İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KUZEYDOĞU AKDENİZ BÖLGESİNDEKİ DİRİ FAYLARIN KİNEMATİĞİNİN GPS GÖZLEMLERİ VE ELASTİK YARI UZAYSAL YER DEĞİŞTİRME MODELİ İLE BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ali ÖZKAN

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KUZEYDOĞU AKDENİZ BÖLGESİNDEKİ DİRİ FAYLARIN KİNEMATİĞİNİN GPS GÖZLEMLERİ VE ELASTİK YARI UZAYSAL YER DEĞİŞTİRME MODELİ İLE BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ali ÖZKAN
(501092603)

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan Hakan YAVAŞOĞLU

HAZİRAN 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501092603 numaralı Doktora Öğrencisi Ali ÖZKAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KUZEYDOĞU AKDENİZ BÖLGESİNDEKİ DİRİ FAYLARIN KİNEMATİĞİNİN GPS GÖZLEMLERİ VE ELASTİK YARI UZAYSAL YER DEĞİŞTİRME MODELİ İLE BELİRLENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Hasan Hakan YAVAŞOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Himmet KARAMAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Hasan SÖZBİLİR Dokuz Eylül Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Selim Serhan YILDIZ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Oğuz SELBESOĞLU İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 29 Mart 2021
Savunma Tarihi : 1 Haziran 2021

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince hiçbir zaman benden bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, beni maddi manevi destekleyen ve bana çalışmamın her aşamasında motivasyon sağlayan Tez Danışmanım Doç. Dr. Hasan Hakan YAVAŞOĞLU'na en içten saygı ve sevgilerimi sunar, kendisine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın ilerlemesinde katkılar sunan tez izleme komitesi üyeleri; Prof. Dr. Himmet KARAMAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Selim Serhan YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Desteği ve yapıcı eleştirileri için Prof. Dr. Frédéric MASSON'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında verdikleri tüm destekler için Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU'na ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nurullah ALKAN'a şükranlarımı sunarım.

Sonsuz sevgi ve destekleri için annem, babam ve canım eşime ise minnettarım.

Bu tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) MGA-2019-42243 nolu proje ve Hitit Üniversitesi BAP ODMYO19001.19.002 nolu proje ile desteklenmiştir.

Mart 2021

Ali ÖZKAN
Jeodezi ve Fotogrametri
Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 5
1.2 Literatür Araştırması 7
2. KUZEYDOĞU AKDENİZ BÖLGESİ **13**
2.1 Bölgenin Tektoniği 13
2.1.1 Doğu Anadolu Fayı 14
2.1.2 Karasu Fayı 14
2.1.3 Karataş-Osmaniye Fayı 15
2.2 Bölgenin Depremselliği 16
2.3 Bölgenin Kinematiği 27
3. GPS TEKNİĞİ KULLANILARAK TEKTONİK HAREKETLERİN GÖZLEMLENMESİ **33**
3.1 GPS Gözlem Ağı 33
3.2 Kampanya GPS Gözlem Çalışmaları 36
3.3 GPS Verilerinin İşlenmesi 39
3.3.1 GAMIT Adımı ve sonuçlar 39
3.3.2 GLOBK Adımı ve sonuçlar 46
4. BLOK MODELLEME **57**
4.1 TDEFNODE Yazılımı 62
4.2 Tez Çalışmasındaki Blok Modelleme Stratejisi 69
4.3 Doğu Akdeniz Bölgesi Modelleme Çalışmaları 75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **93**
KAYNAKLAR **101**
EKLER **111**
ÖZGEÇMİŞ **167**

KISALTMALAR

VLBI : Very Long Baseline Interferometry
SLR : Satellite Laser Ranging
GNSS : Global Navigation Satellite Systems
SAR : Synthetic Aperture Radar
InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar
GPS : Global Positioning System
GLONASS : Global Navigation Satellite System
BDS : BeiDou Navigation Satellite System
QZSS : Quasi-Zenith Satellite System
IRNSS : Indian Regional Navigation Satellite System
IGS : International GNSS Service
ITRF : International Terrestrial Reference Frame
RINEX : Receiver Independent Exchange Format
GMT : The Generic Mapping Tools
GAMIT : GNSS at MIT
GLOBK : Global Kalman Filter
TUSAGA-Aktif : Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı-Aktif
CORS : Continuously Operating Reference Stations
ANAT : Anadolu Tektonik Bloğu
AMNS : Amanos Tektonik Bloğu
SINA : Sina Tektonik Bloğu
ARAB : Arabistan Tektonik Bloğu
ISKD : İskenderun Tektonik Bloğu
EAF : East Anatolian Fault
DAF : Doğu Anadolu Fayı
DAFZ : Doğu Anadolu Fay Zonu
KF : Karasu Fault (Fayı)
KOF : Karataş-Osmaniye Fault (Fayı)
DSF : Dead Sea Fault
CA : Cyprus Arc

KAFZ : Kuzey Anadolu Fay Zonu

EAS : Ege Açılma Sistemi

KTJ : Kahramanmaraş Triple Junction

HTJ : Hatay Triple Junction

KOTJ : Karlıova Triple Junction

USGS : United States Geological Survey

KOERI : Kandilli Observatory And Earthquake Research Institute

HGK : Harita Genel Komutanlığı (Yeni adı Harita Genel Müdürlüğü)

TEQC : Translation Editing Quality Check

SP3 : Standart Product 3

SOPAC : Scrips Orbit and Permanent Array Center

USNO : United States Naval Observatory

ERP : Earth Rotation Parameters

RMS : Root Mean Square

WRMS : Weighted Root Mean Square

NRMS : Normalized Root Mean Square

GEM GAF-DB : Global Earthquake Model Global Active Faults Database

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen depremler (Ms ≥ 6.0). **17**
Çizelge 2.2 : Doğu Anadolu Fayı üzerinde ve çevresinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0). **20**
Çizelge 2.3 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0), KOERI (URL-3), USGS (URL-4). **22**
Çizelge 2.4 : Literatürdeki çalışmalarda Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki fay segmentleri için verilen kayma hızları. **27**
Çizelge 3.1 : Gözlem yapılan yıllara göre GPS nokta sayıları. **36**
Çizelge 3.2 : 2019 yılında GPS ölçmeleri yapılan kampanya noktaları. **37**
Çizelge 3.3 : Kampanya ölçmeleri sırasında kullanılan GPS ekipmanları. **38**
Çizelge 3.4 : GAMIT çözümlerinde değerlendirmeye dahil edilen IGS istasyonları. **41**
Çizelge 3.5 : Birleştirilen GPS hız alanları için dönüşüm sonuçları. **51**
Çizelge 3.6 : Referans sistemi tanımlamada kullanılan IGS istasyonları. **52**
Çizelge 4.1 : Blok modelleme çalışmalarına dair istatistiksel sonuçlar. **78**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Anadolu ve çevresinin tektonik yapısı. Önemli tektonik yapılar için kısaltmalar Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Doğu Anadolu Fayı (DAF), Ege Açılma Sistemi (EAS), Karlıova üçlü kavşak noktası (KOTJ), K.Maraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) şeklinde verilmiştir. Siyah vektörler ile gösterilen levha hızları Reilinger ve diğ. (2006) ve Florentin ve diğ. (2014) çalışmalarından derlenmiştir. Mavi çizgisellikler ile sunulan fay gösterimleri Global Earthquake Model Global Active Faults Database (GEM GAF-DB)'den alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). **2**

Şekil 1.2 : Doğu Akdeniz bölgesi çevresindeki tektonik yapıların ve basitleştirilmiş diri fayların gösterimi (Emre ve diğ, 2018). **6**

Şekil 1.3 : Türkiye diri fay haritası (Emre ve diğ, 2013). **8**

Şekil 1.4 : Türkiye deprem tehlike haritası (URL-2). **9**

Şekil 2.1 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresinde bulunan ana diri fay segmentleri. Fay segmentleri Westaway (2003) ve Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmalarından derlenmiştir. Fay haritası Global Earthquake Model Global Active Faults Database (GEM GAF-DB)'den alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). Siyah oklar levha hızlarını göstermektedir. Levha hızları McClusky ve diğ. (2003) ve Reilinger ve diğ. (2006) çalışmalarından alınmıştır. Kısaltmalar; Doğu Anadolu Fayı (EAF), Karasu Fayı (KF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Ölü Deniz Fayı (DSF), Kıbrıs Yayı (CA), Karlıova üçlü kavşak noktası (KOTJ), Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) için verilmiştir. **13**

Şekil 2.2 : Çalışma bölgesinin detaylı tektonik yapısı. Kısaltmaları verilen önemli jeolojik yapılar Doğu Anadolu Fayı (EAF), Gölbaşı-Türkoğlu segmenti (GT), Çelikhan-Erkenek segmenti (CE), Antakya-Türkoğlu segmenti (AT), Karasu Fayı (KF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Ölü Deniz Fayı (DSF), Kıbrıs Yayı (CA), K.Maraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) şeklindedir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ, 2011 çalışmasından alınmıştır. **16**

Şekil 2.3 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen depremlerin dağılımı. Deprem lokasyonları Çizelge 2.1'de verilen çalışmalarından derlenmiştir. Fay gösterimleri GEM Global Active Faults projesi veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). Kısaltmalar Şekil 2.1'de verilmiştir. **17**

Şekil 2.4 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde 1900 yılından günümüze kadar aletsel dönemde meydana gelen depremlerin dağılımı. Deprem lokasyonları USGS ve KOERI arşivlerinden derlenmiştir. Fay gösterimleri GEM Global Active Faults projesi veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). Kısaltmalar Şekil 2.1'de verilmiştir. **25**

Şekil 2.5 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde meydana gelmiş ve büyüklüğü Mw ≥ 4.5 olan aletsel dönem depremlerin odak mekanizması çözümleri. Odak mekanizması çözümleri Ekström ve diğ. (2012) çalışmasından elde edilmiştir. Fay gösterimleri GEM Global Active Faults projesi veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). **26**
Şekil 3.1 : Çalışma bölgesinde oluşturulan GPS gözlem ağı. Siyah çokgenler TUSAGA-Aktif istasyonlarını, beyaz ters üçgenler bölgedeki kamu kurumlarına ait diğer sürekli GPS istasyonlarını, mavi baklava simgeleri tez çalışmasında kullanılan kampanya GPS gözlem noktalarını, sarı üçgenler bölgedeki diğer kampanya GPS gözlem noktalarını ve turuncu kareler ise çalışma bölgesindeki vilâyetleri göstermektedir. Kısaltmaları verilen önemli jeolojik yapılar Doğu Anadolu Fayı (EAF), Ölü Deniz Fayı (DSF), Karasu Fayı (KF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Kıbrıs Yayı (CA), K.Maraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) şeklindedir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır. **34**
Şekil 3.2 : Kampanya GPS gözlem ağı nokta tesis tipi örnekleri - yer noktası (solda) ve HGK pilye (sağda). **35**
Şekil 3.3 : Tech2000 sabit yükseklikli GNSS ölçme ekipmanı (zincirli tripod). **38**
Şekil 3.4 : Doktora tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen 2019 kampanya GPS gözlem çalışmaları. Yer Noktası-PT40 (solda) ve HGK Pilye-PT36 (sağda). **39**
Şekil 3.5 : PT02 Kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 258. GPS günü (15 Eylül 2019) için sinyal faz artıkları analizi (skyplot) grafiği. **42**
Şekil 3.6 : PT26 Kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 254. GPS günü (11 Eylül 2019) için sinyal faz artıkları analizi (skyplot) grafiği. **42**
Şekil 3.7 : PT31 kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 256. GPS günü (13 Eylül 2019) için sinyal faz artıklarının uydu yükseklik açısına bağlı analizi. **44**
Şekil 3.8 : PT47 kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 258. GPS günü (15 Eylül 2019) için sinyal faz artıklarının uydu yükseklik açısına bağlı analizi. **45**
Şekil 3.9 : PT42 ve PT02 kampanya GPS gözlem noktaları için konum değişimini gösteren zaman serisi örnekleri (günlük). **48**
Şekil 3.10 : ONIY (Osmaniye) ve HAT1 (Hatay) TUSAGA-Aktif istasyonları için konum değişimini gösteren zaman serisi örnekleri (günlük). **48**
Şekil 3.11 : ONIY (Osmaniye) ve HAT1 (Hatay) TUSAGA-Aktif istasyonları için konum değişimini gösteren zaman serisi örnekleri (aylık birleştirilmiş). . **49**
Şekil 3.12 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için 2019 yılı kampanya GPS gözlemleri ve TUSAGA-Aktif istasyon verileri kullanılarak elde edilen sıfır-net-dönüklük (no-net-rotation, NNR) ITRF2008 referans sisteminde tanımlı güncel GPS hız alanı. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri GEM GAF-DB veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). **50**
Şekil 3.13 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için doktora tez çalışmasından üretilen güncel GPS hız alanı ile literatürdeki diğer GPS hız alanı çözümlerinin birleştirilmesi sonucunda elde edilen ITRF2000 referans sisteminde Avrasya levhası sabit yatay GPS hız alanı. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri GEM GAF-DB'den alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). **53**
Şekil 3.14 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için ITRF2000 referans sisteminde Avrasya levhası sabit yatay GPS hız alanının detaylı gösterimi. Hız vektörleri %95

olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır. **54**
Şekil 3.15 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için ITRF2000 referans sisteminde Arabistan levhası sabit yatay GPS hız alanının detaylı gösterimi. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır. **55**
Şekil 4.1 : Blok sınırlarındaki hareketin fay boyunca neden olduğu deformasyon ve buna bağlı olarak oluşan deprem döngüsü. **57**
Şekil 4.2 : Blok modelleme yaklaşımı temelinde "A" ve "B" iki komşu tektonik blok olmak üzere aynı "E" Euler kutbuna bağlı bloklar arasındaki etkileşim. Bloklar arasındaki fayın tamamen ya da kısmen kilitli olması durumunda GPS gözlemlerinden elde edilen blok hızları siyah vektörler, serbest kayma olması durumundaki blok hızları kırmızı vektörler ile gösterilmiştir (Çakır, 2010). **58**
Şekil 4.3 : Doğrultu atımlı fay sisteminde blokların birbirlerine göre hareketi. (a) Fay düzlemine olan uzaklığa göre faya paralel gözlenen hızlar (b) Kilitlenme derinliği ve blok hareketlerinin temsili olarak gösterildiği blok model (Çakır, 2010). **61**
Şekil 4.4 : Fay düzlemi ve üzerindeki yer değiştirme bileşenlerinin gösterimi (Aktug, 2006). **63**
Şekil 4.5 : TDEFNODE yazılımında fay yüzeyindeki numaralandırılmış düğüm noktalarının gösterimi (URL-1). **67**
Şekil 4.6 : TDEFNODE yazılımında blok ve fay geometrilerinin tanımlanması. Gösterim sol yanal atımlı fay sistemi modeline göre oluşturulmuştur (URL-1). **68**
Şekil 4.7 : Blok modellemede kullanılan en basit (a) ve en karmaşık (b) blok ve fay geometrisi. Mor çizgisellikler blok ve fay sınırlarını, mavi noktalar fay segmentlerini birleştiren yüzeydeki düğüm noktalarını, turuncu ve sarı etiketler ise sırasıyla blok ve fay isimleri için kullanılan kısaltmaları göstermektedir. **71**
Şekil 4.8 : Blok modellemede kullanılan nihai blok ve fay geometrisi. Mor çizgisellikler blok ve fay sınırlarını, mavi noktalar fay segmentlerini birleştiren yüzeydeki düğüm noktalarını, turuncu ve sarı etiketler ise sırasıyla blok ve fay isimleri için kullanılan kısaltmaları göstermektedir. **72**
Şekil 4.9 : Derinlik ve φ parametresi arasındaki ilişki (URL-1; Wang ve diğ, 2003). **74**
Şekil 4.10 : Değişen blok ve fay geometrilerine bağlı olarak model ve gözlem hızlarının gösterimi. Birleştirilmiş GPS hız alanının kullanıldığı en basit modelden en karmaşık modele doğru gelişim sırasıyla (a), (b) ve (c) ile verilmiştir. Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmasının tüm hız kestirim değerlerinin birleştirilmiş hız alanından çıkartılarak oluşturulan en karmaşık model geometrisi ise (d) ile verilmiştir. Sarı ve turuncu etiketler sırasıyla fay segmentlerinin ve blokların isimlerini göstermektedir. **76**
Şekil 4.11 : Değişen blok model geometrisine göre model ve gözlem hızlarından hesaplanan artık hızların (residuals) gösterimi. **77**
Şekil 4.12 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için daraltılmış blok model alanında elde edilen model ve gözlem hızlarının gösterimi. Kırmızı renkli vektörler model sonucu elde edilen hızları, siyah renkli vektörler ise GPS gözlemleri ile elde edilen Arabistan levhası sabit hızları göstermektedir. Mor çizgisellikler fay segmentleri ile blok sınırlarını ve mavi noktalar da

fay segmentlerini birleştiren düğüm noktalarını temsil etmektedir. Turuncu etiketler blok isimlerini ifade etmektedir. Bölgedeki önemli tektonik yapılar EAF (Doğu Anadolu Fayı), KOF (Karataş-Osmaniye Fayı), DSF (Ölü Deniz Fayı) ve CA (Kıbrıs Yayı) ile gösterilmiştir. **79**
Şekil 4.13 : Daraltılmış blok model alanında nihai blok ve fay geometrisine göre model ve gözlem hızlarından hesaplanan artık hızların (residuals) gösterimi. **80**
Şekil 4.14 : Çalışma bölgesinde oluşturulan profillerin yerleri ve Arabistan levhası sabit GPS gözlem hızları. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır. **81**
Şekil 4.15 : Profiller (Şekil 4.14) boyunca elde edilen model ve gözlem hızlarına dair bileşenler. Kırmızı hat fay paralel model hızlarını, kırmızı semboller ölçeklenmiş standart sapmalarının çizgiler ile temsil edildiği gözlem hızlarının fay paralel bileşenini, mavi hat fay normal model hızlarını, mavi semboller ölçeklenmiş standart sapmalarının çizgiler ile temsil edildiği gözlem hızlarının fay normal bileşenini, yeşil ve siyah hatlar ise sırasıyla kilitlenmenin ve dönüklüğün fay paralel bileşenlerini, mor hatlar ise profilleri dik kesen fay doğrultularını göstermektedir. **82**
Şekil 4.16 : Çalışma bölgesindeki fay segmentleri boyunca phi (φ) parametresinin derinlik ile değişimi. **85**
Şekil 4.17 : EAF ve KOF boyunca phi (φ) parametresinin derinlik ile değişimi (detaylı gösterim). **85**
Şekil 4.18 : Çalışma bölgesindeki fay segmentleri boyunca phi parametresine bağlı olarak kestirilen kayma eksikliği dağılımının derinlik ile ilişkisi. **87**
Şekil 4.19 : Değişen blok ve fay geometrilerine bağlı olarak elde dilen fay kayma hızlarının gösterimi. Şekil 4.10'da detayları verilen model kompozisyonları kullanılmıştır. Model ile ilgili istatistikler üstteki mavi satırlarla özetlenmiştir. Açık yeşil (negatif) ile verilen kutular sol yanal doğrultu atımlı fayların kayma hızlarını göstermektedir. Beyaz (pozitif) ve sarı (negatif) renkli kutular ise sırasıyla gerilme (uzaklaşma) ile sıkışmaya (yakınlaşma) karşılık gelen normal ve ters fay bileşenlerine işaret etmektedir. **88**
Şekil 4.20 : Daraltılmış blok model alanında nihai blok ve fay geometrisine göre fay kayma hızlarının gösterimi. Gösterim detayları Şekil 4.19'da verilmiştir. **91**
Şekil 4.21 : Daraltılmış blok model alanında fay kayma hızlarının, katı blok hızlarının, blok dönme hızlarının ve blok içi yamulma (gerinim) hızlarının gösterimi. Çift yönlü mavi oklar yamulma hızlarını, kırmızı vektör ve siyah dairesel vektör sırasıyla katı blok hızlarını ve blokların dönme hızlarını göstermektedir. Şekil üzerindeki diğer detaylar Şekil 4.19'da verilmiştir. **92**

KUZEYDOĞU AKDENİZ BÖLGESİNDEKİ DİRİ FAYLARIN KİNEMATİĞİNİN GPS GÖZLEMLERİ VE ELASTİK YARI UZAYSAL YER DEĞİŞTİRME MODELİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Türkiye'nin en önemli neotektonik ve sismojenik yapılarından birisi olan sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) Erzincan'ın doğusunda Karlıova'dan başlayarak Hatay'a kadar uzanan ve daha güneyde Ölü Deniz Fayı ile birleşen aktif bir fay zonudur. Arabistan ve Afrika plakalarının kuzeye doğru farklı hızlardaki bağıl hareketleri, Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağı boyunca gelişen kıta-kıta birleşmesi ve Anadolu plakasının batıya kaçışına bağlı olarak DAFZ üzerinde ve çevresinde önemli sismik aktiviteler meydana gelmektedir.

DAFZ'nin güneyinde Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası ile Hatay üçlü kavşak noktası arasındaki Karasu Fayı (KF) ile Kıbrıs Yayı'nın etkisi altındaki Toprakkale, Yumurtalık, Karataş-Osmaniye (KOF) Fayları Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin karmaşık tektonik yapısı içerisinde yer alan depremsellik açısından önemli fay segmentleridir. Bu faylar 2012 ve 2018 yıllarında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritasında diri fay sınıfında değerlendirilmiştir. Buna karşın bölgedeki diri fayların kinematiğini araştırmak için yapılan jeodezik çalışmaların sınırlı kalması bu fayların davranışlarının anlaşılmasını ve deprem potansiyellerinin ortaya konulmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle, söz konusu diri faylara ait güncel kayma hızları ve kilitlenme derinlikleri gibi fay kinematiğini yansıtan parametrelerin jeodezik yöntemler kullanılarak yüksek doğrulukla belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan en etkin yöntem fayların geometrisine ve karakteristiğine uygun olarak tesis edilmiş jeodezik ağlar üzerindeki sürekli istasyon ve kampanya noktalarında GPS gözlemleri gerçekleştirmektir.

Bu doktora tez çalışmasında, Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde büyük deprem üretme potansiyeli yüksek diri faylar geniş bir jeodezik ağ kullanılarak izlenmiş ve toplanan GPS verilerinin modellenmesi sonucunda blokların dönme hızları, fay kayma hızları, fay kilitlenme derinlikleri ile blok içi yamulma hızları yüksek doğruluk ve uzaysal çözünürlükle belirlenmiştir. Bu amaçla, uygun geometri ve dağılım dikkate alınarak kampanya GPS gözlem noktaları ile sürekli GPS istasyonlarından (TUSAGA-Aktif ve kamu kurumlarına ait CORS ağlarının istasyonları) oluşan geniş bir jeodezik ağ tasarlanmıştır. Bu spesifik gözlem ağı, aynı zamanda bünyesinde Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde gerinim biriktiren önemli diri fayları dik kesen profiller barındırmaktadır. Bu profiller yardımıyla söz konusu diri fayların kinematik özellikleri hakkında önemli bulgulara ulaşılmıştır.

GPS verilerinin GAMIT/GLOBK yazılımı ile işlenmesi neticesinde çalışma bölgesi ve civarı için kampanya gözlem noktaları ve sürekli GPS istasyonlarının ITRF2008 datumunda tanımlandığı güncel GPS hız alanı elde edilmiştir. Bu GPS hız alanının literatürdeki diğer hız alanı çözümleri ile entegrasyonu sağlanarak ITRF2000 referans sisteminde Avrasya levhası sabit bütünleşik bir yatay GPS hız alanı

tanımlanmıştır. Hız alanı çözümlerinin ortak bir referans sisteminde birleştirilebilmesi için 6 parametereli (3 öteleme ve 3 dönüklük) bir dönüşüm modeli kurulmuştur. Ayrıca, literatürdeki çalışmalarından derlenen Euler kutup parametrelerine bağlı olarak Arabistan levhası sabit GPS hız alanı üretilmiş ve böylece blok modelleme için uygun bir veri seti oluşturulmuştur.

Bu çalışmada diri fayların kinematik özelliklerinin blok modeller ile tanımlanabilmesi için TDEFNODE yazılımından yararlanılmıştır. Blok modellemede, en basit geometriden daha karmaşık olana doğru, veri ile uyumlu blok modelin test edilmesine dayalı bir strateji benimsenmiştir. Buna göre, Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki diri fayların kinematik özelliklerini araştırmak için belirli bir model alanında 5 bloktan oluşan bir blok model tanımlanmıştır. Blok modellemeye ilişkin izlenen adımlar ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak açıklanmıştır.

Blok modelleme sonuçları ve fay uzunluklarına bağlı olarak faylar üzerindeki gerinim birikimleri ve olası deprem büyüklükleri hesaplanmıştır. Doğu Anadolu Fayı'nın Gölbaşı-Türkoğlu segmenti üzerinde 1114 depreminin (M ≥7.8) ardından başlayan gerinim birikimi ~6.8 metre olarak belirlenmiştir ve 7.2 ile 7.6 büyüklüklerinde olası depremlere yol açabileceği tahmin edilmektedir. 1513 depremi (M ~7.4) sonrasında Karataş-Osmaniye Fayı'nda başlayan deformasyonun büyüklüğü günümüzde fayın farklı bölgelerinde ~1.3-2.1 metre değerlerine ulaşmıştır ve bu bölgelerde 6.8 ile 7.2 büyüklükleri arasında olası depremlere neden olabileceği değerlendirilmektedir. Karasu Fayı üzerinde ise 1822 (M 7.4) ve 1872 (M 7.2) depremleri göz önünde bulundurulduğunda ~0.4-0.6 metre gerinim birikiminin büyüklüğü 6.6-7.2 aralığında olası depremlere neden olabileceği öngörülmektedir.

Bu doktora tez çalışması sonucunda Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki önemli diri fayların sahip olduğu büyük ölçekli deprem oluşturma potansiyeli ortaya konulmuştur ve tez çıktılarının ulusal deprem eylem planları, sismik risk analizleri, deprem hasar tahmin çalışmaları ile kentsel dönüşüm planlarına katkılar sunması beklenmektedir.

DETERMINATION OF THE KINEMATICS OF ACTIVE FAULTS IN THE NORTHEASTERN MEDITERRANEAN REGION BY GPS OBSERVATIONS AND ELASTIC HALF-SPACE DISLOCATION MODEL

SUMMARY

East Anatolian Fault Zone (EAFZ), one of the most important neotectonic and seismogenic fault systems, is a left-lateral strike-slip active fault zone extends from Karliova in the east of Erzincan to the Hatay region where it reaches the Dead Sea Fault Zone in the further south. East Anatolian Fault Zone (EAFZ) has an intense seismic activity depending on the northward relative motions of Arabian and African plates with varying velocities, continental collision occuring along Bitlis-Zagros Fold and Thrust Belt and the westward motion of Anatolian Plate.

In terms of seismicity, Karasu Fault (KF) between Kahramanmaras Triple Junction and Hatay Triple Junction on the south of the EAFZ, Toprakkale, Yumurtalık and Karatas-Osmaniye (KOF) Faults interacting with Cyprus Arc are considerable segments within the complex structure of the northeast of Mediterrenean region. These faults were evaluated as active faults in Active Fault Map of Turkey updated in 2012 and 2018. On the other hand, the fact that few geodetic studies conducted to investigate the kinematics of active faults in the region makes it difficult to understand the behaviours of these faults and reveal their earthquake potentials. Therefore, it has been required to estimate the parameters of fault kinematics such as recent fault slip rates and fault locking depths along these active faults using geodetic methods with a high degree of accuracy. The most efficient method used for this purpose is to perform GPS observations on permanent stations and campaign sites within geodetic networks formed according the geometry and distinctive features of relevant faults. Within the scope of GPS data process, the campaign GPS data set obtained in 2009, 2010, 2011 and 2019 were integrated with the data acquistions from the permanent GPS stations located around the northeastern Mediterranean region. Besides, eighteen permanent GPS stations from the IGS global network were involved in order to tie our local network with a global one and also to estimate more accurate orbital and Earth orientation parameters. The whole GPS data set was processed using the GAMIT/GLOBK software. The GAMIT stage consists of the estimations of orbital and Earth orientation parameters, station coordinates and zenith delay parameters of the atmosphere at each station. The second stage includes Kalman filtering embedded in GLOBK scripts to define a reference frame with a consistent set of coordinates and velocities.

During this PhD thesis, active faults that have high potential to generate major earthquakes in the northeastern Mediterranean region had been monitored using a large-scaled geodetic network and block rotation rates, fault slip rates, fault locking depths and internal block strain rates were estimated with high accuracy and sptatial resolution by modeling the GPS data gathered accordingly. To obtain these parameters, considering proper geometry and distribution, a wide geodetic network

consisting of campaign observation sites and permanent GPS stations (within Turkish National Permanent GPS Network-Active and local CORS networks belonging to public institutions) was designed. This particular observation network contain also profiles perpendicular to the major active faults accumulating strain in the northeastern Mediterranean region. With the help of these profiles, significant indications about the kinematic features of these active faults have been obtained.

As a result of processing GPS data with GAMIT/GLOBK software, recent GPS velocity field comprising campaign observation sites and permanent GPS stations defined in ITRF2008 datum was derived for the study area and its surroundings. By combining this GPS velocity field with the other velocity field solutions in the literature, an integrated horizontal GPS velocity field with reference to the Eurasia-fixed reference frame in ITRF2000 was defined. A 6-parameter (3 translations and 3 rotations) transformation model was established to be able to integrate velocity field solutions within a common reference frame. The accuracy of the transformation was assessed using the wrms parameter depending on the common GPS observation sites. Furthermore, GPS velocity field in Arabia-fixed reference frame was derived based on the Euler pole parameters provided from the studies in the literature, and thus an appropriate data set for blok modeling was generated.

In this study, TDEFNODE software was used to define the kinematic features of the active faults by means of block models. In block modeling, from the simplest geometry to more complex one, a strategy based on testing the block model fitting to the data was adopted. Thus, a block model consisting of 5 blocks was defined in a particular model area in order to investigate the kinematic features of the active faults in the northeastern Mediterranean region. The steps followed and the results obtained regarding the block modeling were explained in detail. More specifically, the block model introduced in this dissertation demonstrates a left-lateral strike-slip motion with a slip rate of 7.48±0.59–7.57±0.58 mm/year while no significant normal/reverse fault components in the Gölbaşı-Türkoğlu segment of the East Anatolian Fault. Additionally, the results that have been reached for the Karataş-Osmaniye Fault indicate a left-lateral strike slip with a rate of 2.48±3.74-4.84±4.01 mm/year and a reverse faulting with a vertical slip rate component of 3.52±4.11-4.40±5.31 mm/year. On the other hand, the Karasu Fault shows a normal faulting with a slip rate of 2.63±2.07-2.72±4.16 mm/year and a left-lateral strike slip in a similar pattern with Karataş-Osmaniye Fault ranging in rates of 2.64±1.57-4.09±1.58 mm/year. After modeling of GPS data, the fault slip rates estimated by the inversion process allow us to calculate the possible magnitudes of earthquakes with the help of empirical equations and even to forecast on which fault segments of the probable destructive earthquakes may occur.

Depending on the block modeling results and fault lengths, the strain accumulations on the faults and probable earthquake magnitudes were calculated. The strain accumulation that began after the 1114 earthquake (M ≥7.8) on the Gölbaşı-Türkoğlu segment of the East Anatolian Fault was determined as ~6.8 meters and it is forecasted that it may cause probable earthquakes with the magnitudes of 7.2 to 7.6. The measure of the deformations initiated on the Karataş-Osmaniye Fault after the 1513 earthquake (M ~7.4) has reached to ~1.3-2.1 meters on the different parts of the fault and it is considered that it may cause probable earthquakes with a range between 6.8 and 7.2 in magnitudes. Considering the 1822 (M 7.4) and 1872 (M 7.2) earthquakes, it is predicted that ~0.4-0.6 meters of strain accumulations on the Karasu Fault may cause probable earthquakes with a magnitude range of 6.6-7.2.

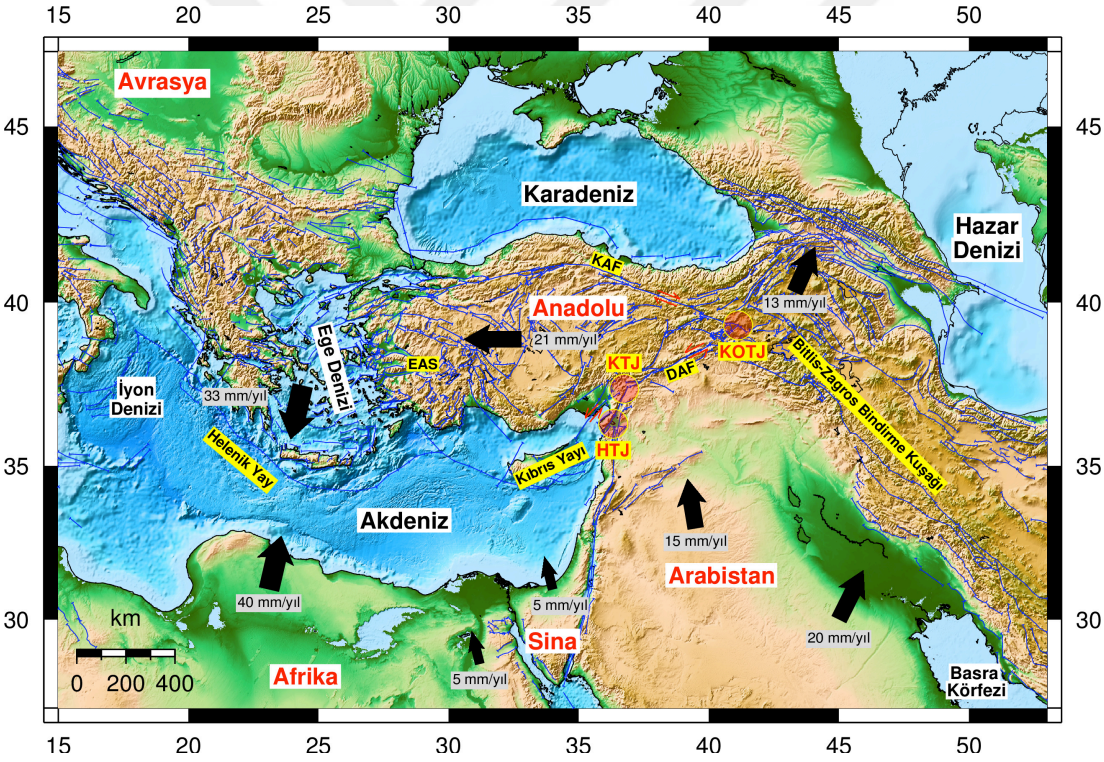
In this PhD thesis, major earthquake potential of the main active faults in the northeastern Mediterranean region has been demonstrated and the outcomes of the thesis are expected to contribute to the national earthquake strategy and action plan, seismic risk analysis, earthquake loss assessment studies and urban transformation plans.

1. GİRİŞ

Yerkabuğu hareketlerinin anlaşılmasına dair gerçekleştirilen önemli çalışmaların geçmiş yüzyılda Alman jeofizikçi Alfred Wegener tarafından 1912'de ileri sürülen *Kıtaların Kayma Teorisi* ile başladığı kabul edilmektedir. Dönemin önemli jeologları tarafından da desteklenen bu teori *Levha Tektoniği* teorisine temel oluşturan önemli çalışmalardandır. Aynı şekilde yine levha tektoniği için önemli kabul edilen McKenzie ve Parker (1967) çalışmasında ise "*paving stone theory*" ile levha tektoniğinin küre üzerinde nasıl uygulanacağının matematiksel çözümü ortaya konulmuştur. Günümüzde kıtasal ölçekteki yerkabuğu hareketlerinin mekanizması araştırılırken kullanılan *Levha Tektoniği* teorisi gelişim sürecinin ardından 1969 yılı sonunda tamamlanmıştır. Buna göre levha tektoniğinde yerkürenin litosfer tabakası Euler kuramına göre bir kutup noktası etrafında hareket edebilen birçok büyük ve oldukça fazla küçük tektonik levhalardan oluşmaktadır. Bu levhalar, yer yuvarının manto katmanındaki konveksiyon akımlarına bağlı olarak birbirlerine çarparlar, birbirlerinden uzaklaşırlar, biri diğerinin altına sürüklenir veya birbirlerine göre yanal hareket edebilirler. Yerküre üzerinde yaşanan büyük depremlerin çok önemli bir bölümünün de levha sınırlarında meydana gelmesi bu teoriyi destekler niteliktedir.

Depremlerin oluşumu ile ilgili olarak temelde Reid (1911) tarafından ortaya konulan elastik atım (yer değiştirme) teorisi (elastic rebound theory) tektonik hareketlerin jeodezik gözlemler ile açıklanabildiğini gösteren önemli bir referanstır. Bu teoriye göre, fayların sınırlandırdığı bloklar birbirlerine göre rölatif hareket ederken fay düzlemi boyunca bir gerilme meydana getirirler. Bu gerilme (stres), sürtünme kuvveti ile karşılanırken fay düzlemi boyunca kilitlenmeye bağlı olarak bloklar üzerinde bir gerinim (deformasyon) oluşturur. Gerilme artışı sonucunda sürtünme kuvvetinin yenilmesiyle yerkabuğunda ani ve büyük bir yer değiştirme (atım) ile depremler meydana gelir.

Ülkemiz ve çevresinin dolayısıyla Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin güncel tektoniği Arabistan, Afrika, Sina ve Avrasya levhalarının rölatif hareketlerine bağlı olarak kontrol edilmektedir (Şekil 1.1). Bu etkileşim içindeki en önemli tektonik yapılar transform fay özellikleri ile dextral (sağ yanal) Kuzey Anadolu Fayı ve sinistral (sol yanal) Doğu Anadolu Fayı, horst-graben yapısında içerisinde normal/ters faylanmanın baskın olduğu Ege Açılma Sistemi, Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağı'ndaki kıtasal çarpışmaya bağlı olarak Anadolu levhasının batıya doğru hareketi, Helenik Yay ve Kıbrıs Yayı boyunca Akdeniz tabanındaki okyanusal litosferin Avrasya ve Anadolu levhalarının altına dalması sonucu ortaya çıkan dalma-batma zonudur. Bu tektonik yapılar Arabistan, Afrika ve Avrasya levhaları arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak levha sınırlarındaki deformasyon alanlarını oluşturmaktadırlar (Jackson ve McKenzie, 1984; Le Pichon ve diğ, 1995; McClusky ve diğ, 2000; Reilinger ve diğ, 2006; Westaway, 1994).



Şekil 1.1 : Anadolu ve çevresinin tektonik yapısı. Önemli tektonik yapılar için kısaltmalar Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Doğu Anadolu Fayı (DAF), Ege Açılma Sistemi (EAS), Karlıova üçlü kavşak noktası (KOTJ), K.Maraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) şeklinde verilmiştir. Siyah vektörler ile gösterilen levha hızları Reilinger ve diğ. (2006) ve Florentin ve diğ. (2014) çalışmalarından derlenmiştir. Mavi çizgisellikler ile sunulan fay gösterimleri Global Earthquake Model Global Active Faults Database (GEM GAF-DB)'den alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020).

Özellikle gelişen uydu teknolojilerine bağlı olarak levha hareketlerinin jeodezik yöntemler ile gözlemlenmesi muhtemel bir sismik aktivitenin yerinin, büyüklüğünün ve oluşturabileceği hasarın boyutlarının kestirilebilmesi açısından son derece önemlidir. Bu bağlamda, VLBI (Very Long Baseline Interferometry – Çok Uzun Bazlı İnterferometri), SLR (Satellite Laser Ranging – Uydulara Lazerle Uzaklık Ölçmeleri), GNSS (Global Navigation Satellite Systems – Küresel Konum Belirleme Sistemleri) ve SAR (Synthetic Aperture Radar – Sentetik Açıklıklı Radar) levha hareketlerinin gözlemlenmesinde güncel olarak en çok kullanılan jeodezik teknikler olarak öne çıkmaktadır. GNSS çatısı altında yer alan GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System), Galileo, BDS (BeiDou Navigation Satellite System), QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) ve IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) konum belirleme sistemleri sırasıyla ABD, Rusya Federasyonu, Avrupa Birliği, Çin Halk Cumhuriyeti, Japonya ve Hindistan tarafından finanse edilerek işletilen sistemlerdir. Bu tez çalışmasında, ekonomik olma ve yüksek konum doğruluğu sağlama özellikleri nedeniyle tektonik hareketlerin izlenmesindeki rolü büyük olan GPS tekniğinden yararlanılmıştır.

Levha sınırları boyunca süreklilik arz eden fay hatları üzerindeki gerinim (deformasyon) birikiminin kestirilebilmesi için özellikle GPS tekniğinin kullanıldığı jeodezik gözlem ağlarından yararlanılmaktadır (Aktug ve diğ, 2013, 2016; Mahmoud ve diğ, 2013; McClusky ve diğ, 2000; Reilinger ve diğ, 1997, 2006; Tiryakioğlu ve diğ, 2013; Yavaşoğlu ve diğ, 2011). Bu jeodezik ağlar sürekli gözlemlerin yapıldığı istasyonlardan ve periyodik olarak tekrarlı kampanya gözlemlerinin gerçekleştirildiği kampanya gözlem noktalarından oluşmaktadır. Güncel gerinim birikimlerinin araştırılması çerçevesinde sürekli GPS istasyonları ile desteklenen tekrarlı kampanya GPS gözlemleri kullanılarak elastik yarı uzaysal yer değiştirme modeli ile elde edilecek blok kayma hızları ve fay kilitlenme derinlikleri tektonik açıdan aktif bir bölgede gelecekteki muhtemel bir yıkıcı depremin yaklaşık büyüklüğü ve yeri konusunda tahmin yapabilmeyi mümkün kılmaktadır. Kinematik etkilere maruz kalan bu jeodezik ağlar tasarlanırken bazı bilimsel noktaların da göz önünde bulundurulması ağın deformasyon gözlem performansı açısından oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde kabuk deformasyonlarının izlenmesine yönelik olarak jeodezik ağ tasarımı hakkında detaylı bilgiler verilecektir.

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi sismotektonik açıdan oldukça karmaşık bir yapıdadır. Arabistan, Afrika, Sina ve Anadolu levhalarının rölatif hareketlerine bağlı tektonik mekanizma nedeniyle bölgedeki fayların önemli bir bölümünün hem doğrultu atımlı hem de normal/ters faylanma özelliklerinden söz edilebilmektedir (Aktug ve diğ, 2016; Barka ve diğ, 1999; Gürsoy ve diğ, 2003; Mahmoud, 2012; Reilinger ve diğ, 2006; Yurtmen ve diğ, 2000). Aynı zamanda, tektonik açıdan karmaşık bu yapı içerisindeki fay kayma hızlarının Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı genelinde elde edilen kayma hızlarından görece daha küçük olması bölgedeki fayların kinematik özellikleri hakkında bir fikir birliği sağlanabilmesini güçleştirmektedir. Bu bağlamda literatürdeki çalışmaların jeodezik açıdan eksiklikleri de düşünüldüğünde bu doktora tez çalışmasının literatüre katkısı dikkat çekici niteliktedir. Bu doktora tez çalışmasının özgün değeri düşük fay kayma hızlarına rağmen çalışmada anlamlı GPS hızları üretebilecek prezisyonu yüksek güncel veri setinin kullanılmış olması ve özellikle Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ölçeğinde Adana, Osmaniye, Hatay ve Gaziantep illerinin çevrelediği alanda fay segmentlerinin uzaysal ve zamansal çözünürlüğü yüksek geniş bir jeodezik ağ ile izlenmiş olmasıdır.

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki diri fayların kinematiğinin GPS gözlemleri ve elastik yarı-uzaysal yer değiştirme modeli ile belirlenmesi, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve civarındaki diğer diri fayların potansiyel deprem tehlikesinin ortaya konulması bakımından önemlidir. Son on yıllar süre zarfında özellikle DAFZ'nin kuzey bölümünde meydana gelen Elazığ-Sivrice (Mw=6.5, 2020, KOERI), Elazığ-Karakoçan (Mw=6.1, 2010, KOERI) ve Bingöl (Mw=6.4, 2003, KOERI) depremleri yıkıcı etkileri ile ortaya çıkan orta büyüklükte depremlerdendir. Buna paralel olarak DAFZ'nin güney ucundaki Adana, Osmaniye, Hatay ve Gaziantep illerini içine alan Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi de levha hareketlerine bağlı olarak deformasyon birikimlerinin güncel tektonik bakış açısıyla sorgulanması gereken ve bu anlamda sismik tehlike barındıran kritik bir bölgedir.

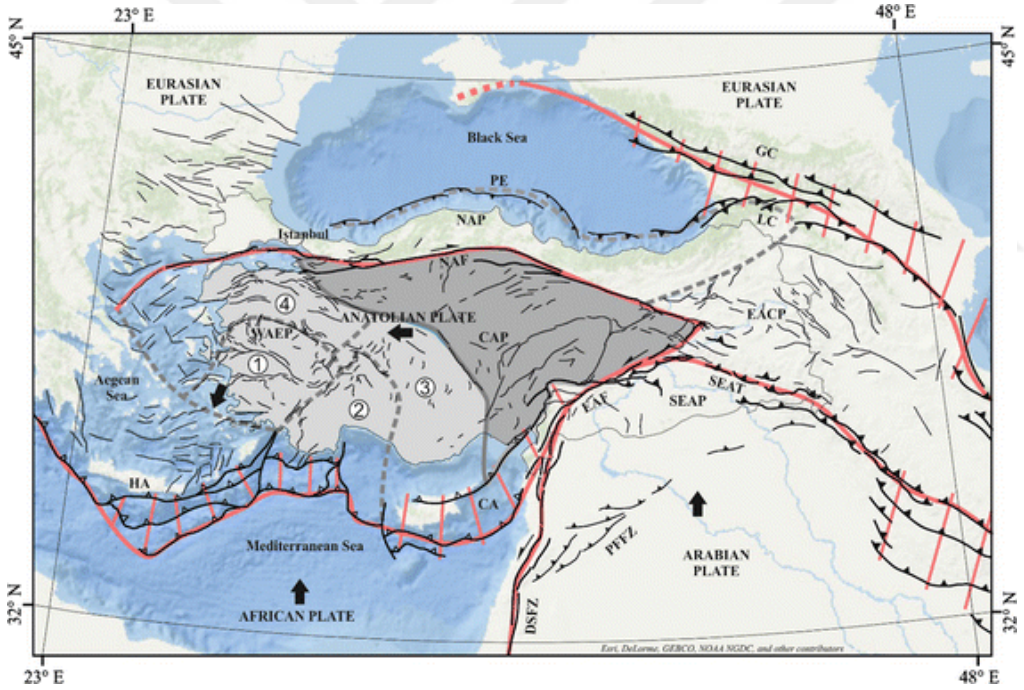
Bu bağlamda, bu tez çalışması kapsamında Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin tektoniği üzerinde etkili olan blokların Euler kutup noktaları etrafında dönme hareketleri (rotasyonları) ve bu blokların sınırlarını oluşturan fayların üzerindeki güncel gerinim birikimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre, bölgenin güncel veriler ile

desteklenen GPS hız alanının elde edilmesi, GPS gözlem hızları kullanılarak blokların rotasyonel hızları ve bölgedeki önemli diri faylar üzerindeki kayma hızlarının kestirimi, fayların kayma eksikliği ile kilitlenme dağılımlarının ortaya konulması bu doktora tez çalışmasında ileri sürülen hipotezin çözümlenmesinde rol oynayan başlıca adımlardır. Bu çerçevede sürekli GPS istasyonlarından ve kampanya GPS gözlem noktalarından elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek yüksek uzaysal çözünürlüklü blok modelleme stratejisi ile bölgedeki diri fayların kinematik özelliklerine dair güncel bulgular ve değerlendirmeler sunulmuştur.

1.1 Tezin Amacı

Adana, Osmaniye, Hatay ve Gaziantep illerini de kapsayan Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi kesişen Arabistan, Afrika, Sina ve Anadolu levhaları sebebiyle tektonik açıdan oldukça stratejik bir konumdadır. Arabistan ve Anadolu levhalarının sınırını oluşturan Doğu Anadolu Fayı (DAF), Arabistan ve Sina levhalarının sınırını oluşturan Ölü Deniz Fayı ve Anadolu bloğu ile Afrika bloğunu birbirinden ayıran Kıbrıs Yayı bölgedeki aktif levha sınırlarına karşılık gelmektedir (Şekil 1.2). Bu levha sınırları ile levha içi fayları barındıran tektonik yapılar yer kabuğunda önemli deformasyonlara yol açarak sismik aktivitelere neden olmaktadır. Levha sınırları boyunca ve levha içi faylar üzerinde süregelen uzun dönem (intersismik dönem) deformasyonların neden olduğu gerilme artışlarına bağlı olarak ortaya çıkabilecek deprem tehlikesinin kestirilebilmesi için fay zonları üzerindeki kayma hızları, kilitlenme derinlik ve oranlarının belirlenmesi gerekir. DAFZ üzerindeki fay kayma hızları Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'ye kıyasla düşük olmasına karşın Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki karmaşık tektonik yapı içerisinde en yüksek kayma hızlarına karşılık gelmektedir. Literatürde yayımlanmış çalışmalardan DAFZ boyunca faya paralel kayma hızlarının değişkenlik gösterdiği ve Karlıova'dan başlayarak güneybatıya doğru gidildikçe azaldığı bilinmektedir (Aktug ve diğ, 2016; Mahmoud, 2012; Nocquet, 2012; Reilinger ve diğ, 2006). Bunun yanında, DAF'nin intersismik dönem deformasyonlar sonrası ortalama deprem tekrarlama periyodu ~150-250 yıl olarak ileri sürülmektedir (Bletery ve diğ, 2020; Hubert-Ferrari ve diğ, 2020; Palutoğlu ve Şaşmaz, 2017). 1789 Palu-Elazığ (M > 7.0), 1874 Hazar Gölü-Elazığ (M > 7.1), 1893 Malatya (M > 7.1) ve 1905 Pütürge (M 6.8) depremleri 19. yüzyılda DAF üzerinde meydana gelen önemli sismik aktiviteler olarak kayıtlara

geçerken 20. yüzyıldaki sismik etkinlik görece daha zayıf kalmıştır (Ambraseys, 1989; Hubert-Ferrari ve diğ, 2020). Ancak, 22 Mayıs 1971 Bingöl (Ms 6.8, , KOERI), 1 Mayıs 2003 Bingöl (Mw 6.4, KOERI & M 6.4, USGS), 8 Mart 2010 Elazığ, Kovancılar (Mw 6.1, KOERI & M 6.1, USGS) ve 24 Ocak 2020 Elazığ, Sivrice (Mw 6.5, KOERI & M 6.7, USGS) depremleri sismik tehlikelerin yok olmadığını ve ortaya çıkarılmasının gerekli olduğunu bir kez daha göstermiştir. Buna karşın Adana, Osmaniye, Hatay ve Gaziantep illerini de içine alan ölçekte Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin güncel tektoniğini anlamaya yönelik ve güncel veriler ile desteklenen bir bilimsel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada geçmişte bölgede yapılan çalışmalardan derlenecek veriler ve tez çalışması süresince yapılacak yeni gözlemlerin bütünleşik bir bakış açısı ile değerlendirilmesi sonucunda DAFZ ve civarındaki diri faylara ait güncel kayma hızları ve kilitlenme oranlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 1.2 : Doğu Akdeniz bölgesi çevresindeki tektonik yapıların ve basitleştirilmiş diri fayların gösterimi (Emre ve diğ, 2018).

Bu amaç doğrultusunda, Türk ve Fransız bilim insanlarından oluşan ortak araştırma grubunun 2009-2011 yılları arasında bölgede yapmış olduğu kampanya tipi GPS gözlem verileri derlenmiştir. Ayrıca, TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı-Aktif) ağı ve kamu kurumlarının bu çalışmadaki ağ yapısına uygun yerel ağlarına dair veriler ücretsiz temin edilerek tez çalışması kapsamındaki analizlere dahil edilmiştir. Doktora tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sürecinde

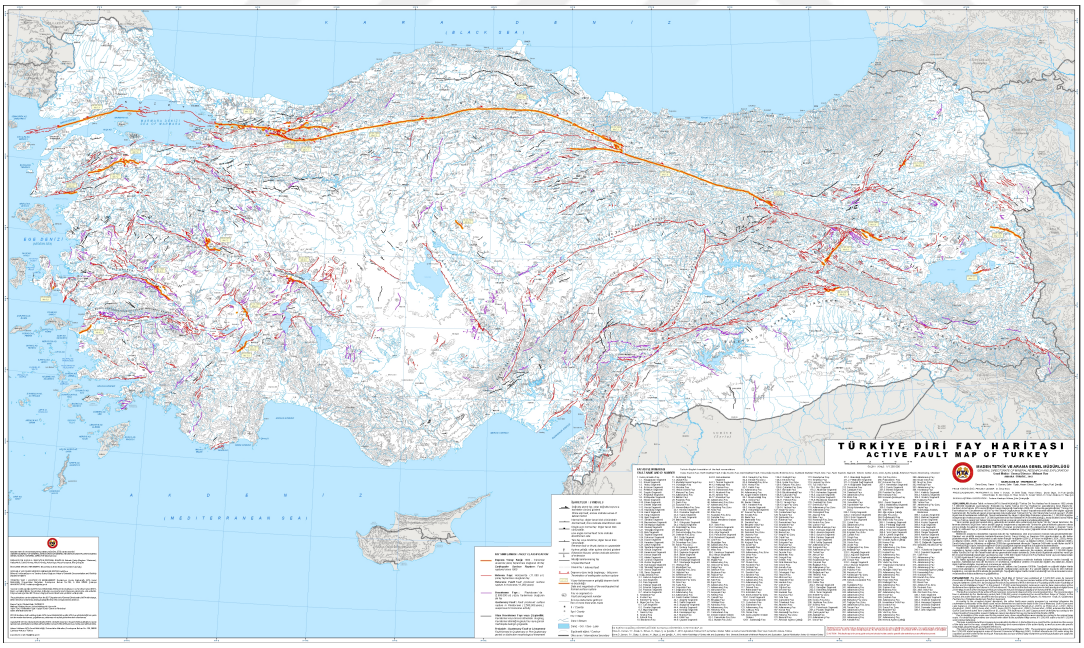
takip edilen diğer adımlar; belirlenen faylara dik yönde ve fayların kinematiğinin anlaşılmasına yönelik uygun dağılımdaki profiller yardımıyla GPS gözlem ağının oluşturulması, bu profiller üzerindeki kampanya noktalarında GPS tekniği ile doktora tez çalışması süresi içinde GPS ölçmeleri gerçekleştirilmesi, derlenen arşiv veriler ve güncel gözlem verilerinin sürekli GPS istasyonları ile beraber kullanılarak nokta hızlarının hesaplanması, güncel fay kayma hızlarının kestirimi ve kayma eksikliği ile kilitlenme oranı dağılımlarının incelenen tüm fay segmentleri için ortaya konulması olarak hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

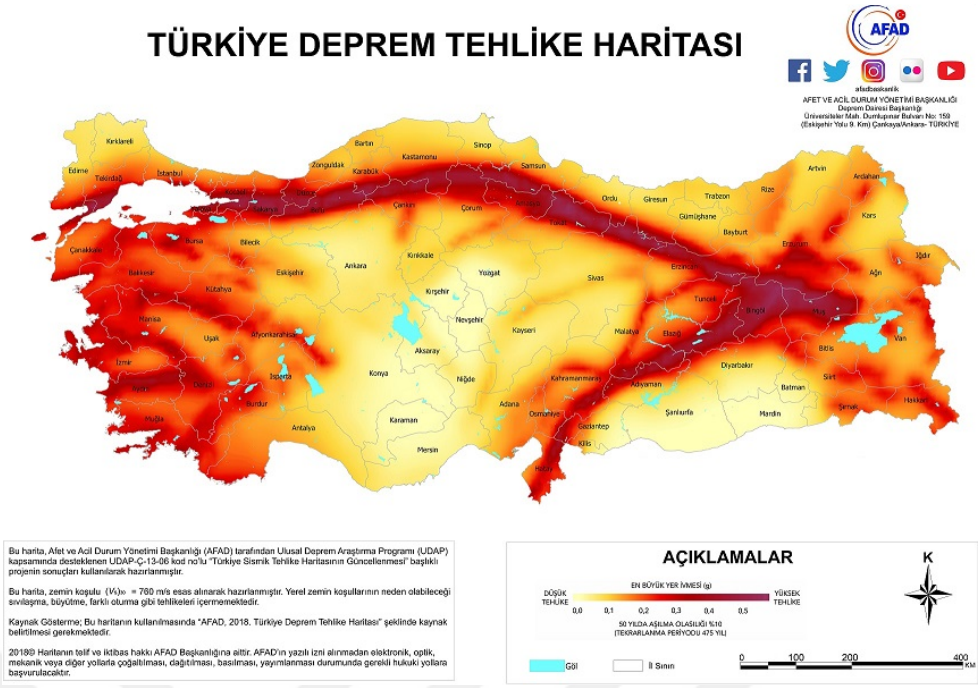
Türkiye'nin en önemli neotektonik ve sismojenik yapılarından birisi olan DAFZ, Arabistan ve Anadolu levhalarının sınırını oluşturan Kuzeydoğu-Güneybatı gidişli ve bindirme bileşenine de sahip sol yanal doğrultu atımlı aktif bir sistem olarak tarif edilmektedir (Dewey ve diğ, 1986; McKenzie, 1972, 1976; Sengör, 1979). DAFZ, Kuzeydoğu-Güneybatı ana gidiş doğrultusuna paralel, yarı paralel ve oblik olarak uzanan ana segmente göre çok daha kısa fayları da içine alan karmaşık bir tektonik yapıdır. DAFZ boydan boya kesintisiz bir fay düzleminden ziyade lokal çek-ayır havzaları ve yükselen alanları barındıran birbirinden farklı segmentlerden oluşmaktadır (Emre ve Duman, 2007; Sengor ve diğ, 1985; Westaway, 1994). DAFZ'nin fay geometrisi ve davranışı dikkate alındığında beş parça (Hempton ve diğ, 1981) ya da fay segmentlerinin doğrultuları baz alındığında altı parçadan oluştuğu vurgulanmaktadır (Saroglu ve diğ, 1992a). Bahsi geçen altı parçalı yapı Karlıova-Bingöl, Palu-Hazar Gölü, Hazar Gölü-Sincik, Çelikhan-Erkenek, Gölbaşı-Türkoğlu ve Türkoğlu-Antakya segmentlerinden oluşmaktadır. Bunun yanında, Barka ve Kadinsky-Cade (1988) fay geometrisi ve sismik aktiviteye bağlı olarak DAFZ boyunca 14 farklı segment bulunabileceğini ileri sürmüştür.

DAFZ literatürde ilk defa Allen (1969) ile tanımlandıktan sonra Arpat ve Şaroğlu (1972a, 1972b) ile 1971 Bingöl Depremi (Mw: 6.8) sırasında oluşan yüzey kırıkları haritalanmış ve ilk kez Doğu Anadolu Fay Zonu olarak adlandırılmıştır. McKenzie (1972) fay düzlemi çözümleri ve arazi gözlemlerine dayanarak Bingöl-Karlıova ve İskenderun Körfezi arasında fay sisteminin sınırlarını tanımlamıştır.

DAFZ, kuzeyde Karlıova'da KAFZ ile oluşturduğu üçlü birleşme noktasından güneyde Kahramanmaraş-Türkoğlu'na kadar yaklaşık 500 km uzunluğundaki doğrultu boyunca uzanmaktadır. DAFZ'nin Türkoğlu'ndan sonraki güney bölümü bilim insanları ve araştırmacılar için tartışmalıdır. Bazı çalışmalarda DAFZ, Karlıova'dan başlayarak güneybatıya doğru Osmaniye, Yumurtalık ve İskenderun Körfezi üzerinden Kıbrıs'a kadar uzanan ve daha güneyde Ölü Deniz Fayı ile direkt bağlı olmayan bir hat olarak ele alınmıştır (Hempton, 1987; McKenzie, 1972; Taymaz ve diğ, 1991; Westaway ve Arger, 1996). DAFZ'ye ait Karasu (Amanos) Segmenti ile Kıbrıs Yayı'nın etkisi altındaki Toprakkale, Karataş ve Yumurtalık Fayları ise Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin karmaşık tektonik yapısı içerisinde yer alan depremsellik açısından önemli segmentlerdir (Şekil 1.3). Bitlis-Zagros ve Kıbrıs Yayı birleşme kuşakları gibi farklı fay sistemleri ile etkileşim altındaki bu faylar güncellenen Türkiye Diri Fay Haritasında diri fay sınıfında değerlendirilmiştir (Emre ve diğ, 2013, 2018). Ayrıca, en büyük yer ivmesi değerlerinin gösterildiği deprem tehlike haritasında da sismik tehlike açısından aynı bölgelere işaret edilmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.3 : Türkiye diri fay haritası (Emre ve diğ, 2013).



Şekil 1.4 : Türkiye deprem tehlike haritası (URL-2).

Bunun yanında DAFZ'nin Hatay-Samandağ'a kadar uzanan bir yapıda olduğu da savunulmaktadır (Lyberis ve diğ, 1992; Perinçek ve Çemen, 1990; Saroglu ve diğ, 1992a; Sengor ve diğ, 1985; Westaway, 1994). Diğer yandan Türkoğlu ve Antakya arasında kalan segmentin (Karasu Fayı) Ölü Deniz Fayı'nın kuzey bölümünün bir parçası olduğu da düşünülmektedir (Arpat ve Şaroğlu, 1972b; Muehlberger, 1981; Westaway, 2004). Tüm bu yaklaşımların dışında Karasu Fayı bazı çalışmalarda tek başına ayrı bir fay olarak da değerlendirilmiştir (Gülen ve diğ, 1987; Muehlberger ve Gordon, 1987; Perinçek ve Çemen, 1990; Yürür ve Chorowicz, 1998).

Bu tektonik yapı içerisindeki Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde 21 deprem ($M \geq 6$) ve aletsel dönemde günümüze kadar 39 deprem ($M \geq 5.0$) kayıtlara geçmiştir. Bölgenin depremselliği ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.2'de verilmiştir.

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki başlıca diri fayların kinematik özellikleri geçmişte farklı çalışmalarla sorgulanmıştır. Bu çalışmalarda sismoloji, jeofizik, paleosismoloji, jeoloji, paleomanyetizma ve jeodezi bilim dalları çerçevesinde birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Doğu Anadolu Fayı (DAF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Karasu Fayı (KF), Ölü Deniz Fayı ve Kıbrıs Yayı ise bölgenin kinematiği üzerinde etkili olan fay sistemleridir. Bu doğrultuda, Taymaz ve diğ. (1991) ve Kiratzi (1993) çalışmalarında sismoloji verilerinden yararlanılarak DAF'nin fay kayma hızı elde edilmiştir. DAF kayma hızını Taymaz ve diğ. (1991) 25-35 mm/yıl

aralığında ortalama 29 mm/yıl, Kiratzi (1993) 6 mm/yıl olarak kestirmiştir. Westaway (2003) ve Westaway ve Arger (1996) çalışmalarında jeolojik gözlemlere bağlı olarak DAF'nin Gölbaşı-Türkoğlu segmenti için fay kayma hızı sırasıyla ~4 mm/yıl ve ~4.6 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Hatay ve Kahramanmaraş üçlü kavşak noktaları arasında kalan Antakya-Türkoğlu segmenti (Karasu Fayı) sismik açıdan kritik bir diğer segmenttir. Bu segment üzerinde Altunel ve diğ. (2009) paleosismoloji ve jeofizik gözlemler, Karabacak ve diğ. (2010) jeoloji ve jeofizik araştırmaları ile Amik Havzası içindeki fay kayma hızını belirlemeye çalışmışlardır. Buna göre, Altunel ve diğ. (2009) 6.07 mm/yıl, Karabacak ve diğ. (2010) 4.94±0.13 mm/yıl kayma hızı değerlerine ulaşmışlardır. Bunun dışında, bölgenin batıda Kıbrıs Yayı ile bağlantısını sağlayan Karataş-Osmaniye Fayı üzerindeki kayma hızı Westaway ve Arger (1996) tarafından jeolojik gözlemlere bağlı olarak 5.0 mm/yıl olarak kestirilmiş Gürsoy ve diğ. (2003) çalışmasında ise paleomanyetik bakış açısı ile 6.0 mm/yıl şeklinde ortaya konulmuştur.

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar-İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar) tekniği SAR uydu görüntüleri kullanılarak geniş alanlardaki yüzey deformasyonlarının yüksek doğruluklu bir şekilde belirlenebilmesine olanak sağlayan bir diğer jeodezik yaklaşımdır. Bu teknik kullanılarak literatürde DAF özelinde kayma hızlarına işaret eden sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Walters ve diğ. (2014) GPS gözlemleri ile birleştirdiği InSAR sonuçlarına göre DAF için 8.0±0.1 mm/yıl kayma hızı ileri sürmüştür. Cavalié ve Jónsson (2014) ise yine GPS tekniği ile desteklediği çalışmasında DAF kayma hızını 13 mm/yıl, kilitlenme derinliğini ise 4.5 km olarak kestirmiştir. Bu çalışmada olası bir asismik kaymanın (creeping) ya da dar bir sismojenik yapıdaki yüzeye yakın bir elastik gerinim birikiminin bu sığ kilitlenme derinliğine neden olabileceği değerlendirilmiştir.

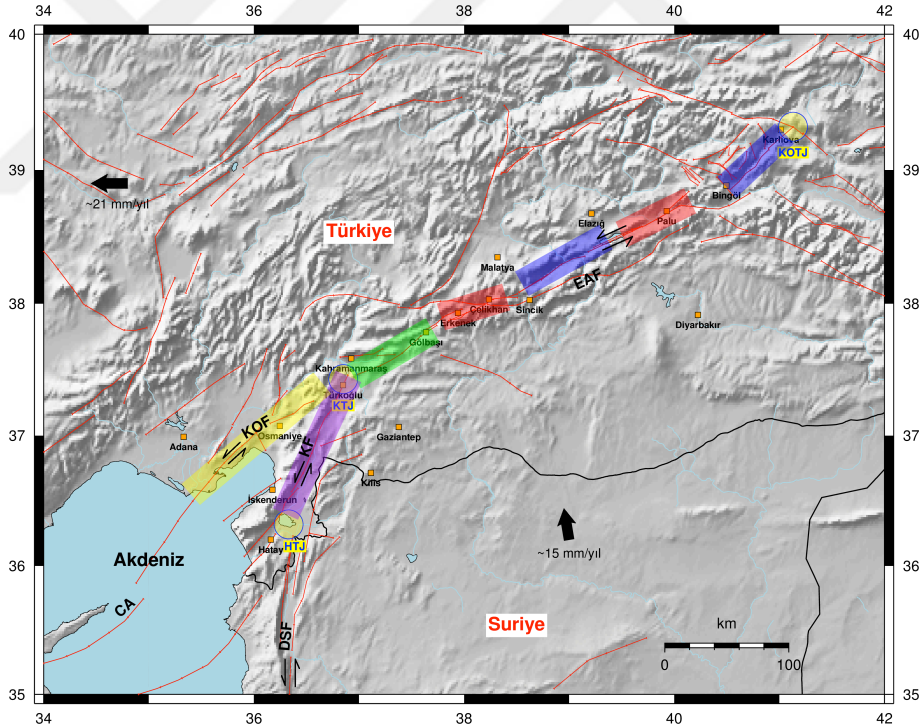
Barka ve diğ. (1999) ile başlayan ve günümüze kadar yoğun bir şekilde devam ettirilen jeodezik gözlemler Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresi için önemli bir bilimsel birikim sunmaktadır. Barka ve diğ. (1999) tarafından ilk defa GPS tekniği kullanılarak Misis ve Karataş-Osmaniye Faylarının bulunduğu Anadolu ve Afrika levha sınırında kayma hızı 8.0 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, McClusky ve diğ. (2000) ile Reilinger ve diğ. (2006) DAF üzerindeki fay kayma hızları için GPS gözlemlerine dayanan önemli sonuçlar sunmuşlardır. DAF kayma

hızını McClusky ve diğ. (2000) 9±1 mm/yıl, Reilinger ve diğ. (2006) farklı segmentler için 10.0±0.3 ve 9.9±0.2 mm/yıl olarak elde etmiştir. Meghraoui ve diğ. (2011) Doğu Anadolu ve Karataş-Osmaniye Fayları için kayma hızı kestirimlerini 1991-2004 dönemindeki GPS gözlemlerinden yararlanarak gerçekleştirmiştir. Meghraoui ve diğ. (2011) Doğu Anadolu Fayı için 8.8±0.3 mm/yıl ve Karataş-Osmaniye Fayı için 3.6±0.6 mm/yıl hız kestirim değerlerine ulaşmıştır. Nocquet (2012) ise daha önce literatürde yayımlanmış GPS çözümlerini birleştirerek Doğu Anadolu ve Karasu Fayları için hız kestirimlerinde bulunmuştur. Nocquet (2012) çalışmasında kayma hızları DAF için 8-10 mm/yıl, Antakya-Türkoğlu segmenti için 2-3 mm/yıl olarak yayımlanmıştır. Mahmoud (2012) ve Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmaları Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için GPS gözlemlerinin kullanıldığı en detaylı jeodezik çalışmadır. Aktuğ ve diğ. (2016) ise Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin yanı sıra Doğu Anadolu Fayının diğer segmentlerinde fay kayma hızlarının kestirildiği önemli bir diğer çalışmadır. Bu tez çalışmasında referans alınan Mahmoud (2012) ve Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmalarında yayımlanmış fay kayma hızları detaylı olarak Bölüm 2.3'de ele alınmıştır.

