İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OLASI İSTANBUL DEPREMİNDE MARMARA DENİZİ'NDE OLUŞABİLECEK TSUNAMİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Burkay ŞEŞEOĞULLARI

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : HİDROLİK VE SU KAYNAKLARI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OLASI İSTANBUL DEPREMİNDE MARMARA DENİZİ'NDE OLUŞABİLECEK TSUNAMİNİN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Burkay ŞEŞEOĞULLARI
(501031504)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. Hikmet Kerem CIĞIZOĞLU**

Diğer Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Sedat KABDAŞLI (İ.T.Ü.)**

Yrd.Doç.Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde, kuzeydoğu Marmara kıyılarına yakın bölgede bulunan denizaltı heyelanının hareket etmesi durumunda oluşabilecek tsunamiler incelenmiştir. Çalışma aynı zamanda, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK), Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 104Y161 numaralı projenin sonuçlarını içermektedir. Çalışma kapsamında, analitik model kullanılarak, heyelana yakın bölgedeki tsunami genlikleri; nümerik model kullanılarak, tsunaminin kıyıda oluşturacağı en büyük dalga yükseklikleri ve kıyı şeridinde tsunami genliklerine ait zaman serileri hesaplanmıştır.

Bu şekilde, literatürde yeni olduğu düşünülen, analitik yöntemle nümerik yöntemin birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Her iki aşama içerisinde gerekli yerlerde çeşitli bilgisayar yazılımları yapılarak ve birçok analitik ve nümerik paket program kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmanın diğer bölgelerde heyelan kaymasından dolayı oluşabilecek olan tsunami etkilerinin belirlenmesinde öncü olması amaçlanmıştır.

Öncelikle bana bu projede çalışma olanağı sağlayan ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. H. Kerem CIĞIZOĞLU'na ve çalışma süresi boyunca birlikte çalıştığım proje yürütücüsü Doç. Dr. Abdul HAYIR'a teşekkür ederim.

Son olarak, eğitim hayatımın her kademesinde sürekli yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2006 Burkay ŞEŞEOĞULLARI

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR vi
TABLO LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
SEMBOL LİSTESİ xi
ÖZET xii
SUMMARY xiii

1. DALGA MEKANİĞİ 1
1.1 Giriş 1
1.2 Dalgaların Genel Özellikleri 2
1.2.1 Tanımlar 2
1.2.2 Dalga tipleri ve sebepleri 3
1.3 Uzun Dalgalar 5
1.3.1 Sığ suda dalga yayılma hızı 6
1.3.2 Asimptotik uzun dalgalar 7
1.4 Uzun Dalga Teoremi 8
1.4.1 Süreklilik denklemi 8
1.4.2 Hareket denklemleri 9
1.4.3 Enerji denklemi ve enerji akısı 10
1.5 Uzun Dalga Modelleri 11
1.5.1 Lineer uzun dalga modeli 11
1.5.2 Lineer olmayan uzun dalga modeli 12
1.5.3 Boussinesq dalga modeli 12
1.6 Dalga Hareketlerinde Meydana Gelen Değişimler 13
1.6.1 Dalgaların sığlaşması 14
1.6.2 Dalgaların sapması 15
1.6.3 Dalgaların kırılması 16
1.6.4 Dalgaların yansıması 17
1.6.5 Dalgaların dönmesi 18

2. HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ 20
2.1 Giriş 20
2.2 Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Analizi 21
2.2.1 Model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması 21
2.2.2 Sınır şartlarının ve çözüm ayarlarının tanımlanması 22

2.2.3 Sonuçların yorumlanması 23
2.3 HAD Analizi İçin Geliştirilmiş Bilgisayar Programları 25
2.3.1 SSIIM 25
2.3.2 FLUENT 25
2.3.3 FIDAP 26
2.3.4 STAR-CD 26
2.3.5 TELEMAC 26
2.3.6 FLOW-3D 27
2.3.7 TABS 27
2.3.8 PHOENICS 27
2.3.9 CFX 28
2.4 Nümerik Modelleme Yöntemi 28
2.4.1 Izgara sisteminin ve sayısal ağ modelinin oluşturulması 28
2.4.2 Sonlu elemanlar yöntemi 31

3. TELEMAC MODEL SİSTEMİ 36
3.1 Giriş 36
3.2 TELEMAC Modülleri 37
3.3 Matematiksel Yaklaşım 41

4. TSUNAMİ 47
4.1 Giriş 47
4.2 Tsunaminin Fiziksel Özellikleri 48
4.2.1 Tsunami tanımı ve oluşumu 48
4.2.2 Tsunami hareketi 50
4.2.3 Tsunaminin ilerleme hızı ve sığlaşma etkisi 50
4.3 Tsunami Türleri 52
4.3.1 Deniz tabanı depremi tsunamisi 52
4.3.2 Deniz tabanı çöküntüsü tsunamisi 52
4.3.3 Deniz tabanı heyelanı tsunamisi 54
4.3.4 Deniz tabanı volkanizması tsunamisi 54
4.3.5 Dünya dışı sebeplerden oluşabilecek tsunamiler 55
4.4 Tsunaminin Tırmanma Yüksekliği 55
4.4.1 Deneysel yaklaşım 55
4.4.2 Teorik yaklaşım 56

5. MARMARA DENİZİ 58
5.1 Giriş 58
5.2 Marmara Denizi'nin Jeolojisi ve Batimetrisi 58
5.3 Marmara Denizi ve Tsunami 60

5.3.1 Marmara Denizi'ndeki tsunami potansiyeli 62
5.3.2 Marmara Denizi'ndeki potansiyel heyelan alanları 64
5.3.3 Marmara Denizi'nde meydana gelmiş tsunamiler 67

6. UYGULAMA PROJESİ 69
6.1 Proje Tanımı 69
6.2 Analitik Modelin Kurulması 73
6.2.1 Model ve matematiksel tanımlama 73
6.2.2 Sayısal hesaplar 75
6.2.3 Analitik model sonuçları 79
6.3 Batimetri Verilerinin Oluşturulması 82
6.4 Sayısal Ağ Modelinin Kurulması 86
6.4.1 Batimetri verilerinin girilmesi 86
6.4.2 Model alanının tanımlanması 87
6.4.3 Arazi modelinin oluşturulması 89
6.4.4 Ağ tabakasının oluşturulması 90
6.4.5 Sınır şartlarının belirlenmesi 92
6.4.6 Model çıktılarının alınması 94
6.5 Simülasyonların Yapılması 95
6.5.1 Girdi dosyalarının hazırlanması 96
6.5.2 Simülasyonların çalıştırılması 98
6.5.3 Çıktı dosyalarının alınması 98
6.6 Sonuçlar 99
6.6.1 Sayısal ağ ve batimetri modeli 99
6.6.2 Belirli zamanlarda model alanındaki dalga hareketi 101
6.6.3 İki nokta arasında zamanla değişen dalga profili 104
6.6.4 Maksimum dalga yüksekliği ve zaman serisi 104

KAYNAKLAR 115

ÖZGEÇMİŞ 120

KISALTMALAR

CAD	: Computer Aided Design
CFD	: Computational Fluid Dynamics
ÇAYDAG	: Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu
DER	: Direction des Etudes et Recherches
EDF	: Electricite de France
FEM	: Finite Element Methods
HAD	: Hesaplamalı Akışkan Dinamiği
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
LNH	: Laboratoire National d'Hydraulique
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
ODTÜ	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
OSY	: Ortalama Su Yüzeyi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SHOD	: Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı
SSY	: Sakin Su Yüzeyi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1	Derin Su, Geçiş Derinliği ve Sığ Su Dalgaları…….....	4
Tablo 1.2	Kısa ve Uzun Dalgalar.....	4
Tablo 1.3	Dalga Tipleri ve Sebepleri.....	5
Tablo 3.1	TELEMAC Modüllerine İlişkin Bilgiler.....	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1a : Dalga Karakteristikleri ……..... 3
Şekil 1.1b : Dalga Karakteristikleri ……..... 4
Şekil 1.2 : Dalga Yayılma Hızları..... 7
Şekil 1.3 : Dalga Hareketlerindeki Değişim Bölgeleri..... 13
Şekil 1.4 : Dalgaların Sığlaşması..... 14
Şekil 1.5a : Dalgaların Sapması..... 15
Şekil 1.5b : Dalgaların Sapması..... 16
Şekil 1.6 : Dalgaların Kırılması..... 17
Şekil 1.7 : Dalgaların Yansıması..... 18
Şekil 1.8 : Dalgaların Dönmesi..... 18
Şekil 2.1 : HAD Analizi için Oluşturulan Sayısal Ağ Modeli..... 22
Şekil 2.2 : HAD Analizi için Sınır Şartlarının Belirlenmesi..... 23
Şekil 2.3 : TELEMAC-2D Programı ile Tsunami Simülasyonu..... 24
Şekil 2.4 : Sayısal Ağ Modeli..... 24
Şekil 2.5 : Üçgen ve Dörtgen Yapılı Sayısal Ağ Modelleri..... 29
Şekil 2.6 : Üçgen ve Dörtgen..... 29
Şekil 2.7 : Düzgün ve Düzgün Olmayan Izgara Sistemleri..... 30
Şekil 2.8 : Yapısal ve Yapısal Olmayan Izgara Sistemleri..... 30
Şekil 2.9 : Blok ve Çoklu Blok Izgara Sistemleri..... 30
Şekil 2.10 : Şaşırtmalı ve Şaşırtmalı Olmayan Izgara Sistemleri..... 30
Şekil 2.11 : Bir, İki ve Üç Boyutlu Sonlu Elemanlardan Oluşan Cisimler. 32
Şekil 2.12 : Üçgen Sonlu Eleman..... 33
Şekil 3.1 : TELEMAC Model Sonuçları..... 37
Şekil 3.2 : Bazı TELEMAC Modülleri..... 38
Şekil 3.3 : MATISSE Programı Ekran Görüntüsü..... 39
Şekil 3.4 : RUBENS Programı Ekran Görüntüsü..... 39
Şekil 3.5 : Parçacık Hareketi..... 42
Şekil 3.6 : Sıkıştırılamayan İdeal Akışkan Hareketi..... 43
Şekil 3.7 : İki Boyutlu İdeal Akışkan Hareketi..... 44
Şekil 4.1 : Tsunami Sonucundaki Su Hareketi..... 48
Şekil 4.2 : Tsunami Sonucu Deniz Yüzeyindeki Su Seviyesi Değişimi... 49
Şekil 4.3 : Tsunami Oluşum Evreleri..... 49
Şekil 4.4 : Sığ Bölgede Dalga Hareketinde Meydana Gelen Değişme..... 51
Şekil 4.5 : Deniz Tabanı Depremi Tsunamisi..... 53
Şekil 4.6 : Deniz Tabanı Çöküntüsü Tsunamisi..... 53
Şekil 4.7 : Deniz Tabanı Heyelanı Tsunamisi..... 54
Şekil 4.8 : Deniz Tabanı Volkanizması Tsunamisi..... 55
Şekil 5.1 : Marmara Denizi Aktif Fay Haritası..... 59
Şekil 5.2 : Marmara Denizi'nin Batimetri Haritası..... 59
Şekil 5.3 : Marmara Denizi'nde Bulunan Çukurluklar..... 60

Sayfa No

Şekil 5.4 : Marmara Denizi'nde Bulunan Fayların Tek Seferde Kırılması Durumunda Oluşması Beklenen Eş Şiddet Haritası..... 62
Şekil 5.5 : 120–1999 Yılları Arasında Marmara Denizi'nde Oluşmuş Tsunamiler..... 63
Şekil 5.6 : Denizaltı Heyelanının Harekete Geçmesi..... 65
Şekil 5.7 : Marmara Denizi'ndeki Potansiyel Heyelan Alanları..... 65
Şekil 5.8 : Doğu Marmara Denizi'ndeki Heyelan Alanları..... 66
Şekil 5.9 : Proje Kapsamında Dikkate Alınacak Heyelan Bölgesi..... 66
Şekil 6.1 : Proje Kapsamında İncelenecek ve Modelleme Çalışması Yapılacak Olan Kuzeydoğu Marmara Kıyıları..... 69
Şekil 6.2 : Marmara Denizi'ni ve Çevresinin Yüzey Görüntüsünü Gösteren Sayısal Üç Boyutlu Harita..... 70
Şekil 6.3 : Projede Dikkate Alınacak Olan Heyelan Bölgesi..... 71
Şekil 6.4 : Heyelan Bölgesinin Ortalama Boyutları..... 71
Şekil 6.5 : Tsunami Oluşumunun Matematik Modeli..... 73
Şekil 6.6 : Problem Modeli ve Heyelanın Sistematik Görüntüsü..... 75
Şekil 6.7 : $t=t^*$ Anındaki Tsunami Dalga Genlikleri..... 76
Şekil 6.8 : $t \leq t^*$ Anındaki Tsunami Dalga Genlikleri..... 77
Şekil 6.9 : $t \geq t^*$ Anındaki Tsunami Dalga Genlikleri..... 77
Şekil 6.10a : Tsunami Dalga Genliklerinin Görüntüleri..... 78
Şekil 6.10b : Tsunami Dalga Genliklerinin Görüntüleri..... 79
Şekil 6.11 : Heyelan Bölgesinin Sayısal Üç Boyutlu Modeli..... 80
Şekil 6.12 : Heyelan Bölgesinin Çeşitli Açılardan Üç Boyutlu Görüntüsü 80
Şekil 6.13 : $t=t^*$ Anındaki Dalga Hareketi..... 81
Şekil 6.14 : $t=3t^*$ Anındaki Dalga Hareketi..... 81
Şekil 6.15 : $t=6t^*$ Anındaki Dalga Hareketi..... 81
Şekil 6.16 : $t=9t^*$ Anındaki Dalga Hareketi..... 82
Şekil 6.17 : Sığ Bölgelerdeki Batimetri Faktörü..... 82
Şekil 6.18 : Çalışma Alanına Ait Sayısal Üç Boyutlu Model..... 84
Şekil 6.19 : Derinlik Değişimlerini Gösteren Sayısal Üç Boyutlu Model.. 84
Şekil 6.20 : Projede Kullanılan Batimetri Haritası..... 85
Şekil 6.21 : Oluşturulan Batimetri Haritası..... 87
Şekil 6.22 : Model Sınırlarının Tanımlanması..... 88
Şekil 6.23 : Kıyı Çizgisinin Tipinin Belirlenmesi..... 88
Şekil 6.24 : Sayısal Arazi Modelinin Oluşturulması..... 89
Şekil 6.25 : Hesap Ölçütlerinin Belirlenmesi..... 89
Şekil 6.26 : Sayısal Ağ Tabakası..... 90
Şekil 6.27 : Adalara Yakın Bölgedeki Sık Ağ Yapısı..... 91
Şekil 6.28 : Ağ Tabakasındaki Noktaların İnterpolasyonu..... 91
Şekil 6.29 : Oluşturulan Ağ Tabakasına İlişkin Özet Bilgiler..... 92
Şekil 6.30 : Modelde Oluşturulan Sınır Çizgileri..... 93
Şekil 6.31 : Kıyı Şeridi İçin Belirlenen Sınır Şartları..... 93
Şekil 6.32 : Geometri Dosyasının Oluşturulması..... 94
Şekil 6.33 : Sınır Dosyasının Oluşturulması..... 95
Şekil 6.34 : Analitik ve Nümerik Model İçin Belirlenen Ortak Sınır..... 96
Şekil 6.35 : Fortran Dosyası..... 97
Şekil 6.36 : Yönetici Dosyası..... 98

Sayfa No

Şekil 6.37 : Sayısal Ağ Modeli..... 100
Şekil 6.38 : Batimetri Modeli..... 100
Şekil 6.39 : Dalganın Zamana Göre Konumu..... 102
Şekil 6.40 : Zamanla Değişen Dalga Hareketi..... 103
Şekil 6.41 : Model Bölgesinden Seçilen Noktalar..... 104
Şekil 6.42 : C_1 ve C_2 Noktaları Arasında Zamanla Değişen Dalga Profili. 105
Şekil 6.43 : D_1 ve D_2 Noktaları Arasında Zamanla Değişen Dalga Profili. 106
Şekil 6.44 : P_1 Noktasına Ait Sonuçlar..... 107
Şekil 6.45 : P_2 Noktasına Ait Sonuçlar..... 108
Şekil 6.46 : P_3 Noktasına Ait Sonuçlar..... 109
Şekil 6.47 : P_4 Noktasına Ait Sonuçlar..... 110
Şekil 6.48 : P_5 Noktasına Ait Sonuçlar..... 111
Şekil 6.49 : P_6 Noktasına Ait Sonuçlar..... 112
Şekil 6.50 : P_7 Noktasına Ait Sonuçlar..... 113
Şekil 6.51 : P_8 Noktasına Ait Sonuçlar..... 114

SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan
a	: Dalga genliği
c	: Dalga yayılma hızı
$\mathbf{c_g}$	: Dalga grup hızı
E	: Dalga enerjisi
F	: Kuvvet
f	: Koriolis parametresi
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Dalga yüksekliği
h	: Su derinliği
k	: Dalga sayısı
$\mathbf{K_r}$	: Sapma Katsayısı
$\mathbf{K_s}$	: Sığlaşma Katsayısı
$\mathbf{K_y}$	: Yansıma Katsayısı
K	: Dönme Katsayısı
L	: Dalga boyu
m	: Kütle
P	: Basınç
Q	: Debi
T	: Dalga periyodu
t	: Zaman
u	: x yönündeki yatay hız
V	: Hız
v	: y yönündeki yatay hız
W	: Yatay yöndeki rüzgar hızı
w	: Dairesel frekans
η	: Su seviyesindeki değişim, dalga genliği
ρ	: Yoğunluk

OLASI İSTANBUL DEPREMİNDE MARMARA DENİZİ'NDE OLUŞABİLECEK TSUNAMİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde, kuzeydoğu Marmara kıyılarına yakın bölgede bulunan denizaltı heyelanının hareket etmesi durumunda oluşabilecek tsunamiler incelenmiştir. Çalışma aynı zamanda, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK), Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 104Y161 numaralı projenin sonuçlarını içermektedir. Çalışma kapsamında, analitik model kullanılarak, heyelana yakın bölgedeki tsunami genlikleri; nümerik model kullanılarak, tsunaminin kıyıda oluşturacağı en büyük dalga yükseklikleri ve kıyı şeridinde tsunami genliklerine ait zaman serileri hesaplanmıştır.

Çalışmanın ilk iki bölümünde sırasıyla dalga mekaniği ve Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca uzun dalga modellerine ve nümerik modelleme yöntemine değinilmiştir. Nümerik hesaplamalar için kullanılan bilgisayar paket programlarını içeren TELEMAC Model Sistemi üçüncü bölümde anlatılmıştır. Dördüncü bölüm, tsunaminin fiziksel özelliklerine ve türlerine ilişkin bilgileri içermektedir. Beşinci bölümde Marmara Denizi'nin yapısı ve batimetrisi üzerinde durularak, tsunami ile olan ilişkisi ortaya konmuştur. Uygulamayı içeren son bölümde ise, projeye ilişkin tüm analitik ve nümerik hesaplamalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Hesaplamalarda birçok bilgisayar paket programı kullanılmış ve gerekli yerlerde bilgisayar yazılımları yapılmıştır. Ayrıca kullanılan programlara ait; analitik model, sayısal ağ modeli ve simülasyon sonuçlarının görüntülerine yer verilmiştir.

Bu şekilde, literatürde yeni olduğu düşünülen, analitik yöntemle nümerik yöntemin birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmanın diğer bölgelerde heyelan kaymasından dolayı oluşabilecek olan tsunami etkilerinin belirlenmesinde öncü olması amaçlanmıştır.

MODELING OF TSUNAMI IN THE SEA OF MARMARA AFTER A PROBABLE ISTANBUL EARTHQUAKE

SUMMARY

In this study the tsunamis resulting from a submarine landslide that may be occured after an earthquake in the Sea of Marmara at the region near to northeast Marmara coasts were examined. The study also includes the results of a project which was supported by TUBITAK. The amplitudes of the tsunami at the regions that are closer to the landslide were computed by using the analytical model. Then the wave setup at the coast and the time series of the amplitudes of the tsunami in the coastline were calculated by using the numerical model**.**

At the first and second chapters, there is information about wave mechanics and Computational Fluid Dynamics (CFD). Also long wave models and numerical modeling methods were explained. The third chapter includes information about TELEMAC Modeling System used for the numerical computations. At the forth chapter, the physical characteristics and the types of tsunamis were explained. The fifth chapter has emphasized the geology and the bathymetry of the Sea of Marmara. The relationship between tsunami and the Sea of Marmara was showed. In the last chapter including the application, all analytical and numerical computations concerning the project were detailed. In addition to these details, the analytical model, the mesh and the results of simulations which were performed with TELEMAC were reported.

In the result, the analytical method and the numerical method were merged. The aim of this study was to be an initiator for the determination of the effects of the tsunamis resulting from landslides in the other case studies.

1. DALGA MEKANİĞİ

1.1 Giriş

Su dalgalarının mekaniği ile ilgili çalışmalar yüzyıldan fazla bir süredir devam etmektedir. 1845 yılında Airy lineer dalga teorisini ortaya koymuştur, daha sonra Stokes 1847 yılında daha yüksek mertebeden dalga teorileri ile ortaya çıkmıştır. 1872 yılında Bossinesq uzun dalga teorisini, 1893 yılında Michell ve 1894 yılında Cowan sınırlayıcı dalga yüksekliklerini ortaya atmışlardır [9]. Daha sonraları ise rüzgarların dalgalar üzerindeki etkisinin önemi ortaya çıkmıştır. Lineer olmayan dalga teorilerinin uygulanmasının güç olması nedeniyle Skjelbreia ve Hendrickson 1961 yılında beşinci mertebeden Stokes dalga teorisini ve Weigel 1964 yılında mühendislik uygulamaları için cnoidal dalga teorisinin grafiksel çözümlerini vermişlerdir. 1985 yılında ise Williams, dalga karakteristiklerini geniş kapsamlı bir şekilde oldukça kullanışlı bir tablo haline getirmiştir [4,s.14].

Atmosfere açık bir su kütlesinin üzerinde nadiren dalga oluşmaz. Oluşan dalgalar, akışkan üzerine etkiyen ve onu yerçekimi ve yüzey gerilmesine karşı şekil değiştirmeye zorlayan kuvvetlerin bir sonucudur. Bu kuvvetler, akışkan yüzeyinde dengenin oluşması için çalışırlar. Dalgaların oluşması için, suya etkiyen (rüzgar ya da suya düşen bir taş gibi) bir dış kuvvetin bulunması gerekir. Bu kuvvetler etkidiğinde, yerçekimi ve yüzey gerilme kuvvetleri harekete geçer ve dalgaların ilerlemesine neden olurlar; aynı bir teldeki gerilmenin teli titrettiği ve ses dalgalarının ilerlemesine neden olduğu gibi [9].

Dalgalar, suya etkiyen kuvvetlerin büyüklüğüne bağlı olarak değişik boyutlarda ve şekillerde oluşurlar. Suya düşen küçük bir taş veya büyük bir kaya farklı büyüklüklerde dalgalar oluşturur. Farklı çarpma hızları da farklı büyüklükte dalgaların oluşmasına neden olur ki, bu da suyun yüzeyine etkiyen basınç kuvvetlerinin de taşırılan su miktarı kadar önemli olduğunu gösterir. Ayın, güneşin ve diğer gök cisimlerinin çekim kuvvetleri sonucu en uzun su dalgaları ve gel-gitler oluşur. Bu dalgalar dünyanın çevresinin yarısı kadar yol kat ederler ve çok büyük hızlarla ilerlerler. En küçük dalgalar bir santimetreden daha kısa olabilirler.

Dalgaların boyu, suya etkiyen kuvvetlerin büyüklüğü hakkında bir fikir verir. Örneğin dalga ne kadar uzunsa, yüzey gerilme kuvvetine göre yerçekimi kuvveti daha önem kazanır [9].

Dalgaların önemi azımsanamaz. Suyun içindeki veya yakınındaki her cisim dalga etkisine maruz kalır. Kıyıda, fırtına sırasında oluşan dalgaların etkisiyle harekete başlayan kumlar erozyona veya yapılarda hasara neden olabilir. Su içindeki açık deniz platformları da dalgaların etsine maruzdurlar ve şiddetli fırtınalara dayanabilecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Su üzerindeki tüm gemiler dalga etkisine maruzdur. Suda ilerleyen her gemi, bir basınç alanı oluşturur ve bu da dalgaların oluşmasına neden olur. Oluşan dalgalar gemilerin hareketine karşı meydana gelen direncin büyük bir kısmını meydana getirirler [9].

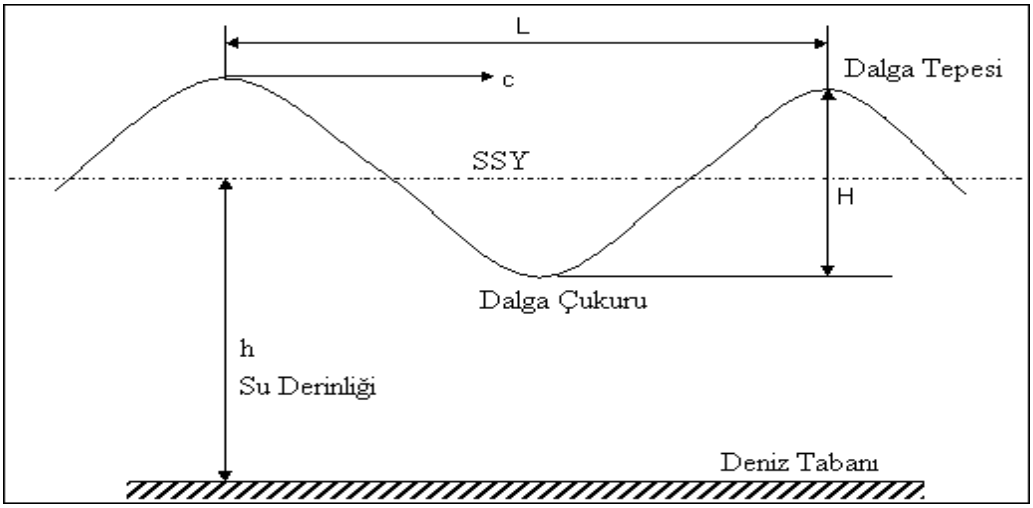
1.2 Dalgaların Genel Özellikleri

1.2.1 Tanımlar

- Deniz suyu yüzeyinin, rüzgar, ay ve güneş arasındaki çekim kuvvetlerinin zamansal değişimleri ve deprem gibi bazı etkiler sonucunda ortalama su seviyesinden süreksizlik göstermesine dalga adı verilir.
- Ortalama su yüzeyi (OSY), dalga profilinde dalga tepesi altındaki alanın dalga çukuru üstündeki alana eşit olduğu çizgidir.
- Sakin su yüzeyi (SSY), dalga hareketinin olmadığı durumdaki su seviyesidir.
- Dalga yüksekliği (H), ardışık dalga tepesi ile dalga çukuru arasındaki düşey mesafedir.
- Dalga boyu (L), ardışık iki dalga tepesinin veya dalga çukurunun arasındaki yatay mesafedir.
- Genlik (a), genellikle dalga yüksekliğinin yarısına eşit olup, ortalama su seviyesinden yukarı doğru ölçülen pozitif, aşağı doğru ölçülen negatif genliktir.
- Periyot (T), aynı enkesitten ardışık iki dalga tepesinin veya dalga çukurunun geçmesi için gereken saniye cinsinden zaman aralığıdır.
- Dalga cephesi, dalga tepesinden geçen yanal yöndeki çizgiye denir.
- Dalga yönü, dalgaların ilerlemekte oldukları yöndür.

- Dalga ortagonali, dalgaların ilerlemekte oldukları ve dalga cephesine dik olan doğrultudur.
- Dalga yayılma hızı (c), ortagonal üzerindeki dalgaların ilerleme hızıdır.
- Dalga grup hızı (c_g), dalga enerjisinin yayılma hızıdır ve derin sularda dalga yayılma hızının yarısına (c_g=c/2), sığ sularda ise dalga yayılma hızına (c_g=c) eşittir.
- Dalga dikliği (H/L), dalga yüksekliğinin dalga boyuna oranıdır.
- Dalga enerjisi (E), potansiyel ve kinetik enerjilerin toplamıdır.
- Dalga enerji akışı, dalga grup hızı ile enerjisinin çarpımına eşittir ve dalganın gücü olarak da isimlendirilir [1,s.113–116].

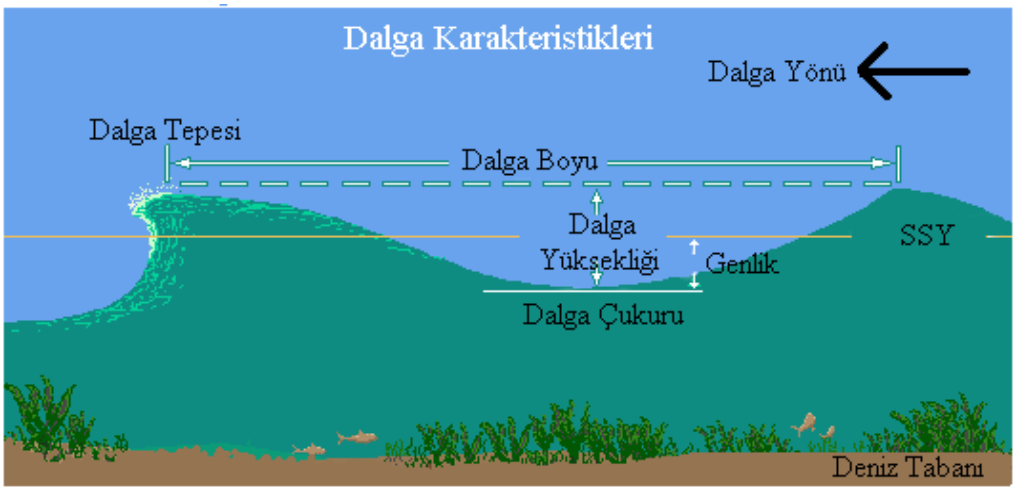
Konunun daha iyi anlaşılabilmesi açısından tanımlanan bazı dalga karakteristikleri Şekil 1.1a ve Şekil 1.1b'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1a: Dalga Karakteristikleri.

1.2.2 Dalga tipleri ve sebepleri

Dalga tiplerini tanımlamadan önce kısaca dalga sınıflandırılmasından bahsetmek gerekir. Kıyı yakınlarında oluşan dalgalar çeşitli nedenlerden oluşabilir ve kıyıya doğru yaklaştıkça yükseklikleri ve boyları, sığlaşma ve sapma olayları nedeniyle değişebilir. Bu nedenle dalgalar derin su dalgası, geçiş derinliği dalgası ve sığ su dalgası olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma; su derinliği h ve dalga boyu L olmak üzere Tablo 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1b: Dalga Karakteristikleri.

Tablo 1.1: Derin Su, Geçiş Derinliği ve Sığ Su Dalgaları (Kabdaşlı, 1992).

Büyüklük	$\frac{h}{L}$	$\frac{2\pi h}{L}$	$\frac{\tanh(2\pi h)}{L}$
Derin Su	$> \frac{1}{2}$	$> \pi$	≈ 1
Geçiş Derinliği	$\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} < \frac{h}{L} < \pi$	Kendisi
Sığ Su	$< \frac{1}{25}$	$< \frac{1}{4}$	$\approx \frac{2\pi h}{L}$

Dalgalar, su derinliğinin dalga boyuna oranına göre kısa dalga ve uzun dalga diye ikinci defa sınıflandırılırlar (Tablo 1.2).

Tablo 1.2: Kısa ve Uzun Dalgalar (Kabdaşlı, 1992).

Dalga Tipi	Büyüklük	Periyot
Kısa Dalga	$\frac{1}{20} < \frac{h}{L}$	T < 30 s
Uzun Dalga	$\frac{h}{L} < \frac{1}{20}$	30 s < T < 1 saat

Deniz ve okyanuslarda oluşan dalga hareketinin en tipik özelliği periyodik bir yapıya sahip olmasıdır. Periyodik dalgalar kendilerini oluşturan ağırlık, kapilarite gibi kuvvetlere, periyotlarına ve yayıldıkları ortamın derinliğine göre sınıflandırılırlar. Bu dalga tipleri ve sebepleri Tablo 1.3'de gösterilmiştir.

Rüzgar etkisiyle oluşan dalgalar ağırlık dalgalarıdır ve rasgele bir karaktere sahip olup, düşük enerjili ve kısa periyotlu dalgalardır. Rüzgar etkisiyle suyun dengesi bozulduktan sonra, dalganın rüzgara karşı ve ona ters oluşan sırtları arasında basınç

farkı doğar. Böylece rüzgar enerjisi su yüzeyine geçer. Açık denizdeki bu atmosferden su yüzeyine sürekli enerji geçişi rüzgar dalgalarını oluşturur. Meydana gelen rüzgar dalgaları, yükseklikleri değişmekle beraber, periyotlarını koruyarak çok uzun mesafeler kat ederek kıyıya ulaşırlar, bu işlem dispersiyon olarak adlandırılır. Rüzgar dalgaları, açık denizde rüzgar hızının 1 m/s'nin üzerine çıktığı zaman oluşmaya başlarlar. Su yüzeyinde önce küçük pürüzlükler oluşur, rüzgarın şiddeti ve esme süresi arttıkça boyları ve periyotları artar ve diklikleri azalır.

Tablo 1.3: Dalga Tipleri ve Sebepleri (Yüksel ve diğ., 1998).

Dalga Tipi	Periyot	Sebep
Rüzgar Dalgası	$\leq$ 15 s	Rüzgar Gerilmesi
Ölü Deniz Dalgası	$\leq$ 30 s	Rüzgar Dalgası
Surf Salınımı	1-5 dk	Dalga Grubu
Çalkantı	2-40 dk	Rüzgar Değişimi,
(Seiche)		Tsunami, Surf Salınımı
Tsunami	5-60 dk	Deprem
Gel-git	12-24 saat	Güneş ve Ay Çekimi
Fırtına Kabarması	1-30 gün	Rüzgar Gerilmesi

Periyodik dalgaların matematiksel olarak ifade edilmeleri oldukça zordur ve günümüzde önemli bir araştırma konusudur. Eğer dalga yüksekliği; dalga boyu ve su derinliği ile karşılaştırıldığında oldukça küçükse, matematiksel ifadeler lineer formda tariflenebildiğinden literatürde bu tip dalgalar lineer dalga veya Airy dalga olarak isimlendirilmektedir. Lineer dalga çok basit olmasının yanı sıra bu konuda birçok probleme çok iyi çözümler getirmekte ve mühendisler tarafından tercih edilmektedir. Bu teori sadece sinüzoidal formda olan küçük genlikli dalgalar için geçerlidir. Büyük genlikli dalgalarda görülen dalga tepesi ve çukuru arasındaki asimetri ve kütle taşınımı lineer dalga teorisi ile açıklanamamakta ve dolayısıyla lineer olmayan teorilerin kullanılmasını gerektirmektedir [4,s.12].

1.3 Uzun Dalgalar

Sığ sularda ilerleyen dalgalar genellikle uzun dalgalar veya sığ su dalgaları olarak bilinirler. Gel-git dalgaları, tsunamiler ve diğer uzun periyotlu dalgalar, derin suda oluşsalar bile sığ su dalgaları veya uzun dalgalar olarak adlandırılırlar. Bu çalışmada Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde, bu bölgede bulunan heyelanın hareket etmesi sonucunda kuzeydoğu Marmara kıyılarında oluşabilecek

tsunamiler modelleneceğinden, sadece uzun dalgalar ile ilgili teorik bilgiler verilecektir.

1.3.1 Sığ suda dalga yayılma hızı

Lineer dalga teorisi çözümünden elde edilen denklemlerin Bernoulli denkleminde yerine konulması sonucunda, dalga yayılma hızı için şu ifade kullanılır;

$$c^2 = \frac{g}{k}\tanh(kh) = \frac{gL}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \qquad \textbf{(1.1a)}$$

c dalga yayılma hızı, aynı zamanda faz hızı olarak da isimlendirilir; çünkü dalga profilinin bütün noktaları (aynı faza sahip olarak) aynı hızda yayılırlar. Buradaki g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$c = \frac{L}{T} = \frac{\varpi}{k}$ eşitliği uygulanarak dalga yayılma hızı;

$$\varpi^2 = gk\tanh(kh) \qquad \textbf{(1.1b)}$$

ile ifade edilebilir, ϖ dalga hareketinin dairesel frekansını göstermektedir**,** bu ifade T dalga periyodu ve L dalga boyu arasındaki bağıntıyı ifade ettiğinden dispersiyon denklemi olarak da bilinir. Farklı faz hızlarında farklı frekanslarda (periyotlarda) yayılan dalgalar da dispersiv dalgalar olarak isimlendirilir. Dalgaların yayılma hızları dalga boyları ile orantılı olduğundan, c=f(L), uzun dalgalar kısa dalgalara göre daha hızlı yayılırlar, bu nedenle dalga yayılma hızının dalga boyu ile değiştiği bu tip dalgalara dispersive dalga denir. Derin su halinde dalgalar dispersive dalga tipindedir. Buna karşın, sığ su halinde farklı boylardaki küçük genlikli dalgaların tamamının şiddeti sadece su derinliğine bağımlı c=f(h) olacak şekilde aynı dalga yayılma hızlarına sahip olurlar. Bu tip dalgalara ise nondispersive dalga denilmektedir [4,s.16].

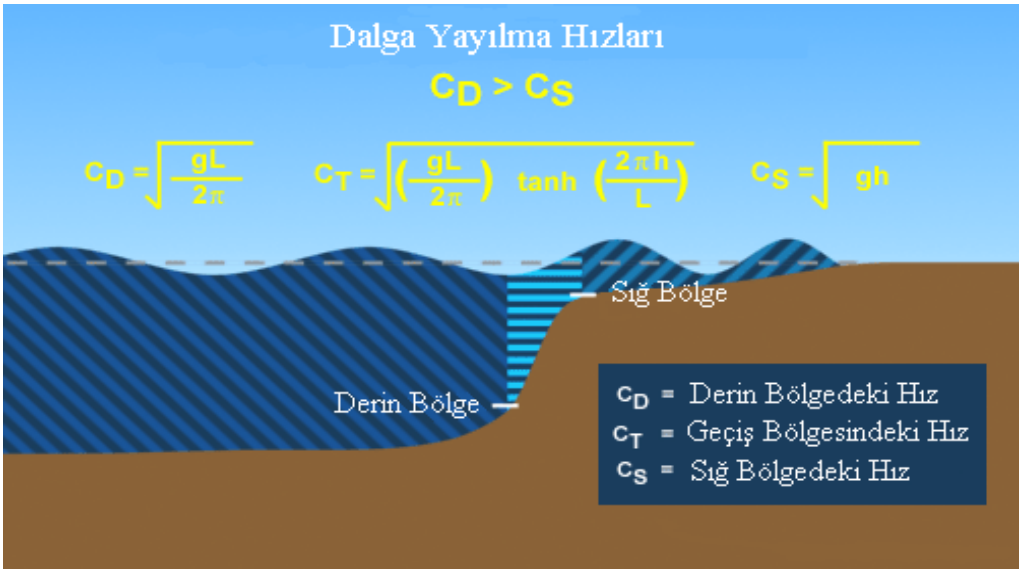
Sığ suda, $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$ ise $\tanh(kh) \cong kh \cong \frac{2\pi h}{L}$ olacağından, dalga yayılma hızı;

$$c = \frac{gTh}{L} \qquad \textbf{(1.2a)}$$

ve $c=\frac{L}{T}$ eşitliği yerine konulursa;

$$c=\sqrt{gh} \qquad \textbf{(1.2b)}$$

olarak bulunur. Sığ sularda dalga grup hızı c_g, dalga yayılma hızı c'ye eşit olduğundan dalga hızı c ile ifade edilmiştir. Burada g yerçekimi ivmesini, h de ortalama su derinliğini ifade etmektedir. Görüldüğü gibi dalga yayılma hızı, dalga periyodunun değil derinliğin bir fonksiyonudur. İleride proje uygulama bölümünde h, heyelan bölgesinde heyelanın ortalama derinliği olarak alınacaktır. Bilgi vermesi açısından derin, sığ ve geçiş bölgelerindeki dalga yayılma hızları Şekil 1.2'den incelenebilir.



Şekil 1.2: Dalga Yayılma Hızları.

1.3.2 Asimptotik uzun dalgalar

İlerleyen bir dalga için hızlar ve serbest su yüzeyi profili şu şekilde ifade edilir [9]:

$$u=\frac{H}{2}\frac{gk}{\omega}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}\cos(kx-\omega t) \qquad \textbf{(1.3a)}$$

$$v=\frac{H}{2}\frac{gk}{\omega}\frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh}\sin(kx-\omega t) \qquad \textbf{(1.3b)}$$

$$\eta=\frac{H}{2}\cos(kx-\omega t) \qquad \textbf{(1.3c)}$$

Hiperbolik fonksiyonların sığ sudaki asimptotlarını kullanarak parçacık hızlarını bulabiliriz. Bu durumda parçacığın yatay hızı;

$$u_s = \frac{gHk}{2\omega}\cos(kx-\omega t) = \frac{\eta c}{h} \qquad \textbf{(1.4a)}$$

olup, s indisi sığ suyu ifade eder. Parçacığın düşey hızı ise;

$$v_s = \frac{gHk}{2\omega}\left[k(h+z)\right]\sin(kx-\omega t) = \frac{H}{2}\frac{c}{h}(kh)\left(1+\frac{z}{h}\right)\sin(kx-\omega t) = -c\left(1+\frac{z}{h}\right)\frac{\partial \eta}{\partial x} \qquad \textbf{(1.4b)}$$

ile ifade edilir. Düşey hız, tabanda sıfırdan, yüzeyde maksimuma kadar lineer olarak değişir ve u_s'den çok küçük bir değerdir. Yatay ve düşey hızların oranı;

$$\frac{(u_s)_{\max}}{(v_s)_{\max}} = \frac{1}{kh} \qquad \textbf{(1.5)}$$

ve bu dalgaların altındaki basınç;

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}\cos(kx-\omega t) \qquad \textbf{(1.6)}$$

denklemlerinden;

$$p = -\rho g z + \rho g \eta \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \qquad \textbf{(1.7a)}$$

$$p = -\rho g z + \rho g \eta = \rho g(\eta - z) \qquad \textbf{(1.7b)}$$

denklemleri elde edilir. Uzun dalgalar altındaki basınç hidrostatiktir ve parçacık düşey ivmelerinin çok küçük olduğunu gösteren bir sonuçtur.

