

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**JEODEZİK ÖLÇÜLER İLE
DEPREM KAYNAK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Bahadır AKTUĞ

Anabilim Dalı : JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ

EKİM 2006

**JEODEZİK ÖLÇÜLER İLE
DEPREM KAYNAK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Bahadır AKTUĞ
(501022302)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Ekim 2006**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. R.Nurhan ÇELİK

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Tefik AYAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Haluk EYİDOĞAN (İ.T.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. Oğuz GÜNDOĞDU (İ.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. D.Uğur ŞANLI (B.Ü.)

EKİM 2006

ÖNSÖZ

Doğası gereği karmaşık ve bir o kadar analitik incelenmesi zor deprem olgusu ülkemiz coğrafyasının yadsınmaz bir gerçeğini oluşturmaktadır. Yakın geçmişte yaşanan Marmara felaketleri deprem olgusu hakkında bildiklerimizin ne kadar sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum hiçbir bilim dalının tek başına yeterli olamadığı, farklı disiplinler ile elde edilen her türlü bulgunun birlikte değerlendirilmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Özellikle ülkemizde, yakın geçmişe kadar diğer yer bilimleriyle ilişkisi sınırlı kalan Jeodezi bilimine bu anlamda önemli görevler düşmektedir. Çağımızda, geomatik mühendisliğinden beklenen ürünler daha geniş bir yelpazeye yayılmış, farklı çalışma alanlarıyla olan etkileşimleri artmış ve karmaşıklaşmıştır.

Jeodezik verilerden deprem kaynak mekanizmasının belirlenmesi yapısı gereği karmaşık yeri konu alması nedeniyle karmaşık bir mekanik ve matematik problemidir. Çalışmanın ülkemizde jeodezi alanında ilk defa ele alınması nedeniyle ayrıca önemli olduğu değerlendirilmektedir. Birçok bilim dalını ilgilendiren bu çalışmada yüksek lisans çalışmamda olduğu gibi yeni ve öncü çalışmaları her zaman destekleyen ve tez yürütücülüğümü üstlenerek çalışmanın her aşamasında bana yardım ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç.Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK'e, farklı alanlardaki bulguları karşılaştırmama yardımcı olan Prof.Dr. Ali KOÇYİĞİT'e ve Prof.Dr. Haluk EYİDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Evlilik hazırlıkları sırasında bile bu çalışmaya yoğun zaman ayırmama sabırla katlanan, tezdeki hatalarımı özenle düzelterek sürekli yanımda olan eşim Besime AKTUĞ' a ise ayrı bir teşekkür borçluyum.

Bu çalışmanın konuyla ilgili müteakip çalışmalar için faydalı olması dileğiyle...

Mayıs 2006

Bahadır AKTUĞ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI	1
2. YERKABUĞU DEFORMASYONU VE YER DEĞİŞTİRMELER	8
2.1. Deprem Döngüsü ve Sismik Fazlar	8
2.2. Mekanik ve Matematiksel Yer Değiştirme Modelleri	8
2.2.1. Elastik Atılım Teorisi	8
2.2.2. İki Boyutlu Modeller	9
2.2.2.1. Doğrultu Atımlı Modeller	9
2.2.2.2. Eğim Atımlı Modeller	11
2.2.3. Genelleştirilmiş Üç Boyutlu Modeller	11
2.3. Fay Geometrisi ve Kayma	14
2.4. Elastik Yarı-Uzay Modelleri	16
2.4.1. Yanal Atım	17
2.4.2. Düşey Atım	17
3. OPTİMİZASYON VE PARAMETRE TAHMİNİ	20
3.1. Doğrusal Modellerde Parametre Tahmini	21
3.2. Doğrusal Olmayan Modellerde Parametre Tahmini	23
3.3. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modellerin Optimizasyon	25
3.4. Tümel (Global) Optimizasyon ve Hüristik Yöntemler	27
3.5. Benzetimli Yaklaşma(Simulated Annealing)	32
4. JEODEZİK ÖLÇÜLER İLE DEPREM KAYNAK MEKANİZMASI İLİŞKİSİNİN BİR OPTİMİZASYON PROBLEMİ OLARAK ÇÖZÜMÜ	36
4.1. Direkt ve Ters Modelleme	36
4.2. Jeodezik Moment ve Moment Büyüklüğü	37
4.3. Optimizasyon Başlangıç Değerleri	38
4.4. Amaç Fonksiyonu ve Sınır Değerleri	39
5. İZMİT DEPREMİ KAYNAK MEKANİZMASININ MODELLENMESİ	43
5.1. Giriş	43
5.2. Mevcut Modeller	44
5.2.1. İki Parçalı Model	44
5.2.2. Altı Parçalı Model	50
5.3. Geliştirilen Modeller	56
5.3.1. İki Parçalı Model	56

5.3.2. Beş Parçalı Model	60
6. ÇAY DEPREMİ (03 ŞUBAT 2002, Mw6.5) KAYNAK MEKANİZMASININ MODELLENMESİ	64
6.1. Tektonik Yapı	64
6.2. GPS Ölçüleri ve Yer değiştirmeler	66
6.3. Geliştirilen Model	69
6.4. Çay Depremi Kaynak Mekanizmasının Değerlendirmesi	72
7. UYGULAMA YAZILIMI	75
7.1. Giriş	75
7.2. Uygulama Yazılımının Özellikleri	75
7.3. Direkt ve Ters Modelleme İşlem Adımları	76
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	93

KISALTMALAR

GPS	: Global Konum Belirleme Sistemi
NEIC	: Amerikan Ulusal Deprem Bilgi Merkezi
USGS	: Amerikan Ulusal Jeoloji Kurumu
EMSC	: Doğu Akdeniz Sismoloji Merkezi
CMT	: Centroid Moment Tensor

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Fay Geometrisine İlişkin Parametreler	15
Tablo 2.2 Eğim açısı, derinlik ve kayma vektörlerinin ilişkisi.....	16
Tablo 4.1 Benzetimli Tavlama ve BFGS yöntemlerinin Griewangk fonksiyonunu üzerindeki etkinliği.....	42
Tablo 5.1 İzmit depremi öncesi ve sonrasında yapılan ölçmeler ile elde edilen yer değiştirmeler (Reilinger ve diğ., 2000).....	46
Tablo 5.2 İzmit Depremi Dislokasyon Model Parametreleri (Aktuğ, 2003).....	47
Tablo 5.3 (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen İzmit Depremi dislokasyon model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu inceleme sonuçları.....	50
Tablo 5.4 (Wright ve diğ., 2001)'de verilen 6 segmentli İzmit Deprem kaynak mekanizması (I).....	52
Tablo 5.5 (Wright ve diğ., 2001)'de verilen 6 segmentli İzmit Deprem kaynak mekanizması (II).....	53
Tablo 5.6 (Wright ve diğ., 2001)'de verilen İzmit Depremi dislokasyon model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu inceleme sonuçları.....	56
Tablo 5.7 İki segmentli İzmit Depremi dislokasyon modelinin başlangıç ve sınır parametreleri.....	57
Tablo 5.8 Geliştirilen iki segmentli İzmit Depremi dislokasyon model parametreleri.....	57
Tablo 5.9 Geliştirilen ve Tablo 5.8'de verilen verilen İzmit Depremi dislokasyon model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu sonuçları.....	57
Tablo 5.10 Geliştirilen 5 segmentli İzmit Depremi Kaynak Mekanizması Model Parametreleri (yatay yer değiştirmeler kullanılarak).....	60
Tablo 5.11 Geliştirilen 5 segmentli İzmit Depremi Kaynak Mekanizması Model Parametreleri (üç boyutlu yer değiştirmeler kullanılarak).....	61
Tablo 5.12 Geliştirilen 5 segmentli İzmit Depremi Kaynak Mekanizması model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu sonuçları.....	61
Tablo 6.1 Çay Depremi öncesi ve sonrasında yapılan ölçmeler ile elde edilen Ankara IGS noktasına göre hesaplanan ve bölgesel intersismik düzeltme getirilen noktalar.....	67
Tablo 6.2 Tek segmentli Çay Depremi dislokasyon modelinin başlangıç ve sınır parametreleri.....	69
Tablo 6.3 Geliştirilen iki segmentli İzmit Depremi dislokasyon model	69

	parametreleri.....	
Tablo 6.4	Geliştirilen ve Tablo 6.5’de verilen verilen İzmit Depremi dislokasyon model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu sonuçları.....	70

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1a	İzmit Depreminin meydana getirdiği yüzey yer değiştirmeleri	4
Şekil 1.1b	Jeodezik ölçüler ile elde edilmiş fay düzlemi kayma değerleri	4
Şekil 1.2a	Düzce Depreminin meydana getirdiği yüzey yer değiştirmeleri	4
Şekil 1.2b	Jeodezik ölçüler ile elde edilmiş fay düzlemi kayma değerleri	4
Şekil 2.1	Reid'in elastik atılım teorisi.	9
Şekil 2.2	Sonsuz uzunlukta doğrultu atımlı bir fay sistemi için yer	10
Şekil 2.3	değiştirmeler.	10
Şekil 2.4	İntersismik ve kosismik fazda yer değiştirmeler.	11
Şekil 2.5	Fay geometrisi ve fay üzerindeki yer değiştirmeler	14
Şekil 2.6	Eğim Açısı δ 'nın farklı değerlerine göre değişen fay niteliği	15
Şekil 2.7	Pozitif ve negatif eğim açısına (δ) göre fay düzleminin dönmesi	15
Şekil 3.1	Çok sayıda yerel minimumu olan bir fonksiyon	29
Şekil 3.2	Altı-hörgüçlü deve fonksiyonu	29
Şekil 3.3	Griewangk fonksiyonu	31
Şekil 3.4	Rosenbrock (banana) fonksiyonu	31
Şekil 3.5	Benzetimli Yaklaşım Algoritması.	35
Şekil 5.1	GPS ölçüleri ile 51 noktada ölçülen düşey değiştirmeler.	45
Şekil 5.2	Ölçü ve model yatay yer değiştirmeleri (Reilinger)	45
Şekil 5.3	Hesaplanan yatay ölçü-model farkları (Reilinger)	48
Şekil 5.4	Ölçü ve model düşey yer değiştirmeleri (Reilinger)	48
Şekil 5.5	Hesaplanan düşey ölçü-model farkları(Reilinger)	49
Şekil 5.6	Ölçü ve model yatay yer değiştirmeleri (Wright, I)	49
Şekil 5.7	Hesaplanan yatay ölçü-model farkları (Wright, I)	51
Şekil 5.8	Ölçü ve model düşey yer değiştirmeleri (Wright, I)	51
Şekil 5.9	Hesaplanan düşey ölçü-model farkları (Wright, I)	52
Şekil 5.10	Ölçü ve model yatay yer değiştirmeleri (Wright, II)	53
Şekil 5.11	Hesaplanan yatay ölçü-model farkları (Wright, II)	54
Şekil 5.12	Ölçü ve model düşey yer değiştirmeleri (Wright, II)	54

Şekil 5.13	Hesaplanan düşey ölçü-model farkları (Wright, II)	55
Şekil 5.14	Ölçü ve model yatay yer değiştirmeleri (2 segment)	55
Şekil 5.15	Hesaplanan yatay ölçü-model farkları (2 segment)	58
Şekil 5.16	Ölçü ve model düşey yer değiştirmeleri (2 segment)	59
Şekil 5.17	Hesaplanan düşey ölçü-model farkları (2 segment)	59
Şekil 5.18	Ölçü ve model yatay yer değiştirmeleri (5 segment)	60
Şekil 5.19	Hesaplanan yatay ölçü-model farkları (5 segment)	61
Şekil 5.20	Ölçü ve model düşey yer değiştirmeleri (5 segment)	62
Şekil 5.21	Hesaplanan düşey ölçü-model farkları (5 segment)	62
Şekil 5.22	Çay depremi için verilen odak mekanizmaları ve artçı şoklar	63
Şekil 6.1	Çay ilçesi ve çevresindeki temel tektonik birimler	65
Şekil 6.2	GPS ölçüleri ile 28 noktada ölçülen yatay yer değiştirmeler.	66
Şekil 6.3	GPS ölçüleri ile 28 noktada ölçülen düşey yer değiştirmeler.	68
Şekil 6.4	En yakın istasyonun zaman serisi	68
Şekil 6.5	Yakın istasyon zaman serisi	69
Şekil 6.6	Ölçü ve model yatay yerdeğiştirmeleri (1 segment)	70
Şekil 6.7	Hesaplanan yatay ölçü-model farkları (1 segment)	71
Şekil 6.8	Ölçü ve model düşey yerdeğiştirmeleri (1 segment)	71
Şekil 6.9	Hesaplanan düşey ölçü-model farkları (1 segment)	72
Şekil 7.1	Jeodezik ölçülerin programa girdi olarak verilmesi	77
Şekil 7.2	Fay Geometri/Kayma değerlerinin girilmesi/değiştirilmesi	77
Şekil 7.3	Kullanılacak noktaların seçimi	78
Şekil 7.4	Analiz için kullanılan menü	78
Şekil 7.5	Hesaplanan parametrelerin saklanması/kaydedilmesi	79
Şekil 7.6	Model ve ölçü farklarının grafik olarak incelenmesi	79

SEMBOL LİSTESİ

ν	: Blok kayma hızı
D	: Sismojenik Zon Kalınlığı
V	: İntersismik yer değiştirme
x	: Fay sınırına dik uzaklık
t	: Zaman
ε	: Kayma Gerinimi
θ	: Fay Eğim Açısı
τ	: Kayma Gerilimi
S	: Kayma Vektörü
δ	: Eğim Açısı (dip angle)
α	: Fay doğrultusunun azimutu (strike)
d	: Fay Düzleminin derinliği
L	: Fay Düzleminin Uzunluğu
W	: Fay Düzleminin Genişliği
SS	: Kayma vektörünün fay doğrultusu yönündeki bileşeni (strike-slip)
DS	: Kayma vektörünün fay doğrultusuna dik yöndeki bileşeni (dip-slip)
r	: Kayma vektörünün yönü (rake).
W	: Fay düzleminin genişliği
φ_2	: Fayın diğer uç noktasının enlemi
d	: Fay başlangıç noktasının derinliği
φ_1	: Fay başlangıç noktasının enlemi
λ_1	: Fay başlangıç noktasının boylamı
δ	: Fay başlangıç noktasının eğimi
λ_2	: Fayın diğer uç noktasının boylamı
α	: Fay doğrultusunun azimutu
L	: Fay düzleminin uzunluğu
SS	: Doğrultu Atım
DS	: Eğim Atım
ξ, η	: Noktasal kaynağın elastik yarı-uzay sisteminde koordinatları
δ	: Eğim Açısı (dip angle)
μ, λ	: Lamé sabitleri
y', d'	: Fay düzlemine paralel bir koordinat sistemindeki koordinatları
ξ, η, q	: Fay düzlemi koordinat sistemindeki koordinatlar
R	: Fay başlangıç noktasının orijine olan uzaklığı
X	: Noktanın fay doğrultusu yönündeki koordinatı
U_i	: $i=1,2,3$ şeklinde sırasıyla SS, DS ve açılma (opening)
u_i	: Fay Doğrultusu, eğimi ve dik yöndeki yer değiştirmeler
I	: Ölçüler
A	: Dizayn matrisi

JEODEZİK ÖLÇÜLER İLE DEPREM KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Deprem kökenli yer değiştirmelerin jeodezik ölçülerle belirlenmesi ve modellenmesi iki yönlü bir olgu olarak değerlendirilebilir. Birincisi jeodezik ağların söz konusu etkilerden arındırılması, diğeri ise ülkemiz için kaçınılmaz bir olgu olan depremin yüzeydeki etkilerinin cm duyarlılığında sayısal olarak ifade edilerek, diğeri bilim dalı ve disiplinlere vazgeçilmez bir girdi olarak sunulmasıdır. Ülkemizde son yıllarda meydana gelen İzmit ve Düzce Depremlerinin etki alanı ve kaynak mekanizmalarının belirlenmesinde jeodezik veriler çok önemli bir role sahiptir.

Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak mekanizması ilişkisi için belirli varsayımlarla çeşitli fonksiyonel ilişkiler mevcuttur. Bu şekilde belirli bir fay geometrisi ve kayma değerleri ile yüzeyde meydana gelen yer değiştirmeleri “direkt modelleme” ile bulmak olanaklıdır. Ancak jeodezik ölçüler ile yüzeyde hesaplanan yer değiştirmelere en iyi uyan fay geometrisi ve kayma değerlerinin bulunması için karmaşık analitik ilişkiler yanında gelişmiş optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada ters çözüm modellemesi için uygun yöntem araştırması yapılmış, geliştirilen yazılım araçları yardımıyla en uygun olduğu değerlendirilen “Benzetimli Yaklaşma (Simulated Annealing)” yöntemi 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı gruplarca yapılan çözümlerle karşılaştırıldığında bulunan fay geometrisi ve kayma değerlerinin yüzey yerdeğiştirme değerlerine diğeri mevcut çalışmalardan daha iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca 03 Şubat 2002 tarihinde Çay (Afyon)’da meydana gelen depremler için faylanma mekanizması modellenmiştir.

DETERMINATION OF EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS THROUGH GEODETIC OBSERVATIONS

SUMMARY

Determination and modelling of seismic displacements can be considered a two-fold phenomenon. One is dispersing such effects from geodetic networks and the other one is quantifying the effects of earthquakes at cm level precision, which are inevitable for Turkey and presenting them as input to the other disciplines. Geodetic observations had an important role in determination of subject areas and fault mechanisms of recent İzmit and Düzce earthquakes.

Functional relation can be established between geodetic observations and earthquake source mechanism under certain assumptions. In this way, it is possible to compute surface displacements with direct modelling using certain fault geometry and slip values. However, computation of fault geometry and slip values which best fit the surface displacements requires advanced optimization methods together with complicated analytical functions.

In this study, possible methods of inverse modelling were investigated and simulated annealing, which is considered the most appropriate method, was tested for İzmit Earthquake, August, 17th, 1999 using the software tools developed within the study. Results reveal that computed fault geometry and slip values fit geodetic surface displacements better than any other available studies. In addition, faulting mechanism was also modelled for 03 February 2002 Çay (Afyon) Earthquake.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Deprem kökenli yer değiştirmelerin jeodezik ölçülerle belirlenmesi ve modellenmesi iki yönlü bir olgu olarak değerlendirilebilir. Birincisi jeodezik ağların söz konusu etkilerden arındırılması, diğeri ise ülkemiz için kaçınılmaz bir olgu olan depremin yüzeydeki etkilerinin cm duyarlılığında sayısal olarak ifade edilerek, diğeri bilim dalı ve disiplinlere vazgeçilmez bir girdi olarak sunulmasıdır. Ülkemizde son yıllarda meydana gelen İzmit ve Düzce Depremlerinin etki alanı ve kaynak mekanizmalarının belirlenmesinde jeodezik veriler çok önemli bir role sahiptir (Aktuğ ve diğ., 2000), (Reilinger ve diğ., 2000), (Ayhan ve diğ., 2001), (Bürgmann ve diğ., 2002a, 2002b), (Ergintav ve diğ., 2002), (Aktuğ, 2003).

Depremlerin jeodezik ağlar üzerindeki etkileri özellikle uzay bazlı (SLR, GPS, VLBI) yüksek duyarlıklı ölçü sistemlerinin gelişmesi ile daha iyi anlaşılmıştır. Depremler nedeniyle yüzeyde meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler farklı jeodezik ağlarda (GPS, nivelman, triangülasyon, trilaterasyon vb.) bölgesel ölçekte doğrudan deformasyon yaratmaktadır (Ayhan ve diğ., 2002). Jeodezik ağlar üzerindeki bu deformasyonun tüm ağ noktalarında belirlenmesi gerekli zaman, personel ve donanım açısından olanaklı olmadığı gibi ekonomik olmaktan da uzaktır. Bu nedenlerden ötürü, bölgesel deformasyonu temsil edici nitelikteki sınırlı sayıda nokta ile, depremsel deformasyonun etki alanının ve miktarının belirlenmesi ve bulunan yer değiştirmeler ile fay mekanizmasının yeterli duyarlılıkta modellenmesi en uygun çözüm olarak görülmektedir (Aktuğ, 2003). Bu şekilde elde edilen modeller ile jeodezik ağlar üzerindeki depremsel etkiler belirli duyarlılıkta bulunabilir ve giderilebilir. Depremsel deformasyonun belirlenmesi ve modellenmesi birçok açıdan önemlidir:

a. Depremler büyüklüklerine göre çok geniş bir alanda etkili olabilmekte ve jeodezik altyapı da aynı oranda zarar görmektedir. Hangi ölçekte olursa olsun, jeodezik ağların korunması ve geliştirilmesi için jeodezik değerler üzerindeki depremsel değişimlerin dikkate alınması zorunludur. Sadece İzmit Depreminin Türkiye Ulusal

Temel GPS ağı üzerinde İzmir'e kadar milimetreler düzeyinde etki yarattığı bilinmektedir (Ayhan ve diğ., 2002).

b. Depremlerden önce başlamış fakat henüz tamamlanamamış, depremlerden sonra başlayan hatta deprem öncesinde tamamlanmış uygulamalar ile güncellenmesi devam eden planlama ve yeniden yapılanma çalışmalarının hasar görmüş jeodezik altyapı ile gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Diğer yandan, kısa sürede, depremin etki alanına giren bölgedeki tüm noktaların yeniden ölçülmesi olanaklı değildir. Örneğin İzmit ve Düzce Depremleri sonrasında Marmara, İç Anadolu'nun batısı ve kuzeyi ile Ege Bölgesinin kuzeyi, mevcut ölçü duyarlıkların üzerinde yer değiştirmeye maruz kalmıştır (Reilinger ve diğ., 2000), (Ayhan ve diğ., 2001).

c. Farklı jeodezik ağların hepsi için yenileme/düzeltilme ölçüleri yapılması olanaklı değildir. Örneğin, 1999 yılında meydana gelen depremlerden dolayı, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA), Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağı, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) hatta ölçeği tam olarak bilinmemekle birlikte Türkiye Ulusal Gravite Ağı zarar görmüştür (Aktuğ, 2003).

d. Depremsel deformasyonun modellenmesi, herhangi referans koordinat sistemi ve/veya jeodezik ölçü türü ile elde edilen değişimler ve buna bağlı fay mekanizma modellerinin diğer türdeki jeodezik ağlara uygulanmasını olanaklı hale getirmektedir. Örneğin, GPS ile elde edilen depremsel yükseklik değişimleri, düşey kontrol ağlarına, InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ile elde edilen yatay yer değiştirmeler, GPS ağlarına ya da GPS ile elde edilen yer değiştirmeler ED-50 sistemindeki kadastral ağlara uygulanabilir (Ayhan ve diğ., 2002).

e. Yapılan çalışmalar hangi seviyede olursa olsun, hala yerin iç süreçleri hakkındaki bilgiler çok sınırlıdır. Bu durum farklı bilim dalı ve disiplinlerden çok-disiplinli araştırma çalışmalarının kaçınılmazlığını ortaya koymaktadır. Jeodezik ölçüler, deprem gibi karmaşık bir olgunun fiziksel ve sosyal boyutlarıyla incelenmesi için bir yer bilimi olan jeodezinin jeoloji ve jeofizik ile birlikte ortak çalışmasını sağlamaktadır.

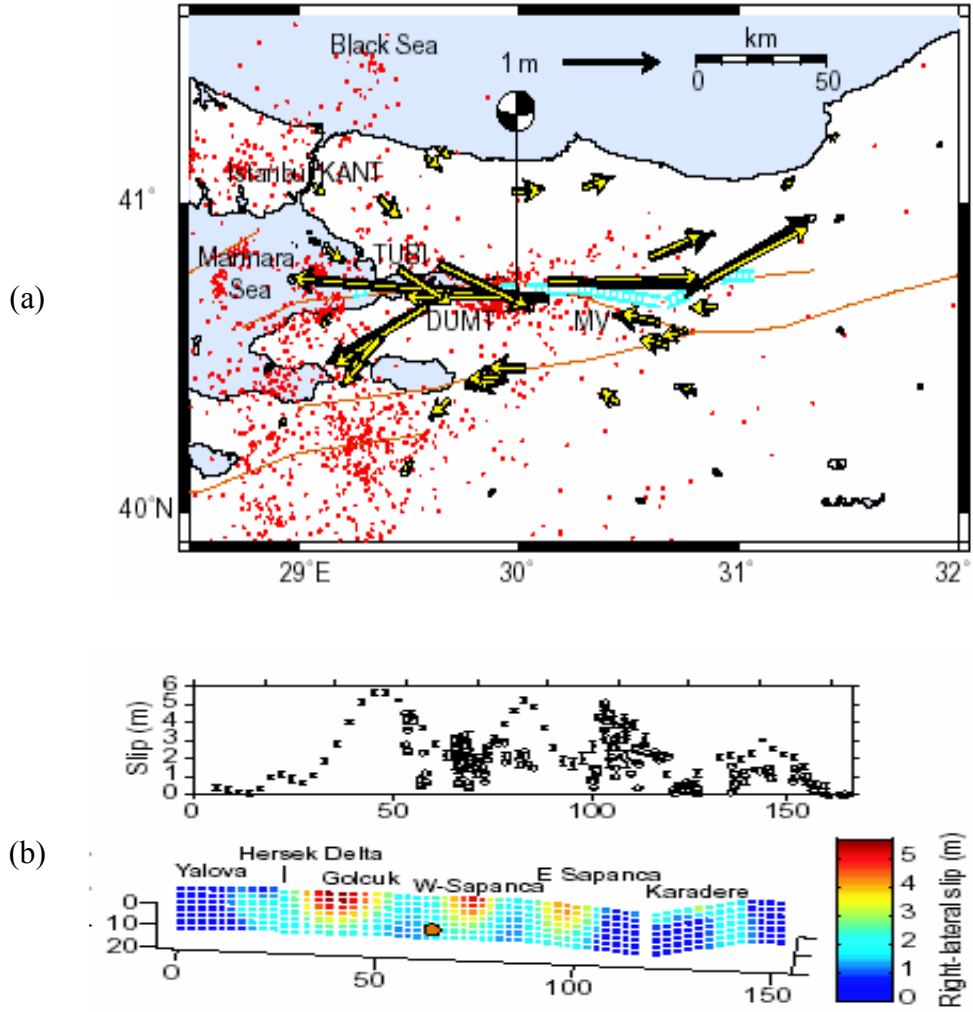
f. Günümüz jeodezik ölçme sistemleri depremsel yer değiştirmeleri diğer bilim dallarında olmayan bir duyarlılıkta sayısal olarak ortaya koyabilmekte ve bu nicelik bilgisi birçok yerbilimi araştırmaları için temel sayısal veri kaynağını oluşturmaktadır.

g. Fay mekanizmalarının modellenmesi sadece deprem anı (kosismik) yer deşiştirmeleri için değil, aynı zamanda depremler arası (intersismik) yer değiştirmelerin değerlendirilmesinde de kullanılabilmektedir (Nakiboğlu ve diğ., 1998), (Feigl ve Dupre, 1999), (Meade ve diğ., 2002),

Doęası gereęi karmařık bir olgu olan depremin, gerek yatay ve gerekse dūřey heterojenlik gōsteren yer yūzeyindeki etkilerinin tam olarak analitik modellenebilmesi olanaklı olmamakla birlikte, yerkabuęunun kısa zaman aralıklarında elastik davranıř gōstermesi ve birtakım sadeleřtirmeler ve kabuller ile yer yūzeyindeki yer deęiřtirmeler ve deprem kaynak mekanizması arasında fonksiyonel iliřkiler kurulabilir. Jeodezik nokta koordinatlarında deęiřiklięe neden olan fay dūzlemi geometrisi ve fay dūzlemindeki kayma miktarları bilinirse, elastik yarı-uzay modelleri ile depremin neden olduęu yūzey yer deęiřtirmeleri belirli duyarlılıkta hesaplanabilir. Deprem ncesi ve sonrası GPS ls bulunan noktaların koordinat deęiřimleri kullanılarak, bu yūzey deęiřtirmelerine neden olan fay dūzlemlerine ait kayma miktarları (yanal ve dūřey atım) ve geometri parametreleri hesaplanabilirse, elde edilecek model parametreleri daha sonra deprem sonrası ölçüsü bulunmayan noktalarda depremlerin etkilerini hesaplamak için kullanılabilmektedir (Ayhan ve dię., 2002), (Aktuę, 2003).

Jeodezik verilerle deprem kaynak mekanizmasının belirlenmesine yōnelik örnekler 1999 yılı depremleri sonrasındaki çalışmalarla verilebilir. 17 Aęustos 1999 tarihinde meydana gelen İzmit Depremi zellikle Marmara Bōlgesinde 2 metreye ulaşan yūzey değiştirmeleri meydana getirmiştir. Bu tarihten önce ve sonra yapılan GPS lleri depremin yūzeyde yarattığı yer değiştirmeler yüksek duyarlılıkla belirlenmiş ve ters modelleme ile bu yer değiştirmelere en iyi uyan deprem kaynak mekanizması belirlenmiştir (Reilinger ve dię., 2000). şekil 1.1’de İzmit Depreminin yūzeyde meydana getirdiği yer değiştirmeler ve ters modelleme sonucunda elde edilen deprem kaynak mekanizması gōsterilmektedir.

Benzer bir alıřma, 12 Kasım 1999 tarihinde meydana gelen Dūzce depremi için de yapılmıř, deprem öncesi ve sonrası elde edilen GPS verileri hem yūzey deęiřtirmeleri hem de ters modelleme ile deprem kaynak mekanizmasının modellenmesi için kullanılmıřtır (Ayhan ve dię., 2001). Dūzce depremi için elde edilen yūzey yer deęiřtirmeleri ve deprem kaynak mekanizması řekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.1: (a) İzmit Depreminin meydana getirdiği yüzey yer değiştirmeleri (koyu renkli oklar ölçüleri, açık renkli oklar model değerlerinin göstermektedir) (b) jeodezik ölçüler ile elde edilmiş fay düzlemi kayma değerleri (deprem odağı küçük daire ile gösterilmiştir) (Reilinger ve diğ., 2000).

Deprem kaynak parametreleri kısaca bir depremin geometrik ve fiziksel kinematik ve dinamik nitelik ve nicelikleri şeklinde tanımlanabilir. Buna göre bir depremin kaynak parametreleri;

a. Kinematik Parametreler

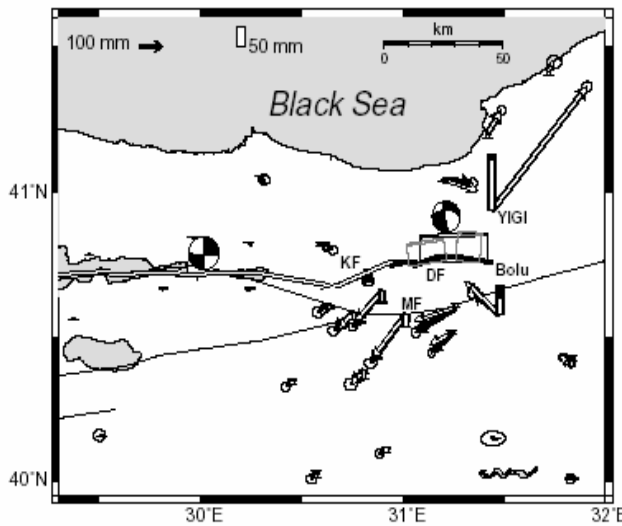
- Fay doğrultusu
- Fay eğimi
- Fay boyu
- Fay eni (derinliği)
- Kayma açısı (kayma vektörü)

b. Dinamik Parametreler

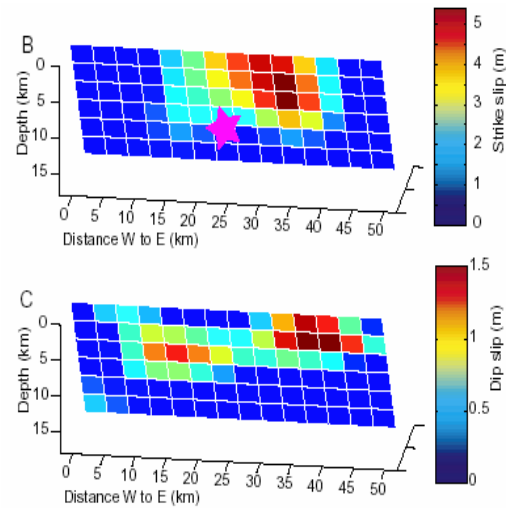
- Büyüklük
- Sismik Moment
- Sismik enerji
- Kaynak fonksiyonu
- Yükselme (rise) zamanı
- Faylanma süresi
- Faylanma hızı

şeklinde ifade edilebilir. Jeodezik ölçüler yardımıyla deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi birçok açıdan güçlükler içermektedir. Bu güçlükler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Deprem kaynak parametreleri ile depremin yüzeyde yaratacağı yer değiştirmeler arasındaki ilişkiler (direkt model) tek anlamlı değildir (Okada, 1985). Diğer bir ifade ile yüzeyde aynı yer değiştirmeleri meydana getirecek farklı deprem kaynak modelleri bulunabilir.
- Modellenmeye çalışılan yerkabuğu ve üst manto yatay ve düşey anlamda homojen değildir. Dolayısıyla bulunacak sonuç gerçeği değil, gerçeği temsil ettiği düşünülen ve jeodezik verilere en iyi uyan “en iyi” değerler olacaktır.



(a)



(b)

Şekil 1.2: (a) Düzce Depreminin meydana getirdiği yüzey yer değiştirmeleri (koyu renkli oklar ölçüleri, açık renkli oklar model değerlerinin göstermektedir) (b) jeodezik ölçüler ile elde edilmiş fay düzlemi kayma değerleri (deprem odağı yıldız ile gösterilmiştir) (Ayhan ve diğ., 2001).

