

**FAY DEĞİŞTİRGENLERİNİN  
BELİRLENMESİNDE GPS TABANLI BİR  
JEODEZİK AĞ GEOMETRİSİNİN  
ENİYİLEMESİ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Müh. GÜLŞEN TAŞKIN**

Anabilim Dalı : Bilşim  
Programı : Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik

Temmuz 2003

FAY DEĞİŞTİRGENLERİNİN  
BELİRLENMESİNDE GPS TABANLI BİR  
JEODEZİK AĞ GEOMETRİSİNİN  
ENİYİLEMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Müh. GÜLŞEN TAŞKIN

702011024

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Temmuz 2003

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Temmuz 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan Saygın

Tez Eş Danışmanı : Doç. Dr. Semih Ergintav

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nüzhet Dalfes

: Doç. Dr. Hasan Dağ

: Doç. Dr. Ergin Tarı

Temmuz 2003

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilimsel desteğini esirgemeyen sevgili hocam, Prof. Dr. Hasan Saygın'a teşekkür ederim.

Tez konumda oldukça emek sarfeden ve yoğun işlerinin arasında özveri ile vakit ayırıp yönlendiren sevgili hocam, Doç. Dr. Semih Ergintav'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca yorum ve desteklerinden ötürü Hüseyin Kaya'ya, Sevdâ Üsküplü'ye, tezimi okuyan sevgili arkadaşım Oğuzhan Ceylan'a ve tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Temmuz 2003

Müh. GÜLŞEN TAŞKIN

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	vii
<b>TABLO LİSTESİ</b>	viii
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	x
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	xi
<b>ÖZET</b>	xii
<b>ABSTRACT</b>	xiii
<b>1 Giriş</b>	1
<b>2 Jeofizikte Modelleme</b>	4
2.1 Jeofizikte Modellemeye Giriş . . . . .	4
2.1.1 Jeofizikte Modellemenin Amaç ve Kapsamı . . . . .	5
2.1.2 Jeofizikte Problem Çözümünde Temel İlkeler . . . . .	6
2.1.3 Jeofizikte Problem Çözüm Yöntemleri . . . . .	7
2.2 Sonsuz Uzunluktaki Yanal Atıllımlı Bir Fayın Elastik Yarı Uzay Modeli . . . . .	9
<b>3 Genelleştirilmiş Ters Kuram ve Jeofizikte Ters Problem Çözümleri</b>	13
3.1 Giriş . . . . .	13
3.2 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Problemler . . . . .	14
3.3 Aşırı Tanımlı Sistemlerin Enküçük Kareler İle Çözümü . . . . .	17
3.4 Doğrusal Olmayan Problemlerin Enküçük Kareler ile Ters Çözümü	20
<b>4 Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS)</b>	25
4.1 Giriş . . . . .	25
4.2 GPS Birimleri . . . . .	25
4.2.1 Uzay Birimi . . . . .	25

4.2.2	Kontrol Birimi . . . . .	25
4.2.3	Kullanıcı Birimi . . . . .	26
4.3	GPS Ölçme Yöntemleri . . . . .	26
4.3.1	Sürekli Ölçme Yöntemi . . . . .	26
4.3.2	Kampanya Tipi Ölçme Yöntemi . . . . .	26
4.4	GPS Ölçülerinde Hata Kaynakları . . . . .	26
4.5	GPS Koordinatlarından Yerel Koordinatlara Geçiş . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Olasılıksal Kavramlar</b>	<b>28</b>
5.1	Rastlantısal Değişken ve Rastlantısal Olay . . . . .	28
5.2	Olasılıksal Kavramlar . . . . .	29
5.2.1	Ortalama Değer . . . . .	29
5.3	Değişinti (Varyans) ve Standart Sapma . . . . .	30
5.4	İlişki Katsayısı . . . . .	30
5.5	Normal Dağılım (Gauss Dağılım) . . . . .	31
5.6	Chi-kare ( $\chi^2$ ) Testi . . . . .	31
5.7	Değiştirgen Tahminlerinin Güven Aralıkları . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Benzetim ve Eniyileme</b>	<b>33</b>
6.1	GPS Tabanlı Bir Jeodezik Ağın Benzetim ve Eniyilemesi . . . . .	33
6.2	Matematiksel Modelin Oluşturulması . . . . .	33
6.3	Benzetim . . . . .	34
6.3.1	Yapay Verilerin Oluşturulması . . . . .	34
6.3.2	Problemin Çözümü . . . . .	36
6.4	Algoritma . . . . .	39
6.5	Eniyileme . . . . .	40
6.5.1	Eniyileme Ölçütleri . . . . .	40
6.5.2	Nokta Sayılarına Göre Eniyileme . . . . .	40
6.5.3	İstasyon Noktalarının Konumlarının Belirlenmesi . . . . .	41
6.5.4	Gürültünün etkisi . . . . .	44
6.5.5	En Uygun İstasyon Dağılımları . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Marmara GPS Ağı Üzerinde Uygulama</b>	<b>47</b>
7.1	Marmara GPS Ağı (MAGNET) . . . . .	47
7.1.1	MAGNET'de Gerçek Veriler ile Değiştirgen Kestirimi . . . . .	51
<b>8</b>	<b>Paralel İşlemler</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>SONUÇ</b>	<b>58</b>

<b>KAYNAKLAR</b>	60
<b>EKLER</b>	
<b>A ANA PROGRAM</b>	63
<b>B ALT PROGRAMLAR</b>	68
<b>C MAKEFILE</b>	73

## KISALTMALAR

<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>MAGNET</b>	Marmara GPS Ağı
<b>KAF</b>	Kuzey Anadolu Fay Hattı
<b>NAVSTAR</b>	Navigation System with Time and Ranging
<b>DoD</b>	Department of Defence
<b>OCS</b>	Operational Control System
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984
<b>ED50</b>	European Datum 1950
<b>BARD</b>	Bay Area Regional Deformation Network
<b>SCIGN</b>	Southern California Integrated GPS Network
<b>FREDNET</b>	The Friuli Regional Deformation Network
<b>OCS</b>	Operational Control System
<b>TÜBİTAK</b>	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
<b>MAM</b>	Marmara Araştırma Merkezi
<b>YDBAE</b>	Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü
<b>UTM</b>	Universal Traverse Mercator
<b>YBMG</b>	Yüksek Boyutlu Model Gösterilimi
<b>NFS</b>	Network File System
<b>NIS</b>	Network Information System

## TABLO LİSTESİ

### Tablo

7.1	MAGNET üzerinde elde edilen gözlemsel veriler . . . . .	48
-----	---	----



## ŞEKİL LİSTESİ

### Şekil

2.1	Ters ve Düz Problemlerin Gösterilimi . . . . .	7
2.2	Devrik problem çözümünün işleyişi . . . . .	9
2.3	Yanal Atılımlı Faylar . . . . .	10
2.4	Elastik yarı uzayda basit bir fay modeli. Yüzeyden $H$ derinliği kadar kilitlenmiş ve bu derinliğin altında serbest bir kayma sözkonusudur. . . . .	10
2.5	$H$ değiştirgen analizi . . . . .	11
2.6	$S$ değiştirgen analizi . . . . .	11
6.1	Enbüyük uzaklık $\pm 40$ km.'de toplam istasyon sayısı 40 olan bir jeodezik ağın model gösterilimi. . . . .	36
6.2	Gürültü içeren gözlem istasyonlarının ağ üzerinde gösterilimi . .	36
6.3	5000 farklı gürültü içeren gözlemler ile elde edilen $H$ ve $S$ değiştirgenleri . . . . .	37
6.4	$S$ ve $H$ değerlerinin normalize edilmiş beklenen ve gözlemsel frekans gösterilimi . . . . .	38
6.5	Programın akış şeması, 12 ve 24. satırların arasında kalan kısım ise çekirdek fonksiyondur. . . . .	39
6.6	Gözlem istasyonlarının sayılarının arttırılması durumunda $S$ ve $H$ değiştirgenlerinin %90 güvenilirlikte kaldıkları aralıklar. . . . .	41
6.7	Gözlem sayısının artması durumunda $S$ ve $H$ değiştirgenlerinin varyansları. . . . .	41
6.8	Yüksek Boyutlu Model Gösterilim ile yapılan $S$ ve $H$ 'a ait duyarlılık yüzdeleri . . . . .	42
6.9	Gözlem istasyonlarının ağ üzerinden çıkarılma şeması . . . . .	43
6.10	%90 güvenilirlikte $H$ değiştirgenine ait güvenilirlik limitleri . . . . .	43
6.11	%90 güvenilirlikte $S$ değiştirgenine ait güvenilirlik limitleri . . . . .	43
6.12	Gürültülerin arttırılması durumunda değiştirgenlere ait varyans gösterilimi. . . . .	44

6.13	En uygun istasyon dağılımları . . . . .	45
7.1	Marmara GPS ağından bir görünüm . . . . .	47
7.2	Gözlemsel değerlerin profil üzerine izdüşümü . . . . .	49
7.3	Herhangi bir gürültü eklenmeksizin MAGNET istasyon dağılımı. .	49
7.4	Ölçme ve merkezleştirme hataları gibi gürültüleri içeren gözlemsel veriler. . . . .	50
7.5	5000 deneme sonucunda elde edilen değiştirgenlerin güvenilirlik yüzdelerinin gösterilimi. . . . .	50
7.6	MAGNET geometrisi ile belirlenen $S$ ve $H$ değerlerinin normalize edilmiş gözlemsel ve beklenen frekans gösterilimi . . . . .	51
7.7	MAGNET verilerinin kullanılması ile model değiştirgenlerinin kestirimi. . . . .	52
8.1	Tek işlemcili bir bilgisayarda deneme sayısına karşılık hesaplama süreleri. . . . .	53
8.2	Dağıtık hesaplama yapmak için kullanılan Perl betiği. . . . .	55
8.3	Tek işlemcili bir bilgisayarda deneme sayısına karşılık hesaplama süreleri. . . . .	56
8.4	Sabit bir deneme sayısı için işlemci sayılarının arttırılması durumundaki hesaplama zamanları. . . . .	57

## SEMBOL LİSTESİ

$H$	Fayın kilitli olduğu derinlik
$S$	Fayın birim zamandaki kayma miktarı
$A$	Jakobyen dizey (matris)
$\Delta \mathbf{p}$	Değiştirgen (parametre) düzeltme yöneyi (vektörü)
$\Delta \mathbf{g}$	Model tepkisi ile gözlemsel yerdeğiştirmelerin fark yöneyi
$v$	Marquardt-Levenberg Faktörü
$\chi^2$	Chi-kare

## ÖZET

Son zamanlarda, yüksek doğruluklu jeodezik ölçme yöntemlerinin artması, bu yöntemlerden biri olan Küresel Konum Belirleme Sisteminin (GPS) yerkabuğu hareketlerinin ve yerdeğiştirmelerinin belirlenmesinde kullanılmasına neden olmaktadır. Bu amaçla sürekli ve kampanya tipi GPS ölçme türleri kullanılarak deprem alanındaki sismik risk belirlenebilmektedir. Bu çalışma da, sismik risk taşıyan bölgedeki fay değiştirgenlerinin (parametrelerinin) yüksek doğrulukta tek boyutlu bir model aracılığı ile belirlenebilmesi için en uygun ağ geometrisinin tasarımının nasıl olması gerektiği sorusuna cevap aranmaktadır. Benzetim (simülasyon) teknikleri ile model kurulmuş ve farklı türde ağ değiştirgenleri için en uygun ağ tasarımları çıkarılmıştır. Bu ağ değiştirgenleri gözlem istasyonlarının sayısı, konumları ve ölçmelerin içereceği gürültü miktarı şeklindedir. Bunlara ek olarak, benzetim ile kurulan modelin gerçek dünya problemi üzerinde de bir uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama Doğu Marmara'daki Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın (KAF) kuzey kolu üzerinde yapılmıştır.

## ABSTRACT

In the recent years, the rapid growth of highly accurate geodetic surveying makes Global Positioning System (GPS) a tool to determine the crustal deformation and the displacements. For this purpose, the seismic risk in the earthquake region can be determined by using continuous and campaign type GPS surveying. In this thesis, it is desired to find an optimum geometry of a geodetic network to estimate fault parameters with high accuracy with aim of one dimensional model. The model is constructed by using simulation techniques and the optimum network design is obtained for the different network parameters. These network parameters include the number of geodetic network stations, locations of them, and the amount of the noise in the measurements. In addition, the model which is constructed by simulations is applied to real world problems. This application is realized in Northern zone of Northern Anatolian Fault in Eastern Marmara.

## BÖLÜM 1

### Giriş

Son zamanlarda yüksek doğruluklu ölçme yapabilen birtakım jeodezik ölçme yöntemlerinin geliştirilmesi, bu yöntemlerin yüksek doğruluk gerektiren alanlarda kullanılmasına olanak tanımıştır. Özellikle Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ölçme tekniği bu özellikleri sağlayan oldukça etkin bir yöntemdir.

Bu amaçla sürekli olarak yerkaşu deformasyonlarının izlenmesinde GPS gözlem istasyonlarını içeren jeodezik ağlar kurulmuştur ve geliştirilmektedir. Özellikle kabuk deformasyonlarının ve fayların aktif olduğu bölgelerde jeodezik ağlar oluşturulmuştur. GPS ölçme yöntemi ile kabuksal deformasyonları incelemeye yönelik Kuzey Kaliforniya'da BARD, Güney Kaliforniya'da SCIGN ve İtalya'da FREDNET gibi jeodezik ağlar tasarlanmıştır [1-3]. Türkiye'de ise MAGNET (Marmara GPS Network) ağı bu amaçla kurulmuştur [4].

Kabuk deformasyonlarının etkin bir biçimde izlenebilmesi için, gözlemler sonucu elde edilen verilerin doğruluğunun yüksek olması son derece önemlidir. Bu nedenle jeodezik ağdaki gözlem istasyon noktalarının uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu anlamda gözlemsel verinin kalitesini arttırmak amacı bir takım yöntemler kullanılmaktadır ve bu alanda yapılan çok sayıda çalışma vardır. Genelde bu çalışmalar, gözlemlere etki edebilecek hataları en küçük yapmaya ve veri doğruluğunu arttırmaya yönelik çalışmalardır [5].

Ölçme doğruluğunu arttırmaya yönelik ağ eniyilemesinin (optimizasyon) dışında fay değıştirgenlerini bulmayı hedefleyen eniyileme çalışmaları da vardır. Bu kapsamda yapılan çalışmalardan biri, güney Kaliforniya'da San Jacinto fayının değıştirgenlerinin belirlenmesi üzerine GPS ölçme tekniği ile kurulan bir jeodezik ağdaki gözlem istasyonlarının en uygun dağılımının belirlenmesi üzerinedir [6]. Bu çalışmada, yanal atımlı faya ait derinlik ve kayma miktarı şeklinde iki değıştirgenin kestirimi yapılmıştır. Değıştirgenlerin kestirimi aynı anda yapılmamış, bir değıştirgen sabit tutulup diğer değıştirgen belirlenmeye çalışılmıştır. Diğer bir çalışma ise önceki çalışmaya benzer şekilde, fay mekaniğinin belirlenmesinde jeodezik ağların eniyilemesine yöneliktir. Bu çalışmada gerçek dünya üzerinde bir uygulama yapılmamış, benzetimler ile

fay derinliği ve kayma miktarı belirlenmeye çalışılmıştır [7]. Jeodezik ağın eniyilemesinde değişik türde eniyileme algoritmaları kullanılmıştır. Her iki çalışmada tek boyutlu yanal atımlı faya ilişkin model kullanılmaktadır [8, 9].

Bu alışmada,  $H$  fayın kilitli olduğu derinlik ve  $S$  fayın kayma miktarı olmak üzere, fay değiştirgenlerinin yüksek doğrulukta elde edilmesine yönelik bir jeodezik ağın eniyilemesi yapılmaktadır. Değiştirgenler, gözlemsel veri yolu ile kestirilmeye çalışılmaktadır. Bu problem türü jeofizikte, ters problem olarak adlandırılır. Bu anlamda bu çalışmada ters problem zm yapılmaktadır [10].

İlk aşamada gerçek verilerin kullanılması yerine yapay yolla üretilen gözlemsel veriler kullanılmıştır. Gözlemsel verilerin oluşturulmasında biri lme hatalarına karşılık gelen gürültüler, diğeri ise merkezlendirme hatalarına karşılık gelen gürültüler olmak üzere iki türlü gürültü üretilmiştir. Bunlardan lme hatalarına karşılık gelen gürültüler ilişkisel olarak, merkezlendirme hatalarına karşılık gelen gürültüler ise durağan gürültü olarak üretilmiştir.

Bu şekilde birkaç ağ değiştirgenine göre simetrik yapıda ve gözlem istasyonlarının eşit aralıklarla konumlandırıldığı bir jeodezik ağın eniyilemesi yapılmıştır. Bu ağ değiştirgenleri, gözlem istasyonlarının sayıları, gözlem istasyonlarının konumları, gözlemlerdeki yanılığı (gürültü) düzeyi ve GPS lme tekniği olarak sıralanabilir. Her bir eniyileme adımı benzetimler yapılarak tamamlanmıştır. Benzetimlerde gürültü (yanılığı) değişken olarak tutulmuştur. Başka bir deyişle farklı gürültülere sahip gözlemler yolu ile model üzülüp fay değiştirgenleri elde edilmiştir.

Ağ değiştirgenlerine göre benzetim ve eniyileme sonucunda, gözlem istasyon sayıları ve konumları rastgele belirlenerek çok sayıda deneme yapılmıştır. Bu denemelerin sonucunda en az sayıda gözlem istasyonu içeren ve aynı zamanda en uygun fay değiştirgenlerini belirleyen jeodezik ağ tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen tüm bulgular, yanal atımlı fayın tek boyutlu modellenmesi sonucunda elde edilmiştir. Zamanın değişken olarak alınmamış yani birim zamanda yerdeğiştirmelerin incelenmiştir.

Bu kapsamda fay değiştirgenlerinin daha etkin olarak belirlenmesi için iki boyutlu fay modeli ile jeodezik ağ eniyilemesi yapılmalıdır. Bu alışmada GPS lme yöntemleri için ayrıca bir eniyileme algoritması oluşturulmamıştır. lme yönteminin hangi istasyon üzerinde kullanılması gerektiği fay değiştirgeninin duyarlı olduğu bölge ile belirlenmiştir. Dolayısıyla GPS lme tekniğininin hangi istasyonlarda uygulanması ile ilgili detaylı bir çalışma yapılması en uygun jeodezik ağın belirlenmesi açısından önemli ltlerden biridir.

Gerçek dünya problemi olarak MAGNET üzerinde bir uygulama yapılarak bu jeodezik ağdaki istasyon dağılımmının fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde ne kadar etkin olduğu araştırılmıştır. Ayrıca, Doğu Marmara'daki Kuzey Anadolu

Fay Hattı'nın kuzey kolununun bulunduğu bölgede yapılan gerçek gözlemler ile çalışılarak bu alandaki faya ilişkin model değiştirgenleri saptanmıştır.



## BÖLÜM 2

### Jeofizikte Modelleme

#### 2.1 Jeofizikte Modellemeye Giriş

Son yıllarda yer kabuğu deformasyonunun ölçülmesi ve modellenmesinde çok önemli çalışmalar yapılmıştır [11]. Uzaysal jeodezik yöntemlerin klasik yerüstü ölçme yöntemlerine göre milimetreler mertebesinde doğruluğa sahip olması yer deformasyonlarının sürekli olarak izlenmesinde en fazla tercih edilen yöntem olmasına neden olmaktadır.

Aktif fay üzerinde yapılacak olan modelleme ile o faya ait bazı sismik değiştirgenlerin bulunması amaçlanmaktadır. Bu fiziksel değiştirgenler fayın derinliği, yıllık kayma miktarı ve genliği, yüzey altının geometrisi, yer kabuğunun orta tabaka ve üst tabakaya ait reoloji değiştirgenleri şeklinde sıralanabilir. Fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde bir takım modelleme araçları kullanılmaktadır. Bu araçlar, elastik yarı uzayda deprem anındaki enerji birikimi sonucu (coseismic) meydana gelen yerdeğiştirmelerinin analitik çözümü, depremler boyunca oluşacak olan deformasyonların belirlenmesi için sonlu elemanlar gibi yöntemler olabilir. Modellemedeki amaç, modelin uygulanacağı kaynağın fiziksel yapısının ve buna uygun matematiksel modelin belirlenmesidir.

İlk çalışmalarda, sismik kuşaktaki yer kabuğu deformasyonlarının saptanması için durağan yerdeğiştirmelerin belirlenmesi yoluna gidilmiştir [12]. Kuram (teori) olarak elastik tepki kuramı, fiziğin katı hali ve Green fonksiyonlarını içeren dislokasyon teoremi kullanılmıştır. Başlangıçta, depremlerin modellenmesinin amacı, yerdeğiştirme ve deformasyon değiştirgenlerin zamana ve konuma göre belirlenmesidir. Bu değiştirgenler gerilme birikiminin kinematik ve dinamik modelinin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

Kaynağın modellenmesi hakkında ilk olarak 1957 yıllarında iki boyutlu makaslama faylarının yer değiştirme alanlarının incelenmesi üzerinde çalışılmıştır [13]. 1958'te üç boyutlu faylara ilişkin statik alanların hesabı konusunda bir kuram geliştirilmiştir [14]. Bu kurama göre, yarı sonsuz bir ortamda meydana gelen dislokasyona ait alan, altı adet Green fonksiyonu ile tanımlanabilmekte

ve bunlardan sadece düşey doğrultu atımlı fay için gerekli fay değiştirgeni, yani faya ait olan derinlik hesaplanmıştır. Kuramda ise matematiksel model olarak yer değiştirme dislokasyon yüzeyi kullanılmıştır. 1964 yılında üç boyutlu fay modellemelerine ilişkin yer değiştirme ve gerilme alanlarının hesaplanması üzerine çalışılmıştır. Green fonksiyonlarının kullanılması ile yarı sonsuz elastik bir ortamda yer alan, dislokasyon yüzeyi üzerindeki herhangi türden bir harekete ilişkin statik alanlar hesaplanmaya çalışılmıştır [15]. 1985 de ise gerilmeden dolayı oluşan yüzey deformasyonlarının belirlenmesi üzerinde bir model geliştirilmiştir [16].

Bu çalışmada, elastik yarı uzayda bulunan sonsuz uzunlukta düşey, yanall atımlı bir faylanma ve bunun sonucu oluşacak olan deformasyonun modellenmesi incelenecektir. Bu model birinci derece fay değiştirgenlerinin belirlenmesi açısından pratik bir uygulama niteliğindedir.

### **2.1.1 Jeofizikte Modellemenin Amaç ve Kapsamı**

Jeofizikte modelleme, jeofizik belirtiyeye neden olan kaynağın modellenmesi anlamına gelmektedir [17].

Jeofizikte yer ile iletişim, pasif ve aktif iletişim olmak üzere iki yollu olmaktadır. Pasif iletişimde, yerin belirli bir fiziksel alanı üzerinde herhangi bir jeofizik etki olmaksızın, kaynağın doğrudan uygun aletler ile algılanmasıdır. Bu iletişim türüne doğal kaynaklı yöntem uygulamaları örnek olarak verilebilir. İkinci iletişim türü olan, aktif iletişimde ise yeryuvarı bir dürtü ile uyarılmakta ve bu uyarıya karşı yerin verdiği tepki ölçülmektedir. Yapay kaynaklı jeofizik yöntemi bu tür uygulamalar için iyi bir örnektir.

Her iki yöntemde de çözüme gidebilmek için değişik türde modellemelerin yapılması gerekmektedir. Bunlar jeolojik yapının modellenmesi, fiziksel benzeşimin kurulması, matematiksel modelin kurulması, doğrusal dizge modellemesi, kaynağın modellenmesi, uyarı iminin modellenmesi gibi, birbirinden farklı yaklaşımlarla elde edilebilen modelleme türleridir. Modellemede ortam koşulları son derece önemlidir. Eğer ortam düzgün bir geometriye, tekdüze (homejen) bir yapıya sahip değilse modelleme türü de değişecektir. Bu tür durumlarda ise genellikle sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri ile çözüme gidilmektedir [18].

Jeofizikte modelleme uygulamalarından bir diğeri ise rastgelelik içeren olayları inceleyen stokastik modellemedir.

Jeofizikte modellemede problem çözümü iki yönlüdür [17]. Bu çözümler düz (forward) problem çözümü ve ters (inverse) problem çözümü olarak adlandırılırlar. Düz problem çözümünde jeolojik bir modelin vereceği jeofizik

belirti hesaplanmaya çalışılır. Bu yöntem aynı zamanda “model tepkisi” olarak da isimlendirilebilir. Ters problem çözümü diğer adıyla “değiştirgen kestirim” yaklaşımı ise düz problem yaklaşımının tam tersidir. Bu yaklaşımda, jeofizik modelden kalkılarak jeolojik modelin değiştirgenleri bulunmaya çalışılır.

