

SİSMİK DENİZ TABANI HAREKETLERİNİN KIYILARDA OLUŞTURDUĞU DALGALAR

E. N. OTAY¹ ve C.M. KAZEZYILMAZ-ALHAN²

¹Boğaziçi Üniv., İnşaat Müh. Böl., 80815 Bebek, İstanbul. otay@boun.edu.tr

²Duke Univ., Civil & Env. Eng. Dept., Durham, NC 27708-0287, USA. cmk5@duke.edu

ÖZET

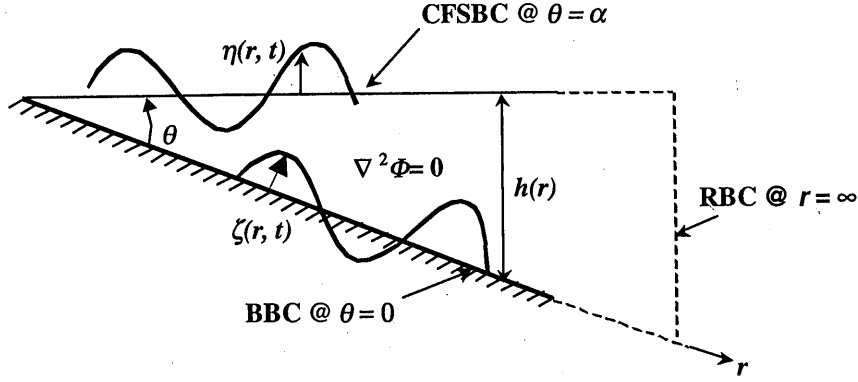
Deprem sırasında kaydedilen sismik yer hareketleri, fiziksel mekanizması sualtındaki bir dalga pedalının işleyişine benzeyen zorlamalar sonucunda yüzey dalgaları oluşturur. Bilinen tsunami mekanizmasından farklı olan bu yeni dalga problemi, sistemi kontrol eden denklemler ve sınır şartları eşliğinde analitik olarak çözülmüştür. Elde edilen çözüm olası sismik dalga tanımlarına uyarlanarak, farklı eğimli kıyılarda deprem sonucu oluşabilecek su dalgaları incelenmiştir. Daha sonra, elde edilen bu dalga denklemi için gerçek depremlerde ölçülen yer ivmelerini kullanabilecek şekilde Fourier serisi çözümü geliştirilmiştir. Bulunan spektral çözüm 1999 Kocaeli depremi sırasında İzmit Körfezi'ne uyarlanarak, Yarımca'da kaydedilen yer ivmesi sonucu Değirmendere kıyısında oluşan su dalgası hesaplanmıştır.

1. GİRİŞ

17 Ağustos 1999 tarihinde Marmara Bölgesi'nde meydana gelen $M_w=7.4$ şiddetindeki deprem sırasında İzmit Körfezinde bir deprem dalgasının meydana gelip gelmediği kamuoyunda ve bilim dünyasında uzun süre tartışıldı. Altınok ve diğerleri (1999) ve Yalçın ve diğerlerinin (1999) yaptığı kıyı taramaları sırasında bulunan ipuçlarına ve başvurdukları görgü tanıklarının ifadelerine deprem sırasında İzmit Körfezi'nin Doğu kesimlerinde tsunami adı verilen büyük dalgaların oluştuğu saptanmıştır. Açık denizlerde ve derin okyanus tabanlarında meydana gelen sualtı depremleri sonucunda oluşan tsunamiler ve bunların oluşum mekanizmaları Wiegel (1970), Tuck ve Hwang (1972), ve Hammack (1973) tarafından analitik olarak incelendi. Ancak İzmit Körfezi'nde olduğu gibi deniz dibinde kıyıya yakın geçen fay hareketleri sonucu oluşan deprem dalgalarının fiziksel oluşumu üzerine yapılan çalışmalar sayısal model çalışmalarıyla (Hunt, 1988; Raichlen ve diğerleri, 1996, Watts, 2000) sınırlı kalmıştır. Deprem sırasında sabit eğimli kıyı profili boyunca oluşan yüzey dalgalarını ve oluşum mekanizmalarını analitik olarak araştırmak üzere Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki bir tez çalışması kapsamında (Kazezyılmaz, 2000) yürütülen araştırmaların bir özeti aşağıda verilmiştir.

