

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KRİP EDEN FAYLARIN GPS ÖLÇÜLERİYLE İZLENMESİ:
İZMİT VE HAZAR GÖLÜ - PALU FAYINDAN ÖRNEKLER

Seda ÖZARPACI

DOKTORA TEZİ
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Geomatik Programı

Danışman
Prof. Dr. Uğur DOĞAN

Eş-Danışman
Prof. Dr. Semih ERGİNTAV

Temmuz, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KRİP EDEN FAYLARIN GPS ÖLÇÜLERİYLE İZLENMESİ: İZMİT VE
HAZAR GÖLÜ - PALU FAYINDAN ÖRNEKLER**

Seda ÖZARPACI tarafından hazırlanan tez çalışması 02.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Geomatik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Uğur DOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Semih ERGİNTAV
Boğaziçi Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur DOĞAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ziyadin Çakır, Üye
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Aydın ÜSTÜN, Üye
Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur ŞANLI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Uğur DOĞAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Krip Eden Fayların GPS Ölçüleriyle İzlenmesi: İzmit ve Hazar Gölü - Palu Fayından Örnekler başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Seda ÖZARPACI

İmza

Bu Çalışma, TÜBİTAK-ÇAYDAG (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu - Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu) tarafından 113Y102, 114Y250, 117Y278 ve 118Y450 numaralı TÜBİTAK 1001 Projeleri ve 2016 yılı 2214-A Yurt Dışı Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu çalışma içinde bulunmakta gurur duyduğum ekip sayesinde yapılmıştır. Ekibin başında olan, beni maddi manevi destekleyen, öğrencisinin her zaman daha ileri gitmesi için elinden gelen herşeyi yapan, kendini işine adanmış ve çalışma prensipleri açısından her zaman örnek alacağım ve alınması gereken sayın danışmanım Prof. Dr. Uğur Doğan'a ne kadar teşekkür etsem azdır. Beni sadece doktoramla sınırlı kalmayıp, sürekli farklı alanlara da iten, ufkumu genişleten danışmanımla çalıştığım için kendimi her zaman çok şanslı hissedeceğim.

İsmi dünyaya duyurmuş, mesleğini önceliği haline gelmiş, kendini işine adanmış ve Türkiye'ye büyük katkılar sağlamış, bunun yanında kendisiyle her konuştuğumda yeni birşeyler öğrendiğim ve bilgisinin sınırı olmadığını düşündüğüm saygıdeğer eş danışmanım Prof. Dr. Semih Ergintav'a bana ve tezime verdiği katkılardan dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın ilerlemesinde katkılar veren sayın tez izleme üyelerim; Prof. Dr. Ziyadin Çakır'a, şekillerimi onun eleştirileri olmasa asla böyle çizemezdim, Prof. Dr. Cüneyt Aydın'a ve Prof. Dr. Aydın Üstün'e, özellikle sakin yapısı ve yapıcı eleştirileri için, teşekkürü borç bilirim. Tez savunmamda yer alan, doktora eğitimim boyunca bana yardımcı olan ve destekleyen sayın Prof. Dr. Uğur Şanlı'ya çok teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında, asla yardımını esirgemeyen ve elinden gelen herşeyi yapmaya çalışan, manevi desteğini her zaman hissettiğim sevgili oda arkadaşım Arş. Gör. Alpay Özdemir'e sonsuz teşekkürler.

Özellikle hayatımızı eve sığdırmaya çalıştığımız bu zor günlerde, manevi desteğini esirgemeyen, her fırsatta arayıp soran, Yalçın Yılmaz'a, Mustafa Üstüner'e, Zeynel Abidin Polat'a, Hicret Gürsoy Sürmeneli'ye, Muharrem Hilmi Erkoç'a, okul sürecinde beraber keyifle vakit geçirdiğim Fahri Karabulut'a, Hüseyin Duman'a, Batuhan Kılıç'a ve diğer çalışma arkadaşlarıma, beni her zaman dinleyen ve öğütlerini esirgemeyen Nedim Onur Aykut'a, bu çalışmaların veri toplama kısmında, bizimle kampanyaya gelen, canla başla çalışan bütün YTÜ öğrencilerine ve yüksek lisans öğrencilerimiz Efe Turan Ayruk ve İlay Farıma'ya ve her zaman desteklerini hissettiğim sevgili ailem ve bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Seda ÖZARPACI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	8
2 İZLENEN YÖNTEM	10
2.1 Deprem Deformasyon Döngüsü	10
2.2 Asismik Krip Hareketi	12
2.3 GPS Verilerinin Değerlendirilmesi	18
2.4 Elastik Yer Değiştirme Modellemesi	22
3 1999 İZMİT KIRIĞI ÜZERİNDEKİ ASİSMİK YÜZEY KAYMASININ BELİR- LENMESİ	29
3.1 KAF ve 1999 İzmit Depremi	30
3.1.1 KAF'ın Tektoniği	30
3.1.2 KAF'ın Depremselliği	30
3.1.3 1999 İzmit Depremi	32
3.2 GPS Ölçmeleri ve Değerlendirmeleri	33
3.2.1 Kampanya GPS Ölçmeleri	33
3.2.2 Sürekli GPS Verileri	36
3.2.3 GPS Verilerinin Değerlendirilmesi	39
3.3 Hız Kestirimi	45

3.4	Modelleme Çalışmaları	49
3.4.1	Uzak Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Kayma Hızının Belirlenmesi	49
3.4.2	Yakın Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Krip Hızının Belirlenmesi	52
4	DAF'IN HAZAR GÖLÜ - PALU SEGMENTİ ÜZERİNDEKİ KRİP HAREKETİNİN BELİRLENMESİ	61
4.1	DAF	61
4.1.1	DAF'ın Tektoniği	61
4.1.2	DAF'ın Depremselliği	62
4.2	GPS Ölçmeleri ve Değerlendirmeleri	64
4.2.1	Kampanya GPS Ölçmeleri	64
4.2.2	Sürekli GPS Verileri	68
4.2.3	GPS Verilerinin Değerlendirilmesi	71
4.3	Hız Kestirimi	79
4.4	Modelleme Çalışmaları	82
4.4.1	Uzak Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Kayma Hızının Belirlenmesi	83
4.4.2	Yakın Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Krip Hızının Belirlenmesi	86
5	SONUÇ VE ÖNERİLER	94
	Kaynakça	97
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	108

SİMGE LİSTESİ

$\mathbf{x}$	Bilinmeyenler Vektörü
$\mathbf{C}_{xx}$	Bilinmeyenlerin Varyans Kovaryans Matrisi
M	Deprem Büyüklüğü
$\mathbf{R}$	Dönüklük Matrisi
ϵ	Dönüklük Parametresi
v_{II}	Fay Paralel Hız Büyüklüğü
x	Faya Dik Mesafe
H	Heaviside Fonksiyonu
$\mathbf{A}$	Katsayılar Matrisi
D	Kilitlenme Derinliği
v_d	Kilitlenme Derinliği Altında Sürekli Kayma Hızı
d_2	Krip Derinliği
d_1	Kripin Başladığı Derinlik
M_w	Moment Büyüklüğü
k	Ölçek Faktörü
$\mathbf{b}$	Ölçüler Vektörü
$\mathbf{C}$	Ölçülerin Varyans Kovaryans Matrisi
c	Öteleme Parametresi
v_c	Sığ Yüzeyde Meydana Gelen Asismik Kayma Hızı
σ	Standart Sapma
V	Uzun Dönem Hız Büyüklüğü
T_1	Veri Başlangıç Tarihi
T_2	Veri Bitiş Tarihi

T_x	X Bileşeni için Test Büyüklüğü
v_x	X Bileşeninin Hız Büyüklüğü
T_y	Y Bileşeni için Test Büyüklüğü
v_y	Y Bileşeninin Hız Büyüklüğü
T_z	Z Bileşeni için Test Büyüklüğü
v_z	Z Bileşeninin Hız Büyüklüğü

KISALTMA LİSTESİ

BUSAGA	Bursa Sabit GNSS Ağı
DAF	Doğu Anadolu Fayı
GNSS	Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System)
GPS	Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
FOGMEX	Birinci Dereceden Gauss-Markov Ekstrapolasyonu (First-Order Gauss-Markov Extrapolation)
IGS	Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service)
InSAR	İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar)
İSU	Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü
ITRF	Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi (International Terrestrial Reference Frame)
KAF	Kuzey Anadolu Fayı
LOS	Bakış Açısı (Line of Sight)
PWL	Parçalı Doğrusal (Piecewise Linear)
SASKİ	Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü
SOPAC	Scripps Yörünge ve Sabit Ağ Merkezi (Scippps Orbit and Permanent Array Center)
TUSAGA-Aktif	Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif
UEDAŞ	Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Anadolu'nun içinde bulunduğu tektonik yapı ([2]'den değiştirilerek alınmıştır)	1
Şekil 1.2	KAF'ta son yüzyılda meydana gelen $M \geq 7$ depremler. [29, 30]'den yararlanılarak çizilmiştir. Diri fay haritası [31]'den alınmıştır	2
Şekil 1.3	1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca ilk krip bulguları [34]	4
Şekil 1.4	1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca InSAR verileriyle krip araştırması [35]	5
Şekil 1.5	1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca InSAR ve GPS verileriyle krip araştırması [36]	5
Şekil 1.6	DAF boyunca uzun dönem profil modeli [3]	7
Şekil 2.1	Deprem döngüsünün doğrultu atımlı faylarda klasik gösterimi [50] .	10
Şekil 2.2	Deprem döngüsündeki kayma [50]	11
Şekil 2.3	İlk gözlenen krip, Cienega Şaraphanesinin duvarında meydana gelmiştir [56]	12
Şekil 2.4	İsmetpaşa duvarının yayınlanan fotoğrafları [60]	13
Şekil 2.5	İzmit'te krip bulguları [66]	14
Şekil 2.6	Hayward fayında meydana gelen kripin kaldırım taşında oluşturduğu yerdeğiştirmenin izlenmesi [67]	14
Şekil 2.7	Hayward fayında meydana gelen kripin kaldırım taşındaki kanıtının yok edilmesi [67]	15
Şekil 2.8	Doğrultu atımlı faylarda meydana gelen davranış biçimleri, ([85] ve [66])	17
Şekil 2.9	GAMIT işlem adımları ([98]'den yararlanılmıştır)	19
Şekil 2.10	Düz ve ters modelleme yöntemleri	23
Şekil 2.11	Yüzeyde ve sismojenik zonun altından sonsuza kadar krip eden fay modeli ([108]'den değiştirilerek alınmıştır)	27
Şekil 3.1	Türkiye'nin içinde bulunduğu tektonik durum [2]'den yararlanılmıştır	29
Şekil 3.2	KAF'ta son yüzyılda meydana gelen $M \geq 7$ depremler [29, 30]'den yararlanılarak çizilmiştir	31
Şekil 3.3	1999 İzmit depremi fay segmentleri [30]'dan yararlanılarak çizilmiştir	32
Şekil 3.4	1999 İzmit fay izi boyunca kampanya ölçmeleri yapılan nokta yerleri	34

Şekil 3.5	1999 İzmit depreminden önce ve sonra ölçülen SMAS kampanya noktası	34
Şekil 3.6	İzmit kampanya tarihleri	35
Şekil 3.7	KR17 istasyonunda meydana gelen tahribat	36
Şekil 3.8	İzmit ve çevresindeki sürekli GPS istasyonları	38
Şekil 3.9	Datum tanımında kullanılan IGS istasyonları	39
Şekil 3.10	3-boyutlu benzerlik dönüşüm modeli ([141]'den yararlanılmıştır.) .	40
Şekil 3.11	IGS istasyonları için kampanya tarihlerinde yapılan test sonuçları . .	42
Şekil 3.12	IZMC istasyonuna ait zaman serisi	43
Şekil 3.13	KR14 kampanya noktasına ait zaman serisi	44
Şekil 3.14	GAMIT/GLOBK ile hız alanı elde etme örnek şeması	46
Şekil 3.15	1999 İzmit deprem bölgesi hız alanı	47
Şekil 3.16	1999 İzmit deprem bölgesi yakın hız alanı	48
Şekil 3.17	1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan profiller	50
Şekil 3.18	1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan profillerin modellenmesi ve kestirilen parametreler	51
Şekil 3.19	1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan yakın alan profiller	52
Şekil 3.20	1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan yakın alan profillerin modellenmesi ve kestirilen parametreler	53
Şekil 3.21	2011-2017 yılları arasında InSAR verileriyle yapılan profil modellemesi [36]	53
Şekil 3.22	2002-2010 yılları arasında InSAR verileriyle yapılan profil modellemesi [35]	54
Şekil 3.23	P2-P2' profilinin modellenmesi	55
Şekil 3.24	Literatürdeki krip hızlarıyla karşılaştırma	56
Şekil 3.25	d-d' profilinin modellenmesi	56
Şekil 3.26	SISL-SMAS bazına ait geçmiş modelleme çalışmaları [34]	57
Şekil 3.27	c-c' profilinin modellenmesi	57
Şekil 3.28	1999 İzmit fay yüzey izi boyunca kampanya zaman aralığındaki sismik aktivite	59
Şekil 3.29	Kampanya, kripmetre ve sismoloji verilerinin beraber değerlendirilmesi	60
Şekil 4.1	DAF segmentleri ([151]'den yararlanılarak çizilmiştir)	62
Şekil 4.2	1822'den sonra gerçekleşen 10 büyük deprem ve Coulomb stres dağılımı [155]	63
Şekil 4.3	Çalışma kapsamında ölçülen GPS noktaları	65
Şekil 4.4	Kampanya tarihleri	65
Şekil 4.5	EL27 kampanya noktasına giderken yola çıkan engel	66
Şekil 4.6	Çalışma kapsamında düzenlenen kampanyalardan örnekler	67
Şekil 4.7	EL04 kampanya GPS noktası	67

Şekil 4.8	EL06 kampanya GPS noktası	68
Şekil 4.9	Elazığ bölgesi için değerlendirmeye katılan GPS istasyonları	69
Şekil 4.10	IGS istasyonları	71
Şekil 4.11	IGS istasyonları için kampanya tarihlerinde yapılan test sonuçları . .	72
Şekil 4.12	ELZG istasyonuna ait zaman serisi	73
Şekil 4.13	ADİY istasyonuna ait zaman serisi	75
Şekil 4.14	EL06 kampanya GPS noktasına ait zaman serisi	76
Şekil 4.15	EL09 kampanya GPS noktasına ait zaman serisi	77
Şekil 4.16	EL07 kampanya GPS noktasına ait zaman serisi	78
Şekil 4.17	Elazığ bölgesi hız alanı	79
Şekil 4.18	Elazığ kampanya ölçmelerinden elde edilen hız alanı	80
Şekil 4.19	Sivrice hız alanı	81
Şekil 4.20	Hazar Gölü doğusundaki hız alanı	81
Şekil 4.21	Palu hız alanı	82
Şekil 4.22	Elazığ uzak alan profilinin modellenmesi	83
Şekil 4.23	GPS verileri ile DAF uzak alan modellemesi [158]	84
Şekil 4.24	InSAR ve GPS ile DAF ve KAF modellemesi [38]	84
Şekil 4.25	InSAR ve yayınlanmış GPS verileri ile DAF ve KAF modellemesi [39] .	85
Şekil 4.26	DAF uzak alan model sonuçlarının literatürle karşılaştırılması	85
Şekil 4.27	Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' profili	86
Şekil 4.28	Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' yakın alan profilinin modellenmesi .	87
Şekil 4.29	Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' profilinin modellenmesi	87
Şekil 4.30	Hazar bölgesinde oluşturulan B-B' profili	88
Şekil 4.31	Hazar bölgesinde oluşturulan B-B' yakın alan profilinin modellenmesi .	89
Şekil 4.32	Hazar bölgesinde oluşturulan B-B' profilinin modellenmesi	89
Şekil 4.33	Hazar bölgesinde oluşturulan C-C' profili	90
Şekil 4.34	Hazar bölgesinde oluşturulan C-C' yakın alan profilinin modellenmesi .	90
Şekil 4.35	Hazar bölgesinde oluşturulan C-C' profilinin modellenmesi	90
Şekil 4.36	Palu bölgesinde oluşturulan D-D' profili	91
Şekil 4.37	Palu bölgesinde oluşturulan D-D' yakın alan profilinin modellenmesi .	91
Şekil 4.38	Palu bölgesinde oluşturulan D-D' profilinin modellenmesi	92
Şekil 4.39	Proje kapsamında oluşturulan (a) katalogdaki depremlerin dağılımı ve (b) DAF boyunca alınan düşey kesit, altlık aktif fay haritası ([31]'den alınmıştır)	93

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Krip ölçme yöntemleri [50]'den değiştirilerek alınmıştır.	15
Tablo 3.1	KAF'ın son yüzyılda ürettiği $M \geq 7$ depremler. ([7, 11, 30, 125, 133, 134]'den yararlanarak oluşturulmuştur.)	31
Tablo 3.2	İzmit bölgesi için değerlendirilen sürekli GPS verileri	37
Tablo 3.3	Datum tanımında kullanılan IGS istasyonlarının Avrasya referanslı ITRF14 epok 2010.0 koordinat (m) ve hızları (mm/yıl)	41
Tablo 3.4	1999 İzmit fay yüzey izi boyunca oluşturulan hız analizi sonuçları (mm/yıl)	49
Tablo 4.1	DAF'ın son yüzyılda ürettiği $M \geq 6$ depremler ([153]'den yararlanarak oluşturulmuştur)	63
Tablo 4.2	Elazığ bölgesi için değerlendirilen sürekli GPS verileri	70
Tablo 4.3	Elazığ bölgesinin datum tanımında kullanılan IGS istasyonlarının Arap plakası referanslı ITRF14 epok 2010.0 koordinat (m) ve hızları (mm/yıl)	71

Krip Eden Fayların GPS Ölçüleriyle İzlenmesi: İzmit ve Hazar Gölü - Palu Fayından Örnekler

Seda ÖZARPACI

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur DOĞAN

Eş-Danışman: Prof. Dr. Semih ERGİNTAV

Bu tez çalışması kapsamında iki farklı bölgede GPS ölçüleri kullanılarak krip araştırması yapılmıştır. İlk çalışma sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fayı üzerinde 1999 İzmit deprem kırığı yüzey izi boyunca, ikinci araştırma ise sol yanal doğrultu atımlı kuzeydoğu güneybatı yönlü sıkışmalı Doğu Anadolu Fayı üzerinde Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca gerçekleştirilmiştir.

1999 İzmit depremi fay yüzey izi boyunca 2014 - 2016 yılları arasında yılda iki defa olmak üzere faya mesafesi 400 metre ile 10 km arasında değişen 32 kampanya noktasında toplam 5 kampanya gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber, bölgenin çevresinde bulunan TUSAGA-Aktif ve farklı kuruluşlara ait sürekli GPS ağlarına ilişkin sürekli GPS istasyonlarının 2013 - 2019 yılları arasındaki GPS ölçüleri, kampanya GPS verileriyle birlikte GAMIT/GLOBK (v10.7) programıyla değerlendirilmiştir. Değerlendirme işlemi sırasında 8 IGS istasyonu kullanılmış ve bu istasyonların kampanya tarihlerinde güvenilir olduklarını gösterebilmek adına Bursa-Wolf 3 boyutlu dönüşüm modeli kullanılarak uyum testi yapılmıştır. GLOBK yardımıyla günlük olarak elde edilen GPS çözümleri zaman serisi analizi ile yıllık, yarıyıllık etkilerden, aykırı ölçülerden temizlenmiş ITRF14 Avrasya referanslı hız alanı elde edilmiştir. Hız alanındaki plakanın dönmesi nedeniyle oluşan etki Avrasya plakasına göre tanımlı Anadolu plakasının kutup noktasına göre düzeltilmiştir. Elde edilen hız alanı fay paralel hızlara dönüştürülerek elastik yerdeğiştirme modeliyle en küçük kareler algoritması kullanılarak 1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca krip hızı

ve derinliği kestirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek asismik kayma 1999 İzmit depremi dışmerkezine yakın ve hızı 12.7 mm/yıl (10.3 - 15.1, %95 g.a.) olarak belirlenmiştir. Doğuya ve batıya doğru ilerledikçe azalan bu yavaş kayma Sakarya Gölü'nün doğusunda ise sona ermektedir. Asismik kaymanın en yüksek değere ulaştığı bölgede krip derinliği 1.3 km (0.7 - 2, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir.

Ayrıca bölgede deprem öncesinde de ölçmeleri bulunan GPS noktalarında da kampanya ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. SISL ve SMAS 1994 yılından itibaren ölçmeye başlanmış, depremden önce ve hemen sonra ölçmeler devam ettiğinden, deprem anı ve sonrasında meydana gelen yerdeğiştirmeyi izlemek için veri kaynağı oluşturmuştur. Bu veriler yeniden değerlendirilmiş, kampanya ölçmelerinden sonra 2019 yılında bu baz tekrar ölçülerek deprem sonrası etkiler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar 1999 İzmit depremi etkilerinin logaritmik olarak azalarak devam ettiğini ve burada yıllık 2.5 mm/yıl hızda kaymanın mevcut olduğunu göstermektedir. Deprem sonrası meydana gelen toplam yerdeğiştirme 30 cm'ye kadar ulaşmıştır ki bu deprem anındaki yerdeğiştirmenin yaklaşık %10'u kadardır.

Hazar Gölü - Palu arasında yapılan araştırmada ise, 2015 - 2019 yılları arasında yılda iki tekrar lme yapılarak 27 kampanya noktasında toplam 7 kampanya gerçekleştirilmiştir. Kampanya noktalarının faya yakınlığı 300 metre ile 4 km arasında değişmektedir. Faya olan mesafeleri 22 ile 400 km arasında değişen sürekli istasyonların 2014 ile 2020 arasındaki GPS gözlemleri değerlendirilmiş ve İzmit bölgesindeki değerlendirme tekrarlanarak hızlar bu sefer Arap plakasına göre oluşturulmuştur. Uzak alan verilerinin modellenmesi için tek bir profil oluşturulmuş ve uzun dönem kayma hızı 9.93 mm/yıl (7.73 - 12.13, %95 g.a.) ve kilitlenme derinliği 15.09 km (10.49 - 19.69, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir. Yakın alanda ise 4 profil oluşturularak, Sivrice'den Palu'ya krip hızı ve derinliği elastik yarı uzay modeli uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bölgede ilk defa yüzeyde asismik kayma olduğu GPS verileri yardımıyla kanıtlanmaktadır. Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca yüzeyde ortalama yaklaşık 6 mm/yıl (4.16 - 7.84, %95 g.a.) hızla yavaş kayma meydana gelmektedir ve bu sığ kaymanın derinliği segment boyunca ortalama 6.1 km (1.4 - 10.8, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 1999 İzmit depremi yüzey izi, Hazar Gölü - Palu segmenti, Krip, GPS, Elastik yerdeğiştirme modeli

ABSTRACT

Monitoring Creeping Faults with GPS Measurements: The Case Studies of the Izmit and Hazar Lake - Palu Faults

Seda ÖZARPACI

Department of Geomatic Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Uğur DOĞAN
Co-advisor: Prof. Dr. Semih ERGİNTAV

Within the scope of this thesis, creep research has been accomplished in two different regions with using GPS measurements. The first study was performed along the 1999 Izmit earthquake rupture surface trace which is the part of the right lateral strike slip North Anatolian Fault, and the second study was carried out along the Hazar Lake - Palu segment on the left lateral strike slip East Anatolian Fault.

In the first region, along the 1999 Izmit earthquake surface trail, a total of 5 campaigns were carried out at 32 campaign points, ranging between 400 meters and 10 km, twice a year between 2014 and 2016. In addition, the GPS measurements of TUSAGA-Active and continuous GPS stations for the networks of different organizations, between 2013 and 2019 were processed with the GAMIT / GLOBK (v10.7) program. During the evaluation process, 8 IGS stations were used and a compatibility test was carried through using the Bursa-Wolf 3D transformation model to demonstrate that these stations were reliable on the campaign dates. With the daily time series analysis of GPS solutions attained from GLOBK, the ITRF14 Eurasian referenced velocity field, which is cleaned from the annual, semiannual effects and outliers, has been gained. The effect caused by the rotation of the plate in the velocity field was corrected according to Anatolian - Eurasian Euler Pole. The velocity field was converted to fault parallel. The creep velocity and depth were estimated along the surface trace of 1999 Izmit earthquake by using the least squares algorithm with the elastic displacement model. According to the results, the highest aseismic slip is close to the epicenter of the 1999

Izmit earthquake with the velocity of 12.7 mm/yr (10.3 - 15.1, %95 c.i.). This slow slip, which decreases as it moves east and west, ends in the east of Sapanca Lake. In the region where the seismic slip reaches the highest value, the depth of creep has been estimated as 1.3 km (0.7 - 2, %95 c.i.).

In addition, campaign measurements were carried out at GPS sites in the region before the earthquake. Measurements are being performed at SISL and SMAS since 1994, and due to the measurements were continued before and immediately after the earthquake, the data source gives an opportunity to monitor the displacement that occurred during and after the earthquake. This data was re-processed and after the campaign measurements, the SISL-SMAS base was re-measured in 2019 and the effects after the earthquake were investigated. The obtained results show that the effects of the 1999 Izmit earthquake have continued logarithmically, and that there is a slip about 2.5 mm/yr. The total displacement after the earthquake has reached up to 30 cm, which is about %10 of the displacement at the moment of the earthquake.

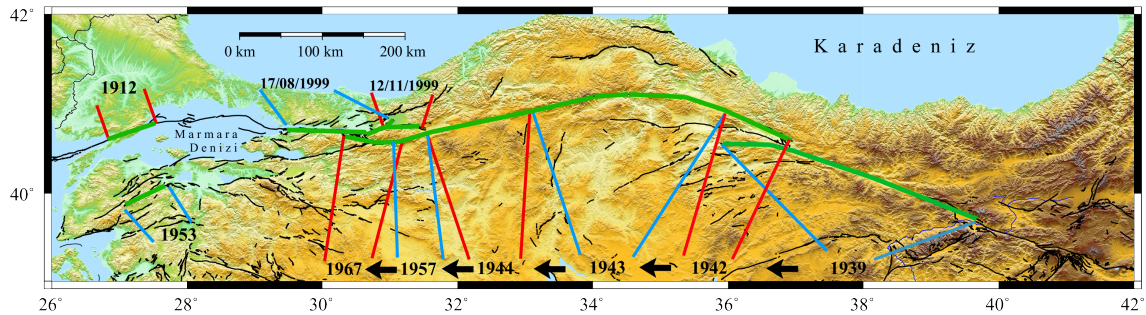
In the research conducted between Hazar Lake - Palu, between 2015 and 2019, a total of 7 campaigns were conducted at 27 campaign points by measuring twice a year. The proximity of the campaign points to the fault varies between 300 meters and 4 km. GPS observations between 2014 and 2020 of continuous stations with distances to the fault between 22 and 400 km were processed and the methodology which conducted in the Izmit region was repeated here, and this time the velocity field were taken referenced to Arabic plate. A single profile was created to model the far-field data, and long-term slip rate was estimated at 9.93 mm/yr (7.73 - 12.13, %95 c.i.) and locking depth was 15.09 km (10.49 - 19.69, %95 c.i.). In the near field, 4 profiles were produced, and the creep velocity and depth for the elastic half-space model was applied from Sivrice to Palu. According to the results, for the first time in the region, it is proved that there is aseismic slip along Hazar Lake - Palu segment of the East Anatolian Fault with the help of GPS data. Slow slip occurs at an average of about 6 mm/yr (4.16 - 7.84, %95 c.i.) along Hazar Lake - Palu segment, and the depth of this shallow slip as an average of 6.1 km (1.4 - 10.8, %95 c.i.) is estimated.

Keywords: 1999 Izmit earthquake surface trace, Hazar Lake - Palu segment, Creep, GPS, Elastic dislocation model

yaylarında görülen okyanus litosferinin çökmesi ve buna bağlı arka yay yayılımı, Türkiye'nin batısı, Marmara Denizi ve Korint Körfezi'nde görülen kıtasal yayılma, Anadolu'nun kıtasal kaçıışı, Kuzey ve Güney Anadolu Fayları ve Ölüdeniz Fayı gibi yanal atımlı faylar, ve Afrika, Arap ve Avrasya plaka etkileşimleri sayılabilir [2, 3]. Doğu Akdeniz tektoniği büyük oranda bu üç plakanın (Afrika ve Arap plakalarının Avrasya plakasıyla) çarpışmasını etkilemektedir [4].

Tüm bu süreçler Türkiye'yi doğal bir tektonik laboratuvarı haline getirmiştir. Özellikle son yüzyılda Kuzey Anadolu Fayı (KAF) boyunca meydana gelen $M > 7$ depremlerle dünyanın gözleri Türkiye'ye ve içinde bulunduğu aktif tektonik yapıya çevirmiştir.

1948 yılında İhsan Ketin [5] tarafından tanıtılan, KAF, sağ yanal doğrultu atımlı, Karadeniz'e paralel uzanan yaklaşık 1500 km uzunluğunda aktif bir faydır [6–12]. 1939 yılında $M_w = 7.8$ Erzincan depremiyle başlayan deprem silsilesi, batıya göç ederek yarattıkları stresi bir sonraki fay segmentine iletmıştır (Şekil 1.2) [11, 13–16]. Bu silsilenin 1967'de meydana getirdiği $M_w = 7.4$ Mudurnu depremi ile 1912 yılında meydana gelen $M_w = 7.4$ Ganos depremleri Marmara Bölgesi'nde sismik bir boşluk yaratmış ve izlenmeye başlanmıştır [2, 17]. Bu nedenle, 17 Ağustos 1999'da meydana gelen İzmit depremi uydu teknikleriyle en iyi gözlenen, iyi çalışılmış depremlerden biridir [17–28].



Şekil 1.2 KAF'ta son yüzyılda meydana gelen $M \geq 7$ depremler. [29, 30]'den yararlanılarak çizilmiştir. Diri fay haritası [31]'den alınmıştır

Deprem anında meydana gelen kayma genel olarak fay yüzeyi boyunca eşit dağılmaz. Deprem anında daha az kayma olan bölgelerde, aradaki farkı kapatmak için deprem sonrasında (postseismik) artçı kaymalar meydana gelebilmektedir [27]. [17], İzmit depreminin odak noktasında deprem anında meydana gelen kayma dağılımının daha düşük olduğunu, batıya ve doğuya doğru gidildikçe, fay boyunca daha fazla kayma olduğunu göstermiştir. GPS gözlemleri ile [17], Gölçük, Batı ve Doğu Sapanca olmak üzere üç segmenti ayıran İzmit fayı yüzey kırığı boyunca kayma dağılımını hesaplamıştır. [17], 1999 İzmit depreminin merkez noktasında 2 m'den daha az kayma varken, doğuda Gölçük kesiminde 5.7 m ve Batı Sapanca kesiminde 4.7 m kayma belirlemiştir. Fay düzleminin odak alanı da dahil olmak üzere nispeten düşük

bu kayma alanlarının gelecekte, hızı güçlendiren (sürünen - krip eden) hareketle kayma farkını kapatacağı belirtilmiştir.

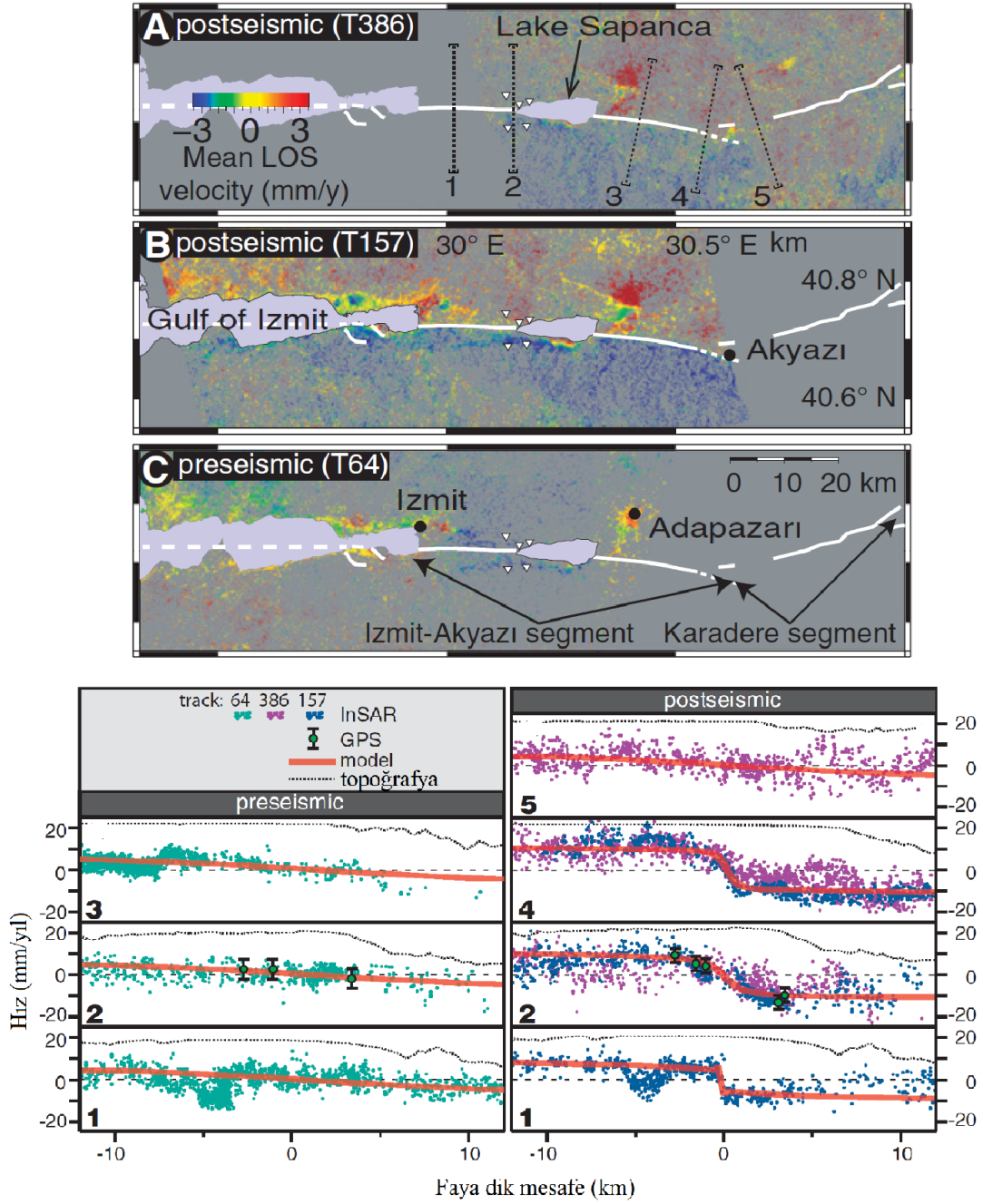
1999 İzmit yüzey kırığı, [30] tarafından beş segmente ayrılmıştır. Batıdan doğuya sırayla bu segmentler, Hersek, Karamürsel-Gölcük, İzmit-Sapanca Gölü, Sapanca-Akyazı ve son olarak da Karadere segmenti olarak ifade edilmiştir. İlgili çalışmada, Karamürsel-Gölcük ve İzmit-Sapanca bölümleri arasında yer alan kuzeybatı-güneydoğu-doğrultulu fay olan Gölcük normal fayında 2.3 m düşey yerdeğiştirme bulunmuştur. Fay kırığı boyunca yatay yerdeğiştirme, İzmit - Sapanca Gölü, Sapanca - Akyazı ve Karadere kesimleri boyunca sırasıyla 3.5 m, 5.2 m ve 1.5 m'ye ulaşmaktadır [30]. Yüzey kırığı boyunca maksimum sağ yanal atımlı kayma miktarı, Arifiye yakınlarındaki Sapanca - Sapanca - Akyazı segmentinin doğusunda 5.2 m olarak belirlenmiştir.

1999 İzmit depreminin deprem anı deformasyon ve kayma dağılımının yanı sıra deprem sonrası deformasyonu da incelenmiştir [27]. Bazı çalışmalar deprem sonrası deformasyonu alt kabuk ve / veya üst mantoda viskoelastik gevşeme ile ilişkilendirmiştir [32, 33]. Sonraki çalışmalar deprem sonrası logaritmik olarak azalan postsismik artçı kayma ile başlayan sismik olmayan fay kripti üzerinde durmuştur [34–36].

Deprem anı deformasyondan sonra 1999 İzmit fay kırığı boyunca başlayan krip olayı, hızla azalarak sabit bir hal almıştır [34]. [34], İzmit - Akyazı süpershear segmentinde krip olduğunu ilk defa InSAR ve GPS ölçmeleri yardımıyla göstermiştir (Şekil 1.3).

Şekil 1.3'de üst bölümde, ENVISAT ve ERS verilerinden elde edilen InSAR zaman serileri yardımıyla oluşturulmuş 1999 İzmit yüzey izi boyunca yüzey deformasyonları A ve B deprem sonrası ve C deprem öncesi şeklinde görülmektedir. Şekil 1.3 C'de renklendirilmiş InSAR bakış açısı hızlarında bir değişim görülmezken, A ve B'de yüzey izi boyunca açık bir renk değişimi, başka bir deyişle hız gradyeni mevcuttur. Şekil 1.3 A'da 1999 İzmit deprem yüzey izi boyunca oluşturulmuş 5 profilin yeri gösterilmiştir. Bu profiller boyunca InSAR ve GPS verileri ile oluşturulan modeller de deprem öncesi (preseismic) ve deprem sonrası şeklinde alt bölümde gösterilmiştir. Burada deprem öncesinde ERS uydusunun 64 numaralı izine ait (yeşil noktalar), deprem sonrasında ise ENVISAT uydusuna ait 157 ve 386 numaralı izlerine ait (sırasıyla mavi ve mor noktalar) InSAR hızları, GPS verilerine dayalı hızlar ve model sonuçları (kırmızı çizgi) gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, deprem öncesinde hızın doğrusal olduğu görülürken, deprem sonrasında Karadere segmenti hariç diğer bütün bölümlerde, hızın değiştiği ve fayın kuzey ve güney bölümlerinde hız gradyeninin olduğu görülmektedir. 2002 - 2010 yılları arasında elde edilen InSAR verisine dayalı

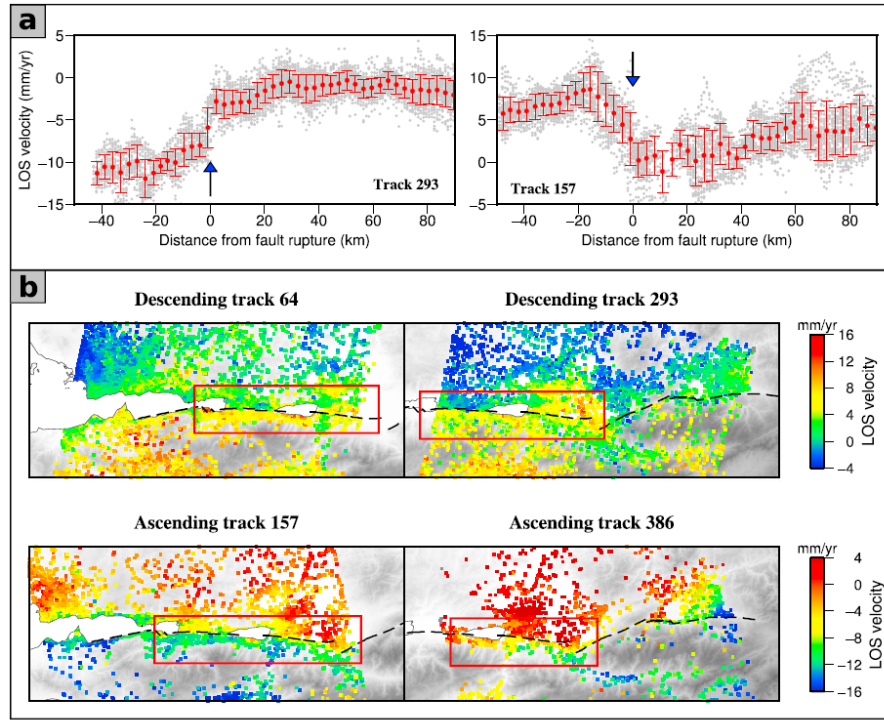
modellemede yüzeyde meydana gelen asismik kayma gösterilmiştir.



Şekil 1.3 1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca ilk krip bulguları [34]

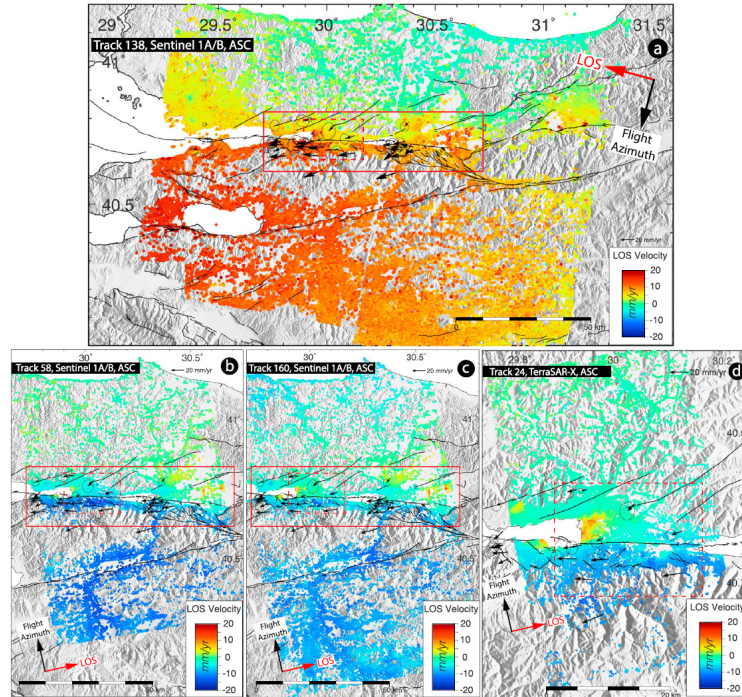
[35], 2002-2010 yılları arasında analiz edilen InSAR ve yayınlanmış GPS verileriyle İzmit yakınlarında maksimum 11 ± 2 mm/yıl hızla sismik olmayan kayma bulmuştur (Şekil 1.4).

Şekil 1.4'de alçalan ve yükselen InSAR LOS (line of sight - bakış açısı) hız gradyeni fayın yüzeyde krip ettiğini göstermektedir. Bu çalışmada, uzun dönem gerinim birikimine kıyasla, sık kripin önemsiz olduğu sonucuna varılmıştır [35].



Şekil 1.4 1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca InSAR verileriyle krip araştırması [35]

[36], GPS ve InSAR ve kripmetre (creepmeter) verileri ile İzmit yüzey fay izi boyunca sığ krip araştırması (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca InSAR ve GPS verileriyle krip araştırması [36]

Şekil 1.5’de, Sentinel-1A/B, TerraSAR-X InSAR ve GPS verileri kullanılarak 2011-2017 yılları arasında İzmit depreminin merkez üssünde maksimum krip oranı yaklaşık 8 mm/yıl olarak bulunmuştur.

Özellikle 20. yüzyıldaki aktif durumu ve ürettiği depremler nedeniyle çok fazla çalışılan KAF’a nazaran Doğu Anadolu Fayı (DAF) bu dönemde suskun kalmış ve KAF kadar yoğun incelenmemiştir. Genel olarak Anadolu’yu ya da Anadolu’nun doğusunu konu alan bu çalışmalar, bölgeyi bir bütün olarak incelemeyi uygun görmüştür [2, 3, 37–39].

DAF’ın varlığı 20. yüzyılın 2. yarısında keşfedilmiştir. [40], KAF’ı anlatırken, bu fay zonundaki sağ yanal atımı yok edecek sol yanal atıma sahip Karlıova’dan başlayan, Ölü Deniz Fayı’na kadar uzanabileceği düşünülen bir fay yapısından bahsetmiştir. Tamamen sol yanal atımlı 25 cm yerdeğiştirmenin meydana geldiği [41] 22 Mayıs 1971 tarihinde olan 6.8 büyüklüğündeki Bingöl depremi ile gözler bu fay hattına çevrilmiş ve ilk defa [42], bu faya "East Anatolian Fault" ismini vermiştir. [43], fayı uydu görüntüleriyle göstererek, Anadolu ve Arap plakaları arasındaki hareketin büyük kısmını karşıladığını söylemiştir.

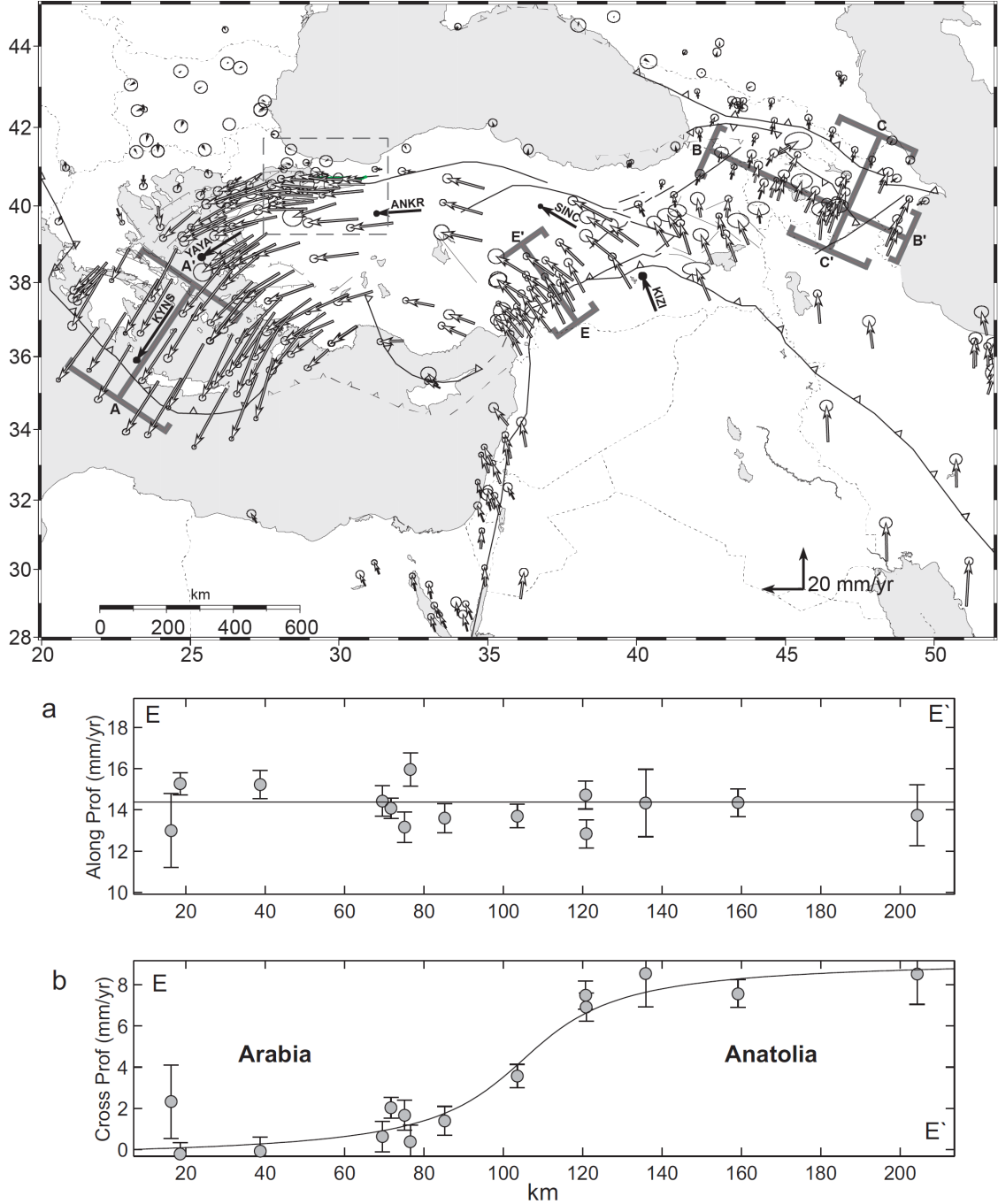
Literatürdeki birçok çalışma bu fay için kayma hızı belirlemeye çalışmıştır. [41], yıllık 25 - 35 mm bir kayma hızı aralığı belirleyerek, ortalama 29 mm/yıl bir kayma hesaplamıştır. [37], DAF için yaklaşık 13 mm/yıl sol yanal hareket ve Arabistan ve Türkiye arasında yaklaşık 2 mm/yıl kısalma olduğunu belirtmiştir. [44] çalışmasında da, yine kendine ait [37] çalışmayı eleştirerek, sol yanal hareketin yıllık yaklaşık 8 mm olduğunu vurgulamıştır. [2], kayma hızını GPS hızlarıyla 9 ± 1 mm/yıl, [3], yine GPS hızlarını kullanarak yaklaşık 10 mm/yıl bulmuştur (Şekil 1.6).

[3]’te tasarlanan profilin (kesitin) yeri Şekil 1.6’da, gösterilmektedir. Burada, E’-E, DAF boyunca kestirilen parametreler için oluşturulan profilin yerini göstermektedir. Şekil 1.6 a’da profil boyunca oluşturulan profil paralel hızları ve b’de profil boyunca oluşturulan profil dik hızları verilmektedir. Şekil 1.6 b, 18 km derinliğinde kilitli sonsuz uzunlukta yanal atımlı bir fayda oluşan gerinim birikimini göstermektedir [3]. [3], GPS hızlarını kullanarak DAF boyunca yanal kayma hızını yaklaşık 10 ± 1 mm/yıl, sıkışma hızını ise, yaklaşık 5 ± 1 mm/yıl kestirmiştir.

[38] çalışmasında, GPS hızlarını birleştirilerek, DAF için 13 mm/yıl kayma hızı belirlemiş ve sonuçların [45]’de verilenlerle daha uyumlu olduğunu belirtmiştir.

[39] ise, bu hızı 7.5 ± 0.1 mm/yıl olarak belirlemiştir. [38] çalışmasında ayrıca, DAF için kitlenme derinliği bulunmak istenmiş ve bu değer fayın bazı bölümlerinde yaklaşık 4.5 km hesaplanmıştır. Bu sığ değerın görüldüğü alan için söz konusu

çalışmada iki hipotez ortaya atılmıştır: Fayın bu bölümünün asismik olarak kaydığı ya da dar fay zonunda dar bir bölgenin yüzeye yakın deformasyonun büyük bir kısmını biriktirdiği öne sürülmüştür. Bununla birlikte, InSAR gözlemlerinin, DAF boyunca keskin bir süreksizlik görülmemekle birlikte, faydaki asismik kaymanın yüzeye ulaşmadığı belirtilmiştir. Bu nedenle fayın bu bölümünün elastik gerinim biriktirme olasılığından bahsedilmiştir.



