

**JEODEZİK ÖLÇÜLER İLE DEPREM KAYNAK
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNDE YÖNTEM ETKİNLİĞİ**
(EFFICIENCY OF METHODOLOGY IN DETERMINATION OF EARTHQUAKE
SOURCE PARAMETERS THROUGH GEODETIC MEASUREMENTS)

Bahadır AKTUĞ¹, Rahmi Nurhan ÇELİK²

¹Harita Genel Komutanlığı, Ankara

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
bahadir.aktug@hgk.mil.tr

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. 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.

Anahtar Kelimeler: GPS, kosmik yerdeğiştirmeler, elastik yarı-uzay modelleri, ters modelleme, tümel optimizasyon.

ABSTRACT

Functional relation can be established between geodetic observations and earthquake source mechanism under certain assumptions. In this way, it is possible to compute surface displacements with direct modeling using certain fault geometry and slip values. However, computation of fault geometry and slip values which the best fit to the surface displacements requires advanced optimization methods together with complicated analytical functions. In this study, possible methods of inverse modeling were investigated and simulated annealing, which is considered the most appropriate method, was tested for 1999 İzmit Earthquake, August,17th using the software tools developed within the study. Results reveal that computed fault geometry and slip values fit geodetic surface displacements better than any other available studies.

Key Words: GPS, coseismic displacements, elastic half-space models, inverse modeling, global optimization.

1. GİRİŞ

Deprem 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, diğer bilim dalı ve disiplinlere vazgeçilmez bir girdi olarak sunulmasıdır. 1999 yılında meydana gelen İzmit ve Düzce Depremlerinin etki alanı ve kaynak mekanizmalarının (fay geometrisi ve kayma değerleri) belirlenmesinde jeodezik veriler önemli bir role sahiptir (Reilinger vd., 2000; Ayhan vd., 2001; Aktuğ, 2003; Aktuğ, 2006).

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 bilimleri 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.

Bu çalışmada, jeodezik ölçülerden hareketle deprem kaynak parametrelerinin elde edilmesi (ters model) incelenecektir. İkinci bölümde jeodezik ölçülerden deprem kaynak parametrelerinin belirlenebilmesi için deprem mekanizması tarihsel süreç içinde matematiksel olarak ele alınmış, üçüncü bölümde klasik optimizasyon yöntemlerinin yerine gelişmiş sayısal yöntemlerden biri olarak Benzetimli Yaklaşma (Simulated Annealing)'nın mevcut probleme uygunluğu incelenmiştir. Dördüncü bölümde 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 kuramı matematiksel olarak ifade edilmiştir. Beşinci bölümde kullanılan yöntem ve yazılımın etkinliğini araştırmak amacıyla 17 Ağustos İzmit Depremi ele alınarak mevcut modellerle (Reilinger vd., 2000; Wright vd., 2001) karşılaştırılmıştır. İzmit Depremi için ters modelleme ile bulunan fay mekanizması çözümünün GPS verileriyle uyumu mevcut diğer 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.

2. MEKANİK VE MATEMATİKSEL YER DEğİŞTİRME MODELLERİ

Deprem döngüsü ve yüzey yer değiştirmelerine ilişkin çalışmalar Reid (1911)'in elastik serbestlenme (elastic rebound) teorisi ile başlamıştir. Bu modelde oluşan deprem ile gerinim (strain) boşalmakta ve fay sınırına yakın bölümler toparlanmakta ve sonra gerinim birikimi tekrar başlayarak döngü devam etmektedir. Doğrultu atımlı

Buna göre elde edilen yanal ve düşey atım eşitlikleri aşağıda verilmiştir (Okada, 1985):

