

Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi

Bahadır AKTUĞ*, **R. Nurhan ÇELİK**

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak mekanizması ilişkisi için belirli varsayımlar altında fonksiyonel ilişkiler kurulabilir. Bu şekilde belirli bir fay geometrisi ve kayma değerleri kullanarak yüzeyde meydana gelen yer değiştirmeleri “direkt modelleme” ile hesaplamak olanaklıdır. Ancak jeodezik ölçüler ile yüzeyde hesaplanan yer değiştirmelere en iyi uyan fay geometrisi ve kayma değerlerinin bulunması için karmaşık analitik ilişkiler yanında gelişmiş optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fay geometrisi ve kayma vektörünün yüzeyde gerçekleştirilen ölçüler yardımıyla bulunması “ters modelleme” olarak adlandırılmakta olup, söz konusu ilişkiyi sağlayan fonksiyon çok sayıda yerel minimuma sahiptir. Parametrelere ait başlangıç değerlerinin iyi bilinmediği durumlarda ters modelleme ile tümel minimum elde edilememektedir. Jeolojik yüzey gözlemleri ve jeofizik odak mekanizması çözümleri, fay geometrisi ve kayma vektörüne ilişkin belirli doğrulukta başlangıç değerleri sağlamakla birlikte özellikle yüzey kırıklarının gelişmediği ve sismik ağların sık olmadığı görece olarak küçük depremlerde fay geometrisi ve kayma vektörüne ilişkin yeterli doğrulukta bilgi mevcut olmamaktadır. Bu çalışmada ters modelleme için uygun yöntem araştırması yapılmış, geliştirilen yazılım araçları yardımıyla en uygun olduğu değerlendirilen “benzetimli yaklaşım” yöntemi 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı gruplarca yapılan çözümlerle karşılaştırıldığında bulunan fay geometrisi ve kayma değerlerinin jeodezik ölçüler ile bulunan yüzey yer değiştirme değerlerine diğer mevcut çalışmalardan daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. Jeodezik yüzey ölçüleri ile yapılan ters çözümlerde özellikle başlangıç değerlerinin iyi bilinmediği durumlarda kullanılan optimizasyon yönteminin daha fazla önem kazandığı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Fay mekanizması, yer değiştirme, optimizasyon, ters modelleme, jeodezik ölçüler.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Bahadır AKTUĞ. bahadir.aktug@hgm.mil.tr; Tel: (312) 595 22 58.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği programında tamamlanmış olan "Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.10.2007 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 10.01.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.02.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Determination of earthquake source parameters through geodetic measurements

Extended abstract

Functional relations can be established between geodetic observations and earthquake source mechanism under certain assumptions. In this way, it is possible to compute surface displacements with direct modeling using certain fault geometry and slip values. However, computation of fault geometry and slip values which best fit to the surface displacements requires advanced optimization methods together with complicated analytical functions. Although, geological surface observations and seismic focal mechanism solutions provide first-order information about fault geometry and slip vector, they are particularly inadequate for relatively small earthquakes where no surface ruptures are formed and seismic networks are not sufficiently dense. For this type of inversion situations, classical parameter estimation methods such as least-squares and derivative-based optimization methods may fail depending on the a priori values of parameters and produce local estimates of a global optimization problem.

Monte-Carlo methods which have been in use for years in other fields of engineering are quite slow for large optimization problems. However, statistical mechanisms behind such methods are particularly useful for investigating complicated problems which intrinsically contain many local minima. In such cases, these heuristic methods provide sufficient convergence when iteration number is kept high. Other methods such as exhaustive searches or grid approximations prove to be inefficient when number of parameters is more than three. This study employs Simulated Annealing for determining fault geometry parameters from a set of surface geodetic observations. In this method, Monte-Carlo runs are controlled by a parameter called critical temperature. When the cost is lower than the previous iteration, new set of parameters are always accepted while the cost is higher than the previous iteration new set of parameters are only accepted if the temperature is sufficiently cool. Critical temperature decreases with according the pre-assumed probability distribution. In terms of inverting geodetic observations for fault parameters, a standard normal distribution was found to be sufficiently efficient. This procedure is analogous to cooling of metals after being ex-

posed to high temperature heat which gives the name of the algorithm. Determination and modeling of seismic displacements can be considered a two-fold phenomenon. One is dispersing such effects from geodetic networks and the other one is quantifying the effects of earthquakes at cm level precision which are inevitable for Turkey and presenting them as input to the other disciplines. Turkish National Horizontal Control Network (TNHCN) has been serving surveying community for more than half a century. However, seismic deformations of 20th century are predicted to have distorted the network up to 10 meters. Considering the relatively less geometrical precision, TNHCN is often regarded as inappropriate for demanding applications. Nevertheless, most cadastral maps and other plans are expressed in TNHCN and TNHCN has to be accurate at a specified level. İzmit Earthquake which occurred on August 17th, 1999 has been an interest of geosciences community for years. While the efforts to quantify the related deformation was mostly focused on the geodynamical aspects of surface deformation. Considering that the region of earthquake is a dense population area involving intensive cadastral applications, deformation of geodetic networks due to earthquakes is an equally important topic. Restoration and re-organization studies which immediately begin after an earthquake need a well-maintained geodetic re-infrastructure which is also subject to displacements of a few meters.

In this study, possible methods of inverse modeling using various geodetic observations ranging from Global Positioning System to high-precision spirit leveling were investigated and simulated annealing, which is considered the most appropriate method, was tested for 1999 İzmit Earthquake, using the software tools developed within the study. Comparison of results with other studies shows that vertical components are noisier in terms of dynamical modeling than horizontal components up to an order of ten implying non-earthquake vertical deformation. Results also reveal that computed fault geometry and slip values fit geodetic surface displacements are largely dependent on the optimization method. A new set of fault geometry and slip parameters for İzmit Earthquake are considered to better fit to the data than any other available studies.

Keywords: Fault mechanism, displacement, optimization, inverse modeling, geodetic observations.

Giriş

Depremesel kökenli yer değiştirmelerin jeodezik ölçülerle belirlenmesi ve modellenmesi iki yönlü bir olgu olarak değerlendirilebilir. Birincisi jeodezik ağların söz konusu etkilerden arındırılması, diğeri ise depremin yüzeydeki etkilerinin cm duyarlılığında sayısal olarak ifade edilerek, diğeri bilim dalı ve disiplinlere vazgeçilmez bir girdi olarak sunulmasıdır. 1999 yılında meydana gelen İzmit ve Düzce Depremlerinin etki alanı ve kaynak mekanizmalarının belirlenmesinde jeodezik veriler çok önemli bir role sahiptir (Reilinger vd., 2000; Ayhan vd., 2001; Aktuğ, 2003).