Şekil 1.6 DAF boyunca uzun dönem profil modeli [3]

Deprem tahminlerinin doğruluğu burada biriken gerilme miktarı ile yakından ilgilidir. Fay boyunca aseismik krip olması, elastik gerilme tahminlerini karmaşık hale getirir

[46]. Bu nedenle, faylardaki sismik potansiyelinin tahmini, faylardaki kayma ve kitlenme miktarlarının doğru anlaşılmasına bağlıdır. Jeodezik teknikler yardımıyla kaymanın zamansal ve mekansal evrimini belirlemek mümkündür [47].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında, krip sonucu oluşan yüzey deformasyonlarını ölçmek amacıyla GPS ile etkin bir tektonik ağ kurulumuna yönelik metodoloji oluşturulmuş ve bu metodoloji ile çalışma alanlarındaki krip davranışı araştırılmıştır. Türkiye'deki sürekli GPS ağları tektonik amaçlarla oluşturulmadığından, faya yakın bölgelerde sürekli istasyon bulunmamaktadır. Ancak krip parametrelerini belirlemek için faya yakın alanda GPS ölçmesi yapılmalıdır. Bu nedenle bu tez kapsamında faya yakın alanda oluşturulan kampanya GPS ölçmeleriyle krip hızı ve derinliği parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, KAF'ın 1999 İzmit kırığı ve DAF'ın Hazar Gölü - Palu segmentleri üzerinde meydana geldiği düşünülen asismik kayma hareketine ilişkin hız ve derinlik parametreleri GPS ölçme yöntemiyle kestirilmiştir.

Bu amaç kapsamında,

- Her iki bölgede oluşturulan sürekli GPS istasyonları ile kampanya GPS noktalarını içeren GPS ağından elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve zaman serisi analizlerinin yapılması,
- Her iki bölge için GPS istasyon ve GPS noktaları için hız parametrelerinin kestirimi ve bölgelere ilişkin hız alanlarının oluşturulması,
- Elastik yerdeğiştirme modelleri kullanılarak, 1999 İzmit depreminden sonra deprem kırığı ve Hazar Gölü – Palu segmenti boyunca asismik kaymanın güncel hız ve derinlik parametrelerinin kestirilmesi gerçekleştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Faydaki sismik olmayan kayma hızının, buna bağlı olarak gerinim birikiminin ne kadarının bu kayma ile karşılandığının, asismik kaymanın başlangıç ve bitiş noktalarının belirlenmesi, deprem tahminlerinin doğruluğunun artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu kapsamda, bu çalışma için aşağıdaki hipotezler öngörülmektedir:

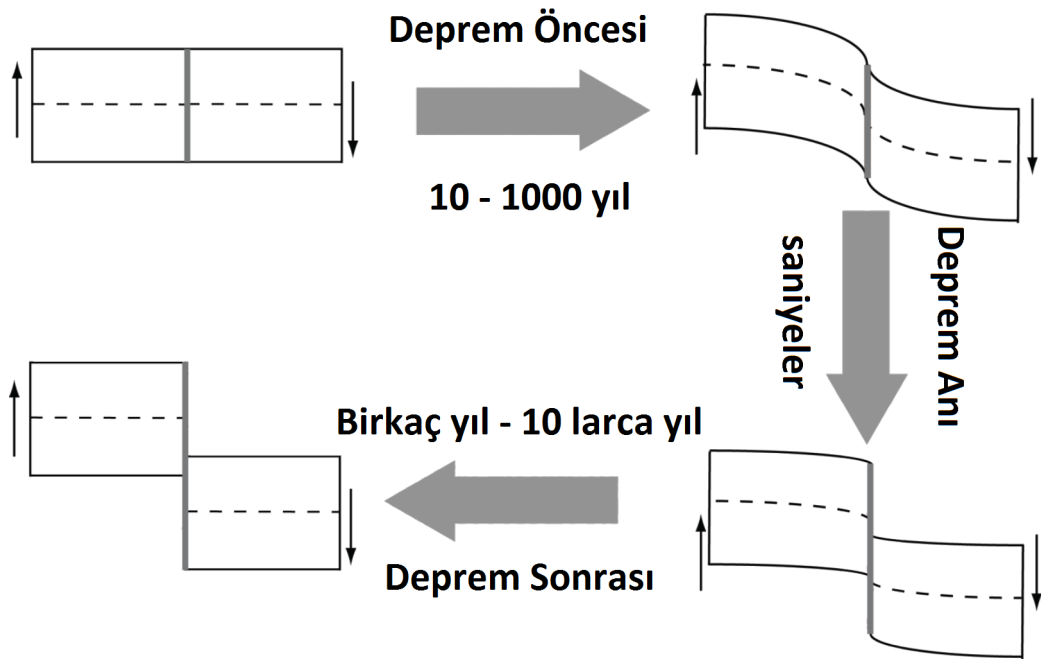
- Krip olayı yakın alanda mevcut sürekli ve kampanya GPS ölçüleriyle belirlenip izlenebilmektedir.

- 1999 İzmit kırığı boyunca, GPS ile İzmit depremi tarafından tetiklenen ve episodik olarak devam eden krip olayları salt GPS ile ölçülebilecek düzeydedir.
- DAF'ın Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca krip olayı meydana gelmektedir.

2 İZLENEN YÖNTEM

2.1 Deprem Deformasyon Döngüsü

1906 San Francisco depremi [48, 49] karada ilk gözlemlenebilen, deprem anı deformasyonunun belirlenebildiği bir deprem olarak, hem çok çalışılmış hem de yerle ilgili edinilen bilgilerin temelini oluşturmuştur. [49], çalışmasında elastik sıçrama kuramını (elastic rebound theory) oluşturmuştur (Şekil 2.1).



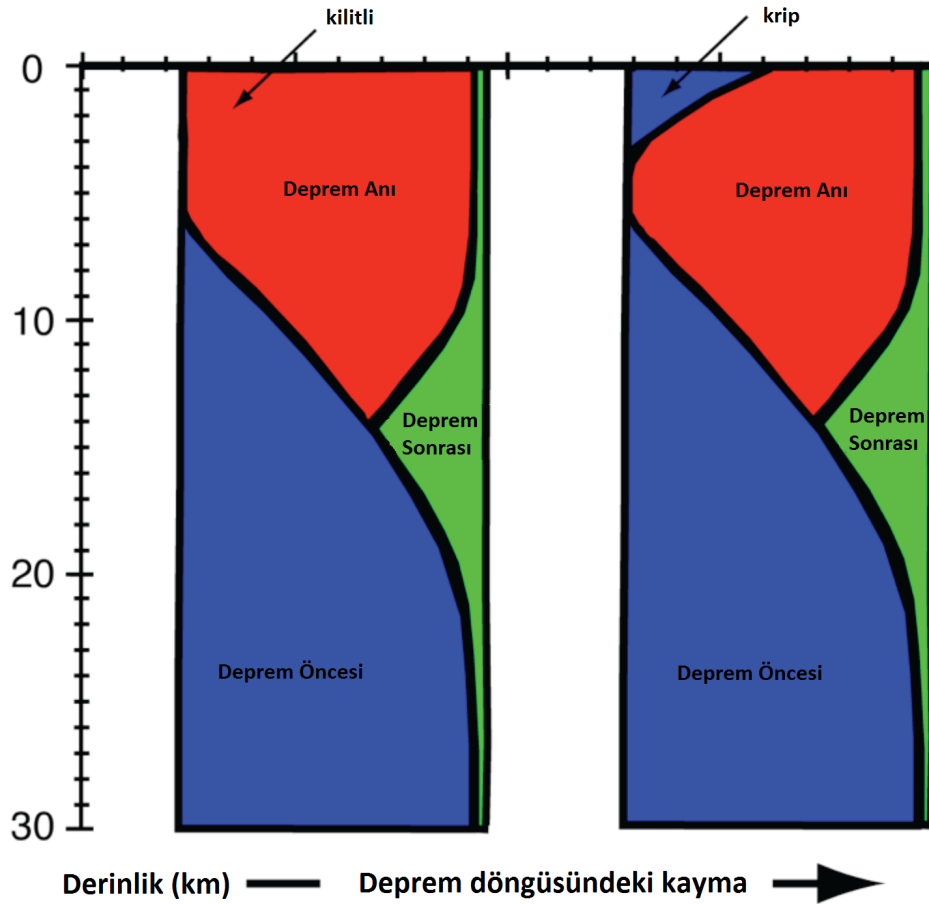
Şekil 2.1 Deprem döngüsünün doğrultu atımlı faylarda klasik gösterimi [50]

Reid, fay boyunca sürekli yavaş hareketlerle elastik olarak gerinim biriktiğini ve deprem anında fay yüzeyinde bu gerinimin ani kayma ile aniden serbest kaldığı sonucuna varmıştır [51]. Doğrultu atımlı faylarda gerinim birikimi ve depremle salınımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1’e göre, deprem öncesinde faya (kalın kesiksiz çizgi) yerleştirilmiş bir çit olduğu varsayılırsa (kesikli ince çizgi), zamanla fayın sınırını oluşturduğu iki plakanın birbirine göre hareketi gerinim birikimine yol

açacak ve bu birikim sonucunda deprem meydana gelecek, çit kırılacak, deprem anı deformasyonu oluşacaktır.

Şekil 2.1'deki gibi depremler arasındaki zaman boyunca kilitli olan fay, deprem öncesinde on yıllardan yüzyıllara uzanan zaman diliminde elastik gerinimin yavaş yavaş birikmesiyle zorlanmaya başlar [50]. Kilitli segment meydana gelen baskıya yenilerek saniyeler ya da dakikalar süren kırılma anını yaşar, sonrasında birkaç yıldan onlarca yıla kadar sürebilen deprem sonrası dönem başlar [50, 52]. Presismik ya da intersismik denilen gerinim birikiminin olduğu deprem öncesi, kosismik denilen ve gerinimin salındığı deprem anı, postsismik yani deprem sonrası şeklinde süreç devam eder [53]. Bu sürecin tamamına deprem döngüsü denilmektedir.

Şekil 2.2'de deprem döngüsü sırasında oluşan kayma alanları örneklendirilmiştir. Deprem öncesi dönemde, deprem anında ve deprem sonrasında meydana gelen kayma miktarları deprem döngüsünün sonunda her derinlikte eşittir.



Şekil 2.2 Deprem döngüsündeki kayma [50]

Şekil 2.2'de soldaki görüntü ile yüzeyde kilitli bir fayda meydana gelen kayma miktarı

gösterilirken, sağdaki şekilde, yüzeyde krip denilen asismik kaymanın oluştuğu bir durum gösterilmektedir.

2.2 Asismik Krip Hareketi

İki plaka arasındaki hareket nedeniyle oluşan kayma, sismik veya asismik olabilir ve bu iki kayma modu, uzun dönem plaka hareketlerini karşılamak için zamansal ve mekansal olarak birbirini tamamlamaktadır [54]. Krip (creep), depremlerle ilişkili bir sismik enerji üretemeyecek kadar yavaş fay kayması olarak bilinmektedir ve yavaş kayma ya da asismik kayma şeklinde de adlandırılmaktadır [55].

İnsan yapımı binalarda, yollarda, kaldırımlarda izleri yakalanan krip, dünyada ilk defa Kaliforniya'da San Andreas fayında gözlenmiştir [56].



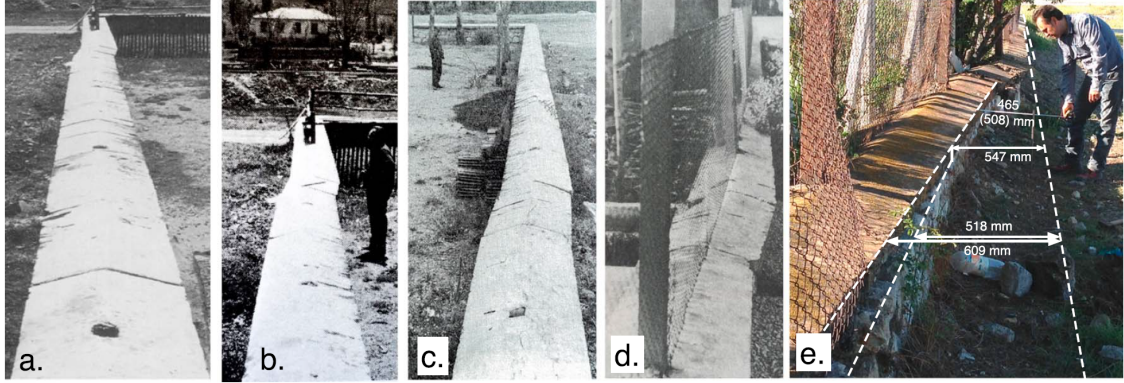
Şekil 2.3 İlk gözlenen krip, Cienega Şaraphanesinin duvarında meydana gelmiştir [56]

Kaliforniya yakınlarındaki bir şarap imalathanesi duvarında 1956 yılından itibaren izlenen kripin sağ yanal atımlı, yıllık yarım inçlik bir kaymaya neden olduğu ve muhtemelen 50 yıldır bu hızda hareket ettiği belirtilmiştir [56, 57].

Şekil 2.3'de San Andreas fayıyla kesişen Hollister yakınlarındaki Cienega

Şaraphanesinin ana duvarında gözlenen kripin yarattığı deformasyon görülmektedir.

Türkiye’de ise ilk defa, San Andreas fayıyla çok benzer özellikleri taşıyan Kuzey Anadolu Fayı [9, 58] üzerinde bulunan İsmetpaşa’da 1969 yılında gözlenmiştir (Şekil 2.4) [8, 58, 59].



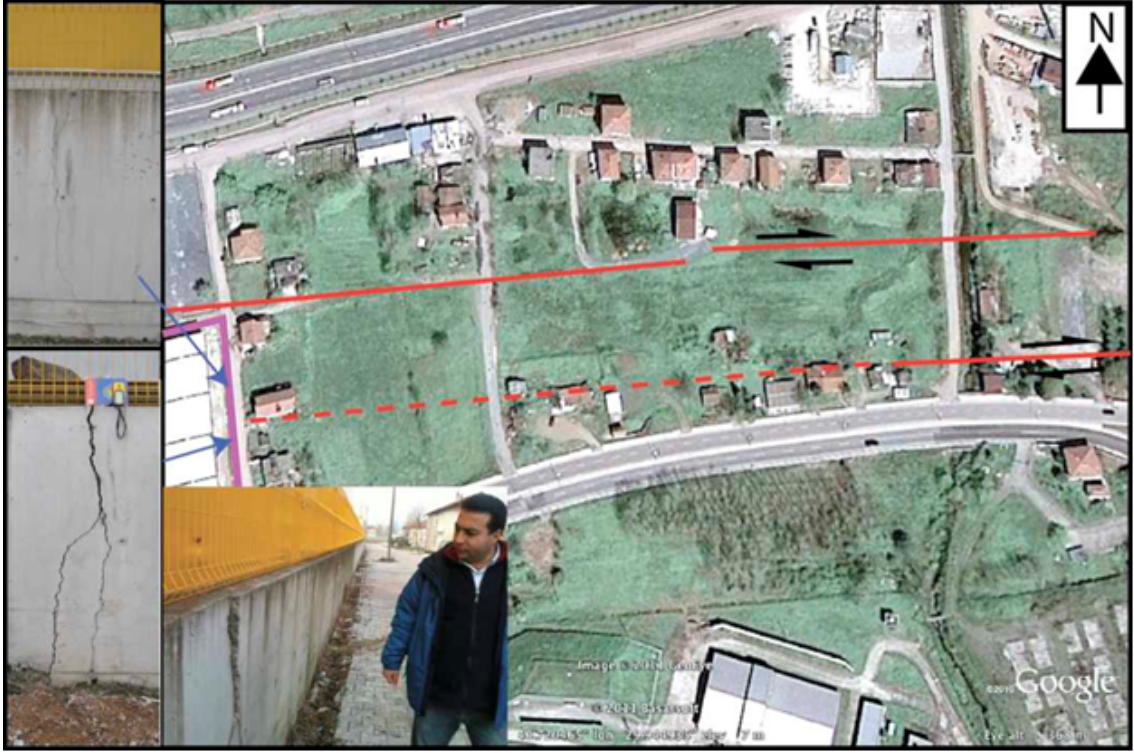
Şekil 2.4 İsmetpaşa duvarının yayınlanan fotoğrafları [60]

[60]’dan alınan Şekil 2.4’de İsmetpaşa’da kripin ilk kez saptandığı duvar ve yıllar geçtikçe duvarda meydana gelen deformasyonun izlenmesi farklı çalışmalardan toplanarak oluşturulmuştur. Şekilde duvar sırasıyla (a) Güneye bakılarak Nisan 1969 [8], (b) güneye bakılarak Nisan 1969 [40], (c) kuzeye bakılarak 14 Ekim 1969 [59], (d) kuzeye bakılarak 11 Temmuz 1978 [59] ve (e) yine kuzeye bakılarak Mayıs 2014 tarihlerinde görüntülenmiştir. Yıllar boyunca birçok araştırmacı burada çalışmış ve krip hızının nasıl değiştiği üzerine ölçmeler yapmışlardır [61–65]. [60], çalışmasında Kuzey Anadolu Fayının İsmetpaşa kesimindeki deprem döngüsü bağlamında, artçı kaymadan günümüz plaka sınırına geçişi çözmek amacıyla 1944 ve 2016 yılları arasında bir artçı kayma geçmişini incelemiştir.

Şekil 2.5’de de Türkiye’de İsmetpaşa’dan sonra ikinci olarak gözlenen, 1999 İzmit depremi ile tetiklenerek başlayan [34], krip hareketinin insan yapımı nesnelerde (duvarda) oluşturduğu deformasyon görülmektedir.

Şekil 2.6, San Pablo şehrindeki Contra Costa Kolejinin kampüsündeki bir kaldırım taşında ilerlemesi izlenen Hayward fayındaki krip göstermektedir. Ancak bir müteahhitin tekerlekli sandalyeye uygun bir rampa yapmak amacıyla kaldırım düzeltmesi ile Hayward fayının bu ünlü kaldırım taşı yokedilmiştir (Şekil 2.7).

Bu olay sonucunda üniversiteler belediyelerle işbirliği içinde çalışarak, bu tür sembol haline gelmiş yapıları sorumlu kişilere bildirme kararı almıştır, çünkü kripin varlığının saptanması, hızının kestirilmesi ve izlenmesi, deprem tahminlerinin doğru yapılması açısından çok büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.5 İzmit'te krip bulguları [66]



Şekil 2.6 Hayward fayında meydana gelen kripin kaldırım taşında oluşturduğu yerdeğiştirmenin izlenmesi [67]

Krip ilk defa görüntülendikten sonra, faylarda meydana gelen bu kaymanın daha detaylı incelenmesi için fay yakınlarına jeodezik ölçme ağıları kurulmaya başlanmıştır.



Şekil 2.7 Hayward fayında meydana gelen kripin kaldırım taşındaki kanıtının yok edilmesi [67]

Kripin gözlenmeye başlandığı ilk yıllarda GPS ile uydu gözlemleri başlamadan önce, ölçmeler nirengi, trilaterasyon ağıları yardımıyla ya da kripmetrelerle yapılmıştır [68–77]. Krip ölçme yöntemleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1 Krip ölçme yöntemleri [50]’den değiştirilerek alınmıştır.

Yöntem	Zamansal Çözünürlük	Mekansal Çözünürlük	Kapsama Alanı
Dizi Nirengi	Ay - yıl	10 - 20 km	Çok sınırlı
Trilaterasyon	Ay - yıl	100 metre	Çok sınırlı
Kripmetre	Saniye	3 - 200 metre	1 nokta x alet sayısı
Gerinimmetre	Saniye	3 - 200 metre	1 nokta x alet sayısı
GPS	Saniye	10 km	0.1 nokta / km ²
InSAR	6 - 50 gün	100 metre	100 nokta / km ²

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi ilk iki yöntem, 1980’li yıllardan önce çok faydalı olmasına rağmen, zamansal çözünürlüğü arazi çalışmalarıyla sınırlı olduğundan doğruluğu yüksek olmasına rağmen çok kullanışlı değildir. Bununla beraber,

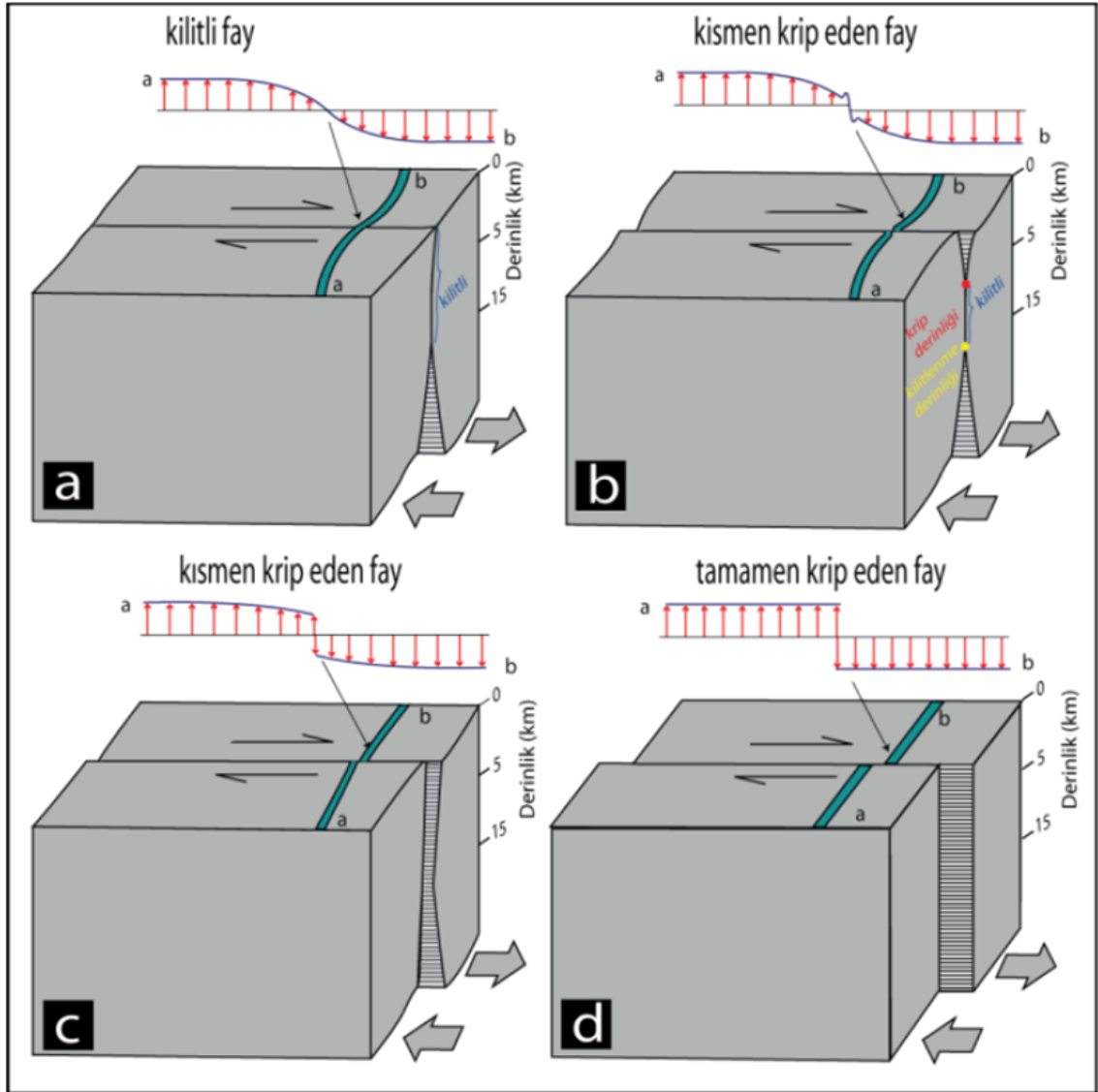
kripetreler, krip olaylarını mikron hassasiyetinde görüntüleyebilen, sürekli kayıt yapabilen cihazlardır [78]. Zaten pek çok faydaki krip oranları genellikle yılda birkaç milimetreden daha azdır [78]. Sadece kurulduğu bölgedeki kaymayı yansıtacağından, mekansal çözünürlüğü düşüktür, yine de verdiği ayrıntılı bilgiler nedeniyle krip görülen birçok fay üzerinde kurulumu yapılmıştır [36, 78–80]. Uydu teknolojilerinin gelişmesiyle beraber krip çok daha ayrıntılı çalışılmaya başlanmış, özellikle birbirini tamamlayan bu iki ölçme yönteminin birlikte kullanılmasıyla, sistemin mekaniği çok ayrıntılı şekilde incelenmeye başlanmıştır [34–36, 46, 61, 64, 81–83]. GPS yönteminin mekansal çözünürlükteki zayıflığını (TUSAGA-Aktif istasyonlarının birbirine olan mesafesi yaklaşık 60 km dir.) InSAR kapatmakta, InSAR'ın zamansal çözünürlüğündeki zayıflığını, sürekli GPS (cGPS) istasyonları tamamlamaktadır.

Ölçme yöntemleriyle, daha yakından incelenmeye başlanan sığ yüzeydeki asismik kaymaların, depremden önce (intersismik), depremden sonra (postsismik) ve deprem tarafından tetiklenerek (triggered) meydana gelen kaymalar şeklinde oluştuğu anlaşılmıştır [55, 76, 84]. Asismik kayma sığ derinliklerde, intersismik ve postsismik dönemlerde, sürekli (steady) veya geçici (transient) krip şeklinde kendini göstermektedir [54]. Kayma, sadece sığ derinlikte olmayıp, sismojenik zon boyunca oluşabileceği gibi, yaklaşık 40 km'den daha fazla derinliklerde neredeyse tamamen asismik meydana gelmektedir [55, 84]. Fayın belirli bir km'nin altında kitlenmesinin nedeni yüzeydeki krip hızının, uzun dönem fay kayma hızından düşük olmasıdır ve fay boyunca söz konusu bölgelerin arayı bir deprem sırasında kapatması beklenir [46]. Şekil 2.8'de doğrultu atımlı faylarda meydana gelebilecek davranış biçimleri gösterilmiştir.

Şekil 2.8 a'da yüzeyde kilitli olan fayda, bir derinlikten sonra kayma görülmektedir. Kilitlenme derinliğinin altında fay kaymaya ve a - b profili boyunca faydan uzaklaştıkça gerinim biriktirmeye devam etmektedir. Bu nedenle fay izi boyunca hız vektörleri sıfır iken, faydan uzaklaştıkça büyüklükleri artar.

Şekil 2.8 b, a'ya ek olarak sığ yüzeyde krip göstermektedir. Bu nedenle a - b profilinde fay izinin bulunduğu bölgede bir adım görülmektedir. Şekil 2.8 c'de ise yüzeyden derine kadar artan hızda bir fay gösterilmektedir. Şekil 2.8 d'de fay yüzeyden derine özdeş bir hızla hareket etmektedir. Şekil 2.8'de ilk üç durumda fay boyunca deprem oluşabilir. Şekil 2.8 d'de bütün yüzey boyunca kayma hızı eşit olduğundan gerinim birikmemektedir. Faydaki bu asismik kayma oluşumu bir dizi fiziksel ve kimyasal işlemle açıklanabilmektedir. Bunlar, belirli kaya türlerinin sürtünme direncini, kimyasal reaksiyonları, kuru kayaçların genişlemesini, yüksek gözenek basıncını, yüksek sıcaklıkları, fay geometrisini veya bu faktörlerin kombinasyonlarını

içermektedir [84].



Şekil 2.8 Doğrultu atımlı faylarda meydana gelen davranış biçimleri, ([85] ve [66])

Yukarıdaki açıklamalar ışığında krip olayına neden olan mekanizmaları açıklamak gerekirse; (1) fay zonlarındaki kil gibi zayıf minerallerin [86, 87] ya da mekanik ve kimyasal nedenlerle meydana gelen birbirine bağlı aşırı makaslama foliasyonlarının [88–90] varlığı ve (2) fay zonunda hapsedilmiş çok yüksek basınçlı sıvı içeriğidir [91, 92]. Bu durumun fay zonlarında çoğunlukla rastlanılan yüksek sıvı muhtevallı, düşük geçirimlili, ve düşük dayanımlı killerce zengin makaslama zonlarında deprem esnasında meydana gelen yüksek ısınmadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir [93]. İster sıvı basıncı nedeniyle, isterse minerolojik nedenlerle oluşsun, aktif faylar boyunca nadiren gözlenen bu krip hareketinin nasıl ve ne zaman başladığı konusunda belirsizlikler halen devam etmektedir.

1944 yılında, KAF'ın İsmetpaşa segmentinin ve 1868 yılında SAF'ın Hayward

segmentinin büyük depremlerle kırılması temel alınarak, krip hareketinin depremler tarafından tetiklenmiş olabileceği [61] tarafından ileri sürülmüştür. [34] tarafından, 1999 İzmit deprem kırığı üzerinde başlatılan çalışmalar krip olayının depremler tarafından tetiklenebileceğine dair somut bulgular elde edilmesini sağlamıştır. Bu tür artçı kaymaların [32, 94] büyük depremler sonrasında uzun süreler devam ettiği bilinmektedir. Örneğin, İzmit kırığı üzerinde postsismik deformasyonların, yaklaşık 20 yıldır devam ettiği bilinmekte olup [26, 27, 34], 1906 San Francisco depremi için deprem sonrası kaymaların yaklaşık 40 yıl boyunca gözlemi yapılabilmektedir [95].

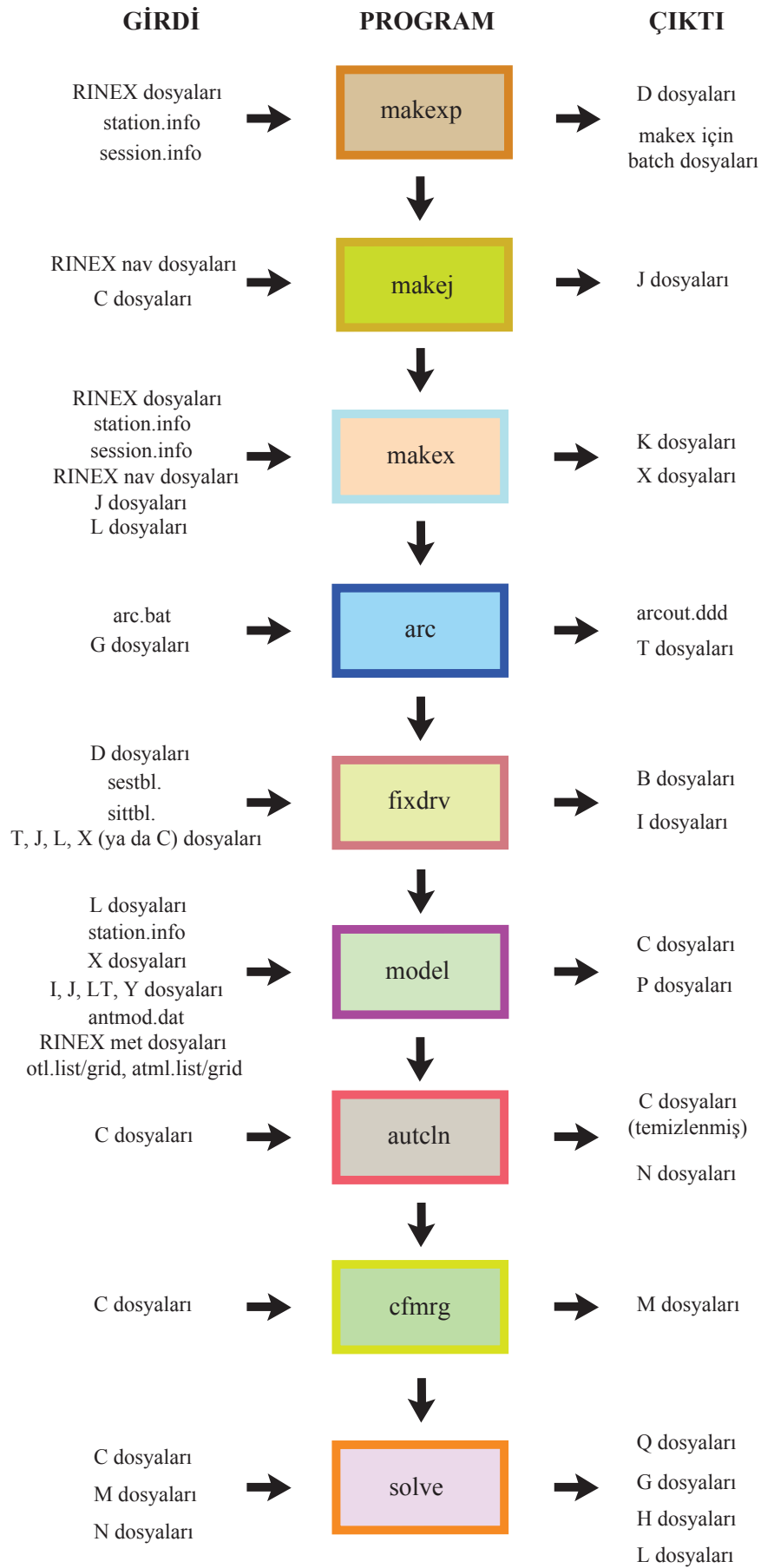
Her ne şekilde olursa olsun, fayların yüzey izleri boyunca meydana gelen asismik krip olayı, gelecekte meydana gelebilecek elastik gerinim salınımlarının tahminlerini karmaşık hale getirmektedir [46]. Fay yüzey izlerindeki krip olayının deprem döngüsü açısından önemi gözardı edilemez. Eğer faylar biriken gerinimin azımsanamayacak bir kısmını asismik kayma şeklinde harcarsa, sismik tehlike azalabilmektedir [55]. Bununla beraber, krip eden fayların daha az tehlikeli olabileceği düşünülse de, Kaliforniya'daki Hayward ve Tayvan'daki Chishang faylarının yüzeyde krip ettiği bilindiği halde, 6.8 büyüklüğünde deprem ürettikleri görülmüştür [96]. Bu nedenle, krip yapısının daha iyi anlaşılması gerekmektedir [46, 55, 96, 97].

2.3 GPS Verilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında elde edilen sürekli ve kampanya tipi GPS ölçüleri Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından geliştirilen GAMIT/GLOBK (v10.7) [98] programıyla değerlendirilmiştir. Bu bölümde, GAMIT/GLOBK yazılımı ve buna ilişkin veri değerlendirme stratejileri açıklanmıştır.

Şekil 2.9'de girdi, çıktı ve uygulama adımları verilen, GAMIT (program solve), programa girdi olan istasyonların göreceli konumlarını, yörüngesel ve yer dönme parametrelerini, zenit gecikmelerini ve faz belirsizliklerini, ikili farklar faz gözlemlerini kullanarak tahmin etmek için ağırlıklı en küçük kareler algoritmasını işleme katmaktadır. Gözlemler ve parametreleri ilişkilendiren fonksiyonel model doğrusal olmadığından, GAMIT iki çözüm üretir. İlki birkaç desimetre doğruluğunda koordinatları, ikincisi nihai kestirimleri vermektedir [99]. (Daha fazla bilgi için [98]'ye bakınız.).

GAMIT çözümü genellikle istasyon konumlarının nihai kestirimlerini elde etmek için doğrudan kullanılmamaktadır. Daha ziyade, GAMIT'te elde edilen istasyon konumlarının tahminleri ve ilişkili bir kovaryans matrisi ("quasi-observations" yani "yarı gözlemler") ve (isteğe bağlı olarak) yörünge ve Dünya dönme parametreleri, GLOBK'ya veya diğer benzer programlara girdi olarak verilerek, burada başka ağlarla



Şekil 2.9 GAMIT işlem adımları ([98]'den yararlanılmıştır)

birleştirmek suretiyle, koordinat ve hızlar elde edilmektedir.

Şekil 2.9’de GAMIT işlem adımları görülmektedir. Solve programının çıktısı olan H dosyaları yukarıda anlatıldığı gibi GLOBK programına girdi olarak verilmektedir [98–100].

Bu tez kapsamındaki veri değerlendirme işlemi (GAMIT) sırasında aşağıdaki değerlendirme stratejisi izlenmiştir [99];

- Deney Seçimi = BASELINE tercih edilmiştir. Yörünge parametrelerinin kestirilmesi gereken durumlarda RELAX tercih edilmelidir. 1994 sonrası IGS yörünge parametreleri için BASELINE tercih edilebilir ve bu tercihle kısıtlamalar göz ardı edilmektedir. Kısıtlamalara karar verirken, solve iki çözüm uygular; biri doğrudan giriş kısıtlamalarını kullanan ("kısıtlı" veya "sıkı") çözüm, diğeri gevşek kısıtlamaları (10 ppm) kullanan bir ("gevşek") çözümdür. "Sıkı" çözüm Q dosyasında görüntülenir, L- (istasyon koordinatı) ve G- (yörünge parametresi) dosyalarını güncellemek ve M dosyasını yazmak için kullanılır. GLOBK kullanılmayacaksa, GAMIT tarafından üretilen bu "sıkı" çözümler, parametrelerin son tahminlerini yani son koordinat çözümlerini sağlamaktadır. "Gevşek" çözüm Q dosyasında (altta bulunan kısıtlamalar ve istatistikler hariç) görüntülenmez, ancak GLOBK’ya girdi olarak oluşturulan H dosyasına yazılır. Son analiz için GLOBK kullanılacaksa, yörünge (ve istasyon) kısıtlamalarının ve GAMIT sestbl ayarlarında yapılan bu kısıtlama değerlerinin GLOBK çözümü üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Bu çalışmada, GAMIT gevşek çözümler kullanılmış, bu bilgiler H dosyasına yazılmış ve GLOBK’ya girdi olarak sağlanmıştır. Son çözümler GLOBK ile elde edilmiştir.
- Gözlem seçimi = *LC_AUTCLN* tercih edilmiştir. Bu tercih, iyonosferden bağımsız lineer kombinasyon ("LC" veya "L3") anlamına gelmektedir ve Şekil 2.9 işlem adımlarının sonuncusu olan solve’un son çözümünde belirsizlik parametrelerini (istasyon / uydu kombinasyonları) ve geniş düzlemin (WL) çözünürlüğünü kullandığını göstermektedir. Bu çözüm, hem L1 hem de L2 serileri için P kodu kullanan modern alıcılarla, özellikle de uzun bazlarda çok etkilidir.
- Analiz Tipi = 1-ITER tercih edilmiştir. Tercih edilen yaklaşım, (genellikle) model, autcln ve solve yoluyla iki geçişle sonuçlanan analiz tipidir, ilk çözüm (6. karakteri “p” ile adlandırılan Q dosyası yazılır) koordinat ve yörünge parametrelerini nihai değerlerine yakınlaştırmaya yarar, böylece artık değerleri azaltarak, hata değerlerini küçültür. İlk çözümde autcln ilk artık değerler

üzerinde çalışır ve ikinci çözümde, solve, M-dosyasında yazılan dengelenmiş değerleri çözerek bir "postfit" düzenleme gerçekleştirmektedir.

- Su buharı nedeniyle, yüzey meteorolojik verileri kullanılarak yapılan atmosferik gecikme modelleri çok zayıf olduğundan, GAMIT zenit gecikmesindeki düzeltmelerin tahmini gerçekleştirmektedir. Zenith Modelinde "Number Zen = 1" ve "Zenith Model = CON" tercih etmek, oturum boyunca zenith gecikmesi için tek bir parametre belirlemektedir. Zenith-delay varyasyonlarının en iyi temsili genellikle parçalı doğrusal (Piecewise Linear - PWL) fonksiyonu kullanılarak gün boyunca her 2-6 saatte bir yeni zenith gecikme parametresi ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada da, her iki saat için bir parametre belirlenmiş (bunun için "Number Zen = 13" ya da "Interval Zen = 2" seçilebilir) ve model olarak PWL "Zenith Model = PWL" kullanılmıştır. Konuyla ilgili daha geniş bilgi [99]'ten edinilebilir.

GLOBK, normal denklemlerden ziyade kovaryans matrisleri üzerinde çalışan bir Kalman filtresi (çözümde stokastik parametreler yoksa ardışık en küçük karelere eşdeğer) kullanır ve bu nedenle tahmin edilen her parametre için sonsuz olmayan bir priori kısıtlama belirtmenizi gerektirir. Kombinasyonu etkilememek için GAMIT, GLOBK tarafından kullanılan çözümü parametrelerde gevşek kısıtlamalar (loose constraints) ile üretmektedir. Ancak, faz işlemlerinde faz belirsizliklerinin çözülmesi gerektiğinden (mümkünse), GAMIT aynı zamanda nihai çözümü için kısıtlamaları gevşetmeden önce kullanıcı tanımlı kısıtlamalarla birkaç ara çözüm üretir [99]. ([98] Bölüm 3.4'de bu adımlar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır).

GLOBK programının kullanıldığı üç ortak mod veya uygulama vardır:

- Bir çok günlük deney boyunca ortalama istasyon koordinatlarının bir tahminini elde etmek için bireysel oturumların (örn. günler) gözlemlerinin kombinasyonu. GPS analizleri için yörüngesel parametreler, kısa veya uzun yay çözümlerine izin vererek stokastik olarak ele almak,
- İstasyon hızlarını tahmin etmek için birkaç yıllık gözlemlerden elde edilen istasyon koordinatlarının deney ortalamalı (ilk şıktan) tahminlerinin kombinasyonu,
- Günler veya yıllar boyunca ölçüm hassasiyetinin zaman serisi değerlendirmesini oluşturmak için bireysel oturumlardan bağımsız koordinat tahmini kestirmektir [100].

2.4 Elastik Yer Değiştirme Modellemesi

Sağ yanal doğrultu atımlı faylarda Bölüm 2.1’de anlatılan deprem döngüsünün intersismik denilen uzun döneminde meydana gelen gerinim birikiminin yeryüzünde oluşturduğu deformasyon [72]’de açıklanmıştır. Bu hareketi anlamlandırabilmek için öncelikle yer gözlemlerine ihtiyaç vardır. Bu gözlemler Bölüm 4.1’de tanımlanan GPS gözlemlerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen koordinat ve hız çözümleri olabileceği gibi, InSAR verilerine dayalı hız çözümü ya da Tablo 2.1’de belirtilen diğer jeodezik yöntemlerle elde edilen veriler de olabilmektedir. Fay boyunca faydan belirli mesafelerde yapılacak ölçmelerden elde edilecek hız çözümleri, elastik yer kabuğundaki davranışları anlayabilmek için kullanılmaktadır.

Yerin davranışını kavrayabilmek için yapılan jeodezik gözlemlerle elastik yer kabuğu arasında fiziksel bir ilişkiye ihtiyaç duyulmaktadır ve Şekil 2.1 b ve c’de görülen doğrultu atımlı faylardaki bu karakteristik deformasyon eğrisi arktanjanant fonksiyonu ile ilişkilendirilmiştir.

Transform bir fayda, iki plaka hareket ederken, fayın yüzeyde kilitli olduğu ve kilitlenme derinliğinin altındaki bölgede serbestçe kayma meydana geldiği düşünülürse (Şekil 2.1 b ve c), fay paralel hız aşağıdaki basit modelle ifade edilebilir [72, 101]:

$$v_{||}(x) = \frac{V}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{D}\right) \quad (2.1)$$

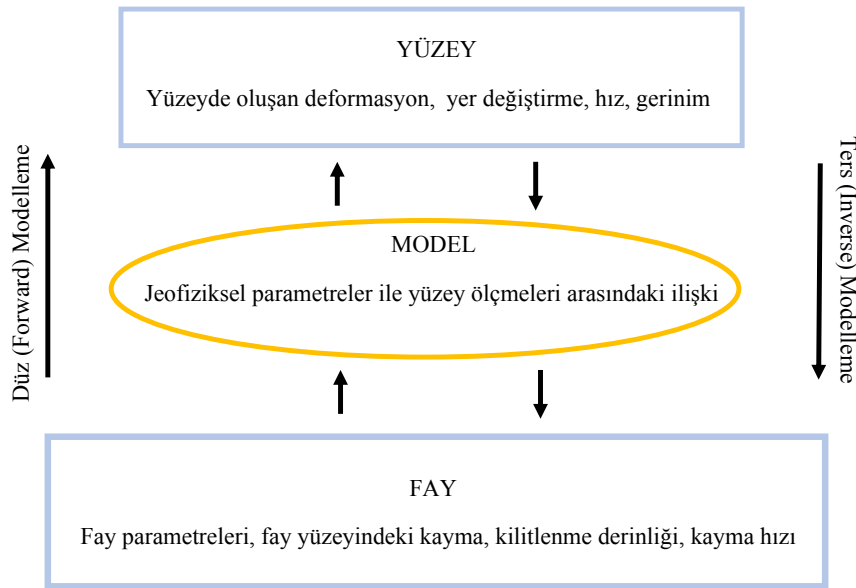
Burada, D kilitlenme derinliğini, x faya dik uzunluğu, V uzak alan hızını, $v_{||}(x)$ ise x noktasındaki fay paralel hızı göstermektedir [72, 101].

Şekil 2.8 a, doğrultu atımlı bir fay boyunca gerinim birikiminin en basit halini göstermektedir. Elastik yarı uzayda dikey bir kesit şeklinde temsil edilen fayın D derinliği altındaki hızı V , uzun dönem göreceli plaka hızına eşit ve fay bu derinlik üzerinde kilitlidir [52].

Faydan $\pm 10D$ ötedeki mesafelerde hız $\pm V/2$ olduğundan plakaların iç kısımları eşit şekilde hareket eder. Kilitlenme derinliğini Şekil 2.8’deki gibi 15 km olduğu düşünülürse, yapılması gereken jeodezik ölçmelerin fayın her iki yanında en az 100 km mesafeye kadar gerçekleştirilmesi gerekmektedir [72].

Bir fayı çevreleyen yüzeydeki yerdeğiştirmelerin, hız alanının ya da gerinim birikiminin jeodezik yöntemlerle belirlenmesi, elastik yarı-uzay modellemede yerin altında meydana gelen kaymaların hesaplanabilmesine olanak tanımaktadır [46]. Bu

jeofiziksel parametrelerin jeodezik ölçmeler yoluyla modellenebilmesi için iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki düz (forward) modelleme yöntemidir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Düz ve ters modelleme yöntemleri

Şekil 2.10'a göre, düz modelleme yönteminde, kaynaktan sonuca doğru ilerlenmektedir, başka bir deyişle, yüzeyde oluşan deformasyona ulaşabilmek için öncelikle kaynak parametreler, fay parametreleri, volkan parametreleri, yer altında harekete neden olan etkiler analitik yöntemlerle [102], ya da nümerik yöntemlerle [103, 104] belirlenmektedir ancak düz modelleme yöntemleri, işlem yükü nedeniyle uzun sürebilmektedir.

Ters (inverse) modelleme yönteminde ise (Şekil 2.10), yüzeyde oluşan deformasyon, hız ve gerinim değişimleri, yani jeodezik gözlemler kullanılarak, sismojenik bölgede oluşan kayma, kilitlenme derinliği gibi kaynak parametrelere ulaşılmaktadır [105, 106]. Asismik kayma sismojenik zon boyunca bütün derinliklerde meydana gelebilir ve bunu haritalayabilmek için faydan belirli bir uzaklığa kadar jeodezik ölçmeler yapılmalı ve ters modelleme yöntemi uygulanmalıdır [55].

Ters modelleme yöntemi uygulanırken, en çok kullanılan algoritma en küçük karelerdir ve bu yöntem kareleri alınan düzeltmelerin (model ile ölçü arasındaki farkların) toplamının minimum olduğu modeli üretmektedir [107, 108]. (2.1)'de verilen modelde jeofiziksel parametreler de en küçük kareler algoritması kullanılarak ters modelleme yöntemiyle çözülebilmektedir.

Bu denklemde, $v_{||}(x)$ ölçüler yardımıyla hesaplanan hız verilerini, x ise, faya dik mesafeyi göstermektedir. Fayın konumunu doğru bildiğimizi düşündüğümüzde, x

değeri de bilinen bir büyüklük olarak kabul edilmektedir. D , kilitlenme derinliği, sismoloji verileri ya da önceki çalışmalardan elde edilmekle beraber genellikle bilinmeyen olarak kabul edilmektedir. V , uzun dönem kayma hızı, D gibi ters modelleme yöntemiyle elde etmemiz gereken bir büyüklüktür. Sadece uzun dönem kayma hızının bilinmeyen olarak kabul edildiği çözüm, lineer olarak en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözüldüğü gibi, kilitlenme derinliğinin de kestirilmesi gereken bir parametre olarak alındığı çözüm ise lineer olmayan en küçük kareler yöntemi ile çözülmesi gereken bir problem haline dönüşmektedir.

Lineer bir denklem çözümü göz önüne alınarak oluşturulan fonksiyonel model

$$\mathbf{b} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (2.2)$$

olur [109–113].

Burada, $\mathbf{A}$ ölçüler ile model arasındaki fiziksel ilişkiyi tanımlayan katsayılar matrisini, $\mathbf{b}$ fay paralel hızları içeren ölçü vektörünü, $\mathbf{v}$ ölçülere ilişkin düzeltme vektörünü göstermektedir. Uzun dönem kayma hızı (V) tek bilinmeyen olarak $\mathbf{x}$ bilinmeyenler vektörünü belirtmektedir.

n tane ölçü için (2.2) modeli matris gösterimi kullanılırsa

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\pi} \arctan \frac{x_1}{D} \\ \frac{1}{\pi} \arctan \frac{x_2}{D} \\ \vdots \\ \frac{1}{\pi} \arctan \frac{x_n}{D} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = (V), \mathbf{b} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

olarak elde edilir.

$\mathbf{x}$ bilinmeyenler vektörünün en küçük kareler yöntemine göre çözümü için

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b} = 0 \quad (2.4)$$

ya da $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ ve $\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}$ gösterimi ile

$$\mathbf{N} \mathbf{x} - \mathbf{n} = 0 \quad (2.5)$$

normal denklemleri elde edilir [112, 113]. Ölçülere ilişkin standart sapmalar ve aralarındaki korelasyonlar göz önüne alınarak $\mathbf{C}_{bb}$ varyans-kovaryans matrisi

$$\mathbf{C}_{bb} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{m1} & \sigma_{m2} & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1m}\sigma_1\sigma_m & \rho_{2m}\sigma_1\sigma_m & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

olarak oluşturulur ve σ_0^2 birim ağırlıklı ölçünün varyansı olmak üzere $\mathbf{P}$ ağırlık matrisi

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \mathbf{C}_{bb}^{-1} \quad (2.7)$$

olur.

