

Gökova Körfezi depremlerinin kaynak parametreleri ve Rodos-Dalaman bölgesinde tsunami riski

Seda YOLSAL*, Tuncay TAYMAZ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Gökova Körfezi Türkiye'nin güneybatısında Ege Denizi kıyısında yer alan ve bölgedeki tektonik ve depremsellik açısından aktif graben sistemlerinden biridir. Son yıllarda özellikle 2004-2005 tarihleri arasında körfez içerisinde bir çok sayıda orta büyüklükte ($M_w \geq 5.0$) deprem meydana gelmiştir. Bu çalışmada ters çözüm teknikleri ve telesismik uzaklıklarda kaydedilen P ve SH dalga şekilleri kullanılarak bölgede oluşan güncel depremlerin kaynak mekanizması parametreleri ve fay düzlemi üzerinde meydana getirdikleri kayma dağılımı ve yırtılma süreçleri modelleri elde edilmiştir. En küçük hatalı kaynak mekanizması çözümlerine göre depremler genel olarak D-B doğrultulu normal faylanma mekanizması ile sığ odak derinliklerinde meydana gelmektedirler. Kaynak mekanizması çözümlerinde çok küçük miktarlarda doğrultu atımlı faylanma bileşenleri bulunmaktadır. Telesismik cisim dalgalarının ve yakın alan istasyonların ters çözüm ile modellenmesi sonucu elde edilen kayma dağılımı modelleri ise depremlerin oldukça basit şekilli ve dalım yönünde ilerleyen dairesel kırılmalar ile meydana geldiklerini göstermektedir. Ayrıca, Hellenik Yayı'nın doğu uzanımı üzerinde yer alan Rodos adası ve çevresinde tarihsel dönem içerisinde meydana gelen ve tsunami (depreşim) dalgalarına neden olduğu rapor edilen birçok sayıda deprem bulunmaktadır. 1481 yılında meydana gelen tarihsel depremler için sığ su dalgası teorisine dayalı yöntemlerle ve GEBCO-BODC batimetri verisi ile tsunami dalga simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları bu bölgede meydana gelen bir depremin daha çok episantra yakın bölgelerde örneğin Rodos adası ve çevresinde ve Gökova Körfezi - Fethiye kıyılarında etkili tsunami dalgalarına neden olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Anadolu, deprem, Gökova Körfezi, Rodos-Dalaman, sismotektonik, tsunami.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Seda YOLSAL. yolsalse@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 62 60.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Girit-Kıbrıs yayları ve Ölü Deniz fay zonu çevresinde oluşan depremlerin kaynak mekanizması parametreleri, kayma dağılımları ve tarihsel tsunami simülasyonları" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 25.09.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 28.10.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Source mechanism parameters of Gulf of Gökova earthquakes and tsunami risk in the Rodos-Dalaman region

Extended Abstract

The Gulf of Gökova locates in southwestern Turkey near the Aegean Sea and surrounded by Datça Peninsula to the south, the island of Kos to the west and Bodrum Peninsula to the north. Active deformation in the region has been observed from widespread seismicity, active normal faulting and tectonically generated topography. In recent and historical times, many destructive earthquakes have occurred in southwestern Turkey. Most of the seismic activity is concentrated along the northern branch of Gökova Fault Zone and it is controlled by E-W trending normal fault system. Intense earthquake activity occurred in Gulf of Gökova in August 2004 and January 2005. Source mechanism solutions and rupture histories for 10 earthquakes, of magnitude $M_w \geq 5.0$ and shallow focal depth ($h < 20$ km), which occurred in the region during the period 1986-2005, are used to investigate the geometry of faulting in the region. To obtain source mechanisms and slip distributions on the fault plane, we compared the shapes and amplitudes of long period P- and SH-waveforms recorded in the distance range of 30-90 degrees. The seismograms are formed by the combination of direct (P or SH) and reflected (pP and sP, or sS) phases from a point source embedded in a given velocity structure. Receiver structures are assumed to be homogeneous half-spaces. Seismograms were weighted according to the azimuthal distribution of stations. The solutions were also constrained by P-wave first motion polarities of near-field stations. All the distribution of P-wave first-motion polarities on the equal-area projection of the lower focal hemispheres are consistent with the minimum misfit solutions within a few degrees, with the strikes and dips of the nodal planes. We have also obtained earthquake rupture histories and slip distribution on the fault plane using teleseismic broad-band P waveforms. The rupture process were presented as a spatio temporal slip distribution on a fault plane which was divided into $M \times N$ subfaults with length dx and width dy . Then, slip-rate function on each sub fault was described by a series of triangle functions with a rise time.

Generally, earthquakes initiates with an earthquake cluster activity and continue for a long time in the

gulf. This kind of earthquake generation pattern can carry on by weeks or months decreasing in frequency and in magnitude. The kinematics of the deformation is controlled by normal faults with small strike slip components trending E-W, NE-SW and NW-SE directions. Earthquake source mechanism solutions indicate that normal fault mechanism with a strike-slip component have been observed on the E-W oriented graben and normal fault systems in the Gulf of Gökova and they confirm that extension is in a north - south direction that is in a good agreement with the geology and tectonic structure of the region. T-axes directions obtained from source mechanism solutions demonstrate the NW-SE direction of extension as a result of the convergence between the African plate and the Eurasian plate and the westward movement of the Anatolian block. On the other hand, all earthquakes have generally short source duration and uniform rupture propagation along the dip direction and their focal depths are generally less than 15 km and thus we may suggest that seismic thickness in this region is about ~10 km. All these slip distribution results show a uniform circular rupture propagation along the dip direction with a short source duration for earthquakes in Gulf of Gökova .

On the other hand, the Gulf of Gökova has a real and major tsunami hazard to the lives and population since it is near the Eastern Mediterranean coast. In this study we have also investigated the tsunami wave propagations to obtain time histories of water surface fluctuations and water particle velocities created by historical 1481 Rhodes earthquakes ($M \sim 7.0-7.5$) in the Eastern Mediterranean sea using TUNAMI-N2 and AVI-NAMI mathematical models based on the method of Okada (1985). The related parameters for the earthquake are adapted by an analogy of current plate boundaries and earthquake source mechanisms obtained by inversion of teleseismic P- and SH- waveforms. The understanding the faulting geometry, tectonic evolutions and source rupture processes along the active fault zones have significant importance on the tsunami generation. The major and well-known seismic generated tsunamis have occurred in Aegean and Mediterranean Seas and these waves affected the coastal regions since historical times.

Keywords: Anatolia, earthquakes, Gulf of Gökova, Rodos-Dalaman, seismotectonics, tsunami.