1.4 Uzun Dalga Teoremi

1.4.1 Süreklilik denklemi

Sıkıştırılamaz bir akışkan için üç boyutlu kütlenin korunumu denklemi [9];

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad \textbf{(1.8)}$$

şeklinde olup, akışkan içinde her yerde geçerlidir. Derinlik üzerinden Leibnitz integral kuralı kullanılarak integral alınırsa;

$$\int_{-h}^{\eta}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)dz=\int_{-h}^{\eta}\frac{\partial u}{\partial x}dz+w(x,y,\eta)-w(x,y,-h)=0 \qquad \textbf{(1.9)}$$

U ve V şu şekilde tanımlanır:

$$U=\frac{1}{h+\eta}\int_{-h}^{\eta}udz \qquad \textbf{(1.10a)}$$

$$V=\frac{1}{h+\eta}\int_{-h}^{\eta}vdz \qquad \textbf{(1.10b)}$$

Böylece u ve v'nin derinlikle değişmediğini kabul eder, sınır koşulları dikkate alınıp süreklilik denklemi kullanılırsa üç boyuttaki kinematik serbest su yüzeyi koşulu şu hali alır:

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}+u(x,y,\eta)\frac{\partial\eta}{\partial x}+v(x,y,\eta)\frac{\partial\eta}{\partial y}=w(x,y,\eta) \qquad \textbf{(1.11)}$$

Zamana göre sabit olan bir yüzeyde taban sınır koşulu ise;

$$w(x,y,-h)=-u(x,y,-h)\frac{\partial h}{\partial x}-v(x,y,-h)\frac{\partial h}{\partial y} \qquad \textbf{(1.12)}$$

olup, düşey olarak integre edilmiş denklemde bu koşullar yerine konulursa, süreklilik denkleminin son hali aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial[U(h+\eta)]}{\partial x}+\frac{\partial[V(h+\eta)]}{\partial y}=-\frac{\partial\eta}{\partial t} \qquad \textbf{(1.13)}$$

1.4.2 Hareket denklemleri

Burada hareket denklemlerinin elde edilmesi için yapılan işlemler detaylı bir şekilde anlatılmayacaktır. O nedenle lineerleştirilmiş denklemler sonuç olarak verilecektir. Temel denklemler, süreklilik ve hareket denklemleri lineer değillerdir. Lineer olmayan denklemleri [9],

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=-g\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\right)+\frac{1}{\rho(h+\eta)}\left[\tau_{zx}(\eta)-\tau_{zx}(-h)\right] \quad \textbf{(1.14)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}=-g\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}\right)+\frac{1}{\rho(h+\eta)}\left[\tau_{zy}(\eta)-\tau_{zy}(-h)\right] \quad \textbf{(1.15)}$$

lineerleştirmek için U,V ve η'nın küçük olduğu kabulü yapılır. Böylece bunların çarpımları da küçük olacaktır. Lineer denklemlerde τ kayma gerilmeleri yoktur. Lineerleştirilmiş süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial (Uh)}{\partial x}+\frac{\partial (Vh)}{\partial y}=-\frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \textbf{(1.16)}$$

ve lineerleştirilmiş sürtünmesiz uzun dalganın hareket denklemleri;

$$\frac{\partial U}{\partial x}=-g\frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \textbf{(1.17a)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}=-g\frac{\partial \eta}{\partial y} \quad \textbf{(1.17b)}$$

şeklinde elde edilmektedir. Eğer taban yataysa, denklemler çapraz diferansiyel alınarak;

$$c^2\left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2}\right)=\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad \textbf{(1.18)}$$

denklemi elde edilmektedir ve burada $c=\sqrt{gh}$ dalga denklemidir.

1.4.3 Enerji denklemi ve enerji akısı

Toplam enerji, kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamıdır. Düşey hız bileşenleri çok küçük olduklarından hesaba katılmazlar. Bu durumda kinetik ve potansiyel enerji [9];

$$KE=PE=\frac{1}{16}\rho g H^2 \quad \textbf{(1.19)}$$

olduğundan, birim yüzey alanındaki toplam enerji;

$$E = KE + PE = \frac{1}{8}\rho g H^2 \quad \textbf{(1.20)}$$

ve ortalama enerji akısı;

$$\overline{\Im} = EnC = E\sqrt{gh} \quad \textbf{(1.21)}$$

denklemleri ile ifade edilirler. Bu da gösterir ki, enerji, sığ su dalgalarının hızıyla aynı fazda ilerler.

1.5 Uzun Dalga Modelleri

Tsunamilerin simülasyonlarında genellikle uzun dalga modelleri kullanılmaktadır. Bu konudaki ilk çalışmalar tek yönde ilerleyen dalgaların formüle edilmesiyle başlamıştır. Daha sonra bilgisayar kapasitelerinin artması ile birlikte bir tsunaminin okyanusta zaman içinde ilerlemesinin simülasyonu mümkün olmuştur. Bu simülasyonlar çoğunlukla sığ su denklemleri, ender olarak da daha gelişmiş bir model olan Boussinesq denklemleri kullanılarak yapılmaktadır. Burada tsunami modellemelerinde kullanılan, lineer, lineer olmayan ve Boussinesq dalga teorilerinden bahsedilecektir [14].

1.5.1 Lineer uzun dalga modeli

İlerleyen dalgaların su içinde sebep olduğu zerrecik hareketinin dikey hız bileşeninin ihmal edilmesi ve dalga boyunun su derinliğine oranının küçük olması halinde lineer olmayan (nonlineer) terimlerin ihmal edilerek lineerleştirilmesi ilkesine dayanan teori lineer uzun dalga teorisidir.

Bu teorinin uygulanması için h/L ve H/h oranlarının küçük olması iki önemli koşuldur. Bu şartların ikisi de açık denizdeki tsunami dalgalarında sağlanır. Tsunami dalgasının açık denizdeki dalga boyu 100 km'ye kadar ulaşabilir. Su derinliği de birkaç km kadardır. Su derinliği ve dalga boyu oranı (h/L) yaklaşık olarak 10^{-2} mertebesinde olmaktadır. Aynı şekilde, dalga yüksekliği ve su derinliği oranı da (H/h), açık denizde tsunami dalgasının yüksekliği birkaç metreyi geçmediğinden, 10^{-3} mertebesindedir.

Lineer uzun dalga teorisine göre, kartezyen koordinatlarda derinlik integre edilerek oluşan süreklilik denklemi ve momentum denklemi sırasıyla;

$$\eta_1 + \vec{\nabla}(h\bar{u}) = 0 \qquad \textbf{(1.22)}$$

$$\bar{u}_t + g\vec{\nabla}\eta = 0 \qquad \textbf{(1.23)}$$

olarak verilmektedir. Yukarıdaki denklemlerde, η dalgadan ötürü oluşan serbest su yüzeyi deformasyonunu, $\bar{u} = \bar{u}_i + \bar{u}_j$ su derinliğine göre ortalaması alınmış yatay hız vektörünü, $\nabla = (\partial/\partial x)_i + (\partial/\partial y)_j$ yatay eksenlere göre nabla operatörünü ve t indisi de zamana göre kısmi türevi göstermektedir [14].

1.5.2 Lineer olmayan uzun dalga modeli

Tsunami simülasyonlarında, dalga yüksekliğinin nispeten küçük olduğu bölgelerde lineer uzun dalga teorisi yeterli olduğu halde, sığ sularda dalga yüksekliğinin artmasından dolayı iyi sonuçlar vermemektedir. Sığ sularda lineer uzun dalga teorisi denklemleri geçerliliğini yitirir. Lineer olmayan terimlerin ihmal edilmediği lineer olmayan (nonlineer) uzun dalga teorisi denklemleri bilgisayar kapasitelerinin artmasından sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Lineer olmayan (nonlineer) uzun dalga teorisine göre süreklilik ve momentum denklemleri sırasıyla;

$$\eta_1 + \vec{\nabla}\left[(h+\eta)\bar{u}\right] = 0 \qquad \textbf{(1.24)}$$

$$\bar{u}_t + \left[\bar{u}\vec{\nabla}\right]\bar{u} + g\vec{\nabla}\eta = 0 \qquad \textbf{(1.25)}$$

olarak verilmektedir. Bu denklemler de, lineer denklemlerde olduğu gibi serbest su yüzeyi deformasyonu ve derinliğe göre ortalaması alınmış yatay hız vektörü cinsinden verilmiştir [14].

1.5.3 Boussinesq dalga modeli

Uzun dalga teorisinde tamamen ihmal edilen orbital hız vektörünün dikey bileşeni, Boussinesq dalga teorisinde ihmal edilmemekte ve su derinliği boyunca doğrusal olarak değiştiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla, dalga dinamik basıncı da uzun dalga teorisinin aksine artık statik basınca eşit olmamaktadır.

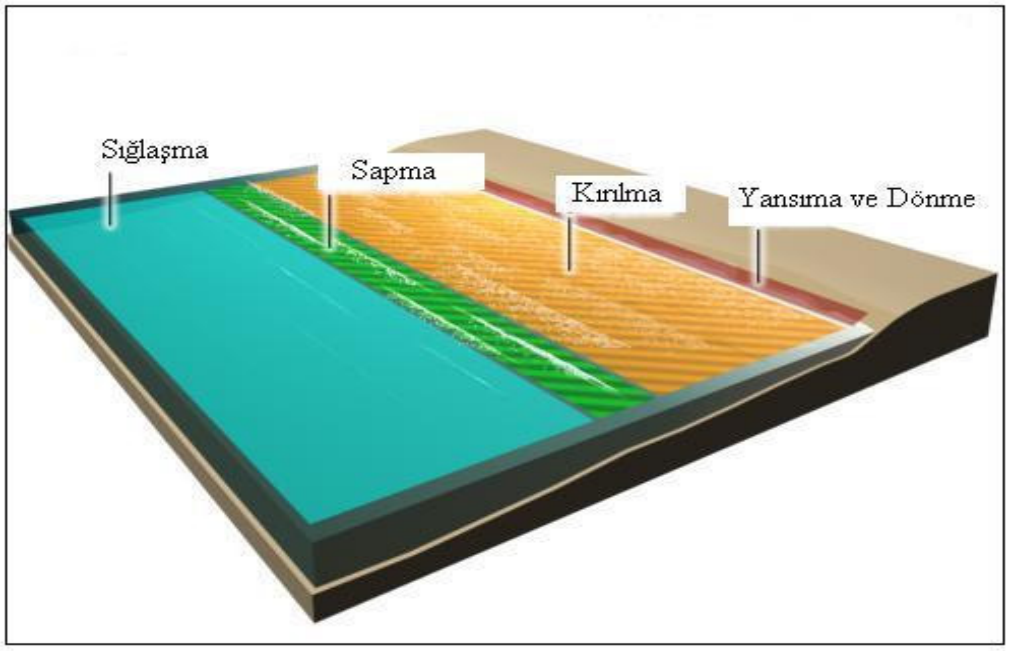
Boussinesq dalga denklemleri;

$$\eta_1 + \vec{\nabla}\left[(h+\eta)\bar{u}\right] = 0 \qquad \textbf{(1.26)}$$

$$\bar{u}_t + \left[\bar{u}\vec{\nabla}\right]\bar{u} + g\vec{\nabla}\eta = \frac{h^2}{3}\vec{\nabla}\left[\vec{\nabla}\bar{u}_t\right] \qquad \textbf{(1.27)}$$

olarak verilmektedir. Bu denklemlerden (1.26) ile verilen süreklilik denklemi, lineer olmayan (nonlineer) uzun dalga teorisinde kullanılan (1.24) denklemi ile aynıdır ve hiçbir yaklaşım içermez. Momentum denklemi, sağ taraftaki dispersiyon terimi ile lineer olmayan (nonlineer) uzun dalga teorisinden ayrılmaktadır. Bu terim temelde soldaki lineer olmayan terimi dengeleyerek, lineer olmayan daimi dalgaları mümkün kılmaktadır. Ayrıca, yine bu terim sayesinde dalga hızları uzun dalga teorisine kıyasla daha doğru olarak modellenmektedir [14].

1.6 Dalga Hareketlerinde Meydana Gelen Değişimler



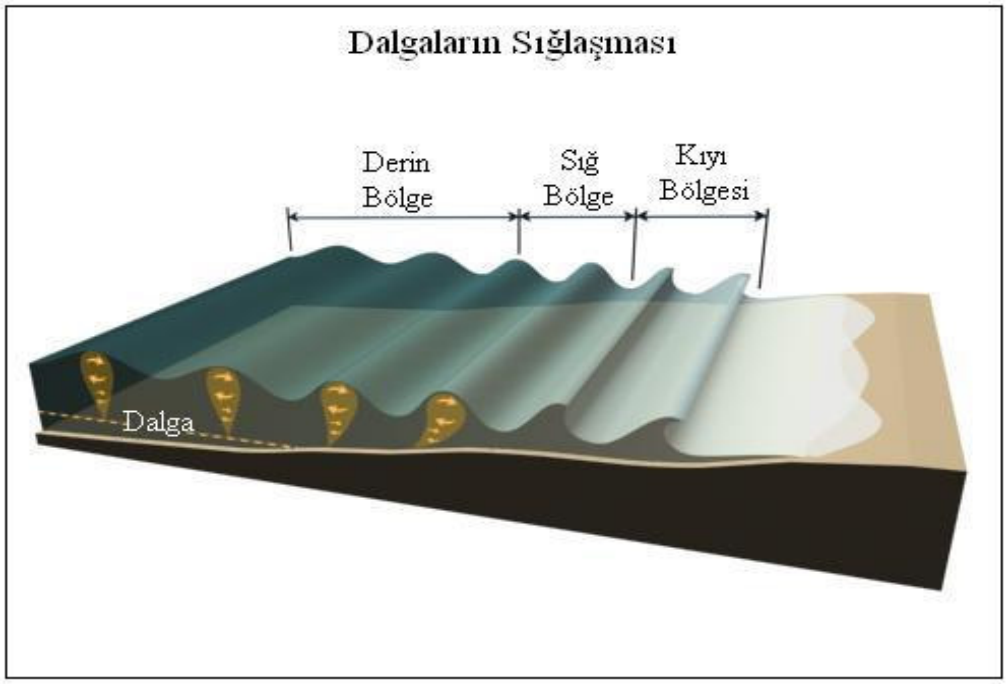
Şekil 1.3: Dalga Hareketlerindeki Değişim Bölgeleri.

Açık denizde derin sularda oluşan dalgalar oldukça uzun mesafeler boyunca şekillerinin değiştirmeksizin kıyıya doğru hareket ederler. Açık deniz koşullarında deniz tabanının ve su derinliğinin dalga özelliklerine herhangi bir etkisi yoktur. Bu dalgalar kıyıya doğru yaklaştıklarında, azalan derinliğin etkisi ile dalga boyları ve

yayılma hızları azalmaya, buna karşın yükseklikleri artmaya başlar ve dalgalar gittikçe dikleşir. Su derinliği, dalga boyunun yarısına düştüğünde, dalgada sırasıyla sığlaşma, sapma, kırılma ve kıyının durumuna bağlı olarak yansıma ve dönme olayları meydana gelir (Şekil 1.3). Burada dalga hareketlerinde meydana gelen değişimlerle ilgili teorik olarak fazla detaya girilmeyecektir; ancak tanımlamalar ve genel denklemler verilecektir.

1.6.1 Dalgaların sığlaşması

Dalgalar kıyıya doğru ilerledikçe, azalan derinliğin etkisini hissetmeleri ile beraber dalga boyları kısalır ve dikleşirler. Genel olarak bu olay sığlaşma olarak ifade edilebilir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4: Dalgaların Sığlaşması.

Derin sudaki dalga yayılma hızı c_0 ve sığ sudaki dalga yayılma hızı c olarak dikkate alındığında K_s sığlaşma katsayısı;

$$K_s = \sqrt{\frac{c_0}{c}} \qquad \textbf{(1.28)}$$

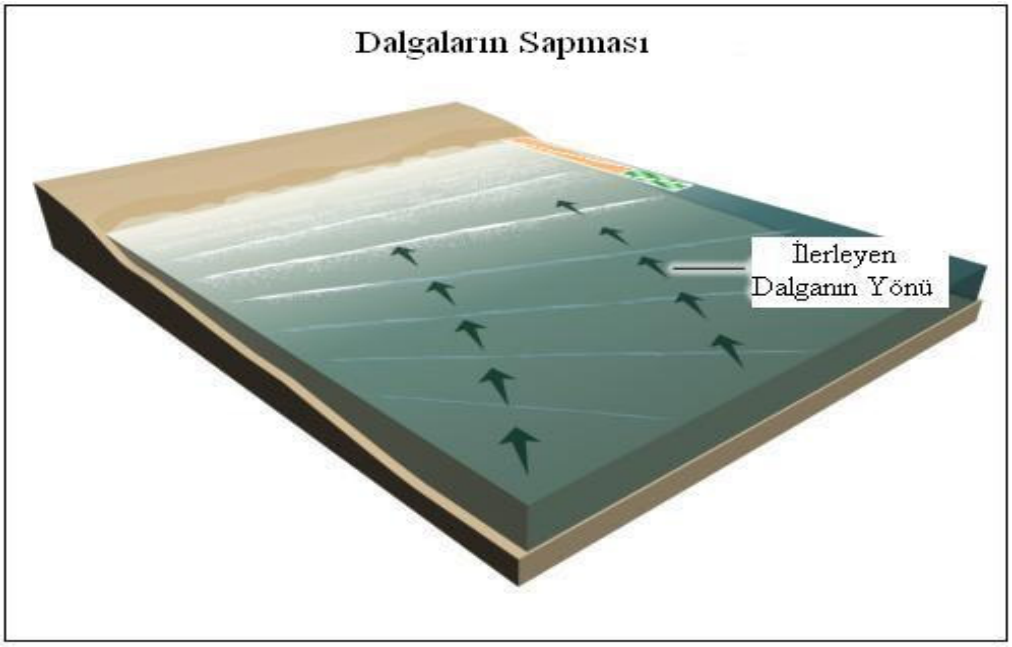
olarak ifade edilir. K_r sapma katsayısı olmak üzere, derin sudaki dalga yüksekliği H_0 ile sığ sudaki dalga yüksekliği H arasında ise;

$$H = K_s K_r H_0 \quad \textbf{(1.29)}$$

ilişkisi vardır. Eğer dalgalar batimetri çizgilerine (eş derinlikli noktaları birleştiren çizgiler) paralel olarak ilerliyorlarsa bu takdirde sapma olayı meydana gelmeyeceğinden K_r=1 olur ve $H=K_sH_0$ haline gelir [4,s.34–36].

1.6.2 Dalgaların sapması

Kıyıya belli bir açı altında yaklaşan dalgaların, kıyıya yakın tarafların taban tesirinden daha önce etkilenerek yavaşlamaları nedeniyle dönerek batimetri çizgilerine paralel duruma gelmeleri olayına sapma adı verilir (Şekil 1.5a ve Şekil 1.5b).



Şekil 1.5a: Dalgaların Sapması.

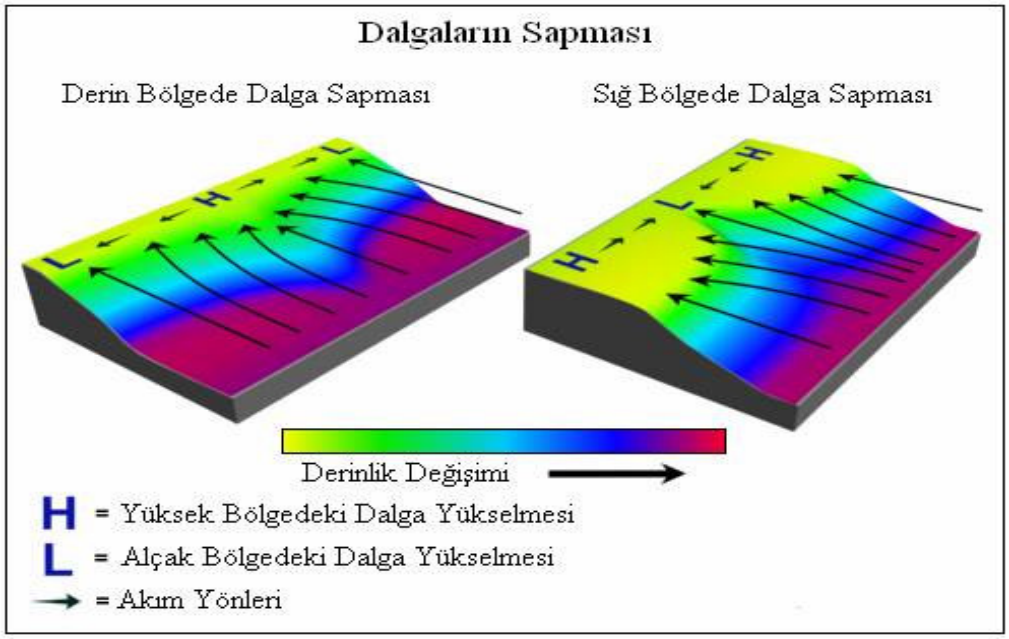
Derin sudaki dalga yayılma hızı c_0 ve sığ sudaki dalga yayılma hızı c arasında;

$$\frac{c}{c_0} = \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad \textbf{(1.30)}$$

ile ifade edilen bir ilişki vardır. K_r sapma katsayısı ise;

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}} \quad \textbf{(1.31)}$$

ile tanımlanıp, burada, α_0 derin su dalga tepesinin batimetri ile yaptığı açıyı, α sığ su dalga tepesinin batimetri ile yaptığı açıyı, b_0 derin sudaki dalga tepesinin genişliğini, b ise sığ sudaki dalga tepesinin genişliğini ifade etmektedir [4,s.29–31].



Şekil 1.5b: Dalgaların Sapması.

1.6.3 Dalgaların kırılması

Dalgaların kıyı yakınlarında ilerlemeleri sırasında yükseklikleri ve boyları değişerek deformasyona uğrar. Bunun sonucu olarak da dalga tepesinde, su moleküllerinin hızlarının, dalga yayılma hızına eşit olduğu bir sınır koşula ulaşılır. Bu sınır koşul da aşılıp, su moleküllerinin hızı, dalga yayılma hızını geçerse dalga daha da dikleşir ve formu bozularak kırılır (Şekil 1.6).

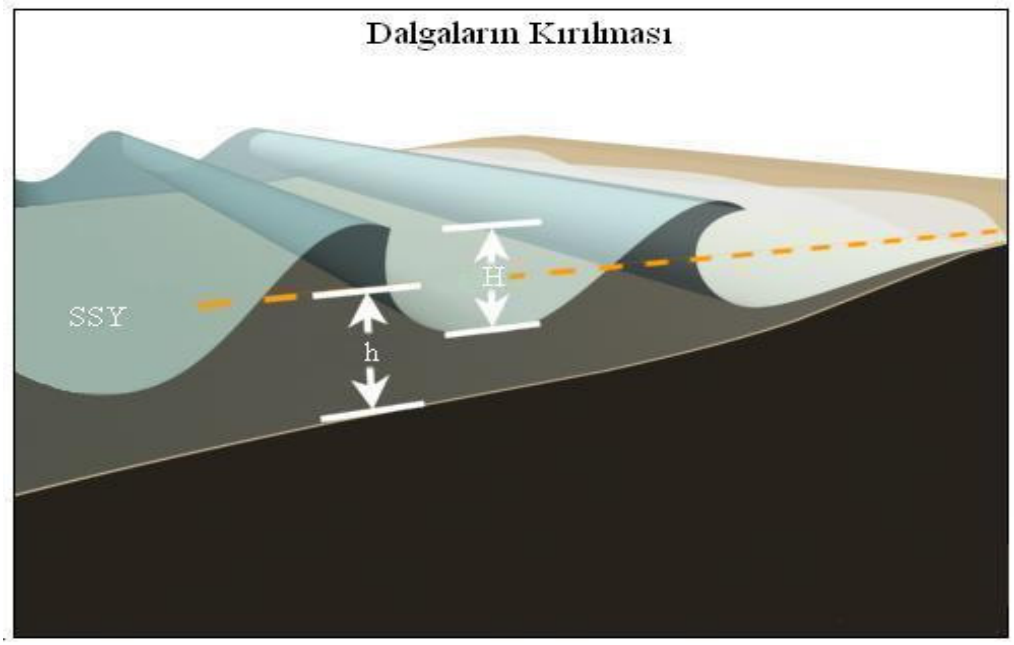
Derin sudaki dalga için, dalga yüksekliği (H) ve dalga boyuna (L) bağlı maksimum diklik sınırı;

$$\frac{H}{L} = 0.142 \approx \frac{1}{7} \qquad \textbf{(1.32a)}$$

ile, sığ sudaki dalga için, dalga yüksekliği (H) ve kırılma derinliğine (h) bağlı maksimum diklik sınırı ise;

$$\frac{H}{h} = 0.78 \qquad \textbf{(1.32b)}$$

olarak ifade edilir [4,s.42–44].



Şekil 1.6: Dalgaların Kırılması.

1.6.4 Dalgaların yansıması

Açık denizden gelen dalga bir engele çarptığında eğer engelin geometrisi ve yüzey özellikleri dalganın sönümlenmesine yol açmıyorsa gelen dalga enerjisinin bir kısmı veya genellikle tamamı geri yansır. Bu olaya dalga yansıması adı verilir (Şekil 1.7).

Gelen dalga yüksekliği H, yansıyan dalga yüksekliği H_y ise yansıma katsayısı;

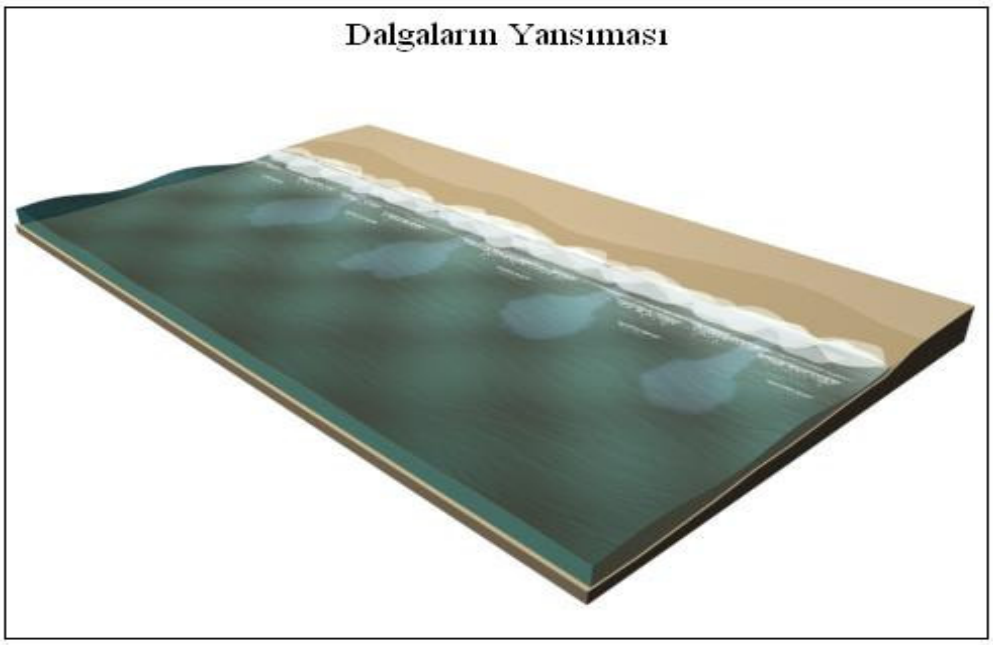
$$K_y = \frac{H_y}{H} \tag{1.33}$$

olarak tanımlanır. K_y=1 olduğunda tam yansıma, K_y=0 olduğunda ise tam harcanma (yansıma yok) olduğu söylenebilir.

Yapının tipine göre gelen dalga enerjisinin bir kısmı yansıtılırken, bir kısmı da yapının arkasına geçebilir. Bu durumda H_t geçen dalga yüksekliği olmak üzere, geçiş katsayısı;

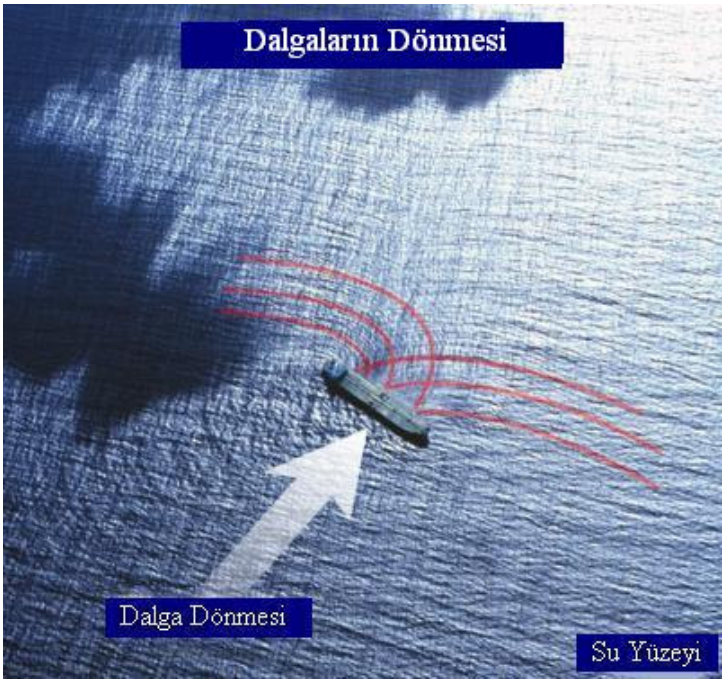
$$K_t = \frac{H_t}{H} \tag{1.34}$$

olarak ifade edilir [1,s.203].



Şekil 1.7: Dalgaların Yansıması.

1.6.5 Dalgaların dönmesi



Şekil 1.8: Dalgaların Dönmesi.

Dönme, dalgaların derin sulardan sığ sulara ilerlerken bir dalgakıran veya bir engelle karşılaştığında dalgaların korunan saha içine dalgakıranın ucundan dalga enerjisinin taşınımı dolayısı ile dönerek girmesidir (Şekil 1.8).

Bir engele gelen dalga yüksekliği H, engelin arkasındaki belirli bir noktadaki dalga yüksekliği H_i ise, dönme katsayısı;

$$K' = \frac{H}{H_i} \tag{1.35}$$

olarak ifade edilir [1,s.196–197].

2. HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ

2.1 Giriş

Akışkanlarla ilgili bilinen ilk çalışmalar Archimedes (MÖ 285–212) tarafından yapılmıştır. Archimedes suyun kaldırma kuvvetinden hareketle, akışkanlar için bir takım hesaplama yöntemleri geliştirmiştir. Ancak, akışkanlarla ilgili esas gelişmeler Rönesans'tan sonra 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, eddy oluşumu ve sürüklenme kuvvetleri hakkında bilgiler vermiştir.

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 Françis (1815–1892), Jean Louis Marie Poiseouille (1799–1869) yaptıkları deneysel çalışmalarla akışkanlar mekaniğinin geliştirilmesinde önemli katkılarda bulunmuşlardır.

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. Henri Navier (1785–1836) ve George Stokes (1819–1903), Newtonian akışlara sürtünme terimlerini de ilave ederek, bütün akışları analiz etmede başarıyla uygulanan ve günümüzde Navier-Stokes denklemleri olarak bilinen momentum denklemlerini bulmuşlardır.

Ludwig Prandtl (1875–1953) yüzeye yakın yerlerde sınır tabakanın etkili olduğunu, onun dışında ise sürtünme kuvvetlerinin olmadığı durumlarda Bernoulli denkleminin uygulanabileceğini göstermiştir. Aynı şekilde çok geniş teorik ve deneysel çalışmalar Thedore Von Karman (1881–1963) ve Geofrey Taylor'un (1886–1975) yanında pek çok araştırmacı tarafından da yapılmış ve yapılmaktadır.

Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD), akışkanlarla ilgili tüm problemlerin bilgisayar kullanılarak çözüldüğü ve sonuçlarının hesaplandığı bir bilim dalıdır. Özellikle son yıllarda bilgisayar kapasitelerinin artmasıyla beraber daha sık kullanılmaya başlanmıştır ve gelişmeye devam etmektedir [12]. Literatürde İngilizce olarak Computational Fluid Dynamics (CFD), Türkçe olarak Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) şeklinde geçmekte olup, bu çalışmada terminoloji olarak Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) kullanılacaktır.

Bu yöntemdeki temel amaç, çözülecek problemi birbirini dikine ve boyuna kesen ızgara sistemi (grid) şeklinde oluşturarak, sistemi oluşturan her bir elemandaki bilinmeyen değerleri gerekli denklemler kullanarak hesaplamaktır [11].

2.2 Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Analizi

Herhangi bir Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) analizi genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar işlem sırasına göre;

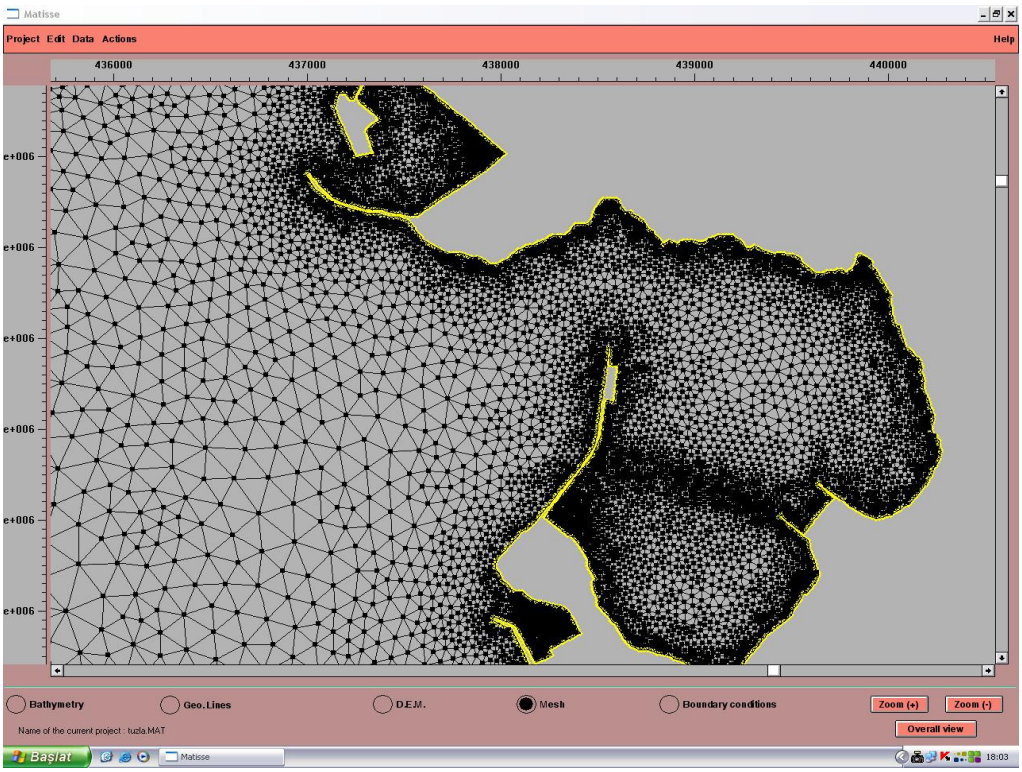
- Model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması,
- Sınır şartlarının ve çözüm ayarlarının tanımlanması,
- Sonuçların yorumlanması

olarak sıralanabilir.

2.2.1 Model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması

Bir HAD analizinin yapılabilmesi için modeli bulunan akış hacminin sonlu sayıda ufak 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 küçük ise sonuçlar o kadar hassas olur. Ancak bu parçaların sayısı analiz süresine de doğrudan etki eder. Bu nedenle yüksek gradyenlerin olduğu bölgelerde yoğun, diğer bölgelerde ise daha seyrek elemanlar kullanılarak optimum bir sayı bulmak gerekmektedir.

Bu çalışmada HAD analizi için TELEMAC nümerik programı kullanılmıştır. Model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması ise MATISSE programı ile yapılmıştır. Marmara Denizi'nin kuzeydoğu kısmı için oluşturulan modelde, kıyıya ve adalara yakın yerlerde daha küçük, kıyıdan uzak bölgelerde ise daha büyük elemanlar kullanılarak sayısal ağ modeli oluşturulmuştur (Şekil 2.1).

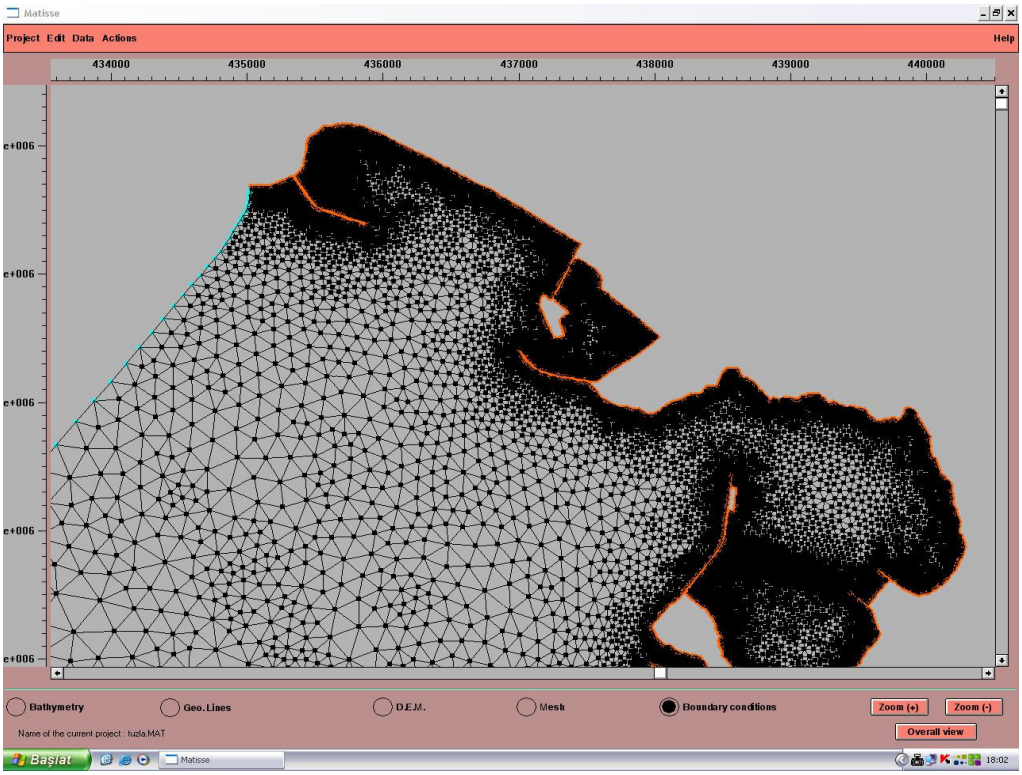


Şekil 2.1: HAD Analizi için Oluşturulan Sayısal Ağ Modeli.

2.2.2 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. Bu detaylara 3. ve 6. bölümlerde girilecektir.

Oluşturulan sayısal ağ modelinde sınır şartlarının tanımlanması için yine MATISSE programı kullanılmıştır. Proje sınırları belirlendikten sonra kıyı şeridi ve deniz bölgeleri için ayrı ayrı sınır şartları tanımlanmıştır (Şekil 2.2). Tüm sınır koşulları tanımlandıktan sonra sistemin çözüm ayarlarının yapılması gerekmektedir. Burada çözüm ayarlarından kasıt gerekli hesap kriterlerinin belirlenmesidir. Sayısal yöntemlerin belirlenmesinin ardından HAD analizi için gerekli model oluşturulur.



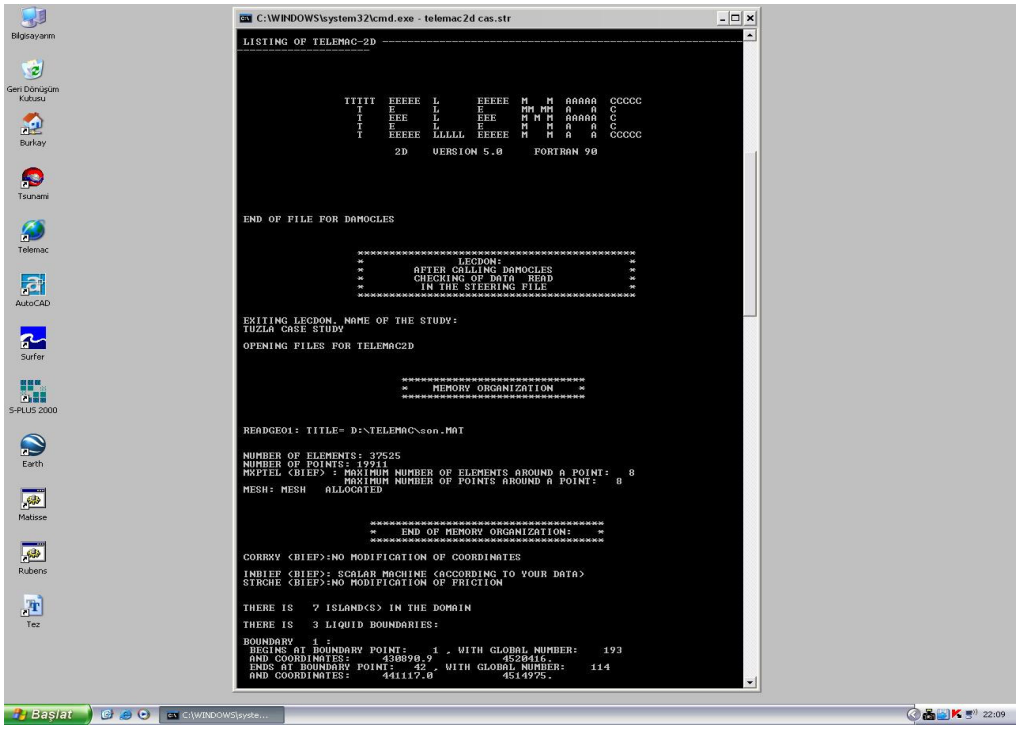
Şekil 2.2: HAD Analizi için Sınır Şartlarının Belirlenmesi.

2.2.3 Sonuçların yorumlanması

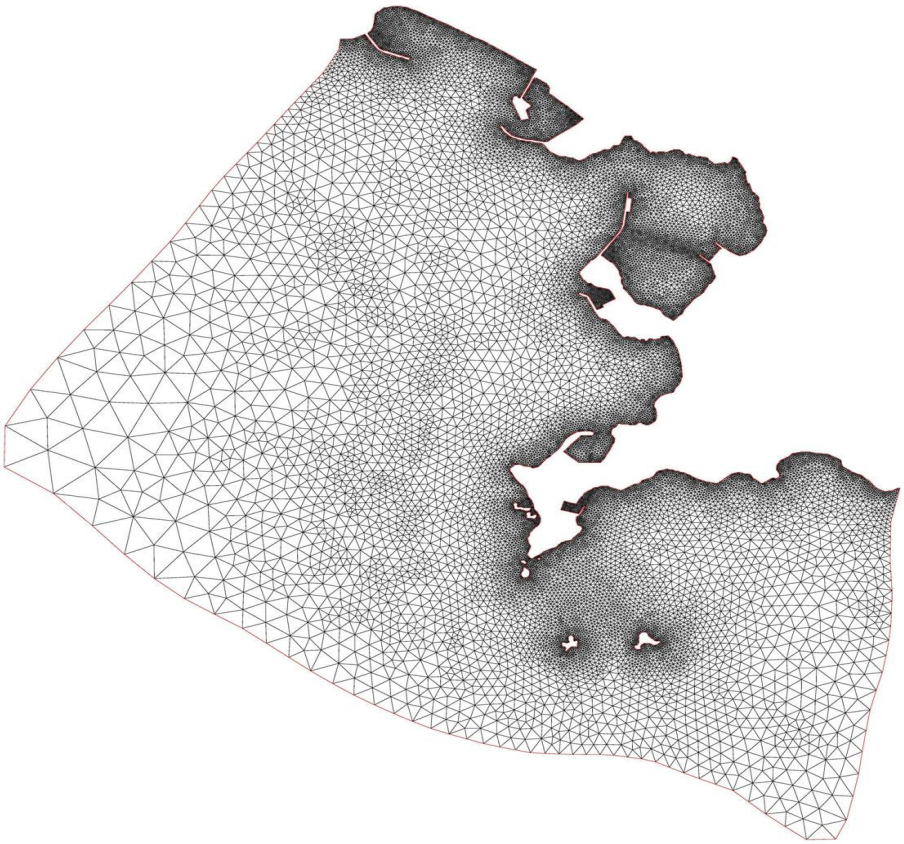
Sayısal ağ modeli ve sınır şartları belirlendikten sonra HAD analizi yapılabilir. Öncelikle model ve sınır şartları oluşturulduktan sonra elde edilen çıktılar, analiz için girdi olarak kabul edilir ve gerekli ise başka girdi dosyaları da hazırlanarak analiz gerçekleştirilir.

Bu çalışmada HAD analizi için, Marmara Denizi için oluşturulan modelde tsunami simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlar TELEMAC-2D programı ile yapılmıştır. Sayısal ağ modeli ve sınır şartları hazırlandıktan sonra elde edilen çıktı dosyalarına, COMPAQ VISUAL FORTRAN programında hazırlanan fortran dosyası ve yönetici dosyası da eklenerek analiz için girdiler oluşturulmuş ve TELEMAC-2D programı kullanılarak UNIX ortamında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.3).

Simülasyon işlemleri tamamlandıktan sonra, HAD analizinin sonuçları elde edilir ve bu sonuçların yorumlanması gerekir. Tsunami simülasyonları yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar RUBENS programı kullanılarak görüntülenmiştir ve sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 2.4, elde edilen sonuçlardan çalışma alanına ait sayısal ağ modelini göstermektedir.



