



Doğu Akdeniz Bölgesindeki Tsunami Tehlikesinin Belirlenmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 116Y462

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Baran AYDIN

Danışman:
Doç. Dr. Utku KANOĞLU

Bursiyerler:
Özge BAYAZITOĞLU
Naeimeh SHARGHİVAND

HAZİRAN 2018
ADANA



ÖNSÖZ

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3001 - Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenen bu proje çalışması ile Doğu Akdeniz bölgesinin tsunami potansiyelinin belirlenebilmesi ve bölge için hazırlanacak tsunami risk ve taşkın haritaları için bir altyapı oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda bölge içerisinde seçilen önemli kıyı noktaları için çeşitli deprem senaryoları oluşturulmuş, bu depremler sonucunda meydana gelecek olası bir tsunaminin kıyılarımıza etkisi sayısal bir model aracılığıyla belirlenmiştir.

Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, Akdeniz'de büyüklüğü 8,0 veya üzerinde bir deprem gerçekleşmesi halinde bölgedeki birçok kıyı şeridi önemli bir tsunami tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır. Geçmişte bölgede benzer büyüklükte depremlerin ve etkisi neredeyse tüm Akdeniz baseninde hissedilen tsunamilerin gerçekleştiği unutulmamalıdır. Bu nedenle, öncelikle bölge için bir tsunami tehlikesinin varlığı kabul edilmelidir. Gerek yurt çapında doğal afetler konusunda çalışmalar yapan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) gibi kurumlar, gerekse bölgedeki yerel yönetimler, başta üniversiteler olmak üzere bu konunun diğer paydaşlarıyla eşgüdümlü bir şekilde afet öncesi ve sonrası eylem planları hazırlamalı ve bunları ciddiyetle uygulamalıdır. Bu çalışmaların yapılması, olası bir tsunami afetinin en az hasarla atlatılabilmesi için kritik önemdedir.

Bir yüksek lisans ve bir doktora bursiyerinin maddi olarak desteklediği ve bir yüksek lisans tez çalışmasına büyük katkıları olan bu projeye verdiği destekten dolayı TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığı'na (ARDEB) şükranlarımızı sunarız.

Dr. Öğr. Üyesi Baran AYDIN
Proje Yürütücüsü
Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLolar LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	1
2.1. Tsunaminin Tanımı ve Kısa Tarihi	1
2.1. Tsunami Tahmini ve Erken Uyarı Sistemleri.....	3
2.1. Doğu Akdeniz'de Tsunami.....	4
3. GEREÇ VE YÖNTEM	7
3.1. Tsunami Yayılımı İçin MOST Sayısal Modeli	7
3.2. ComMIT Ara Yüzü.....	8
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	10
KAYNAKLAR	26

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. MOST modelinde üçlü ağ sistemi için önerilen çözünürlükleri. 10

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.** Akdeniz boyunca uzanan Helen ve Kıbrıs yayları (Nicoll, 2010)..... 6
- Şekil 2.** Doğu Akdeniz ve Ege Denizi boyunca yerleştirilen birim tsunami kaynakları (Kanoğlu vd., 2014). 8
- Şekil 3.** ComMIT ara yüzünün “Model Setup” modülü. Şekilde Akkuyu ve Yeşilovacık limanları için birim tsunami kaynağı olarak “medrb14” (yeşil boyalı dikdörtgen) seçilmiş ve deprem büyüklüğü $M=7,5$ olarak belirlenmiştir. Her iki kıyı bölgesi için A- (yeşil çerçeve), B- (sarı çerçeve) ve C-ağları (kırmızı çerçeve) aynı olacak şekilde tanımlanmıştır..... 11
- Şekil 4.** Adana'nın Yumurtalık Limanı için birim tsunami kaynağı olarak “medrb18” (yeşil boyalı dikdörtgen) seçilmiş ve deprem büyüklüğü $M=7,5$ olarak belirlenmiştir. A-ağı yeşil çerçeve ile, B-ağı sarı çerçeve ile, C-ağı ise kırmızı çerçeve ile gösterilmiştir. 12
- Şekil 5.** Mersin'in Akkuyu ve Yeşilovacık limanları ile Adana'nın Yumurtalık Limanı'nda belirlenen izleme noktalarının haritada gösterimi. 13
- Şekil 6.** Akkuyu Limanı'nda belirlenen izleme noktasında ($36.14208^{\circ}K$, $33.53913^{\circ}D$) farklı deprem büyüklükleri için elde edilen dalga yüksekliği-zaman grafikleri. Kırmızı kesikli çizgi ilk dalganın maksimum yaptığı anı, siyah kesikli çizgi ise en büyük dalganın maksimum yaptığı anı göstermektedir. Akkuyu için ilk dalga en büyük dalga olduğundan bu iki çizgi çakışmaktadır. 14
- Şekil 7.** Yeşilovacık Limanı'nda belirlenen izleme noktasında ($36.19104^{\circ}K$, $33.65457^{\circ}D$) farklı deprem büyüklükleri için elde edilen dalga yüksekliği-zaman grafikleri. Kırmızı kesikli çizgi ilk dalganın maksimum yaptığı anı, siyah kesikli çizgi ise en büyük dalganın maksimum yaptığı anı göstermektedir. 15
- Şekil 8.** Yumurtalık Limanı'nda belirlenen izleme noktasında ($36.767615^{\circ}K$, $35.793288^{\circ}D$) farklı deprem büyüklükleri için elde edilen dalga yüksekliği-zaman grafikleri. Kırmızı kesikli çizgi ilk dalganın maksimum yaptığı anı, siyah kesikli çizgi ise en büyük dalganın maksimum yaptığı anı göstermektedir. 16
- Şekil 9.** Akkuyu ve Yeşilovacık için tanımlanan A-ağı içerisindeki her bir noktada hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri. Deprem büyüklüğü yukarıdan aşağıya sırasıyla $M=7,5$, $M=8,0$ ve $M=8,5$ olarak değiştirilmiştir. 17
- Şekil 10.** Yumurtalık için tanımlanan A-ağı içerisindeki her bir noktada hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri. Deprem büyüklüğü yukarıdan aşağıya sırasıyla $M=7,5$, $M=8,0$ ve $M=8,5$ olarak değiştirilmiştir. 18

ÖZET

Bu proje çalışmasının amacı Doğu Akdeniz bölgesinin tsunami potansiyelinin belirlenebilmesi amacıyla bölge içerisinde seçilen kritik noktalar için çeşitli deprem senaryoları oluşturmak ve bu depremler sonucunda meydana gelebilecek olası tsunamilerin kıyılarımıza etkisini sayısal bir model aracılığıyla belirlemektir. Yapılan bu çalışmanın, bölge için hazırlanması kaçınılmaz olan tsunami risk ve taşkın haritaları için bir zemin oluşturulması amaçlanmıştır.

Doğu Akdeniz bölgesinin tsunami tehlike analizinin yapılabilmesi amacıyla bölgede ekonomik ve sosyal açıdan ve çevre açısından kritik konumda olan Mersin'in Akkuyu ve Yeşilovacık limanları ile Adana'nın Yumurtalık Limanı çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde farklı deprem büyüklüğü senaryoları için olası bir tsunaminin yayılımının yanı sıra kıyı şeridinde meydana getireceği dalgalanma hesaplanmış ve bu sonuçlara ait grafikler elde edilmiştir. Her bir senaryo için kıyıda belirlenen önemli bir nokta için kıyı tırmanmasının zaman serisi olarak grafiği ve her bir ağ noktasında hesaplanan maksimum dalga yüksekliği grafikleri sunulmuştur.

Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, büyüklüğü 7,5'in altındaki bir deprem senaryosu için Doğu Akdeniz kıyılarında tsunami kaynaklı önemli bir dalga hareketliliğinin söz konusu olmayacağı söylenebilir. Ancak, bekleneceği üzere, deprem büyüklüğü arttıkça kıyıda gözlenen dalga yükseklikleri de artacaktır. Deprem büyüklüğünün 8,0'ın üzerinde gerçekleşmesi halinde ise bölgedeki birçok nokta önemli bir tsunami tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır. Bölgede geçmişte benzer büyüklükte depremlerin gerçekleştiği göz önüne alınırsa, böyle bir tehlikenin varlığının ciddiyle ele alınmalıdır. Gerek yurt genelinde doğal afetler konusunda çalışmalar yapan Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) gibi kurumlar, gerekse bölgedeki yerel yönetimler tarafından, konunun diğer paydaşlarıyla eşgüdümlü bir şekilde afet öncesi ve sonrası eylem planları hazırlanması olası bir tsunami afetinin en az hasarla atlatılabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Anahtar kelimeler: Doğu Akdeniz, deprem, tsunami tehlikesi, sayısal modelleme



ABSTRACT

The aim of this project is to determine the tsunami potential of the Eastern Mediterranean region by developing hypothetical earthquake scenarios for critical coastal sites in the region and calculating the run-up and inundation of the subsequent tsunami waves through a numerical model. The study is hoped to be used as a basis for future tsunami flood and risk maps for the region.

The coastal areas selected in order to carry out a tsunami hazard analysis in the Eastern Mediterranean are the Akkuyu and Yeşilovacık Ports in Mersin and the Yumurtalık Port in Adana. These regions are known for their economic, social, and environmental importance. Propagation and inundation of potential tsunami waves at these coastlines are presented through plots for different earthquake moment magnitudes. Graphs for the time series of wave amplitudes at determined points, and the maximum wave amplitude at each grid point are given for each scenario.

The results obtained from the numerical model suggest that earthquakes having moment magnitude smaller than 7.5 will generate weak oscillations at the selected coastal regions. The wave extrema increase with the earthquake magnitude, as expected. On the other hand, for earthquakes with magnitude greater than 8.0 there will be significant wave motions at the coasts. Given that such earthquakes occurred in the region in the past, the hazard induced by tectonic tsunamis should seriously be taken into account by both the central and the local government authorities, such as the Disaster and Emergency Management Authority (AFAD), who are responsible for pre- and post-disaster action planning. This issue is critical for minimizing the damage of a possible tsunami event.

Keywords: Eastern Mediterranean, earthquake, tsunami hazard, numerical modeling

1. GİRİŞ

Bu proje çalışmasında Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyılarının karşı karşıya olduğu tsunami tehlikesinin boyutlarını belirlemek amacıyla, bölge içerisinde seçilen kritik noktalar için sayısal bir model kullanılarak en büyük dalga yükseklikleri belirlenmiş, tsunami dalgalarının meydana getirdiği kıyı tırmanmaları hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların bölge için hazırlanması kaçınılmaz olan tsunami risk ve taşkın haritalarının oluşturulmasına ve bu doğrultuda afet öncesi ve sonrası çalışmaların yapılmasına zemin oluşturması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Tsunaminin Tanımı ve Kısa Tarihi

Tsunami, deniz tabanında meydana gelen deprem, toprak kayması ya da volkanik patlama gibi ani bir hareketlilik sonucu oluşan, yayılımları sırasında artan yükseklikleri ve sahip oldukları yüksek enerji nedeniyle kıyılarda büyük can ve mal kayıplarına sebep olabilen yüzey dalgalarını tanımlamak için kullanılan Japonca bir terimdir. Dolayısıyla tsunami, insanları ve doğayı doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen başlıca doğal afetlerden biridir. Japonca'da "tsu" (liman) ve "nami" (dalga) kelimelerinin birleşiminden türeyen bu kavramın ilk kullanımı 15 Haziran 1896'da Japonya'da gerçekleşen 8,5 büyüklüğündeki deprem sonrasında meydana gelen ve yaklaşık 21.000 insanın ölümüne neden olan afet sonrası yapılan yardım çağrıları sırasında olmuştur. Tsunami sözcüğünün diğer dünya dillerine girişi ise büyük oranda 26 Aralık 2004 Hint Okyanusu Tsunamisinden sonradır.

