

ZEMİN HAFIZASI VE AKTİF FAYLAR

Hasan ÇETİN¹,

¹Çukurova Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, Adana

E-Posta: cetinh@cu.edu.tr

ÖZET

Jeolojide, yakın geçmişte hareket etmiş ve gelecekte de hareket etme olasılığı olan faylar aktif fay olarak tanımlanır. Aktif fayların geçmiş zamanlardaki hareketleri ve bu hareketler sonucu oluşan depremler ise, paleosismolojinin konusunu oluşturmaktadır. Paleosismolojik çalışmalarda önemli bir yeri olan hendek çalışmaları sonucunda herhangi bir fayın geçmişteki hareket sayısı ve hareketlerin miktarları bulunabilmektedir. Hendeklerden alınan uygun örneklerin yaşlarının belirlenmesiyle bu hareketlerin yaklaşık yaşları ve tekrarlanma periyodları bulunabilmekte ve böylece gelecekteki olası hareketler için tahminler yapılabilmektedir. Ancak hendekler hareketlerin karakterleri (sismik veya asismik) konusunda yeterli bilgi vermemektedir.

Oysa zemin mekaniği ilkeleri kullanılarak, hendeklerden uygun örnekler alınıp, bunlar üzerinde gerekli deneyler yapılarak birimlerin ilk kez faylanmaları sırasındaki hareketlerin karakterleri saptanır ve buradan hareketle diğer hareketlerin karakterleri hakkındada bilgi sahibi olunabilir. Ayrıca faylanma sırasında etkin olan asal gerilme miktarları ve yönleri yine zemin mekaniği ilkeleri kullanılarak belirlenip diğer yöntemlerle bulunan yönlerle karşılaştırılabilir. Böylece açılması ekonomik açıdan pek de ucuz olmayan hendekler daha verimli kullanılmış olurlar.

Bu çalışmanın amacı ilk defa yazar tarafından önerilen bu yeni yöntemi tanıtmak ve yöntemin başarı ile uygulandığı Meers, Dogu Anadolu ve Kuzey Anadolu faylarından örnekler sunmaktır.

ABSTRACT

In geology, active faults are defined as faults that have moved recently and may move in the near future. Past movements of active faults and earthquakes caused by these movements are the subject of paleoseismology. As a result of trench investigations, which are crucial in paleoseismological studies in active tectonics, the number and the amount of movements on a particular fault can be determined. After dating the samples obtained from the trenches, the ages of the movements and their recurrence intervals can be found; thus, predictions on possible future movements can be made. But, the trenches do not give enough information on the nature (seismic or aseismic) of movements.

However, using soil mechanical concepts, proper samples can be obtained from the trenches, and after running the necessary tests on these samples, the nature of movements during the faulting of the units in the trenches for the first time can be determined, and in turn, information on the nature of other movements can be obtained. The amounts and directions of the principal stresses that were active during the faulting can also be found again using soil mechanical concepts, and they can be compared with the directions found in other methods. Thus, considering high cost of trench excavation, these trenches could be used in a more productive way.

The aim of this study is to introduce this new method developed by the author for the first time and give examples from the Meers, East Anatolian and North Anatolian faults on which the method was used successfully.

GİRİŞ

Hendek çalışmaları aktif tektoniğin alt konularından biri olan ve eski depremlerin araştırılmasını içeren paleosismolojik çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Hendekler 20-30 m uzunlukta, 3-4 m derinlikte ve birkaç metre genişlikte, aktif faylara dik ve/veya paralel açılan kazılardır. Klasik paleosismolojik çalışmalarda açılan hendek duvarlarına bir ağ kurularak detay bir şekilde haritalanır. Hendeklerde aranan geçmişteki hareketlere bağlı olarak oluşan yapılardır. Bunlar genelde kolüviyal kamalar, gömülü toprak seviyeleri, yapısal uyumsuzluklar, farklı miktarlarda deformasyona uğramış birimler ve sıvılaşma yapılarıdır. Bu yapılar kullanılarak fayın geçmişteki hareket sayısı, hareket miktarları, yapılardan alınan uygun numunelerin yaşlarının tayini ile de hareketlerin yaklaşık oluş

zamanları, hızları ve tekrarlanma periyodları bulunur. Böylece, en son oluşan hareketin zamanı ve tekrarlanma periyodu bilindiği için gelecekteki olası bir hareketin ne zaman olabileceği yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

