yapılacak istasyon isimlerinin seçilmesi, istasyonlara ait gevşek-zorlama değerlerinin belirlenmesi) yapılmasıyla başlar.

Yükseklik gizleme açısı, alıcının konumuna göre sinyal istenmeyen uyduları devre dışı bırakır. Tepe noktası anten faz merkezinde bulunan ve gökyüzüne doğrultulmuş bir koniyi temsil eder. Koninin yanal yüzeyi yatay düzlemle belirtilen değer kadar açı yapar. Bu açının üstünde, koninin içinde kalan uyduların verileri değerlendirmeye girer. Diğer uydular ufuk düzlemine çok yakın yükseklik açısında sinyale sahip olduğundan atmosferik etkiyi en yüksek düzeyde içerirler.

GNSS alıcılarının uydu sinyalini algıladığı nokta anten faz merkezidir. Bu nokta ölçüm ve çevresel koşullar nedeniyle önceden bilinen faz merkezinden farklı gerçekleşir ve ölçü sırasında değişiklik gösterebilir. Bu iki nokta arasındaki kayıklık, uydu yüksekliğine, azimut açısına ve ayrıca sinyalin türüne (L1 veya L2) bağlı olarak değişir. Yüksek duyarlıklı çalışmalarda bu kayıklık göz ardı edilemez. Farklı anten modelleri için labarotuvar ortamında gerçekleştirilen kalibrasyon ile antenin mutlak ve bağıl faz kayıklığı hesaplanmakta ve IGS ürünü olarak atx formatında sunulmaktadır (Gülal ve diğ., 2011).

Tablo 1.3. Günlük GNSS verilerinin değerlendirmesine yönelik GAMIT analiz parametreleri

Veri Analiz Parametreleri		***Referans Datum ve Koordinat Sistemi***	
Gözlem ölçü sıklığı:	30 Saniye (RINEX dosyaları)	**Datum dönüşüm stratejisi**	7 Parametreli dönüşüm (3 öteleme, 3 dönüklük ve 1 ölçek bkz. Bölüm 4.3.2)
Yükseklik gizleme açısı (elevation mask)	10º	**Referans sistem**	IGS14 (ITRF2014)
Anten faz merkezi modelleri (referans dosya)	igs14_wwww.atx	**Stabilizasyon istasyonları**	ANKR, BUCU, CRAO, GRAZ, ISTA, TUBI, MATE, NICO, ORID, SOFI, ZECK, TEHN, GRAZ, NSSP, RAMO ve ORID
GNSS Yörünge dosyası	IGS (Final)		
Okyanus gelgit modeli	FES2004		
Troposferik harita fonksiyonu	VMF1		
Iyonosfer düzeltmesi (ionex file)	IGS Ionosphere Maps Files (igsg_ddd0.yyi)		

*wwww: gps week (gps haftası), ddd: yılın günü, yy: yılın son iki hanesi

1990'lı yıllardan beri uydu altimetresi ile okyanus gel-git etkileri yüksek doğruluklu modellenebilmektedir. 2004 yılında Fransız tidal (gel-git) grubu (FTG) tarafından hidrodinamik denklemlerle bir dizi sonlu elemanlı çözümünü (FES: Finite Element Solutions) yayınladı. GAMIT analizlerinde bu gel-git modelini esas almaktadır (Lyard ve diğ., 2006).

Yeryüzünden itibaren atmosferin ilk 50 kilometresinde troposfer tabakası yer alır. Elektromanyetik sinyaller üzerindeki kırıcılık indisi dikkate alındığında devamındaki 200 kilometrelik katman iyonosfer tabakasıdır. GNSS uydularından alıcılara gelen sinyaller bu iki temel katmandan geçişi sırasında enerji kaybı ve gecikmeye uğrar. İyonosferde gecikmeye neden olan elektron aktivitesi, metreküpteki elektron miktarının fonksiyonu olarak zamana bağlıdır. İyonosferik gecikmenin giderilmesi için çift frekanslı GNSS alıcıları kullanılmaktadır. Farklı frekansa sahip dalgalar aynı bölgede farklı direnç göstereceğinden, aralarındaki kayıp ya da kazanç hesaplanabilir. IGS 1998 yılından beri çift frekanslı GNSS alıcılarından topladığı günlük veri ile toplam elektron miktarını (TEC) ifade eden model harita ve dosyalarını IONEX formatı ile yayınlamaktadır. Troposferdeki gecikme ise frekansa bağlı değildir. Troposferin kuru ve ıslak bölgeleri için söz konusu etki ayrıdır. Kuru bileşen yeryüzünün farklı bölgelerinde ölçülen ısıya, basınca, nem oranına ve yüksekliğe bağlı olarak modellenir. Analizde kullanılan model VMF1 modelidir (Boehm ve diğ., 2005). Yeryüzüne çok yakın ve görece daha düşük gecikme değeri üreten ancak belirlenmesi daha zor olan ıslak bileşen ise değerlendirme sırasında bilinmeyen parametrelerle birlikte kestirilir.

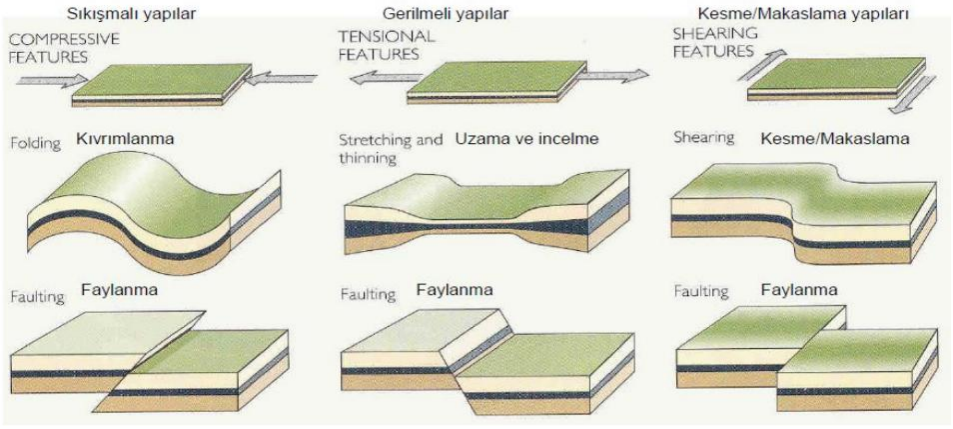
1.5.3.Track

Track, gözlem epoğu bazlı kinematik, yani hareketli bir alıcı için çözüm yapan GAMIT/GLOBK yazılım takımının bir modülüdür (URL-7). Burada hareket ile alıcının değil çözümün hareketli başka bir deyişle epok bazlı olması anlaşılmalıdır. Konumu için cm ve altı doğrulukta çözüm aranıyorsa faz gözlem verilerine ihtiyaç duyulur. Track gözlem sonrası değerlendirme yazılımı olarak kullanılır. Jeodinamik araştırmalarda özellikle sismik aktivitenin gerçekleştiği (deprem anı) yer değiştirmelerin analizini sağlar. Elde edilen epok bazlı koordinat bilgisi; seçilen referans noktasına göre yorumlanır. Koordinat bileşenlerinin zaman serisi anlık yer değiştirme etkilerini açığa çıkarır. Yüksek frekanslı gözlemler (1Hz ve daha yüksek) deprem anlarını ve karakterlerini incelemek için çok kullanışlıdır. Çözüm iyinosferik etkinin sabit ve gezici noktalarda aynı kalması kabulünü esas alır. Bu nedenle istasyonlar arası mesafenin 100 km'nin altında olması tavsiye edilmektedir (Herring ve diğ., 2008).

2. İZMİT KÖRFEZİNDE YÜZEY DEFORMASYONLARI

2.1. Yerkabuğu Deformasyonu

Deformasyon genel olarak bir cisim için; yer değiştirme, dönme veya şekil değiştirme durumları için kullanılan bir kavramdır. Yerkabuğunda deformasyonlar, bir kayaç kütlesine sıkıştırma, gerilme kesme/makaslama benzeri kuvvet uygulandığında bu kütlenin şeklinin ya da hacminin değişmesiyle meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar faylar, eklemler, kıvrımlar ve foalisyon (yapraklanma) gibi jeolojik durumları beraberinde getirmektedir. Yeryuvarını oluşturan kayaç kütleler sert ve sağlam olmalarına rağmen uzun zaman periyotları sonunda, yerkabuğuna etki eden kuvvetler sonucunda deformasyona uğrarlar. Bu kuvvetler temel olarak; cismi sıkıştıran ve boyunu daraltan sıkışma kuvvetler, cismi çeken, boyunu arttıran ve koparmaya çalışan çekme kuvvetleri ve cismi birbirine ters iki yönde kuvvetle sıkıştıran kesme/makaslama kuvvetleri olarak üç türde incelenmektedir. Şekil 2.1'de bu kuvvetlerin sonuncunda zeminlerde meydana gelebilecek durumlar ifade edilmiştir. Yeryuvarı plaka tektoniği çalışmalarına göre, bu üç kuvvet; birbirinden uzaklaşan, yaklaşan veya birbirine göre yanal olarak kayan plakalarda meydana gelmektedir (Yalçın ve diğ., 2013).

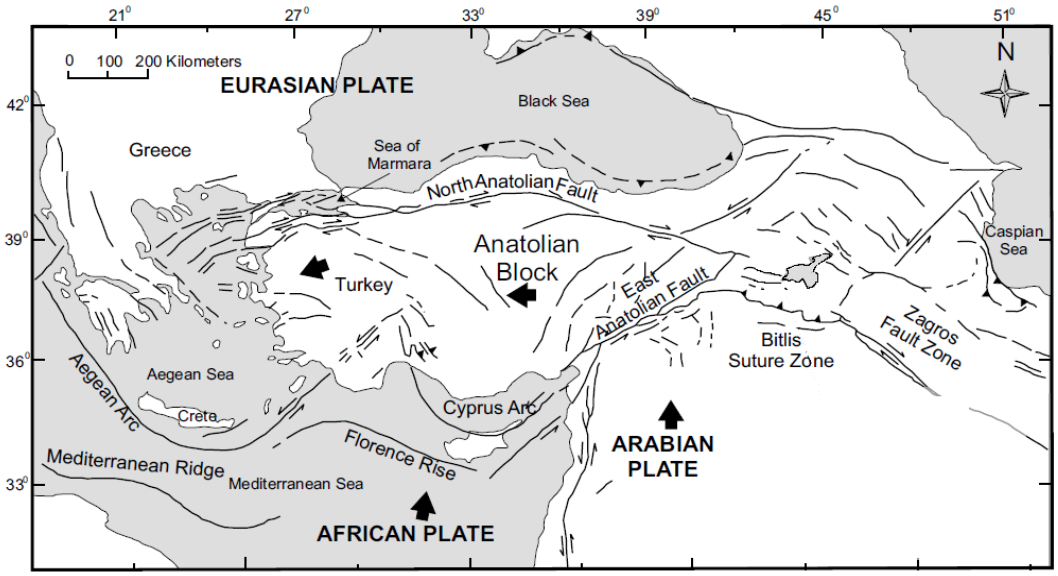


Şekil 2.1. Litosferik yerkabuğu deformasyonu ve yapısal sınıflama (URL-9)

2.2. Anadolu Plakası ve tektonik özelliklerine genel bakış

Yerkürenin 70 ila 100 kilometre arasında kalınlığa sahip yüzey katmanı litosfer bir taş küre olarak modellenmiştir. Kıtalar ve okyanuslar bu katmanda yer almaktadır.

Şekil 2.1'de gösterilen sıkışma, gerilme ya da makaslama durumları taş kürede meydana geldiğinde faylanma adı verilen sınırlar veya yüzey kırıkları oluşur. Tektonik araştırmalar ülkemizin bulunduğu coğrafyanın anakaraların birleşme yeri olduğunu ortaya çıkarmıştır. Türkiye ve yakın coğrafyasında Avrasya anakarasına göre plakaların hareket yönleri ve bunların sınırları (ana fay çizgileri) Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Türkiye ve yakın çevresinin tektonik durumu ve fayların konumu (Yalçın ve diğ., 2013).

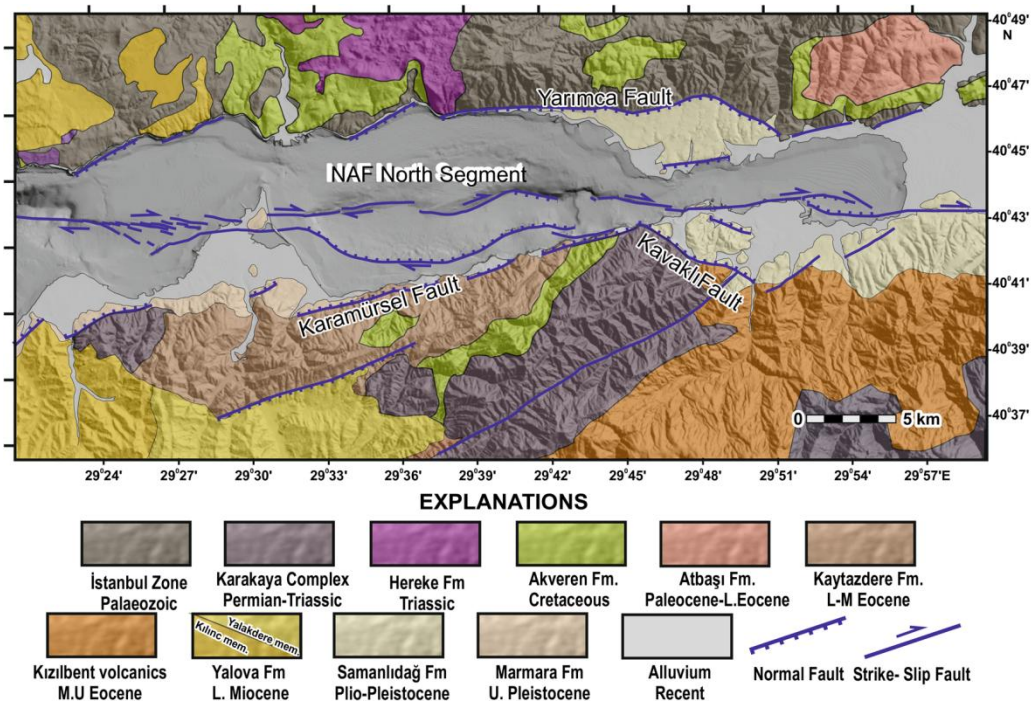
1948 yılında İhsan Ketin Kuzey Anadolu'da meydana gelen depremlerin lokasyonu ve yeryüzünde bıraktığı izlerden yararlanarak Kuzey Anadolu Fayını (KAF) tanımladı. Doğu Anadolu'dan başlayarak Karadeniz kıyısına paralel doğrultuda ilerleyen fay, Marmara Bölgesinde iki kola ayrıldıktan sonra Ege Denizinin batısına kadar uzanır. Tek parça olmayıp irili ufaklı parçalardan oluşur ve 500 ila 1000 m arasında değişen genişlikle bir kuşak (zon) içinde kalır. Ege Denizi içindeki segmenti ile birlikte uzunluğu yaklaşık 1500 km'ye dayanır. Fayın kuzeyinde bulunan Avrasya Kıtası fay boyunca sağ yanal atılımlı bir yapıyı ortaya çıkarmıştır. Güneydoğu Anadolu'ya güneyden yaklaşık 16 mm/yıl hızla yaklaşan Arap plakası Anadolu bloğunu doğudan Avrasya plakasına sıkıştırarak ortalama 20 mm/yıl hızla batıya yönelmesine neden olur (McClusky, ve diğ., 2000; Reilinger ve diğ., 2011).

İzmit Körfezi 17.08.1999 tarihinde büyüklüğü Mw=7.4 Gölcük ve 12.11.1999 tarhinde büyüklüğü Mw=7.2 Düzce depremlerinden etkilenmiştir. Her iki deprem Kuzey Anadolu Fayının aktif yapısının sonucudur. Yeni tektonik dönemde KAF'ın

aktif yapısı sadece deprem üretmekle kalmayıp, aynı zamanda bölgenin jeomorfolojisini şekillendirmektedir. İzmit Körfezi güneyde yüksekliği 1500 m'ye çıkan Samanlı Dağları ile Kuzeyde 500 m yükseklikli dalgalı düzlüklerle çevrilidir ve bir çöküntü havzası olarak doğu batı yönünde uzanır. Çöküntü havzasındaki alüvyal topraklar kuzey ve güney yamaçlardan nehir ve akarsularla taşınmıştır ve güncel jeolojik yapıyı meydana getirmiştir. Körfezin içinde Marmara Denizi boyunca ilerleyen fay KAF'ın kuzey kolu olarak bilinir. KAF'ın güneydine kıyı boyunca irili ufaklı normal faylanmalar gözlenir. Bunların en büyüğü Karamürsel Fayıdır. Kuzey kıyıda ise benzer çizgesellik Yarımca Fayı olarak tanımlanmıştır. Buna göre KAF boyunca sağ yanal atılımlı ana deformasyona havza jeolojisinden kaynaklanan yerel deformasyonlar da katılmaktadır. İzmit Körfezi'nin ayrıntılı jeolojik haritası Şekil 2.3'de sunulmaktadır.

2.3. İzmit Körfezinde Zemin Durumuna Bağlı Olası Deformasyonlar

Yerkabuğunda ölçülen deformasyonları büyük ölçüde etkileyen sebeplerin başında zeminin jeolojik yapısı ve sağlamlığı söz konusudur. Bu sebeple İzmit körfezine ait jeolojik durum incelenmiş, zeminde ölçülecek deformasyonlara etkileri yorumlanmıştır.



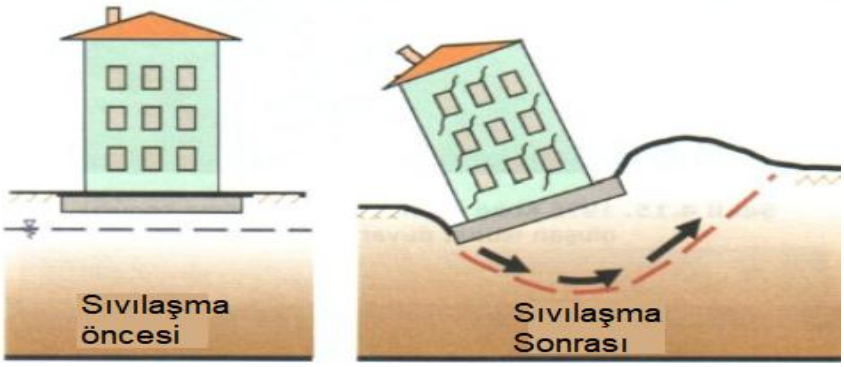
Şekil 2.3. İzmit körfezi jeolojik haritası ve toprak türleri (Alvar ve Yaltırak, 2020).

2.3.1 Alüvyal topraklar

Taşınmış topraklar olarak da bilinen alüvyon yığınları, toprak partiküllerinin yüzey akarsuları tarafından düşük eğimli veya düz yerlerde birikmesiyle meydana gelir. İklim koşullarının ve jeomorfolojik yapının şekillendirdiği bu zeminler çakıl, kum ve mil gibi unsurlardan oluşmaktadır. Deltalar ve vadi tabanlarının genişlediği yerlerde akarsu boyu ovalarında sık rastlanmaktadır. Ülkemizde başlıca, Ege'de Bakırçay, Gediz, Küçük Menderes, Büyük Menderes, ovalarında, Doğu anadoluda, Erzincan, Erzurum, Pasinler, Muş ovaları diğer ovaları ve bu çalışma bölgesini de kapsayan Kuzey Anadolu fay zonu üzerindeki çöküntü ovalarda görülmektedir. Şekil 2.3'de İzmit körfezinin toprak tipleri açısından durumu gösterilmiştir. Alüvyal toprakların kıyı, delta ve benzeri su seviyesinde bulunmaları sıvılaşma ihtimalini beraber getirmektedir (Ündül ve Gürpınar, 2003).

2.3.2 Sıvılaşma

Sıvılaşma (Liquefaction), deprem ya da benzeri büyük kuvvetlerin hızlı bir şekilde yer kabuğuna etkisi ve bu etkiyle zeminin sertliğini (sıkılığını) anlık olarak kaybetmesi olarak tanımlanmaktadır. Gerçekleştiği durumda, zemin mukavemetini kaybederek bir süreliğine katı yerine akıcı sıvı gibi davranmaktadır (Celep ve Kumbasar, 2000).



Şekil 2.4. Sıvılaşma öncesi ve sonrası zemin etkisi (Celep ve Kumbasar, 2000).

Depremde ortaya çıkan sismik dalgalar, genellikle suya doygun ve gevşek zeminlerde ilerleyip birbirlerine göre kayma kuvvetleri ile zeminde yer değiştirmeye neden olurlar. Sismik dalgalar ani ve çok kısa süreli olmasından dolayı, partiküller arası suyun drene olması için gereken süre yeterli olmamaktadır. Ortamdan uzaklaşamayan sıvının basıncı aniden arttığında zemin partiküllerini bir arada tutan kuvvetler yok olur ve partiküller birbirinden uzaklaştırır. Bu durumda da zemin dayanıklılığını yitirir. Zeminin sıvılaşması sonucu yapı, zemine batma veya hafif

yapılarda yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi gözlenebilir. Sıvılaşan zemindeki küçük kayma gerilmeleri altında büyük şekil değiştirmelere sebep olur ve yapılarda zemin göçmesi hasarları meydana getirir (Şekil 2.4).

2.3.3 Zemin mekaniği ve yapılaşma

Kentleşmenin ve nüfus artışının olduğu bölgeler beraberinde çok katlı ve büyük binaları da getirmektedir. Büyük yapıların artmasıyla yüzey alana etki eden kuvvetlerin artması orantılıdır. Artan kuvvetler neticesinde bölge zeminlerinde meydana gelen küçük sayılacak deformasyonlar üzerlerindeki yapılar için tehlike arz edebilmektedir. Deprem riski taşıyan ya da zemin açısından yeterli sağlamlığa sahip olmayan bölgelerin yüksek hassasiyetle izlenmesi, bu bölgelerde alınması gereken önlemler ve yeni yapı alanlarının yer seçimleri önemli kaynak olmaktadır. Günümüzde bu bölgelerin izlenme teknikleri arasında GNSS teknikleri ve uydu radar görüntüleri sıkça kullanılan tekniklerdendir.

İzmit körfezi ve çevresi jeolojik ve morfolojik yönden incelendiğinde, sahil kesimlerinin yoğunlukla yumuşak ve alüvyal zeminler olduğu bilinmektedir. İzmit körfezinde bina yoğunluklarının zamana bağlı artmasının zeminde meydana gelen deformasyonlarla ilişkisinin araştırıldığı çalışmada Erener ve diğ. (2019) bu oranın doğrusal olan sonuçlarına varmıştır.

3. GNSS İLE DEFORMASYON ANALİZİ

Dilimize Fransızcadan geçmiş olan deformasyon; biçimi bozulma, biçimsizleşme anlamında kullanılır. Yerkabuğu bir bütün olarak düşünüldüğünde zaman içerisinde iç ve dış kuvvetlerin etkisiyle blok hareketleri ile ötelenme, dönme, gerilme, sıkışma biçiminde değişime uğrar ve başlangıçtaki görünümünden uzaklaşır. Meydana gelen değişim jeodezik, jeolojik, jeofizik vb. yerbilimlerinin farklı disiplinlerini ilgilendirdiğinden inceleme konusu olur. Jeodezi bilimi bu değişimi geometrik olarak gözleyen ve haritalayan yerbilim dalıdır. Yerkabuğundaki deformasyon yersel ve uydu teknikleriyle farklı biçimlerde izlenebilmektedir. Noktasal deformasyon belirli sıklıkta oluşturulmuş yüzey ağları yardımıyla ölçülürken, yüzey elemanı olarak uzaktan kullanılan algılama ve fotogrametrik yöntemler daha geniş alanların kontrol edilmesini sağlar. Bu bölümde GNSS tekniklerine dayalı olarak noktasal deformasyon analizleri hakkında bilgi verilecektir.

3.1. Deformasyon İzleme Ağları

Uzun süreli kabuk deformasyonlarının izlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri GNSS tekniğidir. Yöntem farklı ölçüm ve izleme tekniklerine dayalı model yaklaşımlarıyla deformasyonun kinematik özelliklerinin anlaşılmasını sağlamaktadır. Yeryüzünde zaman değişkenli meydana gelen deformasyonların anlaşılması için en önemli hususlardan biri referans alınıp farklı periyotlarda tekrarlanarak (sürekli veya kampanyalar hâlinde) gözlenecek olan noktalardır. Üzerinde bulunduğu yerkabuğu adına bilgi vermesi beklenen noktalar veya sürekli ölçüm yapacak alıcıların antenleri; sağlam sert, kayaç, uzun süre kaybolmayacak, korunaklı alanlarda seçilmelidir. Zemin üzerine işaretli, sadece gözlem yapılacak anlarda kullanılan noktalar genel yapısı itibariyle, zeminin durumuna göre ve ülkemizde BÖHYY'nin belirlediği kıstaslara uygun olarak, beton üzerine çivi yahut pilye üzerine olacak şekilde tesis edilmektedir (Şekil 3.1).

Kabuk üzerinde sabit yer kontrol noktalarıyla analizler için ulusal ölçekte en kapsamlı örnek TUTGA (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı) ağıdır. 1997 ila 1999 yılları arasında Türkiye'nin tektonik plaka hareketleri ve depremlerden sonra oluşan deformasyonlarını izleme, ulusal yatay kontrol ağını geliştirme, gereksinimleriyle

çağın gerektirdiği teknolojik ilerlemeler ile GNSS alıcılarıyla gözlem yapılmaya uygun TUTGA oluşturulmuştur. Ulusal ölçekte yapılan çalışmada 694 nokta ile ülke sınırları içini 15 ila 50 km aralıkla sıklaştırmıştır. TUTGA ağı ile noktalara ait ITRF koordinat sisteminde 1-3cm doğruluklu X, Y ve Z yönlerinde koordinat değerleri, ve bu değerlere ait zamana bağlı değişimleri ile hesaplanmış Vx, Vy ve Vz hız değerleri elde edilmiştir(Aktuğ ve diğ., 2011).



(a) (b)

Şekil 3.1. (a): Beton pilye olarak inşa edilmiş TUTGA noktası (b): Kayalık üzerine işaret edilmiş TUTGA notkası

Bölüm 1'de bahsedilen kriterle GNSS çalışmalarına katkı sağlamak, GZK ölçümlere olanak ve altlık olmak ve en önemlisi bulunduğu noktanın zamana bağlı değişimini kesintisiz gözlemek hedefiyle CORS istasyon larının kurulumu yaygınlaşamıştır. Önceki bölümlerde bu istasyonların global ve ulusal düzeydeki kullanım stratejilerine değinilmiştir. Büyük ölçekteki blokların tektonik olarak genel hareketleri dışında, yerel anlamda deformasyon davranışı gösteren, sismik olarak aktif, ya da başka jeolojik sebeplerden aykırı davranışlar gözlemlenebilir. İster büyük ister küçük ölçekte olsun her türlü deformasyon davranışı bu nitelikteki istasyonlar tarafından sürekli izlenmektedir.

3.2. Deformasyonların Belirlenmesi

Yeryuvarı üzerindeki tektonik hareketlerin istatistiksel anlamda gözlenebilir şekilde izlenmesi, jeodezi disiplini için en önemli problemlerden biridir. Doğal tektonik hareketler oldukça yavaş (yılda santimetreler bandında) olduğundan hareketlerin kısa sürede ya da direkt olarak ölçülmesine imkân yoktur. Ayrıca ölçümler yapılırken referans alınacak datum sistemlerinin farklılaşması bu hesabı iyice zora sokar. Bu gerekçelerle bağıl olarak yer kabuğunda meydana gelen deformasyonların takibinde

periyodik yani zaman ölçeğinin de analizin parçası olduğu bir teknik izlemek zorunlu hâle gelmiştir (Yalçınkaya, 2000).

Deformasyon izleme ağları için hazırlanmış tasarım planı büyük önem arz etmektedir. Hareketin beklendiği bölge üzerinde, noktanın sürekliliğini sağlamak için korunaklı zeminler seçilmelidir. Mevsime veya jeolojik yapısına göre sağlam olmayan zeminler blok veya yapıya ait deformasyon hareketinden uzak yanlış yoruma giden fikirler verebilir. Yine bölgenin durumu ve belirlenen ihtiyaca göre, CORS istasyonlarının tesis edileceği yer ve zeminlerin seçiminde bu hususlar dikkate alınır. Farklı periyotlarda yapılan GNSS ölçülerinden kaba hatalı olanlar da ayıklandıktan sonra her periyot ayrı ayrı dengelenip nokta koordinatları elde edilir. Farklı periyotlardaki dengelenmiş koordinatların karşılaştırılması için ortak bir jeodezik datum şarttır. Bu gerekliliği sağlamak için Tablo 3.1.'deki koşullara uygun deformasyon alanının dışında, deformasyon izleme süresince hareketsiz kabul edilen nokta ya da noktalar belirlenir. Dayanak noktalarına göre farklı kampanya epoklarında dengelenen ağların koordinatları artık karşılaştırmaya hazır durumdadır.

3.3. Dengeleme ve Güven Ölçütleri

Mühendislik disiplinlerinin bir çoğunun da kabul ettiği gibi; geometrik ya da fiziksel olarak ölçülen değerlerin tamamı ölçü hatalarını da içinde barındırır. Bu hatalar ölçme tekniklerinin ve insan duyularının sınırlarının toplam etkisidir. Yapılması gereken ölçüm işini tekrar etmek, kontrol edilemeyen hataların etkisini azaltmaktır. Dengeleme hesaplarının amacı, fazla ölçüler yardımıyla koordinat bilinmeyenleri gibi aranan büyüklüklerin dengelenmiş (tek değere indirgenmiş) değerlerini sayısal olarak elde etmektir. Kaba hatalar ve dengeleme işlemi öncesi ölçülerden arındırılan sistematik etkiler dengelemenin kapsamı dışındadır. Ayrıca raslantısal hataların yayılımını inceleyerek dengelenmiş fonksiyon değerlerinin duyarlılıklarına ulaşmak temel hedefler arasındadır (Öztürk, 1991).

Datum; uzayda herhangi bir noktanın yatayda ve/veya düşeyde konumunu belirlemek için seçilen parametre sistemine denir. Jeodezik ağlar, belirli bir datuma başka deyişle oluşturulan referans yüzeye, modele ve bunlarla ilişkilendirilmiş parametrelerine bağımlıdır. Bu parametreler ile ağın ilgili datumdaki yeri, ölçeği ve dönüklüğü bilgileri belirlenir. Datum parametrelerinin sayısı ağın boyutuna ve ölçülerin türüne göre değişkenlik gösterebilir (Tablo 3.1). Farklı boyut ve ölçü türlerindeki jeodezik ağlar dengelenirken datum parametrelerinin tümü ya da bir

kısmı bilinmez ise bilinmeyen datum parametresini temsil eden datum defekti oluşur. Datumu bilinen jeodezik ağların dengeleme hesabı EKK (En Küçük Kareler) yöntemi ile gerçekleştirilir. Böyle ağlarda sabit yani bilinen kabul edilen nokta veya noktaların doğruluk ve duyarlılığı kesin kabul edildiğinden içerdikleri hataların ağın tamamını etkilemesi kaçınılmaz olur. Bu durum sabit kabul edilen noktandan uzak ölçülere gelecek düzeltme değerlerinin artması anlamına gelir.

Datum parametrelerinin bilinmediği, veya ağın bazı noktalarının kesin koordinatlarına bağlanmadan (zorlamasız) dengelendiği çözümlere serbest ağ dengelemesi denmektedir. Bu çözümlerde normal denklemlerde bilinmeyenlerin katsayılar matrisi olan $\mathbf{N=(A^TPA)}$'nın tersi alınamaz ve iki farklı yaklaşım uygulanabilir. Bunlardan ilki serbest ağ dengelemesine olanak sağlayan Tüm İz Minimum çözümüdür. Bu çözümde, amaç fonksiyonu olarak seçilen $\mathbf{V^TPV=min}$ şartına ek olarak ağın oluşturulduğu koordinat dönüşümünü de sağlayacak $\mathbf{X^TX=min}$ şartı eklenir.