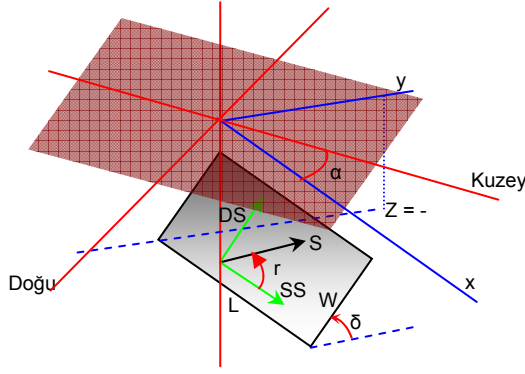
Bu çalışmada, jeodezik ölçülerden hareketle deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi (ters model) incelenecektir. Öncelikle jeodezik ölçülerden deprem kaynak parametrelerinin belirlenebilmesi için deprem mekanizması tarihsel süreç içinde matematiksel olarak ele alınmış ve ardından klasik optimizasyon yöntemlerinin yerine gelişmiş sayısal yöntemlerden biri olarak Benzetimli Yaklaşma (Simulated Annealing)'nın mevcut probleme uygunluğu araştırılmıştır. Ardından deprem kaynak mekanizmasını oluşturan fay düzlemi geometrisi ve fay düzlemi üzerindeki kaymalar ile yeryüzü noktalarının konum ve yer değiştirme vektörleri arasındaki ilişkiler incelenmiş, fay geometrisi ve kayma vektörü ile yer yüzeyindeki yer değiştirmeleri ilişkilendiren elastik yarı-uzaydaki yer değiştirme teorisi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Kullanılan yöntem ve yazılımın etkinliğini araştırmak amacıyla 17 Ağustos İzmit Depremi ele alınarak mevcut modellerle karşılaştırılmıştır. İzmit Depremi için ters modelleme ile bulunan fay mekanizması çözümünün GPS verileriyle uyumu mevcut diğeri çalışmalardan daha iyi bulunmuş olup, çok sayıda yerel minimum içeren bu karmaşık analitik ilişkilerin çözümünde jeodezik yüzey ölçülerinin nitelik ve niceliği yanında ters modellemede kullanılan yöntemin etkin bir rol oynadığı görülmüştür. Kullanılacak optimizasyon yönteminin seçimi özellikle başlangıç parametreleri iyi bilinmediğinde ve ölçülen yer değiştirmeler küçüldükçe daha da artmaktadır.

Mekanik ve matematiksel yer değiştirme modelleri

Deprem döngüsü ve yüzey yer değiştirmelerine ilişkin çalışmalar Reid'in (1911) elastik serbestlenme (elastic rebound) teorisi ile başlamıştır. Bu modelde oluşan deprem ile gerinim boşalmakta ve fay sınırına yakın bölümler toparlanmakta ve sonra gerinim (strain) birikimi tekrar başlayarak döngü devam etmektedir. Doğrultu atımlı bir sistem için iki boyutlu ilk matematiksel model Savage ve Burford (1973) tarafından verilmektedir. Elastik yer değiştirme teorisinin yer kabuğuna uygulanması ile ilgili bugüne dek çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Steakeete, 1958; Press, 1965; Aki ve Richards, 1980; Okada, 1985; Cohen, 1999). Ancak elastik-yarı uzaydaki yer değiştirme problemi en genel haliyle ilk defa Okada, (1985)'te verilmektedir. Bu modelde gerek analitik gerekse de nümerik yöntemlerde, problemi daha basit hale getirmek amacıyla yer kabuğu bir bütün-uzay (whole-space) yerine yüzeylerinden herhangi birinde normal gerilim ve yüzey kuvvetlerinin sıfır olduğu yarı-uzay (half-space) kabul edilmektedir. Noktasal bir kaynak, Δu_j (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 'nun dislokasyonu nedeniyle, Σ izotropik bloğunda oluşan deplasman alanı u_i (x_1, x_2, x_3),

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

ile verilir (Cohen, 1999; Okada, 1985). Burada δ_{jk} Kronocker deltası, λ ve μ Lamé elastik sabitleri, v_k , $d\Sigma$ yüzeyine ait yüzey normalinin k inci bileşeni, u_{ij} ise, (ξ_1, ξ_2, ξ_3) konumundaki noktasal kaynak ile oluşan u_i (x_1, x_2, x_3) deplasmanının i inci bileşenidir (Okada, 1985). Noktasal kaynak için verilen eşitlik fay düzlemi için integral ile elde edilebilir. Düzlemsel bir kaynak için kullanılan geometri ve kayma parametreleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Dörtgensel bir alan için (fay düzlemi) (1) eşitliğinin açılımından elde edilen analitik denklemler, (2-12) eşitliklerinde verilmektedir. Kayma vektörü bileşenlerinin (U_1, U_2) sebep olduğu yüzey yer değiştirmelerini (u_x, u_y, u_z), Şekil 1'de verilen fay düzlemi koordinat sistemindeki bu eşitlikler yardımıyla (1) eşitliğinin integralini alarak ifade etmek olanaklıdır.



Şekil 1. Fay geometrisi ve kayma

- s : kayma vektörü
 δ : eğim açısı (dip angle)
 α : fay doğrultusunun azimutu (strike)
 d : fay düzleminin derinliği
 L : fay düzleminin uzunluğu
 w : fay düzleminin genişliği
 SS : fay doğrultusu yönündeki kayma (strike-slip)
 DS : fay eğimi doğrultusunda kayma (dip-slip)
 x,y : fay doğrultusu ve ona dik koordinatlar.
 r : kayma vektörünün yönü (rake).(bu açı fay düzlemi üzerindeki yer değiştirmeyi bileşenlerine ayırmak için kullanılabilir. ds = s.sin (r) , ss = s. cos (rake))

Buna göre elde edilen yanal ve düşey atım eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

Yanal Atım

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

$$u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{y'q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \quad (3)$$

$$u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{d'q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \quad (4)$$

Düşey-Atım

$$u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} + I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \quad (5)$$

$$u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{y'q}{R(R+x')} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{x'\eta}{R+\eta} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \quad (6)$$

$$u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{y'q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cos \delta \right] \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{R+d'} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R+\eta)] - I_3 \quad (9)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{y'}{R+d'} - \ln(R+\eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \quad (10)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} [\ln(R+d') - \sin \delta \ln(R+\eta)] \quad (11)$$

$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \quad (12)$$

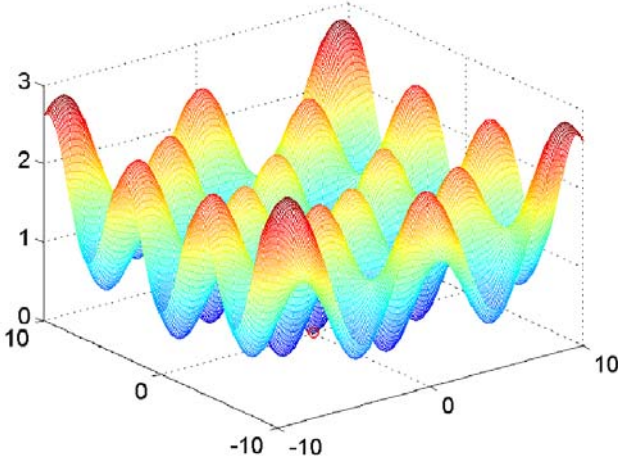
$$\tan^{-1} \frac{\eta(X+q \cos \delta) + X(R+X) \sin \delta}{x'(R+X) \cos \delta} \quad (13)$$