Ancak hendekler hareketlerin karakterleri hakkında (sismik veya asismik) konusunda yeterli bilgi vermemektedir. Bu çalışmada; zemin mekaniği ilkeleri kullanılarak açılan hendeklerdeki birimlerin ilk faylanmaları (çünkü fay üzerinde oluşan sonraki hareketler kalıntı, "artık" gerilmelerin etkisi altında olacaktır) sırasındaki hareketlerin sismik veya asismik karakterde olduğunun bulunabileceği ve buradan hareketle varsa diğer hareketlerin ve gelecekteki olası hareketlerin hangi karakterde olabileceği hakkında bilgi sahibi olunabileceği yeni bir yöntem olarak açıklanacaktır. Böylece açılması genelde iş makineleri kullanılarak mümkün olan, dolayısıyla pek de ucuza mal olmayan hendeklerin daha verimli kullanılabileceği önerilecektir. Çalışmanın amacı ilk defa yazar tarafından önerilen bu yeni yöntemi tanıtmak ve yöntemin başarı ile uygulandığı ABD'nin Oklahoma Eyaletindeki Meers fayı ile ülkemizin ve dünyanın iki önemli fayı olan Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay sistemleri üzerinde tamamlanan ve halen devam etmekte olan örnek çalışmalardan sonuçlar sunmaktır.

ZEMİN HAFİZASI

Hemen hemen her jeolojik birim bünyesinde iki çeşit bilgiyi muhafaza eder. Birincisi olduğu ortamla ilgili bilgiler, ikincisi ise olduğu andan itibaren geçirdiği deformasyonlarla ilgili bilgilerdir (Nagaraj, 1993). Voight (1974), jeolojik birimlerin deformasyonlar sırasında tektonik gerilmeleri bünyelerine hapis veya kayıt edeceğini belirtmektedir.

Casagrande (1932), zemin mekaniğinin konusu olan jeolojik birimlerin (zeminlerin) hafızasının olduğunu, bu birimlere uygulanan gerilmelerin birimlerin dokularında hapis edildiklerini belirtmiştir. Bir jeolojik birim arazide daha önce etkisi altında kaldığı gerilmelerden daha yüksek bir gerilmeye maruz kalırsa, bu yeni gerilme etkisinde, dokuyu oluşturan taneler, gözenekler ve diğer bileşenlerin sıkışması ile değişime uğrayarak birimin dokusu daha sağlam hale gelir (Holtz ve Kovacs, 1981). Bu olaya jeolojide kompaksiyon, zemin mekaniğinde ise konsolidasyon denir. Zeminin veya birimin etkisi altında kaldığı en yüksek gerilmeye ise zemin mekaniğinde ön konsolidasyon basıncı denir. Zeminin

gerilmeye uğraması; üzerine bir bina inşa edilmesi veya kıvrımlanma, faylanma ve sünme (krip) gibi jeolojik olaylar sonucunda herhangi bir yönde olabilir (Voight, 1966; Hobbs ve diğ., 1976; Feda, 1978).

Karig ve Hou (1992), jeolojik zamanın zemin mekaniğindeki toprak basınç katsayısı, K , üzerindeki etkisini çalışmış ve killi birimlerde K değerinin en az 10^6 yıl veya daha fazla bir zaman içinde korunduğu ve değişmediğini göstermişlerdir. Burada $K = \sigma'_h / \sigma'_v$ dir ve σ'_h yatay efektif, σ'_v ise düşey efektif gerilmelerdir. Bu sonuca göre, örneğin günümüzden 10^6 yıl (Geç Pleyistosen sonları) önce bir jeolojik birimin hafızasında o birimin deformasyonu sırasında tutulan yatay ve düşey gerilmeler günümüze değin değişmeden korunacaktır. Genelde Holosen'in başlarına kadar inen paleosismolojik çalışmalar için bu süre yeterli bir zaman dilimidir.