Uzun dönem kayma hızı (V) bilinmeyeninin çözümü,

$$\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} = \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{n} \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

Eğer kilitlenme derinliği (D) de bilinmeyen olarak bu yöntem ile kestirilmek istenirse, arctanjant fonksiyonuna bağlı olarak lineer olmayan bir denklem sistemi oluşmaktadır. Lineer olmayan bu denklem sistemini ilk olarak Taylor açılımı yardımıyla doğrusallaştırılır. Bu amaçla bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri hesaplanır. Bunun için probleme bağlı olarak değişik çözüm yolları bulunabilir. Örneğin, denklem sistemi sonucunda elde edilen bilinmeyenler başlangıçta öngörülen yaklaşık değerlere eklenerek yeni yaklaşık değerler belirlenir ve iteratif şekilde çözüm elde edilir. Bu işlem yaklaşık değerler ile sonuç değerler arasındaki fark sıfır olana kadar devam etmektedir.

Uzun dönem kayma hızı (V) ile birlikte kilitlenme derinliği (D) bilinmeyen olarak göz önüne alınan model

$$v_i = c + \frac{V}{\pi} \arctan\left(\frac{x_i - x_0}{D}\right) \quad (2.9)$$

olur [109–111]. Burada, c hızdaki öteleme parametresini, x_0 ise fayın mesafesini

tanımlar ve bu çalışmada bu değer sıfır alınmıştır.

(2.9) eşitliği Taylor serisine göre doğrusallaştırır

$$v_i = [c_0 + \frac{V_0}{\pi} \arctan(\frac{x_i - x_0}{D_0})] + \delta c + (\frac{1}{\pi} \arctan(\frac{x_i - x_0}{D_0}))\delta V - \frac{V_0}{\pi} \frac{x_i^2}{D_0^2 + x_i^2} \delta D \quad (2.10)$$

ve matris gösterimi ile (2.2) modeline dönüştürülürse

$$\begin{bmatrix} v_1 - (c_0 + \frac{V_0}{\pi} \frac{x_1 - x_0}{D_0}) \\ v_2 - (c_0 + \frac{V_0}{\pi} \frac{x_2 - x_0}{D_0}) \\ \vdots \\ v_n - (c_0 + \frac{V_0}{\pi} \frac{x_n - x_0}{D_0}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta v_1}{\delta c} & \frac{\delta v_1}{\delta V} & \frac{\delta v_1}{\delta D} \\ \frac{\delta v_2}{\delta c} & \frac{\delta v_2}{\delta V} & \frac{\delta v_2}{\delta D} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta v_n}{\delta c} & \frac{\delta v_n}{\delta V} & \frac{\delta v_n}{\delta D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta c \\ \delta V \\ \delta D \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} v_1 - (c_0 + \frac{V_0}{\pi} \frac{x_1 - x_0}{D_0}) \\ v_2 - (c_0 + \frac{V_0}{\pi} \frac{x_2 - x_0}{D_0}) \\ \vdots \\ v_n - (c_0 + \frac{V_0}{\pi} \frac{x_n - x_0}{D_0}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\pi} \arctan(\frac{x_1}{D}) & -\frac{V_0}{\pi} \frac{x_1}{D^2 + x_1^2} \\ 1 & \frac{1}{\pi} \arctan(\frac{x_2}{D}) & -\frac{V_0}{\pi} \frac{x_2}{D^2 + x_2^2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{1}{\pi} \arctan(\frac{x_n}{D}) & -\frac{V_0}{\pi} \frac{x_n}{D^2 + x_n^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta c \\ \delta V \\ \delta D \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

olarak elde edilir.

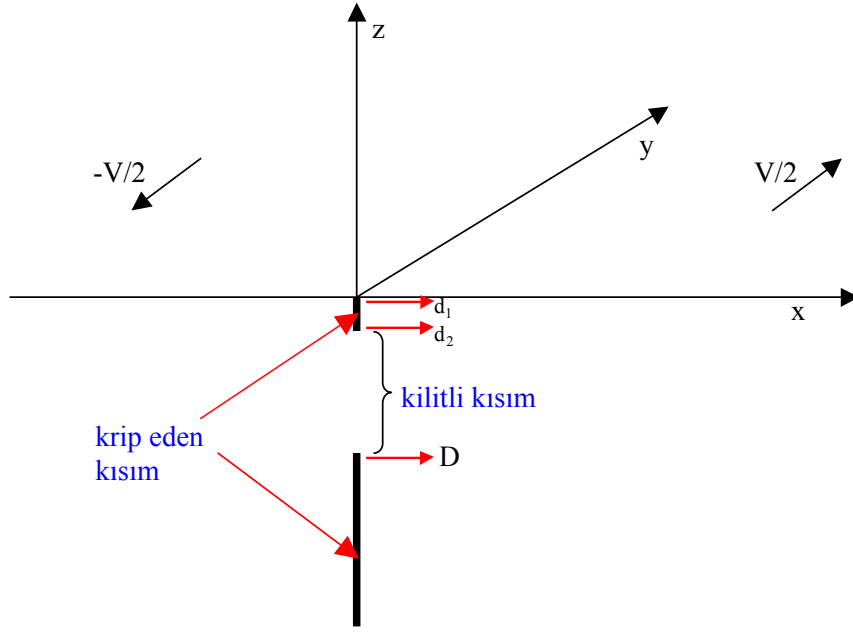
(2.12) eşitliği (2.8)'e göre çözülür ve elde edilen bilinmeyen model parametreleri başlangıçta kullanılan yaklaşık değerlere eklenerek

$$\hat{c} = c + \delta c, \hat{V} = V_0 + \delta V, \hat{D} = D_0 + \delta D \quad (2.13)$$

iteratif çözüm işlemi gerçekleştirilir.

(2.1) modelindeki yaklaşımın sismojenik zonun tamamıyla kilitli olduğu durumlarda uygulanması gerekmektedir. Eğer yüzeyde meydana gelen asismik kayma olayı (bkz. Bölüm 3) söz konusu ise, aşağıda açıklanan modelin uygulanması gerekmektedir (Şekil 2.11).

Fay izi boyunca oluşabilen bu krip hareketi sistemi daha karmaşık hale getirmektedir. Fay izi boyunca krip, Şekil 2.8 b ve Şekil 2.11'da verildiği gibi sığ derinlikte meydana gelebilir. Krip derinliği ile kilitlenme derinliği arasında fay kilitli kalıp, kilitlenme derinliği altında yine asismik kaymaya devam edebilir. Bu durumda fay paralel hız,



Şekil 2.11 Yüzeyde ve sismojenik zonun altından sonsuza kadar krip eden fay modeli ([108]'den değiştirilerek alınmıştır)

sadece uzun dönem hızıyla değil, ayrıca buna ek olarak yüzeyle ya da d_1 ile krip derinliği d_2 arasında meydana gelen sığ krip hızıyla birlikte açıklanır [35, 36, 83]:

$$v_{||}(x) = \frac{v_d}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{D}\right) + v_c \left[\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{d_2}\right) - H(x) \right] + c \quad (2.14)$$

Burada, v_d kilitlenme derinliği altında meydana gelen ve uzak alan gerinim birikimine neden olan kayma hızını, v_c sığ yüzeyde meydana gelen asismik kayma hızını, c öteleme parametresini ve H Heaviside fonksiyonunu göstermektedir. Bu çalışmada, d_2 derinliğinden başlayan krip yüzeye kadar geldiğinden, d_1 parametresi 0 alınmıştır.

Heaviside ya da step (adım) fonksiyonu

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

olarak verilmektedir. x faya dik mesafeyi gösterirken, fayın altında kalan yerler 0, fayın üstünde kalan yerler ise 1 olarak tanımlanmaktadır.

(2.14) modelinde, fay paralel hız bileşenleri $v_{||}(x)$ ve faya dik mesafe x bilinen

değerler, D kilitlenme derinliği, V uzak alan hız değeri ile birlikte c öteleme parametresi ise bilinmeyenler olarak değerlendirilerek çözüm elde edilir.

1999 İZMİT KIRIĞI ÜZERİNDEKİ ASİSMİK YÜZEY KAYMASININ BELİRLLENMESİ

Afrika ve Arap plakalarının Avrasya plakasıyla birleşmesi ve Anadolu'nun batı yönlü kaçıışı Türkiye'de birçok önemli plaka sınırının oluşmasına neden olmuştur [114]. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Anadolu mikro bloğunun Avrasya plakasıyla hareketini karşılayan Kuzey Anadolu Fayı ile, Arap plakası ile hareketini karşılayan Doğu Anadolu Fay hatları, Türkiye'nin aktif tektoniğinde ağırlıklı bir yapıya sahiptir.



Şekil 3.1 Türkiye'nin içinde bulunduğu tektonik durum [2]'den yararlanılmıştır

Şekil 3.1'deki, küçük kırmızı oklar KAF'ta sağ yönlü, DAF'ta ise sol yönlü doğrultu atımı olduğunu göstermektedir. Büyük siyah oklar ise plakaların genel hareketini yansıtmaktadır. Anadolu plakası sağ yönlü kaçışını yaparken geçtiğimiz yüzyıl boyunca KAF bu harekete yenik düşmüştür. Son yüzyıldaki yoğun hareketiyle KAF soldan sağa doğru kırılarak stresi bir sonraki segmente aktarmış ve son olarak 1999

yılında İzmit ve Düzce depremleri meydana gelmiştir.

3.1 KAF ve 1999 İzmit Depremi

3.1.1 KAF'ın Tektoniği

KAF, bir düzlemde oluşmak yerine, parçalanmış-ezilmiş kayaçların olduğu, su kaynaklarının yüzeye çıktığı, baraj göllerinin meydana geldiği, yer yer 500-1000 metre genişliğe ulaşan bir fay zonu şeklindedir [7]. Türkiye'nin doğusunda Karlıova üçlü ekleminden başlayarak batıda Yunanistan'a kadar uzanan yaklaşık 1500 km uzunluğunda, sağ doğrultu atımlı bir fay zonudur [29]. Sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay olduğu, üzerinde meydana gelen depremlerin sonucunda, duvarların, dere yataklarının fay hattına denk gelen yerlerdeki ötelenmelerinin sağ yönlü olmasından anlaşılmaktadır [7].

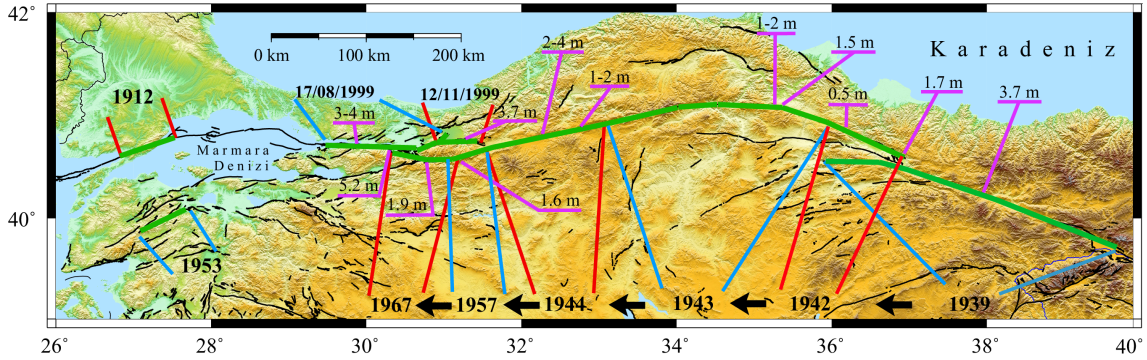
KAF'ın Yaşı ve Yerdeğiştirmesi: Yer yer daha yaşlı ve daha genç yapılar bulunsa da genel olarak jeomorfolojik, jeolojik ve tektonik araştırmalar sonucunda KAF'ın yaşının geç miyosen-erken pliyosen olduğu kabul edilmektedir [9, 10, 30, 115, 116]. Ayrıca KAF boyunca geç miyosenden bu yana toplam yerdeğiştirme hakkında da farklı yorumlar yapılmıştır. [7], KAF üzerindeki toplam yerdeğiştirmenin [117]'nin belirttiği gibi 350-400 km'ye ulaşmadığı ve bu değer onlarca km ile sınırlı olduğu görüşündedir. Birçok araştırmacı bugün bu görüşte hemfikirdir ve yaklaşık 50-100 km arasında bir yerdeğiştirme olduğu düşünülmektedir [10, 30, 115, 116]. Bu bilgiler ışığında KAF genç ve aktif bir yapıdadır.

3.1.2 KAF'ın Depremselliği

KAF'ın aktif yapısı 20. yüzyılda birçok depremi beraberinde getirmiştir. Bu depremler genel olarak $M \geq 7$ büyüklüğünde olup, büyük yıkımlar getirmiş, can ve mal kaybına neden olmuştur (Tablo 3.1).

Tablo 3.1'de görüldüğü gibi 1939 yılında başlayan, doğudan batıya hareket eden ve Marmara Bölgesine ulaşan depremlerle sarsılmıştır (Şekil 3.2). Marmara Bölgesi'nin doğu ucunda ikiye ayrılan KAF, kuzey ve güney ana kollardan devam eder [118]. 1953 Yenice-Gönen depremi fayın güney kolunun batı ucunda meydana gelen sağ yanal atımlı ve 1.5 - 4.3 metre arasında ötelemelere neden olan bir depremdir [4, 119–121]. Güney kolun batı ucunda 1967'de meydana gelen $M_w=7.4$ Mudurnu depremi [7, 122, 123] ile 1912 yılında meydana gelen $M_w=7.4$ Ganos depremleri [124–127] Marmara Bölgesi'nde sismik bir boşluk yaratmış ve bölgenin birçok araştırmacı tarafından yakından izlenmesine neden olmuştur [2, 17]. 1999 depremleri sonrasında, kuzey

kol üzerindeki Marmara Denizi altında kalan bölgede, deprem olma ihtimalinin arttığı şeklinde görüşler kesilmektedir [28, 128–132].



Şekil 3.2 KAF'ta son yüzyılda meydana gelen $M \geq 7$ depremler [29, 30]'den yararlanılarak çizilmiştir

Şekil 3.2'de depremlerin doğudan batıya doğru göçü ve kayma miktarları görülmektedir. Siyah ince çizgiler diri fay haritasını göstermektedir [31]. KAF boyunca meydana gelen depremler ve etki alanları, zamanla batıya kayması ve son olarak 1999 depremlerini tetiklemesi plaka hareketlerinin olağan bir sonucudur ve özellikle 1999 İzmit depremi, onbinlerce can ve milyarlarca dolar mal kaybına neden olmuştur. Tablo 3.1'de bu depremlerin büyüklükleri ve kayma miktarları daha ayrıntılı verilmiştir.

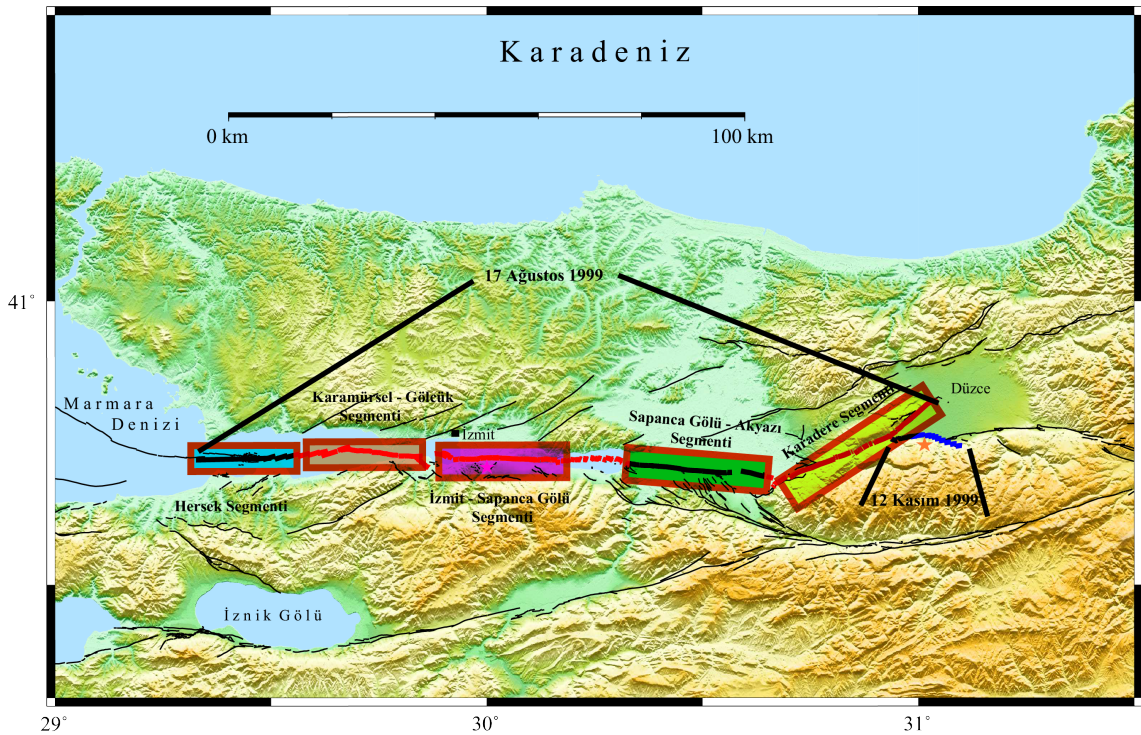
Tablo 3.1 KAF'ın son yüzyılda ürettiği $M \geq 7$ depremler. ([7, 11, 30, 125, 133, 134]'den yararlanarak oluşturulmuştur.)

Depremin Tarihi	Depremin Yeri	Depremin Büyüklüğü	Fayın Uzunluğu (km)	Maks Yatay Kayma Miktarı (m)	Maks Düşey Kayma Miktarı (m)
09.08.1912	Ganos	7.4	100	5.5	?
27.12.1939	Erzincan	7.8	340	3.70	1-2
20.12.1942	Erbaa-Niksar	7.1	40	1.75	?
27.11.1943	Kastamonu-Samsun	7.3	280	1.50	1
01.02.1944	Bolu-Gerede	7.3	180	3.50	1
18.03.1953	Yenice-Gönen	7.5	50	4.30	0.5
26.05.1957	Abant	7.0	40	1.60	0.4
22.07.1967	Adapazarı-Mudurnu	7.3	60 (80)	1.90	1.20
17.08.1999	İzmit-Gölcük	7.4	145	5.20	2.3
12.10.1999	Düzce	7.2	40	3.76	0.76

Tablo 3.1'de verilen deprem fay uzunlukları, maksimum kayma miktarları ve KAF boyunca depremlerin birbirini nasıl tetiklediği görülmektedir.

3.1.3 1999 İzmit Depremi

17 Ağustos 1999 tarihinde İzmit'te Türkiye saatiyle 03:02'de meydana gelen $M_w=7.4$ büyüklüğündeki deprem, 37 saniye sürmüş ve dışmerkezinin 70 km uzağında bulunan İstanbul da dahil olmak üzere birçok şehirde hissedilmiş ve büyük yıkım yaratmıştır [135]. Tablo 3.1'de de görüldüğü gibi 5.20 metreye varan yatay kaymanın olduğu depremin yüzeyde oluşan izi ve segmentleri Şekil 3.3'te görülmektedir. Şekil 3.3'te kırmızı kalın çizgiler 1999 İzmit depreminin, mavi kalın çizgiler ise 1999 Düzce depreminin fay izini, eflatun yıldız 1999 İzmit depreminin odak noktasını, turuncu yıldız ise 1999 Düzce depreminin odak noktasını, siyah ince çizgiler diri fay haritasını [31] göstermektedir.



Şekil 3.3 1999 İzmit depremi fay segmentleri [30]'dan yararlanılarak çizilmiştir

Marmara'nın kuzey yarısından geçen ve büyük bir kısmı denizin altında kalan KAF'ın kuzey kolunda meydana gelen 1999 İzmit depreminin fay izine bakıldığında (Şekil 3.3), 5 segment görülmektedir [10, 30]. Batıdan doğuya doğru fay;

- Hersek,
- Karamürsel - Gölçük,
- İzmit - Sapanca Gölü,
- Sapanca Gölü - Akyazı,
- Karadere

segmentlerinden oluşmaktadır [30]. Karamürsel-Gölcük segmenti, İzmit-Sapanca Gölü segmentinden 4-5 metre genişliğinde, Hersek segmenti ise Karamürsel-Gölcük segmentinden 6 km genişliğinde açılma sıçraması (releasing stepover) ile ayrılmıştır [10].

Bu tez çalışmasında birinci bölge olan, İzmit-Akyazı arasındaki İzmit-Sapanca Gölü ve Sapanca Gölü-Akyazı segmentleri üzerinde inceleme yapılmıştır.

3.2 GPS Ölçmeleri ve Değerlendirmeleri

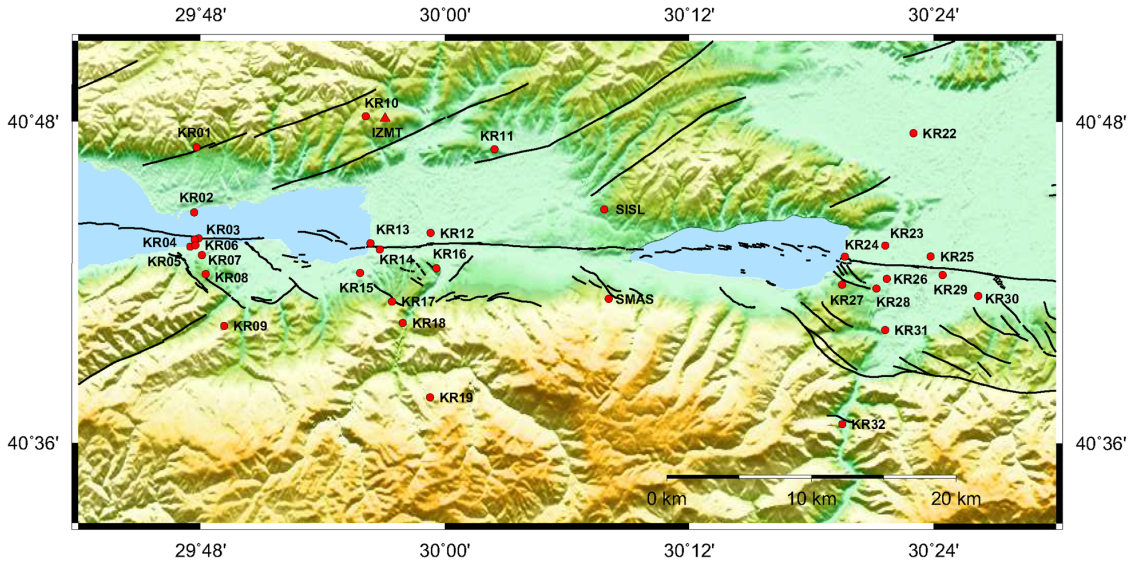
Bu tez kapsamında, ilk olarak, Kuzey Anadolu Fayı'nın 1999 İzmit kırığı boyunca çalışılmış olup, hem sürekli hem de kampanya tipi GPS ölçmeleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Sonuçlar zaman serisi analizi ile beraber hız alanı oluşturularak modellenmiştir.

Çalışma başlangıç tarihinde bölgedeki tek sürekli istasyon Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif (TUSAGA-Aktif)'e [136] ait IZMT istasyonu olduğundan ve bölgeyi izlemedeki yetersizlikten dolayı, kampanya tipi GPS ölçmeleri yapılmasının zorunluluğu doğmuştur. Zamanla faya yakın ve uzak bölgesel sürekli ağların da kurulmaya başlanmasıyla bunlar da verilere eklenmiş, bu şekilde fay karakteristiği ile ilgili daha fazla bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle bu kısım sürekli ve kampanya şeklindeki GPS verileri olarak iki başlık halinde incelenecektir.

3.2.1 Kampanya GPS Ölçmeleri

1999 İzmit depreminden sonra deprem kırığı boyunca başlayan krip hareketinin [34] karakteristiğini belirlemek amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi ve Yıldız Teknik Üniversitesi arasında ortaklaşa yürütülen 113Y102 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında fay izi boyunca faya dik 4 profil oluşturulmuştur (Şekil 3.4). Profili oluşturan noktaların faya olan uzaklıkları yaklaşık 100 m ile 10 km arasında değişmektedir. Belirtilen proje kapsamında 2014 - 2016 yılları arasında 34 GPS noktasında 5 kampanya GPS ölçmeleri yapılmıştır. Şekil 3.4'te kırmızı daireler kampanya GPS noktalarını, kırmızı üçgen ise bölgedeki TUSAGA-Aktif ağına ilişkin IZMT sürekli istasyonu göstermektedir.

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, noktalar fay boyunca batıdan doğuya doğru profiller şeklinde isimlendirilmiş, ilk iki harfini krip kısaltması KR olarak almış ve 01 den başlayarak 32'ye kadar numaralandırılmıştır. SISL ve SMAS 1999 İzmit depreminden önce de ölçülmeye başlanmış ve depremden hemen sonra da ölçmelere devam edilmiştir. Bu nedenle bu iki nokta birçok çalışmada kullanılmış [2, 3, 22, 27, 28,



Şekil 3.4 1999 İzmit fay izi boyunca kampanya ölçmeleri yapılan nokta yerleri

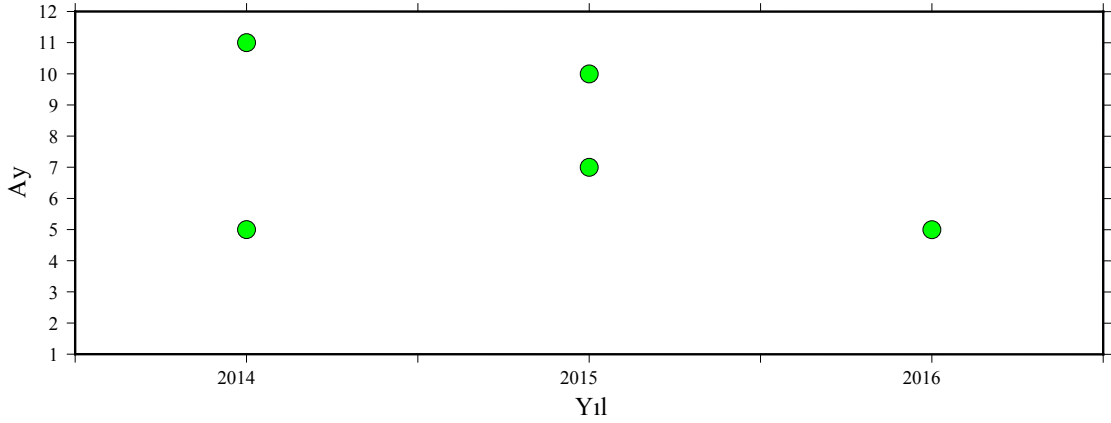
34] ve deprem anı ve sonrasını izlemek için bilgi kaynağı olmuştur. Depremden sonra da depremin etkisinin ne kadar süreceğini görmek ve daha doğru deprem tahminleri üretebilmek için kampanya ölçmeleriyle izlenmeye devam edilmiştir. Şekil 3.5'de SMAS noktası görülmektedir.



Şekil 3.5 1999 İzmit depreminden önce ve sonra ölçülen SMAS kampanya noktası

2014 yılının Mayıs ayında başlayan kampanyalar 2 yıl boyunca devam etmiş ve oluşabilecek yıllık sistematik hataların önüne geçebilmek için yaklaşık 6 ayda bir

tekrarlanarak toplam 5 kampanya gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 İzmit kampanya tarihleri

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, kampanyalar 2014, 2015 yıllarında ikişer defa yapılmış ve 2016 yılında son bir defa daha yapılarak sonlandırılmıştır.

GPS kampanya ölçmelerinde kullanılan alıcılar çift frekanslı, Trimble NetR9 olup, antenler de Jeodezik Trimble Zephyr’dir. GPS ölçmeleri yapılırken;

- Yöntem: Statik ölçme yöntemi
- Alıcının Gördüğü En Az Uydu Sayısı: Minimum 4
- Verinin Kayıt Edildiği Süre: Her istasyonda minimum 10 saat
- Verinin Kayıt Aralığı: 15 saniye
- Uydu Yükseklik Açısı: 10°

olarak belirlenmiştir.

Kampanya noktalarında ölçmeler, her kampanya sonunda değerlendirilmiş ve önceki kampanya sonuçlarıyla ve elde edilen hızları etraflarındaki hız alanıyla karşılaştırılmıştır. Bu işlem sırasında anomali sergilediği düşünülen noktalar sonuç hız alanından ve modellemeden çıkarılmıştır. Bu noktalardan biri Şekil 3.7’de görülen KR17 noktasıdır. Bu nokta yanında yapılan yol inşaatı nedeniyle hasar görmüş ve hız çözümü etkilenmiş olduğundan, modelde yanlış kestirim yapılmasını ya da doğruluğu düşürmesini engellemek açısından sonuçlardan çıkarılmıştır.



Şekil 3.7 KR17 istasyonunda meydana gelen tahribat

3.2.2 Sürekli GPS Verileri

Kampanya ölçmeleri başladığı zaman 1999 İzmit fay izi çevresinde en yakın bir toplamda üç TUSAGA-Aktif istasyonu bulunmaktaydı. Buna ek olarak Marmara Denizi'nin doğu kısmında Marmara Bölgesi Sürekli GPS Gözlem Ağına (MAGNET) [137] ait TUBI istasyonu bulunmaktadır. Zamanla bölgedeki belediyeler ve yerel kuruluşlar kendi ağlarını oluşturmaya başlamıştır. Bu çalışma kapsamında, bölgedeki her veriyi değerlendirmek için bu kuruluşlarla irtibata geçilmiş ve bu veriler de çalışmaya entegre edilmiştir.

Sakarya Büyükşehir Belediyesi Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (SASKİ) işlettiği GPS ağının tüm verileri çalışmada kullanılmıştır. Aynı şekilde, Kocaeli Büyükşehir Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (İSU), bütün verileri sisteme entegre edilmiştir. İSU verileri özellikle faya olan yakınlığı dolayısıyla önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Bununla beraber, kurulumu çok yeni olduğu için doğruluğu daha yüksek veri elde edebilmek için zamana ihtiyaç vardır. Bunlara ek olarak, Bursa Sabit GNSS Ağı'na (BUSAGA) [138] ait 2 istasyon, Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş. (UEDAŞ)'ye ait 1 istasyon ve Çayirova Belediyesi'nin 1 GPS istasyonun da verileri bu çalışma dahilinde değerlendirilmiştir (Şekil 3.8). Tablo 3.2'de bu sürekli GPS (cGPS - continuous GPS) istasyonlarına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.2'de sırayla istasyon adı, istasyona ait enlem ve boylam bilgisi, değerlendirmeye katılan veri başlangıç (T_1) ve bitiş (T_2) zamanı, analiz edilmiş

Tablo 3.2 İzmit bölgesi için değerlendirilen sürekli GPS verileri

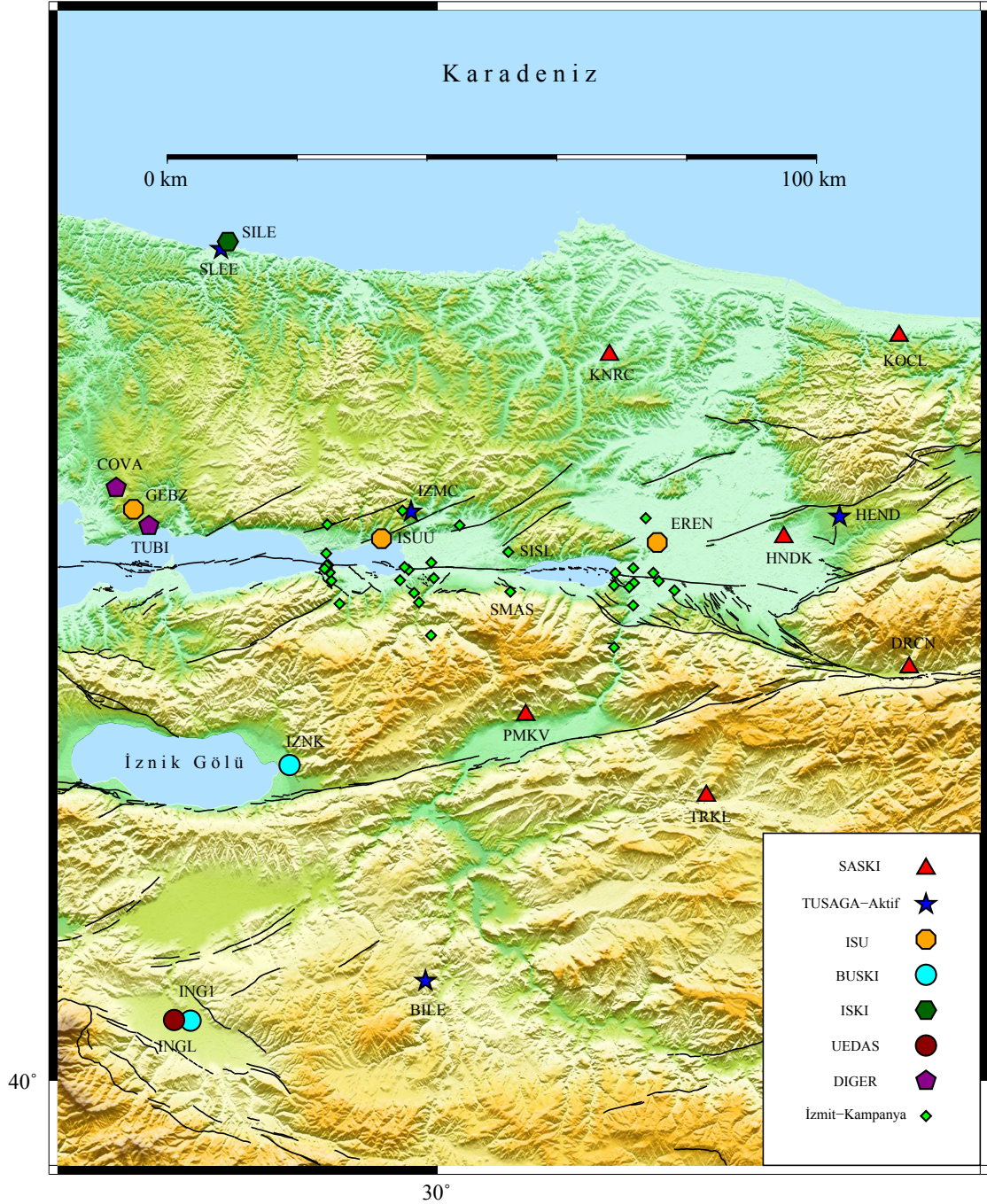
İstasyon Adı	Enlem	Boylam	T_1	T_2	Süre (yıl)	Ağ
DRCN	40.5835	30.8691	2016.422	2019.178	2.756	SASKİ
HNDK	40.7662	30.6381	2016.416	2019.493	3.077	SASKİ
KNRC	41.0212	30.3167	2016.416	2019.496	3.079	SASKİ
KOCL	41.0478	30.8504	2016.422	2019.296	2.874	SASKİ
PMKV	40.5166	30.1622	2016.424	2019.496	3.071	SASKİ
TRKL	40.4028	30.4953	2016.422	2019.496	3.074	SASKİ
ISUU	40.7641	29.8965	2017.074	2019.745	2.671	ISU
EREN	40.7587	30.4046	2017.074	2019.745	2.671	ISU
GEBZ	40.8052	29.4394	2017.074	2019.745	2.671	ISU
IZNK	40.4462	29.7271	2016.027	2019.745	3.717	BUSAGA
ING1	40.0860	29.5141	2016.027	2018.490	2.463	BUSAGA
INGL	40.0860	29.5141	2016.364	2019.712	3.348	UEDAŞ
IZMC	40.8020	29.9509	2013.003	2019.745	6.742	TUSAGA-Aktif
BILE	40.1415	29.9774	2013.003	2019.745	6.742	TUSAGA-Aktif
SLEE	41.1687	29.6007	2013.003	2019.745	6.742	TUSAGA-Aktif
TUBI	40.7867	29.4507	2013.003	2019.745	6.742	MAGNET
COVA	40.8355	29.4074	2016.244	2019.553	3.309	Çayırova Bld.

verinin toplam süresi ve verinin ait olduğu kuruluş verilmektedir. Tablo 3.2’de de görüldüğü gibi değerlendirmeye katılan en uzun veri TUSAGA-Aktif ve MAGNET verisidir. Kampanya verileriyle birlikte hareket edebilmek adına, veri değerlendirme işlemi 2013 yılından itibaren başlatılmış ve bu istasyonlara ait önceki veriler analiz dışında bırakılmıştır. Diğer veriler kuruluşları itibariyle değerlendirme işlemine katılmış ve genel olarak kampanya tarihlerinin dışında kalmıştır. En kısa süreli veri 2.5 yıl ile İSU ağına aittir.

Şekil 3.8’de ise, Tablo 3.2’de verilen sürekli istasyonların kampanya noktalarıyla beraber yerleri görülmektedir. Şekil 3.8’de mavi yıldızlar TUSAGA-Aktif, kırmızı üçgenler SASKİ, turuncu sekizgenler İSU, turkuaz daireler BUSKİ, koyu yeşil altıgenler İSKİ, kahverengi daireler UEDAŞ ve mor beşgenler COVA ve TUBI sürekli istasyonlarının, yeşil dörtgenler kampanya noktalarının yerlerini göstermektedir. Siyah ince çizgiler diri fay haritasını [31] göstermektedir. Tamamı bu bölgede yer alan SASKİ ağına çalışmaya TUSAGA-Aktif ağından daha fazla katkısı olmuştur. İSU ağına da tamamı çalışma bölgesinin içinde yer almaktadır. Ancak BUSKİ, UEDAŞ ve İSKİ ağlarının bir bölümü çalışma bölgesinin içinde yer aldığından bu ağların tamamı kullanılmamıştır. Veri aralığı çok sık olmamakla beraber, homojen dağılmış istasyonlar sayesinde, bölgeyi hem uzak alan hem de yakın alandan izleyebilmek mümkündür.

Bölgedeki istasyonların bazılarının isim benzerliği nedeniyle değerlendirme sırasında oluşacak sıkıntılara engel olmak için bu istasyonlara yeni isimler verilmiştir. Örneğin,

TUSAGA-Aktif ağına ait IZMT istasyonu burada IZMC olarak kullanılmıştır, çünkü IGS ağında 4 harfli kodu IZMT olan başka bir istasyon daha bulunmaktadır. Ayrıca UEDAŞ ve BUSAGA genellikle aynı bölgedeki istasyonları aynı kodla isimlendirmiştir. INGL istasyonu da buna dahildir. Bu nedenle BUSAGA'nın bu istasyonu ING1 olarak değiştirilmiştir.



Şekil 3.8 İzmit ve çevresindeki sürekli GPS istasyonları

3.2.3 GPS Verilerinin Değerlendirilmesi

GPS verilerinin değerlendirilmesi işlemi Bölüm 2.3'te anlatıldığı gibi GAMIT/GLOBK (v10.7) GNSS yazılımı [98] ile gerçekleştirilmiştir.

GPS ölçüleri için datum tanımlama 8 IGS istasyonuna göre yapılmıştır. Kampanyalarda, IGS istasyonları olarak çalışma bölgesi etrafında ve kampanyalar süresince kesintisiz verisi bulunan noktalar seçilmiştir (Şekil 3.9, Tablo 3.3). IGS istasyonlarındaki GPS ölçüleri Scripps Yörünge ve Sabit Ağ Merkezi (Scripps Orbit and Permanent Array Center - SOPAC) tarafından oluşturulan arşivden temin edilmiştir.



Şekil 3.9 Datum tanımında kullanılan IGS istasyonları

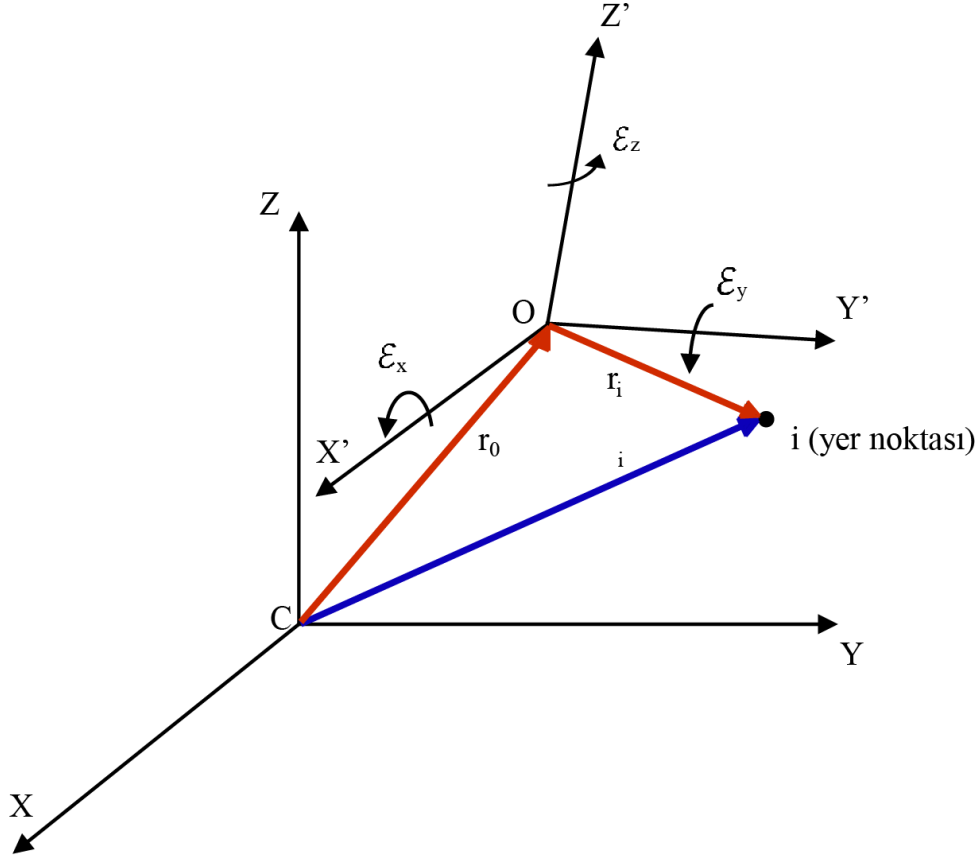
Değerlendirme işlemi sırasında datum tanımı için kullanılan IGS istasyonların verilen istasyon koordinatları ile kampanya döneminde dengeleme ile hesaplanan koordinatları arasında 3 boyutlu benzerlik dönüşümü (Bursa-Wolf Modeli) (Şekil 3.10) uygulanarak istasyonlar için uyuşum testi yapılmıştır.

Bir X', Y', Z' sisteminden X, Y, Z sistemine geçiş

$$\mathbf{X} = \mathbf{t} + (1 + k)\mathbf{R}\mathbf{X}' \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir [139, 140].

Burada, $X = [X, Y, Z]^T$ ilk sistem koordinatlarını, $X' = [X', Y', Z']^T$ ikinci sistem koordinatlarını, $t = [t_x, t_y, t_z]$ öteleme parametrelerini, k sistemler arasındaki ölçek faktörünü göstermektedir.



Şekil 3.10 3-boyutlu benzerlik dönüşüm modeli ([141]'den yararlanılmıştır.)

Eksenler arasındaki dönüklük parametreleri $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ olmak üzere $\mathbf{R}$ dönüklük matrisi

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 0 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

elde edilir [139, 140].

Bir i noktasının 3-boyutlu benzerlik dönüşüm modeli (3.1) için en küçük kareler

kestiriminin fonksiyonel modeli

$$\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z' & Y' & X' \\ 0 & 1 & 0 & Z' & 0 & -X' & Y' \\ 0 & 0 & 1 & -Y' & X' & 0 & Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X' - X \\ Y' - Y \\ Z' - Z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

olur. Burada v_X, v_Y, v_Z ilk sistem koordinatlara getirilecek düzeltmeleri göstermektedir.

IGS istasyonlarının hesaplanan koordinatları ile bilinen koordinatları (Tablo 3.3) arasında (3.1) eşitliğinde verilen 3-boyutlu benzerlik dönüşümü yapılarak sistematik bir ilişkinin olup olmadığı 5 kampanya GPS ölçüsü için araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre istasyonların kaba hataları bakımından uyumlu olup olmadıkları gösterilerek değerlendirmenin dış doğruluğu ile ilgili bilgi elde edilmiştir [112, 113].

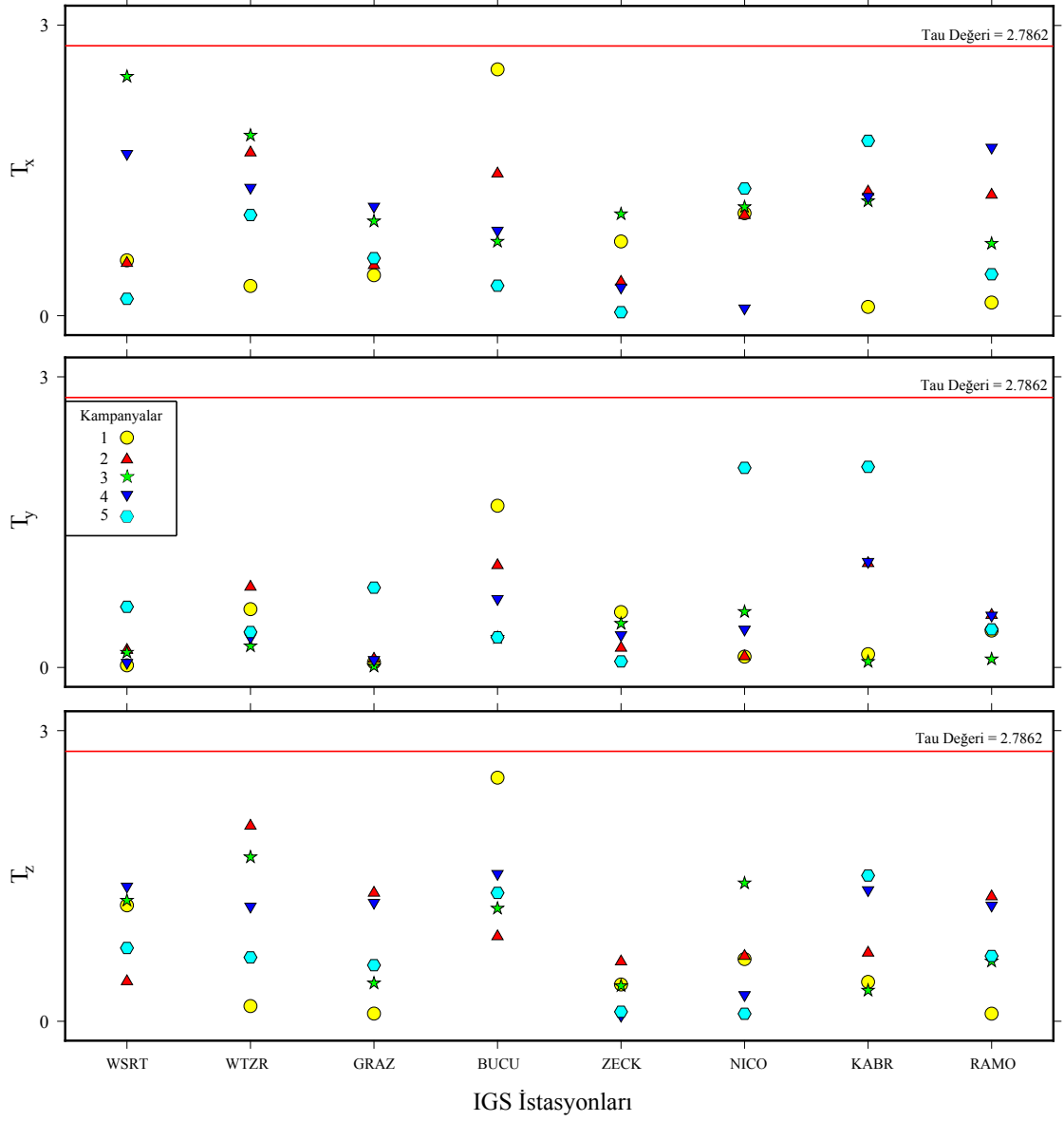
Kampanyalardan belirlenen koordinatlar ile verilen koordinatlar arasında yapılan dönüşümler sonucu elde edilen uyum nokta testi sonuçları Şekil 3.11'de verilmiştir. Burada T_x, T_y ve T_z test değerlerini (örnek olarak, $T_x = \frac{|v_{xi}|}{s_0 \sqrt{Q_{xixi}}}$, s_0 dönüşüm standart sapması) göstermektedir. Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0.05$ için Tau dağılımının güven sınır değeri $\tau_{f,1-\alpha/2} = 2.7862$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre $T_x, T_y, T_z < \tau_{f,1-\alpha/2}$ olduğundan tüm istasyonlar uyumlu olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11).