3.3.1. Tüm iz minimum yöntemiyle serbest ağ dengelemesi

Tüm iz minimum ile hiçbir noktanın sabit (bilinen) kabul edilmediği çözümlerde nokta koordinatlarının tamamı bilinmeyen alınarak matematik model kurulur. Ölçüleri bilinmeyenlere bağlayan fonksiyonel ve ölçülerin varyans-kovaryans bilgileriyle şekillenen stokastik model sırasıyla,

1. $\boldsymbol{L_i + v_i = \Phi_i(x, y, z \ldots); i = 1,2, \ldots n}$ (3.1)

2. $\mathbf{P_{ll} = Q_{ll}^{-1}}$ (3.2)

eşitlikleriyle yazılır. (3.1) ve (3.2) eşitliklerinde $\boldsymbol{L_i}$ yalın ölçüyü, $\boldsymbol{v_i}$ dengeleme sonrası düzeltmesini, $\boldsymbol{\Phi_i(x, y, z \ldots)}$ bilinmeyenlerine bağlı fonksiyonel modeli, P ölçülerin ağırlık matrisini, Q ters ağırlık (kofaktör) matrisini tanımlar. Buna göre doğrusallaştırılmış düzeltme denklemleri

$$\mathbf{V = AX - l} \quad (3.3)$$

biçiminde düzenlenir. Burada $\mathbf{AX}$ (3.1) eşitliğinde $\boldsymbol{\Phi_i}$ fonksiyonunun Taylor serisindeki doğrusal terimlere karşılık gelir, $\boldsymbol{v}$ aynı fonksiyonun başlangıç (ölçünün yaklaşık) değeri ile $\boldsymbol{L_i}$ ölçüsü arasındaki farkı yani küçültülmüş ölçüyü ifade eder. İçinde ölçüleri, bilinmeyenleri ve ölçü hatalarını barındıran en küçük kareler kuralına göre tanımlı amaç fonksiyonu,

$$\mathbf{V^T Q_{ll}^{-1} V = V^T P_{ll} V = min} \tag{3.4}$$

Eşitlik (3.5)'te $\mathbf{N = A^T PA}$ matrisinin tersi alınamaz. Bu durumda koordinat bilinmeyenleriyle oluşturulacak $\mathbf{iz\{N^+\} = min}$ ve $\mathbf{X^T X = min}$ koşulu denklem sistemine eklenir Moore-Penrose ters alma işlemi gerçekleştirilir (Moore, 1920):

$$\mathbf{(A^T PA)X - \left(A^T Pl\right) = 0} \tag{3.5}$$

$$\mathbf{N^+ = (N + GG^T)^{-1} - GG^T} \tag{3.6}$$

Normal denklemler matrisinin tersi $\mathbf{N^+}$ olarak gösterilir. **G** normal deklemlerde oluşan datum açığını ortadan kaldırmak için kullanılır. Sonuç olarak bilinmeyen parametrelerin (3.5)'e göre çözümü,

$$\mathbf{x = N^+ n = \left[\left(N + GG^T\right)^{-1} - GG^T\right](A^T Pl)} \tag{3.7}$$

İle gerçekleştirilir. 3 boyutlu GNSS ağları için diferansiyel datum dönüşümünün ortogonal özellikli katsayılar matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\mathrm{G}(3\mathrm{p},3) = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{\mathrm{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{\mathrm{p}} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{\mathrm{p}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/\sqrt{\mathrm{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{\mathrm{p}} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{\mathrm{p}} \end{bmatrix} (\mathrm{p} = \text{ağdaki nokta sayısı}) \tag{3.8}$$

Tablo 3.1. Jeodezik ağların türüne göre datum parametreleri ve parametreleri belirleyen ölçüler

Ağın Boyutu	Ağın Türü	Datum Parametre	
		Sayısı	Türü
1B	Geometrik Nivelman Ağı	1	Bir noktanın yüksekliği
	Trigonometrik Nivelman Ağı	1	Bir noktanın yüksekliği

Tablo 3.1. (Devam) Jeodezik ağların türüne göre datum parametreleri ve parametreleri belirleyen ölçüler

2B	Yatay Doğrultu Ağı	4	İki noktanın yatay koordinatı (x,y)
	Yatay Doğrultu-Kenar Ağı	3	Bir noktanın yatay koordinatı (x,y) ve bir doğrultunun yönü
3B	Üç Boyutlu Doğrultu Ağı	7	İki noktanın üç boyutlu koordinatı (x,y,z) ve bir doğrultunun yönü
	Üç Boyutlu Doğrultu Ağı	6	İki noktanın üç boyutlu koordinatı (x,y,z)
	GNSS Ağı	3	Bir noktanın üç boyutlu koordinatı (x,y,z)

*B: Boyut (1, 2 veya 3 Boyutlu Ağlar)

3.3.2. Güvenirlik ölçütleri ve Baarda testi

Jeodezik ağların doğruluğunu arttırmak için ölçüler tekrarlı olarak yapılmakta ve çözüm kümesinin rasgele değişkeni olarak belirlenmektedir. Dengeleme hesabından elde edilen düzeltmeler, rastlantısal hataların dışında matematiksel model ile ölçülerin gerçekteki fiziksel ve geometrik durumları arasındaki farklardan etkilenir. Bu durumdaki $\boldsymbol{v_i}$ ile gösterilen düzeltme değerlerine ölçü düzeltmeleri yerine, dengeleme artıkları (residual) olarak bakılır. Normal dağılıma aykırı düzeltme değerleri özel test yöntemleri ile belirlenebilir. Normal dağılımın dışına çıkan düzeltmelere karşılık gelen ölçüler ise uyuşumsuz (outlier) olarak adlandırılır.

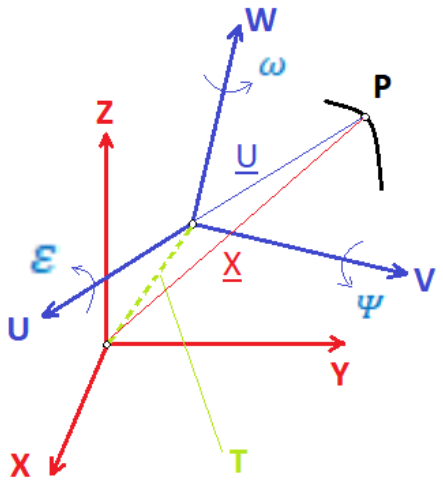
Jeodezik ağın ölçüleri içinde saklı kaba hatalar, dengeleme parametrelerinin kestirim değerleri ve onların standart sapmaları için bozucu etkiler üretir. Ağın fiziksel ve geometrik gerçekliğinde ortaya çıkabilecek bozulmaları önlemek amacıyla uyuşumsuz ölçülerin tespiti ve ölçü gruplarından ayıklanmaları için bazı istatistiksel test yöntemleri uygulanmaktadır (Erdoğan ve diğ., 2017). Bunlardan biri, bu çalışmanın 4.1. bölümünde de kullanılan Baarda test yöntemidir.

Yöntem kısaca öncül varyans biliniyorsa düzeltmeler ve onların standart sapma değerlerinden türetilen eşitlik (3.10) ile elde edilen T_i test değerinin eşitlik (3.11)'deki q sınır değeriyle karşılaştırılarak test büyüklüğünü aşan istatistiksel değerlerin tespiti ile kullanılır. Burada kullanılan σ^2 öncül (kuramsal) olarak belirlenen varyans değeridir. e_i ölçü hataları vektörü ve **P** ölçülerin ağırlık matrisi iken $\boldsymbol{v}$ matrisi ölçülere getirilen düzeltmeler matrisidir(Kurt, 2001).

$$T_i = \frac{|\underline{e_i}^T \underline{P}\, \underline{v}|}{\sigma_0 \sqrt{\underline{e_i}^T \underline{P}\underline{Q}_{vv}\underline{P}\underline{e_i}}} = \frac{|(\underline{v})_i|}{\sigma_0 \sqrt{(\underline{Q}_{vv})_{ii}}} \sim N(0,1) \quad (3.10)$$

$$q = z_{(\alpha_0)} = \sqrt{F_{(1,\infty,2\alpha_0)}} \quad (3.11)$$

3.4. Datum Dönüşümü



Şekil 3.2. Üç boyutlu uzayda iki farklı koordinat sistemi ile ifade edilen P noktası için datum dönüşümünün geometrik yorumu

Uzayda bir nokta farklı koordinat sistemlerince ifade edilebilir. Koordinat sistemleri birbirlerinden datum parametrelerine göre ayrışır. Bir datum sistemin bir başkasından farkı başlangıç noktasının konumu, koordinat eksenleri boyunca ölçek katsayısı ve dönüklük parametreleri ile açıklanır. Datum parametreleri kullanılarak bir sistemde ifade edilen noktaların diğerine taşınmasına datum dönüşümü adı verilir.

$$\underline{\mathbf{R}} = \underline{\mathbf{I}} + \underline{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega & -\Psi \\ -\omega & 0 & \varepsilon \\ \Psi & -\varepsilon & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + (1+\Delta)\underline{\mathbf{R}} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Helmert Transformasyonu olarak bilinen benzerlik dönüşümü üç boyutlu uzayda Şekil 3.2'deki gibi gösterilir. Burada x, y ve z dönüştürülecek yeni sistemin koordinat değerleridir. t_x t_y *ve* t_z değerleri bu eksenlerdeki öteleme miktarlarıdır. (1+ $\boldsymbol{\Delta}$) iki datum sisteminde aynı uzunluk elemanları arasındaki ölçek faktörünü ifade

etmektedir. Eski sistemin u, v, w koordinatlarıyla tanımlı konum vektörü **R** dönüklük matrisi ile çarpılarak yeni datuma geçiş sağlanır. **R** dönüklük matrisinin köşegen olmayan terimleri sırasıyla u, v ve w eksen dönüklükleri ifade eden ε, Ψ ve ω küçük açılarından oluşur (Üstün, 1996).

3.5. Deformasyonların Tespiti ve Nokta Hızları

Jeodezik çalışmalarda deformasyon izleme noktasının zamana bağlı değişimi kolay anlaşılabilir ve yorumlanabilir olmalıdır. Söz konusu değişimi temsil eden vektörler yer değiştirme (displacement), hız (velocity) veya ivmeyi (acceleration) tanımlamak için kullanılabilir. Öte yandan bir koordinat bileşeni yönünde zamana bağlı değişimi gösteren grafikler literatürde zaman serisi olarak bilinir. Çoğu zaman bu büyüklerin sadece kendisini görselleştirmekle kalınmaz, parametre yoluyla kestirilen bu büyüklerin, standart sapma değerleri veya hata elipsleri de çizime eklenerek sonuçların anlam kazanması sağlanır.

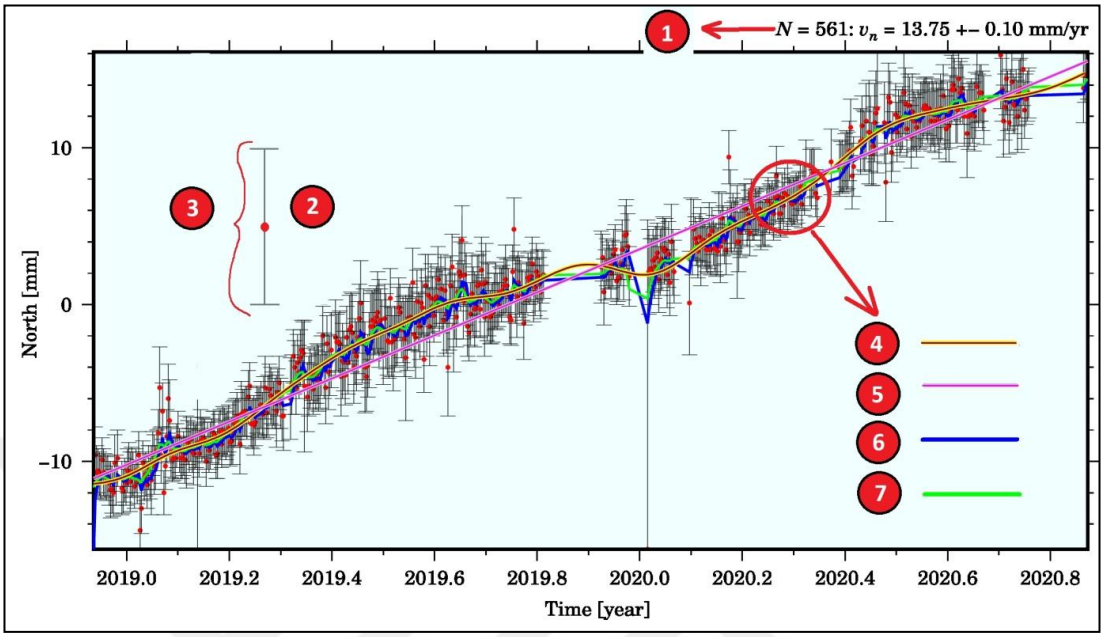
3.5.1. Zaman serilerinin oluşturulması

Tez kapsamında oluşturulan zaman serileri, yerel jeodezik sistemde kuzey, doğu ve yukarı eksen doğrultuları için ayrı oluşturulan çizgisel grafikle ifade edilmiştir. Zaman serisinin apsis değerlerini grafiğe dengeli bir şekilde aktarabilmek için ortalamadan olan farkları (mm cinsinde) esas alınmıştır. Zaman serisinde dengeli konum bileşeni (kırmızı nokta) hatası ile birlikte resmedilmiştir. Ayrıca yeterince analiz verisi bulunan noktalarda yıllık değişimi gösteren doğrusal trend ve rasgele gürültüden arındırılmış (filtrelenmiş) doğrusal olmayan konum hareketi grafiğe eklenmiştir (Şekil 3.3).

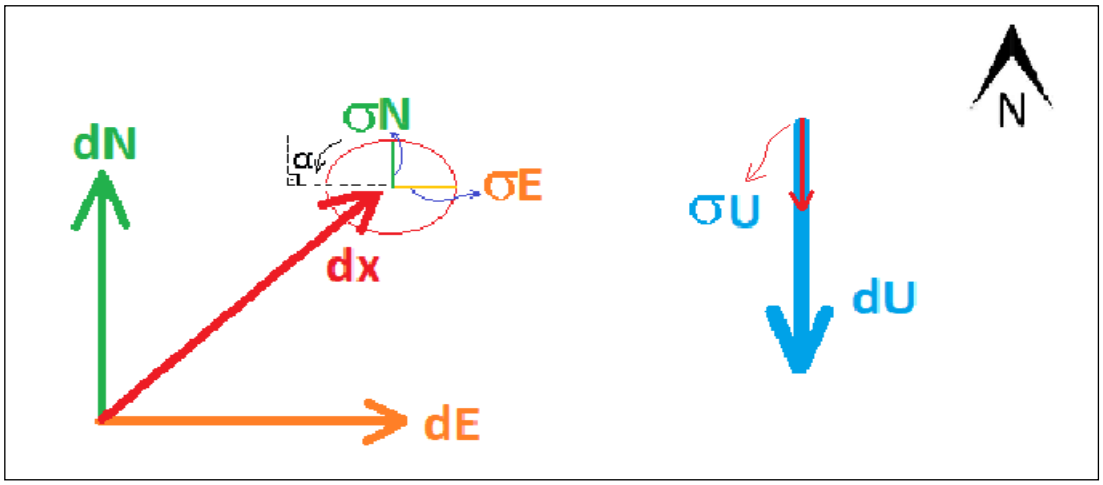
3.5.2. Hız haritalarının oluşturulması

Üç boyutta dengelenmiş konum veya hız bilgilerinin harita düzlemine aktarılması ile deformasyonun yatay karakteri yorumlanabilir. Projeksiyon koordinatlarına geçişi sağlanan istasyon koordinatları ve hesaplanan hızları, yatay düzlemde kuzey ve doğu bileşenlerinin bileşke vektörü olarak gösterilmektedir. Yükseklik bileşeni farklı biçimlerde (yukarı/aşağı vektör gibi) ifade edilebilir. Yatay hız vektörünün hata elipsleri eksenleri yatayda alınan değerler kuzey ve doğu yönü olduğu için bu yönlerin standart sapmalarıdır. Büyüklükleri belirlenen elipslerin dönüklükleri ise bu eksenler arasındaki korelasyona göre belirlenmektedir. Düşey yönlü vektörlerin haritası ise ayrıca hazırlanmıştır. Haritanın tam dik kuzey doğrultusu yukarı hareketi güney doğrultusu ise aşağı (çökme) hareketini ifade etmektedir. Bu yöndeki standart

sapma değeri ise vektörün üzerinde yer alan kalınlığı daha düşük vektörle gösterilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Çalışma kapsamında kullanılan zaman serilerinden bir örnek. 1: çözüme giren ölçü (gün) sayısı, 2: günlük çözüme ait konum bileşeninin ortalamaya göre konumu, 3: konumun (ölçünün) standart sapması, 4: kollokasyon yaklaşımı ile filtrelenmiş konum, 5: ölçülerin trendi, 6: Bayes filtresi için gidiş kestirimi, 7: optimum Bayes kestirimi.



Şekil 3.4. Hız vektörünün yatay bileşenleri ve hata elipsi parametreleri (solda), düşeydeki hız vektörü ve hata parametresi (sağda).

4. İZMİT KÖRFEZİNDEKİ DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ

İzmit Körfezi'nin genel yüzey deformasyon karakteristiği gerek tektonik gerekse alüvyal zemin özellikleriyle şekillenmektedir. Bölgede yerleşim yerleri ve büyük yapıların son yıllarda çoğalmasıyla olası yüzey deformasyonlarının yayılımı ve kinematik davranışını belirleme gereksinimi doğmuştur. Jeolojik ve jeofizik araştırmalarla doğu Marmara bölgesinin tektonik yapısı farklı gruplarca incelenmiş ve hâlen bazı projeler kapsamında saha araştırmaları devam etmektedir. Tezin amacı kapsamında sayısal uygulamalar ile çalışma bölgesinde mevcut yüzey deformasyon araştırmalarına farklı bir boyut kazandırılmak istenmiştir. Tezin başlıca katkısı diğer çalışmalarda kullanılan GNSS istasyonlarına göre daha sık konumsal çözünürlüklü ve düşey yönlü deformasyonların da incelendiği kapsamlı bir çalışma olmasıdır. Bu doğrultuda üç GNSS tekniğini esas alan deformasyon analizi gerçekleştirilecektir.

4.1. Yer Kontrol Noktalarının Statik GNSS Ölçüleri ile Deformasyon Analizi

4.1.1 1. GNSS kampanyası (2009)

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi tarafından ihale edilen fotogrametrik harita yapım işi, il sınırları içerisinde jeodezik GNSS ağının kurulması sürecinin başlamasını sağlamıştır. Çalışmanın öncelikli amacı fotogrametrik harita yapımında yer kontrol noktası ihtiyacını karşılamaktı. Körfezi çevreleyen bölgede 79 nokta yeri tespit edilmiştir. Yüklenici firma Büyükşehir Belediyesinin kontrolünde ve onayında tesis ettiği bu istasyonlarda ilk ölçüleri 2009 yılında statik GNSS oturumlarıyla gerçekleştirmiştir. Ölçüsü yapılan noktaların Körfez Bölgesine dağılımı Şekil 4.2'de verilmiştir.

GNSS gözlem dosyaları ve ilgili tarihlere ait TUSAGA-Aktif IZMT istasyonu verileriyle birleştirilerek yeniden değerlendirilmek üzere 80 noktalı bir GNSS ağı oluşturulmuştur. Ağ ölçüleri öncelikle Topcon Tools yazılımı ile ön değerlendirme işleminden geçirilmiştir. Noktaların yaklaşık koordinat değerleri, aralarındaki baz uzunlukları ve baz bileşenlerinin varyans-kovaryans bilgileri elde edilmiştir. Ölçüm süreleri beklenenden kısa, yatay ve düşey konum hataları sırasıyla 15 ve 25

mm'den büyük 32 baz dengelemeye sokulmamıştır. Ön değerlendirme ölçütlerini sağlayan toplam baz sayısı 640 olmuştur.



(a) G2331729



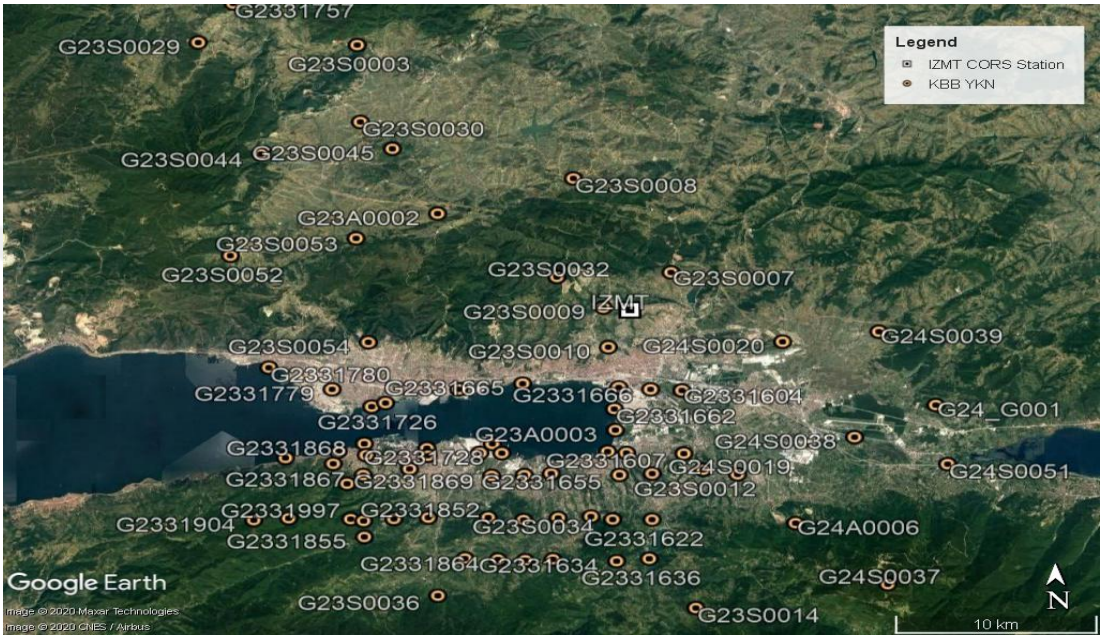
(b) G23A0003

Şekil 4.1. (a): Zemine tesis edilmiş G2331729 no'lu yer kontrol noktası ve GNSS alıcısı ile statik oturumda ölçüm anı. (b): Beton pilye olarak tesis edilmiş G23A0003 no'lu kontrol noktası ve ölçüm anı.

Ağın yaklaşık koordinatları, baz ölçüleri ve stokastik model bilgileri kullanılarak girdi verileri hazırlanmış; Linux gcc ile derlenmiş konsol tabanlı C yazılımı 'adjust3d' kullanılarak dengeleme yapılmıştır.

adjust3d serbest dengeleme sonuçları Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Önceki bölümlerde açıklandığı üzere Baarda test yöntemine göre uyuşumsuz ölçüler belirlenmiştir. Burada uyuşumsuz ölçü test istatistiği eşik değeri 3.29 ölçüt alınmıştır. Baarda test sınırını aşan değerlerin en büyüğüne karşılık gelen baz, ölçü

kümesinden çıkarılmış ve işlem tekrar edilmiştir. Uyuşumsuz ölçülerin tamamen ayıklanmasından sonra toplam baz sayısı 640'tan 538'e gerilemiştir. Uyuşumsuz ölçülerden arınmış ağın dengeleme sonuçları, yatay ve düşey konum hatalarının dağılımı Tablo 4.2'de özetlenmiştir. Gerek Tablo 4.1 gerekse 4.2'deki istatistik sonuçlar uyuşumsuz ölçüler atıldıktan sonra ağdaki iyileşmeyi gözler önüne sermektedir.



Şekil 4.2. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi fotogrametrik harita yer kontrol noktalarının dağılımı.

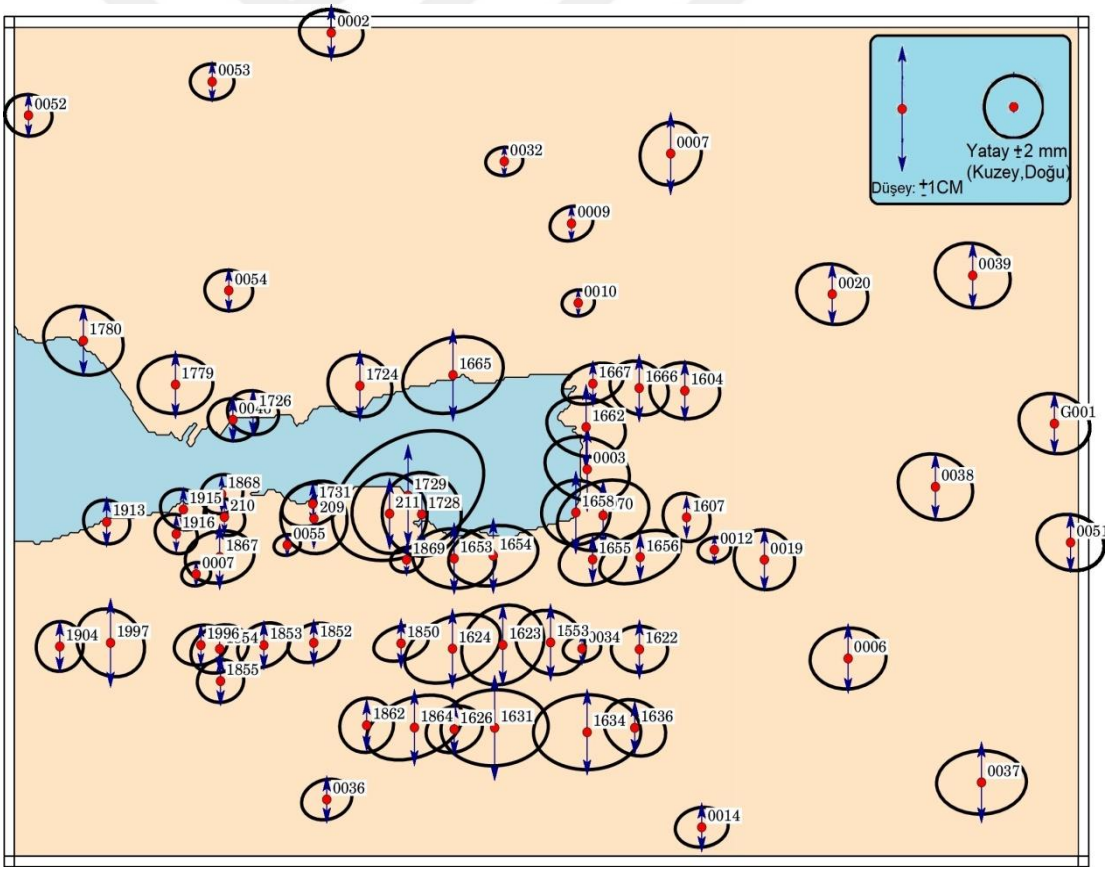
Deformasyon analizinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri her kampanyada dengeleme sonucu elde edilen noktalara ait standart sapmalardır. Standart sapmalar, noktalara ait yer değiştirmelerin yorumunda anlam kazanır. Periyodik kampanya ölçüleri arasındaki farkın deformasyon mu yoksa ölçü hatalarının yayılımından mı kaynaklanıyor sorusuna cevap verir. 1. GNSS kampanyasında dengelenen noktaların yatay ve düşey yönlerde sırasıyla hata elipsleri ve yukarı/aşağı yönlü standart sapma büyüklükleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Dengelenmiş koordinatlara ilişkin standart sapma değerleri (yerel jeodezik sistem bileşenlerine göre) ortalama değerler yatayda kuzey ve doğu yönlerinde sırasıyla 2.1 mm ile 1.61 hesaplanmıştır. Düşeyde ise ortalama 4.41 mm'lik standart sapma GNSS tekniklerinin yatay bileşen hataları dikkate alındığında beklenen bir sonuçtur. Özetle, 1. kampanya ölçülerinin dengeleme sonuçları GNSS ağının yatayda 5 mm, düşeyde 10 mm'den büyük yer değiştirmelerin bu kalitedeki ölçülerle yakalanabileceğini işaret etmektedir.

Tablo 4.1. Uyuşumsuz ölçülerin ayıklanması öncesi ve sonrası dengeleme sonuçları

	1. Durum		2.Durum	
Nokta ve baz sayısı	80	640	80	538
Öncül Varyans (cm^2)	1.00		1.00	
Soncul Varyans(cm^2)	117.7446		4.6751	

*1. Durum: Tasarlanan jeodezik ağa üzerindeki oluşan tüm baz ölçülerini içeren dengeleme sonucu, 2. Durum: Uyuşumsuz ölçüler testi uygulanıp, test değerini aşan ölçülere ait bazlardan kritik olmayanların ayıklanmasından sonraki dengeleme sonuçları.

Ağın kalite ölçütlerinin belirlenmesinden sonra 1. kampanya kesin dengeleme işlemi sonuçlandırılmıştır. GNSS ağında deformasyon araştırmasını kolaylaştırmak için sabit olduğu düşünülen IZMT istasyonu dengelemede referans (dayanak) alınmıştır.



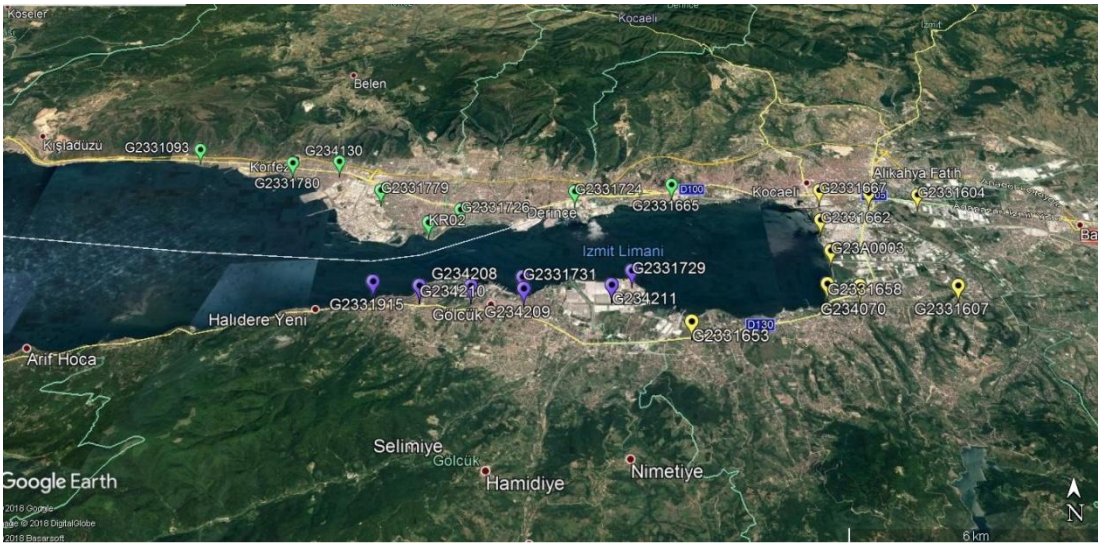
Şekil 4.3. 1.GNSS kampanyasında dengelenmiş yatay koordinatlar için hata elipsleri ve düşey koordinat bileşeni için standart sapma büyüklükleri (aşağı-yukarı yönlü oklar).

Tablo 4.2. 1.GNSS kampanyasında dengelenmiş ölçülere ait en düşük, en yüksek ve ortalama standart sapma değerleri

1. GNSS KAMPANYASI	σ_{min} (cm)	σ_{max} (cm)	σ_{ort} (cm)
Kuzey	±0.091	±0.551	±0.210
Doğu	±0.065	±0.364	±0.161
Yukarı	±0.195	±0.8451	±0.441

4.1.2 2. GNSS kampanyası (2018)

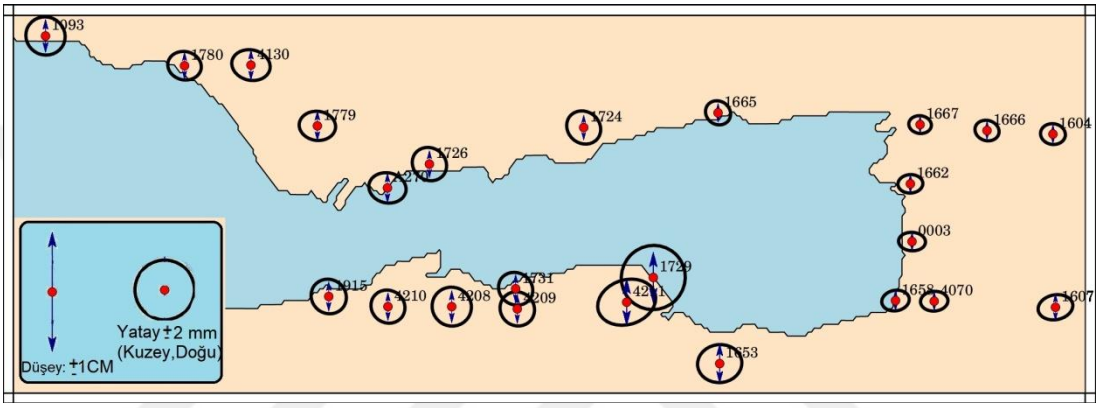
2018 yılı Ocak ayının 2, 3 ve 4. günlerinde 117Y155 proje çalışanlarından oluşan 10 kişilik bir arazi ekibiyle 1. kampanya ölçülerinin yapıldığı jeodezik ağda statik GNSS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 117Y155 numaralı İzmit Körfezi ve çevresinde yüzey deformasyonu araştırmasına uygun 24 noktada yapılmıştır. Şekil 4.4'te gösterilen nokta kümesinin seçiminde zemin çökmelerinin etkisinin görülebileceği alüvyon zeminlere ve yakın çevresine öncelik verilmiştir. Oturum ölçü süreleri noktanın derecesi, bulunduğu konumun sağlamlığı gibi etkenler göz önünde bulundurularak 2 ile 8 saat arasında 1 Hz (saniyede 1 ölçü) kayıt aralıklı gözlem oturumu düzenlendi. Ölçmelerde Hyper Pro ve Hyper+ model Topcon alıcıları kullanılmıştır. Gözlem yapılan tüm istasyonlarda anten yükseklikleri, nokta adı, ölçü başlangıç-bitiş saati, alıcının sehpa veya pilyeye kurulması, anlık hava durumu gibi meta verileri ölçü karnelerine yazılmıştır.



Şekil 4.4. 2.GNSS kampanyasında ölçülen noktaların dağılımı.

İkinci kampanyada toplam 110 baz ve IZMT istasyonunun da dâhil olduğu 25 noktalı jeodezik ağ oluşturulmuştur. İlk kampanyada göz önünde bulundurulan husularla dengeleme sonuçlandırılmış, birim ağırlıklı karesel ortalama hata m_0 = 1.31 cm elde

edilmiştir. Düzlem koordinatlar için hata elipsi ve düşey bileşen standart sapma büyüklükleri Şekil 4.5'te gösterilmiş; yerel jeodezik sistemde koordinat bileşenlerin ortalama hataları Tablo 4.3'de özetlenmiştir. İlk kampanyaya oranla daha düşük standart sapma değerlerine ulaşılmıştır. Bunun nedeni ölçü sürelerinin uzun olmasıdır. İlk kampanyada 1 saatlik oturum süreleri bu kampanyada 4 ila 8 saat arasına çıkarılmıştır. Özellikle düşeyde elde edilen ortalama 2.29 mm'lik standart sapma bu yöndeki deformasyonu izlemede kıymetlidir. Önceki kampanyada olduğu gibi dengeli kesin koordinatlar IZMT sabit alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.5. 2.GNSS kampanyasında dengelenmiş yatay koordinatlar için hata elipsleri ve düşey koordinat bileşeni için standart sapma büyüklükleri (aşağı-yukarı yönlü oklar).

Tablo 4.3. 2.GNSS kampanyasında dengelenmiş ölçülere ait en düşük, en yüksek ve ortalama standart sapma değerleri

2. GNSS KAMPANYASI	σ_{min} **(cm)**	σ_{max} **(cm)**	σ_{ort} **(cm)**
Kuzey	±0.076	±0.217	±0.118
Doğu	±0.059	±0.214	±0.101
Yukarı	±0.142	±0.426	±0.229

1. ve 2. GNSS kampanyalarının ortak noktalarında 8 yıllık yer değiştirme vektörünün elde edilme fırsatı doğmuştur. Hareketin beklendiği stres bloğunun dışında yer alan IZMT istasyonunun bu süreçte stabil kaldığı kabul edilmiştir. Her iki periyotta global sistemdeki dengeli koordinatlar IZMT'nin başlangıç kabul edildiği yersel koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Bu sayede noktalarda meydana gelen deformasyonun IZMT istasyonuna göre kuzey, doğu ve düşey yönde sergilediği hareketler incelenebilmiştir.

