

# ELASTİK YARI UZAY MODELLERİ VE DEPREMSEL KOORDİNAT DEĞİŞİMLERİNE DİNAMİK BİR YAKLAŞIM

( ELASTIC HALF-SPACE MODELS AND A DYNAMIC APPROACH TO SEISMIC DISPLACEMENTS)

**Bahadır AKTUĞ**

## ÖZET

İzmit ve Düzce Depremleri, yer bilimlerine yeni bir ivme kazandırmakla beraber, yerin iç süreçleri ilgili bilgilerimizin ne kadar az olduğunu da göstermiştir. GPS in mevcut hassasiyeti neo-tektomatik süreçlerin sayısal olarak ifade edilmesi sağlasa da, jeodinamik nitelikli ölçü kampanyaları ile sağlanan nokta sıklığı, depremlerden hemen sonra yoğunluk kazanan ölçü çalışmaları dikkate alındığında yetersiz kalmaktadır. GPS ölçü hassasiyeti ile karşılaştırıldığında, birkaç metreye ulaşan ham ko-sismik deplasmanları, kinematik yöntemlerle incelemek, doğal olarak istenilen sonucu vermemektedir. Bu yazıda, deprem kaynaklı yüzey yerdeğiştirmelerinin değerlendirilmesinde aritmetik koordinat farklarını kullanan interpolasyon/extrapolasyon gibi kinematik yaklaşımlar yerine, koordinat farkları yanında farklı disiplinlerden, sismik fay düzlemi çözümleri, jeolojik yüzey kırıkları gözlemleri, sismik moment büyüklüğü hatta paleomanyetik verilerin kullanılmasına olanak tanıyan elastik yarı uzay modelleri ile dinamik bir yaklaşım denenmiştir. Bu yaklaşımla ko-sismik deplasmanları hesaplayan “dislocator” isimli yazılım geliştirilmiş ve İzmit ve Düzce Depremleri ko-sismik etkilerini elastik yarı uzay modelleriyle hesaplayan bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Ölçü ve kestirim değerleri arasındaki farklara ilişkin karesel ortalama hata 2 cm. den küçük olarak bulunmuş, faylardan uzaklaştıkça çok daha iyi değerlerin elde edilebildiği gözlenmiştir. Söz konusu yazılım [http://www.hgk.mil.tr/yeni\\_sayi.html](http://www.hgk.mil.tr/yeni_sayi.html) adresinden temin edilebilir.

## ABSTRACT

İzmit and Düzce Earthquake have given a new momentum to the earth sciences as well as substantiating lack of information about the earth’s interior processes. While the current precision of GPS provides an indispensable quantification, spatial resolution obtained by geodynamics-oriented survey-mode campaigns are inadequate with respect to dense survey activities initiated just after an earthquake. By nature, the kinematic approaches like polynomial fitting, interpolation/extrapolation toward the raw coseismic displacements reaching up to a few meters are far from efficiency when comparing to GPS precision. Instead of kinematic approaches which utilize the simple arithmetically differentiated coordinates, a dynamic approach, which exploits fault mechanisms, enabling incorporating data into solutions from other disciplines like seismic fault-plane solutions, geologic surface rupture observations, seismic moment values even paleomagnetic data as well as measured coordinate differences is put into use. A software called ‘dislocator’ which uses this dynamic approach and computes coseismic displacements out of fault geometry and dislocation is developed and this dynamic approach is applied to coseismic displacements of İzmit and Düzce Earthquakes. The rms value pertaining to the differences of observations and model values was found to less than 2 cm. and it was observed that the differences become much less gradually from the fault lines. The software “dislocator” can be downloaded from [http://www.hgk.mil.tr/yeni\\_sayi.html](http://www.hgk.mil.tr/yeni_sayi.html).

## 1. GİRİŞ

17 Ağustos 1999 İzmit, 12 Kasım 1999 Düzce ve 6 Haziran 2000 Çerkeş depremleri jeodezik noktaların koordinatlarında birkaç metreye varan değişiklikler meydana getirmiştir. Sismik Moment Büyüklüğü ( $M_w$ ), 6.0'dan büyük olan depremlerin nokta koordinatları üzerinde önemli değişiklikler yaptığı bilinmektedir. Depremlerin etki alanına giren bölgedeki tüm noktaların yeniden ölçülmesi olanaklı olmamakla birlikte, yer kabuğu kısa zaman aralıklarında elastik davranış göstermesi nedeniyle, deprem sonrası ölçüsü bulunmayan noktalarda depremlerin etkilerini hesaplamak olanaklıdır. Jeodezik nokta koordinatlarında değişikliğe neden olan fay düzlemi geometrisi ve yerdeğiştirmeler bilinirse, elastik yarı-uzay modelleri ile depremin neden olduğu yüzey yerdeğiştirmeleri hesaplanabilir. Deprem öncesi ve sonrası GPS ölçüsü bulunan noktaların koordinat değişimleri kullanılarak, bu yüzey yerdeğiştirmelerine neden olan fay düzlemlerine ait kayma miktarları (yanal ve düşey atım) ve geometri parametreleri hesaplanabilir. Bu işleme 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. Elastik yarı-uzay modelinin doğrusal olmaması ve Taylor serisi açılımı ile yakınsaması için çok iyi başlangıç değerlerine ihtiyaç duyması nedeniyle, EKK (En Küçük Kareler) gibi doğrusal yöntemlerle, yüzey nokta koordinat değişimlerinden fay düzlemine ilişkin parametrelerinin elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan parametre tahmini (Non-linear Parameter Estimation) yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak yine de, fay parametrelerinin tamamını bir seferde elde edilmesi yerine iki grup halinde değerlendirilmesi gerekir. Bunun nedeni, fay parametreleri geometri ve fay düzlemi yerdeğiştirmesi parametreleri şeklinde iki grup halinde düşünüldüğünde, elastik yarı-uzay modelinde, yerdeğiştirme parametrelerini içeren kısım doğrusal iken, geometri parametrelerini içeren kısım doğrusal olmamasıdır. Buna göre, geometri parametreleri bilindiğinde problem doğrusal hale gelecektir. Ölçü ve model farklarının karelerinin toplamının minimum olması, EKK ile yapılan işlemlerde doğal olarak uygulanırken, doğrusal olmayan parametre kestiriminde koşul olarak uygulanmaktadır. Ters modelleme tekniğinde izlenen temel işlem adımları aşağıdadır :