- Yer yüzeyindeki yer deşiştirmelerden deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi analitik olarak olanaklı değildir. Ters modellemenin, jeodezik verilerle deprem kaynak parametrelerinin mevcut analitik ilişkiler çerçevesinde en iyi uyum sağladığı bir optimizasyon problemi olarak ele alınması zorunluluğu bulunmaktadır.
- Ölçüler ve modeller kusursuz değildir. Bu nedenle, ölçü hatalarını dikkate alan ve kullanılan jeodezik ölçme tekniğine göre uygun amaç fonksiyonunun seçilmesi parametreler üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.
- Depremler sonrasında yüzeyde meydana gelen yer değiştirmeler her zaman tektonik atımlarla ilişkili olmayabilir. Zemin sıvılaşması, toprak kayması, yerel çökme gibi faktörler dikkate alınmadığında deprem kaynak parametrelerinin hatalı şekilde belirlenmesi olasıdır. Ters modellemede kullanacak noktaların ana deformasyon zonu dışında ve diğer etkenlerin etkisi altında olmaması gerekir.
- Bir optimizasyon problemi olarak ele alınan ters modellemede, amaç fonksiyonu çok sayıda yerel minimuma sahiptir. Bu durum, “kısıtlı optimizasyon (constrained optimization)” yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Yukarıdaki İzmit ve Düzce depremleri yoğun verinin bulunduğu ve yüzeyde deprem kırıklarının meydana geldiği örneklerdir. Diğer bir ifade ile başlangıç deprem kaynak parametrelerinin iyi bilindiği bu depremlerde ters modelleme klasik yöntemlerle bile iyi sonuç verebilmektedir. Ancak bir deprem ülkesi olan ülkemizde çoğu zaman başlangıç deprem kaynak parametreleri yeterli prezisyonda bilinmemekte, bu nedenle klasik optimizasyon yöntemleri ile sonuç alınamamaktadır.
- Benzer bir durum, verilerin niceliği ile ilgilidir. Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A)’nın ikinci dönem ölçüleri tam olarak tamamlanmamış olup, ülkemizde meydana gelen birçok deprem için yeterli miktarda veri bulunmamaktadır. Ayrıca küçük ölçekteki birçok depremi modelleyebilmek için jeodezik ağların mekânsal çözünürlüğü yeterli değildir. Bu durum kullanılan optimizasyon yönteminin etkinliği ve dolayısıyla seçimini de doğrudan etkilemektedir.
- Kısıtlı optimizasyon için kullanılacak sınır değerleri yeterli doğrulukta bilinse bile amaç fonksiyonunun çok parametrelili olması ve çok fazla yerel minimuma sahip olması nedeniyle klasik optimizasyon yöntemleriyle tümel (global) minimum yerine yerel minimumun elde edilmesi daima olasılık dahilindedir. Bu nedenle, tümel

minimumuna ulaşabilen gelişkin optimizasyon yöntemlerinin daha etkin olduğu söylenebilir.

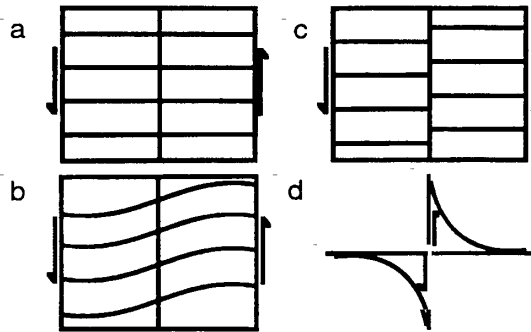
Bu çalışmada, yukarıda belirtilen problemler ışığında jeodezik ölçüler yardımıyla deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi (ters model) incelenecektir. Elde edilen parametreler ile jeodezik ağların deprem kaynaklı deformasyonların incelenmesi (direkt model) ise çalışmanın diğer önemli bir yönünü oluşturmaktadır. Çalışmada uygulanması öngörölmüş tüm işlem adımları gerçekleştirilmiş olup, izlenen işlem adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- a. Jeodezik ölçüler yardımıyla deprem kaynak parametrelerinin belirlenebilmesi için öncelikle deprem mekanizması tarihsel süreç içinde matematiksel olarak ele alınmış,
- b. Deprem kaynak mekanizmasını oluşturan fay düzlemi geometrisi ve fay düzlemi üzerindeki kaymalar ile yeryüzü noktalarının konum ve yer değiştirme vektörleri arasındaki ilişkiler incelenmiş,
- c. Fay geometrisi ve kayma vektörü ile yer yüzeyindeki yer değiştirmeleri ilişkilendiren elastik yarı-uzaydaki yer değiştirme teorisi matematiksel olarak ifade edilmiş, jeodezik ölçüler ile yüzey yer değiştirmeleri arasındaki ilişkilerin bir optimizasyon problemi olarak ele alınması ve modellenmesi gerçekleştirilmiş,
- d. Klasik optimizasyon yöntemlerinin kullanılabilirliği ve gelişmiş Nümerik Yöntemler araştırılmış, Benzetimli Yaklaşma (Simulated Annealing)'nın mevcut probleme uygunluğu incelenmiş,
- e. Hazırlanan çözüm algoritmaları mevcut problemle benzerlik taşıyan basit fonksiyonlarla test edilmiş (çok sayıda yerel minimum içeren) ve başlangıç değerleri elde edilen fonksiyonların global minimumun elde edilmesi için gerekli yöntemler araştırılmış,
- f. Kullanılan yöntem ve yazılımın etkinliğini araştırmak ve önemli bir deprem için yeni modeller üretmek amacıyla 17 Ağustos İzmit Depremi ele alınmış, yerli ve yabancı grupların çalışmaları geliştirilen modeller ile karşılaştırılmış,
- g. İzmit Depremi modellendirilerek, içerisinde optimizasyon, mekanik, jeodezi gibi çeşitli alanlar barındıran karma bir yöntem test edilmiştir.

2. YERKABUĞU DEFORMASYONU VE YER DEĞİŞTİRMELER

2.1. Deprem Döngüsü ve Sismik Fazlar

Deprem döngüsü ve yüzey yer değiştirmelerine ilişkin çalışmalar Reid (1911)'in elastik atılım (elastic rebound) teorisi ile başlamıştır. Buna göre, fay sınırıyla ayrılan blokların göreceli hareketleri, doğrusal (zamana göre) gerinim (strain) birikimi yaratmaktadır. Blokların fay sınırının altında belirli bir derinliğe kadar kilitli olması sebebiyle gerinim birikimi süresince fay sınırına yakın bölümler, fay sınırından uzak bölümler kadar yer değiştirememektedir. Yerkabuğunun geometri ve reolojisine bağlı olarak oluşan deprem ile gerinim boşalmakta ve fay sınırına yakın bölümler toparlanmaktadır. Daha sonra gerinim birikimi tekrar başlamakta ve döngü devam etmektedir (Turcotte ve Schubert, 1982). Bu durum sonsuz doğrultu atımlı bir sistem için Şekil 2.1’de grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Reid'in elastik atılım teorisi. (a) Gerinim birikimi başlamadan önceki durum, (b) Gerinim birikimi ile faya dik hatların aldığı durum (c) hatların depremle birlikte elastik olarak faya dik hale gelmesi (d) Depremden sonra noktaların fay sınırına yakın ve uzak oluşlarına göre yer değiştirmeler.

Buna göre deprem döngüsü için üç farklı faz tanımlanabilir: doğrusal gerinim birikiminin depreme kadar devam ettiği “deprem öncesi (intersismik) faz”, deprem süresini kapsayan “ deprem anı (kosismik) faz” ve depremden hemen sonra deprem etkilerinin devam ettiği süreç olan “deprem sonrası (postsismik) faz” (Lambeck, 1988). Bazı tanımlamalarda deprem öncesi ile depremler arasındaki fazları ayırt

etmek için, intersismik faz yanında depremin öncesi süre için kullanılan “presismik” faz tanımlanması da bulunmakla birlikte, deprem sonrası fazın devamında deprem öncesi fazın tekrar başladığı ve bu fazın deprem öncesiyle aynı karakterde olduğu kanısı daha yaygındır.

2.2. Mekanik ve Matematiksel Yer değiştirme Modelleri

2.1.1. Elastik Atılım (Serbestlenme) Teorisi

Elastik atılım teorisini açıklamak için yanal atımlı bir fay sistemi sınırına dik doğrultudaki hatların gerinim ve atılım ilişkisi Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

2.1.2. İki Boyutlu Modeller

2.1.2.1. Doğrultu Atımlı Modeller

Yüzey yer değiştirmeleri ile blok hızı ve sismojenik tabaka kalınlığı ilişkisi Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Elastik atılım teorisi en sade haliyle sayısal olarak

$$V(x,t) = \frac{v}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x}{D} \right), \quad (2.1)$$

şeklinde verilmektedir (Savage ve Burford,1973). Buna göre, kayma gerinimi ise

$$\varepsilon_{xy}(x,t) = \frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{vt}{2\pi D} \frac{1}{1+(x/D)^2} \quad (2.2)$$

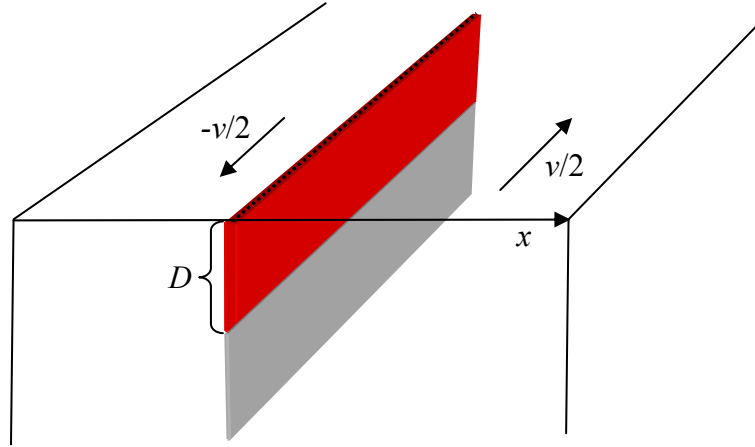
şeklinde elde edilir (Savage ve Burford,1973).

Burada v , x ve D , sırasıyla plakaların fayın kilitli olduğu derinlik altında göreceli hareket hızı, fay sınırına göre noktaların dik uzaklıkları ve sismojenik tabaka kalınlığıdır (Turcotte ve Schubert, 1982), (Cohen, 1999). (1)’de verilen deprem öncesi yer değiştirme görüleceği üzere, fay sınırında yön değiştiren ters tanjant fonksiyonuna bağlıdır. Derinlik ile yüzey yer değiştirmelerinin ilişkisi, farklı derinlikler için Şekil 2.3’de grafik olarak gösterilmektedir.

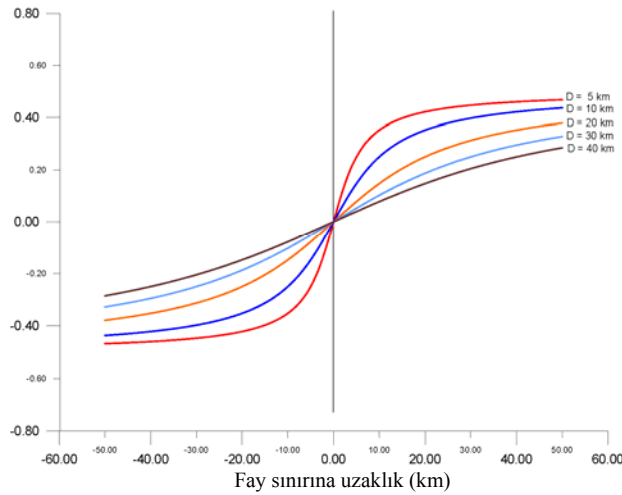
Sonsuz uzunlukta yanal atımlı blokların deprem öncesi fazdaki davranışı için yukarıda verilen eşitlik yardımıyla, deprem anı fazdaki yer değiştirmeler hesaplanabilir. Buna göre;

$$V(x) = \Delta V \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{x}{D} \right) \right], \quad (2.3)$$

Burada, ΔV deprem sırasında faz düzlemi üzerindeki yer değiştirmeye karşılık gelmekte olup, yıllık yer değiştirme ile zamanın çarpımına eşittir ($\Delta V = v.t$) (Cohen, 1999). Farklı derinlikler için deprem anı yer değiştirmeler Şekil 2.4’de verilmektedir.

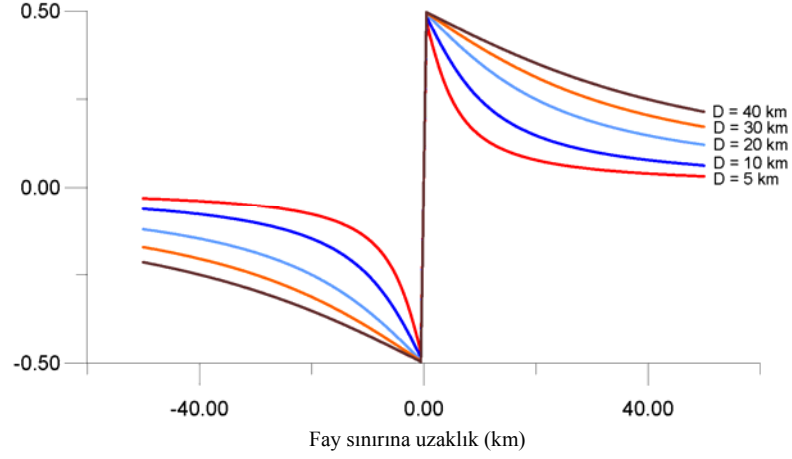


Şekil 2.2: Sonsuz uzunlukta doğrultu atımlı bir fay sistemi için yer değiştirmeler. D : sismojenik tabaka kalınlığı, x : faydan olan uzaklık, v : Toplam göreceli yer değiştirme.



Şekil 2.3: Deprem öncesi fazda yer değiştirme. (1) eşitliğinde farklı derinlikler ve $v=1$ m için çizdirilmiştir.

Kuzey Anadolu Fay Zonundan (KAFZ) bir örnek vermek gerekirse, Avrasya Plakasına göre yaklaşık 25 mm/yıl olan yıllık kayma değeri 100 yılda 2.5 m kaymaya karşılık gelmektedir.



Şekil 2.4: Deprem anı fazda yer değiştirmeler (2.3 eşitliğindeki farklı derinlikler ve $V=1$ m için çizdirilmiştir)

2.1.2.2. Eğim Atımlı Modeller

Freund ve Barnett (1976) (2.1)'de verilen sonsuz uzunluktaki medyunda meydana gelen yanal atım modelini, yine sonsuz uzunlukta medyum için düşey atım için geliştirmiştir. Buna göre θ , fayın eğim açısı, u_3 düşey yönde, u_2 yatay yönde yer değiştirme olmak üzere,

$$u_2 = \frac{\Delta u \cos \theta}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_D}{D} \right) - \frac{(x_2 - x_p) D}{(x_2 - x_D)^2 + D^2} - \text{sign}(x_2) \frac{\pi}{2} \right] \quad (2.4)$$

$$u_3 = \frac{\Delta u \sin \theta}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D}{x_2 - x_D} \right) - \frac{x_2 D}{(x_2 - x_D)^2 + D^2} - \frac{\pi}{2} (1 - \text{sign}(x_2)) \right] \quad (2.5)$$

Burada, $x_D = D/\tan \theta$ ve $x_p = D/(\sin \theta \cos \theta)$ olup, u_3 yükselme için pozitif olarak alınmıştır (Freund ve Barnett, 1976).

2.1.3. Genelleştirilmiş Üç Boyutlu Modeller

Yukarıda problemi sadeleştirmek için kullanılan iki boyutlu modeller, daha sonra yerini üç boyutlu genel haline bırakmıştır. Birçok çalışma mevcut olmakla birlikte, elastik-yarı uzaydaki yer değiştirme problemi en genel haliyle (Okada, 1985)'te verilmektedir. Bundan sonraki bölümlerde her tür fay geometrisi ve kayma vektörünü kapsayan yer değiştirme eşitlikleri ile ilgilenilecektir. Bu anlamda elastik yer değiştirme teorisini yerkabuğuna uygulanması ile ilgili bugüne dek çeşitli

alışmalar yapılmıştır (Steketee, 1958), (Press, 1965), (Aki ve Richards, 1980), (Okada, 1985), (Cohen, 1999). Gerek analitik gerekse de nümerik yöntemlerde, problemi daha basit hale getirmek amacıyla yerkabuğu bir bütün-uzay (whole-space) yerine yarı-uzay (half-space) kabul edilmektedir. Yarı-uzay, bütün-uzaydan yüzeylerinden herhangi birinde, normal gerilim (normal stress) ve yüzey kuvvetlerinin (traction) sıfır olduğu bir blok olarak düşünölebilir. Yeryüzünü, yüzey kuvvetlerinin ve yüzey gerilimlerinin sıfır olduğu bir yarı uzay olarak kabul etmek hesap yükünü yaklaşık üç kat azaltmaktadır. Bütün-uzay yer bilimlerinde hemen hemen hiç kullanılmamakla birlikte, bu yaklaşımın uygulama alanına bir örnek olarak toprak mekaniği ve uzunluğuna göre çok derinde bulunan yapıların modellenmesi verilebilir. Pratikte yarı-uzay kavramı işlem yükünü oldukça hafifletmekle birlikte, yine de problemi bir bütün uzaydan, yarı-uzaya indirgemek bazı işlemleri gerektirmektedir (Cohen, 1999). Bu işlemler;

- Noktasal kaynağın bir kopyasını (image source), noktasal kaynağın yer yüzeyine göre simetrik bir konumuna yerleştirmek. Bu işlem ile yüzey kuvvetleri (traction) ters işaretli olduğundan toplam yüzey kuvveti değeri sıfır olarak sınır koşulunu sağlayacak, fakat bu durumda yüzey gerilimi iki katına çıkacaktır.
- Birinci adımda iki katına çıkan yüzey gerilimini ortadan kaldırmak için Steketee (1958), Galerkin vektörü kullanmayı önermiştir. Bu durumda toplam yüzey gerilim değeri sıfır olacak ve sınır değeri koşulları sağlanacaktır. Bu şekilde bütün-uzay problemi, bir yarı-uzay problemine dönüşür.

Noktasal bir kuvvetten kaynaklanan yer değiştirme için temel eşitlik aşağıda verilmektedir:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad i,j : 1,2,3 \quad (2.6)$$

Burada, ρ yoğunluğu, u_i , f_i , x_i sırasıyla yer değiştirme, birim hacim için iç kuvvetler ve konumu, τ gerilimi ve t ise zamanı ifade etmektedir. Gerilim ifadesindeki tekrarlı indeks Einstein toplam kuralını (summation convention) göstermektedir. Gerilim (stress) ve gerinim (strain) ile gerinim ve yer değiştirme arasındaki temel bağıntılar (2.7), (2.8) ve (2.9)'da verilmektedir.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i,j : 1,2,3 \quad (2.7)$$

$$\tau_{ij} = c_{ijpq} \varepsilon_{pq} \quad i,j,p,q : 1,2,3 \quad (2.8)$$

Burada, ε gerinimi, c ise reolojik sabitleri ifade etmektedir. İzotropik bir blok için c ,

$$c_{ijpq} = \lambda \delta_{ij} \delta_{pq} + \mu (\delta_{ip} \delta_{jq} + \delta_{iq} \delta_{jp}) \quad (2.9)$$

şeklindedir. Burada δ Kronocker Deltası, λ ve μ ise Lamé elastik sabitleridir. (2.4), (2.5) eşitlikleri (2.6) ve (2.3) eşitliklerinde yerine konulduğunda, (2.3) temel eşitliğinden (2.7)'de verilen eşitlik elde edilir.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = f_i + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.10)$$

Bu diferansiyel denklem sisteminin çözümü ile ilgili örnekler birçok sismoloji kitabında mevcuttur (Aki ve Richards, 1980), (Cohen, 1999). Bunun için genel olarak Aki ve Richards, (1980)' de verilen Green fonksiyonları ya da Steketee (1958)' de verilen Somigliana Tensör Çözümü kullanılmaktadır (Cohen, 1999). Noktasal bir kaynak, Δu_j (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 'nın yer değiştirmesi nedeniyle, Σ izotropik bloğunda oluşan yüzey yer değiştirme alanı u_i (x_1, x_2, x_3),

$$u_i = \frac{1}{F} \int \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] \nu_k d\Sigma \quad (2.11)$$

ile verilir (Cohen, 1999), (Okada, 1985). Burada δ_{jk} Kronocker deltası, λ ve μ Lamé elastik sabitleri, ν_k $d\Sigma$ yüzeyine ait yüzey normalinin k ıncı bileşeni, u_i^j ise, (ξ_1, ξ_2, ξ_3) konumundaki noktasal kaynak ile oluşan u_i (x_1, x_2, x_3) yer değiştirmenin i inci bileşenidir (Okada, 1985).

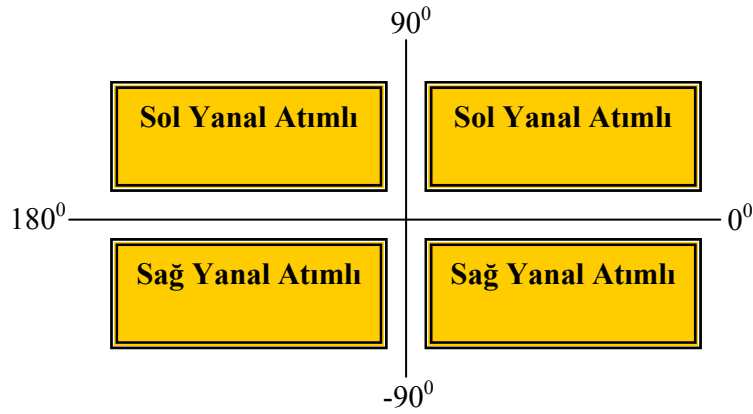
2.3. Fay Geometrisi ve Kayma

Standardı sağlamak amacıyla, izleyen bölümlerde fay düzlemi üzerindeki yer değiştirmeye “fay düzlemi yer değiştirmesi (dislocation)”, yer değiştirme nedeniyle yüzeydeki noktalarda oluşan yer değiştirmeye “fay düzlemi yer değiştirmesi

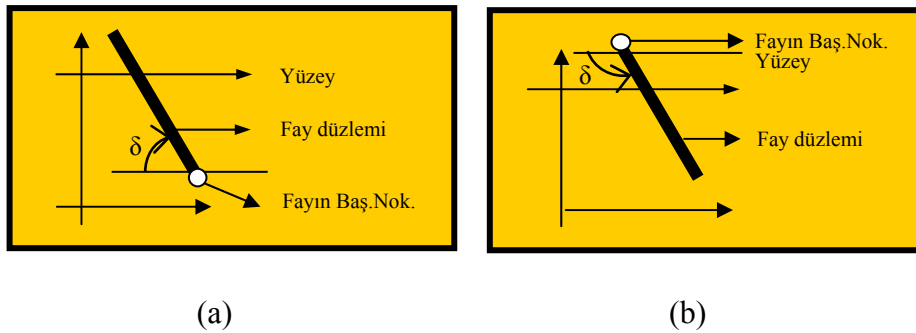
- 14

Tablo 2.1: Fay Geometrisine İlişkin Parametreler

1	w (Fay düzleminin genişliği)	6	φ_2 (Fayın diğer uç noktasının enlemi)
2	d (Fay başlangıç noktasının derinliği)	7	λ_2 (Fayın diğer uç noktasının boylamı)
3	φ_1 (Fay başlangıç noktasının enlemi)	ya da	
4	λ_1 (Fay başlangıç noktasının boylamı)	6	α (Fay doğrultusunun azimutu)
5	δ (Fay başlangıç noktasının eğimi)	7	L (Fay düzleminin uzunluğu)



Şekil 2.6: Eğim Açısı (dip angle) δ 'nın farklı değerlerine göre değişen fay niteliği



Şekil 2.7: (a) Pozitif (b) negatif eğim açısına (δ) göre fay düzleminin dönmesi

Kullanılan eğim açısının farklı değerleri fayın niteliğini değiştirebileceği gibi DS ve SS değerlerinin pozitif veya negatif olma durumları da fayın niteliğini değiştirmektedir.

2.4. Elastik Yarı-Uzay Modelleri

Noktasal kaynağın sebep olduğu yüzey yer değiştirme alanından, dörtgen bir alanın sebep olacağı yer değiştirme alanını elde etmek için, (2.11) eşitliğinin açılımından elde edilecek analitik eşitliklerin fay düzleminin uzunluğu (L) ve genişliği (W)'ne bağlı integral çözümü yapmak gereklidir.

Tablo 2.2: Eğim açısı, derinlik ve kayma vektörlerinin ilişkisi

Param.	Değer	Birim	AÇIKLAMA
δ	-90.12	derece	III. Bölgede eğim açısına sahip olması, SS ve DS değerlerinin pozitif olması Sağ yanal atımlı ve ters bir fay olduğunu göstermektedir.
SS	2.80	m.	
DS	1.28	m.	
D	-0.08	km.	
W	16.03	km.	
Yukarıdaki fay modeli ile aynı sonuçları verecek aşağıdaki gibi başka değerler kümesi oluşturulabilir. Derinliğin ve yanal atım bileşeninin işaretine dikkat edilmelidir.			
δ	89.80	derece	I.Bölgede fayın sağ-yanal atımlı olması için negatif sol yanal atıma sahip olması gerekir. Hem I. hem de III. Bölgede ters faylanma olduğu görülmektedir.
SS	-2.80	m.	
DS	1.28	m.	
D	15.95	km.	
W	16.03	km.	

Buna göre;

$$\int_x^{x-L} d\xi \int_p^{p-W} d\eta \quad (2.12)$$

olur. Burada, x ve p fay düzleminin Şekil 2.4'de verilen koordinatlarını; $d\xi$ ve $d\eta$ ise, noktasal kaynağın elastik yarı-uzay yer değiştirme modeline göre fay düzlemi üzerindeki koordinatlarına bağlı yer değiştirme fonksiyonlarını göstermektedir. Analitik denklemleri kapalı halde ifade etmek için, (2.12) integrali aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p-W) - f(x-L, p) + f(x-L, p-W) \quad (2.13)$$

Dörtgensel bir alan için (fay düzlemi) (2.11)'de verilen eşitliğin açılımından elde edilen analitik denklemler, (2.14-2.24) eşitliklerinde verilmektedir. Kayma vektörü bileşenlerinin (U_1, U_2) sebep olduğu yüzey yer değiştirmeleri (u_x, u_y, u_z), Şekil-4'de

verilen fay düzlemi koordinat sistemindeki bu eşitlikler yardımıyla (2.11) eşitliğinin integralini alarak ifade etmek olanaklıdır. Buna göre elde edilen yanal ve düşey atım eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

2.4.1. Yanal Atım

$$u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \quad (2.14)$$

$$u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{y' q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \quad (2.15)$$

$$u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{d' q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \quad (2.16)$$

2.4.2. Düşey-Atım

$$u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} + I_3 \sin \delta \cdot \cos \delta \right] \quad (2.17)$$

$$u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{y' q}{R(R+x')} + \cos \delta \cdot \tan^{-1} \frac{x' \eta}{R+\eta} - I_1 \sin \delta \cdot \cos \delta \right] \quad (2.18)$$

$$u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{y' q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \cdot \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cdot \cos \delta \right] \quad (2.19)$$

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-I}{\cos \delta} \frac{\xi}{R+d'} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \quad (2.20)$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R+\eta)] - I_3 \quad (2.21)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{I}{\cos \delta} \frac{y'}{R+d'} - \ln(R+\eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \quad (2.22)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{I}{\cos \delta} [\ln(R+d') - \sin \delta \cdot \ln(R+\eta)] \quad (2.23)$$

$$I_s = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos \delta} \frac{2}{\tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{x'(R + X) \cos \delta}} \quad (2.24)$$

U_i	: Kayma vektörü (slip) bileşenleri
δ	: Eğim Açısı (dip angle)
μ, λ	: Lamé sabitleri
y', d'	: Fay düzleminin noktanın 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 uzaklığı
X	: Noktanın fay doğrultusu yönündeki koordinatı
U_i	: $i=1,2,3$ şeklinde sırasıyla SS,DS ve açılma (opening)
u_i	: $i=1,2,3$ şeklinde sırasıyla fay doğrultusu, eğim açısı ve fay düzlemine dik doğrultulardaki yer değiştirmeler

Kuşkusuz tam elastik bir yerkabuğu için geliştirilen analitik ifadeler gerçek fiziksel yeryüzünü yansıtmayacaktır. Ancak gelinen noktada birçok araştırmacı ve akademisyen Okada (1985)'te en genel hali verilen elastik yarı-uzayda yer değiştirme eşitliklerini başarıyla kullanmıştır. Örneğin, Arnadottir ve Segall (1994)'te yersel ölçüler ile deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesinde, Bürgmann ve diğ. (2002a)'da deprem anı ve sonrası yer değiştirmeleri modellemede, Du ve diğ. (1992) San Andreas'ta deprem anı yer değiştirmeleri modellemede, Feigl ve Dupré (1999), İzmit Depremi yer değiştirmelerini modelleme, Meade ve diğ. (2002) Marmara Bölgesindeki deprem öncesi hızların modellenmesinde, Segall ve Matthews (1997)'de deprem sonrası verilerin modellemesinde, Wright ve diğ. (2001)'de İzmit Depremi deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesinde, Johnson ve diğ. (2001)'de Tayvan depremi deprem anı yer değiştirmelerinin modellenmesinde elastik yarı-uzay modellerini başarıyla kullanmışlardır.

Elastik yarı-uzay modellerdeki yanal saf elastik yer kabuğu kabulünü esnetmek için elastisite modülünü değiştirerek kullanan Du ve diğ. (1992), Johnson ve diğ. (2001) ya da farklı elastik özelliklerdeki katmanları kullanan Wang, ve diğ. (2003) gibi çalışmaları olmakla birlikte, çalışma alanındaki yerkabuğunun yanal ve düşey heterojenliği ile ilgili sayısal bilgilerin azlığı nedeniyle kesin bir yöntem oluşturulamamıştır.

Elastik yarı-uzay modelleri ile ilgili kabullerin esnek hale getirilmesi ile ilgili diğer bir örnek ise, fay düzlemi üzerindeki kayma miktarının fay düzleminin her yerinde

aynı olduğu (üniform) kabulünün, fay düzleminin küçük parçalar halinde ters modellemeye tabii tutulması ve her bir parça için ayrı kayma vektörleri elde edilmesidir (Bürgmann ve diğ., 2002a), (Bürgmann ve diğ., 2002b), (Feigl ve Dupré, 1999), (Aoki ve diğ., 1999). Ancak bu durumda parametre sayısı oldukça artacağından, bu yöntemin uygulanabilmesi için kayma fonksiyonun fay düzlemi üzerindeki sürekliliği ise ayrı bir kısıt olarak optimizasyon probleminde ele alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak depremlerin yeryüzündeki jeodezik ölçülerde meydana getirdiği değişimlerin, fay geometrisi ve kayma vektörleri ile ilişkilerinin elastik yarı-uzayda bir yer değiştirme ile yeterli doğrulukta modellenebileceği değerlendirilmektedir.

3. OPTİMİZASYON VE PARAMETRE TAHMİNİ

Temel matematik terimi olarak optimizasyon belirli kısıtlara bağlı olan ya da olmayan fonksiyonların minimum ve maksimum değerlerini bulma ile ilgili disiplindir. Örneğin, üretim yapan bir birimin, sahip olduğu kaynakların sınırları geçmeyecek şekilde kârlarının maksimize edilmesi gibi (Wikipedia, 2005). Bir başka kaynakta yine benzer şekilde, fizik, mühendislik, ekonomi ve biyolojideki nicel (kantitatif) problemlerin çözümü ile uğraşan uygulamalı matematik alanı tanımlanmış, fonksiyonların maksimum ve minimumunun bulunması şeklinde farklı disiplinlerde ortaya çıkan problemlerin matematiksel yöntemlerle çözülmesini ifade ettiği belirtilmiştir (Britannica, 2005). Daha teknik bir tanım ise Gill ve diğ., (1981) tarafından “bir ya da daha çok değişkenin bir şekilde fonksiyonu olan ve tek bir “iyi” ölçütü ile tanımlanan amaç fonksiyonunun belirli koşul ve kısıtlar içerisinde maksimum veya minimum değerlerinin incelenmesi” biçiminde ifade edilmiştir.

Optimizasyon yöntemleri üzerine çeşitli sınıflandırmalar mevcuttur. Bunlardan biri;

- Doğrusal Modellerde Optimizasyon
- Doğrusal Olmayan Modellerde Optimizasyon

şeklindedir (Liebelt, 1967). Diğer bir tanımlama ise:

- Kısıtlı Optimizasyon
- Kısıtsız Optimizasyon

biçiminde verilmektedir (Gill ve diğ., 1981). Optimizasyon uygulanacak problemin büyüklüğüne göre bir başka kategori ise;

- Küçük Ölçekli Optimizasyon
- Orta Ölçekli Optimizasyon
- Büyük Ölçekli Optimizasyon

şeklinde yapılmıştır (Mathworks, 1996).

Doğrusal modellerde parametre tahmininde “en uygunluk (optimalite)” kavramı çeşitli kaynaklarda kaynaktan ele alınmıştır (Liebelt, 1967), (Gelb, 1974), (Gill ve diğ., 1981). Parametre tahmini (Koch,1987), jeodezik ağ tasarımı ve jeodezik ağlarda optimizasyon (Grafarend ve Sanso, 1985), (Ayan, 1981) ve (Ayan, 2000)’de bulunabilir.

Genel optimizasyona geçmeden önce jeodezik çalışmalarda ana araç olarak kullanılan En Küçük Kareler Yönteminden (EKKY) kısaca bahsedilecek, diğer alanlarda etkin olarak kullanılan doğrusal modellerde optimizasyon yöntemlerine değinilecek, doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları ile gerek EKKY’nin gerek diğer doğrusal optimizasyon yöntemlerinin büyük ölçekli doğrusal olmayan optimizasyon çalışmalarında neden kullanılmadığı üzerinde durulacaktır.