Burada; δ eğim açısını; μ ve λ, Lamé sabitlerini, y',d' fay düzleminin koordinat sisteminin merkezini ifade ettiği ve fay düzlemine paralel bir koordinat sistemindeki koordinatları; ξ,η ve q, fay düzlemi başlangıç noktasının fay düzlemi koordinat sistemi üzerindeki koordinatlarını; R, fay başlangıç noktasının orijine olan uzaklığını, X, noktanın fay doğrultusu yönündeki koordinatını, S_i (i=1, 2, 3) sırasıyla azimut, eğim ve fay düzlemini dik yöndeki kaymaları, u_i (i: x, y, z) ise sırasıyla fay doğrultusu, eğim açısı ve fay düzlemine dik doğrultulardaki yer değiştirmeleri ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan modellerde tümel optimizasyon problemi

Doğrusal olmayan veya doğrusal hale getirildiklerinde yinelemeli olarak çözülemeyen (yakınsamayan) veya doğrusallaştırılması oldukça zor ve karmaşık problemler ile doğrusal modeller için kullanılmayacak kısıtlar içeren problemlerin çözümü genel olarak doğrusal olmayan optimizasyonun konusu olarak düşünülebilir (Gill

vd., 1981). Hangi ölçekte olursa olsun, parametreye sayısından bağımsız olarak birçok fonksiyonun birden fazla yerel ve bir adet global minimuma sahip olduğu bilinmektedir. Global ve yerel minimum kavramları iki parametrelili Griewangk fonksiyonu ile gösterilebilir. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 2' de verilmektedir.



Şekil 2. Griewangk fonksiyonu

İki değişkenli Griewangk fonksiyonu,

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

$$-10 \leq x_1 \leq 10, \quad -10 \leq x_2 \leq 10 \quad (14)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Fonksiyonun bir adet tümel minimumu olup, tümel minimumdaki parametre değerleri (0,0), tümel minimum değeri ise sıfırdır. Ancak bu fonksiyonun klasik optimizasyon yöntemleriyle çözülmeye çalışılması durumunda tümel minimum elde edilememektedir.

Metalürjideki tavlama genel anlamda, metallerin yüksek derecede ısıtılması ve daha sonra kontrollü olarak soğutulması metaldeki kristal sayısının artırılması ve kırılmalıklarının giderilmesi anlamına gelmektedir. Yüksek ısı atomların ilk pozisyonlarının dışına çıkmalarını ve yüksek enerji seviyesinde dolaşmalarını sağlamaktadır. Daha sonraki yavaş soğutma işlemi ise atomların ilk bulduklarından da daha düşük iç enerji seviyesine ulaşmalarına olanak vermektedir

(Kirkpatrick vd., 1983). Bir optimizasyon problemine uyarlandığında enerji seviyesi amaç fonksiyonu E, her bir enerji durumu amaç fonksiyonun parametre kümesi (s), sıcaklık (T) ise optimizasyon probleminin yeni parametre kümesini seçme ölçütü olarak değerlendirilir. Benzetimli Yaklaşma (BY) ise isminden de anlaşılacağı gibi minimum enerji kristal yapıya dönüşen metalin soğuma ve katılaşma sürecini örnek almış, fonksiyonlara ait global minimumun bulunmasındaki gerekli yöntemi buna göre düzenlemiştir. BY'nın en önemli avantajı yerel minimuma takılmamasıdır. Genel olarak optimizasyon yöntemlerinde amaç fonksiyonunu azaltan parametreler yeni parametreler olarak kabul edilmekteyken, BY'de yerel minimumdan kaçınmak amacıyla kritik sıcaklığa bağlı olarak amaç fonksiyonunun değerini artıran parametreler de yeni parametreler olarak kabul edilebilmektedir. Kullanılan dağılıma bağlı olarak sıcaklık düşürülmektedir. Bu durum amaç fonksiyonunun değerini artıran parametrelerin yeni parametreler olarak seçilmesi olasılığının da bu seçilen dağılıma bağlı olduğu anlamına gelmektedir (Kirkpatrick vd., 1983). Bir enerji seviyesinden diğerine geçişin kabul edilmeside, optimizasyonda yeni parametre kümesinin kabul edilmesidir. Yeni parametre kümesi ile önceki parametre kümesinin değerlendirilmesi için öncelikle amaç fonksiyonunun iki farklı parametre kümesi için olan farkı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\delta E = E(s1) - E(s0) \quad (15)$$

Herhangi bir optimizasyon yönteminde yeni değerlerin kabul edilmesinin (15) eşitliğindeki Yeni parametre kümesi s1'in kabul edilmesi;

$$p = e^{\left(\frac{-\delta f}{T}\right)} \quad (16)$$

örneğin üstel bir dağılım fonksiyonu için şeklinde ifade edilebilir. Burada T, kritik sıcaklık veya sistem sıcaklığı, δf amaç fonksiyonundaki değişimdir. Kirkpatrick vd. (1983)'e göre yeni bir parametre kümesinin seçilme olasılığı,

$$p = f(\delta f, T) \quad (17)$$

ile verilmektedir. BY'nin işleyişindeki diğer bir özellik ise p 'nin her zaman sıfırdan büyük olmasıdır. Diğer bir deyişle (15) eşitliğine göre eğer δE pozitif bile olsa daha kötü bir çözüm (amaç fonksiyonunu değerinin öncekinde daha büyük olması) olsa bile yeni bir parametre kümesi olarak seçilebilmesidir. Buna göre (16) eşitliği;

$$p = e^{\left(\frac{\delta f}{dT}\right)} \quad (18)$$

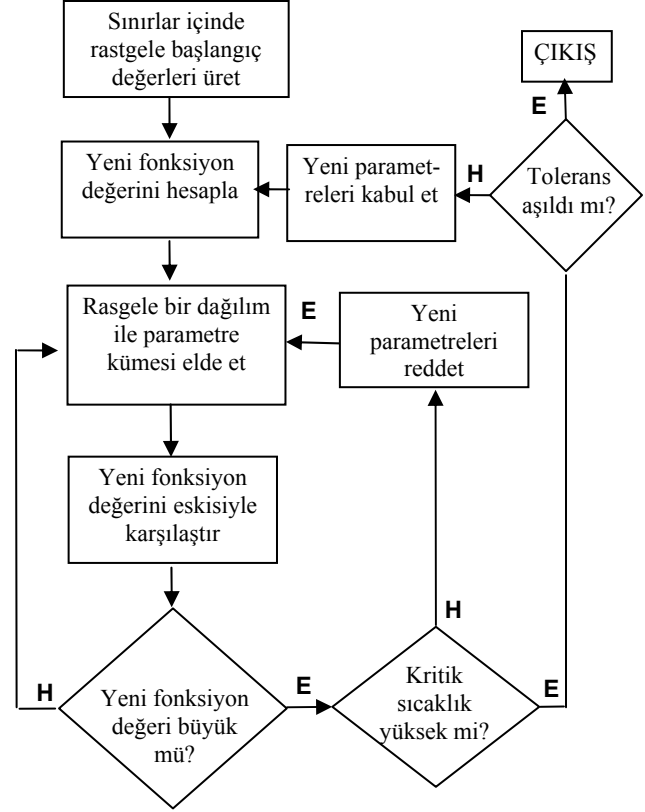
şekline dönüşür. Optimizasyon işlemi belirlenen iterasyon sayısı kadar tekrarlanarak sonuca ulaşılır. Her iterasyon ile birlikte kritik sıcaklık değeri düşürülür. Kritik sıcaklık değerinin düştüğü durumda yeni parametrelerin kabul edilme olasılığının azalması anlamına gelir (Kirkpatrick vd., 1983). Algoritmanın işleyişi şematik olarak Şekil 3'de verilmektedir.

