İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL BOĞAZI'NIN 3 BOYUTLU HİDRODİNAMİK MODELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Melih KOŞUCU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL BOĞAZI'NIN 3 BOYUTLU HİDRODİNAMİK MODELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Melih KOŞUCU
501121512

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet ÖZGER

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121512 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Melih KOŞUCU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "İstanbul Boğazı'nın 3 Boyutlu Hidrodinamik Modeli" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mehmet ÖZGER** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Abdüsselam Altunkaynak** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Osman Pektaş .....
Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Mayıs 2016
Savunma Tarihi : 6 Haziran 2016

Anneme, babama, kardeşime ve hanımıma…

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca sabrı ve anlayışıyla yanımda olan kıymetli hanımıma, Kitaplarla dolu bir hayat içinde yaşamamda en büyük pay sahibi olan sevgili Anneme, sarkazm yeteneği ve kıvrak zekasıyla hayatıma ayrı bir renk katan kardeşim Oğuzhan Koşucu'ya, teknik bilgisi ve hayata bakış açısı ile kendisine sıklıkla benzetildiğim sevgili dayım Ahmed Yücel'e, ve hayatlarımızın kesiştiği 18 yıl boyunca sergilediği şahsiyet, dirayet ve dürüstlüğüyle bana tükenmez hazineleri miras bırakan merhum dedem Osman Yücel'e şükran ve minnet duygularıyla dolu olduğumu belirtmek isterim.

Tez yazım sürecinde bilgisi, tecrübesi ve yardımseverliğiyle maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Mehmet Özger hocama teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Tez konumla ilgili ilk teorik bilgileri almama vesile olan ve beni –deyim yerindeyse- literatürle tanıştıran Doç. Dr. Abdüsselam Altunkaynak hocaya teşekkür ederim.

Engin müktesebatı ve teşvikleriyle tez konusu hakkındaki bilgi dağarcığımın gelişmesinde büyük katkısı olan Prof. Dr. İzzet Öztürk hocaya teşekkürlerimi arzederim. Veri temini hususunda büyük özveri ve destekte bulunan Prof. Dr. İsmail Toröz hocaya, Doç. Dr. Tarkan Erdik'e, Doç. Dr. Edip Müftüoğlu'na ve AKOM'dan Murat Sarıkaya'ya teşekkür ederim.

Tez yazım süreci boyunca azim ve kararlılığımın artmasına yardımcı olan, ve etrafa saçtıkları pozitif enerjileriyle okumakta olduğunuz tezin manevi cephesinde hatırı sayılır mevkiler üstlenen Araş. Gör. Yavuz Selim Güçlü'ye, Su Mühendisi Mustafa Nuri Balov'a ve Su Mühendisi adayı Mehmet Akif Akman'a teşekkür etmeyi kaçınılmaz bir vazife olarak görmekteyim.

Bu tez vesilesiyle ömür boyu insanlara faydalı olmayı, ve hakiki anlamda kendisiyle buluşunca insanın çürüyemediği "bilgi" ile yaşamayı niyaz ederim.

Mayıs 2016 Mehmet Melih KOŞUCU

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 1
1.2 Literatür Araştırması 2
1.3 Hipotez 9
2. İSTANBUL BOĞAZI'NIN FİZİKSEL YAPISI 11
2.4 Batimetri 11
2.5 Meteorolojik Koşullar 16
2.6 Hidrografik Koşullar 19
2.7 Hidrodinamik Koşullar 21
3. VERİLER 27
3.1 Batimetrik Veri 27
3.2 Hidrografik Veri 28
3.3 Mareografik Veri 32
3.4 Meteorolojik Veri 34
4. HİDRODİNAMİK MODEL VE KURULUMU 41
4.1 Delft3D 41
4.1.1 Hidrodinamik denklemler 42
4.1.1.1 Süreklilik denklemi 42
4.1.1.2 Momentum denklemleri 42
4.1.1.3 Türbülans denklemleri 43
4.1.1.4 Sığ su varsayımı koşulu denklemleri 45
4.1.2 Düşey koordinat sistemi 45
4.1.3 Yatay geniş türbülans simulasyonu 46
4.2 Hidrodinamik Model Kurulumu 47
4.2.1 Hesap ağı kurulumu 47
4.2.1.1 Yatay hesap ağı 47

4.2.1.2 Dikey hesap ağı ... 48
4.2.2 Batimetri tayini ... 49
4.2.3 Parametre tayini ... 50
4.2.3.1 Zaman dilimi ve adımı ... 50
4.2.3.2 Fiziksel parametreler ... 51
4.2.3.2.1 Hidrodinamik sabitler ... 51
4.2.3.2.2 Pürüzlülük katsayısı ... 51
4.2.3.2.3 Viskozite değerleri ... 51
4.2.3.2.4 Isı akış parametreleri ... 52
4.2.3.3 Rüzgar verileri ... 52
4.2.4 Başlangıç koşulları ... 54
4.2.5 Sınır koşulları ... 55
4.2.6 Gözlem istasyonları ... 55
5. DUYARLILIK ANALİZİ VE MODEL SONUÇLARI ... 57
5.1 Duyarlılık Analizi ... 57
5.1.1 Karadeniz'in baskın olduğu durum ... 57
5.1.2 Marmara Denizi'nin baskın olduğu durum ... 61
5.2 Hidrodinamik Model Sonuçları ... 64
5.2.1 Sıcaklık profilleri ... 64
5.2.2 Tuzluluk profilleri ... 68
5.2.3 Hız profilleri ... 73
5.2.4 Debi değerleri ... 86
6. SONUÇ VE ÖNERİLER ... 99
KAYNAKLAR ... 103
ÖZGEÇMİŞ ... 107

KISALTMALAR

AKOM **:** Afet Koordinasyon Merkezi

ECMWF **:** European Center for Medium-Range Weather Forecasts

İSKİ **:** İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi

RANS : Reynolds Averaged Navier - Stokes

SEMBOLLER

$\boldsymbol{B_\varepsilon, B_k}$: Kaldırma kuvveti akısı

C : Chezy katsayısı

$\boldsymbol{C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}}$: k - ε modeli katsayıları

$\boldsymbol{D_v}$: Türbülans yayınırlık katsayısı

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Türbülanstan doğan Enerji Kaybı

f : Coriolis Parametresi (Atalet Frekansı)

$\boldsymbol{g}$: Yerçekimi İvmesi

$\boldsymbol{g'}$: Azaltılmış yerçekimi ivmesi

G : Birleşik Froude Sayısı

H : Su Derinliği

h : Su yüzeyi kotu

k : Türbülans Kinetik Enerjisi

$\boldsymbol{K_v}$: Türbülans kinetik enerji katsayısı

$\boldsymbol{\mu_t}$: Türbülans dinamik viskozitesi

$\boldsymbol{N_{Fr_i}}$: i numaralı (Üst veya Alt) tabakaya ait Densimetrik Froude Sayısı

$\boldsymbol{\nu}$: Kinematik Viskozite

$\boldsymbol{\nu_{sgs}}$: Grid Altı Ölçekli Viskozite

p : Basınç

$\mathbf{p_a}$: Atmosfer Basıncı

$\boldsymbol{P_k}$: Türbülans kinetik enerjisinin üretim parametresi

$\boldsymbol{P_\varepsilon}$: Türbülans kinetik enerjisinin sönümlenme parametresi

ρ : Suyunu Özgül kütlesi

$\boldsymbol{\rho_1}$: Üst tabakaya ait özgül kütle

$\boldsymbol{\rho_2}$: Alt tabakaya ait özgül kütle

S' : Çalkantı sonucu oluşan şekil değiştirme oranı

$\boldsymbol{\sigma_T}$: Prandtl – Schmidt Sayısı

$\boldsymbol{\sigma_k}$: Türbülans kinetik enerjisi düzeltme faktörü

$\boldsymbol{\sigma_\varepsilon}$: Türbülans enerji kaybı düzeltme faktörü

t : Zaman

$\boldsymbol{\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}}$: x, y ve z yönündeki gerilme bileşenleri

$\boldsymbol{\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}}$: x-y, x-z ve y-z düzlemlerindeki kayma gerilmeleri

U : x yönündeki derinlik ortalamalı akım hızı

u : x yönündeki akım hızı

$\boldsymbol{V_i}$: i numaralı (Üst veya Alt) tabakaya ait Ortalama Akım Hızı

v : y yönündeki akım hızı

w : z yönündeki akım hızı

$\boldsymbol{y_i}$: i numaralı (Üst veya Alt) tabakaya ait Akım Derinliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : İstanbul'daki aylık ortalama sıcaklık ve nispi nem değerleri. **16**

Çizelge 2.2 : İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişindeki hidrografik değerler (Türk Boğazlar Sistemi'nin Oşinografik Atlası, 2009). **19**

Çizelge 2.3 : İstanbul Boğazı'nın Marmara çıkışındaki Hidrografik Değerler (Türk Boğazlar Sistemi'nin Oşinografik Atlası, 2009). **20**

Çizelge 2.4 : İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney sınırlarında ölçülmüş aylık ortalama debi değerleri (Altıok, 2015). **25**

Çizelge 3.1 : Pendik ve Anadolu Kavağı istasyonlarında ölçülmüş aylık ortalama su seviyeleri. **33**

Çizelge 5.1 : İstanbul Boğazı'nın Kuzeyinde gözlenen Aylık Ortalama Hız Değerleri. **81**

Çizelge 5.2 : İstanbul Boğazı'nın Güneyinde gözlenen Aylık Ortalama Hız Değerleri. **83**

Çizelge 5.3 : İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde gözlenen aylık ortalama debi değerleri. **87**

Çizelge 5.4 : İstanbul Boğazı'nın güneyinde gözlenen aylık ortalama debi değerleri. **88**

Çizelge 5.5 : İstanbul Boğazı'nın güney ve kuzeyinde ölçülen aylık ortalama debi değerleri (İSKİ, 2004 ve Altıok, 2015). **89**

Çizelge 5.6 : Aylık su seviyesi farkı ve debi ortalamaları. **93**

Çizelge 5.7 : Regresyon analiz tablosu. **98**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İstanbul Boğazı'nın uydudan görüntüsü. **2**

Şekil 1.2 : Tipik bir tabakalı akım yapısına sahip olan İstanbul Boğazı'nın boykesiti (Öztürk, 2010). **6**

Şekil 2.1 : İstanbul Boğazı'na ait batimetri haritası. **12**

Şekil 2.2 : İstanbul Boğazı'ndaki yer isimleri ve ölçüm istasyonları (Artüz, 2007). **15**

Şekil 2.3 : Yönlerine göre rüzgar isimleri. **18**

Şekil 2.4 : İstanbul Boğazı'nın güney eşiği üzerinde 4 farklı tipte oluşan hız profili (Yüksel vd., 2008). **22**

Şekil 2.5 : İstanbul Boğazı yüzey akıntı vektörlerini gösteren harita (Artüz, 2007). **23**

Şekil 2.6 : İstanbul Boğazı'nın 2003 Kasım ayına ait boykesit profili (İSKİ, 2004). **24**

Şekil 3.1 : İstanbul Boğazı'na ait batimetri haritası. **27**

Şekil 3.2 : İSKİ'ye ait Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi'ndeki ölçüm istasyonları. **28**

Şekil 3.3 : İstanbul Boğazı'nın Karadeniz sınırı için tuzluluk ölçüm tablosu. **30**

Şekil 3.4 : İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi sınırı için tuzluluk ölçüm tablosu. **30**

Şekil 3.5 : İstanbul Boğazı'nın Karadeniz sınırı için sıcaklık ölçüm tablosu. **31**

Şekil 3.6 : İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi sınırı için sıcaklık ölçüm tablosu. . **31**

Şekil 3.7 : 2003 yılına ait Pendik'teki su seviyesi değerleri. **32**

Şekil 3.8 : 2003 yılına ait Anadolu Kavağı'ndaki su seviyesi değerleri. **33**

Şekil 3.9 : 2003 Yılına ait ECMWF'ten temin edilen sıcaklık verileri. **34**

Şekil 3.10 : AKOM tarafından 2009-2015 yılları arasında yapılan nispi nem ölçümlerinin günlük bazda ortalamaları. **35**

Şekil 3.11 : 2003 yılına ait İstanbul'daki bulutluluk oranı tahmin değerleri. **36**

Şekil 3.12 : İstanbul'da 15.01.2003 ve 15.04.2003 tarihlerinde U yönündeki rüzgar hızı dağılımı. **37**

Şekil 3.13 : İstanbul'da 15.07.2003 ve 15.10.2003 tarihlerinde U yönündeki rüzgar hızı dağılımı. **37**

Şekil 3.14 : İstanbul'da 15.01.2003 ve 15.04.2003 tarihlerinde V yönündeki rüzgar hızı dağılımı. **38**

Şekil 3.15 : İstanbul'da 15.07.2003 ve 15.10.2003 tarihlerinde V yönündeki rüzgar hızı dağılımı. **38**

Şekil 3.16 : İstanbul'da 15.01.2003 ve 15.04.2003 tarihlerinde atmosfer basıncı dağılımı..... **39**

Şekil 3.17 : İstanbul'da 15.07.2003 ve 15.10.2003 tarihlerinde atmosfer basıncı dağılımı..... **39**

Şekil 4.1 : σ koordinat sistemi (solda) ve Z koordinat sistemi (sağda)..... **46**

Şekil 4.2 : İstanbul Boğazı'nın yatay hesap ağı..... **48**

Şekil 4.3 : İstanbul Boğazı'nın boykesiti ve dikey hesap ağı. **49**

Şekil 4.4 : İstanbul Boğazı'nın Delft3D ile hesap yapımı için hazırlanmış batimetrisi. **50**

Şekil 4.5 : Poyraz'ın hakim olduğu bir zaman dilimine ait rüzgar hız vektörleri..... **53**

Şekil 4.6 : Lodos'un hakim olduğu bir zaman dilimine ait rüzgar hız vektörleri..... **53**

Şekil 4.7 : İstanbul Boğazı'nın başlangıç tuzluluk değerlerini gösteren boykesit..... **54**

Şekil 4.8 : İstanbul Boğazı'nın başlangıç sıcaklık değerlerini gösteren boykesit. **55**

Şekil 4.9 : İstanbul Boğazı'nda kurulan gözlem istasyonları. **56**

Şekil 5.1 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği. **58**

Şekil 5.2 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği. **58**

Şekil 5.3 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği. **59**

Şekil 5.4 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği. **60**

Şekil 5.5 : Karadeniz'in baskın olması halinde 26.08.2003 tarihinde İstanbul Boğazı boykesiti hız vektörleri..... **60**

Şekil 5.6 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği. **61**

Şekil 5.7 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği. **62**

Şekil 5.8 : Marmara'nın baskın olması halinde 08.06.2003 tarihinde İstanbul Boğazı boykesiti hız vektörleri..... **62**

Şekil 5.9 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği. **63**

Şekil 5.10 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği. **64**

Şekil 5.11 : 15 Ocak 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili. **65**

Şekil 5.12 : 15 Nisan 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili. ... **66**

Şekil 5.13 : 15 Temmuz 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili. **66**

Şekil 5.14 : 15 Ekim 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili..... **67**

Şekil 5.15 : 2003 yılının 12 farklı gününe ait İstanbul Boğazı'ndaki sıcaklık değerleri (İSKİ, 2004). **67**

Şekil 5.16 : 15 Ocak 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili. ... **69**

Şekil 5.17 : 15 Nisan 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili. .. **69**

Şekil 5.18 : 15 Temmuz 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili. **70**

Şekil 5.19 : 15 Ekim 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili. ... **70**

Şekil 5.20 : İstanbul Boğazı'nda Ocak ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004). **71**

Şekil 5.21 : İstanbul Boğazı'nda Nisan ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004). **71**

Şekil 5.22 : İstanbul Boğazı'nda Temmuz ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004). **72**

Şekil 5.23 : İstanbul Boğazı'nda Ekim ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004). **72**

Şekil 5.24 : 15 Ocak 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili..... **73**

Şekil 5.25 : 15 Nisan 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili..... **74**

Şekil 5.26 : 15 Temmuz 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili..... **74**

Şekil 5.27 : 15 Ekim 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili. **75**

Şekil 5.28 : 15 Şubat 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri. **76**

Şekil 5.29 : 15 Mayıs 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri. **76**

Şekil 5.30 : 15 Ağustos 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri. **77**

Şekil 5.31 : 15 Kasım 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri. **77**

Şekil 5.32 : 15 Şubat 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri. **79**

Şekil 5.33 : 15 Mayıs 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri. **79**

Şekil 5.34 : 15 Ağustos 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri. **80**

Şekil 5.35 : 15 Kasım 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri. **80**

Şekil 5.36 : İstanbul Boğazı'nda gözlenen aylık ortalama akım hızları. **83**

Şekil 5.37 : İstanbul Boğazı'nda güney eşiğinin konumu. **84**

Şekil 5.38 : Güney eşiği üzerindeki 2 saatlik ortalama hız değerleri. **85**

Şekil 5.39 : Güney eşiği üzerindeki aylık ortalama hız değerleri. **86**

Şekil 5.40 : İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde ölçüm ve modelin üst tabaka debileri... **89**
Şekil 5.41 : İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde ölçüm ve modelin alt tabaka debileri. .. **90**
Şekil 5.42 : İstanbul Boğazı'nın güneyinde ölçüm ve modelin üst tabaka debileri... **90**
Şekil 5.43 : İstanbul Boğazı'nın güneyinde ölçüm ve modelin alt tabaka debileri. .. **90**
Şekil 5.44 : Günlük su seviyesi farkı ve kuzey ve güneydeki üst tabaka akımı debisi. **91**
Şekil 5.45 : Kuzey üst tabaka debisi ile su seviyesi arasındaki regresyon eğrisi. **94**
Şekil 5.46 : Güney üst tabaka debisi ile su seviyesi arasındaki regresyon eğrisi. **95**
Şekil 5.47 : Kuzey ile güney üst tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi. **95**
Şekil 5.48 : Kuzey ile güney alt tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi. **96**
Şekil 5.49 : Kuzey üst ile alt tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi. **97**
Şekil 5.50 : Güney üst ile alt tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi. **97**

İSTANBUL BOĞAZI'NIN 3 BOYUTLU HİDRODİNAMİK MODELİ

ÖZET

Türk Boğazlar Sistemi'nin önemli bir kısmı olan İstanbul Boğazı, Marmara ve Karadeniz'i birbirine bağlamaktadır. 31 km uzunluğunda olan Boğaz'ın, en dar kısmı 700 m, en geniş kısmı ise 3500 m'dir. İstanbul Boğazı'nın sınırları kuzeyde Anadolu Feneri ile Rumeli Feneri hattı, güneyde ise İnciburnu Feneri ile Ahırkapı Feneri hattıdır.

Dünyada nadiren görülen bir özelliğe sahip olan İstanbul Boğazı, birbirine çok yakın olan iki kara parçasını ayırması ve bilhassa Tabakalı Akım durumuna sahip olmasıyla bilinmektedir. Boğazdaki akıntı durumunu inceleyecek olursak üst ve alt tabaka olmak üzere hız vektörlerinin birbirine zıt yönde olduğu bir tabakalaşma hali mevcuttur. Karadeniz'deki su seviyesinin Marmara Denizi'ndeki su seviyesine göre daha yüksek kotlarda yer alması, ve Marmara Denizi'nin Karadeniz'e göre daha tuzlu olması bu tabakalaşmada en etkin faktör olarak gösterilebilir. Bu iki faktör sonucunda Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru bir üst akıntı, ve Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru bir alt akıntı oluşmaktadır. Atmosferik koşulların (Lodos gibi) aksi tarzda cereyan etmesi durumunu hariç tutarsak Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru seyr eden üst tabaka akımı, Tuna Nehri debisinin yüksek olduğu ekstrem koşulları yok sayarsak alt tabaka akımı yılın tamamında mevcuttur.

Bu çalışmada yapılmak istenen ve yapılan ise İstanbul Boğazı'ndaki bu tabakalı akım durumunun gerçeğe uygun bir şekilde modellenmesi oldu. Delft3D adlı bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı vasıtasıyla İstanbul Boğazı'nın 3 boyutlu bir Hidrodinamik modeli kuruldu.

Model sonuçları incelendiğinde, uygun sınır şartı, başlangıç şartı ve fiziksel parametreler girildiğinde, hidrodinamik ve hidrografik yapının gerçek durumdaki gibi davrandığı görülmüştür. Sıcaklık, tuzluluk ve hız profilleri, ölçüm profilleri ile uyuşmakta olup, üst tabaka ve alt tabaka debileri de ölçülen debilere yakın değerler almıştır. Buradan, modelin tutarlı ve güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3D HYDRODYNAMIC MODEL OF STRAIT OF ISTANBUL

SUMMARY

Strait of Istanbul is a waterway, which connects Black Sea and Marmara Sea and seperates Rumelia and Anatolia. It is one of the most important parts of Turkish Straits System. Its North Border is a line between Rumelia and Anatolia Lighthouses and its south border is a line between Ahırkapı Lighthouse and İnciburnu Lighthouse. Istanbul Strait's length is 31 km, and its width is changing about 700 m and 3500 m. There are two different humps at the south and north part of the strait. South hump's depth is about 30 m. North hump's depth is approximately 45-50 m. In addition, there is a constriction at the north side of south hump. In the constriction section, width is 700 m.

Water circulation along Istanbul Strait, includes very complicated and comprehensive processes, because of differences between North and South part of Istanbul Strait. North part of Istanbul Strait is an exit to Black Sea. Black Sea is an interior sea, which has lower salinity and higher water level. Especially, Danube River's freshwater discharge towards Black Sea, leads to low salinity (approximately 18 ppt), and high water levels. South part of Istanbul Strait is an entrance to Marmara Sea. Because of brackish water discharge from Mediterranean Sea, Marmara Sea is saltier than Black Sea. Freshwater flow and Brackish Water flow pass the Strait of Istanbul, without mixing. Freshwater flow routes the upper side of the Strait, and brackish water flow routes the lower side. This process is named as "Stratified Flow".

Istanbul Strait has a very complicated bathimetry and morphology. From the plan, Strait of Istanbul has a zig-zag shape. Its maximum depth is 110 m at the narrowest section which is between Kandilli and Bebek. Its minimum depth is on the south hump, which is 28 m. Average Depth is approximately 50-70 m, whole the strait. There are four islets in the strait. Most important of these islets are Kızkulesi and Galatasaray islets.

Hydrographic structure of Istanbul Strait has two layers. Upper layer is –except summer- cold and less salty. Lower layer is –except summer- warmer and saltier. In the Black Sea side of the strait, upper layer depth is 50-60 m. In the Marmara Sea side, upper layer is nearly 20-25 m. Therefore, there is an intermediate layer gradient between two borders of the strait. The intermediate layer's position changes seasonally. When upper layer flow rate is high, intermediate layer moves downwardly, and upper layer depth increases. When lower layer flow rate gets rise, intermediate layer moves upwardly and upper layer depth decreases.