3.1. Doğrusal Modellerde Parametre Tahmini

Doğrusal modellerde en yaygın optimalite tanımlaması yanlılık ve minimum varyans ile ilgili olanıdır (Gelb, 1974), (Mikhail, 1976), (Koch,1987). Buna göre bir parametre tahminin optimal olması, sırasıyla yanlı olmama (unbiasedness) ve en küçük varyansa sahip olmayı ifade eden (3.1) ve (3.2) eşitliklerinin sağlanmasına bağlıdır.

$$E(\hat{x}_i) = x_i \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\hat{x}_i}^2 \Rightarrow \min \quad (3.2)$$

(3.1) eşitliği parametre tahmini ile elde edilen değerlerin, parametrelerin beklenen değerlerine eşit olmasını ifade ederken, (3.2) eşitliği ise parametre tahmininde kullanılan ölçüler ile bunların parametre tahmini sonrası değerleri ile elde edilen varyansların minimize edilmesini ifade etmektedir (burada ölçülerin doğrudan parametreleri temsil ettiği düşünülmüştür). Karesel (quadratic) formun Lagrange çarpanları yardımıyla minimize edilmesiyle elde edilen EKK (En Küçük Kareler Yöntemi) optimal bir tahmin yöntemidir. Karesel formun minimize edilmesi ve bu yöntemle (3.1) ve (3.2) eşitliklerinin matematiksel olarak sağlanması çeşitli kaynaklarda bulunabilir (Mikhail, 1976), (Vanicek ve Krakiwsky, 1982), (El-Sheimy, 2001). EKK’nın optimal olması kuşkusuz minimize edilen artık (residual)

değerlerin kaba ve sistematik hata içermemesine bağlıdır. Deterministik ve stokastik bileşenleriyle parametrik form için Gauss-Markov modeli, ε düzeltme vektörü olmak üzere;

$$l = A \quad + \varepsilon \quad (3.3)$$

şeklindedir (Mikhail, 1976), (Vanicek ve Krakiwsky, 1982), (Koch,1987), (El-Sheimy, 2001). (3.3) eşitliğinin EKK ile çözümü,

$$\min(\|Ax - l\|^2) \quad (3.4)$$

biçiminde ifade edilebilir. (3.4) eşitliğinde minimize edilen fonksiyon L_2 normudur (Segall ve Matthews, 1988). Cebirsel olarak (3.3) eşitliğinin eşit ağırlıklı EKK ile çözümü,

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (3.5)$$

eşitliği ile elde edilir. Çoğu durumda referans sisteminin tanımlanmadığı yada eksik tanımlandığı bu tür normal denklemler sisteminde, parametre sayısı (u) dizayn matrisi (A) olmak üzere $u\text{-rank}(A^T A)$ kadar datum defekti söz konusudur. Diğer bir ifade ile normal denklemler matrisinin $(A^T A)$, $d=u\text{-rank}(A^T A)$ kadar sıfır özdeğeri mevcuttur. Bu haliyle regüler (Cayley) tersi mevcut olmayan $(A^T A)$ matrisi tekildir (singular). Burada “tekillik” deyimini çözümsüzlük yerine sonsuz sayıda çözüme sahip olma yada tek anlamlı çözüme sahip olmama şeklinde algılanmalıdır (Aktuğ, 2004). Bu duruma Vanicek ve Krakiwsky, (1982)’de eksik-tanımlı sistem (under-determined system), Segall ve Matthews (1988)’de regüler olmayan sistem adı verilmektedir. Normal denklemler matrisi gibi dizayn matrisi A da d kadar sıfır özdeğere sahiptir (Liebelt, 1967), (Borre ve Strang, 1997), (Gelb, 1974), (Gill ve diğ., 1981). Bu sistemin çözümü normal denklemler matrisinin genelleştirilmiş tersinin (generalized inverse) alınmasıyla olanaklıdır. Genelleştirilmiş matris inversi,

$$AA^{-1}A = A \quad (3.6)$$

$$(AA^{-1})^T = AA^{-1} \quad (3.7)$$

şeklindedir (Leick, 1990), (Caspary, 1987), (Vanicek ve Krakiwsky, 1982). Ancak, genelleştirilmiş matris inversi tek anlamlı değildir (Grafarend ve Sanso, 1985). Bu nedenle bu denklem sisteminin çözümü için uygun kısıtlar (constraints) kullanılarak geometrik ve fiziksel anlamı olan bir genelleştirilmiş invers bulunması zorunludur. Buna göre parametreler üzerindeki kısıtlar (3.3)'de verilen Gauss-Markov modeline göre;

$$= Hx + \varepsilon \quad (3.8)$$

şeklinde eklenirse, (3.4) ve (3.5) eşitlikleri sırasıyla,

$$\min (\|Ax - l\|^2 + \|Hx - c\|^2) \quad (3.9)$$

$$\hat{x} = (A^T A + H^T H)^{-1} (A^T l + H^T c) \quad (3.10)$$

haline dönüşür (Aktuğ, 2004). Kısıtların kullanılması ile rankı artırılan normal denklemler matrisinin $(A^T A + H^T H)$, regüler (Cayley) inversinin alınması mümkün olur. Elde edilen matris inversi ise yalın haldeki normal denklemler matrisinin $(A^T A)$ genelleştirilmiş inversi'dir. Genelleştirilmiş inversin jeodezide başta datum tanımlama olmak üzere birçok kullanım alanı mevcuttur (Grafarend ve Sanso, 1985).

3.2. Doğrusal Olmayan Modellerde Parametre Tahmini

EKKY'nin jeodezide kullanımı doğrusal ya da doğrusallaştırılmış modeller ile gerçekleşir. Bununla beraber daha geniş anlamda EKKY gerçekte L_2 normu minimizasyonu anlamına gelmekte olup, doğrudan doğrusal olmayan fonksiyonlar için de kullanılabilir. Örneğin (Mathworks, 1996)'da EKKY aşağıdaki şekilde ayrılmıştır:

$$\text{Doğrusal EKKY} \quad : \quad \min_x \|Ax - d\|^2, \text{ m adet denklem, n adet değişken}$$

$$\text{Negatif Olmayan EKKY} \quad : \quad \min_x \|Ax - d\|^2, x \geq 0$$

$$\text{Kısıtlı EKKY} \quad : \quad \min_x \|Ax - d\|^2, Ax \leq b, 1 \leq x \leq u$$

Doğrusal Olmayan EKKY :
$$\min_x \|F(x)\|^2 = \frac{1}{2} \sum F_i(x)^2, \quad 1 \leq x \leq u$$

Doğrusal Olmayan Eğri Geçirme:
$$\min_x \|F(x, a) - b\|^2, \quad 1 \leq x \leq u$$

Teorik olarak tüm analitik ifadeler Taylor serisi ile doğrusallaştırılabilir. Bu şekilde yeniden doğrusal model olarak ifade edilen matematiksel model EKKY ile çözülebilir. Ancak bu çözümün optimal olduğu anlamında gelmemelidir. Zira doğrusallaştırılarak elde edilen modeller ile yapılan çözümlerde çözümün optimal olması için başlangıç değerlerinin gerçeğe yakın olarak bilinmesi gerekir (Borre ve Strang, 1997). Bu durumu gidermek için yenilemeli (iteratif) çözüm yapılır. Her yeni yinelemede parametrelerin önsel (başlangıç) değerleri, sonsal (tahmin) değerleri ile güncellenir (Vanicek ve Krakiwsky, 1982), (El-Sheimy, 2001), (Nakiboğlu ve Demir, 2003). “Parametre Tahmini” ile “Parametre Optimizasyonu” kavramlarının parametreler ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişkiler ile ayırt edildiği söylenebilir. Örneğin, jeodezik problemlerin çoğunda ölçüler ile bilinmeyenler arasındaki analitik ilişkiler kesin olarak belirlidir. Bu anlamda bu tür modellerle elde edilecek çözümlerin optimal olup olmaması doğrudan kullanılan yöntem ve seçilen amaç fonksiyonuna bağlıdır. Benzer şekilde, bu tür problemlerin EKKY ile yapılan çözümlerinde parametrelerin gerçeğe yakın değerlerine ulaşmak olanaklıdır. Buna karşın “Parametre optimizasyonu” parametreler ile amaç fonksiyonu arasındaki analitik ilişkiler açısından daha esnektir. Bu anlamda kullanılan yöntem ne olursa olsun, kurulan fiziksel ya da matematiksel ilişkilerde bulunan eksiklikler, elde edilen parametrelerin gerçeğe yakınlığını doğrudan etkileyecektir (Gill ve diğ., 1981). Dolayısıyla elde edilen parametre değerlerini “gerçeğe en yakın” yerine “amaç fonksiyonuna ve/veya verilere en iyi uyan” şeklinde değerlendirmek daha doğru olacaktır (Schwefel, 1981). Optimizasyon uygulamalarının parametre tahmin uygulamalarına göre bir diğer eksikliği de hata sınırlarının EKKY’nin tersine doğrudan analitik olarak hesaplanamamasıdır. İleriki bölümlerde verileceği üzere hüristik yöntemlerde elde edilen parametrelerinin hataları hiçbir şekilde optimizasyon içerisinde hesaplanamamaktadır (Aoki ve diğ., 1999), (Cervelli ve diğ., 2001).

Özellikle doğrusal olmayan modellerin EKKY ile optimizasyonu, yöneylem araştırma, iktisat, üretim yönetimi gibi birçok alanda kantitatif karar destek sistemleri

için temel araç olarak kullanılmış olup, en yaygın olarak EKKY yöntemleri olan Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt (Levenberg, K., 1944), (Marquardt, 1963) yöntemleri tercih edilmiştir (Apaydın, 1996), (Mathworks, 1996).

3.3. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modellerin Optimizasyonu

Doğrusal olmayan veya doğrusallaştırıldıklarında yinelemeli olarak çözilemeyen (yakınsamayan) veya doğrusallaştırılması oldukça zor ve karmaşık problemler ile doğrusal modeller için kullanılamayacak kısıtlar içeren problemlerin çözümü genel olarak doğrusal olmayan optimizasyonun konusu olarak düşünülebilir.

Doğrusal modellerdeki parametre tahmini gibi optimizasyon teknikleri de belirli bir parametre kümesini $x = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$ optimal olarak bulan yöntemleri ifade etmektedir (Gill ve diğ., 1981). En basit anlamda optimizasyon belirli kısıtlar altında amaç fonksiyonu maksimize veya minimize parametre kümesinin elde edilmesidir. Daha genel bir formülasyon gerekirse, n parametrelili optimizasyon amaç fonksiyonu,

$$f(x_i), i=1,2,\dots,n \quad (3.11)$$

olmak üzere

$$a \leq G_i(x) \leq b \quad (3.12)$$

şeklinde kısıtlar ya da sınır değerleri ile tanımlanabilir. Amaç fonksiyonu ise genel haliyle;

$$\min f(x_i), i=1,2,\dots,n \quad (3.13)$$

şeklinde verilir (MathWorks, 1996). Burada amaç fonksiyonu skaler bir fonksiyon olup, bu skaler fonksiyonu minimize eden x_i parametre kümesi optimal çözüm kümesi olarak adlandırılır (Liebelt, 1967), (Gill ve diğ., 1981).

Gerek doğrusal gerek doğrusal olmayan amaç fonksiyonlarının optimizasyonunda parametre değerleri değiştirilerek önceki değerlerle karşılaştırılır. Bir sonraki parametre değerlerinin nasıl seçileceği, kullanılan yöntemlere bağlı olarak değişmekle birlikte temel olarak amaç fonksiyon değerinin parametre değerlerine bağlı olarak nasıl değişeceğini belirleyen diferansiyel bilgisi (1 ve 2 nci derece kısmi türevler) ile gerçekleşir. Bu anlamda bir sonraki için parametre seçiminde birinci

derece veya ikinci derece türevleri içeren iki tür geliştirilen parametre güncelleme bulunmaktadır:

- Gradyan (Gradient) Kullanan Yöntemler
- Hessian Kullanan Yöntemler

(Gill ve diğ., 1981). Gradyan kullanan yöntemlerde fonksiyonun eğimi dikkate alınır. Fonksiyonun eğimi bulmada en yaygın yöntem “en dik iniş (steepest descent) olarak bilinen fonksiyonun birinci türevi $(-\nabla f(x))$ ile elde edilir. İkinci derece türev kullanan yöntemlerde ise fonksiyonun değişiminin belirlenmesi için Hessian kullanılır. Bu yöntemlere genel olarak “Newton Yöntemleri” adı verilir (Apaydın, 1996). Buna göre, her bir iterasyonda fonksiyonun eğiminin belirlenmesi kuadratik bir denklem sistemiyle gerçekleştirilir:

$$\min \frac{1}{2} x^T H x + c^T x + b \quad (3.14)$$

Burada H pozitif tanımlı hessian matrisi olup, b ve c sabit vektörlerdir (MathWorks, 1996). (3.14) eşitliğinin optimal çözümü x^* ’in kısmi türevlerinin sıfır olmasıyla elde edilir. x^* optimal çözüm olmak üzere bu eşitlik;

$$\nabla f(x^*) = H x^* + c = 0 \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. x^* optimal çözüm ise (15) kullanılarak

$$x^* = -H^{-1}c \quad (3.16)$$

bulunur (Apaydın, 1996). Özellikle Hessian nümerik olarak hesaplanmaktadır. Her iterasyonda bu işlemin tekrarlanması oldukça fazla iterasyon ve zaman yükü getirmektedir. Hessian’ın daha kısa sürede hesaplanması ve etkin çözüme daha kısa sürede ulaşılması için Hessian güncellenmesi ile ilgili çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Gill ve diğ., 1981). Hessian’ı her iterasyon yerine “Hessian güncellemesi” şeklinde özel bir yöntemle hesaplayan yöntemlere “Quasi-Newton Yöntemler” adı verilir. Bunlardan en etkini (Broyden, 1970), (Fletcher, 1970), (Goldfarb, 1970) ve (Shanno, 1970) tarafından geliştirilen BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) yöntemidir.

Bu yöntemde Hessian güncellemesi;

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (3.17)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (3.18)$$

$$q_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) \quad (3.19)$$

şeklinde gerçekleşir (Apaydın, 1996). Hessian güncellemesi tamamlandıktan sonra yeni parametreler,

$$x_{k+1} = x_k + d \quad (3.20)$$

ile bulunur (MathWorks, 1996), (Gill ve diğ., 1981). Burada d ,

$$d = -H_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (3.21)$$

ile verilir. BFGS yöntemi yine Hessian'ın pratik olarak elde edilmesi için geliştirilen Davidon (1959) ve Fletcher ve Powell (1963) yönteminden hareketle geliştirilmiştir. Ancak DFP (Davidon-Fletcher-Powell) yöntemi hala BFGS'ye alternatif olarak kullanılmaktadır (MathWorks, 1992), (MathWorks, 1996).

3.4. Tümel (Global) Optimizasyon ve Hüristik Yöntemler

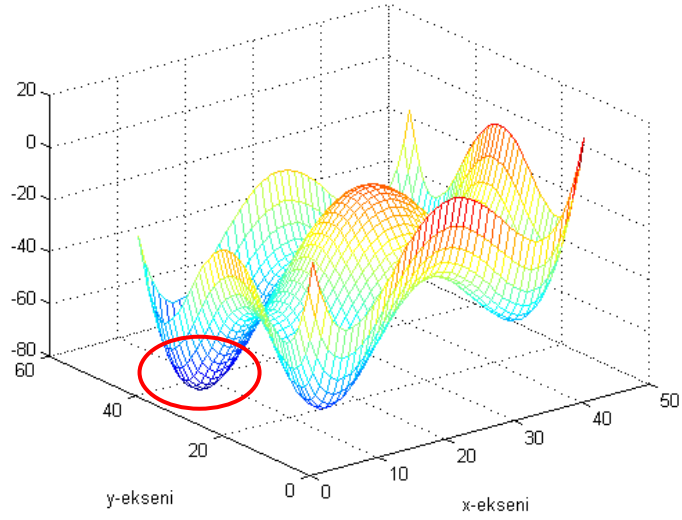
Optimizasyon bölümünün girişinde çeşitli kaynaklarda optimizasyon problemlerinin büyük, orta ve küçük ölçekli olarak ayrıldığı belirtilmişti (Gill ve diğ., 1981), (Mathworks, 1992), (Mathworks, 1996). Hangi ölçekte olursa olsun, parametre sayısından bağımsız olarak birçok fonksiyon birden fazla yerel ve bir adet global minimuma sahip olduğu bilinmektedir. Global ve yerel minimum kavramlarının iki parametrelili bir fonksiyonun değerleri ile açıklanması yerinde olacaktır. Çok sayıda yerel minimumu olan iki parametrelili

$$f(x, y) = 0.5(x^4 - 16x^2 + 5x) + 0.5(y^4 - 16y^2 + 5y) \quad (3.22)$$

fonksiyonunu ele alalım. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 8’de verilmektedir. Şekil 8’de görüleceği üzere fonksiyon çok sayıda yerel minimum içermektedir. Gerçekte bulunması gereken global minimum değer (Şekil 3.1’de kırmızı elips içinde), bu fonksiyonun klasik optimizasyon yöntemleriyle çözülmeye çalışılması durumunda bulunamamaktadır. Klasik yöntemler seçilen başlangıç değerlerine göre farklı yerel minimum noktalarını minimum olarak elde etmektedir. “Doğrusal Olmayan Modellerde Parametre Tahmini” ve “Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modellerin Optimizasyonu” bölümlerinde yer alan gerek EKKY gerek optimizasyon yöntemleri global minimumu belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bunun temel nedeni, başlangıç değerlerine bağlı olarak yöntem algoritmalarının yerel minimumu elde etmesi ve tümel minimumu aramak için gerekli olan algoritmalarından yoksun olmalarıdır. Tümel optimizasyonda başarısız olan bu tür klasik parametre tahmin ve optimizasyon yöntemlerine örnek olarak;

- EKKY
- EKKY Kullanan Optimizasyon Yöntemleri (Levenberg-Marquardt, Gauss-Newton)
- Nelder-Mead Simplex Arama (Nelder ve Mead, 1965)
- Newton Yöntemleri
- Quasi-Newton Yöntemler (Davidon-Fletcher-Powell)
- Quasi-Newton Yöntemler (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) verilebilir.

Tümel ve yerel minimum ilişkisini gösteren ve bir çok optimizasyon yönteminin testinde de sık sık kullanılan diğer bir fonksiyon ise (Dixon ve Szego, 1978)’de verilen altı hörgüçlü deve fonksiyonudur. Altı-hörgüçlü deve fonksiyonu ismini 6 adet yerel minimuma sahip olmasından almıştır. Bu altı yerel minimumdan iki tanesi global minimumdur. Altı hörgüçlü deve fonksiyonunun grafiği Şekil 3.2’de gösterilmekte olup,



Şekil 3.1: Çok sayıda yerel minimumu olan bir fonksiyon (fonksiyonun minimumu kırmızı elips ile gösterilmiştir)

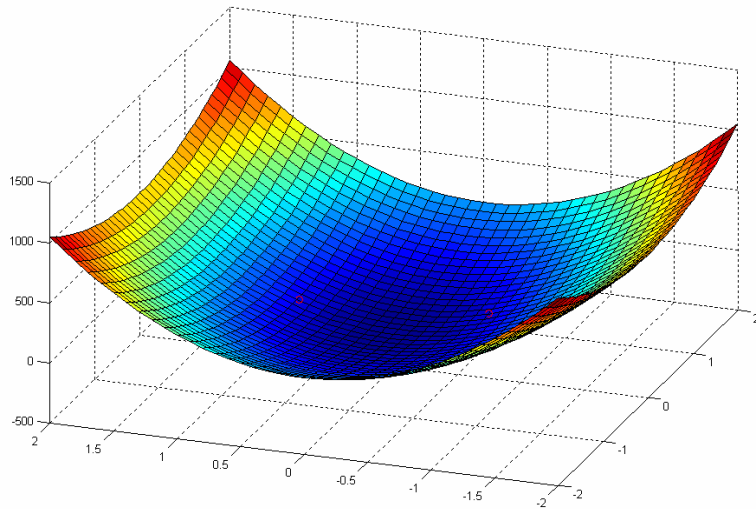
$$f(x_1, x_2) = (4 - 2.1 x_1^2 + \frac{1}{3} x_1^4) x_1^2 + x_1 x_2^2 + (-4 + 4x_2^2) x_2^2 \quad (3.23)$$

$$-3 \leq x_1 \leq 3, \quad -2 \leq x_2 \leq 2$$

şeklinde tanımlanmıştır (Dixon ve Szego, 1978). Fonksiyonun iki adet tümel minimumu olup, tümel minimumdaki parametre değerleri

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0898 \\ 0.7126 \end{bmatrix} \text{ ve } \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0898 \\ -0.7126 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

olarak bulunur.

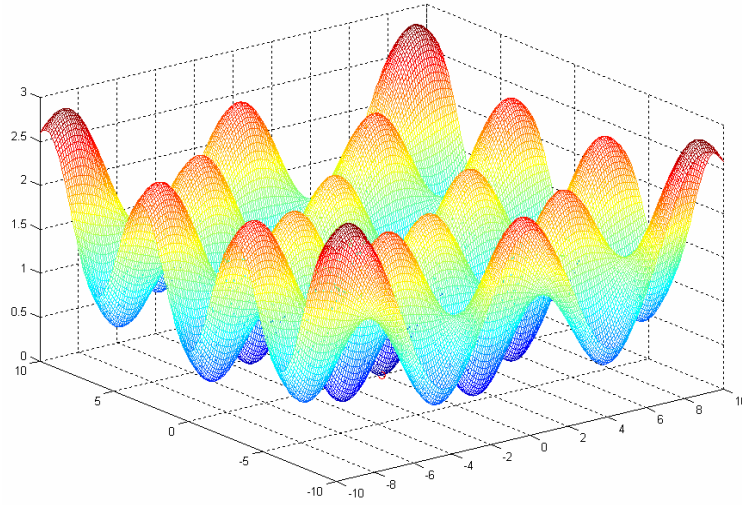


Şekil 3.2: Altı-hörgüçlü deve fonksiyonu

Fonksiyonun tümel minimumdaki değeri ise

$$f(x_1, x_2) = -1.0316 \quad (3.25)$$

Şeklinde hesaplanabilir. Bir başka örnek ise (Van Iwaarden, 1996)'de verilen Griewangk fonksiyonudur. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 3.3' de verilmektedir.



Şekil 3.3: Griewangk fonksiyonu

İki değişkenli Griewangk fonksiyonu,

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + \frac{1}{200} x_2^2 - \cos(x_1) \cos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} x_2\right) + 1.0 \quad (3.26)$$

$$-10 \leq x_1 \leq 10, \quad -10 \leq x_2 \leq 10$$

şeklinde tanımlanmıştır (Van Iwaarden, 1996). Fonksiyonun bir adet tümel minimumu olup, tümel minimumdaki parametre değerleri;

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

olarak bulunur. Fonksiyonun tümel minimumdaki değeri ise

$$f(x_1, x_2) = 0.0 \quad (3.28)$$

şeklinde hesaplanabilir. Yerel minimumu olmamakla birlikte özellikle optimizasyon yöntemlerini zorlayan ve Farklı optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini araştırmaya yarayan diğer bir fonksiyon ise (Weisstein, 2005) ve (Mathworks, 1996)'da verilen Rosenbrock fonksiyonudur. Muz fonksiyonu olarak da bilinen Rosenbrock fonksiyonu,

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (3.29)$$

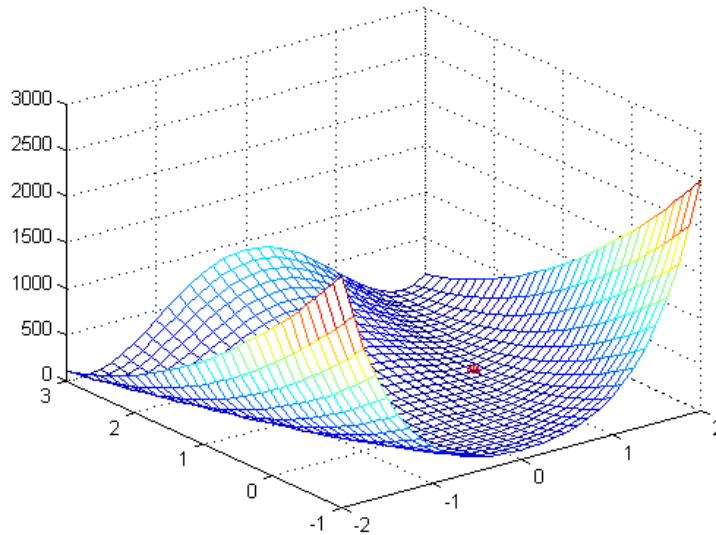
şeklinde tanımlanmıştır. Fonksiyonun bir adet yerel minimumu olup, yerel minimumdaki parametre değerleri

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

olarak bulunur. Fonksiyonun minimumdaki değeri ise

$$f(x_1, x_2) = 0.0 \quad (3.31)$$

şeklinde hesaplanabilir. Rosenbrock fonksiyonun grafiği Şekil 3.4'de verilmektedir.



Şekil 3.4: Rosenbrock (banana) fonksiyonu (fonksiyonun minimumu $x=[1,1]$ 'de $f(x)=0$ şeklinde olup, şekilde kırmızı nokta ile gösterilmiştir)

Daha önce verilen optimizasyon yöntemlerinin tümel optimizasyondaki yetersizliklerinin gidermek amacıyla hüristik yöntemler geliştirilmiş olup, bu

yöntemler diğer yöntemlerin aksine yerel minimumda kaçabilmektedir. Genel olarak birden çok yerel minimuma sahip fonksiyonların tümel optimizasyonu için kullanılan yöntemlere örnek olarak;

- Benzetimli Yaklaşma (Simulated Annealing)
- Rasgele Amaç Değeri (Random Cost)
- Genetik Algoritmalar

verilebilir. Çalışma kapsamında Benzetimli Yaklaşma yöntemi kullanıldığından sonraki bölümde Benzetimli Yaklaşma yöntemi üzerinde durulacaktır. Diğer yöntemlerden Rasgele Amaç Değeri (Berg, 1993) ve (Murray ve diğ., 1996)'da, Genetik Algoritmaları ise (Goldberg, 1988)'de bulunabilir. Global minimumum elde edilmesi ve yerel minimumla ilişkisi ile ilgili yöntemler çok sayıda kaynaktan bulunabilir (Basu ve Frazer, 1990), (Berg, 1993), (Mathworks, 1992), (Mathworks, 1996), (Kirkpatrick ve diğ., 1983), (Rothman, 1985).

3.5. Benzetimli Yaklaşma (Simulated Annealing)

Bu yöntem tümel minimumu bulmak için kullandığı yöntemin benzerliği nedeniyle adını metalürjideki tavlamadan almaktadır. Metalürjideki tavlama, metallerin yüksek derecede ısıtılması ve daha sonra kontrollü olarak soğutularak metaldeki kristal sayısının artırılması ve kırılkanlıklarının giderilmesi anlamına gelmektedir. Yüksek ısı atomların ilk pozisyonlarının dışına çıkmalarını ve yüksek enerji seviyesinde dolaşmalarını sağlamaktadır. Daha sonraki yavaş soğutma işlemi ise atomların ilk bulunduklarından da daha düşük iç enerji seviyesine ulaşmalarına olanak vermektedir. Diğer bir ifade ile amaç metalleri güçlendirmek için metal içerisindeki atomların daha düşük iç enerji seviyesine getirilmesidir. Her bir enerji seviyesi bir “enerji durumu” olarak adlandırılır. Isıtma sürecinde atomlar farklı enerji seviyelerinde dolaşmaktadır. Hatta daha yüksek enerji seviyesine bile çıkabilmektedir. Soğutma işlemi sırasında ise atomların hareketleri nispeten kısıtlanmakta daha düşük enerji seviyeleri geçebilmelerine rağmen, daha yüksek enerji seviyelerine geçişleri güçleşmektedir (Kirkpatrick ve diğ., 1983)

Bir optimizasyon problemine uyarlandığında enerji seviyesi amaç fonksiyonu E , her bir enerji durumu amaç fonksiyonun parametre kümesi (s), sıcaklık (T) ise

optimizasyon probleminin yeni parametre kümesini seçme ölçütü olarak değerlendirilir. Benzetimli Yaklaşma (BY) ise isminden de anlaşılacağı gibi minimum enerji kristal yapıya dönüşen metalin soğuma ve katılaşma sürecini örnek almış, fonksiyonlara ait global minimumun bulunmasındaki gerekli yöntemi buna göre düzenlemiştir. Aslında BY (Metropolis ve diğ., 1953)'de verilen belirli bir sıcaklıktaki atom kümesinin denge konfigürasyonunu bulmaya yarayan yöntemeye dayanmaktadır. Bu iki yöntem arasındaki benzerlik daha önce dile getirilse de, bir global optimizasyon yöntemi olarak (Kirkpatrick ve diğ., 1983) tarafından önerilmiştir. Bir amaç fonksiyonunun (Metropolis ve diğ., 1953)'de verilen Metropolis-Hasting yöntemiyle simülasyonunun yapılması (fonksiyonun minimize edilmesi) fonksiyonun sabit sıcaklıkta Benzetimli Yaklaşma ile bulunması ile aynıdır. Bu anlamda Metropolis-Hasting yöntemi Benzetimli Yaklaşmanın özel bir halidir.

BY'nın en önemli avantajı yerel minimuma takılmamasıdır. Genel olarak optimizasyon yöntemlerinde amaç fonksiyonunu azaltan parametreler yeni parametreler olarak kabul edilmekteyken, BY'de yerel minimumdan kaçınmak amacıyla kritik sıcaklığa bağlı olarak amaç fonksiyonunun değerini artıran parametreler de yeni parametreler olarak kabul edilebilmektedir. Kullanılan dağılıma bağlı olarak sıcaklık düşürülmektedir. Bu durum amaç fonksiyonunun değerini artıran parametrelerin yeni parametreler olarak seçilmesi olasılığının da bu seçilen dağılıma bağlı olduğu anlamına gelmektedir (Kirkpatrick ve diğ., 1983).

Bir enerji seviyesinden diğerine geçişin kabul edilmesi, optimizasyonda yeni parametre kümesinin kabul edilmesidir. Yeni parametre kümesi ile önceki parametre kümesinin değerlendirilmesi için öncelikle amaç fonksiyonunun iki farklı parametre kümesi için olan farkı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\delta E = E(s_I) - E(s_0) \quad (3.32)$$

Herhangi bir optimizasyon yönteminde yeni değerlerin kabul edilmesinin (26) eşitliğindeki Yeni parametre kümesi s_I 'in kabul edilmesi için Örneğin üstel bir dağılım fonksiyonu için;

$$p = e^{\left(-\frac{\delta E}{T}\right)} \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada T , kritik sıcaklık veya sistem sıcaklığı, δf amaç fonksiyonundaki değişimdir. Kirkpatrick ve diğ. (1983)'e göre yeni bir parametre kümesinin seçilme olasılığı,

$$p = f(\delta f, T) \quad (3.34)$$

ile verilmektedir. BY'nin işleyişindeki diğer bir özellik ise p 'nin her zaman sıfırdan büyük olmasıdır. Diğer bir deyişle (27) eşitliğine göre eğer δE pozitif bile olsa daha kötü bir çözüm (amaç fonksiyonunu değerinin öncekinde daha büyük olması) olsa bile yeni bir parametre kümesi olarak seçilebilmesidir. Dikkati çeken diğer bir konu ise sistem sıcaklık değeri ya da BY'nin amaç fonksiyonundan bağımsız olmasıdır. Sıcaklığın düşürülmesi ise azalma miktarı ile kontrol edilir. Buna göre (3.33) eşitliği;

$$p = e^{\left(\frac{\delta f}{dT}\right)} \quad (3.35)$$

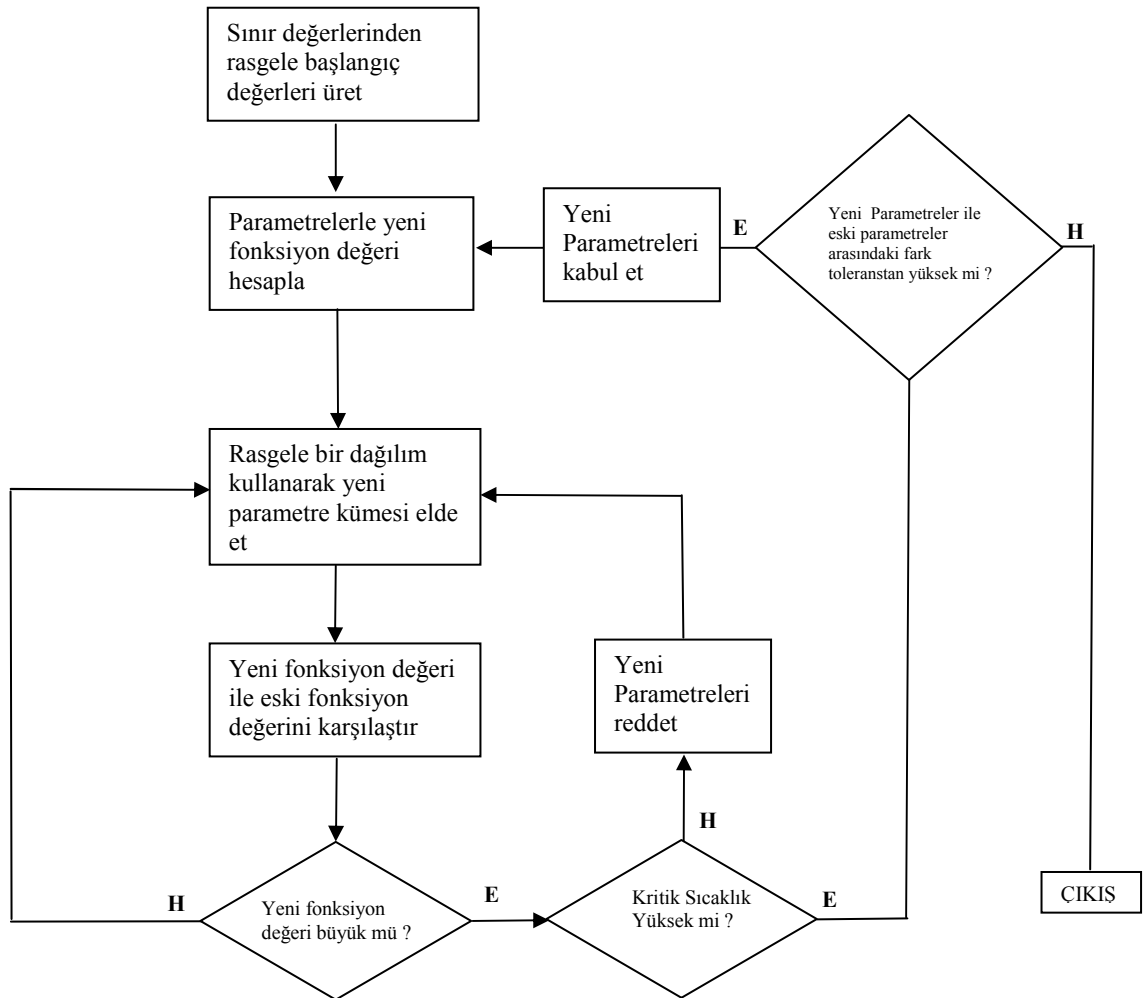
şekline dönüşür. Optimizasyon işlemi belirlenen iterasyon sayısı kadar tekrarlanarak sonuca ulaşılır. Her iterasyon ile birlikte kritik sıcaklık değeri düşürülür. Kritik sıcaklık değerinin düşürülmesi amaç fonksiyonu değerinin arttığı durumda yeni parametrelerin kabul edilme olasılığının azalması anlamına gelir (Kirkpatrick ve diğ., 1983).

