

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖLLERDEKİ HİDRODİNAMİK DENGeye SİSMİK SALINIMLARIN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Murat AKSEL

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

KASIM 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖLLERDEKİ HİDRODİNAMİK DENGeye SİSMİK SALINIMLARIN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Yük. Müh. Murat AKSEL
(517102002)**

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Sedat KABDAŞLI

KASIM 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 517102002 numaralı Doktora Öğrencisi Murat AKSEL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GÖLLERDEKİ HİDRODİNAMİK DENGeye SİSMİK SALINIMLARIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Sedat KABDAŞLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İlhan AVCI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet DOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tarkan ERDİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Adem AKPINAR
Uludağ Üniversitesi

Teslim Tarihi :13 Kasım 2017
Savunma Tarihi :27 Kasım 2017





Anneme, eşime ve çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Göl, baraj gölü, körfez, lagün vb. kapalı ve yarı kapalı sistemlerde deprem etkisinin hidrodinamik denge durumuna olan direk ve dolaylı etkilerinin hidrodinamik modelleme metodu ile araştırıldığı, sahadan temin edilen veriler ile karşılaştırıldığı tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen ve mesleki tecrübesi ile tez çalışmama sayısız ve çok değerli katkılar sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI'ya, tezin planlamasında ve ilerlemesinde sürekli destek olan Prof. Dr. İlhan AVCI ve Prof. Dr. Ahmet DOĞAN'a, tez içeriğindeki ölçüm verileri temin etmemde önemli destekleri bulunan Müh. Tuğrul TOKATLI ve Müh. Canan KARZAN'a, tezimin deprem verilerinin temini ve derlenmesinde destek olan Doç. Dr. Beyza TAŞKIN'a, deprem ve çalkalanma problemlerinde mühendislik bilgisini sürekli olan benimle paylaşan Yrd. Doç. Dr. Gökhan YAZICI'ya, tezim kapsamında kullanılan yazılım ve donanımın temininde gerekli bütçenin oluşturulması için İTÜ BAP Birimi Başkanlığı'na, tez çalışmamın ilerlemesi takip eden ve destek olan Prof. Dr. Mehmet BERKÜN ve Prof. Dr. Yusuf Hatay ÖNEN'e, tezimin içeriğinin genişletilmesine katkı sağlayan Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR, Doç. Dr. Tarkan ERDİK ve Doç. Dr. Adem AKPINAR'a, çalışmalarım sırasında yaptığım analizlerde yardımcı olan Yük. Müh. Sadık YİĞİT, Yük. Müh. Volkan ÖZTUĞ, Müh. Ömer KORKMAZ ve Müh. İrem GÜMÜŞÇÜ'ye, yoğun çalışmalarımnda manevi olarak hep yanımda olan ve destekleyen sevgili merhume anneme, eşim Gülşah'a, kızlarım Ela ve Leyla'ya ve ismini sayamadığım ve yol boyu destek olan tüm dostlarıma teşekkürü borç bilirim.

Kasım 2017

Murat AKSEL
(Yüksek Mühendis)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 Göller ve Göl Hidrodinamiği.....	10
2.1.1 Tanımlar	10
2.2 Göl Hidrodinamiği, Göl İçi Akımlar ve Etkileyen Kuvvetler	11
2.2.1 Rüzgar kaynaklı göl karışımı	12
2.2.2 Sayhe-salınım akıntıları.....	12
2.2.3 Hidrolojik akıntılar	12
2.2.4 Yoğunluk akıntıları	13
2.3 Deprem	13
2.3.1 Tanımlar	13
2.3.2 Depremlerin etkileri	18
2.3.3 Denklemler	19
2.4 Türkiye’de Depremler ve Depremlerin Etkileri	22
3. KULLANILAN MODELLEME METODU	35
3.1 Modelleme Yazılımı	50
4. HİDRODİNAMİK MODELLEME.....	55
4.1 Hidrodinamik Model Kurulum Adımları	55
4.1.1 Modelin kurulması (Preprocess)	55
4.1.2 Modelin çalıştırılması (Hesaplama / Process).....	56
4.1.3 Model sonuçlarının analizi (Postprocess)	56
4.2 Örnek Çalışma Alanı Van Gölü	56
4.2.1 Van Gölü senaryoları	59
4.2.2 Van Gölü Ekim 2011 depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi	61
4.2.3 Van Gölü Kasım 2011 depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi	62
4.2.4 Van Gölü Ekim 2011 depremi modeli hassasiyet analizleri	63
4.2.5 Van Gölü için senaryo sonuçlarının değerlendirilmesi.....	65

4.2.6 Van Gölü Ekim 2011 depremi sonuçlarının ölçüm verileriyle karşılaştırılması	77
4.3 Örnek Çalışma Alanı Eğirdir Gölü	80
4.3.1 Eğirdir Gölü senaryoları	84
4.3.2 Eğirdir Gölü Dinar Depremi Doğu-Batı salınım durumunun modellenmesi	86
4.3.3 Eğirdir Gölü Dinar Depremi Kuzey-Güney salınım durumunun modellenmesi	88
4.3.4 Eğirdir Gölü Dinar Depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi	88
4.3.5 Eğirdir Gölü El-Centro Depremi Doğu-Batı salınım durumunun modellenmesi	88
4.3.6 Eğirdir Gölü El-Centro Depremi Kuzey-Güney salınım durumunun modellenmesi	89
4.3.7 Eğirdir Gölü El-Centro Depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi	90
4.3.8 Eğirdir Gölü askıda katı madde kirliliği durumu modellenmesi	90
4.3.9 Eğirdir Gölü askıda katı madde kirliliği durumunun üç boyutlu Dinar depremi etkisi altında modellenmesi	91
4.3.10 Eğirdir Gölü taban malzemesinin üç boyutlu Dinar depremi etkisi altında askıya kalkma durumunun modellenmesi	91
4.3.11 Eğirdir Gölü için modelleme sonuçlarının değerlendirilmesi	92
5. MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	115
6. SONUÇLAR.....	119
KAYNAKLAR.....	123
EKLER	129
ÖZGEÇMİŞ	137

KISALTMALAR

AFAD	: TC. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AKM	: Askıda Katı Madde
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri
DSİ	: Devlet Su İşleri
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
GSHAP	: Global Seismic Hazard Assessment Program
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MOST	: Method of Splitting Tsunami
NEMC	: Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute National Earthquake Monitoring Center
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
SHARE	: Seismic Hazard Harmonization in Europe
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UTM	: Universal Transverse Mercator
WGS84	: World Geodetic System 1984



SEMBOLLER

a	: İvme
A	: Alan
A_d	: Dalganın genliği
a_s	: Sayhe genliği
b	: Yük kaybı
c	: Dalga hızı
C	: Konsantrasyon
C_{b,i}	: Sediment taşınımında hacimsel oran değeri
CMSC	: Sayısal difüzyon sabiti
C_{SOR}	: Kaynak terimi
c_{ses}	: Sesin su içindeki hızı
c_v	: Özgül ısı sabiti
Dk	: Difüzyon katsayısı
d_i	: Sedimentin karakteristik çapı
dV	: Birim hacim
e	: Birim hacim başına enerji
f	: Viskoz ivme
f	: Kuvvet
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Derinlik
k	: Katsayı
k_d	: Dalga adımı (sayısı)
L	: Uzunluk
m	: Kütle
n_s	: Nikuradse pürüzlülük katsayısı
P	: Basınç
q	: Birim ısı akışı
Q	: Isı akışı
q_{b,i}	: Sediment debisi
r	: Radyal mesafe
R	: Silindirik veya kartezyen koordinat sistemi kullanımına bağlı çevrim yapmaya yarayan katsayı
RMSC	: Schmidt sayısının tersi
R_{DIF}	: Türbülans açılım terimi
R_{SOR}	: Kütle kaynağı
Sc	: Schmidt sayısını
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
T_s	: Periyot
U	: Ortalama akıntı hızı
u_g	: Zemin hızı
u, v, w	: Yer değiştirme vektörü bileşenleri

U_s	: Kontrol hacminin yüzeyinde akım hızı
U_w	: Sonlu elemanın hareket hızı
V	: Hız
ν_f	: Kinematik viskozite
V_F	: Akıma açık hacim
w	: Dikey hız
W_v	: Yapılan iş
α_i	: Sürüklenme parametresi
β	: Sediment taşınımında Richardsan-Zaki düzeltme yöntemi katsayısı
$\eta(x,t)$	: Belirli bir mesafedeki belirli bir zamanda su yüzü kotu
θ	: Eksen etrafındaki dönme açısı
$\theta_{cr,i}$	: Kritik Shields parametresi
θ_i	: Lokal Shields parametresi
μ	: Dinamik viskozite
μ_m	: Momentum saçılım katsayısı
ν_p	: Türbülans saçılımı için katsayı
ξ	: Vortisite
ξ_h	: Su yüzeyi kotu
ρ	: Yoğunluk
σ_n	: Normal gerilme
τ	: İntegrasyon değişkeni
τ_n	: Kayma gerilmesi
Φ	: Viskoz dağılım fonksiyonu
ω	: Açısal hız
∇	: Degrade operatörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 1990 - 2014 yılları arasında Türkiye’de meydana gelmiş en şiddetli 15 deprem.....	25
Çizelge 2.2 Türkiye’de meydana gelmiş $M_s > 5,5$ olan 15 deprem.....	25
Çizelge 2.3 Türkiye’de can kaybı ve hasar olarak en şiddetli 10 deprem.....	26
Çizelge 2.4 23 Ekim 2011 tarihi için DSI su seviyesi ölçüm istasyonlarında ölçülen saatlik ortalama su seviyesi.....	31
Çizelge 2.5 23 Ekim 2011 tarihi için DSI su seviyesi ölçüm istasyonlarında ölçülen depreme kadar ortalama, en yüksek ve en düşük su seviyesi ve ölçüm saatleri.....	32
Çizelge 2.6 09 Kasım 2011 tarihi için DSI su seviyesi ölçüm istasyonlarında ölçülen depreme kadar ortalama, en yüksek ve en düşük su seviyesi ve ölçüm saatleri.....	32
Çizelge 4.1 Modellemede kullanılan kurulu bilgisayara ait özellikler.....	56
Çizelge 4.2 Van Gölü doğal periyodu.....	58
Çizelge 4.3 Van Gölü izleme noktaları bilgileri.....	61
Çizelge 4.4 Ekim 2011 Van depremi Bitlis Merkez DSI 173. şube istasyonu kaydı parametreleri.....	62
Çizelge 4.5 Kasım 2011 Van depremi Bitlis Merkez DSI 173. şube istasyonu kaydı parametreleri.....	63
Çizelge 4.6 Van Gölü için senaryo çalışmaları.....	65
Çizelge 4.7 Van Gölü yüzey alan değişimi.....	77
Çizelge 4.8 Van Gölü için hesaplanan yüzey alan değişim serilerinin hakim periyodları.....	77
Çizelge 4.9 Eğirdir Gölü doğal periyodu.....	82
Çizelge 4.10 Eğirdir Gölü doğal periyodu (iki bölgesi).....	83
Çizelge 4.11 1995 Dinar depremi Burdur istasyonu kaydı parametreleri.....	87
Çizelge 4.12 1940 El-Centro Depremi Imperial Valley İstasyonu kaydı parametreleri.....	89
Çizelge 4.13 Askıda katı madde özellikleri.....	91
Çizelge 4.14 Taban malzemesi özellikleri.....	92
Çizelge 4.15 Eğirdir Gölü için senaryo çalışmaları.....	92
Çizelge 4.16 Eğirdir Gölü için hesaplanan yüzey alan değişim serilerinin hakim periyodları.....	95



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	USGS tarafından hazırlanmış fay hatları haritası.	14
Şekil 2.2	Birincil (P) ve ikincil (S) dalgalarının hareketi.	16
Şekil 2.3	Love ve Rayleigh dalgalarının hareketi.	17
Şekil 2.4	1964 Nigata depreminde sivilaşmış zeminlerde hasar almış yapılar.	18
Şekil 2.5	2004 Niigataken-Chuetsu depreminde sivilaşmış zeminlerde hasar almış altyapılar.	18
Şekil 2.6	1965 Puget Sound Depreminde heyelan sonucunda hasar almış demiryolu.	19
Şekil 2.7	Kapalı ve yarı kapalı havza için ilk dört doğal salınım modu.	21
Şekil 2.8	Dünya deprem riski haritası.	23
Şekil 2.9	Tarihsel deprem kataloğu.	23
Şekil 2.10	Aletsel deprem kataloğu.	24
Şekil 2.11	Avrupa deprem riski haritası.	24
Şekil 2.12	Van Gölü DSİ göl seviyesi ölçüm istasyonları ve DMİ Van meteoroloji istasyonu yerleşimi.	28
Şekil 2.13	Gevaş (Güzelkonak) istasyonu seviye ölçüm sonuçları.	29
Şekil 2.14	Van İskele istasyonu seviye ölçüm sonuçları.	29
Şekil 2.15	Tatvan istasyonu seviye ölçüm sonuçları.	30
Şekil 2.16	İstasyonlara göre su seviyesi günlük değişimi.	30
Şekil 2.17	Van ili günlük en yüksek anlık rüzgar ve ortalama rüzgar hızı.	33
Şekil 3.1	Kontrol hacmi.	37
Şekil 3.2	Kütlesel akım terimleri özet şeması.	37
Şekil 3.3	Silindirik koordinat sistemi.	38
Şekil 3.4	Yüzeyler ve yüzeylere etkiyen kuvvetler.	40
Şekil 3.5	Kontrol hacmi – vektörel gösterimle momentum ifadesi.	41
Şekil 3.6	Momentum akı terimleri özet şeması.	41
Şekil 3.7	Kontrol hacmi – gerilme ve yüzey kuvvetleri.	42
Şekil 3.8	Kontrol hacmi – x doğrultusu için enerji akısı.	46
Şekil 3.9	Yüzeylerden geçen enerji akısının özeti.	46
Şekil 3.10	Yüzeylerden geçen ısı akısının özeti.	47
Şekil 3.11	Viskoz akışkan akımı için karakteristik sınır koşulları.	49
Şekil 4.1	Van Gölü yerbulduru haritası.	57
Şekil 4.2	Van Gölü batimetrisi ve çevre topografyası haritası.	57
Şekil 4.3	Van Gölü çevresinde meydana gelen 3 Mw ve üzeri şiddetteki depremlerin dağılımı.	58
Şekil 4.4	23 Ekim 2011 Van depremi etki bölgesi.	59
Şekil 4.5	Van Gölü modeli.	60
Şekil 4.6	Van Gölü modeli izleme noktaları.	61
Şekil 4.7	Ekim 2011 Van Depremi sırasında kayıta olan istasyonlar.	62
Şekil 4.8	Kasım 2011 Van Depremi sırasında kayıta olan istasyonlar.	63

Şekil 4.9 Pürüz yüksekliği için hassasiyet analizi Tatvan su yüzeyi değişimi zaman grafiği.	64
Şekil 4.10 Viskozite değişimi için hassasiyet analizi Tatvan su yüzeyi deplasmanı zaman grafiği.	64
Şekil 4.11 Ekim 2011 Van Gölü Tatvan izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	66
Şekil 4.12 Ekim 2011 Van Gölü Van Merkez (İskele) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	66
Şekil 4.13 Ekim 2011 Van Gölü Gevaş (Güzelkonak) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	67
Şekil 4.14 Ekim 2011 Van Gölü göl merkez izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	67
Şekil 4.15 Ekim 2011 Van Gölü Erciş Körfezi izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	67
Şekil 4.16 Ekim 2011 Van Gölü tüm izleme noktalarının ilk 15000 sn için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	68
Şekil 4.17 Kasım 2011 Van Gölü Tatvan izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	69
Şekil 4.18 Kasım 2011 Van Gölü Van Merkez (İskele) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	69
Şekil 4.19 Kasım 2011 Van Gölü Gevaş (Güzelkonak) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	69
Şekil 4.20 Kasım 2011 Van Gölü göl merkez izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	70
Şekil 4.21 Kasım 2011 Van Gölü Erciş Körfezi izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	70
Şekil 4.22 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait derinlik boyunca ortalama hız: (DBOH).	71
Şekil 4.23 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait taban hızı: (TH).	72
Şekil 4.24 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait türbülans kinetik enerjisi: (TKE).	72
Şekil 4.25 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait X doğrultusundaki vortisite: (VORX).	73
Şekil 4.26 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait Y doğrultusundaki vortisite: (VORY).	73
Şekil 4.27 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait Z doğrultusundaki vortisite: (VORZ).	73
Şekil 4.28 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait vortisite zaman grafiği (VORT).	74
Şekil 4.29 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait hız zaman grafiği (VT).	75
Şekil 4.30. Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait düşey hız zaman grafiği (VZ).	75
Şekil 4.31 Ekim 2011 Van Depremi Van Gölü yüzey alan değişim grafiği.	75
Şekil 4.32 Kasım 2011 Van Depremi Van Gölü yüzey alan değişim grafiği.	76
Şekil 4.33 Ekim 2011 ve Kasım 2011 depremlerinin karşılaştırma grafiği.	76
Şekil 4.34 Ekim 2011 Van Depremi Van Gölü modelleme sonuçları ve DSİ ölçümleri karşılaştırma grafiği.	79
Şekil 4.35 Eğirdir Gölü yerbulduru haritası.	81

Şekil 4.36 Eğirdir Gölü debi giriş ve çıkış noktaları.	82
Şekil 4.37 Eğirdir Gölü batimetri ve çevre topografyası haritası.	83
Şekil 4.38 Göller bölgesinde ve çevresinde meydana gelen 3 Mw ve üzeri şiddetteki depremlerin dağılımı.	84
Şekil 4.39 Ekim 1995 Dinar Depremi etki bölgesi.	84
Şekil 4.40 Eğirdir Gölü modeli.	85
Şekil 4.41 Eğirdir Gölü modeli izleme noktaları.	86
Şekil 4.42 1995 Dinar Depremi sırasında kayıttaki olan istasyonların yerleşimi.	87
Şekil 4.43 1940 El-Centro Depremi Merkezi ve Imperial Valley İstasyonu.	89
Şekil 4.44 Eğirdir Gölü içinde askıda katı madde konsantrasyonu tanımlanan bölge.	90
Şekil 4.45 Senaryo 2 – Dinar - DB doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.	93
Şekil 4.46 Senaryo 3 – Dinar – KG doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.	93
Şekil 4.47 Senaryo 4 – Dinar üç boyutlu model göl yüzey alanı değişimi.	93
Şekil 4.48 Senaryo 5 – El-Centro – DB doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.	94
Şekil 4.49 Senaryo 6 – El-Centro – KG doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.	94
Şekil 4.50 Senaryo 7 – El-Centro üç boyutlu model göl yüzey alanı değişimi.	94
Şekil 4.51 Derinlik boyunca ortalama hız: (DBOH)	96
Şekil 4.52 Su yüzeyi değişimi: (SYD).	97
Şekil 4.53 Tabandaki Hız: (TH).	98
Şekil 4.54 Türbülans Kinetik Enerjisi: (TKE).	99
Şekil 4.55 Vortisite: (VORT).	100
Şekil 4.56 Senaryo 6 ve 7 için vortisite – zaman grafiği.	100
Şekil 4.57 Hız: (VT).	101
Şekil 4.58 Z doğrultusundaki hız: (VZ).	102
Şekil 4.59 Su yüzeyi değişimi kontörlerinin karşılaştırılması.	103
Şekil 4.60 1-3-5 numaralı izleme noktalarında su yüzeyi değişimi – zaman grafiği	104
Şekil 4.61 15-16-17-18 numaralı izleme noktalarında su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	105
Şekil 4.62 13 – 17 – 24 numaralı izleme noktalarında su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.	106
Şekil 4.63 AKM konsantrasyonunun değişim konturleri.	108
Şekil 4.64 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 0 sn).	109
Şekil 4.65 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 1030 sn).	109
Şekil 4.66 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 1300 sn).	110
Şekil 4.67 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 2300 sn).	110
Şekil 4.68 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 35000 sn).	111
Şekil 4.69 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 75000 sn).	111
Şekil 4.70 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 100000 sn).	112
Şekil 4.71 Taban yüksekliği değişim konturleri (t = 100000 sn).	112
Şekil 4.72 Taban yüksekliği değişim konturleri – pozitif değerler (t = 100000 sn).	113



GÖLLERDEKİ HİDRODİNAMİK DENGEYE SİSMİK SALINIMLARIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Türkiye coğrafi konumu dolayısıyla önemli depremlerin meydana geldiği bir bölgede yer almaktadır. Son yüz yıl içinde Türkiye’de 15’in üzerinde şiddetli ve tahribatı fazla deprem meydana gelmiştir. Bu tez çalışmasında Türkiye’de ve dünyada meydana gelmiş önemli depremlerin Eğirdir Gölü ve Van Gölü üzerindeki olası etkileri incelenmiştir. Tarihsel olarak çalışılan göller ile ilişkili depremlerin etkileri araştırıldığı gibi dünya deprem literatürü açısından önemli bir deprem olan El-Centro Depremi’nin (1940) kurgusal olarak Eğirdir Gölü üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında, iki farklı göl sistemi olan Eğirdir Gölü ve Van Gölü örnek çalışma alanı olarak alınmıştır. Göllerin deprem altındaki davranışlarının modellenmesinde Flow-3D programı kullanılmıştır. Van Gölü’nde yakın tarihli meydana gelmiş Ekim ve Kasım 2011 depremlerinin etkilerinin araştırılması için hidrodinamik modelleme çalışması yapılarak üç boyutlu deprem ivme serisi tüm göl üzerine etkililerek göldeki dinamik değişimler hesaplanmıştır. Bu iki depremde hesaplanan dalga yükseklikleri Van Gölü’nde sürekli ölçüm yapan Devlet Su İşleri göl su seviyesi ölçüm istasyonunun deprem günündeki ölçüm değerleri ile karşılaştırılmış ve değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Modelleme parametreleri ve kabullerin uygunluğu Van Gölü modelinde kontrol edilerek çalışma alanı olarak daha küçük olan Eğirdir Gölü’nün deprem altındaki davranışı da incelenmiştir. Eğirdir Gölü içinse hem Eğirdir için tarihi önemi olan Dinar Depremi hem de kurgusal olarak El-Centro Depremi’nin gölde meydana getirdiği dinamik etkiler incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Eğirdir Gölü için hazırlanan senaryo çalışmalarında gölün depreme tepkisinin daha iyi anlaşılması için Dinar ve El-Centro depremlerinin sadece Doğu-Batı, sadece Kuzey-Güney ve üç boyutlu deprem ivmeleri farklı farklı senaryolarda tek olarak göl kütlesine etkililmiştir.

Tüm modelleme sonuçları göl bazında kendi aralarında değerlendirildiği gibi iki farklı boyut ve şekildeki göl için farklı şiddetlerdeki depremlerin etkileri karşılıklı olarak da incelenmiştir. Van ve Eğirdir Gölleri için deprem etkisi altındaki salınım periyodlarının literatürde bulunan doğal salınım periyodlarından daha küçük olduğu hesaplanmıştır. İki göl sisteminde de depremin şiddetine bağlı olarak sığ bölgelerde su baskını riskleri görülmüştür. Eğirdir Gölü için yapılan tek doğrultu analizlerinde gölün kuzey ve güney olmak üzere iki farklı çanak şeklinde depreme tepki gösterdiği bulunmuştur. Van Gölü için göl ortasında kıyı bölgelerinden daha sayhe adı verilen dalgalar hesaplanmasına rağmen bu durum Eğirdir Gölü için tam tersi olarak bulunmuştur. Hem Van Gölü hem Eğirdir Gölü modelleme ve ölçüm sonuçları göstermektedir ki deprem sonrasında gölün büyüklüğü ve depremin şiddetine bağlı olarak depremin meydana getirdiği salınımlar ve bu salınımlar sonucunda meydana gelen sayheler günlerce sürebilmektedir.

Eğirdir Gölü senaryolarında depremin göl hidrodinamiği üzerindeki etkileri araştırıldığı gibi taban ve askı malzemesinin askıya kalkma, taşınma ve çökme süreçleri de incelenmiştir. Eğirdir Gölü'nde meydana gelebilecek askıda katı madde kirliliğinin çökme sürecine depremin etki edeceği, çökme sürecini uzatacağı ve depremin hakim doğrultusunda yayılım yaparak çökmesine neden olacağı görülmüştür. Eğirdir Gölü tabanında kurgusal olarak tanımlanan silt ve kum karışımı taban malzemesinin Dinar Depremi etkisiyle geçici bir süreliğine askıya kalktığı hesaplanmıştır. Eğirdir Gölü taban malzemesi olarak kurgulanan karakterdeki kum malzemenin bir kısmı deprem sonrasındaki 5 inci saniyede askıya kalkarak kısa süre içinde çökmektedir. Silt malzeme ise depremin bitiminden dakikalar sonrasında en yüksek askı konsantrasyonu sağlamakta ve uzun bir süre askıda kalmakta olduğu tespit edilmiştir.



INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SEISMIC WAVES ON HYDRODYNAMIC REGIME OF LAKES

SUMMARY

Behavior of large water bodies, especially natural and artificial lakes, under earthquake is investigated for various purposes in various research branches. In limnology, earthquake induced waves are investigated for sediment movements and stratigraphic changes at the bottom of the lake and changes in the lake girder due to the coastal depression. About artificial lakes, especially in dam lakes related to ground mechanics, the liquefaction of the ground and possible impacts on the dam structure were hardly examined. Particularly stratified, it is extremely important to examine the lakes where the mixture is less or not at all, and when the lakes are hydrodynamically stable, the hydrodynamic condition changes by seismic effects affect the whole system. The hydrodynamic balance of the present state of the lake is known, and the effects of this hydrodynamic balance to create a sudden and severe depression are not fully predictable and still require research.

Turkey is located in a serious earthquake zone. In the last century, more than 15 severe and demolishing earthquakes have occurred in Turkey. Considering the investigated effects of the major earthquakes in Turkey, numerous research reports and review studies have been conducted. Investigation and evaluation reports on different public institutions and universities as well as independent organizations about earthquakes and their effects has been prepared and presented. Structural damage, loss of life, geological effects caused by earthquake, soil liquefaction and damage due to liquefaction, etc. are main topics in these reports. These issues have been examined in detail in the reports and are continuing to be reviewed.

In this thesis study, possible effects of major earthquakes in Turkey and around the world on Lake Eğirdir and Lake Van were investigated. Dinar Earthquake (1995) for Eğirdir Lake and October and November 2011 Van Earthquakes for Van Lake were studied. In addition to recorded earthquakes in the history which effect the lakes, El-Centro Earthquake (1940), which is an important earthquake in earthquake literature, on Eğirdir Lake is also investigated as fictional.

In this thesis, Eğirdir and Van Lakes which are two different lake systems were taken as case study area. Flow-3D program was used to model the behavior of the lakes under earthquake condition. Earthquake were defined in model as timeserie of earthquake caused additional acceleration. In order to investigate the effects of the October and November 2011 earthquakes in Van Lake, a hydrodynamic modeling study was carried out and three dimensional earthquake acceleration series were applied on the whole lake body to calculate the hydrodynamic response of the lake. Calculated wave heights were compared with measured values at the earthquake day of the State Water Works lake water level monitoring stations which continuously measure in Van Lake. State Water Works monitoring stations in Van Lake are located in Gevas, Tatvan and Van Center port. And aslo in model same coordinates were

selected as historical probe points and timeseries of water surface displacement, pressure, velocity etc. parameters were calculated for these points. Measured values by State Water Works were compatible with the calculated ones in historical probe points in Flow-3D. The highest water surface displacement (seiche wave) was calculated as 0.40 – 0.45 m. In monitoring stations up to 50 cm water surface displacement (seiche wave) was also recorded in the Van Lake on the November Earthquake day in 2011. As a result of modeling, it was calculated the highest change in water surface displacement in the middle of the Van Lake and the lowest was in Erciş Gulf.

Time serie of Van Lake surface area change was calculated within the result of the two scenarios and when the dominant periods of the calculated time series were excluded, it was found that the North - South direction's period was compatible with analytically calculated natural period of the lake. Main oscillation direction in both earthquakes that occurred in Van Lake were calculated as N - S direction.

Behavior of earthquake of Lake Eğirdir examined, which is smaller than Lake Van, after the checking of modeling parameters. For Eğirdir Lake, first the dynamic effects of the Dinar Earthquake, which is both a historic event for Eğirdir was performed. Secondly, the El-Centro Earthquake was examined fictionally and effects of both earthquakes were compared. In the scenario studies prepared for Eğirdir Lake, East-West only, North-South only and three-dimensional earthquake accelerations of Dinar and El-Centro earthquakes were affected to lake body. Different scenarios compared to understand interaction between lake's two separated basins under oscillation. Dominated acceleration direction of the earthquake that the lakes are under influence is oscillating at a period close to the natural period in that direction. This result has been achieved by evaluating the Eğirdir Lake scenarios.

All modeling results were compared between the lake-based ones, as well as the effects of earthquakes of different magnitudes for two different size lake. For Lake Van and Eğirdir, oscillation period under earthquakes were calculated smaller than the period of natural in the literature. In two lake systems, flood risk were observed in shallow coastal regions. The seiche waves calculated in the middle of Lake Van smaller than coasts but in Lake Eğirdir exact opposite situation was determined. Modelling and survey results shows that, oscillations caused by earthquake and resulting seiches can continue for days long depending on the magnitude of earthquake for both lakes. When earthquakes that affect the closed or semi-closed systems like lakes and gulfs occur, there is a flood risk due to the earthquakes in the coastal areas in these regions. The flood risk area in both lakes were calculated as approximately 1 km². Considering the surface area of Lake Van, this value is important for Lake Eğirdir with its small size. Under earthquake effect on water body, the vertical velocity in any domain element in the lake is smaller than the velocities in the horizontal direction and the flow condition is transient. In particularly, the vorticity in the horizontal direction is the rotational extent in the vertical direction. These vorticities are high in shallow regions except for the wave break region where the depth is enough and the effect of the vorticity lasts for a long time.

In Lake Eğirdir scenarios, in addition to earthquake effects on lake hydrodynamics, settle, suspended and bed load sediment transport processes were studied with and without earthquake condition. Fate and transport mechanism was effected because of the earthquake induced oscillations. It was calculated that the silt and sand base material which is defined fictionally on the base of Eğirdir Lake is temporarily

suspended by Dinar Earthquake. Sand settled after a short period but silt suspended for hours. Comparing the fictional suspended solid contaminated scenario (number 8) with the results of control scenario (number 1) which has no earthquake acceleration effect, suspended solid precipitated to the north with the effect of depression. In the control scenario, any hydrodynamic effect has been deposited in the area where the suspension material is not exposed. Suspended material exposed to three dimensional earthquake acceleration moved northward and formed dunes in E - W direction.

This thesis study provided a better understanding of the processes that were experienced or experienced when the earthquake occurred in Van and Eğirdir Lakes. It is important in the literature to investigate the effects of a shallow lake such as Eğirdir Lake and a deep and large lake, such as Van Lake, under the effects of earthquake. As a result of the calculations, considering the effects of the vertical velocity change due to the earthquake, the effects of the cyclic and base materials, two dimensional hydrodynamic models are found to be inadequate in investigating the behavior of lakes under earthquakes. Taking into account the earthquake-related issues that occur in closed or semi-enclosed systems such as lakes and gulfs, the design and coastal use characteristics of coastal structures should be observed in this regard, especially in deep and large lakes such as Van Lake. The risk of earthquake-induced damage should be determined and closed and semi-closed systems should be determined and plans should be made about these systems. In these systems, ground - coastal surveys of historical sites should be done and the deficiencies in the literature about the subject should be completed.

Investigation of the behavior of semi-enclosed systems under earthquake effects and the investigation of hydrodynamic changes of these systems under earthquake effects are very important in terms of putting the effects on the structural, ecological and morphological systems made in the mentioned areas. Seismicity is an important parameter in the study of the dynamics of closed and / or semi-enclosed systems in the planning of infrastructures and superstructure facilities around the lake and the gulf, such as storms, floods, it is clear that the effects created by meteorological anomalies should be investigated, as well as the immediate and short-term effects that may be caused by earthquakes. Infrastructure facilities, environmental sensitive areas, lakes, coastal facilities, etc. earthquake effects should be investigated for the areas, earthquake impact must be included in the planning process while planning for such areas and facilities.



1. GİRİŞ

Ülkemizdeki doğal göller, baraj gölleri ve sulak alanlar önemli bir çalışma alanıdır. Hidrolojik, eko-biyolojik, limnolojik vb. araştırma alanları büyük su kütlesi olan göl ve sulak alanlar ile ilgili pek çok araştırmayı barındırsa da büyük su kütlesi olan doğal ve yapay göllerin deprem altındaki davranışlarını içeren çalışmaların sayısı azdır. Yapılan çalışmalar da genellikle deprem sırasında baraj gölünde meydana gelen sayhelerin baraj gövdesi üzerinde oluşturacağı hidrodinamik kuvvetin hesaplanması olup bu çalışmalarda baraj gövdesinin önündeki su kolonu derin olması sebebiyle batimetrisinin önemsiz olacağı kabulüyle (su derinliği sabit) yapılan çalışmalardır. Baraj gövdesinin deprem durumunda meydana gelen ilave hidrodinamik kuvvetin kabaca hesaplanmasında bu kabul son derece makul olup gölün tamamındaki dinamik durumun açıklanması içinse yetersizdir.

Deprem kuşağında yer alan ülkemizde su kaynağı olarak kullanılan doğal ve yapay göllerin hidrodinamik dengesine depremin meydana getirdiği sismik salınımların etkisi özellikle deprem sırasında ve sonrasında gölün tüm sistemini, çevresini ve morfolojisini etkileyeceği gibi ilgili gölü su kaynağı olarak kullanan toplumu da etkileyecektir. Özellikle tabakalı, karışımın az olduğu ya da hiç olmadığı göllerin incelenmesi son derece önemli olup göllerin hidrodinamik olarak kararlı halde bulunduğu durumlarda sismik etkilerle hidrodinamik durumun değişmesi tüm sistemi etkilemektedir. Gölün mevcut durumdaki hidrodinamik dengesi bilinmekte olup bu hidrodinamik dengeye ani ve şiddetli bir depremin yaratacağı etkiler tam olarak öngörülememekte ve hala araştırma ihtiyacı duyulmaktadır. Bu durum her göl, baraj gölü ve körfez için özeldir.

Göl, baraj gölü, körfez gibi kapalı ve/veya yarı kapalı su kütlelerinin deprem ivmesine bağlı olarak tepkilerinin araştırılması yeni bir çalışma alanı olup bilgisayar destekli modelleme çalışmaları ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde son yıllarda kendisine daha fazla yer bulmaktadır. Konu ile ilgili laboratuvar ölçeğinde çalışmalar kısıtlayıcı ve dar kapsamlıdır. Büyük su kütlelerinin deprem altındaki davranışlarının araştırılmasında genellikle saha gözlem ve ölçümleri kullanılmaktadır. Depremlerin

doğası gereği önceden kestirilemeyen doğa olaylarıdır. Bu sebeple ancak farklı amaçlarla kurulmuş olan gözlem yapılan istasyonlarının rastladığı depreme bağlı değişim değerleri incelenmektedir. Bu değerler her zaman beklenilene karşılayabilecek ölçüde kaliteli olmadığı gibi verinin temin edilmesi de son derece zor olabilmektedir.

Depremlerin etkisiyle birlikte ani bir hidrodinamik değişime maruz kalan su kütlelerinde, depremin şiddetine, hakim periyod ve doğrultusuna, gölün fiziksel ve morfolojik özelliklerine bağlı olarak özellikleri oluşan ve sayhe adı verilen dalgalar meydana gelmektedir.

1.1 Tezin Amacı

“Göllerdeki hidrodinamik dengeye sismik salınımların etkisinin araştırılması” başlıklı bu tezin çalışmasında amaçlanan su kütlelerinin denge durumuna etkilerinin araştırılması, su içinde askıdaki katı maddenin çökme sürecine ve tabandaki çökelmiş halde bulunan sedimentin askıya kalkma durumuna etkisinin incelenmesidir.

Tez kapsamında denge durumundaki su kütlelerinin dışarıdan gelen ilave ivme yüküne göre denge durumunun düşey ve yatay düzlemde nasıl değiştiği, su kütlesi hareketine etkisi ve su kütlesi hareketiyle birlikte bir su kalitesi parametresi olan askıda katı maddenin çökme sürecine etkisinin nasıl olacağı ve tabanda çökelmiş halde bulunan sedimentin askıya kalkma sürecine olası etkisi araştırılmıştır.

Tezde öncelikle incelenecek olan hidrodinamik denge halinde olan tabakasız su kütlelerinin olası sismik etkiler altındaki davranışlarıdır. Tez çalışması kapsamına dahil edilen göller için seçilen ve ilgili göl için tarihsel öneme sahip depremlerin yanı sıra kurgusal depremler çalışılarak farklı deprem koşullarının karşılaştırılması yapılmış, deprem karakteristikleri ile sayhe karakteristikleri arasındaki ilişkiler tartışılmıştır. Deprem koşullarına bağlı olarak göllerdeki hidrodinamik değişimleri göl içinde ve çevresindeki sistemlerdeki etkileri incelenmiştir. Göller gibi kapalı ve/veya körfez, haliç vb. yarı kapalı sistemlerin deprem etkileri altındaki davranışlarının incelenmesinde ve bu sistemlerin deprem etkileri altındaki hidrodinamik değişimlerinin araştırılması, bahsi geçen bölgelerde yapılan yapısal, ekolojik, morfolojik sistemlere de dolaylı etkilerinin ortaya konulması açısından da son derece önemlidir. Tezdeki çalışmanın özgün değeri, kapalı ve/veya yarı kapalı su kütlelerinin deprem etkisi altında gerçek üç boyutlu deprem kaydı ve gerçek batimetrik değerler

kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarının sonuçlarının literatürdeki analitik denklemler ve daha önceki yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması ve tartışılmasıdır.

Tez kapsamına konu olan göller ve bu göllerde etkili olan veya etkili olabileceği düşünülen depremlerin göl hidrodinamiğinde, göl içindeki askıda katı madde taşınım sürecine ve taban malzemesinin hareketine olası etkileri araştırılmış ve çökelme sürecinin deprem etkisi olmaksızın yapılan modelleme çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Doğal ve yapay göller başta olmak üzere büyük su kütlelerinin deprem altındaki davranışları çeşitli araştırma dallarında farklı amaçlarla incelenmektedir. Limnolojide depremin neden olduğu içsel ve yüzeysel dalgalar, sediment hareketleri sonucunda göl tabanındaki tabakalaşmalar ve depreme bağlı olarak göl çanağındaki değişimler incelenmektedir. Yapay göllerde özellikle de baraj göllerinde yapı bilimciler ve zemin mekaniği ile ilgili konularda çalışan araştırmacılar deprem sırasında yapının dayanımı, zeminin sıvılaşması, şev kayması durumlarını vb. baraj yapısına veya gölüne olası etkilerini araştırmaktadırlar.

Doğal ve yapay göllerdeki su karakteristiğine ve hidrodinamik dengeye ait çalışmalar vaka çalışması olarak yapılmakta olup deprem anında veya sonrasında ölçüm ve gözlem yapılan göllerdeki araştırmalar elde edilerek yayınlanmaktadır.

Göllerde meydana gelen veya gölleri etkileyen depremlerin göller üzerine olan etkilerinin araştırılması uzun yıllardır üzerinde kısıtlı olarak çalışılabilen bir araştırma konusudur. Bunun sebeplerinin başında deprem sırasında su seviyesi değişimini kaydedecek ölçüm cihazlarının 1932 yılında Kaliforniya’da meydana gelen Lodi Depremi’nde ise Piper (1933) tarafından su seviyesi ölçüm sonuçlarında sayhenin etkisi tespit edilmiştir. Sayhe yüksekliği 12 – 24 mm olarak hesaplanmıştır.

Sismik etkilere bağlı su kütlesi çalkantılarını 1950 Assam depremi sonucunda Norveç ve İngiltere kıyılarında gözlemleyen Kvale (1955) bu salınımları sayhe (seiche) olarak adlandırmıştır.

Kvale (1955) yaptığı çalışmada Assam depremi sonucunda İngiltere’deki rezervuarlarda ve Norveç’teki fiyordlardaki su salınımlarını gözlemlemiş ve kayıt altına almıştır. Assam depremi sonrasında fiyordlarda meydana gelen sayheler hakkında olan makalesinde Kvale, salınının gölün derinliği ve boyutlarıyla ilişkisi olduğunu ifade etmiştir. Merian (1828) tarafından geliştirilen formülün açıklamasıyla birlikte fiyordlarda meydana gelen salınının periyodunun hesaplanması gerektiği,

ancak bu hesaplamada derinliğin değişken olması ihmal edilmekte olup ortalama su derinliği ve uzunlukta da yine ortalama uzunluk alındığının altı çizilmiştir.

Kvale (1955) tarihli makelesinin sonuç kısmında sayhenin oluşması için iki önemli husus işaret etmiştir.

- 1) Sismik dalgaların hakim periyodu ile sayhe oluşumu beklenen su kütlesinin doğal periyodunun yakın olması gereklidir.
- 2) Deprem enerjisi su kütlesini harekete geçirebilmeye yetecek derecede olmalıdır.

McGarr (1965) uzun dikdörtgen kanallarda yaptığı çalışmalar sonucunda sonsuz genişlikte kabul edilebilecek dikdörtgen kanallarda su yüzeyinin salınımını ifade eden denklemi geliştirmiştir. McGarr, 1965 tarihli makalesinde maksimum sayhe dalgası genliğini belirleyen parametreleri şu şekilde özetlemektedir;

- Sismik dalga genliği
- Derinlik
- Sismik dalgaların periyodu ile su kütlesinin doğal periyodu arasındaki oran

Ayrıca ABD'nin "Gulf Coast" bölgesindeki gözlem ve ölçümlerden yola çıkarak kalın sediment tabakasının sayhenin şiddetini arttırdığını ifade etmiştir.

McGarr tarafından geliştirilen denklem, H: derinlik, L: uzunluk, $c = \sqrt{gH}$, g: yerçekimi ivmesi, k: katsayı, τ : integrasyon değişkeni, t: zaman olmak üzere;

$$\eta(x, t) = + \frac{4H}{\pi c} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \left[\frac{(2n+1)\pi x}{(2n+1)L} \right] \cdot \int_0^t F(\tau) e^{-k(t-\tau)/2} \cdot \sin \left[\frac{(2n+1)\pi c(t-\tau)}{L} \right] d\tau \quad (2.1)$$

şeklindedir. Bu denklemde $\eta(x, t)$ ifadesi ile hesaplanmak istenilen belirli bir mesafedeki belirli bir zamanda su yüzü kotudur.

Denklem iki önemli kabul ile oluşturulmuştur ve denklemin ana gövdesi uzun genlikli dalga teorisinden gelmektedir ve bu denklem Lamb (1932) tarafından geliştirilmiştir.

Denklem geliştirilirken, düşey yöndeki ivme ihmal edilmiş olup dalga uzunluğu derinlikten büyük kabul edilmiştir.

McGarr (1965) yaptığı incelemeler ve denklemden hareketle oluşturduğu grafik ile şu iki sonucu elde etmiştir;

- Kalın taban sedimenti tabakası olan bölgelerde taban sedimenti "amfikitör" yükseltici vazifesi görmektedir ve bu durum sayhenin etkisinin artmasına neden olmaktadır. (Gulf Coast örneği)
- Su derinliğinin fazla olduğu su kütlelerinde salınımın genliği de yüksektir. (Fiyordlardaki salınımlar)

Doğal periyodu 600 sn'den küçük olan su kütlelerinin salınımında yatay bileşen birincil dereceden öncelikli durumdadır (McGarr, 1965).

Mcgarr ve Vorhis (1968) tarafından kaleme alınan ve 1964 yılındaki Alaska Depremi'nin dünya genelindeki hidrolik etkilerinin araştırıldığı raporda kısa periyodlu deprem dalgalarının genliklerinin dağılımının sayhe dağılımı arasında ilişki olduğu konu edilmiştir. Deprem dalgalarının yatay yöndeki periyodu ile sayhelerin yatay yöndeki periyodunun birbiri ile örtüştüğü belirtilmiştir. Aynı rapor içinde depremi üreten fayın çeşidinin de önemli bir parametre olduğu, fayın düşey, yatay, ters kırıklı vb. olmasına bağlı olarak deprem dalgalarının yanal yansıma imkanı mevcut ise sayhenin şiddetinin artabileceğinin altı çizilmiştir. Sayhenin salınımını belirleyen parametrelerin başında ise su kütlesinin geometrisi ve geometriye bağlı olarak da gölün doğal modunun meydana gelecek sayhelerin de karakterini belirleyeceği tespit edilmiştir. Raporda dünyanın pek çok ülkesinden konu olan deprem altındaki gözlem ve ölçüm sonuçları tartışılmaktadır ancak su kütlesinin karakterinin belirleyici olması açısından depremin tüm bölgelerde aynı şiddette hissedildiği kabul edilmiştir. Deprem sırasında özellikle su gözlem kuyularında ve yeraltı akiferlerinde de deprem etkilerinin hissedildiği belirlenmiştir.

ABD Nevada'da bulunan Tahoe Gölü için depreme bağlı olarak gölün tsunami ve sayhe oluşturma potansiyeli çalışmasında Ichinose ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmalarda gölün doğal periyotları ile rüzgara bağlı sayhelerin ölçümlerinin periyotları karşılaştırılmış ve yaptıkları modelleme çalışması sonuçları da bu değerlerle karşılaştırılmıştır. Modelleme çalışmalarının sonuçlarının rüzgara bağlı sayhe periyotları ile uyumlu olmadığı bunun başlıca sebebinin ise yaptıkları modelleme çalışmasında taban batimetrik özelliklerinin ve pürüzlülüğünün tanımlanmamış olmasına bağlamışlardır. İlgili gölde herhangi bir deprem zamanına ait ölçüm verileri bulunmaması sebebiyle bu şekilde kontrol sağlamışlardır.

2002 yılında Denali Depremi (Alaska) 7,9 Mw şiddetiyle 1964 Alaska depreminde olduğu gibi özellikle Seattle, Union Gölü'ndeki limanlarda ve deniz taşıtlarında sayheler sebebiyle hasarlara neden olmuştur (Barberopoulou ve diğ., 2004). Özellikle Puget Loweland bölgesindeki zemin karakterinin sedimentli olması deprem dalgalarının şiddetinin daha etkin olması sebebiyle hassas bir bölge olduğu vurgulanmıştır. Cassidy ve diğ., (2002) tarihli çalışmasında yine aynı depremde Batı Kanada bölgesinde bulunan Wenatchee Gölü kıyılarında yatay doğrultuda 1,5 m mertebesinde su ilerlemesi gözlemlendiğini rapor etmektedir. Barberopoulou ve diğ. (2004), Union Gölü ve Portage Körfezi'nde çok sayıda zincirleme donanımlarında zararlar meydana geldiğini ayrıca Union Gölü kıyısında bulunan boru hatlarında da hasarlar oluştuğunu belirtmektedir. Makalede bahsi geçen gözlemciler tarafından su salınımının etkisi 1 ila 5 dakika aralığında diye sunulmuş olup bu değer in sismograf kayıtlarındaki toplam deprem süresi ile örtüştüğü belirtilmiştir. Yine gözlemcilerden elde edilen bilgilere göre 0,6 ila 3 m yatay salınımı olan su yüzeyinin düşey yerdeğiştirmesinde ise 20 cm mertebesinde kaldığı ifade edilmektedir. Aynı deprem sürecinde ilgili bölgede yüzme havuzlarında da yine çalkantı hareketi gözlemlendiği belirtilmiş olup yüzme havuzlarının doğal modu göz önüne alındığında bu etkinin göllerden veya kıyı bölgelerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Gözlemlerde matematiksel olarak hesaplanandan daha yüksek dalgalarla karşılaşılmasının sadece depreme bağlı göldeki rezonans ile açıklanamayacağı bunun başlıca nedeninin geliştirilen denklemlerin homojen tanklar ve geometriler için olmasıdır. Homojen olmayan göl geometrilerinde veya kıyı geometrilerinde homojen olmayan tırmanma (runup) sebebiyle beklenenden daha yüksek dalgalar gözlenebileceği ifade edilmiştir.

2002 Denali Alaska Deprem'inde, Union Gölü'nde bulunan en az 20 tekne ev hasar görmüştür. Barberopoulou (2008) tarafından Union Gölü üzerine yapılan çalışmasında suni deprem verisi ve Denali, Alaska Depremi'ni kullanarak NOAA tarafından geliştirilmiş MOST (Method of Splitting Tsunami) modelini sismik ivme etkisini de ekleyerek sayısal modelleme çalışması yapmıştır. MOST modelleme yazılımı uzun genlikli dalga teorisi kullanılarak sayhe hesaplamaları için uyarlanmıştır. İlgili makalenin Çizelge 2-1'de sunulan veriler açısından, pik ivmesi (PGA) çok büyük >8 depremler sayhe oluşumuna neden olabilmektedir ancak pik ivmeden daha önemlisi gölün doğal periyoduyla depremin hakim periyodunun yakınlığıdır.

2011 yılında meydana gelen Tohoku Depremi'nin Norveç fiyordlarındaki etkilerini konu alan bir diğer çalışma ise Bondevik ve diğ. (2013) tarafından sunulmuştur. Makalede önemle vurgulanan sayhe başlangıcının depremde kaynaklı S dalgaları olduğu belirtilmiştir. Gözlemci videolarında yapılan araştırmalardan elde edilen bu bilgi sayhenin başlangıcına sebebin tespiti açısından önemlidir. Fiyordların çevresinde bulunan gözlemcilerin ifadeleri durumun ciddiyeti hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. Gözlemcilerden alınan bilgiler ve yapılan modelleme çalışmalarından hareketle sığ bölgelerdeki dalga yüksekliklerinin diğer noktalardan fazla olduğu tespit edilmiştir. Makale kapsamında yapılan nümerik modelleme ile ilgili detaylı bilgi sunulmamış olup karşılaştırmaların saha ölçümleri ile tutarlı olduğu aktarılmıştır. Gözlemciler tarafından yapılan video kayıtlarında bir teknenin salınımını görüntü işleme teknolojisi ile çıkartılmış bu salınımın nümerik modelleme sonuçları ile uyumlu olduğu açıklanmıştır.

Tohoku Depremi ile ilgili Japonya'da yapılan fiziksel modelleme çalışmasında Saiko Gölü için sayhe oluşumu laboratuvar ortamında benzeştirilmiştir. Yapılan çalışmada gölün batimetrisine sahip bir plastik bir model hazırlanmış olup modelin içine su doldurularak bir masa üzerine yerleştirilmiştir. Masaya uygulanan ani kuvvet ve sonrasında model içinde bulunana suyun salınım periyodu gözlemlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda gölün doğal periyodunun salınım periyoduyla eşleştiği ve deprem sırasında da gölün bu şekilde salınıma girdiği sonucuna varılmıştır. Fiziksel modelde yüksek sayhelerin görüldüğü kıyı şeridinde gözlemlenen dalga yüksekliklerinin deprem sırasında göl kıyısında bulunan görgü tanığı ifadeleriyle uyumlu olduğu görülmüştür (Suzuki, 2012).

Gulakyan ve diğ. (2002), Sevan Gölü'nde meydana gelen depremlerin göl hidrodinamiğine ve hidrobiyolojisine olası etkilerini araştırmışlardır. Tabandaki sediment tabakası dahil olmak üzere tüm düşey doğrultuda deprem şiddetine bağlı olarak karışım gözlemlenmişlerdir. Sediment tabakasının altında bulunan gaz hidratı olarak da adlandırılan klatrat hidratların deprem etkisiyle ayrışması ve hidratların içersinde bulunan su moleküllerini serbest bırakması ile Baykal Gölü tabanında Ağustos 2008 yılı depreminin ardından Granin ve diğ. (2012) tarafından incelenmesiyle su tazelenmesi olduğu görülmüştür. Baykal Gölü'nde yapılan daha önceki izleme ve ölçüm çalışmalarında da sismik salınımların başta göl tabanındaki sediment tabakası olmak üzere su kolonu boyunca hem su kalitesini değiştirdiği hem

de gaz çıkışına neden olduğu gözlenmiş, Radziminovich ve diğ. (2009) tarafından çevresel etkilere sebep olduğu ortaya konulmuştur. Avşar ve diğ. (2014) tarafından Göllüköy Gölü ile ilgili yapılan çalışmada, Göllüköy Gölü tabanında sismik etkiler sonucunda meydana gelen su salınımlarına bağlı olarak oluşan “seismite” adı verilen tortul kaya oluşumlarına rastlandığı belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada Göllüköy Gölü ile 50 farklı gölün karşılaştırılmasında da geometrik olarak Göllüköy Gölü’nün sismik etkiler sebebiyle salınım ve sayhe oluşumuna karşı son derece hassas olduğu ifade edilmiştir.

Sapanca Gölü tabanındaki sediment karakterleri ve zemin tabakaları üzerine yapılan araştırma çalışmalarında, şiddetli depremlerin etkisiyle göl içindeki ve göle doğru olan sediment hareketleri değişiklik göstermektedir. İlaveten deprem etkisine bağlı olarak meydana gelen sayheler sonucunda kıyı erozyonuna bağlı olarak göl içine ek sediment girişi olduğu tespit edilmiştir (Schwab, 2009).

2.1 Göller ve Göl Hidrodinamiği

2.1.1 Tanımlar

Gölün tanımı en yalın haliyle Forel (1901) tarafından ‘deniz ile bağlantısı bulunmayan durağan su kütlesi’ olarak verilmiştir. Göller doğal olarak oluşabilecekleri gibi insan yapımı yani doğal olmayan göller de mevcuttur. Baraj gölleri, rezervuarlar doğal olmayan göllere en iyi örneklerdir. Gölün sözlük tanımı ise ‘denizden uzak, iç bölgede bulunan hatırı sayılır derecedeki su kütlesi’ olarak Merriam-Webster’de verilmiştir (URL 1).

Nehir ve yeraltı suları ile beslenen göllerde bahar ve kış aylarında genellikle su girişi gözlemlenir. Yaz ve sonbahar ayları doğal ve yapay göller için su miktarında azalmanın görüldüğü zamanlardır. Bu durum tüm göl yapıları için geçerli olmamakla birlikte tam tersi durumun görüldüğü göl tipleri de mevcuttur. Örnek olarak kutup bölgesinde bulunan göller bu duruma örnek verilebilir.

Göller sınıflandırılırken farklı sınıflandırma metodları uygulanmaktadır. Genel olarak sınıflandırma göllerin oluşum kökeni baz alınarak yapılmaktadır. Oluşumlarına göre göller 11 başlık altında incelenebilmektedir (O’Sullivan ve diğ., 2003). Buzul Gölleri, Tektonik Göller, Karstik Göller, Volkanik Göller, Set Gölleri vb. şeklinde doğal göller sınıflandırılabilir gibi bunlara ek olarak doğal olmayan –insan yapımı- göller de bu sınıflandırmaya dahil edilebilir.

Göller morfolojik olarak sınıflandırılabilirler gibi hidrolojik ve kimyasal özelliklere göre sınıflandırma şekilleri de mevcuttur. Göller ayrıca karışımlarına göre de sınıflandırılmaktadırlar.

