

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MARMARA DENİZİ'NDE MEYDANA GELEBİLECEK BİR DENİZALTI  
HEYELANININ İSTANBUL KIYILARINA ETKİLERİ**

**DOKTORA TEZİ  
Yük. Müh. İsmail KILINÇ**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : HİDROLİK ve SU KAYNAKLARI MÜHENDİSLİĞİ**

**HAZİRAN 2008**

**MARMARA DENİZİ'NDE MEYDANA GELEBİLECEK BİR DENİZALTI  
HEYELANININ İSTANBUL KIYILARINA ETKİLERİ**

**DOKTORA TEZİ**  
**Yük. Müh. İsmail KILINÇ**  
**(501042502)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 Haziran 2008**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Ekim 2008**

**Tez Danışmanları :**      **Prof.Dr. H.Kerem CİĞİZOĞLU (İ.T.Ü)**  
                                 **Doç.Dr. Abdul HAYIR (İ.T.Ü)**  
**Diğer Jüri Üyeleri:**      **Prof.Dr. Sedat KABDAŞLI (İ.T.Ü)**  
                                 **Prof.Dr. Necati AĞIRALIOĞLU (İ.T.Ü)**  
                                 **Doç.Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU (Y.T.Ü)**  
                                 **Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL (Y.T.Ü)**  
                                 **Doç.Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER**

**HAZİRAN 2008**

## ÖNSÖZ

Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde bir kıyı afeti olarak tsunami tarihinde pek çok kez görülmüştür. Tsunami oluşumlarından sonra, yerleşim bölgelerinde en çok etkilenen kesimler doğal olarak kıyı bölgeleridir. Ülkemizde tsunami konusunda yapılan çalışmalar ve bu konuda araştırma yapan bilim adamlarının sayısının çok az olması sebebiyle toplumun tsunami konusunda sağlıklı bilgiler edinmesi güç olmaktadır.

Bu çalışmada, Marmara Denizi civarında meydana gelebilecek bir deprem sonucu veya başka bir sebepten ötürü kuzeydoğu Marmara kıyılarına yakın bölgede bulunan denizaltı heyelan bölgesindeki bir hareketlenme durumunda oluşabilecek dalga hareketleri ve bunların kıyıya etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. 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 modeller kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır.

Bu şekilde, literatürde yeni olan analitik yöntemle nümerik yöntemin birlikte kullanılması hedeflenmiştir. Her iki aşama içerisinde çeşitli parametreler değiştirilerek ve analitik ve nümerik paket programlar kullanılarak çeşitli heyelan senaryolarına göre birçok simülasyonlar yapılmıştır. Bu çalışmanın başka bölgelerde de heyelandan dolayı oluşabilecek olan dalgaların incelemesinde ve kıyılara olan etkilerinin belirlenmesinde örnek olması amaçlanmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında heyelanın gerçeğe uygun hareketleri(ivmeli) modellenerek yüzeydeki dalga büyüklükleri hesaplanmıştır. Genellikle literatürde yapılan benzer çalışmalarda elde edilen büyüklükler heyelan hızlarının ortalama bir değeri için yapılmaktadır. Bu çalışmayla gerçek hız değerleriyle ortalama hız değerleri arasındaki farklılıklar ortaya konmuştur. Yine bu çalışmada literatürde bulunan önceki çalışmalardan farklı olarak hem derin suda hem de sığ suda dispersiyon etkileri de dikkate alınarak sonuçlar elde edilmiş ve diğer sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca tsunaminin kıyıya ulaşma zamanı ile ilgili olarak literatürde yeni olan bir öneri ortaya konulmuştur. Bu öneride heyelan hızları ile kıyıya ulaşma zamanları arasında bir ilişki kurulmuş ve denklemler önerilmiştir.

Çalışmalar süresince iyi günde ve kötü günde hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr.H.Kerem CİĞİZOĞLU'na ve Sayın Doç. Dr.Abdul HAYIR'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca katkılarından dolayı Sayın Prof.Dr.Necati AĞIRALIOĞLU'na, Sayın Prof.Dr.Sedat KABDAŞLI'ya, Sayın Doç.Dr.Yeşim ÇELİKOĞLU'na, ve Sayın Yüksek Mühendis Burak ŞEŞEOĞULLARI ile doktora çalışmaları süresince bana destek olan ve büyük sabır gösteren herkese teşekkür ederim.

Haziran 2008

İsmail KILINÇ  
İnşaat Yüksek Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

|                                                                         |             |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>KISALTMALAR</b>                                                      | <b>v</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                    | <b>vi</b>   |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                    | <b>vii</b>  |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                   | <b>x</b>    |
| <b>ÖZET</b>                                                             | <b>xi</b>   |
| <b>SUMMARY</b>                                                          | <b>xiii</b> |
| <br>                                                                    |             |
| <b>1.GİRİŞ</b>                                                          | <b>1</b>    |
| 1.1 Amaç                                                                | 1           |
| <br>                                                                    |             |
| <b>2. MARMARA DENİZİ VE TSUNAMİ</b>                                     | <b>5</b>    |
| 2.1 Giriş                                                               | 5           |
| 2.2 Marmara Denizi'nin Jeolojisi ve Batimetrisi                         | 5           |
| 2.2.1 Marmara Denizi'ndeki tsunami potansiyeli                          | 7           |
| 2.3 Tsunami                                                             | 11          |
| 2.3.1 Tsunami tanımı ve oluşması                                        | 11          |
| 2.3.2 Tsunami hareketi                                                  | 12          |
| 2.4 Denizaltı Heyelanları                                               | 13          |
| 2.4.1 Denizaltı kayma ve çökmeleri ve bunların boyutları                | 14          |
| 2.4.2 Denizaltı heyelanlarının basitleştirilmiş iki boyutlu modelleri   | 15          |
| 2.4.3 Marmara Denizi'ndeki potansiyel heyelan alanları                  | 17          |
| 2.5 Analitik Modelin Temel Denklemleri                                  | 19          |
| <br>                                                                    |             |
| <b>3. HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ</b>                                  | <b>22</b>   |
| 3.1 Giriş                                                               | 22          |
| 3.2 Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Analizi                                | 23          |
| 3.2.1 Model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması                     | 23          |
| 3.2.2 Sınır şartlarının ve çözüm ayarlarının tanımlanması               | 24          |
| 3.2.3 Sonuçların yorumlanması                                           | 24          |
| 3.3 Nümerik Modelleme Yöntemi                                           | 24          |
| 3.3.1 Sonlu elemanlar yöntemi                                           | 25          |
| 3.4 TELEMAC Modelleme Sistemi                                           | 29          |
| 3.4.1 Matematiksel Yaklaşım                                             | 31          |
| <br>                                                                    |             |
| <b>4. TEZ KAPSAMINDAKİ HİBRİT MODELLEME ÇALIŞMALARI</b>                 | <b>39</b>   |
| 4.1 Giriş                                                               | 39          |
| 4.2 Nümerik çözümü Saint Venant denklemleriyle olan hibrit modellemeler | 41          |
| 4.2.1 Analitik model çalışmaları                                        | 41          |
| 4.2.2 Nümerik model çalışmaları                                         | 47          |
| 4.3 Nümerik çözümü Boussinesq denklemleriyle olan hibrit modellemeler   | 67          |
| 4.3.1 Çalışmanın sebebi ve denklemler                                   | 67          |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.2 Boussinesq denklemleri ile çözüm ve karşılaştırmalar         | 69         |
| 4.4 Heyelan Hacminin Dalga Yüksekliğine Etkisi                     | 75         |
| 4.4.1 Giriş                                                        | 75         |
| 4.4.2 Heyelan Kalınlığının Dalga Yüksekliğine Etkisi               | 76         |
| 4.4.3 Heyelan Genişliğinin Dalga Yüksekliğine Etkisi               | 78         |
| 4.5 İvmeli heyelan modellemeleri ve karşılaştırmalar               | 83         |
| 4.5.1 İvmeli heyelan modellemeleri                                 | 83         |
| 4.5.2 İvmeli ve Sabit Hızlı Heyelan Modellerinin Karşılaştırılması | 95         |
| 4.6 Tsunami Dalgasının Kıyıya Varış Süresi Tahminleri              | 103        |
| <b>5. DEĞERLENDİRMELER</b>                                         | <b>107</b> |
| <b>6. SONUÇLAR</b>                                                 | <b>114</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                   | <b>116</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                    | <b>120</b> |

## **KISALTMALAR**

|                |                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>ÇAYDAG</b>  | : Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu |
| <b>EDF</b>     | : Electricite de France                                   |
| <b>FEM</b>     | : Finite Element Methods                                  |
| <b>HAD</b>     | : Hesaplamalı Akışkan Dinamiği                            |
| <b>İTÜ</b>     | : İstanbul Teknik Üniversitesi                            |
| <b>KAF</b>     | : Kuzey Anadolu Fayı                                      |
| <b>MTA</b>     | : Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü                   |
| <b>SEY</b>     | : Sonlu Elemanlar Yöntemi                                 |
| <b>SHOD</b>    | : Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı      |
| <b>TÜBİTAK</b> | : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu         |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                          | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 4.1:</b> Analitik Model Sonuçları İçin Açıklama ve Birim Tablosu.....                           | 42              |
| <b>Tablo 4.2:</b> Kıyı Şeridi Üzerinde Belirlenen 30 Noktanın Koordinatları....                          | 51              |
| <b>Tablo 4.3:</b> Farklı Heyelan Hızlarındaki En Büyük Dalga yükseklikleri.....                          | 58              |
| <b>Tablo 4.4:</b> Belirlenen Doğrultuların Mesafeleri ve Koordinat Değerleri...                          | 61              |
| <b>Tablo 4.5:</b> Boussinesq denklemleri ile elde edilen maksimum dalga<br>yükseklikleri.....            | 70              |
| <b>Tablo 4.6:</b> Dispersif ve dispersif olmayan model sonuçları arasındaki<br>yüzde olarak farklar..... | 74              |
| <b>Tablo 4.7:</b> İvmeli hareket alternatiflerinin ortalama hızları.....                                 | 95              |
| <b>Tablo 5.1:</b> İvmeli ve sabit hızlı heyelanlar arasındaki korelasyon<br>katsayıları.....             | 113             |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                           | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1 : Marmara Denizi'nin Batimetri ve Fay Haritası.....                                                                             | 6               |
| Şekil 2.2 : Marmara Denizi'nde Bulunan Çukurluklar.....                                                                                   | 7               |
| Şekil 2.3 : 120–1999 Yılları Arasında Marmara Denizi'nde Oluşmuş<br>Tsunamiler .....                                                      | 8               |
| Şekil 2.4 :Tsunami Sonucundaki Su Hareketi .....                                                                                          | 12              |
| Şekil 2.5 : Denizaltı heyelanını ve çamur akışının sistematik enkesitleri.                                                                | 14              |
| Şekil 2.6 : Çevriltili kaymanın sistematik görüntüsü ve deniz altındaki<br>bir kütlenin üst taraftan kaymasının sistematik görüntüsü..... | 15              |
| Şekil 2.7 : Çevriltili heyelanın sistematik en kesiti ve matematik modeli                                                                 | 15              |
| Şekil 2.8 : Denizaltı kayması ve çamur akışının enkesitinin matematik<br>modelleri.....                                                   | 16              |
| Şekil 2.9 : Marmara Denizi'ndeki Potansiyel HeyelanAlanları.....                                                                          | 18              |
| Şekil 2.10 : Bu çalışmada kullanılacak heyelan bölgesi.....                                                                               | 18              |
| Şekil 2.11 : Tsunami Oluşumunun Matematik Modeli.....                                                                                     | 19              |
| Şekil 3.1 : HAD Analizi için Oluşturulan Sayısal Ağ Modeli.....                                                                           | 23              |
| Şekil 3.2 : Bir, İki ve Üç Boyutlu Sonlu Elemanlardan Oluşan Cisimler.                                                                    | 27              |
| Şekil 3.3 : Üçgen Sonlu Eleman.....                                                                                                       | 27              |
| Şekil 3.4 : TELEMAT Model Sonuçları.....                                                                                                  | 30              |
| Şekil 3.5 : Bazı TELEMAT Modülleri.....                                                                                                   | 31              |
| Şekil 3.6 : Parçacık Hareketi.....                                                                                                        | 33              |
| Şekil 3.7 : Sıkıştırılamayan İdeal Akışkan Hareketi.....                                                                                  | 33              |
| Şekil 3.8 : İki Boyutlu İdeal Akışkan Hareketi.....                                                                                       | 35              |
| Şekil 4.1 : Çözüm modelinin profilden temsili görünümü.....                                                                               | 40              |
| Şekil 4.2 : Çözüm modelinin kuşbakışı temsili görünümü.....                                                                               | 40              |
| Şekil 4.3 : Çalışmada kullanılan heyelan modelleri.....                                                                                   | 42              |
| Şekil 4.4 : Model–1B ve $C_R=20$ m/s İçin Tsunami Dalga Genlikleri.....                                                                   | 44              |
| Şekil 4.5 : Model–1B ve $C_R=20$ m/s İçin Tsunami Genliklerine Ait<br>Zaman Serileri.....                                                 | 46              |
| Şekil 4.6 : N1 noktasında farklı heyelan hızlarında analitik model<br>sonucu oluşan dalga yükseklikleri.....                              | 47              |
| Şekil 4.7 : N5 noktasında farklı heyelan hızlarında analitik model<br>sonucu oluşan dalga yükseklikleri.....                              | 47              |
| Şekil 4.8 : Çalışmada kullanılan Batimetrik harita.....                                                                                   | 49              |
| Şekil 4.9 : Çalışmada kullanılan $m=71344$ noktalı sonlu eleman ağı.....                                                                  | 50              |
| Şekil 4.10 : Kıyı Şeridi Üzerinde Belirlenen 30 Noktanın Konumları.....                                                                   | 51              |
| Şekil 4.11 : Model–1B İçin 30 Noktada Oluşan En Büyük ve En Küçük<br>Dalga Yükseklikleri.....                                             | 53              |
| Şekil 4.12 : Model–2 İçin 30 Noktada Oluşan En Büyük ve En Küçük<br>Dalga Yükseklikleri.....                                              | 54              |
| Şekil 4.13 : Tsunami dalgalarının proje sahasında ilerlemesi.....                                                                         | 56              |

|                   |                                                                                                                                |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.14</b> | : Model-1B için P6 Noktasındaki Zaman Serisi Grafikleri.....                                                                   | 57 |
| <b>Şekil 4.15</b> | : Model-1B İçin Farklı Heyelan Hızlarında P6, P15, P16 ve P24 Noktalarında Oluşan En Büyük Dalga Yükseklikleri.....            | 59 |
| <b>Şekil 4.16</b> | : Model-2 İçin Farklı Heyelan Hızlarında P6, P15, P16 ve P24 Noktalarında Oluşan En Büyük Dalga Yükseklikleri.....             | 60 |
| <b>Şekil 4.17</b> | : Sayısal Model Bölgesinde Belirlenen L1, L2 ve L3 Doğrultuları.....                                                           | 61 |
| <b>Şekil 4.18</b> | : Model1B ve $C_R=30$ m/s için L1 Doğrultusu Boyunca 1-5 dk Arasında Oluşan Dalga Genlikleri.....                              | 62 |
| <b>Şekil 4.19</b> | : Model1B ve $C_R=10$ m/s için 1-5 dk Arasında Oluşan Dalga Genliklerinin Üç Boyutlu Görüntüleri.....                          | 64 |
| <b>Şekil 4.20</b> | : A1 Bölgesinin Uydudan Görünümü ve Bölgenin Derinlik Değişimini Gösteren Sayısal Üç Boyutlu Görüntü.....                      | 65 |
| <b>Şekil 4.21</b> | : Model1B ve $C_R=30$ m/s için $t=180s$ ile $t=600$ s Arasında A1 bölgesindeki dalga genliklerinin üç boyutlu Görüntüleri..... | 66 |
| <b>Şekil 4.22</b> | : Farklı denklemlerle yapılan nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....                                                | 71 |
| <b>Şekil 4.23</b> | : Model1B ve $C_R=10, 30, 89, 300$ m/s için P6 noktasında dispersiyon etkisinin karşılaştırılması.....                         | 72 |
| <b>Şekil 4.24</b> | : P15, P16, P24 noktalarında dispersiyon etkisinin karşılaştırılması.....                                                      | 73 |
| <b>Şekil 4.25</b> | : Heyelanın Üçgen ve basitleştirilmiş boyutları.....                                                                           | 75 |
| <b>Şekil 4.26</b> | : Heyelanın temsili kalınlık ve genişliği ile hareket yönü.....                                                                | 76 |
| <b>Şekil 4.27</b> | : $C_R=20$ m/s için Farklı Heyelan Kalınlıklarında Dalga Yükseklikleri.....                                                    | 77 |
| <b>Şekil 4.28</b> | : $C_R=89$ m/s için Farklı Heyelan Kalınlıklarındaki Dalga Yükseklikleri.....                                                  | 78 |
| <b>Şekil 4.29</b> | : $C_R=20$ m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Dalga Yükseklikleri.....                                                  | 79 |
| <b>Şekil 4.30</b> | : $C_R=89$ m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Dalga Yükseklikleri.....                                                  | 79 |
| <b>Şekil 4.31</b> | : $C_R=20$ m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Zaman serileri.....                                                       | 81 |
| <b>Şekil 4.32</b> | : $C_R=89$ m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Zaman serileri.....                                                       | 82 |
| <b>Şekil 4.33</b> | : a) Ortalama Sabit Hızlı Heyelan heyelanın hız-zaman grafiği<br>b) Doğada gerçek bir heyelanın hız-zaman grafiği.....         | 83 |
| <b>Şekil 4.34</b> | : Hazırlanan üç ayrı alternatifin hız-zaman grafikleri.....                                                                    | 84 |
| <b>Şekil 4.35</b> | : Alternatif 1 için analitik model sonucu su yüzeyindeki 14 noktadaki hareketin zamanla değişimi.....                          | 85 |
| <b>Şekil 4.36</b> | : Alternatif 2 için analitik model sonucu su yüzeyindeki 14 noktadaki hareketin zamanla değişimi.....                          | 86 |
| <b>Şekil 4.37</b> | : Alternatif 3 için analitik model sonucu su yüzeyindeki 14 noktadaki hareketin zamanla değişimi.....                          | 86 |
| <b>Şekil 4.38</b> | : İvmeli hareket eden Alternatif 2 için yakın bölgede yüzey değişimi.....                                                      | 87 |
| <b>Şekil 4.39</b> | : İvmeli hareket eden Alternatif 3 için yakın bölgede yüzey değişimi.....                                                      | 88 |
| <b>Şekil 4.40</b> | : Alternatif 1 için 30 noktadaki maksimum ve minimum su seviyeleri.....                                                        | 90 |

|                   |                                                                                                             |     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.41</b> | : Alternatif 2 için 30 noktadaki maksimum ve minimum su seviyeleri.....                                     | 90  |
| <b>Şekil 4.42</b> | : Alternatif 3 için 30 noktadaki maksimum ve minimum su seviyeleri.....                                     | 90  |
| <b>Şekil 4.43</b> | : Değişik noktalardaki ivmeli hareket sonucu oluşan zaman serileri.....                                     | 92  |
| <b>Şekil 4.44</b> | : İvmeli hareket Alternatif 1 için L1 Doğrultusu Boyunca 1–5 dk Arasında Oluşan Dalga Genlikleri.....       | 94  |
| <b>Şekil 4.45</b> | : 1. noktada ivmeli ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler.....                             | 96  |
| <b>Şekil 4.46</b> | : 6. noktada ivmeli ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler.....                             | 96  |
| <b>Şekil 4.47</b> | : 10. noktada ivmeli ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler.....                            | 97  |
| <b>Şekil 4.48</b> | : İvmeli alternatif 2 ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler.....                           | 98  |
| <b>Şekil 4.49</b> | : İvmeli alternatif 3 ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler.....                           | 99  |
| <b>Şekil 4.50</b> | : İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda kıyıda oluşan dalga yükseklikleri.....                         | 100 |
| <b>Şekil 4.51</b> | : İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda dalga tepesinin kıyıya ulaşma süreleri.....                    | 100 |
| <b>Şekil 4.52</b> | : İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda kıyıda oluşan dalga yükseklikler.....                          | 101 |
| <b>Şekil 4.53</b> | : İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda dalga tepesinin kıyıya ulaşma süreleri.....                    | 101 |
| <b>Şekil 4.54</b> | : İvmeli (alt 2) ve sabit hızlı heyelanlarda P6 noktasında zaman serileri.....                              | 102 |
| <b>Şekil 4.55</b> | : İvmeli (alt 2) ve sabit hızlı heyelanlarda P15 noktasında zaman serileri.....                             | 102 |
| <b>Şekil 4.56</b> | : İvmeli (alt 3) ve sabit hızlı heyelanlarda P1 noktasında zaman serileri.....                              | 103 |
| <b>Şekil 4.57</b> | : İvmeli (alt 3) ve sabit hızlı heyelanlarda P26 noktasında zaman serileri.....                             | 103 |
| <b>Şekil 4.58</b> | : Ulaşma zamanı tahmininde kullanılan noktalar.....                                                         | 104 |
| <b>Şekil 4.59</b> | : Değişik heyelan hızlarında dalganın noktaya varma süresi ile merkeze olan mesafesi arasındaki ilişki..... | 105 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                      |                                           |
|----------------------|-------------------------------------------|
| <b>A</b>             | : Alan                                    |
| <b>a</b>             | : Dalga genliği                           |
| <b>c</b>             | : Dalga yayılma hızı                      |
| <b>c<sub>g</sub></b> | : Dalga grup hızı                         |
| <b>E</b>             | : Dalga enerjisi                          |
| <b>F</b>             | : Kuvvet                                  |
| <b>f</b>             | : Koriolis parametresi                    |
| <b>g</b>             | : Yerçekimi ivmesi                        |
| <b>H</b>             | : Dalga yüksekliği                        |
| <b>h</b>             | : Su derinliği                            |
| <b>L</b>             | : Dalga boyu                              |
| <b>m</b>             | : Kütle                                   |
| <b>P</b>             | : Basınç                                  |
| <b>Q</b>             | : Debi                                    |
| <b>T</b>             | : Dalga periyodu                          |
| <b>t</b>             | : Zaman                                   |
| <b>u</b>             | : x yönündeki yatay hız                   |
| <b>V</b>             | : Hız                                     |
| <b>v</b>             | : y yönündeki yatay hız                   |
| <b>W</b>             | : Heyelan Genişliği                       |
| <b>w</b>             | : Dairesel frekans                        |
| <b>η</b>             | : Su seviyesindeki değişim, dalga genliği |
| <b>ρ</b>             | : Yoğunluk                                |
| <b>ζ</b>             | : Düşey yer değiştirme                    |
| <b>c<sub>L</sub></b> | : Ayrılma bölgesindeki hız                |
| <b>c<sub>R</sub></b> | : Birikme bölgesindeki hız                |

## **MARMARA DENİZİ'NDE MEYDANA GELEBİLECEK BİR DENİZALTI HEYELANININ İSTANBUL KIYILARINA ETKİLERİ**

### **ÖZET**

Marmara Denizi'nde bulunan aktif faylardan dolayı Türkiye'nin ekonomik, sosyal ve kültürel yönden en önemli kenti olan İstanbul için sürekli olarak bir deprem beklentisi vardır. Depremin yanı sıra Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir tsunami de İstanbul ve civardaki diğer şehirler için çok zararlı bir afet olarak karşımıza çıkabilir. Tarihte İstanbul ve Marmara'da yaşanmış pek çok tsunami vardır. Bu tsunamilerin başlıca nedeni Marmara Denizi'nde bulunan denizaltı heyelan bölgelerinin depremin tetiklemesiyle hareketlenmesidir.

Bu çalışmada Doğu Marmara'da İstanbul Tuzla açıklarında bulunan heyelan bölgesinde meydana gelebilecek hareketlenmeler ve bunun sonucunda Tuzla sahilinde oluşacak tsunami dalgalarının yüksekliklerinin değişik senaryolara göre hesaplanması hedeflenmiştir.

Tuzla açıklarındaki heyelan bölgesinde 400 m ile 800 m'lik derinlikteki yamaçta bulunan heyelan bölgesi ele alınarak literatürde bulunan iki ayrı tipte denizaltı heyelanı simülasyonu yapılmıştır.

Her iki heyelan modeli için heyelanın üzerindeki su kütlesi yüzeyinde oluşacak dalga genliklerine ait zaman serileri analitik yöntemlerle elde edilmiştir. Bu genlikler, dalgaların kıyıya yaklaşması ile beraber kıyı profilinden etkilenmeye başlayacaktır. Bu nedenle zaman serileri su yüzeyinde kullanılan nümerik metot için girdi olarak kullanılmış ve nümerik metot olan Sonlu Elemanlar Yöntemi yardımıyla kıyıya kadar taşınarak kıyıda oluşacak dalga genliklerine ait zaman serileri elde edilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde heyelan kalınlığı ve genişliği sabit tutularak yüzeyde elde edilen dalga genlikleri nümerik modelde  $C_r=10$  m/s ile  $C_r=300$  m/s arasındaki farklı heyelan hızları için çalıştırılarak bu heyelan hızlarında kıyıda meydana gelecek dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Bunun sonucunda heyelan hızının ve heyelan modelinin kıyıdaki dalga yüksekliği üzerindeki etkileri açıkça görülmüştür.

Ayrıca dispersif dalgalar ile dispersif olmayan dalgaların farklarını ve kıyıdaki dalga yüksekliğine etkilerini incelemek amacıyla nümerik modelde kullanılan denklem takımları da değiştirilmiştir.

Ayrıca proje bölgesinin tamamında seçilen her bir zaman aralığındaki yüzey su kotu elde edilerek dalgaların hareketi gözlemlenmiştir. tsunami risk haritası oluşturabilmek için kıyıda belirlenen kritik noktalarda oluşabilecek maksimum dalga yükseklikleri hesaplanmıştır.

Bununla birlikte denizaltı heyelanı sonucunda oluşabilecek tsunami dalgalarının Marmara Denizi'ndeki hareketlerinin modellenmesi sonucunda söz konusu

dalgaların belirli bir noktaya ulaşması için gerekli zaman hesaplanmıştır. Bu ulaşma zamanı hesabı erken uyarı sistemleri için çok önemlidir.

Diğer bir aşamada ise belirli heyelan hızlarında denizaltı heyelanının kalınlığı ve genişliği değiştirilerek kıyıdaki maksimum dalga yüksekliklerine bakılmış ve heyelan kalınlığı ve genişliği arttıkça dalga yüksekliğinin de arttığı görülmüştür.

Son olarak da literatürde ilk kez yapılan ve gerçeğe daha uygun ama karmaşık bir modelleme olan denizaltı heyelanının ivmeli hareket ettiği durumlar için analitik ve nümerik modellerle simülasyonlar yapılarak daha basit modellerle karşılaştırılmıştır.

## **THE EFFECTS OF A POSSIBLE SUBMARINE LANDSLIDE TO THE COASTS OF ISTANBUL**

### **SUMMARY**

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. 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. There are many tsunamis that happened in the Sea of Marmara in the history. The main reason of these tsunamis are 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 a tsunami and it damages 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 in the Sea of Marmara at the region near to northeast Marmara coasts is taken as the reason of the tsunami in the simulations.

An analytical model was used to find the amplitudes of waves at the surface of water above the submarine landslide. These waves will be directly effected from the water height of sea and the coast profile when travelling to the coasts. So in the regions near to the coasts a computational fluid dynamics model which is based on finite elements method is used.

Analytical and numerical models were used together in this study. Analytical model is used from the submarine up to sea surface and numerical model is used for the surface movement of the waves. 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.

Two different types of submarine landslides that are in the literature were used in this study. The models were applied to the landslide region that is between 400m and 800m depth of water surface around Tuzla coast.

Time series of the wave amplitudes for both of the landslide models were calculated by analytical model. These time series were used as inputs of the numerical model. Then the numerical model is performed for simulating the wave action in the shallow waters of shore.

The simulations for differing landslide velocities are performed for the previously determined landslide models on the selected mesh. These velocities were between  $C_r=10$  m/s and  $C_r=300$  m/s. As a result of this the effects of landslide model and different velocities were observed clearly.

In another stage the landslide type and velocities were taken constant and the thickness and width of the sliding mass was 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 modelling were also changed in this study in order to see the effects of both dispersive and non-dispersive waves to the coast.

In another stage the arrival times of the tsunami waves were estimated for certain points and an equation relating the distance and time was derived

Lastly the motion of the submarine landslide was taken as with changing velocity. This is a more realistic but complicated approach. It was performed firstly for the Sea of Marmara. Analytical and numerical simulations were performed according to this type of motion with an acceleration.

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Amaç

Türkiye sınırları içerisinde kalan tek iç deniz olan Marmara Denizi milyonlarca yıl süren jeolojik olaylar sonucunda oluşmuştur. 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 [1]. 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 [2]. Bunun yanında ülkedeki banka mevduatlarının yüzde 49'u, bütçe gelirlerinin yüzde 59'u ve gayri safi milli hâsılanın yüzde 39'u bu bölgede bulunmaktadır [2]. Ayrıca İstanbul gibi tarihi öneme sahip bir şehrin de bu topraklar üzerinde bulunması ve jeopolitik konumu, bölgenin önemini daha da arttırmaktadır.

Türkiye'nin kalbi sayılabilecek bu bölgede, yıkıcı ve büyük depremleri meydana getiren faylar bulunmaktadır. Bu fayların tamamı Marmara Denizi içerisinde. Bu faylarda meydana gelecek bir hareketlenme önemli depremlerin yanında tsunami denilen başka bir tehlikeye de yol açabilecektir. Deniz dibindeki depremlerden, deniz tabanındaki büyük çamur bölgelerinin ani kaymalarla yer değiştirmesinden, kıyı bölgelerindeki yamaçlardan kayan kaya ve moloz benzeri büyük kütlelerin düşmesinden, deniz dibindeki volkanik faaliyetlerden, meteor düşmesinden ve buna benzer nedenlerden dolayı denizde oluşan su dalgalarına tsunami denmektedir. Bu olaylar okyanus veya deniz yüzeyinde ani su seviyesi değişimlerine sebebiyet vermektedir. Bu dalgalar kıyı yapılarına oldukça büyük zararlar verebilecek güçtedir.

Ülkemizde tsunami konusunda yapılan çalışmaların çok az olmasının yanında, bu konuda araştırma yapan bilim adamlarının sayısı da azdır. Bu nedenle toplum tarafından konu ile ilgili sağlıklı bilgilerin edinilmesi de güç olmaktadır. Tsunami oluşumlarından sonra, yerleşim bölgelerinde en çok etkilenen kesimler doğal olarak

kıyı bölgeleridir. Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde ve sonrasında oluşabilecek bir denizaltı heyelanında da en çok kıyı bölgeleri etkilenecektir. Denizaltı heyelanları Marmara Denizi için tsunamilerin en önemli oluşturunusudur. Tarihi kayıtlarda yapılan incelemelerde bu bölgede meydana gelen doksandan fazla tsunami saptanmıştır [3].

Bu çalışmada, Marmara Denizi civarında meydana gelebilecek bir deprem sonucu veya başka bir sebepten ötürü kuzeydoğu Marmara kıyılarına yakın bölgede bulunan denizaltı heyelan bölgesindeki bir hareketlenme durumunda oluşabilecek dalga hareketleri ve bunların kıyıya etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. 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 kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır.

Bu doktora tezinin bir kısmında, tezi hazırlayanın da doktora süresince çalıştığı TÜBİTAK'a bağlı Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 104Y161 numaralı projesinin sonuçlarından faydalanılmıştır. Proje kapsamında Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde, 40°72' boylam ve 29°29' enleminde ve Tuzla açıklarında olup İstanbul kıyılarının en yakınında bulunan ve ortalama alanı 4054x3930 m<sup>2</sup> olan heyelanın hareketi sonucunda kuzeydoğu Marmara kıyılarında oluşabilecek tsunamiler incelenmiştir.

1999 İzmit depreminden sonra Marmara Denizi'nin batimetrisi, sismisitesi ve fay geometrisine yönelik çalışmalar ilk önce MTA Genel Müdürlüğü'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.

Çalışmalar sonucunda hazırlanan Marmara Denizi batimetri haritasına göre Marmara Denizi içerisinde, güney kesiminde 10, kuzey kenarda ise 7 büyük denizaltı heyelan

bölgesi saptanmıştır [2]. Bu heyelan bölgelerinden, İstanbul ve Marmara kıyılarına yakınlığı açısından, bir tanesi Bakırköy açıklarında, bir tanesi de Tuzla açıklarında olmak üzere önemli iki alan bulunmaktadır. Bu çalışmada Tuzla açıklarındaki heyelan bölgesi dikkate alınmıştır. Bu heyelan literatürde mevcut hareket etme senaryolarına göre modellenmiştir.

Doktora tezi çalışmasında yapılanlar özet olarak aşağıdaki başlıklarda toplanabilir:

- 1- Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir heyelanın oluşturacağı dalgaların Tuzla kıyısındaki etkilerinin analitik ve nümerik modeller ardışık olarak bir arada kullanılarak araştırılması. Literatürde bulunan iki heyelan modeline göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu başlıkta yukarıda bahsedilen TÜBİTAK projesi sonuçlarından faydalanılmıştır. Aşağıdaki 2,3,4 ve 5. maddelerde bahsedilecek çalışmalar sözkonusu TÜBİTAK projesi kapsamının dışında olarak bu tez çalışmasına özgüdür.
- 2- Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir heyelanın oluşturacağı dalgaların dispersif dalga olup olmadıklarına göre etkileri araştırılmıştır. Dispersif dalga modelleri gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir ancak modellemesi daha zordur. Bu bölümde bu zorluk aşılmıştır. Sonuçlar önceki bölümde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.
- 3- Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir heyelanın boyutlarının değiştirilmesi ile oluşturacağı dalgaların Tuzla kıyısındaki etkilerinin analitik ve nümerik modeller bir arada kullanılarak araştırılması. Bu başlık altında önceki bölümlerde bahsedilen heyelan bölgesindeki hareket eden heyelan kütesinin kalınlığı ve genişliği için değişik alternatifler varsayılarak her bir alternatif için kıyıda belirlenen noktalarda oluşacak dalga yükseklikleri hesaplanmıştır.
- 4- Bu aşamaya kadar yapılan çalışmalarda modellemenin kolaylığı için Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir heyelanın sabit ve ortalama bir hızla hareket ettiği kabul edilmişti. Bu heyelanın ivmeli hareketi durumunda hareketi kıyıda belirlenen noktalarda oluşacak dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Deniz tabanında oluşabilecek olan heyelan hareketinde tabaka önce hızlanarak belli bir hıza ulaşacak daha sonra da yavaşlayarak duracaktır. Bütün hareket boyunca tek bir ortalama hız kabul etmek yerine ivmeli bir

harekete göre heyelan modellenmiştir. Bu durum doğadaki olaylara daha yakın olduğu için sonuçları daha gerçekçidir. Ancak modellemesi öncekine nispeten daha zordur. Denizaltı heyelanının ivmeli olarak modellenmesi bu tez çalışması ile ülkemizde ve Marmara Denizi'nde ilk kez yapılmıştır.

- 5- Marmara Denizi'nde olası bir denizaltı heyelanı sonucunda oluşacak tsunami dalgalarının belirlenen noktalara ulaşma zamanları incelenerek değişik heyelan hızlarında, değişik noktalara varış sürelerini veren genel bir denklem önerilmiştir. Bu denklem Marmara Denizi'nin herhangi bir noktasına tsunami dalgasının ulaşma süresini vermektedir. Erken uyarı sistemleri için çok önemlidir.

Yukarıdaki çalışmalarla 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. Bu pek çok simülasyonlardan ve sonuçlardan ancak çok az bir kısmı bu teze sığdırılabilmektedir. Bu çalışmanın başka bölgelerde de heyelandan dolayı oluşabilecek olan dalgaların incelemesinde ve kıyılara 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.

## **2. MARMARA DENİZİ VE TSUNAMİ**

### **2.1 Giriş**

Türkiye sınırları içerisinde kalan tek iç deniz olan Marmara Denizi milyonlarca yıllık jeolojik olaylar sonucunda oluşmuştur. Yaklaşık olarak 240 km uzunluğa, 70 km genişliğe ve 11500 km<sup>2</sup>'lik bir alana sahip olan Marmara Denizi, belki de stratejik açıdan Türkiye'nin en önemli kıyı bölgelerini oluşturan denizdir [1].

Türkiye'nin ekonomik faaliyetleri, neredeyse sanayi yükünün tamamı Marmara Bölgesi şehirlerine dağılmaktadır. Resmi rakamlara göre ülke nüfusunun %24'ü Marmara Bölgesi'nde yaşamaktadır; yine ülkedeki banka mevduatlarının %49'u, bütçe gelirlerinin %59'u ve gayri safi milli hâsılanın %39'u bu bölgededir. Ayrıca ülkenin en fazla sayıda üniversitesine sahip bölgede okuma yazma oranı %89 olup, yüksek öğrenim görmüş nüfusun oranı ise %62'dir [2].

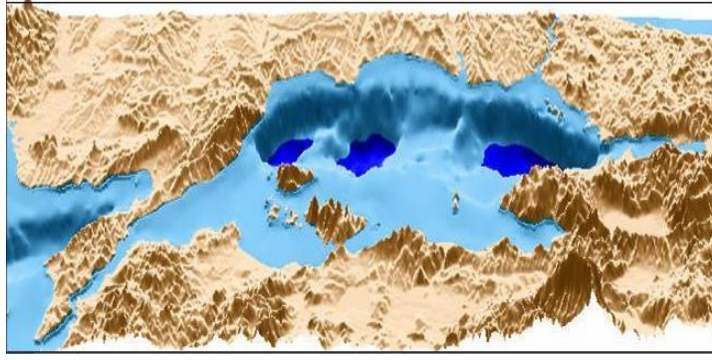
Bu veriler ışığında, özellikle İstanbul'un bu topraklar üzerinde bulunması ve jeopolitik konumu, bölgenin önemini daha da arttırmaktadır. Ülkenin kalbi olarak nitelendirilebilecek bu bölgede, yıkıcı ve büyük depremleri meydana getiren fayların tamamı Marmara Denizi içerisinde bulunmaktadır.

### **2.2 Marmara Denizi'nin Jeolojisi ve Batimetrisi**

Marmara Denizi, Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) iki önemli kolu üzerindedir. Bunlardan kuzey kol, doğuda İzmit Körfezi'nden Marmara Denizi'ne girer ve batıda Mürefte'de denizden çıkar. İkinci kol ise İznik Gölü güneyinden geçerek Gemlik Körfezi'ne girer ve Marmara Denizi güney kıyısını takiben Kapıdağı Yarımadası'na kadar uzanır, burada denizden çıkarak Biga Yarımadası'nın içerisinde devam ederek Ege Denizi'ne doğru devam eder [1].

Türkiye'nin kuzeyi boyunca uzanan Kuzey Anadolu Fay hattı (KAF), Marmara Denizi içerisinde birkaç kola ayrılmıştır ve aktif haldedir. Marmara Denizi'nin





**Şekil 2.2:** Marmara Denizi’nde Bulunan Çukurluklar [1]

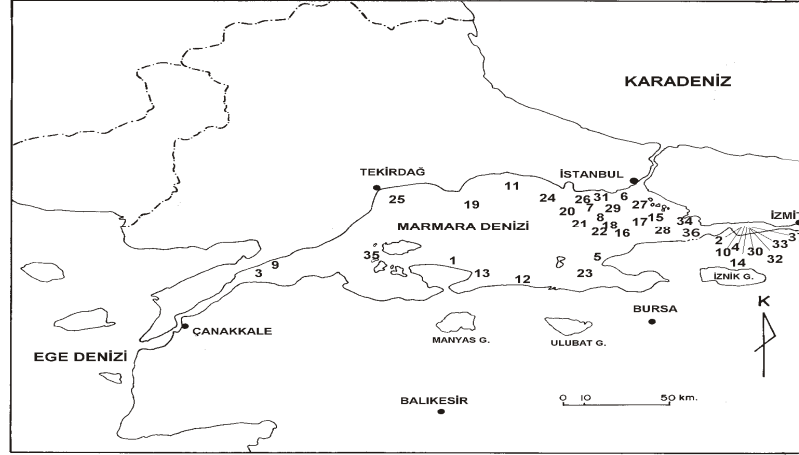
### 2.2.1 Marmara Denizi’ndeki tsunami potansiyeli

Bir yerde geçmişte olmuş depremler ve tsunamiler hakkındaki bilgiler tarihi belgelerden elde edilir. Bunun yanında, kıyılarda hendek kazıları ve jeolojik araştırmalar yapılarak çeşitli kanıtlar araştırılır. Yer katmanlarının yükseklik ve kıyıdan uzaklıkları değerlendirilerek, tsunamilerin tırmanma yükseklikleri ve kıyılardaki ilerleme uzaklıkları belirlenebilmekte; yine buralardaki organik malzemeler üzerinde yaş saptamaları yapılabilmektedir. Yapılan tüm bu çalışmalar, dalganın nerede, nasıl ve neden olduğunu açıklamak için önemli bilgiler sağlar. Daha sonra bu bilgiler kullanılarak, çeşitli bilgisayar modelleri yardımıyla dalganın oluşumu, hareketi ve kıyıdaki davranışları modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılabilir.

Marmara ve çevresinin deprem etkinliğinin yüksek olduğu gerek tarihsel, gerekse aletsel dönemdeki ölçümlerle belirlenmiştir. Tarihsel dönemde M.Ö. 2100 ve M.S. 1900 yılları arasında Marmara ve çevresinde yaklaşık 300 deprem olmuştur. Bu dönemdeki en büyük depremler, 10.09.1509 İstanbul, 22.05.1766 İstanbul, 10.07.1894 İstanbul, 04.01.1935 Erdek ve Marmara Adaları, 18.03.1953 Yenice Gönen, 18.09.1963 Doğu Marmara, 06.10.1964 Manyas, 22.07.1967 Adapazarı Mudurnusuyu ve 17.08.1999 İzmit depremleridir. Bir bölgede gelecekte büyüklüğü en az geçmişte olmuş en büyük depremin büyüklüğü kadar olacak bir deprem oluşma ihtimali olduğuna göre, Marmara ve çevresi bu tür depremleri her zaman yaşayacaktır.

Yaşanabilecek bu tarz bir depremde tsunami oluşma ihtimali ise ayrı bir konu olarak tartışılmaktadır. Türkiye kıyılarında 3000 yılı aşkın bir sürede 90’nın üzerinde tsunami olduğu ve bu dalgaların üçte birinin Marmara Denizi’nde meydana geldiği

belirlenmiştir. İzmit Körfezi, İstanbul kıyıları, Gemlik Körfezi, Kapıdağ Yarımadası ve Gelibolu kıyıları tsunamilerin yoğunlaştığı yerler olarak gösterilmektedir. Bunlardan 120–1999 yılları arasında oluşmuş tsunamiler, tarihsel sıra ile numaralandırılarak Şekil 2.3'te gösterilmiştir [9].



**Şekil 2.3:** 120–1999 Yılları Arasında Marmara Denizi'nde Oluşmuş Tsunamiler [9].

17 Ağustos 1999 yılında İzmit'te meydana gelen depreminin, İzmit Körfezi'nde oluşturduğu dalga hareketleri Marmara Denizi'nde oluşan en son tsunamidir. Önceleri tsunami oluşmadığı görüşleri ortaya atılmış olsa da, 35 gözlem yerinde yapılan araştırmalarda tsunami bulgularına rastlanmıştır. İzmit Körfezi'nin her iki yakasında denizin çekilmesi ile başlayan dalga hareketi, kuzey ve güney kesimlerde 1 metreden 2,5 metreye kadar olan tırmanma yüksekliklerine ulaşmıştır. Tsunami dalgaları fazla büyük olmadığından, kıyılarda etkili hasarlara sebebiyet vermemiştir; ancak bazı bölgelerde önemli sayılabilecek hasarlar oluşmuştur. Meydana gelen tsunaminin periyodu ise 1 dakikadan daha azdır [7].

Tırmanma yüksekliği, suyun karaya doğru ilerlediği maksimum yükseklik ile kıyı çizgisi arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir ve suyun bıraktığı iz ve denizden getirdiği katı maddeler takip edilerek ölçülebilir. Bu yükseklik göz önüne alınarak, etkilerinin çok yüksek olmadığı söylene de, 17 Ağustos 1999 yılında İzmit Körfezi'nde deprem sebebi ile tsunami meydana gelmiştir [7].

Marmara Denizi'nde büyük depremlerin ve tsunamilerin geçmişte olduğu gibi, gelecekte de olabileceği bilimsel bir gerçektir. Bu gerçeğin önüne geçilemeyeceği

için, deprem ve tsunami zararlarının azaltılması çalışmalarının daha ciddi ve hızlı bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

120–1999 yılları arasında Marmara Denizi’nde olmuş tsunamiler Şekil 2.3’de tarihsel sıra ile numaralandırılarak verilmişti. Altınok, Yalçiner, Alpar ve Ersoy tarafından yapılan çalışmada, geçmişte meydana gelmiş bazı tsunamiler ve tarihlerine ulaşılmıştır. Aşağıda bu çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlar belirtilmiştir [9].

- 120/128: Kapıdağ Yarımadası, İzmit ve İzmit’te etkili olan deprem Kapıdağ Yarımadası’nda tsunami hareketleri yaratmıştır.
- 24.08.358: Marmara’da oluşan büyük depremle, İzmit’te tsunami görülmüştür.
- 26.01.447: İstanbul ve İzmit’te etkili olan deprem sonucunda, İzmit’te deniz pek çok ölü balığı karaya atmış, denizin çekilmesi ile gemiler karaya oturmuştur.
- 24/25/26.09.477/480: Çanakkale, İstanbul, İzmit, Gelibolu, Bozcaada’yı etkileyen depremde İstanbul’da tsunami oluşmuş ve kıyı alanlarına zarar vermiştir.
- 15.08.553: İstanbul ve İzmit Körfezi’nde tsunami etkili olmuş ve deniz 2000 m ilerlemiştir.
- 14.12.557: İstanbul ve İzmit Körfezi’nde tsunami etkili olmuş ve deniz 3000 m ilerlemiştir.
- 26.10.740: İstanbul, İzmit, İzmit ve Trakya’nın etkilendiği depremde bazı yerlerde deniz çekilmeleri gözlenmiştir.
- --.10.989: Marmara Denizi’nin doğusunda oluşan depremde tsunami oluşmuştur.
- 14.10.1344: Marmara Denizi, İstanbul, Trakya kıyıları, Gelibolu’da etkili olan depremde, tsunami olmuş ve deniz 2000 m ilerlemiştir.
- 10.09.1509: İstanbul’da oluşan deprem, İstanbul ve Marmara kıyılarında tsunami yaratmıştır. Küçük kıyamet olarak da adlandırılan bu deprem sırasında oluşan dalgalar İstanbul surlarını aşmıştır. Depremin büyüklüğü 8 civarındadır. Oluşan

dalganın tırmanma yüksekliği ise 6 m'den fazladır. İstanbul ve Galata surlarını aşan dalgalar şehrin sokaklarında ilerlemiştir.