Tsunamiler çoğunlukla (%75) deprem kaynaklı olmakla beraber (*tektonik tsunami*), toprak kaymaları (%10), volkanik patlamalar (%4) ve meteorolojik olaylar (%3) tsunamilerin diğer başlıca sebepleridir. Ayrıca, gerçekleşen tsunamilerin yaklaşık %8'lik bir kısmının sebebi tespit edilememiştir (Gusiakov, 2009).

İnsanlık tarihi boyunca gerçekleşen tsunamilerin bir kısmı tarihsel dokümanlar, arkeolojik, jeolojik ve jeomorfolojik araştırmalarla belgelenmiştir. Ortaya çıkarılmış bilinen en eski tsunaminin M.Ö. 7000-6000 yılları arasında Norveç'te yaşandığı, bu olay sırasında dalga yüksekliğinin 9 metreye ulaştığı (Bondevik vd., 2003) bilinmekle beraber, kayıtlara geçmeyen çok sayıda tsunaminin gerçekleştiği de şüphe götürmez bir gerçek olarak ifade edilebilir.

Sadece son 20 yılda meydana gelen birkaç tsunami ise insanlık tarihine iz bırakacak niteliktedir. 26 Aralık 2004 tarihinde Hint Okyanusu'nda, Endonezya'nın Sumatra Adası



açıklarında meydana gelen 9,0 büyüklüğündeki depremin tetiklediği tsunami tüm okyanus baseninde yayılmış; başta Endonezya olmak üzere, aralarında Kenya, Tayland, Sri Lanka ve Hindistan'ın da bulunduğu 16 ülkede toplam 230.000'e yakın insanın hayatını kaybetmesine sebep olmuştur. Yaşanan can kaybı açısından insanlık tarihinin en büyük tsunami felaketi olarak kayda geçen bu afetten sadece yerel halk etkilenmemiş, özellikle yeni yıl tatiline denk gelmesi sebebiyle tatillerini geçirmek üzere bölgede bulunan birçok milletten insan hayatını kaybetmiştir. Sebep olduğu can kaybının yanı sıra, 2004 Hint Okyanusu Tsunamisi ulaştığı ülkelerin kıyı yerleşimlerinde de olağanüstü altyapı ve üstyapı tahribatına yol açmıştır. Yol açtığı toplam ekonomik zararın 10 milyar Amerikan dolarına yakın olduğu bildirilen bu yıkıcı afetten sonra tüm dünya ülkeleri seferber olmuştur. Bölgenin yaralarının sarılabilmesi için uluslararası düzeyde 13,5 milyar Amerikan doları acil durum yardımı ve gelişmiş ülkelere de 5,5 milyar Amerikan dolarından fazla kamu yardımı yapılmıştır (Bernard ve Robinson, 2009). 2004 Hint Okyanusu Tsunamisi, denize kıyısı olan ülkelerde tsunami tehlikesinin göz ardı edilemeyecek önemde olduğunu ve kıyı bölgeleri için tsunami erken uyarı sistemlerinin gerekliliğini çok acı bir şekilde ortaya koymuştur. Hem bu büyük felaketten çıkarılan dersler, hem de bilgisayar destekli modelleme ve benzetim (simülasyon) teknolojisindeki hızlı gelişmeler öncelikle Hint Okyanusu kıyıları olmak üzere tsunami erken uyarı sistemine sahip olmayan bölgeler için bu sistemlerin kurulmasına yönelik çalışmalara büyük ivme kazandırmıştır.

Yakın tarihin önemli bir diğer tsunamisi ise 11 Mart 2011'de Japonya'nın Honshu bölgesinde yaşanmıştır. Tohoku kenti açıklarında meydana gelen, moment büyüklüğü açısından dünya tarihinin dördüncü; Japonya tarihinin ise 1900 yılında başlayan aletsel kayıtlardan itibaren rastlanan en büyük depremi olan 9,0 büyüklüğündeki depremin tetiklediği tsunami tüm dünyada adeta canlı yayında seyredilmiştir. Depremin merkez üssünün kıyıya yaklaşık 70 km gibi çok kısa bir mesafede olması nedeniyle, bölgede bir tsunami erken uyarı sistemi kurulu olmasına ve yerel otoriteler tarafından tsunami uyarısı verilmesine rağmen, bölgedeki halkın tahliyesi için yeterli zaman bulunamamış ve hızla kıyıya vuran tsunami dalgaları yaklaşık 16.000 insanın hayatına mal olmuştur. Tamamıyla yıkılan 127.000'den fazla binanın yanı sıra yaklaşık bir milyon yapı da kısmen zarar görmüş, 340.000'den fazla insan evsiz kalırken milyonlarca haneye uzun bir süre elektrik ve su verilememiştir (Yamazaki vd., 2011). Bütün bunlara ek olarak, gerçekleşen tsunaminin bölgede kurulu olan Fukushima I Nükleer Güç Santrali'nin reaktörlerine ve soğutma sistemine zarar vermesiyle, dünya 1986 Çernobil'den sonraki en büyük nükleer felaketi yaşamıştır. Deprem ve tsunamiden bir gün sonra, 12 Mart 2011 günü santralin birinci reaktöründe, 15 Mart 2011 tarihinde ise dördüncü reaktöründe aşırı ısınma sonucunda hidrojen patlamaları meydana gelmiş, kullanılmış yakıt tanklarından sızan



radioaktif maddeler yeraltı suyuna ve oradan da deniz suyuna karışarak yayılmıştır. Yetkililer yaklaşık 20 km çapında bir bölgeyi karantinaya almış ve 150.000'den fazla insan bölgeden tahliye edilmiştir (Morino vd., 2011). Tarihi boyunca pek çok kez yıkıcı depremler ve tsunamilerle yüz yüze kalmış olması nedeniyle doğal afetler konusunda en hazırlıklı ülkelerden biri olan Japonya yaşadığı tsunami felaketi karşısında adeta şok olmuş ve çaresiz kalmıştır. Sonuç olarak, her ne kadar kıyı yapılarının tasarımlarının en kötü senaryoya göre yapıldığı düşünülmüş olsa da, 2011 Japonya Tsunamisi sonucu meydana gelen dalgalar bu yapıların tasarımına esas olan kritik değerleri aşmış ve dalgakıranlar, kıyı tahkimatları ve kıyı duvarları gibi yapılara büyük oranda hasar vermiştir. Bu nedenle 2011 yılından sonra tüm dünyada yapılan afet önleme çalışmaları kapsamında kıyı yapıları tasarım şartnameleri aşamalı tsunami büyüklükleri esas alınarak yeniden düzenlenmiştir. Örneğin Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği'nin (ASCE) 7 numaralı şartnamesinde yapı tasarımında tsunami yüklerinin de dâhil edildiği bir bölüme yer verilmiştir.

Sadece yakın tarihten verilen yukarıdaki iki örnek bile bir tsunaminin sebep olabileceği felaketin boyutlarını ortaya koymak için yeterlidir. Bir doğal afetin tamamıyla önlenmesi mümkün olmasa da, günümüzde insanoğlunun sahip olduğu bilimsel yöntemler ve teknolojik gelişmeler, tsunami gibi doğal afetlerin etkilerinin tahmin edilmesini ve dolayısıyla en aza indirilmesi mümkün kılmaktadır.

2.2. Tsunami Tahmini ve Erken Uyarı Sistemleri

Kıyılar, gerek yerleşim, gerekse ticaret açısından sahip oldukları yüksek ekonomik değerleri ile tarihte olduğu gibi günümüzde de medeniyetler açısından cazibe merkezleri olmuşlardır. Dünya üzerinde birçok önemli şehrin kıyılara yakın yerlere kurulduğu bir gerçektir. Kıyılar hem turizm açısından, hem de lojistik açıdan çok yoğun olarak kullanılmaktadır. Dünya ticaretinin yaklaşık %90'ının denizyolu vasıtasıyla yapılması bunun en önemli göstergesidir.

Diğer yandan, kıyılar kaçınılmaz bir biçimde yılın belirli dönemlerinde çeşitli doğa olaylarına maruz kalmaktadırlar. Meteorolojik olarak sahip oldukları özellikler nedeniyle kıyılarda fırtına kabarması, kasırga/hortum gibi doğal olaylar sıkça meydana gelmektedir. Bu tür olayların etkileri, ilgili bölgenin dalga ikliminin belirlenmesi ve bu doğrultuda tedbirler alınmasıyla en aza indirilebilir. Kıyılarının savunmasız olduğu olaylar ise doğal afetlerdir. Deniz tabanında meydana gelecek bir depremin veya bu depremin tetikleyeceği bir tsunaminin kıyılardaki etkisi son derece yıkıcı olabilmektedir. Yukarıda örnek verilen 2004 Hint Okyanusu ve 2011 Japonya tsunamileri bunun en iyi kanıtlarıdır.



Bu tip doğa olayları ve doğal afetler yaşandıkça bilim insanları bunları anlamaya ve önceden tahmin etmeye yönelik yöntemler geliştirmişlerdir. Bu bağlamda tsunami erken uyarı sistemleri, deniz tabanında meydana gelen bir deprem sonrasında deniz yüzeyindeki dalga hareketinin önceden tahmin edilerek yetkili mercilere uyarı verilmesi suretiyle gerekli tedbirlerin alınmasını ve olası tsunaminin yol açacağı zararların en aza indirilmesini amaçlayan sistemlerdir (Whitmore, 2009). Ancak tsunamilerin seyrek görülmeleri nedeniyle okyanuslara kıyısı olan ülkeler dahi yerel tsunami erken uyarı sistemleri geliştirme konusunu öncelikleri arasına almamışlardır (Melgar vd., 2013). Tarihsel olarak Pasifik Okyanusu kıyıları tsunamiye daha fazla maruz kaldığından, tsunami erken uyarı sistemini geliştiren ilk ülkeler bu okyanusa kıyısı olan Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) olmuştur. Fakat 2004 Hint Okyanusu Tsunamisiyle birlikte, erken uyarı sistemine sahip olmayan bölgelerde gerçekleşen bir tsunaminin ne ölçüde büyük can ve mal kayıplarına sebep olabildiği anlaşılmıştır. Bu doğrultuda olası bir tsunamiden doğrudan veya dolaylı olarak etkilenmesi muhtemel ülkeler tsunamiye karşı önlemler almaya başlamışlar, UNESCO çatısı altında toplanan hükümetler bu konudaki çalışmalara hız vermişlerdir (Synolakis ve Bernard, 2006; <http://www.ioc-tsunami.org/>). Ülkemizde yapılan çalışmalar ise Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Merkezi tarafından koordine edilmiştir. Türkiye kıyılarını içine alan Kuzeydoğu Atlantik, Akdeniz ve Bağlantılı Denizler Tsunami Uyarı Merkezi'ne (North-eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning Center, NEAMTWS) bağlı Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Değerlendirme Merkezi, 17 Ağustos 1999 depreminin on beşinci yıldönümünde, 17 Ağustos 2014 tarihinde açılmıştır.

