

KADEMELİ (En Echelon) KIVRIM GEOMETRİSİNDE ÜÇÜNCÜ BOYUT: SAN ANDREAS FAY ZONUNDAN ÖRNEKLER

The Third Dimension in En Echelon Fold Geometry: Examples From The San Andreas Fault Zone

HAYRETTİN KORAL İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, -İstanbul

ÖZ : Bu çalışma en echelon kıvrımların üç boyutlu geometrisini ortaya koymayı amaçlamıştır. Bu amaca ulaşmak için Güney Kaliforniya'da San Andreas Fayı boyunca Los Angeles ve Ventura bölgelerinde oniki farklı antiklinalde yirmidört kıvrım gidişi incelenmiştir. Artan derinlikle en echelon kıvrım çizgilerinin yeni bir gidiş kazandıkları ve kıvrımların fay düzlemiyle daha küçük açılar oluşturdukları görülmüştür. Kıvrım gidişindeki değişimin çalışılan düzeylerdeki birimlere etkiyen deformasyon süresi ve fiziksel faktörler arasındaki farklılıktan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

ABSTRACT : This study investigates three-dimensional geometry of en echelon folds. To elicit the geometry, twenty-four fold azimuths were examined on twelve separate anticlines in the Los Angeles and Ventura areas. Field data show that hinge azimuths of en echelon folds deviate to new orientation and acquire smaller angles to the shear direction. The change in orientation of the fold azimuths is interpreted as the consequence of difference in duration of deformation and physical parameters between the levels studied.

GİRİŞ

Son yıllarda en echelon çatlak ve kink çiftlerinin geometrisi ve oluşum mekanizmaları çeşitli çalışmacılar tarafından incelenmiştir (örneğin, Tchalenko and Ambraseys, 1970; Ramsey, 1980; Barlett ve diğ. 1981; Aydın ve Page, 1984). Bununla birlikte doğrultu atımlı fay zonlarının diğer bir unsuru olan en echelon kıvrımların geometrisi büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Bu çalışma en echelon kıvrımları çeşitli stratigrafik seviyelerde incelemeyi amaçlamaktadır.

Doğrultu atımlı fay zonları genellikle düşey veya düşeye yakın konumlu, yataya yakın atımlı bir fay çeşididir. Hareketin yönüne bağlı olarak sağ atımlı veya sol atımlı olarak sınıflandırılır. Literatürde "wrench", "tear" "truncurrent" gibi değişik isimlerle anılmışlardır.

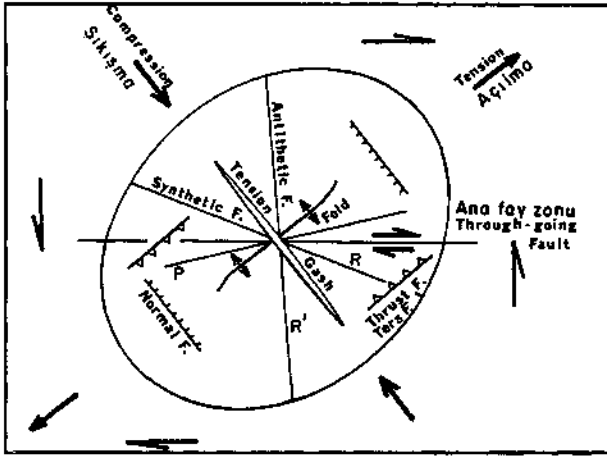
Doğrultu atımlı faylar sıklıkla kademeli (en echelon) örnek gösteren kırıklar, faylar ve kıvrımlarla birlikte bulunurlar. Böyle bir sistemin oluşumunda iki farklı mekanizma rol oynayabilir. Bunlar sırasıyla rotasyonlu ve rotasyonsuz makaslamalardır. Yer kabukta önemli miktarlarda aüm gösteren doğrultu atımlı faylar rotasyonlu makaslamanın bir sonucu olarak gelişirler (Sylvester, 1988). Şekil 1 Sağ atımlı böyle bir fay sisteminde gelişmesi beklenen çeşitli yapıların gerilme alanı ve makaslama yönüyle olan ilişkilerini sergilemektedir.