Şekil 2.3: TELEMAC-2D Programı ile Tsunami Simülasyonu.



Şekil 2.4: Sayısal Ağ Modeli.

2.3 HAD Analizi İçin Geliştirilmiş Bilgisayar Programları

HAD analizi için geliştirilmiş bilgisayar programları, çökelti, erozyon, oyulma, aşınma, türbülanslı akımlar, sifonlar, sel, tsunami, gel-git, dolusavak problemleri gibi birçok hidrolik problemin modellemesini yapabilmektedirler [11].

Özellikle son yıllarda bu konuda geliştirilmiş bilgisayar programları, sözü edilen problemleri 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak modelleyebilmektedir. Bu programlar, bilgisayarda kurulu olan WINDOWS ve LINUX işletim sistemlerinde veya UNIX ortamında çalışmaktadır. Her iki sistemde çalışabilenleri de mevcuttur. Burada bu programlardan bazılarına ilişkin özet bilgiler verilecektir [11].

2.3.1 SSIIM

SSIIM, isim olarak İngilizce "Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option" kelimelerinin büyük olan ilk harflerinden oluşmuş, katı madde taşınımı problemlerinin çözümü için geliştirilmiş bir hidrolik mühendisliği yazılımıdır. Navier-Stokes ve difüzyon denklemlerini kullanarak, 3 boyutlu düzgün olmayan yapıların çözümünü sağlamaktadır.

SSIIM, bilgisayarda kurulu olan WINDOWS ve LINUX işletim sistemleri üzerinde çalışmaktadır. Program, internet üzerinden ücretsiz olarak sağlanabilmektedir. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiimwin/

2.3.2 FLUENT

FLUENT, sonlu hacimler yöntemini kullanan, sıkıştırılamaz, orta sıkıştırılabilir ve yüksek sıkıştırılabilir akışlar için HAD çözücüsüdür. Fluent firması tarafından üretilmiş olan program, laminer, geçiş ve türbülanslı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile çözülmesine olanak sağlar.

FLUENT, bilgisayarda kurulu olan WINDOWS ve LINUX işletim sistemleri üzerinde ve UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, pahalı sayılabilecek bir ücret karşılığında satılmaktadır. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.fluent.com

2.3.3 FIDAP

FIDAP, sonlu elemanlar yöntemini kullanan, yapısal ve yapısal olmayan sistemleri çözen bir HAD programıdır. Fluent firması tarafından üretilmiş program, özellikle hidroelektrik projelerindeki su modellemeleri için kullanılmaktadır.

FIDAP, bilgisayarda sadece UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, pahalı sayılabilecek bir ücret karşılığında satılmaktadır. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.fluent.com

2.3.4 STAR-CD

Computational Dynamics firması tarafından üretilmiş olan STAR-CD programı, yapısal ve yapısal olmayan sistemler ile çok hücreli sistemlerden oluşan birçok hidrolik probleminin çözümü için kullanılmaktadır.

STAR-CD, özellikle baraj dolusavaklarındaki kavitasyon problemleri ve debi modellemeleri için kullanılmaktadır. Bilgisayarda kurulu olan WINDOWS ve LINUX işletim sistemleri üzerinde ve UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, belirli bir ücret karşılığında satılmaktadır; ancak akademik kullanımlar için daha ucuz bir fiyata sahip olmak mümkündür. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.cd.co.uk

2.3.5 TELEMAC

TELEMAC, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu birçok hidrolik problemi çözen bir HAD programıdır. Program, Fransız Elektrik Kurumu tarafından üretilmiştir. Program hakkındaki diğer bilgiler 3. bölümde daha geniş olarak verilecektir.

TELEMAC, bilgisayarda sadece UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, oldukça pahalı sayılabilecek bir ücret karşılığında satılmaktadır. Daha çok akademik çevreler tarafından kullanılan program, buradaki kullanıcılara daha ucuz bir fiyata sağlanabilmektedir. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.hrwallingford.co.uk/software/telemac

2.3.6 FLOW-3D

FLOW-3D, sonlu hacimler yöntemini kullanarak 3 boyutlu ortogonal sistemleri çözen bir HAD programıdır. Flow Science firması tarafından üretilmiştir. Özellikle dolusavak, taşkın, baraj yıkılmaları ve hidrolik sıçrama gibi hidrolik problemlerinde kullanılmaktadır.

FLOW-3D, bilgisayarda sadece UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, pahalı sayılabilecek bir ücret karşılığında satılmaktadır. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.flow3d.com

2.3.7 TABS

TABS, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station tarafından üretilmiş, genellikle nehir ve hidrolik mühendisliği problemlerinde kullanılan, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu yapıların çözümünü sağlayan bir HAD programıdır.

TABS, bilgisayarda kurulu olan WINDOWS ve LINUX işletim sistemleri üzerinde çalışmakta olup, diğer HAD analizi yapan programlar kadar pahalı olmamakla beraber, belirli bir ücret karşılığında satılmaktadır. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://hlnet.wes.army.mil/software/tabs/tabs.htm

2.3.8 PHOENICS

PHOENICS, Cham Corporation firması tarafından üretilmiş olan, sonlu hacimler yöntemini kullanarak yapısal ve yapısal olmayan sistemler ile çok hücreli sistemlerden oluşan birçok hidrolik probleminin çözümü için kullanılan, HAD analizi yapan ilk programlardan biridir.

PHOENICS, bilgisayarda kurulu olan WINDOWS ve LINUX işletim sistemleri ile UNIX ortamında çalışmaktadır. Daha çok nehir problemlerinin çözümü için kullanılmakta olan ve belirli bir ücret karşılığında satılmakta olan programın eski sürümleri kısıtlı kullanım şekli ile internet üzerinden sağlanabilmektedir. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.cham.co.uk/

2.3.9 CFX

CFX, AEA Technology firması tarafından üretilmiş olan, sonlu hacimler yöntemini kullanarak HAD analizi yapan bir bilgisayar programıdır. Programın, yapısal ve yapısal olmayan sistemlerin çözümü için geliştirilmiş iki sürümü vardır.

CFX, bilgisayarda sadece UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, belirli bir ücret karşılığında satılmaktadır. Program hakkındaki daha detaylı bilgilere, aşağıdaki web sayfası kullanılarak ulaşılabilir:

- http://www.aeat.co.uk/cfx/

2.4 Nümerik Modelleme Yöntemi

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.

HAD analizi yapılacak olan herhangi bir problem, nümerik modelleme yöntemleri ile çözülmektedir. Bu çözüm 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 gerekmektedir. Burada ızgara sisteminin ve sayısal ağın oluşturulması ile SEY kısaca anlatılacaktır.

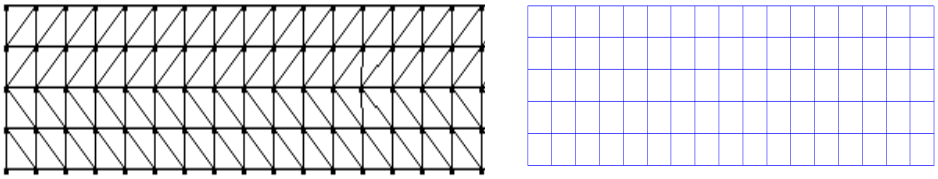
2.4.1 Izgara sisteminin ve sayısal ağ modelinin oluşturulması

Burada tanımlaması yapılacak olan ifadeler, literatürde daha sık kullanıldığı için parantez içlerinde İngilizce dilindeki karşılıkları ile açıklanacaktır.

Herhangi bir sayısal ağ modeli oluşturulurken şu adımlar izlenir. Esas olarak çözülecek problem, birbirini dikine ve boyuna kesen çizgiler biçiminde ayrılarak çeşitli şekiller oluşturulur. Bu şekillerin oluşturduğu sisteme ızgara sistemi (grid) denir. Oluşturulan ızgara sistemi sonlu sayıda irili ufaklı parçalara bölünür. Bu parçaların her birine hücre (cell) veya eleman (element) adı verilir. Bu hücrelerdeki noktalara ise düğüm noktası (node) denir. Bu hücrelerden oluşan tüm sisteme ise sayısal ağ modeli (mesh) denmektedir.

HAD analizinin temel mantığı, çözülecek olan hidrolik problem için, yatay ve düşey çizgiler yardımıyla ızgara sistemini oluşturmak ve sayısal ağ tabakasını elde ederek, tabakayı oluşturan hücrelerdeki her bir düğüm noktası için ayrı ayrı çözüm yapmaktır.

Şekil 2.5'te üçgen ve dörtgen elemanlarından oluşmuş sayısal ağ modeli örnekleri görülmektedir [7].

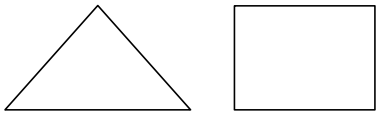


Şekil 2.5: Üçgen ve Dörtgen Yapılı Sayısal Ağ Modelleri (Cığızoğlu, 2005).

Sayısal ağ modelini oluşturan ızgara sistemleri, çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir.

- Şekil
- Düzgünlük
- Yapı
- Blok
- Konum
- Hareket.

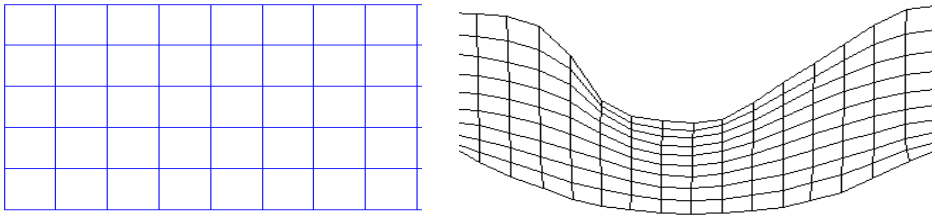
bu sınıflandırma şekillerinden bazılarıdır. Izgara sistemini oluşturan elemanlar çeşitli şekillerde olabilirler. Şekil 2.6'da üçgen ve dörtgen şekilleri görülmektedir.



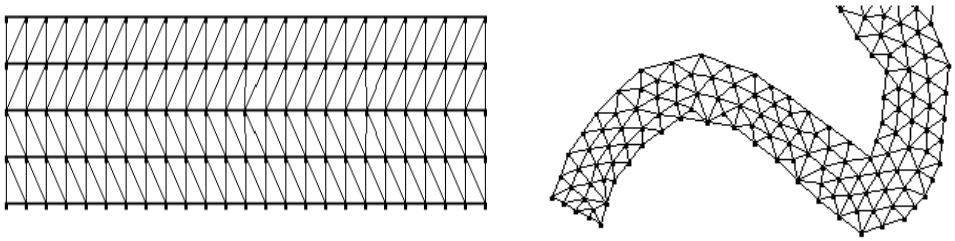
Şekil 2.6: Üçgen ve Dörtgen (Cığızoğlu, 2005).

Izgara sistemini oluşturan çizgiler arasındaki açı; 90 derece ise, bu şekilde oluşan yapıya düzgün ızgara sistemi (orthogonal grid), 90 dereceden farklı ise oluşan yapıya düzgün olmayan ızgara sistemi (non-orthogonal grid) denir. Şekil 2.7'de düzgün ve düzgün olmayan ızgara sistemleri görülmektedir.

Izgara sistemleri yapısal (structured) ve yapısal olmayan (unstructured) şekilde de sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.8). Genellikle iki boyutlu olarak tasarlanmış modeller yapısal, farklı şekilde tasarlananlar ise yapısal olmamaktadır.

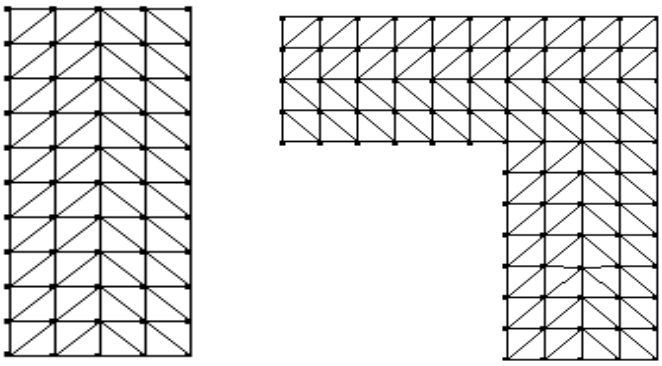


Şekil 2.7: Düzgün ve Düzgün Olmayan Izgara Sistemleri (Cığızoğlu, 2005).



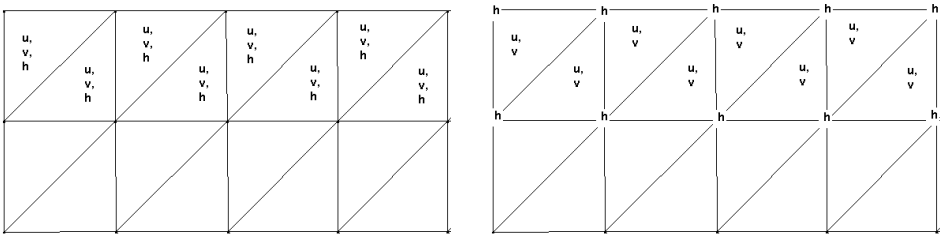
Şekil 2.8: Yapısal ve Yapısal Olmayan Izgara Sistemleri (Cığızoğlu, 2005).

Sadece bir yapısal sistemden oluşan şekle blok ızgara sistemi (block grid), iki ve ikiden fazla yapısal sistemden oluşan şekle ise çoklu blok ızgara sistemi (multi-block grid) adı verilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9: Blok ve Çoklu Blok Izgara Sistemleri (Cığızoğlu, 2005).

Izgara sistemleri konumları itibarı ile şaşırtmalı (staggered) ve şaşırtmalı olmayan (unstaggered) şekilde de sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Şaşırtmalı ve Şaşırtmalı Olmayan Izgara Sistemleri (Cığızoğlu, 2005).

2.4.2 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. Burada terminoloji olarak SEY ifadesi kullanılacaktır.

SEY 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.

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

Yapı alanı dışındaki problemlerin SEY 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.

Genel amaçlı SEY paket programları, 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yıllarının ortaları ile birlikte SEY ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 adet makale ve kitap yayınlanmıştır.

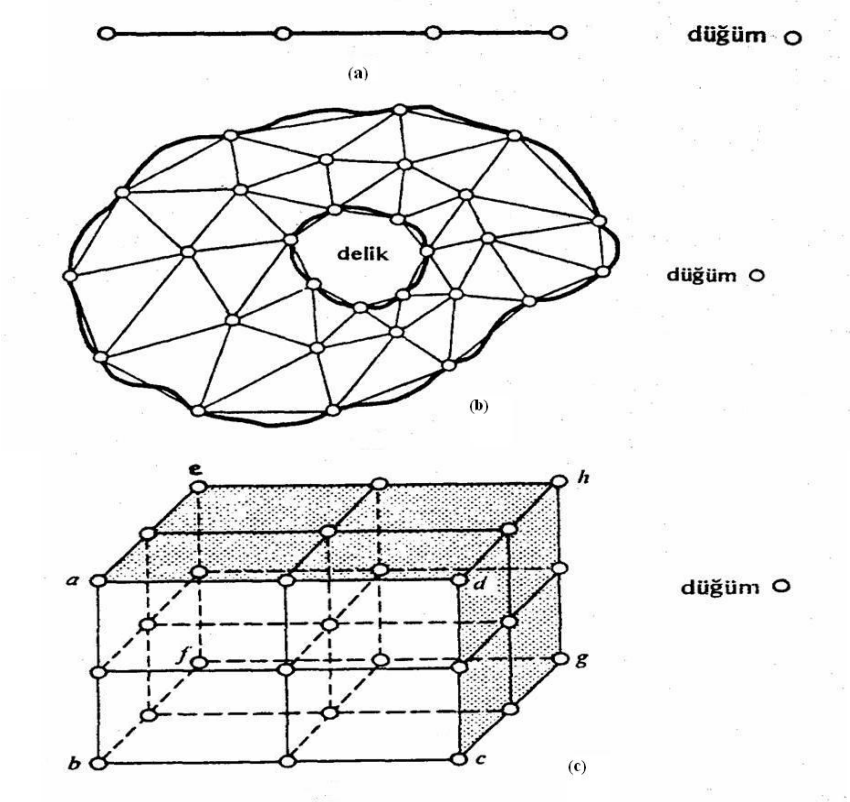
SEY, fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir ve matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük 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 alanın

almış olduğu en büyük değer veya en büyük gradyen pratikte özel bir önem taşımaktadır.

SEY ile çözülecek olan problem, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana (element) bölünür. Elemanlar düğüm (node) adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebrik 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.

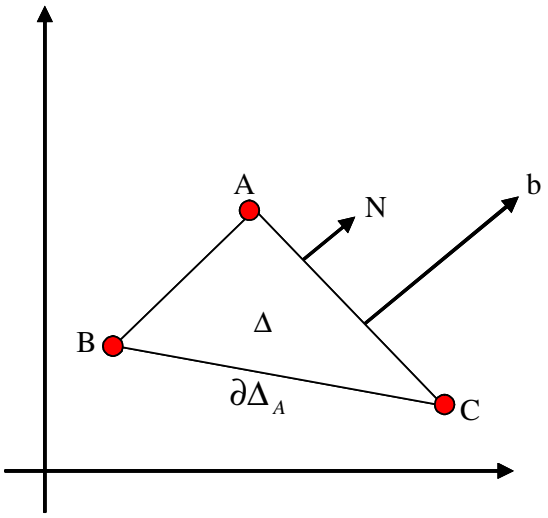
Çözümü istenilen problemin geometrisi, kullanılan SEY paket programı içinde veya bir bilgisayar destekli tasarım programında, İngilizce dilindeki ifadesi ile Computer Aided Design (CAD), ortamında oluşturulabilir.

Bu yöntem ile çözülecek problemin, sonlu boyutta çok sayıda elemana bölünerek analiz edildiğinden bahsedilmişti. Şekil 2.11'de (a)'da üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim görülmektedir. (b)'de üçgen elemanlar sistemi haline getirilmiş iki boyutlu delikli bir cisim ve (c)'de a, b, c, d, e, f, g, h şeklinde 8 özdeş dikdörtgen prizma elemana ayrılmış üç boyutlu bir cisim görülmektedir.



Şekil 2.11: Bir, İki ve Üç Boyutlu Sonlu Elemanlardan Oluşan Cisimler.

Yöntemin çözülmesi için cismi temsil eden her bir elemanın rijitlik matrisinin tanımlanması gerekir. Bunun için Şekil 2.12'de üçgen sonlu eleman alınmıştır [7].



Şekil 2.12: Üçgen Sonlu Eleman (Cığızoğlu, 2005).

Bu şekildeki indisler;

A, B, C: Üçgen sonlu elemanın düğüm noktaları

A_x, A_y : A düğüm noktasının x ve y koordinatları

Δ : 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;

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)\begin{bmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \\ c_x & c_y \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

- Eleman matrisi;

$$M = \left(\frac{|\Delta|}{12}\right)\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

- Toplam eleman matrisi;

$$M_1 = \left(\frac{|\Delta|}{3}\right)\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

- x yönündeki rijitlik matrisi;

$$K_X = \left(\frac{1}{4|\Delta|}\right)\begin{bmatrix} a_x^2 & a_x b_x & a_x c_x \\ a_x b_x & b_x^2 & b_x c_x \\ a_x c_x & b_x c_x & c_x^2 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

- y yönündeki rijitlik matrisi;

$$K_y = \left(\frac{1}{4|\Delta|}\right)\begin{bmatrix} a_y^2 & a_y b_y & a_y c_y \\ a_y b_y & b_y^2 & b_y c_y \\ a_y c_y & b_y c_y & c_y^2 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

- Eleman rijitlik matrisi;

$$K = K_x + K_y = \left(\frac{1}{\Delta}\right) N N^T \tag{2.6}$$

- x yönündeki türev matrisi;

$$L_x = -\left(\frac{1}{6}\right)\begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_x & b_x & c_x \\ a_x & b_x & c_x \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

- y yönündeki türev matrisi;

$$L_y = -\left(\frac{1}{6}\right)\begin{bmatrix} a_y & b_y & c_y \\ a_y & b_y & c_y \\ a_y & b_y & c_y \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.8)}$$

3. TELEMAC MODEL SİSTEMİ

3.1 Giriş

TELEMAC programı, Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) analizi yapan, Fransız Elektrik Kurumu Electricite de France (EDF), Araştırma ve Çalışma Müdürlüğü Direction des Etudes et Recherches (DER), Ulusal Hidrolik Laboratuarı Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) tarafından üretilmiş ve nümerik modellemeler için kullanılan bir paket programdır.

Program, HR Wallingford Software Ltd. firması tarafından pazarlanmaktadır. Firma hakkında daha geniş bilgilere ulaşmak amacıyla internet üzerinden aşağıdaki web sayfası kullanılabilir:

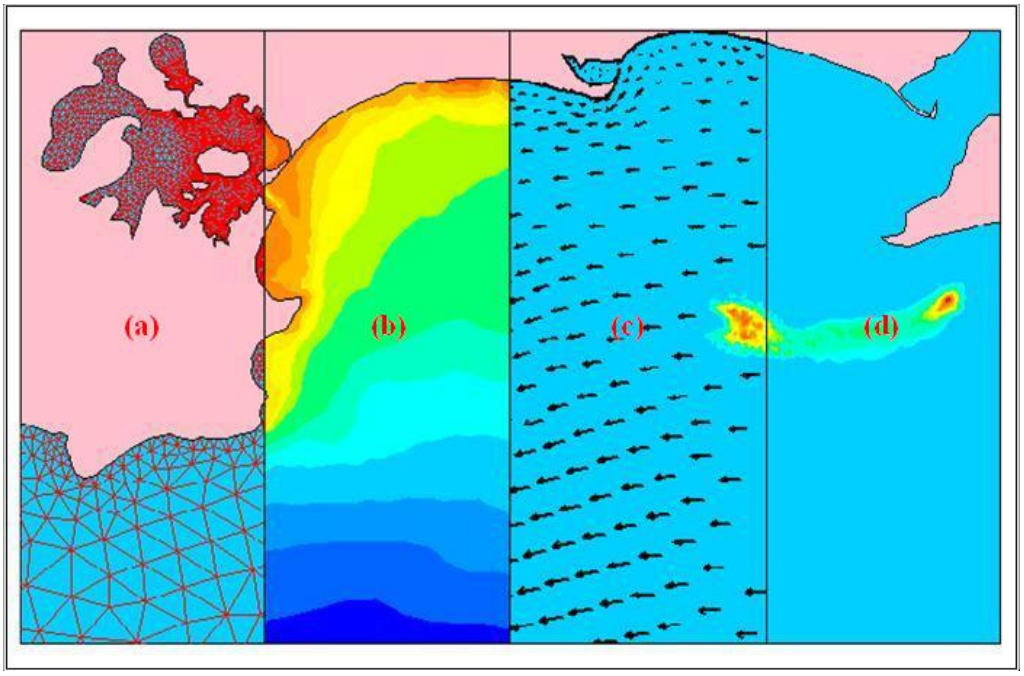
- http://www.wallingfordsoftware.com/

Bunun dışında programın pazarlanması, içeriği ve kullanımı ile ilgili bilgiler için aşağıdaki web sayfalarından da yararlanılabilir:

- http://www.hrwallingford.co.uk/software/telemac
- http://www.telemacsystem.com/gb/default.html
- http://www.sogreah.fr/

TELEMAC programının bilgisayara kurulabilmesi için, bilgisayar üzerinde WINDOWS NT4, WINDOWS 2000 veya WINDOWS XP işletim sistemlerinden birisinin kurulu olması gerekir. Ayrıca modelleme çalışmaları sırasında yapılacak olan simülasyonlar için de COMPAQ VISUAL FORTRAN yazılımının yine bilgisayarda kurulu olması gerekmektedir. Kurulumu işletim sistemi üzerine yapılan program, herhangi bir işletim sistemi üzerinde değil, sadece UNIX ortamında çalışmaktadır. Program, kurulumu ve kullanımı zor olmasına karşın; kullanıcıya, çözülen probleme belirli aşamalarda yazılım yolu ile müdahale şansı tanımaktadır.

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



Şekil 3.1: TELEMAC Model Sonuçları.

Örnek olarak Şekil 3.1'de TELEMAC ile modellenmiş bazı hidrolik problemlerin simülasyon sonuçları görülmektedir. Burada a,b,c ve d görüntüleri sırası ile;

(a) hidrodinamik akış modeli

(b) dalga modeli

(c) katı madde hareketi

(d) su kalitesi

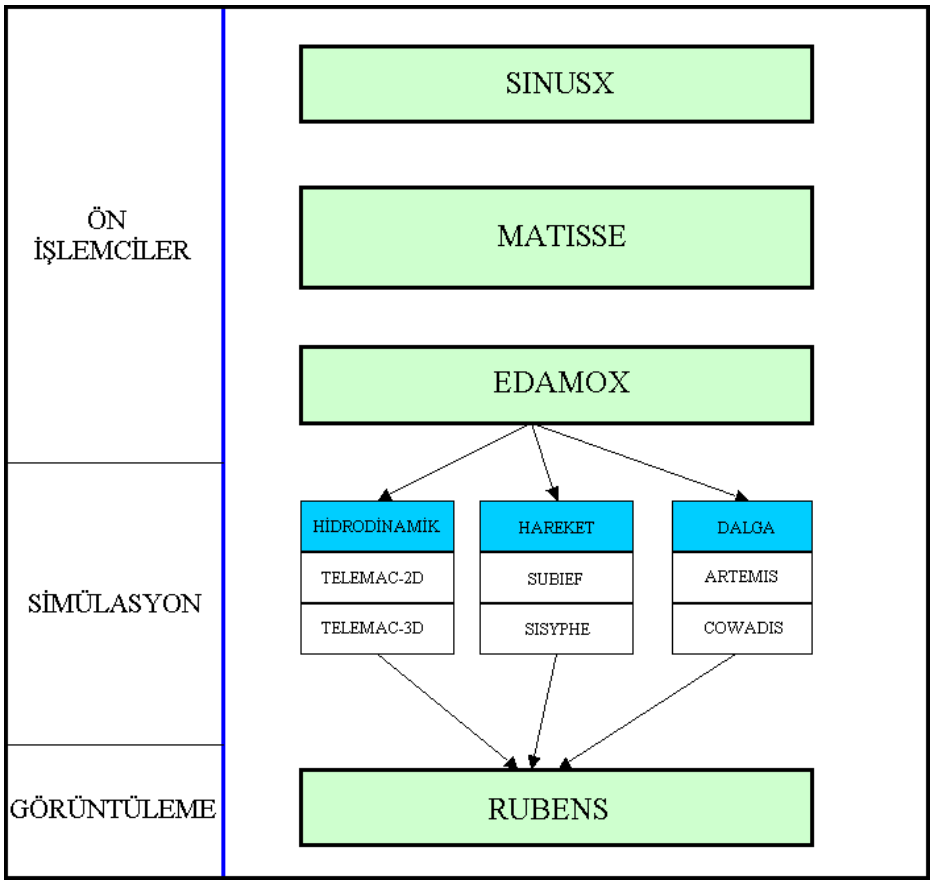
problemleri için yapılmış olan model sonuçlarını göstermektedir.

3.2 TELEMAC Modülleri

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 içerisinde bulunan bu programlar, herhangi bir problemin çözümünü üç aşamalı bir süreçten geçerek hesaplamaktadır. Bu süreçler sırası ile şu şekildedir:

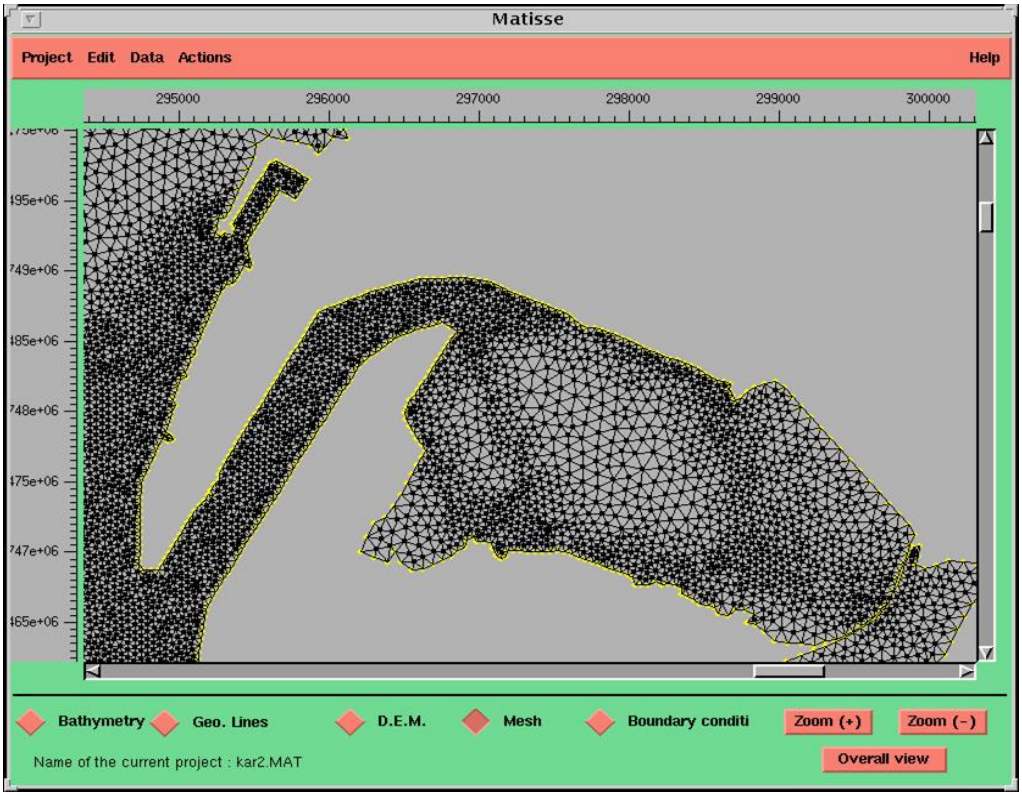
- Ön işlemciler
- Simülasyon
- Görüntüleme

Çözülecek olan problemin arazi yapısının tanımlanması, sayısal ağ modelinin kurulması, sınır şartlarının oluşturulması ve hesap ölçütlerinin belirlenmesi gibi tüm altyapı çalışmaları ön işlemci program tarafından yapılır. Ön işlemci programından 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 simülasyonlar RUBENS programı yardımı ile görüntülenir ve sonuçlar elde edilir. Şekil 3.2'de bu süreçlerde kullanılan bazı TELEMAC modülleri görülmektedir.

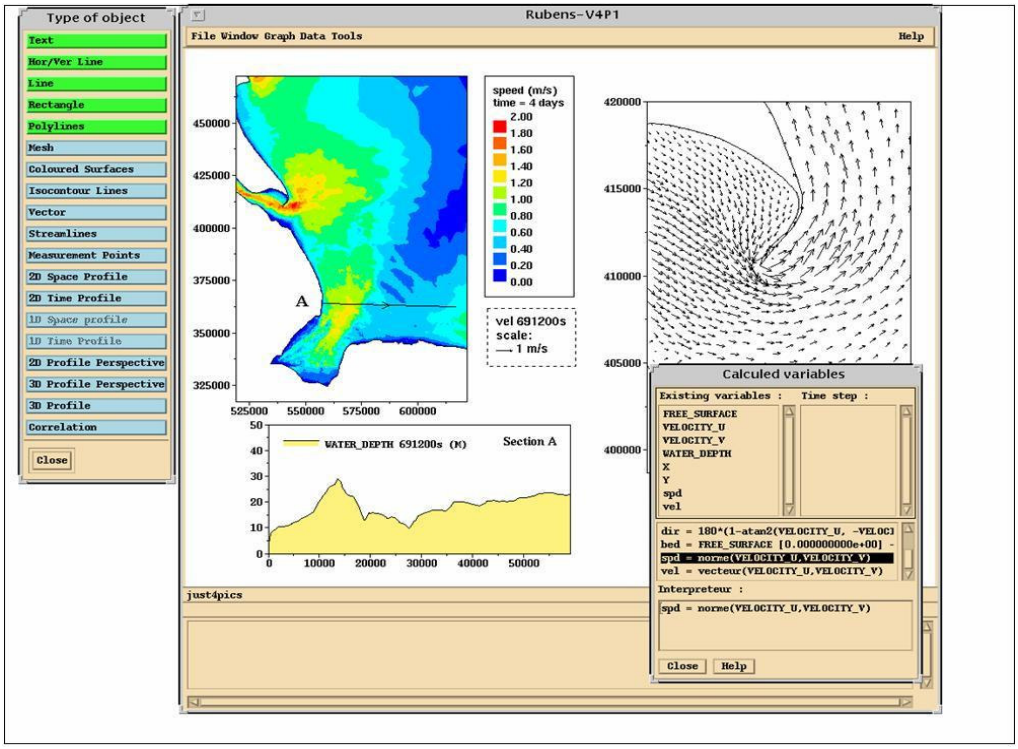


Şekil 3.2: Bazı TELEMAC Modülleri.

Bu çalışmada, tsunaminin nümerik modellemesi aşamasında ön işlemci olarak MATISSE, simülasyon hesapları için TELEMAC-2D ve sonuçların görüntülenmesi için de RUBENS programları kullanılmıştır. MATISSE ve RUBENS programlarına ait ekran görüntüleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Programların kullanımına ilişkin detaylı bilgiler uygulama projesi bölümünde verilecektir.



Şekil 3.3: MATISSE Programı Ekran Görüntüsü.



Şekil 3.4: RUBENS Programı Ekran Görüntüsü.

Tablo 3.1'de, TELEMAC içinde kullanılan modüllere ait; programın adı ve tipi, genel anlamda çözdüğü problemin tanımı ve üreticisi hakkında bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.1: TELEMAC Modüllerine İlişkin Bilgiler.

Program Adı	Program Tipi	Çözdüğü Problem	Üreticisi
SINUSX	Ön İşlemci	Model Alanı Belirleme	EDF-LNH
STBTEL	Ön İşlemci	Ağ Dosyası Okuma	EDF-LNH
EDAMOX	Ön İşlemci	Yönetici Dosyası Yaratma	EDF-LNH
MATISSE	Ön İşlemci	Ağ Yöneticisi	EDF-LNH
TELEMAC-2D	Simülasyon	Hidrodinamik	EDF-LNH
TELEMAC-3D	Simülasyon	Hidrodinamik	EDF-LNH
WQ-2D	Simülasyon	Su Kalitesi	HR Wallingford
WQ-3D	Simülasyon	Su Kalitesi	HR Wallingford
SUBIEF-2D	Simülasyon	Katı Madde Hareketi	EDF-LNH
SUBIEF-3D	Simülasyon	Katı Madde Hareketi	EDF-LNH
SEDPLUME-3D	Simülasyon	Katı Madde Hareketi	HR Wallingford
TSEF	Simülasyon	Katı Madde Hareketi	EDF-LNH
PLUME-RW	Simülasyon	Kirlilik	HR Wallingford
SISYPHE	Simülasyon	Kirlilik	EDF-LNH
ARTEMIS	Simülasyon	Dalga Mekaniği	EDF-LNH
COWADIS	Simülasyon	Dalga Mekaniği	EDF-LNH
BOUSSINESQ	Simülasyon	Dalga Mekaniği	EDF-LNH
TOMAWAC	Simülasyon	Dalga İklimi	EDF-LNH
ESTEL-2D	Simülasyon	Yeraltı Suyu	EDF-LNH
ESTEL-3D	Simülasyon	Yeraltı Suyu	EDF-LNH
RUBENS	Görüntüleme	Model Sonuçları	EDF-LNH

3.3 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:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u\vec{\nabla}(h) + h div(\vec{u}) = S_h \qquad \textbf{(3.1)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(u) = -g\frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} div(h\nu_t \vec{\nabla} u) \qquad \textbf{(3.2)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(u) = -g\frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} div(h\nu_t \vec{\nabla} v) \qquad \textbf{(3.3)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} div(h\nu_T \vec{\nabla} T) \qquad \textbf{(3.4)}$$

Bu denklemlerdeki ifadeler şu şekilde açıklanabilir:

h (m) : Su derinliği,

u,v (m/s) : Hız elemanları,

T (-) : Aktif veya pasif izleyici,

g (m^2/s) : Yerçekimi ivmesi,

υ, υ_T (m^2/s) : Momentum ve iz difüzyon katsayıları,

Z (m) : Taban yükseltisi,

t (s) : Zaman,

x,y (m) : Yatay yöndeki koordinatlar,

S_h (m/s) : Akışa ait kaynak terim,

S_x, S_y (m/s^2) : Dinamik denklemlere ait kaynak terimler,

S_T (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:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} div(h\frac{\nu_t}{\sigma_k}\vec{\nabla}k) + P - \varepsilon + P_{kv} \quad \textbf{(3.5)}$$

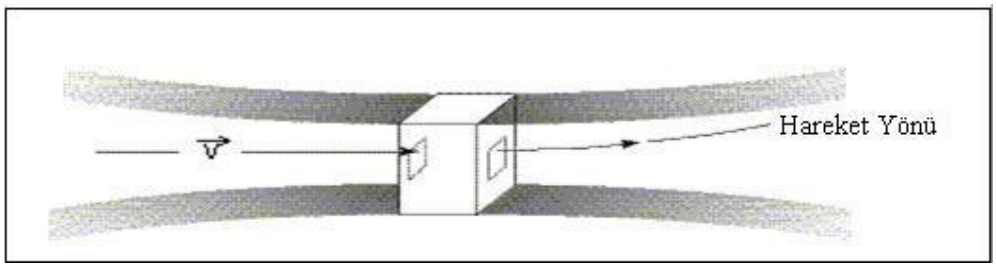
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(\varepsilon) = \frac{1}{h} div(h\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\vec{\nabla}\varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon}P - C_{2\varepsilon}\varepsilon) + P_{\varepsilon v} \quad \textbf{(3.6)}$$

TELEMAC-2D programı, hidrodinamik modeller için Saint-Venant denklemlerini kullanmaktadır. Burada hidrodinamik akış modelleri için kullanılan denklemler açıklanacak ve bunların nasıl elde edildikleri anlatılacaktır. Bu denklemler yardımı ile Saint-Venant denklemleri oluşturulacaktır.

Hidrodinamik akış modeli genel anlamda iki denklemi içermektedir:

- Süreklilik denklemi
- Momentum denklemi

Burada sıkıştırılamayan ideal bir akışkan içindeki parçacığın hareketi incelenecektir. Sabit V hızındaki bir parçacığın hareketi Şekil 3.5'te görülmektedir [7].



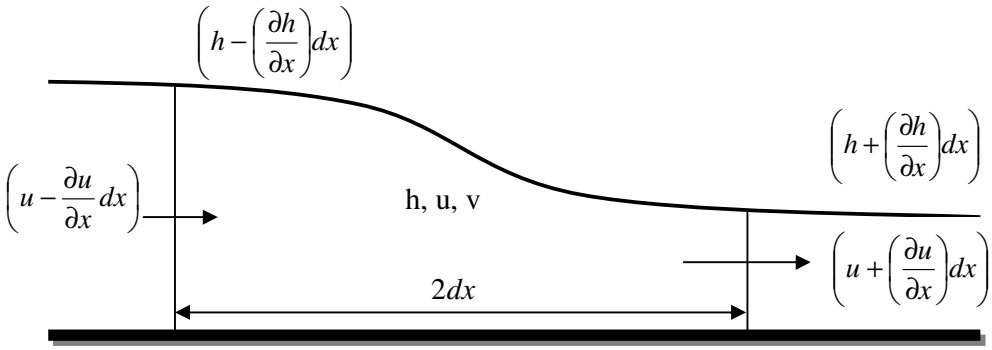
Şekil 3.5: Parçacık Hareketi (Cığızoğlu, 2005).

Burada birim zamanda kontrol hacminden geçen akış miktarı için şu ifade kullanılır:

$$Q = V_1A_1 = V_2A_2 = V_3A_3 = ... \quad \textbf{(3.7)}$$

Bu denklemde A (m^2), alan; V (m/s), hız ve Q (m^3/s), debidir. Şekil 3.6'da, 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:

Biriken Akım Miktarı = Giren Akım Miktarı – Çıkan Akım Miktarı **(3.8)**



Şekil 3.6: Sıkıştırılamayan İdeal Akışkan Hareketi (Cığızoğlu, 2005).

Biriken Akım Miktarı = $\frac{\partial h}{\partial t}2dx$ **(3.9)**

Giren Akım Miktarı = $\left(u-\frac{\partial u}{\partial x}dx\right)\left(h-\frac{\partial h}{\partial x}dx\right)$ **(3.10)**

Çıkan Akım Miktarı = $\left(u+\frac{\partial u}{\partial x}dx\right)\left(h+\frac{\partial h}{\partial x}dx\right)$ **(3.11)**

Yukarıdaki ifadeler (3.8) denkleminde yerlerine yazılırsa şu denklem elde edilir:

$$\frac{\partial h}{\partial t}2dx=\left(u-\frac{\partial u}{\partial x}dx\right)\left(h-\frac{\partial h}{\partial x}dx\right)-\left(u+\frac{\partial u}{\partial x}dx\right)\left(h+\frac{\partial h}{\partial x}dx\right) \quad \textbf{(3.12)}$$

Buradan bir boyutlu, zamana bağımlı süreklilik denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial t}=0 \quad \textbf{(3.13)}$$

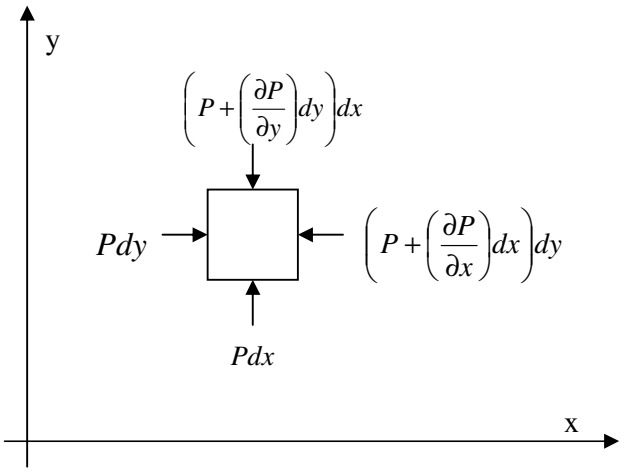
Süreklilik denklemi iki boyutlu olarak şu şekilde yazılır:

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x}+\frac{\partial(vh)}{\partial y}+\frac{\partial h}{\partial t}=0 \quad \textbf{(3.14)}$$

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

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x}+\frac{\partial(vh)}{\partial y}+\frac{\partial \eta}{\partial t}=Q \quad \textbf{(3.15)}$$

Şekil 3.7'de iki boyutlu ideal bir akışkan hareketi tanımlanmıştır. Bu şekilde $m=\rho dxdy$ kütlesi, belirli bir P basıncına maruzdur.



Şekil 3.7: İki Boyutlu İdeal Akışkan Hareketi (Cığızoğlu, 2005).

