



T. C.

**SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KUZEY ANADOLU FAY ZONU' NUN DOĞU KESİMİNDEKİ
TEKTONİK HAREKETLERİN BLOK MODELLEME İLE
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayyüce Kartal

20179249001

Geomatik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih Poyraz

SİVAS

HAZİRAN 2020

Ayyüce KARTAL’ ın hazırladığı ve “KUZEY ANADOLU FAY ZONU’NUN DOĞU KESİMİNDEKİ TEKTONİK HAREKETLERİN BLOK MODELLEME İLE İNCELENMESİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI’ nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Doç. Dr. Fatih POYRAZ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Ömer YILDIRIM Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Kemal Özgür HASTAOĞLU Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Özlem Pelin CAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

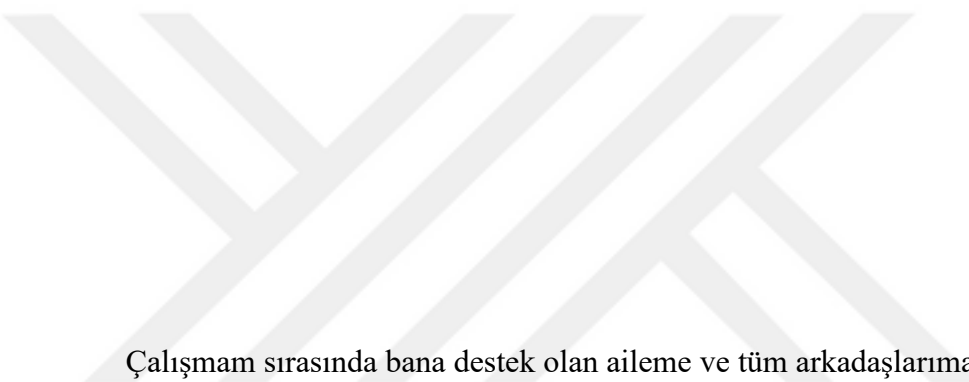
Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)' nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Ayyüce KARTAL, 2020



Çalışmam sırasında bana destek olan aileme ve tüm arkadaşlarıma...

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

10.05.2020

Ayyüce KARTAL

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her daim yardımcı olan, kıymetli vaktini ayırarak tezdeki sorunlarımı çözmemde yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Fatih Poyraz ve akabinde bölümdeki diğer hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Üniversite hayatıma başladığım an itibariyle deneyim ve fikirlerinden yararlandığım ve her türlü desteğini hissettiğim kıymetli hocam Prof. Dr. Ömer YILDIRIM' a teşekkür ederim.

Tezdeki verilerin değerlendirmesinde, sonuçların yorumlanmasında fikirlerinden yararlandığım sayın Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU' a teşekkür ederim.

Program konusunda bilgisinden yararlandığım sayın Prof. Dr. Bahadır AKTUĞ' a teşekkür ederim.

Çalışmam süresince her zaman yanımda olan desteklerini her zaman hissettiğim arkadaşlarım, Yük. Harita Müh. Esmâ DEMİRCİ, Harita Müh. Rümeysa ŞENER, Yük. Harita Müh. Halime ÖDÜL, Öğr. Gör. Derya IŞIK, Harita Müh. Melek BÖLÜKBAŞI, Harita Müh. Ferhat KONUKSEVER' e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemdeki en büyük destekçilerim olan, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana sabır duyan anneme, babama ve abime sonsuz teşekkürlerimi sunarım...

ÖZET

KUZEY ANADOLU FAY ZONU'NUN DOĞU KESİMİNDEKİ TEKTONİK HAREKETLERİN BLOK MODELLEME İLE İNCELENMESİ

Ayyüce KARTAL

Yüksek Lisans Tezi

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih POYRAZ

2020, 73+xvii sayfa

Bu tez çalışmasında, aktif bir tektoniğe sahip, Avrasya ve Anadolu Plakasının sınırını oluşturan Kuzey Anadolu Fay Zonu' nun doğu kesiminin blok hareketleri ve gerinim birikimleri incelenmiştir. Çalışma alanına ilişkin gerinim birikimini ve kayma miktarlarını elde etmek için çalışmada uygulanacak yöntemlere uygun olan 10 adet TUSAGA-Aktif istasyonlarından yararlanarak bir GNSS ağı oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan hız verileri GAMİT/GLOBK yazılımları kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu ağdaki ölçü verileri ile hesaplanmış hız vektörlerini girdi verisi olarak kabul eden Geodsuit programı yardımıyla Gerinim analizi ve Blok modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu sayede elde edilen sonuçların, çalışma bölgesinin tektonik yapısıyla, uyumunu incelenmiştir.

Gerinim analizi sonucunda elde edilen çalışma alanına ilişkin gerinim alanı incelendiğinde KAFZ' ın sağ yanal atımlı fay karakterine uygun olarak, KB -GD yönünde sıkıştığını ve KD-GB yönünde genişlediğini görülmektedir. Kısacası, bölgenin tektonik yapısıyla uyum sağladığı ve anlamlı bir birikimin varlığı söz konusudur.

Modelleme çalışmasında fay ve blok geometrisini oluşturmak için MTA'nın aktif fay haritasından yararlanılmıştır. Fayın yapısal özellikleri analiz edilerek, fayın tek segmentli ve üç segmentli oluşumundaki değişimlerini incelemek için iki farklı model oluşturulmuştur.

Birinci modelde; fay hattının çalışma alanı boyunca yapısının tek segment olduğunu kabul ederek değerlendirildiğinde, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kayma (Strike-slip) miktarının 20.9 ± 1.2 mm/yıl ve eğim yönündeki kaymanın (Dip-slip) 1.5 ± 1.0 mm/yıl sıkışma rejimi oluşturduğu görülmektedir.

İkinci modelde ise blok sınırlarını oluşturulan fayın üç ayrı segmenti değerlendirildiğinde Reşadiye, Suşehri, Refahiye segmentlerinde fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kayma miktarlarının sırasıyla 21.1 ± 1.3 mm/yıl, 21.1 ± 1.3 mm/yıl, 21.3 ± 1.3 mm/yıl olarak hesaplanmış ve eğim yönündeki kaymalarının ise sırasıyla 1.2 ± 1.0 mm/yıl, 2.5 ± 1.0 mm/yıl, 2.5 ± 1.0 mm/yıl değerlerinde sıkışma rejimi oluşturdukları görülmektedir. Fay doğrultusu ve eğim yönündeki kaymaların değerlerinin hız alanıyla uyumlu ve fayın karakterini yansıttığı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Kuzey Anadolu Fay Zonu, Deprem, Gerinim, Blok Modelleme.



ABSTRACT

INVESTIGATION WITH BLOCK MODELLING OF THE TEKTONIC MOVEMENTS IN THE EASTERN SECTION OF THE NORTH ANATOLIAN FAULT ZONE

Ayyüce KARTAL

Master of Science Thesis

Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Fatih POYRAZ

2020, 73+xvii pages

In this thesis study, block movements and strain accumulation of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone, which forms the boundary of the Eurasian and Anatolian Plate, which have an active tectonics, were investigated.

A GNSS network has been created by using 10 TUSAGA-Active stations that are suitable for the methods to be applied in the study in order to obtain the strain accumulation and shear amounts related to the study area.

The speed data used in the study were evaluated using GAMIT / GLOBK software.

Strain analysis and block modeling studies have been made with the help of Geodsuit program, which accepts as input data the velocity vectors calculated with measurement data in this network. In this way, of the results obtained was investigated compatibility with its tectonic structure of the study area.

When the strain area related to the region obtained as a result of strain analysis is examined, it can be seen that KAFZ is compressed in the NW-SE direction and expands in the NE-SW direction in accordance with the right lateral fault character. In short, the region's harmony with its tectonic structure and there is a meaningful accumulation.

In the modeling study, to create the fault and block geometry was used the active fault map of the MTA. By analyzing the structural properties of the fault, For to examine the changes in the single segment and three segment formation of the fault were created the two different models.

In the first model; when evaluated accepting that the as one segment of structure along the working area of the fault line is observed 20.9 ± 1.2 mm / year of amount right

direction slip (strike-slip) in fault of the direction range and created a compression regime 1.5 ± 1.0 mm / year of slip (dip-slip) in the slope direction.

In the second model, When the fault of the block borders is evaluated as three separate segments, In the Reşadiye, Suşehri, Refahiye segments, was observed which were calculated as 21.1 ± 1.3 mm / year, 21.1 ± 1.3 mm / year, 21.3 ± 1.3 mm / year, respectively, and created a compression regime the 1.2 ± 1.0 mm / year, 2.5 ± 1.0 mm / year, 2.5 ± 1.0 mm / year respectively of slips in slope direction. It is thought that the values of the shifts in the direction of the fault and the slope direction are compatible with the speed area and reflect the character of the fault.

Key Words: North Anatolian Fault Zone, Earthquake, Strain, Block Modeling.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEKTONİK HAREKETLER VE DEPREM.....	5
2.1. Yerkürenin Yapısı ve Levha (Plaka) Tektoniği	5
2.2. Deprem	8
2.3. Faylanma (Kopma).....	12
2.4. Türkiye'nin Tektonik Yapısı	16
2.5. Kuzey Anadolu Fay Zonu	21
2.5.1. Kuzey Anadolu Fay Zonunun Türkiye'deki konumu.....	21
2.5.2. Kuzey Anadolu Fay Zonunun tektonik yapısı	23
2.5.3. Kuzey Anadolu Fay Zonunda meydana gelmiş büyük depremler ve atımları	23
3. GNSS AĞLARI	27
3.1. Uluslararası GNSS Ağı	27
3.2. TUSAGA-AKTİF Ağı.....	28
4. GPS TEKNİĞİ YÖNTEMİ İLE TEKTONİK HAREKETLERİN BELİRLENMESİ.....	31
4.1. GPS Hızlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntem ve Materyaller	32
4.1.1. GAMIT yazılımı	34
4.1.2. GLOBK yazılımı	35
5. GERİNİM ANALİZİ	37
5.1. Genel Bilgiler	37
5.1.1. Gerilim	37
5.1.2. Gerinim	40
5.2 Gerinim Parametreleri ve Matematiksel İfadesi.....	41
6. BLOK MODELLEME	47
7. UYGULAMA: KUZEY ANADOLU FAY ZONUNUN DOĞU KESİMİ' NİN STRAİN ANALİZİ VE MODELLENMESİ	52
7.1. Çalışma Alanı: Kuzey Anadolu Fay Zonunun Doğu Kesimi.....	52
7.2. Avrasya Levhasına Göre KAFZ Doğu Kesiminin Hız Alanın Belirlenmesi .	56
7.3. KAFZ Doğu Kesiminin Gerinim Alanının Belirlenmesi	58
7.4. Çalışma Alanının Modellenmesi	59
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Yerkürenin iç yapısı (Url-2)	5
Şekil 2.2 Yerkürenin Dış Kabuğunun Yapısı (Tiryakioğlu, 2010).....	6
Şekil 2.3 Dünyamızdaki ana tektonik levhalar ve hareket yönleri (Url-3).....	7
Şekil 2.4 Levha (Plaka) hareketleri (Url-4)	8
Şekil 2.5 Deprem oluşum mekanizması (Atabey, 2000’ den değiştirilerek).....	10
Şekil 2.6 Gerilme-Zaman ilişkisi. Kırmızı kesik çizgi fay üzerindeki sürtünme ve normal gerilmenin yenildiği eşik değeri göstermektedir (Çakmak, 2010’dan değiştirilerek).	11
Şekil 2.7 Farklı tektonik davranışlar altında meydana gelen yapılar (Köksal 2011’den değiştirilerek)	13
Şekil 2.8 Fay çeşitleri	13
Şekil 2.9 Eğim atımlı normal faylar (B) ve eğim atımlı ters fayların (C) gösterimi	14
Şekil 2.10 Normal (A) ve ters (B) fayların doğadaki görünümü (Url-8)	14
Şekil 2.11 Sağ yönlü doğrultu atımlı fay (B), Sol yönlü doğrultu atımlı fay (C).....	15
Şekil 2.12 Sağ ve sol yönlü doğrultu atımlı fayların yeryüzünde oluşturduğu değişimlerin gösterimi (Url-5 ve Url-7’ den değiştirilerek)	15
Şekil 2.13 Yanal atımlı fay gösterimi (Tiryakioğlu, 2012)	16
Şekil 2.14 Türkiye ve çevresinin, Levhaların tektonik haritası. Düz çizgi; yanal atımlı fay, kesikli çizgi; normal fay, üçgenli çizgi; bindirme bölgesi (Demir, 1999; McClusky vd., 2000)	17
Şekil 2.15 Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Url-11)	20
Şekil 2.16 Levhaların göreceli hareketi ile Kuzey Anadolu Fayının oluşumu (McClusky vd., 2000; Köksal, 2011).....	21
Şekil 2.17 Kuzey Anadolu Fay hattının güzergahı (Barka ve Kadinsky-Cade 1988)....	22
Şekil 2.18 Kuzey Anadolu fayı ve bağlantılı kolları (Öztürk, 2017)	23
Şekil 2.19 Erzincan Depreminden bu yana Kuzey Anadolu Fayı boyunca meydana gelen depremler (Şengör vd., 2005).	25
Şekil 3.1 IGS istasyonlarının dağılımı (Bülbül, 2018)	28
Şekil 3.2 TUSAGA-Aktif İstasyonlarının dağılımı (Url-14).....	30
Şekil 4.1 Bilimsel amaçlı yazılımlarda iş akışı (Kahveci ve Yıldız, 2012).....	33
Şekil 5.1 Cisme etkiyen (dış kuvvet), F kuvveti.....	37
Şekil 5.2 (1) Çekme gerilmesi (2) Sıkışma gerilmesi.....	38
Şekil 5.3 Kesme gerilmesi	39
Şekil 5.5 Kesme gerinimi	41
Şekil 5.6 Gerinim elipsi, maksimum ve minimum asal gerinim parametreleri (Demir, 1999)	44
Şekil 5.7: a) sıkışmayı b) açılmayı gösterir (Cai ve Grafarend, 2007).....	44
Şekil 5.8 Kayma gerinim parametrelerinin (γ_1, γ_2) farklı durumları için gösterimleri (Feigl, 1990).....	45
Şekil 6.1 Blok modellemenin genel ilkesi (Çakmak, 2010)	47
Şekil 6.2 Fay geometrisi ve kayma (Aktuğ ve Çelik, 2008).....	48
Şekil 7.1 Çalışma Alanının gösterimi	52
Şekil 7.2 MTA’nın üretmiş olduğu Türkiye Diri Fay Haritası (Emre vd., 2013)	53
Şekil 7.3 Çalışma bölgesinden geçen fayın segmentleri	53
Şekil 7.4 Çalışmada kullanılan TUSAGA-AKTİF İstasyonlarının dağılımı.....	55

Şekil 7.5 Çalışma Alanını Oluşturan TUSAGA-AKTİF İstasyonlarına ait ITRF08 Sisteminde Avrasya Levhasına Göre Hız vektörleri.....	57
Şekil 7.6 Çalışma alanındaki gerinim parametreleri ile hesaplanması ile elde edilen sıkışma ve açılma yönleri (Mavi vektörler bölgedeki açılmayı kırmızı vektörler ise sıkışmayı göstermektedir.).....	58
Şekil 7.7 Birinci modeldeki fay boyunca meydana kayma miktarları	60
Şekil 7.8 Birinci modeldeki artık hızlar (Veri-model hız farkı)	61
Şekil 7.9 İkinci modeldeki fay boyunca meydana gelen kayma miktarları.....	62
Şekil 7.10 İkinci modelin artık hızları (Veri-model hız farkı)	63



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Kuzey Anadolu fayı üzerinde meydana gelen tarihsel depremler (Url-12)	25
Çizelge 7.1 Çalışmada kullanılan TUSAGA-AKTİF istasyon noktaları	54
Çizelge 7.2 Çalışmada kullanılan IGS istasyon noktaları	55
Çizelge 7.3 TUSAGA-AKTİF ve IGS İstasyonlarına ait hız bileşenleri ve standart sapmaları.....	57



SİMGELER DİZİNİ

B	Katsayılar matrisi
G	Rijitlik modülü
dF	Bağıl konum değişim gradyent tensörü
f_s	Kesme kuvveti
E	Simetrik gerinim tensörü
w	Ters simetrik dönme tensörü
t	Zaman
du	Bağıl konum değişimi
$\mathcal{E}_{max}$	Maksimum asal gerinim
$\mathcal{E}_{min}$	Minimum asal gerinim
ϕ	Maksimum gerinim yönü
Δ	Dilatasyon
S	Kayma vektörü
δ	Eğim açısı (dip angle)
α	Fay düzleminin azimutu (strike)
d	Fay düzleminin derinliği
L	Fay düzleminin uzunluğu
w	Fay düzleminin genişliği
SS	Fay doğrultusu yönündeki kayma (strike-slip)
DS	Fay eğimi yönündeki kayma (dip-slip)
x,y	Fay doğrultusu ve ona dik koordinatlar
r	Kayma vektörünün yönü (rake)

KISALTMALAR DİZİNİ

CÜ	Cumhuriyet Üniversitesi
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu
GPS	Global Positioning System
DAFZ	Doğu Anadolu Fay Zonu
EGS	Ege Graben Sistemi
HKY	Helenik Kıbrıs Yayı
IGS	International GNSS Service
TUTGA	Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı
TUSAGA	Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı
GNSS	Global Navigation Satellite System
IERS	International Earth Rotation Service
IAG	International Association of Geodesy
MAGNET	Marmara GPS Ağı
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
HUAM	Ham Uydu Alıcı Mesafesi
EKK	En Küçük Kareler
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
HGK	Harita Genel Komutanlığı

1. GİRİŞ

Türkiye sismik aktivite bakımından dünyadaki en aktif bölgelerden birisidir. Bu yüzden, Türkiye ve etrafının aktif tektoniği hakkında detaylı, doğru ve ulaşılabilir bilgiler edinilmesi gerekli olup, depremi çok detaylı inceleyerek bunların kaynak parametrelerini, fayların eylemleri, fayın atım miktarı ve mekanizması hakkında detaylı bilgilere sahip olmamız gerekmektedir. Bu da faylar boyunca deformasyonun nasıl biriktiği ve bu deformasyonun depremlerle nasıl boşaldığını, faylar üzerindeki kayma hızını ve fay zonundaki her bir segment üzerinde meydana gelen büyük depremlerin tekrarlanma aralıklarını belirlemek ve daha detaylı bir şekilde ortaya çıkartılmasıyla mümkündür. Bu sayede yeryüzünde oluşabilecek depremler hakkında, nerelerde ya da yaklaşık olarak ne zaman gerçekleşebileceği ile ilgili tahminler yürütülebilmektedir. Oluşan bir depremin meydana getirdiği deformasyonların hesaplanması, kırılma olasılığı artan fayların tespit edilmesi için o depremin kaynak parametrelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Deprem kaynak parametrelerini oluşturan, fay düzlemi geometrisi, fay düzlemi üzerindeki kaymalar ile yer yüzeyindeki noktaların yer değiştirmesinin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Günümüzde bu kaynak parametrelerin belirlenmesi için birçok jeodezik yöntemler kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi Global Navigation Satellite Systems (GNSS) ölçme yöntemidir (Poyraz vd., 2016). Bugüne kadar Kuzey Anadolu Fay Zonu boyunca jeodezik, jeolojik ve sismolojik değişik yöntem ve verilerle, ortalama olarak 5 mm-110 mm aralığında değişen hareket büyüklüklerinin sonuçları elde edilmiştir (Demir, 1999). KAFZ' ın batı kesimindeki hareketler için jeolojik verilerden, Barka ve Kadinsky-Cade (1988), 5-10 mm/yıl; sismolojik veriler yardımıyla Kasapoğlu ve Toksöz (1983) 10 mm/yıl; Taymaz vd. (1991), 38 mm/yıl; Kiratzi ve Papazachos (1995), 16 mm/yıl değerini, Demir (1999), bölgenin batı kesiminin; doğusunda ve en güneyinde 12.2 ± 0.6 , batıda 16.6 ± 0.7 mm/yıl değerini elde etmiştir, Özener ve Doğru (2009), 25 ± 0.4 mm/yıl yıllık hareket miktarları belirlemiştir. KAFZ' ın doğu kesimindeki hareketler için bölgenin doğusunda hız büyüklüğü 13 ± 0.5 mm/yıl iken batıda 22 ± 0.3 mm/yıl değerine ulaşmaktadır (Poyraz, 2009). Tatar (2011) KAFZ' ın 16.3 ± 2.3 mm/yıl ile 24.0 ± 2.9 mm/yıl değerinde hareket büyüklüğü saptamıştır. McClusky vd. (2000)' nin KAFZ boyunca oluşturduğu doğrusal hız ortalama $22-24 \pm 1$ mm/yıl, Reilinger vd. (2006) KAFZ boyunca yaklaşık 25 mm/yıl olarak hız alanı belirlemiştir.

KAFZ, Anadolu levhası ile Avrasya levhasını birbirinden ayıran, doğuda Karlıova'dan batıda Saros Körfezine kadar uzanan dünyanın en önemli yanal atımlı faylarından birisidir (Şengör vd., 2005).

KAF üzerinde 1999 yılından bu zamanlara kadar az hasar vermiş olsa bile ciddi büyüklükte depremler meydana gelmiştir ve gelmeye devam etmektedir. Bu sebeple fay üzerinde detaylı çalışmalar yapılarak daha fazla verinin toplanması ve bilgilerin öğrenilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Yavaşoğlu, 2009).

Ayrıca ülkemizde yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi ve izlenmesi amacıyla birçok proje kapsamında GPS ağları kurulmuştur. Kurulan bu ağdaki istasyonların bazıları sürekli ölçüm yapan, bazıları da kampanya zamanında kullanılmak üzere genelde proje amaçlı tesis edilmiştir. Bu ağlardan bazıları, Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından Türkiye'de bölgesel olarak kurulan Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA), Türkiye genelinde tesis edilen Sürekli Gözlem Yapan Referans İstasyonları (CORS-TR) veya Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif (TUSAGA-Aktif), Marmara bölgesinin jeodinamiğini incelemek için Marmara GPS Ağı (MAGNET), KAFZ' ın batı bölgesinin takibi ve kontrolü için Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS) Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) ve Ege Açılma Sistemi (EAS) kapsayacak şekilde tasarlanan Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yöntemlerle Araştırılması Projesi (TURDEP) gibi GPS ağlarını sıralayabiliriz (Poyraz, 2009). TUSAGA-Aktif sisteminden elde edilen koordinatları kullanılarak büyük ölçekli harita bilgisi üretilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, TUSAGA-Aktif referans istasyonlarının koordinat ve hızlarının doğru ve hassas şekilde üretilmesi gerekmektedir (Özdemir, 2016). Yer kabuğu deformasyonların incelenmesinde jeodeziciler noktaların zaman içerisinde yer değiştirmesi (hız alanı) ile ilgilenmesine karşılık, jeolog ve jeofizikçiler için daha çok gerinim (strain) alanının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Elastik ve Mekanik' te bir objenin deformasyona uğraması ile deformasyona uğramadan önceki, yani orijinali arasındaki ilişkiyi yansıtan durum gerinim alanıdır (Demir, 1999).

KAF'ın batı kesiminde Demir (1999)' e göre bölgeye ilişkin ortalama çekme ve sıkışma yönlerini veren maksimum ve minimum asal gerilme parametreleri ile maksimum asal gerilme yönü; $E1 = 0.20 \mu\text{s/yıl}$, $E2 = -0.15 \mu\text{s/yıl}$ $\beta = 14.6$ grad, toplam kesme gerilmesi $\gamma = 0.35 \mu\text{rad/yıl}$, Poyraz (2009)' ın çalışma sonuçlarına göre, KAFZ' ın doğu kesiminde; $E1 = 0.48 \mu\text{s/yıl}$, $E2 = -0.28 \mu\text{s/yıl}$ $\beta = 14.6$ grad, toplam kesme gerilmesi $\gamma = 0.55 \mu\text{rad/yıl}$ değerleri elde edilmiştir. Sonuçlara göre bölgenin aktivitesine uygun anlamlı gerilme

birikiminin olduğunu ortaya çıkartılmıştır. Gerilme birikiminin KAFZ' ın doğu bölümü boyunca Anadolu ve Avrasya plakası üzerinde görülmesi, bölgedeki deformasyon zonunun çok geniş olduğunu ortaya koyması açısından önem taşımaktadır (Demir, 1999). İntersismik, bölgedeki fay boyunca deformasyonun biriktiği (gerilme artar) ve bu nedenle potansiyel enerjinin arttığı son deprem anına kadar süren bir dönemdir. Depremden önce plakalarının birbirine göre bağıl hareketlerinin oluşturduğu deformasyon artışını ve böylece meydana gelebilecek deprem tehlikesini belirlemek mümkündür. Bir depremin sismik momenti, deprem kinetik enerjiye dönüşmeden önce biriken potansiyel enerji ile hesaplanabilir. Bu dönemde, yüzey deformasyonları, fay kırılması ve deprem boyunca bu kırılmanın hareketinin geometrisini belirlemek için GNSS kullanılabilir. Bu nedenle fay parametrelerinin hesaplanması, deprem tehlikesini açıklamada çok önemlidir. Jeodezik verilerin depremlerin etki alanı ve kaynak mekanizmalarının belirlenmesinde önemli bir rolü vardır (Reilinger vd., 2000; McClusky vd., 2000; Ayhan vd., 2001; Ergintav vd., 2002; Burgmann vd., 2002; Poyraz vd., 2019).

Depremlerin meydana geldiği bölgelerde bulunan tüm noktaların tekrardan ölçülmesinin olanaklı olmaması ve yer kabuğu kısa zaman aralıklarında elastik bir hareket göstermesinden dolayı deprem sonrası dönemde ölçüsü olmayan noktalarda depremlerin nasıl etki ettiğini hesaplamak mümkündür. Fay düzlemi geometrisi ve yer değiştirmeler, jeodezik nokta koordinatlarında değişikliğe neden olur. Bu nedenler bilinirse, elastik yarı-uzay modelleri kullanılarak depremden kaynaklanan yüzey yer değiştirmeler sayısal olarak elde edilebilir. İnter-sismik ve post-sismik dönemlerde GPS ölçüsü bulunan noktaların koordinat değişimleri ile, harekete sebep olan fay düzlemlerine ait kayma miktarları (yanal ve düşey atım) ve geometri parametreleri hesaplanabilir (Aktuğ, 2003). Tez çalışmada, gerinim birikimini belirlemek için strain analizi ayrıca yıllık kayma miktarlarını (Strike slip, Dip slip) bulabilmek için elastik yarı uzay yaklaşımının benimsendiği blok modelleme yöntemleri kullanılmıştır.