Doğrultu atımlı fay zonundaki kıvrımlar yüzeyde kademeli (en echelon) bir örnek gösterirler (Campbell, 1958). En echelon terimi kıvrımların geometrisi ve bölgesel dağılımını tanımlayan fakat herhangi bir yapısal köken belirtmeyen bir terimdir. En echelon kıvrımlar makaslama deformasyonunun erken safhalarında oluşurlar ve makaslama yönüne oblik gelişirler (Wilcox ve diğ., 1973). İdeal olarak makaslama yönüyle 45°lik bir açı yapan bu kıvrımlar şekil değiştirme elipsoidinin kısalma yönüne dik gelişirler. En echelon kıvrımlar ya sağ yanlı veya sol yanlı örnekler oluştururlar. Bu özelliklerinden dolayı en echelon kıvrımlar doğrultu atımlı fay zonlarında hareket ve ana gerilme yönlerini ortaya çıkarmada yararlı yapılarıdır (şekil 1).

Bugüne kadar kademeli kıvrımlarla ilgili çeşitli çalışmalar genellikle laboratuvar deneyleriyle sınırlı kalmıştır (örneğin Wilcox ve diğ. 1973; Harding, 1974, 1976; Odonne ve Vialon, 1983). Bu çalışma diğer çalışmalardan farklı olarak üç boyutlu en echelon kıvrım geometrisini laboratuvar ve saha verilerinin ışığı altında inceleyecektir.

ÇALIŞMA ALANI

Kıvrım geometrisini araştırmak amacıyla San Andreas fay sistemindeki en echelon kıvrımlar



Şekil 1: Doğrultu atımlı fay zonlarında gelişen yapılar arasındaki geometrik ilişkileri gösteren diyagram

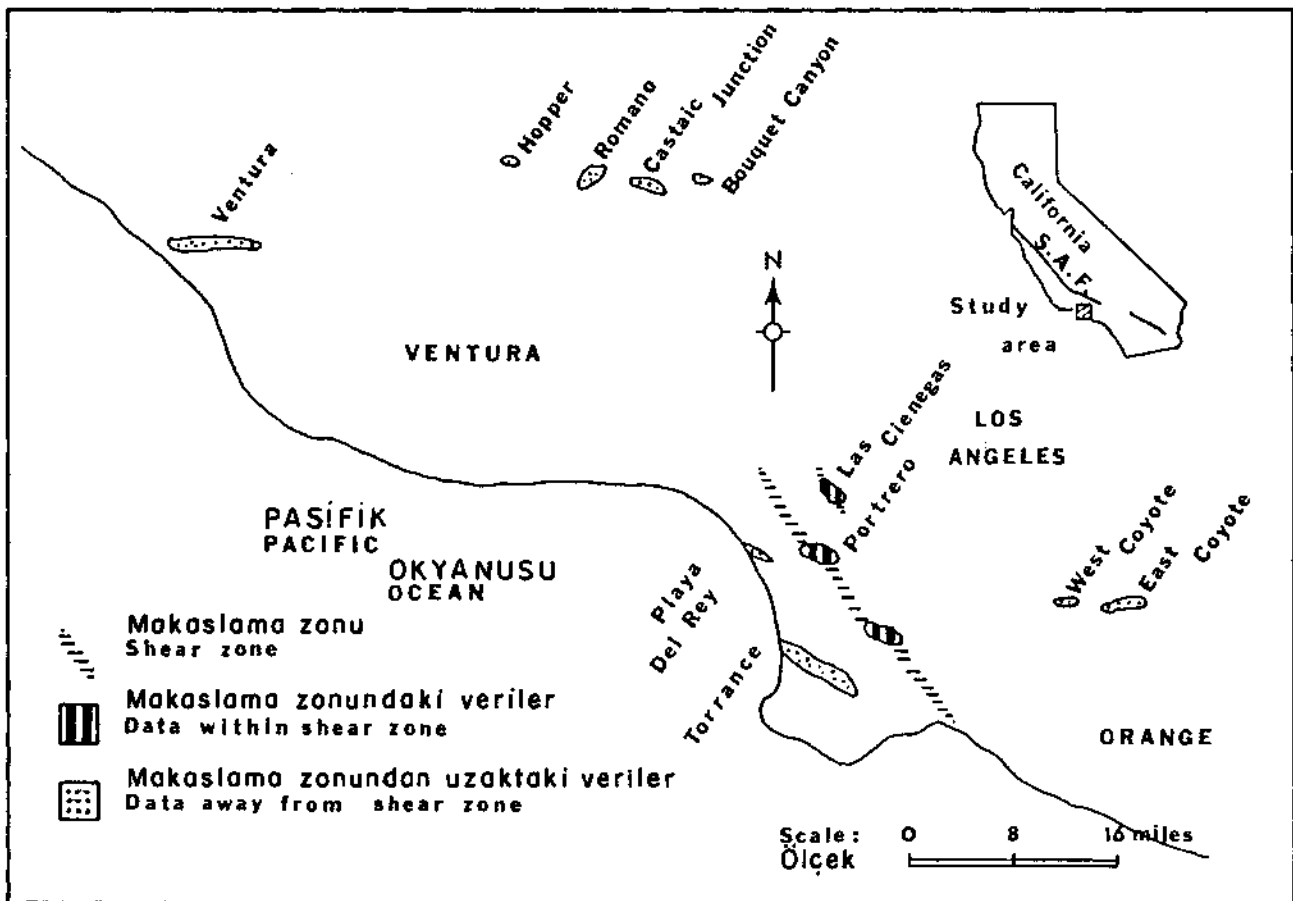
Figure 1: Plan view of geometric relations among structures expected to form along a strike-slip fault zone