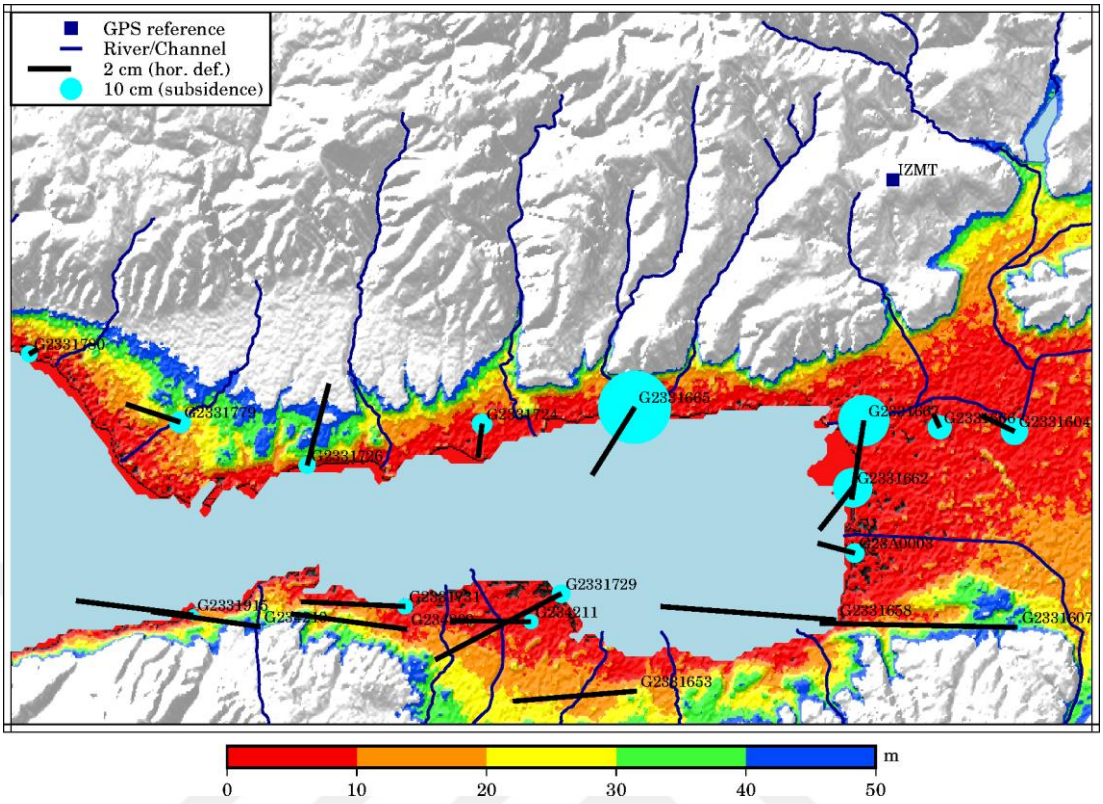
Üstün ve diğ. (2018) bu durumları incelemiştir. Dikkat çeken hususlardan biri yoğunlukla alüvyal zemin üzerine kurulu kıyı (özellikle körfezin kuzeyi) noktalarında

belirgin çökme hareketleri olmuştur. Ayrıca, Avrasya plakası üzerinde yer alan IZMT noktasına göre Kuzey Anadolu Fayının güneyinde kalan noktaların fayın sağ yanal atılımlı özelliğiyle uyum içindedir. Kuzey, doğu ve yukarı yönlerinde deformasyon analizi yapılan noktalara ilişkin yer değiştirmeler Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.6'da noktaların 8 sene içindeki hareketleri gösterilmiştir. Ayrıca burada 10'ar metre aralıklarla gösterilen topoğrafyaya da dikkat çekilirse çökme değerlerinin sık olduğu yerler deniz seviyesine yakın ilk 10 metrelik rakım ve nehirlerin denizlerle birleştiği bölgelerdir. 33.5 cm'lik çökme ile en fazla çökme değerine sahip G2331665 noktası yine kıyı şeridine yakın dolgu ile inşa edilmiş alan üzerinde olması da bu analizin önemli sonuçlarındandır.

Tablo 4.4. 1. ve 2. GNSS kampanyaları arasında meydana gelen deformasyonlar

Nokta	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
G23A0003	0.46	-1.70	-8.82
G2331604	0.73	-1.54	-12.36
G2331607	0.19	-9.13	-2.91
G2331653	-0.46	-5.71	-0.97
G2331658	0.62	-8.11	1.23
G2331662	-1.95	-1.53	-17.96
G2331665	-3.12	-1.96	-33.49
G2331666	0.63	-0.30	-10.80
G2331667	-3.63	-0.55	-23.38
G2331724	-1.54	-0.19	-9.29
G2331726	3.76	1.00	-7.77
G2331729	-3.05	-5.81	-8.37
G2331731	0.22	-4.80	-7.10
G2331779	0.83	-2.49	-9.94
G2331780	0.23	0.38	-7.45
G2331915	0.67	-5.40	-5.07
G234209	0.72	-5.34	-0.98
G234210	0.70	-5.04	-0.83
G234211	0.05	-3.74	-6.81

Düşey eksende meydana gelen değişimlerin neredeyse tamamı eksi yönde yani çökme olarak kaydedilmiştir. Şekil 4.6'da bu değerleri temsil eden simgeler çökmenin büyüklüğüne göre artan çap değerlerine sahip daireler olarak gösterilmiştir. Yataydaki deformasyonlar siyah çubuklarla gösterilmiş ayrıca bölgedeki nehirlere de bu şekil üzerinde dikkat çekilmiştir.



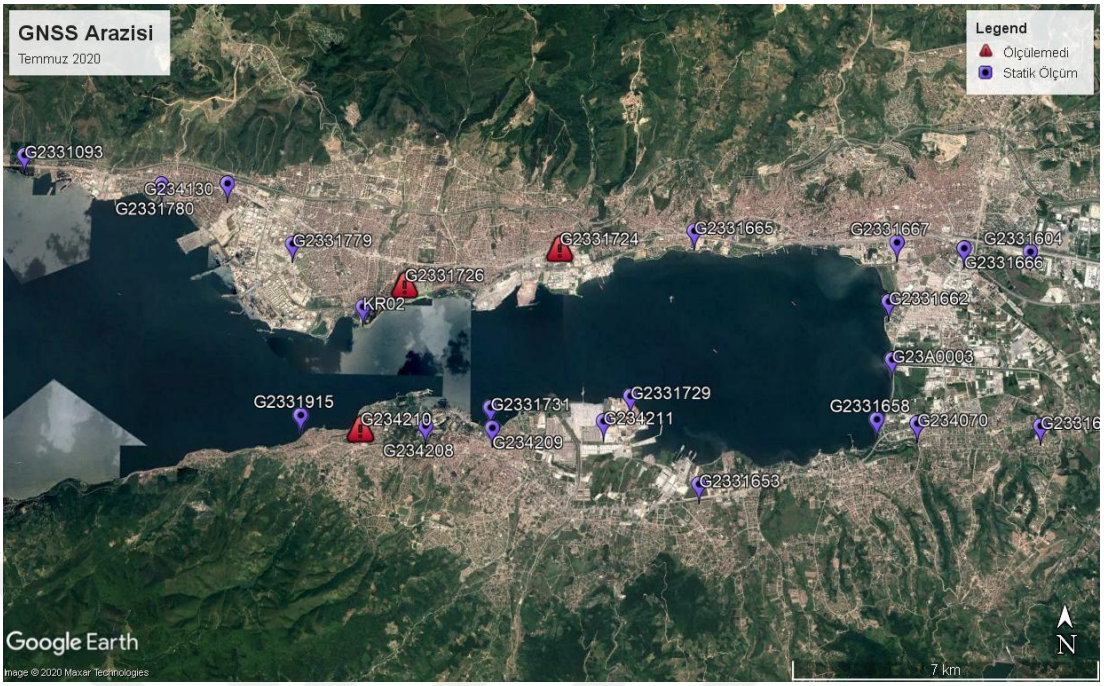
Şekil 4.6. 1. ve 2. GNSS kampanyaları analizleri sonucunda elde edilen deformasyon değerleri (Üstün ve diğ., 2018).

4.1.3 3. GNSS kampanyası (2020)

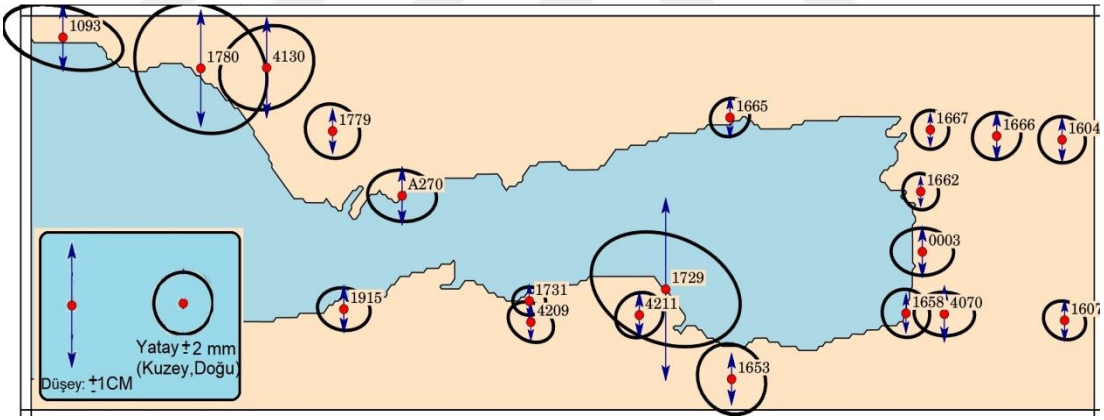
2020 yılının Temmuz ayı içerisinde farklı günlerde yapılan arazi çalışması ile 1. ve 2. Kampanyalarla ölçülen yer kontrol noktalarından hâlen sağlam durumda olanların statik oturumlarla ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tahrip veya ölçümü gerçekleştirilemeyenlerle birlikte ölçülen noktalar Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Üç kampanyada da ölçülen ortak nokta sayısı 16'dır. Üçüncü kampanya dengeleme sonuçlarına ait yatay ve düşey yöndeki standart sapmalar Şekil 4.8'de, en düşük, en yüksek ve ortalama değerler ise Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

3. Kampanyanın dengelemesi ardından yatay yönlerde çoğunlukla ilk iki kampanya ile tutarlı sonuçlar elde edildi. Körfez çevresinin önceki bölümlerde de işlenen jeomorfolojik yapısından beklenen ve 8.5 senelik çökme olayları üçüncü kampanya ile doğrulanmıştır. Kampanyalar arasındaki değişimler incelenirken ölçümlerin yapıldığı mevsimler de dikkate alınmalıdır. 2009 yılında yapılan ilk kampanya nisan,



Şekil 4.7. 3. GNSS kampanyası ile ölçümü yapılan (mor renkler) ve yapılamayan (kırmızı) yer kontrol noktalarının dağılımı



Şekil 4.8 3.GNSS kampanyasında dengelenmiş yatay koordinatlar için hata elipsleri ve düşey koordinat bileşeni için standart sapma büyüklükleri (aşağı-yukarı yönlü oklar).

Tablo 4.5 3.GNSS kampanyasında dengelenmiş ölçülere ait en düşük, en yüksek ve ortalama standart sapma değerleri

3. GNSS KAMPANYASI	σ_{min} (cm)	σ_{max} (cm)	σ_{ort} (cm)
Kuzey	±0.111	±0.469	±0.173
Doğu	±0.091	±0.522	±0.148
Yukarı	±0.248	±1.469	±0.383

Tablo 4.6 2. ve 3. GNSS kampanyları arasında meydana gelen deformasyonlar

Nokta	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
G23A0003	-0.31	0.72	0.29
G2331604	0.46	-0.45	0.91
G2331607	0.66	-2.43	-1.21
G2331653	-0.70	-2.09	-0.05
G2331658	1.73	-3.08	-2.30
G2331662	0.34	-1.02	-2.30
G2331665	-1.17	0.11	-6.5
G2331666	-0.41	0.77	1.29
G2331667	-1.02	-0.25	-2.07
G2331729	-0.55	-6.15	-0.38
G2331731	0.17	-1.62	1.77
G2331779	-0.98	-0.84	-0.71
G2331780	-0.31	1.83	-1.09
G2331915	-0.90	-0.88	1.25
G234209	0.36	-2.33	-2.39
G234211	-0.23	0.28	-0.40

Tablo 4.7 1. ve 3. GNSS kampanyları arasında meydana gelen deformasyonlar

Nokta	Kuzey (cm)	Doğu (cm)	Yukarı (cm)
G23A0003	0.15	-0.99	-8.53
G2331604	1.91	-1.99	-11.45
G2331607	0.85	-11.56	-4.12
G2331653	-1.17	-7.8	-1.02
G2331658	2.35	-11.19	0.99
G2331662	-1.60	-2.56	-20.26
G2331665	-4.29	-1.84	-39.99
G2331666	0.22	0.47	-9.51
G2331667	-4.66	-0.81	-25.46
G2331729	-3.60	-11.96	-8.76
G2331731	0.39	-6.42	-5.33
G2331779	-0.15	-3.33	-10.65
G2331780	-0.08	2.21	-8.54
G2331915	-0.23	-6.28	-3.81
G234209	1.08	-7.68	-3.78
G234211	-0.18	-3.46	-7.21

2018'deki 2. kampanya Ocak, 2020'deki 3. kampanya ise Temmuz ayının sonunda gerçekleşmiştir. Noktalardaki konumsal değişim doğrusal bir modelle uyumlu olmayabilir. Bölüm 4.2'de incelenen sabit istasyonların zaman serilerinde mevsimsel

salınımlar bu bilgiyi pekiştirmektedir. Deformasyonlara ilişkin yorumlara derinlik kazandırabilmek için daha fazla kampanya ölçüsüne gereksinim duyulacağı açıktır. Bunun mümkün olmadığı durumlarda seçenek olarak daha efektif GNSS teknikleri denenebilir.

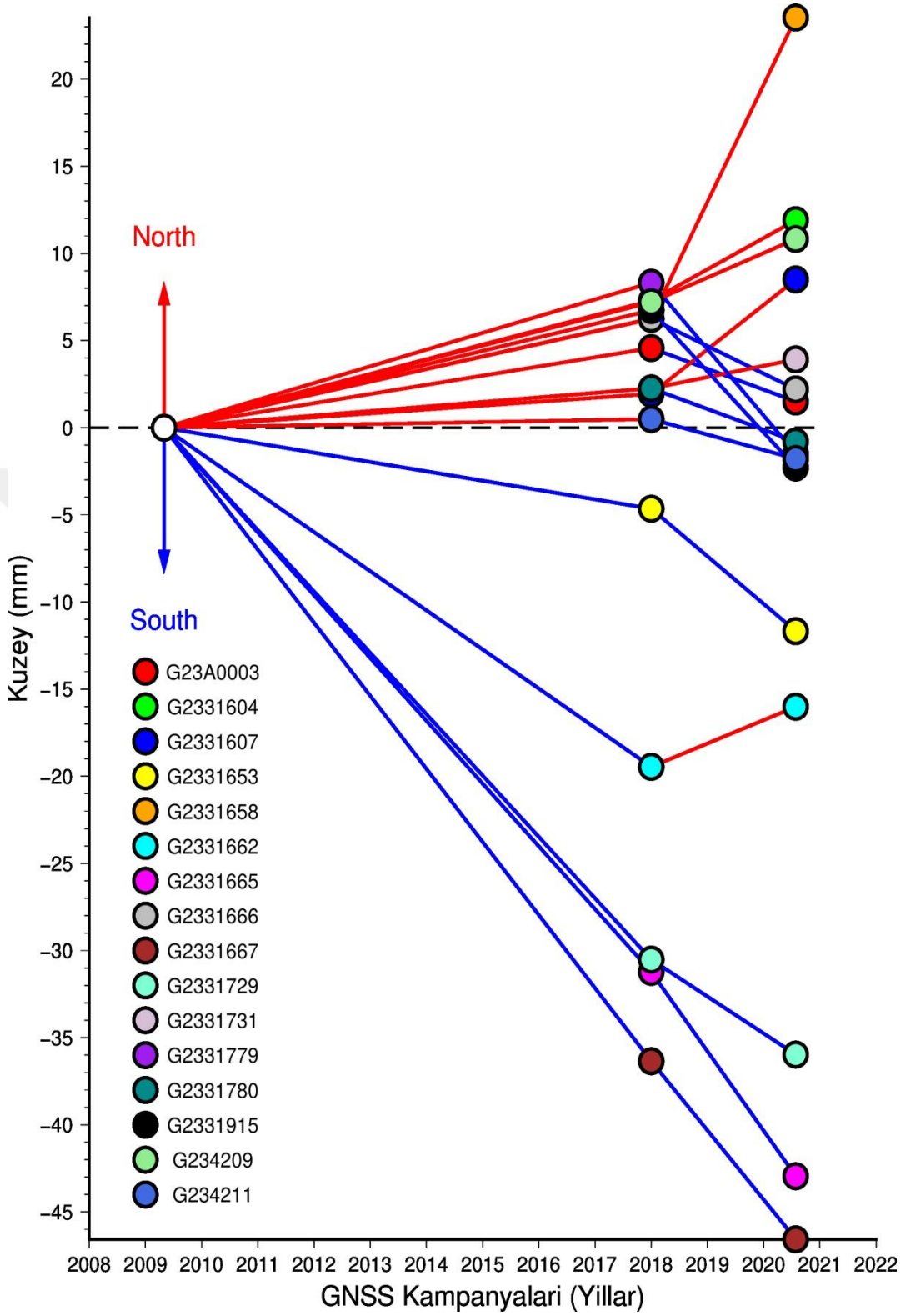
4.1.4. Periyot ölçülerinin deformasyon analizi

Statik kampanya GNSS analizleriyle elde edilen yatay ve düşey yöndeki konum bilgileri, değerlendirmeye giren ortak noktalarda deformasyon analizine alınmıştır. 2009'dan itibaren, 8.5 ve 11 senelik zaman farklarında meydana gelen deformasyonlar kampanya epoğuna ait kesin koordinatların farkları ile temsil edilmektedir. Ayrıca 2. ve 3. epoğun karşılaştırılması ilk epoktan bağımsızdır; 2.5 senelik deformasyon olarak yorumlanmıştır. 3 epokluk zamansal analizler sırasıyla Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir. Deformasyon değerleri IZMT sabit alınarak hesaplanmıştır.

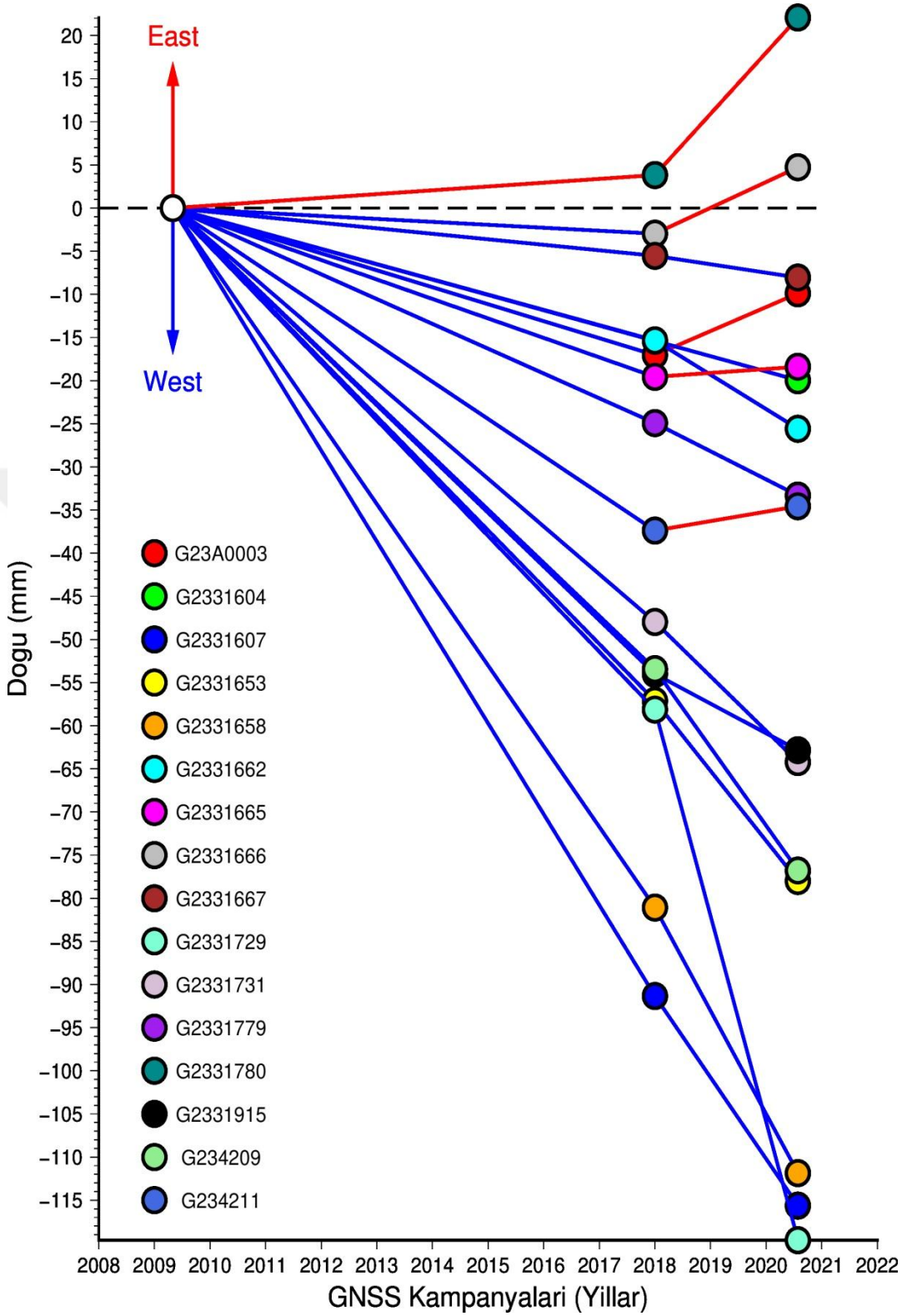
İlk bölümlerde de değinildiği gibi İzmit Körfezi'nin güneyi Avrasya plakasına göre batıya doğru yıllık santimetre mertebelerinde ilerlemektedir. Şekil 4.10 1. epokla kıyaslanan sırasıyla 2. ve 3. epok yer değiştirmeleri literatüre giren ve bölgeye yakın hız vektörleriyle tutarlıdır. Şekil 4.9'da 2. zaman aralığında yön ve hareket büyüklüğü değişimlerinin, gözlem süresi yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle Anadolu plakasının hareketinden daha düşük hızlarda gerçekleşen deformasyonların tespiti için uzun gözlem süresine ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır.

Düşey bileşenler için ölçülerin yapıldığı mevsimler dikkate alınırsa; mevsimsel döngüde 2. ve 3. epok benzer periyottadır. Bölüm 4.2'de sabit istasyonların bu dönemlerdeki hareketleri incelendiğinde görece yılın en yüksek değişimi yaz aylarında, en düşük değişimi yıl başlarında gösterdiği görülecektir. Yeraltı sularının etkisi bu gözlemlerde incelenmesi gereken bir faktör olarak düşünülmelidir.

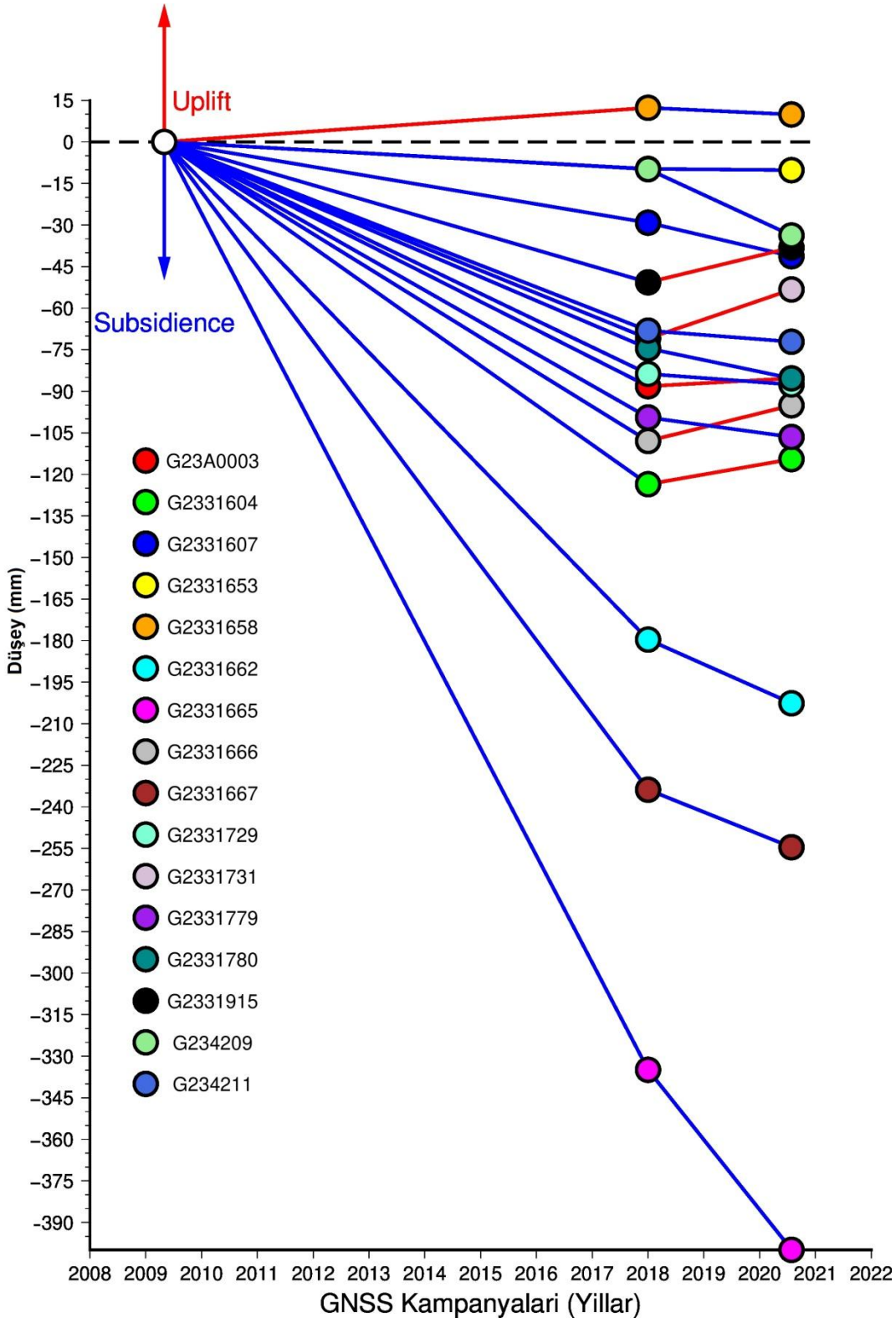
Ondalık sistemde ilk epok 2009.33, son epok 2020.57 yılında yapılmıştır. Arada geçen süre 11.24 yıldır. Tablo 4.8'de, statik deformasyon analizine dayalı konum değişimleri ile trendin doğrusal devam ettiği varsayılan bir modelde hızlar kestirilmiştir.



Şekil 4.9. Ölçümü yapılan noktaların zamana bağlı kuzey-güney yönde değişimleri



Şekil 4.10. Ölçümü yapılan noktaların zamana bağlı doğu-batı yönde değişimleri



Şekil 4.11. Ölçümü yapılan noktaların zamana bağlı yukarı-aşağı yönde değişimleri

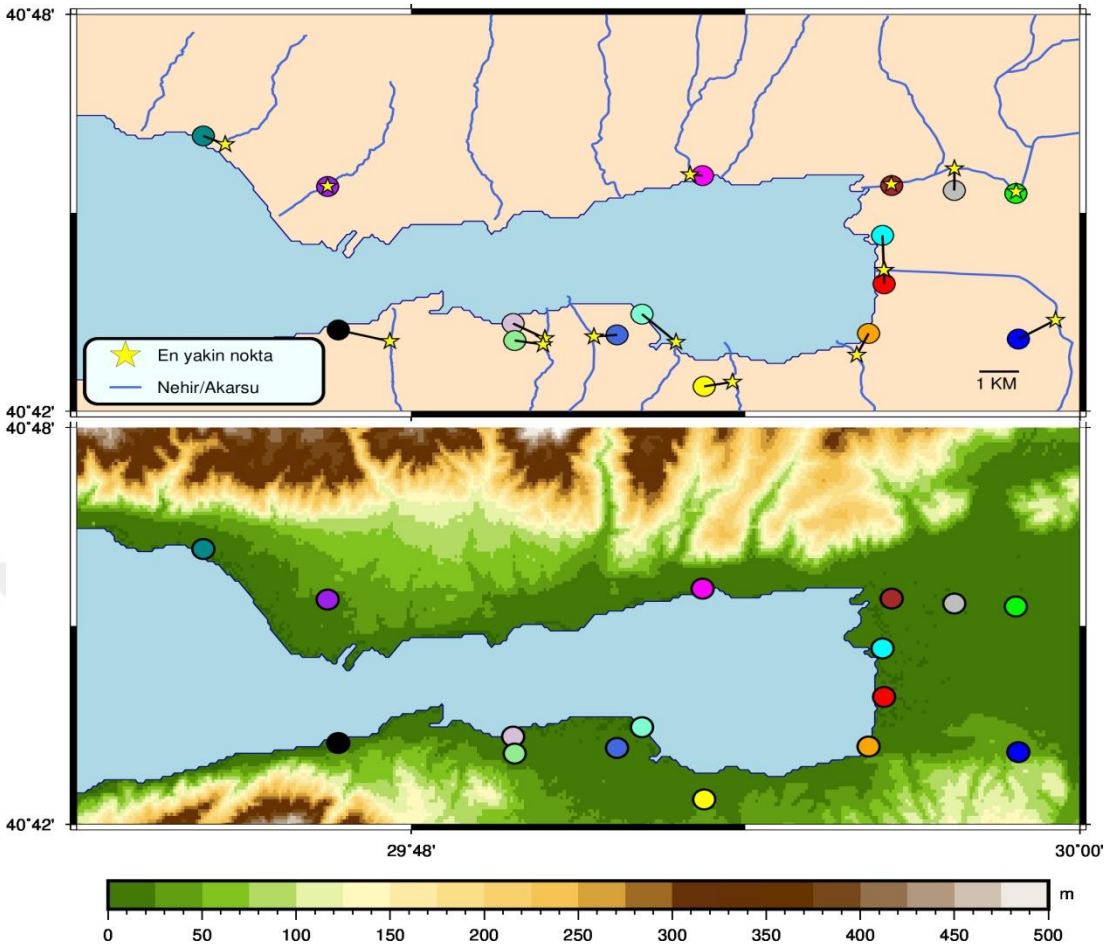
Tablo 4.8. İlk ve son epok itibariyle elde edilen konum değişimlerinden ortalama hız kestirimleri

Nokta	Konum Değişimi (mm)			Ortalama Hız (mm/yıl)		
	Kuzey	Doğu	Yukarı	Kuzey	Doğu	Yukarı
G23A0003	1.5	-9.9	-85.3	0.1	-0.9	-7.6
G2331604	11.9	-20.0	-114.5	1.1	-1.8	-10.2
G2331607	8.5	-115.6	-41.3	0.8	-10.3	-3.7
G2331653	-11.7	-78.0	-10.2	-1.0	-6.9	-0.9
G2331658	23.5	-111.9	9.9	2.1	-10.0	0.9
G2331662	-16.0	-25.6	-202.6	-1.4	-2.3	-18.0
G2331665	-43.0	-18.4	-399.9	-3.8	-1.6	-35.6
G2331666	2.2	4.7	-95.1	0.2	0.4	-8.5
G2331667	-46.6	-8.1	-254.6	-4.1	-0.7	-22.7
G2331729	-36.0	-119.6	-87.6	-3.2	-10.6	-7.8
G2331731	3.9	-64.2	-53.3	0.4	-5.7	-4.7
G2331779	-1.5	-33.3	-106.5	-0.1	-3.0	-9.5
G2331780	-0.8	22.1	-85.4	-0.1	2.0	-7.6
G2331915	-2.3	-62.8	-38.2	-0.2	-5.6	-3.4
G234209	10.8	-76.8	-33.8	1.0	-6.8	-3.0
G234211	-1.8	-34.6	-72.1	-0.2	-3.1	-6.4

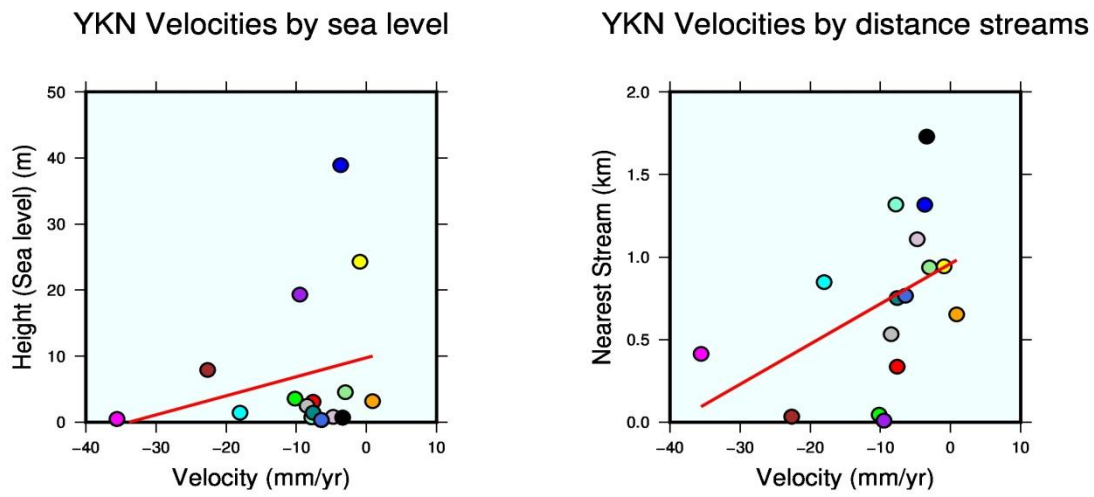
İzmit körfezi ve çevresinin özellikle düşey yönlü deformasyonları jeolojik etkenler, sıvılaşma, bina yoğunluğu, tektonik durum, topografya gibi etkenlerle ilişkilendirilmektedir. Düşey yönlü hızların en büyüğü -35.6 mm/yıl ile G2331665 noktasıdır. Düşeydeki bu kinematik, noktaların topografyadaki konumları ve akarsu ya da nehirlere yakınlığıyla ilişkisi incelenmiştir (Şekil 4.12).