Before the modelling process, a description about obtained data is required. In the model, it is used 4 different type data. 1. Bathymetric Data 2. Hydrographic Data, 3. Water Level Datas 4. Meteorological Data. Bathymetric data is obtained by Turkish Naval Forces Office of Navigation, Hydrography and Oceanography. The data has high definiton, and reflects the straits general and critical bathymetric conditions. Hydrographic data is obtained by General Directorate of Istanbul Water and Sewerage Administration. In the hydrographic data, there are temperature and salinity parameters with depth-changing format. This data is observed by monthly periods. In a year, there are 12 different hydrographic observations. Water Level datas are observed by Turkish Naval Forces. Hourly observations is occured for water levels. Water level observations are executed at two different stations, which are north and south part of the strait. Meteorological datas are obtained by ECMWF and AKOM. From ECMWF, wind speed and mean sea level air pressure observations are obtained. From AKOM, Temperature, Relative Humidity and Cloudiness datas are delivered.

To establish hydrodynamic model, Delft3D-Flow is used. Delft3D-Flow is a computational fluid dynamics software, which uses finite differences method to solve problems. Momentum, Continuity and Hydrostatic Pressure Equations are solved by Delft3D-Flow. In order to start modelling, computational grid is setted up. After the establishing of grid, bathymetry is made compatible with Delft3D-Flow format. Time frame, physical parameters, initial conditions, boundary conditions, processes, observation points are adjusted. Because of the stratified flow phenomena, 3D model establishment is required. Thus, for 3D model, 20 vertical layers are determined. Boundary conditions are Water Level, Salinity and Temperature. Initial conditions parameters are same with Boundary Conditions parameters.

After the running of model, salinity, temperature and velocity profiles are extracted. It is observed that, salinity and temperature profiles are similar with observational profiles of the strait. Velocity profiles are also realistic. In the hump and constriction zones, velocities are risen. In the mentiones zones, there is another different event, which is exchange between layers. Especially on the hump and constriction, two layers are being mixed, and a mass transfer occurs. Velocities magnitudes and vectors are differentiate month by month. In February, upper layer velocities are taken high values. On the other hand, in October month, upper layer velocities are getting lower values, moreover, rarely, upper layer velocity vectors' direction is changed 180^{o}. This event is blockage of upper layer. In February, January and December, lower layer blockage event is occured uncommonly. These blockage events are related with magnitude of discharge of layers.

Discharge values are one of the most important parameters of model's output. After the comparison of monthly averaged discharge values with measured discharge valuıes, it is determined that model results are reliable and confident. High correlation numbers are achieved, from comparison of model and measurment discharge values. Another remarkable result of model is, high correlation numbers between upper layer discharges and water level differences (between North and South sides of th strait) are found. It means, water level differences and upper layer discharges are convenient for regression analysis. When regression analysis is done, a regression equation is found, and this equation's R^2 value is sufficiently high.

Ultimate aim of the hydrodynamic modelling of Istanbul Strait is establishing a reliable and consistent model. From the consistent and harmonious results with observations, the goal of this study is achieved.

1. GİRİŞ

İstanbul Boğazı, Karadeniz ve Marmara Denizi'ni birbirine bağlayan ve İstanbul şehrini Anadolu ve Rumeli olmak üzere ikiye bölen dar bir su yoludur. Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su sirkülasyonu, İstanbul Boğazı aracılığıyla sağlanır. Şekil 1'deki uydu görüntüsünden de anlaşılacağı üzere İstanbul Boğazı, Karadeniz ve Marmara Denizi arasında mukavves bir kanal görünümü arzetmektedir. Boğaz'ın Kuzey girişi Anadolu ve Rumeli Fenerlerini birbirine bağlayan hat, Güney girişi ise Ahırkapı Feneri'ni Kadıköy İnciburnu Feneri'yle birleştiren hattır. Tarihte Doğu Roma ve Osmanlı gibi iki süper gücün başkentinde bulunma ayrıcalığını taşıyan İstanbul Boğazı, günümüzde Türkiye sınırları içerisinde yer almaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Yapılan çok sayıda ölçüm göstermiştir ki Karadeniz ve Marmara Denizi arasında İstanbul Boğazı yoluyla gerçekleşen bir su transferi mevcuttur. Bahsedilen su transferinin yapısı, Tabakalı Akım ismini taşımaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilmek istenen, İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik ve Oşinografik yapısının 3 boyutlu modellenmesidir. Modelleme işlemi için Delft3D-FLOW adlı bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı seçilmiştir.



Şekil 1.1 : İstanbul Boğazı'nın uydudan görüntüsü.

1.2 Literatür Araştırması

Dünyada en meşhur ve önde gelen Boğaz tipi sistemleri sıralayacak olursak, İstanbul, Çanakkale, Süveyş, Panama, Malaka, Babu'l-Mendeb, Hürmüz, Torres ve Cebel-i Tarık Boğazları bunların başlıcaları olur. İstanbul Boğazı, -tıpkı Çanakkale ve Cebel-i Tarık Boğazları gibi- Tabakalı Akım durumuna sahip olmasıyla diğer boğazlar arasında özel bir konumda bulunmaktadır. İstanbul Boğazı'nın hidrografik ve oşinografik yapısından ilk bahseden, bilindiği kadarıyla merhum Seyyah-ı Alem Evliya Çelebi'dir. Miladi 1682'de vefat eden Evliya Çelebi, 10 ciltlik Seyahatname'sinin 1. Cildinde İstanbul'u tanıtırken Boğaz'la ilgili rüzgar ve tuzluluk durumlarından bahsetmiştir (2011). Rüzgarla ilgili olarak, Lodos'un hakim olduğu zamanlarda Marmara Denizi'ndeki atmosfere yakın olan su kütlesinin Karadeniz'e doğru yönelerek bir karışıma sebep olduğu ve bu durumda iki deniz arasında bir sınır kalmadığı söylenmiştir. Tuzlulukla ilgili ise, Boğaz'ın Karadeniz tarafının az tuzlu, Marmara Denizi tarafının ise çok tuzlu olduğunı belirtmiştir.

Tabakalı Akım durumuyla ilgili bilgi veren ilk yazılı kaynak ise Kont Marsilli'nin İsveç Kraliçesi'ne yazdığı mektuplardır (Artüz, 2007). 1681 yılına ait olan bu mektuplarda Kont Marsilli, İstanbul Boğazı'nın iki tabakalı bir akım yapısına sahip olduğunu, üst tabakanın Karadeniz'den Marmara Denizi'ne, alt tabakanın ise Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru seyrettiğini yazmıştır. İstanbul Boğazı'nın birçok farklı yerinde ölçümler yapan Kont Marsilli, bu yaptığı ölçümlere istinad ederek,

Boğaz hakkında bir Deniz haritası hazırlamıştır. Ne var ki, ortaya attığı bu iki tabakalı akım teorisine, kendi zamanında şüphe ile yaklaşılmıştır.

Aradan 200 yıla yakın bir süre geçtiğinde İngiliz Amirali Wharton, 1872 yılında, bir donanma gemisi olan Shearwater ile İstanbul ve Çanakkale Boğazlarında Yoğunluk ve Tuzluluk ölçümleri yaptı (Artüz Ed., 2007). Amiral Wharton'ın bulgularına göre Ege Denizi'nden gelen alt tabaka akımı Çanakkale ve İstanbul Boğazları'ndan geçerek Karadeniz'e ulaşıyordu. Ayrıca Amiral Wharton, rüzgarın şiddetiyle deniz seviyesi ve akıntı hızı arasında güçlü bir ilişkinin olduğundan bahsediyordu.

1884 yılında, bir Rus Bahriye subayı olan Makaroff, Taman adlı gemisiyle İstanbul Boğazı'nda yaklaşık 1000 adet akıntı ölçümü, ve 4000 adet sıcaklık ve yoğunluk ölçümü gerçekleştirdi (Artüz Ed., 2007). Kendisinden önce yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgisi olmayan Makaroff, Wharton ve Marsilli ile aynı sonuca ulaştı ve temin ettiği bulguları 4 maddede sıraladı:

- İstanbul Boğazı alt ve üst tabakalarında birbirine zıt yönlü iki akım hali bulunmaktadır.
- Mevcut akımların şiddeti, iki tabaka arasındaki yoğunluk farkı, ve Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı ile ilişkilidir.
- İki tabaka arasındaki arayüzey, hareketsizdir ve büyük bir yoğunluk gradyanına sahiptir.
- Arayüzeyin derinliği rüzgar şiddetine, ve Karadeniz'deki su seviyesi değişimlerine bağlıdır.

Makaroff'un ulaştığı bu bulgular, bugün de geçerliliğini korur niteliktedir ve kurulan Hidrodinamik modelde bu bilgilerden istifade edilmesi gerektiği düşünülmüştür.

1894 yılında Spindler, Selanik isimli Türk gemisiyle Marmara, İstanbul Boğazı ve Çanakkale Boğazı'nda ölçümler yaptı (Artüz Ed., 2007). Bu çalışmanın amaçlarından biri, daha önce Amiral Wharton tarafından başlatılan, bölgenin Batimetrik haritasının oluşturulması işinin tamamlanması idi. Fakat asıl önemli olan ise kurduğu Hidrografik istasyonlar ile Boğaz'daki tuzluluk değerlerini rakamsal olarak sunması oldu. Hidrografik istasyonlarla yapılan ölçüme göre Karadeniz'den gelen yüzeysel akım, 18.1 ppt (parts per thousand – bin partikül içinde 18.1 partikül) tuzluluğa sahip olarak Boğaz boyunca Marmara Denizi'ne doğru seyretmekte iken, Akdeniz'den gelen 38.8 ppt tuzluluğa sahip alt akıntı Karadeniz'e yönelmektedir.

1910 yılında Danimarka'lı denizci Nielsen, Thor gemisiyle Karadeniz ve Boğazlarda ölçümlerde bulundu (Artüz Ed., 2007). Bu ölçümler neticesinde İstanbul Boğazı'nın Karadeniz sınırında üst ve alt tabaka arasındaki arayüzey mesafesini 30-40 m arası, Marmara Denizi sınırındaki arayüzey mesafesini ise 20-25 m olarak tespit etti. Ayrıca Nielsen'ın ölçümleri sonucunda Marmara Denizi derinliklerinin "ağır" Akdeniz kış suları ile dolu olduğu gözlendi. Bu da daha önceden yapılan varsayımlar için bir kanıt teşkil etmiş oldu.

1917 yılında Alman denizci Merz, ve ilk Türk Hidrografı olarak bilinen Ahmed Rasim bey, Adelgunde adlı yat ile İstanbul ve Çanakkale Boğazlarının Hidrografisiyle alakalı çalışmalara başladı (Artüz Ed., 2007). 1917 Eylül-Ekim'inde ve 1918 Mayıs-Temmuz'unda bu çalışma kapsamında pek çok ölçüm yapıldı. Merz ölçümleri yapmasına rağmen ömrü vefa etmeyerek ölçümler üzerine analiz yapma işini Moeller'e bıraktı. Moeller'in bu ölçümlerden ulaştığı sonuca göre Karadeniz'den Marmara Denizi'ne geçen üst tabaka akımı debisi 12620 m^3/s olarak bulunmuşken, tam tersi istikametteki alt tabaka debisinin 6120 m^3/s değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çeçen ve diğ. (1981), ölçüm ve matematiksel model çalışmalarında bulundu. 1980 yılına ait 4 mevsimde, İstanbul Boğazı'nın tuzluluk ve sıcaklık profilleri çıkartıldı. Bu çıkarılan profillere göre matematiksel model kuruldu. Ölçümlerden ve model sonuçlarından yapılan çıkarıma göre Marmara Denizi'nden gelen alt tabaka akımının her zaman Karadeniz'e ulaşmadığı bilgisine ulaşıldı. Bayazıt ve Sümer (1982), Çeçen ve diğ. (1981)'nin başladığı çalışmaları devam ettirmiştir. Bu çalışmada alt ve üst tabaka için tuz ve su denge denklemleri yazılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile İstanbul Boğazı'nda yapılan ölçümler uyum arz etmektedir.

Sümer ve Bakioğlu (1981), kurdukları İstanbul Boğazı'nın matematiksel modelinde 1966 Temmuz'u ile 1968 Şubat'ı arasındaki dönemde Anadolu Kavağı ve Üsküdar'da yapılan su seviyesi ölçümlerini esas alarak üst tabaka debisini ortalama olarak 19700 m^3/s, alt tabaka debisini ise 7300 m^3/s olarak hesaplamıştır. Bu çalışmada tuzluluk değerleri üst tabaka için 17.5 ppt, alt tabaka için 38.5 ppt kabul edilmiştir. Temmuz 1966 ile Şubat 1968'de yapılan ölçümlere göre, İstanbul Boğazı'nın kuzeyi (Kavak) ile güneyi (Üsküdar) arasındaki ortalama su seviyesi farkı 33 cm'dir. Sümer ve Bakioğlu (1981), bu çalışma sonucunda İstanbul Boğazı'nın kuzeyi ile güneyi

arasındaki su seviyesi farkının değişiminin, tabakalı akım yapısına oldukça esaslı bir etkisinin olduğunu vurgulamıştır.

Latif ve diğ.'nin (1991) yayınladığı Akdeniz sularının Karadeniz'deki varlığını açıklayan çalışmada, Akdeniz'den (dolayısıyla Marmara'dan) gelen alt tabakadaki su kütlesinin Karadeniz'e her zaman ulaşamama nedeninin kuvvetli kuzeyli rüzgarlar olduğu belirtildi. Diğer taraftan yine aynı çalışmada, kuvvetli güneyli rüzgarların üst tabakadaki Karadeniz kökenli su kütlesi akımını bloke ettiği belirlendi.

Özsoy ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru seyreden alt tabaka su kütlesi akımının bloke olması iki sebebe bağlanmaktadır. Bunlardan birisi kuvvetli kuzeyli rüzgarlar olarak gösterilirken, diğeri ise Karadeniz'e giren tatlı su hacmindeki artıştır. Karadeniz'e giren fazla miktardaki tatlı su debisi, İstanbul Boğazı'na girerek alt tabakayı bloke etmektedir. Bunun sonucunda alt tabakadaki tuzlu suyun büyük bir kısmı üst tabakaya katılarak Marmara istikametine yönelmektedir.

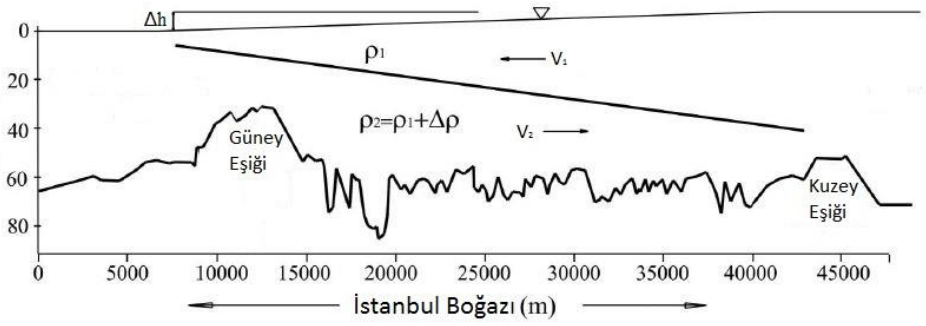
Armi (1986), tabakalı akımları incelediği çalışmasında, Densimetrik Froude Sayısı ve Birleşik Froude Sayısı adlı boyutsuz iki parametre tanımlamıştır. Densimetrik Froude Sayısı, iki tabaka için ayrı ayrı tanımlanan, hangi tabaka inceleniyorsa o tabakanın derinliğini ve ortalama akım hızını hesaba katan boyutsuz bir parametredir. Birleşik Froude Sayısı, tabakalı akımlarda üst tabakanın ve alt tabakanın Densimetrik Froude Sayılarının karelerinin toplamının karekökünü eşittir. Farmer ve Armi (1986), tabakalı akımlar üzerine yaptıkları incelemelerde açık kanallardaki daralma ve eşik bölgelerinde bir takım sonuçlara ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre kesitin daraldığı bölgelerde, ve derinliğin azaldığı eşikli kısımlarda Birleşik Froude Sayısı 1 değerini almaktadır. Daralma ve eşik olarak zikredilen bu bölgelerde "maximal exchange" (Azami alışveriş) denilen bir vakıa gerçekleşmektedir. Azami alışveriş, tıpkı tek tabakalı akımlarda meydana gelen hidrolik sıçramada olduğu gibi, akım hızının olağan duruma göre büyük bir değere kavuşup jet halinde güzergahına devam etmesi şeklinde cereyan eder. Bu vasıtayla menba ve mansap tarafındaki su alışverişi azami haddine ulaşır ve hidrolik kontrol sağlanmış olur.

$$N_{Fr_i} = \frac{V_i}{\sqrt{g' * y_i}} \tag{1.1}$$

$$g' = g * \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \tag{1.2}$$

$$G^2 = {N_{Fr_1}}^2 + {N_{Fr_2}}^2 \tag{1.3}$$

Oğuz ve diğ. (1990), İstanbul Boğazı'nın Matematiksel Modelini kurarak model çalışmalarını devam ettirdiler. Bu model çalışmasında İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney girişlerinde bulunan eşiklerin ve ayrıca Emirgan-Arnavutköy arasındaki 2.5 km uzunluğunda ve 700 m genişliğindeki nisbeten dar kesimin Boğazın hidrolik kontrolünü sağladığı ortaya konuldu. Kurulan modele göre eşik ve daralma bölgelerinde Birleşik Froude Sayısı'nın 1'e eşit olduğu, ve geri kalan bölgelerde ise 1'den küçük olduğu tespit edildi. Özellikle Armi ve Farmer'ın (1986) ortaya koyduğu "Azami Alışveriş" (Maximal Exchange) vakıasının İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney eşiklerinde ve güneye yakın bölgedeki daralma kesitinde gerçekleştiğinin açıklanması, bu model çalışması için kayda değer bir husus olmuştur. Şekil 1.2'de İstanbul Boğazı'nın boykesiti ve iki tabaka arasındaki ayrım çizgisi verilmiştir. Azami alışverişin vuku bulduğu yerler kuzey ve güneydeki eşik, ve 20. Km civarında olan en derin ve en dar bölgedir.



Şekil 1.2 : Tipik bir tabakalı akım yapısına sahip olan İstanbul Boğazı'nın boykesiti (Öztürk, 2010).

Beşiktepe ve diğ. (1994), ADCP (Akustik Doppler Akıntı Profilleyici) ve CTD (İletkenlik, Sıcaklık ve Derinlik) ölçümü yapan cihazlar vasıtasıyla bir takım ölçümler yapmışlar ve bu ölçümlerden elde edilen hidrografik veriler (tuzluluk ve sıcaklık) yardımıyla bazı dinamik hesaplamalarda bulunmuşlardır. Bahsedilen ölçümler İstanbul ve Çanakkale Boğazları, ve Marmara Denizi'nde yani diğer adıyla Türk Boğazlar Sistemi'nde yapılmıştır. Bu ölçümler vasıtasıyla Türk Boğazlar Sistemi'nin

tuzluluk, sıcaklık ve akım profilleri çıkartılarak literature hatırı sayılır bir katkıda bulunulmuştur. Ölçüm sonuçlarından ve kararlı akım durumu olduğu varsayılarak yapılan hesaplamaların ardından Karadeniz'den Marmara Denizi'ne geçen net debinin yaklaşık 20000 m^3/s, ters yöndeki alt tabaka akımının ise 10000 m^3/s olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sur ve diğ. (1994), Karadeniz'e deşarjı olan nehirlerin debileriyle Karadeniz su seviyesi arasında çok yakın bir ilişki olduğunu, bu nehirler arasından da Tuna Nehri'nin etkisinin en fazla olduğunu belirtmiştir. Bu durumda Tuna Nehri'nin debisinin artması durumunda Karadeniz su seviyesinin yükselmesi, ve İstanbul Boğazı üst tabaka akımının debisinin artması beklenmektedir. Bir tatlı su deşarj kaynağı olan Tuna Nehri'nin debisi arttığında İstanbul Boğazı'nın üst tabaka derinliği artmakta, ve tuzluluk değeri azalmaktadır.

Gregg ve diğ. (1999) İstanbul Boğazı'nda yapılan ölçümlerden yola çıkarak bazı sonuçlara ulaşmışlardır. Bu sonuçların belki de en önemlisi İstanbul Boğazı'ndaki akımın "Yarı-Kararlı" olduğu yönündedir. Bu çalışmanın öncesinde İstanbul Boğazı ile ilgili yapılan model çalışmalarında Kararlı akım durumu esas alınırken bahsi geçen çalışmayla birlikte "Yarı-Kararlı" akım hali ön plana çıkmıştır. Gregg ve Özsoy, (2002) bir önceki çalışmada tesbit edilen "Yarı-Kararlı" akım durumuna binaen bazı mülahazalarda bulunmuşlardır. Bu mülahazalara göre İstanbul Boğazı'ndaki üst tabaka akımı Marmara Denizi'ne girerken, alt tabaka akımı ise Kuzey eşiği üzerinden Karadeniz'e girerken Sel Rejimine sahiptir. Ayrıca taban sürtünmesi, İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısı üzerinde oldukça önemli bir konuma sahiptir. Yine aynı çalışmaya göre İstanbul Boğazı'nın güneyindeki eşik ile güneye yakın olan daralma bölgeleri birbirinden ayrı düşünülemez. Çünkü bahsedilen bu iki yapı hidrodinamik etkileri düşünüldüğünde (hidrolik kontrol gibi) birbirlerini tamamlayıcı niteliktedir.

İstanbul Boğazı'nın 3 boyutlu hidrodinamik modeli, Telemac3D adlı bir akışkanlar dinamiği yazılımıyla Akay (2002), tarafından kurulmuştur. Bu modelde yapılandırılmamış ağ sistemi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine göre İstanbul Boğazı'nın hidrodinamiği sayısallaştırılmıştır. Mevcut modelin güney sınır şartı İstanbul Boğazı'nda daha önce yapılan debi ölçümlerine dayanırken, kuzey sınır şartı ise serbest su derinliği ve hızı olarak belirlenmiştir. Marmara Denizi'ne açılan sınırda kullanılan debi değerleri, Özsoy ve diğ. (1998) tarafından yapılan çalışmada verilen

debi değerlerinden istifade edilerek oluşturulmuştur. Burada Akay (2002), İstanbul Boğazı'nın üst tabaka debisi ile alt tabaka debisi arasında, ve alt tabaka tuzluluğu ile üst tabaka tuzluluğu arasında yaklaşık olarak 2/1'lik bir oranın varlığından bahsetmiştir.