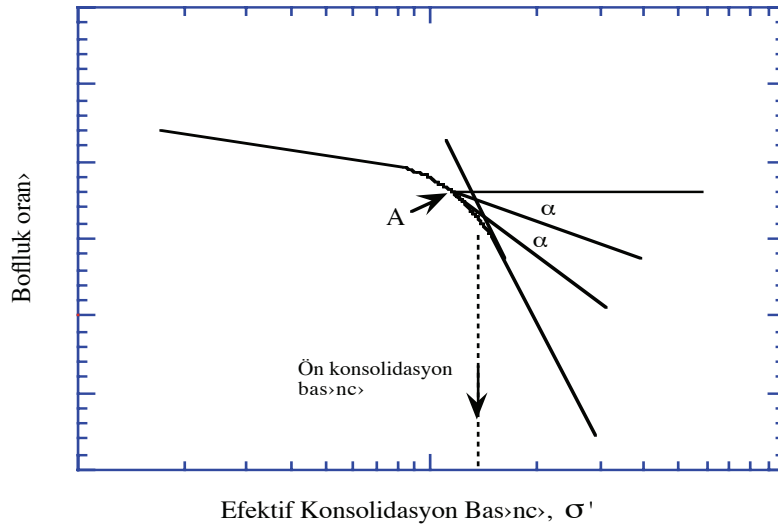
Casagrande (1936), Burmister (1951) ve Schmertmann (1955), herhangi bir zeminin etkisi altında kaldığı en büyük efektif gerilme olan ön konsolidasyon basıncının tayini için yöntemler geliştirmişlerdir. Bunlardan en çok tercih edilen Casagrande'nin yöntemidir. Bu yöntemle göre zeminden alınan örselenmemiş örnek üzerinde konsolidasyon deneyi yapılır ve log efektif gerilmeye karşılık boşluk oranı eğrisi çizilerek zeminin geçmişte etkisi altında kaldığı en büyük efektif gerilme bulunur (Şekil 1). Bu yöntemler genelde daha çok yapıların oturması ile ilgilenen zemin mekanikçiler tarafından düşey efektif gerilmelerin tayini için kullanılmıştır. Ancak, Ward ve diğ. (1959), Simons (1965), Tchalenko (1967) ve Esu ve Calabresi (1969) zeminden aldıkları örselenmemiş örnekler üzerinde, yatay yönlerde de konsolidasyon deneyleri yaparak zeminin geçmişte etkisi altında kaldığı en büyük yatay efektif gerilmeleri de yine Casagrande'nin yöntemini kullanarak belirlemişlerdir.

Bu çalışmaların ışığı altında, hendeklerde karşılaşılan ve genelde Kuvaterner yaşlı olan genç jeolojik birimlerin (zeminlerin) ilk faylanmaları esnasında etken olan asal gerilmelerin (σ_1 , σ_2 , σ_3) birimlerin hafızasına alınabileceği ve bu gerilmelerin Casagrande yöntemi ile bulunabileceği söylenebilir.

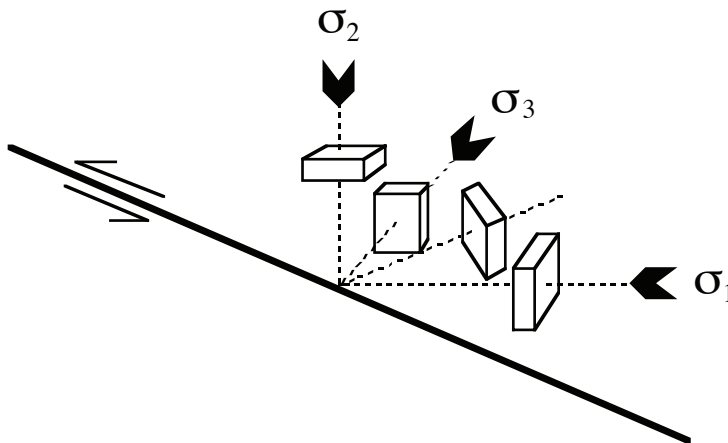
ASAL GERİLMELER VE YÖNLERİNİN BULUNMASI

Bilindiği gibi, normal fayların oluşumunda σ_1 düşey, σ_2 ve σ_3 yatay yönlerde, ters fayların oluşumunda σ_1 ve σ_2 yatay, σ_3 düşey, doğrultu atımlı faylarda ise σ_1 ve σ_3 yatay, σ_2 ise düşey yönlerde etkirler (Anderson, 1951). Hendeklerdeki birimlerden örselenmemiş numune alırken bu yönlerle dikkat edilmeli, birbirine dik iki yönde ve bunların arasında bir

yönde olmak üzere, en az üç yönde numune alınmalıdır. Bu yönlerden birinin teorik σ_1 , diğerinin ise teorik σ_3 yönünde olmasına özen gösterilmeli ve numuneler zemin mekaniği standartlarına göre alınmalıdır (Şekil 2). Numuneler faya mümkün olduğu kadar yakın alınmalıdır. Alınan yönlü numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapıp, Casagrande'nin yöntemi ile bu yönlerdeki efektif gerilmeler bulunur. Daha sonra, bu gerilmelerin doğrudan asal gerilmelerden ziyade, daha çok bu yönlerdeki normal gerilmeler olma olasılığının yüksek olmasından dolayı, bu gerilmeler normal



Şekil 1. Casagrande (1936) yöntemi ile bir zeminin ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi.