Tablo 3.3 Datum tanımında kullanılan IGS istasyonlarının Avrasya referanslı ITRF14 epok 2010.0 koordinat (m) ve hızları (mm/yıl)

İstasyon Adı	X	Y	Z	v_x	v_y	v_z
BCU	4093760.7860	2007793.8927	4445130.0254	2.24	0.42	0.52
GRAZ	4194423.7260	1162702.7787	4647245.4583	-0.57	0.44	0.32
KABR	4377282.9587	3081551.6655	3456136.9668	-1.03	-6.01	7.14
NICO	4359415.6199	2874117.1194	3650777.8877	2.02	-6.33	2.47
RAMO	4514721.7478	3133507.9089	3228024.7946	-0.98	-4.17	6.96
WSRT	3828735.7932	443305.03614	5064884.7727	-0.79	-0.39	-0.19
WTZR	4075580.4620	931853.88004	4801568.1743	-0.45	-0.06	-0.25
ZECK	3451174.5925	3060335.5073	4391955.6946	0.41	0.41	1.37

Şekil 3.11'de, X, Y ve Z bileşenleri için bulunan T_x, T_y ve T_z test büyüklükleri her bir kampanyaya göre sırasıyla verilmektedir. Her bileşendeki kırmızı çizgi karşılaştırma değerini göstermektedir ve her istasyon için elde edilen test büyüklüğü bu değer altında kalmaktadır. Bu durum, yapılan referans testleri sonucunda,

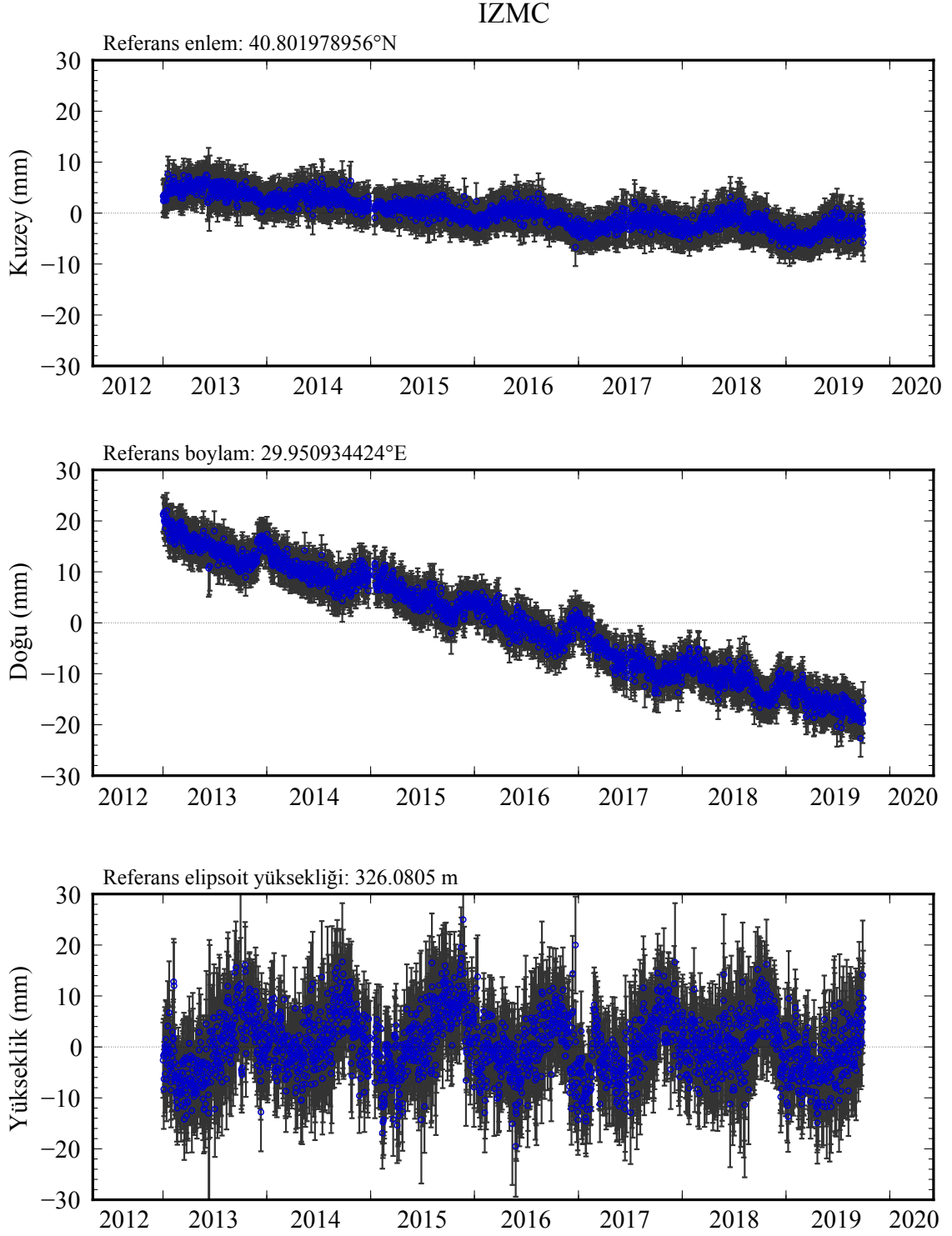
kampanya tarihlerinde IGS istasyonlarının X , Y ve Z bileşenlerinin uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.11 IGS istasyonları için kampanya tarihlerinde yapılan test sonuçları

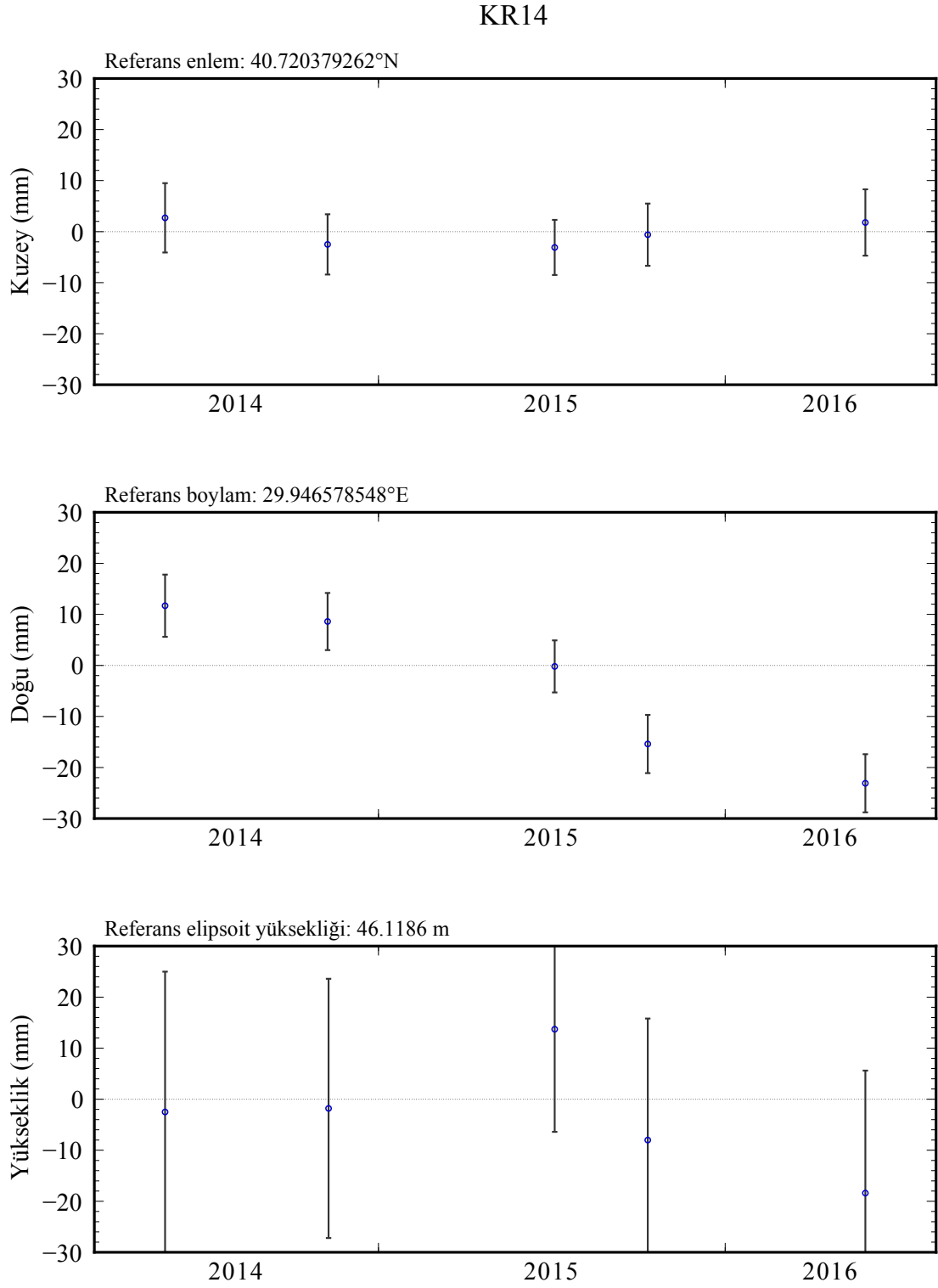
GPS verilerinin günlük analizleri sonucunda zaman serileri elde edilmektedir. Sürekli istasyonlar için ve kampanya ölçüleri için zaman serileri ayrı ayrı incelenmiştir [142]. Şekil 3.12’de TUSAGA-Aktif ağına ait bir istasyon olan IZMT’nin (ismi değiştirilerek IZMC yapılmıştır) zaman serisi görülmektedir.

Şekil 3.12’de, sırasıyla IZMT istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşenlerine ait günlük çözümlerinde kaba hatalı ölçüler temizlenmiş şekliyle verilmektedir. En uzun süreli değerlendirme aralığına sahip IZMT istasyonunun Avrasya referanslı 2013 - 2020 arasındaki zaman serisi incelendiğinde kuzey bileşende çok büyük bir hareket yokken, doğu bileşende ise batı yönlü bir yerdeğiştirme olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12 IZMC istasyonuna ait zaman serisi

Örnek olarak Şekil 3.13'te, kampanya noktalarından KR14'e ait zaman serisi verilmektedir. Bu nokta konumu itibariyle hem faya en yakın hem de 1999 İzmit depremi merkez üssüne yakın noktalardan biridir (Şekil 3.4).



Şekil 3.13 KR14 kampanya noktasına ait zaman serisi

Şekil 3.13'te KR14 kampanya noktasına ilişkin 5 kampanya verisinin günlük çözümleri

kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni olarak verilmektedir. Avrasya levhası referans alınarak yapılan bu çözümlerde, kuzey bileşeninde bir hareket görülmezken, doğu bileşeninde 2 yılda yaklaşık 18 mm’lik bir negatif yönlü (batıya doğru) yerdeğiştirme görülmektedir. KR14 noktasının yükseklik bileşeninde ise, IZMC istasyonundaki gibi (Şekil 3.12) kampanya süresi boyunca çökme ya da yükselme gibi herhangi bir etki görülmemektedir.

GPS verilerinin değerlendirilmesi sonucunda istasyonlara ait elde edilen günlük veriler incelenip zaman serisi analizi gerçekleştirilerek, her bir istasyon için hız kestirimi yapılmıştır.

3.3 Hız Kestirimi

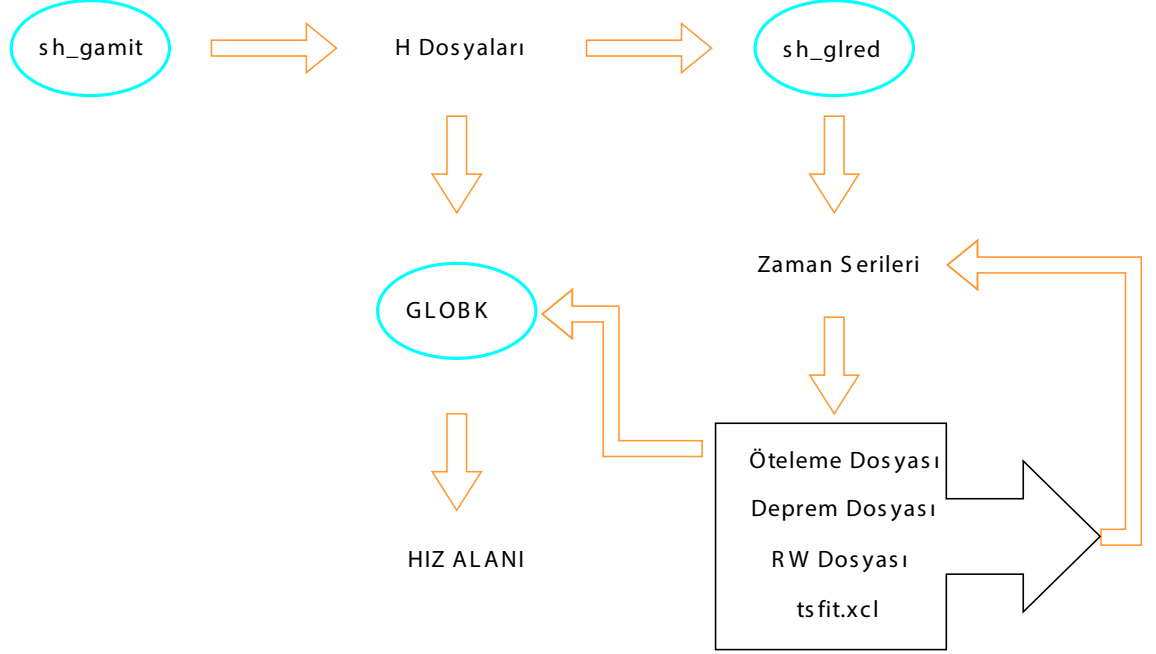
GPS gibi Global Navigasyon Uydu Sistemlerinden (GNSS) sürekli veri kaydeden gözlem istasyonlarının zaman serileri, zaman bağımlı gürültü özellikleri sergilemektedir [143]. Bütün yer bilimcilerin tekrarlanan jeodezik gözlemlerden ölçmek istedikleri en temel (ve ortak) değer, üç bileşende (yerel doğu, kuzey ve yükseklik) bir zaman serisinin doğrusal eğimi olan uzun dönem (tektonik) hızdır. Zaman bağımlı gürültünün seküler hız üzerindeki ana etkisi, hızı kestirirken, doğruluğu azaltmaktır (belirsizlikleri arttırmak). Bu nedenle yer bilimciler, zaman serisi parametrelerinden seküler hızlara ek olarak, mevsimsel döngüler, depremler veya ekipman değişimleri nedeniyle meydana gelen ötelemeler ve volkanik ve tektonik hareketlerle de ilgilenmektedir [142].

Burada kullanılan zaman serisi analizi tekniği esas olarak zamansal korelasyonlar nedeniyle tahmini parametrelerin belirsizliğindeki artışı yaklaşık olarak kestirmek için tasarlanmıştır. Zamana bağımlı gürültü nedeniyle parametre belirsizliğindeki artışın istatistiksel tahmininden elde edilen eşdeğer rasgele yürüyüş işlemi gürültüsünü (random walk process noise) bir Kalman filtresine dahil ederek genişletilen bu yöntemle, zaman serilerine ve bunların daha gerçekçi belirsizliklerine uyan tüm parametreler kestirilmektedir [142] (Şekil 3.14).

Bu tez çalışmasında, [3]’te de kullanılan, [144]’te "RealSigma" olarak adlandırılan ve GLOBK programında [100] bir seçenek olan tsfit, “Birinci Dereceden Gauss – Markov Ekstrapolasyon” algoritması (FOGMEX) uygulanmış, istasyonlar arasındaki korelasyonları içeren hız parametresinin yanında standart sapmaları da kestirilmiştir [142].

Şekil 3.15’de bölgenin hız alanı verilmektedir. Mavi oklar Tablo 3.2’de verilen sürekli istasyonların hızını, kırmızı oklar ise Şekil 3.4’da yerleri gösterilen kampanya

noktalarına ait Avrasya referanslı hız alanını %95 güven elipsleriyle göstermektedir. Turuncu kalın çizgiler 1999 İzmit depremi yüzey izini, siyah ince çizgiler diri fayları göstermektedir [31].



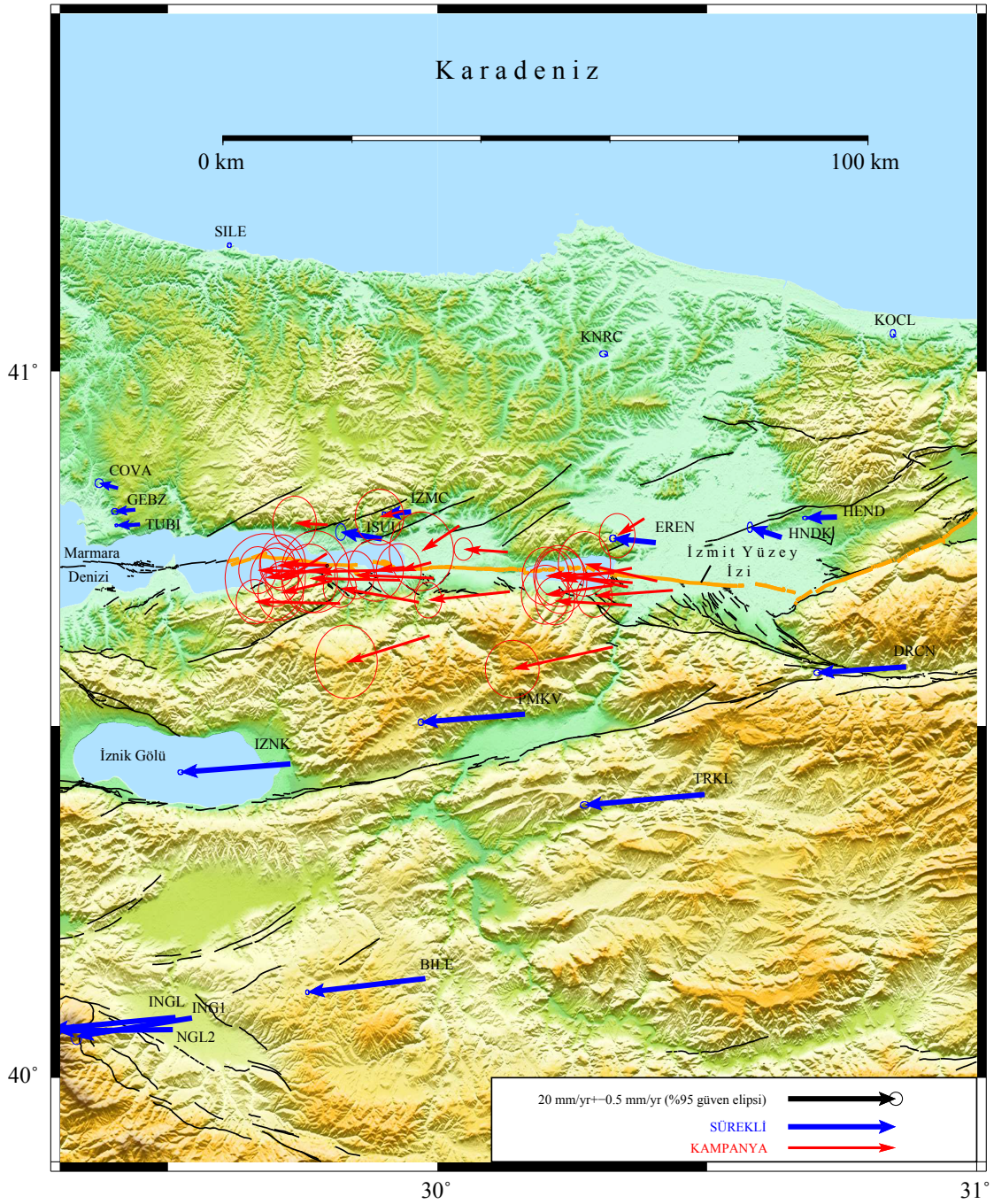
Şekil 3.14 GAMIT/GLOBK ile hız alanı elde etme örnek şeması

Hız alanı oluşturulurken sabit Avrasya plakasına göre $26.692 \pm 0.8^\circ N$ ve $31.808 \pm 0.1^\circ E$ kutup noktasında, $0.84 \pm 0.05^\circ/Myr$ hızıyla dönen Avrasya plakası göz önüne alınmıştır. [3]'teki kutup noktası tüm KAF için hesaplandığından burada kullanılmamıştır. Bulunan kutup noktasına göre hızlardaki plakanın dönmesi nedeniyle oluşan etki çıkarılmış ve elde edilen hız alanıyla modelleme yapılmıştır.

Elde edilen hız alanı sonuçlarına göre, doğu - batı bileşenli en yüksek hız değeri INGL istasyonunda -23.7 ± 0.26 mm/yıl kestirilmiştir. Bu istasyonu, TRKL, BILE, ING1, NGL2, PMKV ve IZNK istasyonları takip etmektedir. Fayın güneyinde bulunan sürekli istasyonlardan en düşük hıza DRCN istasyonu sahiptir. DRCN istasyonunun doğu - batı bileşenli hızı, -16.52 ± 0.25 mm/yıl kestirilmiştir. Kuzey - güney bileşenli en yüksek hız, -3.44 ± 0.61 mm/yıl ile ING1 istasyonunda kestirilmiştir.

Doğu - Batı bileşenli en düşük hız ise, bölgenin en kuzeyinde bulunan SILE GPS istasyonunda, 0.03 ± 0.15 mm/yıl ile kestirilmiştir. SILE istasyonunda kestirilen bu hız değeri burada anlamlı bir hızın olmadığını göstermektedir. KOCL ve KNRC istasyonlarındaki hız kesitirimleri de 1 mm/yıl'ın altındadır. Kuzey - güney bileşenli en düşük hız ise -0.2 ± 0.13 mm/yıl ile HEND istasyonunda kestirilmiştir.

Kampanya GPS noktalarında kestirilen hızlar, daha yakından Şekil 3.16'da görülmektedir.

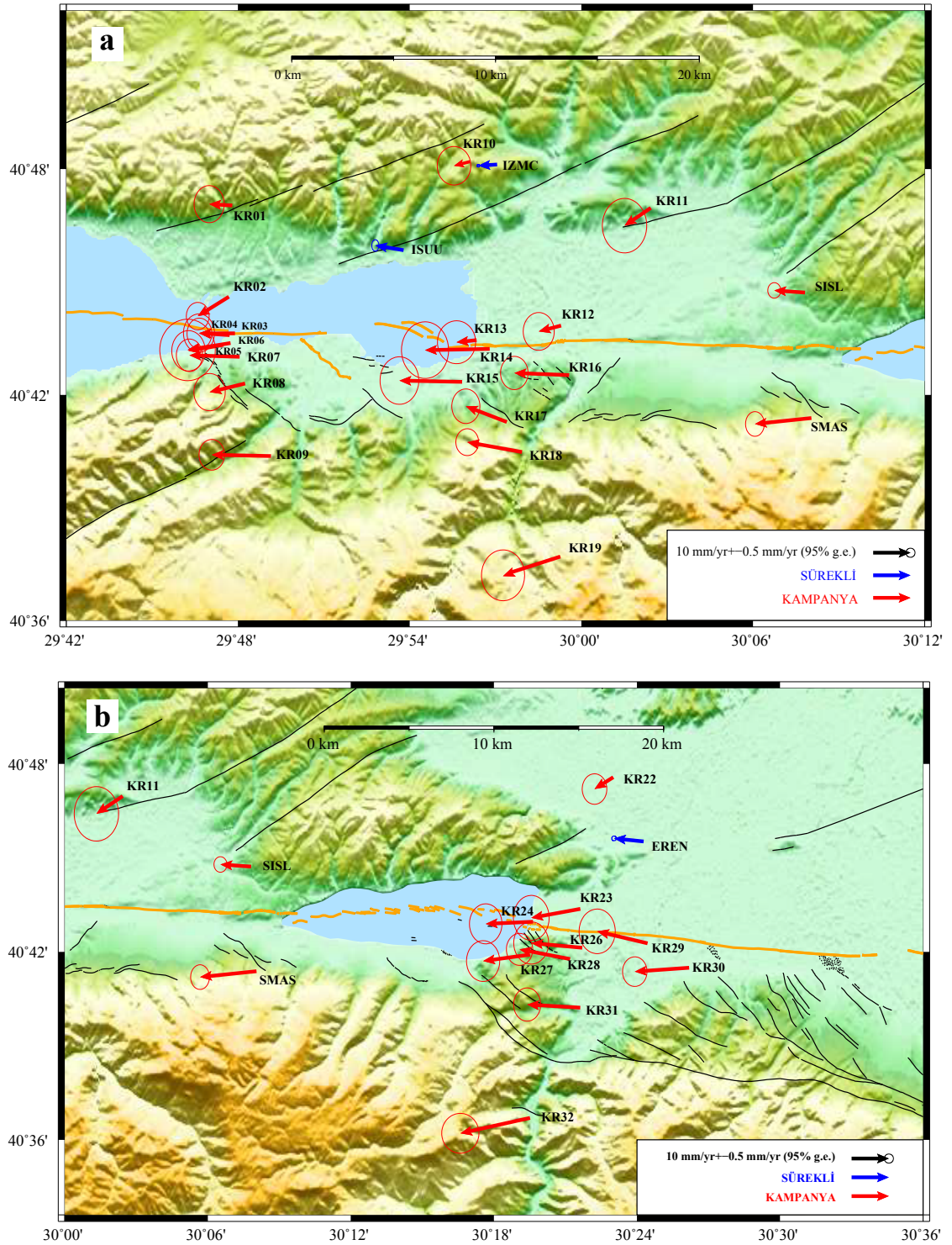


Şekil 3.15 1999 İzmit deprem bölgesi hız alanı

Kampanya noktaları göz önüne alındığında, KR32 GPS noktasında (Şekil 3.16 b) -18.67 ± 2.04 mm/yıl ve KR14 GPS noktasında (Şekil 3.16 a) -17.32 ± 2.58 mm/yıl ile en yüksek doğu - batı bileşenli hızlar kestirilmiştir. KR02 GPS noktasında (Şekil 3.16 a) -5.19 ± 1.5 mm/yıl ile en yüksek kuzey - güney bileşenli hız belirlenmiştir.

Kampanya noktalarında en düşük doğu - batı bileşenli hız -4.29 ± 1.84 mm/yıl ile

KR10 noktasında kestirilmiştir.



Şekil 3.16 1999 İzmit deprem bölgesi yakın hız alanı

KR03 GPS noktasında ise -0.03 ± 1.68 mm/yıl ile en düşük kuzey - güney bileşenli hız kestirilmiştir. Bu bölgede kestirilen hızlarla ilgili ayrıntılı bilgi Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4 1999 İzmit fay yüzey izi boyunca oluşturulan hız analizi sonuçları (mm/yıl)

Noktanın Yeri / Bileşen		Doğu	Kuzey	σ_d	σ_k
Fayın Kuzeyi	ort	-5.65	-0.67	0.87	1.04
	maks	-13.16	-5.19	1.96	1.5
	min	0.03	-0.2	0.15	0.13
Fayın Güneyi	ort	-15.56	-0.75	1.35	1.61
	maks	-23.07	-4.86	0.26	2.78
	min	-8.02	-0.05	1.17	1.68

Tablo 3.4'te, fayın kuzeyinde ve güneyindeki sürekli istasyonlar ve kampanya GPS noktalarının beraber değerlendirilerek hesaplanan ortalama, minimum ve maksimum değerleri görülmektedir. Tablo 3.4'e göre, hız bileşenlerinin doğu - batı bileşenli olduğu ve kuzey - güney bileşen değerlerinin genelde anlamsız olduğu görülmektedir. Batı yönlü en büyük hız değerlerinin fayın güneyinde olduğu ve Avrasya referanslı hız alanında, bu sonucun doğal olduğu anlaşılmaktadır.

3.4 Modelleme Çalışmaları

Bu çalışmada, iki boyutlu modelleme fay boyunca faya atılan dik profiller yardımıyla Bölüm 2.4'te anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17).

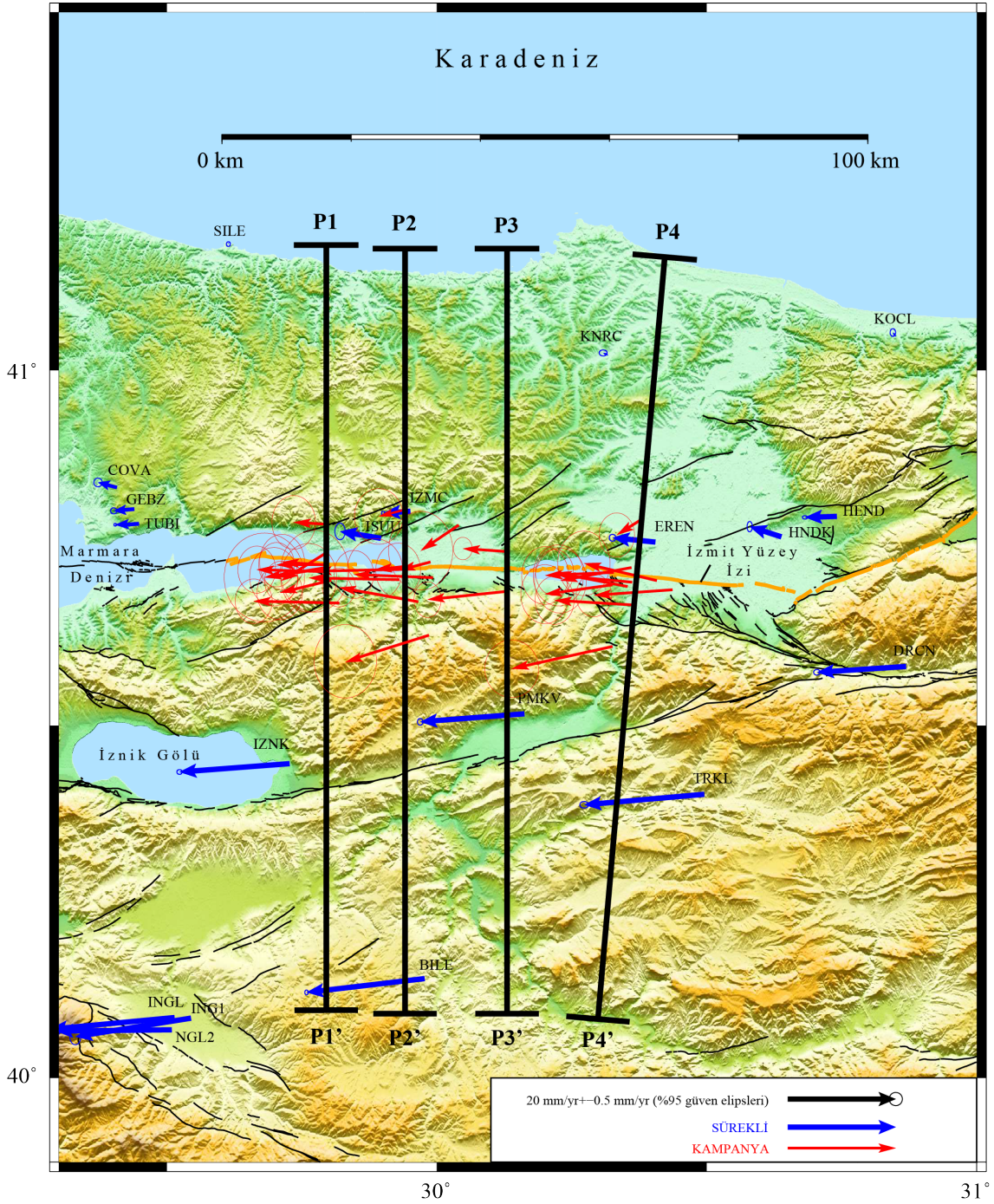
Sığ ve derin kayma oranları iki aşamada tahmin edilmiştir. İlk olarak, yakın alan verileri göz ardı edilerek uzun ve uzak alan profillerinden derin kayma (ve kilitleme derinliği) kestirilmiştir. Bundan sonra, belirlenen kestirim değerleri sabitlenerek sığ oranların kestirimi yapılmıştır. Bu yaklaşım, klasik yaklaşımdaki, sığ ve derin kayma oranları (ve derinlikleri) arasındaki ilişkiyi ortadan kaldırmaktadır [35, 36].

3.4.1 Uzak Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Kayma Hızının Belirlenmesi

Uzak alan hızın ve kilitleme derinliğinin kestirimi için kullanılan, Şekil 3.17'de görülen faya dik, uzun profiller fayın 70-75 km güneyine ve 50 km kuzeyine kadar uzanmaktadır. Şekil 3.17'deki siyah kalın 4 çizgi (soldan sağa doğru P1-P4) profillerin yerini göstermektedir. Mavi ve kırmızı oklar sırasıyla sürekli ve kampanya GPS hızlarını ve %95 olasılıklı güven elipslerini, turuncu kalın çizgiler 1999 İzmit depremi yüzey izini, siyah ince çizgiler diri fayları [31] göstermektedir.

Profil boyunca hesaplanan fay paralel hızlar (2.1) modeli ve uzak alan GPS hızlarına ilişkin standart sapmalar göz önüne alınarak oluşturulan stokastik model kullanılarak, Bölüm 2.4'te ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi fayın yüzeyden sismojenik zonun sonuna kadar kilitli olduğu ve sismojenik zonun altında serbestçe kaydığı düşünülen [72],

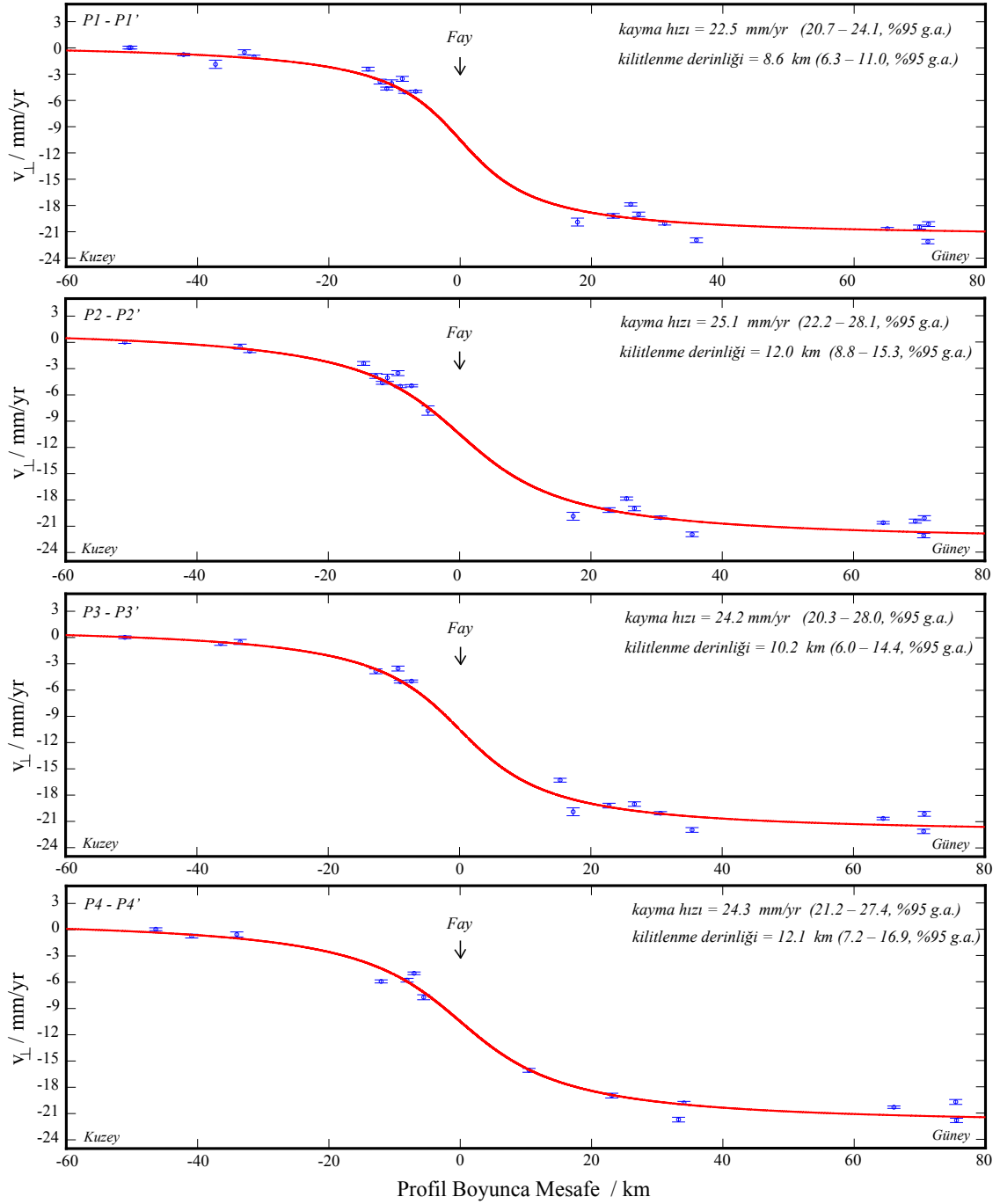
kilitlenme derinliği ve uzak alan hızları her bir profil için ayrı ayrı kestirilmiş ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan profiller

Şekil 3.18’de mavi noktalar GPS istasyonlarına ait fay paralel hız bileşenlerini ve standart sapmalarını göstermektedir. Sıfır noktasından itibaren grafiğin sol tarafı fayın kuzeyini sağ tarafı ise fayın güneyini göstermektedir. Kırmızı çizgi sonsuz uzunlukta, dikey sağ yanal doğrultu atımlı bir fay için kayma hızı ve derinliği kestirilen, veriye en uygun modeli yansıtmaktadır.

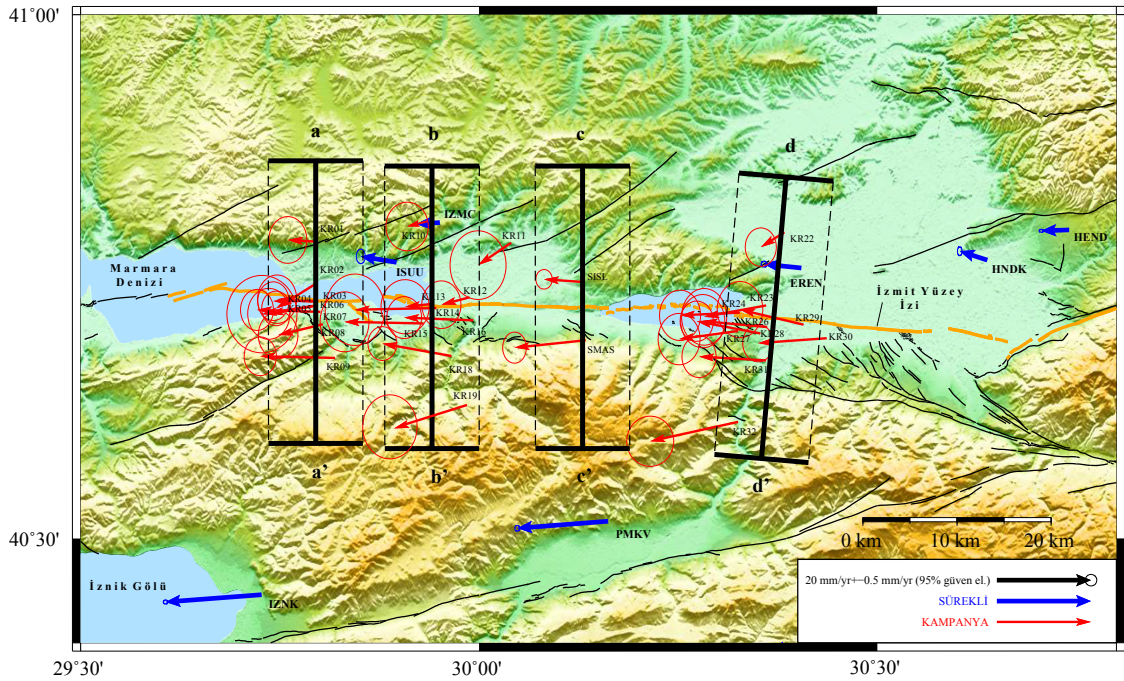
Şekil 3.18’de görüldüğü gibi, 1999 İzmit fay izi boyunca jeodezik olarak belirlenen kayma hızı 22.5 ile 25.1 mm/yıl arasında değişirken ortalama kayma hızı 24 mm/yıl ve standart sapması 1.4 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. 8,6 ila 12,1 km arasında değişen kilitleme derinliği ise ortalama 10,7 km ve standart sapması 1.8 km olarak kestirilmiştir. Kayma hızları ve kilitleme derinliğindeki belirsizlikler, yakındaki jeodezik gözlemlerin yoğunluğuna ve kalitesine bağlı olarak sırasıyla, 0,9 - 1,9 mm/yıl ve 1,2 - 2,4 km’dir.



Şekil 3.18 1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan profillerin modellenmesi ve kestirilen parametreler

3.4.2 Yakın Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Krip Hızının Belirlenmesi

Yakın alan fay paralel hızlar yardımıyla krip parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan, Şekil 3.19’da görülen faya dik kısa profiller, 30 km uzunluğunda 10 km genişliğinde ve uzun profillerle (Şekil 3.17) merkezleri çakışık olarak belirlenmiştir. Şekil 3.19’te Gölcük’ten Sapanca’ya doğru oluşturulan siyah kalın 4 çizgi profillerin yerini göstermektedir. Mavi ve kırmızı oklar sırayla sürekli ve kampanya GPS hızlarını ve %95 güven elipslerini, turuncu kalın çizgiler 1999 İzmit depremi yüzey izini, siyah ince çizgiler ise diri fayları [31] göstermektedir.

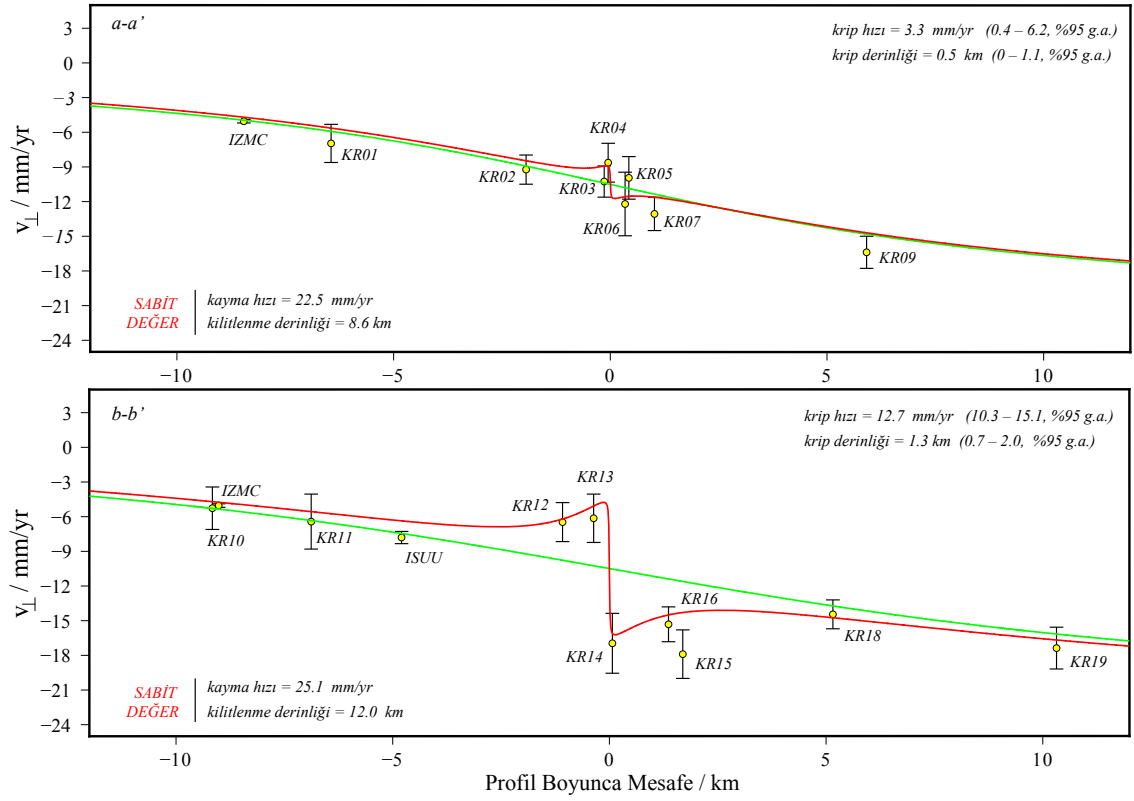


Şekil 3.19 1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan yakın alan profiller

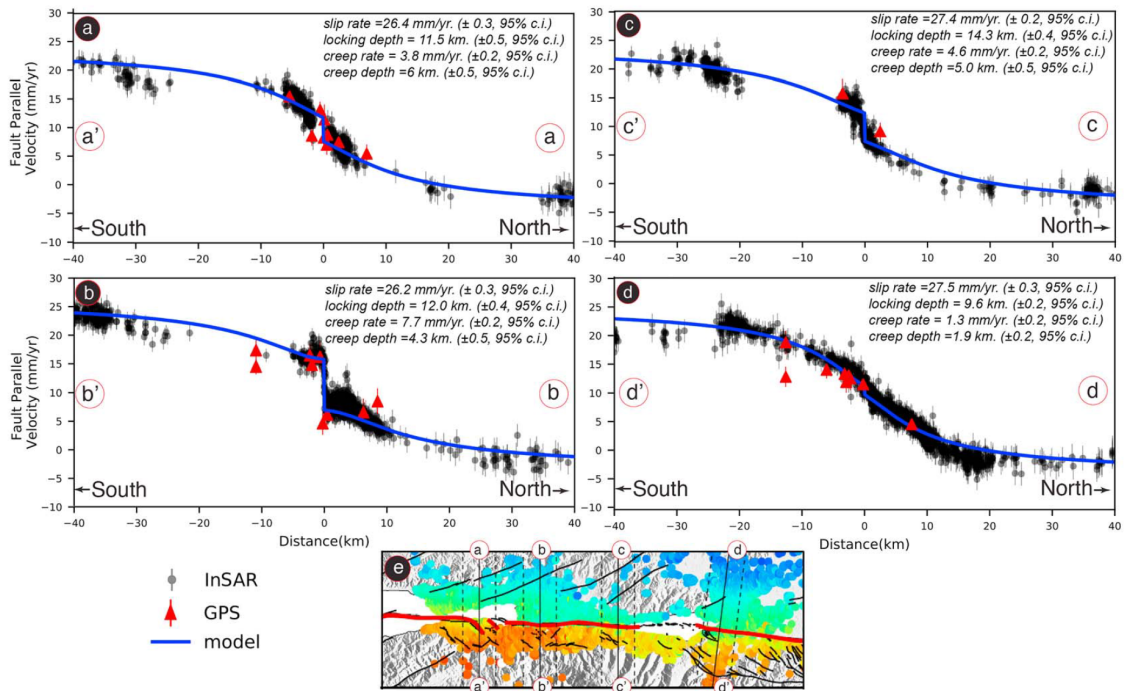
Uzun dalgaboyu kullanılarak bir önceki adımda bulunan kilitleme derinliği ve sismojenik zonun altındaki sürekli kayma hızı Formül 2.14’te yerine yerleştirilerek krip hızı ve derinliği kestirilmiştir (Şekil 3.20). Krip parametreleri belirlenirken stokastik model, yakın alandaki GPS hızlarına ilişkin standart sapmalar göz önüne alınarak oluşturulmuştur.

Şekil 3.19’da yerleri gösterilen a-a’ ve b-b’ profillerinin modelleri Şekil 3.20’de verilmektedir. Şekil 3.20’de sarı noktalar GPS istasyonlarına ait fay paralel hız bileşenini ve hata barları ise bu noktalara ait standart sapmaları vermektedir. Sıfır noktasından itibaren grafiğin sol tarafı fayın kuzeyini sağ tarafı ise fayın güneyini göstermektedir. Kırmızı çizgi krip hızı ve krip derinliğinin kestirildiği modeli, yeşil çizgi ise uzun dalgaboyuna ait modeli yansıtmaktadır.

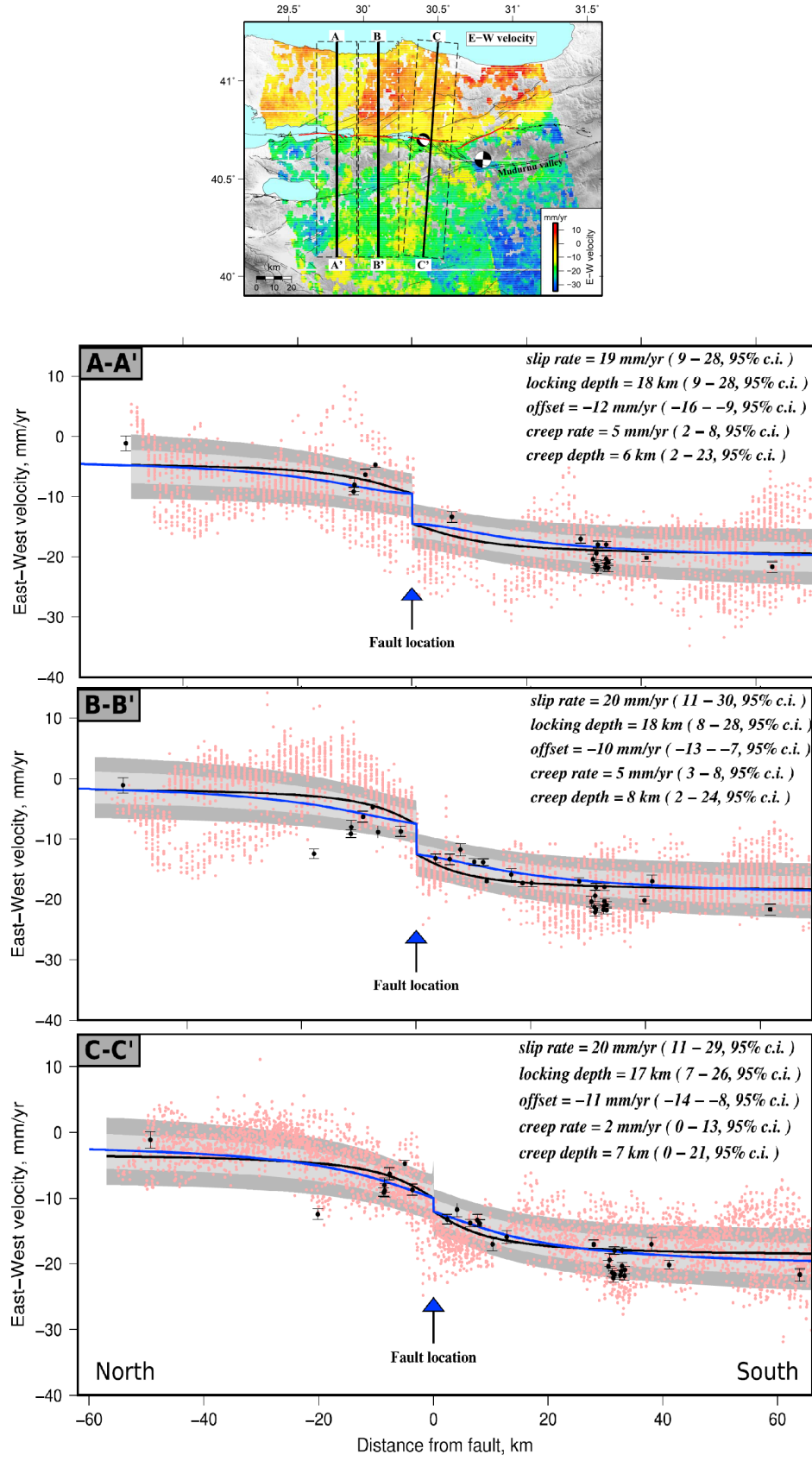
Gölcük civarını modellemek için kullanılan a-a’ profiline dik hız bileşenleriyle



Şekil 3.20 1999 İzmit depremi fay izi boyunca faya dik atılan yakın alan profillerin modellenmesi ve kestirilen parametreler



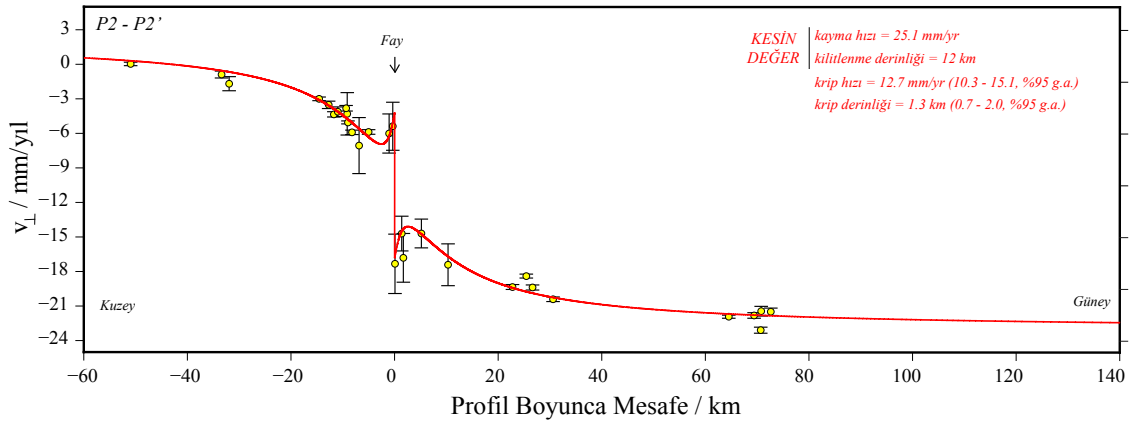
Şekil 3.21 2011-2017 yılları arasında InSAR verileriyle yapılan profil modellemesi [36]



Şekil 3.22 2002-2010 yılları arasında InSAR verileriyle yapılan profil modellemesi [35]

kestirilen krip hızı 3.3 mm/yıl (0.4 - 6.2 mm/yıl, %95 g.a.) ve krip derinliği 0.5 km (0-1.1 km, %95 g.a.) dir. Şekil 3.21 a'da 2011 - 2017 yılları arasında InSAR verileriyle aynı bölge için yapılan model sonucunda, krip hızı 3.8 mm/yıl (± 0.2 , %95 g.a.) ve krip derinliği 6 km (± 0.5 , %95 g.a.) bulunmuştur [36].