Bir önceki bölümde sözü edilen her iki tsunami de yakın tarihte gerçekleşmiş ve etkileri beklenenin çok üzerinde olan birer doğal afet olmaları sebebiyle ele alınmışlardır. Dünyanın çeşitli kıyı bölgelerinde önemli sonuçlar doğuran birçok tsunami gerçekleşmiştir. Bu tsunamiler hakkında detaylı bilgiye *tsunami kataloğu* adı verilen çalışmalar aracılığıyla ulaşılabilmektedir. Tsunami katalogları, kısaca, belirli bir zaman diliminde belirli bir ülkenin ya da bölgenin kıyılarında meydana gelen tsunamileri sebepleri (tsunamiye neden olan kaynak mekanizma, örneğin deprem ya da deniz tabanında meydana gelen toprak kayması gibi) ve sonuçları ile (yaşanan can kaybı, etkilenen kıyı bölgeleri, gerçekleşen maddi hasar, zarar gören önemli yapılar gibi) derleyerek arşivleyen, aynı zamanda kapsamlı bir veri tabanı olarak hem deterministik hem de olasılıksal tsunami risk analizlerinin de en önemli bileşeni olan çalışmalardır.

2.3. Doğu Akdeniz'de Tsunami

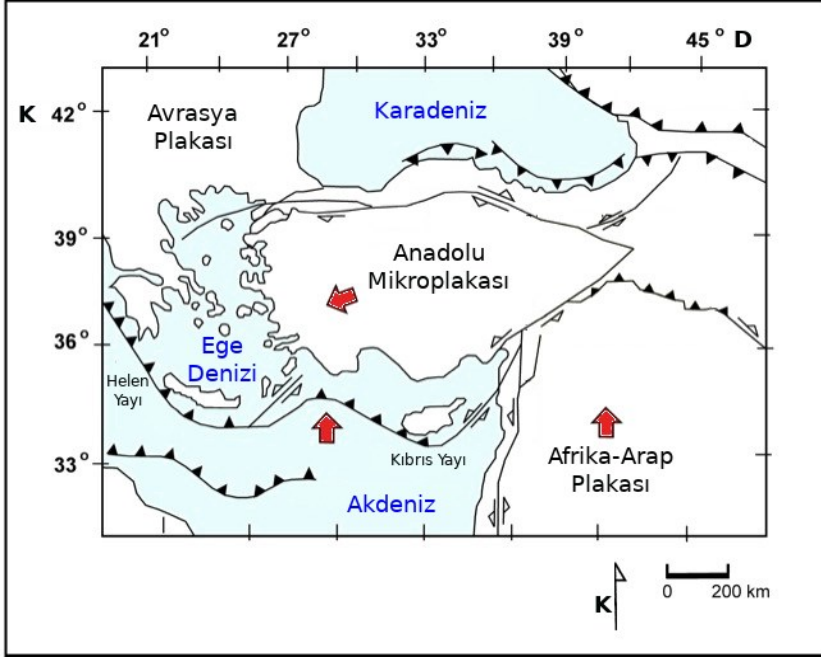
Yukarıda da belirtildiği gibi, tsunamilerin başlıca sebebi depremlerdir. Deprem kaynaklı tsunamiler *tektonik tsunami* olarak da adlandırılmaktadır. Bu nedenle belirli bir bölgede tsunami tahmini yapabilmek için bölgenin sismolojik olarak iyi incelenmesi gerekir.

Akdeniz bölgesini inceleyen çalışmalara bakıldığında, bölgenin deprem açısından aktif bir bölge olduğu ve geçmişte bu bölgede birçok tektonik tsunaminin gerçekleştiği görülmektedir (Papadopoulos ve Fokaefs, 2005). Akdeniz boyunca doğudan batıya doğru uzanan iki fay hattı mevcuttur. Afrika levhasının Avrasya levhası altına kuzeye doğru dalma-batmasıyla oluşmuş, sismik olarak oldukça aktif olan Helen ve Kıbrıs yayları (Şekil 1), geçmişten günümüze oldukça geniş bir büyüklük aralığında depremler ve bu depremlerin tetiklediği tsunamiler üretmişlerdir. Helenik Yay, Ege Denizi'nde Girit Adası'nın güneyi ile Afrika Yarımadası'nda Libya'nın kuzeyi arasındaki bölgeden geçmektedir. Kıbrıs Yayı ise Kıbrıs Adası'nın güneyi ile Nubia (Nil Deltası'nın kuzeyi) ve Levant (Akdeniz'in doğu sınırını oluşturan kıyı bölgesi) arasında kalan bölgeden geçmektedir (Valle vd., 2014). Tarih boyunca bu iki yay üzerinde birçok deprem meydana gelmiştir.

Bölgede geçmişten günümüze meydana gelmiş tsunamileri katalog olarak derleyen birçok araştırmacı mevcuttur (Ambraseys, 1962; Altınok ve Ersoy, 2000; Guidoboni ve Comastri 2005a,b; Papadopoulos ve Fokaefs, 2005; Fokaefs ve Papadopoulos, 2007; Ambraseys ve Synolakis, 2010; Altınok vd., 2011). Aynı zamanda ABD'de NOAA'ya (National Oceanic and Atmospheric Administration) bağlı NGDC (National Geophysical Data Center) tarafından geliştirilen veri tabanı aracılığıyla M.Ö. 2100 yılından günümüze değin Büyük Okyanus, Pasifik ve Hint Okyanusları, Akdeniz ve Karayip Denizi'nde meydana gelen tsunamilere aynı harita üzerinde web ortamında erişim sağlanabilmektedir. NOAA/NGDC Küresel Tsunami Veri Tabanına göre, M.Ö. 2000 ile M.S. 2018 yılları arasında Doğu Akdeniz'de, koordinatları 33.00°K - 37.70°K ve 19.02°D - 34.79°D olarak belirlenen bölge için, büyüklüğü 4,5 ile 8,5 arasında değişen 46 adet depremin ardından tsunami gözlenmiştir.

Altınok vd. (2011) tarafından derlenen güncel tsunami kataloğuna göre; 17.yy'dan 1999 yılına kadarki 3500 yıllık bir zaman diliminde Türkiye kıyılarını etkileyen 134 adet tsunami meydana gelmiştir. Büyük çoğunluğu sismik kaynaklı olan bu tsunamilerin 41 tanesi Doğu Akdeniz'de gözlemlenmiştir.

21 Temmuz 365 tarihinde Yunanistan'ın Girit Adası'nın güneyinde, büyüklüğü çeşitli kaynaklarda 8,0-8,5 arasında verilen deprem ve buna bağlı gelişen tsunami Doğu Akdeniz'de meydana gelmiş en büyük ve en yıkıcı tsunami olarak kayıtlara geçmiştir. Tüm Doğu Akdeniz baseninde yayılarak etkisi Akdeniz'in karşı yakasındaki Mısır'ın İskenderiye kıyılarına ulaşan bu doğal afet sonucu yaklaşık 5.000 kişi hayatını kaybetmiştir.



Şekil 1. Akdeniz boyunca uzanan Hellen ve Kıbrıs yayları (Nicoll, 2010).

Yine Girit Adası açıklarında 8 Ağustos 1303 tarihinde meydana gelen 8,0 büyüklüğündeki deprem ve ardından oluşan tsunami Rodos ve Girit adalarının doğu kesimlerinde büyük tahribata yol açmış; dalgalar Mısır kıyıları dâhil tüm Akdeniz baseninde etkisini göstermiştir. Doğu Akdeniz’de yarattığı can kaybı ve tahribat bakımından tarihsel kayıtlara geçen diğer önemli tsunamiler 11 Mayıs 1222 Kıbrıs, 3 Mayıs 1481 Rodos, 1 Temmuz 1494 Girit, 21-22 Ağustos 1856 Cezayir, 9 Şubat 1948 Karpat ve 9 Temmuz 1956 Amorgos deprem ve tsunamileridir (Valle vd., 2014).

Bölgede gerçekleşen son tsunami ise 20 Temmuz 2017 günü Bodrum açıklarında gerçekleşen 6,6 büyüklüğündeki depremin ardından yaşanmış, meydana gelen tsunami Bodrum Yarımadası ve Yunanistan’ın Kos Adası’nda etkili olmuştur. Bölgedeki kamera kayıtları incelendiğinde, Bodrum’un Gümbet Koyunda depremden 5 dakika sonra denizin çekildiği, bundan 13 dakika sonra ise dalgaların kıyıya ulaşarak 60 m içeriye ilerlediği görülmektedir. Kos Adası’nda tsunamiden etkilenen bölge ise Eski Liman bölgesi olmuştur. Gözlenen en büyük dalga yükseklikleri Gümbet’te 1,9 m, Kos Adası’nda ise 1,5 m olarak gerçekleşmiştir (Yalçiner vd., 2017).

Yukarıda sözü edilen tarihsel bilgiler ve bölgenin sismolojik verisi göz önüne alındığında, Doğu Akdeniz bölgesinde, yaygın kanının aksine, ciddi bir tsunami potansiyeli olduğu görülmektedir. Türkiye’nin Akdeniz kıyı şeridi gerek sanayi ve ticaret gerekse turizm açısından ülkemiz için oldukça önemli bir konumdadır. Hatay’da İskenderun Demir-Çelik Fabrikası (İSDEMİR) ve limanı, Adana’nın Yumurtalık ilçesinde İSKEN Sugözü Termik

Santrali ile BOTAŞ ve Toros Gübre'ye ait limanlar yer almaktadır. Mersin Akkuyu'da Türkiye'nin ilk nükleer enerji santralinin yapımı devam etmektedir. Ayrıca, Mersin, Adana ve Hatay kıyı şeridi boyunca uzanan irili ufaklı çok sayıda plaj, sahil sitesi ve turistik tesis bölgede kıyıların yoğun kullanıldığının göstergesidir. Bölge aynı zamanda sahip olduğu lagünler, koylar ve milli parklar ile nadide bir biyolojik çeşitliliğe sahiptir. Dolayısıyla Doğu Akdeniz özelinde detaylı bir çalışma ile bölgenin tsunami potansiyelinin belirlenmesi büyük bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Bu proje çalışmasının amacı bu eksikliği kısmen de olsa gidermektir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Tsunami Yayılımı İçin MOST Sayısal Modeli

Tsunami erken uyarı sistemlerinin kısa dönemli tahmin yapabilmeleri, önceden hesaplanıp kaydedilmiş tsunami yayılımları kullanmaları ile mümkün olmuştur. Bu sayede gerçek zamanlı yayılım sonuçları daha kısa sürede elde edilmekte ve herhangi bir acil durum esnasında daha kısa sürede tedbir alınmasına olanak sağlanmaktadır. Bu doğrultuda oluşturulan ilk tsunami yayılım veri tabanı ABD'de NOAA'ya bağlı NCTR (NOAA Center for Tsunami Research) tarafından oluşturulmuştur (Gica vd., 2008). Bir tsunami yayılım veri tabanının oluşturulma adımları şöyledir:

- NCTR tarafından okyanus baseni boyunca bilinen fay hatları boyunca 100x50 km² büyüklüğündeki bir dikdörtgen fay bloğunun düzeyde 1 m yer değiştirmesine karşılık gelen ve *birim tsunami kaynağı* adı verilen kaynaklar tanımlanmıştır (Şekil 2). Ege Denizi ve Akdeniz için birim tsunami kaynakları TÜBİTAK destekli bir Türkiye-Yunanistan Uluslararası İkili İşbirliği projesi kapsamında 100x50 km² ve 50x25 km² boyutlarında oluşturularak NCTR veri tabanına eklenmiştir (Kanoğlu vd., 2014).
- Tanımlanan her bir birim tsunami kaynağı için, Method of Splitting Tsunamis (MOST) sayısal modeli kullanılarak yayılımlar hesaplanmış ve bu yayılımlar bir veri tabanına kaydedilmiştir (MOST Manual, 2006). MOST, doğrusal olmayan sığ-su dalga denklemlerini küresel koordinatlarda sonlu farklar yöntemiyle çözen ve 2003 yılından bu yana yaşanan her tsunami için yapılan testlerde oldukça başarılı sonuçlar veren, güvenilirliğini kanıtlamış bir modeldir (Tang vd., 2012). Tsunami yayılımının okyanus baseninde doğrusal olduğu kabulünden hareketle, veri tabanındaki yayılımlar uygun katsayılarla çarpılarak ve gerektiğinde birkaç birim tsunami kaynağının yayılımlarının doğrusal birleşimi alınarak gerçek ya da senaryo bir tsunaminin yayılımı ve kıyı tırmanması MOST ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 2. Doğu Akdeniz ve Ege Denizi boyunca yerleştirilen birim tsunami kaynakları (Kanoğlu vd., 2014).