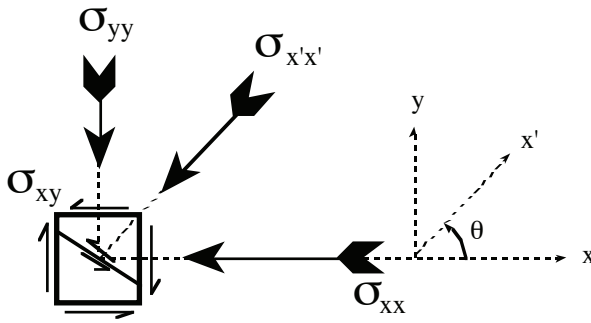


Şekil 2. Hendek çalışmalarında, doğrultu atımlı sol yönlü bir fay için önerilen üç boyutta örselenmemiş numune alım yönleri. (Buradaki asal gerilme yönleri teorik yönlerdir).

gerilmeler olarak kabul edilir ve Jaeger ve Cook (1979)'un aşağıdaki formülü kullanılarak tek bilinmeyen olan σ_{xy} bulunur. Eğer deney sonunda bulunan gerilmeler tesadüfen asal gerilmeler ise, σ_{xy} zaten sıfır veya ihmal edilebilecek değerde küçük çıkacaktır.

$$\sigma_{x'x'} = \sigma_{xx} \cos^2\theta + \sigma_{xy} \sin 2\theta + \sigma_{yy} \sin^2\theta$$

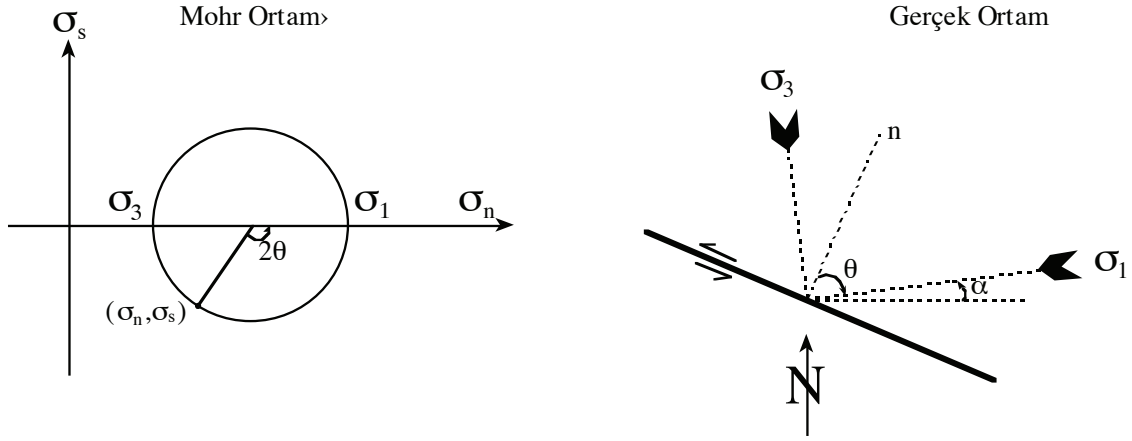
Burada σ_{xx} ve σ_{yy} x ve y eksenleri yönündeki normal gerilmeler; $\sigma_{x'x'}$ ise x ve y eksenleri arasındaki bir üçüncü yöndeki (x') normal gerilme; θ x ve x' arasındaki veya maksimum asal gerilme σ_1 ile x düzleminde ve x yönündeki normal gerilme, σ_{xx} , arasındaki açı; tek bilinmeyen σ_{xy} ise x düzleminde fakat y eksen yönündeki kesme gerilmesidir (Şekil 3).



Şekil 3. Faylanmaya uğramış bir numune üzerinde etken olan normal ve kesme/makaslama gerilmeleri. (Burada $\sigma_{x'x'}$, x ekseninin θ kadar döndürülmesi (rotasyon) sonucu elde edilen x' yönünde etken olan normal gerilmedir).

Böylece tek bilinmeyen σ_{xy} bulunduktan sonra, hendeklerdeki birimlerin, numunelerin alındığı derinlikte faylanmasına neden olan, gerilme durumunun Mohr dairesi çizilip, asal gerilme değerleri bulunabilir. Bu Mohr dairesinin oluşturduğu kırılma zarfı ile aynı derinliğin bir zemin mekaniği laboratuvarında simule edilerek, aynı biriminden alınan numunelerin üç eksenli veya kesme kutusu deneylerinde çok yavaş (drenajlı) bir şekilde bir kaç günde kırılması ile elde edilen kırılma zarfı karşılaştırılır. Eğer daha önceki bulunan kırılma zarfı ikincisinden daha büyük çıkarsa, faylanma büyük bir olasılıkla hızlı, yani sismik, eğer kırılma zarfları birbiri ile çakışır veya çok yakın çıkarsa faylanma yavaş,

büyük bir olasılıkla asismik olmuştur denebilir. Ayrıca elde edilen Mohr daireleri kullanılarak, Mohr dairesi ortamından, gerçek (arazi) ortamına geçilip asal gerilme yönleri bulunabilir (Şekil 4). Böylece çalışılan bölgede etken olan asal gerilme yönleri bulunup bu yönler hidrolik çatlatma (hydraulic fracturing), kuyu göçmeleri (wellbore breakouts), fay düzlemi çözümü gibi diğer yöntemlerle bulunan yönlerle karşılaştırılabilir.