Sıcaklık dolayısıyla oluşan tabakalaşma durumu, sadece İstanbul Boğazı'na münhasır olmayıp pek çok akarsu ve gölde meydana gelebilmektedir. Örneğin, etrafı kapalı sınırlarla çevrili olan Van Gölü, atmosfer sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık tabakalaşmasına sahne olmaktadır (Turunçoğlu, 2003). Yine Beyşehir Gölü de atmosfer sıcaklığı ile derin göl sularının sıcaklığı arasındaki farka binaen bir sıcaklık tabakalaşması yaşamaktadır (Mercan, 2006). Göllerde sıklıkla rastlanan bir durum olması hasebiyle sıcaklık tabakalaşmasının İstanbul Boğazı'nda da meydana gelmesi anormal görülmemektedir. Fakat tuzluluk farkı dolayısıyla oluşan tabakalaşma, İstanbul Boğazı'nın sıradışı hidrodinamik yapısını ortaya koyabilmek açısından iyi bir fikir vermektedir.

Öztürk (2010), İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modelini Danimarka Hidrolik Enstitüsü tarafından geliştirilen bir yazılım olan MIKE 3 adlı yazılımda kurmuştur. Kurulan modelde sıcaklık ve tuzluluk sınır şartı İSKİ tarafından 2004-2005 yıllarında yapılan ölçümlerden, su seviyesi sınır şartı ise MARMARAY'ın inşaatı çalışmaları kapsamında İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney çıkışlarında yapılan Su Seviyesi ölçümlerinden alınmıştır. İki adet Su Seviyesi ölçüm istasyonuna ek olarak İstanbul Boğazı'nın muhtelif noktalarında 3 adet gözlem istasyonu akıntı ölçümü gerçekleştirmiştir. Bu akıntı ölçümlerinden yola çıkılarak Mart 2005 dönemi için modelin kalibrasyonu sağlanmıştır. Kalibrasyon işleminden sonra ise 4 farklı dönem için modelin Doğrulanması yapılmıştır. Akıntı ölçümlerine göre yapılan Doğrulama işleminde gerekli hassaslığın sağlanması üzerine modelin uygun olduğu görülmüştür.

Jarosz ve diğ. (2011), 2008 Eylül'ü ile 2009 Şubat'ı arasındaki 5 aylık süreçte İstanbul Boğazı'nda yapılan ölçümleri değerlendirmiştir. Zikredilen ölçümler İstanbul Boğazı'nın Kuzey ve Güney çıkışlarında ADCP VE CTD cihazları ile yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre üst tabaka debisi 12000 – 14000 m^3/s aralığında yer alırken, alt tabaka debisi 8000 – 10500 m^3/s aralığında yer almıştır.

Öztürk (2011), hidrodinamik modelleme çalışmalarından ulaşılan bulgulara göre, İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi girişinden alt tabakaya verilecek bir atık su

deşarjının %70'inin, İstanbul Boğazı'nın kanal kısmından yapılacak bir alt tabaka deşarjının ise %90-95'inin Karadeniz'e ulaştığını belirtmiştir. Bu bilgiye istinaden, İstanbul Boğazı'nın güney kısmındaki eşik ve daralma bölgelerinde hatırı sayılır bir miktarda tabakalar arası karışma olduğu söylenebilir.

Sözer (2013) tarafından yayınlanan doktora çalışmasında İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modeli ROMS (Region Ocean Modeling System) adlı yazılım ile kurulmuştur. İstanbul Boğazı'nın Kuzey çıkışı için Şile'de, Güney çıkışı için ise Yalova'da 2008-2012 yılları arasında yapılan su seviyesi ölçümlerinden elde edilen veriler Su Seviyesi sınır şartı olarak girilmiştir. Modelde Karadeniz ve Marmara Denizi tuzluluk ve sıcaklık sınır şartları olarak sabit tuzluluk ve sıcaklık değerleri ile tabakalı tuzluluk ve sıcaklık değerlerinin hidrodinamik yapıya etkisi üzerinde denemeler yapılmıştır. Bunun sonucunda hidrografik verilerin (sıcaklık ve tuzluluk) tabakalı sınır şartı olarak girilmesi durumunda modelde oluşan akım koşullarının gerçeğe çok yakın olduğu görülmüştür.

Altıok ve Kayışoğlu (2015), İSKİ'nin ADCP ve CTD cihazlarıyla yaptığı 11 yıllık (1999-2010) akıntı profili ölçümlerini ve 15 yıllık (1996-2010) sıcaklık ve tuzluluk ölçümlerini esas alarak bazı değerlendirmelerde bulunmuştur. Çalışmanın esas amacı, İstanbul Boğazı'nın sıcaklık, tuzluluk ve akıntı profillerini çıkarmak ve bu profillerdeki zamanla meydana gelen değişiklikleri tespit etmek şeklinde belirtilmiştir. Mezkur çalışmaya göre, üst tabaka debisi yaklaşık 13000 m^3/s, alt tabaka debisi ise 7800 m^3/s olarak verilmiştir. Moeller'in ulaştığı değerlere yakın olması, ve 15 yıllık bir ölçüm sonucunda ulaşılması gibi faktörler baz alınırsa, mevcut çalışmanın dikkat çekici bir nitelikte olduğu görülecektir.

1.3 Hipotez

Literatür çalışmalarından anlaşıldığı kadarıyla İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısını yansıtan en önemli unsur tabakalı akım halidir. Tabakalı akımın oluşabilmesi için ise iki şart gerekmektedir. 1. Boğazın kuzey ve güney sınırları arasındaki su seviyesi farkı. 2. Boğazın kuzey ve güney sınırları arasındaki tuzluluk ve sıcaklık farkı. Delft3D-FLOW adlı Sonlu Farklar Yöntemi'ne göre akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerini sayısallaştırarak çözen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programında kurulan bir İstanbul Boğazı modelinde bu iki şart, sınır ve başlangıç şartı

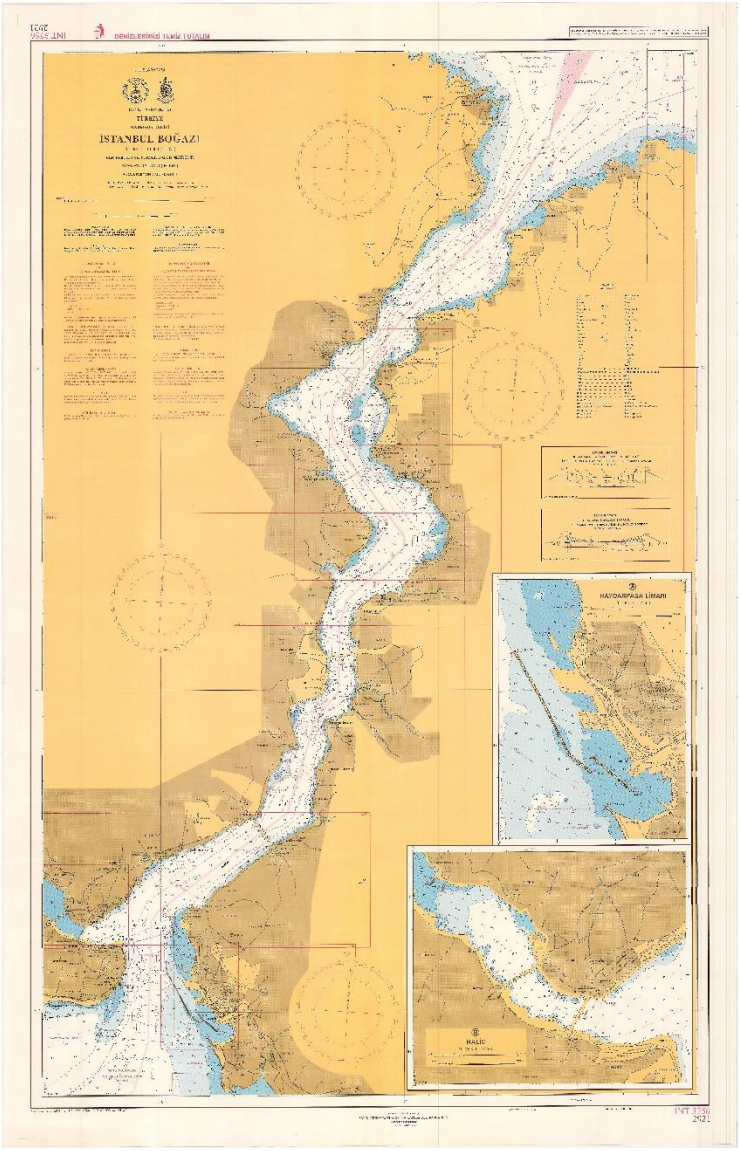
olarak girildiğinde tıpkı gerçek durumdaki gibi bir tabakalı akım yapısının oluşması beklenmektedir.

2. İSTANBUL BOĞAZI'NIN FİZİKSEL YAPISI

Dünyada nadiren görülen tarzda bir boğaz olması bakımından İstanbul Boğazı'nın fiziksel şartları, zikre şayan bir nitelik taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında kurulan modelde özgül ağırlıkları hissedilir derecede yüksek olan Batimetri, Meteoroloji, Hidrografi (Sıcaklık ve Tuzluluk) ve Hidrodinamikle ilgili koşulları, teferruatıyla irdelenmeye fazlasıyla layıktır. Kurulan modelin fiziksel mekanizmalarını anlayabilmek için bahsedilen koşulların tavsif edilmesi oldukça faydalı olacaktır.

2.4 Batimetri

31 km uzunluğa sahip olan İstanbul Boğazı, Marmara Denizi ile Karadeniz'i birleştiren bir su yolu olma özelliği taşımaktadır. İstanbul Boğazı'nın kuzey girişinde derinliği 45-60 m arasında olan 2 km uzunluğunda bir eşik mevcuttur. Bu eşik, Karadeniz Baseni ve İstanbul Boğazı arasındaki sınırı oluşturur. Boğazın enkesit şekli doğal bir su kanalına benzemektedir. Öyle ki, Boğaz girişinden Kandilli-Bebek hattına kadarki kesim, maksimum derinliği 60-80 metre arası olan bir kanal şekli arzeder. Kandilli-Bebek kısmında ise derinlik 110 metreyi bulmaktadır. Kandilli-Bebek'ten Ortaköy-Kuzguncuk hattına kadar olan kısmın maksimum derinliği 50-75 metre değerleri arasında kalmaktadır. Ortaköy-Kuzguncuk hattından Beşiktaş-Üsküdar hattına kadar olan mesafede maksimum derinlik 40-50 metre arasındadır. Beşiktaş-Üsküdar ve Sarayburnu-Üsküdar hatlarında ise 28-30 metre derinliklerinde eşikler mevcuttur. İstanbul Boğazı'nın bu kısmında (Üsküdar önleri) derinlik 30 metre civarında seyretmekte iken Eminönü-Şemsipaşa hattından itibaren derinlik 40 metreyi aşmakta, hatta biraz daha güneydeki Topkapı Sarayı-Doğancılar hattıyla birlikte 50 metrenin üstüne çıkmaktadır. İstanbul Boğazı'nın güney sınırını oluşturan Ahırkapı Feneri – İnciburnu Feneri hattına kadar 50-60 metre arasında değişen maksimum derinlik, bu hattın güney kısmında artmaktadır ve böylece Marmara Denizi'nin İstanbul Boğazı'na nisbeten daha derin olan batimetrisi başlamış olur. Şekil 2.1'de İstanbul Boğazı'nın Batimetrik haritası verilmiştir.



Şekil 2.1 : İstanbul Boğazı'na ait batimetri haritası.

Boğazdaki maksimum derinliklere sahip olan kısımların yanında hatırı sayılır bir önemi haiz olan sığ bölgeler mevcuttur. Öncelikle bir ada veya adacık görünümü arzeden yapılardan bahsedecek olursak bunların 4 tane olduğunu görürüz. 1.Rumeli Kavağı açığında bulunan, takriben 180 metre uzunluğu ve 120 metre genişliğe sahip olan Dikilikaya, 2. Bebek Koyu'ndaki Bebek Feneri'nin üzerinde bulunduğu Ada, 3. Kuruçeşme Feneri kayalığı ve bu kayalığın açığında bulunan Galatasaray Adası, 4. Salacak mevkiinin 200 metre açığında bulunan Kız Kulesi'nin üzerinde yer aldığı ada

Ada ve adacıklar haricinde bir de sığ bölgeleri zikretmek gerekmektedir. Bunları sıralayacak olursak: 1. İstanbul Boğazı'nın girişindeki Rumeli Feneri açıklarından Büyük Liman açıklarına uzanan bölgedeki sığlık, 2. Anadolu Feneri açıklarından

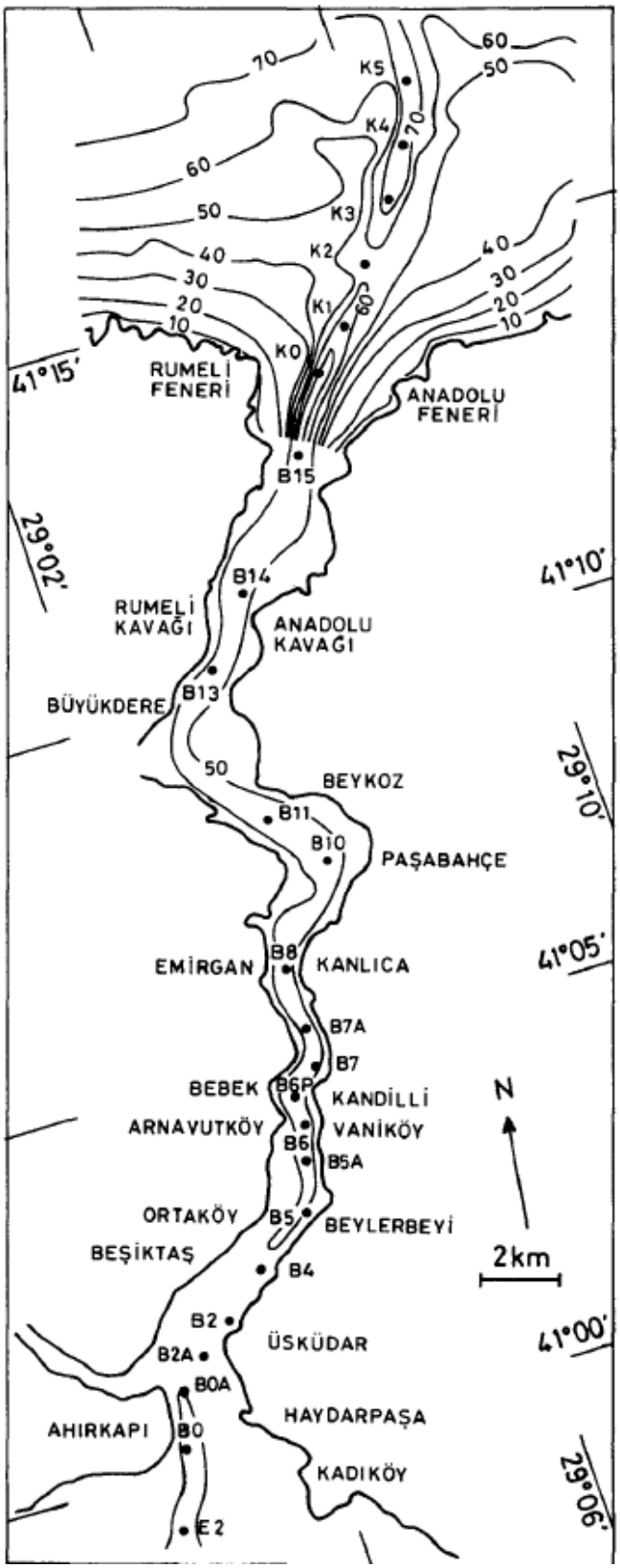
Anadolu Kavağı kıyısına kadar uzanan sığlık, 3. Büyükdere Koyu'ndaki sığlık, 4. Umuryeri Trafik Gözcü İstasyonu açıklarındaki büyük sığlık, 5. Tarabya Koyu'ndaki sığlık, 6. İstinye Koyu ve Yeniköy sahilindeki sığlık, 7. İncirköy ve Paşabahçe açıklarındaki sığlık, 8. Rumeli Hisarı'nın kuzeyinden başlayıp Bebek Koyu'na kadar gelen, ve oradan Galatasaray Adası'na ulaşan sığlık, 9. Kanlıca Sahili'nden başlayıp Anadolu Hisarı ve Küçüksu Kasrı sahiline kadar gelen sığlık, 10. Kandilli Burnu'ndan başlayıp Beylerbeyi Sahili'ne kadar uzanan sığlık, 11. Galatasaray Adası ile Boğaziçi Köprüsü arasında kalan bölgede Rumeli Yakası Sahili'ndeki sığlık, 12. Dolmabahçe Sarayı Sahili'ndeki sığlık, 13. Üsküdar Şemsipaşa açıkları ile Kadıköy Moda Sahili açıkıları arasında kalan bölgedeki devasa sığlık, 14. Tarihi Yarımada'nın güneydoğusunda yer alan Ahırkapı Burnu'nun güney ve doğusunda bulunan sığlık.

14 maddede sıralanan bu sığ bölgelerde su derinliği 0 ila 10 metre arasında değişmektedir. Bu değişikliğin vuku bulmasında rüzgar koşulları, Karadeniz'den İstanbul Boğazı'na gelen debi, yağış şiddeti, buharlaşma gibi faktörler aktif rol oynamaktadır.

İstanbul Boğazı'nın tabii bir kanal görünümü arzetmesi, hidrodinamik ve oşinografik yapının sağlıklı olarak anlaşılabilmesi için morfolojik yapının doğru şekilde tahlil edilmesinin gerekliliğini doğurur. Bu bapta, İstanbul Boğazı'nı oluşturan Anadolu ve Rumeli sahilleri arasındaki mesafenin konuma göre nasıl değiştiğini incelemek yerinde olacaktır.

Boğaz'ın Karadeniz girişindeki Rumeli ve Anadolu Fenerleri arasındaki mesafe yaklaşık 3.5 km'dir. Rumeli-Anadolu Feneri hattından güneybatıya gidildikçe kesit daralmaktadır, ta ki Çalı Burnu – Fil Burnu hattına kadar. Çalı Burnu – Fil Burnu arası mesafe 1.3 km'dir. Bu hattan güneybatıya doğru gidildikçe iki kıyı arası mesafe önce 2.7 km'ye kadar artış göstermektedir. Daha sonra ise Rumeli ve Anadolu Kavaklarının olduğu kesimde mesafe 1 km'ye kadar düşmektedir. Karşılıklı iki kavağın olduğu hattan güneybatıya doğru giderken kıyılar arası mesafe 1 - 1.5 km arasında değişmektedir. Fakat Mezar Burnu - Macar Burnu hattından sonra hızlı bir enkesit genişlemesi başlamaktadır. Öyle ki, İstanbul Boğazı'nın en geniş kesiti olarak kabul edilen Çayırbaşı – Umuryeri Hattına kadar gelinir. Buradaki ara mesafe 3.6 km'dir. Meydana gelen bu maksimum genişlemeden sonra güneydoğu istikametine doğru bir daralma meydana gelmektedir. Bu daralma da Nalet Burnu – Selvi Burnu arasındaki mesafe olan 1.2 km ile son bulmaktadır. Nalet Burnu – Selvi Burnu hattından

güneydoğuya gidildikçe enkesitte bir genişleme olduğu görülecektir. Bu genişlemenin bittiği hat, Yeniköy – İncirköy hattıdır. Yeniköy ile İncirköy sahilleri arasındaki mesafe 2.2 km'dir. Yeniköy – İncirköy hattından güneybatı yönüne gidildikçe Boğaz enkesiti daralma göstermektedir. Emirgan – Kanlıca hattına gelindiğinde kesit genişliğinin 850 m olduğu görülmektedir. Bu kesitten itibaren İstanbul Boğazı'nın en dar kesitli bölgesi güneye doğru uzanmaktadır. Yine bu dar kesitteki Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nde iki kıyı arası mesafe 760 m'dir. Bu bölgedeki ve bütün İstanbul Boğazı'ndaki en dar kesit ise 700 m ile Kandilli Burnu – Aşiyan Burnu hattının bulunduğu kesittir. Özellikle Akıntı Burnu – Vaniköy hattından güneye doğru, bu dar kesitte hatırı sayılır bir genişleme meydana gelir. Bu genişleme, Çengelköy ile Kuruçeşme Sahili arasındaki 1.6 km'lik mesafenin varlığı ile sonlanır. Çengelköy – Kuruçeşme Sahili hattından sonra güneybatıya doğru giderken kesitte kısa süreli bir daralma gözlenir. Bu daralmanın maksimum olduğu yer Boğaziçi Köprüsü'nün bulunduğu 1 km genişliğe sahip hattır. Boğaziçi Köprüsü'nden güneybatıya gidildikçe yine bir genişleme ortaya çıkmaktadır. Bu genişlemenin maksimum olduğu yer Dolmabahçe – Üsküdar arasındaki 1.8 km'lik mevkidir. Dolmabahçe – Üsküdar hattından sonra Kabataş – Şemsipaşa hattındaki ara mesafe 1.6 km olmaktadır. İstanbul'un Rumeli kısmında Tarihi Yarımada tam da burada başlamaktadır. Şemsipaşa muhitinin batısı Haliç'in başladığı yere tekabül etmektedir. Tarihi Yarımada ise Haliç'in güney kısmında yer almaktadır. Sarayburnu, Tarihi Yarımadanın en kuzeydoğu noktasında yer alması hasebiyle İstanbul Boğazı'ndaki mesafe değişimleri ele alındığında zikredilebilecek en mühim noktalardan biridir. O halde Sarayburnu ile Şemsipaşa arasındaki mesafeyi tespit etmek istersek bunun 1.8 km olduğunu görmüş oluruz. Bu kesitten sonra güneye doğru giderken iki kıyı arası mesafenin arttığı gözlenmektedir. İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi için hukuki bir sınır teşkil eden Ahırkapı Feneri ile İnciburnu Feneri hattı arasındaki mesafe 2.9 km'dir. Buradan itibaren İstanbul Boğazı'nın kuzeyden güneye doğru devam eden rotası son bulmuş, ve Marmara Denizi başlamış olur.



Şekil 2.2 : İstanbul Boğazı'ndaki yer isimleri ve ölçüm istasyonları (Artüz, 2007).

2.5 Meteorolojik Koşullar

İstanbul Boğazı, Kuzey yarım kürede yer alması sebebiyle Kış Mevsimini Aralık, Ocak ve Şubat, Bahar Mevsimini Mart, Nisan ve Mayıs, Yaz Mevsimini Haziran, Temmuz, Ağustos ve Güz Mevsimini ise Eylül, Ekim ve Kasım aylarında geçirir. Çizelge 2.1'de İstanbul'daki aylık ortalama sıcaklık ve nispi nem değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 : İstanbul'daki aylık ortalama sıcaklık ve nispi nem değerleri.