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

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

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

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

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

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

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

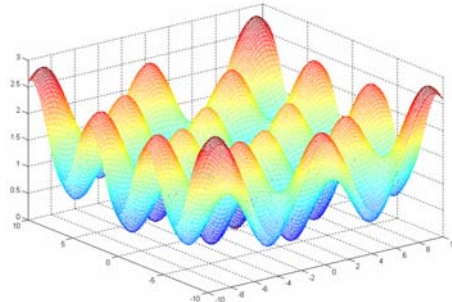
$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} [\ln(R+d') - \sin \delta \cdot \ln(R+\eta)] \quad (11)$$

$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \frac{\eta(X+q \cos \delta) + X(R+X) \sin \delta}{x'(R+X) \cos \delta} \quad (12)$$

- δ : Eğim Açısı (dip angle)
 μ, λ : Lamé sabitleri
 y', d' : Fay düzleminin noktanın orijini ifade ettiği ve fay düzlemine paralel bir koordinat sistemindeki koordinatları
 ξ, η, q : Fay düzlemi başlangıç noktasının fay düzlemi koordinat sistemi üzerindeki koordinatları
 R : Fay başlangıç noktasının orijine olan uzaklığı
 X : Noktanın fay doğrultusu yönündeki koordinatı
 S_i : $i=1,2,3$ şeklinde sırasıyla SS, DS ve açılma (opening)
 u_i : ($i: x, y, z$) şeklinde sırasıyla fay doğrultusu, eğim açısı ve fay düzlemine dik doğrultulardaki yer değiştirmeler

3. DOĞRUSAL OLMAYAN MODELLERDE GLOBAL OPTİMİZASYON PROBLEMİ

Doğrusal olmayan optimizasyon genel olarak; (a) doğrusal olmayan veya doğrusal hale getirildiklerinde yinelemeli olarak çözülemeyen (yakınsamayan) problemler (b) doğrusallaştırılması oldukça zor ve karmaşık problemler ile (c) doğrusal modeller için kullanılmayacak kısıtlar içeren problemleri kapsar (Gill vd., 1981). Hangi ölçekte olursa olsun, parametre sayısından bağımsız olarak birçok fonksiyonun birden fazla yerel ve bir adet global (tümel) minimuma sahip olduğu bilinmektedir. Global ve yerel minimum kavramları iki parametrelili Griewangk fonksiyonu örneği ile gösterilebilir. Bu fonksiyonun grafiği Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Griewangk fonksiyonu.

İki değişkenli Griewangk fonksiyonu,

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 + \frac{1}{200} x_2^2 - \cos(x_1) \cos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} x_2\right) + 1.0 \quad (13)$$

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

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. Global minimumun elde edilmesindeki sorunlar yerel minimumlar yerine global minimumları bulmayı amaçlayan optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu kapsamda Kirkpatrick vd. (1983) Benzetimli Yaklaşma (BY) yöntemini önermektedir. Bu yöntem, yerel

minimuma takılan diğer yöntemlerin aksine, her bir iterasyon sonucu elde edilen değerleri bir olasılık yoğunluk fonksiyonu şeklinde modelleyerek global minimumu bulabilmektedir. Benzetimli Yaklaşma yöntemi ismini metalürjideki metallerin yüksek derecede ısıtılması ve daha sonra kontrollü olarak soğutularak metaldeki kristal sayısının artırılması ve kırılgenliklerinin giderilmesinden almaktadır. 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'nin 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 edilmesi, optimizasyonda yeni parametre kümesinin kabul edilmesidir. Yeni parametre kümesi ile önceki parametre kümesinin değerlendirilmesi için öncelikle amaç fonksiyonunun iki farklı parametre kümesi için olan farkı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\delta E = E(s_1) - E(s_0) \quad (14)$$

