

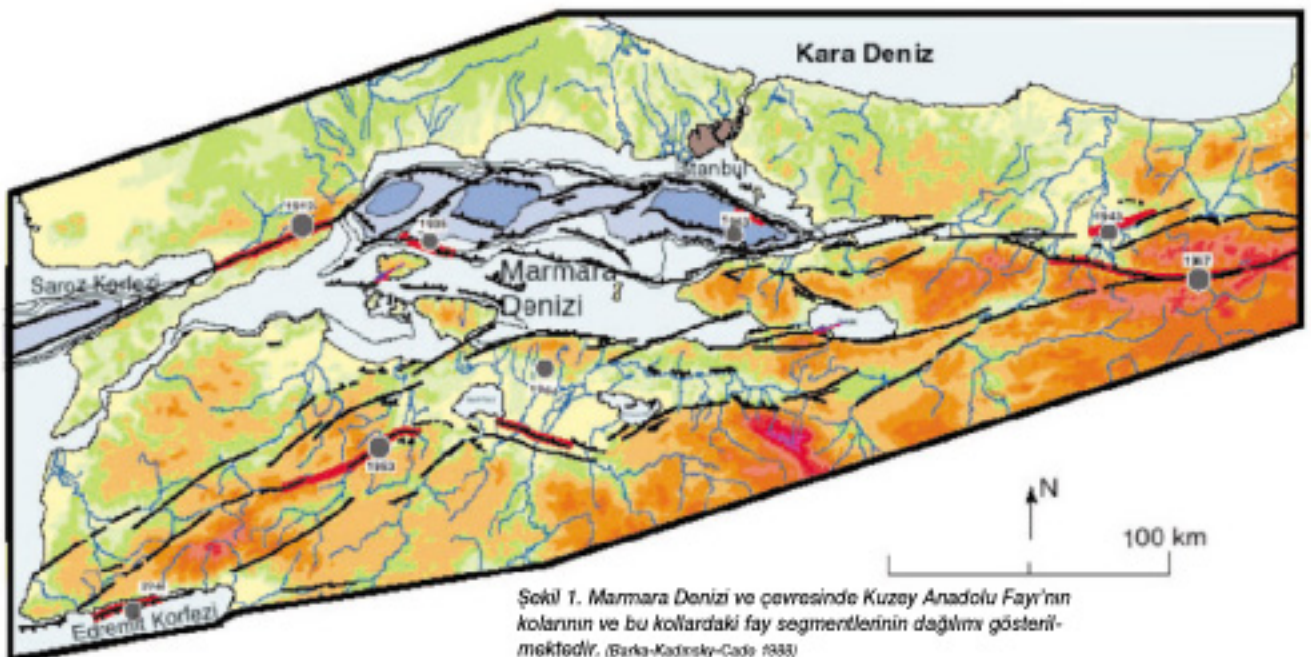
# Marmara Denizi'nin Deprem Mekanizması

17 Ağustos 1999 İzmit depremi sonrasında Marmara Denizi içinde Kuzey Anadolu Fayı'nın ne gibi bir geometrisi olduğu ve kinematığı hakkında farklı görüşler ortaya atılmıştır. Bu görüşlerden biri olan ve 1988 yılında Barka ve Kadinsky-Cade (1988) tarafından batimetri (derinlik), denizçi sismik profillerin analiz ve çevre fayların geometrilerine dayanarak ortaya konulan pull-apart modeli bazıları tarafından eleştirilmiş, ancak yine de eleştiren kişiler tarafından herhangi bir elle tutulur model ortaya konulmamıştır. Bu makalede, Marmara Denizi içindeki ve yakınındaki fayların geometrisi ve kinematığı iki boyutlu sınırlı elemanlar metodu ile modellenmiştir. Bu modelleme sırasında Marmara Denizi içindeki çukurlukların hangi faylara uygun olarak geliştiği veya başka bir deyişle bu morfolojiyi hangi doğrultuda ve uzunluktaki fayların oluşturabileceği irdelenmiştir.

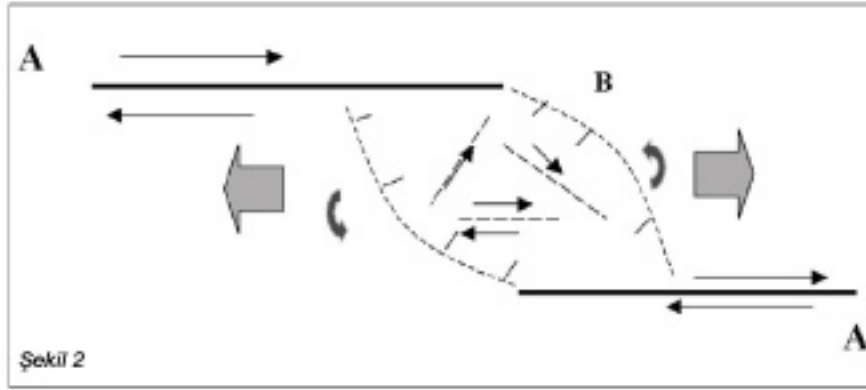
**M**ARMARA Denizi'nin kuzey yarısında yer alan yaklaşık 1200 m derinlikteki üç çukurluk, Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunun İzmit körfezi ve Gaziköy-Gelibolu segmentleri (fay parçaları) arasında büyük bir pull-apart yapının parçaları olarak açılmaktadır (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988). Bu çukurluklar birbirlerinden iki KD-GB uzanımlı sırtla ayrılmaktadır. Bunlar Orta Marmara sırtı ve Batı Marmara sırtı ola-