2. KUZEYDOĞU AKDENİZ BÖLGESİ

2.1 Bölgenin Tektoniği

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi neotektonik açıdan Anadolu plakasının güney sınırı içinde olup, Anadolu plakasını çevreleyen ve Avrasya plakasına göre birbirlerinden farklı hızlarla yaklaşık kuzey yönde hareket eden Afrika ve Arabistan plakaları tarafından kontrol edilmektedir. Bu kuzey yönlü hareketler sağ yanal atımlı Kuzey Anadolu Fayı ile sol yanal atımlı Doğu Anadolu Fayı etkisi altındaki Anadolu plakasının batıya kaçışını tetiklemektedir. Söz konusu bu neotektonik mekanizma Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki ana diri fay segmentlerini ön plana çıkarmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresinde bulunan ana diri fay segmentleri. Fay segmentleri Westaway (2003) ve Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmalarından derlenmiştir. Fay haritası Global Earthquake Model Global Active Faults Database (GEM GAF-DB)'den alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). Siyah oklar levha hızlarını göstermektedir. Levha hızları McClusky ve diğ. (2003) ve Reilinger ve diğ. (2006) çalışmalarından alınmıştır. Kısaltmalar; Doğu Anadolu Fayı (EAF), Karasu Fayı (KF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Ölü Deniz Fayı (DSF), Kıbrıs Yayı (CA), Karlıova üçlü kavşak noktası (KOTJ), Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) için verilmiştir.

2.1.1 Doğu Anadolu Fayı

Arabistan ve Anadolu plakaları arasındaki hareketin karşılandığı Doğu Anadolu Fayı (DAF), kuzeydoğuda Bingöl-Karlıova üçlü kavşak noktasından başlayarak kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda güneybatıda Kahramanmaraş-Türkoğlu üçlü kavşak noktasına kadar uzanmaktadır. Kuzeydoğu-güneybatı gidişli ve bindirme bileşenine sahip sol yanal doğrultu atımlı bir fay sistemi olarak tanımlanan (Dewey ve diğ, 1986; McKenzie, 1972, 1976; Sengör, 1979) Doğu Anadolu Fayı Karlıova-Bingöl, Palu-Hazar Gölü, Hazar Gölü-Sincik, Çelikhan-Erkenek, Gölbaşı-Türkoğlu ve Türkoğlu-Antakya segmentlerinden oluşmaktadır (Saroglu ve diğ, 1992a). Bölüm 2.3'de detayları verilen birçok sismolojik, jeolojik ve jeodezik çalışma ile Doğu Anadolu Fayı'nın söz konusu bu segmentleri üzerinde yoğun fay kinematiği araştırmaları gerçekleştirilmiş, uzun dönem ve kısa dönem kayma hızları kestirilmeye çalışılmıştır.

DAF'nin Çelikhan-Erkenek ve Gölbaşı-Türkoğlu segmentleri çalışma bölgesi içinde yer almaktadır. Bu segmentlerin sırasıyla 45 ve 90 km uzunluklarında sol yanal atımlı oldukları literatürde ifade edilmektedir. Çelikhan-Erkenek segmenti üzerindeki Göksu Irmağı'nın ~13 km (Saroglu ve diğ, 1992a, 1992b), Gölbaşı-Türkoğlu segmenti üzerindeki Aksu Irmağı'nın 16.5 km (Yönlü ve diğ, 2013) ve bölgedeki derelerin 3.5-4 km civarındaki ötelenmeleri DAF'nin sol yanal hareketinin bir kanıtıdır (Saroglu ve diğ, 1992a, 1992b).

2.1.2 Karasu Fayı

Türkoğlu ve Hatay üçlü kavşak noktaları arasında yer alan Türkoğlu-Antakya segmenti Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin karmaşık tektonik yapısı içerisinde neotektonik ve sismojenik karakter yönüyle oldukça stratejik bir önem taşımaktadır. Türkoğlu-Antakya segmenti 150 km uzunluğundaki Karasu Fayı (KF) ile beraber çevresinde göreceli olarak daha kısa fay parçacıklarını da barındırmaktadır. Kuzeyde sol yanal atımlı Gölbaşı-Türkoğlu segmenti ile bağlantısı bulunan Türkoğlu-Antakya segmenti üzerinde sol yanal atım ile beraber normal fay bileşeni de gözlenmektedir (Aktug ve diğ, 2016; Mahmoud, 2012; Reilinger ve diğ, 2006).

Karasu Fayı (Amanos Fayı), Ölü Deniz Fayı'nın kuzeyinde, Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası ile Hatay üçlü kavşak noktası arasında Amanos Dağları boyunca

uzanan, sol yanal doğrultu atımlı bileşeni baskın, kuzey-kuzeydoğu ve güney-güneybatı gidişli ~150 km uzunluğunda bir fay olarak tanımlanmaktadır (Rojay ve diğ, 2001). Bölüm 2.3'de detaylı olarak değinilen Altunel ve diğ. (2009) ile Karabacak ve diğ. (2010) çalışmaları bu fay segmenti üzerinde uzun dönem kayma hızlarının kestirildiği referans çalışmalardır. Reilinger ve diğ. (2006), Nocquet (2012), Mahmoud (2012) ile Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmaları ise bu segment üzerinde kısa dönem fay kayma hızlarının elde edildiği önemli jeodezik çalışmalardır.

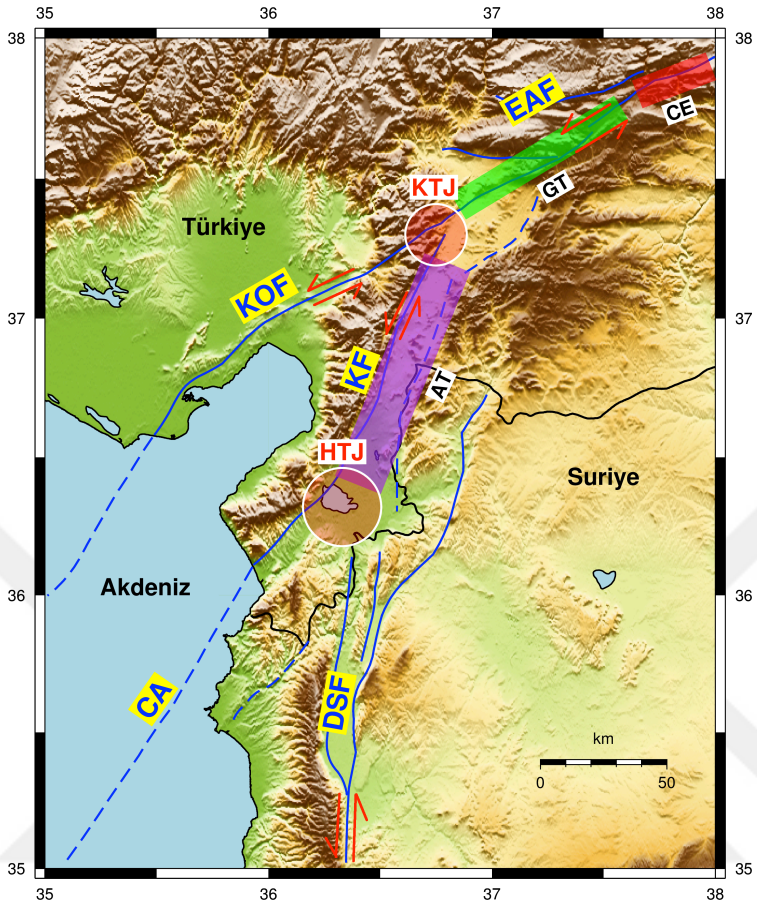
2.1.3 Karataş-Osmaniye Fayı

Karataş-Osmaniye Fayı, Doğu Anadolu Fayı'nın devamı niteliğinde düşünülen (Hempton, 1987; McKenzie, 1972; Taymaz ve diğ, 1991; Westaway ve Arger, 1996) ve Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası ile Yumurtalık arasında ~75 km uzunluğunda, devamında ise Akdeniz içerisinde Kıbrıs Yayı ile birleşen bir fay segmentidir (Mahmoud, 2012). Bölüm 2.3'de detaylandırılan Westaway ve Arger (1996) ile Gürsoy ve diğ. (2003) çalışmaları ile bu fay üzerindeki uzun dönem kayma hızları, Barka ve diğ. (1999), Meghraoui ve diğ. (2011), Mahmoud (2012) ile Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmaları ile de kısa dönem kayma hızları kestirilmiş ve fay kinematiği araştırılmıştır.

DAF üzerinde oluşan hareketin önemli bir bölümü de batıda Karataş-Osmaniye (KOF) üzerine aktarılmaktadır. Bölüm 2.2'de değinilen 1513 depreminin (M ~7.4) KOF üzerinde meydana geldiği tahmin edilirken (Ambraseys, 2009) ve yakın geçmişte 1998 Adana depremi (M 6.3, KOERI & USGS) göz önünde bulundurulduğunda KOF segmentinin önemli miktarda gerinim biriktirdiği ve sismik tehlike oluşturduğu sonucuna ulaşılabilir.

Türkoğlu'nun batısında kalan faylanma için bilim insanları arasında bir fikir birliğine varılamamıştır. Bu konudaki genel kanı, doktora tezinin çalışma bölgesini de oluşturan bu sahada batıda Kıbrıs Yayı ile birleşen Karataş-Osmaniye Fayı ve güneyde Ölü Deniz Fayı birleşen Karasu Fayı için Doğu Anadolu Fayı'nın devamı niteliğinde sayılabileceği görüşüdür. Aksi düşünce ise bu fayların ayrı birer fay sistemi şeklinde tanımlanması gerektiği ve hatta bir diğeri Karasu Fayı'nın Ölü

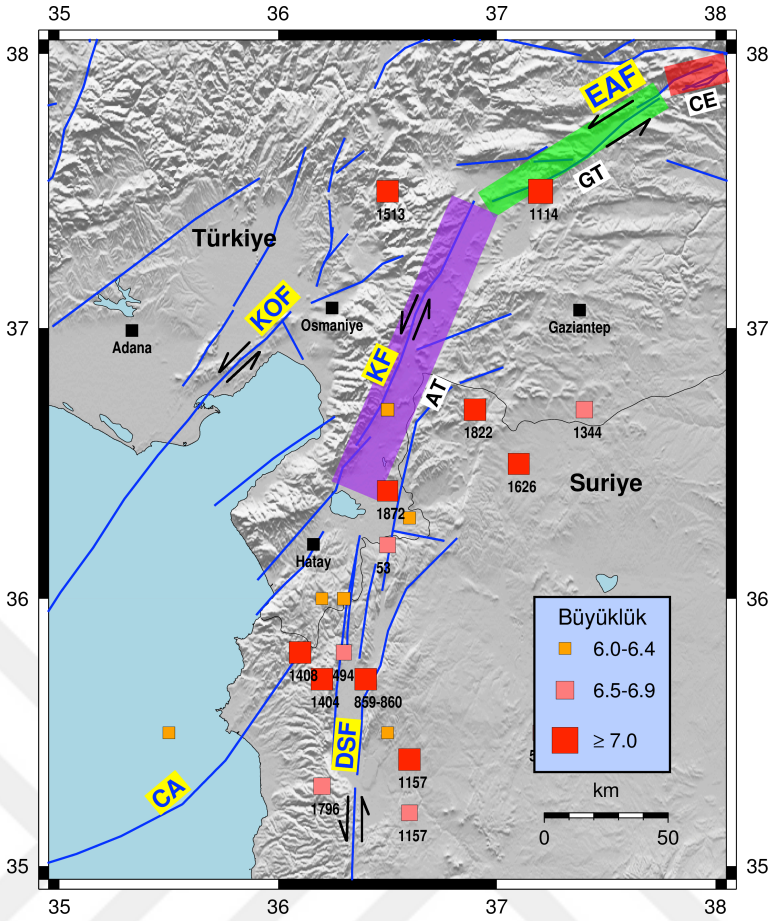
Deniz Fayı'nın kuzeyde kalan bir parçası olduğu yönündedir. Bölgenin tektonik yapısı önemli fay segmentleri ile Şekil 2.2'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 2.2 : Çalışma bölgesinin detaylı tektonik yapısı. Kısaltmaları verilen önemli jeolojik yapılar Doğu Anadolu Fayı (EAF), Gölbaşı-Türkoğlu segmenti (GT), Çelikhan-Erkenek segmenti (CE), Antakya-Türkoğlu segmenti (AT), Karasu Fayı (KF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Ölü Deniz Fayı (DSF), Kıbrıs Yayı (CA), K.Maraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) şeklindedir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ, 2011 çalışmasından alınmıştır.

2.2 Bölgenin Depremselliği

Tarihsel dönemde Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresinde birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin önemli bir kısmı Türkiye'nin güneyinde ve Suriye'nin kuzeyinde ciddi hasarlar yaratan depremlerdir (Şekil 2.3). Literatürdeki çalışmalarda Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen 21 adet büyük deprem ($Ms \geq 6.0$) kayıtlara geçmiştir (Çizelge 2.1).



Şekil 2.3 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen depremlerin dağılımı. Deprem lokasyonları Çizelge 2.1'de verilen çalışmalarından derlenmiştir. Fay gösterimleri GEM Global Active Faults projesi veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). Kısaltmalar Şekil 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen depremler (Ms ≥ 6.0).

No	Tarih	Boylam	Enlem	Hesaplanan Büyüklük (Ms)	Referans Çalışma
1	37 (M.Ö.)	36.30	36.00	6.2	(Sbeinati ve diğ, 2005)
2	53	36.50	36.20	6.6	(Sbeinati ve diğ, 2005)
3	494	36.30	35.80	6.5	(Sbeinati ve diğ, 2005)
4	531-534	37.20	35.50	6.5	(Sbeinati ve diğ, 2005)

Çizelge 2.1 (devam) : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen depremler (Ms ≥ 6.0).

No	Tarih	Boylam	Enlem	Hesaplanan Büyüklük (Ms)	Referans Çalışma
5	565-571	36.20	36.00	6.0	(Sbeinati ve diğ, 2005)
6	859-860	36.40	35.70	7.4	(Sbeinati ve diğ, 2005)
7	1114	36.50	37.30	7.7	(Ambraseys, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998; Sbeinati ve diğ, 2005)
8	02-	36.50	35.50	6.0	(Sbeinati ve diğ, 2005)
9	1157	36.60	35.20	6.6	(Sbeinati ve diğ, 2005)
10	1157	36.60	35.40	7.4	(Ambraseys, 2004, 2006; Ambraseys ve Jackson, 1998; Guidoboni ve diğ, 2004; Poirier ve Taher, 1980; Sbeinati ve diğ, 2005)
11	1344	37.40	36.70	6.8	(Ambraseys, 2009; Sbeinati ve diğ, 2005)
12	1404	36.20	35.70	7.4	(Sbeinati ve diğ, 2005)
13	1408	36.10	35.80	7.4	(Ambraseys ve Jackson, 1998; Ambraseys ve Melville, 1995; Sbeinati ve diğ, 2005)

Çizelge 2.1 (devam) : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde tarihsel dönemde meydana gelen depremler (Ms ≥ 6.0).

No	Tarih	Boylam	Enlem	Hesaplanan Büyüklük (Ms)	Referans Çalışma
14	1513	36.50	37.50	7.4	(Ambraseys, 1989)
15	1568	35.50	35.50	6.0	(Sbeinati ve diğ, 2005)
16	1626	37.10	36.50	7.3	(Sbeinati ve diğ, 2005)
17	1726	36.60	36.30	6.1	(Sbeinati ve diğ, 2005)
18	1738	36.50	36.70	6.2	(Sbeinati ve diğ, 2005)
19	1796	36.20	35.30	6.8	(Ambraseys, 1989, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998; Sbeinati ve diğ, 2005)
20	1822	36.75	36.10	7.4	(Ambraseys, 1989, 2006, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998; Sbeinati ve diğ, 2005)
21	1872	36.50	36.20	7.2	(Ambraseys, 1989, 2006; Ambraseys ve Jackson, 1998; Sbeinati ve diğ, 2005)

Tarihsel kayıtlar incelendiğinde, Türkoğlu-Gölbaşı segmenti ile ilişkili 29 Kasım 1114 depremi (Ms 6.9, Ambraseys, 2009; M ≥7.8, Ambraseys ve Jackson, 1998; Ms 7.7, Sbeinati ve diğ, 2005); oldukça dikkat çekicidir. Benzer şekilde, 1513 depreminin (M 7.4) Türkoğlu'nun güneybatısında KOF üzerinde meydana geldiği tahmin edilmektedir (Ambraseys, 1989, 2009). Bunların dışında Hatay ve çevresini

etkileyen yakın geçmişteki en büyük iki deprem ise 13 Ağustos 1822 (M 7.4) ve 3 Nisan 1872 (M 7.2) sarsıntılarıdır (Ambraseys, 1989, 2006, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998; Sbeinati ve diğ, 2005). Söz konusu depremlerin birçoğu DAF üzerinde ve Türkoğlu-Antakya-Adana üçgeninde hakim olan baskın sol yanal atımlı fay karakteristiğini yansıtmaktadır (Arpat ve Şaroğlu, 1972b).

DAFZ, KAFZ kadar aktif olmasa da aletsel dönemde üzerinde ve çevresinde yıkıcı büyük depremlerin meydana geldiği bilinmektedir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : Doğu Anadolu Fayı üzerinde ve çevresinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0).

No	Tarih-Yer	Boylam	Enlem	Büyüklük	Referans
1	04.12.1905-Malatya	39.00	39.00	Ms 6.8	(Ambraseys, 1989; Ambraseys ve Jackson, 1998; Ayhan ve diğ, 1981; Duman ve diğ, 2018)
2	17.08.1949-Karlıova/Bingöl	40.62	39.57	Ms 6.7	(Ambraseys, 1988; Ayhan ve diğ, 1981)
3	14.06.1964-Sincik/Adıyaman	38.51	38.13	Ms 5.9	(Ergin ve diğ, 1967; Jackson ve McKenzie, 1984; McKenzie, 1972; Taymaz ve diğ, 1991)
4	07.03.1966-Varto/Muş	41.60	39.20	Ms 5.6	(Jackson ve McKenzie, 1984; McKenzie, 1972)
5	19.08.1966-Varto/Muş	41.56	39.17	Ms 6.9	(Ergin ve diğ, 1971; Jackson ve McKenzie, 1984; McKenzie, 1972)
6	20.08.1966-Karlıova/Bingöl	40.98	39.42	Ms 5.3	(Jackson ve McKenzie, 1984; McKenzie, 1972)

Çizelge 2.2 (devam) : Doğu Anadolu Fayı üzerinde ve çevresinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0).

No	Tarih-Yer	Boylam	Enlem	Büyüklük	Referans
7	22.05.1971-Bingöl	40.52	38.85	Ms 6.8	(Ambraseys, 1989; Ambraseys ve Jackson, 1998; Duman ve diğ, 2018; Jackson ve McKenzie, 1984; Seymen ve Aydın, 1972; Taymaz ve diğ, 1991)
8	06.09. 1975-Lice/Diyarbakır	40.77	38.51	Ms 6.7	(Ambraseys, 1989; Jackson ve McKenzie, 1984; Nabelek, 1984)
9	05.05.1986-Doğanşehir/Malatya	37.79	38.02	Ms 5.8	(Taymaz ve diğ, 1991)
10	06.06.1986-Sürgü/Malatya	37.91	38.01	Ms 5.6	(Taymaz ve diğ, 1991)
11	13.07.2003-Doğanyol/Malatya	38.98	38.27	Ms 5.3	(Tan, 2004)
12	01.05.2003-Bingöl	40.46	39.00	Ms 6.3	(Kalafat ve diğ, 2007; Tan ve Taymaz, 2004)
13	11.08.2004-Sivrice/Elazığ	39.25	38.34	Ms 5.4	(Tan ve Taymaz, 2005)
14	9 Şubat 2007-Sivrice/Elazığ	39.05	38.40	Mw 5.5	KOERI (URL-3)
15	21 Şubat 2007-Sivrice/Elazığ	39.31	38.35	Mw 5.7	KOERI (URL-3)
16	08.03.2010-Kovancılar/Elazığ	40.12	38.83	Mw 6.1	(Duman ve diğ, 2018; Tan ve diğ, 2011)

Çizelge 2.2 (devam) : Doğu Anadolu Fayı üzerinde ve çevresinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0).

No	Tarih-Yer	Boylam	Enlem	Büyüklük	Referans
17	24.01.2020-Sivrice/Elazığ	39.08	38.39	Mw 6.5, M 6.7	KOERI (URL-3), USGS (URL-4)

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde 1900 yılından günümüze kadar aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0) ile ilgili olarak KOERI (Kandilli Observatory And Earthquake Research Institute) ve USGS (United States Geological Survey) deprem katalogları zengin bir veri seti sunmaktadır (Çizelge 2.3). Şekil 2.4'de ise 1900 yılından günümüze doktora tez çalışma bölgesi sınırları içinde meydana gelmiş ve deprem büyüklüğü Mw ≥ 3.0 olan depremlerin dağılımı gösterilmiştir. Çalışma bölgesi içinde yakın zamanda meydana gelen en büyük sarsıntı 27 Haziran 1998 Adana depremidir (M 6.3, KOERI & USGS). Bunun dışında Şekil 2.4'den de görüleceği gibi bölgenin kuzeyinde oluşan sismik aktivite yoğunluğu üzerinde düşünülmesi gereken bir noktadır. Sismik aktivite ile ilgili bir diğer önemli husus Gölbaşı-Türkoğlu ve Türkoğlu-Antakya segmentleri üzerinde diğer fay segmentlerine oranla seyrek sismik aktivite gerçekleşmesi durumudur. Çalışma bölgesi civarında ise DAF'nin yıkıcı deprem üretebilme potansiyelini göstermesi açısından son yıllarda meydana gelen 24 Ocak 2020 Elazığ, Sivrice (Mw 6.5, KOERI & M 6.7, USGS), 8 Mart 2010 Elazığ, Kovancılar (Mw 6.1, KOERI & M 6.1, USGS) ve 1 Mayıs 2003 Bingöl (Mw 6.4, KOERI & M 6.4, USGS) depremleri oldukça önemlidir.

Çizelge 2.3 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0), KOERI (URL-3), USGS (URL-4).

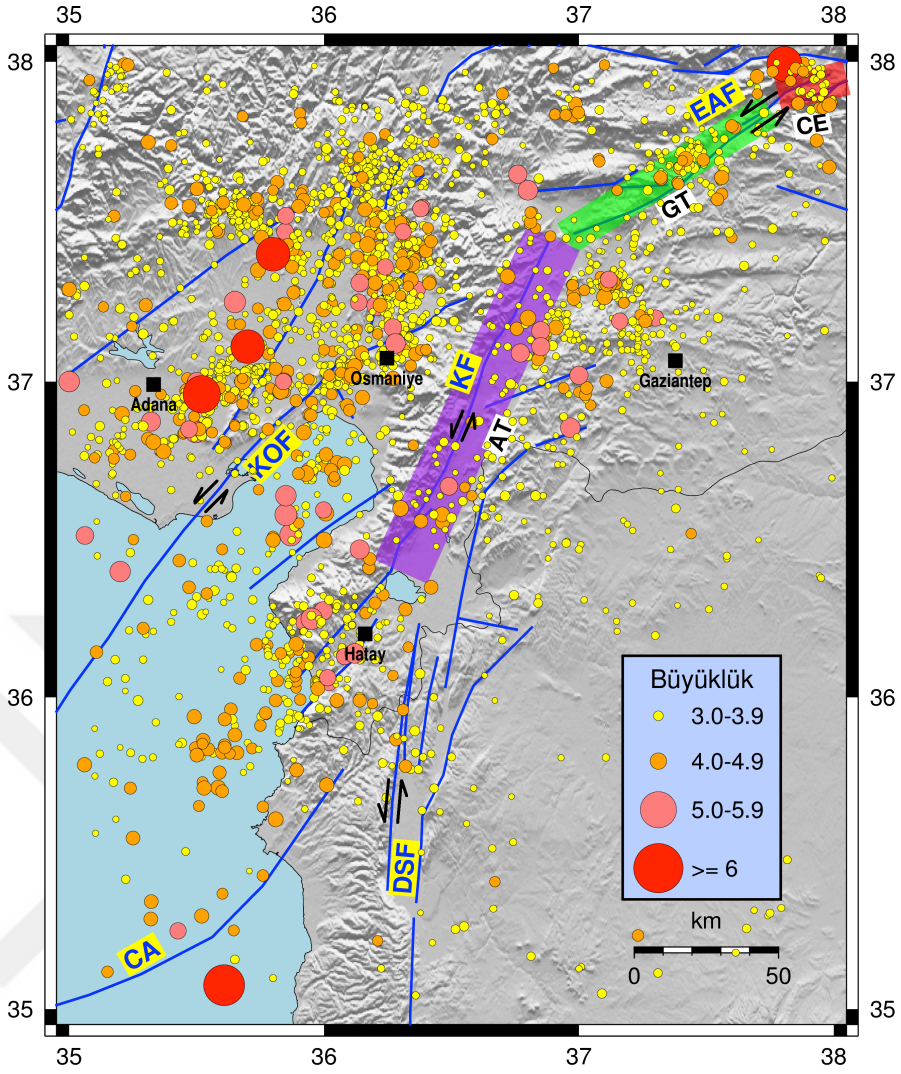
No	Tarih-Saat	Boylam	Enlem	Büyüklük	Referans
1	17.02.1908-03:00:01	37.400	35.800	6.0	KOERI
2	30.10.1908-11:30:00	37.600	36.800	5.5	KOERI
3	25.12.1915-06:06:09	36.470	36.140	5.4	KOERI

Çizelge 2.3 (devam) : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0), KOERI (URL-3), USGS (URL-4).

No	Tarih-Saat	Boylam	Enlem	Büyüklük	Referans
4	29.09.1918-12:07:14	35.077	35.608	6.6	USGS
5	05.10.1921-19:09:46	36.400	35.200	5.6	KOERI
6	17.03.1926-13:20:00	37.000	35.000	5.6	KOERI
7	25.09.1933-09:46:50	37.000	35.500	5.3	KOERI
8	14.06.1936-17:01:37	36.640	35.850	5.6	KOERI
9	20.03.1945-07:58:56	37.110	35.700	6.0	KOERI
10	08.04.1951-21:38:10	36.516	35.869	5.8	KOERI, USGS
11	22.10.1952-17:00:41	36.841	35.496	5.7	KOERI, USGS
12	24.03.1953-21:17:36	36.855	36.966	5.3, 5.5	KOERI, USGS
13	01.06.1961-16:31:44	37.650	36.760	5.3	KOERI
14	07.04.1967-18:33:31	37.360	36.240	5.0	KOERI
15	29.06.1971-09:08:12	37.110	36.850	5.3	KOERI
16	11.07.1971-20:12:56	37.160	36.850	5.3	KOERI
17	17.08.1971-04:29:33	37.090	36.770	5.3	KOERI
18	01.01.1975-00:30:01	36.670	36.490	5.2	KOERI
19	28.12.1979-03:09:08	37.470	35.847	5.1	KOERI, USGS
20	05.05.1986-03:35:38	37.993	37.806	6.1	USGS
21	03.08.1986-01:33:20	37.200	37.300	5.0	KOERI, USGS
22	24.06.1989-03:09:58	36.719	35.943	5.1	USGS
23	10.04.1991-01:08:40	37.359	36.221	5.2, 5.4	KOERI, USGS

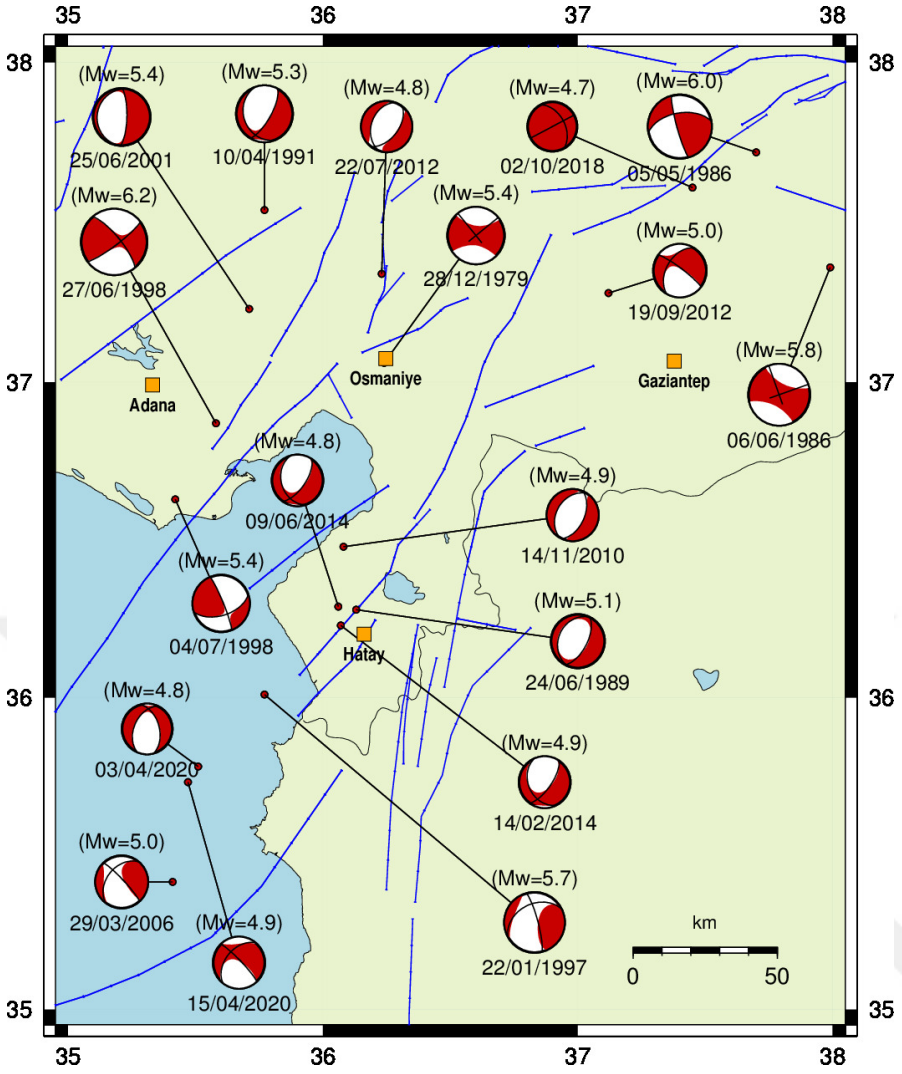
Çizelge 2.3 (devam) : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde aletsel dönemde meydana gelen depremler (Mw ≥ 5.0), KOERI (URL-3), USGS (URL-4).

No	Tarih-Saat	Boylam	Enlem	Büyüklük	Referans
24	03.01.1994-21:00:31	37.002	35.842	5.0	KOERI, USGS
25	22.01.1997-17:57:19	36.250	35.951	5.5, 5.7	KOERI, USGS
26	22.01.1997-18:24:50	36.239	35.922	5.0, 5.1	KOERI, USGS
27	22.01.1997-18:27:30	36.275	35.997	5.3	USGS
28	27.06.1998-13:55:52	36.878	35.307	6.3	KOERI, USGS
29	04.07.1998-02:15:47	36.874	35.321	5.1, 5.4	KOERI, USGS
30	25.06.2001-13:28:46	37.238	36.206	5.5	KOERI, USGS
31	31.10.2001-12:33:53	37.249	36.136	5.2, 5.1	KOERI, USGS
32	14.12.2002-01:02:43	37.470	36.310	5.0	KOERI
33	29.03.2006-22:05:15	35.252	35.427	5.0	USGS
34	17.06.2009-04:29:12	36.047	36.020	5.0	KOERI, USGS
35	14.11.2010-23:08:25	36.595	35.998	5.0	KOERI
36	22.07.2012-09:26:03	37.546	36.384	5.0	KOERI, USGS
37	19.09.2012-09:17:46	37.320	37.117	5.1	KOERI
38	29.07.2015-22:00:54	36.514	35.061	5.2	KOERI
39	19.08.2018-15:22:14	37.289	36.364	5.1	USGS



Şekil 2.4 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde 1900 yılından günümüze kadar aletsel dönemde meydana gelen depremlerin dağılımı. Deprem lokasyonları USGS ve KOERI arşivlerinden derlenmiştir. Fay gösterimleri GEM Global Active Faults projesi veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020). Kısaltmalar Şekil 2.1'de verilmiştir.

Şekil 2.5'de 1976 yılından günümüze doktora tez çalışma bölgesi sınırları içinde meydana gelmiş ve deprem büyüklüğü Mw ≥ 4.5 olan aletsel dönem depremlere dair odak mekanizması çözümleri verilmiştir. Çözümlerde fay bileşenlerinin davranışı "beachball" gösterimleri ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.5 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde meydana gelmiş ve büyüklüğü Mw ≥ 4.5 olan aletsel dönem depremlerin odak mekanizması çözümleri. Odak mekanizması çözümleri Ekström ve diğ. (2012) çalışmasından elde edilmiştir. Fay gösterimleri GEM Global Active Faults projesi veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020).

Buna göre DAF'nin Gölbaşı-Türkoğlu segmenti ve güneybatıda KOF üzerindeki mekanizmanın baskın olarak sol yanal doğrultu atımlı olduğu görülmektedir. KOF'nin kuzeyinde ise normal faylanma görülmektedir. Ancak özellikle Gölbaşı-Türkoğlu segmenti civarında meydana gelen depremlerden mekanizmada oblik fayların da çalıştığı sonucu çıkartılabilir. 27 Haziran 1998 Adana depreminde ise mekanizmanın baskın olarak sol yanal doğrultu atımlı olarak çalıştığı söylenebilir. Bunun dışında Türkoğlu-Antakya segmentinde özellikle Hatay civarında meydana gelen depremlerde oblik fay mekanizmaları üzerindeki normal fay bileşeni daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde Kıbrıs Yayı çevresinde

mekanizma çözümleri oblik fayların varlığına işaret ederken normal fay bileşeninin depremlerde ana unsur olarak davrandığı görülmektedir.

2.3 Bölgenin Kinematiği

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresinin kinematik özellikleri farklı gözlem tekniklerinin kullanılmasına bağlı olarak hem uzun dönem hem de kısa dönem deformasyonların kestirimi ile açıklanabilir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 : Literatürdeki çalışmalarda Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki fay segmentleri için verilen kayma hızları.

Fay Segmenti	**Kayma Hızı (mm/yıl)**	**Yöntem**	**Referans Çalışma**
Doğu Anadolu Fayı	25-35	Sismoloji	(Taymaz ve diğ, 1991)
Amik Havzası	6.07	Paleosismoloji	(Altunel ve diğ, 2009)
	4.94±0.13	Paleosismoloji, jeofizik	(Karabacak ve diğ, 2010)
Karataş-Osmaniye Fayı	5.0	Jeoloji	(Westaway ve Arger, 1996)
	6.0	Paleomanyetizma	(Gürsoy ve diğ, 2003)
Misis ve Karataş-Osmaniye Fayları	8.0	Jeodezi (GPS)	(Barka ve diğ, 1999)
Doğu Anadolu Fayı	9±1	Jeodezi (GPS)	(McClusky ve diğ, 2000)
Hazar Gölü-Palu	10.0±0.3	Jeodezi (GPS)	(Reilinger ve diğ, 2006)
Palu-Türkoğlu	9.9±0.2		
Antakya-Türkoğlu	6.8±0.3		

Çizelge 2.4 (devam) : Literatürdeki çalışmalarda Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki fay segmentleri için verilen kayma hızları.

Fay Segmenti	Kayma Hızı (mm/yıl)	Yöntem	Referans Çalışma
Doğu Anadolu Fayı	8.8±0.3	Jeodezi (GPS)	(Meghraoui ve diğ, 2011)
Karataş-Osmaniye Fayı	3.6±0.6		
Doğu Anadolu Fayı	8-10	Jeodezi (GPS)	(Nocquet, 2012)
Antakya-Türkoğlu	2-3		
Doğu Anadolu Fayı	9.0±0.3	Jeodezi (GPS)	(Mahmoud, 2012)
Karataş-Osmaniye Fayı	3.6±0.7-4.5±0.8		
Antakya-Türkoğlu	4.0±1.0		
Doğu Anadolu Fayı	10.3±0.7-10.5±0.6	Jeodezi (GPS)	(Aktug ve diğ, 2016)
Antakya-Türkoğlu	4.2±1.3-4.5±1.1		
Karataş-Osmaniye Fayı	2.7±1.4		
Doğu Anadolu Fayı	13	Jeodezi (InSAR + GPS)	(Cavalié ve Jónsson, 2014)
Doğu Anadolu Fayı	8.0±0.1	Jeodezi (InSAR + GPS)	(Walters ve diğ, 2014)

Yapılan çalışmalarda Taymaz ve diğ. (1991) fay düzlemi çözümlerine bağlı olarak belirlenen kayma hızlarının DAFZ için 25-35 mm/yıl aralığında ortalama 29 mm/yıl olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Kiratzi (1993) sismik açıdan incelediği DAFZ için kayma hızını 6 mm/yıl olarak kestirmiştir. Jeolojik gözlemlere dayanan çalışmaları ile Westaway (2003) ve Westaway ve Arger (1996) DAF'nin Gölbaşı-Türkoğlu segmenti için fay kayma hızını sırasıyla ~4 mm/yıl ve ~4.6 mm/yıl olarak elde etmişlerdir. Altunel ve diğ. (2009) Amik Havzası içinde gerçekleştirilen paleosismoloji çalışmaları ile Ölü Deniz Fayı'nın kuzeyinde (Antakya-Türkoğlu arasındaki segment) kayma hızını 6.07 mm/yıl olarak belirlemiştir. Benzer şekilde, Karabacak ve diğ. (2010)'nin çalışmasında ise bölgedeki jeolojik gözlemler, elektrik özdirenç ve gözlem kuyularından elde edilen verilerin analizine bağlı olarak aynı segment üzerinde en az 4.94±0.13 mm/yıl büyüklüğünde bir kayma hızından söz edilmektedir. Karataş-Osmaniye Fayı özelindeki kayma hızı Westaway ve Arger (1996) çalışmasında jeolojik gözlemlere bağlı olarak 5.0 mm/yıl ve Gürsoy ve diğ. (2003) çalışmasında kullanılan paleomanyetik yöntem sonucunda ise 6.0 mm/yıl olarak ortaya konulmuştur.

Diğer yandan gelişen uzay jeodezisi ile birlikte Barka ve diğ. (1999) GPS gözlemlerine dayanarak Kıbrıs Yayı'nın doğu ucundaki Misis ve Karataş-Osmaniye Faylarının ayırdığı Anadolu-Afrika levha sınırında 8.0 mm/yıl hızında bir normal bileşenli sol yanal kaymadan söz etmektedir. Ayrıca McClusky ve diğ. (2000) çalışmasında Arabistan levhasının 18-25 mm/yıl ile kuzeye doğru gidişinin DAFZ boyunca sol yanal doğrultu atımlı 9±1 mm/yıl'a karşılık gelen bir harekete neden olduğu vurgulanmıştır. Zamanla artan GPS gözlemlerinin bir sonucu olarak DAFZ için kayma hızları Hazar Gölü-Palu ve Palu-Türkoğlu arasındaki segmentlerde sırasıyla ortalama 10.0±0.3 ve 9.9±0.2 mm/yıl şeklinde kestirilmiştir (Reilinger ve diğ, 2006). Aynı çalışmada daha güneye inildikçe kayma hızlarının azaldığı ve Türkoğlu-Antakya arasındaki segmentte ortalama 6.8±0.3 mm/yıl sol yanal doğrultu bileşeni ve 6.4±0.3 mm/yıl normal fay bileşeni belirlenmiştir.

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin Karasu, Toprakkale, Osmaniye-Karataş ve Yumurtalık Fayları özelinde kayma hızları hakkında literatürde sınırlı sayıda güncel ve detaylı çalışma bulunmaktadır. Bu bağlamda, 1991-2004 yılları arasındaki GPS gözlemlerini baz alarak Meghraoui ve diğ. (2011) kayma hızlarını Doğu Anadolu

Fayı için 8.8±0.3 mm/yıl ve Karataş-Osmaniye Fayı için 3.6±0.6 mm/yıl olarak belirlemiştir. Ayrıca daha önce yayınlanmış çalışmalarda elde edilen GPS çözümleri ve hız alanlarının birleştirilmesi ile ortaya koyduğu bakış açısıyla Nocquet (2012) DAFZ'nin Arabistan ve Anadolu levhalarını sınırlayan segmenti için 8-10 mm/yıl, güneyde Türkoğlu'ndan başlayarak Ölü Deniz Fayı'na kadar uzanan segmenti için 2-3 mm/yıl ölçeğinde hız kestiriminde bulunmuştur.

Adana, Osmaniye, Hatay ve Gaziantep illerini de kapsayan Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için en güncel detaylı araştırma sıklaştırılmış GPS ağı noktalarındaki periyodik gözlemlere dayanan kayma hızlarının bölgesel ve yerel deformasyonlar perspektifinde analiz edildiği Mahmoud (2012) çalışmasıdır. Bu çalışmada, Antakya-Türkoğlu arasındaki Karasu Fayı'nın 4.0±1.0 mm/yıl sol yanal doğrultu atım ve 2.1±0.9-2.7±0.7 mm/yıl ters fay bileşenine sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca Karataş-Osmaniye Fayı üzerindeki 3.6±0.7-4.5±0.8 mm/yıl sol yanal doğrultu atımın 0.8±0.8-1.2±0.5 mm/yıl bir açılma rejimi ile desteklendiğinden söz edilmektedir. Bunun yanında aynı çalışmada Doğu Anadolu Fayı'nın ise 9.0±0.3 mm/yıl kayma hızı ile normal/ters fay bileşeni olmayan sol yanal doğrultu atımlı karakterine dikkat çekilmektedir. Diğer çalışmalarla örtüşen sonuçlarıyla ve GPS gözlem noktalarının çalışma alanındaki yüksek uzaysal çözünürlüğü ile öne çıkan Mahmoud (2012) çalışması bölgenin güncel tektoniğine ışık tutması açısından önemli bir referanstır.

Aktuğ ve diğ. (2016) çalışması ise, Kuzey Doğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki diri fayların kinematiğini Doğu Anadolu Fayı boyunca 10.3±0.7-10.5±0.6 mm/yıl sol yanal doğrultu atım ve 0.7±0.6-6.3±1.0 mm/yıl ters fay bileşeni ile açıklamaktadır. Bunun yanında, Karasu Fayı ve güneyinde 4.2±1.3-4.5±1.1 mm/yıl sol yanal doğrultu atım ve baskın bir 2.3±1.6 mm/yıl normal fay bileşeni göze çarpmaktadır. Ayrıca Karataş-Osmaniye Fayı üzerinde 2.7±1.4 mm/yıl sol yanal doğrultu atım ve 2.8±2.6 mm/yıl ters faylanma, daha kuzeyde ise 1.6±1.1 mm/yıl sağ yanal doğrultu atım ve 3.4±2.1 mm/yıl normal faylanma karakteri bölgedeki fay kinematiği açısından önemli diğer bulgulardır.

InSAR tekniği, SAR uydu görüntüleri ile geniş alanlardaki yüzey deformasyonlarının izlenebildiği yeni bir jeodezik tekniktir. Literatürde Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin kinematiğini ortaya koyan bir InSAR çalışması bulunmazken DAF çevresindeki sınırlı sayıda çalışma Walters ve diğ. (2014) ile Cavalié ve Jónsson (2014) tarafından

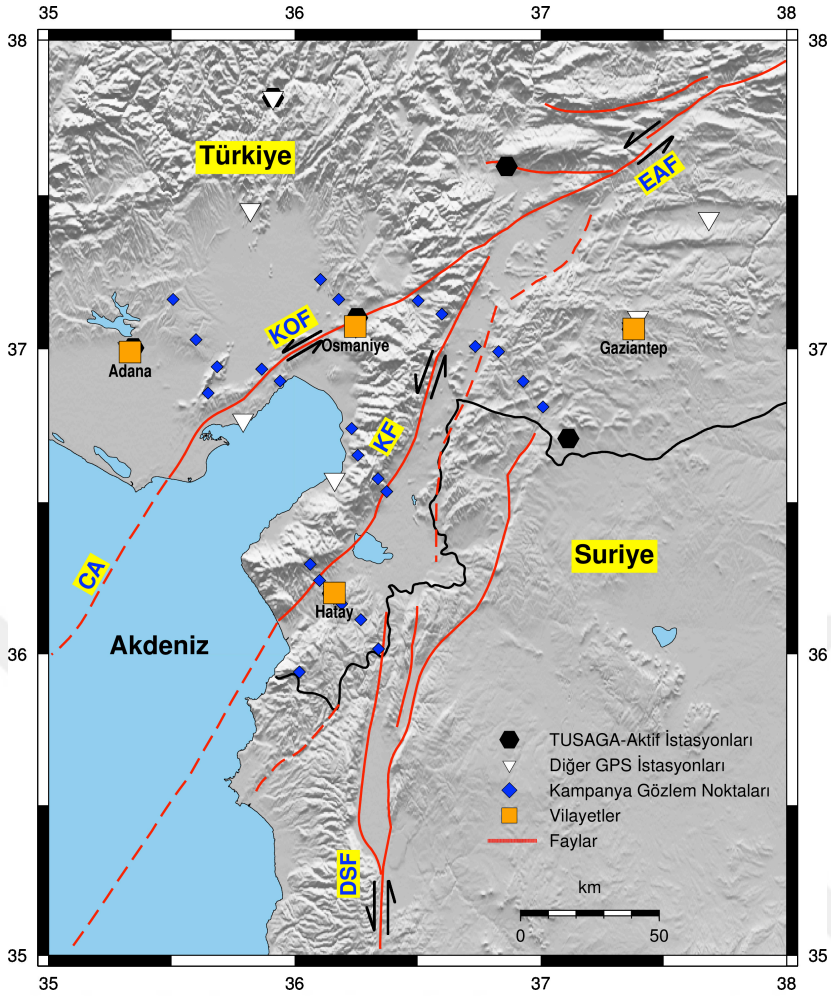
gerçekleştirilmiştir. GPS gözlemleri ile desteklenen bu InSAR çalışmalarında Walters ve diğ. (2014) DAF kayma hızını 8.0±0.1 mm/yıl olarak belirlemiş, Cavalié ve Jónsson (2014) ise DAF için 13 mm/yıl kayma hızı ve 4.5 km kilitlenme derinliği öne sürmüştür. Cavalié ve Jónsson (2014), bu sığ kilitlenme derinliğinin olası bir asismik kayma ya da dar bir sismojenik yapıdaki yüzeye yakın bir elastik gerinim birikimi ile açıklanabileceğini savunmaktadır.

Literatürdeki bu çalışmalar göstermektedir ki Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin doğusundaki Doğu Anadolu Fayı üzerinde fay kayma hızları en büyük değerlerini alırken Kahramanmaraş üçlü kavşak noktasının batısındaki Karataş-Osmaniye Fayı ve güneyindeki Karasu Fayı üzerinde kayma hızları görece azalmaktadır. Doğu Anadolu Fayı'nın transfer ettiği sol yanal doğrultu atımlı hareket Karataş-Osmaniye Fayı ve Karasu Fayı tarafından paylaşılmaktadır. Buna karşın hem Karataş-Osmaniye Fayı hem de Karasu Fayı üzerindeki eğim atımlı bileşenler Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki sistemin Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı gibi baskın doğrultu atımlı bir karaktere sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Ancak, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında birçok sürekli GPS istasyonu (TUSAGA-Aktif ve kamu kurumlarına ait CORS ağlarının istasyonları) ile yeni kampanya ölçmelerinin de dahil edildiği yüksek uzaysal ve zamansal çözünürlüklü güncel bir jeodezik veri setinden faydalanılmıştır. Bu sayede, Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki diri fayların kayma hızları, kilitlenme oranları ve derinlikleri yüksek prezisyonlu olarak kestirilebilmiş ve zengin jeodezik veri seti yardımıyla güncel gerinim birikimine neden olan fay mekanizma bileşenleri belirlenebilmiştir.

3. GPS TEKNİĞİ KULLANILARAK TEKTONİK HAREKETLERİN GÖZLEMLENMESİ

3.1 GPS Gözlem Ağı

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki diri faylara dair uzun dönem deformasyonların bölgesel davranışının kontrol edilmesi ve fay kinematiğinin güncel olarak tanımlanabilmesi için bu tez çalışması kapsamında geniş bir GPS gözlem ağı oluşturulmuştur. Bu GPS gözlem ağı, TUSAGA-Aktif ağının bölge civarındaki sürekli GPS gözlem istasyonları, bölgedeki kamu kurumları tarafından yerel ölçekte işletilen sürekli GPS gözlem istasyonları ve kampanya GPS gözlem noktalarından oluşmaktadır. Aynı zamanda gözlem ağı bünyesinde fayların kinematiğinin anlaşılmasına yönelik uygun dağılımda ve sıklıkta kampanya GPS gözlem noktalarından oluşan ve fay doğrultularına dik yönde konumlandırılan profiller yer almaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Çalışma bölgesinde oluşturulan GPS gözlem ağı. Siyah çokgenler TUSAGA-Aktif istasyonlarını, beyaz ters üçgenler bölgedeki kamu kurumlarına ait diğer sürekli GPS istasyonlarını, mavi baklava simgeleri tez çalışmasında kullanılan kampanya GPS gözlem noktalarını, sarı üçgenler bölgedeki diğer kampanya GPS gözlem noktalarını ve turuncu kareler ise çalışma bölgesindeki vilâyetleri göstermektedir. Kısaltmaları verilen önemli jeolojik yapılar Doğu Anadolu Fayı (EAF), Ölü Deniz Fayı (DSF), Karasu Fayı (KF), Karataş-Osmaniye Fayı (KOF), Kıbrıs Yayı (CA), K.Maraş üçlü kavşak noktası (KTJ) ve Hatay üçlü kavşak noktası (HTJ) şeklindedir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır.

TUSAGA-Aktif ağı istasyonları ile diğer yerel sürekli GPS istasyonları tektonik hareketlerin gözlemlenmesi amacıyla tesis edilmedikleri için lokal tektonik problemlerin çözümü için yetersiz kalabilmektedir. Bu aşamada, tektonik açıdan detaylı olarak izlenecek her bir fay segmenti için faya yakın alanda ve uzak alanda tesisli jeodezik gözlem noktalarına ihtiyaç vardır. Faylara yakın alanlardaki gözlemler ile fayların kilitlenme derinlikleri prezisyonlu bir şekilde kestirilebilir, fay düzlemlerinden uzak alanlarda yapılan gözlemler ile genel blok davranışı tanımlanabilmektedir. Bu anlamda, faylara yakın alanda ve uzak alanda

gerçekleştirilen GPS gözlemlerinin fonksiyonu yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur (Bohnhoff ve diğ, 2016; Halıcıoğlu ve diğ, 2009; Taskin ve diğ, 2003). Bu nedenle yüzeyden yapılan GPS gözlemleri ile derinlik boyutunun kontrolü için fay düzlemlerine dik olarak ve kilitlenme derinliklerinin yaklaşık $\pm 1/\sqrt{3}$ katı uzaklıkta izleme yapılması gerekir (Halıcıoğlu ve diğ, 2009; Kutoglu ve Akcin, 2006). Gözlem noktaları tesis edilirken fay segmentleri üzerindeki deformasyonların büyüklüklerine ve bu deformasyonların izleneceği alana bağlı olarak yeterli sayıda nokta gözlem ağına dahil edilir (Halıcıoğlu ve diğ, 2009; Kutoğlu ve diğ, 2009). Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde meydana gelen depremlerin odak derinlikleri göz önüne alındığında ve Mahmoud (2012) çalışmasına göre bölgedeki önemli fay segmentleri için kilitlenme derinlikleri 15 km'den daha sığdır. Buna göre, bu tez çalışmasında kilitlenme derinliklerinin kestirilebilmesi için yakın alan GPS gözlemleri fay düzlemine 10 km'den daha yakın bir mesafede gerçekleştirilmiştir.

Fay kinematiğinin anlaşılması için ortaya konulan bu stratejiye uygun olarak izleme yapılacak alanda yer noktası şeklinde tesis edilen kampanya GPS gözlem noktalarının yanı sıra çalışma bölgesindeki GPS gözlemleri yapmaya elverişli ve pilye olarak tesisli bir Harita Genel Komutanlığı (HGK) noktasından da faydalanılmıştır (Şekil 3.2).

Şekil 3.2 : Kampanya GPS gözlem ağı nokta tesis tipi örnekleri - yer noktası (solda) ve HGK pilye (sağda).

Bu tez çalışmasında analizlere dahil edilen GPS noktalarının yıllara göre gözlem durumunu gösteren özet tablo Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kampanya noktalarında ve sürekli GPS istasyonlarında yapılan gözlemler ile ilgili detaylı epok bilgisi ekte verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Gözlem yapılan yıllara göre GPS nokta sayıları.

	Gözlem Yapılan Yıllar							**Ait Olduğu Kurum**
	2009	**2010**	**2011**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	
Kampanya Nokta Sayısı	24	24	23	-	-	-	20	-
Sürekli GPS İstasyon Sayısı	-	-	-	22	22	22	22	TKGM (TUSAGA-Aktif ağı)
	-	-	-	-	-	-	10	Belediyeler (Yerel CORS ağları)

3.2 Kampanya GPS Gözlem Çalışmaları

Doktora tez çalışmasının saha çalışmaları arazide tesisli mevcut kampanya noktalarının gözlem yapmaya uygun olup olmadıklarının tespit edildikleri istikşaf çalışması ile başlamıştır. Buna bağlı olarak istikşaf sonuçlarına göre planlanan kampanya GPS ölçmeleri 7-17 Eylül 2019 tarihleri arasında 20 kampanya gözlem noktasında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.2).

Kampanya ölçmelerinde izlenecek GPS gözlem stratejisi, çalışma dahilindeki tüm kampanya noktalarında 15 saniye veri örnekleme aralığı ile farklı iki gün içerisinde en az sekizer saatlik iki oturum halinde toplam 16 saatlik GPS gözlemlerinin gerçekleştirilmesi şeklinde oluşturulmuştur. Nokta tesis tipi yer noktası olan kampanya gözlem noktalarında olası anten yükseklik problemlerini en aza indirebilmek ve çevresel koşulların ölçme oturumları üzerindeki olumsuz etkilerinin önüne geçebilmek için sabit yükseklikli GPS gözlem ekipmanları (zincirli tripod) kullanılmıştır (Şekil 3.3). Kampanya ölçmeleri sırasında kullanılan GPS ekipmanları ile ilgili detaylı bilgi Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : 2019 yılında GPS ölçmeleri yapılan kampanya noktaları.

Nokta Adı	Nokta Tesis Tipi	Ölçme Durumu	Ölçme Yapılan GPS Günü
PT01	Yer Noktası	Ölçüldü	258-259
PT02	Yer Noktası	Ölçüldü	258-259
PT04	Yer Noktası	Ölçülemedi	-
PT05	Yer Noktası	Ölçüldü	258-259
PT07	Yer Noktası	Ölçülemedi	-
PT08	Yer Noktası	Ölçüldü	254-255
PT09	Yer Noktası	Ölçüldü	254-255
PT12	Yer Noktası	Ölçüldü	254-255
PT24	Yer Noktası	Ölçülemedi	-
PT26	Yer Noktası	Ölçüldü	254-255
PT30	Yer Noktası	Ölçüldü	254
PT31	Yer Noktası	Ölçüldü	256-257
PT33	Yer Noktası	Ölçüldü	256-257
PT34	Yer Noktası	Ölçüldü	256-257
PT35	Yer Noktası	Ölçüldü	256-257
PT36	HGK Pilye	Ölçüldü	256-257
PT37	Yer Noktası	Ölçüldü	256-257
PT38	Yer Noktası	Ölçüldü	256-257
PT39	Yer Noktası	Ölçüldü	250-251-260
PT40	Yer Noktası	Ölçüldü	250-251-260

Çizelge 3.2 (devam) : 2019 yılında GPS ölçmeleri yapılan kampanya noktaları.

Nokta Adı	Nokta Tesis Tipi	Ölçme Durumu	Ölçme Yapılan GPS Günü
PT42	Yer Noktası	Ölçüldü	250-251
PT43	Yer Noktası	Ölçüldü	250-260
PT46	Yer Noktası	Ölçülemedi	-
PT47	Yer Noktası	Ölçüldü	258-259

Çizelge 3.3 : Kampanya ölçmeleri sırasında kullanılan GPS ekipmanları.

GPS Alıcısı Bilgisi*	GPS Anten Bilgisi*
Ashtech UZ-12 (Z-Xtreme Receiver)	ASH701975.01A (Geodetic IV, Rev A)
Thales Z-Max (Z-Max Receiver)	THA800961+REC (Thales and Ashtech 800961)
* GPS alıcı ve anten modelleri NGS (National Geodetic Survey) kodları ile verilmiştir.	

Şekil 3.3 : Tech2000 sabit yükseklikli GNSS ölçme ekipmanı (zincirli tripod).

2019 yılı kampanya GPS gözlem çalışmaları çerçevesinde gözlem yapılan yer noktası (PT40) ve HGK pilye (PT36) tesisleri için görünümler Şekil 3.4'de verilmiştir. PT39 ve PT40 kampanya gözlem noktalarında GPS alıcısındaki batarya problemleri sebebiyle ölçmeler sonraki günlerde yinelenmiştir.

Şekil 3.4 : Doktora tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen 2019 kampanya GPS gözlem çalışmaları. Yer Noktası-PT40 (solda) ve HGK Pilye-PT36 (sağda).

3.3 GPS Verilerinin İşlenmesi

3.3.1 GAMIT Adımı ve sonuçlar

Doktora tez çalışması kapsamında, 2019 yılına dair güncel kampanya GPS verilerinin geçmiş yıllarda aynı gözlem noktalarındaki arşiv verileri ile TUSAGA-Aktif ağının ve kamu kurumlarının himayesindeki yerel sürekli GPS istasyon verilerinin birlikte işlenmesi yoluna gidilmiştir. Kampanya GPS gözlem verileri 2009, 2010, 2011 ve 2019 yıllarına aittir. Bu aşamada öncelikle, işlenecek ham veri dosyalarının GPS alıcılarının dosya kayıt formatlarından bağımsız bir format olan ortak RINEX (Receiver INdependent EXchange) formatına çevrilmesi gerekir. RINEX formatına çevrilen verilerin analizler öncesinde TEQC programı (Estey ve Meertens, 1999) ile kalite kontrolleri de yapılmıştır. Kampanya GPS gözlem noktalarında ve sürekli GPS gözlem istasyonlarında toplanan veriler Reilinger ve diğ.

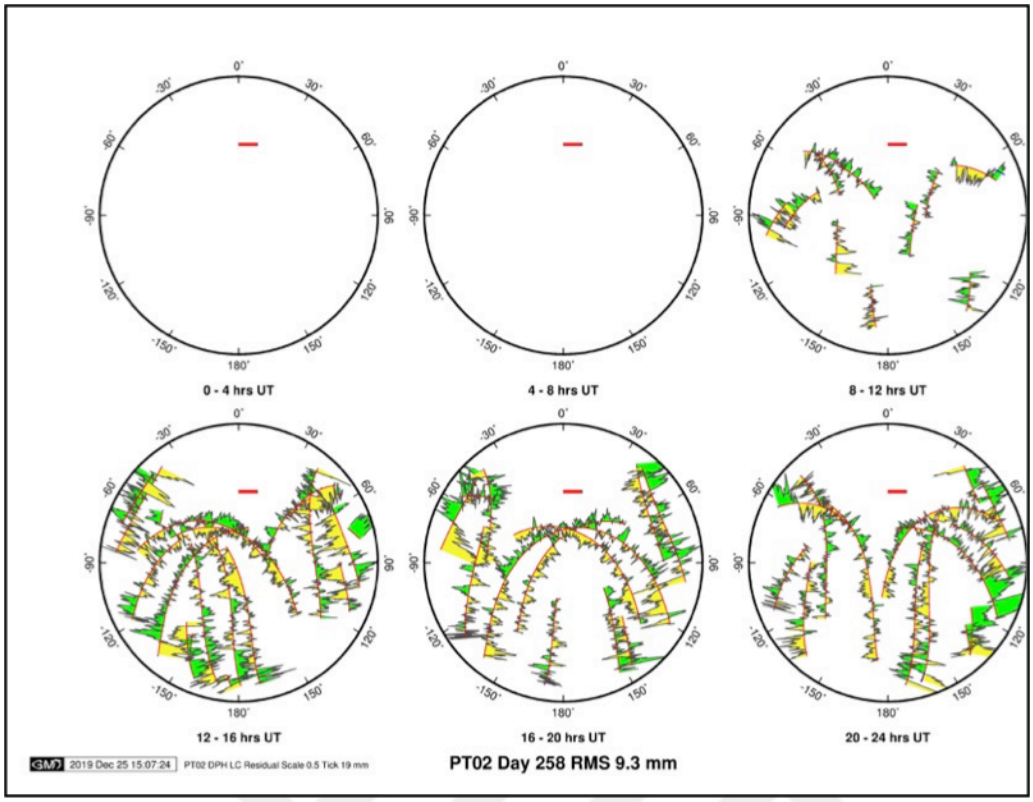
(2006) çalışmasında detaylandırılan veri işlem stratejisine uygun olarak Massachusetts Teknoloji Enstitüsü Yer Atmosfer ve Gezegen Bilimleri Bölümü (MIT EAPS, ABD) tarafından geliştirilen GAMIT/GLOBK yazılımı ile işlenmiştir (Herring ve diğ, 2015b; King ve Bock, 2002). Veri işlem sürecinde öncelikle, öncül kalite kontrolü yapılan RINEX formatına çevrilmiş kampanya gözlem noktaları ile sürekli GPS istasyon verileri ve değerlendirme için düzenlenen gerekli bilgiler (alıcı ve anten tipleri, anten yüksekliği, vb.) analizi yapılacak GPS günlerine ait klasörlere eklenmiştir. Uluslararası GNSS Servisi (IGS)'nin ürettiği hassas yörünge bilgisi SP3 (Standard Product 3) formatında SOPAC (Scrips Orbit and Permanent Array Center) sunucusundan alınmıştır. Yer dönme parametreleri (ERP; Earth Rotation Parameters), USNO (United States Naval Observatory) değerlerinden alınarak kullanılmıştır. Güneşten kaynaklanan radyasyon basınç etkileri için 9 parametreli Berne modeli, katı yerkabuğu gelgit etkisi için IERS03 modeli, troposferik etkiler için Saastamoinen troposferik modeli ile VMF1-Vienna Mapping Function 1 (Viyana İzdüşüm Fonksiyonu 1) yaklaşımı, gravite alanı için EGM08 modeli, GPS anten faz merkezleri için yüksekliğe bağlı model, faz belirsizlik çözümü için taşıyıcı dalga fazlarının iyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonu, iyonosferik gecikmeler için GPS gözlemlerine bağlı çiftli-farklar yöntemi ile yüksek dereceli iyonosferik terimlerin etkileri için GMAP modeli tercih edilmiştir. Değerlendirmeye IGS küresel izleme ağından 18 istasyon dahil edilmiştir (Çizelge 3.4). Bunun yanında çözümlerde TUSAGA-Aktif ve diğer kamu kurumlarına ait sürekli GPS gözlem ağlarında yer alan 30 istasyonun verisinden de faydalanılmıştır. Değerlendirmede uydu yükseklik açısı 10° olarak belirlenmiştir. GAMIT günlük çözümlerinin kontrolü nrms (normalize karesel ortalama hata) değerlerinin verilen 0.15-0.25 referans aralığında kalması ile sağlanmıştır. Sonrasında koordinat değişimini zamansal olarak izleyebilmek için zaman serileri üretilmiştir. Zaman serilerinin analizi neticesinde yer değiştirme hızlarının kestirimi mümkün olabilmektedir. Kaba hatalardan arındırılan koordinat zaman serileri için wrms (ağırlıklı karesel ortalama hata) değerlerinin referans aralığı yatay bileşenler için 2-4 mm ve yükseklik bileşeni için 10-15 mm olarak kabul edilmiştir (Herring ve diğ, 2015a; Tiryakioglu, 2012). Yerkabuğu ve atmosferden birikerek oluşan etkiler sebebiyle GPS gözlem noktasının rölatif olarak daha derin ve katı yerkabuğuna göre hareket etmesi sinyal içindeki rastgele yürüyüş gürültüsüne (random walk noise) katkı yapmaktadır (Langbein ve Johnson, 1997). Bu sebeple zaman serilerinde daha anlamlı kestirim hataları elde

edebilmek amacıyla tüm noktalarda rastgele yürüyüş gürültüsü genliği yatay bileşenler için 2 mm/√yıl olarak uygulanmıştır (McClusky ve diğ, 2000).

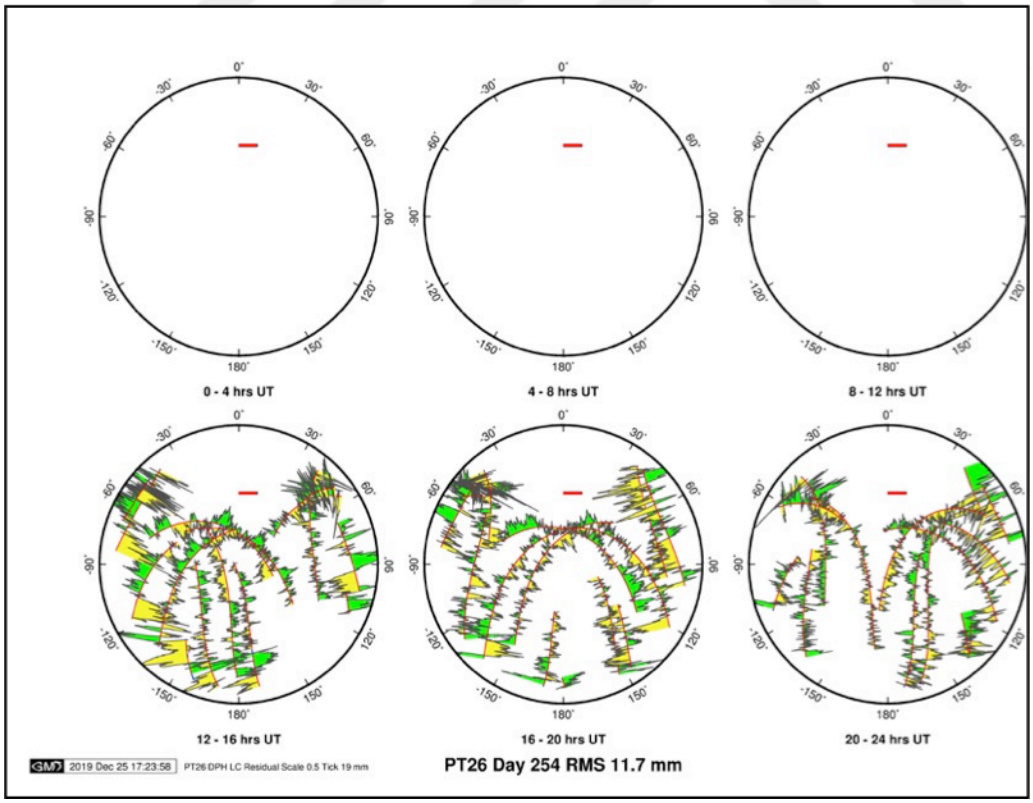
Çizelge 3.4 : GAMIT çözümlerinde değerlendirmeye dahil edilen IGS istasyonları.