Noktaların deniz seviyelerinden olan yükseklikleri ile düşey yönlerindeki yıllık hızları arasındaki ilişkinin Pearson korelasyon katsayısı 0.241 ile pozitif yönde korelasyonludur. Ayrıca, noktaların nehir veya akarsulara yakınlıklarının hızlarıyla ilişkilerini incelenmiştir. Pearson korelasyon katsayısı 0.449 ile yine pozitif yöndedir ve yüksekliğe göre daha güçlü ilişki tespit edilmiştir(Şekil 4.13).

Noktalara ait yükseklik ve akarsu yakınlıkları özniteliklerinin bölgede deformasyonda etkinliği anlaşılmıştır. Konum çözünürlüğünün arttırarak bölgenin genel deformasyon durumu incelenirken aynı zamanda deformasyona sebep olan faktörlerden bazıları da saptanmıştır. Yeryuvarının benzer kritik bölgelerinde deformasyon analizi için yer noktaları sıklaştırılabilir ve deformasyona etki ettiği düşünülen nitelikleri ile benzer şekilde ilişkilendirilebilir. Bu sayede deformasyona etki eden faktörler hakkında fikir sahibi olunurken hangi etkinin daha yoğun olduğu da anlaşılabilir.



Şekil 4.12. Noktaların topografyadaki konumları (altta) ve akarsu ya da nehirlere yakınlığı (üstte).



Şekil 4.13. Noktaların düşey yöndeki hızları ile yüksekliklerinin ilişkisi (solda) ve akarsu yakınlıklarının ilişkisi (sağda)

4.2. Sürekli Çalışan GNSS İstasyonlarında Deformasyon Analizi

Tektonik veya volkanik anlamda, sismik aktivitelerin görüldüğü, insan aktivitelerinin yoğun, jeotehlike risklerinin ise yüksek olduğu veya mekansal bilgi teknolojilerinin gerçek zamanlı ve kesintisiz işletildiği uygulamalarda sürekli işletilen GNSS ağlarının önemi her geçen gün artmaktadır. 90'lı yıllardan itibaren yeryüzüne dağılmış binlerce istasyon yerbilim çalışmalarına benzersiz bir katkı sunmuştur. Bu istasyonların bir araya getirilmesiyle hem jeodinamik araştırmaların sonuçları anlam kazanmakta hem de TUSAGA Aktif benzeri VRS ağlarıyla kesintisiz ve gerçek zamanlı konum altyapısı kurulmaktadır.

İzmit Körfezi ve çevresinde gözlem verisi 20 yılı aşkın süredir elde edilebilir, sürekli çalışan GNSS istasyon vardır. IGS istasyonları arasında yer alan TUBI ve ISTA istasyonları buna örnektir. Zaman içerisinde farklı kurum ve kuruluşların değişik amaçlar çerçevesinde tesis ettiği CORS istasyonları bu nokta kümesini genişletmiştir. Tablo 4.9'da listelenen ve bu çalışmada kullanılan CORS istasyonlarının isimlerini, tesis amaçlarını ve bu çalışma için yararlanılan veri niteliğini vermektedir.

Tablo 4.9. İzmit Körfezi ve yakın çevresindeki, deformasyonların incelenmesinde kullanılan CORS istasyonlarının özeti

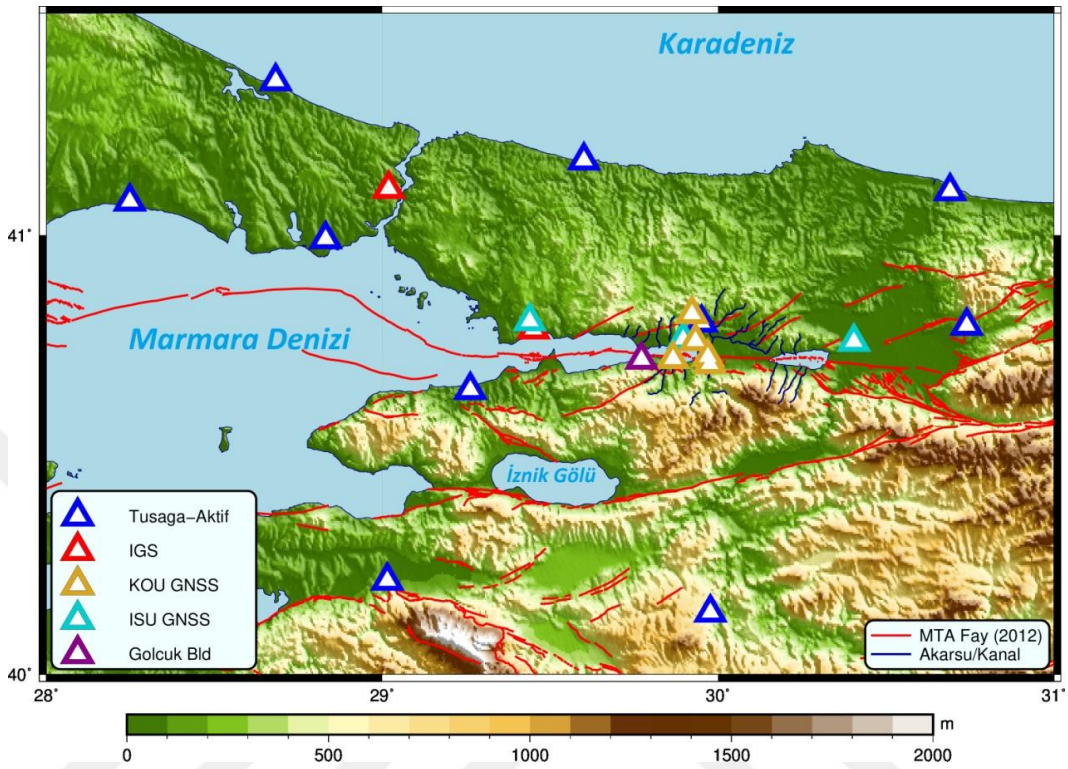
İstasyon	Kurum/Kuruluş	Konum			Veri Başlangıç Tarihi (ay/yıl)
		Enlem (Derece)	Boylam (Derece)	Yükseklik (metre)	
KOUM	Kocaeli Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü	40.821505	29.922398	436.87	12/2018
KSBS		40.719460	29.866099	50.64	12/2018
KBBB		40.760225	29.932891	68.64	01/2020
KDHF		40.708223	29.975263	162.96	01/2020
KMYO		40.724293	29.969763	88.41	01/2020
ISUU	ISU (İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi)	40.764068	29.896454	63.03	07/2016
EREN		40.758695	30.404617	83.38	07/2016
GEBZ		40.805243	29.439398	255.53	07/2016
GGOL	Gölcük Belediyesi	40.717859	29.772092	59.43	08/2017
BILE	TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif)	40.141462	29.977392	584.33	01/2016
BURS		40.214253	29.015230	183.28	
HEND		40.794993	30.740751	208.53	
ISTN		40.990964	28.831638	77.05	
IZMT		40.801980	29.950937	326.08	

Tablo 4.9. (Devam) İzmit Körfezi ve yakın çevresindeki, deformasyonların incelenmesinde kullanılan CORS istasyonlarının özeti

SLEE	TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif)	41.168731	29.600686	127.81	01/2016
ESKS		39.745688	30.463612	850.76	
KARB		41.347120	28.682775	93.60	
KUT1		39.394155	30.033641	1027.40	
HARC		39.677745	29.152761	712.53	
NAHA		40.173305	31.332088	705.54	
YLOV		40.649076	29.262350	64.47	04/2019
SLVR		41.076082	28.248472	64.40	02/2019
KRSU		41.099318	30.691198	48.80	05/2019
ANKR	IGS (International GNSS Service)	39.887373	32.758470	976.00	01/2016
ARUC		40.285715	44.085588	1222.16	
BUCU		44.463946	26.125745	143.23	
ISTA		41.104449	29.019344	147.24	
TUBI		40.786726	29.450687	220.33	
MATE		40.649134	16.704463	535.66	
NICO		35.140988	33.396449	190.01	
ORID		41.127313	20.794054	773.01	
SOFI		42.556096	23.394737	1119.52	
ZECK		43.788394	41.565070	1166.29	
RAMO		30.597608	34.763143	886.84	
POLV		49.602616	34.542935	178.34	
PENC		47.789605	19.281533	291.74	
GANP		49.034715	20.322940	746.04	
GRAZ		47.067132	15.493484	538.29	
BSHM		32.778988	35.022987	225.06	
CRAO		44.413261	33.990986	365.80	
DRAG		31.593204	35.392074	31.86	
DYNG		38.078552	23.932435	510.56	
MIKL		46.972786	31.972846	93.92	
TEHN		35.697284	51.334096	1194.56	

Aşağıda CORS istasyonlarının analiz sonuçları farklı gruplar altında sıralı biçimde paylaşılacaktır. Şekil 4.14 ile istasyonların bölgeye dağılımı gösterilmiştir. Gruplamada istasyonların bölgeye yayılım ölçeği, amacı ve sorumlu kuruluşu belirleyicidir. İstasyon konumunda (koordinat bileşenleri cinsinden) zaman serilerine dayalı hızlar ve deformasyon büyüklükleri verilirken genelden yerele doğru gidilmiştir. Deformasyonların büyüklük sıralaması da buna uyumludur. Tüm CORS noktalarında, analiz sonuçları Gamit/GlobK yazılım paketinden üretilmiş ve GMT (Generic Mapping Tools) yardımıyla görselleştirilmiştir. Haritalar üzerinde, istasyonların

konumları, topografya yükseklik bilgisi, bölge yakınındaki akarsular, fay hatları gösterilmiştir.



Şekil 4.14. İzmit körfezi ve çevresinde gözlem yapan CORS istasyonları (kurumlarla birlikte)

4.2.1. TUSAGA-Aktif istasyonlarının izlenmesi

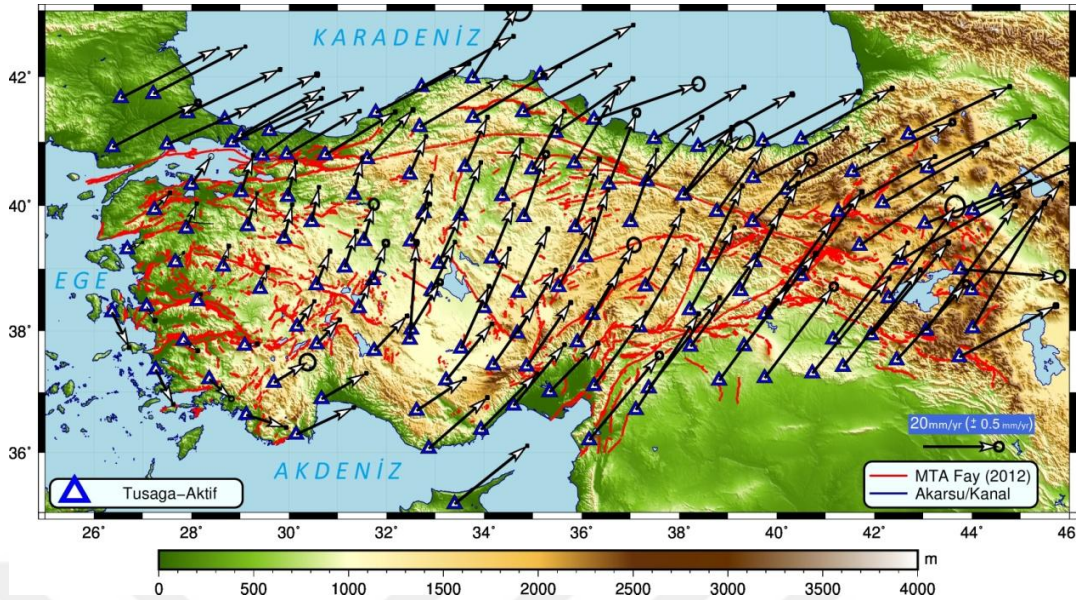
Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti sınırları içinde bugün itibariyle toplamda 156 CORS istasyonu hizmet vermektedir. TUSAGA-Aktif ülke çapında ve bölgesel ölçekte yapılan jeodezik çalışmalara gözlem verisi sağlamaktadır. Tablo 4.9'da yer alan TUSAGA-Aktif istasyonları Doğu Marmara'de gerçekleşen yerkabuğu deformasyonunu izlemek üzere bu çalışmaya dahil edilmiştir. Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi seçilen istasyonlar Kuzey Anadolu Fay zonunun Anadolu ve Avrasya birbirlerine göre hareketlerini ortaya çıkaracak niteliktedir. Bu hareket genellikle, Avrasya plakasının sabit kabul edilmesiyle açıklanır. Arap ve Afrika plakalarının baskısı Anadolu plakasının hareketini değerlendirmede unutulmamalıdır.

TUSAGA-Aktif istasyonlarının tümünün katılımıyla öncü çalışma ülkemizin üzerinde bulunduğu plaka tektoniğine dair yorum ile tutarlı sonuçlar vermiştir. TUSAGA-Aktif

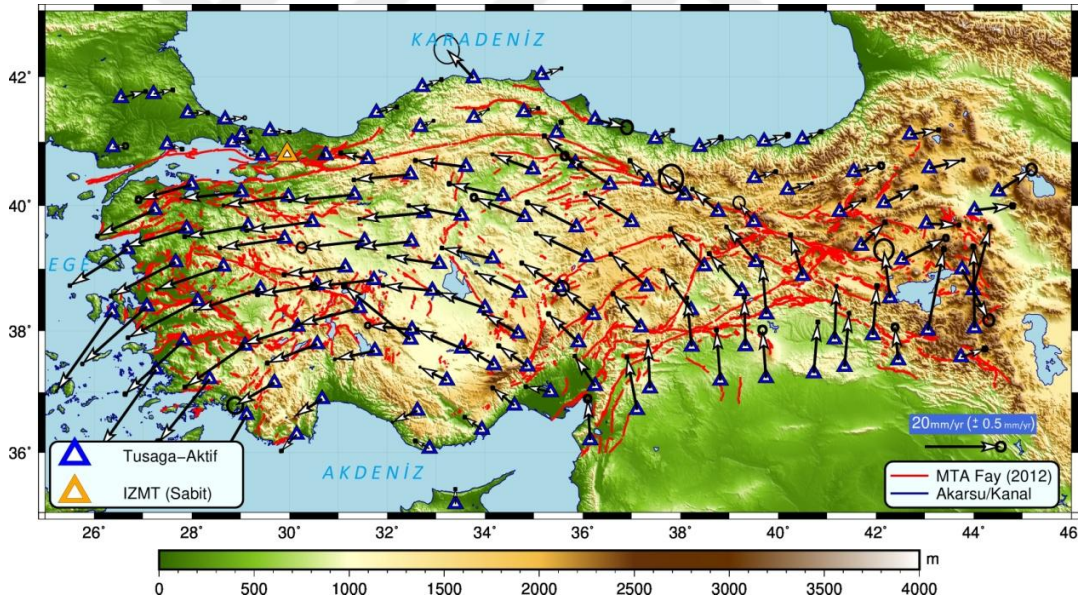
sisteminin çalışmaya başladığı tarihten itibaren (en erken 2009) yılda 3'er günlük (100, 101 ve 102. günler) gözlem verileri GAMIT/GLOBK ile analiz edilmiştir. ITRF2014 koordinat sistemi gerçekleşmesi için IGS'in ANKR, BUCU, CRAO, GRAZ, ISTA, TUBI, MATE, NICO, ORID, SOFI, ZECK, TEHN, GRAZ, NSSP, RAMO ve ORID istasyonları değerlendirmeye dahil edilmiştir. Günlük çözümler yıllık ortalama hızların kestirimi için kullanılmıştır. Kuzey ve doğu yönlerinin bileşkesi olarak hız vektörleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Kestirilen hızların IZMT istasyonuna göre yön ve büyüklükleri Şekil 4.16'de görselleştirilmiştir. Bu durum Şekil 2.2'de betimlenen Kuzey Anadolu Fay'ının göre baskın karekterini gösterecektir. Vektör yönleri ve uzunlukları Anadolu ve Arap plakalarının Bölüm 2'de incelenen hareketini açıklamaktadır.

Tablo 4.9'daki çalışma bölgesi ve çevresindeki istasyonların 2016'dan itibaren sürekli değerlendirildiği yukarıdaki analize daha yakından ve ayrıntılı bakmamızı sağlar. Günlük olarak değerlendirilen 14 TUSAGA-Aktif istasyonunun yatay ve düşey hızları hesaplanmıştır. Günlük toplam çözüm sayısına karşılık gelen ölçü sayıları (N), sırasıyla Kuzey (North), Doğu (East) ve Yukarı (Up) yönlerinde meydana gelen değişimler ve yıllık hızları bunlara ait zaman serileri ile birlikte gösterilmiştir. Zaman serilerinin teknik okuması Bölüm 3.4.1'de anlatıldığı gibidir. IZMT istasyonuna ait zaman serisi Şekil 4.17 ile gösterilmiştir (diğer istasyonların sonuçları için EK-1'e bakınız.). Bölüm 1'de bahsedildiği gibi deformasyonu anlamlı kılmak için hareketin hangi noktaya göre gerçekleştiği açıklanmalıdır. IZMT istasyonuna ait zaman serisini bu açıdan anlamak önemlidir. İstasyonların analizleri yapılırken bu istasyonun mutlak konumu başlangıç kabul edileceğinden, sergilediği doğrusal hareket eğilimi (trend) de sabit alınmış olacaktır. Buna göre IZMT istasyonu koordinat bileşenlerine ilişkin trend diğer istasyonlardan çıkarıldığında geriye hız farkı ve günlük değişimini gösteren zaman serisi kalır. Bu durumda Şekil 4.18 gibi zaman serisi yeni bir görünüm alacaktır. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yıllık hızları sayısal olarak Tablo 4.10'da özetlenmiştir. Hız vektörleri yatay ve düşeyde sırasıyla Şekil 4.19 ve 4.20'de görselleştirilmiştir.

IZMT istasyonunun trend'den arındırılmış hareketleri en belirgin kuzeyde olmak üzere mevsimsel salınımları işaret etmektedir. Kuzey bileşeninde 2016'nın kış aylarında -5 mm'den yılın ortasına yani yaz mevsimine doğru +5 mm'ye kadar salınım görülmektedir. Bu durum tektonik olarak hareketli bölgelerin CORS istasyonları ile izlenmesinin avantajlarını kanıtlamaktadır.



Şekil 4.15. TUSAGA-Aktif istasyonlarının ITRF2014 sistemine göre yatay hız vektörleri (mm/yıl)



Şekil 4.16. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT istasyonu sabit alındığında yatay hız vektörleri (mm/yıl)

Tablo 4.10. Çalışma bölgesinde TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları

İstasyon	Ölçü sayısı (gün)	Kuzey (±std) (mm/yıl)	Doğu (±std) (mm/yıl)	Yukarı (±std) (mm/yıl)
IZMT	1752	0	0	0

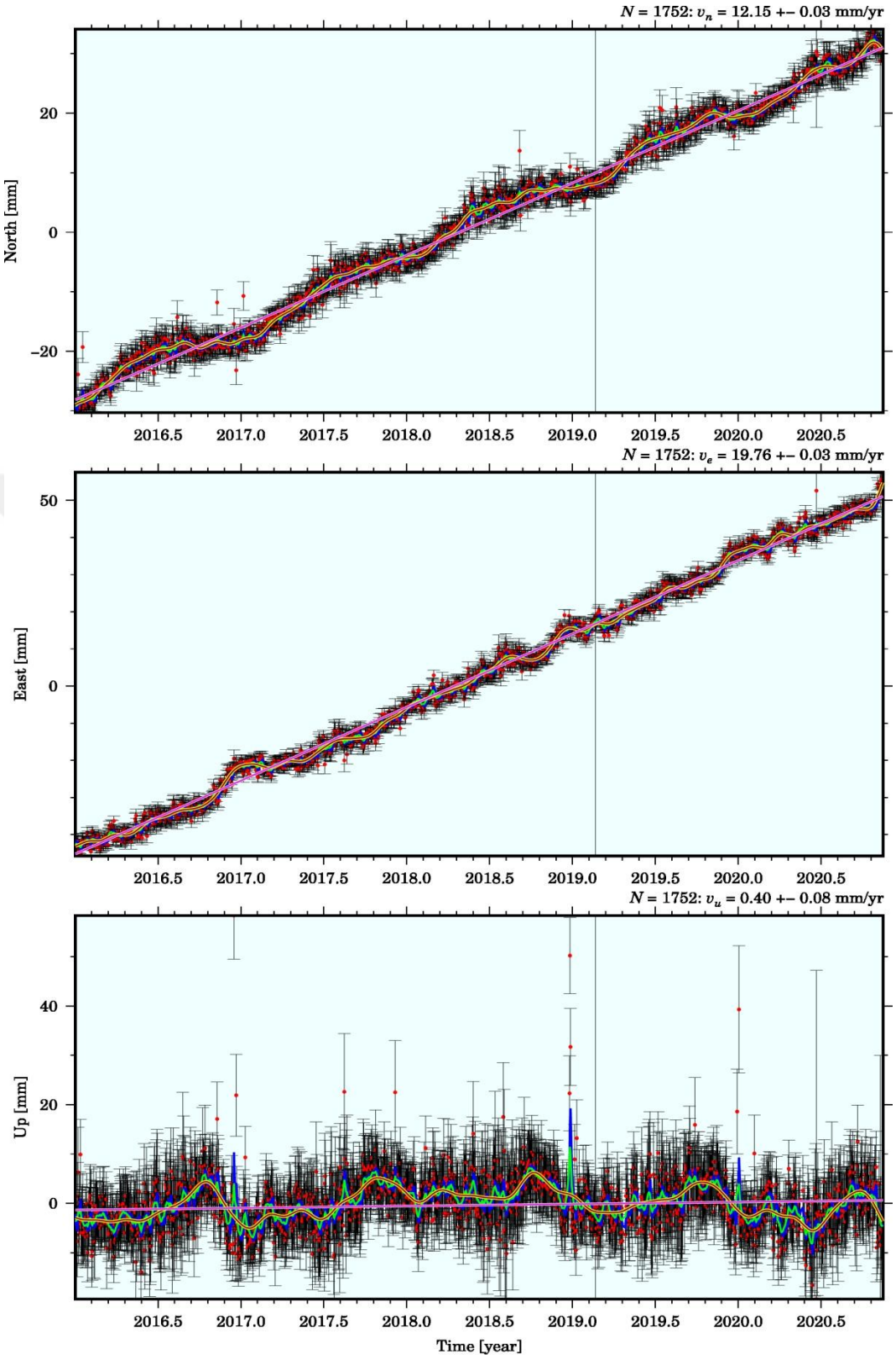
Tablo 4.10. (Devam) Çalışma bölgesinde TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları

HEND	1747	-0.16 (0.03)	-0.89 (0.03)	-1.38 (0.13)
NAHA	1702	-1.66 (0.02)	-16.83 (0.02)	0.66 (0.08)
KRSU	342	2.45 (0.19)	5.71 (0.18)	-9.64 (0.77)
ESKS	1753	-2.67 (0.02)	-16.69 (0.02)	0.13 (0.09)
BILE	1750	-2.22 (0.02)	-16.74 (0.02)	-0.38 (0.08)
KUT1	263	-3.31 (0.53)	-17.29 (0.36)	0.8 (1.22)
SLEE	1745	1.6 (0.06)	6.45 (0.04)	0.56 (0.06)
YLOV	560	0.28 (0.09)	-11.06 (0.11)	-4.05 (0.36)
HARC	1752	-2.78 (0.02)	-16.57 (0.02)	-0.79 (0.09)
BURS	1748	-0.55 (0.05)	-14.36 (0.03)	-4.43 (0.10)
ISTN	1670	0.57 (0.03)	5.02 (0.04)	-1.25 (0.07)
KARB	1751	0.47 (0.02)	4.69 (0.02)	-0.28 (0.06)
SLVR	317	19.46 (0.19)	1.81 (0. 23)	-15.13 (0.72)

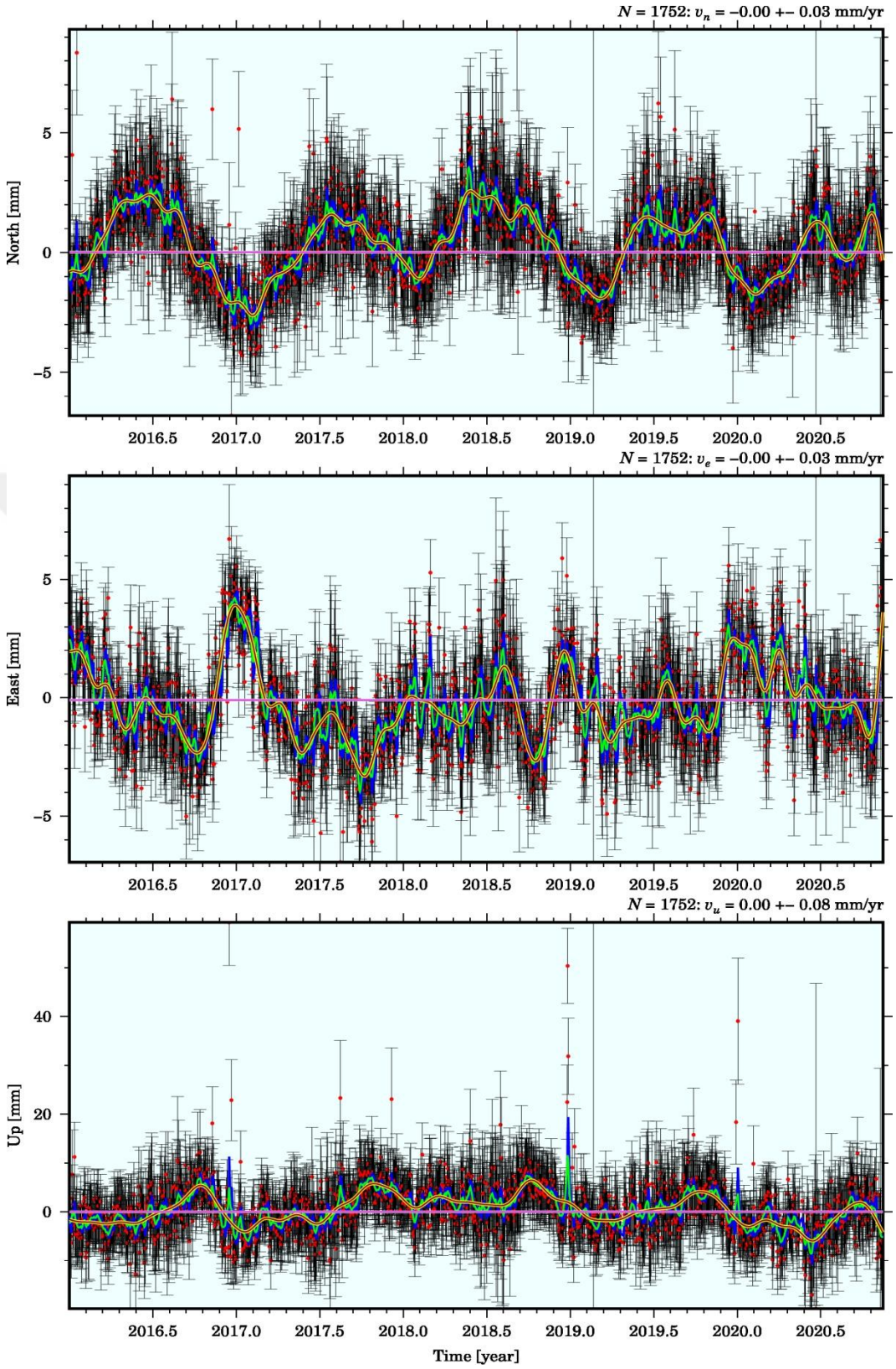
Şekil 4.19 ve 4.20'de SLVR istasyonununun davranışında 2020 yılının başında kurulması ve dolayısıyla ölçü sayısının azlığı açıklar. EK-1'deki zaman serisinden görüldüğü gibi ölçü sayısı 317 ile sınırlı kalmıştır. Yeni kurulan istasyonlarda ölçü sayısı arttıkça ve zaman ilerledikçe hız bilgilerinin güvenirliği ve doğruluğu iyileşir.

Yatayda hız vektörlerinin yönleri incelendiğinde, IZMT istasyonuna göre kuzey ve güney yönlerinde ters yönlü hareketleri dikkat çekmektedir. Bu durum Avrasya Plakası ile Anadolu plakasının yıllar içinde birbirine dair olan hareketini de göstermektedir.

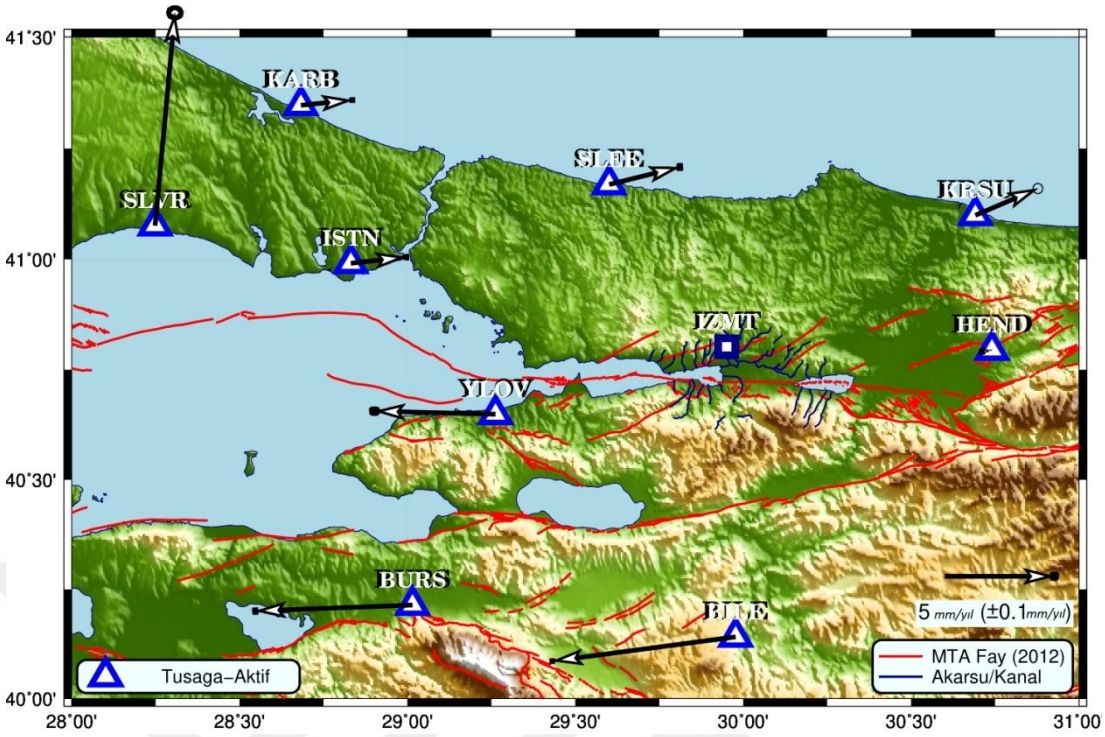
Yatay yönlerde saptanan bu yönelim aynı zamanda Kuzey Anadolu Fayı'nın geometrisi ile de uyumludur.



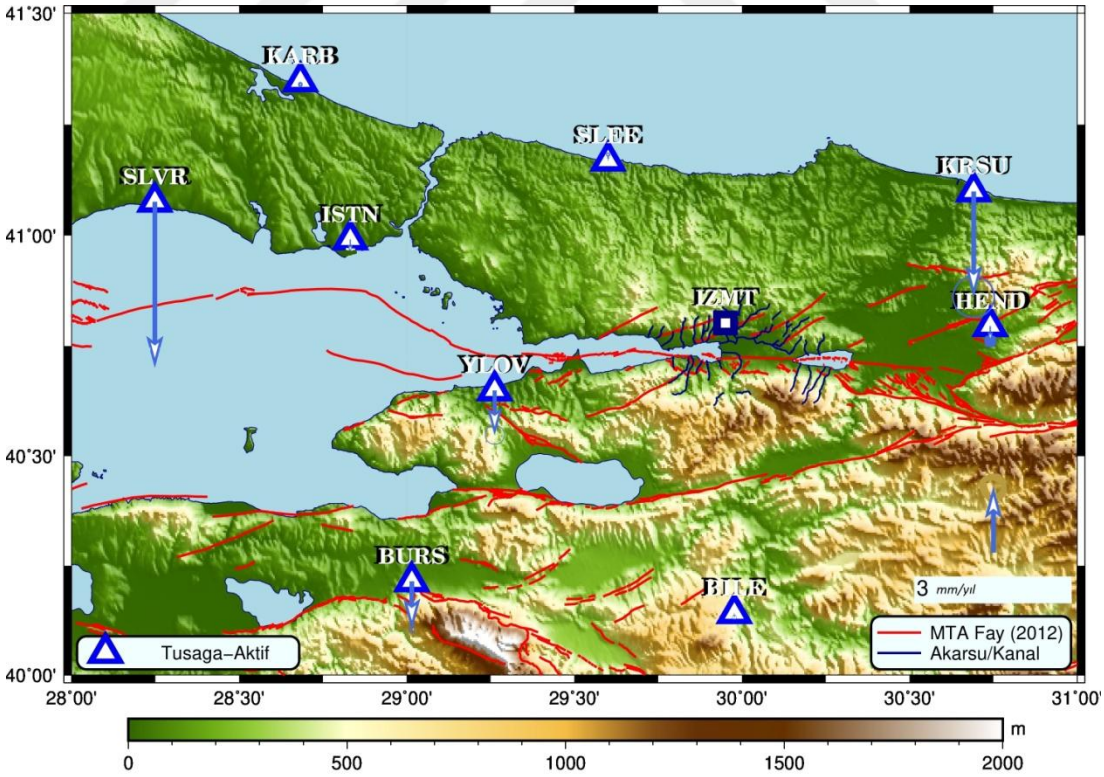
Şekil 4.17. IZMT istasyonu zaman serisi (ITRF2014 referans sisteminde mutlak)



Şekil 4.18. IZMT istasyonu zaman serisi (IZMT sabit)



Şekil 4.19. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT'ye göre yataydaki hızları (mm/yıl)



Şekil 4.20. TUSAGA-Aktif istasyonlarının IZMT'ye göre düşeydeki hızları (mm/yıl)

4.2.2. ISU ve Gölcük Belediyesi CORS istasyonları

İzmit körfezine odaklanan çalışma çerçevesinde, ISU'ya (Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi) ait 3 (ISUU, EREN ve GEBZ) ve Gölcük Belediyesine ait 1 (GGOL) istasyonun gözlem verileri günlük olarak elde edilip çalışma kapsamında oluşturulan GNSS ağı ile birlikte değerlendirilmiştir. ISU istasyonlarI KAF'nın kuzeyinde, GGOL ise güneyinde yer almaktadır. Tektonik yapının geometrisinin çözümüne önemli katkı sağlayan bu istasyonlarda ayrıca GGOL istasyonunun zemin olarak dolgu bölgenin yoğunlukta olduğu, sahil şeridi üzerinde yer alması deformasyon araştırmasına anlam katmaktadır. İstasyonlarIN IZMT'ye sabitlenmiş zaman serileri EK-2'de gösterilmiştir. Yine Bölüm 4.2.1'deki gibi yıllık hızları Şekil 4.21 ve 4.22'de gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 4.11'de ölçü sayılarına ve hız değerlerine yer verilmiştir.