rak adlandırılmıştır. Bu sırtların derinlikleri 450-700 m arasında değişmektedir. Her ne kadar Marmara Denizi içinde son 30 yıldır birçok farklı petrol şirketi ve araştırma kuruluşu tarafından sismik profiller yapılmış ise de bu sırtların kinematığı ve bu açılma içindeki önemleri iyi anlaşılmamıştır. Bunun üç nedeni vardır; bunlardan birincisi sismik profillerin hepsinin Marmara Denizi içindeki yapıları göz önüne almadan D-B ve K-G yapılmış olması, yani profillerin yapıları dik ve paralel kes-

memesi, ikincisinde detay batimetrik veri (1-2 m bazında) olmaması ve üçüncüsüne ise elde bir model olmadan sismik profillerin değerlendirilmesidir. Bu çalışmada, bu sırtların kinematığının ve Marmara Denizi'nin oluşumunun anlaşılması için, Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunun İzmit körfezi ve Gelibolu arasında kalan segmentleri sınırlı eleman (boundary element) metodu ile modellenmiştir. Bu modelleme sırasında GPS verilerinden yararlanılmıştır (Straub ve Kahle, 1995).

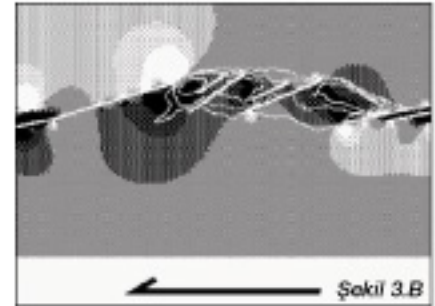
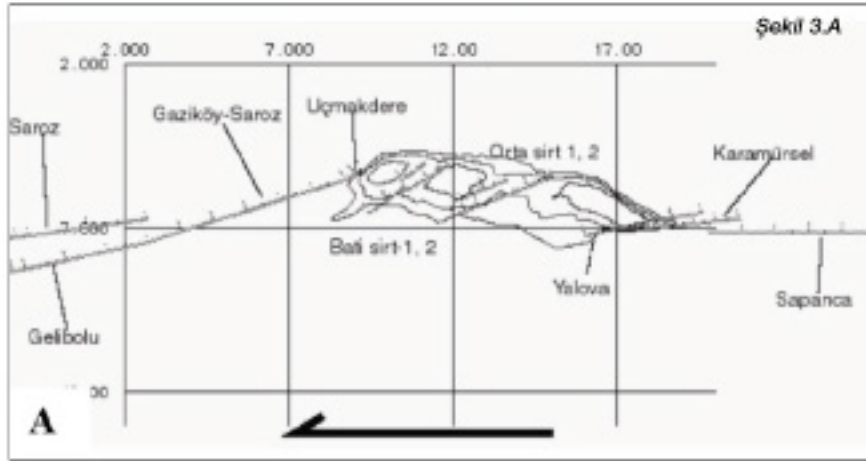


Şekil 1. Marmara Denizi ve çevresinde Kuzey Anadolu Fayı'nın kolunun ve bu kollarındaki fay segmentlerinin dağılımı gösterilmektedir. (Barka-Kadinsky-Cade 1988)



Şekil 2. Bir pull-apart yapı içinde gelişebilecek faylar ve ilgili yönleri gösterilmektedir. Büyük oklar gerime doğrultularını siyah oklar saatın tersine döme hareketini göstermektedir.

Şekil 3. A. Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunun İzmit körfezi ile Saroz körfezi arasında kalan kısmının, sınırlı elemanlarla modellenmesi sonucu gerçek deniz içi ve kara morfolojik yapısına en uygun fay modeli gösterilmektedir. B. Bu fay modeline gösterilen vektör yönünde bir yer değiştirme uygulandığı takdirde elde edilen alçalan (siyah kısımlar) ve yükselen (beyaz kısımlar) alanların dağılımı gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi doğuda Armutlu yarımadası ve İzmit körfezi ve orta kısımda 3 basen ve bunları ayıran daha sıg iki sırt ve batıda Ganos yükselimi ve Saroz baseni belirgin olarak elde edilmiştir. Beyaz çizgiler batimetrik eşderinlikleri göstermektedir. Bu model bize sirtlarda KD-GB uzanımı faylar olduğu takdirde bu deniz içi yapısının oluşacağını göstermektedir.