Ay	Günlük Minimum Sıcaklıkların Aylık Ortalaması (°C)	Günlük Maksimum Sıcaklıkların Aylık Ortalaması (°C)	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Nispi Nem (%)
Ocak	3.38	9.46	6.46	82.75
Şubat	3.65	9.90	6.60	84.17
Mart	4.65	12.47	8.47	78.88
Nisan	8.35	16.99	12.44	75.73
Mayıs	13.67	23.03	17.99	73.41
Haziran	17.73	26.46	22.00	72.76
Temmuz	20.40	28.62	24.94	72.81
Ağustos	20.87	28.92	24.91	72.98
Eylül	17.31	25.46	21.32	73.98
Ekim	12.73	19.63	16.10	80.50
Kasım	9.73	16.35	12.93	81.04
Aralık	5.38	11.79	8.55	83.43

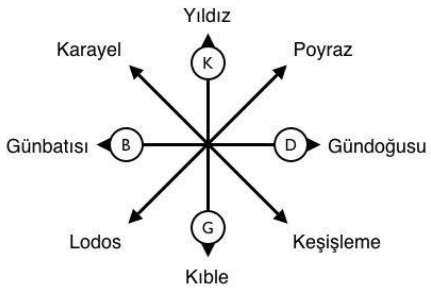
Çizelge 2.1'deki meteorolojik veriler, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Afet Koordinasyon Merkezi tarafından (AKOM) İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Kampüsü'nde 2009-2015 yılları arasında gerçekleştirilen ölçümlerin aylık bazda ortalamalarının alınması suretiyle oluşturulmuştur.

Bahsedilen çizelgede görüleceği üzere, İstanbul'da Kış Mevsiminde sıcaklıklar 3°C ile 12 °C arasında değişmektedir. Kimi zaman bu mevsimde sıcaklık negatif değerlere düşse de genelde pozitif değerler almaktadır. Özellikle en çetin geçen aylar Ocak ve Şubat'tır. Bahar mevsiminin gelmesiyle birlikte sıcaklık değerlerinde gözle görülür bir artış yaşanmaktadır. Mart ayında 4.65 °C olan minimum ortalama sıcaklık değeri Nisan ve Mayıs aylarında 8.35 ve 13.67 °C olmaktadır. Yine Bahar mevsiminde Mart'tan Mayıs'a gidildikçe maksimum ortalama sıcaklık değerinde büyük miktarda bir artış olduğu görülür. Mart ayında maksimum ortalama sıcaklık 12.47 °C iken Mayıs ayında 23.03 °C'dir. Haziran ayından itibaren bütün Yaz Mevsimi süresince sıcaklık maksimum değerlere ulaşmaktadır. Bu süreçte ortalama minimum sıcaklık 19.7 °C olurken, ortalama maksimum sıcaklık 28 °C'yi bulmaktadır. Ağustos ve Eylül ayından sonra Güz Mevsiminin gelmesiyle birlikte sıcaklık değerleri ciddi miktarda azalmaktadır. Eylül ayındaki maksimum ve minimum ortalama sıcaklıkların 17.3 – 25.5 °C değerlerini alması bu aydaki meteorolojik koşulların yaz mevsimine yakın olduğunu göstermektedir. Bu bakımdan Eylül ayı için Yaz Mevsimi ile Güz Mevsimi arasında kalan bir geçiş dönemi denebilir. Fakat Ekim ve Kasım ayları, Güz Mevsiminin özelliklerini yansıtmaları açısından tipik birer numune teşkil etmektedir. Bu iki ayda minimum ortalama sıcaklık değeri 11.23 °C iken maksimum ortalama sıcaklık değeri 18 °C olmaktadır. İstanbul Boğazı'nın üst tabakası bu mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmekte olduğu için atmosferik koşulların zikredilmesi gerekli görülmüştür.

Meteorolojik koşulların en önemlilerinden bir diğeri ise Nispi Nem'dir. Öncelikle belirtmek gerekir ki, İstanbul, bir deniz şehri olması dolayısıyla yılın tamamında %70'ten daha fazla nispi neme sahiptir. Fakat Nispi nemde de tıpkı sıcaklıkta olduğu gibi mevsimsel değişikliklerden bir etkilenme söz konusudur. Çizelge 2.1'deki Nispi Nem değerleri –bir önceki paragrafta da bahsedildiği üzere- AKOM tarafından 2009-2015 yılları arasında yapılan ölçümlerin aylık bazda ortalamasıdır. Sözü edilen çizelgeye dikkatli bakıldığında, yaz mevsiminde nispi nemin azaldığı, kış mevsiminde

ise arttığı görülmektedir. Özellikle yağışın yüksek olduğu Ekim ve Şubat ayları arasında ortalama nispi nem değerleri %80'in üzerine çıkmaktadır.

İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamiği üzerinde en büyük etkisi olan atmosferik faktör rüzgardır denilse muhtemelen hata yapılmış olmaz. Çünkü hava ve su gibi iki akışkanın birbirlerine uyguladıkları kayma gerilmesi kuvvetinin esas kaynağı rüzgardır. Rüzgar etkisi, durgun bir akışkan partikülünün hız ve ivme kazanması için yeterli bir unsurdur. İstanbul Boğazı'nda da rüzgar etkisiyle akım, hız ve ivme oluşumuna rastlanmaktadır. Yönlerine göre tasnif edilecek olursa 8 rüzgar çeşidi olduğu söylenebilir. Bu 8 rüzgar çeşidi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Yönlerine göre rüzgar isimleri.

İstanbul Boğazı'nda 8 yönden sadece ikisi baskındır. Bunlar Poyraz ve Lodos'tur. Poyraz rüzgarları kuzeydoğudan gelir ve yılın genelinde İstanbul Boğazı üzerinde hakimdir. Bu rüzgarlar Karadeniz'den Marmara Denizi'ne geçmekte olan üst tabakadaki su kütlesinin hızını ve debisini arttırır. Yani Marmara ve Karadeniz basenleri arasındaki su alışverişinde mühim bir rolü bulunmaktadır. Lodos rüzgarları ise güneybatı kökenlidir ve yalnızca kışın ekstremum soğuk günlerinde ve seyrek olarak görülür. Bu rüzgarların İstanbul Boğazı Hidrodinamiği üzerindeki etkisi oldukça mühimdir. Lodos başlangıcından sonra Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru transfer edilen üst tabaka su kütlesinin hızında önce bir azalma daha sonra sıfırlanma ve giderek negatif yönde artma görülür. Buna İstanbul Boğazı üst tabakasının bloke olması hali denilmektedir. Bu durumda Marmara Denizi'nden Karadeniz'e aktarılmakta olan su debisinde büyük bir artış görülür. Yani Marmara Denizi, Lodos rüzgarlarının varlığıyla birlikte baskın duruma geçer. Ne var ki, Lodos rüzgarları çok uzun ömürlü değildir, ve Karadeniz'in genel haldeki baskınlığı, Lodos rüzgarlarının sınırlı bir zaman dilimindeki varlığıyla son bulacak mahiyette değildir.

2.6 Hidrografik Koşullar

İstanbul Boğazı'nın en temel özelliklerinden biri, Üst ve Alt olmak üzere iki tabakadan oluşmasıdır. Üst Tabaka derinliği ortalama 25 metre değerinde iken, Alt Tabaka derinliği, batimetriye bağlı olarak değişmektedir. Ana hatlarıyla, birbirine zıt yönde hızlara sahip iki tabakadan oluşan İstanbul Boğazı'nda üst ve alt tabakalar arasında hatırı sayılır bir yoğunluk farkı vardır. İstanbul Boğazı'nın karakteristik özelliklerini belirleyen iki temel hidrografik parametre mevcuttur. Bunlar, Tuzluluk ve Sıcaklıktır.

Yoğunluk farkı çok büyük oranda Tuzluluk farkından kaynaklanmaktadır. Tuna Nehri'nden gelen tatlı su debisi, Karadeniz'den giriş yaparak İstanbul Boğazı'ndaki Tuzluluk miktarını azaltmaktadır. Bu Tuzluluk azaltıcı etki, en çok üst tabakada görülmektedir. Çünkü Karadeniz'den Marmara Denizi istikametine giden debi İstanbul Boğazı'nın üst tabakasından geçmektedir. Alt Tabaka ise Akdeniz – Ege Denizi – Çanakkale Boğazı – Marmara Denizi yoluyla gelen yüksek tuzluluktaki suların Karadeniz istikametinde seyr ederken geçtiği güzergahtır.

Sıcaklığın bu tabakalaşma üzerine etkisi Tuzluluğa nisbeten daha azdır. Her ne kadar Sıcaklığın etkisi az olsa da, tabakalar arasında kayda değer bir sıcaklık farkının olduğu vurgulanmalıdır. Özellikle atmosfer sıcaklığının ekstremum değerler aldığı Yaz ve Kış mevsimlerinde Üst Tabaka ile Alt Tabaka arasında belirgin bir sıcaklık farkı oluşur. Yaz Mevsiminde üst tabaka suları alt tabakaya göre daha sıcakken, Kış Mevsiminde bunun tam tersi vuku bulacaktır. Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te sıcaklık ve tuzluluk gibi hidrografik parametrelerin alt ve üst tabakada yılın belirli aylarında nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişindeki hidrografik değerler (Türk Boğazlar Sistemi'nin Oşinografik Atlası, 2009).

Tarih	Sıcaklık Üst Tabaka (°C)	Sıcaklık Alt Tabaka (°C)	Tuzluluk Üst Tabaka (ppt)	Tuzluluk Alt Tabaka (ppt)
Şubat 2005	6	12	17.4	33
Mayıs 2005	9	13.8	18.3	35.2
Temmuz 2005	20	14.4	17.1	35.8
Kasım 2005	13.8	15	17.8	36.2
Şubat 2006	4.5	12	17.4	33.3
Mayıs 2006	7.5	13.9	18.4	35.4
Ağustos 2006	27	14.5	18.2	36.1
Kasım 2006	14.5	14.9	17.9	36

Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Daire Başkanlığı, 2005-2006 yıllarında TCG MESAHA I adlı araştırma botuyla İstanbul Boğazı'nda bir takım ölçümler yapmıştır. Bu ölçümlerle gerçekleştirilmek istenen, İstanbul Boğazı'ndaki akıntı hızları, tuzluluk, sıcaklık, basınç ve çözünmüş oksijen gibi parametrelerin dağılımını tespit etmektir. Bu çizelgelerde Şubat ayı Kışı, Mayıs ayı Baharı, Temmuz veya Ağustos ayları Yazı, Kasım ayı ise Güzü temsil etmektedir.

Çizelge 2.3 : İstanbul Boğazı'nın Marmara çıkışındaki Hidrografik Değerler (Türk Boğazlar Sistemi'nin Oşinografik Atlası, 2009).

Tarih	Sıcaklık Üst Tabaka (°C)	Sıcaklık Alt Tabaka (°C)	Tuzluluk Üst Tabaka (ppt)	Tuzluluk Alt Tabaka (ppt)
Şubat 2005	6.3	15.5	18.7	37
Mayıs 2005	10.5	14.3	19.7	37.6
Temmuz 2005	21.2	15	18	37.4
Kasım 2005	13.9	14.7	19.5	36.5
Şubat 2006	5.2	13.2	18.3	35.4
Mayıs 2006	12.8	14.4	18.6	36.6
Ağustos 2006	22.7	14.2	20.4	37.1
Kasım 2006	14.7	14.9	18.8	38.2

Yukarıda verilen çizelgelere göre sıcaklık ve tuzluluk değerleri konusunda bazı yorumlarda bulunmak mümkündür. Örneğin, İstanbul Boğazı'nın her iki ucunda da üst tabaka sıcaklıkları mevsimlerin ortalama sıcaklıkları ile doğru orantılıdır. Yaz Mevsiminde üst tabaka suları sıcaklığı 20 °C'nin üzerine çıkmakta, Kış Mevsiminde ise 5-6 °C civarına inmektedir. Alt tabakadaki su sıcaklığı ise genel olarak 14-15 °C değerlerini alır. Fakat İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişinde yapılan ölçüme göre alt tabaka su sıcaklığı kış mevsiminde kısmen azalarak 12 °C olmuştur. Bu da Karadeniz'e yakın olan kısımda İstanbul Boğazı'nın alt tabakasının atmosferle etkileşiminin nisbeten fazla olduğu anlamını taşımaktadır. Yine de İstanbul Boğazı alt tabakası, atmosferle etkileşimi bakımından üst tabakaya göre daha az edilgen kalmaktadır.

Tuzluluk değerleri üzerinde fikir beyan edilecek olursa ilk göze çarpan husus üst tabakadaki tuzluluğun alt tabaka tuzluluğunun yarısı nisbetinde olmasıdır. Bunun sebeplerinden biri, üst tabakayı Tuna'dan Karadeniz yoluyla gelen tatlı suların teşkil etmesidir. Bir diğer sebep ise Akdeniz'den gelen tuzlu suların İstanbul Boğazı'nın alt tabakasını oluşturmasıdır. Böylece üst tabaka sularının tuzluluğu 18 ppt civarında değerler alırken alt tabaka tuzluluğu 33-38 ppt aralığında çeşitlenmektedir. Her ne

kadar üst tabakanın genel ortalama tuzluluğu 18 ppt olsa da, özellikle yaz aylarında İstanbul Boğazı'nın Marmara tarafının 20 ppt'ye kadar çıktığı görülecektir. Aynı zamanda Karadeniz'e yakın kısmın alt tabakasında tuzluluk 35 ppt civarında iken, Marmara Denizi'ne yakın kısımda 37-38 ppt değerlerini almaktadır. Bu da göstermektedir ki, Marmara Denizi'ne yakın kısımda genel olarak Tuzlulukta bir artış söz konusudur. Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki genel tuzluluk farkı, İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney noktalarındaki ölçümlere yansımıştır.

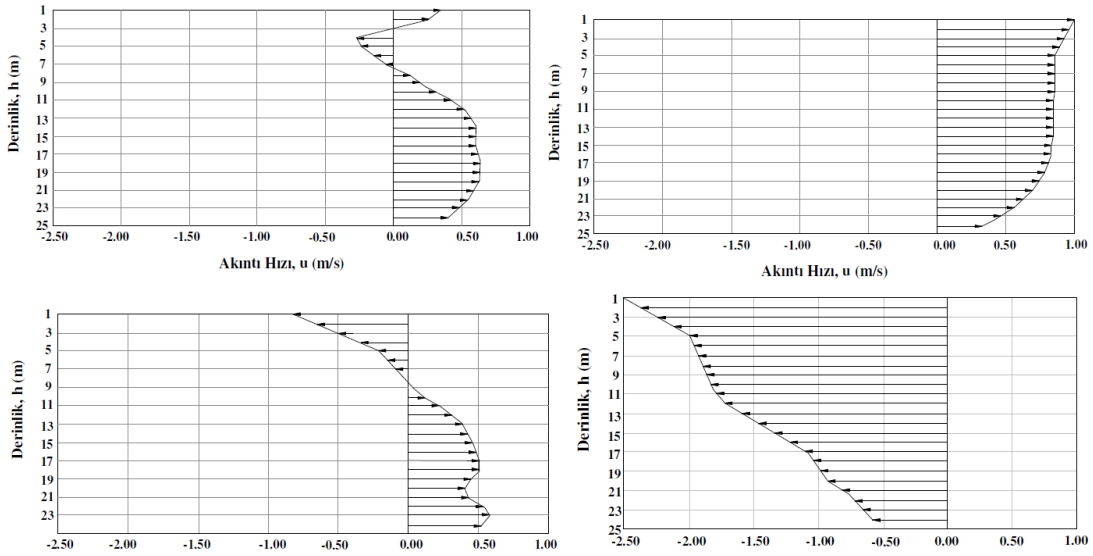
2.7 Hidrodinamik Koşullar

Daha önce İstanbul Boğazı'nın tabakalı akım yapısına sahip olduğundan bahsedilmişti. Tabakalı akım kavramını açmak gerekirse zikredilmesi gereken hususlar, iki farklı akışkanın veya özgül ağırlıkları farklı olan aynı cinsteki iki akışkanın birbirleriyle temas halinde bulunmalarına rağmen aralarındaki karışımın çok az olması, ve farklı akım koşullarına sahip olmalarıdır. İstanbul Boğazı, alt ve üst tabaka olmak üzere iki farklı tabakadan oluşan bir hidrodinamik yapıya sahiptir. Üst tabaka, Karadeniz menşeili, tuzluluğu nisbeten az olan (18 ppt civarı) suların Marmara Denizi istikametinde akmasıyla oluşur. Alt tabaka ise Akdeniz kökenli ve tuzluluğu yüksek olan (38 ppt civarı) suların Ege Denizi – Çanakkale Boğazı – Marmara Denizi tarikiyle gelerek Karadeniz'e doğru seyretmesiyle teşekkül eder.

MARMARAY Projesi kapsamında İstanbul Boğazı'nda Sirkeci-Üsküdar arasına yapılması planlanan bir tünel için 2004-2006 yıllarında bazı ölçümler gerçekleştirilmiştir. İstanbul Boğazı'nın güney kısmındaki eşik üzerinde bu kapsamda hız profilleri çıkarılmıştır.

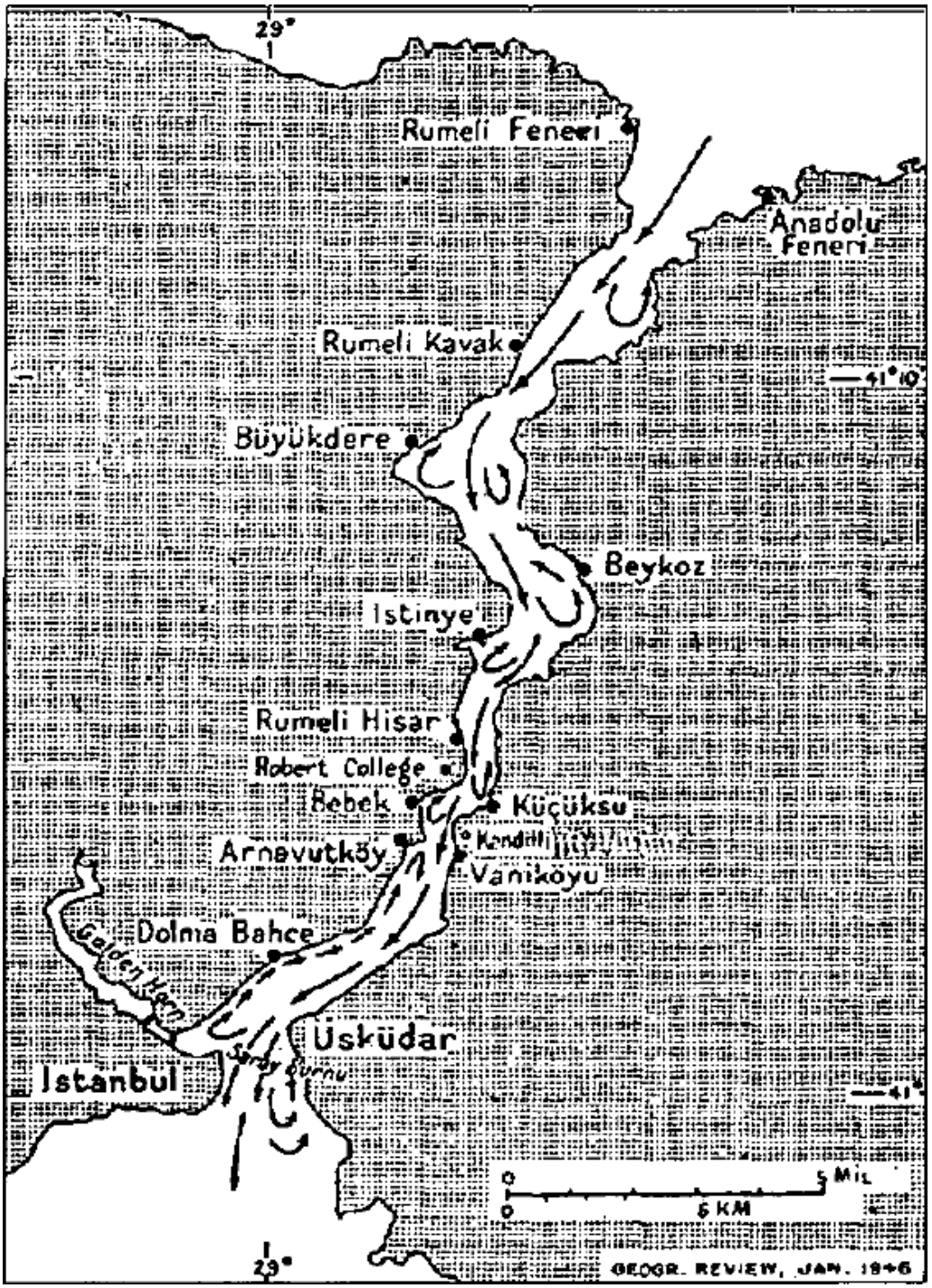
Şekil 2.4'de görüldüğü üzere İstanbul Boğazı'nda muhtelif zamanlarda farklı tipte hız profilleri oluşabilmektedir. Üstteki iki hız profili, Lodos rüzgarının hakim olduğu zamanlarda alınmıştır. Sol üstteki durumda Lodos rüzgar şiddeti sağ üstteki duruma göre nisbeten daha zayıftır. Bu sebeple sol üstteki profilde 3 tabakalı bir durum meydana gelerek sadece atmosfere yakın olan 3 metrelik bölümde ters yönde bir akım oluşmuştur. Sağ üstteki profilde ise Lodos rüzgar şiddeti, bütün üst tabaka akımını bloke edip tam ters istikamette döndürerek hız değerini 1 m/s mertebesine ulaştırmıştır. Üstteki her iki durum da genel hali yansıtmayıp Lodos rüzgarının hakim olduğu ender kış günlerinde görülmektedir. İstanbul Boğazı'nın genel durumu içinse temsil edebilirlik açısından en uygun hız profilinin sol alttaki profil olduğu belirtilmelidir.

Buna göre alt tabakadaki ortalama hız değeri 0.3-0.4 m/s mertebesinde iken, üst tabaka ortalama hızı 0.5 m/s civarında olmaktadır. Yılın genelinde böyle bir tabakalı akım durumu mevcuttur. Üst tabaka akımı güneye doğru yönelirken, alt tabaka suları, güneyden kuzey istikametine gitmektedir. Bir diğer hız profil tipi olan sağ alttaki profil, Poyraz rüzgarının şiddetini arttırdığı veya Karadeniz'den İstanbul Boğazı'na tatlı su giriş debisinin arttığı zaman dilimlerinde görülmektedir. Bu durumda maksimum hız değeri güney istikametinde 2.5 m/s değerine kadar yükselmektedir. Ortalama hız ise 1.5-2 m/s arasında değerler almaktadır.



Şekil 2.4 : İstanbul Boğazı'nın güney eşiği üzerinde 4 farklı tipte oluşan hız profili (Yüksel vd., 2008).

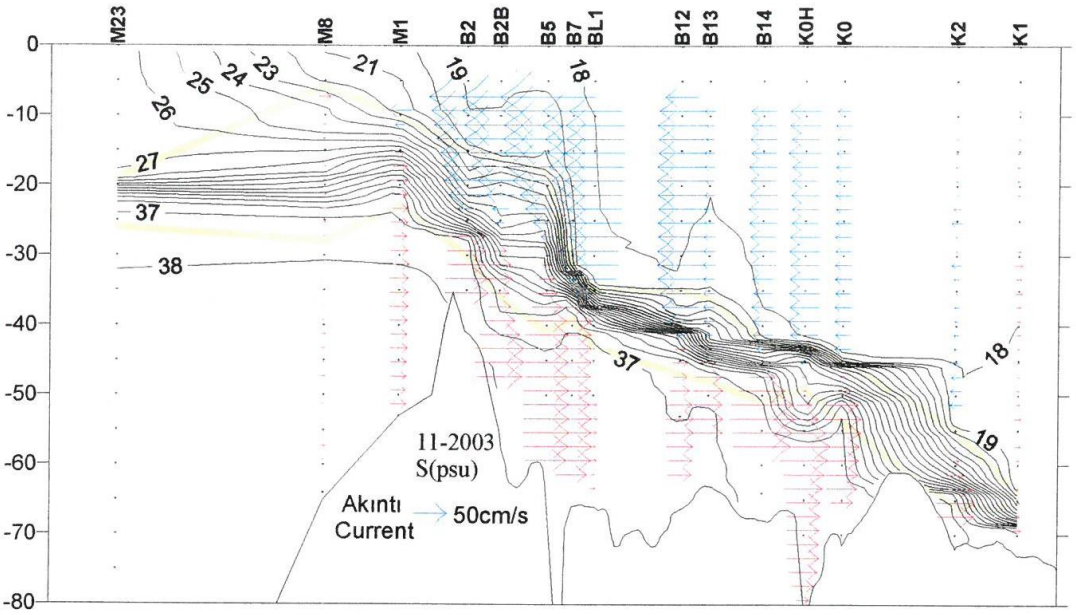
İstanbul Boğazı'nın atmosferle temas halindeki su kütlesinin hidrodinamik halini yansıtan harita Şekil 2.5'te verilmiştir. Verilen haritaya göre İstanbul Boğazı'ndaki menderesleşme ve koyların etkisi çevrinti vektörlerinin oluşumuna sebep olmaktadır. Özellikle Büyükdere, Beykoz, İstinye, Bebek, Küçüksu koyları ve Haliç, çevrinti oluşumunun gerçekleştiği konumların başında gelmektedir. Her ne kadar haritada gösterilmese de kesitin genişlediği Büyükdere - Umuryeri hattı gibi mevkilerde hızların azalacağı, kesitin daraldığı Emirgan – Kanlıca hattı gibi bölgelerde ise hızların artacağı, hidrolik açıdan birer realite hükmündedir.



Şekil 2.5 : İstanbul Boğazı yüzey akıntı vektörlerini gösteren harita (Artüz, 2007).

Şekil 2.6'da İstanbul Boğazı'nın tuzluluk ve akıntı durumunun boykesitteki genel durumu verilmiştir. Kesitin sol tarafı Marmara Denizi'ni, sağ tarafı ise Karadeniz'i göstermektedir. İstanbul Boğazı'nın hidrodinamiğini daha iyi anlamak için bahsedilmesi gereken önemli bir husus, boykesitin Marmara Denizi ve Karadeniz taraflarında kalan iki adet eşiğin akım koşullarına olan etkisidir. Güney eşiğinin derinliği yaklaşık 30 metre civarındadır. Kuzey eşiği ise takriben 60 metre

derinliğindedir. Bu iki eşik İstanbul Boğazı'nın alt ve üst tabakalarının komşu denizlerle (Karadeniz ve Marmara Denizi) etkileşimini kontrol altında tutarak maksimum alışveriş adı verilen bir vakıanın gerçekleşmesine sebep olur. Eşiklerin bulunması sebebiyle azalan derinlik, kesitlerde hızı arttırır. Bu da Karadeniz ve Marmara Denizi'ne geçen debi miktarının artması sonucunu doğurur. Hız değerlerinin arttığı bir başka bölge Emirgan-Kanlıca ve Arnavutköy-Vaniköy arasındaki dar enkesitli kısımdır. Bu bölgede de kesitin küçülmesine bağlı olarak hız değerlerinde bir artış görülür. İki eşikte ve bir daralan kesitte hızın artış göstermesi ve bu vesileyle debi alışverişinin azami haddine ulaşması maksimum alışverişe sebep olur. Maksimum alışveriş bölgelerine Hidrolik Kontrol kesitleri de denmektedir. Çünkü İstanbul Boğazı'nın akım yapısı ancak bu iki eşik ve bir daralma bölgesi ile yarı-kararlı hale gelmektedir.



Şekil 2.6 : İstanbul Boğazı'nın 2003 Kasım ayına ait boykesit profili (İSKİ, 2004).

1999-2010 yılları arasında İstanbul Boğazı'nın Kuzey ve Güney sınırlarında yapılan debi ölçümlerine göre Çizelge 2.4'teki değerler elde edilmiştir. Bu uzun süreli sayılabilecek ölçümlere göre İstanbul Boğazı'nın üst ve alt tabaka debi değerlerinin aylık değişimi hakkında yaklaşık olarak bazı sonuçlara ulaşmak mümkündür. Örneğin, Şubat-Haziran arası üst tabaka debisinin artması, bu dönemden biraz önce, Tuna, Dinyeper ve Dinyester nehirlerinden gelen tatlı suların Karadeniz'e girişinin arttığı şeklinde yorumlanabilir. Bu dönemden biraz önce denmesinin sebebi, Karadeniz'e

giren tatlı suların İstanbul Boğazı'na ulaşması için bir miktar mesafe katetmeye ve zamana ihtiyacı olmasındandır. Açıklığa kavuşturulması gereken bir mesele ise İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney sınırlarında ölçülen debi değerlerinin tamamen aynı olmamasıdır. İlk bakışta garip bir görünüm arzeden bu durum, öyle düşünülmelidir ki, alt ve üst tabakalar arası -sınırlı da olsa- alışverişin varlığı bilindiğinde normal karşılanacaktır. Bu alışveriş, kimi zaman üst tabakadan alt tabakaya doğru, kimi zamansa alt tabakadan üst tabakaya doğru gerçekleşmektedir. Böylece Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su bütçesi dengesi sağlanmış olur.

Çizelge 2.4 : İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney sınırlarında ölçülmüş aylık ortalama debi değerleri (Altıok, 2015).

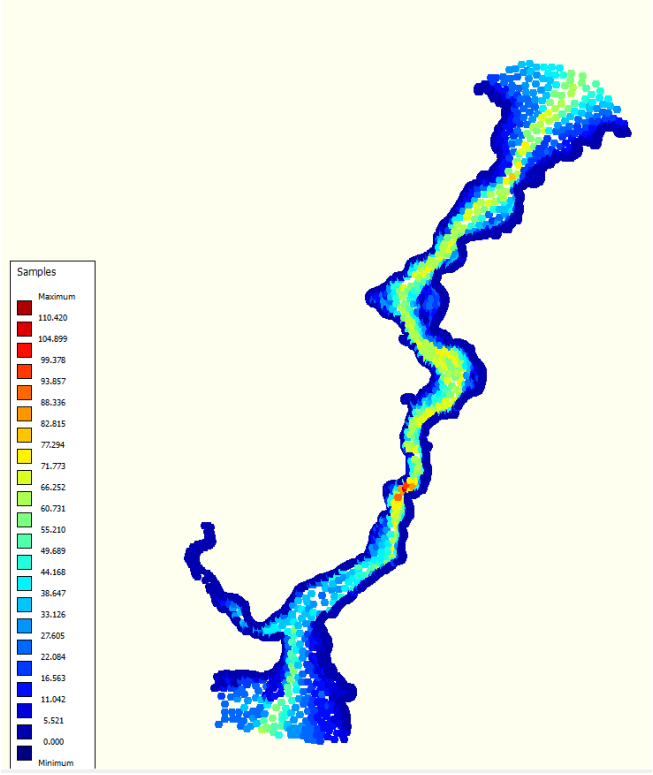
	Karadeniz Girişi Ortalama Debi (m^3/s)		Marmara Girişi Ortalama Debi (m^3/s)	
Ay	Üst Tabaka	Alt Tabaka	Üst Tabaka	Alt Tabaka
Ocak	8950	10030	9150	9720
Şubat	14260	5810	16080	5520
Mart	15320	6860	16190	6240
Nisan	16510	4930	19150	4860
Mayıs	16610	5050	18410	4980
Haziran	15740	5530	17590	5730
Temmuz	12510	7830	12210	8220
Ağustos	12670	8300	13890	8270
Eylül	9000	10190	9060	9960
Ekim	8030	13000	7880	12010
Kasım	9950	9330	9210	9100
Aralık	14240	8410	14800	8730
Ortalama	12816	7940	13635	7778

3. VERİLER

İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin kurulabilmesi için ilgili bölgede gerçekleştirilmiş bir takım ölçüm ve gözlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu maksatla modelin girdisi olarak kullanılmak üzere Batimetri, Hidrografi, Mareografi (Su Seviyesi) ve Meteoroloji verileri temin edilmiştir.

3.1 Batimetrik Veri

Ani genişleme-daralma ve derinleşme-sığlaşma gibi vakıaların sıklıkla görüldüğü İstanbul Boğazı'nda hidrodinamik yapıya tesir eden en önemli faktörlerden biri Batimetrik yapıdır. Bu kapsamda Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı olarak çalışan Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan Şekil 3.1'de görülen batimetri verileri temin edilmiştir. Modelin kurulumu için yeterli çözünürlükte olan batimetrik harita, 1/20000 ölçeğindedir.

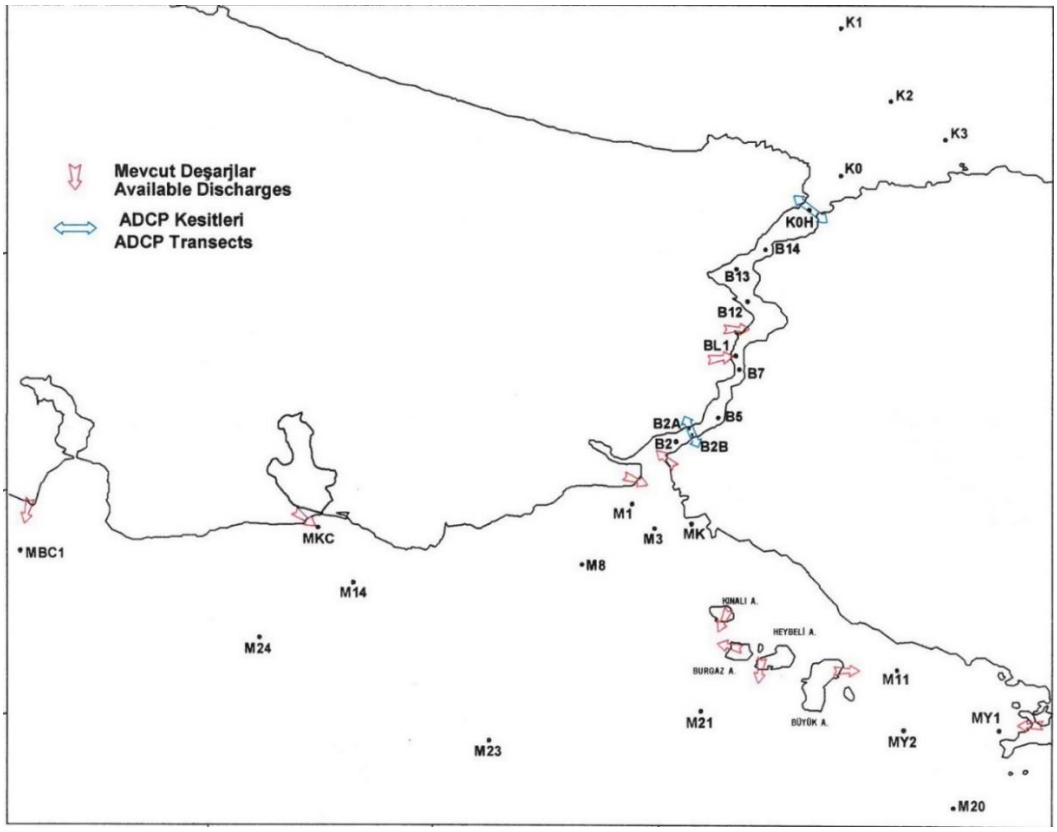


Şekil 3.1 : İstanbul Boğazı'na ait batimetri haritası.

3.2 Hidrografik Veri

Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere İstanbul Boğazı'ndaki Hidrodinamik koşulların mahiyetinin kavranabilmesinde, Hidrografik verilerin hatırı sayılır bir önemi vardır. Bunun sebebi, İstanbul Boğazı'nın alt tabakasındaki su kütlesi hareketinin çok tuzlu bölgeden az tuzlu olan bölgeye yönelmesi, bir başka ifadeyle, bölgeler arası tuzluluk farkının hız profili oluşumuna etki etmesidir. Başlıca Hidrografik verilerden Sıcaklık ve Tuzluluğun model girdisi olarak kullanılması kararlaştırılmıştır. Böylece, İstanbul Boğazı'nda yapılan Hidrografik veri ölçümlerine ihtiyacın hasıl olacağı anlaşılmıştır.

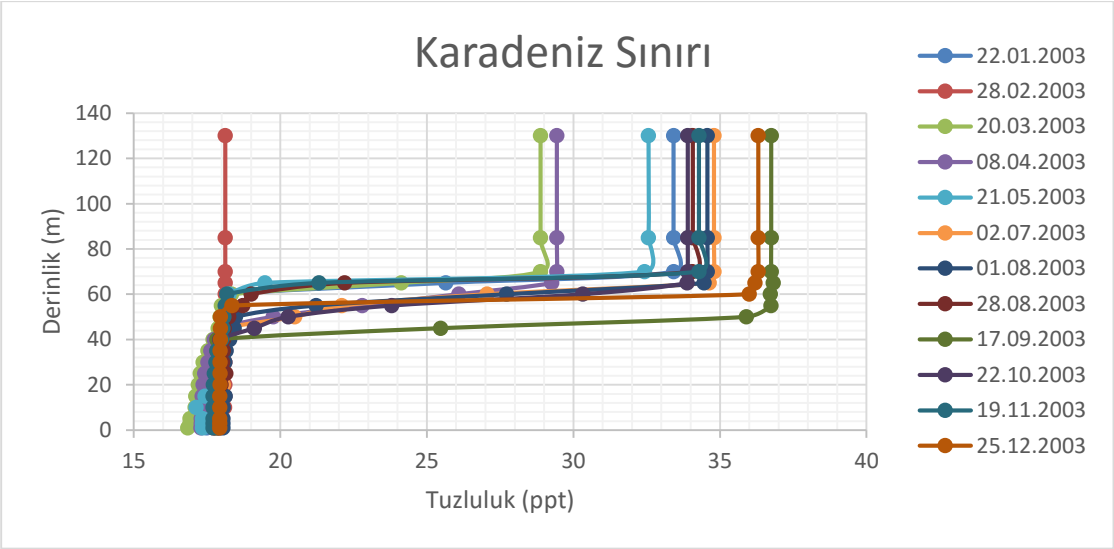
İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi, 1996 yılında Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi'nde başlattığı düzenli ölçümlerle önemli bir veri kaynağı oluşturmuştur. İSKİ'nin 1996'dan günümüze kadar devam eden ölçümleri arasından modelin kurulacağı örnek yıl olan 2003 için Tuzluluk ve Sıcaklık verileri kullanılmıştır. Şekil 3.2'de verilen İSKİ ölçüm istasyonları haritasında, İstanbul Boğazı'nın kuzey sınırı için K0, K1 VE K2 istasyonlarından, İstanbul Boğazı'nın güney sınırı içinse M23 istasyonundan istifade edilmiştir.



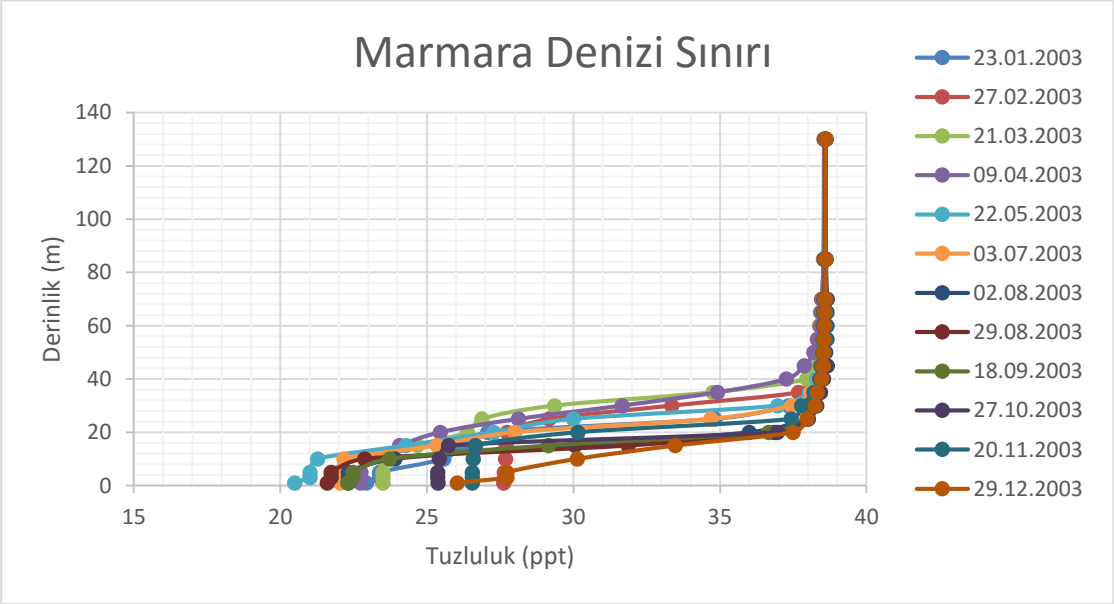
Şekil 3.2 : İSKİ'ye ait Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi'ndeki ölçüm istasyonları.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi sınırlarına ait tuzluluk ölçümleri verilmiştir. Bu iki grafikte ilk göze çarpan husus, Karadeniz tarafında üst tabakadaki, Marmara Denizi tarafında ise alt tabakadaki Tuzluluk değerinin belirli bir değere yakınsamasıdır. Karadeniz tarafındaki üst tabakada Tuzluluk, 18 ppt değerine yakınsarken, Marmara Denizi tarafındaki alt tabakada bu değer 38 ppt'ye yakınsamaktadır. Karadeniz sınırı alt tabakasında Ocak-Haziran arasındaki zaman diliminde tuzluluk değeri, Temmuz-Aralık ayları arasındaki döneme nazaran daha azdır. Bunun sebebi, Ocak-Haziran ayları arasında Tuna Nehri'nin debisinin artması ve bu debi artışının Karadeniz yoluyla İstanbul Boğazı'na gelen tatlı suyun miktarını arttırmasıdır. Marmara Denizi sınırında ise üst tabakadaki Tuzluluk değerinin Mart-Eylül ayları arasında düşüş gösterdiği görülmüştür. Bu da, Tuna Nehri kaynaklı tatlı su debisindeki artışın Marmara Denizi sınırına, Karadeniz sınırından bir süre sonra (Yaklaşık 2 ay sonra) tesir ettiğini göstermektedir. Mart-Eylül ayları arasındaki nisbeten düşük Tuzluluktaki Marmara Denizi sınırı üst tabakası, diğer dönemlerde görece yüksek Tuzluluk değerlerine ulaşmaktadır. Bu yüksek Tuzluluk değeri, 27-28 ppt mertebelerine kadar çıkmaktadır.

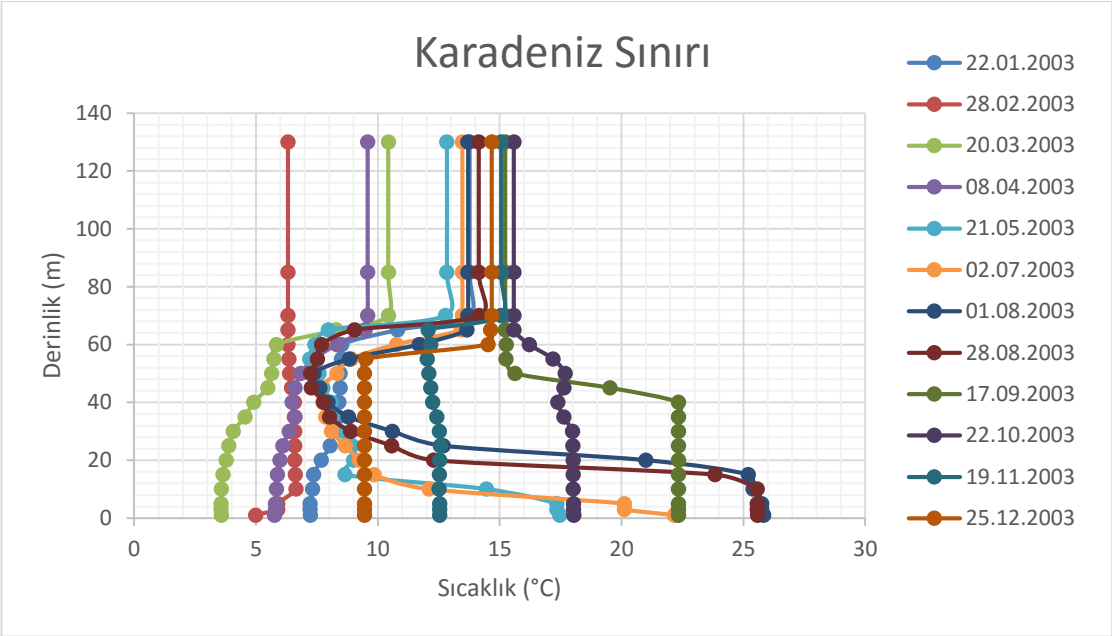
Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi sınırlarına ait Sıcaklık değerleri verilmiştir. Bu iki grafikle ilgili ilk söylenebilecek olan, iki sınır için de üst tabakadaki sıcaklık değerlerinin mevsime bağlı değerler aldığıdır. Kış aylarında atmosferin sıcaklığında meydana gelen düşüş, Karadeniz ve Marmara Denizi üst tabaka sularına sirayet ederek sıcaklığı düşürmüştür. Yaz mevsiminde ise bunun tam tersi vuku bularak üst tabaka sularındaki sıcaklık değerleri artış göstermiştir. Kayda değer bir başka husus, Marmara Denizi tarafındaki alt tabaka suları genel olarak 15 °C civarında bulunmaktadır. Karadeniz tarafında da yılın genelinde 15 °C'ye bir yakınsama söz konusu olsa da, özellikle kış mevsiminde meydana gelen atmosfer sıcaklığındaki düşüşün alt tabaka sularına sirayet ettiği görülmüştür. Bu şekilde alt tabaka suları sıcaklığının 4-5 °C'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir.