Bu çalışmada, fay boyunca en büyük krip hızını, 1999 İzmit odak noktasına en yakın Yuvacık yakınlarındaki profil b-b' vermektedir. Burada yıllık 12.7 mm (10.3 - 15.1 mm/yıl, %95 güven aralığı) 'lik asismik kayma mevcuttur. Buradaki krip derinliği ise, 1.3 km (0.7 - 2.0 km, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir. Şekil 3.21 b'de görüldüğü gibi [36] da çalışmada en yüksek krip hızını bu bölgede kestirilmiştir. [36]'a göre burada krip hızı 7.7 mm/yıl (± 0.2 , %95 g.a.) ve krip derinliği 4.3 km (± 0.5 , %95 g.a.) bulunmuştur. Şekil 3.22'de ise, [35]'in çalışmasından bir görsel verilmektedir. Bu çalışmada ise, aynı bölge için (Şekil 3.22 A-A') 2002 - 2010 yılları arasında belirlenen krip hızı 5 mm/yıl (2-8, %95 g.a.) ve krip derinliği 6 km (2-23, %95 g.a.) kestirilmiştir.

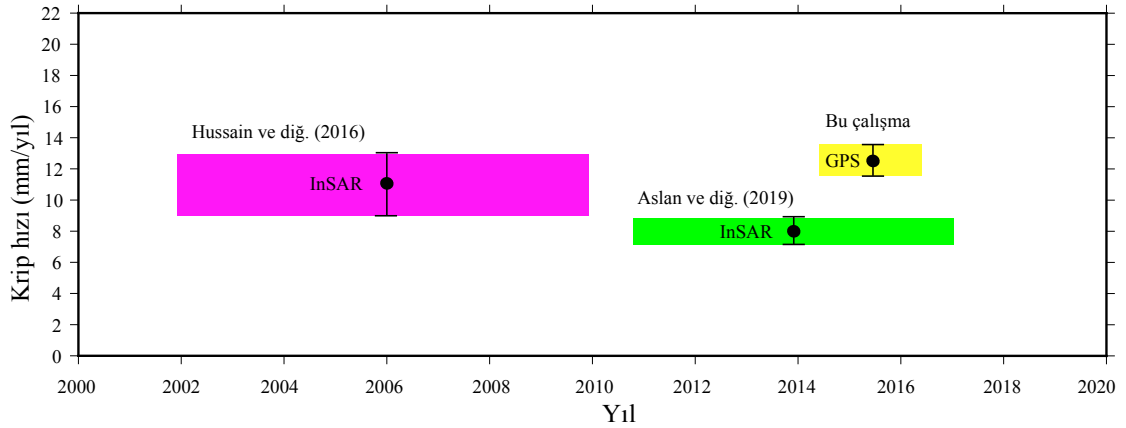


Şekil 3.23 P2-P2' profilinin modellenmesi

Şekil3.23'de, P2-P2' profili için uzun dalgaboylu ve kısa dalgaboylu sinyalleri literatürdeki diğer yayınlar gibi beraber göstermektedir. Şekil3.23'de sarı noktalar GPS istasyonlarına ait fay paralel hız bileşenini ve hata barları ise bu noktalara ait standart sapmaları vermektedir. Sıfır noktasından itibaren grafiğin sol tarafı fayın kuzeyini sağ tarafı ise fayın güneyini göstermektedir. Kırmızı çizgi, fay paralel GPS hız bileşenlerine en uygun elastik yerdeğiştirme modelini yansıtmaktadır. Şekil3.23'de verilen krip hızı parametresi literatürdeki diğer çalışmalarla bir grafik halinde de gösterilmiştir (Şekil 3.24).

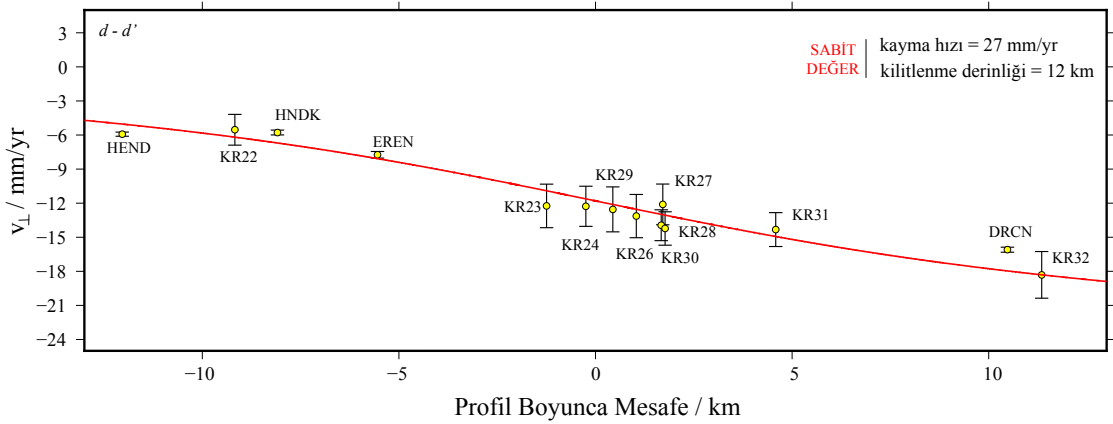
Şekil 3.24'te İzmit şehrine yakın alanda 2002 - 2010 yılları arasında [35] tarafından InSAR verilerinin modellenmesiyle kestirilen krip hızı mor renkte, 2011 - 2017 yılları arasında [36] tarafından yine InSAR verilerinin modellenmesiyle kestirilen krip hızı yeşil renkte gösterilmiştir. Bu çalışmada kestirilen krip hızı ise, sarı renkte gösterilmiştir. Dikdörtgenlerin eni kestirilen parametrelerin 1 sigma standart

sapmalarını vermektedir.



Şekil 3.24 Literatürdeki krip hızlarıyla karşılaştırma

İzmit şehri yakınlarındaki profilde en yüksek bulunan asismik hareketin batıya doğru azaldığı görülmektedir. Bu durumun doğuya doğru da aynı olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.21 d’de görüldüğü gibi [36] da çalışmasında 1.3 mm/yıl (± 0.2 , %95 g.a.) biçiminde en düşük hızı burada belirlemiştir. Şekil 3.22 C-C’de ise [35] bu profil için 2 mm/yıl (0-13, %95 g.a.) krip hızı kestirilmiştir.

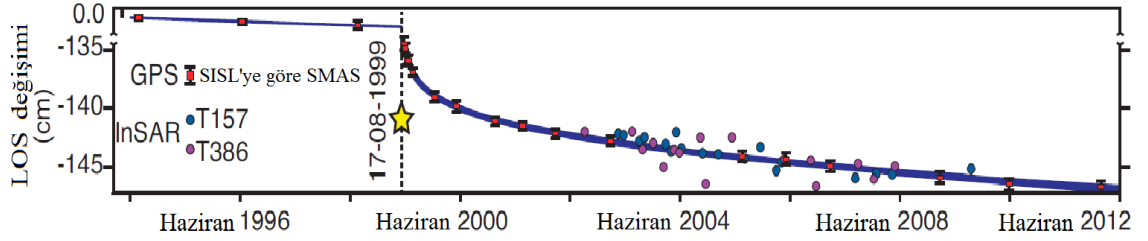


Şekil 3.25 d-d’ profilinin modellenmesi

Bu çalışmada ise, d-d’ profili incelendiğinde Sapanca Gölünün doğusunda GPS verilerine dayalı kestirilen hızlarla elde edilen parametrelere bakıldığında asismik kaymaya rastlanmamıştır (Şekil 3.25). Şekil 3.25’de sarı noktalar GPS istasyonlarına ait fay paralel hız bileşenini ve hata barları ise bu noktalara ait standart sapmaları vermektedir. Sıfır noktasından itibaren grafiğin sol tarafı fayın kuzeyini sağ tarafı ise fayın güneyini göstermektedir. Kırmızı çizgi, fay paralel GPS hız bileşenlerine en uygun elastik yerdeğiştirme modelini yansıtmaktadır. Şekil 3.25’de faya yakın noktalardaki fay paralel hız bileşenlerinin Şekil 3.20’de olduğu gibi atım vermediği, yumuşak bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Bu da fay yüzeyinde bir kayma

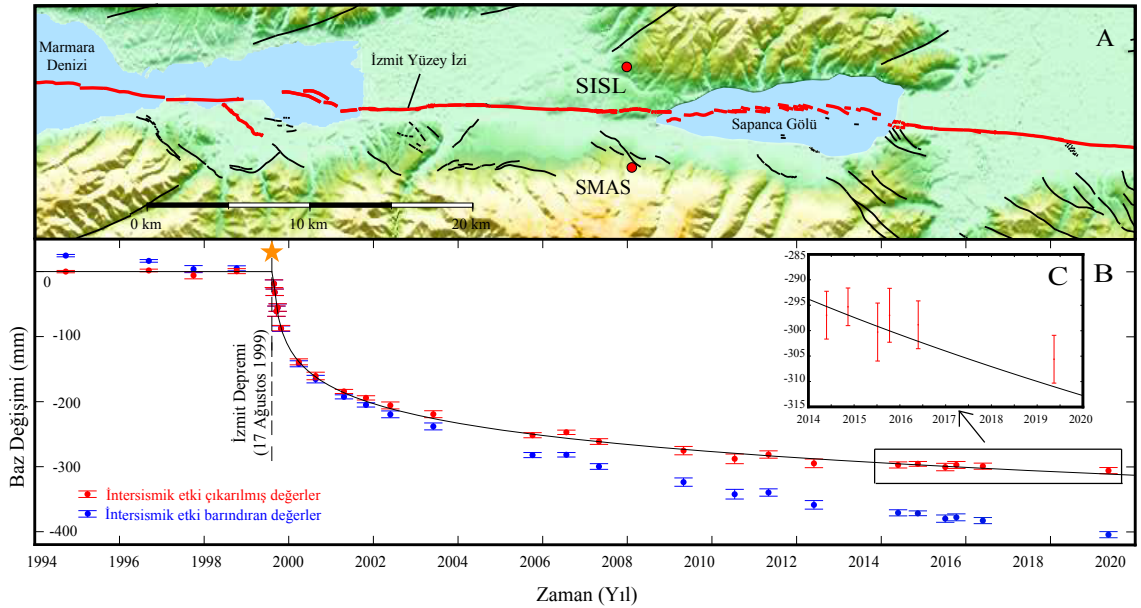
olmadığını göstermektedir. Fay burada sismojenik zon boyunca kilitli olup, sadece bu bölgenin altında (12 km'nin altında) yıllık 27 mm'lik bir hızla kaymaktadır.

c-c' profili ise, 1999 İzmit depreminden önce ölçülmeye başlanmış ve depremden sonra da ölçülmeye devam etmiş yaklaşık 25 yıllık GPS kampanya geçmişi bulunan bir bazın profilidir. [34] çalışmasında InSAR ve GPS verileriyle bazın modellemesini gerçekleştirmiş ve deprem sonrası etkinin depremden hemen sonra başlayarak logaritmik bir şekilde azalmayla devam ettiğini kaydetmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 SISL-SMAS bazına ait geçmiş modelleme çalışmaları [34]

Bu çalışmada, bu veriler, 2014 - 2016 yılları arasında ölçülen kampanya verileriyle beraber tekrar değerlendirilmiş ve deprem sonrası etkinin güncel durumunu araştırmak için 2019 yılında son bir kampanya düzenlenmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 c-c' profilinin modellenmesi

Daha önce [34]'de verilen SISL-SMAS baz değişimi, krip hareketinin zamansal değişimlerini incelemek amacıyla ölçülmeye devam edilmiştir. Bu nedenle, bu tezin konusu olan 1999 İzmit deprem fay yüzey izi etrafında 32 kampanya noktasında 2014-2016 yılları arasında ölçmeler düzenlenmiş ve son olarak sadece bu iki noktada 2019 yılının Mayıs ayında bir kampanya gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.27 A'da SISL ve

SMAS noktalarının yerini gösterilmektedir. Burada, kırmızı kalın çizgiler 1999 İzmit depremi yüzey izini, siyah ince çizgiler diri fayları [31] göstermektedir. Şekil 3.27 B, 1994 yılından 2020'ye kadar yapılan kampanya ölçmelerine göre hesaplanan iki nokta arasındaki baz değişimini göstermektedir. Mavi noktalar intersismik etki barındıran baz değişimini gösterirken, kırmızı noktalar intersismik etki giderilmiş baz değişim değerlerini vermektedir. İntersismik etkinin giderilmesi için deprem öncesi hızlardan yararlanılmıştır [2]. Deprem öncesi hızın zamanla çarpılmasıyla elde edilen değerler baz değişimlerinden çıkarılarak, intersismik etkinin giderilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.27 B'de turuncu yıldız deprem anını göstermektedir.

Fay zonuna yaklaşık 3 - 4 km mesafede yer alan SISL ve SMAS GPS noktalarına ilişkin 25 yıllık baz değişimini gösteren Şekil 3.27 B, bölgedeki deformasyonun 1999 depreminden hemen sonra hızlanarak başladığını ve hızlanma miktarının postsismik davranışlardan beklendiği gibi zamanla azaldığını göstermektedir. Şekil 3.27 B'de görülen zamana bağlı bu davranış, 1999 İzmit depremine ait logaritmik rahatlama fonksiyonunu temel alan postsismik model ile analiz edilmiştir [27]:

$$Model = a + bt + c \log(1 + dt) \quad (3.4)$$

Burada, t zamanı tanımlamaktadır. a rahatlama genliği, kabuğun ve üst mantonun reolojisine ve gözlem alanının uzaysal boyutunun fiziksel özelliklerine bağlı olup, ortamdaki gerilme boşalımının fonksiyonu ve deprem sonrası ortamın etkisi olarak tanımlanır. b ortamın doğrusal hızını göstermekte, c ise rahatlama zamanını ölçeklemektedir. Rahatlama zamanı ise, yüksek ivmeli deformasyonların azalarak sistemin dengeye gelmesi beklenen zamanı göstermektedir. Levenberg-Marquardt ters modelleme yaklaşımıyla a , b , c ve d katsayıları sırasıyla $-21.81 \pm 4.1 \text{ mm}$, $-0.35 \pm 0.1 \text{ mm/yıl}$, $-48.39 \pm 2.9 \text{ mm}$, ve $17.28 \pm 4.2 \text{ mm/yıl}$ olarak kestirilmiştir. Zaman içindeki bu azalış, sistemin fayın kilitlenmeye başladığını, postsismik davranışa neden olan kaynak zonun gittikçe sığlaştığını göstermektedir. Krip etme olasılığı göz önüne alınmaz ise, Şekil 3.27 B'de, model değişiminde görüldüğü gibi halen 3 mm/yıl olan krip hızının bu modele göre, yaklaşık 10 yıl içinde tamamiyle sıfırlanacağı ve bu segmentin tam kilitli hale gelebileceğini kestirmek mümkündür.

Şekil 3.27 C, GPS ölçülerinde salınımlar olduğunu göstermektedir. Bu salınımlar [36]'ın vurguladığı gibi krip hızında farklılıklar olduğuna ve anlık hızlanmalar olabileceğine işaret etmektedir.

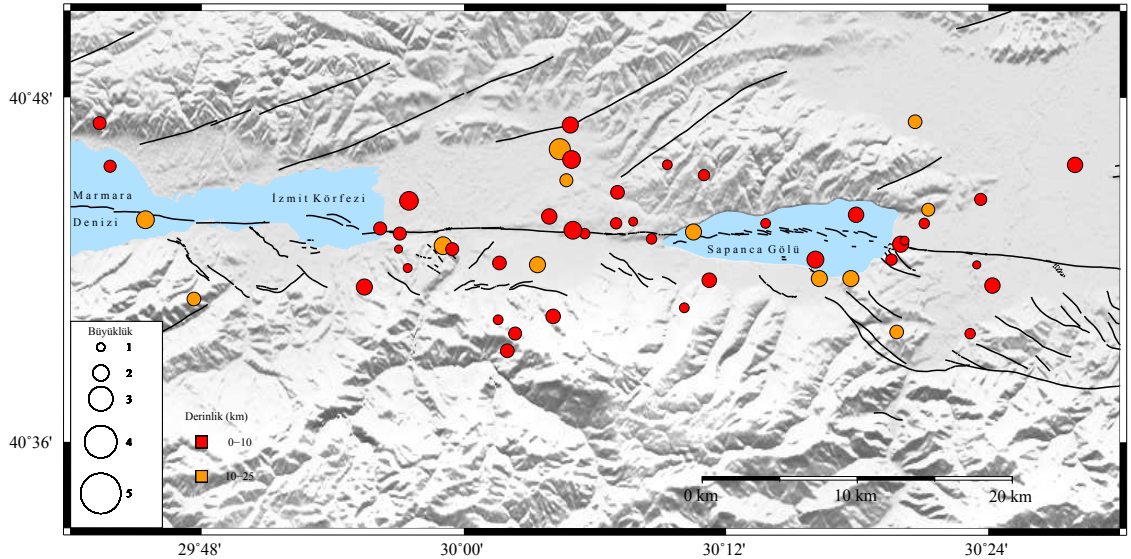
Şekil 3.29 A'da b-b' profili boyunca 5 GPS kampanyasından elde edilen kümülatif doğu bileşeni verilmektedir. Noktaların ilk değerleri faya olan mesafeleri alınarak görsel

olarak anlaşılır hale getirilmiştir. Şekil 3.29 B’de kampanya tarihlerindeki kripmetre verisinden elde edilen sağ yanal yerdeğiştirmeler verilmektedir. Kripmetre verileri [36]’dan alınmıştır. Şekil 3.29 C’de ise, yine aynı tarihlerde meydana gelen depremlerin yarattığı sismik dalgaların ortaya çıkardığı toplam enerji gösterilmektedir. Ortaya çıkan toplam enerji E

$$\log E = 1.44M + 5.24 \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir ve birimi joule dır [145]. Burada M depremin büyüklüğünü göstermektedir. Şekil 3.29 C’de gösterilen enerjiyi ortaya çıkaran sismik dalgaları üreten depremler Şekil 3.28’de verilmektedir (2014 - 2016 yılları arasında meydana gelen bu depremlere ait veriler [146]’den elde edilmiştir). Şekil 3.29 D ise b-b’ profilinin haritasıdır. Kırmızı kalın çizgi 1999 İzmit depremi yüzey izini, siyah çizgiler ise diri fayları [31] göstermektedir.

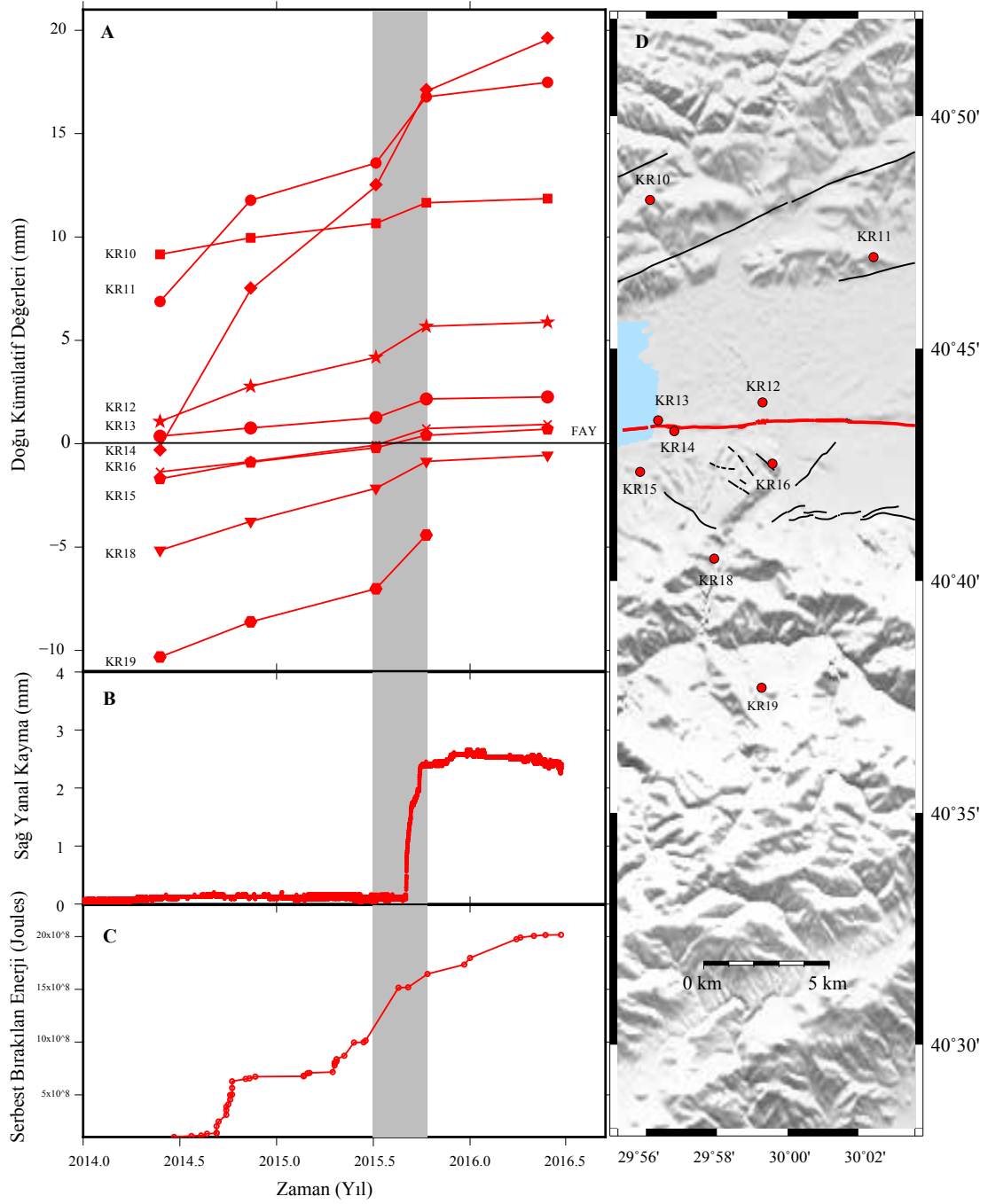
Kümülatif değerler kripmetre ve sismoloji veriyle beraber değerlendirildiği zaman, 2015 yılının ikinci yarısında bir kripmetre olayıyla karşılaşmaktadır. Kampanya tarihlerinde bölgede araştırılan ISC kataloğunda büyüklüğü maksimum olan deprem 19 Haziran 2015 ($M = 2.6$) tarihinde meydana gelmiştir. 3. ve 4. GPS kampanyalarının arasına denk gelen olayın bu asismik hareketi tetiklemiş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.28 1999 İzmit fay yüzey izi boyunca kampanya zaman aralığındaki sismik aktivite

Şekil 3.29 A’ya genel olarak bakıldığında maksimum yerdeğiştirmenin faya en yakın nokta olan KR14’te meydana geldiği görülmektedir. KR14 noktası İzmit depreminin

odak noktasına en yakın GPS noktasıdır ve maksimum asismik hareket bu noktada görülmektedir.



Şekil 3.29 Kampanya, kripmetre ve sismoloji verilerinin beraber değerlendirilmesi

DAF'IN HAZAR GÖLÜ - PALU SEGMENTİ ÜZERİNDEKİ KRİP HAREKETİNİN BELİRLENMESİ

4.1 DAF

4.1.1 DAF'ın Tektoniği

DAF, kuzeybatıda Karlıova üçlü ekleminden başlayıp, KB-GD doğrultusunda ilerleyerek, güneybatıda Kahramanmaraş'a Ölüdeniz Fayı ile birleşen (Şekil 4.1), Anadolu plakasıyla Arap palakası arasındaki hareketi karşılayan, yaklaşık 600 km uzunluğunda, aktif ve sol yanal atımlı bir fay zonudur [37, 42, 44, 147–149]. Dünyanın en önemli kıta içi transform faylarından biri olan DAF, KAF'tan sonra Türkiye'nin de ikinci büyük kıta içi dönüşüm fayıdır [150]. DAF, birçok araştırmacı tarafından farklı segmentlere ayrılmıştır [10, 37, 151]. Şekil 4.1'te fay boyunca segmentler farklı renklerle gösterilmiştir.

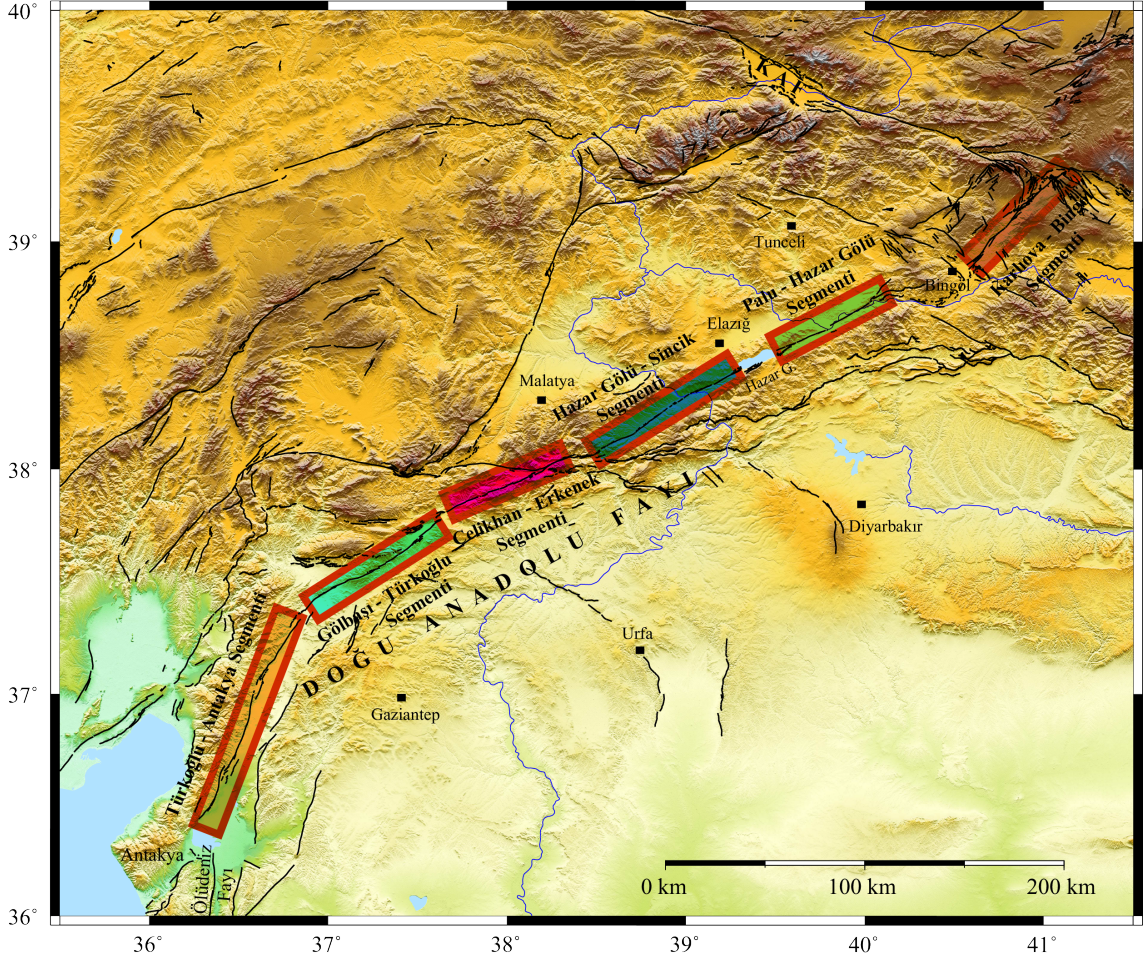
Şekil 4.1'te görüldüğü gibi, genel olarak fay kuzeydoğudan güneybatıya doğru;

- Karlıova – Bingöl,
- Palu – Hazar Gölü,
- Hazar Gölü – Sincik,
- Çelikhan – Erkenek,
- Gölbaşı – Türkoğlu,
- Türkoğlu – Antakya

şeklinde 6 segmente ayrılmıştır [151].

Bu tez çalışmasının ikinci çalışma bölgesi ise, Şekil 4.1'de Türkiye'nin doğusundaki tektonik yapının en önemli elemanı DAF üzerindeki kuzeybatıdan güneydoğuya doğru

ikinci segment olan Palu - Hazar Gölü segmenti ve Hazar Gölü'nün güneydoğusunda kalan Sivrice bölgesidir.



Şekil 4.1 DAF segmentleri ([151]'dan yararlanılarak çizilmiştir)

DAF'ın Yaşı ve Yerdeğiştirmesi: [148], erken miyosende, ne KAF'ın ne de DAF'ın varolmadığını belirtmiştir. Birçok araştırmacı tarafından geç miyosen-erken pliyosen yaşında olduğu düşünülen [42, 147, 148] DAF boyunca toplam yerdeğiştirme yine birçok araştırmacıya göre 22-27 km civarındadır [10, 42, 147]. [152], Karlıova-Türkoğlu arasındaki toplam kayma miktarının metrelerden 33 km'ye kadar değiştiğini belirtmiştir.

4.1.2 DAF'ın Depremselliği

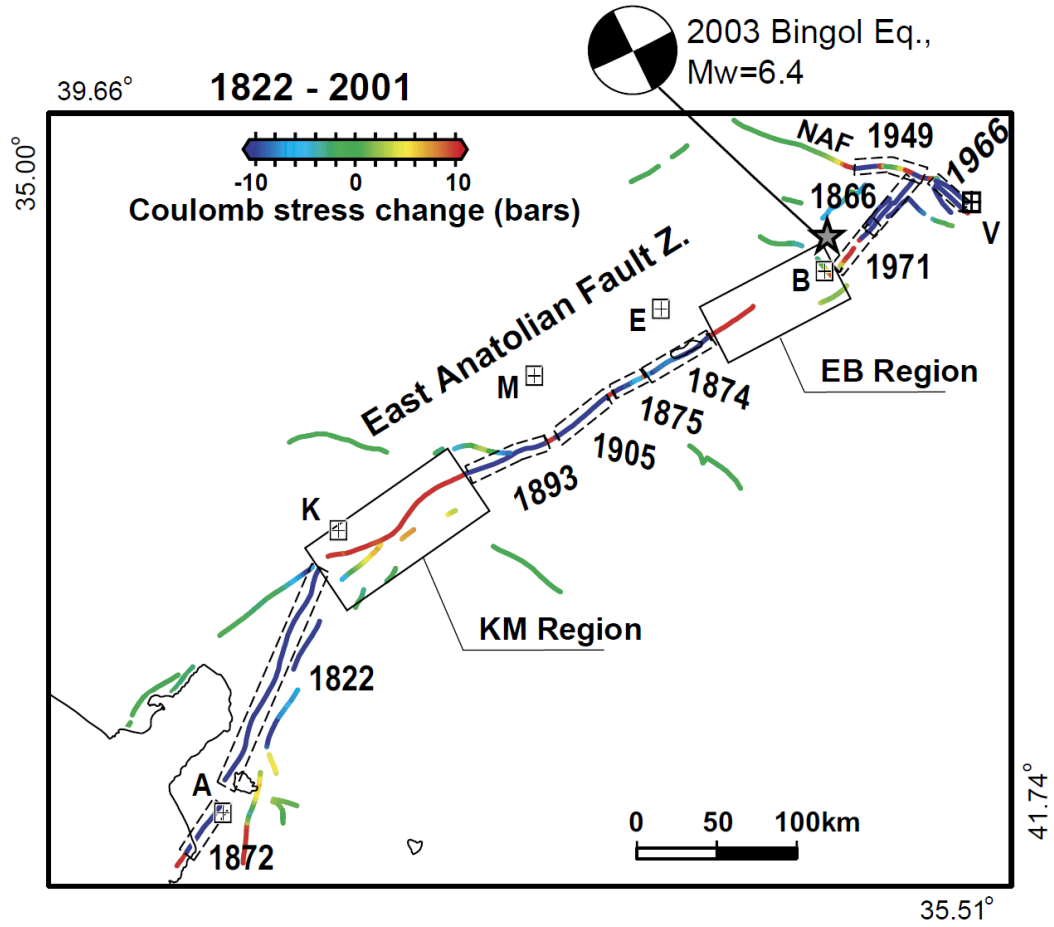
DAF'da, 20. yüzyılda KAF'ta olduğu gibi $M \geq 7$ depremlerin oluşmadığı, fakat bu yüzyılda $M \geq 6$ birçok depremler görülmüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi fay, 20. yüzyılda suskun olmasına rağmen, tarihsel dönemlere bakıldığında DAF üzerinde büyük depremler görülmektedir [154, 155]. [147], yapılan çalışmada, fayın Palu-Sincik arasındaki bölgeyi gezerek, fay izlerinin

Tablo 4.1 DAF'ın son yüzyılda ürettiği $M \geq 6$ depremler ([153]'den yararlanarak oluşturulmuştur)

Depremin Tarihi	Depremin Yeri	Depremin Büyüklüğü
04.12.1905	Pütürge (Malatya)	6.8
20.03.1945	Ceyhan (Adana)	6.0
14.06.1964	Sincik (Adıyaman)	6.0
22.05.1971	Bingöl	6.8
05.05.1986	Sürgü (Malatya)	6.0
27.06.1998	Yüreğir (Adana)	6.2
01.05.2003	Bingöl	6.3
08.03.2010	Kovancılar (Elazığ)	6.1
24.01.2020	Sivrice (Elazığ)	6.8

çok yeni olduğunun ve bunun tarihsel dönemde meydana gelmiş büyük depremlerin belirtisi olabileceğinin altını çizmiştir. [155] çalışmasında, aletsel dönemde meydana gelen 10 depremi konu alarak, DAF boyunca Coulomb stres dağılımını incelemiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 1822'den sonra gerçekleşen 10 büyük deprem ve Coulomb stres dağılımı [155]

Şekil 4.2’de, EB olarak tanımlanan bölge bu çalışmada sismik boşluk olarak ele alınmıştır. Yüksek Coloumb gerilme değeri kestirilmesine rağmen bölgenin deprem üretme potansiyeli hakkında yetersiz veri olduğu için [155] bu bölge için beklenen bir deprem büyüklüğü vermekten kaçınmışlardır. Farklı araştırmacılar ise, jeoloji, paleosismoloji, tarihsel deprem aktivitesi ve GPS verilerini kullanarak bölgenin $M \geq 7.4$ büyüklüğünde bir deprem üreteceğini öne sürmüşlerdir [156–158].

4.2 GPS Ölçmeleri ve Değerlendirmeleri

Tez kapsamındaki ikinci çalışma bölgesi olan Doğu Anadolu Fay hattının Hazar Gölü - Palu segmentinde de hem sürekli hem de kampanya tipi GPS ölçüleriyle çalışılmıştır.

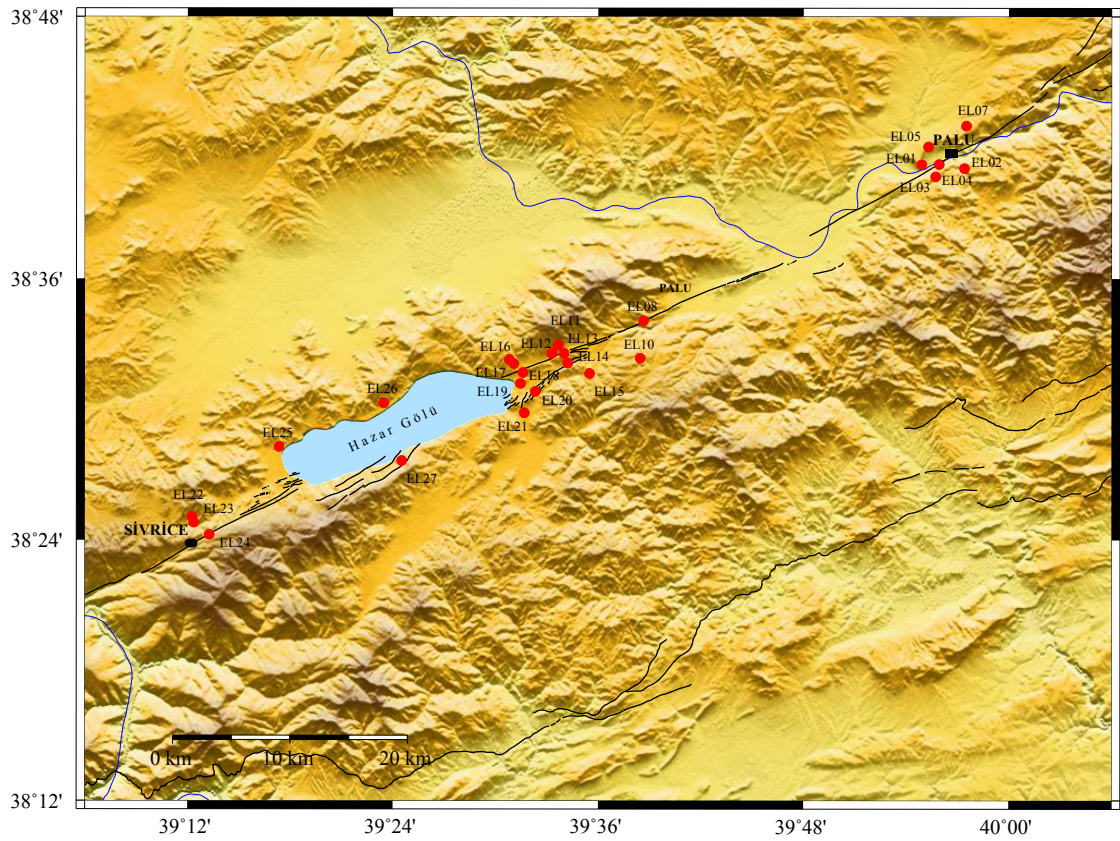
Bu bölgede de TUSAGA-Aktif istasyonlarının bölgeye ve birbirlerine olan uzak mesafeleri, fay hattını yakından incelemeye olanak tanımadığından, Sivrice’de ve Hazar Gölü - Palu segmenti üzerinde faya dik 4 profil oluşturacak şekilde GPS noktaları tesis edilmiştir. Değerlendirme sırasında hem sürekli hem de kampanya tipi GPS ölçüleri beraber analiz edilerek sonuçlar irdelenmiştir.

4.2.1 Kampanya GPS Ölçmeleri

Doğu Anadolu Fay hattının Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca var olduğu düşünülen krip parametrelerinin belirlenebilmesi ve yakın alanın daha iyi izlenebilmesi için Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi ve Yıldız Teknik Üniversitesi arasında ortaklaşa yürütülen 114Y250 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında fay izi boyunca faya dik 4 profil oluşturulmuştur. Profilleri oluşturan noktalar, faya mesafeleri 300 metre ile 4 km olan beton pilyeler dökülerek tesis edilmiştir. Bölgede önceden var olan İller Bankasına ait 3 pilye ile beraber toplam 27 noktadan oluşan kampanya noktalarından ve burada gerçekleştirilen ölçmelerden örnekler Şekil 4.6’da verilmektedir.

İlk 5 kampanyadan sonra tamamlanan 114Y250 nolu projenin ardından yine Yıldız Teknik Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi işbirliğiyle yürütülen 118Y450 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi başlatılmış ve son iki kampanya bu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

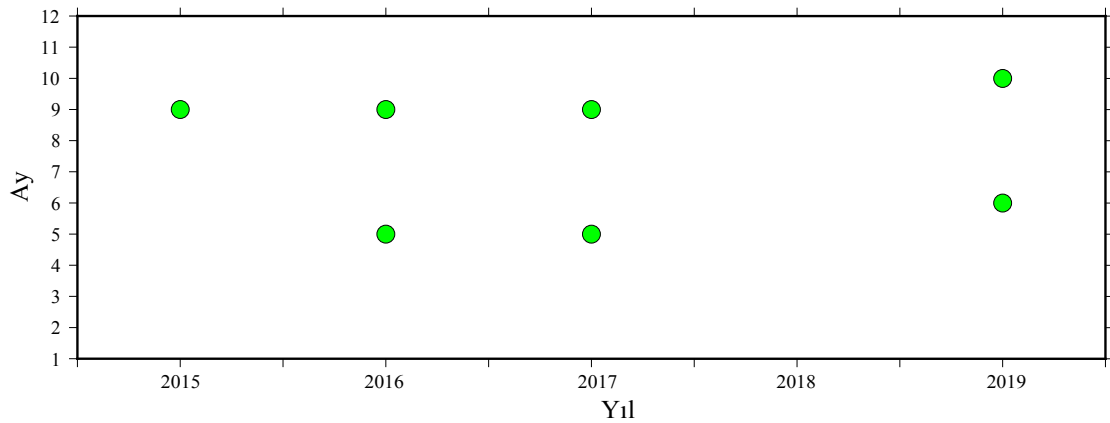
Şekil 4.3’te tamamının görüldüğü kampanya noktaları Palu’dan itibaren güneybatıda Sivrice’ye doğru ilk iki karakteri Elazığ’ın kısaltması olan EL ve son iki karakteri 01’den başlayarak (EL01-EL27) isimlendirilmiştir. İlki 2015 Eylül ayında olmak üzere toplam 7 kampanya GPS ölçmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3 Çalışma kapsamında ölçülen GPS noktaları

Şekil 4.3'te bütün kampanya noktaları beraber görülmektedir. Kırmızı daireler kampanya noktalarının yerlerini, siyah çizgiler diri fayları ([31]) göstermektedir.

2015 yılının Eylül ayında başlayan kampanyalar 2 yıl boyunca devam etmiş, bir yıl aradan sonra tekrar başlanmış olup, oluşabilecek yıllık mevsimsel hataların önüne geçebilmek için yaklaşık 6 ayda bir tekrarlanarak toplam 7 kampanya GPS ölçmesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Kampanya tarihleri

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, kampanyalar 2015 yılında bir defa, 2016, 2017 ve 2019 yıllarında ikişer defa yapılmıştır.

GPS kampanya ölçmelerinde kullanılan alıcılar çift frekanslı, Trimble NetR9 olup, antenler de Jeodezik Trimble Zephyr'dir. GPS ölçmeleri yapılırken;

- Yöntem: Statik ölçme yöntemi
- Alıcının Gördüğü En Az Uydu Sayısı: Minimum 4
- Verinin Kayıt Edildiği Süre: Her istasyonda minimum 10 saat
- Verinin Kayıt Aralığı: 15 saniye
- Uydu Yükseklik Açısı: 10°

olarak belirlenmiştir.

Elazığ'ın karasal iklimi ve toprak yapısı sonucu sürekli meydana gelen heyelanlar nedeniyle kampanyalar çok zorlu şartlarda gerçekleştirilmiştir. Özellikle Hazar Gölü'nün güneyinde bulunan EL27 noktası (İller Bankası'na ait tepenin üstünde bir nokta) ulaşım açısından bu noktaya gidenleri güç durumda bırakmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 EL27 kampanya noktasına giderken yola çıkan engel

Yapılan kampanya ölçmelerinden bir örnek Şekil 4.6'da verilmektedir. Ayrıca Palu ilçesinde tesis edilen GPS kampanya noktalarından EL04 ve EL06, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Çalışma kapsamında düzenlenen kampanyalardan örnekler



Şekil 4.7 EL04 kampanya GPS noktası



Şekil 4.8 EL06 kampanya GPS noktası

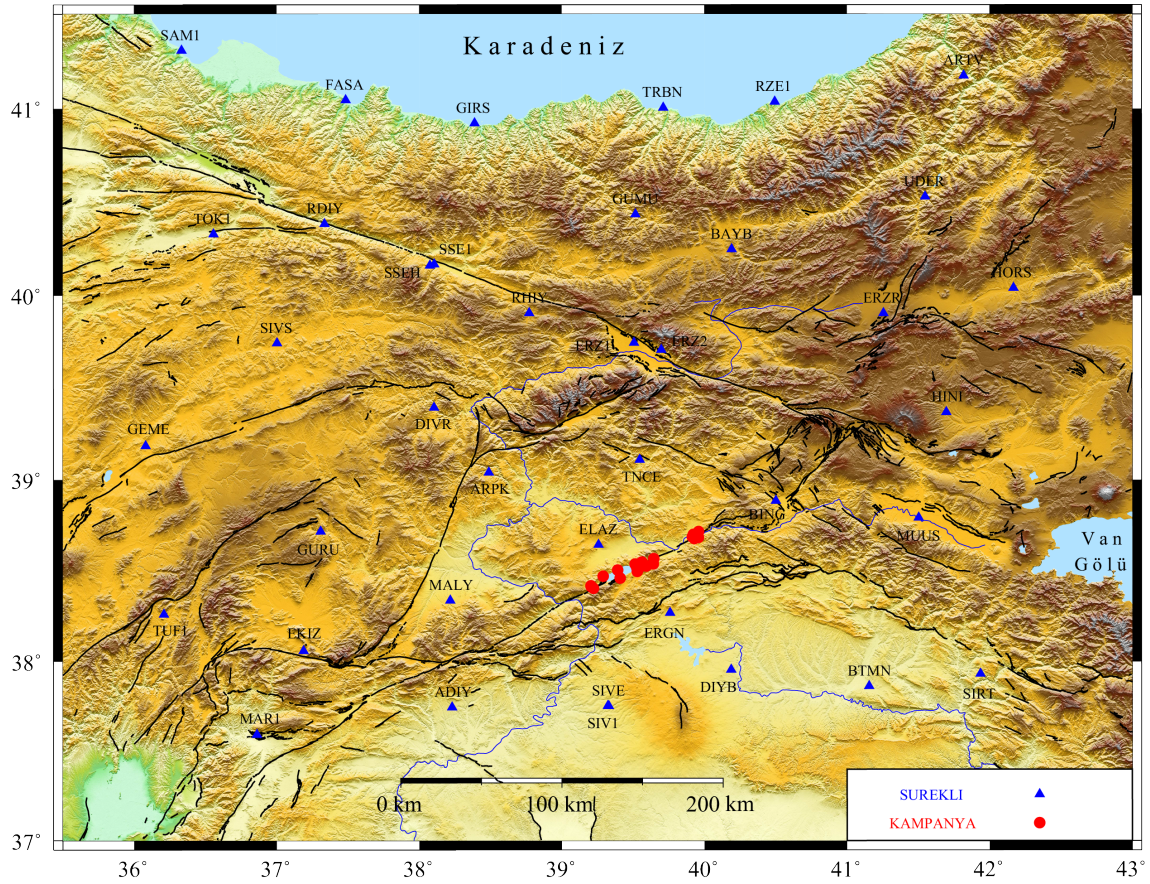
Şekil 4.7’te gösterilen EL04 GPS noktası EL02 ve EL03 noktalarıyla beraber Murat Nehri’nin ve DAF’ın güneyinde yer almaktadır. EL01, 05, 06 ve 07 ise fayın kuzeyinde yer almakta ve bu şekilde Palu 7 GPS noktası ile izlenmiştir (Şekil 4.3). Ancak kampanyalar sonucunda değerlendirilen noktaların zaman serileri incelenmiş ve anomali görülen noktalar hız alanından ve modellemeden çıkarılmıştır. Şekil 4.8’de EL06 kampanya noktasının hemen yanında bir kazı yapıldığı görülmektedir. Palu bölgesinde oluşturulacak fay parametrelerinin doğruluğunun düşmesini engellemek için bu nokta verisi hız alanından çıkarılmış ve son iki kampanyada ölçülmemiştir (Şekil 4.14).

Hazar Gölü’nün doğusunda bulunan ve anomali görülen bir nokta da EL09 GPS noktasıdır. Bu nokta da EL06 gibi ilk beş kampanyadan sonra bir daha ölçülmemiştir (Şekil 4.15).

4.2.2 Sürekli GPS Verileri

Bölgede uzak alan kontrolünü sağlayabilmek amacıyla TUSAGA-Aktif istasyonlarından faydalanılmıştır. İstasyonların faya uzaklığı 22 ile 400 km arasında değişmektedir. Veriler kampanya verileriyle eş zamanlı değerlendirilmek üzere 2014 yılının Ocak

ayından itibaren değerlendirilmeye başlanmış ve 2019 yılının Kasım ayına kadar değerlendirilmiştir. Şekil 4.9'de sürekli GPS istasyonları gösterilmekte ve bunlara ilişkin bilgiler Tablo 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.9 Elazığ bölgesi için değerlendirilmeye katılan GPS istasyonları

Şekil 4.9'da mavi üçgenler TUSAGA-Aktif ağına ait sürekli GPS istasyonlarının, kırmızı daireler ise bu çalışma kapsamındaki kampanya noktalarının yerini, siyah çizgiler diri fayları göstermektedir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, sürekli istasyonlar homojen bir şekilde çevreye yayılmış ve kampanya noktalarıyla beraber fayın hem uzak alan hem de yakın alan kontrolünün yapılması sağlanmaktadır.

Tablo 4.2'de sırayla istasyon adı, istasyona ait enlem ve boylam bilgisi, değerlendirilmeye katılan veri başlangıç (T_1) ve bitiş (T_2) zamanı, analiz edilmiş verinin toplam süresi verilmektedir. Tablo 4.2'de görüldüğü gibi, maksimum veri değerlendirme süresi yaklaşık 6 yıldır. Bazı istasyonların değerlendirme sürelerinin 6 yıldan az olmasının nedeni, istasyonların yerlerinin ve isimlerinin değiştirilmesidir. Örneğin tablodaki ilk istasyon ADIY (Adıyaman) daha sonra taşınarak ADY1 adıyla başka bir konumda veri toplamaya başlamıştır. Bu nedenle, değerlendirme süresi düşük olmakla beraber ve hız alanındaki doğruluğu da düşük olacaktır.

