

## MARMARA DENİZİNDE TARİHSEL DEPREMLER: YERLERİ, BÜYÜKLÜKLERİ, ETKİ ALANLARI VE GÜNCEL KIRILMA OLASILIKLARI

Cenk Yaltırak<sup>1,2</sup>, M. Korhan Erturaç<sup>2</sup>, Okan Tüysüz<sup>2</sup>, Kezban Saki-Yaltırak<sup>2</sup>

Marmara Denizi ve yakın çevresinde 32 si tarihsel, 2 si güncel olmak üzere toplam 34 yıkıcı deprem olmuştur. Bunların yanı sıra, Marmara kıyılarındaki yerleşimlerde 64 tane,, hakkında herhangi bir yeri yıktığı konusunda bilgi bulunmayan ama hissedilen deprem vardır. Bu depremlerin içinde bilgi verenler M.S.484 yılından itibaren başlar. 484 yılından bu yana 1515 yıl içinde tarihi yerleşimlere göre, Marmara Denizi ve çevresinde olan depremler; Şarköy, batı, orta ve doğu Marmara, İstanbul'un güney batısı ile İzmit Körfezi civarında olmak üzere 6 ana grupta toplanabilmektedir. Bu ayrımların yapılması basit bir temel metoda dayanır. Öncelikle, tarihsel depremlerin en güvenilir sonuçları saptanmıştır. Bu saptamaların en önemlisi, bir depremin yıkım yapıp yapmadığıdır. Bundan sonra, nereyi yıkmıştır veya çevrede etkilediği alan neresidir sorusuna yanıt aranmıştır.

Bunu yapabilmek için depremler etki alanlarına göre sınıflanmışlardır. Kıyılarda bulunan, tarihsel olarak sürekli yerleşim olan bölgeler sınıflanırken doğu-batı yönüne göre değerlendirilmiştir. Böylece, yıkımın merkezi ve etki alanı ile depremin Marmara'nın hangi kesiminde olduğu ortaya çıkarılmıştır. İkinci aşamada, bu depremlerin İstanbul'da yaptıkları etkiler sınıflanmıştır. Bu sınıflamada, kriter olarak, İstanbul'un anıtsal yapılarında oluşan hasarlar ele alınmıştır. Tarihsel depremlerin İstanbul'a etkisi; surlarda, tapınaklarda, Ayasofya kubbesinde, Galata'da, Bakırköy-Yeşilköy civarında ve Boğaz hisarlarında oluşan hasarlar, can kaybı, deprem sonrası salgın ve göç, tsunami dalgasının olup olmadığına göre beş seviyede değerlendirilmiştir. Bunlar, hissedilen, ağır hissedilen (panik yaratacak derecede), hafif yıkıcı, yıkıcı ve ağır yıkıcı etkilerdir. Bu yaklaşımdan sonra depremlerin alansal dağılımı ve İstanbul'a olan etkileri bir araya getirilerek, Marmara Denizi çevresinde hasar merkezlerinin doğu batı ekseninde konumu saptanmıştır. Bu metotla 484, 824, 1083, 1354,1659 ve 1912 depremlerinin Saroz Körfezi ile Marmara denizi batısı arasında bir yerde; 543, 797, 1063, 1343, 1569 ve 1766-Ağustos depremlerinin Batı Marmara kıyılarında; 542, 795, 1032, 1346, 1556, 1766-Mayıs depremlerinin orta Marmara kuzey sahilleri ve İstanbul'da; 478, 732, 1011, 1332, 1542, 1754 depremlerinin İstanbul'un batısı ve İstanbul sur içinde etkin olduğu saptanmıştır. İstanbul'da ağır hasar yapan ve etki alanı içinde de hasar yaratan depremler ise sadece 557, 989 ve 1509 depremleridir. Bu üç deprem de İstanbul'da ağır hasar yapmış, çok sayıda ölüme neden olmuştur. Tsunami dalgası oluşturan, sur kulelerini yıkan, Ayasofya Kubbesini yıkan veya hasar verenler de bu depremlerdir. Yalova, Bursa, Marmara Ereğlisi, Hersek Deltasında yıkıcı etkileri olan bu depremler, Doğu Marmara çevresinde etkindirler. İzmit Körfezi ve doğusunda etkin olan depremler ise 551, 740, 975, 1296, 1501, 1719 depremleridir, Yalova ile İzmit'in doğu kesimi arasında etkindirler.