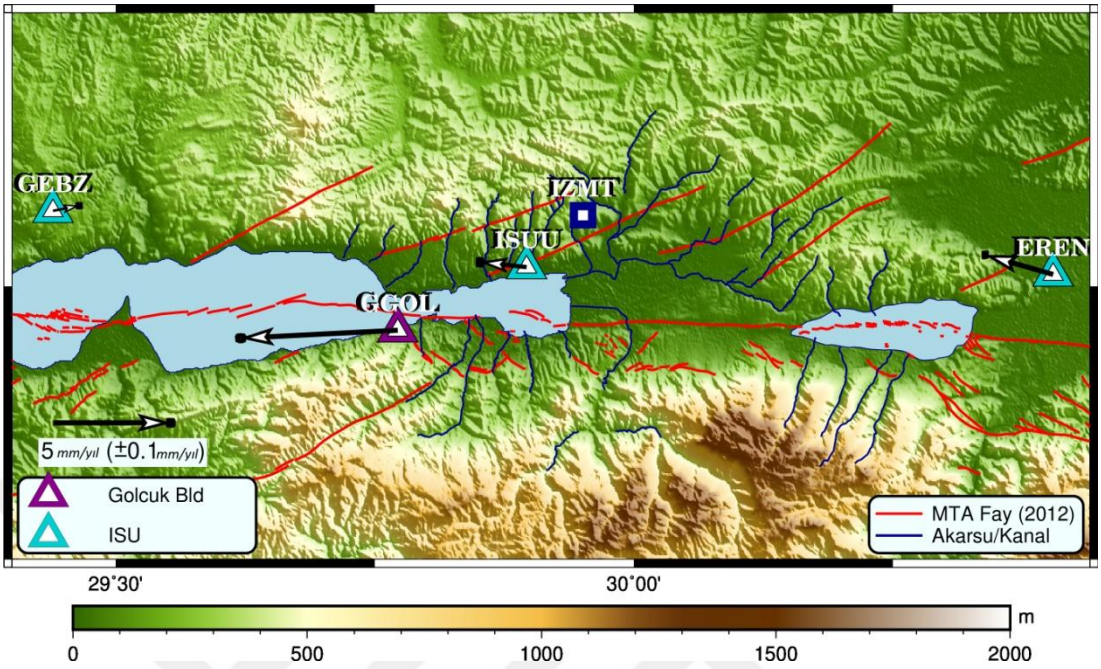
Tablo 4.11. ISU ve GGOL istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları

İstasyon	Ölçü sayısı (gün)	Kuzey (±std) (mm/yıl)	Doğu (±std) (mm/yıl)	Yukarı (±std) (mm/yıl)
IZMT	1752	0	0	0
ISUU	1438	0.21 (0.05)	-1.99 (0.05)	-0.1 (0.09)
EREN	1448	0.83 (0.03)	-2.90 (0.02)	-2.43 (0.07)
GEBZ	1401	0.22 (0.02)	1.12 (0.02)	-1.01 (0.07)
GGOL	844	-0.34 (0.05)	-6.70 (0.06)	-1.31 (0.13)

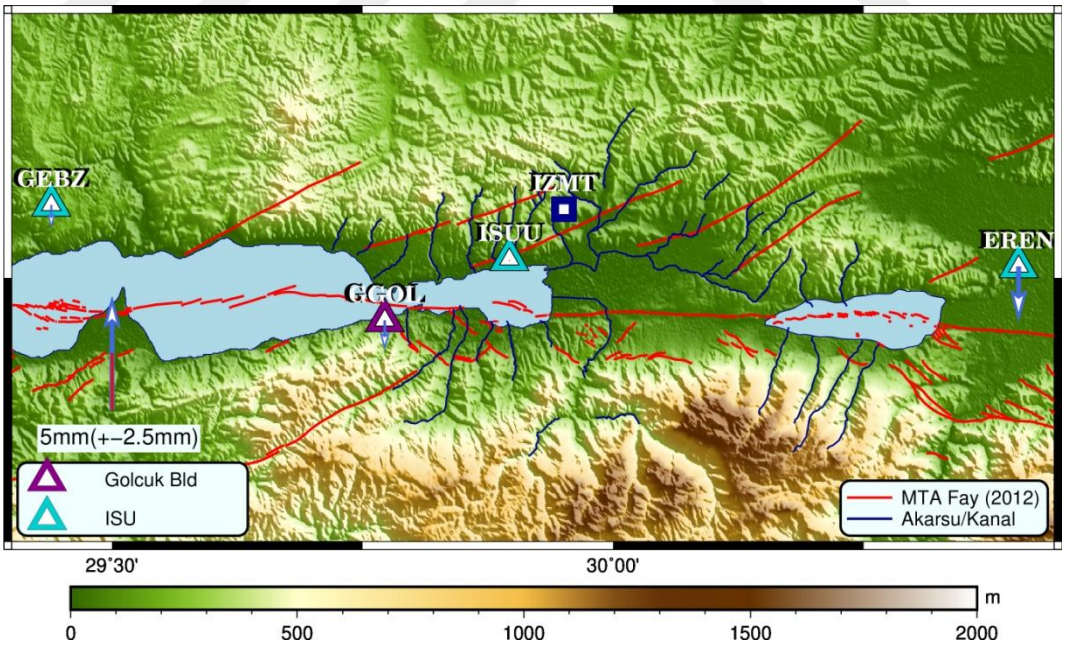
Şekil 4.23 ve 4.24'de sırasıyla ISUU ve GGOL istasyonlarına ait zaman serileri incelenmektedir. ISUU istasyonunun yatay yönlerdeki mevsimselere bağlı salınımı, plaka olarak aynı bölgede bulunduğu IZMT ile benzerlik göstermiştir.

Her iki istasyonun düşey yönlü zaman serileri incelendiğinde ise genel trend olarak ISUU -0.1 mm ve GGOL -1.3 mm yıllık değerlerine sahiptir. Ortaya çıkan çökme değerleri noktaların alüvyon depo sahalarının uzağında (topoğrafyanın yükselmeye başladığı yerlerde) kalması ile açıklanabilir.

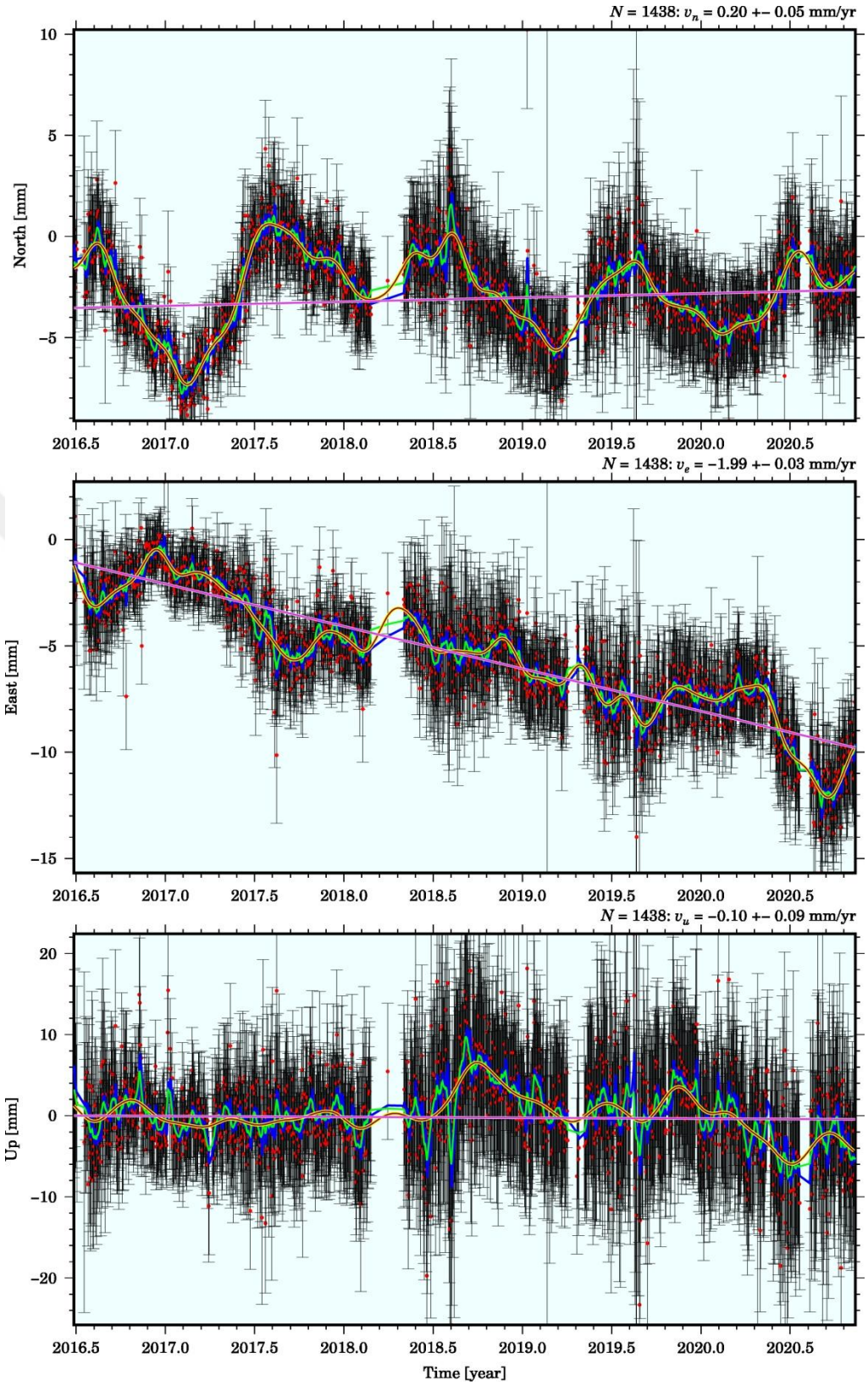
Deformasyon beklenen bölgenin dışında (doğuda) kalan EREN istasyonunun görece GEBZ ve ISUU'dan daha hızlı deformasyona uğraması bu istasyonun şehrin merkezinde, topografyanın düşük yükseklikte olan bölgesinde bulunmasına bağlanmıştır.



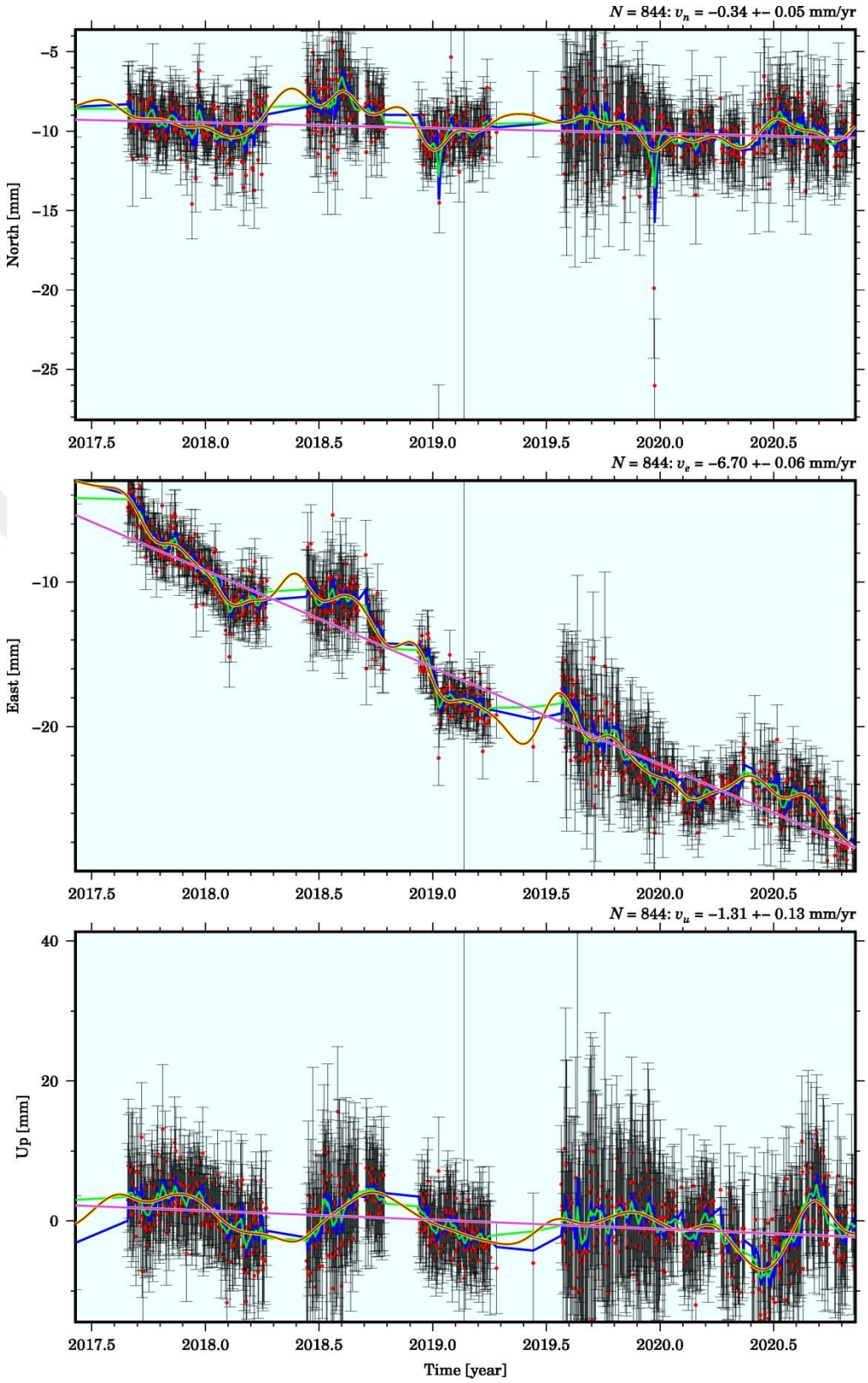
Şekil 4.21. ISU ve Gölcük Belediyesi istasyonlarının IZMT'ye göre yatay hızları (mm/yıl)



Şekil 4.22. ISU ve Gölcük Belediyesi istasyonlarının IZMT'ye göre düşey hızları (mm/yıl)



Şekil 4.23. ISUU istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)



Şekil 4.24. GGOL istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)

4.2.3 Kocaeli Üniversitesi GNSS istasyonları

Marmara Denizinin İzmit körfezi çevresinde, Kuzey Anadolu Fayı'nın güneyinde iki (KSBS ve KDHF), kuzeyinde üç (KOUM, KBBB ve KMYO) adet olmak üzere toplam 5 CORS istasyonu tesis edilmiştir. Jeodezik ağlarda gözlemi yapılan istasyonların yıllık hızlarından (mm/yıl) bahsedebilmek için, en az 1, ideal 2.5 yıl olmak üzere analiz edilmesi gerçekçi olacaktır. 2018 yılının sonunda ölçüm yapmaya başlayan KOUM ve KSBS ile 2020 yılının başlarında kurulumu tamamlanıp ölçüme başlayan KBBB, KDHF ve KMYO istasyonlarının zaman serilerindeki kestirilen hızları ve standart sapmaları yorumlanırken dikkatli olunmalıdır. Sayısal değerler Tablo 4.12'te gösterilmiştir.

Tablo 4.12. KOU GNNS Ağı istasyonlarının IZMT istasyonuna göre yatay ve düşeydeki hızları

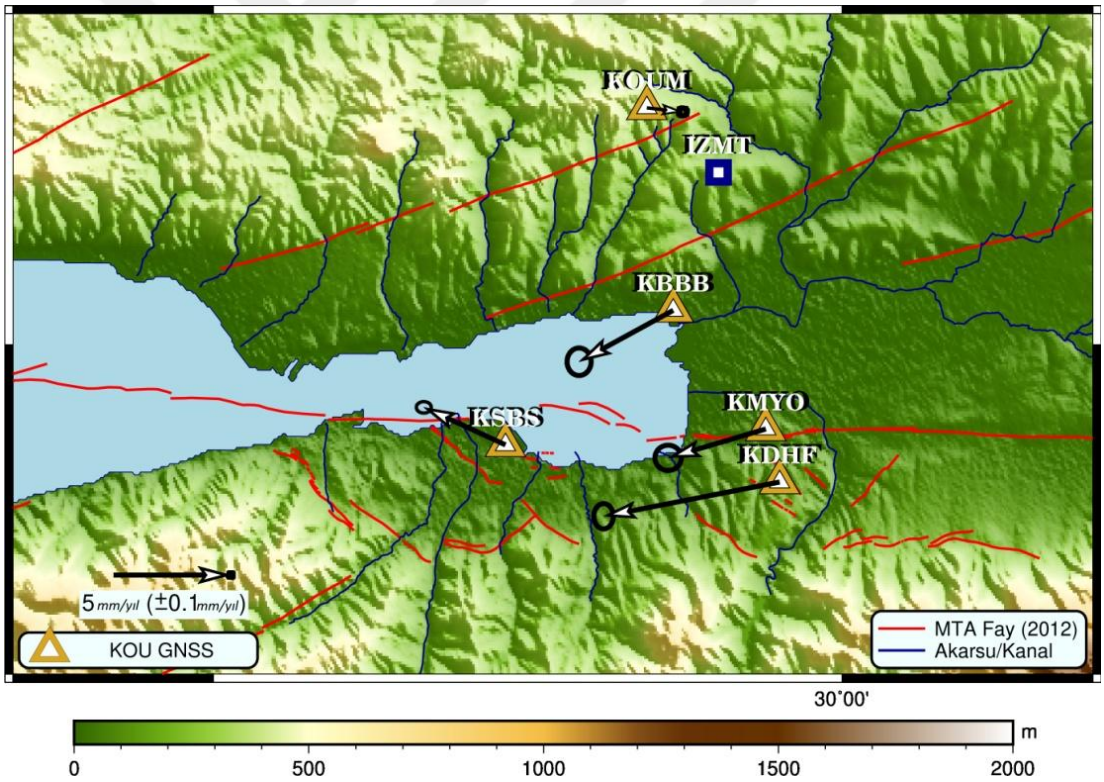
İstasyon	Ölçü sayısı (gün)	Kuzey (±std) (mm/yıl)	Doğu (±std) (mm/yıl)	Yukarı (±std) (mm/yıl)
IZMT	1752	0	0	0
KOUM	453	-0.17 (0.07)	1.54 (0.08)	0.34 (0.27)
KSBS	561	1.60 (0.10)	-3.48 (0.13)	-4.21 (0.29)
KBBB	291	-2.19 (0.24)	-4.01 (0.21)	-0.93 (0.88)
KDHF	273	-1.46 (0.22)	-7.50 (0.17)	4.12 (0.92)
KMYO	283	-1.23 (0.22)	-4.16 (0.23)	2.25 (0.91)

KOUM istasyonu kurulum ve test aşamasında veri kayıplarına uğramıştır. İstasyon normal çalışmaya başladıktan sonra hız kestirimlerinin güvenilir sonuç vermesi beklenmektedir. KOUM istasyonunun yatay ve düşey yöndeki hızlarının 0'a yakın olmasının sebebi, IZMT istasyonuna yakınlığı dolayısıyla aynı kararlı zemin üzerinde bulunmasıdır. Fakat günlük çözümlerinin mevsimsel dalgalanması IZMT istasyonuna göre genlik ve faz farkını işaret etmektedir (Şekil 4.27).

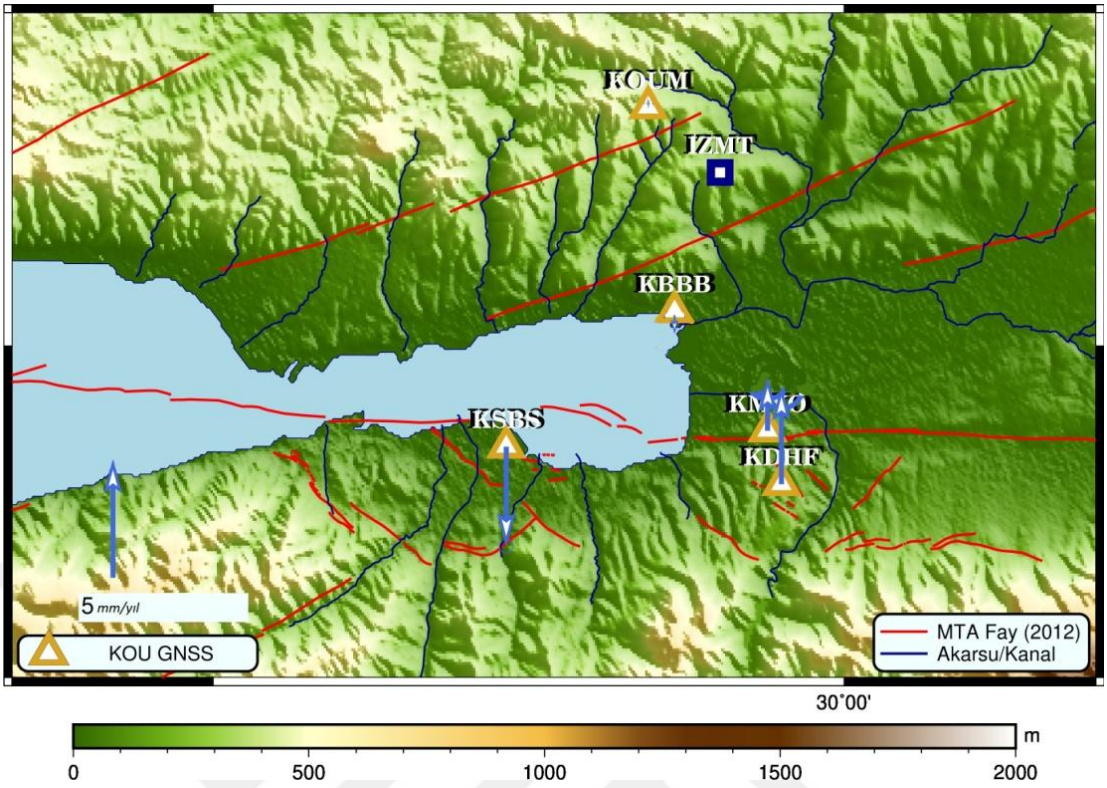
Körfezin güneyinde, denize yakın ve dolgu topraktan oluşan Gölcük sanayi bölgesi içinde yer alan KSBS istasyonu, beklendiği üzere -4.21 mm/yıl hızla çökmektedir. İstasyonun hemen çevresinde bulunan G234211 ve G231729 noktalarının GNSS kampaylarıyla elde edilen hızlarıyla (-3.2 mm/yıl ve -4 mm/yıl) tutarlıdır. Yatayda deformasyon bölge tektoniği ve çevresindeki ölçülerle tutarlı kuzeye doğru 1.6 mm/yıl ve batıya doğru 3.48 mm/yıl hızlarıyla ilerlemektedir (Şekil 4.28).

Kurulumu tamamlanalı henüz 1 yılı doldurmayan istasyonlardan KBBB Şekil 4.10'da görüleceği üzere ISUU istasyonunun 1 km'den daha yakınında tesis edilmiştir. Düşey yönde ISUU -0.1 mm/yıl ve KBBB -0.93 mm/yıl ile tutarlı sonuçlara sahiptir. İstasyon zemin açısından Körfez kıyısına çok yakın ve sıvılaşma riski bulunan bir yerdedir. Elde edilen düşey hız bilgisinin birkaç yıldan sonra anlam kazanacağı hesaba katılmalıdır. (Şekil 4.29).

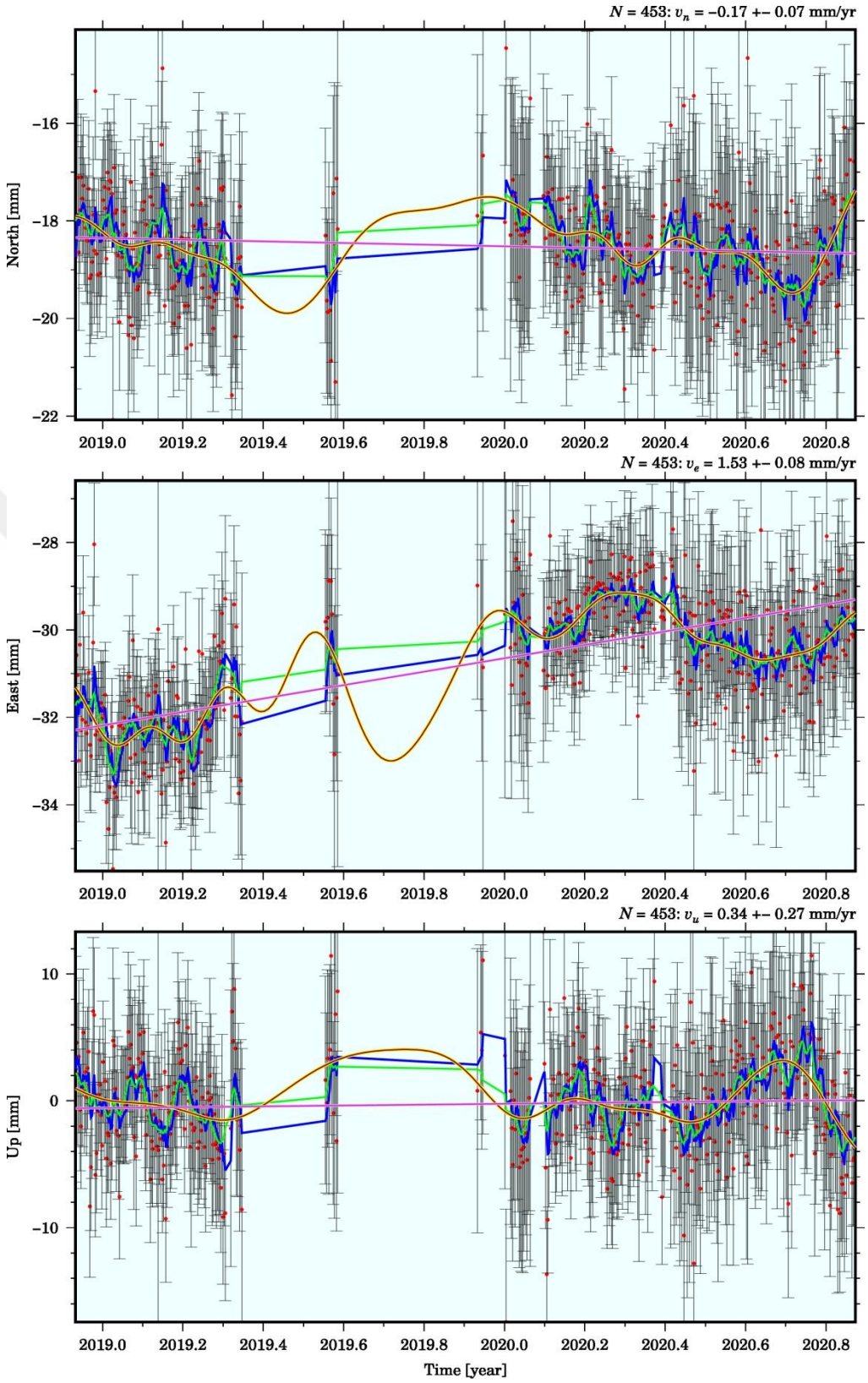
Yatay ve düşeyde hareketleri göze çarpan KDHF ve KMYO istasyonları arasından (uzaklıkları 1.5 km) Kuzey Anadolu Fayı geçmektedir. İstasyonlar yukarı yönde 4.12 mm/yıl ve 2.25 mm/yıl hareket etmektedirler. Bulundukları bölge hareketleri için kesin yorum yapılmasına elverişli değildir (Şekil 4.30 ve 4.31). KDHF ve KMYO istasyonları yatay yönde hem birbirleriyle hem de ve yer kontrol noktalarıyla tutarlı sonuçlar göstermiştir(Şekil 4.25).



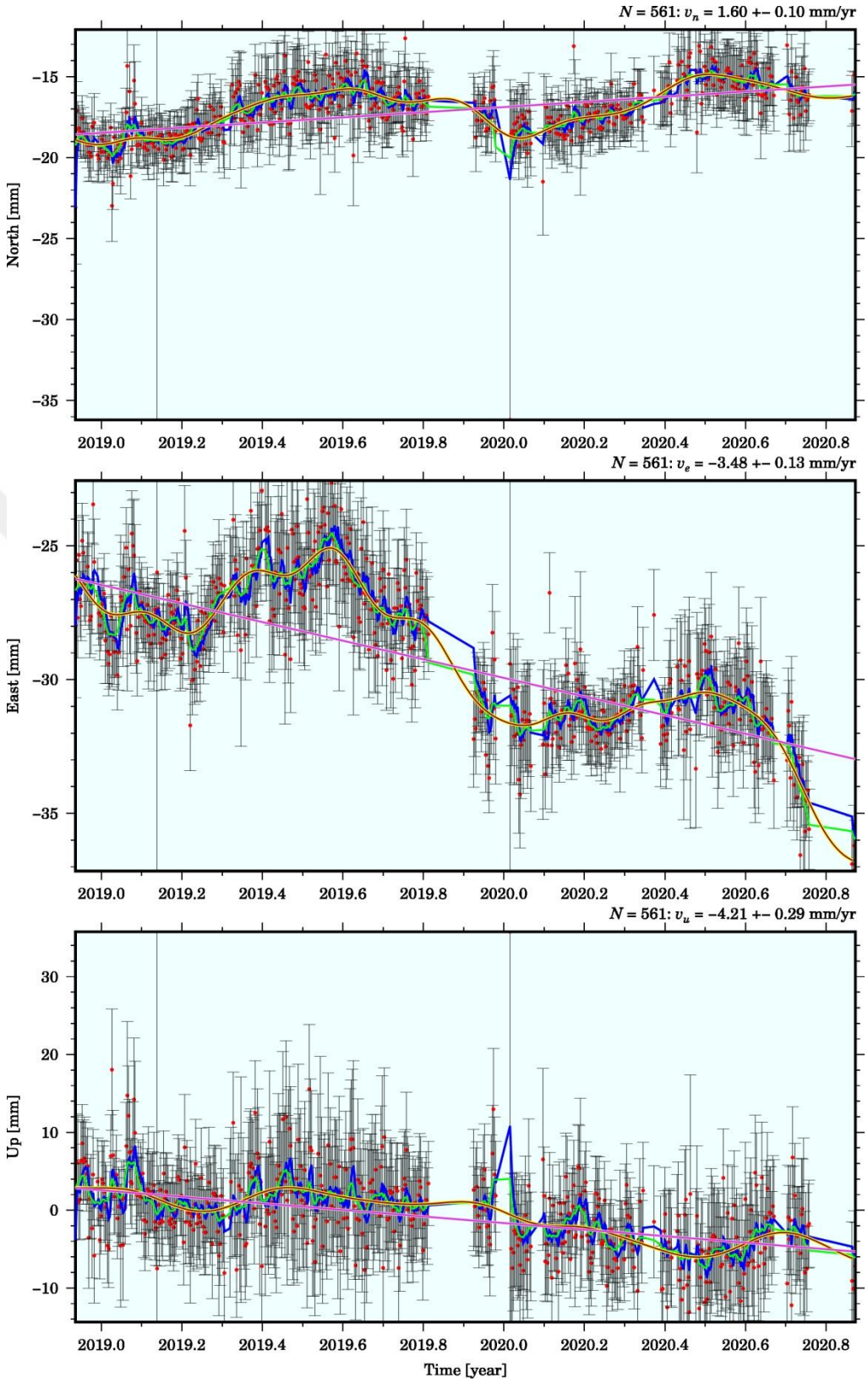
Şekil 4.25. KOU GNSS Ağı istasyonlarının IZMT'ye göre yatay hızları (mm/yıl)



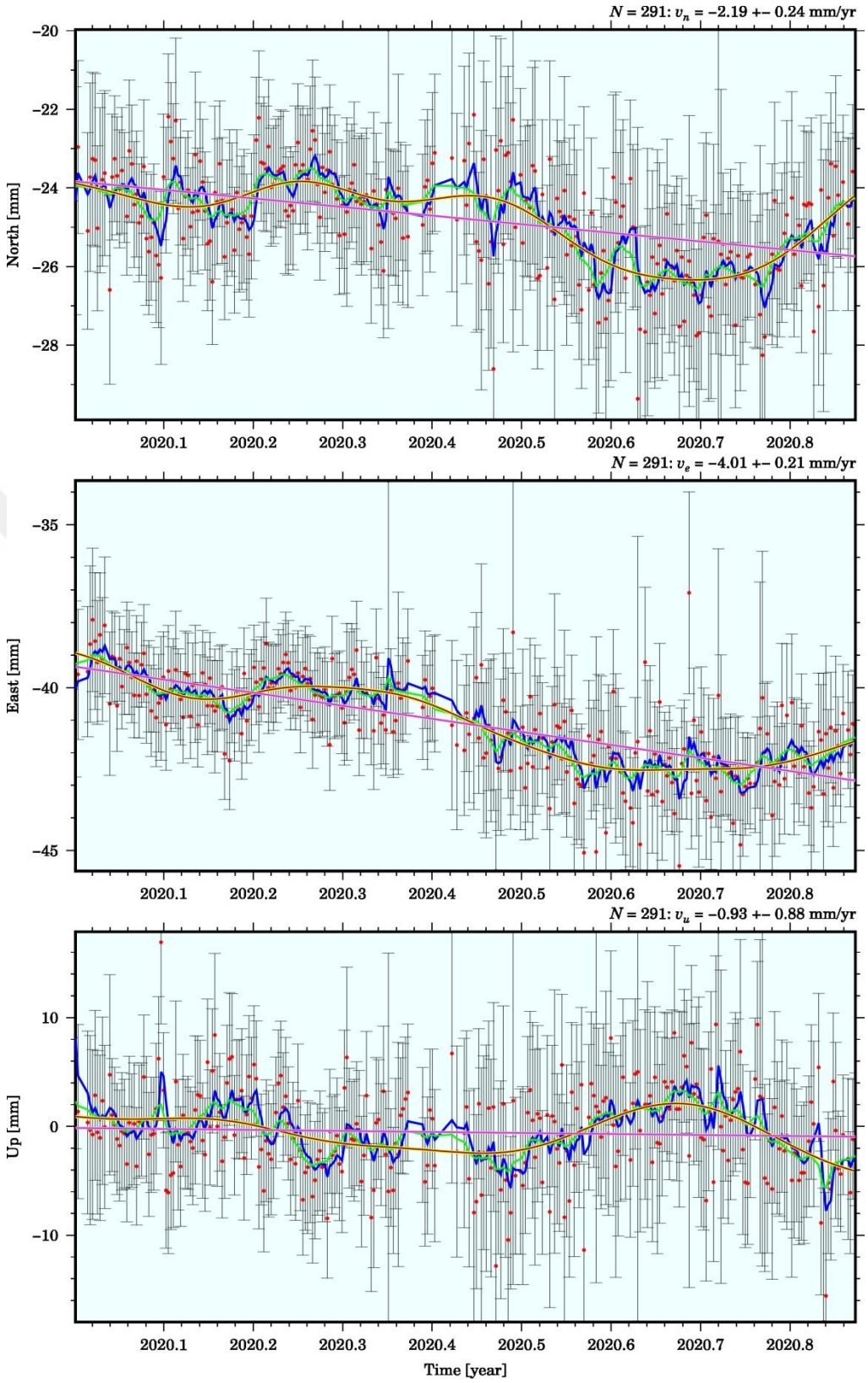
Şekil 4.26. KOU GNSS Ağı istasyonlarının IZMT'ye göre düşey hızları (mm/yıl)