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

Başlangıç fay parametre değerleri çözümün sağlığı ve iteratif yöntemin yakınsaması açısından büyük önem taşımaktadır. Ölçü değerleri ile elastik yarı uzay modeli ile hesaplanan değerler her aşamada karşılaştırılmalıdır. Modelleme çalışmalarında elde edilen

parametrelerin sismolojik verilerle uyumu ile ilgili olarak yapılabilecek bir kontrol de, sırasıyla (1) ve (2) eşitliklerinde verilen jeodezik moment ( $M_0$ ) ve jeodezik moment büyüklüğünün ( $M_w$ ), sismik fay düzlemi çözümlerindeki sismik moment ve moment büyüklükleri ile karşılaştırılmasıdır.

$$M_0 = \sqrt{ss^2 + ds^2} + 30.10^9 \quad (1)$$

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

Bu eşitliklerde;

ss : Fay Düzlemi üzerinde fay uzanımı yönündeki yer değiştirme,

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

Başlangıç fay parametrelerinin elde edilmesinde ve/veya elde edilen fay parametrelerinin karşılaştırılmasında kullanılabilir yöntemler ise :

- Sismometre verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen sismik fay düzlemi çözümleri (hipocenter, epicenter, fay doğrultusu, yanal atım, düşey atım, derinlik, sismik moment, moment büyüklüğü) : Çoğu fay düzlemi çözümlerinde derinlik sabit ( Örn. 33 km.) alınmaktadır. Sadece yansıyan P dalgalarını (P') kullanan çözümler derinlik hakkında gerçekçi bilgi vermektedir. Belirtilen parametrelerin elde edilebilmesindeki duyarlık, sismik fay düzlemi çözümlerinden deprem anındaki sismometrelerinin deprem merkezine olan uzaklık ve dağılımlarına bağlı olup, strong-motion verileri büyük önem kazanmaktadır /12/.
- Moment büyüklüğü ile fay parametreleri arasında ilişki kuran istatistiki çalışmalar : Hangi büyüklükteki depremlerin tarihsel olarak hangi geometriye sahip oldukları /14/'te verilmektedir.
- Jeolojik Yüzey Gözlemleri : Yüzey kırıklarının (surface) ve yüzey atımlarının tespit edilebilmesi ve ölçülmesi fayın doğrultusu ve atım miktarı ile ilgili önemli bilgiler sağlamaktadır /6/.
- Paleosismoloji ve paleomanyetizma verileri : Birden fazla büyük depreme maruz kalmış jeodezik noktalarda, koordinatların geçmiş depremlerin etkilerinden arındırılması için bu verilerden yararlanılmaktadır. Fay aynası üzerinde özellikle normal faylanma ile ilgili olarak kayma miktarı ve yaş tayini yapılabilmektedir.

Fay düzlemi ile ilgili geometri ve yerdeğiştirme parametreleri elde edildikten sonra bir veya daha fazla depremin yüzey nokta koordinatlarındaki ko-sismik etkilerinin elastik yarı-uzay modelleri ile hesaplanması işlemine Direkt Modelleme (Forward Modeling) adı verilir. Elastik Yarı Uzay Modelleri, genel olarak herhangi bir noktadaki depreme meydana gelen deprem anı yer değiştirmelerinin (kosismik) hesaplanmasında kullanılmasına rağmen, uygun geometri ve fay düzlemi yer değiştirmeleri tanımlanırsa, inter-sismik hızların belirlenmesinde de kullanılabilir. Sadece direkt modelleme ve ölçü-model farkları karşılaştırılarak da fay geometrisi ve fay düzlemi yer değiştirmesi ile ilgili parametreler hesaplanabilir veya

iyileştirilebilir. Bu yöntem temel olarak “deneme-yanılma” ya dayanmakla birlikte, model ile elde edilen yer değiştirmeler, ölçülen yer değiştirmeler ile karşılaştırılarak model parametreleri iyileştirilmektedir.

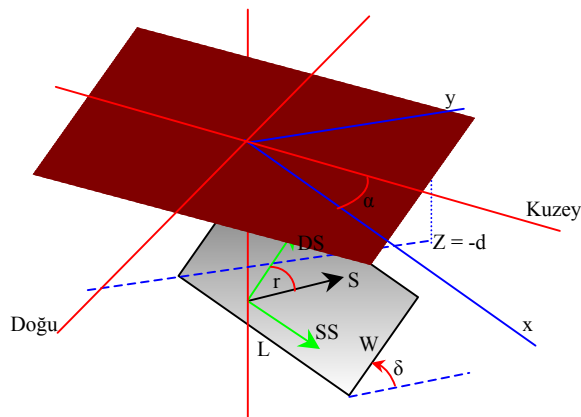
Deprem öncesi ve sonrası GPS veya diğer konum belirleme ölçüleri bulunan noktalarda elde edilecek ko-sismik yer değiştirme değerleri ile başka yöntemler kullanılarak da, ölçüsü olmayan noktalardaki ko-sismik yer değiştirmeler hesaplanabilir. Kinematik yöntemler olarak adlandırılan bu yöntemler (çeşitli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

Bu çalışmada İzmit ve Düzce depremlerinin ko-sismik etkileri üzerinde durulduğundan, /7/ ve /12/ çalışmalarında GPS ve inSAR (Interferometrik Synthetic Aperture Radar) verileri ile oldukça yoğun veriler yardımıyla belirlenmiş fay geometri ve fay düzlemi yer değiştirmesi değerleri doğrudan kullanılarak Direkt Modelleme uygulanmıştır. Bu amaçla yazar tarafından geliştirilen “dislocator” isimli yazılım kullanılarak, İzmit ve Düzce depremlerinin yüzeydeki jeodezik nokta koordinatlarına etkisi elastik yarı uzay modelleri ile hesaplanmaktadır. Söz konusu yazılım [http://www.hgk.mil.tr/yeni\\_sayi.html](http://www.hgk.mil.tr/yeni_sayi.html) adresinden temin edilebilir.