Göller karışımlarına göre sınıflandırılırsa (Güner, 2008);

Amiktik, yıl boyunca hiç karışmayan göllerdir. 80° enleminin üzerinde bulunan ve yüzeyi buz ile kaplı göller örnek olarak verilebilir.

Holomiktik, rüzgara bağlı ve tamamen karışan göllerdir.

Oligomiktik, Az şekilde karışan ve tabakalaşmayan göllerdir. Özellikle Ekvatorial bölgelerde görülürler.

Monomiktik, Sıcak ve Soğuk Monomiktik Göller olmak üzere iki alt başlıkta incelenirler. Yıl boyunca 1 kere karışırlar. Karışma mevsimlerine bağlı olarak incelenirler.

Polimiktik, Sürekli karışım halindedirler.

Dimiktik, İlkbahar ve Sonbahar mevsimlerinde 1 kere olmak üzere yılda 2 defa karışan göllerdir.

Meromiktik, tabakalaşmanın gözlemlendiği ve tabakalar arasında karışımın söz konusu olmadığı göllerdir. Tabanlarında oksijen eksikliğine bağlı olarak ve yeraltından çıkan gazlardan kaynaklı farklı zehirli gaz tabakaları barındırabilirler. Şiddetli fırtına veya dış kuvvetlere bağlı olarak meydana gelen karışım durumlarında çevre açısından ciddi riskler oluşturabilirler. Karışım tabakasının kaynağına göre de göller meromiktik alt sınıflara ayrılırlar.

2.2 Göl Hidrodinamiği, Göl İçi Akımlar ve Etkileyen Kuvvetler

Göllerdeki hidrodinamik hareketleri başlatan su kütlelerine etkiyen kuvvetlerdir. İç akıntılar genel olarak rüzgar etkisi ile gerçekleşir. En etkili akım oluşturan kuvvet su yüzeyine momentum ve enerji transfer eden rüzgardır. Rüzgar su kütlelerine momentum transfer etmesinin yanı sıra su kütlesi yüzeyinde meydana gelen ısınma ve soğuma ile birlikte yoğunluk değişimine bağlı sirkülasyon da oluşur. Okyanuslar veya büyük deniz ve göl sistemlerinde buna ek olarak atmosfer basıncının etkisiyle de oluşan akıntılar ve çevrıntiler görülmektedir. Bu kuvvetlere ek olarak gel-git, deprem gibi dışarıdan gelen ek kuvvetler de göl içerisindeki akıntı ve çevrıntilerin karakterini

etkilemektedir. Ek olarak akarsularla taşınan akımlar hidrodinamik etkiler oluşturduğu gibi hava durumuna bağlı olarak meydana gelen yüzeysel ısınma veya soğuma yüzey ile iç bölge arasında ısı farkına bağlı yoğunluk farkı meydana getirir. Meydana gelen yoğunluk farkı yoğunluk akıntılarını meydana getirir. Kütleli olarak büyük göllerde bile gel-git etkileri az olarak görülür.

2.2.1 Rüzgar kaynaklı göl karışımı

Rüzgar su yüzeyine temas ettiğinde rüzgar enerjisi momentumunu su yüzeyine transfer eder. Su yüzeyinde rüzgar estiği doğrultuda su derinliğine ve rüzgar hızına bağlı olarak kabarma gözlemlenir. Rüzgar kuvveti ve yerçekimi kuvvetinin etkisiyle su yüzeyi yana doğru dökülmeye başlar. Bu olay yüzeydeki suyun alt tabakalara doğru hareketine neden olur.

2.2.2 Sayhe-salınım akıntıları

Su kütlesi içerisindeki salınımların oluşum kaynakları arasında rüzgara bağlı akıntılar, depremler, şev kayması vb. kaynaklar sayılabilir. Oluşan sayhenin karakteri gölün morfolojisine ve tabakalaşma özelliğine bağlı değişkenlik gösterebilir. Homotermal bir gölde yüzeysel bir salınımın periyodu olan T_s , L karakteristik uzunluk, h ortalama derinlik, g yerçekimi ivmesi olduğu durumda (2.2) denkleminde gösterildiği gibi hesaplanır (Benstsson, 2012 ve Merian 1828).

$$T_s = 2 \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad (2.2)$$

Sığ göllerde salınımların göl hidrodinamiğine etkisi son derece önemlidir. Ortalama akıntı hızı (U) ise herhangi bir başka etken olmadığı takdirde ve sayhenin genliği a_s olarak kabul edildiğinde (2.3) denklemindeki şekilde elde edilir (Benstsson, 2012).

$$U = 2a_s \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (2.3)$$

2.2.3 Hidrolojik akıntılar

Göl çanağı içerisine dışarıdan gelen her türlü debi su kütlesi içerisinde akıntıya neden olur. Özellikle akarsular yardımıyla göle taşınan sular, yeraltından gölü besleyen yeraltı suları buna örnek olarak verilebilir. Göle dışarıdan gelen ek su özelliğine göre tabakalaşmaya neden olur veya karışımı etkiler (Benstsson, 2012).

Aynı şekilde göl çanağı içinden çıkan kütle de göl içerisinde hidrodinamik denge durumunu etkileyecektir.

2.2.4 Yoğunluk akıntıları

Düşey yöndeki yoğunluk farklılıkları göl içinde akıntıların oluşmasına sebep olur. Yoğunluk farkı oluşumunun en önemli nedeni yüzeyin alt tabakalara göre daha hızlı soğuması ve/veya ısınmasıdır. Ayrıca bitki bulunan kıyı şeritleri açık kısımlara göre daha sıcak olup yoğunluk farkı oluşturabilir.

2.3 Deprem

2.3.1 Tanımlar

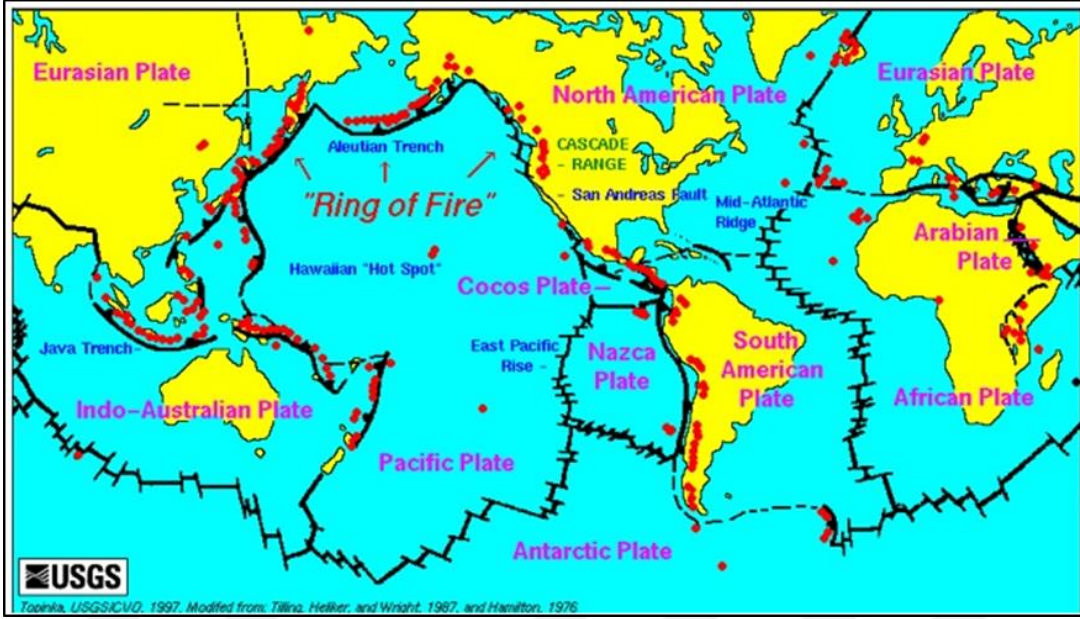
Deprem konusu başlıca bir çalışma alanıdır. Deprem oluşumu, deprem dalgalarının gelişimi, dalgaların ilerleyişi, yansıma, kırılması, depremin jeolojik ve yapısal etkileri her biri ayrı bir çalışma ve uzmanlık konusudur.

Deprem, en basit ve yalın tabiriyle, Dünya'nın dış kabuğunun altında sıkışan enerjinin ani bir şekilde açığa çıkması olayının adıdır. Depremlerin araştırma bilimine ise sismoloji adı verilmektedir.

Yılda yaklaşık 50000 adet deprem olmakta ve bunlardan yüksek şiddette ve yerleşim yerine yakın meydana gelenleri ise yıkıcı olmaktadır (Britannica, 2017).

Depremlerin büyük çoğunluğunun meydana geldiği alanlar tektonik tabakaların kenarlarındaki kısımlarda kalmakta olup kabuk altındaki toplam enerjinin neredeyse %80'i bu bölgelerden açığa çıkmaktadır.

Şekil 2.1'de dünya genelindeki aktif fayların ve yanardağların dağılımını gösteren şekil sunulmuştur. Özellikle Amerika ve Asya kıtası arasında kalan bölge "Ateş Çemberi" olarak anılmakta olup şiddetli depremlerin çoğunluğunun meydana geldiği bölgedir. (URL 2) ilave olarak Türkiye'nin hem kuzeyinden hem de güneyinden de kaydadeğer fay hatları olduğu bilinmektedir. Bu harita Birleşik Devletler Jeoloji Kurumu tarafından 1997 yılında hazırlanmıştır.



Şekil 2.1 USGS tarafından hazırlanmış fay hatları haritası.

Deprem oluşum sürecine bakıldığında basit bir şekilde şu şekilde açıklanabilir. Bir fay kırılması fay boyunca veya yukarı doğru ilerledikçe, kaya kütleleri zıt yönlerde savrulur ve böylece tabakalar gerginliğin az olduğu bir pozisyona geri döner. Herhangi bir noktada bu hareket bir anda değil, düzensiz adımlarla gerçekleşebilir. Bu ani yavaşlamalar ve yeniden başlamalar, sismik dalgalar halinde yayılmış titreşimlere neden olur.

Deprem fayları kırılma çeşitlerine göre 3'e ayrılırlar;

- Doğrultulu Atımlı Kırık (Strike-Slip)
- Eğim Atımlı Normal Kırık (Normal)
- Eğim Atımlı Ters Kırık (Thrust)

Sismik depremlere ek olarak insan faaliyetleri sonucunda yapay depremlerde oluşabilir. Nükleer patlama, geniş rezervuarların dolum/boşaltım süreci, maden göçükleri vb. olaylar sonrasında da küçük çaplı ve şiddeti görece az olan depremler de oluşabilmektedir. ABD'deki Hoover, Mısır'daki Aswan High Barajı ve Zambiya'daki Kariba Barajı'nda dolum sırasında meydana gelen depremler bildirilmiştir (Britannica, 2017).

Depremler başta jeolojik özellikteki değişikliklere neden olmak üzere, insan yapımı yapılara zarar verme, insan ve hayvan yaşamı üzerinde etkilere neden olmak üzere çeşitli etkilere sahiptir. Bu etkilerin çoğu sağlam zemin üzerinde karada gerçekleşir,

ancak çoğu deprem odak noktası okyanus tabanı altına yerleştirildiğinden, okyanus kenarlarında şiddetli etkiler sıklıkla görülmektedir. Kıyı bölgelerini etkileyen ve okyanus tabanında meydana gelen en yakın tarihli ve etkili olanları ise 2011 Tohoku ve 2012 Hint Okyanusu Depremleri'dir.

Depremler, zemin sıvılaşmasından, tsunamilere, yeraltısuyu seviyesi değişikliklerinden, yanardağ patlamalarına kadar pek çok doğal felakete de neden olurlar. Bunlar dolaylı etkiler olarak düşünülebilir.

Tsunamiler –Japonca “Harbour Wave” demektir- deniz tabanındaki fay kırılmasının yukarı veya aşağı yönde büyük su kütlelerini harekete geçirmesi ile meydana gelmektedir.

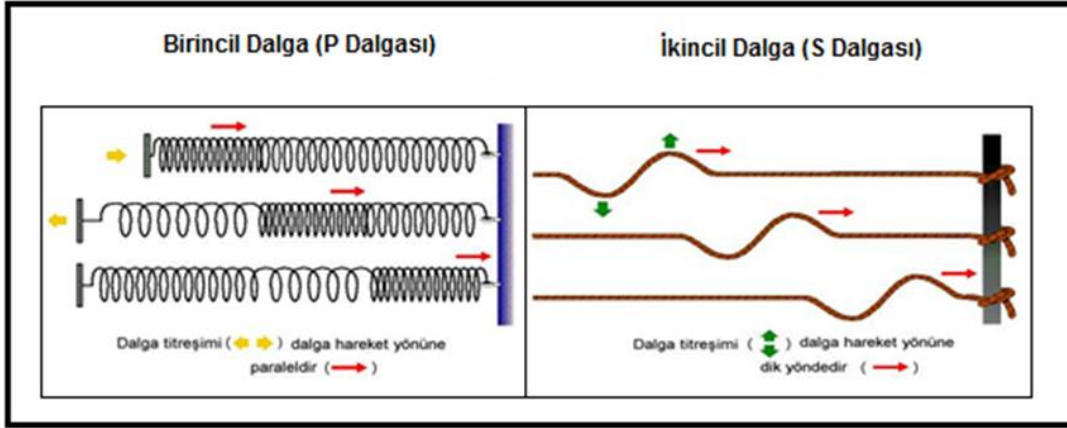
Körfez, göl, baraj gölü gibi kapalı ve/veya yarı kapalı su kütleleriyle karşılaşan sismik dalgalar bu kütlelerinde salınımına neden olmaktadır. Tsunamilerden farklı olarak gelişen bu salınımlar daha önceki bölümlerde de tanımlandığı üzere sayhe diye adlandırılırlar.

Deprem dalgalarının kaydı sismograf adı verilen özel aletler yardımıyla kaydedilir. Tarih boyunca pek çok farklı deprem şiddeti ölçü birimi geliştirilmiştir. Bu ölçü birimleriyle deprem şiddeti ifade edilmektedir. Bu şiddet ifadesi, dalgalarının kaydının hakim periyodu, pik ivme şiddeti, deprem süresi vb. deprem özelliklerinden hareketle belirli skalalarda depremleri sınıflandırmaya yaramakta kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmalara örnek olarak Mercalli ve Rihter örnek verilebilir. Mercalli bir skala sınıflandırması yaparken Rihter depreme ait parametrelerin kullanıldığı denklemler yardımıyla bir şiddet değeri hesaplamak üzerine kuruludur.

Deprem kaynağı tarafından üretilen sismik dalgalar yaygın olarak üç ana tipte ele alınır. İlk ikisi, P (veya birincil) ve S (veya ikincil) dalgaları, cisim dalgası da denilen bu dalgalar zemin içinde yayılırlar. Üçüncüsü ise Love ve Rayleigh dalgalarından oluşur, bu dalgalar ise dünya yüzeyi boyunca yayılır. Bu tür sismik dalgaların varlığı 19. yüzyılda matematiksel olarak öngörülmüş, modern karşılaştırmalar ve teorik hesaplamalar ile sismik dalgaların fiili ölçümleri arasında uygunluğu bulunduğu görülmüştür.

P-Dalgası: Ölçüm aletlerine ilk ulaşan deprem dalgasıdır. Hızı zemin yapısına göre 1,5 ile 8 km/sn arasında değişir. Tanecik hareketleri yayılma doğrultusundadır

(Boyuna dalgalarıdır). Yıkım etkisi düşüktür. Her tür ortam içerisinde hareket edebilirler.



Şekil 2.2 Birincil (P) ve ikincil (S) dalgalarının hareketi.

S-Dalgası: Ölçüm aletlerine ikincil olarak ulaşan deprem dalgasıdır. Hızı P dalgası hızının %50'ı ile %70'i arasında değişir. Tanecik hareketleri yayılma doğrultusuna dik ya da çaprazdır, kayma dalgalarıdır (Enine Dalgalar). Yıkım etkisi yüksektir. Akışkanların (su, hava vb.) içinde ilerleyemezler.

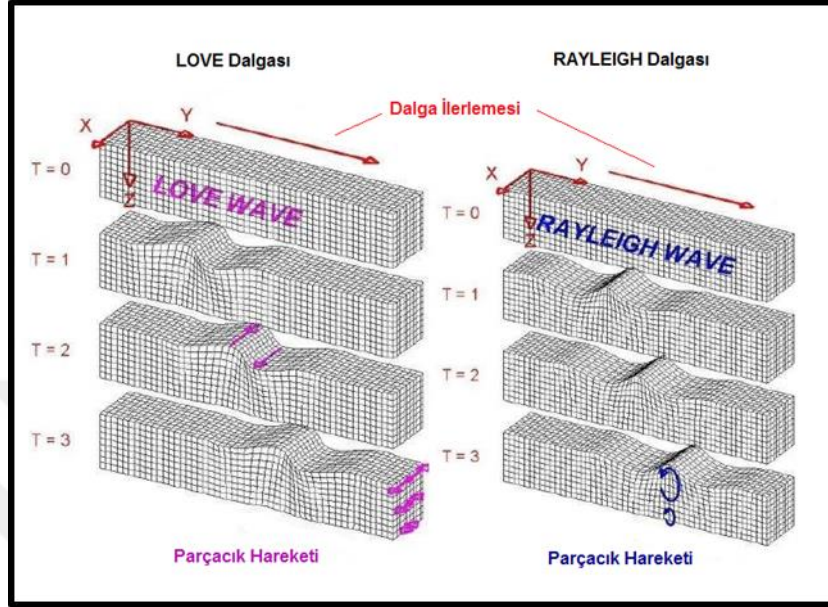
Bondevik ve diğ. (2013) tarafından hazırlanan ve literatür araştırması kısmında bahsedilen çalışmada önemle vurgulanan sayhe başlangıcının depremden kaynaklı S dalgaları olduğudur. Su yüzeyindeki düzensizlikler S dalgalarının su kütlesine ulaşması ile başlamaktadır.

Rayleigh Dalgaları: Katı yüzeyde hareket eden hem enine hem boyuna dalgalarıdır. Dalga genliği deprem merkezinden uzaklaştıkça üstel olarak azalır. Rayleigh dalgalarının ilerleyişinde katı yüzeyler eliptik bir yörünge izler. Yüzeyden derinlere doğru inildikçe hareket eliptik özelliğini kaybedip sadece ileri yönlü bir hareket haline gelir. İdeal homojen zeminlerde Rayleigh dalgaları dağılıma (dispersiyon) uğramazlar. Çok büyük depremlerde kaybolmadan dünyayı defalarca dolaşabilecek enerjiye sahip Rayleigh dalgaları olduğu gözlemlenmiştir. Rayleigh dalgaları P ve S dalgalarının dünya yüzeyi ile etkileşimi ile meydana gelirler.

Rayleigh dalgalarının yoğunluğu;

- Depremin şiddetine,
- Depremin uzaklığına,
- Depremin derinliğine,

- Zemin özelliklerine,
- Depremi odak mekanizmasına,
- Fayın kırılma doğrultusuna bağlı olarak değişir.



Şekil 2.3 Love ve Rayleigh dalgalarının hareketi.

Love Dalgaları: Kutuplaşmış pek çok S Dalgasının etkileşimi ile meydana gelmiş yüzeysel deprem dalgalarına Love dalgaları adı verilir. A. E. H. Love tarafından tespit edildiğinden adı Love dalgalarıdır. Love dalgaları P ve S dalgalarından daha yavaş ancak Rayleigh dalgalarından daha hızlı hareket ederler. Love dalgaları birbirinden farklı hıza sahip tabakaların üst üste yer aldığı durumlarda meydana gelir. En yüksek genliğe sahip dalgalardır.

Depremle ilişkili tanımlar ve depremleri tanımlayan özelliklerden bazıları (Hays, 1980);

Depremi şiddeti, belirli bir yerde deprem etkilerinin subjektif olarak nitelendirildiği ve depremde meydana gelen enerji,

Depremi merkezi ve deprem merkezinin derinliği,

Depremi pik ivmesi (PGA), deprem süresince kaydedilen en yüksek ivme,

Sönümlenme, depremin merkezinden uzaklaştıkça etkisinin azalması,

Hakim periyod, depremin tüm zaman serisinde hakim olan periyod,

Ortalama periyod, deprem boyunca görülen ortalama periyod,

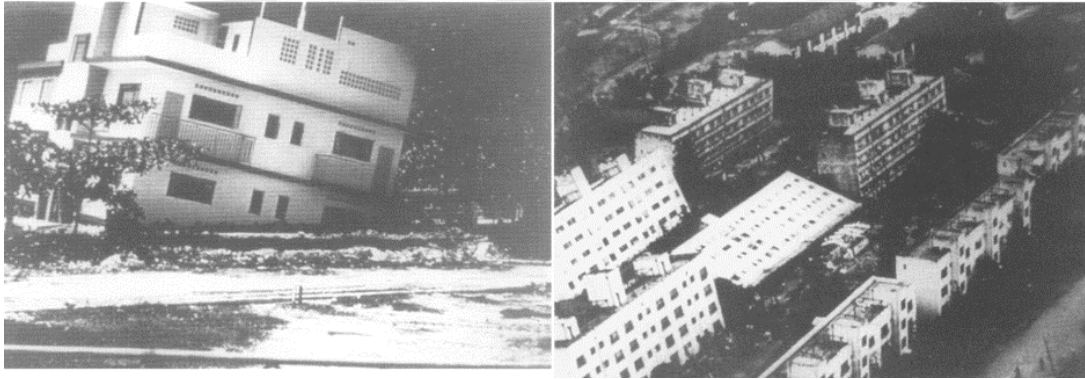
Housner şiddeti, Macelli şiddetinin geliştirilmiş formatında bir deprem şiddeti ölçü skalası,

Grup hızı, deprem dalgalarının katarının ilerleme hızı, temel tanımlarını açıklamakta fayda vardır.

2.3.2 Depremlerin etkileri

Depremler sırasında meydana gelen enerji dalgalar halinde ilerler. Bu enerji hem çevresel etkilere neden olur hem de karşılaştıkları yapılarda hasarlara neden olabilirler. Fay hattının üzerinde bulunan yüzeylerde veya yapılarda depreme bağlı direk hasarlar meydana geldiği gibi depremden kaynaklanan dolaylı etkilerde hem çevrede hem de yapılarda hasarlara neden olurlar.

Sıvılaşma: Tam oturmamış (konsolide olmamış) suya doymuş zeminler deprem dalgalarının etkisi altında yoğun bir akışkan gibi hareket eder. Bu durum sıvılaşma olarak adlandırılır (FEMA). Sıvılaşma, katı bir kıvamdaki zemin, artan su basıncı ile sıvılaştırılmış bir duruma dönüştüğünde meydana gelir. Kil örtülerinden arınmış olan sil, kum, çakıl gibi suya doymuş granüler zeminler sıvılaşma eğilimindedir.



Şekil 2.4 1964 Niigata depreminde sıvılaşmış zeminlerde hasar almış yapılar.



Şekil 2.5 2004 Niigataken-Chuetsu depreminde sıvılaşmış zeminlerde hasar almış altyapılar.

Toprak Kayması (Heyelan): Depremler dolaylı etkiler olarak heyelanları tetikleyebilirler. Deprem sırasında gevşek şev karakterinde olan bölgelerde deprem dalgalarının etkisiyle heyelan görülme riski yüksektir.



Şekil 2.6 1965 Puget Sound Depreminde heyelan sonucunda hasar almış demiryolu.

Tsunamiler ve Sayheler: Tsunamiler büyük su kütlesi hareketi sonucunda, sayheler ise periyodik salınım sonucunda meydana gelirler. Tsunamiler düşey doğrultudaki fay kırılmalarında su kütlesinin ani yer değiştirmesi sonucunda oluşurlar ve kıyı bölgeleri ve deniz içindeki yapılar açısından hasara neden olabilirler. Sayheler ise deprem dalgalarının periyodik hareketi sonucunda başlayarak su kütlesinin doğal periyoduna bağlı olarak devam ederler. Tsunamiler tekil dalga hareketi iken sayheler periyodik salınımlardır.

2.3.3 Denklemler

Sayhe, rüzgar, sismik dalgalar (deprem), ani kütle giriş çıkışları (sel, toprak kayması vb.) nedenlerle kapalı veya yarı kapalı sistemlerde uzun periyodlu doğal salınımlı bir çalkantı olarak ifade edilebilir. Göl, nehir, liman, koy, körfez gibi su sistemlerinde gözlemlenmektedirler. Sayhe, gitar teli veya bir membranın titreşimine benzer fiziksel bir harekettir ve su kütlesinin doğal moduna bağlı bir hareketi mevcuttur. En düşük frekanslı modu, temel mod olarak adlandırılır (Rabinovich, 2009). Dış etkinin baskın periyodu veya frekansı doğal periyod veya frekansla ne ölçüde yakın ise o şiddette salınım gözlemlenir ve salınım sonucunda üretilen sayhenin genliği o denli büyük olması beklenir.

Lineer dalga teorisine göre su yüzeyi profilinin genel denklemi,

$$\eta(x, t) = A_d \cos(k_d x - \omega t) \quad (2.4)$$

şeklindedir (Kabdaşlı, 1992). A_d : dalganın genliğini, $k_d = 2\pi/\lambda$ ise dalga adımı (sayısını), $\omega = 2\pi/T$ ise dalganın açısal frekansını (hızını), $T = \lambda/c$ ise periyodunu, $c = \sqrt{gH}$ ise dalga hızını ifade etmektedir.

Birinci adımdaki su yüzü profili için,

$$\eta_1(x, t) = A_d \cos(k_d x - \omega t) \quad (2.5)$$

denklemi geçerli olacaktır. Dalga katarının bir sonraki adımındaki yüzey profili ise,

$$\eta_2(x, t) = A_d \cos(k_d x + \omega t) \quad (2.6)$$

şeklını alacaktır. Durağan dalga durumunda ise bu iki denklemin süperpozisyonu söz konusudur ve denklem,

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \eta(x, t) = 2A_d \cos k_d x \cos \omega t \quad (2.7)$$

halini alacaktır (Lamb, 1932)(Wilson, 1972).

Su yüzeyi denkleminin dikdörtgen bir kanal için L: uzunluk, H: derinlik ve t: zaman için ifadesi,

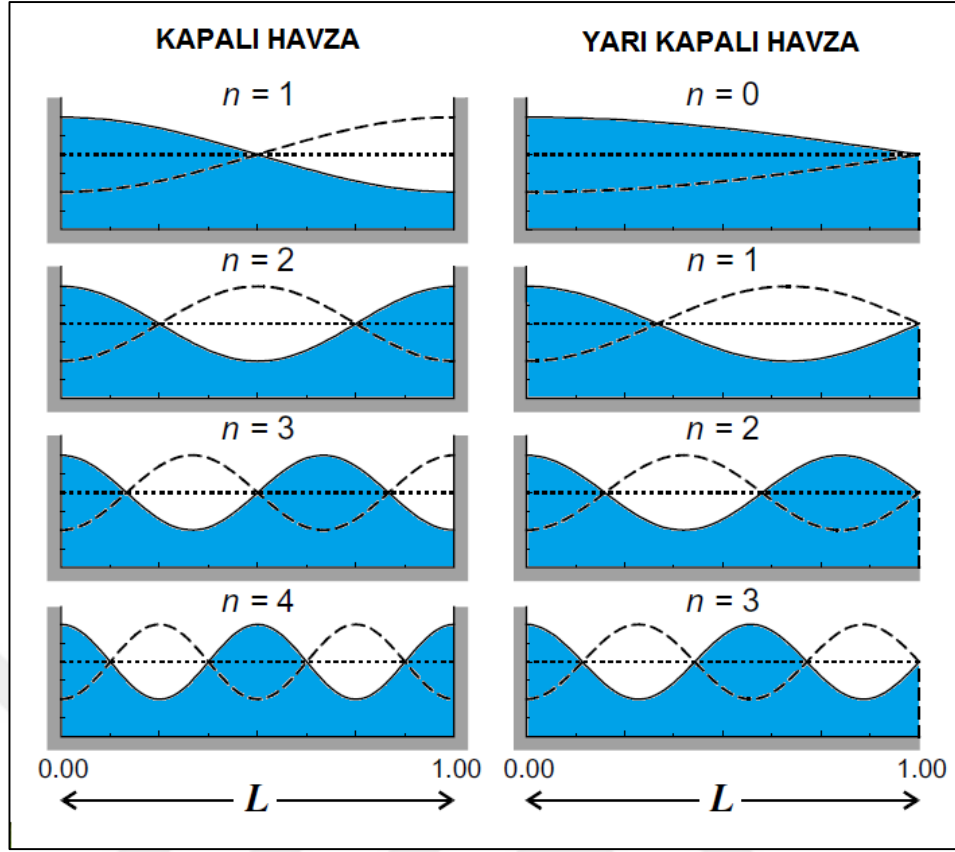
$$\eta(x, t) = 2A_d \cos k_d x \cos \omega t \quad (2.8)$$

şeklindedir (Rabinovich, 2009).

Kütle giriş çıkışına kapalı sınır koşulu olarak belirlenen $x = 0$ ve $x = L$ aralığı için,

$$k_d = \frac{\pi}{L}, \frac{2\pi}{L}, \frac{3\pi}{L}, \dots, \frac{n\pi}{L} \quad (2.9)$$

Salınım modları için kapalı sistemin doğal salınım modları hesaplanabilir. İlk modlar için hazırlanmış görsel Şekil 2.7’de sunulmuştur. Yarı kapalı havza durumu ile kapalı havza durumu arasındaki fark ise şekilde gösterildiği üzere son fazın farkı kadardır.



Şekil 2.7 Kapalı ve yarı kapalı havza için ilk dört doğal salınım modu.

Sismik etkilere bağlı sayhe tanımı ilk olarak Kvale (1955) tarafından Norveç ve İngiltere'deki göllerin 1950 tarihli Assam Depremi'ndeki salınımlarını ifade etmek amacıyla yapılmıştır. Bu tanım günümüzde kapalı ve/veya yarı kapalı durumdaki göl, körfez, koy, nehir, kanal, havuz vb. su kütlelerinin sismik etki altındaki davranışının genel tanımı olarak kullanılmaktadır.

Sayheleri ilk olarak betimleyen araştırma çalışmaları ise 1755 Lizbon, Portekiz Depremi ile ilgili gözlemlerin bulunduğu çalışmalarda mevcuttur (Wilson, 1953 ve Richter, 1958). Lizbon ve Assam depremlerine ilaveten 1964 Alaska Depremi çalışmasında McGarr ve Vorhis (1968) tarafından ve 2002 Denali Depremi içinde Barberopoulou ve diğ. (2004) tarafından gözlemler ve araştırmalar yayınlamıştır. McGarr tarafından hem 1965 hem de 1968 yılındaki yayınlarında sayhelerin hareketlerinin uzun kanallardaki dalga hareketine bağlı olarak hesaplanabileceği ortaya atılmıştır. Ancak Barberopoulou tarafından Denali Depreminin Union Gölü etkileri üzerine yapılan çalışmada bu kabulün belirli bir yaklaşım sunmasına rağmen taban etkisi ve geometrik değişkenlik sebebiyle yetersiz olduğu ifade edilmiştir (2008). Sismik dalgaların etkisinin araştırılmasında sık su denklemlerinin uyarlanması gerekli olmuştur (Nicolisky, 2010).

Küresel koordinatlarda su yüzeyi denklemleri kütle ve momentum korunumu koşuluyla,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\eta \mathbf{v}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial (\eta \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \eta \mathbf{v}) = -g \eta \nabla \xi_h - f \eta (\mathbf{e}_r \times \mathbf{v}) + \eta \boldsymbol{\tau} \quad (2.11)$$

şeklindedir (Nicolson, 2010).

$$\xi_h = H + \eta \quad (2.12)$$

Denklem 2.12’de böylece H : derinlik ve η : su yüzeyi değişimi olmak üzere herhangi bir noktadaki, herhangi bir zamanda su deriliğinin batimetri de dahil olacak şekilde kotunu hesaplamak mümkün olmaktadır. İlgili denklemlerin ivmesel koordinat sisteminden ivmesel olmayan sisteme taşınarak “ f ” zorlanmış kurgusal bir yatay kuvvet eklenerek gerçekleştirilmiştir (Arnold, 1989). Denklem 2.11’de sismik etki altındaki zemin hızı u_g olarak tanımlanırsa, $f \approx du_g/dt$ şeklinde sisteme ilave edilebilmektedir (Nicolson, 2010). Bu ilave Gardarsson (1997) tarafından sığ su kütlelerinin deprem etkileri altındaki davranışının araştırılması için ve Barberopoulou ve diğ. (2006) tarafından ise göllerde sayhenin araştırılması için sığ su denklemlerinde başarıyla uyarlanmıştır.

Rijid kabul edilen su tabanının etkisiyle su kütlelerinde meydana gelen elastik salınımın frekansı,

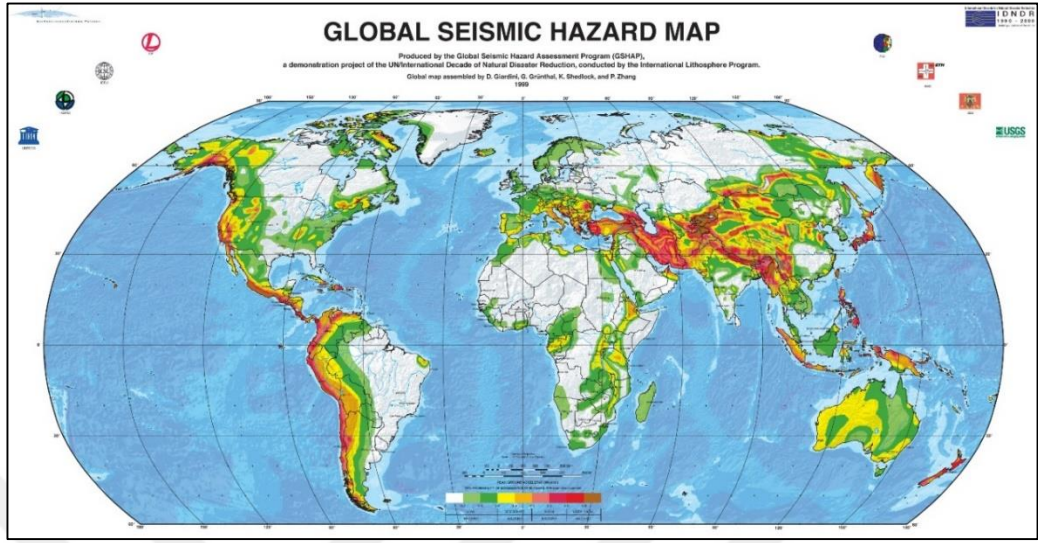
$$v_k = c_{ses}(1 + 2k)/4H \quad (2.13)$$

$k = 0, 1, 2, \dots$ ve c_{ses} : sesin su içindeki hızı (1481 m/s, 20 °C) şeklinde hesaplanabilir (Nosov ve diğ., 2007). Su kütlelerinin altında bulunan tabanın salınım frekansı, su kütlelerinin 0. mod frekansından küçük olması durumunda ($v < v_0$) olduğu durumda elastik karakterde bir dalga oluşumundan bahsedilemez ancak yine de ağırlık dalgaları oluşacaktır (Levin ve Nosov, 2008).

2.4 Türkiye’de Depremler ve Depremlerin Etkileri

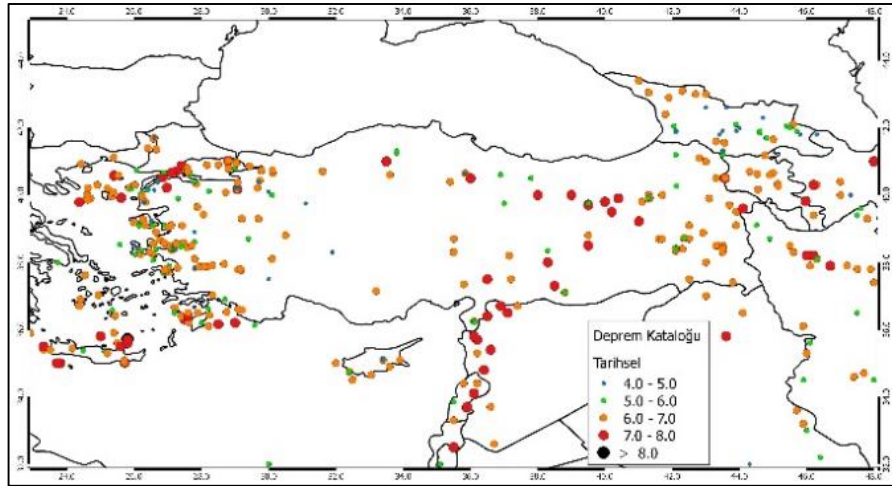
Dünya üzerindeki depremsel aktivitenin yüksek olduğu bölgeler göz önüne alındığında Türkiye’de Japonya’dan başlayarak Atlas Okyanus’una kadar uzanan Himalaya-Alp deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Şekil 2.8’de sunulan ve Birleşmiş Milletler tarafından yürütülen “Global Seismic Hazard Assessment Program” tarafından

hazırlanmış dünya deprem riski haritasında da Türkiye'nin bulunduğu konumun durumu açıktır.

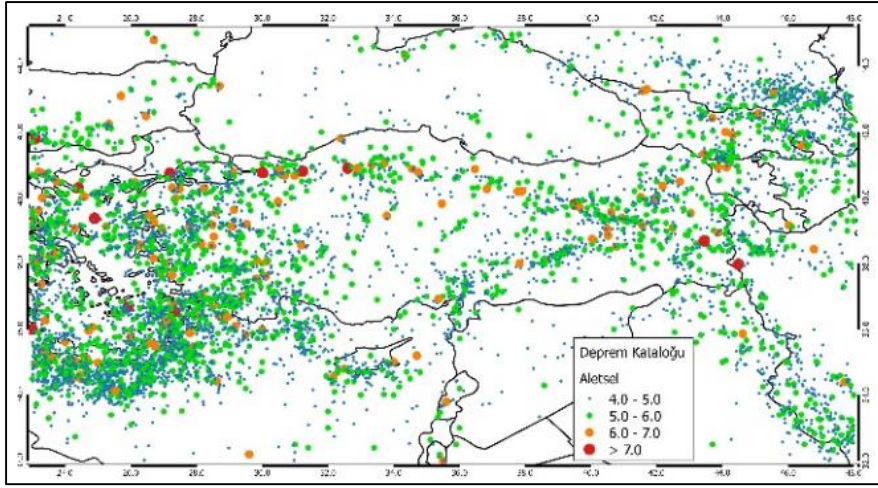


Şekil 2.8 Dünya deprem riski haritası.

Türkiye Sismik Risk Haritası Güncellemesi projesi kapsamında Şekil 2.9'da sunulan tarihsel depremlerin dağılımı ve Şekil 2.10'da ise sismografik aletlerle kaydı bulunan aletsel deprem ölçümlerine göre dağılım görseli sunulmuştur (Akkar ve diğ., 2013). Tarihsel olarak şiddetli depremleri barındıran Türkiye coğrafyası, modern ölçüm istasyonları sayesinde sürekli izlenmekte ve izleme kayıtları da arşivlenerek, bölge ile ilgili deprem araştırmalarında kullanılmaktadır.

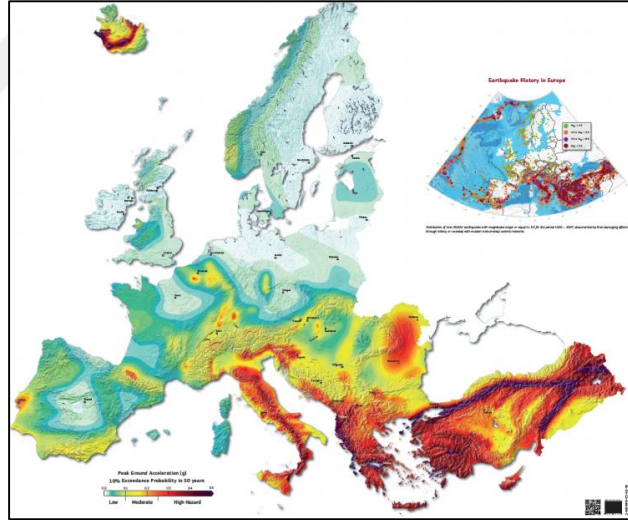


Şekil 2.9 Tarihsel deprem kataloğu.



Şekil 2.10 Aletsel deprem kataloğu.

Türkiye için yapılan deprem haritaları ve risk durumu tespitleri sürekli olarak geliştirilmekte ve bu kapsamda çok önemli çalışmalar yürütülmektedir. Avrupa Birliği 7. Çerçeve Programı SHARE projesi kapsamında Avrupa ve Türkiye için deprem kataloğu oluşturulmuştur. Geçmiş depremlerden hareketle yapılan istatistiksel ve stokastik analizler sonucunda da bölge için deprem riski haritaları güncellenmiştir.



Şekil 2.11 Avrupa deprem riski haritası.

Şekil 2.11’de sunulan güncel deprem riski haritası göz önüne alındığında Türkiye’de depremlerin sıklıkla ve yüksek şiddetlerde yaşandığı ve yaşanacağı gerçeği ortadadır. Geçmiş dönemlerdeki depremler araştırıldığında 1900 – 2014 tarihleri arasında Türkiye’de meydana gelmiş en şiddetli 15 deprem Çizelge 2.1’de sunulmuştur (NEMC, 2017). Bu dönem içindeki depremlerde 8 Ms ve üzeri deprem bulunmamakta olup en şiddetli deprem 1939 tarihli Erzincan depremidir.

Çizelge 2.1 1990 - 2014 yılları arasında Türkiye’de meydana gelmiş en şiddetli 15 deprem.

TARİH	Saat (T.S.)	YER	ŞİDDET	MAG (Ms)
09.08.1912	3:29	Mürefte (TEKİRDAĞ)	X	7,3
07.05.1930	0:34	TÜRK –İRAN SINIRI	X	7,2
27.12.1939	1:57	ERZİNCAN	X-XI	7,9
20.12.1942	16:03	Erbaa (TOKAT)	IX	7,0
27.11.1943	0:20	Ladik (SAMSUN)	IX-X	7,2
01.02.1944	5:22	Gerede-Çerkeş (BOLU)	IX-X	7,2
18.03.1953	21:06	Yenice (ÇANAKKALE)	IX	7,2
25.04.1957	4:25	Fethiye/Rodos(MUĞLA)	IX	7,1
26.05.1957	8:33	Abant (BOLU)	IX	7,1
06.10.1964	16:31	Manyas (BALIKESİR)	IX	7,0
28.03.1970	23:02	Gediz (KÜTAHYA)	IX	7,2
24.11.1976	14:22	Muradiye (VAN)	IX	7,5
17.08.1999	3:01	Gölcük (KOCAELİ)	X	7,8
12.11.1999	18:57	DÜZCE	IX	7,5
23.10.2011	13:41	Van	VIII	7,2

Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi tarafından derlenen bu deprem kütüphanesindeki veriler kullanılarak $M_s > 5,5$ olan son 15 deprem ise Çizelge 2.2’de sunulmuştur. Son depremlerden en akılda kalıcı ve şiddetli olanı ise 2011 yılı Ekim ayında meydana gelen Van depremidir (NEMC, 2017).

Çizelge 2.2 Türkiye’de meydana gelmiş $M_s > 5,5$ olan 15 deprem.

TARİH	Saat (T.S.)	YER	ŞİDDET	MAG (Ms)
19.05.2011	23:15	Simav (Kütahya)	VI	5,9
22.09.2011	6:22	Cengerli-Refahiye (ERZİNCAN)	VI	5,6
23.10.2011	13:41	Van	VIII	7,2
23.10.2011	13:56	Van Gölü	VI	5,6
23.10.2011	14:32	Halkalı (VAN)	VI	5,6
23.10.2011	23:45	Mollakasım (VAN)	VI	5,9
25.10.2011	17:55	Değirmenözü (VAN)	VI	5,6
09.11.2011	21:23	Edremit (VAN)	VI	5,6
10.06.2012	15:44	Ölü Deniz Açıkları (AKDENİZ)	VI	6,0
14.06.2012	8:52	Yeniköy-Silopi (ŞIRNAK)	V	5,5
08.01.2013	16:16	Kuzey Ege Denizi	VI	6,2
15.06.2013	19:10	GİRİT ADASI-AKDENİZ	VI	6,0
17.06.2013	0:39	GİRİT ADASI-AKDENİZ	VI	5,7
28.12.2013	17:21	ANTALYA KÖRFEZİ-AKDENİZ	VI	6,0
24.05.2014	12:25	GÖKÇEADA AÇIKLARI- EGE DENİZİ	VII	6,8

Aynı kaynak bilgileri kullanılarak en çok hasara neden olan 10 deprem sıralaması ise Çizelge 2.3’de sunulmuştur.

Çizelge 2.3 Türkiye’de can kaybı ve hasar olarak en şiddetli 10 deprem.

TARİH	Saat (T.S.)	YER	ŞİDDET	MAG (Ms)	CAN KAYBI	HASARLI BİNA
27.12.1939	1:57	ERZİNCAN	X-XI	7,9	32968	116720
20.12.1942	16:03	Erbaa (TOKAT)	IX	7,0	3000	32000
27.11.1943	0:20	Ladik (SAMSUN)	IX-X	7,2	4000	40000
01.02.1944	5:22	Gerede-Çerkeş (BOLU)	IX-X	7,2	3959	20865
19.08.1966	14:22	Varto (MUŞ)	IX	6,9	2396	20007
28.03.1970	23:02	Gediz (KÜTAHYA)	IX	7,2	1086	19291
06.09.1975	12:20	Lice (DİYARBAKIR)	VIII	6,6	2385	8149
24.11.1976	14:22	Muradiye (VAN)	IX	7,5	3840	9232
30.10.1983	7:12	ERZURUM – KARS	VIII	6,9	1155	3241
17.08.1999	3:01	Gölcük (KOCAELİ)	X	7,8	17480	73342

Türkiye’deki önemli depremlerin araştırılan etkilerine bakıldığında çok sayıda araştırma raporu ve inceleme çalışması yapılmıştır. Farklı kamu kurumları ve üniversiteler ayrıca bağımsız kuruluşlar depremler ve sonrasındaki etkileri hakkında araştırma, inceleme ve değerlendirme raporu hazırlanmış ve sunulmuştur. Yapısal hasarlar, can kayıpları, depremin neden olduğu jeolojik etkiler, zemin sıvılaşması ve sıvılaşmaya bağlı hasarlar vb. konular bu raporlarda detaylı şekillerde incelenmiş ve incelenmeye devam etmektedir. Tez kapsamındaki konu dikakate alındığında depremlerin hidrolik etkileri haricindeki diğer etkiler kapsam dışında bırakılmıştır. Depremlerin neden olduğu sayhe ile ilgili olarak ise araştırma ve inceleme raporlarında fazla bir veri ve bilgiye doyurucu bir şekilde rastlanılmamıştır. Sayhe ile karıştırılan tsunami konusunda ise kıyı şeridi uzun olan Türkiye ile ilgili daha fazla bilgiye ve araştırmaya raporlarda yer verilmektedir.

Tüm dünyada meydana gelen tsunamilerin yaklaşık olarak %10 Türkiye kıyılarını da etkileyen Akdeniz içinde meydana gelmektedir (Altınok ve diğ. 1994).

18.10.1343 Batı Marmara depremi sırasında tsunami dalgaları Boğaziçine ve Beylerbeyi’ne kadar ulaşmıştır (Ozansoy, 2001).

1509 yılında 10 Eylül günü, Marmara Denizi’nde meydana gelen ve tahmini şiddeti 8 civarında olduğu tahmin edilen deprem sırasında ve sonrasında meydana gelen

dalgaların Yenikapı surlarını aştığı ve Aksaray bölgesinde ve İzmit tersanesinde su baskınlarına neden olduğu, deprem kaynaklı tsunaminin yüksekliğinin 6 m'den fazla olduğu belirtilmiştir (Bayülke ve diğ., 1990).

10.07.1894 tarihli tarihli yine İstanbul merkezli depremde ise sahil boyunca deniz suyu yer yer 50 m'ye yakın mertebede çekilerek tekrar ve tekrar baskında bulunduğu Öztin (1994) tarafından hazırlanan raporda ifade edilmektedir.

1912 Şarköy-Mürefte depreminde meydana gelen tsunami sebebiyle Prens Adaları, Yeşilköy, Kadıköy, Karaköy, Büyükçekmece, Haliç ve Boğaziçi'nde su baskınları ve sıradışı dalgalar görülmüştür (Altınok ve diğ., 2003).

1939 Erzincan depremi sırasında Fatsa sahilinde, 1968 Bartın depremi sırasında ise Amasra sahilinde tsunami gözlemlenmiştir (Altınok ve diğ., 1994). Özellikle Amasra sahilinde denizin ilk dalgada 100 m artçıl dalgalarda ise 50 – 60 m kıyından içeri doğru ilerlediği gözlenmiştir.

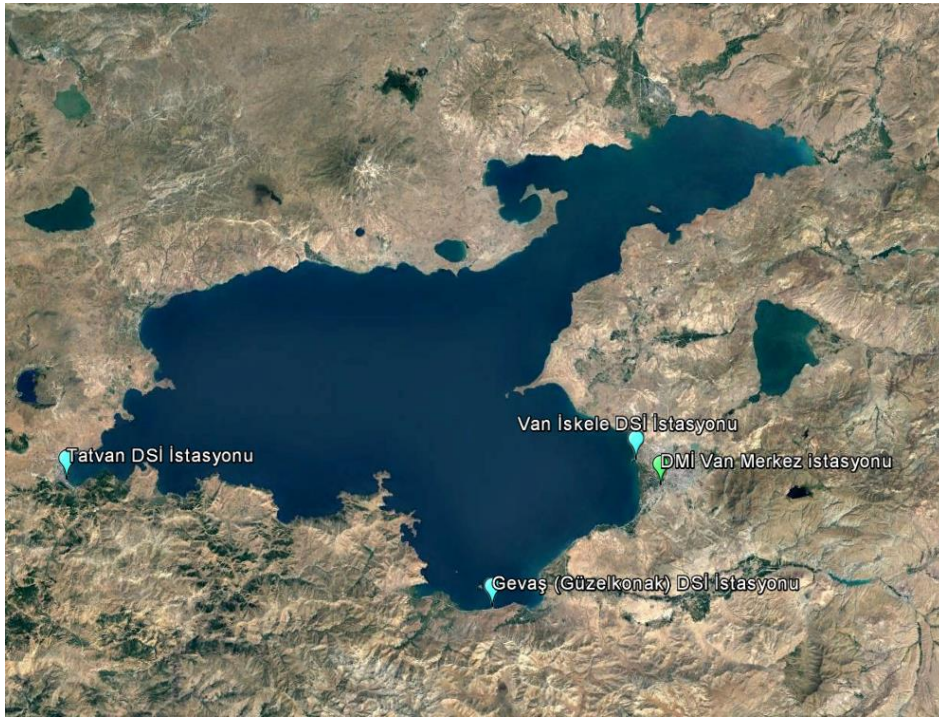
Marmara ve Ege Denizinde gözlemlenen tsunami ve sayhelere ilaveten Karadeniz'de Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde meydana gelen depremlerin tetiklediği sayhe ve tsunamiler ölçülmüş ve/veya gözlemlenmiştir. Karadeniz'in kuzeyinde kapalı bir koy olan Azak Denizi ise tsunami etkilerine ve sayhe oluşumlarına hassas bir bölge olması sebebiyle sıklıkla bu etkilerin bir gözlem noktası haline gelmiştir (Altınok, 1999).

1999 İzmit depremi sonrasında da başta İzmit körfezi ve Prens Adaları olmak üzere İstanbul'un pek çok farklı noktasında su baskınları görülmüş, Boğaziçi'nin Marmara Denizi girişinde bulunan Kuleli Askeri Lisesi bahçesi duvarı kıyından 10 m ayrılmış, normal deniz seviyesinden 2 m yüksekliğinde deniz suyu seviyesi gözlenmiştir (Selimoğlu, 1999), (Altınok ve diğ., 2003). Ayrıca İzmit depreminden kaynaklı meydana gelen tsunami etkilerinin incelendiği ve deprem sonrası meydana gelen tsunaminin nümerik modelleme yöntemiyle araştırıldığı makalesinde Altınok ve diğ. (2001) dalgaların 1 – 2,5 m yüksekliğinde olduğunu ve yer yer kıyı bölgelerinde 100 m mertebesinde karada su baskınlarına neden olduğunu ifade etmektedir. Özellikle Değirmendere sahilinde 10 m su yükselmesi görülmüştür (Altınok ve diğ., 2000). Yine aynı çalışmada fay İzmit Körfezi'nin neredeyse tam ortasından geçmekte olduğu halde güney sahillerine tsunaminin kuzey sahilllerinden daha önce ulaştığı ifade edilmektedir.

Tsunamilere ek olarak 1999 depreminde Yuvacık Baraj Gölü'nde 10 m mertebesinde dalgalar gözlemlendiği iddia edilmektedir (Hinks, 2015). Ancak bu büyüklükteki dalgaların baraj gövdesinde hasar oluşturacağı kesin olup bu değer tartışmaya açık durumdadır.

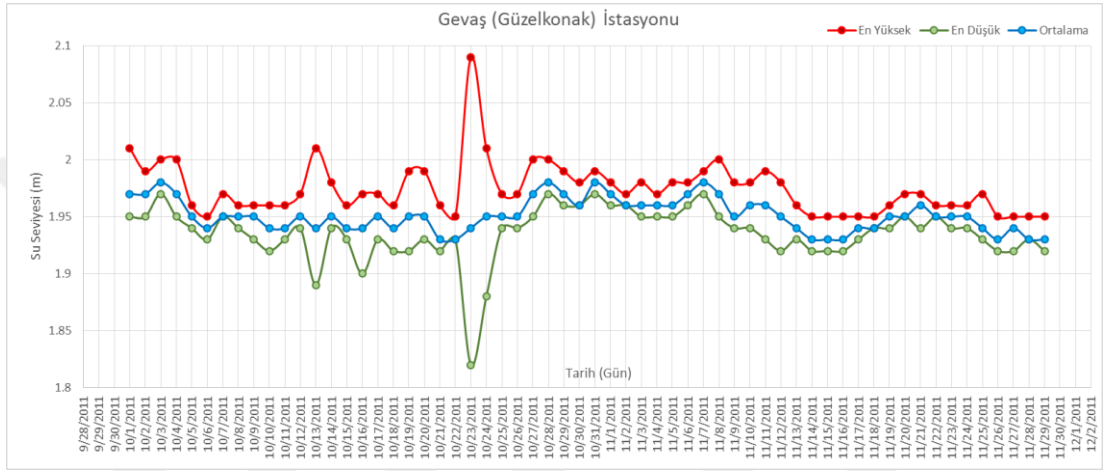
DSİ Bölge Müdürlüğü'nün Van Gölündeki ölçümlerine göre 9 Kasım 2011 tarihinde meydana gelen Ms 5,6 büyüklüğündeki depremde Van Gölü'nün seviyesi 4 cm yükseldiği, 1649,51 m. olan göl seviyesinin deprem sırasında 1649,55 m kotuna çıktığı ve sonrasında tekrar normal seviyesine geri döndüğü gözlenmiştir (AFAD, 2011). Bu durum ilgili depremde kayıt istasyonu tarafından tespit edilen maksimum su yüzeyi kotu değişiminin 4 cm mertebesinde olduğunu düşündürmektedir.