İstasyon	İstasyon Mevki	İstasyon	İstasyon Mevki
ANKR	Türkiye-Ankara	NICO	Kıbrıs-Nicosia
BSHM	İsrail-Haifa	ONSA	İsveç-Onsala
BUCU	Romanya-Bucuresti	POTS	Almanya-Potsdam
DRAG	İsrail-Metzoki Dragot	RAMO	İsrail-Mitzpe Ramon
GLSV	Ukrayna-Kiev	SOFI	Bulgaristan-Sofia
GRAZ	Avusturya-Graz	TUBI	Türkiye-Gebze
ISTA	Türkiye-İstanbul	VILL	İspanya-Villafranca
MATE	İtalya-Matera	WTZR	Almanya-Bad Koetzting
MERS	Türkiye-Mersin	ZECK	Rusya-Zelenchukskaya

Statik GPS gözlem metodu ile yapılan ölçümlerde sinyal yansıma hataları, atmosferik etkiler ve kayıtçı-anten performansı gibi parametreler doğruluğu etkileyebilecek en önemli faktörlerdendir. Atmosferik düzensizlikler, anten faz merkezi değişimleri, uydu yörünge hataları, sinyal saçılma, vb. GPS gözlemlerinin içerdiği modellenemeyen tüm hataları barındıran taşıyıcı sinyal faz artıkları gözlem doğruluk ve hassasiyeti konusunda önemli bir parametredir. Kampanya gözlem noktalarında 2019 yılında yapılan ölçmelere sinyal faz artıkları sebebiyle getirilen düzeltmelerin azimut ve yükseklik açısına bağlı dağılımının grafik gösterimleri (skyplot) verilmiştir (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6).



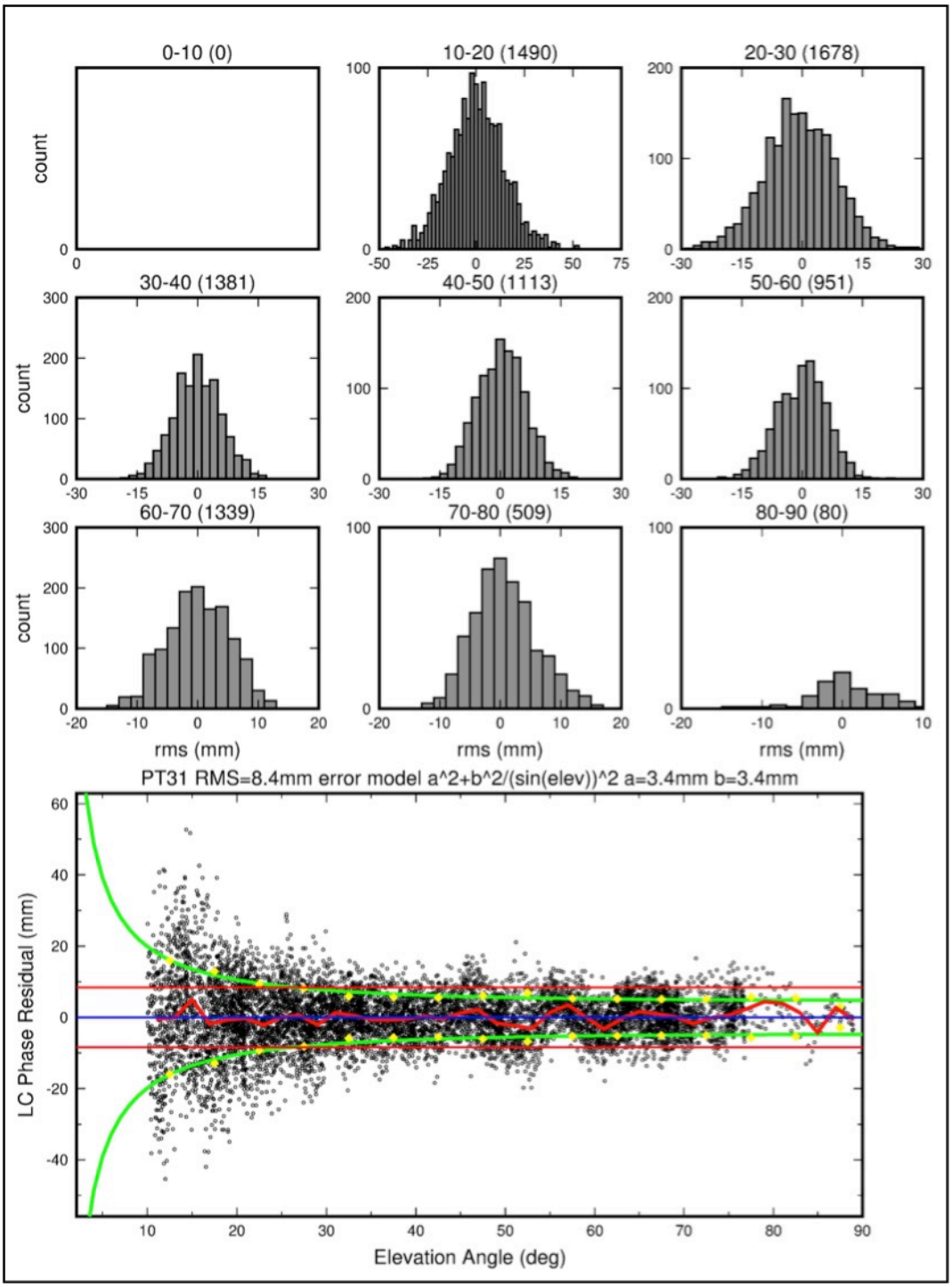
Şekil 3.5 : PT02 Kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 258. GPS günü (15 Eylül 2019) için sinyal faz artıkları analizi (skyplot) grafiği.



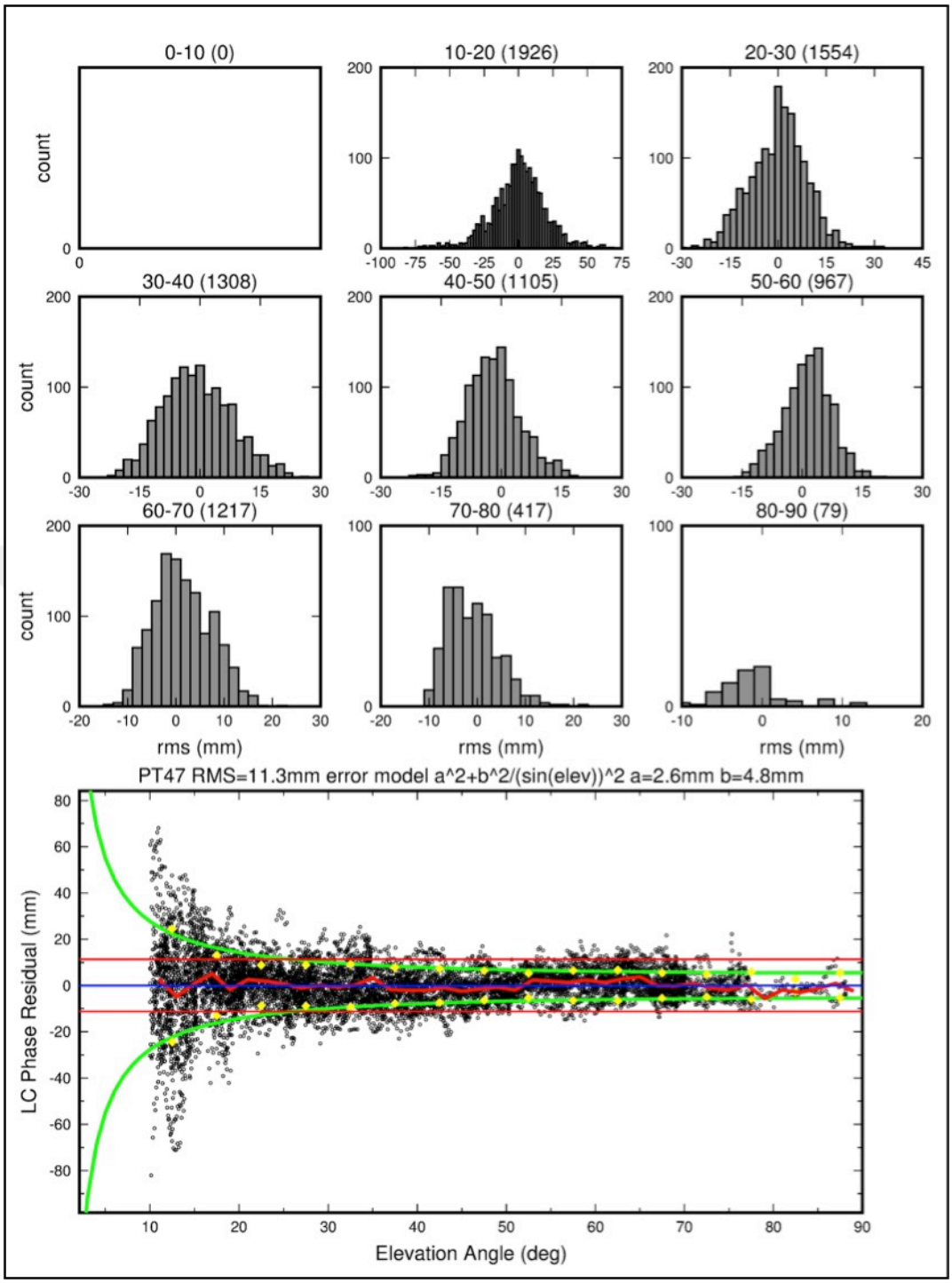
Şekil 3.6 : PT26 Kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 254. GPS günü (11 Eylül 2019) için sinyal faz artıkları analizi (skyplot) grafiği.

Skyplot grafiklerinde faz artıklarının gökyüzü projeksiyonunda gösterimi yapılmaktadır. 4 saat aralıklı olarak gözlemlerin sınıflandırıldığı bu grafiklerde sağ taraf (0 derece) kuzey yönü, yukarı taraf (90 derece) doğu yönünü ve her bir dairenin merkezi de zenit doğrultusunu işaret etmektedir. Kırmızı hatlar uydu yörüngelerini, mavi hatlar GPS analizlerinde kullanılmayan verilerin uydu zamanlarını, sarı ve yeşil kısımlar sırasıyla pozitif ve negatif faz artıklarını (düzeltmeleri), ortadaki kırmızı düz çizgi ise 10 mm'lik ölçeği göstermektedir. Dairelerin merkezinde uydu yükseklik açısı 90° olduğu durumda gözlem noktasında zenit açısı 0°'ye karşılık gelir. Dairenin merkezinden dışarıya doğru uydu yükseklik açısı azalır ve buna bağlı olarak iyonosferden bağımsız düzeltme miktarları artar. Bu skyplot analizlerinden yola çıkarak bir gözlem noktasındaki sinyal yansıma hatalarının etkisini değişik zamanlardaki yüksek faz artıklarından, su buharı gibi atmosferik etkileri ise tek bir zaman için kestirilen yüksek faz artıklarından çıkarmak mümkündür. PT26 kampanya GPS gözlem noktasında 11 Eylül 2019 günü (254. GPS günü) 12-16 (UTC) saatleri arasında gözlenen faz artıkları atmosferik gecikmelerin etkisini ortaya koymaktadır (Şekil 3.6).

Ayrıca faz artıkları ve uydu yükseklik açısı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak yani anten faz merkezi değişimini gözleyebilmek adına faz artıklarının karesel ortalama hatalarından oluşan sınıflar ile histogramlar oluşturulmuştur. Histogramlar her bir 10 derecelik uydu yükseklik açısı dilimlerinde ele alınmıştır. Histogramların altında ise kampanya gözlem noktalarına ait verilerin sinyal faz artıkları uydu yükseklik açısının bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8). Bu gösterimlerde uydulara ait yükseklik açılarına karşılık gelen LC faz düzeltme değerlerinin dağılımı verilmiştir. Siyah noktalar faz artıklarını, sıfır ekseni çevresinde salınım yapan kırmızı kalın çizgi uydu yükseklik açısının bir fonksiyonu olan ortalama faz artığını, yeşil çizgiler uydu yükseklik açısı için kullanılan modeli ve ince kırmızı çizgiler 1-sigma standart sapma sınırlarını temsil etmektedir.



Şekil 3.7 : PT31 kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 256. GPS günü (13 Eylül 2019) için sinyal faz artıklarının uydu yükseklik açısına bağlı analizi.



Şekil 3.8 : PT47 kampanya GPS gözlem noktası 2019 yılı 258. GPS günü (15 Eylül 2019) için sinyal faz artıklarının uydu yükseklik açısına bağlı analizi.

3.3.2 GLOBK Adımı ve sonuçlar

GAMIT aşamasında değinilen verilerin kalite kontrolüne yönelik analiz çalışmalarının dışında istenilen zaman aralıklarında istasyonlara ait koordinatlar da kestirilmektedir. Koordinat değişimini zamansal olarak izleyebilmek için zaman serileri üretilmektedir. Zaman serilerinin analizi neticesinde yer değiştirme hızlarının kestirimi mümkün olmaktadır. Doğru bir analiz için meteorolojik ve yerel koşullar ile zaman serilerindeki sıçramalar ilişkilendirilmeye çalışılmakta, herhangi bir açıklama getirilemeyen büyük anomaliler uyuşumsuz ölçü analizleri ile çözüm dışında bırakılmaktadır. Sonuç olarak, oluşturulan zaman serilerinden, kalman süzgeçleme yardımıyla yapılan trend analizi ile istasyonların hızları (amaca uygun olarak istenilen referans sistemine göre) belirlenebilmektedir. Şekil 3.9'de PT42 ve PT02 kampanya GPS gözlem noktaları, Şekil 3.10'de ise ONIY ve HAT1 TUSAGA-Aktif istasyonları için 2019 yılı kampanya dönemindeki GPS gözlemlerinin de dahil edildiği günlük konum değişimlerini gösteren örnek zaman serileri verilmiştir.

Günlük konum değişimlerinin yanı sıra, ONIY ve HAT1 TUSAGA-Aktif istasyonları için 2016-2018 dönemine dair günlük çözümlerin aylık bazda birleştirilmesiyle oluşturulan ve gözlem istasyonlarının aylık konum değişimini gösteren zaman serileri Şekil 3.11 ile verilmiştir. Buna göre, yine Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da da olduğu gibi wrms (ağırlıklandırılmış karesel ortalama hata) ve nrms (normalize edilmiş karesel ortalama hata) parametrelerine bakılarak GPS gözlem verilerinin güvenilirliği ve aynı zamanda model ile verinin uyumu kontrol edilmektedir.

$$wrms = \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n-u}\right)\Sigma\left(\frac{e}{\sigma}\right)^2}{\Sigma\left(\frac{1}{\sigma}\right)^2}} \tag{3.1}$$

$$nrms = \sqrt{\frac{\Sigma\left(\frac{e}{\sigma}\right)^2}{\mathrm{n-u}}} \tag{3.2}$$

e : kestirim değerlerinin ortalamasından olan sapma (artık değer-residual)

n : gözlem sayısı

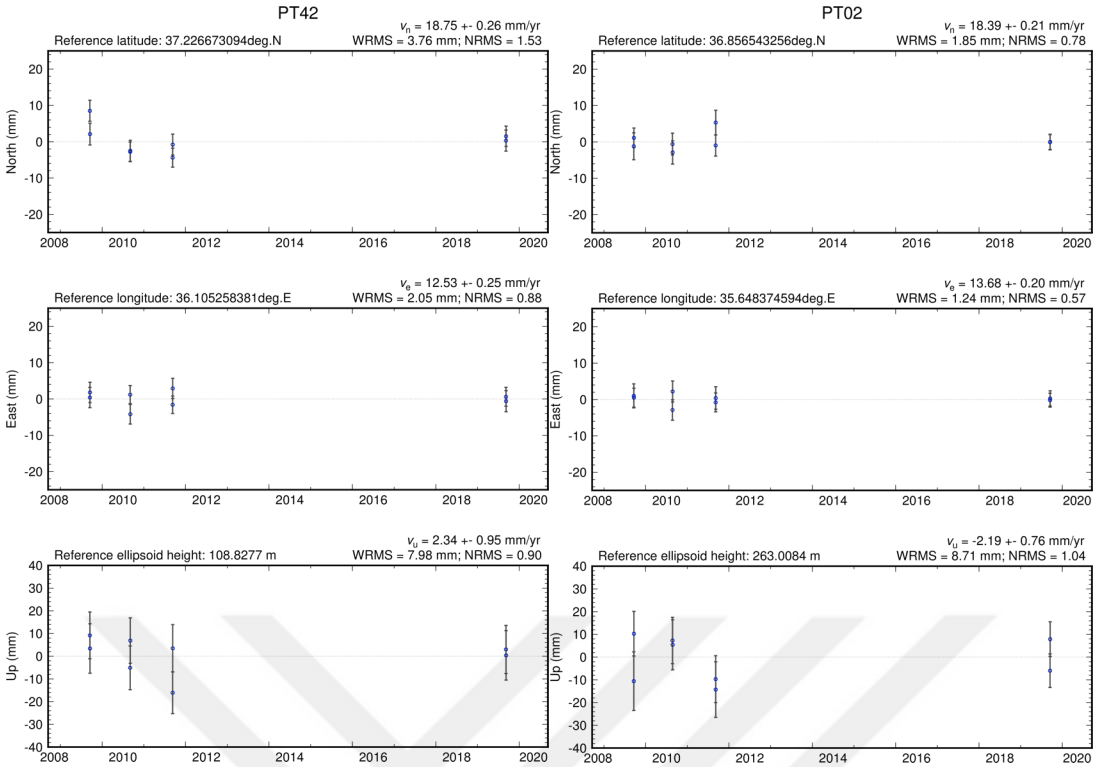
u : bilinmeyen sayısı

σ : standart sapma

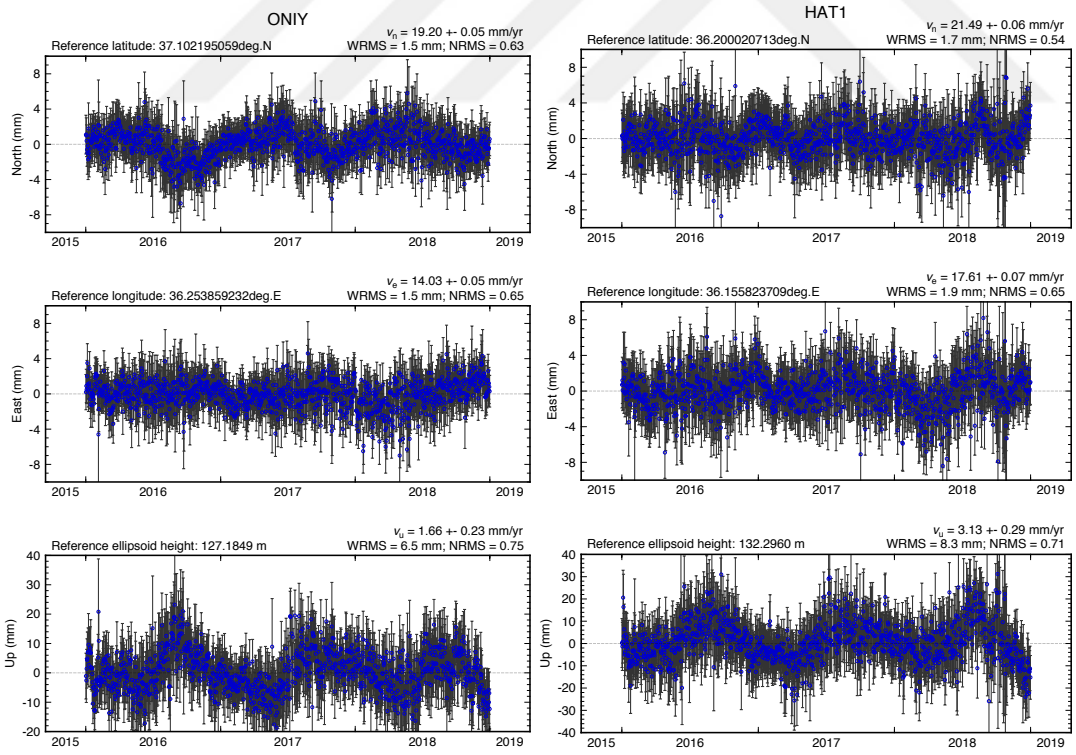
Zaman serisi tekrarlılıklarında üstteki grafik kuzey-güney bileşeni, ortadaki grafik doğu-batı bileşeni ve alttaki grafik yükseklik bileşenini göstermektedir. Yatay eksen zaman, düşey eksen ise ilgili bileşendeki mm ölçeğinde koordinat değişimini ifade etmektedir.

Genel olarak zaman serisi tekrarlılık analizleri sonucu kontrol parametrelerinden biri olan nrms değerleri yaklaşık 1 civarındadır. Bu sonuç yapılan zaman serisi analizlerinin güvenilir olduğunu ifade etmektedir. İstasyonlara ait zaman serilerinde görülen salınımlar Ay ve Güneş'in çekim etkileri, mevsimsel kutup hareketi, kara ve okyanus gel-gitleri, noktanın tesis edildiği ana kayaçların termal genleşmesi, vb. mevsimsel etkiler ile ilişkilendirilmekte ve detaylı trend anazlileri ile bu etkilerin sonuçları kestirilebilmektedir.

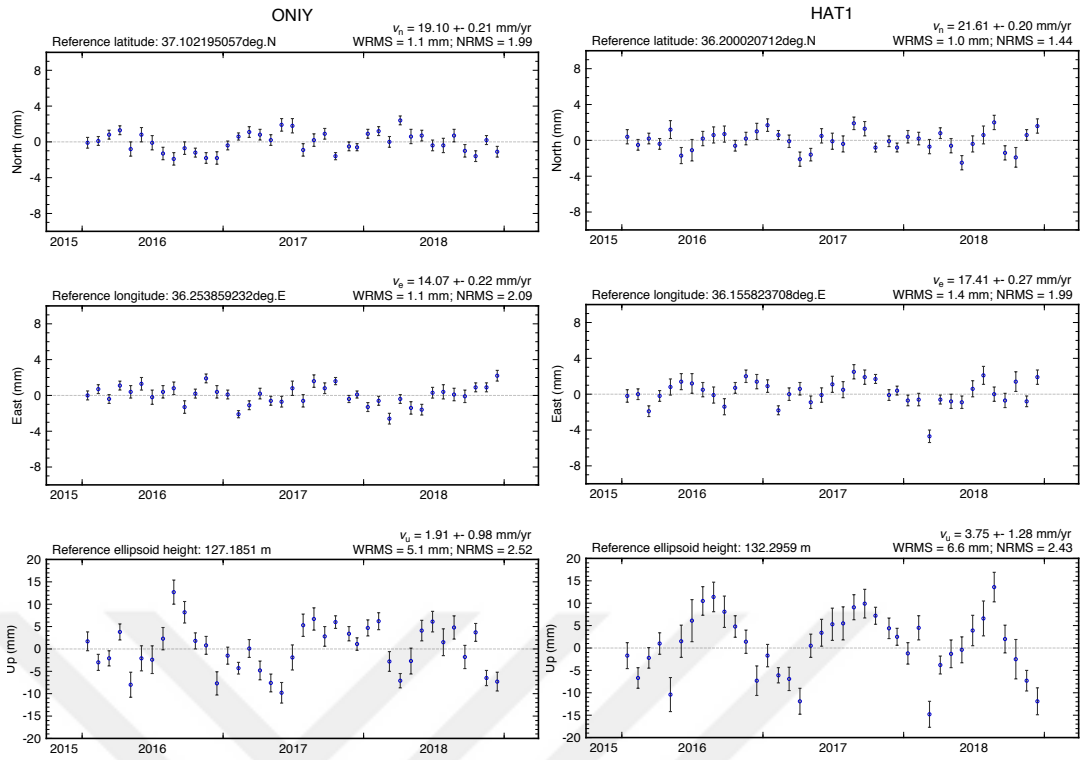
Bir diğer gösterge ise hem günlük hem de aylık bazda gözlem verilerinden elde edilen hız kestirim değerleridir. Hem günlük hem de aylık birleştirilmiş zaman serilerinde wrms ve hız kestirim değerleri göz önünde bulundurulduğunda uzun dönem yer değiştirmeler ışığında verinin güvenilirliği için olumlu çıkarımlar yapılabilir. Daha açık bir ifade ile zamansal çözünürlüğü günlük zaman serilerine göre düşük olan aylık birleştirilmiş zaman serileri de anlamlı kestirim değerlerine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır, bu da aynı gözlem istasyonlarından elde edilen daha az yoğun veri ve aynı veri işlem stratejisinin sonuca ulaşmak için yeterli olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3.9 : PT42 ve PT02 kampanya GPS gözlem noktaları için konum değişimini gösteren zaman serisi örnekleri (günlük).

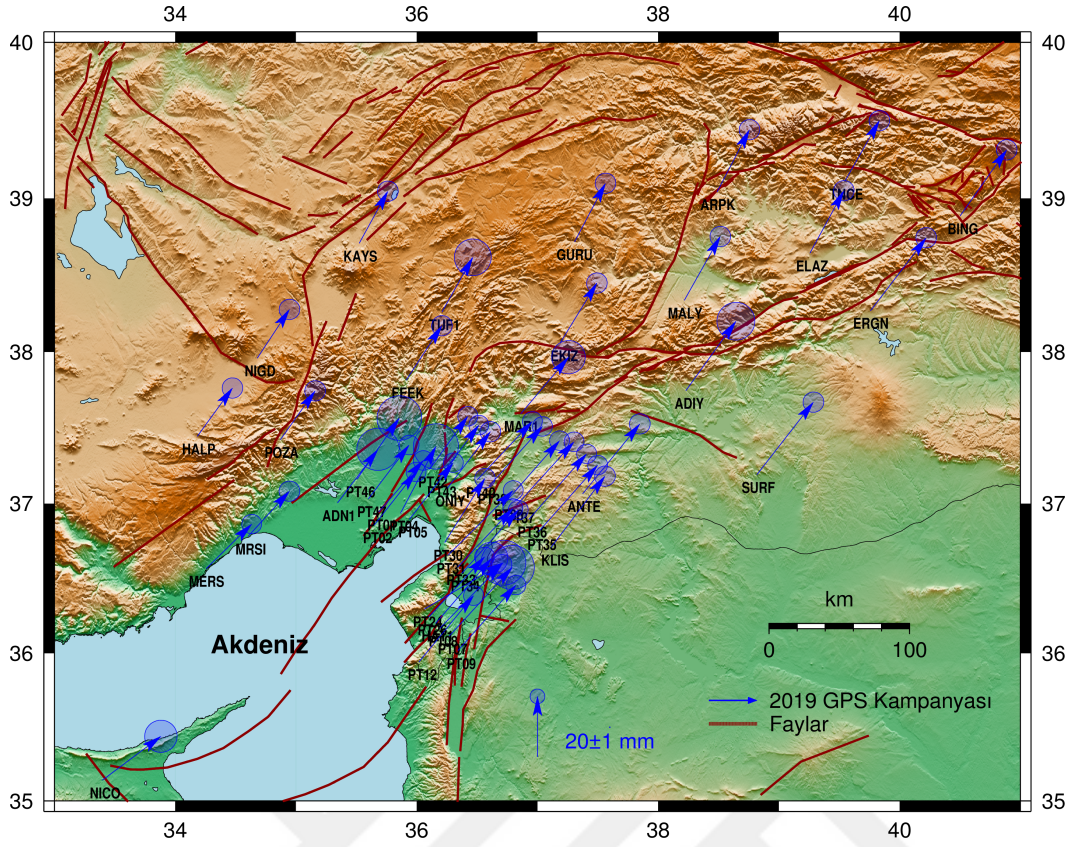


Şekil 3.10 : ONIY (Osmaniye) ve HAT1 (Hatay) TUSAGA-Aktif istasyonları için konum değişimini gösteren zaman serisi örnekleri (günlük).



Şekil 3.11 : ONIY (Osmaniye) ve HAT1 (Hatay) TUSAGA-Aktif istasyonları için konum değişimini gösteren zaman serisi örnekleri (aylık birleştirilmiş).

Zaman serilerinin kontrolü sonrasında kampanya GPS noktaları ve sürekli GPS gözlem istasyonlarından oluşan GPS gözlem ağının hareketi dünya üzerindeki tüm ana levha hareket ve yüzölçümlerine bağlı olarak elde edilen sıfır-net-dönüklük (no-net-rotation, NNR) ITRF2008 hız alanı içerisinde tanımlanmıştır (Şekil 3.12) (Altamimi ve diğ, 2012). Sıfır-net-dönüklük, tüm levhaların ağırlıklı ortalama hızlarının referans alındığı sistemde tanımlandığı için literatürde mutlak levha hareketleri olarak da bilinmektedir.



Şekil 3.12 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için 2019 yılı kampanya GPS gözlemleri ve TUSAGA-Aktif istasyon verileri kullanılarak elde edilen sıfır-net-dönüklük (no-net-rotation, NNR) ITRF2008 referans sisteminde tanımlı güncel GPS hız alanı. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri GEM GAF-DB veritabanından alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020).

Mutlak levha hareketlerinin yanı sıra birleştirilmiş hız çözümlerine bağlı olarak elde edilen yatay GPS hız alanları seçilen herhangi bir levhaya göre dönüşüm yapılarak rölatif biçimde de gösterilebilir. Bu rölatif hız alanı tanımı referans alınacak levha üzerinde yatay hızları minimum olan mümkün olduğunca fazla sayıda ancak güvenilirliği uzun yıllardır kabul edilen noktaların sabit kabul edilmesiyle sağlanır. Buna bağlı olarak levha sınırlarındaki ve levha içi fayların üzerindeki yamulma birikimlerini modelleyebilmek adına farklı referans sistemlerinde elde edilen GPS hız alanları analiz edilir ve birleştirilir.

Blok modelleme temelinde hem kayma hızlarının daha güvenilir bir şekilde kestirilebilmesi hem de GPS hız alanının uzaysal çözünürlüğünün artırılabilmesi için bu çalışma çerçevesinde kampanya GPS noktaları ile sürekli GPS istasyonları verilerinin analizleri neticesinde elde edilen güncel GPS hız alanı, çalışma bölgesi ve civarı için literatürdeki çalışmalardan elde edilen GPS hız alanı sonuçları ile birleştirilmiştir. Bu noktada kestirimi yapılan güncel GPS hız alanı ile literatürden

sağlanan GPS hız alanı çözümlerinin ortak bir refereans sistemi çatısı altında değerlendirilebilmesi için küresel bir yüzeyde Euler teoremine dayanan bir dönüşüm modeli tanımlanması gerekir. Bu dönüşüm modelinde bir referans GPS hız alanına göre dönüşümü yapılacak GPS hız alanında ve referans sistemde temsil edilen ortak noktalar için GPS hızları farklarının minimum olması sağlanarak 6 parametreli (3 öteleme ve 3 dönüklük) bir dönüşüm matrisi uygulanır. Dönüşüm modelinin doğruluğu ortak nokta sayısına bağlı olarak wrms (ağırlıklı karesel ortalama hata) değeri ile temsil edilir.

Bu doktora tez çalışmasında literatürdeki diğer GPS hız alanı çözümleri ile ortak nokta sayısının fazlalığı sebebiyle Reilinger ve diğ. (2006) çalışmasındaki hız alanı çözümü dönüşüm modelinde referans hız alanı olarak seçilmiştir. Birleştirilen GPS hız alanları için dönüşüm sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir. Buna göre, hız alanı çözümlerinin her biri referans hız alanı çözümü ile birleştirilirken dönüşüm modelinde 1 mm/yıl'dan daha küçük karesel ortalama hata değerlerine ulaşılmıştır.

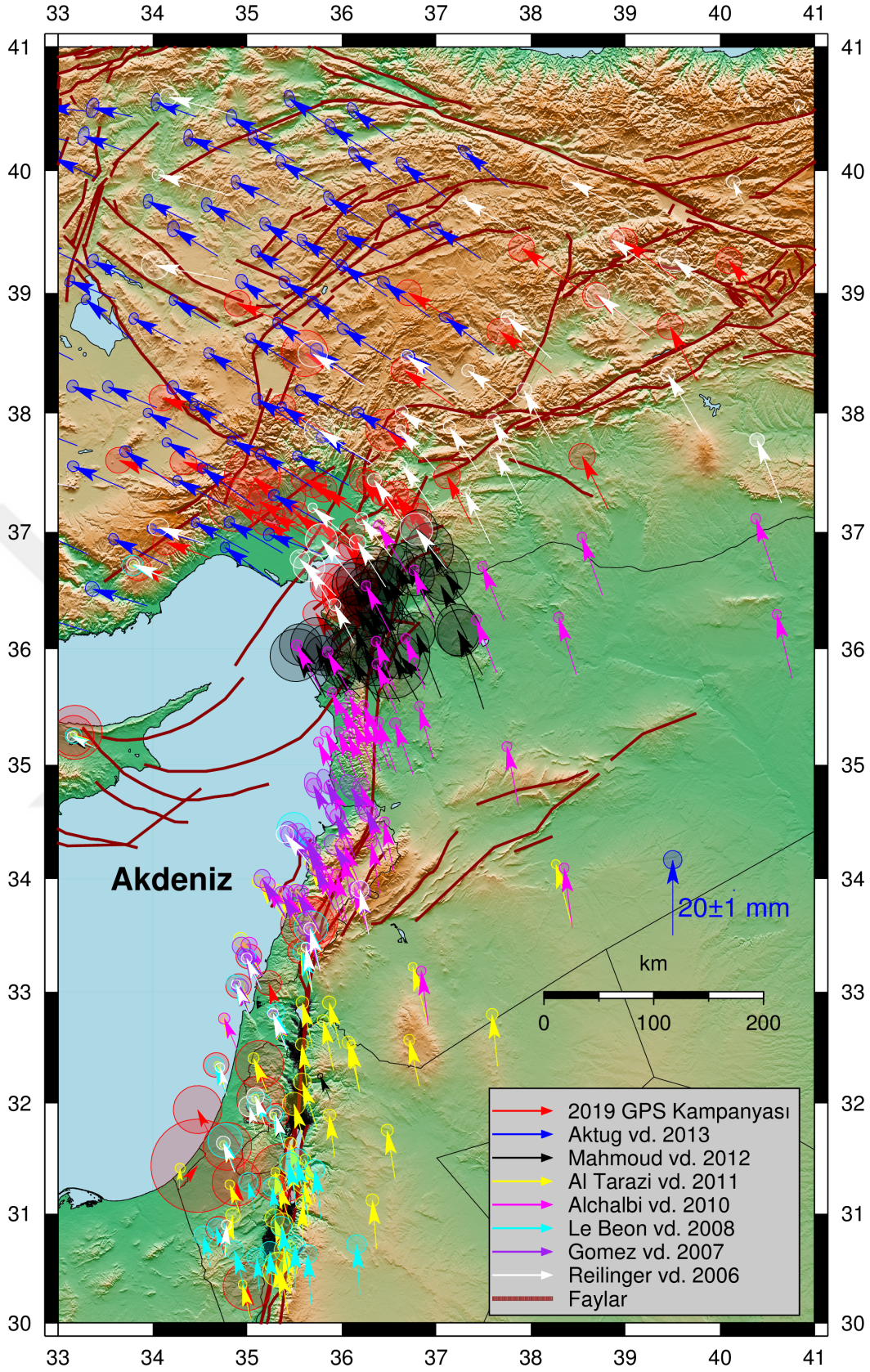
Çizelge 3.5 : Birleştirilen GPS hız alanları için dönüşüm sonuçları.

GPS Hız Alanı	**WRMS (mm/yıl)**	**Ortak Nokta Sayısı**
Bu çalışma	0.76	97
(Aktug ve diğ, 2013)	0.67	5
(Mahmoud ve diğ, 2013)	0.57	6
(Al-Tarazi ve diğ, 2011)	0.72	20
(Alchalbi ve diğ, 2010)	0.74	10
(Le Beon ve diğ, 2008)	0.71	32
(Gomez ve diğ, 2007)	0.77	5
Referans GPS Hız Alanı: (Reilinger ve diğ, 2006)		

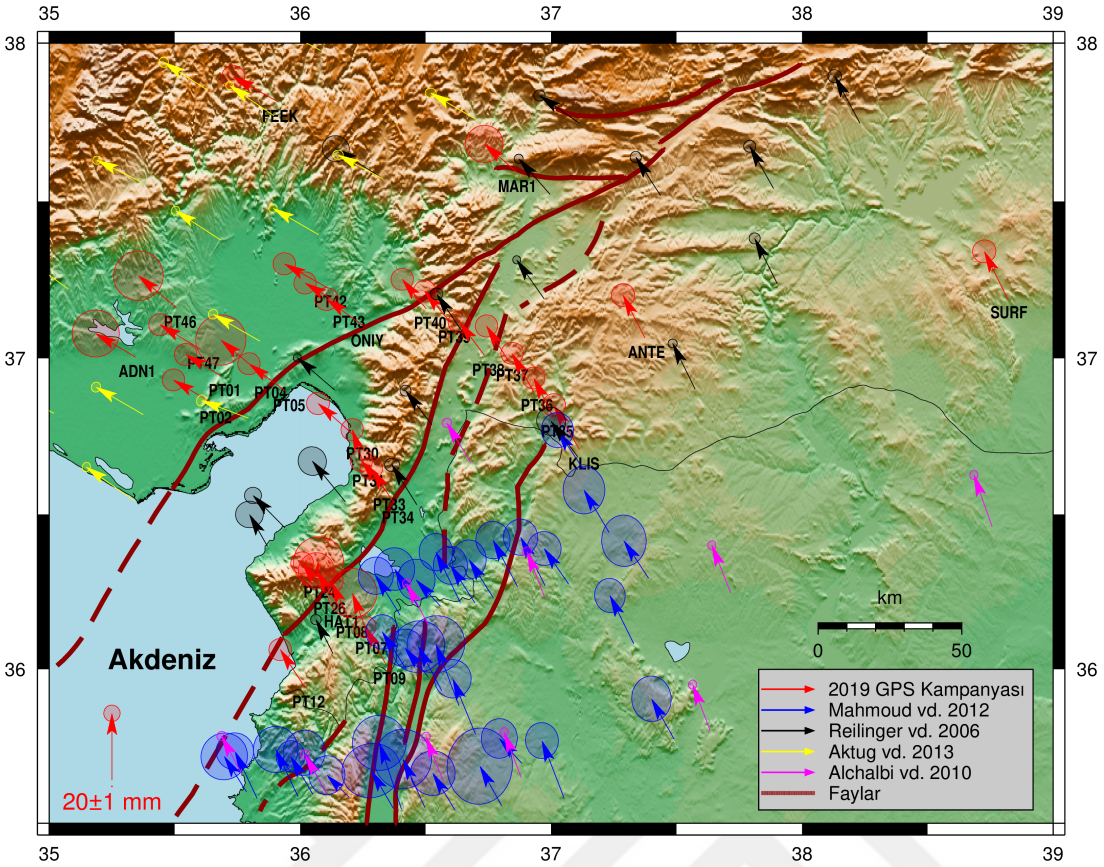
Bu dönüşüm sonucunda Çizelge 3.6'da verilen IGS istasyonları ile rigid olarak tanımlanan Avrasya levhası sabit alınarak ITRF2000 referans sisteminde elde edilen yatay GPS hız alanı Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve civarında geçmiş dönemlerde farklı çalışmalarla ortaya konulan hız alanı sonuçları ile birlikte gösterilmiştir (Şekil 3.13). Doktora tez çalışması kapsamında ele alınan çalışma bölgesine dair GPS hız alanının detaylı gösterimi ise Şekil 3.14 ile yapılmıştır.

Çizelge 3.6 : Referans sistemi tanımlamada kullanılan IGS istasyonları.

İstasyon	**İstasyon Mevki**	**İstasyon**	**İstasyon Mevki**
VILL	İspanya-Villafranca	POTS	Almanya-Potsdam
TIXI	Rusya-Tixi	WTZR	Almanya-Bad Koetzting
NRIL	Rusya-Norilsk	ONSA	İsveç-Onsala
BUCU	Romanya-Bucuresti	NYAL	Norveç-Ny Alesund
NICO	Kıbrıs-Nicosia	ZIMM	İsviçre-Zimmerwald
GLSV	Ukrayna-Kiev	HERS	Birleşik Krallık-Hailsham
BRUS	Belçika-Brussels	WSRT	Hollanda-Westerbork
GOPE	Çekya-Ondrejov	ZECK	Rusya-Zelenchukskaya
JOZE	Polonya-Jozefoslaw	ISTA	Türkiye-İstanbul
TLSE	Fransa-Toulouse	SOFI	Bulgaristan-Sofia
BOR1	Polonya-Borowiec	NVSK	Rusya-Novosibirsk
GRAZ	Avusturya-Graz	TRO1	Norveç-Tromsoe



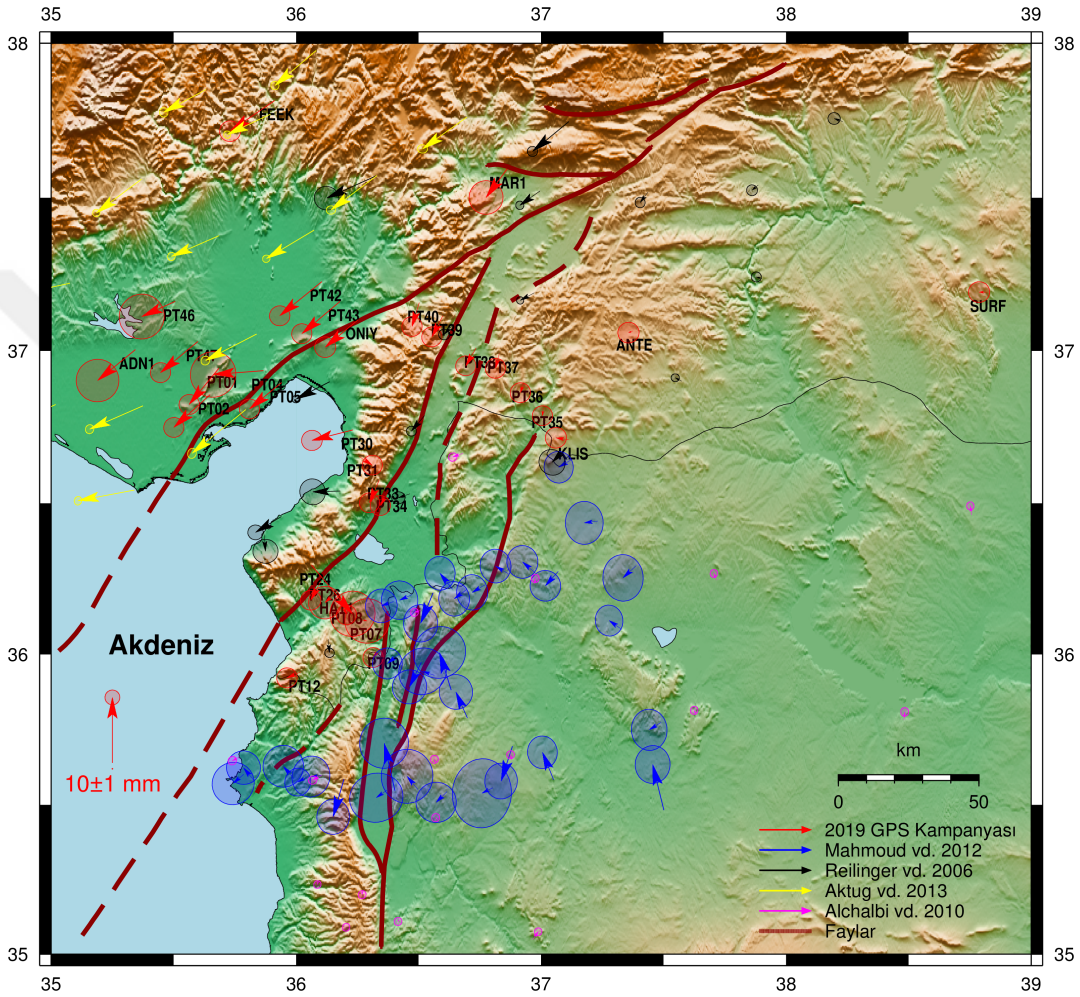
Şekil 3.13 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için doktora tez çalışmasından üretilen güncel GPS hız alanı ile literatürdeki diğer GPS hız alanı çözümlerinin birleştirilmesi sonucunda elde edilen ITRF2000 referans sisteminde Avrasya levhası sabit yatay GPS hız alanı. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri GEM GAF-DB'den alınmıştır (Styron ve Pagani, 2020).



Şekil 3.14 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için ITRF2000 referans sisteminde Avrasya levhası sabit yatay GPS hız alanının detaylı gösterimi. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilen Avrasya levhası sabit yatay GPS hız alanı ile genel blok davranışının aksine Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ölçeğinde bir alanda yamulma birikimi ve rölatif levha hareketlerinin görsel olarak izlenmesi oldukça zordur. Bu durumda hem Anadolu-Arabistan levha sınırı hem de levha içi faylar boyunca yamulma birikimlerinin ortaya konulabilmesi için Arabistan referans sisteminde tanımlı bir hız alanı tanımına ihtiyaç duyulmaktadır. 2019 yılı kampanya GPS gözlemleri sonucunda doktora tez çalışması kapsamında elde edilen güncel GPS hız alanı ile literatüdeki diğer GPS hız alanı çözümlerinin dönüşüm sonuçları Şekil 3.15'de Arabistan levhası sabit yatay GPS hız alanı şeklinde verilmiştir. Bu dönüşümde Arabistan blok hızı Mahmoud (2012) çalışmasında Avrasya-Arabistan blokları için yayımlanan Euler kutup parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Reilinger ve diğ. (2006) çalışmasında yayımlanan Euler kutup parametreleri kullanılarak elde edilen dönüşüm modelinin Mahmoud (2012) çalışmasından üretilen model ile arasındaki hız farklarının (residual) 1 mm'den daha az olduğu belirlenmiştir. Arabistan levhası sabit nokta hızları, Arabistan blok hızının

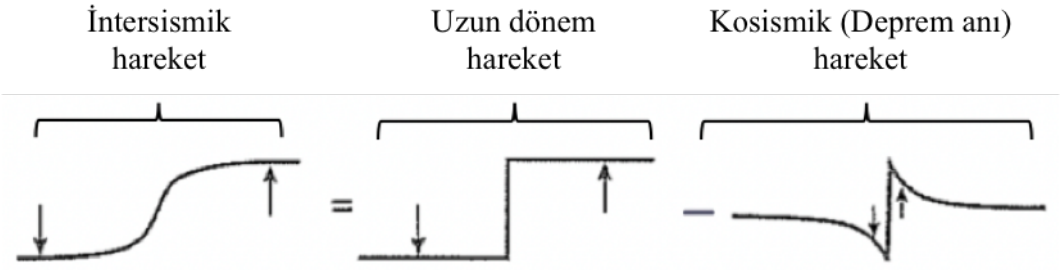
ITRF2000 referans sisteminde hesaplanan mutlak nokta hızlarından kartezyen düzlemde farklarının alınmasıyla elde edilen artık (residual) hızlardır. Buna göre özellikle DAFZ'nin güney bölümünde Osmaniye, Hatay ve Adana illerini kapsayan alanda tektonik açıdan karmaşıklığın ortaya konulmasının yanı sıra jeodezik gözlem ağı profillerinin üzerinde gözlenen farklı hızlara bağlı olarak fay lokasyonları ile bu faylara dair bir kilitlenmeden söz etmenin mümkün olduğu görülmüştür.



Şekil 3.15 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için ITRF2000 referans sisteminde Arabistan levhası sabit yatay GPS hız alanının detaylı gösterimi. Hız vektörleri %95 olasılıklı güven elipsleri ile birlikte gösterilmiştir. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır.

4. BLOK MODELLEME

GPS hızları noktasal olarak ele alındığında kampanya noktalarının ve sürekli GPS istasyonlarının yıllık hareketlerini tanımlamak için önemli bir göstergedir. Bu anlamda, kestirilen GPS hız değerleri gözlem noktalarının hareketlerinin birbirlerinden bağımsız olarak yorumlanabilmesi için yeterlidir. Ancak aktif tektonik bakış açısıyla gözlem yapılan noktaların birbirlerinden bağımsız olarak değerlendirilmesi yerine bu noktaların faylarla çevrelenmiş bloklar üzerinde yer aldığı ve bu blokların birbirlerine bağlı olarak hareket ettiği düşünülür. Blokların hareketlerine bağlı olarak yamulma birikiminin blokların rijit bir bütün olarak hareket etmesinden mi yoksa bloklar içi deformasyonlar sebebiyle mi ortaya çıktığı ise süregelen bir tartışmadır (Thatcher, 2009). Blok modelleme yaklaşımında (McCaffrey, 2002; Meade ve Hager, 2005) birbirinden bağımsız olarak bir kutup noktası etrafında dönme hareketi yapan elastik rijit blokların dönüklükleri ve yamulma birikimleri jeodezik gözlemlerden yararlanarak eş zamanlı olarak kestirilir. Bu yaklaşım, kosismik (deprem anı) hareket hızı ve intersismik blok hızı toplamının uzun dönem blok rotasyonel hızına eşit olduğu varsayımına dayanmaktadır (Şekil 4.1) (Savage, 1983).



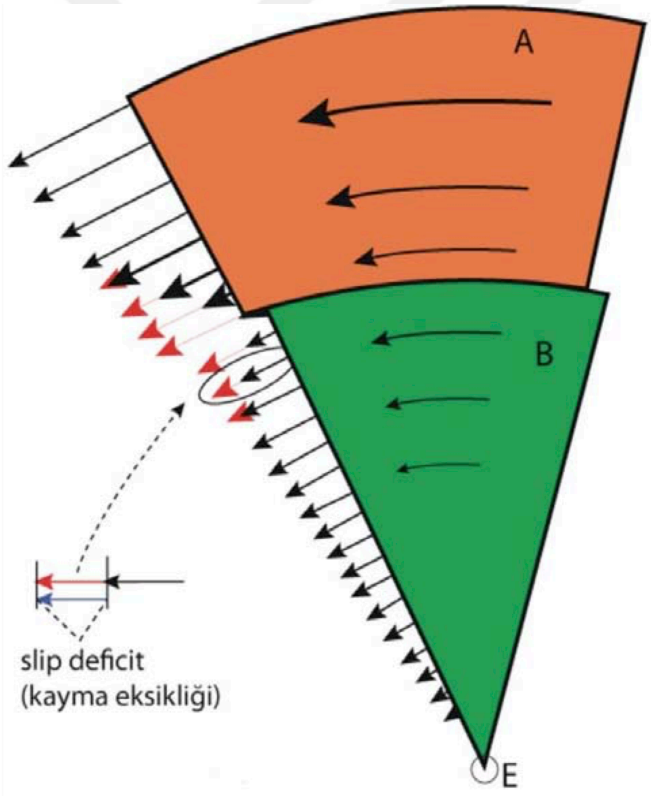
Şekil 4.1 : Blok sınırlarındaki hareketin fay boyunca neden olduğu deformasyon ve buna bağlı olarak oluşan deprem döngüsü.

Blok modelleme temelinde uzun dönem blok hızları levhaların rotasyonel hızları, *"V_R"*, ile ifade edilir. Ayırca yer kabuğunun kilitli sığ derinliklerinde ise fay düzlemi üzerinde blokların birbirlerine göre hareketine karşılık gelen ancak vektörel olarak ters yönde elastik bir yer değiştirme (elastik geri sekme-atım), *"V_E"*, söz konusudur. Bunun dışında civardaki görece daha kısa fayların etkisi, *"V_S"*, blok model

oluşturulurken ihmal edilebilir olsa da blok içi deformasyonların ortaya çıkmasında önemli bir etkendir (McCaffrey, 2005). Blokların intersismik hızları, *"V_I"*, tüm bileşenlerin vektörel toplamı olarak yazılır:

$$\vec{V}_I = \vec{V}_R + \vec{V}_E + \vec{V}_S \tag{4.1}$$

Bloklar intersismik dönemde sistematik olarak hareket etmelerine rağmen blok sınırlarındaki kayaçların sürtünmesine bağlı olarak bir mukavemet ile karşılaşır. Bu nedenle faylarla sınırlanmış blokların blok içi ve sınırlarında tektonik açıdan davranışları farklıdır. Oluşan sürtünme blok içinde ve sınırlarında gözlemlenen hızların farklı olmasına neden olmaktadır. Kayma eksikliği olarak ifade edilen bu hız farkı çoğunlukla depremle sonuçlanan yamulma birikimine yol açmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Blok modelleme yaklaşımı temelinde "A" ve "B" iki komşu tektonik blok olmak üzere aynı "E" Euler kutbuna bağlı bloklar arasındaki etkileşim. Bloklar arasındaki fayın tamamen ya da kısmen kilitli olması durumunda GPS gözlemlerinden elde edilen blok hızları siyah vektörler, serbest kayma olması durumundaki blok hızları kırmızı vektörler ile gösterilmiştir (Çakır, 2010).

Kilitlenme derinliği sismojenik tabaka içerisinde bir fayın mekanizmasına dair karakterini yansıtan önemli bir parametredir. Bir fay segmentinin kilitli olduğu ya da asismik krip hareketi (creeping) nedeniyle serbest kayma yaptığı fay etkileşim

parametresi (coupling fraction), *"phi"*, ile belirlenir (Yavasoglu, 2009). Phi parametresi matematiksel olarak,

$$\varphi = 1 - \frac{V_C}{V_R} \tag{4.2}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (Galgana ve diğ, 2007). Burada, "V_C" fay boyunca kısa dönem yer değiştirme hızını ve "V_R" uzun dönem kayma hızını (levha hızını) göstermektedir. Uzun dönem kayma hızı ile kısa dönem yer değiştirme hızının birbirine eşit olması durumunda asismik krip hareketi diğer bir ifade ile sürtünme olmaksızın serbest kayma söz konusu olmaktadır. Bu durumda phi parametresi "*0*" değerini almaktadır. Fay üzerinde bir yer değiştirmenin olmaması durumunda ise fay segmentinin tamamıyla kilitli olduğu ve buna bağlı olarak "V_C"" değişkeninin "*0*" değerini alması ile birlikte phi parametresinin "*1*" değerine eşit olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

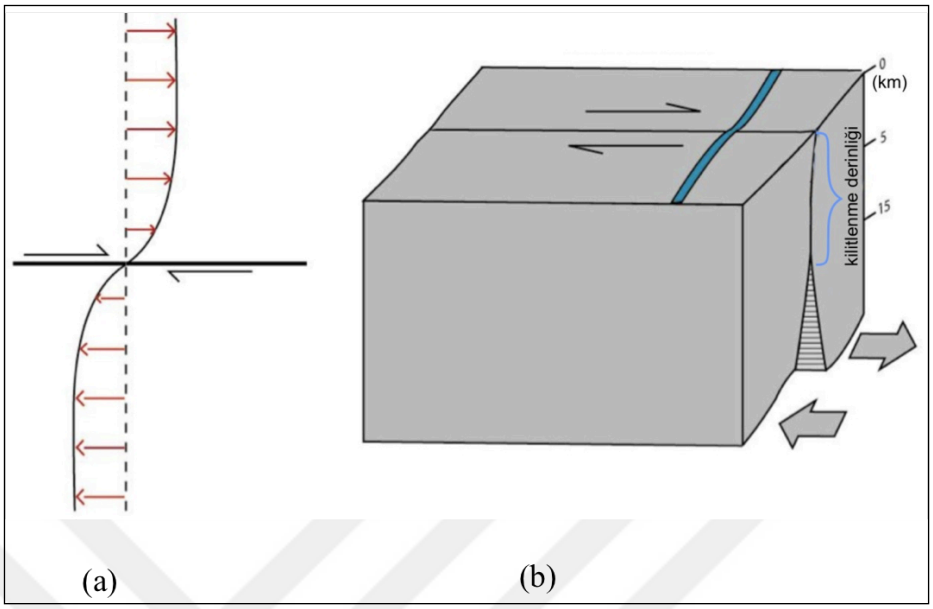
Blok hareketleri nedeniyle oluşan yer değiştirmenin büyüklüğü jeolojik yöntemlerle (Arpat ve Şaroğlu, 1972b; Dewey ve diğ, 1986; Westaway, 2003; Westaway ve Arger, 1996) hesaplanabildiği gibi jeodezik teknikler kullanılarak da yüksek doğruluklu bir şekilde kestirilebilir. Belirli bir zaman aralığında oluşan toplam yer değiştirme GPS gözlemleri ile belirlenirken hareket genellikle yıllık bazda periyodik olarak tanımlanır. Bu döngüsellik içinde fay boyunca oluşan yer değiştirmenin zamana bağlı büyüklüğü "kayma hızı" (slip rate) ile ifade edilir. Kayma hızları, Bölüm 3.1'de anlatıldığı gibi fay boyunca faya yakın alanda ve uzak alanda yeterli sayıda tesis edilen jeodezik noktalarda sürekli olarak veya periyodik zaman dilimlerinde GPS tekniği ile yapılacak gözlemler yardımıyla kestirilebilir (DiZio, 2016; McCaffrey, 2002; Tiryakioglu, 2012; Yavasoglu, 2009). Buradan hareketle blok modelleme yaklaşımı GPS nokta hızlarının yanı sıra 3 boyutlu elastik yarı-uzaysal homojen bir ortamda tanımlı blok ve fay geometrileri, blokların euler kutup parametreleri ve derinlik eğrilerinin öncül değerleri kullanılarak blokların rotasyonel hızlarının, faylar üzerindeki kilitlenme derinliği dağılımlarının ve bloklar içerisindeki yamulma hızlarının kestirimini mümkün kılmaktadır (Okada, 1985). Kayma hızlarına bağlı olarak hareket eden bloklar üzerinde bir gerilme (stres) meydana gelir. Bu gerilme neticesinde malzemede yapısal özelliğine göre şekilsel veya hacimsel değişiklikler oluşabilir. Malzemedeki şekil ve hacim değişiklikleri gerinim (deformasyon-strain) olarak adlandırılır (Yavasoglu, 2009). Yarı-uzaysal homojen

bir ortamda 3 boyutlu geometriye sahip bloklardan referans olarak seçilen blok üzerinde gerinim ve yüzey kuvvetlerinin sıfır olduğu kabul edilir (Aktug, 2006; McCaffrey, 2002; Yavasoglu, 2009). Ancak jeodezik gözlem nokta dağılımının yetersiz olması durumunda blok modelleme yaklaşımının zayıf yönü ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, kayma hızı kestirimleri, tanımlanan blok geometrilerine ve öncül kilitlenme derinliklerine çok daha duyarlı hale gelir. Buna rağmen blok modelleme yaklaşımı doğrultu atımlı fay sistemleri (D'Alessio ve diğ, 2005; McCaffrey, 2005; Meade ve Hager, 2005), dalm-batma kuşakları (Loveless ve Meade, 2011; Serpelloni ve diğ, 2010; Wallace ve diğ, 2004) ya da daha karmaşık yapıdaki levha sınırları (Meade, 2007; Reilinger ve diğ, 2006; Socquet ve diğ, 2006) gibi farklı tektonik rejimlerin hakim olduğu bölgelerde intersismik hızların kestiriminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Blok modelleme yaklaşımının temelinde Reid (1911) tarafından ortaya konulan tek boyutlu elastik atım teorisi (elastic rebound theory) bulunmaktadır. Reid (1911)'in öne sürdüğü elastik atım teorisi ile depremlerin oluşumunda 3 ana evrenin varlığından söz edilmeye başlanmıştır. Bu evreler; fay üzerinde gerilimin arttığı ve buna bağlı olarak gerinim birikimi nedeniyle potansiyel enerjinin depolandığı intersismik dönem (inter-seismic period), depremin meydana geldiği ve gerinim birikiminin ani bir yer değiştirme ile karşılandığı kosismik dönem (co-seismic period) ve fay boyunca yeni bir kuvvet dengesinin oluştuğu deprem sonrası dönem (post-seismic period) şeklinde tanımlanmaktadır (Kanamori, 1994; Kasahara, 1981; Lambeck, 1988; Okada, 1985; Thatcher, 1993).

Bu teoriye göre, blokların rölatif hareketi esnasında faya yakın alanların faydan uzak alanlara göre daha az yer değiştirmesi sonucunda blok sınırlarındaki fay düzlemi boyunca bir gerilme meydana gelmektedir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi fayın yüzeyden belirli bir derinliğe kadar kilitli olması, oluşan gerilme kuvvetinin bloklar arasındaki sürtünme kuvvetini yendiği zamana kadar yer kabuğunda meydana gelen elastik deformasyonun biriktiği ve bunun sonucunda depolanan potansiyel enerjinin eşik değere ulaşmasıyla beraber gerinim birikiminin ani büyük bir yer değiştirmeye neden olacağı anlamına gelmektedir. Gerinim birikiminin bu büyük yer değiştirme ile karşılanması sonrası deprem döngüsünde post-sismik döneme geçilir ve bu

dönemde yeni kuvvet dengesi oluşurken ko-sismik dönemdeki atım intersismik döneme kadar sönümlenir.



Şekil 4.3 : Doğrultu atımlı fay sisteminde blokların birbirlerine göre hareketi. (a) Fay düzlemine olan uzaklığa göre faya paralel gözlenen hızlar (b) Kilitlenme derinliği ve blok hareketlerinin temsili olarak gösterildiği blok model (Çakır, 2010).

Elastik yarı-uzaysal homojen bir ortamda kilitlenme derinliğinin yer kabuğunun yüzeyinde gözlenen yer değiştirmelere bağlı olarak kestirilebilmesi için Savage ve Burford (1973)'da verilen,

$$V_P(X) = \frac{V_R}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{X}{D}\right) \tag{4.3}$$

eşitliği kullanılır. Bu eşitlikte; "V_P" faya parelel hızı, "V_R" uzun dönem blok hızını, "X" faya olan uzaklığı ve "D" kilitlenme derinliğini ifade etmektedir. Faya yakın alanlarda yüzeyden yapılacak GPS gözlemleri ile kilitli fayın derinlik kontrolü sağlanabilirken uzak alan GPS gözlemleri neticesinde dönme hareketine bağlı olarak oluşan blok hızını kestirmek mümkündür. Bu hususta detaylı bilgi Bölüm 3.1'de verilmiştir. Burada gerinim birikiminin üzerinde gözlem yapılan faydan kaynakladığı ve blok davranışının rijit olduğu varsayımı göz önünde bulundurulmalıdır.

Jeodezik veriler kullanılarak blok modelleme yaklaşımı ile blokların dönme hızları, fay kayma hızları, fay kilitlenme oranları ve derinlikleri eş zamanlı olarak kestirilebilir. Bunun için 3 boyutlu elastik yarı-uzaysal homojen bir ortamda blok ve fay geometrilerine, bloklara dair öncül Euler kutup parametrelerine ve öncül derinlik eğrilerine bağlı bir sismojenik tabaka yapısına ihtiyaç vardır. Bu şartlar çerçevesinde

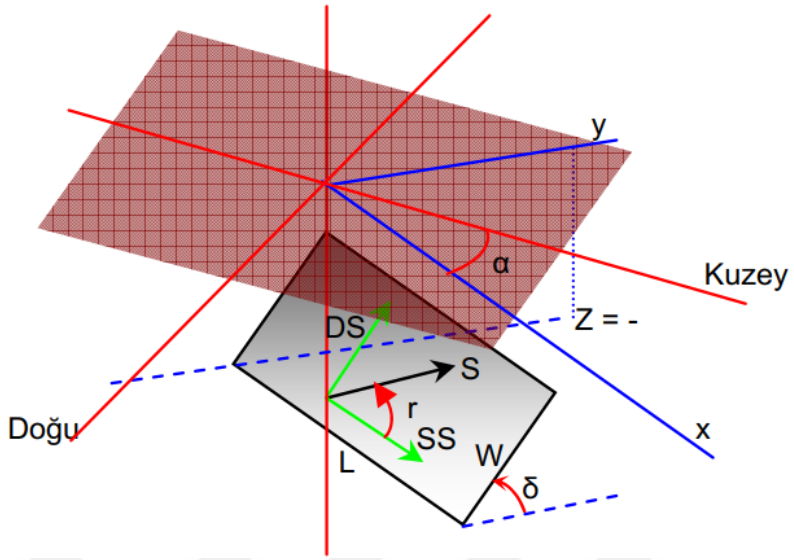
blok modelleme yaklaşımı kullanılarak gerinim birikimlerinin modellenebilmesi için TDEFNODE yazılımından yararlanılmıştır.

4.1 TDEFNODE Yazılımı

TDEFNODE, blok sınırlarını oluşturan faylar üzerindeki ve blokların içindeki gerinim birikimini, blokların dönüklüklerini ve deprem anında (kosismik) ya da volkanik kaynaklar, asismik krip hareketi, vb. nedenler ile oluşan yer değiştirmeleri modellemek için kullanılan açık kaynak kodlu bir yazılımdır (McCaffrey, 2009). Yazılım, Benzetimli Yaklaşım (Simulated Annealing) (Press ve diğ, 1986) yöntemi ile GPS nokta hızlarına ters çözüm uygulayarak gözlem verilerinin modele uygunluğunu test eder. Rob McCaffrey tarafından Fortran programlama dilinde derlenmiş bu yazılım ilk versiyonu DEFNODE (McCaffrey, 1995) ile birlikte yer bilimlerinde kinematik problemlerin çözümüne önemli katkılar sağlamıştır (Galgana ve Hamburger, 2010; McCaffrey, 2002, 2005, 2009; McCaffrey ve diğ, 2000; Prawirodirdjo ve diğ, 1997; Schmalzle ve diğ, 2014; Socquet ve diğ, 2006; Wallace ve diğ, 2004; Zhang ve diğ, 2013). Tez çalışmasında da kullanılan TDEFNODE, ilk versiyondan farklı olarak zaman bağımlı elastik deformasyonların GPS zaman serileri ve InSAR tekniği ile oluşturulan çoklu interferogramlar yardımıyla modellenmesine olanak sağlamaktadır (McCaffrey, 2009). Unix tabanlı işletim sistemleri üzerinde çalışabilen yazılımda oluşturulan sonuç dosyalarının görüntülenmesi GMT (Wessel ve diğ, 2013) betikleri ile mümkün kılınmıştır.

Tez çalışmasında TDEFNODE yazılımı, oluşturulan blok ve fay geometrilerine bağlı olarak blokların dönüklüklerinin, tanımlı faylar üzerindeki gerinim birikiminin ve bu fayların kilitli olma durumunun modellenmesi için kullanılmıştır. Blok modelleme yaklaşımı Okada (1985)'de verilen matematiksel eşitlikler kullanılarak GPS gözlem verilerine ters çözüm uygulanması esasına dayanır. Bunun için öncelikle farklı hız alanı çözümleri ortak tek bir referans sistemi altında toplanır. Birleştirilmiş çözümlerden elde edilen hız alanı ile birincil aşamada, tanımlı fay düzlemleri boyunca serbest kayma hareketinin olduğu varsayımına dayanılarak blokların bir Euler kutbuna bağlı dönüklükleri hesaplanmaktadır. İkincil olarak elastik yarı-uzaysal homojen bir ortamdaki fayın yer değiştirme alanını tanımlayan Okada yaklaşımı (Okada, 1985) ile yüzeydeki GPS gözlemlerinden elden edilen yer

değiştirmeye bağlı olarak fay düzlemi üzerindeki kayma vektörü kestirilmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Fay düzlemi ve üzerindeki yer değiştirme bileşenlerinin gösterimi (Aktug, 2006).

Buna göre Şekil 4.4'te,

S : Kayma vektörü

δ : Eğim açısı (dip angle)

α : Fay doğrultusunun azimutu

d : Fay düzleminin derinliği

L : Fay düzleminin uzunluğu

W : Fay düzleminin genişliği

SS : Kayma vektörünün fay doğrultusu yönündeki bileşeni

DS : Kayma vektörünün fay doğrultusuna dik yöndeki bileşeni

x,y : Fay düzlemine ait koordinat sisteminin eksenleri (x ekseni fay doğrultusuna paralel, y ekseni fay doğrultusuna dik yöndedir.)

r : Kayma vektörünün yönünü gösteren ve x eksenine paralel doğrultu ile kayma vektörü arasında kalan açı (rake)

olarak ifade edilir (Aktug, 2006).