Bundan sonraki bölümlerde sırasıyla, fay geometrisi ve fay düzlemi yerdeğiştirmesi detaylı olarak açıklanmakta, elastik yarı uzay modelleri ve analitik denklemleri verilmekte ve son olarak, aynı zamanda model uyumunu iyileştirmek için gridleme yöntemi de kullanılmış ve test edilmiş olan İzmit ve Düzce ko-sismik yerdeğiştirme modeli ve uygulama sonuçları sunulmaktadır.

## 2. FAY GEOMETRİSİ VE KAYMA

Standardı sağlamak amacıyla, izleyen bölümlerde fay düzlemi üzerindeki yer değiştirmeye (dislocation) “dislokasyon”, yer değiştirme nedeniyle yüzeydeki noktalarda oluşan yer değiştirmeye (displacement) “deplasman” denilecektir. Dislokasyon, fay düzlemi üzerinde 2 boyutlu bir vektör olarak düşünülebilir. Bu vektöre kayma vektörü (slip), fay düzleminin üst kenarından itibaren saat istikametinde ölçülen açığa ise, kayma açısı (rake) adı verilir.



- S : Kayma Vektörü
- $\delta$  : Eğim Açısı (dip angle)
- $\alpha$  : Fay doğrultusunun azimutu (strike)
- d : Fay Düzleminin derinliği
- L : Fay Düzleminin Uzunluğu
- W : Fay Düzleminin Genişliği
- SS : Kayma vektörünün fay doğrultusu yönündeki bileşeni (strike-slip)
- DS : Kayma vektörünün fay doğrultusuna dik yöndeki bileşeni (dip-slip)
- x,y : Fay düzlemi koordinat sistemi eksenleri. x, fay doğrultusu boyunca, y, ona dik doğrultuda olacak şekildedir.
- r : Kayma vektörünün yönü (rake). Bu açı fay düzlemi üzerindeki yerdeğiştirmeyi bileşenlerine ayırmak için kullanılabilir.  $DS = S \cdot \cos(r)$ ,  $SS = S \cdot \sin(rake)$ .

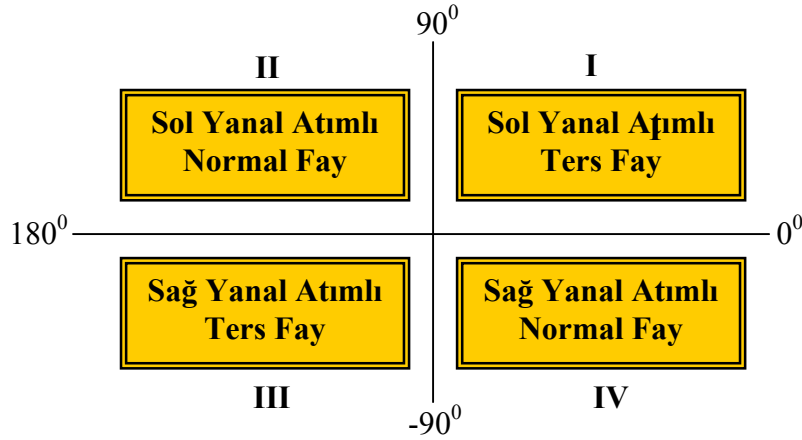
### Şekil-1. Fay geometrisi ve fay üzerindeki yer değiştirmeler

Kayma, fay doğrultusu ve fay düzlemi üzerinde ona dik doğrultuda olmak üzere iki bileşen halinde incelenmektedir. Bunlar fay doğrultusu yönündeki yanal atım (strike-slip) ve buna dik doğrultudaki düşey atım (dip-slip)'dir. Ayrıca fay düzlemi üzerindeki açılmayı ifade eden açılma (opening, tensional slip) da tanımlanabilir. Derinlik, fayın eğim açısının ölçüldüğü noktanın derinliği olduğundan, eğim açısı değiştiğinde fay düzlemi dönmekte, dolayısıyla derinlik değişmektedir. Fay geometrisi yedi parametre ile tanımlanabilmektedir. Fay geometrisi ve fay üzerinde yer değiştirme tanımında kullanılan parametreler Tablo-1'de verilmektedir.