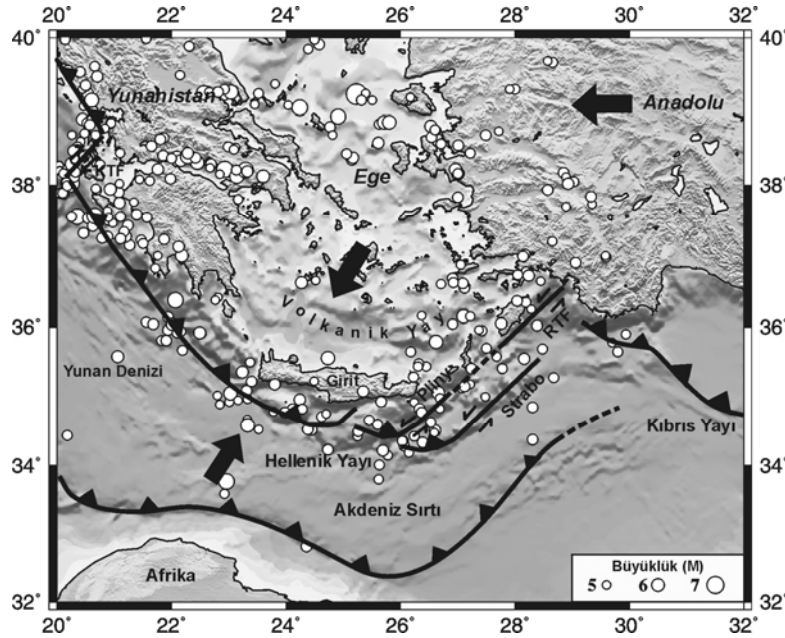
Giriş

Türkiye'nin güneybatı kıyısında yer alan Gökova Körfezi, yaklaşık olarak D-B doğrultusunda 90 km uzunluğunda, K-G doğrultusunda 25 km genişliğinde aktif bir graben sistemidir (Şekil 1). Gökova Körfezi bölgesi, K-G yönlü bölgesel açılma tektoniği etkisi altında bulunan Batı Anadolu-Ege Denizi alanının bir parçasıdır (Taymaz vd., 1990, 1991, 2004a,b, 2007a,b; 2008a). Açılma tektoniğinin etkileri, Ege Denizi batimetrisinde olduğu gibi Batı Anadolu'nun jeolojik ve jeomorfolojik yapısından da açıkça görülmektedir. Yapılan araştırmalara göre, bu bölge başlıca birbirini takip eden iki tektonik evre ile karakterize edilmektedir. Birinci evre, bölgede saatin tersi yönünde dönmeye neden olan ve KB-GD yönelimli rift ve graben sistemini (örn; Milas-Ören, Yatağan-Muğla riftleri) oluşturan K-G yönlü paleotektonik rejimdir. İkincisi ise, D-B yönelimli rift ve graben yapısının (örn; Gökova grabeni) gelişmesinde etkili K-G yönlü açılma rejimidir (Görür vd., 1995). Körfez içerisinde son yıllarda meydana gelen orta büyüklükteki depremler ($M_w \geq 5.0$), güncel deformasyonun yapısını ve aktif tektonizmayı anlamak açısından oldukça büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada 10 adet güncel Gökova Körfe-

zi depremine ait kaynak mekanizması parametreleri ters çözüm teknikleri ve telesismik P ve SH dalga şekilleri kullanılarak belirlenmiş ve körfezin tektonik yapısı yorumlanmıştır. İncelenen bu depremlere ait kayma dağılımı ve yırtılma süreçleri modelleri telesismik geniş bantlı P dalgaları ile saptanmıştır. Ayrıca, tarihsel kayıtlarda belirtildiği üzere Hellenik Yayı'nın doğu uzanımı ile ilişkili olarak meydana gelen büyük, sığ odaklı ve eğim atımlı depremlerin tsunami dalgaları oluşturarak Gökova Körfezi ve çevresini etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, 1481 Rodos-Dalaman çukuru depremleri için sığ su teorisine dayalı geliştirilen yöntemler ile tsunami dalga simülasyonları yapılmıştır. Deprem kaynaklı olarak oluşan tsunami (depreşim) dalgalarının Doğu Akdeniz içerisindeki yayılmaları belirlenmiş, batimetrik yapının etkisi gözlenmiş ve seçilen çeşitli kıyılarda yapay su seviyesi yükseklikleri hesaplanmıştır. Buradaki tsunami dalga yüksekliği, maksimum pozitif ve negatif tsunami dalga genliklerinin toplamıdır.

Tektonik yapı ve depremsellik

Gökova Körfezi'nin genel tektonik yapısı günümüze kadar bir çok jeofizik yöntem, mikro-tektonik araştırmalar, paleomanyetik çalışmalar

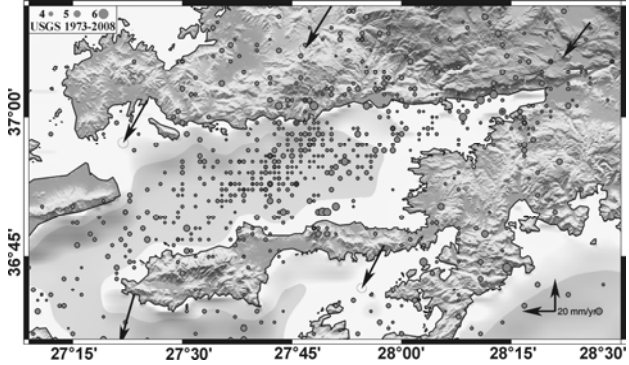


Şekil 1. Girit adası ve Hellenik dalma batma zonu boyunca gelişen ana tektonik unsurlar KTF: Kefalonya Transform Fayı, RTF: Rodos Transform Fayı (Taymaz, 1990; Taymaz vd., 1990, 1991, 2007a; Woodside vd., 2000; Meier vd., 2007; Yolsal vd., 2007a)

ve arazi gözlemleri ile araştırılmış ve incelenmiştir (Kissel vd., 1986; Kurt vd., 1999; Kurt, 2000; Uluğ vd., 2005). Körfezdeki toplam açılma hızı minimum 1.1 mm/yıl, toplam açılma miktarı da minimum 5.5 km olarak hesaplanmıştır (Kurt vd., 1999). Sismik yansıma verileri, körfezin güneyinin ana bir süreksizlik ile, kuzeyinin ise birçok sayıda normal fay ile sınırlandırıldığını göstermektedir. Normal fayların çoğunluğu, D-B ve KB-GD uzanımlı olup deniz tabanını ve taban dolgusunu kesmektedirler. Körfezin içerisine doğru gidildikçe, ana faylar ve onlarla ilişkili antitetik ve sentetik faylar daha az belirgin olmaktadır. Körfezin doğusunda ise KB-GD uzanımlı küçük ölçekli horst-graben sistemleri yer almaktadır ve deniz tabanı, körfezin kuzeydoğusundaki nehirlerin delta birikimleri nedeniyle nispeten sıg ve pürüzsüz bir yapıya sahiptir. Detaylı batimetri verileri, körfezdeki ana yapısal unsurların D-B uzanımlı olduğunu, ancak körfezin ortasında ve doğusunda KB-GD yönelimli şevlerin bulunduğunu göstermektedir (Kurt vd., 1999; Uluğ vd., 2005). Kuzey kenarı, D-B ve KB-GD yönlü ve çoğunluğu deniz tabanına kadar uzanan faylarla ilişkili uçurum ve şevler tarafından kesilmiştir. Körfezin kuzeyinin aksine güney kesiminde herhangi bir kıyı şelfi bulunmamaktadır ve batimetri kıyıda D-B yönelimli olacak şekilde, bir kaç yüz metreye düşmektedir. Havzanın ortası ise K-G doğrultulu dar bir platform olup, orta çukur olarak adlandırılmakta ve su derinliği 700 m'yi aşmaktadır ve Gökova havzasını Ege Denizi'ne bağlamaktadır (Kurt vd., 1999; Uluğ vd., 2005). Bölgeden aktif deformasyonu, yaygın deprensellik, normal faylanmalar ve tektonik nedenlerle yükselmiş topografya ile kendini göstermektedir. Depremlerin daha çok körfezin iç kesiminde ve kuzey kenarı boyunca D-B uzanımlı normal fay sistemi üzerinde yoğunlaştığı gözlenmektedir (Şekil 1). Oluşan depremler genellikle deprem kümesi şeklinde başlayıp, birkaç hafta veya ay boyunca azalan büyüklük ve sayıda devam etmektedir (Şekil 2).