Tablo 4.2 Elazığ bölgesi için değerlendirilen sürekli GPS verileri

İstasyon Adı	Enlem	Boylam	T_1	T_2	Süre (yıl)
ADIY	37.74586	38.22968	2014.001	2016.986	2.98
ADY1	37.76058	38.26124	2018.904	2019.808	0.88
ARPK	39.04059	38.48732	2014.001	2019.808	5.8
ARTV	41.1751	41.81832	2014.001	2019.808	5.8
BABY	40.25015	40.19144	2014.001	2019.808	5.8
BING	38.88545	40.50078	2014.001	2019.808	5.8
BTMN	37.8636	41.15448	2014.001	2019.808	5.8
DIV1	39.37188	38.11942	2017.821	2019.808	2.05
DIVR	39.39432	38.10388	2014.001	2016.986	2.98
DIYB	37.95442	40.18749	2014.001	2019.808	5.8
EKIZ	38.05883	37.18794	2014.001	2019.808	5.8
ELAZ	38.64467	39.25647	2014.001	2019.808	5.8
ERGN	38.26961	39.75819	2014.001	2019.808	5.8
ERZ1	39.74584	39.50612	2014.001	2016.601	2.6
ERZ2	39.70786	39.69704	2017.001	2019.808	2.8
ERZR	39.90561	41.25547	2014.001	2019.808	5.8
FASA	41.04553	37.48475	2014.001	2019.808	5.8
GEME	39.18513	36.08084	2014.001	2019.808	5.8
GIRS	40.92263	38.38816	2014.001	2019.808	5.8
GUMU	40.43707	39.51617	2014.001	2019.808	5.8
GURU	38.71735	37.30787	2014.001	2019.808	5.8
HINI	39.36879	41.69579	2014.001	2019.808	5.8
HORS	40.04165	42.16733	2014.001	2019.808	5.8
MALY	38.3377	38.21689	2014.001	2019.808	5.8
MAR1	37.59338	36.8615	2016.329	2019.808	3.47
MUUS	38.79324	41.50216	2014.001	2019.808	5.8
RDIY	40.38524	37.33567	2014.001	2019.808	5.8
RHIY	39.90611	38.7708	2014.001	2019.808	5.8
RZE1	41.0369	40.49309	2014.001	2019.808	5.8
SAM1	41.30849	36.33376	2014.001	2019.808	5.8
SIRT	37.93191	41.93557	2014.001	2019.808	5.8
SIV1	37.75287	39.32167	2017.493	2019.808	2.3
SIVE	37.7524	39.32927	2014.001	2016.986	2.98
SIVS	39.7437	37.00249	2014.001	2019.808	5.8
SSE1	40.16911	38.10502	2017.821	2019.808	2.05
SSEH	40.16247	38.0749	2014.001	2016.986	2.98
TNCE	39.10967	39.54563	2014.001	2019.808	5.8
TOK1	40.33098	36.55747	2014.247	2019.808	5.56
TRBN	41.00541	39.71149	2014.001	2019.808	5.8
TUF1	38.26055	36.20845	2014.058	2019.808	5.74
UDE1	40.52996	41.54779	2017.821	2019.808	2.05
UDER	40.53128	41.54755	2014.001	2016.986	2.98

4.2.3 GPS Verilerinin Değerlendirilmesi

GPS verilerinin değerlendirilmesi işlemi Bölüm 2.3'te anlatıldığı gibi GAMIT/GLOBK (v10.7) GNSS yazılımı [98] ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10 IGS istasyonları

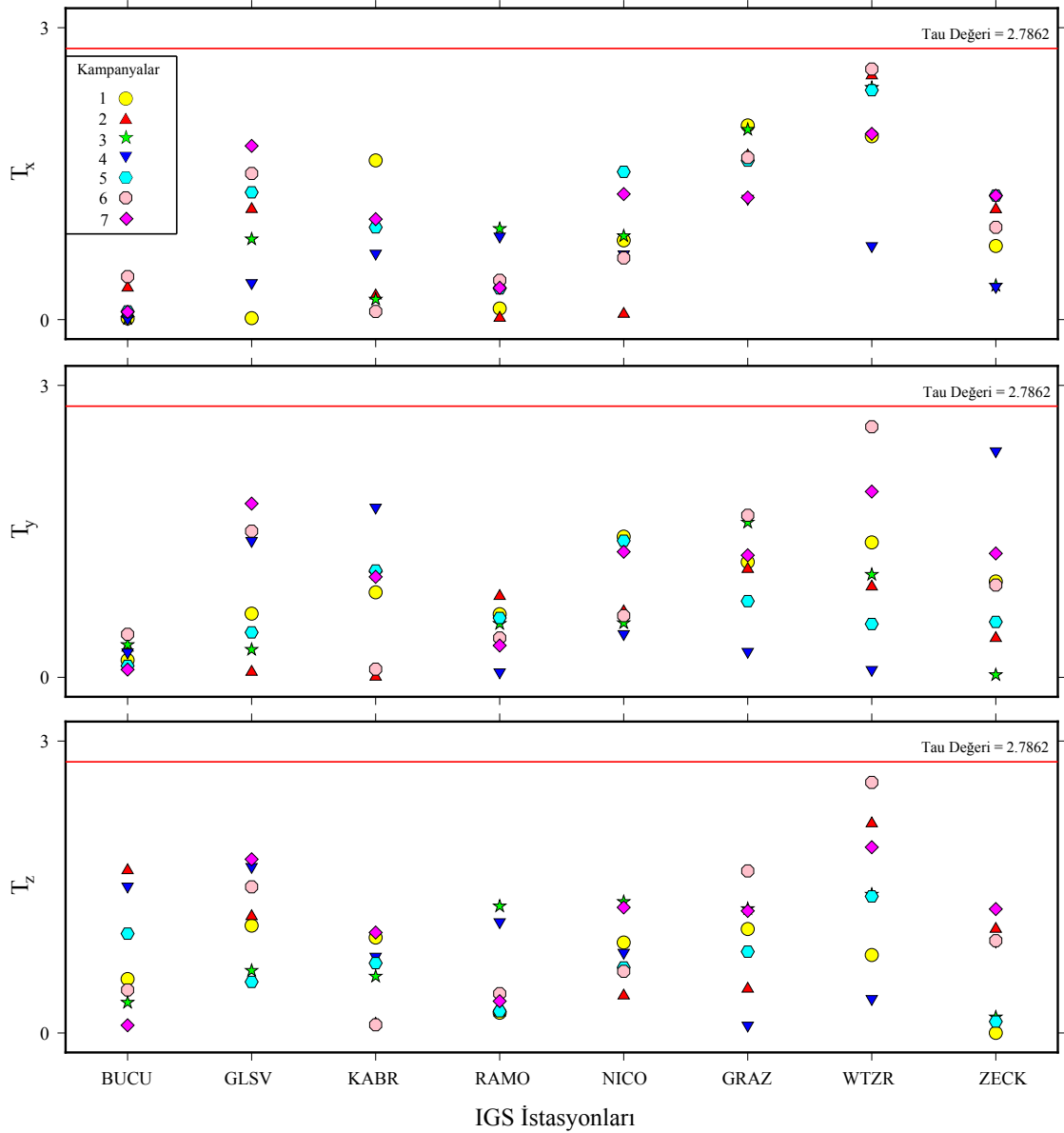
GPS ölçüleri için datum tanımlama 8 IGS istasyonuna göre Arap plakası referans alınarak ITRF14'te gerçekleştirilmiştir. Kampanyalarda IGS istasyonları olarak çalışma bölgesi etrafında ve kampanyalar süresince kesintisiz verisi bulunan noktalar seçilmiştir (Şekil 4.10, Tablo 4.3). IGS istasyonlarındaki GPS ölçüleri Scripps Yörünge ve Sabit Ağ Merkezi (Scripps Orbit and Permanent Array Center - SOPAC) tarafından oluşturulan arşivden temin edilmiştir.

Tablo 4.3 Elazığ bölgesinin datum tanımında kullanılan IGS istasyonlarının Arap plakası referanslı ITRF14 epok 2010.0 koordinat (m) ve hızları (mm/yıl)

İstasyon Adı	X	Y	Z	v_x	v_y	v_z
BUCU	4093760.7860	2007793.8927	4445130.0254	0.29	13.74	-3.7
GLSV	3512888.8551	2068979.9525	4888903.2381	-0.68	17.21	-5.69
KABR	4377282.9587	3081551.6655	3456136.9668	2.42	0.44	-2.99
RAMO	4514721.7478	3133507.9089	3228024.7946	3.08	0.46	-3.22
NICO	4359415.6199	2874117.1194	3650777.8877	4.42	1.36	-6.44
GRAZ	4194423.7385	1162702.7861	4647245.4657	-5.68	14.65	1.37
WTZR	4075580.4629	931853.88145	4801568.1734	-6.6	15.47	1.96
ZECK	3451174.5925	3060335.5073	4391955.6946	2	14.67	-10.41

Değerlendirme işlemi sırasında datum tanımı için kullanılan IGS istasyonlarının verilen istasyon koordinatları ile kampanya döneminde dengeleme ile hesaplanan istasyon koordinatları arasında Bölüm 3.2.3'te anlatılan 3-boyutlu benzerlik dönüşümü (Bursa-Wolf Modeli) uygulanarak istasyonlar için uyuşum testi yapılmıştır.

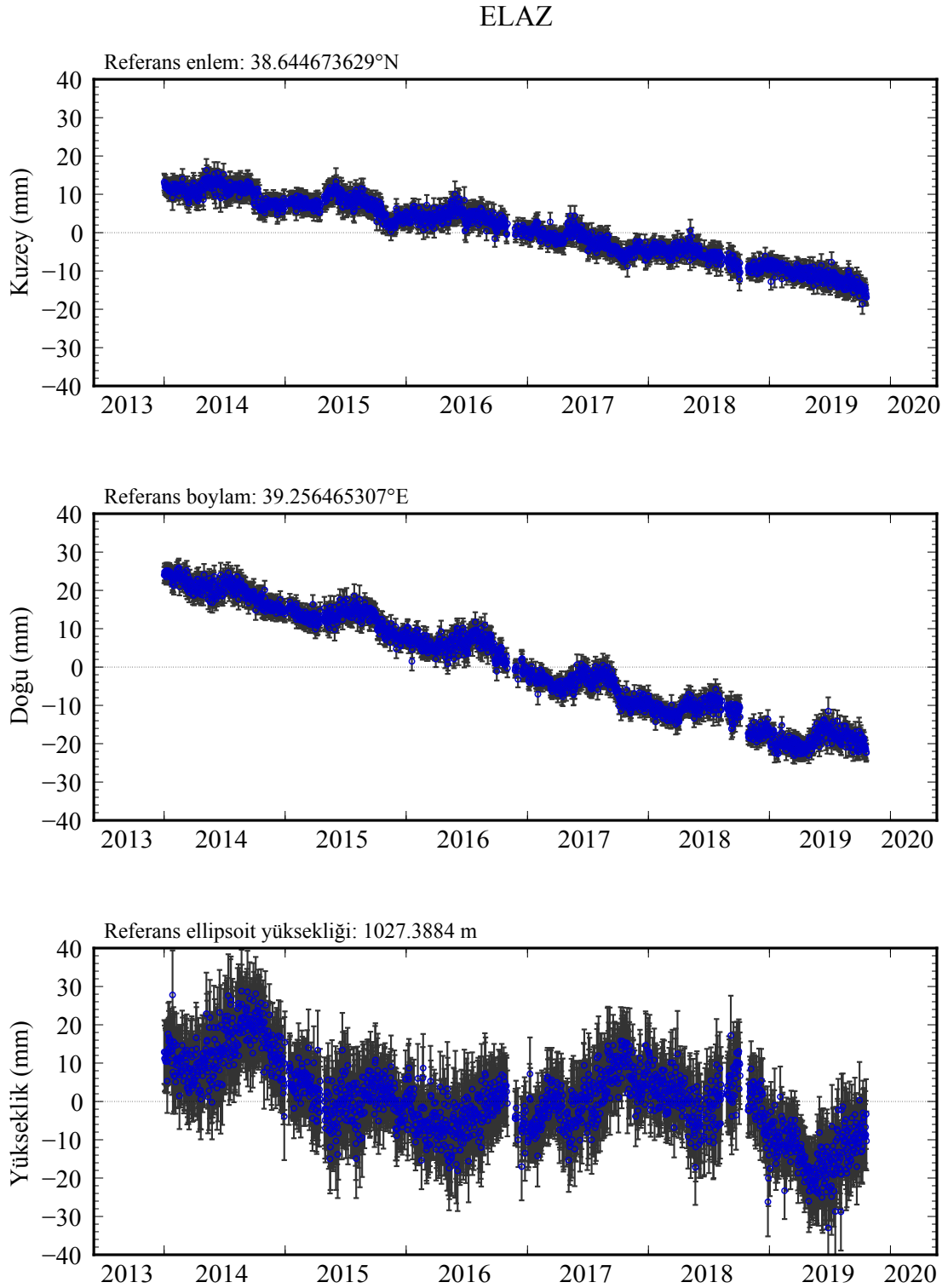
Şekil 4.11'de, X , Y ve Z bileşenleri için bulunan T_x , T_y ve T_z test büyüklükleri her bir kampanyaya göre sırasıyla verilmektedir. Her bileşendeki kırmızı çizgi karşılaştırma değerini göstermektedir ve her istasyon için elde edilen test büyüklüğü bu değerin altında kalmaktadır. Bu durum, yapılan referans testleri sonucunda, kampanya tarihlerinde IGS istasyonlarının X , Y ve Z bileşenlerinin uyuşumlu olduğunu göstermektedir. Bu konuyla ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.2.3'te verilmiştir.



Şekil 4.11 IGS istasyonları için kampanya tarihlerinde yapılan test sonuçları

GPS verilerinin günlük analizleri sonucunda zaman serileri elde edilmektedir. Sürekli

istasyonlar için ve kampanya ölçüleri için zaman serileri ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 4.12’te TUSAGA-Aktif ağına ait bir istasyon olan ELAZ’ın zaman serisi görülmektedir. Şekil 4.9’da mavi üçgenle görülen ELAZ Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca faya ve kampanya noktalarına en yakın GPS istasyonudur.



Şekil 4.12 ELZG istasyonuna ait zaman serisi

Şekil 4.12’te sırasıyla ELAZ istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşenlerine ait günlük çözümleri kaba hatalı ölçüler temizlenmiş şekliyle verilmektedir. Hazar Gölü - Palu segmenti krip araştırması konusunda en uzun süreli değerlendirme aralığına sahip (Tablo 4.2) ELZG istasyonunun Arap referanslı 2014 - 2020 arasındaki zaman serisine bakıldığında kuzey bileşende 6 yılda yaklaşık 3 cm’lik negatif yönlü bir (güneye doğru) hareket görülmektedir (Tablo 4.2). Bu da yaklaşık yılda 0.5 cm güneye doğru bir hareket anlamına gelir. Doğu bileşeni incelendiğinde ise, 6 yılda yaklaşık 5 cm batıya doğru bir yerdeğiştirme sergilediği görülmektedir. Bu veriler ışığında istasyonun Arap plakasına göre güneybatıya doğru hareket ettiği, batıya doğru hareketinin güneye doğru hareketinden baskın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, yükseklik bileşeni zaman serisinden 6 yılda yaklaşık 2 cm’lik bir çökme sergilediği gözlenmektedir.

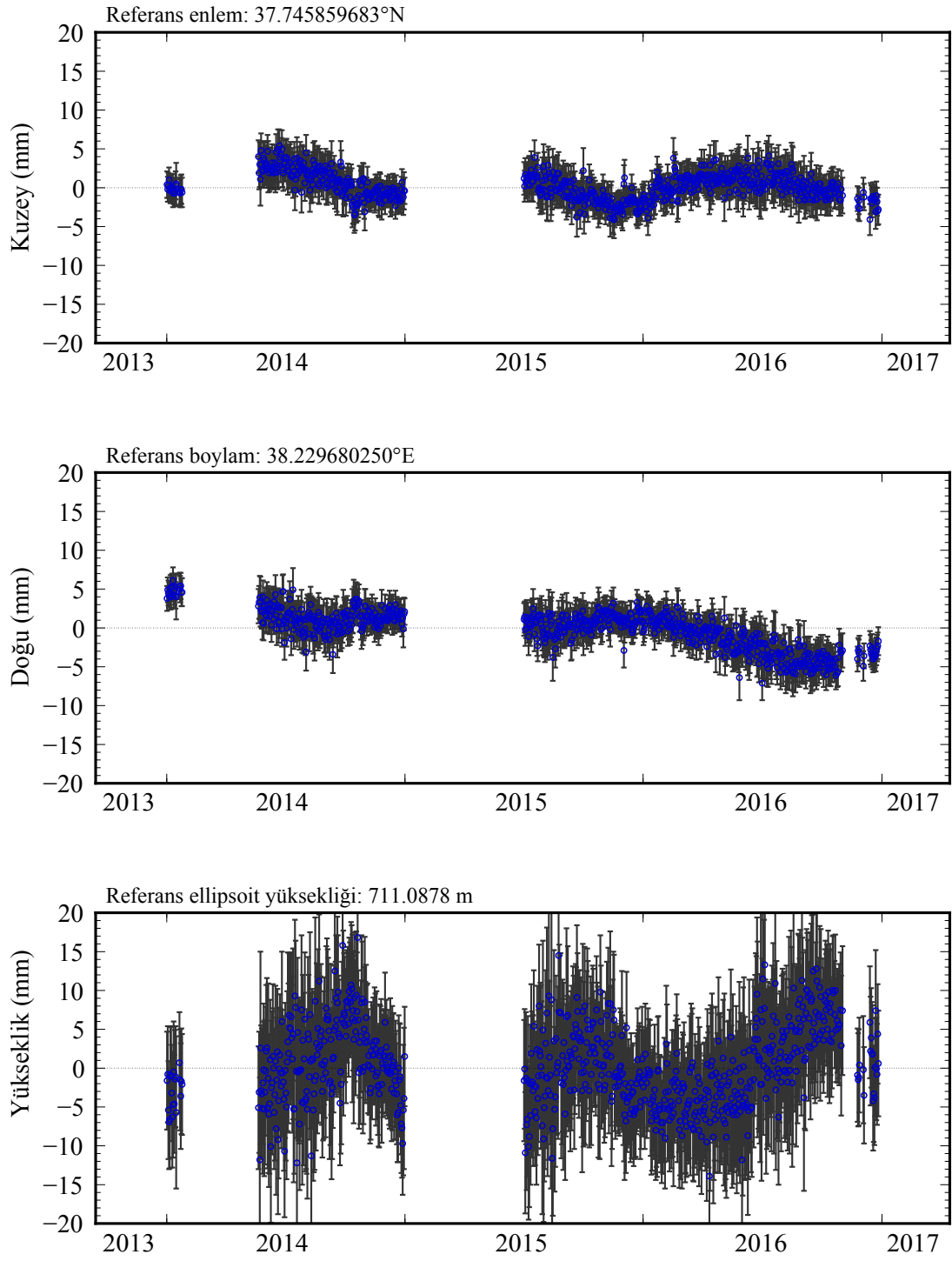
Şekil 4.12’de ELZG istasyonuna ait zaman serisi gösterilmiştir. Şekil 4.12 zaman serisi incelendiğinde arada veri kaybı meydana gelse de sürekliliği olan bir istasyon görülmektedir. Her TUSAGA-Aktif istasyonu bu kadar iyi performans göstermemektedir. Bir örnek vermek gerekirse, ADIY istasyonunda veri kaybının çok fazla olduğu söylenebilmektedir (Şekil 4.13).

Şekil 4.13’te, ADIY istasyonuna zaman serisi görülmektedir. Şekil 4.13’te görüldüğü gibi istasyonda veri boşlukları mevcuttur. 2017 yılında istasyonun işlevine son verilerek 2018 yılının sonlarına doğru ADY1 istasyonu kurulmuştur. Deprem aktivitesi olmadan 4 haneli kodu ve konumu değiştirilen bu istasyonun verideki boşluklardan dolayı yenilendiği düşünülmektedir. Diğer sürekli istasyonların zaman serileri Ek-B’de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında anomali görülen kampanya noktalarından EL06 ve EL09’a ait zaman serileri sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmektedir. Şekil 4.14’te görülen EL06 kampanya noktasına ait zaman serisinin kuzey bileşeninde 3. ve 4. kampanyalar arasında meydana gelen ötelemenin, 4. kampanyaya gidildiğinde Şekil 4.8’de gösterilmiş çukurlaşmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

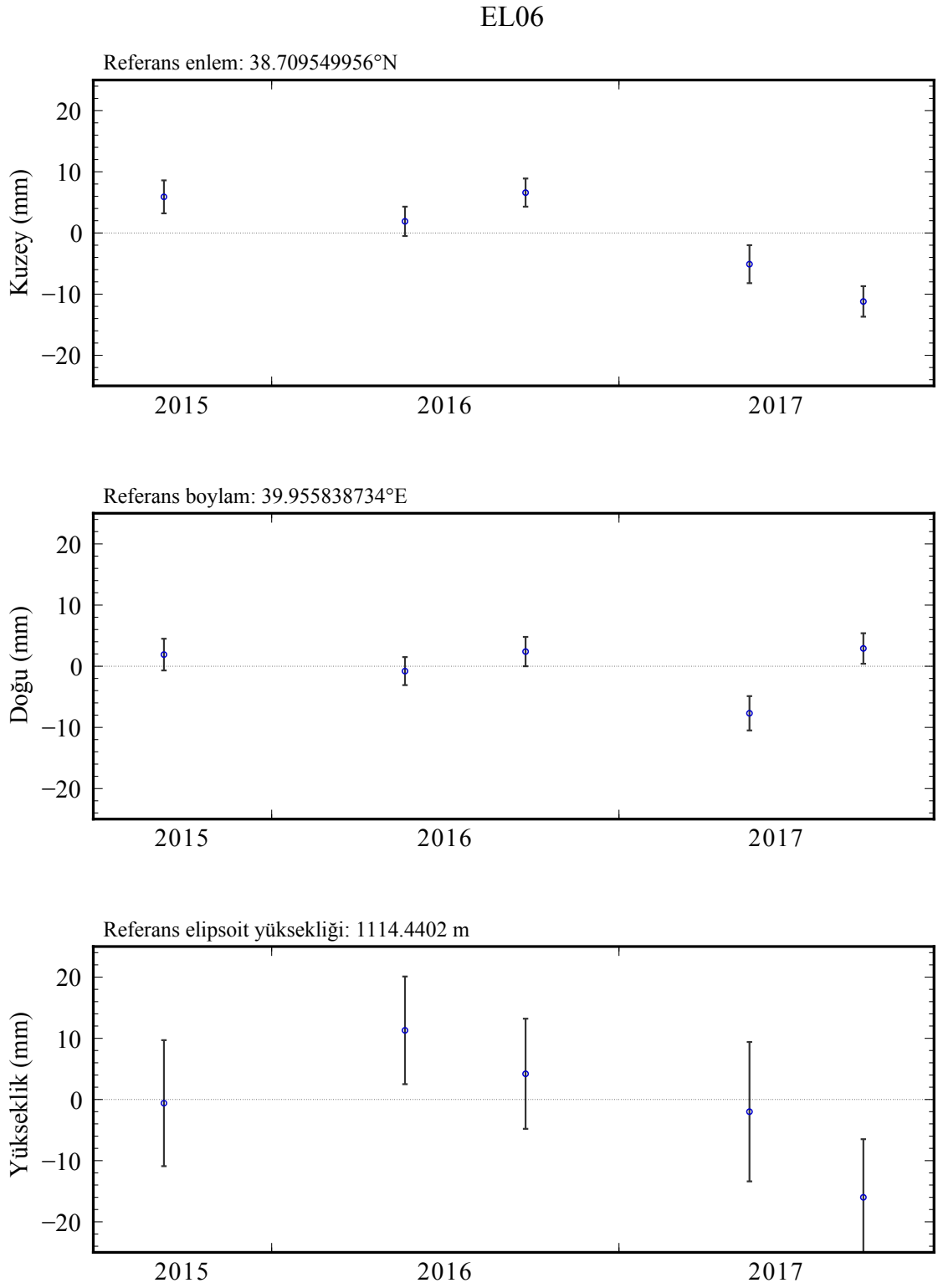
Şekil 4.15’de verilmiş EL09 kampanya noktasının zaman serisine incelendiğinde özellikle doğu bileşeninde bir takım tutarsızlıklar gözlenmektedir. Şekil 4.16, 7 kampanya ölçümünün de gerçekleştirildiği EL07 kampanya noktasına ait zaman serisi görülmektedir. Palu’da yer alan bu noktada, 2015-2019 yılları arasında herhangi bir deprem olmamasına karşın, kuzey bileşeninde yaklaşık 2 cm, doğu bileşeninde ise yaklaşık 3.5 cm negatif yönlü yerdeğiştirme görülmektedir. ELAZ istasyonunda olduğu gibi batı bileşeni daha baskın güneybatı yönlü bir harekete sahip olduğu dikkat çekmektedir. Fayın kuzeyinde konumlanan bu noktada bu hareketi görmek doğaldır.

ADIY



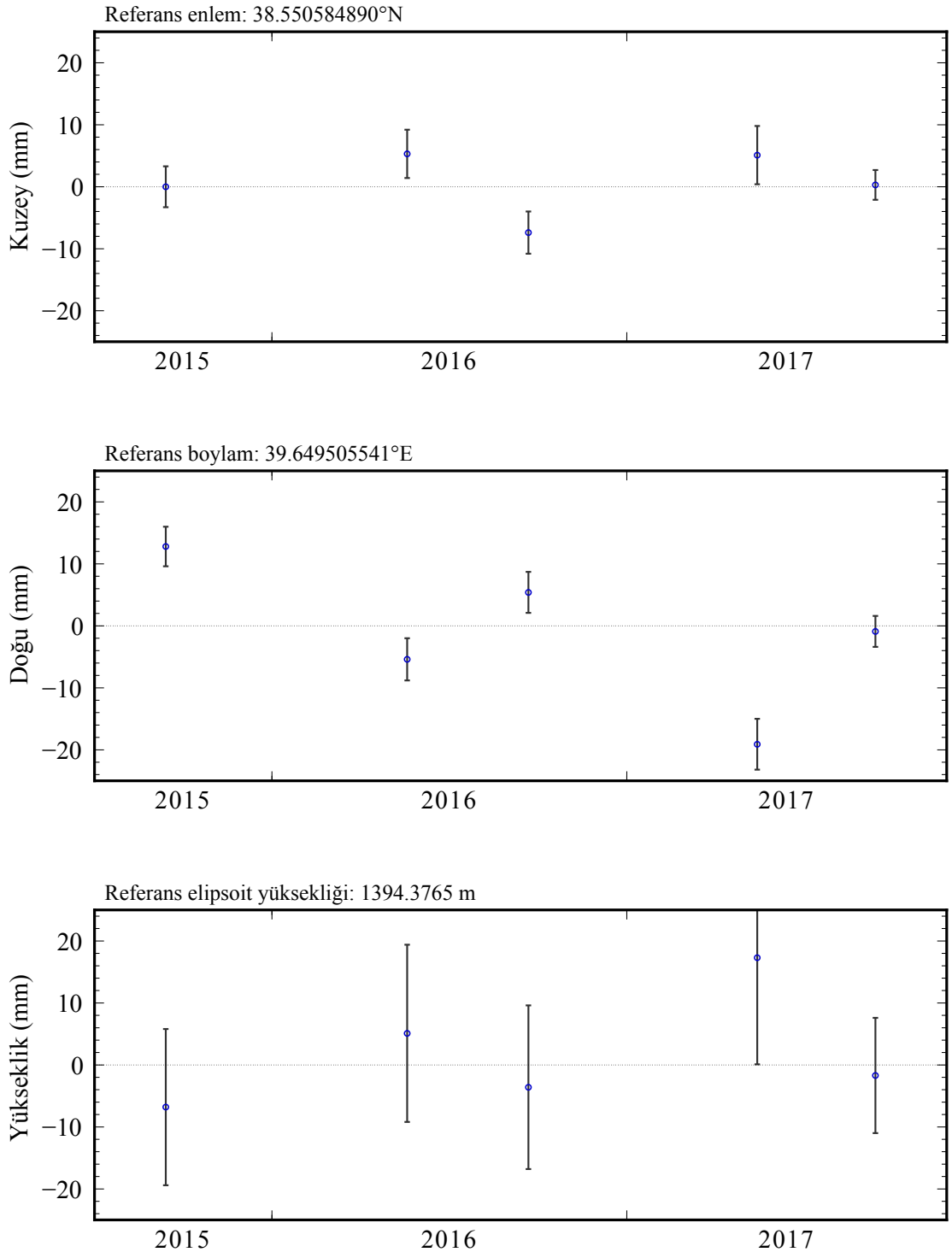
Şekil 4.13 ADIY istasyonuna ait zaman serisi

Ancak EL06 noktasında söz konusu uygun bir hareket görülmemiştir. Fayın kuzeyinde bulunan diğer kampanya noktalarında da Anadolu'nun kaçışını gösteren söz konusu hareket göze çarpmaktadır.



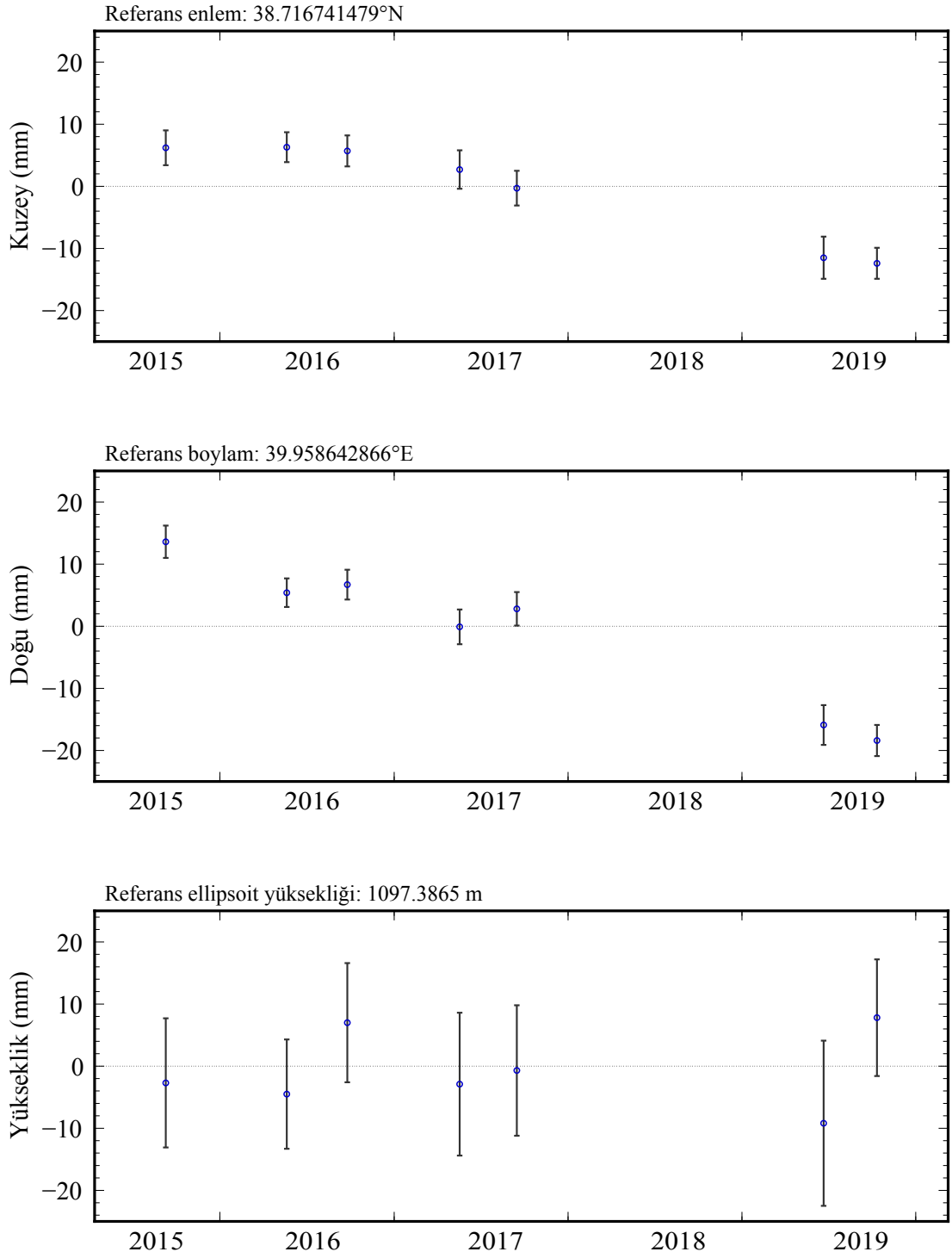
Şekil 4.14 EL06 kampanya GPS noktasına ait zaman serisi

EL09



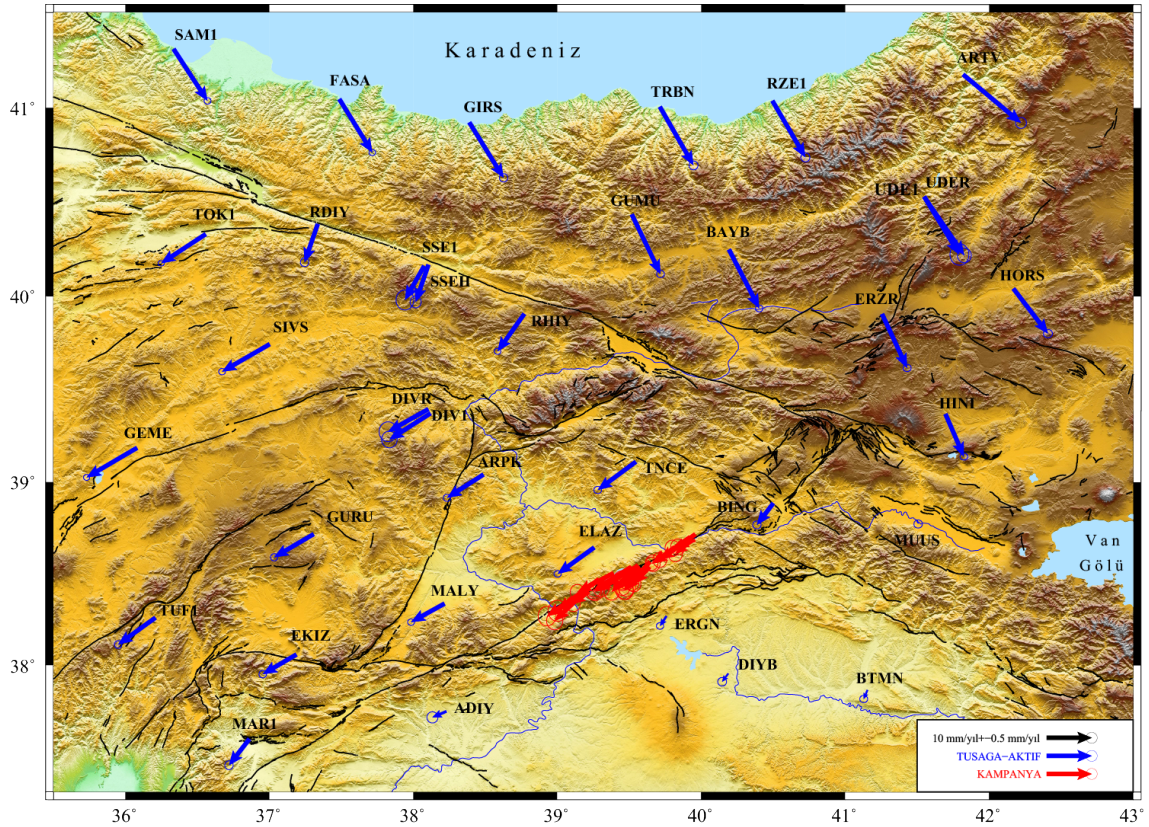
Şekil 4.15 EL09 kampanya GPS noktasına ait zaman serisi

EL07



Şekil 4.16 EL07 kampanya GPS noktasına ait zaman serisi

İstasyonlara ait zaman serileri elde edildikten sonra Bölüm 3.3'te anlatıldığı gibi zaman serisi analizi ile beraber hız alanı oluşturulmuştur (Şekil 4.17).

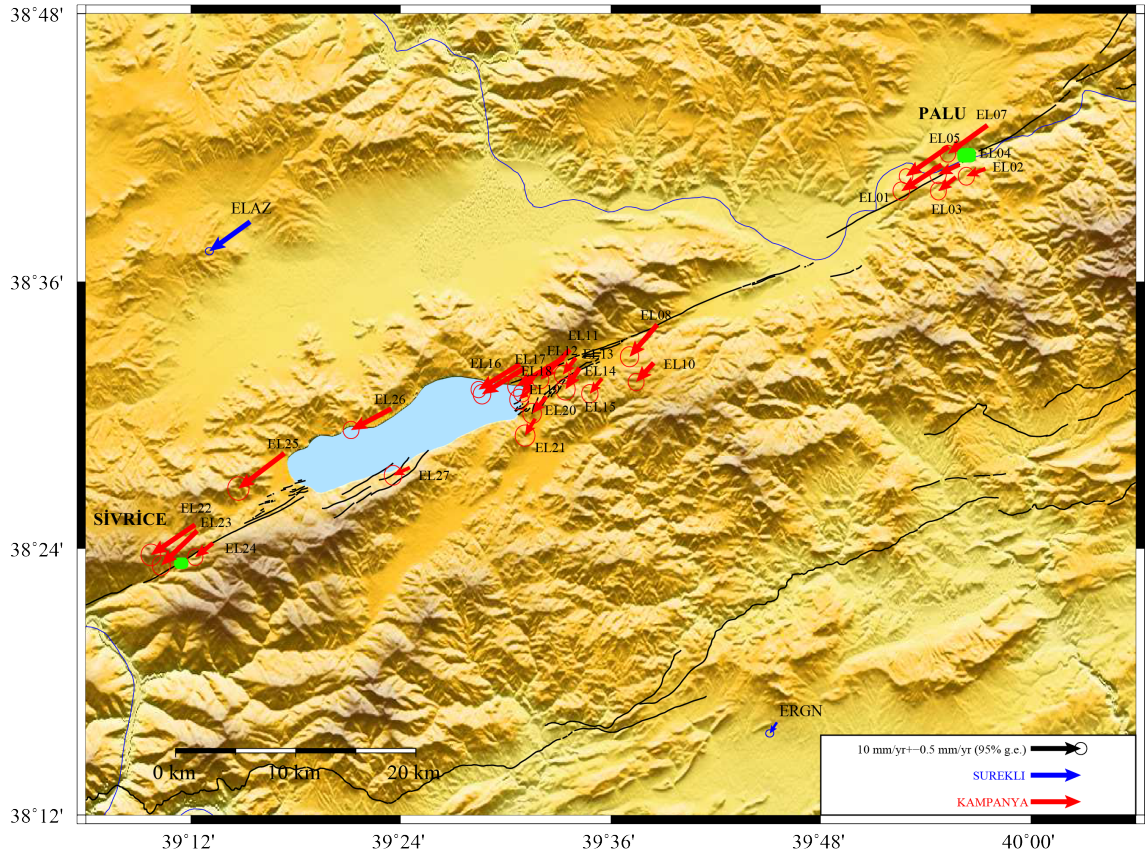


Şekil 4.17 Elazığ bölgesi hız alanı

Şekil 4.17’de mavi ve kırmızı oklar sırayla sürekli ve kampanya GPS hız vektörlerini ve %95 olasılıklı güven elipslerini, siyah ince çizgiler ise, diri fayları göstermektedir. Burada kutup noktası olarak DAF için hesaplanan [3]’daki değerler, yani $28.4 \pm 0.9^\circ N$ ve $18.4 \pm 1.0^\circ E$ kutup noktası, $0.428 \pm 0.009^\circ / Myr$ dönme parametresi göz önüne alınmıştır. Böylece, plakanın dönmesi nedeniyle oluşan etkiyi içermeyen hız alanı elde edilmiştir.

Şekil 4.17’de sürekli istasyonlara ilişkin Arap plakası referanslı hız alanı görülmektedir. Elazığ bölgesinde kırmızı oklar, kampanya ölçmeleriyle elde edilmiş hızları temsil etmektedir. Arap plakası referans alındığında Anadolu plakasının yaklaşık 10 mm/yıllık [3] kaçışı görülmektedir. Kampanya noktalarındaki hız alanı Şekil 4.18’de ayrıca gösterilmiştir.

Şekil 4.18’de mavi ve kırmızı oklar sırasıyla sürekli ve kampanya GPS hızlarını ve %95 olasılıklı güven elipslerini, siyah ince çizgiler diri fayları [31] göstermektedir. Söz konusu hız alanı incelendiğinde fay izi boyunca hız gradyeni çok net görülmektedir.



Şekil 4.18 Elazığ kampanya ölçmelerinden elde edilen hız alanı

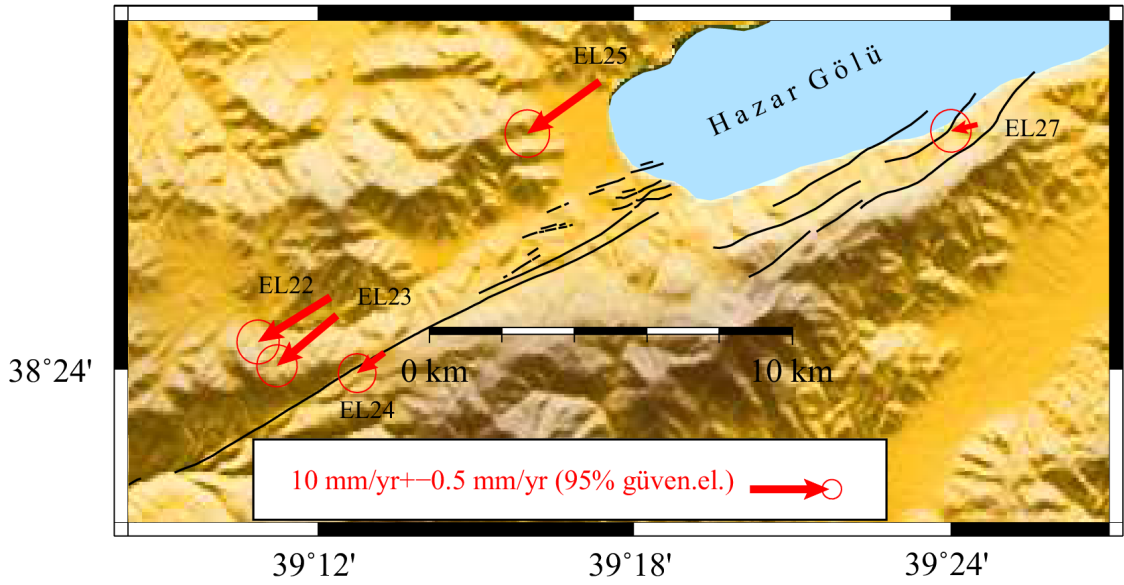
Arap plakası referans alındığından fayın altında kalan noktalarda hız sıfıra yaklaşıırken, fayın üstünde kalan noktalarda güneybatı yönlü yaklaşık 10 mm/yıl'lık bir hareket görülmektedir.

Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21 kampanya bölgelerinde elde edilen hız alanlarını daha ayrıntılı göstermektedir.

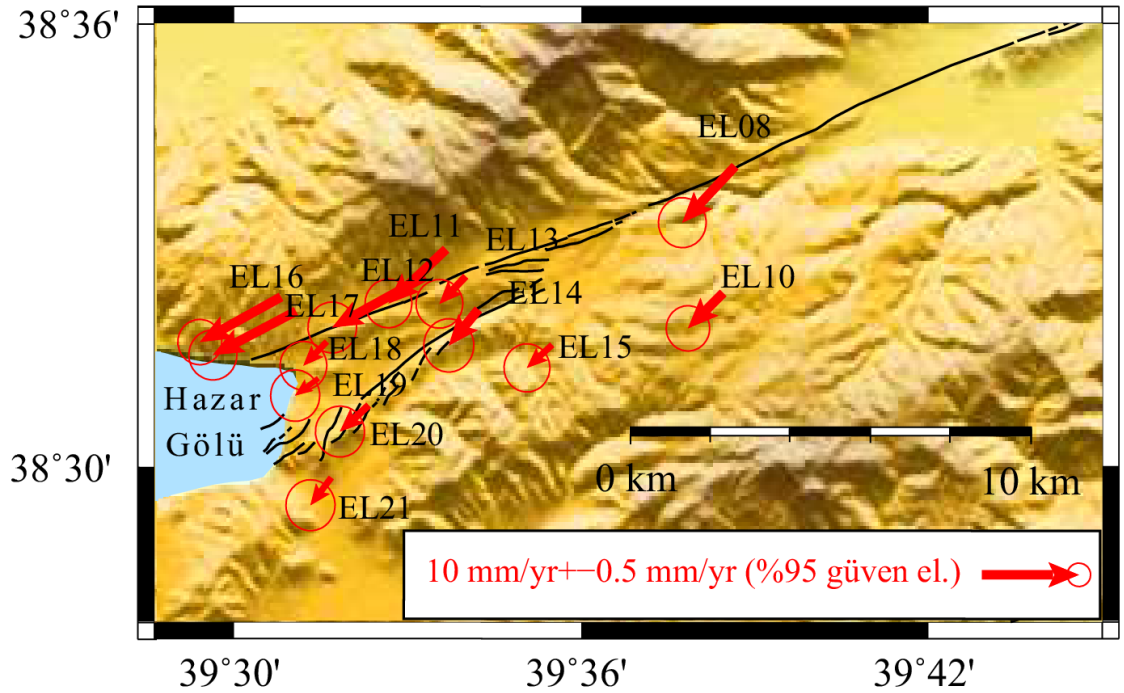
Şekil 4.19 Sivrice bölgesindeki kampanya GPS noktalarının hızlarına ilişkindir. Fayın altında kalan EL24 noktasında kestirilen hız değeri -3.42 ± 0.97 mm/yıl doğu bileşenli ve -2.58 ± 1.00 mm/yıl kuzey bileşenli iken, EL22 ve EL23 noktalarının hızları ise sırasıyla -9.13 ± 1.09 doğu, -5.66 ± 1.13 kuzey ve -7.55 ± 1.04 doğu, -6.35 ± 1.08 kuzey olarak kestirilmiştir. Aralarındaki mesafenin 2 - 3 km olduğu bilinen EL22 ile EL23 ve EL24 noktaları arasındaki bu keskin hız farkının yüzeydeki bir süreksizlikten ileri geldiği düşünülmektedir.

Şekil 4.20'de Hazar Gölü'nün doğusunda yer alan kampanya GPS noktalarının 7 kampanya GPS ölçmesi sonucunda oluşturulan hız alanı görülmektedir. Bölgedeki doğu bileşenli en yüksek hız -9.71 ± 1.04 mm/yıl ile EL12 noktasında, en düşük hız -2.17 ± 1.05 mm/yıl olarak EL21 noktasında kestirilmiştir. Bölgedeki kuzey bileşenli en yüksek hız -5.90 ± 1.02 mm/yıl ile EL08 noktasında, en düşük hız ise -1.82 ± 1.10

mm/yıl ile EL19 noktasında kestirilmiştir.



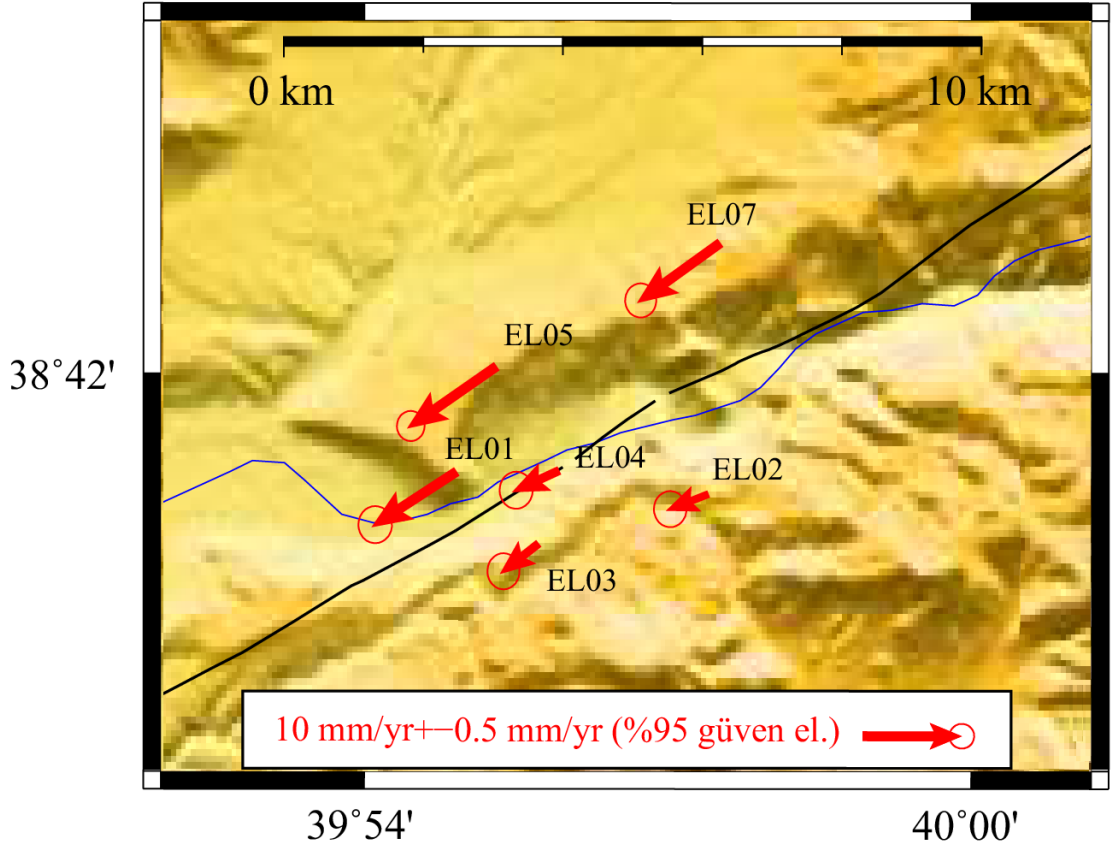
Şekil 4.19 Sivrice hız alanı



Şekil 4.20 Hazar Gölü doğusundaki hız alanı

Şekil 4.21'de Palu çevresinde bulunan kampanya GPS noktalarının GPS ölçülerine dayalı hız alanı gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bölgedeki doğu bileşenli en yüksek hız -8.80 ± 0.92 mm/yıl ile EL05 noktasında, en düşük hız ise, -3.71 ± 0.97 mm/yıl ile EL03 noktasında kestirilmiştir. Kuzey bileşenli hızlarda ise, en yüksek hız yine EL05 noktasında -5.55 ± 0.94 mm/yıl ve en düşük EL02 noktasında -1.14 ± 1.02 mm/yıl olarak kestirilmiştir.