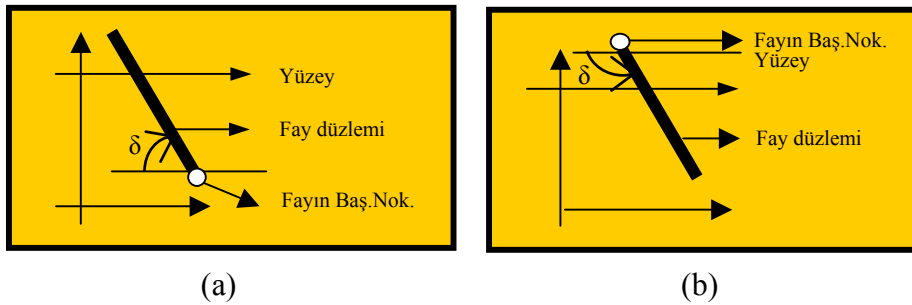
Tablo 1. Fay Geometrisine İlişkin Parametreler

1	w (Fay düzleminin genişliği)	6	$\varphi_2$ (Fayın diğer uç noktasının enlemi)
2	d (Fay başlangıç noktasının derinliği)	7	$\lambda_2$ (Fayın diğer uç noktasının boylamı)
3	$\varphi_1$ (Fay başlangıç noktasının enlemi)	yada	
4	$\lambda_1$ (Fay başlangıç noktasının boylamı)	6	$\alpha$ (Fay doğrultusunun azimutu)
5	$\delta$ (Fay başlangıç noktasının eğimi)	7	L (Fay düzleminin uzunluğu)

Eğim açısı aldığı farklı değerlere göre fayın niteliği değişmektedir. Eğim açısının ( $\delta$ ) farklı değerlerine göre yapılan fay tanımlaması Şekil-2'de verilmektedir. Fayın niteliği dışında; derinlik, eğim açısının ölçüldüğü noktadan itibaren ölçüldüğünden, farklı eğim açıları ile farklı değerler alabilmektedir. Bu durum aynı geometri ve nitelikteki fay mekanizmalarının, farklı değerler ile tanımlanabilmesini sağlamaktadır. Buna ilişkin bir örnek, Tablo-2 ve Şekil-3'de verilmektedir.



Şekil-2. Eğim Açısı (Dip angle)  $\delta$ 'nın farklı değerlerine göre değişen fay niteliği



Şekil-3. (a) Pozitif (b) negatif eğim açısına ( $\delta$ ) göre fay düzleminin dönmesi

Şekil-1’de verilen fay geometrisi ve yer değiştirmeleri sol yanal atımlı, ters bir faya göre yapılmıştır. Diğer ifade ile verilen SS ve DS değerleri pozitif olarak kullanıldıklarında, bu türde bir fay mekanizmasını ifade eder. Kullanılan eğim açısının farklı değerleri fayın niteliğini değiştirebileceği gibi DS ve SS değerlerinin pozitif veya negatif olma durumları da fayın niteliğini değiştirmektedir.

Tablo 2. Eğim açısı, derinlik ve kayma vektörlerinin ilişkisi

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

### 3. ELASTİK DİSLOKASYON TEORİSİ VE ELASTİK YARI UZAY MODELLERİ

Elastik dislokasyon teorisini yerkabuğuna uygulanması ile ilgili bugüne dek çeşitli çalışmalar yapılmıştır /1,8,10,11,13/. Gerek analitik gerekse de nümerik yöntemlerde, problemi daha basit hale getirmek amacıyla yerkabuğu bir bütün-uzay (whole-space) yerine yarı-uzay (half-space) kabul edilmektedir. Yarı-uzay, bütün-uzaydan yüzeylerinden herhangi birinde, normal gerilim (normal stress) ve yüzey kuvvetlerinin (traction) sıfır olduğu bir blok olarak düşünülebilir. Yeryüzünü, yüzey kuvvetlerinin ve yüzey gerilimlerinin sıfır olduğu bir yarı uzay olarak kabul etmek hesap yükünü yaklaşık üç kat azaltmaktadır. Bütün-uzay yer bilimlerinde hemen hemen hiç kullanılmamakla birlikte, bu yaklaşımın uygulama alanına bir örnek olarak toprak mekaniği ve uzunluğuna göre çok derinde bulunan yapıların modellenmesi verilebilir. Pratikte yarı-uzay kavramı işlem yükünü oldukça hafifletmekle birlikte, yine de problemi bir bütün uzaydan, yarı-uzaya indirgemek bazı işlemleri gerektirmektedir /8/. Bu işlemler;

- Noktasal kaynağın bir kopyasını (image source), noktasal kaynağın yer yüzeyine göre simetrik bir konumuna yerleştirmek. Bu işlem ile yüzey kuvvetleri (traction) ters işaretli olduğundan toplam yüzey kuvveti değeri sıfır olarak sınır koşulunu sağlayacak, fakat bu durumda yüzey gerilimi iki katına çıkacaktır.
- Birinci adımda iki katına çıkan yüzey gerilimini ortadan kaldırmak için Steketee, /13/’de verilen Galerkin vektörü kullanmayı önermiştir. Bu durumda toplam yüzey gerilim değeri sıfır olacak ve sınır değeri koşulları sağlanacaktır. Bu şekilde bütün-uzay problemi, bir yarı-uzay problemine dönüşür.

Noktasal bir kuvvetten kaynaklanan deplasman için temel eşitlik aşağıda verilmektedir.

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

burada,  $\rho$  yoğunluğu,  $u_i, f_i, x_i$ , sırasıyla deplasman, birim hacim için iç kuvvetler ve konumu,  $\tau$  gerilimi ve  $t$  ise zamanı ifade etmektedir. Gerilim ifadesindeki tekrarlı indeks Einstein toplam kuralını (summation convention) göstermektedir. Gerilim (stress) ve gerinim (strain) ile gerinim ve deplasman arasındaki temel bağıntılar (4),(5) ve (6)'da verilmektedir.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i,j : 1,2,3 \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = c_{ijpq} \varepsilon_{pq} \quad i,j,p,q : 1,2,3 \quad (5)$$

burada,  $\varepsilon$  gerinimi,  $c$  ise reolojik sabitleri ifade etmektedir. İzotropik bir blok için  $c$ ,

$$c_{ijpq} = \lambda \delta_{ij} \delta_{pq} + \mu (\delta_{ip} \delta_{jq} + \delta_{iq} \delta_{jp}) \quad (6)$$

