

## Marmara Denizi'nde tsunami modellenmesi

İsmail KILINÇ\*, H. Kerem CİĞİZOĞLU, Abdul HAYIR

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

*Bu çalışmada Marmara Denizi'nde Tuzla açıklarında bulunan heyelan bölgesindeki bir hareketlenme sonucunda sahilde seçilen belli noktalarda oluşan tsunami dalga yükseklikleri literatürde çok kullanılan bir denizaltı heyelan modeli ile analitik olarak modellenmiş ve heyelan bölgesinin üzerinden itibaren Tuzla kıyılarına kadar nümerik olarak modellenmiştir. Denizaltı heyelanının değişik hızlardaki hareketine göre Tuzla kıyılarındaki dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Çalışmada ele alınan heyelan bölgesi Tuzla açıklarında, 400 m ile 800 m'lik derinlikteki yamaçtır. Seçilen heyelan modeli için heyelanın üzerindeki su kütlesi yüzeyinde oluşacak dalga genliklerine ait zaman serileri analitik yöntemlerle iki ve üç boyutlu olarak elde edilmiştir. Elde edilen zaman serileri sınır-daki hareketi modellemekte ve bu hareket nümerik yöntemle zorlayıcı etki olarak eklenmiş ve kıyıya kadar taşınarak kıyıda dalga genlikleri bulunmuştur. Ayrıca çalışma alanında üç boyutlu olarak tsunami dalgalarının ilerleyişi görselleştirilerek tsunami dalgalarının çeşitli bölgelerdeki etkileri anlaşılmasına çalışılmıştır. Kıyıda kritik noktalarda oluşabilecek maksimum dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Proje sahası içerisinde seçilen lineer doğrultular boyunca Tsunami dalgalarının ilerleyişi gözlenerek batimetrisinin dalga yüksekliği üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Analitik model  $C_r=10$  m/s ile  $C_r=300$  m/s arasındaki farklı heyelan hızları için çalıştırılarak yüzeyde elde edilen dalga genlikleri nümerik modelde kullanılarak farklı heyelan hızlarında kıyıda meydana gelecek dalga yükseklikleri gözlemlenmiştir. Bu çalışmada dünya literatüründe yeni olduğu düşünülen, analitik yöntemle nümerik yöntemin birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Analitik model, nümerik model, denizaltı heyelanı, tsunami, Marmara Denizi.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: İsmail KILINÇ. ismail.kilinc@aes.com; Tel: (505) 667 29 70.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir denizaltı heyelanının İstanbul kıyılarına etkileri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 23.10.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 25.11.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Modeling of tsunami waves in the Sea of Marmara

### Extended abstract

*Istanbul is the most important city of Turkey in the view of economical, social and cultural aspects. Because of the active faults in the Sea of Marmara, there is always an expectation of an important earthquake that will be harmful for the city and also for the other big cities that are located around the Sea of Marmara such as Bursa, İzmit, Tekirdağ and Yalova. In addition to the earthquake, a tsunami which occurs in the Sea of Marmara can also be a very destructive hazard for Istanbul and other cities around the Sea of Marmara. There are many tsunamis that happened in the Sea of Marmara in the history. The main reason of these tsunamis is the slumps and the landslides that were triggered by an earthquake. One of the most important reasons of the tsunamis on the earth is the submarine landslides. Movement at the sea bottom stirs the above water mass. This causes tsunami waves and these waves damage the coastal areas seriously.*

*The aim of this study is to find the maximum wave heights of possible tsunamis around Tuzla coasts using different scenarios. A submarine landslide that may be occurred after an earthquake or because of any other reason in the Sea of Marmara at the region near to northeast Marmara coasts is taken as the reason of the tsunami in the simulations that are performed in the study.*

*As the solution method, one hybrid method was developed. The main objective of this method is to combine an analytical solution presenting near-field tsunami amplitudes above the submarine mass failure with a numerical solution indicating the tsunami amplitudes in the coastal regions.*

*An analytical model that is frequently used in the literature was applied to find the amplitudes of tsunami waves at the surface of Sea of Marmara above the submarine landslide region. These tsunami waves will be directly affected from the water depth of the Sea of Marmara. It will be also affected by the shore profile when traveling to the coasts. Because of this reason, a computational fluid dynamics model which is based on finite elements method is used in the regions that are very close to the coasts. The model solves the Navier-Stokes equations.*

*Analytical and numerical models were used together in this study. The analytical model is used from the submarine up to sea surface and the numerical model is used for modeling of the movement of the tsunami waves at the sea surfaces. In the border of two models the outputs of analytical model is used as the inputs of numerical model that means the initial and boundary conditions of numerical model is obtained from the analytical model. The output of the analytical model is the tsunami wave amplitudes for each minute of a 900 seconds period.*

*The submarine landslide type that is named as Model2 in the literature was applied in this study. The model was applied to the submarine landslide region that is located between 400m and 800m depth of water surface around Tuzla coast.*

*Time series of the wave amplitudes at the top of the water mass over the landslide region for the landslide model were calculated by using analytical model. These time series were used as inputs of the numerical model. Then the numerical model is performed for simulating the wave propagation in the shallow waters of shore of Tuzla.*

*The simulations for 13 different landslide velocities are performed for the previously determined landslide model on the selected mesh. These velocities were ranging between  $C_r=10$  m/s and  $C_r=300$  m/s. As a result of this, the effects of landslide model and different landslide velocities to the amplitudes of the tsunami waves were observed clearly.*

*In another stage the landslide type and submarine landslide velocities were taken as constant and the thickness and width of the sliding mass were changed. The results of these simulations show that there is a linear relation for the thicknesses and the widths with the wave heights.*

*The equations used in numerical modeling were Saint Venant equations that are derived from Navier-Stokes equations. The equations used in numerical modeling were also changed in this study in order to see the effects of both dispersive and non-dispersive waves to the coast.*

**Key words:** *Analytical modeling, numerical modeling, submarine landslide, tsunami, Sea of Marmara.*

## Giriş

Marmara Denizi yaklaşık olarak 240 km uzunluğa, 70 km genişliğe ve 11500 km<sup>2</sup>'lik bir alana sahip olmakla birlikte stratejik olarak Türkiye'nin en önemli kıyı bölgelerinin bulunduğu denizdir (Tüysüz, 2003). Türkiye'nin ekonomik ve endüstriyel faaliyetlerinin önemli bir bölümü Marmara Bölgesi şehirlerine dağılmaktadır ayrıca resmi rakamlara göre ülke nüfusunun yüzde 24'ü de bu bölgede yaşamaktadır. Bunun yanında ülkedeki banka mevduatlarının yüzde 49'u, bütçe gelirlerinin yüzde 59'u ve gayri safi milli hâsılının yüzde 39'u bu bölgede bulunmaktadır (Yaltrak, 2005).

Türkiye'nin kalbi sayılabilecek bu bölgede, yıkıcı ve büyük depremleri meydana getiren faylar bulunmaktadır. Bu faylarda meydana gelecek bir hareketlenme önemli depremlerin yanında tsunami tehlikesine de yol açabilecektir.