Herhangi bir deprem olmaksızın fay izi boyunca gözlenen bu hız gradyeni, yüzeyde asismik bir kayma olduğuna işaret etmektedir. Söz konusu kayma ve parametreleri modelleme kısmında daha ayrıntılı incelenecektir.



Şekil 4.21 Palu hız alanı

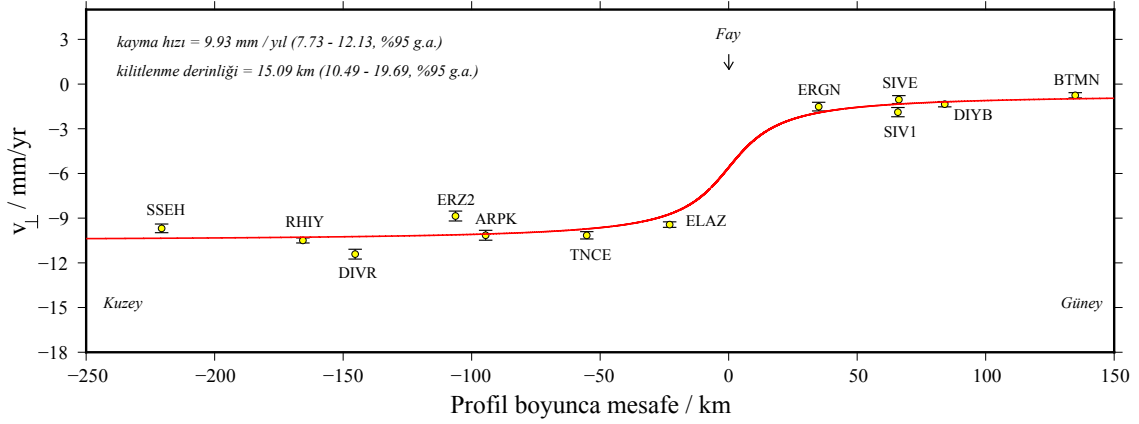
4.4 Modelleme Çalışmaları

Bu çalışmada, Bölüm 2.4'te ayrıntılı bir şekilde anlatılan iki boyutlu modelleme çalışması fay boyunca oluşturulan ve faya dik profiller yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Sığ ve derin kayma oranları iki aşamada kestirilmiştir. İlk olarak, yakın alan verileri göz ardı edilerek, (2.1) modeli ile, uzak alan profillerinden derin kayma (ve kilitleme derinliği) kestirilmiştir. Uzak alan modeli uygulanırken stokastik model, uzak alan GPS hızlarına ilişkin standart sapmalar göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Daha sonra, (2.14) modeli ile, bir önceki adımda elde edilen parametreler sabit alınarak, krip hızı ve derinliği kestirilmiştir. Krip parametreleri belirlenirken, stokastik model, kampanya GPS hızlarına ilişkin standart sapmalar göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, klasik yaklaşımdaki bulunan sığ ve derin kayma oranları (ve derinlikleri) arasındaki ilişkiyi ortadan kaldırmaktadır [35, 36].

4.4.1 Uzak Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Kayma Hızının Belirlenmesi

Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca, modellemede kullanılan sürekli GPS istasyonları değişmemektedir. Bu nedenle fay boyunca uzun dönem hız ve kilitlenme derinliği parametreleri aynı kestirim değerine ulaşmaktadır. Bu çalışmada da tek bir profil ile fay boyunca tek kilitlenme derinliği ve tek uzak alan hızı kestirilmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Elazığ uzak alan profilinin modellenmesi

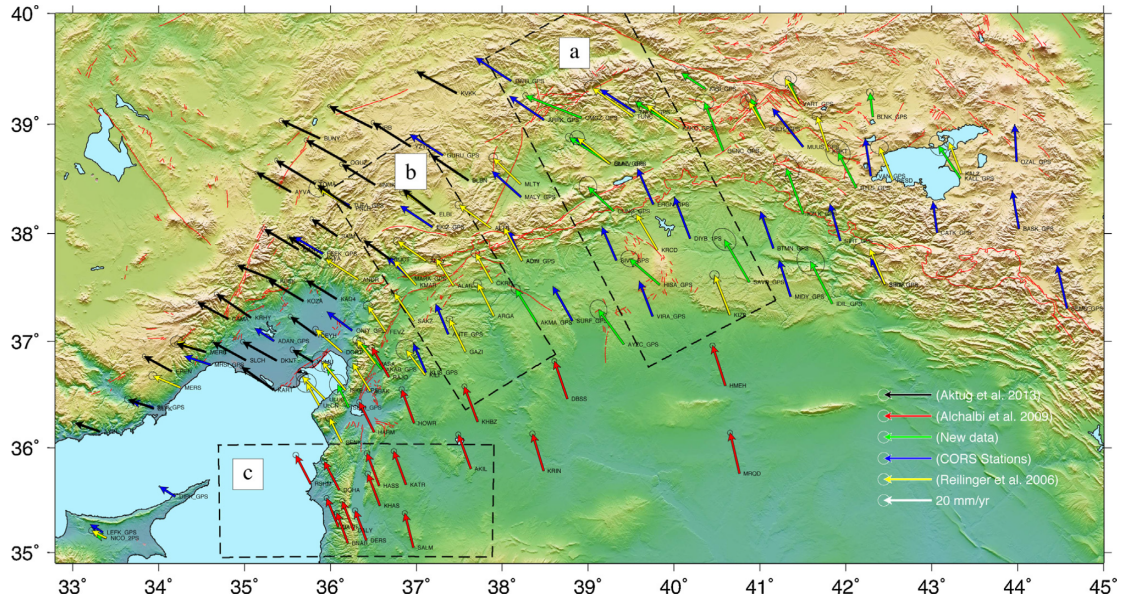
Şekil 4.22’de, sarı noktalar GPS istasyonlarına ait fay paralel hız bileşenlerini, hata barları ise bu noktalara ilişkin standart sapmalarını göstermektedir. Sıfır noktasından itibaren grafiğin sol tarafı fayın kuzeyini, sağ tarafı ise fayın güneyini göstermektedir. Kırmızı çizgi, fay paralel GPS hız bileşenlerine en uygun elastik yer değiştirme modelini ifade etmektedir. Şekil 4.22’de görüldüğü gibi, sürekli GPS istasyonları fayın kuzeyinde yaklaşık 250 km’ye kadar uzanırken, fayın güneyinde 150 km’ye kadar devam etmektedir. Fayın uzun dönem parametrelerinin kestirilebilmesi için yeterli mesafede hız alanı oluşturulmuştur [72].

Profilde görüldüğü gibi sürekli istasyonların GPS verilerine dayalı fay paralel hızları ve bunlara ilişkin standart sapmalar göz önüne alınarak oluşturulan stokastik model kullanılarak, Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca, uzun dönem kayma hızı 9.93 mm/yıl (7.73 - 12.13, %95 g.a.) ve kilitlenme derinliği 15.09 km (10.49 - 19.69, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir.

DAF boyunca kayma hızı, GPS verilerine dayalı olarak, [2]’de 9 ± 1 mm/yıl, [3]’de yaklaşık 10 ± 1 mm/yıl kestirilmiştir.

[158] DAF’ı tek bir profille değil, Türkoğlu’nun kuzeyi (a) ve güneyi (b) olarak iki ayrı profil yardımıyla modellemiştir (Şekil 4.23).

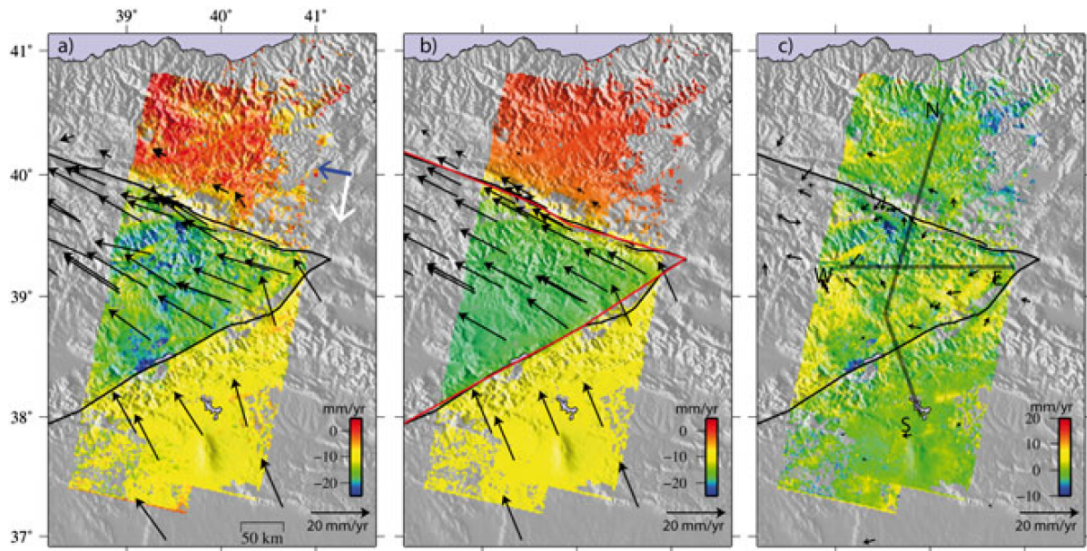
[158], bu çalışmaya konu olan bölgede (Şekil 4.23a) yayınlanmış GPS hızlarıyla DAF boyunca kayma hızını 11.6 mm/yıl (± 3.94), kilitlenme derinliğini yaklaşık olarak



Şekil 4.23 GPS verileri ile DAF uzak alan modellemesi [158]

28.85 km (± 29.24) kestirmiştir. [158] çalışmasında, kilitlenme derinliği kestiriminin gerçekçi olmadığını ifade etmiştir.

[38]'de ise, InSAR analizleriyle yayınlanmış GPS hızlarını birleştirilerek, DAF boyunca kayma hızını 13 mm/yıl kestirilmiştir (Şekil 4.24).

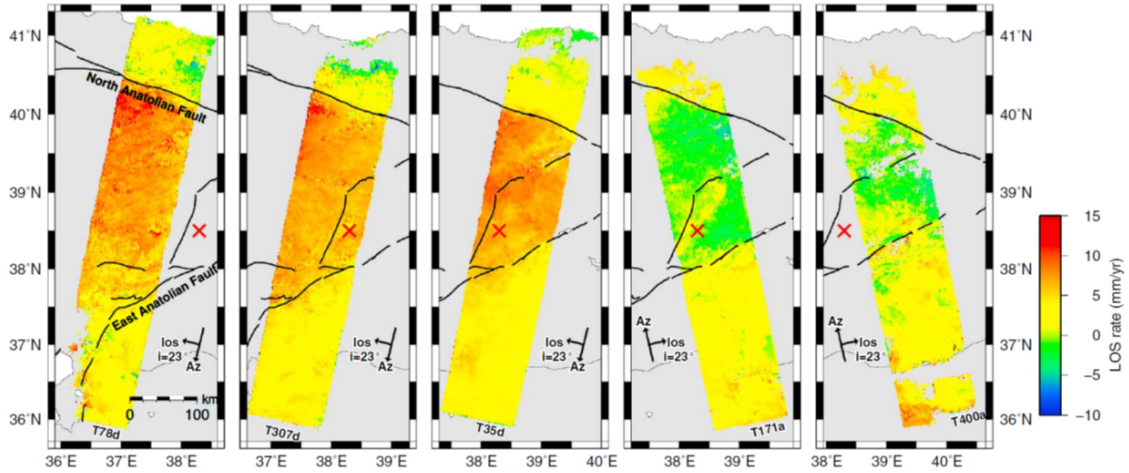


Şekil 4.24 InSAR ve GPS ile DAF ve KAF modellemesi [38]

[38], InSAR ve yayınlanmış GPS hızlarıyla DAF boyunca kilitlenme derinliğini yaklaşık olarak 4.5 km kestirmiştir. [3] ise aynı büyüklüğün 18 km olduğunu belirtmiştir (Şekil 1.6).

[39], yine InSAR ve yayınlanmış GPS hızlarıyla DAF ve KAF'ı beraber modelleyerek

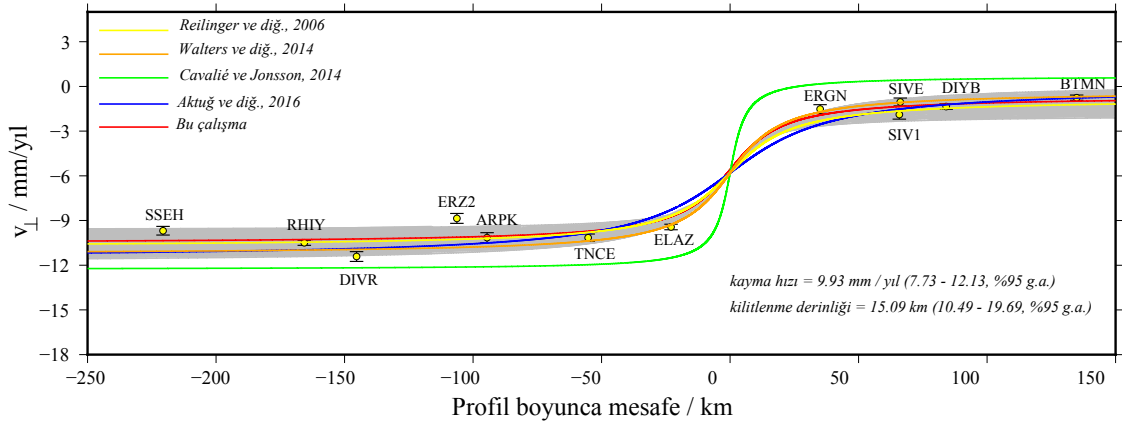
uzak alan kayma hızı ve kilitlenme derinliği parametrelerini kestirmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 InSAR ve yayınlanmış GPS verileri ile DAF ve KAF modellemesi [39]

Şekil 4.25’de gösterilen InSAR verilerinin modellenmesiyle DAF için 11 mm/yıl (± 3) kayma hızı ve 15 km (± 5) kilitlenme derinliği kestirilmiştir [39].

Şekil 4.26’da literatürde DAF için kestirilmiş uzak alan kayma hızı ve kilitlenme derinliği parametrelerinin bu çalışma sonuçlarıyla karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 4.26 DAF uzak alan model sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

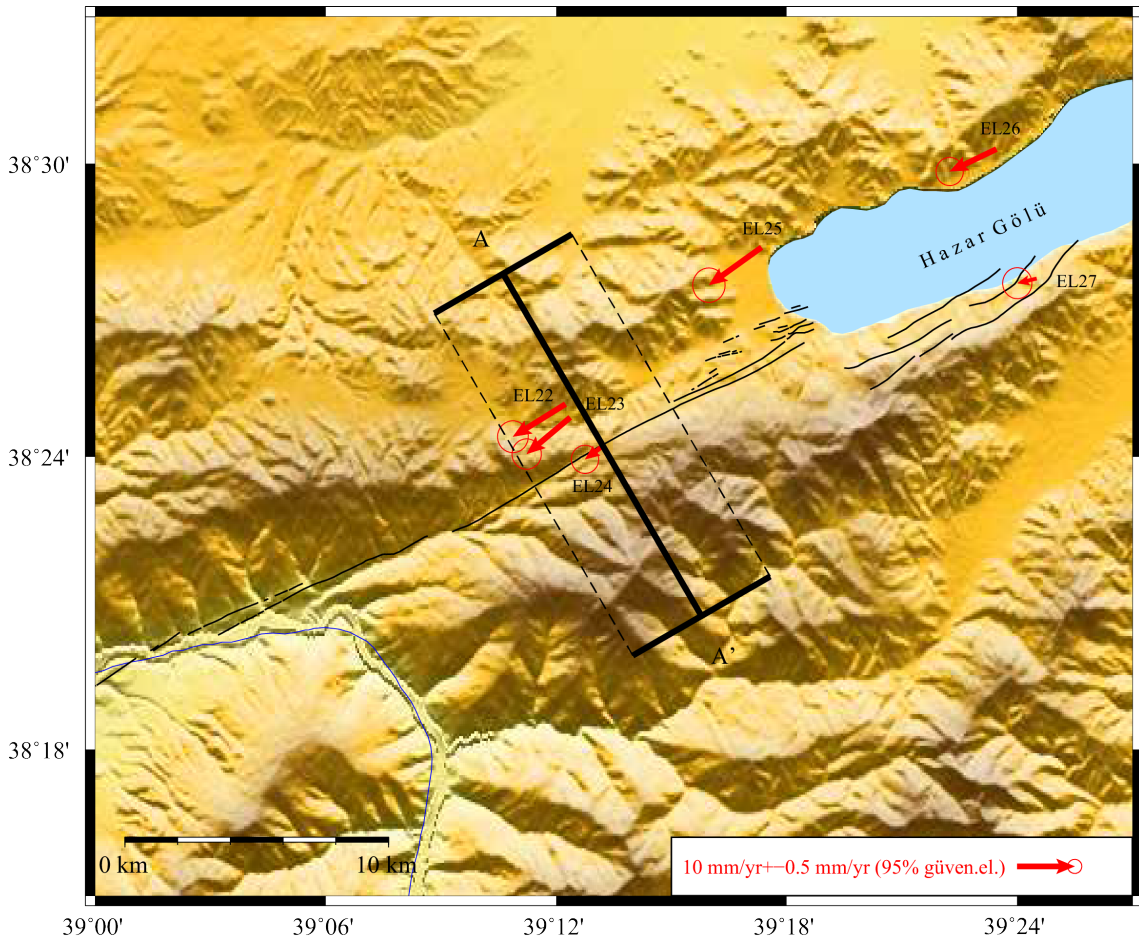
Şekil 4.26’da her bir renk ayrı bir çalışmada kestirilen uzak alan kayma hızı ve kilitlenme derinliği göz önünde bulundurularak oluşturulan model sonuçlarını göstermektedir. Kırmızı çizgi bu çalışma sonucunda elde edilen modeli, gri alan ise bu modelin %95 olasılıklı güven aralığını göstermektedir.

Bu çalışmada, uzun dönem kayma hızı, 9.93 mm/yıl (7.73 - 12.13, %95 g.a.) ve kilitlenme derinliği, 15.09 km (10.49 - 19.69, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan güncel GPS verileriyle kestirilen bu değerler

ile literatürdeki kestirim değerleri güven aralığı içinde olduğundan, bu kestirim değerleriyle analize devam edilmiştir.

4.4.2 Yakın Alan Fay Paralel Hızlar Kullanılarak Krip Hızının Belirlenmesi

(2.1) modeli ile kestirilen uzun dönem kayma hızı ve kilitlenme derinliği (2.14) modelinde sabit kabul edilerek dört profil boyunca fay krip parametreleri belirlenmiştir. Modelleme çalışmasında profil boyunca hesaplanan fay paralel hızlar ile bunlara ilişkin standart sapmalar göz önüne alınarak oluşturulan stokastik model kullanılmıştır. Fay parametrelerinin belirlendiği profiller, hem hızların bölge bölge daha iyi görülebilmesi hem de profil yerlerinin anlaşılabilmesi için yakın olarak Şekil 4.27, 4.30, 4.33 ve 4.36’te gösterilmektedir.

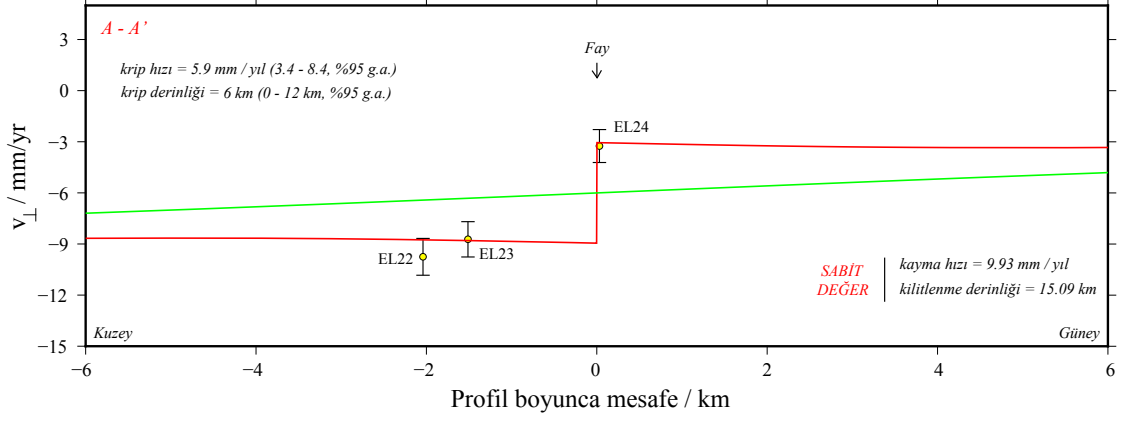


Şekil 4.27 Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' profili

Şekil 4.27’de kırmızı oklar kampanya GPS hızlarını ve %95 güven elipslerini, siyah ince çizgiler diri fayları [31] göstermektedir.

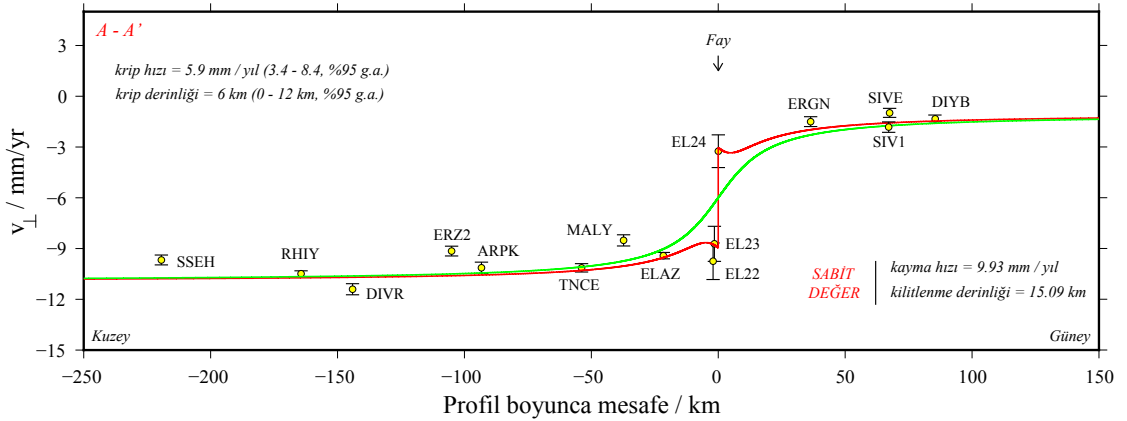
Hız alanı daha yakından incelendiğinde, fayın hız gradyeni üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Fayın altında ve üstündeki hız vektörleri gözle görülür bir değişim

içermektedir. Bu da yüzeydeki asismik hareketin en büyük göstergesidir ki, profil modelleri ile bu hareketin parametreleri de belirlenmiştir. Yakın alan çözümleri daha net görülebilmesi için ayrı ayrı çizdirilmiş ve Şekil 4.28, 4.31, 4.34 ve 4.37’de, uzak alan çözümleri ise Şekil 4.29, 4.32, 4.35 ve 4.38’de verilmektedir.



Şekil 4.28 Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' yakın alan profilinin modellenmesi

Gösterilen profil modellerinde, sarı noktalar GPS istasyonlarına ait fay paralel hız bileşenlerine, hata barları ise bu noktalara ait standart sapmalara ilişkindir. 0 noktasından itibaren grafiğin sol tarafı fayın kuzeyini sağ tarafı ise fayın güneyini göstermektedir. Kırmızı çizgi, fay paralel GPS hız bileşenleriyle elde edilmiş yüzeyde krip eden, yeşil çizgi ise yüzeyde kilitli sol yanal atımlı faya en uygun elastik yerdeğiştirme modelini yansıtmaktadır. Söz konusu dört profil Sivrice’den Palu’ya doğru sırasıyla verilmiştir. Burada yeşil çizgi bir önceki adımda kestirilen uzun dönem kayma hızı ve kilitlenme derinliğine göre oluşturulan modeli göstermektedir. Kırmızı çizgi ise, kestirilen uzun dönem kayma hızı ve kilitlenme derinliği sabit alınmış ve bununla beraber yüzeyde meydana gelen asismik hareketi göstermektedir.



Şekil 4.29 Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' profilinin modellenmesi

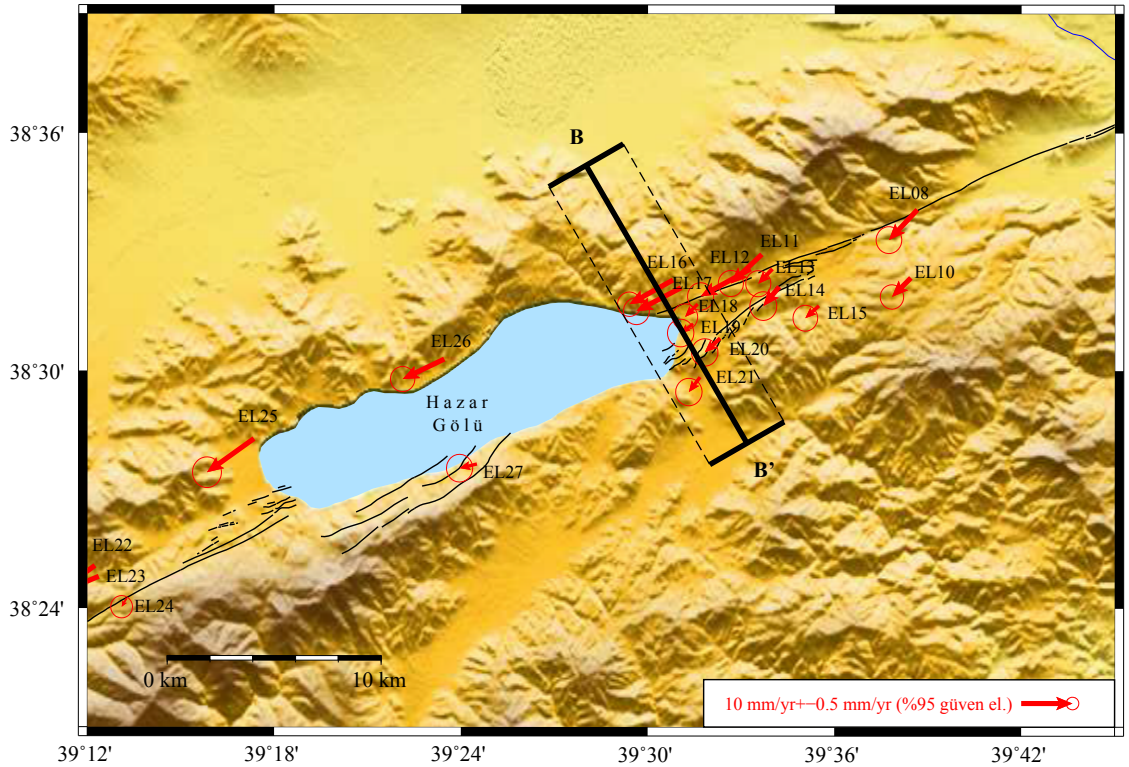
Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29’da Sivrice bölgesinde oluşturulan A-A' profilinin konumu ve modelleri verilmektedir.

Şekil 4.27’de Sivrice’de bulunan GPS noktalarının hızları ve profilin konumu gösterilmektedir. Sivrice’de sadece 3 GPS noktası bulunmaktadır. Bu noktalardan EL24 fay izi boyunca faya en yakın (300 m) GPS kampanya noktasıdır. Şekil 4.28’te bu üç noktanın fay paralel hızları standart sapmalarıyla gösterilmektedir.

Fay yüzey izinin bulunduğu yerdeki atım asismik kaymadan kaynaklanan hız gradyeninin bir sonucudur. 9.93 mm/yıl kayma hızı ve 15.09 km kilitlenme derinliği sabit alındığında, kestirilen krip hızı 5.9 mm/yıl (3.4 - 8.4, %95 g.a.), krip derinliği ise, 6 km (0 - 12, %95 g.a.) bulunmuştur.

Şekil 4.29’da yeşil çizgi ile gösterilen eğri, Şekil 4.22’de verilen uzun dalgaboyunu temsil etmektedir. Yüzeyde hiç hareket olmadığı durumda gerçekleşecek durumu gösteren bu arctanjant eğrisi, fayın yer yüzeyindeki izi boyunca GPS noktalarının fay paralel hızlarından ne kadar uzaklaştığını göstermektedir.

Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32’de Hazar Gölü doğusunda oluşturulan B-B’ profilinin konumu, yakın ve uzak alan modelleri gösterilmektedir.

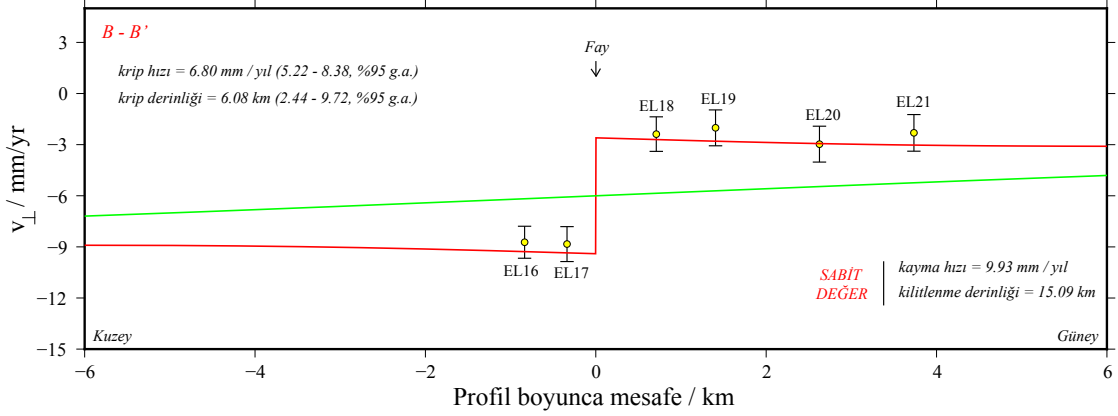


Şekil 4.30 Hazar bölgesinde oluşturulan B-B’ profili

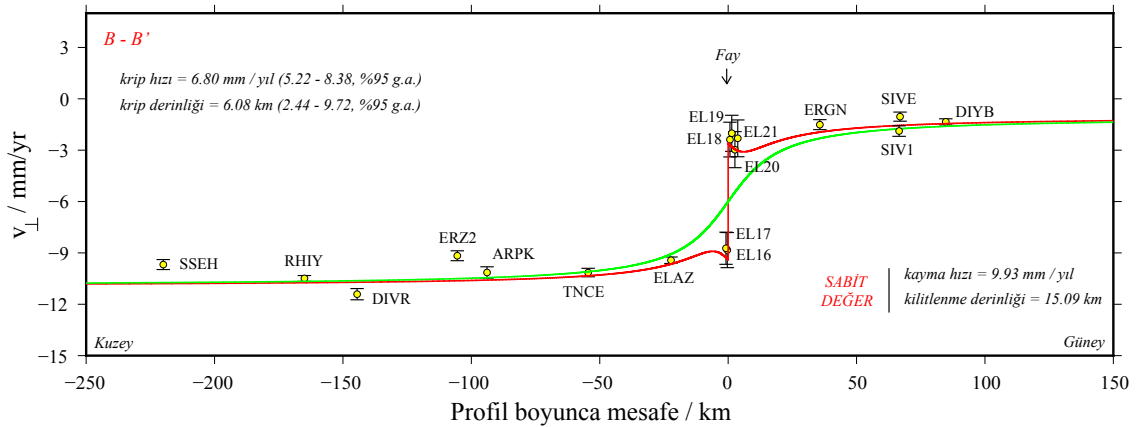
Sivrice bölgesinde görülen hız gradyeni Şekil 4.30’de görüldüğü gibi Hazar Gölü’nün kuzeydoğusunda da devam etmektedir. Şekil 4.31’de profili oluşturan 6 GPS noktasına ilişkin çıkarılan profil modeli gösterilmektedir. Bu noktalardan ikisi fayın kuzeyinde, geri kalanları fayın güneyinde bulunmaktadır. GPS noktalarına ilişkin fay paralel

hızları 4.31 ve 4.32’de gösterilmektedir.

Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca yüzeyde krip olduğunu gösteren profil modellerine göre en yüksek krip hızı ise Hazar Gölü’nün hemen doğusunda B-B’ profili boyunca görülmektedir. B-B’ profilinin modellenmesiyle, krip hızı, 6.80 mm/yıl (5.22 - 8.38, %95 g.a.) ve krip derinliği, 6.08 km (2.44 - 9.72, %95 g.a.) olarak kestirilmiştir.



Şekil 4.31 Hazar bölgesinde oluşturulan B-B’ yakın alan profilinin modellenmesi

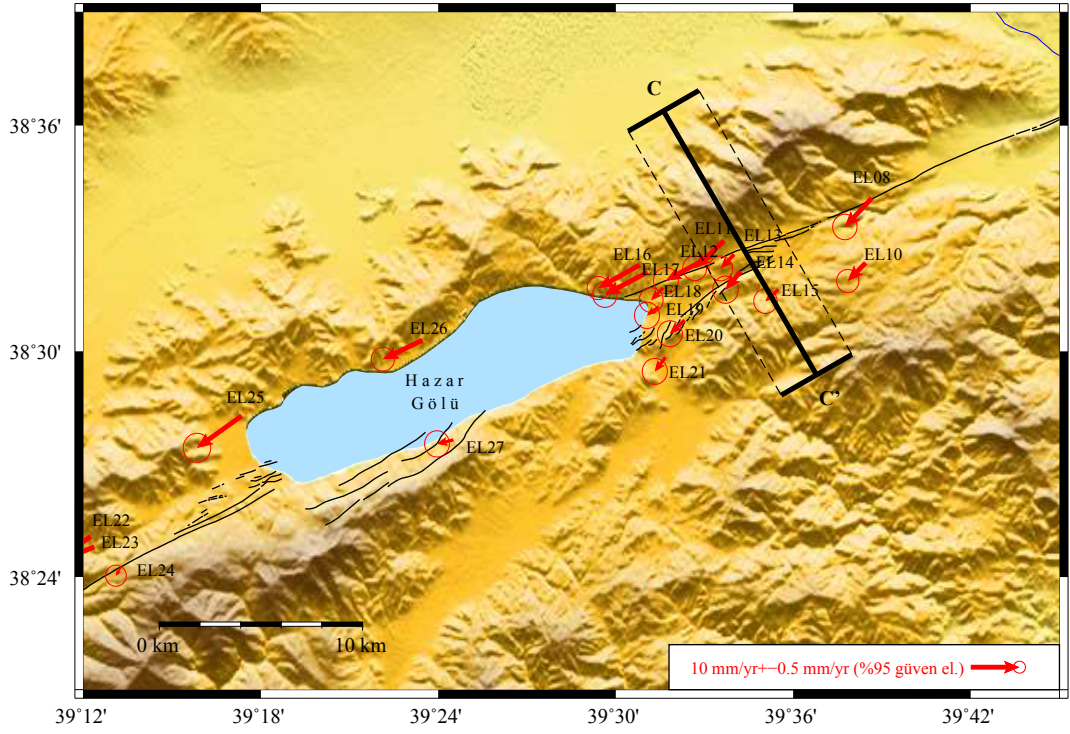


Şekil 4.32 Hazar bölgesinde oluşturulan B-B’ profilinin modellenmesi

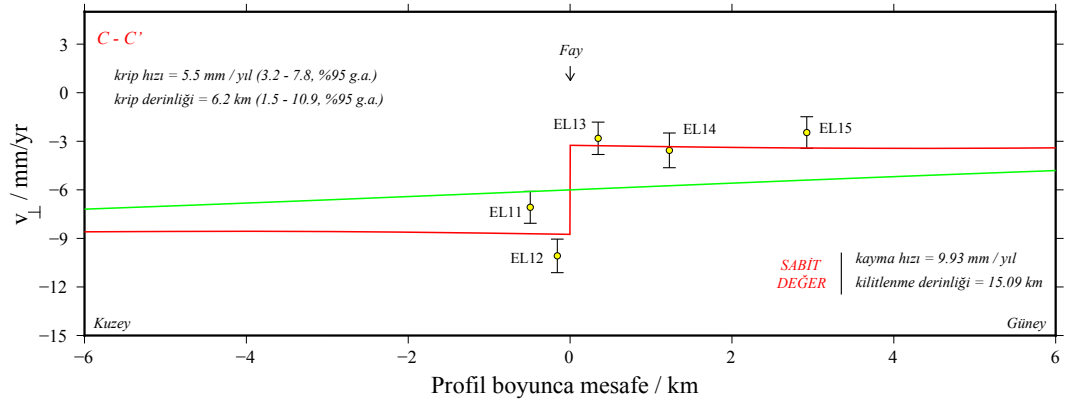
Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35’de Hazar Gölü doğusunda oluşturulan C-C’ profilinin konumu, yakın ve uzak alan modelleri gösterilmektedir.

Şekil 4.34’de profil boyunca ikisi fayın kuzeyinde ve geri kalanı fayın güneyinde olmak üzere toplam 5 GPS noktası görülmektedir. EL08, EL09 ve EL10 noktalarının bulunduğu bölgeden, EL09 anomali göstermesi nedeniyle çıkarıldığı için iki noktadan bir profil oluşturulmamıştır (Şekil 4.33).

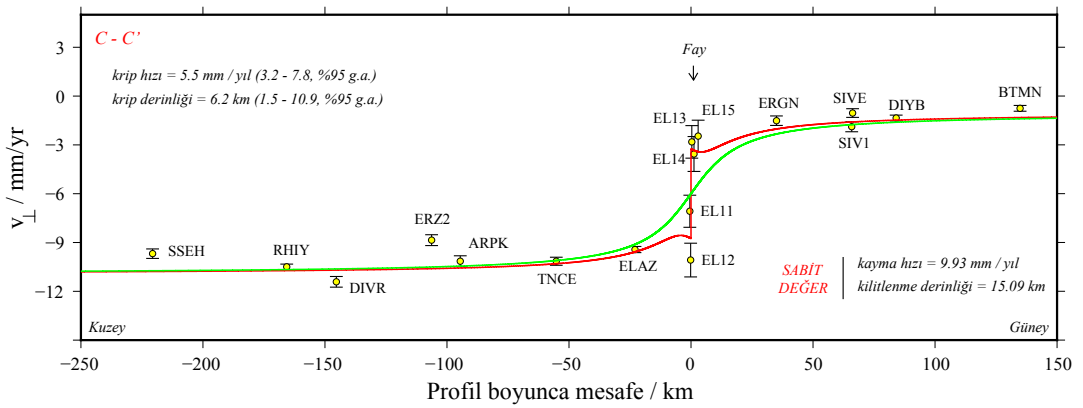
Hazar Gölü’nün doğusundaki ikinci profil olan C-C’ profili boyunca, yaklaşık 5.5 mm/yıl (3.2 - 7.8, %95 g.a.) asismik kayma hızı ile Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca en düşük krip hızı elde edilmiştir.



Şekil 4.33 Hazar bölgesinde oluşturulan C-C' profili

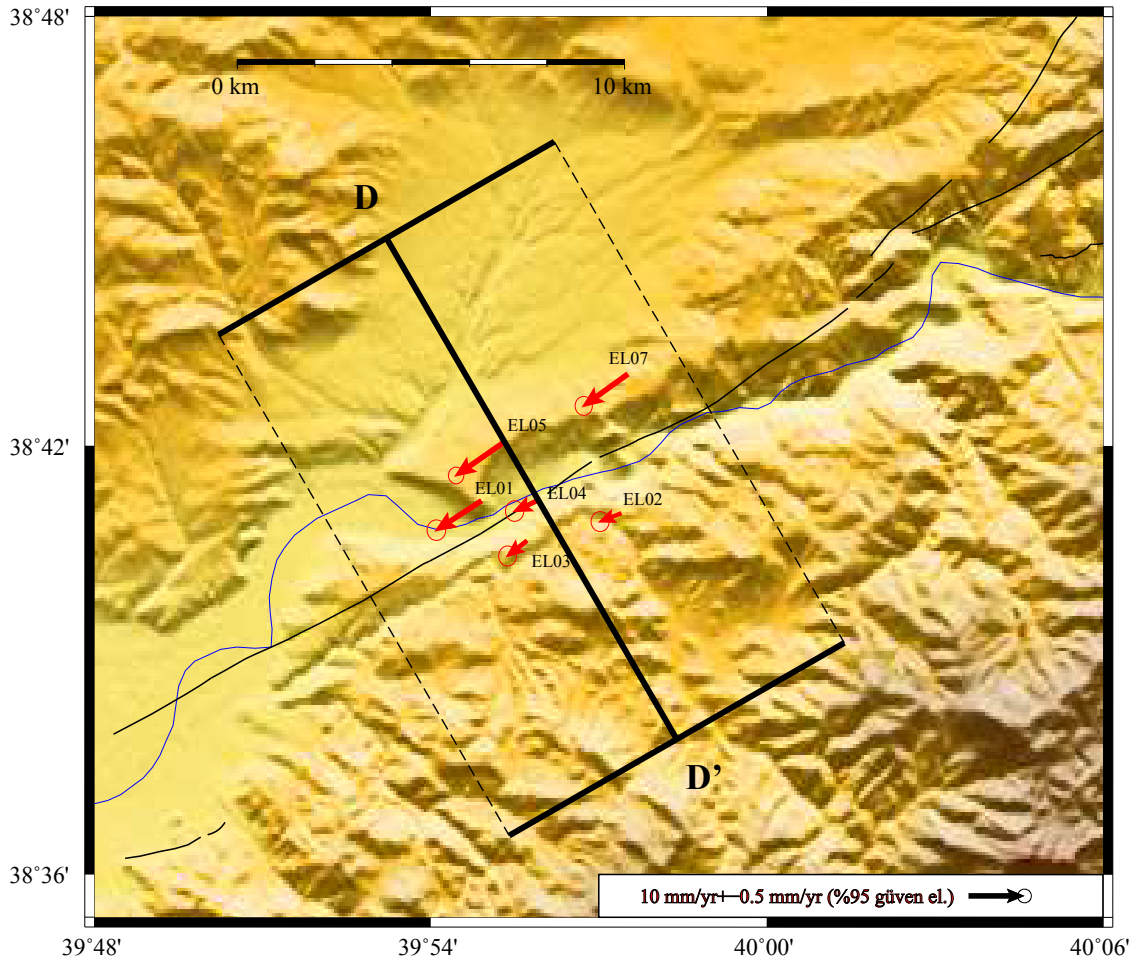


Şekil 4.34 Hazar bölgesinde oluşturulan C-C' yakın alan profilinin modellenmesi

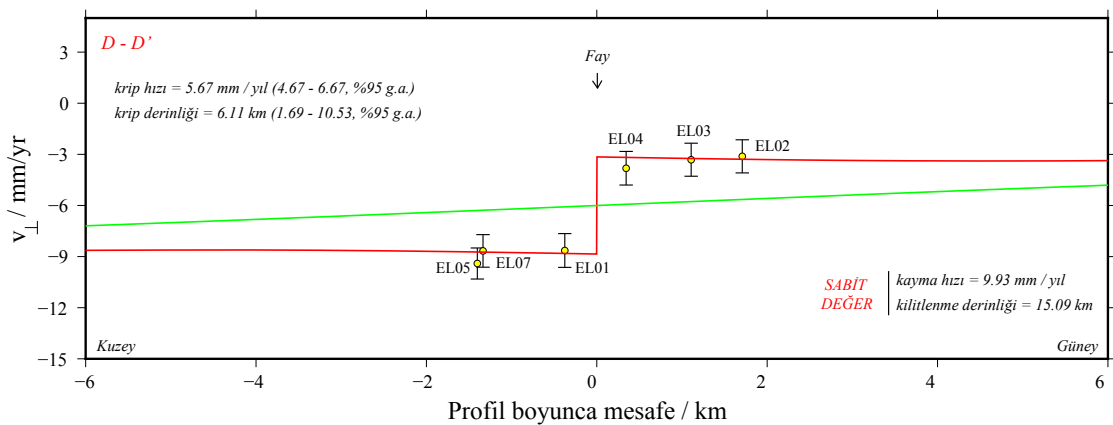


Şekil 4.35 Hazar bölgesinde oluşturulan C-C' profilinin modellenmesi

Şekil 4.36, 4.37 ve 4.38’de Palu bölgesinde oluşturulan D-D’ profilinin konumu, yakın ve uzak alan modelleri gösterilmektedir.



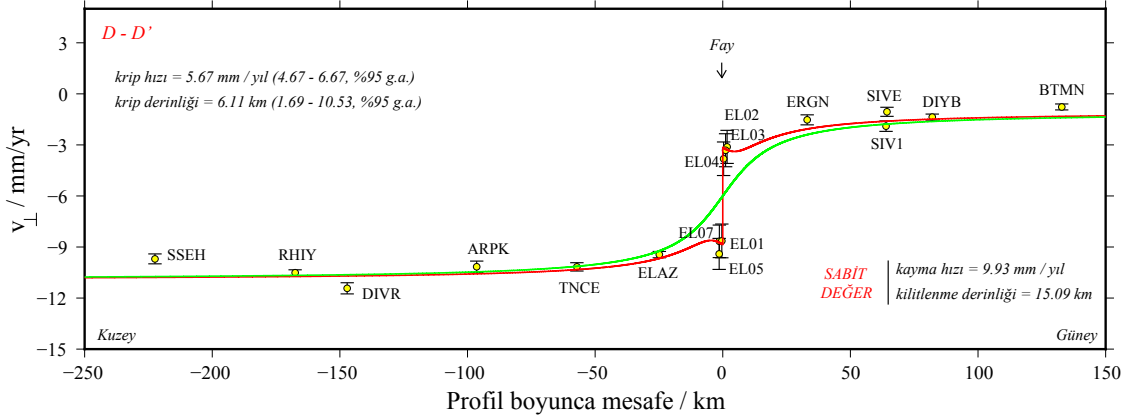
Şekil 4.36 Palu bölgesinde oluşturulan D-D’ profili



Şekil 4.37 Palu bölgesinde oluşturulan D-D’ yakın alan profilinin modellenmesi

Palu bölgesinde 7 nokta ile başlanan kampanyalara, bir noktayı çıkararak altı nokta ile devam edilmiştir. Fayın kuzeyinde ve güneyinde üçer nokta bulunmaktadır (Şekil 4.37).

Palu, yüzeyde 5.67 mm/yıl (4.67 - 6.67, %95 g.a.) hızla kayarken, bu kaymanın sona erdiği derinlik 6.11 km (1.69 - 10.53, %95 g.a.) bulunmuştur.



Şekil 4.38 Palu bölgesinde oluşturulan D-D' profilinin modellenmesi

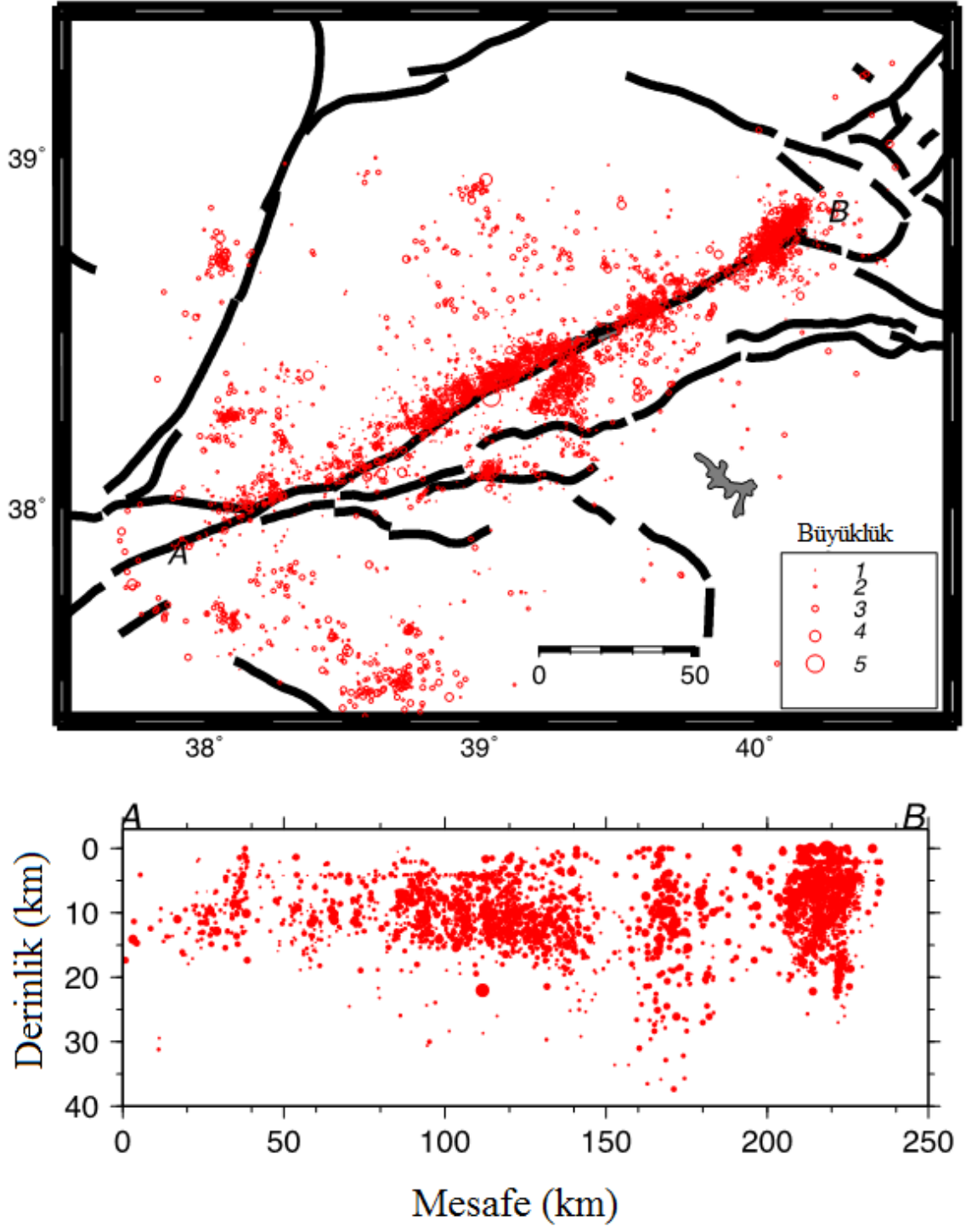
DAF Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca ortalama asismik kayma hızı yaklaşık 5.97 mm/yıl ve ortalama standart sapması ± 0.92 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Profillere göre kestirilen ortalama kilitlenme derinliği, fay boyunca yaklaşık 6.10 km ve standart sapması ± 2.35 km olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca GPS verilerine dayalı olarak krip bulgularının gösterildiği ilk çalışma olduğundan karşılaştırma yapılabilecek bir kaynak bulunmamaktadır.

Bölgede gerçekleştirilen 114Y250 ve 118Y450 numaralı TÜBİTAK projeleri çerçevesinde kullanmak üzere, bölgedeki tüm sismoloji istasyonlara ait (KOERI, AFAD dahil) okumaları içeren bir katalog oluşturulmuştur.