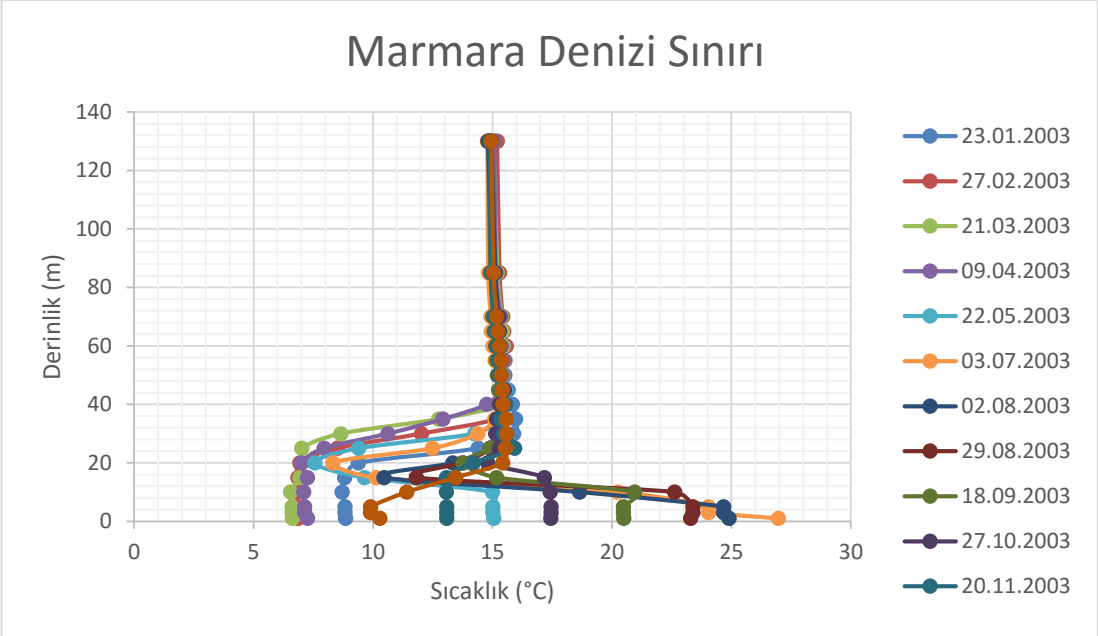
Şekil 3.3 : İstanbul Boğazı'nın Karadeniz sınırı için tuzluluk ölçüm tablosu.



Şekil 3.4 : İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi sınırı için tuzluluk ölçüm tablosu.



Şekil 3.5 : İstanbul Boğazı'nın Karadeniz sınırı için sıcaklık ölçüm tablosu.

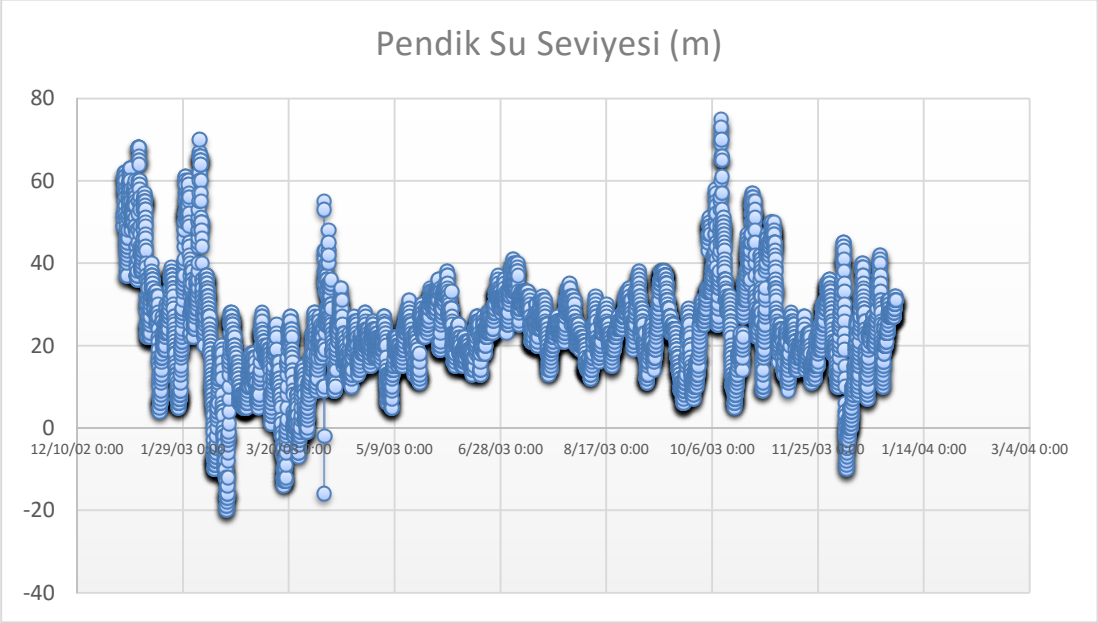


Şekil 3.6 : İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi sınırı için sıcaklık ölçüm tablosu.

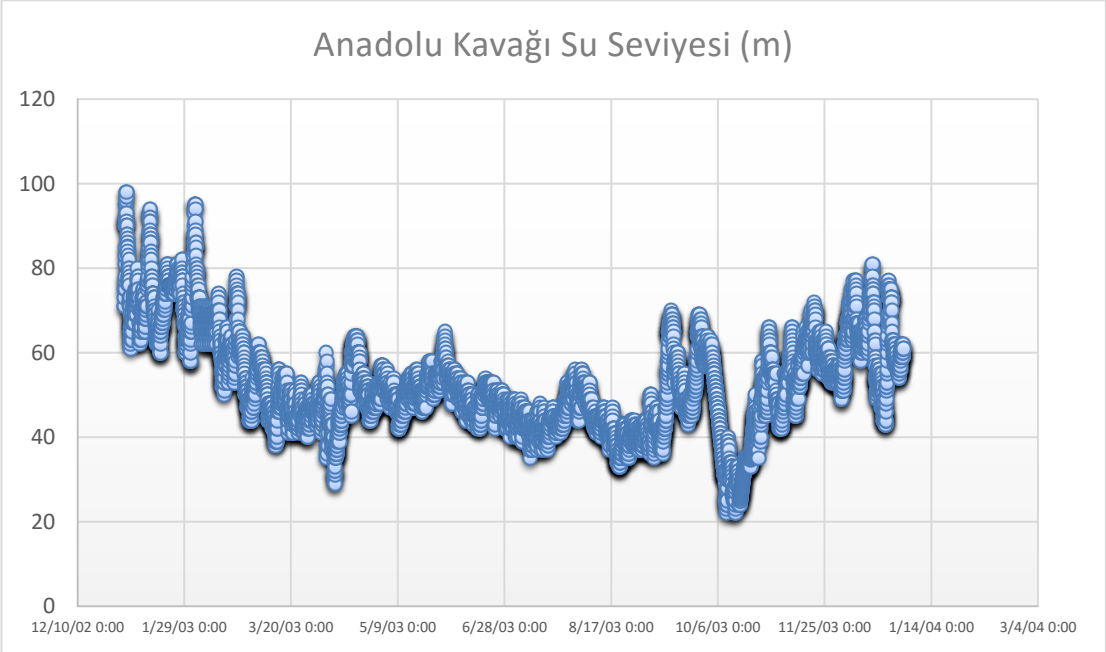
3.3 Mareografik Veri

Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su alışverişinde en önemli rol oynayan faktörlerden biri, yılın her ayında değişen su seviyeleridir. Karadeniz'deki su seviyesinin yılın genelinde Marmara Denizi'ndeki su seviyesinden yüksek olduğu bir realitedir. Aradaki bu su seviyesi farkı dolayısıyla Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru gerçekleşen bir su transferi oluşmaktadır. Su seviyeleri arasındaki farkın büyüklüğüne göre şekillenen su transferi, İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısında hatırı sayılır bir rol oynamaktadır.

Türkiye Cumhuriyeti Deniz Kuvvetleri Komutanlığı tarafından 2003 yılında Pendik, Erdek ve Anadolu Kavağı'nda saatlik periyotta düzenli ölçümler yapılmıştır. İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin kurulması kapsamında modele sınır şartı olarak girilmek üzere Su Seviyesi verilerinin gerekli olduğu görülmüştür. Bu durumda İstanbul Boğazı'nın kuzey sınırını temsilen Anadolu Kavağı'nda ölçülmüş su seviyesi değerleri, güney sınırını temsilen ise Pendik'te ölçülmüş su seviyesi değerleri sınır şartı olarak belirlenmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den anlaşıldığı üzere yılın neredeyse tamamında, Karadeniz tarafında olan Anadolu Kavağı'nda, Marmara Denizi tarafında olan Pendik'e göre su seviyesi daha yüksektir. Fakat Lodos rüzgarının etkisini gösterdiği Ocak ayının bazı günlerinde Marmara Denizi tarafındaki su seviyesinin Karadeniz tarafındakine nazaran daha yüksek olduğu görülür. Bu durum geçici olup sadece Lodos rüzgarının hakim olduğu zaman dilimlerinde görülmektedir.



Şekil 3.7 : 2003 yılına ait Pendik'teki su seviyesi değerleri.



Şekil 3.8 : 2003 yılına ait Anadolu Kavağı'ndaki su seviyesi değerleri.

Aylık bazda alınan ortalama değerler Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bahsedilen çizelgeye göre İstanbul Boğazı'nın iki sınırı arasındaki su seviyesi farkının maksimum olduğu zaman dilimi Aralık-Mart ayları arasıdır. Bu ise Tuna Nehri debisinin maksimum olduğu döneme tekabül etmesi bakımından gerçekçi bir ölçüm niteliği taşımaktadır.

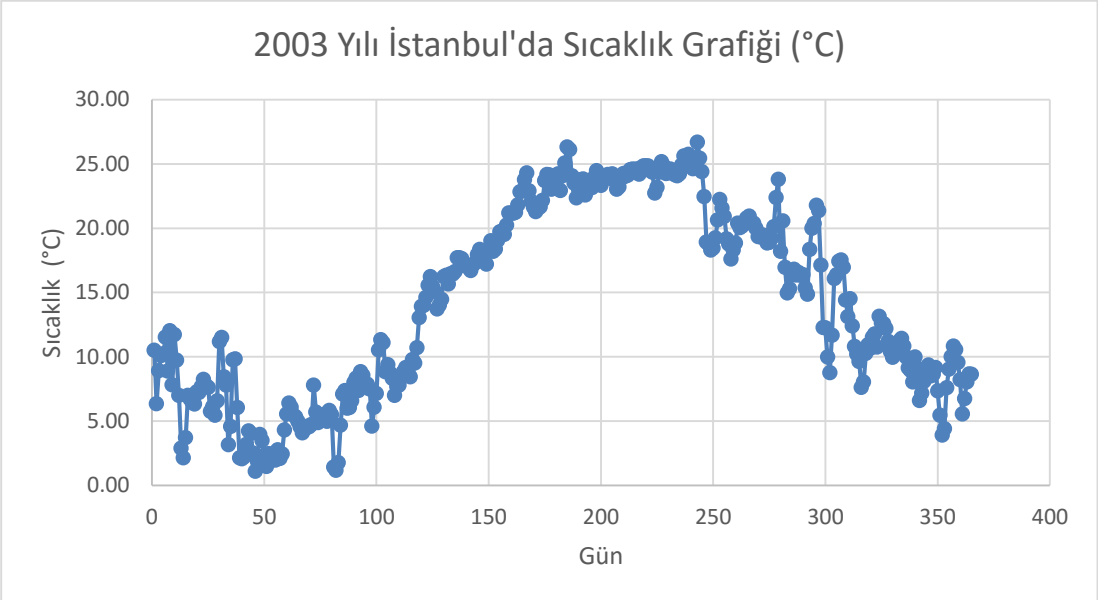
Çizelge 3.1 : Pendik ve Anadolu Kavağı istasyonlarında ölçülmüş aylık ortalama su seviyeleri.

	Kavak Su Seviyesi (m)	Pendik Su Seviyesi (m)
Ocak	0.73	0.35
Şubat	0.64	0.17
Mart	0.48	0.11
Nisan	0.49	0.21
Mayıs	0.52	0.22
Haziran	0.49	0.24
Temmuz	0.44	0.27
Ağustos	0.40	0.23
Eylül	0.51	0.22
Ekim	0.45	0.33
Kasım	0.58	0.25
Aralık	0.62	0.21

3.4 Meteorolojik Veri

İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin kurulabilmesi için gerekli olan verilerden biri de Meteorolojik verilerdir. Burada Meteorolojik veriden kasıt, sıcaklık, nispi nem, bulutluluk, rüzgar ve atmosfer basıncına dair olan veridir.

Sıcaklık verisiyle ilgili olarak, her ne kadar elimizde AKOM tarafından yapılan bir takım ölçüm sonuçları yer alsa da, 2003 yılı için AKOM tarafından yapılmış düzenli bir ölçüm bulunmamaktadır. Bu sebeple sıcaklık verileri ECMWF'ten (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Avrupa Orta-Ölçekli Hava Tahmin Merkezi) alınmıştır. ECMWF verilerinin güvenilirliği ile ilgili bir korelasyon testinin olumlu sonuç vermesi bunda etken olmuştur. Öyle ki, 2009-2015 yılları arasında AKOM tarafından yapılan ölçümlerle ECMWF'in aynı dönemdeki tahminleri birbirleriyle mukayese edilmiş, ve korelasyon katsayılarının %99'a yakın değerler alması sonucunda ECMWF verilerinin güvenilirliği doğrulanmıştır. Modelin kurulduğu yıl olan 2003 için AKOM tarafından veri sağlanamadığından, ECMWF'ten aynı yıl için yapılan tahmin verileri temin edilmiştir.

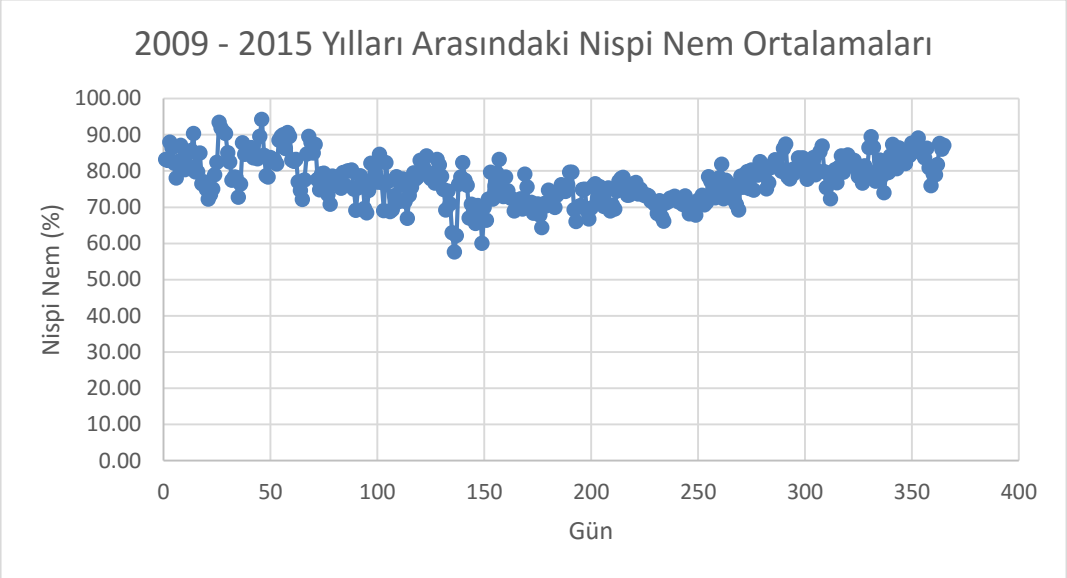


Şekil 3.9 : 2003 Yılına ait ECMWF'ten temin edilen sıcaklık verileri.

Şekil 3.9'da 2003 yılı için İstanbul'da yapılan ECMWF tahmin verileri mevcuttur. Bu grafikten anlaşılan o ki, 2003 yılında –kimi ufak çaplı sapmalar dışında- olağandışı bir durum görülmemektedir. Aralık, Ocak ve Şubat aylarında sıcaklık değerleri düşük,

Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında ise yüksektir. Bu da mevsim normallerinin gerektirdiği bir durumdur. Sonuç olarak 2003 yılı için sıcaklık tahmin değerlerinde herhangi bir gerçek dışılık görülmemiştir.

Bir diğer meteorolojik veri Nispi nem verisidir. Nispi nem verisi, ECMWF'ten temin edilemediği için AKOM'dan temin edilen 2009-2015 yılları arasındaki 7 yıllık verinin günlük bazda ortalaması alınarak modele dahil edilmiştir.

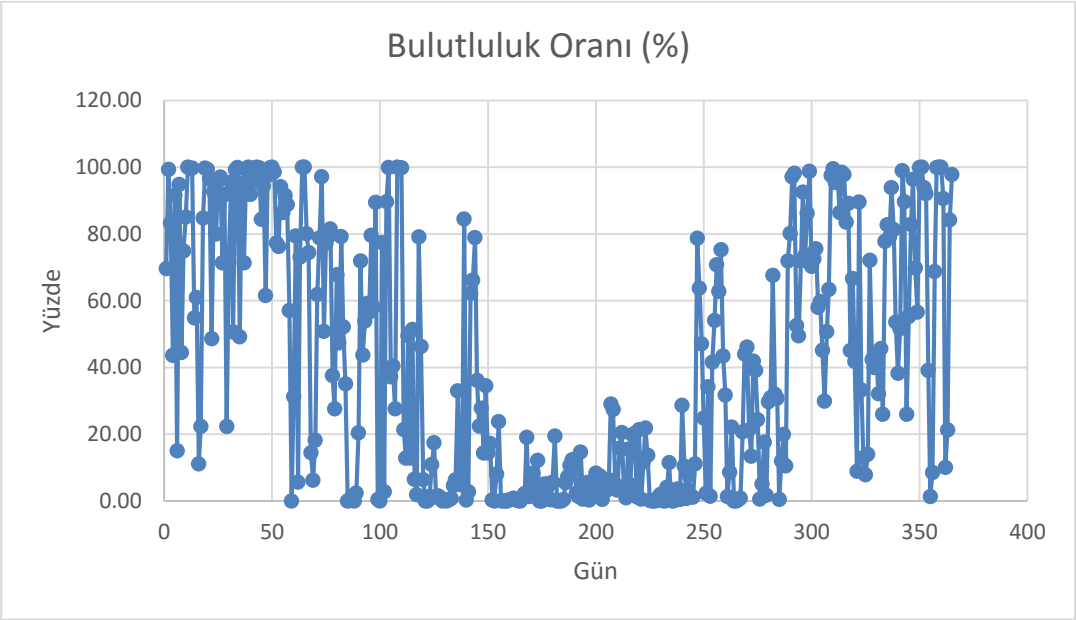


Şekil 3.10 : AKOM tarafından 2009-2015 yılları arasında yapılan nispi nem ölçümlerinin günlük bazda ortalamaları.

Yağış miktarının yüksek olduğu güz ve kış aylarında rutubetin ve nispi nemin yüksek olması beklenir. Şekil 3.10'da 2009-2015 yılları arasında İstanbul'da yapılan ölçümlerin günlük bazda ortalamaları verilmiştir. Buna göre, kış mevsiminde nispi nem artarken, yaz aylarında bu değerler düşmektedir. Her ne kadar sıcaklığın arttığı dönemde nispi nem azalsa da, bir kıyı şehri olan İstanbul'da nispi nem değerleri %60'ın altına çok nadiren düşmektedir. Bu da deniz kıyısında olmanın getirdiği rutubet yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.

Yağışla ilgili olan bir diğer parametre Bulutluluk oranıdır. Gökyüzündeki bulut miktarı ve oranı, güneş radyasyonunu ve yağış miktarını doğrudan ilgilendirmektedir. Bulutluluğun yüksek olduğu dönemlerde yağışın yüksek, radyasyonun düşük, ve bulutluluğun düşük olduğu dönemlerde yağış miktarının düşük, güneş radyasyonunun ise yüksek olması beklenir. İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik Modelinin kurulumu kapsamında kullanılan Bulutluluk verisi ECMWF'ten temin edilmiştir. 2003 yılının

tamamı için alınan veriler, günlük bazda alınan ortalamalar cinsinden Şekil 3.11'de verilmiştir.



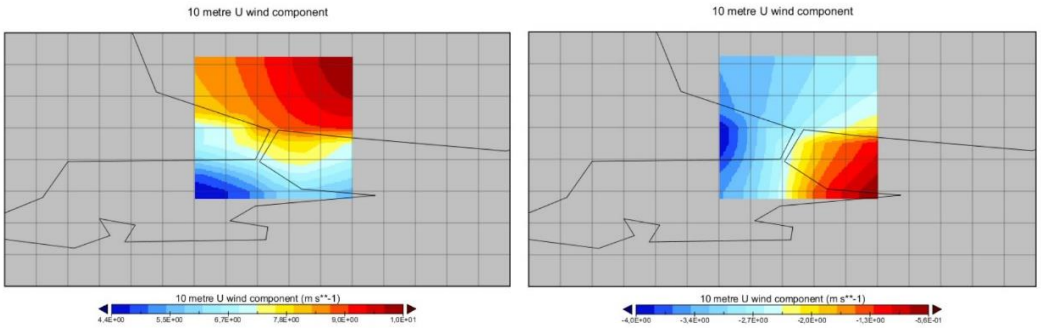
Şekil 3.11 : 2003 yılına ait İstanbul'daki bulutluluk oranı tahmin değerleri.

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere, yağışın yüksek olduğu Kış, Güz ve Bahar dönemlerinde bulutluluk oranında hatırı sayılır bir artış görülmektedir. Bu mevsimlerde kimi zaman %20'nin altına düşen oranlardan söz edilse dahi, genel itibariyle %100'e yakın değerlerin baskın olduğu anlaşılacaktır. Haziran, Temmuz ve Ağustos gibi sıcak ve kurak aylarda ise Bulutluluk değerleri ana hatlarıyla %20'nin altında seyretmektedir. Bu ise, mevsim normallerini yansıtması bakımından son derece olağan bir vakıadır.