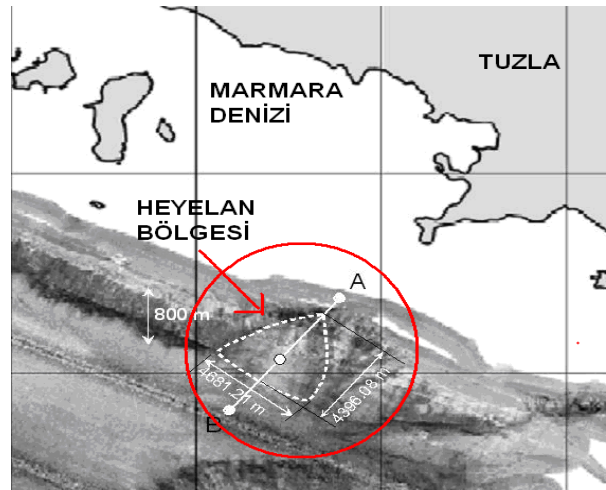
Tsunami afetlerinde, yerleşim bölgelerinde en çok etkilenen kesimler doğal olarak kıyı bölgeleridir. Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde ve sonrasında oluşabilecek bir tsunami kıyı bölgelerini önemli ölçüde etkileyecektir. Tarihi kayıtlarda yapılan incelemelerde bu bölgede meydana gelen doksanından fazla tsunami saptanmıştır (Altınok vd., 2001). Denizaltı heyelanları Marmara Denizi için tsunamilerin en önemli oluşturuşudur.

Bu çalışmada, kuzeydoğu Marmara kıyılarına yakın bölgede bulunan denizaltı heyelan bölgesindeki bir hareketlenme durumunda oluşabilecek dalga hareketleri ve bunların kıyıya etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle heyelan bölgesinin analizi ve çeşitli durumlarda oluşabilecek heyelanlar ile bu heyelanlar sonucunda su yüzeyinde meydana gelecek dalga genliklerinin analitik model kullanılarak hesaplanması ve yüzeyde oluşacak dalgaların Tuzla kıyılarına kadar olan seyrinin ve kıyıdaki davranışının nümerik ve analitik modeller hibrit olarak kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır.

1999 İzmit depreminden sonra Marmara Denizi'nin batimetrisi, sismisitesi ve fay geometrisine yönelik çalışmalar önce MTA Genel Müdür-

lüğü'nün Sismik-I ve Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD) Çubuklu-I gemileri ile başlamıştır. Daha sonra TÜBİTAK koordinatörlüğünde Fransız, İtalyan ve Amerikalı bilim adamları tarafından, LeSuroit, Odine Finder, Marion Dufraine gibi gelişmiş bilimsel araştırma gemileri ile araştırmalar yapılmıştır (Şeşeoğulları, 2006; Alpar vd., 2000).

Çalışmalar sonucunda hazırlanan Marmara Denizi batimetri haritasına göre Marmara Denizi içerisinde, güney kesiminde 10, kuzey kenarda ise 7 büyük denizaltı heyelan bölgesi saptanmıştır (Yaltrak, 2005). Bu heyelan bölgelerinden, İstanbul ve Marmara kıyılarına yakınlığı açısından, bir tanesi Bakırköy açıklarında, bir tanesi de Tuzla açıklarında olmak üzere önemli iki alan vardır. Bu çalışmada Tuzla açıklarındaki heyelan bölgesi dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan heyelan

Şekil 1'de görülmekte olan bu heyelan bölgesi literatürde mevcut hareket etme senaryolarına göre modellenerek literatürde yeni olan analitik yöntemle nümerik yöntemin birlikte kullanılması gerçekleştirilmiştir. Her iki aşama içerisinde çeşitli bilgisayar yazılımları yapılarak ve analitik ve nümerik paket programlar kullanılarak çeşitli heyelan senaryolarına göre pek çok simülasyonlar yapılmıştır. Pek çok simülasyondan ve sonuçlardan bir kısmı bu makalede sunulmuştur. Bu çalışmanın başka bölgelerde de heyelandan dolayı oluşabilecek olan dalgaların

incelemesinde ve kıyılarına olan etkilerinin belirlenmesinde örnek olması amaçlanmıştır.

Sonuç olarak Marmara Denizi'nde depremlerin ve tsunamilerin geçmişte olduğu gibi, gelecekte de olacak olması bilimsel bir gerçektir. Kaçınılmaz olan bu gerçeğin önüne geçilemeyeceği için, deprem ve tsunami zararlarının azaltılması çalışmalarının daha ciddi ve hızlı bir şekilde ele alınması gerekir.

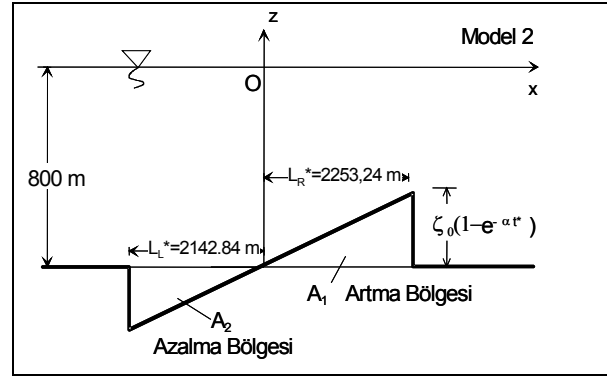
### Kullanılan denizaltı heyelan modeli

Denizaltı heyelanlarına deniz tabanındaki eğimli arazilerde çatlaklı kayalar veya granüllü sedimentler olarak sıkça rastlanmaktadır. Bu sediment parçacıkları deprem gibi tektonik erozyona veya sismik şekil değiştirmelere maruz kaldığında gözenekli su basıncında azalma meydana gelir ve sedimentlerin oluşturduğu parçanın dayanımı azalır. Kasırgalar ve rüzgâr dalgaları, sediment içerisinde birikmiş olan gözeneklerdeki gazların varlığı gibi sebepler sedimentin mukavemetinin azalmasına sebep olabilir (Hampton, 1972).

Bu etkiler kuvvet dengelerini bozar. Eğer kuvvet dengesi bozulursa hareket başlar ve bu sedimentin veya kayaların hareketi denizaltı heyelanı olarak isimlendirilir. Bu bölgede bulunan denizaltı heyelanı eğer yeteri derecede hızlı hareket ederse tsunami oluşturabilir. İlk olarak bu heyelanın nasıl hareketleneceği sorusu akla gelir. Heyelanın hareketlenmesinde sedimentin zayıflığı, oluşmuş olduğu yapının kimyasal ve biyolojik özellikleri, bulunmuş olduğu durum ve geometrik yapısı önemli rol oynar (Hampton, 1972).

Denizaltı heyelanları genellikle yerçekimi kuvvetinin etkisiyle hareket eder. Eğer hareket eden sediment viskoz bir akışkan ise, bu olay kütle akışı (mass flow) olarak isimlendirilir. Hareket eden kütle içerisinde birçok ayrı düzlemlere sahip olan yamaçların temel rijit parçalarının çevrimsel ve ötelemeli hareketleri bir heyelanı oluşturur (Trifunac vd., 2002). Toplanmayan heyelanların son parçası eğer sediment heterojense akış plastik akış (debris flow) olur. Çevrintili akımlar akışkan türbülansı tarafından zorlanan sediment parçacıklarının zayıf kısımlarını hareket ettirir (Lee vd., 1993).