## Pull-apart Basenlerin Kinematığı

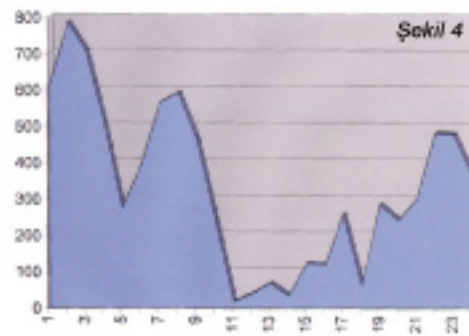
Doğrultu atımlı faylar üzerinde sıkça görülen pull-apart (iki doğrultu atımlı fay parçası arasında, normal faylarla çöken alan) basenler (çukurluk), son 30 yıldır üzerinde çok çalışılan konulardan biridir. Bu çalışmalarda bu yapıların iç kinematik özellikleri sedimantasyonları, büyüklük/atım ve derinlikleri hakkında önemli sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2'de bir sağ-yanal pull-apart alanda beklenen

yapılar ve ilgili rotasyonun yönü gösterilmektedir. Bu şekilden anlaşılacağı gibi bu alanda ana faylara paralel ikincil genişleme meydana gelmekte olup aynı anda ana faylara paralel faylar, ikincil konjuget (çapraz) doğrultu atımlı faylar ve ana faylara dik veya yüksek açılı normal faylar meydana gelmektedir. Ana fayların oluşturduğu basamağın; uç uca birleşen veya uçları birbirinden ayrı veya uçları bir-biri ile örtüşen türde olması bu alanda meydana gelen fayların ana yapı içindeki açılarının değişmesine neden olmaktadır. Bununla beraber yapılar genelde birbirine benzerdir. Bunun ya-

nı sıra pull-apart alanlarının ana faylar arasında rotasyonal hareketler yaptığı da paleomagnetik verilerle ışığında doğrulanmıştır. Bütün daha önceki çalışmalarda ve modellemelerde; genelde hep tek pull-apart yapı ele alınıp incelenmiştir. Bu çalışmada çok daha kompleks olan Marmara Denizi'nde gözlenen üç ayrı çukurluktan oluşan bir yapı modellenmektedir.

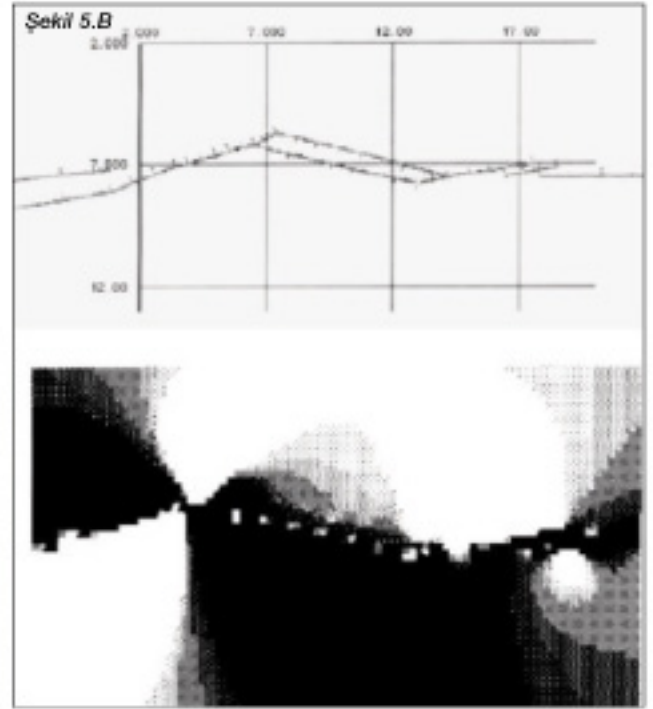
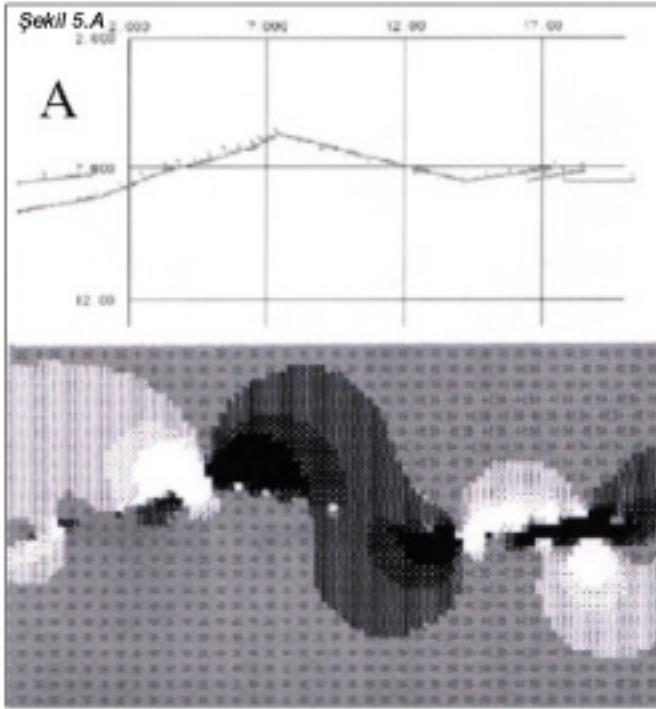
## Marmara Denizinin Kuzey Yarısının Sınırlı Eleman Modellemesi