2. DALGA PROBLEMİ

Deprem sırasında deniz dibindeki sismik zemin hareketi etkisiyle su yüzeyinde oluşan dalgaların analitik çözümü yapılmıştır. Çözümde deniz dibi kıyı profili sabit bir eğimle tanımlanmıştır (Şekil 1). Deniz tabanının sismik salınım sonucu su kütlelerini harekete geçirmesi potansiyel akım denklemleri ile ifade edilerek iki boyutlu polar koordinat sisteminde analitik olarak çözülmüştür. Burada ana denklem olarak Airy-Laplace dalga teorisi, hafif eğim dalga teorisi ve dalga pedalı teorisinde olduğu gibi Laplace denklemi kullanılmış, ancak deniz dibindeki taban hareketini tanımlayan farklı sınır şartları eşliğinde çözülmüştür.



Şekil 1. Problem Şeması ve Sınır Şartları

Laplace denklemi iki boyutlu polar koordinat sisteminde aşağıdaki gibi verilir:

$$\nabla^2 \Phi = 0, \quad 0 \leq r < \infty \text{ ve } 0 \leq \theta \leq \alpha \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial r^2} = 0 \quad (2)$$

Burada, Φ hız potansiyelini, α ise taban açısını, r kıyıya olan radyal uzaklığı, θ açisal koordinatı, α kıyı profilinin eğim açısını, ve t zamanı temsil eder.

Ana denklemde olduğu gibi sınır şartları da polar koordinatlarla yazılmıştır. Serbest yüzeyde dinamik serbest yüzey sınır şartı (DSYSS) ve kinematik serbest yüzey sınır şartı (KSYSS) kabul edilir.

$$\text{DSYSS:} \quad \eta(r, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad \theta = \alpha \quad (3)$$

$$\text{KSYSS:} \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}, \quad \theta = \alpha \quad (4)$$

Hız potansiyelinin zamanda harmonik olduğunu varsayarak ve DSYSS'ni zamana göre türevini alıp KSYSS'na eşitlendiğinde bileşik serbest yüzey sınır şartı (BSYSS) elde edilir.

$$\text{BSYSS:} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{\sigma^2}{g} \Phi = 0, \quad \theta = \alpha \quad (5)$$

Burada, η yüzey salınımını, ζ deniz dibi zemin hareketini, σ zemin hareketinin açısal hızını ve g yerçekimi ivmesini temsil eder.

Taban sınır şartı (TSS) olarak tabandaki suyun zeminin sismik hareketiyle aynı hıza sahip olduğu kabul edilir.

$$\text{TSS:} \quad -\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = \frac{\partial \zeta(r,t)}{\partial t}, \quad \theta = 0 \quad (6)$$

Denklemler analitik olarak çözüldüğünde hız potansiyeli $\phi(r,\theta,t)$ ve yüzeyde oluşan su dalgası $\eta(r,t)$ için aşağıdaki denklemler bulunur:

$$\Phi(r,\theta,t) = -\frac{r}{k} \sin k\theta \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (7)$$

$$\eta(r,t) = \frac{\cos k\alpha}{\sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (8)$$

BSYSS kullanılarak aşağıdaki yayılma denklemi elde edilir.