şeklinindedir. Burada  $\delta$  Kronocker Deltası,  $\lambda$  ve  $\mu$  ise Lamé elastik sabitleridir. (4),(5) eşitlikleri (6) ve (3) eşitliklerinde yerine konulduğunda, (3) temel eşitliğinden (7)'de verilen eşitlik elde edilir.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = f_i + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (7)$$

Bu diferansiyel denklem sisteminin çözümü ile ilgili örnekler birçok sismoloji kitabında mevcuttur /1,8/. Bunun için genel olarak /1/ de verilen Green fonksiyonları yada /13/ te verilen Somigliana Tensör Çözümü kullanılmaktadır /8/. Noktasal bir kaynak,  $\Delta u_j$  ( $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ ) 'nun dislokasyonu nedeniyle,  $\Sigma$  izotropik bloğunda oluşan deplasman alanı  $u_i$  ( $x_1, x_2, x_3$ ),

$$u_i = \frac{1}{F} \int \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left( \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (8)$$

ile verilir /13/. Burada  $\delta_{jk}$  Kronocker deltası,  $\lambda$  ve  $\mu$  Lamé elastik sabitleri,  $v_k$   $d\Sigma$  yüzeyine ait yüzey normalinin  $k$ 'nci bileşeni,  $u_i^j$  ise, ( $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ ) konumundaki noktasal kaynak ile oluşan  $u_i$  ( $x_1, x_2, x_3$ ) deplasmanının  $i$ 'nci bileşenidir /10/.

Noktasal kaynağın sebep olduğu deplasman alanından, dörtgen bir alanın sebep olacağı deplasman alanını elde etmek için, (8) eşitliğinin açılımından elde edilecek analitik eşitliklerin /11/ fay düzleminin uzunluğu ( $L$ ) ve genişliği ( $W$ )'ne bağlı integral çözümü yapmak gereklidir.

Buna göre;

$$\int_x^{x-L} d\xi \int_p^{p-W} d\eta \quad (9)$$

olur. Burada,  $x$  ve  $p$  fay düzleminin Şekil-1'de verilen koordinatlarını;  $d\xi$  ve  $d\eta$  ise, noktasal kaynağın elastik yarı-uzay dislokasyon modeline göre fay düzlemi üzerindeki koordinatlarına bağlı deplasman fonksiyonlarını göstermektedir. Analitik denklemleri kapalı halde ifade etmek için, (9) integrali aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p-W) - f(x-L, p) + f(x-L, p-W) \quad (10)$$

Dörtgensel bir alan için (fay düzlemi) (8)'de verilen eşitliğin açılımından elde edilen analitik denklemler, (11-21) eşitliklerinde verilmektedir. Kayma vektörü bileşenlerinin ( $U_1, U_2$ ) sebep olduğu yüzey deplasmanlarını ( $u_x, u_y, u_z$ ), Şekil-1'de verilen fay düzlemi koordinat sistemindeki bu eşitlikler yardımıyla (10) eşitliğinin integralini alarak ifade etmek olanaklıdır. Buna göre elde edilen yanal ve düşey atım eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

#### Yanal Atım

$$u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \quad (11)$$

$$u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{y' q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \quad (12)$$

$$u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{d' q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \quad (13)$$

#### Düşey-Atım

$$u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{q}{R} + I_3 \sin \delta \cdot \cos \delta \right] \quad (14)$$

$$u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{y' q}{R(R+x')} + \cos \delta \cdot \tan^{-1} \frac{x' \eta}{R+\eta} - I_1 \sin \delta \cdot \cos \delta \right] \quad (15)$$

$$u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{y' q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \cdot \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cdot \cos \delta \right] \quad (16)$$



$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{R + d'} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R + \eta)] - I_3 \quad (18)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{\cos \delta} \frac{y'}{R + d'} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \quad (19)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} [\ln(R + d') - \sin \delta \cdot \ln(R + \eta)] \quad (20)$$

$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \frac{\tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{x'(R + X) \cos \delta}}{\cos \delta} \quad (21)$$

- $U_i$  : Kayma vektörü (slip) bileşenleri  
 $\delta$  : Eğim Açısı (dip angle)  
 $\mu, \lambda$  : Lamé sabitleri  
 $y', d'$  : Fay düzleminin noktanın orijini ifade ettiği ve fay düzlemine paralel bir koordinat sistemindeki koordinatları  
 $\xi, \eta, q$  : Fay düzlemi başlangıç noktasının fay düzlemi koordinat sistemi üzerindeki koordinatları  
 $R$  : Fay başlangıç noktasının orijine olan uzaklığı  
 $X$  : Noktanın fay doğrultusu yönündeki koordinatı  
 $U_i$  :  $i=1,2,3$  şeklinde sırasıyla SS, DS ve açılma (opening)  
 $u_i$  :  $i=1,2,3$  şeklinde sırasıyla fay doğrultusu, eğim açısı ve fay düzlemine dik doğrultulardaki yer değiştirmeler