Denizaltı heyelanları 2500 m'den daha küçük derinliklerde olmak koşulu ile hemen hemen her derinlikte olabilir; fakat çoğunlukla 800 m ve 1000 m arasında bulunurlar. Benzer şekilde denizaltı heyelanları bütün derinliklerde sonlanabilir (Booth vd., 1993). Ölçülen denizaltı heyelanların uzunlukları 0.3 km ile 380 km arasında değişir ve genellikle heyelanın kalınlığı da 0.2 km ile 50 km arasında değişmektedir (Trifunac vd., 2001). Çoğu heyelan 10 km<sup>2</sup>'lik bir alana sahiptir. En çok denizaltı heyelanları (% 56) 40 veya daha küçük eğimli bölgelerde oluşur. 10 km<sup>2</sup>'den daha büyük olan heyelanlar ise 30 ila 40'lik yamaçlarda meydana gelir (Booth vd., 1993). Heyelanların çoğu (% 35) plastik akış, (% 20) tabakalı akış, (% 17) taneli akış ve (% 11) blok kayması şeklindedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan heyelan modeli

Bu çalışmada Şekil 2'de gösterilen basit kaynak modeli  $10\text{m/s} \leq c_T \leq 300\text{m/s}$  hızlar arasında  $\zeta_0=15-25$  m kalınlıktaki modeller ele alınmaktadır. Bu model literatürde çevrintili heyelan veya Model2 olarak adlandırılmıştır (Trifunac vd., 2001).

Şekil 2'de kütle korunumu ilkesi uygulandığında  $L_{azal}/L_{top}=(c_L+c_C)/(c_R-c_C)$  ve  $\zeta_1/\zeta_0=(c_R-c_C)/(c_L+c_C)$  olur. Model-2'de heyelanın artma ve azalma bölgelerindeki genlikler zamanla derece derece artmakta ve her zaman anında X'in lineer bir fonksiyonu olmaktadır. Artma bölgesinin sonunda genlik  $\zeta(c_R t^*, y; t)=\zeta_0(1-e^{-\alpha t^*})$  olmaktadır. Bu modelde genlik  $\zeta(x, y; t)=\zeta_0(x/c_R t)(1-e^{-\alpha t})$  denkleminde X ve t'ye bağlı olarak değişmektedir. Bu bölgedeki eğim zamanla derece derece büyür ve üst yüzey zamanla saatin ters yönünde

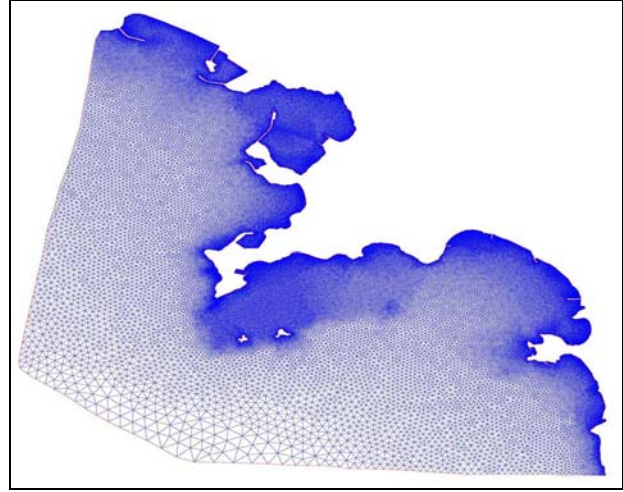
döner. Toplama ve azalma bölgelerindeki son uzunluklar sırasıyla  $L_{top}=t^* c_R$ , ve  $L_{azal}=t^* c_L$ 'dir. Oranlar  $L_{azal}/L_{top}=c_L/c_R$ ,  $A_1=(1/2)c_R t^* \zeta_0 (1-e^{-at})$  ve  $A_2=(1/2)c_L t^* \zeta_0 (1-e^{-at})$  şeklinde yazılabilir. Bu model için  $c_R=c_L$  ise kütle korunumu vardır.

Burada  $c_L, c_c$  ve  $c_R$ , kaynak alanındaki toplama ve azalım bölgesindeki hızları göstermektedir. Ayrıca  $L_R=c_R t^*$  karakteristik uzunluğu gösterir ve kütle korunumundan  $A_1=A_2$ 'dir. Model-2'de genellikle  $c_R=c_L$  değilse,  $A_1 \neq A_2$ 'dir. Burada  $L_R=c_R t^*$  karakteristik uzunluğu gösterir.  $\zeta_0$  toplama bölgesinin kalınlığını  $\zeta_1$  azalma bölgesinin kalınlığını göstermektedir. Artan ve azalan bölgelerin hacimleri eşit olmak durumundadır ( $A_1 W = A_2 W$ ) (Trifunac vd., 2001).

### Kullanılan nümerik yöntem

Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler sonucunda nümerik modelleme yöntemleri diğer mühendislik problemlerinin çözümünde olduğu gibi hidrolik mühendisliği problemlerinin çözümlerinde de sıkça kullanılmaya başlanılmıştır.

Bu çalışmada Nümerik modelleme yöntemi olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde çözülecek olan problem sonlu boyutta çok sayıda elemana bölünerek analiz edilmesinden dolayı yönteme Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) denmektedir (Şekil 3). Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz yöntemleridir. Argyis ve Kelsey (1960) virtüel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğerleri (1956), bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ise ilk defa Clough (1960) tarafından ifade edilmiştir. Metodun üç boyutlu problemlere uygulanması, iki boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir. Bu çalışmada kullanılan nümerik modeller Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesine dayanmaktadır.



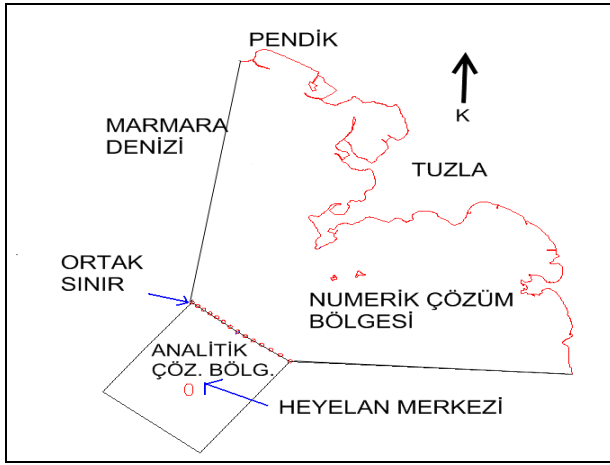
Şekil 3. Proje bölgesi sonlu eleman ağ modeli

### Yapılan simülasyonlar

Öncelikle Marmara Denizi tabanında meydana gelebilecek bir heyelan hareketi için analitik yöntem kullanılarak seçilen heyelan modeline göre yapılan hesaplamalar sonucunda su yüzeyinde daha önce belirlenen noktalarda oluşan hareketin düşey eksenindeki zamanla değişimi elde edilmiştir. Daha önce belirlenen bu noktalar analitik çözüm bölgesi ile nümerik çözüm bölgesinin sınırında bulunmaktadır. Analitik yöntem temelde süreklilik denkleminde dayanmaktadır. Bu değerler aslında deniz yüzeyinde oluşan dalga yüksekliklerinin zamanla değişimidir ve nümerik yöntemin girdileri olarak kullanılmaktadır. Marmara Denizi'nin heyelan bölgesinden itibaren Tuzla ve civarı sahillerine kadar olan kısmını kapsayan yüzeyinde ise sonlu elemanlar yöntemine dayanan nümerik modelleme kullanılarak dalga hareketinin zamanla değişimini gösteren simülasyonlar yapılmıştır (Şekil 4). Bu çalışmada kullanılan batimetri haritası ise Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD) tarafından hazırlanmış olan haritadır.