3.2. ComMIT Ara Yüzü

1965 yılında UNESCO Hükümetlerarası Oşinografi Komisyonu (UNESCO/IOC) tarafından kurulan ilk Hükümetlerarası Koordinasyon Grubu (ICG) Pasifik Okyanusu için bir tsunami uyarı sistemi geliştirmiş; 2004 Hint Okyanusu Tsunamisinin ardından ivme kazanan çalışmalar sonucunda Hint Okyanusu Tsunami Erken Uyarı Sistemi (IOCTWS) kurulmuştur. ICG/IOCTWS tarafından 2005 yılında ikinci kez toplanan koordinasyon grubunda tsunami uyarı ve tehlike analizi çalışmalarını daha ileri düzeye çıkarma amacıyla NCTR tarafından geliştirilen MOST modeli için ComMIT (Community Modeling Interface for Tsunamis) ara yüzü geliştirilmiştir (Titov, 2011). Bir tsunaminin üç ana aşaması (fazı) oluşum (deformasyon), yayılım ve kıyı tırmanması fazlarıdır. Bunlardan oluşum ve yayılım fazları, gerektiğinde tsunami erken uyarı sisteminin hızlı tahminler yapabilmesi için yukarıda anlatıldığı şekilde önceden hesaplanıp bir veri tabanına kaydedildiğinden, gerçek bir deprem sonrasında ComMIT ara yüzü ile sadece kıyı tırmanması fazının hesaplanması yeterli olmaktadır. Yayılım fazı MOST sayısal modeli ile hesaplanırken; yayılım sonuçları kıyı tırmanması hesabında sınır şartı olarak kullanılmaktadır. ComMIT kıyıya yaklaştıkça çözünürlüğü artan, iç içe geçmiş üçlü bir ağ sistemi kullanarak tırmanma hesaplamasını gerçekleştirmektedir. Bu sayede derin denizde daha düşük çözünürlükte veri kullanarak hesaplama süresi azaltılmakta, kıyıda ise mümkün olan en yüksek çözünürlük kullanarak su basma-taşkın hesapları için daha kesin sonuç alınmaktadır. Bu sebeple modellemede kullanılan sayısal harita çözünürlükleri sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. MOST modeli için önerilen en uygun ağ çözünürlükleri Tablo 1’de gösterilmiştir (MOST Manual, 2006).

ComMIT ara yüzü ile tsunami senaryosu oluşturmak için sisteme önceden belirlenmiş birim tsunami kaynaklarının parametreleri, birim tsunami kaynağına ait dalga yükseklikleri ve her iki yatay yöndeki hız bileşeni yüklenir. Daha sonra oluşturulacak senaryolar için aşağıda kısaca özetlenen modüller kullanılarak modelleme çalışmaları tamamlanmış olur.

- **Model Setup:** Bu modülde öncelikle oluşturulacak tsunaminin hesaplanacağı bölgenin sayısal haritası, üçlü ağ sistemi (A-, B- ve C-ağları) şeklinde MOST formatında yüklenir. Daha sonra modellemede kullanılacak birim tsunami kaynağı ya da kaynakları belirlenir. Model için seçilecek deprem büyüklüğü iki şekilde belirlenebilir. “Total Magnitude” seçeneği ile istenilen deprem büyüklüğü girilebileceği gibi, eğer birden çok birim tsunami kaynağı kullanılacaksa, her kaynağın ağırlık katsayısının (“Alpha”) manuel olarak belirlenmesi de mümkündür (Şekil 3). Bu modülde ayrıca modelleme yapılacak süre, zaman adımı, sürtünme katsayısı gibi model parametreleri de belirlenir.

Tablo 1. MOST modelinde üçlü ağ sistemi için önerilen çözünürlükleri.

MOST model süreci	Önerilen Çözünürlük	Gereken En Düşük Çözünürlük
<i>Deformasyon</i>	1 yay-dakika (≈ 1.800 m)	4 yay-dakika (≈ 7.300 m)
<i>Yayılim</i>		
<i>Tırmanma (A-Ağı)</i>	36 yay-saniye (≈ 1.080 m)	2 yay-dakika (≈ 3.600 m)
<i>Tırmanma (B-Ağı)</i>	6 yay-saniye (≈ 180 m)	18 yay-saniye (≈ 500 m)
<i>Tırmanma (C-Ağı)</i>	≤ 1 yay-saniye (≤ 30 m)	2 yay-saniye (≈ 60 m)

- **Initial Condition:** Modellemenin yapılacağı en geniş bölge olan A-ağında tsunami oluşumu için ilk şartlar bu modülden görüntülenir.
- **Grid Bathymetry:** Üçlü ağ sisteminin ayrı ayrı görüntülediği modüldür.
- **Results Animation:** Bu modülde tsunami model sonuçları üçlü ağ sisteminin her biri için animasyon olarak görüntülenebilir. Aynı zamanda belirlenen bir izleme noktası için dalga yüksekliği-zaman grafiğine ulaşılabilir, bu grafik resim dosyası olarak (PNG dosya biçiminde) kaydedilebilir veya Google Earth programına aktarılabilir.
- **Results Extrema:** Modelleme boyunca kaydedilen maksimum ve minimum dalga yükseklikleri ve dalga hızları bu modülde görüntülenip PNG, GeoTiff Raster dosyası veya ASCII Raster dosyası formatlarında kaydedilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu proje kapsamında Doğu Akdeniz Bölgesi'nin tsunami tehlike analizinin yapılması amacıyla bölgede ekonomik, turistik ve sosyal açıdan kritik konumda olan Mersin'in Akkuyu ve Yeşilovacık limanları ile Adana'nın Yumurtalık Limanı çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

Mersin il sınırları içerisinde kalan Akkuyu Limanı, bölgede Türkiye'nin ilk nükleer enerji santralinin inşa ediliyor olması nedeniyle önemlidir. Hemen doğusundaki Yeşilovacık Limanı turizm açısından önemli bir konumdadır.

Adana'nın Yumurtalık Limanı ise hem batısındaki lagünler ve milli parklar ile çevre açısından, hem de doğusunda bulunan termik santral, serbest bölge, doğalgaz ve petrol boru hattı limanları ile stratejik açıdan önemli bir bölgedir.

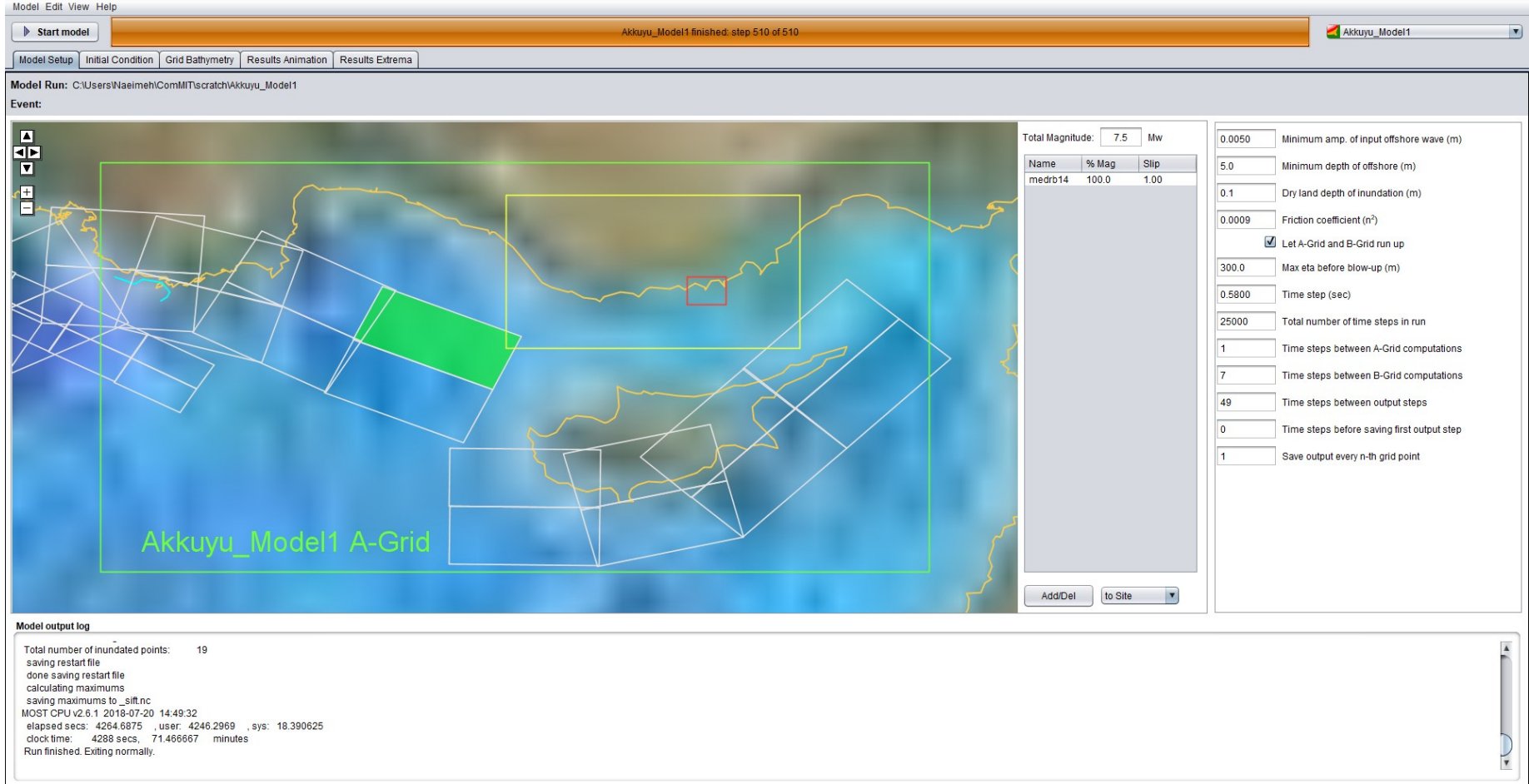
Model Edit View Help

Start model Akkuyu_Model1 finished: step 510 of 510 Akkuyu_Model1

Model Setup Initial Condition Grid Bathymetry Results Animation Results Extrema

Model Run: C:\Users\Waeimehi\ComMIT\scratch\Akkuyu_Model1

Event:



Total Magnitude: 7.5 Mw

Name	% Mag	Slip
medrb14	100.0	1.00

0.0050 Minimum amp. of input offshore wave (m)

5.0 Minimum depth of offshore (m)

0.1 Dry land depth of inundation (m)

0.0009 Friction coefficient (n²)

Let A-Grid and B-Grid run up

300.0 Max eta before blow-up (m)

0.5800 Time step (sec)

25000 Total number of time steps in run

1 Time steps between A-Grid computations

7 Time steps between B-Grid computations

49 Time steps between output steps

0 Time steps before saving first output step

1 Save output every n-th grid point

Model output log

Total number of inundated points: 19

saving restart file

done saving restart file

calculating maximums

saving maximums to _sift.nc

MOST CPU v2.6.1 2018-07-20 14:49:32

elapsed secs: 4264.6875 , user: 4246.2969 , sys: 18.390625

clock time: 4288 secs, 71.466667 minutes

Run finished. Exiting normally.