Blok modelleme yaklaşımında, yeryüzünde herhangi bir noktanın hız değeri, Euler kutup değerine bağlı olarak durağan blokun dönmesi ve blokları sınırlayan faylar boyunca elastik yamulma birikiminin toplamı olarak ele alınır. Oluşturulan model ise fayın kilitlenme derinliğine, kavrama oranına ve atım hızına bağlıdır (Okada, 1992; Çakmak, 2010).

Bu çalışmada Avrasya ve Anadolu Plakasının sınırını oluşturan KAFZ'ın doğu kesimindeki TUSAGA-Aktif istasyonlarından yararlanarak oluşturulan GNSS ağındaki hız verilerini kullanarak; blok (faylarla sınırlandırılmış rijit alan) modelleme yöntemi

kullanılmıştır. Bu modelleme yaklaşımında yeryüzündeki noktaların yatay hızları girdi verisi olarak kabul edilir. Blok modelleme ile kayma miktarları (yanal ve düşey atım) ve gerinim birikiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen kayma miktarları ve gerinim birikimleri bölgenin tektonik yapısının ve fay karakteri (hareket yönü) hakkında bilgi sağlayan yardımcı veriler olarak kullanılabilir.

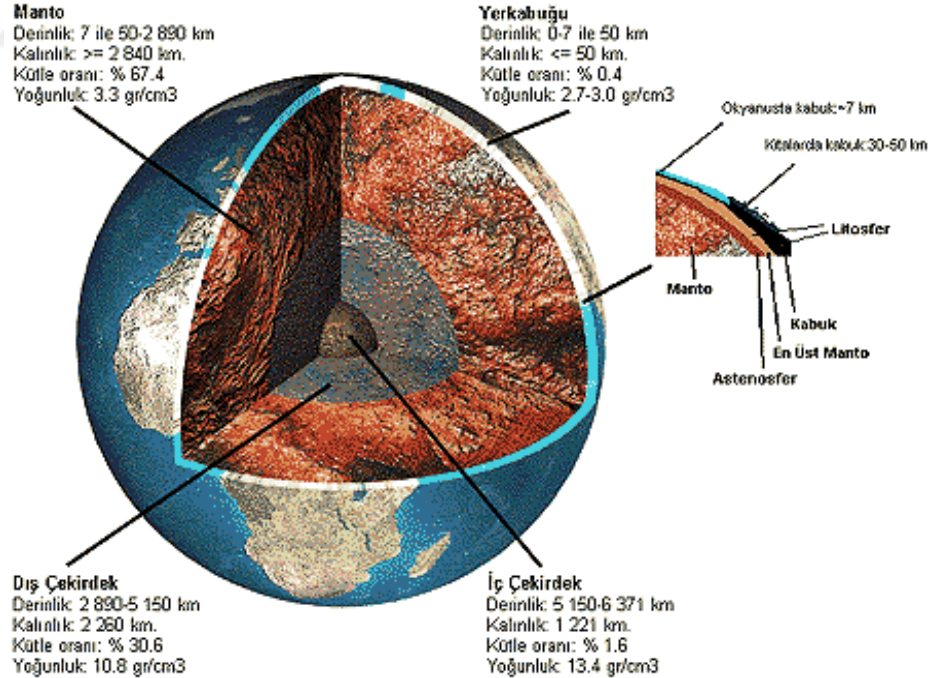


2. TEKTONİK HAREKETLER VE DEPREM

2.1. Yerkürenin Yapısı ve Levha (Plaka) Tektoniği

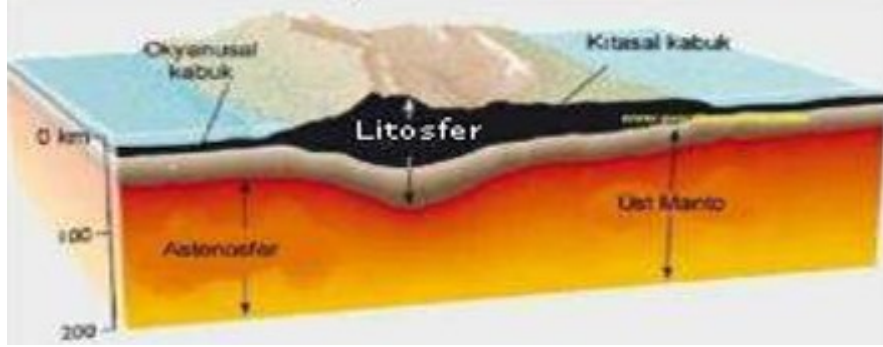
Depremler, yanardağların oluşumu gibi tektonik olayları inceleyen yerbilimciler, bu olayların sebepleri ve oluşum sistemleri hakkında değişik varsayım ve kuramlar ortaya koymuşlardır. 19' uncu yüzyıldan bu yana yerbilimciler tarafından benimsenen kuram Levha tektoniğidir. Levha tektoniğini anlamak için dünyanın iç ve dış yapısının çok iyi bilinmesi gerekmektedir (Şekil2.1 ve Şekil 2.2) (Tiryakioğlu, 2010).

Yerküre, yaklaşık olarak 6371 km yarıçapındadır. Dıştan içe doğru Yerkabuğu, Manto ve Çekirdek katmanlardan meydana gelir. Manto, Üst ve Alt Manto olarak iki kısma ayrılır, Çekirdek de Dış ve İç Çekirdek olarak kısımlara ayrılmaktadır. Yeryuvarın en dışındaki katman yerkabuğudur, kıtalar altında 25-50 km, okyanusların altında ise 5 ile 8 km'lik bir kalınlığa sahip olduğu bilinmektedir. Yerkabuğu kendisi gibi rijit (katı) olan ve yaklaşık olarak 70-100 km kalın bir katmanın en üst kısmı olan Litosferi oluşturur. Litosferin altında ise Üst Mantonun daha yumuşak ve akıcı hareketli bir yapıya sahip olan ve Astenosfer yer alır (Şekil2.2) (Url-1).



Şekil 2.1 Yerkürenin iç yapısı (Url-2)

Plaka tektoniği kuramının iyi anlaşılabilmesi için kıtaların rölatif hareketlerini ve okyanusların nasıl oluştuğu hakkındaki bilgilerin iyi anlaşılması gereklidir (Tiryakioğlu, 2010).



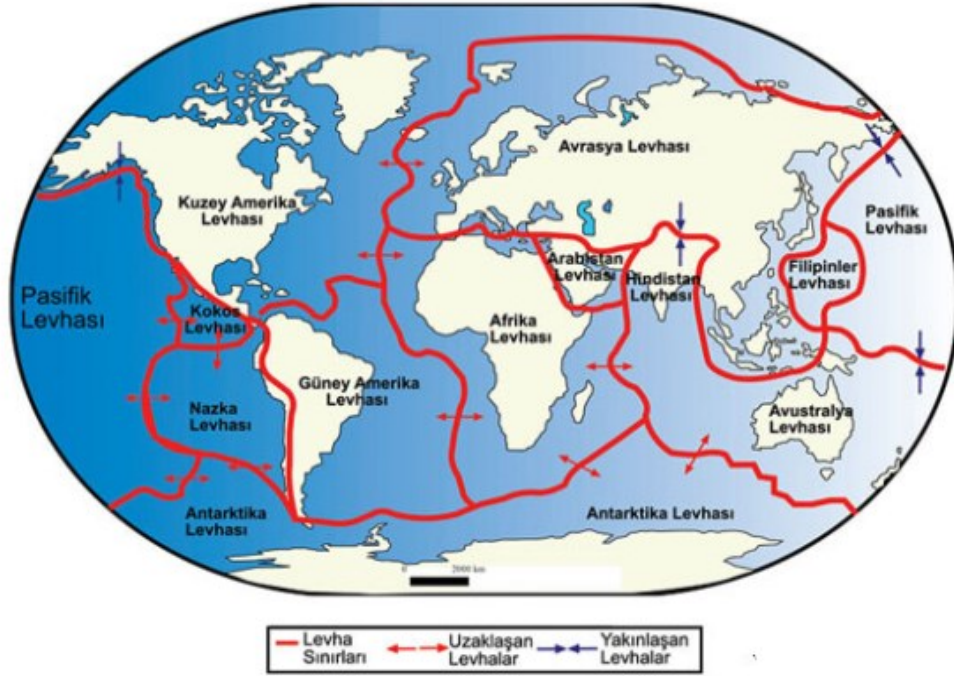
Şekil 2.2 Yerkürenin Dış Kabuğunun Yapısı (Tiryakioğlu, 2010)

Okyanus tabanlarını ve kıtaları oluşturan yerkabuğu farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Kıtaları oluşturan kabuk, alüminyum oksit, silisyum ve oksit miktarı bakımından bol ve az yoğun (2.7-2.9 gr/cm³) kayalardan, okyanus tabanlarını oluşturan kabuk ise demir ve magnezyum oksit miktarı bakımından bol, daha yoğun (2.9-3.0 gr/cm³) kayalardan meydana gelir (Köksal, 2011).

Dünyanın en iç kısmında bulunan çekirdeğin sıcaklığı yaklaşık olarak 6000°C'dir. Bu sıcaklık nedeniyle yerin iç kısmında konveksiyon akıma benzer bir hareket oluşturmaktadır. Çekirdeğe yakın bölgeler ısının etkisiyle yüzeye doğru hareket ederken yüzeye yakın soğuk bölgeler ise merkeze doğru hareket etmesiyle meydana gelen ısı alışverişi konveksiyon akımı oluşturur. Litosferin alt kısmında bulunan Astenosfer çekirdekten aldığı bu ısı nedeniyle kendi içerisinde yıllık olarak, santimetre mertebesinde bir hızla hareket etmekteyken yerin iç kısmı ile yeryüzündeki sıcaklık arasındaki ısı farkı yerin manto kısmında da yıllık olarak birkaç santimetre hızla hareket etmektedir. Bu konveksiyon akım hareketleri ile üstteki litosfer kırılarak farklı yönlerde hareket etmeye başlamıştır ve birbirine göre hareket eden farklı boyutlarda parçalara ayrılmışlardır. Bu parçalara levha veya plaka adı verilmektedir. Bunları inceleyen bilim dalına da levha ya da plaka tektoniği adı verilmektedir (Tiryakioğlu, 2010; Köksal, 2011; Url-2).

Dünyada yedi tane büyük ana levha, çok sayıda da küçük levha bulunmaktadır. Bunlar yıllık olarak birbirlerine göre 1- 16 santimetre aralığında hareket etmektedirler (Şekil 2.3) (Yalçınkaya ve Teke, 2006).

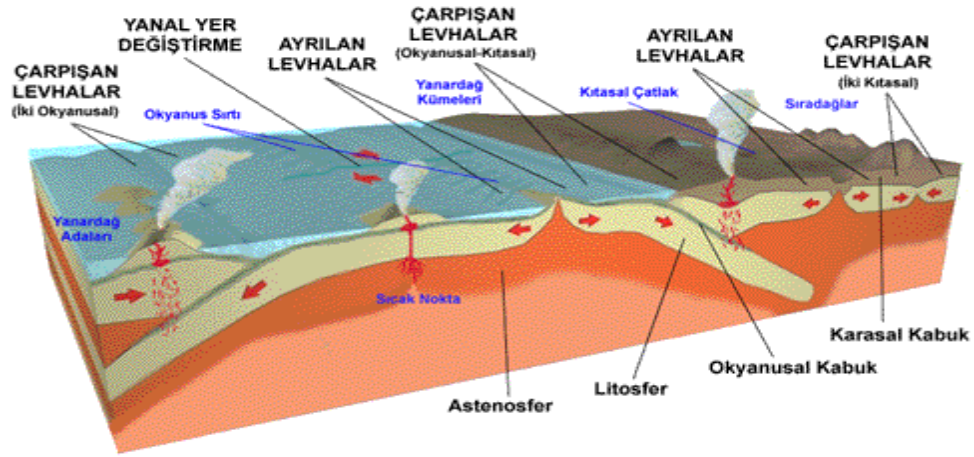
Bu hareketler yavaş olduğu için insan gözü ile fark edilmesi mümkün değildir bunun için günümüzde yaygın olarak kullanılan uydu ölçmeleri yöntemlerinden biri olan GPS ile hassas ve doğru şekilde ölçülebilmektedir (Yavaşoğlu vd., 2003).



Şekil 2.3 Dünyamızdaki ana tektonik levhalar ve hareket yönleri (Url-3)

Yer kabuğundaki levhalar sürekli hareket eder ancak bu hareketler düzenli değildir. Bu hareketi sağlayan astenosfer ve mantoda meydana gelen konveksiyon akımları, levhaların bir birtakım birlerine göre bağlı hareketine sebep olmaktadır. Bu bağlı hareketler ile levhalar birbirine göre uzaklaşır, yaklaşır, yanal olarak kayarlar ya da birbirine sürtünürler. Bu hareketler sonucunda farklı tektonik olaylar meydana gelmektedir (Şekil 2.4). Levha hareketlerine örnek olarak Atlantik Okyanusu'nda levhalar birbirinden uzaklaşır ve okyanus sırtını oluşturur, Güney Amerika'daki Peru-Şili Hendek'inde levhalardan biri diğerinin altına batar ve sonucunda derin okyanus hendeğini oluşturmuştur, Kaliforniya'daki San Andreas kırığında ise levhaların birbirine sürtünmesiyle Dünyadaki en uzun ve en aktif faylardan biri olan San Andreas fayını oluşturmuştur. Levhaların hareketi çok yavaştır. Ancak levhaların birbiriyle karşılaşması büyük depremlere sebep olabilir. İki tektonik levha birbirini itmeye başladığı zaman bir gerinim birikimi meydana gelir. Bu birikim kritik değere ulaştığı zaman fay düzlemi boyunca sürtünme kuvvetini yenerek, fay çizgisinin her iki tarafındaki kayaç bloklarının birbirine rölatif hareketlerini oluşturmaktadır.

Bu hareketler çok kısa bir zaman sürecinde gerçekleşir. Fay boyunca yırtılma oluşur ve bu yırtılma anlık olarak şok niteliğinde sarsıntı meydana getirmektedir. Sarsıntı ile çok uzaklara kadar yayılabilen deprem (sarsıntı) dalgaları ortaya çıkmaktadır. Baktığımızda Dünyada depremlerin olduğu yerler çoğunlukla levhaların birbirini zorladıkları levha sınırlarında meydana gelmektedir. (Poyraz, 2009; Köksal, 2011; Url-3).



Şekil 2.4 Levha (Plaka) hareketleri (Url-4)

2.2. Deprem

Yer kabuğunda fay düzlemi olarak bilinen kırıklarda, biriken potansiyel enerjinin aniden kinetik enerjiye dönüşme anında ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak yeryüzünü sarsma olayına deprem denir. Depremler şok niteliğinde olup çok kısa sürede meydana gelir. Depremlerin oluşmasının nedenlerine bağlı olarak farklı türleri mevcuttur. Bunların başlıcaları;

Volkanik Depremler, patlamalara bağlı, yerin içindeki erimiş maddenin yeryüzüne çıkarken fiziksel, kimyasal olaylar sonucunda oluşan gazların patlamasıyla meydana gelirler.

Çöküntü Depremleri, yer kabuğu içerisindeki boşlukların örneğin kömür ocaklarındaki galerilerin, tuz ve jipsli arazilerde erime sonucu oluşan boşlukların tavan bloğunun çökmesi ile meydana gelmektedir.

Tektonik Depremler, Levhaların hareketiyle oluşan depremler bu gruba girmektedir. Dünyadaki depremlerin büyük bir kısmı tektonik deprem türünde meydana gelmektedir. Jeodezik bakış açısıyla genel olarak depremlerin oluşması, elastik serbestleme teorisine dayanmaktadır.

Amerikalı bilim adamı H.F Reid' in 1910 yılında ileri sürmüş olduğu bir kuramdır. Depremlerin meydana gelmesine yönelik ilk önemli çalışma olan 1906 San Francisco depremi sonrasında, jeodezik ölçme yöntemleri yardımıyla yapılmıştır. Çalışma sonucunda ise yer değiştirmelerin fayın ve etrafında büyük değerlerde olduğunu faydan uzaklaştıkça yer değiştirmelerin azaldığını ortaya koymuştur. Bu çalışma ile Reid elastik serbestleme teorisinin temelini ortaya koymuştur (Çakmak, 2010).

Bu teoriye göre deprem, fayın iki tarafındaki bloklar fay boyunca birbirine sürtündükleri için hareket edemez ve kilitlenirler blokların durağan hızının zamana bağlı olarak gerinim birikiminin sonucunda deforme olurlar. Deformasyonun gücü sürtünme gücünü veya blokları oluşturan kayaların kırılmasını sağlayacak seviyeye geldiği zaman aniden kırılmasıyla faylar meydana gelir. Bu birikim depremin odak noktasında boşalır. Fay harekete geçerek bloklarda kaymalar meydana gelir. Daha sonra fayın iki tarafındaki bloklar deformasyon öncesindeki yapılarındaki hallerine geri dönerler. (Köksal, 2011; Çakmak, 2010).

Reid'in elastik serbestleme teorisine göre, Çakmak, (2010) deprem döngüsünü üç adımda tanımlamıştır.

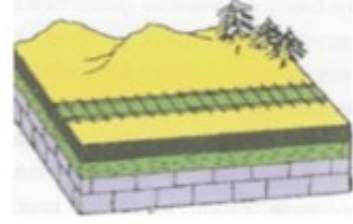
- 1- Hareketin rastlanmadığı, gerilme birikiminin gözlenmediği evre,
- 2- Levhaların görelî hareketleriyle birlikte bölgede gerilmenin biriktiği evre,
- 3- Fayın kırılması ile levhalardaki hareket anı, gerilme boşalımı evresi, bu aşamadan sonra döngü başa dönerek devam eder.

Şekil 2.5' de görüldüğü üzere bölgede gerilme boşalımına kadarki süreçte bir çubukla örneklendirilerek meydana gelen değişiklikler verilmiştir (Atabey, 2000).

Çubuk Değişimleri



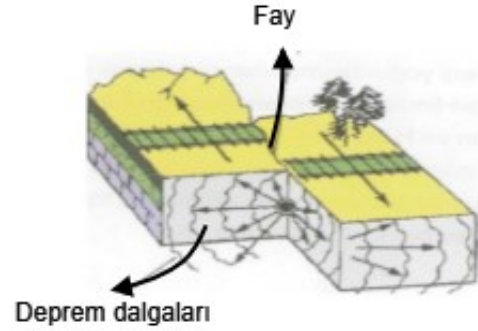
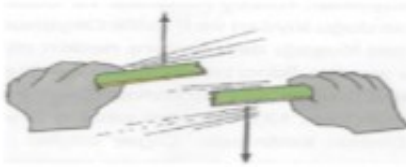
Kaya Değişimleri



Gerilme birikiminin olmadığı ilksel durum

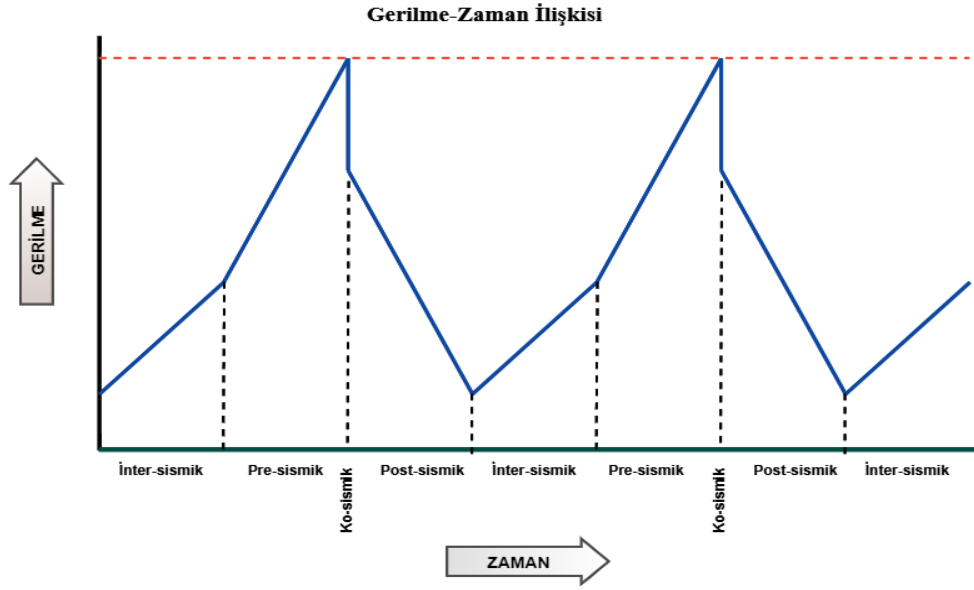


Gerilme birikiminin yükseldiği kayaların deforme olamaya başladığı durum



Fayın kırılması ile gerilme boşalımının olduğu durum

Şekil 2.5 Deprem oluşum mekanizması (Atabey, 2000' den değiştirilerek)



Şekil 2.6 Gerilme-Zaman ilişkisi. Kırmızı kesik çizgi fay üzerindeki sürtünme ve normal gerilmenin yenildiği eşik değeri göstermektedir (Çakmak, 2010'dan değiştirilerek).

Şekil 2.6' de anlatılmaya çalışılan elastik serbestleme teorisine göre gerilme zaman ilişkisinin deprem döngüsünü daha iyi anlayabilmek adına önemli bir yere sahiptir. Bu teoriye göre depremlerin tekrarlanma sürecinin bilinmesi mümkündür. Fakat bilindiği üzere depremin meydana getirdiği etki basit doğrusal davranışlarla açıklanamamakla birlikte ayrıca bölgenin tektonik yapısı depremin oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Bu kurama göre depremlerle ilişkili iki yer değiştirme evresi yeterli olarak kabul ediliyordu fakat yer değiştirme döngüsü deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası (postseismic) olmak üzere en az üç evreyle tanımlanabilmektedir. (Okada, 1985; Çakmak, 2010).

Depremin oluşumunda dört ayrı dönem bulunmaktadır; Depremin,

İnter-Sismik Dönemi: Fay üzerinde hareketin gözlenmediği, deformasyonun henüz oluşmadığı fakat kitlenme alanında gerilimin yükselmeye başladığı ve enerji birikiminin olduğu dönemdir.

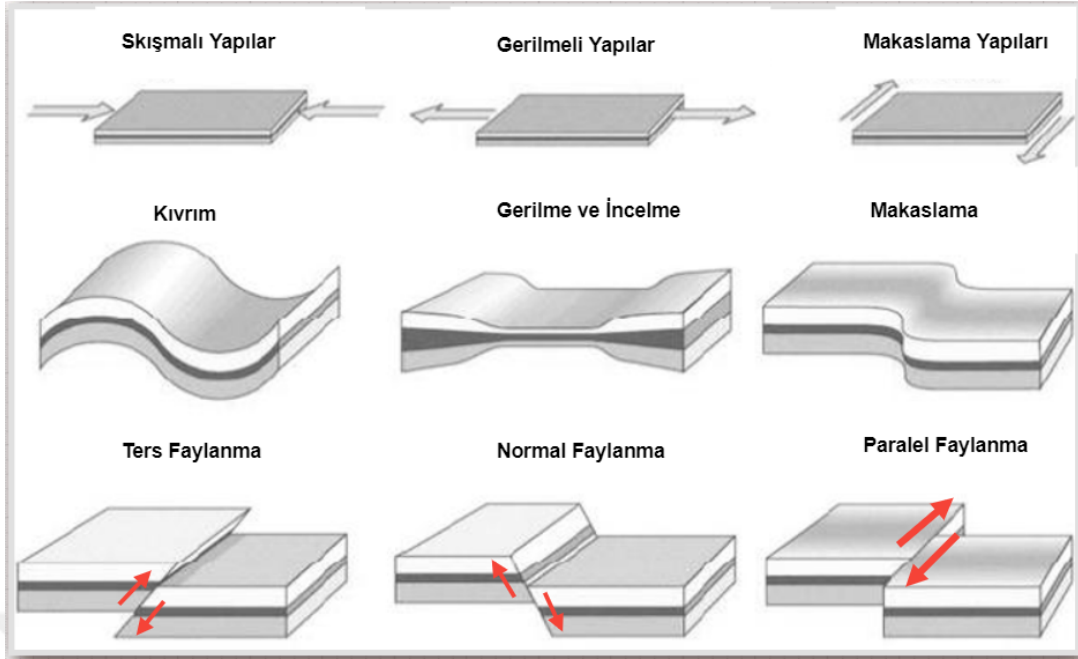
Pre-Sismik Dönemi: Fay üzerindeki potansiyel enerjinin artık bloklarda bir kayma veya kırılma oluşturacak kritik düzeye yaklaştığı deprem anından önceki dönemdir.

Ko-Sismik Dönemi: Çok kısa bir dönem olup, biriken gerilimin aniden boşalması ile depremin oluşum anıdır. Kısaca oluşan potansiyel enerji birikiminin kinetik enerjiye dönüşmesi durumudur.

Post-Sismik Dönemi: Deprem sonrası dönem olup, fayın denge haline geldiği, artçı sarsıntıların gözlemlendiği evredir. Bu evrede fay inter-sismik döneme girmeye başlayabilir veya hareket oluşturacak durum ortadan kalkabilir. Eğer deprem döngüsüne tekrar girerse bu evrenin sonu aslında inter-sismik dönemin başlangıcı olarak kabul edilir (Poyraz, 2005; Dönmez ve Tiryakioğlu, 2018).