### 2.1.2 Jeofizikte Problem Çözümünde Temel İlkeler

Modellemede kullanılacak olan verinin tanımsal nitelikte, yani herhangi bir matematiksel bağıntı ile açıklanabilen özellikte olması oldukça önemlidir. Ancak, gerçekte tam anlamıyla tanımsal bir gözlemsel veri bulabilmek güçtür. Çünkü tüm gözlemsel veriler belli ölçülerde rastgele bileşenleri içerir ve bu bileşenler de “gürültü” olarak adlandırılır. Bu tür veriler de tanımsal olmayan veriler gurubuna girerler. Yani, herhangi bir matematiksel bağıntı ile açıklanamaz, yalnızca istatistik özellikleri ile tanımlanabilirler.

Tanımsal veriye eşlik eden gürültünün düzeyi ne olursa olsun modelleme sonucunda hesaplamada belli düzeyde yanlılığı olacağından belirlenen değiştirgenler gerçek değiştirgenler değildir. Bu nedenle model saptaması (determination) terimi yerine model kestirimi (estimation) terimi kullanılmaktadır [17].

Jeofizikte problem çözümünde birtakım yaklaşımlar sözkonusudur. Bu yaklaşımlar, aşağıdaki gibi sıralanabilir.

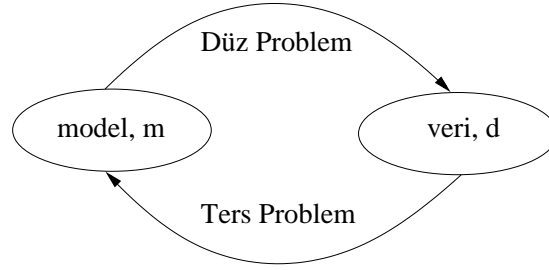
- Tüm verinin tanımsal veri olduğu ve herhangi bir rastgele bileşeni içermediği varsayılır ve bu varsayım altında model değiştirgenleri bulunur. Ancak bilinmesi gerekir ki, tanımsal veri rastgele bileşenleri içeriyorsa model belirli ölçülerde yanlılığı içerecek ve modelin güvenilirliğini de bu yanlılığı düzeyi belirleyecektir.
- Rastgele bileşenleri içeren tanımsal verilerin çözümlenmesinde yanlılığı, gürültü oranı büyüdükçe azalır. Bu nedenle gürültüyü bastırmak amacı ile işleme başlamadan önce gürültüyü enküçükleyecek bir ön işlem uygulanır. Bu işlem bir frekans süzgeçlemesi ya da başka bir süzgeçleme türü ile yapılabilir.
- Bu tür yaklaşımda ise rastgele bileşene dokunulmaz. Buna karşılık değiştirgen kestiriminde ortaya çıkacak olan yanlılığı enküçüklenmeye çalışılır. Yöntem olarak genellikle “enküçük kareler kestirimi” kullanılır.

Bunların dışında da değişik türde kestirim yöntemleri ve uygulamaları vardır.

Rastgele bileşenleri içeren çözümde ise stokastik süreçleri tanımlamak için sonsuz sayıda değiştirgen saptanması gerekmektedir ki bu da olanaksızdır. Bu tür problemlerde temel sorun değiştirgen kestirimidir.

### 2.1.3 Jeofizikte Problem Çözüm Yöntemleri

Jeofizikte, birtakım jeofizik verilerden hareketle yeraltına ait jeolojik bilginin elde edilmesi konulu problemler üzerinde çalışılmaktadır. Bu tür problemler ters ve düz problem olmak üzere iki ana başlık adı altında incelenmektedir. Sözgelimi,  $S$  terimi birçok model değiştirgenine karşılık gelsin ve bu model değiştirgenleri doğrudan ölçülemiyor olsun (yeryuvarının çekirdeğinin yarıçapı). Model değiştirgenlerinin değerlerine karşılık gelen bazı ölçülebilir değiştirgenler tanımlanabilir. Bu durumda düz problem çözümü ile ölçülebilir değiştirgenlerin belirlenmesi, ters problem çözümüyle ise ölçülebilen değiştirgenlerden model değiştirgenlerinin belirlenmesi sözkonusu olacaktır. Düz ve ters problemlerin çözüm şeması Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1: Ters ve Düz Problemlerin Gösterilimi

#### 2.1.3.1 Düz Problem Çözümü

Verilen bir modelden, modele ilişkin verilerin hesaplanması işlemidir. Bir modelin jeofizik tepkisini ya da beklenen belirtisini hesaplamak, karmaşık bir takım hesaplamalar gerektirse bile yapılması gereken işlemler aslında zor değildir. Yapılması gereken işlemler ise kısaca;

- Matematiksel modeli oluşturmak,
- Model değiştirgenlerini belirlemek,
- Sayısal hesaplamaları yapmak,

şeklinde sıralanabilir. Bu tür problem çözümü düz problem olarak adlandırılır.

Düz problem çözümünde temelde yapılan işleme yapay veri üretme işlemi denilebilir. Bu aşamada bir değiştirgen kestirme işlemi sözkonusu değildir. Çünkü

değiştirgenler önceden belirlenir. Burada jeolojik yapı modelinden kalkarak jeofizik belirtilerin hesaplanmasına ilişkin yöntemler üzerinde durulacaktır. Jeolojik bir yapıyı modellemek için genel olarak iki grup değiştirgenin belirlenmesi gerekir:

- Geometrik değiştirgenler,
- Fiziksel değiştirgenler.

Geometrik değiştirgenler, yapının biçimini tanımlayan büyüklüklerdir. Çoğu zaman hesaplama zamanından kazanmak için geometri olabildiğince az nokta ile tanımlanır ve model idealleştirilmeye çalışılır. Cismin geometrisi dışında, ortamın fiziksel özelliklerinin de bilinmesi oldukça önemlidir.

Jeolojik modelin belirlenmesinin ardından, fiziksel model belirlenmelidir. Fiziksel modelin biçimi ve modelleme tekniği, çözülecek probleme ve uygulanacak jeofizik yönteme bağlı olarak değişir. Fiziksel modellemedeki amaç, jeofizik problemi, çözümünü bilinen bir fizik problemine dönüştürmektir. Problem böylece bir jeoloji problemi olmaktan çıkar ve matematiksel-fizik problemine dönüşür.

Fiziksel modelin ortaya koyduğu ve çözülmesi gereken bağıntı problemin özelliğine göre değişir. Basit bir analitik bağıntı olabileceği gibi, bir diferansiyel denklem veya tümlev (integral) denklem de olabilir. Bu bağıntı, kurulan jeolojik modelden beklenen jeofizik belirtinin ifadesidir. Dolayısıyla değiştirgenlerin belli değerleri için hesaplanan büyüklükler kuramsal jeofizik belirtiyi verecektir. Bu aşamanın sonucunda düz problem çözümü tamamlanmaktadır.

Verilen bir jeolojik model için çözüm bulunduğundan sonra, jeolojik modelin çeşitli değiştirgenleri için aynı matematiksel model kullanılarak kuramsal jeofizik belirti değerleri, başka bir deyişle model tepkisi bulunabilir. Model tepkisinin gözlemsel verilere uygun olması beklenir.

### **2.1.3.2 Evrik (Ters) Problem Çözümü**

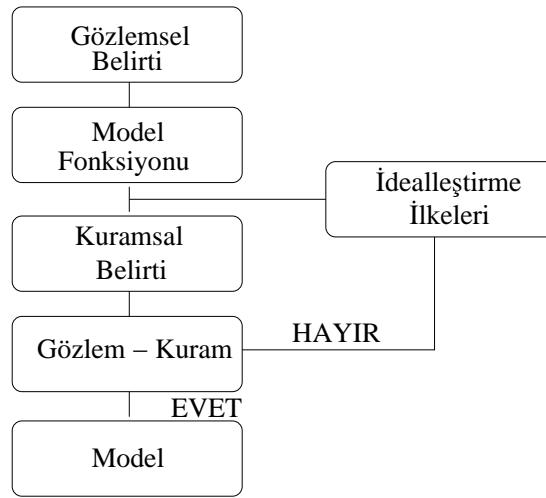
Jeofizikte ters problem, ölçülen bir jeofizik belirtiyi yorumlamak ve ona neden olan yeraltı yapısını ortaya çıkarmak olarak tanımlanabilir. Kısacası, veriden kalkarak jeolojik yapının ya da kaynağın modellenmesi anlamına gelmektedir. Bu tür problem çözümüne jeofizikte, “Evrik (Ters) Problem Çözümü” adı verilir.

Evrik problemde amaç, bir takım ölçmeler yardımı ile modelin yeniden yapılandırılmasını sağlamaktır. Bir başka deyişle verilerden hareketle kaynağa ilişkin fiziksel değiştirgenlerin kestirilmesidir.

Evrik problem çözümünde aslında düz problem çözümünü uygulamak kaçınılmazdır. Çünkü yapılan iş, gözlemsel belirtiyeye uyan kuramsal bir belirti

hesaplamak ve bunu veren yeraltı yapısını ve kaynağı bulmaktan ibarettir. Kuramsal belirtinin hesaplanması ise düz problem çözümdür.

Ters problem çözümü için uygulanabilecek bir yol, uzun hesaplama zamanı alan deneme-sınama yöntemidir. Bu yöntemde gözlemsel belirtinin durumuna bakarak bir başlangıç modeli seçilip kuramsal model tepkisi hesaplanmaya çalışılır. Model tepkisi ile gözlemsel değerler karşılaştırılıp uyumları incelenir. Uyum iyi değilse model değiştirilerek işlem yenilenir ve bu süreç iyi bir uyum elde edinceye kadar sürdürülür. Kuramsal değerler ile gözlemsel değerlerin uyum içinde olduğu model en olası jeolojik modeli verecektir. Ters problem çözümünün akış şeması aşağıdaki şekilde verilmektedir.



Şekil 2.2: Devrik problem çözümünün işleyişi

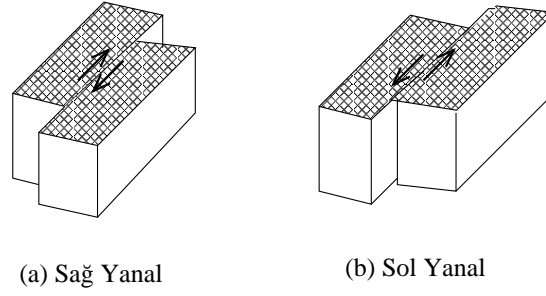
Sonuç olarak ters problem çözümünde izlenen yol düz problem çözümünde izlenen yolun tersidir. Bu nedenle bu çözüm “ters çözüm” olarak adlandırılır. Ters problem çözümü doğrudan doğruya değiştiren kestirimini amaçlamaktadır.

## 2.2 Sonsuz Uzunluktaki Yanal Atımlı Bir Fayın Elastik Yarı Uzay Modeli

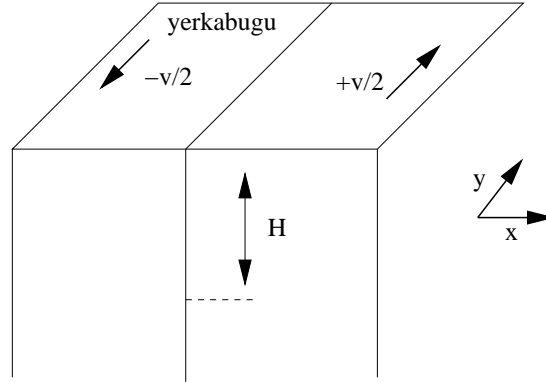
Yanal atımlı faylar, hareket yönüne göre sağ yanal atımlı fay ve sol yanal atımlı fay olmak üzere ikiye ayrılırlar [19]. Eğer fayın karşı bloğu sağa doğru hareket ediyorsa sağ yanal atımlı fay, sola doğru hareket ediyorsa ise sol yanal atımlı fay olarak isimlendirilirler (Şekil 2.3a-b).

Düzgün elastik bir yarı uzayda, sonsuz uzunlukta, düşey yanal atımlı bir fayın model gösterilimi ise Şekil 2.4 ile gösterilmektedir [8] [9].

Fay  $z = -H$  derinlikte kilitlenmiş ve hareketi sözkonusu değildir. Burada fayın kilitlenmesi, kırık üzerindeki sürtünme direncinin, fay düzlemine paralel gerilme bileşeninden büyük olması anlamına gelir. Yani bu derinlikte sistem



**Şekil 2.3:** Yanal Atımlı Faylar



**Şekil 2.4:** Elastik yarı uzayda basit bir fay modeli. Yüzeyden  $H$  derinliği kadar kilitlenmiş ve bu derinliğin altında serbest bir kayma sözkonusudur.

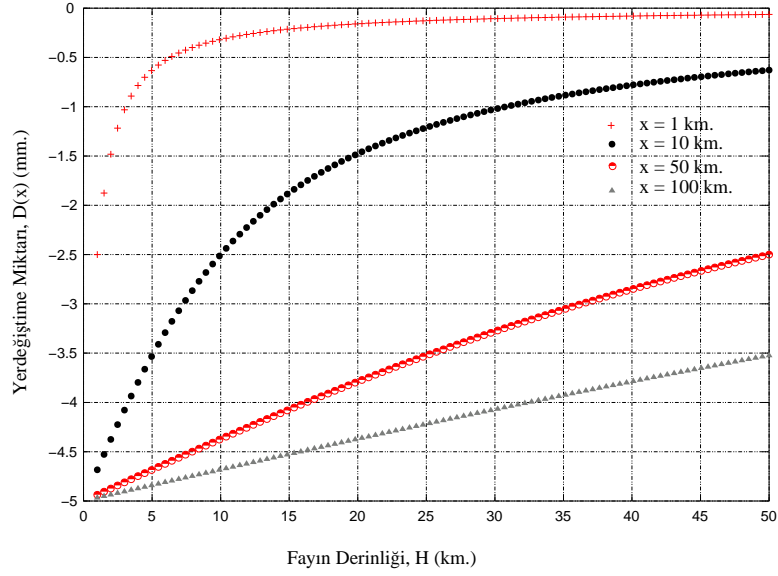
kesinlikle hareket etmemektedir. Olası bir deprem anında, sürtünme direnci aşılar ve bölgede biriken gerilme serbest kalır. Bunun yanı sıra bu derinlik altında  $S$  hızı ile sistem serbest olarak yılda belli bir miktar hareket etmektedir. Şekil 2.4'de fayın sol bloğu dışa doğru  $-v/2$  sabit bağlı bir hızla hareket ederken, sağ bloğu ise içe doğru  $+v/2$  sabit bağlı bir hızla hareket etmektedir. Faya paralel yerdeğiştirme ise (2.1) bağıntısı ile gösterilmektedir.

$$D(x) = -\frac{S}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{H}\right) \quad (2.1)$$

Burada  $x$  faya olan dik uzunluğa,  $S$  ise kilitli olan kısmın altında meydana gelen serbest kayma miktarına karşılık gelir. Bu bağıntı fay düzlemi üzerinde verilen herhangi bir nokta için yerdeğiştirmeyi verir. Kullanılacak dislokasyon modeli, yanal atımlı bir fay için tek boyutlu, iki değişirgenli bir modeldir. Bu modelde kırılma boyunca deformasyonun düzgün olduğu varsayılmaktadır.

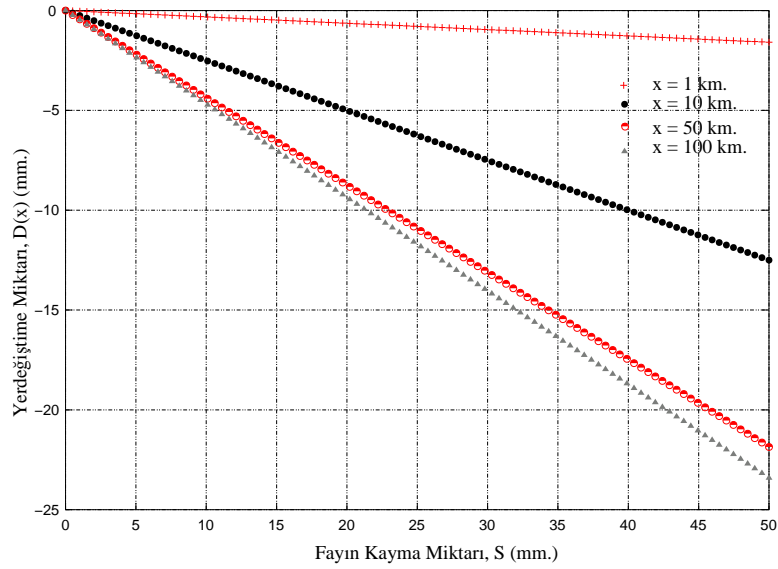
Sonuçta, bu model  $-\infty$  ve  $+\infty$  uzunluktaki yanal atımlı bir fayın yerdeğiştirmesini vermektedir.

Bu bağıntı değişirgenlerine göre incelendiğinde  $H$  ve  $S$  model bilinmeyenlerinin, yerdeğiştirme üzerindeki etkisi aşağıdaki şekiller ile açıklanabilir. Şekil 2.5  $S$  değişirgeni sabit tutulup ve  $H$  değişirgeni değişken olarak seçildiğinde, yerdeğiştirme fonksiyonun belli  $x$  değerlerinde alacağı değerleri göstermektedir. Bu grafiğe göre,  $H = 0 - 5$  km. aralığında



**Şekil 2.5:** H değıştiren analizi

$x = 1$  km. iken yerdeğıştirme çok hızlı bir şekilde değişmektedir. Ancak aynı aralıkta  $x$ 'in diğer değerleri için yerdeğıştirme miktarı gittikçe azalmakta ve elde edilen fonksiyon doğrusal bir fonksiyon olmaktadır. Bu sonuç, (2.1) bağıntısında  $H$  değıştiren bilinmeyeninin fonksiyonun yakın  $x$  değerlerinde duyarlılık gösterdiğini, uzak  $x$  değerlerinde ise gösterdiği duyarlılığın çok az olduğu kanıtlamaktadır.



**Şekil 2.6:** S değıştiren analizi

Aynı şekilde  $S$  değıştiren bilinmeyeni için aynı analiz yapılırsa, yani  $H$  değıştirenini sabit tutulur,  $S$  değişken olarak seçilir ve belli  $x$  değerleri için yerdeğıştirme fonksiyonu incelenirse yukarıdaki analizin tersi bir durum elde edilir. Şekil 2.5'de  $x = 1$  km.'de yerdeğıştirme fonksiyonunun aldığı değer



enküçük iken,  $x = 100$  km.'de ise yerdeğiştirme fonksiyonun aldığı değer enbüyüktür. Bu durumda,  $S$  değiştirgen bilinmeyeni  $x$ 'in uzak değerlerinde duyarlı iken, yakın değerlerinde duyarlılığı çok az olmaktadır. Dikkat edilmesi gereken önemli nokta da  $H$  değiştirgeninin  $S$  değiştirgenine göre yerdeğiştirme değerinin ani bir şekilde büyümesidir. Diğer bir deyişle,  $H$  değiştirgeninde meydana gelen yerdeğiştirmenin doğrusal olmayan bir artışı karşısında,  $S$  değiştirgeninde doğrusal bir azalış gözlenmektedir.

## BÖLÜM 3

### Genelleştirilmiş Ters Kuram ve Jeofizikte Ters Problem Çözümleri

#### 3.1 Giriş

Gözlemsel veriden kalkarak modeli belirlemeyi amaçlayan problem türü ters problem olarak adlandırılmaktadır [17]. Ters problem çözümü gözlem uzayından model uzayına geçişi sağlar. Bazı durumlarda modeli tam anlamıyla belirlemek olanaklı ise de çoğu zaman ancak idealleştirilmiş bir model belirlenebilir. Modelin tam anlamı ile belirlenebilmesi için sonlu sayıda değiştirgen ile tanımlanması gerekmektedir. Örneğin bir deprem kaynağının modellenmesi için;

- Deprem merkez üssünün  $X$  ve  $Y$  koordinatları,
- Odak derinliği,
- Oluş zamanı,
- Sismik momenti,
- Fay düzleminin doğrultu ve eğim açısı,
- Hareket yönünün (vektör) konumu,
- Fay düzleminin boyutları,
- Kaynak zaman fonksiyonu,
- Yırtılmanın yönü ve hızı,

gibi değiştirgenlerinin belirlenmesi gerekir. Bunların tümünü bir arada ve aynı zamanda belirlemek güçtür. Ancak modelde sonlu sayıda bilinmeyen olduğundan problemin çözümü vardır.

Yeraltı yapılarının gelişigüzel karakteri, biçim ve özellikleri modelleme aşamasında problem yaratmaktadır. Değiştirgenlerin dağılımı rastgele olan cisimlerin modellenebilmeleri için sonsuz sayıda değiştirgene gereksinim vardır. Bu nedenle çözüm için kurulacak denklem sistemi eksik tanımlı

(underdetermined) denklem sistemi olacaktır. Bir başka deyişle, denklem sisteminde bilinmeyen sayısı gözlem sayısından fazla olacaktır. Problemin çözülebilir duruma getirilebilmesi için modelin idealleştirilmesi gerekmektedir.

Jeofizikte her yönetime ilişkin kuram, birtakım varsayımların ışığı altında geliştirilir. Bu zorunluluk idealleştirmeden ileri gelmektedir. Ters problem çözümünde idealleştirme çok büyük sorunlar yaratabilir. Bunun nedeni, gözlemsel verilerle uyum içinde olmayan bir model fonksiyonunun seçilerek değiştirgen kestiriminin yapılmasıdır. Model değiştirgenlerini saptamaya yönelik jeofizik uygulamalarda model fonksiyonunun belirlenmesindeki yanlışlıklar fiziksel değiştirgenlerin anlamsız değerler almasına neden olabilir. Model tepkisinin gözlemsel veriye uymasına karşılık, gerçeklere hiç uymayan bir jeolojik yapı ortaya çıkabilir.

Bütün bunların yanısıra ters problem çözümünde değiştirgenlerin kestirimi gözlemsel veriler aracılığı ile yapıldığından burada gözlemsel verilerin kalitesi de son derece önemlidir. Verilerin, modele ilişkin bilgileri taşıması gerekmektedir. Dolayısıyla ters problem çözümünde veriden sağlanabilecek bilgilerin neler olduğunun bilinmesi ve bunların sağlanabilmesi için modelin uygun biçimde değiştirgenlendirilmesi çok önemlidir. Aynı şekilde bunun tersi, yani, modelde belirlenmesini istediğimiz değişkenlerin ne tür verilere duyarlı olduğunun bilinmesi ve ters çözümde onların kullanılmasının önemi büyüktür.

Tüm bunların sonunda, genel olarak şu sonuca ulaşmak mümkündür. Yeraltındaki bir jeolojik yapı ya da bir kaynağı tam olarak tanımlayacak sonsuz tane değiştirgen vardır ve bunlar “değiştirgen uzayını” oluştururlar [17]. Her jeofizik ters problemin çözümü bu değiştirgen kümesinin bir alt kümesi içinde yer almaktadır. Çok çözümlülük nedeni ile bulunan çözüm yöneyi gözlemsel veriler ile uyuşan bir model fonksiyonu verebilecek olası çözüm yöneylerinden yalnızca biridir. Başka bir deyişle, çözüm yöneyinin elemanları, o yöntem için geçerli olabilecek değiştirgenlerin oluşturduğu olası çözüm yöneyi alt kümelerinden biridir. Sonuç olarak, idealleştirilmiş cismi belirleyen değiştirgenlere ilişkin alt küme  $\mathbf{A}$ , modeli tam tanımlayan değiştirgen kümesi  $\mathbf{P}$  olmak üzere  $\mathbf{A} \in \mathbf{P}$  olacaktır.

### 3.2 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Problemler

Ters problemlerin bir bölümünde, model fonksiyonunun tepkisi ile model değiştirgenleri arasındaki ilişki doğrusaldır. Bu tür problemlerde modele ilişkin değiştirgenler model fonksiyonunun bilinmeyenini oluştururlar.  $\mathbf{A}$  model değiştirgenlerinin, matematiksel modeli tanımlayan  $F$  fonksiyonunda yerine

konulması ile elde edilen  $F(A)$

$$\mathbf{A} \longrightarrow \mathbf{F}(\mathbf{A}) \quad (3.1)$$

model tepkisi olarak adlandırılır. Bu yaklaşım düz problem çözümdür.  $\mathbf{x}$  uzamsal (spatial) yöneyi göstermek üzere  $g(\mathbf{x}, \mathbf{A})$  gözlemsel değerlerinden  $\mathbf{A}$  değiştirgen yöneyinin bulunması,

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \longrightarrow \mathbf{A} \quad (3.2)$$

ise ters problem çözümdür.  $\mathbf{A}$  değiştirgen yöneyinin bulunabilmesi için

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{A}) - \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{A}) = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

denkleminin çözülmesi gerekir. (3.3) bağıntısının doğrusal olması durumunda çözülmesi gereken denklem, doğrusal bir denklem takımıdır. Sonuç olarak doğrusal ters problem çözümleri bir doğrusal denklem sisteminin çözülmesi ve bilinmeyenlerin bulunması demektir. Verinin tam ve eksiksiz, çözümün kesin olması durumunda (3.4) numaralı bağıntı elde edilir.

$$\forall g(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \equiv \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \quad (3.4)$$

Burada  $x$ 'in her değeri için model tepkisi gözlemsel değerlere “özdeş” olacaktır. Bu durum ideal veri ve ideal çözüm için geçerlidir. Pratikte ise,

$$\exists g(\mathbf{x}, \mathbf{A}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \quad (3.5)$$

koşulu sağlanabilmektedir. Yani, gözlem noktalarının bazılarında model tepkisi gözlemsel verilere eşit, bazı noktalarında ise değildir. Bunun başlıca nedeni, modellemede kullanılacak olan verinin tam ve eksiksiz olmaması ve model fonksiyonunun gerçek modeli tam olarak yansıtmamasından ileri gelmektedir.