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü

Bu depremlerin olduğu bölgelerin çevrelediği Marmara Denizi'nde son yıllarda yapılan çalışmalarla elde edilen fay haritaları farklı kinematik modellere dayanır. Bu modellere tarihsel depremleri bölgesel olarak koyduğumuzda, yığılmalar olmakta ve iki deprem arasında geçen zamanda biriken atım, yıkıcı olamayacak kadar etkisiz depremler üretmektedir.

Örneğin, Doğu Marmara'da Adalar Fayı (50 km.) ve Adalar Fayı'ndan batıya Gaziköy'e kadar uzanan 110 km.lik parça, kırılma kinematığı açısından üzerinde büyük deprem olacağı tahmin edilen faylardır. Eğer Marmara'da ana depremler bu iki fayda oluyor ise bu durumda, Batı Marmara'da 18, Doğu Marmara'da 3 deprem olması gerekirdi. Bu modele göre Batı kolunda olması gereken bu 18 depremin aralarındaki zaman aralıkları ve GPS hızlarından elde edilen birikime göre, ancak bu fayın üzerinde yıkıcı diyebileceğimiz depremler 4 tanedir. Bu durumda, Marmara denizi çevresinde yıkıcı olan 14 tarihsel depremin olmaması gerekir. Bu da tarihsel verilerde sözü edilen yıkımları açıklamamaktadır. Doğu Marmara'da Adalar Fayı'nın 50 km boyu ve 12 km sismojenik zon göze alındığında, olması gereken üç tarihsel depremin büyüklükleri, etki alanları ve oluşturabilecekleri yıkımlar da tarihsel verilerle uymamaktadır.



Şekil 1 Adalar Fayı üzerinde biriken gerilme  
 AB: İki blok herhangi iki nokta arasında alınan uzaklık (dik kenar)  
 BB': İki blok arasında sağ yanal ötelenme miktarı (kısa dik kenar)  
 AB': Ötelenme sonrasında iki blok arasındaki oluşan yeni uzaklık (hipotenüs)

Normal bileşenli Adalar Fayı (Okay vd., 2000 ve Armijo vd., 2002) üzerinde biriken atımı bulabilmek için, KAF'ın bölgede sağ yanal hareketinden kaynaklanan gerilmeyi hesaplamak gerekir. Doğu Marmara'da olan depremler arasında geçen zaman aralıklarına göre, Kocaeli bloğu ile Armutlu bloğu birbirine göre sağ yanal, 1894 ile 1509 arasında 6 m., 1509 ile 989 arasında 8.3 m., 989 ile 557 arasında 6.8 m. ötelenmiş olması gerekir. Adalar Fayı'nın eğim açısı 80-85°, sismojenik zon 10-12 km, taban ve tavan bloğu arasında deformasyonun gerçekleştiği zonun genişliği 1.74 km civarındadır. Fay

zonu dışında kalan alanı rijit kabul ettiğimizde\* ve maksimum atım dikkate alındığında, hipotenüsün uzunluğunda olan değişimden (Şekil-1) elde edilen gerilme miktarı 2 cm dir. Bu durumda 80° eğimli bir fayda, sağ yanal atımın yaratacağı yamulmadan oluşabilecek maksimum düşey atım 10 cm civarında olacaktır. Bu durumda 10 cm düşey atım, Adalar Fayı'nda maksimum büyüklük olarak Mw 6.1 civarında bir potansiyeli gösterir (Çizelge-1).

Fay uzunluğu (m)	Sismojenik derinlik (m)	Atım (m)	Mw
50.000	10.000	0,10	6,12

Çizelge 1 Adalar Fayı'nın normal atımla çalıştığı ve doğu Marmara'da ki depremlerle kırılması varsayımı üzerine maksimum büyüklük