Özetle; Benzetimli Yaklaşma, birden fazla minimumlu yöntemlere alternatif olarak hüristik bir global optimizasyon yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Bu anlamda yerel minimumlardan kaçarak global minimumu bulmakta etkin bir yöntemdir. Teorik olarak Benzetimli Yaklaşma sonsuz defa icra edildiğinde global minimumu bulur. Ancak sınırlı olanaklarla bu her zaman geçerli olmayabilir. Benzetimli Yaklaşma yöntemi yerel minimumlardan kaçabilmek için “kritik sıcaklık” adı verilen bir kontrol parametresi ile belirli bir rasgele dağılım kullanılır. Bu parametre her bir döngüde farklıdır. Algoritmanın işleyişi şematik olarak Tablo 3.1’de verilmektedir.

Genel olarak algoritmanın işleyişi aşağıdaki şekildedir:

- Girdi parametrelerin sınır değerleri arasında kalacak rasgele parametre girdi değerleri kullanılarak başlangıç değerleri üretilir ve bu parametrelerle fonksiyon değeri hesaplanır.

- Algoritma yüksek kritik sıcaklık değeri ile belirli bir dağılımdan yeni bir rasgele değerler kümesi üretir.
- Yeni parametreler ile fonksiyonun değeri hesaplanır ve önceki değerle karşılaştırılır.
- Eğer yeni fonksiyon değeri öncekine göre daha küçükse yeni parametre kümesi kabul edilir ve yeni parametre değerleri olarak alınır. Daha büyükse kabul edilip edilmeyecekleri kritik sıcaklık değerine bağlıdır. Eğer kritik sıcaklık yüksek ise yeni değerler kabul edilir, düşükse ret edilir.
- Örneklem kümesi arttıkça kritik sıcaklık değeri düşer.
- Parametre değerleri önceki parametre değerlerinden belirlenen tolerans kadar farklı oluncaya kadar II-V adımları tekrarlanır.



Şekil 3.5: Benzetimli Yaklaşma Algoritması

4. JEODEZİK ÖLÇÜLER VE DEPREM KAYNAK MEKANİZMASI İLİŞKİSİNİN BİR OPTİMİZASYON PROBLEMİ OLARAK ÇÖZÜMÜ

4.1. Direkt ve Ters Modelleme

Fay düzlemi ile ilgili geometri ve kayma parametreleri bilindiğinde bir veya daha fazla depremin yüzey nokta koordinatlarındaki deprem anı etkilerinin elastik yarı-uzay modelleri ile hesaplanması işlemine direkt modelleme (forward modeling) adı verilir. Benzer şekilde deprem öncesi ve sonrası jeodezik ölçüsü bulunan noktaların koordinat değişimleri kullanılarak, bu yüzey değiştirmelerine neden olan fay düzlemlerine ait kayma miktarları (yanal ve düşey atım) ve geometri parametreleri hesaplanabilir. Bu işleme ise ters modelleme (inverse modeling) adı verilmektedir. Temel girdiler olarak koordinat değişimleri kullanılır. Bunun yanı sıra, fay geometrisi ve kayma miktarlarına ilişkin başlangıç değerleri, sismik fay düzlemi çözümleri ve jeolojik yüzey ölçümleri gibi diğer kaynaklardan elde edilir (Aktuğ, 2003). Elastik yarı-uzay modelinin doğrusal olmaması ve Taylor serisi açılımı ile yakınsaması için çok iyi başlangıç değerlerine ihtiyaç duyması nedeniyle, EKK (En Küçük Kareler) gibi doğrusal yöntemlerle, yüzey nokta koordinat değişimlerinden fay düzlemine ilişkin parametrelerinin elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan parametre tahmini (Non-linear Parameter Estimation) ve optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak yine de, fay parametrelerinin tamamını bir seferde elde edilmesi yerine iki grup halinde değerlendirilmesi gerekir. Bunun nedeni, fay parametreleri geometri ve fay düzlemi yer değiştirmesi parametreleri şeklinde iki grup halinde düşünüldüğünde, elastik yarı-uzay modelinde, yer değiştirme parametrelerini içeren kısım doğrusal iken, geometri parametrelerini içeren kısım doğrusal olmamasıdır. Buna göre, geometri parametreleri bilindiğinde problem doğrusal hale gelecektir. Ölçü ve model farklarının karelerinin toplamının minimum olması, EKK ile yapılan işlemlerde doğal olarak uygulanırken, doğrusal olmayan parametre kestiriminde koşul olarak uygulanmaktadır. Ters modelleme tekniğinde izlenen temel işlem adımları aşağıdadır:

- Başlangıç fay düzlemi geometri parametreleri sabit tutularak fay düzlemi yer değiştirme değerlerinin (yanal ve düşey atımlar) doğrusal yöntemle (EKK) elde edilmesi.
- İlk adımda elde edilen fay düzlemi yer değiştirme değerleri sabit alınarak ve geometri parametreleri üzerinde zorlama (constraint) uygulanarak doğrusal olmayan yöntemlerle yeni geometri parametrelerinin elde edilmesi (Doğrusal Olmayan Parametre Tahmini)
- Yeni geometri değerleri sabit alınarak yeni fay düzlemi yer değiştirme değerlerinin EKK ile elde edilmesi.
- Elde edilen yeni fay düzlemi yer değiştirme değerleri sabit alınarak Doğrusal Olmayan Parametre Tahmini ile fay geometrisi parametrelerinin tekrar hesaplanması.
- Son iki adımdaki işlemlere iteratif olarak devam edilmesi.

4.2. Jeodezik Moment ve Moment Büyüklüğü

Başlangıç fay parametre değerleri çözümün sağlığı ve iteratif yöntemin yakınsaması açısından büyük önem taşımaktadır. Ölçü değerleri ile elastik yarı uzay modeli ile hesaplanan değerler her aşamada karşılaştırılmalıdır. Modelleme çalışmalarında elde edilen parametrelerin sismolojik verilerle uyumu ile ilgili olarak yapılabilecek bir kontrol de, sırasıyla (4.1) ve (4.2) eşitliklerinde verilen jeodezik moment (M_0) ve jeodezik moment büyüklüğünün (M_w), sismik fay düzlemi çözümlerindeki sismik moment ve moment büyüklükleri ile karşılaştırılmasıdır (Aktuğ, 2003). Moment ve moment büyüklüğü ilişkisi Aki ve Richards (1980)'de;

$$M_0 = A \sqrt{ss^2 + ds^2} + 30.10^9 \quad (4.1)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 6.0 \quad (4.2)$$

şeklinde verilmekte olup, bu eşitliklerde;

A : Fay Düzleminin alanı,

ss : Fay Düzlemi üzerinde fay uzanımı yönündeki yer değiştirme,

ds : Fay Düzlemi üzerinde fay eğim açısı yönündeki yer değiştirmedir.

4.3. Optimizasyon Başlangıç Değerleri

Birçok optimizasyon ve parametre tahmin yönteminde bilinmeyenlerin başlangıç değerlerinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın bilinmesi gerekmektedir. Başlangıç fay parametrelerinin elde edilmesinde ve/veya elde edilen fay parametrelerinin karşılaştırılmasında kullanılabilecek yöntemler:

- Sismolojik verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen deprem parametreleri ve sismik fay düzlemi çözümleri (hipocenter, epicenter, fay doğrultusu, yanal atım, düşey atım, derinlik, sismik moment, moment büyüklüğü) : Çoğu fay düzlemi çözümlerinde derinlik sabit (Örn. 33 km.) alınmaktadır. Belirtilen parametrelerin elde edilebilmesindeki duyarlık, sismik fay düzlemi çözümlerinden deprem anındaki sismometrelerinin deprem merkezine olan uzaklık ve dağılımlarına bağlı olup, strong-motion verileri büyük önem kazanmaktadır.
- Moment büyüklüğü ile fay parametreleri arasında ilişki kuran istatistiki çalışmalar : Hangi büyüklükteki depremlerin tarihsel olarak hangi geometriye sahip oldukları Vakov (1996) ve Wells ve Coppersmith, (1994) tarafından verilmiştir..
- Jeolojik Yüzey Gözlemleri: Yüzey kırıklarının (surface) ve yüzey atımlarının tespit edilebilmesi ve ölçülmesi fayın doğrultusu ve atım miktarı ile ilgili önemli bilgiler sağlamaktadır (Aktuğ, 2003).
- Paleosismoloji ve paleomanyetizma verileri: Birden fazla büyük depreme maruz kalmış jeodezik noktalarda, koordinatların geçmiş depremlerin etkilerinden arındırılması için bu verilerden yararlanılmaktadır. Fay aynası üzerinde özellikle normal faylanma ile ilgili olarak kayma miktarı ve yaş tayini yapılabilmektedir.

Elastik Yarı Uzak Modelleri, genel olarak herhangi bir noktadaki depremle meydana gelen deprem anı yer değiştirmelerinin (kosismik) hesaplanmasında kullanılmasına rağmen, uygun geometri ve fay düzlemi yer değiştirmeleri tanımlanırsa, deprem öncesi hızların belirlenmesinde de kullanılabilir. Sadece direkt modelleme ve ölçü-

model farkları karşılaştırılarak da fay geometrisi ve fay düzlemi yer değiştirmesi ile ilgili parametreler hesaplanabilir veya iyileştirilebilir. Bu yöntem temel olarak “deneme-yanılma” ya dayanmakla birlikte, model ile elde edilen yer değiştirmeler, ölçülen yer değiştirmeler ile karşılaştırılarak model parametreleri iyileştirilmektedir.

Deprem öncesi ve sonrası GPS veya diğer konum belirleme ölçüleri bulunan noktalarda elde edilecek deprem anı yer değiştirme değerleri ile başka yöntemler kullanılarak da, ölçüsü olmayan noktalardaki deprem anı yer değiştirmeler hesaplanabilir. Kinematik yöntemler olarak adlandırılan bu yöntemler (çeşitli interpolasyon/extrapolasyon teknikleri) özellikle dağılımı sistematik olmayan ve zaman zaman birkaç metreye varan bu etkileri gidermek konusunda yetersiz kalmaktadır. Hareketleri, sonuçları açısından inceleyen kinematik yöntemler ile hareketi doğuran sebepler açısından inceleyen dinamik yöntemler, bu anlamda birbirlerinden ayrılmaktadır. Elastik yarı-uzay yöntemleri, deprem anı etkileri yüzeyde elde edilen değerleri bu yer değiştirmeleri oluşturan fay sistemleri açısından değerlendirmesi açısından dinamik bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

4.4. Amaç Fonksiyonu ve Sınır Değerleri

Farklı jeodezik ölçü gruplarıyla deneysel fay mekanizma modellerinin ilişkilendirilmesi çok parametrelili bir optimizasyon problemi olarak düşünülebilir. Fay geometrisi ve kayma miktarlarına bağlı analitik elastik yer değiştirme eşitlikleri yardımıyla yer yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeler bulunabilir. Kullanılan geometri ve kayma parametreleri belirli sınır değerleri arasında kullanılarak, yapılan gerçek ölçülerle karşılaştırılabilir. Ölçülerin hataları da dikkate alındığında problem;

$$\begin{aligned}
 g &\rightarrow \min(r^T C_l^{-1} r) \\
 M &= f(\varphi_0, \lambda_0, D, w, L, \alpha, \delta, SS, DS, TS, \nu) \\
 r &= T M - f(\varphi_i, \lambda_i) \\
 f(\varphi_i, \lambda_i) &= \ell_j
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 &\varphi_1 \leq \varphi_0 \leq \varphi_2, \\
 &\lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2, \\
 &D_1 \leq D \leq D_2, \\
 &w_1 \leq w \leq w_2, \\
 &L_1 \leq L \leq L_2, \\
 &\alpha_1 \leq \alpha_0 \leq \alpha_2, \\
 &\delta_1 \leq \delta_0 \leq \delta_2 \\
 &SS_1 \leq SS_0 \leq SS_2 \\
 &DS_1 \leq DS_0 \leq DS_2 \\
 &TS_1 \leq TS_0 \leq TS_2
 \end{aligned}
 \quad
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \textbf{Koşullar:} \\ \\ \text{Sınır} \\ \text{değerleri ile} \\ \text{tanımlanmış} \\ \text{parameter} \\ \text{aralıkları} \end{array}$$

şeklinde formüle edilebilir. Burada $\varphi_0, \lambda_0, D, w, L, \alpha, \delta, SS, DS, TS, \nu$ parametreleri sırasıyla fay başlangıç noktasının enlemi ve boylamı, fay düzleminin derinliğini, genişliğini, uzunluğunu, azimutunu, eğim açısını, doğrultu atım bileşeni, eğim atım bileşenini, açılma bileşenini ve yer değiştirmenin meydana geldiği ortamın Poisson oranını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu olarak;

$$WRSS = r^T C_r^{-1} r \quad (4.4)$$

kullanılmıştır. Burada

$WRSS$: Ölçü ve model farklarının ağırlıklı karesel ortalaması

r : Ölçü ve model değerleri farkı ($d_{ölçü} - d_{model}$)

C_r : Ölçülerin kovaryans matrisi

olarak kullanılmıştır. Amaç fonksiyonun bu şekilde kullanılması oldukça yaygın olup, birçok çalışmada kullanılmıştır. (Harris ve Segall, 1987), (Segall ve Mathews, 1997), (Cervelli ve diğ., 2001), (Reilinger ve diğ., 2000).

Analitik elastik yarı-uzay modelleri bulunan model yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılacağı jeodezik ölçü türüne göre üç boyutlu koordinat farkı haline getirilmesi T matrisi ile sağlanmaktadır. Örneğin GPS ağlarındaki 3 boyutlu koordinat değişimleri için T matrisi birim matris iken nivelman ağlarındaki yükseklik değişimleri için;

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

şeklinde ele alınabilir. Trilaterasyon bazları ve GPS bazvektörleri için de benzer şekilde T matrisi düzenlenebilir ve/veya genişletilebilir.

Bu çalışmada yüzey yer değiştirmelerinin ters modellemesinde (yüzey yer değiştirmeler kullanılarak fay geometrisi ve kayma değerlerinin elde edilmesinde) kullanılacak amaç fonksiyonu ikinci bölümde verildiği üzere oldukça karmaşık olup çok fazla sayıda yerel minimum içermektedir. Bu haliyle deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesine başlangıç değerleri iyi bilinmediğinde standart

parametre tahmin ve optimizasyon yöntemleriyle global minimum değeri bulunamamaktadır.

Bu nedenlerden dolayı jeodezik ölçülerden deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi için global minimum ve global minimumdaki parametre değerlerini elde edebilecek gelişkin optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Tümel (global) bir optimizasyon problemi olarak modellenen yüzey yer değiştirmeleri ve deprem kaynak parametreleri ilişkisi problemi olan problemin çözülmesinde Benzetimli Tavlama yöntemi kullanılmıştır.

Tümel optimizasyon yöntemlerinin bir dezavantajı ise bulunan tümel minimumun aslında gerçek tümel minimum değil, ona yakın bir değer olmasıdır. Bu durum gerçek minimumu bulunabilecek amaç fonksiyonlarının gerçek yerine gerçek değere yakın bir değer bulunması şeklinde ortaya çıkar. Gerçek minimumu bulunabilecek fonksiyonlar tek bir yerel minimumu olan ve bu yerel minimumun da tümel minimum olduğu fonksiyonlardır. Doğrusal modeller bunlara örnek verilebilir.

Buradan hareketle yer değiştirme parametreleri aşağıda gösterildiği şekilde doğrusal ve doğrusal olmayan parametreler şeklinde ikiye ayrılmıştır.

$$\begin{array}{ll}
 \left. \begin{array}{l}
 \varphi_1 \leq \varphi_0 \leq \varphi_2, \\
 \lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2, \\
 D_1 \leq D \leq D_2, \\
 w_1 \leq w \leq w_2, \\
 L_1 \leq L \leq L_2, \\
 \alpha_1 \leq \alpha_0 \leq \alpha_2, \\
 \delta_1 \leq \delta_0 \leq \delta_2
 \end{array} \right\} & \text{Sınır değerleri ile tanımlanmış doğrusal olmayan parametreler} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l}
 SS_1 \leq SS_0 \leq SS_2 \\
 DS_1 \leq DS_0 \leq DS_2 \\
 TS_1 \leq TS_0 \leq TS_2
 \end{array} \right\} & \text{Sınır değerleri ile tanımlanmış doğrusal parametreler}
 \end{array}$$

Bu şekilde doğrusal ve doğrusal olmayan şeklinde ayrılan parametrelerin tamamı önce Benzetimli Yaklaşma ile tahmin edilmiş, daha sonra elde edilen geometri parametreleri sabit alınarak, yerel minimumun bulunmasında etkin bir yöntem olan BFGS ile kayma parametreleri iyileştirilmiştir. Bu şekilde hem yerel hem de tümel optimizasyon yöntemlerinin avantajları kullanılmaya çalışılmıştır.

Kullanılan Benzetimli Yaklaşma ve BFGS yöntemlerinin etkinliğini araştırmak amacıyla önceki bölümde verilen Griewangk fonksiyonu farklı başlangıç değerleriyle çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Benzetimli Yaklaşma ve BFGS yöntemlerinin Griewangk fonksiyonunu üzerindeki etkinliği

Yöntem	X_1	X_2	$F(X_1, X_2)$
Benzetimli Yaklaşma	-0.0358226399	0.0024625393	0.0126105138
Benzetimli Yaklaşma + BFGS	-0.0000000098	-0.0000000353	0.0006495238
BFGS (I)	0.0000001586	8.7111001516	1.2660486704
BFGS (II)	3.1104241292	-4.3556719036	1.3382936354
BFGS (III)	6.2209357545	-0.0000008658	1.5807295140

Üçüncü bölümde verildiği üzere bu fonksiyonun gerçek tümel minimum değeri 0 olup, $f(0,0)$ ’da elde edilmektedir. Görüleceği üzere en etkin yöntem Benzetimli Tavlama ve BFGS yöntemlerinin birlikte kullanılmasıdır.

Literatürde, deprem kaynak parametrelerinin iyi bilindiği problemler için klasik optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı örnekler (Harris ve Segall, 1987), (Feigl ve Dupré, 1999), (Segall ve Mathews, 1988), (Segall ve Mathews, 1997), (Wright ve diğ., 2001) olduğu gibi gelişkin optimizasyon yöntemlerinin de kullanıldığı (Bürgmann ve diğ., 2002a, 2002b), (Aoki ve diğ. 1999), (Cervelli ve diğ., 2001) gibi çalışmalar mevcuttur.

5. İZMİT DEPREMİ KAYNAK MEKANİZMASININ MODELLENMESİ

5.1. Giriş

17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen İzmit Depremi, jeodezik nokta koordinatlarında birkaç metreyi geçen yer değiştirmeler meydana getirmiştir (Aktuğ ve diğ., 2000), (Reilinger ve diğ., 2000), (Wright ve diğ., 2001), (Bürgmann ve diğ., 2002b), (Feigl ve diğ., 2002), (Ergintav ve diğ., 2002), (Wang ve diğ. 2003), (Aktuğ, 2003). Depremi meydana geldiği Marmara Bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) üzerinde yakın tarihteki büyük depremler ve sismolojik aktiviteden dolayı farklı yer bilimlerinden bilim adamları tarafından çalışılmaktaydı. Farklı çalışma gruplarının bir araya gelmesiyle depremin hemen ardından başlayan GPS kampanyaları ile deprem öncesi ölçüsü bulunan noktalarda ölçümler gerçekleştirildi (Aktuğ ve diğ., 2000), (Ergintav ve diğ., 2002), (Aktuğ, 2003). Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçülerinin analizi deprem yüzey kırıkları yakınında iki metreye ulaşan yer değiştirmeleri ortaya çıkarmıştır (Reilinger ve diğ., 2000), (Aktuğ, 2003). GPS ölçüleri yanında özellikle mekânsal çözünürlüğü çok yüksek olan inSAR ölçülerinin de dâhil edilmesiyle veri grubu genişletilmiş ve İzmit Depremi kaynak mekanizması için çözüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Deprem öncesi ve sonrası yüzey ölçüleri (GPS, inSAR, Nivelman vb.) ile hesaplanan deprem anı yer değiştirmeler deprem kaynak mekanizmasını oluşturan geometri ve kayma değerlerinin elde edilmesi için modellenmektedir. Her ne kadar yersel yatay kontrol ağları ve ölçüleri bu amaçla çeşitli zamanlarda kullanılmış olsa da (Prescott ve Yu, 1986), (Savage ve Svarc, 1997), (Segall ve Matthews, 1988) 1999 yılında ülkemizde meydana gelen depremlere deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesi için sadece GPS ve inSAR ölçüleri kullanılmıştır (Reilinger ve diğ., 2000), (Ayhan ve diğ., 2001), (Aktuğ, 2003). Söz konusu ölçme sistemlerinin düşey hareketlere duyarlı olduğu değerlendirildiğinde, üç boyutlu yer değiştirmeler ile elde edilecek model parametrelerinin zemin sıvılaşması, erozyon, çökme gibi yerel değişimlerden etkileneceği değerlendirilmektedir. Aliosmanoğlu ve Çelik (2002) özellikle fayın

doğu kesiminde jeodezik altyapı hasarların zemin yapısından oldukça etkilendiğini belirtmektedir. Bu amaçla modellemeler hem iki hem de üçboyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.

5.2. Mevcut Modeller

İzmit Depremi ve yüzey ölçülerinden elde edilen yer değiştirme parametreleri ilk olarak (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilmiştir. Hem inSAR hem de GPS ölçülerinin kullanıldığı bu çalışmada İzmit Depremi deprem anı yer değiştirmeleri iki parçalı bir fay sisteminin yer değiştirmesi olarak modellenmiş, bulunan fay yer değiştirmesi sistemi aynı çalışmada deprem sonrası yer değiştirmelerin modellenmesinde de kullanılmıştır. Ardından (Wright ve diğ., 2001) tarafından yine inSAR ve (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen GPS yer değiştirmelerini kullanarak iki yeni model daha ortaya konmuştur.

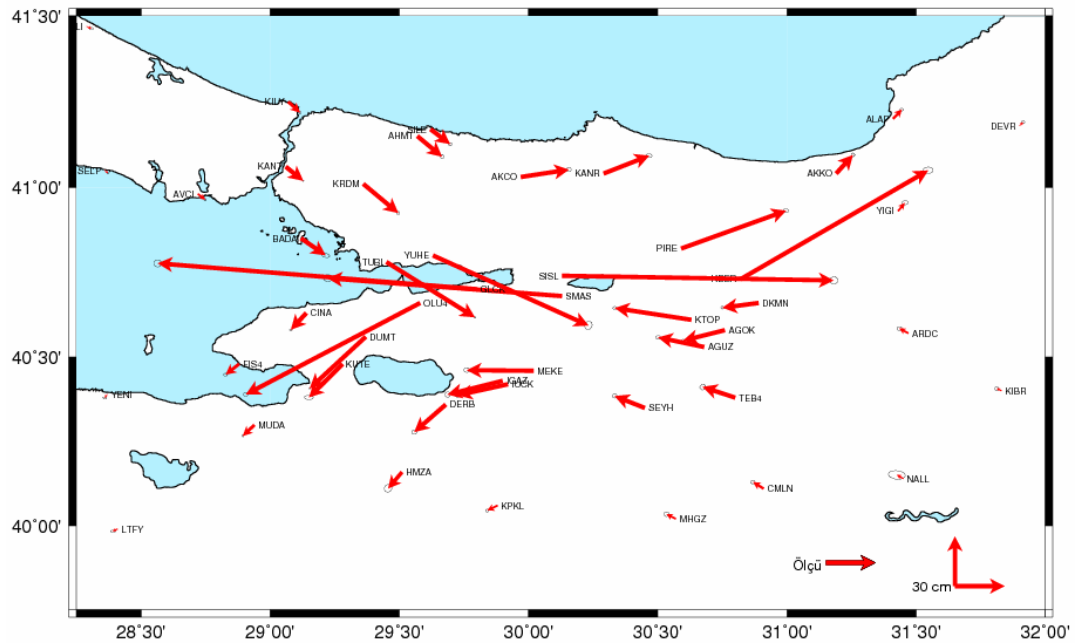
Bu çalışmaları izleyen dönemde (Feigl, K.L. ve diğ., 2002), GPS, ERS, RADARSAT ve SPOT'tan oluşan daha geniş bir veri kümesi ile uygulama yapmış, ancak önceki çalışmalarda verilen yer değiştirme geometrisi iyileştirilmeyerek, fay düzlemi üzerindeki slip dağılımı üzerinde durulmuştur. Fay geometrisi ve kayma değerleri kullanılarak jeodezik nirengi koordinatlarının düzeltilmesi uygulaması ise ülkemizde ilk defa TUTGA ve yatay kontrol ağı noktalarının koordinatları üzerinde (Aktuğ, 2003)'de gerçekleştirilmiştir.

Özetle, fay geometrisi ve kayma değerlerinin birlikte ayrıntılı olarak hesaplanarak yayımlandığı temel iki yayın (Reilinger ve diğ., 2000) ve (Wright ve diğ., 2001) bulunmaktadır. Bu iki yayında ise toplam üç adet farklı model bulunmaktadır. Bu bölümde, önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak elde edilen yeni modeller ve sonuçlar söz konusu iki çalışmada yer alan üç ayrı model ile karşılaştırılarak incelenecektir.

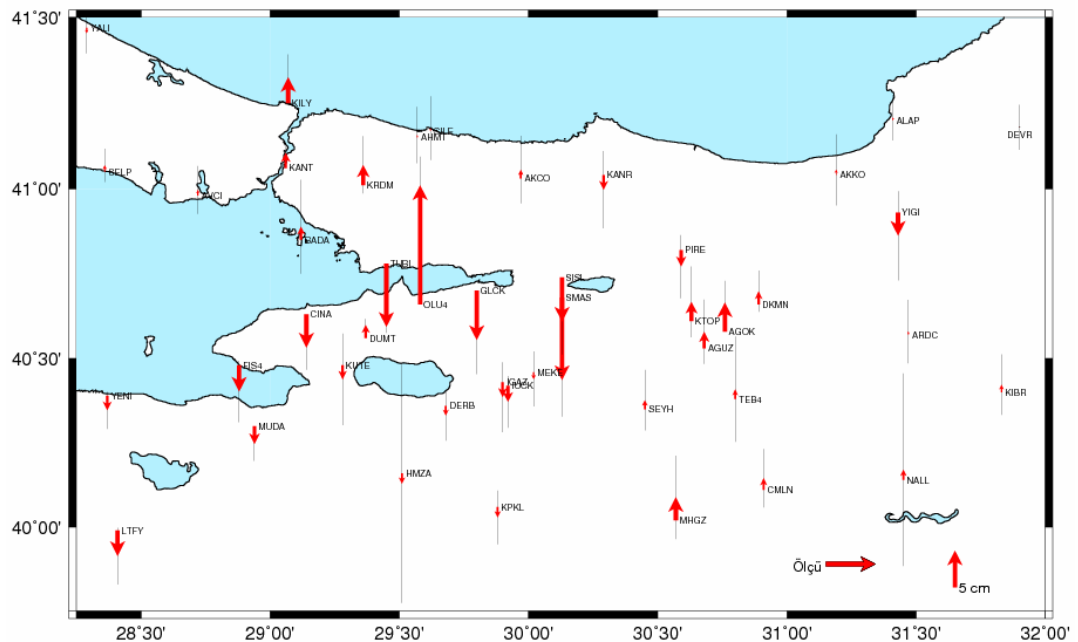
5.2.1. İki Parçalı Model

İzmit Depremi öncesi ve sonrası yapılan GPS ölçüleri ile elde edilen yüzey değiştirme değerleri (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilmiş olup, bu değerler Tablo 5.1'de gösterilmektedir. GPS ölçüleri ile elde edilen yatay yer değiştirmeler ise sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

Gerek Tablo 5.1’de gerekse de Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü üzere, İzmit Depremi 2 m’ye varan yatay, bazı noktalarda 1.5 m’yi aşan düşey yer değiştirmeler meydana getirmiştir.



Şekil 5.1: Deprem öncesi ve sonrasına ait GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay değiştirmeler.



Şekil 5.2: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey değişimler.

Tablo 5.1: İzmit depremi öncesi ve sonrasında yapılan ölçmeler ile elde edilen yer değiştirmeler (Reilinger ve diğ., 2000)

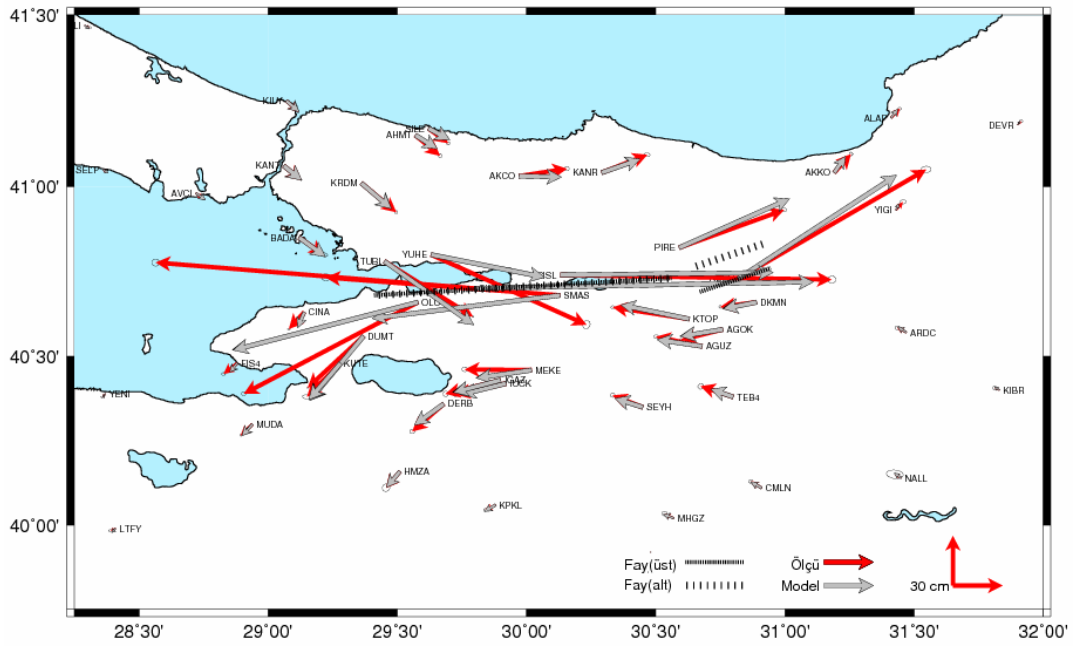
No	İstasyon	λ (°)	ϕ (°)	ΔE (mm)	ΔN (mm)	$\sigma_{\Delta E}$ (mm)	$\sigma_{\Delta N}$ (mm)	σ_{EN}	ΔH (mm)	σ_H (mm)
1	ANKR	32.75	39.88	-7.2	5.7	1.6	1.3	0.006	-0.4	1.6
2	DEVİR	31.90	41.18	21.4	21.7	3.6	3.6	-0.018	0.0	12.5
3	KIBR	31.83	40.40	-28.4	14.3	4.6	4.4	-0.049	10.3	16.8
4	SIVR	31.81	39.56	-21.2	19.8	5.2	2.8	0.048	-5.7	13.4
5	ARDC	31.47	40.57	-54.1	29.3	5.9	4.7	0.052	4.1	17.6
6	NALL	31.45	40.14	-38.6	22.6	20.7	10.5	-0.150	14.0	53.3
7	YIGİ	31.43	40.93	41.6	49.6	7.7	4.8	0.096	-31.5	24.7
8	ALAP	31.41	41.20	52.5	55.6	4.0	3.5	0.043	3.9	12.6
9	AKKO	31.19	41.04	101.3	112.2	4.6	4.5	0.024	7.0	19.6
10	CMLN	30.91	40.11	-64.8	40.0	5.1	4.5	-0.047	16.1	16.2
11	DKMN	30.89	40.66	-217.6	-28.7	3.6	3.5	-0.008	17.6	11.4
12	KDER	30.82	40.73	1129.4	654.6	12.4	8.0	0.053	85.2	35.8
13	TEB4	30.80	40.38	-195.8	64.5	6.9	6.9	0.121	13.3	29.2
14	AGOK	30.76	40.58	-251.0	-62.7	3.7	2.7	0.007	39.4	11.9
15	AGUZ	30.68	40.53	-278.0	57.7	5.5	4.2	0.068	22.4	17.7
16	KTOP	30.63	40.61	-460.9	71.0	4.9	3.9	0.057	26.3	19.6
17	PIRE	30.59	40.82	631.1	227.7	6.6	4.5	0.015	-22.4	17.5
18	MHGZ	30.57	40.02	-56.2	29.6	6.5	5.5	0.025	31.3	23.1
19	SEYH	30.45	40.35	-181.7	71.5	5.3	5.4	0.018	12.2	16.7
20	KANR	30.29	41.04	274.2	107.5	7.5	4.2	0.001	-19.7	21.3
21	SMAS	30.13	40.68	-1409.9	107.6	9.6	8.7	0.026	-111.6	20.3
22	SISL	30.13	40.74	1635.3	-27.9	9.4	8.9	0.007	-60.0	18.2
23	MEKE	30.02	40.46	-402.6	3.6	7.0	5.5	0.021	-9.4	15.1
24	AKCO	29.97	41.03	289.6	44.4	5.3	5.4	-0.015	11.9	18.7
25	IUCK	29.92	40.42	-303.1	-66.1	5.6	5.1	0.026	-22.1	14.3
26	IGAZ	29.90	40.43	-331.3	-82.9	6.4	6.5	0.011	-20.2	19.4
27	KPKL	29.88	40.06	-62.3	-30.2	3.9	3.5	0.034	-14.3	14.8
28	GLCK	29.80	40.70	-1921.1	156.0	9.0	8.9	-0.006	-66.7	18.9
29	DERB	29.68	40.36	-190.3	-166.4	6.0	5.3	0.003	-12.5	14.1
30	YUHE	29.63	40.80	936.3	-421.7	9.2	9.8	0.106	-69.2	65.2
31	SILE	29.62	41.17	119.1	-90.3	4.4	3.6	0.065	3.4	17.7
32	OLU4	29.58	40.66	-1049.4	-551.0	5.5	4.0	-0.029	161.1	15.9
33	AHMT	29.57	41.15	149.1	-124.7	4.4	4.3	0.028	3.2	15.6
34	HMZA	29.51	40.16	-83.1	-98.8	9.0	9.6	0.116	-14.0	65.9
35	TUBİ	29.45	40.78	533.4	-333.2	1.5	1.9	0.045	-86.1	3.1
36	DUMT	29.37	40.56	-337.5	-311.3	1.5	1.8	0.034	17.7	3.4
37	KRDM	29.36	41.01	210.7	-175.5	4.0	4.2	0.031	27.6	15.8
38	KUTE	29.28	40.48	-202.8	-201.8	10.8	5.1	-0.007	-19.0	25.3
39	CINA	29.14	40.63	-93.0	-100.6	3.3	2.3	0.034	-44.7	12.3
40	BADA	29.12	40.85	149.0	-103.5	9.4	5.3	-0.252	17.6	26.0
41	KILY	29.07	41.25	71.3	-65.8	2.8	2.6	0.020	35.3	12.6
42	KANT	29.06	41.06	104.8	-84.4	1.9	1.7	0.028	20.8	3.4
43	MUDA	28.94	40.30	-70.3	-66.8	2.3	2.2	-0.003	-24.1	9.5
44	FIS4	28.88	40.48	-81.9	-64.7	4.8	3.2	0.042	-35.6	17.0
45	AVCI	28.72	40.98	44.0	-34.9	2.9	3.0	-0.091	7.5	13.2
46	LTFY	28.41	39.99	-28.8	-13.3	5.8	2.8	-0.068	-34.8	15.6
47	YENİ	28.37	40.39	-15.4	-22.0	4.5	2.5	-0.214	-19.9	10.3
48	SELP	28.36	41.05	18.6	-17.8	2.5	2.1	0.021	8.6	9.2
49	YALI	28.29	41.47	28.0	-13.8	4.6	2.5	-0.101	-7.4	11.1
50	MERT	27.96	40.96	10.0	-8.9	1.8	1.5	0.032	0.9	3.1
51	MADT	27.58	40.61	-1.7	-7.1	1.8	1.6	0.035	-1.4	3.4

Bu yüzey yer değiştirmeleri ile fay sistemi arasındaki analitik ilişkiler 2. bölümde, yüzey değiştirmelerinden fay sistemi parametrelerinin elde edilme yöntemleri ise 3. ve 4. bölümde açıklanmıştır. Benzer şekilde (Reilinger ve diğ., 2000)'de elde edilen iki segmentli model Tablo 5.2'de verilmektedir. Bu modele göre toplam 120 km'yi aşan ve derinliği 20 km'nin altında iki yer değiştirme düzlemiyle yüzey değiştirmeleri modellenmiş ve sonuçta yer değiştirme olarak çözümlenen deprem kaynak mekanizmasını ifade eden 18 parametre belirlenmiştir.

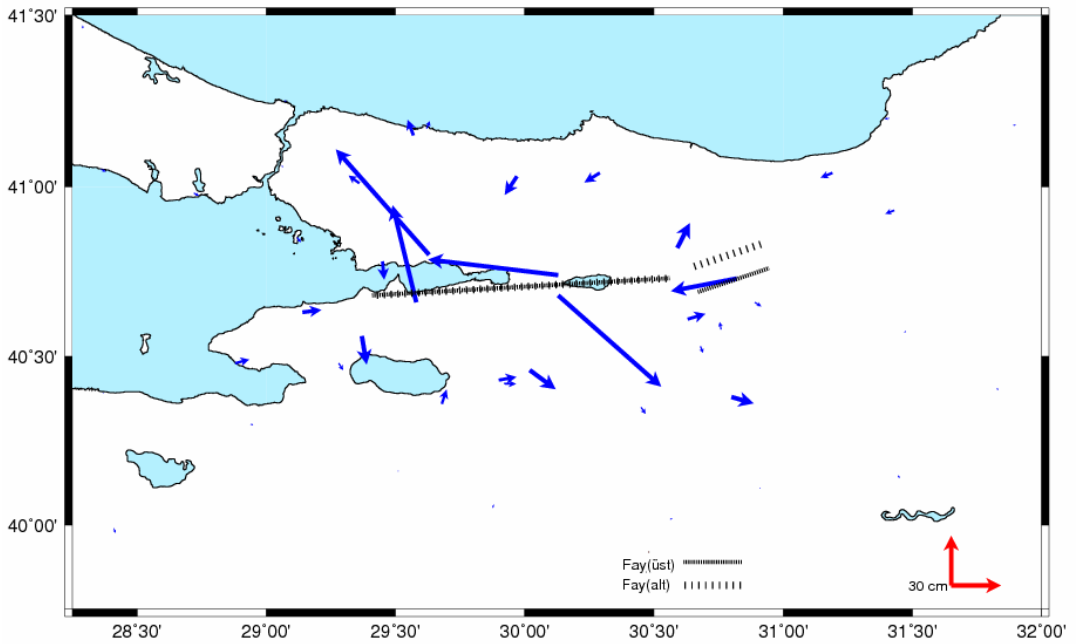
Tablo 5.2: İzmit Depremi Yer değiştirme Model Parametreleri

	Λ_1 ($^\circ$)	Φ_1 ($^\circ$)	A ($^\circ$)	D (km)	δ ($^\circ$)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)
İzmit #)	29.41	40.68	86.29	-0.08	-90.12	97.34	16.03	2.80	0.28
İzmit #2	30.67	40.69	71.36	-0.10	-63.80	24.50	18.74	1.64	0.54

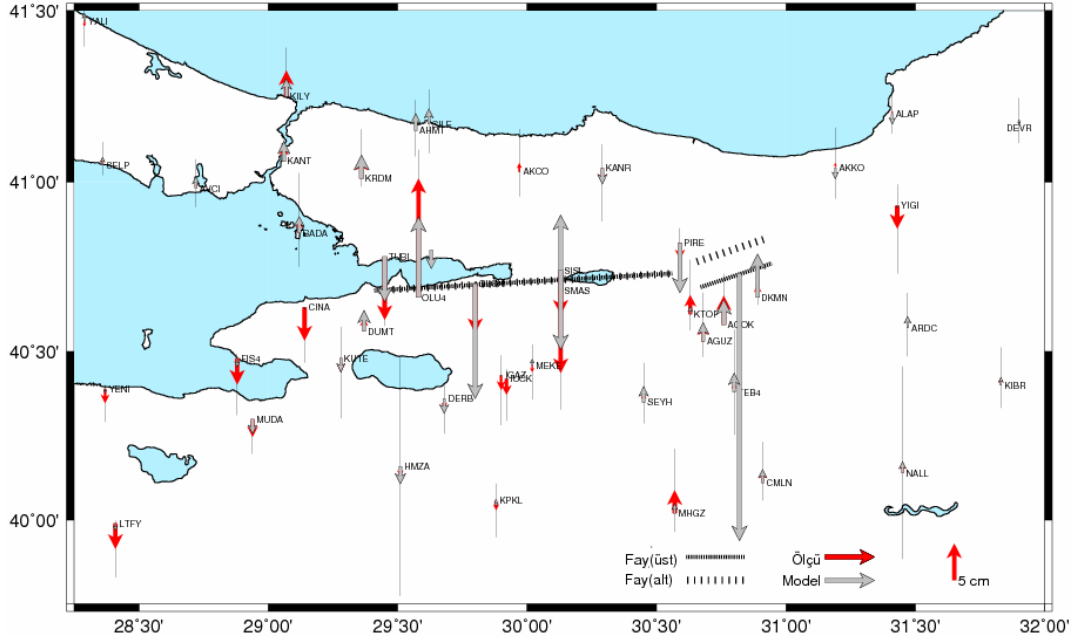
(Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen deprem kaynak mekanizması ile 51 adet GPS noktasındaki yer değiştirmeler direkt model ile hesaplanmış, GPS ölçülerinden elde edilenler ile modelden elde edilen yatay yer değiştirmeler ve farkları sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4.'de gösterilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde özellikle model fay sistemine yakın bölümlerde 50 cm'ye ulaşan farklar gözlenmektedir. Aynı karşılaştırma düşey yer değiştirmeler için de yapılmış, benzer şekilde GPS ölçüleri ve direkt model ile elde edilen düşey yer değiştirmeler ve farkları sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6.'da gösterilmiştir. Düşey yer değiştirmelerdeki farkların dm'ye ulaştığı görülmektedir. Her ne kadar yatay değiştirmelere göre daha küçük görünse de, GPS ölçülerinden elde edilen düşey yer değiştirmelerin birkaç dm seviyesinde olduğu değerlendirildiğinde düşey yer değiştirmelerin modellenmesinin de yetersiz kaldığı söylenebilir. Yerel etkiler ya da fay deformasyon zonu içinde kaldıkları için uyumsuz olabilecek bazı noktaların dikkate alınmaması durumunda (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen modelin diğer GPS ölçüleri ile ne kadar uyumlu olduğu araştırılmıştır. Bu amaçla (4.4) eşitliğinde verilen karesel form yatay, düşey ve üç boyutlu farklar için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Toplam 7 farklı nokta grubu ile yapılan incelemede elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'de verilmektedir.



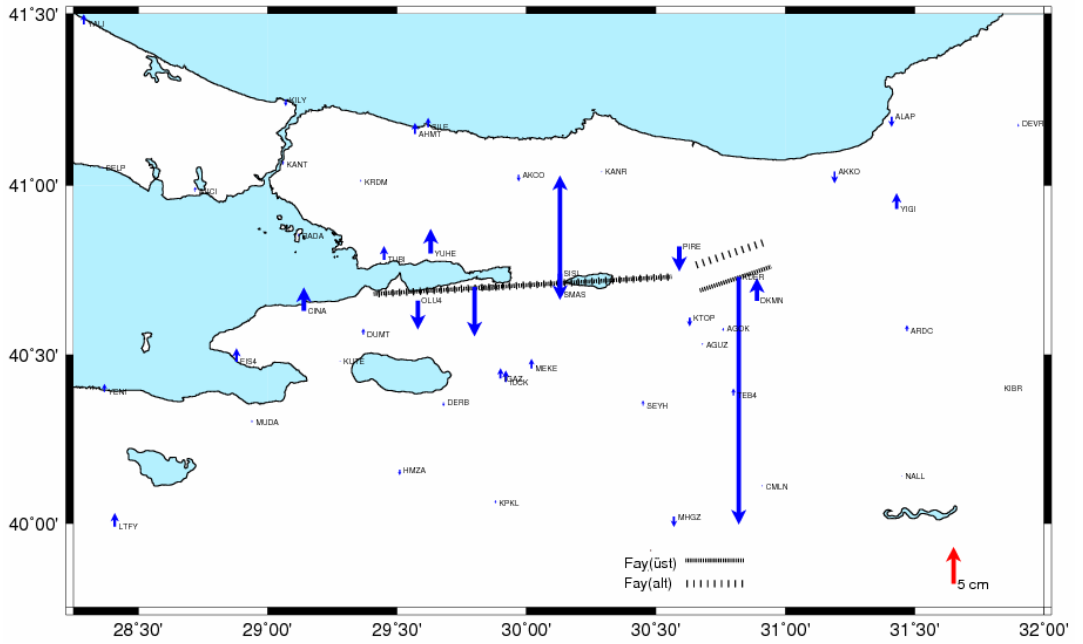
Şekil 5.3: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmeler.



Şekil 5.4: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmelerin farkı (Model-Ölçü farkları) gösterilmekte olup, modele göre fayın ters tarafında kalan ve bu nedenle ~5.5 m yer değiştirme bulunan GLCK noktası çıkarılmıştır).



Şekil 5.5: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeleri.



Şekil 5.6: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmekte olup, sadeleştirilmiş modele göre faya çok yakın olan KDER noktası yaklaşık yarım metre düşey yer değiştirme göstermektedir).

Tablo 5.3: (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen İzmit Depremi model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu inceleme sonuçları

Model	2D WRSS	3D WRSS	1D WRSS
A	4071.28	4080.23	8.95
B	276.93	285.61	8.69
C	248.98	255.57	6.60
D	161.69	168.20	6.51
E	131.05	137.69	6.64
F	102.83	109.47	6.64
G	100.12	103.44	3.32

^A 51 noktanın tamamı ile

^B GLCK noktası hariç

^C GLCK ve SMAS noktaları hariç

^D GLCK, SMAS ve OLU4 noktaları hariç

^E GLCK, SMAS, OLU4 ve YUHE noktaları hariç

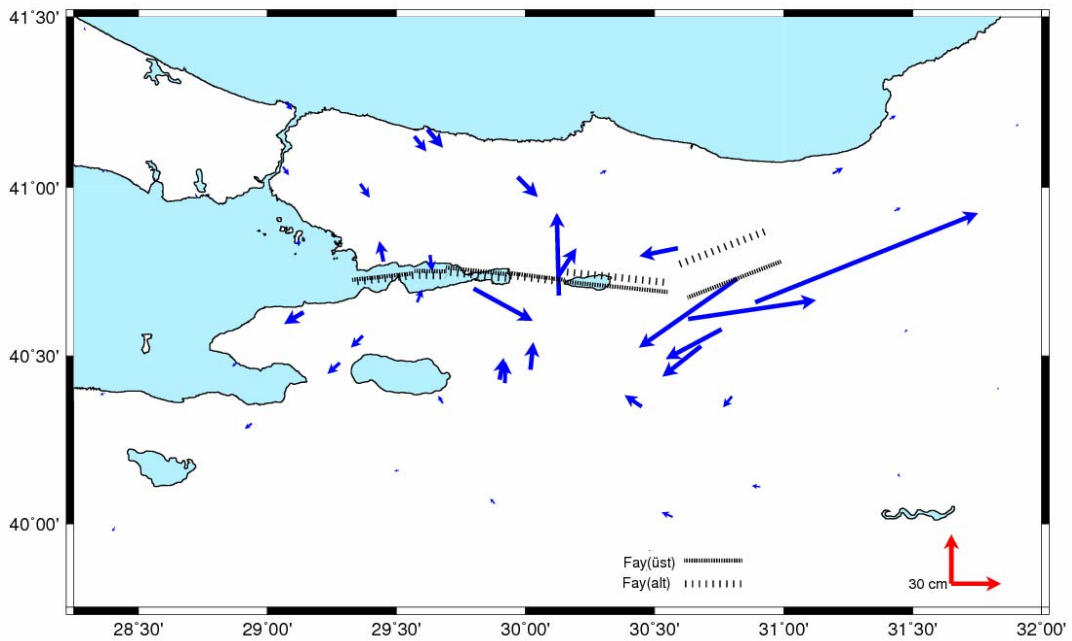
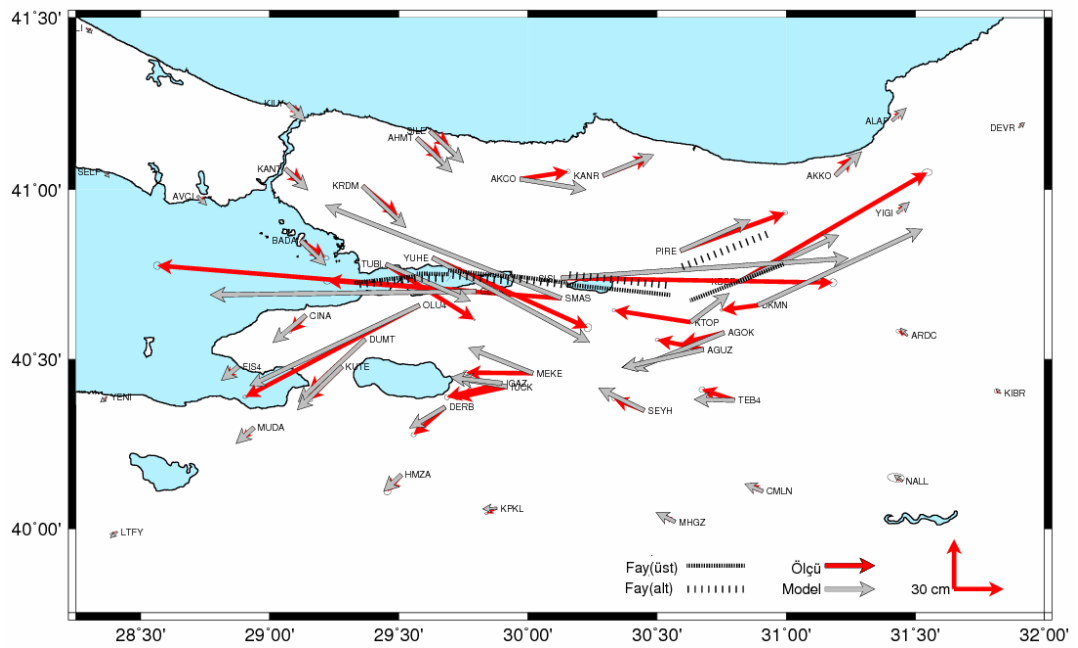
^F GLCK, SMAS, OLU4, YUHE ve SISL noktaları hariç

^G GLCK, SMAS, OLU4, YUHE, SISL ve KDER noktaları hariç

Tablo 5.3'ten görüleceği üzere GLCK noktasının çıkarılması karesel formu çarpıcı şekilde azaltmaktadır. Bunun nedeni 97 km lik hattın tek bir yer değiştirme düzlemiyle modellenmiş olması ve GLCK noktasının modele göre ters tarafta kalmış olmasıdır. Buna karşın fay deformasyon zonu içerisinde kalan 5 nokta daha hesaptan çıkarılmış olmasına rağmen karesel formun daha da iyileşmediği görülmektedir. Bu durum, (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen iki parçalı kaynak mekanizması modelinin bölgenin genelindeki deprem anı yer değiştirmeleri yeterince temsil edemediği şeklinde yorumlanabilir.

5.2.2. Altı Parçalı Model

İzmit Depreminin kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla diğer bir çalışma ise (Wright ve diğ., 2001)'de yapılmıştır. Wang ve diğ. (2003) katmanlı model çalışmasında bu modeli dikkate almaktadır. Wright ve diğ. (2001) tarafından hesaplanan iki ayrı 6 parçalı model ile elde edilen yatay yer değiştirmeler ile (Reilinger ve diğ., 2000)'de GPS ölçülerinden elde edilen yüzey yer değiştirmeleri Şekil 5.7'de, Wright ve diğ. (2001)'de verilen ilk model ile ölçülerden elde edilen yatay yer değiştirmeler arasındaki farklar Şekil 5.8'de verilmektedir.

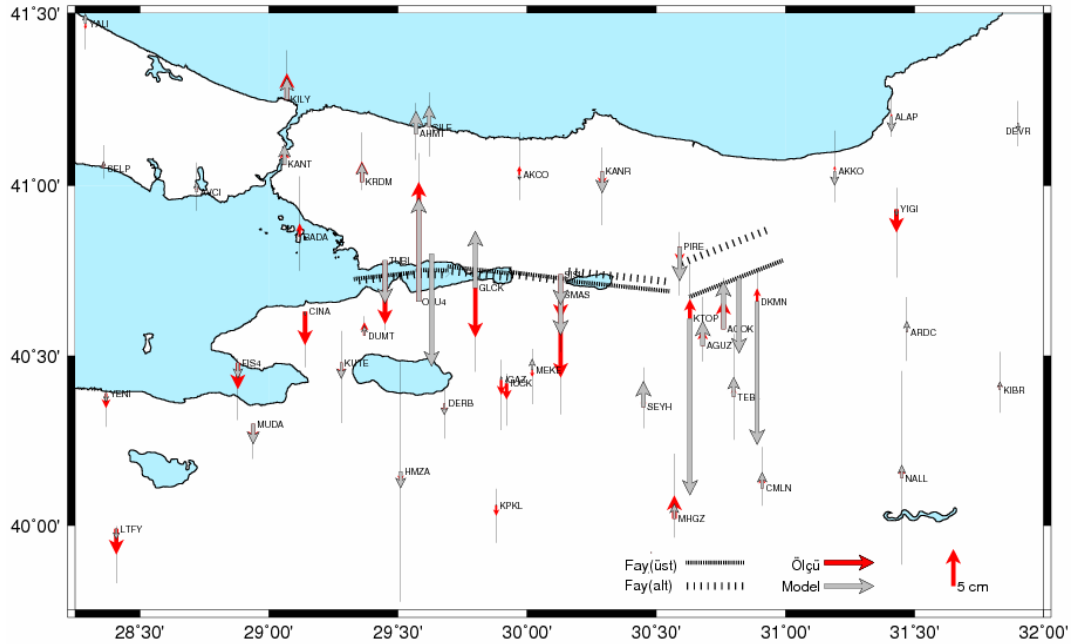


Altı parçalı fay geometrisi Şekil 5.7’ de gösterilmekle birlikte, segmentlerin geometri ve kayma değerleri Tablo 5.4’de verilmektedir.

Tablo 5.4: (Wright ve diğ., 2001)’de verilen 6 parçalı İzmit Deprem kaynak mekanizması (I)

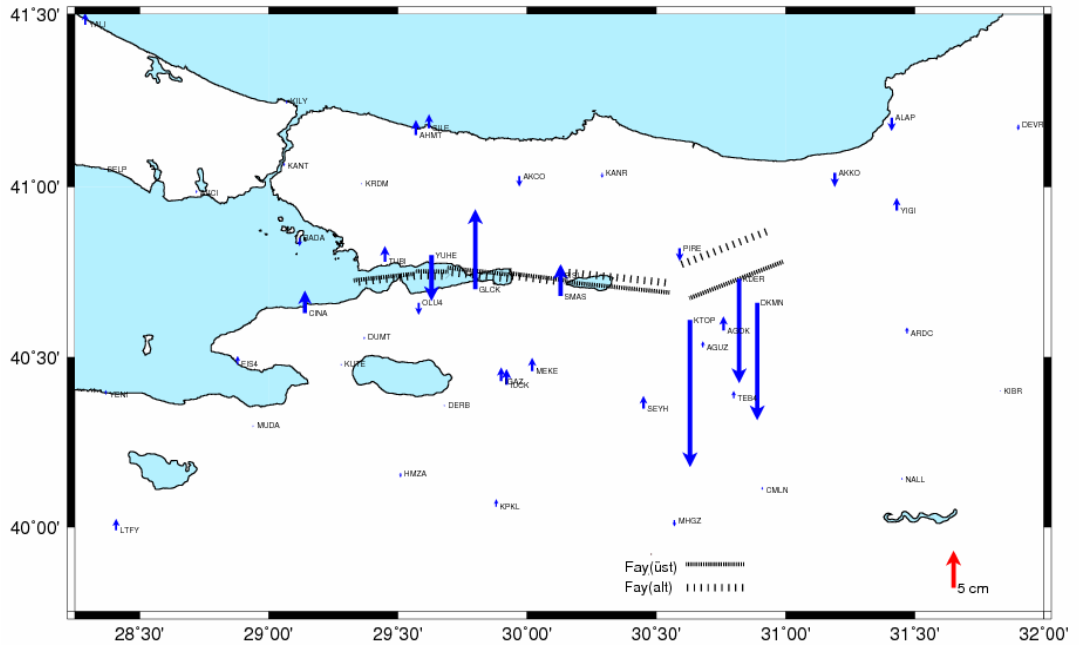
#	Λ_1 ($^\circ$)	Φ_1 ($^\circ$)	A ($^\circ$)	D (km)	Δ ($^\circ$)	L (km)	S (m)	r ($^\circ$)
1	29.450	40.730	84.000	20.000	88.000	20.100	1.700	174.000
2	29.630	40.744	91.000	20.000	86.000	10.500	2.500	171.000
3	29.812	40.739	96.000	20.000	86.000	20.300	4.900	178.000
4	30.039	40.726	277.000	20.000	88.000	18.200	4.600	-178.000
5	30.347	40.708	276.000	20.000	81.000	34.200	2.100	-164.000
6	30.813	40.728	249.000	20.000	61.000	32.800	1.700	-168.000

Aynı modelden elde edilen düşey yer değiştirmeler ile GPS ölçüleri ile elde edilen düşey yer değiştirmeler Şekil 5.9’da, farkları ise Şekil 5.10’da sunulmaktadır.



Şekil 5.9: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile (Wright ve diğ., 2001)’de verilen (a) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler

Bu modele göre toplam 130 km’yi aşan ve derinliği 20 km olarak tanımlanmış 6 adet fay düzlemi ile yüzey değiştirmeleri modellenmiş ve sonuçta yer değiştirme olarak çözümlenen deprem kaynak mekanizmasını ifade eden 48 parametre belirlenmiştir. Deprem kaynak mekanizmasının belirlenmesinde (Reilinger ve diğ., 2000)’de verilen GPS ölçüleri ile iki ayrı radar görüntü çiftinden elde edilen inSAR verileri kullanılmıştır.

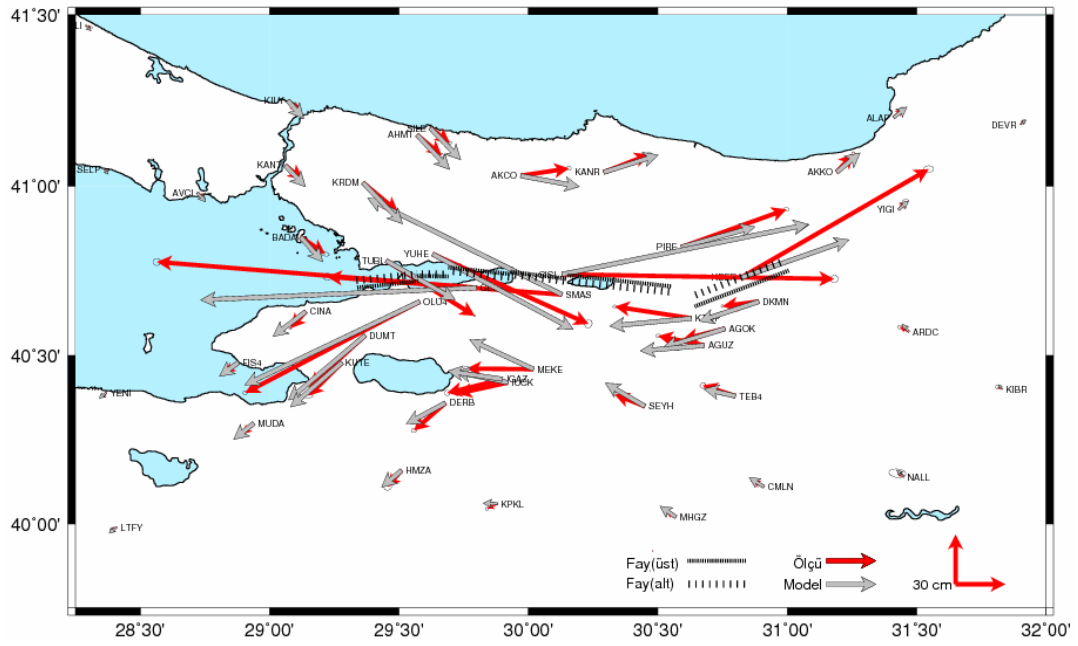


Şekil 5.10: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile (Wright ve diğ., 2001)'de verilen (a) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)

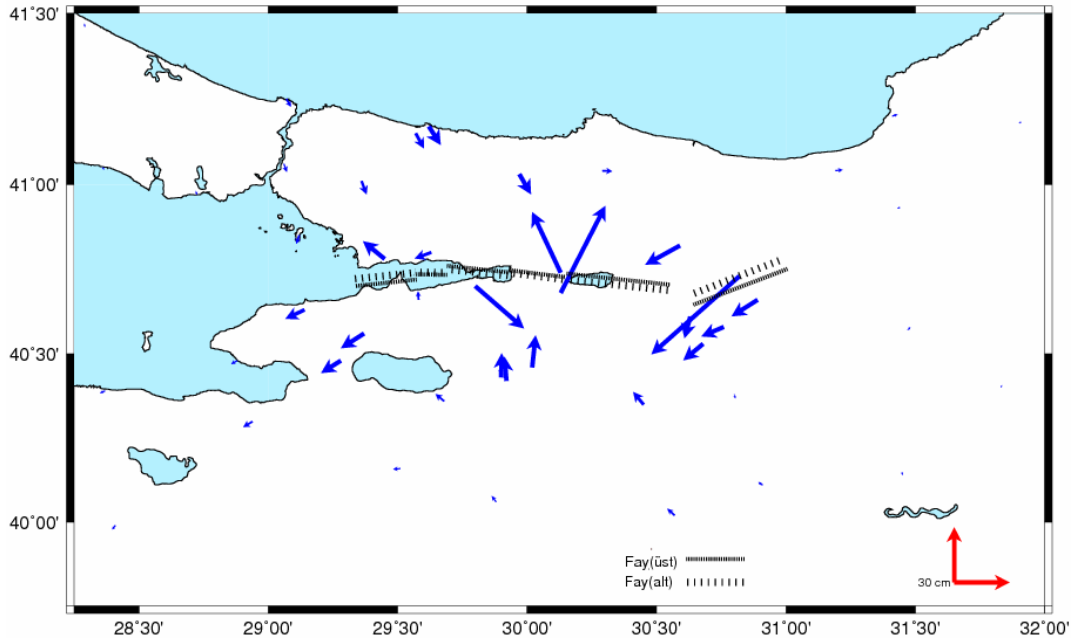
Benzer şekilde elde edilen fakat bu kez farklı uydu radar görüntü çiftlerinin kullanıldığı diğer bir model yine (Wright ve diğ., 2001)'de verilmektedir. Bu model de 6 parçalı olup, bulunan geometri ve kayma değerleri Tablo 5.5'de, GPS ve model ile elde edilen yatay değiştirmeler Şekil 5.11'de, model-GPS yatay yer değiştirme farkları Şekil 5.12'de, aynı şekilde düşey yer değiştirmeler ile farkları ise sırasıyla ile Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmektedir.

Tablo 5.5: (Wright ve diğ., 2001)'de verilen 6 parçalı İzmit Deprem kaynak mekanizması (II)

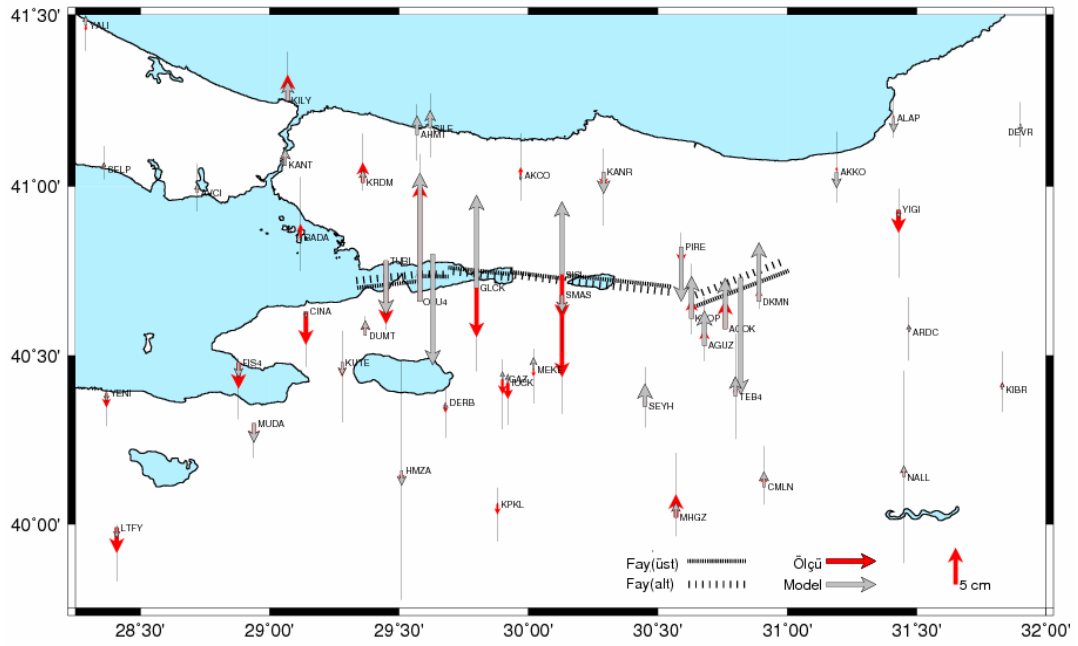
#	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	S (m)	r (°)
1	29.450	40.730	264.000	21.600	84.000	20.100	1.600	-174.000
2	29.630	40.744	271.000	21.600	88.000	10.500	2.300	-167.000
3	29.812	40.739	96.000	21.600	87.000	20.300	4.700	178.000
4	30.039	40.726	97.000	21.600	88.000	18.200	4.400	177.000
5	30.347	40.708	96.000	21.600	85.000	34.200	1.800	162.000
6	30.813	40.728	249.000	21.600	81.000	32.800	1.400	-166.000



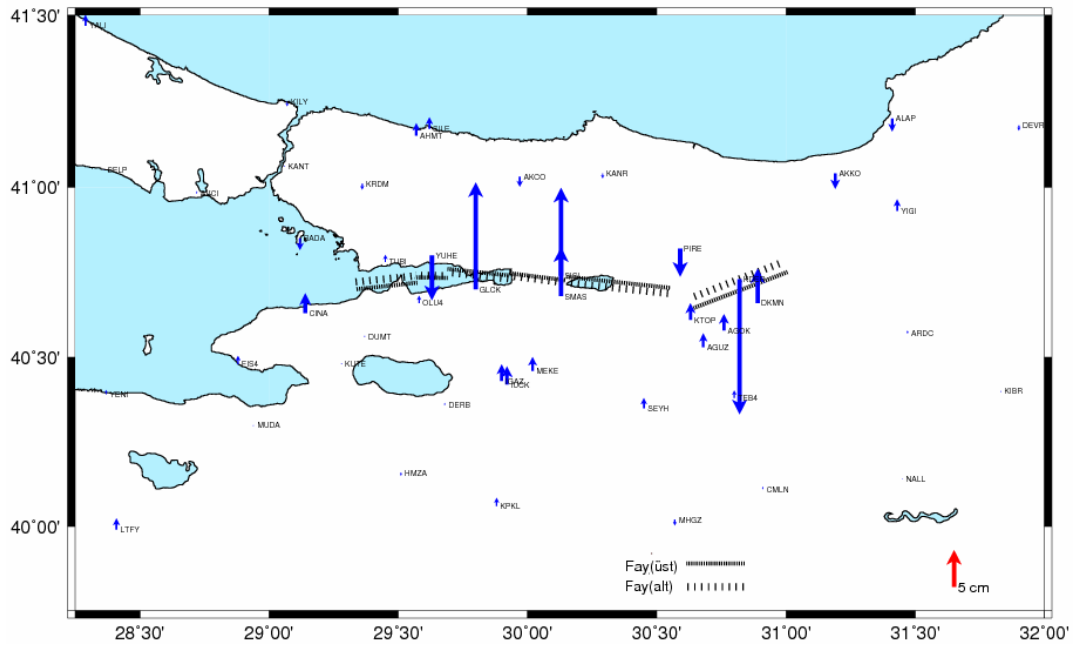
Şekil 5.11: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Wright ve diğ., 2001)'de verilen (b) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmeleri.



Şekil 5.12: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Wright ve diğ., 2001)'de verilen (b) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmelerin farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)



Şekil 5.13: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler(kırmızı) ile (Wright ve diğ., 2001)'de verilen (b) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler



Şekil 5.14: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile (Wright ve diğ., 2001)'de verilen (b) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)

(Wright ve diğ., 2001)'de verilen model incelenmiş, KTOP dışında fayın üzerinde olan ya da basitleştirilmiş doğrusal fay hatları nedeniyle fayın ters tarafında kalarak model değerleri ters çıkan istasyonla karşılaşılmamıştır. KTOP'un davranışının sebebi ise fayın uçlarındaki model etkileridir. Altı parçalı modelin etkinliğini araştırmak amacıyla önceki modelde yapılan incelemeye benzer şekilde GPS ölçüsü bulunan istasyonlardaki yer değiştirmeler hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. (Wright ve diğ., 2001)'de verilen modelin uyumu ile ilgili sonuçlar Tablo 5.6'da verilmektedir.

Tablo 5.6: (Wright ve diğ., 2001)'de verilen İzmit Depremi yer değiştirme model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu inceleme sonuçları

Model	2D WRSS	3D WRSS	1D WRSS
A	3778.03	3793.04	15.01
B	3822.92	3836.98	14.05
C	3838.49	3852.69	14.20
D	3906.67	3921.10	14.42
E	3987.88	4002.58	14.70
F	4062.17	4077.10	14.94
G	3701.33	3712.76	11.43

^A 51 noktanın tamamı ile

^B GLCK noktası hariç

^C GLCK ve SMAS noktaları hariç

^D GLCK, SMAS ve OLU4 noktaları hariç

^E GLCK, SMAS, OLU4 ve YUHE noktaları hariç

^F GLCK, SMAS, OLU4, YUHE ve SISL noktaları hariç

^G GLCK, SMAS, OLU4, YUHE, SISL, KTOP ve KDER noktaları hariç

5.3. Geliştirilen Modeller

5.3.1. İki Parçalı Model

İki parçalı kaynak mekanizmasının daha iyi modellenip modellenemeyeceğini araştırmak için önce tüm istasyonlar dahil edilerek ters çözüm yapılmıştır. Ters modellemede açılma (tensile slip) dışında bütün parametreler kestirilmiş olup, açılma sıfır kabul edilmiştir. Ters çözümde kullanılan başlangıç ve sınır değerleri Tablo 5.7'de verilmektedir. Bu aşamada dört farklı modelleme yapılmıştır. Öncelikle bütün noktaların kullanıldığı bir ters çözüm yapmak arzu edilmiş ve tüm noktaların yatay yer değiştirmelerinin kullanıldığı yeni bir model geliştirilmiştir. Daha sonra yine tüm noktalarının üç boyutlu yer değiştirmelerinin kullanıldığı bir başka model daha geliştirilmiştir. İki parçalı bir fay sistemi için daha iyi bir model elde etmek amacıyla daha sonra GLCK, TUBI, KDER, OLU4, SISL, SMAS, KDER noktaları dikkate alınmadan iki ve üç boyutlu yer değiştirmeler kullanılarak iki yeni model daha elde

edilmiştir. Elde edilen yeni modellere ait kaynak mekanizması parametreleri Tablo 5.8’te, modellere ilişkin diğer bilgiler Tablo 5.6’da verilmektedir.

Tablo 5.7: İki parçalı İzmit Depremi fay yer değiştirme modelinin başlangıç ve sınır parametreleri

	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
İzmit #1	29.400	40.600	85.00	10.00	-115.00	100.00	15.00	3.00	1.00	0.0
Sınır ($\pm$)	0.300	0.200	10.0	15.0	15.0	10.0	5.0	2.0	1.0	0.0
	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	α (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
İzmit #2	30.600	40.600	70.00	10.00	-60.00	20.00	15.00	2.00	1.00	0.0
Sınır ($\pm$)	0.300	0.200	10.0	15.0	15.0	5.0	5.0	2.0	1.0	0.0

Tablo 5.8: Geliştirilen iki parçalı İzmit Depremi yer değiştirme model parametreleri

Model	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
A	29.503	40.705	87.50	-0.90	-100.00	90.00	20.00	2.85	0.42	0.0
	30.664	40.686	69.65	0.00	-64.67	20.77	13.21	2.40	1.19	0.0
B	29.501	40.704	87.48	-0.81	-100.00	90.00	20.00	2.87	0.35	0.0
	30.663	40.683	68.47	0.00	-68.37	22.41	14.32	2.23	0.87	0.0
C	29.470	40.750	88.31	0.18	-115.00	90.00	20.00	2.88	0.0	0.0
	30.657	40.679	64.44	-0.19	-60.00	23.87	20.00	2.02	0.60	0.0
D	29.463	40.754	88.59	-1.07	-115.00	90.00	20.00	2.79	0.00	0.0
	30.652	40.686	67.29	1.81	-60.00	24.84	10.00	3.25	0.92	0.0

^A 51 noktanın tümü kullanılarak yatay (2B) yer değiştirmeler ile

^B 51 noktanın tümü kullanılarak yatay ve düşey (3D) yer değiştirmeler ile

^C GLCK, TUBİ, KDER, OLU4, SISL, SMAS ve YUHE noktaları hariç yatay (2B) yer değiştirmeler ile

^D GLCK, TUBİ, KDER, OLU4, SISL, SMAS ve YUHE noktaları hariç yatay ve düşey (3B) yer değiştirmelerle

Tablo 5.9: Geliştirilen ve Tablo 5.8’de verilen İzmit Depremi yer değiştirme model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu sonuçları

Model	2D WRSS	3D WRSS	1D WRSS	M_0 (Nm)	M_w	İterasyon Sayısı
A	204.35	233.50	29.16	1.776E+020	7.500	256552
B	206.96	229.27	22.32	1.789E+020	7.502	331344
C	21.73	27.75	6.02	1.856E+020	7.513	235478
D	22.53	25.31	2.78	1.759E+020	7.497	298445

^A 51 noktanın tümü kullanılarak yatay (2B) yer değiştirmeler ile

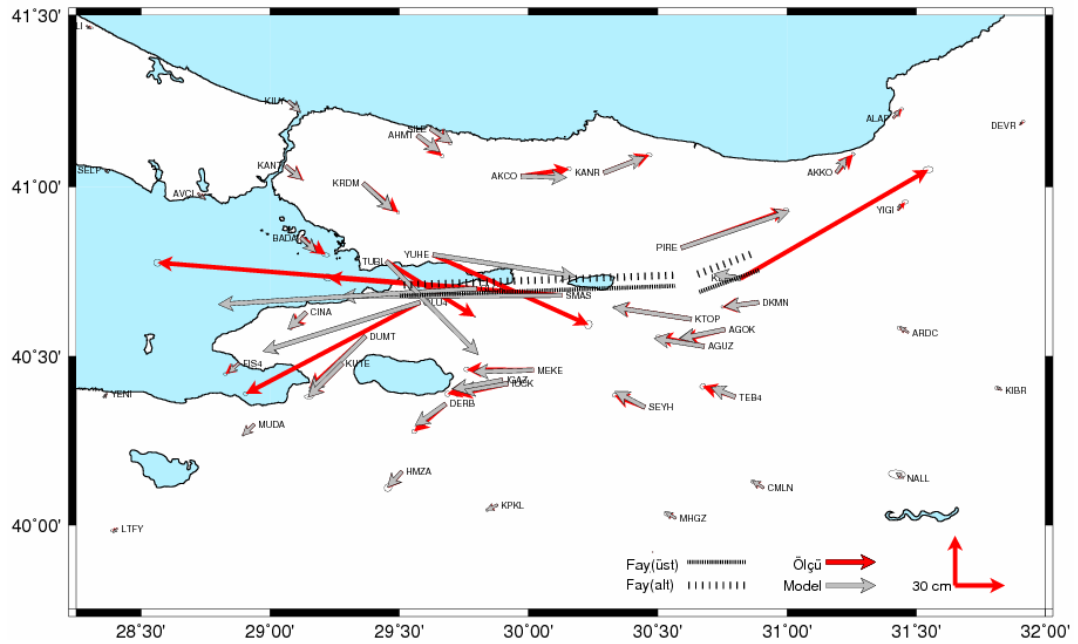
^B 51 noktanın tümü kullanılarak yatay ve düşey (3D) yer değiştirmeler ile

^C GLCK, TUBİ, KDER, OLU4, SISL, SMAS ve YUHE noktaları hariç yatay (2B) yer değiştirmeler ile

^D GLCK, TUBİ, KDER, OLU4, SISL, SMAS ve YUHE noktaları hariç yatay ve düşey (3B) yer değiştirmeler ile

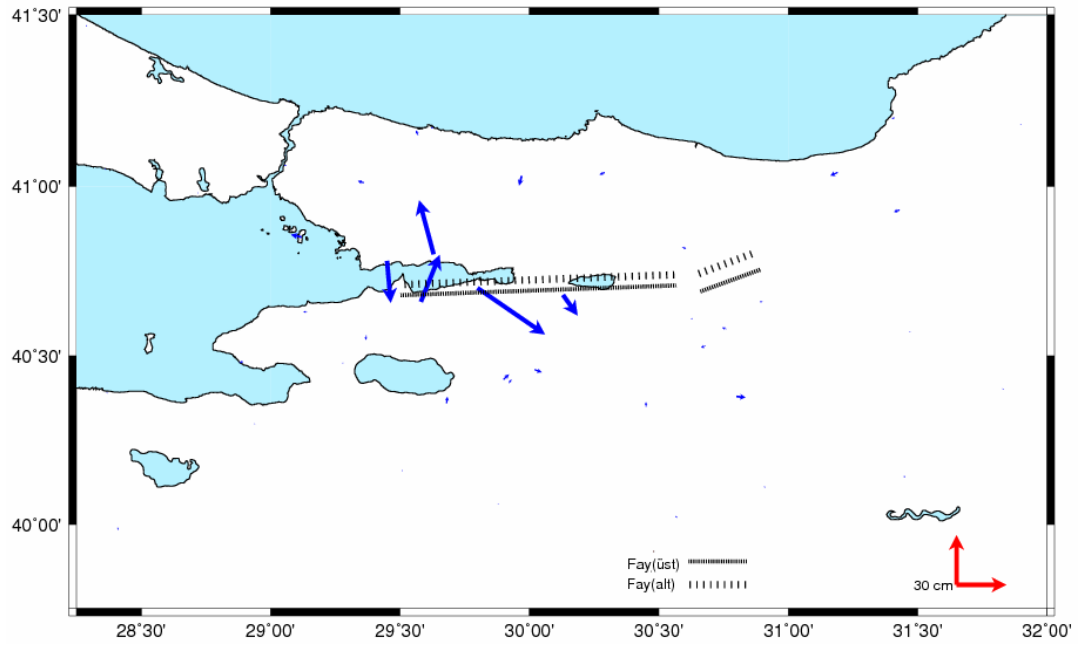
Görüleceği üzere iki parçalı daha basit doğrusal fay modellerinin problemli olduğu fay sınırlarına yakın noktalarda, çok parçalı modeller daha etkin olarak çalışmaktadır. Ancak gerek sayısal gerekse grafik sonuçlar çok parçalı modellerin fay geometrisinin basitliğini gidererek fay sınırlarına yakın bölgelerde daha iyi sonuç vermekle beraber (Wright ve diğ., 2001)'de fay sınırından uzaklaştıkça model ile ölçülerin uyumlu olmadığı gözlenmektedir.

GPS ölçüleri ile geliştirilen iki parçalı model yer değiştirmeleri Şekil 5.15'te, farkları ise Şekil 5.16'da verilmektedir.

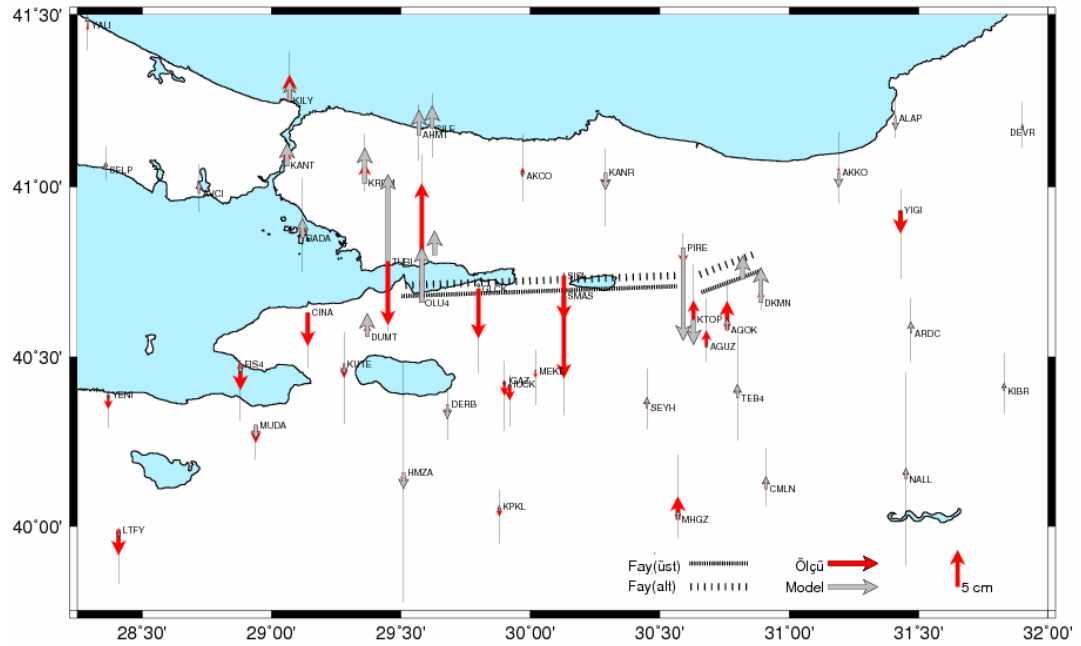


Şekil 5.15: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 45 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile geliştirilen 2 parçalı yer değiştirme ile elde edilen yatay yer değiştirmeler

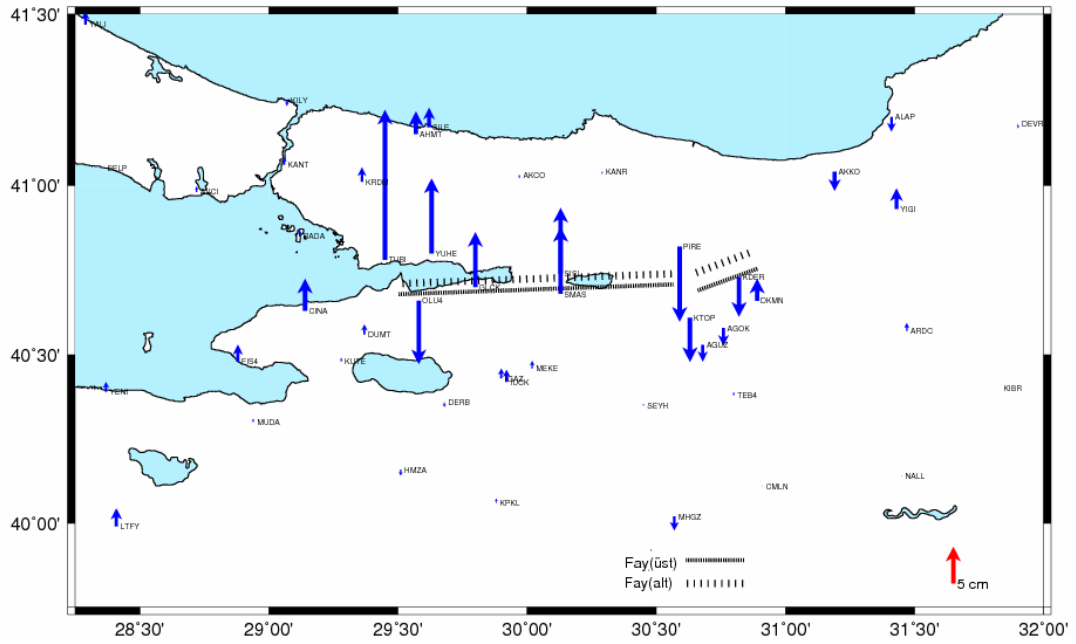
Fay hattına yakın noktalarda az sayıda parçalı modellerin tümünde olduğu gibi uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. En büyük farkların fay sınırına yakın noktalarda elde edildiği Şekil 5.16'da daha açık olarak gösterilmektedir. Bunun en önemli nedeni fay hattının az sayıda düzlemle temsil edilmeye çalışılmasıdır. Diğer bir neden ise, fay hattına yakın noktaların ana deformasyon zonu içinde kalması ve dolayısıyla deprem anı atım dışında çökme, zemin sıvılaşması, toprak kayması vb. nedenlerle açıklanabilir. Daha çok düşey yönde etki eden çökme ve zemin sıvılaşması gibi davranışları incelemek için GPS ve model düşey yer değiştirmeler Şekil 5.17'de, farkları ise Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile geliştirilen 2 parçalı yer değiştirme ile elde edilen yatay model yer değiştirmelerin farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir).



Şekil 5.17: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 49 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile geliştirilen 2 parçalı fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler.



Şekil 5.18: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile 2 parçalı fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir).

5.3.1. Beş Parçalı Model

Geliştirilen iki parçalı İzmit deprem kaynak mekanizması yanında çok parçalı bir kaynak mekanizmasını modellemek amacıyla iki farklı model oluşturulmuştur. İlkinde 49 istasyona ait GPS ölçüleri yatay yer değiştirmeleri kullanılmış ve ters çözümle 5 parçalı yeni bir model daha oluşturulmuştur. İkinci olarak ise yine aynı sayıda istasyonla ancak bu defa GPS ölçülerinin üç boyutlu yer değiştirmeleri kullanılmıştır. Elde edilen yeni modellerin parametreleri Tablo 5.10 ve Tablo 5.11’de, diğer bilgileri ise Tablo 5.12’de verilmektedir.

Tablo 5.10: Geliştirilen 5 parçalı İzmit Depremi Kaynak Mekanizması Model Parametreleri (yatay yer değiştirmeler kullanılarak)

Mod.	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
1	29.388	40.690	91.09	10.00	88.00	15.38	15.49	-1.52	0.20	0.0
2	29.633	40.713	87.16	16.49	86.00	17.58	17.66	-5.22	0.04	0.0
3	30.113	40.717	267.00	15.56	88.00	17.22	20.94	-3.83	-0.82	0.0
4	30.581	40.674	281.54	13.04	81.00	39.20	15.25	-1.98	-1.13	0.0
5	30.922	40.853	259.00	10.00	61.00	30.22	22.70	-1.01	-1.04	0.0

* KDER ve YUHE noktaları kullanılmamıştır

Tablo 5.11: Geliştirilen 5 parçalı İzmit Depremi Kaynak Mekanizması Model Parametreleri (üç boyutlu yer değiştirmeler kullanılarak)

Mod.	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
1	29.352	40.699	89.53	11.55	88.00	15.55	13.61	-1.57	0.64	0.0
2	29.635	40.702	88.74	16.31	86.00	16.50	16.09	-6.53	0.58	0.0
3	30.144	40.729	263.49	15.56	88.00	18.86	15.97	-4.54	-0.26	0.0
4	30.570	40.688	283.03	9.75	81.00	36.21	13.09	-2.42	-1.86	0.0
5	30.926	40.843	265.57	7.34	61.00	25.22	17.70	-1.59	-1.74	0.0

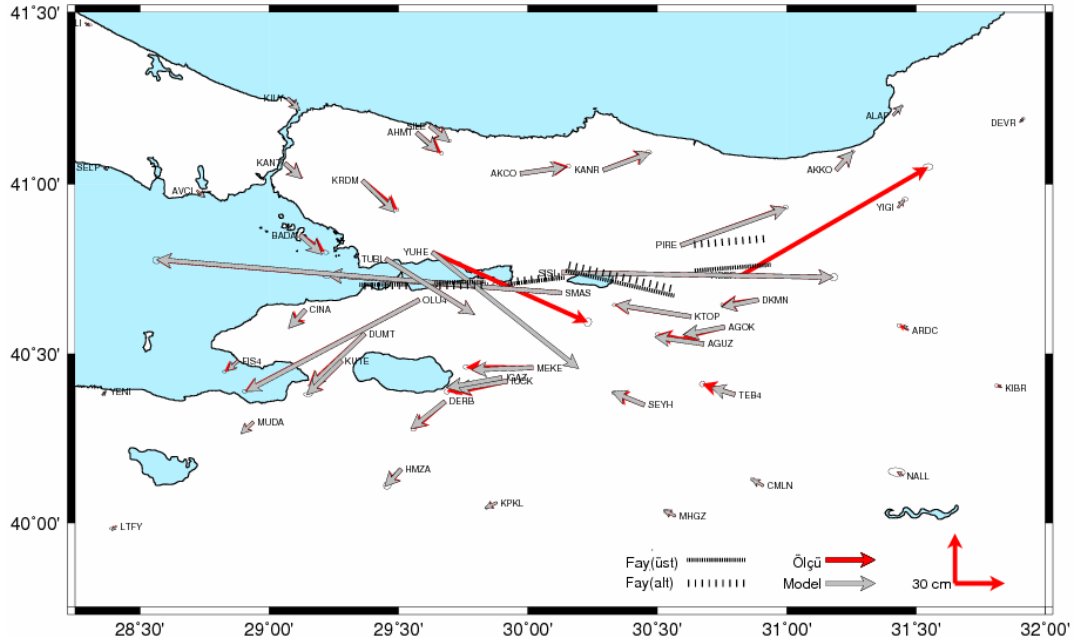
*KDER ve YUHE noktaları kullanılmamıştır

Tablo 5.12: Geliştirilen 5 parçalı İzmit Depremi Kaynak Mekanizması model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu sonuçları

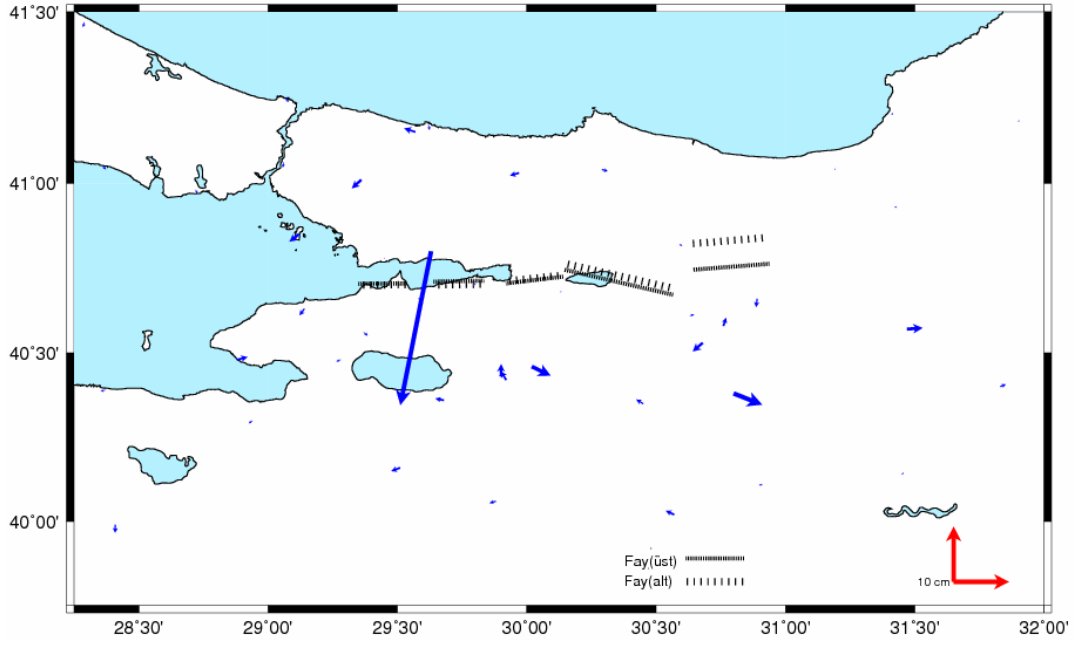
Model*	2D WRSS	3D WRSS	1D WRSS	M_0 (Ntm)	M_w	İterasyon
2B*	9.63	183.93	174.30	1.727E+020	7.491	775052
3B*	11.83	16.37	4.55	1.790E+020	7.502	657052

*KDER ve YUHE noktaları kullanılmamıştır

Uygulama sonucunda, biri iki ve diğeri beş parçalı iki temel yeni model elde edilmiştir. Daha fazla sayıda parçalı modeller de elde edilebilecek olmasına rağmen karşılaştırma amacıyla (Reilinger ve diğ., 2000) ile (Wright ve diğ., 2001)'de verilen sırasıyla iki ve 6 parçalı parçalı baz alınarak iki ve beş parçalı modeller geliştirilmiştir. Üç boyutlu GPS ölçüleri ile elde edilen iki parçalı model temel model olarak kabul edilmiş olup, model ve ölçülerin grafiği Şekil 5.19'da, farkları ise Şekil 5.20'de verilmektedir.

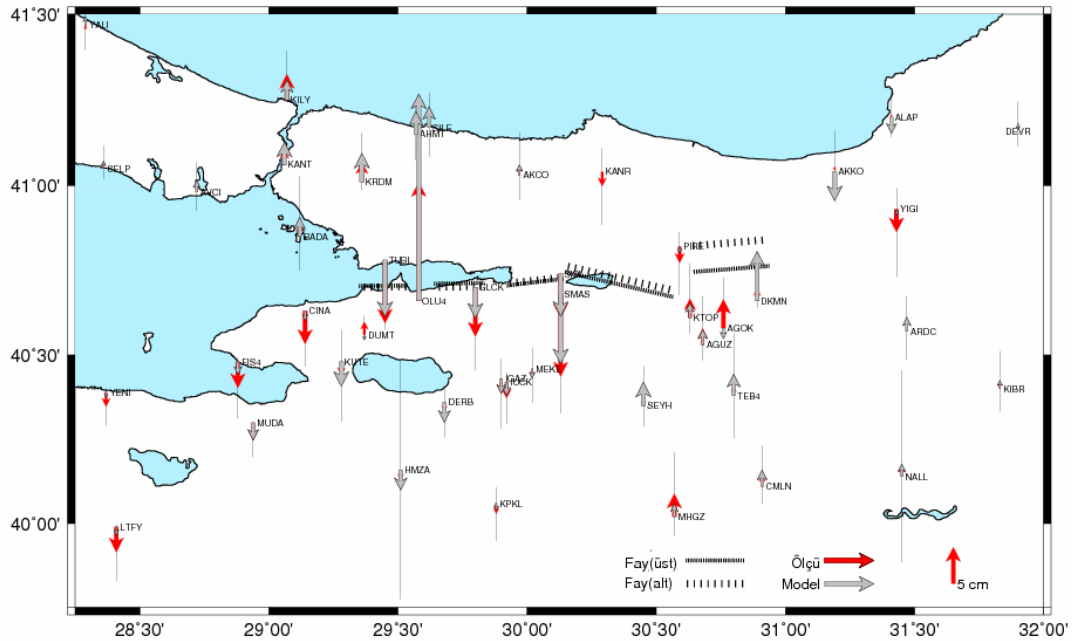


Şekil 5.19: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 49 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile geliştirilen 5 parçalı yer değiştirme ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)



Şekil 5.20: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile geliştirilen 5 parçalı yer değiştirme ile elde edilen yatay model yer değiştirmelerin farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)

Geliştirilen model ile elde edilen düşey bileşenler ve GPS ölçüleri ile elde edilen düşey bileşenler Şekil 5.21’de, farkları ise Şekil 5.22’de verilmektedir.



Şekil 5.21: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 49 noktada hesaplanan düşey yer değiştirmeler ile geliştirilen 5 parçalı fay yer değiştirme modeli ile elde edilen düşey model yer değiştirmeler

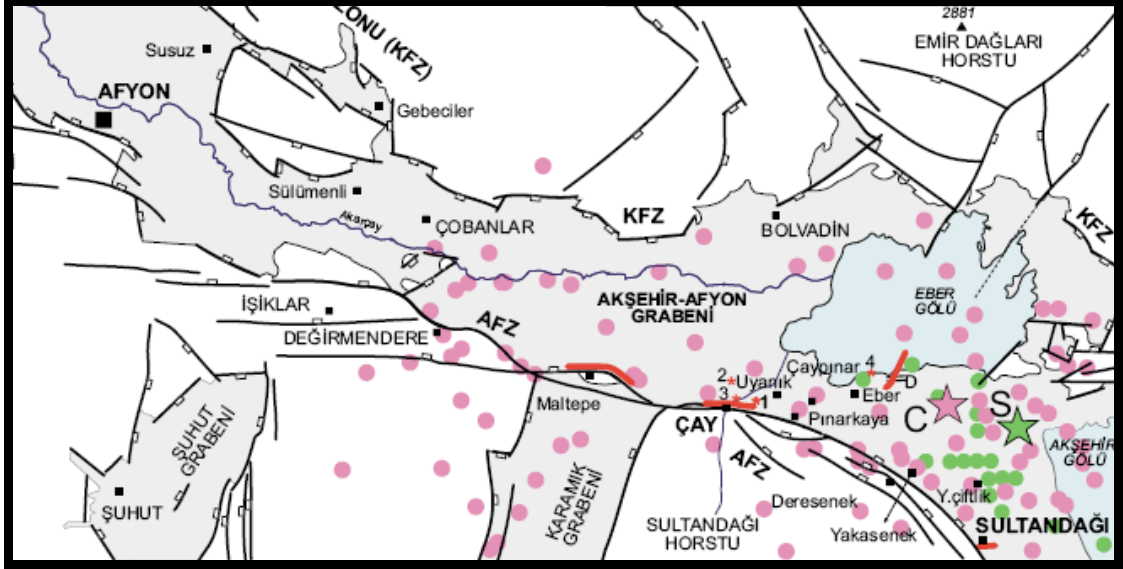
6. ÇAY (AFYON) DEPREMİ (03 ŞUBAT 2002, Mw6.5) KAYNAK MEKANİZMASININ MODELLENMESİ

6.1. Tektonik Yapı

03.02.2002 tarihinde Afyon Çay ilçesi yakınında yerel saatle 9:11' de büyüğü Mw6.5 olan bir deprem meydana gelmiştir. İlk çözümler depremin geçmişte yoğun depremselliğin yaşandığı Konya-Afyon-Balıkesir hattı yakınında Eber ve Akşehir Gölleri arasında meydana geldiğini göstermektedir (NEIC, 2005). Koçyiğit ve diğ.(2002) depremin (Koçyiğit, 1984)'de Akşehir Fay Zonu olarak tanımlanan zonda meydana gelerek 2000 Sultandağ Depreminin kuzey-kuzey-batıya doğru devamı şeklinde yorumlamıştır. Buna karşın Demirtaş ve diğ. (2003) ise ilk depremin Sultandağ Fayı üzerinde diğerlerinin ise Eber Gölü'nün hemen güneyinde yer alan Üçkuyu Fayları üzerinde meydana geldiğini iddia etmektedir. Koral ve Yılmaz (2003) ise Koçyiğit ve diğ.(2002)'ye benzer şekilde depremin Akşehir-Afyon Grabeninin batı ucunu oluşturan Çay-Eber Fayı üzerinde meydana geldiğini belirtmektedir. Gerek 2000 gerek 2002 yılında meydana gelen depremlerin odak mekanizması çözümleri normal bir faylanmaya işaret etmektedir. Bununla beraber Çay bölgesini de içine alan doğuda Fethiye-Burdur Fay Zonu batıda Akşehir Fay Zonu ile sınırlanan Isparta açısının neotektonik rejimi hakkında farklı görüşler mevcuttur (Barka ve diğ., 1995), (Koçyiğit, 1984), (Şaroğlu ve diğ., 1987), (Koçyiğit, 2005). Dışmerkezinin Çay ilçesi civarında yer aldığı bu deprem sismik etkinliği uzun zamandır bilinen Afyon-Akşehir grabeninin güney kenar fayı veya faylarından kaynaklanmıştır. Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultusunda uzanan Sultandağları yapısal olarak bir horst durumunda olup, Akşehir ovasını sınırlayan yamacı bir eğim atımlı normal fay karakterindedir (Gökten ve diğ., 2003).