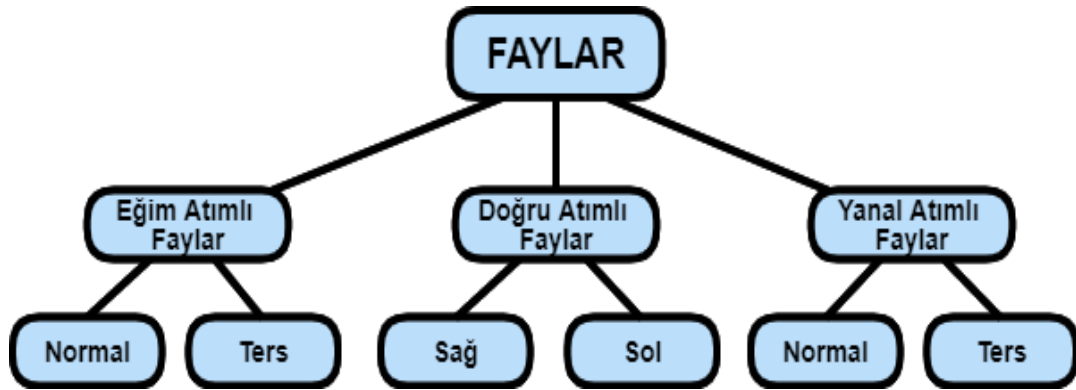
2.3. Faylanma (Kopma)

Levhaların, bir düzlem boyunca birbirine göre gözle görülebilecek büyüklükte kayma hareketi göstermesine faylanma (kopma) denir. Bu kayma hareketi sırasında çok uzaklara kadar yayılabilen deprem dalgaları ortaya çıkar. Bu dalgalar geçtiği yerleri sarsarak ve hareketin oluş yönünden uzaklara gittikçe enerjisi azalarak yayılır. Bu sırada yeryüzünde, bazen gözle görülebilen, metreden, yüzlerce kilometreye kadar uzanabilen ve onlarca kilometre derinliğinde olabilen, fay adı verilen arazi kırıkları oluşabilir. Faylar bazen yeryüzünde açık şekilde görünmezler, yüzeyde gizlenmiş olabilirler (Şekil 2.7) (Poyraz, 2009; Köksal, 2011; Tiryakioğlu, 2012; Url-5). Fayların oluşmasındaki başlıca hareketler tektonik levhalar arasındaki sıkıştırma, çekme ve makaslama davranışları ile meydana gelmektedir. Kayaçlar, fay yüzeyi boyunca gerginlik enerjisine sebep olan ve birbirlerinden ayrıldığında ise depremin meydana gelmesiyle sonuçlanan ‘sıkışmayı’ alıkoyabilir. Kayaçların kırılmasını etkileyebilen üç farklı stres neticesinde bilinen üç farklı fay çeşidi oluşur: Gerilme, kayaçları birbirinden ayırarak normal faylanmaya neden olur. Sıkışma, kayaçların birbirini sıkıştırmasıyla ters faylanmaya neden olur. Kayaçların birbirinin üzerinde kayması sonucunda makaslanma gerilmesi oluşur ve bu durumda paralel faylanma olmasına neden olur (Köksal, 2011; Url-5).



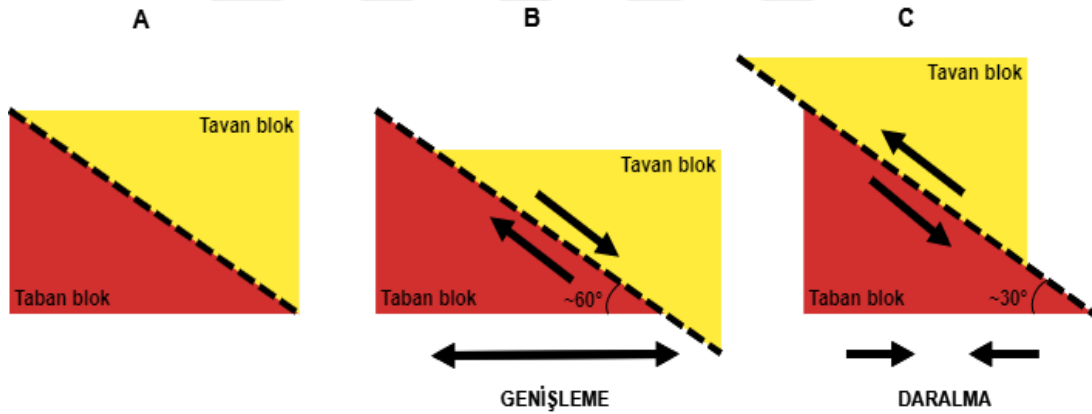
Şekil 2.7 Farklı tektonik davranışlar altında meydana gelen yapılar (Köksal 2011'den değiştirilerek)

Faylanma esnasındaki kayma hareketini oluşturduğu süreksizlik yüzeyine fay düzlemi ya da fay aynası denilmektedir. Fay düzlemi, deforme olduğundan aynı genişliklerde olmayıp, ezilerek parçalanmış yapılardan oluştuğu için fay zonu da denir. Fayın ayırdığı yüzeyin iki tarafında da yer alan kayaçlara blok denir. Fay düzlemine göre yukarı da kalan bloğa, tavan bloğu, aşağıda kalan bloğa ise taban bloğu denir. Bu blokların faydan uzaklaşma miktarına atım ya da ötelenme denir. Tavan blok ile taban bloğun, fay düzlemi boyunca yapmış oldukları farklı yönlerdeki hareketleri ve blokların fay düzlemi ile geometrik ilişkisi fay çeşitlerini oluşturmaktadır (Şekil 2.8) (Url-6).

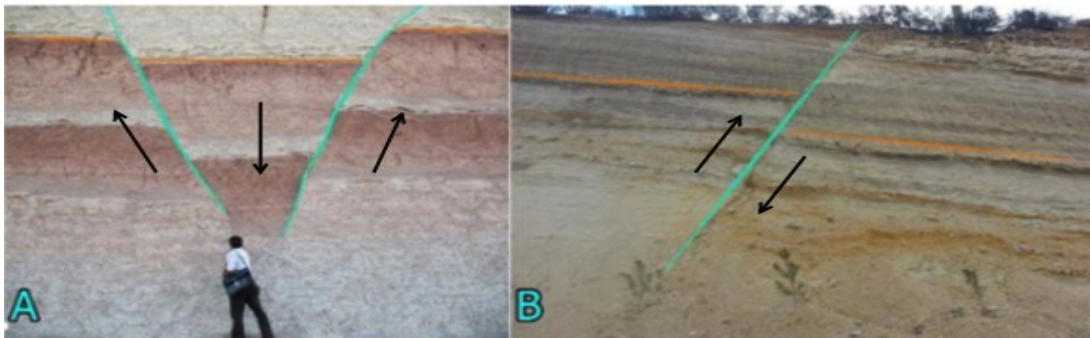


Şekil 2.8 Fay çeşitleri

Eğim Atımlı Faylar: Bu çeşit faylarda hareket vektörü, fay düzlemine dik eğim yönüne paraleldir. Tavan ve taban bloğun birbirine göre düşey şekilde aşağı yukarı hareket etmesidir. Eğim atımlı faylar gerilmeli ve sıkışmalı tektonik rejiminde gelişirler. Eğimli bir fay düzlemi üzerindeki tavan bloğunun, düzlemin altındaki taban bloğuna göre eğim yönüne aşağı yöne doğru kayarken göreceli olarak taban bloğunun eğim tersi yönünde birbirinden uzaklaşarak kayması neticesinde oluşan faylara Eğim Atımlı Normal Faylar denir (Şekil 2.9). Normal fayların oluşumunda gerilme etkili olduğu için bölgenin genişlemesine (uzama) neden olmaktadır. Bu tür fayların hareketliliğiyle birlikte oluşan topoğrafik yükselim alanlarına Horst, çöküntü kısımlarına da Graben denir. Eğim Atımlı Ters Fayların oluşması tavan bloğun, taban bloğa göre eğim tersi yönüne yani yukarı doğru bir kayma yaparken taban bloğun ise eğim yönünde yani aşağıya doğru bir kaymayla birbirine yaklaşıyor oluşular. Sıkışmalı bölgelerde meydana geldikleri için daralma (kısılma) meydana gelir. (Atabey, 2000; Tiryakioğlu, 2012; Köksal, 2011; Url-5; Url-6; Url-7).

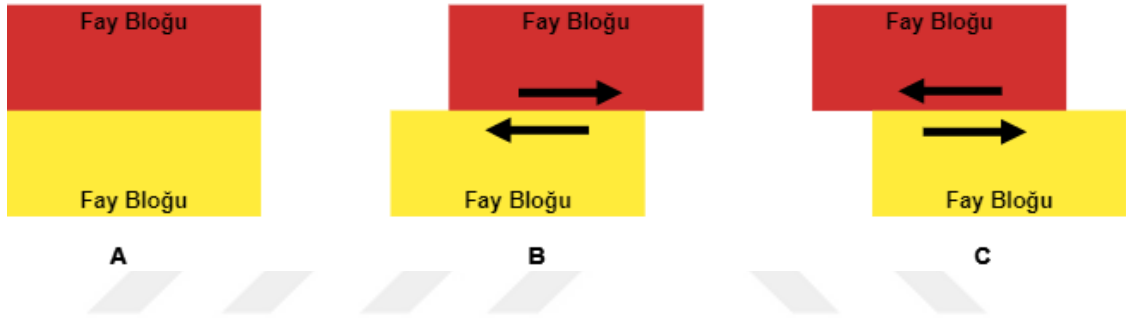


Şekil 2.9 Eğim atımlı normal faylar (B) ve eğim atımlı ters fayların (C) gösterimi

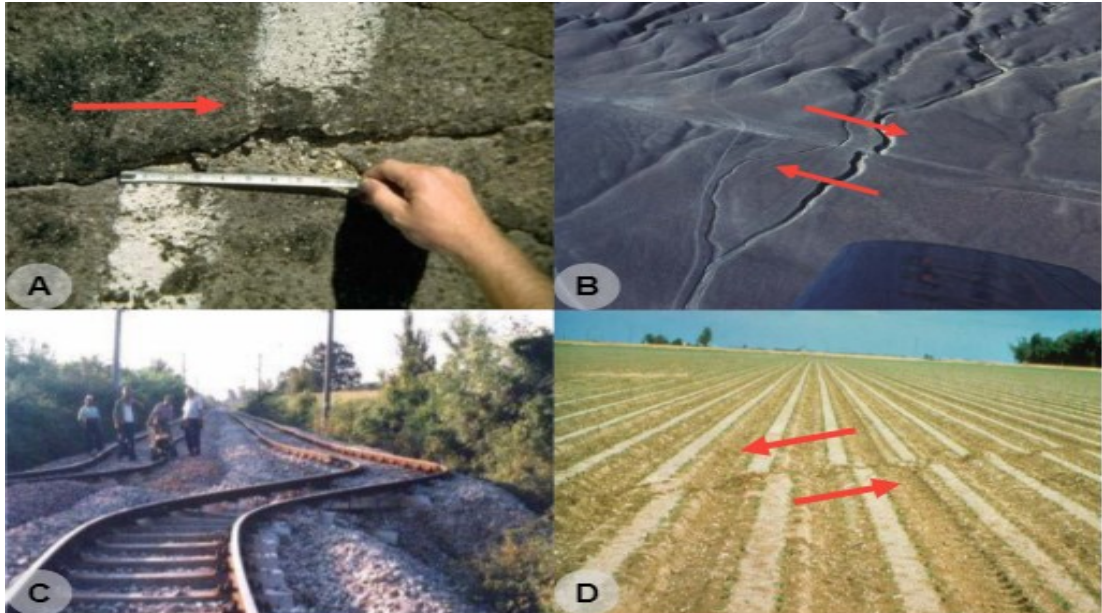


Şekil 2.10 Normal (A) ve ters (B) fayların doğadaki görünümü (Url-8)

Doğrultu atımlı faylar: Fay düzleminin iki tarafındaki blokların hareket vektörünün fayın doğrultusuna paralel ve eğim yönüne dik olacak şekilde yatay olarak birbirinden zıt yöndeki hareketiyle oluşan faylara doğrultu atımlı faylar denir. Doğrultu atımlı faylarda bloklar yatay yönde kayarlar ve düşey bir kayma gözlenmez sapma açıları sıfırdır. Kayma yönüne göre sağ ve sol yönlü doğrultu atımlı faylar vardır. Fayın hareket yönünü gözlemleyebilmek mümkündür. Bloklardan herhangi biri üstünde durulup karşıdaki bloğa bakıldığında, bloğun kayma yönü bakanın sağ tarafına doğruysa sağ atımlı, sol tarafına doğruysa sol atımlı bir faydır (Şekil 2.11). Diğer türlü blokların üzerinde objelerde (duvar, yol, dere vb.) fay hareketi sonrasında sağa sola doğru bir ötelenme olmuşsa hangi yönde bir atımın oluştuğu belirlenebilir (Şekil 2.12) (Atabey, 2000; Tiryakioğlu, 2012; Url-5; Url-6; Url-7, Url-8).

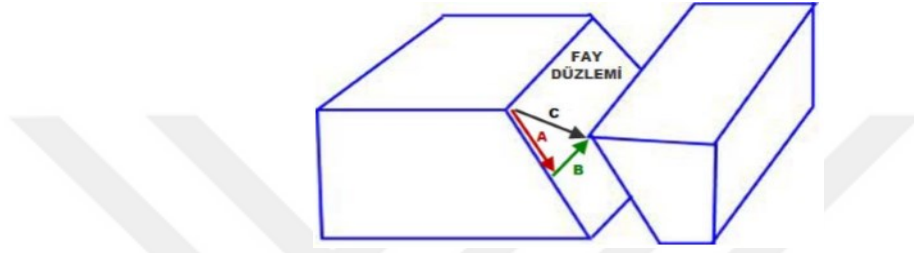


Şekil 2.11 Sağ yönlü doğrultu atımlı fay (B), Sol yönlü doğrultu atımlı fay (C)



Şekil 2.12 Sağ ve sol yönlü doğrultu atımlı fayların yeryüzünde oluşturduğu değişimlerin gösterimi (Url-5 ve Url-7' den değiştirilerek)

Yanal Atımlı Faylar: Yanal atımlı faylarda diğer isimleriyle verev, oblik faylarda, hareket yönünün hem eğim yönünde yani eğim atımlı faylar gibi hem de yatay yönde yani doğrultu atımlı faylar gibi olduğu görülmüştür böylece tek bir yöne atım oluşturmazlar. Kısacası fay düzlemi boyunca yatay ve düşey yönde hareket eden faylardır. Blokların birbirine göre yaptığı göreceli hareketleriyle normal ve ters yanal atımlı faylar oluşmaktadır (Url-7). Şekil 2.13’ deki gösterilen A; fayın eğim yönündeki eğim atım bileşenini, B; fayın doğrultusuna paralel olan yanal atım bileşenini, C; fayın hareket yönü boyunca oluşan net atımı göstermektedir (Tiryakioğlu, 2012).



Şekil 2.13 Yanal atımlı fay gösterimi (Tiryakioğlu, 2012)

2.4. Türkiye’nin Tektonik Yapısı

Avrupa, Asya ve Afrika plakalarının sınırlarında yer alan Türkiye, tektonik anlamda eski çağlardan bu yana devam eden yer kabuğu hareketlerinin etkisini sürdürmektedir (Şengör, 1980). Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağında yer almaktadır ve Alp-Himalaya sisteminin Akdeniz tarafında bulunmaktadır. Bu sistemin kuzeyinde Avrasya plakası, güneyinde Afrika ve Arap plakaları, batısında Ege bloğu, doğusunda ise Doğu Anadolu bloğu yer almaktadır. Afrika ve Arap plakalarının Avrasya plakası ile çarpışması, Türkiye’nin tektonik oluşum sürecinde önemli bir yere sahiptir (McKenzie, 1972; McKenzie, 1978; Dewey ve Şengör, 1979; Jackson ve McKenzie, 1988).

Yeryüzündeki plakalara baktığımızda Avrasya Plakası en büyük plakalardan biri olup Afrika ve Arap Plakalarının hareketlerine göre daha yavaş hareket etmektedir. Yapılan birçok jeodezik çalışmalar sonucunda yıllık hareket miktarları Avrasya Plakası ortalama 5 mm olarak, Avrasya plakasının hareketsiz olduğu varsayılarak sabit alındığında ise Arap Plakası ortalama 18-20 mm, Afrika Plakası ortalama 5-6 mm hızla kuzey yönünde hareketleri saptanmıştır. Bu plakaların arasında kalan, Türkiye’nin de üzerinde bulunduğu Anadolu Plakası Avrasya Plakasına doğru sıkıştırılmaktadır. Bunun sonucunda ise Anadolu Plakası batı yönünde ortalama 24-25 mm’ lik bir hızla hareket etmektedir. Bu hareketlerin sonucu olarak Doğu Anadolu bloğu ve Ege bloğunda da hareket

- 1- Sağ Yanal Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ),
- 2- Sol Yanal Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ)
- 3- Ege-Kıbrıs Yayı ve sol yanal Ölü Deniz Fayı

12 milyon yıl önce Bitlis Bindirme Kuşağı (BBK) boyunca Arap Levhasının kuzeye hareketi ile Anadolu Levhası ile Avrasya Levhasının çarpışması sonucunda, çarpışma zonunun kuzeyinde KAFZ ve onun eşleniği DAFZ meydana gelmiştir. Bu sağ ve sol yönlü doğrultu atımlı faylar boyunca Anadolu Bloğu batıya doğru hareket etmeye başlamıştır. Arap levhasının kuzeye hareketinin sonucunda Anadolu Bloğu ve bunun yanı sıra Doğu Anadolu Bölgesi de içsel deformasyona uğramış (Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi), birçok ters atım bileşenli sol ve sağ yönlü doğrultu atımlı faylar meydana gelmiştir. Doğu Anadolu'daki sıkışma hareketinin KAFZ ile batıya taşınmasının sonucu olarak büyük ve küçük çaplı grabenlerden (çöküntü) oluşan Ege Graben Sistemi (EGS) meydana gelmiştir. EGS' de yer alan çok sayıda bloğun kenarları doğrultu atımlı bileşenli normal faylar ile sınırlanmıştır. Diğer taraftan, Afrika levhasının Avrasya levhasının altına dalması ile Helenik-Kıbrıs Yayı (HKY) oluşmuştur (Demirtaş ve Erkmén, 2000; Ünlü-9).

Anadolu levhası, kuzey tarafta Avrasya levhası ile KAFZ, güneyde ve güneybatı tarafında, Afrika levhası ile aktif Helenik yayı ve Kıbrıs hendeği, doğu tarafta ise Arap levhası ile DAFZ; levhalar ile fayların sınırlarını oluşturmuştur. Levhalar Anadolu levhasını çevrelemiş durumdadır. Ülkemizin üzerinde yer aldığı Anadolu levhasının aktif tektoniğini oluşturan diğer levhalar ile sınırları olan bu faylardır (Köksal, 2011).

Avrasya ve Anadolu levhalarının sınırını oluşturan KAFZ, sismik açıdan fazlasıyla aktif, morfolojik olarak gelişmiş bir yüzey yapısına sahip, dünyadaki en iyi bilinen fay kuşaklarından birisidir. KAFZ, Türkiye'nin doğu kısmında Karlıova'dan başlayıp, batı kesimdeki kuzey Ege'nin doğusuna, Saros körfezine kadar uzanan, Karadeniz ile paralel olan, yaklaşık 1500 km uzunluğunda ve birkaç yüz metreden 40 km' ye varan genişliğe sahip, sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay zonudur. KAFZ Doğu Anadolu sıkışma bölgesini Ege-Kıbrıs yayına bağlamaktadır. Bu fay tek bir kırık düzlem yapısına sahip değildir birçok kırıktan meydana gelmektedir. KAFZ üzerinde yapılan jeodezik çalışmalarda yıllık olarak ortalama 25mm/yıl sağ yönlü bir kayma hareketi yaptığı hesaplanmıştır (Ketin, 1976; Dewey ve Şengör, 1979; Barka ve Kadinsky Cade, 1988; Barka, 1992; McClusky vd., 2000; Bozkurt, 2001; Şengör vd.,2005; Eren, 2009)

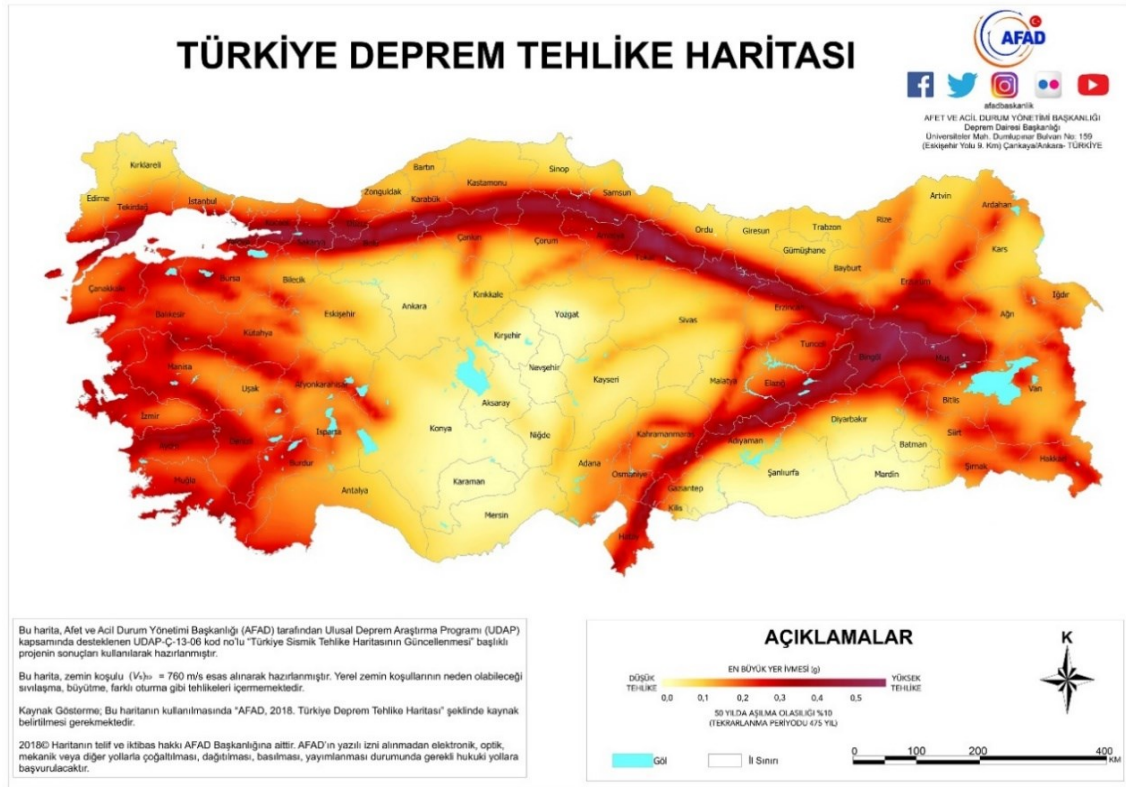
Doğu Anadolu Fay Zonu kuzeyde Anadolu levhası ile güneyde Afrika ve Arap levhaları arasında kalan 550 km uzunluğunda sol yönlü doğrultu atımlı fay zonudur. DAFZ, kuzey doğu bölesinde bulunan Karlıova'da KAFZ ile bir üçlü kesişme bölgesi oluşturacak şekilde başlamakta, güneybatı yönünde Bingöl'e kadar ulaşmaktadır. DAFZ üzerindeki yapılan çalışmalara göre yıllık kayma miktarları, jeolojik verilere dayalı olarak 6-10 mm/yıl, jeodezik ölçmeleri ile GPS verilerinden ile Taymaz vd. (1991) fay zone için 25-35 mm/yıl, Westavey (1994), 13 ± 1 mm/yıl, McClusky vd. (2000), DAFZ boyunca 9 ± 2 mm/yıl, kayma oranlarını tahmin etmişlerdir (Bozkurt, 2001).

Bu Fay zonunun tektonik yapısı, birbirine paralel olarak sıralanmış, eğik fay dizilerinden oluşan, birçok itme-çekme havzaları, önemli bindirme ve kıvrımlanma deformasyonları ile karışık bir sisteme sahip olan fay, Karlıova üçlü kesişme bölgesinin doğu kesimindeki, kuzey-güney tektonik sıkışma zone olarak tanımlanmaktadır (Öztürk, 2009).

Doğu Akdeniz'de Afrika ve Anadolu Plakaları arasındaki çakışma Ege ve Kıbrıs yayları boyunca batma hareketi ile yer değiştirir. Afrika Plakası kuzey-kuzeydoğu yönünde hareket ederek Anadolu Plakasının altına doğru batmaktadır bu tektonik olay Ege yayı sınırı boyunca devam ettiği düşünülür (Bozkurt, 2001). EKY Türkiye'nin güney kıyısı dolaylarında, Girit kara parçasının güney kısmından, kuzeydoğu istikametinde Rodos kara parçasının güney kısmından Fethiye Körfezine değin uzanmaktadır. Ege bloğu Anadolu Plakasının batısında yer alır ve güneybatı yönünde açılma meydana gelir bunun neticesinde normal bir faylanma görülür. Bu açılma sadece Anadolu Levhasını hareketiyle açıklanamamıştır bunu yanı sıra Arap levhasının Avrasya ve Anadolu levhasının altına batmasıyla Ege bloğunda meydana gelen çekme kuvvetinin meydana gelmesi de etki etmektedir. EKY, Girit kara parçası ile Fethiye Körfezi ortasında bulunan Plini ve Strabo çukurlukları boyunca ters fay nitelikli sol yönlü doğrultu atımlı fay davranışı sergilemektedir. EKY, Antalya Körfezi, Kıbrıs kuzeyi ve İskendurun Körfezi boyunca içbükey bir kavis oluşturmaktadır (Le Pichon ve Angelier, 1979; Url-10).

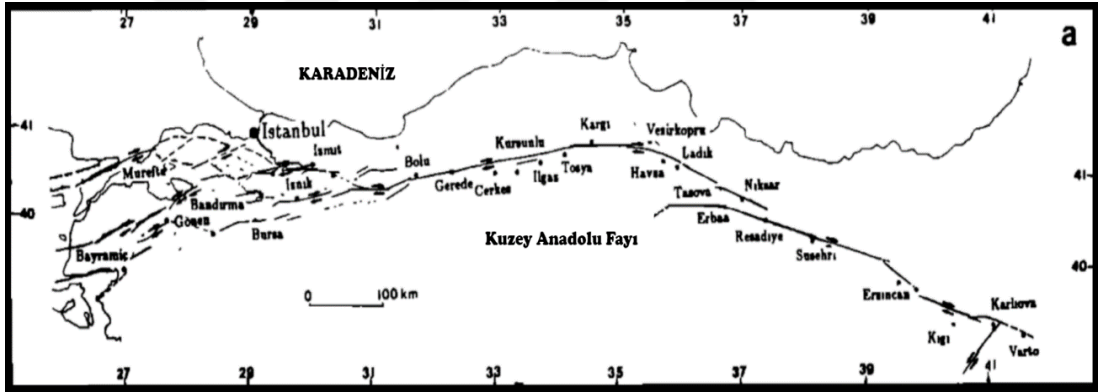
KAFZ ve DAFZ' ın ve diğer fay sistemlerinin meydana gelmesiyle, Anadolu levhasının batıya hareket etmesi Türkiye'de dört farklı aktif tektonik bölgenin meydana gelmesine neden olmuştur. Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi, Kuzey Anadolu Bölgesi, Orta Anadolu Ova Bölgesi, Batı Anadolu Genişleme Bölgesi olarak tanımlanırlar (Eren, 2009).