Şekil 3. ComMIT ara yüzünün “Model Setup” modülü. Şekilde Akkuyu ve Yeşilovacık limanları için birim tsunami kaynağı olarak “medrb14” (yeşil boyalı dikdörtgen) seçilmiş ve deprem büyüklüğü M=7,5 olarak belirlenmiştir. Her iki kıyı bölgesi için A- (yeşil çerçeve), B- (sarı çerçeve) ve C-ağları (kırmızı çerçeve) aynı olacak şekilde tanımlanmıştır.

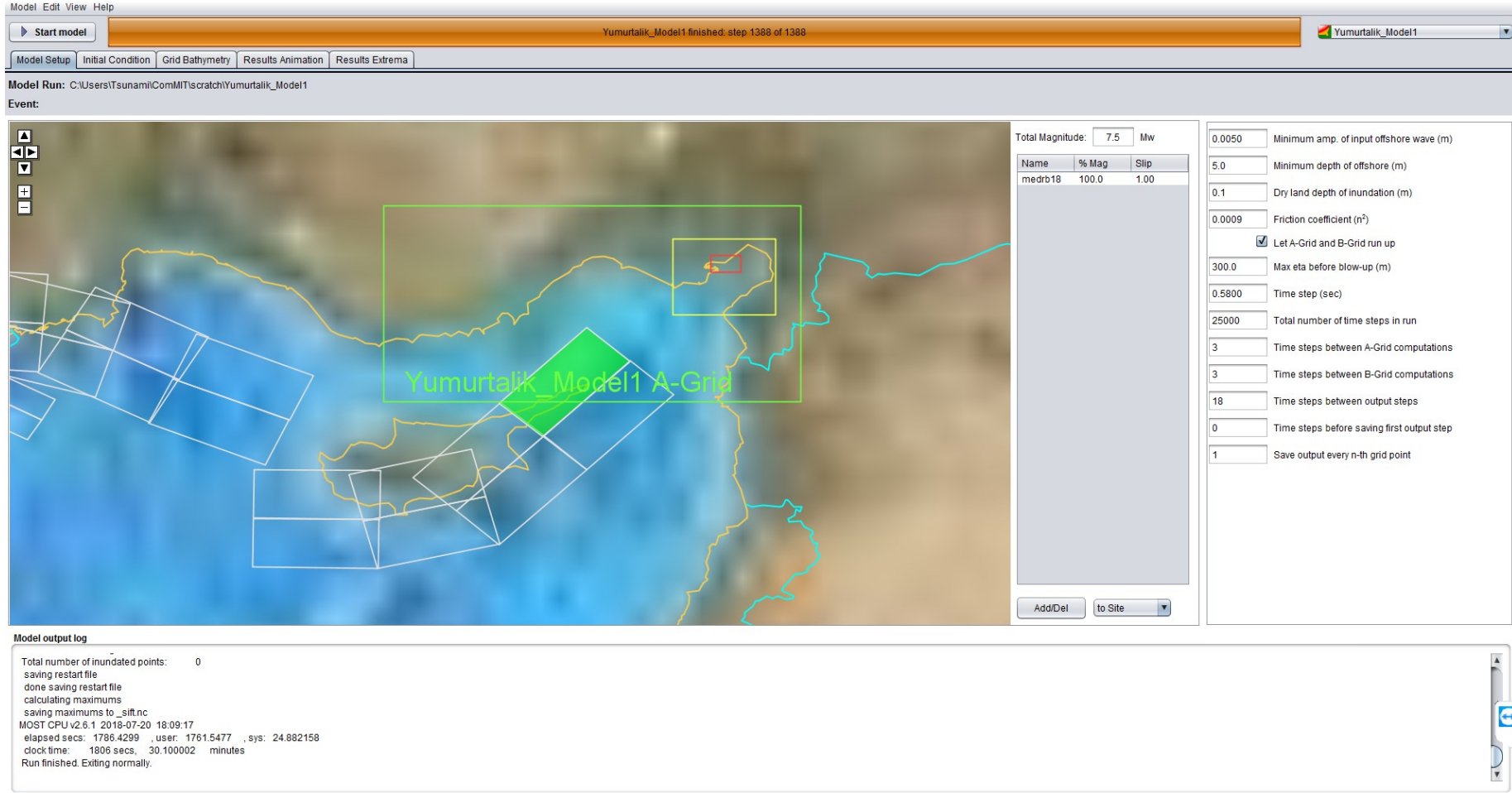
Model Edit View Help

Start model Yumurtalik_Model1 finished: step 1388 of 1388

Model Setup Initial Condition Grid Bathymetry Results Animation Results Extrema

Model Run: C:\Users\Tsunami\ComMIT\scratch\Yumurtalik_Model1

Event:



Total Magnitude: 7.5 Mw

Name	% Mag	Slip
medrb18	100.0	1.00

0.0050 Minimum amp. of input offshore wave (m)

5.0 Minimum depth of offshore (m)

0.1 Dry land depth of inundation (m)

0.0009 Friction coefficient (n²)

Let A-Grid and B-Grid run up

300.0 Max eta before blow-up (m)

0.5800 Time step (sec)

25000 Total number of time steps in run

3 Time steps between A-Grid computations

3 Time steps between B-Grid computations

18 Time steps between output steps

0 Time steps before saving first output step

1 Save output every n-th grid point

Model output log

Total number of inundated points: 0

saving restart file

done saving restart file

calculating maximums

saving maximums to _sift.nc

MOST CPU v2.6.1 2018-07-20 18:09:17

elapsed secs: 1786.4299 ,user: 1761.5477 ,sys: 24.882158

clock time: 1806 secs, 30.100002 minutes

Run finished. Exiting normally.

Şekil 4. Adana'nın Yumurtalık Limanı için birim tsunami kaynağı olarak "medrb18" (yeşil boyalı dikdörtgen) seçilmiş ve deprem büyüklüğü $M=7,5$ olarak belirlenmiştir. A-ağı yeşil çerçeve ile, B-ağı sarı çerçeve ile, C-ağı ise kırmızı çerçeve ile gösterilmiştir.



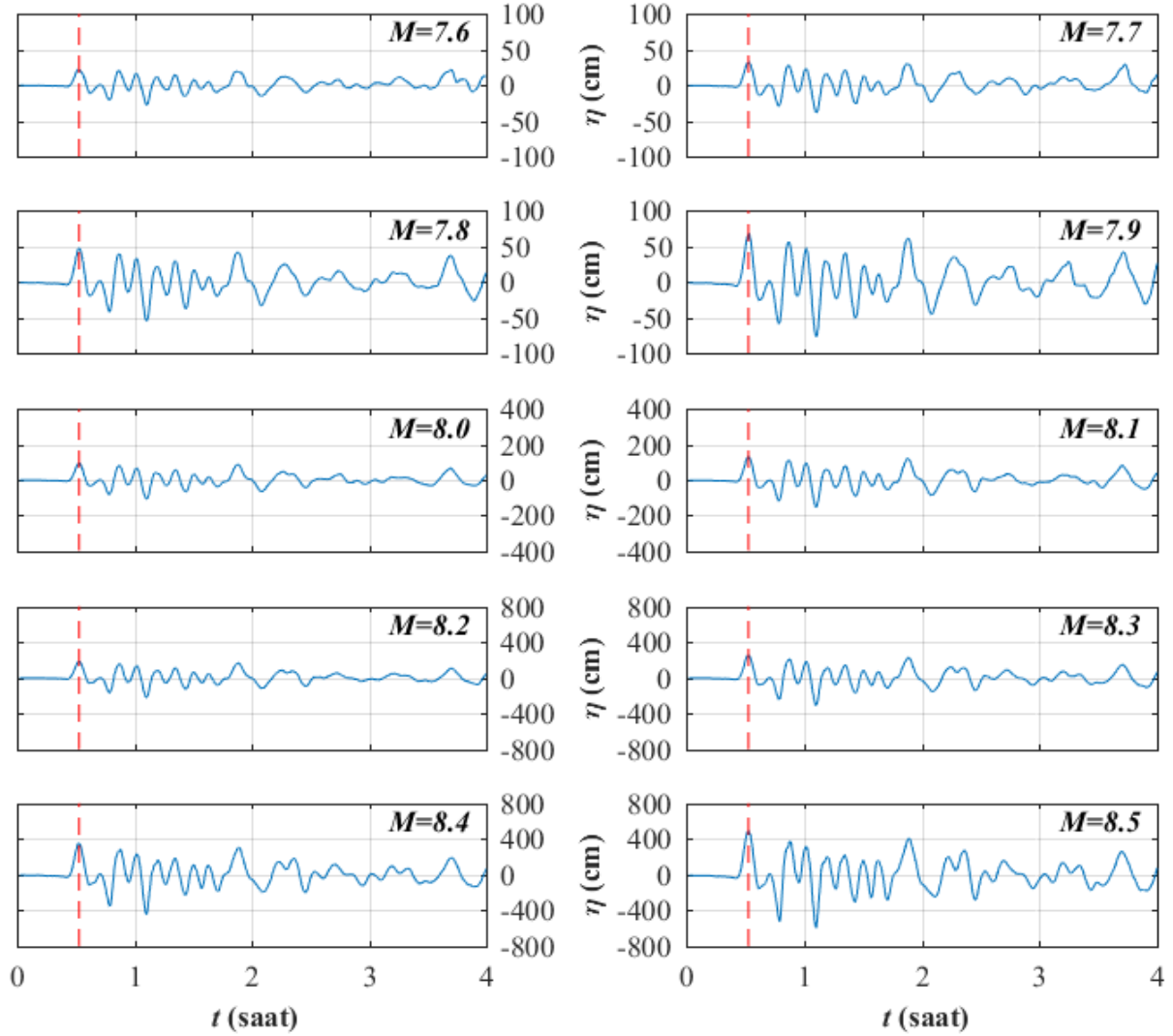
Şekil 5. Mersin'in Akkuyu ve Yeşilovacık limanları ile Adana'nın Yumurtalık Limanı'nda belirlenen izleme noktalarının haritada gösterimi.

Yukarıda sözü edilen kıyı kesimleri için üçlü ağ yapısı ve seçilen birim tsunami kaynakları Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Her üç bölge için kıyıda belirlenen izleme noktalarının haritadaki yerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Farklı deprem senaryoları için kıyı tırmanmasının zaman serisi olarak grafiği ile her ağ noktasında hesaplanan maksimum dalga yüksekliği aşağıda sunulmuştur.