Gökova Körfezi ve çevresinde tarihsel dönemde (M.Ö 227, M.Ö 199-198, 142-144, 1741, 1851, 1863, 1869) yıkıcı bir çok sayıda deprem meydana gelmiştir. Örneğin, 1493 depremi Bodrum ilçesinin tamamen yıkılmasına neden ol-

muştur (McKenzie, 1972). Aletsel dönemde rapor edilen önemli depremler ise, 23 Nisan 1933 Kos adası depremi ($M_s=6.5$), 23 Mayıs 1941 Muğla Depremi ($M_s=5.9$), 13 Aralık 1941 Muğla Depremi ($M_s=5.7$), 23 Mayıs 1961 Marmaris Depremi ($M_s=6.3$), 27 ve 28 Nisan 1989 ($M_w=5.1$, $M_w=5.4$) ve 05 Ekim 1999 ($M_w=5.2$) Gökova depremleridir. Bölgede son olarak, Ağustos 2004 ve Ocak 2005 aylarında yoğun deprem aktivitesi gözlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Gökova Körfezi ve çevresinin morfoloji ve güncel deprem etkinlik haritası (USGS-NEIC kataloğunda 1973-2008 tarihleri arasında meydana gelmiş olan depremler ve GPS hız vektörleri) (McClusky vd., 2000, 2003)

Veri ve yöntem

Deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi için yapılan ters çözüm işlemlerinde telesismik ($30^\circ \leq \Delta \leq 90^\circ$) uzaklıklarda bulunan istasyonlarda kaydedilen P ve SH cisim dalgaları ile yapay olarak üretilen dalga şekilleri ve genlikleri karşılaştırılmaktadır. Belirlenen kaynak parametreleri, fayın doğrultu, dalım ve kayma açısı, odak derinliği, sismik moment ve kırılmanın zaman içindeki davranışını gösteren kaynak zaman fonksiyonudur. Gökova Körfezi depremlerine ait veriler IRIS Breq-FAST (<http://www.iris.edu>) web sayfasından deprem oluş zamanına (t_0) uygun olacak şekilde belirli bir zaman aralığı için alınmıştır. Kaynak mekanizması çözümleri Zwick ve diğerleri (1994) tarafından geliştirilen ikili kuvvet çifti ve moment tensör çözüm özelliklerine sahip MT5 algoritması ile belirlenmiştir. Fay düzlemi üzerindeki kayma dağılımları ise geniş-bantlı telesismik P cisim dalgaları ve yakın alan kayıtların kullanıldığı Yagi ve

Kikuchi (2000) ters çözüm algoritması ile belirlenmiştir. Sonuçta, faylanan alanın boyutları (uzunluk, genişlik), sismik moment boşalımı, maksimum yerdeğiştirme miktarı, gerilme düşümü, kırılma süresi gibi kaynak parametrelerine ulaşılmaktadır.

Tarihsel deprem katalogları ve günümüzde yapılan çeşitli arkeolojik araştırmalar, Rodos adası ve çevresinde tarihsel dönem içerisinde birçok sayıda yıkıcı büyük depremin meydana geldiği ve bunların bir çoğunun Akdeniz kıyılarını etkileyen tsunami dalgalarına neden oldukları belirtilmektedir (Ambraseys, 1960, 1962; Guidoboni vd., 1994; Ambraseys ve Melville, 1995; Soloviev vd., 2000; Altınok ve Ersoy, 2000; Guidoboni ve Comastri, 2005a,b; Fokaefs ve Papadopoulos, 2006; Papadopoulos vd., 2007, Yolsal vd., 2007a). Bu çalışmada doğrusal olmayan sığ su dalga teorisine ve Okada (1985) modeline dayalı olarak geliştirilen TUNAMI-N2, AVI-NAMI ve NAMI-DANCE (Yalçiner vd., 1995, 2000; Yalçiner ve Pelinovsky, 2007) programları ile 2000 m grid aralığına sahip batimetri dosyası (GEBCO BODC/1997) kullanılarak tarihsel 1481 Rodos, Dalaman Çukuru ve çevresi depremleri için tsunami (depreşim) dalga simülasyonları yapılarak dalgaların deniz içerisinde zamana bağlı olarak yayılımları ve davranışları belirlenmiştir. Ayrıca, çeşitli kıyılarda etkili olan su seviyesi yükseklikleri seçilen ölçüm noktaları için hesaplanmıştır. Sığ su dalga teorisi, düşük frekans ve uzun dalga boyuna sahip tsunami dalgalarının modellenmelerinde en yaygın olarak kullanılan matematiksel yaklaşımdır ve aşağıda gösterilen denklemler (1-4) ile ifade edilmektedirler (Imamura, 1995; Okada, 1985; Yalçiner vd., 2000).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

x, y: yatay eksenler

z: düşey eksen

t: zaman

h: durgun su derinliği

η : durgun su yüzeyi üzerindeki suyun düşeydeki yerdeğiştirme hareketi

u, v, w: x, y ve z doğrultularındaki su partikül hızları

g: gravite ivmesi

τ_{ij} : j normal düzlemi üzerinde i doğrultusundaki normal veya teğet kesme gerilmesi

Tsunami (depreşim) kaynağının seçimi de teorik olarak oldukça karmaşık bir problemdir ve bölgedeki faylanma mekanizmasının çok iyi bilinmesini gerektirir. Simülasyon programında, deniz tabanındaki eğim atımlı faylanma ile meydana gelen düşey harekete bağlı olarak tanımlanan başlangıç dalgası kullanılmakta ve dalga denizde ve sığ sularda ilerlemesinin sayısal analiz yoluyla belirlenmesi amaçlanmaktadır. Tsunami simülasyonlarının matematiksel modelleri için gereken en önemli parametreler, deprem geometrisi (kaynak derinliği, doğrultu, dalım ve kayma açıları), odaktaki düşey yerdeğiştirme miktarı, faylanma alanı, sismik moment (enerji), depremin kıyıda olan uzaklığı ve kıyı geometrisidir (su derinliği ve kıyı eğimi) (Yalçiner vd., 1995, 2000).

Kaynak mekanizması çözümleri ve kayma / yırtılma dağılımları

Son yıllarda Gökova Körfezi içerisinde orta büyüklükte birçok sayıda deprem meydana gelmiştir. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Merkezi tarafından yayınlanan rapora göre, Gökova Körfezinde 3 Temmuz–21 Aralık 2004 tarihleri arasında büyüklüğü 2.0 ile 5.5 arasında değişen yaklaşık 2000 adet deprem Gökova Körfezi'ni oluşturan ve genel uzanımı körfeze paralel olan normal faylar üzerinde meydana gelmiştir. Depremlerin çoğunun körfezin içerisinde toplandıkları görülmektedir (Şekil 2 ve 3). Güncel depremlerin bu çalışma kapsamında belirlenen kaynak mekanizması çözümleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, en küçük hatalı kaynak mekanizması çözümlerinin tümü, depremlerin D-B doğrultulu normal