çalışılmıştır. Bu fay zonunun çalışmasında kademeli kıvrımlarla ilişkili petrol üretim alanlarının varlığı önemli bir faktördür. Fay zonu boyunca petrol üretim alanlarından elde edilen yeraltı haritaları bu çalışma için gerekli olan verileri sağlamıştır. Verilerin çoğunun Los Angeles ve Ventura bölgelerine yoğunlaşması nedeniyle çalışma sözü edilen bu bölgede gerçekleştirilmiştir (şekil 2).

İncelenen her kıvrım için farklı yaş ve derinlikteki birimleri temsil eden en az iki yapı haritası ve çalışılan birimlerin yaşını gösterir stratigrafik sütun elde edilmiştir. Şekil 3 bunun bir örneğini göstermektedir.

Bölge jeolojisinin yalınlığı Los Angeles ve Ventura bölgelerinin çalışma alanı olarak seçiminde rol oynayan diğer bir faktördür. Jeoloji basit olarak iki bölümde incelenebilir:

a) Temel kayaları; ve b) sedimenter birimler. Temel kayaları iki tiptir. Birincisi mavi ve lavsonit şistlerden oluşan Katalina şistidir. İkinci kaya türü yeşil şist ve serpantinlerden oluşan Fransiscan karmaşığdır. Fransiscan karmaşığı Los Angeles bölgesinin batı kısmında görülür.



Şekil 2: Çalışma alanı ve geometrisi incelenen kıvrımların çalışma alanı içindeki yerleri

Figure 2: Study area and locations of data used for investigating en echelon fold geometry

KADEMELİ KIVRIM GEOMETRİSİ

Taban birimlerin üzerine uyumsuz olarak sedimenter birimler gelir. Sedimenter kayalar genel olarak kumtaşı ve silt taşından oluşmuştur. Bu istif hemen hemen bütün bölge için karakteristiktir. İstifte bazı farklılıklar da mevcuttur. Bunlara örnek olarak Üst Kretase'de konglomeralar, Orta Miyosen'de volkanik kayalar ve Pliyosen ile Pleistosen'de denizel olmayan klastikler gösterilebilir.

Bölge Üst Kretase'den Alt Miyosen'e kadar bir havza niteliğini korumuştur. Üst Miyosen'den itibaren Pasifik Plakasının Kuzey Amerika Plakasıyla çarpışması nedeniyle yaklaşık 15 milyon yıl öncesinden başlayarak bir makaslama ve sıkışma rejiminin etkisi altında kalmıştır. Bu rejim bölgede San Andreas fayının gelişimine yol açmıştır (Campbell and Yerkes 1976).