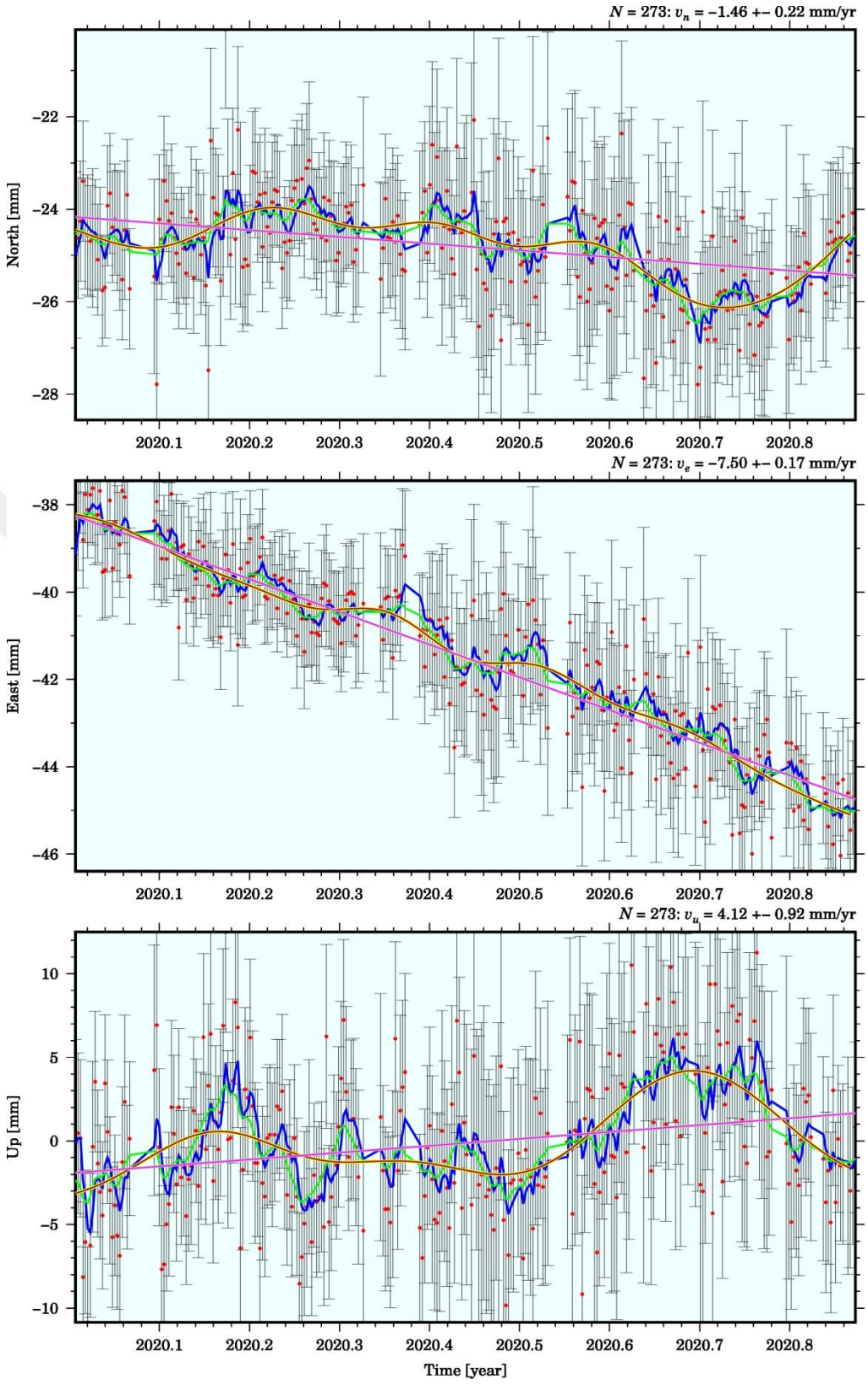
Şekil 4.27. KOUM istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)



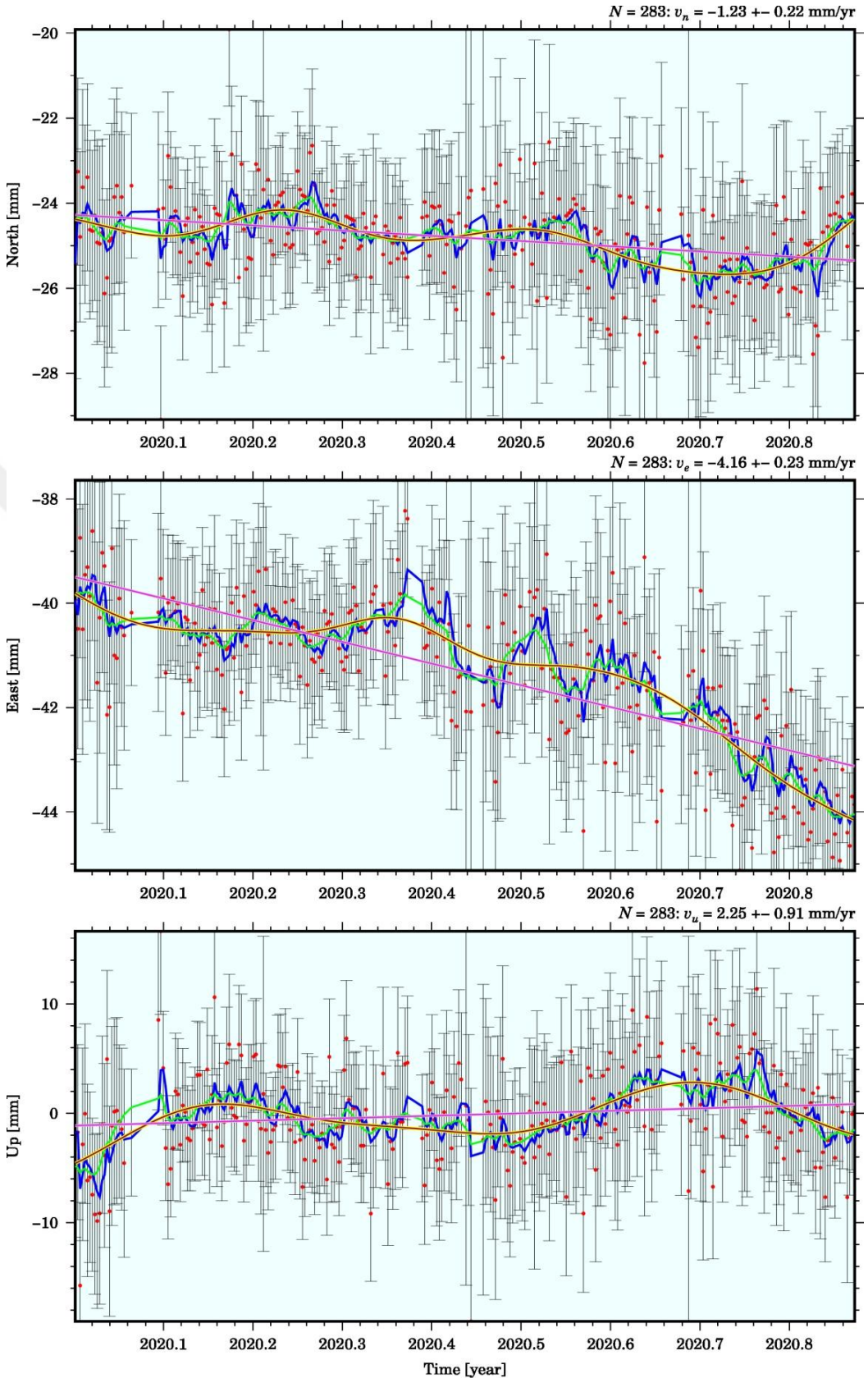
Şekil 4.28. KSBS istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)



Şekil 4.29. KBBB istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)



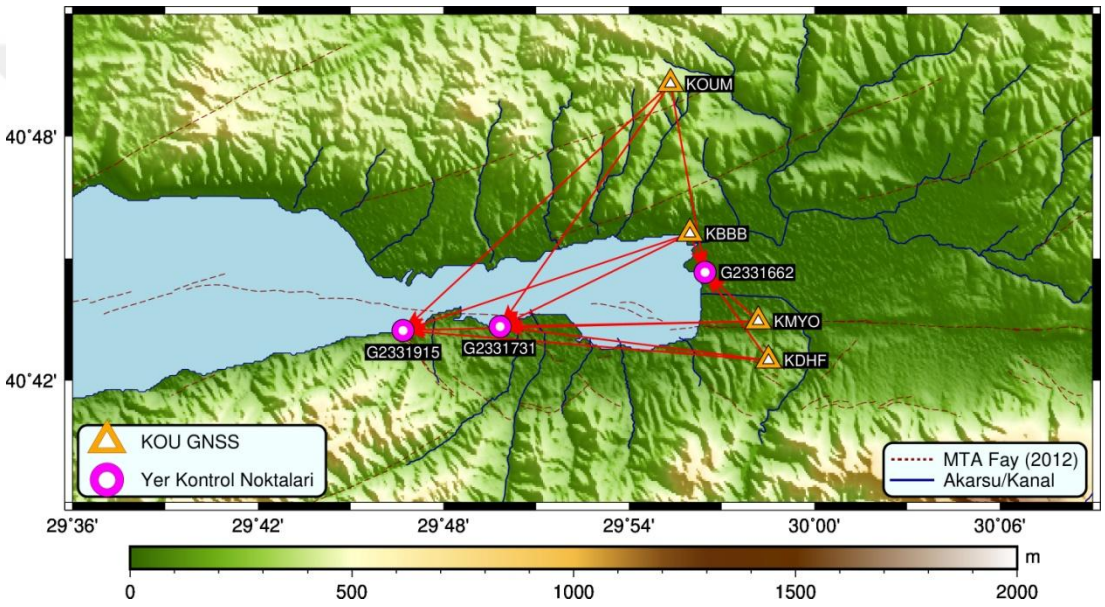
Şekil 4.30. KDHF istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)



Şekil 4.31. KMYO istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit)

4.3. Yer kontrol noktalarının GZK ile izlenmesi

Yerkabuğunun deformasyon beklene alanların tamamını CORS alıcılarıyla donatmanın maliyeti yüksek maliyetlere sebep olacaktır. Yer kontrol noktalarının yüksektir. GNSS alıcılarıyla farklı periyotlarda uzun oturumlu statik ölçülmesi deformasyon alanlarının konumsal-zamansal çözünürlüğünü arttırır. Statik ölçümlerin doğruluğunu arttırmak için uzun oturumlara ihtiyaç vardır. Gerçek zamanlı kinematik tekniğiyle çok daha kısa sürede yakındaki RTK CORS istasyonlarının desteğiyle gezici alıcının santimetre doğruluklu koordinatları elde edebilmektedir.



Şekil 4.32. GZK yöntemiyle ölçülen noktalar, kullanılan sabit istasyonlar ve oluşturdukları bazlar.

Çalışmanın bu bölümünde, Bölüm 4.1'de statik analizi yapılan yer kontrol noktaları G2331662, G2331915 ve G2331731 GZK yöntemiyle ölçülmüştür. Bölüm 1.4'te bahsedildiği üzere GZK yöntemi klasik ya da Ağ-GZK olarak 2'ye ayrılır. Klasik GZK denemeleri için GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beideo) veri toplayan KOU GNSS ağına ait KBBB, KDHF, KMYO ve KOUM noktaları kullanılmıştır (Şekil 4.32). Ağ-GZK uygulaması için de TUSAGA-Aktif sistemi kullanılmıştır.

Ölçmeler, yeni nesil GNSS alıcılar ile sürekli gözlem modunda 1 saniye aralıkta 120 epok kaydedilerek yapılmıştır. Klasik GZK ile sırasıyla KBBB KDHF KMYO ve KOUM istasyonlarında gelen düzeltmeler kullanılmıştır. Bu teknikte noktaların düzeltme aldıkları sabit istasyonlara mesafeleri önem arz etmektedir. Şekil 4.33,34

ve 35 120 epokta elde edilen ölçülerin zaman serileri örnek olarak gösterilmiştir. Referans alınan istasyona göre her koordinat bileşenine ilişkin yerel jeodezik sistem koordinatları ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Sırasıyla Tablo 4.13, 4.14 ve 15'da standart sapması en büyük çıkanların KOUM istasyonu ile yapılan GZK'dan elde edildiği anlaşılmıştır. Şekil 4.33,34 ve 35'ten de görüleceği üzere sabit istasyonlara olan mesafe ve yükseklik farkları bu durumla ilişikilidir. Özellikle G2331662 noktasının KBBB'ye olan yakınlığı (yaklaşık 2 km) en iyi sonuçları yeterince açıklamaktadır.

TUSAGA-Aktif sistemi ile Ağ-GZK çözümü tüm noktalarda benzer standart sapmalar vermiştir. Klasik yöntem ile karşılaştırıldığında benzer duyarlılığa 5 km'den yakın istasyonlarda ulaşıldığı tespit edilmiştir. VRS tekniği ile noktanın yakınında bir sanal referans istasyonu farz edilip düzeltme değerleri buna göre üretilmektedir. Atmosferik modelleme kullanılan tekniğin esasını oluşturduğundan hatalar en aza indirilmektedir. Klasik yöntemin de iyileşmesinin nedeni aynıdır. Baz mesafeleri kısaldıkça aynı atmosferik koşullara sahip noktalardan bahsedilebilir. KOUM istasyonundan elde edilen konum duyarlılığının düşme nedeni gezici alıcının uzak olması ve arada 400 m'lik yükseklik farkının bulunmasıdır.

Bu çalışmada RTK için ölçüler 120 epok (saniye) ile sınırlı tutulmuştur. Daha uzun süreli gözlemlerle verilen standart sapma değerlerinin ve konum doğruluğunun iyileşeceği açıktır. Yukarıdaki araştırmanın sonuçları, GZK ve Ağ-GZK tekniklerinin deformasyon analizinde kullanılabilirlik açısından potansiyel taşıdığını bizlere göstermiştir. GZK yönteminin yakın mesafelerde ulaştığı sonuç Ağ-GZK'nın önünde olabilmektedir. Bu sonuçla, CORS istasyonu ile sürekli izlenen bir noktanın 1 km çapıyla çevresinde santimetre altı doğrulukla deformasyon analizi yapmak olanaklı görülmüştür. Bu tekniklerle deformasyonu izlenen alanın konumsal çözünürlüğü arttırılabilir.

Tablo 4.13. G2331662 noktasında sabit istasyonlar ve TUSAGA-Aktif'e dayalı RTK tekniğinin duyarlıkları (120 ölçü için)

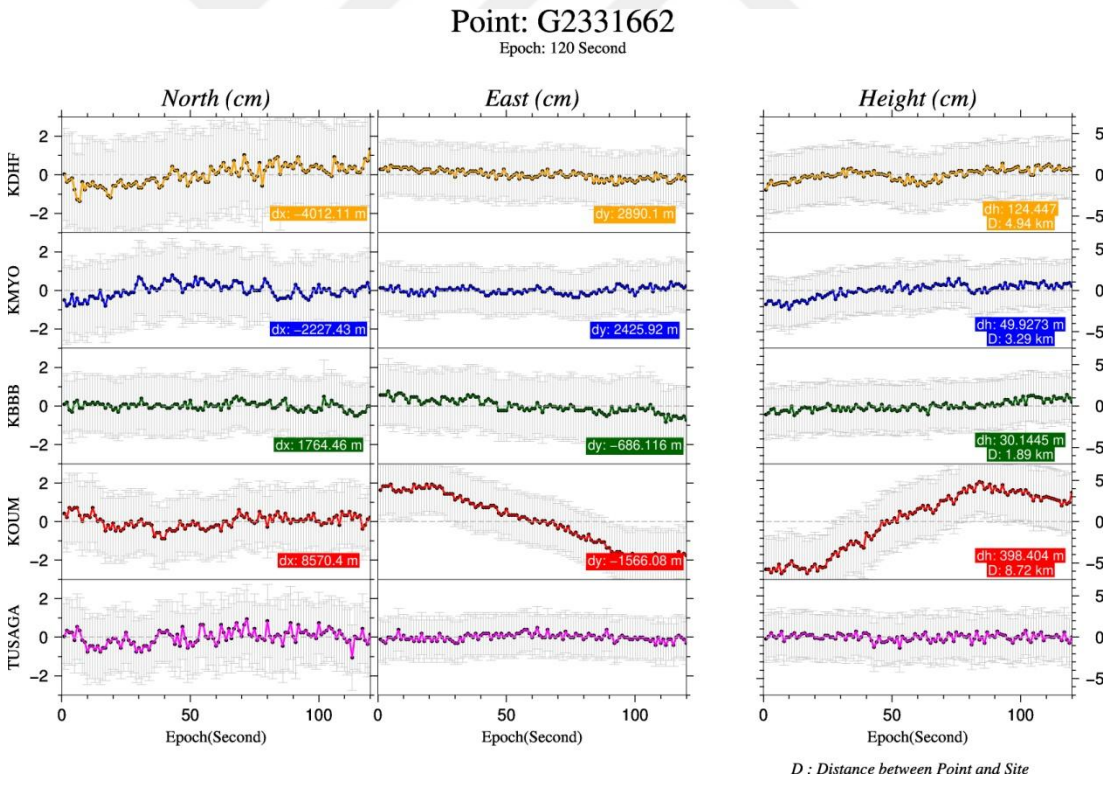
G2331662	Kuzey Std (cm)	Doğu Std (cm)	Yukarı Std (cm)
KBBB	0.204	0.349	0.565
KDHF	0.519	0.236	0.681
KMYO	0.365	0.171	0.816
KOUM	0.339	1.333	3.656
TUSAGA-Aktif	0.392	0.178	0.413

Tablo 4.14. G2331915 noktasında sabit istasyonlar ve TUSAGA-Aktif'e dayalı RTK tekniğinin duyarlıkları (120 ölçü için)

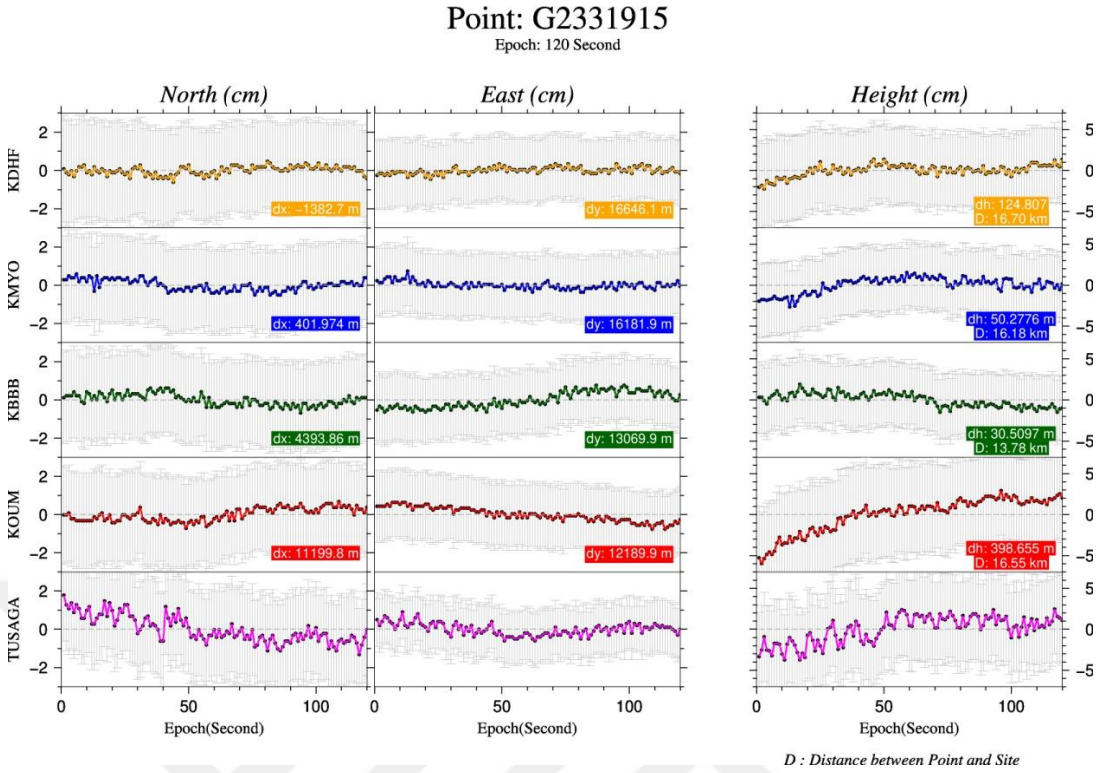
G2331915	Kuzey Std (cm)	Doğu Std (cm)	Yukarı Std (cm)
KBBB	0.297	0.409	0.786
KDHF	0.218	0.165	0.715
KMYO	0.278	0.183	0.948
KOUM	0.339	0.355	2.071
TUSAGA-Aktif	0.693	0.310	1.606

Tablo 4.15. G2331731 noktasında sabit istasyonlar ve TUSAGA-Aktif'e dayalı RTK tekniğinin duyarlıkları (120 ölçü için)

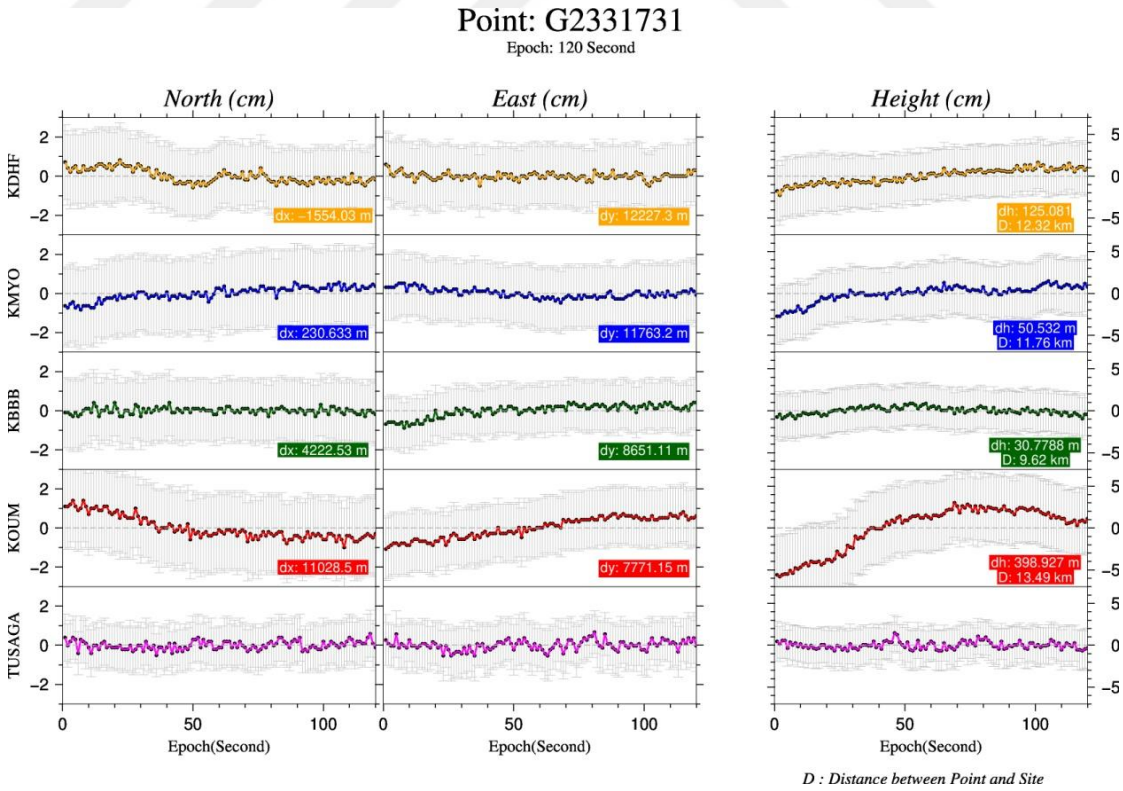
G2331731	Kuzey Std (cm)	Doğu Std (cm)	Yukarı Std (cm)
KBBB	0.155	0.323	0.414
KDHF	0.343	0.176	0.848
KMYO	0.326	0.221	0.937
KOUM	0.584	0.532	2.612
TUSAGA-Aktif	0.215	0.250	0.427



Şekil 4.33. G2331662 istasyonda GZK zaman serileri. Düşey bileşen penceresinde gezici alıcı uzaklığı (D) gösterilmiştir.



Şekil 4.34. G2331915 istasyonda GZK zaman serileri. Düşey bileşen penceresinde gezici alıcı uzaklığı (D) gösterilmiştir.



Şekil 4.35. G2331731 istasyonda GZK zaman serileri. Düşey bileşen penceresinde gezici alıcı uzaklığı (D) gösterilmiştir.

4.4. Farklı GNSS Tekniklerinin Karşılaştırılması

Kabuk deformasyonlarının izlenmesinde konumsal ve zamansal çözünürlük anlam kazanır. Bölüm 4.1 ve 4.2'den elde edilen yer kontrol noktaları ve istasyonlara ait hızlar Şekil 4.36'da birleştirilmiştir. Yatay yönde elde edilen hızların tümü özellikle Kuzey Anadolu Fayı tektoniğine uygun ve birbirleriyle yakın sonuçlar vermiştir. Körfezin güney yakasında bulunan GGOL, KSBS ve görece daha doğuda olan KDHF ve KMYO günlük zaman serilerinden elde edilen hız yakın evredeki G2331915, G2331731, G2334209, G2334211, G2331729, G2331653, G2331658 ve G2331607 noktaları ile örtüşmektedir.

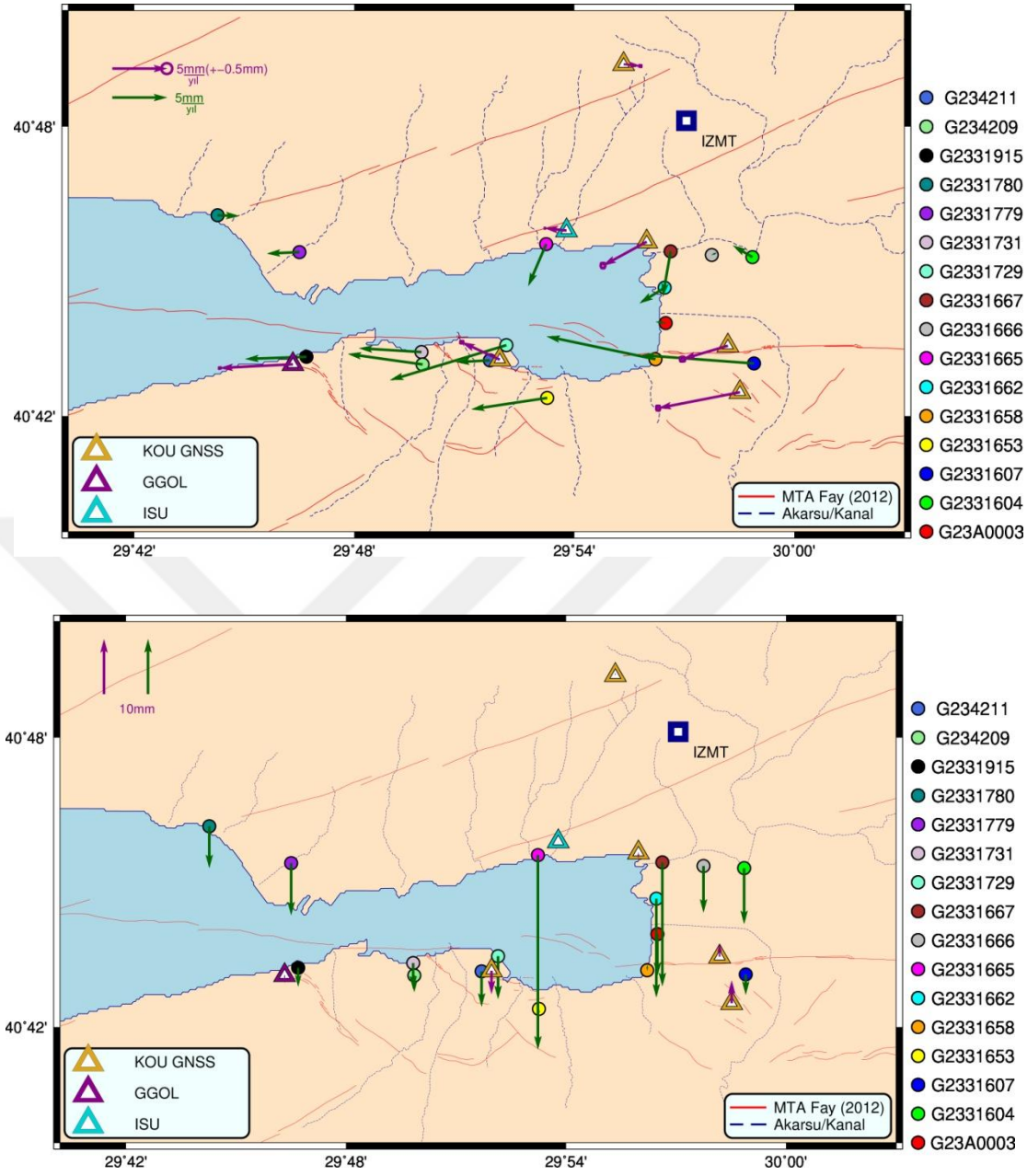
Düşey yönde elde edilen hızlar daha düşük seyir ederken kıyı çizgisine yakın dolgu alanlarındaki bazı istasyonlarda yılda 3.5 cm'e kadar çıkabilmektedir. Yer kontrol noktaları körfezin çevresinde zemine tesis edilmiştir. Sürekli istasyonlar sağlam yapı ve binaların çatısında yer almaktadır. Noktaların zemin ve üzerinde konumlandığı yapı durumu deformasyon farklarını ortaya çıkarabilmektedir. Ayrıca yer kontrol noktalarında en yüksek deformasyon izlenen noktaların akarsu yataklarına en yakın yerlerde olduğu ayrıntısına dikkat çekilmiştir.

Zamansal çözünürlük bakımından kampanya çözümlerinin günlük çözümlere yaklaşması bile imkansızdır. Ancak noktanın gözlem periyodu geniş, konum ölçme doğruluğu santimetre altına ulaşır ve 5-6 periyodun üzerinde ölçüm sağlanırsa 1 cm üzerindeki hızlarda deformasyon yakalanabilmektedir. 2009 yılında ilk ölçümü yapılmış yer kontrol noktalarıyla yer değiştirmeler bu yolla tespit edilebilmiştir. CORS istasyonlarının en erkeni 2016 yılında analiz edilmeye başlasa da KDHF ve KMYO gibi istasyonlar henüz 1 yıllık periyodunu tamamlamamış olup deformasyon hızları için kesin konuşmak zordur.

Çalışma bölgesine yakın CORS istasyonları sayesinde zamansal çözünürlük yükseldiğinden mevsimsel salınımlar izlenebilir. Deformasyon nedenlerinin araştırılmasında bu çözünürlüğün önemi büyüktür.

Deformasyon beklenen tüm alanı CORS istasyonları ile donatmak maliyet ve lojistik açısından neredeyse imkâsızdır. Nokta sıklaştırılması yer kontrol noktalarının belirli periyotlarla izlenmesi konumsal çözünürlüğü istenilen seviyede arttırabilir.

Yersel noktaların statik olarak ölçülmesinden elde edilen doğruluk santimetre civarındaki deformasyonların izlenmesini mümkün kılmaktadır. Statik deformasyon analizine alternatif olarak düşünülen GZK yöntemleri Bölüm 4.3'te incelenmiştir. Sonuçlara göre benzer seviyelerdeki deformasyonların okunabilmesi için klasik GZK



Şekil 4.36 CORS istasyonları ve yer kontrol noktalarının yıllık hızları (yukarda yatay hızlar, aşağıda düşey hızlar olmak üzere).

kullanılıyorsa istasyonun en fazla 1-2 km uzağında noktalar seçilmesi uygun olacaktır. Ağ-GZK yöntemi VRS tekniği dolayısıyla oldukça etkilidir. Bu sebeple yavaş ilerleyen beklenen deformasyonların izlenmesi mümkün olmayacaktır.

5. SONUÇLAR

Doğu Marmara (İzmit) Körfezi ve çevresinde, jeolojik, antropolojik, topografik ya da sismik sebeplerden meydana gelmesi muhtemel yatay ve düşey yöndeki kabuk deformasyonları farklı GNSS teknikleri ile izlenmiştir. CORS istasyonları zamansal ölçekte en yüksek doğrulukta çözümler sunmaktadır. Fakat bu istasyonlardan oluşan bir jeodezik ağın kurulumu ve konumsal çözünürlüğünün arttırılması çok maliyetli ve zorlu olacaktır.

GNSS tekniğiyle deformasyon analizi belirlemenin bir diğer yöntemi yer kontrol noktalarının statik olarak ölçülmesidir. Farklı tarihlerde uzun oturum süreli yapılan ölçmeler ile deformasyonlar gözlenebilmektedir. Fakat bu noktaların zemindeki devamlılığını sağlamak zor olabilmektedir. Ayrıca zamansal ölçekte CORS istasyonlarının sağladığı çözünürlüğe ulaşması olanaksızdır. Standart sapmaların sınırından daha yavaş deformasyonların tespiti mümkün olmayacaktır.