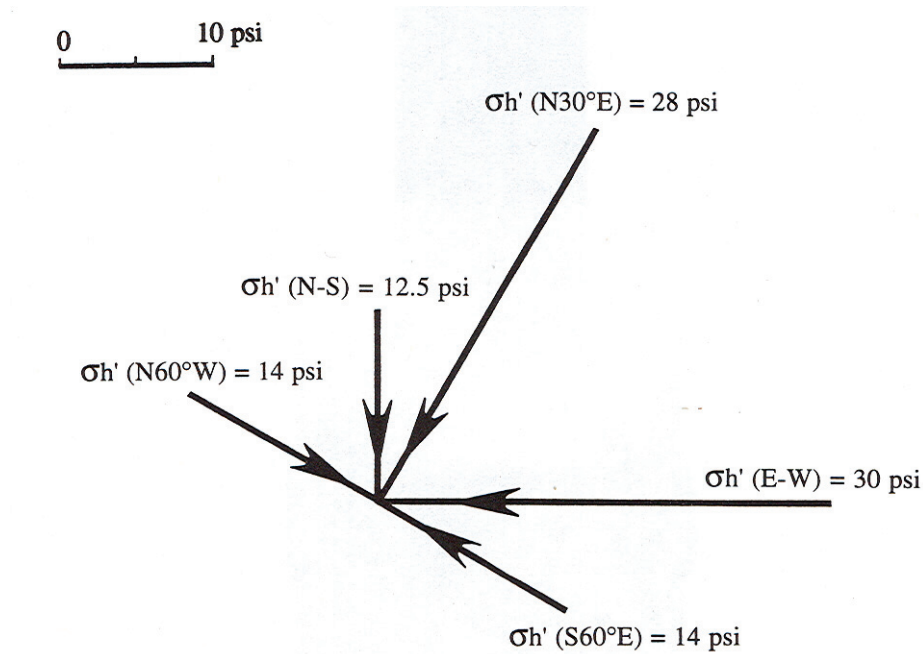


Şekil 4. Sonuçların Mohr ve gerçek ortamlarda değerlendirilmesi. σ_n : normal gerilme, σ_s : kesme/makaslama gerilmesi, θ : maksimum asal gerilme, σ_1 ile kayma yani fay düzlemi normali (n) arasındaki açı, α : teorik σ_1 yönü ile gerçek σ_1 yönü arasındaki olası dönme (rotasyon) açısı.