- 05.04.1646: İstanbul'da etkili olan depremde tsunami oluşmuş ve 136 gemi harap olmuştur.
- --.09.1754: İzmit Körfezi'nde olan büyük depremle oluşan tsunami hasar yaratmamıştır.
- 22.05.1766: Marmara Denizi'nde depremle birlikte tsunami oluşmuş, İstanbul Boğazı kıyılarında ve Mudanya Körfezi'nde zarara neden olmuştur.
- 10.07.1894: Depremle oluşan tsunami İstanbul'da etkili olmuştur, bazı yerlerde deniz 50 m kadar çekilmiş ve geri dönmüş; fakat sahil sınırı değişmemiştir. Deniz suyu kabarmış ve 200 metre sahile taşmıştır. Prens Adaları civarında ve Büyükçekmece'den Kartal'a kadar olan alanda tsunami gözlenmiştir. Depremın büyüklüğü 7'den küçük, dalganın tırmanma yüksekliği 6 m'den azdır. Karaköy ve Azapkapı köprüleri bile sular altında kalmıştır. Yeşilköy'de deniz depremden yaklaşık on dakika kadar önce geriye çekilmiş ve çok geçmeden dev dalgalar sahile vurarak 3 sıra eve kadar ulaşmış, ön sırayı alıp götürmüştür.
- 04.01.1935: Marmara Adası'nın batısındaki Hayırsız Ada'da depremle beraber sis düdüğü binası yıkılmış, sahildeki birçok kaya parçaları denize dökülmüş ve sular kabarmıştır.
- 18.09.1963: Dış merkezi denizde olan Çınarcık, Yalova civarında etkili olan bu depremde deniz kaynar hale gelmiştir. Depremın büyüklüğü 6,1'dir. Depremden sonra Mudanya Körfezi'nde doğu-batı doğrultusunda sahil şeridinde deniz dibi kabuklarına rastlanmıştır. Bandırma'da deniz dalgaları 1 m kadar yükselerek kıyı duvarlarını aşmıştır. Oluşan dalgalar fazla büyük değildir.
- 17.08.1999: 7,4 büyüklüğünde, 15–17 km odak derinliğindeki İzmit Depremi, İzmit Körfezi'nde tsunami yaratmıştır. 35 gözlem yerinde yapılan araştırmada tsunami bulgularına ulaşılmıştır. Bu bulgulara göre; İzmit Körfezi'nin her iki kıyısında deniz önce çekilmiştir. Kuzey kısmında dalganın kıyıdaki tırmanma yüksekliği 1 m'den 2,5 m'nin üzerine kadar ulaşmış, güney kısmında Kavaklı-Seymen arasındaki kıyının dışında Kılıç Deltasına kadar olan şeritte 1 m'den 2,5

m'ye kadar değişen tırmanma yükseklikleri saptanmıştır. Değirmendere'de dalga yüksekliğinin 10 m'nin üzerine ulaştığı belirlenmiştir. Yalova'ya doğru tsunami bulguları kaybolmaktadır. Oluşan tsunaminin periyodu 1 dakikadan daha azdır.

## **2.3 Tsunami**

### **2.3.1 Tsunami tanımı ve oluşması**

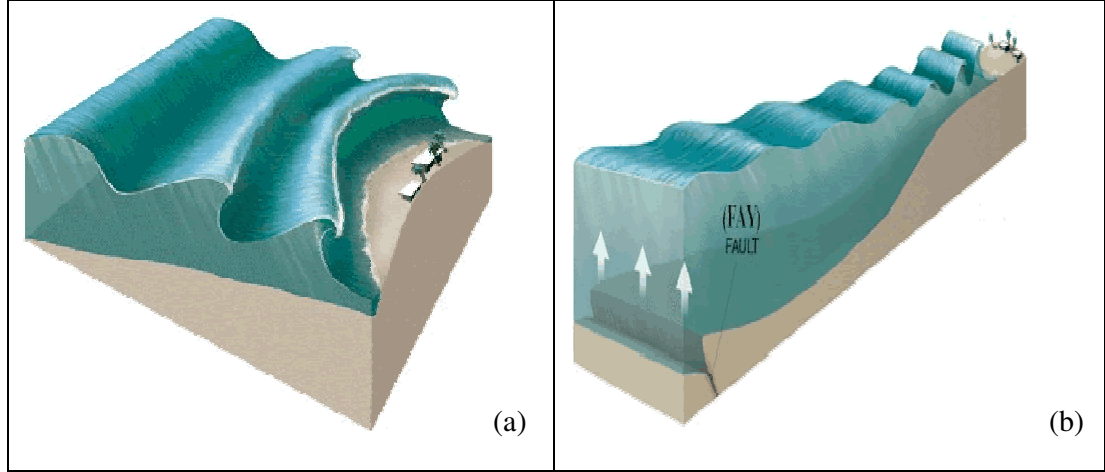
Tsunamilerle ilgili ilk bilgiler M.Ö. 6. yüzyıldan önce Anoksogoras, Demokritos, Aristotle, Starbo ve Pliny ile başlamıştır ve M.Ö. 5. yüzyılda Thucydides, tsunamilere depremlerin neden olduğu görüşünü savunmuştur. Tsunami konusunda en önemli çalışmaları doğal olarak bundan en çok zararı gören Japonlar yapmıştır. Orta doğuda tsunamiye ilişkin ilk bilgiler 4000 yıl öncesine dayanan Ugarit ve 3370 yıl öncesine dayanan Ras Samara'da bulunan tabletlerde yazılıdır [4].

15 Haziran 1896 günü Japonya'da 4 dakika süren zayıf, hasar yapmayan bir deprem olmuş; fakat o depremden sonra oluşan dalga 22000 kişinin ölümüne neden olmuştur. Bu dalganın yarattığı afet nedeniyle Japonlar bütün dünyaya yardım çağrılarında bulunmuşlar ve böylece Tsunami sözcüğü böylece ilk defa Japonya'daki Büyük Meiji Sanriku tsunamisinden sonra kullanılmaya başlamıştır [5].

Tsunami sözcüğü Çince kaynaklı olup, Japoncada liman anlamına gelen "tsu" ve dalga anlamına gelen "nami" sözcüklerinin birleşiminden oluşarak, "liman dalgası" anlamında kullanılmaktadır ve "tsunami" diye okunmaktadır. İngilizcede buna gel-git dalgası anlamına gelen "tide wave" dense de bu kullanım şekli doğru değildir ve genelde tsunami kelimesi kullanılmaktadır. Türkçe şekliyle ilk olarak 1985 yılında Prof. Dr. Hüseyin Soysal tarafından "deniz taşması" ismi verilmiş; ancak bu tanımlama dalga hareketini yeteri kadar temsil etmediği için tsunami terimi kullanılmaya devam edilmiştir. Daha sonra 2000 yılında Yalçiner tarafından hem dalga hareketini temsil etmesi, hem de deprem kelimesi ile uyumluluk göstermesi ağışından "depreşim dalgası" terimi kullanılmıştır [6]. Bu çalışmada ise terminoloji olarak "tsunami" kelimesi kullanılacaktır.

Deniz dibindeki depremlerden, deniz tabanındaki büyük çamur bölgelerinin ani kaymalarla yer değiştirmesinden, kıyı bölgelerindeki yamaçlardan kayan kaya ve moloz benzeri büyük kütlelerin düşmesinden, deniz dibindeki volkanik

faaliyetlerden, meteor düşmesinden, deniz altında yapılan nükleer denemeler ve benzeri nedenlerden dolayı oluşan su dalgalarına tsunami denmektedir [7] (Şekil 2.4a). En çok görülen tsunamiler genellikle yer kabuğunun kırılmasından kaynaklı yer değiştirmeden ya da fay hareketinden kaynaklanır. Bu olaylar okyanus veya deniz yüzeyinde ani su seviyesi değişimlerine sebep olmaktadır (Şekil 2.4b).



**Şekil 2.4:** Tsunami Sonucundaki Su Hareketi [8]

### 2.3.2 Tsunami hareketi

Tsunamiler ilk oluştuklarında tek dalga olmalarına rağmen, kısa bir zaman sonra birkaç dalga haline gelirler. Bazı durumlarda ilk dalgalar, bazı durumlarda ise ikinci ve üçüncü dalgalar etkilidir. Genellikle sonraki dalgalar etkili olduğundan dolayı, önden giden dalgaya centilmen dalga denilmektedir. Kıyılara ulaşan tsunaminin etkisi; önce denizin çekilmesi veya karaya doğru ilerlemesi, ardından da karada dalga tırmanması ve su taşınımı şeklinde olur.

Sakin bir suya atılan bir taşın oluşturduğu dairesel dalgalara benzer olarak, deniz dibinin ani hareketlenmesi, deniz yüzeyinde bir merkezden yayılan dalgalar oluşturur. Tsunamiler de bu tür dalgalardır. Oluştukları merkezden hemen hemen dairesel olarak yayılırlar. Yayılan dalga cephelerinin yönlerinin değişmesi ancak çok sığ sularda sapma şeklinde olabilir. Açık denizlerde, derinlik farklılıkları dalga cephelerinin ilerleme hızlarında önemli farklar yaratacak düzeyde olmadığından, tsunamiler dairesel şekilde yayılırlar.

Diğer deniz dalgalarına kıyasla, tsunaminin belirli bir noktaya ulaştığı an çok belirgin olarak tespit edilebilir. Özellikle alçak seviyeli bölgelerde güçlü su tırmanmaları yıkıcı sonuçlara sebep olabilir. Tsunami kıyıya ulaştığı zaman, su hızla karaya tırmandığı için tsunami gelişinin hemen öncesinde kıyı bölgelerinde aniden su çekilmeleri meydana gelebilir. Ardından ilk dalga kıyıya ulaşır ve bu dalgaya öncü dalga denir. Bazı durumlarda ilk dalgada maksimum yükselme olabileceken, bazı durumlarda ise ikinci, üçüncü hatta yedinci dalgada maksimum yükselme gözlemlenebilir. Bu durum gelen dalga sayısına da bağlıdır [7].

## **2.4 Denizaltı Heyelanları**

Deniz tabanındaki eğimli arazilerde denizaltı heyelanlarına sıkça rastlanmaktadır. Özellikle çatlaklı kayalar veya granüllü sedimetlerde karşımıza çıkmaktadırlar. 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, geçici rüzgâr dalgaları, sediment içerisinde birikmiş olan gözeneklerdeki gazların varlığı ve hatta sediment içerisindeki karbonat çözülmesi sedimentin mukavemetinin azalmasına sebep olabilir [10]. Bu etkiler kuvvet dengelerini bozar ve hareket başlar. Sedimentin veya kayaların bu hareketine denizaltı heyelanı denir.

Bu heyelanlar eğer yeterli hıza sahipse tsunami oluşturabilirler. Heyelanın hareketlenmesinde sedimentin zayıflığı, olduğu yapının kimyasal ve biyolojik özellikleri, bulunduğu durum ve geometrik yapısı önemli rol oynar. Bu yüzden denizaltı heyelanının mekanizmasının çözülmesi oldukça zordur.

Pek çok denizaltı heyelanları (yüzde 90'a yakını) 100 km<sup>2</sup> den küçüktür. Bu nedenle pek çok denizaltı kayma hareketleri insanlar tarafından duyulmadan(kaydedilmeden) gerçekleşmektedir. Ancak kıyı çizgisine çok yakın olan ve büyük hacimde bir malzemenin küçük bir alanda hareketine dayanan denizaltı heyelanları Valdez ve Stewart'da 1964'te olduğu gibi çok önemli tsunami felaketlerine yol açabilmektedir. Bilinen en büyük yamaç hareketleri Havai adalarının açıklarında meydana gelmiştir. Bunlardan bazıları 200 km'den uzun ve 5x10<sup>3</sup> km<sup>3</sup> den fazla hacimlidir. Bu hacmin bir seferde kayması afet boyutunda tsunami genliklerine sebep olabilir. 1929'da 7.2 şiddetindeki bir deprem Grand Banks da bir denizaltı kaymasını tetiklemiştir. Çöken

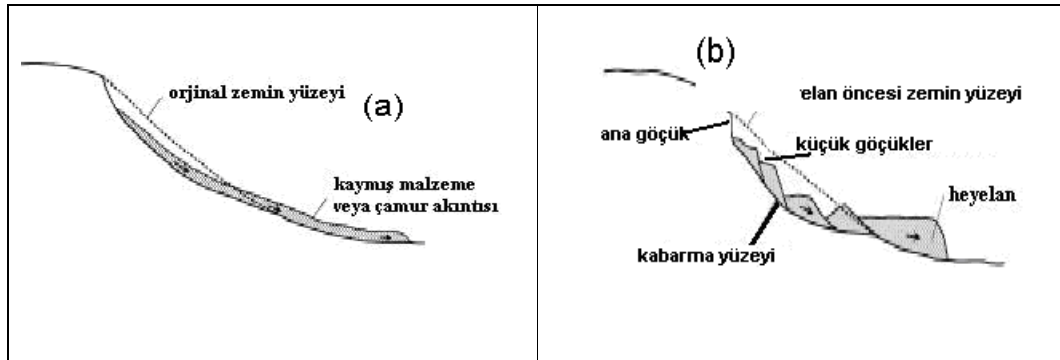
malzemenin bir kısmı çevrintili akıntıya dönüşmüş ve 700 km'den fazla giderek yolu üzerindeki haberleşme kablolarına zarar vermiştir [11].

#### 2.4.1 Denizaltı kayma ve çökmeleri ve bunların boyutları

Su altı yamaçlarında heyelanı tetikleyen başlıca etkenler; ani sediment yığılması ile eğimin fazla artması, organik madde bozulmasından ortaya çıkan gazlar, fırtına dalgaları ve kıta sahanlığı yamaçlarındaki heyelanların başlıca etkeni olan depremlerdir. Kayan malzeme yerçekimi tarafından yönlendirilir. Eğer hareket eden sediment viskoz bir akışkana benziyorsa bu durumda kütle akımı oluşur(Şekil 2.5a). Hareket tepeden aşağıya veya kaynak alanı yukarı veya aşağıya doğru kayabilir. Rijit tabakaların dairesel veya düzlemsel hareketi de heyelan oluşturur(Şekil 2.5b, Şekil 2.6). Çökmeler ise kayan malzeme bloklarının kıvrımlı kayma yüzeyinde döndükleri heyelanlardır. Eğer sediment heterojen ise en son aşamada bir de küçük parçalardan oluşan akım oluşur. Çevrilti akışlar akışkan türbülansının oluşturduğu bulanıklık sonucu suda asılı kalan sediment parçacıklarının taşınımını sağlar [12].

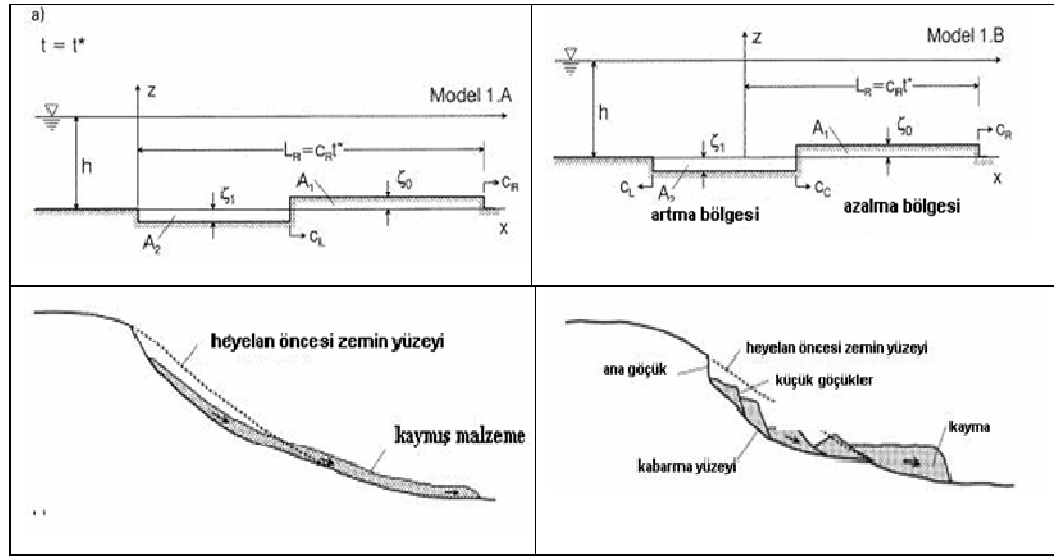
Heyelanlar 2500 metreden düşük her derinlikte olur ama en çok 800-1000 metre derinlikler arasında olur. Pek çok heyelanın başlangıcı yamacın tabanıdır.(2000-2200 m su derinliği). Keza farklı derinliklerde de olabilir [13].

Ölçülmüş heyelan uzunlukları 0.3 ile 380 km arasında değişir. (dağılımın mod'u 2-4 km dir) genişlikler 0.2 ile 50 km arasındadır. Orijine yakın yerdeki sediment kalınlığı 10-650 m arasındadır. Alanlar ise en fazla  $2 \times 10^4 \text{ km}^2$  ye ulaşmıştır. Ancak genellikle  $10 \text{ km}^2$  olur. Heyelanların yüzde 56'sı 4 derece veya daha az eğimlerde oluşmuştur.  $10 \text{ km}^2$  den büyük heyelanlar ise 3-4 derece arası eğimli yamaçlarda oluşur [13].



Şekil.2.5: Denizaltı heyelanlarının veya çamur akışının sistematik en kesitleri [6]





**Şekil 2.8:** Denizaltı kayması ve çamur akışının enkesitinin matematik modelleri [6]

Bütün modeller tek yönlü yer değiştirmelere göre, x-y düzleminde tsunami oluşumunu ve x-eksenindeki genelliği koruyacak şekilde karakterize edilmişlerdir. Bütün kaymalarda sabit W genişliği varsayılmıştır. Saçılma hareketi pozitif ve negatif x-eksenlerinde tek cepheli veya çift cepheli olarak varsayılmıştır. Düşey yer değiştirme  $\zeta$ , ayrılma bölgesinde negatif (aşağı doğru) birikme bölgesinde pozitifdir yani yukarı doğrudur.

Model 1A,  $x=0$  da tetiklenmiş ve pozitif x-ekseni yönünde tek cepheli (yamaç aşağı) saçılmadan olan kütle hareketini temsil etmektedir.  $c_L$  ve  $c_R$  ise ayrılma ve birikme bölgelerindeki hızları temsil etmektedir. Model 1B ve Model 2 ise heyelanın alt ucu da dâhil olmak üzere herhangi bir noktada başlayan ve iki cepheli saçılan kütle hareketlerini temsil etmektedir. Bu modellerde ayrılma bölgesi pozitif x yönünde  $c_R$  hızı ile birikme bölgesi ise negatif x yönünde  $c_L$  hızı ile pozitif x yönünde  $c_C$  hızı ile hareket eder. Bu çalışmadaki modellerde kütle dengesi sabit kabul edilmiştir yani ayrılma bölgesinden ayrılan kütle miktarı birikme bölgesine eşit kabul edilmiştir. İstisna olarak Model 2 de  $c_L \neq c_R$  olduğu için kütle korunduğu varsayılmamıştır.

Modeller 1A ve 1B de ayrılma ve birikme bölgelerinin genlikleri eşittir. Bu genlikler bu bölgelerin alanları üzerindeki ortalama genliğe eşittir. Kabarmış ve taşınmış malzemenin hacimleri  $A_1W$  ve  $A_2W$  olur. Burada  $A_1$  ve  $A_2$  bu bölgelerin düşey alanlarıdır. (bkz. Şekil 2.7a ve 2.7b).

Şekil 2.7 ve 2.8’de şekillerin alt tarafları fiziksel prosesin şematik gösterimini sunmaktadır. Şekil 2.8’de bulunan Model 1A ve 1.B debris çığları (Şekil 2.8) [14] ve debris veya çamur akıntılarıdır.(örneğin Santa Barbara havzasındaki çamur akıntısı). Model 1B Santa Barbara havzasının doğu tarafında geriye doğru oluşan göçme sonucu ana yarığın aşınması sonucu genişleyen yamaç kaymasının yaklaşık bir modeli olarak düşünülebilir [15]. Model 1A aşağı yönde kütlelerin kaymasını göstermektedir. Model 1B geriye doğru oluşan bir heyelan veya çökme olarak düşünülebilir. Model2 ise (Şekil 2.7) dairesel bir kaymayı temsil etmektedir.

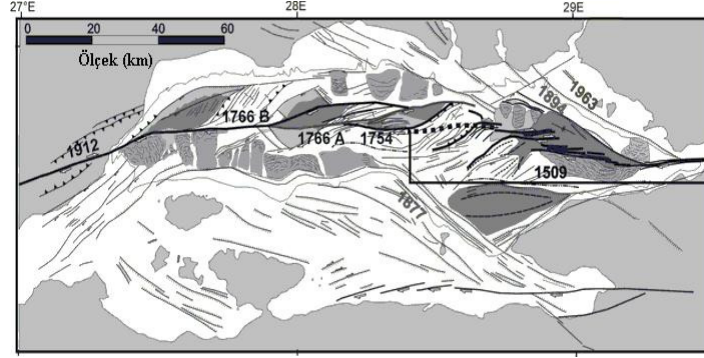
27 Mart 1964 Seward ve Valdez’de denize yakın yerleşimlere hasar veren deniz seviyesinin altında oluşan ve denizde yayılan büyük heyelanlar olmuştur. Seward’da 1200 m uzunluğunda ve 15-150 m genişliğinde bir sahil kademe kademe su altında kalmış ve kaybolmuştur. Bu olay 50 metre derinlikte olan ve 20-35 derece arasındaki bir yamacın kaymasının sonucu oluşmuştur. Burası su altındaki bir delta ağzıdır. Kıyıya yakın bazı yerlerde su yüksekliği 30 metreden fazla yükselmiştir. Valdez de ise 75 milyon metreküplük bir sedimenti içeren bir delta ağzı heyelanı olmuştur. Bu heyelan kıyı boyunca 10 metrelik tsunami meydana getirmiştir. Körfezden aşağıya doğru ilerledikçe tsunaminin genliği deniz seviyesinin 50m üzerine ulaşmıştı [16]. Bu durum Model1B’nin fiziksel haline bir örnek olarak alınabilir.

Kuzey Kaliforniya sahilinin açıklarında Humboldt kayma bölgesinde retrogressive şekilde göçmüş büyük bloklar vardır. 8x9 km<sup>2</sup> lik bu Humboldt heyelan bölgesinin hareketi de Model 1B ile açıklanabilir [17].

#### **2.4.3 Marmara Denizi’ndeki potansiyel heyelan alanları**

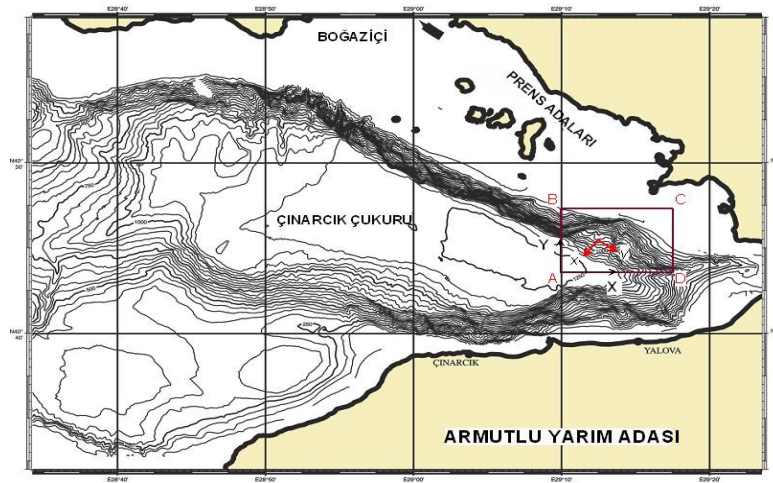
Tsunamilerin bazıları deniz tabanının aniden deforme olması ve yer değiştirmesiyle oluşur. Yer kabuğunun deformasyonu ile oluşan tektonik depremler deniz tabanında düşey yönde meydana geldiğinde, deforme olan bölgenin üzerindeki su, denge konumundan hareket eder. Yer çekimi etkisi altında davranış gösteren ve yer değiştiren su kütlesi ile şekillenen dalgalar yeniden denge konumuna dönmeye çalışır ve bu durum tsunami oluşturur. Marmara Denizi için en önemli yanlış, yalnızca fay karakterlerine dayanan modellere bakarak bu denizde tsunami olmayacağını söylenmesidir. Oysa denizaltı heyelanları tsunami oluşumları için çok büyük tehlikedir. Bu nedenle heyelan faktörünü göz ardı eden çalışmalar, Marmara Denizi için tsunami potansiyelini ortaya koymakta yetersiz kalabilmektedir [2].

Kısaca diyebiliriz ki Marmara Denizi için tsunamilerin en önemli oluşturunusu denizaltı heyelanlarıdır. Marmara Denizi içerisinde, güney kesiminde 10, kuzey kenarda ise 7 büyük denizaltı heyelan bölgesi saptanmıştır. Şekil 2.9'daki üzerinde dalgali çizgiler bulunan gri renkli alanlar Marmara Denizi'nde tsunami yaratabilecek heyelanları göstermektedir.



**Şekil 2.9:** Marmara Denizi'ndeki Potansiyel Heyelan Alanları [2]

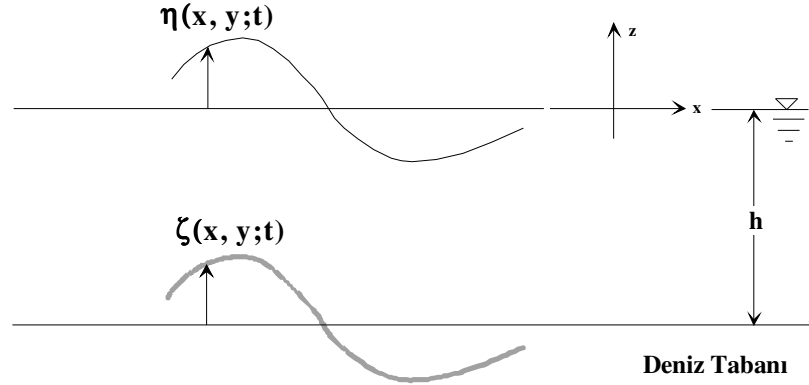
Bu heyelan alanlarının en büyükleri doğu Marmara kıyılarına yakın bölgelerde bulunmaktadır (Şekil 2.10). Bunlardan en büyüğü Armutlu Yarımadası önü ile İmralı Yarımadası arasında 17x4 km<sup>2</sup> genişliğinde bir alanı kapsayan heyelan bölgesidir. Diğer bir önemli heyelan alanı ise, Marmara ve İstanbul kıyılarının en yakınında, Tuzla açıklarında bulunan heyelan bölgesidir (Şekil 2.10). Bu çalışma kapsamında, bu bölgedeki heyelan kullanılacaktır.



**Şekil 2.10:** Bu çalışmada kullanılacak heyelan bölgesi [7]

## 2.5 Analitik Modelin Temel Denklemleri

Model olarak  $z=-h$ 'de rijit deniz tabanıyla,  $z=0$ 'da serbest su yüzeyiyle sınırlı bir bölgede bulunan akışkan ele alınmıştır. Bu akışkanın ani olarak deniz tabanının kabarması veya alçalmasıyla (katı madde heyelanı ile)  $(\zeta(x, y; t))$  oluşacak su dalgası hareketi  $(\eta(x, y; t))$  incelenecektir. (Şekil 2.11) Akışkan için çevrimsiz, sıkıştırılamayan ve viskoz olmayan akış ( $\nabla \vec{g} = 0$ ;  $\vec{g}$  akışkan hızı) ele alınmıştır. Tsunami oluşumu ve yakın bölgede yayılışı yerin sıkıştırılabileceği veya yerkürenin küreselliğinden fazla etkilenmemektedir. Bu yüzden bu etkenler dikkate alınmamaktadır [18].



**Şekil 2.11:** Tsunami Oluşumunun Matematik Modeli [18]

Hız potansiyeli Laplace denklemini ve sınır koşullarını sağlamalıdır.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

Problemin kinematik ve dinamik sınır koşulları;

$$z = \eta(x, y; t) \text{ 'de } \phi_z = \eta_t + \phi_x \eta_x + \phi_y \eta_y \quad (2.2a)$$

$$z = -h + \zeta(x, y; t) \text{ 'de } \phi_z = \zeta_t + \phi_x \zeta_x + \phi_y \zeta_y \quad (2.2b)$$

$$z = \eta(x, y; t) \text{ 'de } \phi_t + \frac{1}{2}(\Delta \phi)^2 + g\eta = 0 \quad \text{şeklindedir.} \quad (2.3)$$

Burada sırasıyla  $t$ ,  $x$  ve  $y$  değişkenine göre kısmi türevi göstermektedir [18].

Sınır koşullarında bulunan doğrusal olmayan terimler  $(\phi_x \eta_x, \phi_y \eta_y, \phi_x \zeta_x, \phi_y \zeta_y)$  ve  $(\Delta \phi)^2$  ihmal edildiğinde ve sınır koşulları deforme olmamış sınır yüzeylerine uygulandığında ( $z = \zeta(x, y; t)$  ve  $z = \eta(x, y; t)$  yerine  $z = -h$  ve  $z = 0$  olduğunda) bu zor problemin birinci derece doğrusallaştırılmış çözümü elde edilebilir. Bu yaklaşım genellikle denizaltı kaymaları, çökmeleri, heyelanları sonucu oluşan pek çok tsunamide su derinliği oluşan dalga genliklerinden çok büyük olduğu için doğru kabul edilir.

Bu durumda (2.2a) ve (2.3) denklemlerini tek bir denklemde toplarsak

$$\phi_z(x, y, -h; t) = \zeta_t(x, y; t) \quad (2.4)$$

$$\phi_{tt}(x, y, 0; t) + g\phi_z(x, y, 0; t) = 0 \quad (2.5)$$

denklemlerini elde ederiz. Denklem (2.1) ( $\nabla^2 \phi = 0$ ) in Denklem (2.4) ve (2.5)'teki sınır koşullarını sağlayan bir çözümü  $t$  için Laplace dönüşümü ve  $x, y$  için Fourier dönüşümü ile elde edilebilir.

$$\bar{\phi}_{zz}(\bar{k}, z; s) - k^2 \bar{\phi}(\bar{k}, z; s) = 0 \quad (2.6)$$

$$\bar{\phi}_z(\bar{k}, -h; s) = s\zeta(\bar{k}; s) \quad (2.7)$$

$$\bar{\phi}_z(\bar{k}, 0; s) + (s^2 / g) \bar{\phi}(\bar{k}, 0; s) = 0 \quad (2.8)$$

Dönüşüm ise

$$\bar{f}(\bar{k}; s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_2 x} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_1 x} \left[ \int_0^{\infty} e^{-st} f(x, y; t) dt \right] dx \right] dy \quad \text{olur [18].} \quad (2.9a)$$

Burada  $k$ ,  $(k_1, k_2)$  çiftinin basit bir yazım şeklidir ve

$$k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (2.9b)$$

Denklem (2.6) nın genel bir çözümü olarak

$$\bar{\phi}(\bar{k}, z; s) = A(\bar{k}; s) \cosh kz + B(\bar{k}; s) \sinh kz \quad \text{verilir.} \quad (2.10)$$

$A(\bar{k};s)$  ve  $B(\bar{k};s)$  fonksiyonları denklem (2.7) ve (2.8) kullanılarak elde edilir ve bunlardan yararlanarak

$$\bar{\phi}(\bar{k}, z; s) = -\frac{gs\zeta(\bar{k};s)}{(s^2 + \omega^2)\cosh kh} \left( \cosh kz - \frac{s^2}{gk} \sinh kz \right) \text{ elde edilir [18]} \quad (2.11)$$

Burada

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad \text{olur.} \quad (2.12)$$

Burada  $\omega$  dalga'nın dairesel frekansını gösterir [18].

$\eta(x, y; t)$  için çözüm aşağıdaki şekilde yapılır:

Serbest yüzeydeki hareket  $\bar{\eta}(\bar{k};s)$  denklem (2.3)'te görüldüğü gibi  $\bar{\phi}(\bar{k}, z; s)$  ile ilgilidir. Buradan

$$\bar{\eta}(\bar{k};s) = -(s/g)\bar{\phi}(\bar{k}, 0; s) \quad \text{elde edilir.} \quad (2.13)$$

Denklem (2.11) ve (2.13) sonucunda  $\bar{\eta}(\bar{k};s)$  ifadesi  $\bar{\zeta}(\bar{k};s)$  cinsinden ifade edilebilecek hale gelir.

$$\bar{\eta}(\bar{k};s) = \frac{1}{\cosh kh} \frac{s^2}{s^2 + \omega^2} \bar{\zeta}(\bar{k};s) \quad (2.14)$$

$\eta(x, y; t)$  için çözüm aşağıdaki şekilde yapılır:

(1)  $\zeta(x, y; t)$  ve  $\bar{\zeta}(\bar{k};s)$ 'i elde etmek için dönüşüm uygulanır,

(2)  $\bar{\eta}(\bar{k};s)$  ifadesi  $\bar{\zeta}(\bar{k};s)$  yerine konulduktan sonra (2.14) denklemi kullanılarak elde edilir,

(3)  $\eta(x, y; t)$  ters dönüşümler kullanılarak hesaplanır [18].

Yukarıda anlatılan model daha sonra başka çalışmalarda da kullanılmıştır. (Bkz. [6,7, 22])

### 3. HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ

#### 3.1 Giriş

Akışkanlarla ilgili bilinen ilk çalışmalar Archimedes'e (MÖ 285–212) kadar dayanır. Ancak, akışkanlarla ilgili esas gelişmeler Rönesans ve sonrasında olmuştur ve en önemli gelişmeyi Leonardo Da Vinci (1452–1519) yapmıştır. Vinci, tek boyutlu sürekli akış için süreklilik denklemini çıkararak dalga hareketleri, jet akışları, hidrolik sıçramalar ve sürüklenme kuvvetleri hakkında bilgiler vermiştir [7].

Newton'un (1642–1727) yerçekimi kanununu bulmasından sonra yerçekimi ivmesi de hesaplara katılmıştır. Sürtünmesiz akışlarda en önemli gelişmeleri Daniel Bernoulli (1700–1782), Leonard Euler (1707–1783), Joseph-Louis Lagrange (1736–1813) ve Pier Simon Laplace (1749–1827) yapmışlardır. Euler, şimdi Bernoulli denklemi olarak bilinen bağıntıları ilk geliştirendir. Açık kanal akışları, boru akışları, dalgalar, türbinler ve gemi sürüklenme katsayıları üzerinde Antonie De Chezy (1718–1789), Henri Pitot (1695–1771), Wilhelm Eduard Weber (1804–1891), James Bicheno Francis (1815–1892), Jean Louis Marie Poiseuille (1799–1869) yaptıkları deneysel çalışmalarla akışkanlar mekaniğinin geliştirilmesinde önemli katkılarda bulunmuşlardır [7].

William Froude (1810–1879) ve oğlu Robert'in (1846–1924) modelleme kanunlarını geliştirmesinden sonra, Lord Rayleigh (1842–1919) boyut analizi tekniğini ve Osborne Reynolds (1842–1912) klasik boru deneyini (1883) geliştirerek akışkanlar mekaniğinde çok önemli olan boyutsuz sayıları bulmuşlardır. Henry Navier (1785–1836) ve George Stokes (1819–1903), Newtonian akışlara sürtünme terimlerini de ilave ederek, bütün akışları analiz etmede başarıyla uygulanan ve Navier-Stokes denklemleri olarak bilinen momentum denklemlerini bulmuşlardır [7].

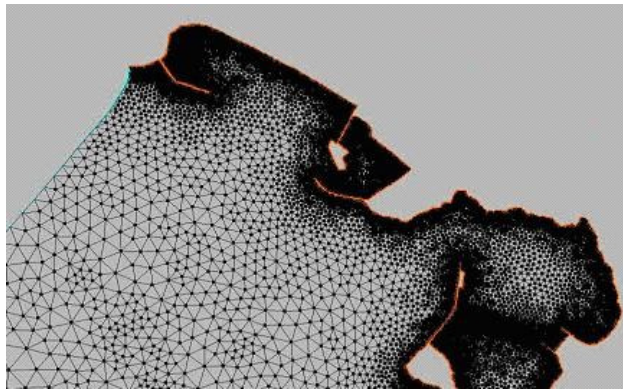
Hesaplamalı Akışkan Dinamiği, akışkan problemlerinin bilgisayar ile çözüldüğü bir bilim dalıdır. Özellikle son yıllarda bilgisayar kapasitelerinin artmasıyla beraber daha sık kullanılmaya başlanmıştır ve gelişmeye de devam etmektedir [19]. Literatürde İngilizce olarak Computational Fluid Dynamics (CFD) geçen yöntemdeki temel amaç, çözülecek problem alanının birbirini dikine ve boyuna kesen ızgara sistemi (grid) şeklinde oluşturularak, sistemi oluşturan her bir elemandaki bilinmeyen değerleri gerekli denklemler kullanarak hesaplamaktır [20].

### 3.2 Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Analizi

Herhangi bir Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) analizi genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada model ve sayısal ağ tabakası oluşturulur, ikinci aşamada sınır şartları ve çözüm ayarları tanımlanır ve üçüncü aşamada ise sonuçlar yorumlanır [7].

#### 3.2.1 Model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması

Bir HAD analizinin yapılabilmesi için modeli bulunan akış hacminin sonlu sayıda parçalara bölünmesi gerekmektedir. Bu işleme sayısal ağ oluşturma işlemi, sonucunda oluşan modele de sayısal ağ veya sayısal model denir. Bu parçaların (elemanlar) sayısı ne kadar çok ise sonuçlar o kadar hassas olur. Ancak bu parçaların sayısı analiz süresine de doğrudan etki eder. Bu nedenle yüksek gradyanların olduğu bölgelerde yoğun, diğer bölgelerde ise daha seyrek elemanlar kullanılarak optimum bir sayı bulmak gerekmektedir [7]. Örnek bir sayısal ağ modeli Şekil 3.1'de sunulmuştur.



**Şekil 3.1:** HAD Analizi için Oluşturulan Sayısal Ağ Modeli [7]

### **3.2.2 Sınır şartlarının ve çözüm ayarlarının tanımlanması**

Sayısal ağ tabakası oluşturulduktan sonra sıra sınır şartlarının tanımlanmasına ve çözüm ayarlarının yapılmasına gelir. Burada dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır. Bunlardan bazıları, sayısal model sınırlarında kullanılacak sınır şartları ve arka planda yapılacak hesaplamalar için kullanılacak sayısal yöntemlerdir [7].

### **3.2.3 Sonuçların yorumlanması**

Sayısal ağ modeli ve sınır şartları belirlendikten sonra HAD analizi yapılabilir. Öncelikle model ve sınır şartları oluşturulduktan sonra elde edilen çıktılar, analiz için girdi olarak kabul edilir ve gerekli ise başka girdi dosyaları da hazırlanarak analiz gerçekleştirilir [7].

## **3.3 Nümerik Modelleme Yöntemi**

HAD analizi yapılacak olan herhangi bir problem, nümerik modelleme yöntemleri ile çözülmektedir. Bu çalışmada sırasında ise İngilizce literatürde Finite Element Methods (FEM) olarak geçen Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılmaktadır. Bu tür problemlerin bilgisayar ortamında çözülmesi için, probleme ait ızgara sisteminin (grid) ve sayısal ağ modelinin (mesh) oluşturulması, daha sonra sınır şartlarının tanımlanması ve sonuçların yorumlanması gerekmektedir [7].

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin artması ile beraber, nümerik modelleme yöntemleri mühendislik problemlerinin çözümünde daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar kapasitelerinin ve güçlerinin artması bunu sağlayan en önemli etkenler olmuştur. Günümüzde bu yöntem hidrolik mühendisliği problemleri için de sıkça kullanılmaktadır. Nümerik modelleme için geliştirilmiş bilgisayar programları, çökelti, erozyon, oyulma, aşınma, türbülanslı akımlar, sifonlar, sel, tsunami, gel-git, dolusavak problemleri gibi birçok hidrolik problemin modellemesini yapabilmektedirler [20].

Burada bu programlardan bazılarına ilişkin özet bilgiler verilecektir [20].

SSIIM: Navier-Stokes ve difüzyon denklemlerini kullanarak, 3 boyutlu düzgün olmayan yapılarda katı madde taşınımı problemlerinin çözümünde faydalanılır.

FLUENT: Sonlu hacimler yöntemine dayanan, sıkıştırılmaz, orta sıkıştırılabilir ve yüksek sıkıştırılabilir akışkanlar için kullanılır.

FIDAP: Sonlu elemanlar yöntemine dayanan, yapısal ve yapısal olmayan sistemler özellikle hidroelektrik projelerindeki su modellemeleri için kullanılmaktadır.

STAR-CD: Yapısal ve yapısal olmayan sistemler ile çok hücreli sistemlerden oluşan birçok hidrolik probleminin (baraj dolusavaklarındaki kavitasyon problemleri ve debi modellemeleri vb.) çözümü için kullanılmaktadır.

TELEMAC: Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2 ve 3 boyutlu birçok hidrolik problemi çözen bir programdır

FLOW-3D: Sonlu hacimler yöntemini kullanarak 3 boyutlu ortogonal sistemleri çözen bir programdır. Özellikle dolusavak, taşkın, baraj yıkılmaları ve hidrolik sıçrama problemlerinde kullanılır.

TABS: Genellikle nehir ve hidrolik mühendisliği problemlerinde kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2 ve 3 boyutlu yapıların çözümünü sağlar.

### **3.3.1 Sonlu elemanlar yöntemi**

Bu yöntemde çözülecek olan problem sonlu boyutta çok sayıda elemana bölünerek analiz edilmektedir. Bu nedenle yönteme Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) denmektedir. İngilizce dilinde ise Finite Element Methods (FEM) olarak kullanılmaktadır. 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 [6].

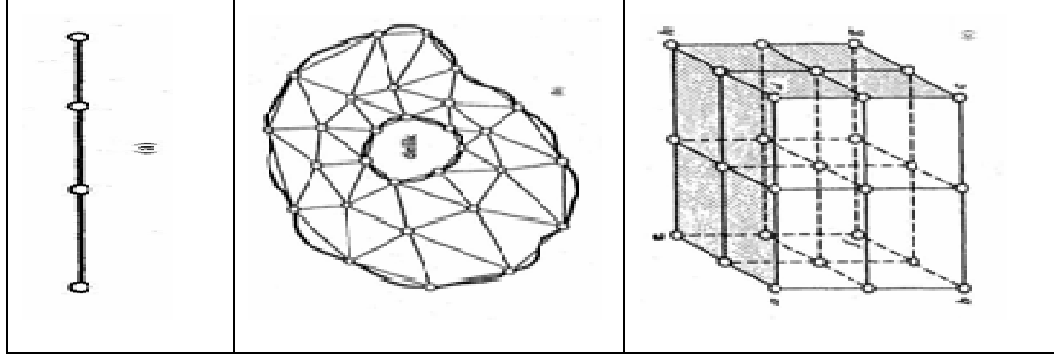
İlk gerçek kabuk elemanlar eksenel simetrik elemanlar olup, bunları silindirik ve diğer kabuk elemanları izlemiştir. Araştırmacılar 1960'lı yılların başlarında düzgün olmayan (non-linear) problemlerle ilgilenmeye başlamışlardır ve Turner ve diğerleri (1960) geometrik olarak bu tür problemler için bir çözüm tekniği geliştirmiştir [6].

Yapı alanı dışındaki problemlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözümüne 1960'lı yıllardan sonra başlanmıştır. İlk olarak Zienkiewicz ve Cheung (1965), SEY ile Poisson denklemini çözmüştür. Daha sonra Doctors (1970), yöntemi potansiyel akışa uygulamıştır. SEY geliştirilerek ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan ve diğer birçok alana uygulanmaktadır [6].

SEY, fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir ve matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde, sıcaklık alanı veya ısı akışı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük alanının almış olduğu en büyük değer veya en büyük gradyen pratikte özel bir önem taşımaktadır.

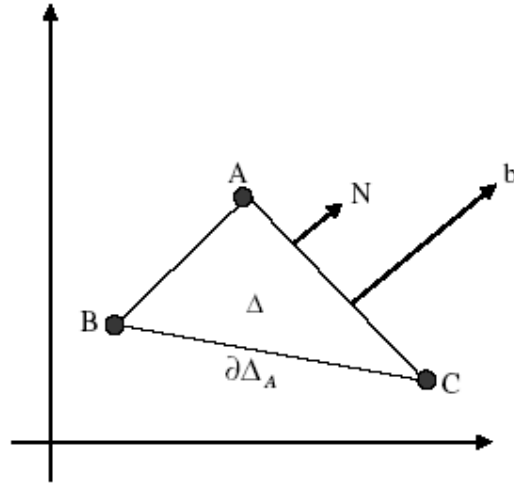
Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözülecek olan problem, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana (element) bölünür. Elemanlar düğüm (node) adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebri bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğümlerdeki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Bu yöntem ile çözülecek problemin, sonlu boyutta çok sayıda elemana bölünerek analiz edildiğinden bahsedilmiştir. Şekil 3.2a'da üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim görülmektedir. Şekil 3.2b'de üçgen elemanlar sistemi haline getirilmiş iki boyutlu delikli bir cisim ve Şekil 3.2c'de a, b, c, d, e, f, g, h şeklinde 8 özdeş dikdörtgen prizma elemana ayrılmış üç boyutlu bir cisim görülmektedir.



**Şekil 3.2:** Bir, İki ve Üç Boyutlu Sonlu Elemanlardan Oluşan Cisimler [21]

Yöntemin çözülmesi için cismi temsil eden her bir elemanın rijitlik matrisinin tanımlanması gerekir. Bunun için Şekil 3.3’de üçgen sonlu eleman alınmıştır [21].