$$\frac{\sigma^2 r \alpha}{g} = k \alpha \cot k \alpha \quad (9)$$

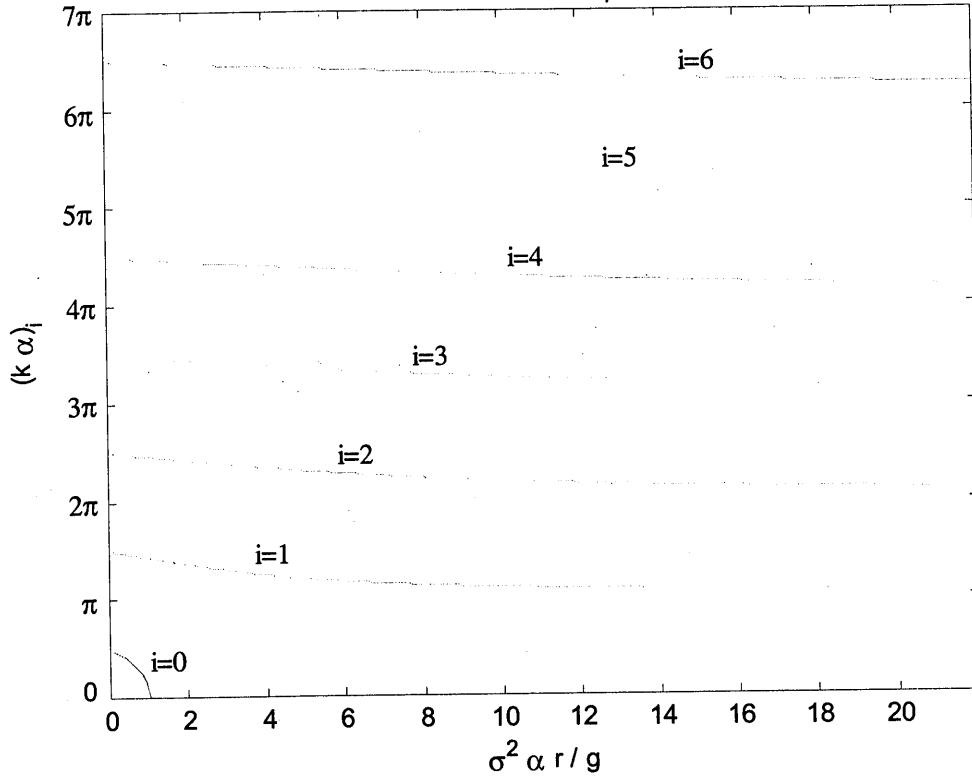
Burada k dalga sayısını temsil eder.

Bu sonuçlardan yüzey dalgası $\eta(r,t)$ 'nin kıyıda olan uzaklık r , sismik frekans σ , taban eğimi α , yerçekimi ivmesi g , ve zemin hızı $\zeta(r,t)$ 'nin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Su derinliği h 'nin kıyıda uzaklık ile radyal açının çarpımı olduğundan hareketle dalga genliğini kontrol eden parametrelerin derinlik, sismik frekans ve yerçekimi ivmesi olduğu bulunur.

3. TABAN VE YÜZEY HAREKETİ ARASINDAKİ GENLİK İLİŞKİSİ

Su yüzeyi salınımını veren (8) denklemdeki $\cos(k\alpha)$ terimi zemindeki sismik dalga ile yüzeydeki su dalgası arasında bir genlik transfer faktörü niteliğindedir. Bu faktörün hesaplanabilmesi için (9) yayılma denkleminin çözülmesi gerekir. Bu ise ancak iteratif metodlarla ve sayısal olarak mümkündür. Newton-Rapson metoduna dayalı bir algoritma

ile yapılan çözüm sonucunda değişik $\sigma^2 h/g$ sayıları için Şekil 2’de görülen $k\alpha$ değerleri bulunmuştur.