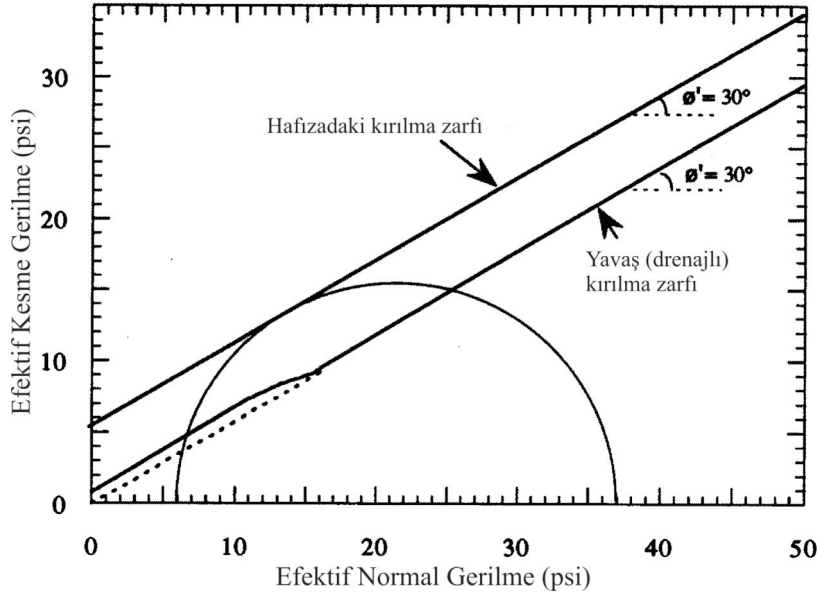
ÖRNEK ÇALIŞMALAR

Paleosismolojik çalışmalar ile ABD'nin Oklahoma eyaletindeki Meers fayının aktif bir fay olduğu, son hareketinin yaklaşık 1100 yıl önce (Geç Holosen) meydana geldiği konusunda bilim adamları hem fikir olmuşlardır (Luza ve diğ., 1987; Madole, 1988; Kelson ve diğ., 1990a,b; Cetin, 1992, 2003). Ancak bazı araştırmacılar fayın 1100 yıl önceki hareketinin karakteri konusunda ayrılığa düşmüş ve hareketin asismik (fay kribi şeklinde) olduğunu ileri sürmüşlerdir (Tilford, 1987; Burrell and Tilford, 1996). Yazar tarafından fay üzerinden 5.5 m derinlikten alınan örselenmemiş yönlü numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda zeminin 5.5 m derinlikte faylanması esnasında zemin hafızasına farklı yönlerde kaydedilen efektif basınçlar (önkonsolidasyon basınçları) belirlenmiştir (Şekil 5). Daha sonra yapılan gerilme analizleri sonucunda faylanmanın yönü $K62-72^\circ D$ olan maksimum asal gerilme etkisinde gerçekleştiği ve zeminin faylanmasına neden olan kırılma zarfı belirlenmiştir. Elde edilen bu kırılma zarfı ile aynı

zemini laboratuvar ortamında drenajlı şartlar altında yenmek veya kırmak için gerekli kırılma zarfı karşılaştırılarak faylanmaya neden olan hareketin sismik karakterde olduğu ortaya konulmuştur (Şekil 6). Şekilde görüldüğü gibi zeminin 1100 yıl önce 5.5 m derinlikte faylanması esnasında hafızasına kaydedilen kırılma zarfı aynı zemini drenajlı şartlar altında (yavaş) kırmak için gerekli kırılma zarfından daha büyük (yukarıda) çıkmıştır. Bulunan maksimum asal gerilme yönü bölgede diğer araştırmacılar (Dart, 1987; Zoback ve Zoback, 1991) tarafından değişik yöntemler kullanılarak bulunan ortalama $K80^\circ$ D yönüyle uyumlu çıkmıştır.