23 Ekim 2011 tarihinde saat 13:41'de Van, Tuşba ilçesi merkezinde meydana gelen 7,2 Mw şiddetindeki depremde DSİ Van Bölge Müdürlüğü Van Gölü seviye ölçüm istasyonlarında da deprem etkisiyle meydana gelen sayhe dalgaları tespit edilmiştir. Şekil 2.12'de sunulan yerleşimde, deprem öncesinde, deprem sırasında ve depremden sonra kayıta olan Tatvan, Gevaş (Güzelkonak) ve Van İskele istasyonlarının bulundukları noktalar mavi renkte gösterilmiştir. Aynı yerleşim planında sunulan yeşil nokta ise Devlet Meteoroloji İşlerine ait meteoroloji gözlem istasyonuna aittir.

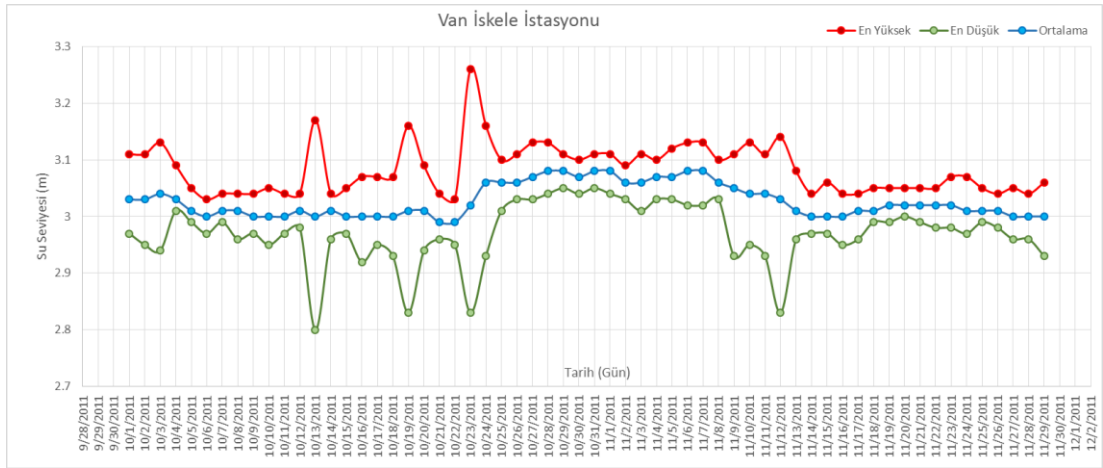


Şekil 2.12 Van Gölü DSİ göl seviyesi ölçüm istasyonları ve DMI Van meteoroloji istasyonu yerleşimi.

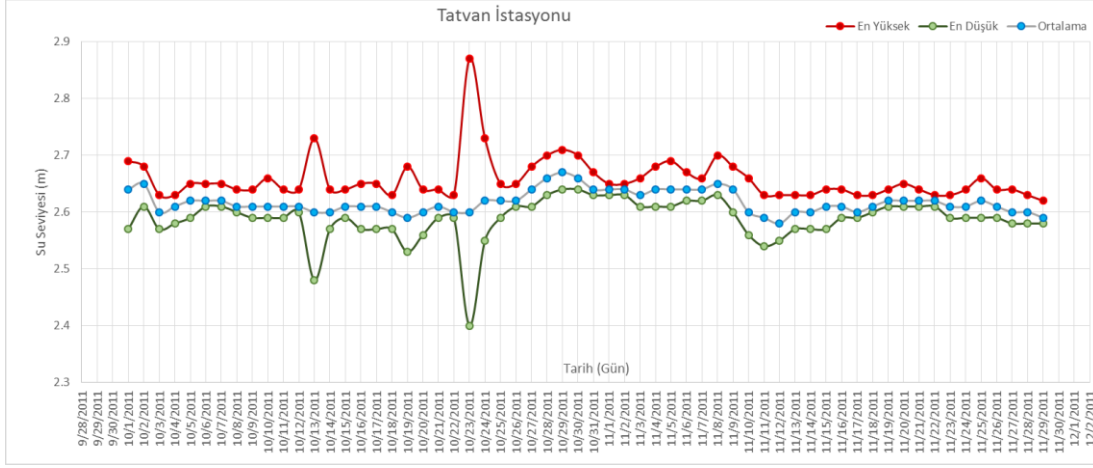
01.10.2011 – 30.11.2011 arası ölçüm sonuçlarına ait günlük ortalama, en yüksek ve en düşük değerler Gevaş, Van ve Tatvan istasyon için sırasıyla Şekil 2.13, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’de sunulmuştur. Grafiklerdeki mavi çizgi günlük ortalama değeri, kırmızı çizgi gün içinde ölçülmüş olan en yüksek değeri ve yeşil çizgi ise gün içinde ölçülmüş olan en düşük seviye değerini göstermektedir. Grafiklerde 23.10.2011 ve 09.11.2011 Van depremlerinde yaşanan sayhe oluşumları görülmektedir. Özellikle 23 Ekim 2011 tarihli depremin şiddetiyle meydana getirdiği dalgalar tüm istasyonlarda ölçülmüştür (DSİ, 2011).



Şekil 2.13 Gevaş (Güzelkonak) istasyonu seviye ölçüm sonuçları.

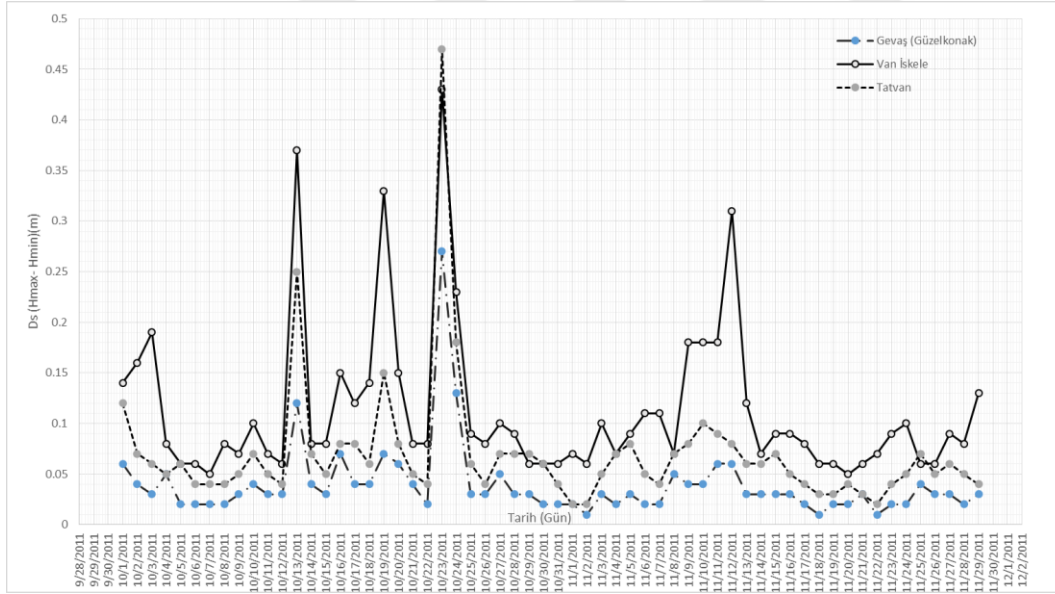


Şekil 2.14 Van İskele istasyonu seviye ölçüm sonuçları.



Şekil 2.15 Tatvan istasyonu seviye ölçüm sonuçları.

İstasyonlardaki günlük en yüksek ve en düşük seviyelerin farkı alındığında ise bu durum daha net görülebilmektedir. Şekil 2.16'da sunulan en yüksek su seviyesi değeri ile en düşük su seviyesi değeri arasındaki farkı grafiğinde de 23 Ekim 2011 depreminin etkisi net bir şekilde görülmektedir. Üç istasyonun hepsinde de aynı gün ve takip eden günde de seviye değişimi gözlenmektedir.



Şekil 2.16 İstasyonlara göre su seviyesi günlük değişimi.

İstasyonlardan temin edilen saatlik ortalama su seviyesi ve günlük en yüksek ve en düşük su seviyesi değerlerine ait değerler incelenmiş, 23 Ekim 2011 tarihine ait istasyonlarda ölçülen saatlik ortalama değerler Çizelge 2.4'te sunulmuştur. Deprem saati olan 13:41'den sonrasındaki ortalama değerlerde tüm istasyonlarda saatlik ortalama su seviyesinde artışlar görülmektedir. En fazla ortalama su seviyesinde değişim 7 - 8 cm ile Van Merkez istasyonunda görülmüştür. Diğer istasyonların saatlik

ortalama değerlerinde ise 1 – 4 cm ortalama su seviyesi değişimi ölçülmüştür. Bu değişimler meydana gelen sayhelerin piklerinin ortalamaya olan etkisinden kaynaklanmaktadır.

21 Ekim 2011 tarihindeki Van Depremi saat 13:41’de meydana gelmiştir. Çizelge 2.4’te sunulan değerlerin ilk 13 saatlik ortalamaları hesaplandığında deprem öncesinde ilgili istasyondaki ölçülen ortalama su seviyesi belirlenmiştir. Deprem öncesinde ölçülen su seviyelerinin ortalamaları hesaplanmış ilave olarak 23 Ekim 2011 tarihindeki en yüksek ve en düşük su seviyesi değerleri ve ölçüm saatleri de eklenerek Çizelge 2.5’te sunulmuştur. 9 Kasım 2011 tarihinde saat 21:23’de meydana gelen Van Depremi’ne ait ölçüm değerleri ise Çizelge 2.6’da sunulmuştur.

Çizelge 2.4 23 Ekim 2011 tarihi için DSİ su seviyesi ölçüm istasyonlarında ölçülen saatlik ortalama su seviyesi.

Tarih	Saat	Saatlik Ortalama Su Seviyesi (m)		
		Tatvan	Van Merkez (İskele)	Gevaş (Güzelkonak)
23.10.2011	1:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	2:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	3:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	4:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	5:00:00	2,60	2,99	1,94
23.10.2011	6:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	7:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	8:00:00	2,60	2,99	1,94
23.10.2011	9:00:00	2,60	2,99	1,93
23.10.2011	10:00:00	2,61	2,99	1,94
23.10.2011	11:00:00	2,61	2,99	1,94
23.10.2011	12:00:00	2,61	3,00	1,94
23.10.2011	13:00:00	2,60	3,00	1,94
23.10.2011	14:00:00	2,61	3,08	1,94
23.10.2011	15:00:00	2,62	3,04	1,95
23.10.2011	16:00:00	2,62	3,07	1,94
23.10.2011	17:00:00	2,60	3,07	1,95
23.10.2011	18:00:00	2,64	3,06	1,95
23.10.2011	19:00:00	2,61	3,07	1,95
23.10.2011	20:00:00	2,62	3,05	1,96
23.10.2011	21:00:00	2,60	3,05	1,96
23.10.2011	22:00:00	2,63	3,07	1,96
23.10.2011	23:00:00	2,64	3,06	1,96
23.10.2011	24:00:00	2,61	3,07	1,95

Çizelge 2.5 23 Ekim 2011 tarihi için DSİ su seviyesi ölçüm istasyonlarında ölçülen depreme kadar ortalama, en yüksek ve en düşük su seviyesi ve ölçüm saatleri.

İstasyon	Tatvan			Van Merkez (İskele)			Gevaş (Güzelkonak)		
Durum	Deprem Öncesi Ortalama	En Yüksek	En Düşük	Deprem Öncesi Ortalama	En Yüksek	En Düşük	Deprem Öncesi Ortalama	En Yüksek	En Düşük
Su Seviyesi (m)	2,60	2,87	2,4	2,99	3,26	2,83	1,93	2,09	1,82
Saat	-	16:35	14:27	-	16:54	14:36	-	13:48	13:56

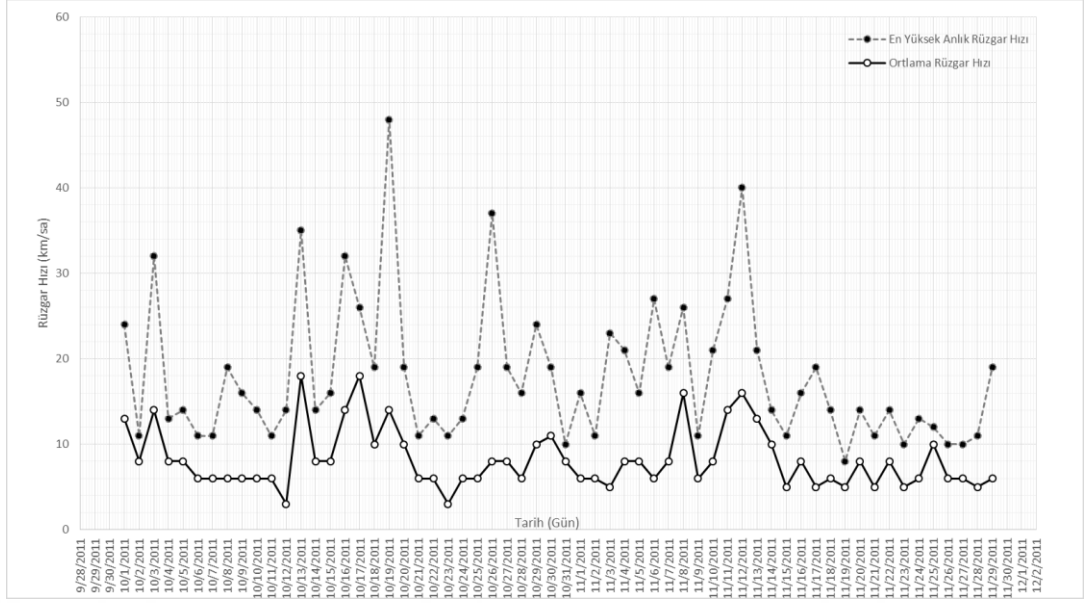
Çizelge 2.6 incelendiğinde en düşük değerlerin deprem kaynaklı olduğu söylenebilir ancak özellikle Tatvan ve Van Merkez istasyonlarında ölçülmüş değerlerin depremden önceki saatlerde ölçülmüş olması Kasım 2011 depreminin gölün dinamiğinde ciddi bir etkisi olmadığı söylenebilir.

Çizelge 2.6 09 Kasım 2011 tarihi için DSİ su seviyesi ölçüm istasyonlarında ölçülen depreme kadar ortalama, en yüksek ve en düşük su seviyesi ve ölçüm saatleri.

İstasyon	Tatvan			Van Merkez (İskele)			Gevaş (Güzelkonak)		
Durum	Deprem Öncesi Ortalama	En Yüksek	En Düşük	Deprem Öncesi Ortalama	En Yüksek	En Düşük	Deprem Öncesi Ortalama	En Yüksek	En Düşük
Su Seviyesi (m)	2,64	2,68	2,60	3,05	3,11	2,93	1,95	1,98	1,94
Saat	-	12:52	23:09	-	21:18	21:26	-	23:10	23:39

Şekil 2.17’de 2011 yılının Ekim ve Kasım aylarına ait anlık ve ortalama rüzgar hızları sunulmaktadır (DMİ, 2011). İlgili tarihler aralığında meteorolojik şartlar incelendiğinde ise depremin meydana geldiği günlerde rüzgar hızında anormallik gözlenmemiştir. Ancak su yüzeyi değişimlerinin gözlemlendiği 3, 13, 16, 19, 26, 29 Ekim ve 3, 6, 8, 12, 17 Kasım 2011 tarihlerinde fırtına durumu meydana geldiği görülmektedir. Rüzgar hızının ani artışları ve günlük ortalama rüzgar hızının yüksek olması Van Gölü’nde fırtınaya bağlı dalga oluşumuna neden olduğu ve bu durumunda istasyonlarca kaydedildiği açıktır.

Depremlere ait günlerdeki rüzgar durumu incelendiğinde ise ortalama ve anlık rüzgar hızlarının ilgili iki günde de normal seyirde olduğu görülmektedir.



Şekil 2.17 Van ili günlük en yüksek anlık rüzgar ve ortalama rüzgar hızı.

Eğirdir Gölü çalışmasında yapılan modelleme sonuçlarının kontrolü için herhangi bir arazi ölçümü, saha gözlemi, görgü tanıklığı ifadesi ile Dinar depremi etkileri üzerine bilgiye ulaşılamamıştır. Uzun ve zorlu uğraşlar sonucunda sadece Van Gölü için DSİ nezdinde yapılan göl suyu seviyesi ölçüm sonuçlarının günlük en yüksek ve en düşük okuma değerleri ile saatlik bazda ortalama su seviyesi değerleri elde edilebilmiştir. DSİ Bölge Müdürlüğü personeliyle yapılan görüşmelerde Van Gölü Ekim 2011 Depremi sırasında göl içinde bulunan istasyonlarda depreme bağlı olarak yer değiştirme meydana geldiği ve deprem başlangıcı sonrasındaki verilerde hata olasılığının yüksek olduğu dile getirilmiştir.



3. KULLANILAN MODELLEME METODU

Akışkanın hareketi lineer olmayan, zamana bağlı ikinci dereceden diferansiyel denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu denklemlerin çözülmesi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), “*Computational Fluid Dynamics (CFD)*” olarak adlandırılmaktadır.

Göllerin deprem etkisi altında hidrodinamik denge durumundaki değişikliklerin araştırılması için hareket denklemlerinin çözülmesi ve bu çözümlemeye depreme bağlı ivme serisinin ilave edilmesi gerekmektedir.

Akışkanın herhangi bir özelliğine uygulanan zamansal ve fiziksel türev, matematiksel formda temsil edilebilir ve toplam zaman türevi olarak adlandırılabilir.

Genel olarak, akışkan hareketinin analiz edilebileceği iki temel yol vardır. İlk yaklaşım, temel kanunlara katılan parametrelerin bileşke etkilerinin tahminlerini bir sınırlı bölge (kontrol hacmi) üzerinde kullanmaktır. Lagrangian yaklaşım adı da verilen bu yaklaşım çerçevesinde, koordinat sisteminde bir nokta uzayda sabitlenip akışkanın özelliklerinin ilgili noktadaki değişimi incelenir.

İkinci yaklaşım ise, akım modelleri sonsuz küçük bir bölgede nokta-nokta analizi yapılır ve temel diferansiyel denklemler temel koruma yasaları için uyarlanarak geliştirilir. Tek tek parçacıkların hareketli konumu izlenip ve yörünge boyunca meydana gelen değişimler gözlemlenirse, Eulerian yaklaşım söz konusudur. Hız sahası boyunca türev kavramını örneklemek gerekli ise, Eulerian sisteminde, hız vektör alanının Kartezyen formu,

$$V(r, t) = iu(x, y, z, t) + jv(x, y, z, t) + kw(x, y, z, t) \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir.

Sonsuz kabul edilebilen akışkan sistemi için, Newton’un ikinci yasa önermesini kullanarak, akım için ivme vektör alanı (a) hesaplanabilir.

$$a = \frac{dV}{dt} = i \frac{du}{dt} + j \frac{dv}{dt} + k \frac{dw}{dt} \quad (3.2)$$

u, v ve w'nin her skaler bileşeni ve dört değişkenin (x,y,z,t) bir fonksiyonudur ve ayrıca, $u=dx/dt$; $v=dy/dt$ ve $w=dz/dt$. Böylece, skaler zaman türevi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\frac{du(x,y,z,t)}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.3)$$

u,v ve w'nin toplam türevinin derlenmiş hali şu şekilde yazılabilir,

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + (V \cdot \nabla) u; \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + (V \cdot \nabla) v; \frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + (V \cdot \nabla) w \quad (3.4)$$

(V) ve de grade operatörü (∇) içeren kompakt nokta ürünü olarak aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$(V \cdot \nabla) = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}; \nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.5)$$

Elde edilen toplam ivme,

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) = \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \quad (3.6)$$

$\frac{\partial V}{\partial x}$ terimi yerel (lokal) ivme olarak adlandırılır ve akım koşulları kararlı hale geldiğinde ihmal edilebilir.

Parantez içinde belirtilen, fiziksel (konumsal/uzamsal) hız gradyanı olduğunda ortaya çıkan konvektif ivme olarak adlandırılır. Bu ikisinin birleşimi toplam zaman türevi olarak adlandırılır ve bu kavram herhangi bir skaler / vektör akım değişkenine genişletilebilir. Basınç ve sıcaklık için de benzer bir ifade yazılabilir.

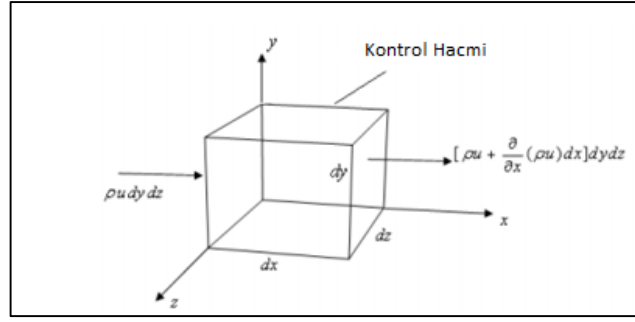
Operatör (∇) içeren kapalı ifade aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + (V \cdot \nabla) p \quad (3.7)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} + (V \cdot \nabla) T \quad (3.8)$$

Kütlenin Korunumu

dx – dy – dz boyutlarına sahip olan son derece küçük bir kontrol hacmi alınacak olursa elemanın her iki tarafındaki akım bir boyutlu olarak ele alınabilir ve süreklilik kavramı korunabilir ve böylece akışkan özelliklerinin eşit olarak değiştiği kabul edilebilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kontrol hacmi.

Temel kontrol hacmi ifadesini ele alacak olursak,

$$\int_{cv} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{out} - (\rho_i A_i V_i)_{in} = 0 \quad (3.9)$$

kontrol hacmi elemanı çok küçük olması sebebiyle, hacim integralinin aşağıdaki diferansiyel formuna indirgenmesi uygun olacaktır.

$$\int_{cv} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (3.10)$$

Kütlesel akım terimleri, üç yüzeyden kontrol hacmine girişi ve üç yüzeyden kontrol hacminden çıkışı içeren ve toplamda altı yüzey için gösterilmektedir (Şekil 3.2). Bu terimler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Yüzey	Giren Debi	Çıkan Debi
x	$\rho u dy dz$	$\left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx \right] dy dz$
y	$\rho v dx dz$	$\left[\rho v + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dy \right] dx dz$
z	$\rho w dx dy$	$\left[\rho w + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dz \right] dx dy$

Şekil 3.2 Kütlesel akım terimleri özet şeması.

Denklem 3.8'deki bu terimler yerine konulduktan sonra,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dx dy dz = 0 \quad (3.11)$$

Ya da,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.12)$$

Ya da,

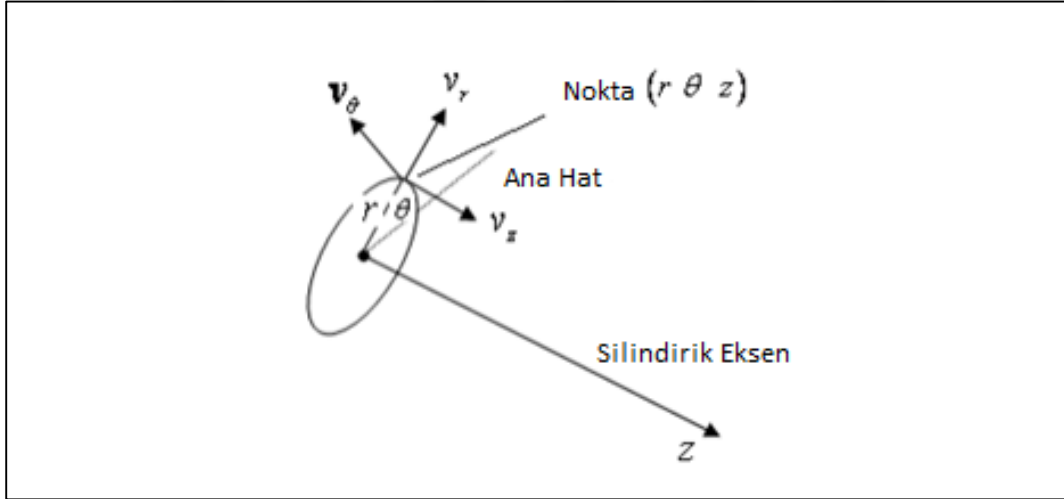
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3.13)$$

Kartezyen koordinat sisteminde son derece küçük bir kontrol hacmi için istenen kütle koruma denklemi yukarıda verilmektedir. Kararlı/kararsız, viskoz/viskoz olmayan, sıkışmaz/sıkıştırılabilir gibi ana akışkan kategorileri için geçerlidir.

Alternatif olarak, süreklilik denklemi birçok pratik akım hesaplamasında yararlı olduğu için silindirik koordinat sistemi içinde de ifade edilmektedir. Bu durumda, rastgele bir nokta koordinatlarıyla tanımlanır (r, z, θ).

Burada, z , z eksenini boyunca uzaklık, r , radyal mesafe ve θ ise Şekil 3.3’de gösterildiği gibi eksen etrafındaki dönme açısıdır. Kartezyen koordinatlardan silindirik koordinatlara dönüşüm, aşağıdaki ifade yardımıyla mümkün olabilir.

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} ; \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) ; \quad z=z \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 Silindirik koordinat sistemi.

Böylece, silindirik koordinat sistemindeki süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (3.15)$$

şeklindedir. Akım kararlı halde ise, tüm özellikler yalnızca konumun fonksiyonudur. Dolayısıyla Denklemler (3.10 ve 3.12) indirgenebilirler.

$$\textbf{Kartezyen} : \quad \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (3.16)$$

$$\textbf{Silindirik} : \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (3.17)$$

Özel bir durumda, akışkan sıkıştırılamazsa, yoğunluk değişiklikleri önemsiz hale gelir ve akımın kararlı halde olup olmadığına bakılmaksızın, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ olduğu söylenebilir.

$$\text{Kartezyen} : \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.18)$$

$$\text{Silindirik} : \quad \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.19)$$

$$\text{Vektör ilişkisi} : \quad \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.20)$$

Gerilme (Stres) Alanı

Newton'un hareket yasalarına göre, bir cisme ivme kazandırmak için kuvvet uygulanmalıdır. Sıvı 'sürekli ortam' olarak kabul edilir, öte yandan, akışkan ortamında bir parçacığa etki eden hareket kuvvetlerinin türlerini anlamak gerekmektedir. Genel olarak, her akışkan parçacık yüzey kuvvetleri (basınç, sürtünme) ve kütle kuvvetlerinin (yer çekimi) etkisi altında kalır. Yüzey kuvvetleri, diğer akışkan parçacıkları ve katı ortam ile temasları sonucu oluşur ve gerilmelere yol açar. Kütle kuvveti parçacık boyunca yaşanır ve birim hacim başına yerçekimsel kütle kuvveti ρg olarak ifade edilebilir. Burada ρ , yoğunluk ve g , ise yer çekimi ivmesidir.

Gerilme kavramı, sıvı ve katı sınırlara etki eden yüzey kuvvetlerinin ortam içine iletilmesi olarak tanımlanır. Katı hal durumunda, gerilmeler cisim içinde tetiklenir. Akışkan ortamda, bir cisim bir akışkan içinden geçtiğinde, akışkanın içinde gerilme kuvvetleri oluşur. Gerilmeler daha sonra birim alan başına bu kuvvete göre ölçülür. Bu durumda normal gerilme (σ_n) ve kayma gerilmesi (τ_n) aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$\sigma_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta F_n}{\delta A_n} \right); \tau_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta F_t}{\delta A_n} \right) \quad (3.21)$$

Sıvı sürekli olarak değerlendirildiğinden, kuvvetin bu noktanın etrafında farklı gerilmeler elde etmek için 'P' noktasının etrafında çözülmesi mümkündür. Dikdörtgen kartezyen koordinatlarda, gerilmeler x, y ve z yönlerinde dışa normal olarak çizilen düzlemler üzerinde etki ettiği düşünülür. Daha sonra, x yönü için aşağıdaki şekildeki gibi yazılabilir,

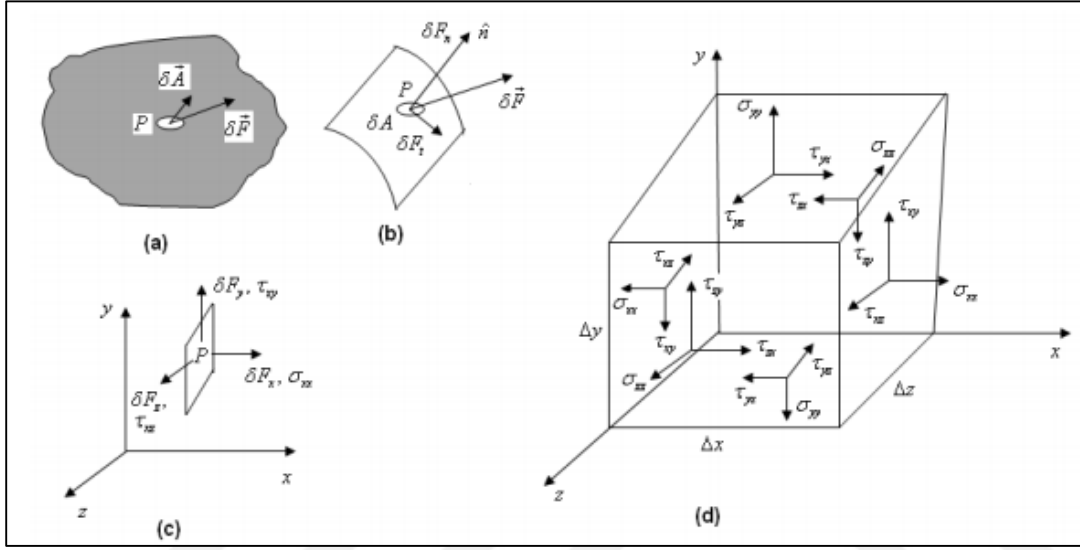
$$\sigma_{xx} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \left(\frac{\delta F_x}{\delta A_x} \right); \tau_{xy} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \left(\frac{\delta F_y}{\delta A_x} \right); \tau_{xz} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \left(\frac{\delta F_z}{\delta A_x} \right) \quad (3.22)$$

Burada, birinci alt simge, gerilmenin üzerinde durduğu düzlemi (yani düzlem x - eksenine diktir) ve ikinci alt simge gerilmenin yönünü belirtir. Her ne kadar 'P' noktasından geçen sonsuz sayıda düzlem olsa bile, ancak birbirlerine dik olan dikey düzlemler üzerinde düşünülmelidir.

Bu nedenle, herhangi bir noktadaki gerilme, aşağıda verildiği gibi matris biçiminde dokuz bileşen tarafından belirtilir ve burada, σ , normal gerilim, τ , kayma gerilmesi olarak ifade edilir.

$$\text{Bir noktada gerilme} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Δx , Δy , Δz boyutundaki sonsuz küçük bir elemana atıfta bulunarak, gerilmelerin üzerinde etki yaptığı altı düzlem vardır. Düzlemler isimlendirilir ve düzlemin dışına doğru normal yönüne göre pozitif veya negatif olarak gösterilir. Bir gerilme komponenti pozitifdir, bunun üzerinde etki ettiği gerilme komponenti ve düzlem yönü hem pozitif hem de negatiftir. Şekil 3.4’de gösterilen gerilmelerin hepsi pozitifdir.



Şekil 3.4 Yüzeyler ve yüzeylere etkiyen kuvvetler.

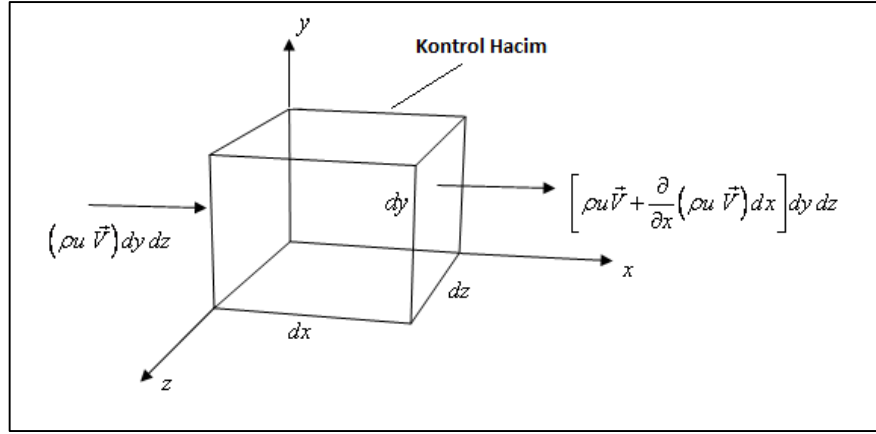
Genel Korunum Denklemleri

Tek boyutlu kontrol hacimi ile çizgisel momentum için denklem yazılacak olursa,

$$\Sigma F = \frac{d}{dt} (\int_{cv} V \rho dV) + [\Sigma (m_i V_i)_{out} - \Sigma (m_i V_i)_{in}] \quad (3.24)$$

şeklindedir. Bu denklem, yukarıda belirtilen kontrol hacmine uygulandığında, hacim integral türevi indirgenir ve aşağıdaki hali alır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\int_{cv} (\rho V) dV) \cong \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) dx dy dz \quad (3.25)$$



Şekil 3.5 Kontrol hacmi – vektörel gösterimle momentum ifadesi.

Momentum akı terimleri toplamda altı yüzey için üç yüzeyden giriş ve üç yüzeyden çıkışı içerecek şekilde altı yüzü göstermektedir. Bu terimler aşağıda özetlenmiştir.

Yüzey	Giren Kütle	Çıkan Kütle
x	$(\rho u \bar{V}) dy dz$	$\left[\rho u \bar{V} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \bar{V}) dx \right] dy dz$
y	$(\rho v \bar{V}) dx dz$	$\left[\rho v \bar{V} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \bar{V}) dy \right] dx dz$
z	$(\rho w \bar{V}) dx dy$	$\left[\rho w \bar{V} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \bar{V}) dz \right] dx dy$

Şekil 3.6 Momentum akı terimleri özet şeması.

Terimler yerine konulduğunda,

$$\Sigma F = \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u V) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v V) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w V) \right] dx dy dz \quad (3.26)$$

Denklemleri elde edilmiş olur. Bu denklemde ilgili terimler yerine konulduğunda,

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u V) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v V) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w V) \right] = V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) \right] + \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (3.27)$$

Ya da,

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u V) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v V) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w V) \right] = V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) \right] + \rho \frac{dV}{dt} \quad (3.28)$$

Denklemin ilk kısmı, süreklilik denklemidir ve ikinci kısım sıvı parçacıklarının toplam ivmesi iken ihmal edilebilir. Böylece denklem aşağıdaki hale gelmektedir.

$$\Sigma \vec{F} = \rho \frac{dV}{dt} dx dy dz \quad (3.29)$$

Ya da,

$$dF_{\text{yerçekimi}} + dF_{\text{yüzey}} = \rho \frac{dV}{dt} dx dy dz \quad (3.30)$$

Ya da,

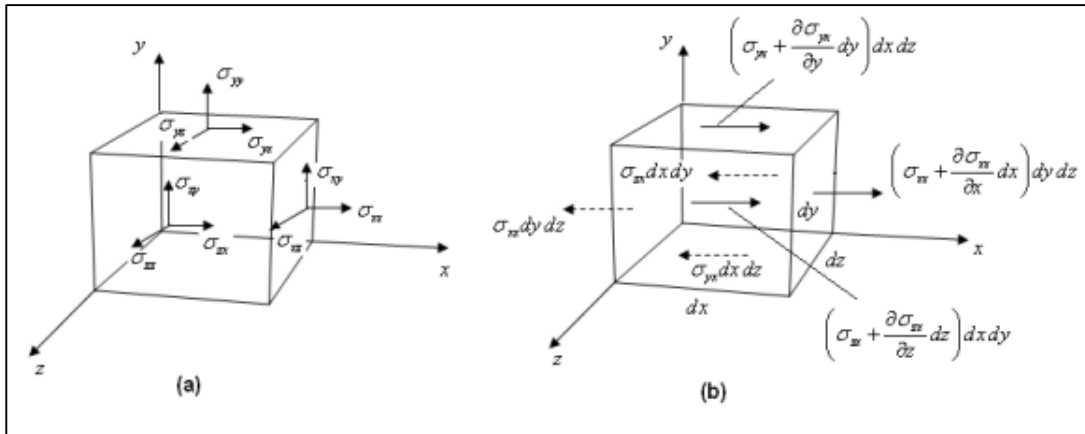
$$\left(\frac{dF}{dV}\right)_{\text{yerçekimi}} + \left(\frac{dF}{dV}\right)_{\text{yüzey}} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (dV = dx dy dz) \quad (3.31)$$

Akışkan parçacığı çok küçük olduğu için, kuvvetlerin toplamı denklemde verildiği gibi diferansiyel form ile gösterilir. Burada, kontrol hacmi üzerindeki net kuvvet iki çeşittir ve bu kuvvetler kütle kuvvetleri ve yüzey kuvvetleri'dir. İlki, tüm maddelerin üzerinde etki yapan yerçekiminden kaynaklanmaktadır. Birim hacim başına yerçekimi kuvvetidir.

$$\frac{dF}{dV_{\text{yerçekimi}}} = \rho g \quad (3.32)$$

Yüzey kuvvetleri esas olarak kontrol yüzeyinin kenarlarına etki eder ve hidrostatik basınç ve viskoz gerilmelere olan katkının toplamıdır. Hidrostatik basınç yüzeye dik olarak etki ederken, viskoz stresler (τ_{ij}) hız gradyanına bağlı olarak ortaya çıkar. Şekil 3.7'de verilen noktalara atıfta bulunarak, bu gerilmelerin toplamı aşağıdaki gibi bir gerilme tensörü (σ_{ij}) olarak gösterilebilir.

$$\sigma_y = \begin{bmatrix} -p + \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & -p + \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & -p + \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$



Şekil 3.7 Kontrol hacmi – gerilme ve yüzey kuvvetleri.

Gerilmeler yerine, gerilme gradyanının kontrol yüzeyinde net kuvvet oluşturduğu söylenebilir. Öyleyse, x yönünde birim hacim başına net kuvvet aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$dF_{x,yüzey} = \left[\frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_{zx}) \right] dx dy dz \quad (3.34)$$

Ya da,

$$\frac{dF_x}{dV} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zx}) \quad (3.35)$$

Benzer şekilde, y ve z yönlerinde birim hacim başına net kuvvetler aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{dF_y}{dV} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zy}) \quad (3.36)$$

$$\frac{dF_z}{dV} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zz}) \quad (3.37)$$

Vektör formunda eşitlikler aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\left(\frac{dF}{dV} \right)_{yüzey} = -\nabla p + \left(\frac{dF}{dV} \right)_{viskoz} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.38)$$

$$\left(\frac{dF}{dV} \right)_{viskoz} = i \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + j \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + k \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3.39)$$

$$\left(\frac{dF}{dV} \right)_{viskoz} = \nabla \cdot \tau_{ij} \quad \text{ve} \quad \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Doğrusal momentum diferansiyel denklemi elde etmek için denklemler (3.22, 3.25 ve 3.30) birleştirilerek aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\rho g - \nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (3.41)$$

Navier-Stokes Denklemi

Çizgisel momentum için geçerli olan denklem, herhangi bir sıvının viskoz-stres şartları ile karakterize edilen genel hareketi için de geçerlidir.

$$\text{X yönünde momentum: } \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.42)$$

$$\text{Y yönünde momentum: } \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.43)$$

$$\text{Z yönünde momentum: } \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.44)$$

Denklemin son üç konvektif terimi denklemi lineer çözümlenemeyen hale getirir ve genel analizi karmaşıktırır. Viskoz streslerin birim gerinim oranı ve viskozite katsayısı (μ) ile orantılı olduğu Newtonian akışkanının sıkıştırılamaz bir akımını düşünmek ile basitleştirme mümkündür. Sıkıştırılamaz bir akışkan için çekme gerilimi terimleri şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (3.45)$$

böylece, sabit yoğunluklu ve sabit viskoziteli Newton akışkanı için diferansiyel momentum denklemi,

$$\rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V = \rho \frac{dV}{dt} \quad (3.46)$$

elde edilir. Bu denklemde dört bilinmeyen p , u , v ve w vardır. Ve akış alanının tüm bilgilerini elde etmek için süreklilik ilişkisi ile birleştirilmelidir.

Euler Denklemi

Doğrusal momentum diferansiyel denkleminin genel formundaki viskoz gerilme bileşenleri ihmal edildiğinde ($\tau_{ij} = 0$), vektörel denklemi aşağıdaki forma indirgenebilir.

$$\rho g - \nabla p = \rho \frac{dV}{dt} \quad (3.47)$$

Skaler formdaki aynı denklem şu şekilde yazılır,

$$\text{X yönünde momentum:} \quad \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.48)$$

$$\text{Y yönünde momentum:} \quad \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.49)$$

$$\text{Z yönünde momentum:} \quad \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.50)$$

Bu ifadedeki ilişki ideal akım koşulları için geçerlidir ve viskoz akış için Euler denklemi olarak bilinir.

Bernoulli Denklemi

Bernoulli denklemi, enerjinin korunumu kabulünden yola çıkılarak yük kayıpları ihmal edilerek elde edilmiştir. Aynı çizgisel yörüngedeki doğrusal momentum denklemi, Euler denklemini, akımın döngüsel ve sürtünmesiz olduğunda geçerli olan viskoz stres bileşenleri ihmal edildiğinde azaltır. Vortisitesi ($\xi = 0$) veya açısız hızı ($\omega = 0$) olmayan akışkan parçacığını çevrintisiz olduğu kabul edilir ve matematiksel olarak, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\xi = 2\omega = \text{curl } V = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{bmatrix} = 0 \quad (3.51)$$

Euler denklemi aşağıdaki biçimde yeniden yazılırsa,

$$\rho \left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right] = \rho g - \nabla p \quad (3.52)$$

Denklemin ikinci terimini basitleştirmek için bir vektör eşitliği vardır.

$$(V \cdot \nabla) V = \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) + (\xi \times V) \quad (3.53)$$

Böylece, denklem tekrar yazıldığında,

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) + (\xi \times V) + \frac{\nabla p}{\rho} - g = 0 \quad (3.54)$$

elde edilir. Tüm denklemin nokta çarpımını rastgele bir vektör deplasmanı (dr) alınırsa,

$$\left[\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \left(\frac{1}{2} V^2 \right) + (\xi \times V) + \frac{\nabla p}{\rho} - g \right] \cdot dr = 0 \quad (3.55)$$

olur.

Aşağıdaki koşulların altında $(\xi \times \vec{V}) \cdot d\vec{r} = 0$, ifadesinin geçerli olduğu kabul edilirse;

- Akışın olmadığı, örneğin $V=0$ (hidrostatik durum)
- Akışın döngüsel olmadığı, $\xi = 0$
- $(\xi \times V)$ 'nin çok nadir bir durum olarak dr'ye dik olması,
- Akış hattı boyunca V ve dr'nin paralel olması,

Akımın çevrimsiz olmadığı ve $g = -gk$ denkleminin geçerli olduğu durum için denklem sadeleştirilirse,

$$\frac{\partial V}{\partial t} \cdot dr + d \left(\frac{1}{2} V^2 \right) + \frac{dp}{\rho} + gz = 0 \quad (3.56)$$

elde edilmiş olur. Denklemi sürtünmesiz sıkıştırılabilir bir akım için iki nokta ('1 ve 2') arasındaki bir akış çizgisi boyunca birleştirildiğinde,

$$\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} ds + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0 \quad (3.57)$$

Burada, ds akış çizgisi boyunca uzanan yay uzunluğudur. Denklem, bir akıntı hattı boyunca sürtünmesiz kararsız akım çizgisi için Bernoulli Denklemi olarak bilinir. Yine, akış sıkıştırılmazsa ($\rho = \text{sabit}$) ve kararlı durum ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) olduğunda, eşitlik sadeleştirilir ve

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 + gz_2 \quad (3.58)$$

Ya da ,

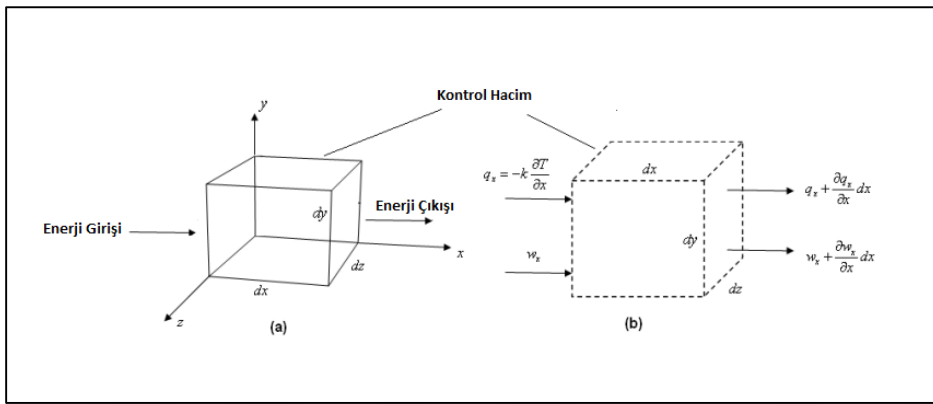
$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}V^2 + gz = \text{akım çizgisi boyunca sabit} \quad (3.59)$$

Bu denklem, kararlı akış enerjisi denkleminde elde edilen denklemle aynıdır ve yalnızca akış çizgisi boyunca sürtünmesiz, sıkışmaz, çevrintisiz ve sabit akış için geçerlidir.

Enerji Denklemi

Sabit kontrol hacmi için enerji denkleminin integral ilişkisini hatırlayacak olursak,

$$Q - W_s - W_v = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} \rho e dV \right) + \int_{cs} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \rho (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (3.60)$$



Şekil 3.8 Kontrol hacmi – x doğrultusu için enerji akışı.

Kontrol hacmi, Şekil 3.8’de gösterildiği gibi birimsel bir sistem olursa, döngüsel hız (açısal hız) terimi olmayacaktır ($W_s = 0$). Birim hacim başına enerjiyi $e = \left(u + \frac{1}{2}V^2 + gz \right)$ olarak ifade edersek, altı kontrol yüzeyi boyunca net enerji akışı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

Yüzey	Giren Enerji	Çıkan Enerji
x	$\rho u \left(e + \frac{p}{\rho} \right) dy dz$	$\left[\rho u \left(e + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) \left(e + \frac{p}{\rho} \right) dx \right] dy dz$
y	$\rho v \left(e + \frac{p}{\rho} \right) dx dz$	$\left[\rho v \left(e + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) \left(e + \frac{p}{\rho} \right) dy \right] dx dz$
z	$\rho w \left(e + \frac{p}{\rho} \right) dx dy$	$\left[\rho w \left(e + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) \left(e + \frac{p}{\rho} \right) dz \right] dx dy$

Şekil 3.9 Yüzeylerden geçen enerji akışının özeti.

Dolayısıyla, denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Q - W_v = \left[\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) \left(e + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho v) \left(e + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho w) \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \right] dx dy dz \quad (3.61)$$

Süreklilik denklemi ve momentum denkleminin türetilmesi sırasında göz önüne alınan benzerlik yardımı ile denklem aşağıdaki formu alır;

$$Q - W_v = \left[\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (\nabla p) \right] dx dy dz \quad (3.62)$$

Enerji transferi ısı iletimiymiş gibi düşünülürse, Fourier ısı iletim kanunu birim sisteme uygulanabilir.

$$q = -k \nabla T \quad (3.63)$$

Burada k, akışkanın ısı iletkenliğidir. X doğrultusundaki yüzeylerden geçen ısı akısı Şekil 3.8-b’de gösterilmiş olup yüzeylere ait bilgiler ise aşağıda özetlenmiştir.

Yüzey	Giren Enerji	Çıkan Enerji
x	$q_x dy dz$	$\left[q_x + \frac{\partial}{\partial x} (q_x) dx \right] dy dz$
y	$q_y dx dz$	$\left[q_y + \frac{\partial}{\partial y} (q_y) dy \right] dx dz$
z	$q_z dx dy$	$\left[q_z + \frac{\partial}{\partial z} (q_z) dz \right] dx dy$

Şekil 3.10 Yüzeylerden geçen ısı akısının özeti.

Net ısı akısı ise kontrol hacmine giren ve çıkan ısı akısı arasındaki farktan elde edilebilir.

$$Q = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y) + \frac{\partial}{\partial z} (q_z) \right] dx dy dz = -(\nabla \cdot q) dx dy dz = \nabla \cdot (k \nabla T) dx dy dz \quad (3.64)$$

x - yüzündeki yapılan iş oranı,

$$W_{v,LF} = -w_x dy dz = -(u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) dy dz \quad (3.65)$$

şeklindedir.

Benzer şekilde,

$$W_v = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{yx} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{zx} + v \tau_{zy} + w \tau_{zz}) \right] dx dy dz = -\nabla \cdot (\nabla \cdot \tau_{ij}) dx dy dz \quad (3.66)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (\nabla p) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\nabla \cdot \tau_{ij}) \quad (3.67)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, Φ viskoz dağılım fonksiyonu olarak bilinir. Newtonian sıkışmayan viskoz akışkan için, bu fonksiyon aşağıdaki gibidir.

$$\Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3.68)$$

Denklem doğrusal momentum denklemi kullanılarak basitleştirildiğinde ve terimler yeniden düzenlendiğinde, Newtonian viskoz akışkan için genel enerji denklemi formülü elde edilir.

$$\rho \frac{du}{dt} + p(\nabla \cdot \nabla) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3.69)$$

Analiz kolaylığı açısından, denklemde bazı geçerli yaklaşımlar yapılabilir. $\partial u \approx c_v dT$; c_v , μ , k ve ρ sabitleri alındığında,

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi; \quad \frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dt} + u \frac{dT}{dx} + v \frac{dT}{dy} + w \frac{dT}{dz} \quad (3.70)$$

denklemi elde edilir.

Temel Denklemler İçin Sınır / Başlangıç Koşulları

Akışkan hareketinin tanımlanması için üç temel diferansiyel denklem kısaca özetlenebilir,

$$\text{Süreklilik Denklemi:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3.71)$$

$$\text{Momentum Denklemi:} \quad \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (3.72)$$

$$\text{Enerji Denklemi:} \quad \rho \frac{du}{dt} + p(\nabla \cdot \nabla) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3.73)$$

Genel olarak, bu üç denklemde ρ , $\mathbf{V}$, p , u ve T olmak üzere beş bilinmeyen vardır. Akışkanın herhangi bir termodinamik durumundan ilave iki bağlantı elde edilebilir. Örneğin,

$$p = p(\rho, T) \quad \text{ve} \quad u = u(\rho, T) \quad (3.74)$$

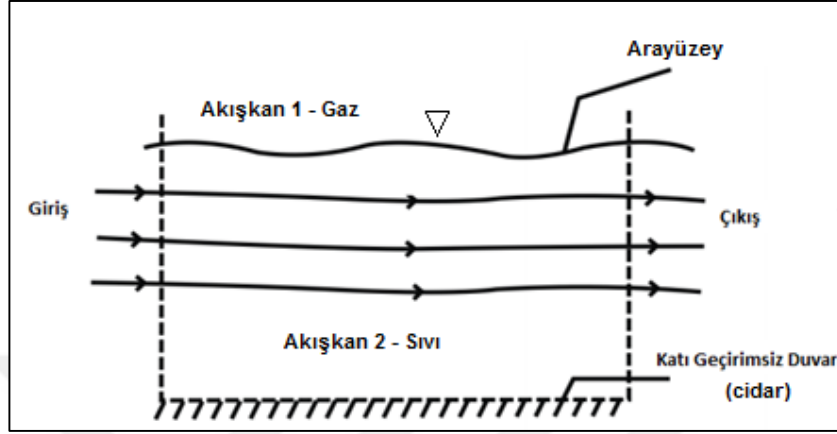
Özgül ısı sabitiyle ideal gaz için denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad \text{ve} \quad \int c_v dT \quad (3.75)$$

Yukarıdaki diferansiyel denklemin çözümünde, akım kararsızsa başlangıç koşullarına ihtiyaç duyulur (örneğin, her değişkenin farklı zaman kademelerinde fiziksel/uzamsal dağılımı). Başka bir deyişle, $t = 0$ 'da, akış özellikleri $(\rho, \mathbf{V}, p, u \text{ ve } T) = f(x, y, z)$ 'nin

bilinen fonksiyonlarıdır ve bu değişkenlerin tüm zaman adımlarında analiz edilmesi gerekir.

Akım sırasında sıklıkla karşılaşılan üç sınır, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi katı duvar, giriş / çıkış ve arayüz olarak sınıflandırılır.



Şekil 3.11 Viskoz akışkan akımı için karakteristik sınır koşulları.

Katı geçirimsiz bir duvar için, ani sıcaklık değişimi durumu yoktur ve yüzeyin hemen önünde hız bileşeni “0”dır (No-Slip Condition). Bu durum şu şekilde ifade edilir,

$$\vec{V}_{Akışkan} = \vec{V}_{Duvar(Cidar)} \text{ ve } T_{Akışkan} = T_{Duvar(Cidar)},$$

Bu durumun ısı geçirmeyen olduğu kabulüyle,

$$(k \frac{\partial T}{\partial n})_{Akışkan} = q_{Katı} \quad (3.76)$$

Akımın giriş ve çıkış sınır koşullarında, V , p ve T 'nin dağılımı ve değişimi her zaman bilinmelidir ve çözüm için mutlaka tanımlanmalıdır.

Arayüzeyde (interface) ise dikey hız ($w_{gaz} = w_{sıvı}$), viskoz-kayma gerilmesi ($\tau_{zy,sıvı} = \tau_{zy,gaz}$; $\tau_{zx,sıvı} = \tau_{zx,gaz}$) ve ısı transferi ($q_{z,sıvı} = q_{z,gaz}$) denklemleri sıvı-gaz arayüzü tariflenebilir.

Bahsedilen korunum denklemlerinin çözümlenmesi matematiksel olarak son derece zordur. Bu sebeple bu denklemlerin bilgisayar yardımıyla çözümlenmesi gerekmektedir. Denklemlerin çözümlenmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde kullanılabilecek pek çok paket yazılım da mevcuttur. Bu tez kapsamındaki hesaplamaların yapılması için Flow-3D paket yazılımı tercih edilmiştir.

Flow-3D paket programının tercih edilmesinin sebepleri;

- Karmaşık geometrilere sahip alanların STL formatında yazılıma eklenerek çözüm yapılabilmesi,
- TruVOF algoritması ve FAVOR® arayüzey oluşturma tekniği sayesinde muadil yazılımlara göre daha hızlı çözüm yapılabilmesi,
- Tsunami, dalga ilerlemesi, tank çalkalanması vb. problemlerin çözülmesinde kullanılıp üretilen çözümlerin önemli akademik ve ticari kesimlerce kabul görmesi,

olarak sıralanabilir.

3.1 Modelleme Yazılımı

Flow-3D genel kullanıma uygun bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Geliştiricileri tarafından hazırlanan özel algoritmalar yardımıyla üç boyutlu ve zamana bağlı multifizik problemlerinin çözülmesinde hareket denklemlerinin çözümlemesini yapmaktadır.

Yazılımda kullanılan tüm denklemler alan ve hacim porozite denklemleri olarak tariflenmiştir (Flow3D, 2017). Bu formulasyon “Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method” olarak adlandırılmakta olup kısaca FAVOR® olarak isimlendirilmiştir (Hirt ve diğ., 1985).