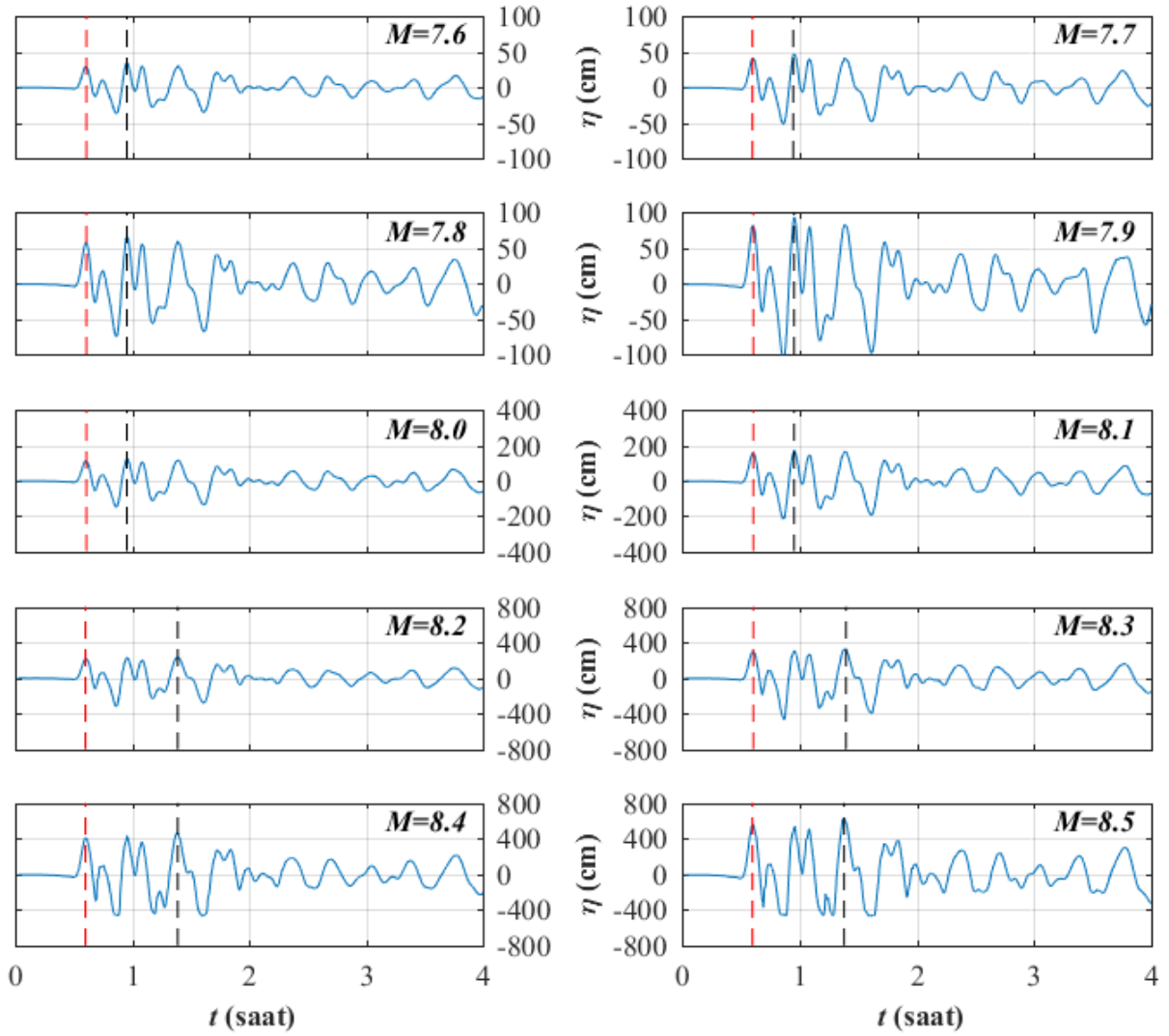
Akkuyu ve Yeşilovacık limanları için yapılan modellemelerde A-, B- ve C-ağları her iki limanı da içine alacak şekilde ortak olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Bu bölgelerde farklı deprem büyüklüğü senaryoları için olası bir tsunaminin yayılımı hesaplanmıştır. ComMIT için girdi olan üçlü ağ sistemindeki A-ağı GEBCO verisinden yararlanılarak 900 m çözünürlüğünde oluşturulmuş (<https://www.gebco.net>), B- ve C-ağları için ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) İnşaat Mühendisliği Bölümü Deniz Mühendisliği Araştırma Merkezi'nden temin edilen sayısal haritalar sırasıyla 300 m ve 45 m çözünürlüklerine enterpole edilmiştir.

Helen Yayı üzerinde seçilen "medrb14" birim tsunami kaynağı (Şekil 3) için yapılan hesaplamalara göre Akkuyu Limanı'nda gözlenen en büyük dalga yüksekliği 7,5 büyüklüğündeki bir deprem için yaklaşık 20 cm olmaktadır. Buna göre, Akkuyu Limanı'nın büyüklüğü 7,5'i geçmeyen depremler için ciddi bir tsunami tehlikesi ile karşı karşıya olmadığı söylenebilir. Ancak Şekil 6'dan da görüleceği üzere, deprem büyüklüğü arttıkça izleme

noktasında hesaplanan en büyük dalga yüksekliği hızla artmakta, $M=8,0$ büyüklüğündeki bir deprem için bu değer yaklaşık 1 m, $M=8,5$ için ise 5 m olmaktadır. Ayrıca, Şekil 6'daki tüm deprem senaryolarında kıyıya depremden yaklaşık 30 dakika sonra ulaşan ilk dalganın en büyük dalga olduğu görülmektedir.

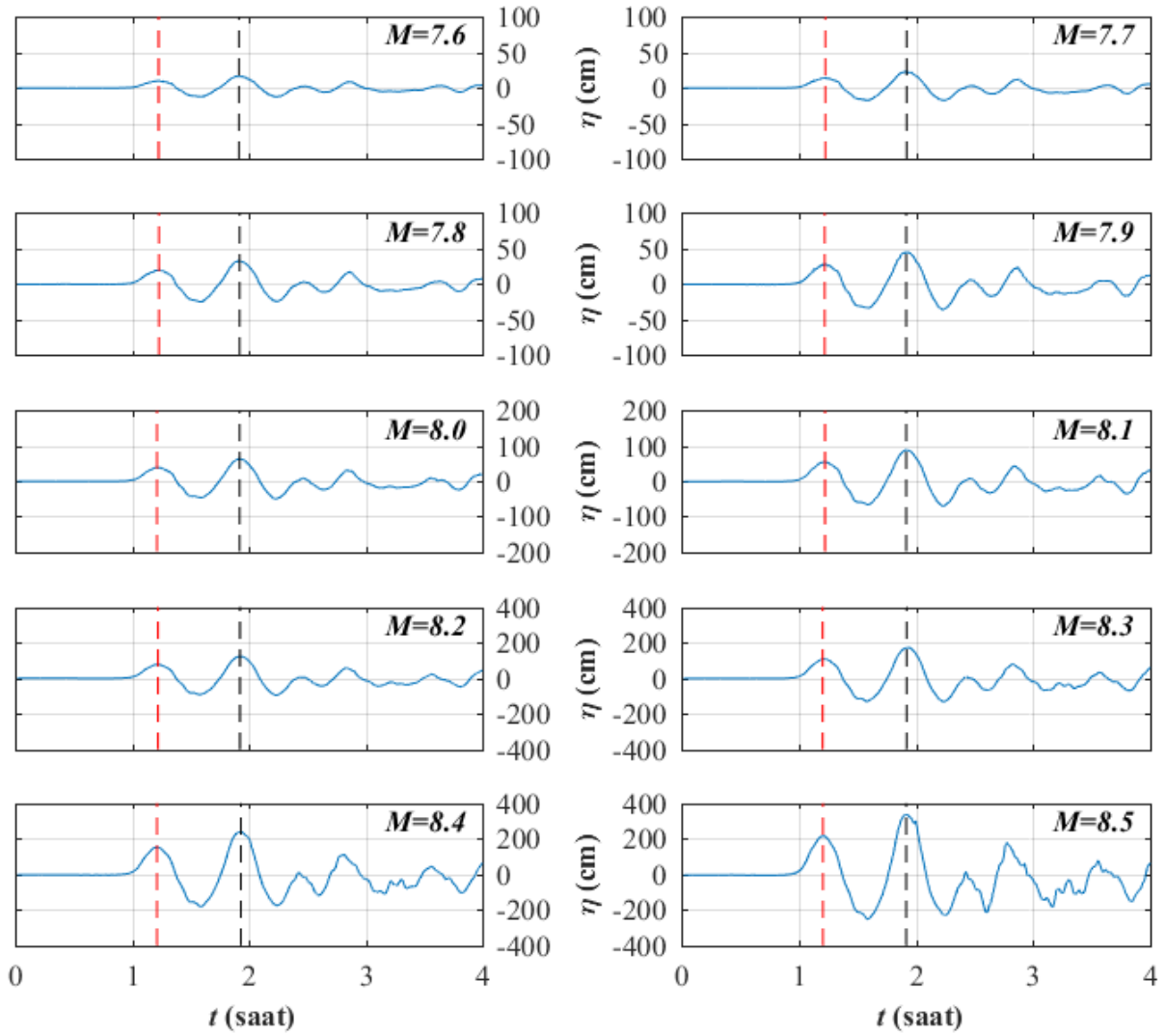


Şekil 6. Akkuyu Limanı'nda belirlenen izleme noktasında ($36.14208^{\circ}K$, $33.53913^{\circ}D$) farklı deprem büyüklükleri için elde edilen dalga yüksekliği-zaman grafikleri. Kırmızı kesikli çizgi ilk dalganın maksimum yaptığı anı, siyah kesikli çizgi ise en büyük dalganın maksimum yaptığı anı göstermektedir. Akkuyu için ilk dalga en büyük dalga olduğundan bu iki çizgi çakışmaktadır.