Herhangi bir optimizasyon yönteminde yeni değerlerin kabul edilmesinin (14) eşitliğindeki Yeni parametre kümesi s_1 'in kabul edilmesi örneğin üstel bir dağılım fonksiyonu için;

$$p = e^{\left(\frac{\delta f}{T}\right)} \quad (15)$$

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,

$$p = f(\delta f, T) \quad (16)$$

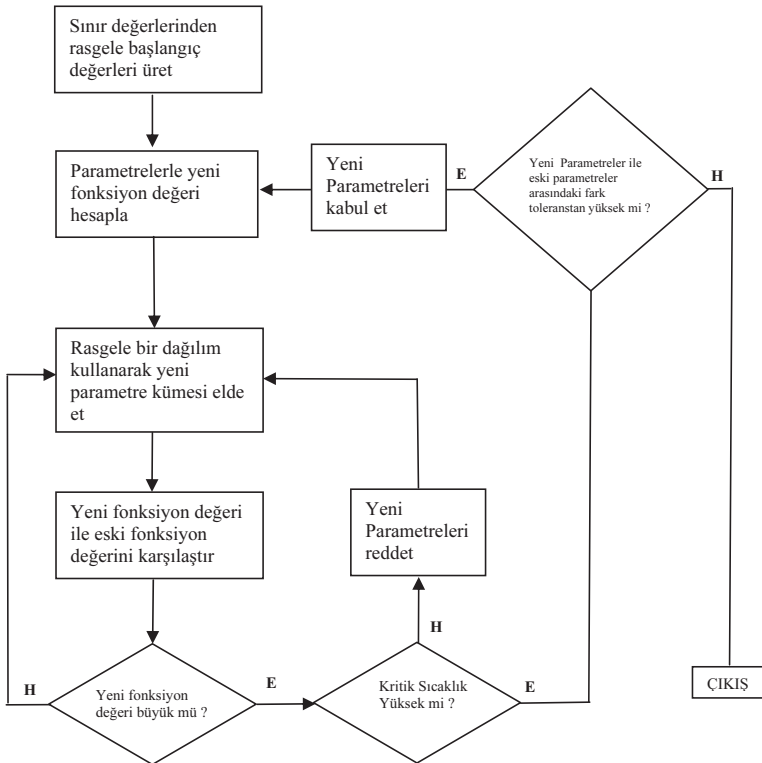
ile verilmektedir. BY'nin işleyişindeki diğer bir özellik ise p'nin her zaman sıfırdan büyük olmasıdır. Diğer bir deyişle (14) eşitliğine göre eğer δE pozitif bile olsa daha kötü bir çözüm (amaç fonksiyonunu değerinin öncekinde daha büyük olması) olsa bile yeni bir parametre kümesi olarak seçilebilmesidir. Buna göre (15) eşitliği;

$$p = e^{\left(\frac{\delta f}{dT}\right)} \quad (17)$$

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

4. JEODEZİK ÖLÇÜLER İLE KAYNAK MEKANİZMASININ ELDE EDİLMESİ

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 koordinat değiştirmelerine neden olan fay düzlemindeki kayma miktarları (yanal ve düşey atım) ve geometri parametreleri hesaplanabilir. Bu işleme ise ters modelleme (inverse modeling) adı verilmektedir.



Şekil 3. Benzetimli yaklaşma algoritması.

Ters modellemede 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, En Küçük Kareler (EKK) gibi doğrusal yöntemlerle, yüzey nokta koordinat değişimlerinden fay düzlemine ilişkin parametrelerinin elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan parametre tahmini (Non-linear Parameter Estimation) ve optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Başlangıç fay parametre değerleri çözümün doğruluğu ve yinelemeli yöntemin yakınsaması açısından büyük önem taşımaktadır. Modelleme çalışmalarında elde edilen parametrelerin sismolojik verilerle uyumu ile ilgili olarak yapılabilecek bir kontrol de, sırasıyla (18) ve (19) eşitliklerinde verilen jeodezik moment (M_0) ve jeodezik moment büyüklüğünün (M_w), sismik fay düzlemi çözümlerindeki sismik moment ve moment büyüklükleri ile karşılaştırılmasıdır.

$$M_0 = A \sqrt{ss^2 + ds^2} + 30.10^9 \quad (18)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 6.0 \quad (19)$$

(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 kullanılabilecek yöntemler (a) sismoloji ile bulunan fay düzlemi çözümleri, (b) moment büyüklüğü ile fay parametreleri arasında ilişki kuran istatistikî çalışmalar (Vakov, 1996; Wells ve Coppersmith, 1994) ve (c) jeolojik yüzey gözlemleri şeklinde sayılabilir (Aktuğ, 2003).