Genel kütle korunumundan hareketle süreklilik denklemi, V_F : akıma açık hacim, ρ : akışkanın yoğunluğu, R_{DIF} : türbülans açılım terimi, R_{SOR} : kütle kaynağı olacak şekilde,

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + R \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} + \xi \frac{(\rho u A_x)}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (3.77)$$

ifade edilebilir. u, v, w daha önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere sırasıyla x, y, z doğrultusundaki hız bileşenleri olmak üzere A_x, A_y, A_z ilgili doğrultudaki akıma açık alan kısmını ifade etmektedir. R katsayısı ise silindirik veya Kartezyen koordinat sistemi kullanımına bağlı farklılık gösteren ve koordinat sistemleri arasında çevrim yapmaya yarayan bir katsayıdır.

Türbülans saçılımının açılımı,

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_p A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_p A_x}{x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (3.78)$$

şeklindedir. Bu ifadede $v_p = S_c \mu_m / \rho$ şeklinde bir katsayı mevcuttur. Bu katsayıda ise S_c : Schmidt sayısını, μ_m : momentum saçılım katsayısını ifade etmektedir.

Sıkıştırılabilen akım hesaplamalarında yoğunluk akısının önemi oldukça fazladır ancak su gibi elastisite modülü çok küçük olan ve sıkıştırılmaz kabulü yapılabilen akışkanların ifadesinde yoğunluk değişimi ihmal edilebilir mertebededir.

$$\left| \frac{\partial \rho}{\rho} \right| < 0.1 \quad (3.79)$$

olduğu durumda yoğunluk değişimi ihmal edilebilir ve böylece düzenlenmiş süreklilik denklemi,

$$\frac{V_F}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (3.80)$$

halini alacaktır.

Navier – Stokes hareket denklemlerinin üç boyutlu olarak ifadesi,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (3.81)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} R \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (3.83)$$

şeklindedir. Burada, G : kütleli kuvvet ivmesi, f : viskoz ivme, b : yük kaybı, U_w : sonlu elemanın hareket hızı, U_s : kontrol hacminin yüzeyinde akım hızı ($U_s = (dQ/\rho Q dA)n$) olarak açıklanabilmektedir. U_s her eleman için tekrar hesaplanmaktadır.

Viskoz akım koşulları için ivme durumu göz önüne alınırsa,

$$\rho V_F f_x = w s_x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \quad (3.84)$$

$$\rho V_F f_y = w s_y - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \quad (3.85)$$

$$\rho V_F f_z = w s_z - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \quad (3.86)$$

$$\tau_{xx} = -2u \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (3.87)$$

$$\tau_{yy} = -2u \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (3.88)$$

$$\tau_{zz} = -2u \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (3.89)$$

$$\tau_{xy} = -u \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi u}{x} \right\} \quad (3.90)$$

$$\tau_{xz} = -u \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \quad (3.91)$$

$$\tau_{yz} = -u \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \quad (3.92)$$

Yukarıda sunulan denklemlerde w_{sx} , w_{sy} ve w_{sz} sırasıyla x , y ve z doğrultusundaki yüzeylerdeki kayma gerilmesi değerini ifade etmektedir. Hesaplamalarda katı cidar önündeki teğetsel hız sıfır olarak kabul edilecektir. Türbülanslı akım koşulları göz önüne alındığında ise cidar bölgesindeki hız profili dağılımına göre cidardaki kayma gerilmesi şiddeti hesaplanacaktır.

Modellemede kullanılan genel taşınım denklemi C konsantrasyon değerini ifade edecek şekilde,

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial C}{\partial x} + u A_y \frac{\partial C}{\partial y} + u A_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_k \frac{\partial C}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_k R \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z D_k \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] + C_{SOR} \quad (3.93)$$

olarak yazılır. Burada D_k : difüzyon katsayısı ve C_{SOR} ise kaynak terimidir. Sayısal ifadeden de görüldüğü üzere taşınım maruz kalan özelliğin (kirletici, sediment vb.) akım koşullarına etkisi bulunmamaktadır. Difüzyon katsayısının hesaplanmasında ise,

$$\rho D = RMSC \cdot \mu + CMSC \quad (3.94)$$

denklemi kullanılmaktadır. Bu denklemde de $RMSC$: Schmidt sayısının tersini, μ : dinamik viskoziteyi, $CMSC$: sayısal difüzyon sabitini belirtmektedir.

Karışım durumu söz konusu olduğunda ise,

$$\mu_{mix} = \frac{\rho \mu + \sum_i (C_i \mu C_i)}{\rho + \sum_i (C_i)} \quad (3.95)$$

denklemi karışımın yeni viskozitesinin hesaplanmasında kullanılacaktır.

Sediment taşınımı hesaplamalarında askıda taşınım, çökelme, akım düzensizliğine bağlı tabanda hareket, taban sürüklemesi proseslerini Mastbergen ve Van den Berg tarafından geliştirilen yöntemlerle hesaplanmaktadır (Mastbergen ve diğ., 2003).

Modelde kritik Shields parametresi hesaplamasında Soulsby-Whitehouse denklemi kullanılmaktadır (Soulsby, 1997).

$$d_{*,i} = d_i \left[\frac{\rho_f (\rho_i - \rho_f) \|g\|}{\mu_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.96)$$

Bu denklemde ρ_i : sedimentin yoğunluğu, ρ_f : akışkanın yoğunluğu, d_i : sedimentin karakteristik çapı, μ_f : akışkanın dinamik viskozitesi şeklindedir.

$$\theta_{cr,i} = \frac{0,3}{1+1,2d_{*,i}} + 0,055[1 - \exp(-0,02d_{*,i})] \quad (3.97)$$

Denklemiyle hesaplanan kritik Shields parametresine ilaveten,

$$\theta_i = \frac{T}{\|g\| d_i (\rho_i - \rho_f)} \quad (3.98)$$

denklemiyle de taban kayma gerilmesine bağılı olarak yerel Shields parametresi hesaplanacaktır.

Tabanda Nikuradse pürüzlülük katsayısı kullanılacaktır. D_{50} ile aynı yükseklikte olacağı kabul edilmektedir.

Sedimentin askıya kalkma hızının hesaplanmasında ise,

$$u_{lift,i} = \alpha_i n_s d_*^{0,3} (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1,5} \sqrt{\frac{\|g\| d_i (\rho_i - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (3.99)$$

denklemini kullanılarak olup α_i : sürüklenme parametresidir ve varsayılan değeri 0.018 olarak kullanılmaktadır (Mastbergen ve diğ., 2003). Çökelme hızının hesaplanmasında ise,

$$u_{\text{çökelme},i} = \frac{V_f}{d_i} \left[(10,36^2 + 1,049 d_*^{0,3})^{0,5} - 10,36 \right] \quad (3.100)$$

denklemini kullanılacaktır (Soulsby, 1997). Denkleminde V_f : kinematik viskozitedir. Parçacıklar arasındaki etkileşim düzeltmesinde Richardsan-Zaki düzeltme yöntemi kullanılacak olup sediment taşınımında ise yazılımda üç farklı çözüm seçeneği bulunmaktadır.

- Meyer-Peter, Müller (Peter ve diğ., 1948)

$$\Phi_i = \beta_{MPM,i} (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1,5} c_{b,i} \quad (3.101)$$

- Neilsen (Neilsen, 1992)

$$\Phi_i = \beta_{Nie,i} \theta_i^{0,5} (\theta_i - \theta'_{cr,i}) c_{b,i} \quad (3.102)$$

- Van Rijn (Rijn, 1984)

$$\Phi_i = \beta_{VR,i} d_{*,i}^{-0,3} \left(\frac{\theta_i}{\theta'_{cr,i}} - 1,0 \right)^{2,1} c_{b,i} \quad (3.103)$$

Denklemlerdeki β katsayıları sırasıyla 8, 12 ve 0.053 olarak alınacaktır. $c_{b,i}$ ise hacimsel oran değeridir. Denklemler ile hesaplanan boyutsuz taban taşınım oranı sonucunda ise,

$$q_{b,i} = \Phi_i \left[\|g\| \frac{(\rho_i - \rho_f)}{\rho_f} d_i^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.104)$$

denklemini vasıtasıyla sediment debisi hesaplanabilir.



4. HİDRODİNAMİK MODELLEME

Hidrodinamik modelleme yazılımlarındaki ve kurulu bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde karmaşık hidrodinamik süreçlerin araştırılması geçmişten günümüze kolaylaşmaktadır.

Tez kapsamında Türkiye’de önemli depremlerin etki bölgesi içindeki göllerde olası etkileri ve bu etkilerin farklı deprem koşulları altındaki sonuçları hidrodinamik modelleme araçları yardımıyla araştırılmıştır. Eğirdir Gölü ve Van Gölü örnek çalışma alanı olarak belirlenmiştir ve bu iki gölün çevresinde meydana gelmiş önemli depremlerin göllerin hidrodinamik durumuna etkileri ve tarihte yaşanmış önemli depremlerin yine aynı göllerde olası etkileri araştırılmış ve tartışılmıştır.

4.1 Hidrodinamik Model Kurulum Adımları

Modelleme süreci üç ana adımla gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Modelin kurulması (Preprocess)

Modelin hazırlanması aşamasıdır. Modellemede altlık ve girdi olarak kullanılacak verilerin araştırılması, hesaplanması, derlenmesi ve programa girilmesi adımdır. Bu adımda model için öncelikle yüzey topografyası ve ilgili göle ait batimetri haritaları sayısallaştırılarak birleştirilerek tek bir yüzey haritası elde edilmiştir. Sonrasında sınır koşulları ve başlangıç koşulları belirlenerek modele tanımlanmıştır. Her bir örnek çalışma alanı ve senaryoya ait başlangıç koşulları, sınır koşulları, yapılan kabuller ve çözüm süresi, ilgili örnek çalışma alanının tanıtımı kısmında detaylandırılmıştır. Model çözüm süresi, örnekleme noktaları ve hesaplama çıktısı alma aralıkları da model kurulumu adımıyla tanımlanmıştır.

Model kurulumu aşamasında harita verilerinin derlenmesi kısmında bir haritalandırma yazılımı olan Global Mapper V.16, model sınır koşulları ve başlangıç koşullarının tanımlanmasında ise Flow-3D yazılımları kullanılmıştır.

4.1.2 Modelin çalıştırılması (Hesaplama / Process)

Her senaryoda modeller, iki günlük süreci kapsayacak şekilde analiz edilmiştir. Hesaplamalarda, İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Doktora Tezlerini Destekleme Projeleri 39777 Numaralı “Göllerdeki Hidrodinamik Dengeye Sismik Salınımların Etkisinin Araştırılması” Projesi kapsamında alınan HP Z640 İş İstasyonu kullanılmıştır. Çözümleme bilgisayarının özellikleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Modellemede kullanılan kurulu bilgisayara ait özellikler.

Model	HP Z640 Workstation (1cpu, 10cores, 20threads)
İşlemci	HP Intel Xeon E5-2630 v4 2.20GHz 8GT/s 25MB Cache 2133MHz 10C
Chipset	Intel C612 Workstation Chipset
Bellek	HP 32GB (2x16GB) DDR4 2133MHz ECC RAM (max.256GB, 8 DIMM)
Ekran Kartı / GPU	HP NVIDIA Quadro K420 2GB (max: Tesla K40)

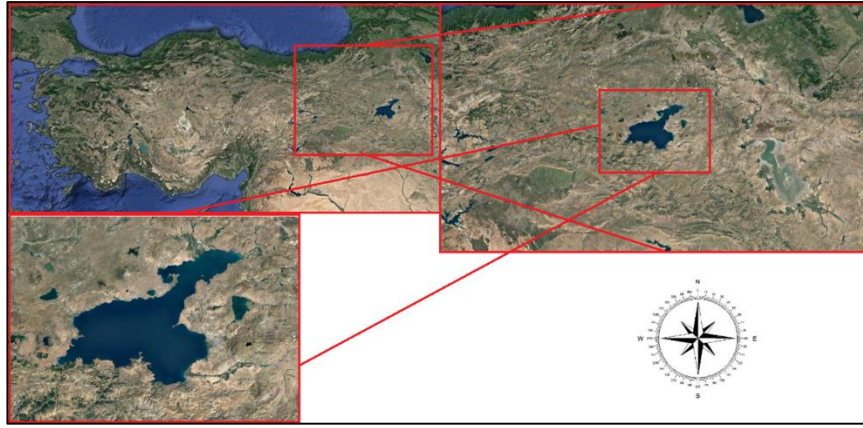
Özellikleri belirtilen bilgisayara kurulu olan Flow-3D yazılımında tez kapsamındaki tüm senaryo çalışmalarının çözümleme işlemi yaptırılmıştır.

4.1.3 Model sonuçlarının analizi (Postprocess)

Çözümlemesi yapılan hidrodinamik modele ait çıktılar özellikleri önceki bölümde sunulan bilgisayarda Flow-3D yazılımının görselleştirme ve analiz modülü olan FlowSight programı ile görselleştirilmiş ve analiz edilmiştir.

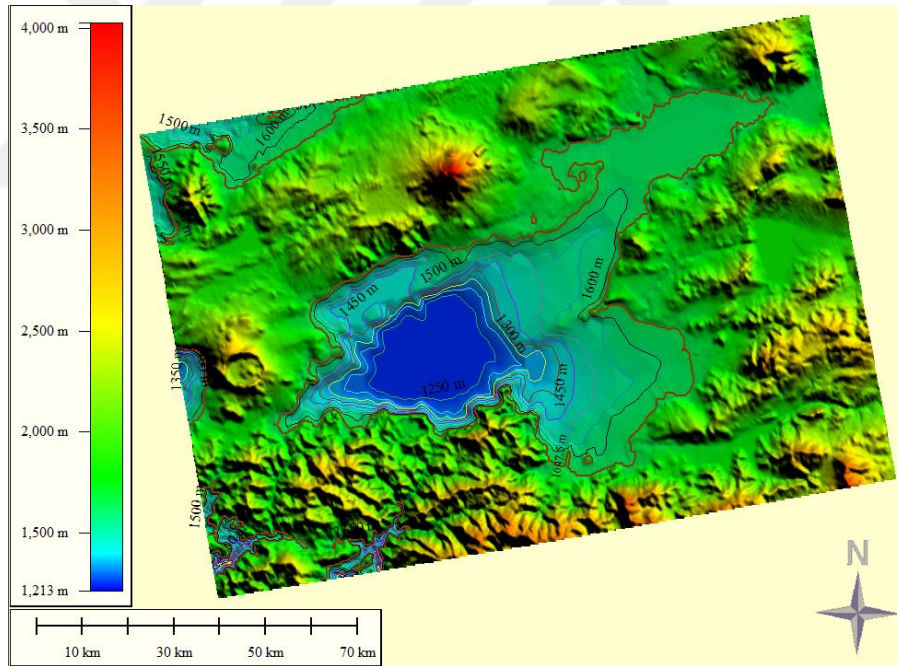
4.2 Örnek Çalışma Alanı Van Gölü

Van Gölü, Doğu Anadolu Bölgesinde, Bitlis ve Van İlleri sınırları içinde Türkiye’nin doğusunda 38°59' ve 38°17' K enlemleri ile 42°16' ve 43°39' D boylamları arasında yer almakta olup Türkiye’deki en büyük göldür. Van Gölü’nün toplam yüzey alanı 3713 km²’dir. Gölün ortalama derinliği 171 m ve en derin noktası ise 451 m olarak tespit edilmiştir. Yüzey rakımı deniz seviyesi itibariyle 1646 m’dir. Van Gölü’nün yerbulduru haritası Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1 Van Gölü yerbulduru haritası.

Van Gölü'nün batimetrik durumu göz önüne alındığında göle ait batimetri ve çevre topografyasına ait harita Şekil 4.2'de sunulmuştur. Göl, gölün kuzeydoğusundaki Erciş Körfezi kısmında sığ olmakla birlikte gölün batı kısmında derinliği 400 m'yi geçen bir derinliğe sahiptir. Gölün doğu kıyılarındaki taban eğimi düşük batı kıyılarındaki taban eğimi ise yüksektir.



Şekil 4.2 Van Gölü batimetrisi ve çevre topografyası haritası.

Denklem 2.2 kullanılarak Van Gölü için doğal periyod hesaplanabilir. Gölün doğal yapısı sebebiyle için Kuzey-Güney eksenini ve Doğu-Batı eksenini farklı doğal periyoda sahiptir. Göl çanağı içindeki en geniş geçiş hattı arasındaki mesafeler ve geçiş hattı üzerindeki ortalama derinlikler alınarak hesaplama yapılmıştır.

Van Gölü için Kuzey – Güney ve Doğu – Batı doğrultuları için hesaplanmış doğal periyotlar Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 Van Gölü doğal periyodu.

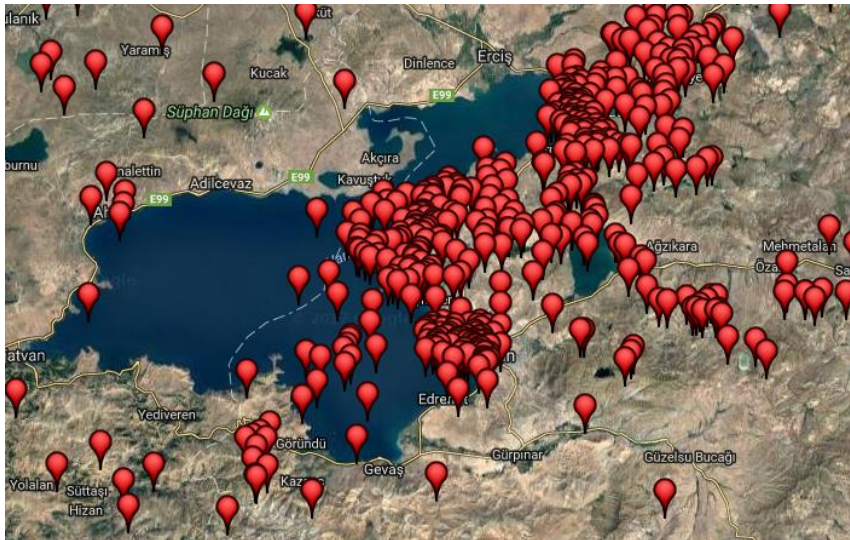
	K-G	D-B
L (km)	50	147
h (m)	60	170
T (sn)	4100	7200

Van Gölü’nün Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde 1. Dereceden deprem riski bölgesi içindedir. Şekil 4.3’de Göller Bölgesi ve çevresinde 1976 yılından günümüze kadar 3 Ms şiddetinden daha büyük şiddette meydana gelen depremlerin dağılımı Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Bölgede son yıllarda meydana gelmiş ve çeşitli kayıplara neden olan iki önemli deprem, Ekim ve Kasım 2011 depremleridir.

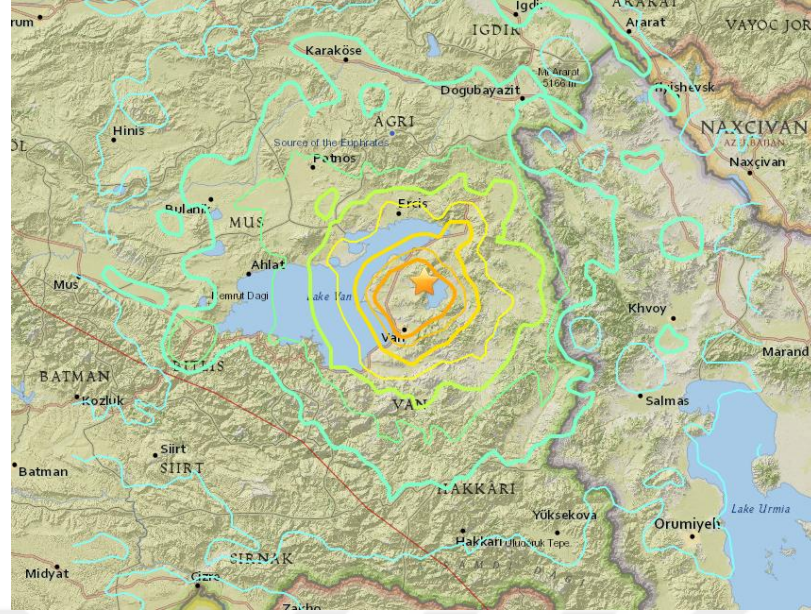
23 Ekim 2011 tarihinde yerel saatle 13.41’de meydana gelen 7,2 Mw şiddetindeki depremdir. Bu depremde toplam 601 kişi hayatını kaybetmiş, 10000’e yakın yapı yıkılmış veya hasar almıştır.

09 Kasım 2011 tarihinde meydana gelen deprem ise Ekim depreminden daha düşük şiddette, 5,6 Mw şiddetindedir. Şiddeti düşük olmasına rağmen yine de 40 kişi hayatını kaybetmiştir.



Şekil 4.3 Van Gölü çevresinde meydana gelen 3 Mw ve üzeri şiddetteki depremlerin dağılımı.

23 Ekim 2011 tarihli depremin merkezi ve çevresindeki etki bölgesine ait görsel Şekil 4.4’te sunulmuştur. Bu etki bölgesinin içinde Van Gölü de bulunmaktadır.



Şekil 4.4 23 Ekim 2011 Van depremi etki bölgesi.

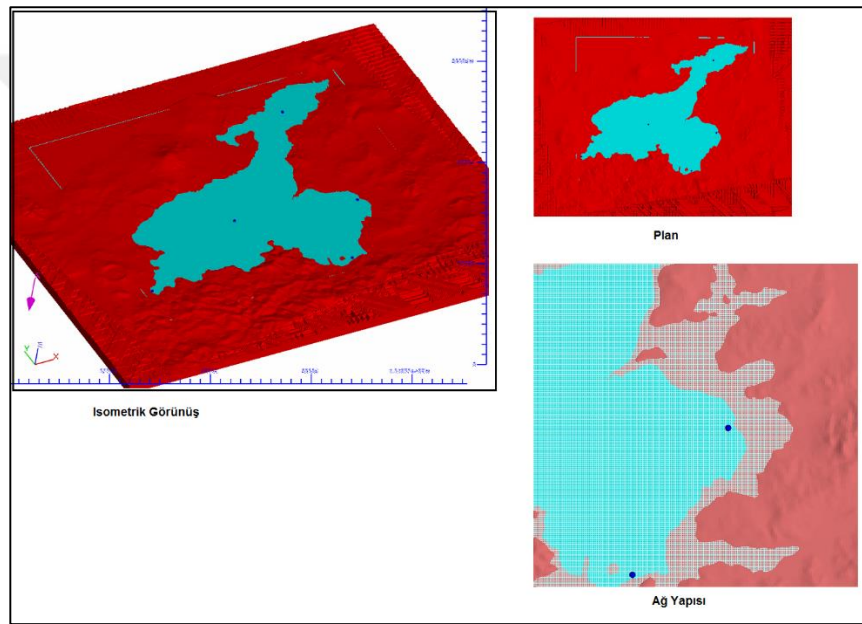
4.2.1 Van Gölü senaryoları

21 Ekim ve 9 Kasım 2011 tarihlerinde meydana gelen ve farklı şiddetlerdeki depremlerin etkileri DSİ ölçüm istasyonları tarafından ölçülmüştür. Bu ölçümlerden özellikle 21 Ekim 2011 depremine ait sonuçlar kullanılarak hazırlanan modelleme sonuçlarını karşılaştırılarak modellemenin doğrulanması ve model parametreleri ile ilgili hassasiyet analizlerinin yapılarak doğru parametre değerlerinin tespiti yapılmıştır. Bu sebeple Van Gölü ve Van Gölü çevresinde yakın zamanda gerçekleşmiş iki depremin modellemesi ve bu modellemelere ek olarak hassasiyet tespiti için farklı parametrelere ait senaryolar çalışılmıştır.

Bu kapsamda Van Gölü'ne sırasıyla 23 Ekim Van Deprem Serisi (2011, 7,2 M_w) ve 9 Kasım Van Deprem Serisi (2011, 5,6 M_w) depremlerinin etkileri araştırılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Van Gölü ile ilgili çalışmalar kapsamında sadece hidrodinamik etkiler araştırılmış olup tüm Van Gölü ile ilgili senaryolardaki ortak özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- Göl için batimetrik koşullar Şekil 4.2'deki topografik ve batimetrik bilgilere göre hazırlanmıştır ve modele altlık olarak kullanılmıştır.
- Taban geçirimsiz kabul edilmiştir.
- Su sıcaklığı 20 °C'de kabul edilmiş ve suyun 20 °C'deki 1 atm basınç altındaki özellikleri kullanılmıştır.

- Debi giriş – çıkışı ihmal edilmiş olup göldeki su seviyesi $t = 0$ anı için yani başlangıç koşulunda 1646 m kotunda kabul edilmiştir.
- Üç doğrultudaki ivmeler zaman serisi olarak değişken tanımlanmış olup düşey doğrultudaki ivme değeri yerçekimi ivmesine ($9,807 \text{ m/sn}^2$) ilave edilmiş veya çıkartılmıştır.
- Türbülans modeli olarak RNG model tercih edilmiştir. RNG türbülans modelinin diğer k- ϵ ve k-w modellerden daha iyi uyum gösterdiği daha önce yapılan çalışmalarda tartışılmıştır (Kaheh ve diğ., 2010).
- Atmosfer basıncı ihmal edilmiştir ve röletif basınç koşulu altında çalışılmıştır.



Şekil 4.5 Van Gölü modeli.

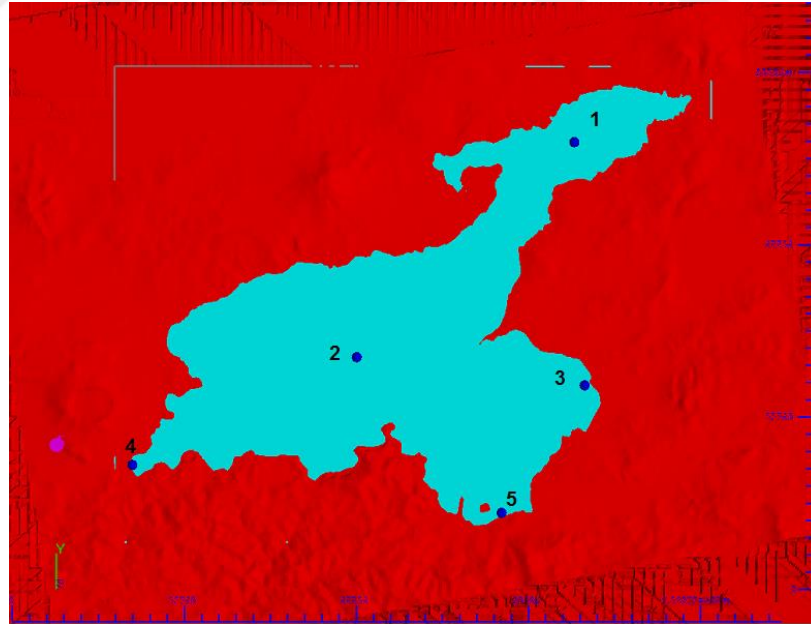
- Modelleme programında Van Gölü için oluşturulan model görseli Şekil 4.5’de paylaşılmıştır. Tüm senaryolarda aynı model altlığı kullanılmıştır.
- İlk 1000 saniyelik sürede göl sadece – z doğrultusunda $9,807 \text{ m/sn}^2$ ’lik yer çekimi ivmesine maruz bırakılmıştır. Deprem ivmesi 1000,01 inci saniye itibariyle başlamaktadır. Deprem ivmesi tüm modelleme alanındaki elemanlara aynı anda aynı doğrultuda olacak şekilde tanımlanmıştır.
- Ağ yapısı olarak kare elemanlar kullanılmış olup bu kare elemanlar batimetri yüzeyine uyumlu halde oluşturulmuştur.
- Model için izleme noktalarının yerleşimi Şekil 4.6’da sunulmuştur. Van Gölü için sediment taşınım ve/veya askıda katı madde izlemesi yapılmayacağı için

ölçüm sonuçları ile karşılaştırma yapılabilecek noktalara izleme noktaları konumlandırılmıştır. İzleme noktalarına ait detaylı bilgiler Çizelge 4.3’de sunulmuştur. Koordinatlar UTM koordinat sisteminde WGS84 projeksiyonunda verilmektedir. 3, 4 ve 5 numaralı izleme noktaları DSİ tarafından göl içinde seviye ölçümü yapılan noktalara göre yerleştirilmiştir. 1 ve 2 numaralı noktalar ise depremin göl içindeki etkilerinin daha iyi araştırılması için seçilmiştir.

Çizelge 4.3 Van Gölü izleme noktaları bilgileri.

Nokta No	Bölge	X Koordiantı	Y Koordiantı	Z Koordinatı
1	Erciş Körfezi	1,922246e ⁺⁰⁶	4,436686e ⁺⁰⁶	1640
2	Göl Merkezi	1,880795e ⁺⁰⁶	4,395818e ⁺⁰⁶	1640
3	Van İskelesi	1,924200e ⁺⁰⁶	4,390445e ⁺⁰⁶	1640
4	Tatvan	1,838067e ⁺⁰⁶	4,375325e ⁺⁰⁶	1640
5	Gevaş (Güzelkonak)	1,908376e ⁺⁰⁶	4,366209e ⁺⁰⁶	1640

- Doğu – Batı doğrultusu x eksenini boyunca, Kuzey – Güney doğrultusu ise y eksenini boyunca alınmıştır.

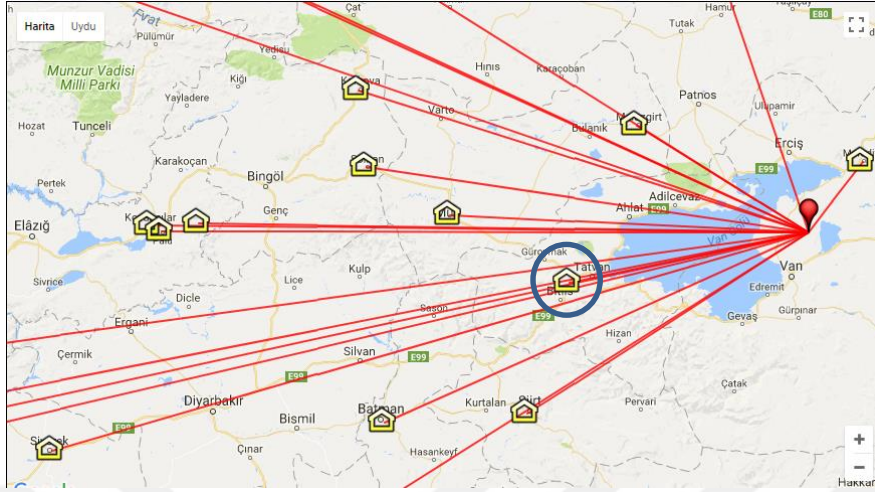


Şekil 4.6 Van Gölü modeli izleme noktaları.

4.2.2 Van Gölü Ekim 2011 depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi

4.2.1 bölümünde tariflenen genel kabuller çerçevesinde 23 Ekim 2011 tarihli Van depreminin Van Gölü için üç boyutlu deprem etkisi modellenmiştir. Bu senaryo kapsamında ise üç ekseninde de ivme kaydı modelleme sürecine dahil edilmiştir.

Deprem sırasında kayıttaki olan tüm istasyonlar Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Mavi halka içine alınan Bitlis Merkez DSİ 173. Şube istasyonudur.



Şekil 4.7 Ekim 2011 Van Depremi sırasında kayıttaki olan istasyonlar.

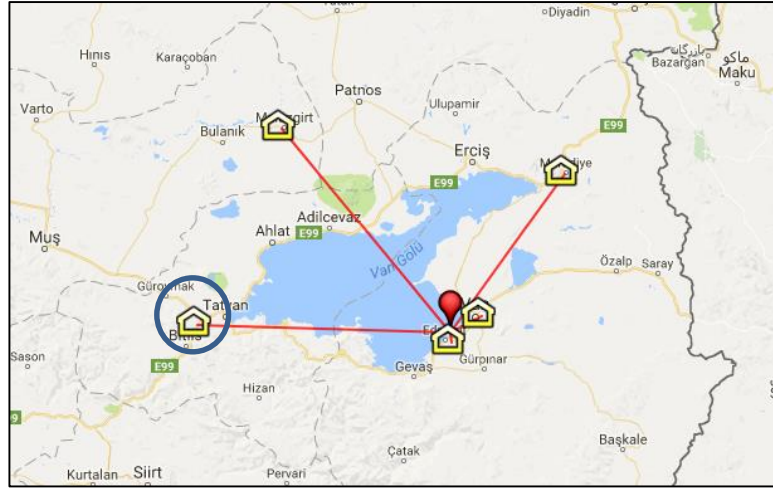
Depreme ait ivme kaydı 38,47 K ve 42,16 D koordinatlarında bulunan Bitlis Merkez DSİ 173. Şube istasyonu kayıtları kullanılarak hazırlanmıştır. Bu istasyon verisinin kullanılmasının nedeni deprem merkezinden itibaren tüm gölü en uzun mesafe boyunca kat eden ışın doğrultusunda bulunmasıdır. Bu durum ilgili istasyondaki deprem dalgasının merkezden çıkarak tüm gölün tamamında etkin olarak hareket ettiğinin kabulüdür. Depreme ait kayıtlar EK-A’da sunulmuştur. Depreme ait karakteristik özellikler ise Çizelge 4.4’te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4 Ekim 2011 Van depremi Bitlis Merkez DSİ 173. şube istasyonu kaydı parametreleri.

Parameter	Van Ekim 2011 (Bitlis Merkez DSİ 173. Şube İstasyonu)		
	Batı/Doğu	Kuzey/Güney	Yukarı/Aşağı
En Büyük İvme (g)	0,103	0,095	0,036
En Büyük Hız (m/sn)	0,078	0,087	0,029
En Büyük Deplasman (m)	0,021	0,023	0,026
Vmax / Amax: (sn)	0,077	0,095	0,081
Hakim Periot (sn)	0,42	0,66	0,42

4.2.3 Van Gölü Kasım 2011 depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi

4.2.1 bölümünde tariflenen genel kabuller çerçevesinde 09 Kasım 2011 tarihli Van depreminin Van Gölü için üç boyutlu deprem etkisi modellenmiştir. Bu senaryo kapsamında ise üç eksen de ivme kaydı modelleme sürecine dahil edilmiştir. Deprem sırasında kayıttaki olan tüm istasyonlar Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Mavi halka içine alınan Bitlis Merkez DSİ 173. Şube istasyonudur.



Şekil 4.8 Kasım 2011 Van Depremi sırasında kayıta olan istasyonlar.

Bu senaryo kapsamında 38,47 K ve 42,16 D koordinatlarında bulunan Bitlis Merkez DSİ 173. Şube istasyonu kayıtları kullanılmıştır. Bu istasyon verisinin kullanılmasının nedeni deprem merkezinden itibaren tüm gölü en uzun mesafe boyunca kat eden ışın doğrultusunda bulunmasıdır. Bu durum ilgili istasyondaki deprem dalgasının merkezden çıkarak tüm gölün tamamında etkin olarak hareket ettiğinin kabulüdür. Deprem kayıtları EK-A’de sunulmuştur. Depreme ait karakteristik özellikler ise Çizelge 4.5’te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5 Kasım 2011 Van depremi Bitlis Merkez DSİ 173. şube istasyonu kaydı parametreleri.

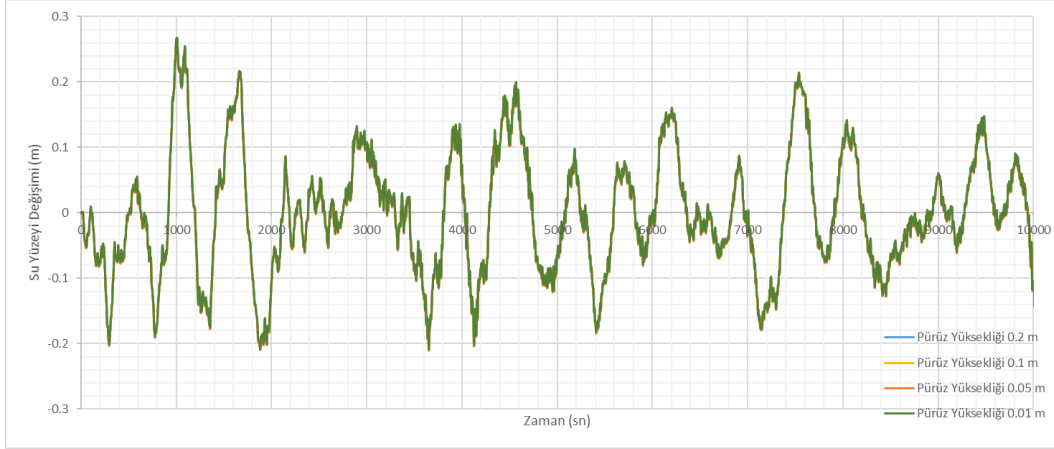
Parameter	Van Kasım 2011 (Bitlis Merkez DSİ 173. Şube İstasyonu)		
	Batı/Doğu	Kuzey/Güney	Yukarı/Aşağı
En Büyük İvme (g)	0,006	0,004	0,002
En Büyük Hız (m/sn)	0,003	0,004	0,003
En Büyük Deplasman (m)	0,02	0,006	0,006
Vmax / Amax: (sn)	0,06	0,103	0,118
Hakim Periot (sn)	0,60	0,46	0,59

4.2.4 Van Gölü Ekim 2011 depremi modeli hassasiyet analizleri

Bölüm 4.2.1’de sunulan modelleme çalışmasına ait genel kabuller kullanılarak Ekim 2011 Van Depremi modellemesi çalışması için parametrik hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizi kapsamında taban pürüzlülüğü ve viskozite değerlerinin model sonuçlarına etkisi araştırılmıştır.

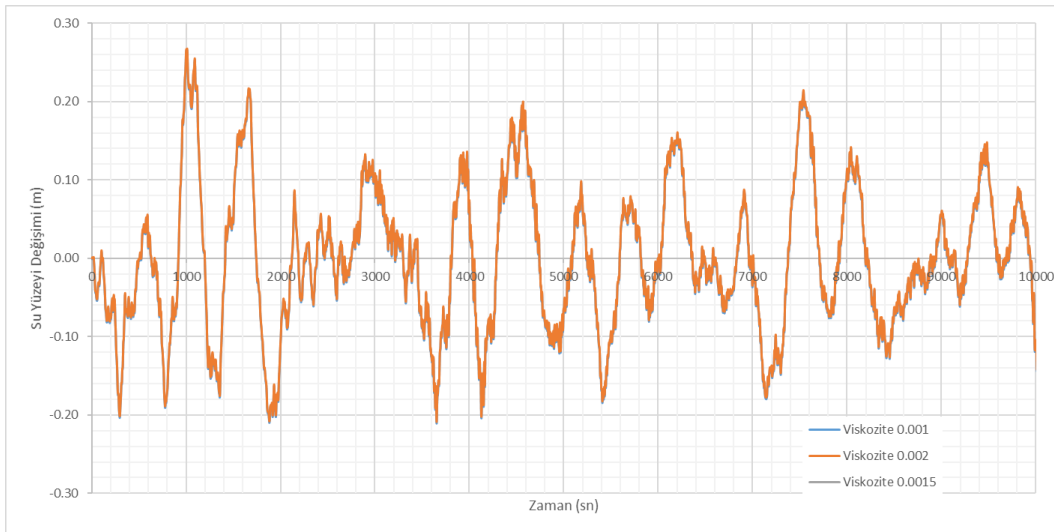
Parametrik analizde öncelikle pürüz yüksekliği değişimi ele alınmıştır. Dört farklı pürüz yüksekliği seçilmiş olup bu değerler 0,01, 0,05, 0,1 ve 0,2 m’dir. Bu değerlere göre yapılan modelleme sonucunda Tatvan noktası için zaman ve su yüzeyi

deplasmanı grafiği Şekil 4.9’da sunulmuştur. Dört farklı pürüz yükseliği değerine bağlı sonuçlar da birbiri ile aynı değerlerde olup pürüz yüksekliğinin model üzerinde etkili olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.9 Pürüz yüksekliği için hassasiyet analizi Tatvan su yüzeyi değişimi zaman grafiği.

Hassasiyet analizi kapsamında diğer bir parametre olarak viskozite seçilmiştir. Van Gölü için su sıcaklığının 5 – 20 °C arasında değişiklik gösterdiği yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir (Kavak ve diğ., 2012). Bu sıcaklık aralığındaki viskozite değeri 0,001 – 0,002 Ns/m²’dir. Viskozite değişiminin modelin çözümüne olası etkinin incelenmesi içinse 0,001, 0,0015 ve 0,002 Ns/m² değerleri seçilerek model çalıştırılmıştır. Bu değerlere göre yapılan modelleme sonucunda Tatvan noktası için zaman ve su yüzeyi deplasmanı grafiği Şekil 4.10’da sunulmuştur. Viskozite değeri değişiminin model sonuçlarına önemli bir etkisi olmadığı hesaplanmıştır.



Şekil 4.10 Viskozite değişimi için hassasiyet analizi Tatvan su yüzeyi deplasmanı zaman grafiği.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulan hem pürüz yüksekliğine hem de viskozite değeri değişimine bağlı sonuçların karşılaştırma grafiklerinde deprem başlangıcı itibariyle ilk

2 saatlik süre göz önüne alındığında iki parametrenin model sonuçları açısından önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Su kütlesinin büyük olması çalışılan parametrelerin model kontrolündeki önemini azaltmaktadır.

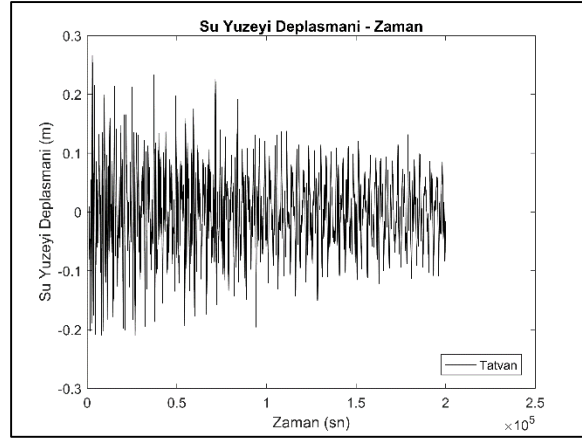
4.2.5 Van Gölü için senaryo sonuçlarının değerlendirilmesi

Van Gölü için yapılan modelleme çalışmalarında iki farklı senaryo kurgulanmıştır. Bu senaryolar Çizelge 4.6’da özetlenmiştir. Bu senaryolar göl yakınındaki merkezlerde meydana gelen gerçek depremlere ait veriler kullanılarak kurgulanmıştır. Deprem sırasında su seviyesi değişimi sonuçlarına ulaşılabilen iki farklı günde meydana gelen depremler kullanılarak üretilen senaryolar Van Gölü üzerinde kullanılmış olup Van Gölü içindeki DSİ su seviyesi ölçüm istasyonlarından ölçülen ve Şekil 2.16’da sunulan değerler ile karşılaştırılmıştır.

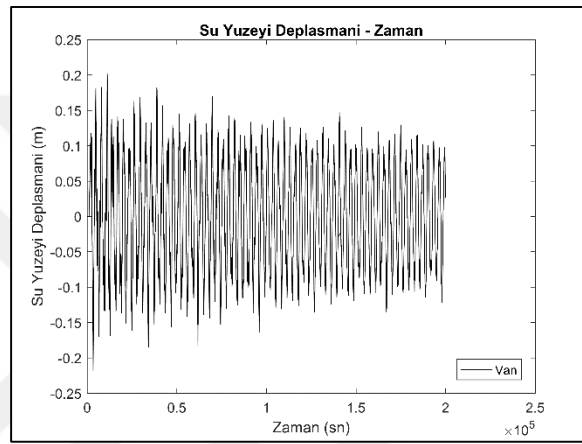
Çizelge 4.6 Van Gölü için senaryo çalışmaları.

Senaryo No	Kullanılan Deprem İvme Kaydı
1	Ekim 2011 Üç Boyutlu (Bitlis Merkez Kaydı)
2	Kasım 2011 Üç Boyutlu (Bitlis Merkez Kaydı)

Şekil 4.6’da sunulan 5 adet izleme noktasına ait değerler MATLAB programı yardımıyla grafik haline getirilmiştir. Ekim 2011 Van Depremi modellemesi için izleme noktalarında zamana bağlı hesaplanan su yüzeyi deplasmanı değerleri her bir izleme noktası için Şekil 4.11 - Şekil 4.13 arasında sunulmuştur. Şekil 4.11’de DSİ ölçüm noktalarından olan Tatvan ölçüm istasyonuna koordinatlı olarak işlenmiş model izleme noktasına ait su yüzeyi değişiminin (deplasman) zamana bağlı grafiği sunulmuştur. Tatvan noktası için başlangıç su seviyesi 0 m olmak üzere en yüksek 0,25 m, en düşük ise -0,2 m su seviyesi değişimi hesaplanmıştır. Şekil 4.12’de Van merkezinde bulunan DSİ tarafından Van Merkezi - İskele ölçüm istasyonu olarak adlandırılan izleme noktasına ait su yüzeyi değişiminin zamana bağlı grafiği sunulmakta olup bu noktada hesaplanan en yüksek su yüzeyi deplasmanı değeri 0,2 m, en düşük ise -0,21 m’dir.

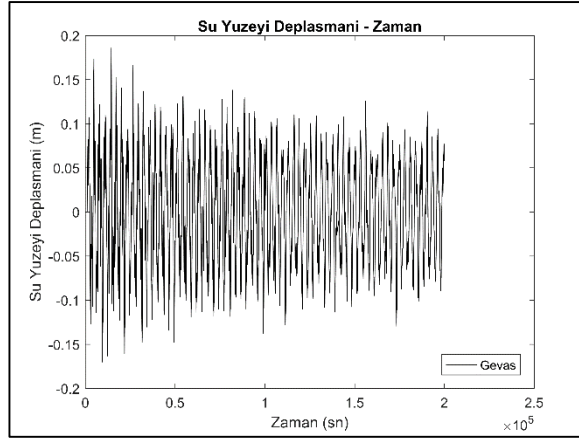


Şekil 4.11 Ekim 2011 Van Gölü Tatvan izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.

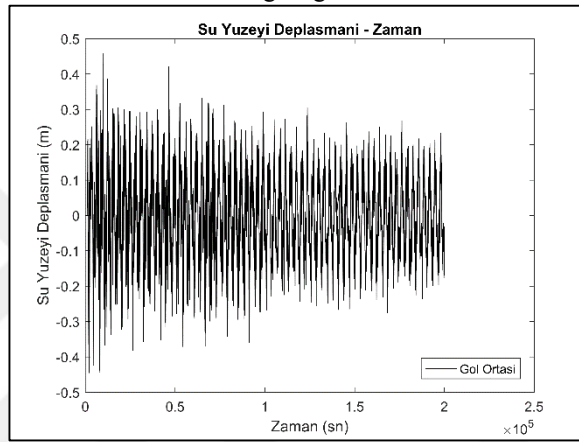


Şekil 4.12 Ekim 2011 Van Gölü Van Merkez (İskele) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.

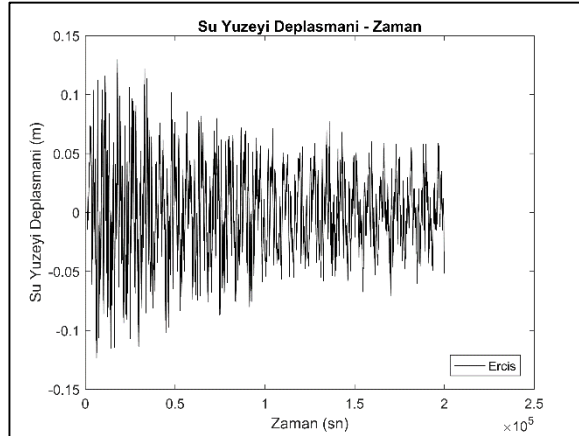
Şekil 4.13’de DSI’nin Gevaş istasyonuna karşılık gelen izleme noktasına ait su yüzeyi değişiminin zamana bağlı grafiği verilmiştir. Gevaş noktası için hesaplanan en yüksek su seviyesi değişimi 0,17 m en düşük ise -0,16 m’dir. Tatvan ve Van Merkez noktaları aynı doğrultuda olacak şekilde Doğu-Batı ekseninde konumlanmaktadır. Gevaş istasyonu ise Van Gölü’nün Güney kıyısında kalmaktadır. Van Gölü’nde 3 istasyon haricinde özellikle Kuzey kıyı şeridi için seviye ölçüm istasyonu bulunmamaktadır. Depremin etkisinin göl merkezinde ve Erciş Körfezi’nde olası etkisinin izlenmesi amacıyla bu iki noktaya ait su seviyesinin zamana bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de sunulmuştur. Göl merkezinde en yüksek 0,5 m en düşük olarak da -0,45 m olarak hesaplanmıştır. Erciş Körfezi’nde ise en yüksek değer 0,12 m en düşük değer de -0,12 m olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13 Ekim 2011 Van Gölü Gevaş (Güzelkonak) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği



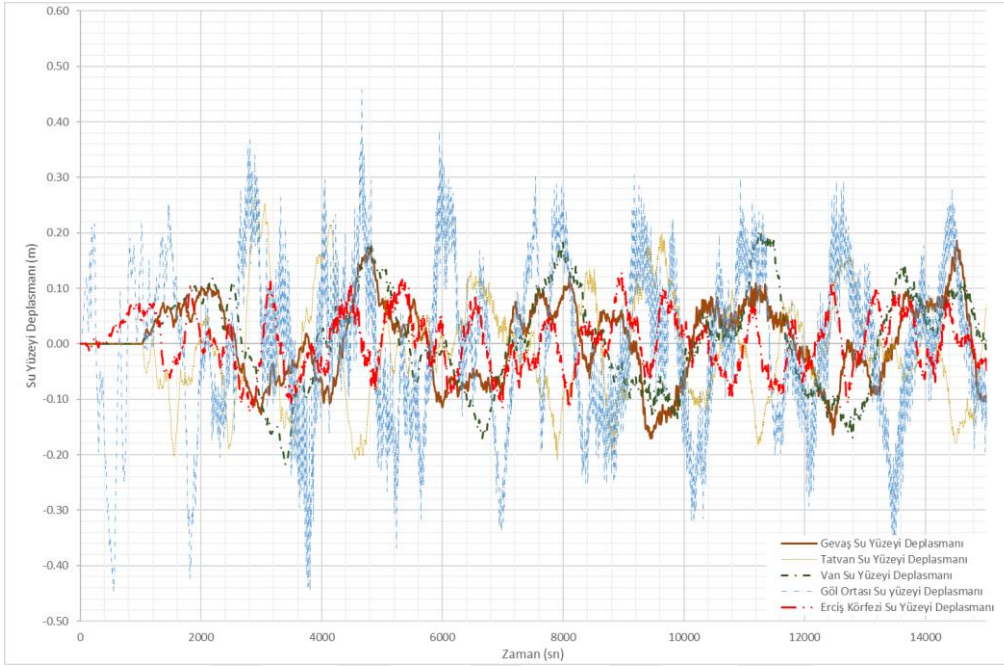
Şekil 4.14 Ekim 2011 Van Gölü göl merkez izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.



Şekil 4.15 Ekim 2011 Van Gölü Erciş Körfezi izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.

Hesaplanan değerler sahye dalgalarıdır. Bu dalgaların kıyıya yakın noktalarda göl merkezinden daha küçük olduğu hesaplanmıştır. Erciş Körfezi ortasındaki izleme noktasındaki su yüzeyi değişimi değeri kıyı bölgelerdeki değerlere yakın değerlerdedir. İzleme noktalarının birlikte, model başlangıcı itibariyle ilk 15000 saniye için su yüzeyi değişiminin zamana bağlı grafiği Şekil 4.15'de sunulmuştur. Hesaplanan değerlerden hareketle oluşturulan bu grafikte mavi çizgi ile sunulan göl

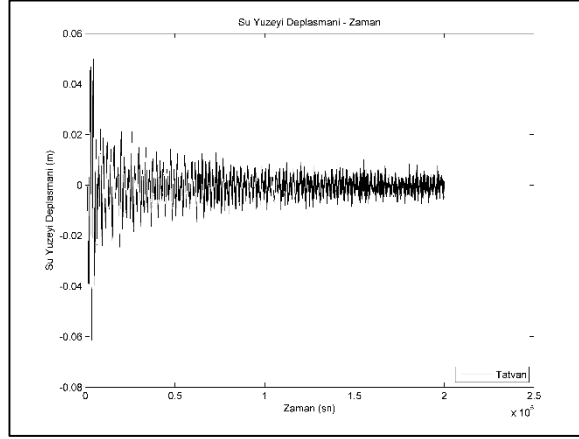
merkezindeki izleme noktasına (izleme noktası 2) ait değerler diğer değerler ile karşılaştırıldığında depremin göl merkezinde etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.



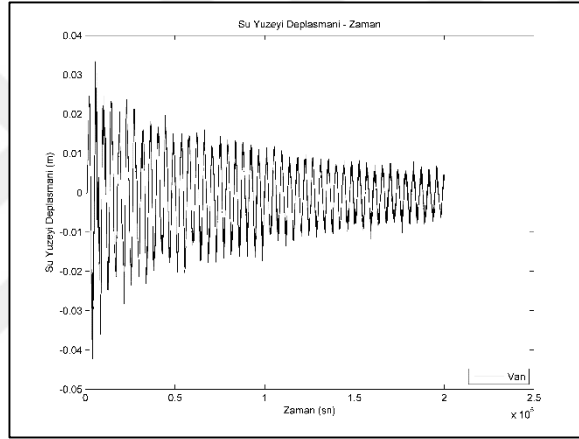
Şekil 4.16 Ekim 2011 Van Gölü tüm izleme noktalarının ilk 15000 sn için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.

Kasım 2011 Van Depremi modelleme çalışması sonucunda izleme noktalarında hesaplanan su yüzeyi deplasmanının zamana bağlı değişim grafikleri her bir nokta için Şekil 4.17 - Şekil 4.21 arasında sunulmuştur. Şekil 4.17’de sunulan Tatvan izleme noktasına ait su yüzeyi değişiminin zamana bağlı gösterildiği grafikte başlangıç değeri 0 m olarak tanımlandığından dolayı hesaplanan en yüksek su seviyesi 0,05 m ve en düşük değer ise -0,06 m mertebesindedir. Tatvan izleme noktasında su seviyesindeki değişimin deprem başlangıcı itibariyle 3,5 saat sonrasında etkisini kaybettiği ancak Ekim 2011 modellemesi sonucunda hesaplanan su seviyesindeki salınımın 2 gün boyunca devam ettiği hesaplanmıştır. Şekil 4.18’de Van merkez izleme noktası için su yüzeyi deplasmanının zamana bağlı değişimi grafiği sunulmuştur. Bu izleme noktasında hesaplanmış en yüksek değer 0,035 m en düşük değer ise -0,04 m’dir. Gevaş izleme noktasına ait hesaplanan değerler Şekil 4.19’da sunulmuş olup hesaplanan en yüksek değer 0,04 m, en düşük değer ise -0,04 m’dir. Şekil 4.20’de zamana bağlı su yüzeyi deplasmanı sunulan göl merkezindeki izleme noktasında hesaplanan en yüksek değer 0,02 m ve en düşük değer ise -0,025 m’dir. Erciş Körfezi’nde bulunan izleme noktasında hesaplanan en yüksek değer 0,03 m ve en düşük değer ise -0,02 m olarak bulunmuştur ve zamana bağlı değişim grafiği ise Şekil

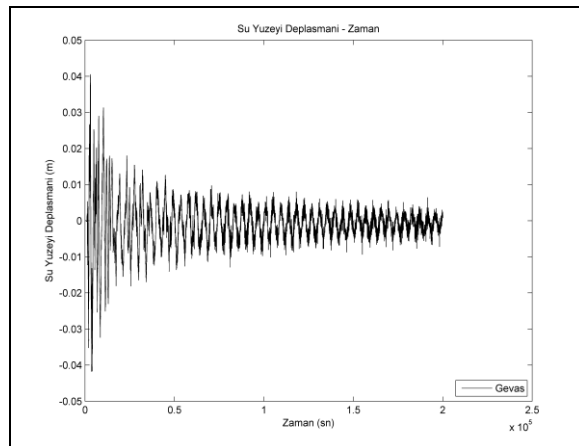
4.21’de sunulmuştur. Bu değerler Ekim 2011 Van Depremi modeli değerleri ile karşılaştırıldığında son derece düşük değerlerdir.



