Yerbilimleri, 22 (2000), 21-31
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

GPS ölçümlerine dayanılarak Türkiye'nin yıllık birim deformasyon ve gerilim hızı dağılımının değerlendirilmesi

Assessment of annual strain rate and stress rate distributions of Turkey from GPS measurements

Ömer AYDAN*
Princeton University, Dept. of Operations Research and Financial Engineering, Princeton, 08544, USA

ÖZ

Bu çalışmada, GPS ölçümlerinden elde edilen yerdeğiştirme hızlarından yararlanılarak yerkabuğunun yeryüzüne teğet düzlemi içersinde oluşan birim deformasyon hız tensörü ile gerilim hız tensörünün tayini için önerilen bir yöntem sunulmuş ve Türkiye milli sınırları içinde yapılan GPS ölçümlerine bu yöntem uygulanmaştır. Elde edilen asal birim deformasyon hız ve gerilim hız hesaplama sonuçları sunularak, Türkiye'de deprem oluşumu açısından önemi tartışılmıştır. Ayrıca GPS'ten elde edilen sonuçlar ile Türkiye'nin genel plaka tektoniğinden beklenen yerdeğiştirme durumu karşılaştırılmıştır. Hesaplanan asal gerilim hız yönleri yerinde yapılan gerilim ölçümlerinden elde edilen en büyük yatay gerilim yönleri ve deprem odak mekanizması çözümlerinden elde edilen P-T eksenlerinin yönleri ile karşılaştırılarak bu çalışmada elde edilen sonuçların doğruluğu irdelenmektedir. Hesaplanan sonuçlardan gerilim ve birim deformasyonlar Türkiye'nin aktif fay zonları örneğin Kuzey Anadolu Fayı, Doğu Anadolu Fayı, Kuzey Doğu Anadolu fayı ve Batı Anadolu Fay Sistemi boyunca yoğunlaştığı görülmüştür. GPS aracılığı ile ölçülen değişik istasyonların yerdeğiştirme yönleri ve büyüklüğü genellikle Türkiye'nin tektonik modeli ile uyum içindedir.

Anahtar sözcükler: Birim deformasyon, gerilim, tektonik, yerdeğiştirme, GPS

ABSTRACT

A method to compute the strain rate and stress rate in the tangential plane to the surface of the earth's crust is presented and it is applied to the GPS measurements in Turkey. Then, the computed distributions of principal strain and stress rates of Turkey are presented and their implications are discussed. Furthermore, the general tendency of deformation pattern obtained from GPS measurements are compared with that expected from the tectonic model of Turkey. Finally, the directions of principal stress rate are compared with those obtained from in-situ stress measurements and P-T axes of earthquake focal plane solutions. The computations showed that the principal strain and stress rate concentrations occur along the active fault systems of Turkey such as North Anatolian Fault (NAF), East Anatolian Fault (EAF) and West Anatolian Fault System (WAFS). The measured deformation pattern by the GPS is generally consistent with that from the tectonic model of Turkey. The directions of principal stress rates are generally in good agreement with those obtained from in-situ stress measurements and focal plane solutions of earthquakes.

Key Words: Strain, stress, tectonics, displacement, GPS

GİRİŞ

Depremin neden olduğu can ve mal kayıpları ülkeleri hem maddi yönden, hem de manevi yönden oldukça etkilemektedir. Bu nedenle depremin oluşum zamanı ile yerinin tahmini için dünyanın bir çok ülkesinde bu konuda oldukça yoğun araştırma ve çalışmalar sürdürülmektedir. Japonya'daki Tokai Deprem Projesi ve ABD'de Parkfield deprem projesi gibi

* Asıl görev yeri: Tokai University, Faculty of Marine Science and Technology, Department of Marine Civil engineering, Shimizu, Shizuoka, Japan

sürdürülmektedir. Japonya'daki Tokai Deprem Projesi ve ABD'de Parkfield deprem projesi gibi çalışmalar bunun tipik örnekleridir. Deprem tahmini için değişik yöntemler denenmekte ve bu amaçla yerkabuğunun manyetik ve elektrik akım hızlarının değişimi, radon gazı çıkışındaki değişimler, atmosferdeki bulut oluşumu, içme ve tarım su kuyularındaki su seviyesinin değişimi, kaplıca ve kaynakların su debilerindeki değişimler ve canlıların anormal davranışlarından yararlanılmaya çalışılmaktadır. Zaman zaman bu yöntemlerden başarılı sonuç alınmakla birlikte, yanlış bir tahmin hem ekonomik yönden zararlı olmakta, hem de halkın bilim dünyasına olan güvenini sarsmaktadır. Böyle bir olay Çin'de meydana gelen Tangshan depreminden önce yaşanmıştır. Yerkabuğunda ki gerilimin büyüklüğünün zamanla değişimi ile yerkabuğdaki kayaçların dayanım özellikleri bilinebilirse, depremin tahmininin en etkin bir şekilde mümkün olacağını söylemek yanlış olmaz. Hasar verici depremlerin oluşum derinliği genellikle 20-30 km olduğu düşünülürse, bu tür ölçümleri gerçekleştirmek oldukça zor olup, bugüne kadar dünyanın hiçbir yerinde böyle bir ölçüm yapılmış değildir. Son yıllarda uydular aracılığı ile yerkabuğunu oluşturan plakaların yerdeğiştirme miktarlarının ölçümü mümkün hale gelmiş olup, bu yenilikten yararlanılarak yerkabuğunun en azından teğetsel düzlemde zamana bağlı olarak birim deformasyon hızı hesaplanabilmektedir. Bugüne değin bu ölçümlerden yararlanılarak yıllık gerilim hızı hesaplanması konusunda yazarın bildiği bir araştırma yapılmış değildir. Bu çalışmada, GPS ölçümlerinden yararlanılarak Türkiye milli sınırları içinde oluşan birim deformasyon ve gerilim hızlarının dağılımlarını hesaplayan bir yöntemin esasları sunulmuş, daha sonra bu yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmiş ve tartışılmıştır.