Farklı jeodezik ölçü gruplarıyla deneysel fay mekanizma modellerinin ilişkilendirilmesi çok parametrelî 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 parametrelerinin ters modellenmesi şeklinde düşünülebilir. Burada parametreler sırasıyla fay başlangıç noktasının enlemi ve boylamı (φ_0, λ_0), fay düzleminin derinliğini (D), genişliğini (w), uzunluğunu (L), azimutunu (α), eğim açısını (δ), doğrultu atım bileşeni (SS), eğim atım bileşenini (DS), açılma bileşenini (TS) ve yer değiştirmenin meydana geldiği ortamın Poisson oranını (ν) ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu olarak model ile ölçü farklarının ağırlıklı karesel toplamları;

$$WRSS = r^T C_r^{-1} r \quad (20)$$

yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada;

$WRSS$: Ölçü ve model farklarının ağırlıklı karesel toplamı

r : Ölçü ve model değerleri farkı

C_r : Ölçülerin kovaryans matrisi

şeklinde dir. 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 ağlarında yerel sistemdeki üç boyutlu koordinat değişimleri için T matrisi birim matris iken nivelman ağlarındaki yükseklik değişimleri için;

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

şeklinde ele alınabilir. Trilaterasyon bazları ve GPS bazvektörleri için de benzer şekilde T matrisi düzenlenebilir ve/veya genişletilebilir. Bu çalışmada yüzey yer değiştirmelerinin ters modellemesinde (yüzey yer değiştirmeler kullanılarak fay geometrisi ve kayma değerlerinin elde edilmesinde) kullanılacak amaç fonksiyonu ikinci bölümde verildiği üzere oldukça karmaşık olup çok fazla sayıda yerel minimum içermektedir. 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 global optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasına gerek vardır. Tümel (global) bir optimizasyon problemi olarak modellenen yüzey yer değiştirmeleri ve deprem kaynak parametreleri ilişkisi problemi olan problemin çözülmesinde Benzetimli Yaklaşım yöntemi kullanılmıştır.

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

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

$$\begin{array}{l}
 \varphi_1 \leq \varphi_0 \leq \varphi_2, \\
 \lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2, \\
 D_1 \leq D \leq D_2, \\
 w_1 \leq w \leq w_2, \\
 L_1 \leq L \leq L_2, \\
 \alpha_1 \leq \alpha_0 \leq \alpha_2, \\
 \delta_1 \leq \delta_0 \leq \delta_2
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \varphi_1 \leq \varphi_0 \leq \varphi_2, \\ \lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2, \\ D_1 \leq D \leq D_2, \\ w_1 \leq w \leq w_2, \\ L_1 \leq L \leq L_2, \\ \alpha_1 \leq \alpha_0 \leq \alpha_2, \\ \delta_1 \leq \delta_0 \leq \delta_2 \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Sınır değerleri ile} \\ \text{tanımlanmış doğrusal} \\ \text{olmayan parametreler} \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 SS_1 \leq SS_0 \leq SS_2 \\
 DS_1 \leq DS_0 \leq DS_2 \\
 TS_1 \leq TS_0 \leq TS_2
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} SS_1 \leq SS_0 \leq SS_2 \\ DS_1 \leq DS_0 \leq DS_2 \\ TS_1 \leq TS_0 \leq TS_2 \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Sınır değerleri ile} \\ \text{tanımlanmış} \\ \text{doğrusal} \\ \text{parametreler} \end{array}$$

Bu şekilde doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde 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.