Noktasal bir kaynak için izotropik bir ortamda Σ yüzeyi boyunca fay düzlemi üzerindeki yer değiştirme Δu_j (ξ_1, ξ_2, ξ_3) nedeniyle yüzeyde meydana gelen yer değiştirme alanı u_i (x_1, x_2, x_3),

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] \nu_k \, d\Sigma \tag{4.4}$$

eşitliği ile verilir (Okada, 1985). Burada δ_{jk} Kronocker deltası, λ ve μ Lamé sabitleri, ν_k dΣ yüzeyine ait yüzey normalinin doğrultu kosinüsü, u_i^j ise $(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$ konumundaki j inci noktasal kaynak nedeniyle meydana gelen u_i (x_1, x_2, x_3) yüzeydeki yer değiştirmenin i inci bileşenidir.

Okada yaklaşımı elastik yarı-uzaysal homojen bir ortamdaki fay düzleminde yüzey yer değiştirme alanının elde edilmesinin $u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] \nu_k \, d\Sigma$(4.4) eşitliğinin analitik denklemler yardımıyla integral çözümü neticesinde mümkün olduğunu ortaya koymaktadır (Okada, 1985). Bu eşitliğin integrali alınarak sırasıyla kayma vektörünün fay düzlemi üzerinde fay doğrultusu yönündeki (strike-slip), fay doğrultusuna dik yöndeki (dip-slip) ve fay düzlemi üzerindeki açılma (tensional slip) bileşenlerine (U_1, U_2, U_3) bağlı olarak yüzeyde meydana gelen yer değiştirmeler (u_x, u_y, u_z)

yanal atım (strike-slip) için;

$$u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \tag{4.5}$$

$$u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \tag{4.6}$$

$$u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \tag{4.7}$$

düşey atım (dip-slip) için;

$$u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \tag{4.8}$$

$$u_y = -\frac{U_2}{2\pi}\left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos\delta \tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR} - I_1 \sin\delta \cos\delta\right] \quad (4.9)$$

$$u_z = -\frac{U_2}{2\pi}\left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin\delta \tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR} - I_5 \sin\delta \cos\delta\right] \quad (4.10)$$

açılma (tensile-slip) için;

$$u_x = \frac{U_3}{2\pi}\left[\frac{q^2}{R(R+\eta)} - I_3 \sin^2\delta\right] \quad (4.11)$$

$$u_y = \frac{U_3}{2\pi}\left[\frac{-\tilde{d}q}{R(R+\xi)} - \sin\delta\left\{\frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR}\right\} - I_1 \sin^2\delta\right] \quad (4.12)$$

$$u_z = \frac{U_3}{2\pi}\left[\frac{-\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos\delta\left\{\frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR}\right\} - I_5 \sin^2\delta\right] \quad (4.13)$$

ile hesaplanabilir (Okada, 1985). Bu eşitliklerde;

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda+\mu}\left[\frac{-1}{\cos\delta}\frac{\xi}{R+\tilde{d}}\right] - \frac{\sin\delta}{\cos\delta} I_5 \quad (4.14)$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda+\mu}[-\ln(R+\eta)] - I_3 \quad (4.15)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda+\mu}\left[\frac{1}{\cos\delta}\frac{\tilde{y}}{R+\tilde{d}} - \ln(R+\eta)\right] + \frac{\sin\delta}{\cos\delta} I_4 \quad (4.16)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda+\mu}\frac{1}{\cos\delta}\left[\ln(R+\tilde{d}) - \sin\delta \ln(R+\eta)\right] \quad (4.17)$$

$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda+\mu}\frac{2}{\cos\delta}\tan^{-1}\frac{\eta(X+q\cos\delta)+X(R+X)\sin\delta}{\xi(R+X)\cos\delta} \quad (4.18)$$

$$p = y\cos\delta + d\sin\delta \quad (4.19)$$

$$q = y\sin\delta - d\cos\delta \quad (4.20)$$

$$\tilde{y} = \eta\cos\delta + q\sin\delta \quad (4.21)$$

$$\tilde{d} = \eta\sin\delta - q\cos\delta \quad (4.22)$$

$$R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2 \quad (4.23)$$

$$X^2 = \xi^2 + q^2 \quad (4.24)$$

U_i : Kayma vektörü bileşenleri (i=1,2,3)

u_i : Fay doğrultusu, eğim açısı ve fay düzlemine dik yöndeki yüzey yer değiştirme bileşenleri ($i=1,2,3$)

δ : Eğim açısı (dip angle)

μ, λ : Lamé sabitleri

$\tilde{y}, \tilde{d}$: Fay düzleminin orijininde olduğu ve fay düzlemine paralel bir koordinat sistemindeki koordinatları

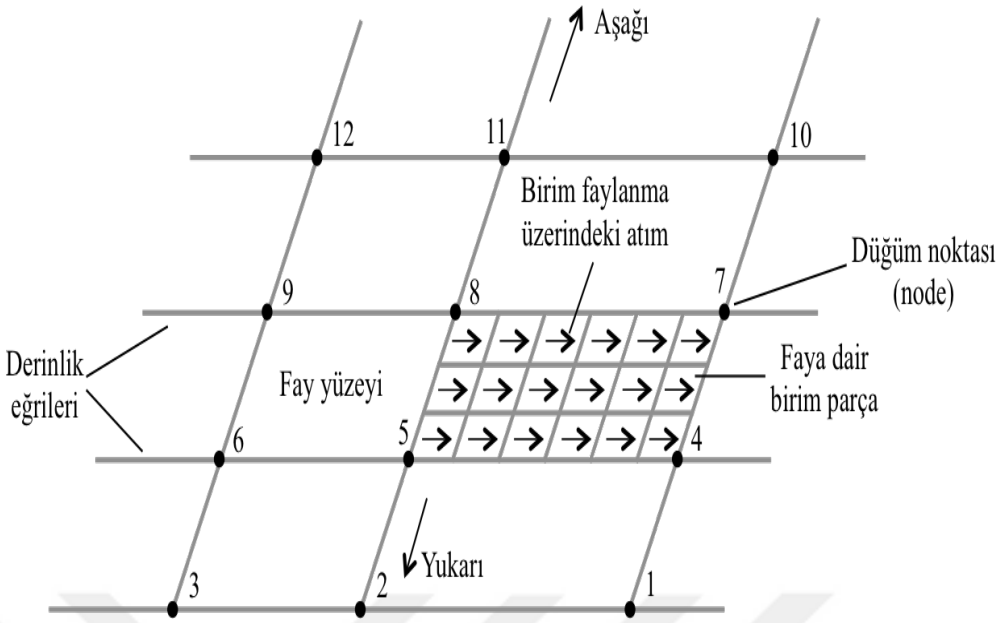
ξ, η, q : Fay düzlemi başlangıç noktasının fay düzlemi koordinat sistemi üzerindeki koordinatları

R : Fay başlangıç noktasının orijine olan uzaklığı

X : Noktanın fay doğrultusu yönündeki koordinatı

şeklinde tanımlanır (Aktug, 2006; Okada, 1985).

TDEFNODE yazılımında blok modelleme çalışmalarının ilk adımını blok ve fay geometrileri ile öncül model parametrelerinin tanımlanması oluşturur. Buna göre bloklar kapalı birer poligon olarak faylar ise birbirine komşu blokların sınırları ile örtüşecek şekilde düşey bir düzlem boyunca tanımlanır. Bloklar ve faylar konumları önceden belirlenen yüzey noktaları ile yatay bir düzlem içinde tanımlanırken her bir bloğu temsil eden noktaların da aynı Euler kutup noktasına bağlı olarak aynı açısal hız ile dönme hareketi yaptığı düşünülür. Fay düzleminin 3 boyutlu olarak tanımlanması temelde fay doğrultusu ve eğim açısı yönünde düğüm noktalarının (node) oluşturduğu dörtgensel parçaların (quadrilaterals) birim faylanmaya karşılık geldiği varsayımına dayanmaktadır (Şekil 4.5). Gerinim birikimi, düğüm noktalarının arasında bilineer enterpolasyon yöntemi kullanılarak bu dörtgensel parçaların üzerindeki deformasyonların toplamı olarak ifade edilir (McCaffrey, 2002).



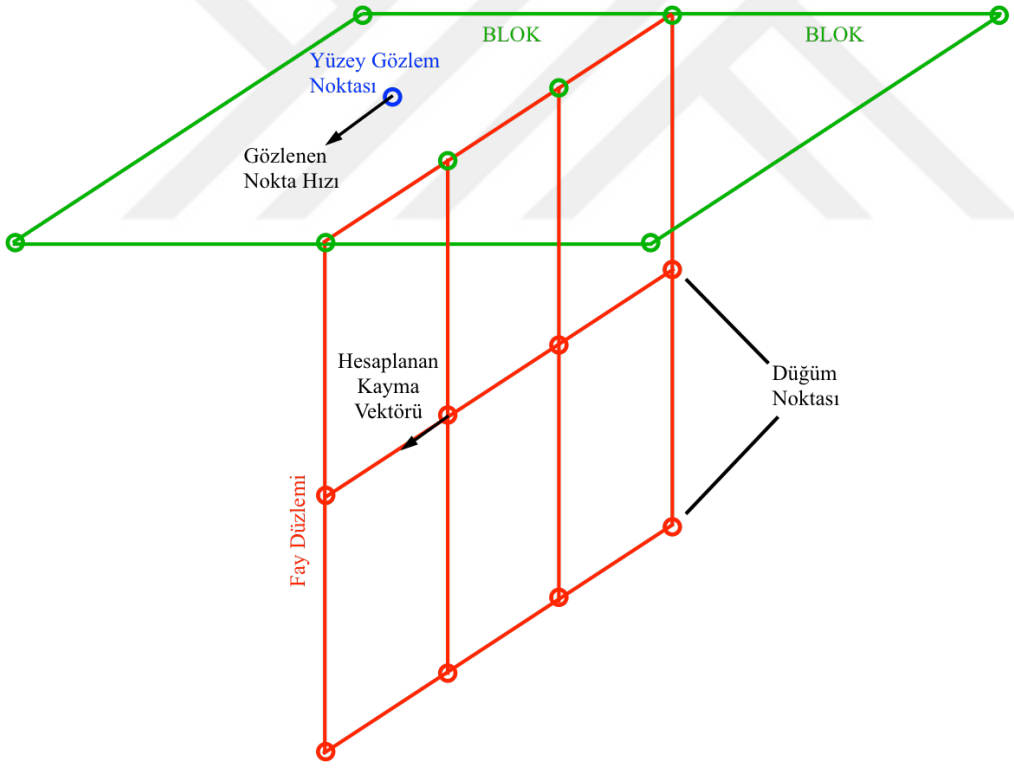
Şekil 4.5 : TDEFNODE yazılımında fay yüzeyindeki numaralandırılmış düğüm noktalarının gösterimi (URL-1).

Modelleme esnasında TDEFNODE yazılımı, fay ve blok geometrilerine, GPS gözlemleri sonucunda elde edilen hızlara ve tanımlı Euler kutup parametrelerine bağlı olarak bloklara rotasyonel hareket kazandırır. Buna göre, faylar ile birbirlerinden ayrılan bloklar farklı açısal hızların etkisiyle rölatif hareketlerini sürdürür. Burada göz önünde bulundurulması gereken husus sürtünme etkisi olmaksızın blokların fay düzlemleri boyunca serbest kayma hareketi yaptıkları varsayımıdır. Bir diğer varsayım ise rotasyonel hareket yapan bloğun rijit yapıda olduğu ve blok içi deformasyonların oluşmadığı temeline dayanmaktadır. Fay düzlemindeki yüzey noktalarına dair hızlar bu varsayımlar neticesinde kestirilebilir. Ancak esas olan belirli derinlik seviyelerinde tanımlı düğüm noktalarındaki hızlardır. Okada yaklaşımına göre jeodezik gözlemler ile yüzeyde elde edilen yer değiştirme ve fay düzlemi üzerinde kestirilen derindeki kayma vektörü arasında doğrusal bir ilişkiden söz etmek mümkündür (Okada, 1985). Fayın tamamen/kısmen kilitli olduğunun veya asismik krip hareketi yaptığının belirlenebilmesi için (4.2) eşitliğinden yararlanarak kilitlenme oranı (φ, phi) hesaplanır. Bu kilitlenme oranına bağlı olarak kayma eksikliği-geri kayma (slip deficit/backslip);

$$V_S = -V_R \,.\, \varphi \tag{4.25}$$

eşitliği ile elde edilir. Burada, "V_S" kayma eksikliği (geri kayma) büyüklüğünü, "V_R" açısal hızlardan hesaplanan düğüm noktasındaki kayma vektörünü, "φ" ise kilitlenme oranını (fay etkileşim parametresi) göstermektedir.

TDEFNODE yazılımında blok ve fay geometrileri tanımlanırken yüzeyde blok sınırlarını ve fay doğrultularını temsil eden düğüm noktalarının gerçeğe en yakın biçimde oluşturulmasına dikkat edilmelidir. Bunun için söz konusu fay sistemi ile ilgili literatürde yayımlanmış çalışmalar, arazideki jeolojik gözlemler, vb. bilimsel kaynaklardan yararlanılmalıdır. Yazılım kontrol dosyasında yüzeydeki düğüm noktaları ile aynı yatay konumda bulunan (eğim açısının 90 dereceye çok yakın olduğu durumda) derindeki düğüm noktaları ile istenen derinliklerde fay düzlemi boyunca derinlik eğrileri oluşturulur (Şekil 4.6). Derinlik eğrileri tanımlanırken sismik veriler, bölgenin jeolojik özellikleri ve chi^2, en küçük kareler, vb. istatistik yöntemler dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.6 : TDEFNODE yazılımında blok ve fay geometrilerinin tanımlanması. Gösterim sol yanal atımlı fay sistemi modeline göre oluşturulmuştur (URL-1).

Oluşturulan blok ve fay geometrileri ile yüzeyde gözlenen nokta hızına bağlı olarak yüzey noktası için hesaplanan kayma eksikliği fay düzlemi boyunca derindeki düğüm noktaları için de hesaplanabilir (Okada, 1985). İleri ve ters çözüm yaklaşımlarını birlikte kullanan TDEFNODE yazılımı bu aşamada yüzeydeki ve

derindeki düğüm noktaları arasındaki bağlantıyı "*Green fonksiyonları (Green's functions)*" ile sağlamaktadır (McCaffrey, 2002). Green fonksiyonları yardımıyla derindeki her bir düğüm noktasında hesaplanan kayma eksikliğinin integrali söz konusu düşey profilin yüzey noktasında hesaplanan kayma eksikliğine eşit olur. Bu aşamada açısal hızlardan hesaplanan fay yüzey nokta hızı ile kayma eksikliği arasındaki fark o yüzey noktası için gözlenen rotasyonel hız büyüklüğünü verir.

Gözlenen hızlar ve TDEFNODE ile kestirilen model hızları arasındaki fark artık hız (residual) olarak adlandırılmaktadır. Modelleme sonucunda gözlem noktalarında elde edilen artık hız değerlerinin sıfıra yakın (teoride ise sıfır) olması beklenmektedir. Ters çözüm yaklaşımında parametrik kestirim istatistiksel olarak χ_n^2, indirgenmiş ki-kare (reduced chi-squared), testi ile kontrol edilir. Blok model ile jeodezik gözlem verileri arasındaki uyumun denetlendiği bu kontrolde test değerinin minimum olması sağlanmaya çalışılır. İndirgenmiş ki-kare için test değeri;

$$\chi_n^2 = \frac{\sum_{i=1,n}\left(\frac{r_i}{\sigma_i F}\right)^2}{n-m} \tag{4.26}$$

eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikte;

n : gözlem sayısı

m : bilinmeyen parametre sayısı

r : artık değer ("*residual*", gözlenen hız değeri – hesaplanan hız değeri)

σ : standart sapma

F : standart sapma ölçek faktörü (verilerin ağırlıklandırılması için kullanılır)

olarak ifade edilmektedir (McCaffrey, 2002).

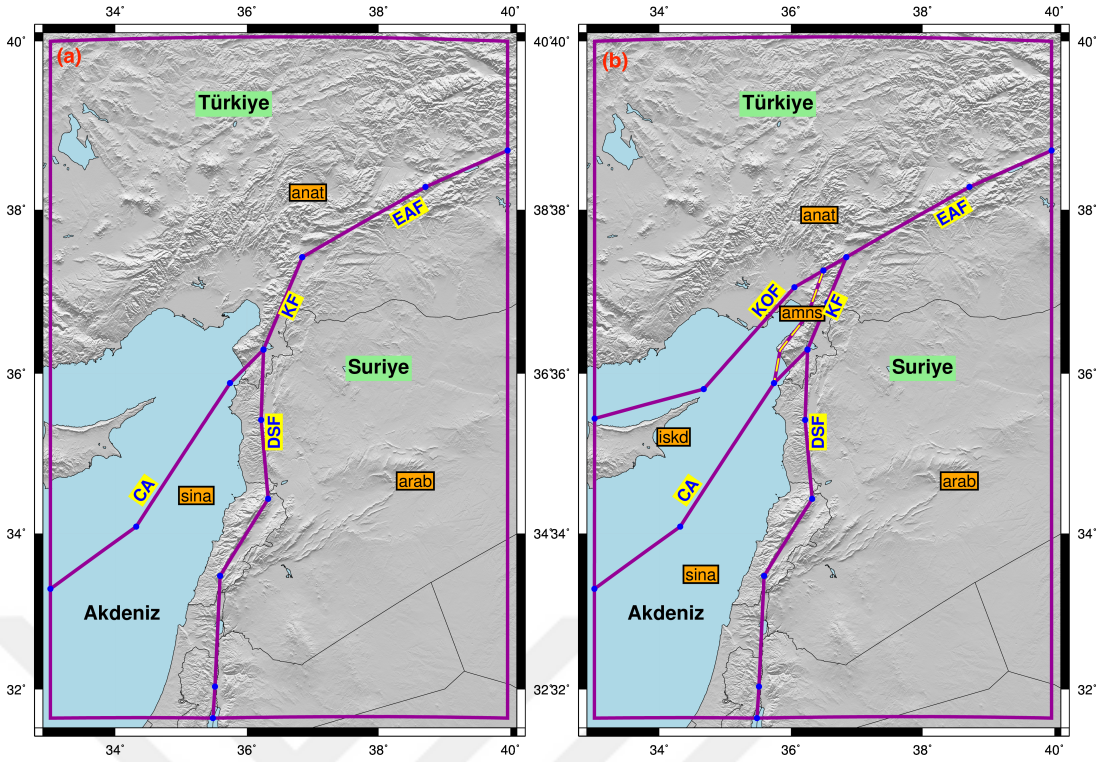
4.2 Tez Çalışmasındaki Blok Modelleme Stratejisi

Bu tez çalışması kapsamında blok modelleme yaklaşımının gereği olarak tektonik levhaların litosferde blok sınırlarındaki faylar ile çevrelenen küresel kapalı yüzeyler olduğu varsayımı temel alınmıştır. Deformasyonların rijit yapıdaki blokların sadece sınırlarında oluştuğu düşünülerek her bloğun farklı bir Euler kutup noktası etrafında

rotasyonel hareket yaptığı ve bir bloğun üzerindeki her noktada açısal hızın aynı olduğu kabul edilmiştir.

Oluşturulan blok ve fay geometrilerine göre GPS hız kestirim değerlerinin ters çözümü ile tektonik blokların rotasyonel hızlarının ve fay sınırlarındaki gerinim birikiminin eş zamanlı parametrik kestirimi için TDEFNODE yazılımı (McCaffrey, 1995, 2002, 2005, 2009) kullanılmıştır. Yazılım, elastik yarı-uzaysal üç boyutlu bir ortamda fay ve blok geometrilerinin tanımlanmasına ve GPS hızlarına ek olarak oluşturulan bloklar için öncül Euler kutup değerlerini başlangıçta girdi olarak beklemektedir. Girdi olarak sağlanan GPS hız kestirim değerleri bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen GAMIT/GLOBK analizlerinden ve literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiştir (Aktug ve diğ, 2013; Al-Tarazi ve diğ, 2011; Alchalbi ve diğ, 2010; Gomez ve diğ, 2007; Le Beon ve diğ, 2008; Mahmoud ve diğ, 2013; Reilinger ve diğ, 2006). Blok modelleme çalışmasına girdi olacak tüm GPS hız kestirim değerleri Bölüm 3.3.2'de detaylı olarak açıklanan dönüşüm işlemi ile ortak tek bir referans sistemi çatısı altında birleştirilmiştir. Model oluşturulurken sismik verilerin de dikkate alındığı blok ve fay geometrileri ile buna ek olarak öncül Euler kutup değerleri daha önce yayımlanmış çalışmalardan sağlanmıştır (Aktug ve diğ, 2016; Mahmoud, 2012; Reilinger ve diğ, 2006).

Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin tektonik özellikleri de göz önünde bulundurularak üzerinde önemli deformasyonlar biriktirebilecek başlıca diri fayların temel oluşturduğu bir kinematik model kurgulanmıştır. Bu bağlamda, özellikle levha sınırlarına karşılık gelen ana faylar model geometrisine dahil edilirken lokal faylar blok modelleme dışında tutularak sadeleştirilmiş bir model ortaya konulmuştur. Kinematik model kurulurken fayların sınırladığı bloklar için bölgenin jeolojisine uygun olarak en basit geometriden başlayarak gittikçe daha karmaşık yapıya bürünen fay geometrilerinin test edilmesi prensibi benimsenmiştir. Bu bağlamda ters çözüm öncesinde blok ve fay geometrileri bölgedeki tektonik yapılar göz önünde bulundurularak en basit modelden en karmaşık modele doğru geliştirilmiştir (Şekil 4.7).

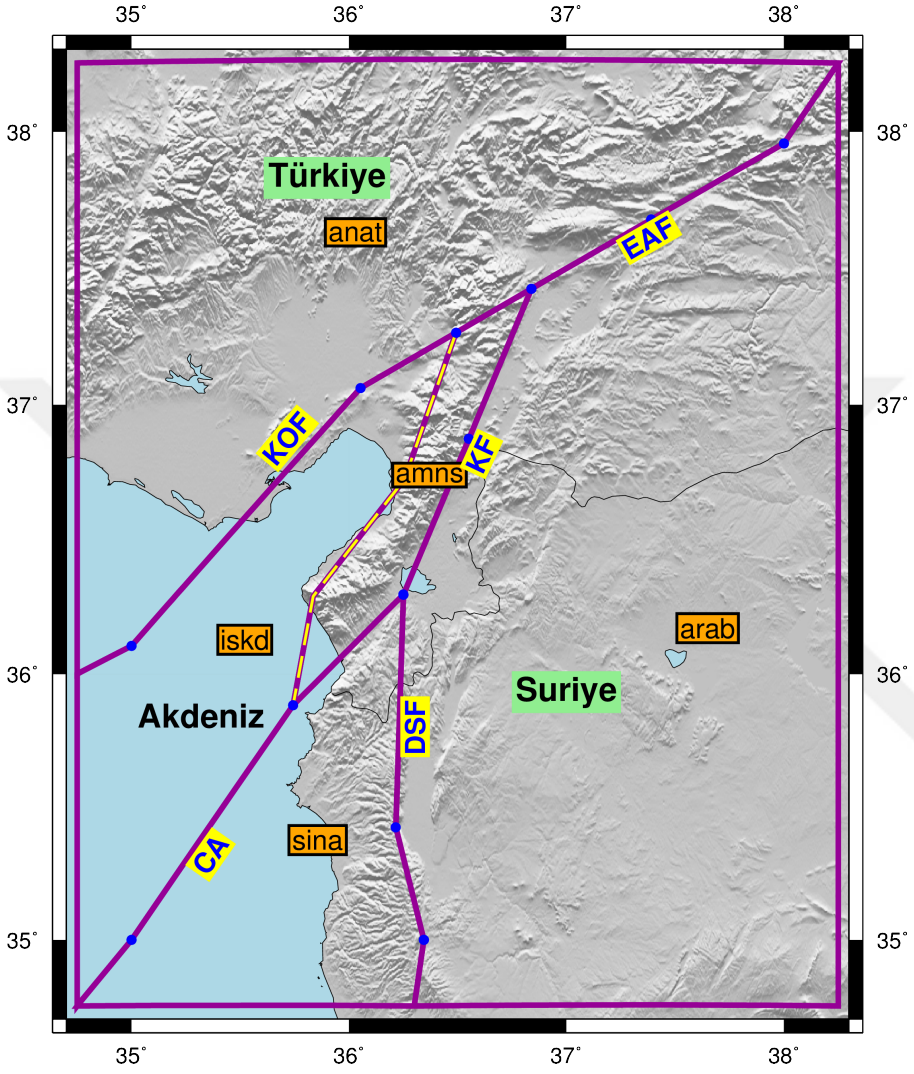


Şekil 4.7 : Blok modellemede kullanılan en basit (a) ve en karmaşık (b) blok ve fay geometrisi. Mor çizgisellikler blok ve fay sınırlarını, mavi noktalar fay segmentlerini birleştiren yüzeydeki düğüm noktalarını, turuncu ve sarı etiketler ise sırasıyla blok ve fay isimleri için kullanılan kısaltmaları göstermektedir.

En basit geometri Arabistan, Anadolu ve Sina blokları (kısaltmalar sırasıyla arab, anat ve sina) ile Doğu Anadolu Fayı, Karasu Fayı, Ölü Deniz Fayı ve Kıbrıs Yayı'nın (kısaltmalar sırasıyla EAF, KF, DSF ve CA) oluşturduğu modeldir (Şekil 4.7a). Oluşturulan en basit geometriden elde edilen istatistiksel model sonuçları blok ve fay geometrisinde daha fazla tektonik yapının tanımlanması ihtiyacını ortaya koymuştur. İstatistiksel test sonucunda indirgenmiş ki-kare (χ_n^2) değerinin 4.816 ile 1.0 teorik değerinden uzak olması bunun kanıtıdır. Bunun neticesinde en basit modele İskenderun (iskd) ve Amanos (amns) blokları ile Karataş-Osmaniye Fayı'nın (KOF) eklenmesiyle model geometrisi tektonik anlamda geliştirilmiştir. Bunun yanında Amanos bloğunun batı sınırı (Şekil 4.7b'de sarı-mor şeritler ile gösterilmiştir) elastik deformasyonun olmadığı ve serbest kayma özelliğinde olan bir segment olarak tanımlanmıştır.

Diğer yandan söz konusu bu geometri ile ulaşılan blok modelleme sonuçlarının istatistiksel göstergeleri Doğu Akdeniz bölgesindeki diri fayların araştırılmasında farklı bir stratejinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu aşamada, Hatay üçlü kavşak noktası civarındaki bölgede tektonik mekanizmanın daha lokal ölçekte incelenmesi

amacıyla ve yeterli GPS gözlem noktası bulunmayan alanların model alanı dışında bırakılması bakış açısıyla blok model alanının daraltılması yoluna gidilmiştir (Şekil 4.8). Tez çalışması kapsamındaki kinematik analizler bu nihai daraltılmış blok model alanı referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

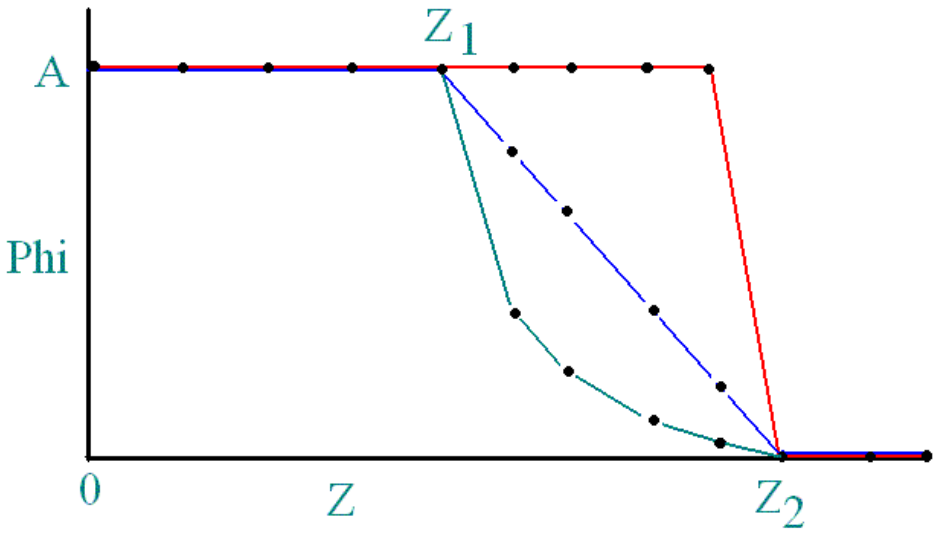


Şekil 4.8 : Blok modellemede kullanılan nihai blok ve fay geometrisi. Mor çizgisellikler blok ve fay sınırlarını, mavi noktalar fay segmentlerini birleştiren yüzeydeki düğüm noktalarını, turuncu ve sarı etiketler ise sırasıyla blok ve fay isimleri için kullanılan kısaltmaları göstermektedir.

Bu tez çalışmasında fay doğrultusu boyunca ve fay doğrultusuna dik belirli derinliklerde konumlandırılan düğüm noktaları yardımıyla fay geometrileri oluşturulmuştur. Fay düzlemleri neredeyse düşey düzlem içinde kalacak şekilde eğim açıları 89 derece olarak tanımlanmıştr. Fay doğrultusuna dik konumda 30 km derinliğe kadar bir düşey düzlem oluşturulmuş ve bu düzlem üzerinde sismojenik tabaka göz önünde bulundurularak fayların kilitli olma ya da serbest kayma (creeping) durumları belirlenmeye çalışılmıştır. Modelde fay düzleminin 30 km

derinlik eğrisinin altında bütün fayların serbest kayma yaptığı varsayılmaktadır. Faylar üzerindeki toplam gerinim birikimi söz konusu fay düzleminin 2x2 km boyutlarda dörtgen parçacıklara ayrılarak bu parçacıklar üzerindeki deformasyonun entegrasyonu ile hesaplanmıştır.

Bir sismojenik tabaka içindeki kilitlenme derinliği fay mekanizmasının karakterini kabaca yansıtan önemli bir parametredir. Literatürde yeryüzünün herhangi bir bölgesindeki kıtasal transform faylar üzerinde kilitlenme derinliğinin 7 km'den daha sığ olarak kabul edilmesi önerilmektedir (Genrich ve diğ, 2000; Le Beon ve diğ, 2008; Walters ve diğ, 2011). Bu çalışmada da kinematik model söz konusu fayların yüzeyden 7 km öncül derinlik değerine kadar tamamen kilitli olduğu varsayımı üzerine kurulmuştur. Bu sınır derinliğin altında sırasıyla kısmen kilitli olma durumunun ve tamamen serbest kayma hareketinin gözlendiği katmanlar tanımlanmıştır. Buna göre fayın tamamen kilitli olduğu kabul edilen katman yüzeyden itibaren Z1 derinliğine kadar uzanırken bu Z1 sınır derinliği altında Z2 derinlik eğrisine kadar olan katmanın kısmen kilitli olduğu ve Z2 eğrisinden daha derinlerde ise serbest kaymanın hakim olduğu varsayımı benimsenmiştir (Şekil 4.9). Buradan hareketle blok modelde her bir fay segmenti tamamen kilitli yüzeye yakın derinliklerde, $0 \leq Z1 \leq 7$ km için, φ = 1 şeklinde tanımlanmıştır. Buna bağlı olarak yüzeyden Z1 derinliğine kadar "*değişmez*" kabul edilen φ parametresinin Z1 ile Z2 arasındaki kestirimine çalışılmıştır. Diğer taraftan Z1 ile Z2 arasında kısmen kilitli olduğu kabul edilen bir fay segmenti için φ parameteresi $0.0 \leq \phi \leq 1.0$ ile ifade edilir. Z1'de maksimum değerine ulaşan φ parameteresi Z2'de minimum değerini alarak serbest kaymanın başladığı derinliği belirtmektedir. Wang ve diğ (2003)'nin "*effective transition zone-ETZ*" olarak tanımladığı Z1 ile Z2 arasındaki bu katmanda φ parameteresinin derinliğe bağlı olarak değişimi farklı yaklaşımlar ile modellenebilmektedir. Bu parametrik değişim matematiksel olarak doğrusal bir fonksiyon (mavi çizgi), boxcar fonksiyonu (kırmızı çizgi) veya üstel bir fonsiyon (yeşil çizgi) ile ifade edilebilir (Şekil 4.9). Bu tez çalışmasında φ parameteresi Z1 ile Z2 arasındaki katmanda derinliğe bağlı olarak değişimi Wang ve diğ. (2003) tarafından ileri sürülen üstel fonksiyon ile modellenmiştir.



Şekil 4.9 : Derinlik ve φ parametresi arasındaki ilişki (URL-1; Wang ve diğ, 2003).

Wang ve diğ (2003)'ne göre;

$$G' = G\ (0.0 \leq G \leq 10.0)$$

$$G' = 20.0 - G\ (10.0 < G \leq 20.0)$$

$$z' = (z - Z1)/(Z2 - Z1)$$

$$Phi\ (z) = 1.0;\ (z\ \leq Z1)$$

$$Phi\ (z) = \frac{exp[-\ (z'/G')] - exp[-(1.0/G')]}{1.0 - exp[-(1.0/G')]};\ (Z1 < z\ < Z2)$$

$$Phi\ (z) = 0.0;\ (z\ \geq Z2)$$

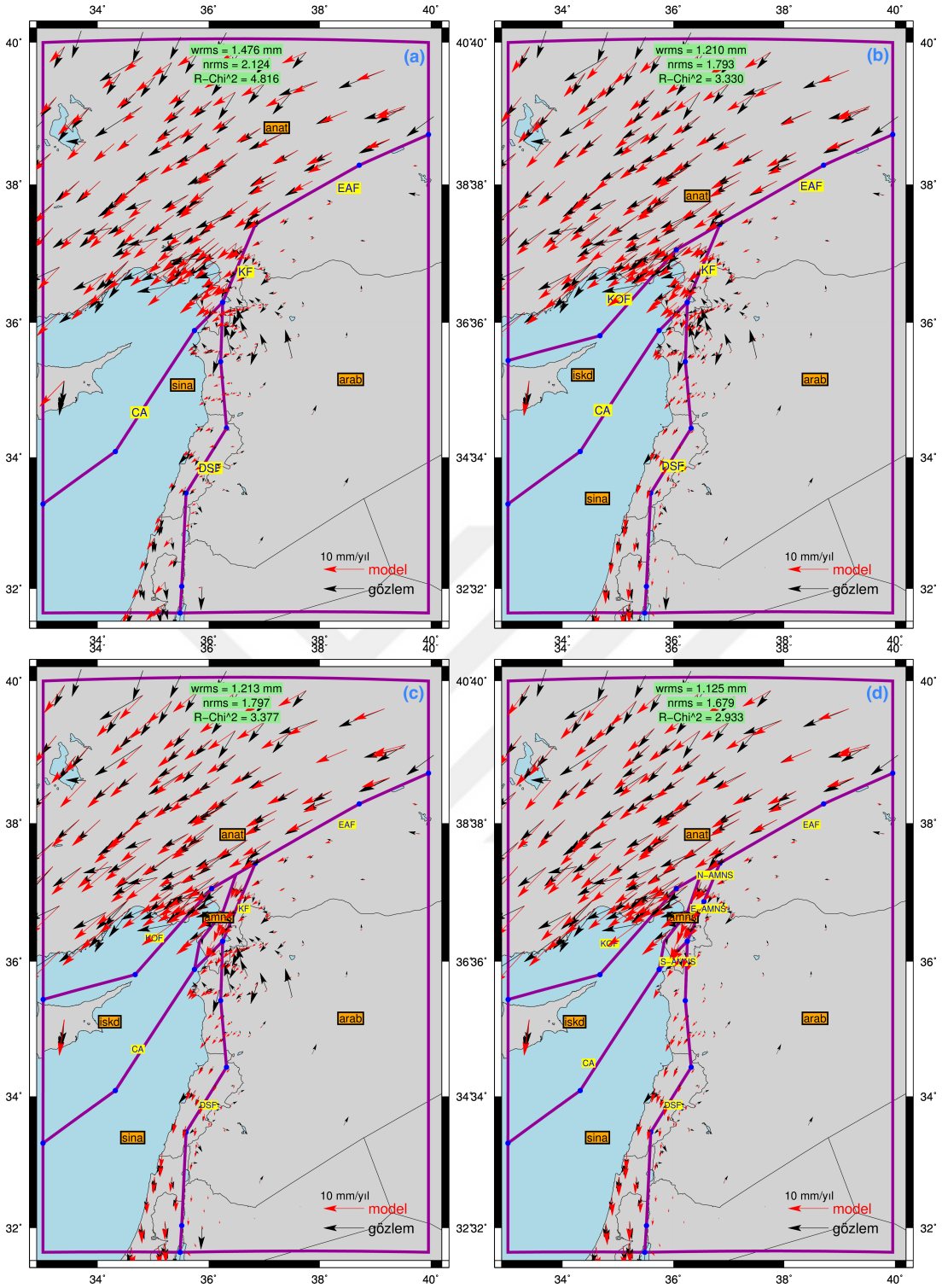
şeklinde ifade edilir. Burada, *G* kayma dağılımının şeklini kontrol eden ölçek faktörünü, *Z1* ve *Z2* ise sırasıyla φ parametre değişiminin araştırıldığı kestirim derinliğinin üst ve alt sınırlarını göstermektedir.

Blok modelleme yaklaşımında ters çözüm tekniği kullanılırken fay doğrultusu boyunca yumuşatma, "*along strike smoothing*", uygulanmıştır. Bu sayede parametrik kestirim değeri izin verilen aralığın dışına çıkarak büyük değişkenlik gösterdiğinde önceden tanımlanan yumuşatma faktörü aradaki farkla çarpılır ve ceza katsayısına eklenir. Bu yumuşatma, kestirim değerinin minimum ve maksimum değerler arasında modele yakınsamasına yardım eder. Bunun dışında, blok modellemeye girdi oluşturan tüm hız alanı çözümleri için eşit ağırlıklandırma yoluna gidilmiştir. Öte yandan diğer hız alanı çözümlerinin ortalamasından daha yüksek standart sapmaya sahip olması nedeniyle Mahmoud ve diğ. (2013)'nin çalışmasından elde edilen tüm GPS hızları kinematik modelleme analizlerine dahil edilmemiştir.

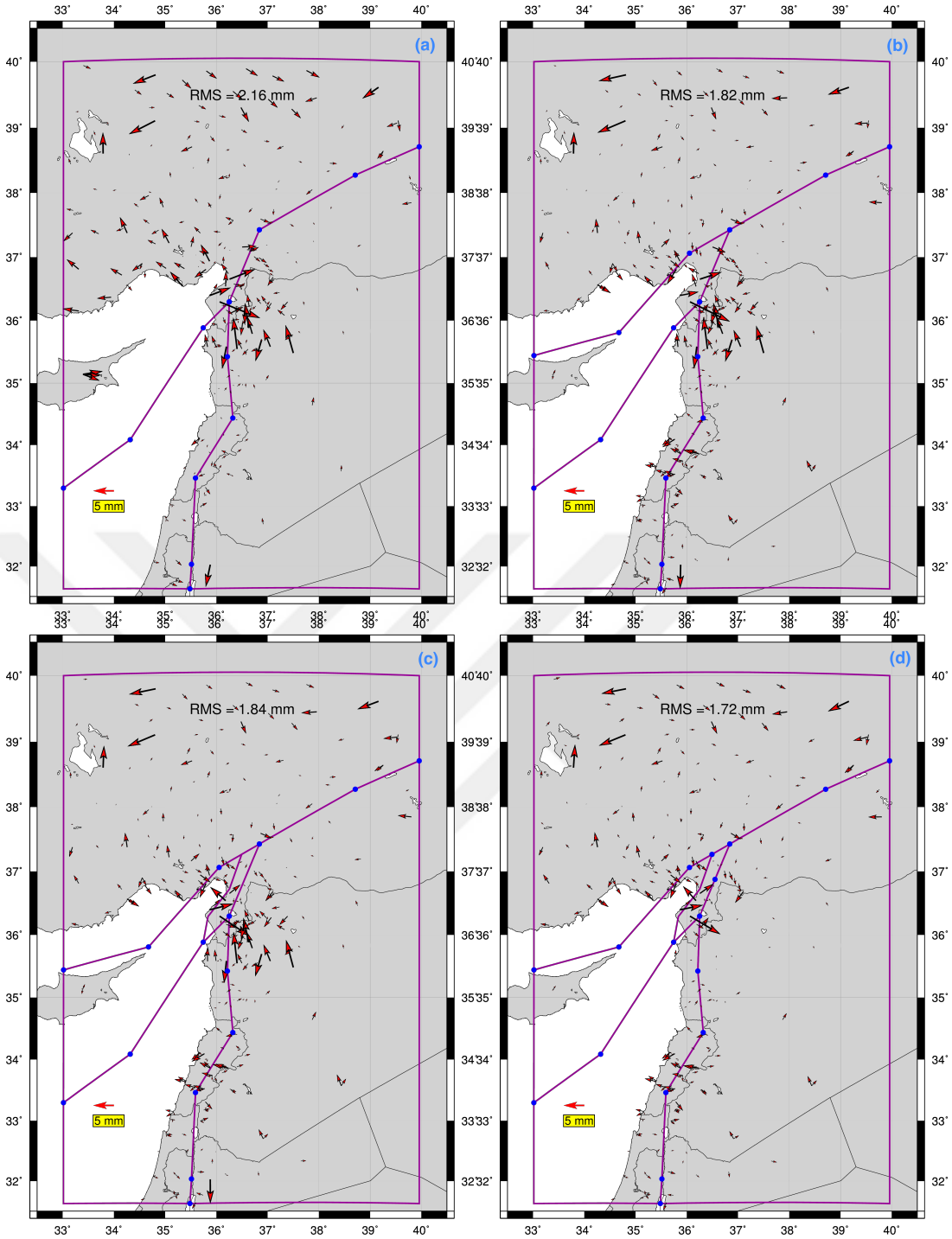
4.3 Doğu Akdeniz Bölgesi Modelleme Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi ve çevresindeki diri fayların kinematiğinin belirlenebilmesi için elde edilen güncel GPS hız alanı kullanılarak farklı blok ve fay geometrisi kompozisyonlarından oluşan çeşitli blok modeller üzerinde çalışılmıştır (Şekil 4.10).

Bir önceki başlıkta detayları verilen blok modelleme stratejisi göz önünde bulundurulmak suretiyle blok modelleme çalışmalarına öncelikle en basit geometriye sahip blok model ile başlanmıştır. Buna göre öncelikle, Arabistan (arab-referans blok), Sina (sina) ve Anadolu (anat) bloklarından oluşan 3 bloklu ve Doğu Anadolu Fayı, Karasu Fayı, Ölü Deniz Fayı ile Kıbrıs Yayı'nı içine alan bir model kurgulanmıştır. Bu model aynı zamanda Reilinger ve diğ. (2006) tarafından sunulan ve Mahmoud (2012) çalışmasında da sorgulanan bir blok model örneğidir. Bölüm 4.2'de Şekil 4.7 ile daha önce geometrisi verilen bu ve benzer diğer modellerde bloklar ve faylar geniş alanlardaki deformasyonların araştırılmasına olanak sağlayacak yapıdadır. Blok modelleme sonucunda üç bloklu bu modelin yeterli ve uygun dağılımda GPS gözlem noktası ile temsil edilip edilmediğini ölçen karesel ortalama hata, RMS = 2.16 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.11). En basit modele İskenderun bloğu (iskd) ve Karataş-Osmaniye Fayı'nın (KOF) eklenmesi neticesinde elde edilen dört bloklu yapı ile GPS gözlem verileri arasında ise RMS = 1.82 şeklinde bir uyum söz konusudur. Kuzeyde Karataş-Osmaniye Fayı, güneyde Kıbrıs Yayı ve doğuda Karasu Fayı ile çevrelenmiş İskenderun bloğunun önemli bir bölümünün Akdeniz içinde kalmasının sonucu olarak blok hareketi incelenirken GPS gözlem noktalarının seyrekliği dezavantaj oluşturmuştur. Modelin geliştirilmesi sırasında son adım Amanos Dağları'nın bulunduğu alanda ilave bir mikro bloğun tanımlanması şeklinde atılmıştır. Üzerindeki GPS gözlem noktalarında hız vektörlerinin İskenderun bloğuna göre daha güneye yönelmiş olması Amanos mikro bloğunun (amns) Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin karmaşık tektonik yapısı içerisindeki rolünün bir göstergesidir.



Şekil 4.10 : Değişen blok ve fay geometrilerine bağlı olarak model ve gözlem hızlarının gösterimi. Birleştirilmiş GPS hız alanının kullanıldığı en basit modelden en karmaşık modele doğru gelişim sırasıyla (a), (b) ve (c) ile verilmiştir. Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmasının tüm hız kestirim değerlerinin birleştirilmiş hız alanından çıkartılarak oluşturulan en karmaşık model geometrisi ise (d) ile verilmiştir. Sarı ve turuncu etiketler sırasıyla fay segmentlerinin ve blokların isimlerini göstermektedir.



Şekil 4.11 : Değişen blok model geometrisine göre model ve gözlem hızlarından hesaplanan artık hızların (residuals) gösterimi.

Amanos bloğunun dahil edilmesiyle oluşan beş bloklu tektonik yapı ile GPS gözlem verileri arasındaki uyum RMS = 1.84 olarak belirlenmiştir. Bu noktadan sonra Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmasından elde edilen tüm hız kestirim değerlerinin Bölüm 4.2'de detaylandırılan nedenle blok modelleme dışında bırakılması beş bloklu nihai model ile GPS gözlemleri arasındaki uyumu artırmıştır. Buna göre en iyi model ve gözlem uyumu, hesaplanan RMS = 1.72 ile bu kombinasyonda ortaya çıkmıştır.

Bunun dışında tüm modellerde model ve gözlem hızlarından hesaplanan artık hızlar (residuals) noktasal bazlı karşılaştırıldığında GPS hız kestirimlerinin herhangi bir sistematik hata içermediği görülmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında blok sınırlarındaki tüm faylar üzerinde gerinim birikimi öngörülmesine rağmen serbest kayma yaptığı düşünülen Amanos bloğunun batı sınırında herhangi bir elastik deformasyon hesaplanmamıştır.

Model hızları ile GPS gözlem hızları arasındaki farkların minimum olması şartıyla hem blokların bir Euler kutbu çevresindeki rotasyonel hareketleri hem de fayların kilitlenme oranları eş zamanlı olarak ters çözüm tekniği ile kestirilmeye çalışılmıştır. Buradaki şarta bağlı olarak, Bölüm 4.1'de de değinildiği üzere, blok modelleme yaklaşımında kestirim değerleri istatistiksel açıdan indirgenmiş ki-kare (χ_n^2) testine tabi tutulur ve bu testin sonucu model ile veri arasındaki uyum için iyi bir göstergedir. Modelin gözlem verileri ile uyumunu test etmek için χ_n^2 değerinin teorik olarak 1.0 değerine yakınsaması beklenir. Bu tez çalışması kapsamında değişen blok ve fay geometrilerine bağlı olarak çeşitli blok modeller için elde edilen istastistiksel sonuçlara Çizelge 4.1'de yer verilmiştir.

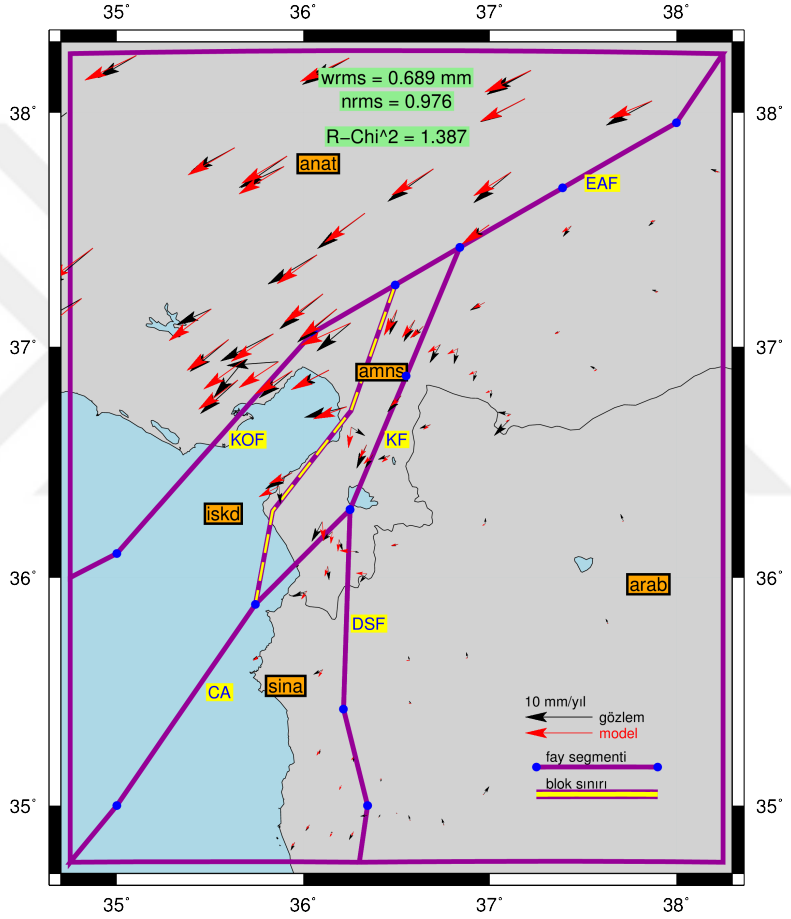
Çizelge 4.1 : Blok modelleme çalışmalarına dair istatistiksel sonuçlar.

Model #	**Blok sayısı**	**Gözlem sayısı**	**Serbest parametere sayısı**	**Serbestlik derecesi**	**wrms (mm/yıl)**	**nrms**	**İndirgenmiş ki-kare (χ_n^2) değeri**
1	3	520	15	505	1.476	2.124	4.816
2	4	642	21	621	1.210	1.793	3.330
3	5	642	27	615	1.213	1.797	3.377
4	5	566	27	539	1.125	1.679	2.933

Çizelge 4.1'deki istatistiksel sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda basit blok model yapısının Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin kinematik özelliklerini anlamak için yeterli olmadığı, aksine bölgenin tektoniği incelenirken karmaşık blok modellerin daha anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Üç ve beş bloklu model geometrileri ile sırasıyla elde edilen en yüksek (4.816) ve en düşük (2.933) χ_n^2 değerleri bunun kanıtı olarak değerlendirilebilir. Buradan yola çıkarak, Amanos bloğunun da dahil olduğu beş bloklu model ile Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmasından derlenen hız

kestirimlerinin dahil edilmediği bir GPS hız alanı çözüm için en iyi kombinasyonu oluşturmaktadır.

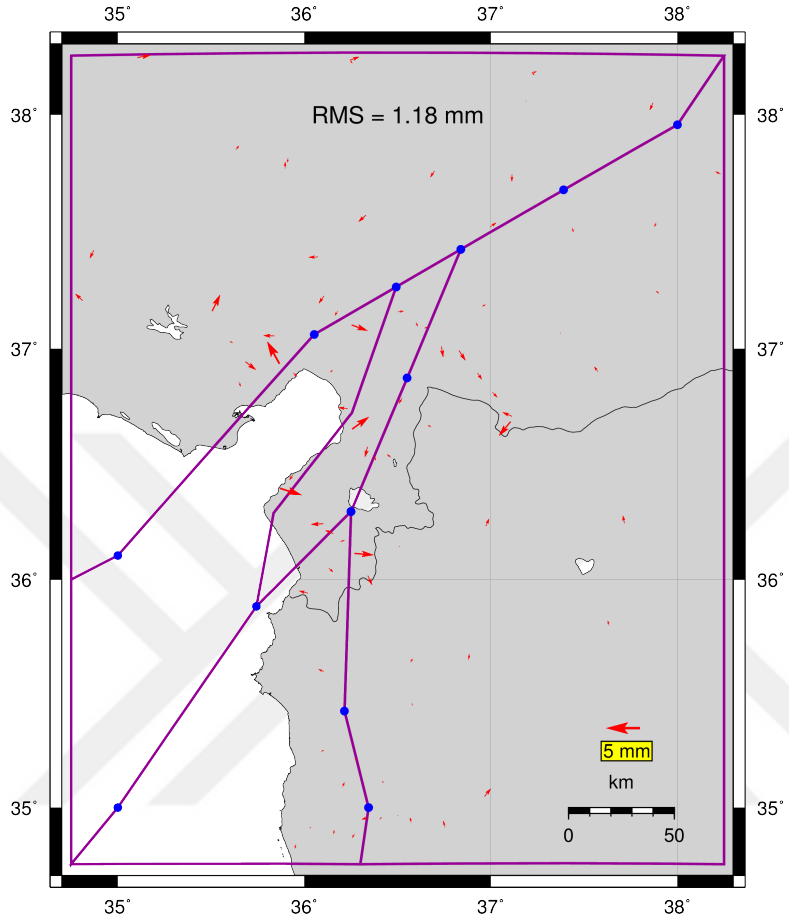
Ancak, Bölüm 4.2'de değinilen nedenlerden dolayı blok model alanı Şekil 4.8 ile verildiği şekliyle sınırlandırılarak Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki fayların kinematik özelliklerinin lokal çerçevede detaylı bir biçimde sorgulanması yoluna gidilmiştir. Bu bağlamda, nihai blok ve fay geometrisi ile blok modelleme sonucunda elde edilen model hızlarının GPS gözlem hızlarına yakınsadığı Şekil 4.12'de hem görsel olarak hem de istatistiksel açıdan ortaya konulmuştur.



Şekil 4.12 : Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için daraltılmış blok model alanında elde edilen model ve gözlem hızlarının gösterimi. Kırmızı renkli vektörler model sonucu elde edilen hızları, siyah renkli vektörler ise GPS gözlemleri ile elde edilen Arabistan levhası sabit hızları göstermektedir. Mor çizgisellikler fay segmentleri ile blok sınırlarını ve mavi noktalar da fay segmentlerini birleştiren düğüm noktalarını temsil etmektedir. Turuncu etiketler blok isimlerini ifade etmektedir. Bölgedeki önemli tektonik yapılar EAF (Doğu Anadolu Fayı), KOF (Karataş-Osmaniye Fayı), DSF (Ölü Deniz Fayı) ve CA (Kıbrıs Yayı) ile gösterilmiştir.

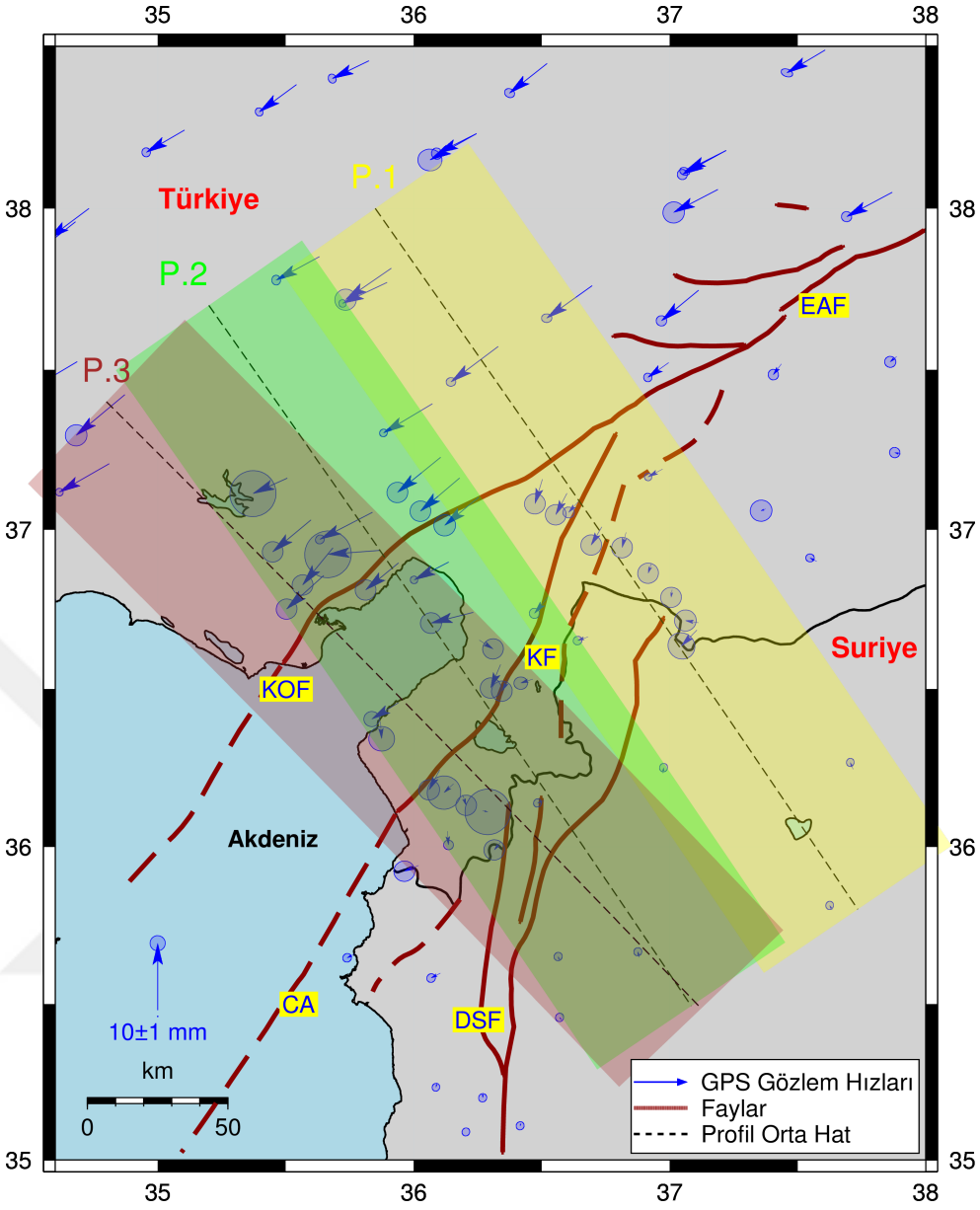
Buna göre, χ_n^2 = 1.387 değeri Çizelge 4.1'deki test değerleri ile karşılaştırıldığında söz konusu model ve gözlem verisi arasındaki uyumun maksimum olduğu

söylenebilir. Benzer şekilde, artık hızların gösterildiği Şekil 4.13'e göre RMS = 1.18 mm olması da bu en iyi uyumu destekler niteliktedir. Ayrıca, model ve gözlem hızı farkları dikkate alındığında herhangi bir sistematik hata bulgusuna rastlanılmamıştır.



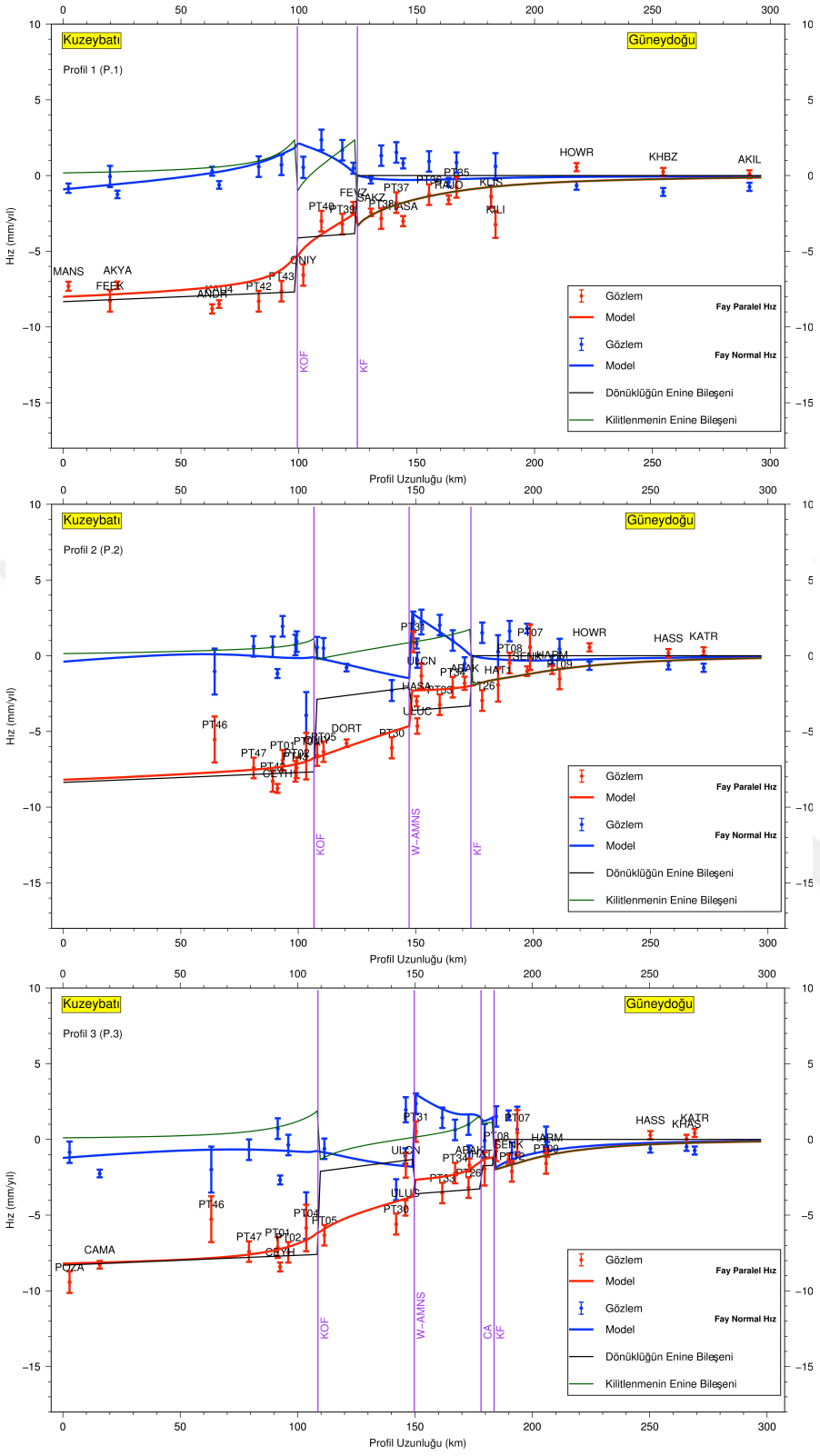
Şekil 4.13 : Daraltılmış blok model alanında nihai blok ve fay geometrisine göre model ve gözlem hızlarından hesaplanan artık hızların (residuals) gösterimi.

Gerinim birikiminin modellenmesi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri fay segmentlerini dik şekilde kesen ve üzerinde GPS gözlem noktaları bulunan profiller (doğrultular) yardımıyla faylara yakın ve uzak alanlarda oluşan deformasyonların belirlenmesidir. Bunun için profiller boyunca Bölüm 3.1'de detayları verilen stratejiye bağlı olarak tesis edilen GPS gözlem noktaları çalışma bölgesindeki fayların kayma hızları, kilitlenme derinlikleri, vb. kinematik özelliklerinin belirlenebilmesine olanak sağlayacak yapıda oluşturulmuştur (Şekil 4.14). Söz konusu profiller üzerindeki her gözlem noktası için hesaplananacak GPS hız bileşenleri gerinim birikiminin modellenmesinde önemli bir role sahiptir.



Şekil 4.14 : Çalışma bölgesinde oluşturulan profillerin yerleri ve Arabistan levhası sabit GPS gözlem hızları. Fay gösterimleri Meghraoui ve diğ. (2011) çalışmasından alınmıştır.

Bu bağlamda, gözlenen GPS hızları profil doğrultusuna paralel (fay normal) ve profil doğrultusuna dik (fay paralel) yönlerdeki bileşenlerine ayrılmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Profiller (Şekil 4.14) boyunca elde edilen model ve gözlem hızlarına dair bileşenler. Kırmızı hat fay paralel model hızlarını, kırmızı semboller ölçeklenmiş standart sapmalarının çizgiler ile temsil edildiği gözlem hızlarının fay paralel bileşenini, mavi hat fay normal model hızlarını, mavi semboller ölçeklenmiş standart sapmalarının çizgiler ile temsil edildiği gözlem hızlarının fay normal bileşenini, yeşil ve siyah hatlar ise sırasıyla kilitlenmenin ve dönüklüğün fay paralel bileşenlerini, mor hatlar ise profilleri dik kesen fay doğrultularını göstermektedir.

Buna göre Arabistan levhası sabit varsayıldığında farklı hızlara sahip Anadolu, İskenderun ve Amanos bloklarının dönme hareketi nedeniyle elastik atım teorisine bağlı olarak meydana gelen intersismik dönem deformasyonlar profiller üzerinde açıkça görülmektedir. Siyah hatlar ile belirtilen fay paralel dönüklük bileşenlerinin negatif değerler alması Arabistan levhasına göre saat yönünün tersine blok hareketlerini doğrulamaktadır. Özellikle siyah hatların oluşturduğu basamaklı yapı tüm blokların dönme hareketini blokların birbirlerine göre hangi oranlarda yavaş ya da hızlı gerçekleştirdiğini ortaya koyması açısından önemlidir. Yeşil hat ise kilitlenmeye bağlı olarak fay paralel bileşen üzerinde yakın alanda oluşan kayma eksikliği nedeniyle yüzeyde meydana gelebilecek atımın büyüklüğünü göstermektedir. Ayrıca profiller boyunca bileşenlerine ayrıştırılan GPS gözlem hızlarının model hızları ve rölatif blok hareketleri ile yüksek uyumu dikkat çekicidir.

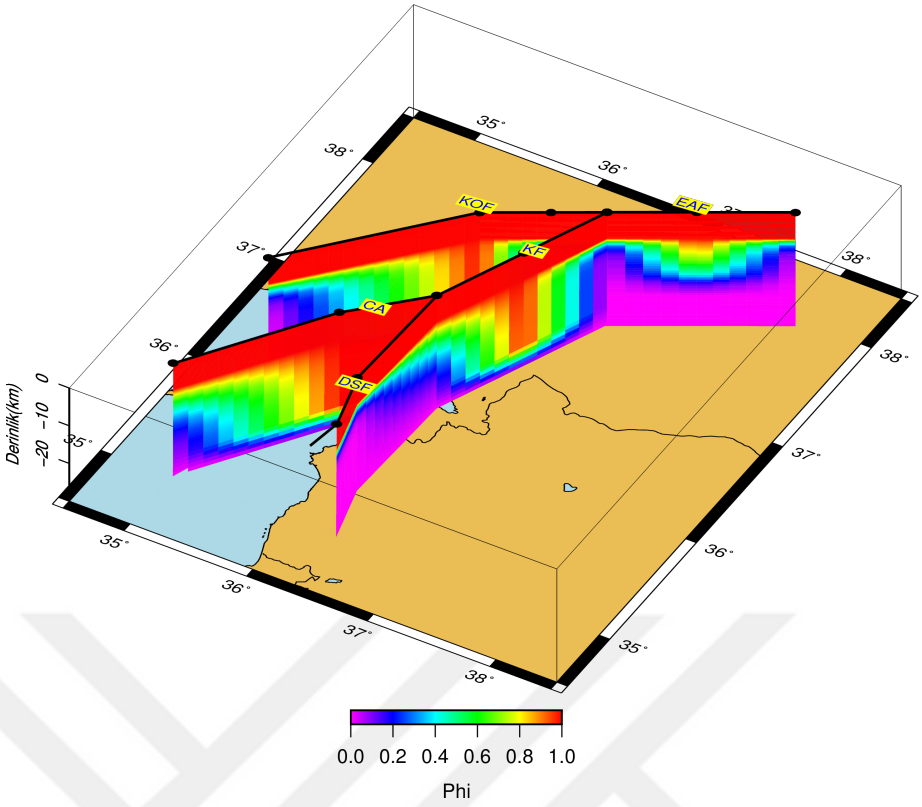
Bunun yanında, fay normal hızlar dikkate alındığında Arabistan (arab) ve Amanos (amns) levhalarının sınırını oluşturan Karasu Fayı (KF) için tüm profillerdeki pozitif eğimin sonucu olarak bir uzaklaşmadan yani normal faylanmadan söz etmek mümkündür. Bu noktada, Karasu Fayı üzerinde 2.10-2.80 mm/yıl kayma ile normal fay bileşen mekanizması çalışmaktadır. Ayrıca 2. ve 3. profillerde Amanos bloğunun serbest kayma yapan batı sınırında (w-amns) görünen fay normal hızlar üzerindeki keskin negatif eğim İskenderun bloğuna (iskd) olan 4.28-4.78 mm/yıl yaklaşmayı işaret etmektedir. Bu profiller üzerindeki kilitlenme bileşeninin İskenderun ve Amanos blokları sınırında anlamlı değişim göstermemiş olması bu sınırdaki serbest kaymayı göstermektedir.