GPS YÖNTEMİ

Global Positioning System (Uydu Konumlama Sistemi) veya GPS olarak adlandırılan sistem, dünya çevresinde belirli bir yörüngede ve yükseklikte dönen uydulardan oluşmaktadır (Şekil 1). Bu uydulardan gönderilen sinyalleri algılayan ve kayıt eden istasyonların uzaysal konumlarını ölçümlerden geometrik olarak hesaplamak mümkün olmaktadır. Değişik uygulama alanlarında ölçüm sonuçları farklı bir şekilde kullanılmaktaysa da plaka tektoniğinde GPS kullanımı için yeryüzüne sabitlenmiş istasyonların uzaysal konumlarındaki değişik zaman aralıklarında ölçülen değişme miktarından yararlanılmaktadır. Son yıllarda bu konuyla ilgili teknolojik yeni gelişmeler sistemi kullanışlı ve ekonomik duruma getirmiştir. Plakaların yerdeğiştirme miktarı milimetre cinsinden ölçülmesi gerektiğinden, sağlıklı bir ölçüm için, ölçüm alınan istasyona o anda en azından 4 uydudan sinyallerin ulaşabilir olması gerekmektedir (Şekil 2). Her bir uydudan gönderilen sinyallerin ulaşma zamanı ile uyduların o andaki konumlarını gözönüne alınarak, geometrik olarak istasyonun uzaysal konumu hesaplanmaktadır. Farklı zamanlarda alınan ölçümler arasında saptanan herhangi bir değişim, o istasyonun uzaysal konumunu değiştirdiği şeklinde düşünülmektedir.

BİRİM DEFORMASYONU VE GERİLME HIZLARINI HESAPLAMA YÖNTEMİ

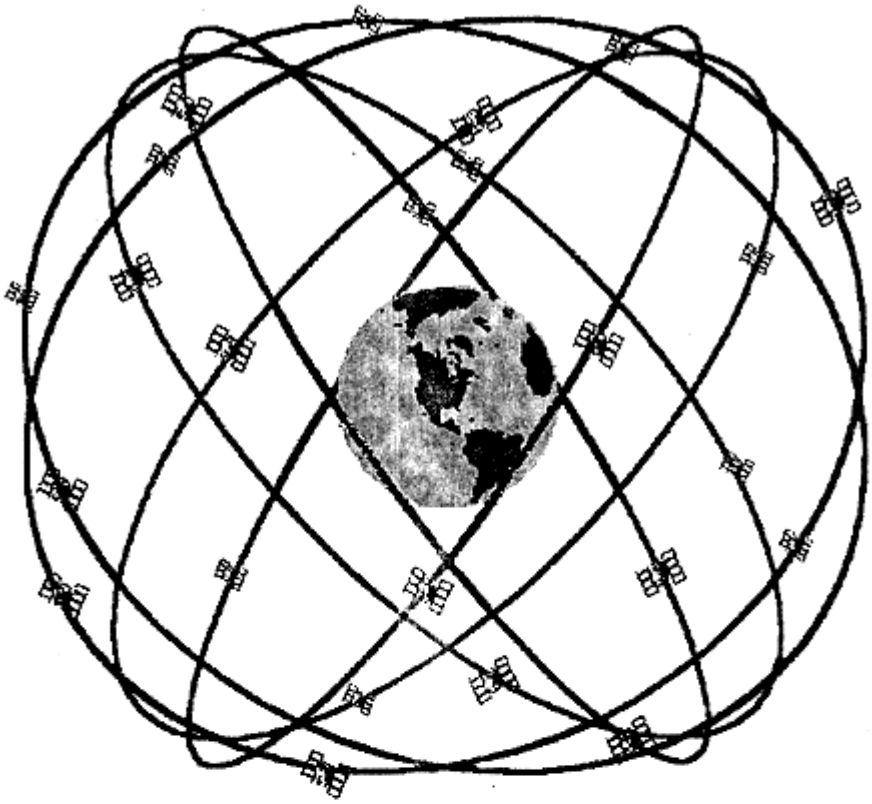
Yeryüzeyinde kurulmuş istasyonların uzaysal konumlarında ki değişimin yerküresinin yüzeyine teğetsel düzlemdeki izdüşümünden yararlanılarak o düzlem içersinde zamana bağlı olarak birim deformasyon hızlarının geometrik olarak hesaplanması mümkündür. Böyle bir hesaplama için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılabilir.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak yapılan hesaplama yöntemi sunulmuştur. Gözlem istasyonu sayısının yoğun olması halinde, üçgen elemanların yerine daha farklı elemanlar kullanılarak hesaplama yapılması mümkün olmakla birlikte, burada özellikle üçgen elemanlar seçilmiştir. Böyle bir seçim, sunulan yöntemin ana hatlarını açık bir şekilde göstermesi ve matematiksel karmaşıklığı en aza indirgemesi nedeniyle yapılmıştır.

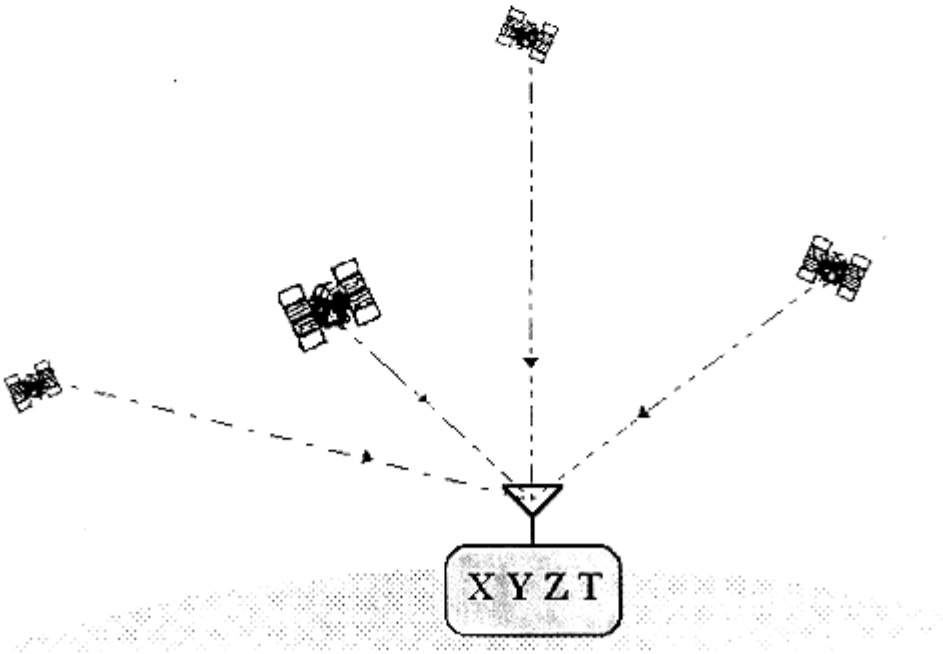
Herhangi bir düzlem içinde oluşan birim deformasyon hızı tensörünün bileşenleri ile yerdeğiştirme hızları arasında geometrik olarak aşağıda verilen ilişkiler kullanılabilir (Şekil 3).