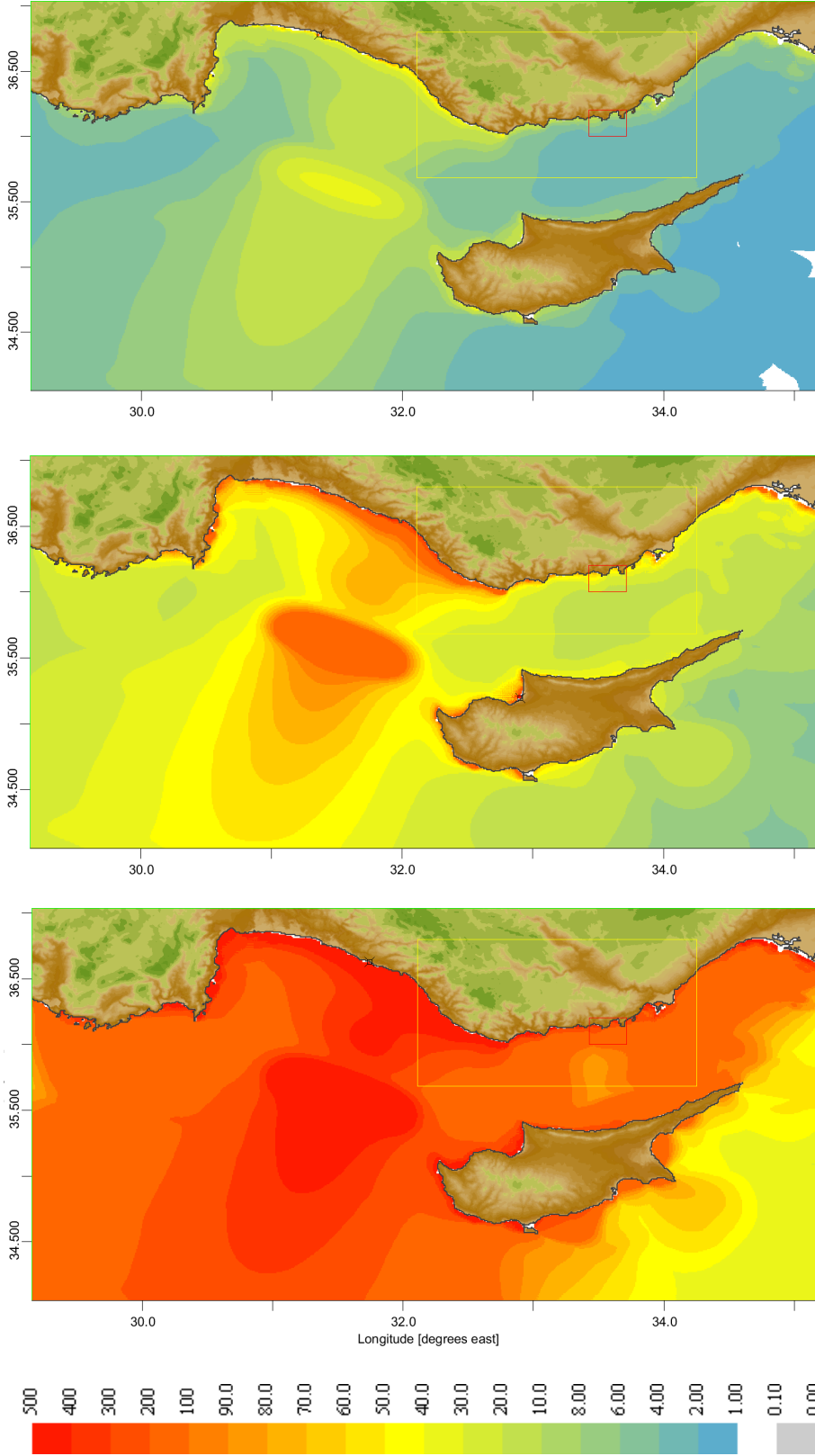
Şekil 7. Yeşilovacık Limanı'nda belirlenen izleme noktasında ($36.19104^{\circ}K$, $33.65457^{\circ}D$) farklı deprem büyüklükleri için elde edilen dalga yüksekliği-zaman grafikleri. Kırmızı kesikli çizgi ilk dalganın maksimum yaptığı anı, siyah kesikli çizgi ise en büyük dalganın maksimum yaptığı anı göstermektedir.

Aynı analiz Akkuyu Limanı'na çok yakın bir konumda olan Yeşilovacık Limanı için yapıldığında ise elde edilen sonuçlar oldukça farklıdır. Yeşilovacık'taki izleme noktasında elde edilen maksimum dalga yüksekliklerinin Akkuyu'ya kıyasla yaklaşık %25-30 daha fazla olduğu görülmüştür. Büyüklüğü $M=7,5$ olan bir deprem için hesaplanan maksimum dalga yüksekliği yaklaşık 25 cm iken bu değer deprem büyüklüğü ile birlikte hızla artmakta, $M=8,0$ için yaklaşık 1,3 m, $M=8,5$ için ise yaklaşık 6,3 m olmaktadır. Akkuyu'da olduğu gibi Yeşilovacık'ta da ilk dalga kıyıya yaklaşık 30 dakika sonra ulaşırken, ilk dalga bu kez en büyük dalga olmayıp, en büyük dalga kıyıya 1-1,5 saat sonra ulaşmaktadır (Şekil 7).

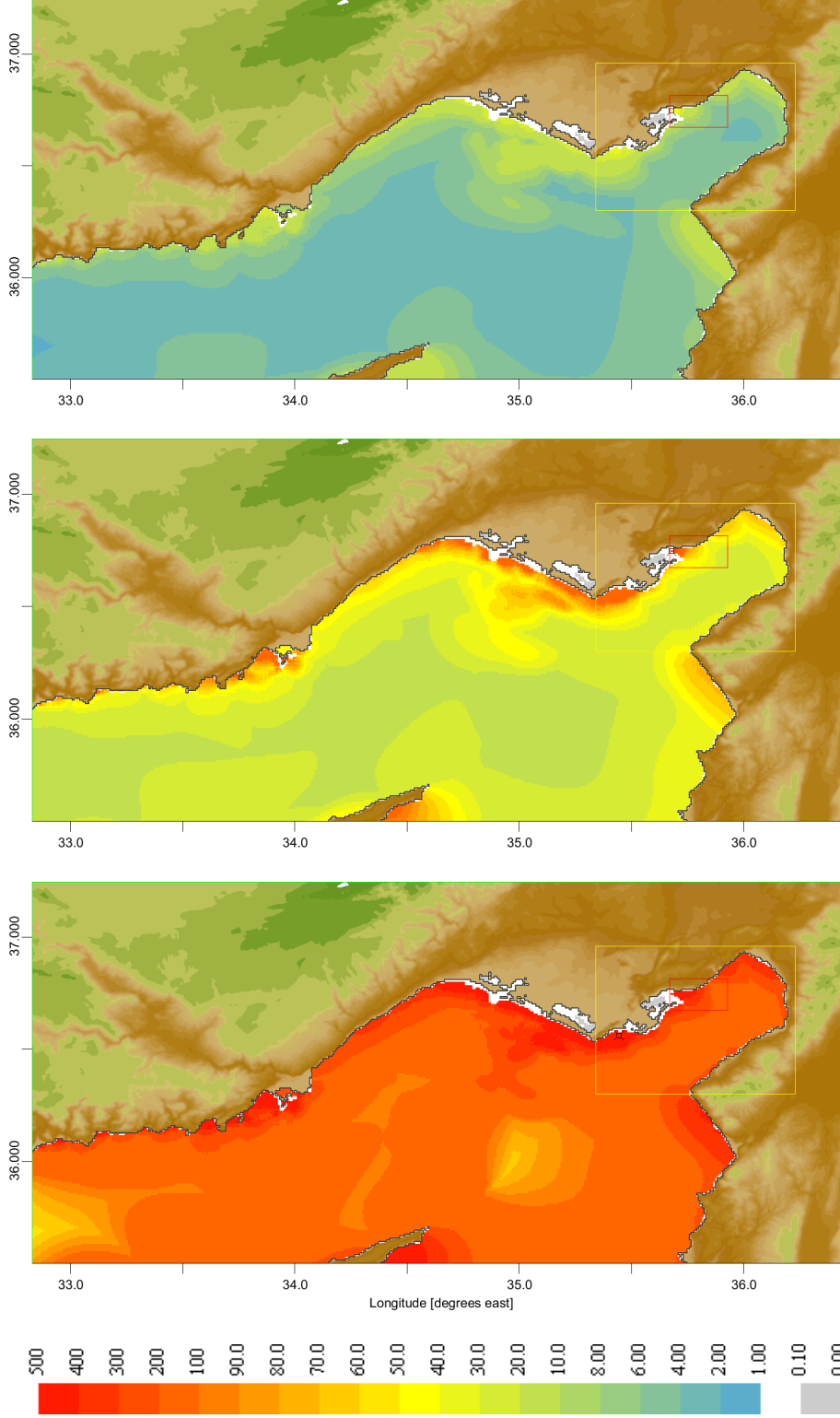


Şekil 8. Yumurtalık Limanı'nda belirlenen izleme noktasında ($36.767615^{\circ}K$, $35.793288^{\circ}D$) farklı deprem büyüklükleri için elde edilen dalga yüksekliği-zaman grafikleri. Kırmızı kesikli çizgi ilk dalganın maksimum yaptığı anı, siyah kesikli çizgi ise en büyük dalganın maksimum yaptığı anı göstermektedir.

Adana'nın Yumurtalık Limanı için hazırlanan modellerde ise Kıbrıs Yayı üzerindeki "medrb18" tsunami birim kaynağı (Şekil 4) kullanılarak çeşitli deprem senaryoları oluşturulmuştur. Büyüklüğü $M=7,5$ olan deprem senaryosuna göre Yumurtalık Limanı'nda görülecek en büyük dalganın yaklaşık 15 cm yüksekliğe sahip olması beklenmektedir. Deprem büyüklüğü $M=8,0$ olduğunda maksimum dalga yüksekliği 60 cm'den fazla olmakta, $M=8,5$ için ise bu değer yaklaşık 3,3 m olarak hesaplanmaktadır (Şekil 8). Tüm senaryolarda Yumurtalık Limanı'na ilk dalganın varış süresi 70 dakikadan fazla olarak hesaplanırken en büyük dalganın yaklaşık 2 saat sonra (115 dakika) kıyıya ulaşacağı öngörülmektedir.



Şekil 9. Akkuyu ve Yeşilovacık için tanımlanan A-ağı içerisindeki her bir noktada hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri. Deprem büyüklüğü yukarıdan aşağıya sırasıyla M=7,5, M=8,0 ve M=8,5 olarak değiştirilmiştir.



Şekil 10. Yumurta için tanımlanan A-ağı içerisindeki her bir noktada hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri. Deprem büyüklüğü yukarıdan aşağıya sırasıyla M=7,5, M=8,0 ve M=8,5 olarak değiştirilmiştir.

Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla Akkuyu ve Yeşilovacık ile Yumurtalık için tanımlanan A-ağları içerisindeki her bir noktada hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri eş yükselti (kontur) eğrisi olarak sunulmuştur. Deprem büyüklüğünün yukarıdan aşağıya sırasıyla $M=7,5$, $M=8,0$ ve $M=8,5$ olarak değiştirilmesiyle Şekil 3 ve Şekil 4'te seçilen tsunami birim kaynaklarının yaratacağı ilk dalgaların Akdeniz basenindeki yayılımları ve bunun sonucunda kıyılarda gözlenecek maksimum dalga yükseklikleri görülmektedir. Bu şekiller aynı zamanda söz konusu tsunamilerin enerji dağılımlarını göstermeleri açısından da önemlidir. Şekil 9 ve Şekil 10'dan da görüleceği üzere, özellikle $M=8,5$ büyüklüğündeki bir deprem sonrası Türkiye'nin güney kıyılarının neredeyse tamamı yüksekliği metreleri bulan tsunami dalgalarına maruz kalacaktır.

Ancak belirtmek gerekir ki, özellikle Şekil 10'da yer yer beyaz renkli konturlar görülmesinin sebebi, bölge için temin edilebilen batimetri haritasının çözünürlüğünün sayısal modelin gerektirdiği en düşük çözünürlüğün altında olması, enterpolasyon yoluyla elde edilen yüksek çözünürlüklü sayısal haritanın ise bölgenin kıyı çizgisiyle tam olarak örtüşmemesidir. Bu soruna beşinci bölümde de ayrıca değinilmiştir.

5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI VE PAYDAŞLARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Özetlemek gerekirse, yukarıda sunulan grafikler incelendiğinde, oluşturulan tüm modellerde, büyüklüğü 7,5'in altındaki bir deprem senaryosu için Doğu Akdeniz kıyılarında tsunami kaynaklı önemli bir dalga hareketliliğinin gözlenmeyeceği söylenebilir. Bekleneceği üzere, deprem büyüklüğü arttıkça kıyıda gözlenen dalga yükseklikleri de artmaktadır. Deprem büyüklüğünün 8,0'ın üzerinde gerçekleşmesi halinde ise bölgedeki birçok nokta önemli bir tsunami tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır. İkinci bölümde de özetlendiği üzere, bölgede geçmişte benzer büyüklükte depremlerin gerçekleştiği bilinmektedir. Kıyılarımızın planlama ve kullanım açılarından mevcut durumu da göz önünde bulundurulursa, böyle bir tehlikenin varlığının ciddiyle ele alınması kaçınılmazdır.