KIVRIM GEOMETRİSİ

En echelon kıvrımların geometrisini öğrenmek amacıyla yumuşak reçineyle yapılan deneylerden yararlanılmıştır. Deneyler:

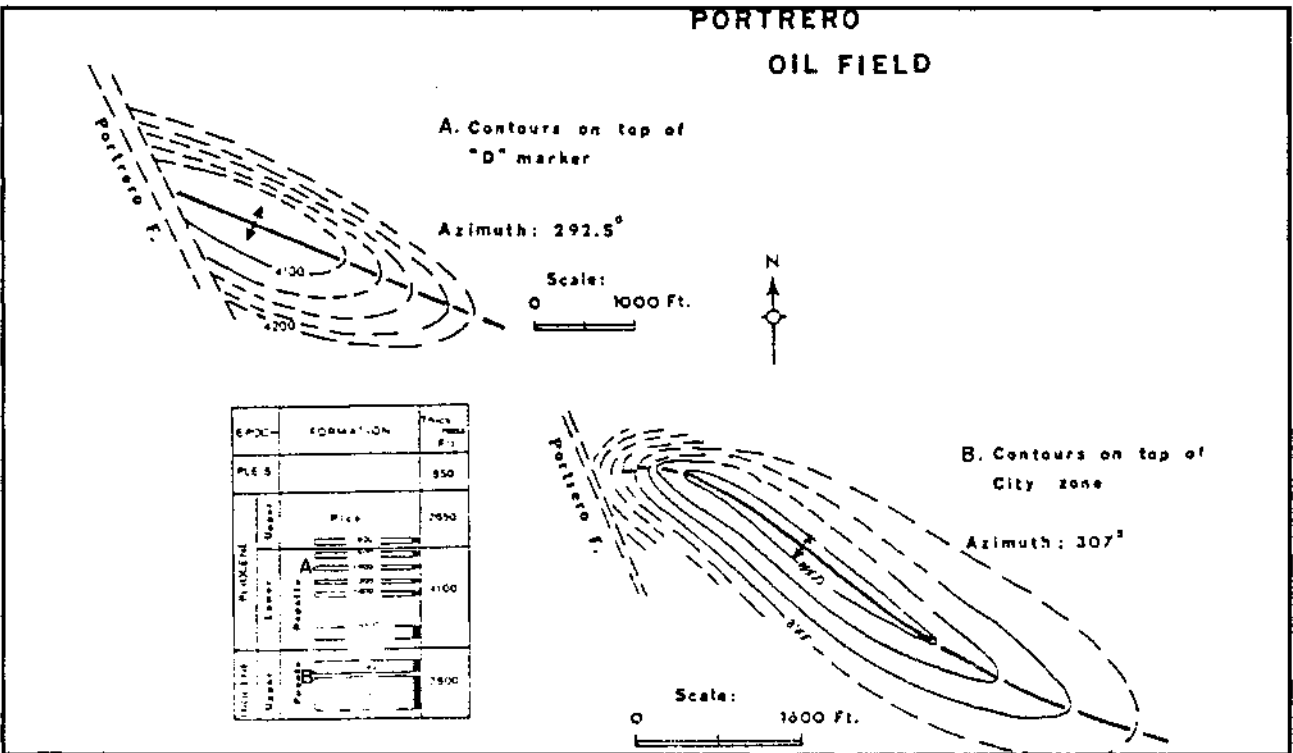
- Faylanmayla ilgili kıvrımlanmanın şekli
- Artan deformasyonla en echelon kıvrım çizgisindeki değişimi incelemiştir.

Bir deformasyon haznesi, iki hareketli blok, thermocouple ve milivoltmetreden oluşan deney aygıtında bloklar hazne içersinde makaslama olayını oluştura-

bilmek, thermocouple ve milivoltmetre deformasyon süresince sıcaklığı ölçebilmek amacıyla kullanılmıştır. Deney esnasında hazne reçine ile doldurulmuş ve arzu edilen katılık elde edilene kadar ısıtılmıştır. Daha sonra hareketli bloklar hareket ettirilerek malzemede oluşan kıvrımların kıvrım çizgileri gözlenilmiştir.