**Şekil 3.3:** Üçgen Sonlu Eleman [21]

Bu şekildeki indisler;

A, B, C: Üçgen sonlu elemanın düğüm noktaları

$A_x, A_y$  : A düğüm noktasının x ve y koordinatları

$\Delta$  : Üçgen sonlu eleman

$\partial\Delta$  : Üçgen sonlu elemanın kenarı

$\partial\Delta_A$  : A kenarı (A düğümünün karşısındaki BC kenarı)

$\partial\Delta_B$  : B kenarı (B düğümünün karşısındaki AC kenarı)

$\partial\Delta_C$  : C kenarı (C düğümünün karşısındaki AB kenarı)

$|\Delta|$  : Üçgen sonlu elemanın alanı

$N$  : Üçgen sonlu elemana ait vektör

$a,b,c$  : A,B,C kenarlarına ait vektörler

$Z$  : z yönündeki birim vektör

ifadelerini tanımlamaktadır.

$$a = (a_x, a_y)$$

$$a = ((B_x - C_x), (B_y - C_y))$$

ifadeleri ise x ve y koordinatlarındaki a vektörünü ifade etmektedir. Bu ifadelere göre eleman matrisleri şu şekilde tanımlanabilir:

- Eleman diverjans matrisi;

$$N = \left( \frac{1}{2} \right) \begin{bmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \\ c_x & c_y \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

- Eleman matrisi;

$$M = \left( \frac{|\Delta|}{12} \right) \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

- Toplam eleman matrisi;

$$M_1 = \left( \frac{|\Delta|}{3} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

- x yönündeki rijitlik matrisi;

$$K_x = \left( \frac{1}{4|\Delta|} \right) \begin{bmatrix} a_x^2 & a_x b_x & a_x c_x \\ a_x b_x & b_x^2 & b_x c_x \\ a_x c_x & b_x c_x & c_x^2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

- y yönündeki rijitlik matrisi;

$$K_y = \left( \frac{1}{4|\Delta|} \right) \begin{bmatrix} a_y^2 & a_y b_y & a_y c_y \\ a_y b_y & b_y^2 & b_y c_y \\ a_y c_y & b_y c_y & c_y^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

- Eleman rijitlik matrisi;

$$K = K_x + K_y = \left( \frac{1}{\Delta} \right) NN^T \quad (3.6)$$

- x yönündeki türev matrisi;

$$L_x = -\left( \frac{1}{6} \right) \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_x & b_x & c_x \\ a_x & b_x & c_x \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

- y yönündeki türev matrisi;

$$L_y = -\left( \frac{1}{6} \right) \begin{bmatrix} a_y & b_y & c_y \\ a_y & b_y & c_y \\ a_y & b_y & c_y \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

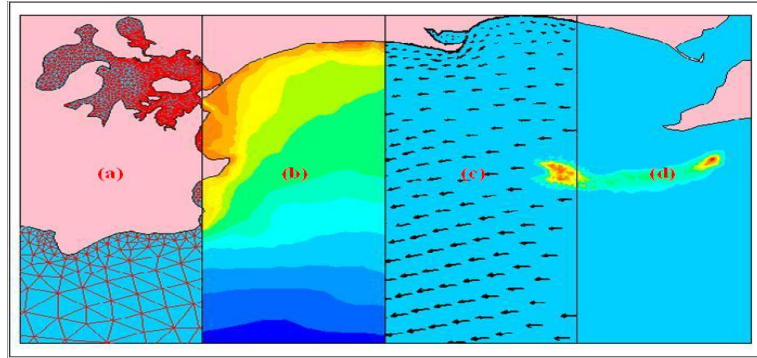
### 3.4 TELEMAT Modelleme Sistemi

TELEMAT programı, Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) analizi yapan, Fransız Elektrik Kurumu Electricite de France (EDF) tarafından üretilmiş ve nümerik modellemeler için kullanılan bir paket programdır. Program, HR Wallingford Software Ltd. firması tarafından pazarlanmaktadır. Firma, programın pazarlanması, içeriği ve kullanımı ile ilgili bilgiler için aşağıdaki web sayfasından da yararlanılabilir:

- <http://www.wallingfordsoftware.com/>

TELEMAC programı kurulumu ve kullanımı zor olmasına karşın; kullanıcıya, çözülen probleme belirli aşamalarda yazılım yolu ile müdahale şansı tanımaktadır [7].

Program, Sonlu Elemanlar Yöntemini (SEY) kullanarak, birçok hidrolik problemin çözümünü 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak gerçekleştirmektedir.



**Şekil 3.4:** TELEMAC Model Sonuçları [7]

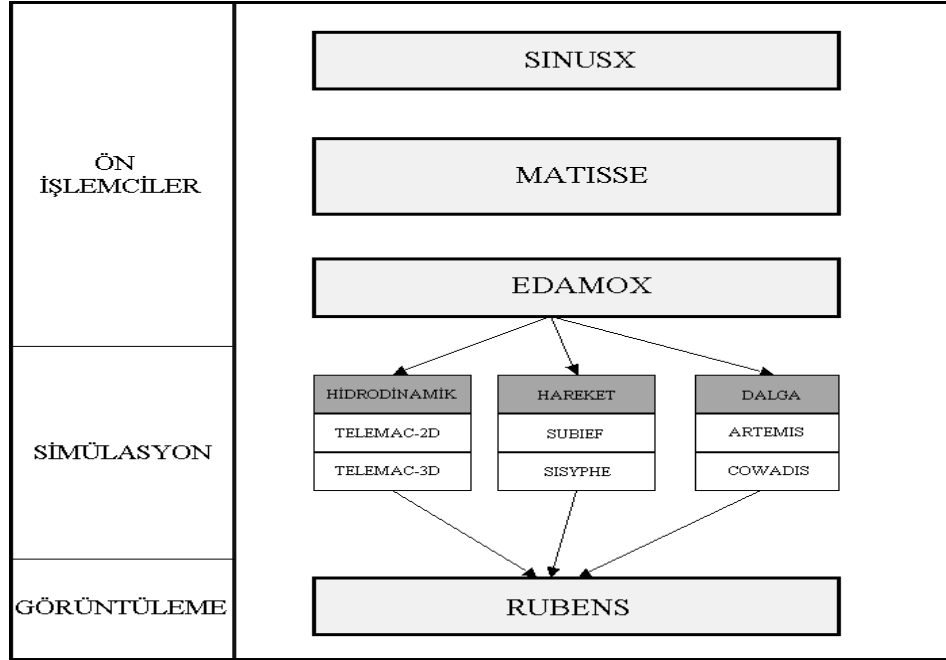
Örnek olarak Şekil 3.4’de TELEMAC ile modellenmiş bazı hidrolik problemlerin simülasyon sonuçları görülmektedir. Burada a,b,c ve d görüntüleri sırası ile; hidrodinamik akış modeli, dalga modeli, katı madde hareketi ve su kalitesi problemleri için yapılmış olan model sonuçlarını göstermektedir.

TELEMAC model sistemi içinde kullanılan çok sayıda modül vardır. Bu modüller başlı başına birer paket program olup, farklı hidrolik problemlerin çözümü için kullanılmaktadır. Model sistemi herhangi bir problemin çözümünü üç aşamalı bir süreç ile yapmaktadır. Bu süreçler sırası ile şu şekildedir:

1. Ön işlemciler
2. Simülasyon
3. Görüntüleme

Çözülecek problemin arazi yapısının tanımlanması, sayısal ağ modelinin kurulması, sınır şartlarının oluşturulması ve hesap ölçütlerinin belirlenmesi gibi tüm altyapı çalışmalarını ön işlemci program yapar. Ön işlemciden elde edilen çıktılar, simülasyon programına aktarılarak, modelleme çalışması yapılır. Bu aşamada yönetici dosyaları girdi olarak kullanılır ve gerek görüldüğü takdirde; hesaplamalar, kullanıcı yazılımları ile desteklenir. Son süreç olan görüntüleme aşamasında ise, yapılan simülasyonların sonuçları görüntülenir. Şekil 3.5’de bu süreçlerde kullanılan bazı TELEMAC modülleri görülmektedir [7].

Bu çalışmada, tsunaminin nümerik modellemesi aşamasında ön işlemci olarak MATISSE, simülasyon hesapları için TELEMAC-2D ve sonuçların görüntülenmesi için de RUBENS programları kullanılmıştır.



Şekil 3.5: Bazı TELEMAC Modülleri [7]

### 3.4.1 Matematiksel Yaklaşım

Projede nümerik hesaplamalar için TELEMAC-2D programı kullanılmıştır. Bu program, serbest yüzeyli akışlar için iki boyutlu hidrodinamik denklemleri çözmektedir. TELEMAC-2D kullanım kılavuzunda bu denklemler vektörel olarak şu şekilde verilmiştir:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(h) + h \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h \vec{v}_T \vec{\nabla} T) \quad (3.12)$$

Bu denklemlerdeki ifadeler şu şekilde açıklanabilir:

- h (m) : Su derinliği,
- u,v (m/s) : Hız elemanları,
- T (-) : Aktif veya pasif izleyici,
- g (m<sup>2</sup>/s) : Yerçekimi ivmesi,
- u, v<sub>T</sub> (m<sup>2</sup>/s) : Momentum ve iz difüzyon katsayıları,
- Z (m) : Taban yükseltisi,
- t (s) : Zaman,
- x,y (m) : Yatay yöndeki koordinatlar,
- S<sub>h</sub> (m/s) : Akışa ait kaynak terim,
- S<sub>x</sub>, S<sub>y</sub> (m/s<sup>2</sup>) : Dinamik denklemlere ait kaynak terimler,
- S<sub>T</sub> (g/l/s) : İze ait kaynak terim.

Burada h, u, v ve T bilinmeyenlerdir.

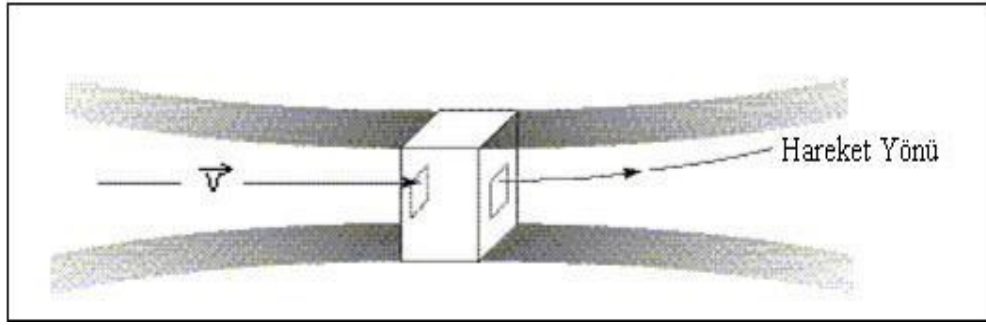
Akışkanın türbülanslı kinetik enerjisini (k) ve türbülanslı kinetik enerji dağılımını (ε) veren denklemler ise şunlardır:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} \text{div}(h \frac{\vec{v}_t}{\sigma_k} \vec{\nabla} k) + P - \varepsilon + P_{kv} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(\varepsilon) = \frac{1}{h} \text{div}(h \frac{\vec{v}_t}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla} \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + P_{\varepsilon v} \quad (3.14)$$

TELEMAC-2D programı, hidrodinamik modeller için çeşitli denklemlerini kullanmaktadır. Hidrodinamik akış modeli genel anlamda Süreklilik denklemi ve Momentum denklemini içermektedir.

Sıkıştırılamayan ideal bir akışkan içindeki parçacığın hareketi incelendiğinde sabit  $V$  hızındaki bir parçacığın hareketi Şekil 3.6'da görülmektedir [21].



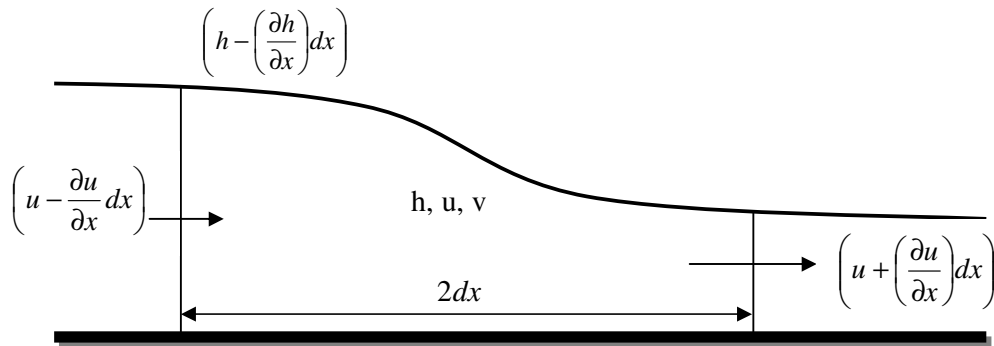
**Şekil 3.6:** Parçacık Hareketi [21]

Birim zamanda kontrol hacminden geçen akış miktarı için şu ifade kullanılır:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_3 A_3 = \dots \quad (3.15)$$

Bu denklemde  $A$  ( $m^2$ ), alan;  $V$  ( $m/s$ ), hız ve  $Q$  ( $m^3/s$ ), debidir. Şekil 3.7'de, sıkıştırılamayan ideal bir akışkan için, su derinliğinin zamana göre değişimi görülmektedir. Bu şekilde  $u$  ( $m/s$ ),  $x$  yönündeki yatay akış hızı,  $h$  ( $m$ ) su derinliği,  $dx$  ise değişim bölgeleri arasındaki yatay mesafedir. Kütlenin korunumu yasasına göre, birim zamandaki akışkan hareketi için şu ifadeler kullanılabilir:

$$\text{Biriken Akım Miktarı} = \text{Giren Akım Miktarı} - \text{Çıkan Akım Miktarı} \quad (3.16)$$



**Şekil 3.7:** Sıkıştırılamayan İdeal Akışkan Hareketi [21]

$$\text{Biriken Akım Miktarı} = \frac{\partial h}{\partial t} 2dx \quad (3.17)$$

$$\text{Giren Akım Miktarı} = \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) \quad (3.18)$$

$$\text{Çıkan Akım Miktarı} = \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) \quad (3.19)$$

Yukarıdaki ifadeler (3.12) denkleminde yerlerine yazılırsa şu denklem elde edilir:

$$\frac{\partial h}{\partial t} 2dx = \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) - \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) \quad (3.20)$$

Buradan bir boyutlu, zamana bağımlı süreklilik denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3.21)$$

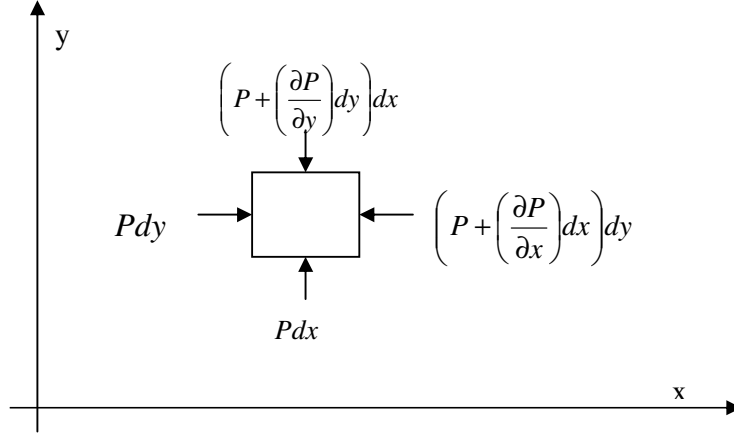
Süreklilik denklemi iki boyutlu olarak şu şekilde yazılır:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3.22)$$

Bu denklem herhangi iki kesit arasında yazılmak istenirse şu hali alır:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = Q \quad (3.23)$$

Şekil 3.8’de iki boyutlu ideal bir akışkan hareketi tanımlanmıştır. Bu şekilde  $m = \rho dx dy$  kütlesi, belirli bir P basıncına maruzdur.



**Şekil 3.8:** İki Boyutlu İdeal Akışkan Hareketi [21]

Newton'un II. Hareket Yasasına göre  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvetleri ile  $a_x$  ve  $a_y$  ivmeleri şu denklemlerle tanımlanır [21]:

$$F_x = a_x dm \quad (3.24)$$

$$F_y = a_y dm \quad (3.25)$$

$$F_x = Pdy - \left( P + \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) dx \right) dy + X\rho dx dy \quad (3.26)$$

$$F_x = \left( -\frac{1}{\rho} \right) \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) dm + Xdm \quad (3.27)$$

$$a_x dm = \left( -\frac{1}{\rho} \right) \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) dm + Xdm \quad (3.28)$$

$$a_x = \frac{du}{dt} \quad (3.29)$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{dx}{dt} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{dy}{dt} \quad (3.30)$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) v \quad (3.31)$$

$$F_y = P dx - \left( P + \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right) dy \right) dx + Y \rho dx dy \quad (3.32)$$

$$F_y = \left( -\frac{1}{\rho} \right) \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right) dm + Y dm \quad (3.33)$$

$$a_y = \frac{dv}{dt} \quad (3.34)$$

$$a_y = \frac{\partial v}{\partial t} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{dx}{dt} + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{dy}{dt} \quad (3.35)$$

$$a_y = \frac{\partial v}{\partial t} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) u + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) v \quad (3.36)$$

Elde edilen kuvvet ve ivme denklemlerinin birleştirilmesi ile Euler momentum denklemleri aşağıdaki şekillerde ifade edilir [21]:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{lokal}} + \underbrace{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) v}_{\text{konvektif}} = \underbrace{\left( -\frac{1}{\rho} \right) \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)}_{\text{basınç}} + \underbrace{X}_{\text{kütle}} \quad (3.37)$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{lokal}} + \underbrace{\left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) u + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) v}_{\text{konvektif}} = \underbrace{\left( -\frac{1}{\rho} \right) \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)}_{\text{basınç}} + \underbrace{Y}_{\text{kütle}} \quad (3.38)$$

Akışkan dinamiği için kullanılan momentum denklemleri; Navier (1827), Poisson (1831), Saint Venant (1843) ve Stokes (1845) tarafından geliştirilmiştir. Euler denklemlerinden geliştirilen Navier-Stokes denklemleri aşağıda verilmiştir [21].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)u + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)v = \left(-\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) + X + \underbrace{v_T \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)}_{viskozite} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)u + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)v = \left(-\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial y}\right) + Y + \underbrace{v_T \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)}_{viskozite} \quad (3.40)$$

TELEMAC-2D içinde kullanılan ve Navier-Stokes denklemleri kullanılarak elde edilen Saint-Venant denklemleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir [21]:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{lokal}} + \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)u + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)v}_{\text{konvektif}} = \underbrace{\left(-g\right)\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)}_{\text{basınc}} + \underbrace{f v}_{\text{koriolis}} - \underbrace{g u \left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h C^2}\right)}_{\text{sürtünme}} + \underbrace{k W_x |W|}_{\text{rüzgar}} + \underbrace{\frac{Q(u - u_0)}{h}}_{\text{kaynakterimle}} \quad (3.41)$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{lokal}} + \underbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)u + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)v}_{\text{konvektif}} = \underbrace{\left(-g\right)\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)}_{\text{basınc}} + \underbrace{f u}_{\text{koriolis}} - \underbrace{g v \left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h C^2}\right)}_{\text{sürtünme}} + \underbrace{k W_y |W|}_{\text{rüzgar}} + \underbrace{\frac{Q(v - v_0)}{h}}_{\text{kaynakterimle}} \quad (3.42)$$

Bu denklemlerdeki ifadeler şu şekilde açıklanabilir:

$u$  (m/s) : x yönündeki yatay hız,

$v$  (m/s) : y yönündeki yatay hız,

$t$  (s) : Zaman,

$g$  (m<sup>2</sup>/s) : Yerçekimi ivmesi,

$h$  (m) : Su derinliği,

$\eta$  (m) : Su seviyesindeki değişim,

$f$  (-) : Koriolis parametresi,

$C$  (m<sup>1/2</sup>/s) : Chezy sürtünme katsayısı,

- $k$  (-) : Rüzgâr şiddeti katsayısı,
- $W$  (m/s) : Yatay yöndeki rüzgâr hızı,
- $W_x$  (m/s) : x yönündeki rüzgâr hızı,
- $W_y$  (m/s) : y yönündeki rüzgâr hızı,
- $Q$  (m<sup>3</sup>/s) : Su debisi,
- $u_0$  (m/s) : x yönündeki su debisi hızı,
- $v_0$  (m/s) : y yönündeki su debisi hızı.

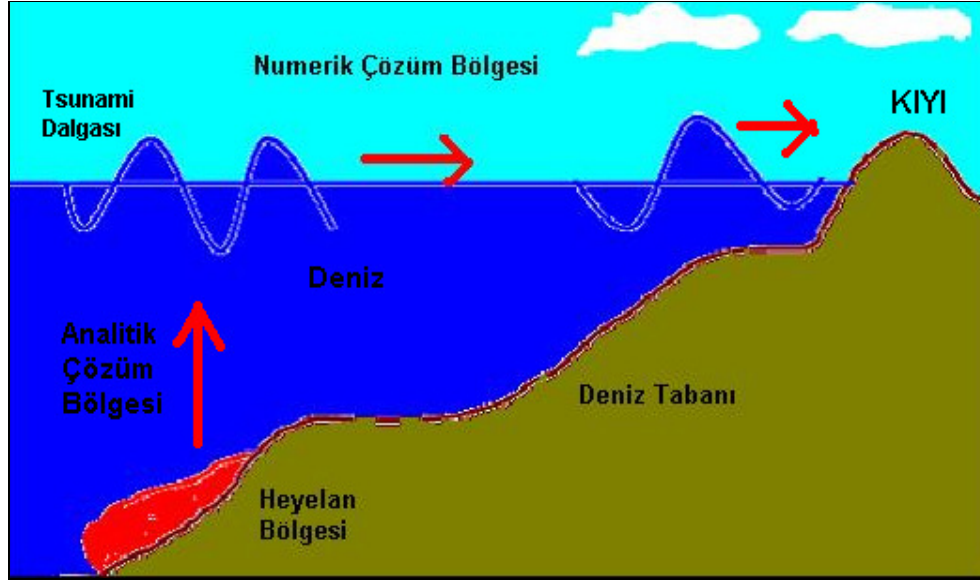
Böylelikle TELEMAC-2D programının kullanmış olduğu Saint-Venant denklemleri ile akış modeli tanımlanmış oldu [21].

## 4. TEZ KAPSAMINDAKİ HİBRİT MODELLEME ÇALIŞMALARI

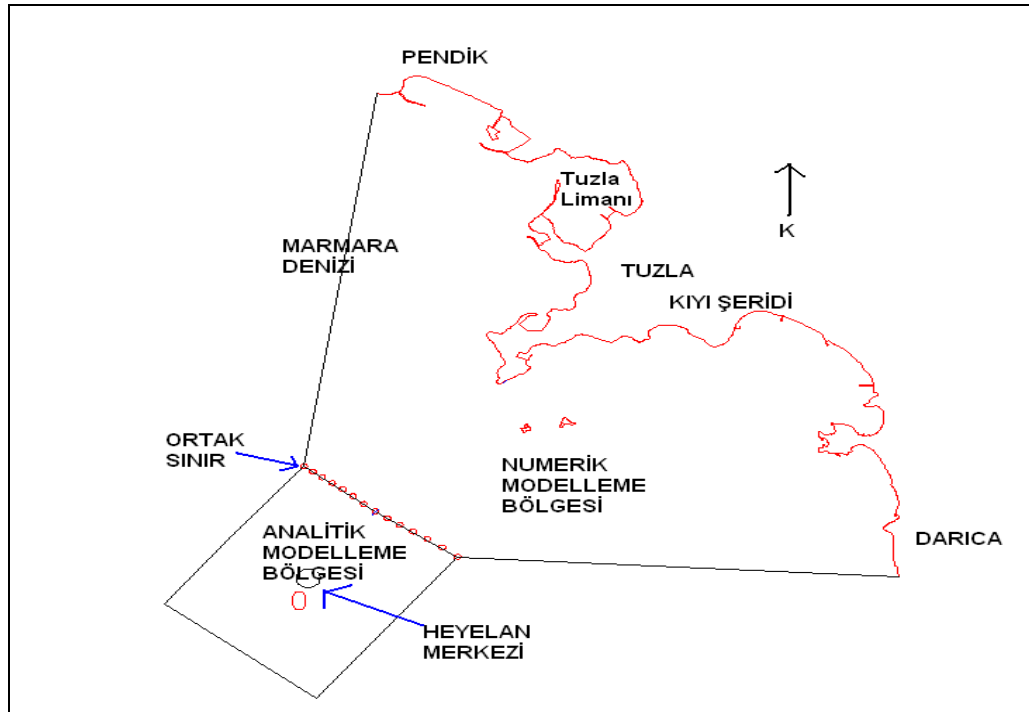
### 4.1 Giriş

Bu bölümde, Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir deprem sonucunda hareket etmesi beklenen, 400 m ile 800 m'lik derinlikteki yamaçta bulunan bu heyelanın yakın bölgede oluşturacağı tsunami genlikleri analitik yöntemle kullanılarak hesaplanmıştır. Yakın bölge için elde edilen tsunami genliklerine ait sonuçlar, dalgaların kıyıya yaklaşması ile beraber kıyı profilinden etkilenmeye başlayacağı için kıyı bölgelerinde, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı Hesaplamalı Akışkan Dinamiği analizi yapan nümerik modelleme yöntemiyle hesaplamalar yapılmış ve tsunaminin çalışma sahasındaki davranışı modellenmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde iki farklı denklem takımı kullanılmıştır. İlk olarak Navier-Stokes denklemleri kullanılarak elde edilen Saint-Venant denklemleri kullanılmıştır. İkinci olarak da Boussinesq denklemleri ile nümerik modelleme yapılmıştır.

Analitik ve Nümerik modelin birlikte çalışabilmesi için belirlenen ortak sınırdaki analitik yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar, nümerik model ile çözülecek bölgenin başlangıç ve sınır koşullarını oluşturmuştur. Böylece kurulan ağ modelindeki sonlu elemanların dış sınırlarında bulunan her düğüm noktasında tsunami genliklerine ait zaman serileri hesaplanmıştır. Bu şekilde analitik yöntemle nümerik yöntemin birleştirilmesinin dünya literatüründe yeni olduğu düşünülmektedir. Bu bölümde yapılan çalışma temsili olarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sunulmuştur. Şekil 4.1'de çözümün profilden görüntüsünü, Şekil 4.2 ise çözümün kuşbakışı görüntüsünü vermektedir.



Şekil 4.1: Çözüm modelinin profilden temsili görünümü



Şekil 4.2: Çözüm modelinin kuşbakışı temsili görünümü

Bir sonraki aşamada ise heyelanın hareket modeli değiştirilmiştir. Önceki çalışmalarda modelin basitleştirilmesi amacıyla denizaltı heyelanının baştan sona sabit ve ortalama bir hız ile hareket ettiği kabul edilmiştir. Tezin ilerleyen aşamalarında modelleme açısından daha zor olan ancak doğadaki gerçek durumu

daha iyi yansıtan ivmeli heyelan modeli kurulmuştur. Bu model de literatürde Marmara Denizi için ilk kez yapılmıştır.

Daha sonraki bölümde ise Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir denizaltı heyelanı sonucunda oluşacak tsunami dalgalarının kıyıya varma süreleri üzerinde çalışılarak, kıyıya olan mesafeler ile dalga varış süresi arasındaki ilişkiler formülize edilmiştir.

Bu çalışmalar aşağıdaki başlıklar altında toplanmıştır.

- Nümerik yöntemde Saint Venant denklemleri kullanılan hibrit modellemeler
- Nümerik yöntemde Boussinesq denklemleri kullanılan hibrit modellemeler
- Heyelan hacmindeki değişimin dalgalara etkisi
- İvmeli heyelanın oluşturduğu tsunaminin hibrit olarak modellenmesi
- Dalgaların kıyıya varış sürelerinin hesaplanması

## **4.2 Nümerik çözümü Saint Venant Denklemleri ile olan hibrit modellemeler**

### **4.2.1 Analitik model çalışmaları**

Bu bölümde Şekil 4.3'de gösterildiği gibi iki basit kaynak modeli  $10\text{m/s} \leq c_T \leq 300\text{ m/s}$  hızlar arasında  $\zeta_0=15\text{--}25\text{ m}$  kalınlıktaki modeller ele alınmaktadır.

Şekil 4.3a, Model-1B'yi göstermektedir. Burada  $c_L, c_c$  ve  $c_R$ , kaynak alanındaki toplama ve azalım bölgesindeki hızları göstermektedir. Ayrıca  $L_R=c_{Rt}^*$  karakteristik uzunluğu gösterir ve maddenin 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(Şekil 4.3b).

Model-1B'de toplama ve azalma bölgeleri üniform genliklere sahip olup  $\zeta_0$  toplama bölgesinin kalınlığını  $\zeta_1$  azalma bölgesinin kalınlığını göstermektedir. Artan ve azalan bölgelerin hacimleri eşit olmak durumundadır ( $A_1W = A_2W$ ). Model-1B için

Şekil 4.3b’de görüldüğü gibi Model 2 için kabul edilen yaklaşık boyutlar Model-1B’dekinden daha büyüktür. Bunun nedeni olarak heyelan tipinin çevrintili olması gösterilmektedir. Çünkü çevrintide daha büyük alan süpürülür. Tablo 4.1’de ise analitik bölümde kullanılan büyüklüklerle ilgili açıklamalar sunulmuştur.

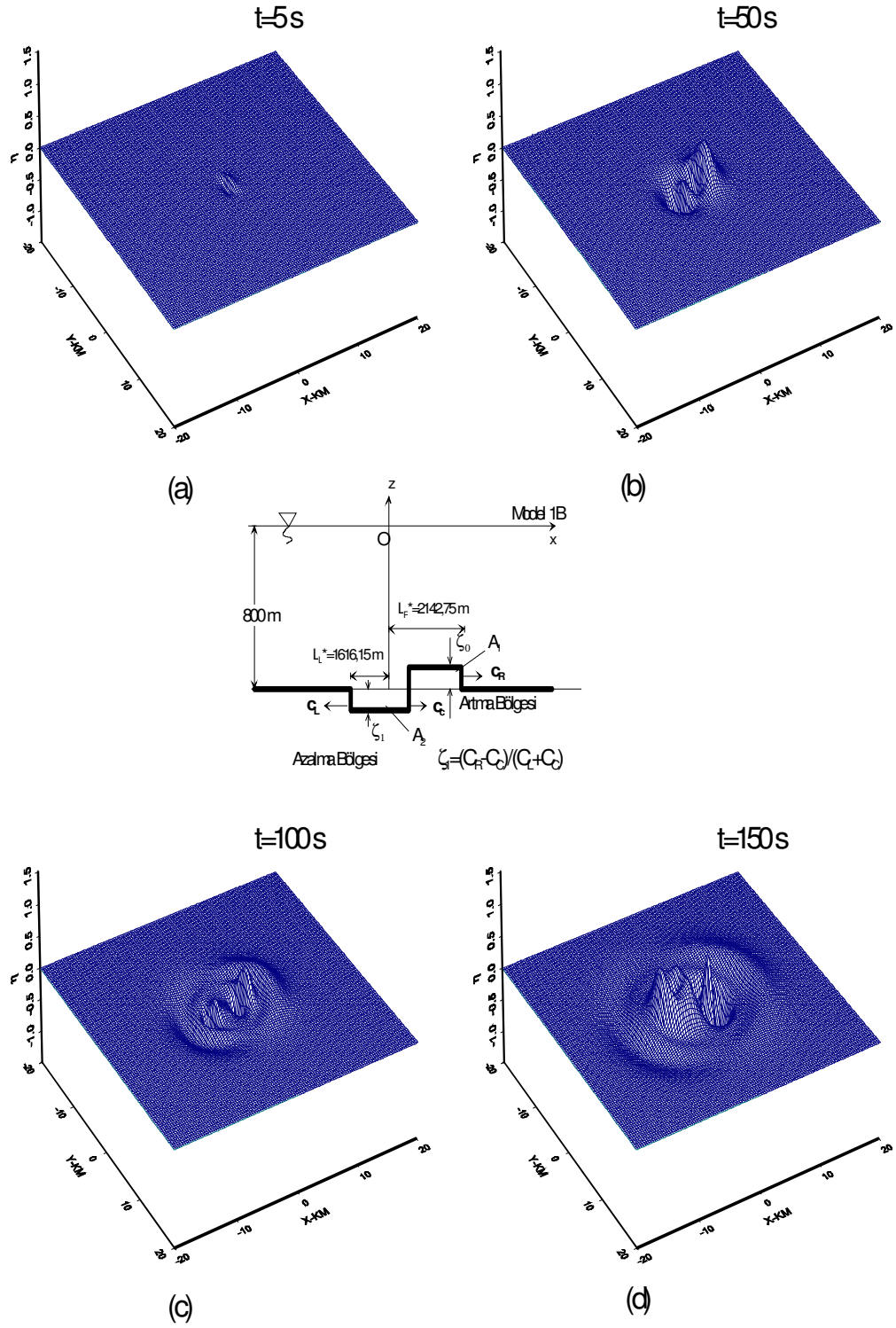
| SİMGE     | BİRİM | AÇIKLAMA                                                         |
|-----------|-------|------------------------------------------------------------------|
| $C_R$     | m/s   | Artma Bölgesinde Öngörülen Ortalama Heyelan Hızı                 |
| $C_L$     | m/s   | Azalma Bölgesinde Öngörülen Ortalama Heyelan Hızı                |
| $C_c$     | m/s   | Artma Bölgesinin Alt Kısımında Kalan Parçacıkların Ortalama Hızı |
| $C_T$     | m/s   | Tsunami Dalga Hızı                                               |
| $t^*$     | s     | Heyelanın Hareket Etme Süresi                                    |
| $L_R^*$   | m     | Heyelanın Artma Bölgesinin En Büyük Uzunluğu                     |
| $\zeta_0$ | m     | Artma Bölgesinin Ortalama Heyelan Kalınlığı                      |
| $\zeta_1$ | m     | Azalma Bölgesinin Ortalama Heyelan Kalınlığı                     |
| $W$       | m     | Heyelanın Ortalama Genişliği                                     |
| $N$       | no    | Düğüm Noktası Numarası                                           |
| $\eta$    | m     | Dalga Yüksekliği                                                 |

42

$\zeta(x, y; t) = \zeta_0 (x / c_R t) (1 - e^{-\alpha t})$  denklemiyle  $x$  ve  $t$ 'ye bağılı 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  $L_{azal}/L_{top} = c_L/c_R$ ,  $A_1 = (1/2)c_R t^* \zeta_0 (1 - e^{-\alpha t})$  ve  $A_2 = (1/2)c_L t^* \zeta_0 (1 - e^{-\alpha t})$  şeklinde yazılabilir. Bu model için  $c_R = c_L$  ise kütle korunumu vardır.

Her iki heyelan modeli için farklı heyelan hızlarında, belirli zamanlarda yakın bölgede belirlenen noktalarda oluşan tsunami genlikleri hesaplanmıştır. Farklı hareket senaryolarına göre iki tip heyelan modeli oluşturularak her model için 13 farklı heyelan hızı dikkate alınmıştır. Bu heyelan hızları,  $C_R = 10$  m/s ile  $C_R = 300$  m/s arasında değişmektedir. Bu hızlardan burada örnek olarak heyelan hızı 20 m/s ve 89 m/s olduğu durumlarda 5, 50, 100 ve 150 saniyelik zaman dilimleri için grafikler Şekil 4.4'te sunulmuştur. Bu grafiklerde amaç dalganın oluşum süreci hakkında bilgi edinmektir. Şekillerdeki  $\eta$  değeri metre,  $X$  ve  $Y$  değerleri ise kilometre cinsinden verilmektedir. Bu şekiller  $C_R = 10$  m/s ile  $C_R = 300$  m/s arasındaki bütün heyelan hızı simülasyonları için elde edilmiştir.

Heyelanın eğiminin düşük ve yerçekimi kuvvetlerinin etkili olduğu durumda heyelan düşük hızlarda hareket eder. Eğimin büyük olması ve heyelanın olduğu malzemedeki iç bağların zayıf veya buz parçacıklarının bulunması, heyelanın daha yüksek hızlarda hareket etmesini sağlamaktadır. Bu hızın en fazla  $C_R = 45$  m/s olabileceği literatürde belirtilmiştir [6]. Heyelanın bu hızdan daha fazla bir hıza çıkması akışkanda mevcut olan sürtünme kuvvetinden dolayı mümkün olmamaktadır. Fakat deprem esnasında bu bölgede yüzey kabarması aynı şekilde heyelanı oluşturabilir, bu durumda hızlar çok büyük değerlere ulaşabilir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada en büyük heyelan hızı  $C_R = 300$  m/s olarak alınmıştır. Buradaki amaç tsunami genliklerinin heyelan hızına bağlılığını belirleyip bir çerçeve oluşturmaktır [6].



Şekil 4.4: Model-1B ve  $C_R=20$  m/s İçin Oluşan Tsunami Dalga Genlikleri.

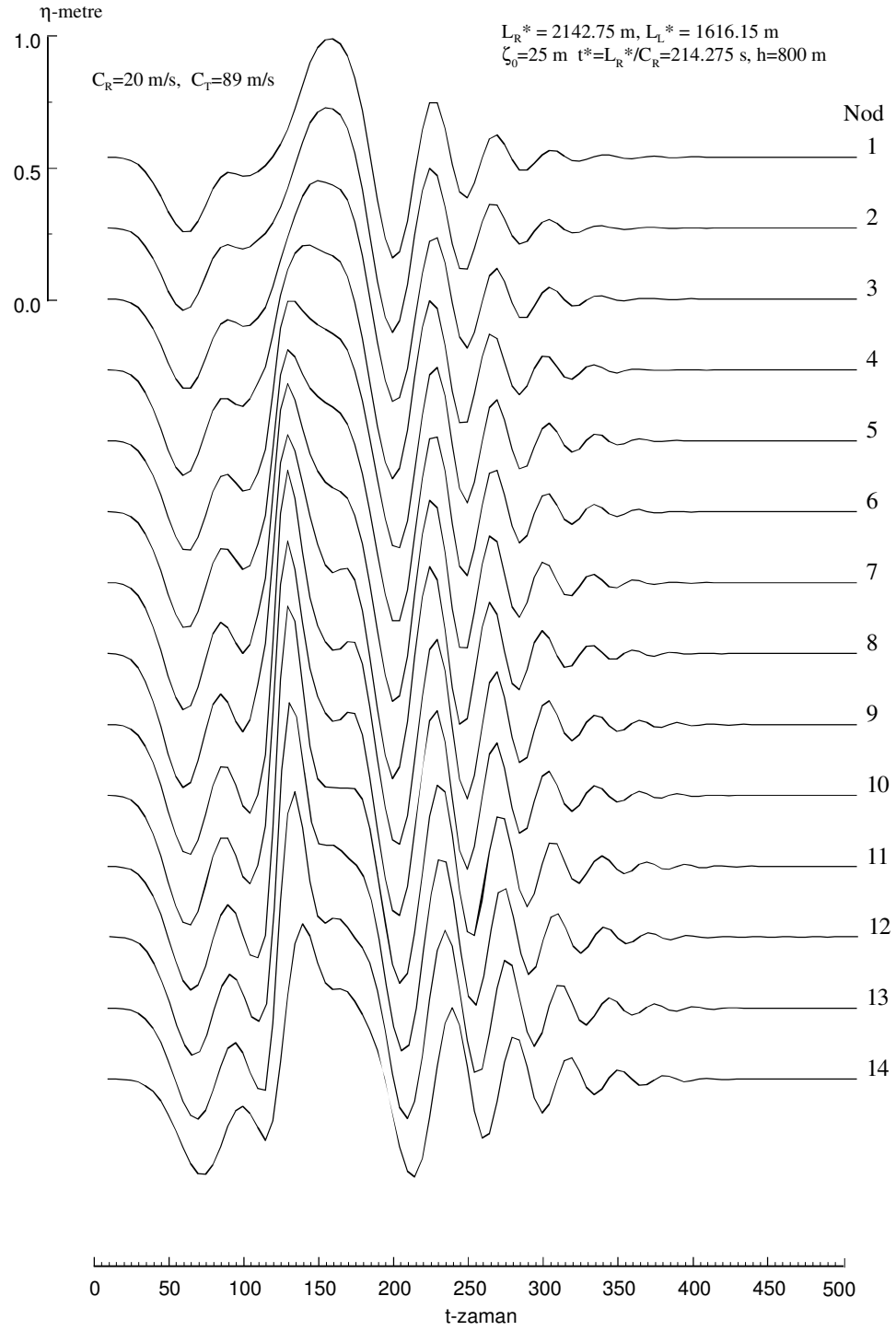
Yukarıda verilen şekilde Model-1B ve  $C_R=20$  m/s için 5, 50, 100 ve 150 s zaman dilimlerinde oluşan tsunami dalga genlikleri görülmektedir. Bu hesaplamalar için;

$C_L=26.50$  m/s,  $t^*=L_R^*/C_R$ ,  $\zeta_1=6.85$  m,  $C_c=10$  m/s,  $W=2792.84$  m,  $C_T=89$  m/s,  $\zeta_0=25$  m olarak alınmıştır.

Daha önce literatürde yapılan çalışmalarda genliklerin heyelan hızının  $C_T = \sqrt{gh}$  'ye yakın olması durumunda (rezonans durum) en büyük değerlere ulaştığını göstermiştir [22]. Burada heyelan hızı  $C_R=10$  m/s ile  $C_R=89$  m/s arasında olduğunda genliklerde hızlı bir artış gözlenmektedir. Bu hızdan sonra değerlerde küçük değişiklikler olmaktadır. Bu sonuçların çok büyük değerlerde heyelan kalınlığına yaklaşması gerekmektedir. Fakat heyelan boyutları su derinliği ile karşılaştırıldığında çok büyük değerlerdedir. Bundan dolayı oluşan genliklerin, heyelan hızının  $C_R = C_T = \sqrt{gh} = 89$  m/s'den daha büyük olması durumunda fazla değişiklik göstermediği gözlenmektedir.

Analitik yöntem kullanılarak aynı zamanda, analitik ve sayısal çözüm bölgeleri için belirlenmiş olan ortak sınırdaki seçilen 14 adet düğüm (nod) noktasında oluşan tsunami genliklerine ait zaman serileri hesaplanmıştır. Sonuçlar yine iki farklı heyelan modeli ve farklı heyelan hızlarında Şekil 4.5'te sunulmuştur. Bu 14 düğüm noktası için 500 saniye boyunca 13 farklı heyelan hızı için dalga genliklerinden oluşan zaman serileri elde edilmiştir. Örnek olarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de analitik ve nümerik çözüm bölgelerindeki 14 noktadan N1 ve N5 noktasında 13 farklı heyelan hızı için oluşan dalga yükseklikleri sunulmuştur. Ortak sınırdaki elde edilen zaman serilerinin oluşturduğu değerler, sayısal çözüm bölgesi için sınır koşulunu oluşturmaktadır. Sayısal model için yapılan simülasyonlarda bu 14 düğüm noktası için elde edilen değerler girdi olarak alınarak bu verilere göre sayısal bölgede çözüm yapılmıştır. Burada örnek olarak Model 1B için 20 m/s heyelan hızında elde edilen çözümler sunulmuştur. (Bkz. Şekil 4.5)

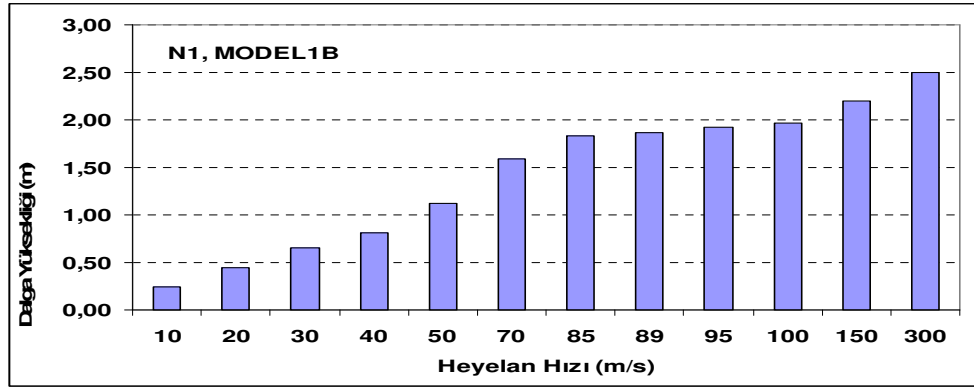
Model 1B



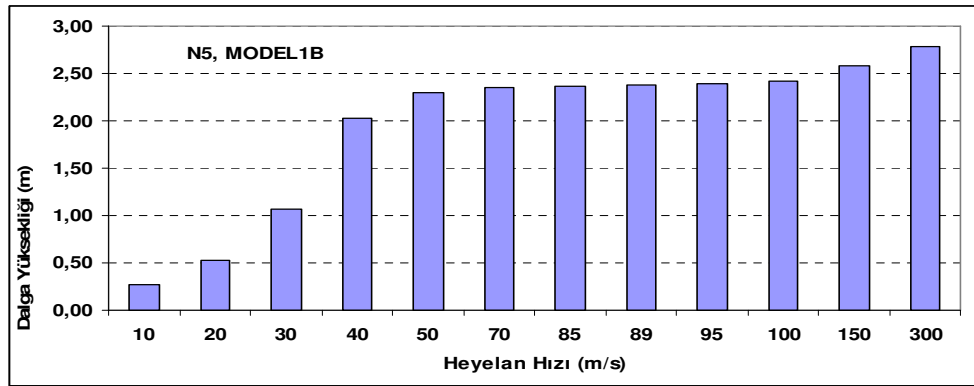
Şekil 4.5: Model-1B ve  $C_R=20 \text{ m/s}$  İçin Tsunami Genliklerine Ait Zaman Serileri.

$$C_L=26.50 \text{ m/s}, \quad C_c=10 \text{ m/s}, \quad C_T=89 \text{ m/s}, \quad t^*=L_R^*/C_R, \quad W=2792.84 \text{ m},$$

$$\zeta_0=25\text{m}, \quad \zeta_1=6.85 \text{ m}$$



**Şekil 4.6 :** N1 noktasında farklı heyelan hızlarında analitik model sonucu oluşan dalgı yükseklikleri



**Şekil 4.7 :** N5 noktasında farklı heyelan hızlarında analitik model sonucu oluşan dalgı yükseklikleri

#### 4.2.2 Nümerik model çalışmaları

Bu çalışmada Nümerik modelleme yöntemi olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Bu yöntemde çözülecek olan problem sonlu boyutta çok sayıda elemana bölünerek analiz edilmektedir. Bu nedenle yönteme Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) denmektedir. İngilizcede ise Finite Element Methods (FEM) terimi kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili paket programları, 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikrobilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yıllarının ortaları ile birlikte Sonlu elemanlar yöntemi ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 adet makale ve kitap yayınlanmıştır.