Jeodezik ölçüler ile deprem kaynak mekanizmasının elde edilmesi

Fay düzlemi ile ilgili geometri ve kayma değerleri bilindiğinde bir veya daha fazla depremin yüzey nokta koordinatlarındaki deprem anı (kosismik dönem) etkilerinin elastik yarı-uzay modelleri ile hesaplanması işlemine direkt modelleme (forward modeling) adı verilir. Benzer şekilde deprem öncesi ve sonrası jeodezik ölçüsü bulunan noktaların koordinat değişimleri kullanılarak, bu yüzey değiştirmelerine neden olan fay düzlemlerindeki kayma miktarları (yanal ve düşey atım) ve geometri parametreleri hesaplanabilir. Bu işleme ise ters modelleme (inverse modeling) adı verilmektedir. Temel girdiler olarak koordinat değişimleri kullanılır. Bunun yanı sıra, fay geometrisi ve kayma miktarlarına ilişkin başlangıç değerleri, sismik fay düzlemi çözümleri ve jeolojik yüzey ölçümleri gibi diğer kaynaklardan elde edilir (Aktuğ, 2003).

Elastik yarı-uzay modelinin doğrusal olmaması ve Taylor serisi açılımı ile yakınsaması için çok iyi başlangıç değerlerine ihtiyaç duyması nedeniyle, EKK (En Küçük Kareler) gibi doğrusal yöntemlerle, yüzey nokta koordinat değişimle-

rinden fay düzlemine ilişkin parametrelerinin elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan parametre tahmini (Non-linear Parameter Estimation) ve optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır.



Şekil 3. Benzetimli Yaklaşma Algoritması

Başlangıç fay parametre değerleri çözümün sağlığı ve iteratif yöntemin yakınsaması açısından büyük önem taşımaktadır. Modelleme çalışmalarında elde edilen parametrelerin sismolojik verilerle uyumu ile ilgili olarak yapılabilecek bir kontrol de, sırasıyla (19) ve (20) eşitliklerinde verilen jeodezik moment (M_0) ve jeodezik moment büyüklüğünün (M_w), sismik fay düzlemi çözümlerindeki sismik moment ve moment büyüklükleri ile karşılaştırılmasıdır.

$$M_0 = A \sqrt{ss^2 + ds^2} + 30.10^9 \quad (19)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 6.0 \quad (20)$$

(Aki ve Richards, 1980). Bu eşitliklerde;

A : Fay Düzleminin alanı,
 ss : Fay Düzlemi üzerinde fay uzanımı yönündeki yer
 değiştirme,
 ds : Fay Düzlemi üzerinde fay eğim açısı yönündeki yer
 değiştirmedir.

Birçok optimizasyon ve parametre tahmin yönteminde bilinmeyenlerin başlangıç değerlerinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın bilinmesi gerekmektedir. Başlangıç fay parametrelerinin elde edilmesinde ve/veya elde edilen fay parametrelerinin karşılaştırılmasında kullanılacak yöntemler sismoloj ile bulunan fay düzlemi çözümleri, moment büyüklüğü ile fay parametreleri arasında ilişki kuran istatistiki çalışmalar (Vakov, 1996; Wells ve Coppersmith, 1994), jeolojik yüzey gözlemleri şeklinde sayılabilir (Aktuğ, 2003).

Farklı jeodezik ölçü gruplarıyla deneysel fay mekanizma modellerinin ilişkilendirilmesi çok parametrelili bir optimizasyon problemi olarak düşünülebilir. Fay geometrisi ve kayma miktarlarına bağlı analitik elastik yer değiştirme eşitlikleri yardımıyla yer yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeler bulunabilir. Problem ölçü hataları dikkate alınarak fay parametreleri $\varphi_0, \lambda_0, D, w, L, \alpha, \delta, SS, DS, TS, v$ nin ters modellenmesi şeklinde düşünülebilir. $\varphi_0, \lambda_0, D, w, L, \alpha, \delta, SS, DS, TS, v$ sırasıyla fay başlangıç noktasının enlemi ve boylamı, fay düzleminin derinliği, genişliği, uzunluğu, azimutu, eğim açısı, doğrultu atım bileşeni, eğim atım bileşeni, açılma bileşeni ve yer değiştirmenin meydana geldiği ortamın Poisson oranını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu olarak model ile ölçü farklarının ağırlıklı karesel toplamları;

$$WRSS = r^T C_r^{-1} r \quad (21)$$

yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada

$WRSS$: Ölçü ve model farklarının ağırlıklı karesel ortalaması

r : Ölçü ve model değerleri farkı

C_r : Ölçülerin kovaryans matrisi

şeklinde. Amaç fonksiyonun bu şekilde kullanılması oldukça yaygın olup, birçok çalışmada

kullanılmıştır (Segall ve Mathews, 1988; Reilinger vd., 2000).

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

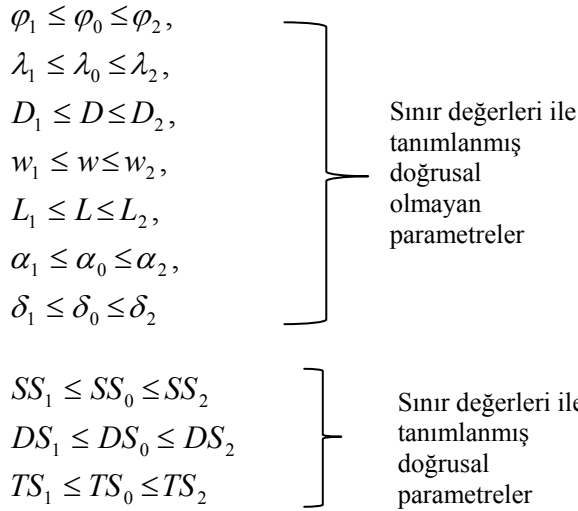
$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

şeklinde ele alınabilir. Trilaterasyon bazları ve GPS bazvektörleri için de benzer şekilde T matrisi düzenlenebilir ve/veya genişletilebilir. Bu çalışmada yüzey yer değiştirmelerinin ters modellenmesinde (yüzey yer değiştirmeler kullanılarak fay geometrisi ve kayma değerlerinin elde edilmesinde) kullanılacak amaç fonksiyonu ikinci bölümde verildiği üzere oldukça karmaşık olup çok fazla sayıda yerel minimum içermektedir. Başlangıç değerlerinin iyi bilinmemesi durumunda, deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesinde, standart parametre tahmin ve optimizasyon yöntemleriyle global minimum değeri bulunamamaktadır. Bu nedenlerden dolayı jeodezik ölçülerden deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi için global minimum ve global minimumdaki parametre değerlerini elde edebilecek gelişkin optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Tümel (global) bir optimizasyon problemi olarak modellenen yüzey yer değiştirmeleri ve deprem kaynak parametreleri ilişkisi problemi olan problemin çözülmesinde Benzetimli Yaklaşım yöntemi kullanılmıştır.