Problem doğrusal olması durumunda çözülmesi gereken denklem sistemi dizey (matris) denklem olarak aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{g} \quad (3.6)$$

Burada  $\mathbf{g}$  gözlemsel verilerin oluşturduğu yöney,  $\mathbf{p}$  model değiştirgenlerini içeren bilinmeyenler yöneyi,  $\mathbf{A}$  ise model fonksiyonunun bilinmeyen değiştirgenlere göre parça türevlerinden oluşan bir dizeydir. (3.6) denklem sisteminin çözümü

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{g} \quad (3.7)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bu çözümün elde edilebilmesi için  $\mathbf{A}^{-1}$  ters dizeyinin hesaplanabilmesi gerekir.

$$\begin{pmatrix} \left(\frac{\partial a}{\partial p_1}\right)_1 & \cdots & \left(\frac{\partial a}{\partial p_n}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial a}{\partial p_1}\right)_2 & \cdots & \left(\frac{\partial a}{\partial p_n}\right)_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial a}{\partial p_1}\right)_k & \cdots & \left(\frac{\partial a}{\partial p_n}\right)_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_k \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$\mathbf{A}$  dizeyi olan Jakobyen dizeyinin her bir satırı, bir gözlem noktasına karşılık gelmektedir. Bu dizeyin her bir sütunu ise  $\mathbf{p}$  değıştiren yöneyinin model fonksiyonuna göre parça türevlerini içermektedir. Buna göre  $\mathbf{A}$  dizeyi için çeşitli durumlar söz konusu olabilir;

- (1) Denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşittir,
- (2) Denklem sayısı bilinmeyen sayısından fazladır,
- (3) Denklem sayısı bilinmeyen sayısından azdır,
- (4)  $\mathbf{A}$  dizeyinin elemanlarından önemli bir kesimi sıfırdır.

Bunlardan birinci durumda, dizey kare dizeydir. Bu tür denklem sistemleri “tam tanımlı” (fully determined) sistemler olarak adlandırılır.  $\mathbf{A}$  dizeyinin özdeğerlerinden herhangi biri sıfır değilse,  $\mathbf{A}$ ’nın tersi alınabilir ve sistemin bir çözüm yöneyi vardır.

İkinci durumda gözlem sayısı bilinmeyen sayısından eksiktir. Bunlara eksik tanımlı (underdetermined) sistemler adı verilir. Sistemin bazı kısıtlar altında en uygun çözümü bulunabilir.

Üçüncü durumda  $\mathbf{A}$  dizeyi dikdörtgendir ve denklem sayısı bilinmeyen sayısından fazladır. Bu tür denklem sistemleri ise “aşırı tanımlı” (overdetermined) denklem sistemleri olarak adlandırılır. Buna göre  $\mathbf{A}$  dizeyinin adi tersi alınamaz. Sistemin bir amaç fonksiyonunu en büyük ya da en küçük yapan çözümleri bulunabilir.

Dördüncü durum olan son durumda ise dizey “seyrek sistem” (sparse system) olarak isimlendirilir ve bazı özel çözüm algoritmaları ile sonuca ulaşılabilir.

Sonuç olarak, eğer problem doğrusal bir denklem sistemi ve katsayılar dizeyinin tersi alınabiliyorsa çözüm yöneyini elde etmek oldukça kolaydır.

Jeofiziğin ters problemlerinin bir bölümü de doğrusal olmayan problemler türündendir. Doğrusal olmayan problemler için tek ve belirli bir algoritma yoktur. Problemin çözümünde, problem doğrusallaştırılır ve yinelemeli olarak çözüm aranmaya çalışılır. Bunun için model fonksiyoneli Taylor serisine açılır ve yüksek mertebeden terimler göz ardı edilerek problem doğrusallaştırılır. Çözüm yinelemeli olarak yapıldığı için bir başlangıç modeli öngörülür ve her yinelemeli adımda model iyileştirilmeye çalışılır.

Ters problem çözümünde doğrusal olmayan problemlerin, doğrusal problemlere göre çözümünün daha zor olduğu bir gerçektir. Bunun çeşitli nedenleri vardır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde doğrusallaştırma işlemi yapılması ve üst mertebeden terimlerin göz ardı edilmesi ile bir yanlgı

düzeyi sözkonusudur. Ayrıca belirli bir çözüm algoritmasının olmayışı ve çözümün yinelemeli olarak yapılması nedeni ile bulunan çözüm hiç bir zaman tam çözüm olmayacak, yaklaşık bir çözüm olacaktır.

Bunların dışında doğrusal olmayan problemlerin daha uzun hesaplama zamanına gereksinimleri vardır. Elde edilecek olan çözüm yöneyinin yanlgı düzeyini azaltmak için yineleme sayısını arttırmak gerekmektedir. Dolayısıyla bu işlemin hesaplama zamanının da uzun olması oldukça doğaldır. Ancak güçlü bilgisayarın üretilmesi ile bu durum çok büyük bir problem olmamaktadır.

Diğer bir problem ise yakınsama problemidir. Yakınsama, yinelemeli çözümün her adımında doğru modele yaklaşma özelliğidir. Bunun tersi olan durum ise ıraksama durumudur. Yakınsama ve ıraksamayı kontrol eden değiştirgenler seçilen algoritmanın özelliği ve kullanılacak verinin kalitesi olarak da düşünelir. Verideki gürültü oranının fazla olması ıraksama nedenlerinden biri olabilir. Bunların yanında, başlangıç modeli olarak seçilen modelin gerçek modele olan yakınlığı ve uzaklığı, yinelemeli durumlarda özdeğerlerin küçülmesi ya da sıfır olması da neden olarak sayılabilir. Ters problem çözümünde en çok karşılaşılan sorunlardan biri de özdeğerler ile ilgili olan sorundur. Özdeğerlerden birinin ya da determinantının sıfır olması durumda denklem sistemi yozlaşır (ill conditioning) ve dizeyin tersi alınmaz.

Jeofizğin ters problem çözümlerinin kuramsal temelleri çeşitli araştırmacılar tarafından ele alınmış ve genelleştirilmiş ters kuramın (generalized inverse theory) ayrıntıları tartışılmıştır [10, 20–22].

### 3.3 Aşırı Tanımlı Sistemlerin Enküçük Kareler İle Çözümü

Uygulamalı bilimlerde yaklaştırma yöntemleri uzun zamandır kullanılmaktadır [23]. Yaklaştırma yöntemlerinde gözlem değerlerine en iyi biçimde uyan bir matematiksel bağıntı bulunabilmektedir. Ancak bulunan bu matematiksel bağıntı belli gözlem aralığındaki değerler için geçerlidir. Dış değer, yani fonksiyonun gözlem aralığının dışında, değer bulmanın da belli yanlgı düzeyi içerisinde mümkün olduğunu söylemek gerekir.

Uygulamalı bilimlerde çok sık kullanılan yaklaştırma yöntemlerinden biri de enküçük kareler yaklaşımıdır. Bu konuyu daha da ayrıntılandırarak olursak, denklem (3.9)'da gösterildiği gibi doğrusal bir denklem sistemi ele alalım.

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{g} \quad (3.9)$$

Burada  $\mathbf{A}$  Jakobyen dizey,  $\mathbf{p}$  bilinmeyen değiştirgenler yöneyi,  $\mathbf{g}$  ise gözlemsel değerlerin oluşturduğu veri yöneyidir.

Modeli belirleyen  $\mathbf{p}$  yöneyin doğru olarak belirlenmesi durumunda (3.4) bağıntısı ile ifade edildiği gibi,

$$\forall x, F(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = g(\mathbf{x}) \quad (3.10)$$

olacaktır. Yani  $\mathbf{x}$ 'in her değeri için model tepkisi gözlemsel değerlere eşit olacaktır. Buna göre

$$\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{g} = 0 \quad (3.11)$$

olmalıdır. Ancak çeşitli nedenler ile model tepkisi gözlemsel verilere tam uymaz, yani (3.10) yerine, (3.5) bağıntısında gösterildiği gibi,

$$\exists x, F(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = g(\mathbf{x}) \quad (3.12)$$

sonucu elde edilir. Açık deyişle,  $\mathbf{x}$ 'in bazı değerleri için model tepkisi gözlemsel değerlere eşittir. Başka bir deyişle kesin değil yaklaşık bir çözüm elde edilebilir.

Gözlem noktalarının her birinde model tepkisi ile gözlemsel değerler arasında

$$(e_i; i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.13)$$

gibi yanılığın verildiğini düşünelim. Bu yanılığın  $m$  boyutunda bir  $\mathbf{e}$  yöneyi ile gösterilebilir. Buna göre (3.11) bağıntısı yerine

$$\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{g} = \mathbf{e} \quad (3.14)$$

bağıntısı yazılabilir. Bilindiği gibi bir yöneyin kare uzunluğu, bileşenlerinin kare uzunluğuna eşittir.

$$E = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.15)$$

Buna istatistikte  $l^2$  normu adı verilir.  $l^2$  normuna göre en uygun çözüm elde etme tekniğine “enküçük kareler” tekniği adı verilir. (3.14) bağıntısının (3.11)'e olabildiğince yaklaşması  $\mathbf{e}$  hata yöneyinin küçültülmesi ile olanaklıdır. Enküçük kareler yönteminde enküçüklenen  $\mathbf{e}$  yöneyinin (3.15) ile verilen kare uzunluğudur. Bir  $\mathbf{e}$  yöneyinin kare uzunluğu,  $\mathbf{e}$ 'nin devriği ile kendisinin çarpılmasından elde edilir. Buna göre,

$$E = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (3.16)$$

yazılabilir. Kare uzunluğu  $E$  ile gösterilip açık bir biçimde yazılırsa,

$$E = (\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{g})^T (\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{g}) = \min \quad (3.17)$$

bağıntısı elde edilir. Bu çarpım yapılırsa,

$$E = \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{p} - \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{g} - \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{p} + \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \min \quad (3.18)$$

düzenlenirse,

$$E = \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{p} - 2\mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{p} - \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \min \quad (3.19)$$

bağıntısı bulunabilir. (3.19) bağıntısının en küçüklenmesi için  $E$ 'nin  $\mathbf{p}$ 'ye göre parça türevlerinin sıfıra eşitlenmesi gerekir.

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{p}} = 0 \quad (3.20)$$

$\mathbf{p}$ 'ye göre türevler hesaplanırsa aşağıdaki bağıntı elde edilecektir.

$$2\mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} - 2\mathbf{g}^T \mathbf{A} = 0 \quad (3.21)$$

buradan da,

$$\mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{g}^T \mathbf{A} \quad (3.22)$$

bağıntısı elde edilir. (3.22) bağıntısının her iki yanının devriği alınırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{p} = \mathbf{A}^T \mathbf{g} \quad (3.23)$$

(3.23) denkleminde  $\mathbf{p}$  bilinmeyenler yöneyi hesaplanırsa,

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{g} \quad (3.24)$$

bulunur. Bu denkleme doğrusal bir denklem sisteminin çözüm bağıntısı adı verilir.

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T = \mathbf{A}_L^{-1} \quad (3.25)$$

gibi bir ters dizey tanımlanabilir.  $\mathbf{A}_L^{-1}$  tersine “genelleştirilmiş ters” ya da “Lanczos tersi” adı verilir [24].

Buna göre “enküçük kareler çözümü” için

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}_L^{-1} \mathbf{g} \quad (3.26)$$

bağıntısı yazılabilir.

(3.9) bağıntısı  $n$  bilinmeyenli  $m$  denklemden oluşan bir sistem olmasına karşın (3.26) denkleminde  $n$  bilinmeyenli  $n$  denklemden oluşan bir sistemdir. Bu denklemler “normal denklemler” olarak isimlendirilir. Enküçük kareler yönteminin uygulanması ile elde edilen bu denklemlere normal denklemler denilmesinin nedeni, bu denklemlerin katsayılar dizeyinin her bir sütunu ile  $\mathbf{e}$  yanılığının “dik”, normal olmasından ileri gelmektedir.

(3.9) bağıntısı aşırı tanımlı bir denklem sistemi olduğu için birden çok çözüm vardır. Bunun nedeni de  $\mathbf{A}_{m \times n}$  dizeyinin adi tersinin alınamayışındır. Bu dizeyin ancak Penrose koşullarını sağlayan bir “genelleştirilmiş tersi” vardır [25]. Enküçük kareler tersi genelleştirilmiş terslerden biridir [24].



Doğrusal problemlerin ters çözümlerin sağlanabilmesi  $\mathbf{A}_L$  dizeyinin tersinin alınabilmesine bağlıdır. Eğer tersi alınabiliyorsa çözüm sağlanabilir. Ancak sadece bu yeterli değildir. Çözüm elde edebilmek için  $\mathbf{A}$  dizeyinin determinantının sıfır ya da sıfıra yakın olmaması, başka bir deyişle özdeğerlerinin sıfıra yaklaşmaması gerekir. Eğer böyle bir durum söz konusu ise zaten dizeyin tersi alınmaz ve çözüm elde edilemez.

Kuramsal açıdan çok basit olmakla birlikte uygulamada, yinelemeli problem çözümlerinde, çözümün yozlaşması çok sık karşılaşılan güçlüklerden biridir.

### 3.4 Doğrusal Olmayan Problemlerin Enküçük Kareler ile Ters Çözümü

Genel olarak doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, denklemin doğrusallaştırılarak yinelemeli çözülmesi ile sonuca ulaşılabileceğinden söz edilmişti. Doğrusallaştırma daha ayrıntılı bir şekilde ifade edilecek olursa, bir  $f(x)$  fonksiyonu ve fonksiyonun türevleri biliniyorsa, fonksiyonun  $x+h$ 'daki değeri  $f(x+h)$ , Taylor serisine açılarak bulunabilir.

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!}f''(x) + \dots + \frac{h^n}{n!}f^{(n)}(x) \quad (3.27)$$

Burada  $f'(x)$ ,  $f''(x)$ ,  $\dots$  birinci, ikinci  $\dots$  türevleri göstermektedir. Bu bağıntı jeofiziğin ters problemleri üzerinde uygulanacak olursa  $f(x)$  model fonksiyoneli yerine  $f(p_i)$  yazılmalıdır. Bu değer belli bir yanılğı olduğunu ve bu yanılğının da  $\Delta p_i$  olduğu düşünülürse, buna göre doğru değiştirgen değeri  $(p_i + \Delta p_i)$  olacaktır. Taylor açılımı bu tanımlara göre yeniden düzenlenecek olursa,

$$f(p_i + \Delta p_i) = f(p_i) + \Delta p_i f'(p_i) + \frac{\Delta p_i^2}{2!} f''(p_i) + \dots \quad (3.28)$$

bağıntısı elde edilecektir. (3.27) bağıntısındaki  $x$  bağımsız değişkeni yerine  $p_i$  bağımsız değişkeni yer almaktadır.  $\Delta p_i$ , değiştirgene, bilinmeyene uygulanacak düzeltmeye karşılık gelmektedir.  $f(p_i)$  başlangıç değer olarak seçilen model değiştirgeni için modelin tepkisini, yani kuramsal olarak hesaplanan değeri göstermektedir.

Kesin çözüme ulaşıldığında,  $\Delta p_i = 0$  olmalıdır. Bu durumda gözlemsel değerlerin yalnızca model tarafından üretildiği, yani gürültü içermediği varsayılırsa,  $(p_i + \Delta p_i)$  düzeltilmiş yanılğı içermeyen, gerçek değiştirgeni gösterecektir. Buna göre  $f(p_i + \Delta p_i)$ 'nin gözlemsel değerleri simgelemesi gerekir.

Görüleceği gibi (3.27) ve (3.28) denklemleri doğrusal olmayan denklemlerdir. Bu denklemleri doğrusallaştırmak için Taylor serisinin ikinci ve daha yüksek mertebeden türevlerinin sıfır olduğu varsayılır ve (3.29) bağıntısı

öngörülür. Bu durumda model tepkisi ve gözlemsel değerler arasında aşağıdaki ilişkiden söz edilebilir.

$$f(p_i + \Delta p_i) = f(p_i) + \Delta p_i f'(p_i) + \epsilon_i \quad (3.29)$$

Burada  $\epsilon_i$  gözardı edilen terimlere karşılık gelmektedir.

Jeofizikteki ve jeodezideki ters problemler genel olarak çok bilinmeyenli oldukları gibi, genellikle gözlem sayısı bilinmeyen sayısından fazla olan aşırı tanımlı sistemlerdir. Buna göre, gözlem noktalarına ilişkin sayacı  $j$ , bilinmeyen değiştirgenler sayacını  $i$ , gözlemsel değerler  $g$  ve hesaplanan değerlerin  $c$  ile simgelendiği bir problem için, hesaplanan değerler;

$$c_j = f_j(p_i); \quad j = 1, \dots, m \quad (3.30)$$

gözlemsel değerler;

$$g_j = f_j(p_i + \Delta p_i); \quad j = 1, \dots, m \quad (3.31)$$

olarak yazılabilir.

Bu tanımlara göre gözlemsel değerler ile hesaplanan değerler arasındaki fark,

$$g_j - c_j = \frac{\partial c_j}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (3.32)$$

olacaktır.

(3.32) bağıntısı  $n$  bilinmeyen değiştirgen için genelleştirilirse,

$$g_j - c_j = \sum_{i=1}^n \frac{\partial c_j}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (3.33)$$

elde edilir.

(3.33) bağıntısında  $g_j - c_j$  yerine  $\Delta g_j$  yazılırsa

$$\Delta g_j = \frac{\partial c_j}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (3.34)$$

sonucuna ulaşılır. Bu bağıntı doğrusal bir denklem takımını göstermektedir. Bu sistemde bilinmeyen sayısı  $n$ , gözlem sayısı ise  $m$  ile ifade edilmektedir. Açık bir biçimde yazılacak olursa,

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_1}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial c_1}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial c_1}{\partial p_n} \Delta p_n &= \Delta g_1 \\ \frac{\partial c_2}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial c_2}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial c_2}{\partial p_n} \Delta p_n &= \Delta g_2 \\ &\dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{\partial c_m}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial c_m}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial c_m}{\partial p_n} \Delta p_n &= \Delta g_m \end{aligned} \quad (3.35)$$

denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin her satırı bir gözlem noktasına, her sütunu ise bir değiştirgen bilinmeyenine karşılık gelir. Elde edilen bu denklem sistemi bir dizey denklem olarak da gösterilebilir. Buna göre

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial c_1}{\partial p_1} & \frac{\partial c_1}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial c_1}{\partial p_n} \\ \frac{\partial c_2}{\partial p_1} & \frac{\partial c_2}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial c_2}{\partial p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial c_m}{\partial p_1} & \frac{\partial c_m}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial c_m}{\partial p_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta g_1 \\ \Delta g_2 \\ \vdots \\ \Delta g_k \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

dizey denkleminde ulaşılabilir. Elde edilen bu dizeyin her bir sütunundaki değerler, model fonksiyonunun her bir değiştirgene göre parça türevlerinin gözlem noktaları için alacakları değerleri göstermektedir.

Önceki bağıntılar ile biçimsel benzerlik sağlamak amacı ile elde edilen denklem sistemi simgesel olarak,

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{g} \quad (3.37)$$

bağıntısı ile gösterilebilir. Bu denklem ile doğrusal problemlerdeki denklem sistemleri karşılaştırılırsa, şu benzerlik ve ayrılıklar gözlemlenebilir;

- Doğrusal olmayan problemler herhangi bir doğrusallaştırma yöntemi ile doğrusal bir problem olarak çözülebilir,
- Doğrusal dizgelerde bilinmeyen değiştirgen yöneyinin  $p$  olmasına karşın, doğrusal olmayan problemlerin her çözüm adımında bulunması gereken bilinmeyen yöneyi,  $\Delta \mathbf{p}$ , değiştirgen yöneyine uygulanacak olan düzeltme yöneyidir,
- Doğrusal problemlerde denklemin sağında  $\mathbf{g}$  gözlem yöneyinin olmasına karşın, doğrusal olmayan problemlerde  $\Delta \mathbf{g}$  yöneyi, yani model  $\mathbf{p}$  yerine  $\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}$  değiştirgeninin uygulanması ile oluşacak model pertürbasyonu, yani model tepkisi ile gözlemsel değerler arasındaki fark yer almaktadır,
- Doğrusal denklem problemi doğrudan doğruya çözülebilmekle birlikte doğrusal olmayan problem yinelemeli bir yöntemle çözülebilmekte ve her yinelemeli adımda  $\mathbf{p}$  değiştirgen yöneyi  $\Delta \mathbf{p}$  yöneyi kadar düzeltilmektedir.

Bu sonuçlara göre doğrusal olmayan problemlerin çözümünde keyfi bir başlangıç modelinin seçimi ve bu modele ilişkin başlangıç değiştirgenlerinin seçimi ile problemin yinelemeli olarak çözümü ve düzeltme yöneyinin bulunması gerekmektedir. Gerçek çözüme ulaşabilmek için  $\Delta \mathbf{p}$  yöneyinin sıfır olması

gerekmektedir. Ancak bu mümkün değildir. Dolayısıyla düzeltme yöneyinin yeterince küçülene kadar yinelemenin devam etmesi gerekmektedir.

Tüm bunların sonucunda (3.37) numaralı doğrusallaştırılmış denklem takımının enküçük kareler çözümü, doğrusal denklem takımlarının çözümüne benzer şekilde aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$\Delta \mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{g} \quad (3.38)$$

Bu denklem ile belirtilen yinelemeli enküçük kareler çözümü,  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  tersinin alınabilmesi durumunda  $e$  yanlgı yöneyinin kare uzunluğunu ( $l^2$  normu) küçük yapıyorsa da, gözlemsel değerler ile model tepkisi arasındaki fark yöneyini belirli bir değerden daha küçük yapmayı güvence altına almamaktadır.

Daha önceden de bahsedildiği gibi, özdeğerlerin sıfır ya da çok küçük olması  $\mathbf{A}$  dizeyinin tersinin alınamamasına, çözüm sırasında da duyarsızlığa hatta hiç çözüm bulunamamasına neden olmaktadır. Bu sorunun önüne geçmek için kullanılan yöntem sönümlü enküçük kareler yöntemi olarak adlandırılır [26], [27],[28].

Sönümlü enküçük kareler yönteminin uygulanmasında kısıtsız enküçük kareler yöntemindeki

$$E = \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (3.39)$$

amaç fonksiyonunun enküçüklenmesi yerine,

$$S = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \vartheta (\mathbf{p}^T \mathbf{p} - p_0)^2 \quad (3.40)$$

amaç fonksiyonu enküçüklenemeye çalışılır. Burada  $\vartheta$  sabit bir değer (Marquardt faktörü),  $\mathbf{p}$  değıştirgen yöneyi,  $p_0$  önceden belirlenmiş bir eşik değeridir. Yanlgı yöneyinin değeri

$$\mathbf{e} = \mathbf{g} - \mathbf{A} \mathbf{p} \quad (3.41)$$

olarak yerine konursa, enküçüklenmesi gereken  $S$  amaç fonksiyonu açık bir biçimde

$$S = (\mathbf{g} - \mathbf{A} \mathbf{p})^T (\mathbf{g} - \mathbf{A} \mathbf{p}) + \vartheta (\mathbf{p}^T \mathbf{p} - p_0^2) \quad (3.42)$$

bağıntısı ile gösterilebilir. Bağıntıdaki ilk parantez içindeki terimin devriği alınrsa,

$$S = (\mathbf{g}^T - \mathbf{p}^T \mathbf{A}) (\mathbf{g} - \mathbf{A} \mathbf{p}) + \vartheta (\mathbf{p}^T \mathbf{p} - p_0^2) \quad (3.43)$$

elde edilir ve denklem düzenlenirse,

$$S = \mathbf{g}^T \mathbf{g} - \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{p} - \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{g} + \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{p} + \vartheta \mathbf{p}^T \mathbf{p} - \vartheta p_0^2 = \min \quad (3.44)$$

sonucuna varılır. Bu bağıntının enküçüklenebilmesi için bilinmeyen değiştirgenlere göre parça türevlerinin sıfır yapılması gerekir. Gereklı türev işlemleri yapılır ve denklem düzenlenirse,

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \vartheta \mathbf{I}) \mathbf{p} = \mathbf{g}^T \mathbf{A} \quad (3.45)$$

elde edilir. Buna göre czm yöneyi,

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \vartheta \mathbf{I})^{-1} = \mathbf{A}^T \mathbf{g} \quad (3.46)$$

Bu bağıntıya “sönümlü enkck kareler” ya da “Marquardt-Levenberg” ters czm adı verilir.

Kısıtsız enkck kareler yönteminde temel sorun  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$  normal dizeyinin esas köşegeni üzerinde sıfır ya da sıfıra yakın değerlerin yer almasından dolayı tersinin alınamayışıdır. Buna karşılık (3.46) bağıntısında  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  normal dizeyine  $\vartheta \mathbf{I}$  gibi bir köşegen dizey eklenmektedir. Başka bir deyişle,  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 'nın esas köşegeni üzerindeki elemanlarına  $\vartheta$  gibi sabit değerler eklenmekte ve sıfır olmaları engellenmektedir.