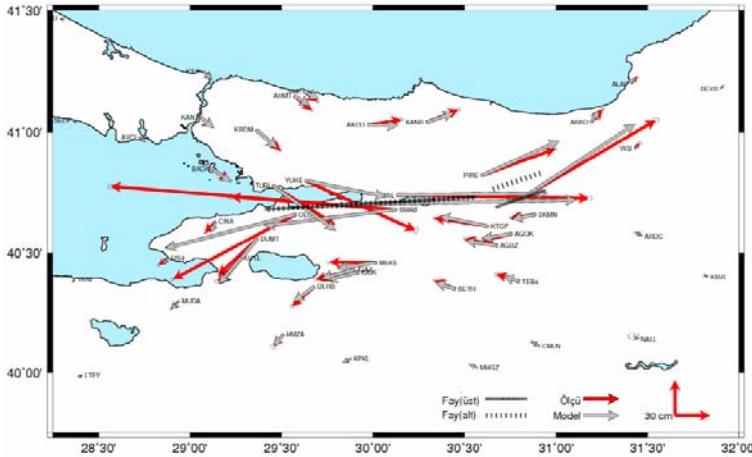
5. 1999 İZMİT DEPREMİ KAYNAK MEKANİZMASININ MODELLENMESİ

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, 2006). 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 bulunan 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.

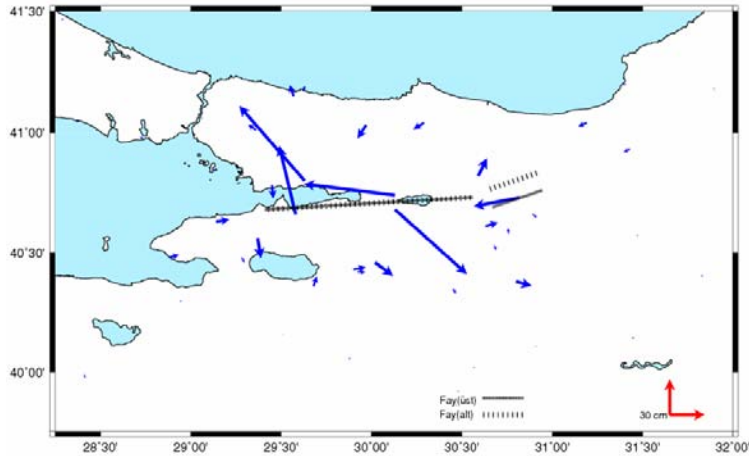
Deprem öncesi ve sonrası jeodezik yüzey ölçüleri (GPS, inSAR, Nivelman vb.) ile hesaplanan deprem anı yer değiştirmeler deprem kaynak mekanizmasını oluşturan geometri ve kayma değerlerinin elde edilmesi için modellenenmektedir. Her ne kadar yersel yatay kontrol ağları ve ölçüleri bu amaçla çeşitli zamanlarda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

Alıosmanoğlu ve Çelik (2002) özellikle fayın doğu kesiminde jeodezik altyapı hasarların zemin yapısından oldukça etkilendiğini belirtmektedir. Bu amaçla modellemeler hem iki hem de üçboyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak elde edilen yeni bir model ile (Reilinger vd., 2000) ve (Wright vd., 2001)'de verilen modeller karşılaştırılacaktır. (Reilinger vd., 2000)'de verilen yatay GPS ölçü ve model değerleri Şekil 4'de, ölçü-model farkları ise Şekil 5'de grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. Hesaplanan ve (Reilinger vd., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay yer değiştirmeler.



Şekil 5. Hesaplanan ve (Reilinger vd., 2000)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yatay yer değiştirmeler (model-ölçü farkları).

(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 sonucunda elde edilen yatay değiştirmeler farkı Şekil 6'da, ölçü-model farklarının sayısal değerlendirilmesi Tablo 2'de verilmektedir. Bu model de öncekinden farklı olarak İzmit Depremi fay sistemini beş parçalı olarak değerlendirmiştir.