Deneyler esnasında kıvrımların en echelon bir örnek gösterdikleri ve kıvrım çizgilerinin makaslama moduna uygun olarak saat yönünde ve aksi yönde rotasyona uğradıkları gözlenilmiştir. Kıvrım gidişindeki rotasyonun büyüklüğünün sıcaklık, deformasyon miktarı ve birim zamandaki deformasyonla kontrol edildiği görülmüştür. Deneysel sonuçlar kıvrım çizgilerinin stratigrafik bir kesitinin farklı derinliklerinde birbirine paralel olmayacağını ve değişik gidişler gösterebileceğini ortaya koymuştur (Koral, 1983).

Kıvrım geometrisi Los Angeles ve Ventura bölgelerindeki oniki ayrı antiklinalde iki farklı düzeyde incelenmiştir. Tablo 1 çalışılan kıvrımlardan elde edilen sonuçları sergilemektedir. Tablodaki 2. sütun kullanılan verilerin kaynaklarını, 3. sütun kıvrım gidişlerinin coğrafik yönlerini, 4. sütun gidişlerin ölçüldüğü düzeylerin jeolojik yaşlarını ve 5. sütun ise makaslama yönü ile deformasyon anında yaptıkları açıları vermektedir. Veriler kıvrım çizgilerinin artan derinlikle (yaşlıya doğru) sistematik bir dönme (rotasyon) yaptığı göstermektedir. Kıvrım eksen



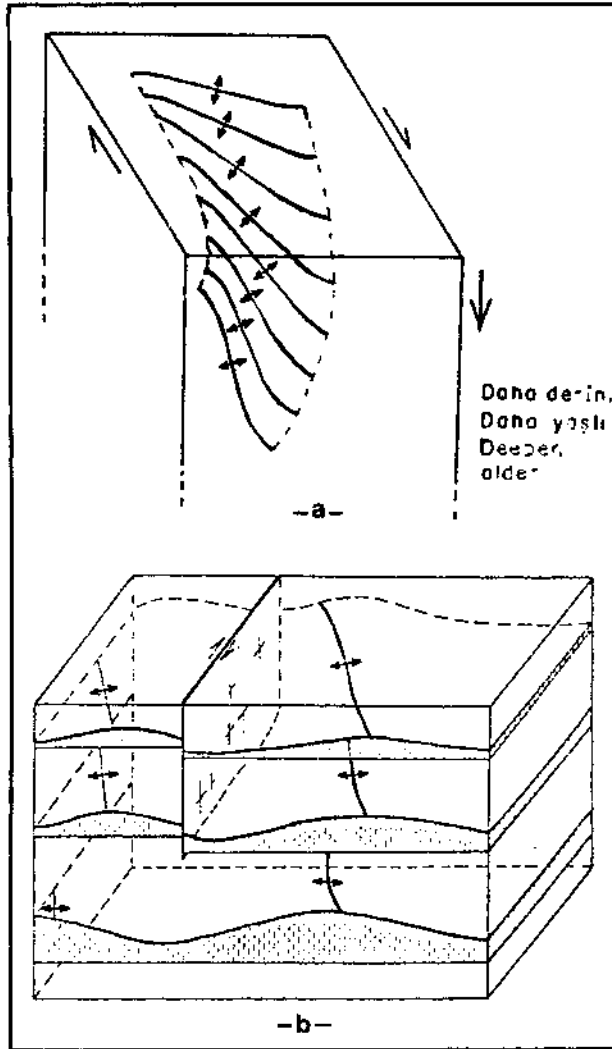
Şekil 3: En echelon kıvrım geometrisini araştırmada kullanılan veri örneği

Figure 3: An example of information used for obtaining en echelon fold geometry

düzlemi artan derinlik ve yaşla bir yelpaze görünümü kazanmaktadır. Bu geometri yaşlı birimlerde kıvrım çizgisindeki dönme sonucunda oluşur (şekil 4a).