Bu durumda Adalar Fayı'nda oluşabilecek 500 yıllık birikimler, Doğu Marmara'da olan tarihsel depremleri karşılayacak kadar yıkıcı olamayacaktır. Le Pichon vd.(2001)'nin modeli de, Batı Marmara'daki diğer fay modellerinden kinematik olarak farklı değildir. Bu model de, Batı ve Orta Marmara'da 18 tarihsel depremi sorgulamayı gerektirir. Adalar Fayı doğrultu atımlı varsayılırsa (Le Pichon vd., 2001), en fazla atımın gerçekleşeceği hesaplanan 1509 depreminin büyüklüğü Mw 7.4'ü geçmeyecektir. Bu durumda, Marmara Denizinin doğusunda 1894 ten bu yana biriken atım 1.7 m olduğundan, bugün Adalar Fayı'nın Mw 6.9 dan büyük bir deprem üretmesi mümkün değildir. Bu durumda da tarihsel verilerle ve güncel çalışmalarla bir çelişki ortaya çıkmaktadır. İstanbul'u etkileyen 3 büyük depremin Ayasofya Kubbesi'ni yıktığı bilinmektedir. Durukal vd., (2003) tarafından yapılan hesaplarla bu kubbeyi yıkacak deprem büyüklüğünün Mw 7.6 dan büyük olması gerekir. Bu durumda doğrultu atımlı fay modeline göre hesaplanan potansiyellere göre (Çizelge-2), Ayasofya kubbesinin, surların ve hisarların yıkılması ile ilgili tarihsel bilgilerin doğru olmaması gerekir.

Deprem	Fay uzunluğu (m)	Sismojenik derinlik (m)	Atım (m)	Mw
200?	50000	10000	1,74-1,83	6,94
1894	50000	10000	6,16	7,31
1509	50000	10000	8,3	7,40
989	50000	10000	6,8	7,34

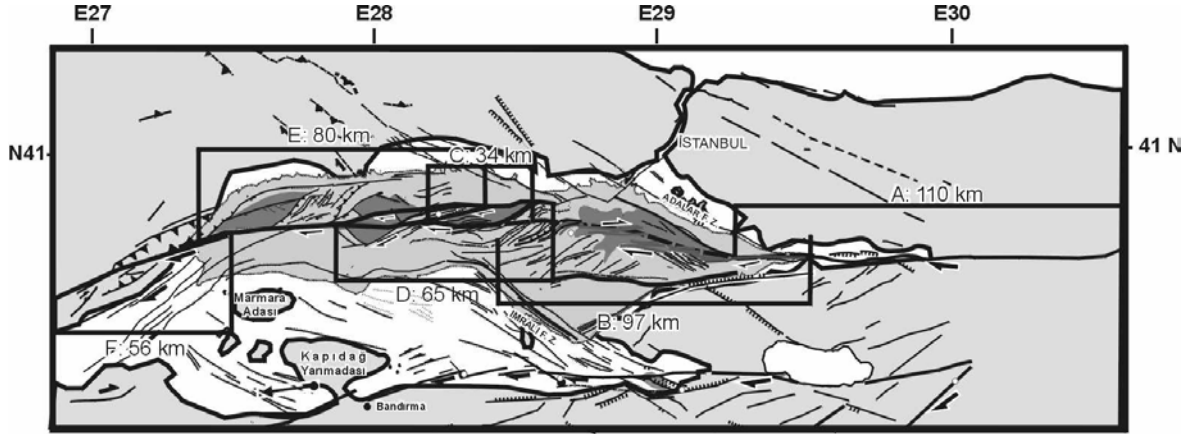
Çizelge 2 Adalar Fayı'nın doğrultu atımlı çalıştığı ve doğu Marmara'da ki depremlerle kırılması varsayımı üzerine büyüklük hesapları

Söz konusu fay modelleri (Okay vd 2000; Le Pichon vd., 2001; Armijo vd., 2002) tarihsel olarak yıkıcı depremleri üretecek potansiyel ile uyumsuz görülmektedir. Bu durumda, Marmara'yı kat edecek yanal hareketin, tarihsel yıkıcı depremleri üretebilmesi için daha fazla fay düzlemine gereksinimi vardır. Bu faylarda da deprem periyotlarının yıkıcı olacak birikimi sağlayacak kadar uzun olması gerekir.