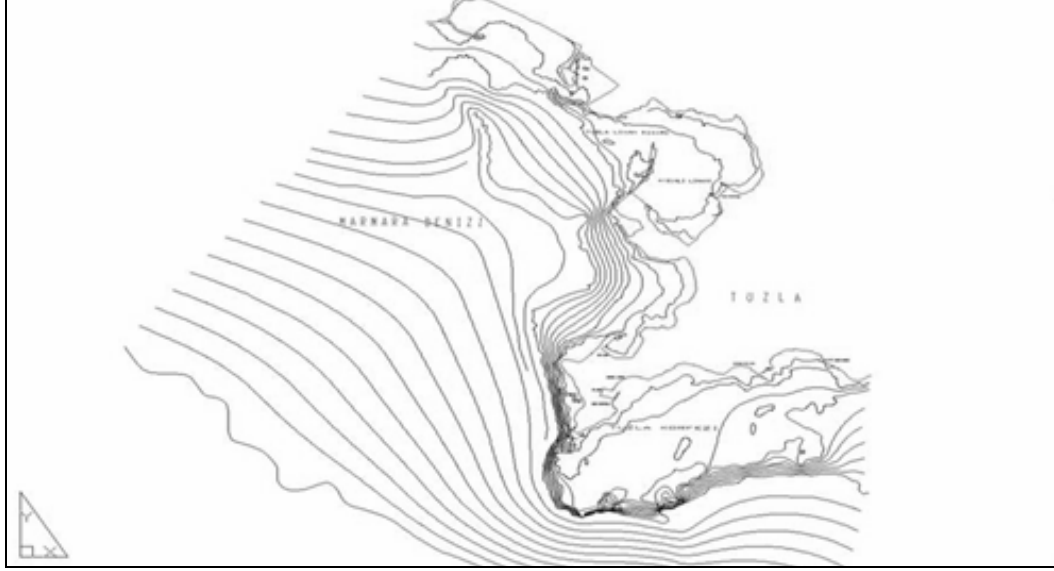
Sonlu Elemanlar Yöntemini (SEY) kullanarak, birçok hidrolik problemin çözümünü 2 boyutlu olarak gerçekleştirmede kullanılan TELEMAR-2D paket programı bu çalışmada Marmara Denizi tabanında meydana gelebilecek olan bir heyelan hareketi

sonucunda deniz yüzeyinde oluşacak tsunaminin Tuzla sahiline kadar olan hareketini nümerik olarak modellemede kullanılmıştır.

Marmara Denizi tabanında meydana gelebilecek hareket için daha önceden seçilen ve su yüzeyinde daha önce belirlenen ortak sınırdaki oluşan hareketin düşey eksenindeki zamanla değişimi analitik yöntem ile her iki heyelan modeline göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmişti. Bu değerler aslında deniz yüzeyinde oluşan dalga yüksekliklerinin zamanla değişiminden ibarettir ve nümerik yöntemin yani TELEMAC-2D programının girdileri olarak kullanılmaktadır. Marmara Denizi'nin heyelan bölgesinden itibaren Tuzla ve civarı sahillerine kadar olan kısmını kapsayan yüzeyinde ise TELEMAC-2D programı kullanılarak dalga hareketinin zamanla değişimini gösteren simülasyonlar bu bölümde yapılmıştır. Bu simülasyonlarda dalgaların kıyıdaki tırmanması dikkate alınmamış ancak katı sınıra ulaşan dalgalarındaki kırılma ve yansımalar dikkate alınmıştır.

Tsunami sonucu oluşacak olan deniz dalgalarının özellikle sığ sulardaki genel karakteristiklerini batimetrik değerler belirlemektedir. Bu dalgalar derin deniz ortamında bile sığ su dalgaları gibi davranırlar. Sığ bölgelerde derinliğin azalması ile beraber, deniz tabanındaki küçük çukurluklar ve tepecikler yapılan modelleme çalışmalarında önem kazanmaktadır. Bu nedenle sığ bölgelerdeki batimetri faktörü göz önüne alınarak batimetrik verilerin oluşturulması gerekir.

Bu çalışmada kullanılan batimetri haritası ise Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD) tarafından aynı bölge için hazırlanmış haritadır(Şekil 4.8). Ayrıca çalışmadaki heyelanın bulunduğu bölge için TÜBİTAK ve Fransız bilim adamları tarafından birlikte hazırlanan; fakat kıyıya yakın bölgeler için detaylı olmayan bir batimetri haritası İTÜ İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim Dalı arşivinde mevcuttur.

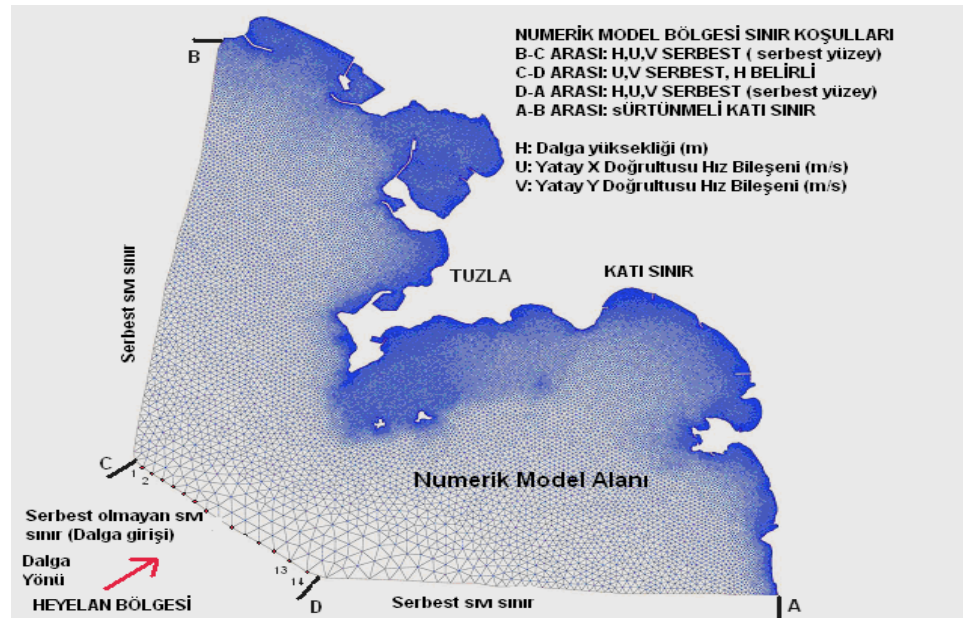


**Şekil 4.8:** Çalışmada kullanılan Batimetrik harita

Sayısal ağ modeli hazırlanırken, bir ön işlemci program olan MATISSE programı kullanılmıştır. Bu tezde MATISSE ve diğer TELEMAC bileşenlerinin kullanımı hakkında detaylı bilgiye girilmeyecektir. Detaylı bilgiler Şeşeoğulları tarafından 2006'da hazırlanan yüksek lisans tezinde sunulmuştur. MATISSE programı bize TELEMAC-2D programında girdi olarak kullanacağımız sayısal ağ modellerini oluşturmaktadır (Bkz Şekil 4.9).

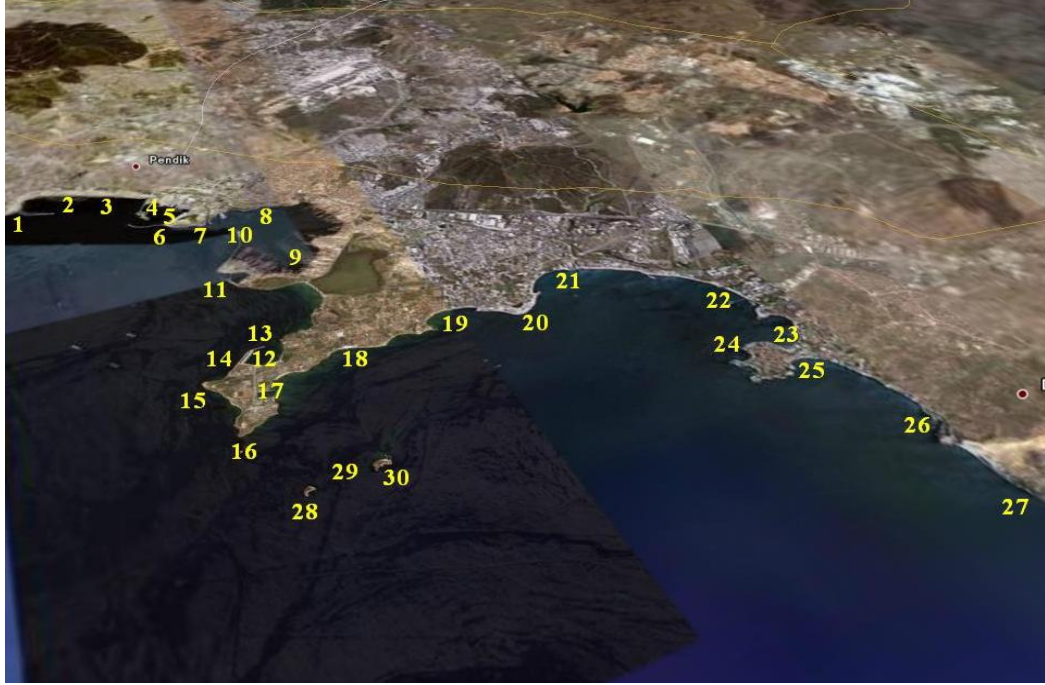
Tuzla kıyı bölgesi için oluşturulan sayısal ağ modellerinden  $m=71344$  adet düğüm noktasına sahip sonlu eleman modelinin görüntüsü Şekil 4.9'da görülmektedir. Burada kırmızı renkli çizgiler model alanını çevreleyen sınır çizgilerini ve adaları oluşturan çizgileri; mavi renkli ve üçgen şeklindeki çizgiler ise çalışma bölgesinde tanımlanan sonlu eleman modelini ifade etmektedir.

Sayısal ağ modelleri oluşturulurken, kullanılan sonlu eleman yönteminde düğüm sayısı artırıldığında çözümlerin daha hassas bir şekilde elde edildiği bilinmektedir. Bu nedenle çalışmanın bundan sonraki aşamalarında  $m = 71344$  adet düğüm noktası olan sayısal ağ kullanılmıştır.  $M=71344$  adet düğüm noktası içeren sayısal ağın nasıl seçildiği Hayır ve diğ. tarafından 2007'de hazırlanan TÜBİTAK proje raporunda detaylı olarak sunulmuştur (Bkz. [6] ).



Bölüm 4.2.1’de analitik model kullanarak Model1B ve Model2 heyelan modellerinin her ikisi için de dalga genliklerinden oluşan zaman serileri heyelan bölgesine yakın deniz yüzeyindeki 14 noktada elde edilmişti. Bu 14 noktanın oluşturduğu çizgi nümerik model bölgesinin dalga yüksekliği belirli ve yatay hız bileşenleri serbest olan sınır bölgesidir (şekil 4.9’da C-D arası). Bu bölgeden nümerik çözüm bölgesine 900 saniye için 14 noktadaki anlık dalga yükseklikleri girilerek bu dalga yüksekliklerinin nümerik çözüm bölgesinde zamanla ilerlemesi gözlemlendi. Şekil 4.9’da bulunan B-C ve D-A arasındaki iki bölge ise serbest sıvı sınır olarak tanımlanmıştır. Bu bölgelerde Dalga yüksekliği ve yatay hız bileşenleri serbest bırakılmıştır. Şekil 4.9’da bulunan A-B arasındaki bölge ise katı sınır olarak tanımlanmıştır. Sürtünmeli katı sınırda dalga yüksekliği ve yatay hız bileşenleri serbest bırakılmamıştır, dalgaların kıyıdaki tırmanması dikkate alınmamış ancak katı sınıra ulaşan dalgalarındaki kırılma ve yansımalar dikkate alınmıştır. Darıca kıyılarından başlayıp, Kartal kıyılarına kadar uzanan yaklaşık 52 km uzunluğundaki kıyı şeridini ve çalışma bölgesindeki iki adet adayı kapsayan bölgede Sonlu Farklar Metodu Navier-Stokes denklemlerinden elde edilen Saint Venant denklemlerine uygulanarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonların sonuçlarını değerlendirmek için kıyı şeridi üzerinde 30 adet nokta belirlenmiştir. Bu noktalardan 27 tanesi tarif edilen kıyı şeridi üzerinden, son üç tanesi ise (P28, P29 ve P30) model alanında bulunan adalar civarından seçilmiştir.

Belirlenen noktaların konumları Şekil 4.10'daki uydu görüntüsünden görülebilir. Bu noktaların X ve Y koordinat değerleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir. Seçilen bu noktaların her biri için; daha önce detaylı olarak bahsedilen 2 farklı heyelan modeli ve 13 farklı heyelan hızı göz önünde bulundurularak simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Her bir simülasyonun süresi 900 saniye (15 dakika) olarak alınmıştır.



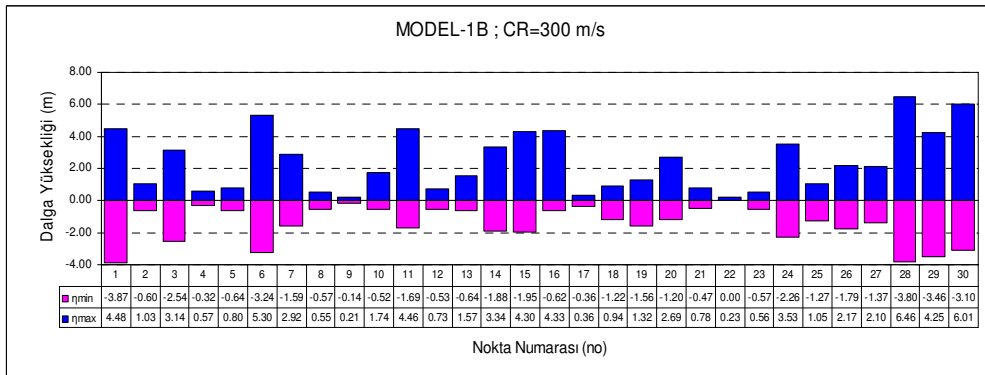
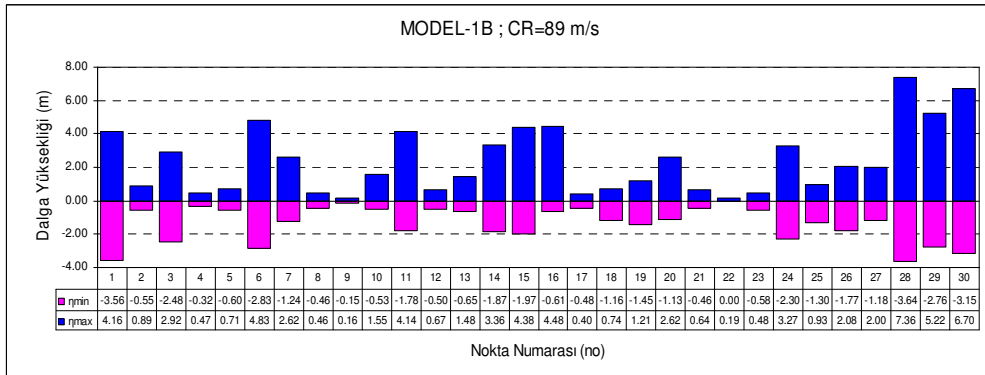
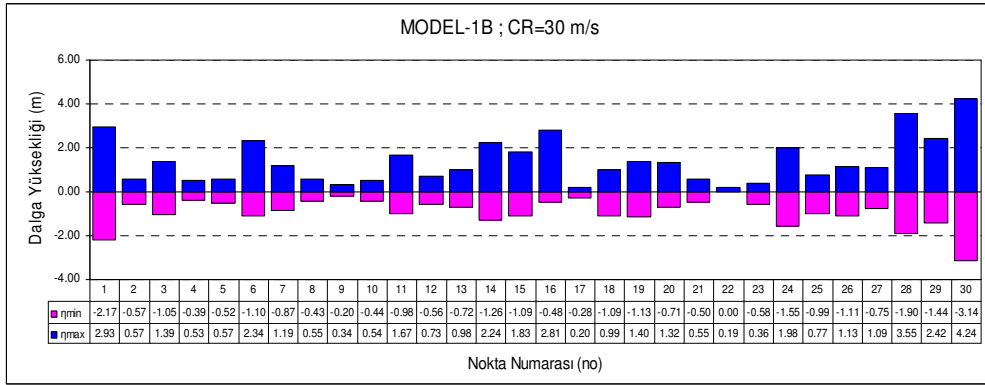
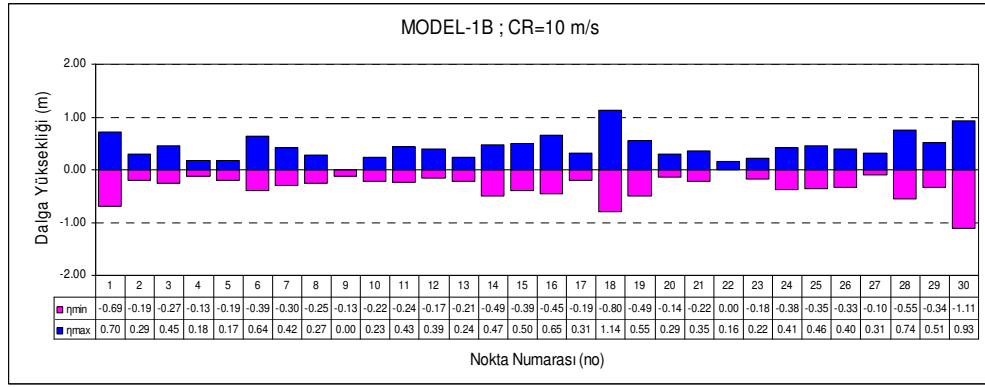
**Şekil 4.10:** Kıyı Şeridi Üzerinde Belirlenen 30 Noktanın Konumları.

**Tablo 4.2:** Kıyı Şeridi Üzerinde Belirlenen 30 Noktanın Koordinatları.

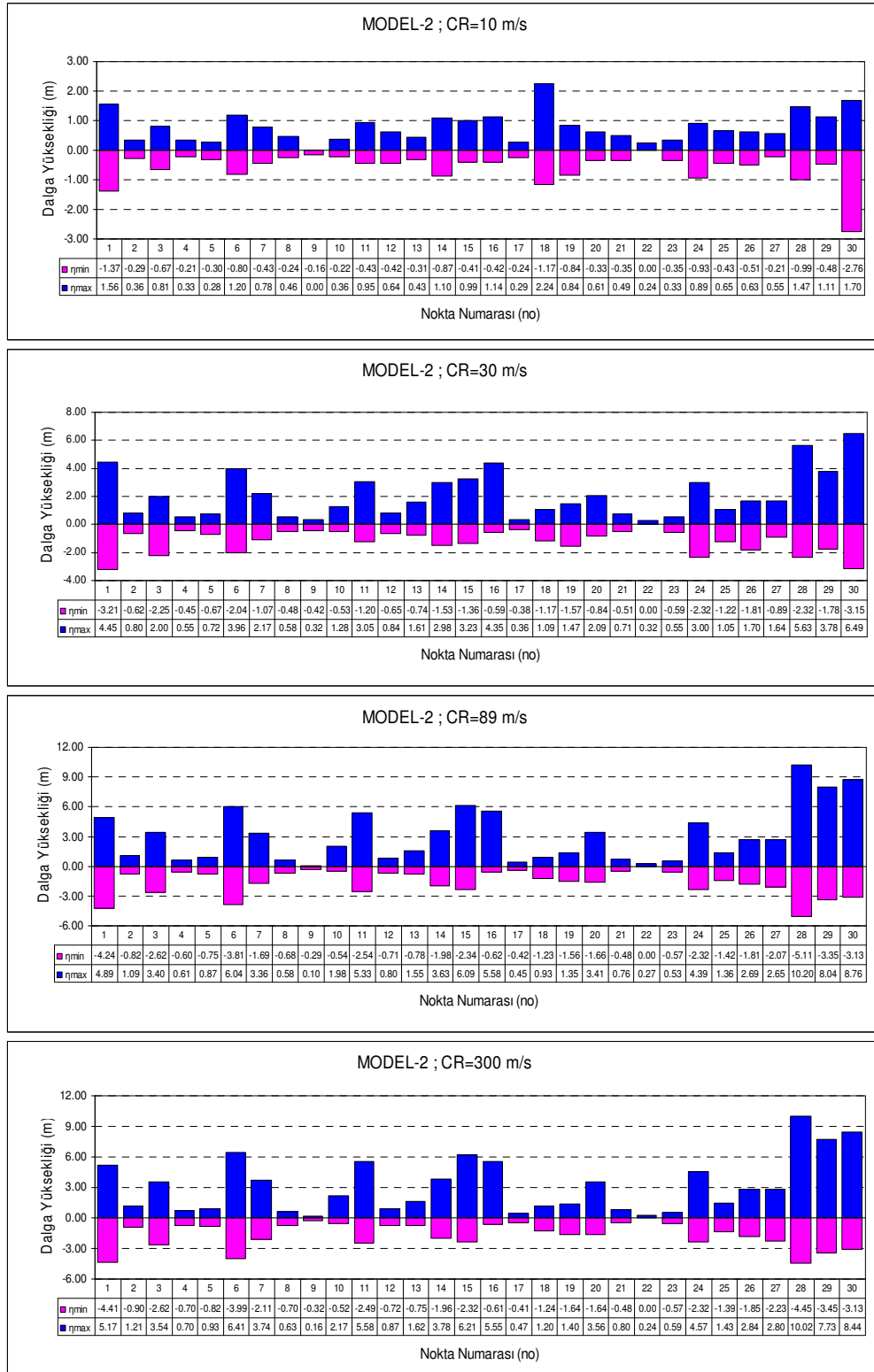
| NOKTA | KOORDİNAT |            | NOKTA | KOORDİNAT |            |
|-------|-----------|------------|-------|-----------|------------|
| P     | X         | Y          | P     | X         | Y          |
| 1     | 435450.80 | 4526863.63 | 16    | 437521.21 | 4519207.04 |
| 2     | 435824.00 | 4527293.75 | 17    | 438084.39 | 4519987.97 |
| 3     | 436849.54 | 4526810.30 | 18    | 439191.20 | 4520507.42 |
| 4     | 437591.97 | 4526216.41 | 19    | 440890.56 | 4520752.32 |
| 5     | 437694.52 | 4525438.42 | 20    | 441929.61 | 4520191.18 |
| 6     | 437623.97 | 4525287.50 | 21    | 442736.43 | 4521118.48 |
| 7     | 438131.64 | 4525043.39 | 22    | 445003.55 | 4519330.55 |
| 8     | 439413.41 | 4525116.05 | 23    | 445091.94 | 4518048.80 |
| 9     | 439267.23 | 4522852.01 | 24    | 443937.56 | 4517927.06 |
| 10    | 438733.40 | 4524700.00 | 25    | 444829.80 | 4517599.25 |
| 11    | 438215.90 | 4522923.00 | 26    | 445449.29 | 4515782.06 |
| 12    | 438036.47 | 4520845.28 | 27    | 445462.15 | 4514550.27 |
| 13    | 438364.13 | 4521109.74 | 28    | 438124.16 | 4517992.54 |
| 14    | 437829.11 | 4520931.53 | 29    | 438466.32 | 4518073.09 |
| 15    | 437207.28 | 4520613.74 | 30    | 438892.37 | 4518157.50 |

Tablo 4.2'deki 30 adet noktadaki dalga karakteristikleri her iki heyelan modeli için  $C_R=10$  m/s den  $C_R=300$  m/s'ye kadar 13 farklı heyelan hızında hesaplanmıştır. Bu heyelan hızları 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s, 70 m/s, 80 m/s, 85 m/s, 89 m/s, 95 m/s, 100 m/s, 150 m/s ve 300 m/s' dir. Bu noktaların her birisindeki maksimum dalga yükseklikleri ile dalga çukurunun oluşturduğu minimum su kotları TELEMAC paket programının sonuç görüntüleme modülü olan RUBENS programı ile heyelan hızının  $c_R = 30, 80, 89, 300$  m/sn olması durumlarına göre her bir noktada hesaplanarak Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de grafik olarak verilmiştir. Şekil 4.11'de Model1B için Şekil 4.12'de ise Model2 için kıyıda elde edilen dalga genlikleri görülmektedir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı gibi denizaltı heyelanının heyelan hızı arttıkça kıyıda oluşan tsunami dalgalarının yükseklikleri de artmaktadır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'ye birlikte bakıldığında önüne dalgakıran, mendirek veya diğer herhangi bir liman yapısı inşa edilmiş noktalardaki maksimum su kotları herhangi bir yapı inşa edilmemiş olanlara nispeten oldukça düşüktür.

Şekil 4.11'deki 4. ve 5. noktalar korunmuş bir limanın içerisinde oldukları için çok yakınlarında bulunan 6. noktaya göre oldukça düşük dalga yükseklikleri oluşmuştur. Aynı durum açık denize bakan 16. nokta ve liman içerisinde seçilmiş olan 17. noktada da görülebilir. Ayrıca açık denize bakan noktalardan da heyelan merkezine yakın olan noktada daha büyük dalga yüksekliği oluşmaktadır. Buna örnek olarak da 11. noktadaki dalga yüksekliği kendisinden heyelan kaynağına daha yakın olan 16.noktaya göre daha düşüktür. Bunlarla beraber deniz içerisinde seçilen 28., 29. ve 30. noktalar iki adet adacığın çok yakınında bulundukları için bu adacıklar tarafından kesilen dalga hareketi iki adanın arasındaki boğazda sıkışarak dalgaların yükselmesine sebep olmasıyla bu noktalardaki dalgalar oldukça yüksektir.



**Şekil 4.11:** Model-1B İçin 30 Nuktada Oluşan En Büyük ve En Küçük Dalgı Yıkseklikleri



**Şekil 4.12: Model-2 İçin 30 Noktada Oluşan En Büyük ve En Küçük Dalgı Yükseklikleri**

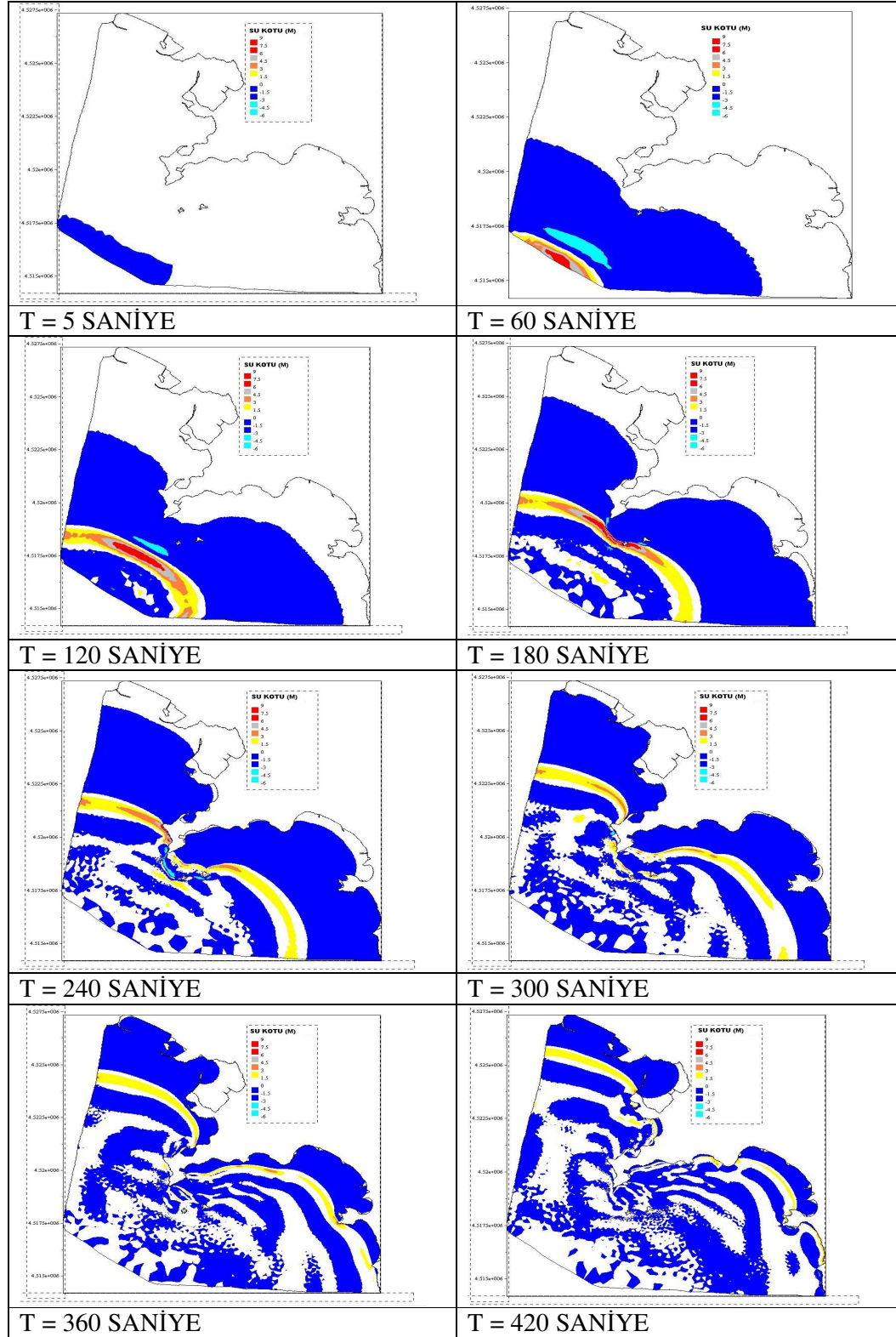
Tsunami dalgalarının kıyıya doğru zamanla ilerleyişi de kullanılan program ile kolayca gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi dalgaların heyelan bölgesinden kıyıya doğru hareketleri istenilen zaman dilimlerinde istenilen bölgelerde kuşbakışı olarak elde edilebilmektedir. Şekil 4.13’de tsunami sonrası oluşan dalgaların Tuzla kıyılarına doğru ilerlemesi ve kıyıya çarpması, yansımaları ve kırılması net bir şekilde görülmektedir. Böylece değişik zaman dilimlerinde alınan görüntüler incelenerek dalgaların kıyıya hangi zaman dilimlerinde ulaştığı ve kıyıdaki oluşturacakları dalga yükseklikleri rahatlıkla elde edilebilir. Eşit zaman aralıklarında alınan görüntüler yardımı ile de dalgaların sığ sulardaki hareket hızının derin sulara nispeten daha düşük olduğu anlaşılabılır.

Bu şekiller aslında heyelan sonucunda oluşan dalganın proje sahasındaki belirli anlarda çekilmiş kuşbakışı resimleridir. Bu resimlerde çeşitli aralıklardaki dalga yükseklikleri verilmiştir. Bu dalga yüksekliklerinden sarı renkte olanlar 2-3 metre yüksekliğindeki dalgaları kırmızı renkte olanlar ise 4-5 metre yüksekliğindeki dalgaları temsil etmektedir. Ve bu resimlerden hangi noktaya ne zaman ne büyüklükte bir dalganın çarpacağı da görülebilmektedir. Aynı risk haritaları dalga yüksekliği için yapıldığı gibi dalganın skaler hızı ve dalga hızının U ve V bileşenleri için de elde edilebilmektedir. Böylece kıyıya yaklaşan dalganın hangi noktada ne kadar hızla kıyıya çarpacağı da modellenmiştir.

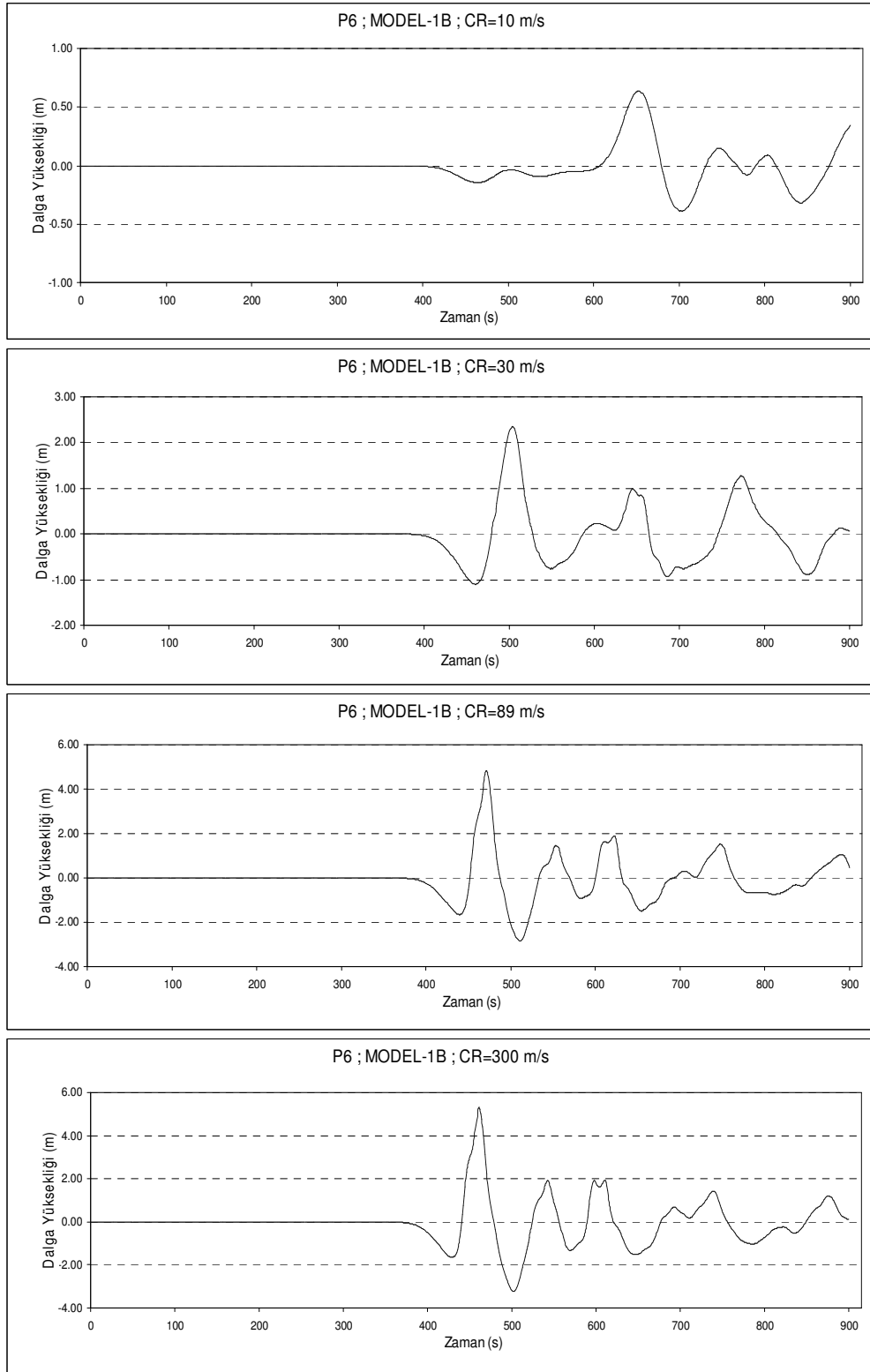
Sonuçların irdelenmesi için seçilmiş olan 30 adet nokta üzerinde su kotlarının zamanla değişimini gösteren zaman serileri de bu bölümde elde edilmiştir. Bu zaman serileri heyelan sonucu oluşacak tsunami dalgalarının kıyıya ne kadar sürede ulaşacağını belirlemek açısından önemlidir. Ayrıca her bir noktaya gelen dalgaların geliş hızı ve noktaya gelen dalga tepelerinin sayısı da bu zaman serilerinden elde edilebilmektedir. Her iki heyelan modelinde 30 noktada  $C_R = 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80, 85, 89, 95, 100, 150, 300$  m/s heyelan hızları için 900 saniye boyunca bu zaman serileri elde edilmiştir. Elde edilen bu zaman serilerinden örnek olarak Model1B ve Model2 için  $C_R = 10$  m/s,  $C_R = 30$  m/s,  $C_R = 89$  m/s ve  $C_R = 300$  m/s için P6 noktasındaki zaman serileri Şekil 4.14’de sunulmuştur. Bu zaman serileri ile ayrıca heyelan hızı arttıkça tsunami dalgalarının kıyıya geliş süresinin kısaldığı görülür. Yani tabandaki kayma hareketi ne kadar hızlı olursa yüzeydeki dalga hareketi de o kadar hızlı olur.

Bu grafikler tsunaminin maksimum dalga yüksekliği ve dalganın söz konusu noktalara ulaşma süresi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bu şekilden ayrıca

heyelan sız arttıkça dalganın kıyıya daha çabuk geldiği de anlaşılmaktadır. Yani heyelan hızındaki artış dalga hızını arttırmaktadır.



Şekil 4.13: Tsunami dalgalarının proje sahasında ilerlemesi

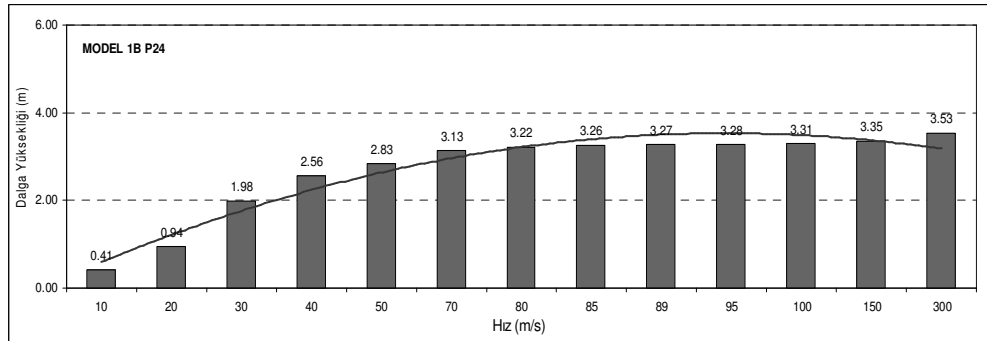
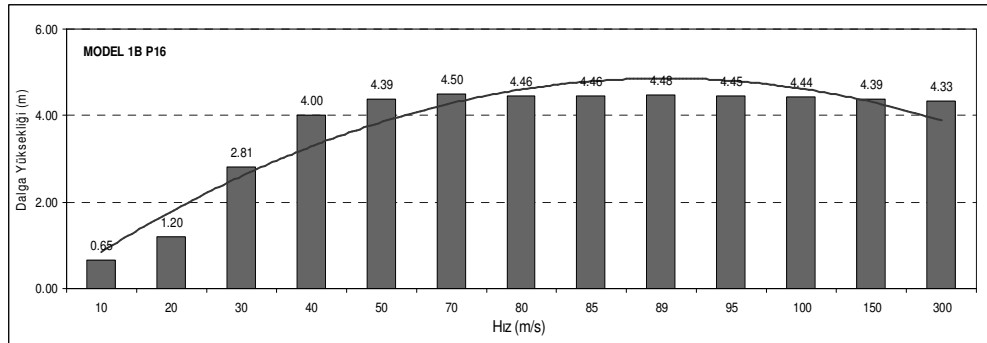
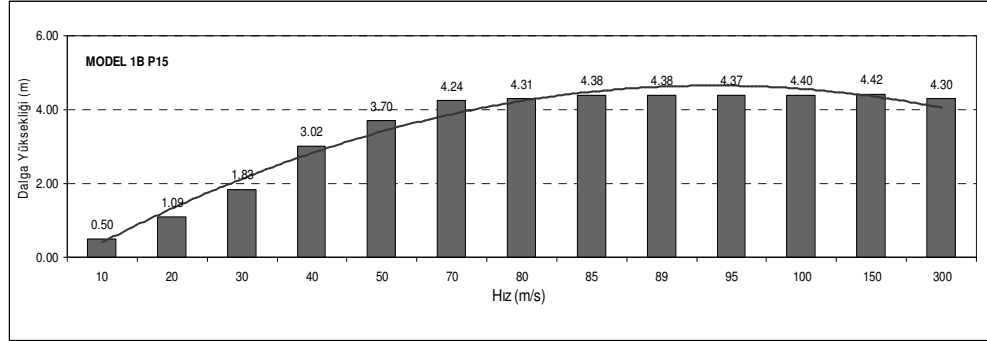
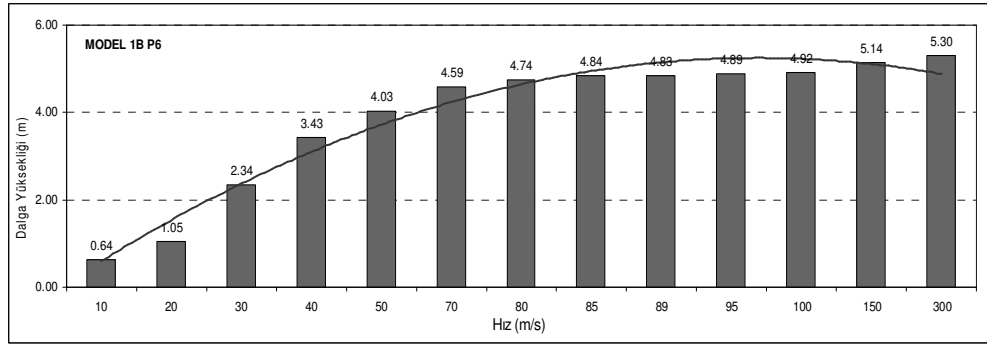


**Şekil 4.14:** Model-1B için P6 Noktasındaki Zaman Serisi Grafikleri

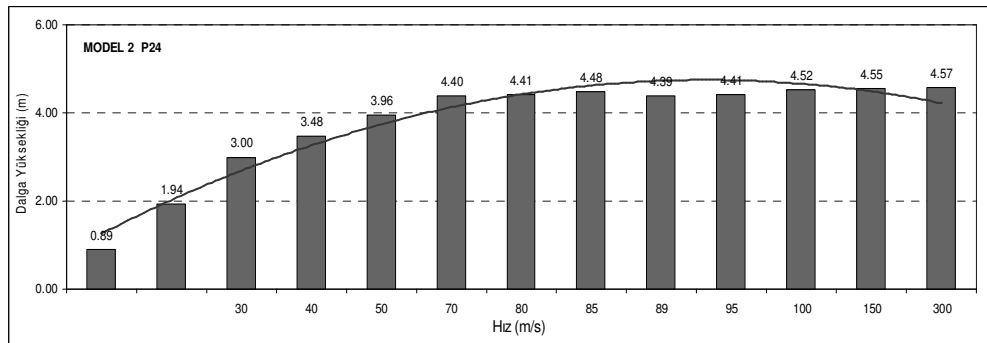
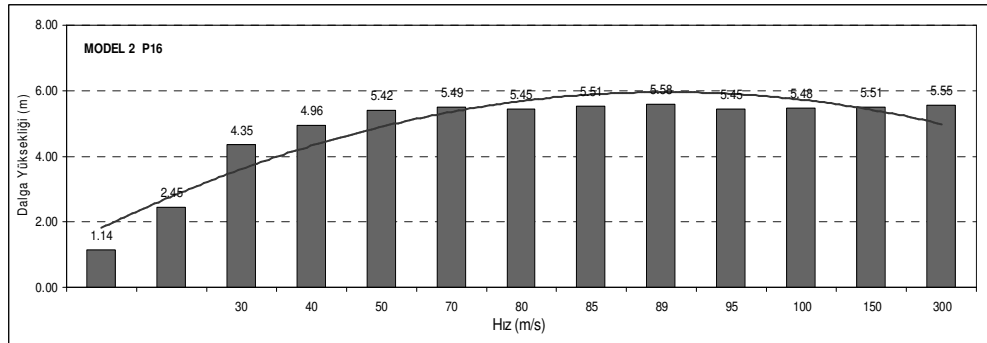
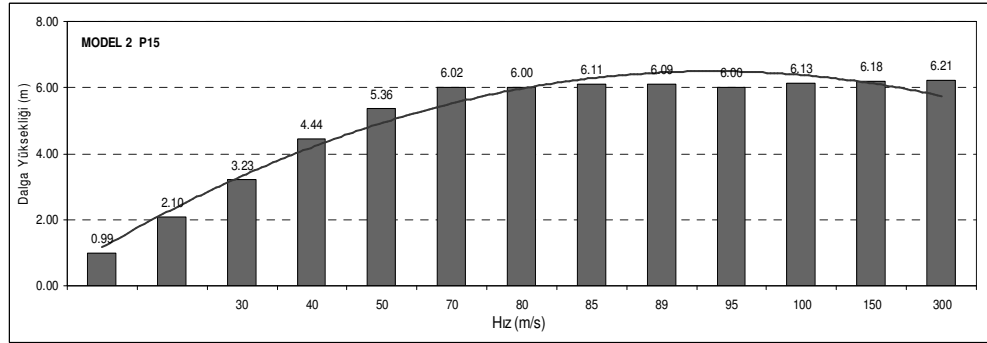
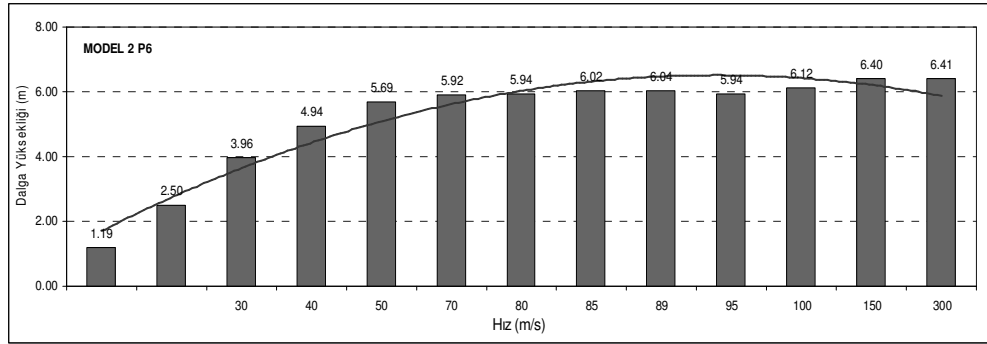
Bu bölümdeki çalışmada 13 farklı heyelan hızı ile yapılmış olan simülasyonlardan elde edilen tsunami genlik değerleri birbiri ile karşılaştırılacak olursa Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'daki gibi bir durum ortaya çıkar. Bu grafikler kıyı şeridi üzerinde seçilmiş olan P6, P15, P16 ve P24 noktalarında farklı heyelan hızlarında oluşan en büyük dalga yüksekliklerini ifade etmektedir. Sonuçlar,  $m=71344$  adet düğüm noktasından oluşan sonlu eleman modeli kullanılarak, iki farklı heyelan modeli (Model1B ve Model2) ve  $C_R=10$  m/s ile  $C_R=300$  m/s arasında değişen 13 farklı heyelan hızı dikkate alınarak elde edilmiştir. Verilen tabloda (Tablo 4.3), 13 farklı heyelan hızı ve iki farklı heyelan modeli için, seçilen dört noktada meydana gelen en büyük dalga yükseklikleri sayısal olarak ifade edilmiştir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, seçilen noktalardaki tsunami genlik değerleri, heyelan hızının belirli bir değerine kadar hızlı bir şekilde yükseliş göstermektedir ve sonrasındaki artış daha düşüktür.

**Tablo 4.3:** Farklı Heyelan Hızlarında Oluşan En Büyük Dalga Yükseklikleri

| $C_R$<br>(m/s) | $\eta_{max}$ (m) |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | P6               |      | P15  |      | P16  |      | P24  |      |
|                | M-1B             | M-2  | M-1B | M-2  | M-1B | M-2  | M-1B | M-2  |
| <b>10</b>      | 0.64             | 1.19 | 0.50 | 0.99 | 0.65 | 1.14 | 0.41 | 0.89 |
| <b>20</b>      | 1.05             | 2.50 | 1.09 | 2.10 | 1.20 | 2.45 | 0.94 | 1.94 |
| <b>30</b>      | 2.34             | 3.96 | 1.83 | 3.23 | 2.81 | 4.35 | 1.98 | 3.00 |
| <b>40</b>      | 3.43             | 4.94 | 3.02 | 4.44 | 4.00 | 4.96 | 2.56 | 3.48 |
| <b>50</b>      | 4.03             | 5.69 | 3.70 | 5.36 | 4.39 | 5.42 | 2.83 | 3.96 |
| <b>70</b>      | 4.59             | 5.92 | 4.24 | 6.02 | 4.50 | 5.49 | 3.13 | 4.40 |
| <b>80</b>      | 4.74             | 5.94 | 4.31 | 6.00 | 4.46 | 5.45 | 3.22 | 4.41 |
| <b>85</b>      | 4.84             | 6.02 | 4.38 | 6.11 | 4.46 | 5.51 | 3.26 | 4.48 |
| <b>89</b>      | 4.83             | 6.04 | 4.38 | 6.09 | 4.48 | 5.58 | 3.27 | 4.39 |
| <b>95</b>      | 4.89             | 5.94 | 4.37 | 6.00 | 4.45 | 5.45 | 3.28 | 4.41 |
| <b>100</b>     | 4.92             | 6.12 | 4.40 | 6.13 | 4.44 | 5.48 | 3.31 | 4.52 |
| <b>150</b>     | 5.14             | 6.40 | 4.42 | 6.18 | 4.39 | 5.51 | 3.35 | 4.55 |
| <b>300</b>     | 5.30             | 6.41 | 4.30 | 6.21 | 4.33 | 5.55 | 3.53 | 4.57 |



**Şekil 4.15: Model-1B İçin Farklı Heyelan Hızlarında P6, P15, P16 ve P24 Noktalarında Oluşan En Büyük Dalga Yükseklikleri**



**Şekil 4.16:** Model-2 İçin Farklı Heyelan Hızlarında P6, P15, P16 ve P24 Noktalarında Oluşan En Büyük Dalga Yükseklikleri

Çalışmamızda ayrıca model alanı üzerinde belirlenen doğrultularda, seçilen doğru boyunca tsunami genlik değerlerinin zamanla nasıl değiştiği de incelenmiştir. Seçilen doğru boyunca dalganın lineer olarak zamanla değişimi takip edilebilir. Bu amaçla sayısal model bölgesi içinde üç çizgi belirlenmiştir. Belirlenen bu L1, L2 ve L3 çizgilerinin uydudan görüntüsü Şekil 4.17’de, başlangıç ve bitiş koordinat değerleri ile L uzunlukları Tablo 4.4’de verilmektedir.

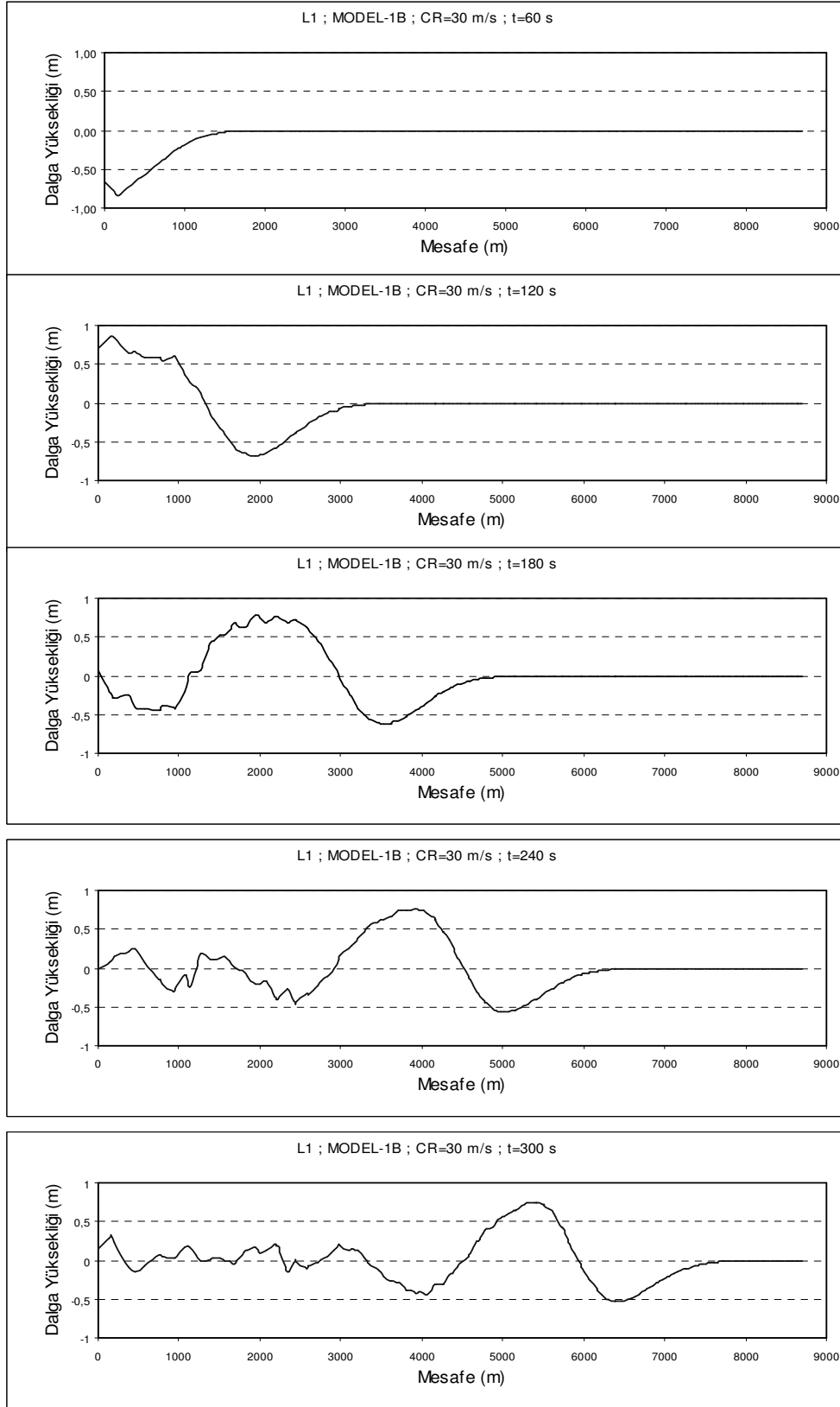


Şekil 4.17: Sayısal Model Bölgesinde Belirlenen L1, L2 ve L3 Doğrultuları

Tablo 4.4: Belirlenen Doğrultuların Mesafeleri ve Koordinat Değerleri

| DOĞRULTU | BAŞLANGIÇ |         | BİTİŞ  |         | MESAFE  |
|----------|-----------|---------|--------|---------|---------|
|          | X         | Y       | X      | Y       | L (m)   |
| L1       | 433961    | 4516960 | 436059 | 4525390 | 8690.36 |
| L2       | 435485    | 4515760 | 441320 | 4520530 | 7535.51 |
| L3       | 435682    | 4515640 | 444259 | 4519990 | 9622.54 |

Bu amaçla Model1B ve Model2 heyelan modelleri ve dört farklı heyelan hızı ( $C_R=10$  m/s,  $C_R=30$  m/s,  $C_R=89$  m/s ve  $C_R=300$  m/s) dikkate alınarak,  $t=600$  s (toplam 10 dk, 1'er dk arayla) süresine kadar her üç doğrultuda tsunami genlikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Model1B için  $C_R=30$  m/s heyelan hızına ait grafikler Şekil 4.18’de sunulmuştur.



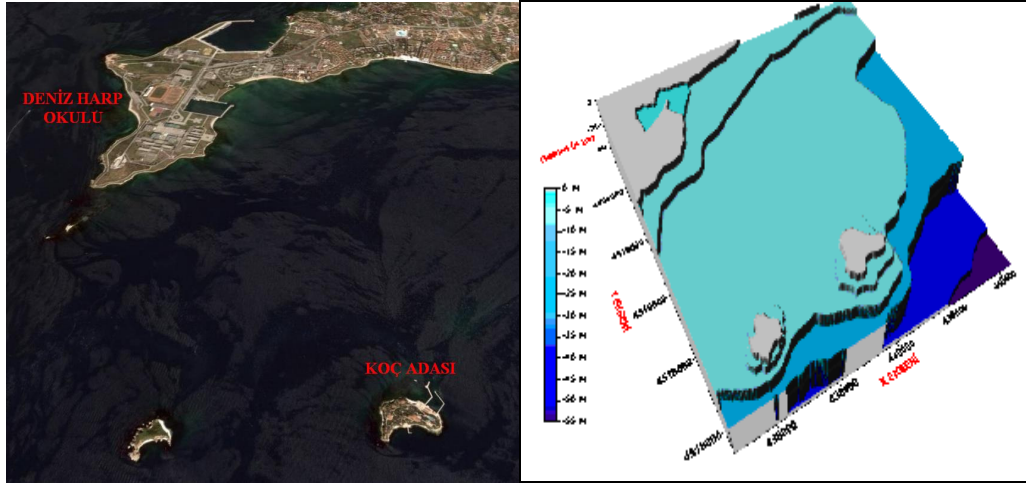
**Şekil 4.18:** Model1B ve  $C_R=30$  m/s için L1 Doğrultusu Boyunca 1–5 dk Arasında Oluşan Dalga Genlikleri

Farklı zamanlarda oluşan dalga genliklerini, model alanı üzerinde üç boyutlu olarak görselleştirilmesi de bu tez kapsamında yapılmıştır. Böylece tsunami sonucu oluşan dalgaların zamana göre konumları ve kıyı bölgelerine hangi sürelerde ulaştığı ve proje sahasındaki yansıma, kırılma ve yön değiştirmeleri daha kolay görülebilmektedir. Denizaltı heyelanının harekete geçmesi ile birlikte yüzeydeki değişim istenen her zaman dilimi için üç boyutlu olarak çizilmiştir. Denizaltı heyelanın hareketinin başladığı  $t=0$  saniye anında doğal olarak herhangi bir dalga hareketi görülmemektedir.

Bu aşamada proje sahasının üç boyutlu görüntüleri Model1B ve Model2 heyelan modelleri için ve farklı heyelan hızlarında ( $C_R=10$  m/s,  $C_R=30$  m/s,  $C_R=89$  m/s ve  $C_R=300$  m/s)  $t=660$  s (toplam 11 dakika, 1'er dakika arayla) boyunca elde edilmiştir. Sayısal model bölgesi için elde edilen sonuçlardan bir kısmı Şekil 4.19'da sunulmaktadır.



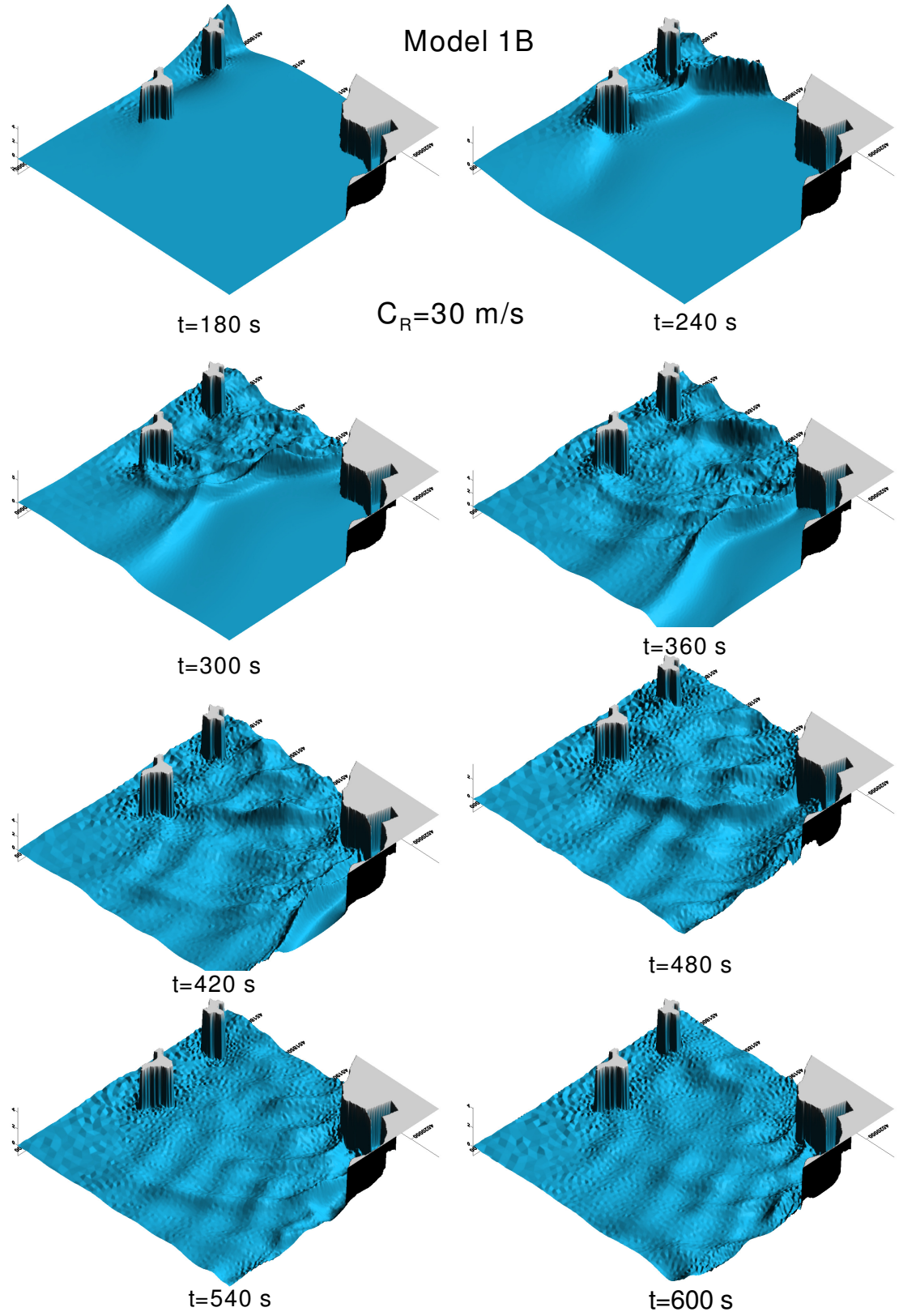
Model alanının hem tamamını hem de model alanı içerisinde seçilen belirli bir bölgeyi detaylı olarak üç boyutlu incelemek mümkündür. Böylelikle belirlenen bölgelerde, oluşan dalgaların zamana göre konumları ve kıyı kesimlerindeki hareketleri daha ayrıntılı olarak görülebilmektedir. Buna örnek olarak proje sahasında A1 adında küçük bir iç bölge belirlenmiştir. Belirlenen A1 bölgesi, model alanında bulunan iki adanın olduğu ve Tuzla'daki Deniz Harp Okulu'nun bulunduğu bölgeden oluşmaktadır. Bu bölge aynı zamanda denizaltı heyelan bölgesinin en yakınında bulunan kıyı kesiminin bir kısmını oluşturmaktadır. A1 bölgesinin uydudan görünümü ve bölgenin derinlik değişimini gösteren sayısal üç boyutlu görüntü Şekil 4.20'de sunulmuştur.



**Şekil 4.20:** A1 Bölgesinin Uydudan Görünümü ve Bölgenin Derinlik Değişimini Gösteren Sayısal Üç Boyutlu Görüntü

Model1B ve Model2 heyelan modelleri ve  $C_R=30$  m/s heyelan hızı dikkate alınarak elde edilmiş olan bölgesel sonuçlar, A1 bölgesinde başlayan dalga hareketinin süresi göz önünde bulundurularak sunulmuştur. Oluşan dalga genliklerine ait üç boyutlu görüntüler  $t=180$  saniye ile  $t=600$  saniye arasında birer dakika arayla gösterilmiştir.

A1 bölgesi için Model1B heyelan modeli ve  $C_R=30$  m/s heyelan hızı dikkate alınarak elde edilen üç boyutlu görüntüler Şekil 4.21'de verilmiştir.



**Şekil 4.21:** Model1B ve  $C_R=30$  m/s için t=180s ile t=600 s Arasında A1 Bölgesinde Oluşan Dalga Genliklerinin Üç Boyutlu Görüntüleri

### 4.3 Nümerik Çözümü Boussinesq Denklemleriyle Olan Hibrit Modellemeler

#### 4.3.1 Çalışmanın sebebi ve denklemler

Bu bölümdeki temel amaç dispersif dalgalar ve dispersif olmayan dalgaların arasındaki farkları inceleyerek kıyıda verecekleri hasarlar hakkında daha detaylı bilgi sahibi olmaktır. Dispersif dalga modelleri Boussinesq dalga denklemleri ile dispersif olmayan dalga modelleri de Saint Venant dalga denklemleri ile ifade edilir. Önceki kısımda elde edilen hibrit modelde dispersif olmayan Saint Venant denklemleri modelin nümerik modelleme kısmında kullanılmıştı. Bu bölümde ise dispersif dalga denklemleri olan Boussinesq denklemleri kullanılacaktır.

Bu bölümde, Bölüm 4.2'deki hibrit modellemenin analitik kısmı yani denizaltı heyelanının oluşmasından sonra hareketin su yüzeyine çıkışına kadar olan kısmı olan Todorovska ve Hayır tarafından geliştirilen analitik modelin Marmara Denizi'ne adaptasyonu aynen alınmıştır(Bkz. Şekil 4.1). Şekil 4.2'de gösterilen ara sınır bölgesindeki 14 noktadaki dalga yükseklikleri kullanılarak nümerik modelleme bölgesindeki dalga yükseklikleri ve diğer dalga parametreleri dispersif dalga modeli olan Boussinesq denklemleri ile çözülmüştür.

Pek çok araştırmacı arasında dalga modellemelerinde dispersiyonun dalga karakteristiklerine etkisi tartışma konusu olmuştur. Bir kısım araştırmacılar dispersiyonun çok az ve ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu savunmuş, diğer bir kısım araştırmacılar ise önemli sayılabilecek etkileri olduğunu savunmuşlardır [23,24,25]. 2004 yılında Hint okyanusunda meydana gelen tsunami dalgalarının çok açık bir şekilde dispersif dalgalar olduğu görülmüştür [25].

Tsunami dalgasında en öndeki dalga tepesi ilerlerken yatay düzlemde değişik frekans ve genliklerde saçılmalar olur. Bu sebeple en öndeki dalgayı bir dalga katarı halinde arkasında oluşmuş dalgalar takip eder. Kıyıya yakın yerlerde bu dalga katarları kıyı batimetrisi ve girinti çıkıntısı gibi etkilerden dolayı geriye yansıyan ya da kırılan en öndeki dalga ile etkileşir [26]. Bu etkinin Marmara Denizi için miktarını bulmak bu bölümdeki çalışmanın amacıdır.

Saint Venant tarafından Navier Stokes denklemlerinden türetilen sığ su dalga modeli aşağıdaki gibidir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial\eta}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

Momentum Denklemleri:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + g \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + g u \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h C^2} \right) = 0 \quad - x \text{ doğrultusu için} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + g \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + g v \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h C^2} \right) = 0 \quad - y \text{ doğrultusu için} \quad (4.3)$$

Burada  $h(x, y)$  su derinliği;  $u(x, y; t)$  ve  $v(x, y; t)$  yatay x-,yönlerindeki hız bileşenleri;  $\eta(x, y; t)$  serbest su yüzeyi kotu;  $t$  zaman; ve  $C$  Chezy sürtünme katsayısıdır [21].

Boussinesq sığ su modelinde de aynı süreklilik denklemi bulunur ancak diğerinden farkı momentum denklemlerinde bulunan dispersiyon terimidir. Denklem 4.4 ve 4.5 Boussinesq dalga modelinin momentum denklemleridir. Bu denklemlerin sağ tarafında dispersiyon terimi bulunmaktadır [21].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) v + g \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + g u \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h C^2} \right) = \frac{g h^2}{3} \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) u + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) v + g \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + g v \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h C^2} \right) = \frac{g h^2}{3} \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \quad (4.5)$$

Bu denklemlerdeki dispersiyon terimi denklemi 2. dereceden bir diferansiyel denklem haline getirdiği için Boussinesq modeli Saint Venant yönteminden daha

karmaşıktır. Ancak dispersiyon etkisini de hesaba kattığı için bu modelin daha net ve gerçekçi sonuçlar verebileceğini söyleyebiliriz.

Fiziksel olarak dispersiyon terimi açılal hızın dik bileşenidir. Uzun dalga teorisinde tamamen ihmal edilen açılal hız vektörünün dikey bileşeni, Boussinesq dalga teorisinde ihmal edilmemekte ve su derinliğı boyunca doğrusal olarak değıştiğı varsayılmaktadır. Dolayısıyla, dalga dinamik basıncı da uzun dalga teorisinin aksine artık statik basınca eşit olmamaktadır. Boussinesq denklemlerinde momentum denklemi, sağ taraftaki dispersiyon terimi ile lineer olmayan (nonlinear) uzun dalga teorisinden (Saint Venant denklemlerinden) ayrılmaktadır. Bu terim temelde soldaki lineer olmayan terimi dengeleyerek, lineer olmayan daimi dalgaları mümkün kılmaktadır. Ayrıca, bu terim sayesinde dalga hızları uzun dalga teorisine kıyasla daha doğru olarak modellenmektedir [27].

Marmara Denizi'ndeki bir tsunami modellemesinde dispersif etkinin araştırılmasının sebebi ise hem suyun sığ olması sebebiyle hem de kıyıların çok girintili ve çıkıntılı olmasından dolayı oluşan tsunami dalgalarında dispersiyon etkisinin önemli olduğunun düşünülmesinden dolayıdır.

Bu sebeple tez çalışmasının bu bölümünde önceki bölümde hibrit modellemenin nümerik modelleme kısmında kullanılan dispersif olmayan Saint Venant denklemleri yerine dispersif karakter gösteren Boussinesq Denklemleri kullanıldığı takdirde sonuçta ne gibi değışimler olabileceğini gözlemlemek maksadıyla Boussinesq denklemleri ile çözüm yapılmıştır.

#### **4.3.2 Boussinesq denklemleri ile çözüm ve karşılaştırmalar**

Bölüm 4.2'de analitik yöntemle yapılan çalışmaların sonuçları kullanılarak nümerik program tekrar çalıştırılmıştır. Yine Bölüm 4.2'de olduğu gibi  $C_R = 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80, 85, 89, 95, 100, 150, 300$  m/s heyelan hızları için 750 saniye boyunca nümerik olarak 30 ayrı nokta için simülasyonlar yapılmıştır. Heyelan kalınlığı yine 25 metre olarak alınmıştır.

Yapılan simülasyonların sonuçlarının incelenmesi için öncelikle önceki aşamada da olduğu gibi belirli noktadaki zaman serileri elde edilmiştir. Bu noktasal zaman serilerinden o noktadaki maksimum dalga yükseklikleri elde edilmiştir. P6, P15, P16,

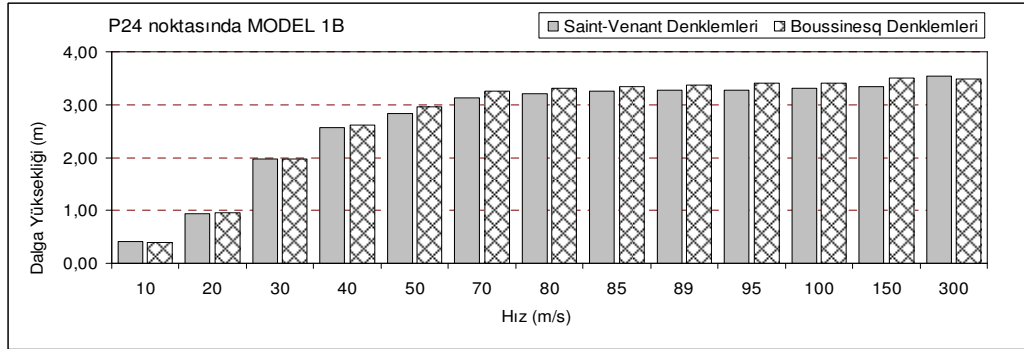
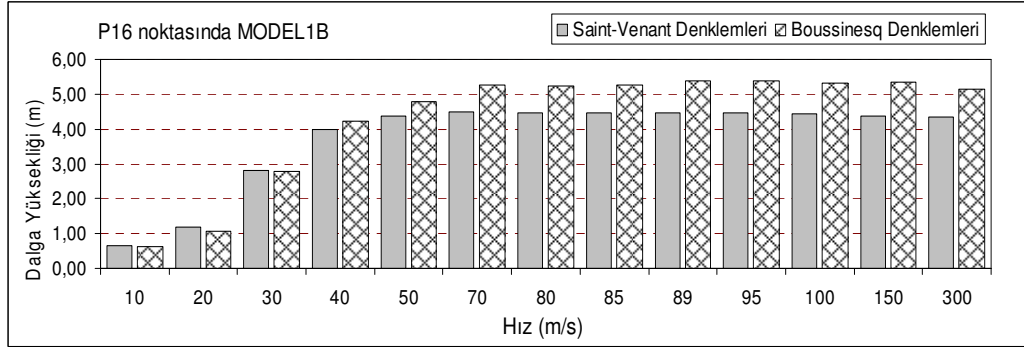
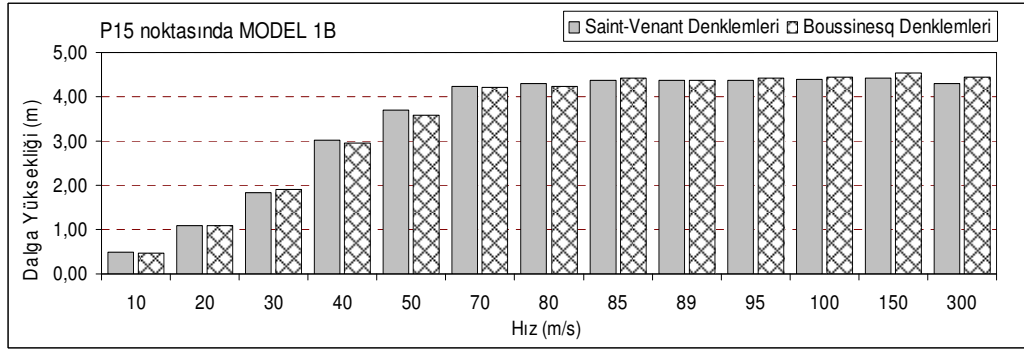
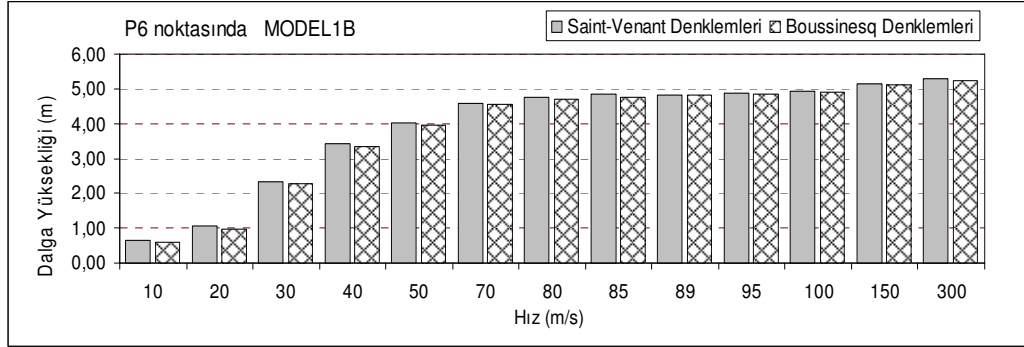
P24 noktaları için elde edilen maksimum dalga yükseklikleri Tablo 4.5’de sunulmuştur. Bu tabloda görüldüğü gibi dalga yükseklikleri heyelan hızı arttıkça artmakta ve heyelan hızı 89 m/s’ye ulaştığında artık artış miktarı önemini yitirmektedir. Bu durum yani heyelan hızı ile dalga yüksekliği arasındaki ilişki önceki bölümde de grafik olarak Şekil 4.16’de sunulmuştur.

**Tablo 4.5:** Boussinesq denklemleri ile elde edilen maksimum dalga yükseklikleri

| CR (m/s) | P6 (m) | P15 (m) | P16 (m) | P24 (m) |
|----------|--------|---------|---------|---------|
| 10       | 0.60   | 0.46    | 0.62    | 0.40    |
| 20       | 0.96   | 1.10    | 1.06    | 0.95    |
| 30       | 2.28   | 1.90    | 2.79    | 1.98    |
| 40       | 3.33   | 2.96    | 4.24    | 2.62    |
| 50       | 3.95   | 3.59    | 4.80    | 2.96    |
| 70       | 4.56   | 4.22    | 5.27    | 3.26    |
| 80       | 4.71   | 4.24    | 5.23    | 3.31    |
| 85       | 4.77   | 4.41    | 5.27    | 3.35    |
| 89       | 4.81   | 4.38    | 5.39    | 3.37    |
| 95       | 4.86   | 4.41    | 5.38    | 3.41    |
| 100      | 4.91   | 4.45    | 5.33    | 3.41    |
| 150      | 5.10   | 4.54    | 5.35    | 3.50    |
| 300      | 5.23   | 4.45    | 5.15    | 3.48    |

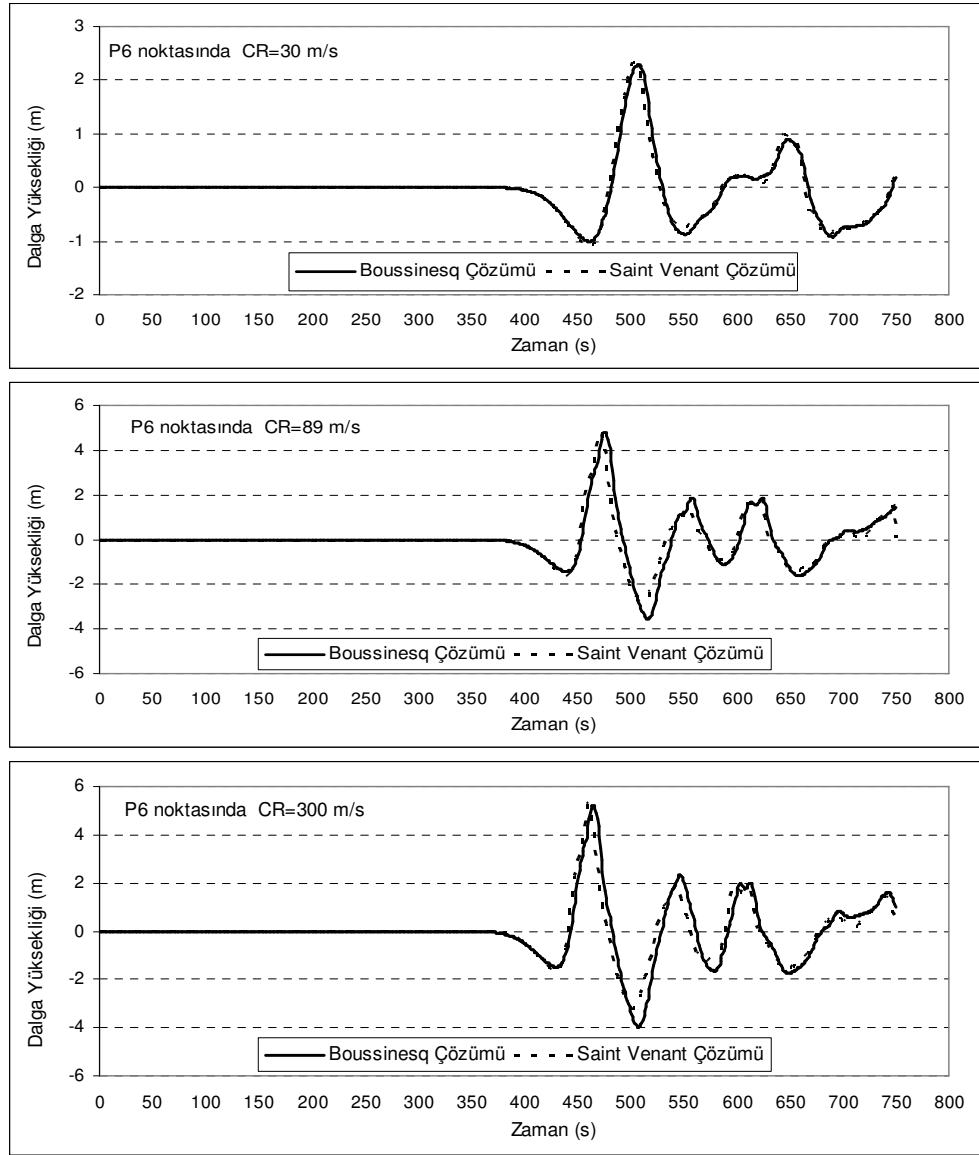
Elde edilen bu dalga yüksekliklerinin bir önceki aşamada dispersif olmayan dalga modeli ile elde edilen dalga yükseklikleri ile arasındaki farkları görebilmek amacıyla Şekil 4.22’deki grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerden de görülebileceği gibi dispersif olmayan dalga modeli ile yapılan çözümler ile dispersif dalga modeli kullanılarak yapılan çözümler birbirine çok yakındır. Ancak Boussinesq denklemleri kullanıldığında denklemde bulunan dispersiyon terimi ile uzun dalga teoremine göre daha doğru sonuçlar elde edilmektedir.

Şekil 4.22 dispersiyon etkisinin farklı noktalarda farklı büyüklükte olduğunu göstermektedir. P6 noktasında Boussinesq yöntemi ve Saint Venant yöntemi arasında gayet az bir dalga yüksekliği farkı bulunurken P16 noktasında dalga yükseklikleri önemli ölçüde değişmiştir. Bunun sebebi her noktanın bulunduğu konum itibarıyla sahip olduğu karakteristiklerinin farklı olması olarak yorumlanabilir.



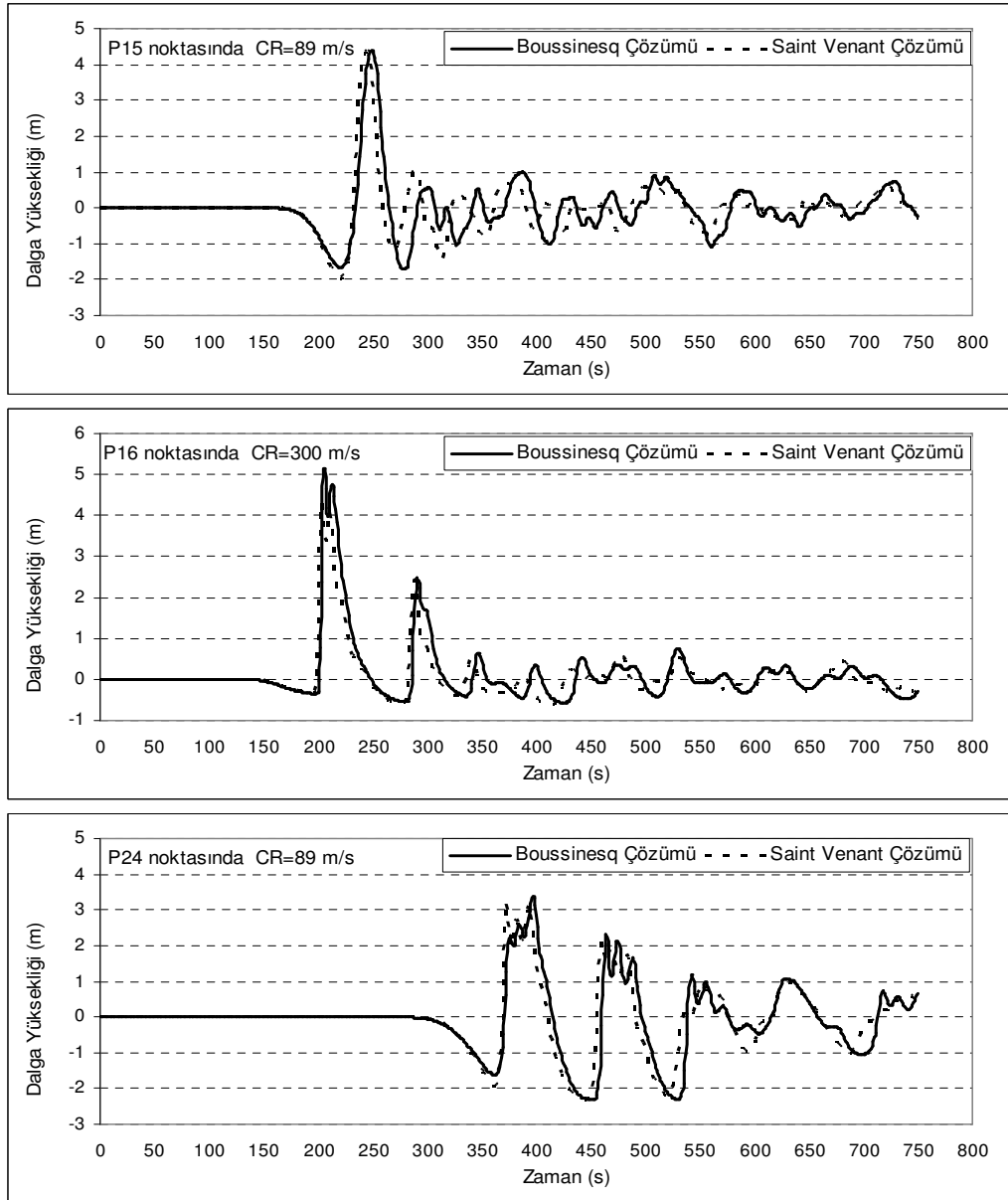
Şekil 4.22: Farklı denklemlerle yapılan nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

$C_R=10, 30, 89$  ve  $300$  m/s hızları için hesap yapılan dört nokta olan P6,P15, P16, P24 noktalarından P6 için zaman serilerinin daha önceki aşamada aynı noktada elde edilen zaman serileri ile karşılaştırılması Şekil 4.23’de sunulmuştur. Görüldüğü gibi Boussinesq denklemleri kullanılarak yapılan nümerik model çözümleri ile Saint Venant Denklemleri kullanılarak yapılan çözümler arasında P6 noktası için fazla önemli bir fark bulunmamaktadır.



**Şekil 4.23:** Model1B ve  $C_R=10, 30, 89, 300$  m/s için P6 noktasında dispersiyon etkisinin karşılaştırılması

Ancak P15, P16, P24 noktaları için baktığımızda durum değişmektedir. Burada P15, P16 ve P24 noktalarındaki her iki denklem takımına göre elde edilen sonuçlardan sadece bir kısmı Şekil 4.24’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre dispersiyon etkisi dalga yüksekliğini P16 noktasında yüzde 20’ye varan oranlarda etkilemiştir. Bunun sebebi olarak da ani batimetri değişimi ve P16’nın önünde bulunan küçük adalardan dolayı gelen tsunami dalgalarının sapmaya uğraması sayılabilir(Bkz. Şekil 4.10).



**Şekil 4.24:** P15, P16, P24 noktalarında dispersiyon etkisinin karşılaştırılması

**Tablo 4.6:** Dispersif ve dispersif olmayan model sonuçları arasındaki fark yüzdeleri

| Heyelan hızı<br>(m/sec) | Nokta |      |       |      |
|-------------------------|-------|------|-------|------|
|                         | P6    | P15  | P16   | P24  |
| 10                      | 5.9%  | 7.0% | 4.7%  | 2.4% |
| 20                      | 8.3%  | 1.2% | 11.4% | 0.4% |
| 30                      | 2.5%  | 4.2% | 0.6%  | 0.1% |
| 40                      | 3.1%  | 1.9% | 6.0%  | 2.3% |
| 50                      | 1.9%  | 3.1% | 9.3%  | 4.8% |
| 70                      | 0.7%  | 0.5% | 17.2% | 4.0% |
| 85                      | 0.5%  | 2.2% | 18.1% | 4.0% |
| 89                      | 0.6%  | 0.0% | 20.8% | 3.2% |
| 95                      | 0.6%  | 0.7% | 20.3% | 4.4% |
| 100                     | 0.4%  | 1.7% | 19.6% | 4.0% |
| 150                     | 3.6%  | 3.3% | 20.7% | 5.9% |
| 300                     | 1.7%  | 0.7% | 17.5% | 4.1% |

Şekil 4.23 ve 4.24 yapılan çalışmanın çok küçük bir kısmını göstermektedir. Bütün sonuçları koymak yerine Tablo 4.6 konulmuştur. Bu tabloda dispersif dalga modeli ve dispersif olmayan dalga modelleri kullanılarak P6, P15, P16, P24 noktalarındaki hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki farklar yüzde olarak verilmiştir. Bu tabloya bakarak her iki model sonucunun hangi noktada, hangi heyelan hızında, ne kadar fark ettiğini söylemek mümkündür.

Her iki dalga modeli arasındaki bir başka fark da Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'den görülebileceği gibi tsunami dalgalarının kıyıya ulaşma süreleri 5-10 saniye değişmektedir yani Boussinesq yöntemi ile yapılan çözümde tsunami dalgaları kıyıya daha geç ulaşmaktadır.

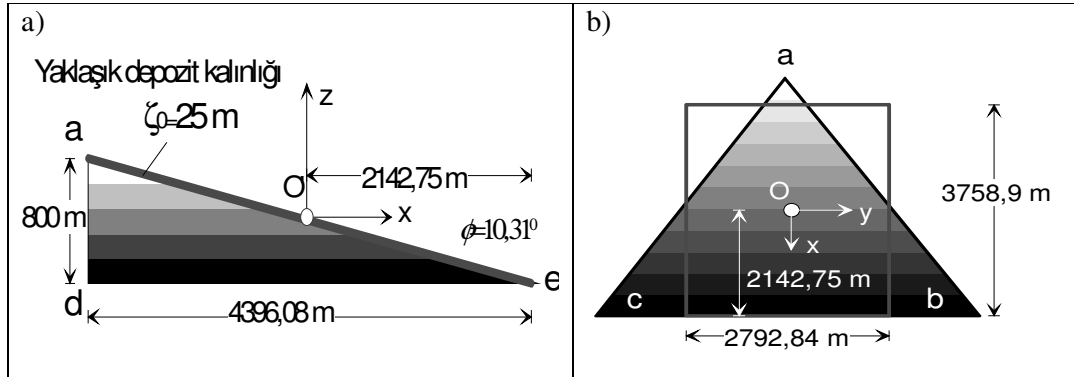
Sonuç olarak çalışmanın kıyı yapısı karmaşık yani girintili çıkıntılı olan denizlerde veya Ege Denizi gibi içinde pek çok ada olan denizlerde ve batimetri değişimlerinin ani olduğu bölgelerde dispersiyon etkisi önemlidir. Dispersiyon terimi yerel batimetrideki değişimden çok etkilenmektedir [28]. Bu gibi noktalarda çözüm yaparken dispersiyon etkisini göz önünde bulunduran Boussinesq denklemleri kullanılmalıdır. Böylece daha gerçekçi sonuçlar elde edilir.

#### 4.4 Heyelan hacminin dalga yüksekliğine etkisi

##### 4.4.1 Giriş

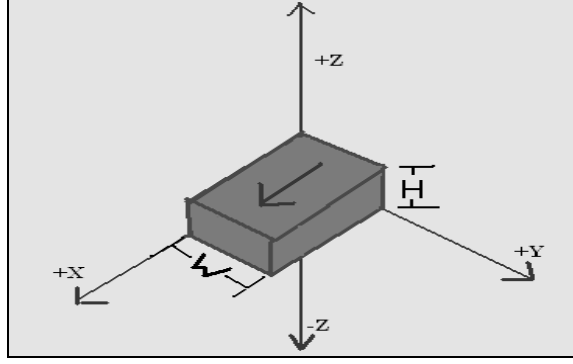
Çalışmanın bu bölümünde Marmara Denizi'nde Tuzla açıklarında bulunan heyelanın boyutları değiştirilerek hem analitik ve hem de nümerik metotlar kullanılarak yeni simülasyonlar yapılmıştır. Bu bölümdeki amaç ise meydana gelecek heyelanın boyutlarının önceki bölümlerde kullanılan boyutlardan farklı olduğu durumlarda kıyıda oluşacak tsunami dalga genliklerinin nasıl olacağını anlamak ve heyelan kütesinin ebatları ile tsunami dalga genliği arasındaki ilişkiyi modelleyebilmektir.

Bu aşamaya kadar kullanılan denizaltı heyelan modellerinde heyelanın boyutları Şekil 4.25'deki gibiydi. Bu heyelanın hareketinin matematik modelini kurabilmek için bazı basitleştirmeler yapmak kaçınılmazdır [6]. Bu yüzden heyelan yüzeyi ideal üçgen yüzey olarak ve kalınlığı da  $\zeta_0$  olarak basitleştirilmiştir (Şekil 4.25a). Daha sonra üçgen yüzeyi dikdörtgen yüzeye dönüştürülmüştür (Şekil 4.25b). Dikdörtgenin yüzey alanı üçgen yüzeyin alanına eşit olacak şekilde oluşturulmuştur [6].



Şekil 4.25: Heyelanın Üçgen ve basitleştirilmiş boyutları [6]

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi heyelana maruz tabakanın ortalama kalınlığı 25 metre olarak eğim ise  $10,31^\circ$  olarak alınmıştır. Heyelan dikdörtgen olarak kabul edildiğinden hareket yönündeki uzunluk 3758.9 metre ve enine uzunluk ise 2792.8 metre olarak sadeleştirilmiştir [6] ( Bkz. Şekil 4.25b).



**Şekil 4.26:** Heyelanın temsili kalınlık ve genişliği ile hareket yönü

Tez çalışmasının bu aşamasında Şekil 4.26’da temsili olarak çizilmiş olan ve +X yönünde hareket etmesi kabul edilen heyelan kütesinin H kalınlığı ve W genişliği sırayla değiştirilerek analitik ve nümerik modellerle hibrit simülasyonlar yapılmıştır.