Kıvrım çizgisinin rotasyonu sağ yönlü faylarda saat yönünde ve sol yönlü faylarda saat yönünün tersindedir. Keza artan deformasyonla kıvrım çizgilerinin makaslama yönü ile daha küçük açılar oluşturduğu görülmüştür. Şekil 4b, Tablo 1'de verilen kıvrım gidişindeki açısal değişimlerin şematize olarak gösterilişidir.

Kıvrımlarda gözlenen diğer bir özellik derinlikle kıvrımlardaki şekil değişiminin artmasıdır. Derinlik ve



Şekil 4: Artan derinlikle kıvrım gidişindeki değişimi ve; en echelon kıvrımların üç boyutlu geometrisini gösteren diyagramlar (Koral, 1983)

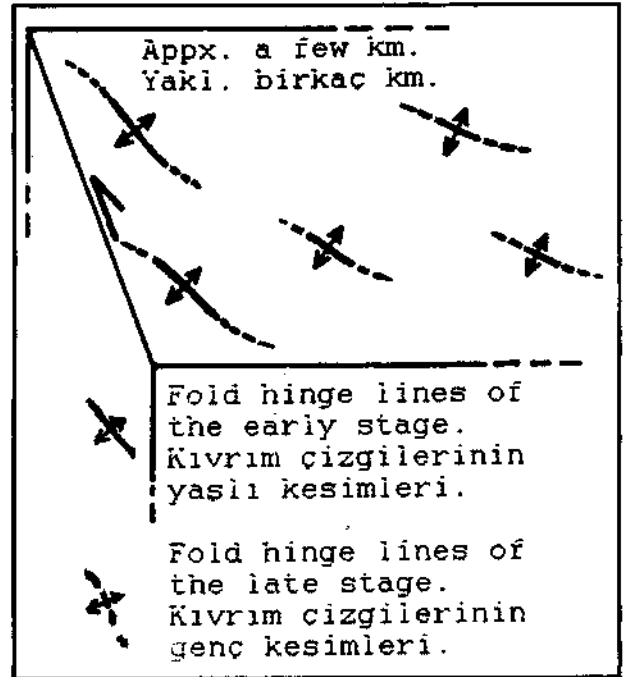
Figür e 4: Diagrams depicting azimuths of a nested fold at successively deeper levels, and exaggerated three-dimensional geometry of an echelon folds (Koral, 1983)

birimin yaşı arttıkça kıvrılma miktarı da artmaktadır. Ayrıca, San Andreas fayı boyunca kıvrımlar yüzeyde fay zonuna uzaklıkla oransal olarak değişen bir özellik gösterirler. Uzak bölgelerdeki kıvrımlar ana fay zonuyla daha büyük açılar oluştururlar. Yüzeysel kıvrımların bir diğer geometrik özelliği de kıvrım çizgilerinin sigmoidal şeklindedir. Bu şekil en echelon kırıklarıninkine benzerdir ve kıvrım çizgisindeki dönme (rotasyon) ve büyümenin sonucunda gelişir.

Bu kıvrım şekli deformasyon ilerledikçe daha belirgin bir hale gelir (şekil 5).

TARTIŞMA

Kayaların akışkanlar gibi davranması jeologlar için şaşırtıcı bir özellik değildir. Bu özellik deneysel çalışmalarda gözlenebilmesine rağmen deneysel çalışmalarda süre sınırlamaları gözlenebilir bir deformasyonu ortaya koymada önemli bir engel teşkil eder. Bu nedenle laboratuvar çalışmaları daha büyük yükler ve hatla daha büyük deformasyon hızlarıyla yapılır. Bununla birlikte gerek saha ve gerekse laboratuvar çalışmalardan kayaların viskoz malzemeler gibi davrandıkları sonucu çıkartılabilir.



Şekil 5: En echelon kıvrım çizgisinin sigmoidal şekli ve ana fay zonuna uzaklığın kıvrım gidişine etkisi

Figure 5: Relationship between the sense of shear and the sigmoidal shape of an en echelon fold hinge line, and the influence of distance on the sigmoidal shape

SITE	Source of data	ϕ	Age (my)	α
WEST COYOTE	(4) v.420-C	272.5	1.5	46.1
	(1) v. II, 48	277	7	41.6
EAST COYOTE	(4) v.420-C	253.5	1.5	65.1
	(1) v. II, 46	263.5	7.5	55.1
VENTURA	(3) v. 170	261.5	5	57.1
	(1) v. II	267.5	7	51.1
ROMANO	(3) v. 170	256.5	6	69.2
	(1) v. 37	269	9.5	56.7
PLAYA DEL REY	(1) v. 30	290	7	35.7
	(1) v. 17	296	11.5	29.7
CASTAIC JUNCTION	(1) v. II	278.5	9	47.2
	(1) v. 52-2	285	11.5	40.7
BOUQUET CANYON	(4) v. 334-H	281.5	2.5	37.1
	(1) v. 53-2	289	9.3	36.7
	(1) v. 53-2	292.5	11.2	33.2
TORRANCE	(1) v. II	286	9.5	39.7
	(1) v. 32-1	293	13.5	32.7
HOPPER CANYON	(2) p. 2	236	14	99
	(1) v. II	241.5	17	93.5
DOMINQUEZ	(3) v. 170	290.5	325.7	35.2
	(2) pt. 1	297.5		28.2
PORTRERO	(2) pt. 1	292.5	325.7	33.2
	(1) v. 47	307		18.7
LAS CIENEGAS	(1) v. 56-1	303	325.7	22.7
	(1) v. 51-2	312		13.7

Tablo I. Kıvrım geometrisini araştırmada kullanılan veriler ve gözlenen açılma değişimleri

Table I. Data used for investigating the fold geometry and observed angles of rotation

- (1). California Division of Oil and Gas, California Oil Fields - Summary Operations
- (2). California Division of Oil and Gas, California oil and gas fields maps and data sheets;
- (3). California Division of Mines Bulletin;
- (4). U.S. Geological Survey Prof. Paper;
- (5). A.A.P.G. Bulletin.

Deneysel çalışmalar kayaların deformasyona cevabının fiziksel parametrelere göre değiştiğini göstermektedir. Bu parametreler çevre basıncı, sıcaklık, akışkan basıncı, asal gerilme veya deformasyon hızıdır. Sıcaklık ve çevre basıncı derinlik arttıkça artar. Böylece kayalar derinlikle değişen mekanik özellikler gösterirler. Kayalar ayrıca artan yaşla dereceli olarak kohezyon

KADEMELİ KIVRIM GEOMETRİSİ

kazanırlar. Daha yaşlı birimler gençlere oranla daha yüksek kohezyona sahiptirler. Bu nedenle kademeli (en echelon) kıvrımların geometrisinde sadece çalışılan seviyeler arasındaki yaş farkı değil, fakat aynı zamanda derinlikle değişen kaya özelliklerinin ve fiziksel parametrelerin etkisi vardır.

SONUÇLAR

San Andreas Fay zonundaki en echelon kıvrımlar için bir geometri tahmin edilmiş ve bu verilerle desteklenmiştir. Bir kıvrımda farklı stratigrafik seviyelerde kıvrım çizgisinde sistematik bir değişimin var olduğu görülmüştür. Değişimin (rotasyonun) büyüklüğü incelenen birimler arasındaki yaş farkı ve deformasyonu etkileyen fiziksel parametrelerin bir sonucudur.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın oluşumuna değerli katkıları nedeniyle Prof. M. Brian Bayly'ye teşekkürü borç bilmekteyim. Makalenin bilgisayara yazımında emeği geçen Şamil Şen'e teşekkür ederim.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Aydın, A., and B. M. Page, 1984. Diverse Pliocene-Quaternary tectonics in a transform environment, San Francisco Bay region, California, G. S. A. Bulletin, 95, 1303-1317.
- Bartlett, W. L., M. Friedman, and J. M. Logan, 1981. Experimental folding faulting of rocks under confining pressure, Part IX. Wrench faults in limestone layers. Tectonophysics, 79,255-277.
- Barton, C. L., 1931. A report on Playa Del Rey oil field. California Div. Oil and Gas. Summary of operations, 17, 5-22.
- California Division of Oil and Gas, 1961. California oil and gas fields maps and data sheets, Los Angeles-Ventura basins and Central Coastal regions, part 2 496-913.
- California Division of Oil and Gas, 1974. California oil and gas field, south central, coastal and offshore California, volume 2.
- Campbell, R. H. and R. F. Yerkes, 1976. Cenozoic evolution of the Los Angeles basin area-relation to plate tectonics. A. A. P. G. pasific Section misc. Rub., 24, 541-558.
- Campbell, J. D., 1958. En echelon folding. Economic Geology, 53, 448-472.
- Cordova, S., 1966. Castaic Junction oil field. California Div. of Oil and Gas, Summ. of Operations, 52 (2), 55-56.