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, bu proje çalışmasıyla Doğu Akdeniz bölgesinin karşı karşıya olduğu tsunami tehlikesinin, diğer bir deyişle, bölgenin tsunami potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar bölgede ihmal edilemeyecek bir tsunami potansiyeli olduğunu göstermiştir. Bu noktadan hareketle, gerek yurt çapında doğal afetler konusunda çalışmalar yapan AFAD gibi kurumların, gerekse bölgedeki yerel yönetimlerin, afet öncesi ve sonrası eylem planları hazırlama konusunda gerekli çalışmaları yapması ve gerekli önlemleri alması, olası bir tsunami afetinin en az hasarla atlatılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmalar

yapılırken yukarıda sözü edilen kamu kurumlarının üniversiteler başta olmak üzere bu konunun diğer paydaşlarıyla eşgüdümlü bir şekilde çalışmalarını büyük önem arz etmektedir.

Bu kapsamda, başvuru metninde de belirtildiği üzere, yapılan proje çalışmasının bir amacı da elde edilen sonuçların konuyla ilgili paydaş kurumlarla paylaşılması idi. Bu hedef proje başvuru metninde 5. İş Paketi olarak tanımlanmış ve proje süresinin son iki ayının bu amaç doğrultusunda ayrılması öngörülmüştü. Her ne kadar sonuçların elde edilmesi sırasında yaşanan ve aşağıda özetlenen bazı aksaklıklar nedeniyle bu hedefe proje süresi içerisinde ulaşılamamış olsa da, proje ekibinin bu konudaki çalışmaları devam etmekte olup önümüzdeki süreçte proje sonuçlarının bir rapor haline getirilerek paydaş kurumlara gönderilmesi planlanmaktadır.

Burada vurgulanması gereken bir diğer nokta ise kıyılarımız için yüksek çözünürlüklü batimetri verisinin eksikliğidir. Bir hidrodinamik modelin en önemli girdisinin batimetri verisi olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Ancak proje süresince, özellikle Adana ve Hatay kıyıları için daha fazla sayıda nokta için benzetim yapılmak istense de, temin edilebilen deniz tabanı haritasının MOST modelinin gerektirdiği çözünürlüklerin (Tablo 1) çok altında olması nedeniyle istenilen noktalar için ve istenilen hassasiyette sonuçlar alınamamıştır. Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi, Yumurtalık Limanı için sunulan sonuçlar büyük oranda daha düşük çözünürlüğe sahip haritaların enterpole edilmesi yoluyla elde edilebilmiştir. Yüksek çözünürlüklü topografya ve batimetri verisi için gerek Harita Genel Komutanlığı, gerekse Seyir Hidrografi Oşinografi Dairesi Başkanlığı ile gerçekleştirilen aylar süren uzun süreli temaslardan sonuç alınamamış, bu kurumların sahip olduğu haritalar için talep ettiği ücretler proje bütçesi limitlerinin kat kat üzerinde olduğundan satın alma yoluyla harita temin edilememiştir. Bu durum ayrıca proje sonuçlarının elde edilmesini geciktirmiş, yukarıda da belirtildiği üzere sonuçların proje süresi içerisinde konuyla ilgili paydaşlarla tartışılmasını da imkânsız hale getirmiştir. Bu süreç ülkemizin bilim ve teknolojiye daha hızlı yol alabilmesi için özellikle kamu kurumlarının daha etkin işbirliği yapması ve bilgi paylaşımının kolaylaştırılması gerekliliğini de ortaya koymaktadır.

Son olarak, Mersin'in Akkuyu ve Yeşilovacık kıyıları için yapılan benzetimlerde kullanılan haritaların paylaşımı konusunda gösterdiği yakın işbirliği nedeniyle ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Deniz Mühendisliği Araştırma Merkezi'nden Sayın Prof. Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER'e teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

Altinok, Y., Alpar, B., Ozer, N., Aykurt, H. 2011. "Revision of the tsunami catalogue affecting Turkish coasts and surrounding regions", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 273-291. doi:10.5194/nhess-11-273-2011.

Altinok, Y., Ersoy, S. 2000. "Tsunamis observed on and near the Turkish coast", *Natural Hazards*, 21, 185-205. doi:10.1023/A:1008155117243.

Ambraseys, N. 1962. "Data for the investigation of the seismic sea waves in the Eastern Mediterranean", *Teknik Rapor, Bulletin of the Seismological Society of America*.

Ambraseys, N., Synolakis, C. 2010. "Tsunami catalogs for the Eastern Mediterranean", *Journal of Earthquake Engineering*, 14, 309-330. doi:10.1080/13632460903277593.

Bondevik, S., Mangerud J., Dawson S., Dawson A., Lohne O. 2003. "Record-breaking Height for 8000-Year-Old Tsunami in the North Atlantic", *EOS Transactions*, 84(31), 289-293.

Bernard, E. N., Robinson, A. R. 2009. Sayfa 1. *The Sea: Tsunamis*. Editörler: Bernard, E. N., Robinson, A. R. Cambridge: Harvard University Press.

Gica, E., Spillane, M., Titov, V. V., Chamberlin, C. D., Newman, J. C. 2008. "Development of the forecast propagation database for NOAA's Short-term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT)", *Teknik Rapor, OAR PMEL-139*.

Guidoboni, E., Comastri, A. 2005. "Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th century", *Teknik Rapor, INGV-SGA, Bologna*.

Gusiakov, V. K. 2009. Sayfa 23. *The Sea: Tsunamis*. Editörler: Bernard, E. N., Robinson, A. R. Cambridge: Harvard University Press.

Kânoğlu, U., Hoto, O., Kalligeris, N., Flouri, E., Aydın, B., Moore, C., & Synolakis, C. 2012. "Tsunami propagation database for the Mediterranean and Aegean Seas", *AGU Fall Meeting, Özet no: 1500513*.

Kânoğlu, U., Yalçınler, A., Aydın, B., Sharghivand, N., Hoto, O., Aksoy, A., Köroğlu, B. 2014. "Tsunami Oluşumu, Yayılımı ve Kıyı Tırmanmasının Modellenmesi ve Ege Denizi'ne Uygulanması", *Teknik Rapor, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Proje No: 109Y387*.

Melgar, D., Bock Y. 2013. "Near-field tsunami models with rapid earthquake source inversions from land- and ocean-based observations: The potential for forecast and warning", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 5939-5955.

Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G., Takahashi, T., Yalçınler, A. 2000. "Discovery of Minoan tsunami deposits", *Geology*, 28, 59-62.

Morino, Y., Ohara T., Nishizawa M. 2011. "Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011", *Geophysical Research Letters*, 38(7), L00G11, 1-7.

MOST Software Manual 2006. "Method of Splitting Tsunami (MOST) Software Manual", The National Oceanic Atmospheric Administration, Pacific Marine Environmental Laboratory



NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory 7600 Sand Point Way NE, Seattle, WA 98115.

Nicoll, K. 2010. "Landscape development within a young collision zone: implications for post-Tethyan evolution of the Upper Tigris River system in southeastern Turkey", *International Geology Review*, 52 (4-6), 404-422.

Papadopoulos, G. A., Fokaefs A. 2005. "Strong Tsunamis in the Mediterranean Sea: A re-evaluation", *ISET Journal of Earthquake Technology*, 463, 159-170.

Papazachos, B. 1996. "Large seismic faults in the Hellenic Arc", *Annali Di Geofisica*, 39, 891-903.

Tang, L., Titov, V. V., Bernard, E., Wei, Y., Chamberlin, C., Newman, J. C., Mofjeld, H., Arcas, D., Eble, M., Moore, C., Uslu, B., Pells, C., Spillane, M. C., Wright, L. M., Gica, E. 2012. "Direct energy estimation of the 2011 Japan tsunami using deep-ocean pressure measurements", *Journal of Geophysical Research*, 117, C08008. doi: 10.1029/2011JC007635.

Titov, V. V., Moore, C. W., Greenslade, D. J. M., Pattiaratchi, C., Badal, R., Synolakis, C. E., Kânoğlu, U. 2011. "A new tool for inundation modeling: Community modeling interface for tsunamis (ComMIT)", *Pure and Applied Geophysics*, 168 , 2121-2131. doi:10.1007/s00024-011-0292-4.

Valle, B., Kalligeris N., Findikakis A. N., Okal E. A., Melilla L., Synolakis C. E. 2014. "Plausible megathrust tsunamis in the eastern Mediterranean Sea", *Engineering and Computational Mechanics*, 167, 99-105.

Whitmore, P. M. 2009. Sayfa 401. *The Sea: Tsunamis*. Editörler: Bernard, E. N., Robinson, A. R. Cambridge: Harvard University Press.

Yalçiner, A. C., Annunziato, A., Papadopoulos, G., Doğan, G. G., Güler, H. G., Çakır, T. E., Özer Sözdinler, C., Ulutaş E., Arikawa, T., Süzen, L., Kanoğlu, U., Güler, I., Probst, P., Synolakis, C. 2017. "The 20th July 2017 (22:31 UTC) Bodrum/Kos Earthquake and Tsunami; Post Tsunami Field Survey Report". <http://users.metu.edu.tr/yalciner/july-21-2017-tsunami-report/Report-Field-Survey-of-July-20-2017-Bodrum-Kos-Tsunami.pdf>.
Son erişim tarihi: 11 Haziran 2018.

Yamazaki, Y., Lay T., Cheung K. F., Yue H., Kanamori H. 2011. "Modeling near-field tsunami observations to improve finite-fault slip models for the 11 March 2011 Tohoku earthquake", *Geophysical Research Letters*, 38(7), L00G15, 1-6.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. BARAN AYDIN
Proje No:	116Y462
Proje Başlığı:	Doğu Akdeniz Bölgesindeki Tsunami Tehlikesinin Belirlenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	UTKU KÂNOĞLU
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ADANA BİLİM VE TEKNOLOJİ Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/04/2017 - 15/04/2018
Onaylanan Bütçe:	63220.0
Harcanan Bütçe:	36671.55
Öz:	<p>Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3001 - Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenen bu proje çalışması ile Doğu Akdeniz bölgesinin tsunami potansiyelinin belirlenebilmesi ve bölge için hazırlanacak tsunami risk ve taşkın haritaları için bir altyapı oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda bölge içerisinde seçilen önemli kıyı noktaları için çeşitli deprem senaryoları oluşturulmuş, bu depremler sonucunda meydana gelecek olası bir tsunaminin kıyılarımıza etkisi sayısal bir model aracılığıyla belirlenmiştir.</p> <p>Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, Akdeniz'de büyüklüğü 8,0'in üzerinde bir deprem gerçekleşmesi halinde bölgedeki birçok kıyı şeridi önemli bir tsunami tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır. Geçmişte bölgede benzer büyüklükte depremlerin ve etkisi neredeyse tüm Akdeniz baseninde hissedilen tsunamilerin gerçekleştiği unutulmamalıdır. Bu nedenle, öncelikle bölge için bir tsunami tehlikesinin varlığı kabul edilmelidir. Gerek yurt çapında doğal afetler konusunda çalışmalar yapan kurumlar, gerekse bölgedeki yerel yönetimler, başta üniversiteler olmak üzere bu konunun diğer paydaşlarıyla eşgüdümlü bir şekilde afet öncesi ve sonrası eylem planları hazırlamalı ve bunları ciddiyetle uygulamalıdır. Bu çalışmaların yapılması, olası bir tsunami afetinin en az hasarla atlatılabilmesi için kritik önemdedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Doğu Akdeniz, tsunami, deprem, modelleme, MOST, ComMIT, kıyı tırmanması
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır