

SİSMİK ORİJİNLİ DENİZ DALGALARININ (TSUNAMI)
OLUŞUMU, HAREKETİ VE KIYILARA ETKİLERİ

Ahmet Cevdet YALÇINER
Y. Doç. Dr.
ODTÜ İnşaat. Müh. Böl.
Kıyı ve Liman Müh.
Araştırma Merkezi

Uğur KURAN
Jeofizikçi
Bayındırlık ve İskan Bakanlığı
Deprem Araştırma Dairesi
Başkanlığı

ÖZET

Okyanuslar ya da denizler tabanında oluşan deprem, volkan patlaması ve bunlara bağlı taban çökmesi ve zemin kaymaları gibi tektonik olaylar sonucu denize geçen enerji nedeniyle özgün bir deniz dalgası oluşabilmektedir. Pasifik okyanusunda çok sık, Ege denizi'nde de bazen rastlanan, Japonca adı "tsunami" olarak bilinen ve birçok dilde de bu isimle anılan dalga bu türdendir.

Bu bildiride sismik orijinli deniz dalgalarının (tsunami) oluşması, genel özellikleri ve deniz ortamı içinde ilerlemesi anlatılmakta, Pasifikte ve Anadolu anakarasını çevreleyen denizler ve içsularadaki önemli tsunami olayları verilmektedir. Bu bilgilere bağlı olarak fayların denizlerdeki ilerlemeleri (Kuran, (1980) ve Yalçiner ve Kuran, (1991)) izlenerek, gelecekte Doğu Akdeniz, Ege, Marmara denizi ve bazı içsularımızda tsunami doğurgan bölgeler gösterilmekte, tsunaminin kıyılarda yaratabileceği etkiler anlatılmaktadır.

1. GİRİŞ

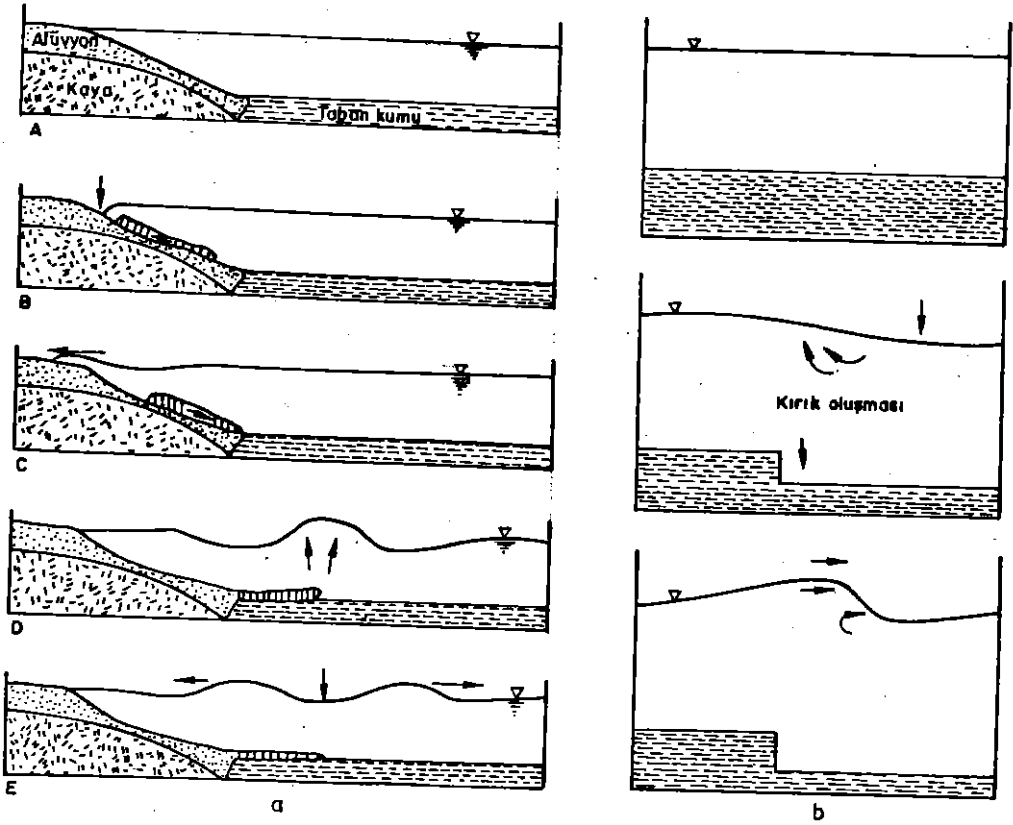
Enerji, su ortamı içerisinde dalga hareketi yolu ile iletilebilmektedir. Rüzgar enerjisinin sürtünme yoluyla denize geçişi, dünya ile ay ve güneş arasındaki çekim kuvvetinin amansal değişimi, limanlar ya da küçük körfezlerde gemiler ve ervanelerinin etkisi, su altındaki zemin kaymaları, deprem, olkan patlaması gibi etkilerle enerjinin suya geçişi gibi olaylar deniz veya göllerde dalgalar oluşturmaktadır. Bu dalgaların hemen hepsi, onları yaratan enerjinin özelliklerine göre farklı karakteristikler taşırlar.