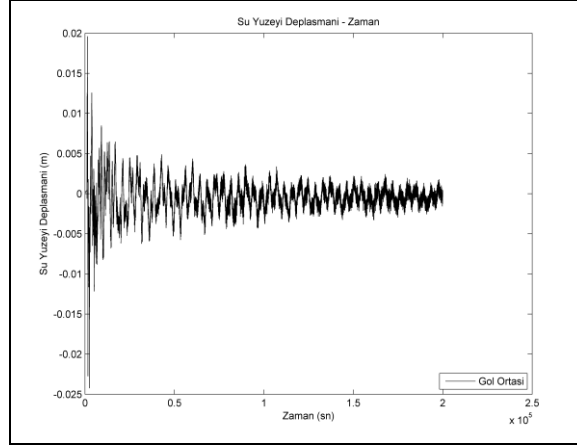
Şekil 4.17 Kasım 2011 Van Gölü Tatvan izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.



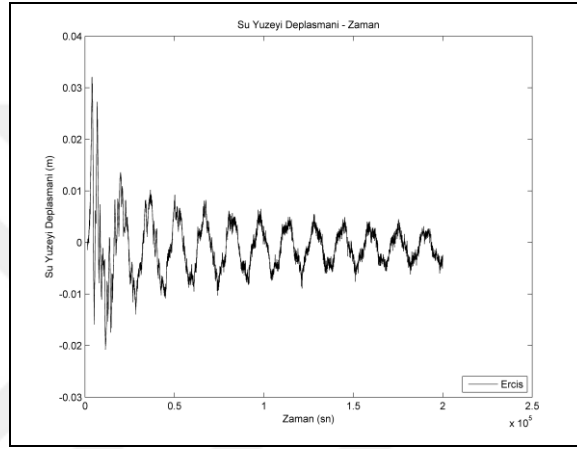
Şekil 4.18 Kasım 2011 Van Gölü Van Merkez (İskele) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.



Şekil 4.19 Kasım 2011 Van Gölü Gevas (Güzelkonak) izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği



Şekil 4.20 Kasım 2011 Van Gölü göl merkez izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.



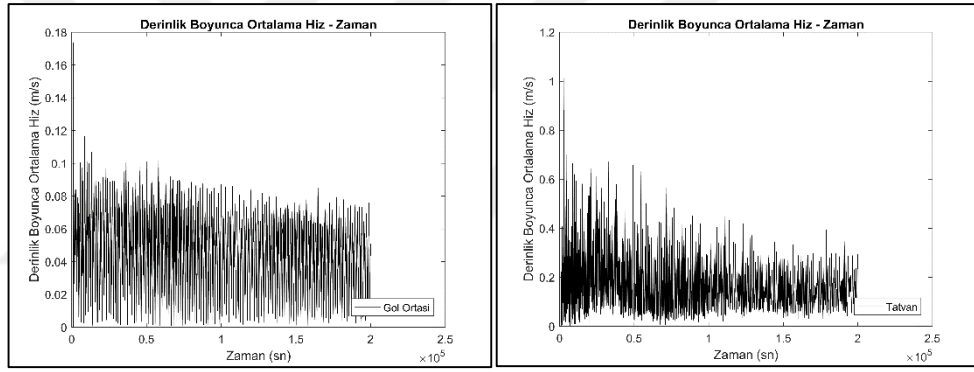
Şekil 4.21 Kasım 2011 Van Gölü Erciş Körfezi izleme noktası için su yüzeyi değişimi – zaman grafiği.

Şekil 4.11 - Şekil 4.15 arasındaki görsellerde Van Gölü için Ekim 2011 depremi sebebiyle meydana gelen sayheler, Şekil 4.17 - Şekil 4.21 arasında ise Kasım 2011 depremi için meydana gelen sayheler sunulmaktadır. Ekim depremi sonrasında meydana gelen sayhe yükseklikleri Kasım depremine göre 10 kat daha büyüktür. Kasım 2011 Van Depreminin Van Gölü dinamiğine etkisi Ekim 2011 Van Depreminin göldeki dinamik etkisine göre küçüktür. Bu sebeple hem Ekim 2011 hem de Kasım 2011 senaryoları için yapılan modelleme çalışmalarına ait sonuç grafikleri EK-D’de paylaşılmakla birlikte burada sadece Ekim 2011 Van Depremi modellemesi sonuçlarına yer verilmektedir.

İzleme noktalarında su yüzeyi değişimi haricinde derinlik boyunca ortalama hız, türbülans kinetik enerjisi, tabandaki hız değeri, hız şiddeti, x,y,z doğrultularında vortisite, hız, x,y,z doğrultularında hız değerleri hesaplanmıştır. Ekim 2011 Van Depremi için izleme noktalarında hesaplanan bu değerlerin zamana bağlı grafikleri her bir nokta için çizilmiş ve EK-D olarak *compact diskte jpeg* formatında sunulmuştur.

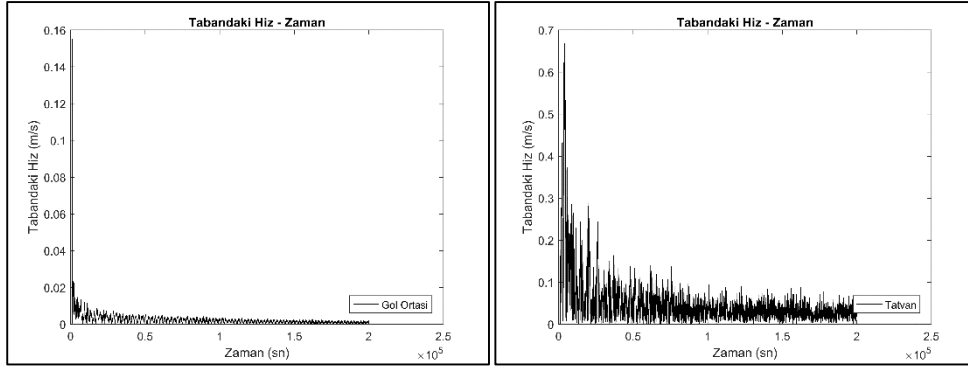
Örnek teşkil etmesi ve grafiklerle ilgili açıklamalar yapılması için Tatvan (4 numaralı nokta) ve göl merkezindeki (2 numaralı nokta) noktalara ait grafikler karşılaştırmalı olarak aşağıda sunulmuştur. Grafiklerde önce göl ortası sonrasında ise Tatvan için hesaplanan değerlere ait grafikler sunulmuştur. EK-D’de sunulan grafiklerde klasörlerin isimlendirmesi deprem adı – doğrultusu şeklindedir. Grafiklerin isimlendirilmesinde ise önce nokta numarası sonrasında ise hesaplanan parametrenin kısaltması verilmiştir. Şekil 4.22 - Şekil 4.30 arasındaki şekillerin isimlendirmesinde parantez içinde belirtilen parametre kısaltmaları kullanılmıştır.

Şekil 4.22’de Ekim 2011 Van depremi modeli sonucunda hesaplanan derinlik boyunca ortalama hız değerinin zamana bağlı değişimi sırasıyla göl ortası ve Tatvan izleme noktaları için sunulmuştur. Derinlik boyunca ortalama hız değerindeki değişim iki nokta içinde azalmaktadır ancak kıyı bölgesinde bulunan Tatvan izleme noktasında hız değeri daha hızlı azalmaktadır.



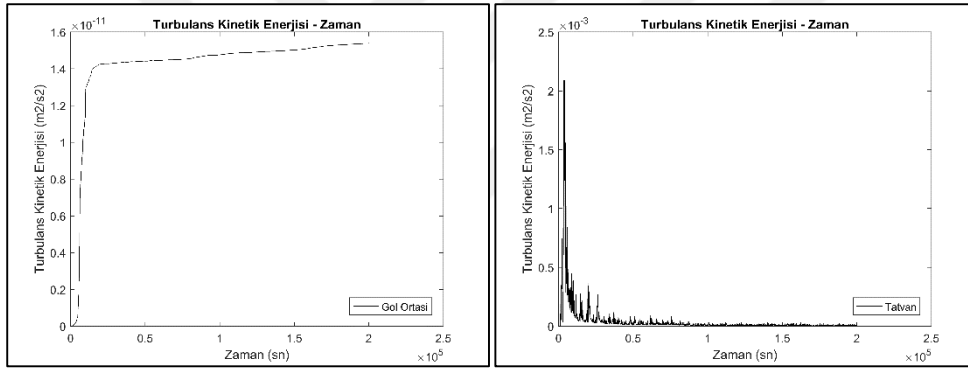
Şekil 4.22 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait derinlik boyunca ortalama hız: (DBOH).

Göl tabanının hemen üzerindeki ilk sonlu elemanda hesaplanan hızın zamana bağlı değişimi göl ortası ve Tatvan izleme noktaları için Şekil 4.23’de sunulmuştur. Depremin ilk etkisinde göl ortasında tabanda 0,15 m/s’lik hız hesaplanmış ancak bu hız kısa sürede 0 m/s değerine yaklaşmıştır. Ancak Tatvan izleme noktası için durum farklıdır ve tabandaki hız azalmakla birlikte sürekliliğini korumuştur.



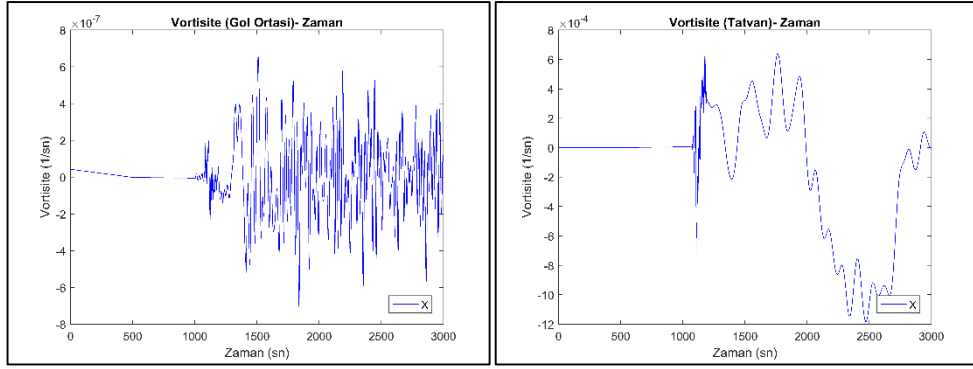
Şekil 4.23 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait taban hızı: (TH).

Şekil 4.24'te göl ortası ve Tatvan izleme noktaları için türbülans kinetik enerjinin zamana bağlı değişiminin grafiği sunulmuştur. Göl ortasındaki izleme noktasında türbülans kinetik enerji değeri 10^{-11} m²/sn² mertebesinde iken Tatvan izleme noktasında 10^{-3} m²/sn² mertebesinde hesaplanmıştır. Tatvan izleme noktasında göl ortasındaki izleme noktasına kıyasla 10^8 kat fark hesaplanmıştır.



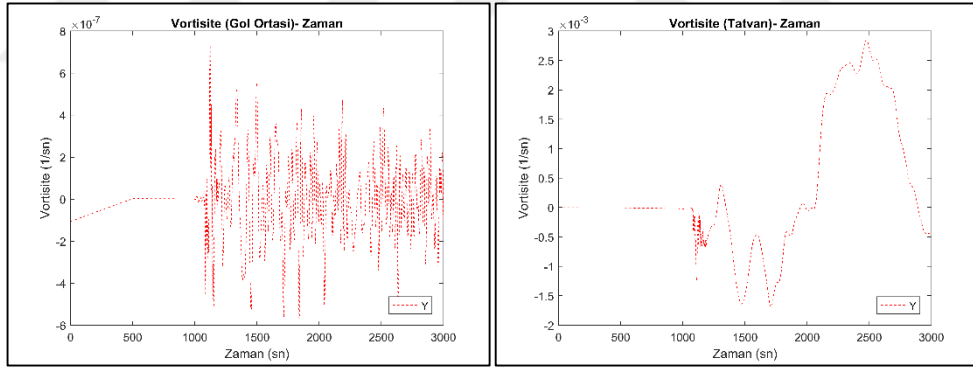
Şekil 4.24 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait türbülans kinetik enerjisi: (TKE).

İzleme noktalarında depreme bağlı olarak meydana gelen akımın karakterinin çevrinti durumunun incelenmesi için çevrinti (vortisite) değeri hesaplanmıştır. Deprem ivmesi doğrultusu olarak Doğu-Batı doğrultusuna denk gelen X doğrultusundaki vortisitenin göl ortası ve Tatvan izleme istasyonları için zamana bağlı değişimi Şekil 4.25'te sunulmuştur. Göl ortasındaki izleme noktasındaki değerler Tatvan izleme noktasına göre 10000 kat daha küçük hesaplanmıştır.

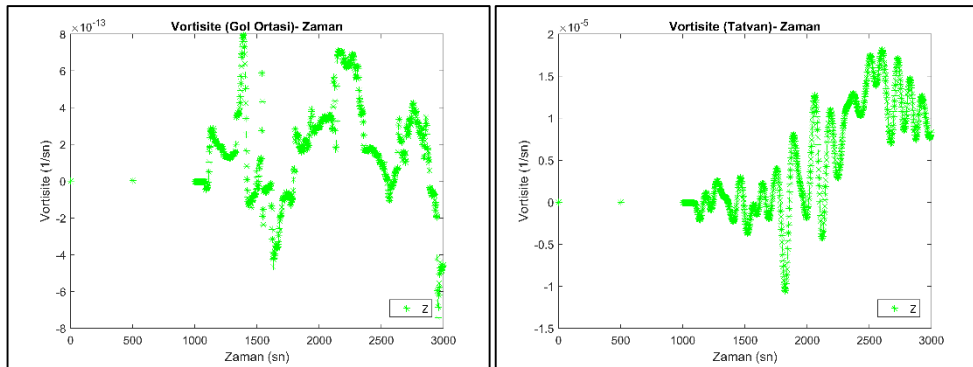


Şekil 4.25 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait X doğrultusundaki vortisite: (VORX).

Deprem ivmesi doğrultusu olarak Kuzey-Güney doğrultusuna denk gelen Y doğrultusundaki vortisitenin göl ortası ve Tatvan izleme istasyonları için zamana bağlı değişimi Şekil 4.26’da sunulmuştur. Göl ortasındaki izleme noktasındaki değerler Tatvan izleme noktasına göre 10000 kat daha küçük hesaplanmıştır. Şekil 4.27’de de deprem ivmesi olarak Yukarı-Aşağı doğrultuya denk gelen Z doğrultusu için vortisitenin zamana bağlı grafiği göl ortası ve Tatvan izleme istasyonları için sunulmuştur. Z doğrultusundaki değerler diğer X ve Y doğrultuları için hesaplanan değerlerden küçük olmasına karşın düşey doğrultuda da vortisite hesaplanmıştır.

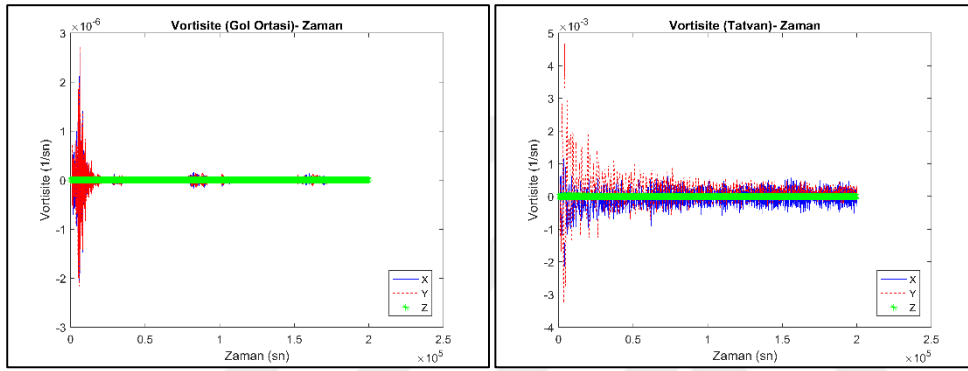


Şekil 4.26 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait Y doğrultusundaki vortisite: (VORY).



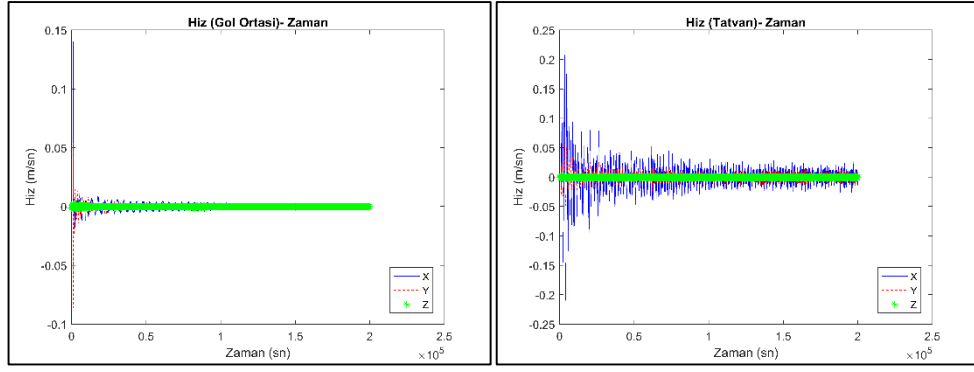
Şekil 4.27 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait Z doğrultusundaki vortisite: (VORZ).

Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de sunulan ve modelleme zamanının ilk 3000 sn’lik kısmını gösteren grafiklere ek olarak tüm doğrultuların birlikte gösterildiği göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait vortisite zaman grafiği Şekil 4.28’de sunulmuştur. Grafikte mavi X doğrultusunu, kırmızı Y doğrultusunu yeşil ise Z doğrultusunu temsil etmektedir. Göl ortasındaki izleme noktasında vortisite deprem sonrasında hızlıca artmakta ancak Tatvan izleme noktasındaki değerlerden hem oldukça küçük değerlerde olup hem de hızlı bir şekilde azalmaktadır. İki izleme noktası içinde düşeydeki çevrinti bileşeni diğer doğrultu değerlerinin yanında ihmal edilebilir mertebededir.

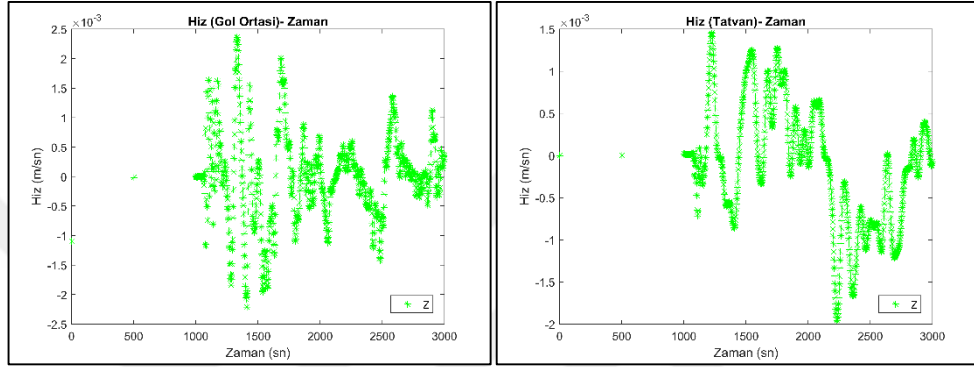


Şekil 4.28 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait vortisite zaman grafiği (VORT).

Göl ortası ve Tatvan izleme noktaları için X, Y ve Z doğrultuları için hız değerleri hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak Şekil 4.29’daki zamana bağlı noktasal hız değişim grafiği hazırlanmıştır. Grafiklerde mavi X doğrultusundaki hız değerini, kırmızı Y doğrultusundaki hız değerini yeşil ise Z doğrultusundaki hız değerini temsil etmektedir. Z doğrultusundaki yani düşeyde hesaplanan hız değeri X ve Y doğrultusunun yanında 0 m/s değerine yakın bir değerdedir. Ancak düşey hız bileşeni 0 değil 0’a yakın bir değerdedir. Daha net görülmesi için sadece Z doğrultusundaki hızın ilk 3000 sn’lik çözüm süresi sonuna kadar hesaplanan değerinin zamana bağlı grafiği göl ortası ve Tatvan izleme noktaları için Şekil 4.30’da sunulmuştur.



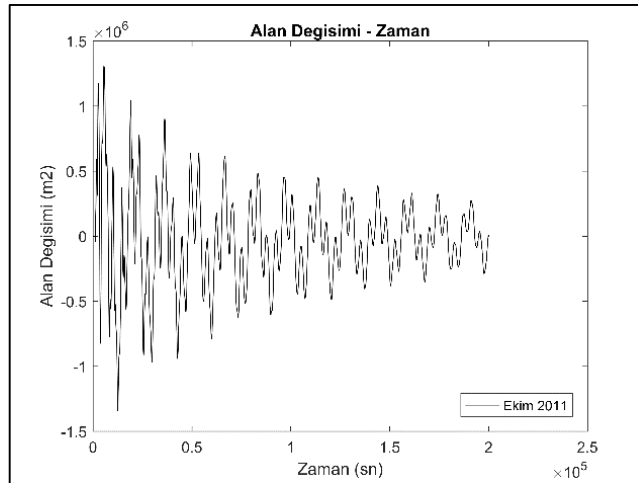
Şekil 4.29 Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait hız zaman grafiği (VT).



Şekil 4.30. Ekim 2011 Van depremi göl ortası ve Tatvan izleme noktalarına ait düşey hız zaman grafiği (VZ).

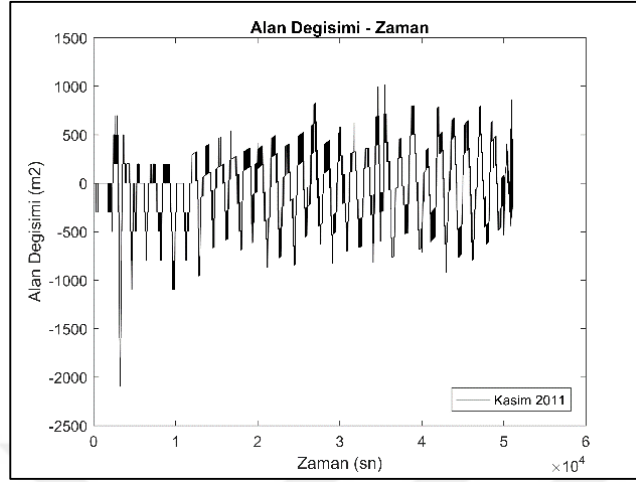
Her senaryo için hesaplanan değerlere ait grafikler Tatvan, Van, Gevaş, göl ortası ve Erciş Körfezi izleme noktaları için hazırlanarak EK-D’de sunulmuştur.

Noktasal hesaplamalara ilave olarak göl yüzey alanı değişimi 2 senaryo için de hesaplanmıştır. Van Gölü’nün başlangıç yüzey alan değeri 3713 km² olarak alınmıştır. Ekim 2011 Van Depremi modellemesi sonucunda zamana bağlı göl yüzey alanının değişimi hesaplanarak Şekil 4.31’de sunulmuştur. Hesaplama sonucunda yaklaşık olarak 1,35 km²’lik bir alanda su baskını riski görülmektedir.



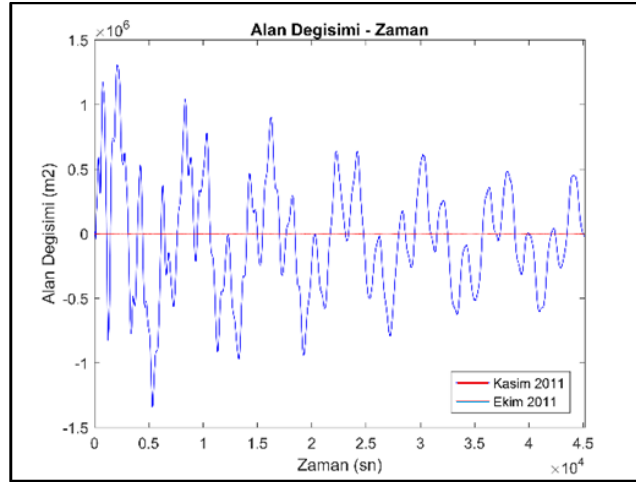
Şekil 4.31 Ekim 2011 Van Depremi Van Gölü yüzey alan değişim grafiği.

Kasım 2011 Van Depremi modellemesi sonucunda hesaplanan göl yüzey alanının zamana bağlı değişimi Şekil 4.32’de sunulmuştur. Hesaplama sonucuna göre göl yüzey alanında önemli bir değişiklik söz konusu değildir.



Şekil 4.32 Kasım 2011 Van Depremi Van Gölü yüzey alan değişim grafiği.

Ekim ve Kasım 2011 Van depremlerinin Van Gölü yüzey alanında meydana getirdiği yüzey alan değişimi değerlerinin birlikte sunulduğu Şekil 4.33’deki yüzey alan değişimi karşılaştırma grafiğinde mavi çizgi ile Ekim 2011 Van depremine ait sonuçlar, kırmızı çizgi ile Kasım 2011 Van depremi modellemesine ait sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 4.33 Ekim 2011 ve Kasım 2011 depremlerinin karşılaştırma grafiği.

Ekim ve Kasım 2011 Van Depremlerine ait modelleme senaryoları sonucunda hesaplanan göl yüzey alanı değişimine ait değerler analiz edilerek en yüksek ve ortalama değişim değerleri Çizelge 4.7’de sunulmuştur. Zamanla değişimin hakim periyodu değişimin zaman içinde baskın olan değeridir. Zaman serilerinin MATLAB

yardımla hızlı fourier dönüşümü metodu (FFT) kullanılarak hakim periyodu hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7 Van Gölü yüzey alan değişimi.

Senaryo	Ortalama Değişim (m2)	Ortalama Değişim (%)	En Yüksek Değişim (m2)	En Yüksek Değişim (%)	Standart Sapma
Kasım 2011	1035	$2.8e^{-06}$	2800	$7.5e^{-06}$	750
Ekim 2011	348200	$9.3e^{-04}$	1344200	0,0035	268553

İki senaryo sonucundaki yüzey alan değişiminin zamana bağlı değerlerinin hakim periyodları Çizelge 4.8’de özetlenmiştir. İki senaryodaki deprem şiddeti farklı olmasına, yüzey alan değişim değerlerinin farklı olmasına rağmen hesaplanan hakim periyod değerleri birbirine yakın değerlerde ve gölün Kuzey – Güney doğal periyoduyla uyumludur.

Çizelge 4.8 Van Gölü için hesaplanan yüzey alan değişim serilerinin hakim periyodları.

Senaryo	Hakim Periyod (sn)
Senaryo 1 – Ekim 2011 Depremi	3800
Senaryo 2 – Kasım 2011 Depremi	3450

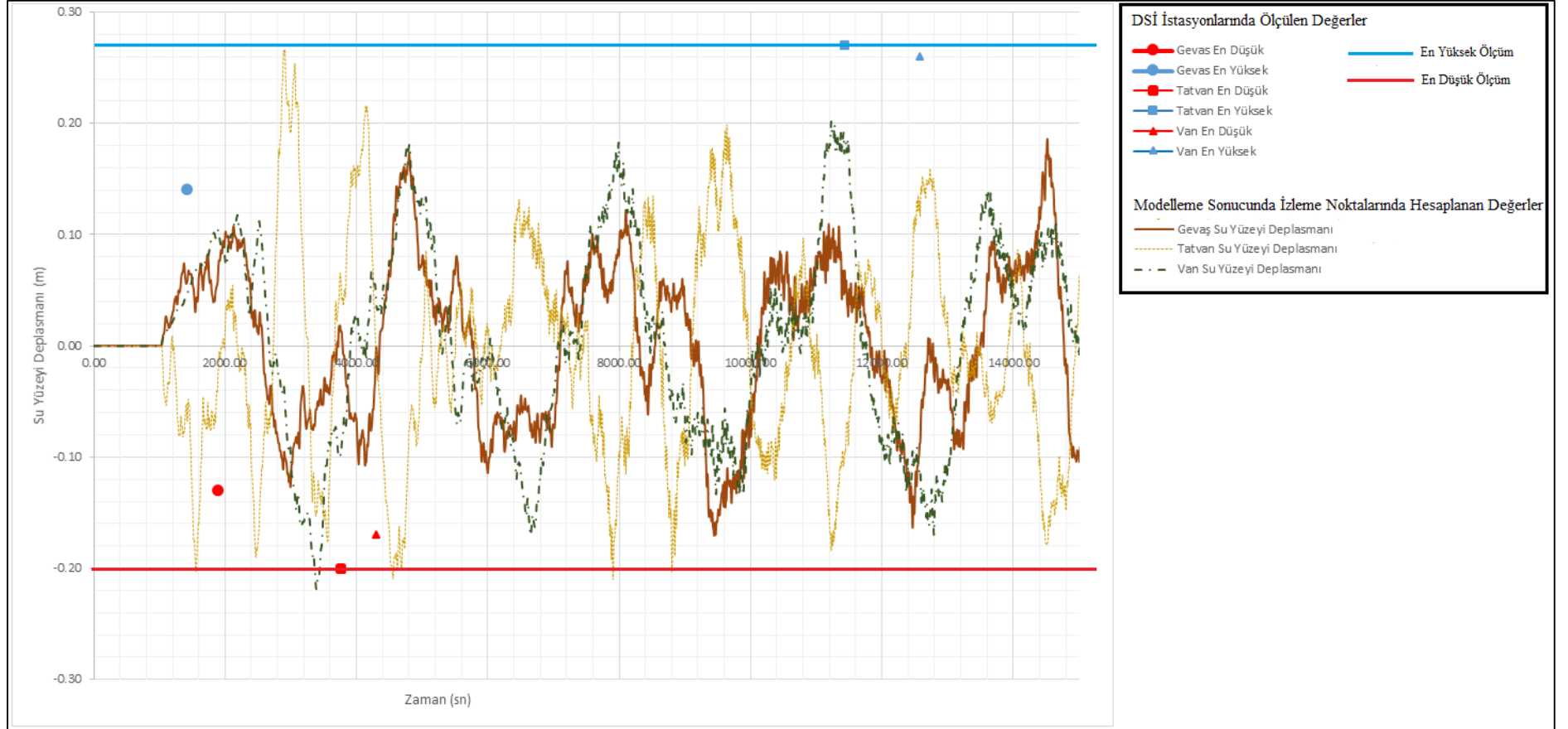
4.2.6 Van Gölü Ekim 2011 depremi sonuçlarının ölçüm verileriyle karşılaştırılması

Bölüm 2.4’te ifade edilen Van Gölü çevresinde meydana gelmiş 23 Ekim 2011 depreminin Van Gölü için etkisi araştırılmıştır. 13:41’de Van, Tuşba ilçesi merkezinde meydana gelen 7,2 Mw şiddetindeki depremde DSİ ölçüm istasyonlarında ölçülmüş ve ölçülen en yüksek ve en düşük su seviyesi değerleri

Çizelge 2.5’de sunulmuştur. Değerler modelleme sonuçları değerleri ile karşılaştırılması amacıyla zamanlarına göre grafik üzerine işlenmiştir. Modelleme sonucunda hesaplanan Tatvan, Gevaş ve Van Merkez izleme noktalarına ait zamana bağlı su yüzeyi değişimi değerleri ve DSİ tarafından ilgili noktalardaki istasyonlarda ölçülen en yüksek ve en düşük su seviyesi değerleri ve deprem başlangıcı itibariyle ölçüm zamanı değerleri kullanılarak Şekil 4.34’teki grafik elde edilmiştir. Grafik üzerindeki mavi noktalar ölçülen en yüksek su seviyelerini, kırmızı noktalar ise en

düşük su seviyelerini ifade etmektedir. Gevaş, Tatvan ve Van merkez ölçüm istasyonları değerleri için sırasıyla daire, kare ve üçgen işaretçi kullanılmıştır. Modelleme sonucunda hesaplanan değerler ise sarı renkle Tatvan izleme noktasındaki su yüzeyi değişimi, yeşil kesikli çizgi ile Van izleme noktasındaki su yüzeyi değişimi ve kahverengi ile de Gevaş izleme noktasındaki su yüzeyi değişimi gösterilmiştir. Hesaplanan değerlerde en düşük değerler Gevaş ölçüm istasyonu değeri haricinde uyumlu, en yüksek değerlerde ise sadece belirli bir gecikme ile Van noktasının uyumlu olduğu görülmektedir. Aynı gecikme süresi Van Merkez noktasının en düşük değeri içinde söz konusudur.





Şekil 4.34 Ekim 2011 Van Depremi Van Gölü modelleme sonuçları ve DSİ ölçümleri karşılaştırma grafiği.

Şekil 4.11 - Şekil 4.13 arasında sunulan grafiklerde su yüzeyi değişimleri incelendiğinde istasyonlardaki su yüzeyi değişiminin en fazla 40 - 45 cm mertebesinde olduğu görülmektedir. Van Gölü'nde bulunan ve ilgili günde ölçüm yapan istasyonlarda da ise en fazla 50 cm su seviyesi değişimi kaydedilmiştir ancak bu kayıtların saatlik ortalama değerler ve gün içinde görülen en yüksek ve en düşük değerler olarak alınması dolayısıyla modelleme sonuçlarıyla belirli düzeyde farklılık göstermesi normaldir. Modelleme sonucunda en yüksek su yüzeyi deplasmanının göl ortasında en düşük değişimin ise Erciş Körfezi'ndeki izleme noktasında gerçekleştiği görülmektedir.

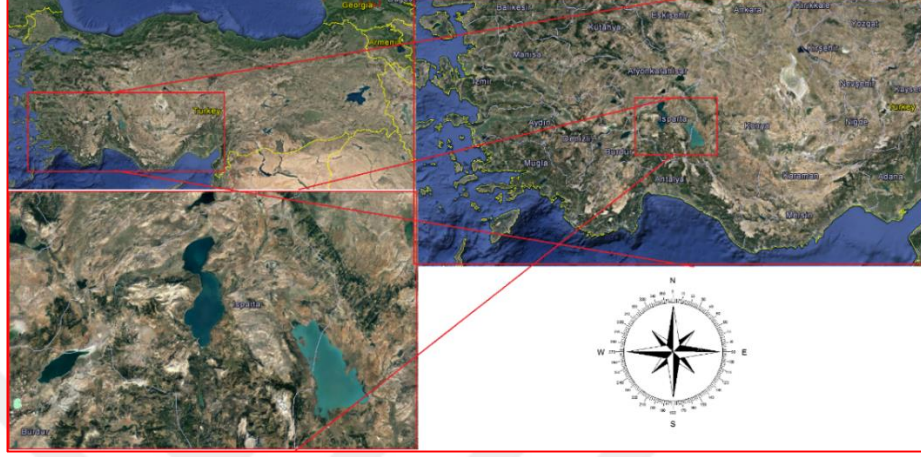
Şekil 4.11 - Şekil 4.13 arasındaki grafiklerde de görüldüğü üzere göldeki izleme noktaları arasında su yüzeyi değişiminde faz farkı mevcuttur. Bu durum DSI ölçüm sonuçlarında da mevcuttur. En yüksek su seviyesi ölçüm değerleri Tatvan ve Van Merkez istasyonlarında görülmüştür. Şekil 4.34'te kırmızı düz çizgi ile DSI tarafından Ekim 2011 Depremi sırasında ve sonrasında Van Gölü'nde ölçülmüş en düşük değer limit, mavi çizgi ile de yine aynı istasyonlarda ölçülmüş en yüksek değer limit belirtilmiştir. Hesaplanan en yüksek su seviyesi deplasmanları ve hesap noktaları ile DSI ölçüm istasyonlarının ölçüm verileri kıyaslandığında dalga yüksekliği olarak yakın değerler bulunmakta ancak zamansal karşılaştırmada tam uyum görülmektedir.

4.3 Örnek Çalışma Alanı Eğirdir Gölü

Van Gölü çevresinde yakın zamanda meydana gelen depremlerin göldeki etkileri Bölüm 4.2'deki çalışmada ifade edilmiştir. Türkiye'de hem depremselliği yüksek hem de göl sayısı bakımından önemli olan coğrafyası göller yöresi bölgesidir. Eğirdir Gölü çevresinde meydana gelmiş tarihi öneme sahip Dinar Depremi'nin ve dünyada meydana gelmiş tarihi öneme sahip El-Centro Depremi'nin kurgusal olarak Eğirdir Gölü'ne olası etkilerinin araştırılması literatür açısından önemli olacağı düşünüldükçe Eğirdir Gölü ve bahsi geçen depremlerin etkileri çalışılmıştır.

Eğirdir Gölü, Akdeniz Bölgesinde, Isparta İli sınırları içinde Türkiye'nin güneybatısında 38°16' ve 37°50' K enlemleri ile 30°44' ve 30°57' D boylamları arasında yer almakta olup Türkiye'deki 25 büyük havza içinde yer alan, Antalya havzası sınırları içinde bir alt havza konumundadır (Kaçikoç, 2013). Eğirdir havzasının toplam yüzey alanı 468 km²'lik göl yüzey alanı ile birlikte toplam yüzey alanı 3020 km²'dir. Gölün maksimum su seviyesi 919,3 m ve göl hacmi de 4 milyar

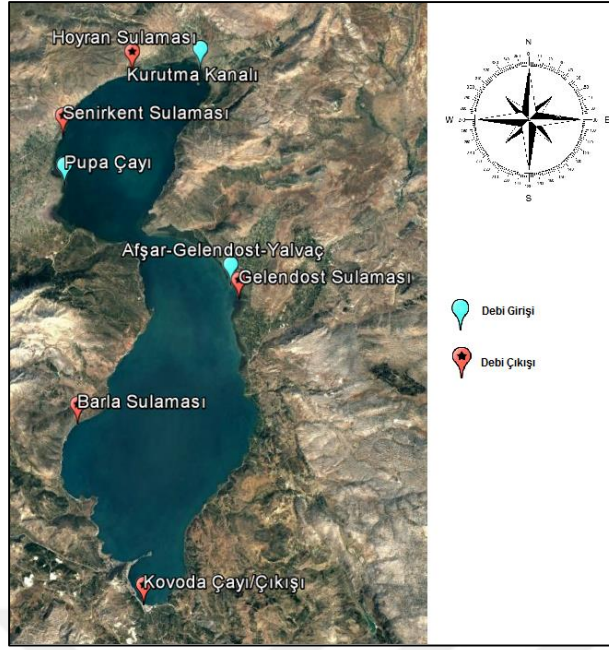
m³ olarak belirlenmiştir. Deniz seviyesinden 917,7 m yükseklikte bulunan göl, yıllara göre değişmekle beraber ortalama 10 - 12 m derinliğe sahiptir ancak daha sonra yapılan çalışmalarda gölün ortalama su derinliğinin 8 – 9 m mertebesine indiği tespit edilmiştir. Eğirdir Gölü termal tabakalaşmanın olmadığı tam karışımli bir göldür (Kaçikoç, 2013).



Şekil 4.35 Eğirdir Gölü yerbulduru haritası.

Eğirdir Gölü'nü yüzeyden besleyen önemli su kaynakları, Uluborlu ve Senirkent tarafından gelen Pupa çayı, Yalvaç tarafından gelen Yalvaç-Gelendost çayı ve kuzeyden Karamuk Gölü'nün sularını boşaltan Düden göle karışmaktadır. Eğirdir gölünden su çıkışları da önemli ölçüdedir. Bunlardan başlıcaları, güney ucundan Kovada Kanalı ile Kovada Gölü'ne çıkış, Barla, Gelendost, Senirkent ve Hoyrat sulamaları olarak sayılabilir (Şekil 4.36).

Eğirdir Gölü için yıllık debi giriş – çıkış durumları incelenecek olursa göle su girişi Kasım – Temmuz ayları arasında, gölden su çıkışı da Temmuz – Ekim ayları arasındadır.



Şekil 4.36 Eğirdir Gölü debi giriş ve çıkış noktaları.

Eğirdir Gölü'nün batimetrik durumu göz önüne alındığında göle ait batimetri ve çevre topografyasına ait harita Şekil 4.37'de sunulmuştur. Taban eğimi son derece düşük olan göl oldukça sığ bir göldür.

Denklem 2.2 yardımıyla Eğirdir Gölü için doğal periyod hesaplanarak yaklaşık değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Gölün doğal yapısı sebebiyle Kuzey-Güney eksenini ve Doğu-Batı eksenini farklı doğal periyoda sahiptir. İki bölge durumunda yapılan periyod hesabı değerleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9 Eğirdir Gölü doğal periyodu.

	K-G	D-B
L (km)	48	17
h (m)	8	8
T (sn)	11000	3900

Göl aslında morfolojik olarak ele alındığında iki farklı çanak yapısının bir boğaz ile birleşmesiyle meydana gelmekte ve herhangi bir zorlayıcı kuvvet altında bu iki göl çanağının kendi içinde farklı hareket etmesi beklenmektedir. Tez boyunca, gölün kuzeyinde bulunan ve 1 numara ile ifade edilerek yeşil renkle işaretlenmiş çanak kuzey çanağı, 2 numara ile adlandırılan ve kırmızı ile işaretlenmiş çanak ise güney çanağı olarak anılacaktır.

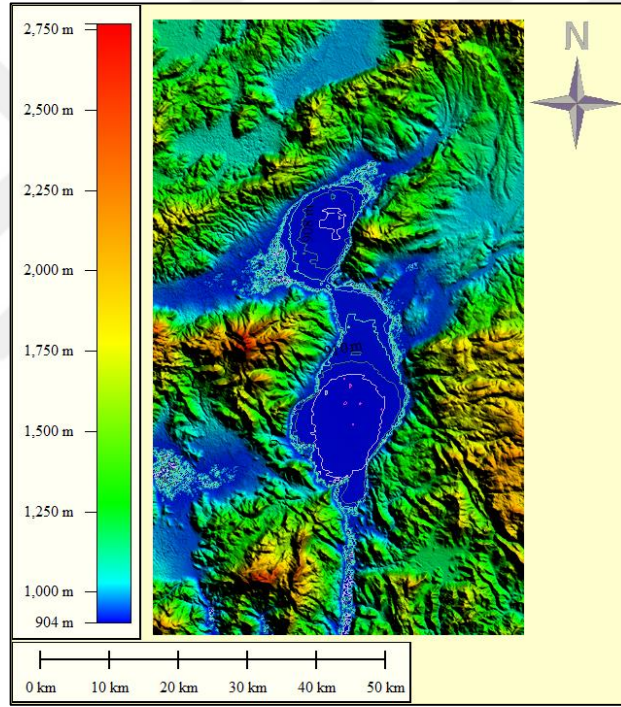
Çizelge 4.10 Eğirdir Gölü doğal periyodu (iki bölgesi).



1	K-G	D-B
L (km)	15	10
h (m)	8	8
T (sn)	3400	2300

2	K-G	D-B
L (km)	33	17
h (m)	8	8
T (sn)	7500	3900

Göl için periyod hesaplanırken iki bölgeye ayrıldığı takdirde doğal periyodun da iki bölge içinde azaldığı görülmektedir.



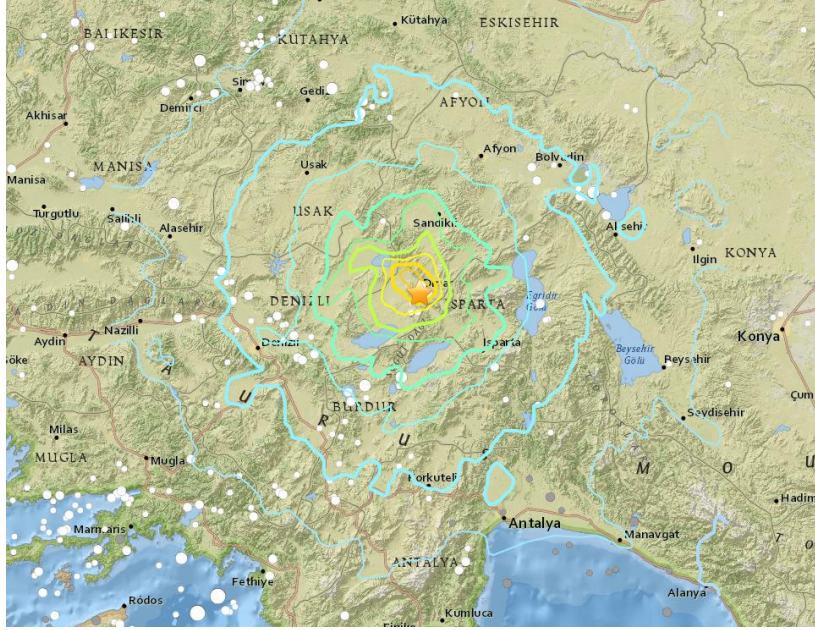
Şekil 4.37 Eğirdir Gölü batimetri ve çevre topografyası haritası.

Eğirdir Gölü'nün içinde bulunduğu Göller Yöresi, 1. Dereceden deprem riski bölgesi içinde olup Batı Anadolu Fay Hattı içinde yer almaktadır. Şekil 4.38'de Göller Bölgesi ve çevresinde 1976 yılından günümüze kadar 3 Ms şiddetinden daha büyük şiddette meydana gelen depremlerin dağılımı gösterilmiştir. Bu depremlerden en akılda kalıcı olanı 1 Ekim 1995 tarihinde yerel saatle 17:57'de (UTC: 15:57) Afyonkarahisar'ın Dinar ilçesinde meydana gelen 6,4 Ms şiddetindeki depremdir. Bu depremde toplam 90 kişi hayatını kaybetmiş, 11000'in üzerinde bina yıkılmış veya hasar görmüştür.



Şekil 4.38 Goller bölgesinde ve çevresinde meydana gelen 3 Mw ve üzeri şiddetteki depremlerin dağılımı.

Ekim 1995 tarihli depremin merkezi ve çevresindeki etki bölgesine ait görsel Şekil 4.39'de sunulmuştur. Bu etki bölgesinin içinde Eğirdir Gölü'nde bulunmaktadır.



Şekil 4.39 Ekim 1995 Dinar Depremi etki bölgesi.

4.3.1 Eğirdir Gölü Senaryoları

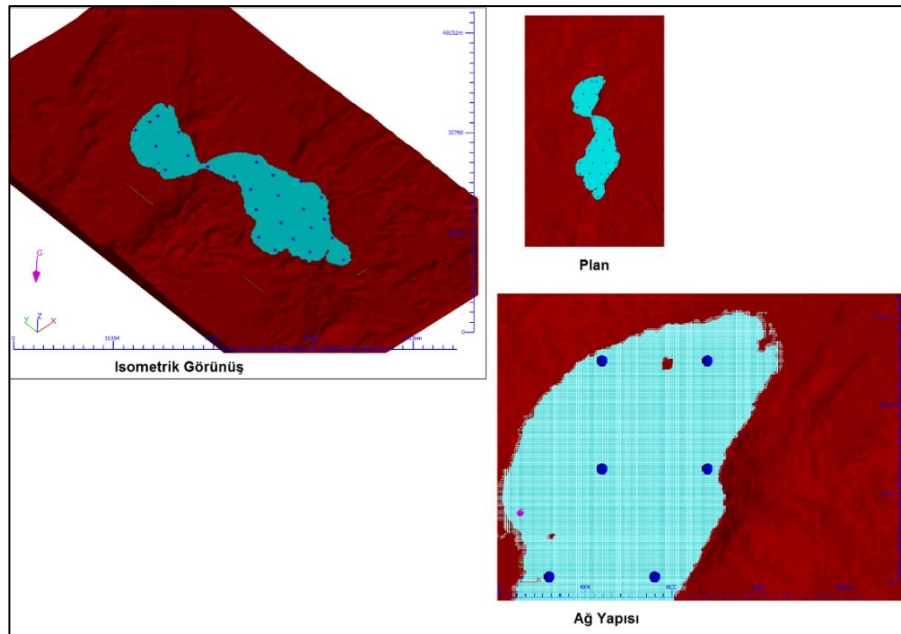
Tez kapsamında Eğirdir Gölü için hazırlanan hidrodinamik denge durumuna sismik salınımların etkisinin araştırılması için öncelikle Eğirdir Gölü'nün hidrodinamik denge altındaki durumu altında iken deprem etkisinin araştırılması yapılmıştır. Bu amaç kapsamında Eğirdir Gölü'ne sırasıyla Dinar Deprem Serisi (1995, 6,1 M_w) ve El-Centro Deprem Serisi (1940, 6,9 M_w) depremlerinin etkileri araştırılarak karşılaştırılmıştır. Hidrodinamik denge durumundaki Eğirdir Gölü'ne belirli bir bölgede iki farklı askıda katı madde konsantrasyonu tanımlanmış olup askıdaki katı maddenin çökme hareketine deprem durumunun etkisi de incelenmiştir. Ayrıca

taban malzemesinin farklı içerik dağılımlarına sahip olduğu durumlarda taban malzemesinin askıya kalkma durumu da ayrıca araştırılmıştır.

Senaryoların farklılıkları ilerleyen alt bölümlerde açıklanmış olup tüm Eğirdir Gölü ile ilgili senaryolardaki ortak özellikler aşağıdaki gibidir.

- Göl için batimetrik koşullar Şekil 4.37'deki topografik ve batimetrik bilgilere göre hazırlanmıştır ve modele altlık olarak kullanılmıştır.
- Taban geçirimsiz kabul edilmiştir.
- Su sıcaklığı 20 °C'de kabul edilmiş ve suyun 20 °C'deki 1 atm basınç altındaki özellikleri kullanılmıştır.
- Debi giriş – çıkışı ihmal edilmiş olup göldeki su seviyesi $t = 0$ anı için yani başlangıç koşulunda 914 m kotunda kabul edilmiştir.
- Üç doğrultudaki ivmeler zaman serisi olarak değişken tanımlanmış olup düşey doğrultudaki ivme değeri yerçekimi ivmesine (9.807 m/sn^2) ilave edilmiş ve/veya çıkartılmıştır.
- Türbülans modeli olarak RNG model tercih edilmiştir. RNG türbülans modelinin diğer k- ϵ ve k-w modellerden daha iyi uyum gösterdiği daha önce yapılan çalışmalarda tartışılmıştır (Kaheh ve diğ., 2010).

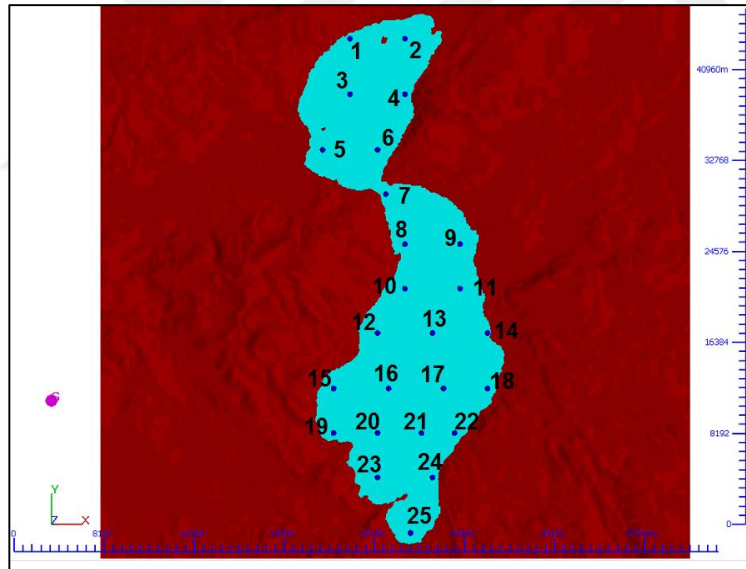
Atmosfer basıncı ihmal edilmiştir ve rölatif basınç koşulu altında çalışılmıştır.



Şekil 4.40 Eğirdir Gölü modeli.

- Modelleme programında Eğirdir Gölü için oluşturulan model görseli Şekil 4.40'da paylaşılmıştır. Tüm senaryolarda aynı model altlığı kullanılmıştır.
- İlk 1000 saniyelik sürede göl sadece – z doğrultusunda $9,807 \text{ m/sn}^2$ 'lik yer çekimi ivmesine maruz bırakılmıştır.
- Ağ yapısı olarak kare elemanlar kullanılmış olup bu kare elemanlar batimetri yüzeyine uyumlu halde oluşturulmuştur.
- Model için izleme noktalarının yerleşimi Şekil 4.41'de sunulmuştur. İzleme noktalarına ait detaylı bilgiler EK – B'de sunulmuştur.
- Askıda katı madde ve taban sedimentinin modellendiği senaryolar için Şekil 4.41'deki noktalara ilave olarak düşeyde de aynı noktaların profili boyunca derinliğe bağlı olarak noktalar tayin edilmiştir.

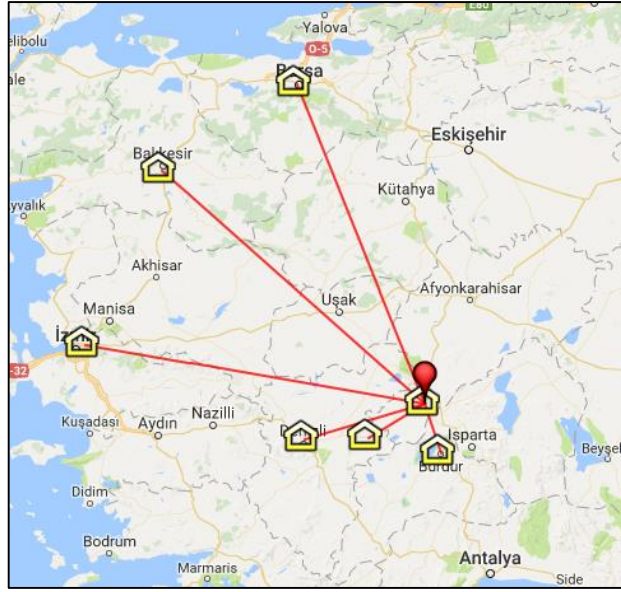
Doğu – Batı doğrultusu x eksenini boyunca, Kuzey – Güney doğrultusu ise y eksenini boyunca alınmıştır.



Şekil 4.41 Eğirdir Gölü modeli izleme noktaları.

4.3.2 Eğirdir Gölü Dinar Depremi Doğu-Batı salınım durumunun modellenmesi

Eğirdir Gölü konum olarak göller yöresinde bulunmaktadır. Bu bölgedeki geçmişte yaşanmış ve kaydı mevcut durumda olan en önemli deprem 1995 Dinar depremidir. Bu senaryo kapsamında kullanılacak olan deprem kaydı Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pacific Earthquake Engineering Research Center) (PEER) veritabanından temin edilmiştir. Tarihi öneme sahip depremlerin PEER veritabanında analiz edilerek düzeltilmiş hali mevcuttur.



Şekil 4.42 1995 Dinar Depremi sırasında kayıta olan istasyonların yerleşimi.

Deprem sırasında kayıta olan istasyonlara ait yerleşim haritası Şekil 4.42’de sunulmuştur. Dinar merkezinde meydana gelen depremin Eğirdir Gölü’ne tesirlerinin araştırılması için Burdur İstasyonu göle daha yakın bir konumda bulunması sebebiyle tercih edilmesi söz konusu olmuştur.

Çizelge 4.11 1995 Dinar depremi Burdur istasyonu kaydı parametreleri.

Parametre	Dinar (Burdur İstasyonu Verisi)		
	Batı/Doğu	Kuzey/Güney	Yukarı/Aşağı
En Büyük İvme (g)	0,039	0,036	0,035
En Büyük Hız (m/sn)	0,045	0,047	0,030
En Büyük Deplasman (m)	0,012	0,013	0,007
Vmax / Amax: (sn)	0,114	0,135	0,088
Hakim Periyot (sn)	0,24	0,22	0,20

İstasyonda ölçülmüş yönler göre depreme ait parametreler Çizelge 4.11’de sunulmuştur. Üç doğrultuda da (Güney – Kuzey, Doğu – Batı ve Yukarı – Aşağı) en büyük ivme hemen hemen aynı mertebededir ve en büyük ivme 0,035 – 0,04 g aralığındadır. Depremi hakim periyodu da yine üç doğrultuda da yaklaşık olarak aynı büyüklükte olup 0,2 – 0,24 saniye aralığındadır.

Deprem etkisinde kullanılan deprem serileri EK-A’da sunulmuştur. Ekte tüm senaryolarda kullanılan deprem ivme kayıtları her bir doğrultu için tek tek sunulmuştur.

Bu senaryo kapsamında Dinar Depremi'nin Burdur İstasyonu tarafından kaydedilmiş Doğu – Batı doğrultusundaki ivme kaydının zaman serisi alınmış ve modelleme yazılımındaki x doğrultusundaki ivme değerine zaman serisi olarak etkitilmiştir.

4.3.3 Eğirdir Gölü Dinar Depremi Kuzey-Güney salınım durumunun modellemesi

Bu senaryo kapsamında, Eğirdir Gölü için Dinar depreminin Burdur İstasyonunda ölçülen ivme kaydının Kuzey – Güney doğrultusundaki zaman serisi kullanılmıştır. Deprem ivme kaydı modellemede y doğrultusundaki ivme değeri olarak zaman serisi halinde modelleme yazılımına tanımlanmıştır.

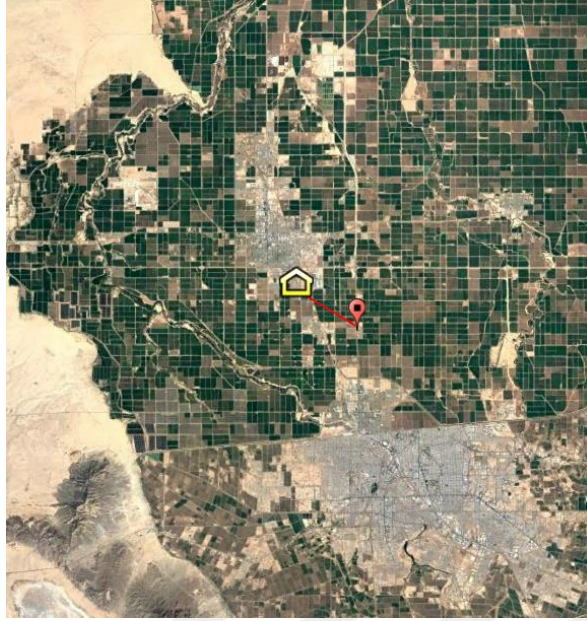
4.3.4 Eğirdir Gölü Dinar Depremi üç boyutlu salınım durumunun modellemesi

4.3.2 ve 4.3.3 bölümlerinde tariflenen senaryolarda sadece tek bir doğrultudaki deprem etkisi modellenmiştir. Bu senaryo kapsamında ise üç eksen de ivme kaydı modelleme sürecine dahil edilmiştir.

4.3.5 Eğirdir Gölü El-Centro Depremi Doğu-Batı salınım durumunun modellemesi

Bölgede gerçekleşen bir depremin incelendiği önceki senaryolara ilave olarak farklı bir coğrafyada meydana gelmiş ve karakteristiği farklı başka bir depremin etkilerinin araştırılması için deprem araştırmaları konusunda, üzerinde en çok çalışılan depremlerden biri olan 1940 El-Centro depremi seçilmiştir.

Şekil 4.43'de sunulan haritada deprem merkezi kırmızı nokta ile işaretlenmiş olup sarı yapı şeklindeki noktada da ölçüm istasyonunun bulunduğu yer işaretlenmiştir.



Şekil 4.43 1940 El-Centro Depremi Merkezi ve Imperial Valley İstasyonu.

Bu senaryo kapsamında EK-A’de ivme-zaman serisi sunulan deprem kayıtlarından Doğu – Batı doğrultusundaki kayıt, Eğirdir Gölü modelinde x doğrultusundaki ivme zaman serisi olarak uygulanmıştır. Depreme ait karakteristik bilgilerin sunumu her bir doğrultu için Çizelge 4.12’de yapılmıştır.

Çizelge 4.12 1940 El-Centro Depremi Imperial Valley İstasyonu kaydı parametreleri

Parameter	El-Centro (Imperial Valley İstasyonu Verisi)		
	Batı/Doğu	Kuzey/Güney	Yukarı/Aşağı
En Büyük İvme (g)	0,211	0,281	0,178
En Büyük Hız (m/sn)	0,313	0,309	0,086
En Büyük Deplasman (m)	0,242	0,086	0,026
V _{max} / A _{max} : (sn)	0,152	0,112	0,049
Hakim Periyot (sn)	0,63	0,58	0,28

4.3.6 Eğirdir Gölü El-Centro Depremi Kuzey-Güney salınım durumunun modellenmesi

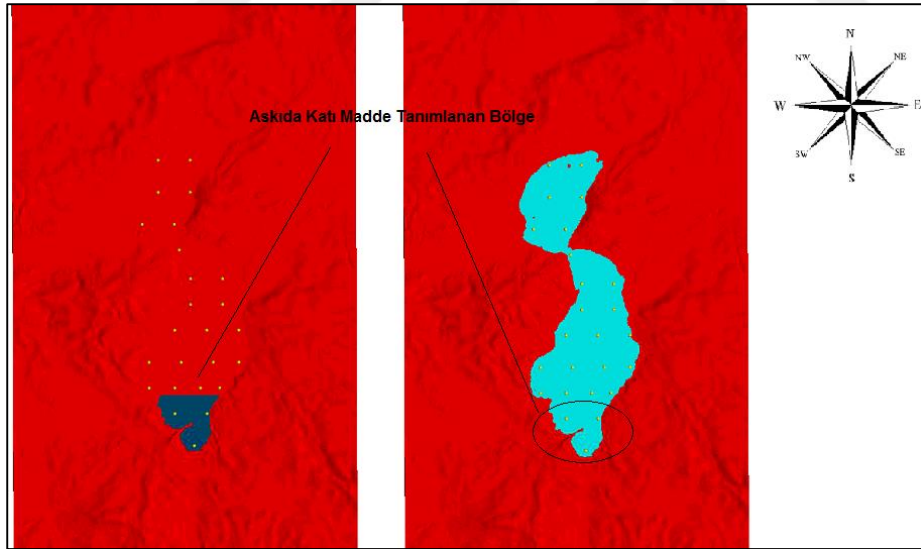
1940 El-Centro depreminin Imperial Valley İstasyonundaki ölçüm verisindeki Kuzey-Güney doğrultu kaydının zaman serisi bu senaryo dahilinde Eğirdir Gölü için y doğrultusundaki ivme zaman serisi olarak tanımlanmıştır.

4.3.7 Eğirdir Gölü El-Centro Depremi üç boyutlu salınım durumunun modellenmesi

4.3.5 ve 4.3.6 bölümlerinde tariflenen senaryolarda sadece tek bir doğrultudaki deprem etkisi modellenmiştir. Bu senaryo kapsamında ise üç eksen de ivme kaydı modelleme sürecine dahil edilmiştir.

4.3.8 Eğirdir Gölü askıda katı madde kirliliği durumu modellenmesi

Askıda katı madde (AKM) konsantrasyonun farklı dağılım gösterdiği kurgusal bir durum bu senaryo kapsamında modellenmiştir. Şekil 4.44'teki görselde işaretlenmiş göl içindeki bölgede kurgusal olarak askıda katı madde konsantrasyonunun yüksek olduğu bir durumda depremin etkisi olmadan doğal çökme sürecinin gerçekleşmesi durumu modellenmiştir. Bu senaryodan elde edilen sonuçlar deprem etkisi altındaki sürecin karşılaştırılması açısından kontrol senaryosu olarak kullanılmıştır. İşaretlenen bölgenin seçilmesindeki temel neden gölün güneyden Kovada Gölü'ne doğru tahliye olmasından kaynaklı olarak göl içinde biriken askıda katı maddenin bu bölgede birikebilme riskinin yüksek olmasıdır.



Şekil 4.44 Eğirdir Gölü içinde askıda katı madde konsantrasyonu tanımlanan bölge.

Askı malzemesi olarak, Çizelge 4.13'de karakteristik özellikleri sunulan inorganik bazlı silt kabulü yapılmıştır.

Çizelge 4.13 Askıda katı madde özellikleri.

Özellik	Kabul Edilen Değer
Karakteristik Çap (d ₅₀) (mm)	0.025
Yoğunluk (kg/m ³)	1800
İçsel Sürtünme Açısı (°)	27

Başlangıç koşulunda askıda katı madde (AKM) konsantrasyonu ise 35 mg/L olarak alınmıştır. 35 mg/L konsantrasyon Eğirdir Gölü için daha önce yapılan araştırma çalışmalarında yıllık bazda ölçülmüş en yüksek AKM konsantrasyonudur (TÜBİTAK, 2011).

4.3.9 Eğirdir Gölü askıda katı madde kirliliği durumunun üç boyutlu Dinar depremi etkisi altında modellenmesi

4.3.8’de tanımlanan bölgedeki askıda katı madde (AKM) bulutunun herhangi bir hidrodinamik etki olmadan çökeltme analizi ilgili senaryo kapsamında yapılmıştır. Bu senaryo kapsamında ise yine aynı bölgede ve aynı karakterdeki AKM bulutunun 1995 Dinar depreminin Burdur istasyonunda ölçülen ivme kayıtlarının sebep olduğu hidrodinamik etkiler altındaki çökeltme eylemi araştırılmıştır.

4.3.10 Eğirdir Gölü taban malzemesinin üç boyutlu Dinar depremi etkisi altında askıya kalkma durumunun modellenmesi

Eğirdir Gölü tabanı önceki senaryolarda geçirimsiz katı sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Bu senaryoda ise tabanda sınır koşulu hidrodinamik etkiler altında hareket edilebilmeye uygun olarak tanımlanmıştır. Uygun taban kayma gerilmesi ve kritik Shields parametresinin aşılması durumunda askıya kalkabilecek şekilde taban malzemesi seçilmiştir. Bu senaryo kapsamında gölün tüm taban yüzeyi aşağıdaki Çizelge 4.14’te özellikleri verilen iki farklı malzemenin hacimsel olarak %10 silt ve % 90 kum olacak şekilde kabul edilerek modele tanımlanmıştır. Taban taşınım modeli olarak en yaygın olarak kullanılan Meyer-Peter Müller metodu seçilmiştir.

Çizelge 4.14 Taban malzemesi özellikleri.

Özellik	Kabul Edilen Değer	
	Silt (%10)	Kum (%90)
Karakteristik Çap (d ₅₀) (mm)	0,025	0,1
Yoğunluk (kg/m ³)	1800	2400
İçsel Sürtünme Açısı (°)	27	32

Deprem kaydı olarak EK-A’da sunulan 1995 Dinar depremi Burdur İstasyonu kaydının üç doğrultu için modelde göle etkilmiştir. Dolayısıyla bu senaryo çalışması üç boyutlu ivme etkisi altında gerçekleştirilmiştir.

4.3.11 Eğirdir Gölü için modelleme sonuçlarının değerlendirilmesi

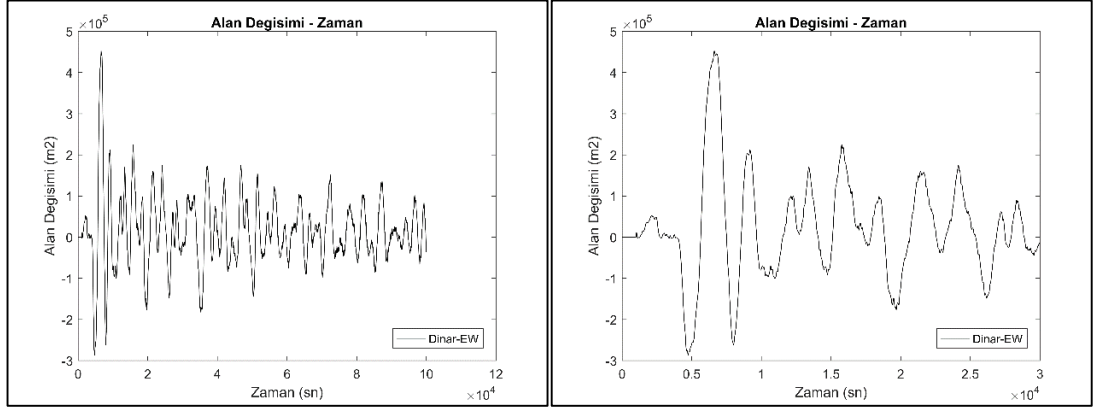
Eğirdir Gölü’nün farklı deprem ve farklı ortam koşullarındaki davranışları araştırılıp karşılaştırılması amacıyla 9 farklı senaryo kurgulanmış ve analiz edilmiştir. Senaryolarla ilgili özet Çizelge 4.15’te verilmiştir. Çizelgede (X) işareti modele dahil edilmeyen, (√) işareti ise modele dahil edilen durumu ifade etmektedir. Örneğin Eğirdir Gölü senaryo çalışmalarında 1 numaralı senaryo kapsamında deprem etkisi ihmal edilmiş olup sadece Şekil 4.44’de belirtilen bölgede askıda katı malzeme olduğu kabul edilerek hesaplama yapılmıştır.

Çizelge 4.15 Eğirdir Gölü için senaryo çalışmaları.

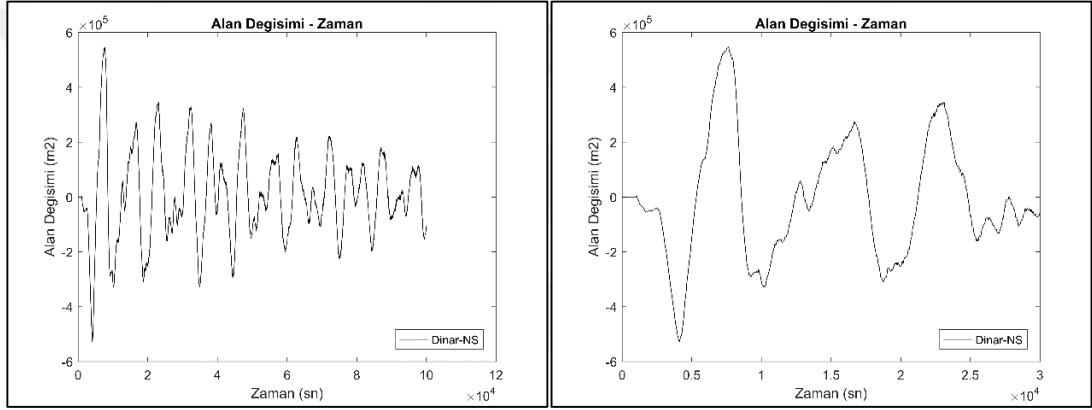
Senaryo No	Kullanılan Deprem İvme Kaydı	Taban Sedimenti	Askıda Katı Madde
1	Sadece Yer Çekimi İvmesi	X	√
2	Dinar 1995 DB Doğrultusu	X	X
3	Dinar 1995 KG Doğrultusu	X	X
4	Dinar 1995 Üç Boyutlu	X	X
5	El-Centro 1940 DB Doğrultusu	X	X
6	El-Centro 1940 KG Doğrultusu	X	X
7	El-Centro 1940 Üç Boyutlu	X	X
8	Dinar 1995 Üç Boyutlu	X	√
9	Dinar 1995 Üç Boyutlu	√	X

Eğirdir Gölü için 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryolara ait hesaplamalar sonucunda elde edilen yüzey alan değişim grafikleri Şekil 4.45 - Şekil 4.50 arasındaki şekillerde paylaşılmıştır. Diğer senaryolardan 1 numaralı senaryoda herhangi bir değişim hesaplanmamış olup 8 ve 9 numaralı senaryolarda da yüzey alan değişimi 4 numaralı senaryo ile aynı olması sebebiyle sunulmamıştır. Şekil 4.45 - Şekil 4.50 arasındaki şekillerde önce ilgili senaryonun tüm çözüm süresi boyunca hesaplanan alan değişim

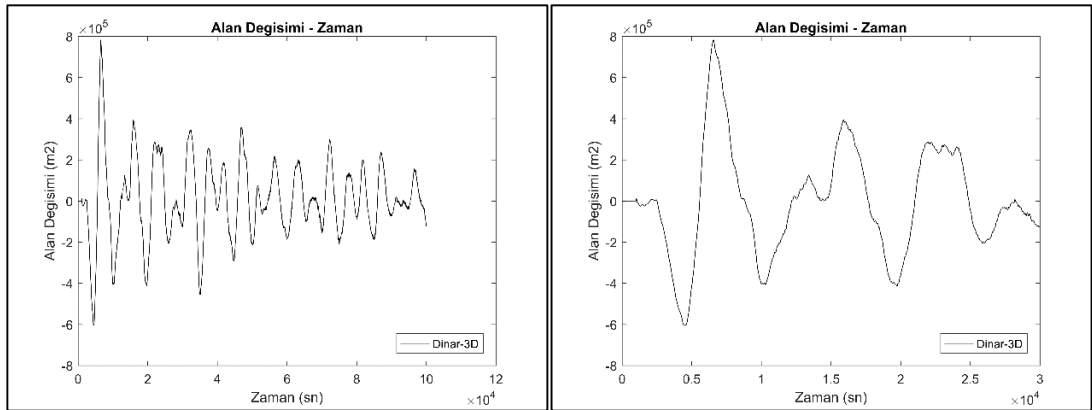
değeri sunulmakta olup deprem etkisinin daha iyi görülebilmesi amacıyla ayrıca ilk 30000 saniyelik kısımda gösterilmiştir.



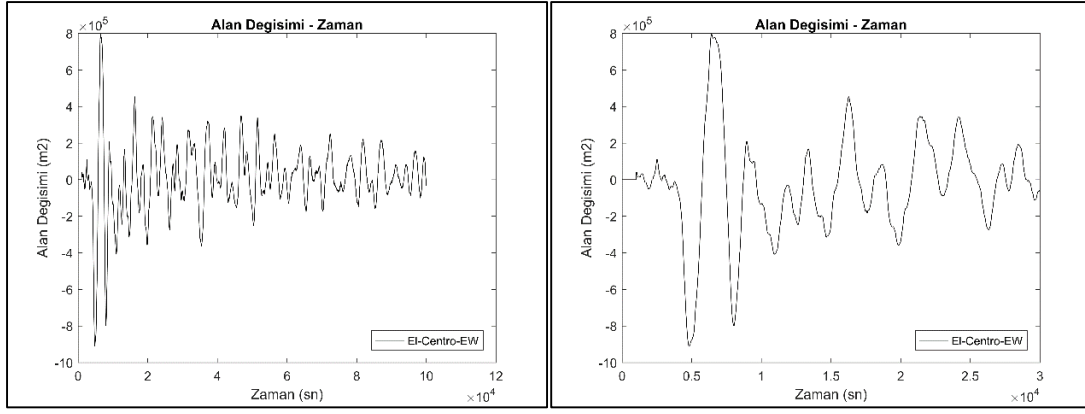
Şekil 4.45 Senaryo 2 – Dinar - DB doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.



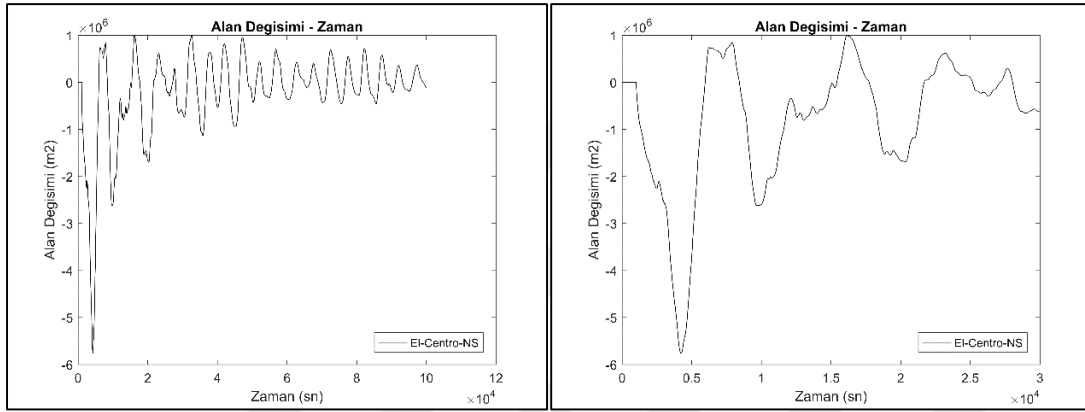
Şekil 4.46 Senaryo 3 – Dinar – KG doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.



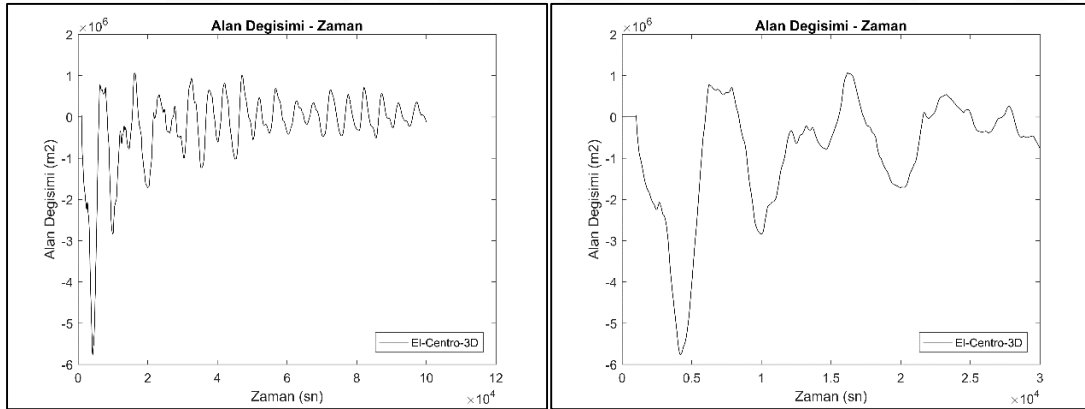
Şekil 4.47 Senaryo 4 – Dinar üç boyutlu model göl yüzey alanı değişimi.



Şekil 4.48 Senaryo 5 – El-Centro – DB doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.



Şekil 4.49 Senaryo 6 – El-Centro – KG doğrultusu göl yüzey alanı değişimi.



Şekil 4.50 Senaryo 7 – El-Centro üç boyutlu model göl yüzey alanı değişimi.

Yüzey alan değişimi zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu zamanla değişimin hakim periyodu değişimin zaman içinde baskın olan değeridir. Zaman serilerinin MATLAB yardımıyla hızlı fourier dönüşümü metodu (FFT) kullanılarak hakim periyodu hesaplanmış ve Çizelge 4.16’da sunulmuştur.

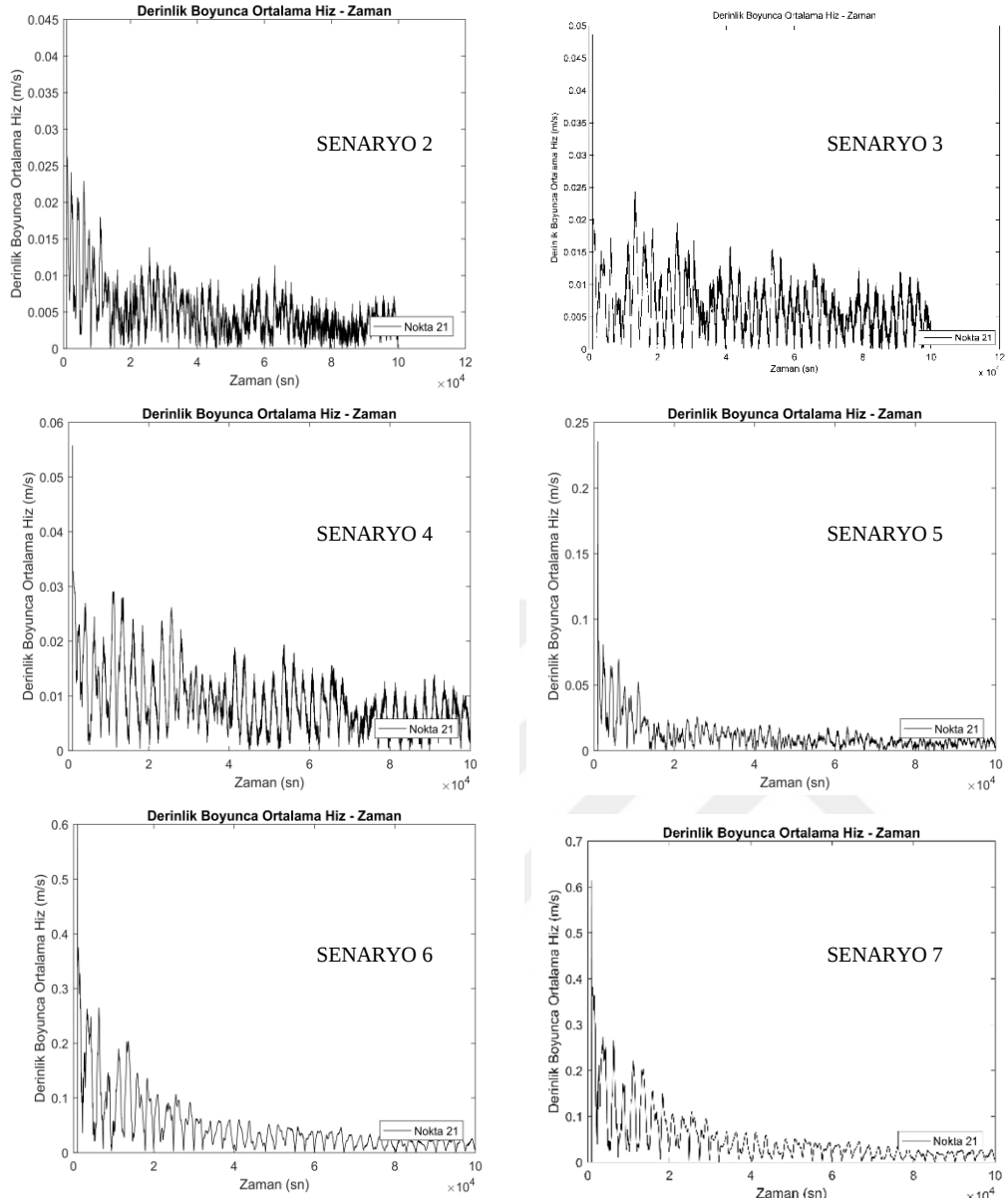
Çizelge 4.16 Eğirdir Gölü için hesaplanan yüzey alan değişim serilerinin hakim periyodları.

Senaryo	Hakim Periyod (sn)
Senaryo 2 – Dinar – DB Doğrultusu	3000
Senaryo 3 – Dinar – KG Doğrultusu	8250
Senaryo 4 – Dinar Üç Boyutlu	8250
Senaryo 5 – El-Centro – DB Doğrultusu	3000
Senaryo 6 – El-Centro – KG Doğrultusu	8250
Senaryo 7 – El-Centro Üç Boyutlu	8250

Modelleme sonucundaki yüzey alan değişiminden hesaplanan hakim periyod değeriyle analitik hesapla bulunan doğal periyod değerlerinin birbirine yakın olduğu ancak modelleme sonucundaki hesaplanan değerlerin gölün morfolojik etkisinin de katkısı ile birlikte doğal periyoddan daha küçük olduğu görülmüştür. Deprem hakim doğrultusunun üç boyutlu deprem etkisi sonucunda da hakim olduğu görülmektedir.

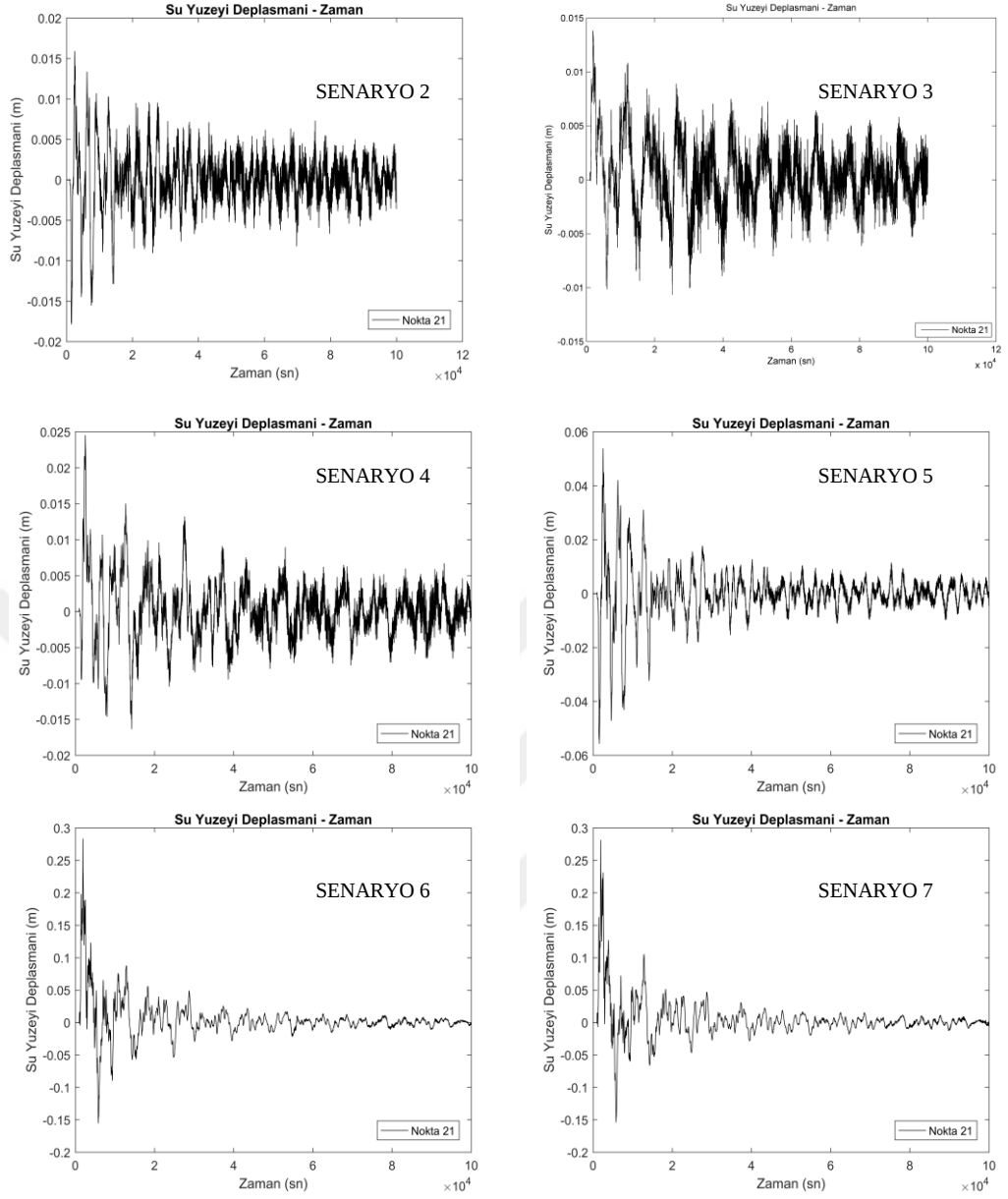
Yüzey alan değişimi haricinde EK-B’de sunulan izleme noktalarında Eğirdir Gölü için tüm senaryolarda izlenen parametreler ve parametrelere göre hazırlanan grafiklerin isimlendirmesine ait açıklamalar ve bir örnek grafik aşağıda sunulmuştur. Örnek grafiklerin gösteriminde senaryo 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 sonuçları için gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktasına ait grafikler sunulmuştur. Bu noktanın örnek nokta olarak seçilme nedeni gölün merkezine yakın bir konumda bulunması dolayısıyla göl tabanı etkisinin en düşük değerde olmasıdır.

Şekil 4.51’de Eğirdir Gölü için çalışılmış 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 sonuçları için gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktasına ait derinlik boyunca ortalama hızın zamanla değişimi grafiği sunulmuştur. Tüm model süresince hesaplanan en yüksek derinlik boyunca ortalama hızlardan en yüksek değer 0,62 m/s ile senaryo 7’de en düşük ise senaryo 2’de 0,045 m/s olarak hesaplanmıştır.



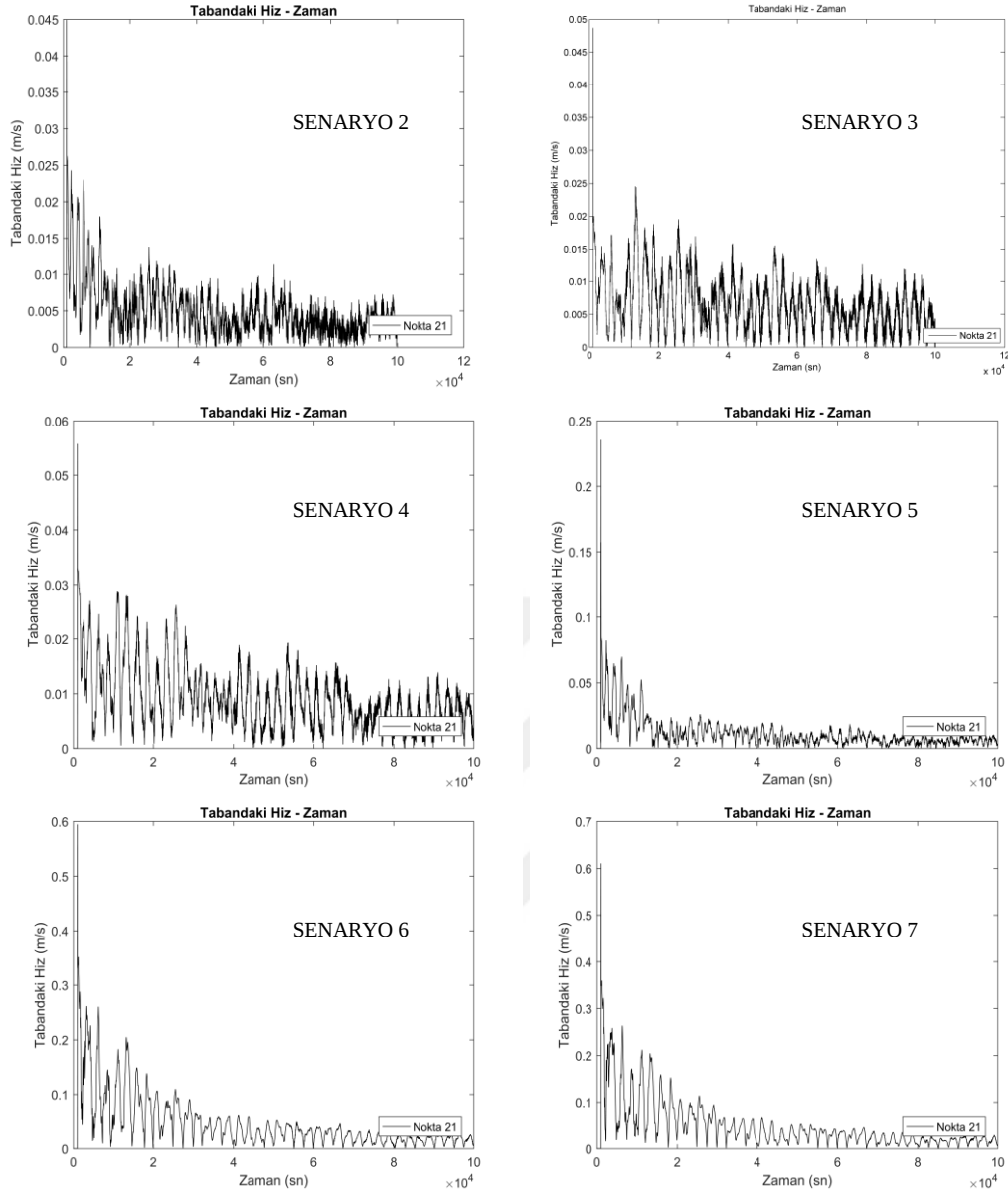
Şekil 4.51 Derinlik boyunca ortalama hız: (DBOH)

Su yüzeyi değişimi değerleri her senaryoda tüm izleme noktalarında hesaplanmıştır. Şekil 4.52’de 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 sonuçları için gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktasına ait su yüzeyi deplasmanının zamanla değişimi grafiği sunulmuştur. Senaryo 4’te su yüzeyi değişimi 0,025 m ile -0,015 m arasında değişmektedir. Senaryo 7’de ise senaryo 4 değerlerinin 10 katı daha fazla su yüzeyi deplasmanı meydana gelmektedir. Senaryo 7’de su yüzeyi 0,28 m ile -0,15 m arasında salınmaktadır. Diğer senaryolarda bu değerler daha düşüktür. Üç boyutlu deprem senaryoları olan 4 ve 7 numaralı senaryolardaki hesaplanan değerler ilgili oldukları deprem için tek doğrultuya ait senaryolarda da yine aynı mertebelerde olup değerler uyumlu ve tutarlıdır.



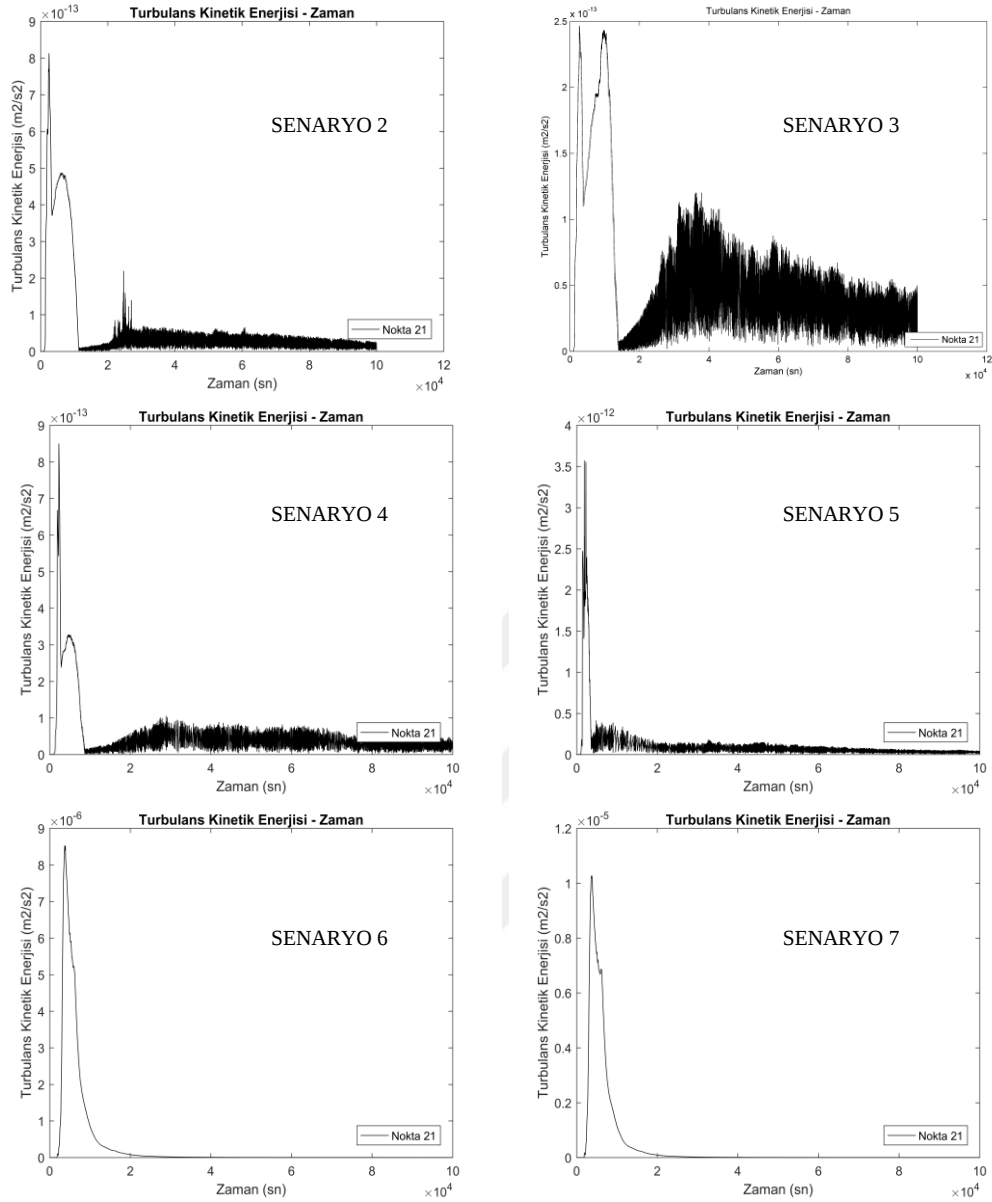
Şekil 4.52 Su yüzeyi değişimi: (SYD).

Şekil 4.53’de tabandaki ilk elemandaki hız değerinin zamanla değişimi grafikleri 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryo sonuçları gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktası için sunulmuştur. tüm senaryolarda görülen en yüksek tabandaki hız değeri 0,6 m/s ile senaryo 7’dir.



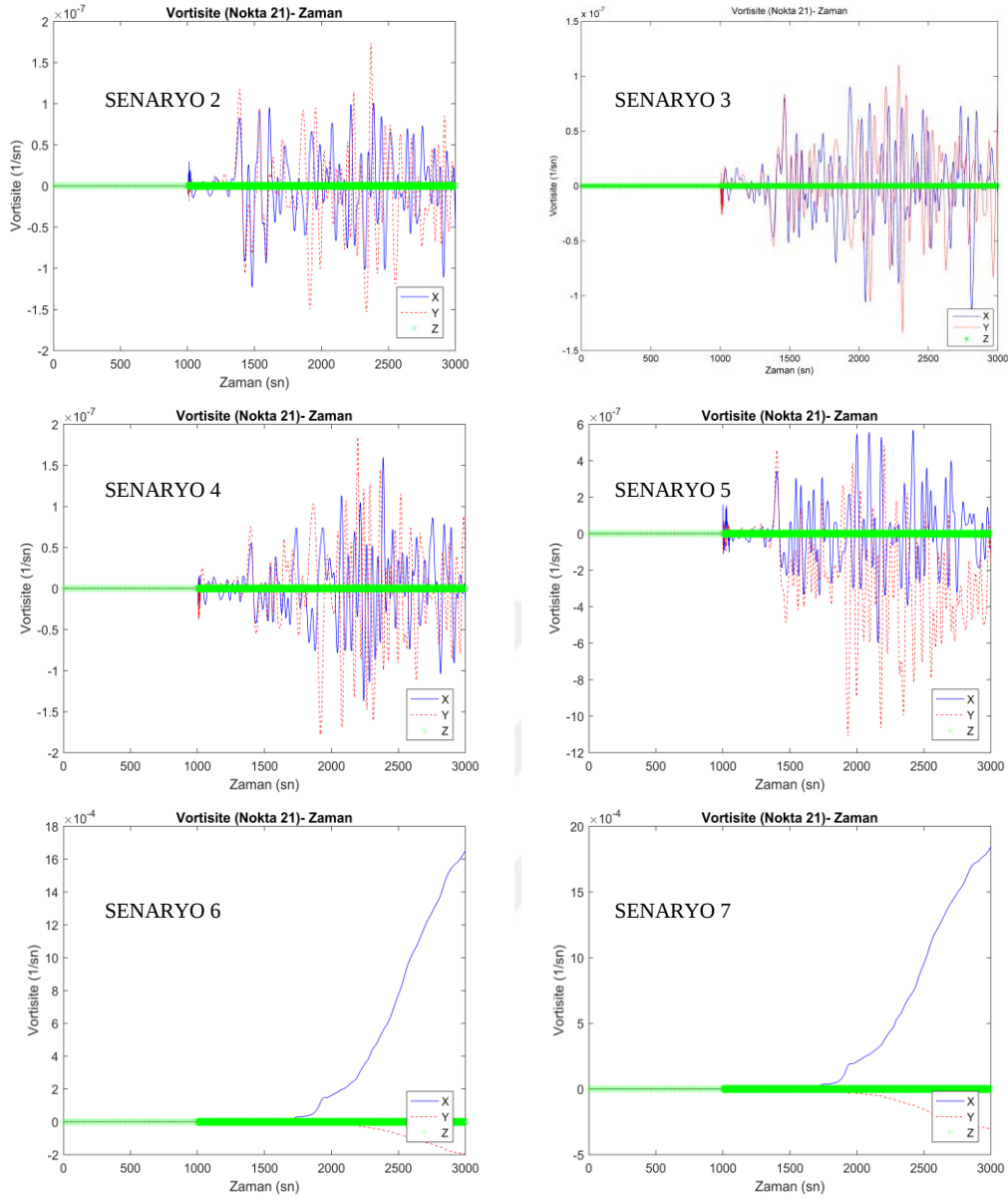
Şekil 4.53 Tabandaki Hız: (TH).

Şekil 4.54'te 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryolar için gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktasındaki türbülans kinetik enerjisinin zamana bağlı değişimi grafikleri sunulmuştur. 6 ve 7 numaralı senaryo sonuçlarında diğer sonuçlardan tamamen farklı olarak ve diğerlerinin değerlerinden çok yüksek değerde türbülans kinetik enerjisi hesaplanmıştır. En fazla türbülans kinetik enerjisi, gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktası için senaryo 7'de hesaplanmıştır.

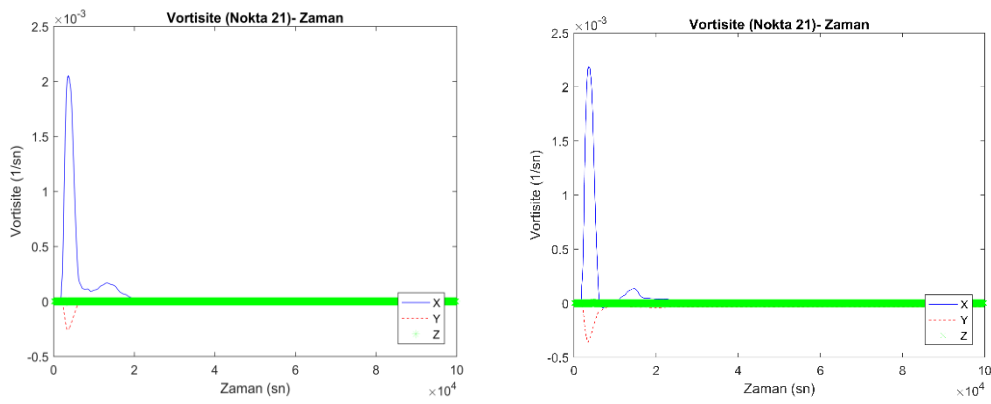


Şekil 4.54 Türbülans Kinetik Enerjisi: (TKE).

Şekil 4.55’de 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryolar için gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktasındaki çevrinti (vortisite) değerinin zamana bağlı değişimi grafikleri sunulmuştur. Depremle birlikte vortisite değerindeki değişimin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla ilk 3000 saniyelik kısım grafik haline getirilmiştir. Ancak senaryo 6 ve 7 için grafikteki eğrilerin devamındaki eğilimin görülmesi için Şekil 4.56’da ilaveten uzun zaman serisi olarak sunulmuştur. Grafiklerdeki mavi çizgi X doğrultusundaki, kırmızı çizgi Y doğrultusundaki ve yeşil çizgi ise Z doğrultusundaki vortisiteyi ifade etmektedir. Eğirdir Gölü modellerinde X doğrultusu Doğu – Batı yönünü, Y doğrultusu Kuzey – Güney yönünü ve Z doğrultusu ise düşey (yukarı – aşağı) doğrultusudur.



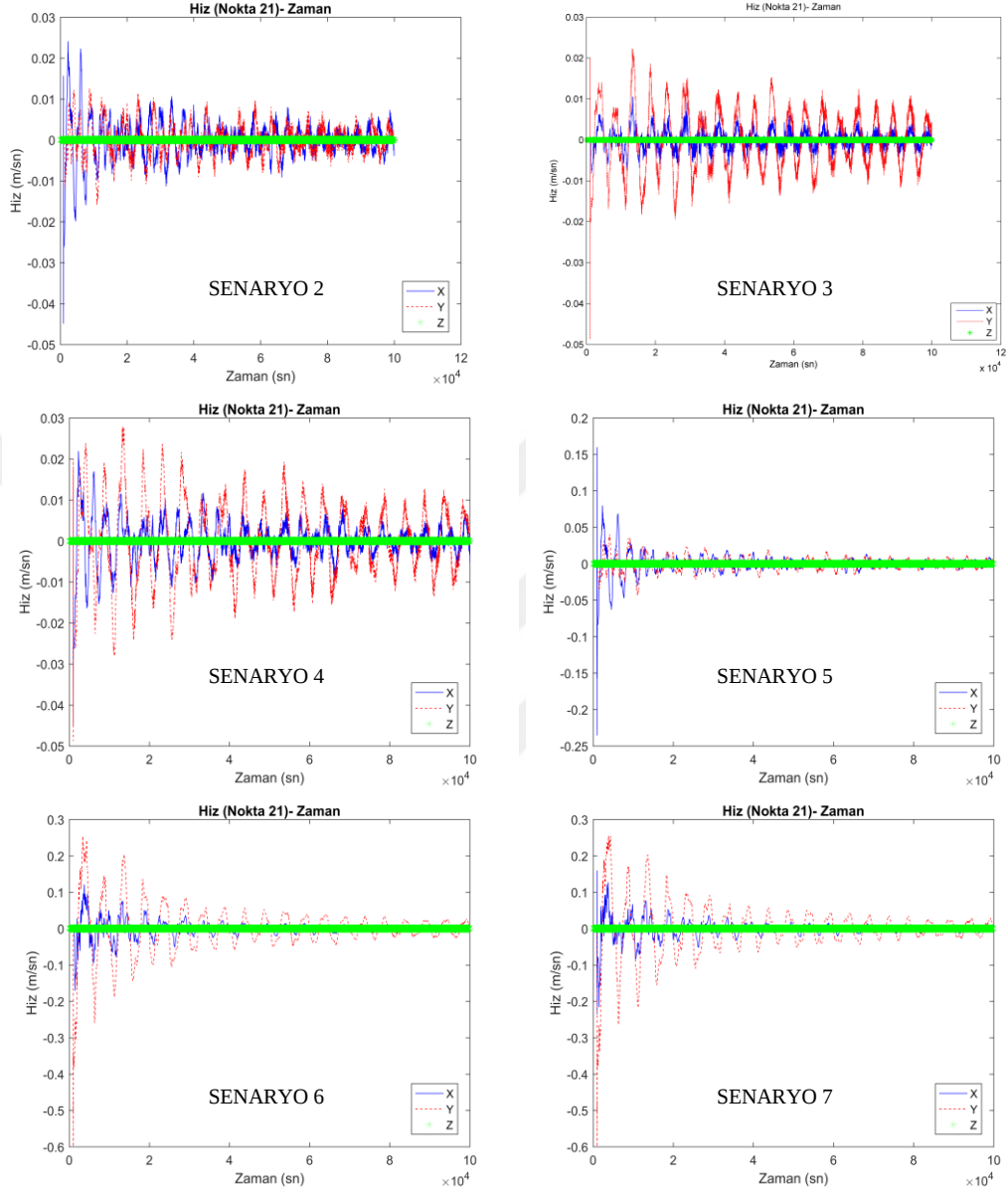
Şekil 4.55 Vortisite: (VORT).



Şekil 4.56 Senaryo 6 ve 7 için vortisite – zaman grafiği.

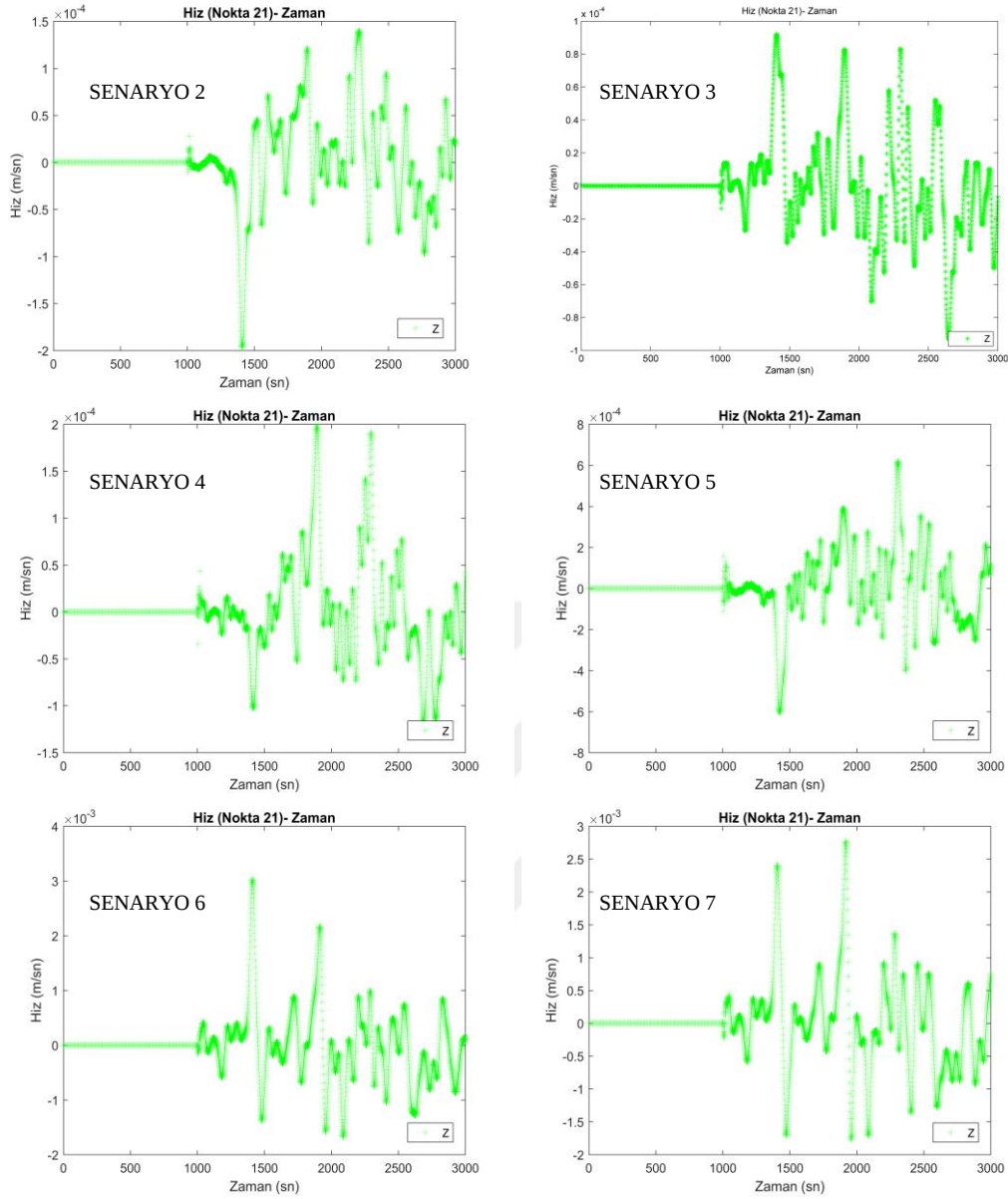
2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryolar için gölün güney çanağındaki orta noktasına denk gelen 21 numaralı izleme noktasındaki hız değerinin zamana göre değişimi grafikleri

her senaryo için Şekil 4.57’de sunulmuştur. Grafiklerdeki mavi çizgi X doğrultusundaki, kırmızı çizgi Y doğrultusundaki ve yeşil çizgi ise Z doğrultusundaki hızı ifade etmektedir.