Sınırlı elemanlar iki boyutlu elastik modelleme olup Bilham ve King (1989) tarafından fay geometrisi ve kinematik ilişkilerin anlaşılması ve bu yapılarla ilgili morfolojik dağılımlarının elde edilmesinde çok yararlı sonuçlar vermiş bir "Macintosh" yazılımıdır. Bu modellemede fay geometrisi, kayma vektörü yönü ve sınırlardaki yer değiştirme miktarları verildiği takdirde, bu faylarla ilgili doğrultu atım miktarları ve stres dağılımları elde edilmektedir. Stres da-



Şekil 4. Şekil 3'te elde edilen model üzerinde fay segmentleri üzerindeki doğrultu atım oranları gösterilmektedir. Bu şekilden açıkça anlaşılacağı gibi master faylar üzerinde doğrultu atım miktarı deniz içi sirtlarına göre çok daha fazla olup deniz içindeki faylarda genişleme (normal) bileşenin daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu bölgenin pull-apart açılma alanına karşılık gelmesi nedeniyle uyumlu bir sonuç olarak elde edilmektedir. Bu nedenle deniz içi sirtları her ne kadar bölgesel kayma

vektörüne sıkışma yapacak biçimde bir doğrultuaya sahipse de bu fayların ikincil genişleme alanında yer alması nedeniyle bu fayların tam tersine transtansiyonel bir kinematığına sahip olduğu çok açık bir biçimde modelden elde edilmektedir.



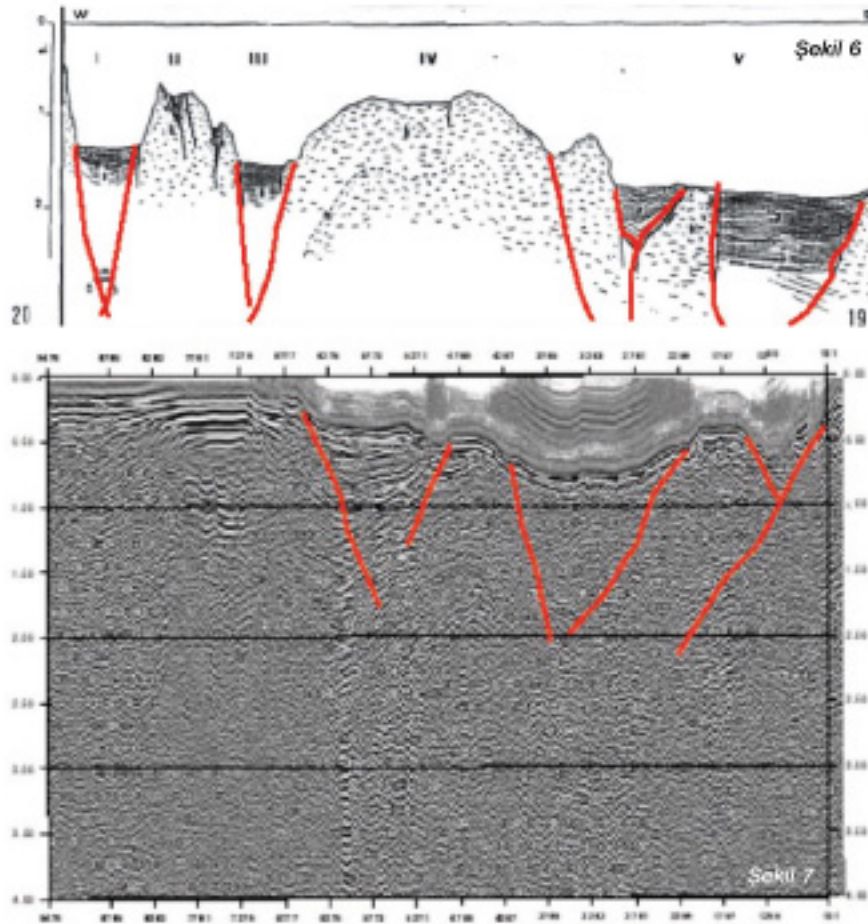
Şekil 5. Marmara Denizi'nde tek fay (A) veya kuzeyden ve güneyden sınırlayan iki fay (B) geçmesi durumunda elde edilen stres veya morfolojik dağılım. Her iki şekildeki dağılım bugünün Marmara Denizi içi veya dışı morfoloji ile uyumlanmamaktadır.