Fay paralel hızlar göz önüne alındığında, Arabistan, Amanos ve Anadolu (anat) bloklarının farklı hızlarla gerçekleştirdikleri dönme hareketlerinin sonucu olarak 1. profil üzerinde meydana gelen intersismik hareket hem Karasu Fayı hem de Karataş-Osmaniye Fayı (KOF) üzerindeki gerinim birikiminin göstergesidir. Bu profil KOF'nin kuzeybatısında fay paralel hızları 8 mm/yıl olarak gösterirken aynı zamanda hem KOF hem de KF'nin ~3-4 mm/yıl kayma hızları ile sol yanal atımlı faylar olduklarını ortaya koymaktadır. Bu faylar üzerindeki kayma eksikliği yeşil hat ile temsil edilen kilitlenme bileşeninde gösterildiği gibi yıllık atım miktarını karşılamaktadır. Aynı zamanda 2. profil üzerindeki fay paralel hızlar Amanos

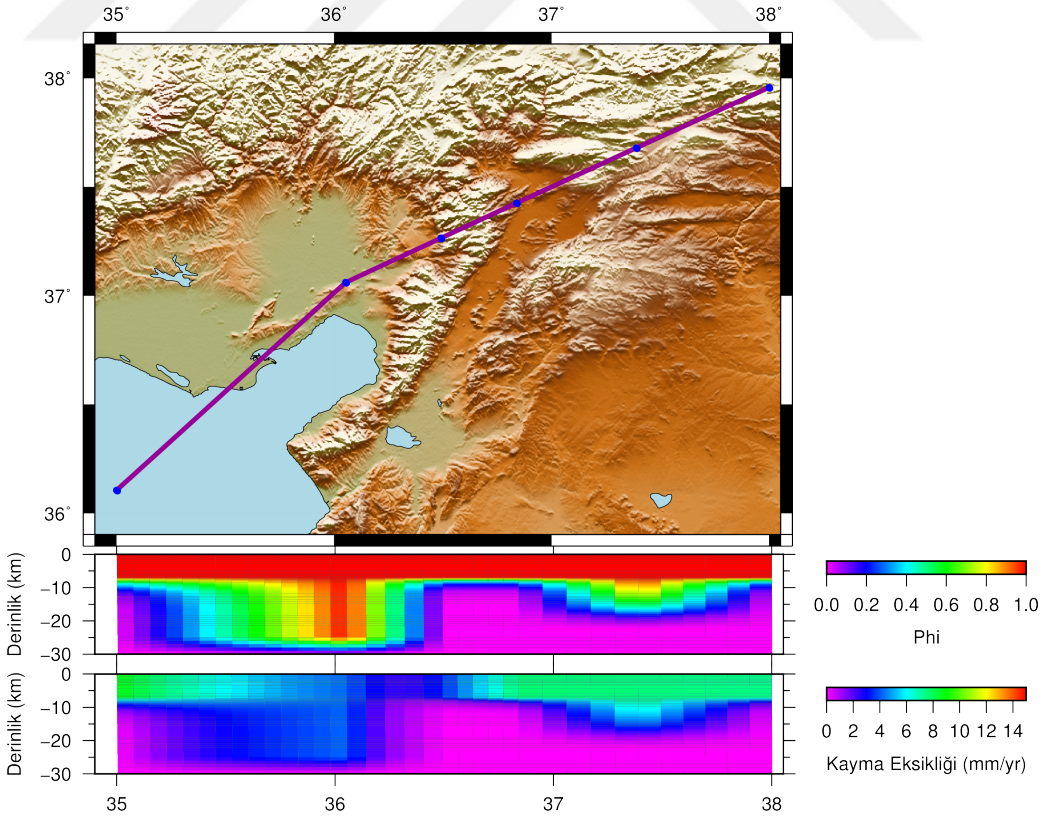
bloğunun batı sınırındaki serbest kaymayı (creeping) 2.35 mm/yıl olarak işaret etmektedir.

Ancak fay segmentlerinin kinematik özelliklerini yansıtan diğer parametreler φ (phi) kilitlenme oranları ve kilitlenme derinlikleridir. Bölüm 4.2'de detaylı olarak anlatıldığı üzere fayın tamamen kilitli olduğu (*φ=1)* kabul edilen sismojenik tabaka yüzeyden itibaren Z1 derinliğine kadar uzanırken bu Z1 sınır derinliği öncül olarak 7 km şeklinde tanımlanmıştır. Bu derinliğe kadar φ parametresi değişmez olarak kabul edilerek kestirim yapılmıştır. Modelde bu katmandan Z2 derinlik eğrisine kadar olan katmanın kısmen kilitli olduğu ve Z2 eğrisinden daha derinlerde ise serbest kaymanın hakim olduğu varsayımı esas alınmıştır. Bu noktada, ters çözüm tekniğinde φ parametresinde hızlı değişimler olmaması için fay doğrultusu boyunca yumuşatma uygulanmıştır. Bu yumuşatmaya bağlı olarak φ parametresindeki değişimlerin Wang ve diğ. (2003)'de verilen λ=0.2 katsayısını geçmemesi sağlanmıştır. Bu katsayı aynı zamanda daha önce Şekil 4.9'da üstel fonksiyon ile tanımlanan kayma dağılımının şeklini belirlemektedir.

Şekil 4.16'da ve detaylı olarak Şekil 4.17'de verilen Doğu Anadolu Fayı (EAF) ve Karataş-Osmaniye Fayı (KOF) boyunca phi (φ) parametresinin derinliğe göre değişimi incelendiğinde fayların tamamen kilitli oldukları *(φ=1)* derinlik EAF ve KOF için sırasıyla 5 km ve 6 km olarak kestirilmiştir. Aynı zamanda EAF 18 km derinliğe kadar kısmi kilitli iken bu sınırdan daha derinde serbest kayma gözlenmektedir. Ancak, KOF ve EAF üzerindeki kayma dağılımları önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu noktada, KOF için sismojenik tabaka içindeki kısmi kilitlenmenin fayın kuzeydoğu bölümünde 10 km'den daha sığ derinlikte olduğu, fayın orta ve güneybatı kısmında 29 km ile EAF'ye göre daha derinlerde son bulduğu ve buna bağlı olarak serbest kaymanın yüzeyden ~30 km derinde gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır. Yine benzer şekilde, Karasu Fayı (KF) ve Kıbrıs Yayı (CA) için kilitlenme derinliği 5 km olarak kestirilirken KF'nin kayma dağılımı KOF ile benzerlik göstermektedir. CA'nın güneybatısında ise yeterince ve uygun dağılımda GPS gözlem noktasının bulunmaması nedeniyle blok modelin bu bölümünde anlamlı kayma dağılımına ulaşmak mümkün olamamıştır.

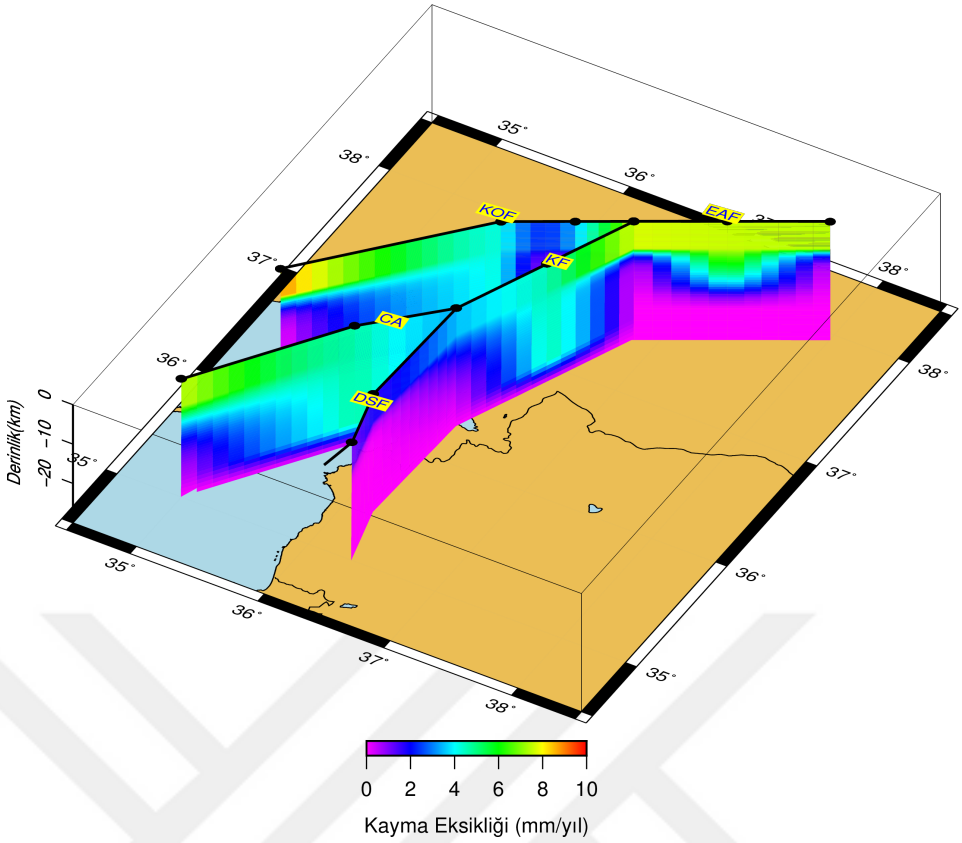


Şekil 4.16 : Çalışma bölgesindeki fay segmentleri boyunca phi (φ) parametresinin derinlik ile değişimi.



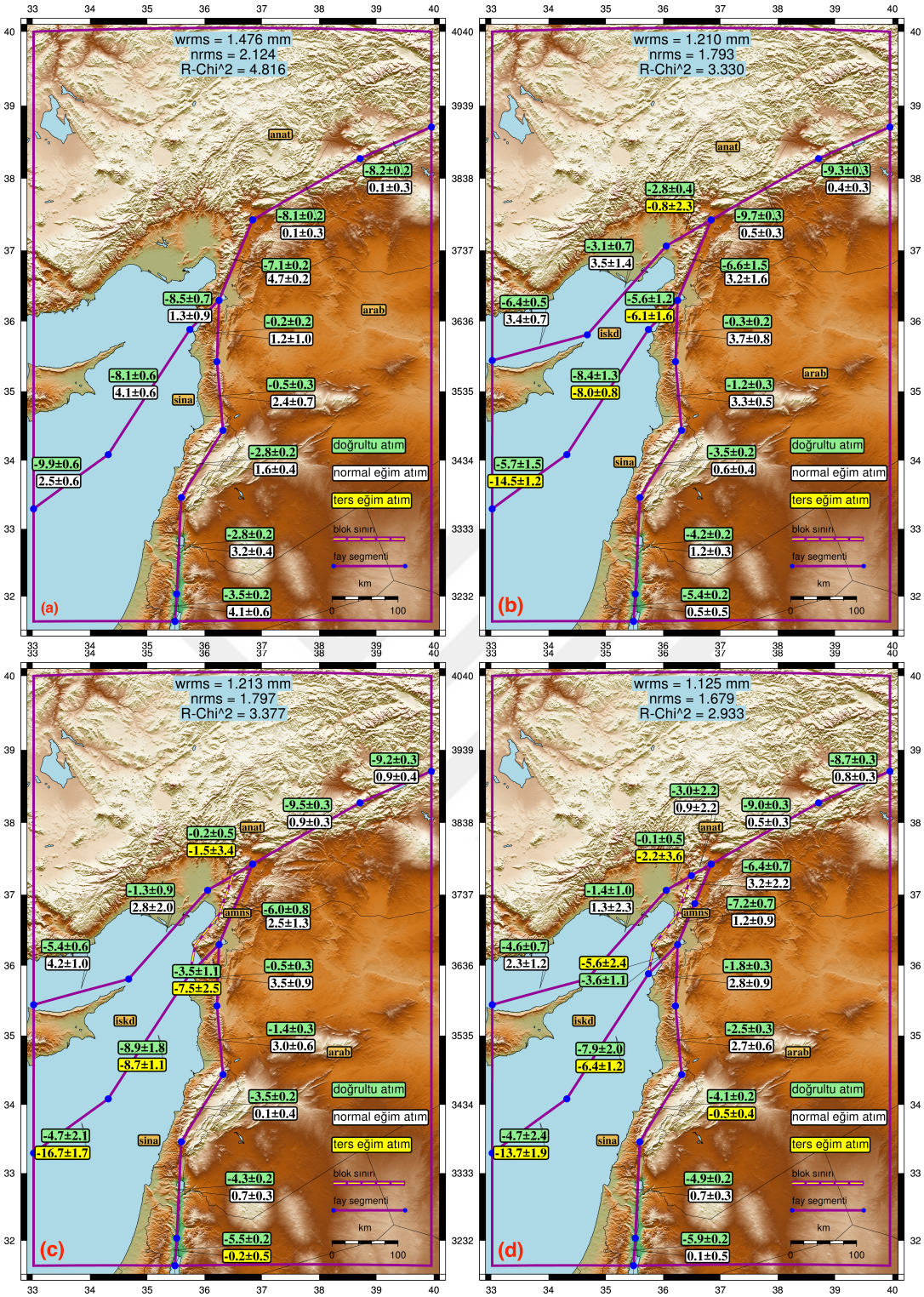
Şekil 4.17 : EAF ve KOF boyunca phi (φ) parametresinin derinlik ile değişimi (detaylı gösterim).

Yine Bölüm 4.1'de ayrıntıları ile değinilen kayma eksikliği-geri kayma (slip deficit/backslip), gerilme kuvvetinin bloklar arasındaki sürtünme kuvvetini yendiği anda kilitlenme oranlarına bağlı olarak gerinim birikiminin neden olduğu ani ve büyük bir yer değiştirmeye karşılık gelen rölatif bir harekettir. Eşitlik (4.25)'te verildiği üzere yüzeydeki kayma vektörüne benzer şekilde kilitlenme oranları da kayma eksikliğinin hesaplanmasına bir çarpan olarak etki yaptığı için tamamen kilitli olma durumunda *(φ=1)* kayma eksikliği en büyük değerine ulaşır. Buna bağlı olarak da muhtemel bir deprem anında fay segmenti üzerindeki en büyük yer değiştirmeye (atım) neden olur. Şekil 4.18'de nihai blok modele bağlı olarak çalışma bölgesindeki önemli tektonik yapılar için elde edilen kayma eksikliği dağılımının derinlik ile ilişkisi gösterilmiştir. Burada kayma eksikliği dağılımı fay doğrultuları boyunca yüzeyden 30 km derinliğe kadar olan sismojenik tabaka için kestirilmiştir. Buna göre, Bölüm 4.2'deki stratejiye bağlı olarak en büyük kayma eksikliği yüzeyde elde edilirken dağılım serbest kaymanın gerçekleştiği sınır derinliğe kadar değişkenlik göstermektedir. EAF için Kahramanmaraş üçlü kavşak noktasına yakın segmentte 7.66 mm/yıl ile en büyük değerini alan kayma eksikliği fayın modeldeki kuzeydoğu ucunda da benzer oranlarda bir gerinim birikimine işaret etmektedir. Güneybatıya doğru aksi istikamette ise KOF'nin en doğusunda ve batısında kayma eksikliği sırasıyla 7.25 ve 7.40 mm/yıl olarak elde edilmiştir. KF'nin kuzeydoğu ucunda Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası ile birleştiği segment üzerinde kayma eksikliği 7.41 mm/yıl değerini alırken güneye doğru inildikçe Antakya civarında 3.96 mm/yıl değerine yakınsadığı görülmektedir. Kıbrıs Yayı'nın Antakya ucunda da 3.77 mm/yıl olan gerinim birikimi bu noktada KF ile benzer özellik göstermektedir. Yine aynı blok modelin güney ucunda yer alan DSF üzerinde ise diğer segmentlere göre nispeten daha sınırlı bir gerinim birikimi (~2 mm/yıl) dikkat çekmektedir. Buna göre Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin fay kayma eksikliğine dair ulaşılan bu sonuçlar Mahmoud (2012) çalışmasında sunulan kestirim değerleri ile iyi uyum göstermektedir.



Şekil 4.18 : Çalışma bölgesindeki fay segmentleri boyunca phi parametresine bağlı olarak kestirilen kayma eksikliği dağılımının derinlik ile ilişkisi.

Şekil 4.10'de verilen en basit blok ve fay geometrisinden başlayarak en karmaşık geometriye doğru gelişen blok modelleme stratejisine dayanan fay kayma hızı kestirimleri Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 : Değişen blok ve fay geometrilerine bağlı olarak elde dilen fay kayma hızlarının gösterimi. Şekil 4.10'da detayları verilen model kompozisyonları kullanılmıştır. Model ile ilgili istatistikler üstteki mavi satırlarla özetlenmiştir. Açık yeşil (negatif) ile verilen kutular sol yanal doğrultu atımlı fayların kayma hızlarını göstermektedir. Beyaz (pozitif) ve sarı (negatif) renkli kutular ise sırasıyla gerilme (uzaklaşma) ile sıkışmaya (yakınlaşma) karşılık gelen normal ve ters fay bileşenlerine işaret etmektedir.

Buna göre, ters çözüm tekniği kullanılarak Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki faylara dair kayma hızları farklı blok ve fay kompozisyonları için kestirilmiştir. Model kompozisyonlarının kayma hızları üzerindeki etkileri model ile veri uyumu için iyi bir gösterge olan indirgenmiş ki-kare (χ_n^2) değerleri ile açıklanabilmektedir.

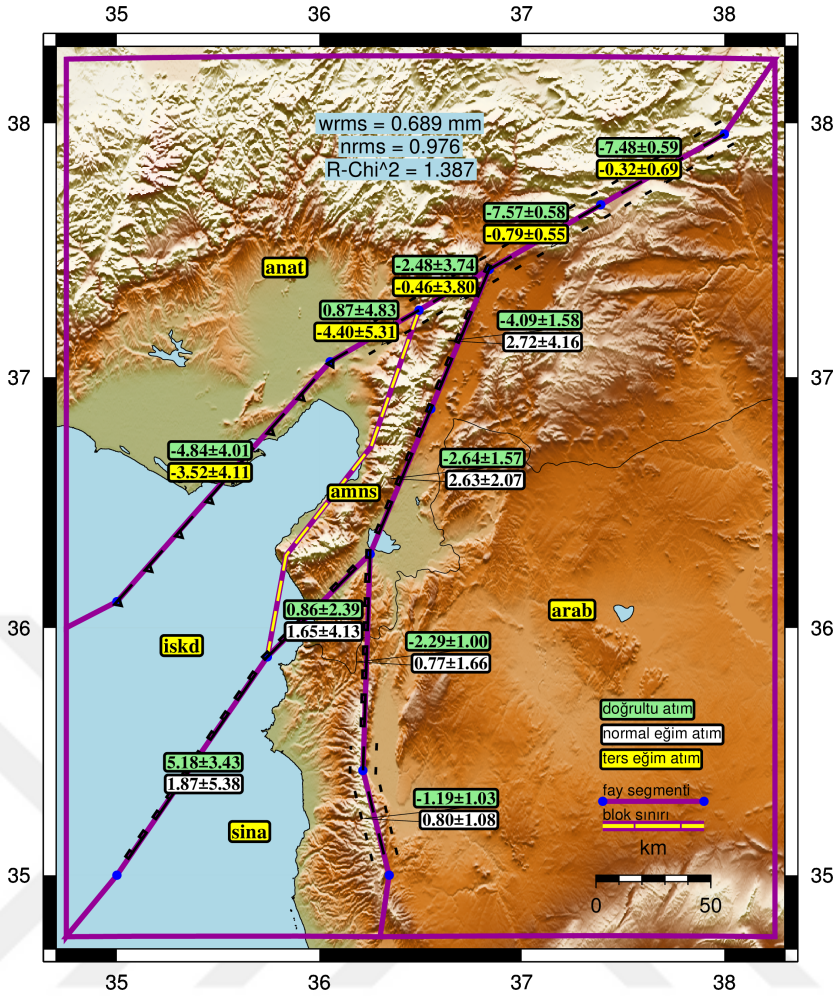
Bu açıdan değerlendirildiğinde EAF için tüm model kompozisyonlarında sol yanal doğrultu atımlı bileşenin baskın olduğu ve herhangi anlamlı bir yaklaşma ya da uzaklaşmaya neden olan normal/ters fay bileşeninin var olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bunun neticesinde, tüm model kompozisyonları arasında en düşük indirgenmiş ki-kare değeri göz önünde bulundurularak EAF'nin sol yanal doğrultu atımlı hareketinin ~9 mm/yıl kayma hızı ile gerçekleştiği görülmektedir.

Karasu Fayı (KF), Şekil 4.19'da (a) ve (b) kompozisyonlarında Kıbrıs Yayı'nın karadaki devamı niteliğinde değerlendirilmesine karşın (c) ve (d) kompozisyonlarında Amanos bloğunun tanımlanması ile beraber bu bloğun doğu sınırını teşkil etmektedir. Buradan hareketle, tüm kompozisyonlarda ulaşılan benzer kinematik bulgular KF üzerinde sol yanal doğrultu atım bileşeninin yanında bir de normal fay bileşeninin hakim olduğu ve bunun da bir açılmaya sebebiyet verdiği sonucunu doğrulamaktadır. Buna göre Şekil 4.19'daki tüm modellerde KF için sol yanal doğrultu atımlı ~6-7 mm/yıl kayma hızı ve normal fay üzerinde düşey atımlı ~3-4 mm/yıl kayma hızı sonuçlarına ulaşılmıştır.

KOF üzerinde elde edilen kayma davranışı KF'deki ile benzer özellikler göstermektedir. Daha açık bir ifade ile Şekil 4.19'daki dört bloklu (b) ve beş bloklu modellerde (c-d) KOF'nin de sol yanal doğrultu atımlı karakteri ortaya çıkmaktadır. Bu bileşende blok ve fay geometrisine bağlı olarak kayma hızının ~5-6 mm/yıl ile segmentin batı ucunda en yüksek değerlerine ulaşırken doğuya doğru azaldığı görülmektedir. Buna karşın bu segment üzerinde belirlenen hem normal hem de ters fay bileşenlerine rağmen düşey hareket yatay harekete oranla daha sınırlı kalmaktadır.

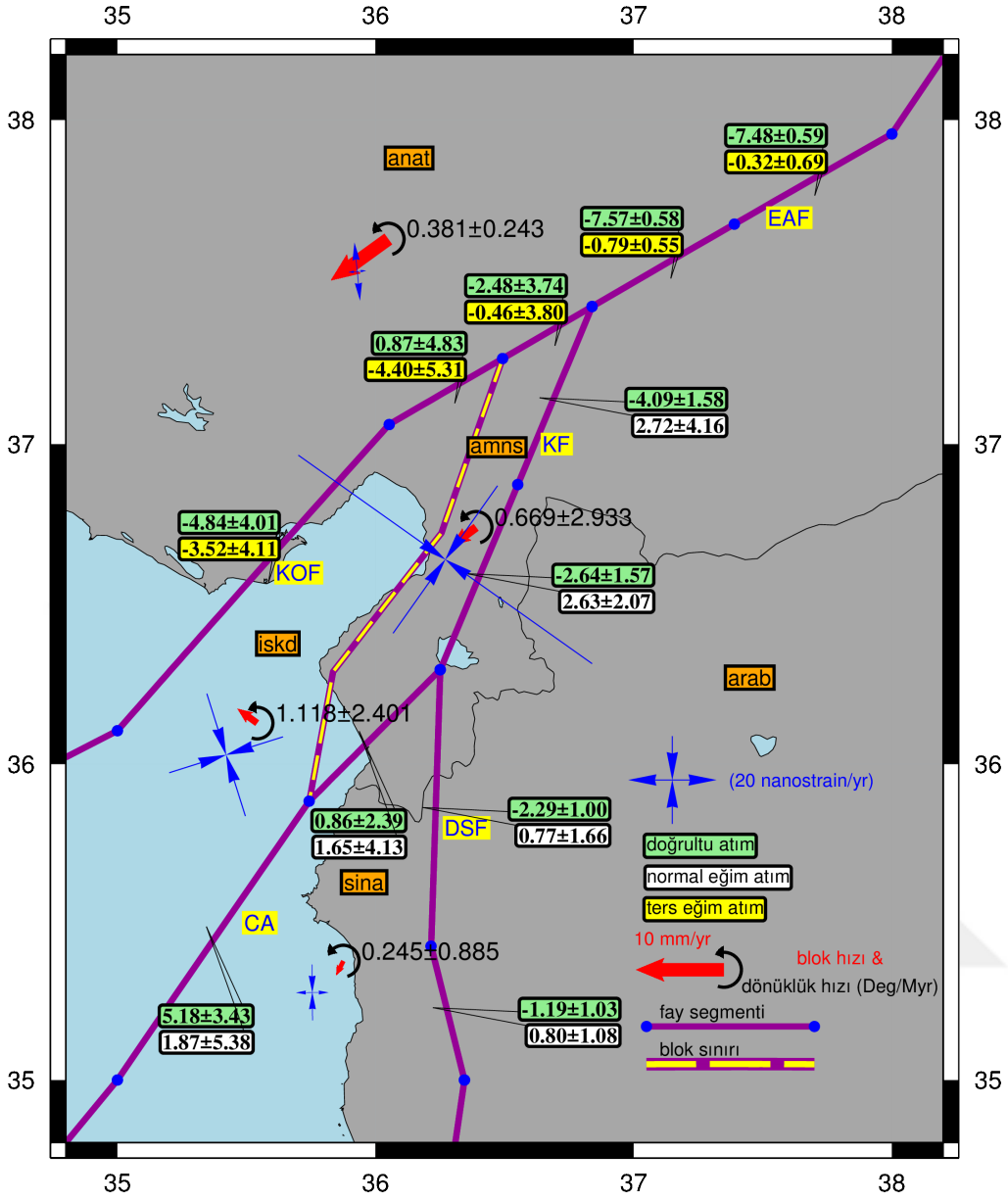
Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinin fay kayma hızlarına dair ulaşılan bu sonuçların Reilinger ve diğ. (2006) ve Mahmoud (2012) çalışmalarında sunulan kestirim değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Ancak Bölüm 4.2'de değinilen nedenlerden dolayı blok model alanının Şekil 4.8 ile verildiği şekliyle sınırlandırılması sonucunda Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki faylara dair kayma hızı kestirimleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Buna göre, 7.48±0.59 - 7.57±0.58 mm/yıl kayma hızına sahip sol yanal atımlı Doğu Anadolu Fayı'nın sismik stresin önemli bir bölümünü 2.64±1.57 - 4.09±1.58 mm/yıl hız ile sol yanal hareket gözlenen Karasu Fayı'na transfer ettiği belirlenmiştir. Tektonik bakış açısıyla Kahramanmaraş üçlü kavşak noktasından (K.Maraş Triple Junction) Doğu Anadolu Fayı'nın güneybatıya doğru devamı niteliğindeki Karataş-Osmaniye Fayı ise 2.48±3.74 - 4.84±4.01 mm/yıl hız ile sol yanal doğrultu atımlı ve 3.52±4.11 - 4.40±5.31 mm/yıl hız ile ters fay bileşenlerine bağlı olarak bu stresin bir kısmını üzerine almaktadır. Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmasında yer verilen Karataş-Osmaniye Fayı'nın 2.70±1.40 mm/yıl hız ile sol yanal doğrultu atımlı ve 2.80±2.60 mm/yıl hız ile ters fay bileşenleri bu çalışmadaki bulgular ile uyum göstermektedir. Karasu Fayı için Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmasında 2.30±1.60 mm/yıl, Mahmoud (2012) çalışmasında ise 2.1±0.9 - 2.7±0.7 mm/yıl hız ile verilen ters fay bileşeninin aksine bu çalışmada 2.63±2.07 - 2.72±4.16 mm/yıl hız ile gösterilen ve Reilinger ve diğ. (2006) çalışmasında da 6.40±0.30 mm/yıl kayma hızı ile desteklenen normal fay bileşeni açılma rejimine işaret etmektedir.



Şekil 4.20 : Daraltılmış blok model alanında nihai blok ve fay geometrisine göre fay kayma hızlarının gösterimi. Gösterim detayları Şekil 4.19'da verilmiştir.

Şekil 4.21'de çift yönlü mavi oklar ile gösterilen blok içi yamulma hızları incelendiğinde en büyük gerinim birikiminin Amanos bloğu (amns) üzerinde olduğu ve doğu yöndeki normal gerinim, kuzey yöndeki normal gerinim ve makaslama gerinim bileşenlerinin sırasıyla 82, 41 ve 35 nanostrain/yıl ile işaret ettiği bir sıkışma yapısı dikkat çekmektedir.



Şekil 4.21 : Daraltılmış blok model alanında fay kayma hızlarının, katı blok hızlarının, blok dönme hızlarının ve blok içi yamulma (gerinim) hızlarının gösterimi. Çift yönlü mavi oklar yamulma hızlarını, kırmızı vektör ve siyah dairesel vektör sırasıyla katı blok hızlarını ve blokların dönme hızlarını göstermektedir. Şekil üzerindeki diğer detaylar Şekil 4.19'da verilmiştir.

Benzer şekilde İskenderun bloğu (iskd) üzerinde de normal gerinim bileşenleri 27 ve 29 nanostrain/yıl, makaslama gerinim bileşeni 17 nanostrain/yıl olan bir sıkışma rejiminden söz edilebilmektedir. Sina bloğu (sina) üzerindeki normal gerinim bileşenleri 7 ve 13 nanostrain/yıl yamulma hız değerleri ile özellikle kuzey-güney yönlü baskın bir sıkıştırma kuvveti oluşturmaktadır. Anadolu bloğu (anat) üzerindeki genişleme ise 13 nanostrain/yıl yamulma hız değeri ile bölgede Sina bloğuna benzer görece düşük gerinim birikimini işaret etmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde gerinim biriktiren önemli diri fayların kinematiğini ortaya koyabilmek için güncel GPS hız kestirim değerleri kullanılarak ters çözüm yöntemi ve üç boyutlu elastik yarı uzaysal yer değiştirme modeli yardımıyla blokların dönme hızları, fay kayma hızları, fay kilitlenme derinlikleri ile blok içi yamulma hızları belirlenmiştir. Bu kapsamda uygun geometri ve dağılımdaki kampanya GPS gözlem noktaları ile sürekli GPS istasyonlarından oluşan geniş bir jeodezik ağ tasarlanarak Adana, Osmaniye, Hatay ve Gaziantep illerini içine alan bölgede başlıca diri faylar üzerindeki güncel deformasyonlar ve buna bağlı oluşan muhtemel sismik tehlikeler gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir:

1. Öncelikle 2009, 2010 ve 2011 yıllarına dair arşiv kampanya GPS verileri tez çalışması kapsamında 2019 yılında gerçekleştirilen kampanya gözlemleri ve sürekli GPS istasyon verileri ile entegre edilerek güncel bir GPS veri seti oluşturulmuştur. Bölgedeki sürekli GPS istasyonları (TUSAGA-Aktif ve kamu kurumlarına ait CORS ağlarının istasyonları) jeodezik gözlem ağının uzaysal ve zamansal çözünürlüğünü artırırken 2019 yılında gerçekleştirilen kampanya GPS gözlemleri hem uzun dönem deformasyonların güncel olarak belirlenebilmesine hem de mevcut veri kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur. Doktora tez çalışmasının özgün değeri olan yeni kampanya gözlem ve GPS istasyon verileri bu yönleriyle bölgedeki tektonik sürecin anlaşılması için benzeri olmayan bir jeodezik birikim sağlamaktadır.

2. Blok modelleme öncesinde, çalışmaya özgü bu jeodezik ağdan sağlanan GPS verileri işlenerek çalışma bölgesi ve civarı için güncel GPS hız alanı tanımlanmıştır. GPS verileri GAMIT/GLOBK yazılımı ile işlenerek kampanya gözlem noktalarının ve sürekli GPS istasyonlarının güncel hız kestirimleri ITRF2008 datumunda gerçekleştirilmiştir. Ancak blok modellemedeki bütünsel bakış açısının gereği olarak bu lokal GPS hız alanının literatürdeki GPS hız alanı

çözümleri ile entegrasyonu neticesinde ITRF2000 referans sisteminde Avrasya levhası sabit bütünleşik GPS hız alanı elde edilmiştir. Bunun için uygun dönüşüm modelinin kurulmasıyla lokal GPS hız alanı ile literatürden sağlanan GPS hız alanı çözümlerinin ortak bir refereans sistemi çatısı altında toplanması sağlanmıştır. Dönüşüm modelinde referans hız alanı Reilinger ve diğ. (2006) çalışmasındaki hız alanı çözümü olarak seçilmiştir. Kullanılan diğer GPS hız alanı çözümleri Aktug ve diğ. (2013), Al-Tarazi ve diğ. (2011), Alchalbi ve diğ. (2010), Gomez ve diğ. (2007), Le Beon ve diğ. (2008) ve Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmalarından sağlanmıştır. Ancak, önceki bölümlerde detaylı olarak değinildiği üzere Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmasından elde edilen hız alanı çözümü blok modellemede kullanılmamıştır. Avrasya levhası sabit GPS hız alanı (Şekil 3.13 ve Şekil 3.14) incelendiğinde bu çalışmadaki jeodezik ağ noktalarında (kampanya gözlem noktaları ve sürekli GPS istasyonları) hız vektörlerinin 11-18 mm/yıl olarak elde edilmesi çalışma bölgesi ve çevresindeki kuzeybatı yönlü hareketin büyüklüğünü göstermektedir. Jeodezik ağın tüm noktalarındaki hız kestirim değerleri için ortalama standart sapma ise her iki bileşende de ±1.65 mm/yıl hesaplanmıştır. Aynı zamanda, bu çalışmada elde edilen hız vektörleri bölgesel olarak Aktug ve diğ. (2013) ve Reilinger ve diğ. (2006) çalışmaları ile oldukça yüksek bir uyum göstermektedir. Bunun dışında, Reilinger ve diğ. (2006) ve Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmalarından derlenen Euler vektör parametrelerine bağlı olarak Arabistan levhası sabit GPS hız alanı da üretilmiş ve bu sayede farklı referans (sabit) blok kısıtları ile nokta hızları sorgulanmıştır (Şekil 3.15). Birbirinden bağımsız olarak her iki referans blok tanımında da birleştirilen çözümlerdeki nokta hızlarının yüksek uyumu veri setinin güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

3. Bu çalışmada, Aktug ve diğ. (2016), McClusky ve diğ. (2003) ve Reilinger ve diğ. (2006) çalışmalarında ortaya konulan blok modellerden farklı olarak Mahmoud (2012) çalışmasındaki gibi Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki diri fayların kinematik özelliklerini detaylı bir şekilde araştırmak için daha karmaşık bir blok model önerilmiştir. Diri fayların kinematik özelliklerinin blok modeller ile tanımlanabilmesi için TDEFNODE yazılımından yararlanılmıştır. Blok modelleme çalışmasında en basit geometriden başlayan ve adım adım daha karmaşık geometriye doğru veri ile model uyumunun test edildiği bir strateji

benimsenmiştir. Model geometrilerinin uygunluğu, modelin yeterli ve uygun dağılımda GPS gözlem noktası ile temsil edilip edilmediğini ölçen karesel ortalama hata (RMS) değerleri ile karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Buna göre, 3 bloklu en basit geometriden 5 bloklu en karmaşık geometriye doğru sırasıyla RMS değerleri 2.16, 1.82 ve 1.84 olarak hesaplanmıştır. Bu noktada Mahmoud ve diğ. (2013) çalışmasından elde edilen hız kestirim değerleri tez çalışmasında daha önce açıklanan gerekçeler ile modelleme dışında bırakılarak daha rafine bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri setinin 5 bloklu en karmaşık geometride ters çözümü sonucunda RMS değeri 1.72 şeklinde hesaplanmıştır. Ancak Bölüm 4.2'de değinilen nedenlerden dolayı blok model alanı Şekil 4.8 ile verildiği şekliyle daraltılarak Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki fayların kinematik özelliklerinin lokal çerçevede detaylı bir biçimde sorgulanması yoluna gidilmiştir. Daraltılmış model alanında 5 bloklu geometrinin aynı veri seti ile kombinasyonu sonucunda RMS değeri 1.18 olarak elde edilmiştir. Bu en düşük RMS değeri, veri ile model arasındaki en yüksek uyuma işaret etmektedir.

4. TDEFNODE blok modelleme yaklaşımında model hızları ile GPS gözlem hızları arasındaki farkların minimum olmasına bağlı olarak indirgenmiş ki-kare (χ_n^2) testi uygulanır ve bu istatistiksel testin sonucunda χ_n^2 değerinin teorik olarak 1.0 değerine yakınsaması beklenir. Bu tez çalışması kapsamında da değişen blok ve fay geometrilerine bağlı olarak elde edilen istastistiksel sonuçlara Çizelge 4.1'de yer verilmiştir. Ancak, yukarıda sözü edilen rafine veri setinin daraltılmış model alanında 5 bloklu geometride çözümü sonucunda 1.387 ile en düşük χ_n^2 değerine ulaşılmıştır. Bu istatiksel sonuç, eldeki güncel GPS verilerine göre bölgenin kinematiğini en iyi yansıtan geometrinin daraltılmış model alanında 5 bloklu tektonik yapı olduğunu göstermektedir. Bunun yanında, model ve gözlem hızı farkları dikkate alındığında doğu-batı ve kuzey-güney bileşen maksimum artık hız değerlerinin (residuals) sırasıyla 3.69 mm/yıl ve 3.38 mm/yıl olarak elde edilmiş olması model ile veri arasındaki en yüksek uyumu numerik olarak da destekler niteliktedir.

5. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki faylara yakın ve uzak alanlarda güncel gerinim birikimi araştırılırken üzerinde GPS gözlem noktaları bulunan ve fay segmentlerini dik şekilde kesen profillerden de yararlanılmıştır (Şekil 4.14). Bu

yöntemde Şekil 4.15'te siyah hatlar ile gösterilen fay paralel dönüklük bileşenlerinin negatif değerler alması Arabistan levhasına (referans blok) göre diğer blok hareketlerinin saat yönünün tersine olduğunu açıklamaktadır. Bu siyah hattın basamaklı yapısı blok dönüklük hızlarının fay paralel bileşenlerinin birbirlerine göre nasıl değiştiğinin göstergesidir. Profillerden, özellikle Karataş-Osmaniye Fayı'nın (KOF) sınır oluşturduğu komşu bloklar arasında (anat-iskd ve anat-amns blok çiftleri) 3.56, 4.79 ve 5.50 mm/yıl (profil no sırasıyla) hız farkları oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 4.21'de verilen blok dönüklük hızları incelendiğinde söz konusu bloklar arasındaki hız farklarının görece fazla oluşu bu durumu açıklamaktadır. Profillerdeki yeşil hat ise kilitlenmenin fay paralel bileşeni yani yüzeyde oluşan kayma eksikliğini göstermektedir. Özellikle Karasu Fayı'nın kuzeydoğu ucundan güneybatı ucuna doğru azalan kayma eksikliği 1. ve 2. profillerden sırasıyla 5.65 ve 3.70 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Karasu Fayı'na dair kayma eksikliğindeki bu değişim Şekil 4.18'de de açıkça görülmektedir. Profiller üzerindeki kilitlenme bileşeninin Amanos bloğunun serbest kayma yapan batı sınırında (w-amns) anlamlı anomaliler göstermemiş olması bu sınırdaki serbest kaymaya işaret etmektedir. Bunun dışında fay normal hızlar dikkate alındığında 1. ve 2. profillerde Karasu Fayı (KF) için 2.10-2.80 mm/yıl kayma hızı ile normal fay bileşeni dikkat çekmektedir. 2. ve 3. profiller incelendiğinde Amanos bloğunun serbest kayma yapan batı sınırındaki (w-amns) keskin negatif eğim 4.28-4.78 mm/yıl hız ile İskenderun bloğuna (iskd) olan yaklaşmayı ifade etmektedir. Fay paralel hızlar göz önüne alındığında, KOF'nin kuzeybatısında hızların 8 mm/yıl civarında olduğu ve aynı zamanda hem KOF hem de KF'nin ~3-4 mm/yıl kayma hızları ile sol yanal atımlı faylar oldukları ortaya konulmuştur. Bu faylar üzerindeki kayma eksikliği de yıllık atım miktarını karşılamaktadır. Amanos bloğunun batı sınırındaki serbest kayma (w-amns) ise 2. profil üzerindeki hız farklarına bağlı olarak 2.35 mm/yıl olarak belirlenmiştir.

6. Şekil 4.16'da ve detaylı olarak Şekil 4.17'de phi (φ) parametresinin derinliğe göre değişimi incelendiğinde fayların tamamen kilitli oldukları *(φ=1)* derinlik EAF ve KOF için sırasıyla 5 km ve 6 km olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda EAF'nin kısmen kilitli olduğu sismojenik zon 5 ile 18 km arasında iken 18 km'den daha derinde serbest kayma gözlenmektedir. KOF için kısmen kilitlenmenin 6 km'den 29 km'ye kadar olan geniş bir sismojenik zon içinde

gerçekleştiği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak serbest kaymanın yüzeyden ~30 km derinde gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Diğer taraftan, Karasu Fayı (KF) ve Kıbrıs Yayı (CA) için kilitlenme derinliği 5 km olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, KF'nin kayma dağılımının KOF ile benzer yapıda olduğu gösterilmiştir. CA'nın güneybatısında ise yeterince ve uygun dağılımda GPS gözlem noktasının bulunmaması nedeniyle blok modelin bu bölümünde anlamlı kayma dağılımına ulaşmak mümkün olamamıştır.

7. Çalışma bölgesindeki başlıca diri faylar için elde edilen kayma eksikliği dağılımının derinlik ile ilişkisi Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Buna göre, EAF'nin Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası ile birleşen Türkoğlu-Gölbaşı segmentinde 7.66 mm/yıl kayma eksikliği hesaplanmıştır. Bu değer, EAF ve devamındaki KOF hattı üzerinde elde edilen en büyük kayma eksikliğine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, KOF'nin en doğusunda ve batısında kayma eksikliği sırasıyla 7.25 ve 7.40 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Bunun dışında, KF'nin kuzeydoğu ucunda Kahramanmaraş üçlü kavşak noktası ile birleştiği segment üzerinde kayma eksikliği 7.41 mm/yıl kestirim değerine sahiptir. Güneye doğru inildikçe Antakya civarında 3.96 mm/yıl değerini almaktadır. Kıbrıs Yayı'nın Antakya ucunda da 3.77 mm/yıl olan yıllık gerinim birikimi bu noktada KF ile benzer özellik göstermektedir. Blok modelin güney ucundaki DSF üzerinde ise görece daha düşük kayma eksikliği (~2 mm/yıl) belirlenmiştir.

8. Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki faylara dair kayma hızı kestirimleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Bu doktora tez çalışmasında ortaya konulan modele göre sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fayı 7.48±0.59 - 7.57±0.58 mm/yıl kayma hızına sahiptir. Bunun yanında, 2.64±1.57 - 4.09±1.58 mm/yıl hızındaki sol yanal hareketi ile Karasu Fayı (Amanos Fayı) Doğu Anadolu Fayı'nın biriktirdiği stresin bir bölümünü üzerine almaktadır. Karasu Fayı'nın sol yanal hareketi Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmasında 4.5±1.1 mm/yıl ve Mahmoud (2012) çalışmasında ise 3.9±1.0-4.0±1.0 mm/yıl ile gösterilmiştir. Karasu Fayı'nın Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmasında 2.30±1.60 mm/yıl ve Mahmoud (2012) çalışmasında 2.1±0.9 - 2.7±0.7 mm/yıl hıza sahip bir ters fay bileşeni olduğu belirtilmiştir. Ancak, Karasu Fayı'nın bu çalışmada 2.63±2.07 - 2.72±4.16 mm/yıl ve Reilinger ve diğ. (2006) çalışmasında da 6.40±0.30 mm/yıl kayma hızı

ile gösterilen normal fay bileşeni açılma rejimine işaret etmektedir. Diğer taraftan bu çalışmadan çıkan sonuçlara göre Karataş-Osmaniye Fayı kuzeydoğu ucunda 2.48±3.74 mm/yıl ve güneybatı ucunda 4.84±4.01 mm/yıl hız ile sol yanal doğrultu atımlı hareketi devam ettirmektedir. Ayrıca, Karataş-Osmaniye Fayı'nın 3.52±4.11 - 4.40±5.31 mm/yıl hıza sahip ters fay bileşeni de bölgenin tektoniği üzerinde etkilidir. Aktuğ ve diğ. (2016) çalışmasında ileri sürülen 2.70±1.40 mm/yıl hız ile sol yanal hareket ve 2.80±2.60 mm/yıl hız ile ters faylanma bu doktora tez çalışmasındaki sonuçlar ile örtüşmektedir. Mahmoud (2012) çalışmasında ise Karataş-Osmaniye Fayı'nın kuzeydoğu ucunda 1.4±0.7 mm/yıl hız ile ters faylanma, güneybatı ucunda 1.2±0.5 mm/yıl hız ile normal faylanma gösterilmiştir.

9. Blok içi yamulma hızları incelendiğinde (Şekil 4.21) en büyük gerinim birikiminin Amanos bloğu (amns) üzerindeki sıkışma yapısında olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde İskenderun bloğu (iskd) üzerinde de görece daha sınırlı bir sıkışma rejiminden söz edilebilmektedir. Sina bloğu (sina) ve Anadolu bloğu (anat) üzerindeki deformasyonlar bölgede görece düşük gerinim birikimlerini yansıtmaktadır.

10. Tüm bu sonuçlar ışığında bu çalışmada, Doğu Anadolu Fayı'nın Türkoğlu-Gölbaşı segmenti üzerinde meydana gelen 1114 (M ≥7.8, Ambraseys ve Jackson, 1998; Ms 7.7, Sbeinati ve diğ, 2005; Ms 6.9, Ambraseys, 2009) depreminin ardından başlayan gerinim birikimi ile 90 km'lik Türkoğlu-Gölbaşı segmentinin olası bir depremde tek parça halinde kırılması durumunda biriken ~6.8 metre atımın 7.2 (Anderson ve diğ, 1996) ile 7.6 (Wells ve Coppersmith, 1994) büyüklüklerinde olası depremler ile karşılanabileceği tahmin edilmektedir. Yine benzer şekilde, 1513 (M ~7.4) (Ambraseys, 1989, 2009) depremi sonrasında günümüze kadar Karataş-Osmaniye Fayı'nın kuzeydoğuda 2.48 mm/yıl kayma hızı ile ~1.3 metre ve güneybatıda 4.84 mm/yıl kayma hızı ile ~2.5 metre deformasyon biriktirdiği düşünülmektedir. Bunun neticesinde her biri 40 km'lik iki fay segmentinin ayrı ayrı kırılması 6.8-6.9 büyüklüklerinde (Anderson ve diğ, 1996) ve 7.0-7.2 büyüklüklerinde (Wells ve Coppersmith, 1994) olası depremlere yol açabilir. Doğu Anadolu Fayı ve Ölü Deniz Fayı arasında 150 km boyunca yaklaşık kuzey-güney doğrultusunda uzanan Karasu Fayı üzerindeki 1822 (M

7.4) ve 1872 (M 7.2) depremleri (Ambraseys, 1989, 2006, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998; Sbeinati ve diğ, 2005) düşünüldüğünde ise günümüze kadar ~0.4-0.6 metre gerinim birikimi tespit edilmiştir. Sol yanal atımlı Karasu Fayı, Wells ve Coppersmith (1994) yaklaşımına göre 2.64-4.09 mm/yıl kayma hızı ile yaklaşık 6.6-6.8 büyüklüğünde olası bir depremi bünyesinde barındırmaktadır. Nitekim Anderson ve diğ. (1996) yaklaşımı bu çalışmaya uygulandığında ise her biri 75 km uzunluğundaki iki fay segmentinden herhangi birinin kırılması durumunda yaklaşık 7.2 büyüklüğünde olası bir deprem öngörülmektedir.

11. Doğu Anadolu Fayı ile kıyaslandıklarında Karasu ve Karataş-Osmaniye Faylarının farklı kinematik özelliklere sahip olmaları nedeniyle Doğu Anadolu Fayı'nın devamı oldukları görüşünün gerçekçi bir bakış açısı olmadığı ve Doğu Anadolu Fayı'nın Kahramanmaraş-Türkoğlu üçlü kavşak noktasından itibaren güneybatıya doğru at kuyruğu yapısı (horsetail structure) oluşturacak şekilde sonlandığı değerlendirilmektedir.

Çalışma kapsamında ortaya konulan souçlardan yola çıkarak yapılabilecek öneriler ise aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Güncel GPS hız alanını iyileştirmek, hız kestirim değerlerinin güvenilirliğini artırmak, blok modelin geliştirilmesini sağlamak ve yeni çalışmalara daha yoğun bir veri seti sunabilmek amacıyla olabildiğince fazla sürekli GPS istasyonu da jeodezik ağa dahil edilerek GPS gözlemlerine devam edilmelidir.

2. Bu çalışmada kullanılan Kuzeydoğu Akdeniz bölgesi için yüksek uzaysal çözünürlüklü güncel GPS verilerine detaylı jeoloji, sismoloji ve paleosismoloji çalışmaları ile eklenecek yeni veri setleri blok modelin geliştirilmesi açısından büyük bir önem taşımaktadır.

3. Bu çalışma sonucunda ileri sürülen Kuzeydoğu Akdeniz bölgesindeki önemli diri fayların sahip olduğu büyük deprem (M > 7) potansiyeli sismik tehlike analizleri için yeni modeller geliştirilmesine yardımcı olması ve deprem hasar tahmin çalışmalarına katkı sunması açısından önemlidir. Buna bağlı olarak özellikle kentsel dönüşüme yönelik planlamalarda yol gösterici rol oynayacaktır.

4. Bu çalışma aynı zamanda Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nca yayımlanan Ulusal Deprem Stratejisi ve Eylem Planı (UDSEP-2023) kapsamında aşağıdaki eylem planlarına sağlayabileceği katkılar açısından da önemli sonuçlar sunmaktadır.

    - Eylem A.1.1.4 Deprem öncesi, anı ve sonrasında fay zonlarındaki yer kabuğu deformasyonların ulusal ve yerel jeodezi ağlarla sürekli olarak izlenecek ve modellenecektir.

    - Eylem A.2.1.2 Bazı diri fay parametrelerini elde edebilmek amacıyla faylardaki kayma hızları jeodezik yöntemlerle elde edilecektir.

KAYNAKLAR

Aktug, B. (2006). *Jeodezik Ölçüler ile Deprem Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aktug, B., Parmaksiz, E., Kurt, M., Lenk, O., Kiliçoğlu, A., Ali Gürdal, M. ve Özdemir, S. (2013). Deformation of central anatolia: GPS implications. *Journal of Geodynamics*, 67, 78–96.

Aktug, B., Ozener, H., Dogru, A., Sabuncu, A., Turgut, B., Halicioglu, K., ... Havazli, E. (2016). Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field. *Journal of Geodynamics*, 94–95, 1–12.

Al-Tarazi, E., Abu Rajab, J., Gomez, F., Cochran, W., Jaafar, R. ve Ferry, M. (2011). GPS measurements of near-field deformation along the southern Dead Sea Fault System. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12.

Alchalbi, A., Daoud, M., Gomez, F., McClusky, S., Reilinger, R., Romeyeh, M. A., ... Darawcheh, R. (2010). Crustal deformation in northwestern Arabia from GPS measurements in Syria: Slow slip rate along the northern Dead Sea Fault. *Geophysical Journal International*, 180, 125–135.

Allen, C. R. (1969). *Active Faulting in Northern Turkey*. Contribution No. 1577, Division of Geological Sciences, California Institute of Technology.

Altamimi, Z., Métivier, L. ve Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117.

Altunel, E., Meghraoui, M., Karabacak, V., Akyüz, S. H., Ferry, M., Yalçiner, Ç. ve Munschy, M. (2009). Archaeological sites (Tell and Road) offset by the Dead Sea Fault in the Amik Basin, Southern Turkey. *Geophysical Journal International*, 179, 1313–1329.

Ambraseys, N. N. (1988). Engineering seismology: part II. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 17, 51–105.

Ambraseys, N. N. (1989). Temporary seismic quiescence: SE Turkey. *Geophysical Journal International*, 96, 311–331.

Ambraseys, N. N. (2004). The 12th century seismic paroxysmin the Middle East: a historical perspective. *Annals of Geophysics*, 47.

Ambraseys, N. N. (2006). Comparison of frequency of occurrence of earthquakes with slip rates from long-term seismicity data: The cases of Gulf of Corinth, Sea of Marmara and Dead Sea Fault Zone. *Geophysical Journal International*, 165, 516–526.

Ambraseys, N. N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.

Ambraseys, N. N. ve Jackson, J. A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133, 390–406.

Ambraseys, N. N. ve Melville, C. P. (1995). Historical evidence of faulting in Eastern Anatolia and Northern Syria. *Annals of Geophysics*, 38.

Anderson, J. G., Wesnousky, S. G. ve Stirling, M. W. (1996). Earthquake size as a function of fault slip rate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 683–690.

Arpat, E. ve Şaroğlu, F. (1972a). Some observations and thoughts on the East Anatolian fault. *Bull. Miner. Res. Explor. Inst. Turk*, 73, 44–50.

Arpat, E. ve Şaroğlu, F. (1972b). The East Anatolian fault system; thoughts on its development. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 78, 1–12.

Ayhan, E., Alsan, E., Sancaklı, N. ve Üçer, S. B. (1981). *Türkiye dolayları deprem kataloğu 1881–1981*. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, İstanbul, Turkey.

Barka, A. A. ve Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7, 663–684.

Barka, A., Akyüz, S. ve Altınel, E. (1999). Adana çevresinin güncel tektoniği ve 1998 Adana depremi. *Türkiye Deprem Vakfı, Aktif Tektonik*, 2, 20–31.

Bletery, Q., Cavalié, O., Nocquet, J. ve Ragon, T. (2020). Distribution of interseismic coupling along the North and East Anatolian Faults inferred from InSAR and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087775.

Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Bulut, F., Stierle, E. ve Ben-Zion, Y. (2016). Maximum earthquake magnitudes along different sections of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, 674, 147–165.

Çakır, Z. (2010). *Türkiye Diri Fayları Boyunca Meydana Gelen Kabuk Deformasyonunun Yapay Açıklık Radar İnterferometrisi (InSAR) Yöntemiyle İncelenmesi*. 107Y281 TÜBİTAK Proje Raporu.

Cavalié, O. ve Jónsson, S. (2014). Block-like plate movements in eastern Anatolia observed by InSAR. *Geophysical Research Letters*, 41, 26–31.

D'Alessio, M. A., Johanson, I. A., Bürgmann, R., Schmidt, D. A. ve Murray, M. H. (2005). Slicing up the San Francisco Bay Area: Block kinematics and fault slip rates from GPS-derived surface velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, 1–19.

Dewey, J. F., Hempton, M. R., Kidd, W. S. F., Saroglu, F. ve Şengör, A. M. C. (1986). Shortening of continental lithosphere: the neotectonics of Eastern Anatolia—a young collision zone. *Geological Society, London, Special Publications*, 19, 1–36.

DiZio, L. (2016). Elastic Block Modeling of Fault Slip Rates across Southern California. *Macalester Journal of Physics and Astronomy*, 4, 3.

Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadirioğlu, F. T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., ... Kurt, A. (2018). Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3277–3316.

Ekström, G., Nettles, M. ve Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201, 1–9.

Emre, O. ve Duman, T. Y. (2007). The East Anatolian Fault: Structural pattern and relationship with the Dead Sea Transform. *AGUFM*, T42B-01.

Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. (2013). Active Fault Map of Turkey with an Explanatory Text. 1:1,250,000 Scale. *General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication Series-30.*, 30.

Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. ve Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 3229–3275.

Ergin, K., Güçlü, U. ve Uz, Z. (1967). A catalog of earthquakes for Turkey and surrounding areas. *Tech. Univ. Istanbul Mining Eng. Fac., Publ*, 24, 74.

Ergin, K., Güçlü, U. ve Aksay, G. (1971). A catalog of earthquakes of Turkey and surrounding area (1965–1970). *Publ. Techn. Univ. Istanbul, Turkey*, 28, 184.

Estey, L. H. ve Meertens, C. M. (1999). TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS solutions*, 3, 42–49.

Florentin, J. A., Blackwell, B. A. B., Tüysüz, O., Tari, U., Genç, Ş. C., Imren, C., ... Kim, M. (2014). Monitoring tectonic uplift and paleoenvironmental reconstruction for marine terraces near mağaracik and Samandağ, Hatay province, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 159, 220–232.

Galgana, G. A. ve Hamburger, M. W. (2010). Geodetic observations of active intraplate crustal deformation in the Wabash Valley seismic zone and the southern Illinois basin. *Seismological Research Letters*, 81, 699–714.

Galgana, G., Hamburger, M., McCaffrey, R., Corpuz, E. ve Chen, Q. (2007). Analysis of crustal deformation in Luzon, Philippines using geodetic observations and earthquake focal mechanisms. *Tectonophysics*, 432, 63–87.

Genrich, J. F., Bock, Y., McCaffrey, R., Prawirodirdjo, L., Stevens, C. W., Puntodewo, S. S. O., ... Wdowinski, S. (2000). Distribution of slip at the northern Sumatran fault system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105, 28327–28341.

Gomez, F., Karam, G., Khawlie, M., McClusky, S., Vernant, P., Reilinger, R., ... Barazangi, M. (2007). Global Positioning System measurements of strain accumulation and slip transfer through the restraining bend along the Dead Sea fault system in Lebanon. *Geophysical Journal International*, 168, 1021–1028.

Guidoboni, E., Bernardini, F. ve Comastri, A. (2004). The 1138–1139 and 1156–1159 destructive seismic crises in Syria, south-eastern Turkey and northern Lebanon. *Journal of Seismology*, 8, 105–127.

Gülen, L., Barka, A. ve Toksöz, M. N. (1987). Continental collision and related complex deformation: Maras triple junction and surrounding structures, SE Turkey. *Hacettepe University Earth Science Journal*, 14, 319–336.

Gürsoy, H., Tatar, O., Piper, J. D. A., Heimann, A. ve Mesci, L. (2003).

Neotectonic deformation linking the east Anatolian and Karataš-Osmaniye intracontinental transform fault zones in the Gulf of İskenderun, southern Turkey, deduced from paleomagnetic study of the Ceyhan-Osmaniye volcanics. *Tectonics*, 22.

Halıcıoğlu, K., Özener, H. ve Ünlütepe, A. (2009). Fay Parametreleri ve Kontrol Ağlarının Tasarımı. *12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.

Hempton, M. R. (1987). Constraints on Arabian plate motion and extensional history of the Red Sea. *Tectonics*, 6, 687–705.

Hempton, M. R., Dewey, J. F. ve Saroglu, F. (1981). The East Anatolian transform fault: along strike variations in geometry and behavior. *EOS Trans.*, 62, 393.

Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A. ve McClusky, S. C. (2015a). *Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program*. Massachusetts Institute of Technology, USA.

Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A. ve McClusky, S. C. (2015b). *Introduction to GAMIT/GLOBK*. Massachusetts Institute of Technology, USA.

Hubert-Ferrari, A., Lamair, L., Hage, S., Schmidt, S., Çağatay, M. N. ve Avşar, U. (2020). A 3800 yr paleoseismic record (Lake Hazar sediments, eastern Turkey): Implications for the East Anatolian Fault seismic cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 538, 116152.

Jackson, J. ve McKenzie, D. (1984). Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77, 185–264.

Kalafat, D., Güneş, Y., Kara, M., Deniz, P., Kekovalı, K., Kuleli, H. S., ... Özel, N. M. (2007). *A revised and extended earthquake catalogue for Turkey since 1900 (M≥ 4.0)*. Boğaziçi University, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bebek-İstanbul.

Kanamori, H. (1994). Mechanics of earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 22, 207–237.

Karabacak, V., Altunel, E., Meghraoui, M. ve Akyüz, H. S. (2010). Field evidences from northern Dead Sea Fault Zone (South Turkey): New findings for the initiation age and slip rate. *Tectonophysics*, 480, 172–182.

Kasahara, K. (1981). *Earthquake mechanics*. Cambridge University Press.

King, R. W. ve Bock, Y. (2002). *Documentation for the GAMIT GPS analysis software*. (Program Manual). Massachusetts Institute of Technology, USA.

Kiratzi, A. A. (1993). A study on the active crustal deformation of the north and east anatolian fault zones. *Tectonophysics*, 225, 191–203.

Kutoglu, H. S. ve Akcin, H. (2006). Determination of the 30-year creep trend on the Ismetpaşa segment of the North Anatolian Fault using an old geodetic network. *Earth, Planets and Space*, 58, 937–942.

Kutoğlu, H. Ş., Akçın, H., Görmüş, S. ve Kemaldere, H. (2009). Kuzey Anadolu Fayı İsmetpaşa Segmentinde Gerçekleştirilen Jeodezik Çalışmalar. *12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.

Lambeck, K. (1988). *Geophysical Geodesy*. Clarendon Press, Oxford.

Langbein, J. ve Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 591–603.

Le Beon, M., Klinger, Y., Amrat, A. Q., Agnon, A., Dorbath, L., Baer, G., ... Mayyas, O. (2008). Slip rate and locking depth from GPS profiles across the southern Dead Sea Transform. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113, 1–19.

Le Pichon, X., Chamot-Rooke, N., Lallemant, S., Noomen, R. ve Veis, G. (1995). Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe: Implications for eastern Mediterranean tectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100, 12675–12690.

Loveless, J. P. ve Meade, B. J. (2011). Partitioning of localized and diffuse deformation in the Tibetan Plateau from joint inversions of geologic and geodetic observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 303, 11–24.

Lyberis, N., Yurur, T., Chorowicz, J., Kasapoglu, E. ve Gundogdu, N. (1992). The East Anatolian Fault: an oblique collisional belt. *Tectonophysics*, 204, 1–15.

Mahmoud, Y. (2012). *Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg Caractérisation géodésique de la déformation active du point triple d'Hatay (Syrie-Turquie)*. (Ph.D. Thesis). Université de Strasbourg, Ecole et Observatoire des Science de la Terre, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Strasbourg.

Mahmoud, Y., Masson, F., Meghraoui, M., Cakir, Z., Alchalbi, A., Yavasoglu, H., ... Inan, S. (2013). Kinematic study at the junction of the east anatolian fault and the dead sea fault from GPS measurements. *Journal of Geodynamics*, 67, 30–39.

McCaffrey, R. (1995). *DEF-NODE users guide*. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.

McCaffrey, R. (2002). Crustal block rotations and plate coupling. *Plate Boundary Zones, Geodyn. Ser*, 30, 101–122.

McCaffrey, R. (2005). Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, 1–27.

McCaffrey, R. (2009). Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia. *Geophysical Research Letters*, 36, 1–5.

McCaffrey, R., Long, M. D., Goldfinger, C., Zwick, P. C., Nabelek, J. L., Johnson, C. K. ve Smith, C. (2000). Rotation and plate locking at the southern Cascadia subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 27, 3117–3120.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... Kahle, H. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105, 5695–5719.

McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D. ve Tealeb, A. (2003). GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophysical Journal International*, 155, 126–138.

McKenzie, D. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30, 109–185.

McKenzie, D. (1976). The East Anatolian Fault: a major structure in eastern Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 29, 189–193.

McKenzie, D. P. ve Parker, R. L. (1967). The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*, 216, 1276–1280.

Meade, B. J. (2007). Present-day kinematics at the India-Asia collision zone. *Geology*, 35, 81–84.

Meade, B. J. ve Hager, B. H. (2005). Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110.

Meghraoui, M., Cakir, Z., Masson, F., Mahmood, Y., Ergintav, S., Alchalbi, A., ... Altunel, E. (2011). Kinematic modelling at the triple junction between the Anatolian, Arabian, African plates (NW Syria and in SE Turkey). *Geophysical Research Abstracts*, 13, 12599.

Muehlberger, W. R. (1981). The splintering of the Dead Sea fault zone in Turkey. *Yerbilimleri (Bull. Inst. Earth Sci.,Hacettepe University.), Beytepe, Ankara.*, 8, 123–130.

Muehlberger, W. R. ve Gordon, M. B. (1987). Observations on the complexity of the East Anatolian Fault, Turkey. *Journal of Structural Geology*, 9, 899–903.

Nabelek, J. L. (1984). *Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves*. M. I. T., Dept. of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences.

Nocquet, J. M. (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579, 220–242.

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75, 1135–1154.

Palutoğlu, M. ve Şaşmaz, A. (2017). Bulletin of the Mineral Research and Exploration. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 155.

Perinçek, D. ve Çemen, I. (1990). The structural relationship between the East Anatolian and Dead Sea fault zones in southeastern Turkey. *Tectonophysics*, 172, 331–340.

Poirier, J. P. ve Taher, M. A. (1980). Historical seismicity in the near and Middle East, North Africa, and Spain from Arabic documents (VIIth-XVIIIth century). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70, 2185–2201.

Prawirodirdjo, L., Bock, Y., McCaffrey, R., Genrich, J., Calais, E., Stevens, C., ... Fauzi, R. M. (1997). Geodetic observations of interseismic strain segmentation at the Sumatra subduction zone. *Geophysical research letters*, 24, 2601–2604.

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. ve Vetterling, W. T. (1986).

Numerical recipes, edn, Vol. 547, pp. Pages. Cambridge Univ Press.

Reid, H. F. (1911). The elastic-rebound theory of earthquakes. *Univ. Calif. Publ.. Bull. Dept. Geol.*, 6, 413–444.

Reilinger, R., McClusky, S., Oral, M. B., King, R. W., Tosoz, M. N., Barka, A. A., ... Sanli, I. (1997). Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *J. Geophys. Res.*, 102, 9983–9999.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... Stepanyan, R. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, 1–26.

Rojay, B., Heimann, A. ve Toprak, V. (2001). Neotectonic and volcanic characteristics of the Karasu fault zone (Anatolia, Turkey): the transition zone between the Dead Sea transform and the East Anatolian fault zone. *Geodinamica Acta*, 14, 197–212.

Saroglu, F., Emre, O. ve Kuscu, I. (1992a). *Active fault map of Turkey*. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara.

Saroglu, F., Emre, O. ve Kuscu, I. (1992b). The East Anatolian Fault Zone of Turkey. *Annales Tectonicae, Special Issue, VI*, 99–125.

Savage, J. C. (1983). A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88, 4984–4996.

Savage, J. C. ve Burford, R. O. (1973). Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78, 832–845.

Sbeinati, M. R., Darawcheh, R. ve Mouty, M. (2005). The historical earthquakes of Syria: An analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. *Annals of Geophysics*, 48, 347–435.

Schmalzle, G. M., McCaffrey, R. ve Creager, K. C. (2014). Central Cascadia subduction zone creep. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 1515–1532.

Sengor, A. M. C., Gorur, N. ve Saroglu, F. (1985). Strike slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, 227-264. *Biddle KT and Christie-Blick N., Strike Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*, 37.

Sengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of the Geological Society*, 136, 269–282.

Serpelloni, E., Bürgmann, R., Anzidei, M., Baldi, P., Mastrolembo Ventura, B. ve Boschi, E. (2010). Strain accumulation across the Messina Straits and kinematics of Sicily and Calabria from GPS data and dislocation modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 347–360.

Seymen, İ. ve Aydın, A. (1972). The Bingöl earthquake fault and its relation to the North Anatolian fault zone. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 79, 8–12.

Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., ...

Spakman, W. (2006). Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, 1–15.

Styron, R. ve Pagani, M. (2020). The GEM Global Active Faults Database. *Earthquake Spectra*, 36, 160–180.

Tan, O. (2004). *The source mechanism properties and rupture histories of the Caucasian, Eastern Anatolian and North Western Iranian Earthquakes*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Tan, O. ve Taymaz, T. (2004). Seismotectonics of the Caucasus and surrounding regions: source parameters and rupture histories of the recent destructive earthquakes. *AGU Fall Meeting Abstracts*, T53B-0479.

Tan, O. ve Taymaz, T. (2005). Source rupture properties of earthquakes in the Eastern Anatolia obtained from body waveform inversion. *International Symposium on the Geodynamics of Eastern Mediterranean: Active Tectonics of the Aegean Region,* Kadir Has University, Istanbul.

Tan, O., Pabuçcu, Z., Tapırdamaz, M. C., İnan, S., Ergintav, S., Eyidoğan, H., ... Kuluöztürk, F. (2011). Aftershock study and seismotectonic implications of the 8 March 2010 Kovancılar (Elazığ, Turkey) earthquake (MW= 6.1). *Geophysical Research Letters*, 38.