#### 4.4.2 Heyelan kalınlığının dalga yüksekliğine etkisi

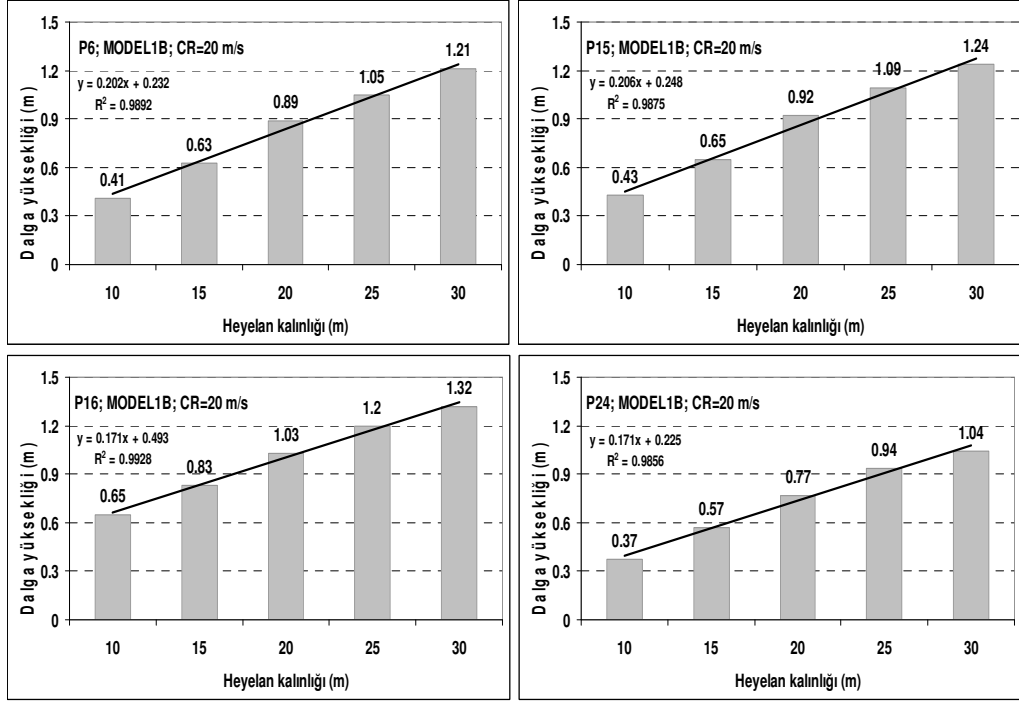
Farklı denizaltı heyelan kalınlıkları kullanılarak yapılan çözümlerde elde edilen tsunami genlik değerlerinin nasıl değiştiğini görmek amacıyla analitik modelde Marmara Denizi dibinde hareket eden kütle kalınlığı değiştirilmiştir. Sayısal model için elde edilen diğer tüm sonuçlarda, denizaltı heyelanının ortalama kalınlığı her iki model için de  $\zeta_0=25$  m olarak alınmıştır.

Bu bölümde heyelan tabakasının ortalama kalınlıkları sırasıyla, 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m kabul edilerek analitik model ile deniz yüzeyindeki dalga yükseklikleri elde edilmiş, bu dalga yükseklikleri nümerik model kullanılarak kıyıya kadar taşınmış ve kıyıda belirlenen noktalarda oluşan dalga yükseklikleri hesaplanmıştır.

Sonuçlar,  $m=71344$  adet düğüm noktasından oluşan sonlu eleman modeli kullanılarak, Model-1B heyelan modeli ve iki farklı heyelan hızı ( $C_R=20$  m/s ve  $C_R=89$  m/s) dikkate alınarak elde edilmiştir. Verilecek olan sonuçlar, kıyı şeridi üzerinde seçilmiş olan P6, P15, P16 ve P24 noktalarında, farklı denizaltı heyelan kalınlıkları için oluşan en büyük dalga yükseklikleri şeklinde ifade edilmiştir.

Model-1B heyelan modeli ve  $C_R=20$  m/s ortalama heyelan hızı dikkate alınarak yapılan çözümlerde, farklı heyelan kalınlıkları ( $\zeta_0$ ) için, kıyıda seçilen dört noktada (P6, P15, P16 ve P24) oluşan en büyük dalga yükseklikleri ( $\eta_{max}$ ) değerleri Şekil 4.27’de verilmiştir.

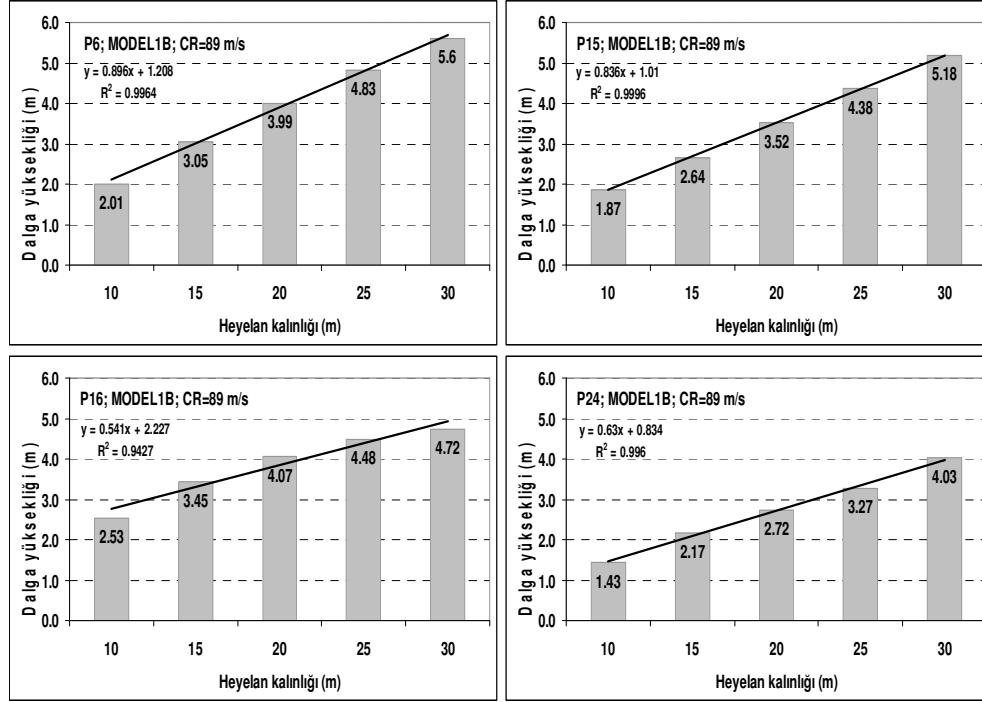
Model1B heyelan modeli ve  $C_R=89$  m/s ortalama heyelan hızı dikkate alınarak yapılan çözümlerde, farklı heyelan kalınlıkları ( $\zeta_0$ ) için, kıyıda seçilen dört noktada (P6, P15, P16 ve P24) oluşan en büyük dalga yükseklikleri ( $\eta_{\max}$ ) değerleri Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.27 :  $C_R=20$  m/s için Farklı Heyelan Kalınlıklarında Dalga Yükseklikleri

Elde edilen şekillerden (Şekil 4.27 ve Şekil 4.28) de anlaşıldığı gibi, denizaltında oluşan bir heyelanın ortalama kalınlığı ile denizin kıyısında oluşan dalgaların genlikleri arasında doğrusal bir ilişki vardır. Heyelan tabakasının kalınlığı arttıkça kıyıdaki dalga yükseklikleri de aynı oranda artmaktadır. Bunun sebebi olarak da çözümün analitik model aşamasında kullanılan denklemlerde heyelan kalınlığının sabit bir sayı olarak denklemde yer almasıdır. Aynı şey ileride de görüleceği gibi genişlik değişimi için de geçerlidir. Bu şekillerden anlaşılan bir başka husus da şudur. P6 noktasındaki farklı heyelan kalınlıkları için elde edilen grafik üzerine çizilen eğilim çizgisinde  $R^2$  değeri yani korelasyon katsayısının karesi 0.99 gibi çok yüksek bir değer çıkarken P16 noktasında bu değer 0.94 değerine düşmektedir. Fiziksel olarak her iki noktaya bakıldığında P6 noktasının açık denize bakan önünde herhangi bir doğal ya da insan yapısı engel bulunmayan ve tsunami dalgasına doğrudan maruz kalan bir nokta olduğu, P16 noktasının ise tsunami dalgası ile arasına adaların girip doğal bir dalgakıran vazifesi gördüğü söylenebilir. Deniz

yüzeyinde bulunan ve dalga hareketini engelleyen oluşumların tsunami dalga yüksekliği üzerinde etkili oldukları buradan anlaşılabilir. Bu da tsunami riski yüksek bölgelerde denizin içerisine yapay koruma bantları veya dalgakıran yapıları yapılarak tsunami dalgalarının vereceği hasarın azaltılabileceğini göstermektedir.



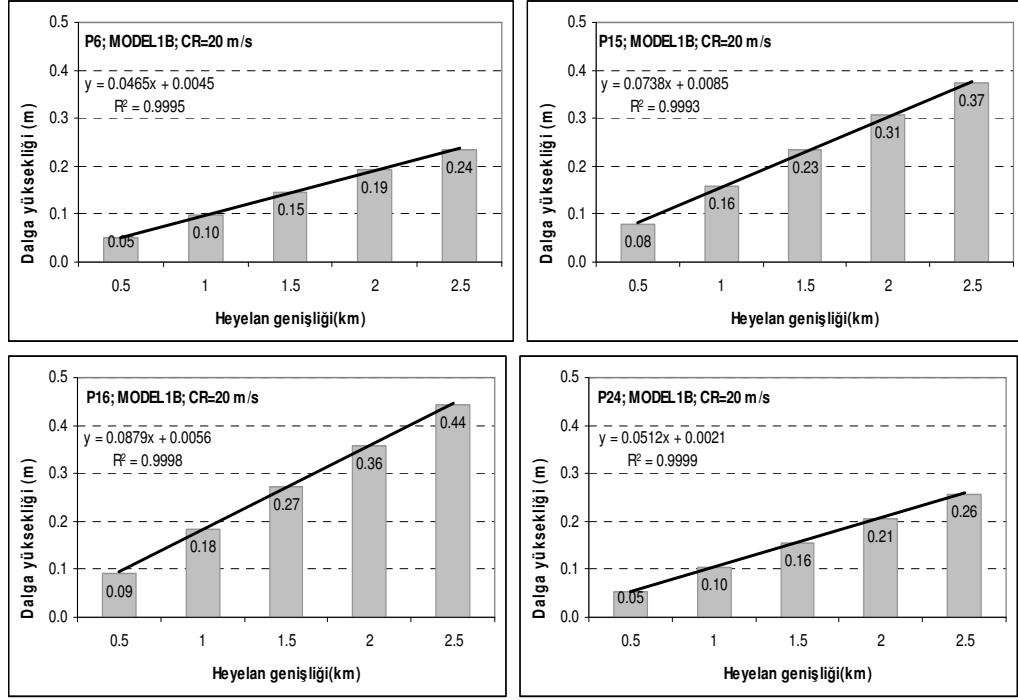
Şekil 4.28:  $C_R=89$  m/s için Farklı Heyelan Kalınlıklarındaki Dalga Yükseklikleri

#### 4.4.3 Heyelan genişliğinin dalga yüksekliğine etkisi

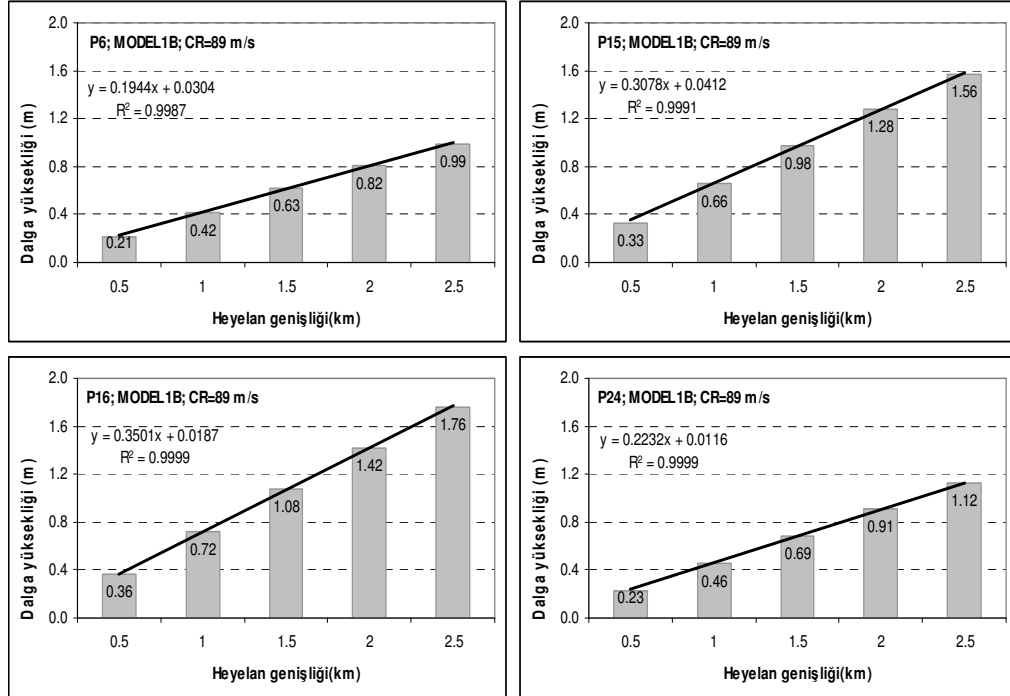
Marmara Denizi'nde Tuzla açıklarında bulunan heyelan bölgesi hakkında yeterli bilgi sahibi olunamamasından dolayı ne büyüklükte bir hareket (yer kayması) olacağı konusu çok önemlidir. Bu nedenle değişik boyutlarda heyelanların etkilerinin incelenmesi meydana gelebilecek tsunamiler hakkında daha detaylı bilgiler verecektir. Yukarıdaki kısımda heyelanın kalınlığı (yükseklik boyutu) ile ilgili değişik alternatifler için simülasyonlar yapılmıştı. Bu bölümde ise genişliği (en Boyutu) yani hareket yönüne dik olan boyutunda yapılan değişiklikler incelenecektir. Bu amaçla önceki aşamalarda 2792,84 metre olarak alınan heyelan genişliği (W) değeri 500 metre ile 2500 metre arasında değişen değerlerde alınmıştır.

Analitik ve nümerik modeller kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucunda heyelan genişliği değişimi ile kıyıda oluşacak tsunami dalgasının maksimum yüksekliği arasında doğrusal bir ilişki olduğu saptanmıştır. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da görülen

grafikler heyelan tabakasının genişliği ile kıyadaki dalga yüksekliği arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4.29:  $C_R=20$  m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Dalga Yükseklikleri

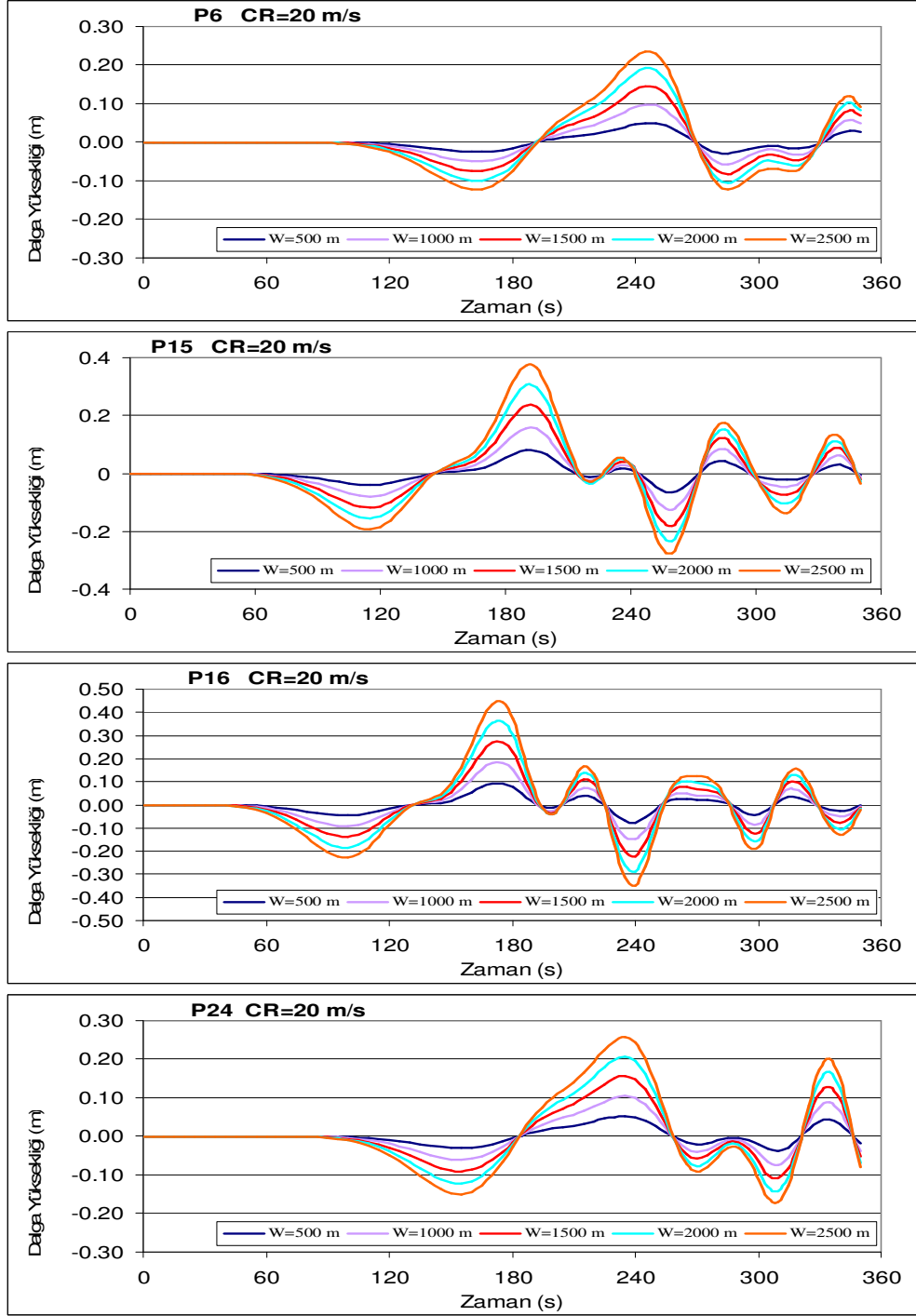


Şekil 4.30:  $C_R=89$  m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Dalga Yükseklikleri

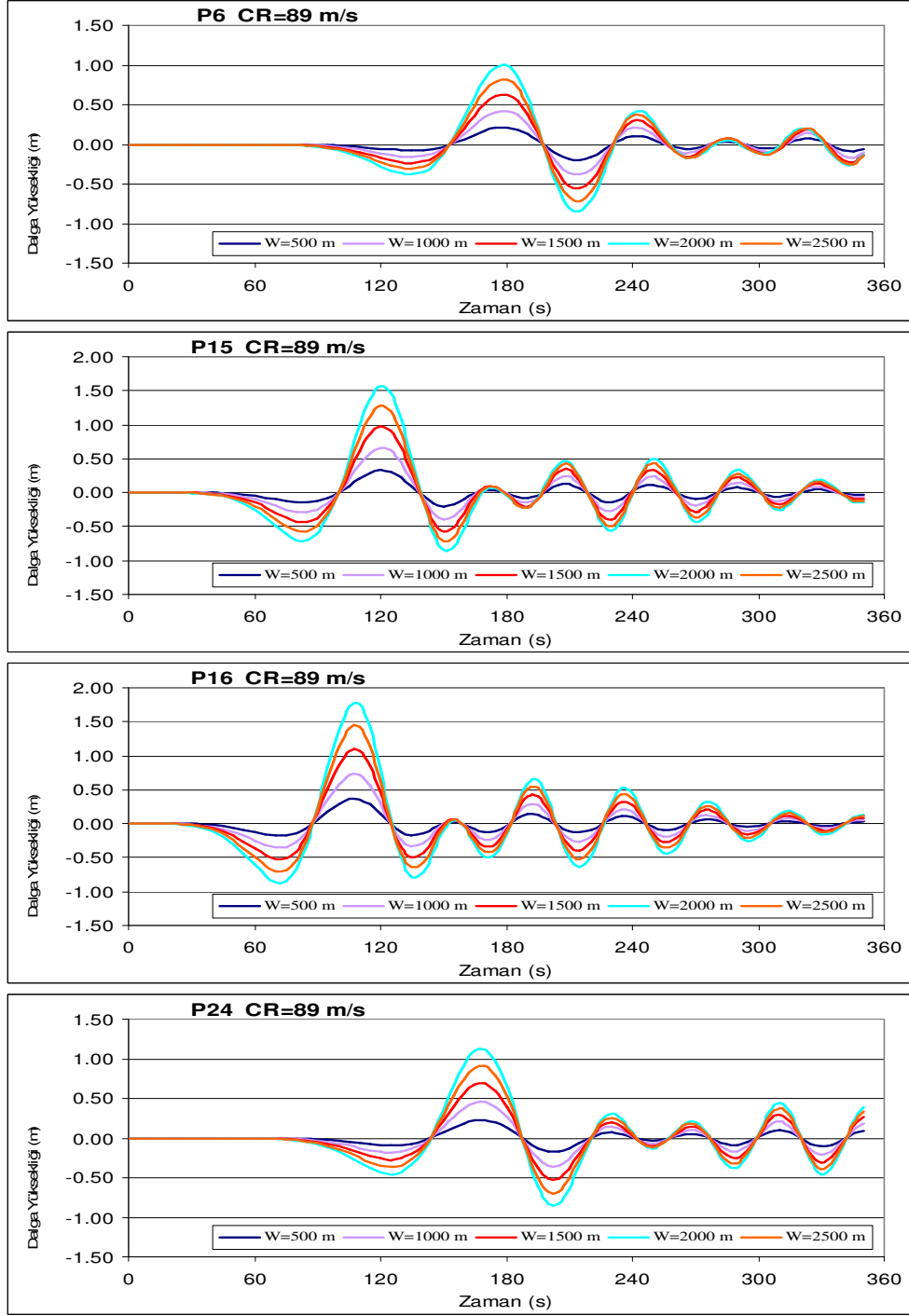
Bu grafikler kullanılarak Marmara Denizi tabanındaki heyelan kütlesinin kalınlığı ile kıyıda belirlenen noktalardaki maksimum dalga yükseklikleri arasında bir denklem kurularak daha farklı genişlik değerleri için oluşabilecek dalga yükseklikleri elde edilebilir. Bu çalışmamız Marmara Denizi'nin Tuzla kıyılarında bulunan heyelan ile ilgili detaylı araştırma yapacak araştırmacılara bu bölgenin hangi durumda kıyıya ne kadar etki edeceğini göstermesi açısından oldukça önemlidir.

Marmara Denizi tabanında meydana gelebilecek olan bir heyelanın kıyıda oluşturabileceği maksimum dalga yükseklikleri arasında doğrusal bir ilişki olması sonucundan yola çıkarak oluşan dalgaların kıyıya ulaşma süreleri ile heyelan kalınlıkları arasındaki ilişkinin nasıl olabileceği de incelenmiştir. Heyelan genişliğindeki değişimin dalgaların kıyıya ulaşma süreleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 bu durumu izah etmektedir. Bu şekillerdeki grafikler P6, P15, P16, P24 noktalarına kadar sadece analitik yöntem kullanılarak yapılmış olan heyelan tsunamisi simülasyonlarının simülasyon süresi boyunca bu noktalardaki zamanla su yüksekliği değişimini göstermektedir. Yani seçilen noktalardaki dalga hareketinin zaman serileridir.

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'deki farklı heyelan genişliği sonucu oluşan dalgaların grafikleri gözlemlendiğinde hemen hemen aynı zaman diliminde tepe noktaları olduğu görülmektedir. Bu durumda ise deniz tabanı heyelanının genişliğinden yüzeydeki dalgaların kıyıda belirlenen noktalara ulaşma sürelerinin etkilenmediği sonucunu çıkarabiliriz. Heyelanın kalınlığı ve genişliğindeki değişimler dalga yüksekliklerini doğrusal olarak değiştirmektedir ancak zaman olarak etkileri çok az olmaktadır. Dalgalar heyelan genişliği arttıkça belirlenen noktalara çok az da olsa daha erken ulaşmaktadır. Bu durum ise heyelan genişliğindeki değişimin kıyıda oluşan dalga boyunu çok az da olsa artırdığını göstermektedir.



Şekil 4.31:  $C_R=20$  m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Zaman serileri

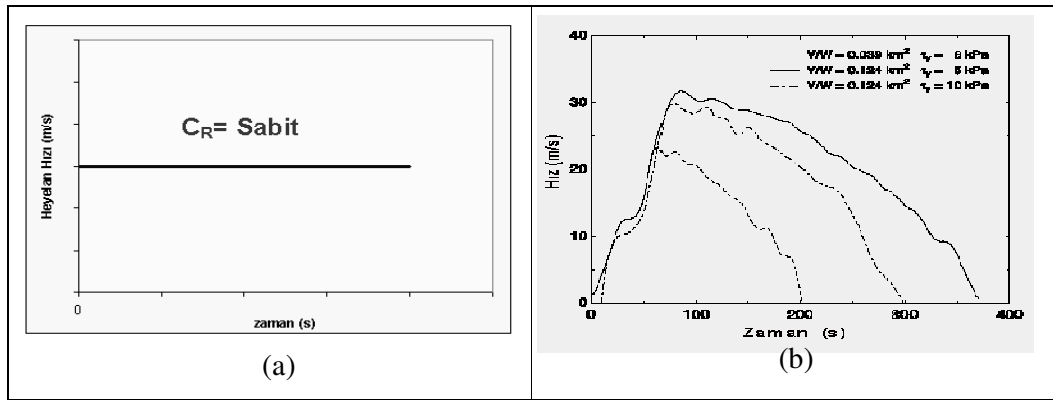


Şekil 4.32:  $C_R=89$  m/s için Farklı Heyelan Genişliklerindeki Zaman serileri

## 4.5 İvmeli Heyelan Modellemeleri ve Karşılaştırmalar

### 4.5.1 İvmeli Heyelan Modellemeleri

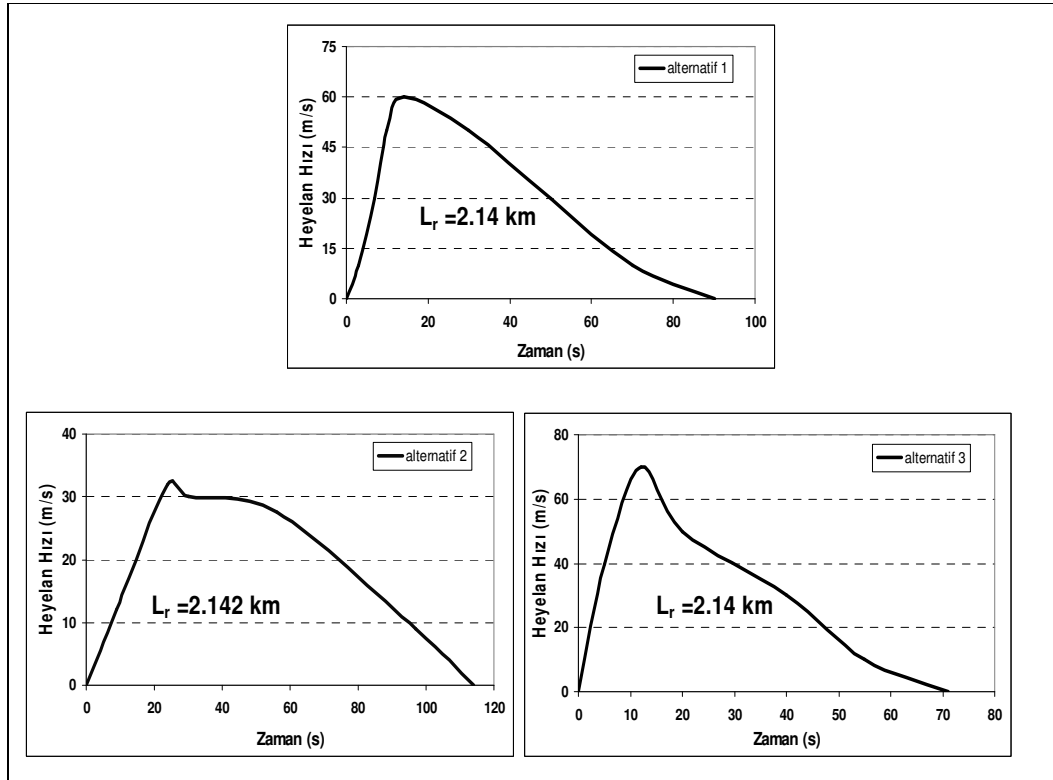
Bu aşamaya kadar yapılan çalışmalarda Marmara Denizi tabanında modellenen heyelanın hareketi oldukça basite indirilmişti. Heyelan aslında daha karmaşık bir geometrisi olmasına rağmen dikdörtgen olarak basitleştirilmişti. Kalınlığı değişken olabilecekken bir plaka halinde baştan sona kadar sabit kalınlıkta olacağı varsayılmıştı. Bütün bunlar matematiksel formülasyonu yazabilmek için ve bilgisayarların bu problemi çözerken harcayacağı zamanı ve gücü azaltabilmek içindi. Bütün bu geometrik basitleştirmelerin yanında heyelanın hareketinde de bir basitleştirme yapılmıştı. Heyelanın hareketi baştan sona kadar sabit ortalama bir hızda olduğu varsayılarak hesaplamalar sabit ve ortalama bir heyelan hızına göre yapılmıştı. (Bkz. Şekil 4.33a) Ancak gerçek hayatta heyelanlar bu kadar basit bir şekilde sabit bir hızla aşağıya doğru kaymaya başlayıp aniden orada durmazlar. Doğada meydana gelen heyelanlarda öncelikle kütlenin zeminden kopması anında çok yavaş olan hız yerçekiminin, eğimin ve kayganlığın etkisiyle gittikçe artar. Daha sonra ise artık sürtünme kuvvetleri etkili olmaya başlar ve zeminin de eğiminin azalması ile kütle yavaşlamaya başlar. Bir süre sonra da tamamen enerjisini kaybeder ve durur [29] (Bkz. Şekil 2.1b). Yani gerçekte önce hızlanan ve sonra da yavaşlayıp duran bu hareket ivmelidir. Bu şekilde bir hareketin modellenmesi daha zordur ancak sabit hızlı modellemelere göre daha doğru neticeler verecektir [29].



Şekil 4.33: a) Ortalama bir sabit hızlı heyelanın hız-zaman grafiği [6] b) Doğada gerçek bir heyelanın hız-zaman grafiği [29]

Şekil 4.33b’de Norveç Denizi’nde Ormen Lange bölgesinde meydana bir heyelanın hareket hızının zamanla değişimi görülmektedir [29]. Bu çalışmadan faydalanarak Tuzla açıklarındaki heyelan için de ivmeli bir hareket olması durumu incelenmiş ve sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

İvmeli heyelan hareketini modellemek amacıyla Şekil 4.33b’de Norveç Denizi’nde Ormen Lange bölgesinde meydana heyelanın hareket tarzına benzeyecek şekilde 3 adet hız-zaman grafiği çizilmiştir.

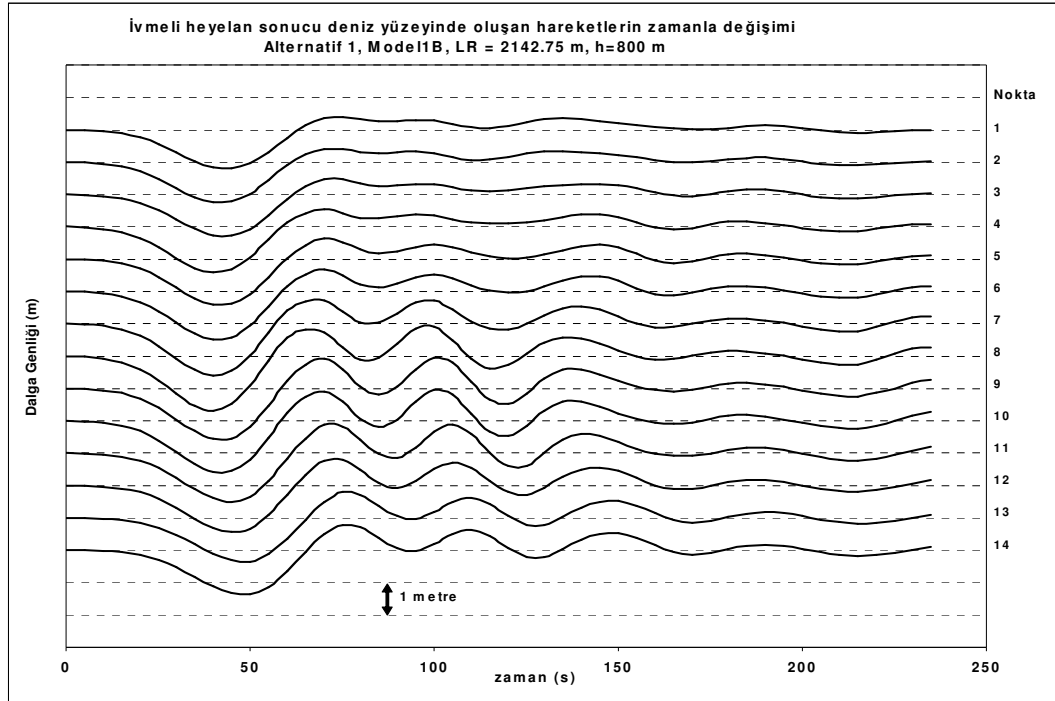


**Şekil 4.34:** Hazırlanan üç ayrı alternatifin hız-zaman grafikleri

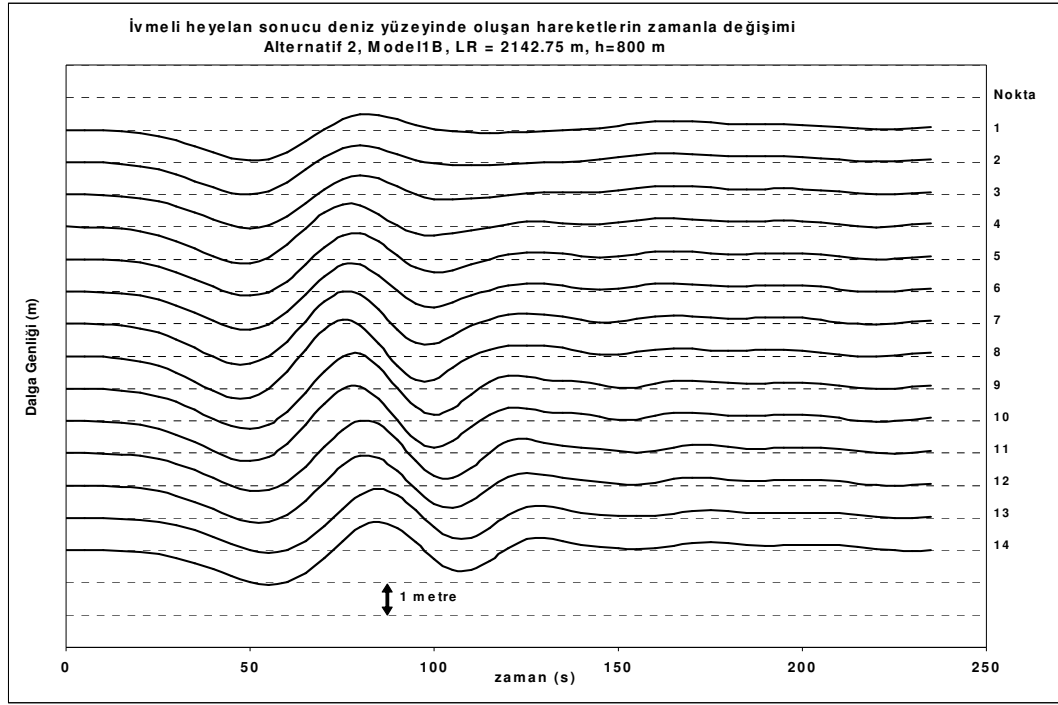
Şekil 4.25'ten de anlaşılacağı gibi heyelan modelleri için hareket mesafesi olan 2142.75 metrelik mesafe ivmeli hareket için seçilecek olan hız-zaman grafikleri içinde temel belirleyicilerden biridir. Çünkü heyelana maruz kütle en fazla bu kadar yol alabilir ve sonra durur. Hız-zaman grafiklerinin altında kalan alanlar kat edilen bu mesafeye eşit olacağı için seçilen hız-zaman grafiklerinin rakamsal değerleri bunu sağlayacak şekilde ve aynı zamanda Şekil 4.33b'de sunulan hız-zaman grafiğine de tip olarak benzer şekilde olmalıdır. Bu kıstasları sağlayacak şekilde birbirinden farklı üç ayrı hız-zaman grafiğinden oluşan üç ayrı alternatif hazırlanmıştır (Bkz. Şekil

4.34). Her bir alternatif farklı bir maksimum hıza ulaşmakta dolayısıyla farklı sürede hareket etmekte ve sonunda alacakları yol aynı olmaktadır.

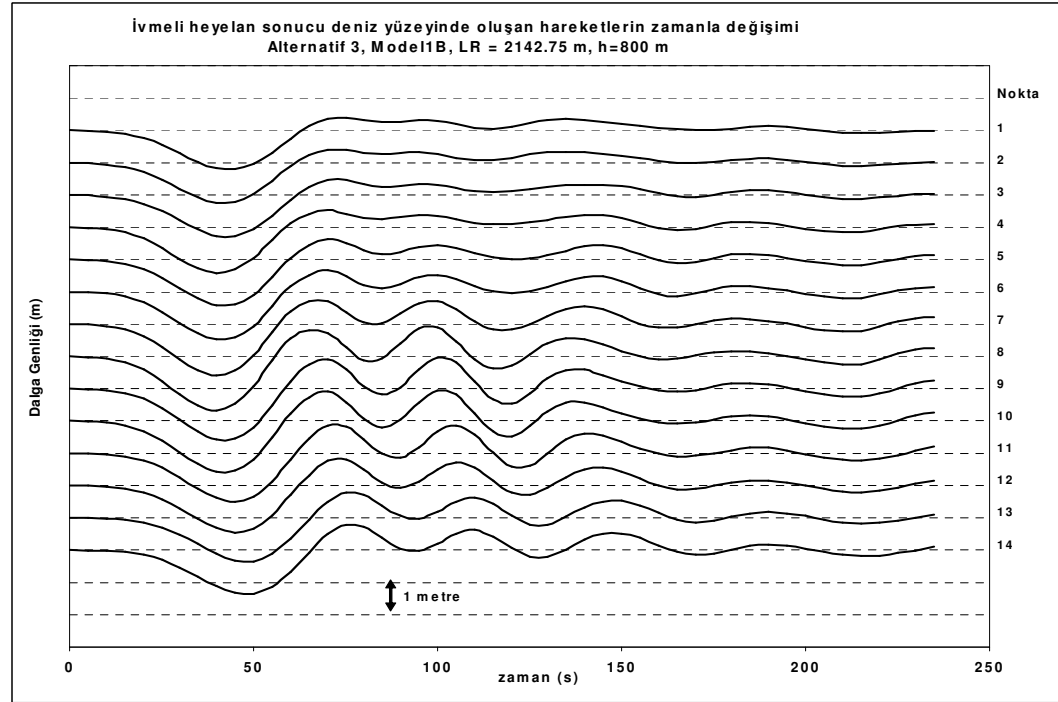
Bu üç alternatif kullanılarak Tuzla açıklarında bulunan heyelan bölgesinin ivmeli olarak yani gerçeğe daha yakın bir şekilde hareketlenmesinin modellenmesi amaçlanmıştır. Bu aşamada da daha önceki aşama olan sabit hızlı heyelanda olduğu gibi analitik ve nümerik yöntemler ardışık olarak yani hibrit olarak kullanılmıştır. İlk olarak analitik modelin bilgisayar programında gerekli modifikasyonlar yapılarak su yüzeyindeki nümerik modelin sınırında bulunan 14 adet noktadaki dalga yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Daha önce kullanılan ve literatürde heyelan modeli Model1B olarak adlandırılan heyelan bu bölümde de esas alınmıştır. Her üç alternatif için de 14 noktada dalga yükseklikleri bulunmuştur. Bu değerlerin birleştirilmesi ile elde edilen zaman serileri ile her bir noktadaki su yüzeyinin oluşturduğu dalgalanmalar çizilmiştir.(Bakınız Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37) Böylece Marmara Denizi'nde 400 m ile 800 m'lik derinlikteki yamaçta bulunan heyelanın yakın bölgede oluşturacağı tsunami genlikleri analitik program kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.35: Alternatif 1 için analitik model sonucu su yüzeyindeki 14 noktadaki hareketin zamanla değişimi

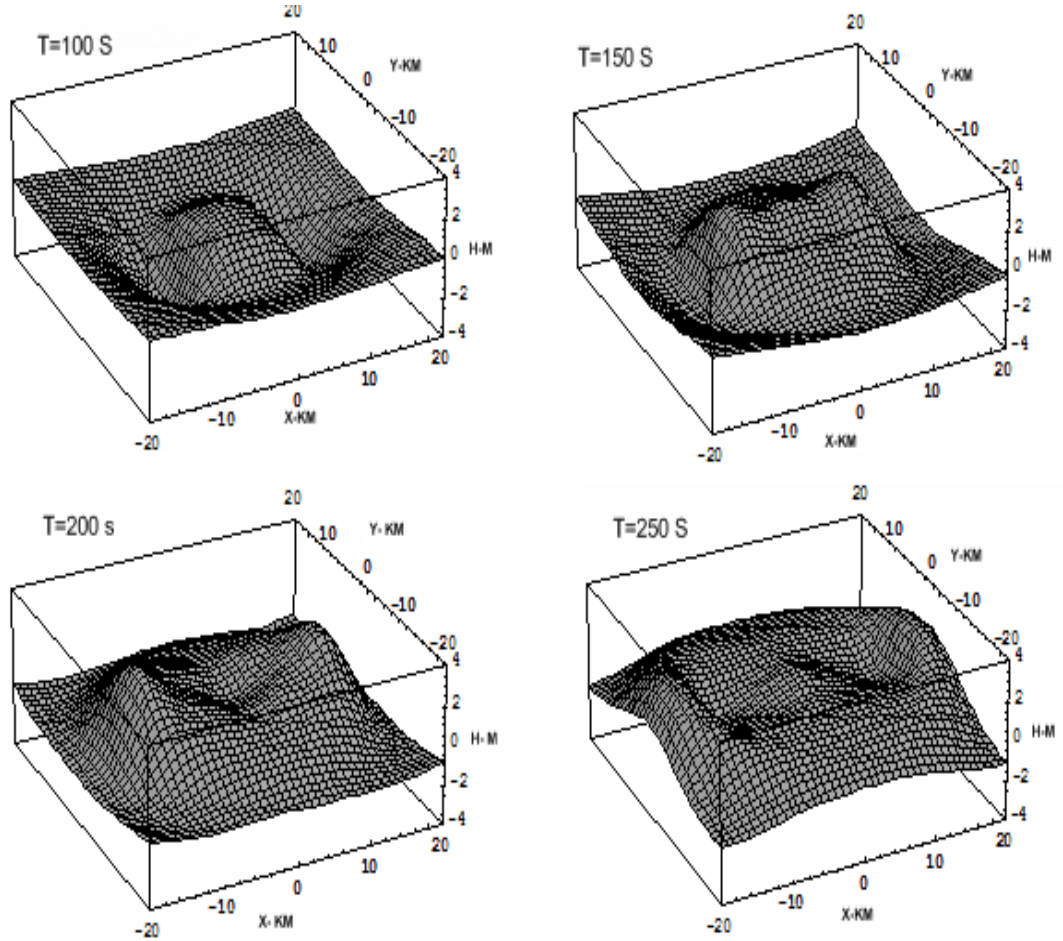


**Şekil 4.36:** Alternatif 2 için analitik model sonucu su yüzeyindeki 14 noktadaki hareketin zamanla değışimi



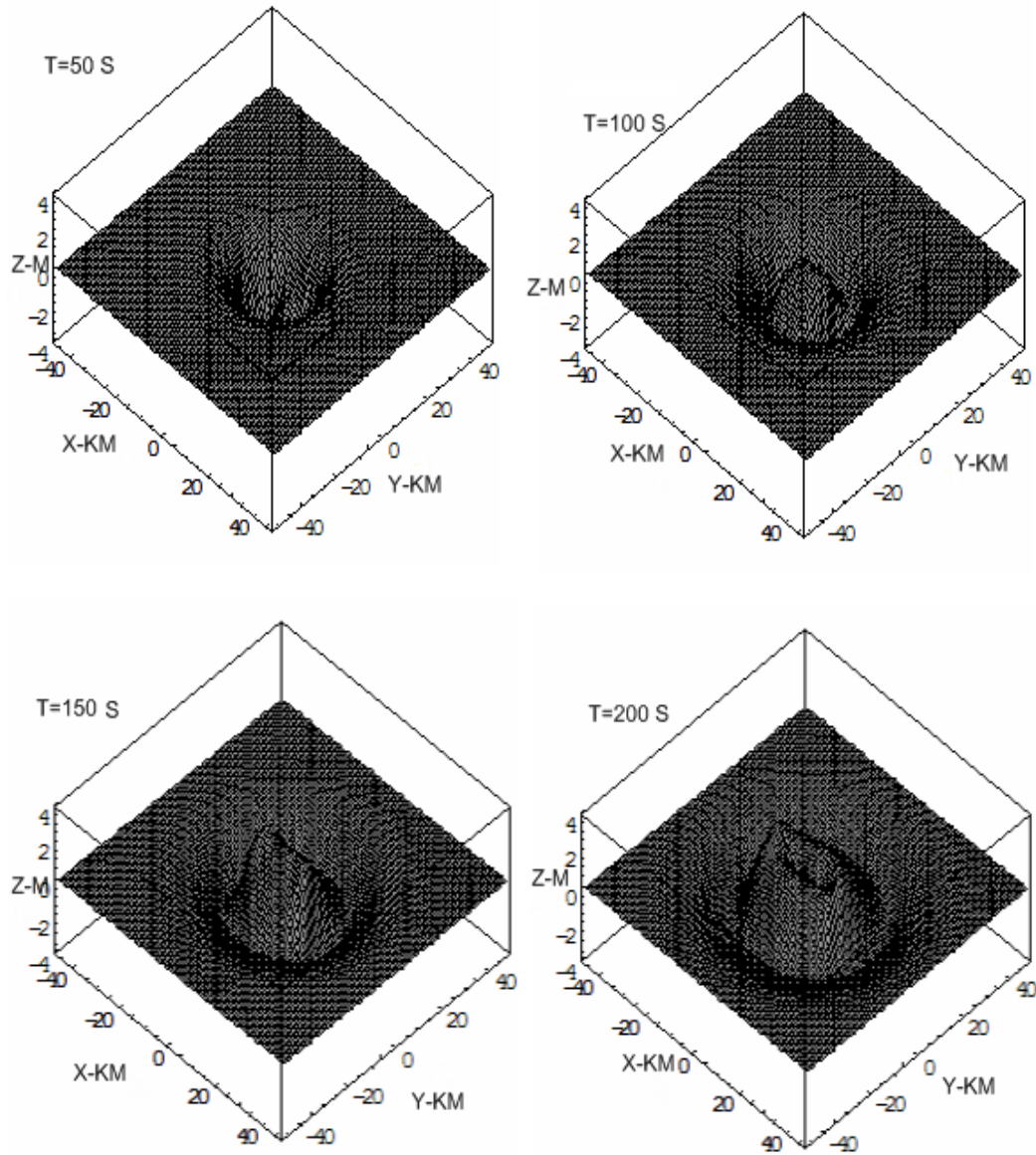
**Şekil 4.37:** Alternatif 3 için analitik model sonucu su yüzeyindeki 14 noktadaki hareketin zamanla değışimi

Marmara Denizi'nde Tuzla açıklarında oluşabilecek bir denizaltı zemin hareketinde, hareket merkezinin hemen üzerindeki su kütesinin yüzeyinde oluşacak değişimin zamana göre durumunu inceleyebilmek amacıyla analitik yöntem sonuçları bu bölgede üç boyutlu olarak görselleştirilmiştir. Daha önceki aşamalarda sabit ve ortalama bir hızla hareket eden heyelan modelleri için yapılmış olan bu üç boyutlu görselleştirme çalışması ivmeli bir şekilde hareket eden heyelanın oluşturduğu dalgaların karakteristiklerini de gözlemleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Şekil 4.38'de ivmeli hareket eden Alternatif 2 heyelan modeli için yakın bölgede oluşan hareketin başlamasından 100 sn, 150 sn, 200 sn ve 250 saniye sonra deniz yüzeyinin şeklini göstermektedir. Şekilde de görüleceği üzere tsunami oluşumu sırasında tsunami kaynağına yakın bölgedeki su yüzeyi taban hareketine bağlı olarak çok ani bir şekilde değişmektedir.