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

$$Fx = a_x dm \quad \textbf{(3.16)}$$

$$Fy = a_y dm \quad \textbf{(3.17)}$$

$$Fx = Pdy - \left(P + \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)dx\right)dy + X\rho dxdy \quad \textbf{(3.18)}$$

$$Fx = \left(-\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)dm + Xdm \quad \textbf{(3.19)}$$

$$a_x dm = \left(-\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)dm + Xdm \quad \textbf{(3.20)}$$

$$a_x = \frac{du}{dt} \quad \textbf{(3.21)}$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\frac{dx}{dt} + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\frac{dy}{dt} \quad \textbf{(3.22)}$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)u + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)v \quad \textbf{(3.23)}$$

$$Fy = Pdx - \left(P + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) dy \right) dx + Y\rho dxdy \tag{3.24}$$

$$Fy = \left(-\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) dm + Ydm \tag{3.25}$$

$$a_y = \frac{dv}{dt} \tag{3.26}$$

$$a_y = \frac{\partial v}{\partial t} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{dx}{dt} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{dy}{dt} \tag{3.27}$$

$$a_y = \frac{\partial v}{\partial t} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) u + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) v \tag{3.28}$$

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

$$\overbrace{\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{lokal} + \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) u + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) v}_{konvektif}}^{ivme} = \overbrace{\underbrace{\left(-\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)}_{basın\varsigma} + \underbrace{X}_{kütle}}^{kuvvet} \tag{3.29}$$

$$\overbrace{\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{lokal} + \underbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) u + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) v}_{konvektif}}^{ivme} = \overbrace{\underbrace{\left(-\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)}_{basın\varsigma} + \underbrace{Y}_{kütle}}^{kuvvet} \tag{3.30}$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) u + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) v = \left(-\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + X + \underbrace{\upsilon_T \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)}_{viskozite} \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) u + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) v = \left(-\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) + Y + \underbrace{\upsilon_T \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)}_{viskozite} \tag{3.32}$$

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

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{lokal}+\underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)u+\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)v}_{konvektif}=\underbrace{(-g)\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)}_{basinc}+\underbrace{fv}_{koriolis}\underbrace{-gu\left(\frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{hC^2}\right)}_{sürtünme}+\underbrace{kW_x|W|}_{rüzgar}+\underbrace{\frac{Q(u-u_0)}{h}}_{kaynak\ terimleı} \qquad \textbf{(3.33)}$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{lokal}+\underbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)u+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)v}_{konvektif}=\underbrace{(-g)\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)}_{basinc}+\underbrace{fu}_{koriolis}\underbrace{-gv\left(\frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{hC^2}\right)}_{sürtünme}+\underbrace{kW_y|W|}_{rüzgar}+\underbrace{\frac{Q(v-v_0)}{h}}_{kaynakterimler} \qquad \textbf{(3.34)}$$

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^2/s) : Yerçekimi ivmesi,

h (m) : Su derinliği,

η (m) : Su seviyesindeki değişim,

f (-) : Koriolis parametresi,

C ($m^{1/2}$/s) : Chezy sürtünme katsayısı,

k (-) : Rüzgar şiddeti katsayısı,

W (m/s) : Yatay yöndeki rüzgar hızı,

W_x (m/s) : x yönündeki rüzgar hızı,

W_y (m/s) : y yönündeki rüzgar hızı,

Q (m^3/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 [7].

4. TSUNAMİ

4.1 Giriş

Şöyle bir geçmişe baktığımızda yeryüzündeki destanların büyük bir kısmı doğal afetlere dayanmaktadır ve bu öyküler su baskınları üzerinedir. Nuh Tufanı, Atlantis ve Gılgamış Destanı gibi birçok öykü hep suların gücüyle ilgilidir [27].

Leonardo Da Vinci, 1504 yılında tamamladığı teknik notlarında, 1489 yılında, Adalya Körfezi'nde denizin yarılarak sularının çekildiğini, sonra tekrar karaya doğru ilerlediğini ve bu sırada oluşan büyük dalgaların da kıyıyı istila ettiğini belirtmektedir. Bu ifade tsunamiyi anlatmaktadır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) desteği ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Afet İşleri Genel Müdürlüğü ve Japonya'nın Tohoku Üniversitesi ile ortaklaşa yürütülen çalışmada Ege kıyılarında Vinci'nin ifade ettiği 1489 yılındaki olayın izleri Dalaman (Muğla) kıyılarında bulunmuştur. Deniz, o yıllarda Dalaman deltasının bir bölümünde, bir kez olmak üzere kıyıdan 250 m kadar içeriye ilerlemiştir. Bu doğal afetin tsunami olduğu, alınan örneklerin Japonya'da yapılan analizleri sonucunda belirlenmiştir [38].

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. Orta çağda İbni Sina ve Omar Al Alam da bu görüşün üzerinde durmuştur. Aynı görüş Darwin ve diğer araştırıcılar tarafından paylaşılmıştır. Tsunami konusunda en önemli çalışmaları doğal olarak bundan en çok zararı gören Japonlar yapmıştır. Orta doğuda tsunamiye ilişkin ilk bilgiler günümüzden 4000 yıl öncesine dayanan Ugarit ve günümüzden 3370 yıl öncesine dayanan Ras Samara'da bulunan tabletlerde yazılıdır [27].

Tsunami sözcüğü literatüre 1896 yılında girmiştir. 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 tsunami

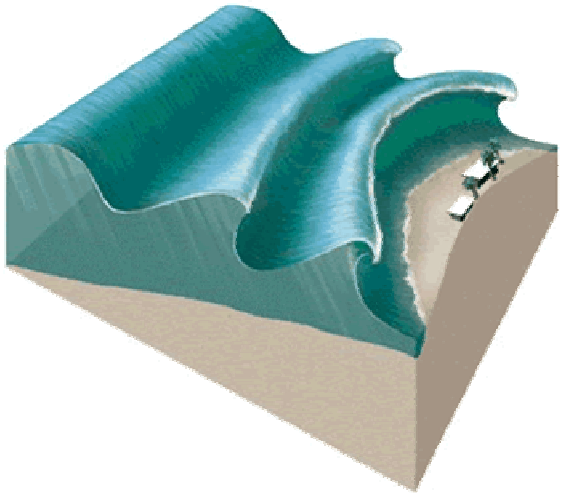
nedeniyle afete uğradıklarını söylemişlerdir. Tsunami sözcüğü böylece ilk defa 1896 yılında bütün dünya dillerine girmiş ve Japonya'daki Meiji Büyük Sanriku tsunamisinden sonra kullanılmaya başlamıştır [38].

Tsunami sözcüğü Çince kaynaklı olup, Japoncada liman anlamına gelen "tsu" ve dalga anlamına gelen "nami" sözcüklerinin birleşiminden oluşarak, "liman dalgası" anlamında kullanılmaktadır ve "tunami" 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 Doç Dr. Ahmet Cevdet Yalçıner tarafından hem dalga hareketini temsil etmesi, hem de deprem kelimesi ile uyumluluk göstermesi açısından "depreşim dalgası" terimi kullanılmıştır. Bu çalışmada ise terminoloji olarak tsunami kelimesi kullanılacaktır.

4.2 Tsunaminin Fiziksel Özellikleri

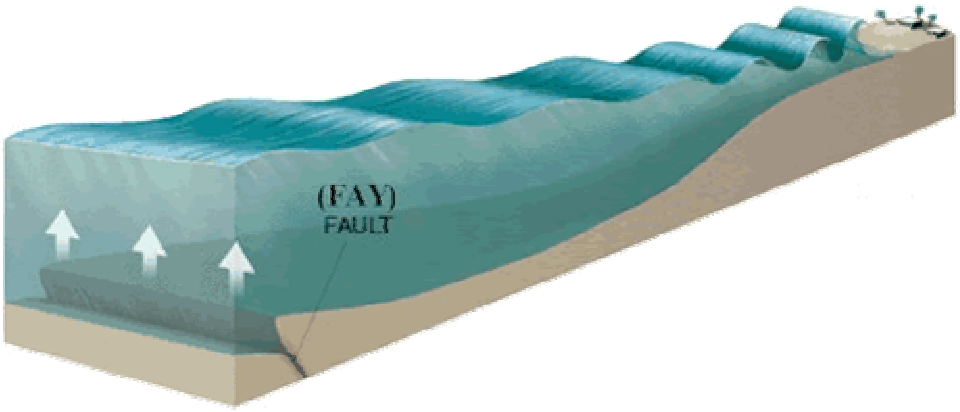
4.2.1 Tsunami tanımı ve oluşumu

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 (Şekil 4.1).



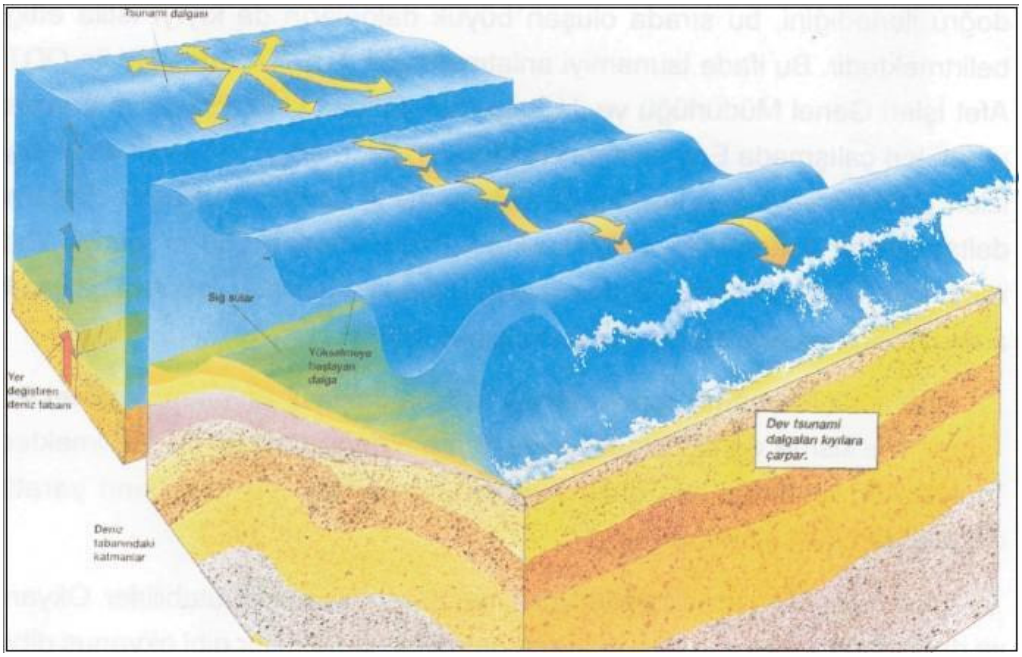
Şekil 4.1: Tsunami Sonucundaki Su Hareketi [53].

Bunların dışında deniz altında yapılan nükleer denemelerin de tsunamilere sebep olabileceği bilinmektedir. Tsunamiler genellikle yer kabuğunun kırılmasından kaynaklı yer değiştirmeden ya da fay hareketinden dolayı oluşmaktadır. Bu olaylar okyanus veya deniz yüzeyinde ani su seviyesi değişimlerine sebep vermektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Tsunami Sonucu Deniz Yüzeyindeki Su Seviyesi Değişimi [53].

Tsunami, rüzgar sebebi ile oluşan diğer dalgalardan çok farklıdır. Bu dalgalar uzun periyotlu ve uzun dalga boylu dalgalardır ve periyotları 5–60 dakika arasındadır. Uzun dalga boyları nedeniyle tsunamiler sığ su dalgası gibi hareket ederler. Tsunami, ay ve güneşin çekimine bağlı olarak gelişen gel-git dalgalarından da ayrılmaktadır.



Şekil 4.3: Tsunami Oluşum Evreleri.

4.2.2 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 yarattığı 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 farklılıklar 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 olabilecekken, bazı durumlarda ise ikinci, üçüncü hatta yedinci dalgada maksimum yükselme gözlenebilir. Bu durum gelen dalga sayısına da bağlıdır.

Kıyı yapılarına zarar verebilecek güçte olan bu dalgalar, 4 m/s hızla koşan bir insandan daha hızlıdır. Bu nedenle aşırı su çekilmesi gibi değişik durumların olduğu kıyı bölgelerinde daha dikkatli davranmak gerekir.

4.2.3 Tsunaminin ilerleme hızı ve sığlaşma etkisi

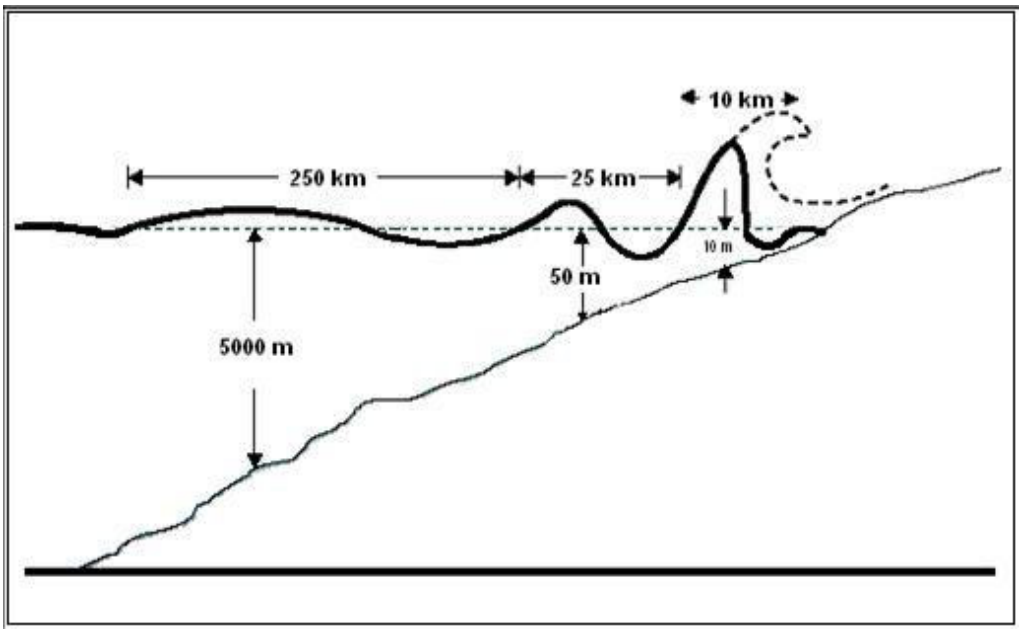
Tsunaminin hızı bulunduğu derinliğin karekökü ile doğru orantılıdır ve (1.2b) denklemindeki $c=\sqrt{gh}$ formülü ile ifade edilir. Burada c, tsunaminin hızını, h, tsunaminin bulunduğu derinliği ve g, yerçekimi ivmesini simgelemektedir. Derin sularda hızlı, sığ sularda yavaş hareket eden bu dalgalar uzun periyotlu olup, dalganın altında bulunan su moleküllerinin birbirini itmesi ile hareket ederler.

Normal okyanus dalgaları ortalama 100 m dalga uzunluğuna sahip iken tsunamiler için bu dalga uzunlukları 100 km'den daha büyük değerlere çıkabilmektedir. Ortalama okyanus derinliğinin 3–4 km arasında olduğu göz önüne alınırsa, su derinliği h'nin, dalga boyu L'ye oranı h/L=4/100=1/25 olarak elde edilir ki; bu da açık denizlerde bile tsunamileri uzun dalga olarak sınıflamak için yeterlidir.

Suyun en derin olduğu açık deniz bölgelerinde tsunaminin hızı saatte 900 km veya daha fazla olabilir. Açık denizlerde böylesine yüksek hızda ilerleyen bu dalgalar, özellikle uzun dalga boyları ve nispeten küçük dalga yükseklikleri nedeni ile açık denizlerde bulunan gemiler tarafından fark edilmemektedir. Gemi boyları, tsunaminin dalga boyuna göre çok küçük olduğundan, açık denizde tsunami ile karşılaşan bir gemi bunun farkında olmadan uzun dalga üzerinde yüzebilir.

Tsunamiler sığ bölgelere yaklaştıkça olay tamamen değişmektedir. Hız ve su derinliği arasındaki ilişkiden dolayı, dalgalar sığ kıyı sularına eriştiklerinde birbirlerinin üzerine yığılır biçimde aniden yavaşlarlar. Bu da dalga yüksekliğinin sakin su seviyesinden çarpıcı bir biçimde artmasına neden olur. Geçmişte yaşanmış tsunamilerde bu yüksekliğin 30 hatta 40 metrelere ulaştığı belgelenmiştir.

Gittikçe sığlaşan kıyı bölgelerine giren bir tsunami iki temel değişikliğe uğrar: dalga boyu kısalır, buna karşın dalga yüksekliği artar. Şematik olarak Şekil 4.4'te bu değişim gözlenebilir.



Şekil 4.4: Sığ Bölgede Dalga Hareketinde Meydana Gelen Değişme.

Bu şekilde görülen sığlaşma etkisi enerji akısının korunumu ilkesi ile incelenebilir. Bu ilkeye göre, bir dalganın toplam enerjisi ile bu dalganın grup hızının çarpımından elde edilen enerji akısı değeri sabittir. Bu değer (1.21) denklemindeki formül ile ifade edilmişti. Böylece dalga yüksekliğinin sığlaşma sonucunda artma miktarı hesaplanabilir.

Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalar, sığlaşma etkisinin derin sudaki dalga yüksekliğini yaklaşık 5 katı bir değere çıkarabildiğini göstermiştir. Zaten tsunamilerin en tehlikeli ve zarar verici özelliği de budur.

4.3 Tsunami Türleri

Tsunamiyi oluşturabilecek nedenler, tsunaminin tanımı içerisinde yapılmıştı. Bu nedenleri bir sınıflandırma biçiminde ayırarak tsunami türleri belirlenmek istenirse, 5 farklı oluşumdan söz edilebilir [52]:

- Deniz tabanı depremi tsunamisi,
- Deniz tabanı çöküntüsü tsunamisi,
- Deniz tabanı heyelanı tsunamisi,
- Deniz tabanı volkanizması tsunamisi,
- Dünya dışı sebeplerden oluşabilecek tsunamiler.

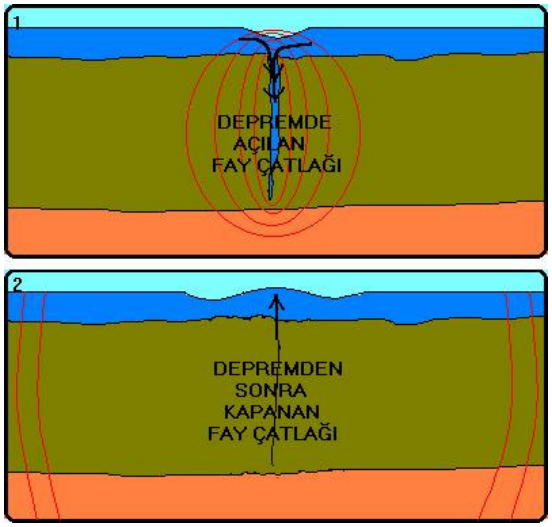
4.3.1 Deniz tabanı depremi tsunamisi

Bu tür tsunamiler deniz tabanındaki fayların harekete geçmesi sonucunda oluşur. Deprem sebepli olan bu tsunamiler, deniz tabanının kırılması ile kendisini meydana getiren deprem ile aynı yerde meydana gelirler (Şekil 4.5).

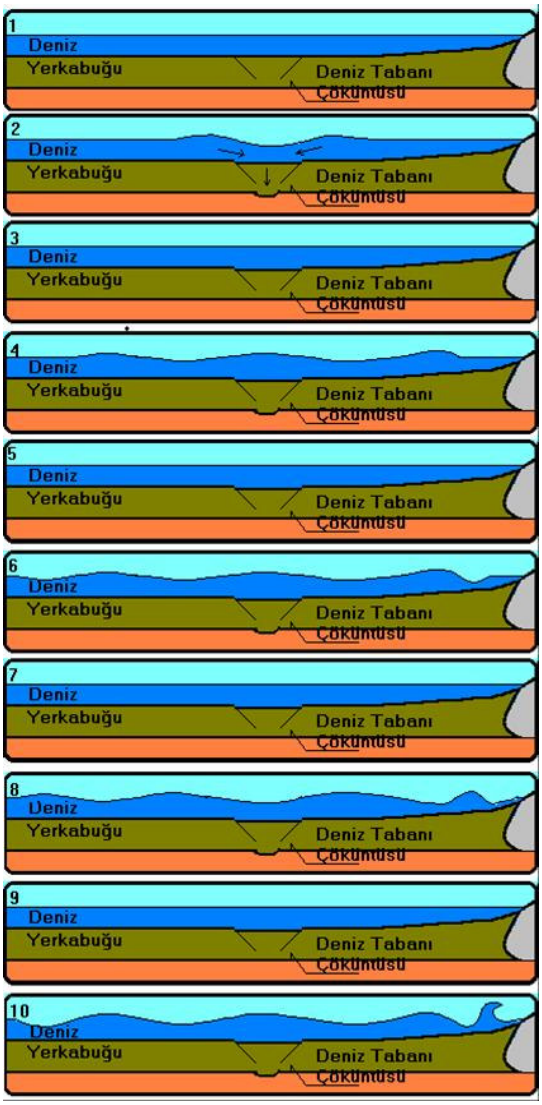
Ancak bazen göller ve lagünler gibi kapalı su alanlarında da tsunami benzeri su yüzeyi salınımları olabilir. Salınım denilen bu olaylar, depremden oldukça uzak bölgelerde görülebilir. 1964 yılında Alaska Depreminin sonucu olarak, Meksika Körfezi'nde meydana gelen salınım, kıyı şeridine büyük zarar vermiştir.

4.3.2 Deniz tabanı çöküntüsü tsunamisi

En tehlikeli olan tsunami türlerinden biridir. Özellikle gerilim rejimi altındaki deniz tabanlarında meydana gelir (Şekil 4.6).



Şekil 4.5: Deniz Tabanı Depremi Tsunamisi (Kaynak, 2002).

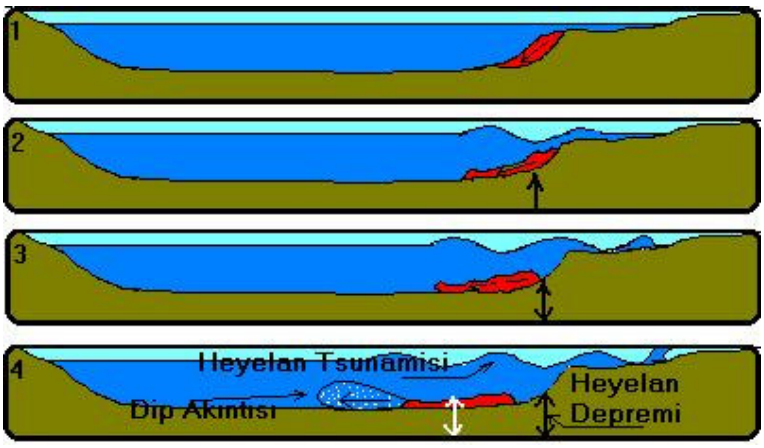


Şekil 4.6: Deniz Tabanı Çöküntüsü Tsunamisi (Kaynak, 2002).

4.3.3 Deniz tabanı heyelanı tsunamisi

Bu tür için toprak kayması terimi, bu kategorideki birçok olay için uygun bir isimlendirme değildir. Bazı durumlarda kayma alanlarındaki kütlenin hareketi tsunami üretmek için yeterli olmasına rağmen, heyelan veya su akışına daha yakın mekanizmalar ile katı madde ya da kaya kütlelerinin hızlı hareketini içerirler. Bu nedenle deniz tabanı veya denizaltı heyelanı kullanımı daha uygundur.

Deniz tabanında meydana gelen heyelan, büyüklüğüne göre değişen boyutlarda tsunami üretebilir ve büyüklüğüne göre dip akıntısına da sebep olabilir (Şekil 4.7). İki farklı tsunami oluşturma mekanizması vardır. Literatürde tek kutupsal mekanizma ve çift kutupsal mekanizma şeklinde de geçmektedir. İlkinde, heyelan, denizaltı materyallerini bir yerden bir yere hareketinin içerirken, bu hareketin tersi yönde tsunami üretir. Diğerinde ise, karadan denize doğru olan ve denizin içerisine doğru giren heyelanlar, suyu aynı yönde iterler; ancak hareket eden kütlenin tamamen suya batması durumunda ters yönlü akış oluşturur. Bu tür heyelanlar suya batma sırasında, suyu bu şekilde yatay olarak iterek tsunami üretirler ve oldukça tehlikelidirler.



Şekil 4.7: Deniz Tabanı Heyelanı Tsunamisi (Kaynak, 2002).

4.3.4 Deniz tabanı volkanizması tsunamisi

Sıcak küller, sıcak gazlar, fumeroller, volkan bombaları, volkan curufları ya yeni bir volkan ağzından, ya da tıkalı bir eski krater bacasından patlayarak, üzerindeki deniz suyunu bir anda yukarıya doğru iter ve tsunami oluştururlar (Şekil 4.8). Bunlardan en korkutucu olanı 1883 yılında Sumatra'da Java Adası açıklarında denizin altından doğan Krakatao Volkanı'nın oluşturduğu tsunamidir. Bu tsunami sonucunda, dalgalar 35 metre yükselerek 33000 kişinin ölümüne neden olmuştur.



Şekil 4.8: Deniz Tabanı Volkanizması Tsunamisi (Kaynak, 2002).

4.3.5 Dünya dışı sebeplerden oluşabilecek tsunamiler

Bu tür tsunamiler dünya dışından gelebilecek meteorların veya gök taşlarının, dünya üzerindeki okyanus ve deniz yüzeylerine düşmesi sonucu oluşabilir. Bu nedenden dolayı oluşabilecek bir tsunami, oluşması muhtemel tsunamilerin en büyüğü ve en tehlikelisidir. Bu meteorların tsunami oluşturmasının en temel sebebi okyanus ve denizlerde açtığı kısa süreli kraterdir. Büyük bir su kütlesinin, oluşan kraterden dışarı doğru fışkırması ve bu kraterin duvarlarının aniden çökmesi, tsunami meydana getirir.

Sayılan tüm bu sebeplerin dışında, tsunamiler bazen insan kaynaklı olarak da oluşabilmektedir. Örneğin 1940 ve 1950'li yıllarda Marshall Adası Bikini atölünde yapılan nükleer denizaltı testleri tsunami meydana getirmiştir.

4.4 Tsunaminin Tırmanma Yüksekliği

Tsunami sonucunda kıyı şeridinde meydana gelen hasarın boyutları, sakin su seviyesi ile suyun yükseldiği en yüksek nokta arasındaki düşey mesafe olarak bilinen tırmanma yüksekliğine bağlıdır. Bu yüzden birçok kıyı yapısının boyutlandırılmasında tırmanma yüksekliği en önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır [18].

Uzun dalgaların tırmanma yüksekliğini belirlemek için, birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Burada bu çalışmalardan bazıları özetlenecektir [18].

4.4.1 Deneysel yaklaşım

Bu konudaki ilk deneysel çalışmayı yapan Hall ve Watts (1953), 1:1 şev eğiminde geçirimsiz yüzeyler için solitary dalga tırmanmasını veren aşağıdaki ampirik bağıntıyı önermişlerdir:

$$\frac{R}{h}=3.1\left(\frac{H}{h}\right)^{1.15} \quad \textbf{(4.1)}$$

Burada, H, dalga yüksekliğini; h, su derinliğini ve R, tırmanma yüksekliğini göstermektedir. Synolakis (1986), düz kıyılarda solitary dalga tırmanmasını teorik ve deneysel olarak incelemiş ve kırılmayan dalgalar için bir yaklaşım teorisi sunmuştur. Tırmanma kanunu olarak da bilinen bu çalışma aşağıdaki ifade ile verilmiştir:

$$\frac{R}{h}=2.831\sqrt{\cot\beta}\left(\frac{H}{h}\right)^{5/4} \quad \textbf{(4.2)}$$

Bu ifadede β, şev eğimidir. Müler (1964) ise solitary dalga tırmanmasını aşağıdaki ifade ile vermiştir:

$$\frac{R}{h}=1.25\left(\frac{\pi}{2\beta}\right)^{0.2}\left(\frac{H}{h}\right)^{1.25}\left(\frac{H}{L}\right)^{-0.15} \quad \textbf{(4.3)}$$

Burada L, dalga uzunluğunu göstermektedir. Pelinovsky ve diğerleri (1999), sığ su denklemlerini kullanarak, farklı enkesitli körfezde düşey duvarlar üzerinde tsunami dalgalarının tırmanmasını incelemiştir. Gelen dalganın genliği ve düşey duvarda tırmanma yüksekliği arasında şu bağıntıyı elde etmişlerdir:

$$\frac{R}{\xi_0}=2+\frac{1}{2}\frac{\xi_0}{h} \quad \textbf{(4.4)}$$

Burada ξ_0, dalga genliğidir.

4.4.2 Teorik yaklaşım

Açık denizden sabit derinlikteki üniform eğimli kıyı üzerine gelen iki boyutlu uzun dalga tırmanması göz önüne alındığında, klasik nonlineer sığ su denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta_t+(u(h+\eta))_x=0 \quad \textbf{(4.5)}$$

$$u_t+uu_x+g\eta_x=0 \quad \textbf{(4.6)}$$

Burada η, dalga genliği; u, ortalama derinlikteki hız ve g, yerçekimi ivmesidir. Kıyı çizgisindeki hız sıfır olduğu zaman maksimum tırmanma noktasına ulaşılmıştır. t=0 iken x=X_1 durumunda solitary dalga kullanılarak yüzey profili şu şekilde tanımlanır:

$$\eta(x,0) = \frac{H}{h}\sec h^2\left(\sqrt{\frac{3}{4}\frac{H}{h}}(x - X_1)\right) \quad \textbf{(4.7)}$$

Burada, H, sabit su derinliği; h, dalga yüksekliği, X_1, eğimin ucundan denize doğru olan mesafedir (X_1 = L/2). Çok sığ su şartlarında solitary dalgalar uzun yatay dalga çukuru ve çok dik tepeli bir görünüm alırlar. Bu durumda ardışık dalgalar birbirlerinden bağımsız olarak göz önüne alınabilirler ve dalga periyodu artık dalga özelliklerinin gelişiminde etkin parametre olmaktan çıkar. H/h oranının birinci mertebeden dikkate alındığı denklemler aşağıda verilmiştir:

$$\eta = H\sec h^2\left(\sqrt{\frac{3}{4}\frac{H}{h^3}}(x - ct)\right) \quad \textbf{(4.8)}$$

$$c = \sqrt{ch}\left(1 + 0.5(H/h)\right) \quad \textbf{(4.9)}$$

$$u = \frac{\eta}{h}\sqrt{gh} \quad \textbf{(4.10)}$$

Burada, c, dalga yayılma hızını ifade etmektedir.

5. MARMARA DENİZİ

5.1 Giriş

Marmara Denizi, milyonlarca yıllık jeolojik olaylar sonucunda oluşmuş ve Türkiye sınırları içerisinde kalan tek iç denizdir. Yaklaşık olarak 240 km uzunluğa, 70 km genişliğe ve 11500 km^2'lik bir alana sahip olan Marmara Denizi, belki de stratejik açıdan Türkiye'nin en önemli kıyı bölgelerini oluşturan denizdir [47].

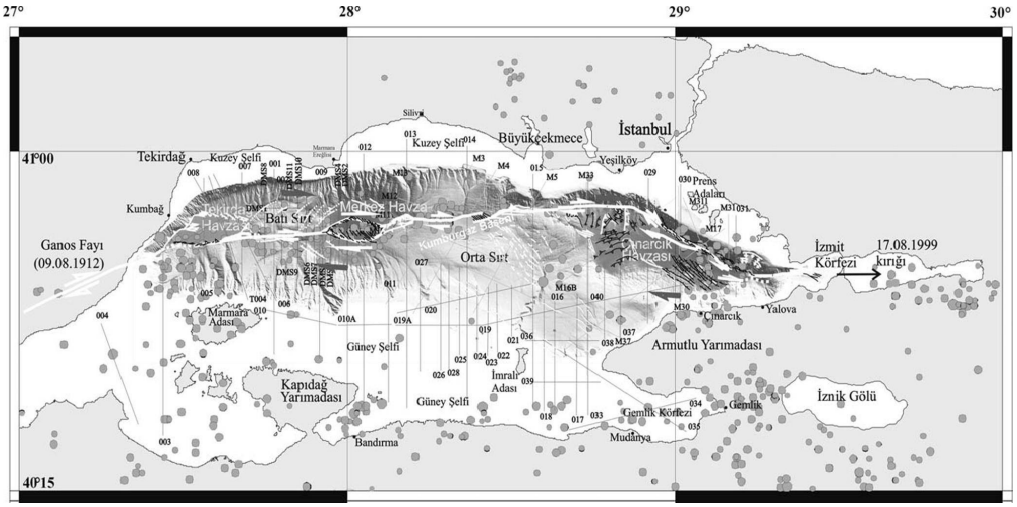
Bölgenin öneminin daha iyi anlaşılması açısından bazı rakamlar verilecek olursa: Türkiye'nin ekonomik faaliyetleri, neredeyse sanayi yükünün tamamı Marmara Bölgesi şehirlerine dağılmaktadır. Resmi rakamlara göre ülke nüfusunun %24'ü Marmara Bölgesi'nde yaşamaktadır; yine ülkedeki banka mevduatlarının %49'u, bütçe gelirlerinin %59'u ve gayri safi milli hasılanın %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 [29].

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.

Çalışmanın bu bölümünde, Marmara Denizi'nin jeolojisi, batimetrisi ve olası bir depremde tsunami yaratma potansiyeli ile ilgili bilgiler verilecektir.

5.2 Marmara Denizi'nin Jeolojisi ve Batimetrisi

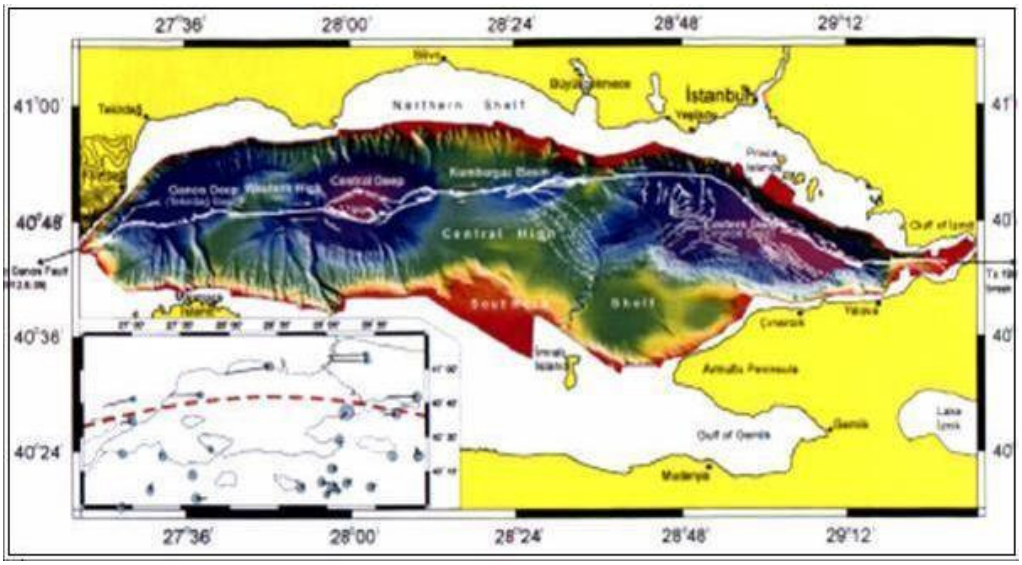
Marmara Denizi, Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) iki önemli kolu üzerindedir. Bunlardan kuzey kol, doğuda İzmit Körfezi'nden Marmara Denizi'ne girer ve batıda Mürefte'de denizden çıkar. İkinci kol ise İznik Gölü güneyinden geçerek Gemlik Körfezi'ne girer ve Marmara Denizi güney kıyısını takiben Kapıdağ Yarımadası'na kadar uzanır, burada denizden çıkarak Biga Yarımadası'nın içerisinden devam ederek Ege Denizi'ne doğru devam eder (Şekil 5.1), [47].



Şekil 5.1: Marmara Denizi Aktif Fay Haritası (İmren ve diğ., 2003).

Türkiye'nin kuzeyi boyunca uzanan Kuzey Anadolu Fay hattı (KAF), Marmara Denizi içerisinde birkaç kola ayrılmıştır ve aktif haldedir. Marmara Denizi'nin doğusunda yer alan ve aktif olan faylar özellikle İstanbul bölgesini yakından ilgilendirmektedir.

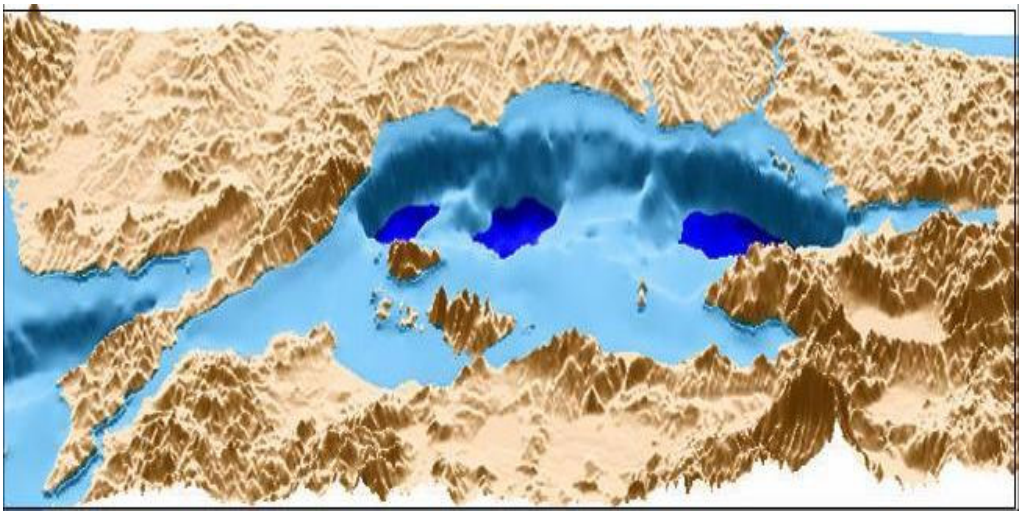
Marmara Denizi'nin batimetrisi konusunda özellikle 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden sonra yapılmış birçok araştırma vardır. Bu çalışmalardan bugüne kadar sonuçları yayınlanmış olan en detaylı batimetri verileri, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD) Çubuklu-I gemisi ile Fransız Ifremer R.V. Le Suroit gemisinin yaptığı araştırmalarla üretilmiştir (Şekil 5.2), [47].



Şekil 5.2: Marmara Denizi'nin Batimetri Haritası (Tüysüz, 2003).

Yakın zamanda üretilen bu batimetri haritaları, Marmara Denizi içerisinde bugüne kadar bilinen çukurluk ve sırtların detay morfolojisine ek olarak çok sayıda yeni yapının da ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu yapılar dik şevler önündeki heyelanlar, çukurlukları besleyen kanallar ve Marmara Denizi içerisine gömülmüş akarsu kanallarıdır. Bu dere yataklarından en belirgin olanı İmralı adası batısından gelerek Çınarcık çukurluğuna uzanan akarsu yatağıdır [47].

Yapılan tüm bu çalışmalar değerlendirildiğinde Marmara Denizi'nin kuzey ve güney kesimlerinin bariz bir batimetrik eğimle birbirinden ayrıldığı görülür. Denizin kuzey tarafında 1200 metreyi geçen derinlikler bulunurken, güney kesiminin 100 metreden daha sığ kıta sahanlığına sahip olduğu görülür. Kuzeydeki derin kesimde birbirinden eşiklerle ayrılmış üç derin çukurluk bulunur (Şekil 5.3). Bunlar batıdan doğuya doğru Tekirdağ, Orta Marmara ve Çınarcık çukurlukları olup, birbirlerinden kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı sırtlarla ayrılmışlardır. Çınarcık çukurluğunda derinlik 1289 metreyi bulmaktadır [47].



Şekil 5.3: Marmara Denizi'nde Bulunan Çukurluklar (Tüysüz, 2003).

5.3 Marmara Denizi ve Tsunami

Marmara Denizi'nde tsunami olup olmayacağı konusundaki tartışmalar son zamanlarda artmıştır. Özellikle 26 Aralık 2004 tarihinde Güney Asya'da meydana gelen tsunami faciasından sonra başta medya olmak üzere Türkiye'de hemen herkes aynı soruyu sormaya başlamıştır: "Acaba Marmara Denizi'nde tsunami olur mu?". Oysa unutulmamalıdır ki; en son 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi sonucunda İzmit Körfezi'nde tsunami oluşmuştur.

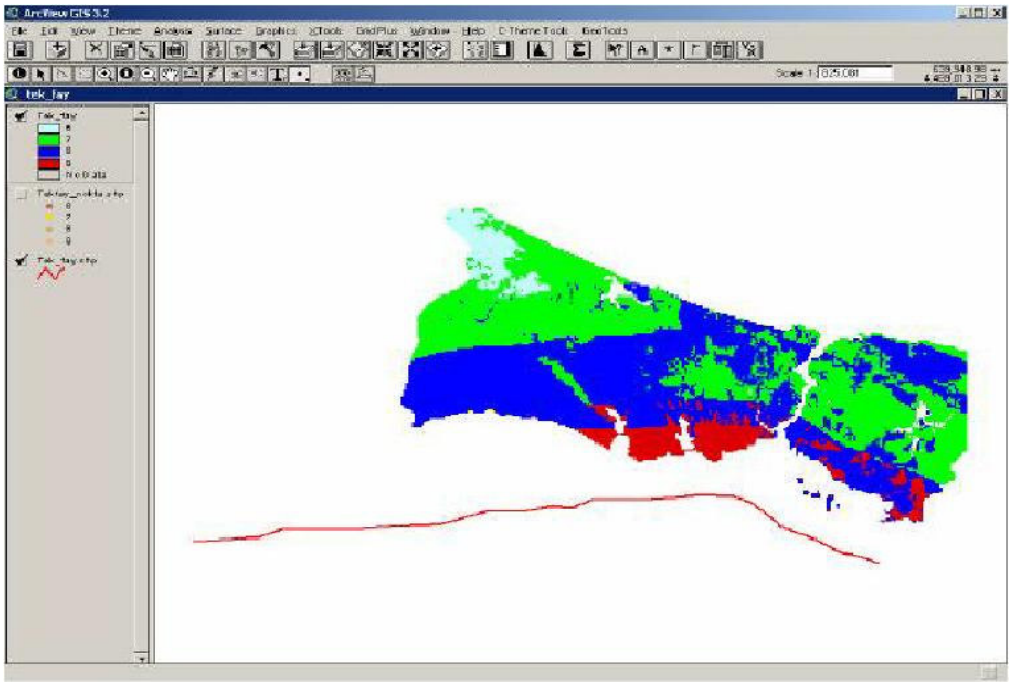
Ülkemizde tsunami konusunda yapılan çalışmaların az sayıda olmasının yanında, tsunami ile ilgili araştırma yapan bilim adamlarının sayısı da azdır. Bu nedenle konu ile ilgili sağlıklı bilgilerin toplum tarafından edinilmesi güç olmaktadır. Tsunamilerin sadece düşey atımlı faylardan meydana gelebileceği düşüncesi ve bazı bilim adamları tarafından yüksek hızlı sismik deniz dalgası olarak ifade edilmesi yeterince doğru tanımlamalar değildir. Bu tür dalgalar, meteor düşmesinden, buzul yuvarlanmasından, volkanik patlamalardan, düşey atımlı faylardan ve denizaltı heyelanlarından oluşabilir.

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 özellikle kıyı bölgeleri bundan etkilenecektir. Tsunami göz önünde bulundurulmadığı durumda da olası depremlerde en çok etkilenecek bölgeler yine kıyı bölgeleri olacaktır. Bunda bölgelerin hangi deprem derecesi içinde yer aldıklarının yanında, fayın kırılma şekli de önemli bir etkendir.

İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü'nden Prof. Dr. Okan TÜYSÜZ tarafından yapılmış olan İstanbul için deprem senaryosu çalışmasında, Marmara Denizi'ndeki tüm fayların birlikte ve tek seferde kırılması durumunda, kırılacak toplam fay uzunluğunun 159 km, deprem büyüklüğünün ise 7,6 ve üzeri olması beklenmektedir. Bu tür bir depremde İstanbul'un sahil şeridindeki geniş bir alan 9 şiddetindeki bir yer sarsıntısına uğrayacaktır. Çalışma sonucunda ortaya çıkan ve oluşması muhtemel eş şiddet haritası Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bu şekildeki kırmızı renkler 9, koyu mavi renkler 8, yeşil renkler 7 ve açık mavi renkler ise 6 değerini ifade etmekte olup, bulundukları bölgelerin depremden hangi şiddette etkileneceğini göstermektedir.

Çalışmalar sonucu, olası depremlerden en çok etkilenmesi beklenen bu kıyı bölgeleri; aynı zamanda, oluşabilecek tsunami sonrasında da etkilenmesi beklenen muhtemel bölgeler arasındadır.