#### 4. UYGULAMA : İZMİT VE DÜZCE DEPREMLERİ KO-SİSMİK YER DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ

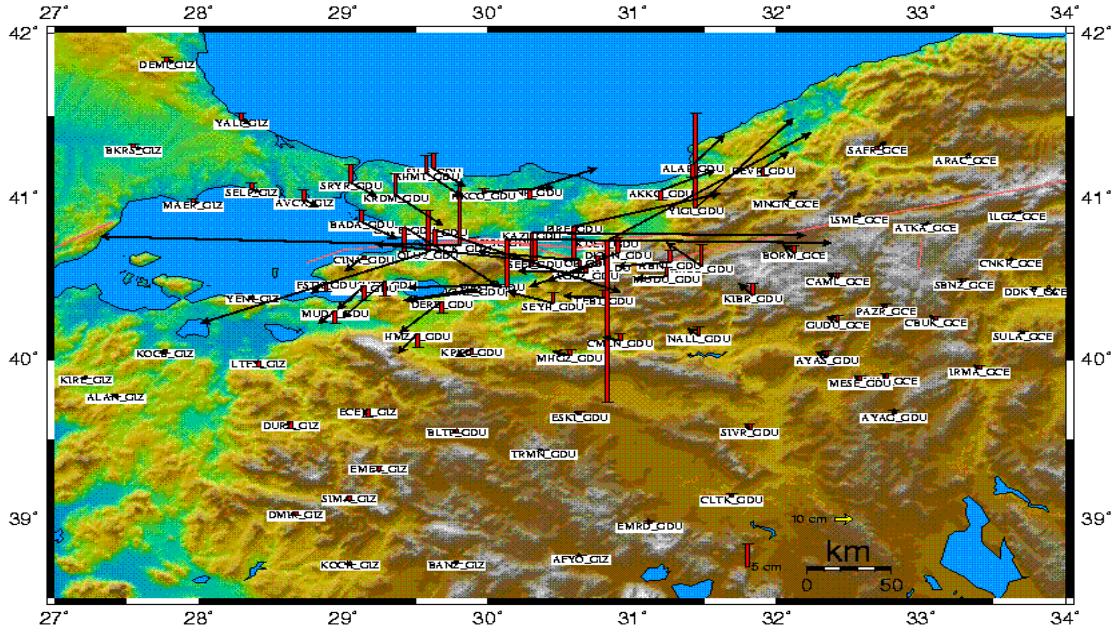
17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 tarihlerinde ardarda meydana gelen İzmit ve Düzce depremleri başta Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) olmak üzere bölgedeki tüm yatay ve düşey kontrol nokta koordinatlarında önemli değişimlere neden olmuştur. Söz konusu değişimlerin 1997 TUTGA ve daha önce çeşitli projeler kapsamında tekrarlı olarak gözlenmiş noktalar yardımıyla birkaç metreye ulaştığı tespit edilmiştir /2,4,5,7,12/. İzmit ve Düzce Depremleri sonrasında yapılan GPS ölçüleri ile belirli noktalara ait koordinatlar yenilense de, söz konusu depremlerin çok geniş bir alanda etkili olması nedeniyle, bölgedeki TUTGA-99 noktalarının tamamında deprem sonrası ölçü yapılamamış ve bu noktalarda oluşan ko-sismik deformasyon, yapılan modelleme çalışmaları ile belirlenmiştir. Bölgede yer alan, ulusal yatay kontrol ağı noktalarının çok büyük bölümünde bu iki büyük depremle kosismik deplasmanlar oluşmasına rağmen, deprem öncesinde GPS ölçümleri olmaması nedeniyle bu noktalardaki ko-sismik deplasmanların doğrudan ölçü ile belirlenmesi oldukça güçleşmiştir.

İzmit ve Düzce depremleri öncesine ait tekrarlı GPS ölçüleri, depremler sonrasında yapılan yoğun GPS ölçüleri ile birlikte değerlendirilerek, söz konusu depremlerin nokta koordinatları



fay düzlemi modelleri kullanılmıştır. /5/ ve /12/ 'de verilen, İzmit ve Düzce Fay geometri ve dislokasyon değerleri Tablo-3'de verilmektedir.

İkinci aşamada ölçü noktalarında ölçülen ve modellenen toplam yer değiştirmelerin (ko-sismik + post-sismik) farkları ( $d_{\text{fark}} = \hat{d}_{\text{ölçü}} - d_{\text{model}}$ ) eşitliği ile elde edilmiş olup bu farklar Şekil-6'da, farklara ilişkin istatistikler Tablo-4'de verilmektedir. Hesaplanan bu farklar bölgede oluşturulan 2.8' x 4.2' grid köşelerinde en küçük eğrilik yöntemi ile interpolate edilmiştir.



Şekil-5. İzmit ve Düzce depremlerinin model ko-sismik etkilerini içeren yer değiştirme değerleri

Tablo-3. İzmit ve Düzce Fay Model Parametreleri

	$\Lambda_1$ (°)	$\Phi_1$ (°)	$\alpha$ (°)	D (km)	$\delta$ (°)	L (km)	W (km)	SS (m)	DS (m)
Düzce	31.08	40.76	88.14	0.0	-51.35	28.45	17.20	3.76	0.76
İzmit (#1)	29.41	40.68	86.29	-0.08	-90.12	97.34	16.03	2.80	0.28
İzmit (#2)	30.67	40.69	71.36	-0.10	-63.80	24.50	18.74	1.64	0.54

Üçüncü aşamada ise toplam yerdeğiştirme değeri bilinmeyen noktalarda 1998.62 ile 2000.45 arasındaki dönemde oluşan toplam yerdeğiştirme (ko-sismik + post-sismik) değeri ( $\hat{d}_{\text{ölçü}}$ ); bu noktanın enlemi ve boylamı kullanılarak, birinci aşamada geliştirilen dislokasyon modelinden yararlarla  $d_{\text{model}}$  değeri ve sonra da ikinci aşamadaki grid veriden yararlarla ölçü ve model farkı değeri  $\hat{d}_{\text{fark}}$  hesaplandıktan sonra ;

$$\hat{d}_{\text{ölçü}} = d_{\text{model}} + \hat{d}_{\text{fark}} \quad (4)$$

eşitliği ile bulunmuştur. İnterpolasyon işlemi ölçü noktalarında test edilmiş olup karşılaştırmada bulunan istatistikler Tablo-3'de verilmektedir. Gridleme için en küçük eğrilik