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{u}}{\partial x};\ \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{v}}{\partial y};\ \dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial y} \qquad (1)$$

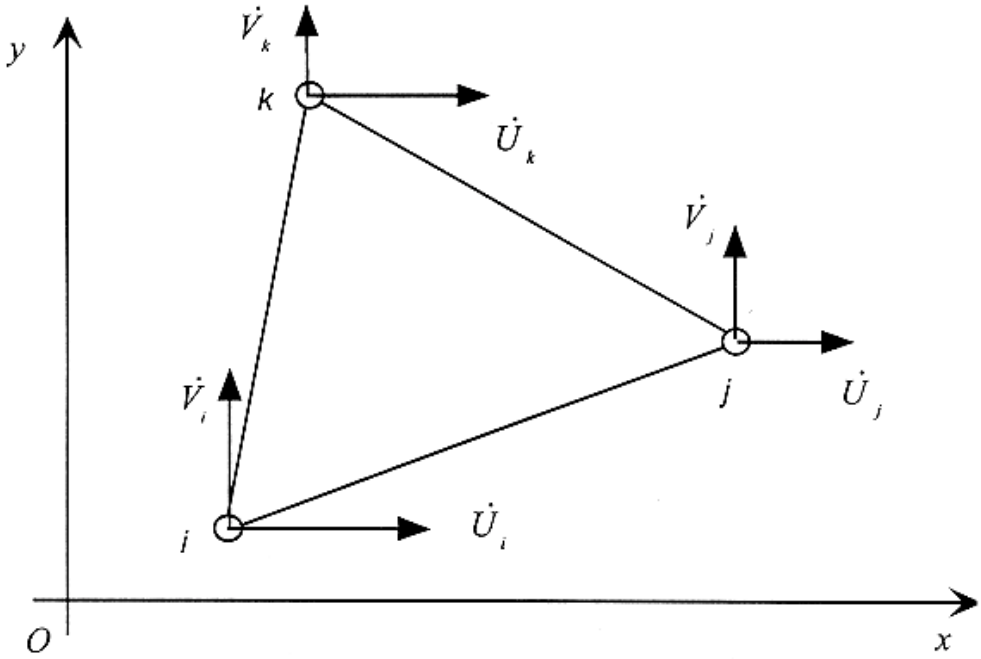
Burada $\dot{u}$ ve $\dot{v}$, x ve y yönündeki yerdeğiştirme hız vektörünün bileşenleridir. Diğer yandan, $\dot{\varepsilon}_{xx}$ ile $\dot{\varepsilon}_{yy}$ ise birim deformasyon tensörünün x ve y düzlemlerine etkiyen normal bileşenleri ve $\dot{\gamma}_{xy}$ makaslama bileşenidir. Yeryüzeyindeki GPS ölçüm istasyonlarının



Şekil 1: Uydu Konumlama Sisteminin (GPS) basitleştirilmiş gösterimi
Figure 1: A simple illustration of Global Positioning System (GPS)



Şekil 2: Bir ölçüm istasyonunda güvenilir bir ölçüm alınabilmesi için gerekli uydu sayısı
Figure 2: Necessary number of satellites for a reliable displacement measurement



Şekil 3: Koordinat sistemi ve tipik bir üçgen eleman için yerdeğiştirme hızlarının tanımı
Figure 3: Coordinate system and the definition of displacement rates for a triangular element

üçgen elemanlar oluşturacak şekilde düzenlendiği düşünülerek Şekil 3'te gösterilen tipik bir üçgen içinde herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme hız bileşenleri aşağıda verildiği gibi interpole edildiği varsayılmıştır.

$$\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x & 0 & y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x & 0 & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \\ c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Üçgenin *i, j, k* düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme hız bileşenleri ile uzaysal konumları arasında yukarıdaki ilişkilerin geçerli olması gerektiği düşünülürse, birkaç matematiksel işlemden sonra aşağıdaki ilişkiler kolaylıkla elde edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{V}_i \\ \dot{U}_j \\ \dot{V}_j \\ \dot{U}_k \\ \dot{V}_k \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Burada;

$$N_i = E_{11} + E_{21}x + E_{31}y\,,$$
$$N_j = E_{12} + E_{22}x + E_{32}y\,,$$
$$N_k = E_{13} + E_{23}x + E_{33}y$$
$$E_{11} = \frac{1}{\Delta}\left(x_j y_k - x_k y_j\right),$$
$$E_{21} = \frac{1}{\Delta}\left(y_j - y_k\right),$$
$$E_{31} = \frac{1}{\Delta}\left(x_k - x_j\right),$$
$$E_{22} = \frac{1}{\Delta}\left(y_k - y_i\right),$$