Şekil 2.15’ de Türkiye Diri Fay Haritasına bakıldığında yukarıda anlatılmış olan Levha hareketleri, Türkiye’nin aktif tektonik yapısını ortaya çıkararak, ülkemizin neredeyse tamamının depremsellik açısından aktif bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Deprem risk haritasına bakıldığında ülkenin tektonik yapısı ile uyum sağladığı ortaya çıkmaktadır. Kuzey Anadolu Fayı, Doğu Anadolu Fayı, Ege, Marmara Bölgeleri aktif tektonik yapıya sahip olduğundan yüksek deprem riski altında oldukları belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 2.15 Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Url-11)

Kurşunlu ve Çerkeş'in kuzeyi, İsmetpaşa, Gerede, Bolu, Abant Gölüne uğrayarak, devamında Mudurnu civarlarındaki Dokurcun vadisine buradan da iki ana kola bölünerek devam etmektedir. Bu ana kollardan birincisi Kuzey'e ikincisi ise Güneybatı yönüne doğru devam ederler. Kuzey kol 'Sapanca Gölü ve İzmit Körfezine uğrayarak Marmara Denizinin kuzeyinden, Sapanca gölü, Armutlu Yarımadası kuzeyi, Marmara Denizi kuzeyi ve Saros Körfezi boyunca uzanarak Trakya'nın güneyinde Mürefte'den karaya çıkarak Ganos Fayında 45 km boyunca' sürmektedir. (Ketin, 1969; Okay vd., 1999; Demirtaş ve Erkmen, 2000). Güneybatıya ayrılan ikinci kol ise; 'Geyve, İzmit, Gemlik, Bandırma, Çan ve Bayramiç ilçelerine uğrayarak, Ege Denizi'ne girmektedir. Bu segment Geyve'nin güneybatısında yine başka bir kola ayrılmakta, burada da Yenişehir, Bursa, Mustafa Kemalpaşa, Manyas, Gönen, Pazarköy' den geçiyor ve Edremit kuzeyinde bulunan Ege Denizi'ne girerek yitmektedir (Şekil 2.17.) (Ketin, 1969; Barka ve Kadinsky-Cade 1988; Köksal, 2011).

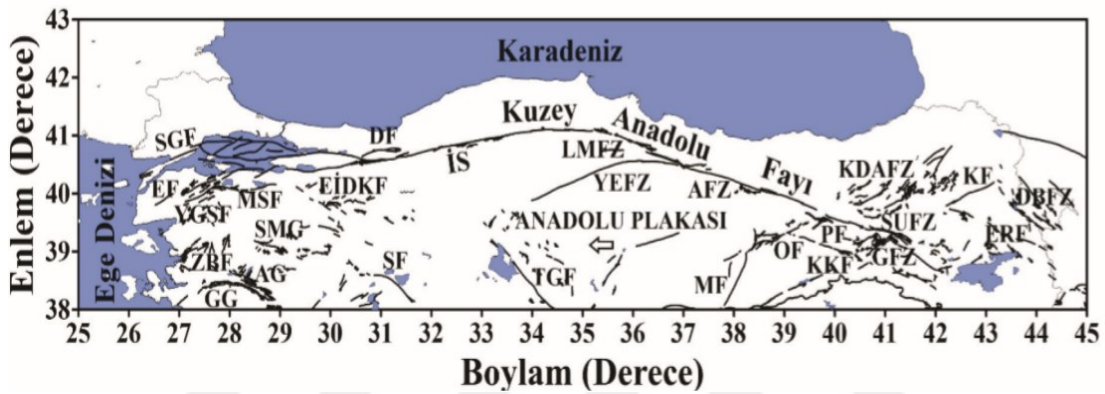


Şekil 2.17 Kuzey Anadolu Fay hattının güzergahı (Barka ve Kadinsky-Cade 1988)

KAFZ, Karadeniz kıyısı boyunca yaklaşık paralel olarak uzanmakta olup batı taraftaki Sakarya nehri (Geyve) ile doğu taraftaki Van Gölü (Bulanık) arasında yer alan ve yeryüzünde kesintisiz bir doğru olarak gözlemlenebilen uzunluğu, tahmini olarak 1100 km olduğu ve Ege denizi ile İran sınırları arasında bulunan uzantılarıyla beraber 1600 km olduğu gözlenmiştir (Ketin, 1976).

2.5.2. Kuzey Anadolu Fay Zonunun tektonik yapısı

Kuzey Anadolu fayının geometrik yapısına bakıldığında tek bir hat boyunca uzamayıp birbirine paralel veya aşamalı faylardan oluşmuştur. Belli bir düzlemde devam etmemekte olup bazı yerlerde daha geniş açılar oluşturarak eğilmekte ve Van Gölü'nün kuzey yakasından devam edip İran sınırına kadar sürmektedir. Bu fay birkaç yüz metre ile 40 km 'ye kadar genişliği bulunmaktadır. Ayrıca bu fay birbirine paralel çoğunun birbiriyle kesişen birkaç kısa faydan oluştuğu büyük bir kısmı vardır (Şekil 2.18) (Bozkurt, 2001).



Şekil 2.18 Kuzey Anadolu fayı ve bağlantılı kolları (Öztürk, 2017)

Fayın neredeyse tamamında sağ yönlü yatay kayma gözlenmiştir, fakat küçük miktarlarda da olsa düşey hareketlerde oluşmaktadır. Genelde bakıldığında fayın kuzey kısmında kalan bölgedeki yerlerde, güneyindekilere göre nispi olarak sağa ve aşağı doğru hareket etmiştir yani KAFZ sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay davranışı göstermektedir (Ketin, 1969). Çoğu zaman odak derinliği 10-20 km bandında değişen depremler üreten KAFZ için, deprem sırasında meydana gelen deformasyon, depremin şiddeti 6-7.5 gibi büyüklükte olması durumunda ve yüzeydeki kırıkların geometrisine göre 100-250 km yarıçaplı bir alana kadar etkisinin göstermektedir (Köksal, 2011).

2.5.3. Kuzey Anadolu Fay Zonunda meydana gelmiş büyük depremler ve atımları

KAFZ' da bugüne kadar meydana gelmiş depremlerin davranışları incelendiğinde, hareketin fayın ortasında başladığını ve sonrasında batı ve doğu kesimlerine doğru devam ettiği görülmektedir. Bu fay üzerinde oluşan depremler genelde yüzeye yakın odak derinliğine sahiptir ve fay zonu boyunca oluşan sağ yönlü doğrultu atım hareketleri ile ilgili olarak açıklanmaktadır.

KAFZ' nu doğrultu atımlı bir fay hareketi oluşturduğundan dolayı fayın kırılabilmesi için büyük ölçüde enerjinin oluşması gerekir ve bu enerji oluştuğu durumda meydana gelen depremlerin büyük ve yıkıcı olmasına neden olmaktadır. Bu fay zone incelendiğinde geçmişte çok şiddetli ve yıkıcı depremlere ev sahipliği yaptığı görülmektedir (Öztürk, 2017).

Jeolojik çalışmalara göre faydaki hareketin toplam atım miktarı 85 ± 5 km- 20-25 km değerlerinde değişim gösterdikleri belirtilmektedir. Faydaki hareket hızının miktarını yıllık olarak 5-10 mm/yıl olarak hesaplanmıştır (Barka, 1992). Levha hareketleri ve sismik bilgiler dahilindeki ölçülerle yıllık olarak 30-40 mm olarak hesaplanmıştır (Taymaz vd., 1991).

GPS ölçümleri sonucundaki veriler kullanılarak hesaplanan hızın yıllık miktarı 24-30 mm/yıl olarak bulunmuştur (Reilinger vd., 1997; McClusky vd., 2000). Bu hareket hızı erken Pliyosen' den itibaren toplam atım miktarının 75-125 km olduğu belirlenmiş olup, jeolojik verilerle hesaplanan 85 ± 5 km'lik toplam kayma ile uyum içinde olduğu görülmektedir. KAFZ' daki depremlere bakıldığında son 60 yılda büyük oranda depremler meydana gelmiştir (Bozkurt, 2001). Kuzey Anadolu fayı üzerinden meydana gelmiş deprem büyüklüğünün 6.6-7.9 şiddeti arasında değiştiği çok büyük yıkıcı yer hareketleri çizelge 2.1' de detaylı olarak verilmiştir.

Kuzey Anadolu fayı, karakter bakımından sağ yönlü doğrultu atımlı bir yırtılma fayı olup yatay yer değiştirme meydana getirirse de bazı zamanlarda düşey atım da yaparlar. Fakat yatay kayma miktarı, düşey kayma miktarından oldukça fazladır (Ketin, 1969). Depremlerin açıklanabilmesi ve bölgede meydana gelebilecek sonraki depremlerin büyüklüğü, karakteri hakkında kestirimler yapabilmek için fayın geometrik yapısını, düşey ve yatay atım miktarlarının bilinmesi gerekmektedir. Yukarıdaki depremlerden sonra bölgede fayın bazı kesimlerinde yapılmış olan çalışmalarda elde edilen yatay ve düşey kayma miktarları hesaplanmıştır.

Depremlerden sonra fayın bazı kesimlerinde ölçülen yatay ve düşey atım miktarları sırasıyla 26 aralık 1939 Erzincan depreminden; 3.70-1~2 m, 20 aralık 1942 Erbaa-Niksar; 1.75 m yatay kayma, 27 kasım 1943 Tosya; 1.50-1.00 m, 1 şubat 1944 Bolu-Gerede; 3.50-1.00 m, 18 mart 1953 Yenice-Gönen; 4.30-0.50 m, 27 mayıs 1957 Abant; 1.60-0.40 m, 22 temmuz 1967 Adapazarı-Mudurnu; 1.90-1.20 m, 13 mart Erzincan; 20-25 cm, 17 Ağustos 1999 İzmit-Gölcük; 1.5 ~ 5.00-2.00 m, 12 kasım 1999 Düzce- Kaynaşlı; 1.5~4.0-1.0~1.5 metrelik atımlar meydana gelmiştir (Ketin, 1969; Url-12).

KAFZ üzerinde birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir ancak bu çalışmaların büyük kısmı özellikle batı kesiminde Marmara bölgesinde gerçekleştirilmektedir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinin büyüklüğünden ve yıkıcı etkilerinden dolayı ayrıca gündemden düşmeyen İstanbul'u da etkileyecek olabileceğinden deprem beklentisiyle Marmara Bölgesi'ndeki çalışmalar hızlı şekilde devam etmektedir. Fakat 1500 km uzunluğundaki KAFZ' ın batısı kadar doğu kesiminde de beklenen depremlerin büyüklüğünde yer hareketleri oluşturabilecek fay yapısına sahiptir. Kuzey Anadolu fayının her yeri yüksek deprem riski taşımaktadır (Özener, 2005).

3. GNSS AĞLARI

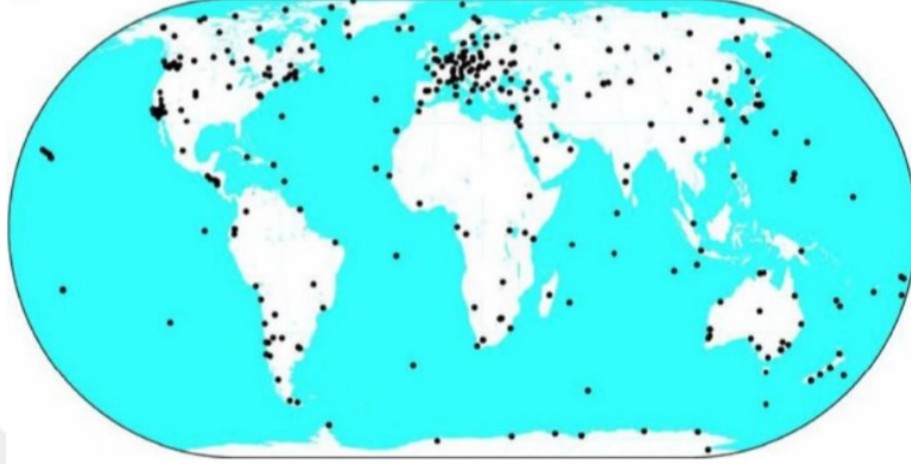
Yeryüzündeki noktaların koordinatlarını hem anlık olarak hem de düzeltilmiş olarak belirlenmesine fırsat tanıyan gerçek zamanlı konum ve doğruluğu yüksek harita bilgisi üretmeye yarayan bir ağ sistemidir. Uydu yörünge efemerisleri ve saat düzeltmeleri, iyonosferik, troposferik düzeltmeleri gibi bilgileri sağlayan çok sayıda evrensel/yerel ağ bulunmaktadır. Bu ağların farklı kurum ve kuruluşlar tarafından kurulumu, korunması ve sürekliliği sağlanmaktadır. Bu ağlar enstitüler, üniversiteler gibi çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından çeşitli projeler kapsamında kurulmuş ve halende takibi sağlanmaktadır (Bülbül, 2018). Bu ağlardan bazıları, uluslar arası olarak kullanılan IGS (Uluslararası GNSS hizmetleri), HGK (Harita Genel Komutanlığı) tarafından Türkiye’de bölgesel olarak kurulan TUTGA (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı), Türkiye genelinde tesis edilen sürekli gözlem yapan CORS-TR veya TUSAGA-AKTİF GPS ağını, Marmara bölgesinin jeodinamiğini incelemek için MAGNET GPS ağı, KAFZ’ ın batı bölgesinin takibi için Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS), Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) ve Ege Açılma Sistemi (EAS) kapsayacak şekilde tasarlanan TURDEP projesi gibi GNSS ağlarını örnek verebiliriz (Poyraz, 2009).

Türkiye konum olarak Arap, Afrika ve Avrasya plakalarının arasında yer alması ve bu plakaların hareketi ile ülkemizde de yıllık cm duyarlılığında bir yer değiştirme olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra meydana gelen depremlerden dolayı noktaların konumlarında depremin şiddetine göre metre mertebesinde yer değişikliği oluşabilmektedir. Bu sebeple farklı amaçlarla tesis edilmiş birçok jeodezik noktaların koordinat değişimleri devamlı izlenmeli ve hızlar belirlenmelidir. Son yıllarda bu amaç doğrultusunda kampanya tipi yani belli zamanda kullanılmak üzere ya da sürekli ölçüm yapan sabit GNSS istasyonlarından yararlanılmaktadır (Aktuğ vd., 2011; Özdemir, 2016).

3.1. Uluslararası GNSS Ağı

FAGS (Astronomik ve Jeofizik Veri Analiz Hizmetleri Federasyonu)’un bir organı olan ve IERS (Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi) ile çalışmalar yürüten IGS (Uluslararası GNSS Servisi), IAG (Uluslararası Jeodezi Birliği) aracılığıyla 1993 senesinde kurulmuştur. Sürekli gelişim içinde IGS, Bilimsel kuruluşlara yüksek doğruluk ve zaman çözümleriyle, güvenli GPS uydu verisi üretmektedir. GPS ‘in Avrupa’ya ait GALILEO ve Rusya’nın sahip olduğu GLONASS sistemleri ile bütünleşmesi ile 14 mart

2005 tarihi itibari ile verilerin belli bir standartta toplanmasını ve değerlendirilmesini gerçekleştirmiş ve uluslararası olarak jeodezik, jeofizik çalışmalarına destek olarak uydu verileri sağlamış olan bir kurumdur (Demirci, 2012).



Şekil 3.1 IGS istasyonlarının dağılımı (Bülbül, 2018)

IGS’ in sunduğu ürünler; Uluslararası Yersel Referans Ağı (ITRF) sisteminde bünyesindeki bütün istasyonların koordinatları ve hızlarını, yüksek doğruluklu hassas efemeris verileri, GPS uydu yörünge bilgileri, Uydu saat bilgileri, iyonosfer ve troposfer tahminleri gibi son derece önemli olan bilgileri sağlamaktadır. Bu ürünler birçok yer bilim çalışmalarında kullanılmaktadır. IGS istasyonları sürekli sabit istasyonlar olduğu için deprem öncesi ve sonrasındaki koordinattaki değişimleri belirleyerek yeryüzü hareketlerinin izlenmesinde, yer dönüklüğünün takibi, referans sistemlerinin (ITRF, IERS gibi) iyileştirilmesi, Uyduların yörüngelerinin belirlenmesi gibi çalışmalarda kullanılmaktadır (Şanlıoğlu ve İnal, 2004; Demirci, 2012; Bülbül, 2018). Dünya üzerinde toplam 508 tane IGS istasyonu bulunmaktadır (Şekil 3.1).

3.2. TUSAGA-AKTİF Ağı

“Sürekli gözlem yapan GPS İstasyonları Ağı ve Ulusal Datum Dönüşümü Projesi (CORS-TR / TUSAGA-Aktif)” İstanbul Kültür Üniversitesi (İKÜ)’ in yürütücülüğünü yaptığı, Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ve HGK’ ın ortak olarak yer aldığı ayrıca Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)’ un da desteklemiş olduğu bir projedir. Proje başlangıcı 2006 mayıs tarihi olup 2009 mayıs tarihinde de faaliyete geçmiştir (Uzel vd., 2011).

TUSAGA-Aktif Sistemi; TKGM ve HGK’ da bulunan 2 adet kontrol merkezi ile 4 adet sabit GNSS istasyonu Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti’nde olmak üzere, 80-100 km arasında mesafelerde homojen olarak dağılmış 158 adet Sabit GNSS istasyonlarından oluşmaktadır (Url-16).

TUSAGA-Aktif Sisteminin temel amacı Tüm Türkiye’ye dağılmış olan noktaların koordinatlarını hassas bir şekilde cm doğruluğunda, gerçek zamanlı düzeltme konum verilerini sağlayarak farklı koordinat sistemleri arasında datum dönüşümü yapmak için gerekli dönüşüm parametrelerini en doğru şekilde ortaya koyarak jeodezik, jeodinamik ve çeşitli çalışmalarda (nokta koordinat ve hızlarının belirlenmesi vb.) kolaylık sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir ağ sistemidir.

TUSAGA-Aktif sisteminin temel amaç ve yararları;

- Projenin temel amacı ilk olarak “Gerçek Zamanlı Kinematik” düzeltilmiş cm duyarlılığında hassas anlık konum verisi üretmek,
- Koordinat sistemleri arasında dönüşüm yapılabilmesi için güvenilir dönüşüm parametreleri belirler (ED-50/ITRF-xx),
- Yapılacak olan GPS çalışmalarında 7/24 saat boyunca yapılan gözlemleriyle, referans noktası olarak yararlanılmasını sağlamak,
- Büyük öneme sahip, “sayısal coğrafi ve mekânsal bilgiler (harita, tapu ve kadastro bilgileri, e-devlet projeleri)” gibi hizmetler için arazide hızlı, güvenilir, ekonomik olarak verilerin toplanmasını sağlar,
- Yerkabuğu hareketlerini, yüksek deprem riski bulunan ülkemizin tektonik hareketlerini sürekli olarak izlenmesi ve deformasyon miktarının hassas şekilde elde edilmesi imkanını tanımaktadır,
- Jeodezik ve jeodinamik çalışmalar açısından hesaplamalar yapılmasının imkanını sunar,
- Troposfer ve iyonesferin modellenmesiyle daha doğru meteorolojik çalışmalarda ve sinyal, iletişim gibi birçok bilimsel çalışmalara da katkılar sağlamaktadır. (Yıldırım vd., 2007; Aktuğ vd., 2011).



Şekil 3.2 TUSAGA-Aktif İstasyonlarının dağılımı (Url-14)

4. GPS TEKNİĞİ YÖNTEMİ İLE TEKTONİK HAREKETLERİN BELİRLENMESİ

Günümüzde yapılan tektonik hareketlerin belirlenmesi çalışmalarında, jeodezik ölçme yöntemleri kullanılmaktadır. Jeodezi, “Dünya üzerinde belirlenmiş noktalar arasında, belirli zaman aralıklarıyla yüksek hassasiyetli konum ve yükseklik belirleyerek dünya üzerindeki yatay ve düşey yer değiştirmeleri” hesaplamaktadır. Bu değişimler ile yüzeyde oluşan deformasyon, yer hareketleri miktarları hakkında bilgiler vermektedir. Geçmiş zamanlarda yersel ölçmeler ile yapılan bu çalışmalar, günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle yerini uzay jeodezisine bırakmıştır. Levha ve fay hareketlerinin izlenmesinde uzaysal jeodezi teknikleri önemli bir role sahiptir. Bu hareketlerin izlenmesinde farklı yöntemler kullanılır, yaygın olarak kullanılan teknikler, VLBI (Very Long Base Interferometry), SLR (Satellite Long Range) ve GPS’ dir.

Bu yöntemler arasında GPS tekniği yöntemi VLBI ve SLR yöntemlerine göre daha maliyetsiz, noktaların birbirini görme şartını ortadan kaldırması, her türlü hava şartlarında ve yirmi dört saat boyunca kullanım imkanları sağladığı için ve üç boyutlu konum hesabında yüksek doğruluk sağlaması sebepleri ile daha sık tercih edilmektedir (Poyraz, 2009; Çakmak, 2010; Tiryakioğlu, 2012).

Özellikle tektonik hareketlerin belirlenmesi, izlenmesi, deformasyon ölçmelerinde GNSS teknolojisinin kullanımı fazlasıyla yaygın hale gelmiştir. Bunu en iyi biçimde 1990 senesinin başlarındaki yapılan çalışmalardaki 10-15 noktalı ağlarla kurulan tektonik sistemin, şimdileri 50-60 nokta ile sürekli ölçüm yapan ağlarla oluşturularak çalışmalar yapılması açıkça göstermektedir (Tiryakioğlu, 2012).

GPS, yer bilimleri, jeodezik ölçümler için en yaygın kullanılan araçlardan biridir. Tektonik hareketlerin oluşmasındaki levha hareketleri, gerilme birikimi gibi kuvvetler hakkında bilgi verir. Bu bilgiler sayesinde büyük çaplı depremlerin oluş yönü ve nerelerde olacağı hakkında bilgiler elde edilmesi sağlanmaktadır. Dünya yüzeyini oluşturan tektonik levhaların iki tarafındaki noktaların levhalar arasındaki etkileşim bölgelerinde birbirine göre yıllık olarak 100 mm’ ye kadar hareket oluşturacağı gözlenmektedir (Herring, 1999).

GPS tekniği ile uzun gözlemler sonucunda depremlerden kaynaklı meydana gelen deformasyonlar belirlenebilmektedir. Aktif fay bölgelerinde fayın ayırdığı blokların hepsini kapsayacak şekilde bir ağ sistemi oluşturulabilir. Bu ağı oluşturan noktalar

üzerinde belli zamanlar veya devamlı gözlemler yapılabilir, bu sayede bölgede deprem öncesi, deprem sırasında ya da sonrasındaki zamanlardaki ölçümler global noktalardan yararlanarak GPS ölçü değerlendirilmesi yapılabilir. Sonucunda ise zamana bağlı farklar ile yer değiştirmeler ve yönleri belirlenebilmektedir. Hareket vektörleri ile bölgede meydana gelen gerilme ve sıkışma kuvvetleri hakkında tahmini bilgiler elde edilebilir (Poyraz, 2009).

4.1. GPS Hızlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntem ve Materyaller

GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde her alıcı firmasına ait mühendislik çalışmalarında kullanılan ticari yazılımların dışında yüksek doğruluk gerektiren, jeodezik ağlarının kurulması, deformasyon ölçüleri, datum parametrelerinin belirlenmesi ve yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi gibi bilimsel çalışmalara yönelik veri analizlerinde üniversite ve AR-GE kuruluşlarının destekleri ile yazılan ve devamlı geliştirilen yazılımlar kullanılmaktadır. Günümüzde bilimsel çalışmalarda sık tercih edilen en önemlileri; GAMIT/GLOBK (Massachusetts Institute of Technology, ABD), BERNESE (Astronomical Institute University of Berne, İsviçre) ve GIPSY (NASA Jet Propulsion Laboratory, ABD), gibi yazılımlar örnek olarak verilebilir (İnal ve Salgın, 2008; Poyraz, 2009, Çakmak, 2010).

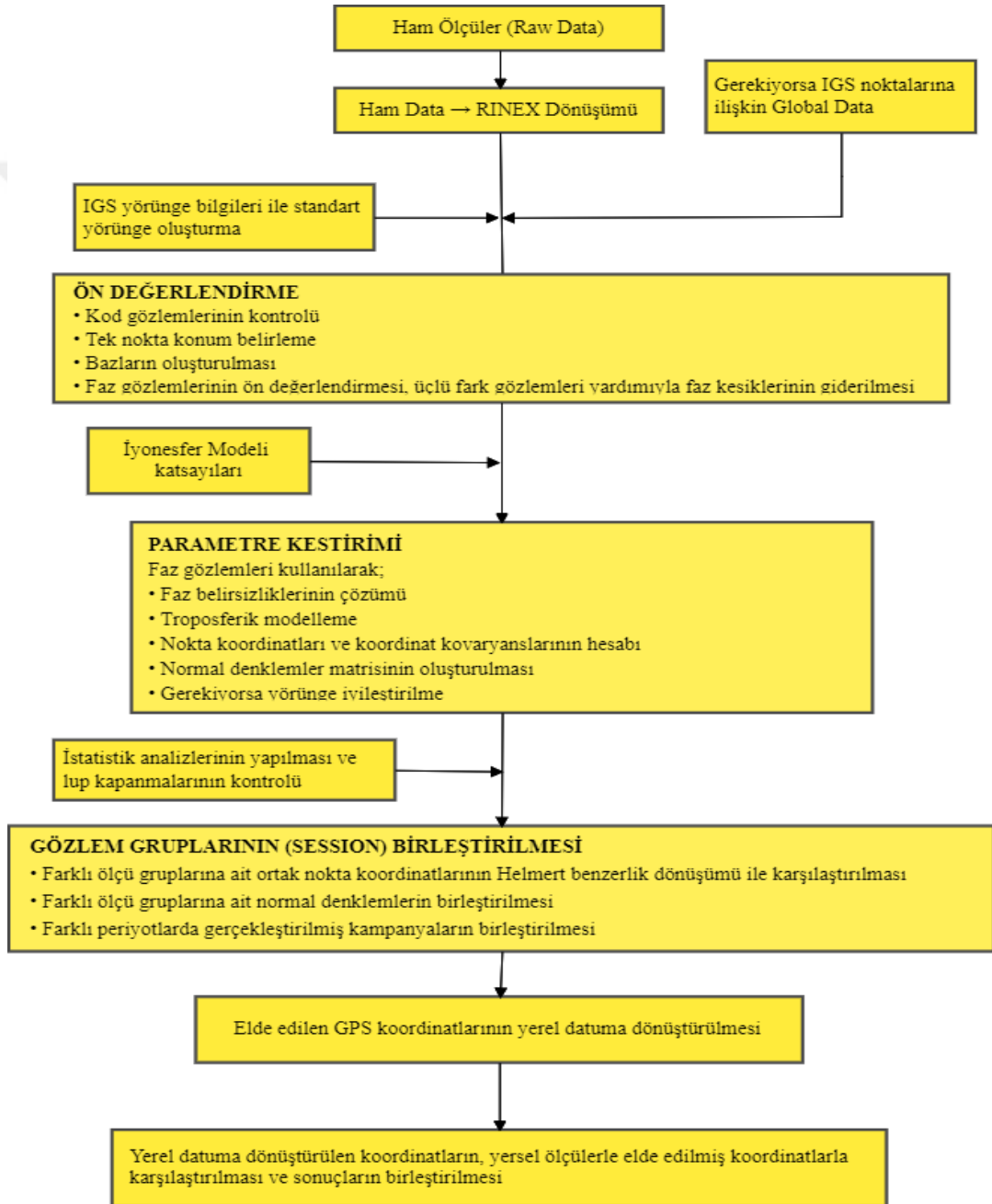
Genelde tüm bu yazılımlarda data analizinden önce, farklı GPS alıcıları ve antenleri kullanılarak elde edilen ham datalar kontrol edilerek her yazılımda kullanılabilecek uygun bir format olan The Receiver Independent Exchange Format (RINEX) alıcıdan bağımsız değişim formatına dönüştürülmesi işlemi gerçekleştirilmelidir (Çakmak, 2010).