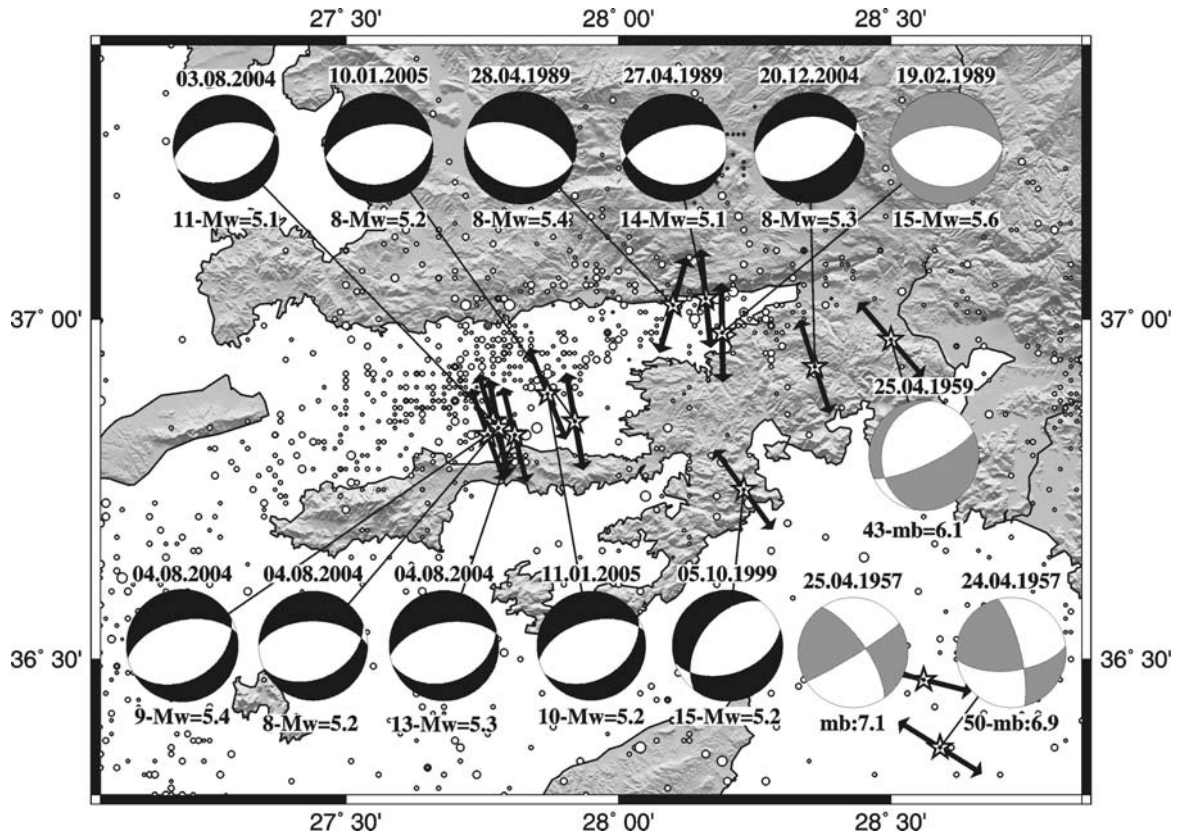
faylanma mekanizması ile sığ (~ 10 km) odak derinliklerinde oluştuğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen deprem kaynak mekanizması parametrelerinden hesaplanan T (çekme) eksenleri doğrultuları da harita üzerinde siyah oklarla verilmiştir. Gökova Körfezi için belirlenen açılma doğrultuları yaklaşık K-G ve KB-GD yönlüdür (Şekil 3). Yapılan çeşitli testler sonucunda odak derinliği için hata miktarı ± 2 km, fay düzlemi açılarındaki hata miktarları ise yaklaşık $\pm 10^\circ$ olarak saptanmıştır. En küçük hatalı kaynak mekanizması çözümlerinde küçük miktarlarda doğrultu atım bileşeninin varlığı görülmektedir.

Sonuç olarak, bölgenin tektonik ve jeolojik yapısıyla uyumlu olarak K-G ve KB-GD yönlü açılma rejimi etkisinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Yagi ve Kikuchi (2000) ters çözüm algoritması ile belirlenen kayma dağılımı mo-

delleri ise depremlerin oldukça basit şekilli, tek düze ve dalım yönünde dairesel kırılmalar ile meydana geldiklerini göstermektedir. Gökova Körfezi depremleri için hesaplanan gerilme düşümü ($\Delta\sigma$) değerleri yaklaşık olarak 5-10 bar arasında değişim göstermektedir. Şekil 3'teki yıldız ve siyah oklar sırasıyla depremlerin ISC kataloğu lokasyonlarını ve T (açılma) eksenlerini göstermektedir.

Tarihsel 1481 Rodos adası ve çevresi depremleri tsunami simülasyonu

İnsanlık tarihi boyunca deniz ve okyanus kenarlarındaki yerleşim alanları devamlı olarak tsunami riskine maruz kalmışlardır. Bu doğal olay, oldukça büyük miktarlarda can ve mal kaybının oluşmasına neden olmuştur. Doğu Akdeniz kıyılarını etkileyen ve tsunami (depreşim) dalgalarına neden olan depremler, genellikle Hellenik ve



Şekil 3. Gökova Körfezi ve çevresinde meydana gelen önemli depremlerin kaynak mekanizması çözümleri (siyah ve açık gri ile gösterilen odak küreleri sırasıyla bu çalışma ve McKenzie (1972) ile Harvard CMT moment tensör kataloğunda rapor edilen çözümleri göstermektedir. Bölgenin deprem aktivitesi USGS NEIC (1973-2008) kataloğundan alınmıştır)

Kıbrıs Yayları boyunca deniz içerisinde sığ ve orta odaklı, dalım atımlı faylanma mekanizmasıyla oluşmaktadır. Tarihsel, jeo-arkeolojik ve paleosismolojik kayıtlar (Minoura vd., 2000), Doğu Akdeniz kıyılarını etkileyen ve Girit'teki Minoan uygarlığının yok olmasına neden olan en büyük tsunaminin M.Ö. 15.yy'da Santorini (Thera) volkanının püskürmesi sonucunda oluştuğunu göstermektedir. Bundan başka bir çok yıkıcı deprem ve neden olduğu tsunami dalgaları, bütün Ege ve Akdeniz kıyılarını etkilemiştir. Hellenik dalma batma zonunun Pliny ve Strabo uzanımları boyunca yer alan Rodos adası ve çevresi yoğun deprem aktivitesi ve Dalaman çukurluğu olarak adlandırılan yaklaşık 4000 m derinlikte tektonik yapıya sahip olması nedeniyle tsunami açısından riskli bölgelerden biri olarak kabul edilmektedir. Tarihsel kataloglar ve yapılan çeşitli araştırmalar 1481 yılında meydana gelen (M~7.0-7.5) ve tsunami dalgalarına neden olan bir çok sayıda depremin varlığını ortaya koymaktadır (Ambraseys, 1962; Ambraseys ve Melville, 1995; Soloviev vd., 2000; Altınok ve Ersoy, 2000; Guidoboni ve Comastri, 2005a,b; Fokaefs ve Papadopoulos, 2006; Papadopoulos vd., 2007, Yolsal vd., 2007a).

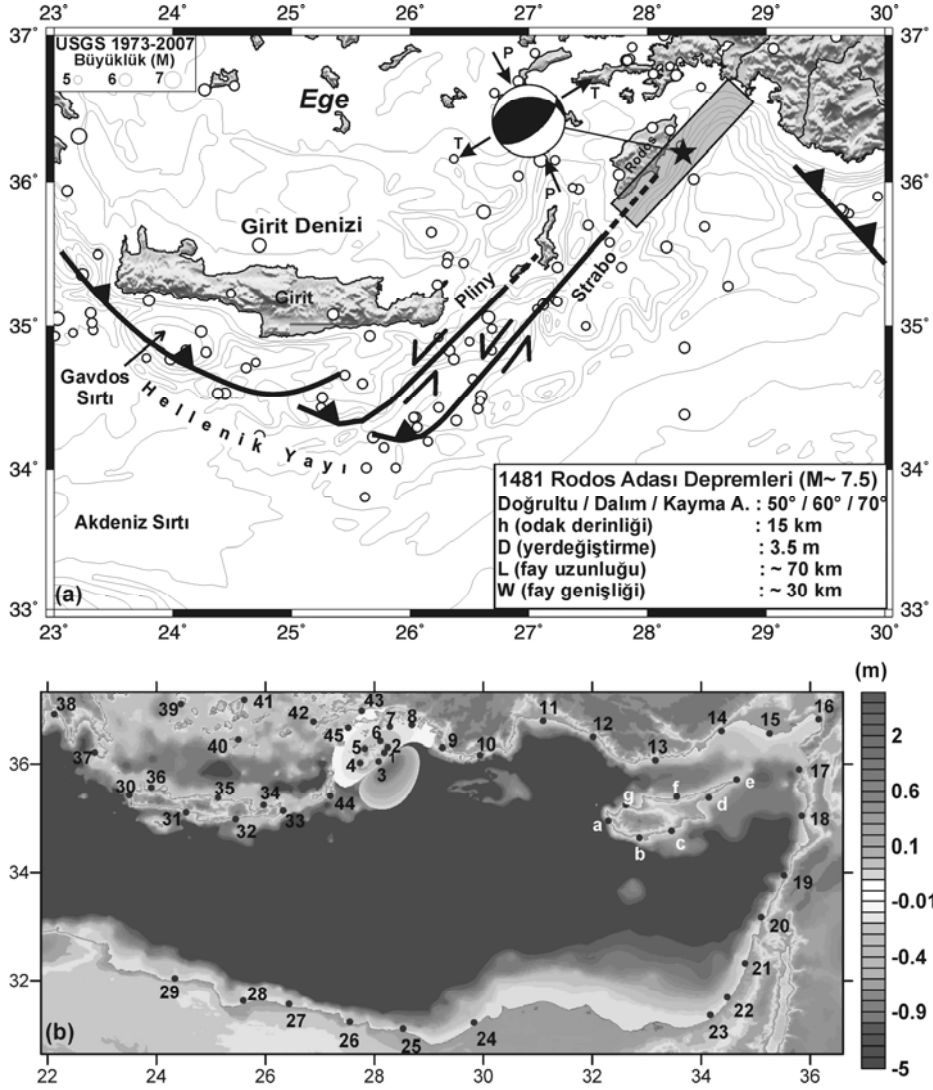
Bu çalışma ile yapılan tsunami dalga simülasyonu çalışmalarında Rodos-Dalaman çukurunda 1481 yılında meydana gelen depremler çalışılmıştır (Tablo 1). Bölgenin aktif tektonik yapısına ve güncel kaynak mekanizması çözümlerine (Taymaz vd., 1990, 1991, 2004a,b; 2005, 2007a,b, 2008a; Yolsal vd., 2004, 2007a,b,c,d,