$$E_{32} = \frac{1}{\Delta}(x_i - x_k),$$

$$E_{12} = \frac{1}{\Delta}(x_i y_k - x_k y_i)$$

$$E_{13} = \frac{1}{\Delta}(x_j y_i - x_i y_j)$$

$$E_{23} = \frac{1}{\Delta}(y_i - y_j),$$

$$E_{33} = \frac{1}{\Delta}(x_j - x_i)$$

$$\Delta = (x_j y_k - x_k y_j) + (x_k y_i - x_i y_k) + (x_i y_j - x_j y_i)$$

(3) nolu ilişki ile (1) nolu ilişkiler kullanılırsa üçgen eleman içinde oluşan birim deformasyon hız tensörü *i, j, k* düğüm noktalarındaki yerdeğiştirme hız bileşenleri ve uzaysal konumları cinsinden aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} \\ \dot{\varepsilon}_{yy} \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{21} & 0 & E_{22} & 0 & E_{23} & 0 \\ 0 & E_{31} & 0 & E_{32} & 0 & E_{33} \\ E_{31} & E_{21} & E_{32} & E_{22} & E_{33} & E_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{V}_i \\ \dot{U}_j \\ \dot{V}_j \\ \dot{U}_k \\ \dot{V}_k \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Birim deformasyon hız tensöründen gerilim hızı tensörünü elde edebilmek için yerkabuğunu oluşturan malzemenin fiziksel özelliklerine dayanan bir ilişki gerekli olup, malzemenin davranışına bağlı olarak değişik ilişkiler kullanılabilir. Bu ilişkilerin içinde en basit ilişki, elastisite kuramına dayanan Hooke'un ilişkisidir. Bunun yanısıra, viskoz malzemeler için Newton, visko-elastik malzemeler için Kelvin ilişkisi gibi bilinen diğer basit ilişkiler de kullanılabilir. Yeryüzüne çok yakın derinlikler gözönünde tutulmaz ve yerkabuğunun düzlemsel birim deformasyon durumunda olduğu varsayılırsa, gerilim hızı tensörü ile birim deformasyon hız tensörü arasında Hooke ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_{xx} \\ \dot{\sigma}_{yy} \\ \dot{\sigma}_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} \\ \dot{\varepsilon}_{yy} \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Burada λ ve μ Lame sabitleri olarak bilinir. Yerkabuğunun elastik dalga hızlarından yararlanılarak yerkabuğunun her iki Lame sabitlerinin değeri yaklaşık olarak 30 GPa olarak alınmaktadır (Fowler 1990).

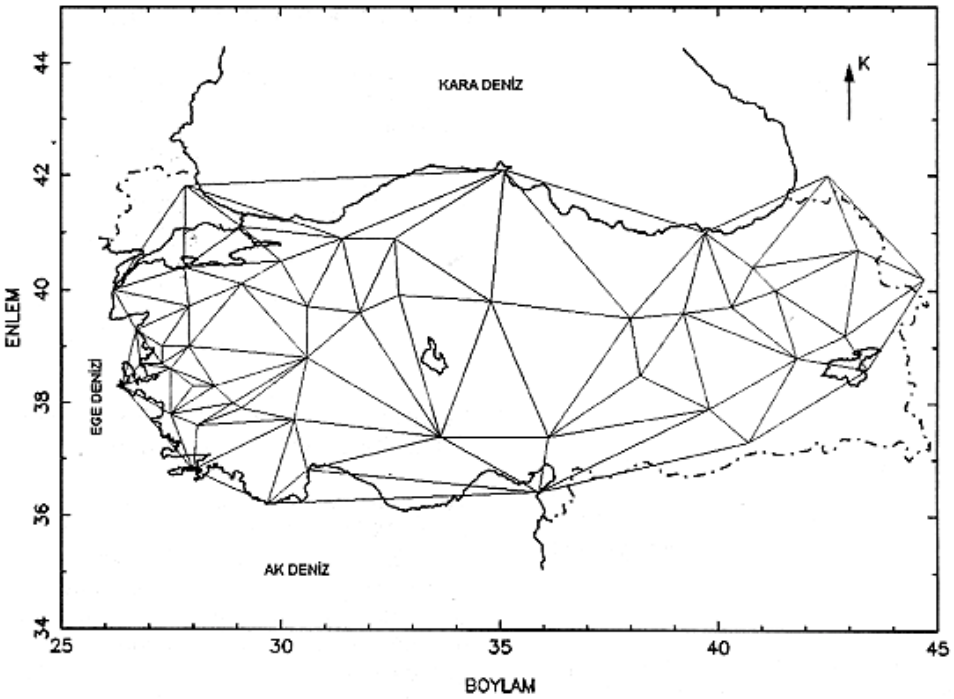
Asal gerilimler ve yönleri gerilim tensörünün bileşenlerinden aşağıdaki ilişkilerden elde edilebilir.

$$\dot{\sigma}_{1,3} = \frac{\dot{\sigma}_{xx} + \dot{\sigma}_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\dot{\sigma}_{xx} - \dot{\sigma}_{yy}}{2}\right)^2 + \dot{\sigma}_{xy}^2} \quad (6)$$

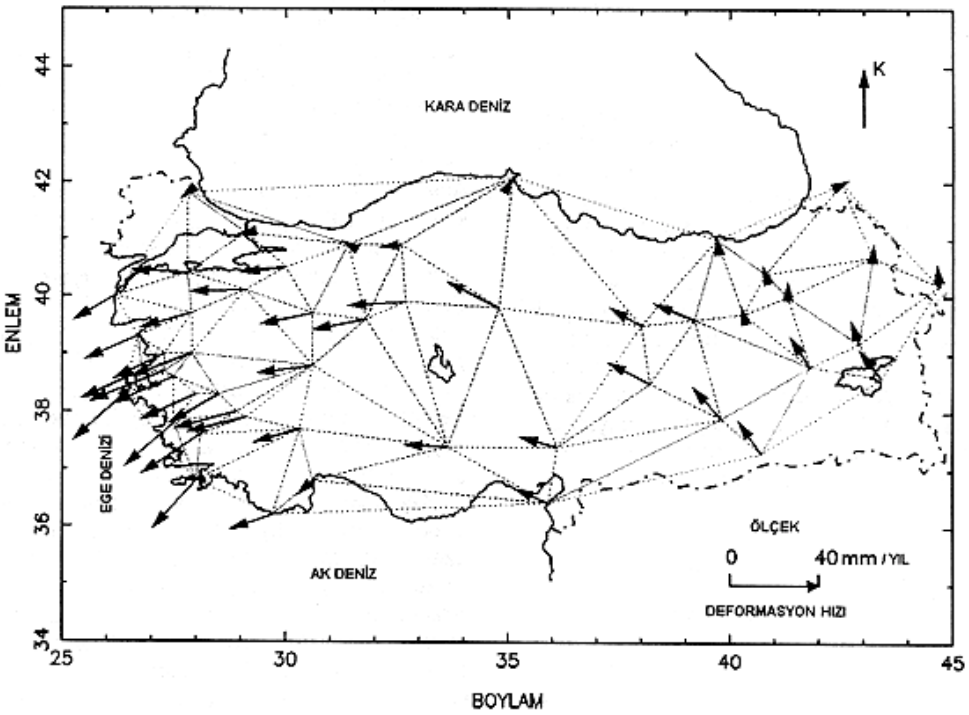
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2\dot{\sigma}_{xy}}{\dot{\sigma}_{xx} - \dot{\sigma}_{yy}}\right) \quad (7)$$

TÜRKİYE VE YAKIN ÇEVRESİNDEKİ GPS İSTASYONLARI VE ÖLÇÜMLER

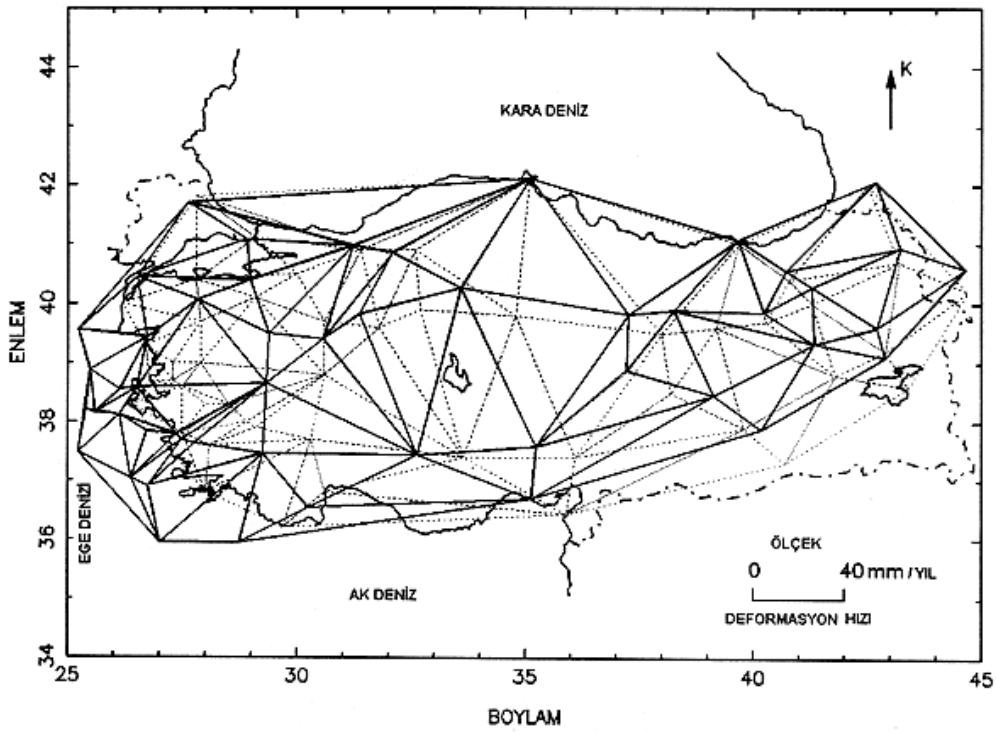
Türkiye'de yerkabuğunun yerdeğiştirme ölçümü Uğur (1974) tarafından ölçülmeye çalışılmıştır. Buna ek olarak Aksoy (1982) tarafından Türkiye Ulusal Üçgenleme Ağını kullanarak Türkiye genelinde yerkabuğunun deformasyonunun ölçümü önerilmesine karşın uygulamaya geçilememiştir. Türkiye'de GPS kullanılarak yapılan ölçümler 1988 yılında başlatılmış olup, ABD'deki Massachusettes Institute of Technology (MIT) ile Türk Kara Kuvvetleri Harita Genel Komutanlığının (TKKHGK) işbirliği ile yürütülmektedir (Oral et al. 1995, Reilinger vd., 1997). Bunun yanısıra, Almanya'nın Institut für Angewandte Geodäsie ile İsviçre Zürih Teknik Üniversitesi (ETHZ) tarafından Marmara, ve Ege bölgeleri ağırlıklı olmak üzere, GPS ölçümleri yapılmaktadır (Straub ve Kahle, 1995; Altıner ve Seeger, 1993). Bu çalışmada kullanılan GPS ölçüm istasyon sayısı 50 olup, ölçüm ağının büyük bir kısmı MIT-TKKHGK grubunun oluşturduğu istasyonları içermektedir. Şekil 4, bu çalışmada kullanılan ağı göstermektedir. 1988 ile 1994 yılları arasında yapılan ölçümlerden elde edilen yıllık yerdeğiştirme miktarları Şekil 5'te gösterilmiştir. Yapılan ölçümler Türkiye'nin plaka tektoniğinde yaygın olarak varsayılan genel deformasyon şekli ile büyük bir uyum göstermektedir (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Kasapoğlu ve Toksöz, 1983; Aydan, 1997). Şekil 5'ten de görüleceği üzere, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) ile sınırlanan Anadolu plakası batıya doğru hareket etmekte ve saat yelkovanına ters yönde yerküresinin kendi ekseni etrafında dönmesinden kaynaklanan Corillois kuvveti etetkisi altında dönmeye çalışmaktadır. Bu yerdeğiştirme şekli, Aydan (1997) tarafından önerilen tektonik modeli desteklemektedir. Şekil 6, ölçülen yerdeğiştirme değerlerini kullanarak elde edilen Türkiyenin



Şekil 4: GPS ölçüm istasyon ağı
Figure 4: GPS mesh used in computations



Şekil 5: 1988 ile 1994 yılları arasında yapılan ölçümlerden elde edilen yıllık yerdeğiştirme hızları
Figure 5: Annual displacement rates at GPS stations throughout Turkey between 1988 and 1994