ğılımları sıkışan ve genişleyen alanlar dağılımı olarak ifade edilmekte olup jeomorfolojik olarak, alçalan ve yükselen alanlara karşılık gelmektedir. Bütün bu bilgiler ve faylar üzerindeki kinematik dağılımlar birçok tektonik yapının daha iyi anlaşılması açısından son derece önemlidir.

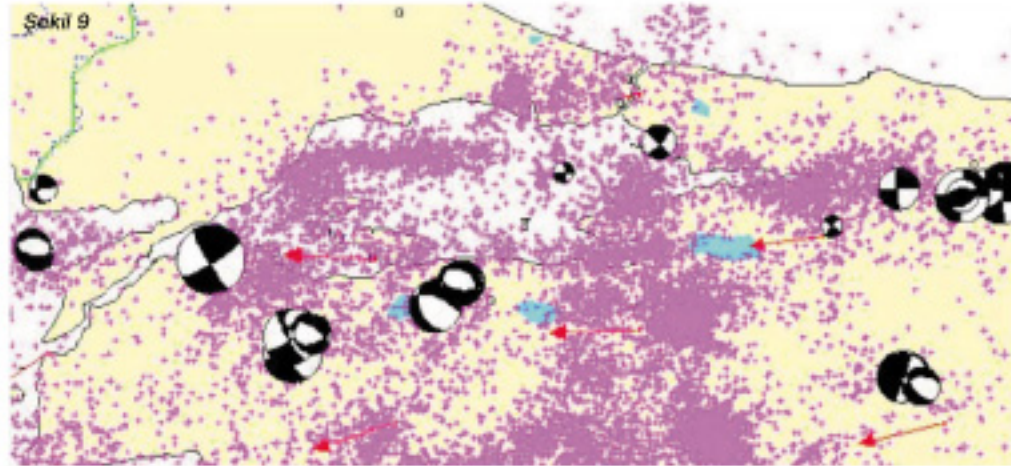
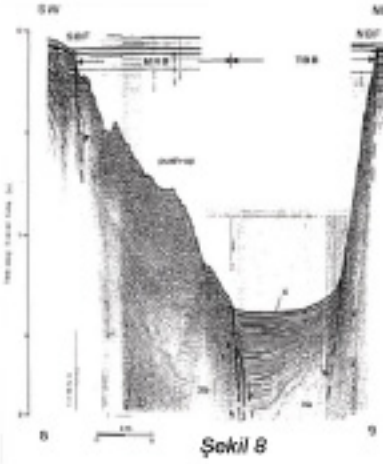
Şekil 3A'da Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunun İzmit körfezi

ve Saroz körfezi arasında kalan kısmın segmentleri ve Marmara Denizi içi 200, 500 ve 1000 m batimetrisi gösterilmektedir. Bu modelde kullanılan kayma vektörünün GPS ölçümlerinden yararlanılarak bu alan için ortalaması alınmıştır. Şekil 3B ise modelleme sonucunda elde edilen stres dağılımlarını göstermektedir. Bu şekilde gösterilen siyah alanlar genişleyen alanları yani basenleri ve beyaz alanlar ise sıkışan yani yükselen alanları ifade etmektedir. Sırtlar birbirine paralel iki fayla sınırlanmıştır.

Modelleme sonuçları ile Marmara Denizi kuzey kesiminin morfolojisi karşılaştırıldığında, Ganos, Kuru dağ ve Armutlu yarımadası yükseltileriyle (beyaz alanlar), İzmit ve Saroz körfezleri açıkça görülmektedir. Deniz içindeyse derin basenler ve daha az derin sırtlar geometrik olarak gerçeğe çok yakın bir biçimde elde edilmiştir. Bu modelden yine açıkça görüldüğü gibi İzmit körfezi ile Ganos arasındaki kısmına tamamen genişleme rejimi hakimdir. Sa-



Şekil 6. Marmara Denizi içinde sıfır sismik yansımaya profil basenleri ve sırtların arasında kalan transtansiyonel fayları göstermektedir (Ergül ve Özal, 1995'ten değiştirilerek alınmıştır). Şekil 7. Marmara Denizi orta sırta oblik K-G uzanımı sismik yansımaya profil sırtın uzun eksenini boyunca genişleme olduğunu göstermektedir (Çetin vd., 1998'den değiştirilerek alınmıştır).



Şekil 8. Marmara denizi içindeki pull-apart basenlerin en batıda yer alan Tekirdağ çukurluğunun dik normal fayları ve içinde yer alan genç çökeller gösterilmektedir (Wong vd., 1995) Şekil 9. Marmara Denizi ve çevresinin 1964-1994 yılları arasındaki deprem aktivitesi (ISC verileri). Kırmızı oklar GPS vektörlerini ve siyah beyaz toplar ise fay düzlemi çözümlerini göstermektedir (Straub ve Kahl, 1995).