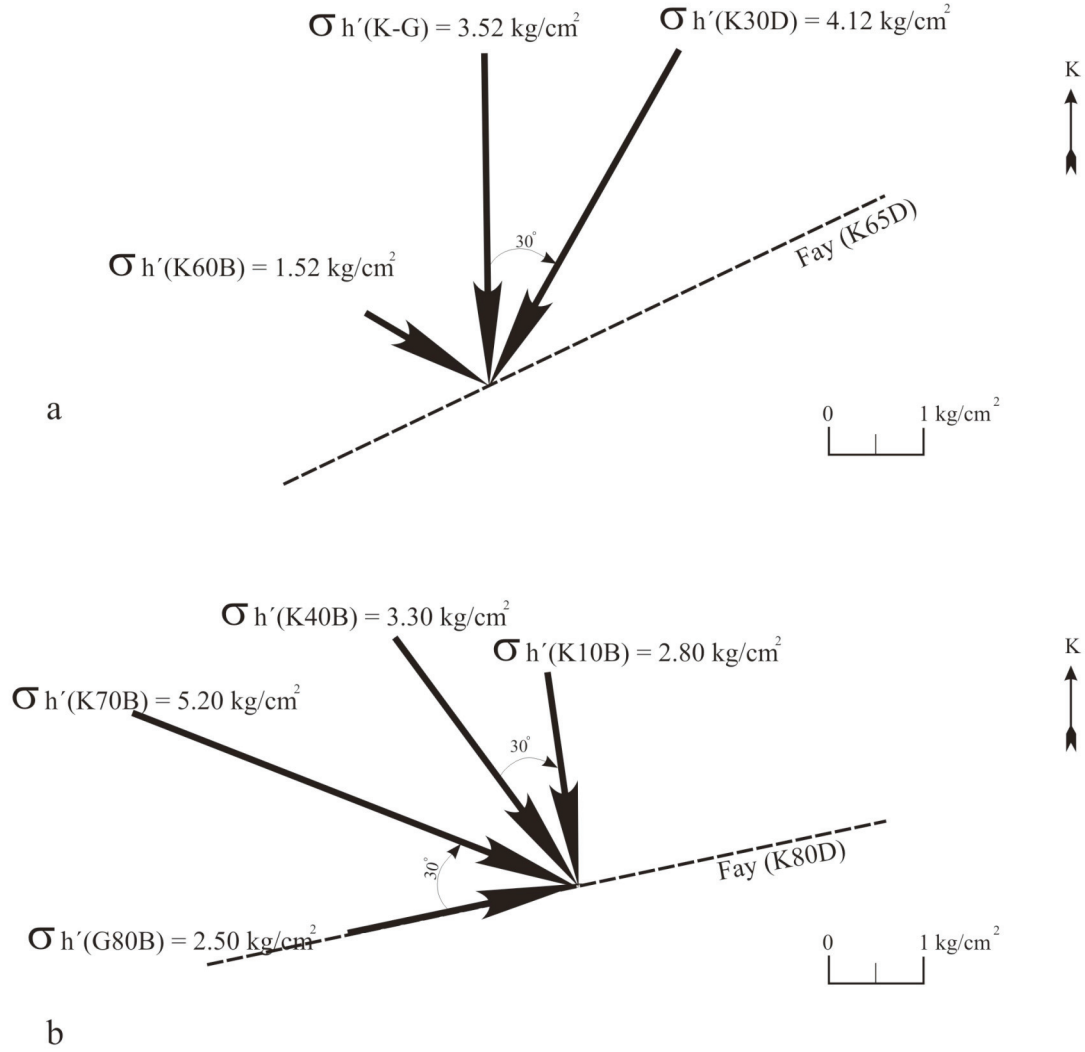


Şekil 5. Meers fayı üzerinde 5.5 m derinlikten alınan yönlü örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri sonucunda farklı yönlerde belirlenen efektif (önkonsolidasyon) basınç değerleri (Cetin, 1997). Fay doğrultusu = $K60^\circ W$. $1 \text{ kg/cm}^2 = 14.22 \text{ psi}$.



Şekil 6. Meers fayı üzerinde 5.5 m derinlikte zemin hafızasına kaydedilen kırılma zarfı ile aynı zemini drenajlı şartlar altında (yavaş) kırmak için gerekli kırılma zarflarının karşılaştırılması (Cetin, 1997). $1 \text{ kg/cm}^2 = 14.22 \text{ psi}$.

Benzer şekilde, Doğu Anadolu Fay Sisteminin Palu-Hazar Gölü ve Kuzey Anadolu Fay Sisteminin Gerede segmentleri üzerinde yapılan paleosismolojik kazı çalışmalarında açılan hendeklerde karşılaşılan faylanmış zeminlerden alınan örselenmemiş numuneler kullanılarak ve aynı yöntem izlenerek asal gerilme yön ve değerleri belirlenmiş ve hendeklerdeki zeminlerin ilk faylanmalarının sismik karakterde olduğu, maksimum asal gerilme yönlerinin bölge için fay düzlemi çözümlerinden elde edilen yönlerle uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 7).



Şekil 7. Doğu Anadolu Fay Sisteminin Palu-Hazar Gölü (a) ve Kuzey Anadolu Fay Sisteminin Gerede (b) segmentleri üzerinde sırası ile 1 m ve 1.5 m derinlikten alınan yönlü örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri sonucunda farklı yönlerde belirlenen efektif (önkonsolidasyon) basınç değerleri.

SONUÇLAR

Sonuç olarak, aktif tektoniğin alt konularından biri olan paleosismik çalışmalar sırasında açılan hendeklerde karşılaşılan ve genelde Kuvaterner yaşlı genç jeolojik birimlerin (zeminlerin) ilk faylanmaları esnasında etken olan asal gerilmelerin birimlerin hafızasına alınabileceği ve bu gerilmelerin Casagrande yöntemi ile belirlenebileceği

söylenabilir. Hendeklerden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılarak hendeklerdeki birimlerin ilk faylanmalarının sismik veya asismik karakterde olduğu bulunabilir. Buradan hareketle varsa diğer hareketlerin karakterleri ve gelecekteki olası hareketlerin ne karakterde olabilecekleri hakkında bilgi sahibi olunup, faylanma sırasında etken olan asal gerilme değerleri ve yönleri bulunabilir. Böylece, hendeklerdeki klasik çalışmaların dışında bir çalışma yapılarak açılması ekonomik açıdan pek de ucuz olmayan hendekler daha verimli kullanılmış olacaktır.