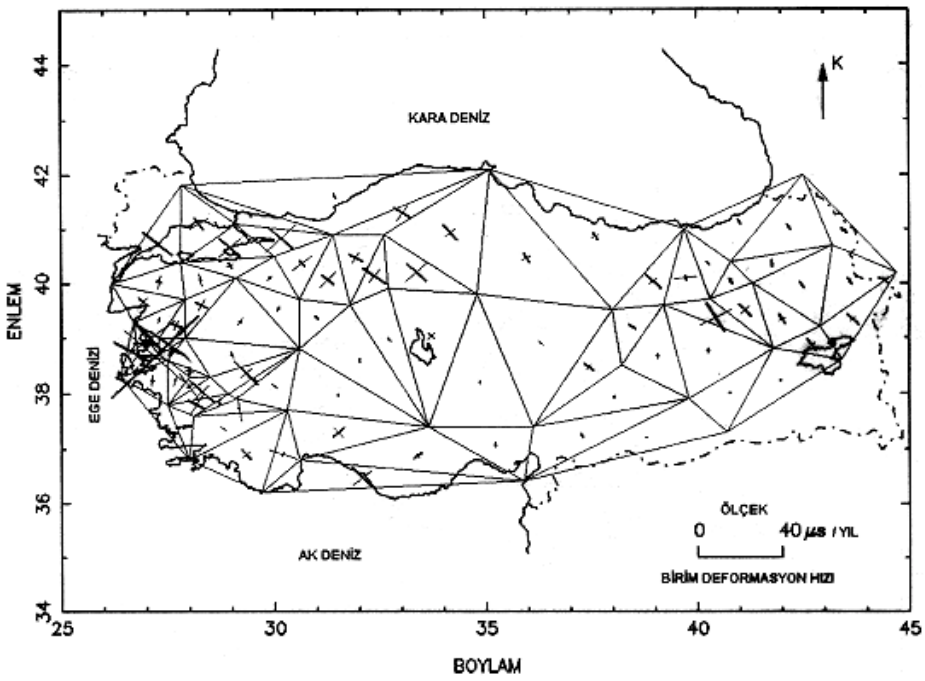


Şekil 6: Türkiye'nin yıllık deformasyon durumu
Figure 6: Annual deformation pattern of Turkey

deformasyon durumunu göstermektedir. Bu sonuçlar Kasapoğlu ve Toksöz (1983) tarafından iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara oldukça benzerlik göstermektedir. Doğu Anadolu bölgesinde Arabistan plakasından dolayı Anadolu plakası ezilmeye maruz kalıp büyük bir sıkışma olayı yaşanmakta ve yerkabuğu bu yörede Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fayları boyunca KB'ya ve Kuzey-Doğu Anadolu fayı boyuncada KD yönüne doğru hareket etmektedir. Batı Anadolu'da ise, KAF boyunca yerkabuğu bir yay boyunca GB'ya doğru hareket etmekte ve yerkabuğunun üst yüzeyinde bir genişleme olgusu meydana gelmektedir. Kuzeye doğru hareket eden Afrika plakası ile hareket etmediği varsayılan Avrasya plakası arasında sıkışan ve yerçekimine ters yönde itilen Anadolu plakası bükülmekte ve dolayısıyla yerkabuğunun üst yüzeyine yakın kısımlarda oluşan çekme olayından dolayı normal faylanma oluşmaktadır. Dolayısıyla Batı Anadolu'da oluşan faylar Batı Anadolu Fay Sistemi olarak adlandırılmaktadır (Aydan 1997).

YILLIK BİRİM DEFORMASYON VE GERİLİM HIZLARI DAĞILIMI

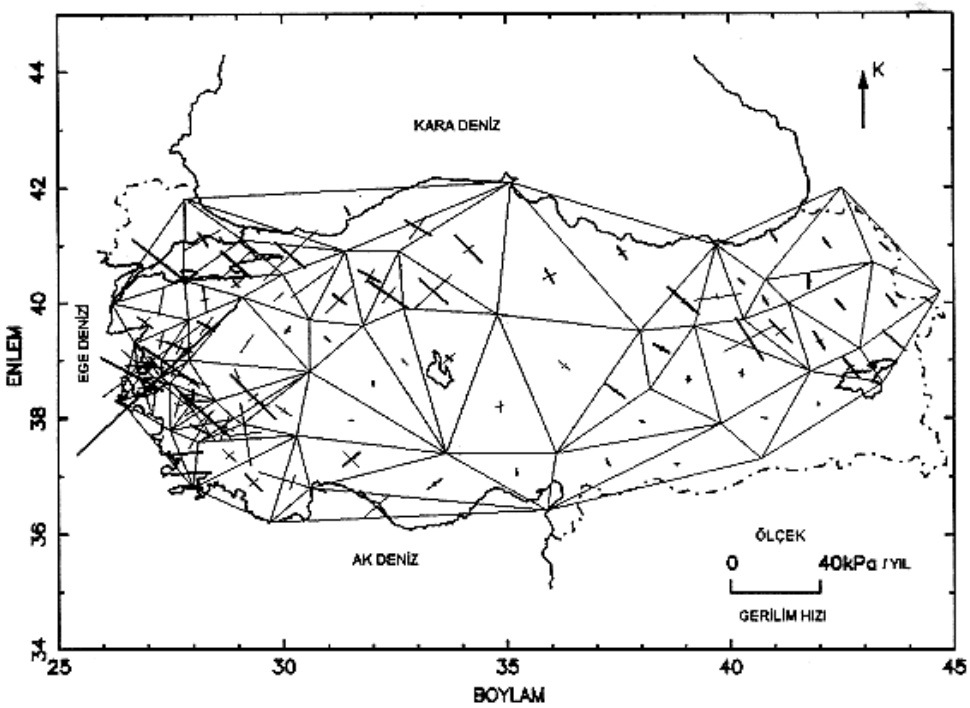
Bir önceki bölümde verilen GPS ölçüm sonuçlarını kullanılarak elde edilen ve Türkiye'nin milli sınırları içinde yerkabuğunun üst-yüzeyine teğetsel düzlem içinde oluşan asal birim deformasyon hız dağılımı Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu şekilde kalın çizgi ile gösterilenler sıkışma ve ince çizgi ile gösterilenler ise çekme karakterli asal birim deformasyon hızlarına karşılık gelmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, birim deformasyon hız yoğunlaşması, Türkiye'nin diri fayları olarak bilinen KAF, DAF, KDAF ile BAFS boyunca gözlenmektedir. Özellikle KAF'ın Bolu ve Marmara Denizi dolaylarında, DAF ile KAF'ın birbirlerini kestiği Karlıova yakınları ile BAFS'in İzmir'i de içeren Gediz ve Büyük Menderes



Şekil 7: Türkiye'de yıllık asal birim deformasyon hızlarının dağılımı
Figure 7: Distribution of annual principal strain rates throughout Turkey