Bu bölümde Marmara Denizi ve tsunami ilişkisine üç açıdan yaklaşılacaktır. Marmara Denizi'ndeki tsunami potansiyeli, Marmara Denizi'nde bulunan potansiyel heyelan alanları ve geçmişte bu denizde meydana gelmiş tsunamiler ilişkiyi belirleyen önemli konulardır.



Şekil 5.4: Marmara Denizi'nde Bulunan Fayların Tek Seferde Kırılması Durumunda Oluşması Beklenen Eş Şiddet Haritası (Tüysüz, 2003).

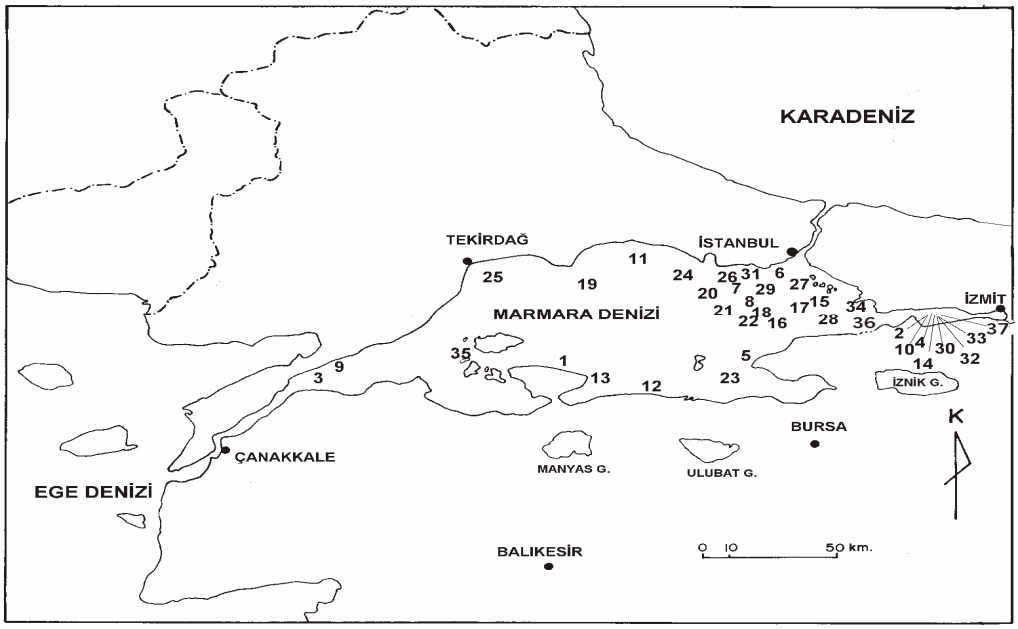
5.3.1 Marmara Denizi'ndeki tsunami potansiyeli

Herhangi bir yerde, geçmiş yıllardaki depremler ve tsunamiler hakkında bilgi edinebilmek için tarihsel belgelerden yararlanılır. Bunun yanında, kıyılarda hendek kazıları ve jeolojik araştırmalar yapılarak çeşitli kanıtlar elde edilebilir. 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 kılardaki 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 oluştuğu 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 5.5'te gösterilmiştir [34].



Şekil 5.5: 120–1999 Yılları Arasında Marmara Denizi'nde Oluşmuş Tsunamiler (Altınok ve diğ, 2000).

17 Ağustos 1999 yılında İzmit'te meydana gelen depreminin, İzmit Körfezi'nde yaratmış olduğu 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.

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 söylense de, 17 Ağustos 1999 yılında İzmit Körfezi'nde deprem sebebi ile tsunami meydana gelmiştir.

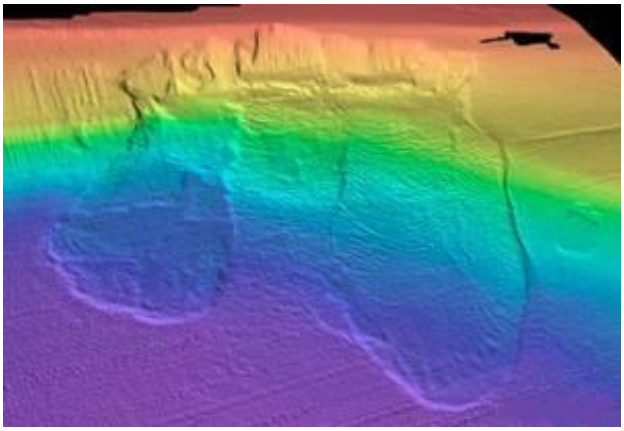
Sonuç olarak bilinmelidir ki; Marmara Denizi'nde sözü edilen büyüklüklerde depremler ve tsunamiler geçmişte olduğu gibi, gelecekte de olacak bilimsel bir gerçektir. Kaçınılmaz olan bu gerçeğin önüne geçilemeyeceği için, deprem ve tsunami zararlarının azaltılması çalışmalarının daha ciddi ve hızlı bir şekilde ele alınması gerekir. "Depremle yaşamaya alışmalıyız" gibi sözler yerine özellikle devlet tarafından disiplinli bir çalışma programının hazırlanması ve süratle uygulamaya konulması gerekir.

5.3.2 Marmara Denizi'ndeki potansiyel heyelan alanları

Tsunamilerin bazıları deniz tabanının aniden deforme olması ve yer değiştirmesiyle oluşur. Tektonik depremler yer kabuğunun deformasyonu ile oluşan bir deprem çeşididir. Bu depremler denizin 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.

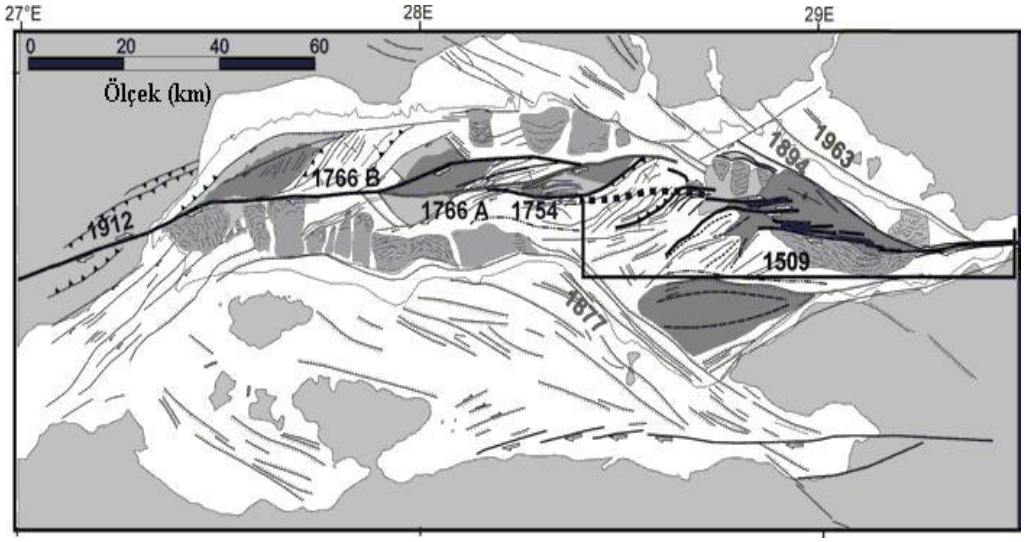
Denizaltı heyelanlarına, deniz tabanındaki eğimli arazilerde çatlaklı kayalar veya granürlü sedimentler olarak sıkça rastlanmaktadır. Bu sediment parçacıkları deprem gibi tektonik erozyona veya sismik şekil değiştirmelere maruz kaldığında gözenekli su basıncında azalma meydana gelir ve sedimentlerin oluşturduğu parçanın dayanımı azalır. Kasırgalar, geçici rüzgar dalgaları, sediment içerisinde birikmiş olan gözeneklerdeki gazların varlığı ve hatta sediment içerisindeki karbonat çözülmesi, sedimentin mukavemetinin azalmasına sebep olabilir.

Bu etkiler kuvvet dengelerini bozar. Kuvvet dengesi bozulduktan sonra hareket başlar ve bu sedimentin veya kayaların hareketi denizaltı heyelanı olarak isimlendirilir (Şekil 5.6). Oluşan denizaltı heyelanı yeteri derecede hızlı hareket ederse tsunami oluşturabilir. Heyelanın hareketlenmesinde sedimentin zayıflığı, oluşmuş olduğu yapının kimyasal ve biyolojik özellikleri, bulunmuş olduğu durum ve geometrik yapısı önemli rol oynar.



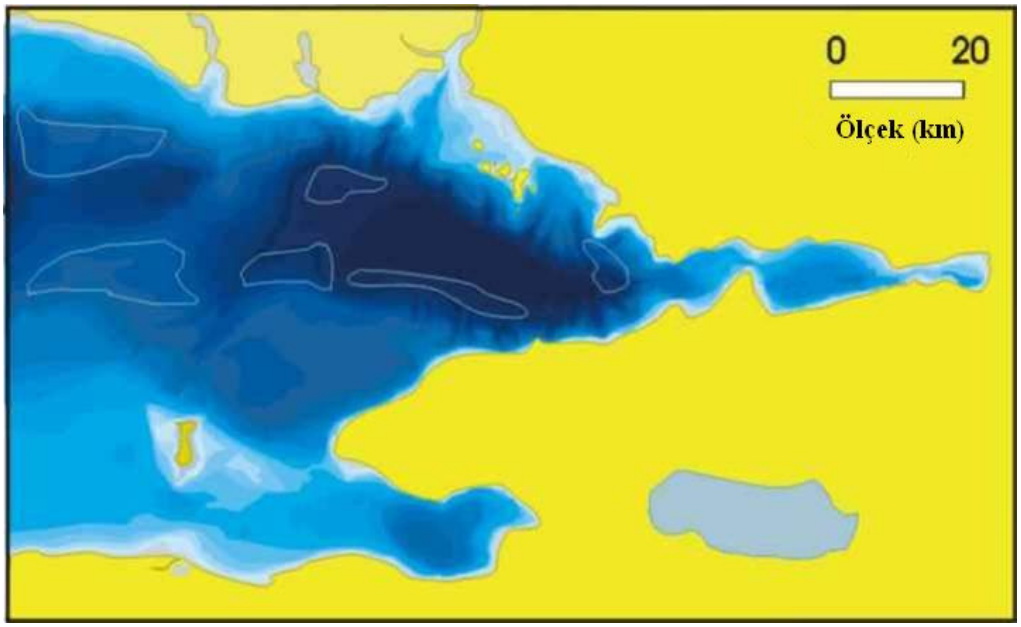
Şekil 5.6: Denizaltı Heyelanının Harekete Geçmesi.

Marmara Denizi için tsunamilerin en önemli oluşturucusu denizaltı heyelanlarıdır. Marmara Denizi içerisinde, güney kesiminde 10, kuzey kenarda ise 7 büyük denizaltı heyelan bölgesi saptanmıştır. Şekil 5.7'deki üzerinde dalgalı çizgiler bulunan gri renkli alanlar Marmara Denizi'nde tsunami yaratabilecek heyelanları göstermektedir.

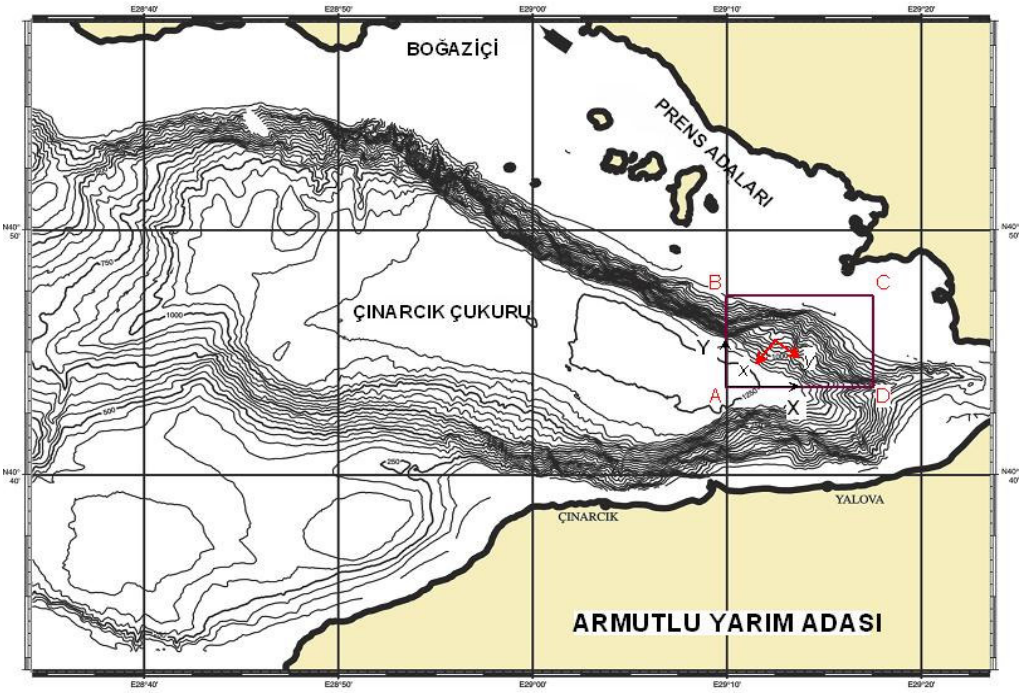


Şekil 5.7: Marmara Denizi'ndeki Potansiyel Heyelan Alanları (Yaltırak, 2005).

Bu heyelan alanlarının en büyükleri doğu Marmara kıyılarına yakın bölgelerde bulunmaktadır (Şekil 5.8). Bunlardan en büyüğü Armutlu Yarımadası önü ile İmralı Yarımadası arasında 17x4 km^2 genişliğinde bir alanı kapsayan heyelan bölgesidir. Diğer bir önemli heyelan alanı ise, Marmara ve İstanbul kıyılarının en yakınında, Tuzla açıklarında bulunan heyelan bölgesidir (Şekil 5.9). Bu çalışma kapsamında, bu bölgedeki heyelanın olası bir deprem sonucunda harekete geçmesiyle yaratabileceği tsunaminin, kıyılarda oluşturacağı dalga genlikleri hesaplanacaktır.



Şekil 5.8: Doğu Marmara Denizi'ndeki Heyelan Alanları (Alpar ve diğ., 2000).



Şekil 5.9: Proje Kapsamında Dikkate Alınacak Heyelan Bölgesi.

Marmara Denizi için en önemli yanılgı, yalnızca fay karakterlerine dayanan modellerle tsunami olmayacağının 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 [29].

5.3.3 Marmara Denizi'nde meydana gelmiş tsunamiler

120–1999 yılları arasında Marmara Denizi'nde oluşmuş tsunamiler Şekil 5.5'de tarihsel sıra ile numaralandırılarak verilmişti. Altınok, Yalçıner, Alpar ve Ersoy tarafından yapılan bu çalışmada, elde edilen bilgiler ışığında geçmişte meydana gelmiş bazı tsunamiler ve tarihlerine ulaşılmıştır. Aşağıda bu çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlar belirtilmiştir [34].

- 120/128: Kapıdağ Yarımadası, İznik 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, İznik 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 m sahile taşmıştır. Prens Adaları civarında ve Büyükçekmece'den Kartal'a kadar olan alanda tsunami gözlenmiştir. Depremin 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 ulaşıp, 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. Depremin 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 kısımda 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.

6. UYGULAMA PROJESİ

6.1 Proje Tanımı

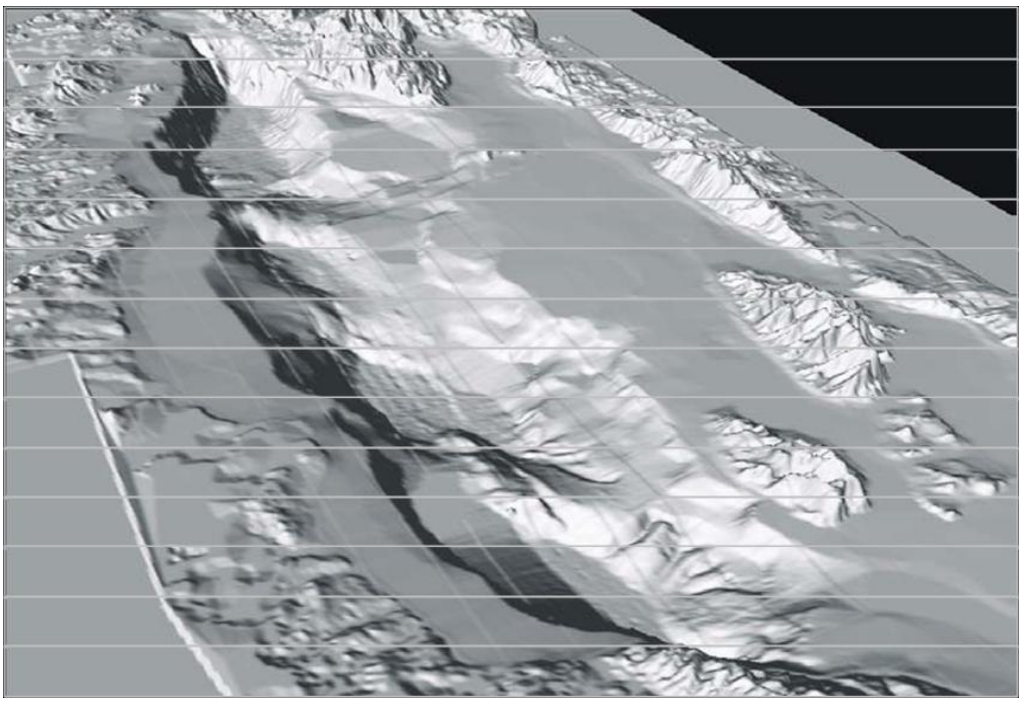
Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK), Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 104Y161 numaralı projenin sonuçlarını içermektedir. Proje kapsamında Marmara Denizi'nde meydana gelebilecek bir depremde, 40º72´ boylam ve 29º29´ enleminde bulunan ve ortalama alanı 4054x3930 m² olarak alınan heyelanın bu bölgede hareket etmesi sonucunda kuzeydoğu Marmara kıyılarında (Şekil 6.1) oluşabilecek tsunamiler incelenmiştir.



Şekil 6.1: Proje Kapsamında İncelenecek ve Modelleme Çalışması Yapılacak Olan Kuzeydoğu Marmara Kıyıları (http://earth.google.com).

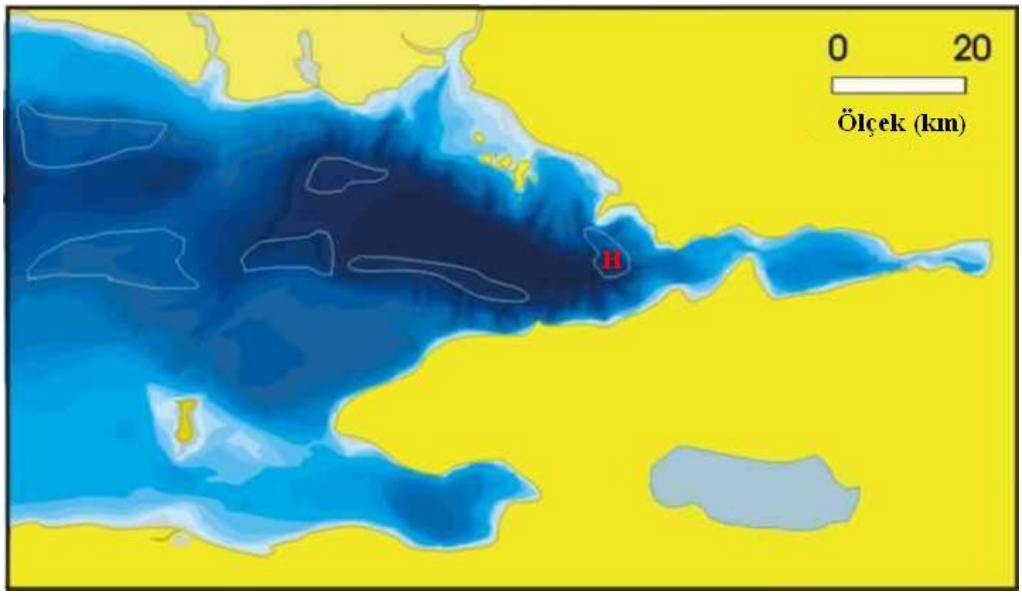
Marmara Denizi'nde 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden sonra ilk araştırmalar Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Sismik-I ve Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD) Çubuklu-I

gemileri ile başlamıştır. Daha sonra TÜBİTAK koordinatörlüğünde Fransız, İtalyan ve Amerikan bilim adamları tarafından, Le Suroit, Odine Finder, Marion Dufraine gibi gelişmiş bilim araştırma gemileri ile araştırmalar yapılmıştır. Bu gemiler Marmara Denizi'nin batimetrisi, sismisitesi ve fay geometrisine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırma gemilerinden elde edilen verilerle ortaya çıkan görüntü Şekil 6.2'deki Marmara Denizi'ni ve çevresinin yüzey görüntüsünü gösteren sayısal üç boyutlu haritadan görülebilir. Bu haritada bakış yönü kuzey-batı yönünden, Trakya üzerinden 10 km yukarıdandır.



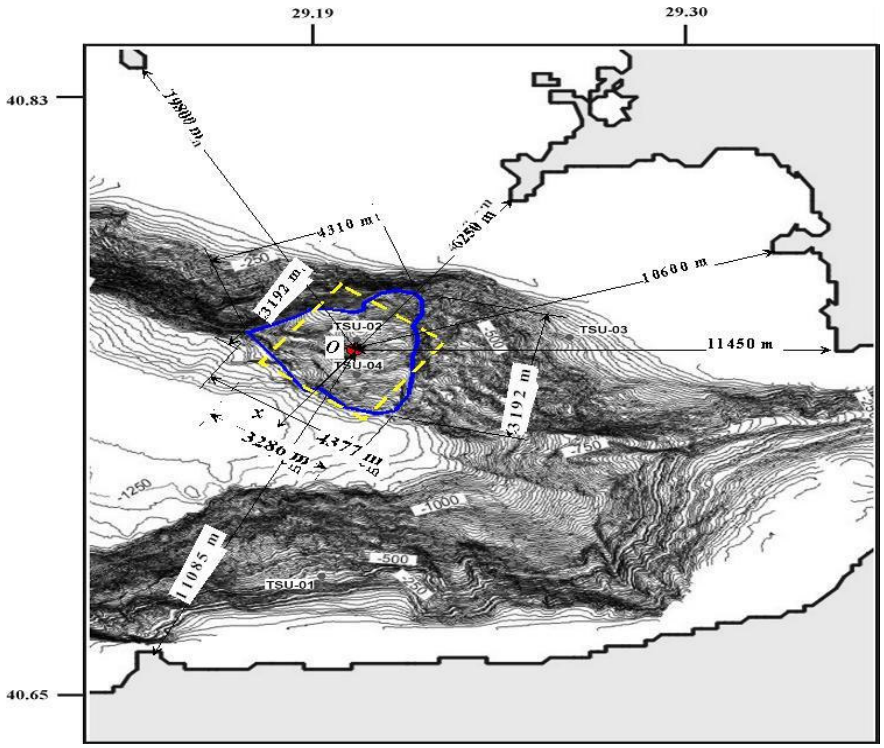
Şekil 6.2: Marmara Denizi'ni ve Çevresinin Yüzey Görüntüsünü Gösteren Sayısal Üç Boyutlu Harita (Yaltırak, 2005).

Çalışmalar sonucunda hazırlanan Marmara Denizi batimetri haritasına göre Marmara Denizi içerisinde, güney kesiminde 10, kuzey kenarda ise 7 büyük denizaltı heyelan bölgesi saptanmıştır. Bu heyelan bölgelerinden, İstanbul ve Marmara kıyılarına yakınlığı açısından, bir tanesi Bakırköy açıklarında, bir tanesi de Tuzla açıklarında olmak üzere önemli iki alan vardır. Proje kapsamında dikkate alınacak olan heyelan bölgesi, 40º72´ boylam ve 29º29´ enleminde bulunan, ortalama alanı 4054x3930 m^2 olarak alınan, Marmara ve İstanbul kıyılarının en yakınında bulunan Tuzla açıklarındaki bölgedir. Heyelan bölgesi Şekil 6.3'teki haritada kırmızı renkli H harfi ile gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Projede Dikkate Alınacak Olan Heyelan Bölgesi.

Heyelan, literatürde mevcut hareket etme senaryolarına göre modellenmiş ve her bir modele göre, heyelana yakın bölgedeki tsunami genlikleri analitik olarak hesaplanmıştır. Analitik hesaplamalar heyelanın ortalama boyutları dikkate alınarak düzgün geometri için yapılmıştır. Şekil 6.4, analitik hesaplamalarda dikkate alınan heyelan bölgesinin ortalama boyutlarını göstermektedir.



Şekil 6.4: Heyelan Bölgesinin Ortalama Boyutları (Hayır, 2005).

Deprem sonucunda hareket etmesi beklenen, 400 m ile 800 m'lik derinlikteki yamaçta bulunan bu heyelanın yakın bölgede oluşturacağı tsunami genlikleri analitik paket program kullanılarak hesaplanmıştır. Yakın bölge için elde edilen tsunami genliklerine ait sonuçlar, dalgaların kıyıya yaklaşması ile beraber kıyı profilinden etkilenmeye başlayacaktır. Bu nedenle kıyı profilinin etkili olmaya başladığı kıyı bölgelerinde, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) dayanan ve Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) analizi yapan nümerik paket program olan TELEMAC ile hesaplamalar yapılmış ve tsunaminin kıyıda oluşturacağı en büyük dalga yükseklikleri bulunmuştur.

Bu iki sistemin birlikte çalışabilmesi için ortak bir sınır belirlenmiştir. Bu sınırda analitik yöntem ile elde edilen sonuçlar, nümerik program ile çözülecek bölgenin başlangıç ve sınır şartlarını oluşturmuştur. Böylece kurulan ağ modelindeki sonlu elemanların dış sınırlarında bulunan her düğüm noktasında tsunami genliklerine ait zaman serileri hesaplanmıştır.

Bu şekilde dünya literatüründe yeni olduğu düşünülen, analitik yöntemle nümerik yöntemin birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Proje için planlanan çalışma programına göre izlenen adımlar;

- Analitik modelin kurulması,
- Batimetri haritasının oluşturulması,
- Sayısal ağ modelinin kurulması,
- Simülasyonların yapılması,
- Sonuçların görüntülenmesi ve yorumlanması

şeklindedir ve her bir adımda birçok bilgisayar programı kullanılmıştır. Analitik ve nümerik modelin kurulması, batimetri haritasının oluşturulması ve düzenlenmesi, simülasyonların yapılması ve sonuçlarının görüntülenmesi için kullanılan paket programların yanı sıra, bazı aşamalarda çözüm için gerekli olan çeşitli yazılımlar yapılmıştır. Kullanılan tüm bilgisayar programları İTÜ bünyesinde lisanlı olarak bulunan programlardır.

Bu bölümde yapılan tüm çalışmalar detaylı olarak anlatılacaktır ve kullanılan programlara ilişkin görüntülere yeterince yer verilmeye çalışılacaktır.

6.2 Analitik Modelin Kurulması

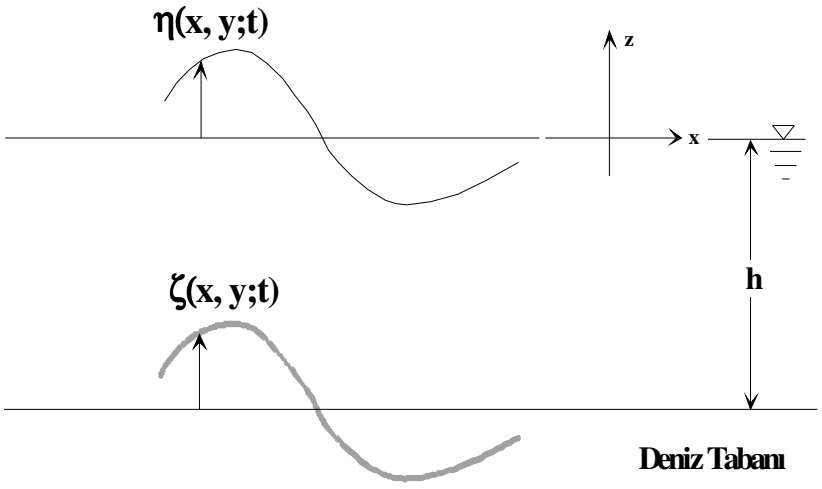
Projenin bu aşamasında analitik yöntem ile ilgili yapılan çalışmalar, TÜBİTAK ÇAYDAG tarafından desteklenen 104Y161 numaralı projenin yürütücüsü olan, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Mekanik Anabilim Dalı öğretim üyesi Doç. Dr. Abdul HAYIR tarafından yapılmıştır. Analitik modelin kurulması ve yönteminin belirlenmesi sırasında, MATHEMATICA paket programı ve yazılımı HAYIR tarafından gerçekleştirilen programlar kullanılmıştır.

Nümerik çözümlere ilişkin teorik bilgiler önceki bölümlerde verilmişti. Burada analitik çözümlere ilişkin teorik bilgilere çok kısa bir şekilde değinilecektir; ancak model ve matematiksel tanımlama, sayısal hesaplar ve sonuçlara ilişkin özet bilgiler verilecektir ki bu sonuçlar nümerik model için bir başlangıç şartı oluşturacaktır.

6.2.1 Model ve matematiksel tanımlama

Çalışmada 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 ($\zeta(x,y;t)$) oluşacak olan su dalgası hareketi ($\eta(x,y;t)$) incelenmiştir (Şekil 6.5), [35].

Çalışmada akışkan için dönen ve viskoz olmayan akış ($\nabla\vec{g}=0$; $\vec{g}$ akışkan hızı) ele alınmıştır. Bu tamamı ile fiziksel olayı karakterize eden hız potansiyelinin ($\phi(x,y,z;t)$) varlığını gösterir. Tsunami oluşumu ve yayılışı yerin elastisesinin sıkıştırılabileceği veya yerkürenin küreselliği ile fazla etkilenmemektedir.



Şekil 6.5: Tsunami Oluşumunun Matematik Modeli (Hayır, 2005).

Hız potansiyeli Laplace denklemini ve sınır koşullarını sağlamalıdır.

$$\nabla^2\phi = 0 \qquad \textbf{(6.1)}$$

Problemin kinematik ve dinamik sınır koşulları;

$$z = \eta(x, y; t)\text{'de} \qquad \phi_z = \eta_t + \phi_x\eta_x + \phi_y\eta_y \qquad \textbf{(6.2a)}$$

$$z = -h + \zeta(x, y; t)\text{'de} \quad \phi_z = \zeta_t + \phi_x\zeta_x + \phi_y\zeta_y \qquad \textbf{(6.2b)}$$

$$z = \eta(x, y; t)\text{'de} \qquad \phi_t + \frac{1}{2}(\Delta\phi)^2 + g\eta = 0 \qquad \textbf{(6.2c)}$$

şeklindedir. Burada sırasıyla t, x ve y değişkenine göre kısmi türevi göstermektedir. (6.1) denklemi lineerleştirilmiş sığ su çözümü Fourier-Laplace dönüşümü yöntemiyle;

$$\bar{f}(\vec{k}; s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_1x}\left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_1x}\left[\int_{0}^{\infty} e^{-st} f(x, y; t)\,dt\right]dx\right]dy \qquad \textbf{(6.3)}$$

olarak elde edilir. Hareket denklemi ve sınır koşullarının dönüşümü ile $\bar{\zeta}(\vec{k}; s)$'den $\bar{\eta}(\vec{k}; s)$ elde edilir. $\bar{\zeta}(\vec{k}; s)$ ve $\bar{\eta}(\vec{k}; s)$ arasındaki bağıntı ise;

$$\bar{\eta}(\vec{k}; s) = \frac{1}{\cosh kh}\frac{s^2}{s^2 + \omega^2}\bar{\zeta}(\vec{k}; s) \qquad \textbf{(6.4)}$$

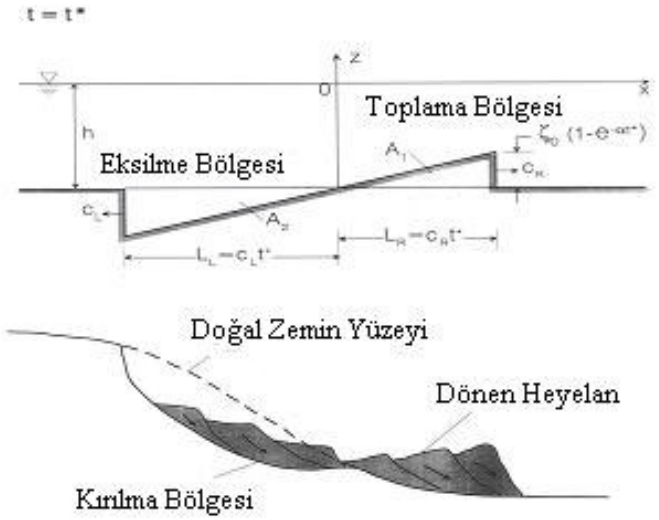
şeklindedir. Dispersiyon denklemi ise;

$$\omega^2 = gk\tanh kh \qquad \textbf{(6.5)}$$

ile ifade edilip, burada ω dalga hareketinin dairesel frekansını göstermektedir.

Şekil 6.6, ($A_1 \neq A_2$ ve $c_R \neq c_L$, karakteristik uzunluk $L_R = c_R t^*$) problem modelini (üst) ve dönen heyelanın sistematik görüntüsünü (alt) göstermektedir. Toplama ve eksilme bölgelerinin genlikleri zamanla x'in lineer bir fonksiyonu olarak derece derece artmaktadır. Toplama bölgesinin en ön kısmında oluşacak olan genlik $\zeta(c_R t, y; t) = \zeta_0(1 - e^{-\alpha t})$ şeklindedir. Bu bölgenin eğimi zamanla derece derece

büyür ve bu bölgenin üst yüzeyi saat yönünde döner. Toplama ve eksilme yüzeyinin son uzunlukları sırasıyla $L_{top} = t^* c_R$ ve $L_{eks} = t^* c_L$ şeklindedir; ayrıca $A_1 = c_R t^* \zeta_0 \left(1 - e^{-\alpha t}\right)/2$ ve $A_2 = c_L t^* \zeta_0 \left(1 - e^{-\alpha t}\right)/2$ yazılabilir. Bu model için eğer $c_R = c_L$ ise kütle korunumu yasası geçerlidir ve model için karakteristik uzunluk $L_R = c_R t^*$ şeklindedir.



Şekil 6.6: Problem Modeli ve Heyelanın Sistematik Görüntüsü (Hayır, 2005).

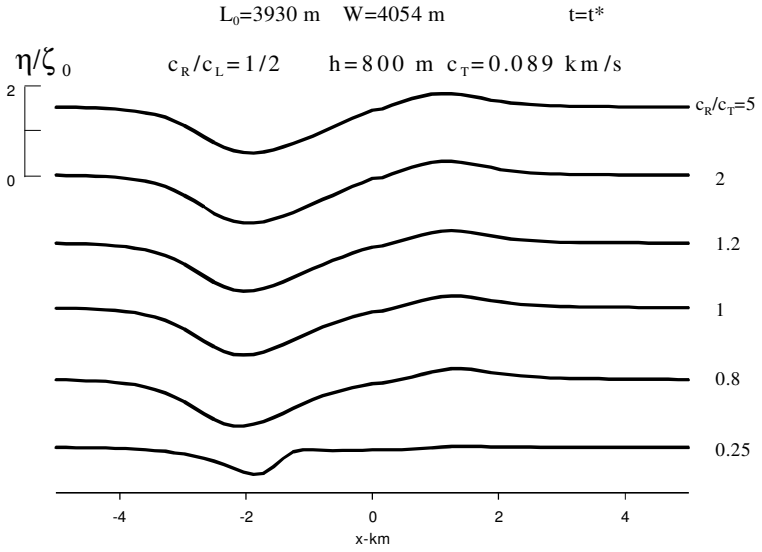
6.2.2 Sayısal hesaplar

Bu heyelandan dolayı oluşabilecek olan tsunamiler çeşitli hareket senaryoları göz önüne alınarak yapılmaktadır. Amaç, belirli büyüklüklere göre simülasyonlar yaparak oluşması muhtemel tsunamileri yakın bölge için bir çerçeve içinde tutabilmektir. Heyelan için oluşturulan matematik modelin, heyelanı yaklaşıklıkla temsil ettiği söylenebilir. Aksi halde kurulacak bir matematik modeli analitik olarak çözmek oldukça güçtür; ancak sayısal yöntemlerle bunu gerçekleştirmek mümkün olabilir. Bunun yanı sıra her ne kadar model yaklaşık bir model ise de tsunaminin fiziksel davranışı hakkında bilgiler içermesi açısından son derece önemlidir.

Yakın bölgeyle ilgili literatürde pek az çalışma mevcuttur. Genellikle tsunami ile çalışan bilim adamları uzak bölge yaklaşımı kullanarak nümerik modellemeler yapmaktadır. Bu çok kaba bir yaklaşımdır. Yapılan çalışmada sayısal veriler kullanılarak elde edilen tsunami büyüklüklerinin kıyı bölgelerinde oluşabilecek etkileri ancak nümerik paket programlar kullanılarak yapılabilir.

Heyelanın kalınlığını belirlemek güç olduğundan dolayı, hesaplar boyutsuz olarak hesaplanmıştır. Kalınlığı belirlendiği takdirde, büyüklükleri boyutlu olarak hesaplamak mümkündür. Ayrıca heyelanın her yerde kalınlığının aynı olduğunu iddia etmek mümkün değildir. Burada ortalama kalınlık dikkate alınmaktadır. Literatürde kalınlığın değişken olduğuna dair çalışmalar mevcuttur.

Şekil 6.7, farklı hızlarla ($0.25 \le c_R/c_T \le 5$) hareket eden heyelanın durduğu anda (t=t*) oluşturacağı, normalize edilmiş tsunami dalga genliklerini ($\eta(x,0;t)/\zeta_0$) göstermekte olup; burada W=4054 m heyelanın ortalama genişliğini ve L_0=3950 m ise heyelanın ortalama boyunu ifade etmektedir.



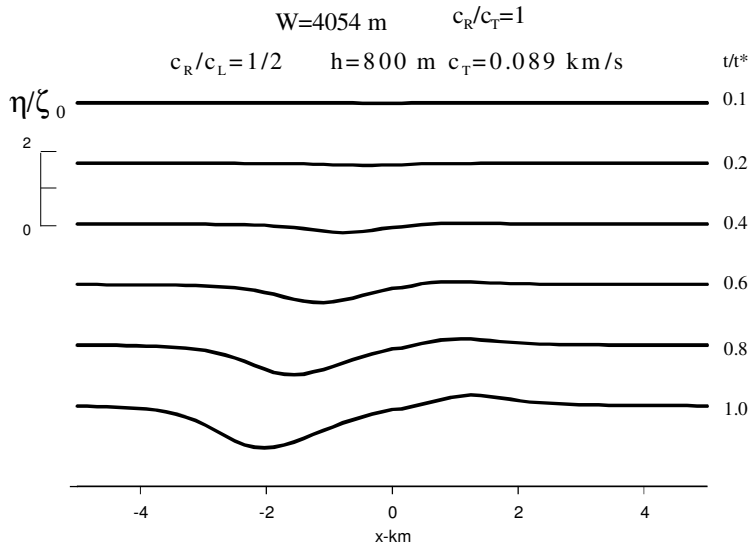
Şekil 6.7: t=t* Anındaki Tsunami Dalga Genlikleri (Hayır, 2005).

Bu şekilden de anlaşılacağı gibi, heyelanın hızı tsunaminin hızına eşit veya daha büyük olduğunda, dalga büyüklüğünde fazla bir değişiklik gözlenmemektedir. Oysa bu oran küçüldüğünde genliklerde bir küçülme olduğu şekilden görülmektedir. Geçmiş yıllarda yapılan benzer çalışmalarda en büyük genliğin, heyelanın hızının tsunaminin hızına yakın olduğu durumlarda meydana gelebileceği gözlenmiştir. Bunun nedeninin heyelanın büyüklüğü ile ilgili olduğu söylenebilir.

Bu şekilden t=14 saniye sonra tsunaminin, Yalova'ya doğru 2 km, Tuzla'ya doğru da 4 km yaklaştığı kolaylıkla hesaplanabilir. Bu süre aynı zamanda heyelanın hareketinin durduğu andır.

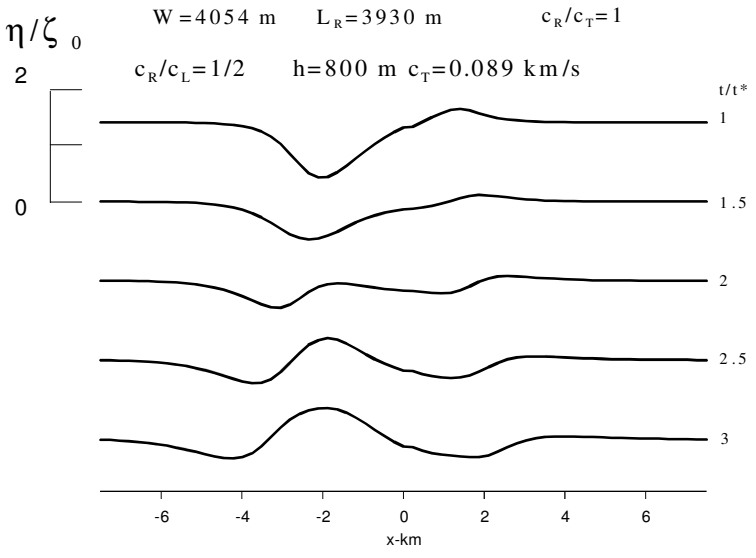
Şekil 6.8, seçilen zaman aralıklarında ($t \le t^*$), $c_R/c_L = 1/2$, $h = 800\ m$ ve $c_T = 0.089\ km/s$ için oluşan tsunami dalga genliklerini ($\eta(x,0;t)/\zeta_0$)

göstermektedir. Burada t* heyelanın hareketinin durduğu andır. W=4054 m heyelanın ortalama genişliğini ve L_0=3950 m ise heyelanın ortalama boyunu ifade etmektedir.



Şekil 6.8: $t \le t^*$ Anındaki Tsunami Dalga Genlikleri (Hayır, 2005).

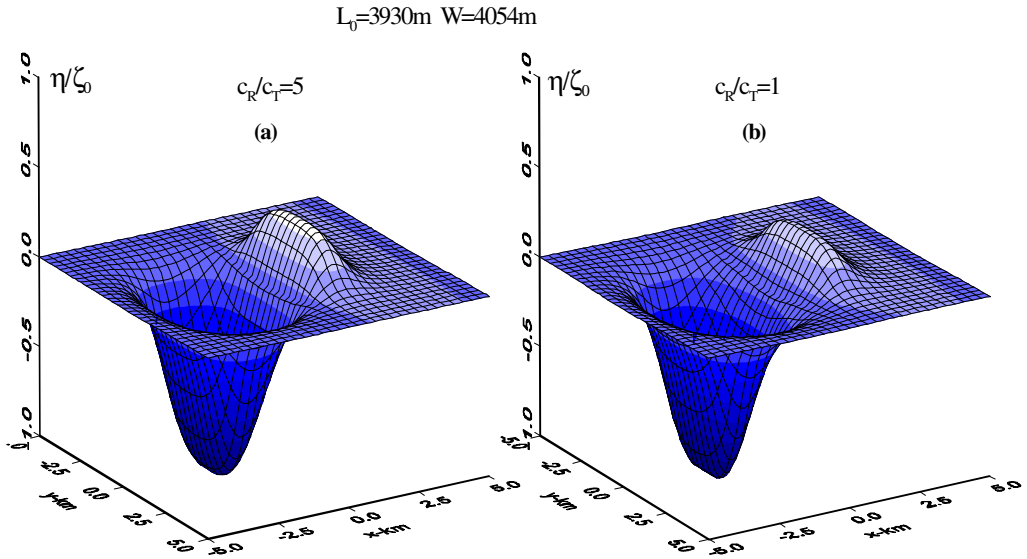
Şekil 6.9, seçilen zaman aralıklarında $(t \ge t^*)$, $c_R/c_L = 1/2$, $h = 800\,m$ ve $c_T = 0.089\,km/s$ için oluşan tsunami dalga genliklerini $(\eta(x,0;t)/\zeta_0)$ göstermektedir. Burada t* heyelanın hareketinin durduğu andır. W=4054 m heyelanın ortalama genişliğini ve L_0=3950 m ise heyelanın ortalama boyunu ifade etmektedir.