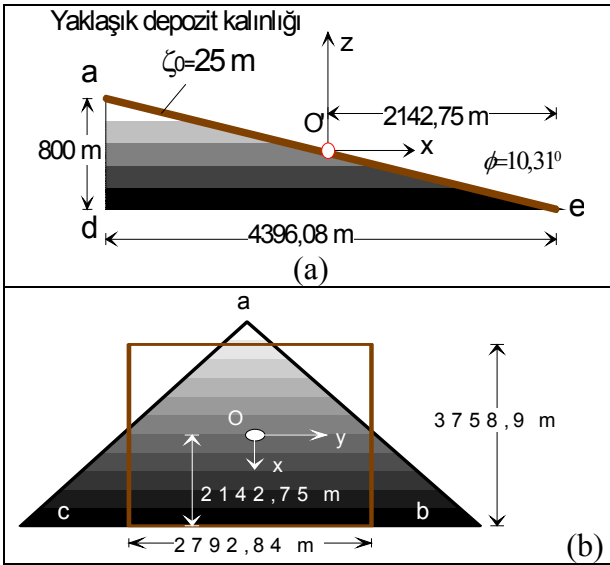
Tuzla yakınlarında bulunan heyelan ve boyutları Şekil 5'te gösterilmektedir. Heyelanın ortalama derinliği 800 m'dir ve en yüksek noktası da 400 m'de bulunmaktadır. Heyelanın tepe ve taban noktaları arasındaki mesafe 800 m'dir. Bu verilere göre heyelanın ortalama eğimi  $\theta=10.31^\circ$  olarak hesaplanmıştır. İncelenen heyelanın yü-

zey alanı üçgene benzemekte ve yaklaşık ölçüleri; tabanı 4681.21 m ve yüksekliği 4468.27 m'dir.



Şekil 4. Çözüm bölgeleri

Denizaltı heyelanının hareketinin matematik modelini kurabilmek için bazı basitleştirmelerin yapılmıştır. Heyelan yüzeyi ideal üçgen yüzey olarak ve kalınlığı da  $\zeta_0$  olarak basitleştirilmiştir (Şekil 5a). Daha sonra üçgen yüzeyi, alanı üçgen yüzeyin alanına eşit olacak şekilde dikdörtgen yüzeye dönüştürülmüştür (Şekil 5b).



Şekil 5. Heyelanın boyutları

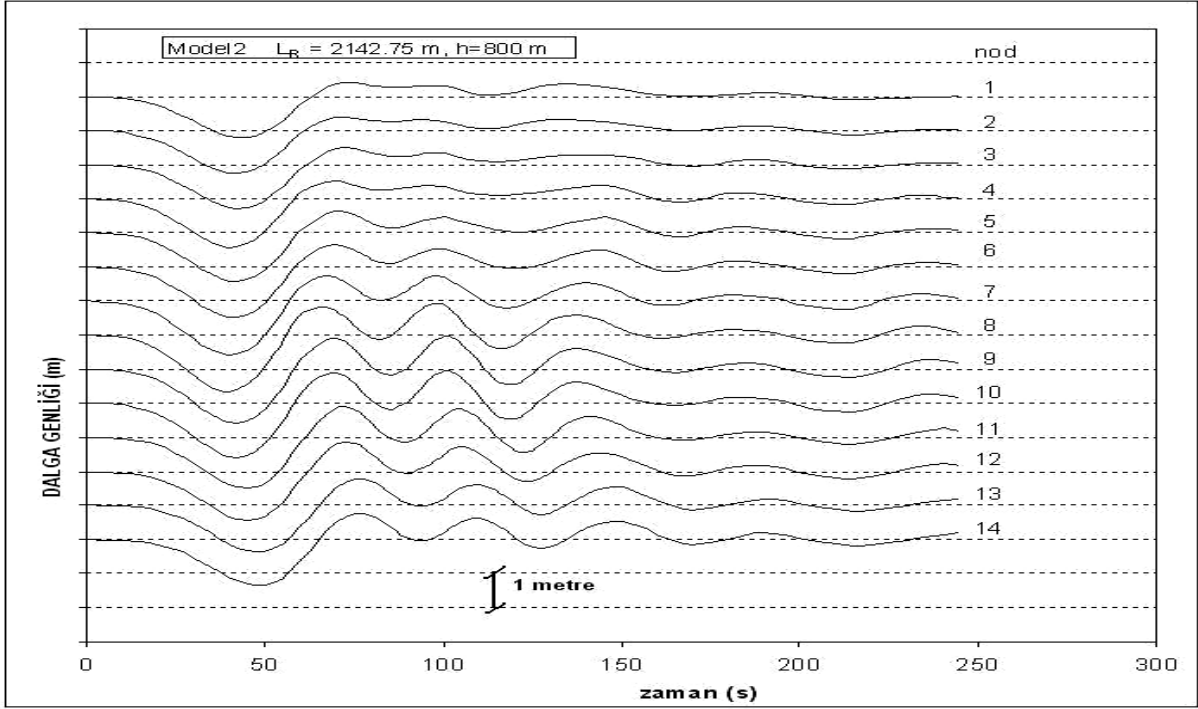
Analitik hesaplamalar heyelanın ortalama boyutları dikkate alınarak düzgün geometri için yapılmıştır. Deprem sonucunda hareket etmesi

beklenen, 400 m ile 800 m'lik derinlikteki yamaçta bulunan bu heyelanın yakın bölgede oluşturacağı tsunami genlikleri analitik program kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda heyelan hızı olarak 10 m/s'den 300 m/s'ye kadar değişen farklı ortalama heyelan hızları alınmıştır. Bu heyelan hızlarına göre analitik model ve nümerik model sınırında bulunan 14 noktaya ait su seviyelerinin zaman serileri 900 saniyelik süreçte her bir saniye için hesaplanmıştır. Şekil 6'da örnek olması açısından ortalama heyelan hızı 30 m/s olan simülasyon için su yüzeyindeki 14 noktada elde edilen su seviyeleri sunulmuştur. Yakın bölge için elde edilen tsunami genliklerine ait sonuçlar, dalgaların sığ bölgelere yaklaşmaları ile tabandan ve kıyı profilinden etkilenmeye başlayacaklardır. Bu nedenle batimetrisinin etkili olmaya başladığı kıyı bölgelerinde, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) dayanan ve Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) analizi yapan nümerik yöntem ile simülasyonlar yapılmış ve tsunaminin kıyıda oluşacağı en büyük dalga yükseklikleri bulunmuştur.

Bu makalede, farklı heyelan hızları için yapılan çözümlerden elde edilen tsunami genlik değerlerinden örnek olarak bir kısmı sunulacaktır. Bu amaçla kıyı şeridi üzerinde seçilmiş 30 noktada farklı heyelan hızlarında oluşan en büyük dalga yükseklikleri bulunmuştur. Seçilen 30 noktalının uydudan görüntüsü Şekil 7'de görülmektedir. Denizaltı heyelanının ortalama hızı 10 m/s olduğu durumda kıyıda seçilen 30 noktada oluşan maksimum ve minimum su seviyeleri Şekil 8'de sunulmuştur. Maksimum su seviyesinden kasıt bu noktada suyun kabarmabileceği en yüksek kottur. Minimum su seviyesi ise o noktada oluşan en büyük dalga çukurunun su seviyesidir.

Denizaltı heyelanının ortalama hızı 30 m/s olduğu durumda kıyıda seçilen 30 noktada oluşan maksimum ve minimum su seviyeleri Şekil 9'da sunulmuştur.

Denizaltı heyelanının ortalama hızı 89 m/s olduğu durumda kıyıda seçilen 30 noktada oluşan maksimum ve minimum su seviyeleri Şekil 10'da sunulmuştur.

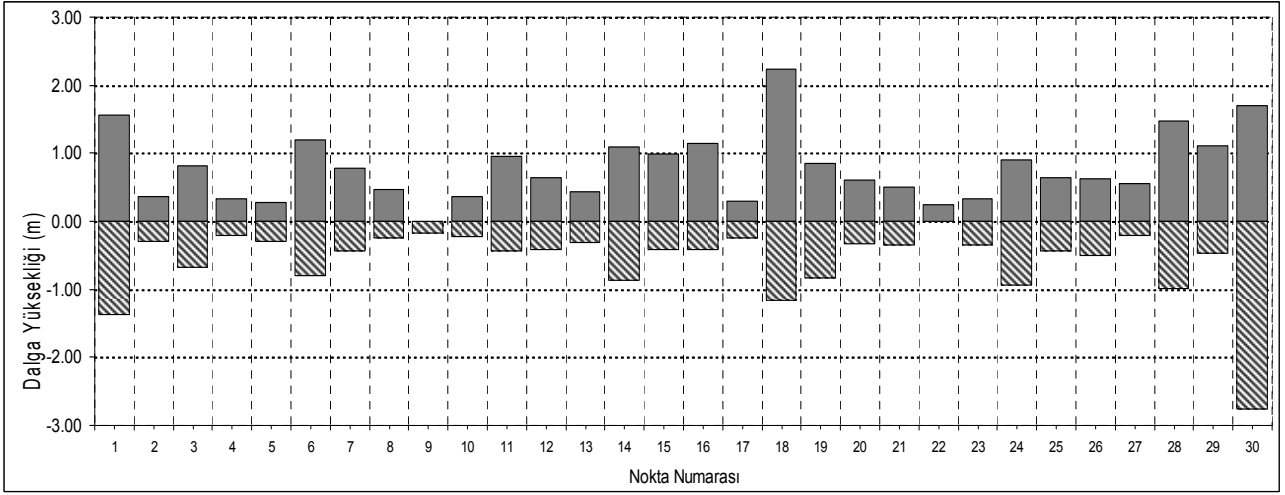


Şekil 6. Ortalama hızı 30 m/s olan heyelan sonucunda heyelanın üzerindeki deniz yüzeyinde oluşan zaman serileri

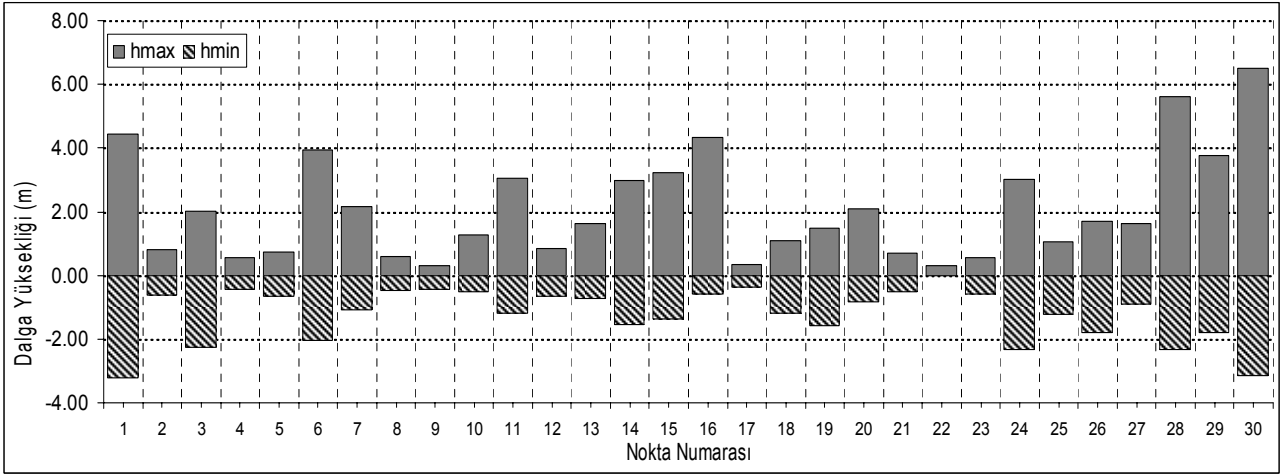


Şekil 7. Kıyı şeridinde seçilen 30 nokta

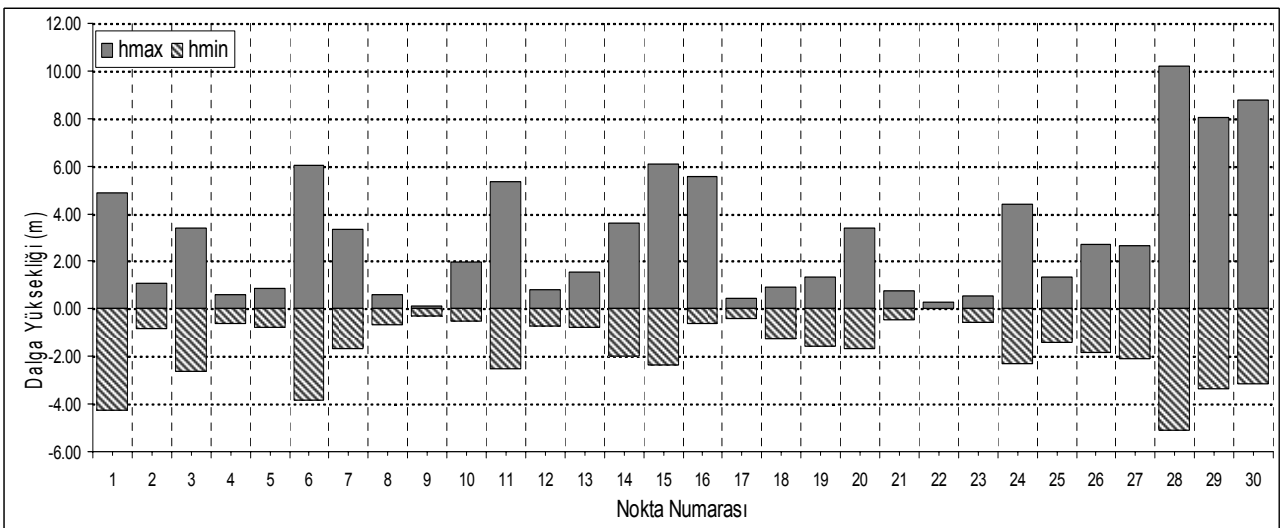
İ. Kılınç ve diğerleri



Şekil 8. Ortalama hızı 10 m/s olan heyelan sonucunda kıyıdaki 30 noktadaki su seviyeleri



Şekil 9. Ortalama hızı 30 m/s olan heyelan sonucunda kıyıdaki 30 noktadaki su seviyeleri



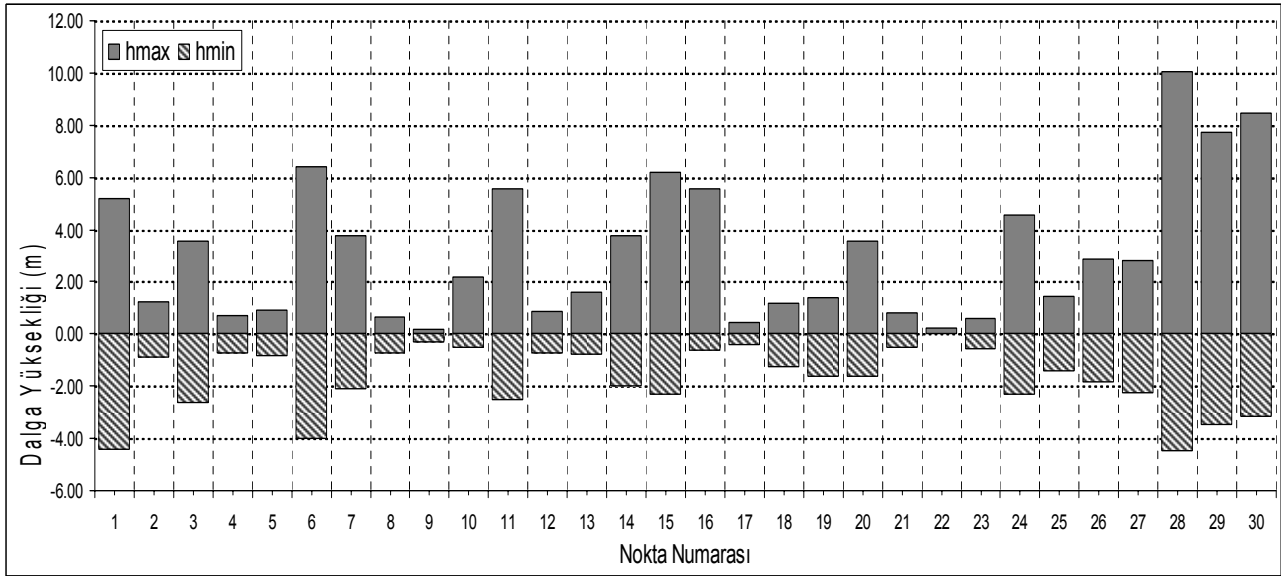
Şekil 10. Ortalama hızı 89 m/s olan heyelan sonucunda kıyıdaki 30 noktadaki su seviyeleri



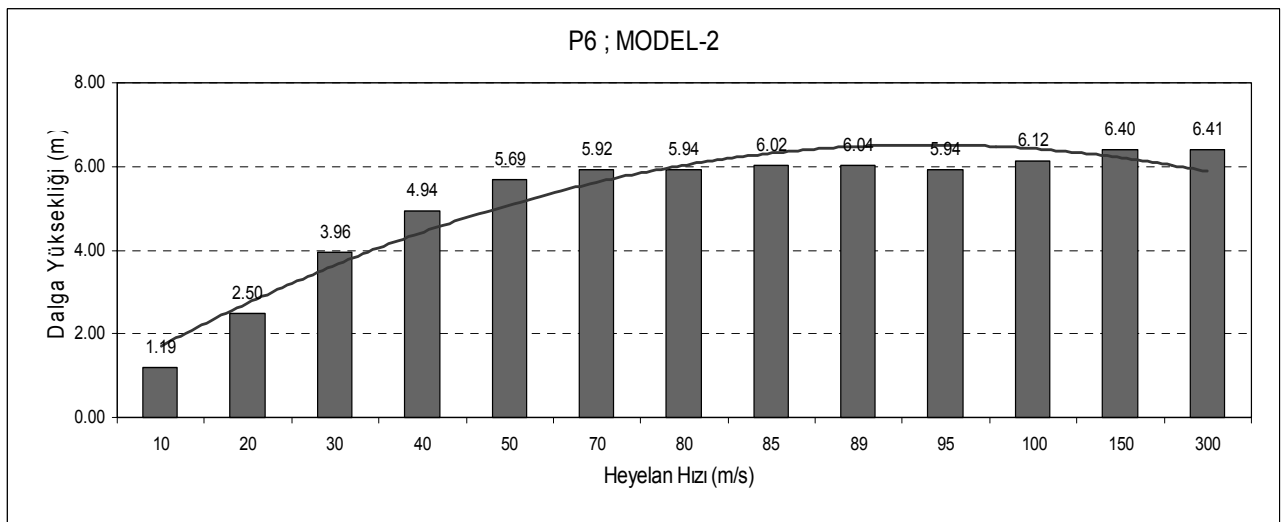
Denizaltı heyelanının ortalama hızı 300 m/s olduğu durumda kıyıda seçilen 30 noktada oluşan maksimum ve minimum su seviyeleri Şekil 11’de sunulmuştur. Kıyı şeridinde bulunan 30 noktada oluşan tsunami yükseklikleri 10 m/s heyelan hızından 300 m/s heyelan hızına kadar olan 13 farklı ortalama heyelan hızına göre elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler her bir nokta için ayrı ayrı değerlendirildiğinde Şekil 11’deki durum ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde de anlaşılacağı üzere tsunami dalga yükseklikleri heyelan hızı arttıkça önceleri hızla yükselmekte ancak heyelan hızı 90

m/s-100 m/s’den daha fazla olduğu durumlarda çok da önemli bir artış göstermemektedir. Seçilen 30 nokta için yapılan çalışmanın Şekil 12 ve Şekil 13 ve Şekil 14’te 6, 15 ve 24 numaralı noktalar için yapılan çizimleri sunulmuştur.

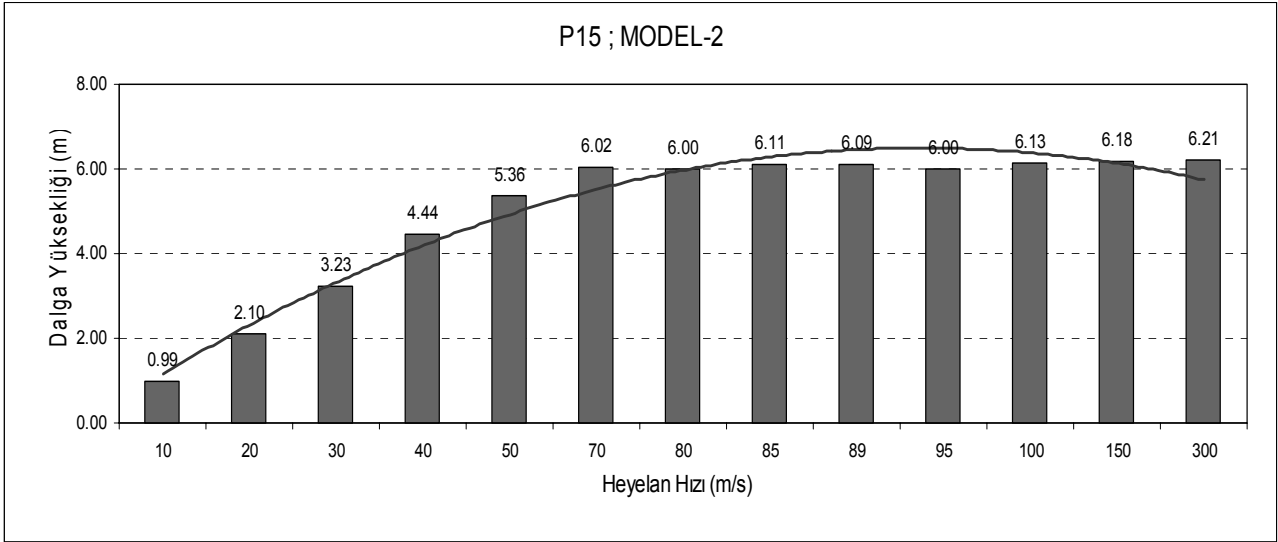
Literatürde yapılan çalışmalarda heyelanın hızları ve geometrileri ile ilgili pek az çalışmalar mevcuttur. Analitik yöntem kullanılarak heyelanın meydana geldiği bölgede oluşan tsunami genliklerinin heyelan hızına bağlı olarak nasıl değiştiğini inceleyen bazı çalışmalar mevcuttur (Todorovska ve Trifunac, 2001; Trifunac vd., 2001). Bu çalışmalara



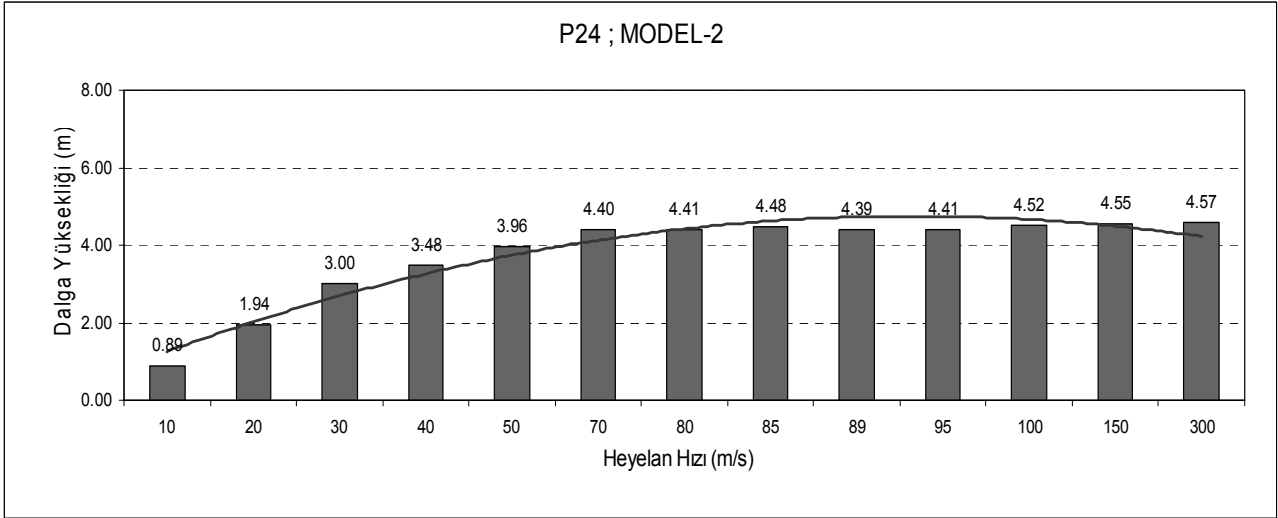
Şekil 11. Ortalama hızı 300 m/s olan heyelan sonucunda kıyıdaki 30 noktadaki su seviyeleri



Şekil 12. Farklı heyelan hızlarında P6 noktasındaki en büyük dalga yükseklikleri



Şekil 13. Farklı heyelan hızlarında P15 noktasındaki en büyük dalga yükseklikleri



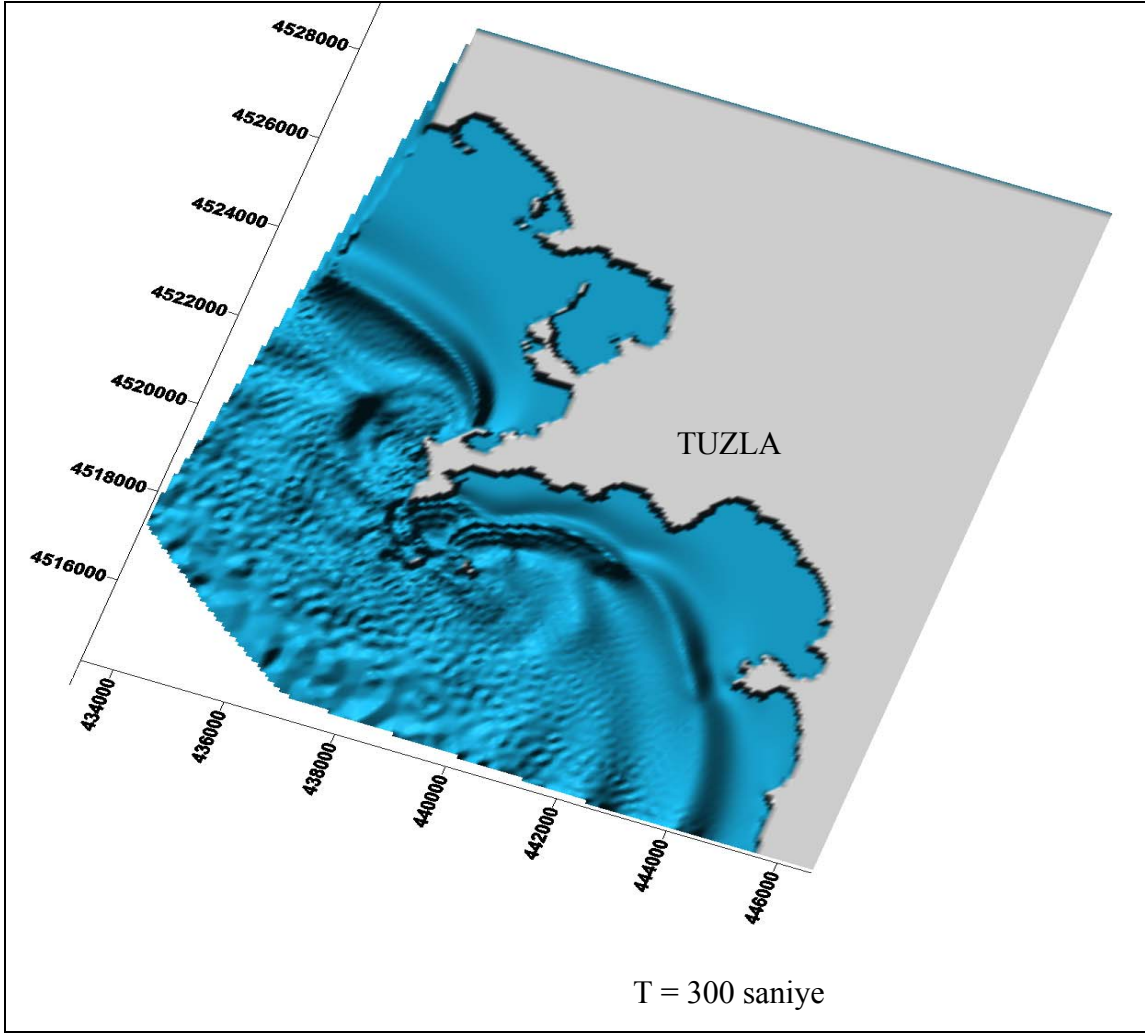
Şekil 14. Farklı heyelan hızlarında P24 noktasındaki en büyük dalga yükseklikleri

göre eğer heyelan hızı, tsunaminin dalga hızına yakın ise bir odaklaşma meydana gelmekte ve genlikler en büyük değerlerini almaktadır. Daha sonra yavaşça azalarak sabitlenmektedir. Ayrıca dalga hızından daha düşük hızlarda önce hızlanarak azalmakta ve sıfır olduğunda sıfır olmaktadır. Bu çalışmada hibrit bir yöntem (Analitik ve nümerik yöntem birlikte) kullanılarak kıyı bölgelerinde bazı noktadaki su dalgası genlikleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan da görüleceği üzere, seçilen noktadaki tsunami genlik değerleri, heyelan hızının belirli bir değerine kadar hızlı bir şe-

kilde yükseliş göstermektedir ve sonrasındaki artışlar azalarak devam etmektedir. Dalgaların kıyıya doğru hareketinin kuşbakışı görüntüsü Şekil 15'te sunulmuştur.