Tarihsel depremler ile faylar arasındaki ilişkiyi açıklama olasılığı olan diğer bir model ise Yalıtırak (2002) tarafından sığ, orta derin ve derin sismik kesitlere dayanarak ortaya konan, derinde tek fay, yüzeye doğru at kuyruğu örgüsünden oluşan bir yapıdır (Şekil-2). Bu çalışmada, söz konusu modele göre, hareketin fay saçaklarına aşmalı olarak aktarması sonucu oluşabilecek periyotlar ve büyüklükler

\* Eğer deformasyonu fay zonu dışınada yayarsak, fay üzerinde birikecek olan stres azalacaktır. Bu nedenle, bu kabul ile sadece fay üzerinde deformasyonun biriktiğini kabul ederek, en yüksek gerilme miktarı hesaplanabilir.

hesaplanmıştır. Marmara'da kara ve deniz alanında tarihsel ve coğrafi olarak sınıflayabildiğimiz depremler, Yalıtırak (2002) nin fay haritasında ortaya konan 6 parçanın coğrafi olarak çevresinde yer alır. Tarihsel depremlerin yıkım alanı dikkate alınarak söz konusu depremlerin en yakın parçada gerçekleştiği kabul edilebilir. Yapılan sınıflama ile tarihsel depremler arasında geçen sürede biriken atım miktarları, söz konusu fay parçalarının Mw 7.1 ile 7.7 arasında kırılmış olabileceğini göstermektedir (Çizelge-3).



Şekil 2 Marmara Denizi'nde bulunan örgülü fay yapısının ve fay parçalarının başlangıç ve bitişlerine göre dağılımı (Yalıtırak, 2002'den alınmıştır.)

F GAZİKÖY (56 km)	E BATI MARMARA (80 km)	D ORTA SIRT KUZEY FAYI (65 km)	C DOĞU SIRTI BATISI (34 km)	B DOĞU MARMARA (97 km)	A KÖRFEZ (110 km)
Geçen Yıl Büyüklük TARİH	Geçen Yıl Büyüklük TARİH	Geçen Yıl Büyüklük TARİH	Geçen Yıl Büyüklük TARİH	Geçen Yıl Büyüklük TARİH	Geçen Yıl Büyüklük TARİH
2003	2003	2003	2003	2003	17 08 1999
91 Mw 7.05	236 Mw 7.46	236 Mw 7.38	249 Mw 7.21		280 Mw 7.43
09 08 1912	05 08 1766	22 05 1766	05 10 1754	494 Mw 7.71	25 05 1719
253 Mw 7.28	197 Mw 7.39	210 Mw 7.35	212 Mw 7.16		221 Mw 7.4
17 02 1659	13 12 1569	10 05 1556	12 06 1542	14 10 1509	1498 (14 09 1501)
305 Mw 7.4	226 Mw 7.43	213 Mw 7.35	210 Mw 7.16		202 Mw 7.37
01 03 1354	18 10 1343	19 05 1346	17 01 1332	520 Mw 7.72	01 07 1296
271 Mw 7.38	280 Mw 7.45	304 Mw 7.45	321 Mw 7.27		321 Mw 7.5
6 12 1082/3	23 10 1063	13 08 1032	09 11 1011	25 10 989	26 10 975
259 Mw 7.36	266 Mw 7.49	237 Mw 7.38	279 Mw 7.24		235 Mw 7.41
05 05 824	797	795	732 ?	432 Mw 7.63	26 10 740
340 Mw 7.44	254 Mw 7.42	253 Mw 7.4	254 Mw 7.22		189 Mw 7.35
484	06 09 543	16 07 542	25 09 478	557(55)	551

Çizelge 3 Marmara Denizi'nde Yalıtırak (2002) modeline göre hesaplanan tarihsel deprem büyüklükleri. Deprem büyüklüklerinin hesaplanmasında sismojenik zonun derinliği Taymaz vd. 2001 e göre Doğuda 9-12 km, orta kesimde 10-13 km batıda ise 12-16 km arasında alınmıştır. Bu Çizelgede doğrultu atımlı faylar dikkate alınmıştır. 1894 depremi normal bileşenli Adalar Fayı'nda olduğundan bu Çizelgede yer almamaktadır. Adalar Fayı üzerinde 2800 yılda 9 cm gerilme yüklemesi olmakta, bu da 1 m düşey atıma karşı gelmektedir. 40 km lik Adalar Fayı'nda 1 m düşey atım, Mw. 7.0 büyüklüğünde deprem üretmektedir. F parçasında yapılan saha çalışmasında 1912-1659, 1659-1354 ve 1354-1083 depremlerinin saha atımları gözlenmiş hata payı 50 cm altında kalmıştır (Yalıtırak vd.,2002)

Tarihsel verilerle uyumlu olan fay paternine dayanarak, verilerin geçmişe doğru test edilmesi mümkündür. Bunun yolu, Çizelge-3 te elde edilen büyüklükler ve fay haritasına (Şekil-2; Yaltırak, 2002) dayanarak, geçmişe yönelik ivme ve şiddet haritalarını bilgisayar ortamında üreterek tarihsel veri ile karşılaştırmaktır. Bu çalışmada söz konusu edilen yaklaşım Coğrafi Bilgi Sistemleri ile üretilen haritalarla test edilmiştir (Tüysüz, 2003). Bunun için ilk olarak üretilen değerler, 17 Ağustos 1999 ve 1912 depremi için uygulanmış, tarihsel ve yarı tarihsel olan bu dönemde yapılan eş şiddet haritalarına uyumlu bir sonuç elde edilmiştir (Erturaç ve Tüysüz, 2003). Aynı şekilde yine, 1894 depremi için yapılan hesaplama ile sahada yapılan gözlemlere uygun bir sonuç elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra Yaltırak (2002) fay paterninde her bir kesim, maksimum ve minimum değerlerle yeniden hesaplanmış, modele göre oluşan eş şiddet haritaları ile tarihsel veriler karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada öne sürülen modele göre elde edilen tarihsel deprem etki alanları, tarihsel depremin yakın çevre şehirlerinin hasarları ile uyumlu bir Çizelge çizmiştir.

Bu modelden elde edilen, Marmara Denizi'nde oluşan 32 tarihsel 2 güncel depremin yeri hakkında bilgi veren senaryo, diğer modellere göre tarihsel verilerle çok daha fazla uyumludur. Bu durumda her bir kesimin üzerinde olan depremler ve büyüklüklerine dayanarak olasılık hesabı yapmak mümkündür. Bunun için elde edilen depremler ve her bir kesim için olasılık, teker teker sınırlı sayıda olsa bile gerçek bireylere dayanarak hesaplanabilir. Bunun için depremler arası geçen zamana göre t-Dağılım fonksiyonu uygulanarak günümüzde her bir kesimde daha önce oluştuğu hesaplanan depremlere göre olasılık hesabı yapılmıştır (Çizelge-4).

YIL	GAZİKÖY	BATI MARMARA	ORTA SIRT KUZEY FAYI	DOĞU SIRT BATISI	DOĞU MARMARA	İZMİT
2002	%0,01	%29	%34	%37	%65	%0,03
2007	%0,02	%41	%45	%46	%70	%0,03
2012	%0,02	%53	%55	%54	%75	%0,03
2017	%0,02	%65	%66	%63	%79	%0,04
2022	%0,02	%75	%75	%71	%82	%0,04
2027	%0,02	%83	%82	%78	%85	%0,05
2032	%0,03	%88	%87	%83	%87	%0,05
2037	%0,03	%92	%91	%87	%89	%0,05
2042	%0,03	%94	%93	%90	%90	%0,06
2047	%0,04	%96	%95	%92	%92	%0,07
2052	%0,04	%97	%96	%94	%93	%0,07
2057	%0,05	%98	%97	%95	%94	%0,08
2062	%0,06	%99	%98	%96	%94	%0,09

**Çizelge 4** Marmara faylarında deprem olasılıkları dağılımı

Sonuç olarak, Marmara Denizi ve çevresindeki tarihsel depremler coğrafi olarak 6 gruba ayrılabilir.

34 yıkıcı depremde açıklayabilecek modelde 6 sismojenik fay parçası bulunur. Bu senaryoya göre hesaplanan büyüklüklere dayanılarak yapılan ivme ve şiddet haritaları, geçmişe yönelik yapılan gruplamayı ve büyüklükleri destekleyen bir patern sunar.

Marmara'da tarihsel depremlerin dağılımı ile her bir fay parçası dikkate alınarak yapılan olasılık hesabında Marmara kara alanlarında (A ve F parçalarında) büyük deprem olma olasılığı bulunmamaktadır.

Marmara'da kırılması beklenen dört kesimin üzerinde yapılan olasılıklara göre önümüzdeki en fazla 60 yıl içinde Marmara denizi içinde bulunan bütün parçalar kırılma eşiklerine ulaşacaktır.

Doğu Marmara'da deprem olasılığı önümüzdeki 10 yıl için sanıldığı gibi %30 civarında değil %75 tir. Bu 17 Ağustos 1999 depreminin stres yüklemesi katkısı olmadan yapılan değerlendirmedir. Tüm bu veriler 16 Ağustos 1999 da elimizde olsaydı ve İzmit parçası için deprem olasılığı hesaplınsaydı, Gölcük depreminin %98 olasılıkla gerçekleşeceğini öne sürebilirdik. Aynı hesabı 1912 Şarköy depremi öncesi için yaptığımızda ise, bu depremin gerçekleşme olasılığı %15 ten azdır. Düşük olasılığa rağmen kırılma eşğine yaklaştığından bu parça kırılabilmiştir. Bu da Marmara'da kırılma eşğini aşmış veya yaklaştırmış bulunan dört fay parçasının herhangi birinin her an kırılabileceğini gösterir. Bu nedenle, Marmara'da olabilecek depremlerin yerinin batıda veya doğuda olması, diğer depremlerin olmayacağını değil, aksine çok daha hızlı gerçekleşebileceğini gösterir.

Marmara Denizi'nde önümüzdeki 60 yıl içinde 4 yıkıcı depremin olacağı neredeyse kesindir(Çizelge-4). Bu depremlerin büyüklüğü, gelecek süreye göre neredeyse hiç değişmemektedir. Doğu Marmara'daki parçada kırılma büyüklüğü de Mw 7.71 civarındadır. Önümüzdeki 60 yıl içinde birikecek büyüklük, bu sonucu ondalık seviyesinde değiştirebilecek kadardır. Bu da İstanbul, Bursa ve Yalova'da alınacak tedbirlerin en az bu değere göre belirlenmesini gerektirmektedir. Özellikle İstanbul'u tehdit eden B, C, D parçaları üzerinde olabilecek depremler, Bursa ve Yalova için de ağır tehdit oluşturmaktadır.

Yapılan eş şiddet haritaları ve ivme dağılımı haritaları, bölgede kıyı çevresi alanların ve alüvyonal ovalardaki her türlü yerleşim alanının ağır deprem tehdidi altında olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada seçilen aralıklar arttırılarak ivme ve şiddet için mikro bölgelendirme yapılabilme olanağı vardır.

## YARARLANILAN KAYNAKLAR

*Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., Barka, A., 2002. Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault, Terra Nova, 14, 2, 80-87.*

*Durukal, E., Cimilli, S., Erdik, M., 2003, Dynamic Response of Two Historical Monuments in Istanbul Deduced from the Recordings of Kocaeli and Düzce Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, 93, 2 (baskıda)*

*Erturaç, M. K., Tüysüz, O., 2003, Modelling the earthquake intensities: A case study on the faults of the Marmara region, NW Turkey. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 6-11 April, 2003, Geophysical Abstracts, Vol.5, EAE03-A-450.*

*Le Pichon, X., Şengör, A.M.C., Demirbağ, E., Rangin, C., İmren, C., Armijo, R., Görür, N., Çağatay, N., Mercier de Lepinay, B., Meyer, B., Saatçılar, R., Tok, B., 2001, The active Main Marmara Fault, Earth and Planetary Science Letters, vol.192, no: 4, p.543-560.*

*Okay, A., Kaşlılar, A., İmren, C., Boztepe, A., Demirbağ, E., Kuşçu, İ. 2000, Active faults and strike slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multi-channel seismic reflection study. Tectonophysics, 321, 189-218.*

Tüysüz, O., 2003, *İstanbul için deprem senaryolarının hazırlanmasında Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kullanılması, İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri raporu. 80 sf.*

Yaltrak, C., 2002 *Tectonic evolution of the Marmara Sea and its surroundings. Marine Geology, 190, 1/2, 493-530*

Yaltrak, C., Alpar, B., Altınok, Y., 2002. *Mürefte-Şarköy Depremi: Ganos Fayı'nın 9 Ağustos 1912 Depreminde atımı, kırık uzunluğu, büyüklüğü, karakteri ve aynı yörede olan tarihsel depremler. Aktif Tektonik Araştırma Grubu 6. Toplantısı, 21-22 Kasım 2002, ATAG-6 Bildiriler Kitabı. 90-93*