**Şekil 4.38** İvmeli hareket eden Alternatif 2 için yakın bölgede yüzey değişimi

Yakın bölgedeki tsunami hareketine örnek teşkil etmesi açısından ivmeli hareket eden heyelan modellerinden Alternatif 3 için yakın bölgede elde edilen su hareketinin farklı bir açıdan ve daha geniş bir sahadaki durumu gösteren üç boyutlu görüntüleri Şekil 4. 39'da sunulmuştur. Bu şekilde heyelanın harekete geçmesinden 50 sn, 100 sn, 150 sn ve 200 saniye sonra su yüzeyinin anlık üç boyutlu görüntüleri sunulmuştur. Hem şekil 4.36 hem de 4.37'de Tuzla sahilleri -X yönünde, Yalova sahilleri ise +X yönünde bulunmaktadır. Heyelan kütlesi ise +X yönünde 10.31 derecelik bir açı ile kaymaktadır.



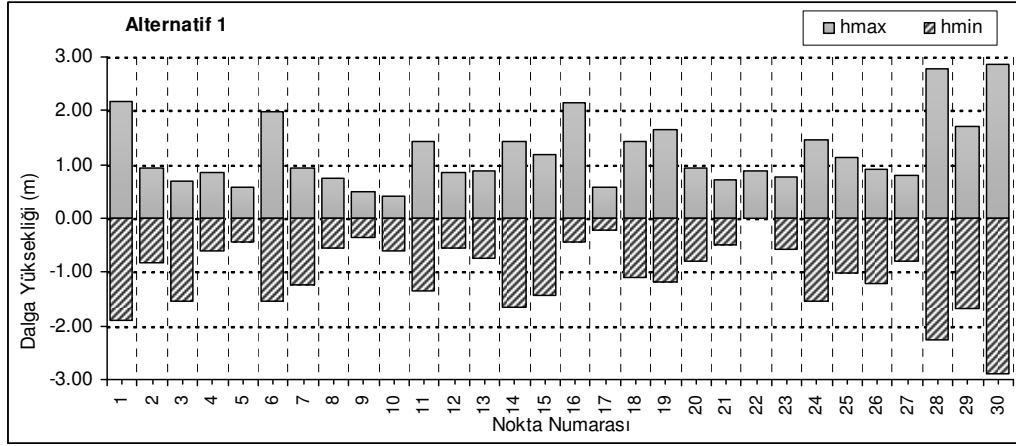
**Şekil 4.39** İvmeli hareket eden Alternatif 3 için yakın bölgede yüzey değişimi

Heyelana yakın bölge için elde edilen tsunami genlikleri, dalgaların kıyıya yaklaşması ile beraber kıyı profilinden etkilenmeye başlayacağı için kıyı bölgelerinde, sonlu elemanlar yöntemine dayanan nümerik modelleme kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve tsunaminin çalışma sahasındaki davranışı modellenmiştir. Daha önceki aşamalarda ispatlandığı gibi dalga yüksekliğinin ve hareketinin batimetri ile yakından ilişkilidir. Nümerik modelleme yaparken batimetri de dikkate alınmıştır. Analitik ve Nümerik modelin birlikte çalışabilmesi için belirlenen ortak sınırdaki analitik yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar, nümerik yöntem ile çözülecek bölgenin başlangıç ve sınır koşullarını oluşturmuştur. Böylece kurulan ağ modelindeki sonlu elemanların dış sınırlarında bulunan her düğüm noktasında tsunami genliklerine ait zaman serileri hesaplanmıştır. (Bkz. Şekil 4.1 ve Şekil 4.9)

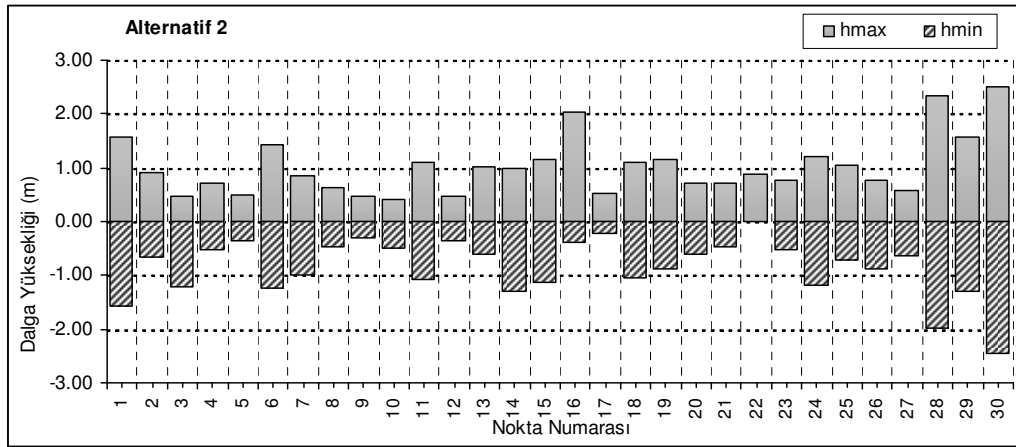
Şekil 4.35, 4.36, 4.37’de verilen zaman serisi değerleri nümerik yöntem ile yapılan hesaplamalar için girdi oluşturmuştur. Daha önce ortalama sabit hızla hareket eden heyelan ile yapıldığı gibi Darıca kıyılarından başlayıp, Kartal kıyılarına kadar uzanan yaklaşık 52 km uzunluğundaki kıyı şeridini ve çalışma bölgesindeki iki adet adayı kapsayan bölgede simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonların sonuçlarını değerlendirmek için kıyı şeridi üzerinde daha önceki aşamada da kullanılan 30 nokta kullanılmıştır. Bu noktalardan 27 tanesi tarif edilen kıyı şeridi üzerinden, son üç tanesi ise (P28, P29 ve P30) model alanında bulunan adalardan seçilmiştir.

Belirlenen noktaların konumları Şekil 4.10’deki uydu görüntüsündedir. Şekil 4.34’de sunulan üç farklı alternatifteki ivmeli heyelanlar için çeşitli simülasyonlar yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Her bir simülasyonun süresi 900 saniye (15 dakika) olarak alınmıştır.

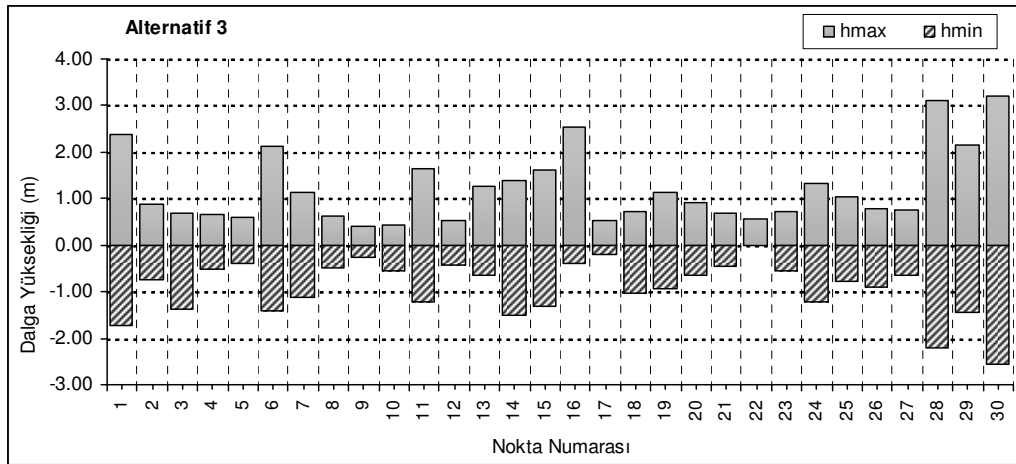
Yapılan simülasyon sonuçlarına göre elde edilen değerlerden 30 noktanın her birindeki maksimum dalga yükseklikleri ile dalga çukurunun oluşturduğu minimum su kotları Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 4.40:** Alternatif 1 için 30 noktadaki maksimum ve minimum su seviyeleri



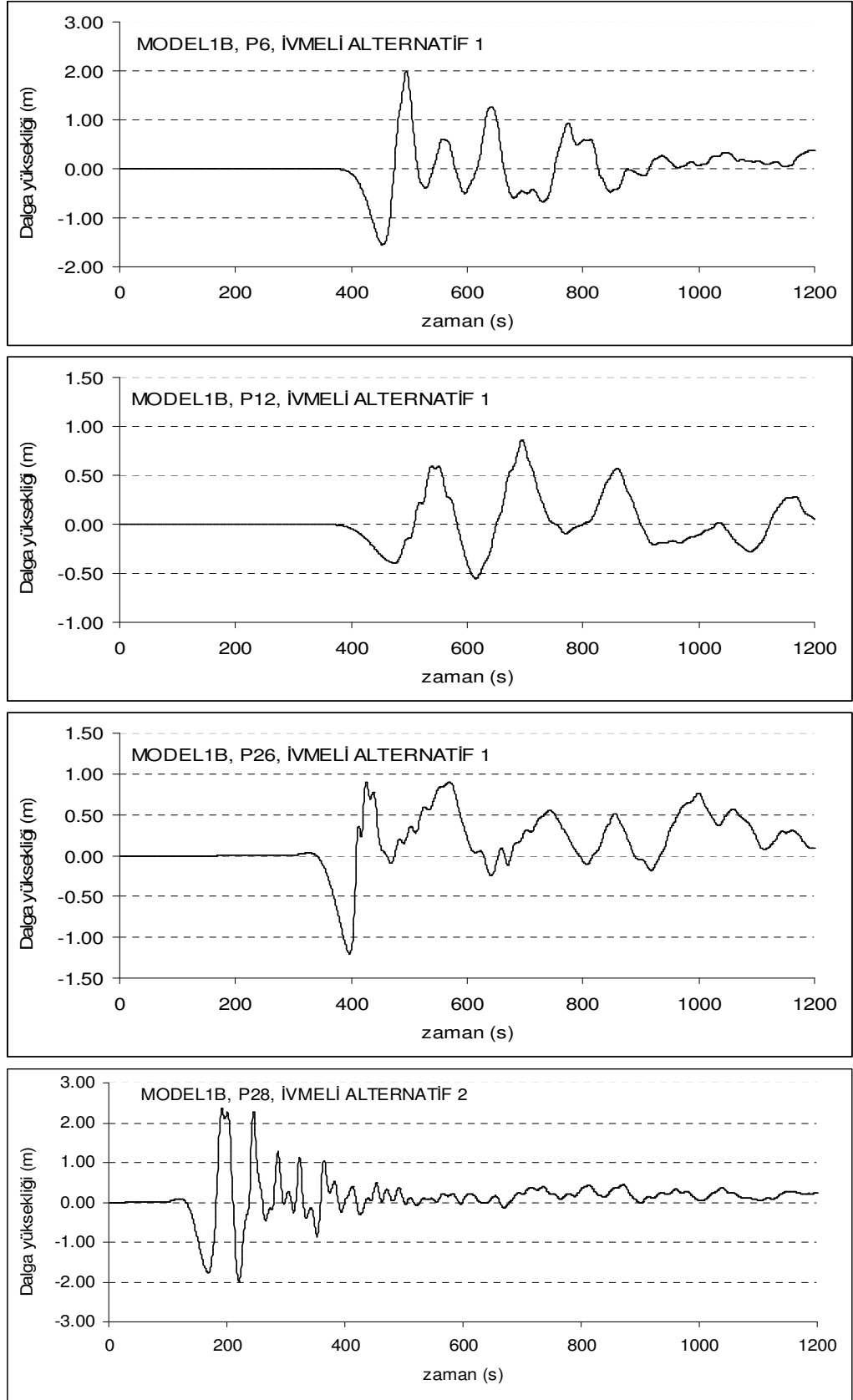
**Şekil 4.41:** Alternatif 2 için 30 noktadaki maksimum ve minimum su seviyeleri



**Şekil 4.42:** Alternatif 3 için 30 noktadaki maksimum ve minimum su seviyeleri

Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'ye birlikte bakıldığında önüne dalgakıran, mendirek veya diğer herhangi bir liman yapısı inşa edilmiş noktalardaki maksimum su kotları herhangi bir yapı inşa edilmemiş olanlara nispeten oldukça düşüktür. Şekil 4.40'daki 4. ve 5. noktalar korunmuş bir limanın içerisinde oldukları için çok yakınlarında bulunan 6. noktaya göre oldukça düşük dalga yükseklikleri oluşmuştur. Aynı durum açık denize bakan 16. nokta ve liman içerisinde seçilmiş olan 17. noktada da görülebilir. Ayrıca açık denize bakan noktalardan da heyelan merkezine yakın olan noktada daha büyük dalga yüksekliği oluşmaktadır. Buna örnek olarak da 11. noktadaki dalga yüksekliği kendisinden heyelan kaynağına daha yakın olan 16. noktaya göre daha düşüktür. Bunlarla beraber deniz içerisinde seçilen 28., 29. ve 30. noktalar iki adet adacığın çok yakınında bulundukları için bu adacıklar tarafından kesilen dalga hareketi iki adanın arasındaki boğazda sıkışarak dalgaların yükselmesine sebep olmasıyla bu noktalardaki dalgalar oldukça yüksektir.

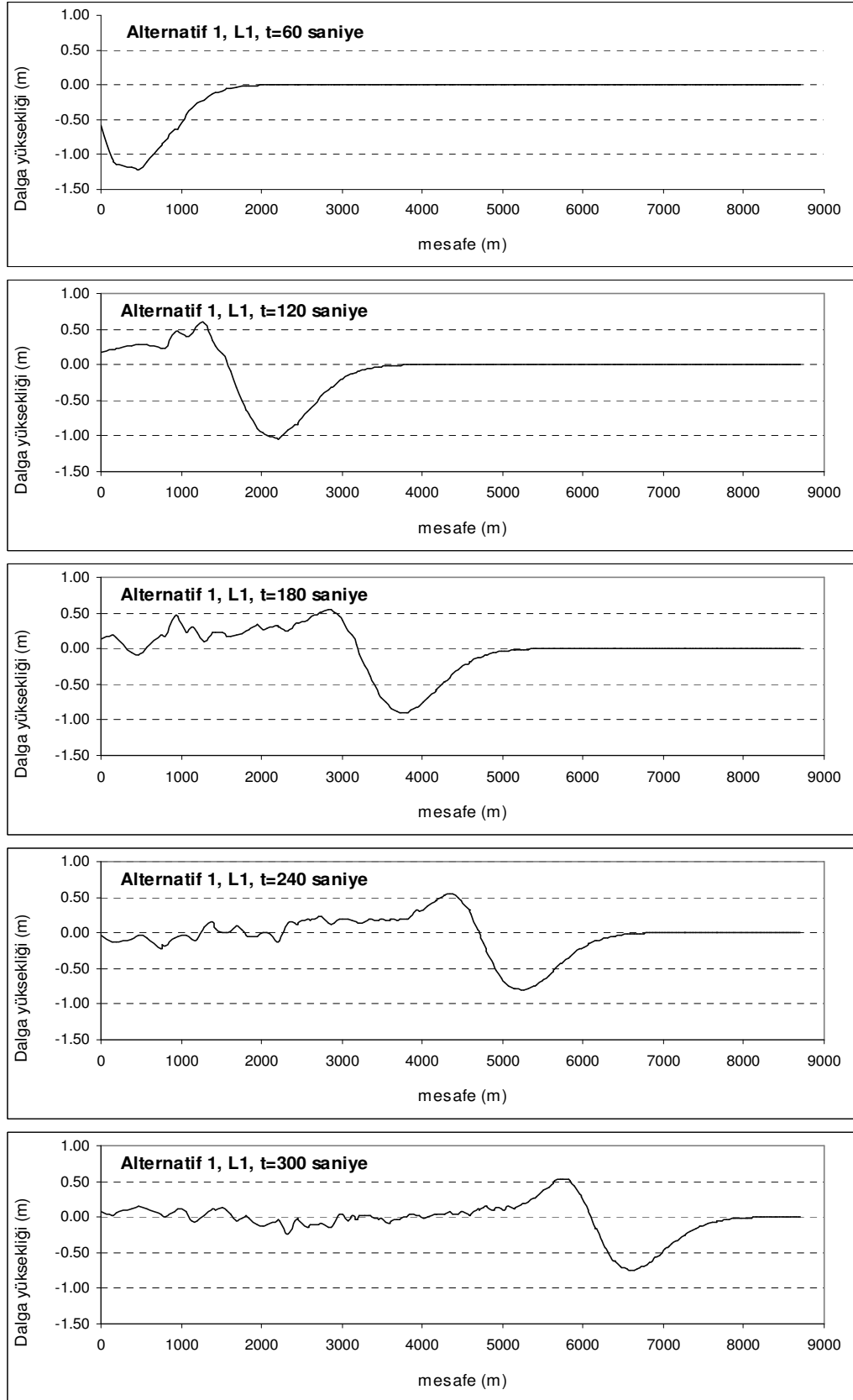
Sonuçların irdelenmesi için seçilmiş olan 30 adet nokta üzerinde su kotlarının zamanla değişimini gösteren zaman serileri de bu bölümde elde edilmiştir. Bu zaman serileri heyelan sonucu oluşacak tsunami dalgalarının kıyıya ne kadar sürede ulaşacağını belirlemek açısından önemlidir. Ayrıca her bir noktaya gelen dalgaların geliş hızı ve o noktaya gelen dalga tepelerinin sayısı da bu zaman serilerinden elde edilebilmektedir. Seçilmiş olan heyelan modelinde ivmeli olarak hareket eden üç heyelan örneği için 900 saniye boyunca 30 noktada bu zaman serileri elde edilmiştir. Elde edilen bu 90 adet zaman serisinden örnek olarak alternatif 1 için P6, P12 ve P26 noktalarındaki ve alternatif 2 için P28 noktasındaki zaman serileri Şekil 4.43'de sunulmuştur. Bu grafikler tsunaminin maksimum dalga yüksekliği ve dalganın söz konusu noktalara ulaşma süresi gibi konular hakkında çok önemli bilgiler vermektedir.



**Şekil 4.43:** Değişik noktalardaki ivmeli hareket sonucu oluşan zaman serileri

Bölüm 4.2’de model alanı üzerinde belirlenen doğrultularda, seçilen doğru boyunca tsunami genlik değerlerinin zamanla nasıl değiştiği de gösterilmiştir. Seçilen doğru boyunca dalganın lineer olarak zamanla değişimini takip edebilmek amacıyla sayısal model bölgesi içinde üç çizgi belirlenmiştir. Bu çizgiler L1, L2 ve L3 olarak adlandırılmıştır ve uydudan görüntüleri Şekil 4.17’de sunulmuştur. Bu çizgiler kullanılarak tsunami hareketinin belirli bir doğrultuda nasıl değiştiği ve ani batimetri değişimlerinde tsunami dalgalarında ne gibi değişimler olduğu gibi çok önemli bilgiler edinilebilir. Ayrıca bu grafikler deniz dibi ile birlikte çizildiği zaman dalganın su derinliği değişimi ile değişimi de görülebilir.

Bu amaçla ivmeli hareket eden 3 ayrı heyelan örneği için  $t=600$  saniye (1’er dakika arayla toplam 10 dakika) süresine kadar her üç doğrultudaki çizgiler boyunca anlık görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan ivmeli heyelan Alternatif 1 için Şekil 4.17’deki 1 numaralı çizgiye ait ilk 5 dakikalık değerlerden elde edilenler Şekil 4.44’de sunulmuştur. Şekil 4.44’deki 5 grafikten dalga hızı hakkında da bilgi sahibi olunabilir. Dalga tepesinin ardışık iki zaman dilimi arasında aldığı mesafenin birim zamandaki miktarı dalga grup hızını vermektedir.



**Şekil 4.44:** İvmeli hareket Alternatif 1 için L1 Doğrultusu Boyunca 1–5 dk Arasında Oluşan Dalga Genlikleri

#### 4.5.2 İvmeli ve Sabit Hızlı Heyelan Modellerinin Karşılaştırılması

Bölüm 4.2’de yapılmış olan sabit hızlı heyelanların 10 m/s ile 300 m/s arasında değişen hızlarda hareket etmesi sonucu kıyıda bulunan belirli noktalardaki dalga yüksekliklerinin hesaplanması ile bu bölümde sunulan ivmeli hareket eden heyelan sonucunda kıyıda bulunan belirli noktalardaki dalga yüksekliklerinin hesaplanması çalışmaları arasındaki farklar bu bölümde incelenecektir. Diğer bir deyişle daha önceki çalışmalarda yapılan modeli basitleştirme ile gerçeğe daha yakın olan ivmeli hareketin sonuçları arasında ne gibi farklar olduğu gösterilecektir.

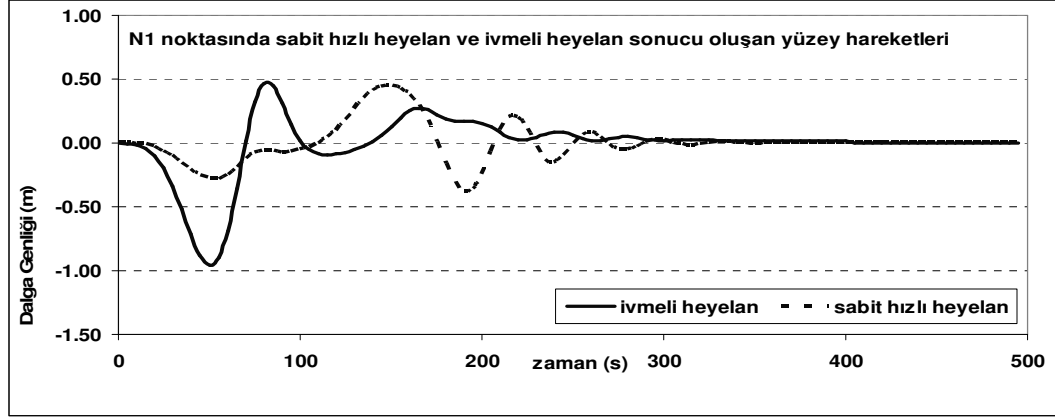
İvmeli heyelan modeli olarak seçtiğimiz 3 alternatifin hız-zaman grafikleri Şekil 4.34’de görülmektedir. Bu grafiklerde temel hareket kanunu olan  $Yol=Hız \times Zaman$  formülü kullanılarak bu alternatiflerin hareket süresince ortalama hızları bulunmuştur. Bulunan ortalama hız değerleri Tablo 4.7’de sunulmuştur.

**Tablo 4.7:** İvmeli hareket alternatiflerinin ortalama hızları

| Alternatif | Yol (m) | Zaman(sn) | Vort (m/s) |
|------------|---------|-----------|------------|
| 1          | 2140    | 90        | 23.78      |
| 2          | 2142    | 107       | 20.02      |
| 3          | 2140    | 71        | 30.14      |

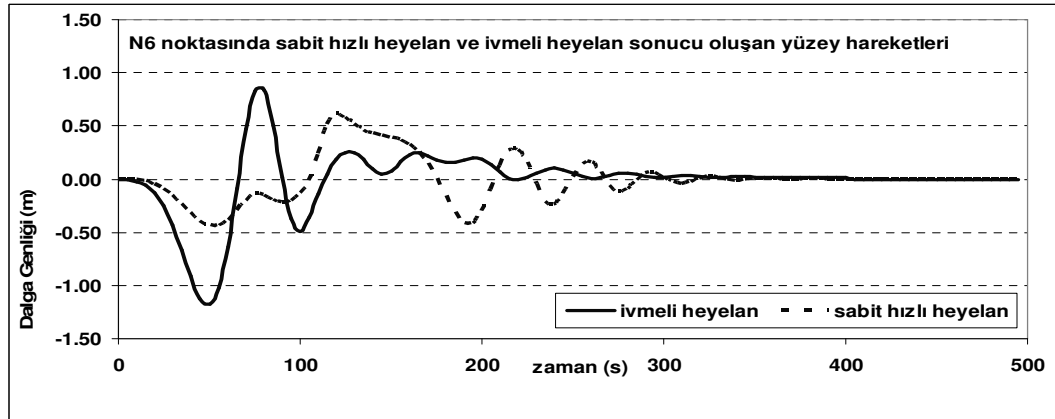
$$V_{ort} = yol / zaman$$

Tablo 4.7’de görüldüğü gibi ivmeli hareket için hazırlanan alternatif 2 ortalama olarak 20 m/s, alternatif 3 ise 30 m/s hızlara sahiptir. Bu durumda bu iki alternatifin sonuçları daha önceki çalışmalarımızda yapılmış olan sabit hızlı heyelan modellerinden  $C_R=20$  m/s ve  $C_R=30$  m/s olan iki modelin sonuçları ile karşılaştırılabilir. Karşılaştırmada için analitik model çıktılarının kendi aralarında ve nümerik model çıktılarının kendi aralarında kıyaslanması esas alınmıştır. Bu amaçla öncelikle analitik model sonucu olarak heyelan bölgesinin tam üzerinde bulunan su kütlesinde daha önceden analitik model ve nümerik model arasında sınır olarak seçilen 14 adet noktadaki dalgaların zamanla değişimi tek tek karşılaştırılmıştır. Bunların hepsini Şekil 4.36’daki gibi tek bir çizim üzerinde göstermek çok karmaşık olacağı için her bir noktadaki tsunami dalgalarına ait zaman serileri tek tek çizilmiştir. Örnek olarak 14 noktadan 1. için Şekil 4.45’de  $C_R=20$  m/s ortalama ve sabit hızla hareket eden heyelan ile ivmeli hareket eden Alternatif 2 zaman serileri sunulmuştur.



**Şekil 4.45:** 1. noktada ivmeli ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değışimler

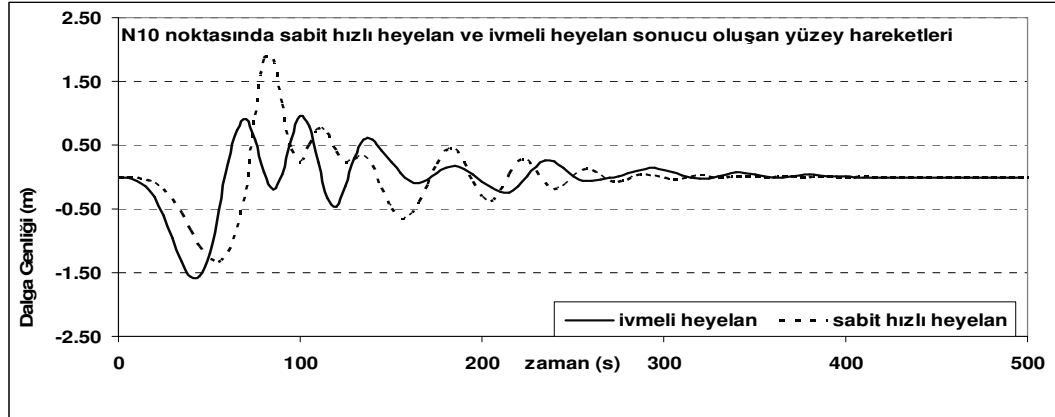
Analitik ve nümerik model sınırındaki 14 nokta için ayrı ayrı bulunan bu zaman serilerinden örnek olarak burada  $C_R=20$  m/s ortalama ve sabit hızla hareket eden heyelan ile ivmeli hareket eden Alternatif 2 için 6. noktada oluşan hareketin karşılaştırılması Şekil 4.46’da bulunmaktadır.



**Şekil 4.46:** 6. noktada ivmeli ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değışimler

Analitik ve nümerik model sınırındaki 14 nokta için ayrı ayrı bulunan bu zaman serilerinden örnek olarak burada  $C_R=30$  m/s ortalama ve sabit hızla hareket eden heyelan ile ivmeli hareket eden Alternatif 3 için 10. noktada oluşan hareketin karşılaştırılması Şekil 4.47’de bulunmaktadır. Bu karşılaştırma grafiklerinden de açıkça görüldüğü gibi ivmeli heyelanda daha kısa bir sürede dalgı çukuru ve ardından dalgı tepesi oluşumu gözlenmektedir. Bunun sebebi hız-zaman grafikleri ile açıklanabilir. Şekil 4.34’deki hız zaman grafiklerinden görüleceğı gibi ivmeli durumda heyelan kütlesi  $T=0$  anında durgun iken aniden çok yüksek bir hıza

ulaşmaktadır. Bu yüksek hız dolayısıyla su yüzeyinde de ani bir değişim olmaktadır. Ortalama sabit hızla hareket eden heyelanda ise adından da anlaşılacağı gibi ortalama ve sabit bir hızla aşağıya doğru kayan kütle ivmeli hareket eden kütle kadar yüksek bir hıza ulaşmamaktadır. Bu sebeple su yüzeyindeki hareket daha geç olmaktadır.



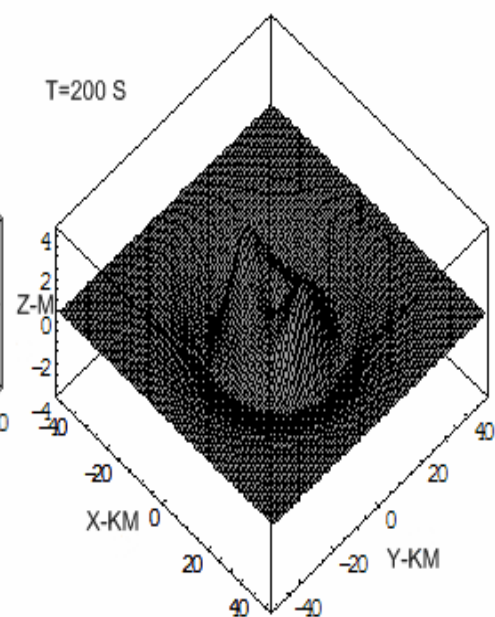
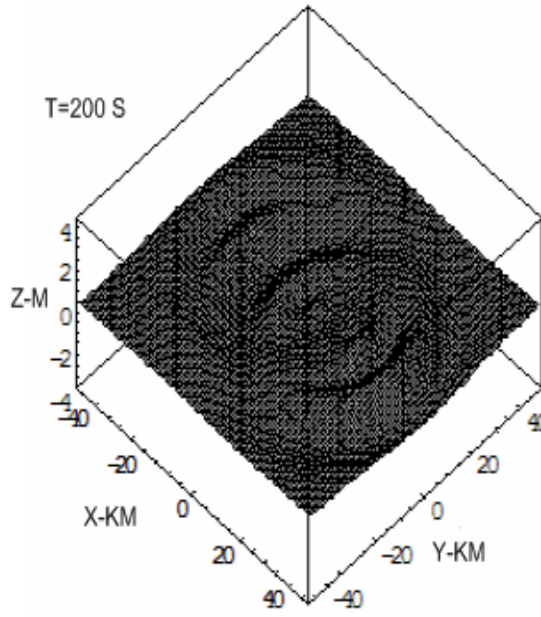
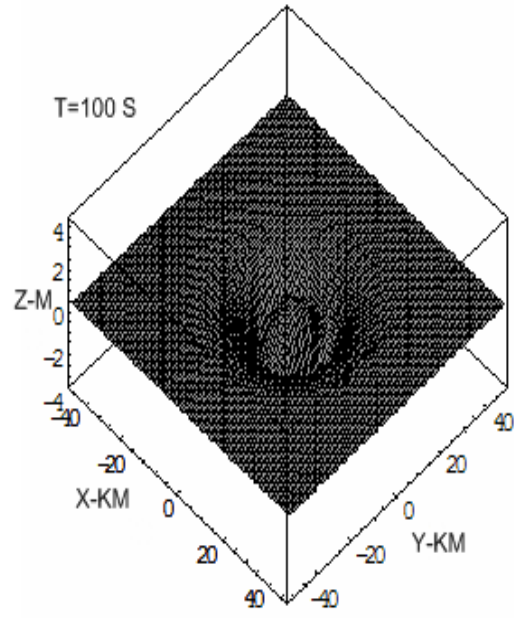
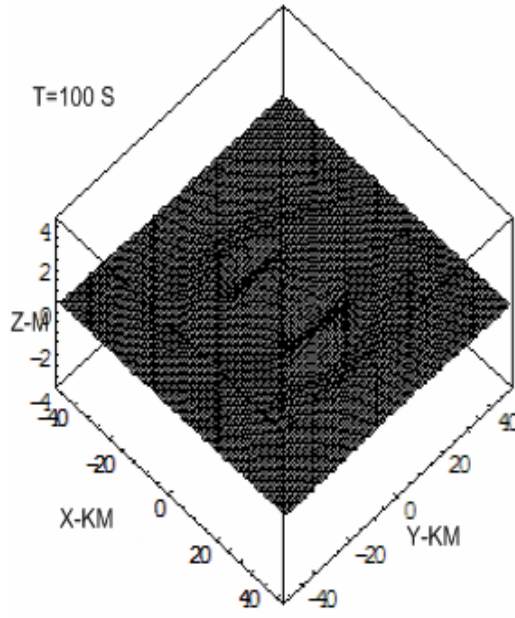
**Şekil 4.47:** 10. noktada ivmeli ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler

Tsunami oluşumundan sonra yakın bölgede yani heyelan bölgesinin tam üzerindeki bölgede su üzerinde meydana gelen hareketler yukarıdaki şekillerden anlaşıldığı gibi birbirinden farklı olmaktadır. Bu durumun üç boyutlu olarak gösterilmesi ile ivmeli ve ortalama sabit hızlı hareket eden heyelan modellerinin karşılaştırılmaları amacıyla Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 hazırlanmıştır. Şekil 4.48’de  $CR=20$  m/s ortalama sabit hızla hareket eden heyelana ait 100 saniye ve 200 saniye anlarındaki yüzeyin üç boyutlu görüntüleri ile ivmeli hareket eden Alternatif 2 heyelanından sonra 100 saniye ve 200 saniyedeki yüzeydeki durumlar yan yana çizilmiştir. Sol tarafta bulunan şekiller ivmeli hareket eden heyelan sonucu su yüzey durumunu sağ taraf ise ortalama sabit heyelan hızıyla (  $CR =20$  m/s) hareket eden heyelana ait durumları göstermektedir.

Şekil 4.49’da  $CR=30$  m/s ortalama sabit hızla hareket eden heyelana ait 150 saniye ve 250 saniye anlarındaki yüzeyin üç boyutlu görüntüleri ile ivmeli hareket eden Alternatif 3 heyelanından sonra 150 saniye ve 250 saniyedeki yüzeydeki durumlar yan yana çizilmiştir. Sol tarafta bulunan şekiller ivmeli hareket eden heyelan sonucu su yüzey durumunu sağ taraf ise ortalama sabit heyelan hızıyla (  $CR =30$  m/s) hareket eden heyelana ait durumları göstermektedir. Her iki şekilde de Tuzla sahilleri -X yönünde bulunmaktadır.

(ivmeli heyelan)

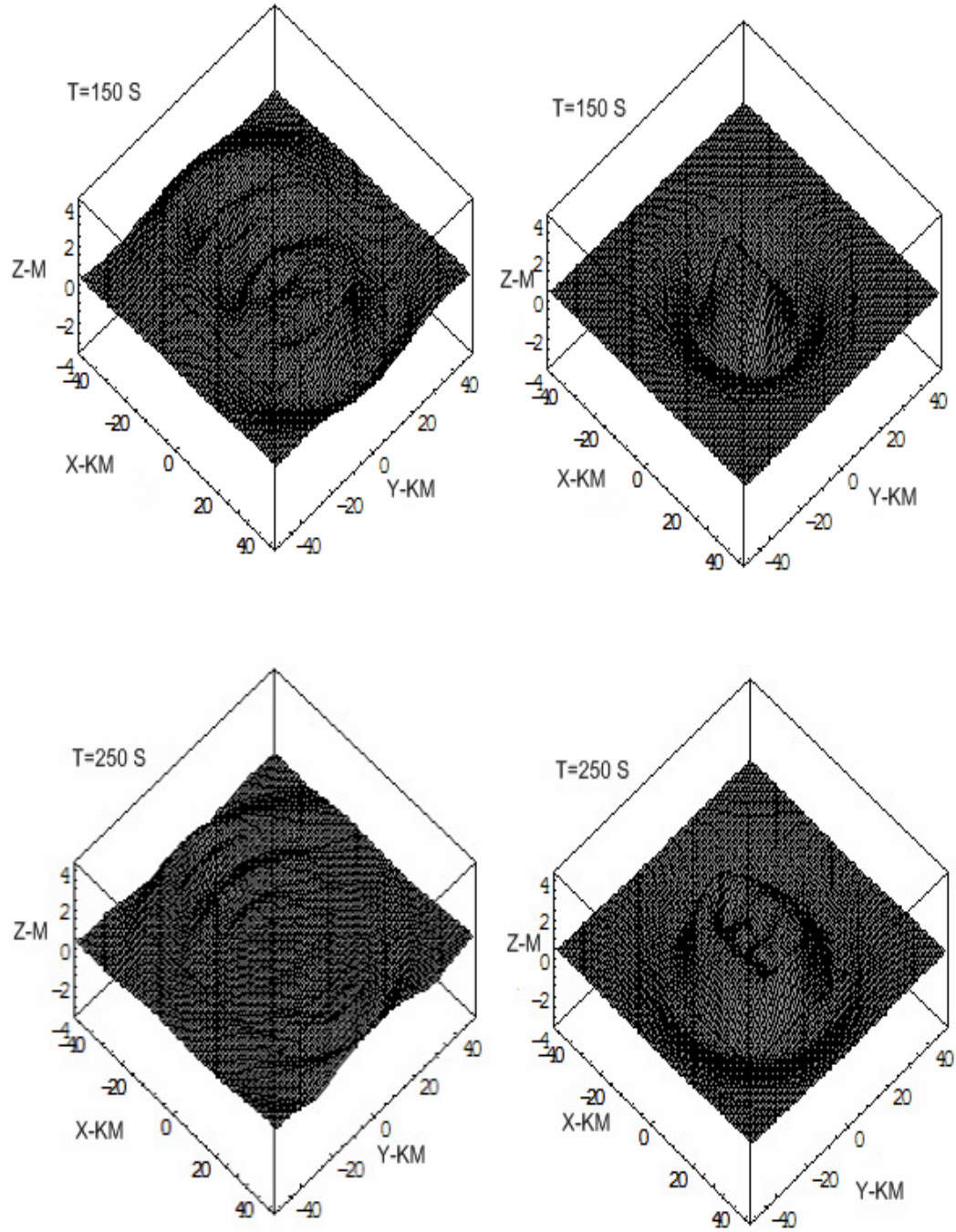
(sabit hızlı heyelan)



Şekil 4.48: İvmeli alternatif 2 ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler

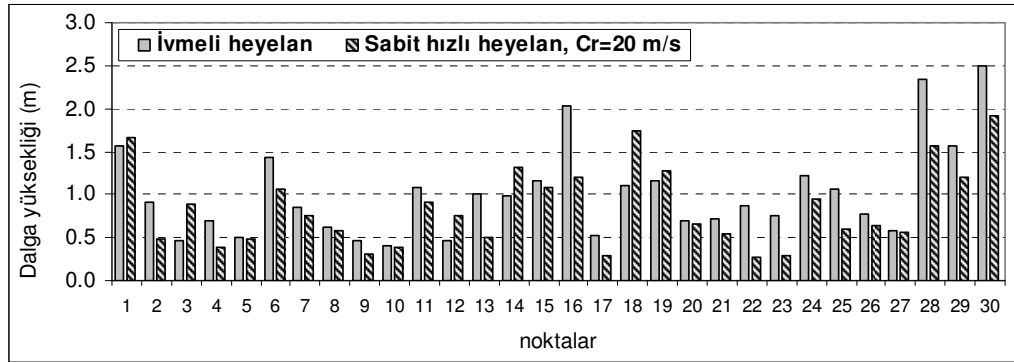
(ivmeli heyelan)

(sabit hızlı heyelan)

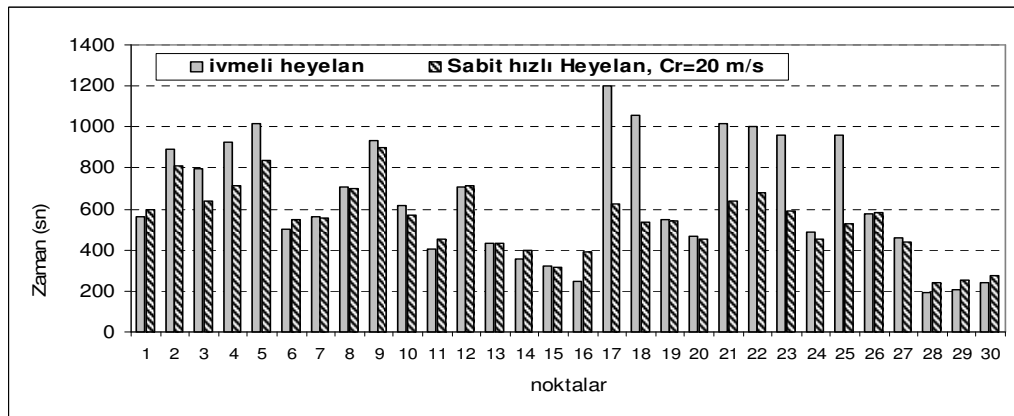


Şekil 4.49: İvmeli alternatif 3 ve sabit hızlı heyelanlarda yüzeydeki anlık değişimler

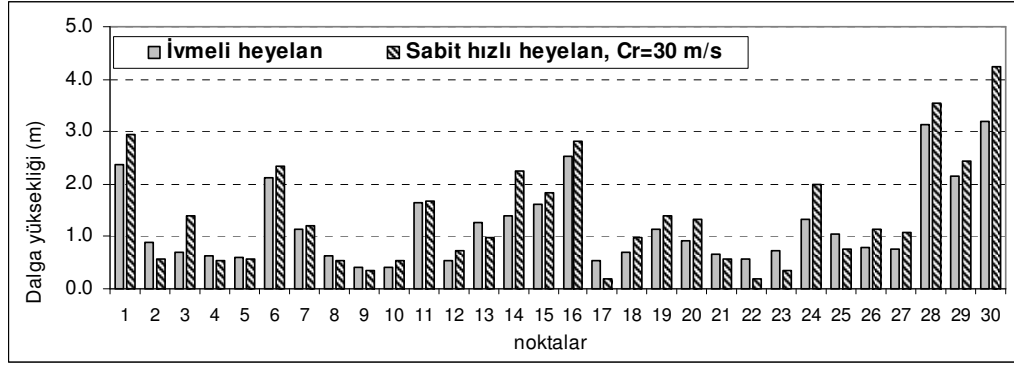
Nümerik çözüm bölgesindeki sonuçların karşılaştırılmasında ise ilk olarak ivmeli hareket eden alternatif 2 ile sabit hızı  $C_R=20$  m/s olan heyelan örnekleri karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de sunulmuştur. Şekil 4.50’de ivmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda kıyıda oluşan dalga yükseklikleri, Şekil 4.51’de ivmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda dalga tepesinin kıyıya ulaşma süreleri görülmektedir. Basitleştirilmiş model olan sabit hızlı modeller ile daha karmaşık olan ivmeli hareket eden modellerin sonuçları arasında bazı farklar vardır. Şekil 4.52 ve 4.53’de ise ivmeli hareket eden alternatif 3 ile sabit hızı  $C_R=30$  m/s olan heyelan örnekleri karşılaştırılmıştır. Bu şekillerden çıkarılan sonuca göre sabit ve ortalama bir hıza sahip basitleştirilmiş heyelan modellerinde elde edilen dalga yükseklikleri ve kıyıya ulaşma zamanları ile ilgili sonuçlar yeterince hassas olmamaktadır. Bunun yerine denizaltı heyelanını gerçeğe daha yakın bir biçimde modelleyen ivmeli heyelan modelleri kullanılmalıdır.