Şekil 2. Yayılma denkleminin sayısal çözümü

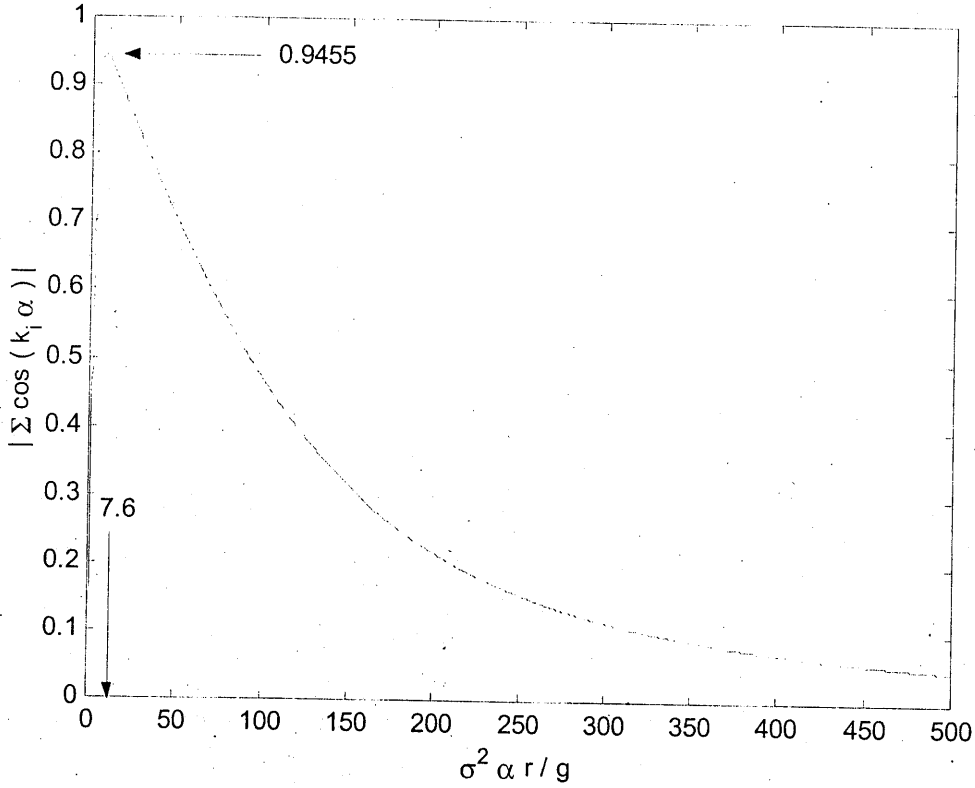
Buradaki k değeri boyutsuz olup Airy-Laplace dalga teorisindeki dalga sayısı gibi dalga boyuyla fiziksel bir bağlantısı yoktur. Şekil 2’de görüldüğü gibi yayılma denkleminin birden çok çözümü vardır. Burada sadece ilk yedi tanesi gösterilmiştir. Yatay eksen üzerindeki $\sigma^2 h/g$ sayısının aldığı değere göre $k\alpha$ sayısı için farklı limitler geçerlidir (10).

$$(k\alpha)_i = \begin{cases} i\pi + \frac{\pi}{2}, & \frac{\sigma^2 r\alpha}{g} = 0 \\ i\pi + \varepsilon_i, & 0 < \frac{\sigma^2 r\alpha}{g} < \infty \\ i\pi, & \frac{\sigma^2 r\alpha}{g} \rightarrow \infty \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, \infty \quad (10)$$

Laplace denkleminin doğrusal olması sayesinde bütün $\cos(k\alpha)_i$ değerleri geçerli olduğu gibi bunların toplamı da problemin geçerli bir çözümüdür. Bu nedenle su yüzeyi oluşacak tüm salınımların superpozisyonu olarak verilir.

$$\eta(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos(k\alpha)_i}{\sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (11)$$

Buradaki $\Sigma \cos(k\alpha)$ terimi genlik transfer faktörüdür, zira yüzey ve zemin dalgalarının genlik oranı bu terimle orantılıdır. Genlik transfer faktörünün $\sigma^2 h/g$ sayısı ile değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Burada genlik transfer faktörünün sıfırdan başlayıp, kritik bir $\sigma^2 h/g$ değerine kadar yükseldiği, ve sonra tekrar sıfıra kadar düştüğü görülmektedir. Şekildeki en yüksek genlik transfer faktörü 0.94 olmakla birlikte bu değer in iterasyon sayısı artıkça üst sınır olarak bire yaklaştığı görülmür. Buradan çıkan önemli sonuç, deprem sonrası oluşan su dalgasının en fazla zemindeki sismik dalga büyüklüğünde olacağıdır.