2008a,b) bakıldığında, Rodos adasının doğusunda meydana gelen büyük depremlerin genel olarak doğrultu atım bileşenine sahip ters faylanma mekanizması ile meydana geldiği görülmektedir. Bu deprem serisinin Rodos adası kıyılarında yükseklikleri 3 m'ye kadar ulaşan tsunami dalgalarına maruz kaldığı, su baskınından hemen sonra denizin geri çekilerek normal su seviyesine döndüğü belirtilmektedir (Ambraseys, 1962; Ben Menahem, 1979; Papazachos vd., 1986; Soloviev vd., 2000). 1481 Rodos adası depremleri (M~7.0-7.5) için sismolojik açıdan kabul gören ampirik bağıntılar (Wells ve Coppersmith, 1994; Mai ve Beroza, 2000; Tan, 2004, 2005; Tan ve Taymaz, 2006) kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve fay uzunluğu ve genişliği yaklaşık olarak sırasıyla 70 km ve 30 km, düşey yerdeğiştirme miktarı ise ~3.5 m olarak hesaplanmıştır. Depreme ait fay düzleminin doğrultu, dalım ve kayma açıları ise sırasıyla, 50°, 60°, 70°, odak derinliği ise 15 km olarak varsayılmıştır (Şekil 4). Bu parametreler kullanılarak hesaplanan başlangıç dalgası genliği 1.250 m'dir.

Tsunami simülasyonunda, 2000 m çözünürlüklü GEBCO-BODC/1997 sayısal batimetri verisi kullanılmıştır. Deprem nedeniyle kırılma anında oluşan ilk su dalgası yüksekliği 1.250 m olarak hesaplanmıştır. Depremin ~10 dk içerisinde Rodos adası ve yakın çevresini, bütün güney batı Türkiye kıyılarını, 30 dk sonra Girit adası kıyılarını etkilediği, Afrika ve Kıbrıs kıyılarına ise ~50 dk sonra ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 5).

Tablo 1. Tarihsel 1481 Rodos-Dalaman depremlerinin rapor edilen oluş zamanı ve makrosismik şiddet bilgileri (Guidoboni ve Comastri, 2005a; Papadopoulos ve Fokaefs, 2005; Papadopoulos vd., 2007; Yolsal vd., 2007a)

Tarih	Oluş zamanı (UT)		Enlem (°K)	Boylam (°D)	Şiddet (I ₀)
03 Mayıs 1481	06:30 (M _s :6.5)	Rodos	36° 26'	28° 13'	V-VII
		Antalya	36° 53'	30° 42'	-
03 Ekim 1481		Rodos	36° 26'	28° 13'	V-VI
17 Aralık 1481	22:00	Rodos	36° 26'	28° 13'	V-VI
18 Aralık 1481	03:00	Rodos	36° 26'	28° 13'	V-VI
18 Aralık 1481	05:15	Rodos	36° 26'	28° 13'	VIII-IX
19 Aralık 1481	05:15	Rodos	36° 26'	28° 13'	IV-V

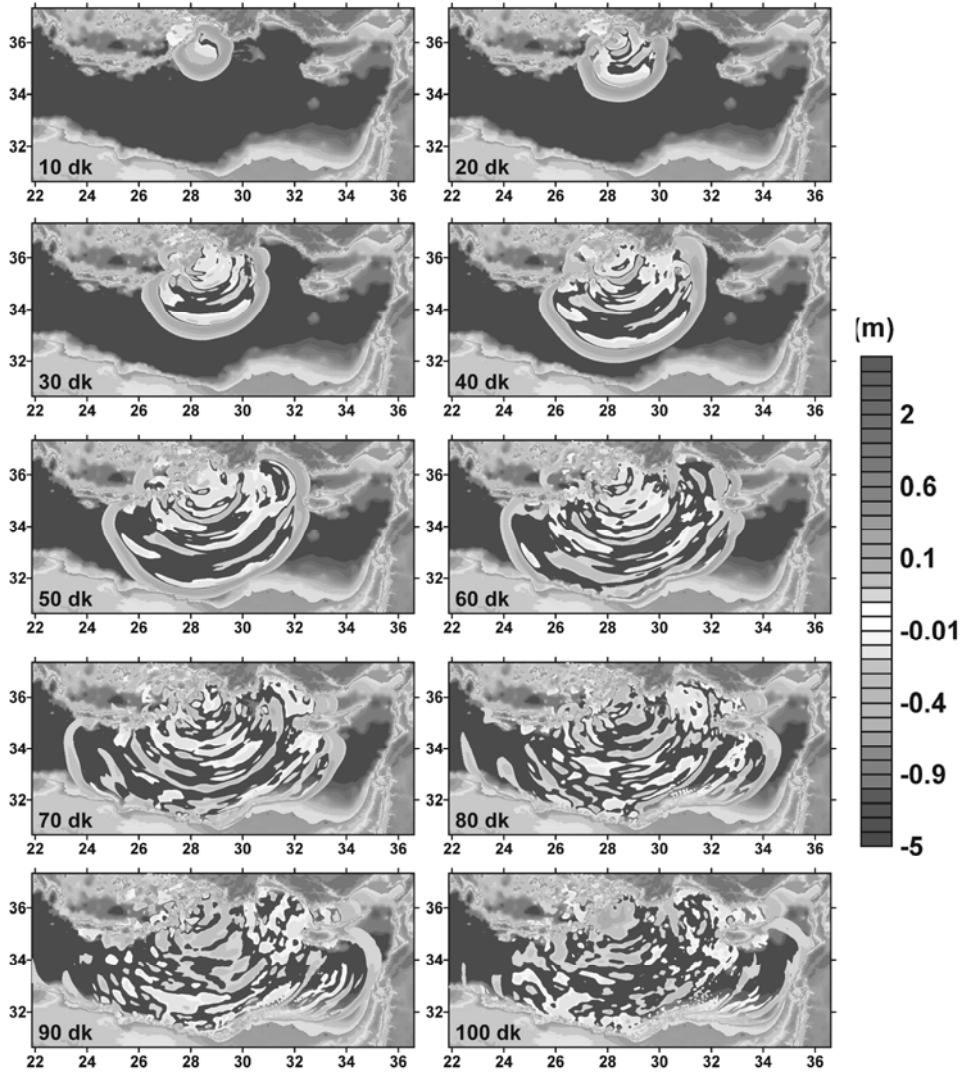


Şekil 4. (a) Rodos Adası ve çevresinin deprem aktivitesi (dikdörtgen kutu içerisindeki yıldız, 1481 Rodos depremlerinin ($M \sim 7.5$) yaklaşık konumunu göstermektedir, sağ alt köşede ise tsunami dalga simülasyonunda kullanılan fay düzlemi parametreleri verilmiştir) (b) Başlangıç dalgası ve yapay su seviyesi ölçüm noktaları