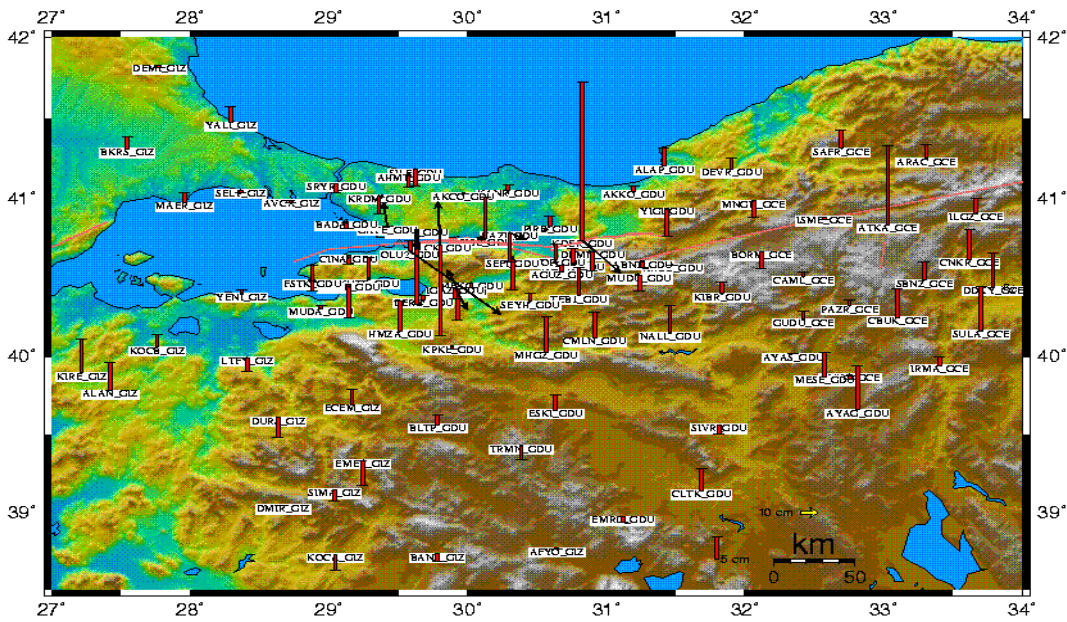


yöntemi uygulanırken, bu yöntemde kullanılan ‘sınır gerilimi ve ‘iç gerilim’ değerleri 0.2 değerinden itibaren 0’a kadar alınarak uygulama yapılmış ve bulunan değerler arasındaki farkların ihmal edilebilir mertebede olduğu tespit edilmiştir. ‘Sınır gerilimi’ ve ‘iç gerilimi’ değerleri 0.2, ‘yalınsama faktörü’ 1 olarak alınmış ve gridleme işlemi sırasında İzmit ve Düzce depremlerinde oluşan yüzey kırıkları koşulları alınarak interpolasyon uygulanmıştır.

Tablo-4: Ölçü-model farkları ( $d_{\text{fark}}$ ) ve bu farkların grid veriden interpolate edilenlerden olan farklarına ( $\hat{d}_{\text{fark}}$ ) ait istatistikler (metre)

İstatistikler	$d_{\text{fark}} = \hat{d}_{\text{ölçü}} - d_{\text{model}}$			$d_{\text{fark}} - \hat{d}_{\text{fark}}$		
	Doğu-Batı	Kuzey-Güney	Yukarı	Doğu-Batı	Kuzey-Güney	Yukarı
Minimum	-0,130	-0,272	-0,203	-0,016	-0,118	-0,033
Maksimum	0,275	0,320	0,354	0,148	0,081	0,155
Ortalama	0,005	0,005	0,011	0,002	-0,002	0,002
Standart Sapma	$\pm 0,043$	$\pm 0,065$	$\pm 0,064$	$\pm 0,017$	$\pm 0,018$	$\pm 0,019$
Rms	$\pm 0,043$	$\pm 0,066$	$\pm 0,064$	$\pm 0,018$	$\pm 0,019$	$\pm 0,019$

Model ile yapılan kestirimlerin doğruluğunu test amacıyla yapılan çalışmada, deprem sonrası GPS ölçüsü bulunan 91 noktanın, İzmit ve Düzce Depremleri nedeniyle maruz kaldığı ko-sismik etkiler ile bu noktalarda elde edilen model değerleri karşılaştırıldığında, model sonuçlarının özellikle yatay koordinatlarda son derece iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ancak fay hattının, deprem bölgesinde gerçekte bir hat değil, bir alanı ifade etmesi, diğer bir ifade ile deformasyon zonu olması, farklı etkilerin (zemin sıvılaşması, lokal çökmeler, homojen olmayan kabuk reolojisi) de dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, faya çok yakın bölgedeki yüzey deplasmanlarının elastik modeller ile yeterince modellenemeyeceği gözden kaçırılmamalıdır.



Şekil-6: Ölçü ve model yer değiştirmeleri arasındaki farklar. Sarı renkli oklar yatay hareketleri, kırmızı renkli düşey çizgiler

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, elastik yarı-uzay modelleri ile depremler sonrası GPS veya diğer bir yöntemle ölçülmemiş noktalarındaki ko-sismik etkilerin nasıl hesaplanacağı incelenmiştir. Depremlerin hemen sonrasında başlatılan kampanya nitelikli GPS gözlemlerinin, depremlerin etki alanına giren tüm yatay ve düşey kontrol noktalarından deprem etkisini giderebilecek nicelikte olması beklenemez. Özellikle, ulusal datumda devam eden haritacılık ve mühendislik amaçlı çalışmalar ile farklı epoktaki sıklaştırma çalışmalarında; kullanılan noktaların deprem öncesi GPS ölçüleri bulunmadıkça, koordinatlardan ko-sismik/post-sismik etkileri gidermenin doğrudan bir yolu bulunmamaktadır. Bu amaçla sadece aralarında yeterli nitelik ve nicelikte hem ulusal sistemde hem de TUTGA sisteminde noktalar bulunan karma ağların tesisi düşünülebilir.