Şekil 4.39, proje kapsamında oluşturulan katalogdaki depremlerin harita üzerindeki dağılımını ve DAF boyunca, bu katalogdan alınan düşey kesiti göstermektedir.

Şekil 4.39 b'deki derinlik kesiti, DAF boyunca fayın mekanik özelliklerinin değiştiğini, çalışma bölgemizi içeren kısımda, sığ derinliklerde (<5km) sismik aktivitenin azaldığını ve daha derinliklerde (>10km) arttığını göstermektedir. Derinliklere bakıldığında, deprem aktivitesinin sismojenik derinlik civarında kümelendiği ve üst kabukta aktivitenin düşük olduğu, ana nedeninin üst kabuğun sünek (kırılgan olmayan) davranış sergilemesi olabileceği, bunun da krip ile ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.39 Proje kapsamında oluşturulan (a) katalogdaki depremlerin dağılımı ve (b) DAF boyunca alınan düşey kesit, altlık aktif fay haritası ([31]'den alınmıştır)

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, krip eden iki farklı bölgede (KAF üzerinde 1999 İzmit depremi kırığı yüzey izi ve DAF üzerinde Hazar Gölü-Palu segmenti boyunca) meydana gelen asismik kayma hareketleri GPS ölçüleri ile belirlenmiştir. Bu kapsamda her iki bölgede oluşturulan sürekli GPS istasyonları ile kampanya GPS noktalarından elde edilen hız parametreleri ve bunlara ilişkin standart sapmalar, elastik yerdeğiştirme modellerinde göz önüne alınarak krip parametreleri (krip hızı ve derinliği) kestirilmiştir. Ayrıca krip olayının yakın alanda mevcut sürekli ve kampanya GPS ölçüleriyle belirlenip izlenebildiği de gösterilmiştir.

1999 İzmit depremi, yanal atımlı faylarda deprem sonrası etkinin çok uzun süre devam ettiği örneklerden biridir (Şekil 3.27). 21 yıl önce gerçekleşen bu deprem sonrası meydana gelen kayma, günümüzde yaklaşık 2.5 mm/yıl hızla devam etmektedir ve SISL - SMAS bazında yaklaşık 30 cm'ye ulaşmıştır (bu değer bu bazda meydana gelen deprem anı yerdeğiştirmenin yaklaşık %10'u kadardır).

1999 İzmit yüzey izi boyunca deprem tarafından tetiklenen ve hala devam ettiğini gördüğümüz episodik krip olayları meydana gelmektedir (Şekil 3.29). Bu olaylar GPS verilerinin yanı sıra InSAR ve kripmetre verileriyle de desteklenmiştir [36]. Krip olayının zamansal ve mekansal dağılımını modellemek amacıyla kullanılarak, kampanya GPS verilerinden elde edilen doğu bileşenine ait kümülatif değerler incelenmiş ve 2015 yılının ikinci yarısında, kripmetre verileriyle de uyumlu bir krip olayına rastlanılmıştır. Kampanya GPS ölçmeleri sırasında bölgede meydana gelen tüm depremler arasında, ISC deprem kataloğuna göre, en büyük deprem 19 Haziran 2015'te ($M = 2.6$) gerçekleşmiştir. Bu depremin böylesi bir krip olayına neden olabileceği düşünülmektedir. Bu krip olayı, 3. ve 4. GPS kampanyalarının sonuçlarında da açıkça görülmektedir (Şekil 3.29A). 1999 İzmit kırığı boyunca, GPS ile İzmit depremi tarafından tetiklenen ve episodik olarak devam eden krip olayları salt GPS ile ölçülebilecek düzeydedir.

1999 İzmit deprem yüzey izi boyunca krip araştırması yapılan çalışmalarda, asismik

kayma hızının en çok depremin dışmerkezinin yakınında olduğu ve buradan uzaklaştıkça yüzeydeki kaymanın azaldığı belirtilmiştir [35, 36]. [35], İzmit şehrine yakın krip hızının 2002 ile 2010 tarihleri arasında 11 ± 2 mm/yıl olarak hesaplandığını belirtirken, [36], bölgede 2011 ile 2017 yılları arasında krip hızını yaklaşık 8 mm/yıl kestirmiştir. Bu çalışmada, depremin dışmerkezinde güncellenmiş GPS hızlarına dayalı 2014 - 2016 yılları arasındaki krip hızı 12.7 mm/yıl ($10.3 - 15.1$, %95g.a.) kestirilmiştir. Sapanca gölünün doğusundaki yavaş kaymanın hızı [35] tarafından 2002 - 2010 yılları arasında 2 mm ($0 - 5$, %95g.a.), [36] tarafından 2011 - 2017 arasında 1.3 mm (± 0.3 , %95g.a.) olarak verilmiştir. GPS kampanya verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, yüzeyde asismik kaymaya rastlanmamış ve bölgedeki asismik kayma derinliği de 0.5 - 1.3 km ($0 - 2$, %95g.a.) olarak belirlenmiştir.

Bununla birlikte, fay boyunca uzun dönem kayma hızı 22.5 ile 25.1 mm/yıl arasında, kilitlenme derinliği ise 8.6 ile 12.1 km arasında kestirilmiştir. [36], fay boyunca uzun dönem kayma hızını 26.2 ile 27.5 mm/yıl arasında, [35] ise 19 - 20 mm/yıl olarak kestirmiştir. Kilitlenme derinliği, [36]'da 9.6 ile 14.3 km arasında değişirken, [35]'da 17 - 18 km olarak belirlenmiştir. Krip olayının en yüksek görüldüğü profil boyunca değerler karşılaştırılacak olursa; [36]'da kilitlenme derinliği 12 km ($11.2 - 12.8$, %95g.a.), kayma hızı ise 26.2 mm/yıl ($25.6 - 26.8$, %95g.a.) hesaplanmıştır. [35]'da ise bu değerler sırasıyla, 18 km ($8 - 28$, %95g.a.) ve 20 mm/yıl ($11 - 30$, %95g.a.) verilmiştir. Bu çalışmada, bu değerler, sırasıyla, 12 km ($8.8 - 15.3$, %95g.a.) ve 25.1 mm/yıl ($22.2 - 28.1$, %95g.a.) olarak kestirilmiştir.

Hazar Gölü - Palu segmenti için, İzmit örneğinde görüldüğü gibi, ayrıntılı çalışmalar bulunmamaktadır. Literatürde DAF, genel olarak, bir bütün olarak ele alınmıştır. Bölgede faya yakın alanda GPS ile yapılan ilk çalışma, bu tez çalışmasıdır. Aynı zamanda, Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca yüzeyde krip olduğu bilgisi ve krip parametreleri ilk defa bu tez kapsamında literatüre kazandırılmıştır.

DAF boyunca kayma hızı, [41] 25 - 35 mm/yıl, ortalama 29 mm/yıl, [37] ~ 13 mm/yıl, [44] ~ 8 mm/yıl, [2] GPS verilerine dayalı hız alanıyla 9 ± 1 mm/yıl, [3] yine GPS hızlarını kullanarak yaklaşık 10 mm/yıl, [38] InSAR analizleriyle GPS hızlarını birleştirilerek, 13 mm/yıl, [39] ise bu hızı 7.5 ± 0.1 mm/yıl olarak belirlemiştir. Bu çalışmada, DAF boyunca uzun dönem kayma hızı, 9.93 mm/yıl ($7.73 - 12.13$, %95g.a.) olarak kestirilmiştir.

DAF boyunca kilitlenme derinliği ise, [38]'de yaklaşık 4.5 km, [3]'de 18 km hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise, Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca 15.09 km ($10.49 - 19.69$, %95g.a.) hesaplanmıştır. Sonsuz uzunlukta sol yanal atımlı dikey

bir fay gibi varsayılarak uygulanan elastik yerdeşiştirme modeli ile literatürle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

DAF'ın Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca krip olayı meydana gelmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, literatürde krip hızı ve derinliği ilk defa bu çalışmada belirlenmiş olup, herhangi bir çalışmayla karşılaştırma yapılamamaktadır. GPS verilerine dayalı hız alanı kullanılarak yapılan profil modeli sonucunda elde edilen asismik kayma hızı, Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca 5.5 ile 6.8 mm/yıl (3.2 – 8.38, %95g.a.) arasında değişmektedir. Bu değer Hazar Gölü'nün doğusunda en yüksek hıza ulaşarak, 6.80 mm/yıl (5.22 – 8.38, %95g.a.) olmaktadır. Ortalama yaklaşık 6 mm/yıl asismik kayma hızıyla fay boyunca uzun dönem hızın yaklaşık %60'ı yüzeyde krip olarak görölmektedir. Segment boyunca krip derinliği ise 6 ile 6.2 km (0 – 12, %95g.a.) arasında değişerek, ortalama 6.1 km olarak kestirilmiştir.

Hem 1999 İzmit depremi yüzey izi boyunca hem de Hazar Gölü - Palu segmenti boyunca yapılan çalışmalarda yüzeyde meydana gelen yavaş kayma olayının, uzun dönem hızının tamamını karşılamadığı ve fay boyunca hala gerinim birikimi olduğu görölmektedir. Bu durumda, asismik kayma görölen bölgeler dahil, fay boyunca deprem meydana gelme olasılığı bulunmaktadır. Deprem tahminlerinin doğruluğu bölgede biriken gerinime bağlıdır. Fay boyunca meydana gelen asismik hareket, elastik gerinim tahminlerini çok daha karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmadaki ölçmelerin sürekliliği ve analizlerin devamlılığı, bölgede ya da komşu faylarda meydana gelebilecek deprem tahminleri açısından hayati önem taşımaktadır.

- [1] D. McKenzie, D. Davies, P. Molnar, "Plate tectonics of the Red Sea and east Africa," *Nature*, vol. 226, no. 5242, pp. 243–248, 1970.
- [2] S. McClusky, S. Balassanian, A. Barka, C. Demir, S. Ergintav, I. Georgiev, O. Gurkan, M. Hamburger, K. Hurst, H. Kahle, *et al.*, "Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 105, no. B3, pp. 5695–5719, 2000.
- [3] R. Reilinger, S. McClusky, P. Vernant, S. Lawrence, S. Ergintav, R. Cakmak, H. Ozener, F. Kadirov, I. Guliev, R. Stepanyan, *et al.*, "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*, vol. 111, no. B5, 2006.
- [4] D. McKenzie, "Active tectonics of the Mediterranean region," *Geophysical Journal International*, vol. 30, no. 2, pp. 109–185, 1972.
- [5] I. Ketin, "Über die tektonisch-mechanischen folgerungen aus den grossen anatolischen erdbeben des letzten dezenniums," *Geologische Rundschau*, vol. 36, no. 1, pp. 77–83, 1948.
- [6] I. Ketin, "Kuzey anadolu deprem fayi," *ITÜDergisi*, vol. 15, pp. 49–52, 1957.
- [7] —, "Kuzey anadolu fayi hakkında," *MTA Dergisi*, vol. 72, pp. 1–27, 1969.
- [8] N. N. Ambraseys, "Some characteristic features of the Anatolian fault zone," *Tectonophysics*, vol. 9, no. 2-3, pp. 143–165, 1970.
- [9] İ. Ketin, "San andreas ve kuzey anadolu fayları arasında bir karşılaştırma," *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, vol. 19, pp. 149–154, 1976.
- [10] A. Barka K. Kadinsky-Cade, "Strike-slip fault geometry in turkey and its influence on earthquake activity," *Tectonics*, vol. 7, no. 3, pp. 663–684, 1988.
- [11] A. Şengör, O. Tüysüz, C. Imren, M. Sakıncı, H. Eyidoğan, N. Görür, X. Le Pichon, C. Rangin, "The North Anatolian fault: A new look," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 33, pp. 37–112, 2005.
- [12] C. Zabcı, "Spatio-temporal behaviour of continental transform faults: Implications from the late Quaternary slip history of the North Anatolian Fault, Turkey," *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 56, no. 11, pp. 1218–1238, 2019.
- [13] A. Barka, "Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 86, no. 5, pp. 1238–1254, 1996.

- [14] R. S. Stein, A. A. Barka, J. H. Dieterich, "Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering," *Geophysical Journal International*, vol. 128, no. 3, pp. 594–604, 1997.
- [15] S. S. Nalbant, A. Hubert, G. C. King, "Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 103, no. B10, pp. 24 469–24 486, 1998.
- [16] F. Lorenzo-Martin, F. Roth, R. Wang, "Elastic and inelastic triggering of earthquakes in the North Anatolian Fault zone," *Tectonophysics*, vol. 424, no. 3-4, pp. 271–289, 2006.
- [17] R. Reilinger, S. Ergintav, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, A. Barka, O. Gurkan, L. Hearn, K. Feigl, R. Cakmak, *et al.*, "Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, $M=7.5$, Izmit, Turkey earthquake," *Science*, vol. 289, no. 5484, pp. 1519–1524, 2000.
- [18] M. Toksoz, R. Reilinger, C. Doll, A. Barka, N. Yalcin, "Izmit (Turkey) earthquake of 17 August 1999: First report," *Seismological Research Letters*, vol. 70, no. 6, pp. 669–679, 1999.
- [19] R. Armijo, B. Meyer, A. Barka, J.-B. de Chabalier, A. Hubert-Ferrari, Z. Cakir, "The fault breaks of the 1999 earthquakes in Turkey and the tectonic evolution of the Sea of Marmara: A summary," *The 1999 İzmit and Düzce earthquakes: preliminary results*, pp. 55–62, 2000.
- [20] T. Wright, E. Fielding, B. Parsons, "Triggered slip: Observations of the 17 August 1999 Izmit (Turkey) earthquake using radar interferometry," *Geophysical Research Letters*, vol. 28, no. 6, pp. 1079–1082, 2001.
- [21] R. Bürgmann, S. Ergintav, P. Segall, E. H. Hearn, S. McClusky, R. E. Reilinger, H. Woith, J. Zschau, "Time-dependent distributed afterslip on and deep below the Izmit earthquake rupture," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 126–137, 2002.
- [22] S. Ergintav, R. Burgmann, S. McClusky, R. Çakmak, R. Reilinger, O. Lenk, A. Barka, H. Ozener, "Postseismic deformation near the Izmit earthquake (17 August 1999, $M=7.5$) rupture zone," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 194–207, 2002.
- [23] E. H. Hearn, R. Bürgmann, R. E. Reilinger, "Dynamics of Izmit earthquake postseismic deformation and loading of the Duzce earthquake hypocenter," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 172–193, 2002.
- [24] Z. Çakır, "Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 Izmit and Düzce Earthquakes using Synthetic Aperture Radar Interferometry," PhD thesis, 2003.
- [25] Z. Cakir, J.-B. d. Chabalier, R. Armijo, B. Meyer, A. Barka, G. Peltzer, "Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations," *Geophysical Journal International*, vol. 155, no. 1, pp. 93–110, 2003.

- [26] S. Ergintav, U. Doğan, C. Gerstenecker, R. Cakmak, A. Belgen, H. Demirel, C. Aydın, R. Reilinger, “A snapshot (2003–2005) of the 3D postseismic deformation for the 1999, Mw= 7.4 Izmit earthquake in the Marmara Region, Turkey, by first results of joint gravity and GPS monitoring,” *Journal of Geodynamics*, vol. 44, no. 1-2, pp. 1–18, 2007.
- [27] S. Ergintav, S. McClusky, E. Hearn, R. Reilinger, R. Cakmak, T. Herring, H. Ozener, O. Lenk, E. Tari, “Seven years of postseismic deformation following the 1999, M= 7.4 and M= 7.2, Izmit-Düzce, Turkey earthquake sequence,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 114, no. B7, 2009.
- [28] S. Ergintav, R. Reilinger, R. Çakmak, M. Floyd, Z. Cakir, U. Doğan, R. King, S. McClusky, H. Özener, “Istanbul’s earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap,” *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 16, pp. 5783–5788, 2014.
- [29] A. Barka, “The north anatolian fault zone,” in *Annales tectonicae*, vol. 6, 1992, pp. 164–195.
- [30] A. Barka, H. Akyuz, E. Altunel, G. Sunal, Z. Cakir, A. Dikbas, B. Yerli, R. Armijo, B. Meyer, J. De Chabalier, *et al.*, “The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian fault,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 43–60, 2002.
- [31] Ö. Emre, T. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun, F. Şaroğlu, “Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası ölçek 1/1.125. 000: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü özel yayın Serisi 30,” *Special Publication Series of MTA-30*, 2013.
- [32] E. Hearn, S. McClusky, S. Ergintav, R. Reilinger, “Izmit earthquake postseismic deformation and dynamics of the North Anatolian Fault Zone,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 114, no. B8, 2009.
- [33] L. Wang, R. Wang, F. Roth, B. Enescu, S. Hainzl, S. Ergintav, “Afterslip and viscoelastic relaxation following the 1999 M 7.4 izmit earthquake from GPS measurements,” *Geophysical Journal International*, vol. 178, no. 3, pp. 1220–1237, 2009.
- [34] Z. Çakir, S. Ergintav, H. Özener, U. Dogan, A. M. Akoglu, M. Meghraoui, R. Reilinger, “Onset of aseismic creep on major strike-slip faults,” *Geology*, vol. 40, no. 12, pp. 1115–1118, 2012.
- [35] E. Hussain, T. J. Wright, R. J. Walters, D. Bekaert, A. Hooper, G. A. Houseman, “Geodetic observations of postseismic creep in the decade after the 1999 Izmit earthquake, Turkey: Implications for a shallow slip deficit,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 121, no. 4, pp. 2980–3001, 2016.
- [36] G. Aslan, C. Lasserre, Z. Cakir, S. Ergintav, S. Özarpaci, U. Dogan, R. Bilham, F. Renard, “Shallow creep along the 1999 Izmit Earthquake rupture (Turkey) from GPS and high temporal resolution interferometric synthetic aperture radar data (2011–2017),” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 124, no. 2, pp. 2218–2236, 2019.
- [37] R. Westaway, “Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 99, no. B6, pp. 12 071–12 090, 1994.

- [38] O. Cavalié S. Jónsson, "Block-like plate movements in eastern Anatolia observed by insar," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 1, pp. 26–31, 2014.
- [39] R. Walters, B. Parsons, T. Wright, "Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of eastern anatolia," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 119, no. 6, pp. 5215–5234, 2014.
- [40] C. R. Allen, "Active faulting in northern Turkey," 1969.
- [41] T. Taymaz, H. Eyidoğan, J. Jackson, "Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey)," *Geophysical Journal International*, vol. 106, no. 3, pp. 537–550, 1991.
- [42] E. Arpat F. Şaroğlu, "The East Anatolian fault system; thoughts on its development," *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, vol. 78, no. 78, pp. 1–12, 1972.
- [43] D. McKenzie, "The east anatolian fault: A major structure in eastern turkey," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 29, no. 1, pp. 189–193, 1976.
- [44] R. Westaway, "Kinematics of the middle east and eastern mediterranean updated.," *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 12, no. 1, 2003.
- [45] C. DeMets, R. G. Gordon, D. F. Argus, "Geologically current plate motions," *Geophysical Journal International*, vol. 181, no. 1, pp. 1–80, 2010.
- [46] R. Bürgmann, D. Schmidt, R. Nadeau, M. d'Alessio, E. Fielding, D. Manaker, T. McEvilly, M. Murray, "Earthquake potential along the northern Hayward fault, California," *Science*, vol. 289, no. 5482, pp. 1178–1182, 2000.
- [47] J.-P. Avouac, "From geodetic imaging of seismic and aseismic fault slip to dynamic modeling of the seismic cycle," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 43, pp. 233–271, 2015.
- [48] A. C. Lawson H. F. Reid, *The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission...* 87. Carnegie institution of Washington, 1908.
- [49] H. Reid, "Permanent displacements of the ground, in the california earthquake of april 18, 1906," *Report of the State Earthquake Investigation Commission*, vol. 2, pp. 16–28, 1910.
- [50] M. Wei, *Observations and modeling of shallow fault creep along the San Andreas Fault system*. University of California, San Diego, 2011.
- [51] W. Thatcher, "Strain accumulation and release mechanism of the 1906 san francisco earthquake," *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, no. 35, pp. 4862–4872, 1975.
- [52] J. Savage, "Equivalent strike-slip earthquake cycles in half-space and lithosphere-asthenosphere earth models," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 95, no. B4, pp. 4873–4879, 1990.
- [53] J. Savage W. Prescott, "Asthenosphere readjustment and the earthquake cycle," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 83, no. B7, pp. 3369–3376, 1978.

- [54] H. Perfettini, J.-P. Avouac, H. Tavera, A. Kositsky, J.-M. Nocquet, F. Bondoux, M. Chlieh, A. Sladen, L. Audin, D. L. Farber, *et al.*, “Seismic and aseismic slip on the central peru megathrust,” *Nature*, vol. 465, no. 7294, pp. 78–81, 2010.
- [55] R. Bürgmann, “The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip,” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 495, pp. 112–134, 2018.
- [56] K. V. Steinbrugge, E. G. Zacher, D. Tocher, C. Whitten, C. Claire, “Creep on the san andreas fault,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 50, no. 3, pp. 389–415, 1960.
- [57] D. Tocher, “Creep rate and related measurements at vineyard, california,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 50, pp. 396–404, 1960.
- [58] C. R. Allen, “Comparisons between the north anatolian fault of turkey and the san andreas fault of california,” in *Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction*, Springer, 1982, pp. 67–85.
- [59] A. Aytun, “Creep measurements in the ısmetpaşa region of the north anatolian fault zone,” in *Multidisciplinary approach to earthquake prediction*, Springer, 1982, pp. 279–292.
- [60] R. Bilham, H. Ozener, D. Mencin, A. Dogru, S. Ergintav, Z. Cakir, A. Aytun, B. Aktug, O. Yilmaz, W. Johnson, *et al.*, “Surface creep on the north anatolian fault at ısmetpasa, turkey, 1944–2016,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 121, no. 10, pp. 7409–7431, 2016.
- [61] Z. Cakir, A. M. Akoglu, S. Belabbes, S. Ergintav, M. Meghraoui, “Creeping along the ısmetpasa section of the north anatolian fault (western turkey): Rate and extent from insar,” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 238, no. 1-2, pp. 225–234, 2005.
- [62] C. Altay, “Continuous creep measurement along the north anatolian fault zone,” *Bull. Geolog. Congr. Turkey*, vol. 6, pp. 77–84, 1991.
- [63] H. Ozener, A. Dogru, B. Turgut, “Quantifying aseismic creep on the ısmetpasa segment of the north anatolian fault zone (turkey) by 6 years of gps observations,” *Journal of Geodynamics*, vol. 67, pp. 72–77, 2013.
- [64] Y. Kaneko, Y. Fialko, D. Sandwell, X. Tong, M. Furuya, “Interseismic deformation and creep along the central section of the north anatolian fault (turkey): Insar observations and implications for rate-and-state friction properties,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, no. 1, pp. 316–331, 2013.
- [65] E. Cetin, Z. Cakir, M. Meghraoui, S. Ergintav, A. M. Akoglu, “Extent and distribution of aseismic slip on the ısmetpaşa segment of the north anatolian fault (turkey) from persistent scatterer insar,” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 15, no. 7, pp. 2883–2894, 2014.
- [66] Z. Cakir, “1999 ızmit kırığı üzerindeki asismik yüzey kaymasının gps ve lidar ölçmeleriyle ızlenmesi,” *TUBITAK Projesi, Sonuc Raporu*, 2017.
- [67] *Berkeley seismology lab*. [Online]. Available: <https://seismo.berkeley.edu/blog/2016/07/08/an-icon-of-plate-tectonics-erased-for-now.html> (visited on 03/27/2020).

- [68] C. R. Allen S. Smith, *Pre-earthquake and post-earthquake surficial displacements*, 1966.
- [69] S. W. Smith M. Wyss, "Displacement on the san andreas fault subsequent to the 1966 parkfield earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, no. 6, pp. 1955–1973, 1968.
- [70] R. Wallace, "Rates and patterns of progressive deformation, in the parkfield-cholame, california, earthquake of june-august 1966," *US Geol. Surv. Prof. Paper*, vol. 579, pp. 23–40, 1968.
- [71] C. R. Allen, M. Wyss, J. N. Brune, A. Grantz, R. E. Wallace, "Displacements on the imperial, superstition hills, and san andreas faults triggered by the borrego mountain earthquake," 1972.
- [72] J. Savage R. Burford, "Geodetic determination of relative plate motion in central California," *Journal of Geophysical Research*, vol. 78, no. 5, pp. 832–845, 1973.
- [73] J. Savage, W. Prescott, M. Lisowski, N. King, "Strain accumulation in southern california, 1973–1980," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 86, no. B8, pp. 6991–7001, 1981.
- [74] J. J. Lienkaemper, J. S. Galehouse, R. W. Simpson, "Creep response of the hayward fault to stress changes caused by the loma prieta earthquake," *Science*, vol. 276, no. 5321, pp. 2014–2016, 1997.
- [75] J. S. Galehouse, *Data from theodolite measurements of creep rates on San Francisco Bay region faults, California: 1979-2001*. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2002.
- [76] A. G. Sylvester, "Near-field tectonic geodesy," <http://books.nap.edu/books/0309036380/html/164.html#pagetop>, 2004.
- [77] F. S. McFarland, J. J. Lienkaemper, S. Caskey, K. Grove, "Data from theodolite measurements of creep rates on san francisco bay region faults, california: 1979-2007," Tech. Rep., 2007.
- [78] R. Bilham, N. Suszek, S. Pinkney, "California creepmeters," *Seismological Research Letters*, vol. 75, no. 4, pp. 481–492, 2004.
- [79] R. Bilham S. Whitehead, "Subsurface creep on the hayward fault, fremont, california," *Geophysical research letters*, vol. 24, no. 11, pp. 1307–1310, 1997.
- [80] J. Langbein, J. Murray, H. Snyder, "Coseismic and initial postseismic deformation from the 2004 parkfield, california, earthquake, observed by global positioning system, electronic distance meter, creepmeters, and borehole strainmeters," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, no. 4B, S304–S320, 2006.
- [81] R. Bürgmannn, E. Fielding, J. Sukhatme, "Slip along the hayward fault, california, estimated from space-based synthetic aperture radar interferometry," *Geology*, vol. 26, no. 6, pp. 559–562, 1998.
- [82] M. Shirzaei R. Bürgmann, "Time-dependent model of creep on the hayward fault from joint inversion of 18 years of insar and surface creep data," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, no. 4, pp. 1733–1746, 2013.

- [83] E. Hussain, A. Hooper, T. J. Wright, R. J. Walters, D. P. Bekaert, "Interseismic strain accumulation across the central North Anatolian Fault from iteratively unwrapped InSAR measurements," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 121, no. 12, pp. 9000–9019, 2016.
- [84] R. A. Harris, "Large earthquakes and creeping faults," *Reviews of Geophysics*, vol. 55, no. 1, pp. 169–198, 2017.
- [85] O. Tatar, F. Poyraz, H. Gürsoy, Z. Cakir, S. Ergintav, Z. Akpınar, F. Koçbulut, F. Sezen, T. Türk, K. Ö. Hastaoğlu, *et al.*, "Crustal deformation and kinematics of the eastern part of the north anatolian fault zone (turkey) from gps measurements," *Tectonophysics*, vol. 518, pp. 55–62, 2012.
- [86] D. E. Moore M. J. Rymer, "Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the san andreas fault," *Nature*, vol. 448, no. 7155, pp. 795–797, 2007.
- [87] C. Morrow, J. Solum, S. Tembe, D. Lockner, T-F Wong, "Using drill cutting separates to estimate the strength of narrow shear zones at safod," *Geophysical Research Letters*, vol. 34, no. 11, 2007.
- [88] L. N. Warr S. Cox, "Clay mineral transformations and weakening mechanisms along the alpine fault, new zealand," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 186, no. 1, pp. 85–101, 2001.
- [89] C. Collettini, A. Niemeijer, C. Viti, C. Marone, *Fault zone fabric and fault weakness. nature 462, 907e910*, 2009.
- [90] A. M. Schleicher, B. A. van der Pluijm, L. Warr, "Nanocoatings of clay and creep of the san andreas fault at parkfield, california," *Geology*, vol. 38, no. 7, pp. 667–670, 2010.
- [91] J. Byerlee, "Friction, overpressure and fault normal compression," *Geophysical Research Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2109–2112, 1990.
- [92] P. Segall, "Integrating geologic and geodetic estimates of slip rate on the san andreas fault system," *International Geology Review*, vol. 44, no. 1, pp. 62–82, 2002.
- [93] R. Holdsworth, E. Van Diggelen, C. Spiers, J. De Bresser, R. J. Walker, L. Bowen, "Fault rocks from the safod core samples: Implications for weakening at shallow depths along the san andreas fault, california," *Journal of Structural Geology*, vol. 33, no. 2, pp. 132–144, 2011.
- [94] K. L. Feigl W. Thatcher, "Geodetic observations of post-seismic transients in the context of the earthquake deformation cycle," *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, no. 14-15, pp. 1012–1028, 2006.
- [95] S. J. Kenner P. Segall, "Postseismic deformation following the 1906 san francisco earthquake," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 105, no. B6, pp. 13 195–13 209, 2000.
- [96] K. H. Chen R. Bürgmann, "Creeping faults: Good news, bad news?" *Reviews of Geophysics*, vol. 55, no. 2, pp. 282–286, 2017.
- [97] R. A. Harris N. A. Abrahamson, "Strong ground motions generated by earthquakes on creeping faults," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 11, pp. 3870–3875, 2014.

- [98] T. Herring, R. King, M. Floyd, S. McClusky, "Gamit reference manual gps analysis at mit release 10.7," *Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Institute of Technology, Massachusetts*, 2018.
- [99] —, "Introduction to gamit/globk release 10.7," 2018.
- [100] —, "Global kalman filter vlbi and gps analysis program reference manual version 10.6," *Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology*, vol. 16, 1e85, 2015.
- [101] J. Weertman J. R. Weertman, *Elementary dislocation theory*. Macmillan, 1964.
- [102] M. Battaglia, P. F. Cervelli, J. R. Murray, "Dmodels: A matlab software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers," *Journal of volcanology and geothermal research*, vol. 254, pp. 1–4, 2013.
- [103] H. Bathke, M. Nikkhoo, E. Holohan, T. Walter, "Insights into the 3d architecture of an active caldera ring-fault at tendürek volcano through modeling of geodetic data," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 422, pp. 157–168, 2015.
- [104] A. Hooper, B. Ófeigsson, F. Sigmundsson, B. Lund, P. Einarsson, H. Geirsson, E. Sturkell, "Increased capture of magma in the crust promoted by ice-cap retreat in iceland," *Nature Geoscience*, vol. 4, no. 11, pp. 783–786, 2011.
- [105] P. Clarke, D. Paradissis, P. Briole, P. England, B. Parsons, H. Billiris, G. Veis, J.-C. Ruegg, "Geodetic investigation of the 13 may 1995 kozani-grevena (greece) earthquake," *Geophysical Research Letters*, vol. 24, no. 6, pp. 707–710, 1997.
- [106] M. Bagnardi A. Hooper, "Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A bayesian approach," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 19, no. 7, pp. 2194–2211, 2018.
- [107] S. N. Lyons, Y. Bock, D. T. Sandwell, "Creep along the imperial fault, southern california, from gps measurements," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 107, no. B10, ETG–12, 2002.
- [108] B. R. Smith-Konter, D. T. Sandwell, P. Shearer, "Locking depths estimated from geodesy and seismology along the San Andreas Fault System: Implications for seismic moment release," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 116, no. B6, 2011.
- [109] Y. Okada, "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space," *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 75, no. 4, pp. 1135–1154, 1985.
- [110] —, "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space," *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 82, no. 2, pp. 1018–1040, 1992.
- [111] *Dc3d0 / dc3d*. [Online]. Available: https://www.bosai.go.jp/study/application/dc3d/DC3Dhtml_E.html (visited on 04/20/2020).
- [112] K.-R. Koch, *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. Springer Science & Business Media, 1999.
- [113] H. Demirel, *Dengeleme hesabı*. Üniversite yayın no: YTÜ. İN. DK-03.0703/Fakülte yayın no: İN. JFM-2003.003, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi/İstanbul, 2003.

- [114] A. D. Özbakir, R. Govers, R. Wortel, "Active faults in the anatolian-aegean plate boundary region with nubia," *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 26, no. 1, pp. 30–56, 2017.
- [115] A. Sengör, "The north anatolian transform fault: Its age, offset and tectonic significance," *Journal of the Geological Society*, vol. 136, no. 3, pp. 269–282, 1979.
- [116] A. C. Şengör C. Zabcı, "The north anatolian fault and the north anatolian shear zone," in *Landscapes and landforms of Turkey*, Springer, 2019, pp. 481–494.
- [117] N. Pavoni, "Die nordanatolische horizontalverschiebung," *Geologische Rundschau*, vol. 51, no. 1, pp. 122–139, 1962.
- [118] S. Özalp, E. Ömer, A. DOğan, "Kuzey anadolu fayı güney kolu'nun segment yapısı ve gemlik fayının paleosismik davranışı, kb anadolu," *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, vol. 147, no. 147, pp. 1–17, 2013.
- [119] I. Ketin F. Roesli, "Makroseismische untersuchungen über das nordwest-anatolische beben vom 18 märz 1953," *Eclogae Geologicae Helvetiae*, vol. 46, pp. 187–208, 1953.
- [120] J. W. Dewey, "Seismicity of northern anatolia," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66, no. 3, pp. 843–868, 1976.
- [121] K. Dirik, F. Belindir, E. Özsayın, A. Kutluay, "Yenice-gönen fay zonu'nun neotektonik özellikleri ve paleosismolojisi," *TUJJB-UDP Project*, 2008.
- [122] N. Ambraseys A. Zatopek, "The mudurnu valley, west anatolia, turkey, earthquake of 22 july 1967," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 59, no. 2, pp. 521–589, 1969.
- [123] C. Zabcı, "Dokurcun-beldibi (adapazarı) arasının morfotektonik ve paleosismolojik özellikleri," PhD thesis, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [124] E. Altunel, M. Meghraoui, H. S. Akyüz, A. Dikbas, "Characteristics of the 1912 co-seismic rupture along the north anatolian fault zone (turkey): Implications for the expected marmara earthquake," *Terra Nova*, vol. 16, no. 4, pp. 198–204, 2004.
- [125] M. E. Aksoy, M. Megraoui, M. FERRY, Z. Cakir, S. Akyuz, V. Karabacak, E. Altunel, "Fault characteristics, segmentation and paleoseismology along the 9 august 1912 ganos earthquake-rupture (north anatolian fault, turkey)," in *International Workshop On Comparative Studies Of The North Anatolian Fault (Northwest Turkey) And The San Andreas FAult (Southern California)*, 2006, p. 40.
- [126] M. E. Aksoy, "Active tectonics and paleoseismology of the Ganos fault segment and seismic characteristics of the 9 August 1912 Mürefte Earthquake of the North Anatolian Fault (Western Turkey)," PhD thesis, Strasbourg, 2009.
- [127] M. E. Aksoy, M. Meghraoui, M. Vallée, Z. Çakır, "Rupture characteristics of the ad 1912 mürefte (ganos) earthquake segment of the north anatolian fault (western turkey)," *Geology*, vol. 38, no. 11, pp. 991–994, 2010.

- [128] R. Stein, J. Dieterich, A. Barka, "Role of stress triggering in earthquake migration on the North Anatolian Fault," *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 21, no. 4, pp. 225–230, 1996.
- [129] T. Parsons, S. Toda, R. S. Stein, A. Barka, J. H. Dieterich, "Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: An interaction-based probability calculation," *Science*, vol. 288, no. 5466, pp. 661–665, 2000.
- [130] X. Le Pichon, N. Chamot-Rooke, C. Rangin, A. Sengör, "The north anatolian fault in the sea of marmara," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 108, no. B4, 2003.
- [131] M. Erdik, M. Demircioglu, K. Sesetyan, E. Durukal, B. Siyahi, "Earthquake hazard in Marmara region," in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, 2003.
- [132] T. Parsons, "Recalculated probability of $M \geq 7$ earthquakes beneath the sea of marmara, turkey," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 109, no. B5, 2004.
- [133] M. Ayhan, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, B. Aktug, E. Herece, R. Reilinger, "Kinematics of the mw= 7.2, 12 november 1999, düzce, turkey earthquake," *Geophysical research letters*, vol. 28, no. 2, pp. 367–370, 2001.
- [134] Z. Çakir, A. A. Barka, J. B. De Chaballier, R. Armijo, B. Meyer, "Kinematics of the november 12, 1999 (mw= 7.2) düzce earthquake deduced from sar interferometry," *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 105–118, 2003.
- [135] A. Barka, "The 17 august 1999 ızmit earthquake," *Science*, vol. 285, no. 5435, pp. 1858–1859, 1999.
- [136] *Tusaga-aktif*. [Online]. Available: <https://www.tkgm.gov.tr/tr/icerik/tusaga-aktif-0> (visited on 04/22/2020).
- [137] *Marmara bölgesi sürekli gps gözlem ağı*. [Online]. Available: <http://ydbe.mam.tubitak.gov.tr/tr/icerik/marmara-bolgesi-surekli-gps-gozlem-agi> (visited on 04/22/2020).
- [138] *Buski'den bursa'ya büyük hizmet*. [Online]. Available: https://www.buski.gov.tr/tr/haber/buskiden_bursaya_buyuk_hizmet__831 (visited on 04/22/2020).
- [139] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [140] A. Leick, L. Rapoport, D. Tatarnikov, *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons, 2015.
- [141] R. Deakin, "A note on the bursa-wolf and molodensky-badekas transformations," *School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University*, pp. 1–21, 2006.
- [142] M. A. Floyd T. A. Herring, "Fast Statistical Approaches to Geodetic Time Series Analysis," in *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*, Springer, 2020, pp. 157–183.

- [143] J. Zhang, Y. Bock, H. Johnson, P. Fang, S. Williams, J. Genrich, S. Wdowinski, J. Behr, "Southern california permanent gps geodetic array: Error analysis of daily position estimates and site velocities," *Journal of geophysical research: solid earth*, vol. 102, no. B8, pp. 18 035–18 055, 1997.
- [144] T. Herring, "Matlab tools for viewing gps velocities and time series," *GPS solutions*, vol. 7, no. 3, pp. 194–199, 2003.
- [145] D. L. Turcotte, *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge university press, 1997.
- [146] I. S. Centre, *On-line bulletin*, 2001.
- [147] E. Arpat F. Şaroğlu, "Türkiye'deki bazı önemli genç tektonik olaylar," *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, vol. 18, no. 1, pp. 91–101, 1975.
- [148] A. Şengör, N. Görür, F. Şaroğlu, "Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study," 1985.
- [149] N. Simao, S. S. Nalbant, F. Sunbul, A. K. Mutlu, "Central and eastern anatolian crustal deformation rate and velocity fields derived from gps and earthquake data," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 433, pp. 89–98, 2016.
- [150] Ö. Emre, T. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun, F. Şaroğlu, "Mart 2010 başyurt-karakoçan (elazığ) depremi değerlendirme raporu," *MTA Jeoloji Etütler Dairesi*, 2010.
- [151] F. Saroglu, O. Emre, I. Kuscı, "Active fault map of turkey," *General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara*, 1992.
- [152] M. A. Özdemir M. İnceöz, "Doğu anadolu fay zonunda (karlıova-türkoğlu arasında) akarsu ötelenmelerinin tektonik verilerle karşılaştırılması," 2003.
- [153] Afad. [Online]. Available: <https://deprem.afad.gov.tr/depremdetay?eventID=416528> (visited on 03/26/2020).
- [154] N. Ambraseys J. Jackson, "Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern mediterranean region," *Geophysical Journal International*, vol. 133, no. 2, pp. 390–406, 1998.
- [155] S. S. Nalbant, J. McCloskey, S. Steacy, A. A. Barka, "Stress accumulation and increased seismic risk in eastern turkey," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 195, no. 3-4, pp. 291–298, 2002.
- [156] H. Cetin, H. Güneyli, L. Mayer, "Paleoseismology of the palu–lake hazar segment of the east anatolian fault zone, turkey," *Tectonophysics*, vol. 374, no. 3-4, pp. 163–197, 2003.
- [157] T. Y. Duman Ö. Emre, "The east anatolian fault: Geometry, segmentation and jog characteristics," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 372, no. 1, pp. 495–529, 2013.
- [158] B. Aktug, H. Ozener, A. Dogru, A. Sabuncu, B. Turgut, K. Halicioglu, O. Yilmaz, E. Havazli, "Slip rates and seismic potential on the east anatolian fault system using an improved gps velocity field," *Journal of Geodynamics*, vol. 94, pp. 1–12, 2016.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgileri: seda.ozarpaci@gmail.com

Makale

1. Aslan, G., Lasserre, C., Cakir, Z., Ergintav, S., Özarpacı, S., Dogan, U., Bilham, R., Renard, F. (2019). Shallow creep along the 1999 Izmit Earthquake rupture (Turkey) from GPS and high temporal resolution interferometric synthetic aperture radar data (2011–2017). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(2), 2218-2236.
2. Özarpacı, S., Doğan, U., Ergintav, S., Çakır, Z., Özdemir, A., Floyd, M., Reilinger, R. (2020). Present GPS Velocity Field Along 1999 Izmit Rupture Zone: Evidence for Continuing Afterslip 20 Years After the Earthquake. *Geophysical Journal International* (Revizyon)

Konferans Bildirisi

1. Doğan, U., Ergintav, S., Zabcı, C., Özarpacı, S., Özdemir, A., Erkoç, M. H. , ... Yazıcı, M.(2019). Investigating the characteristic properties of creeping along the Hazar-Palu Segment of the East Anatolian Fault, Turkey . American Geophysical Union. San Francisco, United States Of America
2. Özarpacı, S., Ergintav, S., Doğan, U., Çakır, Z., (2019). Contribution of GNSS measurements in monitoring 1999 Izmit Rupture Zone after 20 years . ATAG23 - Aktif Tektonik Araştırma Grubu. İstanbul, Turkey
3. Aslan, G., Lasserre, C., Çakır, Z., Ergintav, S., Özarpacı, S., Doğan, U., ... Bilham, R.(2019). Shallow creep along the 1999 Izmit Earthquake Rupture (Turkey) from GPS and high temporal resolution Interferometric Synthetic Aperture Radar Data (2011–2017) . ATAG23 - Aktif Tektonik Araştırma Grubu 23. İstanbul, Turkey
4. Aslan, G., Lasserre, C., Çakır, Z., Ergintav, S., Özarpacı, S., Doğan, U., ... Bilham, R.(2019). Characterizing interseismic aseismic slip along the 1999 Izmit earthquake rupture (Turkey) from GPS, InSAR and creepmeter measurements . European Geosciences Union (EGU) General Assembly. Viyana, Austria
5. Aslan, G., Lasserre, C., Cakir, Z., Ergintav, S., Özarpacı, S., Doğan, U., ... Bilham, R.(2019). 1999 İzmit Kırığı Boyunca Sığ Krip Kareketlerinin GPS ve

- INSAR (2011 - 2017) Verileri ile Gözlemlenmesi . 72. Türkiye Jeoloji Kongresi (pp.478-479). Ankara, Turkey
6. Ergintav, S., Özarpacı, S., Şentürk, S., Özdemir, A., Doğan, U., Çakır, Z., ... Karabulut, H.(2019). Doğu Anadolu Fayı, Hazar-Palu Segmenti Üzerinde Gerçekleşen Krip Davranışının Sorgulanması . 72. Türkiye Jeoloji Kurultayı (pp.33-34). Ankara, Turkey
 7. Çakır, Z., Ergintav, S., Çetin, S., Şentürk, S., Özdemir, A., Doğan, U., ... Karabulut, H.(2018). Surface creep along the East Anatolian Fault . AGU. Washington, United States Of America
 8. Çetin, S., Ergintav, S., Doğan, U., Çakır, Z., Özdemir, A., (2018). Marmara Bölgesi'nde Uzun Dönem Gerilme Birikiminin İzlenmesinde GNSS Ölçülerinin Katkıları . ATAG 22 Aktif Tektonik Araştırma Grubu 22. Toplantısı. Çanakkale, Turkey
 9. Doğan, U., Ergintav, S., Çakır, Z., Çetin, S., Özdemir, A., (2018). Marmara Bölgesi'nde Asismik Yüzey Kayma Olasılığının Sorgulanması: Jeodezik Ölçülerin Katkıları. TUJK2018. İzmir, Turkey
 10. Ergintav, S., Çakır, Z., Doğan, U., Çetin, S., Şentürk, S., Karabulut, H., ... Şaroğlu, F.(2018). Investigation of Seismic Hazard in Palu Region of EAF with State-of-Art Techniques . Uluslararası Palu Sempozyumu. Elazığ, Turkey
 11. Ergintav, S., Çetin, S., Şentürk, S., Özdemir, A., Çakır, Z., Doğan, U., ... Karabulut, H.(2018). New evidence for spatiotemporal fluctuations of slip rate on the East Anatolian Fault, Turkey from newly installed creepmeters and seismological data . EGU-European Geosciences Union. Viyana, Austria
 12. Reilinger, R., Ergintav, S., Karabulut, H., Floyd, M., King, R., Vernant, P., ... Konca, A. Ö. (2018). Fault creep and persistent asperities on the western section of the North Anatolian Fault, Turkey . EGU-European Geosciences Union General Assembly 2018. Vienna, Austria
 13. Ergintav, S., Çakır, Z., Doğan, U., Çetin, S., Şentürk, S., Karabulut, H., ... Şaroğlu, F.(2017). Aseismic slip and surface creep on the Hazar–Palu Section of the East Anatolian Fault, Turkey . AGU-American Geophysical Union. New Orleans, United States Of America
 14. Reilinger, R., Ergintav, S., Karabulut, H., Vernant, P., Floyd, M., Konca, A. Ö. , ... Doğan, U.(2017). Fault creep and persistent asperities on the western section of the North Anatolian Fault, Turkey . AGU-American Geophysical Union. New Orleans, United States Of America
 15. Çakır, Z., Aslan, G., Çetin, S., Doğan, U., Ergintav, S., Lasserre, C., ... Renard, F.(2017). Postseismic deformation of the 1999 Izmit Earthquake (Turkey) – the longest recorded afterslip on a major continental fault . AGU-American Geophysical Union. New Orleans, United States Of America
 16. Doğan, U., Ergintav, S., Çetin, S., Özdemir, A., Çakır, Z., (2017). Sürekli GNSS İstasyonları için Yeni Bir Yaklaşım: Marmara Entegre GNSS Ağı (MEGA) . TUJK - Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (pp.21). İstanbul, Turkey

17. Ergintav, S., Çakır, Z., Doğan, U., Çetin, S., Şentürk, S., Karabulut, H., ... Şaroğlu, F.(2017). DAF'ın Hazar-Palu Segmentinde Gözlenen Krip'e ait Bulgular . ATAG 21 Aktif Tektonik Araştırma Grubu 21. Toplantısı. Afyon, Turkey
18. Şentürk, S., Çakır, Z., Ergintav, S., Doğan, U., Çetin, S., (2017). Surface creep along the East Anatolian Fault (Turkey) revealed by Envisat and Sentinel-1 InSAR time series . Fringe (pp.179). Helsinki, Finland
19. Aslan, G., Çakır, Z., Lasserre, C., Doğan, U., Çetin, S., Renard, F., ... Ergintav, S.(2017). Surface Creep along the 1999 Izmit Earthquake's Rupture (Turkey) from InSAR and GPS . Fringe (pp.160). Helsinki, Finland
20. Çetin, S., Ergintav, S., Doğan, U., Çakır, Z., Şentürk, S., Karabulut, H., ... Şaroğlu, F.(2016). InSAR ve GPS Ölçüleri İle Doğu Anadolu Fayı Boyunca Gazar Gölü - Palu Arasında Krip Araştırması . ATAG 20 Aktif Tektonik Araştırma Grubu 20. Toplantısı (pp.28). Denizli, Turkey
21. Julaiti, W., Ergintav, S., Çakır, Z., Doğan, U., Şentürk, S., Karabulut, H., ... Çetin, S.(2016). Investigating the crustal deformation on the Hazar-Palu segment of the East Anatolian Fault (EAF), Turkey . Japan Geoscience Union Meeting, Chiba, Japan
22. Çetin, S., Ergintav, S., Doğan, U., Çakır, Z., Şentürk, S., Karabulut, H., ... Şaroğlu, F.(2016). Investigation of the Creep along the Hazar – Palu section of the East Anatolian Fault (Turkey) using InSAR and GPS Observations . European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Viyana, Austria
23. Ergintav, S., Çakır, Z., Doğan, U., Şentürk, S., Karabulut, H., Şaroğlu, F., ... Özener, H.(2016). DAF Boyunca, Hazar-Palu Arasında Gözlenen Krip Olayının Çok Disiplinli Araştırılması . 69. Jeoloji Kurultayı, Ankara, Turkey
24. Şentürk, S., Çakır, Z., Ergintav, S., Doğan, U., Çetin, S., Akoğlu, A., ... Meghraoui, M.(2015). Surface Creep Along the East Anatolian Fault (turkey) Revealed by InSAR Timer Series: Implications for Seismic Hazard and Mechanism of Creep . American Geophysical Union - AGU, San Francisco, United States Of America

Proje

1. "1999 İzmit Kırığı Üzerindeki Asismik Yüzey Kaymasının GPS ve Lidar Ölçmeleriyle İzlenmesi" isimli 113Y102 numaralı TÜBİTAK 1001 Projesi (Yürütücü Z. Çakır)
2. "Hazar Gölü-Palu Arasında Doğu Anadolu Fay Zonu Boyunca Gözlenen Krip Olayının Çok Disiplinli Araştırılması" isimli 114Y250 numaralı TÜBİTAK 1001 Projesi (Yürütücü S. Ergintav)
3. "Marmara Bölgesi İçin Gerçekçi Tehlike Haritalarının Oluşturulması Amacıyla, Krip Eden Zonların Araştırılması" isimli 117Y278 numaralı TÜBİTAK 2507 Projesi (Yürütücü S. Ergintav)

4. "Doğu Anadolu Fayı, Hazar-Palu Segmenti Üzerinde Gerçekleşen Krip Hareketi Özelliklerinin Çok Disiplinli Yöntemlerle Belirlenmesi" isimli 118Y450 numaralı TÜBİTAK 1001 Projesi (Yürütücü U. DOĞAN)

Ödöl

1. TÜBİTAK 2016 yılı 2214-A Doktora Sırası Yurt Dışı Araştırma Burs Programı
2. MIT Uluslararası Bilim Ve Teknoloji Girişimleri Ödölü (MIT MISTI)
3. ATAG22 Aktif Tektonik Araştırma Grubu 22. Çalıştayı En iyi sunum 3.lük ödölü