Tüm üretici firmalar kendi özel dosya formatını geliştirmiştir. Alıcılarına ve işleme yazılımlarına özgü veri depolama için başka bir üretici firmanın alıcısından alınan veriler işlenirken sorunlar oluşmaktadır. Bundan dolayı verilerin her GNSS yazılımında kullanılabilecek olan ortak uygun bir formata dönüştürülmesi gerekmektedir.

GAMIT/GLOBK ile değerlendirme işlemleri genel olarak üç kademededir gerçekleştirilmektedir. Öncelikle GPS ölçü verileri RINEX veri formatına dönüştürülür ve bu verilerle ilk olarak GAMIT yazılımında, genel olarak her bir gün için taşıyıcı fazlardaki tamsayı belirsizliğini, uydu saati hataları ve atmosferik etkileri ile gözlenen ve kuramsal olarak elde edilmiş ölçmelerin farklarına dayanan üç boyutlu nokta koordinatlarını ve uydu yörünge parametrelerini lineer kestirim ile dengeleme yapmaktır. GLOBK' de ise temel olarak, Kalman Filtreleme tekniğini kullanarak, farklı zamanlarda yapılmış ölçüleri birleştirme işlemini yapmaktadır.

İlk adımda hesaplanan kestirilen günlük koordinatlar, yörünge ve dünya dönme parametre değerleri bir araya getirerek, kalman filtresi uygulanması ile koordinat ve hız kestirimi gerçekleştirilir. Son olarak, bu koordinat ve hız değerlerinin bir yerel datum sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir (Poyraz, 2009; Yavaşoğlu 2009, Çakmak, 2010; Tiryakioğlu, 2012).

Şekil 4.1’ de yukarıda bahsedilen GNSS değerlendirme yazılımlarının genel iş akışını adım adım anlatan şema bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Bilimsel amaçlı yazılımlarda iş akışı (Kahveci ve Yıldız, 2012)

4.1.1. GAMIT yazılımı

GAMIT yazılımı ile GNSS verilerini işlemek için ilk önce, farklı tipteki alıcılarda toplanmış verilerin RINEX veri formatına dönüştürerek belli standarda indirgenmesi sağlanmalıdır. GAMIT yazılımında işlem aşamaları olarak ilk, uydulara ait ön yörüngeleri ve saat verileri elde edilmektedir. Sonra ilgili istasyon saat düzeltmeleri, bu verilerden RINEX’ de bulunan her bir noktanın yaklaşık konum bilgisi ve HUAM (Ham Uydu Alıcı Mesafesi) bilgileriyle dengeleme öncesi nokta koordinatlarına dayalı olarak hesaplanmaktadır (Yavaşoğlu, 2003; Çakmak, 2012; Tiryakioğlu, 2012)

Aslında bu aşamadaki amaç veri işlem süreci boyunca kullanılan tüm parametrelerin kestirimidir. İkinci aşamada faz gözlemleri değerlendirilerek faz kesiklikleri belirlenir ve ortadan kaldırılır. HUAM ve teorik faz, GAMIT kütüphanesindeki fiziksel modellerden yararlanarak belirlenmektedir. Ay, yer küre ve güneşin çekim alanı, hareketleri ve güneşin radyasyon basıncı gibi nedenlerden dolayı uyduların yörüngeleri değişebilir. GAMIT ile bu etkiler uyduya ilişkin hızını ve ilk konumunu tanımlayan bir vektör ile değerlendirilebilir. Yerin nütasyon, presesyonu ve yer dönme parametreleriyle yersel referans sistemleri ile uyduya ilişkin konum bilgileri karşılaştırılabilir. GAMIT yazılımı bir uydunun hareketi hakkında sayısal olarak bilgi vermekte, faz ve HUAM kestirimlerine dayanarak solar radyasyon basıncının parametrelerinin bir kısmını ve uydu durum vektörünün altı parametresinin doğrusal sapmalarının kestirimlerini yapabilmektedir (Yavaşoğlu, 2003).

HUAM ve teorik faz bir kez hesaplandıktan sonra a-priori (dengeleme öncesi) değerlere bir dizi EKK (En Küçük Kareler) dengelemesi yapılmaktadır. Dengeleme sonunda üç boyutlu koordinatlar, her bir nokta için modellenemeyen atmosferik refraksiyon etkisini gösteren zenit gecikme parametreleri ve birbirinden bağımsız çift fark faz belirsizlik parametreleri belirlenmektedir (King ve Bock, 2002).

İlk dengelemede saptanan birbirinden bağımsız çift farkların faz belirsizlik parametreleri, faz verisinin dağılımı ve baz uzunluğuna dayalı eşleme ile orijinal taşıyıcı faz belirsizliklerinden üretilebilmektedir. Bu eşleme, kısa baz uzunluklarından elde edilen belirsizlik çözümünün daha güvenli olmasının avantajını, ağın tamamı içinde kullanarak, en kısa bağımsız yola göre birbirinden bağımsız çift fark kümesini oluşturmaktadır (Yavaşoğlu, 2003). Diğer adım ise en iyi uyan tamsayıyı iteratif olarak saptayarak çiftli farkları alınmış uzun dalga boylu belirsizlik parametrelerini hesaplamaktır. Bu hesaplamada L1 ve L2 faz gözlemleri bağımsız olarak kullanılır. Bu adımda ki tamsayı değerleri saptanacak olan belirsizlik değerleri dışındaki tüm parametreleri ilk

iyonesferden bağımsız dengelemeden elde edilen değerlerine sabitlenir. Bir kere güvenli şekilde çözülen uzun dalga boylu belirsizlikler, doğru tamsayı değerlerine yuvarlanır. Daha sonra ikinci dengeleme ise iyonesferden bağımsız olarak tüm parametreleri kestirmek ve kısa dalga boylu faz belirsizliklerini çözümlemek için yapılmaktadır. (Herring, 2000; King ve Bock, 2000 Yavaşoğlu, 2003; Tiryakioğlu, 2012;) GAMIT yazılımında dengelemeler sonucunda istasyonların koordinatları, uydu hassas yörünge verileri ve yer dönüklük parametrelerini içeren kovaryans matrisleri elde edilir. Bu veri sonuçları, GLOBK için girdi dosyaları olarak kullanılır (Çakmak, 2012).

4.1.2. GLOBK yazılımı

GLOBK (Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program) yazılımı, uydu jeodezisi ile örneğin; SLR, VLBI, GPS gibi teknikler kullanılarak elde edilmiş ölçmelerin değerlendirilmesi sonucundaki çözümlerin birleştirilerek Kalman Filtresi uygulanması amacıyla geliştirilmiştir. GAMIT yazılımındaki değerlendirme sonucundaki, istasyonların nokta koordinatları, yerin dönüş parametreleri ve uydu yörünge parametrelerine ilişkin varyans - kovaryans matrisleri GLOBK’ de girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Karışık sistemlerin en etkili kestiriminde, Kalman filtresi yöntemi kullanılır. Kalman filtresi, hatalı verilerin olması ve sistemin stokastik modelinin saptanması durumunda bilinmeyen parametreleri kestirmek için kullanılan bir yöntemdir (Yavaşoğlu 2003, Çakmak, 2010).

Parametrelerin ardışık olarak kestirimini sağlayan Kalman filtresi ile iki tür kalman filtresi gerçekleştirilir. Birinci olarak ölçmelerin ağırlıklı ortalamalarının ve hız gibi diğer model parametrelerinin ardışık kestirimlerini veren “ileri” çözüm, İkinci olarak bu ileri çözüme göre ölçme düzeltmelerinin hesaplanmasını sağlayan “geri” çözümdür (Yavaşoğlu, 2003; Tiryakioğlu, 2012; Çakmak, 2010).

Uydu yörünge bilgileri ile istasyonların koordinatları ve bileşenleri oluşturulur. Bir istasyonda yapılan çok zamanlı (birden fazla günü içeren) ölçümlerden koordinat kestirimini elde edilebilmektedir. Ayrıca farklı zamanlarda yapılan ölçümlerden herhangi bir istasyona ait hız vektörünün tahmini ve gün aşırı ya da yıl aşırı zaman serisine açılımını da hesaba katarak bağımsız bir şekilde koordinat hesaplamalarını da yapmak için geliştirilmiştir. GLOBK’ de her bir istasyona ait uzun dönem ve kısa dönem zaman serileri oluşturulur. Bu zaman serileri yardımıyla her bir istasyonun kuzey-güney, doğu-batı ve düşey koordinat bileşenleri ve baz bileşenlerinin zamana bağımlı değişimi

incelenebilmektedir Kestirilen koordinat ve hız değerlerinin referans sistemine tanımlanması yapılmaktadır (Çakmak, 2010; Özbey, 2017).

Kısaca, Kalman Filtreleme tekniğini kullanarak, farklı zamanlarda yapılmış ölçüleri birleştirme işlemini yapmaktadır. İlk adımda hesaplanan kestirilen günlük koordinatlar, yörünge ve dünya dönme parametre değerleri bir araya getirerek, kalman filtresi uygulanması ile koordinat ve hız kestirimi gerçekleştirilir. Bu koordinat ve hız değerlerinin bir yerel datum sistemine dönüştürülmesi sağlanır. Zaman serilerine göre kestirilmiş olan hızlar ve koordinatlar yardımıyla yüzeyde oluşan deformasyon, yer hareketleri miktarları hakkında bilgiler saptanmaktadır.



5. GERİNİM ANALİZİ

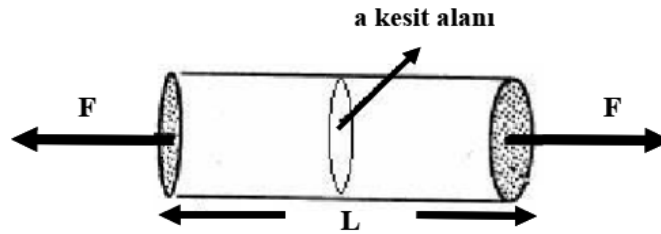
Yer kabuğunun irili ufaklı birçok hareketli plakadan meydana geldiğini Alman Jeofizikçi Alfred Wegener tarafından 1912’ de ‘‘Levha Tektoniği Kuramı’’ ile ortaya koymuştur. Plakaların birbirine göre yaptığı göreceli hareketlerinden dolayı yer kabuğunda deformasyonlar oluşmaktadır. Bu deformasyonlardan kaynaklı plaka sınırlarında ve iç kısımların gerinim oluşmaktadır. Tekrarlanan GNSS ölçüleri ile günümüzde bu plakalardaki yer değiştirme miktarları kolaylıkla saptanabilmektedir. GNSS gözlemleri yardımıyla hesaplanan koordinat farkları ile bulunun yıllık hareket miktarına neden olan kuvvetlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu yer değiştirme verileri kullanılarak, deforme olan alanın boyutlarında oluşan geometrik değişimler hesaplanabilmektedir (Tiryakioğlu, 2012).

5.1. Genel Bilgiler

5.1.1. Gerilim

Gerilim, birçok disiplinlerin çalışmalarında kullanılmaktadır. Katı maddelerin bir kuvvet karşısında gösterdikleri dayanıklılık ve kırılmaya karşı koydukları dayanım çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Mekanik, Malzeme, Zemin Mekaniğinde sıklıkla kullanılır. Gerilme direk saptanamaz ancak meydana gelen deformasyonların ölçülmesi ile hesaplanabilir. Gerilim, genel olarak tanımlanırsa ‘birim alana etki eden kuvvet miktarını’ ifade eder. Dış kuvvetlere karşı koymaya yarayan iç kuvvetler düzenine gerilme (stress) denir. (Poyraz, 2009; Tiryakioğlu, 2012; Url-15).

L uzunluğunda Şekil 5.1’ de gösterilen bir çubuğun kendi eksenini boyunca F kuvveti ile çekilirse, kuvvetin etkisi ile çubukta uzama meydana gelecektir.



Şekil 5.1 Cisme etkiyen (dış kuvvet), F kuvveti

Çubuğun uzama miktarına dl olduğu varsayılırsa, gerilme miktarı;

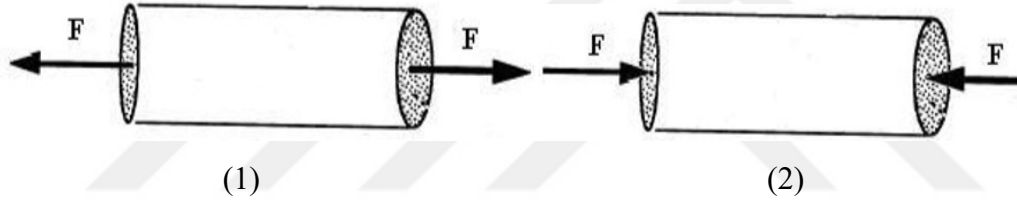
$$\varepsilon = \frac{\text{Uzama Miktarı}}{\text{Gerçek Uzunluk}} = \frac{dl}{L} \quad [5.1]$$

Şeklinde formülleştirilmektedir. Bu denklemde, $L=1$ olursa, $\varepsilon=dl$ olur. Böylece birim uzunluğun ölçek farkı olmaktadır.

Çubuğa dış kuvvet olarak etkiyen F' e karşı çubuğun iç kuvveti tepki gösterecektir. Çubuğun herhangi bir kesitteki alanı a , iç kuvvetin büyüklüğü de f ise F kuvveti;

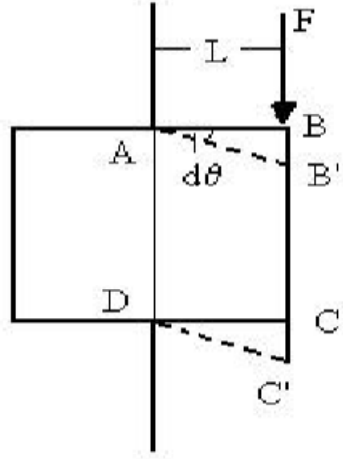
$$F = a * f \text{ ya da } f = \frac{F}{a} \quad [5.2]$$

Şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 5.2 (1) Çekme gerilmesi (2) Sıkışma gerilmesi

Şekil 5.2 (1)' de görüldüğü üzere çekme kuvvetine maruz kaldığı için “çekme gerilmesi” olarak ifade edilir. Şekil 5.2 (2)' de ise F kuvveti tarafından çubuk sıkıştırılmaktadır bu durum ise “sıkışma gerilmesi” olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deformasyona sebep olan kuvvet kesme ya da makaslama olarak adlandırılan gerilimdir. Şekil 5.3' de görüldüğü gibi ABCD cisminde B noktasında bir F kuvvetinin etkisiyle bir süre sonra deforme olacaktır. ABCD dikdörtgeni AB' C' D şeklini alacaktır. Dikdörtgende oluşan deformasyona makaslama ya da kesme gerilimi olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5.3 Kesme gerilmesi

Deformasyonun ölçüsü;

$$d\theta = \frac{BB'}{AB} \quad [5.3]$$

Olur. Eğer cismin alanı “a” ise kesme kuvveti; $f_s = \frac{F}{a}$ olur. Daha açık ifade ile;

$$\frac{\text{Kesme Kuvveti}}{\text{Kesme Gerilmesi}} = \frac{f_s}{d\theta} = \text{sabit} = G \quad [5.4]$$

Oluşmaktadır. Bu bağıntıdaki G sabiti; “Rijitlik Modülü” olarak isimlendirilir.

$$G = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad [5.5]$$

Bağıntısı mevcuttur. (5.5) bağıntısındaki ν Possion oranıdır. Bir cisme tek yönde bir çekme ya da sıkıştırma kuvvetleri uygulandığında cismin kuvvete maruz kaldığı alan değil tüm alan da deformasyon meydana gelmektedir. Yanal kesme gerilmelerinde eksen olarak birbirine karşı zıt işaretlerdir. Yani kuvvetin etki ettiği doğrultuda çekmeden kaynaklı uzama genişleme olurken, yanal kısımlarda basma deformasyonu genişleme deformasyonunu oluşturur ve yanal boyutlarda küçülme, kısalma görülmektedir (Poyraz, 2009).

5.1.2. Gerinim

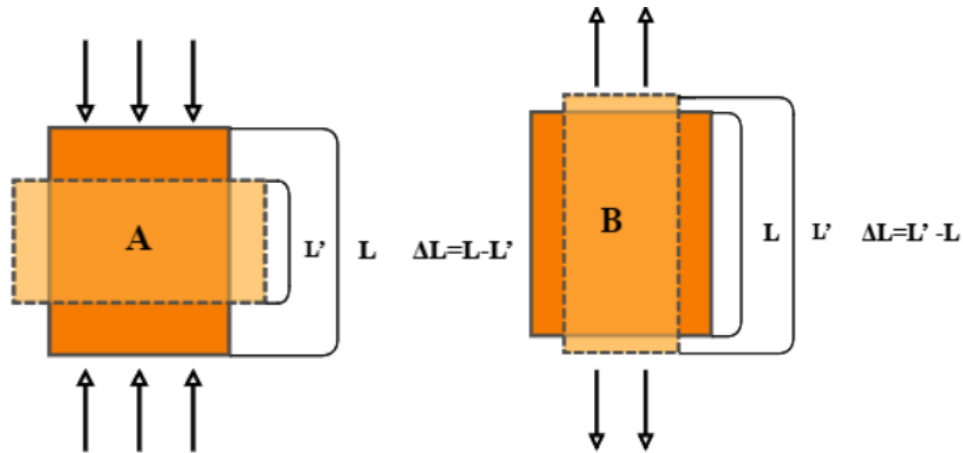
Gerinim, deformasyona uğramış bir alandaki şekil değişimini matematiksel olarak ifade edebilmemizi sağlamaktadır. Gerinim, yer değiştirme ile son derece ilişkilidir. Son zamanlarda deformasyon analizi çalışmalarında, “epoklar arasındaki koordinat farklarının deformasyon” olarak yorumlanmasıyla, bu farklara hangi kuvvetlerin etki ettiği incelenmektedir. Kısaca gerinim herhangi bir cismin birim miktarındaki gerinime karşı oluşan şekil ve hacimsel olarak değişimine gerinim (strain, birim deformasyon) denilmektedir. Bu durumda deformasyon çalışmalarında noktada meydana gelen hareketler ile birlikte noktalar arasındaki gerinimde son derece önem taşımaktadır. Gerinim, bir noktanın diğer yakın noktalara bakılarak yer değiştirme miktarının, noktanın ilk konumu ile referans noktası arasındaki mesafeye bölümü olarak ifade edilebilir (Poyraz ve Aydın, 2009).

Gerinim kavramı kütle üzerinde ele alındığında;

- Kütlenin bütünüyle yer değiştirmesi (dönmesi, kayması)
- Kütle üzerinde bulunan noktaların birbiriyle görel olarak hareketi

Kütlenin bütünüyle kayması ya da dönmesi, katı blok hareketidir. Bu hareket homojen deforme olabilen alanlarda görülmektedir. Noktalardaki bağıl hareket ise deformasyon olarak adlandırılır (Tiryakioğlu, 2012).

Gerinim deformasyon tipine göre çekme, basınç, kesme gerinimi olarak adlandırılırlar (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5).

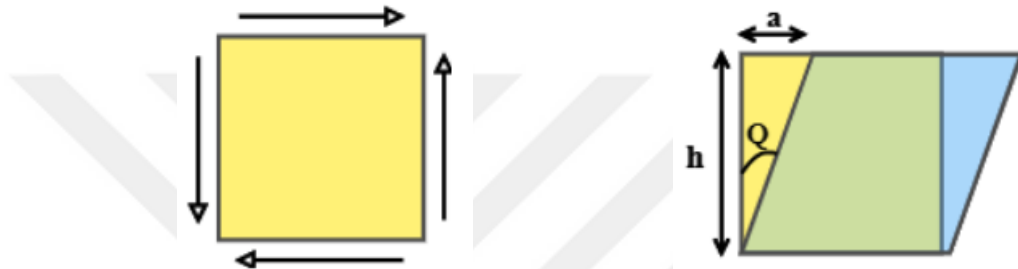


Şekil 5.4 A; baskı gerinimi ile birim boy kısalması, B; çekme gerinimi ile birim boy uzaması (Tiryakioğlu, 2012)

Şekil 5.4 de gösterildiği gibi çekme gerilimi etkisinde boyda uzama meydana gelecektir. Baskı geriniminde ise boyda kısalma oluşacaktır. Sırasıyla bağıntı 5.6 ve 5.7 ile hesaplanabilir.

$$(-)\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [5.6]$$

$$(+)\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [5.7]$$



Şekil 5.5 Kesme gerinimi

Şekil 5.5’de de görüldüğü her gerinim kuvvetiyle oluşan deformasyon da öteleme ya da kayma da oluşabilir. Alan şekil değiştirmeden tüm şekilde yer değiştirebilir.

5.2 Gerinim Parametreleri ve Matematiksel İfadesi

GNSS değerlendirmesi sonucunda bulunan hız vektörleri; yer değiştirmeler ile gerinim parametreleri hesaplanmıştır. Gerinim elemanlarının hesaplanmasında gerinim homojen olarak kabul edilmektedir.

Bu teoriye göre bağıl konum değişimi:

$$d_u = dF * r + u_0 \quad [5.8]$$

Olarak ifade edilmektedir (Kakkuri ve Chen, 1990). Bağıntıdaki; dF bağıl konum değişim gradyent tensörü, $u_0 = [t1 \ t2]^T$ tüm noktalar için kabul edilen öteleme, “katı blok kuvveti hareketi”, $r = [x \ y]^T$ koordinatlardır. dF Bağıl konum değişim gradyent tensörü, simetrik ve antisimetrik gerinim tensörünün toplamı şeklinde yazılabilir:

$$dF = w + E \quad [5.9]$$

Buradaki E simetrik gerinim tensörü:

$$E = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{xy} & e_{yy} \end{bmatrix} \quad [5.10]$$

E gerinim tensörü matrisinin köşegen elemanları, (e_{xx}) x eksen ve (e_{yy}) y eksen doğrultusundaki birim uzunluktaki genişlemeyi, diğer (e_{xy}) elemanları ise koordinat eksenlerine göre deformasyon sonucu ortaya çıkan küçük açısal bozulmayı (shear strain) tanımlamaktadır. Koordinat eksenleri

w ters simetrik dönme tensörü:

$$w = \begin{bmatrix} 0 & w \\ -w & 0 \end{bmatrix} \quad [5.11]$$

W Dönme tensörü ilgili koordinat eksenlerini içeren düzlemde deformasyon sebebiyle meydana gelen katı bloğun diferansiyel dönmesini tanımlamaktadır. d_u deformasyon vektörü, $t1$ ve $t2$ epoklarındaki koordinatların afin dönüşümünün sonucu olarak yazılırsa, $d_u = B^*u$ [5.12]

Şeklinde ifade edilmektedir. B katsayılar matrisi:

$$B = \begin{bmatrix} x & y & 0 & y & 1 & 0 \\ 0 & x & y-x & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [5.13]$$

Şeklinde gösterilir. [5.8] bağıntısına dayanarak [5.10] ve [5.11] bağıntıları ile birlikte düzenlenerek [5.12]'deki eşitlikte yerine konulursa:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 0 & y & 1 & 0 \\ 0 & x & y-x & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{xy} \\ e_{yy} \\ w \\ t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad [5.14]$$

Her bir nokta için yeni bir eşitlik elde edilir. Buaradaki u_x ve u_y iki boyutlu yer değiştirme vektör elemanıdır (Brunner, 1979; Kakkuri ve Chen, 1990; Poyraz, 2009).

Gerinim parametreleri dengeleme ile en küçük kareler yöntemine göre belirlenmektedir. Bu parametreler kullanılarak gerinim elips parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

Alan bozulması:

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy} \quad [5.15]$$

Saf Kayma (püre shear):

$$\gamma_1 = e_{xx} - e_{yy} \quad [5.16]$$

Mühendislik kayması (Engineering shear):

$$\gamma_2 = 2e_{xy} \quad [5.17]$$

Maksimum asal gerinim:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2} \left[(e_{xx} + e_{yy}) + \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + 4e_{xy}^2} \right] \quad [5.18]$$

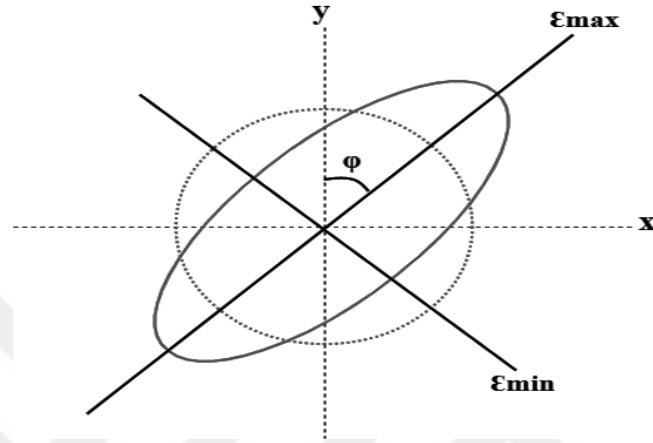
Minimum asal gerinim:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2} \left[(e_{xx} + e_{yy}) - \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + 4e_{xy}^2} \right] \quad [5.19]$$

Maksimum gerinim yönü:

$$\varphi = 0.5 \tan^{-1}(\gamma_1 / \gamma_2) \quad [5.20]$$

Gerinim alanının homojen olmasıyla, bir daire üzerindeki noktaların deformasyondan sonra bir elips üzerinde yer almaktadır bu elipse gerinim elipsi denir. Şekil 5.6 ‘da gösterildiği gibi $\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}$ en büyük ve en küçük uzunluk değişimini ifade eden asal gerinim parametreleri ve bunların yönleri gerinim elipsini tanımlamaktadır (Demir, 1999).



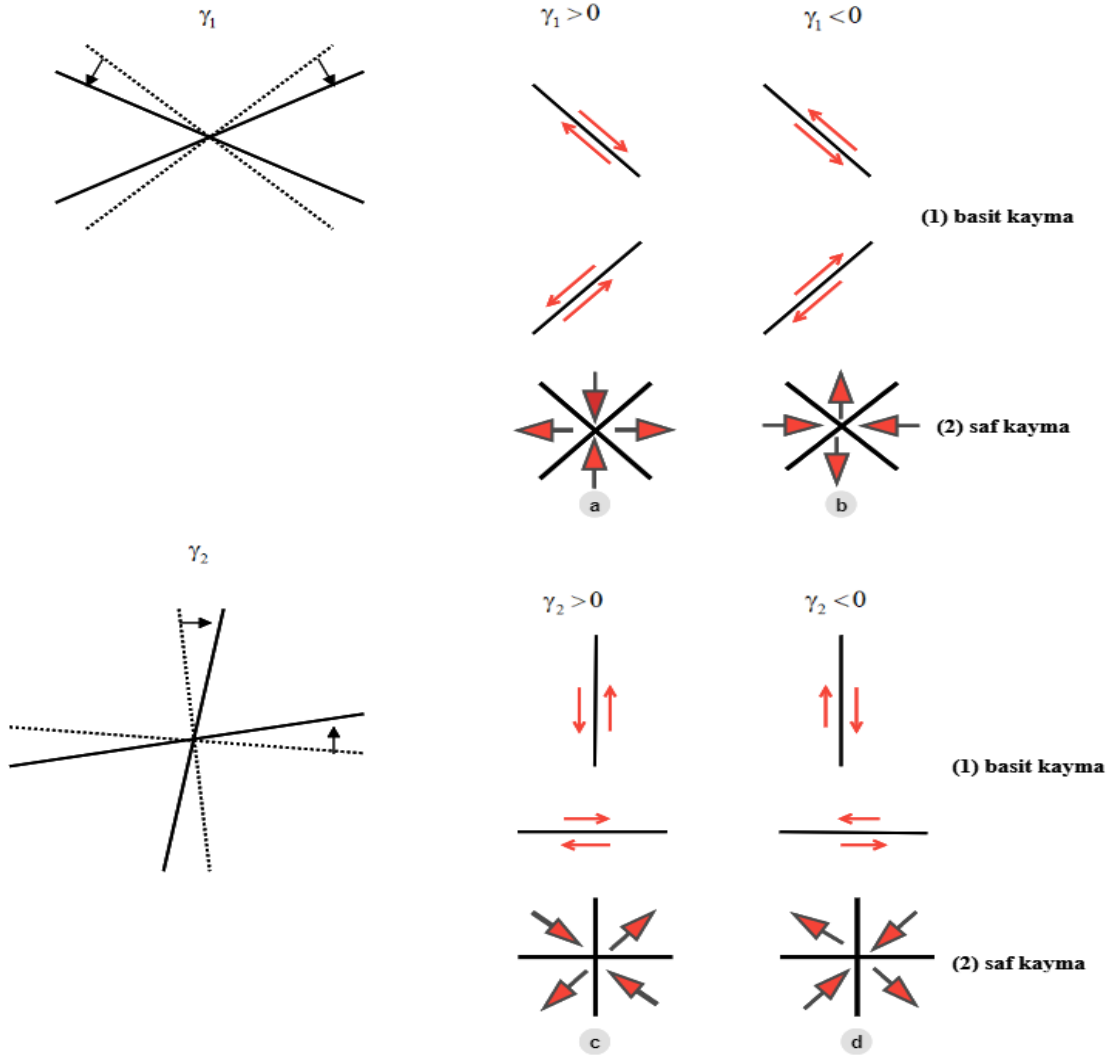
Şekil 5.6 Gerinim elipsi, maksimum ve minimum asal gerinim parametreleri (Demir, 1999)

Asal gerinim parametreleri deformasyonun tipine göre pozitif veya negatif değerler alabilirler. Negatif değer alanda bir sıkışma olduğunu, pozitif değer ise genişlemeyi ifade etmektedir. Minimum ve maksimum asal parametreleri ikisi de pozitifse gerinim elipsi, ikisi de negatif olduğunda sanal elips, biri negatif diğeri pozitifse iki bölümlü hiperbol oluşmaktadır (Demir, 1999). Gerinim elipsi ve gerinim parametreleri şekil 5.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.7 a) sıkışmayı b) açılmayı gösterir (Cai ve Grafarend, 2007)

Asal elemanları pozitif negatif olması grafik gösteriminde farklı karakterde gösterilir. Şekil 5. 7' de görüldüğü gibi a; sıkışma yönü oklar içeriye doğrudur, b; açılmada ise tam tersi olarak oklar dışa doğru olmaktadır (Demir, 1999; Cai ve Grafarend, 2007).



Şekil 5.8 Kayma gerinim parametrelerinin (γ_1, γ_2) farklı durumları için gösterimleri (Feigl, 1990)

Açısal bozulmaları ifade eden kayma gerinim (γ_1, γ_2) parametrelerinin, üç farklı değerlendirme yapılarak şekil 5.8' de gösterilmekte olup,

- γ_1 , Kuzeybatı (KB) – Kuzeydoğu (KD) istikametinde birbirine dik iki uzunluk arasında ki açıda meydana gelen deformasyondan dolayı oluşan artıştır.
- $\gamma_1 > 0$ ve $\gamma_1 < 0$ bu durumlarda fayların karakterlerini ifade etmektedir $\gamma_1 > 0$ olduğunda Kuzeybatı (KB) – Güneydoğu (GD) yönünde sağ yanal atımlı bir fay

veyahut Kuzeydoğu (KD) – Güneybatı (GB) yönünde bir sol yanal atımlı bir fay olduğunu göstermektedir. $\gamma_1 < 0$ bu durum ise açıklanan durumun tersi söz konusudur.

→ γ_2 , burada deformasyondan kaynaklı, Kuzey (K) ve Doğu (D) yönünde birbirine dik iki doğrultu arasındaki azalma oluşmaktadır.

→ $\gamma_2 > 0$ Doğu-Batı yönünde sağ yanal atımlı fay karakterini ya da Kuzey-Güney yönünde sol yanal atımlı fay karakterlerini temsil etmektedir. $\gamma_2 < 0$ buarada yine aksi durum meydana gelmektedir (Feigl vd., 1990; Demir, 1999).

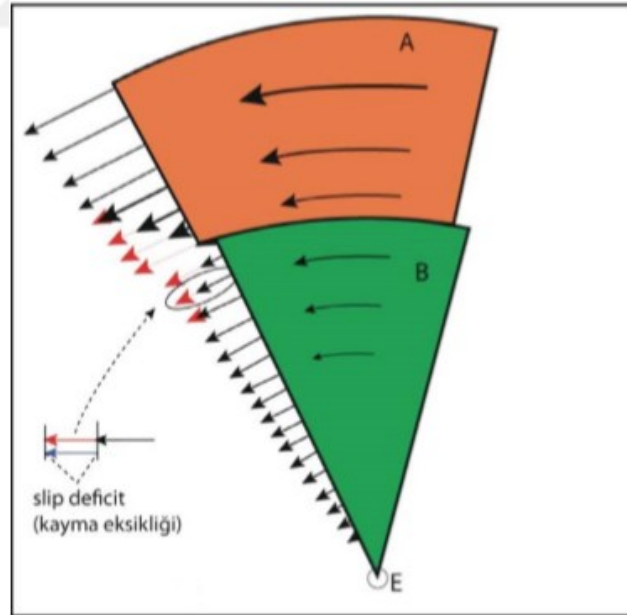


6. BLOK MODELLEME

Blok hareketlerinde, blokların sınırındaki faylarda birtakım etkiler oluşmaktadır. Blok hareketleri depremleri ortaya çıkarmaktadır. Bu hareketlerin meydana geldiği bloğun sınırındaki faylarda oluşan deformasyon ve konumundaki değişim depremden sonra eski durumlarına geri dönerler. Bu oluşumu, “Elastik Geri Dönme” (elastic rebound) teorisi ile açıklanmaktadır (Reid, 1910; Alkan, 2018).

GPS hız verilerinden çalışma alanındaki ölçüm istasyonlarının yıllık hareket miktarlarını belirlemek mümkündür. Fakat bu istasyon noktalarının içinde bulunduğu blokların bağlı hareketlerini belirlemek ve fayların karakteristik özelliğini ifade eden fay parametrelerini ortaya çıkarmak için blok modelleme yöntemi kullanılmıştır.

Blok modelleme temel olarak, yeryüzünde bulunan bir noktanın hızı, Euler kutup değerine tabi şekilde hareketsiz olan bloğun dönmesi ve ayrıca blokların sınırını oluşturan fayların uzunluğu boyunca elastik yamulma birikiminin toplamı olarak ifade edilmektedir. Kurulan model; fayın kilitleme derinliği, blokların birleşme oranına ve kayma miktarlarına bağlıdır (Çakmak, 2010).

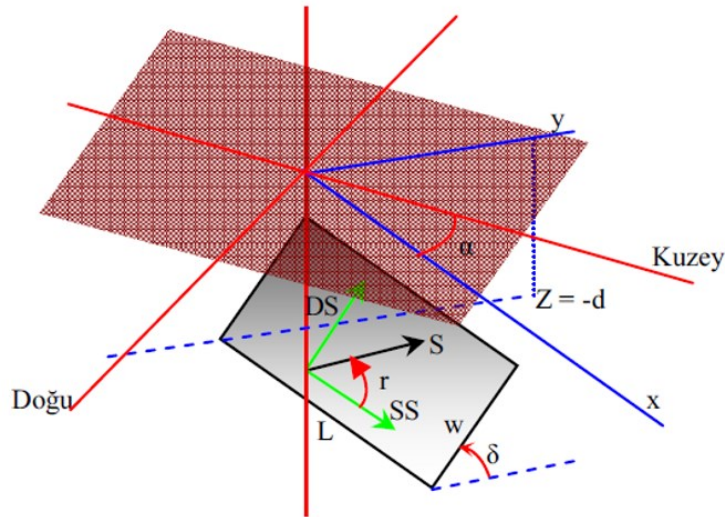


Şekil 6.1 Blok modellemenin genel ilkesi (Çakmak, 2010)

Şekil 6.1’ de verilmiş olan blok modellemenin genel ilkesinde A ve B blokları farklı hızlara sahip, aynı Euler kutba tabi olan iki komşu bloğu temsil etmektedir.

Bloklar kendi alanlarında GPS ölçüleri ile elde edilmiş, şekilde de siyah vektörler olarak görünen bloğun dönme hızlarını (Fayın hareket edemediği, kilitli olduğu durumdaki) ifade etmektedir. Blok dönme hareketleri sonucunda deformasyon oluşmaz. Blokların serbest olduğu, aralarında herhangi bir sürtünme kuvvetinin olmadığı, kırmızı vektörlerle gösterilen hızların arasındaki fark deformasyon birikimi olarak tanımlanan kayma eksikliğinin ifade etmektedir. Bu durum blok sınırlarını oluşturan faylara yakın alanlarda gözlenmektedir (Çakmak, 2010)

Modelleme işlemi için birçok yazılım kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Geodsuit programı tercih edilmiştir. Programın blok modelleme menüsü ile yapılan işlemlerin temel mantığı Okada (1985)' in Elastik Yarı Uzayda yer değiştirme teorisine dayanmaktadır. Okada (1985)'nın teorisine göre sayısal, analitik yöntemlerde karmaşadan kurtulmak ve veri çokluğunu azaltmak için yer kabuğunu bir bütün-uzay olarak değil de yüzeylerden birinin gerilim ve yüzey kuvvetleri olmadığını yani sıfır olduğunu yarı-uzay olarak kabul etmiştir. Bu durum da blok modelleme de bloklardan birinin yüzey kuvvetleri ve gerilim değerinin sabit olduğu varsayılmaktadır (Aktuğ ve Çelik, 2011).



Şekil 6.2 Fay geometrisi ve kayma (Aktuğ ve Çelik, 2008)

S : kayma vektörü
 δ : eğim açısı (dip angle)
 α : fay düzleminin azimutu (strike)
 d : fay düzleminin derinliği
 L : fay düzleminin uzunluğu
 w : fay düzleminin genişliği
 SS : fay doğrultusu yönündeki kayma (strike-slip)
 DS : fay eğimi yönündeki kayma (dip-slip)
 x, y : fay doğrultusu ve ona dik koordinatlar
 r : kayma vektörünün yönü (rake)

Yeryüzündeki yer değiştirme bileşenleri, yanal atım ve düşey atım matematiksel olarak bağıntılarına aşağıda yer verilmiştir (Aktuğ, 2006)

$$DS = S * \sin(r) \quad [6.1]$$

$$SS = S * \cos(r) \quad [6.2]$$

Yanal Atım

$$u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \quad [6.3]$$

$$u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{y' q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \quad [6.4]$$

$$u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{d' q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \quad [6.5]$$

Düşey Atım

$$u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} + I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \quad [6.6]$$

$$u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{y'q}{R(R+x')} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{x'\eta}{R+\eta} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \quad [6.7]$$

$$u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{y'q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi\eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cos \delta \right] \quad [6.8]$$

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{R+d'} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \quad [6.9]$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[-\ln(R+\eta) \right] - I_3 \quad [6.10]$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} \frac{y'}{R+d'} - \ln(R+\eta) \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \quad [6.11]$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[\ln(R+d') - \sin \delta \ln(R+\eta) \right] \quad [6.12]$$

$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \frac{\lambda(X+q \cos \delta) + X(R+X) \sin \delta}{x'(R+X) \cos \delta} \quad [6.13]$$

U_i : Kayma vektörü bileşenleri

δ : Eğim açısı

μ, λ : Lamé sabitleri

y', d' : Fay düzleminin orijini ifade ettiği ve fay düzlemine paralel bir koordinat sistemindeki koordinatları

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

- R : Fay başlangıç noktasının orijine olan mesafesi
 X : Noktanın fay doğrultusundaki koordinatı
 U_i : $i = 1, 2, 3$ sırasıyla SS, DS ve açılma
 u_i : $i = 1, 2, 3$ sırasıyla fay doğrultusu, eğim açısı ve fay düzlemine dik

Eşitlikleri kullanılmıştır (Aktuğ, 2006).

Programda modellemede yaparken gerekli olan hususlar;

- Bloğu oluşturmak için yeteri sayıda GPS ölçü noktaları bulunması gerekmektedir.
- Blokları oluştururken, iki bloğun komşu kenarlarını fayı sınır olarak kabul ederek eşit sayıda node atılır ve çalışma bölgesindeki noktaları içine alacak şekilde poligon olarak kapatılarak blokların tanımlanması sağlanır.
- Fayı sınır olarak kabul ederek atılmış komşu iki bloğun kenarların ortak noktaları birleştirerek topografik düzeltmeler ile fay ve blokların sınırlarını boşluk kalmayacak şekilde bir fay segmenti oluşturur.
- Burada oluşan segmentlere fayın karakterine uygun, fay derinliği ve dip açısı değerleri tanımlanır.

7. UYGULAMA: KUZEY ANADOLU FAY ZONUNUN DOĞU KESİMİ' NİN STRAIN ANALİZİ VE MODELLENMESİ

7.1. Çalışma Alanı: Kuzey Anadolu Fay Zonunun Doğu Kesimi

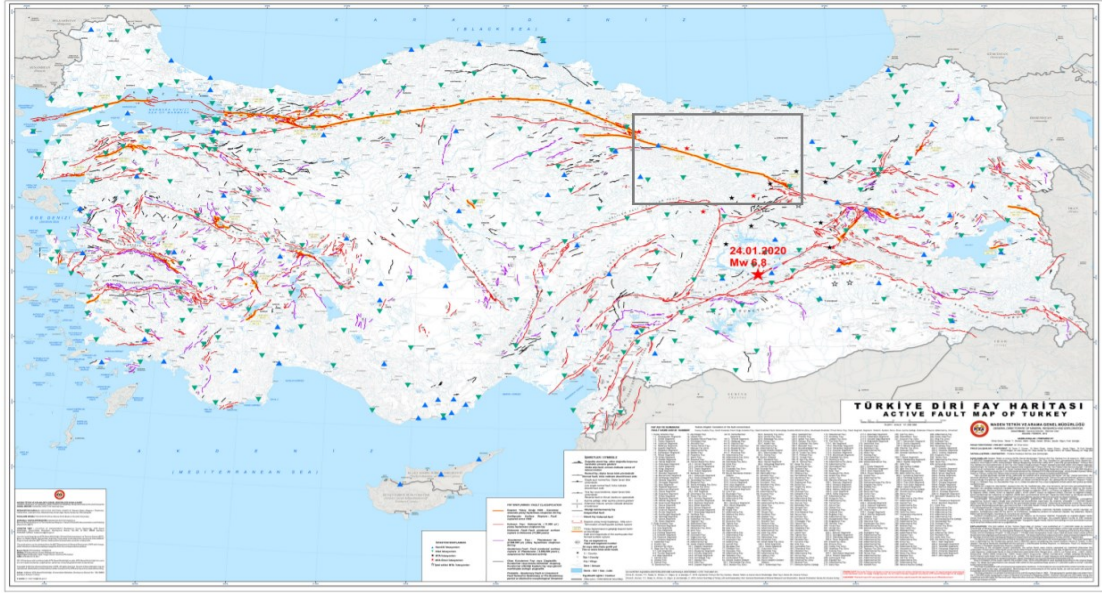
Kuzey Anadolu Fayının yapısına bakıldığında doğudan batıya fay boyunca aktiftir. Geçmişten günümüze kadar tarihsel depremleri göz önünde bulundurduğumuzda KAFZ' ın batısında olduğu kadar doğu kesiminde de büyük yıkıcı depremler meydana gelmiştir ve halende yüksek deprem riski taşıdığı düşünülmektedir.

KAFZ üzerinde birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir ancak bu çalışmaların büyük kısmı özellikle batı kesiminde Marmara bölgesinde gerçekleştirilmektedir. 17 Ağustos 1999 Kocaeli ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinin büyüklüğünden yıkıcı etkilerinden dolayı gündemden düşemeyen İstanbul'u da etkileyecek olmasından dolayı olabilecek deprem beklentisiyle Marmara Bölgesi'ndeki çalışmalar hızlı şekilde devam etmektedir. Fakat 1500 km uzunluğundaki KAFZ' ın batısı kadar doğu kesiminde de beklenen depremlerin büyüklüğünde yer hareketleri oluşturabilecek fay yapısına sahiptir (Özener vd., 2005).

Çalışma alanı KAFZ' ın batısında; Tokat (Reşadiye), doğusunda Erzincan (Refahiye) ve Malatya (Arapgir), kuzeyinde; Ordu (Fatsa), Giresun, Trabzon, Bayburt ve Gümüşhane, güneyinde; Sivas (Gürün) yerleşim yerlerinin içinde bulunduğu 36-42 derece doğu boylamı 38-42 derece kuzey enlemi arasındaki alanı kapsamaktadır.



Şekil 7.1 Çalışma Alanının gösterimi

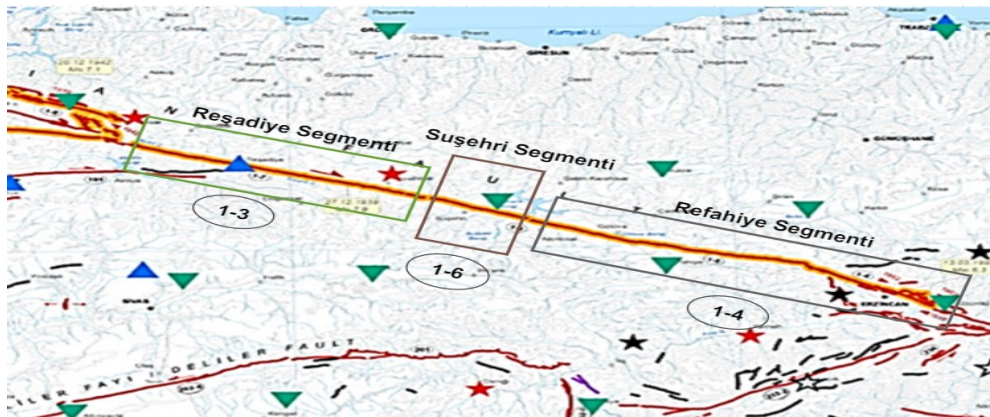


Şekil 7.2 MTA'nın üretmiş olduğu Türkiye Diri Fay Haritası (Emre vd., 2013)

Çalışma bölgesindeki fay, Niksar (Tokat)'dan başlayıp Reşadiye (Tokat), Suşehri (Sivas) Akıncılar (Sivas), Refahiye (Erzincan) yerleşim yerlerinden geçerek Pülümür (Tunceli)'e kadar uzanmaktadır.

1939 Erzincan depremi sonrasında yapılmış çalışmalara göre şiddetli bir deprem olmasından dolayı fayın belli kısımlarının kırıldığını farklı segmentlerin oluştuğu MTA'nın hazırlamış olduğu diri fay haritasında bulunmaktadır.

Şekil 7.2'de verilen harita Türkiye de geçmişten günümüze kadar meydana gelmiş tarihsel depremlerden sonra fayların kırılarak segmentlerden meydana geldiğini göstermektedir. Her fay ve segmentin numaraları ve isimleri bulunmaktadır.



Şekil 7.3 Çalışma bölgesinden geçen fayın segmentleri

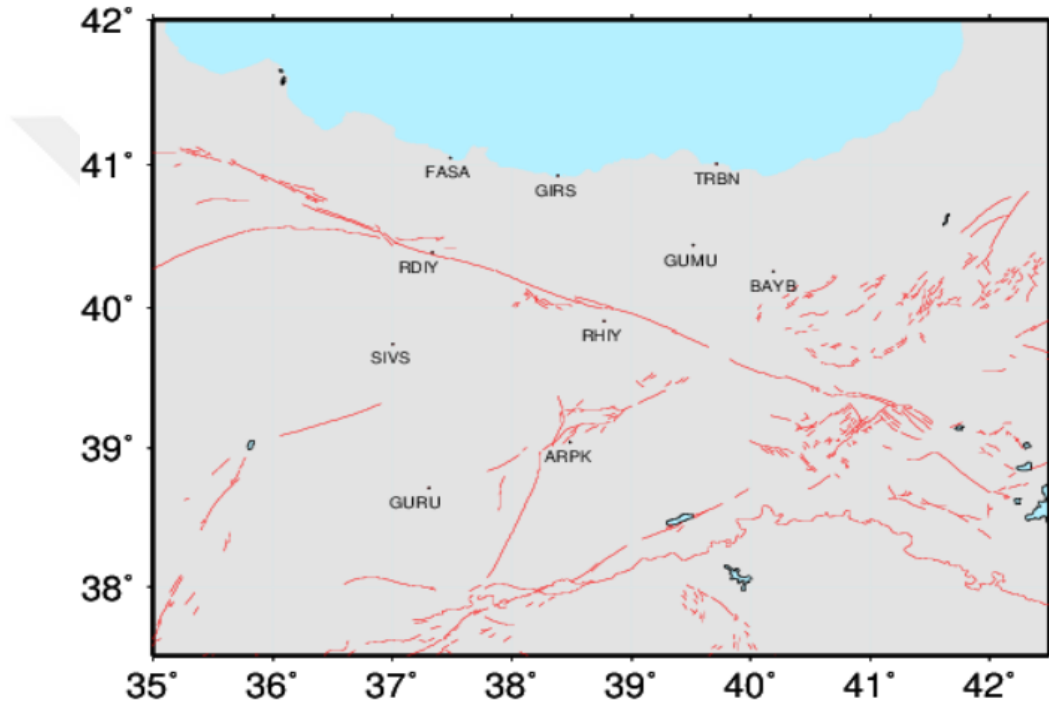
Bu tez çalışmasında Kuzey Anadolu Fay Zonunun doğu kesimindeki “Gerçek Zamanlı Kinematik” düzeltilmiş cm duyarlılığında hassas anlık konum verisi üreterek, yer kabuğu hareketlerini, yüksek deprem riski bulunan ülkemizin tektonik hareketlerini sürekli olarak izlenmesi ve deformasyon miktarının hassas şekilde elde edilmesine imkan tanıyan TUSAGA-AKTİF istasyon noktaları kullanılmıştır. Anadolu plakası ile Avrasya plakasının sınırını oluşturan fayı referans alarak TUSAGA-AKTİF istasyonları ile oluşturulan GPS ağına, KAF’ ın içinden geçtiği Erzincan/Refahiye de bulunana RHIY adlı istasyon noktası, Tokat/Reşadiye de RDIY, KAF’ ın kuzeyinde; Avrasya plakasında Giresun da GIRS, Trabzon da TRBN, Ordu/Fatsa da FASA, Gümüşhane de GUMU istasyon noktaları, batısında; Anadolu plakasında ise Sivas’ ta SIVS, güneyde; Sivas/Gürün de GURU, doğusunda; Bayburt da bulunan BAYB istasyon noktaları kullanılmıştır (Çizelge 7.1.). GPS değerlendirilmesinde doğruluğunu artırmak için mm duyarlılığındaki global IGS istasyon noktaları dahil edilmiştir. (Çizelge 7.2.).

Çizelge 7.1 Çalışmada kullanılan TUSAGA-AKTİF istasyon noktaları

Yerleşim Yeri	Nokta Adı	Boylam (°)	Enlem (°)
Arapgir (Malatya)	ARPK	38.48732	39.04059
Bayburt	BAYB	40.19144	40.25015
Gümüşhane	GUMU	39.51617	40.43707
Gürün (Sivas)	GURU	37.30787	38.71735
Trabzon	TRBN	39.71149	41.00541
Refahiye (Erzincan)	RHIY	38.77080	39.90611
Reşadiye (Tokat)	RDIY	37.33567	40.38524
Fatsa (Ordu)	FASA	37.48475	41.04553
Giresun	GIRS	38.38816	40.92263
Sivas	SIVS	37.00249	39.74370

Çizelge 7.2 Çalışmada kullanılan IGS istasyon noktaları

Yerleşim Yeri	Nokta Adı	Boylam (°)	Enlem (°)
Bucuresti-Romanya	BUCU	26.12574	44.46394
Nicosia-Kıbrıs	NICO	33.39644	35.14099
Poltava- Ukrayna	POLV	34.54293	49.60261
Tubitak-Türkiye	TUBİ	29.45068	40.78672
Zelenchukskaya- Rusya	ZECK	41.56507	43.78839

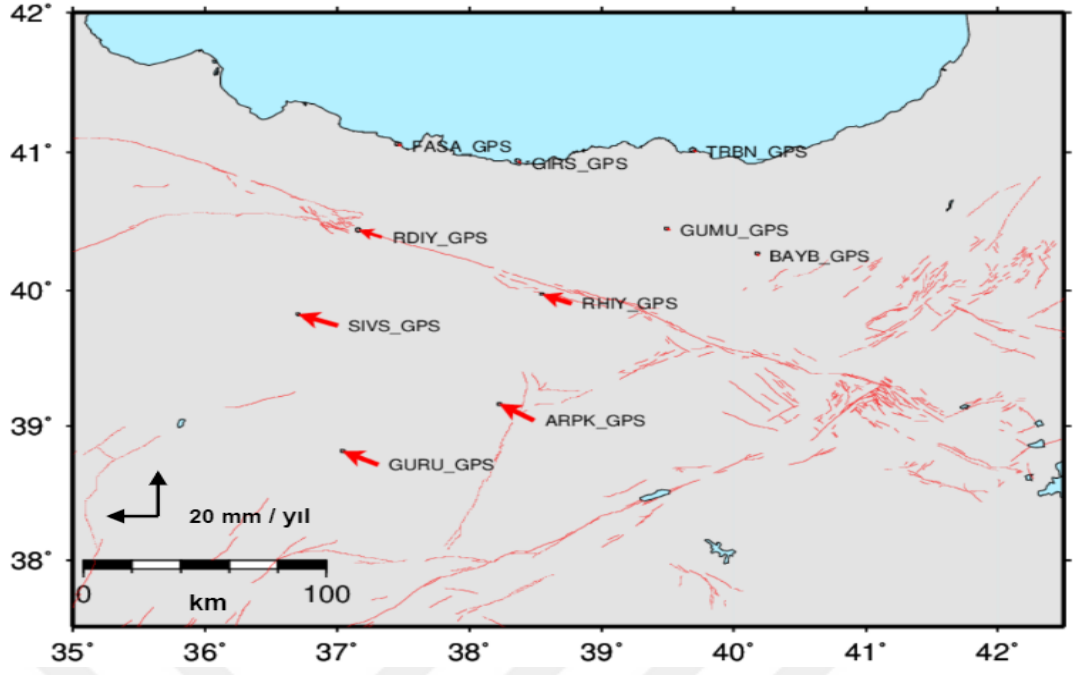


Şekil 7.4 Çalışmada kullanılan TUSAGA-AKTİF İstasyonlarının dağılımı

7.2. Avrasya Levhasına Göre KAFZ Doğu Kesiminin Hız Alanın Belirlenmesi

Türkiye'nin doğusundan batısına kadar uzanan KAFZ' ın doğu kesiminin, tektonik hareketi hakkında tahminlerde bulunabilmek için blok modelleme ve gerinim analizi yapılarak bölgedeki fay doğrultusu yönündeki kayma ve eğim yönündeki kayma miktarlarını, yer değişimlerini, gerinim birikimlerini (bölgeye ilişkin ortalama çekme ve sıkışma yönlerini veren asal gerilme parametrelerini) belirlemek amacıyla KAFZ' ın karakteristik özelliği 'sağ yanal atımlı bir fay' olmasından dolayı blokların birbirine göre yanal hareketlerini saptayabilmek için ve blok modelleme yaparken yeterli sayıdaki noktaların fayın sağında solundaki bloklarda olacak şekilde uygun olmasına dikkat ederek seçilen, TUSAGA-AKTİF istasyonları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan hız verileri TUSAGA-Aktif istasyonlarının, 2013-2014-2015-2016-2017-2018 yıllarına ait üçer günlük (Temmuz ayının 15-16-17 günlerinin verileri) GNSS verileri kullanılarak GAMİT/GLOBK yazılımı yardımıyla elde edilmiştir. Sonucunda bu çalışmada uygulanan blok modelleme ve gerinim analizinde girdi verisi olarak kullanılan Avrasya Plakası sabit alınarak değerlendirilmiş TUSAGA-AKTİF ve IGS istasyonlarına ait yıllık hız bileşenleri ve standart sapmalarına yer verilmiştir (Çizelge 6. 1).

Çizelge 7.1 ve Şekil 7.5 incelendiğinde çalışma alanının en güneyinde bulunan GURU noktasının 18 mm/yıl, SIVS noktası 20 mm/yıl, ARPK noktası 19 mm/yıl değerlerini almıştır. Fayın üzerinde bulunan RDIY 12 mm/yıl olduğu ve RHIY noktasının ise 15 mm/yıl olduğu, fayın kuzey kısmındaki noktalardaki hız değerleri ortalama 1.5 ile 2 mm/yıl arasında değişmektedir. Bu değerlere göre hızın kuzeyden güneye ve doğudan batıya doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Avrasya plakası üzerinde bulunan noktaların hızları faydan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir.



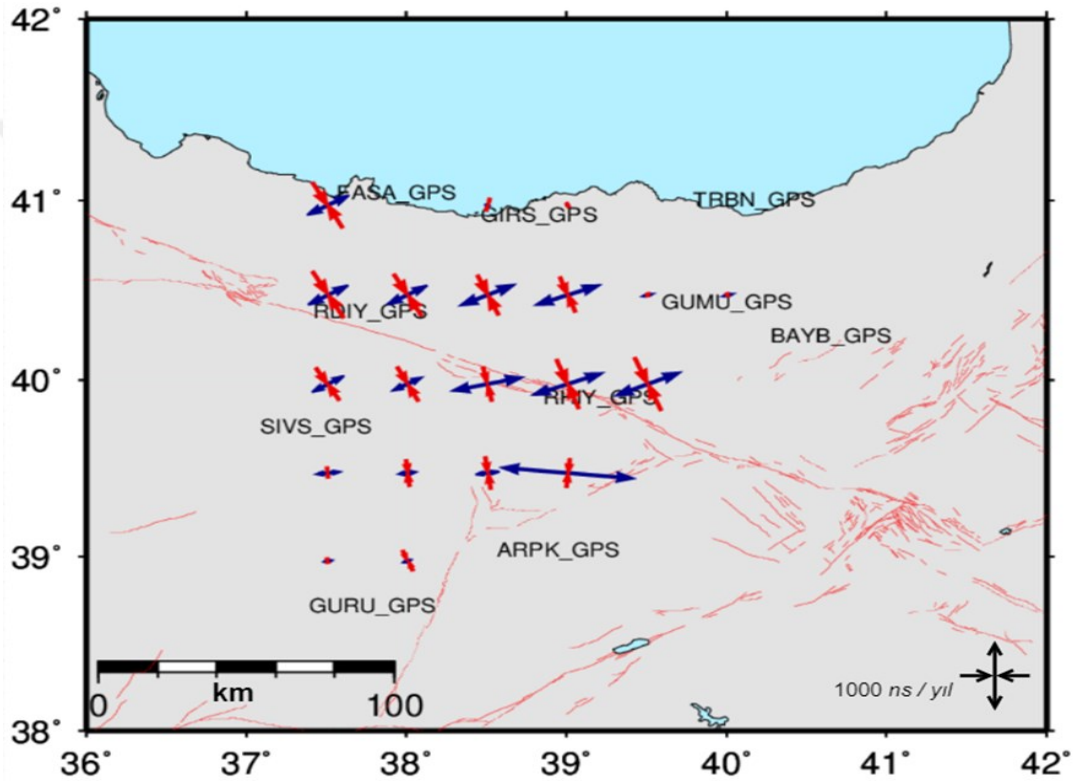
Şekil 7.5 Çalışma Alanını Oluşturan TUSAGA-AKTİF İstasyonlarına ait ITRF08 Sisteminde Avrasya Levhasına Göre Hız vektörleri

Çizelge 7.3 TUSAGA-AKTİF ve IGS İstasyonlarına ait hız bileşenleri ve standart sapmaları

Nokta Adı	Boylam (°)	Enlem (°)	Ve (mm/yıl)	Vn (mm/yıl)	σ_{Ve} (mm/yıl)	σ_{Vn} (mm/yıl)
ZECK	41.56507	43.78839	-0.75	-1.34	0.41	0.35
GUMU	39.51617	40.43707	-1.63	1.13	0.40	0.38
RHIY	38.77080	39.90611	-13.93	5.42	0.34	0.29
ARPK	38.48732	39.04059	-16.19	9.86	0.40	0.37
GIRS	38.38816	40.92263	-1.41	1.50	0.49	0.50
FASA	37.48475	41.04553	-1.95	1.11	0.37	0.35
RDIY	37.33567	40.38524	-11.12	4.49	0.45	0.47
GURU	37.30787	38.71735	-16.64	7.93	0.39	0.38
SIVS	37.00249	39.74370	-18.61	6.70	0.35	0.33
POLV	34.54293	49.60261	-0.44	-1.77	0.39	0.50
NICO	33.39644	35.14099	-0.89	-0.28	0.30	0.35
BUCU	29.45068	40.78672	6.56	5.00	0.39	0.43
TRBN	39.71149	41.00541	-1.32	1.04	0.55	0.56
BAYB	40.19144	40.25015	-0.93	1.61	0.40	0.35

7.3. KAFZ Doğu Kesiminin Gerinim Alanının Belirlenmesi

Bu tez çalışmasındaki bölgenin gerinin alanlarını hesaplamak için Geodsuit Programı kullanılarak iki boyutlu gerinim analizi yapılmıştır. Gerinim Analizi için programa temel girdi verisi olarak, çizelge 7.3'te bulunan noktaların hız bileşenleri ile hızlara ilişkin standart sapmaları kullanılmıştır. Gerinim analizini matematiksel olarak 7. bölümde anlatılmıştır. Çalışma alanı, 0.5×0.5 derecelik gridlere ayrılarak, her bir grid köşesine ait gerinim miktarları ve yönleri hesaplanmıştır. Sonucunda elde edilen gerinim alanı şekil 7.6' de gösterilmektedir.



Şekil 7.6 Çalışma alanındaki gerinim parametreleri ile hesaplanması ile elde edilen sıkışma ve açılma yönleri (Mavi vektörler bölgedeki açılmayı kırmızı vektörler ise sıkışmayı göstermektedir.)

Bölgenin gerinin alanı kuzeyden güneye doğru incelendiğinde; en büyük gerinim alanlarının Refahiye, Akıncılar, Suşehri, Divriği civarında olduğu görülmektedir. Kuzeybatı (KB) – Güneydoğu (GD) yönünde sıkışma ve KD-GB yönünde açılma rejimi hakimdir. Suşehri, Akıncılar, Refahiye, Arapgir civarındaki gerinim alanında açılmanın yoğun olduğu görülmektedir.

Fayın KD bölgesine bakıldığında Ordu, Giresun Trabzon, Gümüşhane Bayburt gerinim alanının çok azaldığı ile karşılaşılmaktadır.

Bölgenin GB-KB yönüne doğru gidildiğinde (Gürün Sivas Tokat Ordu) gerinim alanının arttığı görülmektedir. Bu alandaki gerinimlerin, Kuzeybatı (KB) – Güneydoğu (GD) yönünde sıkışma ve KD-GB yönünde açılma rejimi oluşturduğu görülmektedir.

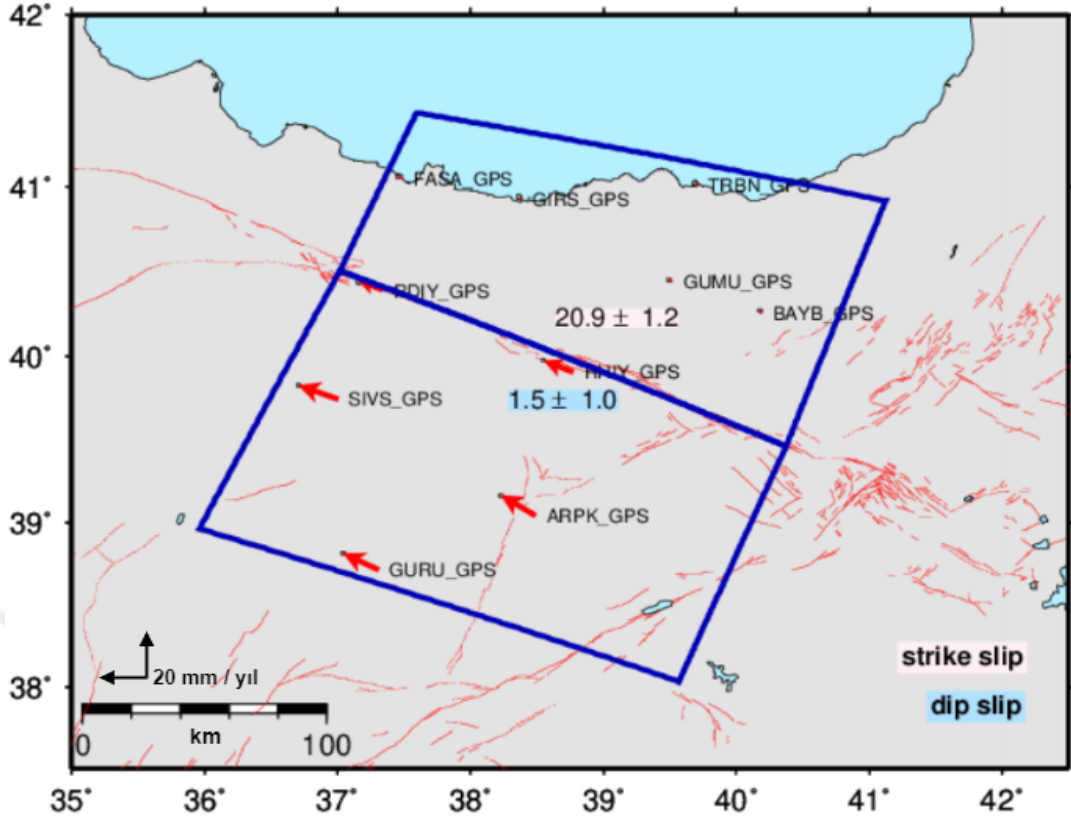
Çalışmanın genel gerinim birikimine bakıldığında bölgenin güneydoğusunda bulunan ARPK noktasının üst kısmındaki açılma rejiminin, alanın gerinim alanına göre farklılık gösterdiğine rastlanılmaktadır. Bu açılma rejiminin sebebinin araştırılma konusu olabileceği düşünülmektedir.

KAFZ' ın sağ yanal atımlı fay karakterine uygun olarak, KB -GD yönünde sıkıştığını ve KD-GB yönünde genişlediğini görülmektedir. Yapılan diğer çalışmalar Demir (1999) ve Poyraz (2009) incelendiğinde çalışmadaki gerinim alanın uyum sağladığı düşünülmektedir. Sonuç olarak bölgeye göre anlamlı bir birikimin varlığından söz edilebilir.

7.4. Çalışma Alanının Modellenmesi

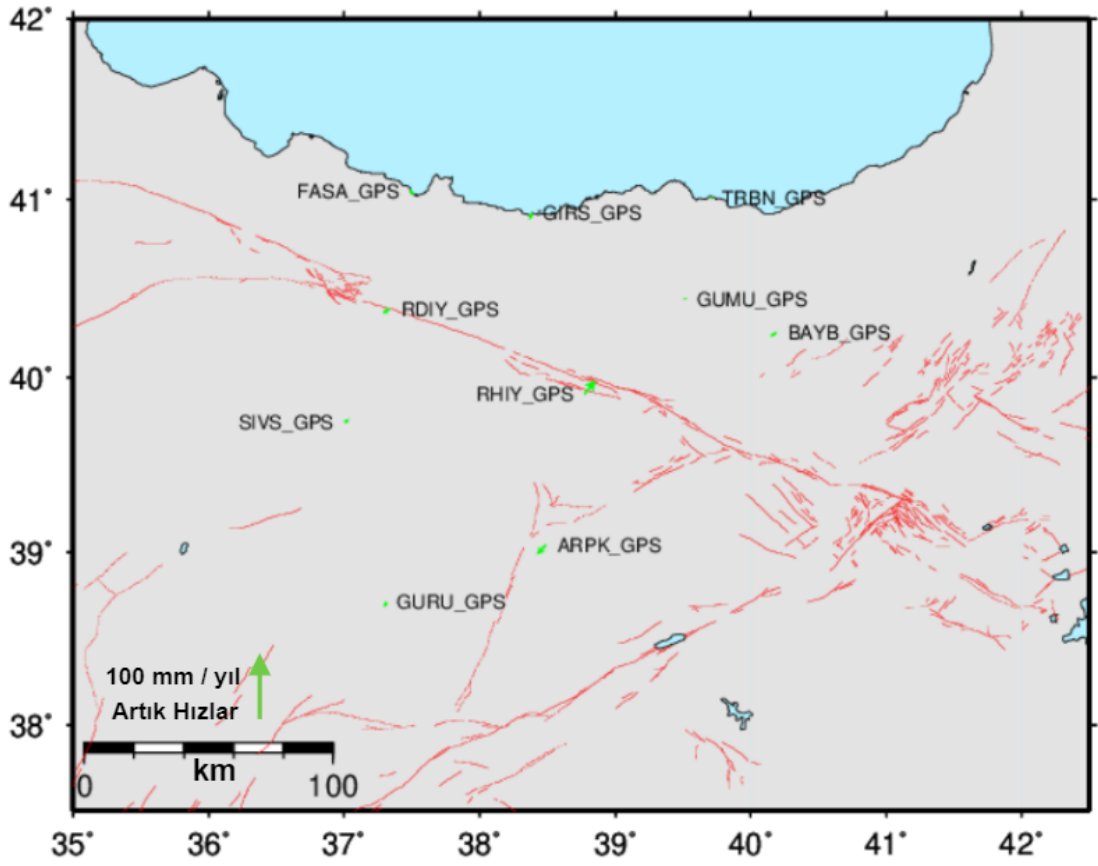
Bu çalışmada, 6. bölümde yer verilmiş olan blok modelleme yöntemi ile Geodsuit programı kullanılmıştır. Modelleme çalışmasında Çizelge 7.3'de verilmiş olan TUSAGA-AKTİF ve IGS istasyonlarına ait hız bileşenleri ve standart sapmaları girdi verisi olarak kullanılmıştır. Ayrıca KAF' da meydana gelmiş depremlerin derinlikleri incelendiğinde bu zonun derinliğinin ortalama değeri 15 km olduğundan bu modelleme çalışmasında da derinlik değeri 15 km kabul edilmiştir.

Modelleme çalışmasında fay ve blok geometrisini oluşturmak için MTA'nın aktif fay haritasından yararlanılmıştır. Çalışma alanının, fay düzlemi geometrisi dikkate alınarak iki bloklu olan fayın tek segmentli ve üç segmentli oluşumundaki değişimlerini incelemek için iki farklı model oluşturulmuştur. Modeldeki bloklar; fayın kuzeyinde olan blok Avrasya plakasını temsil ederken güneyinde kalan blok ise Anadolu plakasını temsil etmektedir. Ayrıca blok modelin anlamlılığını test etmek için Şekil 7.6 ve Şekil 7.8'de yer verilen artık hızlarda hesaplatılmıştır. Artık hızlara bakıldığında değerlerin oldukça küçük çıkması; yapılan modellemelerin anlamlı olduğunu göstermektedir.



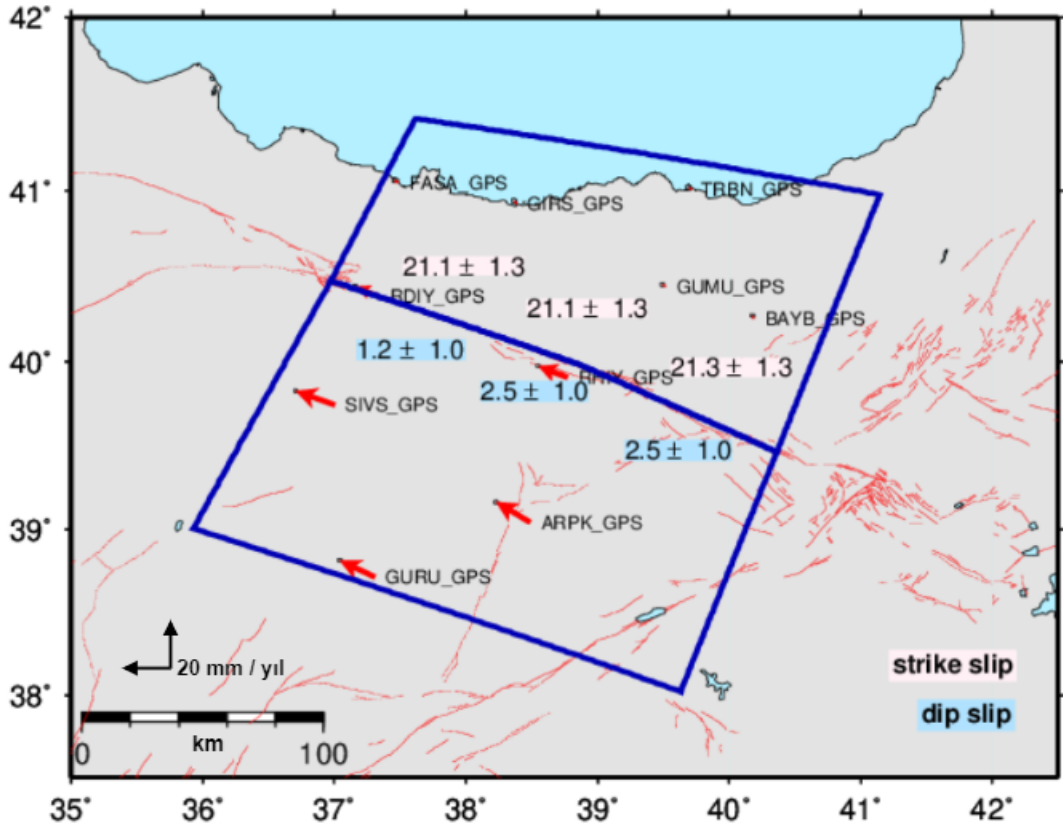
Şekil 7.7 Birinci modeldeki fay boyunca meydana kayma miktarları

Model de ilk olarak fayın tek bir segment oluşturarak değerlendirme yapılmıştır. Şekil 7.7’ de gösterilen modelde blok sınırlarını oluşturulan fay zonundaki segmentin hız alanıyla uyumlu olarak, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kayma (strike-slip) miktarının 20.9 ± 1.2 mm/yıl ve eğim yönündeki kaymanın (Dip-slip) 1.5 ± 1.0 mm/yıl sıkışma rejimi oluşturduğu görülmektedir.



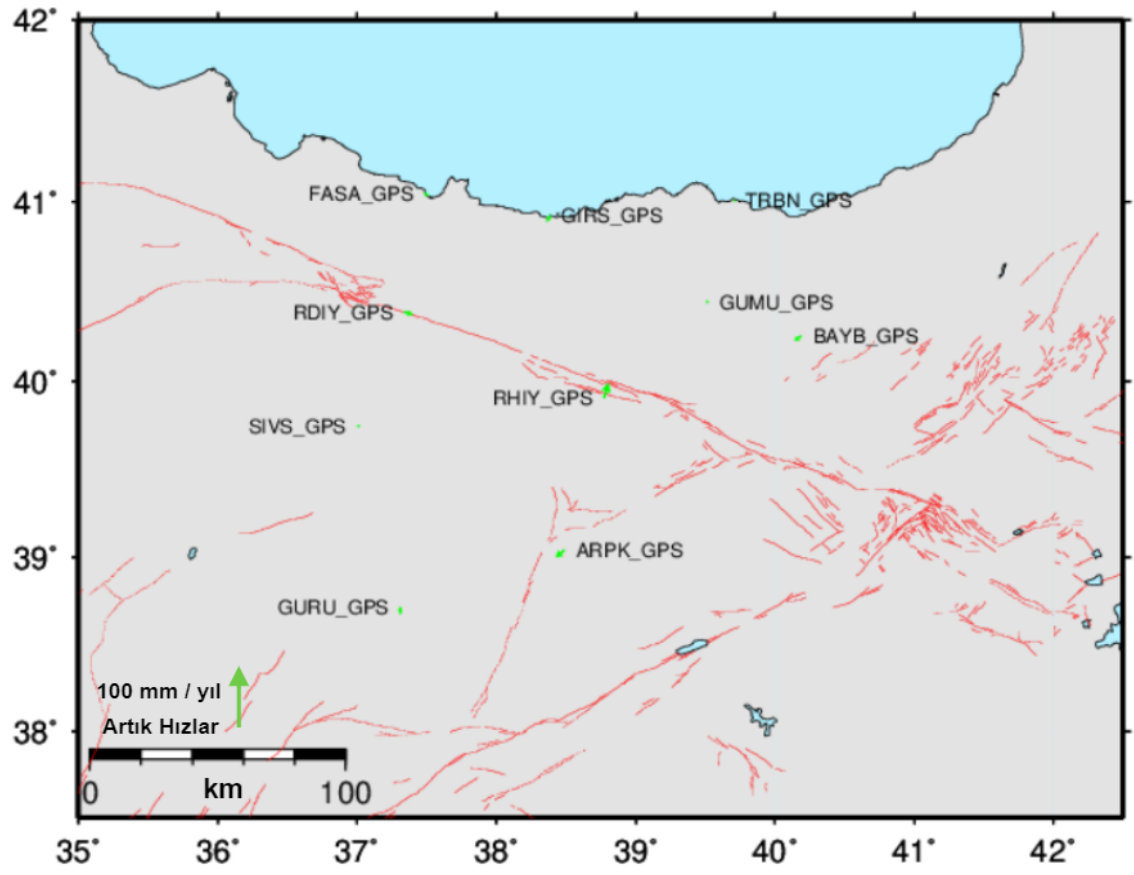
Şekil 7.8 Birinci modeldeki artık hızlar (Veri-model hız farkı)

Oluşturan ikinci modelde; bölgeye ait tarihsel depremler incelendiğinde 1939 Erzincan depremi (7.9) etkisiyle çalışma alanındaki fay üzerinde farklı segmentlerin oluştuğuna dayanan çalışmalar bulunmaktadır. Çalışma bölgesindeki fay, Niksar (Tokat)'dan başlayıp Reşadiye (Tokat), Suşehri (Sivas) Akıncılar (Sivas), Refahiye (Erzincan) yerleşim yerlerinden geçerek Pülümür (Tunceli)'e kadar uzanmaktadır. 1939 Erzincan depremi sonrasında yapılmış çalışmalara göre şiddetli bir deprem olmasından dolayı fayın belli kısımlarının kırıldığını neticesinde farklı segmentlerin oluştuğu belirlenmiştir. Çalışma alanındaki fay üzerinde Reşadiye segmenti, Suşehri segmenti ve Refahiye segmentleri bulunmaktadır. Bu çalışmaların doğrultusunda fayın üç segmentten oluştuğu varsayılarak değerlendirme yapılmıştır. Fayın oluşturduğumuz her bir segment üzerinde fay doğrultusu ve eğim yönündeki kaymalarını belirleyerek segmentlerden her birinin tektonik davranışlarının benzerlik ve farklılıklarını ortaya çıkarmak amaçlanmıştır.