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

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 ölçü kombinasyonu için elde edilmiş olup, bulunan parametreler Tablo 3'de verilmektedir. Geliştirilen yeni model iki parçalı olup, ölçü-model farkları Şekil 7'de, sayısal uyumları ise Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 2. (Wright vd., 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

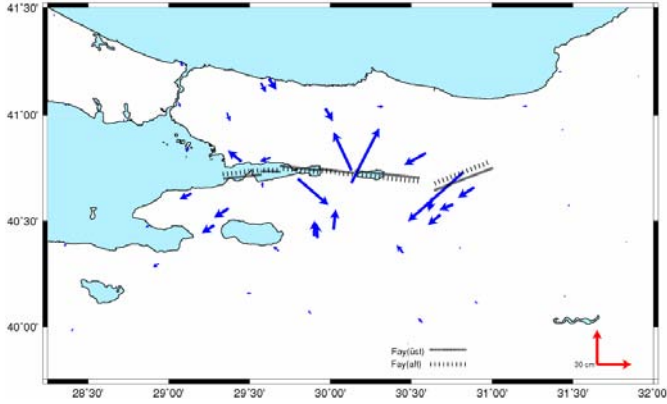
^C GLCK ve SMAS noktaları hariç

^D GLCK, SMAS ve OLU4 noktaları hariç

^E GLCK, SMAS, OLU4 ve YUHE noktaları hariç

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

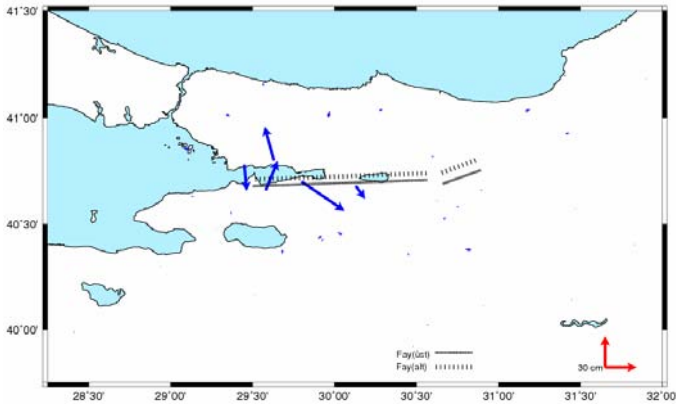
^G GLCK, SMAS, OLU4, YUHE, SISL, KTOP ve KDER noktaları hariç



Şekil 6. Hesaplanan ve (Wright vd., 2001)'de verilen fay yer değiştirme modeli ile elde edilen yayay yer değiştirmeler.

Tablo 3. Geliştirilen iki parçalı modellere ait parametreler.

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



Şekil 7. Hesaplanan ve 2 parçalı model ile elde edilen yayay yer değiştirmeler (model-ölçü) farkları.

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	İterasyon Sayısı
A	204.35	233.50	29.16	1.776E+020	7.500	256552
B	206.96	229.27	22.32	1.789E+020	7.502	331344
C	21.73	27.75	6.02	1.856E+020	7.513	235478
D	22.53	25.31	2.78	1.759E+020	7.497	298445

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

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

^C GLCK, 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

Geliştirilen model incelenen beş parçalı modeller içerisinde en uyumlu olmakla beraber Karadere parçası beklenene göre çok daha kuzeyde, Sapanca parçası ise doğu-batı güneydoğu batı doğrultulu olarak bulunmuştur. İzmit Depremi yüzey kırıklarına uymamakla birlikte verilerle olağanüstü uyumu nedeniyle ayrıca incelenmesi yararlı olacaktır. Sonuç olarak verilerin ters çözümü ile elde edilen deprem kaynak parametrelerinin “gerçek parametreler” değil, belirli bir veri grubuna en iyi uyan parametreler olduğu unutulmamalıdır. Reilinger vd., (2000)’de bulunan fay düzlemi kayma miktarları (Feigl vd., 2002)’de belirtildiği üzere olması gerekenden daha küçüktür. Geliştirilen her iki modelde de Hersek deltası ve Karadere parçasına doğru azalan ancak merkezde 4-5 m’ye ulaşan kayma değerleri vermektedir. Bu durum çeşitli kaynaklarda verilen (Reilinger vd., 2000) ve kayma dağılımını inceleyen çalışmaların yeniden ele alınmasının yararlı olacağı anlamına gelmektedir. Özellikle inSAR verilerinin modellerle zaman zaman uyumsuzluğu çeşitli kaynaklarda yer kabuğu jeolojisi ile açıklanmaya çalışılmıştır (Feigl vd., 2002).