- Driggs, J. L., N. N. Sampson, 1951. Romano Oil Field. California Div. of Oil and Gas, Summ. of operations, 37 (1), 5-12.
- Gravse, D. T., 1954, Geology of the Dominquez oli field, Los Angeles County. Division of Mines Bulletin 170, map sheet 32.
- Harding, T. F., 1973. Newport-Inglewood trend, California-an example of wrenching style deformation. A. A. P. G. Bulletin, 57, 97-115.
- Harding, T. F., 1974. Petroleum traps associated with wrench faults, A. A. P. G. Bulletin, 58, 1290-134.
- Hodges, F. C., 1944. Gas storage and recent developments in the Playa Del Rey oil field. California Division of Oil and Gas, Summ. of Operations, 30 (2), 3-10.
- Jennings, C. W., and B. W. Troxel, 1954. Geology of Southern California, Geologiv guide 2, Ventura basin. Divison of Mines Bulletin, 170, 1-63.710.
- Johnson, R. A., 1961. East area of Portrero oil field. California Div. of oil and Gas. Summ. of Operations, 47 (2), 65-74.
- Koral, H., 1983. Folding of strata within the shear zones: inferences from the azimuths of en echelon folds alog the San. Andreas fault. Unpublished M. Sc. thesis, Rensselaer Polythecnic Institute, 100 p.
- Mefferd, M. G. and S. Cordova, 1962. West Coyote oil field. California Division of oil and Gas, Summ. of operations, 48 (1), 37-46.
- Mefferd, M. G., 1970. Murphy area of Las Cienagas Oil Field. California Division of Oil and Gaz. Summ. of operations, 56 (1), 5-14.
- Odonne, F., and P. Vialon, 1983. Analogue models of folds above a wrench fault. Tectonophysics, 99, 31-46.
- Ramsay, J. G., 1980. Shear zone geometry: a review. Journal of Structural Geology, 2, 83-99.
- Sylvester, G. A., 1988. Strike-slip fault. G. S. A. Bulletin, 100, 1666-1703.
- Tchalenko, J. S., and N. N Ambraseys, 1970. Structural analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake fractures. G. S. A. Bulletin, 81, 1625-1640.
- White, L., 1946. The schist surface of the Western Los Angeles basin. California Divison of Oil and Gas, Summ. of operations, 32 (1): 3-11.
- Wilcox, R. E., T. P. Harding, and D. R. Seely, 1973. Basic-wrench tectonics. A. A. P. G. Bulletin, 57, 74-90.
- Winterer, E. L. and D. L. Durham, 1962. Geoyogy of Southern Ventura Basin, Los Angeles County, California. U.S. Geological Survey Prof. Papar, 334 (H), 275-366.
- Ybarra, R. A., M. W. Dosch and A. D. Stockton, 1960. East Coyote oil field. California Div. of Oil and Gas. Summ. of Operations, 46 (1), 71-76.
- Yeats, R. S., 1973. Newport-Inglewood Fault Zone, Los Angeles Basin, California. A. A. P. G. Bulletin, 57, 117-135.
- Yerkes, R. S. et al., 1965. Geology of the Los Angeles Basin, California an introduction. Geological Survey Prof. Paper, 420 (A), 117-135.
- Yerkes, R. F., 1972. Geology and oil resourcses of the Western Puente Hills area, South California. Geological Survey Prof. Paper 420 (C), 1-62.
- Zulberti, J. L., 1967. Bouquet Canyon Oil Field. California Div. of Oil and Gas. Summ. of Operations, 53 (2), 57-61.