Taskin, G., Uskuplu, S., Saygin, H. ve Ergintav, S. (2003). Optimization of GPS observation strategy for improvement of tectonic measurements. *The IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling*, Marbella, Spain.

Taymaz, T., Eyidoğan, H. ve Jackson, J. (1991). Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey). *Geophysical Journal International*, 106, 537–550.

Thatcher, W. (1993). The earthquake cycle and its role in the long-term deformation on the continental litosphere. *Annals of Geophysics*, 36.

Thatcher, W. (2009). How the continents deform: The evidence from tectonic geodesy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 237–262.

Tiryakioglu, İ. (2012). *GNSS Ölçüleri ile Güneybatı Anadolu'daki Blok Hareketleri ve Gerilim Alanlarının Belirlenmesi*. (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Tiryakioğlu, İ., Floyd, M., Erdoğan, S., Gülal, E., Ergintav, S., McClusky, S. ve Reilinger, R. (2013). GPS constraints on active deformation in the Isparta Angle region of SW Turkey. *Geophysical Journal International*, 195, 1455–1463.

URL-1 <http://www.web.pdx.edu/~mccaf/defnode/manual/tdefnode.html>, erişim tarihi 09.11.2020.

URL-2 <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>, erişim tarihi 24.02.2021.

URL-3 <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>, erişim tarihi 28.02.2021.

URL-4 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, erişim tarihi 28.02.2021.

Wallace, L. M., Beavan, J., McCaffrey, R. ve Darby, D. (2004). Subduction zone coupling and tectonic block rotations in the North Island, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, 1–21.

Walters, R. J., Holley, R. J., Parsons, B. ve Wright, T. J. (2011). Interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault from Envisat InSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 38, 1–5.

Walters, R. J., Parsons, B. ve Wright, T. J. (2014). Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 5215–5234.

Wang, K., Wells, R., Mazzotti, S., Hyndman, R. D. ve Sagiya, T. (2003). A revised dislocation model of interseismic deformation of the Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108, 1–13.

Wells, D. L. ve Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84, 974–1002.

Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. ve Wobbe, F. (2013). GMT 5: A major new release of the Generic Mapping Tools. *Eos Trans. AGU*, 94, 409–410.

Westaway, R. (1994). Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99, 12071–12090.

Westaway, R. (2003). Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean updated. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12, 5–46.

Westaway, R. (2004). Kinematic consistency between the Dead Sea Fault Zone and the Neogene and Quaternary left-lateral faulting in SE Turkey. *Tectonophysics*, 391, 203–237.

Westaway, R. O. B. ve Arger, J. A. N. (1996). The Gölbaşı basin, southeastern Turkey: a complex discontinuity in a major strike-slip fault zone. *Journal of the Geological Society*, 153, 729–744.

Yavasoglu, H. (2009). *Kuzey Anadolu Fayının Orta Anadolu Bölümündeki Güncel Tektonik Aktivitenin Jeodezik Yöntemler ve Elastik Yarı Uzaysal Modelleme ile Belirlenmesi*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yavaşoğlu, H., Tarı, E., Tüysüz, O., Çakır, Z. ve Ergintav, S. (2011). Determining and modeling tectonic movements along the central part of the North Anatolian Fault (Turkey) using geodetic measurements. *Journal of Geodynamics*, 51, 339–343.

Yönlü, Ö., Altunel, E., Karabacak, V. ve Akyüz, H. S. (2013). Evolution of the Gölbaşi basin and its implications for the long-term offset on the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 272–281.

Yurtmen, S., Rowbotham, G., İşler, F. ve Floyd, P. A. (2000). Petrogenesis of basalts from southern Turkey: the Plio-Quaternary volcanism to the north of Iskenderun Gulf. *Geological Society, London, Special Publications*, 173, 489–

512.

Yürür, M. T. ve Chorowicz, J. (1998). Recent volcanism, tectonics and plate kinematics near the junction of the African, Arabian and Anatolian plates in the eastern Mediterranean. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 1–15.

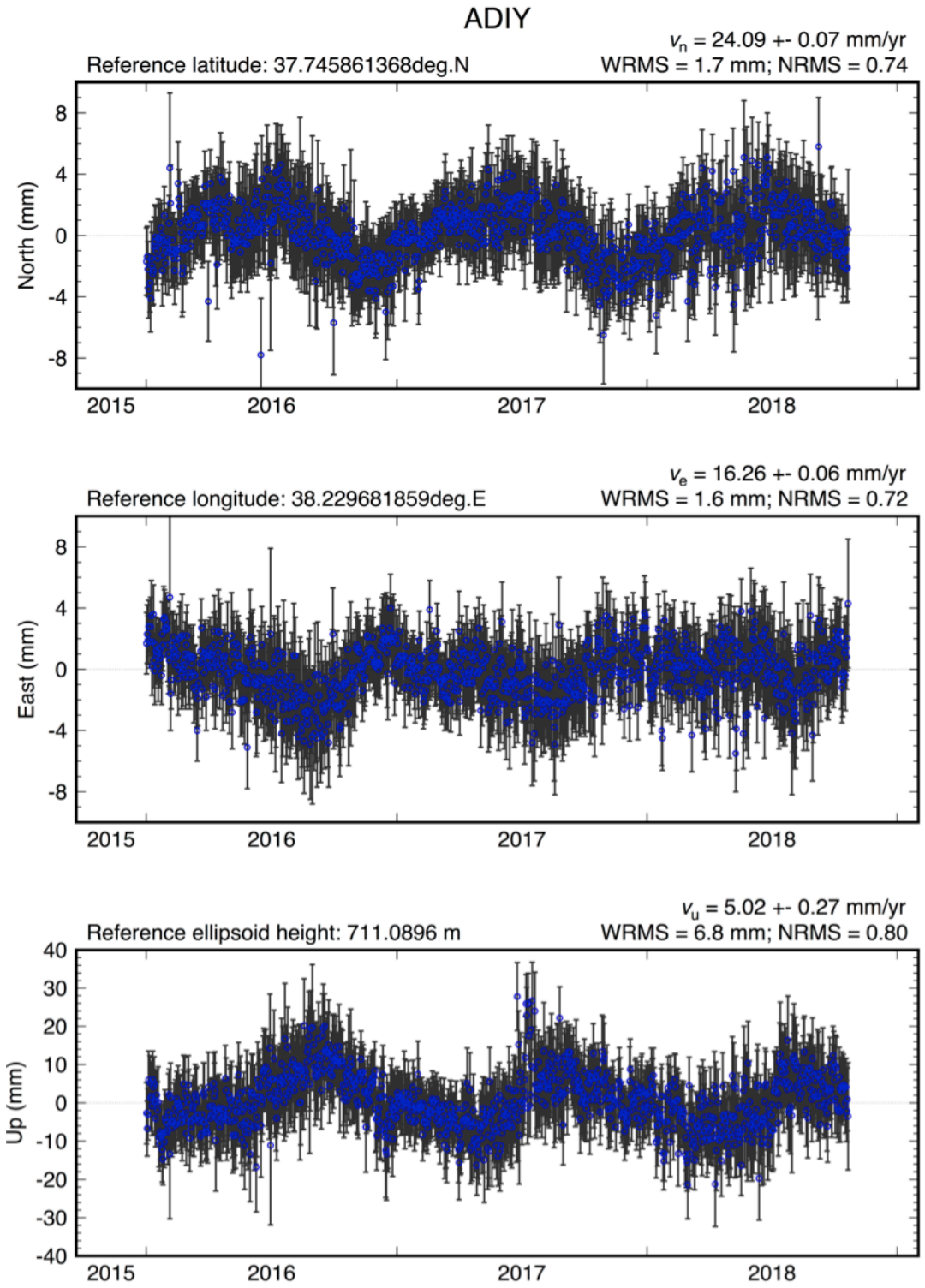
Zhang, Z., McCaffrey, R. ve Zhang, P. (2013). Relative motion across the eastern Tibetan plateau: Contributions from faulting, internal strain and rotation rates. *Tectonophysics*, 584, 240–256.

EKLER

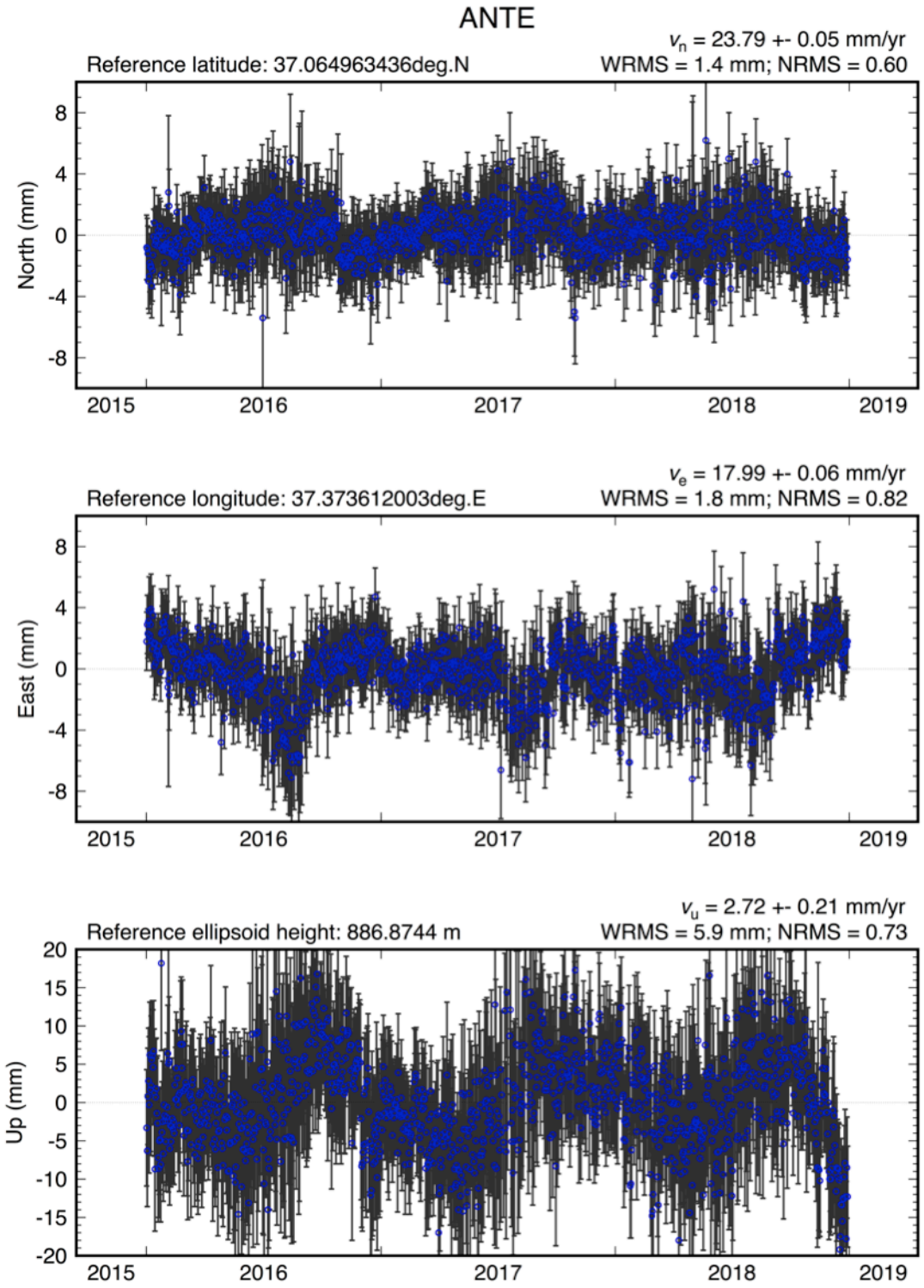
EK A: Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde oluşturulan jeodezik ağın tüm noktaları için elde edilen zaman serisi grafikleri

EK B: Kampanya noktaları ve sürekli GPS istasyonları için GPS gözlem zaman aralıkları

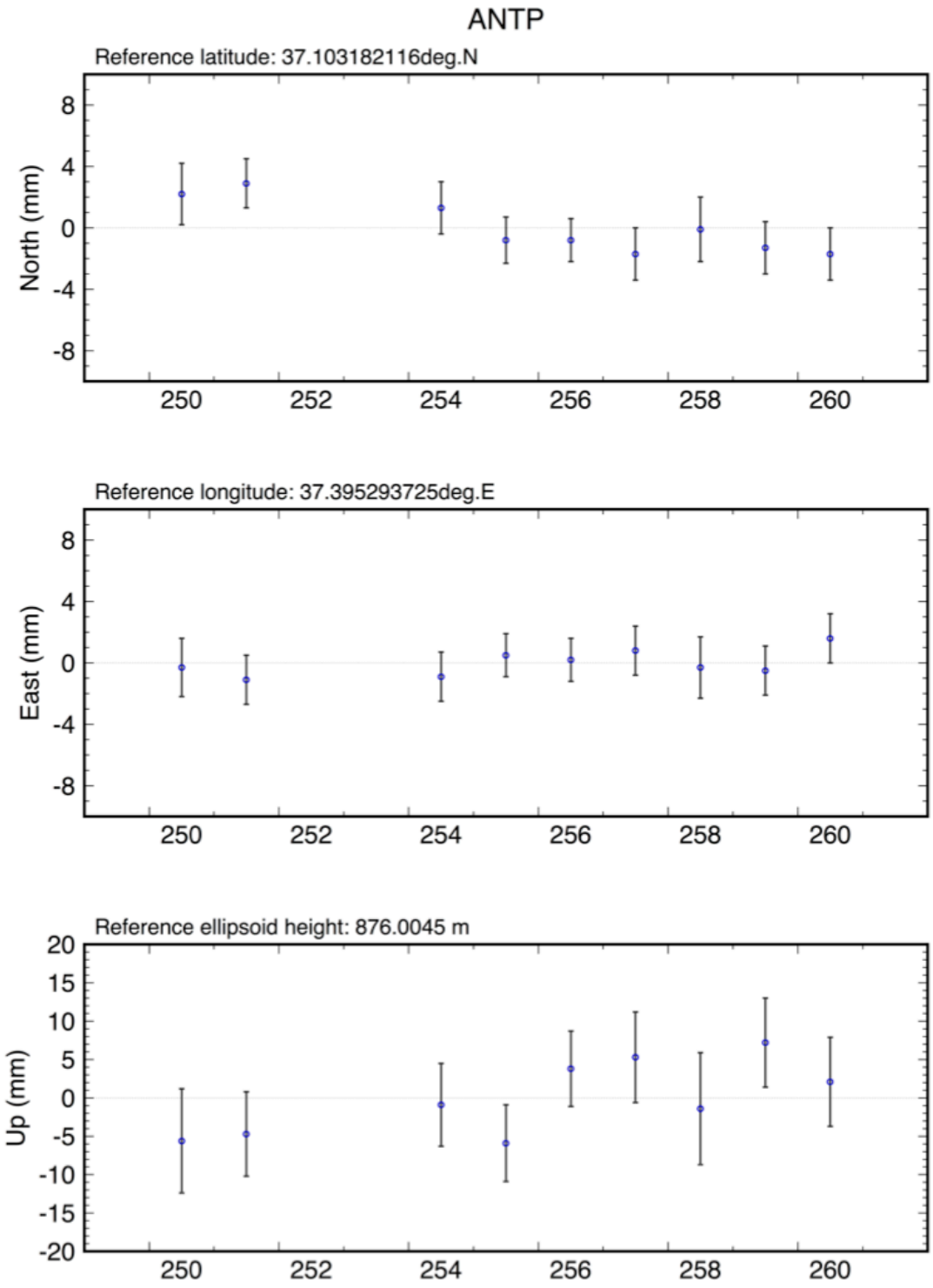
EK A: Kuzeydoğu Akdeniz bölgesinde oluşturulan jeodezik ağın tüm noktaları için elde edilen zaman serisi grafikleri



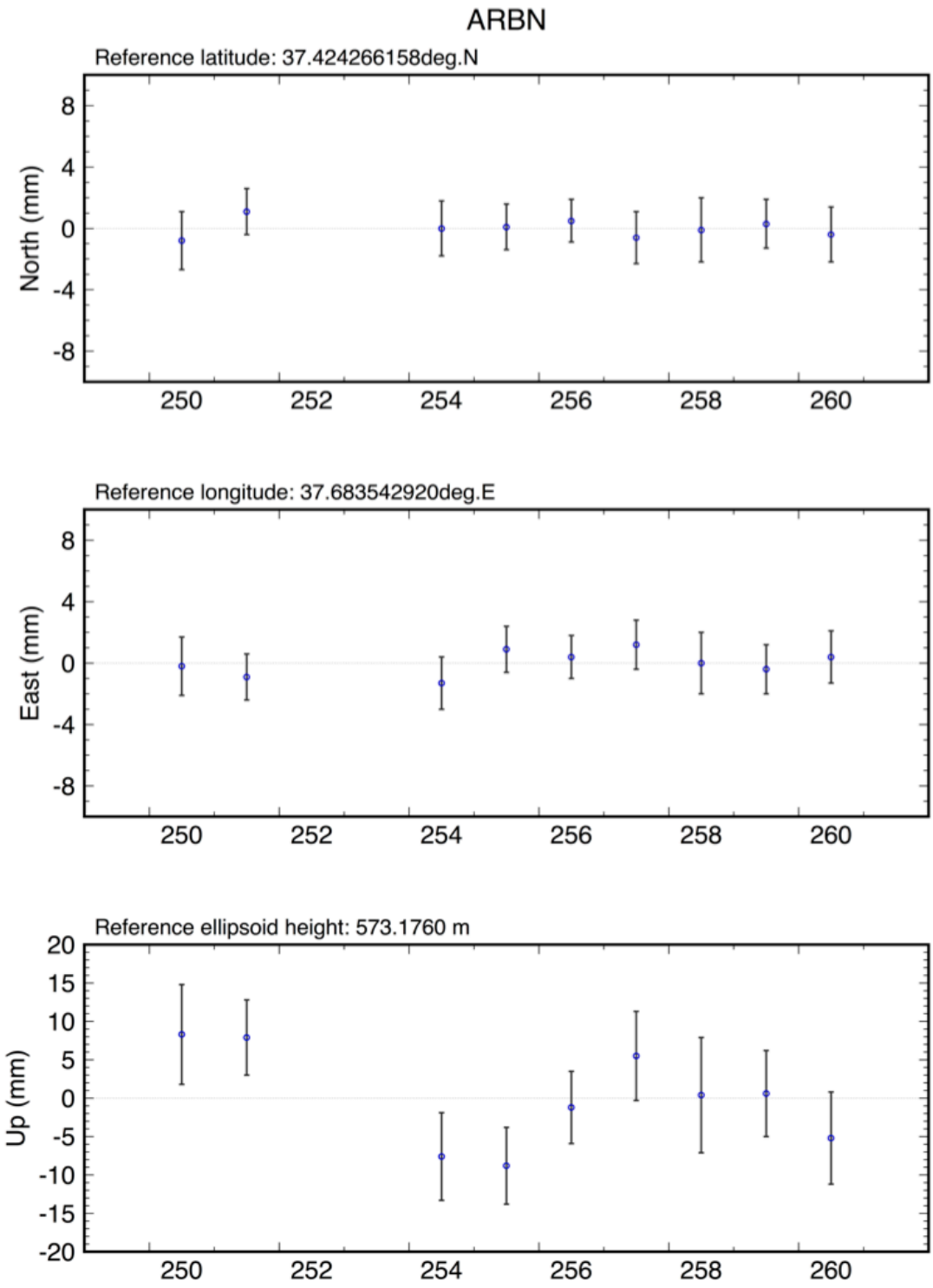
Şekil A.1 : ADIY (Adıyaman) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



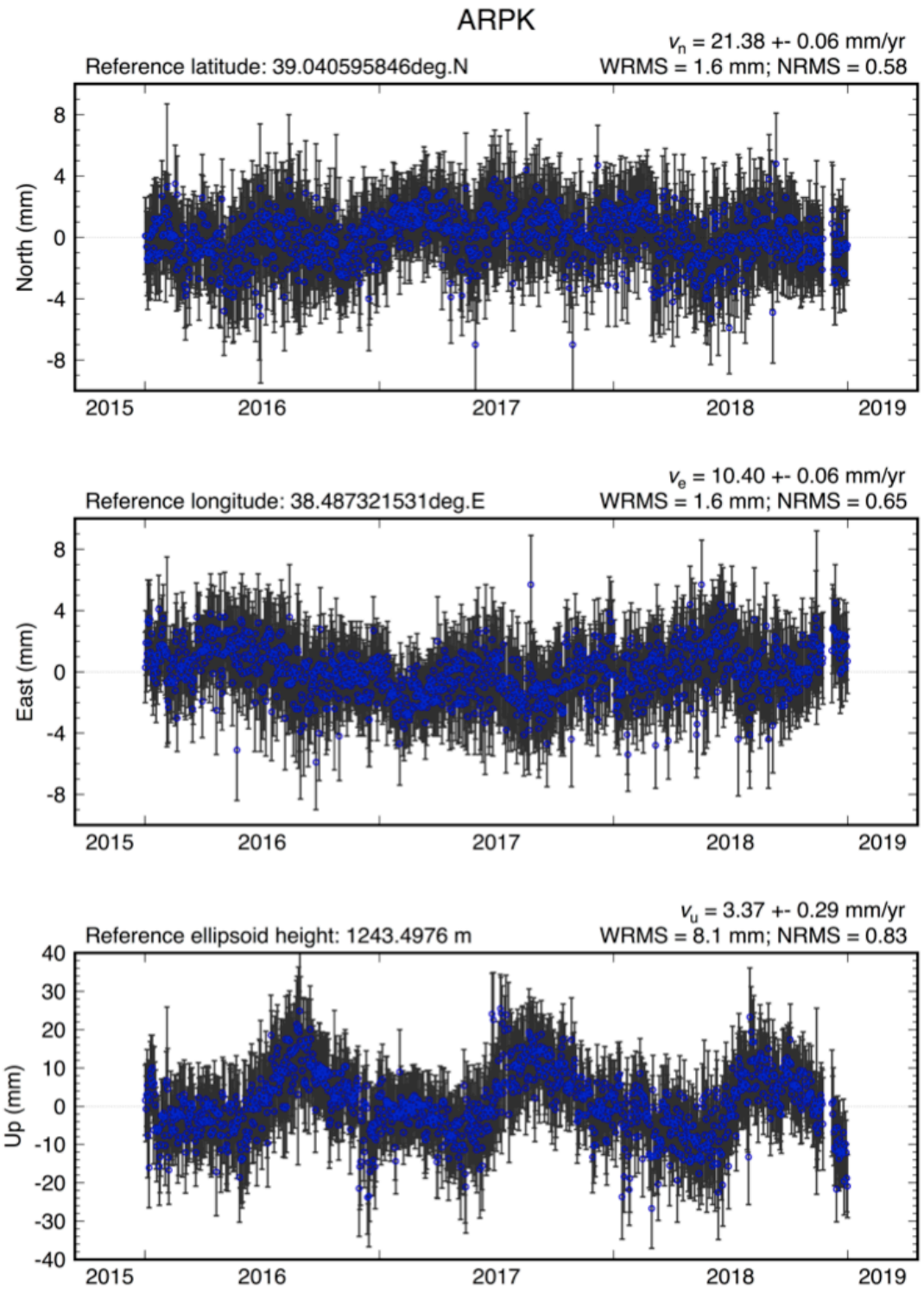
Şekil A.2 : ANTE (Gaziantep) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



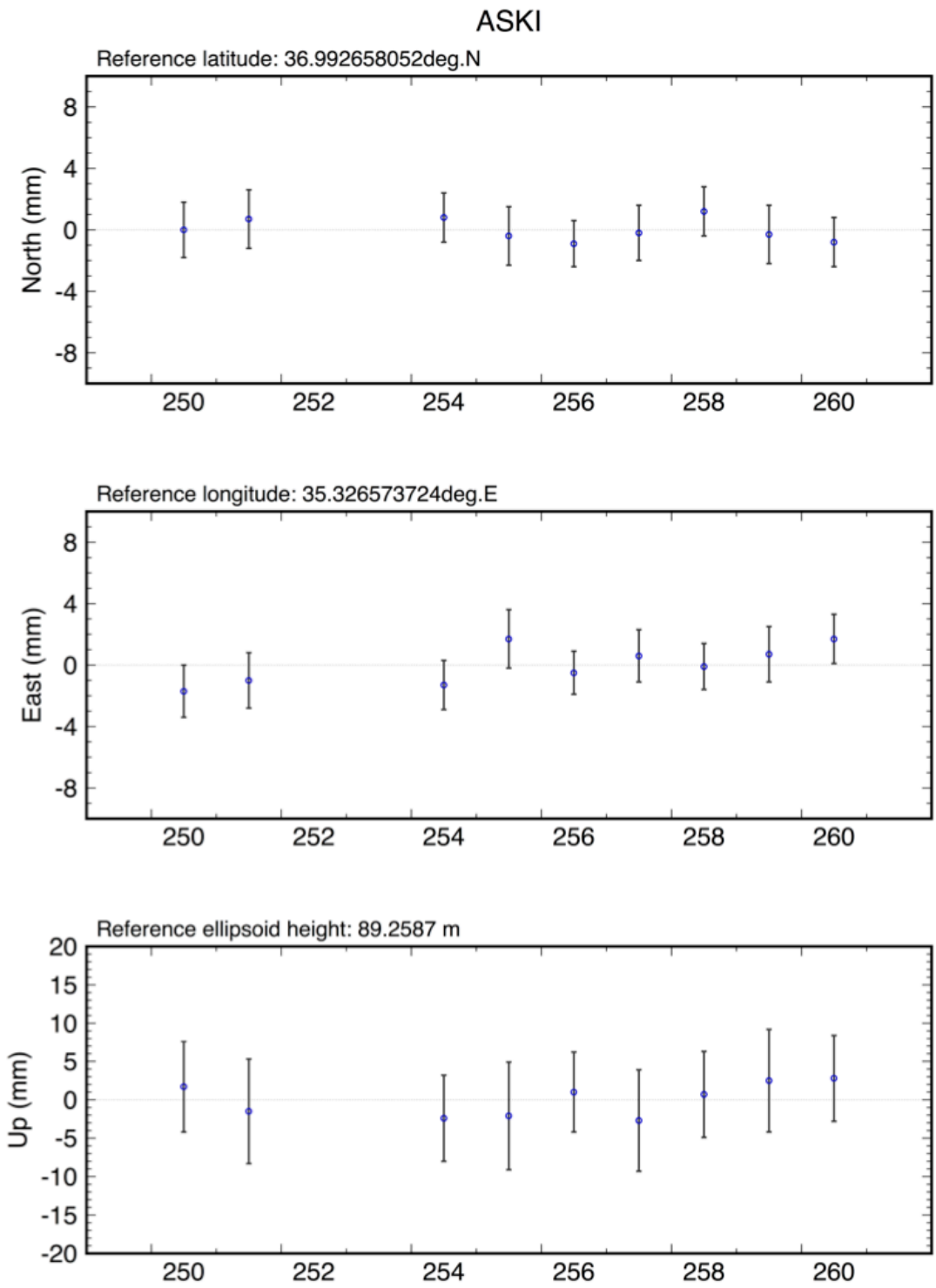
Şekil A.3 : ANTP (Gaziantep) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



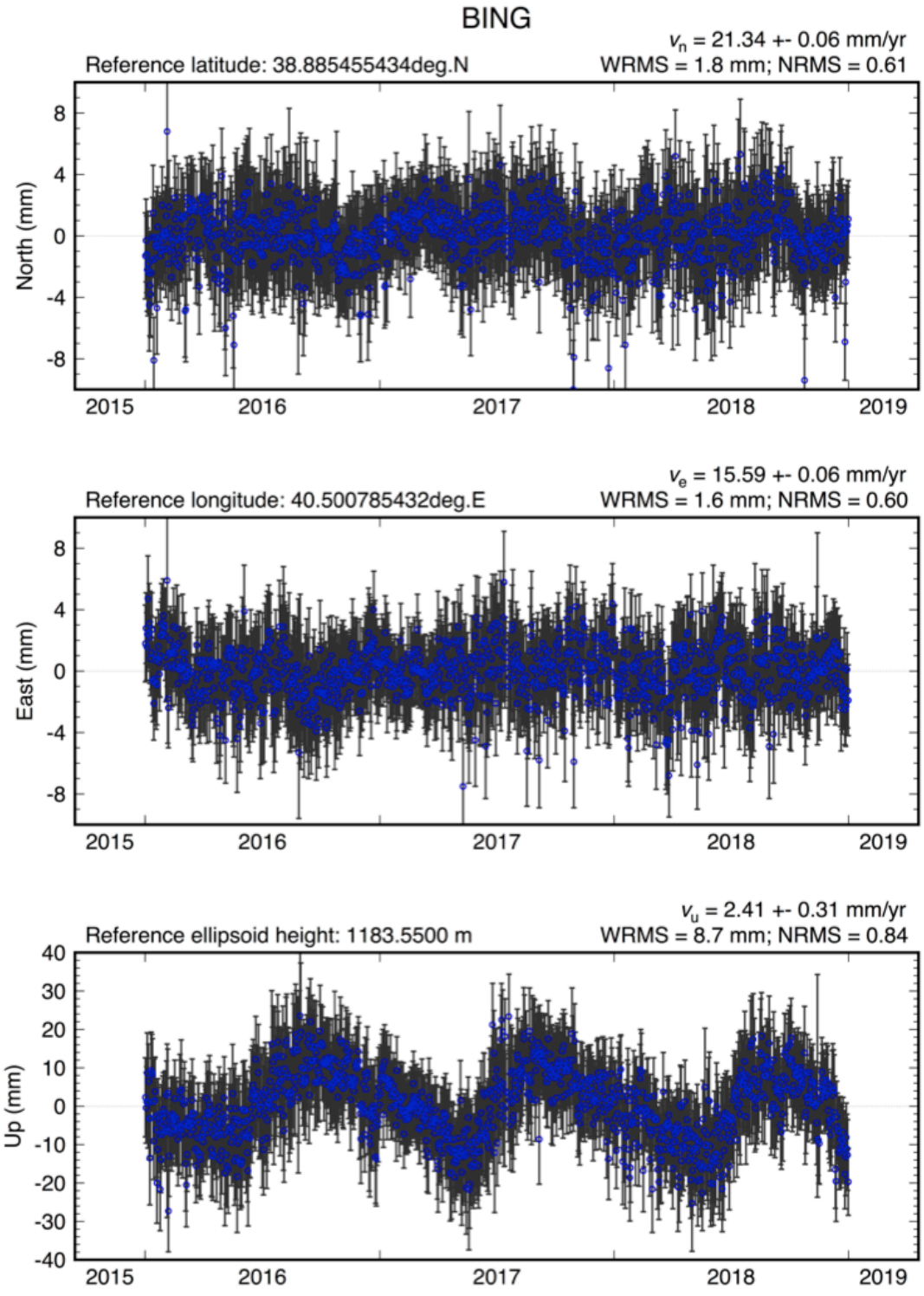
Şekil A.4 : ARBN (Araban-Gaziantep) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



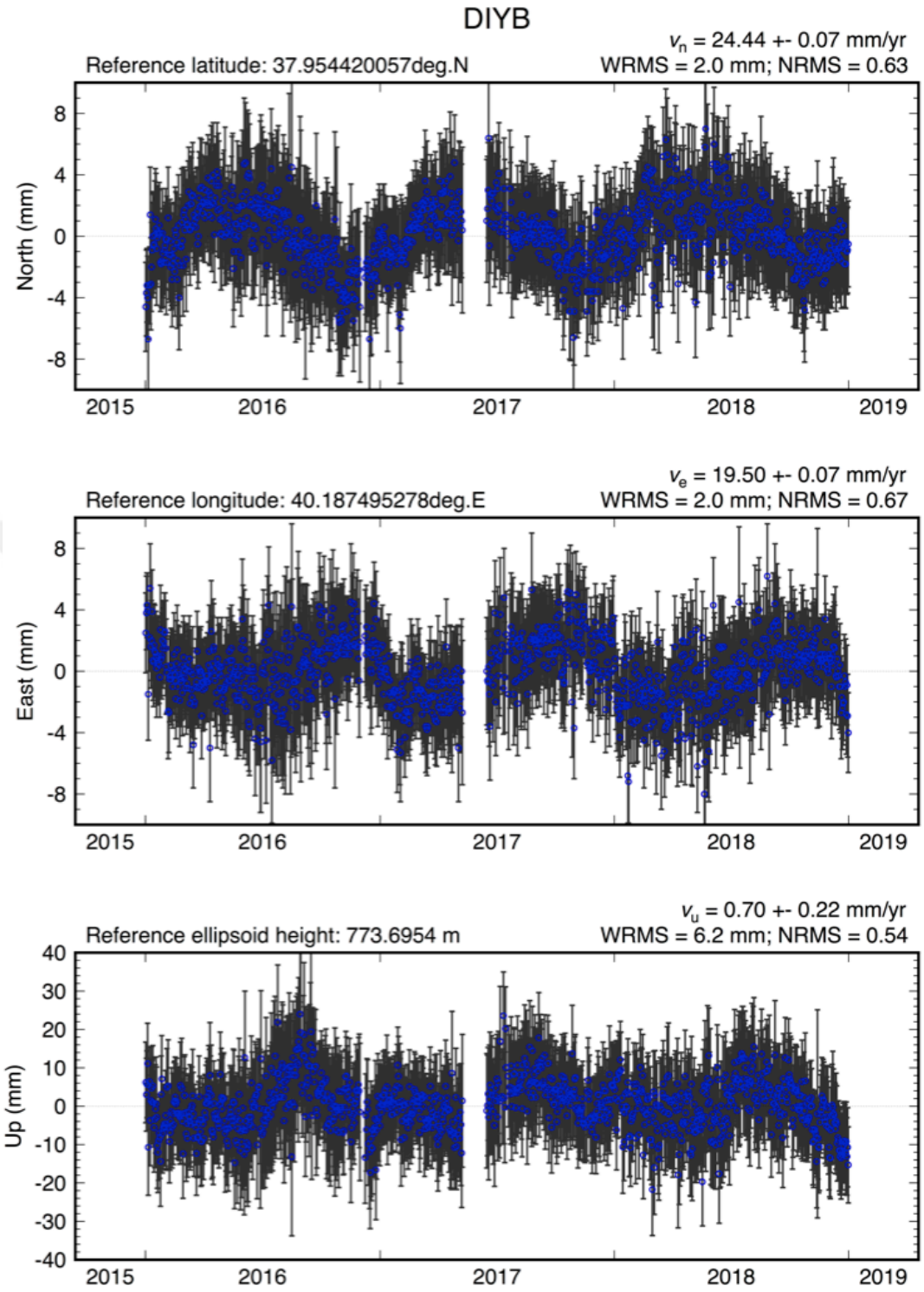
Şekil A.5 : ARPK (Arapgir-Malatya) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



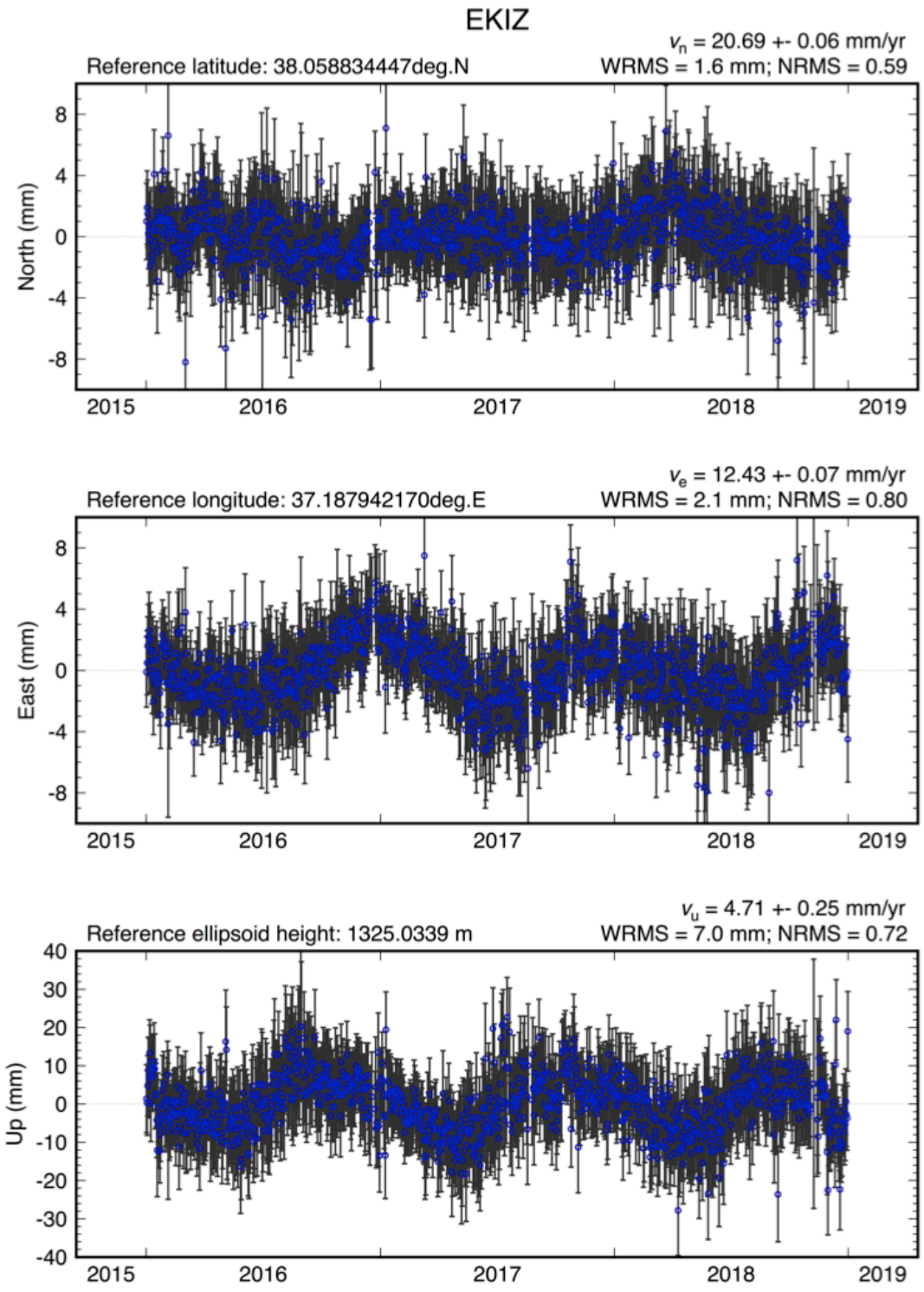
Şekil A.6 : ASKI (Adana) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



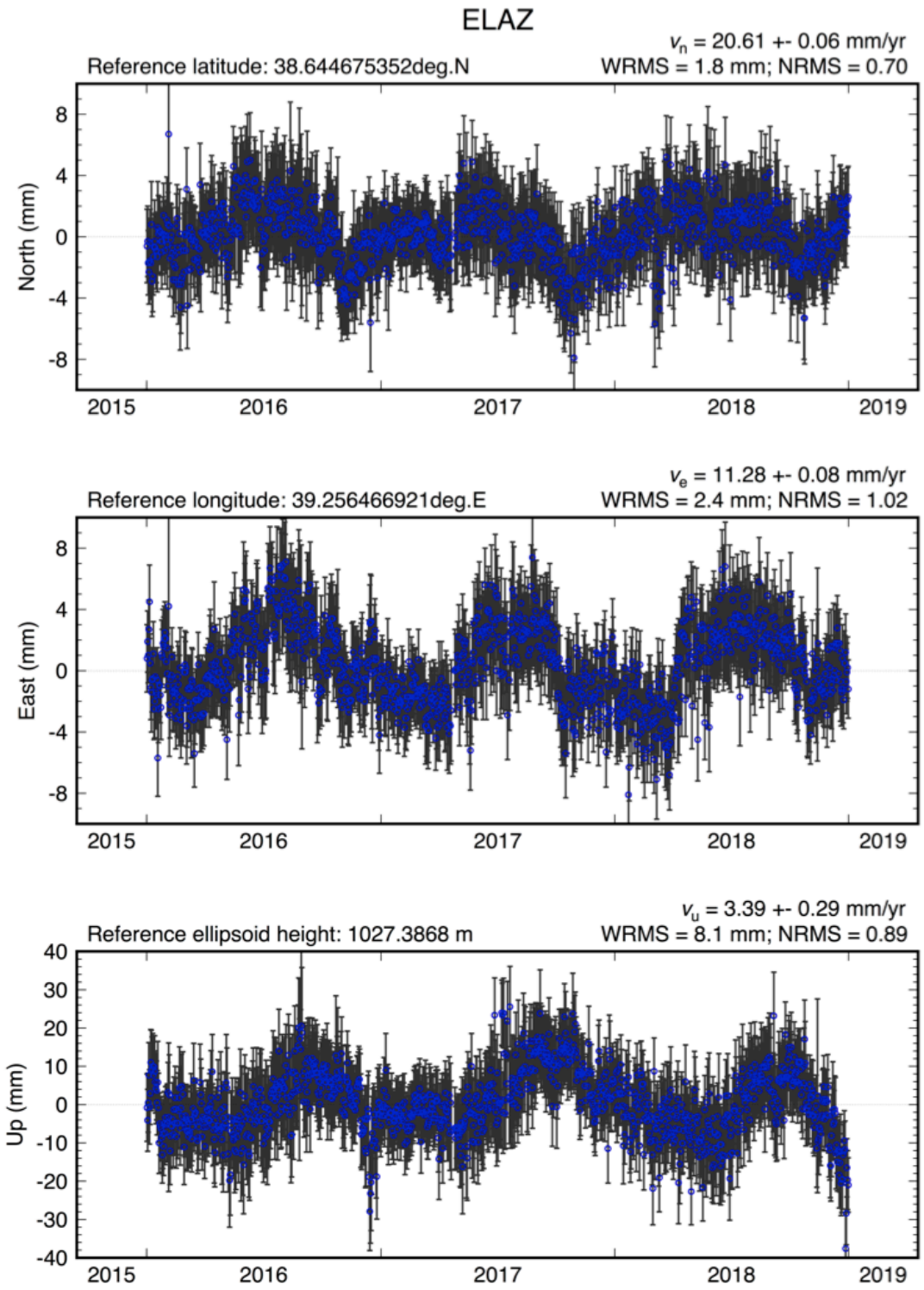
Şekil A.7 : BING (Bingöl) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



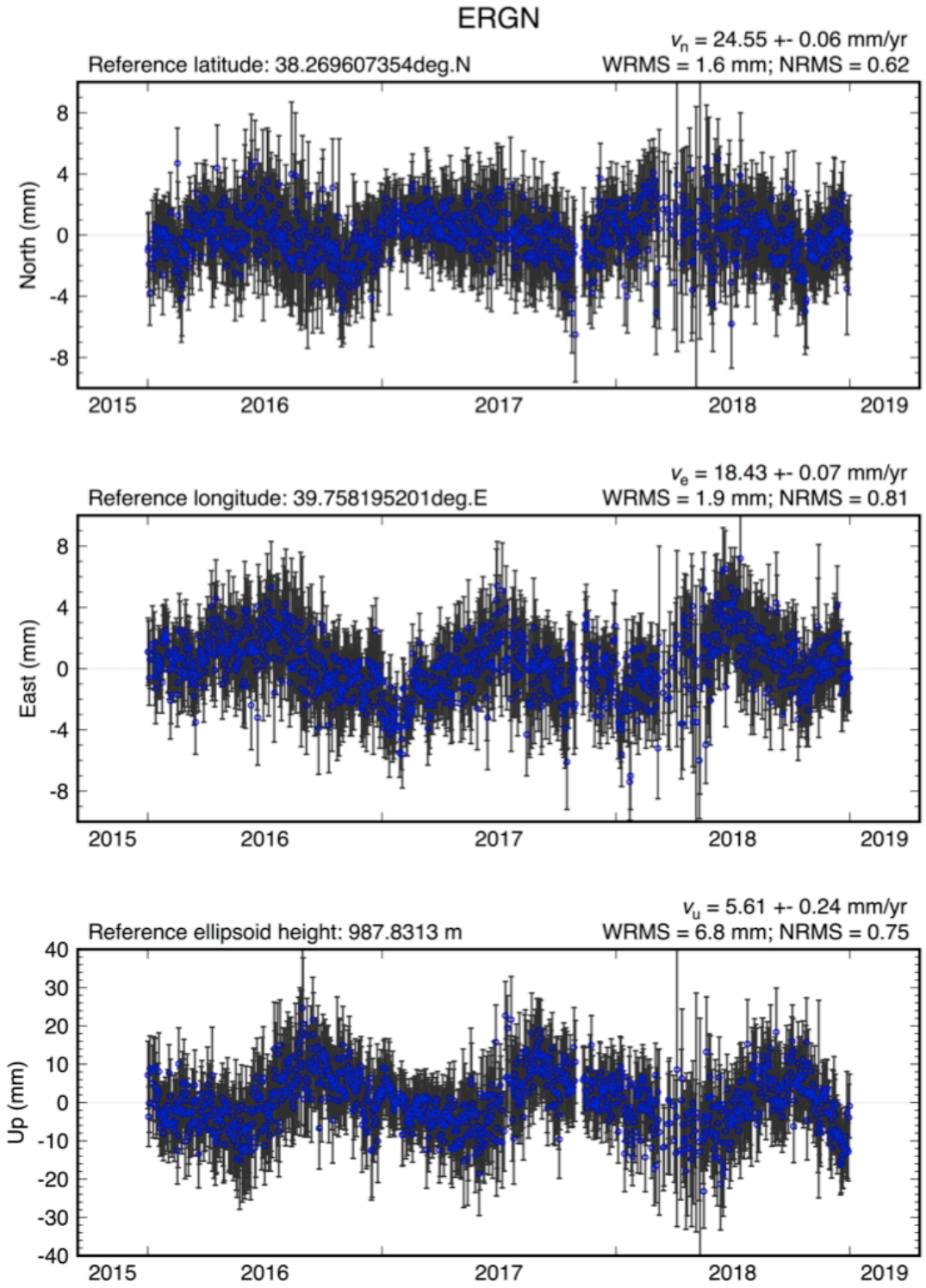
Şekil A.8 : DIYB (Diyarbakır) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



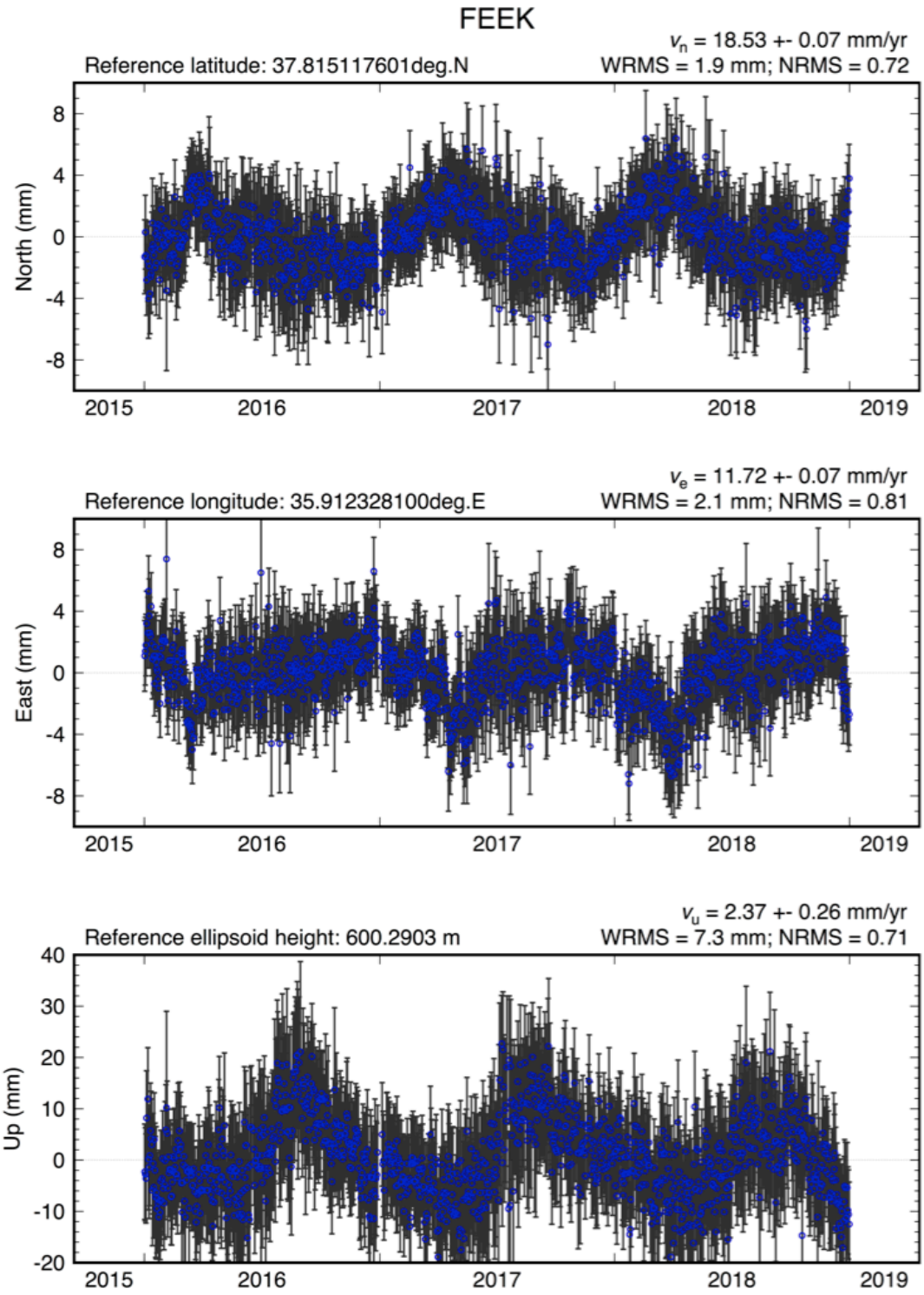
Şekil A.9 : EKIZ (Ekinözü-Kahramanmaraş) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



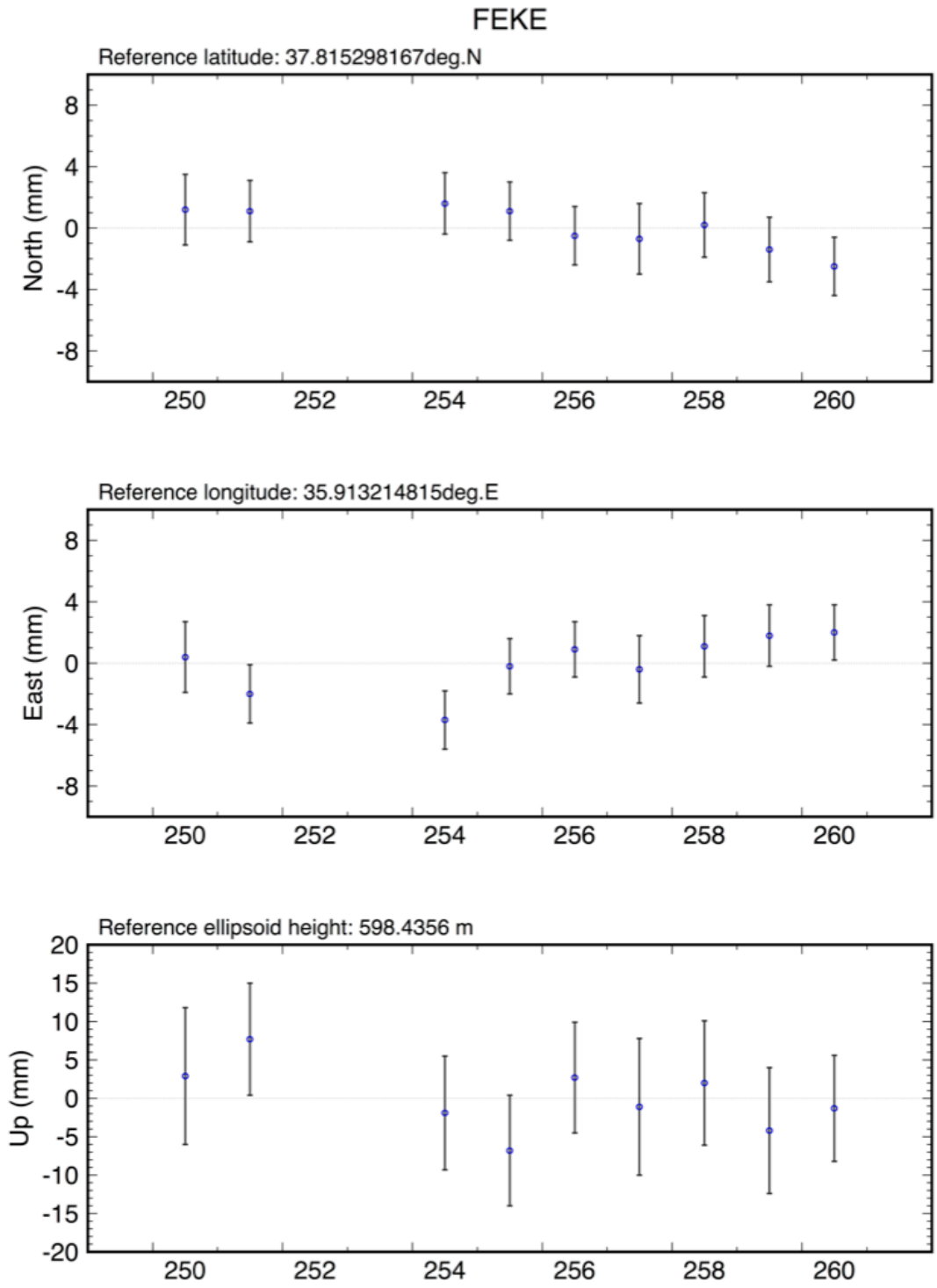
Şekil A.10 : ELAZ (Elazığ) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



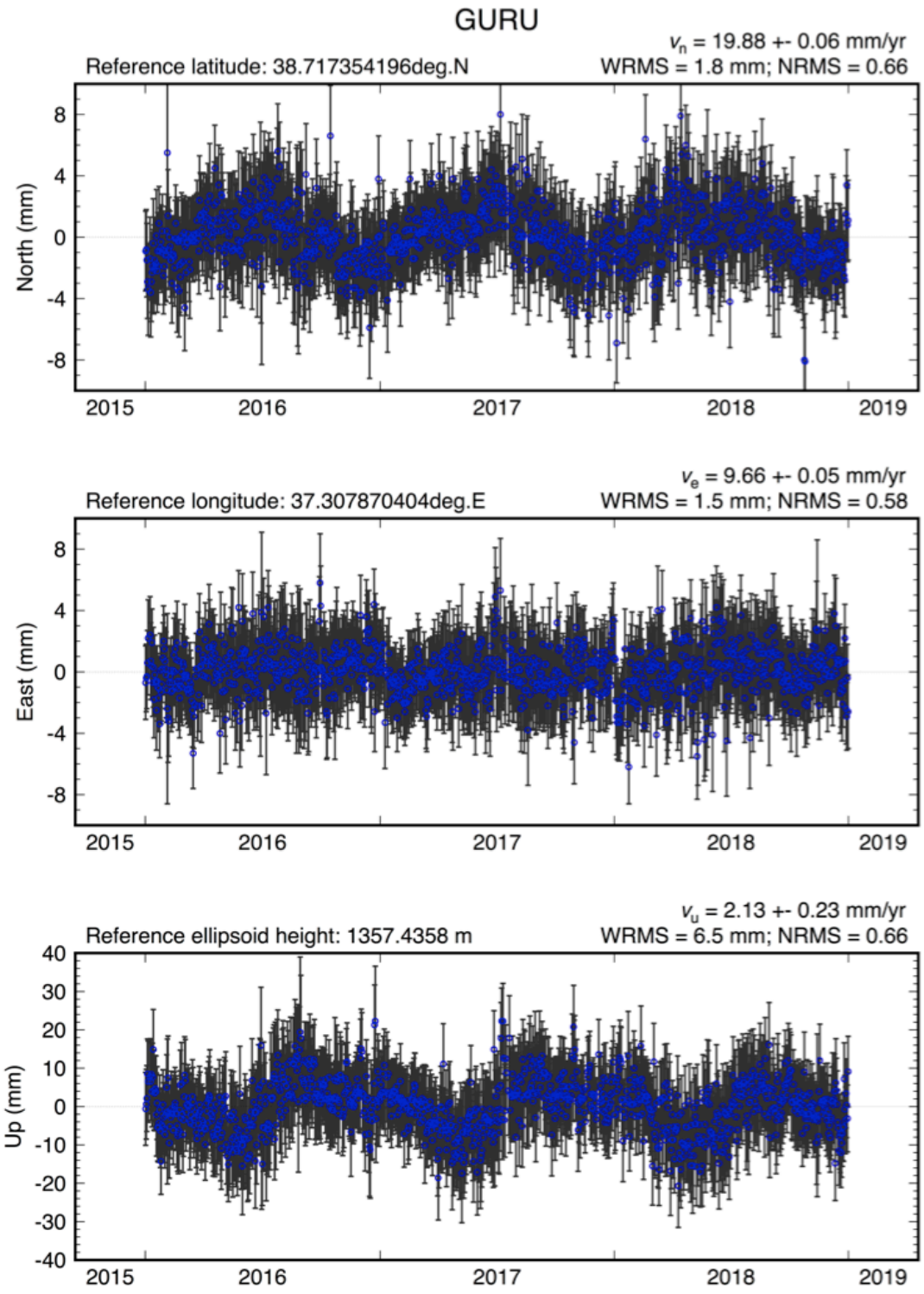
Şekil A.11 : ERGN (Ergani-Diyarbakır) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



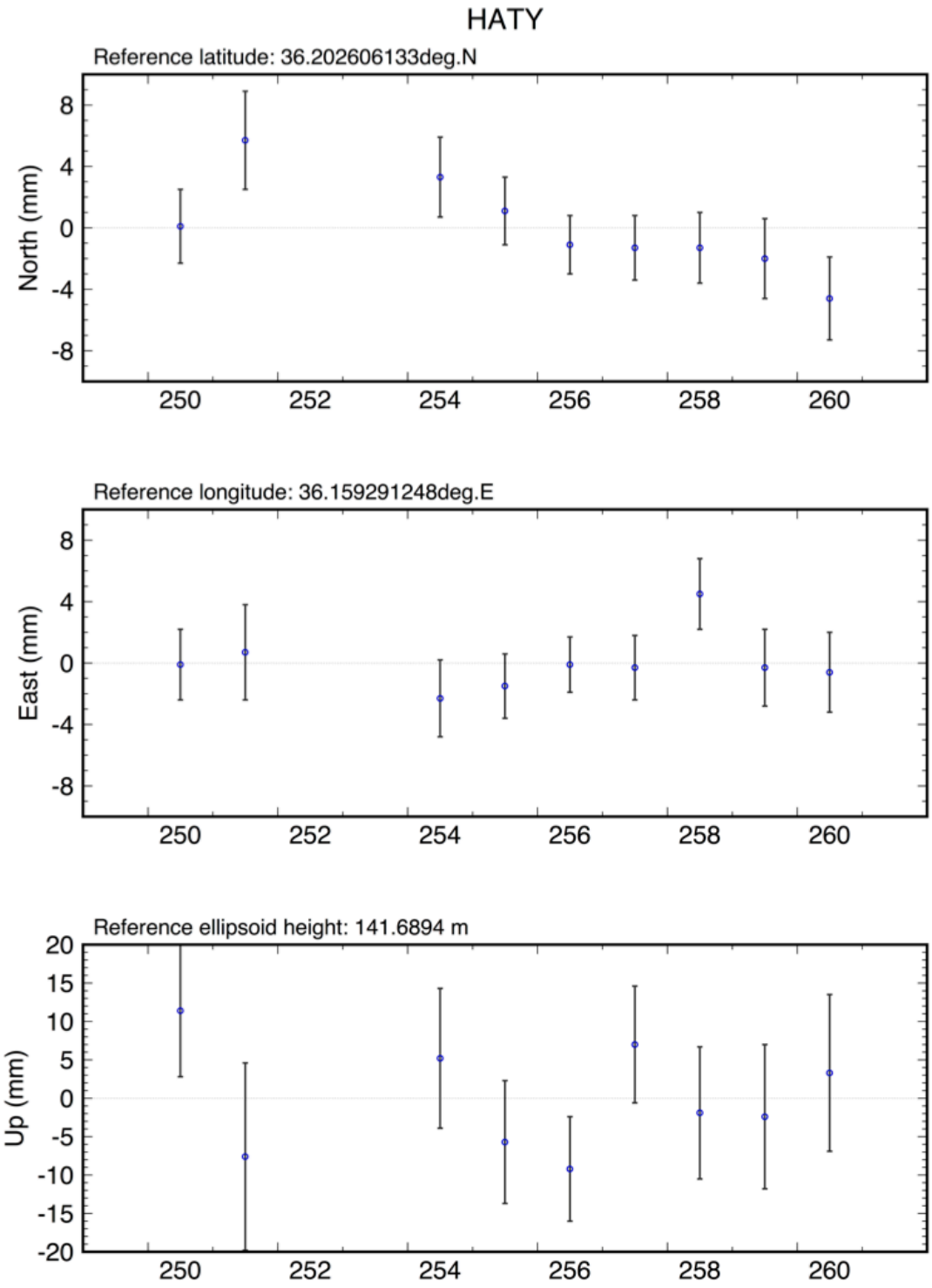
Şekil A.12 : FEEK (Feke-Adana) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



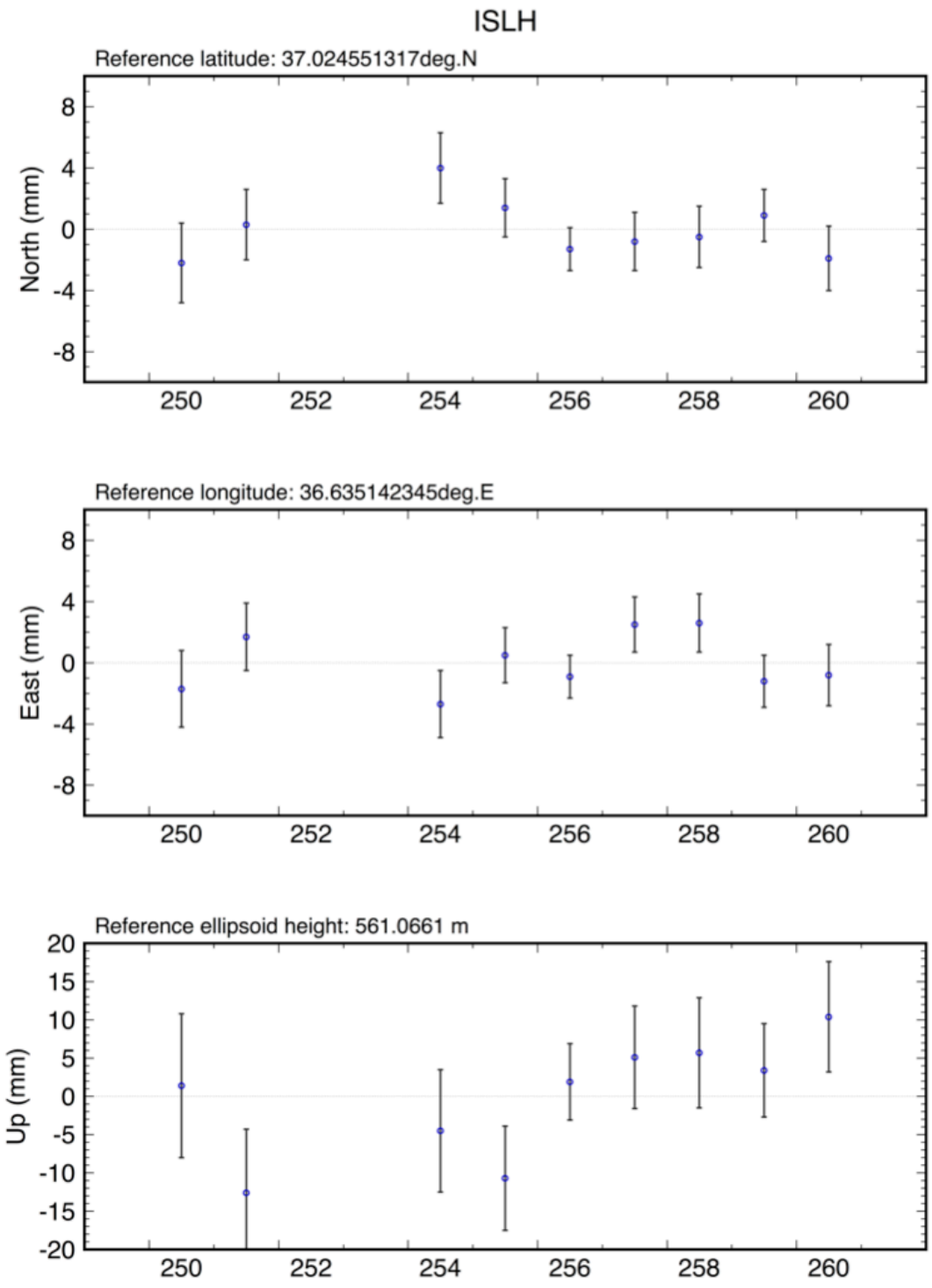
Şekil A.13 : FEKE (Feke-Adana) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



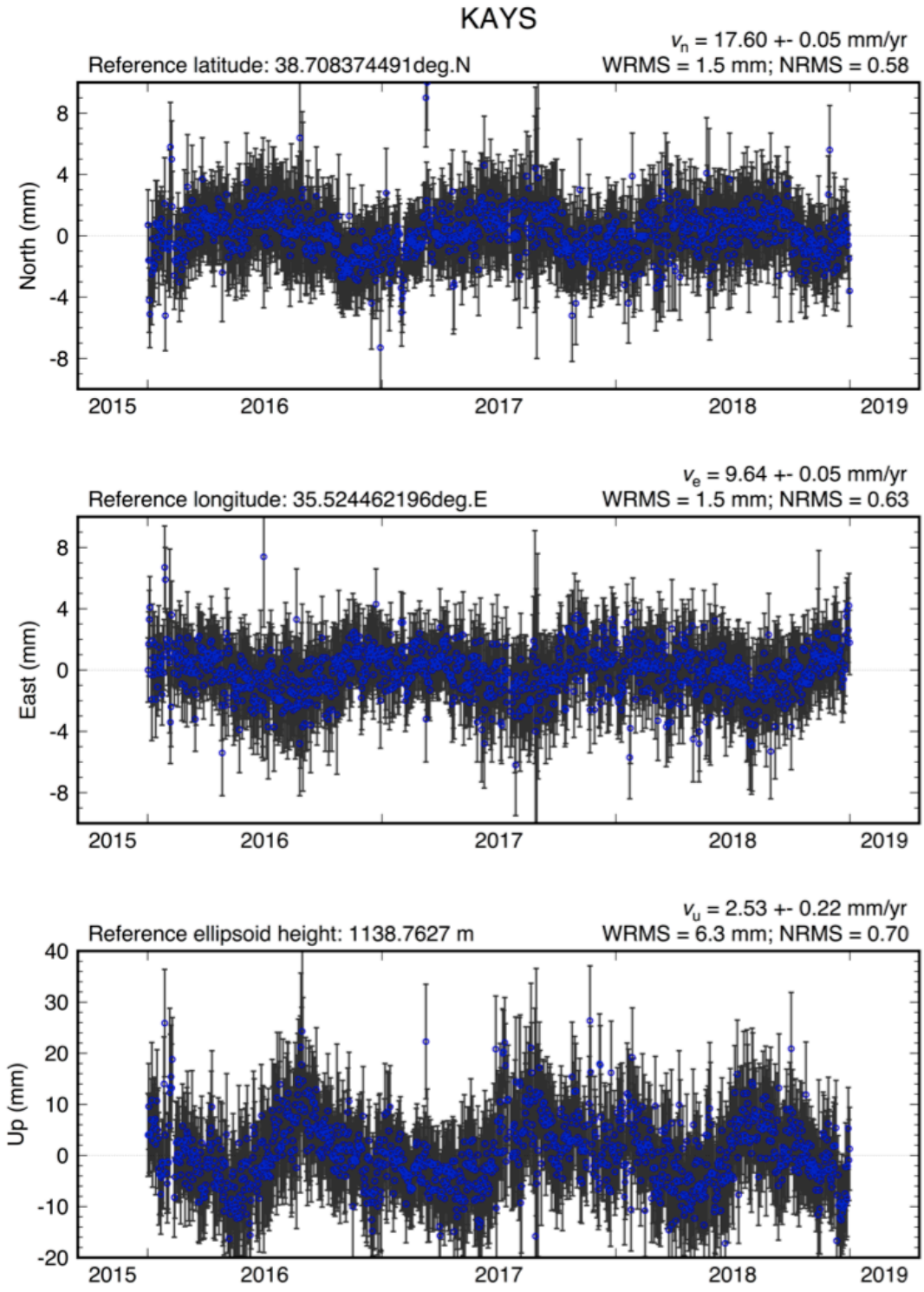
Şekil A.14 : GURU (Gürün-Sivas) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