Şekil 6.9: $t \ge t^*$ Anındaki Tsunami Dalga Genlikleri (Hayır, 2005).

Bu şekilden t=3t*=42 s sonra dalganın Yalova'ya doğru 4 km, Tuzla'ya doğru ise 6 km yaklaştığı kolaylıkla hesaplanabilir. Şekilden de anlaşılacağı gibi heyelanın hareketi durduktan sonra dalga genliklerinde bir küçülme olmaktadır. Yalnız kıyıya çok yaklaşıldığında kıyı profili etkili olmaya başlamaktadır. Bunun için, bundan sonraki hesaplamalar nümerik modeller kullanılarak gerçekleştirilecektir.

Şekil 6.10a, $\eta(x,0;t)/\zeta_0$, $c_R/c_T = 5, c_L/c_R = 2$ ve $c_R/c_T = 1, c_L/c_R$ için tsunami dalga genliklerinin görüntülerini göstermektedir. W=4054 m heyelanın ortalama genişliğini ve L_0=3950 m ise heyelanın ortalama boyunu ifade etmektedir.

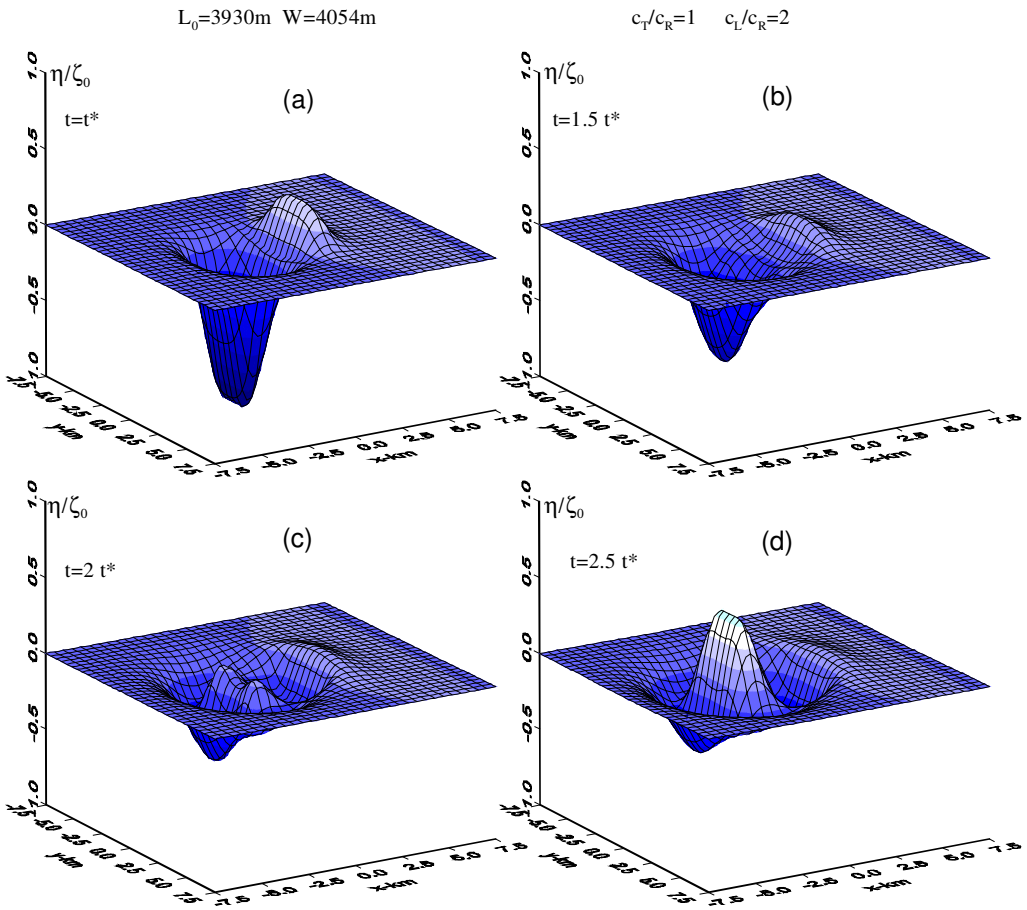


Şekil 6.10a: Tsunami Dalga Genliklerinin Görüntüleri (Hayır, 2005).

Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi; heyelanın hızı, tsunaminin hızına eşit veya büyük olduğunda dalga odaklaşması zor gözlenmektedir.

Şekil 6.10b, $\eta(x,0;t)/\zeta_0$ ve $c_R/c_T = 1, c_L/c_R = 2$ için tsunami dalga genliklerinin görüntülerini göstermektedir. W=4054 m heyelanın ortalama genişliğini ve L_0=3950 m ise heyelanın ortalama boyunu ifade etmektedir. Burada (a), heyelanın hareketinin durduğu zaman olan t=t*, (b), t=1.5t*, (c), t=2t* ve (d), t=2.5t* ifadelerini göstermektedir.

Buradan tsunaminin, heyelanın hareketi durduktan sonra nasıl hareket edeceği ve ne şekil alacağı gözlenebilmektedir. Seçilen büyüklüklerden dolayı Tuzla'ya yönlenen dalga büyüklüğü, Yalova'ya doğru yönlenenden daha büyüktür. Bu da Tuzla bölgesinde dalga etkisinin daha fazla olabileceğinin bir işaretidir.



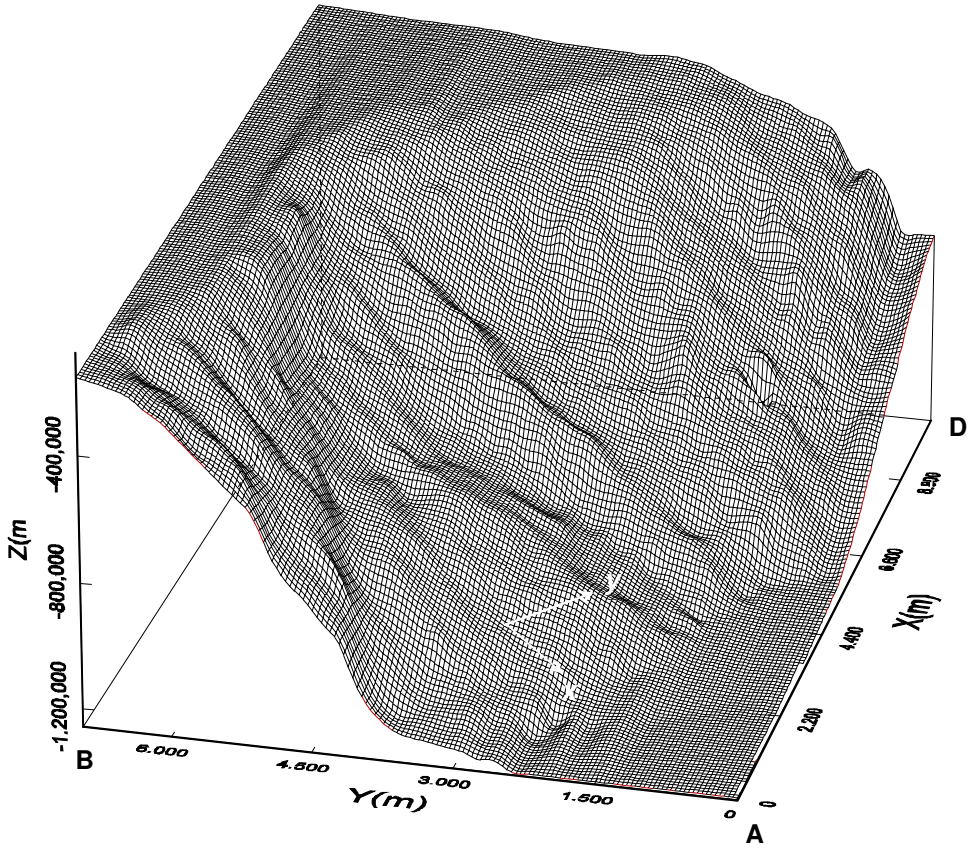
Şekil 6.10b: Tsunami Dalga Genliklerinin Görüntüleri (Hayır, 2005).

6.2.3 Analitik model sonuçları

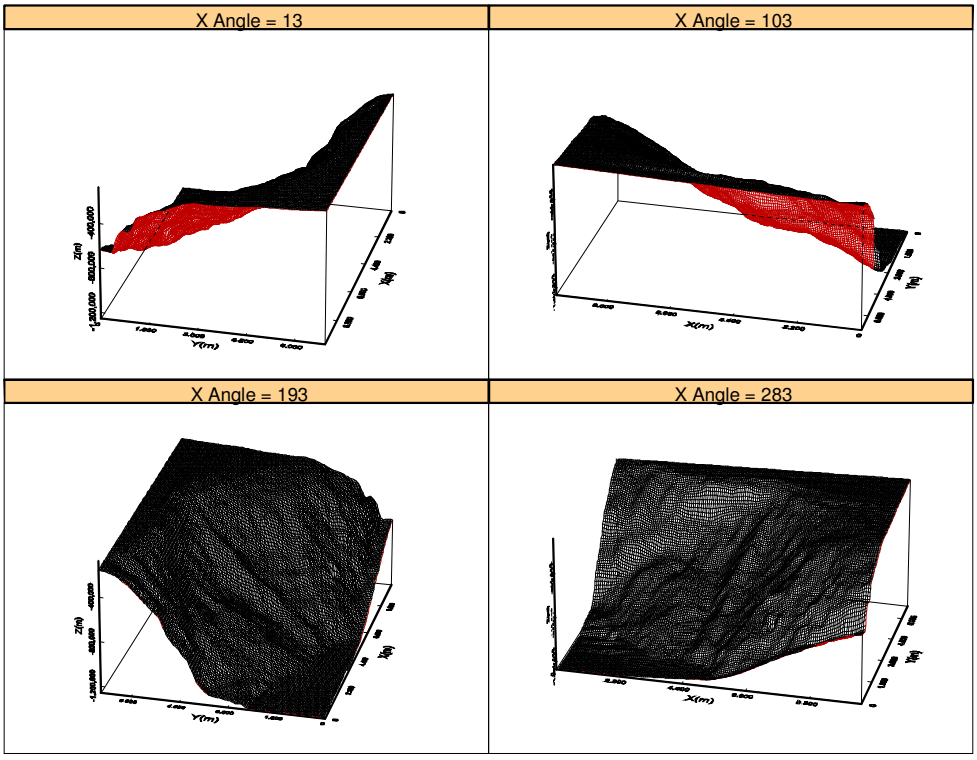
Heyelan için oluşturulan matematiksel model sonucunda, heyelan bölgesine ait sayısal üç boyutlu görüntü Şekil 6.11'deki gibi oluşturulmuştur. Bu modelin çeşitli açılardan üç boyutlu olarak görünüşüne Şekil 6.12'den bakılabilir.

Daha sonraki şekiller ise sırasıyla; t=t*, t=3t*, t=6t* ve t=9t* anındaki üç boyutlu dalga genliklerinin ve dalga hareketinin konuma göre değişiminin iki boyutlu yukarıdan görüntülerini vermektedir.

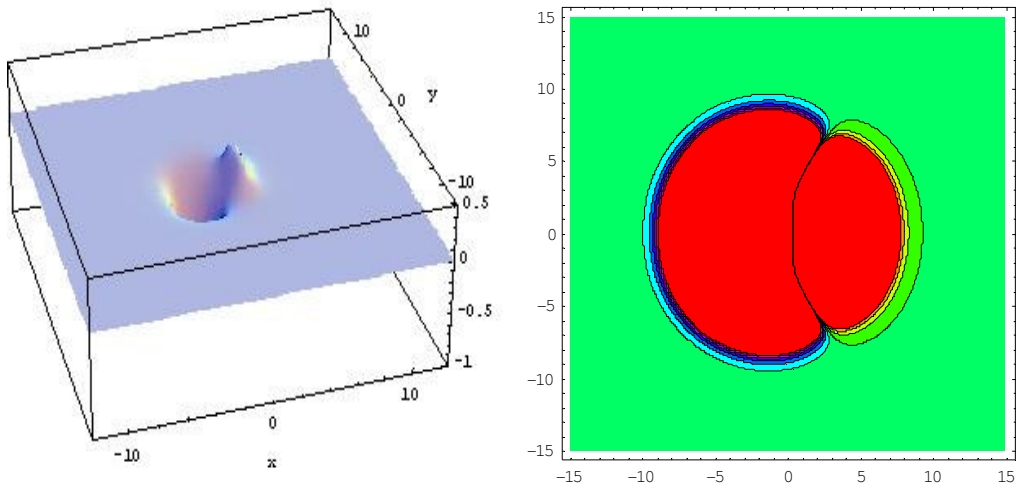
Analitik modelleme sırasında yapılan simülasyonlar sonucunda, deprem sebebi ile harekete geçen heyelanın, yaklaşık olarak t*=14 saniye sonra hareketinin durduğu gözlenmiştir. Modelleme çalışmasında boyutsuz çalışıldığı için, analitik yöntem ile nümerik yöntem arasında belirlenen sınırın bazı noktalarında, yapılan simülasyonlar sonucunda kalınlığı 1 birim olan heyelan bölgesinin hareketi sonucunda 0,4 birimlik dalga genlikleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar nümerik modelleme için girdi kabul edilerek kıyı bölgesindeki net sonuçlar elde edilecektir.



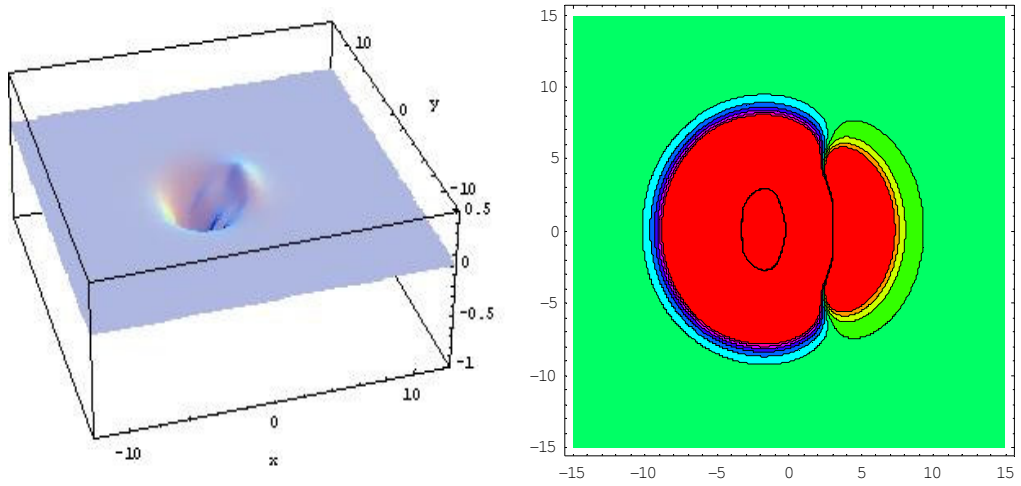
Şekil 6.11: Heyelan Bölgesinin Sayısal Üç Boyutlu Modeli.



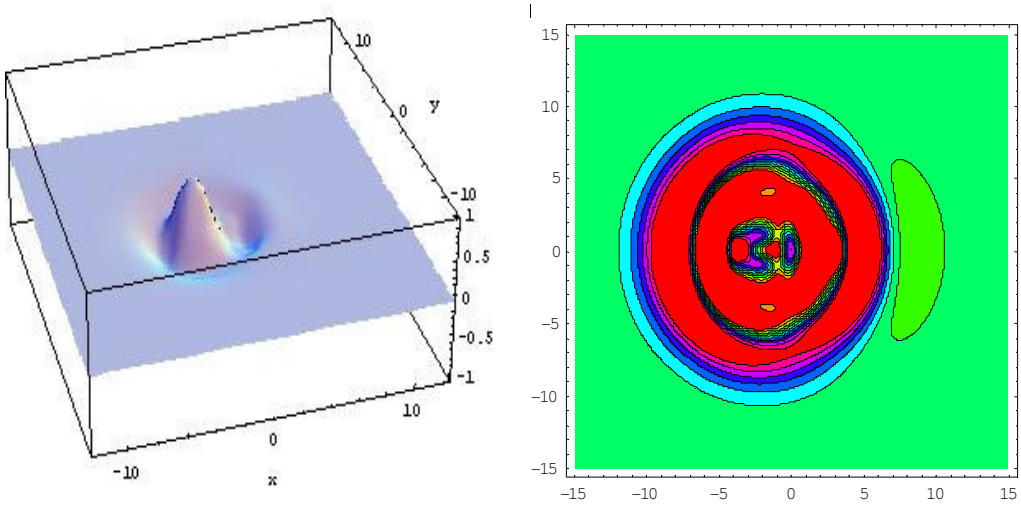
Şekil 6.12: Heyelan Bölgesinin Çeşitli Açılardan Üç Boyutlu Görüntüsü.



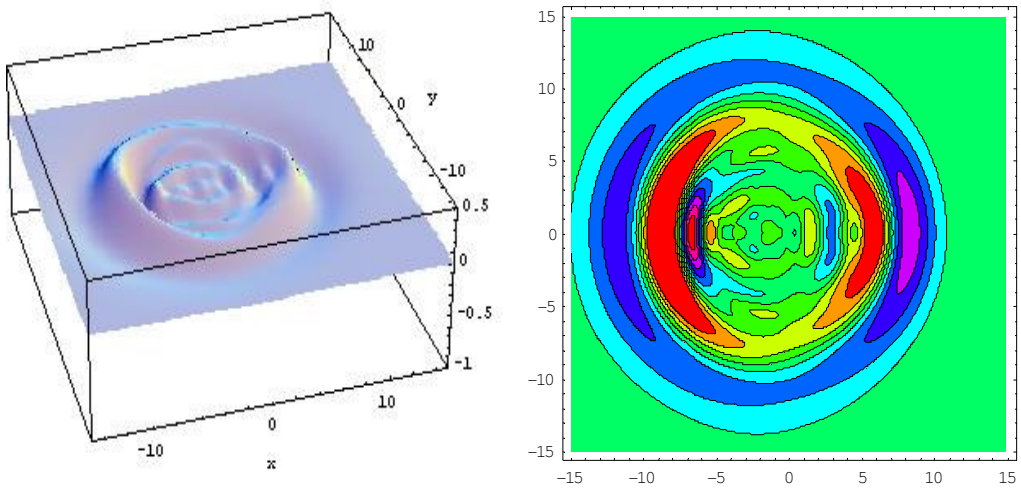
Şekil 6.13: t=t* Anındaki Dalga Hareketi.



Şekil 6.14: t=3t* Anındaki Dalga Hareketi.



Şekil 6.15: t=6t* Anındaki Dalga Hareketi.



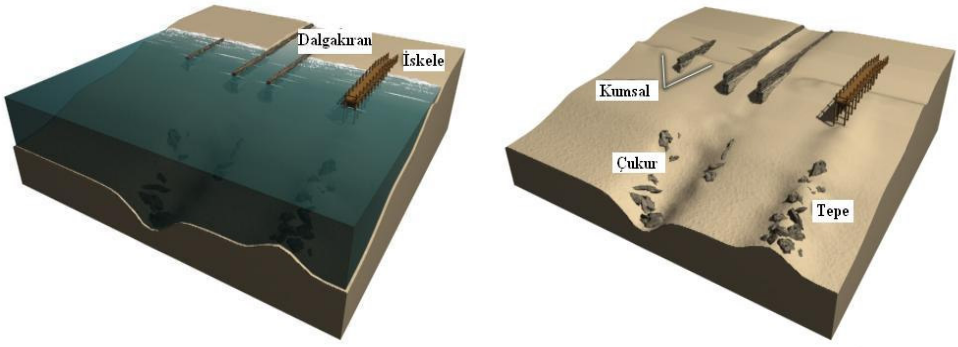
Şekil 6.16: t=9t* Anındaki Dalga Hareketi.

6.3 Batimetri Verilerinin Oluşturulması

Batimetri, "derinlik" anlamına gelen bathos ve "ölçme" anlamına gelen metri kelimelerinin beraber kullanılması sonucu oluşan bir isimdir ve deniz dibi ile su yüzeyinin arasındaki mesafelerin belirli bir bölge için sistematik bir veri olarak düzenlenmesi şeklinde tanımlanabilir.

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 (Şekil 6.17) göz önüne alınarak batimetrik verilerin oluşturulması gerekir.



Şekil 6.17: Sığ Bölgelerdeki Batimetri Faktörü.

Projede, heyelanın bulunduğu bölge için TÜBİTAK ve Fransız bilim adamları tarafından hazırlanan; fakat kıyıya yakın bölgeler için detaylı olmayan bir batimetri haritası İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim Dalı'nda mevcuttur. Çalışmada kullanılan batimetri haritası ise daha önceden temin edilmiş ve Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD) tarafından aynı bölge için hazırlanmış haritadır.

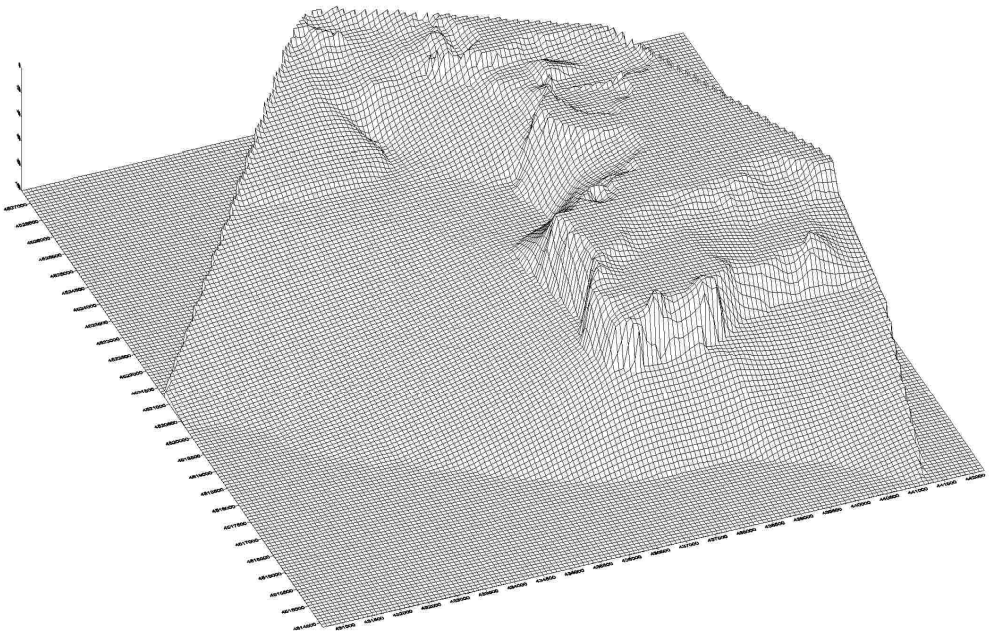
Harita "dwg" uzantılı dosya formatı şeklinde bir AutoCAD dosyasıdır. Nümerik programın daha verimli çalışabilmesi için kıyıya yakın yerlerdeki batimetri verilerinin sıklaştırılması düşünülmüştür. Bu işlemler için SURFER ve S-PLUS programları kullanılmıştır. Bu nedenle batimetri değerleri "xyz" ve "dat" uzantılı dosya formatları şeklinde tekrar düzenlenerek, veriler bu programlara aktarılmıştır.

Bu programlar yardımıyla, eksik olan bölgelerin batimetri sıklaştırılması, mevcut harita üzerindeki kotları belli olan batimetri çizgileri arasında lineer interpolasyon yapılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışma alanına ait sayısal üç boyutlu model elde edilmiştir (Şekil 6.18).

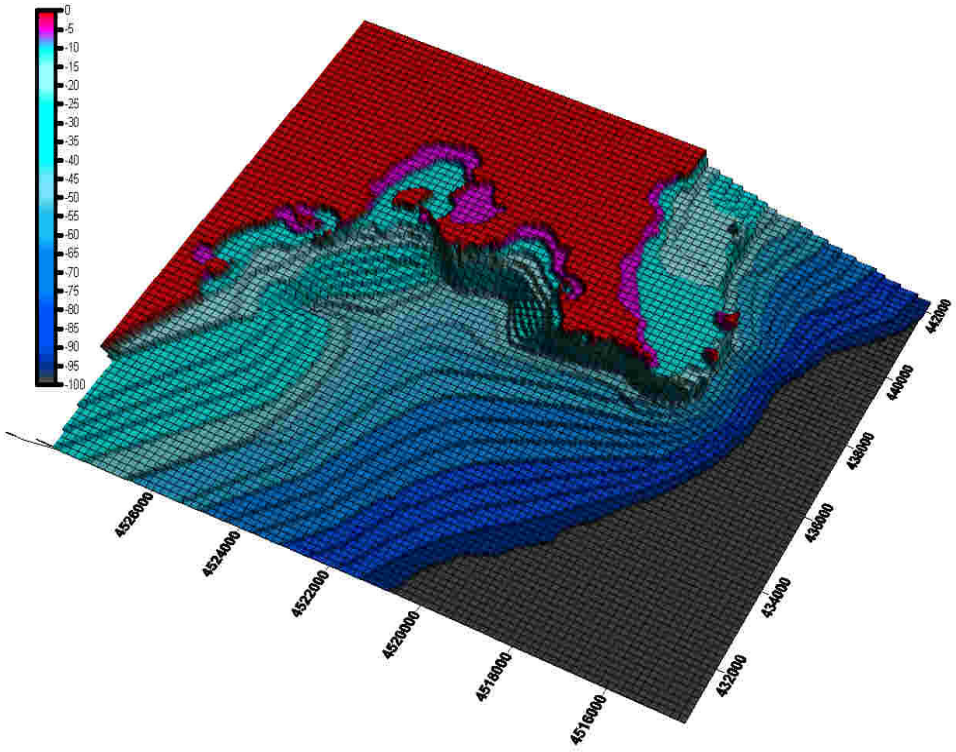
Bu programlar kullanılarak modele ilişkin birçok üç boyutlu görüntü elde edilebilir. Çalışma alanının derinlik değişimlerini gösteren sayısal üç boyutlu model Şekil 6.19'da görülmektedir. Bu şekildeki kırmızı renkli alanlar kotu sıfır olan kara parçalarını ve çalışma alanındaki adaları göstermektedir. Pembe renkli alanlar derinliği 5 metre olan bölgeleri ifade etmektedir. Aynı şekilde diğer renkli alanlar da belirli derinlikteki bölgeleri göstermektedir. Model alanındaki en derin yerler, koyu mavi renkle gösterilen ve yaklaşık 100 metre derinliğindeki bölgelerdir.

SURFER ve S-PLUS programları kullanılarak batimetri verilerinin sıklaştırılması tamamlandıktan sonra, veriler aynı programlar içinde "dxf" uzantılı dosya formatı şeklinde kaydedilerek tekrar AutoCAD programına aktarılmıştır. Burada kıyı şeridini ve adaları oluşturan çizgiler, tek bir çizgi olacak şekilde düzenlenmiştir. Aynı kota sahip olan batimetri verileri ise çoklu çizgi olarak düzenlenmiştir.

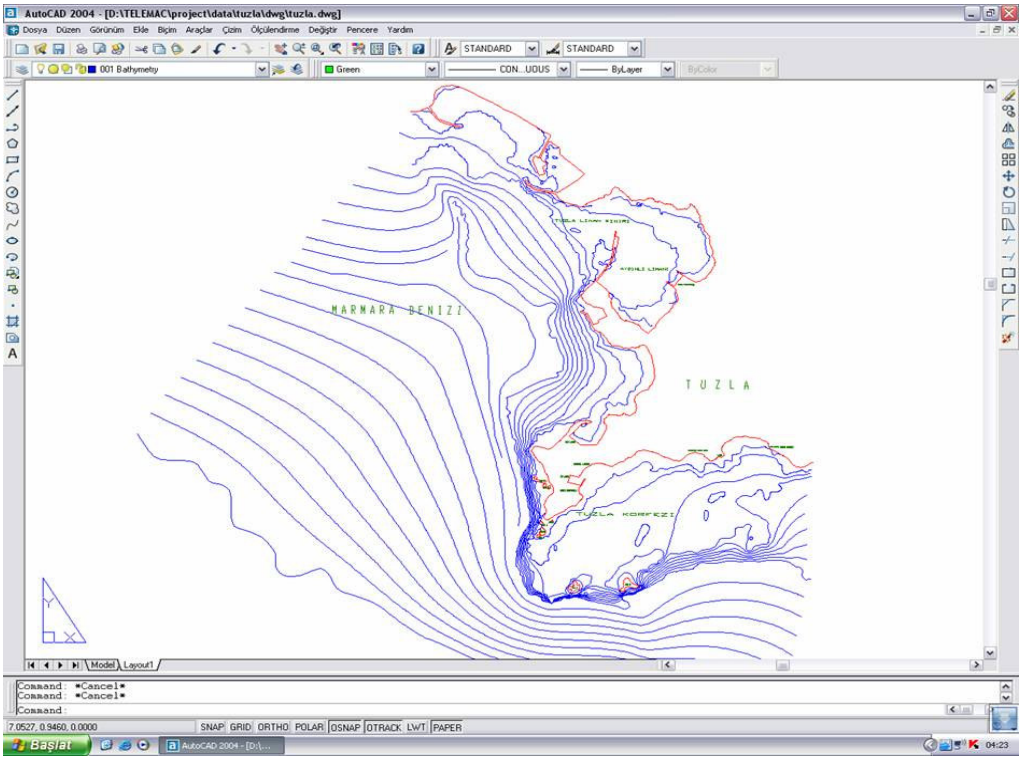
Böylece yaklaşık olarak 35,8 km'lik kıyı uzunluğuna ve 8,3x12,7 km^2'lik bir alana sahip çalışma bölgesi tanımlanmıştır. Projede kullanılan bu batimetri haritası Şekil 6.20'de görülmektedir. Bu şekildeki kırmızı renkli çizgiler kıyı şeridini ve ada sınırlarını oluşturan çizgileri, mavi renkli çizgiler ise batimetri çizgilerini göstermektedir.



Şekil 6.18: Çalışma Alanına Ait Sayısal Üç Boyutlu Model.



Şekil 6.19: Derinlik Değişimlerini Gösteren Sayısal Üç Boyutlu Model.



Şekil 6.20: Projede Kullanılan Batimetri Haritası.

Projede sayısal ağ modelinin oluşturulması için MATISSE programı kullanılmıştır. MATISSE programı veri aktarımı için "sinusx" formatındaki dosyaları kabul etmektedir. Bu nedenle hazırlanan verilerin bu formata uygun olarak düzenlenmesi gerekmektedir.

Bunun için kıyı şeridini, adaları ve batimetri değerlerini oluşturan veriler farklı AutoCAD dosyaları olacak biçimde "dxf" uzantılı dosya formatı olarak ayrı şekillerde hazırlanmıştır. Hazırlanan "dxf" uzantılı veriler, COMPAQ VISUAL FORTRAN programı ile yazılan çevirici program kullanılarak "xyz" uzantılı dosya formatları haline getirilmiştir. Aynı yazılım programı kullanılarak yazılan başka bir çevirici program ile de, "xyz" uzantılı veriler "sinusx" uzantılı dosya formatlarına çevrilmiştir.

Böylece sayısal ağ modelinin kurulması için gerekli olan tüm veri dosyaları hazırlanmıştır. Bu dosyalar; kıyı şeridine, batimetri verilerine ve çalışma alanındaki 7 adet adaya ait, toplam 9 adet "sinusx" uzantılı veri dosyasıdır. Veriler, çalışma bölgesindeki noktaların yatay yöndeki "x" ve "y" koordinat değerleri ile düşey yöndeki "z" derinlik değerlerini içermektedir.

6.4 Sayısal Ağ Modelinin Kurulması

Bu aşamadan itibaren yapılan tüm çalışmalarda TELEMAC model sistemindeki paket programlar kullanılmıştır. TELEMAC model sistemi içindeki programlar daha önce İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim Dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI yürütücülüğünde sonuçlandırılan 100Y086 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında lisanslı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada da İTÜ bünyesinde lisanslı olarak bulunan bu programlar kullanılmıştır.

Model sistemi içerisinde bulunan paket programlar kullanılarak gerçekleştirilen tsunami modellemesi üç aşamalı bir süreçten geçerek sonuçlandırılmıştır. Her bir aşama için kullanılan programlar şunlardır:

- Ön İşlemci : MATISSE
- Simülasyon : TELEMAC-2D
- Görüntüleme : RUBENS

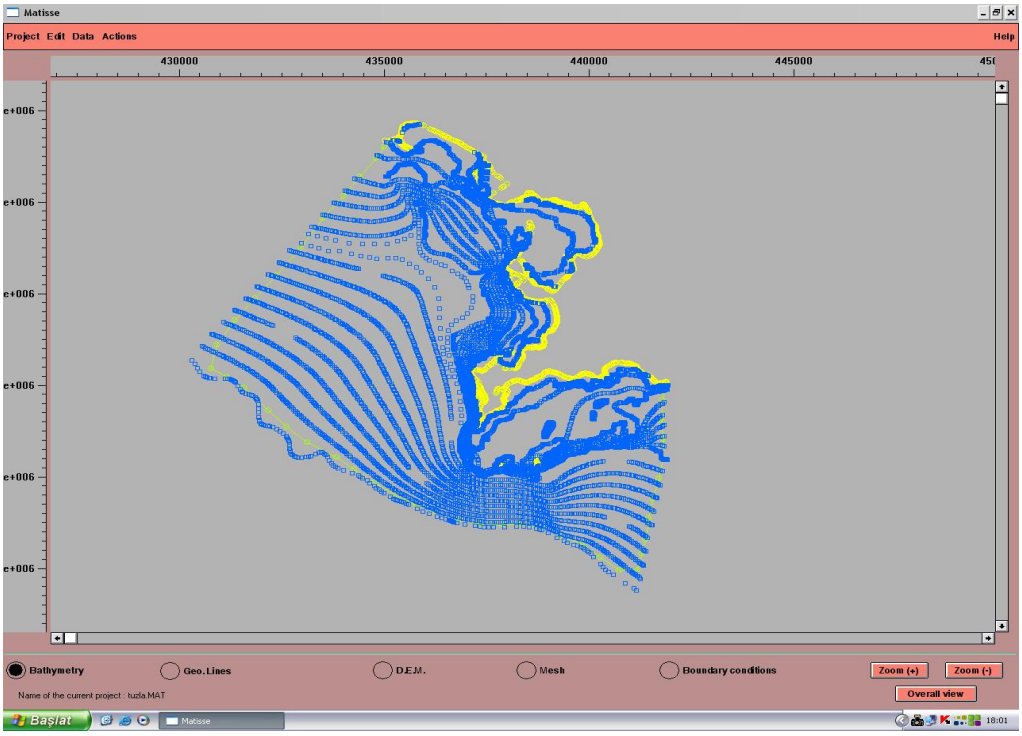
Sayısal ağ modeli hazırlanırken, bir ön işlemci program olan MATISSE programı kullanılmıştır. MATISSE programı ile herhangi bir model ağının oluşturulması 5 aşamada gerçekleştirilmektedir ve bu aşamalar sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- Batimetri
- Geometri Çizgisi
- Sayısal Arazi Modeli
- Ağ
- Sınır Koşulları

6.4.1 Batimetri verilerinin girilmesi

MATISSE programında çalışma alanına ait sayısal harita, batimetri adımında oluşturulmaktadır. Bu işlem iki şekilde mümkün olmaktadır. İlkinde, model alanını oluşturan tüm noktaların koordinat ve derinlik değerleri program içerisinden veri şeklinde sırasıyla girilerek harita elde edilmektedir. Diğer bir yol ise şu şekildedir: Sayısal harita herhangi bir bilgisayar destekli tasarım programında CAD (Computer Aided Design) ortamında hazırlanır ve veriler “sinusx” uzantılı dosya formatına getirilerek, MATISSE programına veri aktarımı şeklinde girilir.

Proje için kuzeydoğu Marmara kıyılarını ve belirli bir alandaki batimetri verilerini içeren harita AutoCAD programında hazırlanmıştı. Çevirici programlar kullanılarak da "sinusx" uzantılı dosyalar elde edilmişti. Bu dosyalar sırası ile veri aktarımı şeklinde MATISSE programına girilerek, çalışma bölgesinin sayısal haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan batimetri haritası Şekil 6.21'de görülmektedir.



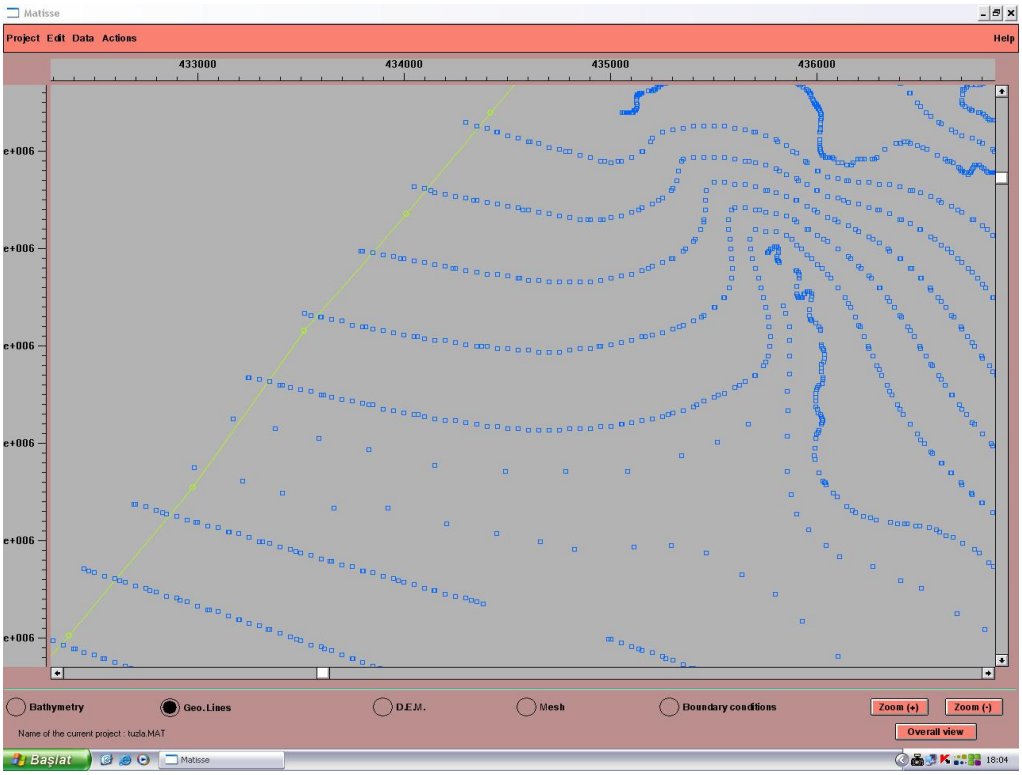
Şekil 6.21: Oluşturulan Batimetri Haritası.

Sayısal haritanın oluşturulması işlemi MATISSE programındaki batimetri adımında gerçekleştirilmiştir. Tüm veriler programa girildikten sonra, harita üzerindeki noktalar değişik şekillerde renklendirilebilir. Burada batimetri noktaları mavi renkle, kıyı çizgisi ve ada sınırları ise sarı renkle tanımlanmıştır.

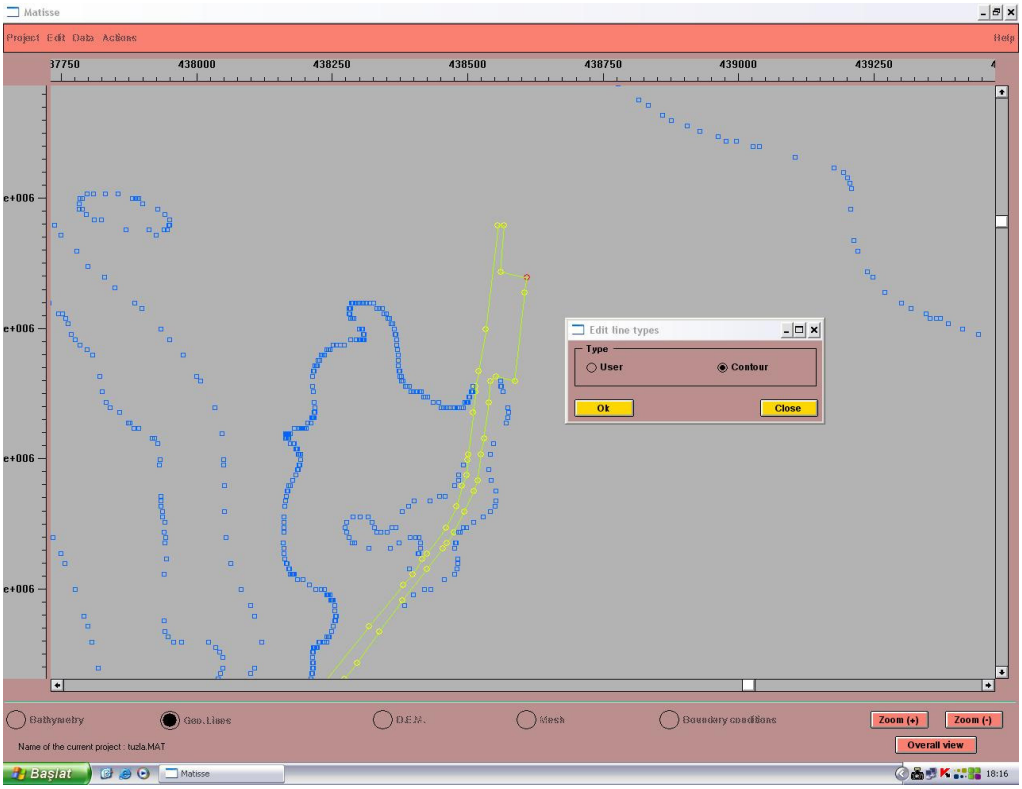
6.4.2 Model alanının tanımlanması

Model alanının tanımlanması MATISSE programının geometri çizgisi adımında yapılmıştır. Bu adımda çalışma bölgesine ait harita üzerinde açık deniz tarafında sınır çizgileri oluşturulmuştur. Bu çizgiler daha sonra kıyı çizgilerine bağlanarak model alanı kapatılmıştır.

Şekil 6.22'de açık deniz tarafında çizilen sınır çizgileri ve tanımlanan model alanının bir bölümü görülmektedir. Bu adımda ayrıca kıyı şeridini ve adaları oluşturan çizgilerin tipleri belirlenmiştir (Şekil 6.23).