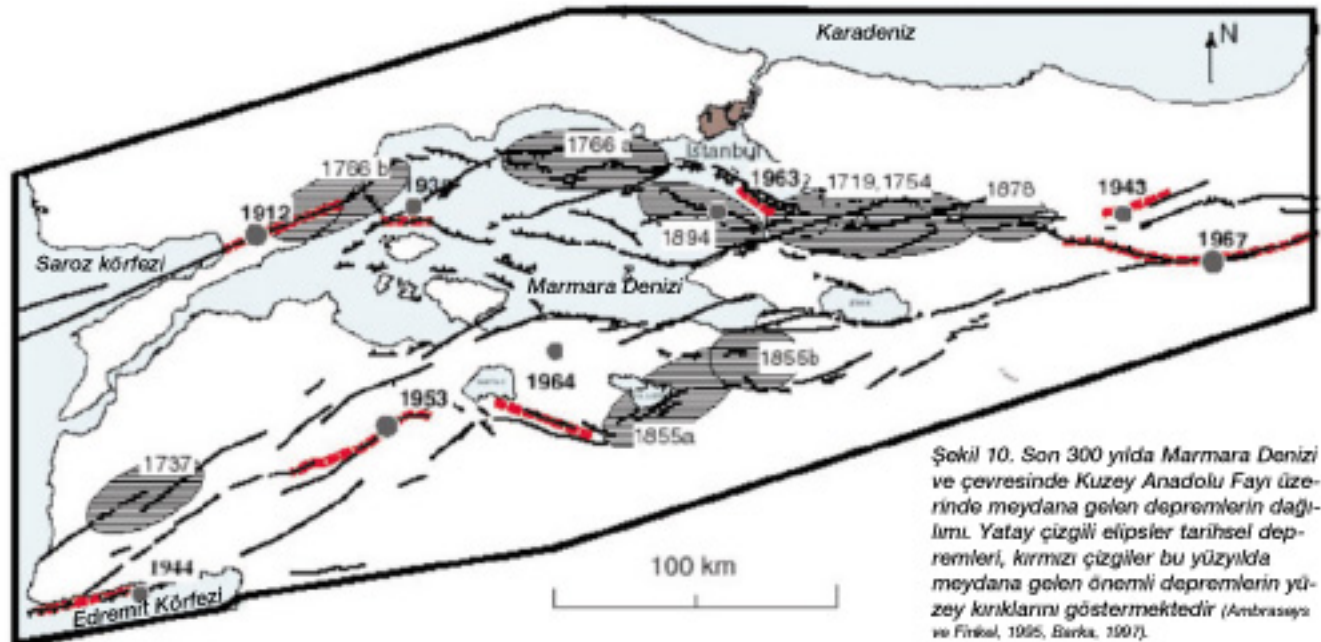
dece iki lokal yükselim orta sırta gözlenmektedir. Başka bir deyişle, Marmara Denizi içindeki faylar üzerinde herhangi bir sıkışma görülmemekte olup geniş bir alana yayılan bir genişleme hakimdir. Modelleme sonuçları batı sırtın biraz daha dönmesi halinde doğrultu-atımın sağ-yanaldan sol yanala geçeceğini göstermektedir. Bu da batı sırtın ana faylarla oblik olması göz önüne alınırsa herhangi bir anomali oluşturmamaktadır. Şekil 4'te ise, bu segmentler üzerindeki doğrultu atım oranları gösterilmektedir. Buna göre orta sırttaki doğrultu atım miktarının ana faylara göre çok daha az olduğu fakat buna karşılık normal bileşenin yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu

da bize sırtların transtansiyonel (doğrultu atım ve genişleme) özellikte olduğunu göstermektedir. Özetle, elde edilen bu model tek çözümlü olup basenler arasında yer alan sırtların ancak bu sırtlara paralel KD-GB uzanımlı iki fayla sınırlandırıldığında Marmara Denizi'nin kuzey yarısına benzer üç basenli iki sırtlı bir morfolojik dağılım elde edilebilmektedir. Şekil 5'te ise Marmara Denizi'ni geçen tek fay ve kuzeyden ve güneyden sınırlayan iki fay modeli ve bunların sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında, bu stres veya morfolojik şekillerin bu yörenin günümüzdeki yüzey şekilleri ile uyum sağlamadığı anlaşılmaktadır. Bu iki