çöküntü havzalarındaki birim deformasyon yoğunlaşmasının oldukça dikkate değer olduğu söylenebilir. Yerkabuğunun elastik davranış gösterdiği varsayılarak, gerekli her iki Lame sabitlerinin değerlerinin 30 GPa (Fowler 1990) alınarak hesaplanan asal gerilim hızları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekildeki çizgilerin kalınlık farklılığı asal birim deformasyon hızlarının gösteriminde kullanılanla aynıdır. Orta Anadolu'da göze çarpan büyük bir değişim görülmez iken, birim deformasyon hızlarında görülen olguya benzer şekilde KAF'ın Bolu ve Marmara Denizi dolaylarında, DAF ile KAF'ın birbirleri ile kesiştiği Karlıova yakınları ile BAFS'in İzmir'i de içeren Gediz ve Büyük Menderes çöküntü havzalarında asal gerilim hızlarında büyük değişmelerin olduğu açık bir biçimde Şekil 8'de görülmektedir. Özellikle 1967'de oluşan Mudurnusuyu depreminin meydana geldiği yörede gerilimdeki değişimin tamamen çekme karakterinde geliştiği söylenebilir. Buna benzer gerilim değişimleri Manyas, Dikili, Torbalı ve Denizli dolaylarında da gözlenmektedir.

Yerkabuğundaki asal gerilimlerin yönleri derinliğe ve yörenin yapısal jeolojisine bağlı olarak değişebileceğinin gerilim ölçümlerinde gözlendiğine dair raporlar (Aydan ve Paşamehmetoğlu, 1994) bulunmakla beraber, burada bu husus dikkate alınmadan elde edilen asal gerilim yönleri tartışılmıştır. Şekil 9'da asal gerilim hızlarının yönleri gösterilmiştir. Asal gerilim hızlarının yönleri yerkabuğundaki asal gerilimlerin yönleri ile herzaman aynı olmayabilir. Aynı olmadığı durumlarda bile, oluşabilecek yön farklılığının pek büyük olamayacağı söylenebilir. Buna gerekçe olarak, yerkabuğunda herhangi bir kalıcı hareket olmadığı durumlarda asal gerilim ile asal gerilim hızının eş-eksenli (co-axial) olması gerekmektedir. Şekil 9'da gösterilen asal gerilim yönlerinin doğruluğu ancak yerinde ölçümlerle irdelenebilir. Ancak Türkiye'de yerinde gerilim ölçümleri son derece sınırlı olup, sadece Küre madeni ile Oymapınar hidroelektrik yeraltı santralında yapılmıştır (Aydan ve Paşamehmetoğlu, 1994). Bu iki yerde elde edilen asal gerilim yönleri ile bu çalışmada elde edilen yönlerin hemen hemen birbirleri ile aynı

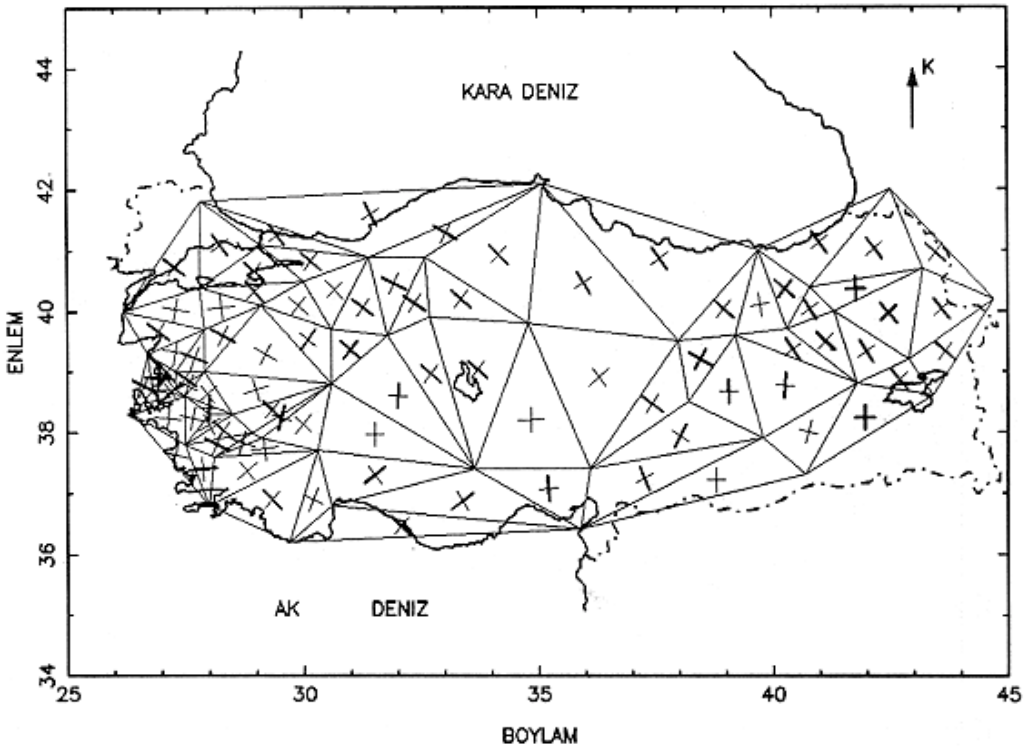


Şekil 8: Türkiye'de yıllık asal gerilim hızlarının dağılımı
Figure 8: Distribution of annual principal stress rates throughout Turkey