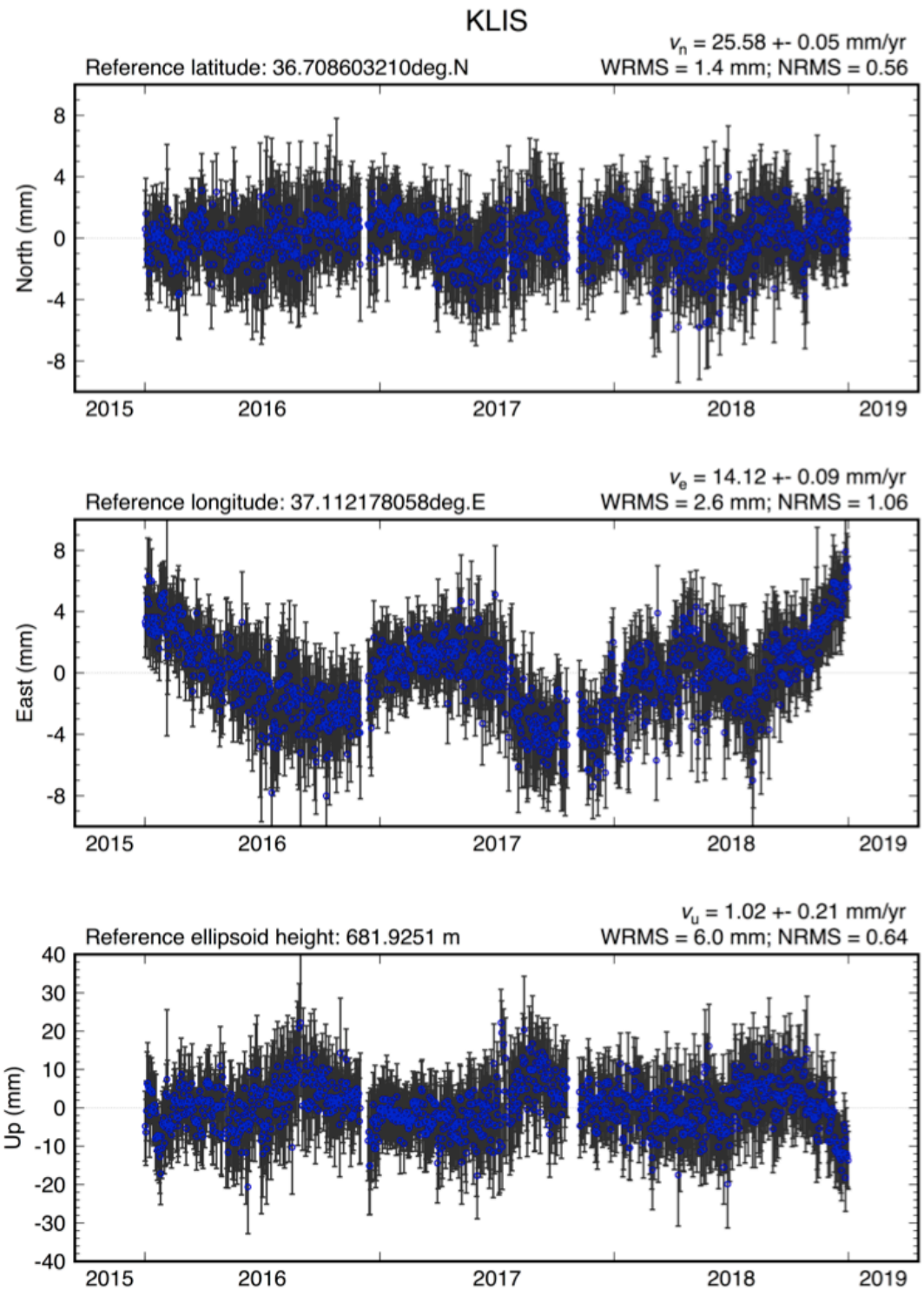
Şekil A.15 : HATY (Hatay) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



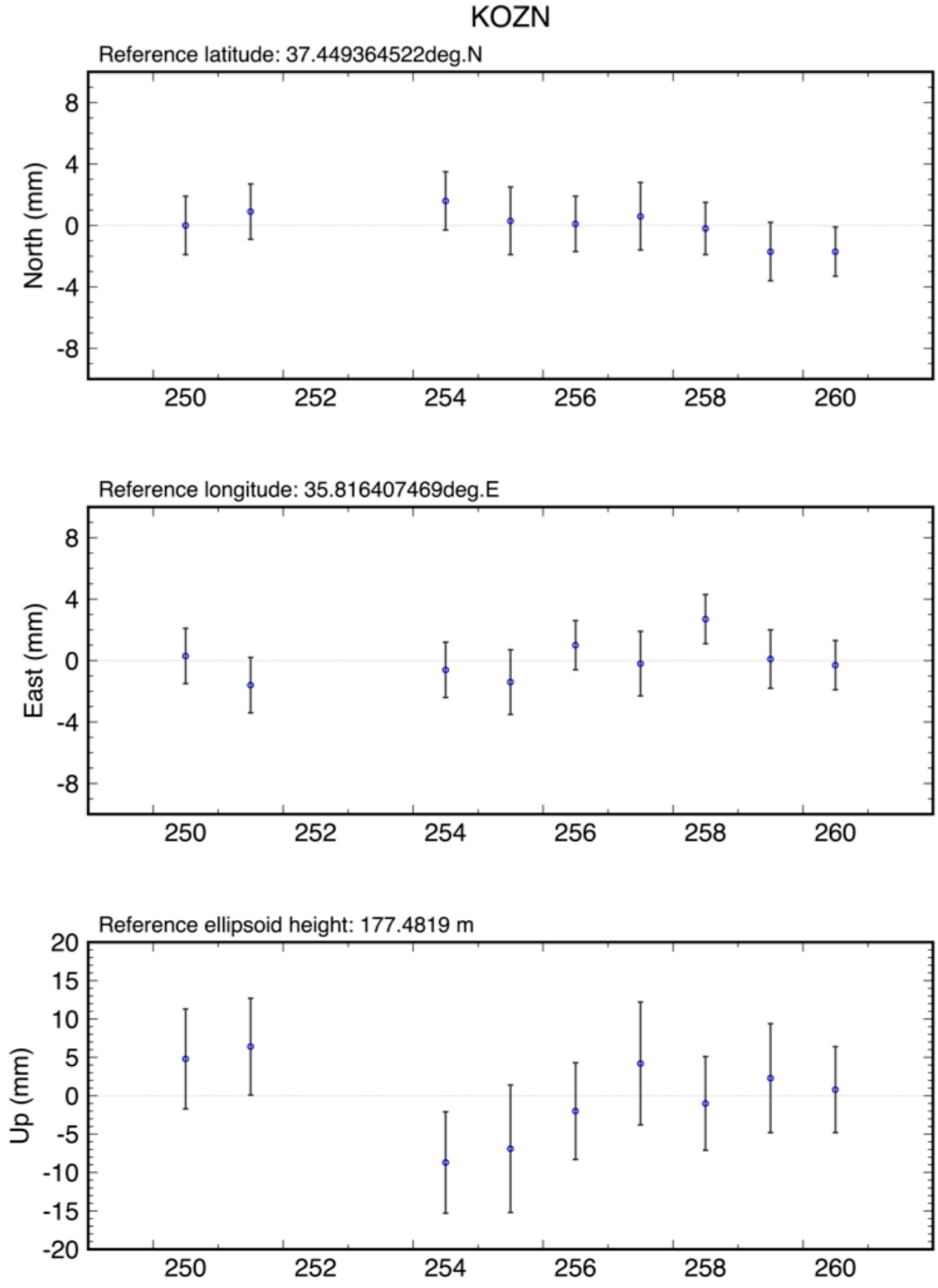
Şekil A.16 : ISLH (İslahiye-Gaziantep) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



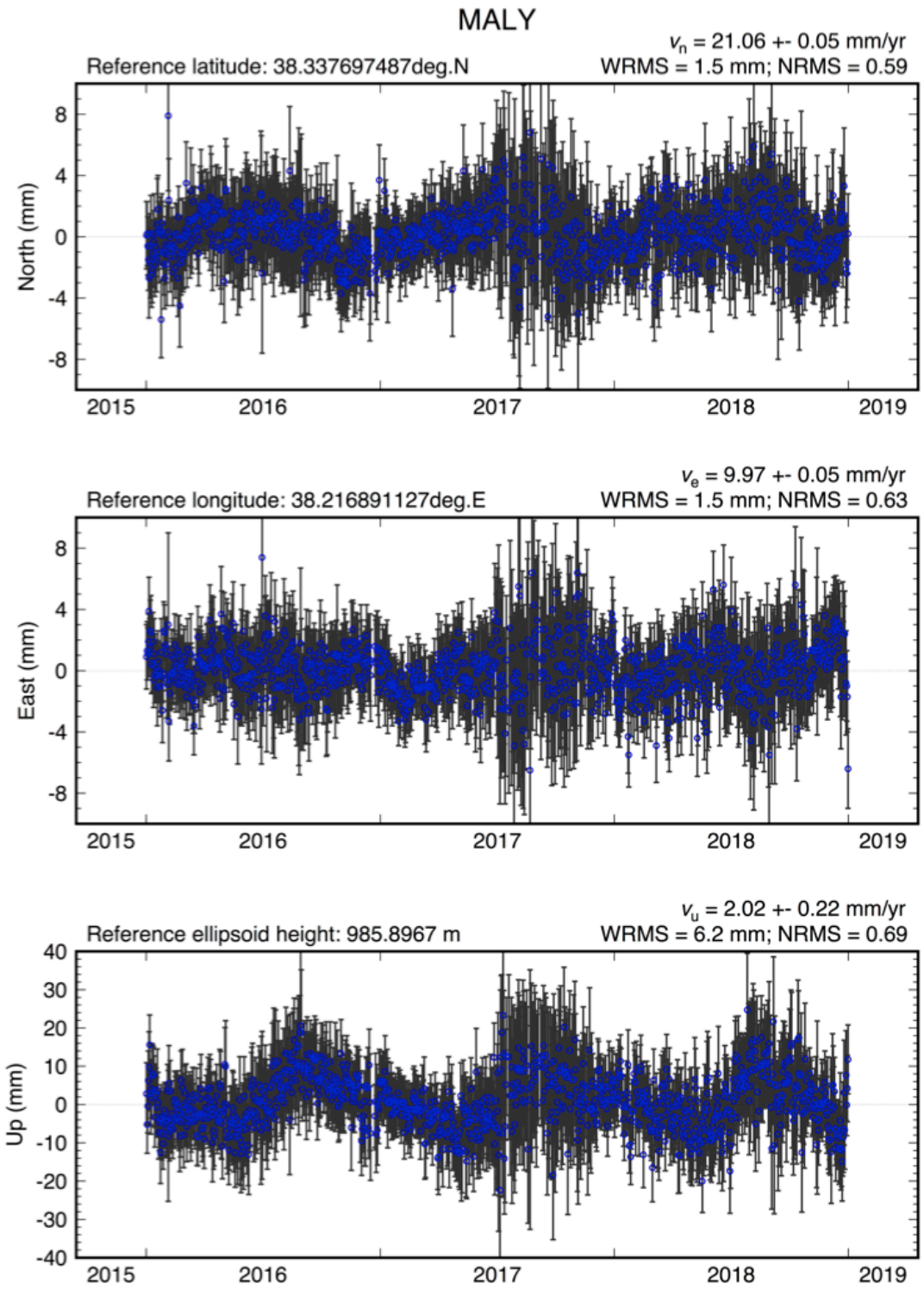
Şekil A.17 : KAYS (Kayseri) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



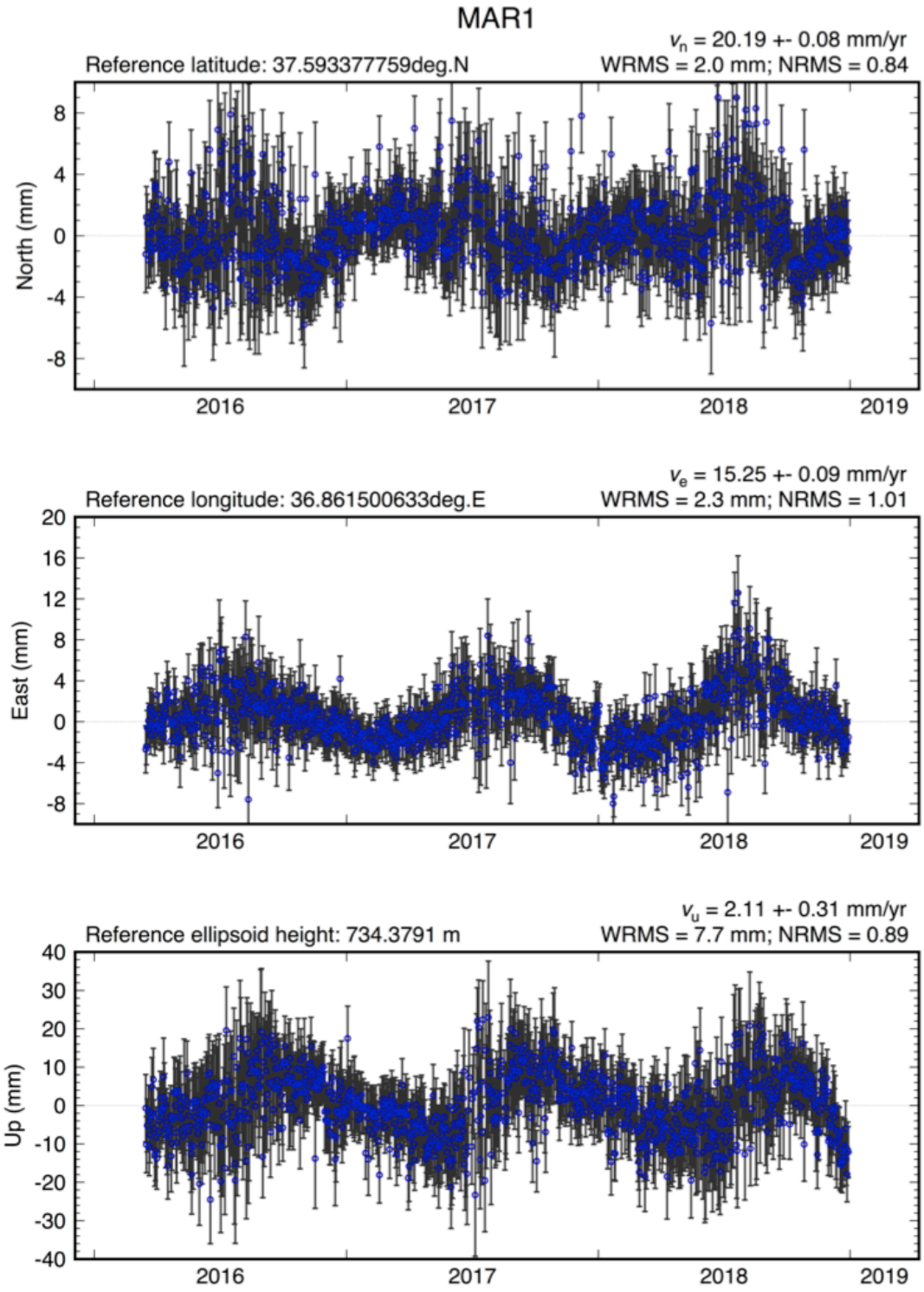
Şekil A.18 : KLIS (KİLİS) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



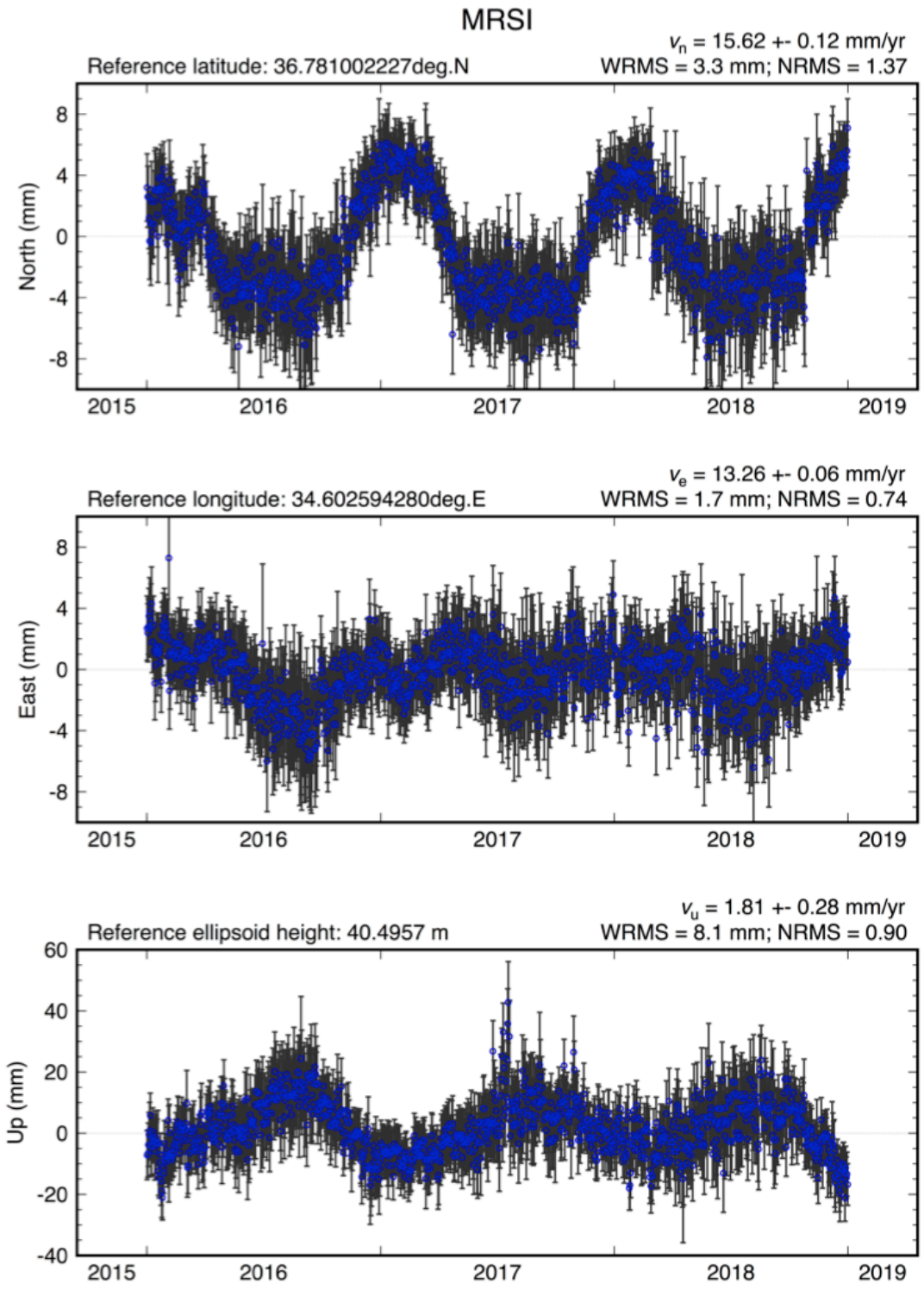
Şekil A.19 : KOZN (Kozan-Adana) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



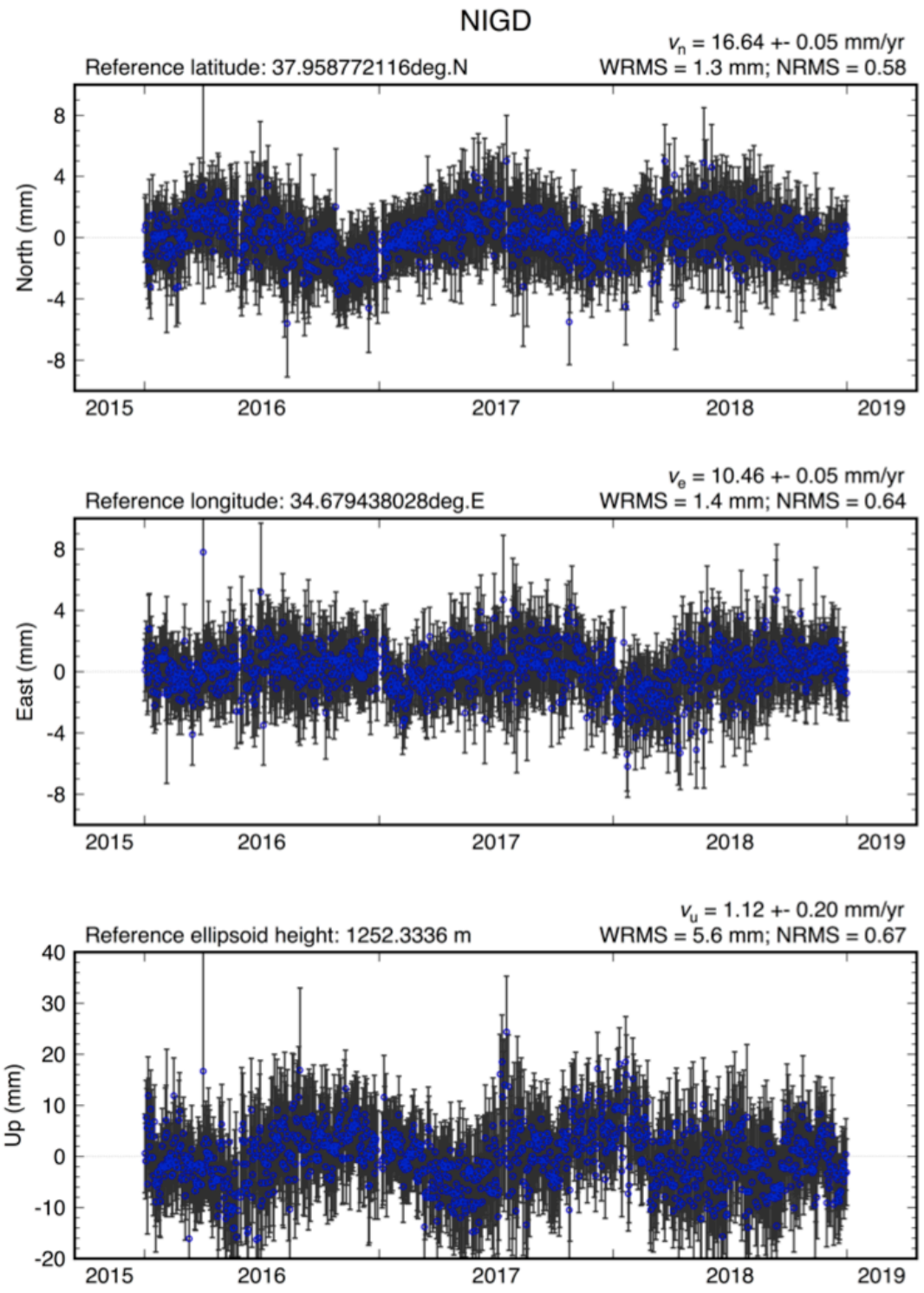
Şekil A.20 : MALY (Malatya) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



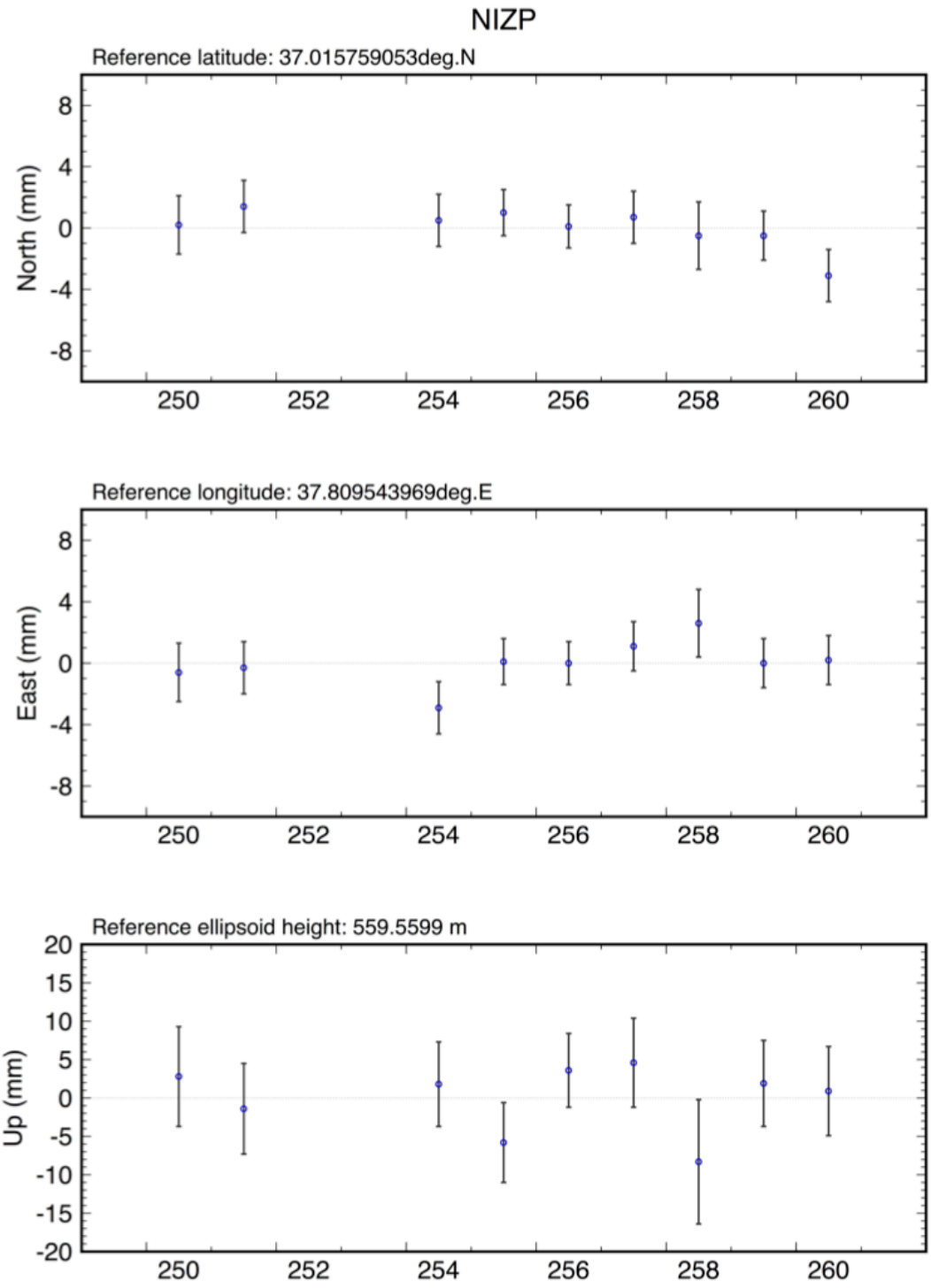
Şekil A.21 : MAR1 (Kahramanmaraş) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



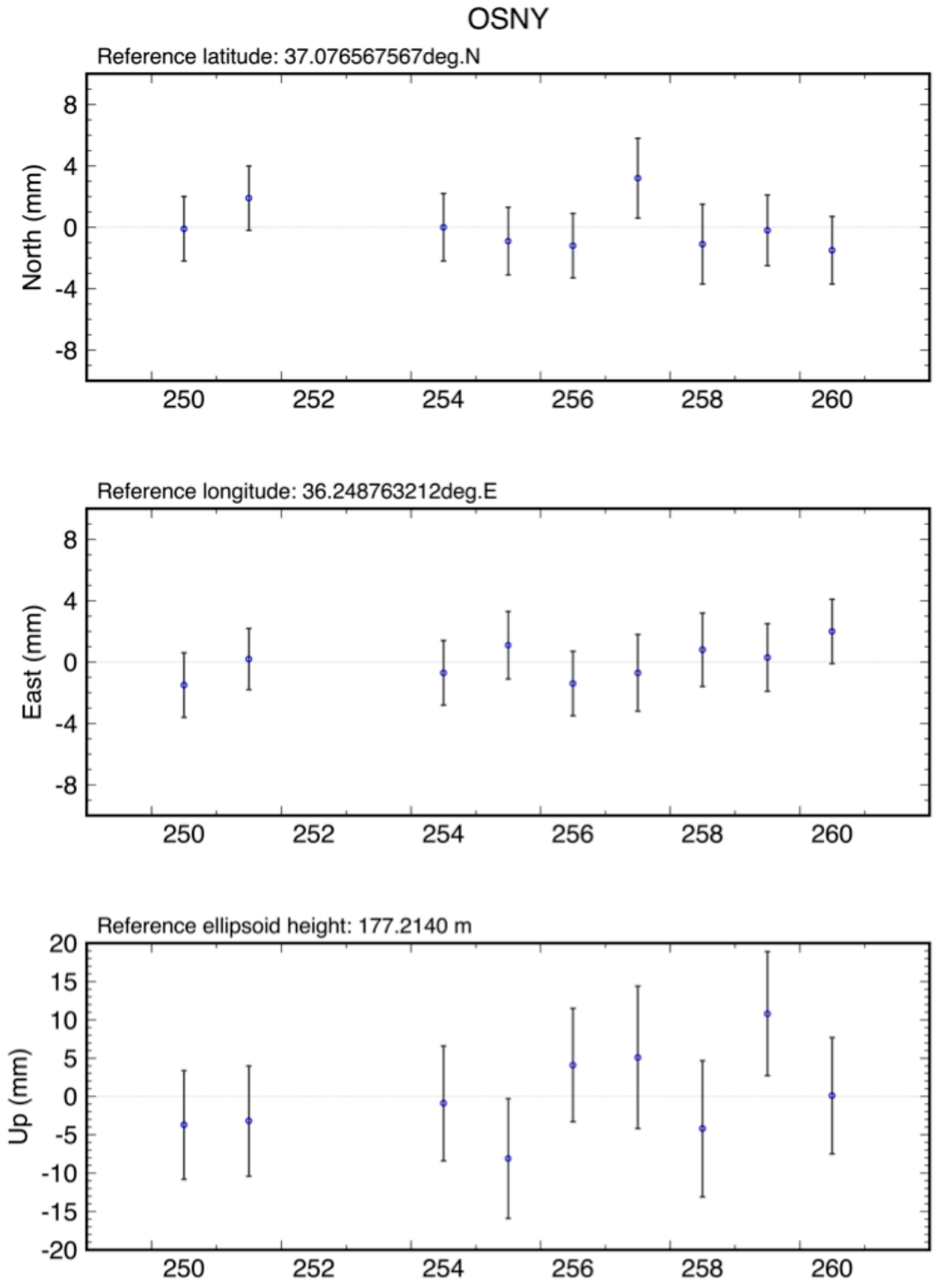
Şekil A.22 : MRSI (Mersin) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



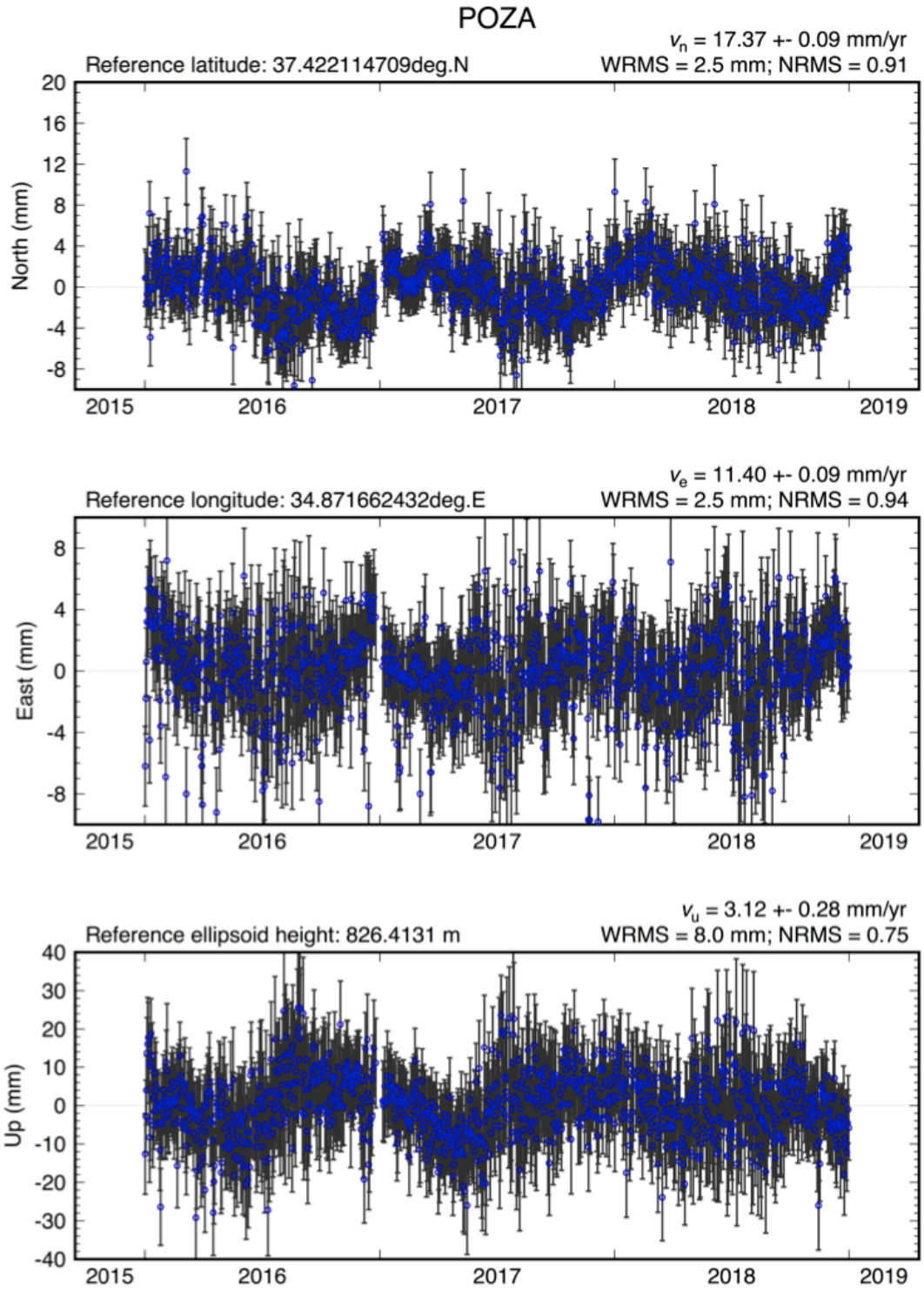
Şekil A.23 : NIGD (Niğde) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



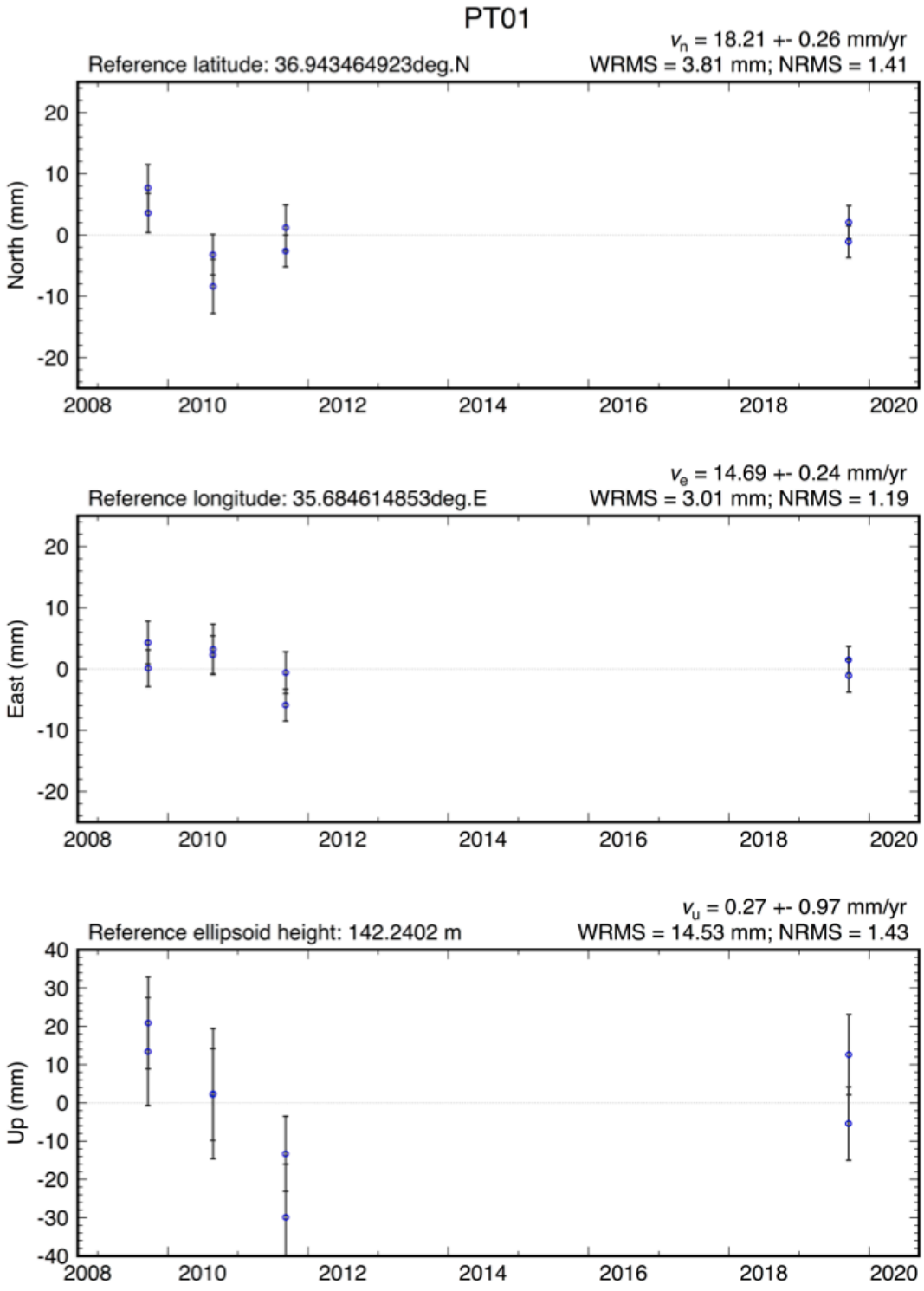
Şekil A.24 : NIZP (Nizip-Gaziantep) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



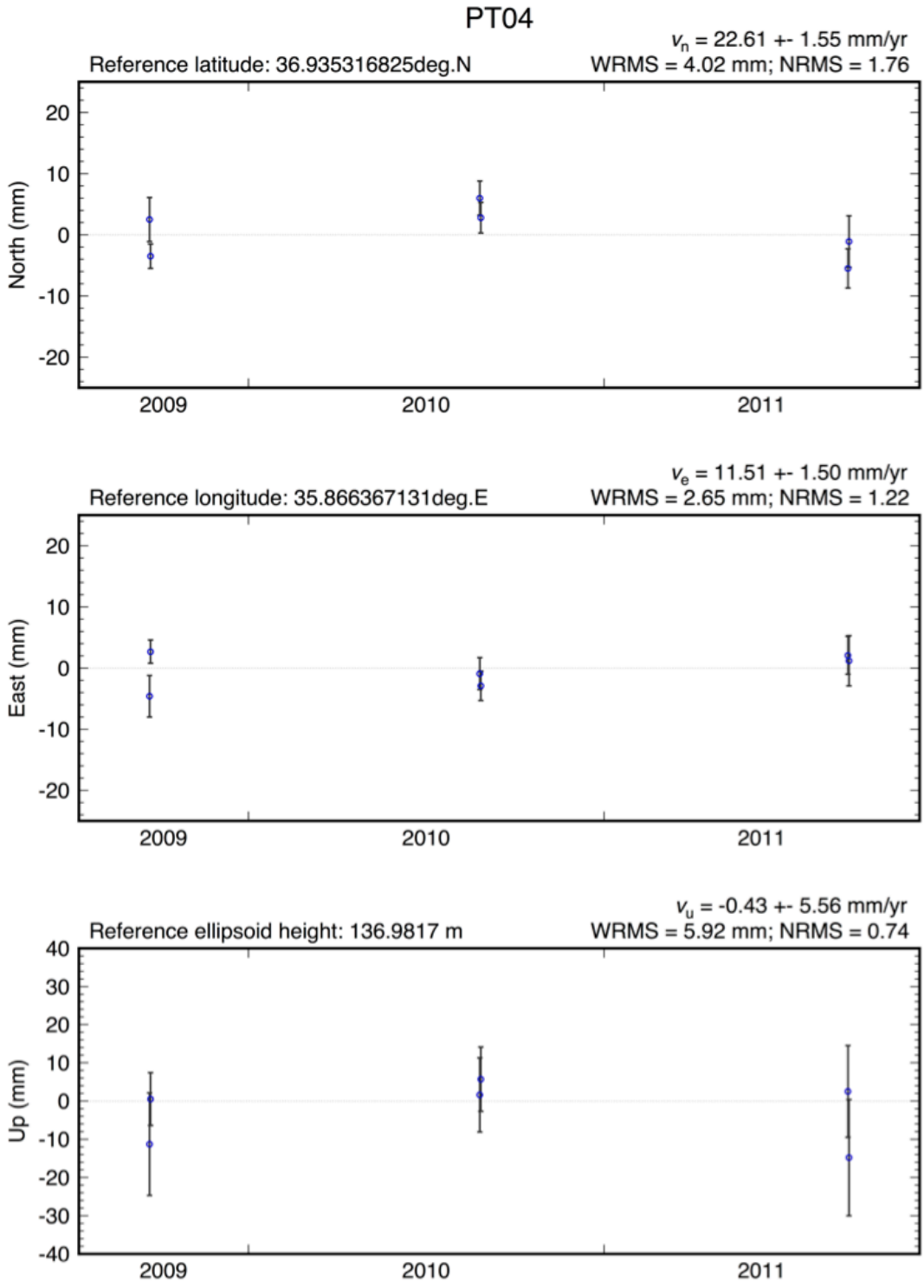
Şekil A.25 : OSNY (Osmaniye) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).



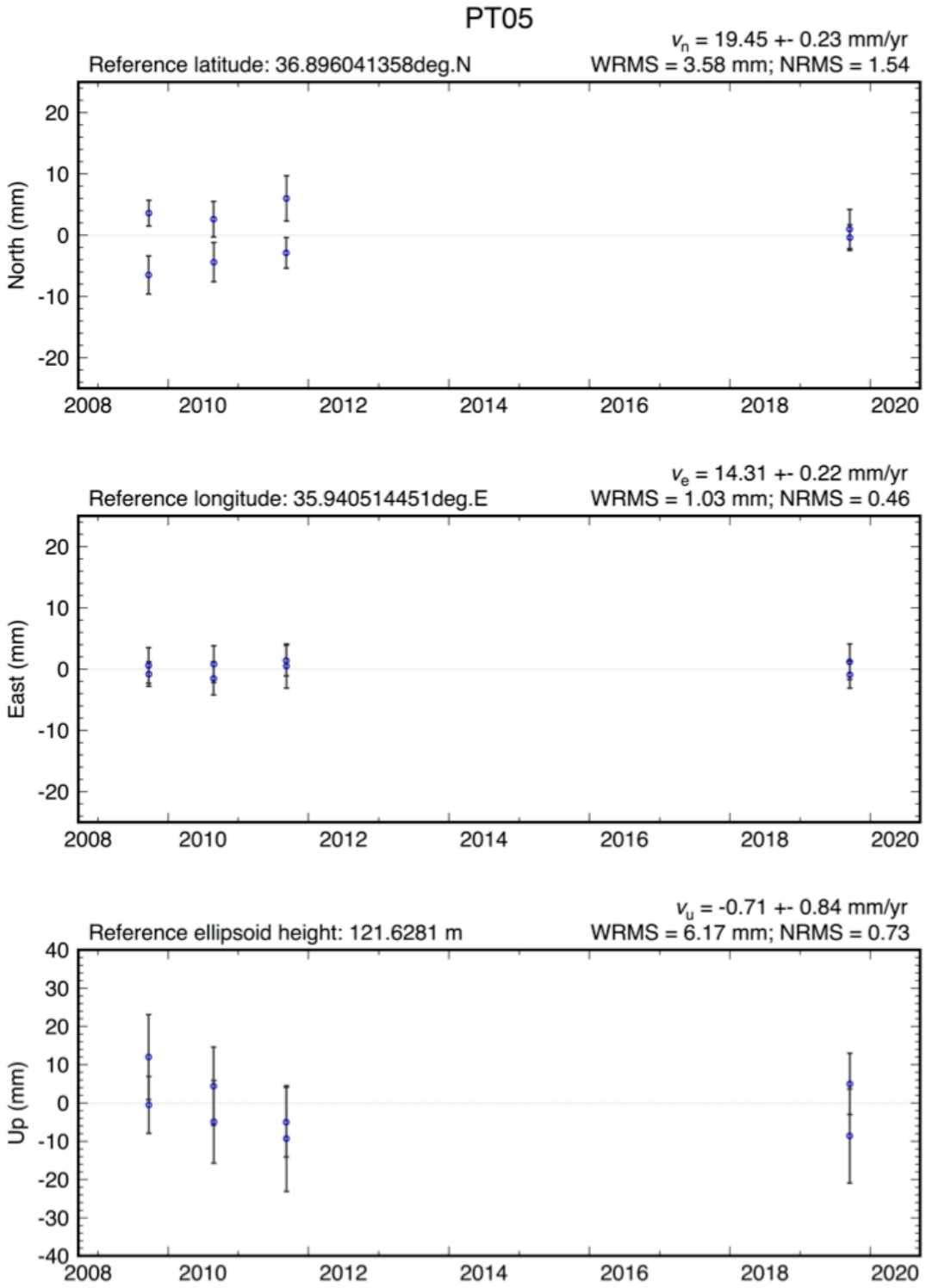
Şekil A.26 : POZA (Pozantı-Adana) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



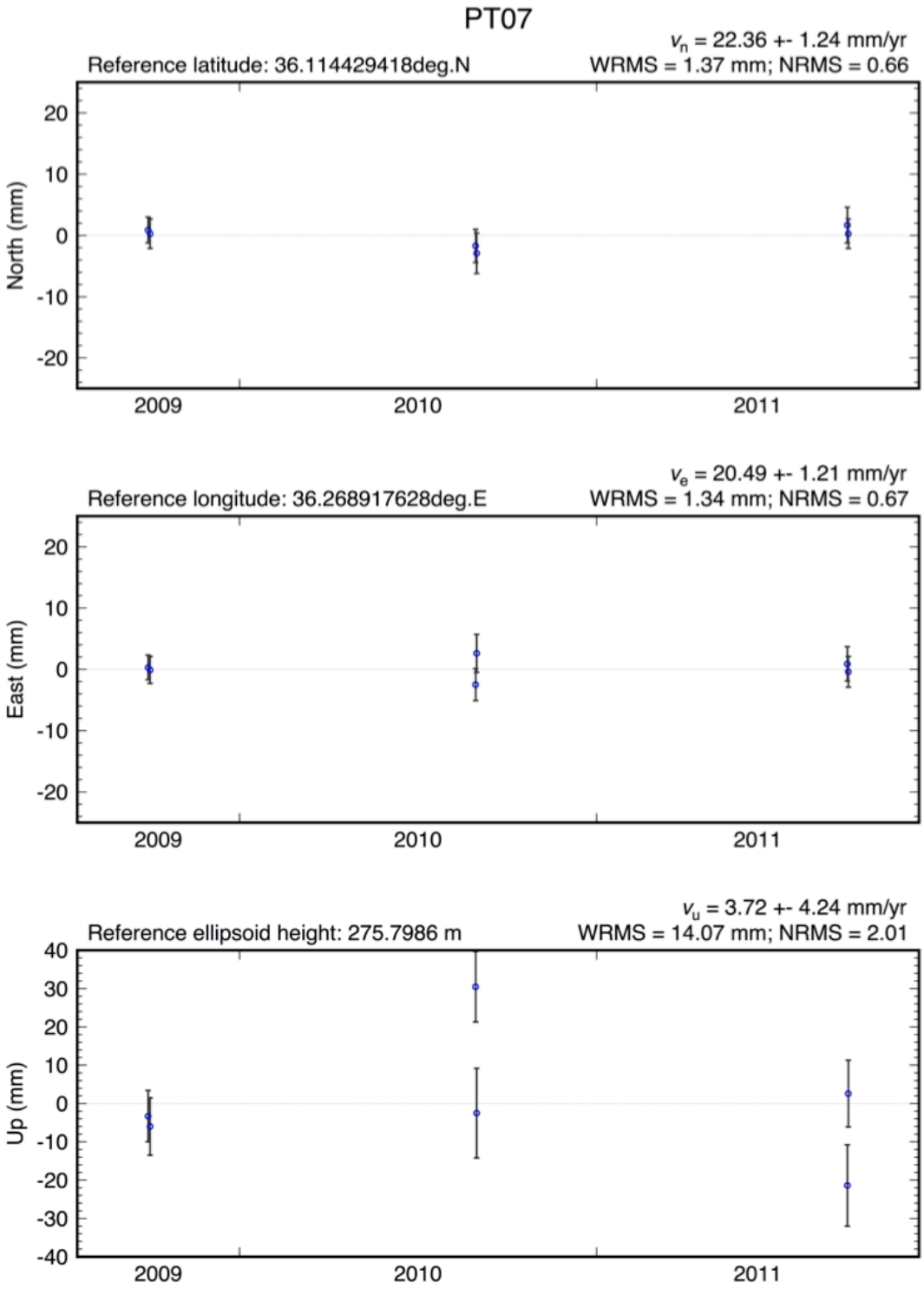
Şekil A.27 : PT01 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



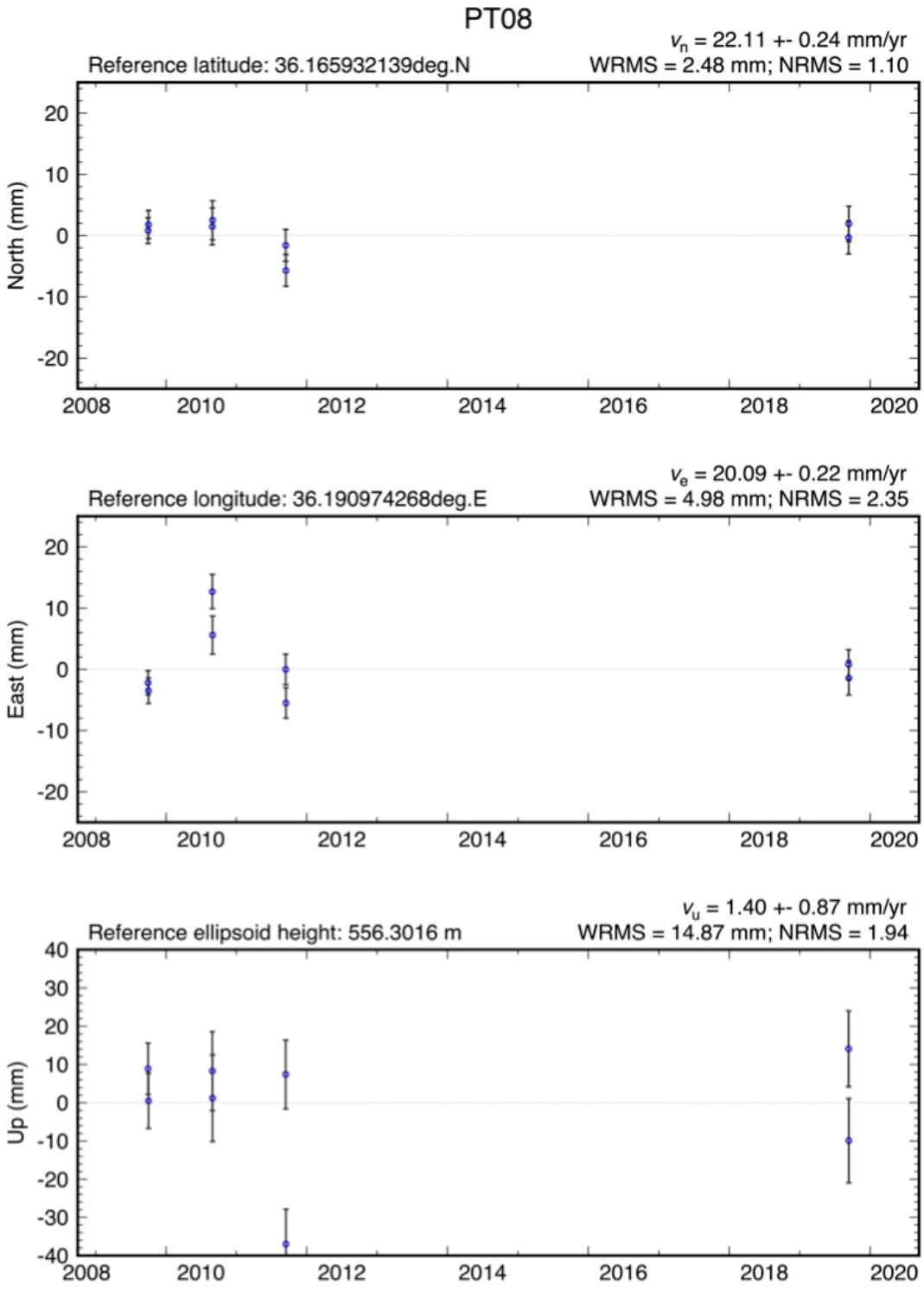
Şekil A.28 : PT04 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



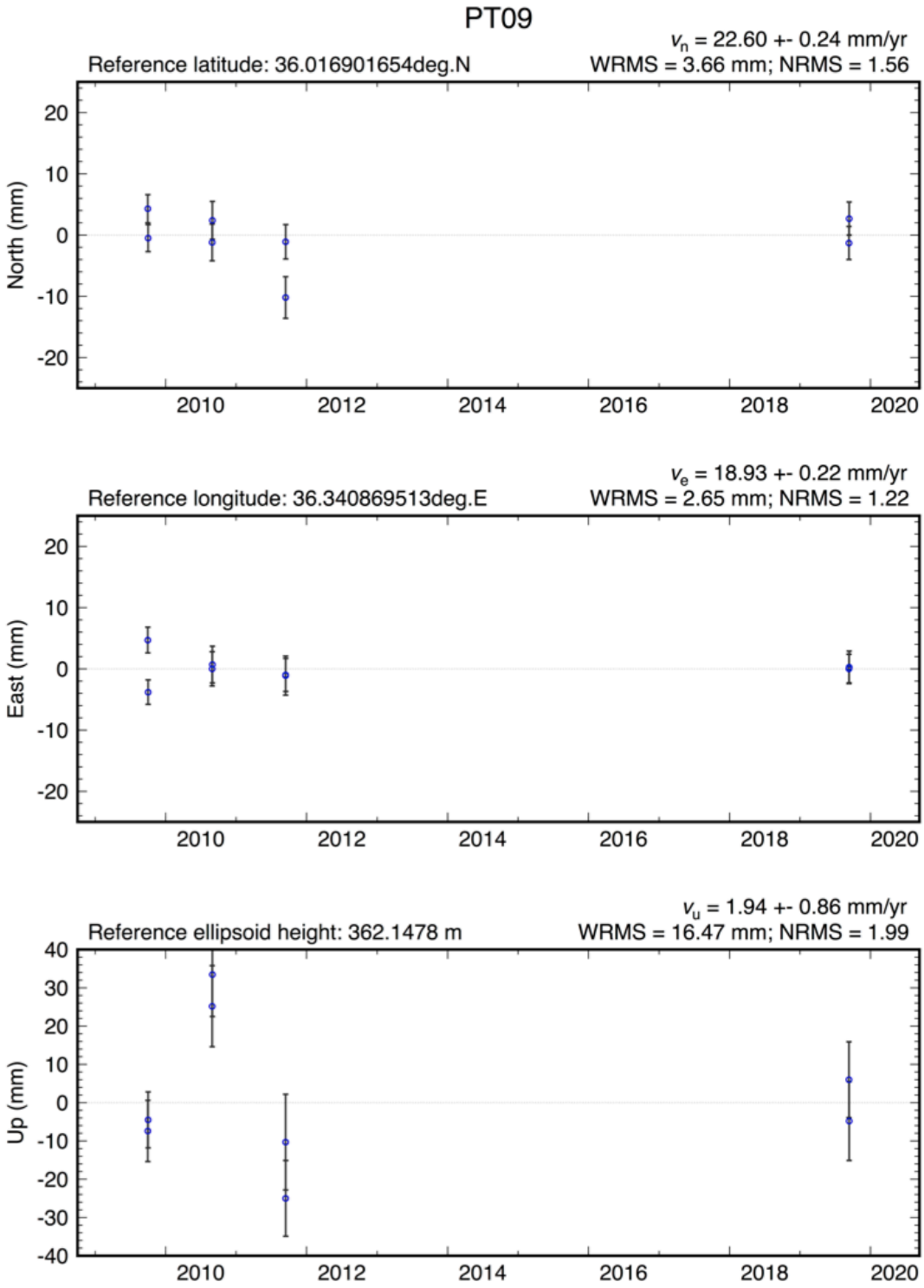
Şekil A.29 : PT05 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



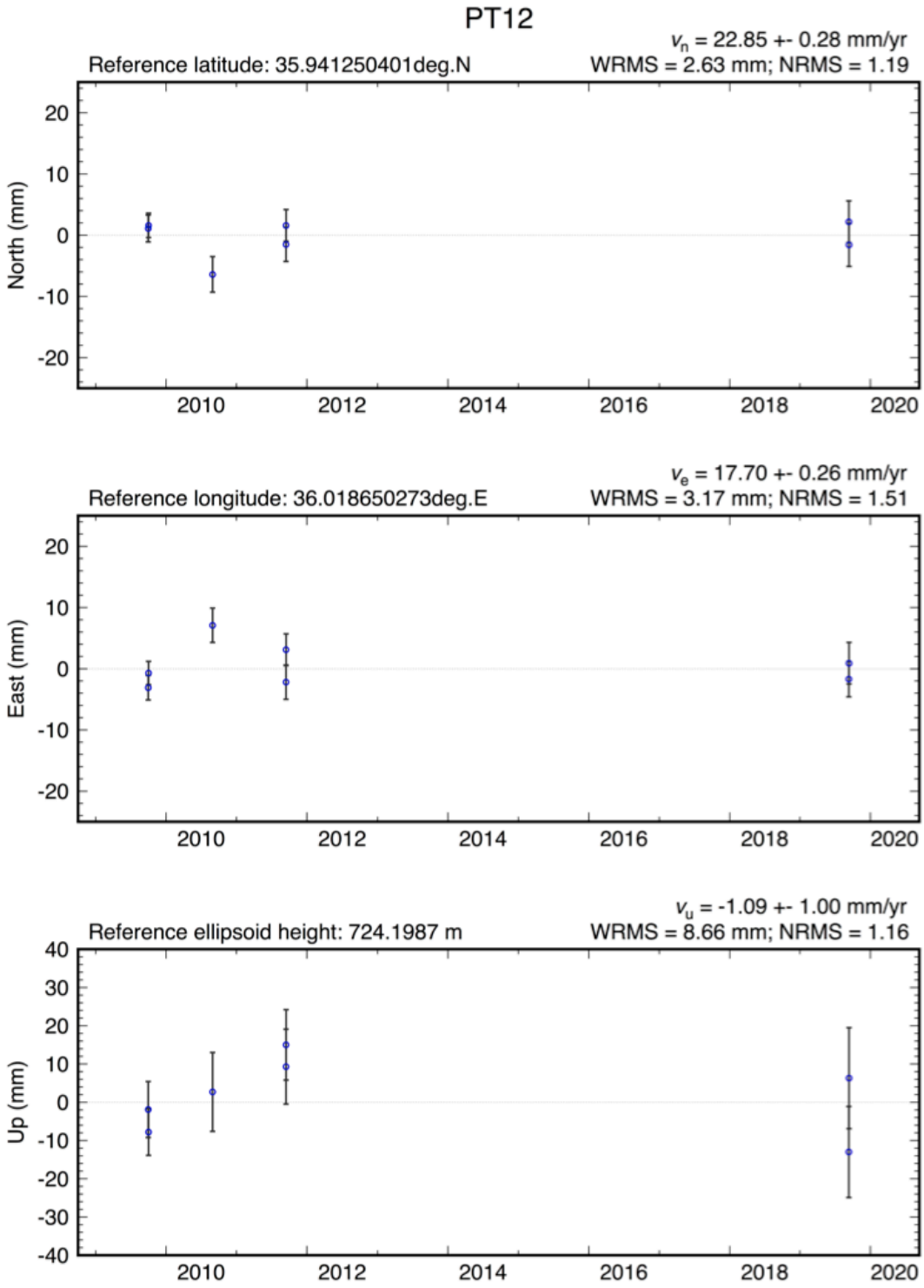
Şekil A.30 : PT07 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



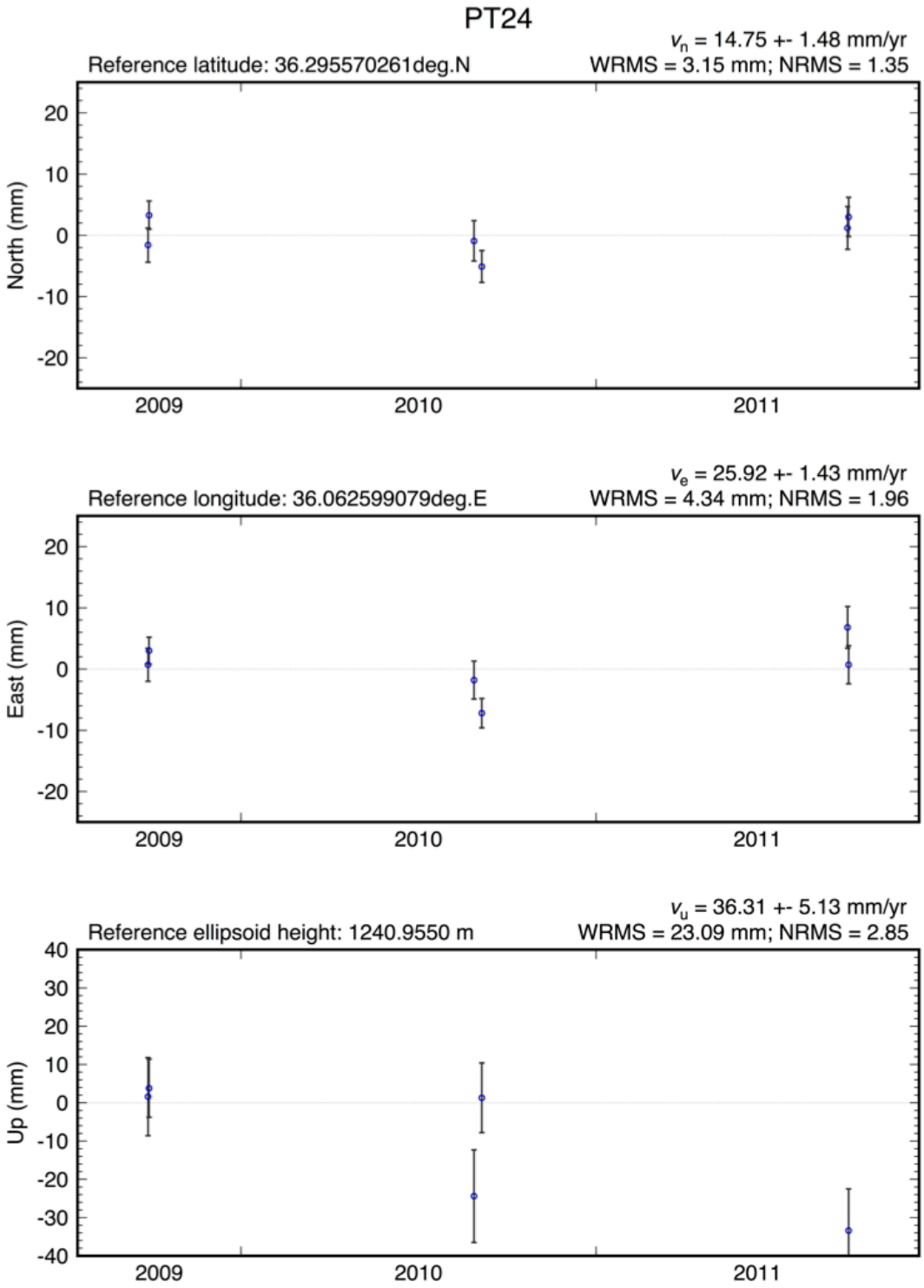
Şekil A.31 : PT08 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



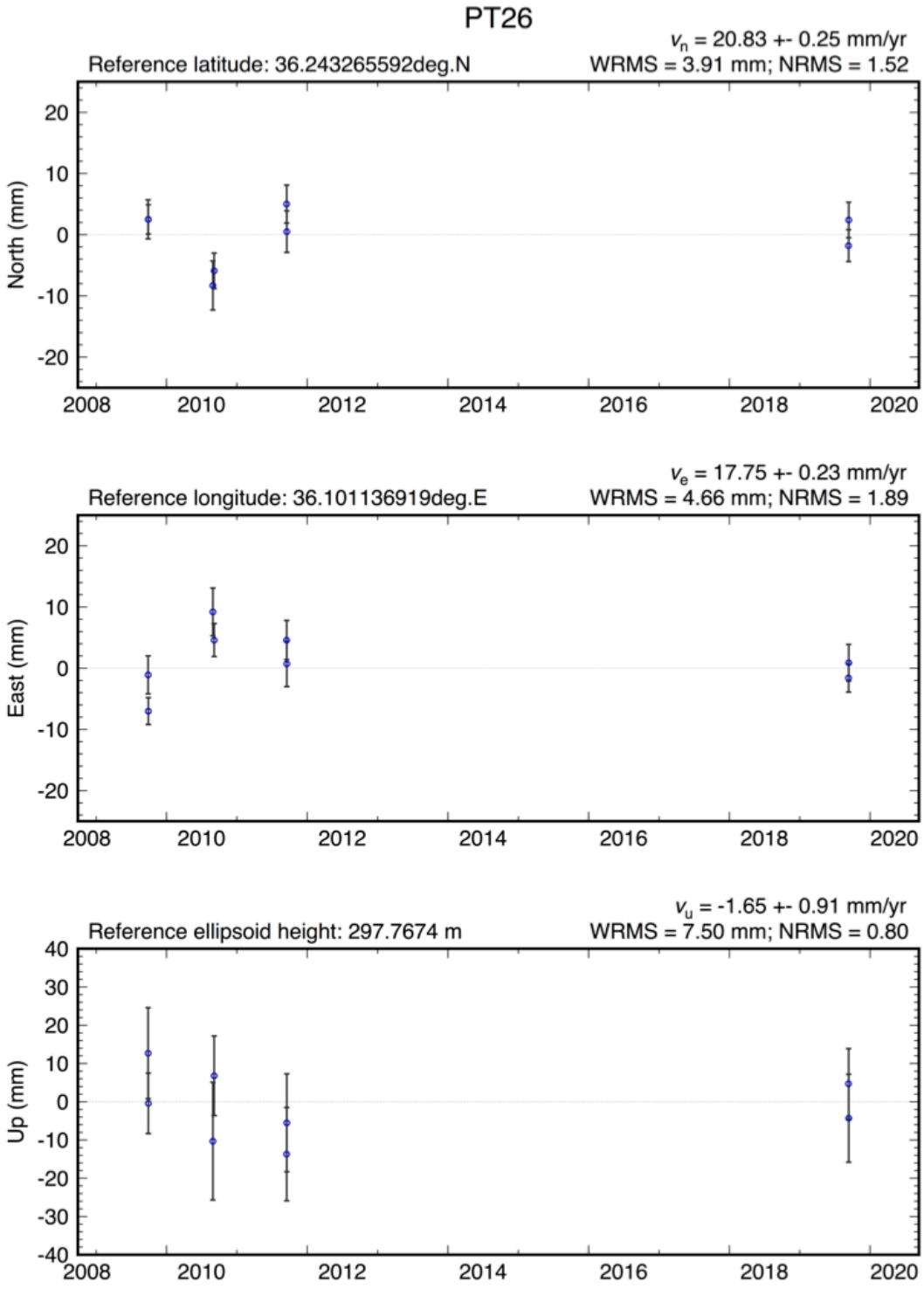
Şekil A.32 : PT09 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