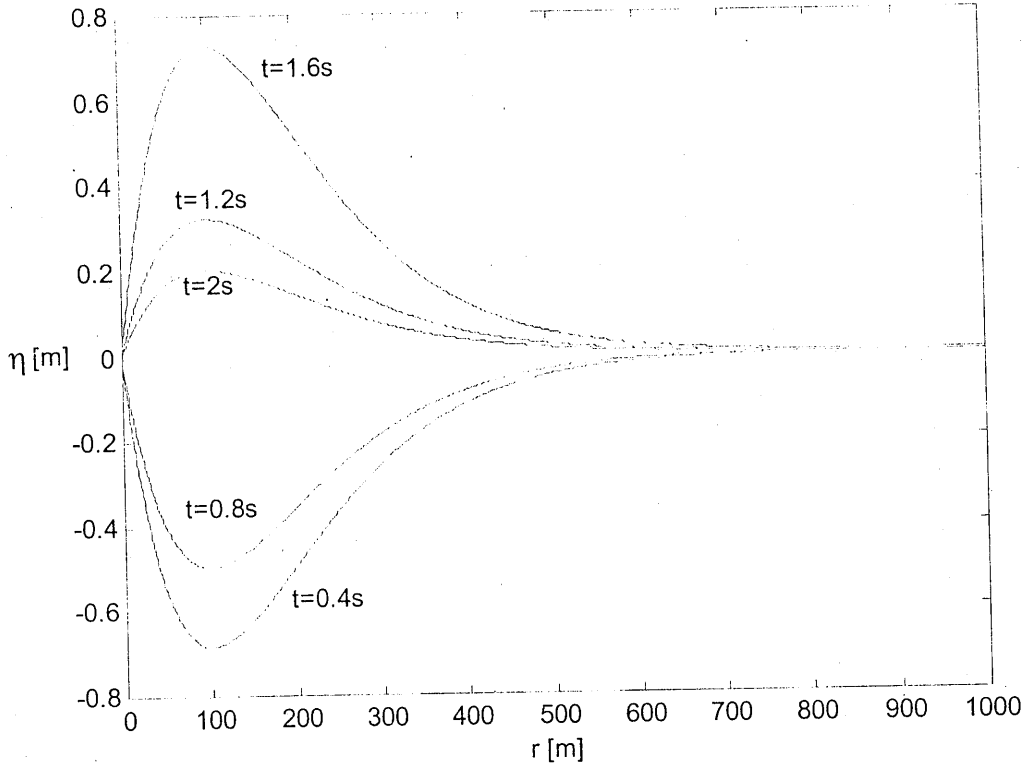


Şekil 3. Genlik transfer faktörünün boyutsuz dalga parametresine göre değişimi

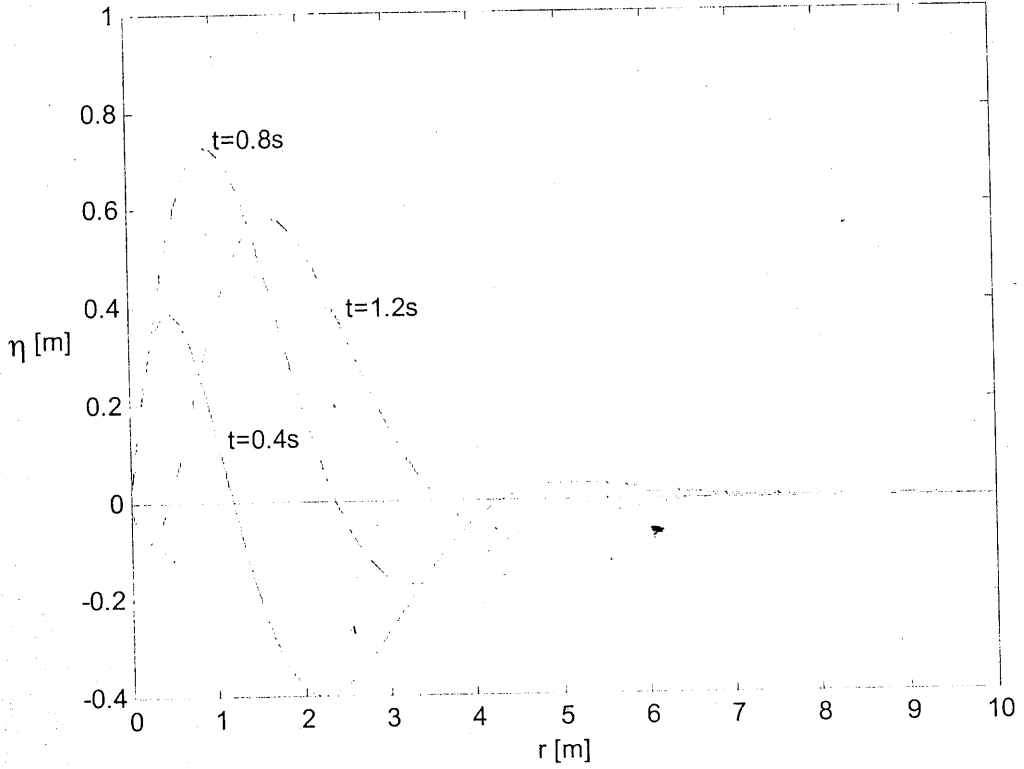
4. DEPREM DALGALARIYLA YAPILAN UYGULAMALAR

Elde edilen analitik çözüme göre deprem sonucu yüzeyde oluşan su dalgası doğrudan sualtı sismik dalgasıyla orantılıdır. Dolayısıyla değişik sismik yer sarsıntıları sonucunda su yüzeyinde değişik dalga hareketleri oluşacaktır. Olası iki sismik dalga tipi için oluşacak yüzey dalgası bilgisayar ortamında incelenmiştir. Bu sismik dalgaların ikisi de zamanda sinuzoidal salınım yapan ve kıydan uzaklaştıkça sönümlenen yer hareketleridir.

Birbirlerinden farklı olan noktaları ise mekanda birinin durağan (Şekil 4a) diğerinin ise kıydan açığa doğru hareket etmesidir (Şekil 4b). Sonuçta su yüzeyinde deniz tabanı hareketine bağlı olarak mekanda durağan veya kıydan uzaklaşarak hareket eden ama her iki kabulde de kıydan uzaklaştıkça sönümlenen dalgalar meydana gelmiştir.