Şekil 4.57 Hız: (VT).

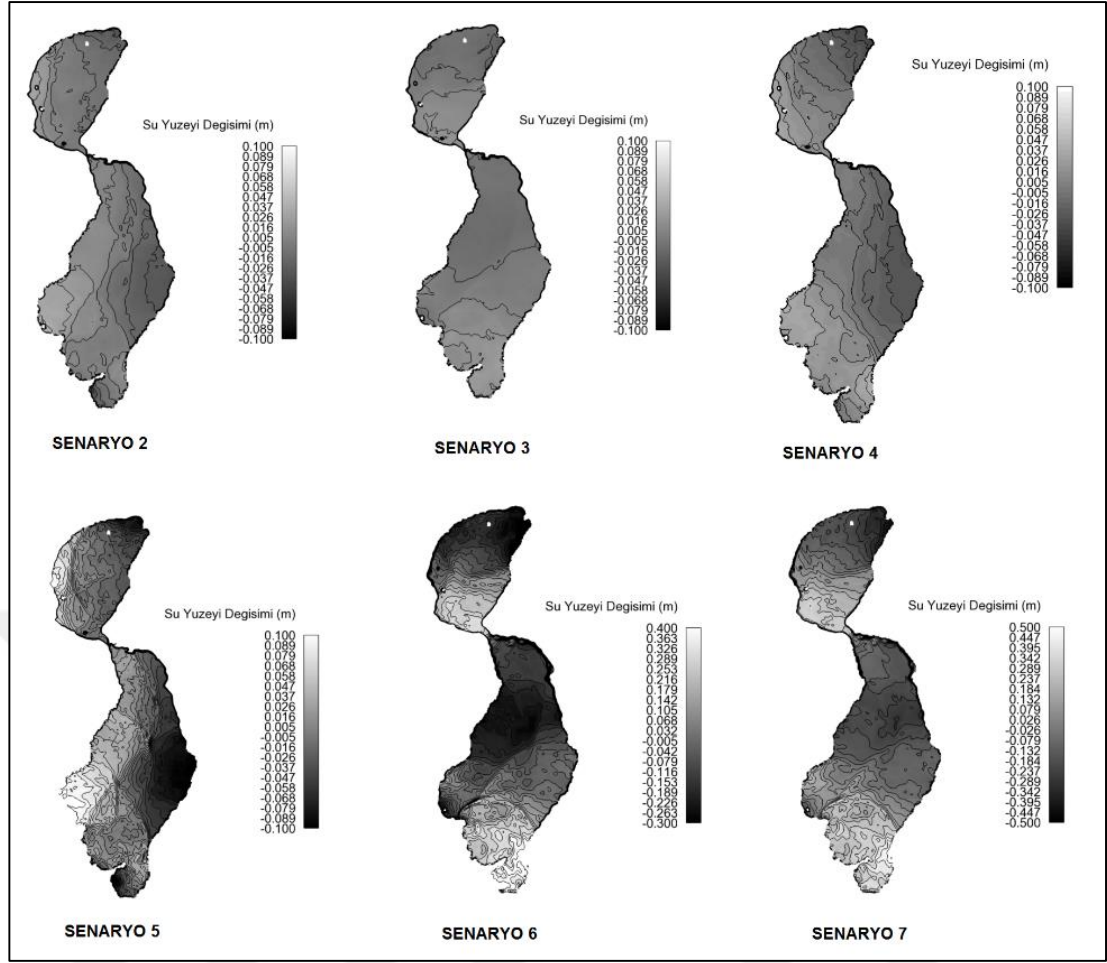
Z doğrultusundaki yani düşeyde hesaplanan hız değeri X ve Y doğrultusunun yanında 0 m/s değerine yakın bir değerdedir. Ancak düşey hız bileşeni 0 m/s değil 0 m/s’ye ye yakın bir değerdedir. Daha net görülmesi için sadece Z doğrultusundaki hızın ilk 3000 saniyelik çözüm süresi sonuna kadar hesaplanan değerlerin zamana bağlı grafiği Şekil 4.58’de sunulmuştur. değerlerin küçük ancak 0 m/s’den farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.58 Z doğrultusundaki hız: (VZ).

Dinar ve El-Centro depremleri içinde hakim salınım doğrultusunun Kuzey-Güney doğrultusu olduğu ve bu hakim salınım doğrultusunun üç boyutlu deprem ivmesi etkisinde de baskın bir rol oynadığı Şekil 4.52'deki grafiklerde de Kuzey-Güney doğrultusu ile üç boyutlu etki durumlarının çok yakın olduğu görülmektedir. Senaryo 6 sonucunun Senaryo 7 grafiğinin uyumu Senaryo 5'ten daha yüksektir.

Göl yüzeyi esas alınarak plan görünümlü şekilde farklı zamanlar değerleri için su yüzeyi değişiminin konturleri hazırlanarak EK-C olarak tezin ekindeki compact diskte sunulmuştur. Her bir senaryo için ayrı ayrı hazırlanmış göl su yüzeyi kotunun değişimini ifade eden su yüzeyi değişim kontörlerine örnek olarak Şekil 4.59'da 2000. saniye için sunulmuştur.



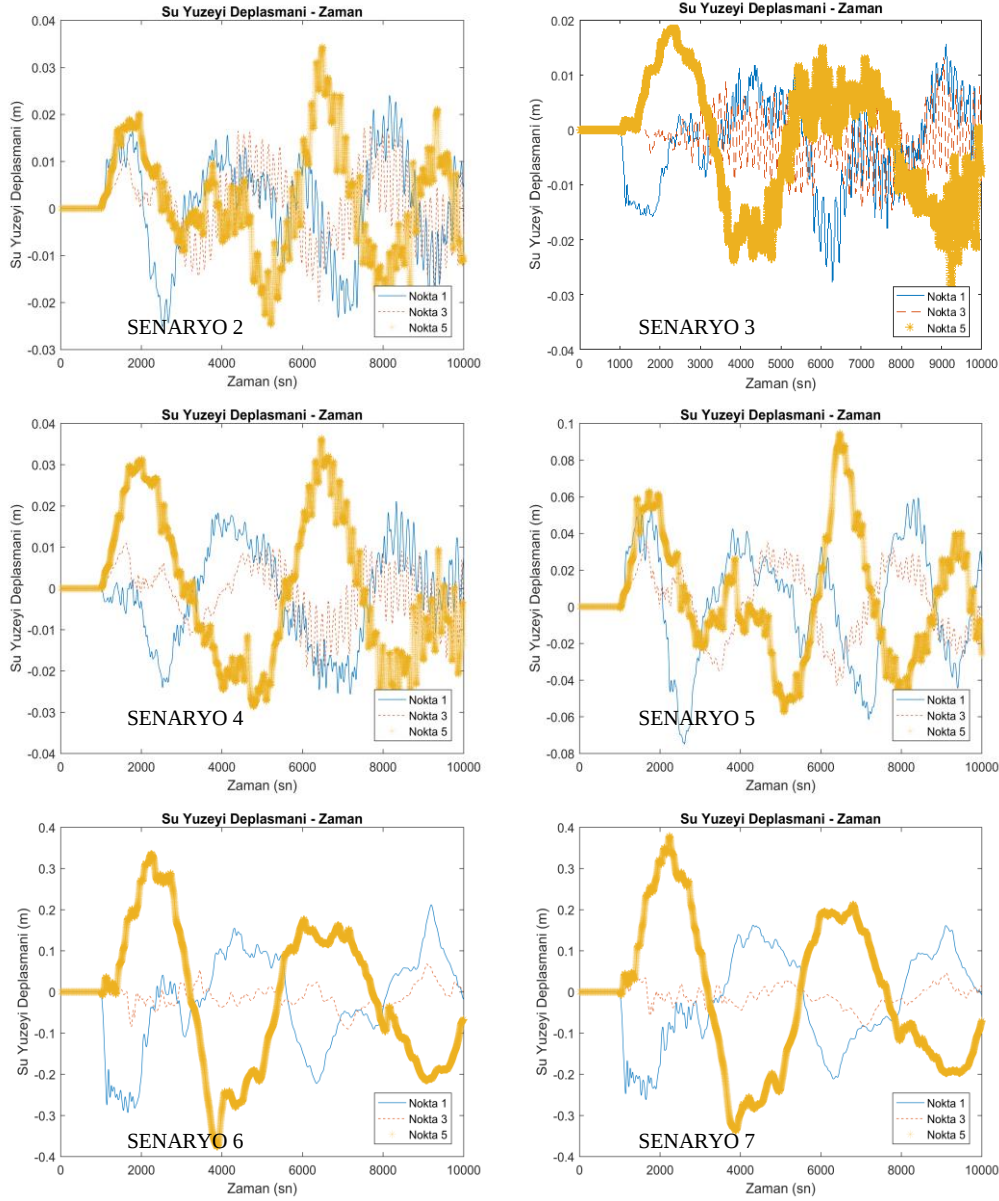
Şekil 4.59 Su yüzeyi değişimi kontörlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.59’da görüldüğü üzere El-Centro depremi Dinar depreminden daha fazla salınım ve daha yüksek sayhe oluşumuna neden olmuştur. Bunun başlıca nedeni iki depremin pik ivmeleri arasında 10 kata yakın bir şiddet farkı bulunmasıdır. Ve ayrıca daha önce ifade edilen hakim salınım doğrultularının üç boyutlu etkileri de Şekil 4.59’nın üzerinde de görülmektedir.

Hesaplamalarda doğrultuya bağlı olarak meydana gelen etkinin daha iyi incelenebilmesi için X doğrultusunda (D – B) ve Y doğrultusunda (K – G) eksenler belirlenip eksen boyunca tüm noktaların birlikte su yüzeyi deplasmanının zamana bağlı değişim grafikleri oluşturulmuştur.

Örneğin izleme noktalarından 1, 3 ve 5 numaralı noktaların birlikte su yüzeyi deplasmanının zamana bağlı değişim grafiği deprem etkisinin Y doğrultusundaki etkisini göstermek için Şekil 4.60’da sunulmuştur. Grafiklerde mavi çizgi 1 numaralı izleme noktasını, kırmızı çizgi 3 numaralı izleme noktasını ve sarı çizgi ise 5 numaralı izleme noktasını temsil etmektedir. K – G doğrultusunun hakim olduğu senaryolarda

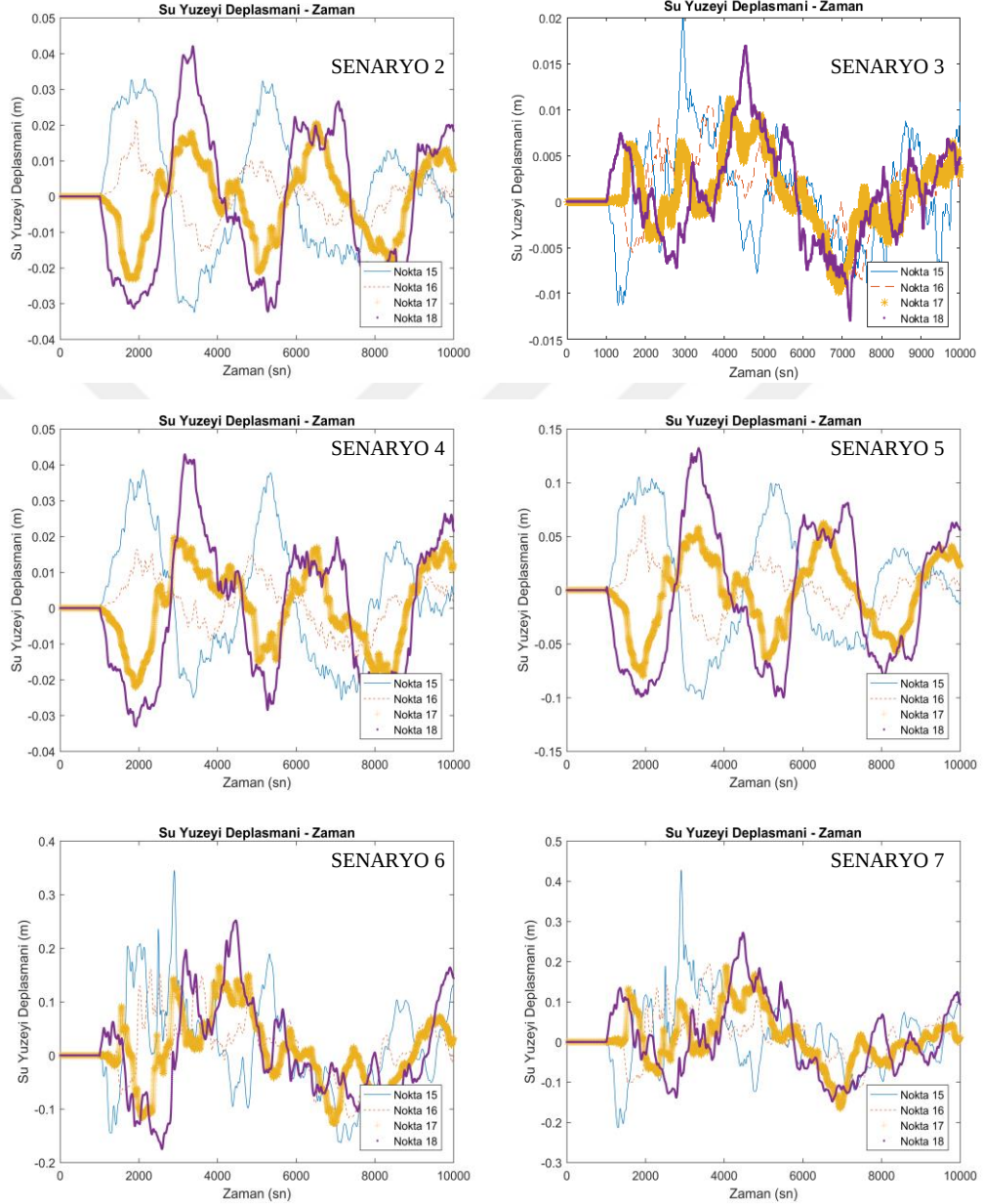
(3, 4, 6 ve 7) noktalar arasındaki su yüzeyi değişiminde faz farkı mevcuttur ancak D – B doğrultusunun tek olduğu senaryolarda (2 ve 5) ise faz farkı mevcut değildir.



Şekil 4.60 1-3-5 numaralı izleme noktalarında su yüzeyi değişimi – zaman grafiği

EK-D’de 1-3-5 numaralı izleme noktalarının karşılaştırma grafiğine ek olarak hem K- G doğrultusunu temsil eden hem de D – B doğrultusunu temsil eden grafikler mevcuttur. K – G doğrultusuna örnek olarak 1-3-5 numaralı izleme noktalarının karşılaştırma grafiği sunulmuştur. Ayrıca 1-3-5 numaralı noktalardan oluşturulan izleme kesiti gölün kuzey çanağındaki durumla güney çanağındaki durumun karşılaştırması için de önemlidir. D – B doğrultusu içinde örnek olarak 15-16-17-18 numaralı izleme noktalarına ait su yüzeyi değişiminin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 4.61’de sunulmaktadır. Bu grafiklerde de D - B doğrultusunun hakim doğrultu

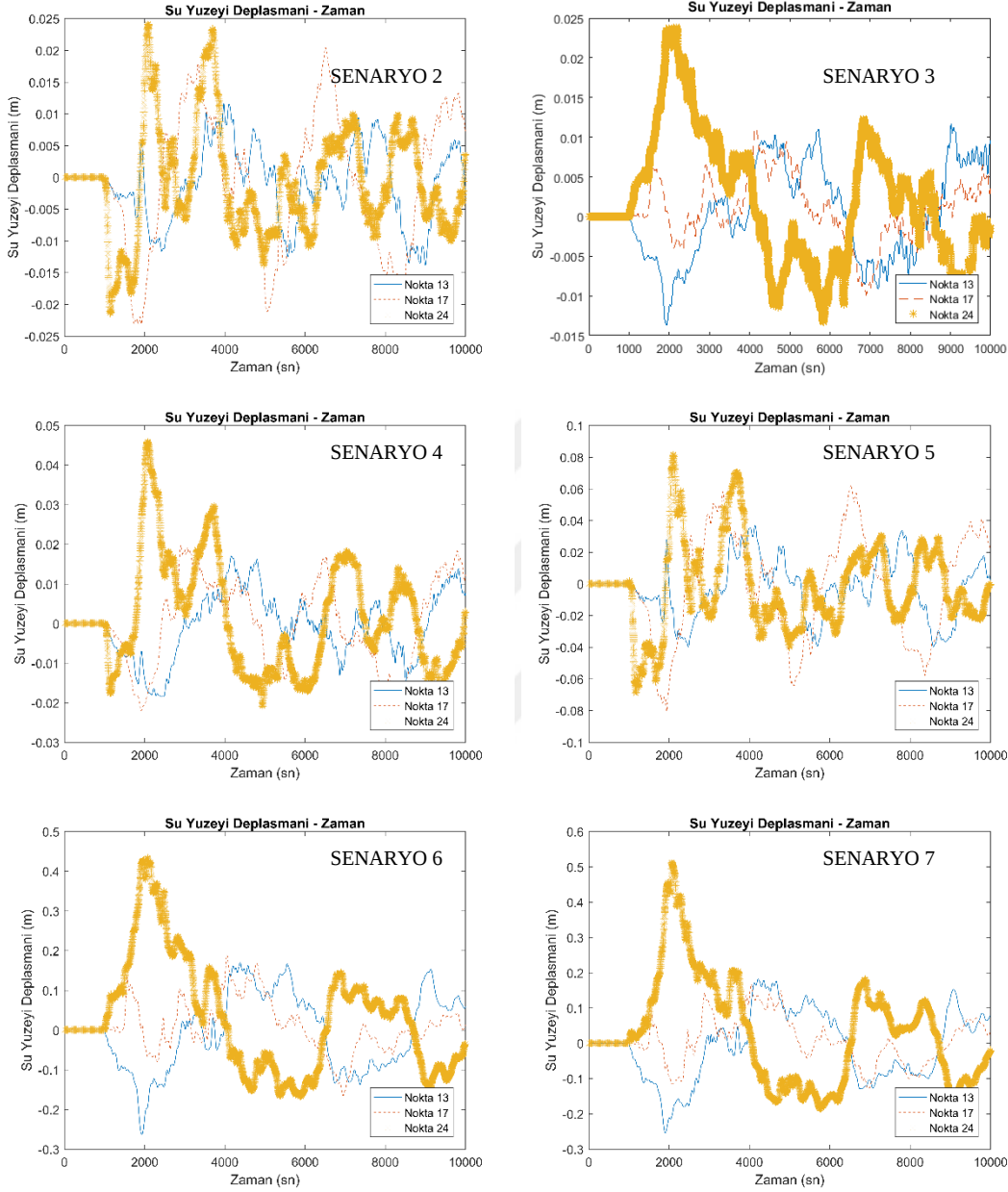
olduğu ki bu sadece D – B doğrultusundaki deprem ivmesinin yalın etkitildiği senaryolar olan 2 ve 5 numaralı senaryolarda faz farkı beklenirken 4 numaralı senaryoda da faz farkının mevcut olması depremin doğrultusunun hakim olamayacak kadar düşük şiddette bir etkiye neden olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.61 15-16-17-18 numaralı izleme noktalarında su yüzeyi değişimi – zaman grafiği

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12 karşılaştırma incelendiği takdirde Dinar depreminde K - G ve D - B doğrultularındaki pik ivme değerinin birbirine yakın olduğu ancak El-Centro depreminde ise pik ivme değerinde K – G doğrultusu için önemli bir baskınlık söz konusudur.

Şekil 4.62’de gölün güney çanağını K – G hattında temsil edecek 13, 17 ve 24 numaralı noktaların karşılaştırmalı grafikleri senaryo 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryolar için sunulmuştur.

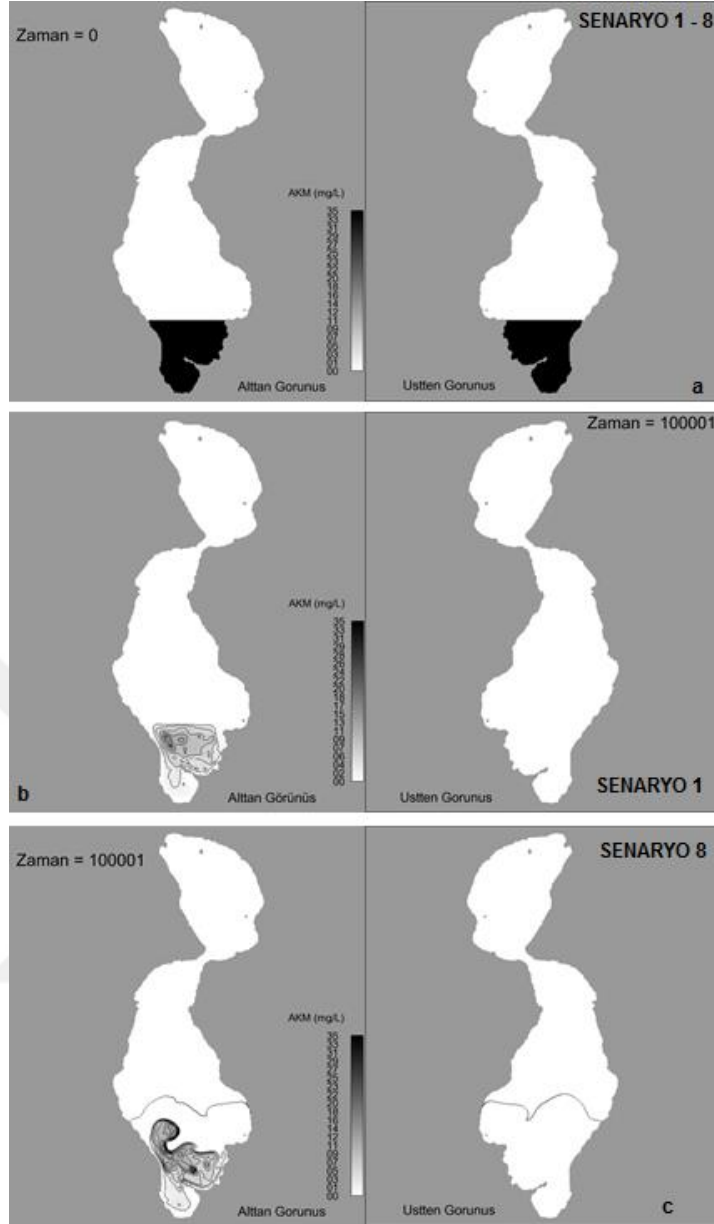


Şekil 4.62 13 – 17 – 24 numaralı izleme noktalarında su yüzeyi değişimi – zaman grafiği

Senaryo sonuçları karşılaştırıldığında su yüzeyi değişiminin periyodu veya sayhelerin periyodu Eğirdir Gölü’nün güney çanağında, kuzey çanağına oranla daha daha yüksek hesaplanmıştır. Kuzey çanağı için periyod 4000 saniye iken güney çanağında periyod 6000 saniyedir.

Askıda katı maddenin çökme süreci ve taban malzemesinin askıya kalkma ve taşınma süreçlerinin incelendiği Senaryolar 8 ve 9 numaralı senaryolardır. Bu senaryoların karşılaştırma senaryosu olarak kullanılan senaryo ise 1 numaralı

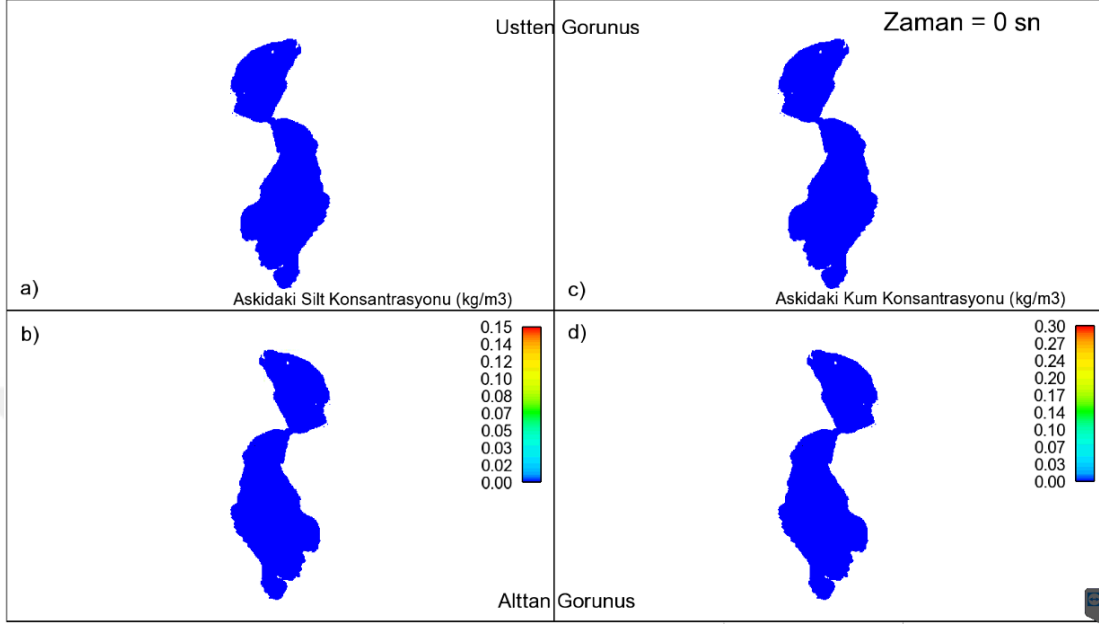
senaryodur. Senaryo 1’de göl sadece yer çekimi ivmesinin etkisi altında sakin durumda bırakılmıştır. Bu durumda senaryo 8’de detaylı tarifi yapılan şekilde AKM tanımlanmış olup bu AKM çökme sürecinin ve dolayısıyla azalma sürecinin izlenmesi yapılmıştır. Senaryo 8 kapsamında ise gölde Dinar depreminin etkisiyle AKM konsantrasyon dağılımındaki değişim hesaplanmıştır. Senaryo 1 ve 8 için hesaplanan duruma ait görseller Şekil 4.63’de sunulmuştur. Şekildeki a kısmında senaryo 1 ve 8 için başlangıç durumunda AKM işaretli alan siyah olarak görselleştirilmiştir. Şeklin b görselinde senaryo 1 uygulaması sonucunda AKM çökmesine ait kontur görseli hazırlanmıştır. Şeklin sol tarafında alttan görünüş sağ tarafında ise üstten görünüş mevcuttur. Çökme tamamlandığı için sadece AKM konsantrasyonuna ait görüntü sol taraftaki görselde mevcuttur. Yine aynı şeklin (Şekil 4.63) c kısmında ise senaryo 8 sonucunda hesaplanan AKM dağılımı görülmektedir. Şeklin sol atarındaki alttan görünüş kısmında gösterildiği üzere, AKM deprem etkisi altında Kuzey doğrultusunda hareket ederek çökmüştür. Bu sonuç deprem salınıminin kapalı bir su kütlesi içinde bulunan AKM çökme sürecine etkili olduğunu göstermektedir.



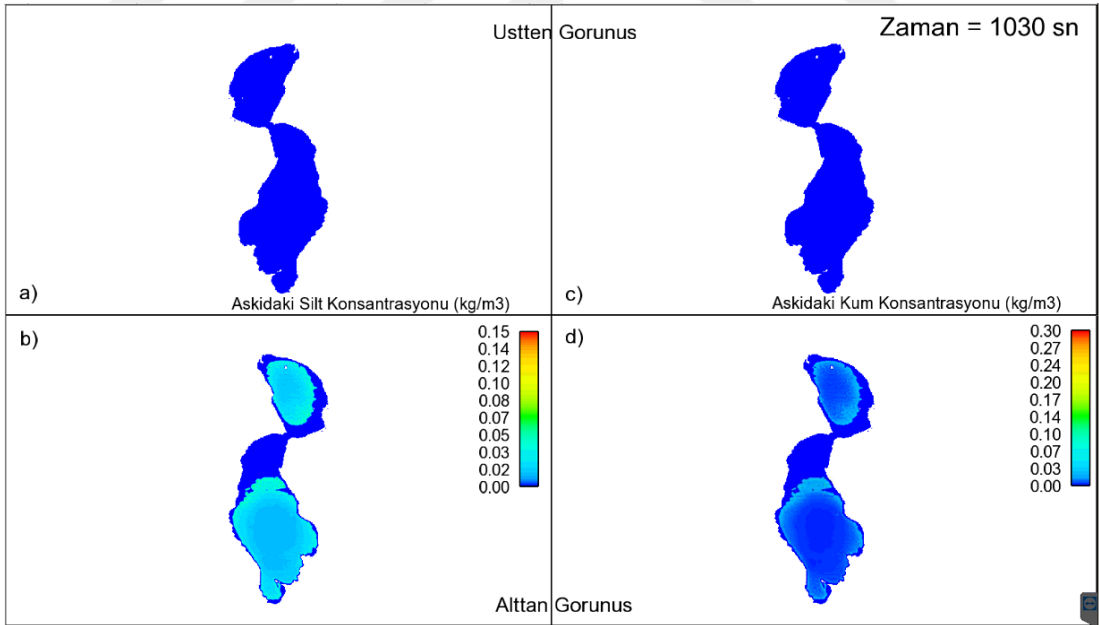
Şekil 4.63 AKM konsantrasyonunun değişim konturleri.

Eğirdir Gölü için çalışılan 9 numaralı senaryoda Bölüm 4.3.10’de belirtilen kabuller göre taban malzemesi dağılımı tanımlanmıştır. Şekil 4.64 - Şekil 4.70 arasında senaryo 9’da hesaplanan askıdaki kum ve silt konsantrasyonlarının zamana bağlı dağılım konturleri sunulmuştur. Görsellerde a ve b şekilleri askıdaki silt konsantrasyonu, c ve d şekillerinde ise kum konsantrasyonu dağılımını ifade etmektedir. Tabandaki ve yüzeydeki dağılım daha net görülebilmesi açısından a ve c şekilleri üstten görünüş, b ve d şekilleri ise alttan görünüş olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.64’te başlangıç durumu sunulmuştur. Askıda kum veya silt malzeme bulunmamaktadır. Tüm silt ve kum karışımı tabandadır. Şekil 4.65’te deprem başladıktan sonraki 30 uncu saniyeye ait konsantrasyon dağılım konturleri sunulmuştur. deprem kaydı 25 saniyelik olması

sebebiyle 30 uncu saniye deprem sonrasındaki 5. saniyeye denk gelmektedir. Deprem etkisi sonrasında meydana gelen kum ve silt malzemesinin askıdaki konsantrasyon dağılımları Şekil 4.65'te görülmektedir. Askıdaki kum konsantrasyonu, silt konsantrasyonundan azdır.



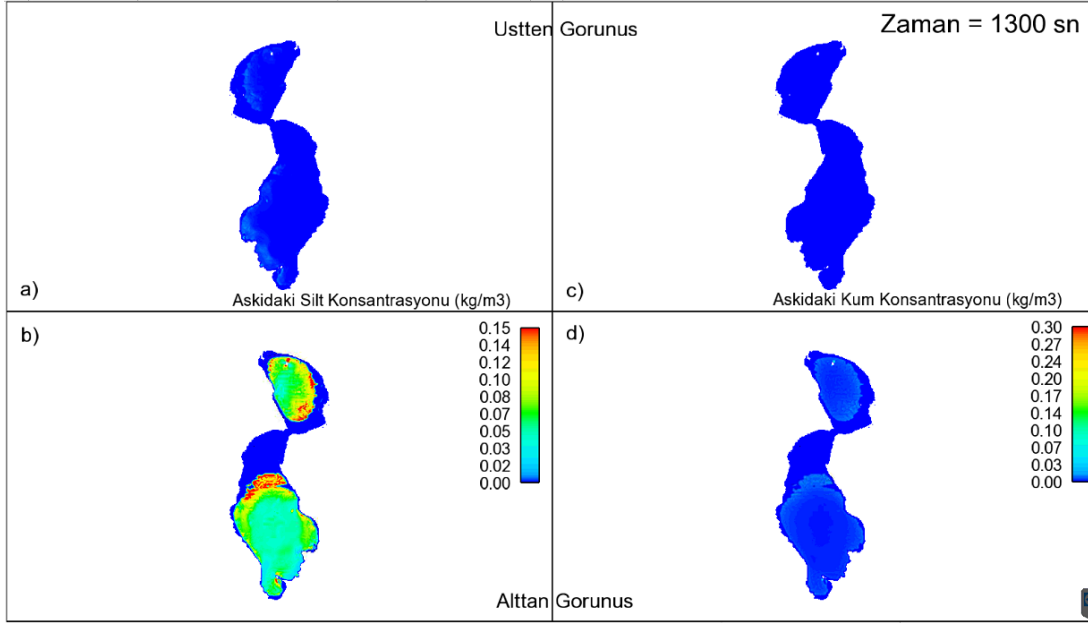
Şekil 4.64 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 0 sn).



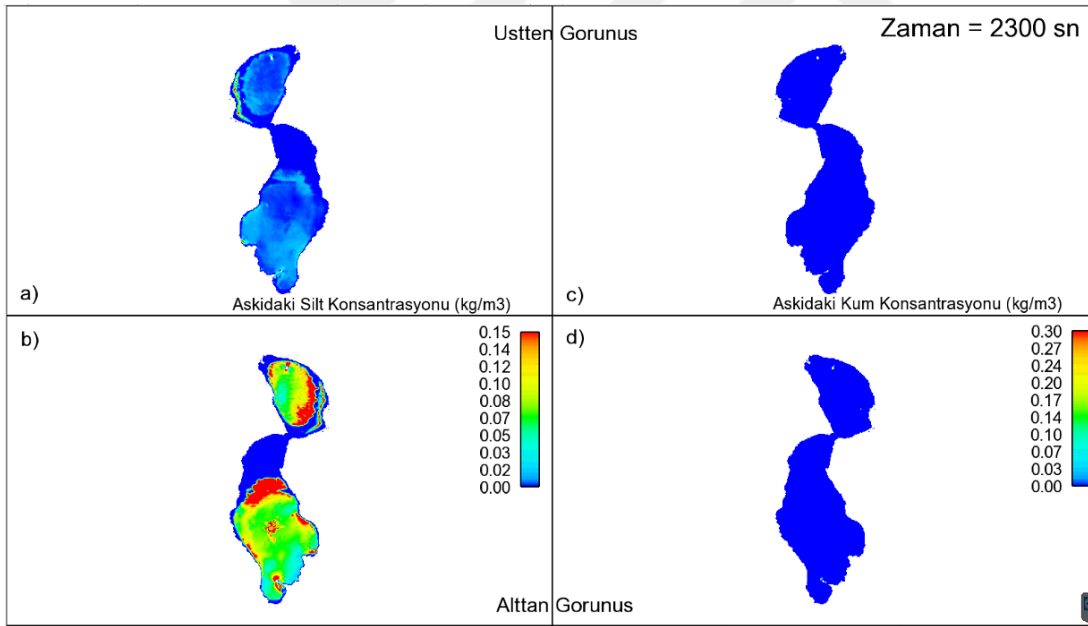
Şekil 4.65 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 1030 sn).

Şekil 4.66'da deprem sonrasındaki 1275. saniyeye ait kum ve silt malzemesinin askıdaki konsantrasyon dağılımları sunulmuştur. Askıdaki kum konsantrasyonu neredeyse kalmamış olup silt konsantrasyonu ise artmıştır. Depremden 2275 saniye

sonrasında kum tamamen çökelmiş olup askıdaki silt konsantrasyonu ise yüzeyden görünebilecek şekilde dağılım göstermektedir (Şekil 4.67).

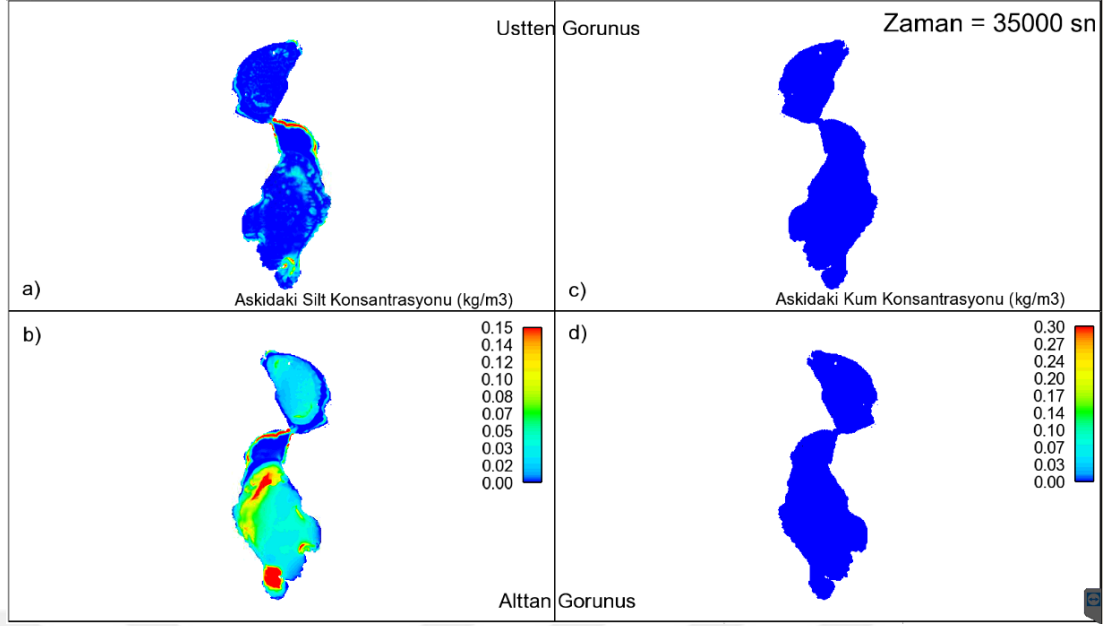


Şekil 4.66 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri ($t = 1300$ sn).

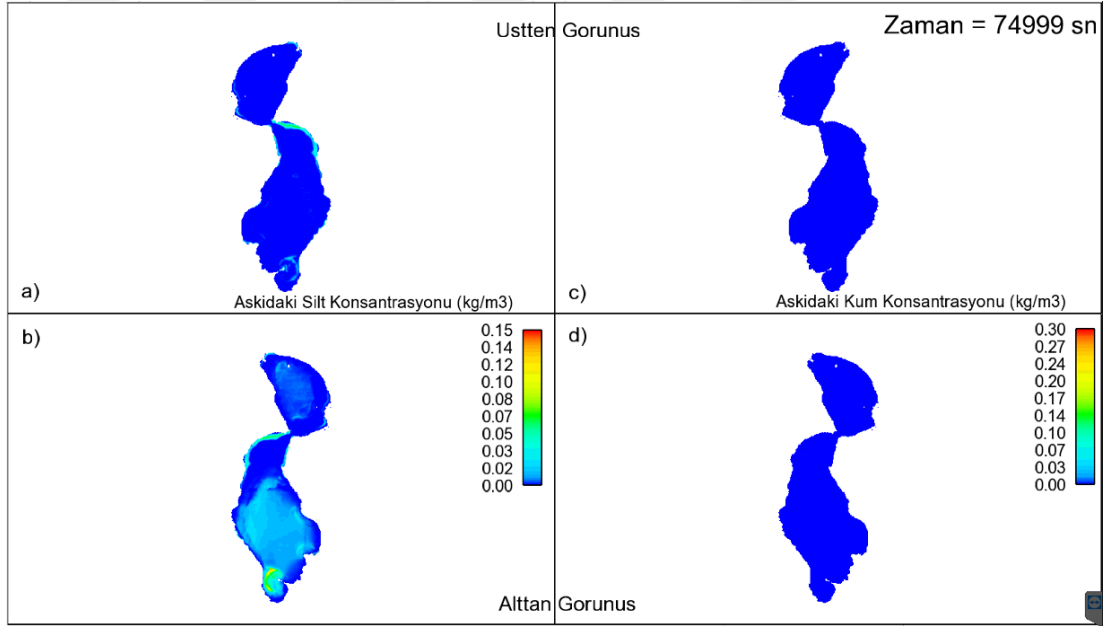


Şekil 4.67 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri ($t = 2300$ sn).

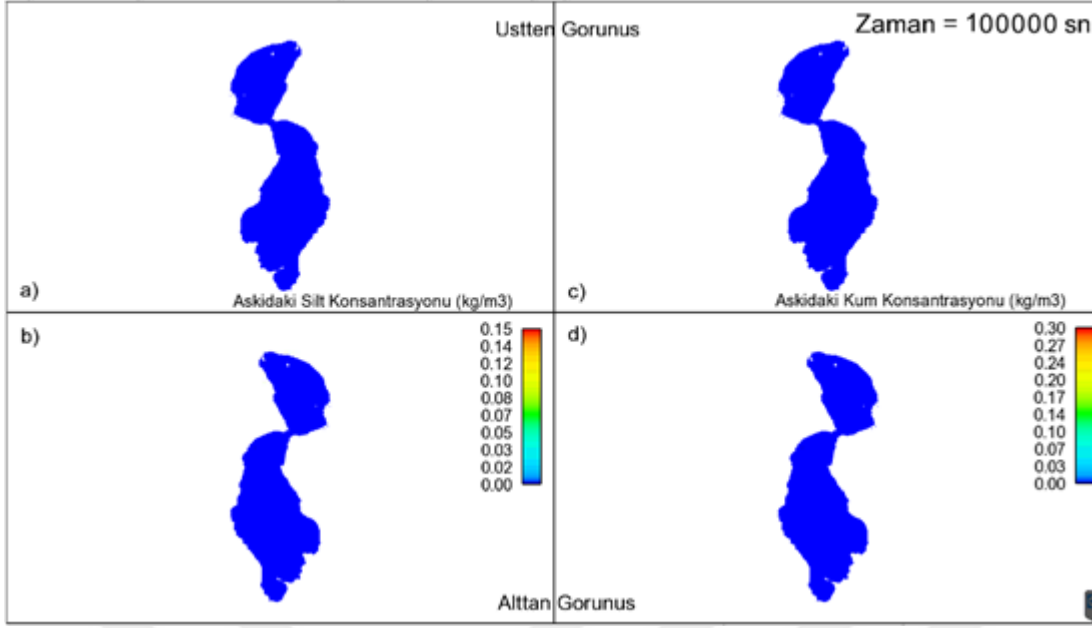
Depremden yaklaşık 10 saat sonrasına denk gelen konsantrasyon dağılımı Şekil 4.68’de sunulmuştur. Askıdaki silt Eğirdir Gölü’nün güneyine doğru birikme eğilimde olduğu hesaplanmıştır. Şekil 4.69’da ise deprem sonrasındaki 21. saat içindeki konsantrasyon dağılımları sunulmuştur. Deprem sonrasındaki 21. saatte askıdaki silt konsantrasyonunda azalma hesaplanmıştır. 28 saat sonrasında ise askıdaki siltin de tamamen çökelmiş ve askıda kalmadığı Şekil 4.70’de görülmektedir.



Şekil 4.68 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 35000 sn).

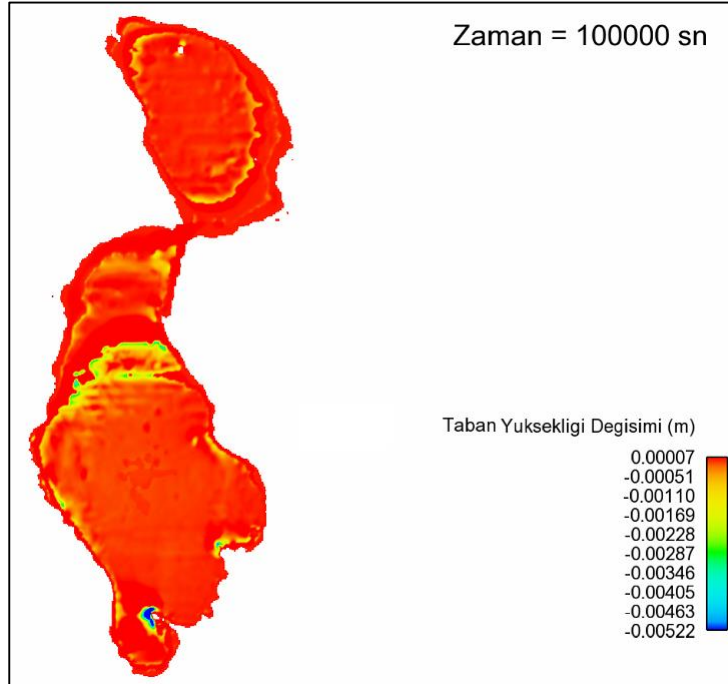


Şekil 4.69 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 75000 sn).



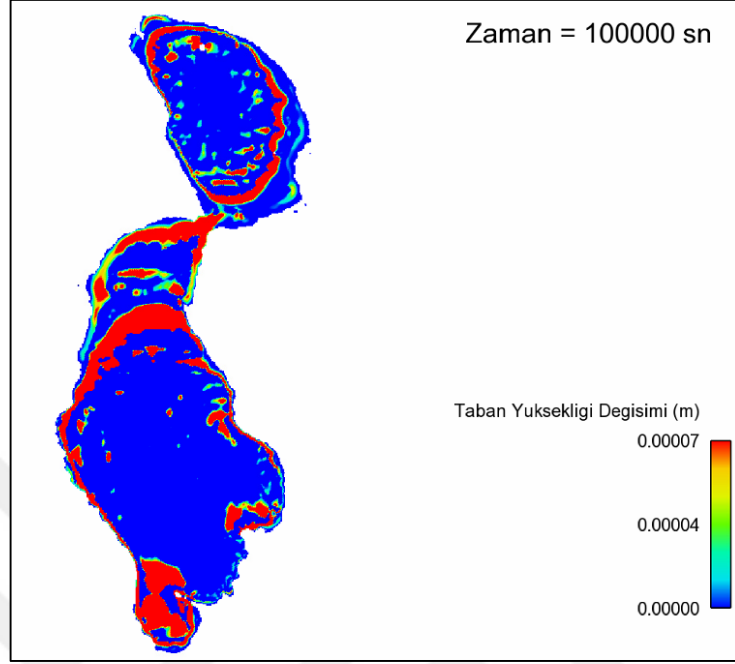
Şekil 4.70 Askıdaki silt ve kum konsantrasyonunun değişim konturleri (t = 100000 sn).

Depremiñ göl tabanındaki morfolojik yapıya doğrudan etki yaptığı açıkça görölmektedir. modelleme sonucunda taban malzemesi askı halinde taşınım gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.71’de tabandaki yığılma ve oyulma bölgeleri görölmektedir. Şekilde kırmızı renk bandı dışındaki renklere ait bölge oyulma bölgesidir. Oyulmaların derinliğı yığılmaya göre daha yüksek olması sebebiyle şekilde izlenebilmektedir.



Şekil 4.71 Taban yüksekliğı değişim konturleri (t = 100000 sn).

Taban değişiminin pozitif yönde (yığılma) mertebesi küçük olması sebebiyle değişim daha net görülebilmesi için renk bandında değişiklik yapılarak sadece pozitif değerler skalaya alınarak şekil 4.72’de sunulmuştur.



şekil 4.72 Taban yüksekliği değişim konturleri – pozitif değerler ($t = 100000$ sn).

Tabanda taşınan malzeme için birikme bölgesi gölün boğaz yaptığı bölgenin kıyıları ile gölün güneyi olarak hesaplanmıştır.



5. MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışması kapsamında Van Gölü için Ekim ve Kasım 2011 depremleri için Van Gölü'ne üç boyutlu deprem ivmesi etkiltilerek 2 farklı senaryo çalışması yapılmıştır. Bu senaryolardan Kasım 2011 depremine ait sonuçlar incelendiğinde ve Bölüm 2.4'de sunulan DSİ ölçüm istasyonu verileri ile kıyaslandığında depremin etkisinin göl dinamiğine önemli bir etkisi olmadığı hesaplanmıştır. Ekim 2011 depremi için DSİ tarafından yapılan ölçüm verileri incelendiğinde Tatvan ve Van merkez istasyonlarında 0,4 – 0,5 m dalga yüksekliği ölçülmüştür. Gevaş istasyonunda ise 0,27 m en yüksek dalga ölçülmüştür. Modelleme çalışması sonucunda hesaplanan değerlerde Tatvan ve Van Merkezine ait izleme noktalarında 0,4 – 0,45 m, Gevaş izleme noktasında ise 0,32 m değerindedir. İzleme noktalarında hesaplanan dalga yükseklikleri zaman serileri incelendiğinde pik değerler görülmektedir, ancak bu pik değerlerin hepsi ölçüm sonuçlarında mevcut olmaması nedeniyle tam zaman uyuşması yapılamamakta sadece dalga yüksekliğinin mertebesi konusunda hesaplanan değerlerin ölçümlerle tutarlı olduğu görülmektedir. Şekil 4.34'te sunulan grafikte görüldüğü üzere DSİ ölçüm sonuçlarında Tatvan ve Van Merkez istasyonlarında en yüksek su seviyesinin ölçüm değerine kadar geçen sürede hesaplama sonuçlarında 2 – 3 adet yüksek değer hesaplanmıştır. Tatvan noktası özellikle coğrafi konumu itibarıyla göl içinde bir koyda bulunmaktadır. Dar bir alan olan koy için hesaplamalarda diğer noktalara göre fazla çalkantı ve yansıyan dalga oluşumları görülmektedir. Bu çalkantı ve yansımalar sebebiyle hesaplanan değerlerin diğer noktalardan daha gürültülü bir seri olması normaldir. Gevaş ve Van Merkezi için hesaplanan su yüzeyi değişimi – zaman serileri ise sinüsoidele uygun serilerdir. Bölüm 4.2.5'te açıklandığı üzere başlangıç durumundaki göl yüzey alanı değişiminin zaman serileri iki senaryo sonucu içinde hesaplanmış olup hesaplanan zaman serilerinin hakim periyodları çıkartıldığında ise göl için analitik olarak hesaplanan K – G doğrultusu doğal periyoduyla uyumlu olduğu görülmüştür. Van Gölü'nde meydana gelen her iki depremde de gölün K – G doğrultusunda salınım gerçekleştirdiği hesaplanmıştır. Şekil 4.34'teki Tatvan haricindeki hesaplanan serilerde de periyodun 3000 – 3500 saniye

arasında olduğu görülmektedir. Çizelge 4.8’de sunulan doğal periyodlarda K – G doğrultusu değeri 4100 sn’dir. Modelleme sonuçlarında hem yüzey alan değişiminin hem de su yüzeyi deplasmanının zaman serilerinde bu değerin 3000 – 3500 saniye aralığında kalması gölün tam bir düzgün geometrik şekli olmamasından kaynaklanmaktadır.

Eğirdir Gölü için yapılan ve farklı durumları temsil eden 9 farklı senaryo çalışması tez kapsamında dikkate alınmıştır. Çizelge 4.15’te Eğirdir Gölü için çalışılan senaryolar özetlenmiştir. Tez kapsamında Eğirdir Gölü için tarihsel öneme sahip Dinar Depremi ve uluslar arası öneme sahip tarihi El-Centro Depremi çalışılmıştır. Depremlerin yalıtılmış tek yön doğrultuları modellenmiş olup ilaveten üç boyutlu deprem ivmesi etkililerek tek doğrultu ve üç boyutlu ivmenin etkileri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.9’da sunulan ve Denklem 2.2 yardımıyla hesaplanan doğal periyodlar ile Çizelge 4.16’da sunulan modelleme sonuçlarının yüzey alan değişimi sonuçlarından elde edilen hakim periyodlar karşılaştırıldığında gölün sadece depremin D – B doğrultusu etkin ivme altında ilgili doğrultuda hesaplanan doğal periyodla uyumlu olduğu ancak üç boyutlu deprem ivmesi etkin olduğunda ve/veya K – G doğrultulu ivmeye maruz kaldığında da K – G doğrultusu için hesaplanan doğal periyodla uyumlu hareket ettiği görülmektedir. Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de sunulan depremlerin karakterleri karşılaştırıldığında El-Centro Depreminin hakim doğrultusunun K – G doğrultusu olduğu ve gölün bu doğrultuda salınım gerçekleştirdiği söylenebilir ancak Dinar Depremi için hakim doğrultunun K – G veya D – B olduğu söylemek kullanılan deprem kaydına ait bilgiler için zordur. İki doğrultunun da pik ivmesi birbirine yakındır. Bölüm 4.3.11’de karşılaştırmalı su yüzeyi değişiminin zamana bağlı sonuçları sunulan 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 numaralı senaryoların Şekil 4.60’da sunulan K – G doğrultulu karşılaştırma grafiğinde ve yine aynı senaryolar için hazırlanmış Şekil 4.61’deki D – B doğrultulu izleme noktalarının karşılaştırma grafiğinde görüldüğü üzere hesaplanan hakim periyodlar hep 3000 – 4000 saniye aralığında hesaplanmıştır. Bu durum Eğirdir Gölü için deprem altındaki herhangi bir etki durumunda gölün oluşturduğu dalgaların periyodunun D – B doğrultusundaki doğal periyodla uyumlu olduğunu ancak yüzey alan değişiminin zamana bağlı serisinin hakim periyodlarının ise K – G doğrultusunda gerçekleştiğini göstermektedir. Göl yüzey alanının azalma ve genişleme periyodunun deprem ivmesince hakim olan doğrultunun doğal periyoduyla tam uyumlu olduğunu göstermektedir. Eğirdir Gölü, Van Gölü ile karşılaştırıldığında hem daha sığ hem de daha küçük bir göldür. Bu sebeple iki göldeki izleme

noktalarında hesaplanan değerler karşılaştırıldığında göl ortasına denk gelen izleme noktalarında Van Gölü için daha yüksek dalgalar, Eğirdir Gölü içinse kıyı kısımlarındaki izleme noktalarında daha yüksek dalgalar hesaplanmıştır. Gölün ortalama derinliğinin boyutlarına oranının meydana gelen sahyelerin karakterinde önemli olduğu görülmektedir. Tam olarak ölçüm sonuçları ile model sonuçlarında örtüşme yaşanmamasının pek çok nedeni mevcuttur. Bunların başında modelleme çalışmasında kullanılan göl batimetrisinin çözünürlüğü, modelleme limiti olan sonlu eleman sayısı kısıtı sebebiyle Van Gölü kadar büyük bir alanın yüksek çözünürlüklü modelinin kurulu bilgisayar gücü ile zor çözümlenebileceği, taban pürüzlülüğünün uniform dağılımda olmaması ve diğer hidrodinamik etkilerin ihmal edilmiş olması gelmektedir.

Eğirdir Gölü senaryo sonuçları incelendiğinde, gölün morfolojik olarak ayrı durumda bulunan ve küçük bir boğaz ile bağlı olan kuzey ve güney çanak bölgelerinin deprem ivmesine verdikleri tepki farklıdır.

Eğirdir Gölü için tanımlanan kurgusal AKM kirliliğinin çökeltme sürecine etkisinin araştırıldığı 8 numaralı senaryonun herhangi bir deprem ivmesi etkisine sahip olmayan 1 numaralı kontrol senaryosu sonuçlarıyla karşılaştırılmasında tespit edilen en önemli sonuç çökeltme sürecinde deprem etkisinin salınımın hakim olduğu doğrultuya doğru askıdaki malzemenin hareket ederek yığılma oluşturduğu şeklindedir. AKM depremin etkisiyle kuzeye doğru ilerleyerek çökelmiştir. Kontrol senaryosunda ise herhangi bir hidrodinamik etkiye maruz kalmayan askı malzemesi bulunduğu bölgede çökelmiştir. Üç boyutlu deprem ivmesine maruz bırakılan askı malzemesi kuzey yönünde hareket ettiği gibi D – B doğrultusunda da tepecikler oluşturmuştur.

Senaryo 9 kapsamında çalışılan taban malzemesinin askıya kalkma ve sediment taşınımı sonuçlarına göre 1995 Dinar Depremi şiddetinde bir depremin göl taban malzemesinin askıya kalkmasına sebep olmaktadır. Özellikle tane çapı küçüldükçe beklendiği üzere bu etki daha fazla hissedilmektedir. Dinar Depremi'ne ait senaryo sonuçlarında göl yüzey alanının zamana bağlı değişimi Şekil 4.45 - Şekil 4.47 arasında ve El-Centro Depremi için de Şekil 4.48 - Şekil 4.50 arasında sunulmuştur. Yüzey alan değişiminde hesaplanan pozitif yöndeki alan değişimleri göl kıyısındaki düşük kota sahip kısımlarda su baskınları ve geri çekilmeler olabileceği göstermektedir. Bu durum depremin etkisi altında göl tabanında katı madde hareketine neden olduğu gibi kıyıda göl içine sediment taşınımı gerçekleşebileceğini göstermektedir.



6. SONUÇLAR

Karışımın az olduğu ve/veya hiç olmadığı durumdaki göl ve körfez gibi kapalı ve/veya yarı kapalı su kütlelerinin sismik salınımlar altındaki hidrodinamik dengedeki değişimlerinin ve bu değişimlerin askıdaki ve tabandaki malzemesinin hareketine olası etkilerinin incelenmesi amacıyla yürütülen bu tez çalışmasında kapalı ve/veya yarı kapalı su kütlesi sistemlerinin hidrodinamik denge durumunun sismik salınımlardan etkilendiği, bu etkinin sismik salınım şiddetine ve su kütlesinin morfolojik özelliklerine bağlı olarak arttığı ve/veya azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. İlave olarak denge durumunda sismik salınımların etkisiyle meydana gelen hidrodinamik etkilerin su kütlesi sistemi içinde ve çevresinde de etkilere neden olduğu belirlenmiştir. Hidrodinamik dengedeki değişimin düşey ve yatayda su kütlesi hareketine etkisi ve su kütlesi hareketiyle birlikte göl için önemli bir su kalitesi parametresi olan askıda katı madde konsantrasyonu değişimine, askıdaki malzemenin çökme sürecine olası etkileri araştırılmıştır.

Hem farklı göller hem de farklı deprem koşullarının hesaplamaları yapılmış olup bu bölümde özetlenen sonuçlara tüm modelleme çalışmalarının sonuçlarının karşılaştırması sonucunda ulaşılmıştır.

Üç boyutlu sayısal hidrodinamik modelleme yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların doğruluğunun ve güvenilirliğinin ispatlanmasında en önemli dayanak Ekim 2011 Van Depremi sırasında kayıta olan DSİ'ine ait ölçüm istasyonlarında ölçülmüş olan günlük en yüksek ve en düşük ölçüm değerlerinin modelleme sonuçları ile karşılaştırılmasıdır. DSİ ölçümlerinde tespit edilen en yüksek ve en düşük değerlerden hareketle hesaplanan dalga yükseklikleri ile modelleme sonucunda elde edilen dalga yükseklikleri yakın değerlerdedir.

Sonuçların elde edilmesi ve karşılaştırılabilmesi için Van Gölü ve Eğirdir Gölü olmak üzere iki farklı örnek çalışma alanı ve Eğirdir örnek çalışma alanı için kıyaslama senaryoları kurgulanmış ve analiz edilmiştir.

Modelleme çalışmalarının sonuçları, literatürdeki mevcut hesaplama yöntemleri ve DSİ kayıtlardaki sonuçların karşılaştırılması sonucunda aşağıda sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

- Göllerin başlangıçtaki yüzey alanı başlangıç koşulu olarak kabul edilirse, deprem etkisi altında bu yüzey alanı deprem sırasında ve sonrasında zamana bağlı olarak değişmektedir. Değişimin periyodu, gölün doğal periyodunun analitik yollarla yapılan hesaplamasından daha küçük çıkmaktadır ve bu durumun başlıca nedeni göl geometrisinin karmaşık yapısıdır. Bu durum hem Eğirdir hem de Van Gölü için geçerlidir. Olası bir deprem durumunda depremin şiddetinden bağımsız olarak iki gölün de salınım periyodu hesaplanmıştır.
- Göl ve körfez gibi kapalı veya yarı kapalı sistemleri etkileyecek depremler meydana geldiğinde bu bölgelerde kıyı kesimlerinde deprem kaynaklı sayhelere bağlı taşkın riski mevcuttur. İki gölde de taşkın riskli alan yaklaşık olarak 1 km²'lik bir bölgeyi kapsamaktadır. Van Gölü'nün yüzey alanı göz önüne alındığında bu değer küçük olmakla birlikte Eğirdir Gölü için önemli mertebededir.
- Göllerin etki altında kaldıkları depremin en yüksek ivme doğrultusu hangi yöndeysse, o doğrultudaki doğal periyoduna yakın bir periyotta salınım yaptığı görülmektedir. Eğirdir Gölü senaryolarının değerlendirilmesiyle bu sonuca ulaşılmıştır.
- Deprem etkisi altında göl içindeki herhangi bir sonlu akım hacminde düşey hız şiddeti yatay doğrultudaki hızlardan küçüktür ve akım koşulu çevrintilidir. Özellikle yatay doğrultudaki çevrinti (vortisite) düşey doğrultudaki çevrintiden fazladır. Bu çevrintiler, derinliğin fazla olduğu dalga kırılma bölgesi dışında sığ bölgelerde ise yüksek şiddettedir ve etkisi uzun süreli devam etmektedir.
- Deprem sırasında başlayan salınımlar deprem şiddetine ve gölün morfolojik özelliklerine bağlı olarak günlerce sürebilmektedir. Bu durum hem Ekim 2011 Van Depremi sırasında DSİ ölçümlerinde hem de modelleme sonuçlarında görülmektedir. DSİ tarafından Van Gölü'nde Ekim 2011 Van Depremi ölçümlerinde iki gün boyunca salınımın devam ettiği gözlemlenmiştir. Salınımın iki gün boyunca devam ettiği modelleme sonuçlarında da

hesaplanmıştır. Van Gölü'nde hesaplanan ve ölçülen bu uzun salınım durumu Eğirdir Gölü'nde de hesaplanmıştır.

- Göl tabanını oluşturan katı madde sahip olduğu malzeme özelliğine, gölün morfolojisine ve depremin şiddetine bağlı olarak deprem etkisiyle hareket edebilmektedir. Eğirdir Gölü için Dinar Depremi şiddetinde bir deprem taban malzemesi olarak kumu harekete geçirebilecek kadar kayma gerilmesi üretebilmektedir. Ancak kum uzun süre askı halinde kalamamakta ve çökelmektedir. Daha ince malzeme sınıfında olan silt ise yine Eğirdir Gölü koşullarında Dinar Depremi etkisi altına askıya kalkabilmekte, hem askı hem taban taşınımı ile farklı bölgelere birikebilmektedir.
- Eğirdir Gölü için yapılan deprem etkisi altındaki taban malzemesi taşınımı modeli sonucuna göre göl içindeki taban malzemesi kıyılara yakın sığ bölgelerden boğaz bölgesine ve gölün güney çıkışına doğru yığılmaktadır. Bu durum sadece Dinar Depremi etkisi altında söz konusudur.
- Gölün kıyı bölgelerinin karakteristik durumu göz önüne alınarak kıyıdan göl içine katı madde taşınımı olasılığı mevcuttur. Göl yüzeyi çekilip tekrar genişlerken kıyılardaki düşük kot bölgelerinde su baskınları görülmesi, su baskınlarına ilave olarak kıyı boyundaki zemin malzemesini göl içine sürüklemesi mümkündür. Sürüklenen malzemelerden göl içinde jeolojik yapılar oluştuğu daha önceden yapılmış ve literatürde sunulmuş olan araştırma çalışmalarında tespit edilmiştir. Sapanca Gölü ile ilgili çalışmalarda bu bulgular mevcuttur. Eğirdir Gölü modelleme sonuçları da hem yüzey alanın periyodik olarak değişim sergilediğini hem de askı ve/veya taban malzemesinin deprem etkisi altında taşınımının mümkün olduğunu göstermektedir.
- Göl ve körfez gibi kapalı veya yarı kapalı sistemlerde askıda katı madde kirliliği mevcut bir bölge var ise, bu kirliliğin deprem etkisi ile birlikte taşınım süreçleri farklılaşacak, depremin etkin olduğu doğrultuda, yani depremin pik ivmesi hangi yönde ise o yönde hareket ederek çökelecektir. Deprem ile birlikte göl içinde düşey hız birleşeninde de artış hesaplanmıştır. İlave yukarı yönlü düşey hız çökelme süresini arttırmaktadır.

- Van Gölü için kıyı bölgelerinde göl merkezine kıyasla daha küçük dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Eğirdir Gölü modelleme sonuçlarında ise gölün her iki çanak yapısında da kıyılarda daha yüksek dalgalar hesaplanmıştır.

Bu çalışma özellikle Van ve Eğirdir Göllerinde deprem meydana geldiğinde yaşanan veya yaşanacak süreçlerin daha iyi anlaşılmasına imkan sağlamıştır. Eğirdir Gölü gibi sığ bir göl ile Van Gölü gibi derin ve büyük bir gölün depreme bağlı olarak maruz kaldıkları etki altındaki davranışların üç boyutlu olarak incelenmesi literatür açısından önemlidir. Hesaplamalar sonucunda deprem etkisiyle meydana gelen düşey hız değişimi, çevrinti ve taban malzemesine etkileri göz önüne alındığında iki boyutlu çalışılan hidrodinamik modellerin göllerin deprem altındaki davranışının araştırılmasında yetersiz olduğu görülmektedir.

Göl ve körfez gibi kapalı veya yarı kapalı sistemlerde meydana gelen deprem kaynaklı sayheler dikkate alındığında, özellikle de Van Gölü gibi derin ve büyük göllerde, kıyı yapılarının tasarımı ve kıyı kullanım özellikleri bu açıdan da gözden geçirilmelidir. Deprem kaynaklı sayhe riski mevcut kapalı ve yarı kapalı sistemler tespit edilmeli, bu sistemlerle ilgili planlamalar yapılmalıdır. Bu sistemlerde tarihi depremlere ait zemin – kıyı araştırmaları yapılmalı, konu hakkında literatürde bulunan eksiklikler tamamlanmalıdır.

Göller gibi kapalı ve/veya körfez, haliç vb. yarı kapalı sistemlerin deprem etkileri altındaki davranışlarının incelenmesi ve bu sistemlerin deprem etkileri altındaki hidrodinamik değişimlerinin araştırılması, bahsi geçen bölgelerde yapılan yapısal, ekolojik, morfolojik sistemlere etkilerinin ortaya konulması açısından da son derece önemlidir.

Göl ve körfez çevresindeki altyapı ve üstyapı tesislerinin planlanmasında, kapalı ve/veya yarı kapalı sistemlerin dinamiklerinin incelenmesinde depremsellik önemli bir parametre olduğu, fırtına, su baskını vb. meteorolojik anomalilerin yarattığı etkiler incelenirken ek olarak depremlerin neden olabileceği anlık ve kısa vadeli etkilerin de araştırılması gerekliliği açıktır. Altyapı tesisleri, çevresel hassas alanlar, göller, kıyı tesisleri vb. alanlar için deprem etkileri incelenmeli, bu gibi alan ve tesisler için planlamalar yapılırken deprem etkisi mutlaka planlama sürecine dahil edilmelidir.

KAYNAKLAR

- AFAD**, (2011, 23 Ekim). *Van Depremi Raporu*, TC. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Akkar, S., Azak, T. E., Çan, T., Çeçen, U., Demircioğlu, M. B., Duman, T.,, Zülfikar, Ö.**, (2013). Revision of Turkish Seismic Hazard Map, (UDAP-Ç-13-06).
- Altınok, Y., Tıntı, S., Alpar, B., Yalçın, A. C., Ersoy, Ş., Bortolucci, E., Armigliato, A.**, (2001). The Tsunami of August 17, 1999 in Izmit Bay, Turkey, *Natural Hazards* 24: 133–146.
- Altınok, Y., Ersoy, Ş.**, (1995). Türkiye Kıyıları ve Yakın Çevresini Etkileyen Tsunamiler, *İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, Cilt 9.
- Altınok, Y., Ersoy, Ş.**, (2000)Tsunamis Observed on and Near the Turkish Coast, *Natural Hazards* 21: 185–205.
- Altınok, Y., Alpar, B., Yalıtırak, C.** (2003). Sarköy-Mürefte 1912 Earthquake's Tsunami, extension of the associated faulting in the Marmara Sea, Turkey, *Journal of Seismology* 7: 329–346.
- Altınok, Y.**, (1999). Tsunamis Along The Coasts Of The Black Sea, *Second Balkan Geophysical Congress And Exhibition* July 5 – 9.
- Arnold, V.**, (1989). *Mathematical methods of classical mechanics*, 2nd edn., pp. 508, Springer.
- Avşar, U., Hubert-Ferrari, A., Batist, M., Lepoint, G., Schmidt, S., Fagel, N.** (2014). Seismically-triggered organic-rich layers in recent sediments from Gölüköy Lake (North Anatolian Fault, Turkey), *Quaternary Science Reviews* 103 pg. 67-80.
- Barberopoulou, A., A. Qamar, T. L. Pratt, K. C. Creager, and W. P. Steele** (2004), Local amplification of seismic waves from the Denali Earthquake and damaging seiches in Lake Union, Seattle, Washington, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L03607, doi:10.1029/2003GL018569.
- Barberopoulou, A.**, (2008, August). A Seiche Hazard Study for Lake Union, Seattle, Washington, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 4, pp. 1837–1848, doi: 10.1785/0120070153.
- Bayülke, N., Öztin F.**, (1990, October) Historical Earthquakes of Istanbul, Kayseri, Elazığ, *Proceedings of Workshop on Historical Seismicity and Seismotectonics of the Mediterranean Region*.
- Bengtsson, L.**, (2012) *Encyclopedia of Lakes And Reservoirs*. Springer.

- Bondevik, S., B. Gjevik, and M. B. Sørensen** (2013), Norwegian seiches from the giant 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3374–3378, doi:10.1002/ grl.50639
- Cassidy, J. F., G. C. Rogers, A. L. Bird, and T. L. Mulder** (2002), The M = 7. 9 Alaska earthquake of 3 November 2002: *Felt reports and unusual effects across western Canada*, *Eos Trans. AGU*, 83(47), Abstract S72F- 1354.
- Donn, W. L.**, (1964). Alaska earthquake of 27 March, 1964: Remote seiche stimulation. *Science*, 146, 261–262.
- Earthquake.** (n.d.) Britannica Academic, Encyclopædia Britannica, Erişim Tarihi 28 Şubat 2017. www.collegiate/article/106195.
- FEMA**, (2003). Unit 3 Earthquake Causes and Characteristics, US Federal Emergency Management Agency Technical Notes, Erişim Tarihi. 16 Şubat 2017. <https://www.fema.gov/>
- FEMA**, (2003).Unit 4 Earthquake Effects, US Federal Emergency Management Agency Technical Notes. 16 Şubat 2017. <https://www.fema.gov/>
- Flow-3D**, (2017). User Manual, Version 11.2.
- Forel, F.A.**, (1901) Handbuch der Seenkunde: allgemeine Limnologie. J. Engelhorn, Stuttgart, 249 pp.
- Gardarsson, S.**, (1997). *Shallow water sloshing*, (Doktora Tezi), University of Washington.
- Granin, N. G., Radziminovich, N. A., Granina, L. Z., Blinov, V. V. ve Gnatovskiy, R. Y.**, (2012). Freshening of near-bottom waters in Lake Baikal triggered by the Mw6.2 Kultuk earthquake of August 2008., *Geo-Marine Letters*, Volume 32, Issue 5-6 , pp 453-464, Springer, Berlin Heidelberg.
- Gulakyan, S. Z. ve Wilkinson, I. P.**, (2002). The influence of earthquakes on large lacustrine ecosystems, with particular emphasis on Lake Sevan, Armenia., *Hydrobiologia*, 472, Sf.123-130, Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Güner, U.**, (2008). *Limnoloji Ders Notları*, Trakya Üniversitesi Fen Fakültesi.
- GSHAP**, (1999). Global Seismic Hazard Map, Global Seismic Hazard Assessment Program.
- Hays, W. W.**, (1980) Procedures for Estimating Earthquake Ground Motions, *Geological Survey Professional Paper 1114*, US Government Printing Office, Washington 1980.
- Hinks, J.**, (2015, 9-10 July). Dams and Earthquakes, *SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, Cambridge UK.
- Hirt, C. W., Sicilian, J. M.** (1985, September). A Porosity Technique For The Definition Of Obstacles in Rectangular Cell Meshes., *International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, 4th.

- Ichinose, G. A., Anderson, J. G., Satake, K., Schweickert, R. A., Lahren, M. M.** (2000, 15 April). The Potential Hazard from Tsunami and Seiche Waves Generated by Large Earthquakes within Lake Tahoe, California-Nevada, *Geophysical Research Letters*, Volume 27, Issue 8, Pages 1203–1206.
- Kabdaşlı, S.** (1992). *Kıyı Mühendisliği*, İTÜ Yayınları, 1992.
- Kaçıkoç, M.** (2013). *Eğirdir Gölü Hidrodinamik ve Su Kalitesinin Delft3d Modeli ile Modellenmesi*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Kaheh, M., Kashefipour, S. M., and Dehghani, A.,** (2010). Comparison of k- ϵ and RNG k- ϵ Turbulent Models for Estimation of Velocity Profiles along the Hydraulic Jump. *6th International Symposium on Environmental Hydraulics*, Athens, Greece.
- Kavak, M. T., Karadoğan, S.** (2012) Van Gölünde Su Yüzeyi Sıcaklık Değişiminin Avhrr Uydu Verileriyle İncelenmesi, *IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2012)*, 16-19 Ekim, Zonguldak.
- Kvale, A.,** (1955). Seismic seiches in Norway and England during the Assam earthquake of August 15, 1950., *Siesmo. Soc. America Bull.*, v.45, No:2., Sf. 93-113.
- Lamb, H.** (1932). *Hydrodynamics*, 6th ed., Dover Publications, New York.
- Levin, B., Nosov, M.** (2008). *Physics of Tsunamis*, Springer, 327 pp.
- Mastbergen D. R., Van Den Berg, J. H.** (2003) Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology*, 50(4):625–637.
- McGarr, A.,** (1965). Excitation of seiches in cahnnels by seismic waves., *Jornal of Geophys. Research.*, v. 72 No: 8., Sf. 847 – 854.
- McGarr, A., and R. C. Vorhis** (1968), Seismic Seiches from the March 1964 Alaska Earthquake, *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, p. E1–E.
- Merian, J.R.** (1828). Ueber die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefässen [On the motion of drippable liquids in containers] (Doktora Tezi) (in German). Basel: Schweighauser. OCLC 4622943.
- Meyer-Peter, E., Müller, R.** (1948). Formulas for bed-load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, pages 39–64.
- NEMC** (2017) Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute National Earthquake Monitoring Center. Erişim Tarihi. Mart 2017. <http://www.koeri.boun.edu.tr/>
- Nicolsky, D. J., Suleimani, E. N., Hansen, R. A.** (2010). *Numerical modeling of the 1964 Alaska tsunami in western Passage Canal and Whittier, Alaska*. Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, AK 99775, USA, Received: 30 September 2010 – Accepted: 4 November 2010 – Published: 3 December 2010.

- Nosov, M. A. and Kolesov, S. V.** (2007). Elastic oscillations of water column in the 2003 Tokachi-oki tsunami source: in-situ measurements and 3-D numerical modelling, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 243–249, doi:10.5194/nhess-7-243-2007.
- O’Sullivan, P.E, ve Reynolds, C.S.,** (2003). *The Lakes Handbook Volume I, Limnology and Limnetic Ecology*, Blackwell Publishing.
- Ozansoy, E.** (2001). Bizans kaynaklarına göre 1200–1453 İstanbul depremleri, In: Sahin, I. (ed.), *Tarih Boyunca Anadolu’da Dogal Afetler ve Deprem Semineri, 22–23 May 2000*, Globus Dünya Basımevi, İstanbul, pp. 1–29.
- Öztin, F.** (1994). 10 Temmuz 1894 İstanbul Depremi Raporu, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara.
- Piper, A. M.** (1933), Fluctuation of water surface in observation wells and at stream-gaging stations in the Mokelumne area, California, during the earthquake of December 20, 1932: *Am. Geophys. Union Trans. 14th Ann. Mtg.*, p. 471-475.
- Rabinovich, A. B.** (2009). *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* (edited by Y.C. Kim), World Scientific Publ., Singapoure..
- Radziminovich, Ya. B., Shchetnikov, A. A. Ve Vologina, E. G.,** (2009). The “Methane Eruption” on Lake Baikal in 1912 as an Effect of a Strong Earthquake., *Jornal of Geophys. Research.*, v. 72 No: 8., Sf. 847 – 854.
- Richter, C. F.** (1958). *Elementary Seismology*. San Francisco: WH Freeman, 768 pp.
- Rijn, L. van,** (1984). Sediment transport, Part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10):1431–1456.
- Selimoglu, Z.** (1999), *Deprem, bir yaratık olarak. Pen’in Deprem Kitabı, Ay Sallanıyor*, Cumhuriyet Kitap Klübü, İstanbul, pp. 296–300.
- SHARE,** (2012). Seismic Hazard Harmonization in Europe, 7th Framework Program of the European Commission Funded Project, 2009 – 2012. Erişim Tarihi. Nisan 2017. <http://www.share-eu.org/>
- Schwab, M. J., Werner, P., Dulski, P., McGee, E., Nowaczyk, N. R., Bertrand, S., & Leroy, S. A. G.** (2009). Palaeolimnology of Lake Sapanca and identification of historic earthquake signals, Northern Anatolian Fault Zone (Turkey). *Quaternary Science Reviews*, 28, 991–1005.
- Soulsby, R.** (1997). *Bedload Transport. in Dynamics of Marine Sand*. Thomas Telford Publications, London.
- Suzuki, T.** (2012). Seismic Seiche Occurred at Lake Saiko due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1* (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 68, No. 4 p. I_152-I_160.
- Wilson, B.** (1972). Seiches, *Advances in Hydrosciences* 8, pp. 1–94.
- Wilson, B.W.** (1953). *Coastal seiches, pt. 1 of Oscillations of the sea and the phenomenon of range*. The Dock and Harbour Authority [London], pp. 41–45.

TÜBİTAK (2011). İçme ve Kullanma Suyu Kaynağı Olarak Kullanılan Eğirdir Gölü Havza Koruma Planı ve Özel Hüküm Belirlenmesi Projesi, TÜBİTAK – MAM.

USGS (n.d) The United States Geological Survey, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu, Erişim Tarihi. 11 Ocak 2017.
<https://earthquake.usgs.gov/>

Url-1 < <http://www.merriam-webster.com>>, Erişim Tarihi. 16 Nisan 2016.

Url-2 <[http://www.geo.mtu.edu/ Active_Faults.html](http://www.geo.mtu.edu/Active_Faults.html)>, Erişim Tarihi. 07 Şubat 2017





EKLER

EK A: Modelleme Kapsamında Kullanılan Deprem Kayıtları

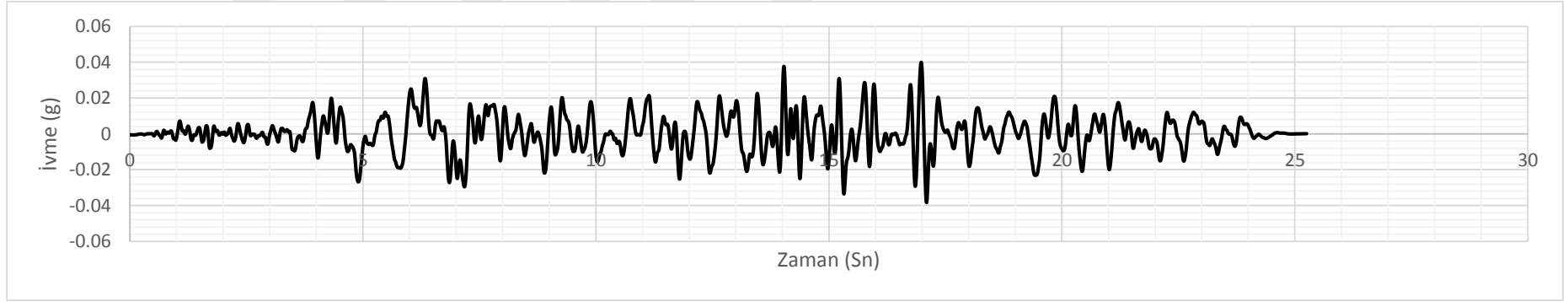
EK B: Eğirdir Gölü Modellemesi İzleme Noktalarının Bilgileri

EK C: Modelleme Sonuçlarına Ait Kontur Görselleri (CD içeriğinde mevcuttur.)

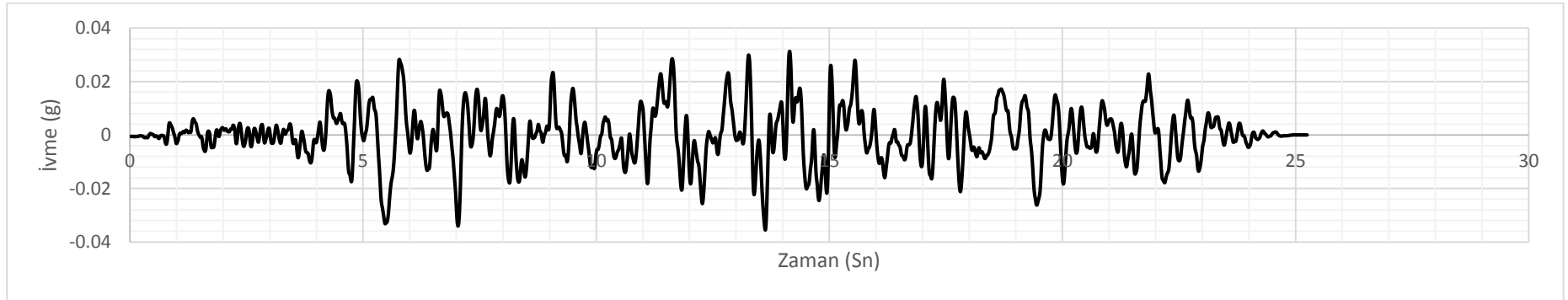
EK D: Modelleme Sonuçlarına Ait Grafikler (CD içeriğinde mevcuttur.)



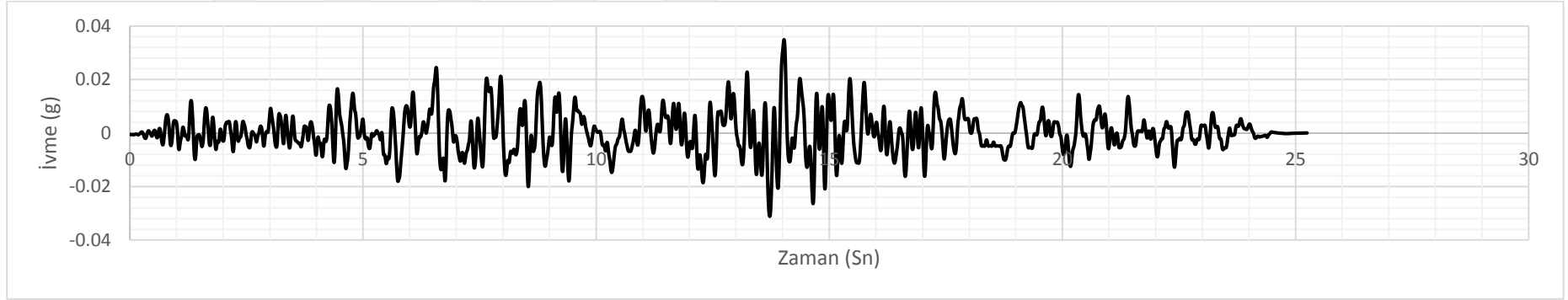
EK A : Modelleme Kapsamında Kullanılan Deprem Kayıtları



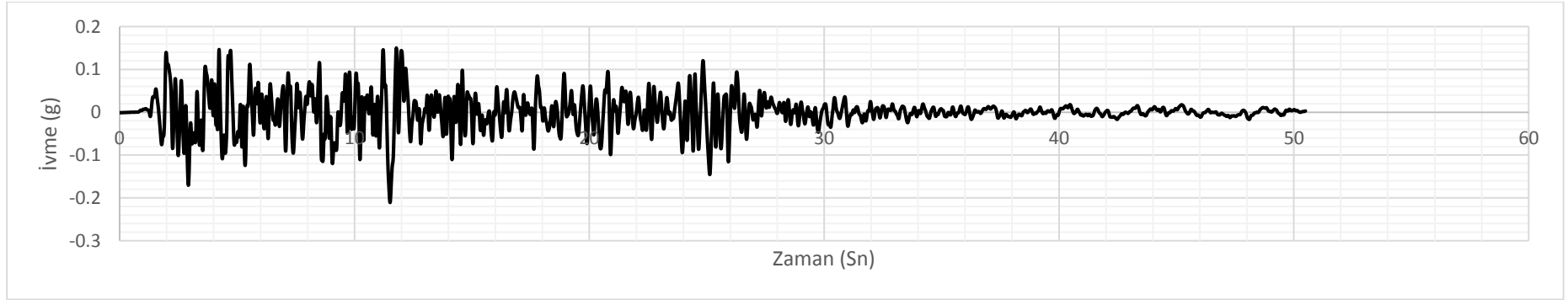
Şekil A.1 : 1995 Dinar Depremi Burdur İstasyonu Kayıtları - Doğu – Batı doğrultusu.



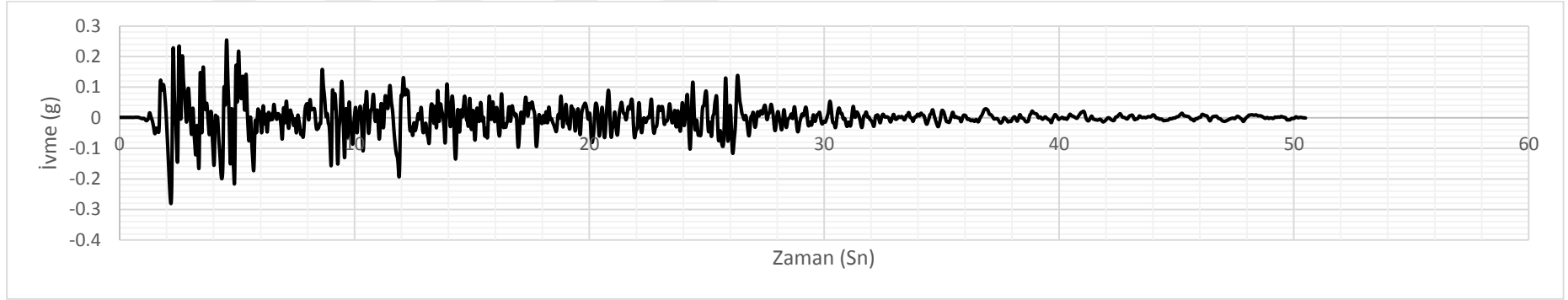
Şekil A.2 : 1995 Dinar Depremi Burdur İstasyonu Kayıtları - Kuzey – Güney doğrultusu.



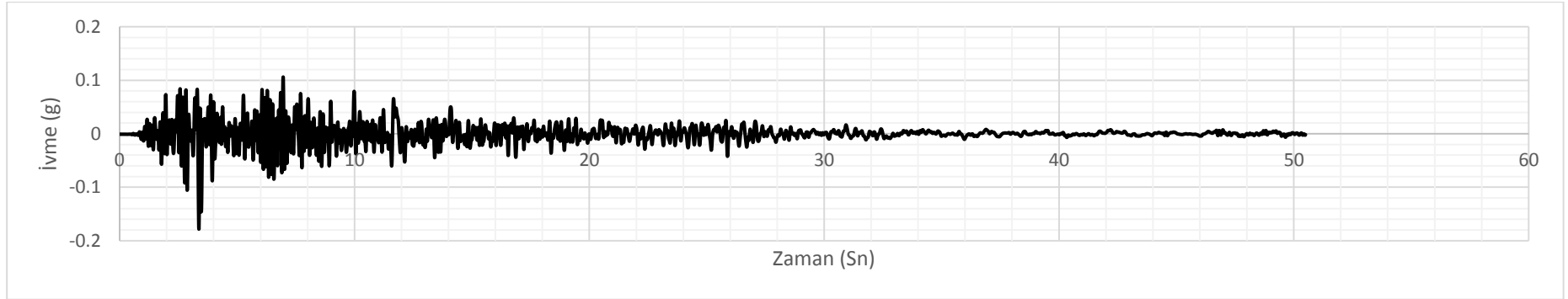
Şekil A.3 : 1995 Dinar Depremi Burdur İstasyonu Kayıtları - Yukarı – Aşağı Doğrultusu.



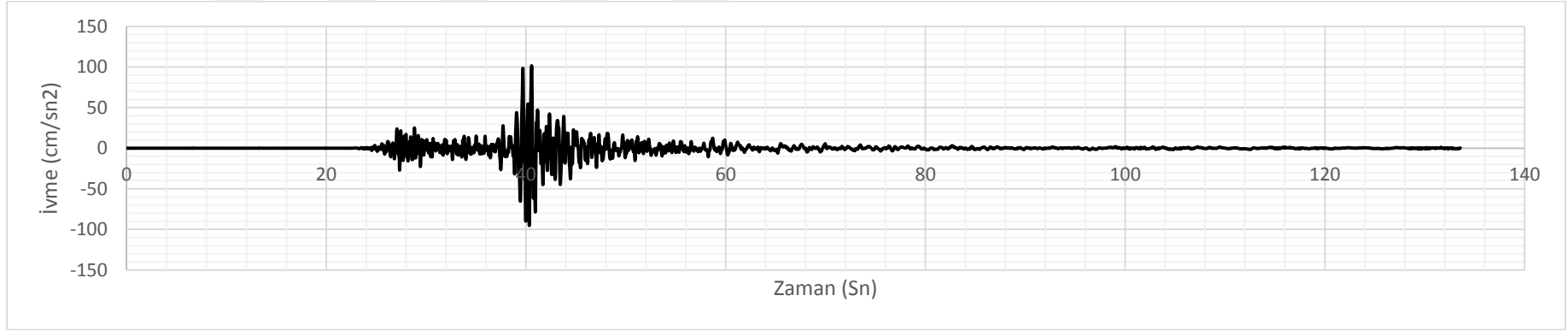
Şekil A.4 : 1940 El-Centro Depremi Imperail Valley İstasyonu Kayıtları - Doğu – Batı Doğrultusu.



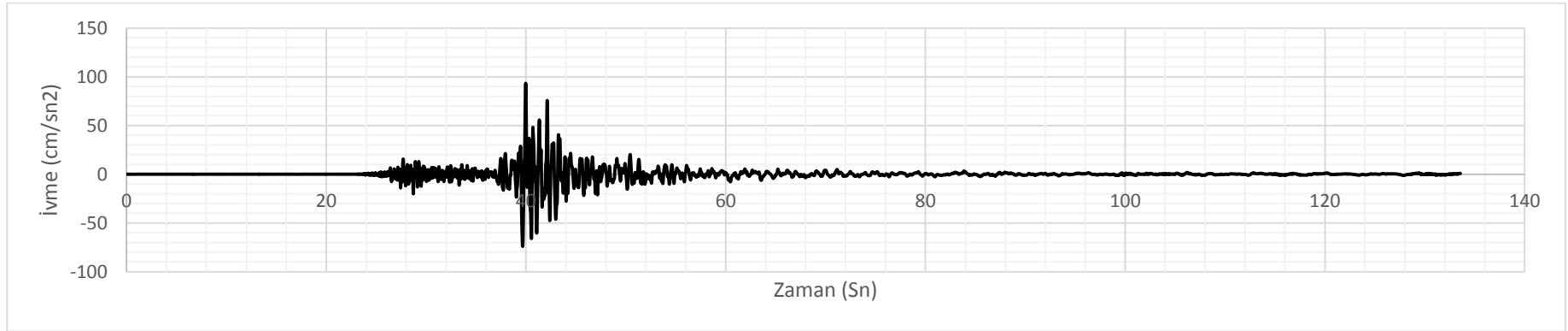
Şekil A.5 : 1940 El-Centro Depremi Imperail Valley İstasyonu Kayıtları - Kuzey – Güney Doğrultusu.



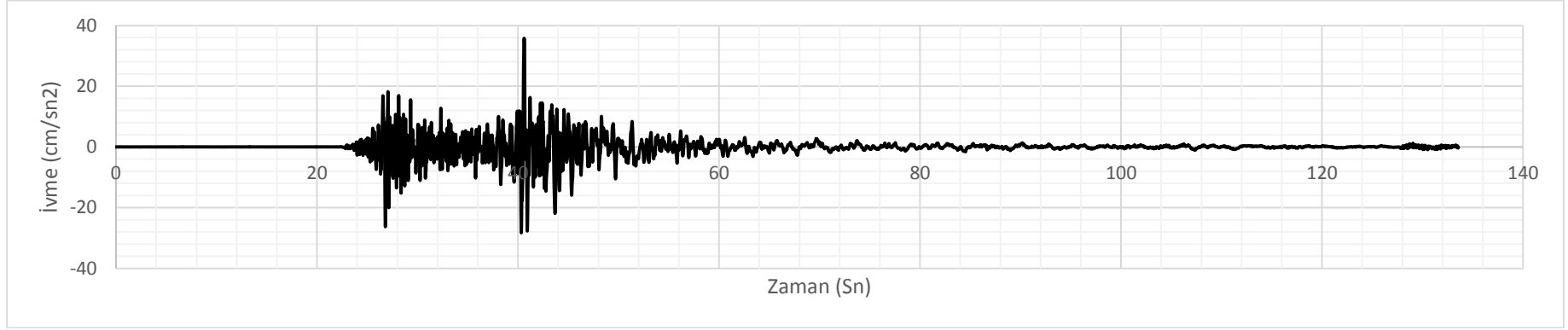
Şekil A.6 : 1940 El-Centro Depremi Imperail Valley İstasyonu Kayıtları - Yukarı – Aşağı Doğrultusu.



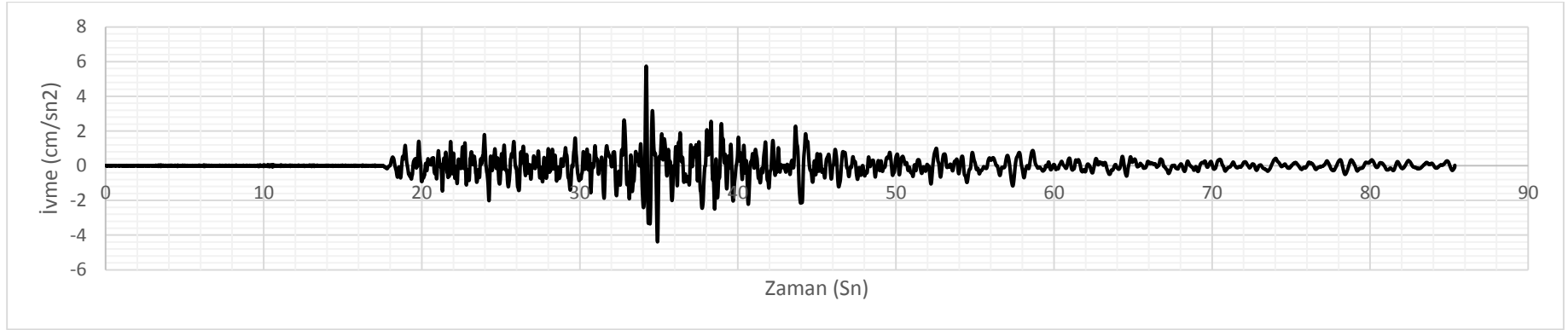
Şekil A.7 : Ekim 2011 Van Depremi Bitlis Merkez DSİ 173. Şube İstasyonu Kayıtları - Doğu – Batı Doğrultusu



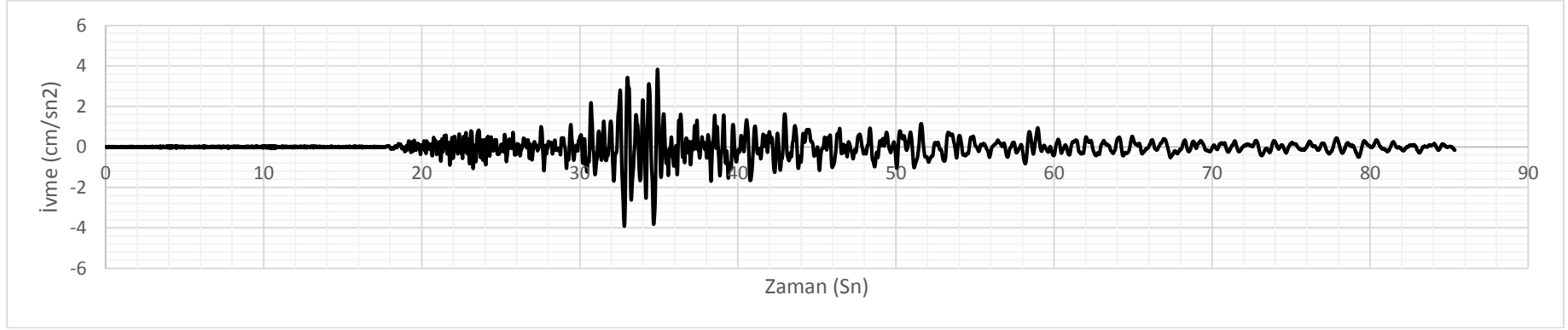
Şekil A.8 : Ekim 2011 Van Depremi Bitlis Merkez DSİ 173. Şube İstasyonu Kayıtları - Kuzey – Güney Doğrultusu



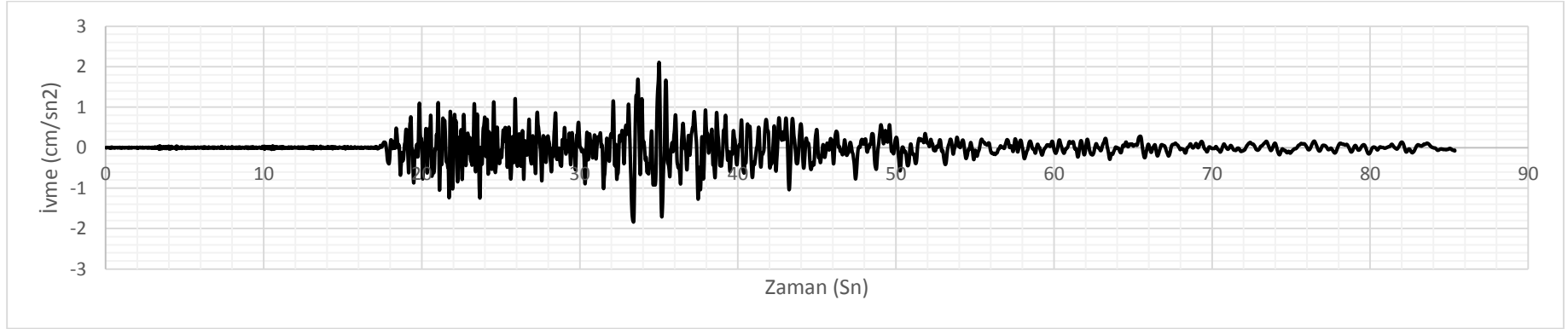
Şekil A.9 : Ekim 2011 Van Depremi Bitlis Merkez DSI 173. Şube İstasyonu Kayıtları - Yukarı – Aşağı Doğrultusu



Şekil A.10 : Kasım 2011 Van Depremi Bitlis Merkez DSI 173. Şube İstasyonu Kayıtları - Doğu – Batı Doğrultusu



Şekil A.11 : Kasım 2011 Van Depremi Bitlis Merkez DSİ 173. Şube İstasyonu Kayıtları - Kuzey – Güney Doğrultusu



Şekil A.12 : Kasım 2011 Van Depremi Bitlis Merkez DSİ 173. Şube İstasyonu Kayıtları - Yukarı – Aşağı Doğrultusu

EK B : Eğirdir Gölü Modellemesi İzleme Noktalarının Bilgileri

Nokta Kodu	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
X Koordinatı	3.07E+05	3.12E+05	3.07E+05	3.12E+05	3.05E+05	3.10E+05	3.11E+05	3.12E+05	3.17E+05	3.12E+05
Y koordinatı	4.24E+06	4.24E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.22E+06	4.22E+06	4.22E+06	4.21E+06
Z Koordinatı	913	913	913	913	913	913	913	913	913	913
Nokta Kodu	11'	12'	13'	14'	15'	16'	17'	18'	19'	20'
X Koordinatı	3.17E+05	3.10E+05	3.15E+05	3.20E+05	3.06E+05	3.11E+05	3.16E+05	3.20E+05	3.06E+05	3.10E+05
Y koordinatı	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06
Z Koordinatı	913	913	913	913	913	913	913	913	913	913
Nokta Kodu	21'	22'	23'	24'	25'	1-2'	1-3'	2-2'	2-3'	3-2'
X Koordinatı	3.14E+05	3.17E+05	3.10E+05	3.15E+05	3.13E+05	3.07E+05	3.07E+05	3.12E+05	3.12E+05	3.07E+05
Y koordinatı	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.19E+06	4.24E+06	4.24E+06	4.24E+06	4.24E+06	4.23E+06
Z Koordinatı	913	913	913	913	913	912	911	912	911	912
Nokta Kodu	3-3'	3-4'	3-5'	4-2'	4-3'	4-4'	4-5'	5-2'	6-2'	6-3'
X Koordinatı	3.07E+05	3.07E+05	3.07E+05	3.12E+05	3.12E+05	3.12E+05	3.12E+05	3.05E+05	3.10E+05	3.10E+05
Y koordinatı	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06	4.23E+06
Z Koordinatı	911	910	909	912	911	910	909	912	912	911
Nokta Kodu	6-4'	8-2'	10-2'	10-3'	11-2'	11-3'	12-2'	12-3'	12-4'	12-5'
X Koordinatı	3.10E+05	3.12E+05	3.12E+05	3.12E+05	3.17E+05	3.17E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05
Y koordinatı	4.23E+06	4.22E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06
Z Koordinatı	910	912	912	911	912	911	912	911	910	909
Nokta Kodu	13-2'	13-3'	13-4'	13-5'	13-6'	14-2'	14-3'	15-2'	15-3'	15-4'
X Koordinatı	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05	3.20E+05	3.20E+05	3.06E+05	3.06E+05	3.06E+05
Y koordinatı	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.21E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06
Z Koordinatı	912	911	910	909	908	912	911	912	911	910
Nokta Kodu	16-2'	16-3'	16-4'	16-5'	16-6'	16-7'	17-2'	17-3'	17-4'	17-5'
X Koordinatı	3.11E+05	3.11E+05	3.11E+05	3.11E+05	3.11E+05	3.11E+05	3.16E+05	3.16E+05	3.16E+05	3.16E+05
Y koordinatı	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06
Z Koordinatı	912	911	910	909	908	907	912	911	910	909
Nokta Kodu	17-6'	18-2'	18-3'	19-2'	19-3'	19-4'	20-2'	20-3'	20-4'	20-5'
X Koordinatı	3.16E+05	3.20E+05	3.20E+05	3.06E+05	3.06E+05	3.06E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05
Y koordinatı	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06
Z Koordinatı	908	912	911	912	911	910	912	911	910	909
Nokta Kodu	20-6'	21-2'	21-3'	21-4'	21-5'	21-6'	21-7'	22-2'	22-3'	22-4'
X Koordinatı	3.10E+05	3.14E+05	3.14E+05	3.14E+05	3.14E+05	3.14E+05	3.14E+05	3.17E+05	3.17E+05	3.17E+05
Y koordinatı	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06
Z Koordinatı	908	912	911	910	909	908	907	912	911	910
Nokta Kodu	22-5'	23-2'	23-3'	23-4'	23-5'	23-6'	24-2'	24-3'	24-4'	24-5'
X Koordinatı	3.17E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.10E+05	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05	3.15E+05
Y koordinatı	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06	4.20E+06
Z Koordinatı	909	912	911	910	909	908	912	911	910	909
Nokta Kodu	25-2'	25-3'								
X Koordinatı	3.13E+05	3.13E+05								
Y koordinatı	4.19E+06	4.19E+06								
Z Koordinatı	912	911								

Şekil B.1 : Eğirdir Gölü modellemesi izleme noktalarının bilgileri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Murat AKSEL

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul / 05.03.1983

Adres: Maltepe - İSTANBUL

E-Posta: murat.aksel@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2010 – İstanbul Kültür Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Araştırma Görevlisi

Yayın ve Patent Listesi:

Demir, S., Karadeniz, A., **Aksel, M.** (2016). Effects of cylindrical and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones, *Powder Technology*, doi:10.1016/j.powtec.2016.03.049.

Loukogeorgaki, E., Lentsiou, E. N., **Aksel, M.**, Yagci, O. (2017). Experimental investigation of the hydroelastic and the structural response of a moored pontoon-type modular floating breakwater with flexible connectors, *Coastal Engineering*, Volume 121, Pages 240–254. doi:10.1016/j.coastaleng.2016.09.002.

Dikmen, S.Ü., **Aksel, M.**, Yiğit, S., Sönmez, M., Şener, B. (2012). “Yüksek Yapı Çalışmalarında Bir Verimlilik Faktörü: Rüzgar”, *e-Journal of New World Sciences Academy*, Volume: 7, Number: 1, Article Number: 1A0281.

Kuzu, L., **Aksel, M.**, Saral, A. (2017). Optimum Air Feed Locations on Medical Waste Incineration Rotary Kiln by Computational Fluid Dynamics (CFD), *Periodicals of Engineering And Natural Sciences Vol. 5* No. 1, ISSN 2303-4521.

Dikmen, S.Ü., **Aksel, M.**, Yiğit, S. (2010). A Study Of The Effects Of Tall Buildings on The Pedestrian Wind Comfort In Istanbul. *CENG'10: 6th International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, Lefke, Kıbrıs.

Dikmen, S.Ü., Yiğit, S., **Aksel, M.** (2011). Effects of Wind in the Construction Activities at Highrise Buildings”. *Sixth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-VI) “Construction Challenges in the New Decade”*, Kuala Lumpur, Malaysia.

Aksel, M., Kabdaşlı, S., Yazıcı, G. (2011). CFD Analysis of Uncontrolled Flow in Alanya Dam Derivation Tunnel, *Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Marine Engineering*, OMAE2011, June 19-24, Rotterdam, The Netherlands.

Aksel, M., Kabdaşlı, S. (2011). Physical modelling of brine discharge: effect of depth on diluton, *Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Marine Engineering*, OMAE2011, June 19-24, Rotterdam, The Netherlands.

Yazıcı, G., Mastanzada, N., **Aksel, M.** (2011). Effects of Large Amplitude Sloshing on the Seismic Response of Aboveground Cylindrical Steel Liquid Storage Tanks, *Engineering Mechanics Institute Conference (EMI2011)*, June 2-4, Boston, The U.S.A.

Mastanzada, N., Yazıcı, G., **Aksel, M.** (2011). Investigation of the Dynamic Stability of the Blue Stream Pipeline, *Engineering Mechanics Institute Conference (EMI2011)*, June 2-4, 2011, Boston, The U.S.A.

Loukogeorgaki, E., Lentsiou, E. N., **Aksel, M.**, Yagci, O., Kabdasli, S. (2014). 3D Experiments On Moored Floating Breakwaters: Hydroelastic And Structural Response Assessment, *Coastlab14*, 29 September – 02 October 2014, Varna, Bulgaria.

Yazıcı, G., **Aksel, M.**, Koroglu A. (2014). Sloshing Displacements of an Above Ground Cylindrical Liquid Storage Tank Subjected to a Near-Fault Earthquake Ground Motion, *ICHE 2014*, Hamburg, ISBN 978-3-939230-32-8.

Aksel, M., Kabdaşlı, S., and Yazıcı, G. (2014). Analysis of the Failure of the Emergency Gates of a Concrete Face Rockfill Dam, *Proceedings of the International Scientific-Technical Progress in Construction and Architecture*, 299-304, Baku, Azerbaijan.

Yazıcı, G., Koroglu A., **Aksel, M.**, Onen, Y. H. (2015). Seismic Vulnerability of Treatment Plants in Istanbul, *International Burdur Earthquake and Environment Symposium*, Proceedings Book pg 260-265.

Aksel, M., Dindar, A.A., Önen, Y.H. (2015). Monitoring the Structural Responses in Shake Table Tests Using Remote Sensing Approach. *Third Conf. Smart Monit. Assess. Rehabil. Struct.*, Antalya, Turkey: 2015.

Cokgor, S., Oztug, V., **Aksel, M.** (2015). Geotextile Tube Usage For Coastal Shore Protection, *Water Resources, Forest, Marine And Ocean Ecosystems*, SGEM 2015, Vol II, ISBN:978-619-7105-37-7.

Dikmen, S.Ü., Yiğit, S., Sönmez, M., **Aksel, M.**, Şener, B. (2011). “Yüksek Yapı Çalışmalarında Bir Verimlilik Faktörü: Rüzgar”. *6. İnşaat Yönetimi Kongresi*, 25 – 27 Kasım 2011, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa, Türkiye.

Cokgor, S., Oztug, V., **Aksel, M.** (2014). Usage of PVC Vinyl Sheet Piles In Coastal Structures, *8. Coastal Engineering Symposium*, October 2014, Society of Civil Engineers, Istanbul, Turkey.

Karadeniz, A., **Aksel, M.**, Demir, S. (2015). Experimental and Numerical Investigation of Effects of Inlet Geometry On Clean Pressure Drop For Stairmand High Efficiency Cyclone, 11th Environmental Engineering Conference, Bursa.

Aksel, M., Insel, G., Keskinler, B. (2015). Computational Fluid Dynamics Applications In Environmental Engineering, 11th Environmental Engineering Conference, Bursa.

Patent: Hidrojektör Nozülü – 2014-GE-34147.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Aksel, M., Kabdaşlı, S. (2017). Numerical Modelling of the 1995 Dinar Earthquake Effects on Hydrodynamic Regime of Egirdir Lake, *International Journal of Environmental and Geoinformatics*, 4(3), ISSN 2148-9173.