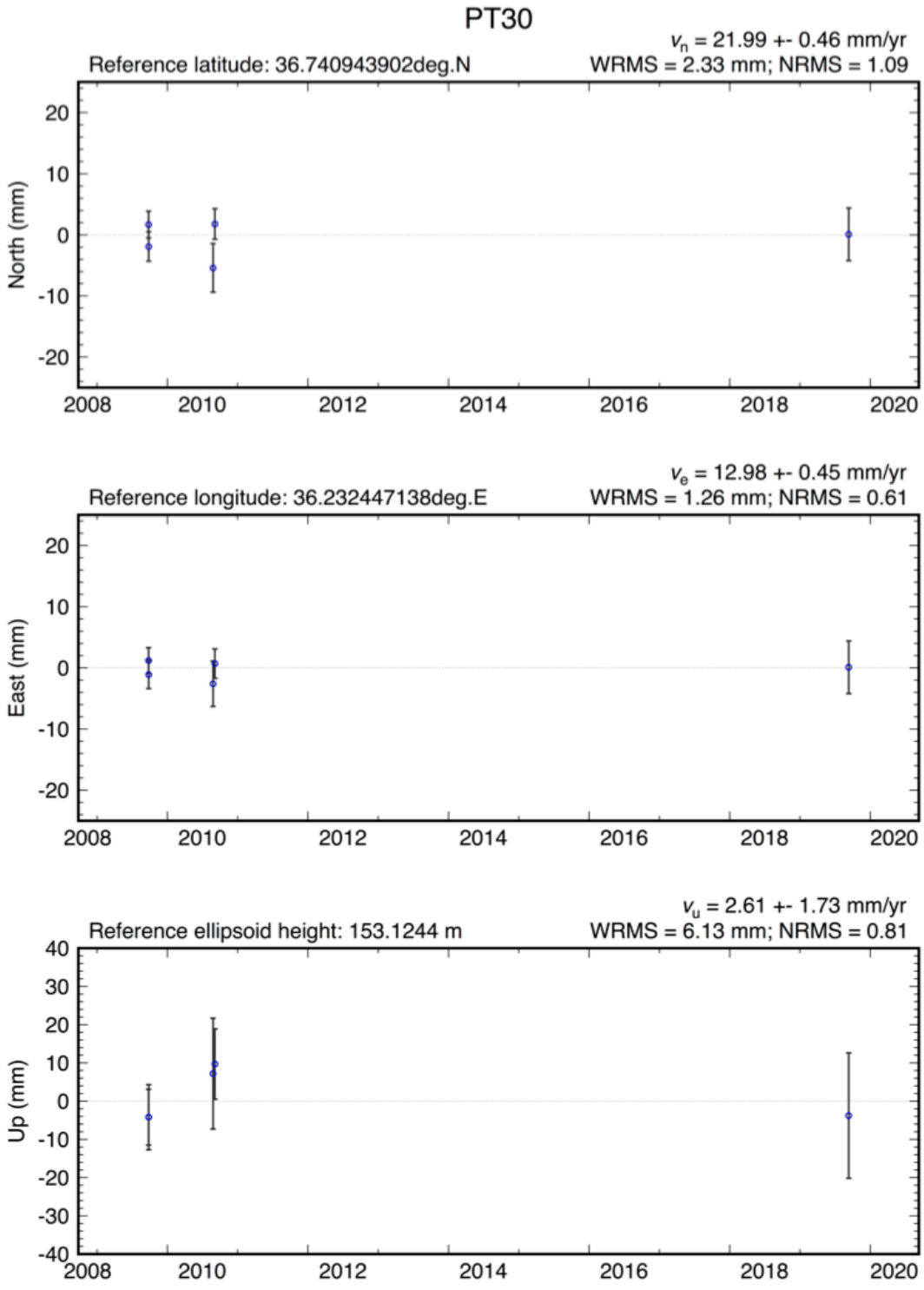
Şekil A.33 : PT12 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



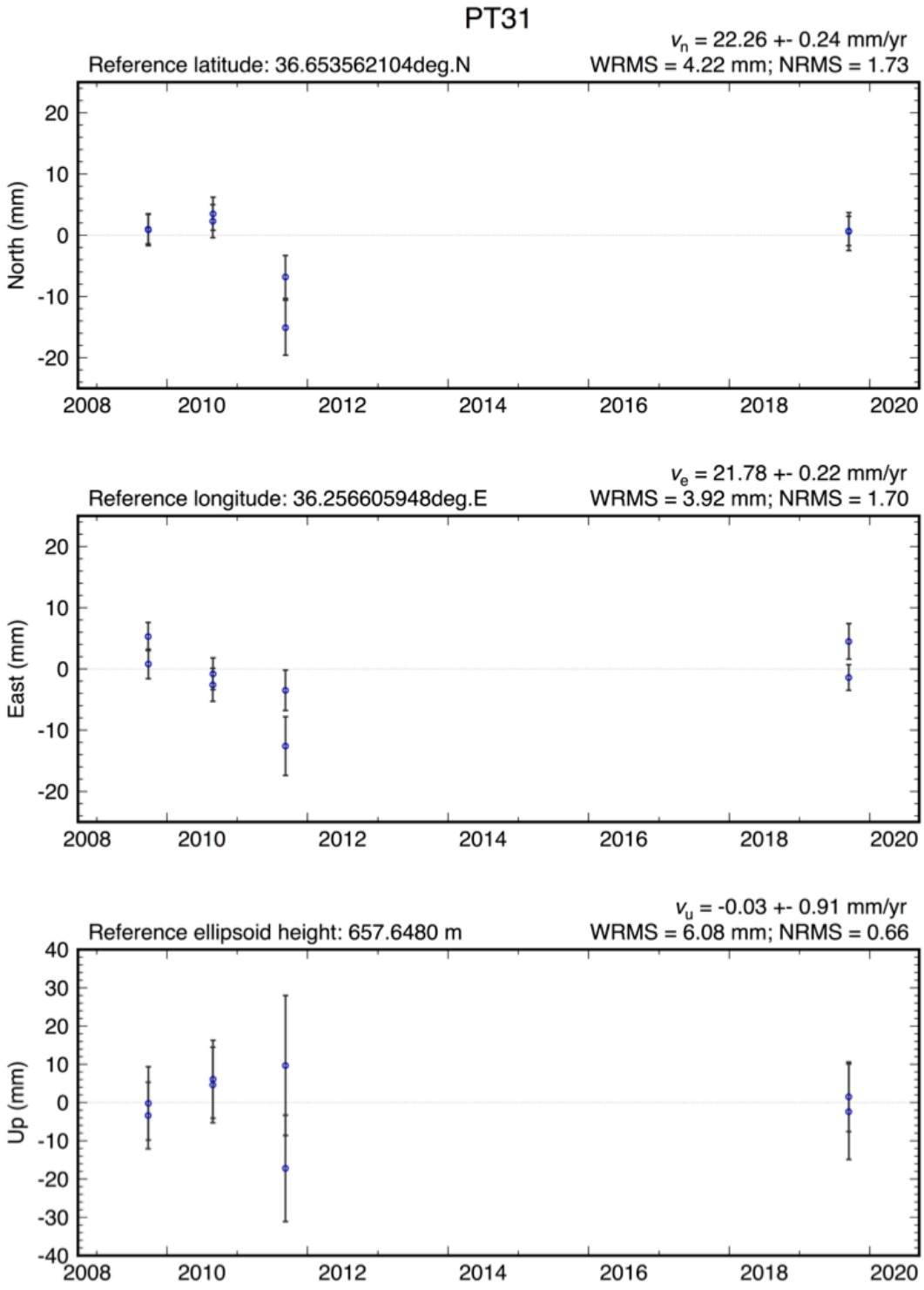
Şekil A.34 : PT24 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



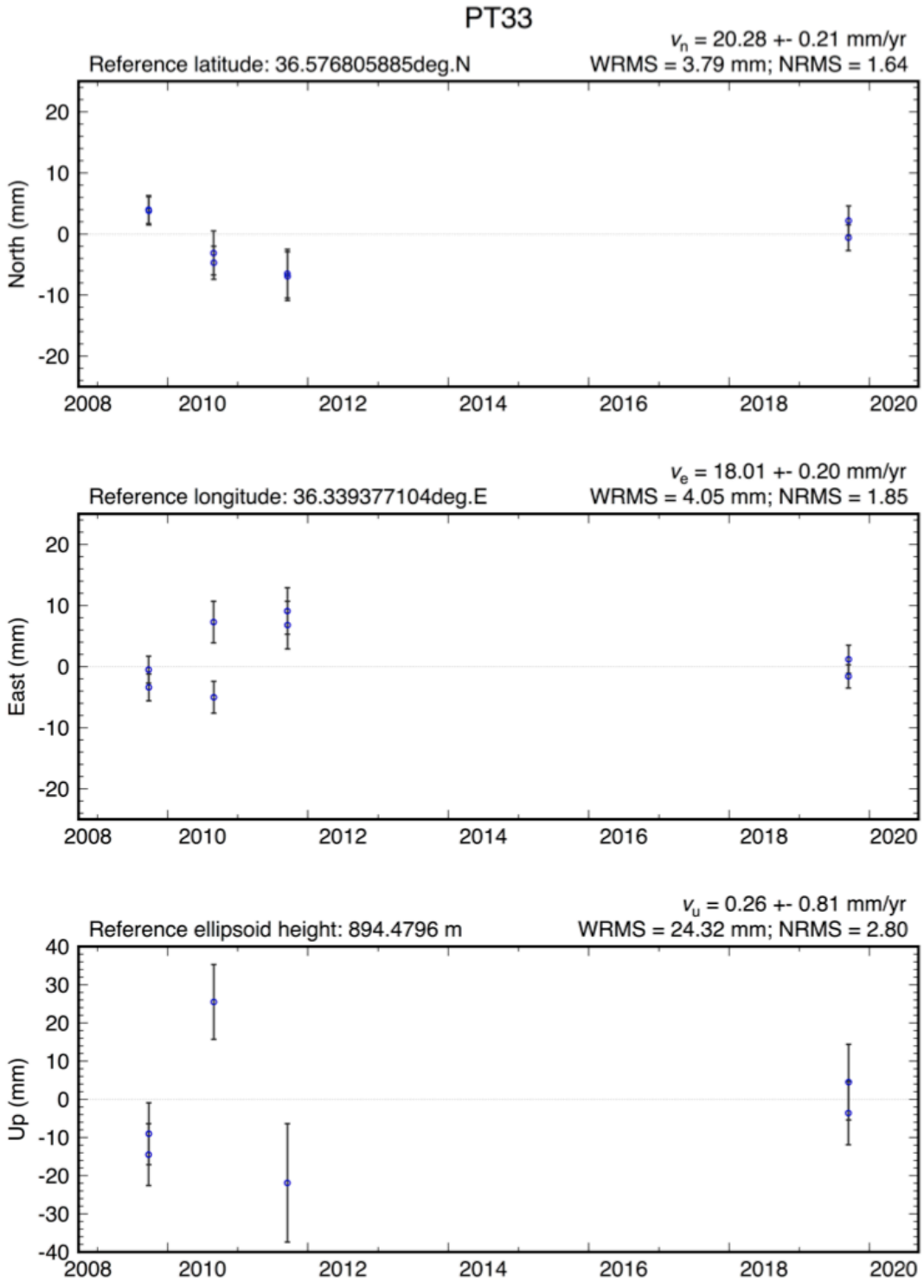
Şekil A.35 : PT26 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



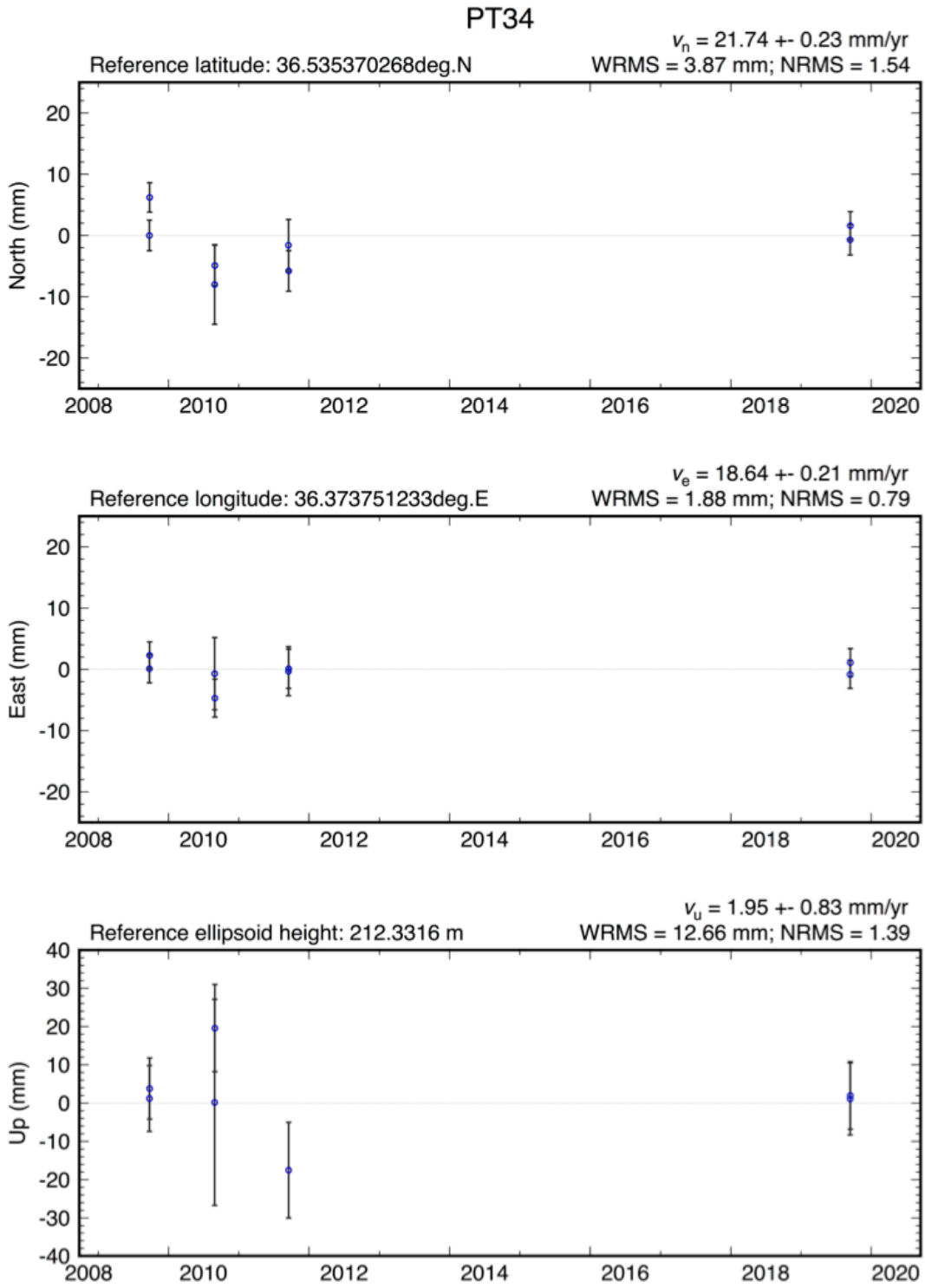
Şekil A.36 : PT30 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



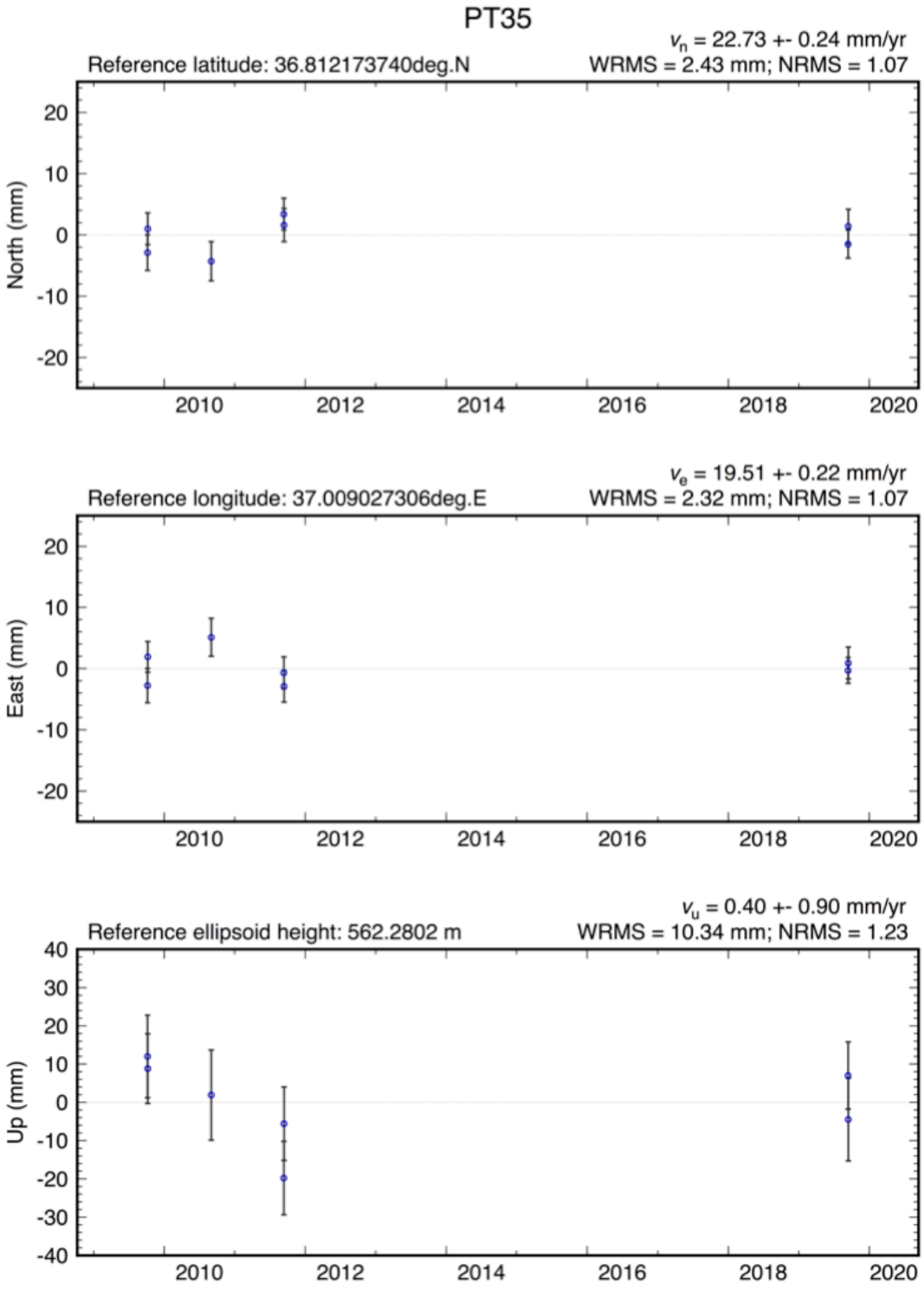
Şekil A.37 : PT31 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



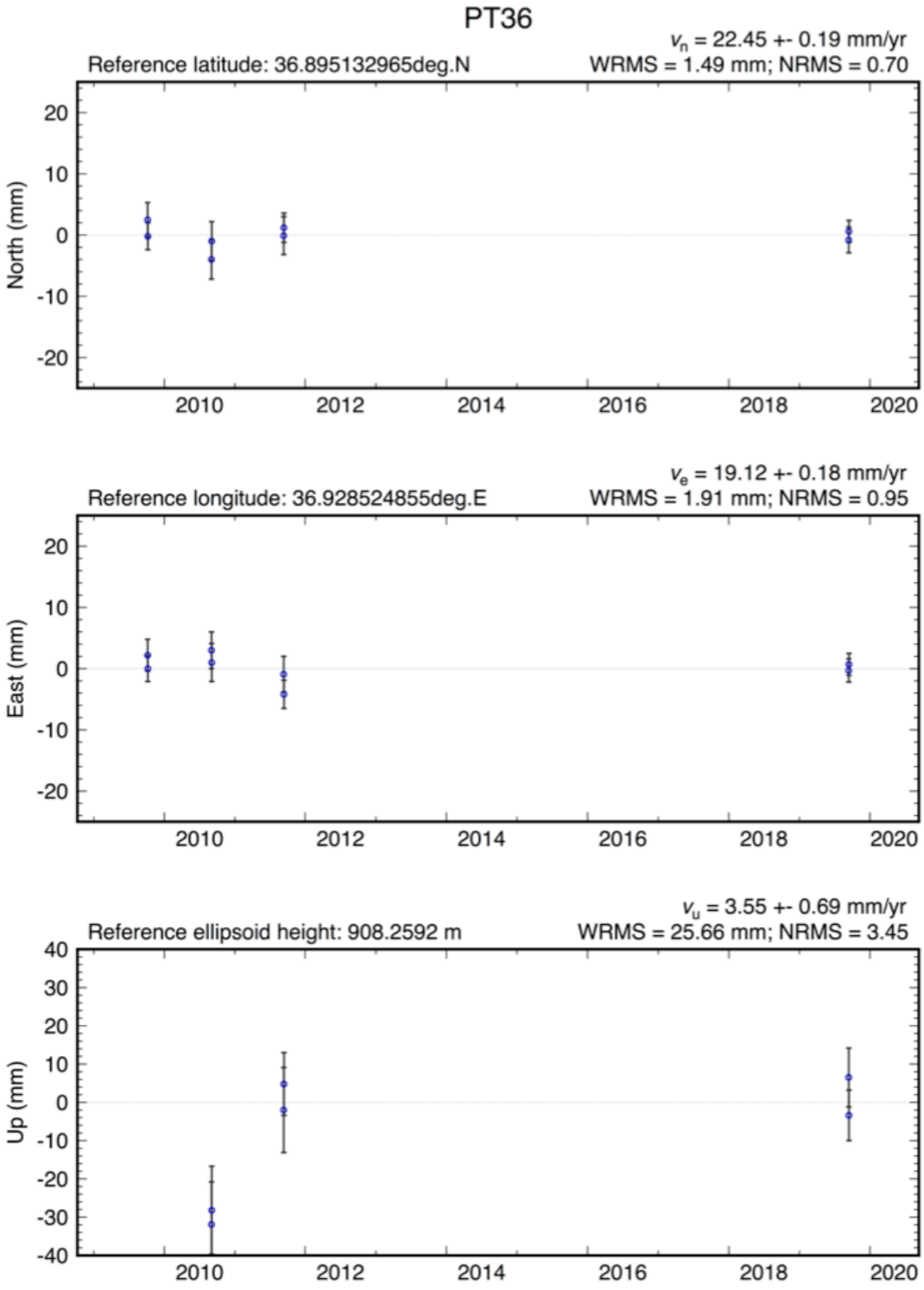
Şekil A.38 : PT33 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



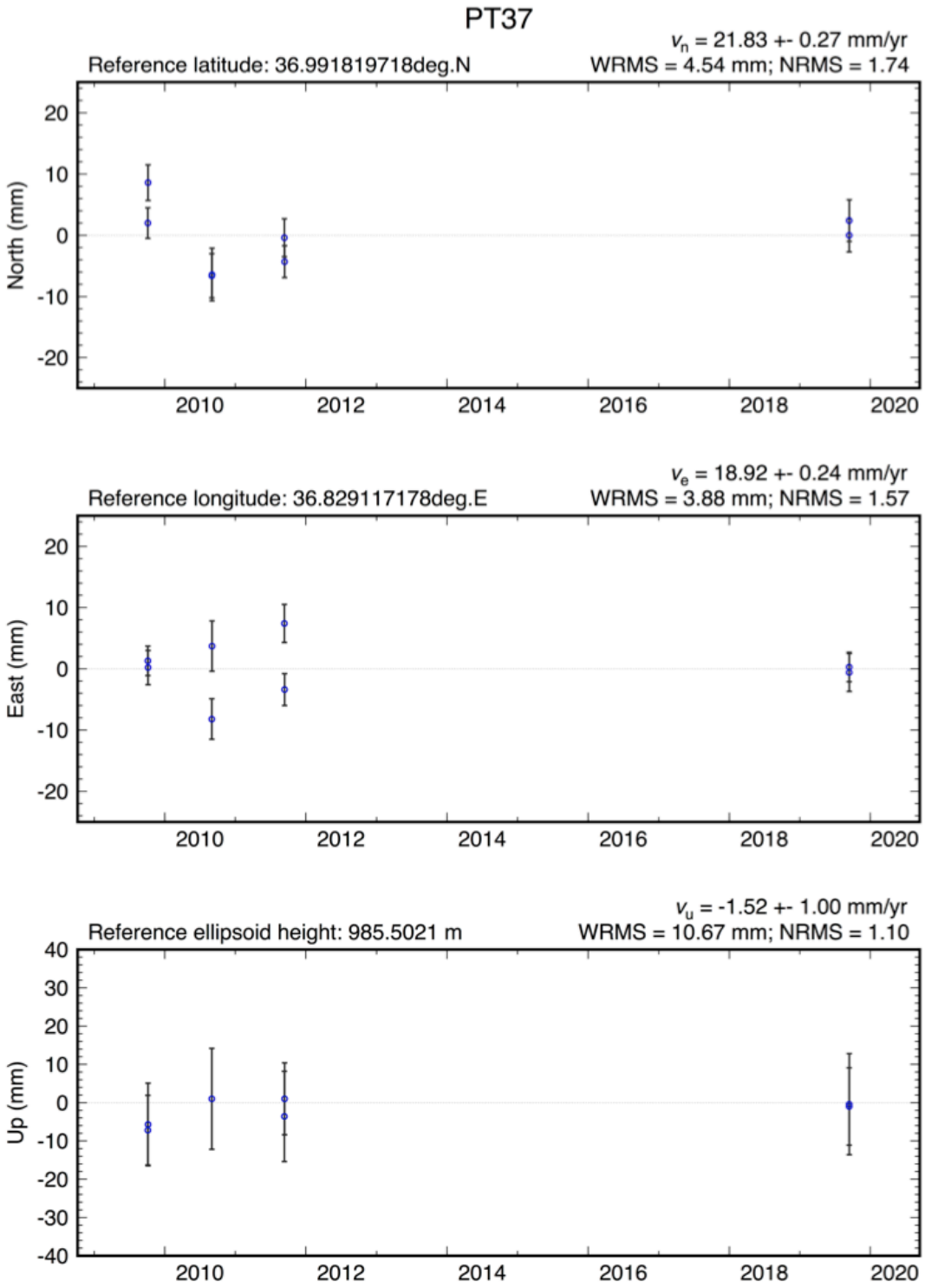
Şekil A.39 : PT34 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



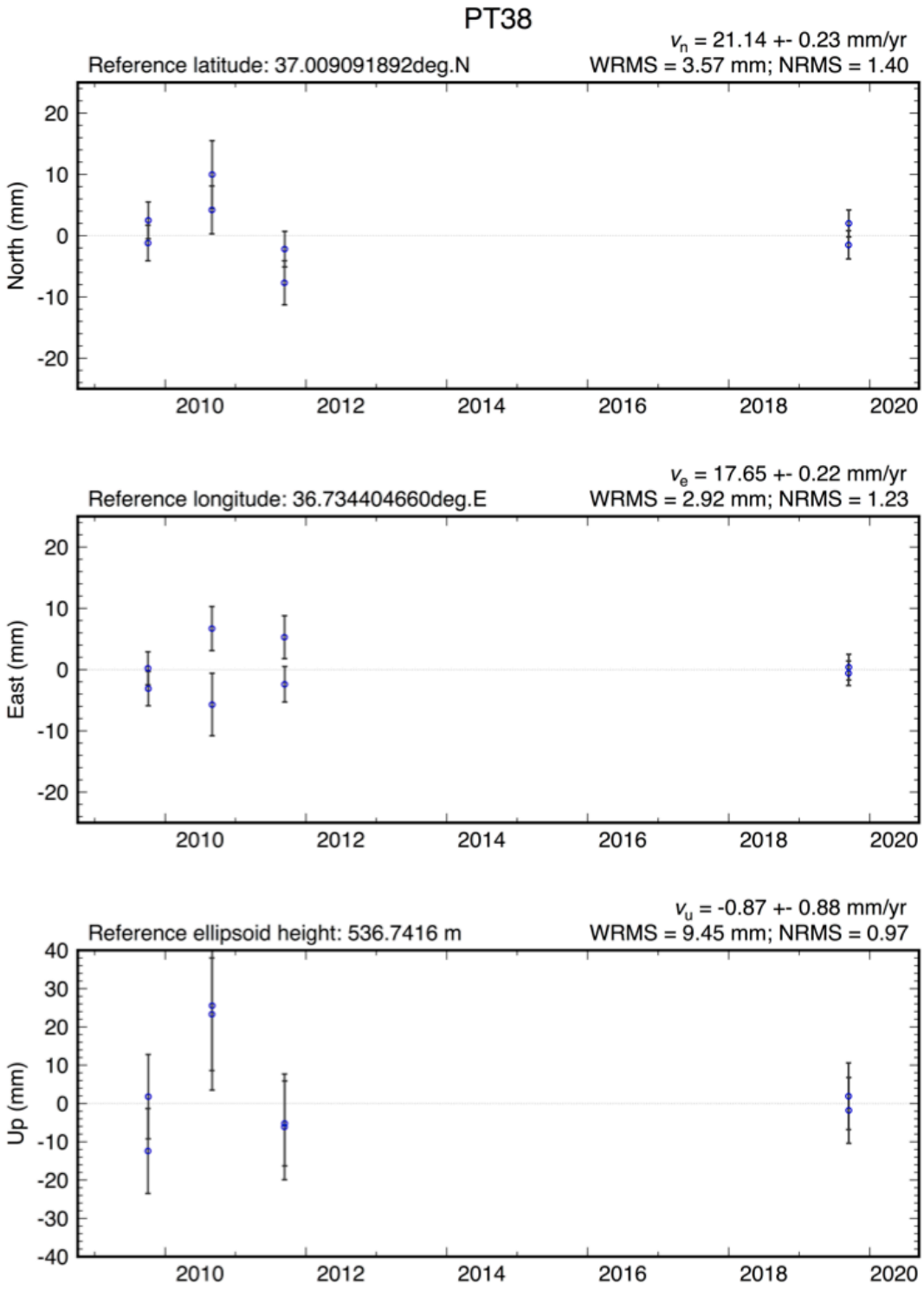
Şekil A.40 : PT35 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



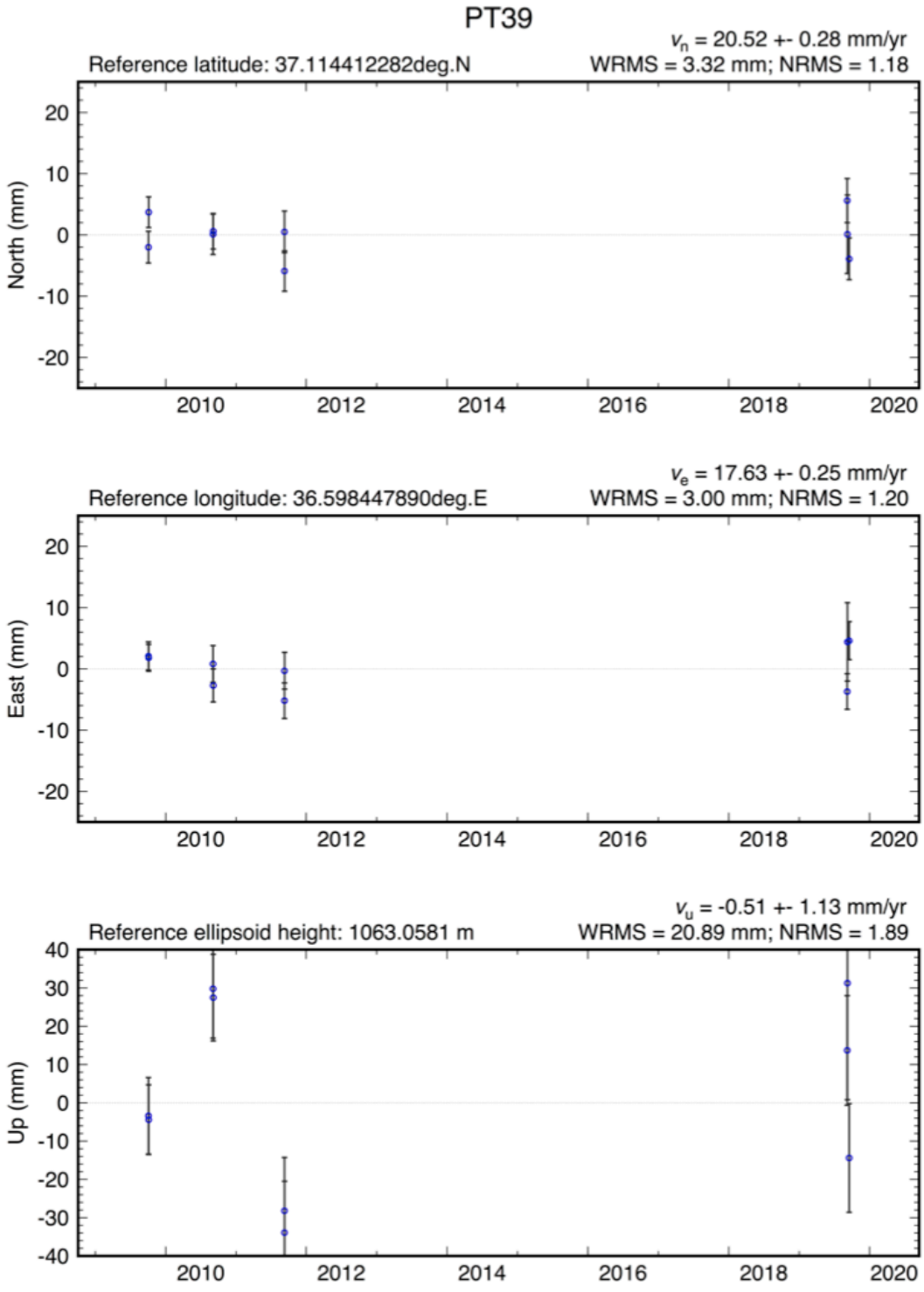
Şekil A.41 : PT36 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



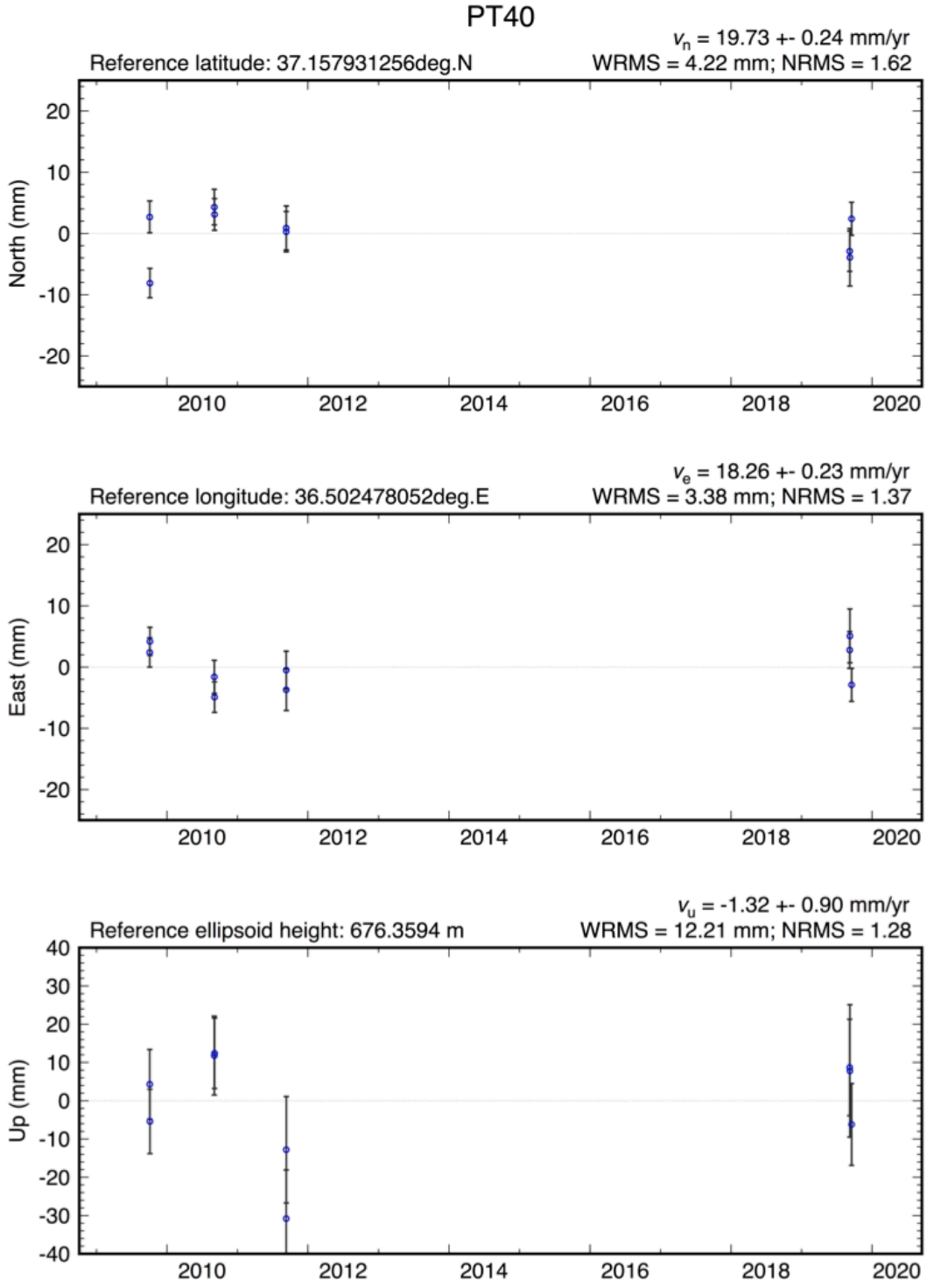
Şekil A.42 : PT37 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



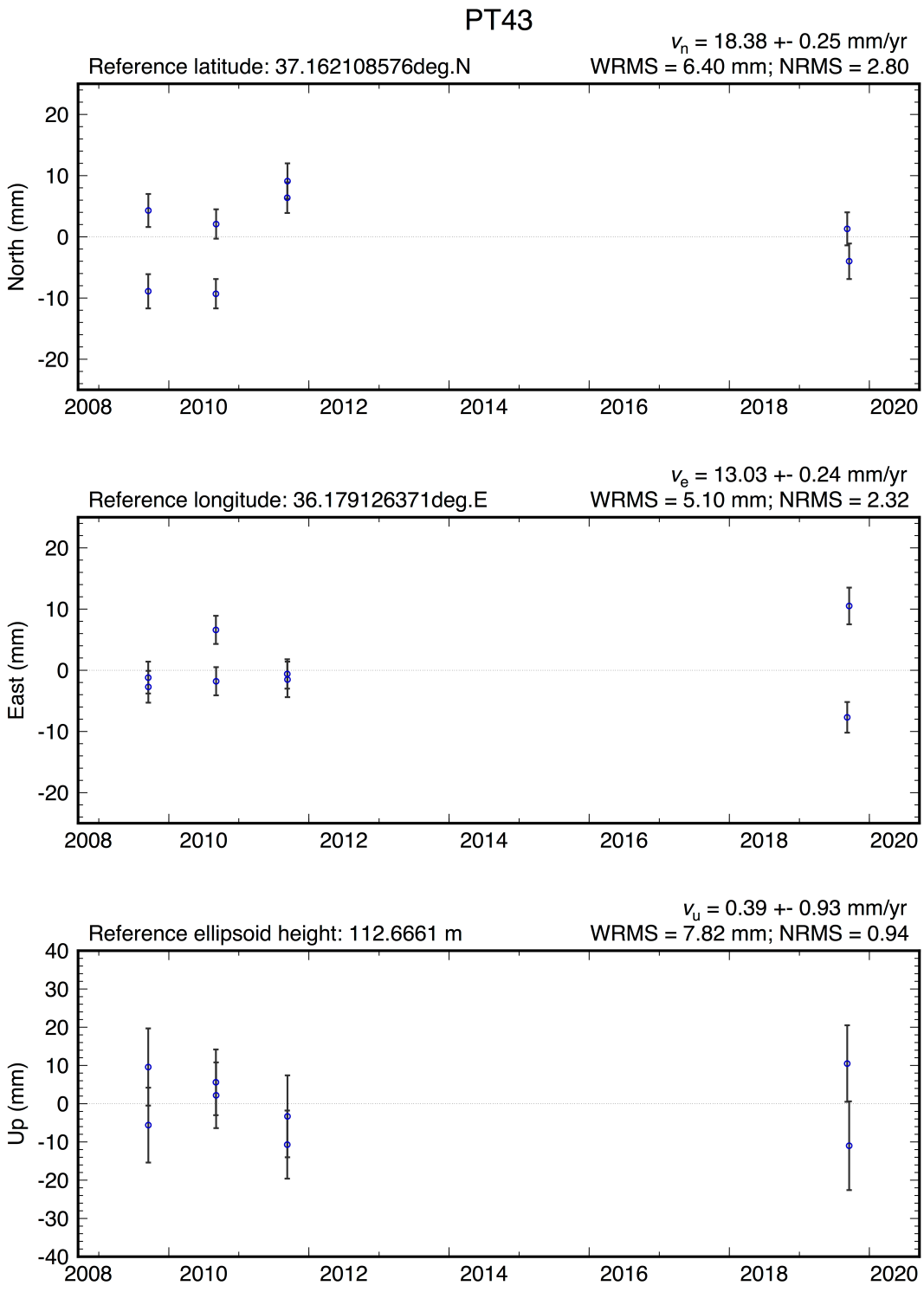
Şekil A.43 : PT38 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



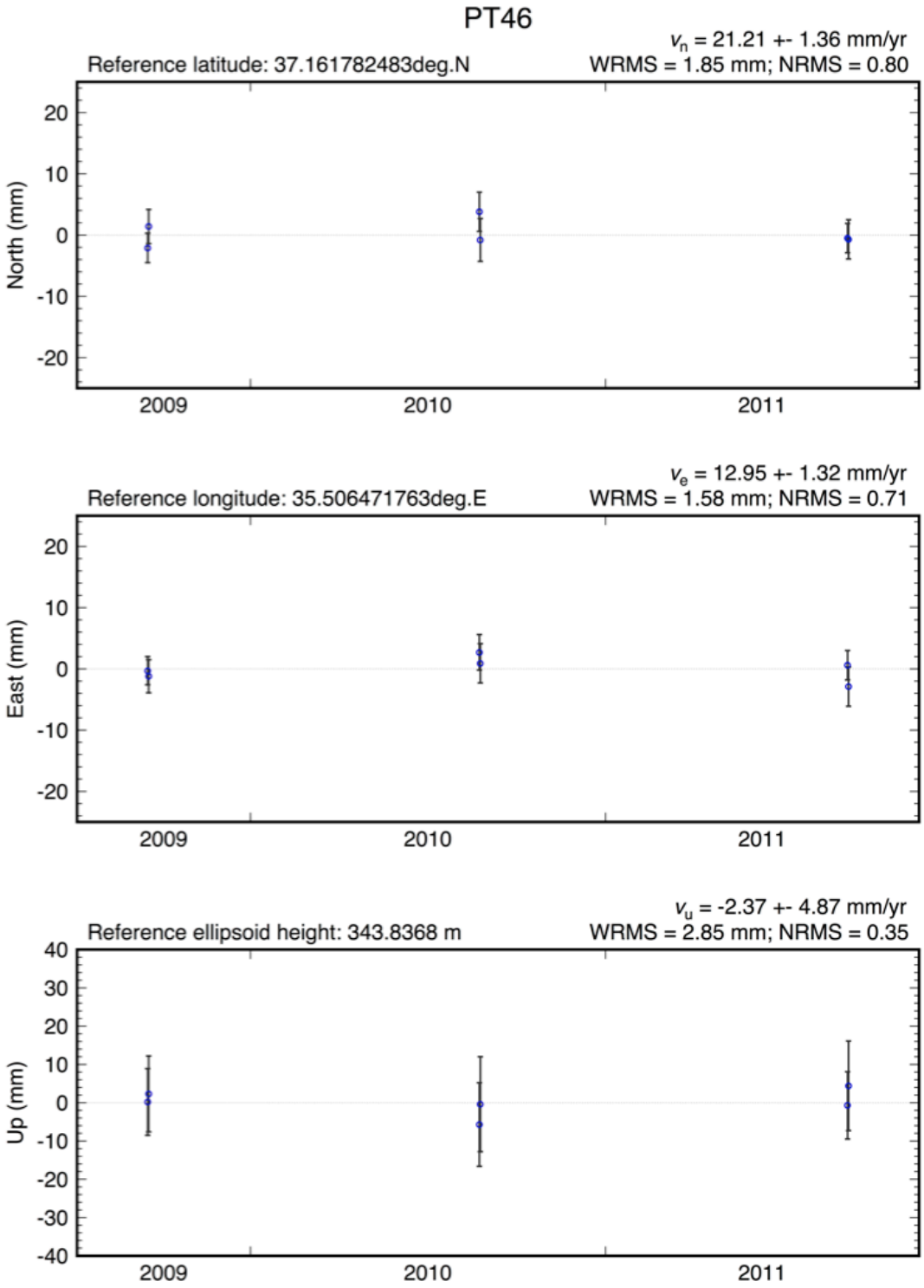
Şekil A.44 : PT39 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



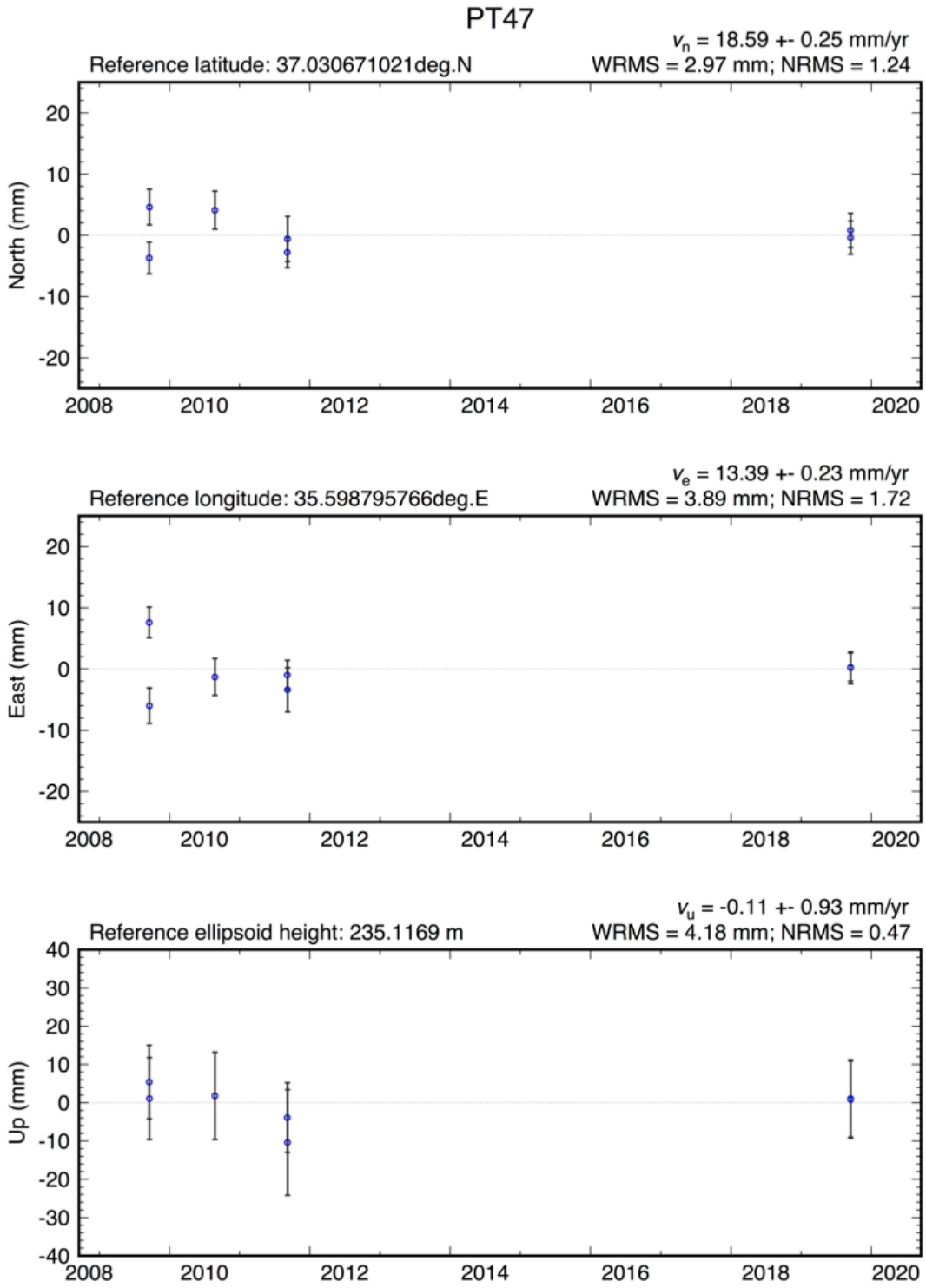
Şekil A.45 : PT40 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



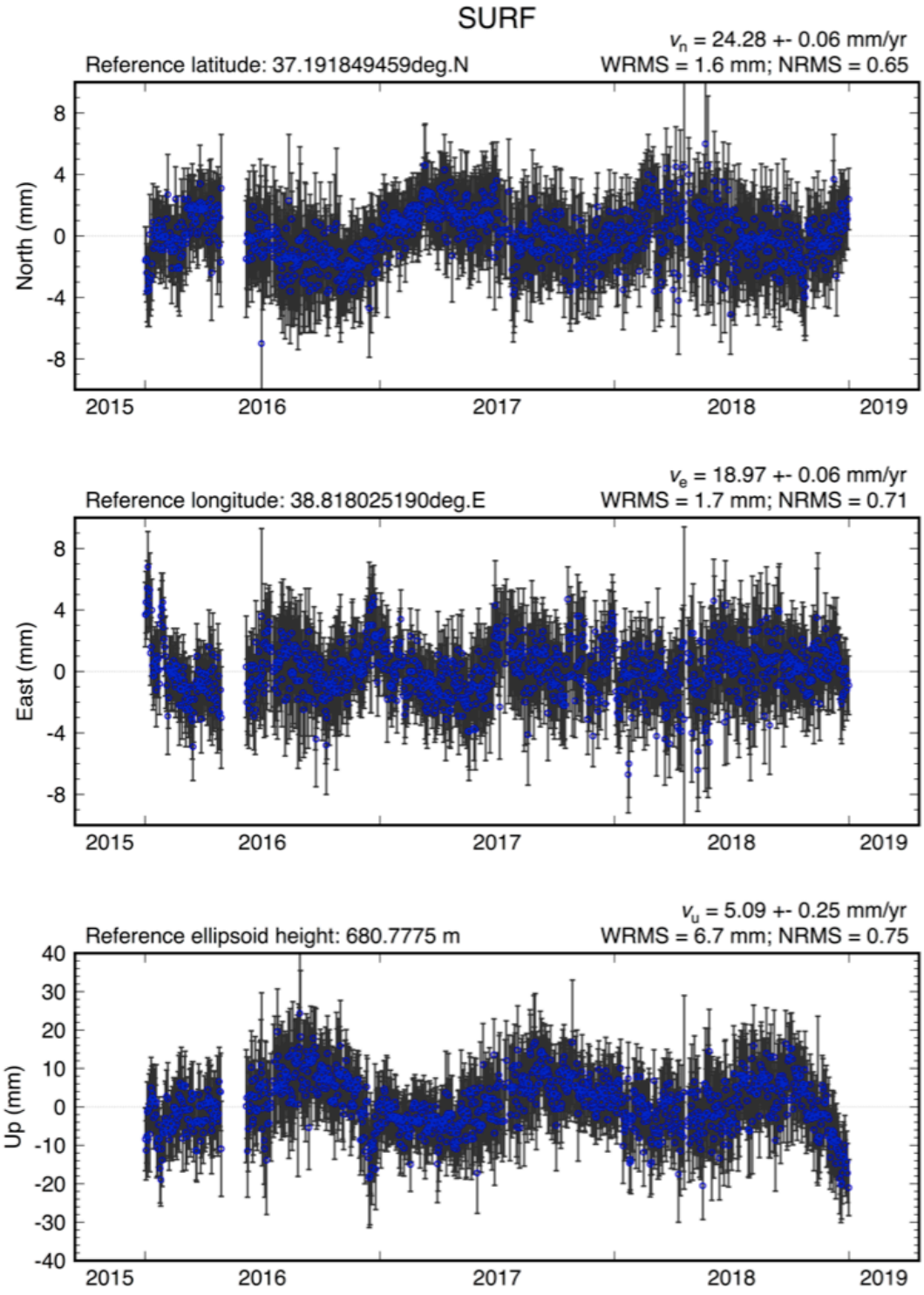
Şekil A.46 : PT43 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



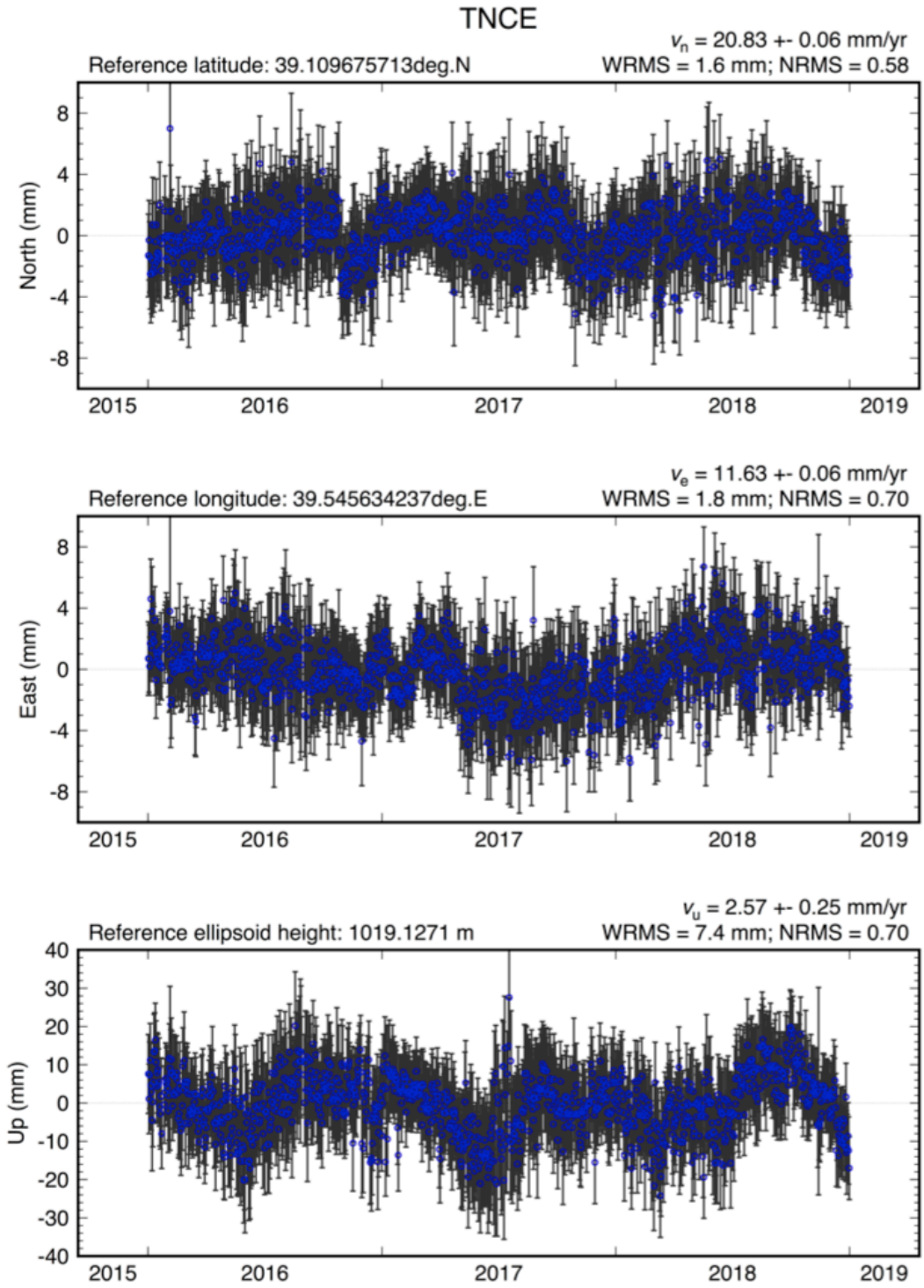
Şekil A.47 : PT46 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



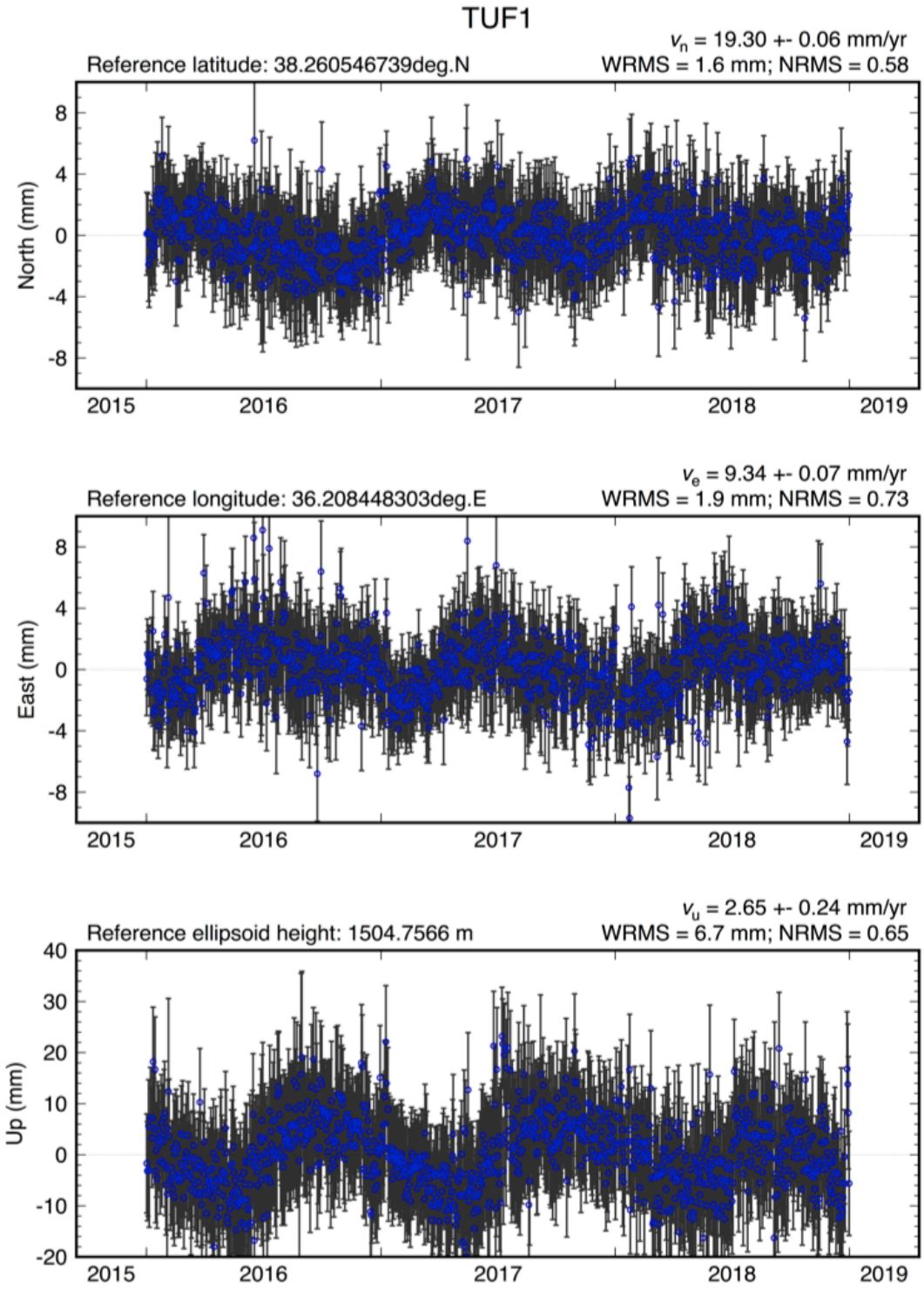
Şekil A.48 : PT47 kampanya GPS gözlem noktası için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (günlük).



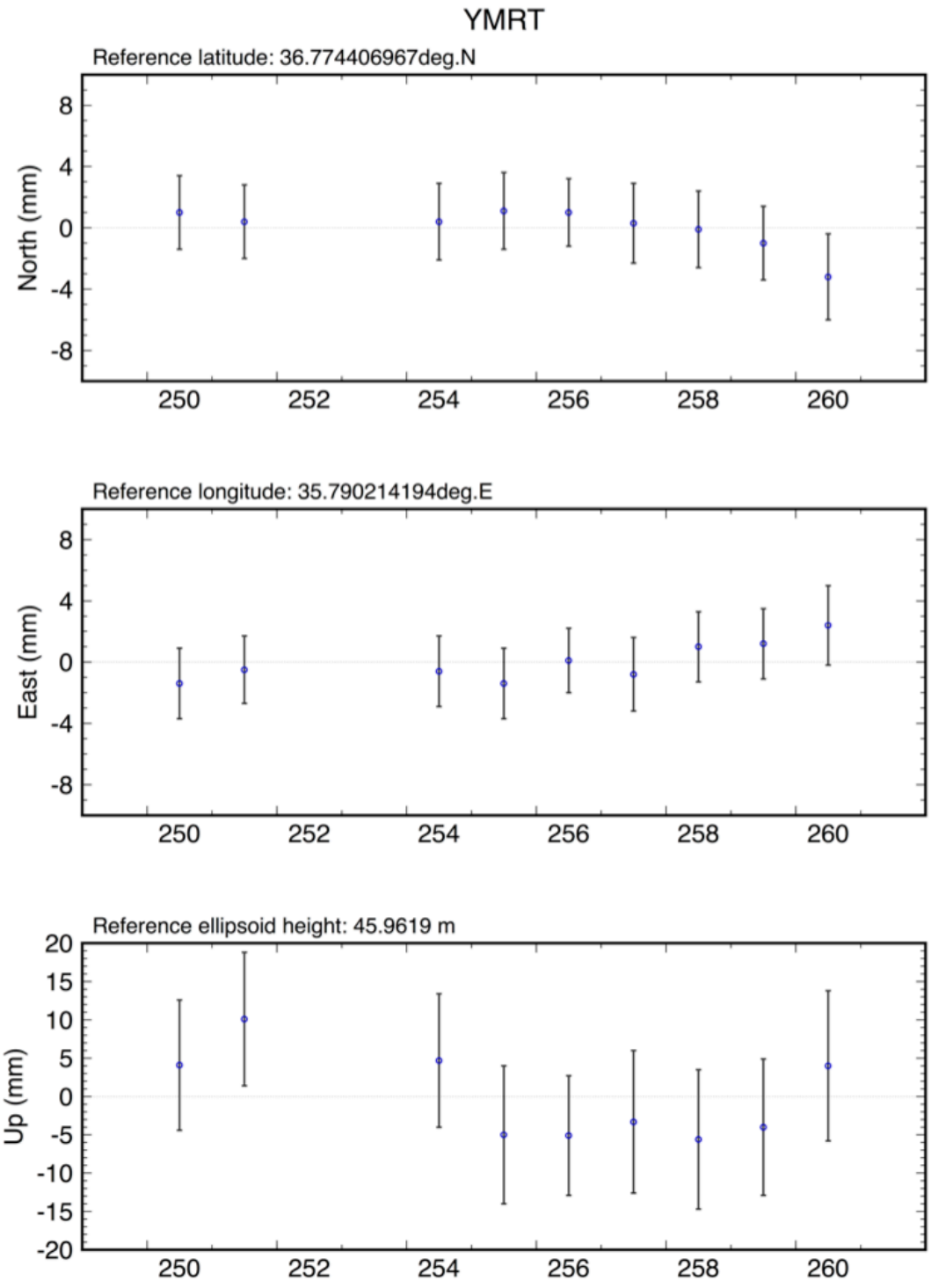
Şekil A.49 : SURF (Şanlıurfa) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



Şekil A.50 : TNCE (Tunceli) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



Şekil A.51 : TUF1 (Tufanbeyli-Adana) TUSAGA-Aktif istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2016-2018 yılları için-günlük).



Şekil A.52 : YMRT (Yumurtalık-Adana) istasyonu için konum değişimini gösteren zaman serisi grafiği (2019 yılı kampanya ölçmeleri dönemi-günlük).

EK B: Kampanya noktaları ve sürekli GPS istasyonları için GPS gözlem zaman aralıkları

Çizelge B.1 : Tez çalışmasındaki analizlere dahil edilen GPS gözlemlerinin her noktadaki epok bilgisi.

Nokta Adı	Nokta Türü	İlk Epok	Son Epok	Dahil Olduğu Ağ
ADIY	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
ANTE	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
ANTP	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
ARBN	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
ARPK	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
ASKI	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
BING	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
DIYB	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
EKIZ	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
ELAZ	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
ERGN	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
FEEK	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
FEKE	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
GURU	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
HAT1	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
HATY	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
ISLH	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
KAYS	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif

Çizelge B.1 (devam) : Tez çalışmasındaki analizlere dahil edilen GPS gözlemlerinin her noktadaki epok bilgisi.

Nokta Adı	Nokta Türü	İlk Epok	Son Epok	Dahil Olduğu Ağ
KLIS	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
KOZN	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
MALY	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
MAR1	Sürekli İstasyon	2016.265	2019.710	TUSAGA-Aktif
MRSI	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
NIGD	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
NIZP	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
ONIY	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
OSNY	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS
POZA	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
PT01	Kampanya Noktası	2009.715	2019.707	-
PT02	Kampanya Noktası	2009.715	2019.707	
PT04	Kampanya Noktası	2009.720	2011.688	-
PT05	Kampanya Noktası	2009.720	2019.707	-
PT07	Kampanya Noktası	2009.742	2011.704	-
PT08	Kampanya Noktası	2009.742	2019.696	-
PT09	Kampanya Noktası	2009.745	2019.696	-
PT12	Kampanya Noktası	2009.745	2019.696	-
PT24	Kampanya Noktası	2009.737	2011.710	-

Çizelge B.1 (devam) : Tez çalışmasındaki analizlere dahil edilen GPS gözlemlerinin her noktadaki epok bilgisi.

Nokta Adı	Nokta Türü	İlk Epok	Son Epok	Dahil Olduğu Ağ
PT26	Kampanya Noktası	2009.737	2019.696	-
PT30	Kampanya Noktası	2009.732	2019.693	-
PT31	Kampanya Noktası	2009.732	2019.701	-
PT33	Kampanya Noktası	2009.726	2019.701	-
PT34	Kampanya Noktası	2009.726	2019.701	-
PT35	Kampanya Noktası	2009.762	2019.701	-
PT36	Kampanya Noktası	2009.762	2019.701	-
PT37	Kampanya Noktası	2009.759	2019.701	-
PT38	Kampanya Noktası	2009.753	2019.701	-
PT39	Kampanya Noktası	2009.753	2019.710	-
PT40	Kampanya Noktası	2009.753	2019.710	-
PT42	Kampanya Noktası	2009.704	2019.685	
PT43	Kampanya Noktası	2009.704	2019.710	-
PT46	Kampanya Noktası	2009.710	2011.682	-
PT47	Kampanya Noktası	2009.710	2019.707	-
SURF	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
TNCE	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
TUF1	Sürekli İstasyon	2016.000	2019.710	TUSAGA-Aktif
YMRT	Sürekli İstasyon	2019.682	2019.710	Belediye-CORS

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Ali ÖZKAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** **:** 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Mühendisliği Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Yıldız, S. S., **Özkan, A.,** Yavaşoğlu, H. H., Masson, F., Tiryakioğlu, İ., Alkan, M. N., Bilgi, S. 2020. Determination of recent tectonic deformations in the vicinity of Adana Osmaniye Hatay Gaziantep triple junction region by half-space modeling, *Comptes Rendus Geoscience.* 1631-0713, 352, 3, 225-234.
- Yıldız S. S., **Özkan A.** 2019. Kuzeydoğu Akdeniz Bölgesindeki Deprem Tehlikesinin Kestirilebilmesine Yönelik Fay Hareketlerinin İzlenmesi, *Zeugma 2. Uluslararası Multi Disipliner Çalışmalar Kongresi*, Ocak 18-20, 2019 Gaziantep, Türkiye.