Tümel optimizasyon yöntemlerinin bir dezavantajı ise bulunan tümel minimumun aslında gerçek tümel minimum değil, ona yakın bir değer olmasıdır. Bu durum gerçek minimumu bulabilecek amaç fonksiyonlarının gerçek yerine gerçek değere yakın bir değer bulunması şeklinde ortaya çıkar. Gerçek minimumu bulunabilecek

cek fonksiyonlar tek bir yerel minimumu olan ve bu yerel minimumun da tümel minimum olduğu fonksiyonlardır.

Doğrusal modeller bunlara örnek verilebilir. Buradan hareketle yer değiştirme parametreleri aşağıda gösterildiği şekilde doğrusal ve doğrusal olmayan parametreler şeklinde ikiye ayrılmıştır.



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

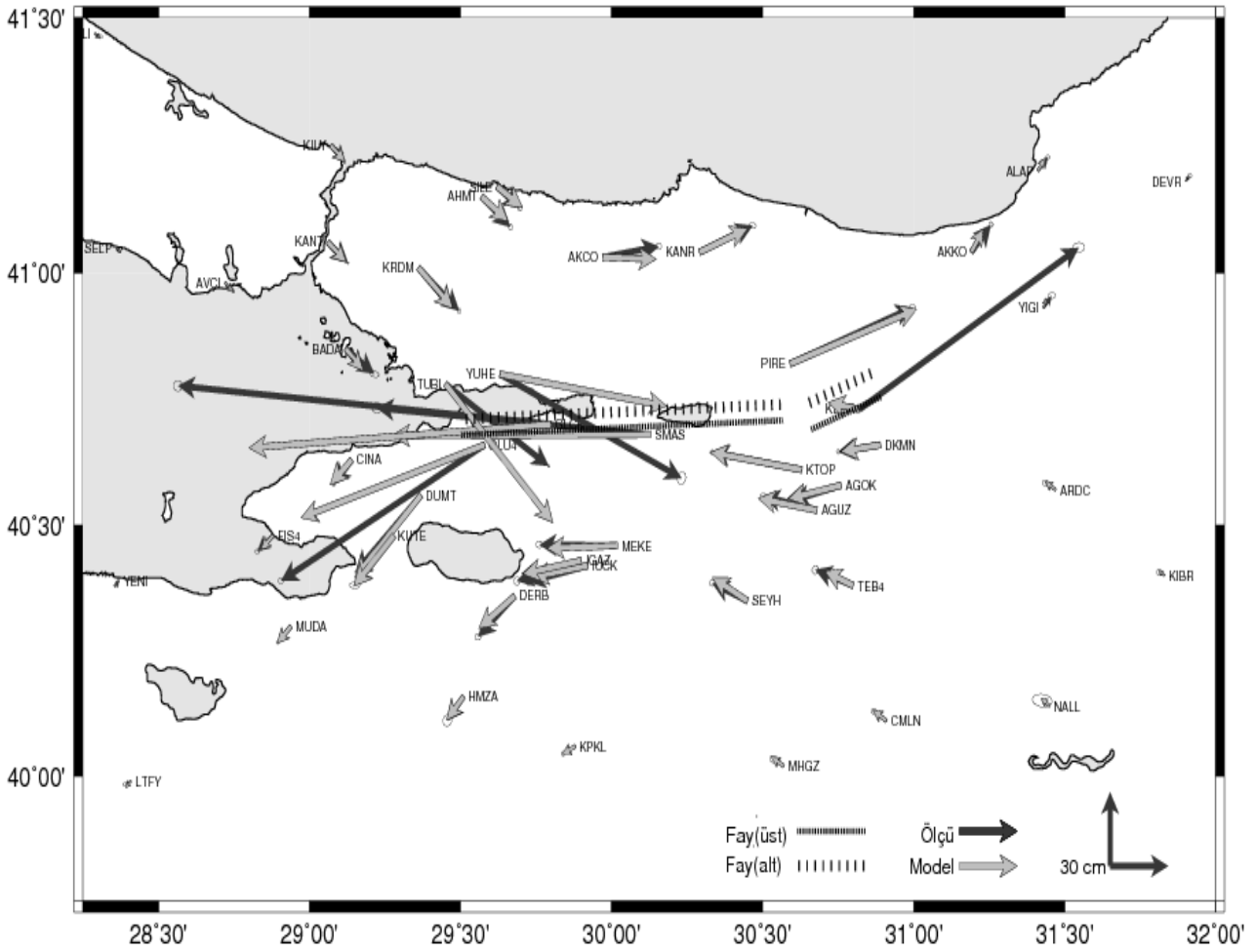
17 Ağustos 1999 İzmit depremi kaynak mekanizmasının modellenmesi

17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen İzmit depremi, jeodezik nokta koordinatlarında birkaç metreyi geçen yer değiştirmeler meydana getirmiştir (Reilinger vd., 2000; Wright vd., 2001; Aktuğ, 2003). Deprem meydana geldiği Marmara Bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) üzerinde yakın tarihteki büyük depremler ve sismolojik aktiviteden dolayı farklı disiplinlerden bilim adamları tarafından çalışılmaktaydı. Farklı çalışma gruplarının bir araya gelmesiyle depremin hemen ardından başlayan GPS kampanyaları ile deprem öncesi ölçüsü bu-

lunan noktalarda ölçümler gerçekleştirilmiştir (Aktuğ, 2003). Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçülerinin analizi deprem yüzey kırıkları yakınında iki metreye ulaşan yer değiştirmeleri ortaya çıkarmıştır (Reilinger vd., 2000; Aktuğ, 2003). GPS ölçüleri yanında özellikle mekânsal çözünürlüğü çok yüksek olan inSAR ölçülerinin de dâhil edilmesiyle veri grubu genişletilmiş ve İzmit Depremi kaynak mekanizması için çözüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Deprem öncesi ve sonrası yüzey ölçüleri (GPS, inSAR, Nivelman vb.) ile hesaplanan deprem anı yer değiştirmeler deprem kaynak mekanizmasını oluşturan geometri ve kayma değerlerinin elde edilmesi için modellenmektedir. Her ne kadar yersel yatay kontrol ağları ve ölçüleri bu amaçla çeşitli zamanlarda kullanılmış olsa da (Segall ve Matthews, 1988) 1999 yılında ülkemizde meydana gelen depremlere deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesi için sadece GPS ve inSAR ölçüleri kullanılmıştır (Reilinger vd., 2000; Ayhan vd., 2001), (Aktuğ, 2003). Söz konusu ölçme sistemlerinin düşey hareketlere duyarlı olduğu değerlendirildiğinde, üç boyutlu yer değiştirmeler ile elde edilecek model parametrelerinin zemin sıvılaşması, erozyon, çökme gibi yerel değişimlerden etkileneceği değerlendirilmektedir. Benzer şekilde Aliosmanoğlu ve Çelik (2002) fayın doğu kesimindeki jeodezik altyapı hasarlarının zemin yapısına bağlı olduğunu belirtmektedir. Bu amaçla modellemeler hem iki hem de üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak elde edilen yeni bir model ile sonuçları söz konusu çalışmalardan, Reilinger vd., (2000) ve Wright vd., (2001)'de verilen modeller karşılaştırılacaktır. Reilinger vd., (2000)'de verilen yatay GPS ölçü ve model değerleri Şekil 4'te, model ve ölçü farkları ise Şekil 5'te grafik olarak gösterilmektedir.