Japonca'da "liman dalgası" anlamına gelen "tsunami" kelimesi, denize çok kısa sürede geçen önemli düzeydeki enerji etkisiyle oluşan, uzun dönemli bir deniz dalgasını temsil eder. Bu deniz dalgası tabandan denize geçen enerjiyi kıyılara kadar ileten doğal bir araç görevi yapmaktadır.

Pasifik kıyılarında, tsunami etkisiyle her yıl önemli düzeyde can ve mal kaybı olmaktadır. Tsunamiden en çok zarar gören ülkelerden biri olan Japonya'da, tsunaminin Okyanusta oluşması ve hareketi, kıyılara geldiğinde etkileri ve buna karşılıklı korunma önlemleri üzerinde araştırmalar yürütülerek ikaz sistemleri kurulmaktadır.

Anadolu'yu çevreleyen denizlerde de tarih boyunca tsunami olarak adlandırılan sismik orijinli deniz dalgaları oluştuğu, bunlara son yüzyıl içinde de rastlandığı kaydedilmektedir (Murty, (1977), Papazachos, (1985), Yalçiner ve Kuran, (1991)). Bu bilgiler, kıyılarımızdaki büyük ve duyarlı yatırımlar (nükleer ya da termik santraller), deniz kıyısındaki sayısız yerleşim merkezleri ve turistik tesislerin tsunami etkisi için riskli durumda olduklarını göstermektedir.

Bildiri kapsamında, tsunaminin ve sismik orijinli deniz dalgalarının oluşması ve deniz ortamındaki hareketi anlatılmakta, Anadoludaki fayları ve kırık ilerlemeleri gözetilerek



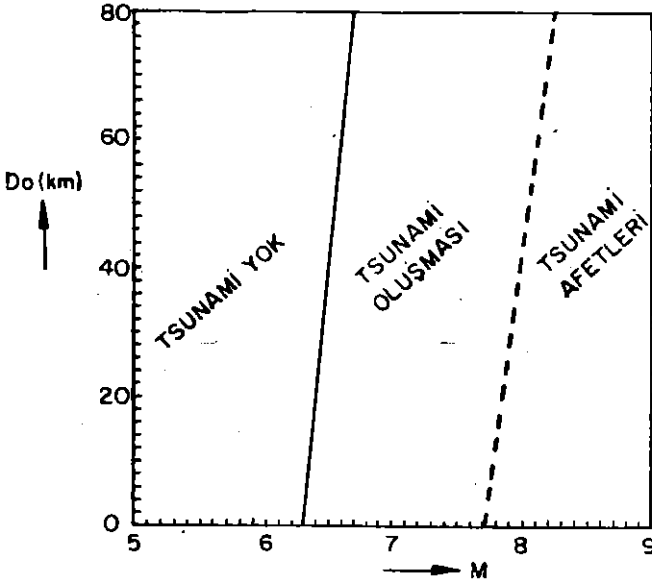
Çizim 1. Sualtı Zemin hareketi Nedeni ile Tsunami Oluşumu

gelecekte denizde oluşması olası depremler ve bunlara bağlı tsunami olayları değerlendirilmekte Marmara, Ege ve Doğu Akdenizdeki tsunami eğilimli kıyı alanları gösterilmektedir.