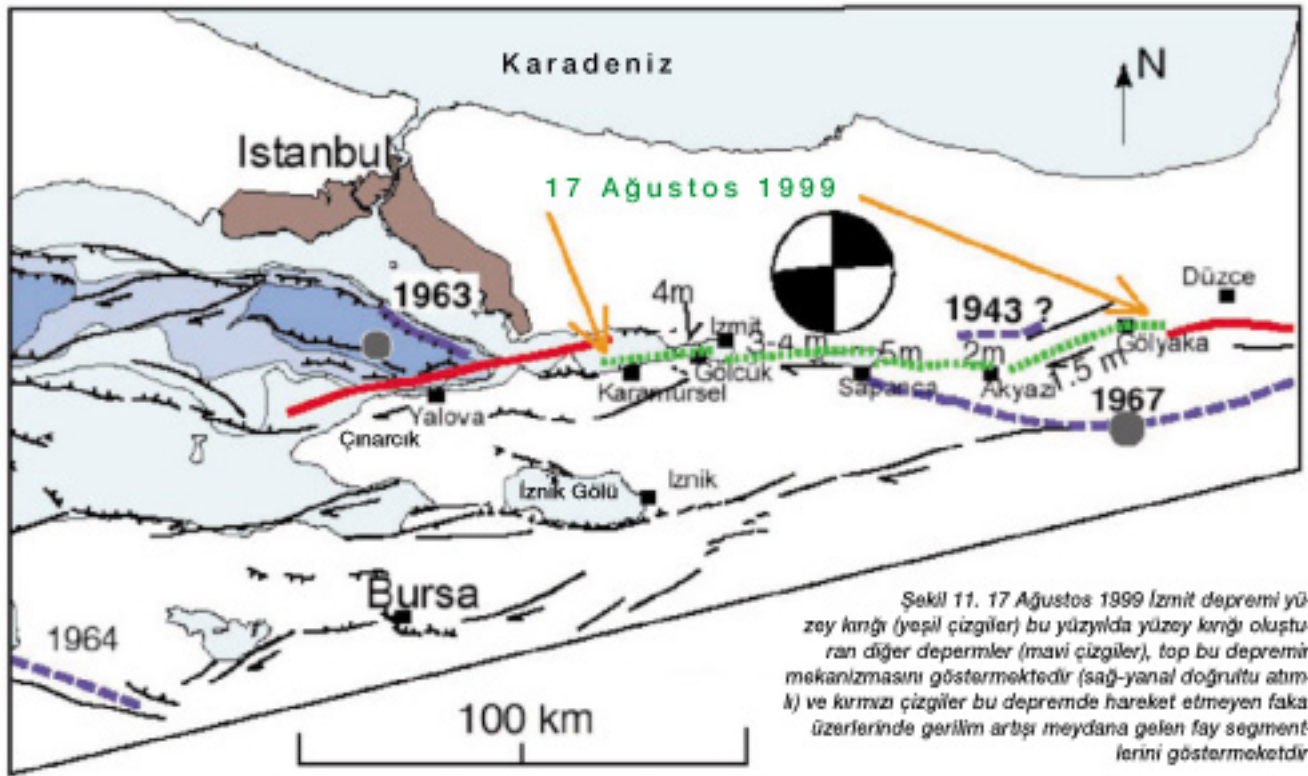
model de yukarıda gösterilen modelin doğruluğunu göstermektedir.

## Tartışma ve Sonuçlar

Marmara Denizi içinde yapılmış olan sığ ve derin sismik profillerle yukarıda elde edilen model sonuçları karşılaştırıldığında birbirleri ile uyum içinde oldukları anlaşılmaktadır. D-B uzanan sığ sismik profil (Ergün ve Özel, 1995) sırt basen ilişkisi hakkında bilgi vermektedir (Şekil 5). Bu profile batı sırt dar orta sırt ise geniş olarak görülmekte olup fay basen ilişkileri alttaki şekilde yorumlanmıştır. Şekil 6 ise orta sırt bo-



Şekil 10. Son 300 yılda Marmara Denizi ve çevresinde Kuzey Anadolu Fayı üzerinde meydana gelen depremlerin dağılımı. Yatay çizgili elipsler tarihsel depremleri, kırmızı çizgiler bu yüzyılda meydana gelen önemli depremlerin yüzey kırıklarını göstermektedir (Anbrassay ve Finkel, 1995; Barka, 1997).



Şekil 11. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi yüzey kırığı (yeşil çizgiler) bu yüzyılda yüzey kırığı oluşturulan diğer depremler (mavi çizgiler), top bu depremin mekanizmasını göstermektedir (sağ-yanal doğrultu atım) ve kırmızı çizgiler bu depremde hareket etmeyen fakat üzerlerinde gerilim artışı meydana gelen fay segmentlerini göstermektedir.

yunca alınan derin sismik profilde (Çetin vd., 1998) yine negatif bir çökme yapısı gözlenmektedir. Bazı düzensiz tabakalar veya kıvrımlı yapılar aynı yapı içinde gelişmektedir. Şekil 7 ise orta basen içinden alınmış sığ profil, kenarları oldukça dik normal faylarla sınırlı bir baseni göstermektedir. Bu da pull-apart'a karşılık gelmektedir. Bütün bu yapılar birarada değerlendirildiğinde, Şekil 8'de ortaya konulan blok diyagramdaki yapı karşımıza çıkmaktadır. Bu blok diyagramda sırtlar transtansiyonel bir yapıda olup genişleme özelliği taşırlar ve ana faylara paralel bir genişleme göstermektedirler. Çukurlar ise sırtlar arasında tamamen normal faylarla sınırlı genişleme yapısı gösterirler.