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen hem iki hem de üç boyutlu ters çözümler, iki boyutlu çözümlerle elde edilen modellerin düşey hareketlerin de modellenmesinde güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum bir başka şekilde şöyle de açıklanabilir: Yatay yer değiştirmeler 2 m’yi bulurken, düşey yer değiştirmeler genel olarak 15 cm’nin altındadır. Ayrıca İzmit Depreminin etki alanındaki düşey yer değiştirmelerin yataylara göre oldukça dağınık olduğu göze çarpmaktadır. Geliştirilen kaynak mekanizması çözümleri (2 ve 5 parçalı modeller), Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFFS)’nden beklenildiği şekilde Karadere parçası haricinde tamamen düşey kabul edilebilecek eğim açıları vermiştir. Yoğun olarak kullanılan inSAR verileri ise genel olarak düşeye duyarlıdır. Diğer bir ifade ile inSAR verileri ile yatay yer değiştirmelerin elde edilmesi öncelikle söz konusu dağınık düşey etkilerle zorlaşmaktadır. Düşey etkilerin dağınık yapısının sismotektonik ile ilgisi olmayan erozyon, toprak kayması, çökme gibi yerel etkenler ya da zemin sıvılaşması gibi daha karmaşık deformasyon süreçlerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Nitekim Marmara depremleri öncesinde ve sonrasında yapılan nivelman ölçüleri ile GPS ölçüleri arasında da uyumsuzluk bulunmaktadır.

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

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

6. SONUÇ

Deprem öncesi ve sonrası jeodezik yüzey ölçüleri (GPS, inSAR, Nivelman vb.) ile hesaplanan deprem anı yer değiştirmeler 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). Söz konusu ölçme sistemlerinin düşey hareketlere duyarlı olduğu değerlendirildiğinde, üç boyutlu yer değiştirmeler ile elde edilecek model parametrelerinin zemin sıvılaşması, erozyon, çökme gibi yerel değişimlerden etkileneceği değerlendirilmektedir. Aliosmanoğlu ve Çelik (2002) özellikle fayın doğu kesiminde jeodezik altyapı hasarların zemin yapısından oldukça etkilendiğini belirtmektedir.

Özellikle inSAR temel olarak düşey hareketlere duyarlı bir ölçme sistemidir. Bu durum zemin yapısı itibariyle erozyon, çökme, kayma gibi doğrudan sismik olmayan ya da zemin sıvılaşması gibi özel deformasyonlara maruz bölgelerde bu verilerle sağlıklı değerlendirme yapılmasını zorlaştırmaktadır. Aynı dezavantaj nivelman ölçüleri için de söz konusudur. Diğer yandan mekânsal çözünürlük GPS ölçülerinin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Örneğin, iki fay düzlemine sahip bir deprem kaynak mekanizmasının modellenmesi için ondan fazla sayıda istasyonda deprem öncesi ve sonrasına ait ölçülere gereksinim bulunmaktadır.

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.

Büyük depremler sırasında ya da deprem merkezine yakın yerlerde sismometreler ile hız ve yer değiştirme ölçülememekte (satüre olmakta), hız ve yer değiştirme ölçülebilmesi için kuvvetli yer hareketi kaydı yapan ivmeölçerler gerekmektedir.