## BÖLÜM 4

### Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS)

#### 4.1 Giriş

Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS), 1974 yılında Amerikan Savunma Bakanlığı (DoD) tarafından askeri amaçlar için geliştirilmiş radyo navigasyon sistemidir [29]. GPS veya NAVSTAR-GPS olarak da bilinir. 1980'den sonra sivillerin kullanımına izin verilmiştir.

Küresel konum belirleme sistemi, yeryüzünden yaklaşık olarak 20200 km yüksekte 24 adet uydudan oluşmaktadır GPS 24 saat boyunca, gece ve gündüz, dünyanın her yerinde, her türlü hava koşulunda (bulutlu, yağmurlu, güneşli), noktalar arası görüş gerektirmeden ölçüm yapma olanağı sağlar.

GPS, yatay ve düşey konum bilgilerini birlikte vermesi gibi üstünlüklerinden dolayı, gemi, uçak vb araçların navigasyonundan, önemli yapıların deformasyonlarının belirlenmesine kadar tüm jeodezik amaçları karşılayacak şekilde doğruluk veren bir yöntemdir. GPS yönteminde konum bilgileri WGS-84 elipsoidi üzerindedir.

#### 4.2 GPS Birimleri

##### 4.2.1 Uzay Birimi

Toplam 24 adet aktif GPS uydusu bu bölümü oluşturmaktadır. Bu uydular, yeryüzünden yaklaşık 20200 km yükseklikte ekvatorla 55 derecelik açı yapan 6 değişik yörünge düzleminde yerleştirilmiştir.

##### 4.2.2 Kontrol Birimi

Kontrol birimi (OCS) uyduların ve sistemin tümüyle çalışmasını sağlamak ve izlemek için kurulan, dünya üzerine dağılmış bulunan çeşitli niteliklere sahip 5 yer istasyonundan oluşur.

### 4.2.3 Kullanıcı Birimi

Kullanıcı birimi, GPS sinyallerini konum bilgilerine dönüştüren aletlerden oluşmaktadır. Anlık konum tespiti için kullanıcı 4 veya daha fazla uydudan (3 uydu konum tespiti ve 1 uyduda uydu-alıcı saat farkının çözümü için) gelen sinyalleri ölçerek hem zamanı hem kendisinin 3 boyutlu konumunu hem de eğer hareket halinde ise hızını hesaplayabilir. GPS kullanıcıları askerler ve siviller olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

## 4.3 GPS Ölçme Yöntemleri

### 4.3.1 Sürekli Ölçme Yöntemi

Sürekli tip GPS ölçmeleri, yerüzündeki bir gözlem istasyonundan sürekli olarak, gerçek zamanlı (real-time) ölçme yapılması olarak ifade edilebilir. Bu şekilde anlık konum değiştirmeleri saptanabilmektedir. Sürekli istasyonların doğruluğunun yüksek olması ve konumlandırılmanın daha özenli yapılması gerekliliğinden maliyeti oldukça yüksektir.

### 4.3.2 Kampanya Tipi Ölçme Yöntemi

Kampanya tipi ölçmede ise yeryüzü üzerinde bir noktanın konumu  $\pm 5 \text{ mm}$ . doğrulukla bulunur. Bu tip ölçmede, alıcı istasyon noktası üzerinde belli bir süre konumlandırılır ve sinyaller toplanır. Daha sonra aynı yıl içerisinde belli bir süre sonra yine aynı nokta üzerinde konumlandırılma yapılarak uydu sinyalleri toplanır. Başka bir deyişle, aynı gözlem noktası üzerinde belli zaman aralıkları ile veri toplanmaktadır.

## 4.4 GPS Ölçülerinde Hata Kaynakları

GPS sinyalleri uydulardan yeryüzündeki alıcılara gelirken bir takım bozucu kuvvetlerin etkisi altında kalırlar. Bu etkiler nedeniyle GPS ölçülerinde sistematik hatalar oluşur. Bu hatalar şöyle sınıflandırılabilir;

- Uydulara bağlı hatalar : uydu saat hatası, yörünge hatası,
- Sinyalin yayılmasından kaynaklanan hatalar: iyonosferik gecikme hatası, troposferik gecikme hatası, yansıma hatası,
- Alıcıya bağlı hatalar: Alıcı saat hatası, anten faz merkezi kayıklık hatası.

Bu hatalardan en önemlisi, troposferik gecikme hatasıdır. Başka bir deyişle, iyonize olmamış atmosferin uydu sinyalleri üzerindeki ışın geciktirme etkisidir.

#### 4.5 GPS Kooridinatlarından Yerel Koordinatlara Geçiş

GPS uydularından elde edilen tüm koordinatlar  $X, Y, Z$  veya  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  uluslararası yerel koordinat sistemi olarak kabul edilmiş olan 3 boyutlu WGS84 referans elipsoidi üzerindedir. WGS84 elipsoidi yerel bir koordinat sistemidir. Ülkemizde yatay kontrol ağlarının dayandığı referans yüzeyi Hayford elipsoidi ve ED50 datumudur. Dolayısıyla elde edilmiş WGS84 koordinatlarının pratikte kullanılabilmesi için bu datumda yapılan ölçmelerin ED50 datumuna dönüştürülmesi zorunludur. Bu işlemler 2 boyutlu Helmert benzerlik dönüşümü ya da 3 boyutlu benzerlik dönüşümü ile gerçekleştirilebilir.



## BÖLÜM 5

### Olasılıksal Kavramlar

Uygulamalı bilimlerde gözlem yolu ile elde edilen veriler birbirlerinden belirli ölçülerde farklılık göstermektedir. Bu farklılıkların birçok nedeni olabilir. Sözgelimi, GPS yolu ile yapılan gözlemlerde, alıcı saat hatası, kullanıcı hatası gibi hatalar yapılan gözlemlere etki etmektedir. Aynı şekilde nemlilik, sıcaklık ve basınç gibi ortam koşullarının da gözlemsel veriler üzerinde önemli bir etkisi vardır. Tüm bu etmenler, başka bir deyişle gürültüler gözlemsel verinin saçılmasına neden olmaktadır.

Bu nedenle daha önceden de sözü edildiği gibi gözlemsel veriler tanimsal olmayan veriler grubuna girerler ve ancak istatistiksel özellikleri ile ifade edilebilirler. Önceden kestirilemedikleri için belirli güvenilirlik sınırı içerisinde olasılık dağılımları incelenebilirler.

İstatistik yöntemler sadece veri saçılmaları karşısında gerçeğe yakın sonuçlar aramak için kullanılmaz. Bunun yanısıra büyüklükler arasında karşılıklı ilişkilerin türünü belirlemede de kullanılırlar. Sözgelimi, olay zaman içinde inceleniyorsa, onun zamana bağlı olarak nasıl değiştiği istatistiksel yöntemler ile incelenebilir. Bu türden incelemelerin yapılabilmesi için uzun bir süreyi kapsayan verilere gereksinim duyulmaktadır.

Yer bilimlerinde istatistiksel incelemelere, depremlerin oluş zamanları, yerleri, büyüklükleri, odak derinlikleri gibi özelliklerinin saklanması ve bu özelliklere dayanarak belli bir güvenilirlik alanında geleceğe ilişkin tahminlerin yapılması örnek olarak verilebilir.

#### 5.1 Rastlantısal Değişken ve Rastlantısal Olay

Rastlantısal değişken, gelecekteki bir gözlemlerde alacağı değeri önceden kesinlikle bilinmeyen değişkendir. Sözgelimi, gürültünün herhangi bir anındaki gözlenecek değerini önceden bilmek mümkün olmadığına göre, gürültü rastlantısal bir değişkendir.

Rastlantısal değişkenlerin belirsizliği, bu değişkenlerin önceden tahmin edilemeyen çok sayıda değiştirigene bağlı olmasından ileri gelir. Değiştirigenerin

olay içerisinde gösterecekleri değişimler veya olay hakkındaki bilgi yetersizliği belirsizlik nedenlerden birkaçı olarak sayılabilir. Bu nedenle bu tür olayları gösteren değişkenlerin deterministik bir yaklaşımla incelenmesi mümkün değildir. Bunun yerine olasılıkçı bir yaklaşım ile inceleme yapılması gerekmektedir.

Rastlantısal değişkenin verilen belli bir aralıktaki değer alma olasılıklarının kuramsal olarak hesaplanabilirliği rastlantısal olay ile ifade edilebilir. Olasılık kuramında rastlantısal bir olayın meydana gelme şansı olasılık adı verilen bir büyüklük ile ifade edilir.

## 5.2 Olasılıksal Kavramlar

### 5.2.1 Ortalama Değer

Bir fonksiyonun belirli bir aralıktaki değerleri değişimler gösteriyorsa ortalama değerinin bilinmesi gerekir. Ortalama değer denilince akla gelen, gözlem değerleri toplamının gözlem sayısına oranı olan basit bir aritmetik ortalamadır.

Bir  $f(x)$  fonksiyonunun  $x = c$  için ortalama değeri  $a \leq x \leq b$  aralığında fonksiyonun sürekli ve  $a \leq c \leq b$  olması koşulu ile

$$f(c) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \quad (5.1)$$

tümlemesi (integrali) ile verilir ve buna matematikte ortalama değer kuramı adı verilir.  $f(x)$  fonksiyonunun  $(a, b)$  aralığındaki ortalama değeri eğrinin altında kalan alana denk bir dikdörtgenin yüksekliğine eşittir. Ayrık verilerin ortalama değeri fonksiyonların ortalama değerinden farklıdır. Buna göre bir ölçünün ortalama değerininin gösterilimi,

$$E(l) = \mu \int_{-\infty}^{+\infty} l f(l) dl \quad (5.2)$$

tümlevidir. Sonsuz küçükler yerine sonlu küçükler ve tümlev yerine de toplam alınırsa (5.3) numaralı bağıntı elde edilir.

$$\mu_{n \rightarrow \infty} \simeq \frac{[l]}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \quad (5.3)$$

Burada  $l_i$  ölçmeleri,  $n$  ise ölçülerin sayısına karşılık gelmektedir.

İstatistikte çok kullanılan diğer bir ortalama ise karekök ortalamadır. Karekök ortalama,

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \quad (5.4)$$

bağıntısı ile verilebilir [23].

### 5.3 Değişinti (Varyans) ve Standart Sapma

Gözlemsel verilerin ortalama değer çevresinde saçılmalarını sayısal olarak gösterebilmek amacı ile bir takım bağıntılar geliştirilmiştir. Sözelimi, gözlemsel verilerin ortalama değerden olan farklarının ortalamasını alarak hesaplama yapmak düşünülebilir. Ancak pozitif ve negatif değerlerin birbirlerini götürmesi nedeni ile saçılma miktarının çok büyük olmasına karşın çok küçük sonuçlar elde edilebilir. Bu bakımdan farkların mutlak değerlerinin toplamını oluşturmak gerekir. Farkların ortalama değeri fark ortalaması olarak adlandırılır. Saçılmayı ortaya çıkarmak için farkların karelerinin toplamı oluşturulur.

Gözlemsel verilerin her birinin ortalama değerden olan farklarının karelerinin aritmetik ortalamasına değişinti, varyans adı verilir (5.5).

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ort})^2 \quad (5.5)$$

Ortalama değer çevresindeki saçılmayı sayısal olarak göstermek için değişinti yerine standart sapma da ölçüt olarak kullanılabilir. Standart sapma değişintinin kareköküdür (5.6).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ort})^2} \quad (5.6)$$

### 5.4 İlişki Katsayısı

Çoğu problemlerde iki rastgele değişken arasında istatistiksel bir ilişki bulunur. Başka bir deyişle, bu iki değişkenin birbirlerine karşılık gelen değerleri bağımsız değildir. Gözlemsel bilimlerde bunun anlamı aynı süreç içinde birden fazla değişkenin gözleminin yapılmasıdır. Sözelimi, GPS gözlemlerinin yapıldığı bir jeodezik ağda, ölçmelerin elde edildiği kaynağın ortak olmasından dolayı kaynak cihazlı her bir istasyonun etkileneceği hata da ortak olacaktır.

Bu şekilde iki değişken arasında bir ilişki bulunması, bunlardan birinin diğerinden etkilenmesi, ya da her iki değişkenin başka değişkenlerden birlikte etkilenmeleri sözkonusu olacaktır. Sözkonusu olan bu ilişkiler fonksiyonel (deterministik) nitelikte değildir [30]. Başka bir deyişle, değişkenlerden biri belli bir değer aldığı anda diğerinin her zaman aynı değeri alacağı söylenemez. Bu bağımsız değişkenlerin ilintilerinin incelenmesine istatistikte ilişki, korelasyon adı verilir.

İki bağımsız değişken arasındaki ilişki korelasyon katsayısı ile ifade edilir. İlişki katsayısı sayısal olarak iki değişken arasındaki ortak varyansın, değişkenlerin her birinin standart sapmalarının çarpımına oranı olarak tanımlanır. Bu

bağlamda ortak değişinti ise iki değişkenin ortalamaları çevresinde beraberce gösterdikleri değişimin bir ölçüsüdür ve her bir değişkenin ortalamadan olan farklarının çarpımlarının toplamı olarak tanımlanır.  $x$  ve  $y$  gibi iki değişkenin ortak değişintisi;

$$k_{xy} = \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ort})(y_i - y_{ort}) \quad (5.7)$$

bağıntısı ile tanımlanır.

## 5.5 Normal Dağılım (Gauss Dağılımı)

Normal dağılım sürekli bir olasılık dağılımı olup istatistikte oldukça önemli bir yer tutar ve

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \quad (5.8)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Bu bağıntıda  $\sigma$  standart sapmayı,  $\mu$  ortalama değeri göstermektedir.

Normal dağılım altında kalan alan 1'e eşittir. En yüksek frekans ortalama değer etrafında olacağından, normal dağılım eğrisi bu noktada enbüyüklenir. Ortalama değerden büyük ve küçük değerlere doğru ise frekans azalır. Eğri ortalama değere göre bakışlıdır.

(5.7) bağıntısından da görüleceği gibi, normal dağılım eğrisinin biçimi aynı zamanda standart sapma tarafından denetlenmektedir.

## 5.6 Chi-kare ( $\chi^2$ ) Testi

Gözlemsel frekanslar ile beklenen frekanslar arasındaki uyumsuzluğun derecesini ölçmek için uygulanan testlerden biri Chi-kare testidir. Bir anlamda gözlemsel verilerin normal dağılıma uygun olup olmadığının bir göstergesidir. Bu test;

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (g_i - b_i)^2 / b_i \quad (5.9)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada  $g_i$  gözlemsel frekansları  $b_i$  ise beklenen frekansları göstermektedir.  $\chi^2 = 0$  olduğunda gözlemsel ve beklenen frekanslar birbirleri ile tam uyum halinde,  $\chi^2 > 0$  olduğunda ise tam bir uyum sağlanamıyor demektir. Sözgelimi,  $\chi^2$  testini gözlemsel verilerin bir normal dağılım gösterip göstermediklerine uygulamak istersek,  $b_i$ 'ler normal dağılımdan beklediğimiz kuramsal frekans değerleri olacaktır.

## 5.7 Değiştirgen Tahminlerinin Güven Aralıkları

Bir örnekteki verileri kullanarak bir değiştirgenin kesin değerini belirlemek mümkün değildir. Ancak bu değiştirgenin en iyi tahmini olan istatistik değeri hesaplanabilir. Bu tahminde yapılabilecek hatanın büyüklüğünü ölçmek için tahminin güven aralığı belirlenir. Güven aralığının genişliği örnekleme dağılımına bağlıdır ve yüzde ile ifade edilir.

## BÖLÜM 6

### Benzetim ve Eniyileme

#### 6.1 GPS Tabanlı Bir Jeodezik Ağın Benzetim ve Eniyilemesi

Jeodezik ağ, belli bir bölgede, jeodezik bir noktaya ait durağan konumsal bilginin elde edilebilmesi için tasarlanan ve bir takım ölçme aletleri ile gözlemlerin yapıldığı bir düzendir. Jeodezik istasyon noktalarının konumlarının uygun olarak belirlenmesi kaliteli verilerin elde edilmesinde oldukça önemlidir.

Bu çalışmada bu türden bir eniyileme yapılmayacağını, daha önceden de belirtildiği gibi yapılacak olan eniyilemenin fay değiştirgenlerinin belirlenmesi üzerine olacağını tekrar vurgulamakta fayda vardır.

Bu bağlamda problem kısaca fay değiştirgenlerinin belirli bir güvenilirlik limiti içerisinde elde edilmesi için jeodezik bir gözlem ağının en iyilenmesi olarak tanımlanabilir. Benzetim ve eniyileme adımına geçmeden önce modelin kurulması gerekmektedir. Kurulacak model üzerinde, modelin test edilmesi amacı ile gerçek veriler yerine model fonksiyonu aracılığı ile üretilen yapay veriler kullanılacaktır. Modelin kurulup çalıştırılmasının ardından benzetim ve birtakım ağ değiştirgenlerine göre eniyileme yapılacaktır.

#### 6.2 Matematiksel Modelin Oluşturulması

Tanımlanan problem, gözlemler aracılığı ile model değiştirgenlerini belirlemeye yönelik olduğundan ters problemdir. Dolayısıyla, ters problemin çözümüne geçmeden önce, jeolojik yapıyı ifade eden bir model fonksiyonuna gereksinim vardır. Bu model fonksiyonu (6.1) numaralı denklem ile verilen, yanal atımlı faya ilişkin modeldir. Model olası bir depremden önce kırığın davranışını ortaya koymaktadır.

$$D(x) = \frac{-S}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{H}\right) \quad (6.1)$$

Bu modelde,  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerinin aynı anda bulunması amaçlanmaktadır.  $x$  fay hattından olan uzaklığı, yani gözlem istasyonlarının konumlarını,  $S$  ve  $H$  ise fay model değiştirgenlerini göstermektedir.

Fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde, istasyon noktaları eşit aralıklarla ve fay hattına göre simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir.

### 6.3 Benzetim

#### 6.3.1 Yapay Verilerin Oluşturulması

Yapay veriler gözlemsel verilere karşılık gelen ancak yapay yolla üretilen verilerdir. Kuramsal olarak hesaplanan verilere gürültülerin eklenmesi ile yapay veriler oluşturulur.

Bu çalışmada, yapay (gözlemsel) verilerin oluşturulmasında iki türlü gürültü etkili olmuştur. Bunlardan biri lme hatalarını içeren gürültüler, diğeri ise merkezlendirme hatalarını içeren gürültülerdir. İstasyon noktalarında yapılan tüm gözlemlerin uydu bazlı bir lme tekniği ile yapıldığı varsayılmıştır. lmelere ilişkin hataların standart sapması  $\pm 1$  mm. olarak belirlenmiştir. Konumlandırmadan doğabilecek hatalar ise  $\pm 1$  mm. aralığında üretilmiştir.

Gözlemsel hatalara karşılık gelen gürültüler ilişkisel gürültü olarak üretilmiştir. İlişkisel gürültü, gözlemlerin oluşturulmasında tüm istasyon noktalarının etkileneceği hata kaynağının ortak olmasından meydana gelmektedir. Sözgelimi, GPS tekniği ile yapılan gözlemlerde meydana gelebilecek gürültü, alıcılara gelen sinyalin aynı kaynaktan gelmesi nedeni ile ilişkisel gürültü olacaktır. Bu nedenle, yapay verilerin oluşturulmasında lme hatalarına ilişkin gürültüler ilişkisel gürültü olarak üretilmiştir.

Atmosferdeki sinyal dağılımının benzetiminde, yani uzamsal olarak lme hatalarına karşılık gelecek ilişkisel gürültülerin oluşturulmasında bir hata modeli ngrlmştir.

Hata modelinin tanımlanmasında lkleme uzunluğu oldukça önemlidir. Bu büyüklük, ortama bağlı olan gürültünün faydan belli bir uzaklıkta baskın olmasını sağlamaktadır.

Ham gürültünün oluşturulması için, normal dağılıma uygun, standart sapması 1 ve ortalama değeri 0 olan rastgele sayılar üretilir ve bu sayılar bir  $\mathbf{X}$  yöneyinde tutulur.  $\mathbf{X}$  yöneyinin kovaryans dizeyi  $\sum_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{I}$  şeklinde bir birim dizeydir. Elde edilen bu gürültülerin uzamsal olarak ilişkilendirilmesinde aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$\sum Y_{ij} = \frac{\sigma^2 L^2}{L^2 + (d_j - d_k)^2} \equiv C_{jk} \quad (6.2)$$

Burada  $L$  lkleme uzunluğu,  $d_j - d_k$  ise  $j$ . ve  $k$ . istasyonlar arasındaki mesafedir. Uygulamada lkleme uzunluğu 3 km. olarak seçilmiştir.

(6.2) numaralı bağıntı ile üretilen değerler, ham gürültülerin kovaryans dizeyini oluşturacaktır. Elde edilen bu dizey simetrik ve pozitif tanımlıdır. Bu

nedenle Cholesky yöntemi ile ayrıklaştırılabilir.

$$\mathbf{C} = \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \quad (6.3)$$

(6.3)'de  $\mathbf{Q}$  dizeyi, Cholesky ayrıklaştırmasından oluşan bir üst üçgen dizeydir. Ayrıklaştırma sonucunda dönüşüm dizeyi elde edilir (6.4).

$$\mathbf{W} = \mathbf{Q}^T \quad (6.4)$$

Ağırlıklandırılmış gürültülerin elde edilmesinde, dönüşüm dizeyi  $\mathbf{X}$  yöneyi ile çarpılır ve kovaryans dizeyi  $\sum_{YY}$  olan ağırlıklandırılmış gürültü yöneyi elde edilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{W}\mathbf{X} \\ W_{YY} &= \mathbf{W} \sum_{XX} \mathbf{W}^T \\ &= \mathbf{W}\mathbf{W}^T \end{aligned} \quad (6.5)$$

Bu gürültü yöneyi  $\mathbf{Y}$ , uzaysal ölçme yöntemi için üretilen ilişkilendirilmiş rastgele gürültüleri içermektedir.

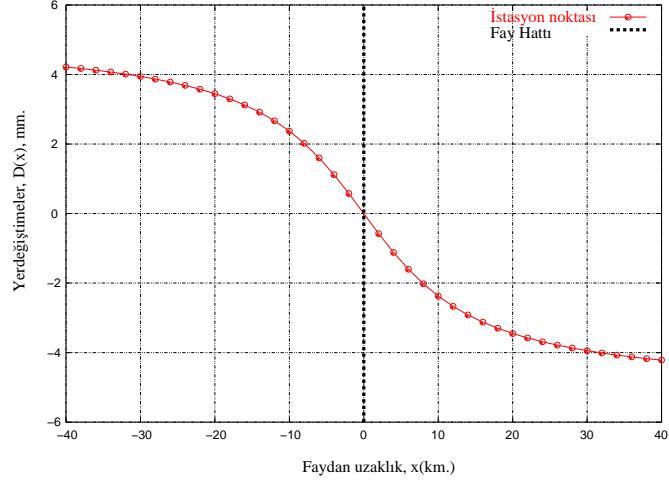
Konumsal hatalara karşılık gelecek gürültüler ise ilişkiel olmayan gürültüler olarak üretilmiştir. Bu hatalar kuramsal olarak hesaplanan model fonksiyonundan elde edilen yerdeğiştirme verilerine doğrudan eklenmektedir. Buradaki gürültü beyaz gürültü yani zaman içinde değişmeyen durağan gürültü olarak tanımlanmaktadır. Bu hatalar kuramsal verilere aşağıdaki biçimde rastgele olarak eklenmiştir.

```
REAL, DIMENSION(:), POINTER :: DISORJ,M
INTEGER IDUM ! GURULTU BASLATAN DEGER
REAL MONINS ! KONUMSAL HATA
.....
ALLOCATE(DISORJ(N)) ! KURAMSAL VERILER
ALLOCATE(M(N)) ! GOZLEMSEL VERILER
DO L=1,N ! GOZLEM ISTASYON SAYISI
M(L)=DISORJ(L)+2*MONINS*RAN1(IDUM)-MONINS
END DO
DEALLOCATE(M)
DEALLOCATE(DISORJ)
.....
```

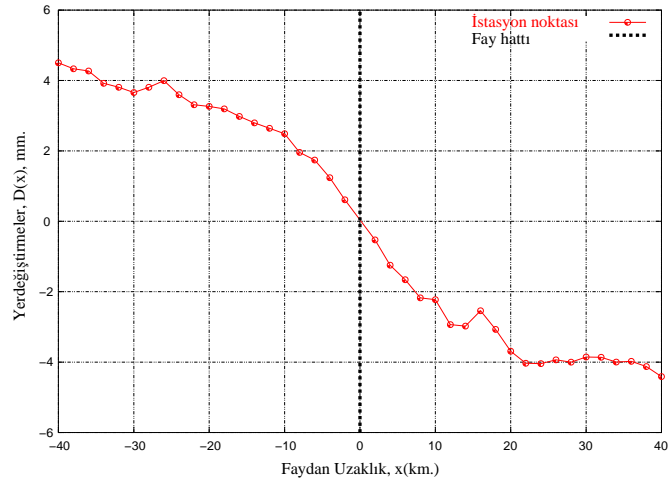
Gürültülerin oluşturulmasının ardından yapay verilerin oluşturulması adımına geçilebilir. Bu adımda fay model değiştirgenleri,  $H = 10$  km. ve  $S = 10$  mm. olarak seçilmiştir.