Sonuç olarak sırtlar üzerinde de genişleme bileşeni vardır, fakat ana faylara oranla daha az da olsa doğrultu atımlı bileşene sahiptirler. Şekil 9, Marmara Denizi ve çevresinin 1964-1994 sismik aktivitesini göstermektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi Marmara basenleri ve batı sırt sürekli mikro aktivite gösterirken orta sırt üzerinde aktivite daha az yoğunur. Aktivitenin bu ikincil genişleme yani pull-apart alanında yoğun olması beklenen bir olaydır, ancak orta sırtta aktivitenin daha az olması, bu sırt

üzerinde doğrultu atımın batı sırtta göre daha fazla olmasından kaynaklanabilir.

Bu verilere göre, (1) Marmara Denizi basenlerinin oluştuğu bölge pull-apart yapıyla ilgili pull-apart içi ikincil genişleme alanına karşılık gelmektedir ve sırtlar üzerinde transtansiyonel hareketler hakimdir, sırtlar üzerinde sıkışma yoktur. (2) Sırtlar üzerinde doğrultu atım bileşenleri ana faylara göre çok daha düşüktür. (3) Marmara Denizi ve sırtlarının pull-apart alandaki, saatin tersine dönme hareketi nedeni ile sırtların ilksel konumları ve kinematikleri ile günümüzdeki konumları ve kinematikleri farklıdır.

Bu kinematik özellikleri deprem aktivitesi açısından değerlendirdiğimizde, modelleme sonuçlarında da açıkça görüldüğü gibi Marmara Denizi'ni baştan başa geçen bir fay olmadığı, sırtlara üzerindeki doğrultu atım bileşenli fayların deprem aktivitesi açısından önemli rol oynadığı ortaya çıkmaktadır. Son 300 yılda Marmara Denizi içinde meydana gelen depremlerin dağılımına baktığımızda da depremlerin farklı büyüklüklerde Marmara Denizi'ni geçtiği söylenebilir (Şekil 10). 1509 gibi çok büyük depremler sırasında birden çok segmentin birbirini tetikleyerek

harekete geçmesi sonucunda oluşmuş olabileceği ileri sürülebilir.

Bu bilgiler ışığı altında 17 Ağustos 1999 depremi değerlendirildiğinde bu deprem sırasında her ne kadar çok kesin olmasa da Yalova segmentinin kırılmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 11). Bu durumda, bu depremin devamının bu fay parçasının kırılması ile gerçekleşmesi olasıdır. Ancak bu depremden önce özellikle Çınarcık çukurluğunda orta büyüklükte bir deprem meydana gelmesi de söz konusu olabilir. Bu açıdan bakıldığında artçı deprem aktivitesinin yakın olarak izlenmesi gerekmektedir.

Aykut Barka

Prof. Dr., İTÜ, Jeoloji ve Bölümleri Enstitüsü, Aynalıkavak, 34291 İstanbul  
TÜRKİYE, MAM, İTÜ Bölümleri Araştırma Enstitüsü, Gebze, Kocaeli

Kaynaklar

- Anderson, N. N. & C. Finkel, (1995) Seismicity of Turkey and Adjacent Area, A historical Review, 1500-1900, Erciyes Üniversitesi ve Karapınar L.Ü. 224 pp.
- Anderson, N. N. (1996) Engineering seismology, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 17, 1-105.
- Barka, A. (1987) Neotectonics of the Marmara region. In "Active tectonics of NW Anatolia - The Marmara pull-apart", eds Schmidtler and Pfister VDF, ETH Zurich, 35-68.
- Barka, A. A. & Kadiroğlu-Celik, K. (1988) Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. Tectonics, 7, 663-694.
- Wilcox, R. & King, G. (1983) The morphology of strike-slip faults: Examples from the San Andreas fault, California. J. Geophys. Res. 88, 10204-10216.
- Çetin, S., İnan, C., Barka, A., Barınç, A., Ercioğlu, E. (1995) Marmara Denizi çevresindeki jeolojik yapıların sismik depremlerle ilişkisi. Özet, Deniz Jeolojisi, Türkiye Deniz Araştırmaları, Workshop, IV, 16-17 Mayıs, 7-12.
- Engin, M. and Özalp, E. (1995) Structural relationship between the east of Marmara basin and the North Anatolian fault. Tectonics, 7, 276-288.
- Smith, C. and Kelle, R., (1995) Active crustal deformation in the Marmara Sea region, NW Anatolia, inferred from GPS measurements. Geophysical Research Letters, v. 22, no. 15, 2553-2556.