Mevzuat tüm büyük barajlarda ivmeölçerlerin bulundurulmasını zorunlu tutmakla beraber, büyük bölümünde bulunmamakta, bulunanlardakilerin de işlevini yerine getirmediği görülmektedir. Örneğin, etki alanında 50'den fazla barajın bulunduğu 1999 Marmara Depremlerinde barajlardaki ivmeölçerlerden kayıt alınamamıştır (Eyidoğan, 2006).

Sismometrelerin çalışma aralığı genel olarak 100-200 Hz civarında olup, hızla gelişen GPS teknolojisi ile 20 Hz'e kadar kayıt alma olanağı bulunmaktadır. 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. Özellikle ana şok büyüklüğüne yakın öncü veya artçı şokların ana şoka yakın tarihlerde meydana geldiği durumlarda söz konusu depremlerin ayırt edilmesi güçleşmektedir. Zira zamansal çözünürlüğü nispeten düşük GPS verileri ile elde edilen sonuçlar ana şok dışındaki depremlerin de etkisini içermektedir. Özetle, sismoloji, jeoloji ve jeodezi kaynaklı verilerin birlikte kullanılma zorunluluğunu bir kez daha görülmektedir.

Jeodezik problemler genel olarak doğrusal ya da doğrusallaştırılmış modeller ile çözülmektedir. Bu çalışmada ele alınan deprem kaynak geometrisi, doğrusal olmayan ve doğrusallaştırılması zor bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu anlamda, doğrusal olmayan ve çok sayıda yerel minimum içeren problemler için kullanılan daha karmaşık yöntemler gerektirmektedir. Söz konusu yöntemlerin jeodezideki diğer alanlara uygulanmasının mevcut problemlerin çözümüne katkı sağlayacağı düşünülmekte, bu tür çalışmaların çok-disiplinli çalışmalarda jeodezinin diğer yer bilimleriyle ilişkisini geliştireceği ve jeodezinin çok-disiplinli çalışmalara katılımını arttıracacağı değerlendirilmektedir.

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.

Aktuğ, B., 2006, Jeodezik Ölçüler ile Deprem Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesinde Yöntem Araştırması, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

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, S. McClusky, O. Lenk, B. Aktug, E. Herece, and R. E. Reilinger**, 2001, Kinematics of the Mw7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, s.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. vd.**, 2002, Estimating slip distribution for the Izmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1,RADARSAT and SPOTmeasurements, *Bull. seism. Soc. Am.*, **92**(1), 138–160.
- Gill, P.E., Murray, W., Wright, M.H.**, 1981, Practical Optimization, Academic Pres.
- Kirkpatrick, S., Gelatt C. D.Jr., Vecchi, M. P.**, 1983. Optimization by Simulated Annealing, *Science*, **220**, s.4598, 671-680.
- Meade, B., B. Hager, S. McClusky, R. Reilinger, S. Ergintav, O. Lenk, A. Barka, and H. Özener**, 2002, Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by global positioning system measurements, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, no. 1, s.208–215.
- Okada, Y.**, 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, s.1135-1154.
- Press, F.**, 1965, Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, *J. Geophys. Res.*, **70**.
- Reid, H.F.**, 1911, The Elastic Rebound Theory of Earthquakes, *Bull.Dept.Geol.Univ. Calif.*, **6**, s.413-444.
- Reilinger, R. E., S. Ergintav, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, A., Barka, O. Gurkan, L. Hearn, K. L. Feigl, R. Cakmak**, 2000, Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M_s7.5, Izmit, Turkey earthquake, *Science*, **289**, s.1519–1524.
- Savage J.C., Burford, R.O.**, 1973, Geodetic determination of relative plate motion in central California, *J.Geophys.Res.*, **78**, s.832-845.
- Segall, P., Matthews, M.**, 1988, Displacement Calculations from geodetic data and the testing of Geophysical Deformation Models, *J. Geophys. Res.*, **93**, No. B12, 14,954-14,966.
- Steakeete, 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**, s.97-113.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J.**, 1994, New Emprical Relations among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacements, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **84**, s.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, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, s.1079-1082.