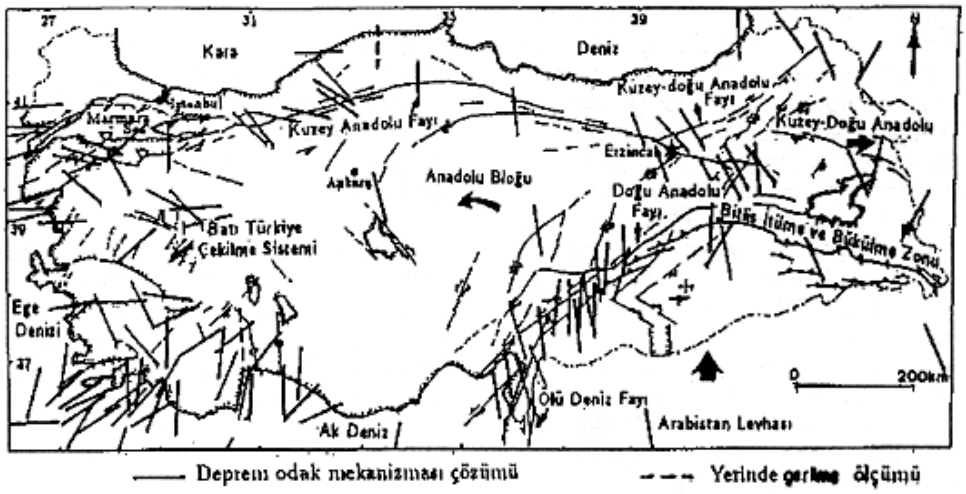
olduğu söylenebilir. Yakın zamanda yazar ve çalışma grubu tarafından Orta Anadoludaki Kapadokya bölgesinde yapılan çalışmada elde edilen asal gerilim yönleri bu çalişmada elde edilenlerle aynı olduğu görülmüştür (Aydan vd., 1999; Watanabe vd., 1999). Bunun yanısıra Şekil 10'da Aydan ve Paşamehmetoğlu (1994) tarafından deprem odak mekanizması ve yerinde gerilim ölçümlerinden elde edilen en büyük yatay gerilim yönleri ile burada gösterilen yönlerin hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. 27.6.1998'de oluşan Adana-Ceyhan depremi ile 14.12.1998'de Kayseri Tuzla gölü depreminde elde edilen P-T eksenleri ile bu çalışmada elde edilen yönlerin yine birbirlerine çok yakın olduğu da gözlenmiştir. Dolayısıyla Şekil 9'da görülen ve GPS ölçümlerinden elde edilen yönlerin Türkiye'deki asal gerilim yönlerini yansıttığı söylenebilir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada GPS ölçüm istasyonlarından elde edilen yerdeğiştirme hızlarından yararlanılarak yerkabuğunun yeryüzündeki teğetsel düzlemi içerisinde oluşan birim deformasyon hız tensörü ile gerilim hız tensörünün tayini için geliştirilen bir yöntem sunulmuş ve Türkiye milli sınırları içinde yapılan ölçümlere bu yöntem uygulanmıştır. GPS'ten elde edilen sonuçların Türkiyenin genel plaka tektoniği ile uyum içersinde olduğu gözlenmiştir. 1988 ile 1994 yılları arasında elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan asal birim deformasyon ve gerilim hızlarında KAF'ın Bolu ve Marmara Denizi dolaylarında, DAF ile KAF'ın birbirlerini kestiği Karlıova yakınları ile BAFS'in İzmir'i de içeren Gediz ve Büyük Menderes çöküntü havzalarında büyük değişmelerin meydana geldiği görülmüştür. Özellikle Mudurnu, Manyas, Dikili, Torbalı ve Denizli dolaylarında gerilim hızlarında büyük değişimlerin olduğu vurgulanmıştır. Aydan ve Paşamehmetoğlu (1994) tarafından derlenen yerinde gerilim



Şekil 9: Türkiye'de asal gerilim hızlarının yönlerinin dağılımı
Figure 9: Distribution of directions of principal stress rates throughout Turkey



Şekil 10: En büyük yatay gerilim yönlerinin dağılımı (Aydan ve Paşamehmetoğlu 1994)
Figure 10: Distribution of directions of maximum horizontal stresses (Aydan ve Paşamehmetoğlu, 1994)

ölçüm yönleri ile odak mekanizması bilinen depremlerden elde edilen P-T eksenlerinden elde edilen asal gerilim yönlerinin ışığı altında, bu çalışmada hesaplanan asal gerilim hız yönlerinin büyük ölçüde Türkiye milli sınırları içinde yerkabuğuna teğetsel düzlemde etkiyen asal gerilim yönlerini yansıttığı doğrulanmıştır.

KAYNAKLAR

Aksoy, A., 1982. Possible use of the Turkish National Triangulation Network for the study of crustal movements in the North Anatolian Fault Zone. International Symposium on Earthquake Prediction in the North Anatolian Fault Zone, İstanbul, 295-300.

Altıner, Y. and Seeger, H., 1993. Is the motion of the Eastern Mediterranean region faster than expected. Geological Journal, 28, 319-325.

Aydan, Ö. ve Paşamehmetoğlu, A.G., 1994. Dünyanın çeşitli yörelerinde ölçülmüş yerinde gerilimler ve yatay gerilim. Kaya Mekaniği Bülteni, 10, 1-17.

Aydan, Ö., 1997. Seismic characteristics of Turkish earthquakes. Turkish Earthquake Foundation, TDV/TR 97-007, 41 p.

Aydan, Ö., Ulusay, R., and Yüzer, E., 1999. A research on Living Environment of Derinkuyu Underground City, Turkey. A report submitted to Japan Ministry of Education, Sports and Culture. Research Report No: 09044154, 149 p (in Japanese).

Barka, A. and Kadinsky-Cade, K., 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. Tectonics, 7, 663-684.

Fowler, C.M.R., 1990. The solid earth – An introduction to Global Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge.

Kasapoğlu, E., and Toksöz, N., 1983. Tectonic consequences of the collision of the Arabian and Eurasian plates: Finite element models. Tectonophysics, 100, 71-95.

Oral, M.B., Reilinger, R.E, King, R.W., Toksöz, M.N., Barka, A., Kınık, İ., and Lenk, O., 1995. Positioning system offers evidence of plate motions in Eastern Mediterranean, EOS, 76, 9-11.

Reilinger, R.E, McClusky, S.C., Oral, M.B., King, R.W., Toksöz, M.N., Barka, A.A., Kınık, I., Lenk, O., and Şanlı, I., 1997. Global positioning system measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Euroasia plate collision zone, Journal Geophysical Research, 102, (B5), 9983-9999.

Straub, S.C. and Kahle, H.G., 1995. Active crustal deformation in the Marmara Sea Region, N.W. Anatolia, inferred from GPS measurements. Geophysical Research Letters, 22, 2533-2536.

Uğur, E., 1974. Kuzey Anadolu Fay Kuşağının Gerede-Çerkeş bölümünde yerkabuğu hareketlerinin jeofizik yöntemlerle incelenmesi, Ankara, Harita Genel Müdürlüğü.

Watanabe, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M. and Aydan, Ö., 1999. Initial stress state in Cappadocia, Proceedings of the 99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka, Japan, K. Matsui and H. Shimada (eds.), 249-260.