Reilinger vd., (2000)'de verilen model ile ölçülerin uyumu sayısal olarak Tablo 1'de özetlenmektedir. İzmit Depremi için geliştirilen diğer bir model ise Wright vd., (2001)'de verilmektedir. Bu model ile ölçülerin sayısal uyumu ise Tablo 2'de, model sonucunda elde edilen yatay



Şekil 4. Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Reilinger vd., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmeler

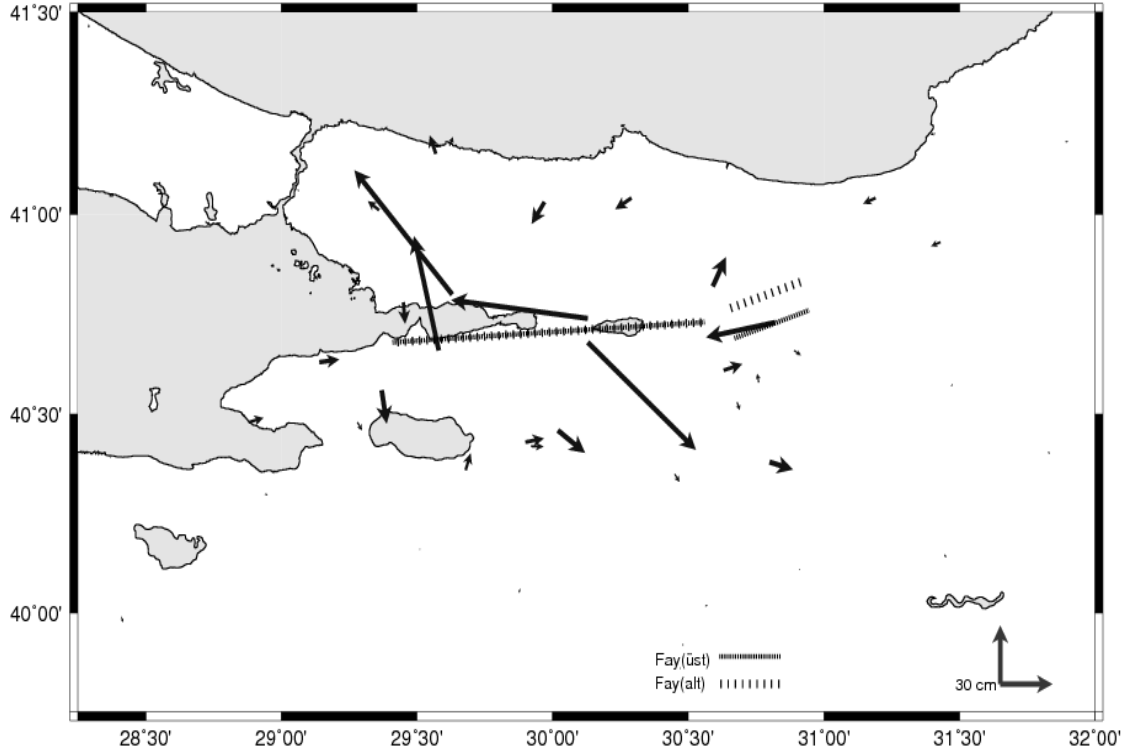
değiştirmeler farkı ise Şekil 6'da verilmektedir. İzmit Depremi için geliştirilen bu model öncekinden farklı olarak İzmit Depremi fay sistemini beş parçalı olarak değerlendirmiştir. Benzer şekilde İzmit Depremi yer değiştirmelerine ait ölçüler önceki bölümde açıklanan Benzetimli Yaklaşım yöntemiyle ters modellenmiştir. Modelleme sonucunda elde edilen fay düzlemi parametreleri dört farklı şekile elde edilerek Tablo 3'de verilmektedir.

Geliştirilen yeni model iki parçalı olup, ölçü-model farkları Şekil 7'de, sayısal uyumları ise Tablo 4'te verilmektedir.

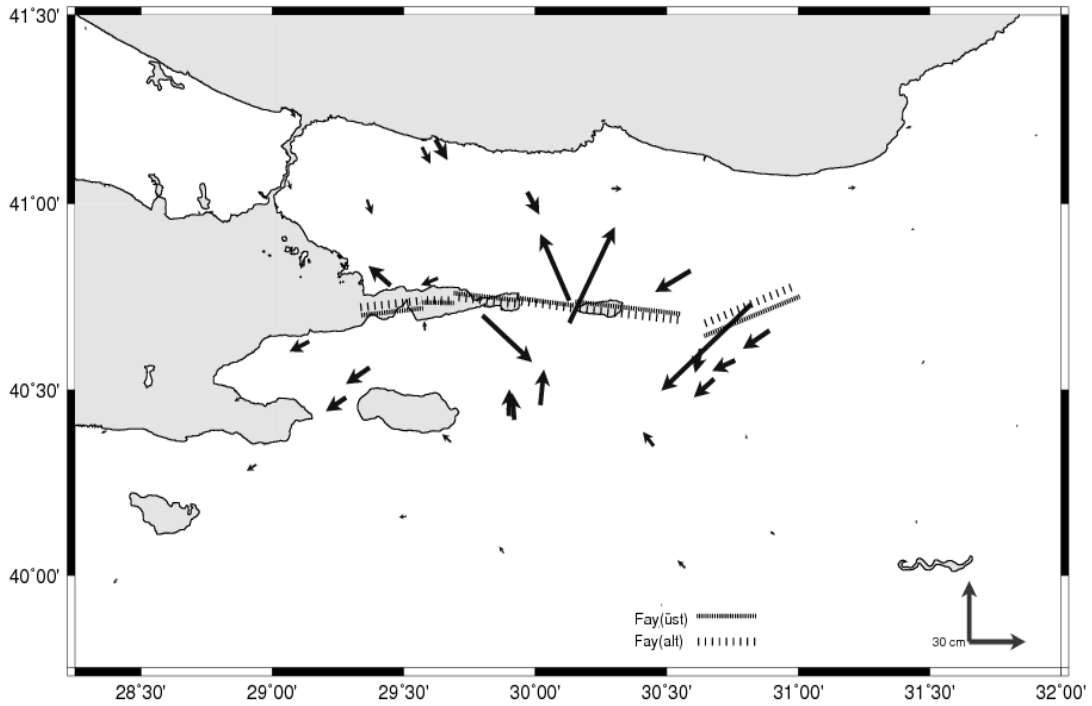
Tablo 1. Reilinger vd., (2000)'de verilen modelin farklı kombinasyonlar için ölçülerle sayısal uyumu

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

- A : 51 noktanın tamamı ile
- B : GLCK noktası hariç
- C : GLCK ve SMAS noktaları hariç
- D : GLCK, SMAS ve OLU4 noktaları hariç
- E : GLCK, SMAS, OLU4 ve YUHE noktaları hariç
- F : GLCK, SMAS, OLU4, YUHE ve SISL noktaları hariç
- G : GLCK, SMAS, OLU4, YUHE, SISL ve KDER noktaları hariç



Şekil 5. Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Reilinger vd., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmelerin farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)



Şekil 6. Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile (Wright vd., 2001)'de verilen (b) fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay model yer değiştirmeler