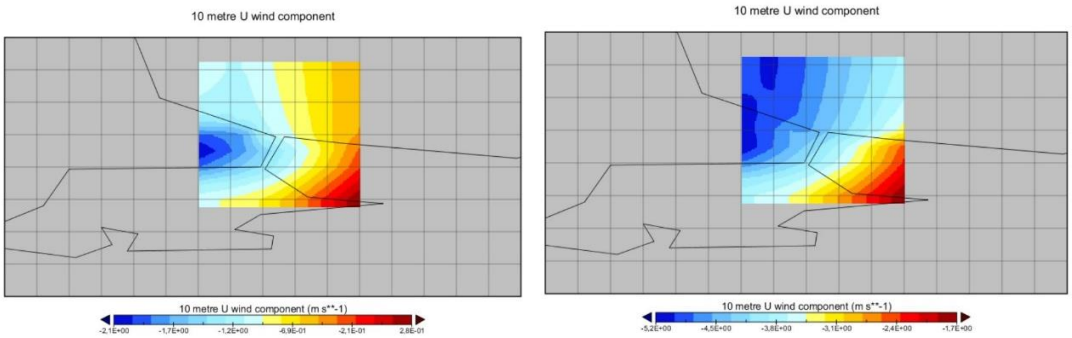
Rüzgarla ilgili olarak "x" ve "y" yönünde olmak üzere, iki farklı yöndeki yatay hız bileşeni kullanılmıştır. Atmosfer basıncıyla ilgili olaraksa, ortalama deniz seviyesi basınç değerleri temin edilmiştir. ECMWF'ten temin edilen bu iki veri, Hidrodinamik yapıyı tam olarak yansıtabilmek için oldukça önemlidir. İstanbul Boğazı üzerinde meydana gelen rüzgar, özellikle üst tabakadaki su kütlesinin hızını büyük oranda etkilemektedir. Örnek verilecek olursa, güneybatı yönünden Lodos rüzgarı estiğinde kuzeyden güneye doğru seyretmekte olan Karadeniz menşeili akım kesilerek bloke olmakta, hatta ters yönde bir akım hızı meydana gelmektedir. Bu vakıa, literatürde "Orkoz" olarak adlandırılmaktadır. Rüzgarın akım hızlarına etki gösterdiği bir başka durum, kuzeydoğu kökenli Poyraz rüzgarının faaliyet göstererek Karadeniz kökenli

İstanbul Boğazı sularının hızını arttırdığı durumdur. Böylece Poyraz'ın etkin olduğu zaman dilimlerinde Karadeniz'den Marmara Denizi'ne transfer edilen su kütlesi miktarında bir artış olmaktadır.

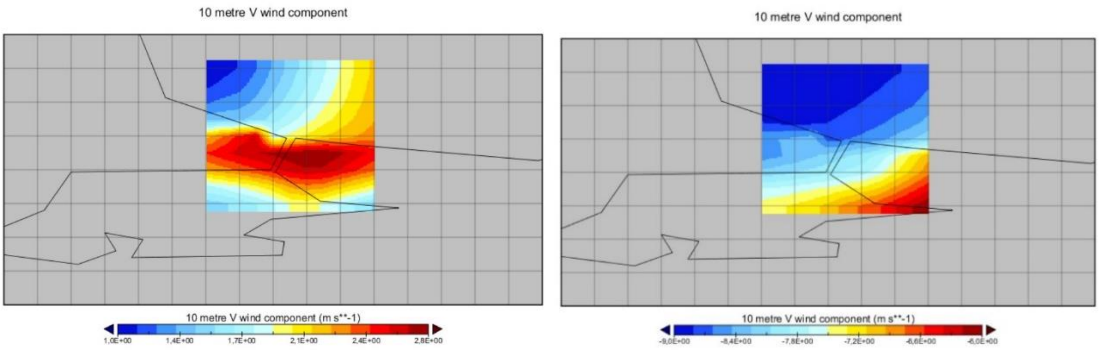
Rüzgar ve Atmosfer Basıncı verilerinin alındığı kaynak, ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Avrupa Orta-Ölçekli Hava Tahmin Merkezi) adlı kurumdur. ECMWF'in websitesinden 01.01.2003 ile 01.01.2004 tarihleri arasında, 1 yıllık U ve V yönündeki rüzgar hızı büyüklükleri, ve deniz seviyesindeki ortalama basınç değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de U yönündeki (Batı-Doğu İstikametindeki) hızlar, 15 Ocak 2003, 15 Nisan 2003, 15 Temmuz 2003 ve 15 Ekim 2003 tarihlerinde olmak üzere 4 ayrı şekilde verilmiştir. Buna göre Ocak ayı kışı, Nisan ayı baharı, Temmuz ayı yaz mevsimini, Ekim ayı ise güzü temsil etmektedir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de ise V yönündeki (Kuzey-Güney İstikametindeki) hızlar, U yönündeki tarihlendirmeyle aynı şekilde tarihlendirilerek verilmiştir. Burada dikkati çeken, Ocak ayında meydana gelen Lodos, ve diğer aylarda etkin olan Poyraz rüzgarlarıdır.



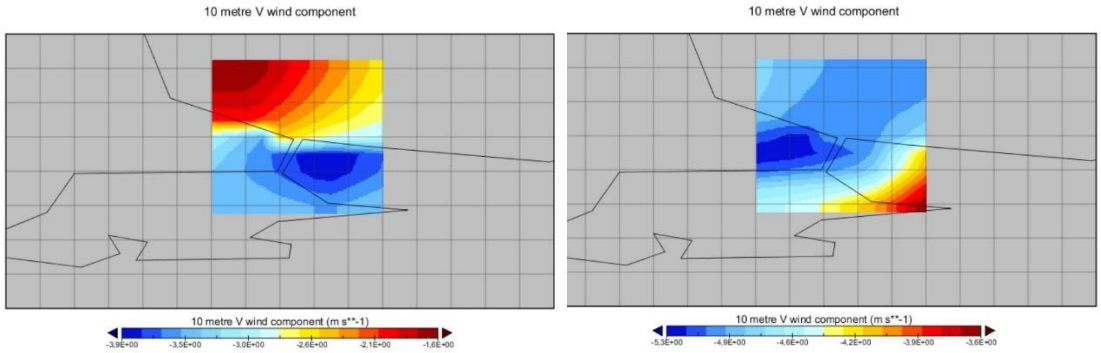
Şekil 3.12 : İstanbul'da 15.01.2003 ve 15.04.2003 tarihlerinde U yönündeki rüzgar hızı dağılımı.



Şekil 3.13 : İstanbul'da 15.07.2003 ve 15.10.2003 tarihlerinde U yönündeki rüzgar hızı dağılımı.

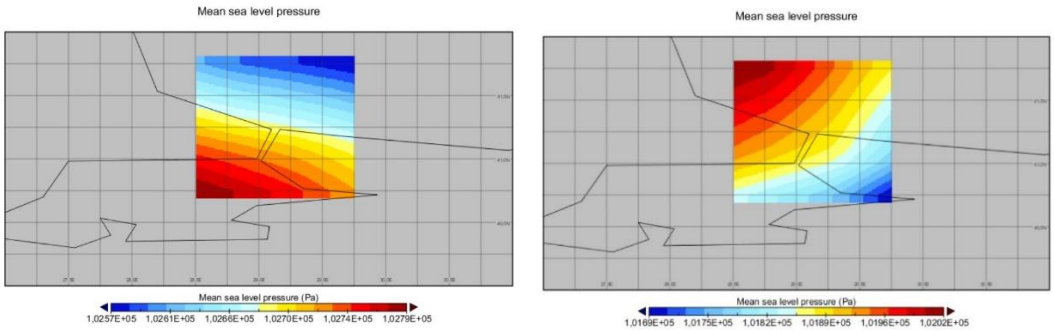


Şekil 3.14 : İstanbul'da 15.01.2003 ve 15.04.2003 tarihlerinde V yönündeki rüzgar hızı dağılımı.

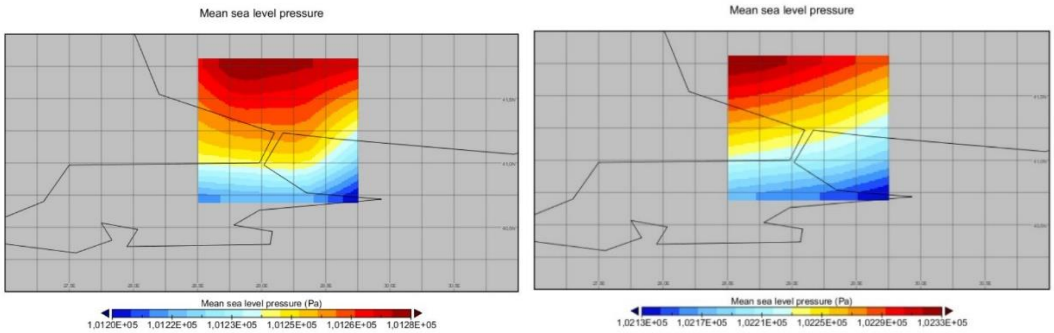


Şekil 3.15 : İstanbul'da 15.07.2003 ve 15.10.2003 tarihlerinde V yönündeki rüzgar hızı dağılımı.

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de İstanbul ve civarındaki deniz seviyesi ortalama basınç değerleri kontür haritası şeklinde verilmiştir. Rüzgarın yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine doğru seyrettiği bilgisine müracaat edersek, Atmosfer Basıncı değerlerinin Rüzgar grafikleriyle örtüştüğü sonucuna ulaşılabilir. Şekil 3.16'da soldaki grafikte yüksek basınç bölgesinin Marmara Denizi tarafı olması, bu bakımdan oldukça anlamlıdır. Çünkü tam da bu dönemde Lodos rüzgarının varlığı söz konusudur. Nisan, Temmuz ve Ekim aylarını temsilen verilen grafiklerde ise Karadeniz tarafı yüksek basınç bölgesi mevkiinde bulunmaktadır. Poyraz rüzgarlarının hakimiyetini sürdürdüğü bu dönemlerde Karadeniz tarafında bir yüksek basınç bölgesi oluşması verilerin tutarlılığı açısından olumludur. Bunun dışında, Atmosfer Basıncı değerleri 101-102 kPa mertebesinde seyretmektedir ki, bu da modelde kullanılan atmosfer basıncı verilerinde herhangi bir anormalliğin bulunmadığı anlamına gelmektedir.



Şekil 3.16 : İstanbul'da 15.01.2003 ve 15.04.2003 tarihlerinde atmosfer basıncı dağılımı.



Şekil 3.17 : İstanbul'da 15.07.2003 ve 15.10.2003 tarihlerinde atmosfer basıncı dağılımı.

4. HİDRODİNAMİK MODEL VE KURULUMU

İstanbul Boğazı'nın 3 boyutlu Hidrodinamik Modeli, Delft3D adlı bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programında kurulmuştur.

4.1 Delft3D

Delft3D, Kıyı, Akarsu, Göl ve Haliçleri 3 boyutlu modellemek ve farklı disiplinlerin yaklaşımlarını tamamen entegre edebilmek için tasarlanmış bir Akışkanlar Mekaniği yazılımıdır. Sediment hareketleri, Akımlar, Deniz ve Okyanus Dalgaları, Su Kalitesi, Morfolojik değişimler ve Ekoloji, Delft3D ile modellenebilen başlıca araştırma alanlarıdır. Bu araştırma alanlarından Akımlar ile ilgili olan Delft3D-Flow, İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamiğinin modellenmesi çalışması kapsamında kullanılmıştır. Zira Akım koşullarının modellenebilmesi ancak Delft3D-Flow modülüyle mümkün olabilmektedir.

Delft3D-FLOW ile 3 boyutlu ve 2 boyutlu model kurulumu yapılabilmektedir. Hız profilini gerçeğe daha yakın bir şekilde yansıtması, ve belki de en önemlisi, Tabakalı akım durumunu ortaya çıkarabilmesi gibi nitelikleri sebebiyle bu çalışma kapsamında 3 boyutlu model kurulumuna karar verilmiştir. Delft3D-FLOW ile modellenebilen başlıca uygulama alanları şöyledir: Gel-git ve rüzgar kaynaklı akımlar, tabakalı ve yoğunluk farkı sebebiyle oluşan akımlar, akarsu simulasyonları, büyük göl ve haznelerin simulasyonu, Tsunami, Hidrolik sıçrama ve taşkın dalgaları gibi ani değişen akımların modellenmesi, körfezlere verilen tatlı su deşarjları, tuzlu su girişimleri, göl, deniz ve haznelerde meydana gelen sıcaklık tabakalaşmaları, soğutma suları girişleri ve atıksu deşarjları, çözünmüş madde ve kirleticilerin taşınımı, sediment taşınımı ve morfoloji, dalga akıntıları, ve hidrostatik olmayan akımlar.

İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin nasıl kurulduğunun anlaşılabilmesi için Delft3D-FLOW modülü tarafından kullanılan koordinat sistemleri ve denklemler iyi bilinmelidir. Bu kapsamda Delft3D-FLOW hakkında bilgi verilmesi uygun ve gerekli görülmektedir.

4.1.1 Hidrodinamik denklemler

İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modelinin Delft3D-FLOW ile kurulması öngörüldüğünden, Delft3D – FLOW modülü tarafından akışkan hareketini tanımlamak maksadıyla çözülen temel denklemlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu temel denklemler süreklilik ve momentum denklemleridir ve türbülansın etkisi de işin içine dahil olmaktadır. Bu denklemler yazılırken Schonewille (2006), Kocaman (2007), ve Öztürk'ten (2010) istifade edilmiştir.

4.1.1.1 Süreklilik denklemi

Denklem 4.1'de özgül kütlesi değişebilen akışkanlar için geçerli olan en genel haldeki Süreklilik Denklemi ifadesi verilmiştir. Buna sıkıştırılabilir akışkanların kütle dengesinin 3 boyutlu denklemi de denilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \qquad (4.1)$$

4.1.1.2 Momentum denklemleri

Denklem 4.2, 4.3 ve 4.4'te sıkıştırılabilen Newtonien akışkanların 3 boyutlu Momentum Denklemleri verilmiştir. Bu denklemlere göre, ağırlık, basınç ve viskoz kuvvetler, akışkan alanı içinde lokal ve konvektif ivmelerin oluşmasına sebep olurlar. Süreklilik Denklemi ile birlikte Momentum Denklemleri, akışkan hareketinin davranışı hakkında net bir bilgi vermektedir.

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial z} - \rho f v + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \qquad (4.2)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial z} + \rho f u + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \qquad (4.3)$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w^2)}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = 0 \qquad (4.4)$$

Momentum Denklemleri'ndeki kayma gerilmesi ifadeleri, viskozite ve hız gradyanları cinsinden olmak üzere Denklem 4.5, ve 4.6'da gösterilmiştir.

$$\tau_{xx} = \rho\,\nu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x}\right), \quad \tau_{yy} = \rho\,\nu\left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y}\right), \quad \tau_{zz} = \rho\,\nu\left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \qquad (4.5)$$

$$\tau_{xy} = \rho\,\nu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right), \quad \tau_{xz} = \rho\,\nu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right), \quad \tau_{yz} = \rho\,\nu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \qquad (4.6)$$

Süreklilik ve Momentum Denklemleri'nin genel ismi Navier-Stokes Denklemleri olarak bilinmektedir. Navier-Stokes Denklemleri her ne kadar akışkan durumunu tamamen tanımlıyor olsa da, mevcut bilgisayar kapasiteleri, bu denklemlerin kesin çözümünün yapılabilmesi noktasında yetersiz kalmaktadır. Özellikle Reynolds sayısının yüksek olduğu Türbülanslı akım ortamlarında bu yetersizlik daha da belirgin bir hale gelmektedir.

4.1.1.3 Türbülans denklemleri

Akışkan hareketinin düzensizliği dolayısıyla ortaya çıkan Türbülansın kesin bir teorik analizinin olmadığı bilinmektedir. Fakat bazı benzeşim ve kabuller ışığı altında Türbülanslı akımlar modellenebilmektedir. Navier-Stokes Denklemleri'nin Türbülanslı akım koşullarındaki özel hali olan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri, Delft3D tarafından kullanılmaktadır. Denklem 4.7'de hız ve basınç parametreleri bileşenlerine ayrılmış olarak verilmiştir. Burada üzerinde çizgi olan bileşen $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p})$, zamansal ortalama değeri, üssü ile gösterilen ifade (u', v', w', p') ise türbülanstan kaynaklanan çalkantı bileşenini göstermektedir.

$$u = \bar{u} + u', \;\; v = \bar{v} + v', \;\; w = \bar{w} + w', \qquad p = \bar{p} + p' \qquad (4.7)$$

Bu dört denklemden hareketle Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri şu şekilde yazılabilmektedir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u'}{\partial x} + \frac{\partial \rho v'}{\partial y} + \frac{\partial \rho w'}{\partial z} = 0 \qquad (4.8)$$

$$\frac{\partial \rho u'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \rho \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \overline{u'w'}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$$
$$- \rho\nu\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}\right) - \rho f v = 0 \qquad (4.9)$$

$$\frac{\partial \rho v'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \rho \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \overline{v'w'}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \rho\nu\left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2}\right) + \rho f u = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \rho w'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial \rho \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \rho \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \overline{w'w'}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \rho\nu\left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2}\right) - \rho g = 0 \quad (4.11)$$

Denklem 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'deki $\rho\overline{u'u'},\ \rho\overline{u'v'},\ \rho\overline{u'w'},\ \rho\overline{v'v'},\ \rho\overline{v'w'}\ ve\ \rho\overline{w'w'}$ ifadeleri Reynolds Gerilmeleri olarak isimlendirilmektedir. Türbülanstan dolayı hızlarda meydana gelen sapmaların çarpımlarının ortalamaları alınarak Türbülans (Eddy) Viskozitesi ifadesine geçiş yapılmaktadır. Türbülans Viskozitesi ise, türbülansın etkisi sonucunda akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir.

Türbülanslı akımları modellemek için öne sürülen pek çok yaklaşım mevcuttur. Fakat kullanılırlık açısından en yaygın olan ve tabakalı akım yapısının modellenmesi açısından en uygun olduğu bilinen k - ε modeli, diğer türbülans modelleri arasından tercih edilmiştir. k - ε modeli, 2. Dereceden bir Türbülans kapatma modelidir ve iki ana denklem içermektedir. Buradaki kapatmanın anlamı, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemi ile ortaya çıkan fazla sayıdaki bilinmeyenin bu modelin denklemleriyle bilinir hale getirilip çözülebilmesidir. k - ε Modeli'nde k, Türbülans Kinetik Enerjisi, ε ise Türbülanstan dolayı oluşan enerji kaybıdır. Türbülans kinetik enerjisi k ile enerji kaybı ε arasındaki ilişki denklem 4.12'de verilmiştir.

$$\mu_t = \frac{\rho c_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (4.12)$$

Türbülans kinetik enerjisi k için kullanılan Taşınım denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right) + P_k + B_k - \rho\varepsilon \quad (4.13)$$

$$P_k = \mu_t\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right], \qquad B_k = \rho g K_v \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4.14)$$

Türbülans enerji kaybı ε için kullanılan Taşınım denklemi:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i\varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right)+P_\varepsilon+B_\varepsilon-\rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4.15}$$

$$P_\varepsilon=C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}P_k,\qquad B_\varepsilon=\frac{C_{1\varepsilon}}{k}\left(\rho g D_v\frac{\partial\rho}{\partial z}\right) \tag{4.16}$$

4.1.1.4 Sığ su varsayımı koşulu denklemleri

Yatay karakteristik uzunluk ölçeğinin, düşey karakteristik uzunluk ölçeğine nisbeten yüksek değerler alması halinde sığ su koşulları geçerli olmaktadır. Bu durumda hidrostatik basınç dağılımı kabulü yapılabilmektedir. Böylece denklem 4.4'ün yerine denklem 4.17 ikame edilebilmektedir.

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g \tag{4.17}$$

Denklem 4.17 yardımıyla Momentum Denklemlerinin modifiye edilmesiyle, 4.18 ve 4.19 numaralı denklemler oluşturulmaktadır. Bu denklemlerin meydana gelişi, sığ su koşulu altında Boussinesq Yaklaşımı vasıtasıyla olmaktadır.

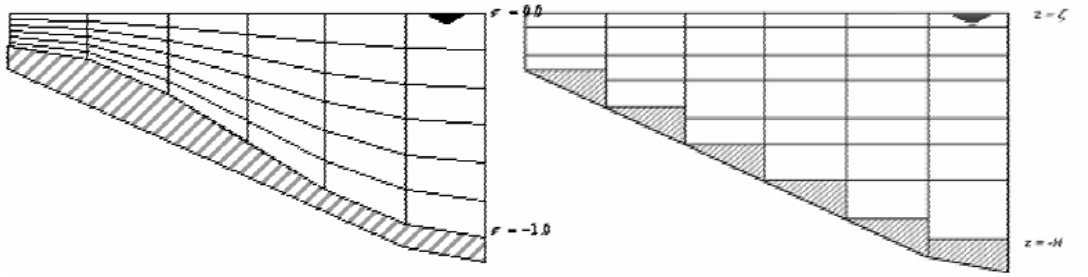
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}-\rho fv+g\frac{\partial h}{\partial x}+g(h-z)\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x}-\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}=0 \tag{4.18}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial z}+\rho fu+g\frac{\partial h}{\partial y}+g(h-z)\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}-\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z}=0 \tag{4.19}$$

4.1.2 Düşey koordinat sistemi

Deniz kıyılarında, haliç ve göllerde, sarp topografya ile birlikte tabakalı akımın ortaya çıkması muhtemeldir. σ-model, taban ve su yüzeyi sınır koşullarına uygun olmasına rağmen, her zaman piknoklin etrafında yeterli çözünürlüğe sahip olmayabilir. Yatay yoğunluk gradyanına sahip yaklaşımlarda, koordinat çizgileri ile yoğunluk arayüzlerinin kesişmesi önemli hatalar doğurabilir. Bu yüzden zayıf tabakalı su sistemlerinde 3 boyutlu benzeşimler için, Z-model kullanılmaktadır. Taban (ve serbest

yüzey) genellikle bir koordinat çizgisine denk gelmez ve tıpkı Şekil 4.1'de sağ kısımdaki gibi merdiven basamakları şeklinde temsil edilirler.



Şekil 4.1 : σ koordinat sistemi (solda) ve Z koordinat sistemi (sağda).

İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modeli kurulurken Z Koordinat Sistemi kullanılmıştır. Çünkü Tabakalı Akım koşulunun modellenebilmesi için en uygun koordinat sistemi Z Koordinat Sistemidir.

4.1.3 Yatay geniş türbülans simulasyonu

Yatay Geniş Türbülans Simulasyonu'nun seçili olması durumunda Delft3D-FLOW yazılımı her zaman adımında ayrı ayrı Yatay Türbülans Viskozitesi değeri hesaplamaktadır. Bu ise Delft3D'nin sabit yatay türbülans viskozitesi değeri kabulü yapılan seçeneğine göre daha gerçekçi bir sonuç ortaya koymaktadır. Grid-altı ölçeği viskozitesi ismi de verilen yatay türbülans viskozitesi değeri denklem 4.20 ile hesaplanmaktadır.

$$\nu_{(SGS)} = \frac{1}{k^2}\left(\sqrt{(\gamma\sigma_T S') + \left(\frac{3g|\vec{U}|}{4HC^2}\right)^2} - \left(\frac{3g|\vec{U}|}{4HC^2}\right)\right) \tag{4.20}$$

$$(S')^2 = 2\left(\frac{\partial u'}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v'}{\partial x}\right)^2 + 2\frac{\partial u'}{\partial y}\frac{\partial v'}{\partial x} \tag{4.21}$$

4.2 Hidrodinamik Model Kurulumu

İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modeli, Delft3D-Flow modülünde Bölüm 3'teki veriler ve Bölüm 2'de tarif edilen koşullar ışığında kurulmuştur. Modelin kurulumu 6 safhadan oluşmaktadır: Hesap Ağı Kurulumu, Batimetri Oluşturma, Girdi Tayini, Başlangıç Koşulu Tayini, Sınır Koşulu Tayini ve Gözlem İstasyonu Yeri Seçimi

Bu 6 safha, teferruatlı bir şekilde irdelenmeye fazlasıyla layıktır.