Fay değiştirgenlerine ait bu değerlerin model fonksiyonunda yerine yazılması ile kuramsal olarak hesaplanan yerdeğiştirme değerlerine eklenen ilişkisel gürültü ve merkezleendirmeden kaynaklanan gürültüler yapay verileri oluşturmaktadır. Şekil 6.1 ve 6.2 istasyon noktalarının faya göre konumlarını, model fonksiyonundan hesaplanan ve gözlemsel verilerden oluşturulan yerdeğiştirmeleri göstermektedir.



**Şekil 6.1:** Enbüyük uzaklık  $\pm 40$  km.'de toplam istasyon sayısı 40 olan bir jeodezik ağın model gösterilimi.



**Şekil 6.2:** Gürültü içeren gözlem istasyonlarının ağ üzerinde gösterilimi

### 6.3.2 Problemin Çözümü

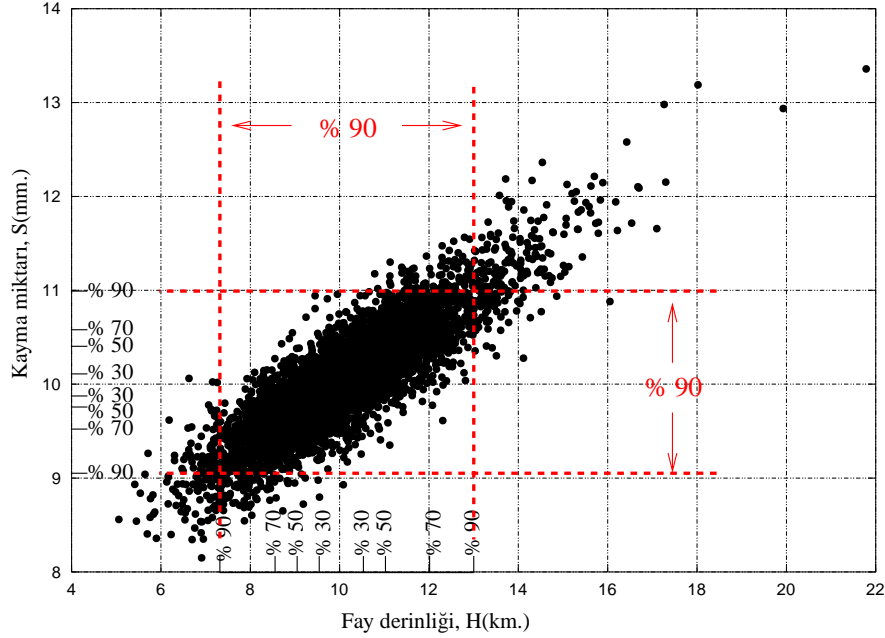
Tanımlanan problem ters problem olduğundan ve model fonksiyonunun da doğrusal olmayan bir fonksiyon olmasından dolayı, geliştirilmiş ters kuramda doğrusal olmayan denklem sisteminin çözümü ile uğraşılacaktır. Bu bağlamda,

denklem sistemi

$$\Delta \mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{I}v)^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{g} \quad (6.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklem sistemi “çekirdek fonksiyon” olarak isimlendirilirse, çekirdek fonksiyonda  $\Delta \mathbf{p}$  yöneyi enküçüklenene kadar yineleme devam edecektir. Başka bir deyişle,  $S$  ve  $H$  fay değiştirgenlerinin kestiriminde, kuramsal veriler ile gözlemsel veriler arasındaki hatanın enküçüklenmesi amaçlanmaktadır. Yanılgı enküçüklendiğinde yineleme işlemi duracak ve değiştirgenler elde edilecektir.

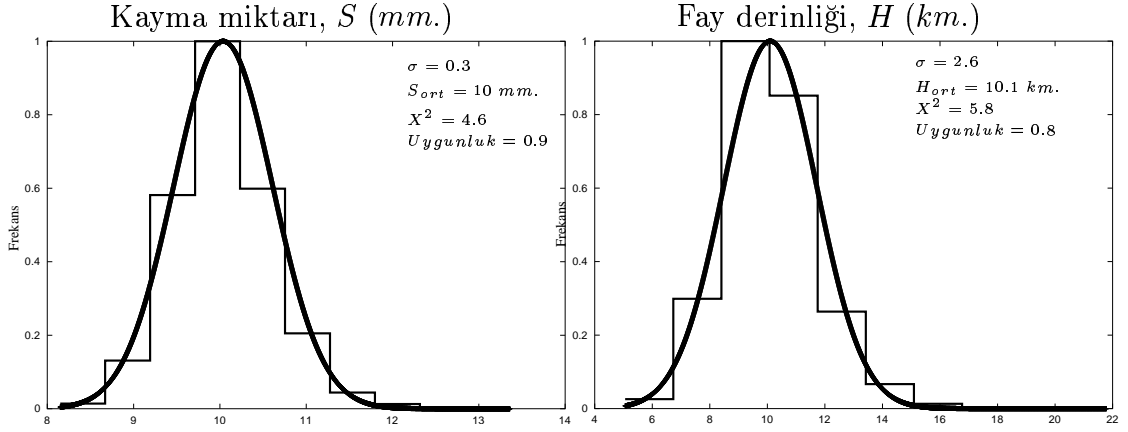
Gürültünün değişken olduğu düşünülürse, yani her bir denemede gözlemlere etki edecek gürültü miktarı farklı tutulursa, deneme sayısı kadar farklı  $S$  ve  $H$  değiştirgeni elde edilecektir. Bu şekilde 5000 deneme sonucunda elde edilen  $S$  ve  $H$  değiştirgen değerlerine ilişkin grafik ve güvenilirlik yüzdeleri Şekil 6.3'te verilmektedir.



**Şekil 6.3:** 5000 farklı gürültü içeren gözlemler ile elde edilen  $H$  ve  $S$  değiştirgenleri

Bu işlemin sonucunda, %90 güvenirlikte  $H$  değiştirgen bilinmeyişi 9.1 – 11 *km.* değerleri arasında kalırken,  $S$  bilinmeyişi 7.5 – 13 *mm.* değerleri arasında kalmaktadır. Bu değerler şunu gösteriyor ki;  $S$  değiştirgeni  $H$  değiştirgenine göre daha iyi kestirilmektedir. Çünkü %90 güvenirlikte  $S$ ,  $H$ 'a göre daha dar bir aralıkta kalmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise değiştirgen bilinmeyenleri çözüm uzayında kalmakta yani,  $S = 10$  *mm.* ve  $H = 10$  *km.* değerlerini içermektedir.

Elde edilen bu verilerin, normal dağılıma uygun olup olmadığı ise  $X^2$  testi ile belirlenmiş ve değiştirgen kestiriminin uygunluğu da (goodness of fit)



**Şekil 6.4:**  $S$  ve  $H$  değerlerinin normalize edilmiş beklenen ve gözlemsel frekans gösterilimi

hesaplanmıştır (Şekil 6.4) [31].

Bu uygunluk değerinin 1'e yaklaşması en uygun kestirimin yapıldığının bir göstergesidir.  $\chi^2$  değeri ise 0'a yaklaştıkça değiştirgen kestiriminin normal dağılıma olan uygunluğu artar. Başka bir deyişle, bu değer beklenen frekanslar ile gözlenen frekanslar arasındaki uyumun derecesine karşılık gelmektedir. Dönüşüm sonucu elde edilen değiştirgenlerin frekans dağılımları ile bu parameterlerin varyans ve ortalama değerlerinden hesaplanan normal dağılımları karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.4'den de anlaşıldığı gibi,  $S$  değiştirgeni normal dağılıma uygunluk açısından  $H$  değiştirgenine göre daha iyi çıkmaktadır. Ayrıca  $S$  değiştirgeninin varyansı  $H$  değiştirgenine göre daha küçük, yani meydana gelen saçılma miktarı daha azdır. Aynı şekilde değiştirgenlerin uygunluğu  $S$  değiştirgeninde daha iyi çıkmaktadır.

## 6.4 Algoritma

Problemin çözümü için FORTRAN 90'da bir program yazılmıştır. Algoritma aşağıdaki şekildedir. Ana program EK A'da, alt programlar, EK B'de ve Makefile ise EK C'de verilmektedir. Programın akış şeması ise Şekil ??'de gösterilmiştir.

```

1: for  $l = 1$  to deneme sayı1 do
2:   Jeodezik istasyonların oluşturulması
3:   for  $i = 1$  to dönüşüm sayı1 do
4:      $H = 10$  km. {Yakınsanacak  $H$  değeri}
5:      $S = 10$  mm. {Yakınsanacak  $S$  değeri}
6:      $D(x) = -\frac{s}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{H}\right)$  {Model tepkisi, yerdeğıştirmeler}
7:     Rastgele gürültü üret {Ölçme ve merkezlendirme hataları için}
8:      $M(x) = D(x) + \text{gürültü}$  {Yapay verilere göre yerdeğıştirmeler}
9:      $\Delta \mathbf{g} = M(x) - D(x)$  {Gözlemsel farklar}
10:     $H_0 = 20$  km. { $H$  için başlangıç değeri}
11:     $S_0 = 20$  mm. { $S$  için başlangıç değeri}
12:    for  $j = 1$  to yineleme sayı1 do
13:       $\mathbf{A}_{mn} = \frac{\partial D(x, p_1, p_2)}{\partial p_n} \Big|_{x=x_m}$  { $m = 1, \dots, N$ }, { $n = 1, 2$ }
14:      [ $p_1 = H, p_2 = S, N$  gözlem istasyon sayısı], {Jakobyen dizey}
15:       $\Delta \mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{I}v)^{-1} \Delta \mathbf{g}$  {Düzeltilme yöneyi}
16:       $H = H_0 + \Delta p_H$  { $H$  düzeltiliyor}
17:       $S = S_0 + \Delta p_S$  { $S$  düzeltiliyor}
18:       $D(x)$  hesapla {Yeni  $S$  ve  $H$  için yerdeğıştirmeler}
19:       $koh = \sum_{i=1}^N \frac{(D(x_i) - M(x_i))^2}{N}$  {Karesel ortalama hata}
20:      if  $koh < \epsilon$  then { $\epsilon$ , yakınsama ölçütü}
21:        exit
22:      else
23:        go to 11
24:      end if
25:    end for
26:     $S$  ve  $H$  değerlerinin saklanması
27:  end for

```

Şekil 6.5: Programın akış şeması, 12 ve 24. satırların arasında kalan kısım ise çekirdek fonksiyondur.

## 6.5 Eniyileme

### 6.5.1 Eniyileme Ölçütleri

Model kurulup, benzetim için gerekli araçlar sağlandıktan sonra jeodezik ağ eniyilemesine geçilebilir. Genel bir ağ eniyilemesi yapmadan önce, modelin bir takım ağ değiştirgenlerine göre davranışı incelenecektir. Bu ağ değiştirgenleri;

- jeodezik istasyon noktalarının sayısı,
- istasyonların fay hattına göre konumu,
- sistem üzerindeki gürültünün etkisi,
- en uygun istasyon dağılımlarının belirlenmesi.

şeklindedir.

Bu şekilde birtakım ölçütlere göre eniyileme yapılmasının amacı, jeodezik ağda baskın olan değiştirgenlerin saptanması ve gözlem istasyonlarının ağ üzerindeki en uygun konumlarının belirlenmesidir.

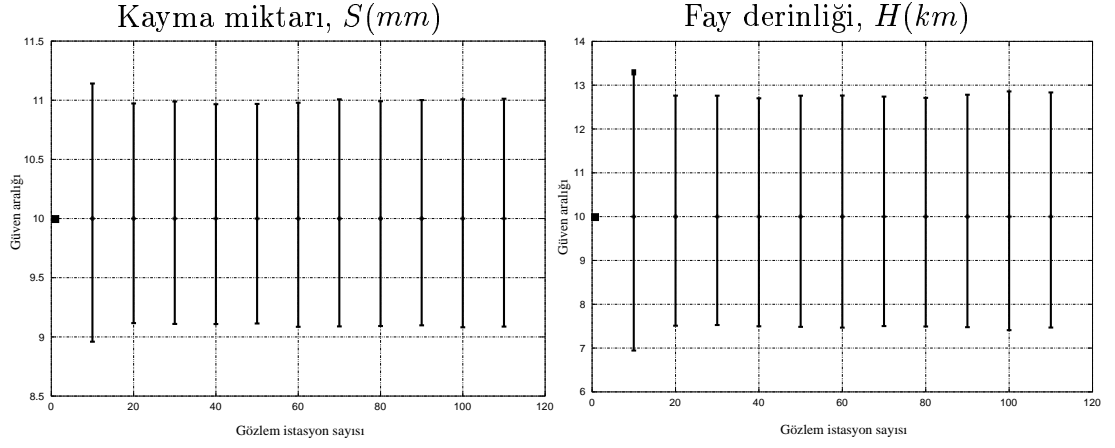
Üç durumda ağın en uygun çözümü bulunduktan sonra genel eniyileme adımına geçilebilir. Genel eniyilemede, Monte Carlo benzetimi kullanılmış, ağ üzerindeki gözlem istasyonu sayıları ve konumları rastgele belirlenerek en uygun çözüm elde edilmiştir.

### 6.5.2 Nokta Sayılarına Göre Eniyileme

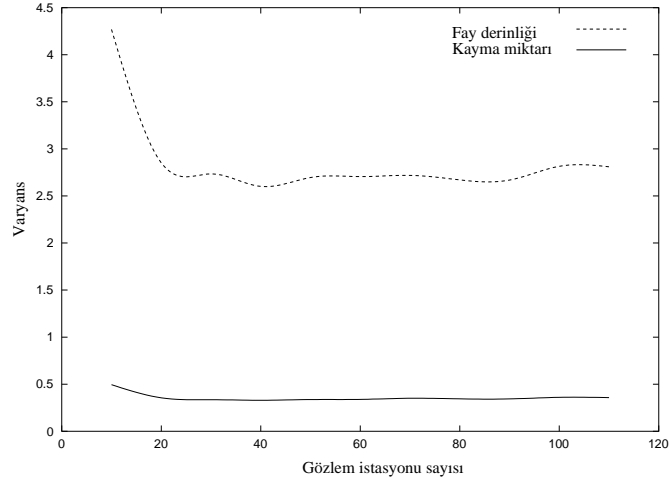
$\pm 40$  km. genişliğinde bir jeodezik ağ üzerinde istasyon sayıları 10'ar 10'ar arttırılmış ve her artışta yapılan benzetimler sonucu  $H$  ve  $S$  değiştirgenlerine ilişkin güvenilirlik limitleri %90 güven aralığında elde edilmiştir. Sonuçlar (Şekil 6.6) ile gösterilmiştir.

Şekil 6.6'da gözlem istasyonlarının sayılarının arttırılması durumunda, güvenilirlik limitlerinde ciddi bir azalma ya da artma görülmemektedir. Bu modelleme sonucunda, fay değiştirgenlerinin kestiriminde gözlem istasyonlarının sayılarının arttırılması çok az bir kazanç sağlamaktadır. İstasyon sayılarının artması maliyeti arttıracığı için bu sonuç oldukça önemlidir.

Şekil 6.7'ye göre istasyon sayılarının artması karşısında  $H$  ve  $S$  değiştirgenlerine ait varyansların çok değişmediği gözlenmektedir. Bu sonuç, gözlem istasyonu sayısının fazla sayıda olmasının model değiştirgenlerinin kestiriminde çok etkili olmadığı sonucu ile örtüşmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta da,  $S$  değiştirgenine ait varyans  $H$  değiştirgenine göre oldukça düşük çıkmaktadır. Dolayısıyla  $S$  değiştirgenindeki ortalama değerden saçılma miktarı  $H$  değiştirgenine göre daha azdır.



**Sekil 6.6:** Gözlem istasyonlarının sayılarının arttırılması durumunda  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerinin %90 güvenirlikte kaldıkları aralıklar.



**Sekil 6.7:** Gözlem sayısının artması durumunda  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerinin varyansları.

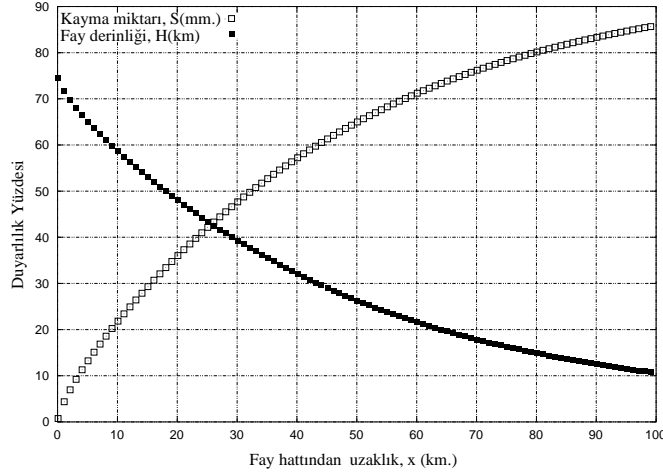
Sonuç olarak, istasyon sayılarının arttırılması, %90 güvenirlik aralığında  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerinin belirlenmesinde çok az bir katkı sağlamaktadır.

### 6.5.3 İstasyon Noktalarının Konumlarının Belirlenmesi

İkinci ağ değiştirgeni olan istasyon noktalarının nerede olması gerektiği ile ilgili incelemede, ilk önce duyarlılık analizi yapılmıştır.

Model değiştirgenlerinin duyarlılıklarının belirlenmesinde Yüksek Boyutlu Model Gösterim kullanılmıştır [32]. Buna göre model fonksiyonu, faydan uzaklığı belirten  $x$  değişkeni sabit tutularak değiştirgenlerine göre ( $S$  ve  $H$ ) YBMG bileşenlerine ayrılmıştır. Sabit ve bir değişkenli YBMG bileşenleri bulunduktan sonra Sobol'un ilgili makalesinde belirttiği varyans formülleri hesaplanmış, ardından hassasiyet katsayıları yine aynı çalışmada belirtildiği gibi bulunmuştur. Bütün bu hesaplamalar özyinelemeli bir algoritma kullanılarak hesaplanmıştır [33]. Buna göre, algoritma  $x = 0 \text{ km}$  ve  $x = 100 \text{ km}$  arasında

bir çok noktada koşulmuş ve elde edilen hassasiyet katsayıları Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 6.8:** Yüksek Boyutlu Model Gösterilim ile yapılan  $S$  ve  $H$ 'a ait duyarlılık yüzdeleri

Şekil 6.8'e göre kayma miktarını daha iyi belirleyebilmek için, faydan uzağa, fay-derinliğini iyi belirleyebilmek için ise fay yakınına gözlem istasyonu yerleştirmek gereklidir. Buradan elde edilen sonuçların, modelin uygulanması sonucunda elde edilen sonuçlar ile örtüşmesi beklenmektedir.

Bu kapsamda, gözlem ağının belli bölgelerinden bazı noktalar çıkarılarak  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerine ait güvenilirlik limitleri elde edilmiştir. Ancak, fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde, gözlem istasyonlarının konumlarının ne derece önemli olduğunu ortaya koymak için aynı anda iki değiştirgeninin kestirimi yerine her iki değiştirgenin de birbirlerinden bağımsız bir şekilde kestiriminin yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla bu incelemede algoritmada bir değişiklik yapılarak, tek değiştirgenli bir kestirim yapılmıştır.

Şekil 6.9'da, 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı bölgeler model fonksiyonu üzerinde gözlem ağından çıkarılan istasyon noktalarının faya göre konumlarını göstermektedir. Sözelimi, faya en yakın olan bölgeden, yani 1 numaralı bölgeden 20 istasyon, dolayısıyla ağdan toplam 40 istasyon çıkarılmıştır ve model çalıştırılarak  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerinin %90 güven aralığında hangi değer aralığında kalacakları belirlenmiştir. Daha sonra sadece 2 numaralı bölgeden gözlem istasyonları çıkarılmış, yani 1 numaralı bölgedeki gözlem istasyonları tekrar ağın içine dahil edilmiş ve tekrar model çalıştırılmıştır. Aynı şekilde sırasıyla numaralandırılmış diğer bölgelerden de aynı sayıda gözlem istasyonları çıkarılmış ve kalan gözlem istasyonları ile model çalıştırılmıştır. Bu işlemlerin sonucunda  $S$  ve  $H$  için güvenilirlik limitleri Şekil 6.10 ve 6.11 ile gösterilmiştir.

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi fay hattına yakın bölgelerdeki istasyonların





gözlem istasyonlarının çıkarılması  $S$  değiştirgenine ait güvenilirlik limitlerini arttırmaktadır (şekil 6.11).

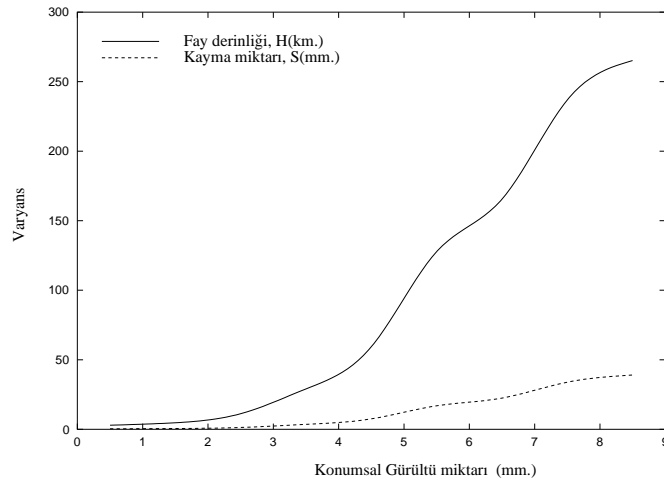
Ancak, her zaman güvenilirlik limitlerinde bu şekilde düzgün bir azalış veya artış sağlanamamaktadır. Güvenirlik limitlerindeki, gürültünün miktarına bağlı olarak düzensiz artış ya da azalışlar ihmal edilebilir seviyelerde olabilir. Başka bir deyişle sonuçlar sistem üzerindeki gürültünün miktarına bağlı olarak değişir. Sistemdeki gürültü miktarı çok fazla olursa bu türden bir sonuç elde edilemez.

Sonuç olarak, sisteme ideal bir gürültü yani aşırı olmayan bir gürültü etki ederken,  $H$  değiştirgenin faya yakın bölgelerdeki,  $S$  değiştirgeninin de faydan uzak olan bölgelerdeki gözlem istasyonları tarafınan kontrol edildiği söylenebilir.  $S$  ve  $H$  değiştirgeni için elde edilen güvenilirlik limitlerinden de açıkça anlaşılacağı gibi, değiştirgenlerin duyarlı olduğu bölgeler YBMG ile yapılan duyarlılık analizi sonucu elde edilen bölgeler ile uyuşum sağlamaktadır.

#### 6.5.4 Gürültünün etkisi

Fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde gözlemsel veriler kullanıldığından, bu verilerin kaliteli olması son derece önemlidir. Eğer gözlemsel verilerin yanlığı düzeyi fazla ise  $H$  ve  $S$  değiştirgeni de bu yanlığıdan etkilenecek ve çok geniş bir aralıkta belirlenecektir.

Ölçme hatalarını ve merkezlendirme hataları içeren gürültünün miktarı arttırıldıķa çözümden ve normal dağılımdan uzaklaşan sonuçlar elde edilmektedir. Gürültü aşırı seviyede arttırıldığında %90 güvenilirlik aralığında  $H$  ve  $S$  değiştirgenlerinde çok yüksek değerlere kadar saçılmalar gözlenmiştir. Konumsal hatadan oluşabilecek gürültülerin arttırılması sonucunda elde edilen değiştirgenlere ait varyans değerleri şekil 6.12 ile gösterilmektedir.



**şekil 6.12:** Gürültülerin arttırılması durumunda değiştirgenlere ait varyans gösterilimi.

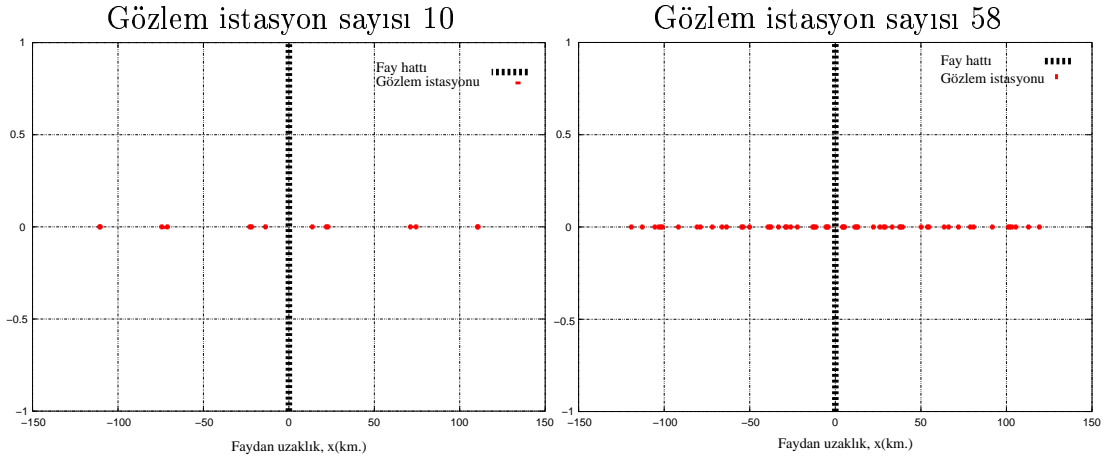
Gürültü miktarının arttırılmasının, beklenildiği gibi sonuçlar üzerinde bozucu bir etkisi vardır. Bu nedenle en uygun  $H$  ve  $S$  değiştirgenlerinin belirlenebilmesi için mümkün olduğunca gürültünün az olması gerekmektedir. Aksi takdirde eldeki veri yozlaşır, veri olmaktan çıkar, gürültü halini alır.