Tarihsel 1481 Rodos adası–Dalaman çukuru depremiyle meydana gelen tsunami (depreşim) dalgalarının kaynaktan çıkarak deniz içerisinde çok fazla çalkantıya sebep olmadan ilerledikleri, ancak zaman içerisinde Kıbrıs adasının kuzey doğusunda, Girit'in kuzeyinde ve Nil Deltası (Mısır) ve Libya kıyılarında oldukça karmaşık hale geldikleri görülmektedir (Şekil 5).

Depremin neden olduğu tsunami (depreşim) dalgalarının maksimum pozitif su seviyesi yüksekliklerinin değişimleri (Şekil 6), dalgaların Doğu Akdeniz Bölgesi'nin kuzey kıyıları için Rodos adası açıklarında ~ 2.5 m yüksekliğe ulaş-

tığını göstermektedir. Güney kıyılarda ise ~ 70 – 80 cm mertebesinde daha düşük pozitif dalga yükseklikleri görülmektedir. Depremin episantrına yakın olan Rodos adası kıyılarındaki 1 no'lu ölçüm noktasında yaklaşık 3.35 m, 2'de ~ 2.85 m ve 3'de ise ~ 2.18 m dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. İskenderiye–Mısır ve Afrika kıyılarındaki tsunami (depreşim) dalga yükseklikleri ise yaklaşık 1 m'dir. Fethiye kıyılarına (11 no'lu nokta) ulaştığı hesaplanan tsunami dalgasının su seviyesi yüksekliği de yaklaşık 1.5 m olarak bulunmuştur. Bunun yanı sıra, Kıbrıs adasına ulaşan tsunami (depreşim) dalgalarının genliklerinin ise oldukça düşük olduğu gözlenmektedir



Şekil 5. Tarihsel 1481 Rodos Adası tsunami depremlerinin 0-100 dakikalık süre için hesaplanan su seviyesi yüksekliklerinin dağılımı

(Şekil 6 ve 7). Örneğin, Kıbrıs'ın batısında Paphos ilçesi kıyılarındaki a noktası için belirlenen dalga yüksekliği ~22.3 cm, doğusundaki e noktasında ise ~27.6 cm'dir (Şekil 6 ve 7). Elde edilen simülasyon sonuçlarının tarihsel kataloglar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Sonuçlar

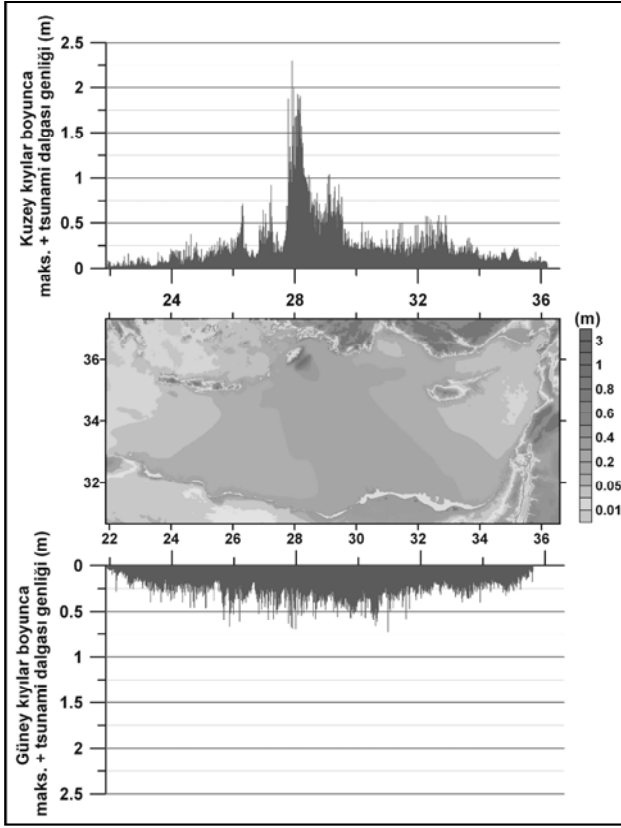
Bu çalışma sonucunda güncel Gökova Körfezi ve Rodos-Dalaman bölgesi depremleri, bölgenin aktif tektoniği ve tsunami açısından potansiyel riski hakkında elde edilen sonuçlar aşağıdaki başlıklar halinde özetlenebilir:

- Bölgenin yoğun deprem aktivitesine sahip olması ve Hellenik dalma batma zonuna yakınlığı nedeniyle hem depremlerden hem de

onlarla ilişkili tsunami dalgalarından etkilene riski oldukça yüksektir.

- Tarihsel 1481 Rodos-Dalaman depremi nedeniyle kıyılarda olduğu hesaplanan yapay tsunami dalgaları, kataloglarda belirtilen değerler ile uyumlu olarak Rodos adası kıyılarında ~3 m'yi bulan dalga genliklerini göstermektedir. Fethiye ve İskenderiye (Mısır) kıyılarında da belirgin ve etkili olabilecek dalga genlikleri (~1 m) elde edilmiştir.
- Batimetrinin tsunami simülasyonlarına olan etkisi, hesaplanan yapay dalgaların deniz içindeki yayılımından, kıyılarda ölçülen farklı su yüksekliklerinden ve dalgaların frekans içeriklerinden açıkça görülmektedir. Ancak, yerel etkilerin örneğin su basma alanlarının belirle-

nebilmesi için daha yüksek çözünürlüklü batimetri verisine ihtiyaç duyulmaktadır.