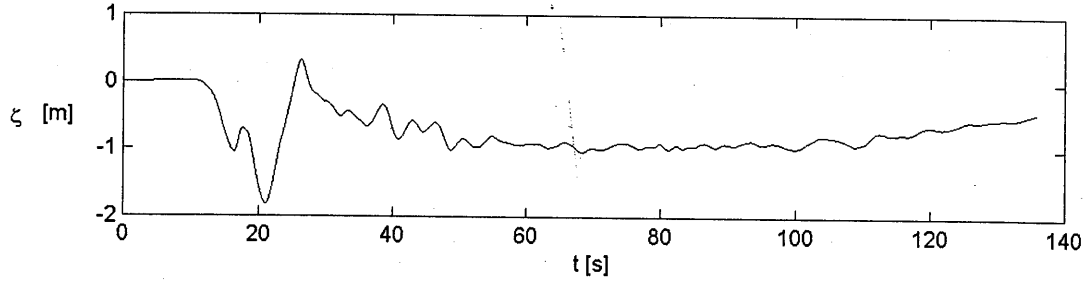


Şekil 4a. Durağan taban hareketi sonucu oluşan su dalgası

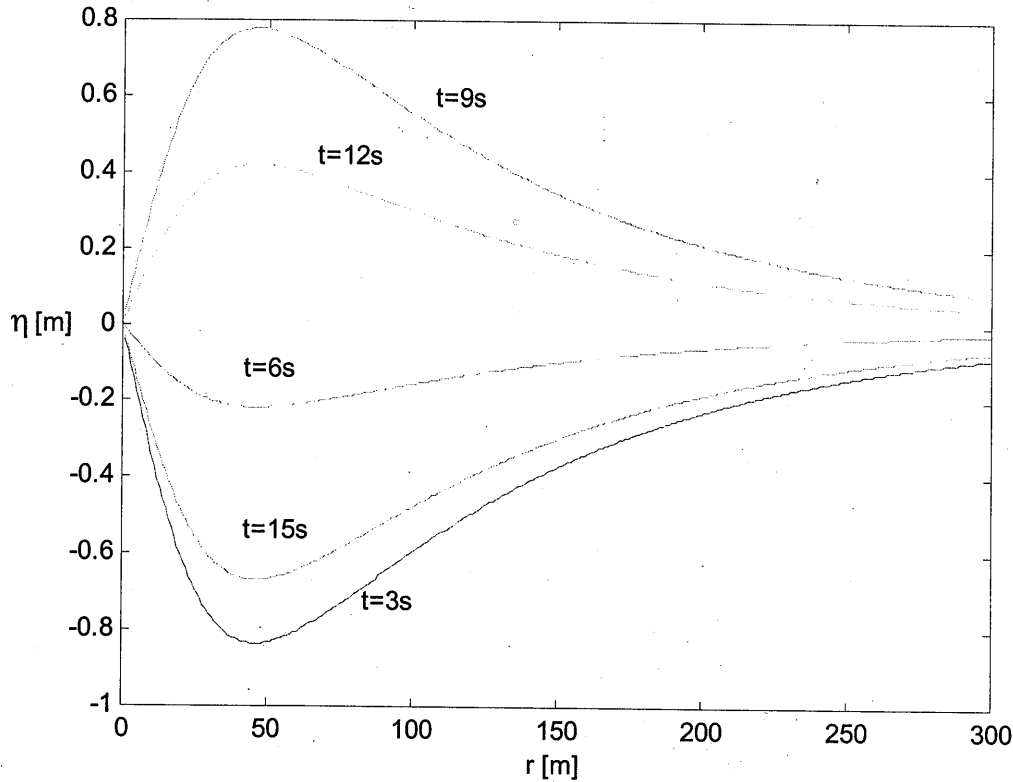


Şekil 4b. İlerleyen taban hareketi sonucu oluşan su dalgası

Yukarda incelenen sismik dalgaların matematiksel fonksiyonlarla gösterilmesine dayanan hesaplamaların yanı sıra, ölçüm sonuçları kullanılarak 1999 Kocaeli Depremi sırasında Değirmendere kıyısında oluştuğu yönünde veriler bulunan su dalgası incelenmiştir. Önceki bölümlerde kapalı formda verilen analitik çözüm, Fourier serisi halinde geliştirilerek, ölçüm sonucu elde edilen dijital yer ivmesi kayıtları ile çözüm üretebilecek bir bilgisayar algoritmasına dönüştürülmüştür. Değirmendere'deki kıyı profili ölçümleri ve Yarımca deprem istasyonundan elde edilen zemin ivmesi ölçümleri (Şekil 5) kullanılarak bilgisayar ortamında yapılan modelleme sonucunda düşeyde yaklaşık 2 m salınım genliğine varan zemin hareketi sonucunda su yüzeyinde oluşan dalganın genliği 0.8 - 1.3 m arasında değişmektedir (Şekil 6).