### 6.5.5 En Uygun İstasyon Dağılımları

şu ana kadar yapılan eniyileme işlemlerinde gözlem istasyonlarının konumları arasındaki uzaklık eşit tutulmuştur. Sistemin ideal tutulması eniyileme değiştirgenlerinin kolaylıkla belirlenmesinde fayda sağlayacaktır.

Bu aşamada, gözlem istasyonları arasındaki mesafe eşit olarak seçilmemiş, istasyon konumları ağ üzerine simetri özelliği bozulmayacak şekilde rastgele olarak atılmıştır. Gözlem istasyonlarının dağılımlarına göre,  $S$  ve  $H$  değiştirgenleri belirlenmiştir. Çok sayıda deneme yapılarak, bu denemelerden en uygun istasyon dağılımı, gözlem istasyon sayılarının az olması, değiştirgen bilinmeyenlerinin çözüm uzayınının içerisinde olması, %90 güvenirlikte  $S$  ve  $H$  değiştirgenlerinin dar bir aralıkta ve normal dağılıma uygun olması ölçütlerine göre belirlenmiştir.

Bu ölçütlere göre, tüm denemelerin içinden iki farklı uygun istasyon dağılımı seçilmiştir. Bunlar istasyon sayısının 10 ve 58 olduğu istasyon dağılımlarıdır. Her iki dağılım birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre gözlem istasyon sayısının 10 ve 58 olduğu düzenek şekil 6.13'deki gibidir.



şekil 6.13: En uygun istasyon dağılımları

Her iki sonuç en uygun fay değiştirgenlerini veren bir dağılıma sahiptir. %90 güvenirlikte gözlem istasyon sayısının 10 olması durumunda,  $H$  değiştirgeni yaklaşık 5 – 15 km. aralığında,  $S$  değiştirgeni ise 9 – 11 mm. aralığında kestirilirken, gözlem istasyon sayısının 58 olması durumunda da  $H$  değiştirgeni 7 – 14 km. aralığında,  $S$  değiştirgeni ise 9 – 11 mm. aralığında kestirilmektedir.

Dolayısıyla %90 güvenirlilikte bu değerlere göre fay uzunluğunun 60 *km.* olduğu bir düzenekte hesaplanan deprem büyüklüğü, gözlem istasyon sayısının 10 olduğu istasyon dağılımında 5.2 – 5.6 büyüklüğünde iken, gözlem istasyon sayısının 58 olduğu istasyon dağılımında da 5.2 – 5.6 büyüklüğünde çıkmaktadır.

Bu sonuçlara göre, deprem büyüklüğü açısından bakıldığında 10 istasyon dağılımına sahip bir ağdan ve 58 istasyon dağılımına sahip bir ağdan benzer sonuçlar elde edilmektedir. Dolayısıyla bir ağda çok sayıda gözlem istasyonunun olmasının bir önemi yoktur. nemli olan bu gözlem istasyonlarının ağ üzerindeki uygun dağılımlarının belirlenmesidir.

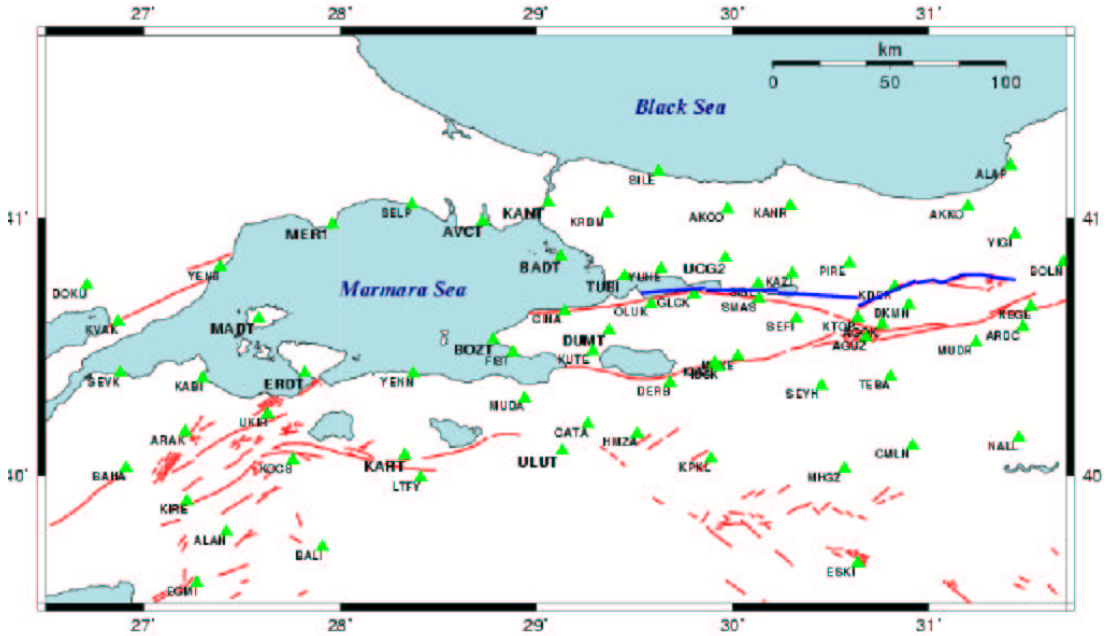
Ayrıca gözlem ağında istasyon sayısının fazla olması; maliyeti arttıracadından en az sayıda istasyon ile uygun bir istasyon dağılımının fay değiştirgenlerin belirlenmesinde ekonomik bir sonuç sağlayacağı açıktır. Gözlem istasyon sayılarının az olmasına rağmen, bunların ağ üzerinde uygun yerlere konumlandırılması ile yüksek doğrulukta fay değiştirgenlerini elde etmek mümkün olacaktır.

## BÖLÜM 7

### Marmara GPS Ağı Üzerinde Uygulama

#### 7.1 Marmara GPS Ağı (MAGNET)

Marmara GPS ağı 24 saat sürekli kayıt yapan GPS istasyonlarından oluşan 12 istasyonluk dinamik bir gözlem ağıdır ve Marmara Bölgesini sürekli izleyerek, olası deprem yerleri ile büyüklüklerini saptamak amacı ile TÜBİTAK, MAM, YDBAE tarafından kurulmuştur. Bu ağı, Kuzey Anadolu Fayının Tekirdağ'dan, İstanbul dahil, İzmit'e kadar olan tüm Marmara Bölgesi'ni kapsayan alandaki batı kısmını ve doğuda Düzce-Bolu'ya kadar olan alandaki orta kısmını kapsamaktadır [34]. Şekil 7.1'de MAGNET jeodezik ağına ait istasyon dağılımı görülmektedir.



Şekil 7.1: Marmara GPS ağından bir görünüm

Toplam 12 adet istasyondan ilk 5 tanesi 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden üç ay önce çalıştırılmıştır. Geri kalan 7 tanesi ise toplanan verilerin değerlendirme

**Tablo 7.1:** MAGNET üzerinde elde edilen gözlemsel veriler

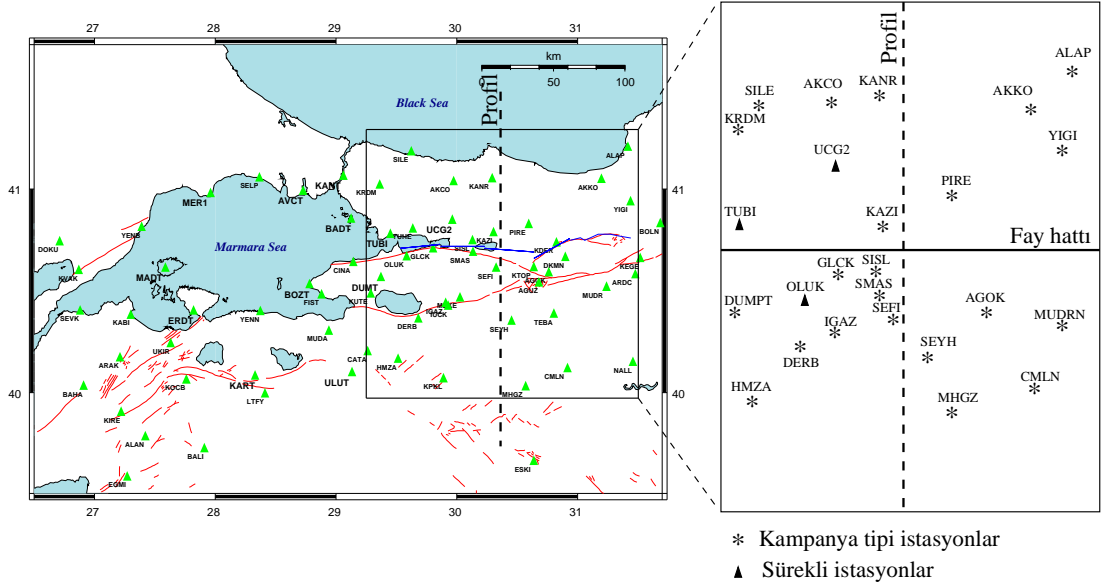
İstasyon Adı	Faydan Uzaklık (km)	Yerdeğiştirme (mm)	Ölçme Tipi
TUBI GPS	-1.0334	4.070853	Sürekli
KAZI GPS	-3.3149	1.515573	Kampanya
PIRE GPS	-8.5119	4.493450	Kampanya
UCGT GPS	-9.0991	5.711967	Sürekli
YIGI GPS	-23.5638	4.254677	Kampanya
KRDM GPS	-26.3598	2.878783	Kampanya
AKCO GPS	-30.0468	1.193707	Kampanya
KANR GPS	-32.5477	4.903053	Kampanya
AKKO GPS	-34.8708	5.076640	Kampanya
SILE GPS	-45.1497	4.560597	Kampanya
ALAP GPS	-52.8697	2.732873	Kampanya
SISL GPS	1.6437	4.430863	Kampanya
GLCK GPS	7.0518	-4.750164	Kampanya
SMAS GPS	7.7508	-6.290323	Kampanya
OLUK GPS	11.9231	-4.719947	Sürekli
SEFI GPS	15.8671	-11.63819	Kampanya
AGOK GPS	17.1445	-8.857246	Kampanya
MUDR GPS	23.7470	-9.192101	Kampanya
DUMT GPS	23.7855	-6.807743	Kampanya
IGAZ GPS	36.4505	-12.86724	Kampanya
SEYH GPS	44.5278	-10.20522	Kampanya
DERB GPS	45.5728	-10.93209	Kampanya
HMZA GPS	68.0916	-11.02249	Kampanya
CMLN GPS	69.0888	-8.017760	Kampanya
MHGZ GPS	80.1184	-8.415813	Kampanya
ESKI GPS	121.0848	-6.810410	Kampanya

sonuçlarına bağlı olarak deprem sonrası deformasyonları duyarlı takip edecek yerlerde devreye sokulmuştur.

Bu bölümde Doğu Marmara'daki KAF'ın kuzey kolu üzerindeki jeodezik istasyonlarının dağılımı incelenecektir. Modellemede İzmit bölgesi üzerinde çalışıldığından Şekil 7.1'de verilen jeodezik istasyonlardan faya olan uzaklığı 120-60 km. arasında kalan istasyon noktaları alınmıştır. Seçilen bu istasyon noktalarından üç tanesi sürekli, diğer 23 tanesi kampanya tipi istasyonlardır.

Kullanılan istasyonlara ait veriler Tablo 7.1'de verilmektedir. Bu veriler TUBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsünden alınmıştır. Bu verilerin elde edilmesinde koordinat dönüşümü ve izdüşüm işlemleri yapılmıştır. WGS84 uydu koordinat sisteminde olan istasyon konumları, UTM koordinat sistemine dönüştürülerek, elde edilen konum bilgileri fay hattı üzerine konum ve yerdeğiştirme olarak izdüşürülmüştür (Şekil 7.2).

Gerçek yerdeğiştirme verilerinin elde edilmesinin ardından, model

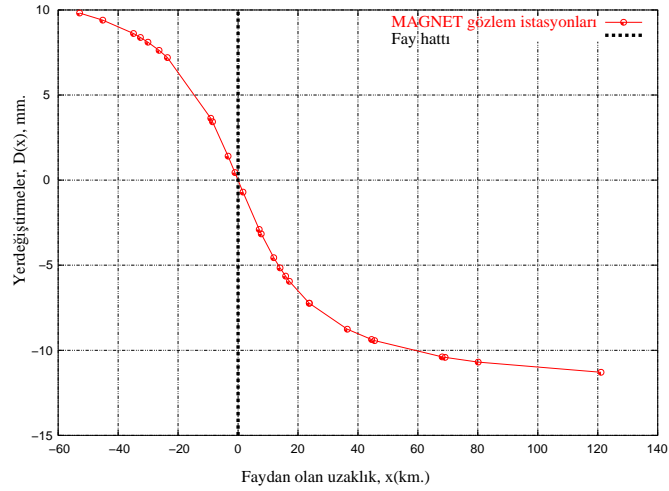


**Şekil 7.2:** Gözlemsel değerlerin profil üzerine izdüşümü

çalıştırılarak İzmit bölgesindeki KAF'ın deşıştırirgenleri elde edilmiştir.

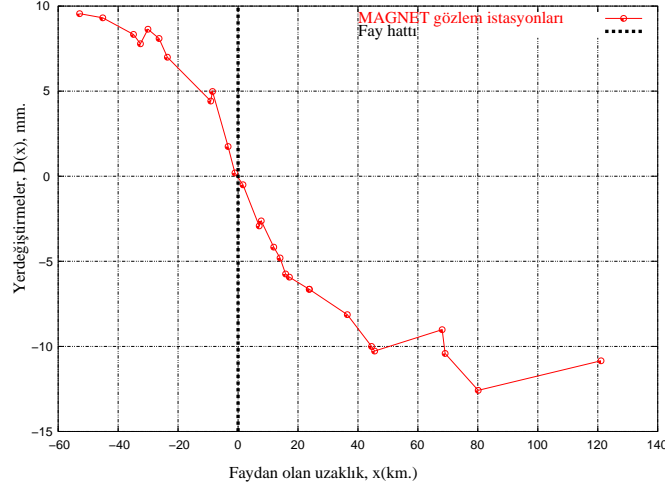
MAGNET üzerinde yapılan ilk çalışmada, istasyon noktalarının fay hattından olan uzaklıkları, ikinci çalışmada ise hem konum hem de yerdeğıştirme verileri kullanılmıştır.

İlk çalışmada, istasyon noktalarının ağı içerisindeki yerleşiminin fayı izlemede ne kadar etkin olacağı sorusu aranacak ve buna ilişkin öneriler yapılacaktır. Dolayısıyla sadece MAGNET geometrisi kullanılacağından bu noktalara ilişkin gerçek veriler yerine yapay veriler kullanılacaktır. Şekil 7.3 MAGNET'deki jeodezik istasyonların konumunu ve bu noktaların model fonksiyonu aracılığı ile hesaplanan yerdeğıştirme değerlerini göstermektedir. MAGNET istasyon noktalarına ait yapay veriler Bölüm 6'da anlatıldığı gibi



**Şekil 7.3:** Herhangi bir gürültü eklenmeksizin MAGNET istasyon dağılımı.

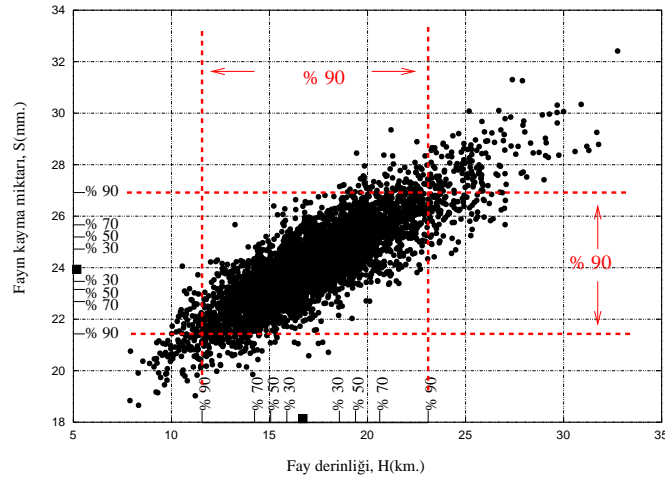
oluşturulmuştur. Her bir istasyon noktasının merkezleştirme hatası da  $\pm 0.5 \text{ mm}$ . aralığında seçilmiştir. Kampanya tipi gözlem istasyonlarında oluşabilecek hata, sürekli istasyonlardaki hata miktarının iki katı olacak şekilde oluşturulmuştur. Magnet istasyon dağılımının gürültü içeren verileri Şekil 7.4'de gösterilmektedir. KAF için modeli oluşturan  $H$  ve  $S$  değişirgenleri sırasıyla  $17 \text{ km}$ . ve  $24 \text{ mm}$ .



**Şekil 7.4:** Ölçme ve merkezlendirme hataları gibi gürültüleri içeren gözlemsel veriler.

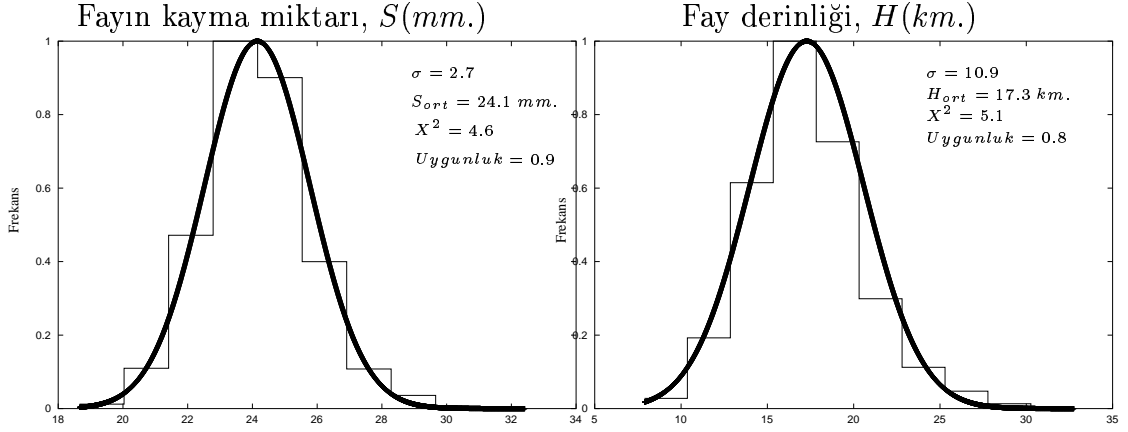
olarak seçilmiştir. Model çalıştırılmadan önce bir de başlangıç değerlerine gereksinim vardır. Başlangıç değerleri ise fay derinliği  $H = 15 \text{ km}$ . ve fayın kayma miktarı  $S = 15 \text{ mm}$ . olarak seçilmiştir.

Her birinde farklı gürültüler üretilmek kaydıyla toplam 5000 dönüşüm yapılmış, dönüşüm sayısı kadar  $H$  ve  $S$  model değıştirgeni elde edilmiştir. Elde edilen  $H$  ve  $S$  değeri Şekil 7.5 de gösterilmiştir.



**Şekil 7.5:** 5000 deneme sonucunda elde edilen değıştirgenlerin güvenilirlik yüzdelerinin gösterilimi.

%90 güvenilirlikte,  $H$  değıştirgeni  $12 \text{ km}$ . ile  $23.2 \text{ km}$ . arasında,  $S$



**Şekil 7.6:** MAGNET geometrisi ile belirlenen  $S$  ve  $H$  değerlerinin normalize edilmiş gözlemsel ve beklenen frekans gösterilimi

değiştirgeni ise  $21.5 mm.$  ile  $26.8 mm.$  arasında kalmaktadır.

Bu sonuçlara göre, MAGNET ile gözlenen  $100 km.$  uzunluktaki yanal atımlı bir fayın olası bir depremde kırılması sonucunda, deprem büyüklüğü (moment büyüklüğü)  $5.9$  ile  $6.2$  arasında olacaktır. Gerçek model değiştirgenlerine göre deprem büyüklüğü hesaplandığında  $6.1$  büyüklüğü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu model ile belirlenen deprem büyüklüğü gerçek deprem büyüklüğüne yakın çıkmaktadır. Buradan da kullanılan matematiksel model aracılığı ile MAGNET istasyon konumlarının deprem değiştirgenlerinin belirlenmesinde uygun bir dağılıma sahip olduğu sonucu çıkarılabilir.  $5000$  adet değiştirgen çiftine ait normal dağılım grafikleri Şekil 7.6'da verilmektedir.

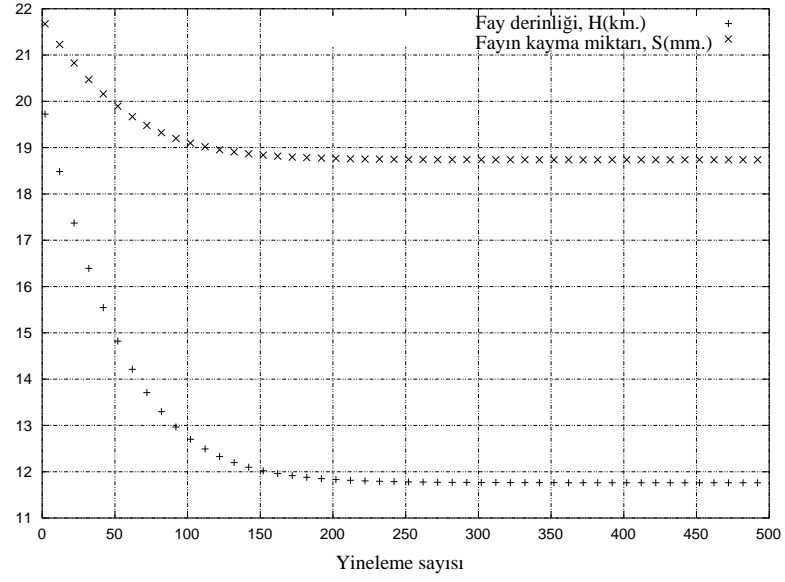
Bu sonuçlara bakıldığında MAGNET istasyon dağılımının uygun bir dağılıma sahip olduğu söylenebilir.

### 7.1.1 MAGNET'de Gerçek Veriler ile Değiştirgen Kestirimi

Şimdiye kadar yapılan uygulamalarda gözlemsel veri yapay olarak oluşturulmakta ve belli ağ değiştirgenlerine göre eniyileme yapılmaktaydı. Burada artık yapay verilerin yerine MAGNET üzerinde GPS ölçme tekniği ile belirlenen Tablo 7.1'deki yerdeğiştirme verileri kullanılacaktır.

Şekil 7.7'de,  $S$  ve  $H$  değiştirgenleri  $500$  yineleme sonucunda bir değere yakınsamıştır. Modelin kestirim sonucu yakınsadığı değere göre oluşturacağı deprem büyüklüğü  $5.7$  olarak hesaplanmıştır. Elde edilen deprem büyüklüğü yetersiz bir öngörüm (under-estimated) olarak düşünülebilir. Büyüklük tek boyutlu bir modele göre hesaplanmakta ve zaman faktörü de hesaba katılmamaktadır. Bu nedenle gerilme birikimi de göz ardı edilmektedir. Dolayısıyla buradan hesaplanan deprem büyüklüğü öngörülen modelin bir sonucu olarak düşünülebilir.





Şekil 7.7: MAGNET verilerinin kullanılması ile model değişirgenlerinin kestirimi.

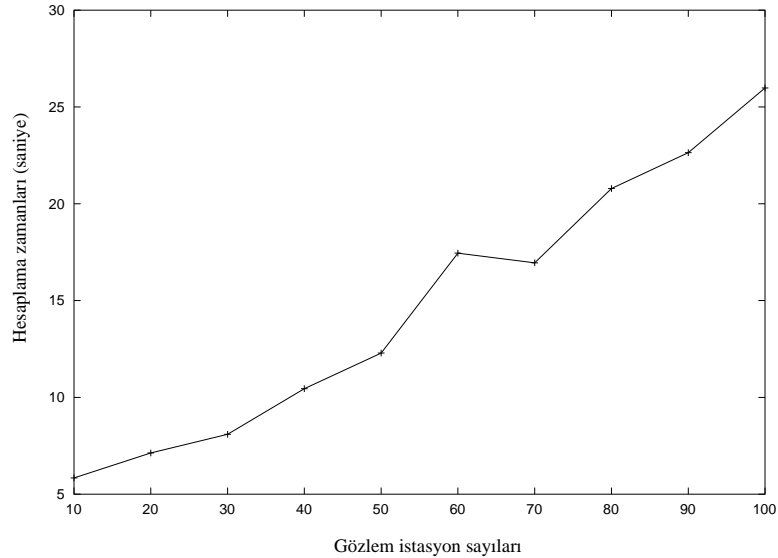
## BÖLÜM 8

### Paralel İşlemler

Kayma miktarı ve fay derinliğini en iyi veren istasyon dağılımını bulmak için çok sayıda deneme yapılabilir. Buna göre birçok ağ değiştirgeni seçkisiz (rastgele) belirlenir ve önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak güven aralıkları hesaplanır. Belli bir güven aralığında değiştirgenlere ait ortalama değer, varyans gibi büyüklükler hesaplanır. Bu büyüklüklere bakılarak en uygun istasyon dağılımına karar verilir.