Sonuçlar ve öneriler

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

Tablo 2. Wright ve diğerleri (2001)'de verilen modelin farklı kombinasyonlar için ölçülerle sayısal uyumu

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

A : 51 noktanın tamamı ile

B : GLCK noktası hariç

C : GLCK ve SMAS noktaları hariç

D : GLCK, SMAS ve OLU4 noktaları hariç

E : GLCK, SMAS, OLU4 ve YUHE noktaları hariç

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

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

Deprem öncesi ve sonrası yüzey ölçüleri (GPS, inSAR, Nivelman vb.) ile hesaplanan deprem anı yer değiştirmeler deprem kaynak mekanizmasını oluşturan geometri ve kayma değerlerinin elde edilmesi için modellenmektedir. Her ne kadar yersel yatay kontrol ağları ve ölçüleri bu amaçla çeşitli zamanlarda kullanılmış olsa da (Segall ve Matthews, 1988) 1999 yılında ülkemizde meydana gelen depremlere deprem anı yer değiştirmelerin modellenmesi için sadece

GPS ve inSAR ölçüleri kullanılmıştır (Ayhan vd., 2001; Reilinger vd., 2000).

Tablo 3. Geliştirilen iki parçalı modellere ait parametreler

Model	A	B	C	D
$7\Lambda_1(^{\circ})$	29.503 30.664	29.470 30.657	29.470 30.657	29.463 30.652
$\Phi_1(^{\circ})$	40.705 40.686	40.704 40.683	40.750 40.679	40.754 40.686
$A(^{\circ})$	87.50 69.65	87.48 68.47	88.31 64.44	88.59 67.29
D(km)	-0.90 0.00	-0.81 0.00	0.18 -0.19	-1.07 1.81
$\Delta(^{\circ})$	-100.00 -64.67	-100.00 -68.37	-115.00 -60.00	-115.00 -60.00
L(km)	90.00 20.77	90.00 22.41	90.00 23.87	90.00 24.84
W(km)	20.00 13.21	20.00 14.32	20.00 20.00	20.00 10.00
SS(m)	2.85 2.40	2.87 2.23	2.88 2.02	2.79 3.25
DS(m)	0.42 1.19	0.35 0.87	0.0 0.60	0.00 0.92

Tablo 4. Geliştirilen iki parçalı model ve farklı kombinasyonlar için ölçü-model sayısal uyumu

Model	2D WRSS	3D WRSS	1D WRSS	M_0 (Nm)	M_w
A	204.35	233.50	29.16	$1.77 \cdot 10^{20}$	7.500
B	206.96	229.27	22.32	$1.79 \cdot 10^{20}$	7.502
C	21.73	27.75	6.02	$1.86 \cdot 10^{20}$	7.513
D	22.53	25.31	2.78	$1.76 \cdot 10^{20}$	7.497

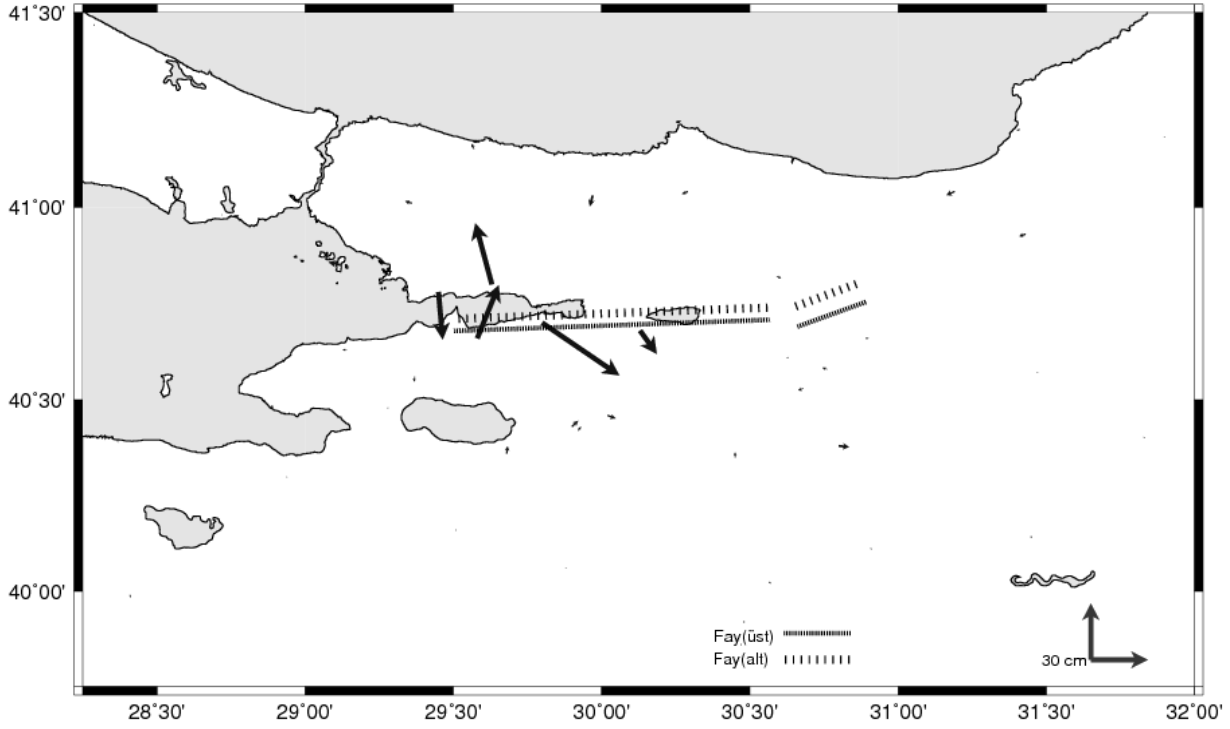
A : 51 noktada yatay (2B) yer değiştirmeler ile

B : 51 noktada yatay ve düşey (3D) yer değiştirmeler ile

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

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

Söz konusu ölçme sistemlerinin düşey hareketlere duyarlı olduğu değerlendirildiğinde, üç boyutlu yer değiştirmeler ile elde edilecek model parametrelerinin zemin sıvılaşması, erozyon, çökme gibi yerel değişimlerden etkilenmeyeceği değerlendirilmektedir. Özellikle inSAR temel olarak düşey hareketlere duyarlı bir ölçme sistemidir. Bu durum zemin yapısı itibarıyla erozyon, çökme, kayma gibi doğrudan sismik olmayan ya da zemin sıvılaşması gibi özel deformasyonlara maruz bölgelerde bu verilerle sağlıklı değerlendirme yapılmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 7. Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüleri ile 51 noktada hesaplanan yatay yer değiştirmeler ile geliştirilen 2 parçalı yer değiştirme ile elde edilen yatay model yer değiştirmelerin farkı (Model-Ölçü farkları gösterilmektedir)

Aynı dezavantaj nivelman ölçüleri için de söz konusudur. Diğer yandan mekânsal çözünürlük GPS ölçülerinin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Örneğin, iki fay düzlemine sahip bir deprem kaynak mekanizmasının modellenmesi için ondan fazla sayıda istasyonda deprem öncesi ve sonrasına ait ölçülere gereksinim bulunmaktadır.