Bu iki yöntemin birbirini tamamlayan yönleri ile deformasyon alanlarının izlenmesinde avantaj sağlayacaktır. Yatay veya düşey yönde yıllık hızlar iki yöntemle de aynı bölgelerde yakın sonuçlar vermektedir. CORS istasyonları ile çalışılan bir bölgenin ayrıca yersel noktalarla desteklenmesi konumsal çözürlüğe katkı verir. CORS sayesinde zamansal çözünürlük günlük çözüme kadar yükselir. CORS istasyonların sayesinde özellikle mevsimsel salınımın tespiti yapılmaktadır.

Kuzey Anadolu Fayı'nın sağ yanal atılımlı geometrisi bilinmektedir. Avrasya plakasına göre Anadolu plakasının batıya doğru hareketi, CORS istasyonlarının ve yersel ölçümlerin yatay bileşenlerinde gözlenmiştir. Bu sonuçla GNSS ölçmeleriyle sismik olarak aktif bölgelerin deprem öncesi ve sonrası genel hareketleri izlenmektedir. Ayrıca yüksek saniyede 100 ölçüye kadar yüksek hertzlerde gözlem yapabilen yeni tür alıcılar ile deprem anına ait bilgiler de edinilebilir. Bu yeni nesil GNSS sistemlerinin sismolojik ağlarla entegre çalışabilmesinin önünü açmaktadır. Bu sayede sismik aktivitenin yüksek olduğu bölgeler sismo-jeodezik ağlarla izlenebilir.

Körfez akarsuların ve nehirlerin birleşme noktası olmasından dolayı sahip olduğu geniş alüvyal zeminler düşey yönde çökmelere el verişlidir. Buna dair en önemli

kanıt, nehir, akarsu ve denizlere yaklaşan noktalarda çökmelerin hızlanmasıdır(Şekil 4.13).

GNSS ölçümleri ile elde edilen yatay ve düşeydeki doğruluk farkı dikkatli yorumlanmalıdır. Çoğu kez yüzey deformasyonları olarak ortaya çıkan değişimlerin kaynağı da birbirinden ayrılır. İzmit körfezinde yatay hareketleri Kuzey Anadolu Fayı şekillendirirken, düşey yönlü yerdeğiştirmeleri (çökme) zemin yapısı belirler. Düşeydeki hata yataydakinin yaklaşık 1.5 ila 3 katına çıkabilmektedir. Çalışmada kullanılan 4 farklı teknik bu durumu kanıtla mıştır. Deformasyon izlemesine karar verilmeden önce hangi hareketlerin önemsendiğine karar verilemeli ölçme ve analiz stratejisi bu tespite göre oluşturulmalıdır.

Klasik GZK yönteminde gezici alıcı ile sabit arasındaki mesafe kısaldıkça doğruluk artmaktadır. Gezicinin referansına en yakın olduğu durumda yatayda 2 mm düşeyde 3 mm'ye kadar standart sapma sahip olduğu gözlenebilmektedir.

KAYNAKLAR

Aktuğ B., Sezer S., Özdemir S., Lenk O., Kılıçoğlu A., Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı Güncel Koordinat ve Hızlarının Hesaplanması, *Harita Dergisi*, 2011, **145**(1).

Alpar B., Yaltırak C., Generalized geological map of the Gulf of İzmit, Eastern part of the Sea of Marmara, Turkey. *Marine Geophysical Research,* 2020, **41**(1).

Atasoy V., Öztürk E., Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Sonuçların Yorumu, *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, 1984 **27**(40).

Bahadır B., Üstün A., İnternet Tabanlı GNSS Veri Değerlendirme Servisleri (Internet Based GNSS Processing Services), *Harita Dergisi*, 2014, **152**(40-50).

Bakici, Sedat & Erkek, B. & İlbey, A. & Kulaksiz, E., Business Model of CORS-TR (TUSAGA-AKTIF). *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, **4**(109-116).

Bayrak, T., Eyo, E., Başoğlu, N., Musa, T., Dinebari, A., Development of an alternative low-cost landslide monitoring method using data from TUSAGA-Aktif GNSS network, *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 2015, **21**(610-623).

Bock Y., Fang P., Sullivan A., Jiang S., Moore E., Argus D., Liu Z., Kedar S., Extended Solid Earth Science ESDR System – Algorithm Theoretical Basis Document, *MEaSUREs ROSES-17*, 2019, **4**.

Boehm J., Werl B., Schuh H., Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *Journal of Geophysical Research,* 2005, **111**.

Boucher, C., Altamimi, Z., The initial IERS Terrestrial Reference Frame. (IERS Technical Note;1) *Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris*, 1989, **4**(98).

Boucher, C., Altamimi, Z., ITRF89 and other realizations of the IERS Terrestrial Reference System for 1989. (IERS Technical Note;6) *Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris*, 1991, **2(**137).

Celep Z., Kumbasar N., *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Beta Yayınevi, İstanbul 2000.

Chatre E., Hegarty C., (2008) Evolution of the Global Navigation SatelliteSystem (GNSS). Proceedings of the IEEE 96 (2008), 1902-1917.

Dahmen, N., Hohensinn, R., Clinton, J., Comparison and Combination of GNSS and Strong-Motion Observations: A Case Study of the 2016 Mw 7.0 Kumamoto Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, **110**.

Dennis, D., McCarthy E., IERS Standards (IERS Technical Note;3) *Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris*, 1989, **4**(77).

Dixon, T., Mao A., Bursik, M., Heflin, M., Langbein, J., Stein, R., Webb, F., Continuous monitoring of surface deformation at Long Valley Caldera, California, with GPS, *Journal of Geophysical Research-Soldi Earth*, 1997 **102**(1207-1234)

Dönmez E. Tiryakioğlu İ., Gediz Fayı Yerkabuğu Hareketlerinin GNSS Gözlemleri ile İzlenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 2018 **18**(1110-1117).

Erdoğan B., Hekimoğlu Ş., Durdağ U. M., Öcalan T., Jeodezik Ağlarda Orijinal Ölçüler İçin Klasik Uyuşumsuz Ölçü Yöntemlerinin Güvenilirliğinin Araştırılması. *Harita Dergisi* **157**(22-28).

Eren K., Ulusal CORS (Sürekli Gözlem Yapan GPS İstasyonu) Sisteminin Kurulması ve Ulusal Datum Dönüşümü Projesi. *TUBITAK,* Proje No: 105G017, 2019.

Erener A., Çok Bandlı Insar Ve GNSS Tekniği İle Doğu Marmara (İzmit Körfezi) Düşey Yönlü Yer Değiştirmelerin İzlenmesi, Zemin Çökmeleri İle Bina Yoğunluğu Ve Sıvılaşma İlişkisinin Araştırılması, *TUBITAK,* Proje No: 117Y155, 2017.

Erener A., Üstün A., Konak H., Çomut F.C., Yalvaç S., Aşcı M., Irmak T.S., Küreç P., Şentürk E., Güvenaltın M.A., InSAR ile Zemin Çökmelerinin İzlenmesi, Bina Yoğunluğu ve Sıvılaşma ile İlişkisinin Araştırılması: İzmit Körfez Bölgesi Örneği, *Uluslarası Deprem Gerçeği ve Kentleşme Çalıştayı*, Kocaeli, Türkiye, 5-16 Ağustos 2018.

Erener A., Üstün A., Yalvaç S., Çomut F., Şentürk E., Kaya E., Zemin Çökmelerinin ve Bina Yoğunluğu İlişkisinin InSAR ve Optik Uydu Görüntüleri ile Araştırılması: Doğu Marmara (İzmit Körfezi) Örneği. *VI. International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Türkiye, 25-27 Eylül 2019.

Garipağaoğlu N., Uzun S.M., İzmit Körfezi kıyılarında kıyı alanı kullanımı. *Türk Coğrafya Dergisi,* 2014, **63**(9-22).

Gülal E., Aykut N. O., Akpınar B., Uygur S.Ö., GNSS Antelerinin Faz Merkezi ve Değişimini Araştırılması, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 18-22 Nisan 2011.

Gurtner W., RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format. *GPS World*, 1994 **5**(7).

Gurtner W., Mader G., The RINEX Format: Current Status, Future Developments, *Proceedings of the Second International Symposium of Precise Positioning with the Global Positioning System*, Ottawa, Kanada, 1990.

Hatanaka Y., A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 2008, **55**(21-30).

İnal C., Gündüz A.M., Bülbül S., Klasik RTK ve Ağ-RTK Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi*, 2014, **2**(2).

Kahveci, M., Yıldız, F., GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama, *Nobel Akademik Yayıncılık*, 5.Baskı (222), Ankara 2019.

Konak H., Küreç P., İnce C., Yaşamsal Altyapı Sistemlerinin Sıklaştırma Gps Ağlarıyla İzlenmesi Ve Deformasyon Sonuçlarının Yorumlanması: Kocaeli İzdogap Gps Ağı Uygulaması. *Geomatik Dergisi*, 2017, **2**(37-51).

Kurt O., GPS Ağlarının Dengelenmesi, Bölüm Seminer Çalışması, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi*, Zonguldak, 2001.

Landau H., Vollath U., Chen X., Virtual Reference Station System, *Journal of Global Positioning Systems*, 2002, **2(**137-143).

Liu, T., Yuan, Y., Zhang, B., Wang, N., Tan, B., Chen, Y., Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations, Journal of Geodesy, 2017, **91**(253-268).

Livaoğlu, H., Irmak, T.S., Güven, İ., Seismic vulnerability indices of ground for Değirmendere (Kocaeli Province, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, **78**.

Logsdon T., The Navstar GPS. In: The Navstar Global Positioning System. *Springer, Boston, MA*. 1992.

Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O., Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. Ocean Dynamics, 2004, **56**(394–415).

Mcloughlin I., Kai W., Su T., Data Collection, Communications and Processing in the Sumatran GPS Array (SuGAr). *Lecture Notes in Engineering and Computer Science,* 2011, **2**(1732-1736).

Mcclusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H.G., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Veis, G., Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**(5695-5719).

Mekik, Ç., Gerçek Zamanlı Kinematik GPS, *Seminer çalışması, ZKÜ*, 11, Zonguldak 2001.

Moore E. H., On the reciprocal of the general algebraic matrix. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1920, **26**(394–395).

Murray J.R., Bartlow N., Bock Y., Brooks B. A., Foster J., Freymueller J., Hammond W.C., Hodgkinson K., Johanson I., López-Venegas A., Mann D., Mattioli G.S., Melbourne T., Mencin D., Montgomery-Brown E., Murray M.H., Smalley R., Thomas V., Regional Global Navigation Satellite System Networks for Crustal Deformation Monitoring, *Seismological Research Letters*, **91**(552–572).

Öğütçü, S., Temporal correlation length of network based rtk techniques. *Measurement,* **134**, 2019.

Öztürk E. Şerbetçi M. Dengeleme Hesabı 1, 2. Baskı, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon, 1989.

Öztürk E., Dengeleme Hesabı 2, 2. Baskı, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon, 1991.

Palano M., Pezzo G., Serpelloni E., Devoti R., D'Agostino N., Gandolfi S., Sparacino F., Anderlini L., Poluzzi L., Tavasci L., Macini P., Pietrantonio G., Riguzzi F., Antoncecchi I., Ciccone F., Rossi G., Avallone A., Selvaggi G., Geopositioning time series from offshore platforms in the Adriatic Sea. Sci Data, 7:373. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00705-w.

Pekcetinoz, B., Ozel, E., Uluğ, A., The Evaluation of Shallow Seismic Studies in Izmit Bay and the Relationship with the North Anatolian Fault. *Journal of Coastal Research,* 2008, **24**(1174-1188).

Raquet, J., 1998, Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers. PhD Thesis, UCGE 20116, University of Calgary.

Reid, H.F., The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 1910, 16-28.

Reilinger. R., McClusky, S., Nubia–Arabia–Eurasia plate motions and the dynamics of Mediterranean and Middle East tectonics, *Geophysical Journal International*, 2011, 186(971–979).

Sümer, Ö., Alak, A., & Tekin, A., A Geological Overview of Historical Development of the Anthropogene and Anthropocene Concepts. *Geological Bullettin of Turkey*, **63**(1-20).

Şengör A.M.C., Tüysüz O., İmren C., Sakınç M., Eyidoğan H., Görür N., Pichon X., Rangin C., The North Anatolian Fault: A new look, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, **33**(37-112).

Şerbetçi, M., Atasoy, V., Jeodezik Hesap, KTÜ yayınları, yayın no: 153, Trabzon 1990

Snay R.A., Soler T., Asce M., Continuously Operating CORS History, Applications, and Future Enhancements, 2011, DOI: 10.1061/9780784411463.ch01

Spofford P.R., Remondi B.W., The National Geodetic Survey Standart. GPS Format SP3, NOAA, *National Geodetic Survey*, 2003.

Tsuji H., Miyagawa K., Yamaguchi K., Yahagi T., Oshima K., Yamao H., Furuya T., Modernization of GEONET from GPS to GNSS, *Journal of the Japan society of photogrammetry and remote sensing*, 2013, **52**(114-120).

Ündül Ö., Gürpınar O., Çokal Vadisindeki (Gelibolu) Alüvyal Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyeli, *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 2003, **1**(67-80).

URL-1 https://www.gsc-europa.eu/galileo/what-is-galileo (Ziyaret tarihi: 18 Kasım 2020)

URL-2 https://www.igs.org/about/ (Ziyaret tarihi: 18 Aralık 2020)

URL-3 https://www.epncb.oma.be/_organisation/about.php (Ziyaret tarihi: 19 Kasım 2020)

URL-4 https://www.tkgm.gov.tr/tr/icerik/tusaga-aktif-0 (Ziyaret tarihi: 19 Aralık 2020)

URL-5 https://www.tusaga-aktif.gov.tr/Web/DepremListe.html (Ziyaret tarihi: Kasım 2020)

URL-6 https://www.topconpositioning.com/gnss-and-network-solutions/gnss-network-solutions/net-g5 (Ziyaret tarihi: Kasım 2020)

URL-7 http://geoweb.mit.edu/gg (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2020)

URL-8 https://www.igs.org/products/#ionospheric_products (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2020)

URL-9 https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/68243/mod_resource/content/ (Ziyaret tarihi: 17 Kasım 202)

Üstün A., Datum Dönüşümleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.

Üstün A., Erener A., Konak H., Şentürk E., Küreç P., Güvenaltın M.A., Yalvaç S., Çomut F.C., An Eight-Year Displacement Investigation In Izmit Bay Based On Gps Control Survey, *Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği Bilimsel Kongresi (TUJJBBK)*, İzmir, Türkiye, 30 Mayıs-2 Haziran 2018.

Wanninger, L., Virtual Reference Stations for Centimeter Level Kinematic Positioning, Portland, Oregon, USA, *Proceedings of ION GPS*, 2002, **1**(1400-1407),

Yalçın H., Gülen L., Utkucu M., Türkiye ve Yakın Çevresinin Aktif Fayları Veri Bankası ve Deprem Tehlikesinin Araştırılması, *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 2013, **34**(133-160).

Yalçınkaya M., Güncel Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi, *Harita Dergisi,* 2000, **124**(38-54).

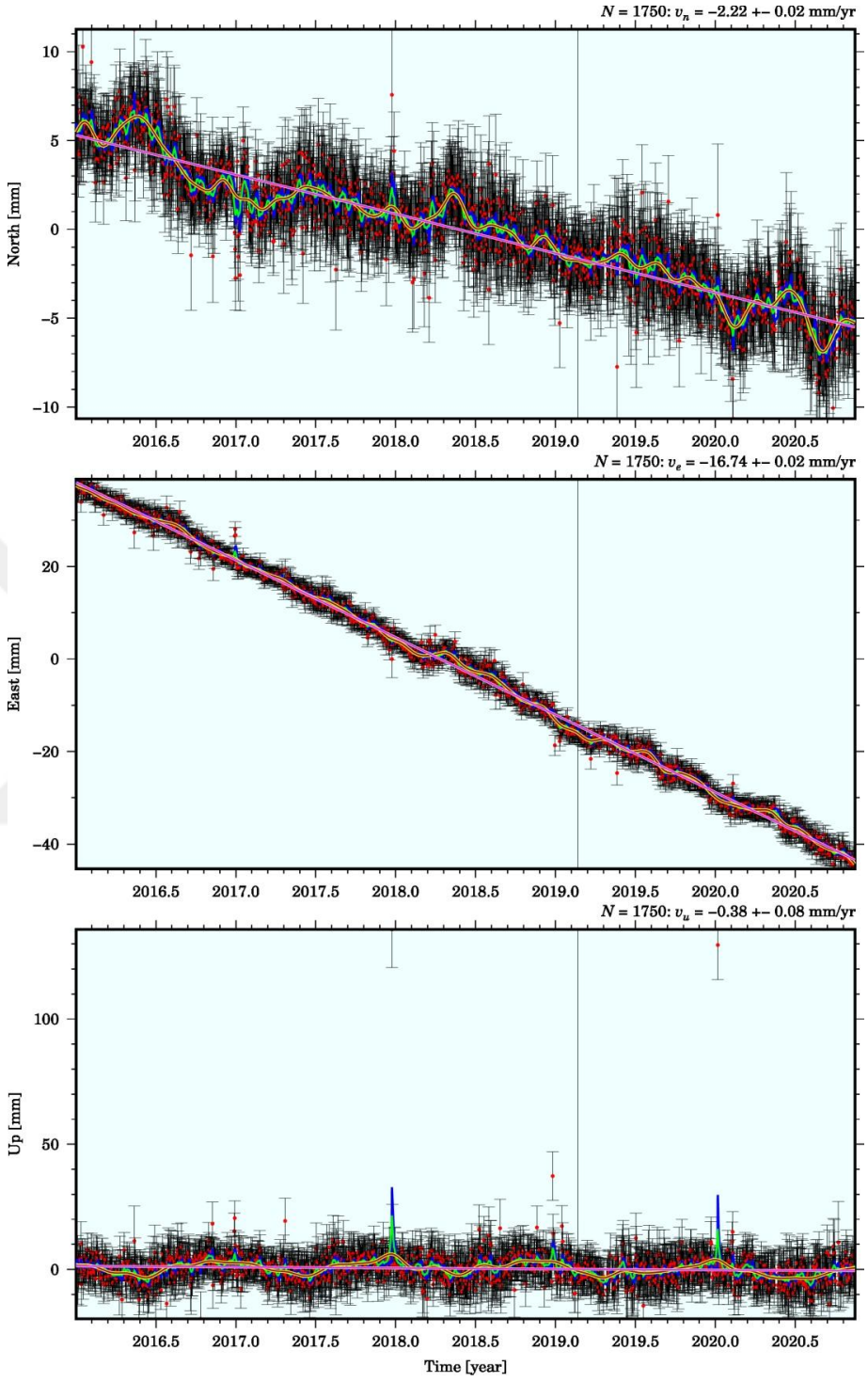
Youd, T., DeDen, D., Bray, J., Sancio, R., Zero-Displacement Lateral Spreads, 1999 Kocaeli, Turkey, Earthquake, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **1**(135).

Zhang, N., Zhang, Y., Gao, Y., Pak, R., Yang, J., Site amplification effects of a radially multi-layered semi-cylindrical canyon on seismic response of an earth and rockfill dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 2019, **116**(145-163).

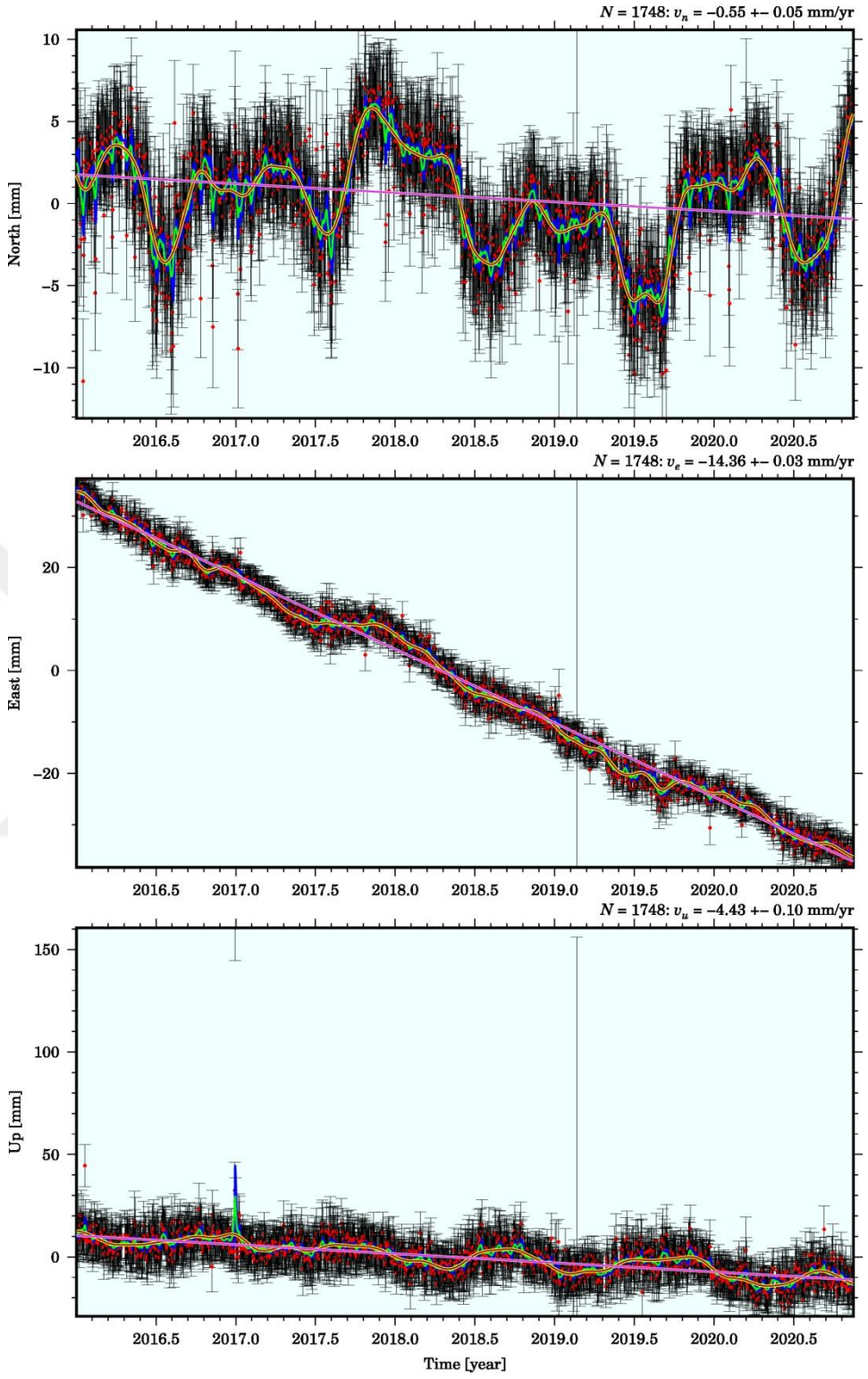
Zumberge J.F., Liu R., Neilan R.E., 1994 Annual report., International GPS service for geodynamics, IGS Central Bureau, Jet Propulsion Lab., Pasadena, California, ABD, 1-2, 1995.

EKLER

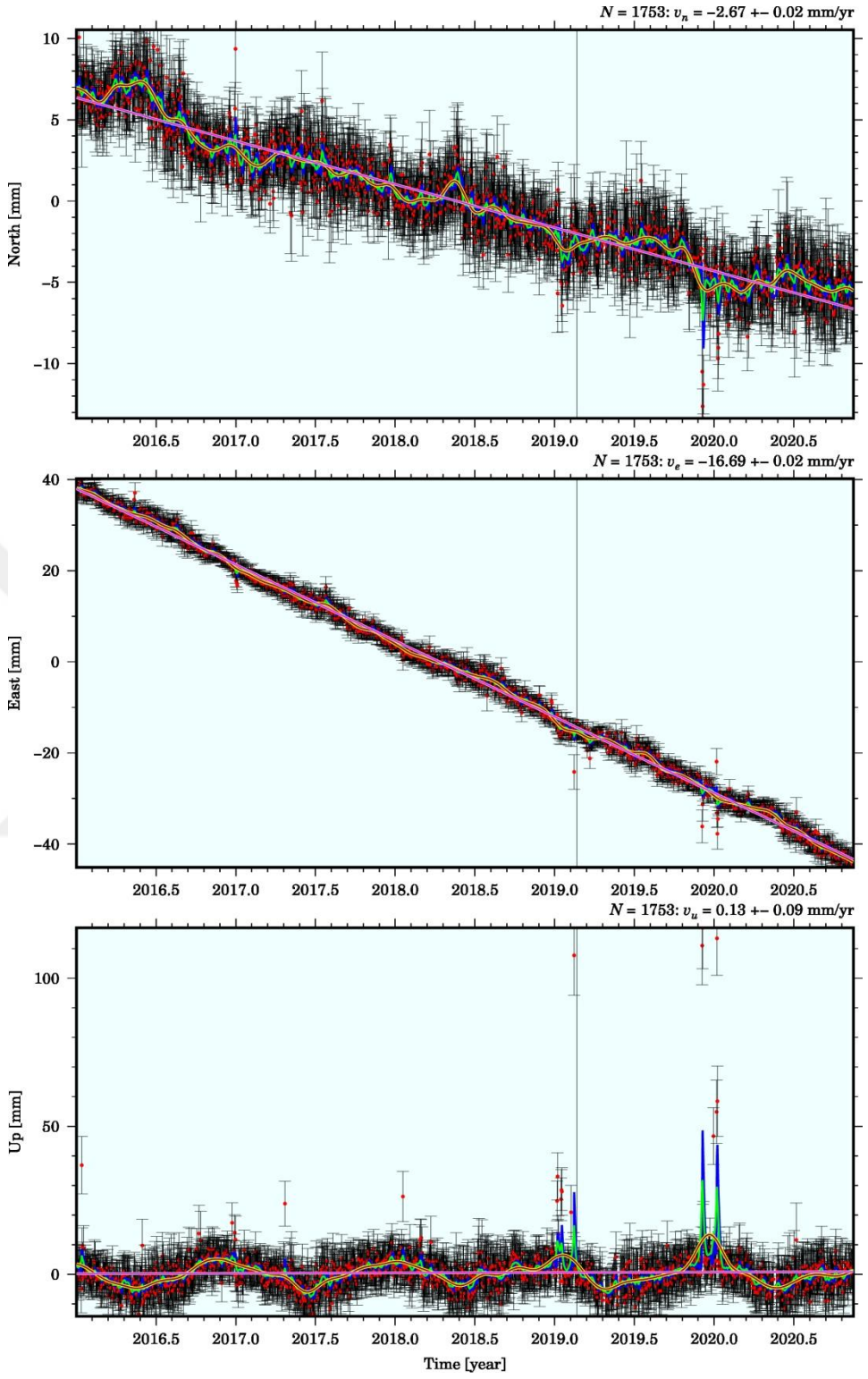
EK-A



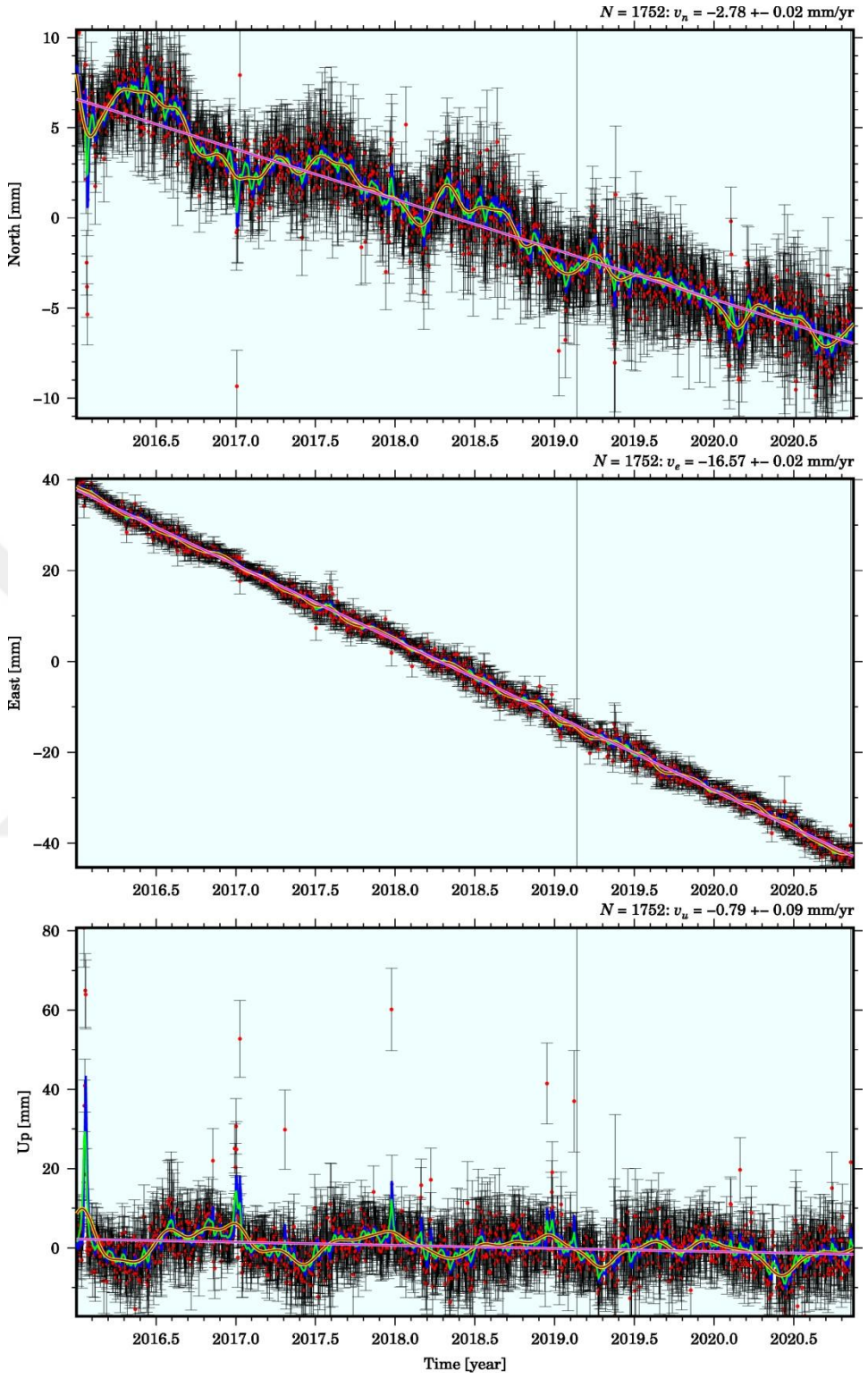
Şekil A.1. BILE istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



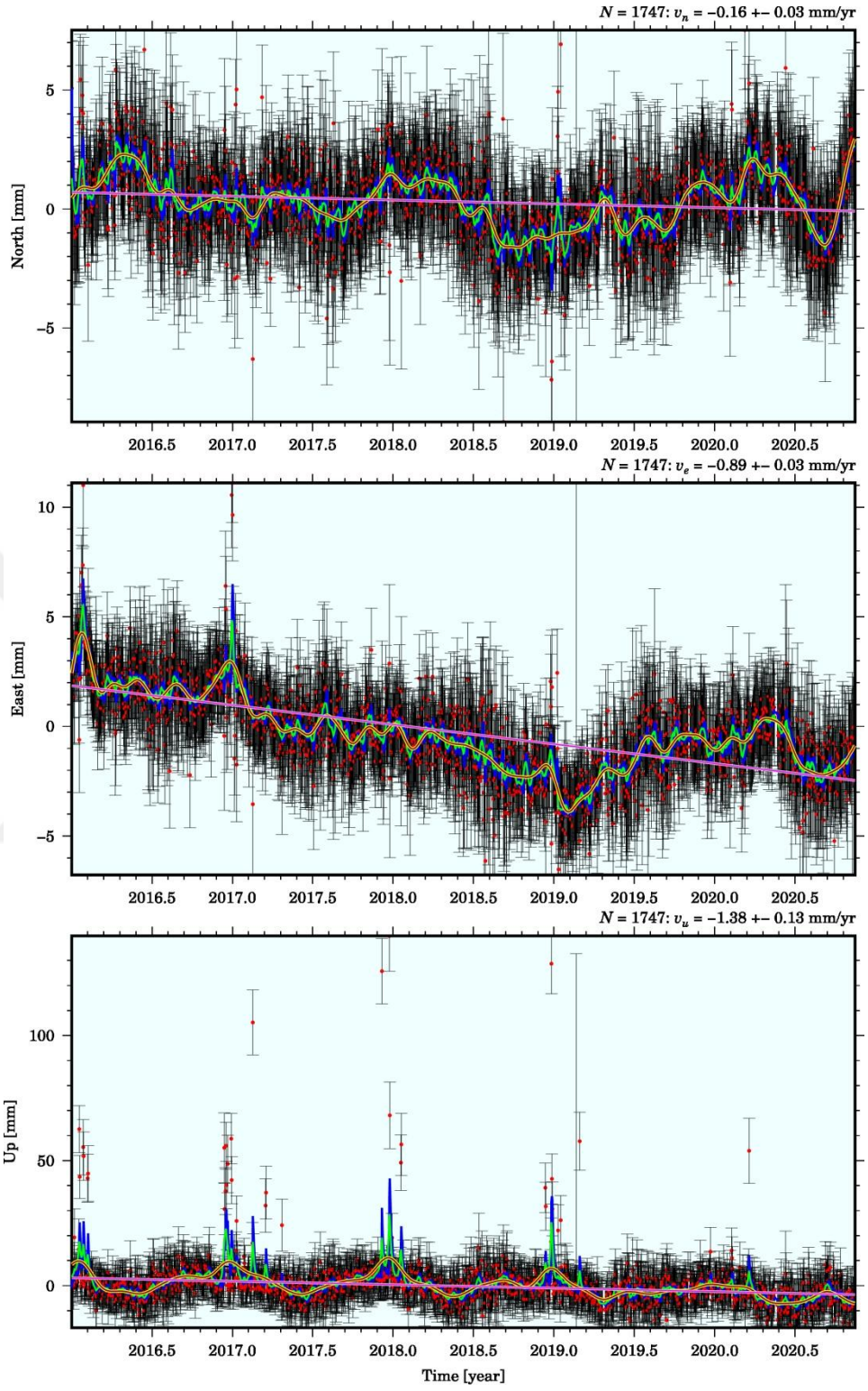
Şekil A.2. BURS istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