Yukarıda belirtilen eniyileme işlemi Monte-Carlo algoritmasını takip etmektedir. Yani tam anlamıyla deneme-yanılma türü bir çalışmadır ve çok sayıda deneme gerektirmektedir. İstasyon sayısı, faydan en uzak mesafe ve istasyonların konumu seçkisiz olarak atanmaktadır. Her denemeye karşılık belli bir güven aralığında fay değiştirgenleri belirlenmektedir.

Bu kapsamda yazılan seri programda, gözlem istasyon sayıları arttırılmış ve çalışma süreleri elde edilmiştir (Şekil 8.1).



**Şekil 8.1:** Tek işlemcili bir bilgisayarda deneme sayısına karşılık hesaplama süreleri.

Şekil 8.1'de gözlem istasyon sayılarının arttırılması durumunda hesaplama zamanlarında arttığı görülmektedir. Bu durum yazılan programın

çalışma hızını belirleyen ana unsurun gözlem istasyon sayılarının olduğunu göstermektedir. Ancak genel bir artışın olmasına rağmen bazı istasyon sayılarında ise hesaplama zamanlarında azalmalar da gözlenmektedir. Bunun nedeni sistem üzerine etki eden gürültünün rastgele oluşundan kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle artan gürültü miktarı karşısında yakınsama adımı da artmaktadır.

Yazılan seri program paralelleştirmeye son derece uygundur. Çünkü denemeler arasında herhangi bir ilişki yoktur. Denemeler birbirinden bağımsız olarak yapılabilir. Parallelleştirme için atılan ilk adım Sun UltraSparc III Cu üzerinde bulunan Fortran derleyiciler ile otomatik paralelleştirilmiştir. Ancak programın birçok alt program içermesi ve kodun karmaşık bir yapıda olması beklenen verimin alınmasına engel olmuştur. Parallelleştirilen program orijinal halinden yaklaşık olarak 3 ile 4 kat daha yavaş çalışmıştır. Bunun üzerine dağıtık hesaplama yönelinmiştir.

Linux işletim sisteminin getirdiği olanaklar herhangi bir betik dil ile birleştirildiğinde dağıtık hesaplama yapılabilir. Karşılaşılan problem için yazılan Perl betiği Şekil 8'de sunulmuştur. Betik içinde görülebileceği gibi dağıtık hesaplama için toplam 17 adet bilgisayar kullanılmıştır. Bu bilgisayarlar Bilişim Enstitüsü öğrenci laboratuvarında bulundaki makinalar arasından seçilmiştir. Bunlardan hiçbirisine paralel hesaplama için özel bir program yüklenilmemiş mevcut düzenek kullanılmıştır. Bu açıdan yaklaşıldığında üretilen çözümün ne kadar ucuz olduğu takdir edilebilir.

Betik çalıştırılırken iki adet değiştirgen verilmektedir. Bu değiştirgenler bilgisayar başına düşen deneme sayısı ve toplam makina sayısı şeklindedir. Şekil 8'de gösterilen betiğin en can alıcı kısmı ssh komutunun etkin olarak kullanılmasıdır. Buna göre uzaktaki bilgisayara ssh ile şifresiz eriştikten sonra program ilgili girdi dosyası ile çalıştırılmakta ve çıktısını da bir dosyaya atmaktadır. Şifresiz bağlanma işlemi için yapılması gereken bir takım işlemler vardır. İlk önce kullanıcı hesabında aşağıdaki komut işletilmelidir.

```
gulsen@fethiye:~> ssh-keygen -t rsa
```

Bu komutun işletilmesinin ardından .ssh dizinine gidilerek aşağıdaki işlemler yapılmalıdır.

```
gulsen@fethiye:~> cd .ssh
```

```
gulsen@fethiye:~/ssh>cp id_rsa.pub authorized_keys2
```

Betikteki -f değiştirgeni işi arkaplane atmakta ve sonra Perl betiğine geri dönmektedir. Her bilgisayar bu girdi ve çıktı dosyalarına farklı bir numara eklemekte ve bu nedenle sonuçlar birbirleri ile karışmamaktadır. Bütün işlemler

```

#!/usr/bin/perl

print "Kullanim : paralel deneme_sayisi makina_sayisi\n";
print "[deneme_sayisi her makinadaki deneme sayisini ifade eder]\n";
$DS=$ARGV[0] ;
$IS=$ARGV[1] ;

@entry=(0.1);
@host=(\@entry);
$host[1]="bilge";
$host[2]="fethiye";
$host[3]="toros";
$host[4]="umraniye";
$host[5]="beyoglu";
$host[6]="beykoz";
$host[7]="cebeci";
$host[8]="bayrampasa";
$host[9]="kadikoy";
$host[10]="besiktas";
$host[11]="fenerbahce";
$host[12]="balat";
$host[13]="maslak";
$host[14]="bebek";
$host[15]="bagcilar";
$host[16]="esenler";
$host[17]="goztepe";
$MAIN="/akademik/gulsen/genel/MAIN";

print "Deneme Sayisi : $DS\n";
for($i=1;$i<=$IS;$i++) {
print "Baglandigim Makine      : [$host[$i]]\n";
$idum=sprintf("%8d",-(10000*rand 1.0));
open(IN,">input$i");
print IN "$idum\n$DS";
close(IN);
system("ssh -f $host[$i] \"$MAIN < ~/genel/input$i > ~/genel/output$i\"");
}

```

**Şekil 8.2:** Dağıtık hesaplama yapmak için kullanılan Perl betiği.

NFS ve NIS ile yönetilen bir ağ üzerinde gerçekleştiği için dosya transferleri için ayrıca bir yazılım kullanılmak zorunda değildir.

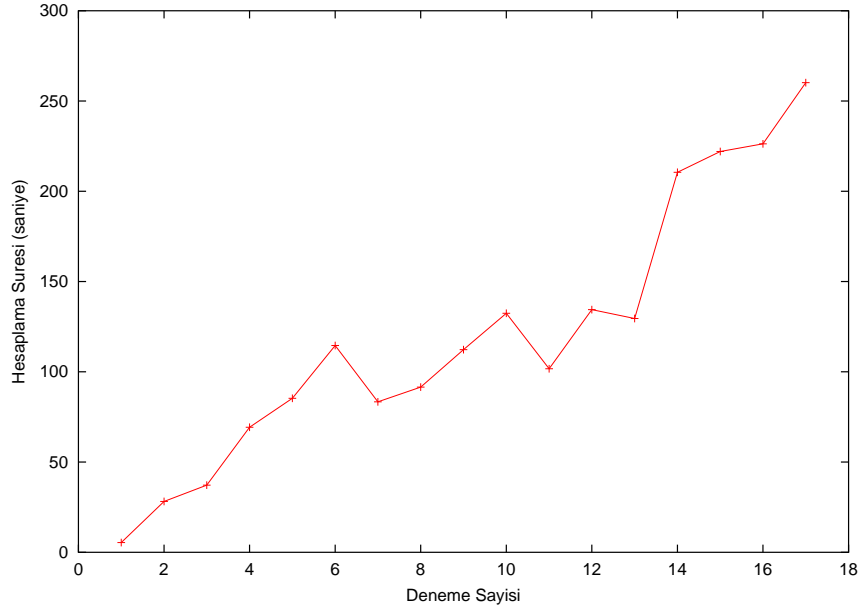
Bu şekilde betik çalıştırıldığında deneme sayısı kadar girdi ve çıktı dosyası oluşacaktır. Tüm sonuçları bir arada görebilmek için elde edilen dosyaların tek bir dosya içine gömülmesi gerekir. Bu amaçla yazılan kabuk programı ise aşağıdaki

şekildedir.

```
#!/bin/sh
declare -i i
cat output1 >output
i=2
while [ $i -le 17 ] # 17: işlemci sayısı
do
    cat output$i >>output
    i=i+1
done
```

Dağıtık hesaplamamanın paralel hesaplamadan en önemli farkı belirli bir işi daha kısa zamanda bitirmek değil, aynı süre zarfında fazla iş yapmaktır. Temelde aynı sonucu vermesine rağmen programlama olarak farklı bir yaklaşım gerektirir.

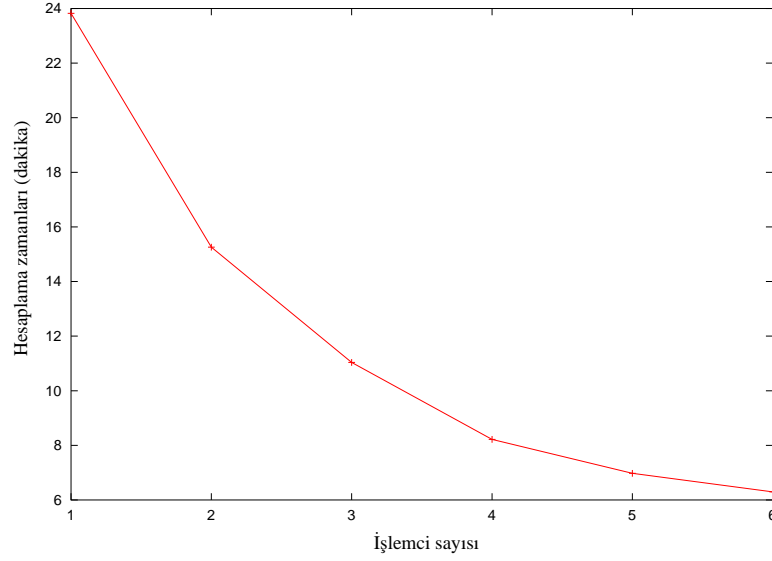
Tek bir işlemci bir makina üzerinde deneme sayılarının artması durumunda elde edilen hesaplama zamanları ise Şekil 8'de gösterilmektedir. Buna göre genel bir artışın yanısıra bazı deneme sayılarında ise azalmalar gözlenmektedir. Bunun nedeni gözlem istasyon sayılarının seçkisiz olarak belirlenmesinden kaynaklanmaktadır. Bütün bu iniş çıkışlara rağmen genel bir yükselme göze çarpmaktadır.



**Şekil 8.3:** Tek işlemcili bir bilgisayarda deneme sayısına karşılık hesaplama süreleri.

Yazılan Perl betiği 120 deneme sayısı için farklı sayıda işlemciler ile çalıştırılmıştır. Buna ilişkin grafik ise Şekil ??'de gösterilmektedir.

Şekil 8'de beklenildiği gibi işlemci sayılarının artması durumunda yapılan işin hesaplama zamanı azaltmaktadır.



**Şekil 8.4:** Sabit bir deneme sayısı için işlemci sayılarının arttırılması durumundaki hesaplama zamanları.

Son olarak 17 adet tek işlemcili bilgisayarda 10'ar tane deneme yapılmış 180 saniye içinde toplam 170 adet deneme gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak problemin paralellik için çok uygun olduğu özellikle dağıtık hesaplama için uygun bir aday olduğu söylenebilir. Ayrıca problemin doğası gereği hiçbir paralel programlama aracına ihtiyaç duymadığını aksine Linux işletim sisteminin özellikleri ve gelişmiş bir betik programlama dili yardımı ile dağıtık hesaplama yapılabildiği gösterilmiştir.

## BÖLÜM 9

### SONUÇ

Değişik dağılımlardaki gözlem istasyonlarının fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde ne derece etkin olduğu benzetim yapılarak saptanmıştır.  $H$  fayın kilitli olduğu derinlik ve  $S$  fayın kayma miktarı olmak üzere iki model değiştirgeni aynı anda bulunmuştur. Yani her iki değiştirgen de model içerisinde değişken olarak tanımlanmıştır. Buna göre yapılan benzetimler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Jeodezik ağ üzerindeki gözlem istasyonlarının sayıları arttırılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen fay değiştirgenlerinin güvenilirlik aralıklarında çok az bir azalma gözlenmiştir. Belli bir noktadan sonra ise azalma durmuş ve herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Dolayısıyla, gözlem istasyon sayılarının arttırılması en uygun fay değiştirgenlerinin belirlenmesinde önemli bir katkı sağlamamaktadır.
- Gözlem istasyonlarının ağ üzerindeki konumlarının değiştirgen kestirimindeki etkisi araştırılmıştır. Buna göre, aynı anda iki model değiştirgenini bulma yerine, değiştirgenlerden biri sabit tutularak diğer değiştirgenin hangi bölgelerde duyarlı olduğuna bakılmıştır. Buna göre,  $H$  değiştirgeni faya yakın bölgelerde daha duyarlı,  $S$  değiştirgeni de faydan uzak bölgelerde daha duyarlı olmaktadır. Başka bir deyişle, uygun bir  $H$  belirleyebilmek için ağ üzerinde faya yakın bölgelere gözlem istasyonu konumlandırılmalıdır. Uygun bir  $S$  belirlemek için ise gözlem istasyonlarının faydan uzak bölgelerde konumlandırılması gerekmektedir.
- Bunlara ek olarak sistemdeki gürültü miktarının arttırılması yani veri kalitesinin düşürülmesi, fay değiştirgenlerinin çok geniş güvenilirlik aralığında belirlenmesine sebep olmaktadır. Verilere aşırı gürültü eklenmesi durumunda herhangi bir çözüm elde edilememektedir. Bu nedenle gözlemsel hataların ve merkezlendirme hatalarının enküçük tutulması uygun model değiştirgenlerinin kestirilmesinde oldukça önemlidir.

- Tüm bu sonuçlara dayanarak istasyon noktalarında hangi tür GPS lmesi yapılması gerektiği belirlenmiştir. Öncelikli olarak hangi fay değiştirgeni belirlenmek isteniyorsa, yüksek bir doğruluğa sahip olan sürekli tip GPS lmesinin, o değiştirgenin duyarlı olduğu bölgelere yerleştirilmesi daha uygun olacaktır. Her iki değiştirgeninde belirlenmesi söz konusu ise sürekli istasyonların faya yakın ve faydan uzak bölgelere konumlandırılması en uygun değiştirgen kestiriminde etkili olacaktır.

Yazılan algoritmanının dağıtık hesaplamaya uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca dağıtık hesaplama dışında, herhangi bir paralel programlama dili aracılığı ile paralelleştirme yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] <http://quake.geo.berkeley.edu/bard/>
- [2] <http://www.scign.org/>
- [3] **Zuliani, D., Battaglia, M., Pascutti, D., Murray, M., Burgmann, R., Michelini, A., Marson, I.,** FREDNET: A Continous GPS Geodetic Network to Monitoring Crustal Deformation in Ne İtaly, *Geophysical Research Abstracts*, **5**.
- [4] **Çakmak,R., Ergintav, S., Belgen, A., Süleyman, C., Kurt, L.,** Marmara Bölgesi Sürekli GPS Gözlem Ağı (MAGNET)'in Güncel Durumu. *Teknik Rapor*.
- [5] **Schön, S., Kutterer, H.,** Interval-Based Description of Measurement Untertainties and Network Optimization, *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*
- [6] **Johnson, H.O., Wyatt, F.K.,** 1994, Geodetic Network Design for Fault-Mechanics Studies, *Manuscripta Geodaetica*, **19**, pp. 309-323.
- [7] **Gerasimenko, M.D., Shestakov, N.V., Teruyiki K.,** 2000, On Optimal Geodetic Network Design for Fault-Mechanics Studies, *Earth Planets Space*, **52**, pp. 985-987.
- [8] **Savage, J.C.,**1987, Effect of crustal layering upon dislocation modelling, *J. Geophys. Res.*, **92**, pp.10595-10600.
- [9] **Lisowski, M., Savage, J.C., Prescott, W.H.,** 1991, The Velocity Field Along The San Andreas Fault in Central and Southern California, *J. Geophys. Res.*, **96**, pp. 8369-8389
- [10] **Parker, R.L.,** 1997, Understanding inverse theory, *Earth Planet*, **5**, pp.35-64.
- [11] **Cohen, S.C.,** 1999, Numerical models of crustal deformation in seismic zones, *Advance In Geophysics*, **41**, pp.133-139.
- [12] **"Canitez, N"**, Statik Dislokasyon Alanları Üzerine Deprem Odağının Geometrisinin Etkisi, *Tubitak Araştırma Raporu, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü*

- [13] **Kasahara, K.**, 1957, The Nature of Seismic Origins as Inferred from Seismological and Geodetic Observations, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **35**, pp.473-532.
- [14] **Steketee, J.A.**, 1958, On volterra's dislocations in semi-infinite elastic medium, *Canadian J. Phys.*,**36**, pp.192-205.
- [15] **Maruyama, T.**, 1964, Statical elastic dislocation in an infinite and semi-infinite medium, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **42**, pp.289-368
- [16] **Okada, Y.**, 1985, Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *Bulletin of Seismological Society of America*, **75,4**, pp.1135-1154.
- [17] **Canitez, N.**, 1997, Jeofizikte Modelleme, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul.
- [18] **Hearn, E.H., Bürgmann, R., Reilinger, R.E.**, 2002, Dynamics of İzmit Earthquake Postseismic Deformation and Loading of the Düzce Earthquake Hypocenter, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92,1**, pp.172-193.
- [19] **Van der, P,B,A., Marshak, S.**, 1997, Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics, **WCB/McGraw-Hill**.
- [20] **Wiggins, A,R., Lerner, K,L., Wisecup, R,D.**, 1976, Residual Statics Analysis as a General Linear Inverse Problem, *Geophysics*, **41,5**, pp.922-938.
- [21] **Matsu'udara, M., Hirata, N.**, 1982, Generalized Least-Squares Solutions to Quasi-Linear Inverse Problems with a Priori Information, *J. Phys. Earth*, **30**, pp.451-468.
- [22] **Tarantola, A., Valette, B.**, 1982, Generalized Nonlinear Inverse Problems Solves Using the Least Squares Criterion, *Rew. Geophy. and Space Physics*, **20,2**, pp.219-132.
- [23] **Canitez, N.**, 1984, Jeofizikte Veri İşlem, *İstanbul teknik Üniversite matbaası*, İstanbul.
- [24] **Lanczos, C.**, 1961, Linear Differential Operators, *Van Nostrand*
- [25] **Penrose, R.**, 1954, A Generalized Inverse for Matrices, *Cambridge Phil. Soc*, **51**, pp.406-413.
- [26] **Marquardt, D,W.**, 1970, An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *Indust. Apply. Math.*, **11**, pp.431-441.
- [27] **Marquardt, D,W.**, 1963, Generalized Inverse, Ridge Regression, Biased Linear Estimation And Nonlinear Estimation, *Techtonometrics*, **12**, pp.591-612.
- [28] **Levenberg, G.**, 1944, A Method for The Solution of Certain Non Linear Problems in Least Squares. *Quart. Appl. Math.*, **12**, pp.64-168.

- [29] **Taşkın, G., Bilgi, S., Demirci, E., Özyurt, A.**,2001 Uydu Görüntülerinin GPS Verileri ile Geometrik Dönüşümü ve Değerlendirilmesi. **İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi.**
- [30] **BAYAZIT, M.**, 1996, İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri, **İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.**
- [31] **Press, W.H., Teukolsky S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P.**, 1992, Numerical Recipies in Fortran, **Cambridge University Press, England.**
- [32] **Sobol, I.M.**, 1993, Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models *MMCE*, **1**, pp.4.
- [33] **Kaya, H., Kaplan, M., Saygın, H.**, 2003 A Recursive Algorithm for Finding HDMR Terms for Sensitivity Analysis *Computer Physics Comminications (dergiye sunuldu).*
- [34] <http://www.ydbae.mam.gov.tr/research/gps/project/project.html>

# EKLER A

## ANA PROGRAM

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C          GENEL PROGRAM                                     C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
PROGRAM GENEL
  IMPLICIT NONE
  EXTERNAL D,RAN1,GASDEV
  INTEGER IDUM,N,PS,HNBINS,SNBINS,MAXHBINS,DFS,DPH,INVRT,IJ
  REAL S,H,SCAL,SO,HO,DC,RESIDU,EPS,HMIN,SMIN,HMAX,SMAX
  REAL HVARYANS,SVARYANS,HORT,SORT,DH,DS,SNORMAX
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: M,DIS,GRID,DG,DP
  REAL, DIMENSION(:,:), POINTER :: A,OPTIMUM
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: SS,HH,YUZDEH,YUZDES
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: YKIYAS1H,YKIYAS2H
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: YKIYAS1S,YKIYAS2S
  REAL CHSQH,PROBH,CHSQS,PROBS,PI,TMP,YUZH,YUZS,BOY,SHEAR
  REAL HMINSON,HMAXSON,SMINSON,SMAXSON,D,RAN1,MAXSBINS,GASDEV

  INTEGER I,STEP,MAXSTEP,K,L,L1,L2,MONINS,MINN,MAXN,J,KLM
  INTEGER MAXITER,IJK,SAYAC,KNSTRN,HYUZDEBOL,SYUZDEBOL
  REAL TMPRES,ARTIS,AS,AH,HNORMAX
  REAL MAXOFFSET,MINOFFSET,MO,MWMIN,MWMAX,MW
  INTEGER ERROR,ERROR1
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: KIYAS1H,KIYAS2H,KIYAS1S,KIYAS2S
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: HEBINS,SEBINS,HBINS,SBINS
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: DISORJ
  REAL, DIMENSION(:,:), POINTER :: COV
  REAL, DIMENSION(:), POINTER :: HAM,AGUR
  CHARACTER DOSYA*1, DASH*1
  REAL SORJ,HORJ,VAR,DELTAH1,DELTAH2,DELTAS1,DELTAS2,HKAT,SKAT
  REAL ORTALAMA,SABIT,ATAN
  REAL TIME(2), TS,TF,ETIME
  INTEGER SOLN,IPRNT,FAIL(10),WAR,NP,omp_get_num_threads
  IDUM=-3 ! GURULTU BASLATAN DEGER
  READ (*,*) IDUM
  MAXN=20 ! MAX ISTASYON SAYIISI (2 KATI)
  MINN=2 ! MIN ISTASYON SAYISI (2 KATI)
  MAXOFFSET=120E+06 ! FAYDAN UZAKLIK
  MINOFFSET=1E+06
  INVRT=5000 ! DONUSUM SAYISI
  PS=2 ! PARAMETRE SAYISI
  SCAL=3E+06 ! OLCEKLEME UZUNLUĞU
  S=10.0 ! KAYMA HIZI
  H=10E+06 ! FAYIN DERINLIGI
  SORJ=10.0 ! KAYMA HIZI
  HORJ=10E+06 ! FAYIN DERINLIGI
  DC=1E-15 ! INDIRME KATSAYISI
  EPS=1E-10 ! HATA SINIRI
  MAXSTEP=500 ! IC DONGU SAYACI
  HO=20E+06 ! H ICIN BASLANGIC DEGERI
  SO=20.0 ! S ICIN BASLANGIC DEGERI
  KNSTRN=1 ! SERBESTLIK DERECEESI
  HNBINS=10 ! H BOLME ARALIGI
  SNBINS=10 ! S BOLME ARALIGI
  MONINS=1.0 ! KONUMSAL HATA
  MAXITER=2 ! ANA DONGU SAYACI
  READ (*,*) MAXITER
  SAYAC=1 ! DOSYA SAYACI
  PI=3.141592654 ! PI SAYISI
  HYUZDEBOL=250 ! H YUZDE HESABI ICIN BOLME ARALIGI
  SYUZDEBOL=200 ! S YUZDE HESABI ICIN BOLME ARALIGI
```

```

KLM=1                ! OPTIMUM MATRIS SAYACI
BOY=60E+06           ! Fay uzunluğu
SHEAR=3E+11          ! Shear module dyne/cm
SABIT=0.3183098862   ! 1/PI
IPRNT=3

C*****
C ***** ACIKLAMA
C 1: SADECE CONFIDENCE
C 2: HBINS ve HEBINS (S ICIN DE TABII)
C 3: SADECE OPTIMUM MATRISI
      WAR=0
C 1: Bilgilendirme mesajlari en sonda verilsin
C      FAIL(10)
C      HATA SAYACLARI
C FAIL(1)      :      H ICIN CHI Square hesaplanamaz ise
C FAIL(2)      :      S ICIN CHI Square hesaplanamaz ise
C*****
      TS=ETIME(TIME)
      DO I=1,10
        FAIL(I)=0
      END DO

C ***** DEPREM BUYUKLUGUNUN HESAPLANAMSI
MO=SHEAR*(H/REAL(10))*(BOY/REAL(10))*(S/REAL(10))
MW=(2.0/3.0)*(LOG10(MO))-16.0)
ALLOCATE(OPTIMUM(MAXITER,MAXN+13))      ! OPTIMUM SONUCLAR TUTULACAK
      DO J=1,MAXN+13
        DO I=1,MAXITER
          OPTIMUM(I,J) = 0.0
        END DO
      END DO