İlk defa yazar tarafından önerilen bu yeni yöntem ABD'nin Oklahoma Eyaletindeki Meers fayı ile Doğu Anadolu Fay Sisteminin Palu-Hazar Gölü ve Kuzey Anadolu Fay Sisteminin Gerede segmentleri üzerinde başarı ile uygulanmış ve faylar üzerinde açılan hendeklerdeki zeminlerin ilk faylanmalarının sismik karakterde olduğu, maksimum asal gerilme yönlerinin bölge için değişik yöntemler ile elde edilen yönlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Anderson, E.M., 1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Oliver & Boyd, Edinburg.
- Burmister, D.M., 1951. The application of controlled test methods in consolidation testing. Proc. Symp. Cons. Test. Soils: ASTM Special Technical Publication 126, p. 83.
- Burrell, R.B and Tilford, N.R., 1996. Evaluation of faulting characteristics and ground acceleration associated with recent movement along the Meers fault, southwestern Oklahoma. Geological Society of America Abstracts with Programs, 28:7.
- Casagrande, A., 1932. The structure of clay and its importance in foundation engineering. Proc. Contributions to Soil Mech., 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston, Massachusetts, pp. 72-112.
- Casagrande, A., 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Proc. 1st. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Cambridge, Massachusetts, 3:60-64.
- Cetin, H., 1992. The northwest extension of the Meers fault in southwestern Oklahoma. Proc. 28th. Symp. Eng. Geology and Geotechnical Eng., University of Idaho, Boise, Idaho, pp. 43-58.
- Cetin, H., 1997. How did the Meers fault scarp form? Paleoeearthquake or aseismic creep? A soil mechanical perspective. Eng. Geol., 47:289-310.

- Cetin, H., 2003. Comment on "Known and suggested Quaternary faulting in the midcontinent United States" by Russell L. Wheeler and Anthony Crone. *Engineering Geology*, Elsevier, Vol. 169, pp. 193-210.
- Dart, R.L., 1987. Horizontal stress orientations from well-bore breakouts in the south-central United States. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 19:269.
- Esu, F. and Calabresi, G., 1969, Slope stability in an overconsolidated clay. *Proc. 7th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Mexico City, Mexico*, 2: 555-563.
- Feda, J., 1978. *Stress in Subsoil and Methods of Final Settlement Calculation*. Elsevier, Amsterdam.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P.F., 1976. *An Outline of Structural Geology*: John Wiley & Sons, New York.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Chapman & Hall, London.
- Karig, D.E. and Hou, G., 1992. High-stress consolidation experiments and their geologic implications. *J. Geophys. Res.*, 97:289-300.
- Kelson, K.I., Swan, F.H. and Coppersmith, K.J., 1990a. Implications of the late Quaternary faulting along the Meers and Criner faults to assessments of seismic hazards in central and eastern U.S. *Geological Society of America, South-Central Section, 24th Annual Meeting, Abstracts with Programs*, 22:10.
- Kelson, K.I., Swan, F.H. and Wesling, J.R., 1990b. Late Quaternary displacements on the Meers fault, southern Oklahoma. *Geological Society of America, South-Central Section, 24th Annual Meeting, Abstracts with Programs*, 22:10-11.
- Luza, K.V., Madole, R.F. and Crone, A.J., 1987. Investigation of the Meers fault, southwestern Oklahoma: Oklahoma Geological Survey Special Publication 87-1, 75 pp.
- Madole, R.F., 1988. Stratigraphic evidence of Holocene faulting in the midcontinent: The Meers fault, southwestern Oklahoma. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100:392-401.
- Nagaraj, T.S., 1993. *Principles of Testing Soils, Rocks and Concrete*. Elsevier, Amsterdam.
- Schmertmann, J.H., 1955. The undisturbed consolidation behavior of clay. *American Society of Civil Engineering Transactions*, 120:1201-1233.

- Simons, N.E., 1965. Consolidation investigation on undisturbed Fornebu clay. Norwegian Geotechnical Institute, 62:1-9.
- Tchalenko, J.S., 1967. The influence of shear and consolidation on the microscopic structure of some clays. Ph.D. Thesis, University of London, London, England.
- Tilford, N. R., 1987. Deformation and seismicity along the Meers fault, Oklahoma. Geological Society of America Abstracts with Programs, 19:869.
- Voight, B., 1966. Interpretation of in situ measurements. Proc. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Portugal, 3:332-348.
- Voight, B., 1974. A mechanism for "locking-in" orogenic stress. Am. J. Sci., 274:662-665.
- Ward, W.H., Samuels, S.G. and Butler, M.E., 1959. Further studies of the properties of London clay. Geotechnique, 9:33-58.
- Zoback, M.D. and Zoback, M.L., 1991. Tectonic stress field of North America and relative plate motions. In: D.B. Slemmons, E.R. Engdahl, M.D. Zoback and D.D. Blackwell (Editors), Neotectonics of North America. Geol. Soc. Am., The Decade of North American Geology (DNAG), Decade Map Volume, pp. 339-366.