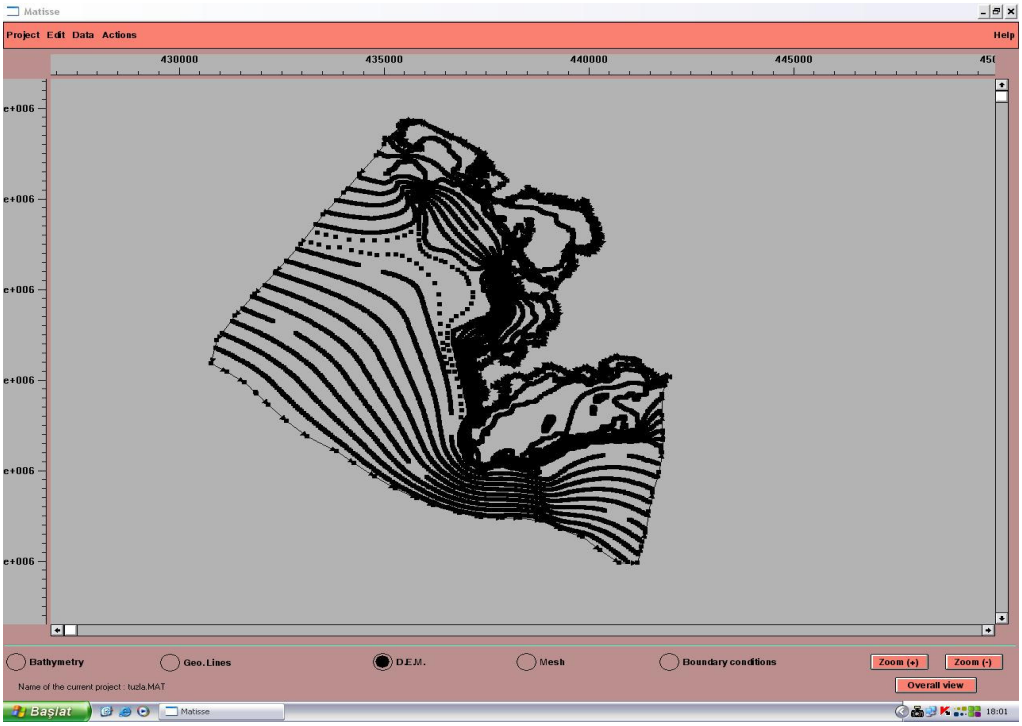
Şekil 6.22: Model Sınırlarının Tanımlanması.



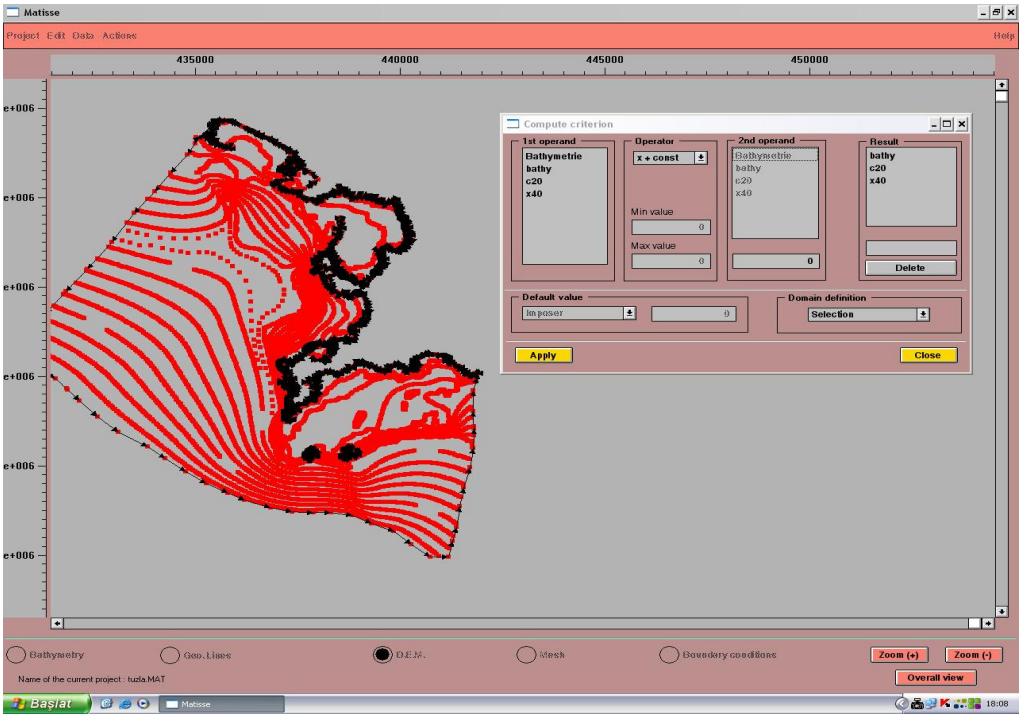
Şekil 6.23: Kıyı Çizgisinin Tipinin Belirlenmesi.

6.4.3 Arazi modelinin oluşturulması

Çalışma bölgesine ait arazi yapısı MATISSE programının sayısal arazi modeli adımında tanımlanmıştır (Şekil 6.24).



Şekil 6.24: Sayısal Arazi Modelinin Oluşturulması.

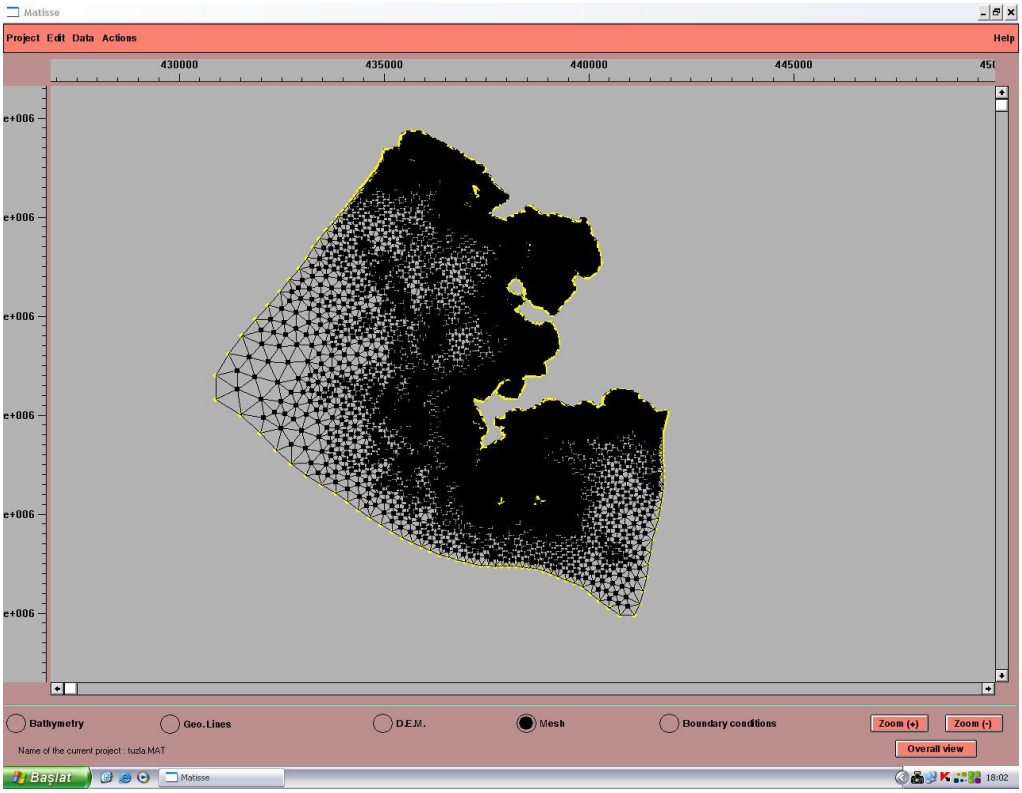


Şekil 6.25: Hesap Ölçütlerinin Belirlenmesi.

Bu adımda, sayısal modeli oluşturacak ağın ebatları saptanmıştır. Oluşturulacak olan ağın sıklığı ve hesap ölçütleri belirlenmiştir (Şekil 6.25).

6.4.4 Ağ tabakasının oluşturulması

Modele ait ağ tabakası MATISSE programının ağ adımında oluşturulur. Bu adımda üçgenler ile oluşturulan ağ tabakası aşağıdaki şekilde görülmektedir.

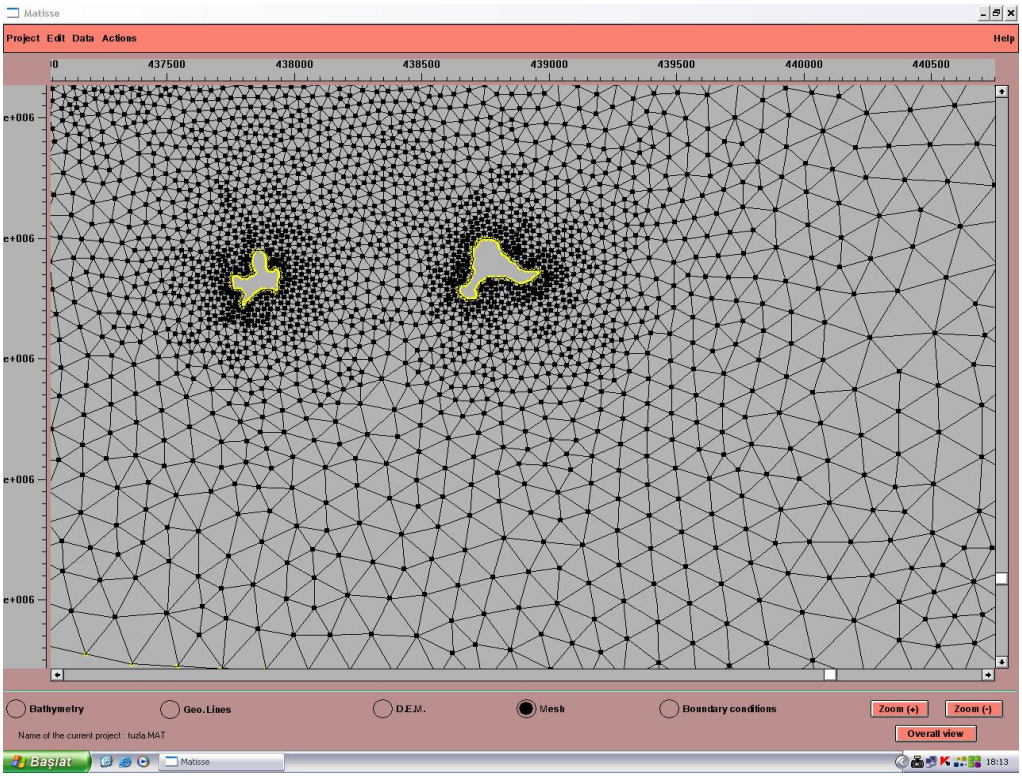


Şekil 6.26: Sayısal Ağ Tabakası.

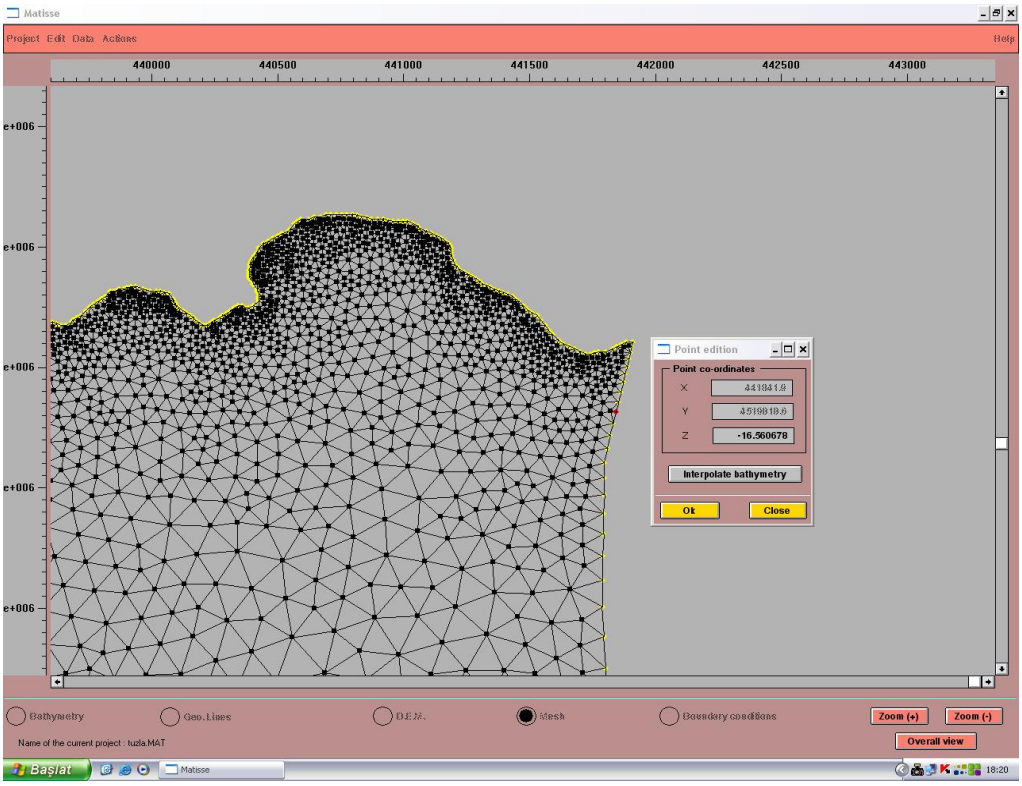
Ağ tabakası oluşturulurken, kıyıya ve adalara yakın yerlerde daha küçük, kıyıdan uzak bölgelerde ise daha büyük elemanlar kullanılarak model oluşturulmuştur. Şekil 6.27'de adalara yakın bölgede oluşturulan ağ tabakasının görüntüsü verilmiştir.

Oluşturulan ağ üzerinde birçok değişiklik yapma imkanı vardır. Model alanını belirleyen çizgilere noktalar eklenebilir. Bazı bölgelerdeki elemanlar daha küçük parçalara ayrılarak ağ yeniden yaratılabilir. Ayrıca model üzerindeki batimetri noktaları interpole edilebilir (Şekil 6.28).

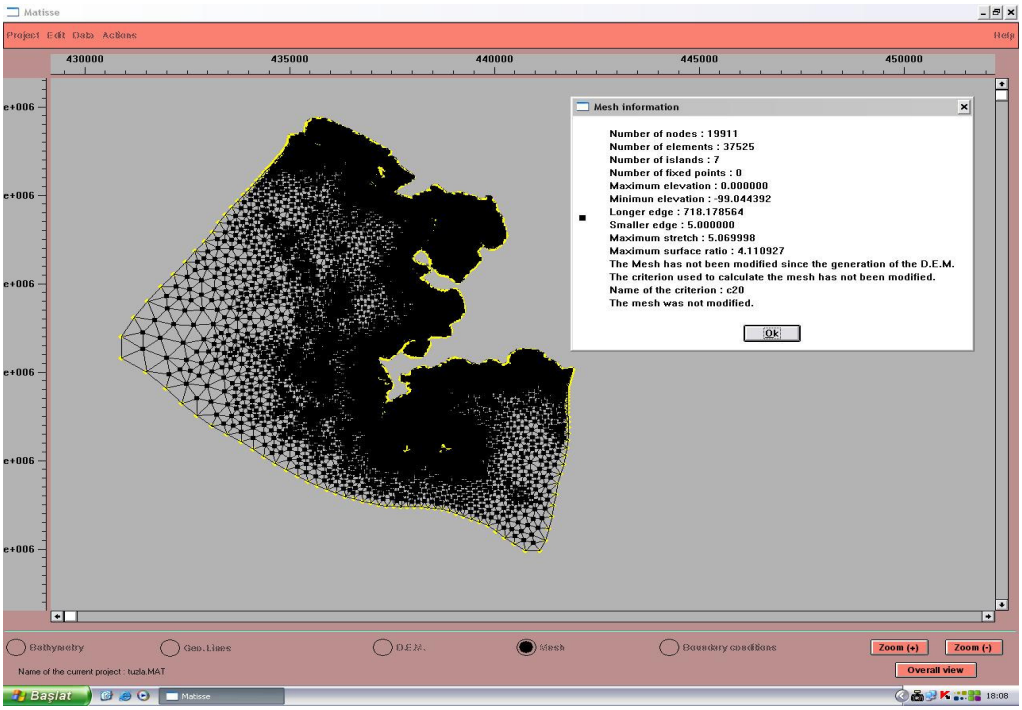
Ağ adımında, MATISSE programının çıktı dosyalarından olan ve TELEMAC-2D programı için girdi olarak kullanılacak geometri dosyası yaratılır. Bu adımda oluşturulan ağa ilişkin özet bilgilere ulaşmak da mümkündür.



Şekil 6.27: Adalara Yakın Bölgedeki Sık Ağ Yapısı.



Şekil 6.28: Ağ Tabakasındaki Noktaların İnterpolasyonu.



Şekil 6.29: Oluşturulan Ağ Tabakasına İlişkin Özet Bilgiler.

Yukarıdaki şekilde oluşturulan ağ tabakasına ait özet bilgiler görülmektedir. Bu bilgilerden bazıları şu şekildedir:

Düğüm sayısı : 19911

Eleman sayısı : 37525

Ada sayısı : 7

Maksimum yükseklik : 0,00 m

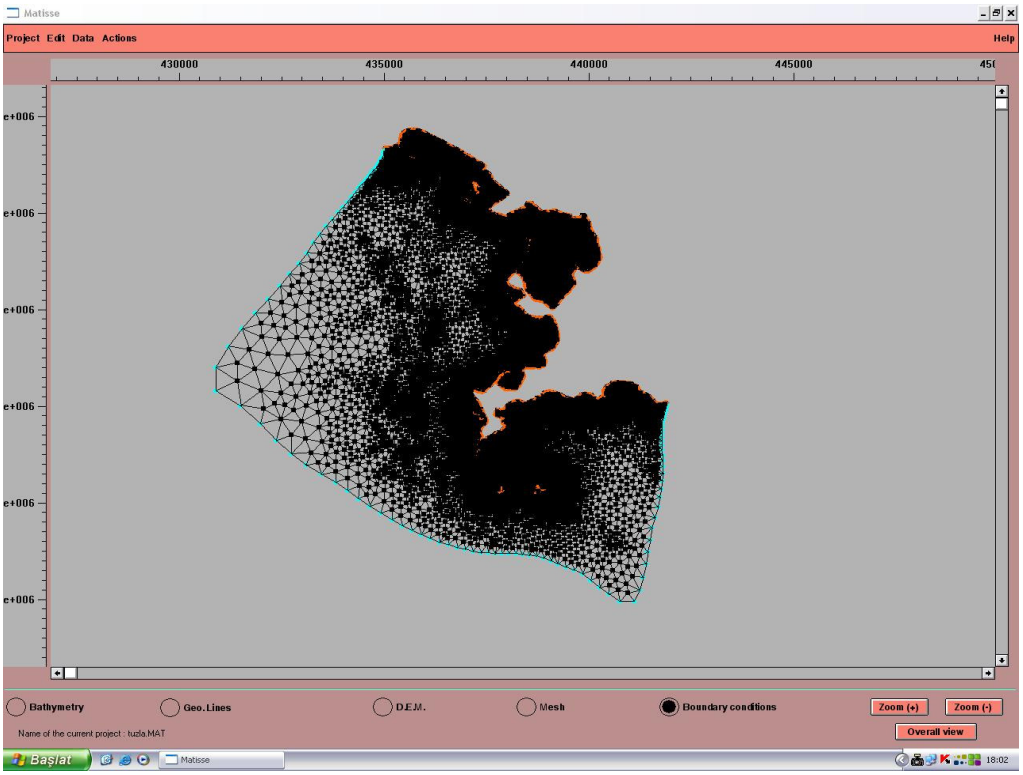
Minimum derinlik : -99,04 m

En uzun kenar : 718,18 m

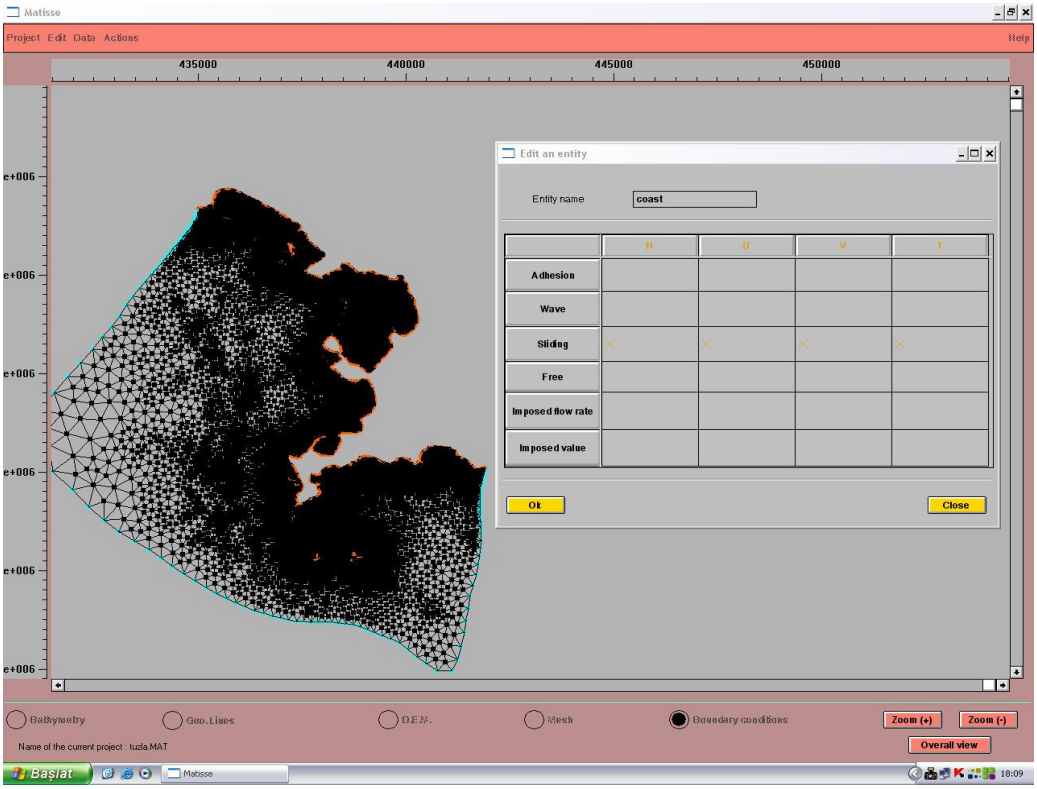
En kısa kenar : 5,00 m

6.4.5 Sınır şartlarının belirlenmesi

MATISSE programının sınır koşulları adımında modele ait sınır şartları tanımlanır. Bu çalışmada sınır koşulları için üç farklı grup oluşturulmuştur. Bunlardan ilki kıyı şeridinden ve adalardan oluşan kara sınırlarıdır. Diğer iki grup ise açık denizdeki sınırlardır. Açık denizin sağ ve sol kenarındaki sınırlar ikinci grup olarak tanımlanmıştır. Belirlenen üçüncü grup açık denizin ortasındaki sınırdır ve bu sınır analitik model ile nümerik model için ortak bir sınırdır.



Şekil 6.30: Modelde Oluşturulan Sınır Çizgileri.



Şekil 6.31: Kıyı Şeridi İçin Belirlenen Sınır Şartları.

Şekil 6.30'da modelde oluşturulan sınır çizgileri, Şekil 6.31'de ise kıyı şeridi için belirlenen sınır şartları görülmektedir. Bu görüntülerdeki turuncu renkli çizgiler kıyı şeridi ve adalardan oluşan kara sınırlarını, açık mavi renkli çizgiler ise açık denizdeki sınırları ifade etmektedir.

Sınır koşulları adımında, MATISSE programının çıktı dosyalarından olan ve TELEMAC-2D programı için girdi olarak kullanılacak sınır dosyası yaratılır.

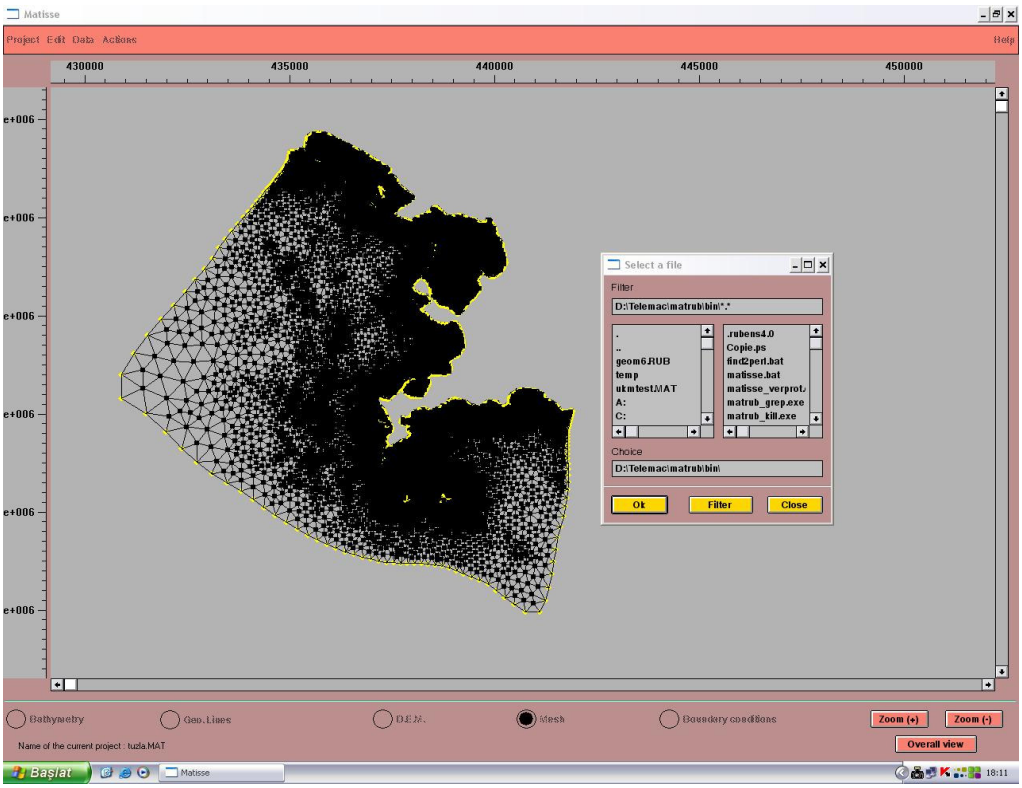
6.4.6 Model çıktılarının alınması

MATISSE programı ile oluşturulan sayısal ağ modeli sonucunda iki adet çıktı dosyası elde edilir. Bu dosyalar şunlardır:

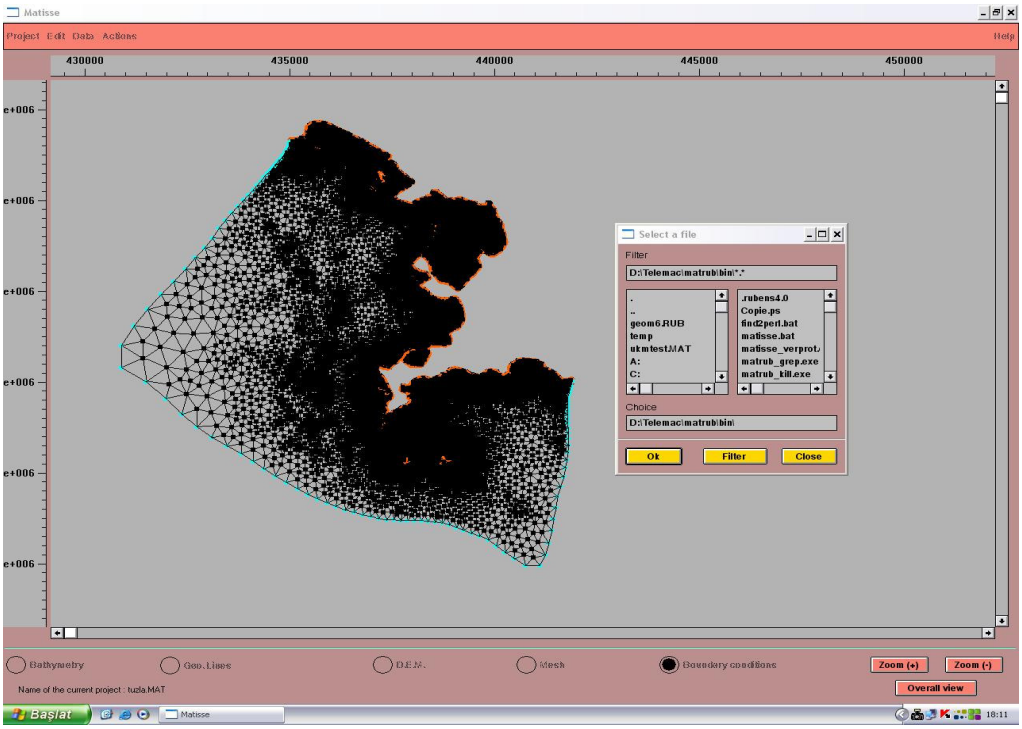
- Geometri dosyası
- Sınır dosyası

Bu iki dosya simülasyon çalışmaları sırasında TELEMAC-2D programının girdi dosyaları olarak kullanılacaktır.

Şekil 6.32'de geometri dosyasının oluşturulması, Şekil 6.33'te ise sınır dosyasının oluşturulması görülmektedir.



Şekil 6.32: Geometri Dosyasının Oluşturulması.



Şekil 6.33: Sınır Dosyasının Oluşturulması.

Geometri dosyası MATISSE programının ağ adımında, proje menüsünden "geo" uzantılı dosya formatı şeklinde kaydedilerek elde edilir. Sınır dosyası ise MATISSE programının sınır koşulları adımında, proje menüsünden "bnd" uzantılı dosya formatı şeklinde kaydedilerek elde edilir. Bu dosya uzantıları istenilen şekilde yazılabilir.

6.5 Simülasyonların Yapılması

Projede nümerik hesaplamalar kullanılarak yapılan tüm tsunami modellemeleri, TELEMAC model sistemi içindeki TELEMAC-2D programı ile yapılmıştır. Bir simülasyon işleminin gerçekleştirilmesi aşağıdaki gibi üç aşamadan oluşmaktadır:

- Girdi dosyalarının hazırlanması
- Simülasyonların çalıştırılması
- Çıktı dosyalarının alınması

Oluşturulan sayısal ağ modelini değiştirerek veya simülasyon için girdi dosyalarını değiştirerek birçok simülasyon yapmak mümkündür. Değişik hesap değerleri verilerek farklı simülasyonlar yapılabileceği gibi, aynı girdilerle farlı sürelerde de simülasyonlar yapılabilir.

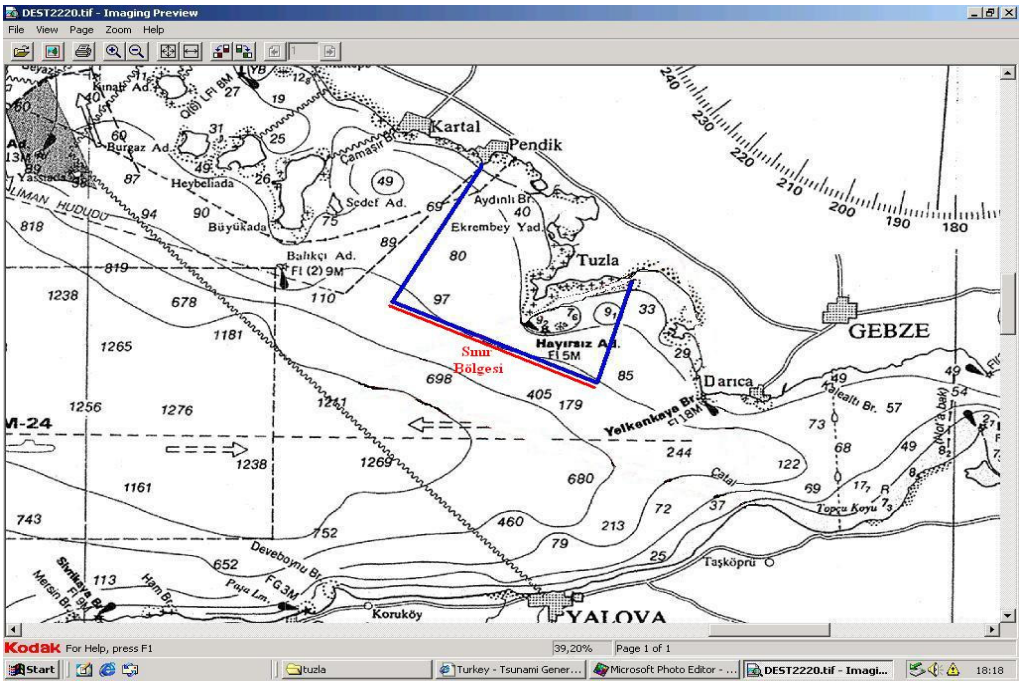
6.5.1 Girdi dosyalarının hazırlanması

TELEMAC-2D programı ile simülasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için tüm girdi dosyalarının hazırlanması gerekir. Çalışmada hazırlanan tüm girdi dosyaları aşağıda gösterilmiştir:

- Geometri dosyası
- Sınır dosyası
- Analitik model sonuçları
- Fortran dosyası
- Yönetici dosyası

Bu girdi dosyalarından geometri ve sınır dosyaları, MATISSE programı kullanılarak hazırlanan sayısal ağ modeline ait çıktı dosyalarıdır. Bu dosyaların nasıl elde edildikleri bir önceki bölümde anlatılmıştı.

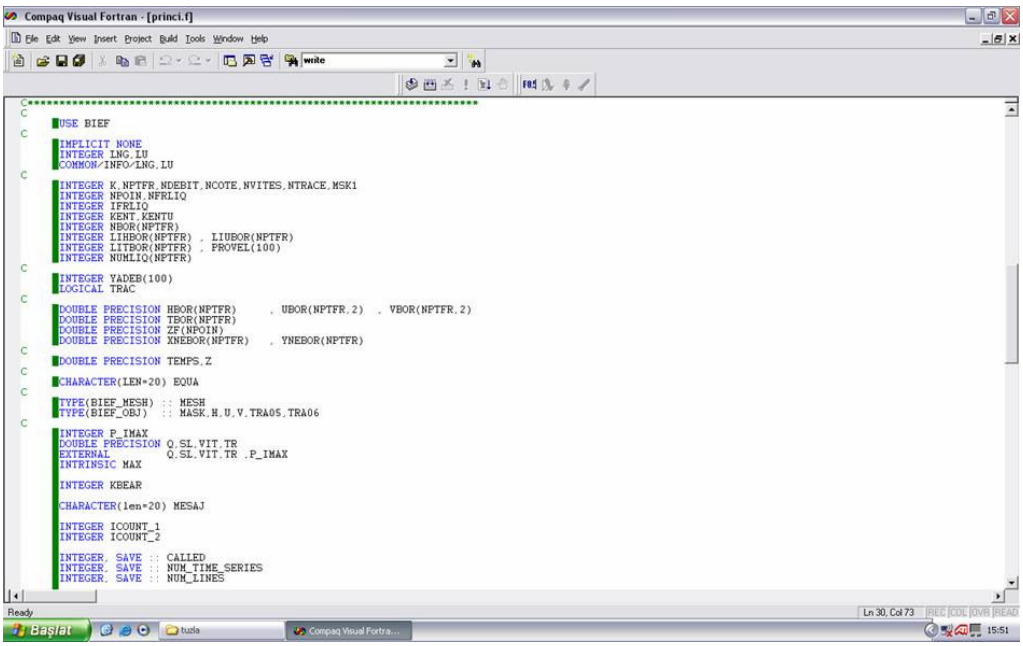
Modelleme yapılırken, analitik model ve nümerik modelin beraber çalışabilmesi için ortak bir sınır belirlenmiştir. Bu sınır bölgesi Şekil 6.34'te görülmektedir. Bu şekildeki mavi renkli çizgiler modelleme çalışması yapılan bölgenin sınırlarını, kırmızı renkli çizgi ise analitik ve nümerik model için belirlenen ortak sınırı kabaca göstermektedir.



Şekil 6.34: Analitik ve Nümerik Model İçin Belirlenen Ortak Sınır.

Sayısal ağ modeli kurulurken, oluşturulan sonlu elemanlar yardımıyla tüm çalışma alanı üçgen elemanlara bölünmüştür. Analitik ve nümerik model için belirlenmiş olan sınır bölgesinde bu elemanlara ait 42 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Analitik hesaplamalar sonucunda bu noktalara ait tsunami genlikleri bir zaman serisi olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler aynı noktalara ait batimetri kotları ile toplanarak, nümerik model için başlangıç koşulu olarak alınmıştır. Böylelikle belli zaman aralıkları ile değişen değerlerden oluşan 42 adet girdi dosyası hazırlanmıştır.

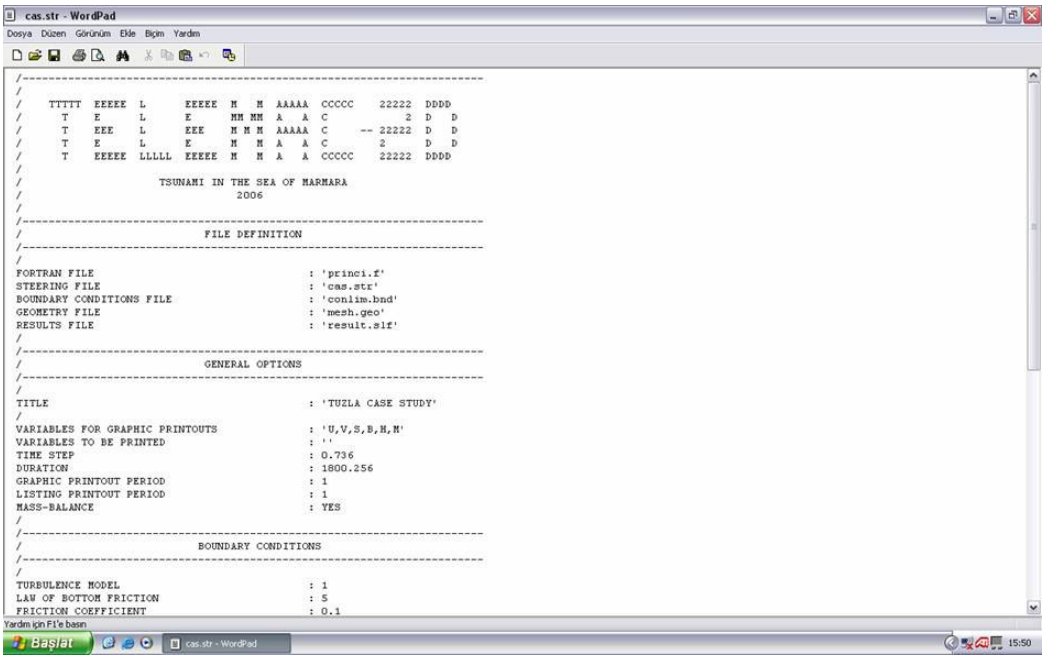
Simülasyon işleminin gerçekleştirilmesi için, gerekli yazılımların yapıldığı fortran dosyasının mutlaka girdi dosyaları arasında olması gerekmektedir. Bu çalışmada nümerik model için yapılan yazılımların dışında analitik model çıktılarının, nümerik model tarafından okunabilmesi için aynı dosya içinde program yazılmıştır. Bu yazılım COMPAQ VISUAL FORTRAN programı kullanılarak İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği'nden Araştırma Görevlisi Ali ERTÜRK tarafından yapılmıştır. Şekil 6.35'te modelleme çalışması için hazırlanmış olan fortran dosyası görülmektedir.



Şekil 6.35: Fortran Dosyası.

Simülasyon çalışmasının yapılabilmesi için gerekli olan son girdi dosyası yönetici dosyasıdır. Bu dosya tüm girdi dosyalarının bilgisayarda UNIX ortamında çalıştırılmasını sağlayan ve modelleme için gerekli parametrelerin belirlendiği dosyadır. Bu parametreler TELEMAC-2D kullanım kılavuzunda bulunan kodlar

kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 6.36'da modelleme çalışması için hazırlanmış olan yönetici dosyası görülmektedir.



Şekil 6.36: Yönetici Dosyası.

6.5.2 Simülasyonların çalıştırılması

TELEMAC-2D programı ile simülasyon işlemi bilgisayarda UNIX ortamında gerçekleştirilmektedir. Öncelikle hazırlanan tüm girdi dosyaları, bilgisayarda TELEMAC model sisteminin kurulu olduğu dizin içinde bir klasöre aktarılır. Daha sonra bilgisayarda komut istemi ile aynı klasör içindeki tüm dosyalar görüntülenir. Son olarak yönetici dosyası çalıştırılarak simülasyon işlemi başlatılır.

Simülasyon işleminin süresi tamamı ile kullanılan bilgisayarın gücü ve kapasitesine bağlıdır. Burada sonuçları verilecek olan 30 dakikalık bir simülasyona ait işlem, yaklaşık olarak 40 dakika sürmüştür. Bilgisayar özelliklerinin farklı olmasına ve girdi dosyalarının içeriğine bağlı olarak bu süre bazen saatlerce sürebilmektedir.

6.5.3 Çıktı dosyalarının alınması

Simülasyon işleminin sonucunda SERAPHIN formatında ve simülasyon süresine göre boyutu değişebilen bir çıktı dosyası elde edilir. 30 dakikalık simülasyon sonucunda yaklaşık 1,2 GB boyutunda bir çıktı dosyası elde edilmiştir. Bu dosya RUBENS programı için bir girdi dosyasıdır ve simülasyon sonuçları bu dosyadan üretilen çıktı dosyaları yardımıyla görüntülenir.

6.6 Sonuçlar

Simülasyon işlemi sonucunda elde edilen çıktı dosyası RUBENS programına aktarılarak sonuçlar görüntülenir. Bunun için RUBENS programı içinde proje menüsünden yeni proje seçilir ve elde edilen çıktı dosyası programa yüklenir. Yükleme işlemi tamamlandıktan sonra istenilen sonuçlar RUBENS programı içerisinden görüntülenebilir.

Sonuçların daha net ve büyük görülebilmesi için, RUBENS programında görüntülenen simülasyon çıktıları çeşitli resim programlarıyla düzenlenmiştir.

Burada 30 dakikalık bir süre için yapılan simülasyona ait sonuçlar verilecektir. Modelleme çalışmasında boyutsuz çalışılmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, 1 birim kalınlığındaki heyelan alanının hareket etmesi durumunda oluşan dalga yüksekliklerini boyutsuz olarak ifade etmektedir.

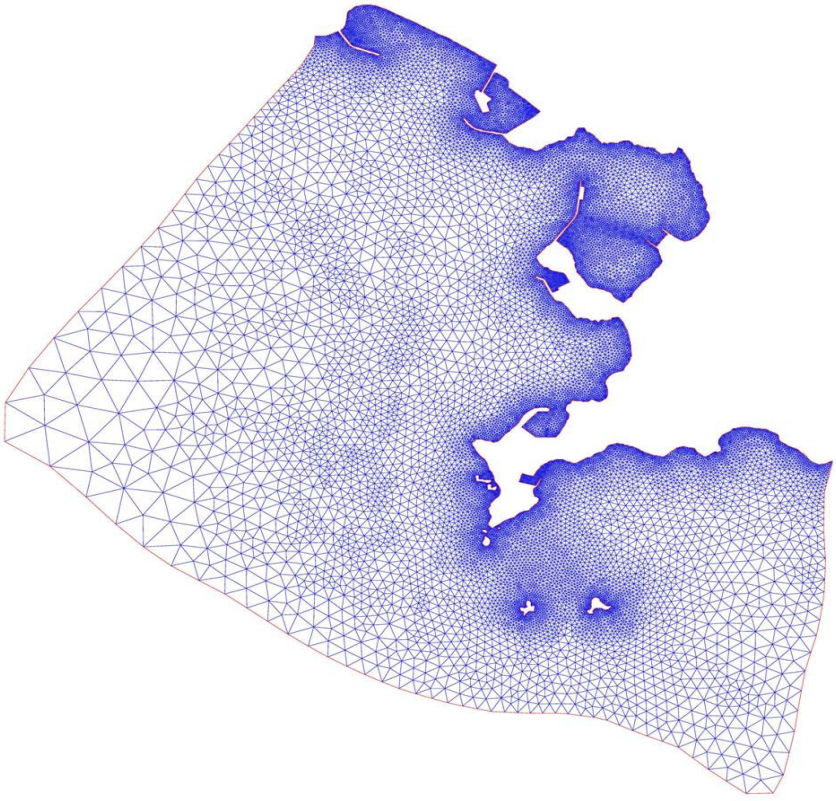
Yapılan simülasyona ait verilecek olan sonuçlar sırasıyla şu şekildedir:

- Sayısal ağ ve batimetri modeli,
- Belirli zamanlarda model alanındaki dalga hareketi,
- İki nokta arasında zamanla değişen dalga profili,
- Maksimum dalga yüksekliği ve zaman serisi.