## Sonuçlar

Sosyal, kültürel, ekonomik, tarihi, siyasi ve stratejik olarak Türkiye'nin en önemli kıyı bölgelerinin bulunduğu deniz olan Marmara Denizi'nde aynı zamanda yıkıcı ve büyük depremleri meydana getiren ülkemizin en önemli fayları bulunmaktadır. Bu faylarda meydana gelecek bir hareketlenme önemli tsunami felaketlerine yol açabilecektir.



Şekil 15. Çözüm bölgesinde elde edilen hareketli ve üç boyutlu simülasyonların belirli zamanlardaki ekran kesitleri

Bu çalışmada kuzeydoğu Marmara kıyılarına yakın bölgede bulunan denizaltı heyelan bölgesindeki bir hareketlenme durumunda oluşabilecek dalga hareketleri ve bunların kıyıya etkiler incelenmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle heyelan bölgesinin analizi ve çeşitli heyelan alternatifleri ile bu alternatiflerin su yüzeyinde oluşturacakları dalga genlikleri analitik model kullanılarak hesaplanmış ve yüzeyde oluşacak dalgaların Tuzla kıyılarına kadar olan seyri ile kıyıdaki davranışı da nümerik modeller kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada çevrintili heyelan tipine göre yapılan simülasyonlar sonucunda denizaltında oluşan heyelanın tipinin de kıyıda oluşacak tsunami dalga yüksekliğinde etkili olduğu gö-

rülmüştür. Şekil 12, 13 ve 14'te görüldüğü gibi 70-80 m/s'den düşük heyelan hızları için her iki model sonunda kıyıda oluşan dalga yüksekliklerinin farkı bazen 1.5-2 katına kadar çıkabilmektedir. Ancak yüksek hızlarda bu fark daha da azalmakla beraber merteye olarak da birbirine yakınlaşmaktadır. Bu sebeple Marmara Denizi'nin bu bölgesinde bulunan denizaltı heyelanının jeolojik ve topoğrafik özelliklerinin ilgili araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmesi ve heyelanın matematiksel modelinin netleştirilmesi önem arz etmektedir.

Çalışmanın bu makede sunulan kısmında Tuzla kıyılarında her biri farklı özelliklerde bulunan 30 farklı noktada oluşan tsunami yükseklikleri hesaplanmıştır. 13 değişik heyelan hızı için simülasyon

yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre literatürde başka araştırmacılar tarafından ulaşılan değerlere yakın maksimum dalga yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Örneğin bu tez çalışmasında Tuzla yarımadası civarında muhtelif noktalarda 5-6 metre yüksekliğinde maksimum dalga yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Başka araştırmacıların aynı heyelan kütlelerinin hareketi için bu bölgede elde ettiği sonuçlar da 5.5 metre civarındadır. Yalçiner ve diğerleri 2002 yılında aynı bölgedeki çamur kayması ile ilgili yaptıkları çalışmada buna yakın sonuçlar bulmuştur. Tarihi kayıtlarda 1509 depremi sonucunda Yenikapı surlarını aşan 6 metrelik dalgalardan bahsedilmektedir (Altınok vd., 2001), ayrıca bundan önceki çalışmalarda İstanbul kıyılarında 5-6 metre yüksekliğinde tsunami dalgalarının oluşabileceği görülmüştür (Yalçiner vd., 2002). Bu tez çalışmasında farklı bir yaklaşım kullanılarak tarihi kayıtlarda bulunan ve başka araştırmacılar tarafından da bulunan 5-6 metre tsunami dalga yüksekliği oluşabileceği sonuçları teyit edilmiştir. Bu yükseklikte hatta daha yüksek değerlerde tsunami dalgalarının topografya ve heyelan merkezine uzaklığa göre belirli noktalarda oluşabileceği analitik ve nümerik matematiksel modeller ile ispatlanmıştır.

Bu şekilde, literatürde yeni olan analitik yöntemle nümerik yöntem birlikte kullanılmıştır. Her iki aşamada çeşitli heyelan senaryolarına göre pek çok simülasyonlar yapılmıştır. Pek çok simülasyonlardan ve sonuçlardan ancak çok az bir kısmı bu makalede sunulabilmektedir. Bu çalışmanın başka bölgelerde de heyelandan dolayı oluşabilecek olan dalgaların incelenmesinde ve kıyılarına olan etkilerinin belirlenmesinde örnek olması amaçlanmıştır.

## Kaynaklar

Alpar, B., Yalçiner, A.C. ve Özbay, İ., (2000). Marmara Denizi'nde potansiyel heyelan alan-

- ları ve bunlara ilişkin depreşim dalgası (tsunami) oluşum ve hareketleri, III. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 5-7 Ekim, Çanakkale.
- Altınok, Y., Ersoy, S., Yalçiner, A.C., Alpar, B. ve Kuran, U., (2001). Historical tsunamis in the Sea of Marmara, *Proceedings, U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Review and International Tsunami Symposium, 7-10 August, 527-533, Seattle, Washington.*
- Booth, J.S., O' Leary, D.W., Popenoe, P. ve Danforth, W.W., (1993). U.S. Atlantic continental slope landslides: Their distribution, general attributes, and implications, in submarine landslides: Selected studies in the U.S. exclusive economic zone, *U.S. Geological Survey Bulletin 2002, U.S. Department of Interior, Denver Co., 80225, 14-22.*
- Hampton, M.A., (1972). Transport of ocean sediments by debris flow, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 56, 53, 6228.*
- Lee, H.J., Schwab, W.C. ve Booth, J.S., (1993). Submarine landslides: An introduction, in submarine landslides: Selected studies in the U.S. exclusive economic zone, *U.S. Geological Survey Bulletin 2002, U.S. Department of the Interior, Denver Co., 80225, 1-13.*
- Şeşeoğulları, B., (2006). Olası İstanbul depreminde Marmara Denizi'nde oluşabilecek tsunami-nin modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Trifunac, M.D. ve Todorovska, M.I., (2002). A note on differences in tsunami source parameters for submarine slides and earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 2, 143-155.*
- Trifunac M.D., Hayir A. ve Todorovska M.I., (2001). Near-field tsunami wave forms from slumps and submarine slides, Department of Civil Engineering Report No. CE 01-01, University of Southern California, Los Angeles, California.
- Tüysüz, O., (2003). İstanbul için deprem senaryolarının hazırlanmasında coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı, İ.T.Ü. Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, İstanbul.
- Yalçiner, A.C., Alpar, B., Altınok, Y., Özbay, İ. ve İmamura, F., (2002). Tsunamis in the Sea of Marmara historical documents for the past, models for the future, *Marine Geology, 190, 445-463*
- Yaltrak, C., (2005). Ulusu ve cumhuriyeti bekleyen tehlike Doğu Marmara depremi bilimsel, siyasal, sosyal gerçekler ve çözümler, *Aydınlanma 1923 Dergisi, 42, 5-24, İstanbul.*