2. TSUNAMI

2.1. Oluşumu

Tsunaminin oluşma safhaları tipik bir örnekle Çizim 1 de verilmiştir. Çizim 1a'daki enerji kaynağı sualtı zemin kayması, 1b'deki ise fay hattındaki taban çökmesi nedeniyle denize geçen enerjidir. Farklı enerji kaynağı olması durumunda da tsunami oluşması genel olarak çizimde sematik olarak sunulan düzende olmaktadır.



Çizim 2. Sualtındaki Depremlerin Şiddet ve Odak Derinliği ile Tsunami ilişkisi (McCulloch, (1985))

Çizim 2. de, tsunami doğmasına neden olacak, sualtındaki depremlerin şiddeti ve odak derinliği ilişkisi gösterilmektedir. Buna göre tsunami oluşabilmesi için deprem şiddeti ile odak derinliği arasında Denklem 1. de verilen eşitsizlikteki koşul sağlanmalıdır. (McCulloch, (1985) ve Murty, (1977))

$$M > 6.3 + 0.005 D_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

burada; M deprem şiddetini, D_0 ise odak derinliğini (km.) temsil etmektedir.

Tsunaminin belirgin bir parametre ile tanımlanması amacıyla Denklem 2 de verilen tsunami şiddeti kullanılmaktadır. Tsunami şiddeti ve kıyılarıdaki etkileri ise Çizelge 1 de verilmiştir.

$$m = \log_2 H \quad \dots\dots\dots (2)$$

burada; m tsunami şiddeti, H ise merkezden 10-300 km. uzakta ölçülmüş tsunami dalga yüksekliğidir.

Cizelge 1. Tsunami Şiddeti ve Kıyılardaki Etkileri

Tsunami Siddeti	Özellikleri ve Kıyılardaki Etkileri
-1	Yükseklik 50 cm.den küçük önemsiz tsunami
0	Yükseklik 1 m. mertebesinde ve hasar yok
1	Yükseklik 2 m. mertebesinde, kıyılardaki evler ve teknelerde hasar olur
2	Yükseklik 4-6 m., evler yıkılır, can kaybı olur
3	Yükseklik 10-20 m., kıyılarda 400 km. boyunca önemli hasarlar ve çok sayıda can kaybı olur
4	Yükseklik 50 m., 500 km. den uzun kıyı boyunca çok önemli hasarlar ve çok sayıda can kaybı olur

2.2 Hareketi

Tsunami, diğer tüm deniz dalgalarında olduğu gibi dalga yüksekliği, dönemi ve boyu gibi karakterisitiklere sahiptir. Dalga boyu yüzlerce kilometre uzunluğunda olduğundan uzun dalgalar sınıfına girer ve hemen her su derinliğinde sığ su dalgası koşullarını sağlayabilir. Denizde, batimetri etkisi ile sapmaya uğrayarak ve karşılaştığı engeller (adalar) nedeniyle dönerek yoluna devam eder. Kıyılara geldiğinde taban sürtünmesi ve yansımadan etkilenir ve taban eğim özellikleri uyarınca tırmanır. Tsunaminin yayılma hızı, uzun dalgalar yayılma hızı ile aynı olduğundan denklem 3 yardımı ile bulunabilmektedir.

$$C = \sqrt{g d} \dots\dots\dots (2)$$

Burada; C, yayılma hızı (faz hızı); g, yerçekimi ivmesi; d, su derinliğidir. Denklemden hesaplanacağı üzere, örneğin 1000 m. su derinliğinde (Marmara denizi, Kuzey Batı Ege ve Doğu Akdeniz için tipik derinlik) yayılma hızı 357 km/saat olabilmektedir.