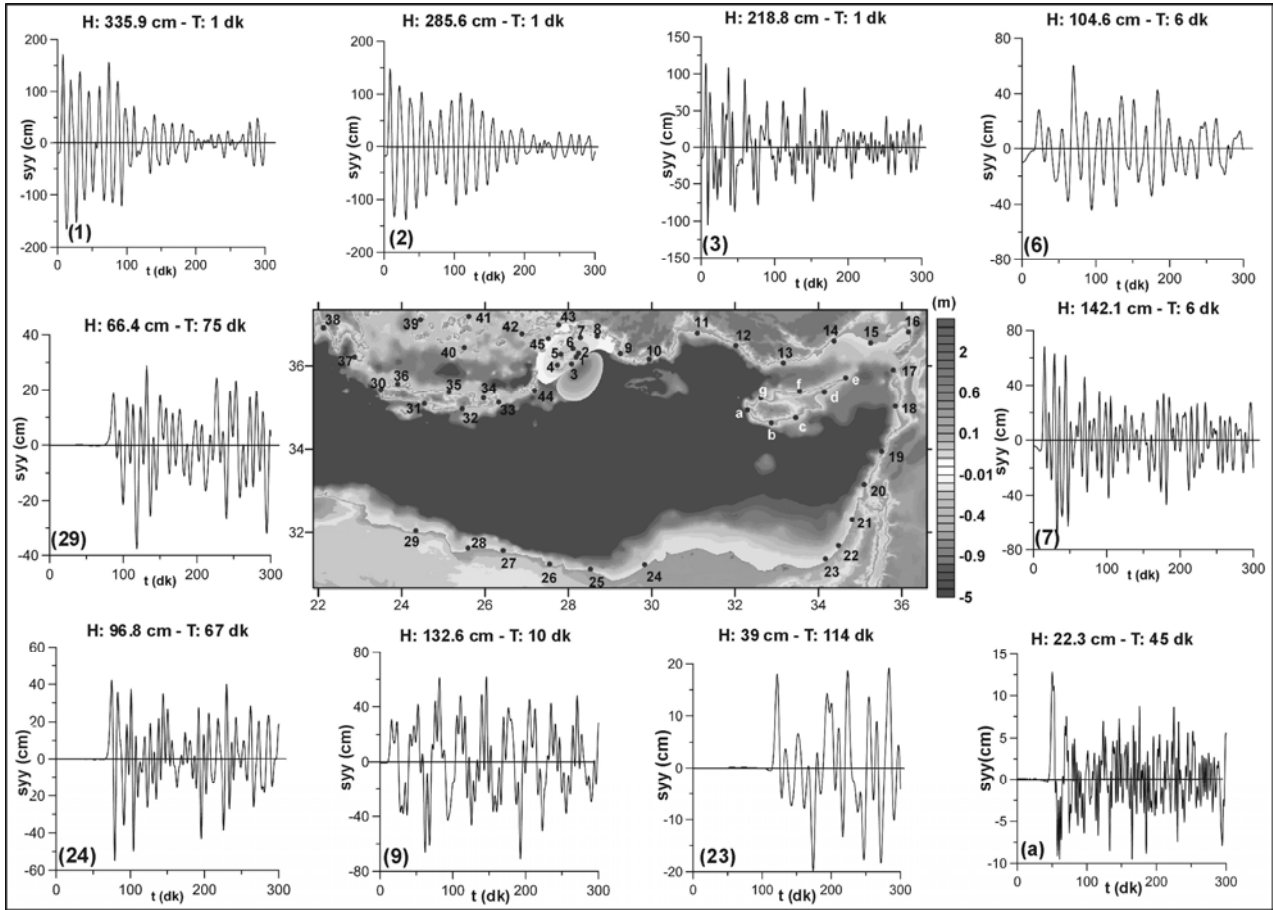
Şekil 6. Tarihsel 1481 Rodos Adası depremi nedeniyle Doğu Akdeniz Bölgesi'nin kuzey ve güney kıyılarında gözlenen maksimum pozitif tsunami dalgası genliklerinin değişimleri

- Gökova Körfezi depremleri, bölgenin aktif tektoniği ve jeolojisi ile uyumlu olarak çok küçük doğrultu atım bileşeni içeren D-B uzanımlı normal faylanma mekanizmaları ile oluşmaktadırlar. Körfezdeki güncel depremlerin en küçük hatalı kaynak mekanizması çözümleri kullanılarak elde edilen T (açılma) eksenleri, Gökova Körfezi'nde baskın olarak K-G ve KB-GD yönlü açılma rejiminin hakim olduğunu işaret etmektedir.
- Gökova Körfezi depremlerinin sığ odak derinliklerinde meydana gelmesi, bölgedeki sismojenik zonun yaklaşık 10-12 km olduğunu göstermektedir. Ancak körfezin batısındaki Kos (İstanköy) adasına doğru gidildikçe depremlerin odak derinliklerinde artış gözlenmektedir ($10 \text{ km} \leq h \leq 120 \text{ km}$).

- Güncel Gökova Körfezi depremlerinin fay düzlemi üzerinde meydana getirdikleri kayma dağılımları ve yırtılma süreçleri modelleri ise, kırılmaların çoğunun eğim doğrultusunda, oldukça basit ve dairesel şekilli olarak kısa süre içerisinde gerçekleştiğini göstermektedir.
- Depremlerin kırılma esnasında meydana getirdikleri ortalama gerilme düşümünün yaklaşık olarak 5-10 bar arasında olduğu ve maksimum yerdeğiştirme miktarlarının da yaklaşık 10-30 cm arasında değişim gösterdiği saptanmıştır.
- Genel olarak değerlendirildiği zaman, Girit ve Rodos adaları çevresinde meydana gelen ve tsunami dalgalarına neden olan bir depremin, İskenderiye-Mısır, Libya (Afrika) ve Türkiye'nin güneybatı kıyılarında etkili olarak hissedildiğini söylemek mümkündür.

Kaynaklar

- Altınok, Y. ve Ersoy Ş., (2000). tsunamis observed on and near the turkish coast, *Natural Hazards*, **21**, 185-205.
- Ambraseys, N.N., (1960). The seismic sea wave on July 9, in the Greek archipelago, *Journal of Geophysical Research*, **65**, 4, 1257-1265.
- Ambraseys, N.N., (1962). Data for the investigation of the seismic sea waves in the Eastern Mediterranean, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **52**, 895-913.
- Ben Menahem, A., (1979). Earthquake catalogue for the Middle East (92 B.C. to 1980 A.D.), *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **21**, 245-313.
- Fokaefs, A. ve Papadopoulos, G.A., (2006). Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea, *Natural Hazard*, DOI:10.1007/S11069-006-9011-3.
- Görür, N., Şengör, A.M.C., Sakıncı, M., Tüysüz, O., Akkök, R., Yiğitbaş, E., Oktay, F., Barka, A., Sarıca, N., Ecevitoglu, B., Demirbağ, E., Ersoy, Ş., Algan, O., Güneysu, C. ve Aykol, A., (1995). Rift formation in the Gökova Region, Southwest Anatolia: Implications for the opening of the Aegean Sea, *Geological Magazine*, **132**, 637-650.
- Guidoboni, E., Comastri, A. ve Triana, G., (1994). *Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th century*, Istituto Nazionale di Geofisica, Rome.



Şekil 7. 1481 Rodos Adası depremleri tsunami simülasyonu için seçilen ölçüm noktalarındaki yapay su seviyesi değerleri (mareogram) ve tsunami dalgası teorik varış zamanları

Guidoboni, E. ve Comastri, A., (2005a). *Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th century*. INGV-SGA, Bologna, 1037, Italy.

Guidoboni, E. ve Comastri, A., (2005b). Two thousand years of earthquakes and tsunamis in the Aegean area (from 5th BC to 15th Century), International Symposium on the Geodynamics of Eastern Mediterranean: Active Tectonics of the Aegean Region, 242, Kadir Has University, İstanbul.

Imamura, F., (1995). *Tsunami numerical simulation with the staggered leap-frog scheme (numerical code of TUNAMI-N1)*, School of Civil Engineering, Tohoku University.

Kurt, H., Demirbağ, E. ve Kuşçu, İ., (1999). Investigation of submarine active tectonism in the Gulf of Gökova, SW Anatolia - SE Aegean Sea, by multi-channel seismic reflection data, *Tectonophysics*, **305**, 477-496.

Kurt, H., (2000). Gökova ve Saros Körfezlerinin aktif tektonizmalarının sismik yansıma verileri ile

incelenmesi, *Doktora tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kissel, C., Laj, C., Mazaud, A., Poisson, A., Savaşçın, Y., Simeakis, K. ve Mercier, J.L., (1986). Palaeomagnetic evidence for Neogene rotational deformations in the Aegean domain, *Tectonics*, **5**, 783-795.

Mai, P.M. ve Beroza, G.C., (2000). Source scaling properties from finite-fault-rupture models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 604-615.