Şekil 7.9 İkinci modeldeki fay boyunca meydana gelen kayma miktarları

Şekil 7.9’ de gösterilen modelde, blok sınırlarını oluşturulan fay zonunun Reşadiye segmentinde; hız alanıyla uyumlu olarak, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kayma (strike-slip) miktarının 21.1 ± 1.3 mm/yıl ve eğim yönündeki kaymanın (Dip-slip) 1.2 ± 1.0 mm/yıl değerinde sıkışma rejimi oluşturduğu, Suşehri segmentinde yine hız alanıyla uyumlu olarak, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kaymanın (strike-slip) 21.1 ± 1.3 mm/yıl ve sıkışma rejiminin (Dip-slip) 2.5 ± 1.0 mm/yıl olduğu ve Refahiye segmentinde ise fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kaymanın (strike-slip) 21.3 ± 1.3 mm/yıl ve sıkışma rejiminin (Dip-slip) 2.5 ± 1.0 mm/yıl değerlerinde değiştiği gözlenmektedir. Bu modele göre fayın doğusunda bulunan Suşehri ve Refahiye segmentlerinin aynı hızla hareket ettikleri gözlenmektedir. Ayrıca üç segmentinde fay doğrultusu yönündeki kaymalarının fayın karakteri, yönü, tektonik yapısı anlamında aynı özellikleri taşıdığı düşünülmektedir. Eğim yönündeki kaymaları (Dip-slip) incelendiğinde ise fayın doğusunda sıkışma rejiminin hakim olduğunu ve sıkışma etkisinin batıya doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.10 İkinci modelin artık hızları (Veri-model hız farkı)

Şekil 7.8 ve şekil 7.10' da gösterimi bulunan artık hızların değerleri 0.3 mm/yıl ile 0.5 mm/yıl arasında bulunmuştur.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Kuzey Anadolu Fayının yapısına bakıldığında doğudan batıya fay boyunca aktiftir. Geçmişten günümüze kadar tarihsel depremleri göz önünde bulundurduğumuzda KAFZ'ın batısında olduğu kadar doğu kesiminde de büyük yıkıcı depremler meydana gelmiştir ve halende yüksek deprem riski taşıdığı düşünülmektedir. Bu sebepten çalışma alanı olarak KAFZ'ın doğu kesimine karar verilmiştir.

Kuzey Anadolu Fay Zonu, Dünyada ve ülkemizde bulunan oldukça uzun ve tektonik anlamda aktif bir yapısı olmasından dolayı birçok araştırmacının çalışma alanı olmuştur. Yeryüzünün hareketli bir yapıya sahip olmasıyla tektonik depremlerin meydana getirdiği deformasyonları, kırılma olasılığı mevcut olan fayların belirlenmesi için deprem kaynak parametrelerini hesaplamada (fay düzlemi geometrisi, fay düzlemi üzerindeki kaymalar ile yer yüzeyindeki noktaların yer değiştirmesi) farklı yöntemler kullanılmıştır.

Günümüzde bu kaynak parametrelerin belirlenmesi için birçok jeodezik yöntemler kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi GNSS ölçme yöntemidir (Poyraz vd., 2016).

Bu tez çalışmasında Avrasya ve Anadolu Plakasının sınırını oluşturan KAFZ'ın doğu kesiminde kalan bölgenin tektonik yapısını ve fay karakteri (hareket yönü) hakkında bilgi sağlamak amacıyla gerinim birikimleri ve kayma miktarlarını elde etmek için çalışmada uygulanacak yöntemlere uygun şekilde seçilmiş olan TUSAGA-Aktif istasyonlarından yararlanarak oluşturulmuş GNSS ağındaki TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait GAMİT/GLOBK yazılımları kullanılarak hesaplanmış hız vektörlerini girdi verisi olarak kabul eden Geodsoft programı ile Strain analizi ve Blok modelleme uygulamaları yapılmıştır.

Modellemede ve gerilim analizinde girdi verisi olarak kullanılan hız alanına bakıldığında; çalışma alanının en güneyinde bulunan GURU noktasının 18 mm/yıl, SIVS noktası 20 mm/yıl, ARPK noktası 19 mm/yıl değerlerini almıştır. Fayın üzerinde bulunan RDIY 12 mm/yıl olduğu ve RHIY noktasının ise 15 mm/yıl olduğu, fayın kuzey kısmındaki noktalardaki hız değerleri ortalama 1.5 ile 2 mm/yıl arasında değişmektedir. Bu değerlere göre hızın kuzeyden güneye ve doğudan batıya doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Avrasya plakası üzerinde bulunan noktaların hızları faydan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Anadolu plakasında ise faydan uzaklaşan noktaların hızlarının arttığı görülmektedir. KAFZ' da yapılan önceki çalışmalara bakıldığında McClusky vd.

(2000)'nin KAFZ boyunca oluşturduğu doğrusal hız ortalama $22-24 \pm 1.0$ mm/yıl' dır, Reilinger vd. (2006) KAFZ boyunca yaklaşık 25 mm/yıl, Poyraz (2009) KAFZ' ın doğu kısmında yapmış olduğu çalışmasında Anadolu plakası üzerinde doğusunda 13 ± 0.5 mm/yıl iken batıda 22 ± 0.3 mm/yıl, Avrasya plakası üzerinde ise en kuzeyinde ve güneyindeki hız büyüklüklerinin sırasıyla 4 ± 0.3 mm/yıl ile 22 ± 0.3 mm/yıl olduğunu belirlemiştir. Bu çalışmada ki kullanılan hız alanın önceki çalışmalarla uyumlu olduğu dşnlmştir.

Strain analizi sonucundaki gerinim alanı incelendiğinde, KAFZ'ın sağ yanal atımlı fay karakterine uygun olarak, KB -GD yönünde sıkışma ve KD-GB yönünde açılma rejimleri görülmektedir. Yapılan diğer alışmalar Demir (1999) ve Poyraz (2009) incelendiğinde çalışmadaki gerinim alanın çalışmalardaki gerinim alanıyla ortalama bir uyum sağladığı ve bölgeye göre anlamlı bir birikimin varlığı tespit edilmiştir.

Bölgenin gerinin alanı kuzeyden güneye doğru incelendiğinde; en büyük gerinim alanlarının Refahiye, Akıncılar, Suşehri, Divriği civarında olduğu görülmektedir. Kuzeybatı (KB) – Güneydoğu (GD) yönünde sıkışma ve KD-GB yönünde açılma rejimi hakimdir.

Suşehri, Akıncılar, Refahiye, Arapgir civarındaki gerinim alanında açılmanın yoğun olduğu görülmektedir.

Fayın KD bölgesine bakıldığında Ordu, Giresun Trabzon, Gümüşhane Bayburt gerinim alanının çok azaldığı ile karşılaşılmaktadır.

Bölgenin GB-KB yönüne doğru gidildiğinde (Grn Sivas Tokat Ordu) gerinim alanının arttığı görülmektedir. Bu alandaki gerinimlerin, Kuzeybatı (KB) – Güneydoğu (GD) yönünde sıkışma ve KD-GB yönünde açılma rejimi oluşturduğu görülmektedir.

Çalışmanın genel gerinim birikimine bakıldığında bölgenin güneydoğusunda bulunan ARPK noktasının st kısmındaki açılma rejiminin, alanın gerinim alanına göre farklılık gösterdiğine rastlanılmaktadır. Bu açılma rejiminin varlığı bir araştırma konusu olduğu düşünülmektedir.

Bölgede meydana gelebilecek tektonik hareketlerin yorumlanabilmesi için bölgenin tektonik yapısının, fay karakterinin (hareket yönü) ve fay parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Blok modelleme çalışmasında fay ve blok geometrisini oluşturmak için MTA'nın aktif fay haritasından yararlanılmıştır (MTA,2006).

Çalışma alanın fay düzlemi geometrisi dikkate alınarak Avrasya ve Anadolu plaklarını temsil eden iki blok kullanılmıştır. Önceki çalışmalara ve bölgede meydana gelmiş depremlerin derinlikleri incelendiğinde bu zonun derinliğinin ortalama değeri 15 km olarak alınmıştır. MTA'nın aktif fay haritası incelendiğinde KAFZ'nın geçmişteki depremlerin sebep olduğu fay segment isimleri ve numaraları bulunmaktadır (Emre vd.,2013). Türkiye Diri fay haritası verileri doğrultusunda bu çalışmadaki fay doğrultusunun Reşadiye, Suşehri ve Refahiye segmentlerinin varlığı ile karşılaşılmaktadır. Blok modelleme çalışmasında bu bilgilere dayalı iki farklı model oluşturularak sonuçlar incelendiğinde; Birinci model, fayın tek segment üzerinde kabul ederek, fay zonundaki segmentin hız alanıyla uyumlu olarak, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kayma (strike-slip) miktarının 20.9 ± 1.2 mm/yıl ve eğim yönündeki kaymanın (Dip-slip) 1.5 ± 1.0 mm/yıl sıkışma rejimi oluşturduğu görülmektedir.

İkinci modelde ise blok sınırlarını oluşturulan fayın üç ayrı segmenti değerlendirildiğin Reşadiye segmentinde; hız alanıyla uyumlu olarak, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kayma (strike-slip) miktarının 21.1 ± 1.3 mm/yıl ve eğim yönündeki kaymanın (Dip-slip) 1.2 ± 1.0 mm/yıl değerinde sıkışma rejimi oluşturduğu, Suşehri segmentinde yine hız alanıyla uyumlu olarak, fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kaymanın (strike-slip) 21.1 ± 1.3 mm/yıl ve sıkışma rejiminin (Dip-slip) 2.5 ± 1.0 mm/yıl olduğu ve Refahiye segmentinde ise fay doğrultusu yönünde sağ yönlü kaymanın (strike-slip) 21.3 ± 1.3 mm/yıl ve sıkışma rejiminin (Dip-slip) 2.5 ± 1.0 mm/yıl değerlerinde değiştiği gözlenmektedir.

Bu modele göre fayın doğusunda bulunan Suşehri ve Refahiye segmentlerinin aynı hızla hareket ettikleri gözlenmektedir. Ayrıca üç segmentinde fay doğrultusu yönündeki kaymalarının fayın karakteri, yönü, tektonik yapısı anlamında aynı özellikleri taşıdığı düşünülmektedir.

Eğim yönündeki kaymaları (Dip-slip) incelendiğinde ise fayın doğusunda sıkışma rejiminin hakim olduğunu ve sıkışma etkisinin batıya doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir.

Çalışma bölgesindeki fay zonunda elde edilen blok modelleme ve strain analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için ölçü sayısının artırılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ayhan, M. E., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Aktug, B., Herece, E., Reilinger, R. E. (2001). Kinematics of the Mw= 7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28(2), 367-370.
- Aktuğ, B., (2003). Elastik Yarı-Uzay Modelleri ve Depremesel Koordinat Değişimlerine Dinamik Bir Yaklaşım.
- Aktuğ, B., Çelik, R. N. (2011). Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi. *İTÜDERGİSİ/d*, 7(1).
- Aktuğ, B., Kurt, M., Parmaksız, E., Lenk, O., Erkan, Y., Aysezen, Ş. (2011). Türkiye’de Sabit GNSS İstasyonlarının Tarihi ve Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı-Aktif (TUSAGA-AKTİF). 13. *Türkiye Bilimsel Harita ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Atabey, E., (2000). Deprem. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/deprem/pdf/deprem.pdf> (Erişim Tarihi: Ocak 2020).
- Barka, A. A., Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7(3), 663-684.
- Barka, A. A. (1992). The north Anatolian fault zone. In *Annales tectonicae* (Vol. 6, No. Suppl, pp. 164-195).
- Burgmann, R., Ayhan, M. E., Fielding, E. J., Wright, T. J., McClusky, S., Aktug, B., Turkezer, A., (2002). Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSAR data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 161-171.
- Brunner, F.K., (1979). “On the Analysis of Geodetic Networks for the Determination of the Incremental Strain Tensor”, *Survey Review*, XXV(192): 56–67.
- Bülbül, S., (2018). Tusaga-Aktif Noktalarında Renkli Gürültülerden Arındırılmış Hız Bileşenlerinin Belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü* (Doktora Tezi), 179s, Konya.
- Bozkurt, E., (2001). Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica acta*, 14(1-3), 3-30.
- Cai, J., Grafarend, E. W. (2007). Statistical analysis of the eigenspace components of the two-dimensional, symmetric rank-two strain rate tensor derived from the space geodetic measurements (ITRF92-ITRF2000 data sets) in central Mediterranean and Western Europe. *Geophysical Journal International*, 168(2), 449-472.
- Çakmak, R., (2010). Jeodezik çalışmalarla Marmara bölgesinde deprem döngüsünün belirlenmesi ve modellerle açıklanması, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), 131s, İstanbul.
- Demir, C., (1999). Kuzey Anadolu Fay Zonu Batı Kesiminde Yatay Yer Kabuğu Hareketleri ve Gerinim Birikiminin Araştırılması, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), 107s, İstanbul.
- Demirtaş, R., Erkmen, C., (2000). “Deprem ve Jeoloji”, *Jeoloji Mühendisleri Odası*, Ankara.

- Demirci, P.,** (2012). Yerel, Ulusal ve Uluslararası Sabit Referans İstasyonlarının Kabuk ve Yapısal Deformasyon Belirleme Amaçlı Tasarlanan Jeodezik Ağlara Entegrasyonu, Ölçme ve Değerlendirme Stratejileri. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi), 71s, İstanbul.
- Demirtaş, R., Yılmaz, R., Berchemer, H., Baier, B.,** (1994). 13 Mart 1992 Erzincan Depreminin Yüzey Kırıkları Artçı Sarsıntıları ve 17 Ekim 1989 Loma Prieta Depremi ile Karşılaştırılması. 47. *Türkiye Jeoloji Kurultayı 1994 Bildiri Özleri*.
- Demirtaş, R., Erkmen, C., Yaman, M.,** (2000). Kasım 1999 Düzce Depremi: Yüzey Kırık Geometrisi, Atım Miktarı Dağılımı ve Gelecek Deprem Potansiyeli. *Deprem Araştırma Dairesi*,
- Demirtaş, R., & Erkmen, C.,** (2000). Deprem ve Jeoloji. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*,
- Dewey, J. F., Şengör, A. C.,** (1979). Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 84-92.
- Dönmez, E., Tiryakioğlu, İ.** (2018). Gediz Fayı Yerkabuğu Hareketlerinin GNSS Gözlemleri ile İzlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1110-1117.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F.,** (2013). Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/yenilenmis-diri-fay-haritalari> (Erişim Tarihi: 06.01.2020).
- Eren, Y.,** (2009). Neotektonik Ders Notları. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Konya*.
<http://www.yasareren.net/yasareren/pdfdosy/neotektonik/Microsoft%20Word%20-%20neotektonikdersnotu.pdf> (Erişim Tarihi: 06.01.2020).
- Ergintav, S., Burgmann, R., McClusky, S., Çakmak, R. E. I. L. I. N. G. E. R., Reilinger, R. E., Lenk, O., Ozener, H.,** (2002). Postseismic deformation near the Izmit earthquake (17 August 1999, M 7.5) rupture zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 194-207.
- Feigl, K. L., King, R. W., Jordan, T. H.,** (1990). Geodetic measurement of tectonic deformation in the Santa Maria fold and thrust belt, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B3), 2679-2699.
- Herring, T. A.,** (1999). "Geodetic Applications Of GPS", IEEE, 87.
- İnal, C., Salgın, Ö.,** (2008). Farklı GPS yazılımları ile değerlendirilen GPS baz uzunluklarının bilinen değerler ile karşılaştırılması. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, c.23, s.2.
- Jackson, J., & McKenzie, D.,** (1988). The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal International*, 93(1), 45-73.
- Kahveci, M., Yıldız, F.,** (2012). GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri *Teori ve Uygulama*, Nobel Akademik Yayıncılık, 222s, 5. Baskı, Ankara.
- Kakkuri, J., Chen, R.** (1990). Four dimensional adjustment of the finnish first-order triangulation: Results of a test computation. *In Developments in Four-Dimensional Geodesy (pp. 161-171)*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kasapoğlu, K. E., Toksöz, M. N.,** (1983). Tectonic consequences of the collision of the Arabian and Eurasian plates: finite element models. *Tectonophysics*, 100(1-3), 71-95.

- Ketin, I.** (1948). Über die tektonisch-mechanischen Folgerungen aus den grossen anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums. *Geologische Rundschau*, 36(1), 77-83.
- Ketin, İ.** (1976). San Andreas ve Kuzey Anadolu Fayları arasında bir karşılaştırma, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 149-154.
- Ketin, İ.** (1969). Kuzey Anadolu fayı hakkında. *MTA Dergisi*, 72, 1-27.
- Kiratzı, A. A., Papazachos, C. B.**, (1995). Azores üçlü kavşağından Orta Doğu'ya aktif kabuk deformasyonu. *Tektonofizik*, 243 (1-2), 1-24.
- King, R. W., Bock, Y.**, (2000). Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software, MIT, Cambridge.
- Köksal, E.**, (2011). Yüzey Deformasyonlarının Diferansiyel InSAR Tekniği ile Belirlenmesi: İsmet Paşa Örneği. *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Yüksek Lisans Tezi), 159 s, Zonguldak.
- Le Pichon, X. ve Angelier, J.**, (1979). The Hellenic Arc and Trench System, a Key to the Neotectonic Evolution of the Eastern Mediterranean Area, *Tectonophysics* 60, 142.
- Machette, M. N.**, (2000). Active, capable, and potentially active faults—a paleoseismic perspective. *Journal of Geodynamics*, 29(3-5), 387-392.
- McKenzie, D. P.**, (1972) Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 30, 109-185.
- McKenzie, D. P.**, (1978) Active Tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea Surrounding regions, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 55, 217-254.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, K., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, M., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N., Veis, G.**, (2000). Global Positioning System Constrains on Plate Kinematics and Dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *J. Geophys. Res.* 105 (B3), 5695–5719.
- Okada, Y.** (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75(4), 1135-1154.
- Okada, Y.**, (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 82(2), 1018-1040.
- Okay, A. I., Demirbağ, E., Kurt, H., Okay, N., Kuşçu, İ.** (1999). An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian fault in Turkey. *Tectonics*, 18(1), 129-147.
- Över, S.**, (1999). Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun orta ve batı kesiminde bölgesel gerilme durumunun incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 42 (1), 85-96.
- Öztürk, S.**, (2017) Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Civarındaki Güncel Deprem Aktivitesinin Bölgesel ve Zamana Bağlı Analizleri. *Yerbilimleri Dergisi*, 38(2), 193-228.
- Öztürk, S.**, (2009). Deprem tehlikesi ve artçı şok olasılığı değerlendirme yöntemlerinin Türkiye'deki depremlere bir uygulaması (Doktora Tezi), *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 373s, Trabzon.
- Özener, H., Doğru, A. G., Turgut, B., Yılmaz, O., Ergintav, S., Çakmak, R., Gürkan, O.**, Kuzey Anadolu Fayı Doğu Kesiminin Kabuk Deformasyonlarının Ve Blok Kinematığının GPS Ölçme Tekniği İle Araştırılması. *TMMOB Harita ve Kadastro*

Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 28 Mart - 1 Nisan 2005, Ankara.

- Özdemir, S.**, (2016). TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasyonlarının hassas koordinat ve hızlarının hesaplanması üzerine. *Harita Dergisi*, 155.
- Özener, H., Doğru, A.** (2009). Jeodezik ve Sismik verilerden Yararlanarak Kabuk Deformasyonu Alanının Belirlenmesi. *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 3, 96-102.
- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. Ö., Koçbulut, F., Demirel, M., Duman, H., Sığircı, R., Karataş, G., Demirkıran, G., Sarıay, R., Şimşek, F.**, (2016). Gediz Grabeninin Doğu Kesimindeki Tektonik Hareketlerinin GPS ve PS-InSAR Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi. *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TUBİTAK 113Y526*, 131s, Sivas.
- Poyraz, F.**, (2009). Yatay Yerkabuğu Hareketleri ve Gerilme Birikiminin Araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora Tezi), 128s, İstanbul.
- Poyraz, F.**, (2005). Yer Kabuğu Hareketlerinin Jeodezik Ölçme Yöntemleriyle Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 110s, İstanbul.
- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. Ö., Koçbulut, F., Tiryakioğlu, İ., Tatar, O., Demirel, M., Duman, H., Aydın, C., Cığer, A.F., Gürsoy, Ö., Türk, T., Sığircı, R.**, (2019) "Determination of the block movements in the eastern section of the Gediz Graben (Turkey) from GNSS measurements" *Journal of Geodynamics*, 123, 38-48.
- Şanhoğlu, İ., İnal, C.**, (2004). IGS ürünlerinin tanıtımı, IGS ürünlerine erişim ve bir uygulama.
- Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X., Rangin, C.**, (2005). The North Anatolian Fault: A New Look, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 37–112.
- Yavaşoğlu, H.**, 2009. Kuzey Anadolu Fayının Orta Anadolu Bölümündeki Güncel Tektonik Aktivitelerin Jeodezik Yöntemler ve Elastik Yarı Uzay Modelleme ile Belirlenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), 205s, İstanbul.
- Reid, H. F.**, (1910). Additional note on the geometry of faults. *Bulletin of the Geological Society of America*, 21(1), 737-740
- Reilinger, R. E., McClusky, S. C., Oral, M. B., King, R. W., Toksoz, M. N., Barka, A. A., Sanli, I.**, (1997). Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B5), 9983-9999.
- Reilinger, R.E., Ergintav, S., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gurkan, O., Hearn, L., Feigl, K.L., Çakmak, R., Aktug, B., Özener, H., Toksöz, M.N.**, (2000). Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey earthquake. *Science* 289 (5484), 1519–1524.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Nadariya, M.** (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5)
- Şengör, A. M. C.**, (1980). Türkiye'nin neotektoniğinin esasları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Konferans Serisi*, 2, 40.
- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Rangin, C.**, (2005). The North Anatolian fault: A New Look. *Annual Review. Earth and Planet. Sciences.*, 33(1), 37-112.

- Şanlıoğlu, İ., İnal, C.,** (2004). IGS Ürünlerinin Tanıtımı, Igs Ürünlerine Erişim ve Bir Uygulama, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik Online Dergi*, 3 (1), 26-40.
- Taymaz, T., Jackson, J., & McKenzie, D.** (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106(2), 433-490.
- Tiryakioğlu, İ.,** (2010) Tektonik Hareketlerin Belirlenmesinde GPS Kullanımı, Ders notları. http://ibrahimtiryakioglu.com/dersler/ozelolcmeler/GPSiLE_TEKTONiK_ders6.pdf (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Tiryakioğlu, İ.,** (2012). GNSS Ölçüleri ile Güneybatı Anadolu'daki Blok Hareketleri ve Gerilim Alanlarının Belirlenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), 157s, İstanbul.
- Uzel, T., Eren, K., Gülal, E., Dindar, A., Tiryakioğlu, i. ve Yılmaz, H.,** (2011). TUSAGAAktif (CorsTr) Verileri ile Tektonik Plaka Hareketlerinin İzlenmesi", *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 18-22 Nisan 2011, Ankara.
- Westaway, R.,** (1994). Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12071-12090.
- Yalçınkaya, M., Teke, K.,** (2006). San Andreas Fayında Yapılan Jeodezik ve Yer Dinamiği Çalışmaları. TUJK 2006 Tektonik ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı 2, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü*, 61080 Trabzon.
- Yavaşoğlu, H., Baykal O., Bilgi, S., Çakmak, R., Erden, T., Ergintav, S., Cankut, D., Karaman, H., Tarı, E., Tarı, T., Tüysüz, O.,** (2003). Kuzey Anadolu Fayı'nın orta Anadolu bölümünün GPS ölçmeleri ile güncel tektonik özelliklerinin belirlenmesi. Kuvaterner Çalıştayı IV, *İTÜ Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü*, 31-36, İstanbul.
- Yavaşoğlu, H.,** (2003) Kuzey Anadolu Fayının Orta Anadolu Bölümünün Kinematığının 2001 ve 2002 GPS Ölçmeleri ile Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek lisans Tezi)*, 64s, İstanbul.
- Yavaşoğlu, H.,** (2009). "Kuzey Anadolu Fayının Orta Anadolu Bölümündeki Güncel Tektonik Aktivitelerin Jeodezik Yöntemler ve Elastik Yarı Uzay Modelleme ile Belirlenmesi", *İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), İstanbul. 205s
- Yıldırım, Ö., Bakıcı, S., Cingöz, A., Erkan, Y., Gülal, E., & Dindar, A. A.** (2007). TUSAGA-Aktif (CORS TR) projesi ve ülkemize katkıları. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi Bildiriler CD'si*, Trabzon, 30.
- Url-1
<http://erdemgundogdu.weebly.com/uploads/5/7/8/3/5783574/7levha_tektonigi.pdf> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-2<<https://www.jeolojitr.com/2018/10/plaka-tektionigi.html>>(Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-3<<https://www.cografyaegitimi.biz/konu/dunyadaki-buyuk-levhalarharitasi.400/>> (Erişim Tarihi: 28.01.2020)
- Url-4
<<http://www.jeofizikmuhendisleri.com/makaleler/Levha.Hareketleri.Ve.Temel.%C4%B0lkeleri.Nelerdir?>> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)

- Url-5 <<https://aybu.edu.tr/muhendislik/insaat/contents/files/DEPREM%20JEOLOJ%C4%B0S%C4%B0.pdf>> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-6 <http://www.kursatozcan.com/ders_notlari/yapisal_jeoloji/kdirik/8_faylar.pdf> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-7 Prof. Dr. Kadir Dirik Ders Notları (2006)
<http://www.kursatozcan.com/ders_notlari/yapisal_jeoloji/kdirik/8_faylar.pdf> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-8 <<https://www.muhendisbeyinler.net/dunyanin-jeolojik-yapisi/>> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-9 < <https://yapimerkezi.com.tr/PdfDosyalari/b4c92eaa-706a-4b96-8f83-f09df3c79480-0af6546c-8359-4c0a-8088-1b85a0ae04e2.pdf> > (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-10 < <https://deprem.afad.gov.tr/depremdetay?eventID=445765> > (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-11 < <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi> > (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-12 < <https://deprem.afad.gov.tr/> > (Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-13 < https://www.researchgate.net/figure/IGS-Tracking-Network-GPS-GLONASS-stations-top-GPS-only-stations-bottom_fig1_251424945 > (Erişim Tarihi: 14.02.2020)
- Url-14<<https://www.tusaga-aktif.gov.tr/Sayfalar/IstasyonHaritasi.aspx> >(Erişim Tarihi: 06.01.2020)
- Url-15 <<https://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-ve-gerinim/>> (Erişim Tarihi 04.03.2020)
- Url-16 < https://www.tkgm.gov.tr/sites/default/files/icerik/ekleri/tusaga-aktif_2018.pdf> (Erişim Tarihi: 06.01.2020)

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Ayyüce Kartal
Doğum Yeri ve Tarihi Kahramanmaraş/Afşin 27.10.1995
Medeni Hali Bekar
Yabancı Dil İngilizce
E-posta Adresi 1995kartal46@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise Afşin Atatürk Lisesi, 2009-2013
Lisans Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, 2013-2017
Yüksek Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, 2017--