İzmit depremi ile ilgili olarak hem iki hem de beş parçalı iki ayrı model geliştirilmiş olmakla beraber, iki parçalı modelin bulunan en iyi model olduğu değerlendirilmektedir. Çalışma sırasında elde edilen diğer bir bulgu ise, nispeten az parçalı basit geometriyle deprem kaynak mekanizmalarının basit geometrilerinden kaynaklanan ve yakın istasyonların fayın karşı tarafında kalması gibi problemlerin çok parçalı nispeten daha karmaşık kaynak mekanizmalarıyla giderilebildiği ancak çok segmentin bir araya gelmesinden dolayı fay uçlarındaki istasyonların uyumsuz olabileceğidir. Bu anlamda fay sınırlarına yakın istasyonlardaki yer değiştirmelerin modellenmesinde çok parçalı kaynak mekaniz-

malarının, faydan uzak istasyonlara ait yer değiştirmelerin modellenmesinde ise nispeten az parçalı kaynak mekanizmalarının daha etkin olduğu söylenebilir. Gerek beş parçalı, gerekse iki parçalı modellerde derinlik beklenenden daha az bulunmuştur. Marmara'daki sismojenik zon kalınlığının oldukça küçük olduğu daha önce Meade vd., (2002)'de dile getirilmiştir.

Yapılan çalışmalar fay geometrisi ve fay düzlemi yer değiştirmesi değerleri ile yüzey yer değiştirmeleri arasındaki ilişkinin bilinen parametre tahmin ve optimizasyon yöntemlerinin yetersiz kaldığı ve daha gelişkin yöntemlere ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen modelleme yazılımı DEFORM'dan etkin bir şekilde yararlanılmıştır. Ayrıca girilen ya da hesaplanan modellerin dünya üzerindeki herhangi bir bölgedeki sonuçlarının gösterilebilmesi amacıyla tüm dünya sahil verileri kapalı poligonlar şeklinde derlenmiş ve programın hızlı ve etkin şekilde diskten okuyup gösterebileceği şekilde düzenlenmiştir. Sismometreler ile hız ve yer değiştirme ölçüle-

memekte (satüre olmakta), hız ve deplasman ölçülebilmesi için kuvvetli yer hareketi kaydı yapan ivmeölçerler gerekmektedir. Mevzuat tüm büyük barajlarda ivmeölçerlerin bulunulmasını zorunlu tutmakla beraber, büyük bölümünde bulunmamakta, bulunanlardakilerin de işlevini yerine getirmediği görülmektedir. Örneğin, etki alanında 50'den fazla barajın bulunduğu 1999 Marmara Depremlerinde büyük bölümünde maalesef kayıt alınamamıştır (Eyidoğan, 2006). Sismometrelerin çalışma aralığı genel olarak 100 Hz civarında olup, maksimum 200 Hz'e kadar çalışabilmektedirler. Hızla gelişen GPS teknolojisi 20 Hz'e kadar çıkmıştır. Bu durum artarak devam eden sabit GPS istasyonları ile ileride dinamik sonuçların da elde edilebileceğini ve buna bağlı olarak jeodezik ölçümlerin ters çözümlerinde dinamik sonuçların da bulunabileceğini göstermektedir. Jeodezik ve sismik veriler karşılıklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Farklı disiplinlerin üstün yanlarından yararlanan çok-disiplinli çalışmaların doğası gereği karmaşık deprem olgusu hakkındaki bilgilerimizin geliştirilmesinde daha etkin bir rol oynayacağı değerlendirilmektedir. GPS ile elde edilen çözümlerin statik ve kümülatif yer değiştirmeleri içerdiği değerlendirildiğinde, her bir sismik hareketin ayrı ayrı incelendiği sismolojik verilerle doğrudan karşılaştırılması oldukça güçtür. Örneğin Çay Depreminin olduğu gün ana şok dışında üç büyük deprem daha olmuştur. Dolayısıyla GPS verileri ile elde edilen sonuçlar ana şok dışındaki depremlerin de etkisini içermektedir. Bu durum aslında sismoloji, jeoloji ve jeodezi kaynaklı verilerin birlikte kullanılma zorunluluğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Sonuçlar oldukça ümit vericidir. Bu tür çalışmaların çok-disiplinli çalışmalarda jeodezinin diğer yer bilimleriyle ilişkisini geliştireceği ve jeodezinin çok-disiplinli çalışmalara katılımını arttıracığı anlaşılmaktadır.

Kaynaklar

- Aki, K. ve Richards, P.G., 1980. *Quantitative Seismology Theory and Methods, I-II*, W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Aktuğ, B., 2003. Elastik Yarı-Uzay Modelleri ve Depremsel Koordinat Değişimlerine Dinamik Bir Yaklaşım, *Harita Dergisi*, Ocak, 2003, Ankara.

- Aliosmanoğlu, Ş., Çelik, R.N., 2002. Depremler nedeniyle oluşan jeodezik altyapı hasarlarının büyük ölçekli harita çalışmalarına etkisi, *Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu*, 16-18 Ekim 2002, Konya.
- Ayhan, M. E., R. Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Aktug, O., Herece, E, and Reilinger, R. E., 2001. Kinematics of the Mw7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 28, 367-370.
- Cohen, S.C., 1999. Numerical Models of Crustal Deformation in Seismic Zones, *Advances in Geophysics*, Vol.41, Academic Press.
- Eyidoğan, H., 2006. Kişisel görüşme, Tez izleme toplantısı, İstanbul Teknik Üniversitesi, 07 Mart 2006, İstanbul.
- Feigl, K. L. Sarti, F., Vadon, H., McClusky, S., Ergintav, S., Durand, P., Burgmann, R., Rigo, A., Massonnet, D., and Reilinger, R., 2002. Estimating slip distribution for the Izmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT and SPOT measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 138-160.
- Gill, P.E., Murray, W., Wright, M.H., 1981. *Practical Optimization*, Academic Pres., London.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D.Jr., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 4598, 671-680.
- Meade, B., Hager, B., McClusky, S., Reilinger, R., Ergintav, S., Lenk, O., Barka, A., and Özener, H., 2002. Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by global positioning system measurements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, no. 1, 208-215.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- Press, F., 1965. Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, *Journal of Geophysical Research*, 70, 1211-1226.
- Reid, H.F., 1911. The Elastic Rebound Theory of Earthquakes, *Bull.Dept.Geol.Univ. Calif.*, 6, 413-444.
- Reilinger, R. E., Ergintav, S., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gurkan, O., Hearn, L., Feigl, K. L., Cakmak, R., 2000. Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M_w7.5, Izmit, Turkey earthquake, *Science*, 289, 1519-1524.

- Savage J. C., Burford, R.O., 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California, *Journal of Geophysical Research*, **78**, 832-845.
- Segall, P., Matthews, M., 1988. Displacement Calculations from geodetic data and the testing of Geophysical Deformation Models, *Journal of Geophysical Research*, **93**, No. B12, 14,954-14,966.
- Stekeete, J.A., 1958. On Volterra's Dislocations in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys.*, **36**, Canada.
- Vakov, A. V., 1996. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism., *Tectonophysics*, **261**, 97-113.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New Empirical Relations Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 974-1002.
- Wright, T. J., Fielding, E. J., Parsons, B. E., and England, P. C., 2001, Triggered slip: observations of the 17 August 1999 Izmit (Turkey) earthquake using radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, **28**, 1079-1082.