C ***** YAZDIRMA
IF (IPRNT.EQ.3) THEN
  WRITE (*,'(1A3,4A8,2A15,6A8)') '#N',
1  'HORT', 'SORT', 'HVAR', 'SVAR', 'CHSH', 'CHSS', 'HMIN',
2  'HMAX', 'SMIN', 'SMAX', 'MMIN', 'MMAX'
  DASH='='
  WRITE (*,'(113A1)') (DASH,I=1,113)
END IF

C ***** ANA DONGU
      DO 3500 IJK=1,MAXITER                ! DENEME SAYISI

C ***** ISTASYON NOKTA SAYISININ BELIRLENMESI
SOLN=INT(((MAXN-MINN)*(RAN1(IDUM))+MINN))
N=SOLN*2
ALLOCATE(COV(N,N))
ALLOCATE(HAM(N))
ALLOCATE(AGUR(N))
ALLOCATE(M(N))
ALLOCATE(DIS(N))
ALLOCATE(DISORJ(N))
ALLOCATE(GRID(N))
ALLOCATE(DG(N))
ALLOCATE(DP(PS))
ALLOCATE(A(N,PS))
ALLOCATE(SS(INVRT))
ALLOCATE(HH(INVRT))

C ***** SIFIRLAMA BOLUMU
      DO I=1,N
        GRID(I) = 0.0
      END DO

C ***** GRIDLERIN OLUSTURULMASI
      DO J=1,SOLN
100    TMP=INT(((MAXOFFSET-MINOFFSET)*(RAN1(IDUM))+MINOFFSET))
        DO K=1,SOLN
          IF (TMP.EQ.GRID(K)) THEN
            GO TO 100
          END IF
        END DO
        GRID(J)=TMP
      END DO

C ***** OLUSTURULAN GRIDLER SIRALI OLSUN
      CALL SHELL(SOLN,GRID)
      DO L=1,SOLN

```

```

        GRID(SOLN+L)=GRID(L)
        GRID(L)=-GRID(L)
    END DO

C ***** GURULTUSUZ YERDEGISTIRMELER
    DO L=1,N
        DISORJ(L)=D(SORJ,HORJ,GRID(L))
    END DO
22    ERROR1=2          ! CHI HESAPLANAMADI

C ***** INVERSION DONGUSU
    DO 2500 K=1,INVRT          ! DONUSUM DONGUSU
1    CONTINUE

C ***** HAM GURULTU ELDE EDILMESI
    ORTALAMA=0.0
    DO I=1,N
        HAM(I)=GASDEV(IDUM)
        ORTALAMA=ORTALAMA+HAM(I)
    END DO
    ORTALAMA=ORTALAMA/REAL(N)
    VAR=0.0
    DO I=1,N
        VAR = VAR + (HAM(I)-ORTALAMA)**2
    END DO
    VAR = VAR/REAL(N)

C ***** KOVARYANS MATRISI VE CHOLESKY AYRIKLASTIRMASI
    DO J=1,N
        DO I=1,N
            COV(I,J)=(VAR*SCAL**2)/(SCAL**2+(GRID(I)-GRID(J))**2)
        END DO
    END DO
    CALL CHOLESKY(N,COV,HAM,AGUR,ERROR)

C ***** YAPAY VERININ ELDE EDILMESI
    DO L=1,N
        M(L)=DISORJ(L)+0.001*AGUR(L)+MONINS*RAM1(IDUM)-MONINS
    END DO

C ***** DIS,DG VE JACOBIYEN DEGERLERININ HESAPLANMASI
    S=S0
    H=H0
    RESIDU=0.0
    DO I=1,N
        DIS(I)= D(S,H,GRID(I))
        RESIDU = RESIDU + (M(I)-DIS(I))**2
    END DO
    RESIDU=RESIDU/REAL(N)

C ***** CEKIRDEK FONKSIYON
    DO 1500 STEP=1,MAXSTEP          ! IC DONGU
    DO I=1,N
        DIS(I)=D(S,H,GRID(I))
        DG(I)=M(I)-DIS(I)
    END DO

C ***** JACOBIAN OLUSTURMA
    AS=-SABIT*ATAN(GRID(I)/H)
    AH=(S*GRID(I)*SABIT)/(H*H+GRID(I)*GRID(I))
    A(I,1)=AS
    A(I,2)=AH
    END DO

C ***** GENELLESTIRILMIS TERS COZUM
    CALL GLS(N,PS,A,DG,DP,DC)
    S=S+DP(1)
    H=H+DP(2)

C ***** RESIDU HESABI
    TMPRES=0.0
    DO I=1,N
        DIS(I)= D(S,H,GRID(I))
        TMPRES = TMPRES + (M(I)-DIS(I))*(M(I)-DIS(I))
    END DO
    TMPRES=TMPRES/REAL(N)
    IF ( ABS(RESIDU-TMPRES).LT.EPS ) THEN
        EXIT
    ELSE IF ( STEP.GE.MAXSTEP ) THEN
        GO TO 1
    
```

```

        END IF
        RESIDU=TMPRES
1500    CONTINUE          ! IC DONGU SONU
        IF (H.GE.0.AND.S.GE.0) THEN
            HH(K)=H
            SS(K)=S
        ELSE
            GO TO 1
        END IF
2500    CONTINUE          ! INVERSION SONU
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      H VE S ICIN HATA HESAPLARI
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C ***** VARYANS VE ORTALAMA DEGER HESABI
        CALL VARYANS(HH,SS,INVRT,HVARYANS,SVARYANS,HORT, SORT)

C ***** BOLME SAYILARI
        CALL NBINS(INVRT,HH,SS,HNBINS,SNBINS,
<         DH,DS,HMIN,SMIN,HMAX,SMAX)

C ***** H' A AIT FREKANS HESABI
        ALLOCATE(HBINS(HNBINS))
        ALLOCATE(KIYAS1H(HNBINS+1))
        ALLOCATE(KIYAS2H(HNBINS+1))
        CALL HBOL(HMIN,HMAX,HH,INVRT,DH,
<         HNBINS,HBINS,KIYAS1H,KIYAS2H,MAXHBINS)

C ***** BEKLENEK DEGERLER - H ( HEBINS HESABI)
        ALLOCATE(HEBINS(HNBINS))
        CALL EXPECTH(HVARYANS,HORT,HMIN,DH,HNBINS,HEBINS)

C ***** CHI - SQUARE TESTI - H ICIN
        CALL CHSONE(HBINS,HEBINS,HNBINS,KNSTRN,DPH,CHSQH,PROBH,ERROR1)
        IF (ERROR1.EQ.-1) THEN
            FAIL(1)=FAIL(1)+1
            GO TO 22
        END IF

C ***** S' E AIT FREKANS HESABI
        ALLOCATE(SBINS(SNBINS))
        ALLOCATE(KIYAS1S(SNBINS+1))
        ALLOCATE(KIYAS2S(SNBINS+1))
        CALL SBOL(SMIN,SMAX,SS,INVRT,DS,
<         SNBINS,SBINS,KIYAS1S,KIYAS2S,MAXSBINS)

C ***** BEKLENEK DEGERLER - S ( SEBINS HESABI)
        ALLOCATE(SEBINS(SNBINS))
        CALL EXPECTS(SVARYANS, SORT,SMIN,DS,SNBINS,SEBINS)

C ***** CHI-SQUARE TESTI - S ICIN
        CALL CHSONE(SBINS,SEBINS,SNBINS,KNSTRN,DPS,CHSQS,PROBS,ERROR1)
        IF (ERROR1.EQ.-1) THEN
            FAIL(2)=FAIL(2)+1
            GO TO 22
        END IF

C ***** GUVENIRLIK YUZDESI HESABI - H VE SICIN
        ALLOCATE(YUZDEH(HYUZDEBOL))
        ALLOCATE(YKIYAS1H(HYUZDEBOL))
        ALLOCATE(YKIYAS2H(HYUZDEBOL))
        ALLOCATE(YUZDES(SYUZDEBOL))
        ALLOCATE(YKIYAS1S(SYUZDEBOL))
        ALLOCATE(YKIYAS2S(SYUZDEBOL))
        HKAT=(HMAX-HORT)/(HORT-HMIN)
        SKAT=(SMAX-SORT)/(SORT-SMIN)
        DELTAH1 = (HORT - HMIN) / HYUZDEBOL
        DELTAH2 = (HMAX - HORT) / (HYUZDEBOL*HKAT)
        DELTAS1 = (SORT - SMIN) / SYUZDEBOL
        DELTAS2 = (SMAX - SORT) / (SYUZDEBOL*SKAT)
        CALL YUZDE(HORT,DELTAH1,DELTAH2,INVRT,HYUZDEBOL,HH,YUZH,
<         HMINSON,HMAXSON, SORT,DELTAS1,DELTAS2,SYUZDEBOL,SS,YUZS,SMINSON,
<         SMAXSON,YUZDEH,YKIYAS1H,YKIYAS2H,YUZDES,YKIYAS1S,YKIYAS2S)

C ***** DEPREM BUYUKLUGUNUN HESAPLANAMSI (YENI H VE S ICIN)
MO=SHEAR*(HMINSON/10.0)*
< (BOY/10.0)*(SMINSON/10.0)
MWMIN=(2.0/3.0)*(LOG10(MO)-16)
MO=SHEAR*(HMAXSON/10.0)*
< (BOY/10.0)*(SMAXSON/10.0)

```

```

MWMAX=(2.0/3.0)*(LOG10(MD))-16)

C ***** OPTIMUM DAGILIMIN TUTULMASI
OPTIMUM(KLM,1) = N ! nokta sayisi tutuluyor
OPTIMUM(KLM,2) = HORT/1E+06 ! H ortalama
OPTIMUM(KLM,3) = SORT ! S ortalama
OPTIMUM(KLM,4) = HVARYANS/1E+12 ! H varyans
OPTIMUM(KLM,5) = SVARYANS ! S varyans
OPTIMUM(KLM,6) = CHSQH ! H CHI degeri
OPTIMUM(KLM,7) = CHSQS ! S CHI degeri
OPTIMUM(KLM,8) = HMINSON/1E+06 ! %90 min h
OPTIMUM(KLM,9) = HMAXSON/1E+06 ! %90 max h
OPTIMUM(KLM,10) = SMINSON ! %90 min s
OPTIMUM(KLM,11) = SMAXSON ! %90 max s
OPTIMUM(KLM,12) = MWMIN ! %90 min mag
OPTIMUM(KLM,13) = MWMAX ! %90 max mag
DO I=1,SOLN ! gridlerin tutulmasi
OPTIMUM(KLM,I+13)=GRID(SOLN+I)/REAL(1E+06)
END DO

C ***** YAZDIRMA
IF (IPRNT.EQ.3) THEN
WRITE(*,700) (OPTIMUM(KLM,I),I=1,13+SOLN)
END IF
700 FORMAT(F3.0,4F8.3,2E15.5,6F8.3,30F10.5)

DEALLOCATE (YUZDES)
DEALLOCATE (YKIYAS1S)
DEALLOCATE (YKIYAS2S)
DEALLOCATE (SEBINS)
DEALLOCATE (SBINS)
DEALLOCATE (KIYAS1S)
DEALLOCATE (KIYAS2S)
DEALLOCATE (YUZDEH)
DEALLOCATE (YKIYAS1H)
DEALLOCATE (YKIYAS2H)
DEALLOCATE (HBINS)
DEALLOCATE (KIYAS1H)
DEALLOCATE (KIYAS2H)
DEALLOCATE (HEBINS)
KLM=KLM+1

DEALLOCATE (SS)
DEALLOCATE (HH)
DEALLOCATE (M)
DEALLOCATE (DIS)
DEALLOCATE (DISORJ)
DEALLOCATE (GRID)
DEALLOCATE (DG)
DEALLOCATE (DP)
DEALLOCATE (A)
DEALLOCATE (COV)
DEALLOCATE (HAM)
DEALLOCATE (AGUR)

3500 CONTINUE ! ANA DONGU SONU

DEALLOCATE (OPTIMUM)
IF (WAR.EQ.1) THEN
WRITE (*,'(40A,1I3)') '#H icin Chi bulunmayan durumlar: ',FAIL(1)
WRITE (*,'(40A,1I3)') '#S icin Chi bulunmayan durumlar: ',FAIL(2)
END IF
TF=ETIME(TIME)
WRITE (*,*) '#ELAPSED TIME (SEC) :', TF-TS
END PROGRAM

```



## EKLER B

### ALT PROGRAMLAR

```
C***** MODEL FONKSIYONU *****
      FUNCTION D(S,H,X)
      REAL S,H,X

      REAL TMP,D
      TMP=0.3183098862
      D=-TMP*S*ATAN(X/H)
      END FUNCTION

C***** CEKIRDEK PROGRAM *****
SUBROUTINE GLS(N,PS,A,DG,DP,DC)
      IMPLICIT NONE
      INTEGER N,PS
      REAL A(N,PS),DG(N), DP(PS),DC

      INTEGER I,J,K
      REAL, DIMENSION(:,:), POINTER :: A1,ATA
      REAL TMP,A11,A12,A21,A22,DET
      ALLOCATE(A1(PS,N))
      ALLOCATE(ATA(PS,PS))

C ***** ACIKLAMA
A : JAKOBYEN MATRISI
DG: DUZELTME YONEYI
DC: MARQUARDT KATSAYISI
PS: PARAMETRE SAYISI

C ***** ATA HESABI - MATMUL
      DO I=1,PS
      DO J=1,PS
      TMP=0.0
      DO K=1,N
      TMP=TMP+A(K,I)*A(K,J)
      END DO
      ATA(I,J)=TMP
      END DO
      END DO

C ***** MARQUARDT EKLEME
      ATA(1,1) = ATA(1,1) + DC
      ATA(2,2) = ATA(2,2) + DC

C ***** TERS ALMA
      A11 = ATA(1,1)
      A12 = ATA(1,2)
      A21 = ATA(2,1)
      A22 = ATA(2,2)
      DET = (A11*A22-A12*A21)
      ATA(1,1) = ((A12*A21)/DET)+1/A11
      ATA(1,2) = -A12/DET
      ATA(2,1) = -A21/DET
      ATA(2,2) = A11/DET

C ***** ATA^-1 ILE AT CARPIMI
      DO I=1,PS
      DO J=1,N
      TMP=0.0
      DO K=1,PS
      TMP=TMP+ATA(I,K)*A(K,J)
      END DO
      A1(I,J)=TMP
```

```

        END DO
        END DO

C ***** ATA^-1 * A^T * DG
        DO I=1,PS
            TMP=0.0
            DO J=1,N
                TMP=TMP+A1(I,J)*DG(J)
            END DO
            DP(I)=TMP
        END DO

        DEALLOCATE(ATA)
        DEALLOCATE(A1)
        RETURN
    END SUBROUTINE GLS

C***** VARYANS HESAPLAMA *****
SUBROUTINE VARYANS(HH,SS,INVRT,HVARYANS,SVARYANS,HORT,SORT)
    IMPLICIT NONE
    INTEGER INVRT
    REAL HH(INVRT),SS(INVRT),HORT,SORT,HVARYANS,SVARYANS

    INTEGER I

C ***** ORTALAMA DEGERIN HESABI - H, S
        HORT=0.0
        SORT=0.0
        DO I=1,INVRT
            HORT=HORT+HH(I)
            SORT=SORT+SS(I)
        END DO
        HORT=HORT/REAL(INVRT)
        SORT=SORT/REAL(INVRT)

C ***** VARYANS HESABI - H, S
        HVARYANS=0.0
        SVARYANS=0.0
        DO I=1,INVRT
            HVARYANS=HVARYANS+(HH(I)-HORT)**2
            SVARYANS=SVARYANS+(SS(I)-SORT)**2
        END DO
        HVARYANS=HVARYANS/REAL(INVRT)
        SVARYANS=SVARYANS/REAL(INVRT)

        RETURN
    END SUBROUTINE

C***** BOLMELERIN HESAPLAMASI *****
SUBROUTINE NBINS(INVRT,HH,SS,HNBINS,SNBINS,
    < DH,DS,HMIN,SMIN,HMAX,SMAX)
    IMPLICIT NONE
    INTEGER INVRT,HNBINS,SNBINS
    REAL HH(INVRT),SS(INVRT),DH,DS

    INTEGER I
    REAL HMAX,HMIN,SMAX,SMIN

C ***** NBINS HESABI
    ! H, S PARAMETRESI
    HMIN=HH(1)
    HMAX=HH(1)
    SMIN=SS(1)
    SMAX=SS(1)
    DO I=1,INVRT
        IF(HH(I).LE.HMIN) THEN
            HMIN=HH(I)
        END IF
        IF(HH(I).GE.HMAX) THEN
            HMAX=HH(I)
        END IF
        IF(SS(I).LE.SMIN) THEN
            SMIN=SS(I)
        END IF
        IF(SS(I).GE.SMAX) THEN
            SMAX=SS(I)
        END IF
    END DO
    DH = (HMAX-HMIN)/HNBINS

```

```

DS = (SMAX-SMIN)/SNBINS

RETURN
END SUBROUTINE

C***** MODEL FONKSIYONU *****
SUBROUTINE HBOL(HMIN,HMAX,HH,INVRT,DH,
< HNBINS,HBINS,KIYAS1H,KIYAS2H,MAXHBINS)
  IMPLICIT NONE
  INTEGER HNBINS,MAXHBINS,INVRT
  REAL HMIN,HMAX,DH,HBINS(HNBINS)
  REAL HH(INVRT),KIYAS1H(HNBINS+1),KIYAS2H(HNBINS+1)

  INTEGER I,J

C ***** SIFIRLAMA BOLUMU
  DO I=1,HNBINS+1
    KIYAS1H(I) = 0.0
    KIYAS2H(I) = 0.0
  END DO
  DO I=1,HNBINS
    HBINS(I)=0.0
  END DO

C ***** HBINS HESAPLANIYOR.
  KIYAS1H(1)=HMIN
  KIYAS2H(1)=HMIN+DH
  DO I=1,HNBINS
    DO J=1,INVRT
      IF(HH(J).GE.KIYAS1H(I).AND.HH(J).LE.KIYAS2H(I)) THEN
        HBINS(I)=HBINS(I)+1
      END IF
    END DO
    KIYAS1H(I+1)=KIYAS1H(I)+DH
    KIYAS2H(I+1)=KIYAS2H(I)+DH
  END DO

C ***** MAX HBINS DEGERININ BULUNMASI
  MAXHBINS=HBINS(1)
  DO I=2,HNBINS
    IF (HBINS(I).GE.MAXHBINS) THEN
      MAXHBINS=HBINS(I)
    END IF
  END DO

C ***** NORMALIZE EDILİYOR
  DO I=1,HNBINS
    HBINS(I) = REAL(HBINS(I))/REAL(MAXHBINS)
  END DO
  RETURN
END SUBROUTINE

C***** BEKLELEN DEGER - H *****
SUBROUTINE EXPECTH(HVARYANS,HORT,HMIN,DH,HNBINS,HEBINS)
  IMPLICIT NONE
  EXTERNAL ERF
  INTEGER HNBINS
  REAL HVARYANS,HORT,HMIN,DH,HEBINS(HNBINS),ERF

  INTEGER I
  REAL PI,ERF1,ERF2,SBT,A,B,MAXEBIN

C ***** SIFIRLAMA ISLEMI
  DO I=1,HNBINS
    HEBINS(I) = 0.0
  END DO

C ***** HEBINS DEGERI HESAPLANIYOR
  SBT = 1.253314137
  PI = 3.141592654
  A=HMIN
  B=HMIN+DH
  DO I=1,HNBINS
    ERF1=(0.5*B*SQRT(2.0/HVARYANS))-(0.5*HORT*SQRT(2.0/HVARYANS))
    ERF2=(0.5*A*SQRT(2.0/HVARYANS))-(0.5*HORT*SQRT(2.0/HVARYANS))
    HEBINS(I)=SBT*SQRT(HVARYANS)*(1.0-ERF(ERF1))
  < -SBT*SQRT(HVARYANS)*(1.0-ERF(ERF2))
    HEBINS(I)=(HEBINS(I)/(SQRT(HVARYANS*2.0*PI)))
  A=A+DH

```

```

      B=B+DH
    END DO

MAXEBIN=HEBINS(1)
  DO I=2,HNBINS
    IF (HEBINS(I).GE.MAXEBIN) MAXEBIN=HEBINS(I)
  END DO
  DO I=1,HNBINS
    HEBINS(I)=HEBINS(I)/MAXEBIN
  END DO
  RETURN
END SUBROUTINE

C***** GUVENIRLIK YUZDESI HESABI *****
SUBROUTINE YUZE(HORT,DELTAH1,DELTAH2,INVRT,HYUZDEBOL,HH,YUZH,
  < HMINSON,HMAXSON, SORT, DELTAS1, DELTAS2, SYUZDEBOL, SS, YUZS, SMINSON,
  < SMAXSON, YUZDEH, YKIYAS1H, YKIYAS2H, YUZDES, YKIYAS1S, YKIYAS2S)
  IMPLICIT NONE
  INTEGER INVRT, HYUZDEBOL, SYUZDEBOL
  REAL HORT, DELTAH1, DELTAH2, HH (INVRT), YUZH, HMINSON, HMAXSON
  REAL SORT, DELTAS1, DELTAS2, SS (INVRT), YUZS, SMINSON, SMAXSON
  REAL YUZDEH (HYUZDEBOL), YKIYAS1H (HYUZDEBOL)
  REAL YKIYAS2H (HYUZDEBOL)
  REAL YUZDES (SYUZDEBOL), YKIYAS1S (HYUZDEBOL)
  REAL YKIYAS2S (SYUZDEBOL)

  INTEGER I, J

C ***** H DEGERI ICIN YUZDE HESAPLANIYOR
  DO I=1, HYUZDEBOL
    YUZDEH(I)=0
  END DO
  ! H baslangic degerleri
  YUZDEH(1)=0
  YKIYAS1H(1)=HORT-DELTAH1
  YKIYAS2H(1)=HORT+DELTAH2
  DO J=1, HYUZDEBOL ! H dongusu
    DO I=1, INVRT
      IF (HH(I).GE.YKIYAS1H(J).AND.HH(I).LE.YKIYAS2H(J)) THEN
        YUZDEH(J)=YUZDEH(J)+1
      END IF
      YKIYAS1H(J)=HORT-DELTAH1*J
      YKIYAS2H(J)=HORT+DELTAH2*J
    END DO
  END DO
  ! H yuzde 90 bul
  DO I=1, HYUZDEBOL
    YUZDEH(I)=YUZDEH(I)/REAL(INVRT)
    IF (INT(YUZDEH(I)*100).EQ.90) THEN
      YUZH=YUZDEH(I)
      HMINSON=YKIYAS1H(I)
      HMAXSON=YKIYAS2H(I)
      EXIT
    END IF
  END DO

C ***** S ICIN YUZDE HESAPLANIYOR
  DO I=1, SYUZDEBOL
    YUZDES(I)=0
  END DO
  ! S baslangic degerleri
  YUZDES(1)=0
  YKIYAS1S(1)=SORT-DELTAS1
  YKIYAS2S(1)=SORT+DELTAS2
  DO J=1, SYUZDEBOL ! S dongusu
    DO I=1, INVRT
      IF (SS(I).GE.YKIYAS1S(J).AND.SS(I).LE.YKIYAS2S(J)) THEN
        YUZDES(J)=YUZDES(J)+1
      END IF
      YKIYAS1S(J)=SORT-DELTAS1*J
      YKIYAS2S(J)=SORT+DELTAS2*J
    END DO
  END DO
  ! S yuzde 90 bul
  DO I=1, SYUZDEBOL
    YUZDES(I)=YUZDES(I)/REAL(INVRT)
    IF (INT(YUZDES(I)*100).EQ.90) THEN
      YUZS=YUZDES(I)
      SMAXSON=YKIYAS2S(I)
    END IF
  END DO

```

```
SMINSON=YKIYASIS(I)
EXIT
END IF
END DO
RETURN
END SUBROUTINE
```

EXPECTS, SBOL isimli alt programlar EXPECTH ve HBOL ile aynı yapıdadır. SHELL, CHOLESKY, CHSONE alt programları ve GASDEV, RAN1 fonksiyonları Numerical Recipies'den alıntıdır.

## EKLER C

### MAKEFILE

```
F77 = ifc
F90 = ifc
FLAGS= -O3
LIB = libgulsen.a

OBJ = RAND1.o CHOLESKY.o D.o GASDEV.o GLS.o VARYANS.o \
NBINS.o HBOL.o EXPECTH.o CHSONE.o GAMMLN.o\
GAMMQ.o GCF.o GSER.o SBOL.o EXPECTS.o YUZDE.o INDEXX.o \
SHELL.o SHUFFLE.o \

all: lib main

lib: $(OBJ)
ar -sr $(LIB) $(OBJ)

main : MAIN.o $(LIB)
$(F90) MAIN.f -o MAIN $(FLAGS) -L. -lgulsen -Vaxlib

clean:
rm *.o MAIN
.f.o:
$(F90) -c $(FLAGS) $<
```



## ÖZGEÇMİŞ

Gülşen TAŞKIN 1978 yılında İstanbul'da doğmuştur. Lise öğrenimini 1995 yılında Dr. Kemal Naci Ekşi Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1996 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Harita ve Kadastro Bölümüne girmiştir. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği bölümüne girerek, 2001 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl İ.T.Ü. Bilişim Enstitüsü Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik Yüksek Lisans ve Doktora Programında Yüksek lisans eğitimine başlamış ve araştırma görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.