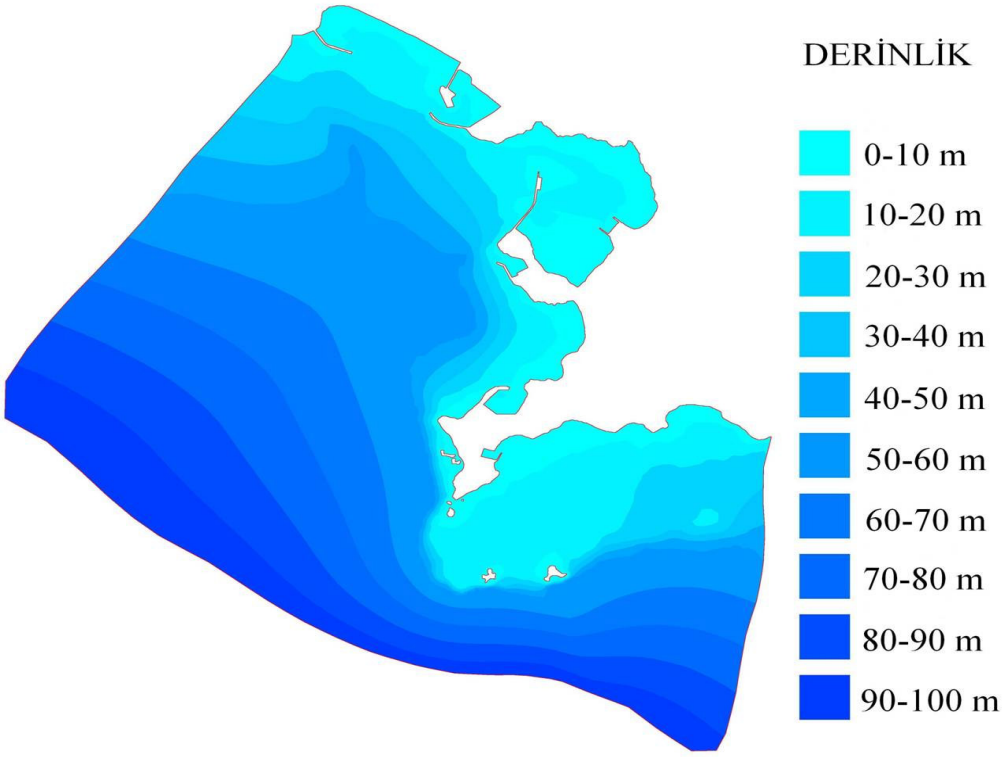
6.6.1 Sayısal ağ ve batimetri modeli

Şekil 6.37, yapılan simülasyon sonucunda elde edilmiş olan sayısal ağ modelini göstermektedir. Şekildeki kırmızı renkli çizgiler çalışma alanını çevreleyen sınır çizgilerini ve adaları oluşturan çizgileri belirtmektedir. Mavi renkli ve üçgen şeklini oluşturan çizgiler ise çalışma alanı içinde tanımlanan sonlu eleman modelini ifade etmektedir.

Şekil 6.38, model alanındaki farklı bölgelerin derinlik değişimlerini göstermektedir. Burada aynı renge sahip olan alanların batimetri değerleri belli kotlar arasında değişmektedir. Bunun için mavi renk tonlarında değişen 10 farklı değer aralığı seçilmiştir. Bu değer aralıklarına ait renk değişimi şeklin sağındaki derinlik cetvelinden görülebilir. Örneğin en açık mavi renge sahip alanlardaki derinlik 0–10 m arasında değişirken, en koyu mavi renge sahip alanlardaki derinlik 90–100 m arasında değişmektedir.



Şekil 6.37: Sayısal Ağ Modeli.



Şekil 6.38: Batimetri Modeli.

6.6.2 Belirli zamanlarda model alanındaki dalga hareketi

Dalga hareketi ile ilgili iki farklı sonuç verilecektir. İlk olarak, tsunami oluşumundan sonra harekete geçen dalganın zamana göre konumu incelenecektir. Daha sonra ise, zaman ilerledikçe dalgaların farklı konumlarda hangi yüksekliklere ulaştığına bakılacaktır.

Şekil 6.39'dan model alanındaki dalga hareketinin zamana göre nasıl değiştiği gözlenebilir. Bu şekilde dalganın farklı kıyı bölgelerine hangi sürelerde ulaştığı görülmektedir. Burada simülasyon zamanı deprem sonrası heyelanın harekete geçmesi ile başlamaktadır. Heyelan hareketinin başladığı t=0 anında doğal olarak herhangi bir dalga hareketi görülmemektedir. t=80 s sonunda dalgaların model alanındaki adalara ulaştığı görülür. Heyelan hareketinden 2 dakika sonra t=2 dk anında dalgaların kıyıya ulaştığı görülmektedir.

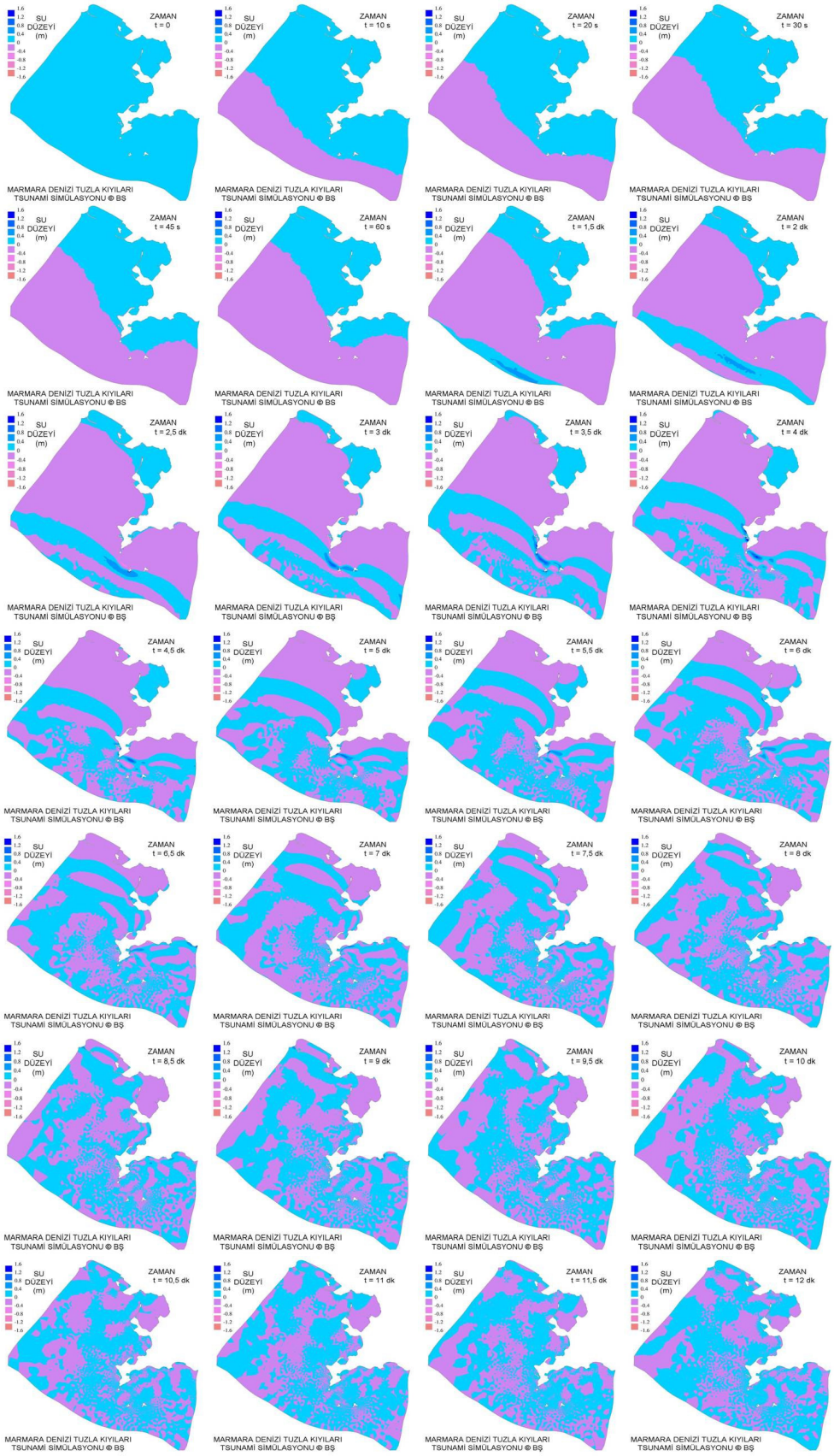
Aynı şekilde t=6 dk anındaki simülasyon sonucuna bakıldığında, dalgaların model alanının sağındaki kıyı şeridinin tamamına ulaştığı görülebilir. Simülasyon sonuçlarından t=12 dk anına bakıldığında ise, tüm kıyı şeridine dalgaların ulaştığı görülür. Zaten bu süreden sonra büyük genlikli yeni dalgaların gelmediği gözlenmiştir. Sonuçlardan 15,20,25 ve 30 dk sonundaki görünümler incelenebilir.

Şekil 6.40'taki simülasyon sonuçları, zamanla değişen dalga hareketini ve bu dalgaların o andaki yüksekliklerini göstermektedir. Şekil üzerindeki renkler ±1,6 birim aralığında değişen dalga genliklerini göstermektedir. Pembe renkle görülen alanlar negatif yöndeki dalga genliğini, mavi renkle ifade edilen alanlar ise pozitif yöndeki dalga yüksekliklerini göstermektedir. Bu renkler koyulaştıkça, her iki yöndeki dalga genlikleri büyümektedir. Bu değişim aralıkları model alanının solundaki cetvelden okunabilir.

Sonuçlar incelendiğinde, 2 ile 3 dakikalık zaman dilimleri arasında, yüksekliği +1,0 birim ve üzeri olan dalgaların model alanındaki adalara ulaştığı görülür. 5 dakikalık bir zaman geçtikten sonra aynı genliklere sahip dalgaların kıyılara vardığı görülür. Model alanının sağında ve solunda bulunan kıyı şeridine bakılacak olursa; bu genliklerdeki dalgaların kıyı şeridine ulaşmaları 8 dakikayı bulmaktadır. Bu zaman diliminden sonra kıyılara ulaşan ve model alanına giren dalgaların genliklerinde azalma olduğu saptanmıştır. 12 dakika sonundaki dalga hareketleri incelendiğinde ise dalga genliklerinde azalmalar olduğu ve dalgaların sönümlendiği görülmüştür.



Şekil 6.39: Dalganın Zamana Göre Konumu.



Şekil 6.40: Zamanla Değişen Dalga Hareketi.

6.6.3 İki nokta arasında zamanla değişen dalga profili

Burada ikisi model alanının sol tarafından, ikisi de model alanının sağ tarafından olmak üzere seçilen nokta çiftleri arasında değişen dalga profilleri verilecektir. Bu nokta çiftlerinden ilki model alanının sol tarafından seçilen C_1 ve C_2 noktalarıdır. Model alanında açık deniz tarafındaki C_1 noktası ile kıyıya yakın yerdeki C_2 noktası arasındaki mesafe L=8086 metredir. Bu noktalar arasında belirli zamanlarda değişen dalga profili Şekil 6.42'den görülebilir.

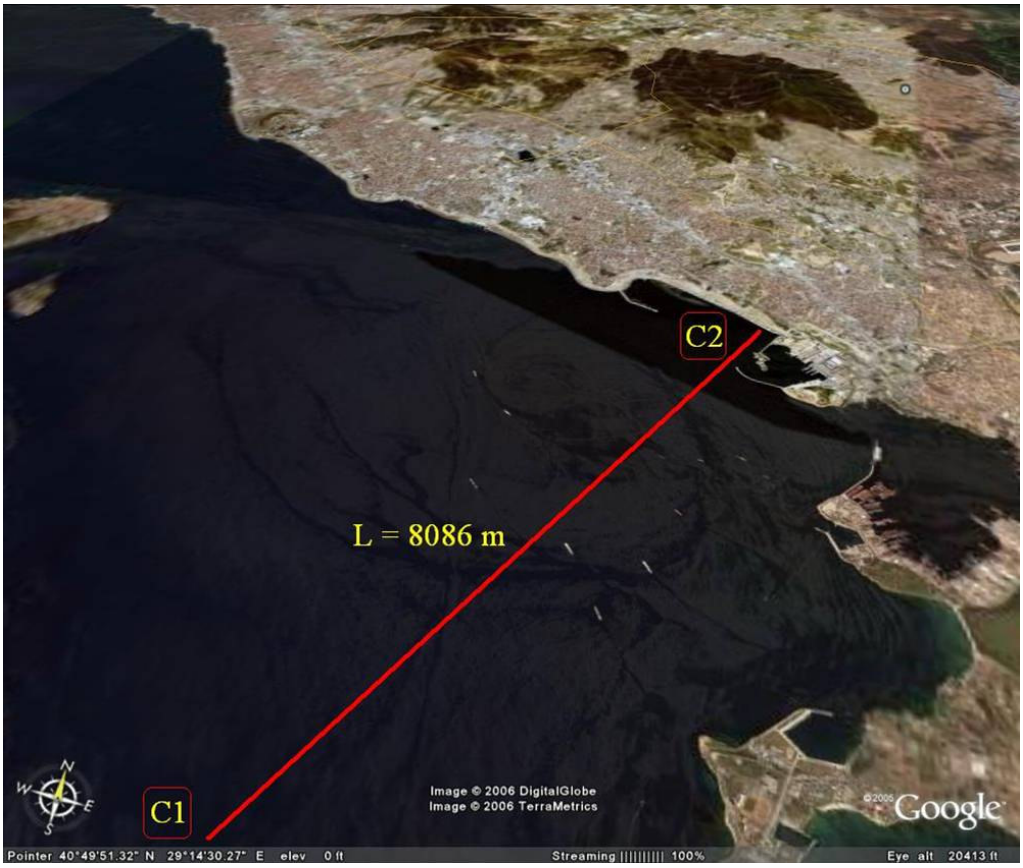
Diğer çift ise model alanının sağ tarafından seçilen D_1 ve D_2 noktalarıdır. Model alanında açık deniz tarafındaki D_1 noktası ile kıyıya yakın yerdeki D_2 noktası arasındaki mesafe L=4836 metredir. Bu noktalar arasında belirli zamanlarda değişen dalga profili Şekil 6.43'ten görülebilir.

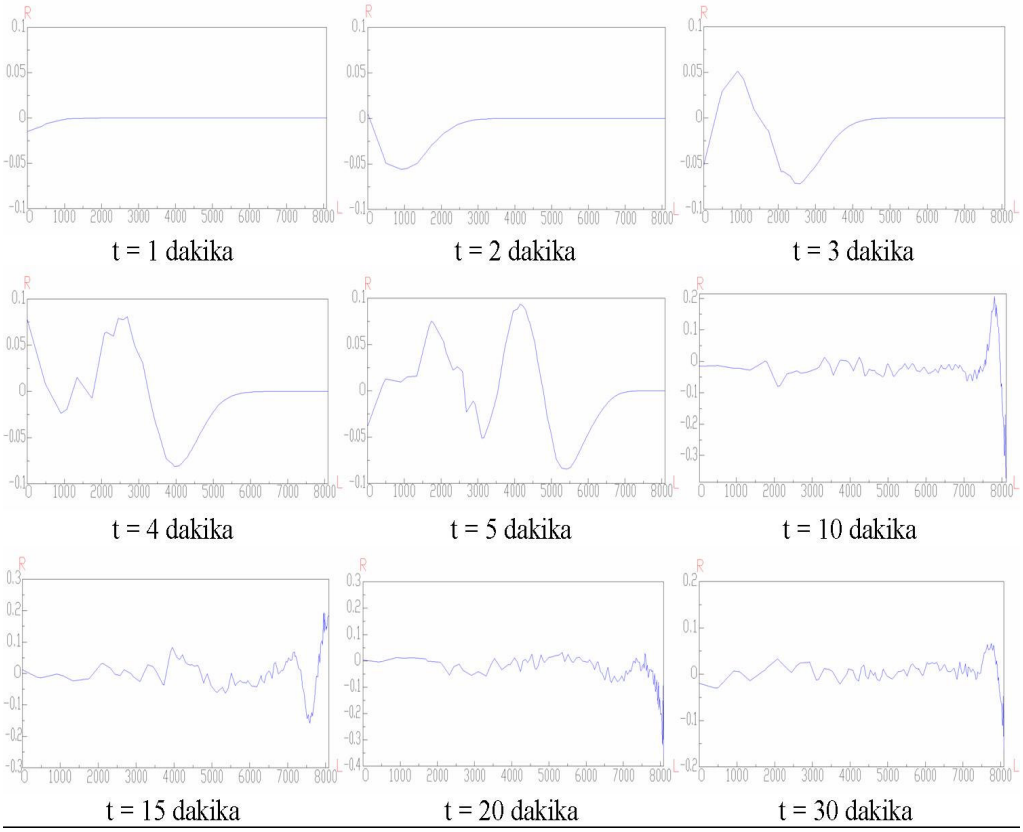
6.6.4 Maksimum dalga yüksekliği ve zaman serisi

Burada model alanından seçilen 8 noktaya ait sonuçlar verilecektir. Sonuçlar kapsamında, bu noktalarda oluşan maksimum dalga yükseklikleri ve bu noktalara ait zaman serileri görülebilir. Seçilen 8 nokta Şekil 6.41'de görülmektedir. Bu noktalara ait sonuçlar ise Şekil 6.44 ve sonraki şekillerden incelenebilir. Sonuçlardaki uydu görüntüleri Google Earth programından elde edilmiştir.

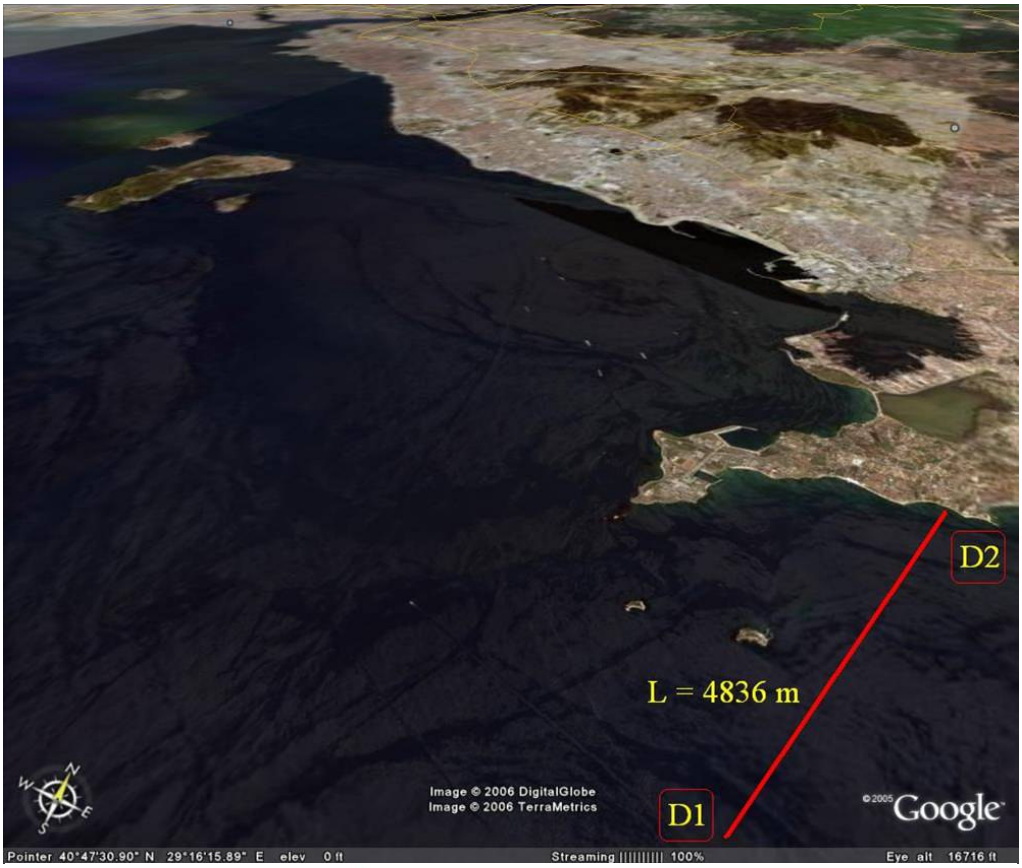


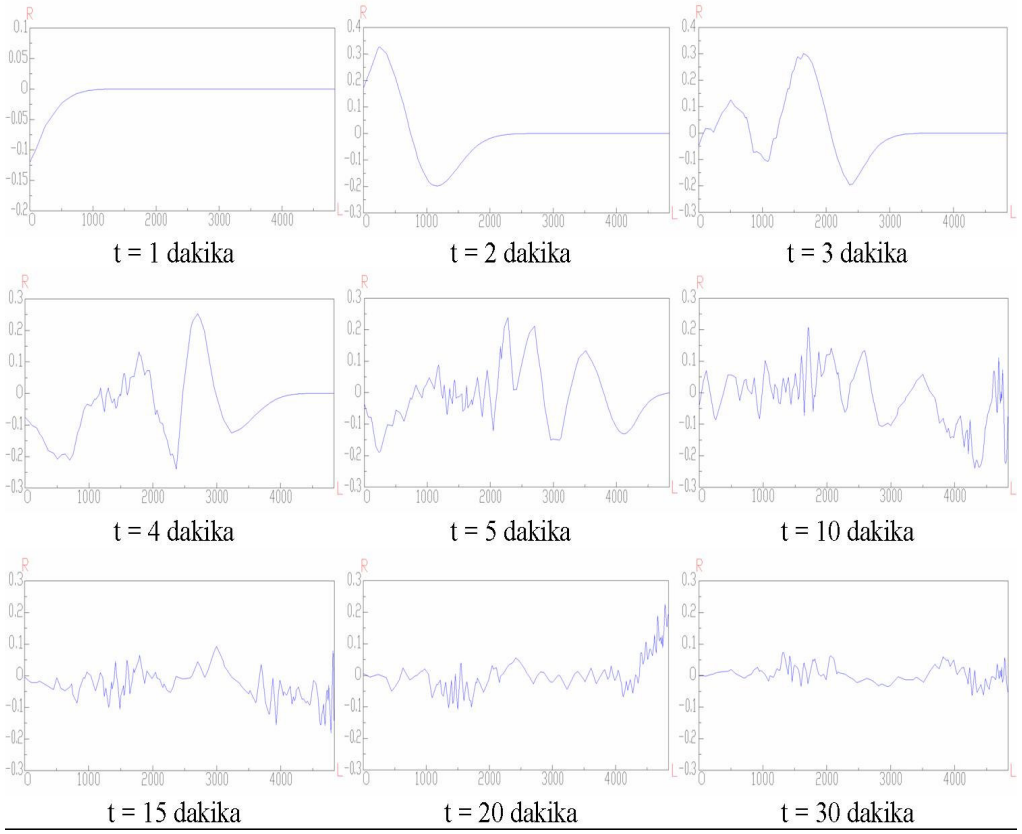
Şekil 6.41: Model Bölgesinden Seçilen Noktalar.





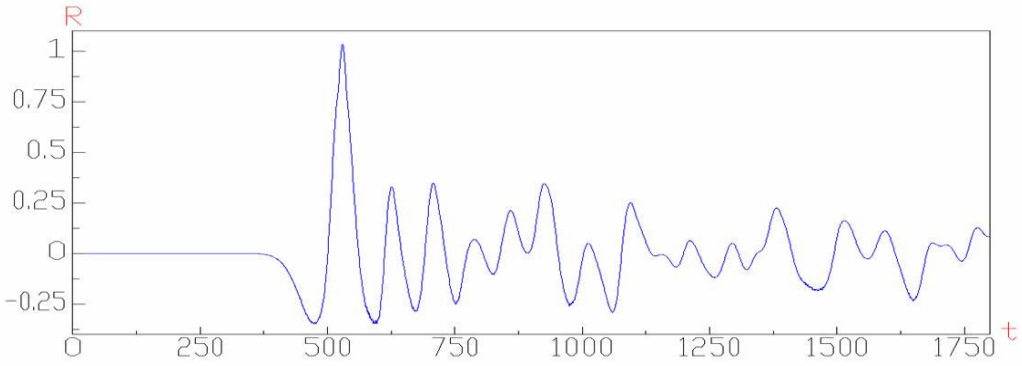
Şekil 6.42: C_1 ve C_2 Noktaları Arasında Zamanla Değişen Dalga Profili.





Şekil 6.43: D_1 ve D_2 Noktaları Arasında Zamanla Değişen Dalga Profili.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
1	435325	4526743	6 dk 10 s	8 dk 5 s	1,05 br

Şekil 6.44: P_1 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

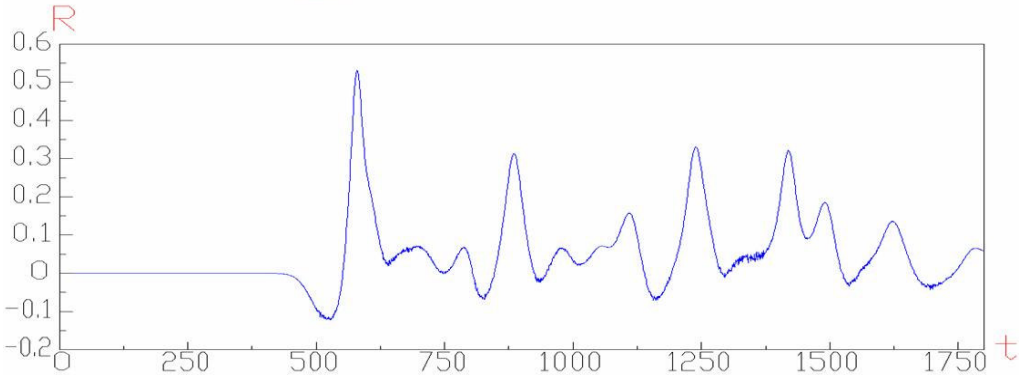
Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
2	438604	4525219	7 dk 10 s	10 dk 5 s	0,53 br

Şekil 6.45: P_2 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

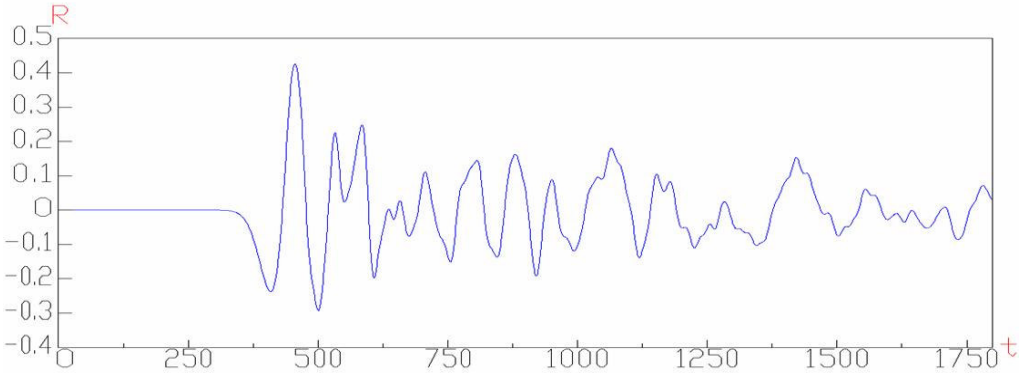
Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
3	438430	4524029	5 dk 45 s	7 dk 50 s	0,42 br

Şekil 6.46: P_3 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

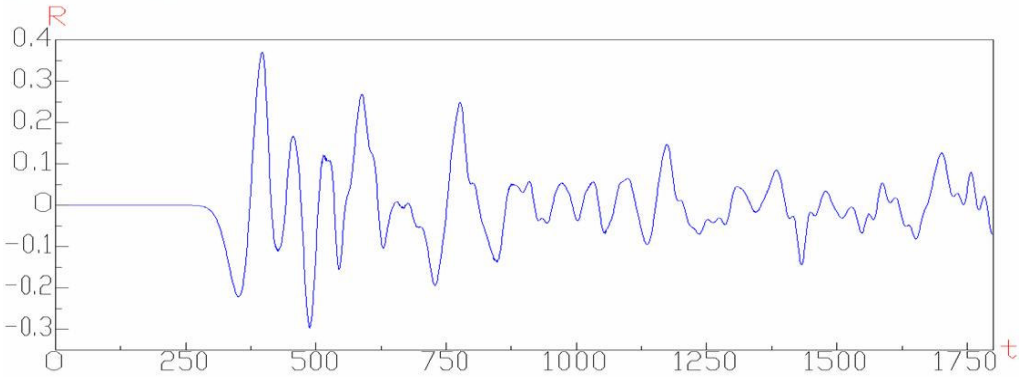
Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
4	438623	4522288	4 dk 25 s	4 dk 45 s	0,37 br

Şekil 6.47: P_4 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.



P	X	Y	t_0	t_R	R_0
5	437780	4519295	3 dk 40 s	5 dk 15 s	1,51 br

Şekil 6.48: P_5 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

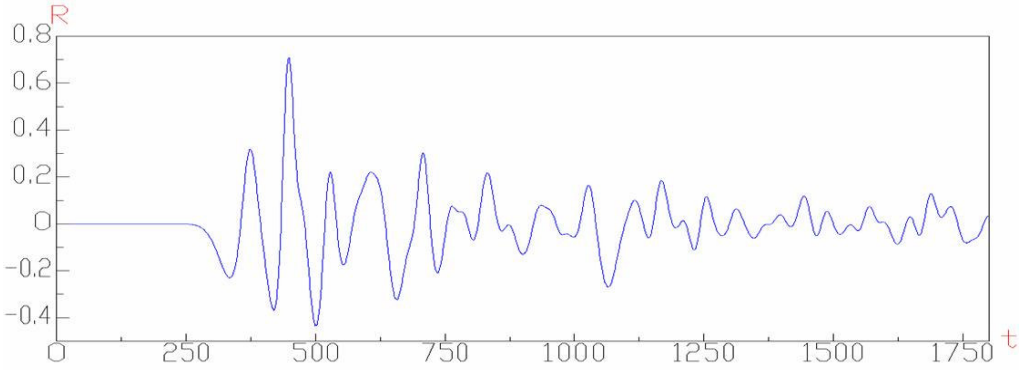
Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
6	439663	4520168	4 dk 15 s	7 dk 35 s	0,70 br

Şekil 6.49: P_6 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

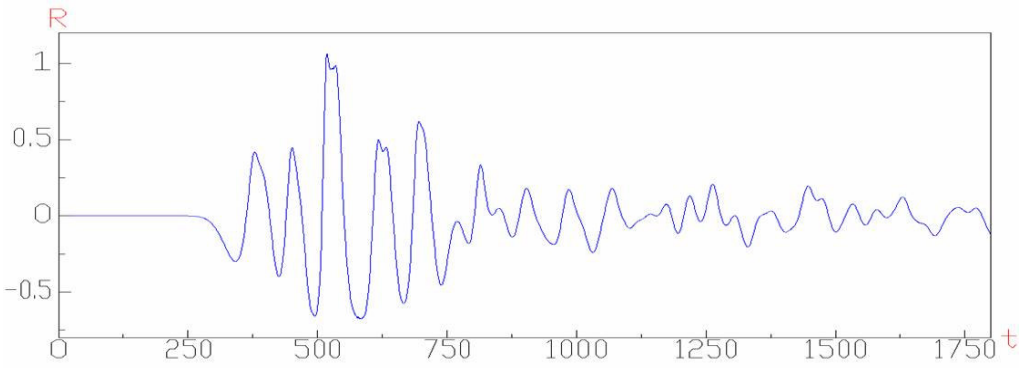
Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
7	440373	4520236	4 dk 20 s	8 dk 40 s	1,05 br

Şekil 6.50: P_7 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

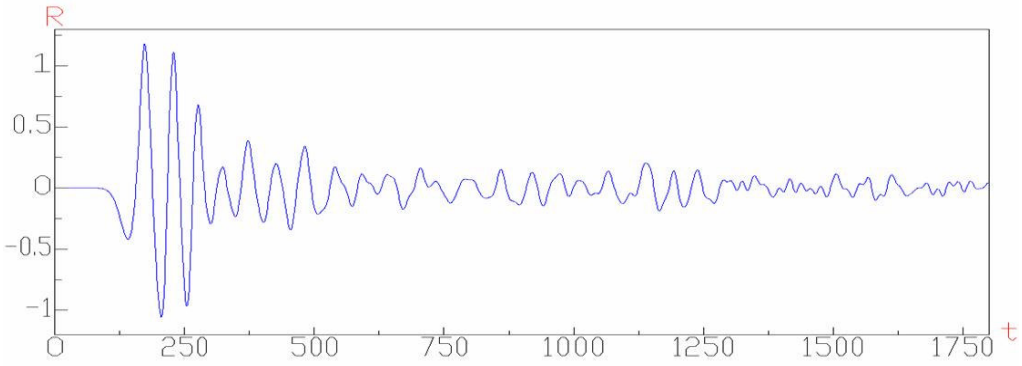
Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.





P	X	Y	t_0	t_R	R_0
8	438780	4517826	2 dk	2 dk 45 s	1,35 br

Şekil 6.51: P_8 Noktasına Ait Sonuçlar.

P : Sonucu Verilen Nokta Numarası,

X : X Yönündeki Koordinat Değeri,

Y : Y Yönündeki Koordinat Değeri,

t_0 : Kıyıda Dalga Hareketinin Başladığı Zaman,

t_R : Maksimum Dalga Yüksekliğinin Oluştuğu Zaman,

R_0 : 1 br Kalınlığındaki Heyelan Alanının Hareketi Sonucu Oluşan Maksimum Dalga Yüksekliği.

KAYNAKLAR

[1] **Kabdaşlı, S.,** 1992. Kıyı Mühendisliği, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[2] **Mader, C.L.,** 2004. Numerical Modeling of Water Waves, Second Edition, CRC Press, New York.

[3] **U.S. Army Corps of Engineers.,** 2002. Coastal Engineering Manuel, EM 1110-2-1100, Washington.

[4] **Yüksel, Y., Çevik, E., Çelikoğlu, Y.,** 1998. Kıyı ve Liman Mühendisliği. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Ankara.

[5] **Yalçıner, A.C., Pelinovsky, E.N., Okal, E., Synolakis, C.E.,** 2003. Submarine Landslides and Tsunamis. Tsunami Hazard Zone, Nato Science Series, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

[6] **Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L.,** 2000. The Finite Element Method Fifth Edition Volume 3: Fluid Dynamics, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[7] **Cığızoğlu, H.K.**, 2005. Numerical Modeling Class Notes, İ.T.Ü. Civil Engineering Faculty, İstanbul.

[8] **Ergin, A.**, 2005. Coastal Engineering-I Class Notes, M.E.T.U. Civil Engineering Faculty, Ankara.

[9] **Ertürk, Ş.N.**, 2002. Dalga Mekaniği Ders Notları, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.

[10] **Ertürk, Ş.N.**, 2003. Akışkanlar Mekaniği Ders Notları, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.

[11] **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.

[12] **Olsen, N.R.B.**, 2000. CFD Algorithms for Hydraulic Engineering, Department of Hydraulic and Environmental Engineering The Norwegian University of Science and Technology, Norway.

[13] **Kırca, V.Ş.Ö.**, 2003. Uzun dalgaların kıyıdaki davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] **Özmen, B.**, 2001. Kuzey Marmara Denizi'nde tsunami simülasyonları için gereken batımetrik datanın oluşturulması, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[15] **Ulusoy, A.İ.**, 2001. Tsunami oluşumu, etkilerin azaltılması ve İstanbul uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[16] **Yılmaz, T.O.**, 2004. Dalga modellenmesinde yapay sinir ağlarının TELEMAC nümerik modeli ile birlikte kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[17] **Cho, Y.S., Park, K.Y. and Lin, T.H**., 2004. Run-up heights of nearshore tsunamis based on quadtree grid system, *Ocean Engineering,* **31,** 1093-1109.

[18] **Gedik, N., İrtem, E. ve Kabdaşlı, M.S**., 2005. Tsunaminin geçirimli kıyılardaki tırmanma yüksekliğinin deneysel incelenmesi, *İ.T.Ü. Dergisi/d-Mühendislik,* **1,** 3-12.

[19] **Halif, M.N.A. and Sabki, S.N**., 2005. The physics of tsunami: Basic understanding of The Indian Ocean disaster, *American Journal of Applied Sciences,* **8,** 1188-1193.

[20] **Hayir, A.**, 2006. The near-field tsunami amplitudes caused by submarine landslides and slumps spreading in two orthogonal directions, *Ocean Engineering,* **33,** 654-664.

[21] **Hebert, H., Schindele, F., Altinok, Y., Alpar, B. and Gazioglu, C**., 2005. Tsunami hazard in the Marmara Sea (Turkey): a numerical approach to discuss active faulting and impact on the İstanbul coastal areas, *Marine Geology,* **215,** 23-43.

[22] **Hubbard, M.E. and Dodd, N**., 2002. A 2D numerical model of wave run-up and overtopping, *Coastal Engineering,* **47,** 1-26.

[23] **İmren, C., Demirbağ, E. ve Şengör, A.M.C**., 2003. Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi içindeki devamı, *İ.T.Ü. Dergisi/d-Mühendislik,* **6,** 47-58.

[24] **Le Pichon, X., Şengör, A.M.C., Demirbağ, E., Rangin, C., İmren, C., Armijo, R., Görür, N., Çağatay, N., Mercier de Lepinay, B., Meyer, B., Saatçılar, R. and Tok, B**., 2001. The active Main Marmara Fault, *Earth and Planetary Science,* **192,** 595-616.

[25] **Sklarz, A.M., Spielvogel, L.Q. and Loomis, H.G**., 1979. Numerical simulation of the 29 November 1975 Island of Hawaii Tsunami by the Finite Element Method, *Journal of Physical Oceanography,* **9,** 1022-1031.

[26] **Yalçıner, A.C., Alpar, B., Altınok, Y., Özbay, İ. and Imamura, F**., 2002. Tsunamis in the Sea of Marmara Historical documents fort he past, models fort he future, *Marine Geology,* **190,** 445-463.

[27] **Aydın, U.**, 2005. Kıyıları yutan dev liman dalgaları tsunamiler ve Türkiye kıyıları, **15,** 1-8, Atatürk Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi Bülteni, Erzurum.

[28] **Yalçıner, A.C.**, 1999. 1999 İzmit tsunamisi, **383,** 34-39, TÜBİTAK Bilim Teknik Dergisi, Ankara.

[29] **Yaltırak, C.**, 2005. Ulusu ve cumhuriyeti bekleyen tehlike doğu Marmara depremi bilimsel, siyasal, sosyal gerçekler ve çözümler, **42,** 5-24, Aydınlanma 1923 Dergisi, İstanbul.

[30] **Alpar, B., Yalciner, A.C., Imamura, F. and Synolakis, C.E**., 2001. Determination of probable underwater failures and modeling of tsunami propagation in the Sea of Marmara, *U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Rewiev and International Tsunami Symposium,* Seattle, Washington, 7-10 August, p. 535-543.

[31] **Altinok, Y., Ersoy, S., Yalciner, A.C., Alpar, B., and Kuran, U**., 2001. Historical tsunamis in the Sea of Marmara, *U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Rewiev and International Tsunami Symposium,* Seattle, Washington, 7-10 August, p. 527-533.

[32] **Yalciner, A.C., Synolakis, C.E., Alpar, B., Borrero, J.C., Altinok, Y., Imamura, F., Tinti, S., Ersoy, S., Kuran, U**., **Pamukcu, S. and Kanoglu, U.,** 2001. Field surveys and modeling of the 1999 Izmit tsunami, *U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Rewiev and International Tsunami Symposium,* Seattle, Washington, 7-10 August, p. 557-563.

[33] **Alpar, B., Yalçıner, A.C. ve Özbay, İ**., 2000. Marmara Denizi'nde potansiyel heyelan alanları ve bunlara ilişkin depreşim dalgası (tsunami) oluşum ve hareketleri, *III. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu,* Çanakkale, Türkiye, 5-7 Ekim.

[34] **Altınok, Y., Yalçıner, A.C., Alpar, B. ve Ersoy, Ş**., 2000. Tarihsel veriler ışığında Marmara Denizi'nde depreşim dalgaları (tsunamiler), *III. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu,* Çanakkale, Türkiye, 5-7 Ekim.

[35] **Hayır, A.,** 2005. Marmara Denizi'nin kuzey batısında deniz tabanında bulunan heyelanın hareket etmesi durumunda oluşacak olan tsunami büyüklükleri için bir model, *XIV. Ulusal Mekanik Kongresi,* Antakya, Türkiye, 12-16 Eylül.

[36] **Kabdaşlı, S., Şeker, D., Ulusoy, İ., Kırca, Ö. ve Aydıngakko, A**., 2003. Tsunami etkilerinin belirlenebilmesi için hidrolik modeller ve CBS'lerin bütünleşik kullanımı, *V. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansıı,* İstanbul, Türkiye, 26-30 Mayıs.

[37] **Şeker, Z.D. ve Kabdaşlı, S**., 2002. Kıyılardaki doğal felaketler için risklerin CBS ile analizi ve risk haritalarının üretilmesi, *Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu,* Konya, Türkiye, 16-18 Ekim.

[38] **Yalçıner, A.C.,** 2000. Tarihsel ve güncel örneklerle depreşim dalgası (tsunami) ve korunma yöntemleri, *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi,* İstanbul, Türkiye, 12 Aralık.

[39] **Aunay, S., Couche, P. and Hervouet, J.M.,** 1999. Installation, use and maintenance of the TELEMAC system on UNIX and WINDOWS-NT, Department Laboratoire National d'Hydraulique, EDF-LNG report HE-43/99/052/A, France.

[40] **EDF-DER,** 1998. 2D Hydrodynamics TELEMAC-2D Software Introductory Examples, Department Laboratoire National d'Hydraulique, France.

[41] **EDF-DER,** 1998. 2D Hydrodynamics TELEMAC-2D Software Reference Manuel, Department Laboratoire National d'Hydraulique, France.

[42] **EDF-DER,** 1998. 2D Hydrodynamics TELEMAC-2D Software User Manuel, Department Laboratoire National d'Hydraulique, France.

[43] **Heitner, L.H**., 1969. A mathematical model for calculation of the run-up of tsunamis, California Institute of Technology Earthquake Engineering Research Laboratory, California, U.S.A.

[44] **Janin, J.M., David, E. and Denot, T.,** 1997. TELEMAC-3D and POSTEL-3D User's Manuel, Department Laboratoire National d'Hydraulique, EDF-LNG report HE-42/97/051/B, France.

[45] **Quiquempoix, O., Boulet, T. and Hervouet, J.M.,** 1998. MATISSE User's Guide, Department Laboratoire National d'Hydraulique, EDF-LNG report HE-42/98/004/A, France.

[46] **Quiquempoix, O.,** 1997. RUBENS User's Guide, Department Laboratoire National d'Hydraulique, EDF-LNG report HE-45/97/009/A, France.

[47] **Tüysüz, O**., 2003. İstanbul için deprem senaryolarının hazırlanmasında coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı, İ.T.Ü. Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, İstanbul, Türkiye.

[48] **Marmara Denizi Tuzla Bölgesi Batimetri Haritası**, 2000. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHOD), 1 adet dwg uzantılı AutoCAD dosyası, İstanbul.

[49] **Yağcı, O.,** 2006. Kişisel görüşme. İstanbul.

[50] **Fıstıkoğlu, O.,** 2006. Kişisel görüşme. İzmir.

[51] **COMET Program,** Rip Currents: Nearshore Fundamentals Print Version, http://meted.ucar.edu/marine/ripcurrents/NSF/print.htm.

[52] **Kaynak, U.,** 2002. Tsunami, Yapı World Araştırma Web Sayfası, http://www.yapiworld.com/deprem/kaynak_tsunami.htm.

[53] **Marmara'da Tsunami Riski**, Doğa Hareketleri Araştırma Derneği, http://www.sismikhaber.org/makaleler/documents/tsunami_ve_marmara.asp

ÖZGEÇMİŞ

Burkay ŞEŞEOĞULLARI, 1979 yılında Mardin'in Mazıdağı ilçesinde doğmuştur. İlk, orta ve lise eğitimini Manisa'nın Soma ilçesinde tamamlamıştır. 2002 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamlayıp, özel bir müteahhitlik firmasında İnşaat Mühendisi olarak çalışmıştır. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.