Aynı gün arka arkaya meydana gelen bu dört depremin merkez üsleriyle ilgili farklı veriler mevcuttur (NEIC, 2005) (Harvard, 2005), (EMSC, 2005), (INGV, 2005), (KOERI, 2005). Depremler 09:11, 11:26, 13:39 ve 13:54'da meydana gelmiş olup, farklı kaynaklarda verilen büyüklükleri 4.8 ile 6.5 arasında değişmektedir. Özellikle

etmesinden kaynaklandığı belirtilmektedir (Koçyiğit ve diğ., 2002). Yüzey kırıkları toplam 30 km uzunluğunda bir alanda gözlenmiştir. Koçyiğit ve diğ. (2002) yüzey kırıkları üzerindeki düşey atım miktarlarını 1-22 cm, yatay yer değiştirme miktarlarını 1-5 cm, çatlak duvarları arasındaki açıklıkları ise 12 cm civarında tespit etmişlerdir. Bölgedeki temel tektonik birimler Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2: Çay ilçesi ve çevresindeki temel tektonik birimler (Koçyiğit ve diğ., 2002)’den alınmıştır (Çay Depremi artçı şokları nokta ile, yüzey kırıkları kalın çizgi ile, Sultandağ ve Çay Depremlerinin merkez üssleri ise yıldızlar ile gösterilmekte olup, Çay Depremi’nin merkez üssü daha batıdadır)

6.2. GPS Ölçüleri ve Yer değiştirmeler

Global Konumlama Sistemi ile 1990’ların başından itibaren yürütülen ölçme çalışmaları Türkiye ve yakın çevresinin neotektonik yapısının sayısal olarak ifade edilmesini sağlamıştır (Aktuğ ve Kılıçoğlu, 2005). Bu anlamda her yıl güncellenen Türkiye hız alanı birçok çalışma için altlık oluşturmaktadır (Aktuğ ve diğ., 2004), (Aktuğ ve Kılıçoğlu, 2005). Ancak GPS noktalarının mevcut mekansal çözünürlüğü 30-50 km arasında olup, görece olarak küçük tektonik olguları algılamak için yetersizdir.

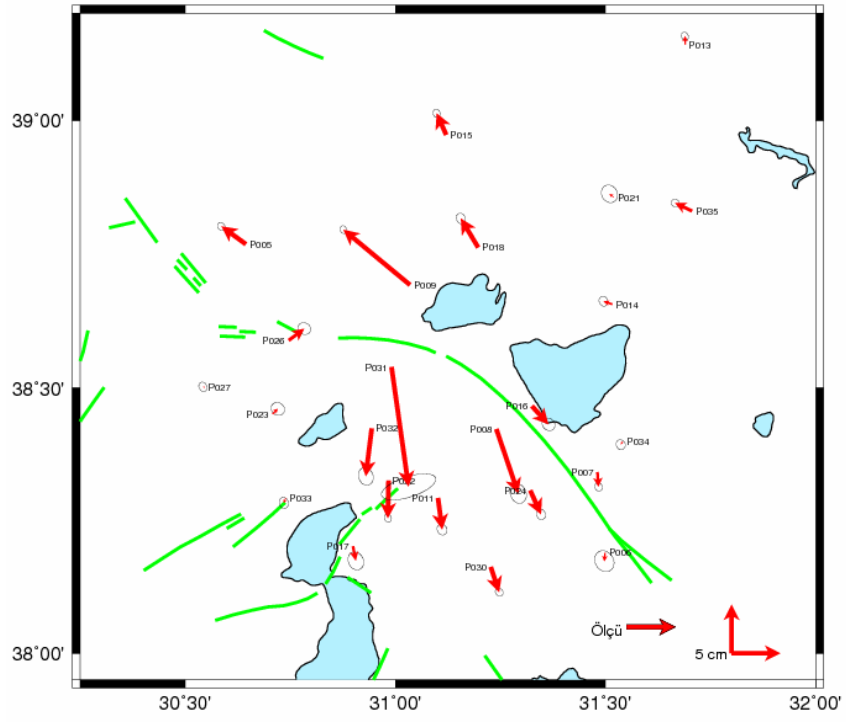
2000 yılı Sultandağ depreminin ardından bölgedeki jeodezik noktalarda meydana gelen deformasyonları gidermek amacıyla ağ yerel olarak sıklaştırılmıştır. 2002 yılı Çay Depreminden sonra yeniden gerçekleştirilen GPS ölçmeleri ile yer değiştirmeleri hesaplama olanağı doğmuştur. Elde edilen yer değiştirmeleri referans koordinat sistemi tanımlamaları ve diğer olası etkilerden arındırmak amacıyla deprem öncesi

ve sonrasına ait koordinatlar ayrı ayrı ANKR IGS noktasına göre bağıl olarak hesaplanmış ve yer değiştirme farkları bulunmuştur. Daha sonra bölgedeki deprem öncesi yer değiştirme etkilerini en aza indirmek amacıyla, hızları bilinen noktalar yer değiştirmelere intersismik düzeltme getirilmiştir. Elde edilen düzeltilmiş nihai yer değiştirmeler sayısal olarak Tablo 6.1’ de, grafik olarak yatay ve düşey yer değiştirmeler ise Şekil 6.3 ve 6.4’de verilmektedir.

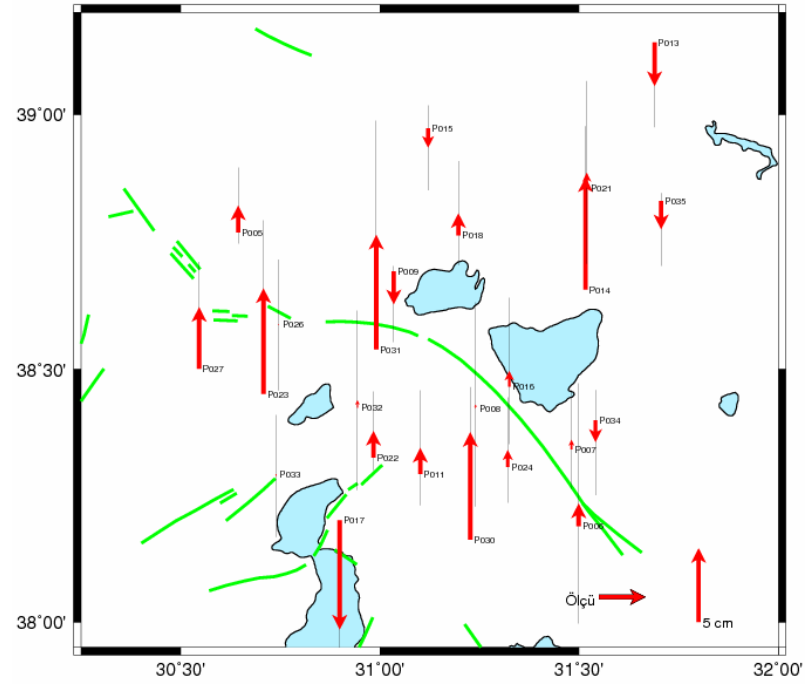
Tablo 6.1: Çay Depremi öncesi ve sonrasında yapılan ölçmeler ile elde edilen Ankara IGS noktasına göre hesaplanan ve bölgesel deprem öncesi hız düzeltmesi getirilen noktalar

No	Nokta	λ (°)	ϕ (°)	ΔE (mm)	ΔN (mm)	$\sigma_{\Delta E}$ (mm)	$\sigma_{\Delta N}$ (mm)	σ_{EN}	ΔH (mm)	σ_H (mm)
1	P005	30.644	38.769	-25.1	18.4	1.5	1.7	-0.15	18.2	10.5
2	P006	31.499	38.19	-0.8	-8.7	4.1	4.4	-0.17	15.4	33.2
3	P007	31.481	38.342	1.0	-15.3	1.6	1.8	-0.15	6.5	13.7
4	P008	31.24	38.423	22.6	-66.7	3.4	4.1	-0.16	2.5	28.2
5	P009	31.035	38.693	-68.5	57.0	1.4	1.6	-0.15	-22.4	10.5
6	P011	31.101	38.293	4.3	-32.5	2.1	2.3	-0.16	17.8	15.9
7	P013	31.689	39.141	-0.1	8.8	1.5	1.7	-0.18	-29.6	11.4
8	P014	31.516	38.657	-9.1	3.1	1.8	2.1	-0.12	76.1	14.1
9	P015	31.121	38.973	-9.9	22.3	1.5	1.8	-0.15	-13.2	11.7
10	P016	31.325	38.466	17.1	-19.0	2.7	2.6	-0.16	10.5	20.2
11	P017	30.899	38.202	2.9	-14.9	3.3	3.8	-0.17	-74.1	27.1
12	P018	31.197	38.763	-17.9	30.0	1.9	2.2	-0.12	15.0	14.4
13	P019	32.527	37.899	3.7	12.6	1.0	1.2	-0.06	-4.0	8.2
14	P021	31.519	38.857	-4.2	3.5	3.4	3.7	-0.14	10.1	25.3
15	P022	30.984	38.326	-0.8	-38.8	1.5	1.7	-0.16	18.0	10.9
16	P023	30.708	38.451	5.4	5.2	2.8	2.7	-0.13	71.5	18.9
17	P024	31.321	38.307	11.0	-24.6	1.9	2.2	-0.11	11.4	14.6
18	P025	32.394	37.869	8.8	5.7	1.2	1.4	-0.06	-2.0	9.2
19	P026	30.746	38.589	16.1	12.1	2.7	2.5	-0.10	-0.8	18.1
20	P027	30.546	38.501	-1.7	0.5	1.7	2.0	-0.18	41.7	12.5
21	P028	32.468	37.921	9.1	8.0	1.0	1.2	-0.06	-6.1	7.9
22	P029	32.506	38.022	1.6	13.3	1.7	2.2	-0.11	-19.3	13.5
23	P030	31.227	38.163	8.7	-26.0	1.6	1.7	-0.17	72.9	12.5
24	P031	30.991	38.539	17.5	-123.5	11.4	5.5	0.58	77.5	31.6
25	P032	30.944	38.424	-6.2	-49.5	3.1	3.7	-0.15	5.0	24.8
26	P033	30.739	38.293	-1.9	-5.0	2.0	2.3	-0.11	-1.2	16.9
27	P034	31.541	38.399	-2.1	-3.1	1.9	2.1	-0.11	-14.9	14.5
28	P035	31.706	38.831	-17.3	8.3	1.7	1.6	-0.08	-19.4	10.1

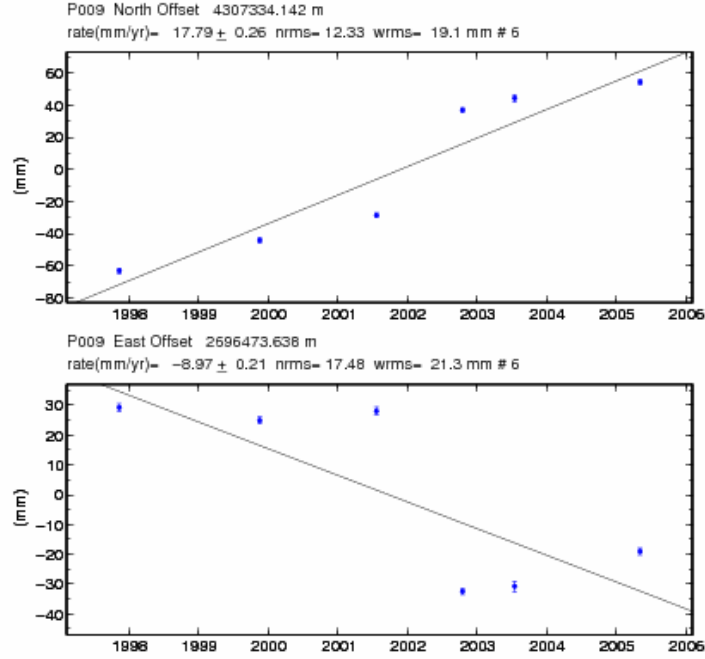
Deprem etki alanına girdiği düşünülen tüm noktaların zaman serileri incelenmiş ve deprem epöğundan itibaren özellikle yatay yöndeki yer değiştirmelerin çarpıcı olarak görüldüğü tespit edilmiştir. Fay sınırına en yakın istasyon için hesaplanan zaman serisi Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 28 noktada hesaplanan yatay değiştirmeler.



Şekil 6.4: Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 28 noktada hesaplanan düşey değiştirmeler.



Şekil 6.5: Çay depreminin meydana geldiği fay sınırına en yakın istasyonun deprem öncesi ve sonrasını kapsayan zaman serisi

6.3. Geliştirilen Model

Jeolojik yüzey kırığı ölçümleri, sismik çözümler ve artçı şokların dağılımı göz önüne alınarak geometri ve kayma değerleri için başlangıç değerleri belirlenmiştir. Belirlenen başlangıç değerleri Tablo 6.2’ de gösterilmektedir. Gerek artçı şokların dağılımı gerekse jeolojik ölçümler fayın güney doğuya doğru kırılmaya devam etmediğini doğu batı uzanımında Eber Gölü güneyinde sonladığına işaret etmektedir. Buna uyumlu olarak başlangıç değerleri için esnek sınır değerleri tanımlanmasına rağmen öngörülen geometri ve kayma değerleri elde edilmiştir. Elde edilen fay geometri ve kayma değerleri Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Tek parçalı Çay Depremi yer değiştirme modelinin başlangıç ve sınır parametreleri

	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
Çay (#1)	31.05	38.20	280.0	8.0	55.0	20.0	16.0	0.5	2.0	0.0
Sınır (±)	0.250	0.250	50.0	5.0	35.0	15.0	10.0	1.0	4.0	0.0

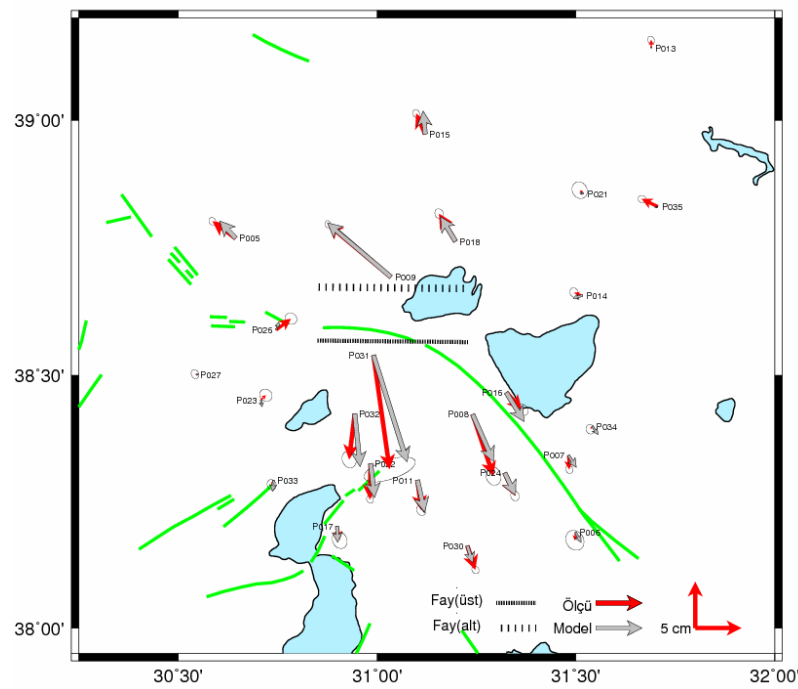
Tablo 6.3: Geliştirilen tek parçalı Çay Depremi model parametreleri

	Λ_1 (°)	Φ_1 (°)	A (°)	D (km)	Δ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)	TS (m)
Çay	31.227	38.671	270.67	11.57	43.21	33.26	15.97	0.26	-0.51	0.0

Ana şokun olduğu gün orta büyüklükte üç deprem daha olduğu değerlendirildiğinde bulunan geometri ve kayma değerlerinin ana şok dışındaki dislokasyonların etkilerini de içermektedir. Jeodezik moment büyüklüğü $M_w 6.6$ olarak hesaplanmıştır. Model ile ölçüler arasındaki uyum değerleri Tablo 6.4’ de, ölçü ve model yer değiştirmeler Şekil 6.6’da, farkları ise Şekil 6.7’ de gösterilmektedir.

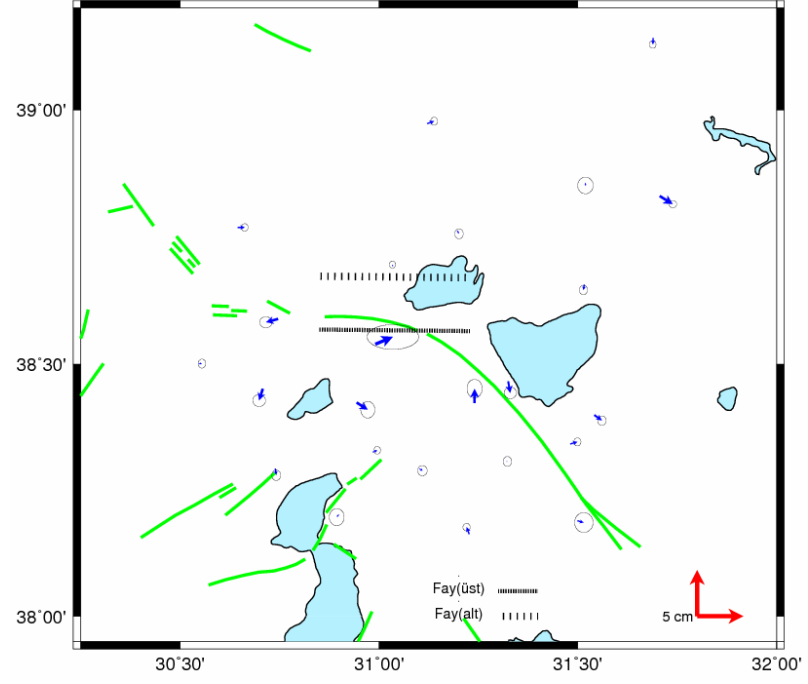
Tablo 6.4: Geliştirilen ve Tablo 6.5’de verilen verilen İzmit Depremi dislokasyon model parametreleri kullanılarak yapılan model uyumu sonuçları

Model	2D WRSS	3D WRSS	1D WRSS	M_0 (Ntm)	M_w	İterasyon
Çay	34.37	38.62	4.25	9.418E+018	6.649	131677

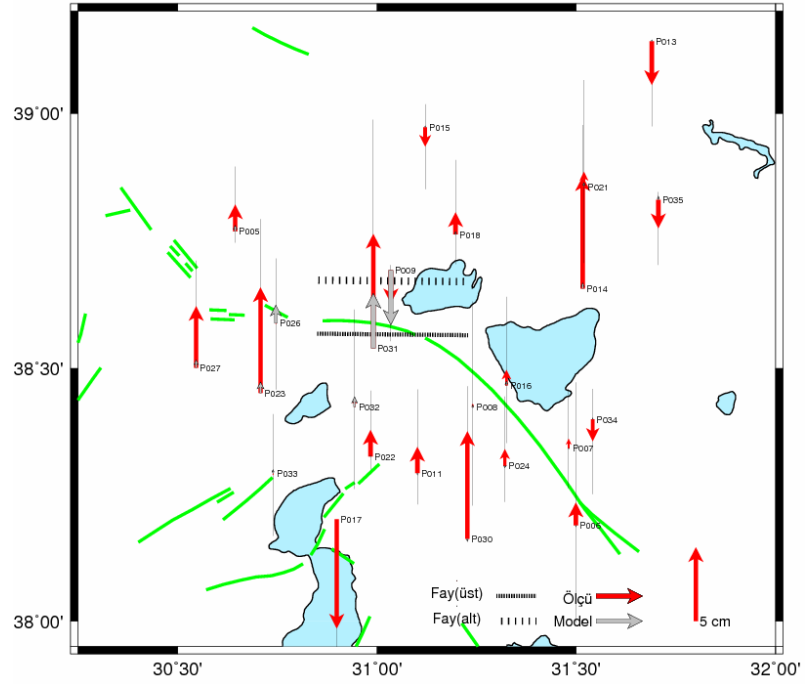


Şekil 6.6. GPS ölçü ve model yatay yer değiştirmeleri

Düşey yerdeğiştirmeler fay sınırına çok yakın iki nokta dışında genel olarak anlamlı değildir. Sadece model ile yapılan incelemede bu büyüklükte bir depremin bu iki istasyon dışında yer değiştirme meydana getirmeyeceği görülmektedir. Ölçülen düşey yer değiştirmeler ve bulunan model ile hesaplanan yerdeğiştirmeler Şekil 6.8’de, bunların farkları ise Şekil 6.9’da verilmektedir.



Şekil 6.7: GPS ölçü ve model yatay yer değiştirmeler farkı (Model-ölçü farkları gösterilmektedir)



Şekil 6.8: GPS ölçü ve model düşey yer değiştirmeleri

Araştırma Enstitüsünün ana şok için hesapladığı lokasyon diğer tüm odak çözümlerine göre güneybatıda kalmaktadır. Bunun dışında Sultandağ-Çay arasında kalan fay kesminin hareket ettiği dair sismolojik veya jeolojik bulgu bulunmamaktadır. Benzer şekilde artçı şok dağılımı da doğu-batı doğrultulu bir fay düzlemine işaret etmektedir (KRDAE, 2005).

GPS ile elde edilen fay mekanizması çözümü birtakım geometrik yakınsamalar içermektedir. Kuşkusuz fay düzleminin kusursuz bir düzlem olduğu düşünülemez. Ancak sismik ve jeolojik sonuçlardan tamamen bağımsız olarak elde edilen fay mekanizması parametrelerinin uyumu söz konusu yakınsamanın kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

Sismik araştırma merkezleri depremin büyüklüğünü farklı ölçütlerle ifade etmektedir. Çay Depremi için USGS tarafından Mw6.2 ve Harvard tarafından Mw6.5 olarak verilen sismik moment büyüklüğü, GPS ile hesaplanan Mw6.6 jeodezik moment büyüklüğü ile uyumludur. Koçyiğit ve diğ. (2002) jeolojik arazi gözlemlerinde toplam 30 km uzunluğunda bir alanda yüzey kırıkları gözlemlemiştir. GPS ölçülerinin ters modellemesi sırasında 5-35 km olarak verilen fay uzunluğu başlangıç değerleri ile 33.26 km olarak bulunan fay düzlemi uzunluğu jeolojik verilerle uyumludur. Fay düzleminin alt noktasının derinliği GPS ölçüleri ile 11.7 km olarak bulunmuştur. Aynı gün dört orta büyüklükte meydana gelen bölge için ana şokun ortalama 5.8 km derinlikte olduğu söylenebilir. Sismik ters çözümlerde benzer şekilde 2.2 – 10 km arasında derinlik vermektedir. Fay düzleminin doğrultusu için 40° - 130° arasında sınır değerleri kullanılmasına rağmen azimut (strike) $90^{\circ}.37$ olarak bulunmuştur. Bu durum fay düzleminin güneyde Akşehir Fay Zonunu izlemediği Eber Gölünün güneyine kadar devam ettiğini göstermektedir. Diğer bir ifade ile Koçyiğit ve diğ. (2002) tarafından Akşehir Fay Zonunun Sultandağ-Çay arasındaki güneydoğu-kuzeybatı uzanımlı bölümün hareket ederek, 2000 yılındaki depremle Sultandağ-Akşehir arasında gelişen hareketi kuzeybatıdan tamamladığı görüşüyle çelişmektedir. Demirtaş ve diğ. (2003) tarafından Üçkuyu Fayı olarak belirtilen ve Eber Gölü güneyinden geçen fay ise hesaplanan fay düzleminin güney ve kuzey kolu arasında kalmaktadır. Fay düzleminin eğim açısı 43.21° olarak elde edilmiştir. Çay-Eber arasındaki faylanma (Koçyiğit ve diğ., 2002)'de belirtildiği şekilde listrik faylanmanın olduğu belirtilen Akşehir Fay Zonu özelliklerini taşıyorsa, hesaplanan

değer yüzeye yakın kesimler için olması gerekenden düşük olabilir. Ancak Emre ve diğ. (2002) bu bölümün düşük eğim açısına sahip olduğu belirtmektedir.

Fay düzlemi üzerindeki kayma değerleri eğim ve doğrultu atım için sırasıyla 0.51 m ve 0.26 m olarak bulunmuştur. Bu haliyle sol yanal bileşeni olan verrev atımlı bir normal faylanma özelliği göstermektedir. Fay düzlemi üzerinde hesaplanan atım değerlerinin yüzeyde çok daha küçük olduğu bilinmektedir. Nitekim, Emre ve diğ. (2002) maksimum 25 cm, Koçyiğit ve diğ. (2002) 1-22 cm, Koral ve Yılmaz (2003) 5-25 cm düşey atım gözlemlemişlerdir. Kullanılan GPS istasyonlarından sadece ikisi yüzeyden düşey atım gözlenebilecek kadar yakındır. Model sonuçları da bu iki istasyon dışında düşey atım beklenmediğini ortaya koymaktadır.

7. UYGULAMA YAZILIMININ TANITILMASI

7.1. Giriş

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm direkt ve ters çözümler ile nümerik modelleme ve optimizasyon geliştirilen uygulama yazılımı ile yapılmıştır. Bu anlamda kullanılan uygulama yazılımı tanıtılması ve yeteneklerinin gösterilmesinin yararlı olacağı düşünülmüştür.

Uygulama yazılımının direkt modelleme yapan versiyonu ilk olarak Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) ölçülerinin tamamlanmasından hemen önce meydana gelen Marmara deprem etkilerini incelemek amacıyla prototip olarak geliştirilmiştir (Aktuğ, 2003). “Dislocator” adıyla ücretsiz olarak dağıtılan yazılım sadece içerisinde tanımlanan o zamanki en güncel İzmit ve Düzce fay geometri ve kayma değerleri ile belirli bir enlem, boylam değeri için söz konusu depremlerin etkilerini hesaplamaya yarayan sade bir programdır. Marmara Bölgesinde deprem kaynaklı koordinat uyuşumsuzluk problemlerinin araştırılmasında ve TUTGA-99A noktalarındaki deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesinde kullanılmıştır (Ayhan ve diğ., 2002).

Doktora çalışması kapsamında program geliştirilmiş, özellikle gelişkin optimizasyon yöntemleri ters modelleme ve grafik gösterim özellikleri eklenmiştir. Geliştirilen yeni yazılıma DEFORM (**D**etermination of **E**arthquake **F**ault **O**rientation and **R**ake **M**odel) adı verilmiştir. Uygulama geliştirme ortamı olarak Delphi v5 kullanılmış, grafik gösterim için TeeChart VCL bileşeninden yararlanılmıştır (Steema, 2006)..

7.2. Uygulama Yazılımının Özellikleri

Yeni geliştirilen uygulama yazılımını yetenekleri kısaca;

- Elastik Yarı-Uzayda her tür deprem kaynak mekanizmasının analitik olarak direkt modellenmesi,
- Bir, iki veya üç boyutlu jeodezik yüzey ölçümleriyle deprem kaynak mekanizmasının modellenebilmesi (ters-modelleme),

- Gelişkin optimizasyon yöntemleri kullanılarak yerel minimuma düşmeden tümel (global optimizasyon) problemlerinin çözebilme,
- Alanındaki en çok tercih edilen BFGS (Broyden-Fletcher-Garbo-Shanno) yöntemiyle yerel optimizasyon problemlerinin çözümü,
- Ters modellemede istenilen sayıda parametrenin sabit alınabilmesi veya alt-üst sınırlar tanımlanabilmesi,
- Elde edilen yeni model ve sayısal değerlerin içinde barındırdığı vektör haritayla tüm dünya üzerinde vektörel olarak gösterebilme,
- Başka herhangi bir yazılıma (Mathematica, Matlab vb.) ihtiyaç duymadan bağımsız olarak çalışabilme,
- Elde edilen çeşitli sonuçların GMT (Wessel ve Smith, 1991) formatında kaydedilerek ayrıca daha yüksek kalitede çizdirilebilmesi
- Jeodezik moment, jeodezik moment büyüklüğü, 1B, 2B ve 3B karesel form hesabı, model ve ölçü farklarının bileşenlerine göre sıralanması gibi çeşitli analiz araçları

şeklinde sıralanabilir.

7.3. Direkt ve Ters Modelleme Hesap Aşamaları

Temel olarak yazılımın işleyiş aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Jeodezik ölçülerin yüklenmesi:

Direkt modelleme ölçülmüş yer değiştirmelere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu amaçla Data/Open Displacement Data menüsü kullanılarak nokta adı/boylam/enlem sırasında hazırlanmış bir ascii dosyası açılabilir ya da input data tab'ındaki editöre manuel giriş yapılabilir. Eğer ters modelleme yapılacaksa, nokta adı/boylam/enlem bilgilerinin devamında ölçülmüş yer değiştirmeler doğu yönünde yer değiştirme/kuzey yönünde yer değiştirme /doğu yönünde yer değiştirmenin standart sapması/kuzey yönünde yer değiştirmenin standart sapması/ doğu ve kuzey yönünde yer değiştirmelerin korelasyonu/ düşey yöndeki yer değiştirme/ düşey yöndeki yer değiştirmenin standart sapması sırasında ancak serbest formatta girilmelidir. Yer değiştirmelerin girildiği bir örnek Şekil 7.1'de verilmektedir.

Site Name	Longitude	Latitude
ANKR	32.75	39.88
DEVN	31.90	41.18
KIBR	31.83	40.40
SIVR	31.81	39.56
ARDC	31.47	40.57
NALL	31.45	40.14
YIGI	31.43	40.93
ALAP	31.41	41.20
AKKO	31.19	41.04
CMIN	30.91	40.11
DKMN	30.89	40.66
KIBR	30.82	40.72

Şekil 7.1: Jeodezik ölçülerin programa girdi olarak verilmesi (serbest formatta)

Fay geometrisi ve Kayma Parametrelerinin Girilmesi:

Direk modelleme yapılacaksa fay geometri ve kayma parametrelerinin yüklenmesi, ters modelleme yapılacaksa başlangıç ve sınır değerlerinin yüklenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Faults/ Open A priori Fault Model menüsü kullanılarak ascii olarak kaydedilmiş bir dosyadan geometri ve kayma değerleri ile bunların sınır değerleri yüklenebilir. Örnek bir fay/geometri ascii dosyası içeriği ve yüklenmiş değerler Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

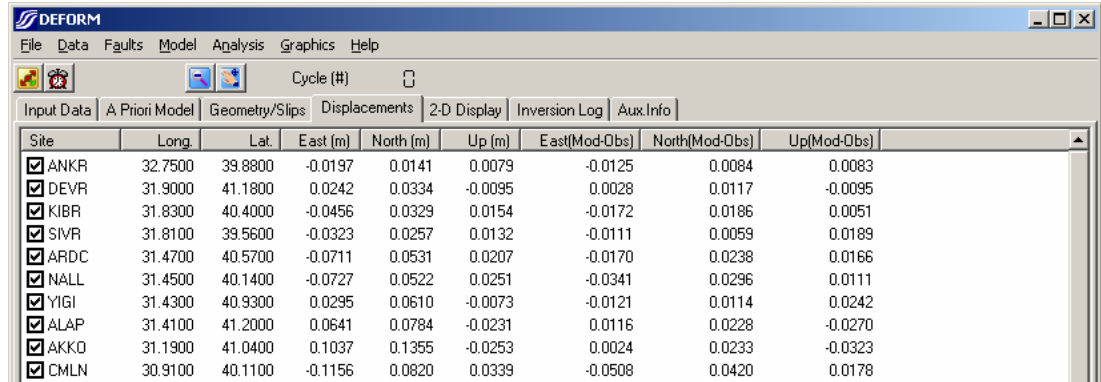
Fault Name	Lon.	Lim.Lon.	Lat.	Lim.Lat.	Strike	Strike Lim.	Depth	Depth Lim.	Dip	Lim.Dip	Length	Leng.Lim.	Width	Wid.Lim.
Izmit_#1	29.410	0.000	40.680	0.000	86.290	0.000	-0.080	0.000	-90.120	0.000	97.340	0.000	16.030	0.000
Izmit_#2	30.670	0.000	40.690	0.000	71.360	0.000	-0.100	0.000	-63.800	0.000	24.500	0.000	18.740	0.000

Name	Long.#1	Lim.±	Lat.#1	Lim.±	Strike	Lim.±	Depth(km)	Lim.±	Dip(deg)	Lim.±	Length(km)	Lim.±	Width(km)	Lim.±	SS(m)	Lim.±	DS(m)	Lim.±	TD
Izmit #1	29.41	0.0	40.68	0.0	86.29	0.0	-0.08	0.0	-90.12	0.0	97.34	0.0	16.03	0.0	5.0	1.0	0.0	0.5	0.0
Izmit #2	30.67	0.0	40.69	0.0	71.36	0.0	-0.10	0.0	-63.80	0.0	24.50	0.0	18.74	0.0	1.64	0.0	0.54	0.0	0.0

Şekil 7.2: Fay geometri ve kayma değerlerinin girilmesi/değiştirilmesi ve ters çözüm için kullanılan arayüz

Kullanılacak Noktaların Seçimi:

Jeodezik ölçülerin yüklenmesinden sonra direkt modelleme yapıldıktan sonra noktalara ait model ve modelden olan farklar ekranda gösterilir. Ters modelleme için kullanılacak noktalar bu ekranda “check” kutucukları şeklinde seçilebilir. Söz konusu örnek bir ekran Şekil 7.3’de gösterilmektedir.