Tsunami dalgasının hareketi, diğer dalga türleri gibi matematiksel model kurularak incelenebilmektedir (Imamura, Goto, Shuto, (1988) ve Shuto, Goto, (1990). Bu model, derin denizde lineer dalga teorisine göre çıkarılan momentum ve süreklilik

denklemlerinin başlangıç değeri problemi şeklinde sayısal yollarla çözülmesini, sığ su derinliğinde ise (derinliğin 50 m. den küçük olduğu derinliklerde) taban sürtünmesi de gözetenilerek sığ su derinliği dalga teorisi yardımı ile sayısal çözümün kıyıya kadar devam ettirilmesini amaçlamaktadır. Son aylarda "Sayısal Tsunami Benzetimi" olarak geliştirilmiş olan bu matematiksel model, depremden hemen sonra, denizdeki su düzeyi profiline ilişkin verileri girdi olarak alıp, işleyebilmekte ve kısa bir süre içinde elde edilen sonuçları ilgili merkezlere bildirerek tsunami uyarı sistemi olarak kullanılabilir (Shuto ve Goto, (1990)).

2.3. Tarihteki Önemli Tsunami Olayları

Tarihi kayıtlar, dünyadaki büyük denizlerin hepsinde tsunami olayları içermektedir. Ancak, sunulan çalışma kapsamında Pasifik Okyanusu ve Anadolu çevresindeki tsunami olayları öncelikli olarak düşünülmüş ve sadece bu iki bölgedeki tsunami olayları hakkında bilgiler verilmiştir.

2.3.1. Pasifik Okyanusu

Pasifik Okyanusu'nun, tsunami eyilimi en çok olan yöre olduğu hem tarihteki hem de günümüzdeki olaylardan anlaşılmaktadır. Bu olayların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Japonya, hemen her yıl tsunami deneyimi yaşama olasılığı yüksek olan bir ülkedir. Bu ülke tarihinde 3 adet çok önemli tsunami olayı kayıtlıdır. Bunlardan en önemlisinin 1611 de oluşmuş olduğu, ancak bu konuda yeterli bilgi bulunmadığı bilinmektedir. İkinci derecede önemli olan, 1896 yılındaki Meiji Büyük Sanriku tsunamisi ($m=4$) olup kıyılarda 30m. tırmanma yaratmış, 21000 can kaybına neden olmuştur. Üçüncü sıradaki ise 1933 yılındaki Shouwa Büyük Sanriku tsunamisi. Bu tsunami 25 m. tırmanmış ve yaklaşık 3000 kişinin ölümüne neden olmuştur (Shuto, Goto, Imamura, (1990)).

1960 Şili ve 1964 Alaska depremleri Pasifikte önemli hasarlar ve can kaybı yaratmış iki ayrı tsunami doğurmuştur. Şili kıyılarında doğan 1960 Şili tsunamisi Japonya kıyılarına 22

saatte ulaşabilmiştir. 1964 Alaska depremi ile oluşan Alaska tsunamisi ise Japonya'ya 6 saatte varmıştır (Imamura, Shuto, Goto,(1988), Imamura, Shuto,(1989)).

Tarihte volkan patlamaları sonrası da tsunami(ler) oluştuğu kayıtlıdır. Bunlardan bazıları, Ağustos 1883 Karakota Volkanı patlamaları sonrası oluşan 3 ayrı tsunami, Ekim 1883 Alaska Augustin Volkanı, Eylül 1952 Myojin Reef Volkanı ve Ocak 1914 Sakurajima Volkanı patlamaları sonrasındaki tsunami olaylarıdır (Murty,(1977)).

2.3.2. Anadolu Çevresindeki Tsunamiler

Ege denizindeki Santorin isimli (bugünkü adı Thera olan $36^{\circ} 21'N$, $25^{\circ} 21'E$) volkanik adadaki patlamalar M.Ö. 1480-1450 yılları arasında devam ettiği ve bu dönemde kıyılarda 100m. yüksekliğe tırmanan bir tsunami oluştuğu belirtilmektedir (Murty, (1977)).

Santorin tsunamisinden itibaren 1956 yılına kadar toplam 47 adet tsunami olayı Murty,(1977) de verilmiştir. Bu bilgiler içinde Santorin merkezli üç tsunami, 1050 yılı, 29 Eylül 1650 ve 28 Ocak 1866 tarihleri ile yer almaktadır. Bunlardan başka 14 Aralık 558, 26 Ocak 740, 14 Ekim 1344, 14 Eylül 1509 ve 5 Nisan 1646 tarihleri ile Marmara denizi ve İstanbul'un tsunami'den etkilendiği belirtilmektedir. 1509 depreminde Hereke koyu boyunca yer alan bizans dönemine ait yalı köşkleri deniz suları altında kalmıştır. Haliç dalgaları Galata Surlarını aşarak arka plandaki mahallelere ulaşmıştır (Öztiñ, (1991)).

Yakın tarih içinde önemli sayılan tsunamilerden biri de Ege denizinde 9 Temmuz 1956 tarihli $36^{\circ} 54'N$, $26^{\circ} 00'E$ merkezli Greenwich zamanı ile saat 03:11:38'' deki 7.5 şiddetindeki deprem veya aynı tarih $36^{\circ} 48'N$, $25^{\circ} 12'E$ merkezli Greenwich zamanı ile saat 03:24:38''deki 7 şiddetindeki ikinci şok nedeniyle gelişen tektonik olaylar sonucu doğan 4.6 m. yükseklikteki tsunamidir. Bu dalğanın, İzmir yakınlarına 1 saat kadar sürede ulaşabildiği, Ege'deki iki ada (Amorgos ve Astipalaea adaları) kıyılarında 25m. ve 20m. yüksekliğe tırmandığı ve Ege denizindeki çalkantının bir gün sürdüğü de belirtilmektedir (Papazachos ve diğerleri,(1985) ve Murty,(1977)).

10 Eylül 1894 tarihindeki Marmara denizi merkezli deprem (M 7.6) nedeniyle Marmara sahili ve adalarda deniz önce 200 m geri çekilmiş sonra karaya ilerleyerek denizdeki kayıkları karaya atmıştır. Adalardaki gemiler ise yüksek dalgalarla çalkalanmıştır. Bu arada Eser-i Cedit vapuru büyükada önünde karaya oturmuştur. Heybeli Ada Çam limanındaki sular bir süre tamamen çekilmiştir (Öztin, (1991)).

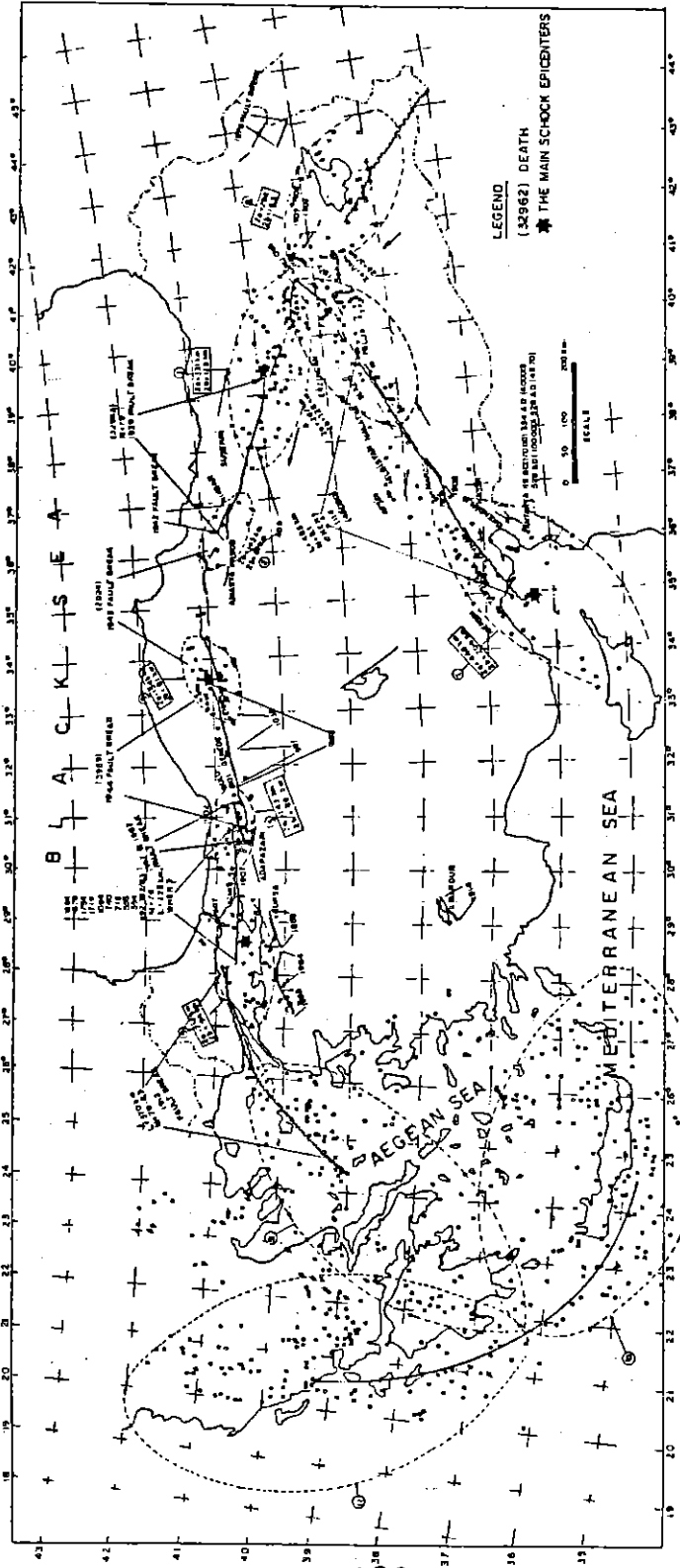
10 Ağustos 1114 depremi Mersin, Kahraman Maraş ve Sanlı Urfa'da etkili olduğu ve sadece Kahraman Maraş bölgesinde 45000 kişinin ölümüne neden olduğu bilinmektedir. Bu deprem İsrail'de de hissedilmiş ve doğu Akdeniz'de tsunami yaratmıştır (Kuran, (1980) ve Yalçiner ve Kuran, (1991)). Doğu Akdenizde tsunami yarattığı bilinen bir başka deprem de 20 Mayıs 1202 depremidir (Ambreseys, (1985)).

Karadeniz'de de tsunami örneğine 1939 Erzincan depreminde rastlanılmıştır. Depremin etkisi ile kuzeyde Karadeniz kıyısında Fatsa bölgesinde deniz önce 50 m. çekilmiş sonra 20 m. ilerlemiş ve daha sonra da normale döndüğü gözlenmiştir (Gutenberg and Richter, (1950)).

Anadolu içsularında da tsunami örneğine 3 Ekim 1914 Burdur depreminde rastlanılmıştır. Bu depremden hemen sonra Burdur Gölünün kıyıdan 300 metre uzaktaki Burdur-Dinar karayoluna kadar taşmış olması bu depremin tsunami doğurduğunu ortaya koymaktadır (Yalçiner ve Kuran, (1991)). Bundan başka 10 Haziran 1964 Manyas (M=6.6) depremi nedeniyle Manyas gölü içinde ve güneyinde meydana gelen fay kırıklarının gölde sismik orijinli dalga yarattığı, ayrıca 28 Şubat ve 11 Nisan 1855 tarihlerinde meydana gelen iki ayrı şok etkisiyle Ulubat Gölünde sismik orijinli dalga oluştuğu tahmin edilmekte ve bu dalganın özellikleri araştırılmaktadır (Coburn ve Kuran, (1985) ve Kuran, (1986)).

3. ANADOLU VE ÇEVRESİNDEKİ TSUNAMİ DOĞURUCU SİSMİK OLAYLAR

Bilindiği üzere, Anadolu'da iki fay hattı bulunmaktadır. Bunlar, Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Faylarıdır. Ege denizinin güneyinden geçen ve Hellenik Yay olarak isimlendirilmiş bir başka fay hattı da aktif durumdadır. Çizim 3 te bu fay hatları ve son



Çizim 3. Anadolu ve Çevresindeki Önemli Fay Hatları ve Kırık İlerlemeleri.

yüzyıl içinde oluşmuş depremlerin merkez ve siddetleri işaretlenmiştir. Bu çizim incelendiğinde Anadolu çevresindeki bazı deniz alanlarının tsunami doğurgan deprem alanları oldukları ortaya çıkmaktadır.

Doğu Anadolu fayının Iskenderun Körfezi batısından geçerek Kıbrıs'a yönelen kolunun bulunduğu bölge bunlardan birisidir. Doğu Akdenizin, özellikle Kuzey Kıbrıs kıyıları, Anamur'dan başlayıp İsrail'e kadar uzanan kıyı bandının gelecekte tsunami etkisi altında kalabileceği dikkate alınmalıdır.

Kuzey Anadolu fayı, ülkemiz sınırları içinde Hakkari'den başlayıp Van Gölünün güneyi, Amasya, Bolu, İzmit, Marmara denizi ortasından geçerek, Saroz körfezi yolu ile Ege denizine uzanmaktadır. Bu fayın Doğu Anadolu fayı ile bulunduğu yer yaklaşık olarak Erzincan, Elazığ, Van Gölü üçgeni içinde kalmakta olup Van Gölü, Hazar Gölü ve büyük baraj göllerinin yakınlarına rastlamaktadır. Bu yüzden bölgedeki gölleri sismik orijinli deniz dalgası eyilimli göller olarak değerlendirmek olasıdır.

Hem tarihi kayıtlar hem de Kuzey Anadolu Fayının Marmara Denizi'nden geçen kısmındaki hareketlilik, bu denizinin her zaman için tsunami doğurabilecek özellikte depreme sahne olacağı olasılığını yüksek tutmaktadır.

Kuzey Anadolu Fayının Ege denizinde Mora Yarımadasına yönelmiş olan son kısmı da ilerlemesine devam etmektedir. Fayın bu kısmındaki hareketlilik kuzey Ege'de, Hellenik Yay'ın Girit Adası güneyine uzanan kısmındaki tektonik hareketler ise güney Ege'de tsunami oluşturma özellikleri taşımaktadırlar. Bu bölgelerde doğabilecek tsunami, tüm Ege adaları ve birçok kıyıları ile Güneydeki Akdeniz Sahillerimizi etkileyebilecektir.

4. SONUÇLAR

Anadolu ve çevresindeki fayların genel özellikleri, tsunami dalgasının oluşumu ve hareketi, tarihteki çeşitli tsunami olayları değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

i. Ege Denizi, Marmara Denizi ve Iskenderun Körfezi-Kıbrıs arasındaki bölgelerdeki olası deprem merkezleri, tsunami

doğurgan özelliğe göstermektedir.

ii. Burdur, Van, Hazar ve Doğu Anadolu'daki birçok baraj gölleri olası depremler nedeniyle tsunami dalgasına sahne olabileceklerdir.

iii. Her depremten sonra (merkezin denizde olması durumunda), kıyılara tsunami dalgasının gelme olasılığı bulunmaktadır. Bu duruma pek ender rastlanılabilecek ise de bu dalganın kıyıda mal ve can kaybı yaratması olasılığına karşı duyarlı olunması gereklidir.

iv. Kıyılarda yapılan çok pahalı ve önemli yatırımların tasarımında (nükleer santraller) için tsunami etkisi de araştırılmaktadır. Bunun yanında diğer büyük kıyı yatırımlarının (termik santraller, limanlar, kıyı koruma yapıları, çeşitli tesisler vb.) tasarımında da sismik deniz dalgaları etkisi gözlemlenmesi uygun olacaktır.

v. Anadolu'yu çevreleyen denizlerdeki sismik orijinli deniz dalgalarının (tsunami) oluşumu ve ilerlemesi konusunda hem kıyı mühendisliği hem de deprem mühendisliği disiplinlerinin işbirliği ile yürütülecek araştırmalar, olası tsunami afetleri için alınabilecek önlemlerin tesbit edilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Ambraseys N. N. (1985) "An Analysis of the Eastern Mediterranean Earthquake of 20 May, 1202" Proceedings of the Symposium on Historical Seismograms & Earthquakes, IASPEI/UNESCO Working Group on Historical Earthquakes, Tokyo.
2. Coburn, A. W. and Kuran, U. (1985) "Emergency Planning and Earthquake Damage Reduction for Bursa Province: A Preliminary Evaluation of Earthquake Risk, Project on Regional Planning for Disasters" Earthquake Research Department, Ministry of Public Works and Housing, Republic of Turkey, and the Martin Center for Architectural Urban Studies, Univ. of Cambridge.
3. Gutenberg, B and Richter, C. F., (1965) "Seismicity of the Earth and Associated Phenomena"
4. Imamura, F. and Shuto, N. " Numerical Simulation of 1960 Chilean Tsunami" Proceedings of Japan China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Kyoto, Japan, July, 1989
5. Imamura, F., Shuto, N. ve Goto, C., (1988), " Numerical Simulation of the Transoceanic Propagation of Tsunamis" 6 th Congress Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Kyoto, Japan, July, 1988, pp. 265-271
6. Imamura, F., Nagai, T. Takenaka, H. ve Shuto, N., (1988) "Computer

Graphics for the Study of Transoceanic Propagation of Tsunamis"

7. Imamura, F., ve Goto, C., (1988), " Truncation Error in Numerical Tsunami Simulation by the Finite Difference Method" Coastal Engg. in Japan, V.31 No:2, pp. 245-163, Aralık 1988.
8. Kuran, U. (1980), "Levant Sahili. Anadolu Fayları Boyunca Yıkıcı Depremlerin Yer, Magnitüd ve Zamanlarının (Uzun Süreli) Önceden Saptanması" Türkiye Jeoloji Kongresi Bülteni, s2, 151-163, 1980
9. Kuran, U. (1986) "Description and Evaluation of Documentary Source Material Related to-1855 Bursa Earthquake" Unpublished Manuscript, Earthquake Research Department, Ministry of Public Works and Housing, Republic of Turkey.
10. McCulloch, D. S., (1985), "Evaluating Tsunami Potential" pp.375-413
11. Murty, T. S., (1977), "Seismic Sea Waves TSUNAMIS" Marine Environmental Data Service Branch, Fisheries and Marine Service Ottawa Kanada
12. Osami, N., Imamura, F. ve Shuto, N., (1991), "A Numerical Model for Far-field Tsunamis and Its Application to Predict Damages Done to Aquaculture" Natural Hazards 00: 000-000, 1991 Kluwer Academic Publishers, Netherlands, NHAZ e884 pp.1-21.
13. Öztin, Feriha, (1991). Jeomorfoloj, Kisisel Görüşmeler.
14. Özsoy, E., Unlüata, U. ve Aral, M., (1982), "Coastal Amplification of Tsunami Waves in the Eastern Mediterranean" J of Physical Oceanography, V 12, pp.117-126 Feb, 1982.
15. Papazachos, B. C., Koutitas, C. H., Karacostas, B. G. and Papaioannou, CH. A. "Source and Short Distance Propagation of the July 9, 1956 Southern Aegean Tsunami" Marine Geology, 65(1985) 343-351,
16. Papazachos, B. C. (1989), "Sea Waves Generated by Earthquakes in Grece and Surrounding Area"
17. Shuto, N., Goto, C. ve Imamura F. (1990), "Numerical Simulation as a Means of Warning for Near Field Tsunami" Coastal Engg. in Japan V33 No.2 pp. 173-193, Dec. 1990.
18. Wyss, M. ve Bayer, M. (1981), "Earthquake Hazard in the Hellenic Arc" Reprinted from Earthquake Prediction- An International Rewiev Maurice Ewing Series 4, American Geophysical Union pp. 153-172
19. Yalçiner, A. C. ve Kuran, U., (1991) "Past, Present and Future of Seismic Sea Waves in the Vicinity of Anatolia" (Abstract) Accepted for Presentation at 13th International Tsunami Symposium by Int.Union of Geodesy and Geophysics, Aug,1991,Vienna.