Şekil 5. Yarımca düşey yönlü sismik yer hareketleri (17 Ağustos 1999)



Şekil 6. Kocaeli depremi sırasında Değirmendere açıklığında oluşan su dalgası

5. SONUÇ

Deprem sonucu oluşan kıyı dalgalarıyla ilgili araştırmalar sonucunda, sismik yer hareketleri ve bunların etkisiyle oluşan yüzey dalgaları arasındaki ilişkiyi tanımlayan analitik bir bağıntıya ulaşılmıştır.

Daha sonra bu analitik çözüm olası sismik yer hareketlerine uyarlanarak test edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, deprem sonucu yüzeyde oluşan su dalgası doğrudan deniz tabanındaki sismik salınımla orantılıdır. Dolayısıyla deniz tabanındaki farklı sismik yer sarsıntıları, su yüzeyinde farklı dalga hareketleri oluşturmaktadır.

Elde edilen analitik çözüm Fourier açılımı ile geliştirilerek 17 Ağustos 1999 depreminde Yarımca'da kaydedilen yer ivmelerine uyarlanacak hale getirilmiştir. Bilgisayar ortamında yapılan model çalışmaları sonucunda ± 2 m'ye varan yer sarsıntılarının, deniz yüzeyinde 0.8 – 1.3 m genlikte su dalgaları oluşturduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- ALTINOK, Y., ALPAR, B., ERSOY, S., YALÇINER, A. C. (1999) "Tsunami Generation of the Kocaeli Earthquake (August 17th 1999) in the İzmit Bay: coastal observations, bathymetry and seismic data," *Turkish Journal of Marine Sciences*, Inst. of Marine Sci. & Man., Istanbul Univ., 5(3), pp. 130-144.
- HAMMACK, J.L., 1973, "A Note on Tsunamis: their Generation and Propagation in an Ocean of Uniform Depth," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 60, Part 4, pp. 769-799.
- HUNT, B., 1988, "Water Waves Generated by Distant Landslides," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 307-322.
- KAZEZYILMAZ, C.M. (2000) "Earthquake Generated Water Waves on Uniformly Sloping Coasts," Lisansüstü Tezi, Boğaziçi Üniv., İnşaat Müh. Böl., İstanbul.
- RAICHLEN, F., LEE, J.J., PETROFF, C., P. WATTS, 1996, "The Generation of Waves by a Landslide: Skagway, Alaska-A Case Study," *Proceedings of the twenty-fifth International Conference on Coastal Engineering*, Orlando-Florida, 2-6 September 1996, Vol. 2, pp. 1293-1306, New York, ASCE.
- TUCK, E.O., L.S. HWANG, 1972, "Long Wave Generation on a Sloping Beach," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 51, Part 3, pp. 449-461.
- WATTS, P., 2000, "Tsunami Features of Solid Block Underwater Landslides," *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, ASCE, in Press.
- WIEGEL, F. L., NODA, E. K., KUBA, E. M., GEE, D. M., G. F. TORNBORG, 1970, "Water Waves Generated by Landslides in Reservoirs," *Journal of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, Vol. 96, No. WW 2, pp. 307-333, May.

YALÇINER, A. C., SYNOLAKIS, C. E., BORRERO, J., ALTINOK, Y., WATTS, P., IMAMURA, F., KURAN, U., ERSOY, Ş., KANOĞLU, U., S. TİNTİ, 1999 "Tsunami Generation in İzmit Bay by the 1999 İzmit Earthquake," *Proceeding of ITU-IAHS International Conference on the Kocaeli Earthquake*, Maçka-İstanbul, 2-5 December 1999, pp. 217-220, İstanbul Technical University, Turkey.

ABSTRACT

The response of water surface to seismic ground motion is investigated for sloping coasts. The problem is defined as potential flow and solved analytically in two-dimensional polar coordinates. The velocity potential and the free surface displacement are found to be a functions of the ground velocity, water depth, seismic frequency and gravitational acceleration. A numerical algorithm is developed to apply the solution to the İzmit Bay during the 1999 Kocaeli Earthquake. The vertical ground velocity and its frequency components are obtained from spectral analysis of measured ground accelerations during the earthquake.