McKenzie, D.P., (1972). Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophysical Journal. Royal Astronomical Society*, **30**, 109-185.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, E., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, E., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanlı, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N. ve Veis, G., (2000). Global posi-

- tioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**, B3, 5695-5719.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D. ve Tealeb, A., (2003). GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions, *Geophysical Journal International*, **155**, 1, 126-138.
- Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T. ve Yalçiner, A.C., (2000). Discovery of Minoan tsunami deposits, *Geology*, **28**, 59-62.
- Okada, Y., (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**, 1135-1154.
- Papadopoulos, G.A. ve Chalkis, B.J., (1984). Tsunamis observed in Greece and surrounding area from antiquity to the present times, *Marine Geology*, **56**, 309-317.
- Papadopoulos, G.A. ve Fokaefs, A., (2005). Strong tsunamis in the Eastern Mediterranean Sea: A Re-Evaluation, *ISSET Journal of Earthquake Technology*, **42**, 4, 159-170.
- Papadopoulos, G.A., Daskalaki, E., Fokaefs, A. ve Giraleas, N., (2007). Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in the east Hellenic Arc and Trench system, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **7**, 57-64.
- Papazachos, B.C., Koutitas, Ch., Hatzidimitriou, P.M. ve Papaioannou, Ch.A., (1986). Tsunami hazard in Greece and the surrounding area, *Annali di Geofisica*, **4B**, 79-90.
- Soloviev, S.L., Solovieva, O.N., Go, C.N, Kim, K.S. ve Shchetnikov, N.A., (2000). Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.–2000 A.D, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, **13**, Kluwer, Dordrecht.
- Tan, O., (2004). Kafkasya, Doğu Anadolu ve Kuzeybatı İnan Depremlerinin Kaynak Mekanizması Özellikleri ve Yırtılma Süreçleri, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tan, O., (2005). Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışma bölgesindeki depremlerin benzerlik ilişkileri, *İTÜ Dergisi*, **4**, 6, 105-115.
- Tan, O. ve Taymaz, T., (2006). Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms. In Post-collisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia, *Geological Society of America, Special Paper*, **409**, 531-578, DOI: 10.1130/2006.2409 (25).
- Taymaz, T., 1990. Earthquake source parameters in the Eastern Mediterranean Region, *PhD Thesis*, Darwin College, University of Cambridge, U.K.
- Taymaz, T., Jackson, J. ve Westaway, R., (1990). Earthquake mechanisms in the Hellenic Trench near Crete, *Geophysical Journal International*, **102**, 695-731.
- Taymaz, T., Jackson, J.A. ve McKenzie, D., (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea, *Geophysical Journal International*, **106**, 433-490.
- Taymaz, T., Westaway, R. ve Reilinger, R., (2004a). Active faulting and crustal deformation in the Eastern Mediterranean Region, *Tectonophysics*, **391**, 1-4, 1-9.
- Taymaz, T., Tan, O. ve Yolsal, S., (2004b). Seismotectonics of Western Turkey: A synthesis of source parameters and rupture histories of recent earthquakes, *Convergent Plate Tectonics of the Mediterranean Region, EOS Transactions AGU*, **85**, 47, *Fall Meeting Supplement, Abstract T53B-0481*: 408, Moscone Convention Center, San Francisco, USA.
- Taymaz, T., Yılmaz, Y. ve Dilek, Y., (2007a). *The Geodynamics of the Aegean and Anatolia*, (eds.) Geological Society, London, Special Publications, ISBN: 978-1-86239-239-7, **291**, 320.
- Taymaz, T., Yılmaz, Y. ve Dilek, Y., (2007b). *The Geodynamics of the Aegean and Anatolia: Introduction*, Geological Society, London, Special Publications, **291**, 1-16.
- Taymaz, T., Tan, O. ve Yolsal, S., (2008a). *Recent devastating earthquakes in Turkey and active tectonics of the Aegean and Marmara Seas* in Huseybe, E.S, eds, *Earthquake monitoring and seismic hazard mitigation in Balkan countries*, NATO Science Series, **81**, 47-55, ISBN 978-1-4020-6814-0, Springer Science and Business Media.
- Taymaz, T., Yolsal, S. ve Yalçiner, A.C., (2008b). Seismotectonics of the Cyprus Arc and Dead Sea transform fault and simulations of the historical earthquakes and tsunamis, *Geophysical Research Abstracts*, **10**, EGU2008-A-00063, General Assembly 2008, Vienna-Austria.
- Uluğ, A., Duman, M., Ersoy, Ş., Özel, E. ve Avcı, M., (2005). Late Quaternary sea-level change, sedimentation and neotectonics of the Gulf of Gökova: Southeastern Aegean Sea, *Marine Geology*, **221**, 381-395.
- Wells D.L. ve Coppersmith, K.J., (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface

- displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 974-1002.
- Yagi, Y. ve Kikuchi, M., (2000). Source rupture process of the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data, *Geophysical Research Letters*, **27**, 1969-1972.
- Yalçın, A.C., Kuran, U., Akçarlı, A. ve Imamura, F., (1995). *An investigation on the generation and propagation of tsunamis in the Aegean Sea by mathematical modeling* in Tsuchiya, Y. ve Shuto, N., eds, *Tsunami: Progress in prediction, disaster prevention and warning*, Advances in Natural and Technological Hazards, Kluwer Academic Publishers, 55-70.
- Yalçın, A.C., Altınok, Y. ve Synolakis, C.E., (2000). *Tsunami waves in Izmit Bay after the Kocaeli Earthquake* in: *Book on Kocaeli Earthquake*, Chapter 13, published by EERI, (Earthquake Engineering Research Institute, USA), Special issue of Earthquake Spectra.
- Yalçın, A.C. ve Pelinovsky, E., (2007). A short cut numerical method for determination of periods of free oscillations for basins with irregular geometry and bathymetry, *Ocean Engineering*, DOI:10.1016/j.oceaneng.2006.05.016
- Yolsal, S. ve Taymaz, T., (2004). Seismotectonics of the Cyprus Arc and Dead-Sea Fault Zone: Eastern Mediterranean, *EOS Transactions AGU*, **85**, 47, Fall Meeting Suppl., Abstract T52B-06, p.389, Moscone Convention Center, San Francisco, USA, December 13-17, 2004.
- Yolsal, S., Taymaz, T. ve Yalçın, A.C., (2007a). *Understanding tsunamis, potential source regions and tsunami prone mechanisms in the Eastern Mediterranean* in Taymaz, T., Yılmaz, Y. ve Dilek, Y. eds, *The geodynamics of the Aegean and Anatolia*, Special Publication, Geological Society of London, **291**, 201-230.
- Yolsal, S., Taymaz, T. ve Yalçın, A.C., (2007b). Source characteristics of earthquakes along the Hellenic and Cyprus Arcs and simulation of historical tsunamis, *Geophysical Research Abstracts*, **9**, EGU2007-A-02306, EGU General Assembly 2007, Vienna-Austria.
- Yolsal, S., Taymaz, T. ve Yalçın, A.C., (2007c). Hellenic ve Kıbrıs yayı depremlerinin kaynak parametreleri ve tarihsel depremlerle ilişkili tsunami simülasyonları, *Bildiriler Kitabı*, 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 509-516, İzmir.
- Yolsal, S. ve Taymaz, T., (2007d). Source mechanism and rupture histories of the recent Gulf of Gökova and Sığacık Bay earthquakes, *Geophysical Research Abstracts*, **9**, EGU2007-A-01776, EGU General Assembly 2007, Vienna-Austria.
- Yolsal, S., Taymaz, T. ve Yalçın, A.C., (2008a). Earthquake source rupture characteristics along the hellenic arc and simulation of the AD 365 Crete earthquake and its tsunami, *Geophysical Research Abstracts*, **10**, EGU-2008-A-00065, EGU General Assembly 2008, Vienna-Austria.
- Yolsal, S., Taymaz, T. ve Yalçın, A.C., (2008b). Source mechanisms of the recent rhodes-Dodecanese Islands Earthquakes and historical tsunami simulations in the eastern Mediterranean, *Geophysical Research Abstracts*, **10**, EGU-2008-A-00072, EGU General Assembly 2008, Vienna-Austria.
- Zwick, P., McCaffrey, R. ve Abers, G., (1994). MT5 Program, *IASPEI Software Library*, **4**, USA.