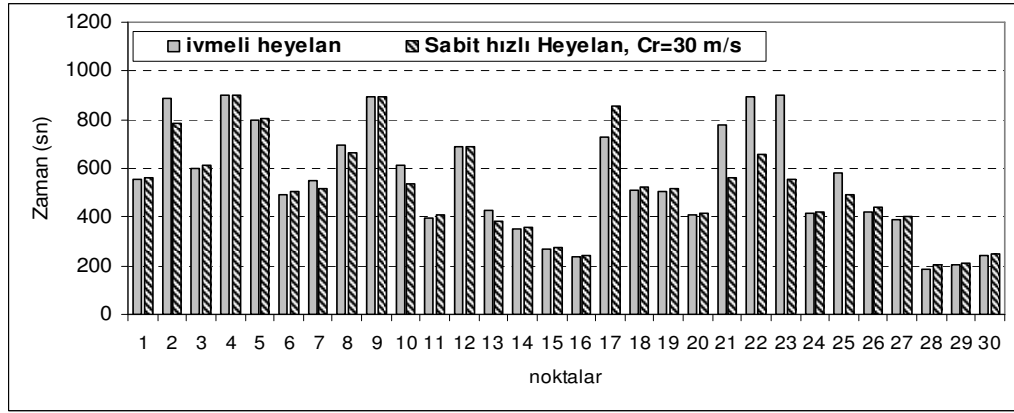
**Şekil 4.50:** İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda kıyıda oluşan dalga yükseklikleri



**Şekil 4.51:** İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda dalga tepesinin kıyıya ulaşma süreleri

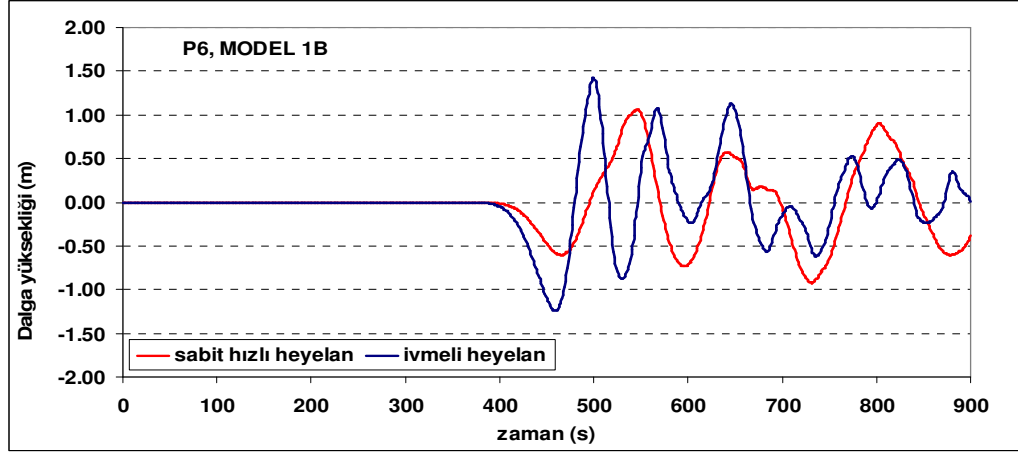


**Şekil 4.52:** İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda kıyıda oluşan dalga yükseklikleri

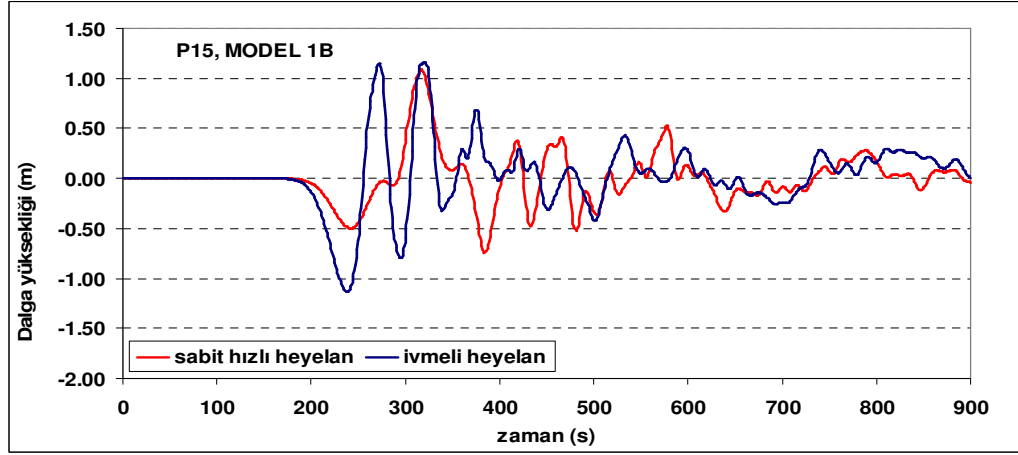


**Şekil 4.53:** İvmeli heyelan ve sabit hızlı heyelanlarda dalga tepesinin kıyıya ulaşma süreleri

İvmeli hareket eden heyelan ile ortalama sabit bir hızla hareket eden heyelanların karşılaştırılmasında yukarıda belirtilen dalga yükseklikleri ve kıyıya ulaşma sürelerinin yanında kıyıda bulunan 30 noktada zamanla su yüzey değişimlerinin de karşılaştırılması yapılmıştır. Kıyıda bulunan 30 noktada ivmeli hareket eden bir heyelan sonucu oluşan tsunami dalgasının zamanla oluşturduğu değişimlere ait zaman serileri ile sabit hızlı heyelan sonucu oluşan tsunaminin kıyıda oluşturduğu değişimler aynı grafik üzerinde çizilerek farkları gösterilmiştir. Burada örnek olarak ivmeli heyelan alternatif 2 ile CR=20 m/s ortalama sabit hızla hareket eden heyelanın sonucunda kıyıda oluşan zaman serilerinden 6. ve 15. nokta Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’de sunulmuştur.

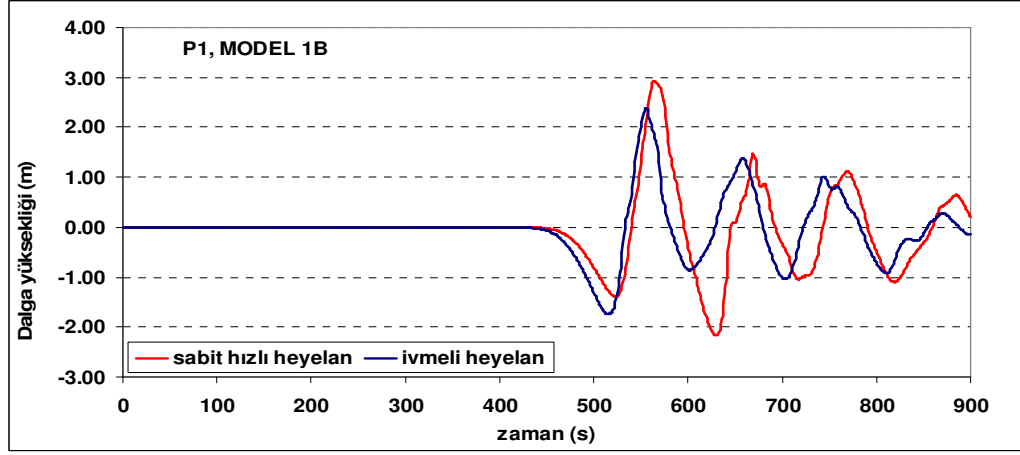


Şekil 4.54: İvmeli (alt 2) ve sabit hızlı heyelanlarda P6 noktasında zaman serileri

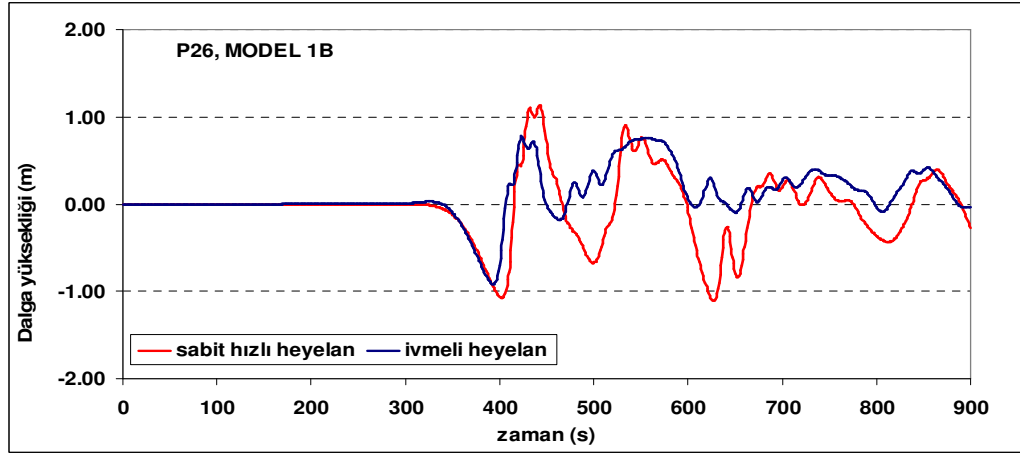


Şekil 4.55: İvmeli (alt 2) ve sabit hızlı heyelanlarda P15 noktasında zaman serileri

Elde edilen zaman serisi karşılaştırma grafiklerinden yine örnek olarak ivmeli heyelan alternatif 3 ile  $CR=30$  m/s ortalama sabit hızla hareket eden heyelanın sonucunda kıyıda oluşan zaman serilerinden 1. ve 26. nokta Şekil 4.56 ve Şekil 4.57 de sunulmuştur. Bu grafiklerden edinilen sonuçlara göre tsunami dalgasının oluşum şekli dalga yüksekliği ve dalga seyir süresi yani dalganın kıyıya ulaşma süresi üzerinde oldukça etkilidir. Dalgaların modellenmesinde gerçeğe ne kadar yakın modeller kullanılırsa sonuçlar da gerçeğe o kadar olmaktadır. Ancak bu modellerin kurulması matematiksel olarak daha karmaşıktır. Ayrıca mevcut hesaplama araçları ile modellemesi daha da uzun sürmektedir. Araştırmacılar en basit şekilde gerçeğe en yakın sonuçları veren modelleri elde edip bunların üzerinde çalışma yapmalıdırlar.



Şekil 4.56: İvmeli (alt 3) ve sabit hızlı heyelanlarda P1 noktasında zaman serileri

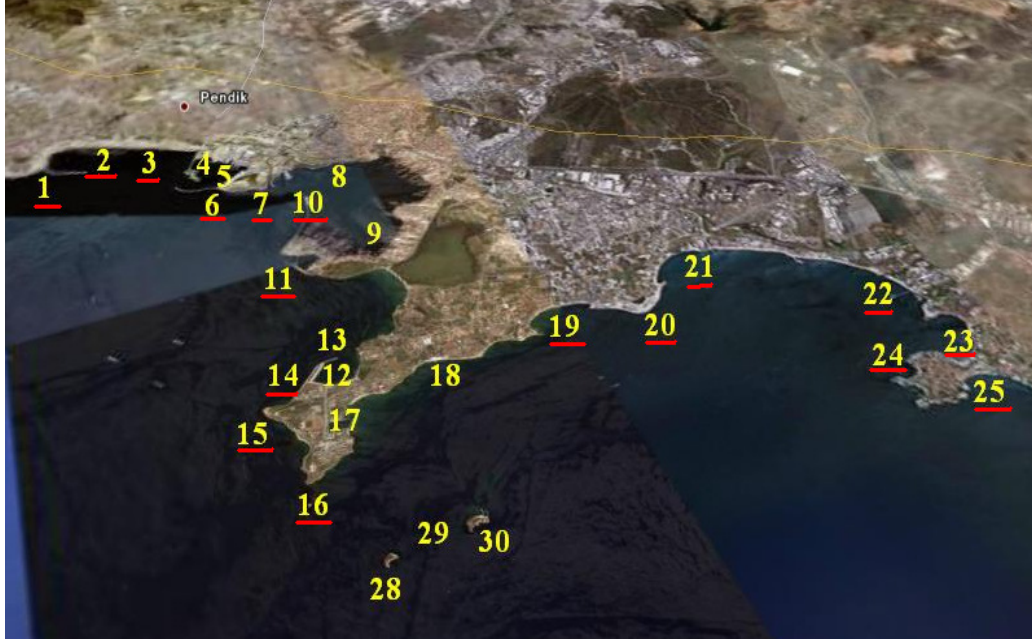


Şekil 4.57: İvmeli (alt 3) ve sabit hızlı heyelanlarda P26 noktasında zaman serileri

#### 4.6 Tsunami Dalgasının Kıyıya Varış Süresi Tahmin Çalışmaları

Bu bölümdeki çalışmada proje sahası içerisindeki çeşitli noktalara tsunami dalgasının en büyük dalga tepesinin o noktaya ulaştığı süre ile noktanın heyelan merkezine olan mesafesi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu çalışma erken uyarı sistemleri için çok önem taşımaktadır. Çünkü bir noktaya dalganın ne kadar sürede ulaşacağını önceden bilmek can ve mal kaybını önlemek açısından önemlidir. Bu çalışmada daha önceki çalışmalarda kullanılan 30 noktadan seçilen noktalar kullanılmıştır( Bkz Şekil 4.47). Seçilen bu noktaların ortak özelliği ise açık denize doğru bakan ve herhangi bir kıyı yapısı arkasında veya liman içinde kalmayan noktalardan olmalarıdır. Çünkü liman veya mendirek gibi insan yapıları dalganın o noktaya ulaşma süresini etkilemektedir.

Mesela Şekil 4.58’de bulunan 4, 5 ve 17 numaralı noktalar korunaklı limanlar içerisinde oldukları için buralara dalga ulaşma süresi değişmiştir. Altı kırmızı çizgili olan noktalar bu bölümdeki hesaplamalarda kullanılmıştır.



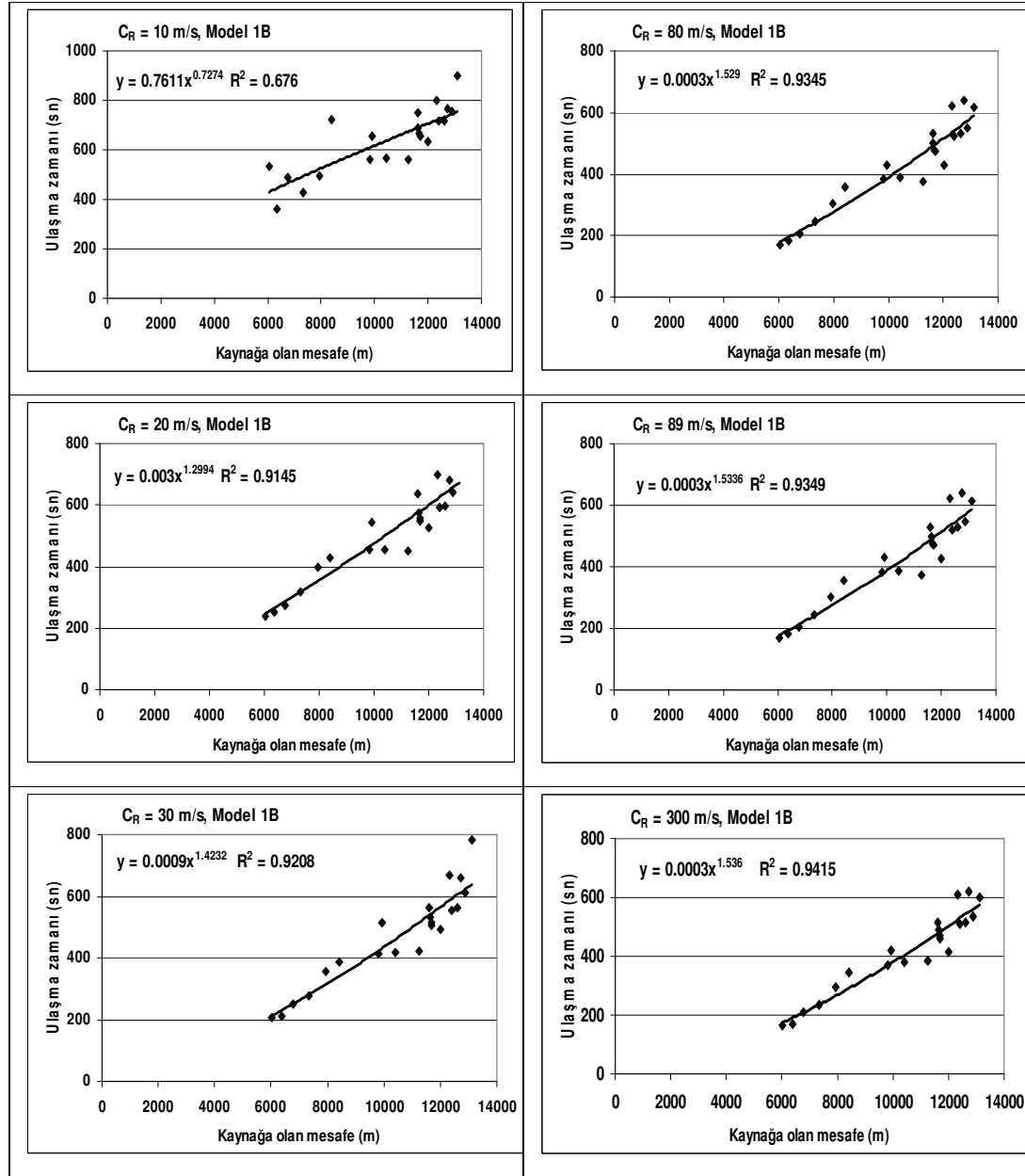
**Şekil 4.58:** Ulaşma zamanı tahmininde kullanılan noktalar

Bu bölümde heyelan modeli olarak yine literatürde kullanılan modellerin bu bölgeye en uygunu olduğu düşünülen Model1B kullanılmıştır.  $C_R = 10 \text{ m/s}$ ,  $20 \text{ m/s}$ ,  $30 \text{ m/s}$ ,  $80 \text{ m/s}$ ,  $89 \text{ m/s}$ ,  $300 \text{ m/s}$  sabit ve ortalama hızıyla hareket eden heyelanlar dikkate alınmıştır. Seçilen noktaların heyelan merkezine olan dik uzaklıkları ile maksimum dalga yüksekliklerinin o noktaya ulaşma zamanları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Şekil 4.59’da da açıkça anlaşıldığı gibi açık denize bakan yani önünde herhangi bir engel bulunmayan noktalara dalga varış süreleri ile heyelan merkezine olan mesafeler arasında bir bağıntı kurulabilir. Böyle bir bağıntı proje alanı içinde veya dışında (Marmara Denizi’nin içerisindeki herhangi bir noktaya) bu heyelan bölgesindeki bir hareketten dolayı oluşacak tsunami dalgalarının ulaşma sürelerini tahmin etmemize yardım etmektedir. Şekil 4.59 incelendiğinde  $C_R = 80 \text{ m/s}$ ,  $C_R = 89 \text{ m/s}$ ,  $C_R = 300 \text{ m/s}$  hızlarında oluşan bir heyelan için;

$$Y = 0.0003 * X^{1.53} \quad (4.6)$$

denklemini önerilebilir. Bu denklemde Y dalganın istenen noktaya ulaşma süresi ve X ise istenen noktanın Tuzla açıklarındaki heyelan bölgesinin geometrik merkezine

olan dik uzaklığıdır. Bu denklem kullanılarak sadece tez çalışmasında kullanılan noktalar için değil numerik modelleme bölgesinin (Bkz. Şekil 4.2) herhangi bir noktası için tsunami dalgası ulaşma süresi çok iyi bir şekilde tahmin edilebilir. Tsunaminin ulaşma süresini veren denklem üsteldir. Bunun yerine birinci dereceden lineer denklemler de elde edilmiştir ancak bu denklemlerin korelasyon katsayıları denklem 4.6'ya nispeten daha küçük olduğu için daha hassas sonuç veren bu denklem seçilmiştir.



**Şekil 4.59:** Değişik heyelan hızlarında dalganın noktaya varma süresi ile merkeze olan mesafesi arasındaki ilişki

Tsunaminin kıyıya ne kadar zamanda ulaşacağını bilmesinin ne kadar önemli olduğu 2004 Hint okyanusu tsunamisinde anlaşılmıştır. Erken uyarı sistemlerinin kurulması ve çalıştırılması doğrudan doğruya tsunaminin varış sürelerinin hesaplanmasına bağlıdır. Ayrıca afet yönetimi ve kıyılardaki yapılaşmanın planlı bir şekilde yapılabilmesi için kıyı afetlerinin en önemlisi olan tsunami dalgalarının da dikkate alınması gereklidir. 2004 yılındaki büyük Hint Okyanusu tsunamisinde Afrika kıyıları Endonezya kıyılarından saatler sonra sular altında kalmıştır. Bu bölgedeki insanların can ve mal kaybına uğramamaları için erken uyarı sistemlerinin önemi büyüktür. Marmara Denizindeki bir tsunaminin İstanbul kıyılarına ulaşması 5 ila 20 dakika arasında değişmektedir. Bu kısa zaman civardaki insanların uyarılması ve can kaybının önlenmesi için çok önemlidir. İstanbul ve Marmara Bölgesinin diğer büyük yerleşimleri ülkemizin nüfus yoğunluğu açısından en kalabalık bölgesi olması sebebiyle zarar olasılığı buralarda daha da artmaktadır. Ayrıca sanayi faaliyetlerimizin önemli bir kısmı da bu bölgededir. Böyle olması durumun önemini arttırmaktadır. Bu çalışmada sadece Marmara Denizi için elde edilen hareket zamanı ve mesafe arasındaki bağıntılar tsunami riski taşıyan başka denizlerde de elde edilip dünya çapında kullanılmalıdır. Marmara Denizi için ileride kurulabilecek bir tsunami erken uyarı sistemine bu çalışmanın sonuçları önemli katkılar sağlayacaktır.

## 5. DEĞERLENDİRMELER

Marmara Denizi için tsunamilerin en önemli sebebi denizaltı heyelanlarıdır. Denizaltı heyelanları ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalara çok fazla değildir. Tarihte Marmara Denizi'nde oluşan doksandan fazla tsunamiye rastlanmıştır [3].

Bu tezde 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 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. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1- 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. (Bkz. Şekil 4.11 ve şekil 4.12 sayfa 53, 54). Başka araştırmacıların aynı heyelan kütlelerinin hareketi için bu bölgede elde ettiği sonuçlar da 5.5 metre civarındadır. Yalçın ve diğ. 2002 yılında aynı bölgedeki çamur kayması ile ilgili yaptıkları çalışmada buna yakın sonuçlar bulmuştur. (Bkz. [30]) Tarihi kayıtlarda 1509 depremi sonucunda Yenikapı surlarını aşan 6 metrelik dalgalar bahsedilmektedir[3], ayrıca bundan önceki çalışmalarda İstanbul kıyılarında 5-6 metre yüksekliğinde tsunami dalgalarının oluşabileceği görülmüştür [30]. 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.

- 2- Sayfa 53 ve sayfa 54’de bulunan Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde kıyıdan biraz açıkta bulunan ve kıta sahanlığının hemen önünde bulunan Koç adası sahilinde tsunami dalga yüksekliğinin yüksek hızlı denizaltı heyelanlarında 8-9 metre mertebesine ulaştığı görülmektedir. Bu ada civarında bu derece yüksek dalga görülmesine sebep olarak taban batimetrisindeki ani değişim ve adalara çarpıp geri dönen dalgaların arkadan gelen dalgalar ile girişim haline gelmesi sonucu kırılan dalga hızındaki enerjinin potansiyel enerjiye yani su seviyesi yükselmesine dönüşmesi gösterilebilir.

Sayfa 65’deki Şekil 4.20’de söz konusu adaların yeri ve bu adalar civarındaki ani batimetri değişimi görülmektedir. Sayfa 65’de bulunan Şekil 4.21 incelendiğinde bu ada civarına gelen dalgaların adalara çarpmadan önceki ve sonraki dalga yükseklikleri arasında fark görülmektedir. Bu bölgede oluşan önemli kırılma ve yansımaların sonucunda bu adalar, arkalarında bulunan anakaraya (Tuzla yarımadasının bir bölümü) bir kalkan vazifesi görmektedir. Yani yüksek tsunami dalgaları bu adalar tarafından kısmen engellenmiştir. Ancak bilinmelidir ki adalara çarpan tsunami dalgaları bazı durumlarda adanın arka yüzündeki kıyılarda daha yüksek tırmanma yapabilmektedir [31].

- 3- Bu çalışmada çevrintili ve çevrintisiz olmak üzere iki ayrı heyelan tipine göre yapılan simülasyonlar sonucunda denizaltında oluşan heyelanın tipinin de kıyıda oluşacak tsunami dalga yüksekliğinde etkili olduğu görülmüştür. Sayfa 58’de bulunan Tablo 4.3’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 mertebe olarak da birbirine yaklaşmaktadır. 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. Yapılacak bu araştırmalar ve incelemeler neticesinde heyelanın literatürdeki modellerden hangisine benzediği anlaşılması ile bu modele göre kıyıda oluşacak dalga yükseklikleri kıyı koruma yapılarının boyutlandırılmasında kullanılması sağlanacaktır. Böylece oluşabilecek bir tsunami afetinin en az zararlar atlatılması için gerekli stratejiler geliştirilebilecektir. Ancak başta da söylendiği gibi heyelan modeli çevrintili veya çevrintisiz de olsa 5-6 metre yüksekliğinde dalgaların oluşması beklenmektedir. (Bakınız sayfa 58, Tablo 4.3)

- 4- Bu tez çalışmasında heyelan tabakasının farklı kalınlıkları için de çeşitli simülasyonlar yapılmıştır. Marmara Denizi'nde Tuzla açıklarında bulunan heyelan kütlelerinin ebatlarının da bilinmesi gerektiği ve bir an önce bu bölgedeki heyelana maruz tabakanın en, boy, yükseklik ve hacim gibi boyut özelliklerinin net bir şekilde belirlenmesi durumunda bu tez çalışmasında Bölüm 4.4'de (sayfa 75- 82) yer alan çalışmalara dayanarak Tuzla açıklarında oluşacak tsunami dalgalarının yüksekliği herhangi bir yeni simülasyon yapmaya gerek kalmadan belirli noktalar için elde edilmiş olan regresyon denklemleri kullanılarak bulunabilir. Örneğin Şekil 4.22 (sayfa 72) incelendiğinde 4 farklı noktaya ulaşan maksimum dalga yükseklikleri ve denizaltı heyelan tabakasının kalınlığı arasında her nokta için ayrı ayrı doğrusal bağıntılar oluşturulmuştur. Heyelan tabakasının kalınlığının 10-30 metre kalınlıkları arasında elde edilen bu denklemler sayesinde o noktadaki farklı heyelan tabaka kalınlıkları için tsunami dalga yükseklikleri kolayca hesaplanabilir. Şekil 4.27'de P16 noktası için denizaltı heyelan tabakası kalınlığı ile P16 noktasındaki maksimum dalga yüksekliği arasında

$$y=0.171x+0.493 \quad (5.1)$$

Denklemini önerilmiş olup

$y(m)$ = P16 için dalga yüksekliği,

$x(m)$ =denizaltı heyelan tabakası kalınlığıdır.

- 5- Ayrıca bu tez çalışmasında heyelan tabakasının genişliği için çeşitli alternatifler denenmiş ve değişik heyelan tabakası genişlikleri için değişik dalga yükseklikleri elde edilmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da denizaltı heyelanının tahmini kalınlığı olan 2792 m yanında 500 metreden 2500 metreye kadar değişen heyelan kütlesi genişlikleri için simülasyonlar yapılmış olup yine heyelan kalınlığı değişimi çalışmalarında olduğu gibi doğrusal regresyon denklemleri elde edilmiştir. Örneğin Şekil 4.30 (sayfa 79) incelendiğinde P24 noktası için denizaltı heyelan tabakası genişliği ile P24 noktasındaki maksimum dalga yüksekliği arasında

$$y=0.2232x+0.0116 \quad (5.2)$$

Denklemini önerilmiş olup

$y(m)$ = P24 için dalga yüksekliği,

$x(km)$ =denizaltı heyelan tabakası genişliğidir.

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda sunulan (5.1) ve (5.2) gibi denklemler farklı noktalar için elde edilmiştir. Böylece bundan sonraki araştırmacıların çalışmaları sonucu bulacakları heyelan tabakası kalınlığına ve heyelan genişliğine göre Tuzla kıyılarında oluşabilecek tsunami dalga yüksekliklerinin en gerçekçi şekilde ve en kolay yoldan hesaplanmasının önü açılmış olmaktadır.

- 6- Bu tez kapsamında Marmara Denizi'nde oluşabilecek bir heyelanın oluşturacağı dalgaların Tuzla kıyısındaki ilerleyişi hem dispersif dalga denklemleri ile hem de dispersif olmayan dalga denklemleri ile hesaplanmıştır.

Dispersiyon etkisini dikkate aldığı için sonuçları doğadaki gerçek dalga hareketine daha çok benzeyen Boussinesq denklemlerinin çözümleri Marmara Denizi için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar dispersiyon etkisini hesaba katmadığı için Boussinesq denklemlerinin daha basitleştirilmiş bir hali olan Saint Venant denklemlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.22, 4.23, 4.24’de sunulduğu üzere dispersiyon etkisini hesaba katmak kıyıdaki tsunami dalga yüksekliği olarak sonuçları çok fazla değiştirmemektedir. Bu nedenle çözülmesi daha zor olan karmaşık dispersif denklemler yerine bu bölge için dispersif olmayan denklemleri kullanmakta mertebe açısından önemli bir sakınca bulunmamaktadır. Gerek maksimum dalga yüksekliği olarak gerekse noktaya varış süresi olarak elde edilen sonuçlar arasında çok önemli bir fark bulunmamaktadır. Bunun sebebi heyelan merkezi ile kıyı arasındaki mesafenin az olmasıdır.

Tablo 4.6’da sunulduğu gibi değişik noktalarda her iki denklem takımı için elde edilen değerler arasındaki farklar genelde yüzde 4-5 mertebesinde. Ancak kıyı yapısının karmaşık olduğu yani yataydaki girinti, çıkıntılar ve ani düşeydeki batimetri değişimlerinin çok olduğu noktalarda bu fark yüksek heyelan hızlarında yüzde 15-20 mertebesine çıkmaktadır. Tablo 4.6’da P16 noktası için verilen sonuçlara göre bu noktanın topoğrafik özelliklerinden dolayı dalga yüksekliklerini hesaplariken dispersiyon etkisini göze almak daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

- 7- Bu tez çalışmasında elde edilen en önemli sonuçlardan birisi de Marmara Denizi’ndeki denizaltı heyelanının modellenmesinde geçmiş literatüre göre yeni olan heyelanın ivmeli hareket etmesinin modellenmesidir. Denizaltı heyelanının ivmeli olarak modellenmesi bu tez çalışması ile ülkemizde ve Marmara Denizi’nde ilk kez yapılmıştır.

Bu bölümdeki çalışmanın sonucunda denizaltı heyelanının hareketi fiziki olarak daha gerçekçi modellenmiştir. Buna bağlı olarak kıyıda oluşacak tsunami dalga yükseklikleri de daha gerçekçi olarak hesaplanmıştır. Bu bölümdeki çalışmada yapılan simülasyonlarda kullanılan ivmeli hareket modellerinin ortalama hızları 20 m/s ve 30m/s gibi nispeten düşük hızlar oluşu için kıyıda oluşan tsunami dalgaları için 2-3 metre mertebesinde maksimum dalga yükseklikleri elde edilmiştir.

Bunun yanında ortalama sabit hızla modellenen heyelanlara göre tsunami dalgalarının kıyıya daha çabuk ulaştığı anlaşılmıştır. Bunun sebebi olarak da Şekil 4.33 incelendiğinde görülür ki; gerçek hayatta oluşan tsunamiler ani

olarak hızlanıp çok yüksek hızlara çıkarlar ve daha sonra yavaşlayarak daha uzun bir sürede dururlar. Bu ani olarak yüksek hıza çıkmasından dolayı aniden oluşan dalga ilk baştaki yüksek hızın etkisiyle daha hızlı hareket ederek kıyıdaki noktaya daha hızlı ulaşır. Zaten Şekil 4.33’de görüldüğü gibi sıfırdan başlayıp sonra tekrar sıfır olan hızında ortalama hızı hareketi boyunca aldığı maksimum hıza göre olacağı için dalgalar ilk baştaki maksimum hızının verdiği bir itme ile kıyıya daha hızlı ulaşırlar. Ancak bu ulaşma hızı bu çalışmadaki pek çok nokta için 5-10 saniye gibi ihmal edilebilecek bir mertebededir.

Bununla birlikte ortalama sabit hızla hareket eden heyelan modelleri ile ivmeli hareket eden heyelan modellerinin kıyıda oluşturdıkları dalga yükseklikleri kıyaslandığında (Bkz. Şekil 4.50, 4.51) modelleme sahasındaki yansıma ve kırılmalardan ayrıca modelleme sahasının topoğrafik özelliklerinden kaynaklanan sebeplerden dolayı iki model tipi arasında bir ilişki kurulamamaktadır. Bazı noktalarda sabit hızlı heyelan bazı noktalarda ise ivmeli heyelan modelleri daha yüksek tsunami dalga yükseklikleri vermektedir.

- 8- Her iki şekildeki hareket sonucu oluşan kıyıdaki seçilen noktalardaki tsunami dalga yüksekliklerini karşılaştırma yapabilmek için korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Tablo 5,1’de ivmeli heyelan modeli alternatif2 ile buna eşit ortalama sabit hızlı hareket eden ( $C_R=20$  m/s) ve ivmeli heyelan modeli alternatif3 ile buna eşit ortalama sabit hızlı hareket eden ( $C_R=30$  m/s) heyelanın maksimum dalga yükseklikleri ve maksimum yükseklikteki dalganın kıyıya varış süreleri arasındaki korelasyonlar hesaplanmıştır. Bu tablo sonuçlarına göre her iki heyelan modeli sonuçları arasında oldukça benzerlik bulunmaktadır. Bu benzerlik kıyıya ulaşma süreleri için daha fazladır.

**Tablo 5.1:** İvmeli ve sabit hızlı heyelanlar arasındaki korelasyon katsayıları

|                                                                          | Maksimum<br>Dalga<br>Yüksekliği (m) | Kıyıya<br>Varış<br>Süresi (s) |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| İvmeli Alternatif 2 ile ortalama sabit hızı $C_R=20$ m/s olan heyelanlar | 0.780                               | 0.954                         |
| İvmeli Alternatif 3 ile ortalama sabit hızı $C_R=30$ m/s olan heyelanlar | 0.795                               | 0.915                         |

Bu tezde sonuç olarak doğadaki fiziksel hareketi daha doğru modelleyen ivmeli heyelan modeli zorluklarına karşın uygulanmıştır. Bu uygulama neticesinde daha önceden elde edilen ve basitleştirilmiş ortalama hızlı heyelanlar ile yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen tsunami dalga yükseklikleri ile arasında 0.80 mertebesinde korelasyon katsayısı bulunmuştur. Bu da yeterli derecede benzerlik olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Bu tezde pek çok farklı parametre dikkate alınarak Tuzla kıyılarında elde edilen tsunami dalga yükseklikleri kıyı şeridi planlamasında, kıyı yapılarının boyutlandırılmasında ve tsunami afetine karşı önlem stratejileri geliştirilmesinde büyük faydalar sağlayabilecektir.

- 9- Son kısımda da Marmara Denizi'nde olası bir denizaltı heyelanı sonucunda oluşacak tsunami dalgalarının kıyıda belirlenen noktalara ulaşma zamanları incelenerek değişik heyelan hızlarında, değişik noktalara varış sürelerini veren genel bir denklem elde edilmiştir. Bu denklem modelleme bölgesinin herhangi bir noktasına tsunami dalgasının ulaşma süresini vermektedir. Erken uyarı sistemleri için çok önemlidir. Marmara Denizi gibi küçük bir denizde tsunami dalgalarının oluşumundan karaya varması bu modelleme bölgesinde 5-15 dakika arasındadır. Bu kısa zaman dilimi kıyı şeridinde bulunan insanların uyarılmaları ve olası can kayıplarının önlenmesi için çok önemlidir.

Ayrıca bu tezde önerilen denklem tsunami riski büyük olan başka denizler için de bu tezde önerildiği şekilde elde edilip kullanılabilirse o deniz çevresindeki insanların da hayati tehlikeden kurtulmaları hatta okyanuslar gibi tsunaminin ulaşması saatler mertebesinde olan büyük denizlerde mal kaybının azaltılmasında da önemlidir.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Tuzla kıyılarına yakın bir bölgedeki denizaltı heyelanındaki bir hareketlenme sonucunda deniz yüzeyinde oluşabilecek dalga hareketleri ve bunların kıyıya etkiler araştırılmıştır.

Sonuç olarak Tuzla yarımadası civarında muhtelif noktalarda 5-6 metre yüksekliğinde maksimum dalga yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada diğer araştırmacılardan farklı bir yaklaşım kullanılmıştır. tsunami dalgalarının topografya ve heyelan merkezine uzaklığa göre belirli noktalarda oluşabileceği analitik ve nümerik matematiksel modeller ile ispatlanmıştır.

Bu çalışma, çevrintili ve çevrintisiz hareket eden iki ayrı heyelana göre yapılan simülasyonları içermektedir. Değişik denizaltı heyelanı tiplerinde kıyıda oluşan tsunami dalga yüksekliklerinin birbirinden farklı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca heyelan tipi değişse bile Tuzla kıyılarında 5-6 metre yüksekliğinde dalgaların oluşacağı görülmüştür.

Denizaltı heyelan tabakasının farklı kalınlıklarda olmasının kıyıdaki dalga yüksekliğine etkisi incelenerek, heyelan tabaka kalınlığı ile kıyıdaki dalga yüksekliği arasında doğrusal bağıntılar kurulmuştur. Ayrıca bu tez çalışmasında heyelan tabakasının genişliği için çeşitli alternatifler denenmiş ve değişik heyelan tabakası genişlikleri için kıyıda oluşan dalga yükseklikleri ile heyelan genişlikleri arasında doğrusal ilişkiler elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında dispersiyon etkisini dikkate aldığı için sonuçları doğadaki gerçek dalga hareketine daha çok benzeyen Boussinesq denklemlerinin çözümleri Marmara Denizi için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar dispersiyon etkisini hesaba katmadığı için Boussinesq denklemlerinin daha basitleştirilmiş bir hali olan Saint Venant denklemlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda oluşan

dalgaların maksimum dalga yükseklikleri ve noktaya varış süreleri arasında çok önemli bir fark bulunmadığı görülmüştür.

Bu tezde yapılan en önemli çalışmalardan biri de yeni olan heyelanın ivmeli hareketinin modellenmesidir. Denizaltı heyelanının fiziki olarak daha gerçekçi modellenmesi olan ivmeli model bu tez çalışması ile ülkemizde ve Marmara Denizi'nde ilk kez uygulanmıştır.. Bu bölümde yapılan simülasyonlarda ivmeli heyelan hareketinin ortalama hızları 20 m/s ve 30m/s gibi nispeten düşük hızlar alındığı için kıyıda tsunami dalgaları 2-3 metre mertebesinde oluşmuştur. Bunun yanında ortalama sabit hızla modellenen heyelanlara göre tsunami dalgalarının kıyıya daha çabuk ulaştığı anlaşılmıştır. Doğadaki fiziksel hareketi daha doğru modelleyen ivmeli heyelan modeli uygulaması sonuçları ile basitleştirilmiş ortalama hızlı heyelan sonuçları karşılaştırılarak tsunami dalga yükseklikleri ile arasında 0.80 mertebesinde korelasyon katsayısı bulunmuştur. Bu da yeterli derecede benzerlik olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Ayrıca bir denizaltı heyelanı ile oluşacak dalgaların Tuzla kıyılarında belirlenen noktalara ulaşma zamanları ile heyelan hızları arasında genel bir denklem elde edilmiştir. Erken uyarı sistemleri için çok önemli olan bu denklem modelleme bölgesinin herhangi bir noktasına tsunami dalgasının ulaşma süresini vermektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışması 13 farklı hızda, 5 farklı kalınlıkta, 5 farklı genişlikte ve 2 farklı heyelan tipinde sabit hızlı ve ivmeli hareket eden ve dispersif olan ve olmayan olmak üzere toplam 120 civarında analitik ve nümerik simülasyonları kapsamaktadır. Her bir simülasyon için bilgisayarın çalışma süresi yaklaşık 4-5 saat civarında sürmüştür. Yapılmış olan bu pek çok simülasyonlardan ve sonuçlardan ancak çok az bir kısmı bu teze sığdırılabilmektedir. Bu çalışmanın başka bölgelerde de heyelandan dolayı oluşabilecek olan dalgaların incelemesinde ve kıyılara olan etkilerinin belirlenmesinde örnek olması amaçlanmıştır. Marmara Denizi'nde çalışılması ve araştırılması gereken daha pek çok heyelan bölgeleri bulunmaktadır.

Bundan sonraki dönemde Marmara Denizi'ndeki farklı heyelan bölgelerindeki hareketlerin kıyılara etkisi ve kıyıdan içeriye dalga ilerlemesi konusunda çalışılabilir. Tuzladan başka tsunami riski taşıyan bölgeler için baskın (tsunami taşkını) modellemeleri ve haritaları hazırlanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Tüysüz, O.**, 2003. İstanbul için deprem senaryolarının hazırlanmasında coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı, İ.T.Ü. Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, İstanbul, Türkiye.
- [2] **Yaltırak, C.**, 2005. Ulusu ve cumhuriyeti bekleyen tehlike Doğu Marmara depremi bilimsel, siyasal, sosyal gerçekler ve çözümler, **42**, 5-24, Aydınlanma 1923 Dergisi, İstanbul.
- [3] **Altınok, Y., Ersoy, S., Yalciner, A.C., Alpar, B., Kuran, U.**, 2001. Historical tsunamis in the Sea of Marmara, *U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Review and International Tsunami Symposium*, Seattle, Washington, 7-10 August, p. 527-533.
- [4] **Aydın, U.**, 2005. Kıyıları yutan dev liman dalgaları tsunamiler ve Türkiye kıyıları, **15**, 1-8, Atatürk Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi Bülteni, Erzurum.
- [5] **Yalçiner, A.C.**, 2000. Tarihsel ve güncel örneklerle depreşim dalgası (tsunami) ve korunma yöntemleri, *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul, Türkiye, 12 Aralık.
- [6] **Hayır, A., Cıgızoglu, H.K., Şeşeoğulları, B. Kılınç, İ., Ertürk, A., Aldemir, Ü., Kabdaşlı, S., Yalçiner, A.C., Yağcı, O.**, 2007. Tuzla Açıklarındaki Olası Denizaltı Heyelanının Doğu Marmara Kıyılarındaki Etkilerinin Araştırılması., TÜBİTAK Proje Raporu, İstanbul
- [7] **Şeşeoğulları, B.**, 2006. Olası İstanbul depreminde Marmara Denizi'nde oluşabilecek Tsunaminin Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [8] **Marmara’da Tsunami Riski**, Doğa Hareketleri Araştırma Derneği,  
[http://www.sismikhaber.org/makaleler/documents/tsunami\\_ve\\_marmara.asp](http://www.sismikhaber.org/makaleler/documents/tsunami_ve_marmara.asp)
- [9] **Altınok, Y., Yalçın, A.C., Alpar, B. ve Ersoy, Ş.**, 2000. Tarihsel Veriler Işığında Marmara Denizi’nde Depreşim Dalgaları (Tsunamiler), *III. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*, Çanakkale, Türkiye, 5-7 Ekim.
- [10] **Hampton, MA**, 1972. Transport of ocean sediments by debris flow, American Association of Petroleum Geologists Bulletin 56(53): 6228.
- [11] **Kuenen, P.H.** 1952. Estimated size of the Grand Banks Turbidity Current, American Journal of Science, 250, 874-884
- [12] **Lee, H.J., Schwab, W.C. and 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. Dept. Of the Interior, Denver Co., 80225, 1-13
- [13] **Booth, J.S. O’leary, D.W., Popenoe, P., and 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. Dept. of Interior, Denver, Co. 80225, 14-22.
- [14] **Normark, W.R., Moore, J.G. and Torresan, M.E.** 1993. Giant Volcano-Related Landslides and the Development of the Hawaiian Islands, in “Submarine Landslides: Selected Studies in the U.S. Exclusive Economic Zone, U.S. Geological survey Bulletin 2002, U.S. Dept. of Interior, Denver, Co., 80225, 184-196.
- [15] **Edwards, B.D., Lee, H.J. and Field, M.E.**, 1993. Seismically induced mudflow in Santa Barbara Basin, California, in Submarine Landslides: Selected Studies in the U.S. Exclusive Economic Zone, U.S. Geological Survey Bulletin 2002, U.S. Dept. of Interior, Denver, Co., 80225, 167-175.

- [16] **Hampton, M.A., Lemke, R.W. and Coulter, H.W.** 1993. Submarine Landslides that had a significant impact on man and his activities: Seward and Valdez, Alaska, in Submarine Landslides: Selected Studies in the U.S. Exclusive Economic Zone, U.S. Geological Survey Bulletin 2002, U.S. Dept. of Interior, Denver, Co., 80225, 123-134.
- [17] **Field, M.E. and Barber, J.H.** 1993. A submarine Landslide Associated with Shallow Sea-Floor gas and Hydrates off Northern, in Submarine Landslides: Selected Studies in the U.S. Exclusive Economic Zone, U.S. Geological Survey Bulletin 2002, U.S. Dept. of Interior, Denver, Co., 80225, 151-157.
- [18] **Todorovska, M.I., Trifunac, M.D.** 2001, Generation of tsunamis by a slowly spreading uplift of the sea floor, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 151-167,.
- [19] **Olsen, N.R.B.,** 2000. CFD Algorithms for Hydraulic Engineering, Department of Hydraulic and Environmental Engineering The Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [20] **Olsen, N.R.B.,** 1999. Computational Fluid Dynamics in Hydraulic and Sedimentation Engineering Class Notes, Department of Hydraulic and Environmental Engineering The Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [21] **Cıgızoğlu, H.K.,** 2005. Numerical Modeling Lecture Notes, İ.T.Ü. Civil Engineering Faculty, Istanbul.
- [22] **Trifunac, M.D., Hayir, A., Todorovska, M.I.** 2002, A note on the effects of nonuniform spreading velocity of submarine slumps and slides on near-field tsunami amplitudes, Soil Dynamics and Earthquake Eng., 22(3), 167-180,.
- [23] **Hirata, K., Satake, K., Tanioka, Y., Kuragano, T., Hasegawa, Y., Hayashi, Y., Hamada, N.,** 2005, The Indian Ocean Tsunami; Tsunami source

model from satellite altimetry., Proceedings of the International Tsunami Symposium., Chania, Yunanistan, s72-76

- [24] **Mader, C.L.**, 2004, Numerical modelling of water waves, Boca Raton CRC Press
- [25] **Kulikov, E.**, 2005, Dispersion of the Sumatra tsunami waves in the Indian Ocean detected satellite altimetry. P.P. Shirshov Oceanology Institute Raporu, Rusya bilimler Akademisi; Moskova
- [26] **Horrrillo, J., Kowalik Z., Shigihara, Y.**, 2006, Wave dispersion study in the Indian Ocean tsunami of December 26, 2004. Marine Geodesy, 29:149-166
- [27] **Yüksel, Y., Çevik, E., Çelikoğlu, Y.**, 1998. Kıyı ve Liman Mühendisliği. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.
- [28] **Ortiz, M., E.Gomes-Reyes, H.S. Velez Munoz** 2001 A fast preliminary estimation for transoceanic tsunami propagation. ITS 2000 proceedings, 723-739
- [29] **De Blasio, F.V., Elverhoi, A., Issler, D., Harbitz, C.B., Bryn, P., Lien, R.**, 2004, Flow models of natural debris flows originating from over consolidated clay materials, Marine Geology, 213, 439-455
- [30] **Yalçmer, A.C., Alpar, B., Altınok, Y., Özbay, İ., İmamura, F.**, 2002, Tsunamis in the Sea of Marmara Historical documents for the past, models for the future, Marine Geology, 190, 445-463
- [31] **Briggs, M.J., Synolakis, C.E., Harkins, G.S., Green, D.R.**, 1995, Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island, Pure and Applied Geophysics, **144**, 3/4, pp. 569-593

## **ÖZGEÇMİŞ**

1977 yılında Uşak'ta doğan İsmail KILINÇ, liseyi Kayseri N.M.Baldöktü Anadolu Lisesinde 1995 yılında, lisans eğitimini Ortadoğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde 2000 yılında bitirmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesinde 2002 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2004 yılında bitirmiştir. Aynı yıl doktora eğitimine başlamıştır. DSİ 14. Bölge Müdürlüğü'nde bir süre çalışmıştır ve halen özel sektörde çalışmaktadır.