Marmara Bölgesinde ulusal sistemdeki noktaların 1940'lardan itibaren birçok depreme maruz kaldıkları bilinmektedir /6/. Bu depremlerin bir kısmının aletsel döneme rastlaması ve jeolojik ölçümler, söz konusu depremlere ait fay parametrelerinin oluşturulmasını yeterli sayılabilecek bilgiyi sağlamaktadır. Ancak buradaki temel sorun, nispeten düşük hassasiyetteki yersel gözlemlerle tesis edilmiş yatay kontrol noktalarının, tesis, ölçü epokları ve üretilmesinde kullanılan diğer yersel noktalara ait bilgilerin ayrı ayrı değerlendirilmesi zorunluluğudur. Sadece inter-sismik bileşenin yılda yaklaşık 2.5 cm. olduğu düşünüldüğünde, inter-sismik, ko-sismik ve post-sismik olguların, yeterli tekrarlılıkta ölçüleri bulunmayan yersel noktalarda birbirlerinden ayrılmasının oldukça güç ve zahmetli olacağı açıktır.

Elastik yarı-uzay modelinin temel girdileri olan fay parametrelerinin olabildiğince fazla veri grubundan elde edilmesi, bu fay parametrelerinin gerçeğe yakınlığı açısından önemli rol oynayacaktır. Bu anlamda birbirini tamamlayan InSAR ve GPS verilerinin yanında tekrarlı nivelman ölçülerinin de bulunduğu ölçü kümesinin daha sağlıklı sonuç vereceği düşünülmektedir.

Elastik yarı-uzay modellerinin sadece fay düzlemi dislokasyonları için değil, uygun derinlik ve sınır değerleri tanımlandığında, intersismik hız alanının dinamik olarak kestiriminde de kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Ülkemizde pek yaygın olmamakla birlikte, noktasal dislokasyon kaynağı içeren volkanik deformasyonlar ile maden çökmesi gibi çalışmalarda da faydalı olabileceği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- /1/ Aki, K. ve Richards, P.G. : Quantitative Seismology Theory and Methods, W.H. Freeman and Co., San Francisco, 1980.
- /2/ Aktug, B., A. Barka, R. Bürgmann, R. Cakmak, S.Ergintav, S.,K.L. Feigle, O.Gurkan, L.Hearn, L., O.Lenk, S.McClusky, H. Meteris, H. Ozener, R.E.Reilinger, M.N.Töksoz, N.Yalçın, GPS Constraints on Coseismic and Early Postseismic Deformation for the Mw 7.4, 17 August 1999, Izmit, Turkey Earthquake, The 1999 Izmit and Duzce Earthquakes: preliminary results, Istanbul Technical University Press, pp.283, 2000.

- /3/ Ayhan, M.E., C. Demir, O. Lenk, A. Kılıçoğlu, B. Aktuğ, M. Açıkgöz, O. Fırat, Y.S.Şengün, A. Cingöz, M.A. Gürdal, A.İ.Kurt, M. Ocak, A. Türkezer, H. Yıldız, N. Bayazıt, M. Ata, Y. Çađlar, A. Özerkan : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A), Harita Dergisi Özel Sayı, No.16, Ankara, Mayıs, 2002.
- /4/ Ayhan, M.E., O. Lenk, C. Demir, A. Kılıçoğlu, M. Kahveci, A. Türkezer, M. Ocak, M. Açıkgöz, A. Yıldırım, B. Aktuğ, Y.S.Şengün, A.İ.Kurt, O. Fırat : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999 (TUTGA-99), Teknik Rapor, Hrt.Gn.K.lığı, Ankara, 2001b.
- /5/ Ayhan, M.E., R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, B. Aktuğ, E. Herece, R.E. Reilinger : Kinematics of the Mw = 7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey Earthquake. Geophysical Research Letters, 28, 2, 367 – 370, 2001a.
- /6/ Barka, A. : Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967, Bull. Seismol. Soc. Am., 86, 1238 – 1254, 1996.
- /7/ Bürgman, R., M. E. Ayhan, E. J. Fielding, T. J. Wright, S. McClusky, B. Aktuğ, C. Demir, O. Lenk, A. Türkezer : Deformation During the 12 November 1999, Düzce, Turkey Earthquake, from GPS and InSAR data, Bull. Seismol. Soc. Am. (Baskıda), 2002.
- /8/ Cohen, S.C. : Numerical Models of Crustal Deformation in Seismic Zones, Advances in Geophysics, Vol.41, Academic Press, 1999.
- /9/ Demir, C., B. Aktuğ, M. Açıkgöz : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA99A), 1992-2001 Yılları GPS Ölçülerinin Birleřtirilmesi, TUJK 2002 Yılı Tektonik ve Jeodezik Ađlar Çalıştay, İznik, 2002.
- /10/ Okada, Y. : Surface Deformation Due to Shear And Tensile Faults In A Half-Space. Bull. Seismol. Soc. Am. Vol.75, 1135-1154, 1985.
- /11/ Press, F. : Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, J.Geophys.Res.70, 1965.

- /12/ Reilinger, R. E., S. Ergintav, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, A. Barka, O. Gürkan, L. Hearn, K.L. Feigl, R. Cakmak, B. Aktug, H. Ozener, M.N. Toksöz : Coseismic And Postseismic Fault Slip For The 17 August 1999, M=7.5, İzmit, Turkey Earthquake, Science, 289, 1519 – 1524, 2000.
- /13/ Stekeete, J.A. : On Volterra's Dislocations in a semi-infinite elastic medium, Can.J.Phys. 36, Canada, 1958.
- /14/ Wells, D.L., K.J.Coppersmith : New Empirical Relations among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacements, Bull.Seismol.Soc.Am.,84, 974-1002, 1994.