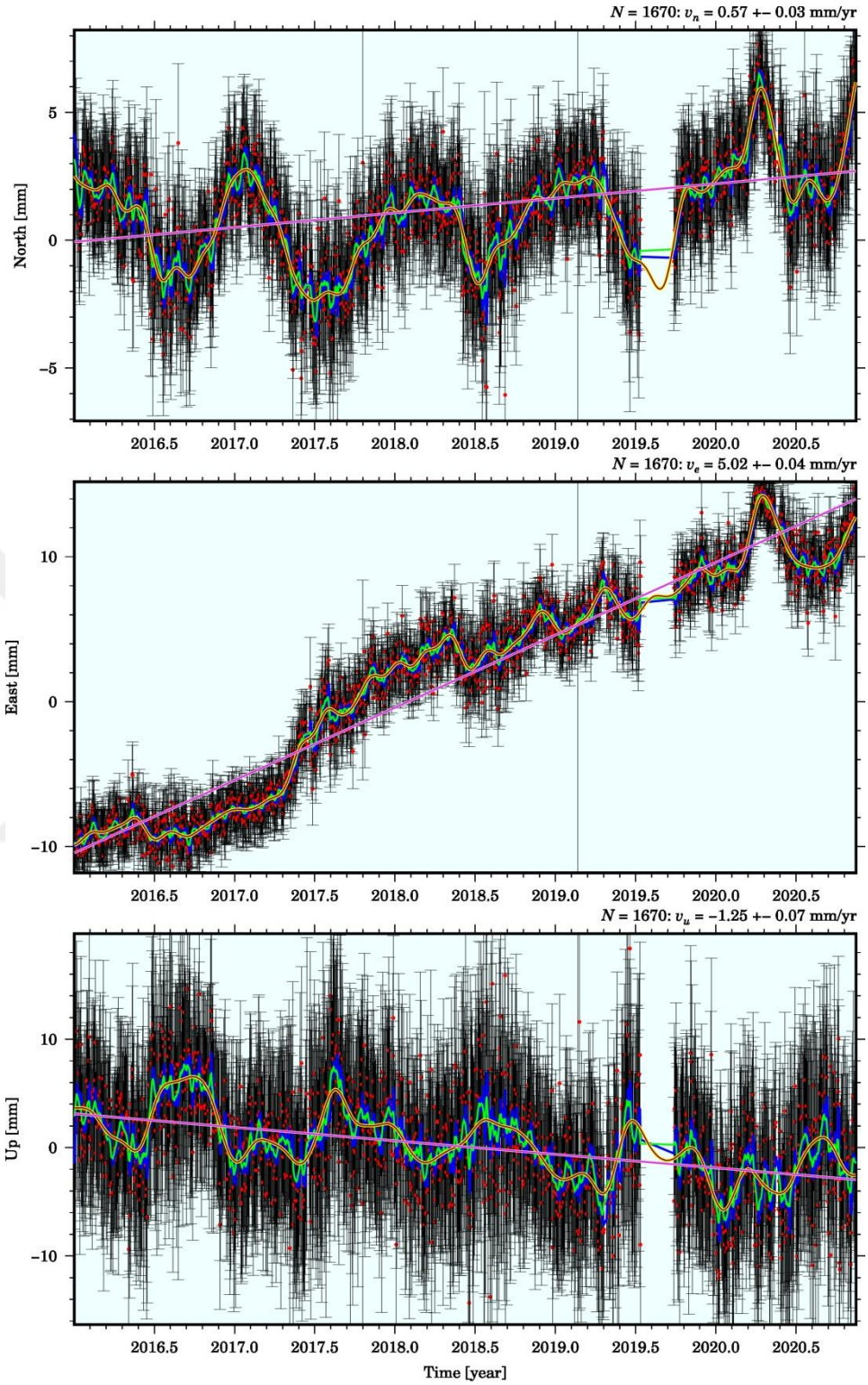
Şekil A.3. ESKS istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



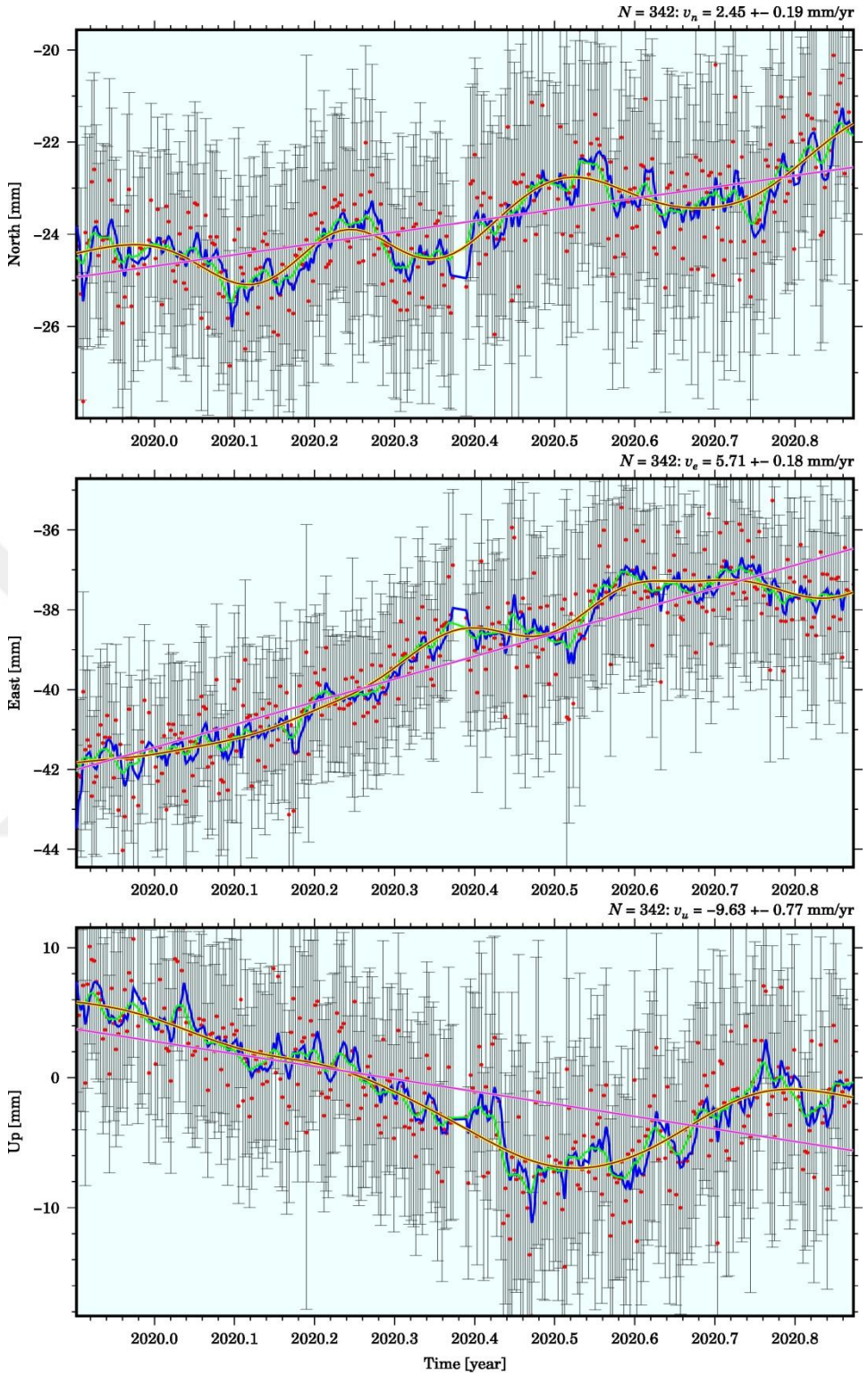
Şekil A.4. HARC istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



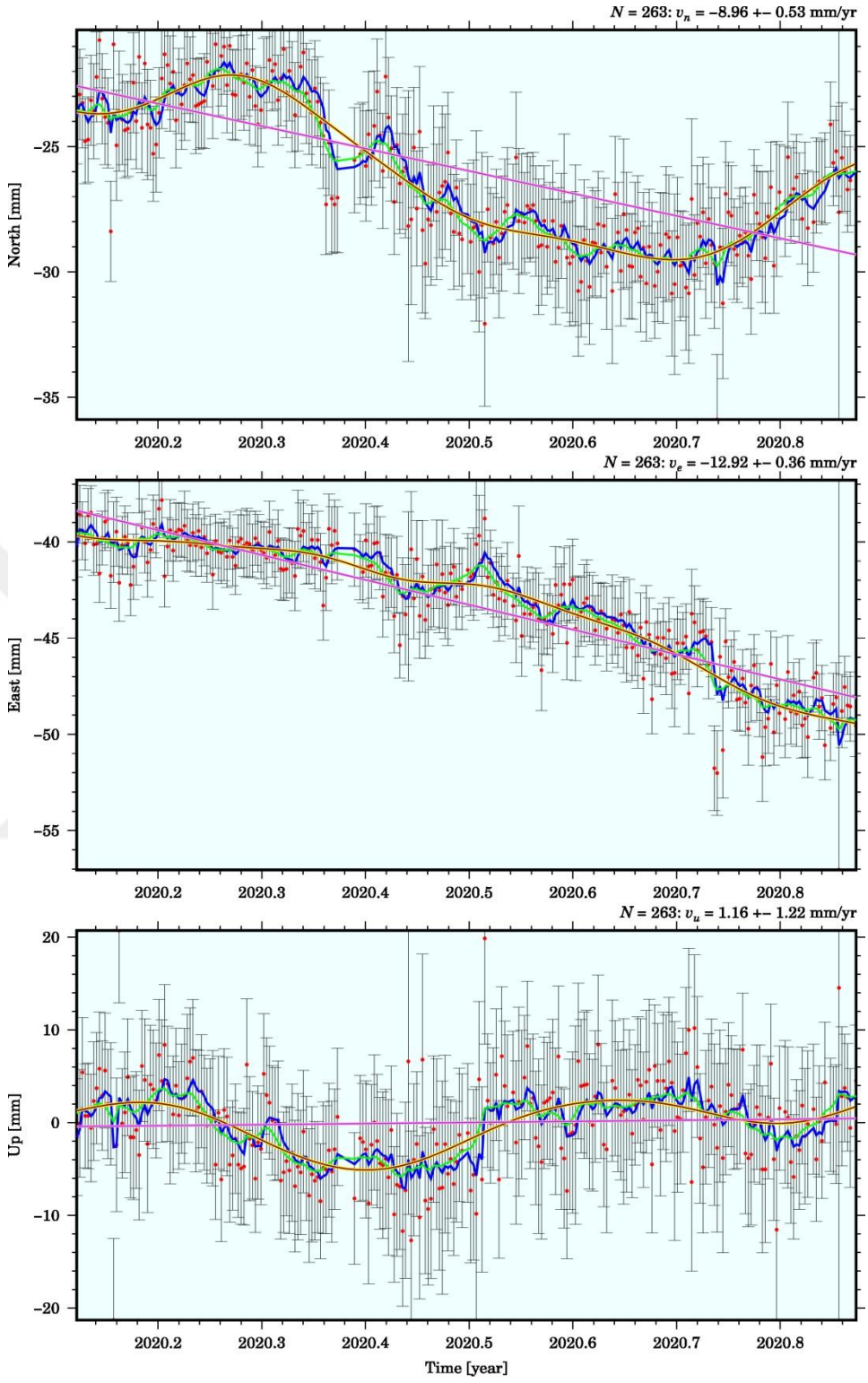
Şekil A.5. HEND istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



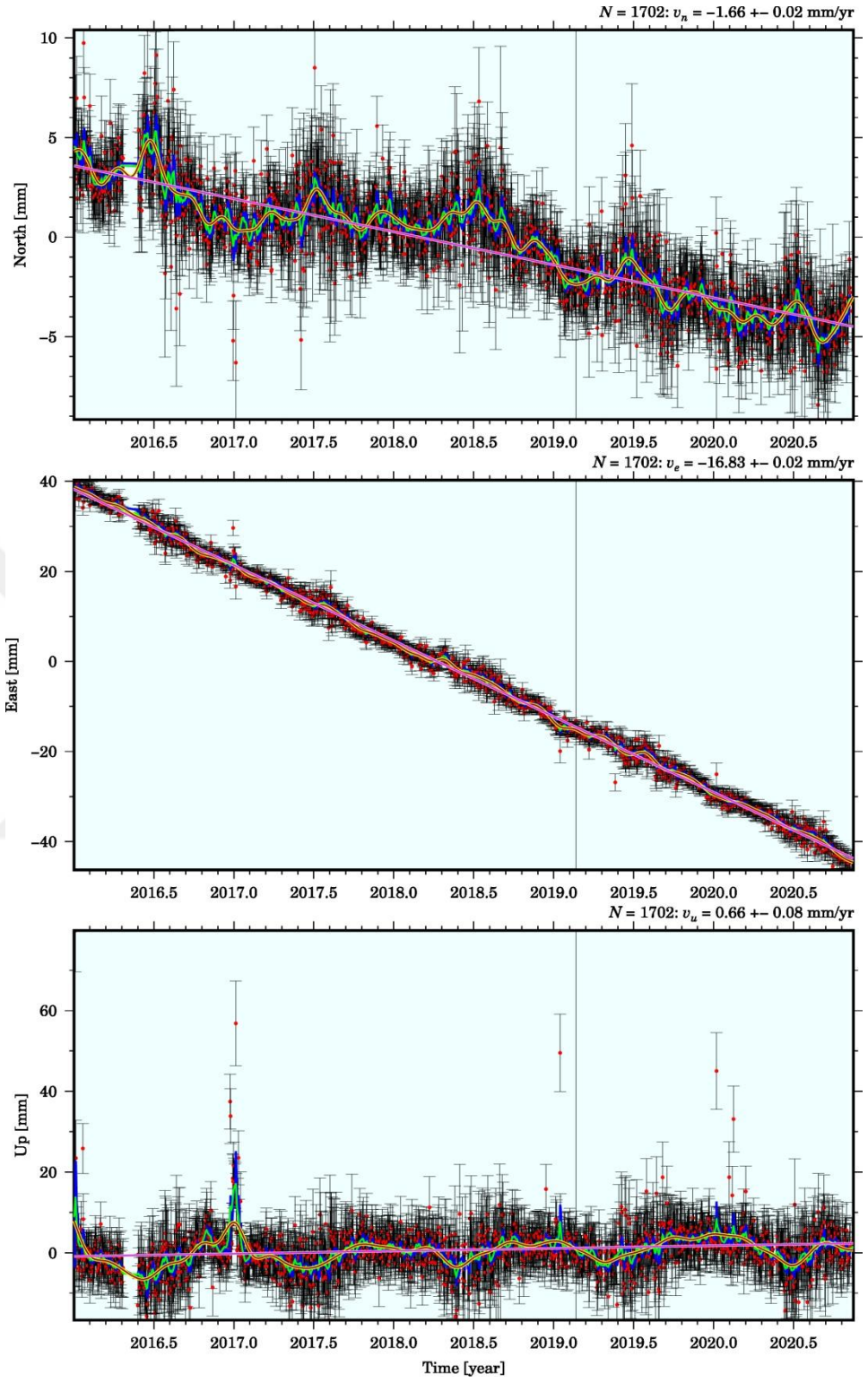
Şekil A.6. ISTN istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



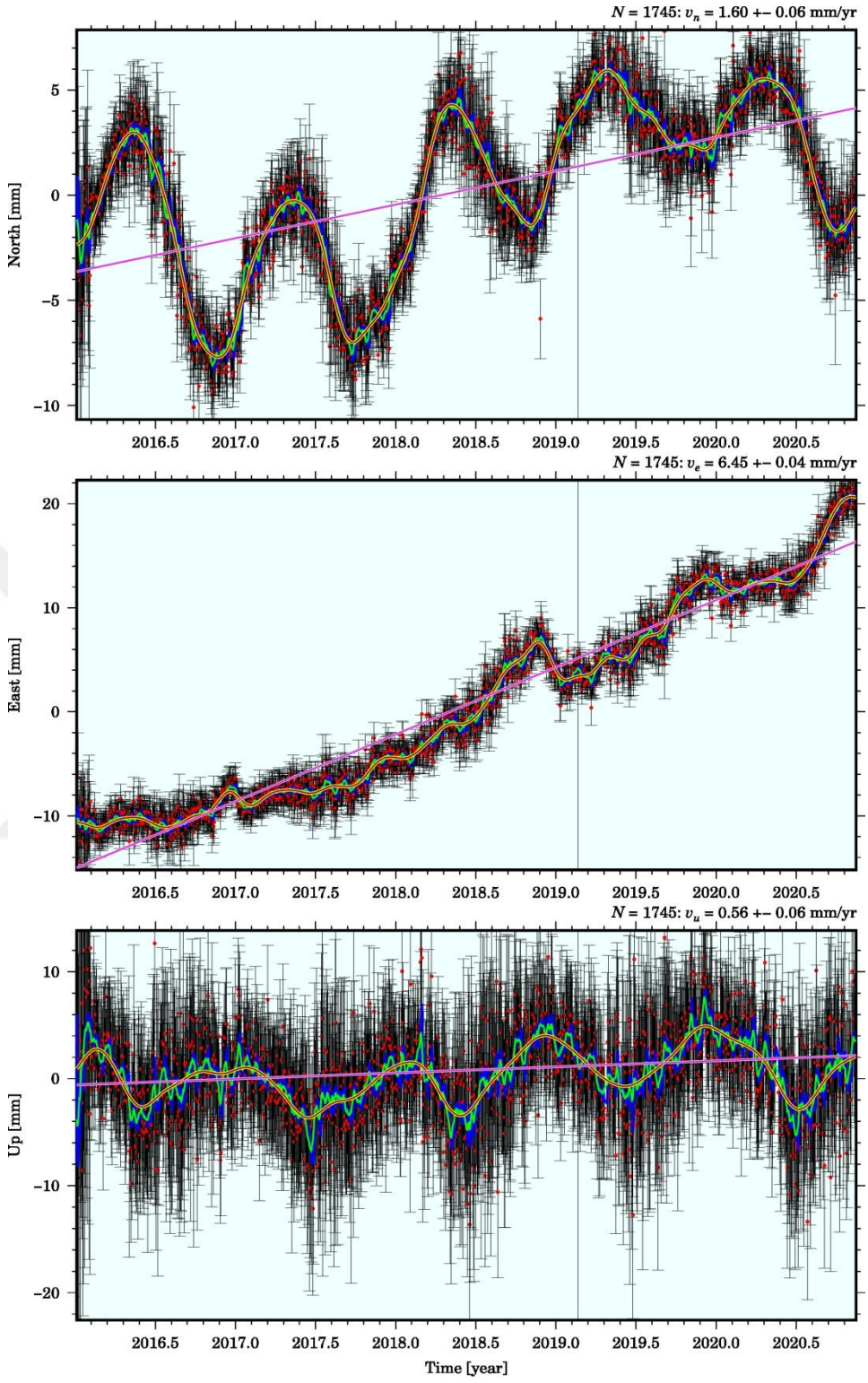
Şekil A.7. KRSU istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



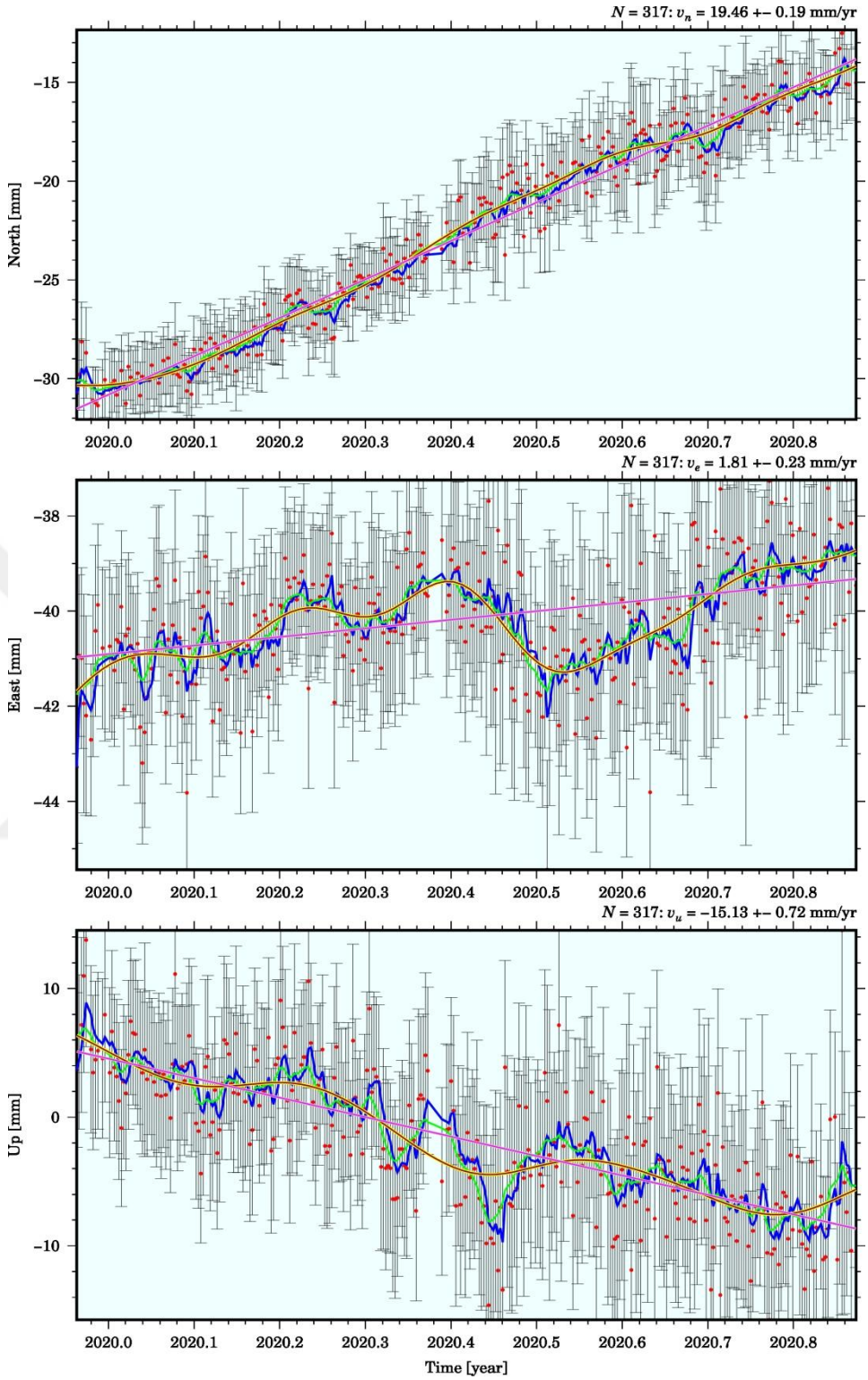
Şekil A.8. KUT1 istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



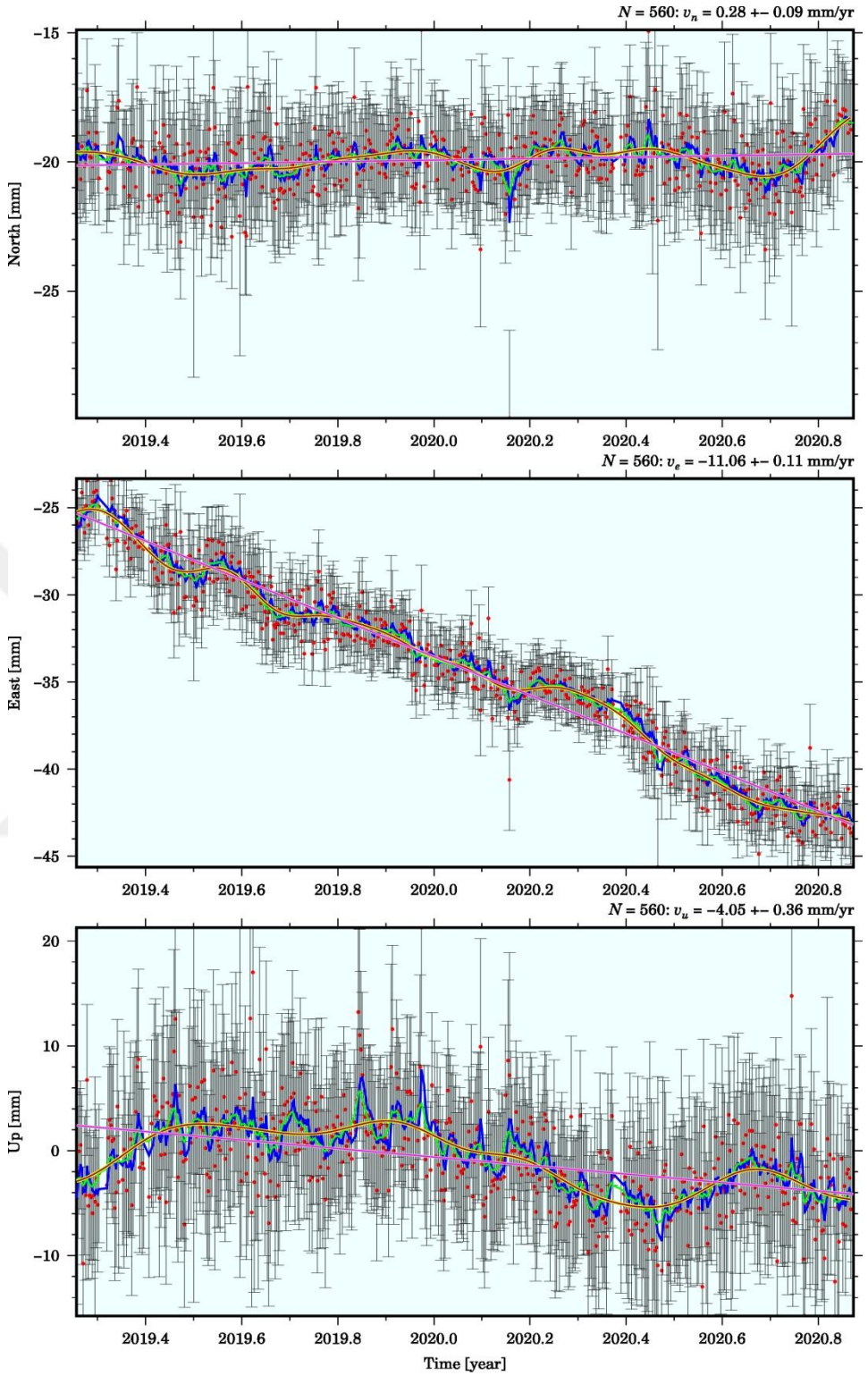
Şekil A.9. NAHA istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



Şekil A.10. SLEE istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)

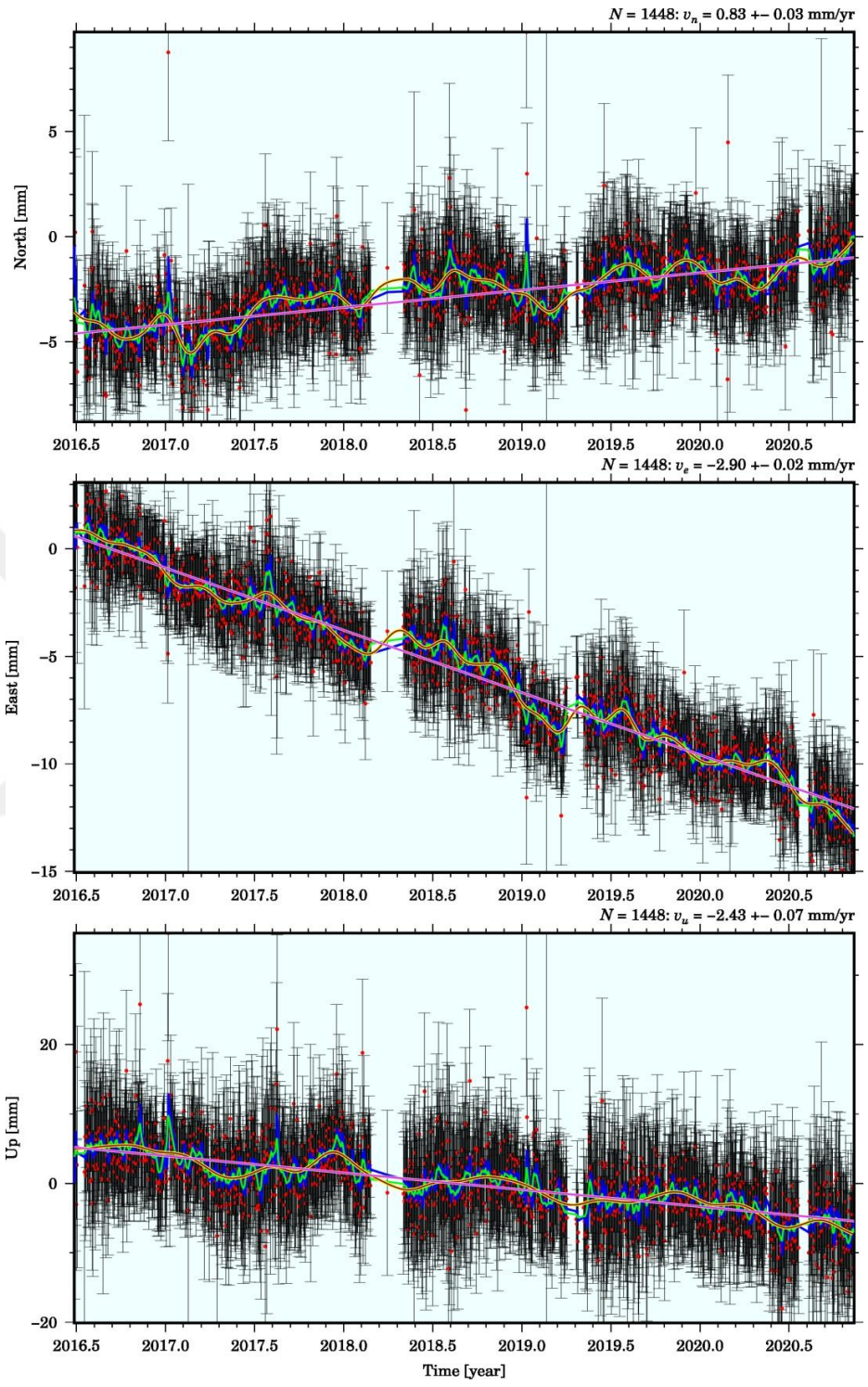


Şekil A.11. SLVR istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)

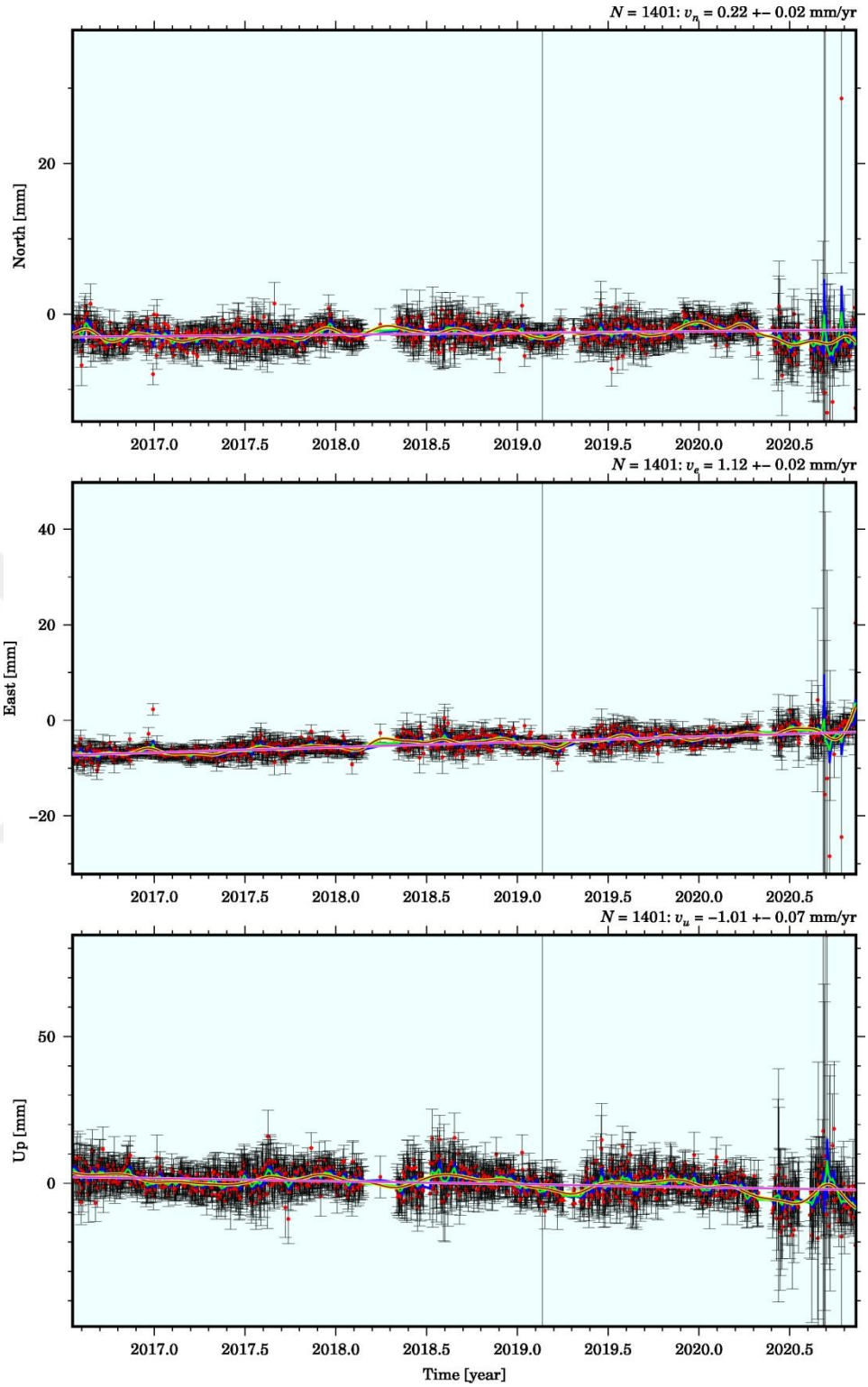


Şekil A.12. YLOV istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)

EK-B



Şekil B.1. EREN istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)



Şekil B.2. GEBZ istasyonuna ait zaman serisi (IZMT sabit olarak)

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Karamürsel'de tamamladı. 2013 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında Harita Mühendisi olarak mezun oldu. 2017-2020 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü'nün yürüttüğü 117Y155 no'lu TUBITAK projesinde Bursiyer olarak görev yaptı. 2017 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Jeoinformasyon Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini hâlen sürdürmekte.