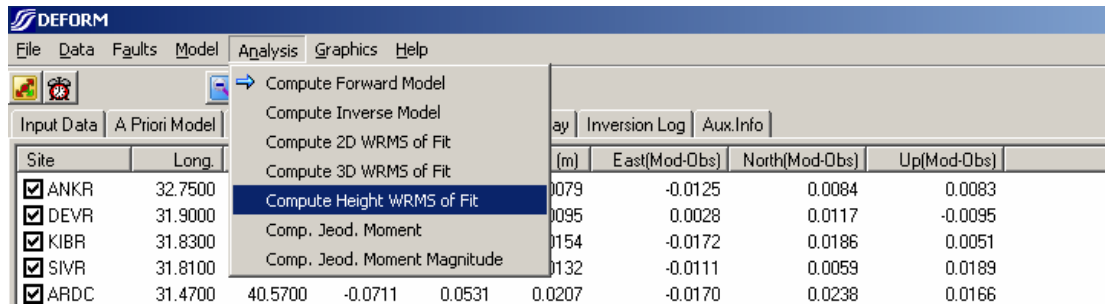


Site	Long.	Lat.	East (m)	North (m)	Up (m)	East(Mod-Obs)	North(Mod-Obs)	Up(Mod-Obs)
☒ ANKR	32.7500	39.8800	-0.0197	0.0141	0.0079	-0.0125	0.0084	0.0083
☒ DEVR	31.9000	41.1800	0.0242	0.0334	-0.0095	0.0028	0.0117	-0.0095
☒ KIBR	31.8300	40.4000	-0.0456	0.0329	0.0154	-0.0172	0.0186	0.0051
☒ SIVR	31.8100	39.5600	-0.0323	0.0257	0.0132	-0.0111	0.0059	0.0189
☒ ARDC	31.4700	40.5700	-0.0711	0.0531	0.0207	-0.0170	0.0238	0.0166
☒ NALL	31.4500	40.1400	-0.0727	0.0522	0.0251	-0.0341	0.0296	0.0111
☒ YIGI	31.4300	40.9300	0.0295	0.0610	-0.0073	-0.0121	0.0114	0.0242
☒ ALAP	31.4100	41.2000	0.0641	0.0784	-0.0231	0.0116	0.0228	-0.0270
☒ AKKO	31.1900	41.0400	0.1037	0.1355	-0.0253	0.0024	0.0233	-0.0323
☒ CMLN	30.9100	40.1100	-0.1156	0.0820	0.0339	-0.0508	0.0420	0.0178

Şekil 7.3: Kullanılacak noktaların seçimi ve Model ve ölçü farklarının sayısal olarak incelenmesi

Hesap işlemleri:

Direkt ve ters modelleme dışında yapılan modellemenin ya da ölçü model uyumu ile ilgili bir takım sorgulamalar yapılabilir. Bu amaçla kullanılacak komutlar Analysis menüsü altında sıralanmış olup Şekil 7.4’de gösterilmektedir.



Site	Long.	Lat.	East (m)	North (m)	Up (m)	East(Mod-Obs)	North(Mod-Obs)	Up(Mod-Obs)
☒ ANKR	32.7500	39.8800	-0.0197	0.0141	0.0079	-0.0125	0.0084	0.0083
☒ DEVR	31.9000	41.1800	0.0242	0.0334	-0.0095	0.0028	0.0117	-0.0095
☒ KIBR	31.8300	40.4000	-0.0456	0.0329	0.0154	-0.0172	0.0186	0.0051
☒ SIVR	31.8100	39.5600	-0.0323	0.0257	0.0132	-0.0111	0.0059	0.0189
☒ ARDC	31.4700	40.5700	-0.0711	0.0531	0.0207	-0.0170	0.0238	0.0166

Şekil 7.4: Analiz için kullanılan menü

Sonuçların ve elde edilen parametrelerin saklanması:

Elde edilen direkt ve ters modelleme sonuçlarının başka bir analizde kullanılmak üzere saklanması veya GMT yazılımı ile (Wessel ve Smith, 1991) ayrıca daha ayrıntılı ya da farklı projeksiyonda çizdirilebilmesi için gerekli kaydetme fonksiyonları tanımlanmış olup Şekil 7.5’ de gösterilmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yerin iç süreçleri hakkındaki bilgilerimizin önemli bir bölümü yüzey ve yüzeye yakın bölgelerle sınırlıdır. Bu durum karmaşık bir yapıya sahip depremel yer değiştirmelerin jeodezik ölçülerle belirlenmesi ve modellenmesi konusunu daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Öyle ki, gerçekte hiçbir model, yanal ve düşey yönde oldukça heterojen yer kabuğunun tüm özelliklerine uyan bir model olmayacaktır. Ne var ki, gerçekçi tahminler ancak verilere dayalı olarak yapılabilir. Bu anlamda, jeodezi yer bilimlerini içerisinde ayrı bir öneme sahiptir. Deprem döngüsünün temelini oluşturan strain birikimi ve/veya stres transferinin deprem olmadan önce sayısal olarak ifade edilebilmesi ancak yüksek prezisyonlu ölçme sistemleri ve yöntemleriyle olanaklıdır.

Bu anlamda depremel yer değiştirmelerin jeodezideki önemi iki yönlü bir olgu olarak değerlendirilebilir. Birincisi, ülkedeki yatırımların aksamadan devam edebilmesi için altyapı faaliyetlerinin temelini oluşturan jeodezik ağların söz konusu etkilerden arındırılması, diğeri ise ülkemiz için kaçınılmaz bir olgu olan depremin yüzeydeki etkilerinin cm duyarlılığında sayısal olarak ifade edilerek, diğer bilim dalı ve disiplinlere vazgeçilmez bir girdi olarak sunulmasıdır. Ülkemizde son yıllarda meydana gelen İzmit ve Düzce Depremlerinin etki alanı ve kaynak mekanizmalarının belirlenmesinde jeodezik veriler çok önemli bir role sahiptir (Aktuğ ve diğ., 2000), (Reilinger ve diğ., 2000), (Ayhan ve diğ., 2001), (Bürgmann ve diğ., 2002a, 2002b), (Ergintav ve diğ., 2002), (Aktuğ, 2003),

1999 yılında meydana gelen 17 Ağustos İzmit ve 12 Kasım Düzce Depremleri suya doymuş zemin yapısına sahip bir bölgede meydana gelmiştir. Bu durum özellikle hesaplanan düşey yer değiştirmelerin tektonik etkiler dışında zemin sıvılaşması, erozyon, çökme gibi yerel etkilere maruz kaldığını göstermektedir.

Deprem öncesi ve sonrası yüzey ölçüleri (GPS, inSAR, Nivelman vb.) ile hesaplanan deprem anı yer değiştirmeler deprem kaynak mekanizmasını oluşturan geometri ve kayma değerlerinin elde edilmesi için modellenmektedir. Her ne kadar yersel yatay kontrol ağları ve ölçüleri bu amaçla çeşitli zamanlarda kullanılmış olsa da (Prescott

ve Yu, 1986), (Segall ve Matthews, 1988) 1999 yılında ülkemizde meydana gelen depremlere deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesi için sadece GPS ve inSAR ölçüleri kullanılmıştır (Ayhan ve diğ., 2001), (Reilinger ve diğ., 2000). Söz konusu ölçme sistemlerinin düşey hareketlere duyarlı olduğu değerlendirildiğinde, üç boyutlu yer değiştirmeler ile elde edilecek model parametrelerinin zemin sıvılaşması, erozyon, çökme gibi yerel değişimlerden etkileneceği değerlendirilmektedir. Aliosmanoğlu ve Çelik (2002) özellikle fayın doğu kesiminde jeodezik altyapı hasarların zemin yapısından oldukça etkilendiğini belirtmektedir.

Özellikle inSAR temel olarak düşey hareketlere duyarlı bir ölçme sistemidir. Bu durum zemin yapısı itibarıyla erozyon, çökme, kayma gibi doğrudan sismik olmayan ya da zemin sıvılaşması gibi özel deformasyonlara maruz bölgelerde bu verilerle sağlıklı değerlendirme yapılmasını zorlaştırmaktadır. Aynı dezavantaj nivelman ölçüleri için de söz konusudur.

Diğer yandan mekânsal çözünürlük GPS ölçülerinin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Örneğin, iki fay düzlemine sahip bir deprem kaynak mekanizmasının modellenebilmesi için ondan fazla sayıda istasyonda deprem öncesi ve sonrasına ait ölçülere gereksinim bulunmaktadır.

Geliştirilen modellerin karşılaştırılması ve test edilmesi için İzmit depremi fay geometrisi ve kayma değerlerinin farklı verilerden hesaplandığı üç farklı örnek kullanılmıştır. Bunlar (Reilinger ve diğ., 2000)'de verilen iki parçalı model, diğerleri ise (Wright ve diğ., 2001)'de verilen ağırlıklı olarak inSAR ölçülerine dayanan modellerdir.

İzmit depremi kaynak mekanizması için çeşitli modeller bulunmakla birlikte biri iki parçalı diğeri beş parçalı iki farklı model GPS ölçüleri ile tam bir uyum içerisindedir. Ancak uygulama bölümünde diğer modellerin ve geliştirilen modellerin ölçülerle uyumu sayısal ve grafik olarak gösterilmekte olup, geliştirilen modellerin mevcut modeller içerisinde İzmit Depremi kaynak mekanizmasını GPS ölçüleri ile en uyumlu modeller oldukları değerlendirilmektedir. Geliştirilen model incelenen beş parçalı modeller içerisinde en uyumlu olmakla beraber Karadere parçası beklenene göre çok daha kuzeyde, Sapanca parçası ise doğu-batı güneydoğu batı doğrultulu olarak bulunmuştur. İzmit Depremi yüzey kırıklarına uymamakla birlikte verilerle olağanüstü uyumu nedeniyle ayrıca incelenmesi yararlı olacaktır. Sonuç olarak

verilerin ters çözümü ile elde edilen deprem kaynak parametrelerinin “gerçek parametreler” değil, belirli bir veri grubuna en iyi uyan parametreler olduğu unutulmamalıdır. Reilinger ve diğ., (2000)’de bulunan fay düzlemi kayma miktarları (Feigl ve diğ., 2002)’de belirtildiği üzere olması gerekenden daha küçüktür. Geliştirilen her iki modelde de Hersek deltası ve Karadere parçasına doğru azalan ancak merkezde 4-5 m’ye ulaşan kayma değerleri verilmektedir. Bu durum çeşitli kaynaklarda verilen (Reilinger ve diğ., 2000) (Bürgmann ve diğ., 2002b), (Ergintav ve diğ., 2002) ve kayma dağılımını inceleyen çalışmaların yeniden ele alınmasının yararlı olacağı anlamına gelmektedir. Özellikle InSAR verilerinin modellerle zaman zaman uyuşmaması çeşitli kaynaklarda yer kabuğu reolojisi ile açıklanmaya çalışılmıştır (Bürgmann ve diğ., 2002b) (Feigl ve diğ., 2002). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen hem iki hem de üç boyutlu ters çözümler, iki boyutlu çözümlerle elde edilen modellerin düşey hareketlerin de modellenmesinde güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum bir başka şekilde şöyle de açıklanabilir: Yatay yer değiştirmeler 2 m’yi bulurken, düşey yer değiştirmeler genel olarak 15 cm nin altındadır. Ayrıca İzmit Depreminin etki alanındaki düşey yer değiştirmelerin yataylara göre oldukça dağınık olduğu göze çarpmaktadır. Geliştirilen kaynak mekanizması çözümleri (2 ve 5 parçalı modeller), Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS)’nden beklenildiği şekilde Karadere parçası haricinde tamamen düşey kabul edilebilecek eğim açıları vermiştir. Yoğun olarak kullanılan inSAR verileri ise genel olarak düşeye duyarlıdır. Diğer bir ifade ile inSAR verileri ile yatay yer değiştirmelerin elde edilmesi öncelikle söz konusu dağınık düşey etkilerle zorlaşmaktadır. Düşey etkilerin dağınık yapısının sismotektonik ile ilgisi olmayan erozyon, toprak kayması, çökme gibi yerel etkenler ya da zemin sıvılaşması gibi daha karmaşık deformasyon süreçlerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Nitekim Marmara depremleri öncesinde ve sonrasında yapılan nivelman ölçüleri ile GPS ölçüleri arasında da uyumsuzluk bulunmaktadır (Ayhan, 2003)

Çalışma sırasında elde edilen diğer bir bulgu ise, nispeten az parçalı basit geometrili deprem kaynak mekanizmalarının basit geometrilerinden kaynaklanan ve yakın istasyonların fayın karşı tarafında kalması gibi problemlerin çok parçalı nispeten daha karmaşık kaynak mekanizmalarıyla giderilebildiği ancak çok segmetin bir araya gelmesinden dolayı fay uçlarındaki istasyonların uyumsuz olabileceğidir. Bu anlamda fay sınırlarına yakın istasyonlardaki yer değiştirmelerin modellenmesinde

çok parçalı kaynak mekanizmalarının, faydan uzak istasyonlara ait yer değiştirmelerin modellenmesinde ise nispeten az parçalı kaynak mekanizmalarının daha etkin olduğu söylenebilir.

Gerek beş parçalı, gerekse iki parçalı modellerde derinlik beklenenden daha az bulunmuştur. Marmara'daki sismojenik zon kalınlığının oldukça küçük olduğu daha önde (Meade ve diğ., 2002)'de dile getirilmiştir.

Çalışma kapsamında diğer bir uygulama ise 03.02.2002 tarihinde Çay (Afyon)'da gerçekleşen Mw6.5 büyüklüğündeki deprem için gerçekleştirilmiştir. Başlangıç model değerleri için sismolojik ve jeolojik verilerden yararlanılmıştır. Söz konusu deprem için jeodezik veriler ile elde edilmiş başka bir fay mekanizması modeli bulunmadığından elde edilen model sismolojik çözümler dışında önemli bir sonucu oluşturmaktadır. Koçyiğit ve diğ. (2002) jeolojik arazi gözlemlerinde toplam 30 km uzunluğunda bir alanda yüzey kırıkları gözlemlemiştir. GPS ölçülerinin ters modellemesi sırasında 5-35 km olarak verilen fay uzunluğu başlangıç değerleri ile 33.26 km olarak bulunan fay düzlemi uzunluğu jeolojik verilerle uyumludur. Fay düzleminin alt noktasının derinliği GPS ölçüleri ile 11.7 km olarak bulunmuştur. Aynı gün dört orta büyüklükte meydana gelen bölge için ana şokun ortalama 5.8 km derinlikte olduğu söylenebilir. Sismik ters çözümlerde benzer şekilde 2.2 – 10 km arasında derinlik vermektedir. Fay düzleminin doğrultusu için 40^0 - 130^0 arasında sınır değerleri kullanılmasına rağmen azimut (strike) $90^0.37$ olarak bulunmuştur. Bu durum fay düzleminin güneyde Akşehir Fay Zonunu izlemediği Eber Gölünün güneyine kadar devam ettiğini göstermektedir. Diğer bir ifade ile Koçyiğit ve diğ. (2002) tarafından Akşehir Fay Zonunun Sultandağ-Çay arasındaki güneydoğu-kuzeybatı uzanımlı bölümün hareket ederek, 2000 yılındaki depremle Sultandağ-Akşehir arasında gelişen hareketi kuzeybatıdan tamamladığı görüşüyle çelişmektedir. Demirtaş ve diğ. (2003) tarafından Üçkuyu Fayı olarak belirtilen ve Eber Gölü güneyinden geçen fay ise hesaplanan fay düzleminin güney ve kuzey kolu arasında kalmaktadır. Fay düzleminin eğim açısı 43.21^0 olarak elde edilmiştir. Çay-Eber arasındaki faylanma (Koçyiğit ve diğ., 2002)'de belirtildiği şekilde listrik faylanmanın olduğu belirtilen Akşehir Fay Zonu özelliklerini taşıyorsa, hesaplanan değer yüzeye yakın kesimler için olması gerekenden düşük olabilir. Ancak Emre ve diğ. (2002) bu bölümün düşük eğim açısına sahip olduğu belirtmektedir.

Fay düzlemi üzerindeki kayma değerleri eğim ve doğrultu atım için sırasıyla 0.51 m ve 0.26 m olarak bulunmuştur. Bu haliyle sol yanal bileşeni olan verrev atımlı bir normal faylanma özelliği göstermektedir. Fay düzlemi üzerinde hesaplanan atım değerlerinin yüzeyde çok daha küçük olduğu bilinmektedir. Nitekim, Emre ve diğ. (2002) maksimum 25 cm, Koçyiğit ve diğ. (2002) 1-22 cm, Koral ve Yılmaz (2003) 5-25 cm düşey atım gözlemlemişlerdir. Kullanılan GPS istasyonlarından sadece ikisi yüzeyden düşey atım gözlenebilecek kadar yakındır. Model sonuçları da bu iki istasyon dışında yüzeyde ölçülebilecek anlamlı düşey atım beklenmediğini ortaya koymaktadır.

Gerek İzmit gerek Çay Depremi ile ilgili çalışmalarda fay geometrisi ve dislokasyon değerleri ile yüzey yer değiştirmeleri arasındaki ilişkinin bilinen parametre tahmin ve optimizasyon yöntemlerinin yetersiz kaldığı ve daha gelişkin yöntemlere ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen modelleme yazılımı DEFORM'dan etkin bir şekilde yararlanılmıştır. Ayrıca girilen ya da hesaplanan modellerin dünya üzerindeki herhangi bir bölgedeki sonuçlarının gösterilebilmesi amacıyla tüm dünya sahil verileri kapalı poligonlar şeklinde derlenmiş ve programın hızlı ve etkin şekilde diskten okuyup gösterebileceği şekilde düzenlenmiştir.

Sismometreler ile hız ve deplasman ölçülememekte (satüre olmakta), hız ve deplasman ölçülebilmesi için kuvvetli yer hareketi kaydı yapan ivmeölçerler gerekmektedir. Mevzuat tüm barajlarda ivmeölçerlerin bulundurulmasını zorunlu tutmakla beraber, büyük bölümünde bulunmamakta, bulunanlardakilerin de işlevini yerine getirmediği görülmektedir. Örneğin, etki alanında 50'den fazla barajın bulunduğu 1999 Marmara Depremlerinde kayıt alınamamıştır (Eyidoğan, 2006).

Sismometrelerin çalışma aralığı genel olarak 100 Hz civarında olup, maksimum 200 Hz'e kadar çalışabilmektedirler. Hızla gelişen GPS teknolojisi 20 Hz'e kadar çıkmıştır. Bu durum artarak devam eden sabit GPS istasyonları ile ileride dinamik sonuçların da elde edilebileceğini ve buna bağlı olarak jeodezik ölçümlerin ters çözümlerinde dinamik sonuçların da elde edilebileceğini göstermektedir.

Jeodezik ve sismik veriler karşılıklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Farklı disiplinlerin üstün yanlarından yararlanan çok-disiplinli çalışmaların doğası gereği karmaşık deprem olgusu hakkındaki bilgilerimizin geliştirilmesinde daha etkin bir rol

oynayacağı değerlendirilmektedir. GPS ile elde edilen çözümlerin statik ve kümülatif yerdeğiştirmeleri içerdiği değerlendirildiğinde, her bir sismik hareketin ayrı ayrı incelendiği sismolojik verilerle doğrudan karşılaştırılması oldukça güçtür. Örneğin Çay Depreminin olduğu gün ana şok dışında üç büyük deprem daha olmuştur. Dolayısıyla GPS verileri ile elde edilen sonuçlar ana şok dışındaki depremlerin de etkisini içermektedir. Bu durum aslında sismoloji, jeoloji ve jeodezi kaynaklı verilerin birlikte kullanılma zorunluluğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

Sonuçlar oldukça ümit vericidir. Bu tür çalışmaların çok-disiplinli çalışmalarda jeodezinin diğer yer bilimleriyle ilişkisini geliştireceği ve jeodezinin çok-disiplinli çalışmalara katılımını artıracığı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aki, K. ve Richards, P.G.**, 1980. Quantitative Seismology Theory and Methods, I-II, W.H. Freeman Co., San Francisco.
- Aktuğ, B.**, 2003. Elastik Yarı-Uzay Modelleri ve Depremesel Koordinat Değişimlerine Dinamik Bir Yaklaşım, *Harita Dergisi*, **129**, 1-19.
- Aktuğ, B.**, 2004. Günümüz Jeodezik Ölçü Sistemlerinde Veri İndirgemesi ve Kısıtların Ele Alınması, *Harita Dergisi*, **131**, 14-28.
- Aliosmanoğlu, Ş., Çelik, R.N.**, 2002. Depremler nedeniyle oluşan jeodezik altyapı hasarlarının büyük ölçekli harita çalışmalarına etkisi, *Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu*, 2002, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-18 Ekim, s. 224-231.
- Aoki, Y., P. Segall, T. Kato, P. Cervelli, and S. Shimada**, 1999. Imaging magma transport during the 1997 seismic swarm off the Izu Peninsula, Japan, *Science*, **286**, 927-930.
- Apaydın, A.**, 1996. Optimizasyon, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Matbası, Ankara.
- Arnadottir, T., and P. Segall**, 1994. The 1989 Loma Prieta earthquake imaged from inversion of geodetic data, *J. Geophys. Res.*, **99**, 21,835-21,855.
- Ayhan, M. A., Demir, C., Kiliçoğlu, A., Sanli, I., and Nakiboglu, S. M.**, 1999. Crustal motion around the western segment of the north Anatolian fault zone: geodetic measurements and geophysical interpretation, , *Proceedings of the 12nd International Conference of International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG99)*, Birmingham, United Kingdom, 18-30 July, s. 111-117.
- Ayhan, M. E., R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, B. Aktug, E. Herece, and R. E. Reilinger**, 2001. Kinematics of the Mw7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 367-370.
- Ayhan, M.E., Demir, C., Lenk, O., Kiliçoğlu, A., Aktuğ, B., Açıkgöz, M., Fırat, O., Şengün, Y.S., Cingöz, A., Gürdal, M.A., Kurt, A.İ., Ocak, M., Türkezer, A., Yıldız, H., Bayazıt, N., Ata, M., Çağlar, Y., Özerkan, A.**, 2002. *Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A)*, Harita Dergisi, **16**, 1-47.
- Barka, A.**, 1996. Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 1238-1254.

- Basu, A., Frazer, L.N.**, 1990. Rapid Determination of the Critical Temperature in Simulated Annealing Inversion, *Science*, **249**, 227-241.
- Berg, B.A.**, 1993. Locating Global minima in optimization problems by a random-cost approach, *Nature*, **361**, 89-112.
- Borre K., Strang G.**, 1997. Linear Algebra, Geodesy and GPS, Wellesley-Cambridge Press, Wellesley.
- Bos, A. G., Usai, S., Spakman, W.**, 2004. A joint analysis of GPS motions and InSAR to infer the coseismic surface deformation of the Izmit, Turkey earthquake, *Geophys. J. Int.*, **158**, 849–863
- Britannica**, 2005. <http://www.britannica.com>
- Broyden, C.G.**, 1970. The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms, *J. Inst. Maths. Applics.*, **6**, 76-90.
- Bürgmann, R., P. Segall, M. Lisowski, and J. Svarc**, 1997. Postseismic strain following the 1989 Loma Prieta earthquake from GPS and leveling measurements, *J. Geophys. Res.*, **102**, 4933–4955.
- Bürgmann, R., P. A. Rosen, E. J. Fielding**, 2000. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **28**, 169–209.
- Bürgmann, R., Ergintav, S., Segall, P., Hearn, E., McClusky, S., Reilinger, R., Woith, H., Zschau, J.**, 2002a. Time-Dependent Distributed Afterslip, on and Deep Below the İzmit Earthquake Rupture, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 126-137.
- Bürgmann, R., M. E. Ayhan, E. J. Fielding, T. Wright, S. McClusky, B. Aktuğ, C. Demir, O. Lenk, and A. Türkezer**, 2002b. Deformation during the 12 November 1999, Düzce, Turkey Earthquake, from GPS and InSAR Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 161–171.
- Cervelli, P., Murray, M., Segall, P., Aoki, Y., Kato, T.**, 2001. Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, **106**, 11,217-11,237.
- Cohen, S.C.**, 1999. Numerical Models of Crustal Deformation in Seismic Zones, *Advances in Geophysics*, **41**, 33-56.
- Demirtaş, R., İravul, Y., Yaman, M.** 2003. 03 Şubat 2002 Eber ve Çay Depremleri, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Rapor No:006, Ankara.
- Dong, D., Herring, T. A., King, R. W.**, 1998. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *J. Geod.*, **72**, 200–211.
- Du, Y., Aydın, A., Segall, P.**, 1992. Comparison of various inversion techniques as applied to the determination of a geophysical model for the 1983 Borah Peak Earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **82**, 1840-1866.

- Emre, Ö. Duman, T.Y., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F., Kuşçu, İ.**, 2002. 03 Şubat 2002 Sultandağı Depremi (Mw6.3) Ön Değerlendirme Raporu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ergintav, S., Bürgmann, R., McClusky, S.**, 2002. Postseismic deformation near the İzmit earthquake (17 August 1999, M 7.5) rupture zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 194–207.
- Eyidoğan, H.**, 2006. Kişisel görüşme, Tez izleme toplantısı, İstanbul Teknik Üniversitesi, 07 Mart 2006, İstanbul.
- Feigl, K. L., and Dupré, E.**, 1999, RNGCHN: a program to calculate displacement components from dislocations in an elastic half-space with applications for modeling geodetic measurements of crustal deformation, *Computers and Geosciences*, **25**, 695-704.
- Feigl, K.L. Sarti, F., Vadon, H., McClusky, S., Ergintav, S., Durand, P., Burgmann, R., Rigo, A., Massonnet, D. and Reilinger, R.**, 2002. Estimating slip distribution for the İzmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT and SPOT measurements, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **92**, 138–160.
- Fletcher, R. ve Powell, M.J.D.**, .1963. A Rapidly Convergent Descent Method for minimization, *Computer Journal*, **6**, 163-168.
- Fletcher, R.**,.1970. A New Approach to Variable Metric Algorithms, *Computer Journal*, **13**, 317-322.
- Freund, L.B., Barnett, D.M.**, 1976. A two-dimensional analysis of surface deformation due to dip-slip faulting, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **66**, 667-675.
- Gelb, A.**, 1974. Applied Optimal Estimation, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Gill, P.E., Murray, W., Wright, M.H.**, 1981. Practical Optimization, Academic Pres., London.
- Goldberg, D.**, 1988. Genetic Algorithms, Addison Wesley, New York.
- Goldfarb, D.**, 1970. A Family of variable metric updates derived by variational means, *Mathematics of Computing*, **24**, 23-26.
- Grafarend E. W. and Sanso F.**, 1985. Optimization and design of geodetic networks, Springer-Verlag, New York.
- Harris, R., and P. Segall**, 1987. Detection of a locked zone at depth on the Parkfield, California segment of the San Andreas fault, *J. Geophys. Res.*, **92**, 7945–7962.
- Hearn, E. H., Bürgmann, R., Reilinger, R.**, 2002. Dynamics of İzmit earthquake postseismic deformation and loading of the Düzce earthquake hypocenter, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 172–193.
- Johnson, K.M, Hsu, Y.J., Segall, P., and Yu, S.B.**, 2001. Fault geometry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake imaged from inversion of GPS data, *Geophysical Research Letters*, **28**, 2285-2288.

- Kirkpatrick, S., Gelatt C. D.Jr., Vecchi, M. P.**, 1983. Optimization by Simulated Annealing, *Science*, **220**, 671-680.
- Koch, K.R.**, 1987. Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Kaymakçı, N., Şaroğlu, F.**, 2002. 3 Şubat 2002 Çay (Afyon) Depreminin Kaynağı ve Ağır Hasarların Nedenleri: Akşehir Fay Zonu, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Tektonik Araştırma Birimi Raporu, Ankara.
- Koçyiğit, A., Özacar, A.**, 2003. Extensional neotectonic regime through the NE edge of outer Isparta Angle, SW Turkey: New Field and Seismic Data, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **12**, 67-90.
- Lambeck, K.**, 1988. Geophysical Geodesy, Clarendon Press, Oxford.
- Larson, K., R. Bürgmann, R. Bilham, and J.T. Freymueller**, 1999. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, **104**, 1077-1093.
- Leick, A.**, 1990. GPS Satellite Surveying, Wiley & Sons Publication, New York.
- Levenberg, K.**, 1944. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least-Squares, *Quart. Appl. Math.*, **2**, 164-168.
- Liebelt**, 1967, An Introduction to Optimal Estimation, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Marquardt, D.W.**, 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-Linear Parameters, *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, **11**, 431-441.
- MathWorks**, 1992. MATLAB Reference Guide, The Mathworks Inc., Massachusetts.
- MathWorks**, 1996. Optimization Toolbox, User's Guide, The Mathworks Inc., Massachusetts.
- Meade, B., B. Hager, S. McClusky, R. Reilinger, S. Ergintav, O. Lenk, A. Barka, and H. Özener**, 2002. Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by global positioning system measurements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 208-215.
- Menke, W.**, 1989. Inversion Methods in Geophysics Academic Press, Inc., New York.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., Teller, E.**, 1953. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, *J. Chem. Phys.*, **21**, 1087-1092.
- Mikhail, E.M.**, 1976, Observations and Least Squares, IEP, New York,
- Murray, M. H., Marshall, G., Lisowski, M., Stein, R.**, 1996. The 1992 M=7 Cape Mendicino, California, earthquake: Coseismic deformation at the south end of the Cascadia megathrust, *J. Geophys. Res.*, **101**, 17,707-17,725.
- Nakiboğlu, S.M., Ayhan, M.E., Demir, C., Kılıçoğlu, A., Şanlı, İ.**, (1998). Kuzey Anadolu Batı Kesiminde Kabuk Hareketleri: Jeodezik Ölçümler ve Jeofizik Yorumları, Proje No.: İNTAG 910, Ankara.

- Nelder, J.A. ve Mead, R.** , 1965. A Simplex Method for Function Minimization, *Computer J.*, **7**, 308-313.
- Nur, A., Mavko, G.**, 1974. Postseismic viscoelastic rebound, *Science*, **183**, 204–206.
- Okada, Y.**, 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Prescott, W. H., S.B. Yu**, 1986. Geodetic measurement of horizontal deformation in the northern San Francisco Bay region, California, *J. Geophys. Res.*, **91**, 7475–7484.
- Press, F.**, 1965. Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1211-1226.
- Reid, H.F.**, 1911. The Elastic Rebound Theory of Earthquakes, *Bull. Dept. Geol. Univ. Calif.*, **6**, 413-444.
- Reilinger, R. E., S. Ergintav, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, A., Barka, O. Gurkan, L. Hearn, K. L. Feigl, R. Cakmak**, 2000. Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M _{7.5}, Izmit, Turkey earthquake, *Science*, **289**, 1519–1524.
- Rothman, D.H.**, 1985. Nonlinear inversion, statistical mechanics and residual statistics estimation, *Geophysics*, **12**, 2784-2796.
- Rybicki, K.**, 1971, The elastic residual field of a very long strike-slip fault in the presence of a discontinuity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **61**, 79-92.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Boray, A.**, 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri. MTA Rapor, No. 8174, 394 s.
- Savage J.C., Burford, R.O.**, 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California, *J. Geophys. Res.*, **78**, 832-845.
- Schwefel, H.-P.**, 1981. Numerical optimization of computer models. Chichester: Wiley & Sons.
- Segall, P., and M. Matthews**, 1997, Time dependent inversion of geodetic data, *J. Geophys. Res.*, **103**, 22,391-22,409.
- Segall, P., Matthews, M.**, 1988. Displacement Calculations from geodetic data and the testing of Geophysical Deformation Models, *J. Geophys. Res.*, **93**, 14,954-14,966.
- Segall, P., R. Burgmann, and M. Matthews**, 2000. Time dependent deformation following the 1989 Loma Prieta earthquake, *J. Geophys. Res.*, **105**, 5615–5634.
- Shanno, D.F.**, 1970. Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization, *Mathematics of Computing*, **24**, 647-656.
- Steema Software**, 2002. <http://www.steema.com>, TeeChart VCL, Avinguda Montilivi, Catalonia, Spain.

- Steakeete, J.A.**, 1958. On Volterra's Dislocations in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys.*, **36**, Canada.
- Turcotte, D. L., Schubert, G.**, 1982. Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems, John Wiley&Sons, New York.
- Vakov, A.V.**, 1996. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism., *Tectonophysics*, **261**, 97-113.
- Vanicek,P.,Krakiwsky,E.J.**, 1982, Geodesy: The Concepts, North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- Wang, R., Lorenzo-Martín, F. ve Roth, F.**, 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust - FORTRAN programs EDGRN/EDCMP, *Computer and Geosciences*, **29**, 195-207.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., Genrich, J.**, 1997. Southern California Permanent GPS Array, Spatial Filtering of Daily Positions for estimating coseismic and post-seismic displacements induced by the 1992 Landers Earthquake, *J. Geophys. Res.*, **102**, 18057-18070.
- Weisstein, E.W.**, 2005. Rosenbrock Function.From [MathWorld](http://mathworld.wolfram.com/RosenbrockFunction.html), A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/RosenbrockFunction.html>
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J.**, 1994. New Empirical Relations among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacements, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.
- Wessel, P., Smith, W. H. F.**, 1991. Free software helps map and display data, *EOS*, **72**, 435-441.
- Wikipedia**, 2005. <http://en.wikipedia.org/wiki/Optimization>
- Wright, T. J., Fielding, E. J., Parsons, B. E., and England, P. C.**, 2001, Triggered slip: observations of the 17 August 1999 Izmit (Turkey) earthquake using radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1079-1082.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Ankara’da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamlamıştır. 1991 yılında Kuleli Askeri Lisesinde lise öğrenimi tamamlayarak, 1995 yılında Kara Harp Okulundan harita subayı olarak mezun olmuştur. 1997-1999 yıllarında, M.S.B.Harita Genel Komutanlığı Harita Yüksek Teknik Okulundaki öğrenimini tamamlayarak harita mühendisi ünvanını almıştır.

1997 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesinde yüksek lisans çalışmasına başlamış ancak çeşitli nedenlerle ayrılmıştır. 1999 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü/ABD’de, 2001 yılında Waseda ve Tokai Üniversiteleri/Japonya’da, 2006 yılında ise Nice Üniversitesi/Fransa ve Oxford Üniversitesi/İngiltere’de yer kabuğu hareketlerinin GPS gözlemleri ile belirlenmesi konusunda araştırmacı olarak çalışmıştır. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliğinde yüksek lisans çalışmasını tamamlayarak Yüksek Mühendis ünvanı almıştır.

Kendisi halen, Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Komutanlığı’nda görev yapmakta olup, bugüne kadar Jeodezi Dairesi Başkanlığında; TUTGA (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı)’nın kurulması, geliştirilmesi ve hesap çalışmaları, İzmit, Düzce, Çerkeş, Bingöl Depremlerinde meydana yüzey yer değiştirmeleri ve fay mekanizmalarının belirlenmesi, bölgesel deprem öncesi ve sonrası deformasyonların belirlenmesi gibi çalışmalarda görev almış, GPS ölçmeleri, GPS hesap çalışmaları, nirengi sıklaştırması konularında sayısız kurs vermiştir. Halen Harita Yüksek Teknik Okulu öğretim görevlisi olup, Dengeleme, Uzay Jeodezi, GPS Uygulamaları, Temel GPS Ölçmeleri ve GPS ile Nirengi Sıklaştırması teorik ve uygulama derslerini vermektedir. Aktuğ evli olup, İngilizce bilmektedir.