4.2.1 Hesap ağı kurulumu

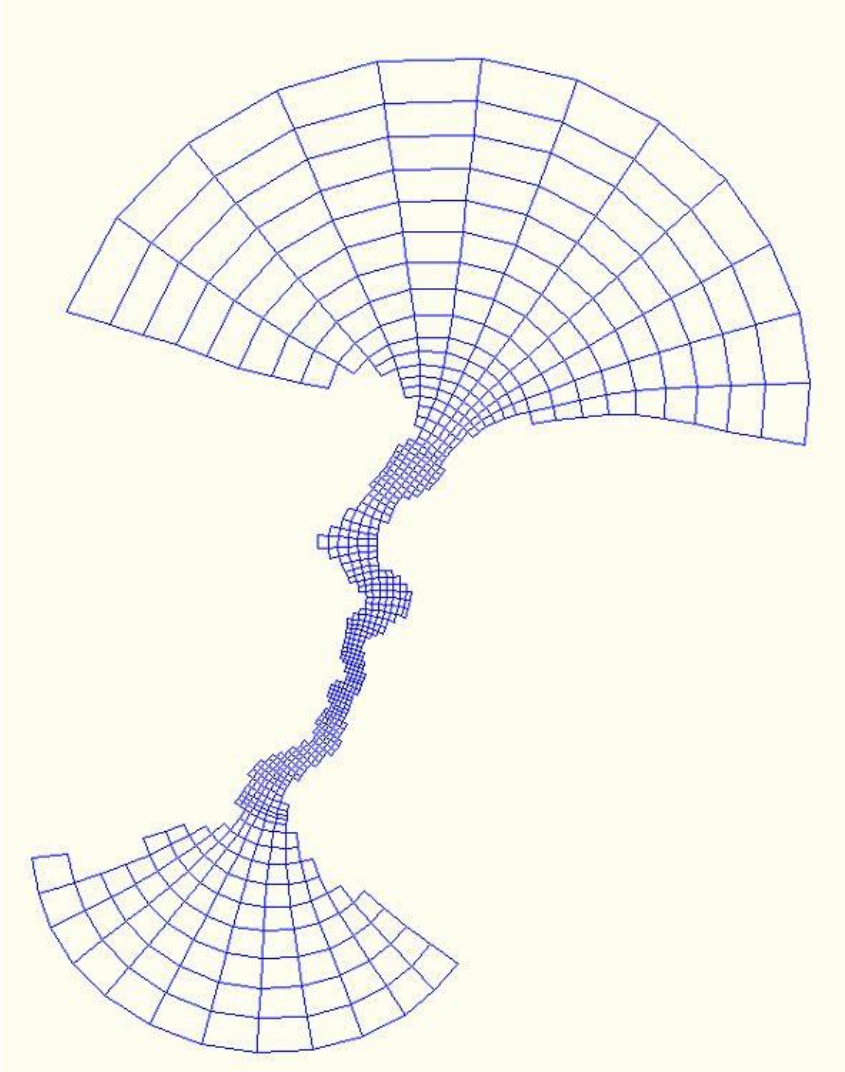
İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin kurulabilmesi için öncelikle hesap ağının sağlıklı ve kıyı morfolojisine uygun bir şekilde oluşturulması gereklidir. Hesap ağı, modeli kurulacak olan akım alanının ayrıklaştırılarak parçalar haline getirilmesi ile oluşan noktalar kümesinin tamamına verilen isimdir. Ağ çizgilerinin birleştiği düğüm noktaları, batimetri interpolasyonu ve hidrodinamik hesap yapılırken esas alınan noktalardır. Bu bakımdan düğüm noktası yoğunluğu ve sayısı ne kadar fazla olursa model çözünürlüğü ve hassaslığı o kadar artacaktır. Ancak bu hassaslık ve çözünürlüğe mukabil modelin hesap süresinde bir artış meydana gelecektir. Hesap süresinin uzaması ise model sonuçlarının değerlendirilmesini geciktirmesi bakımından istenmeyen bir durumdur. Hesap ağının aşırı sık ve aşırı geniş olmak üzere iki aşırı uç tarzının olduğu kabul edilirse, bu iki uç arasında optimum bir hesap ağı sıklığının tercih edilmesi gerektiği söylenmelidir. Böylece, hem yeterli çözünürlük ve hassaslık sağlanacak, hem de hesaplama süresi aşırı bir artış göstermeyecektir. Hidrodinamik modelde kurulan hesap ağı, Yatay Hesap Ağı ve Düşey Hesap Ağı olarak ikiye ayrılmaktadır.

4.2.1.1 Yatay hesap ağı

Yatay Hesap Ağı, Delft3D'nin RGFGRİD modülünde İstanbul Boğazı'nın morfolojisi esas alınarak üretilmiştir.

Hesap ağı sınırları, 30.0354 ile 28.0944 boylamları ve 41.4756 ile 40.7878 enlemleri arasında yer almaktadır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere İstanbul Boğazı'nın tamamı ve Karadeniz ile Marmara Denizi'nin az bir kısmı modele dahil edilmiştir. Bunun sebebi, çalışma alanı olarak planlanan İstanbul Boğazı'nın sınırlara uzak tutularak bu bölgede hassas bir hesaplama yapılmak istenmesidir. Dikey doğrultuda (m yönü) 103 hesap ağı

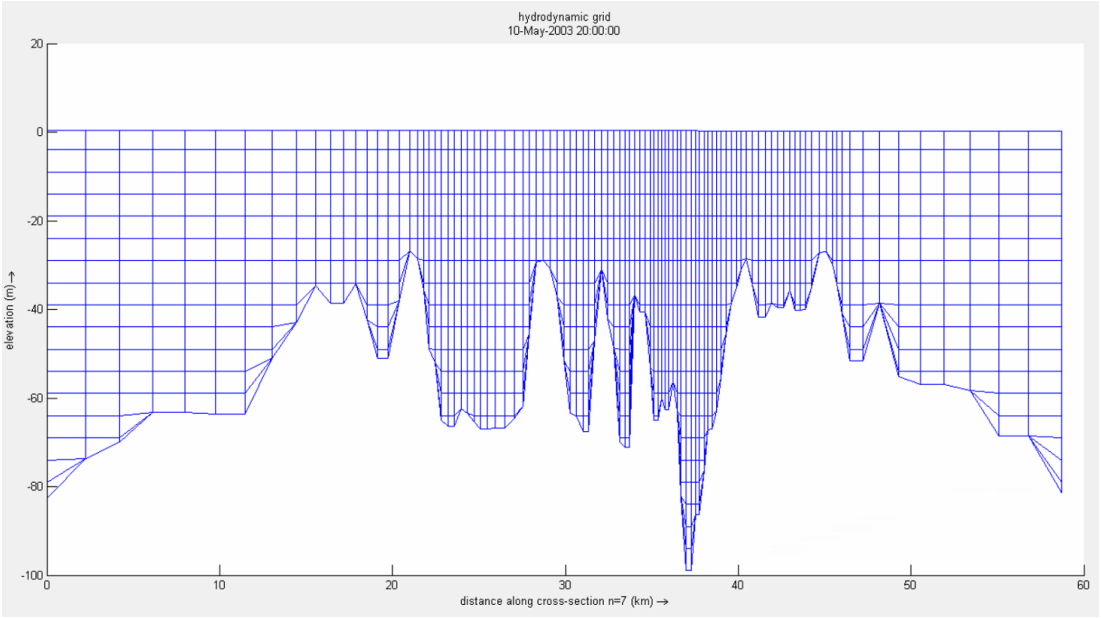
hücresi, Yatay doğrultuda (n Yönü) ise 12 hesap ağı hücresi mevcuttur. Toplam Hesap Ağı Hücresi 685 adettir. En küçük ağ hücresi uzunluğu 198.157 metre, en büyük ağ hücresi uzunluğu ise 6161.816 metredir.



Şekil 4.2 : İstanbul Boğazı'nın yatay hesap ağı.

4.2.1.2 Dikey hesap ağı

Bilindiği üzere, yatay hesap ağı ile katı madde ve ısı iletimi yatay doğrultuda hesaba katılmaktadır. Tabakalı akım gibi çok hassas koşulların bulunduğu bir akım alanında Dikey Hesap Ağından bahsetmek yerli yerinde olacaktır. Çünkü katı madde ve ısının dikey olarak transferi ve adveksiyonu bu tip akımlarda ön plana çıkacaktır. Bu amaçla modelin 3 boyutlu olması öngörülerek Dikey Hesap Ağı oluşturulmuştur.



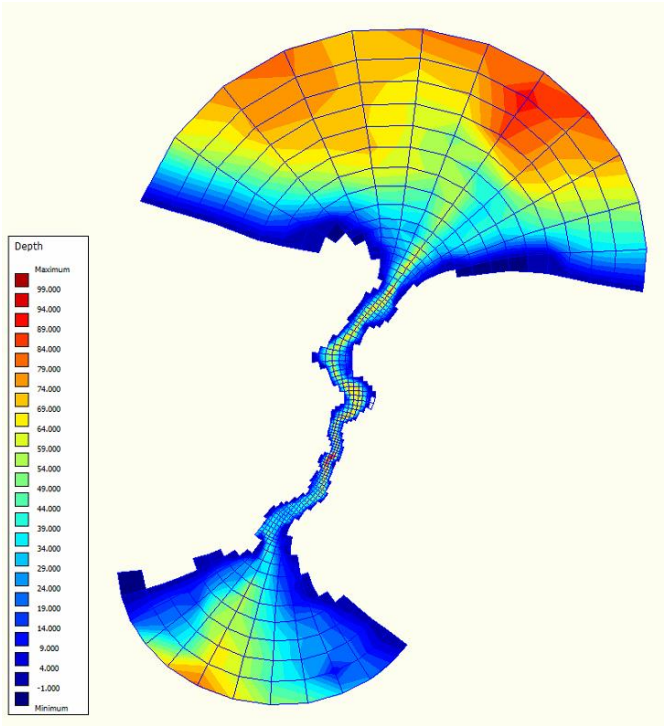
Şekil 4.3 : İstanbul Boğazı'nın boykesiti ve dikey hesap ağı.

Toplam 20 tabakadan oluşan dikey hesap ağı, 5 metrelik sabit derinliklere sahip tabakalara sahiptir. Şekil 4.3'de görüldüğü üzere, klasik Z model yapısı ile kurulan dikey hesap ağında, hücreler eğrisel değil, tamamiyle birbirlerine diktir. Her bir hücre dikdörtgen şekli arzetmektedir. Sadece modelin taban noktalarında batimetrinin hesap ağı ile uyumsuzluk gösterdiği bölgelerde bu diklik bozulmaktadır. Tabakalı akım yapısını Sigma modele göre daha iyi gösterdiği bilinen Z model, akım koşullarını yansıtabilmek için özellikle seçilmiştir. Böylece İstanbul Boğazı'nın modelde mümkün olduğunca doğruya yakın bir şekilde yansıtılacağı planlanmıştır.

4.2.2 Batimetri tayini

Türk Deniz Kuvvetleri'ne bağlı olarak çalışan Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan bir takım batimetri verilerinin alındığı, Bölüm 3.1'de belirtilmişti. İstanbul Boğazı'na ait olan bu batimetrik veriler, Şekil 3.1'de gösterilmişti. Mesaha gemisiyle yapılan ölçümlerle noktasal bazda oluşturulan İstanbul Boğazı'nın batimetrisini Delft3D'deki hesaplamalarda kullanabilmek için bazı hesap işlemlerinde bulunuldu. Eldeki batimetri verisi noktasal olarak kayıtlı olduğu, ve Delft3D noktasal bazlı veri yerine modelin tüm bölgelerinde tanımlı bir batimetrik veriyle hesap yapabildiği için böyle bir gereklilik hasıl oldu. Bu sebeple, Delft3D'nin batimetri üretimi için hazırlamış olduğu QUICKIN modülü kullanıldı. QUICKIN'de noktasal batimetri verisi ile model kurulumu için hazırlanan yatay grid örtüştürülerek bir üçgen

esaslı enterpolasyon işlemi yapıldı. Böylece Şekil 4.4'te de görüldüğü üzere eksik noktaların varlığına son verilerek, yatay hesap ağının tamamında tanımlı bir batimetri verisi üretildi.



Şekil 4.4 : İstanbul Boğazı'nın Delft3D ile hesap yapımı için hazırlanmış batimetrisi.

4.2.3 Parametre tayini

İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modelinin kurulumu için hesap ağı ve batimetri tayininin ardından modelin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesini temin etmek için parametre değerlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu parametreler genel olarak şunlardır: Zaman Dilimi ve Adımı, Fiziksel Parametreler, Başlangıç Koşulları, Sınır Koşulları ve Gözlem İstasyonları.

4.2.3.1 Zaman dilimi ve adımı

4 mevsimin tamamı süresince İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik koşulları incelenmek istendiğinden, model süresi 1 yıl olarak tespit edildi. Bu 1 yıl ise, 1 Ocak 2003 – 1 Ocak 2004 tarihleri arası olarak belirlendi. Çünkü o dönemde yapılmış ölçümlerin temin edilebilirlik ve güvenilirlik açısından model kurulumu için faydalı olacağı görüldü. Bir diğer önemli husus ise, zaman adımı için atanacak değerin

belirlenmesidir. Zaman adımı, modelin ne kadar sürede bir hesap yapacağını gösteren karakteristik bir büyüklüktür. Burada, Courant Sayısı şartına uyumluluk göstermesi açısından 0.25 dakika, yani 15 saniye, Zaman Adımı için uygun görülmüştür. Böylece Hidrodinamik modelin 1 yıl süresince, 15 saniyede bir hesap yapacağı kararlaştırılmıştır.

4.2.3.2 Fiziksel parametreler

Sağlıklı bir hidrodinamik modelin kurulabilmesi için Fiziksel Parametrelerin gerçeğe yakın değerlere sahip olması gerekmektedir. Bu parametreler şöyle sıralanabilir: Hidrodinamik sabitler, Pürüzlülük Katsayısı, Viskozite değerleri ve Rüzgar verileri.

4.2.3.2.1 Hidrodinamik sabitler

Hidrodinamik sabitlerden kasıt, yerçekimi ivmesi, suyun özgül kütlesi ve havanın özgül kütlesidir. Yerçekimi ivmesi 9.81 m/s^2, Suyun özgül kütlesi 1000 kg/m^3, havanın özgül kütlesi ise 1 kg/m^3'tür.

4.2.3.2.2 Pürüzlülük katsayısı

Bölüm 1'de bahsedildiği üzere Gregg ve Özsoy (2002), İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısının şekillenmesinde taban sürtünmesinin oldukça önemli bir yere sahip olduğunu belirtmiştir. Özellikle Akdeniz kaynaklı yüksek tuzluluktaki alt tabaka sularının İstanbul Boğazı'ndaki hareketi, taban sürtünmesinden etkilenmektedir. Bu sebeple taban pürüzlülüğünün hidrodinamik modelde etkin bir şekilde gösterilmesi gerekmektedir. Pürüzlülük katsayısı olarak Manning denkleminde kullanılan Manning pürüzlülük katsayısı, 0.02 olarak seçilmiştir. İstanbul Boğazı'ndan binlerce yıldır akım geçtiği için taban pürüzlülüğünün çok yüksek olmayacağı düşünüldüğünden bu değer seçilmiştir.

4.2.3.2.3 Viskozite değerleri

Bilindiği üzere akışkan hareketinde en mühim faktörlerden biri türbülanstır. Türbülans, günümüzde dahi tam anlamıyla modellenememekle birlikte, bazı yaklaşımlarla gerçeğe yakın olarak modellenebileceği bilinmektedir. Bu yaklaşımlardan biri Türbülans Viskozitesi kavramının altında yatmaktadır. Türbülans Viskozitesi, türbülansın oluşturduğu sürtünme gerilmesinin, akışkanın viskozitesinden kaynaklanan sürtünme gerilmesine benzer tarzda bir sürtünme gerilmesi oluşturduğu

varsayımına dayanmaktadır. Yatay ve Düşey olmak üzere iki tip viskozite vardır. Yatay türbülans viskozitesi 1 m^2/s, Düşey türbülans viskozitesi ise 10^{-4} m^2/s'dir.

Türbülans viskozitesine ilaveten, türbülans yayınırlığı adlı bir parametrenin varlığından bahsetmek yerinde olacaktır. Hidrodinamik model içindeki partiküllerin düşey veya yatay yer değiştirmesi türbülans yayınırlığı ile doğrudan alakalıdır. Yatay türbülans yayınırlığı 500 m^2/s, Düşey türbülans yayınırlığı ise 10^{-5} m^2/s'dir. Bu değerler tabakalı akım koşulunun modellenebilmesi için uygun görülmektedir.

4.2.3.2.4 Isı akış parametreleri

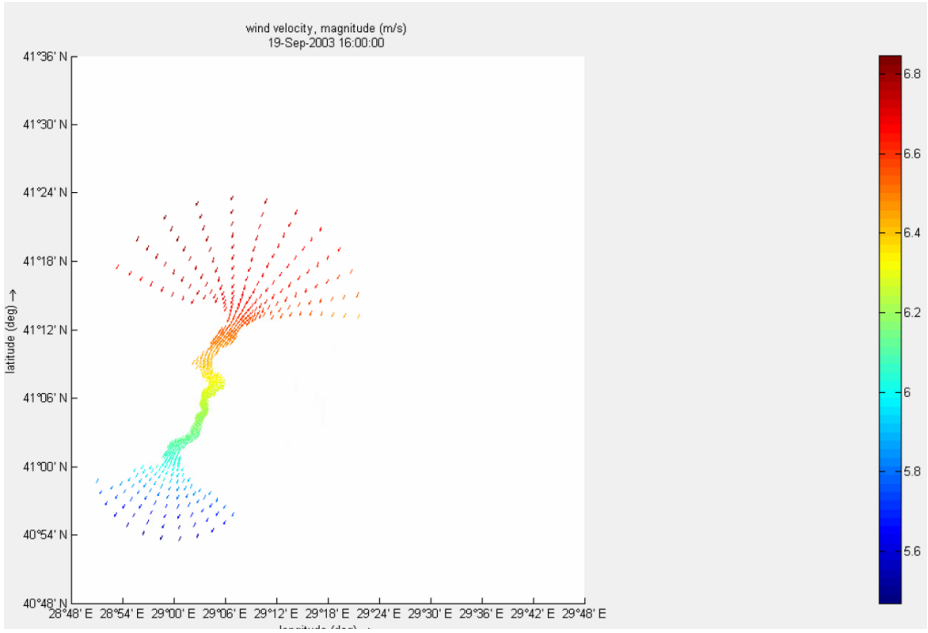
Büyük su kütlelerinin atmosferle etkileşimini gerçeğe yakın bir şekilde modelleyebilmek için ısı akış parametreleri ciddi önem taşımaktadır. İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin kurulabilmesi için bu parametrelere ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Özellikle İstanbul Boğazı'nın üst tabakaları atmosferle sürekli etkileşim halinde olduğundan, bu kısımdaki ısı taşınımı ve buharlaşma etkileri ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, Bölüm 3.4'te verilen atmosfer sıcaklığı, nispi nem ve bulutluluk değerleri Isı Akış Parametrelerinin tayin edildiği bölümde kullanılmıştır. Bunun dışında, denizin berraklık miktarını ifade eden Seki Disk Derinliği, -İstanbul Boğazı'nda yapılmış olan ölçümlere istinaden- 8 m, buharlaşma miktarını belirleyen Dalton Sayısı 0.003045, Isı taşınımını ilgilendiren Stanton Sayısı ise 0.00252 seçilmiştir. Dalton ve Stanton sayıları için bu değerlerin seçilmesi, Türk Boğazlar Sistemi'nin modellendiği MEMPIS (2006) projesinde yapılan kalibrasyonla tayin edilmeleri sebebiyledir.

4.2.3.3 Rüzgar verileri

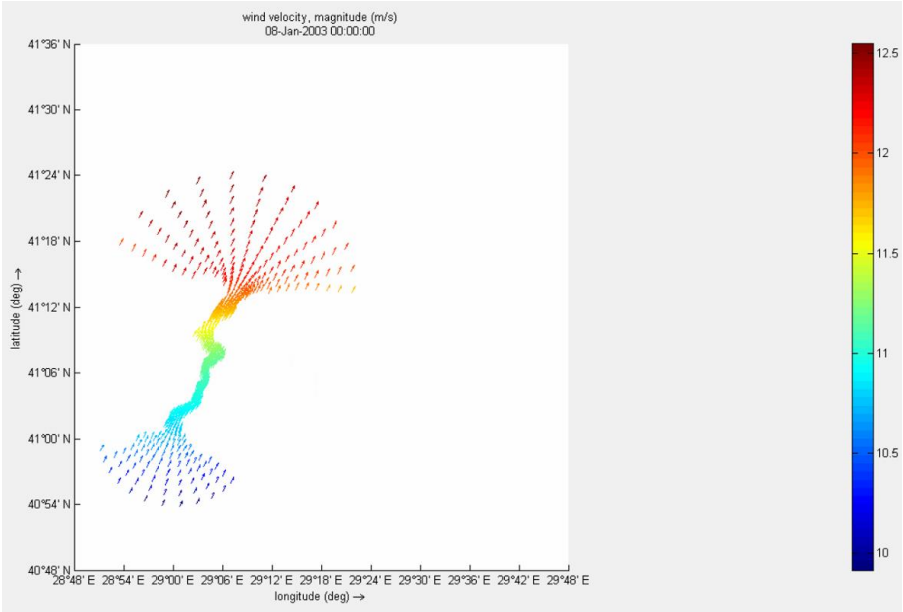
İstanbul Boğazı yüzeyindeki rüzgar kaynaklı gerilme kuvvetleri, özellikle akım alanının üst tabakası üzerinde müessir bir rol oynamaktadır. Bu sebeple, İstanbul Boğazı üzerindeki rüzgar hızı, doğrultu ve yönlerini modelde temsil etmenin elzem olacağı görülmüştür. Özellikle rüzgar hızının had safhada olduğu Poyraz ve Lodos koşullarında İstanbul Boğazı üst tabakasının belirgin bir şekilde rüzgardan etkilendiği tespit edilmiştir.

Bölüm 2.2 ve 3.4'te daha önce bahsedildiği üzere Poyraz rüzgarının hakim olduğu dönemde üst tabaka akım hızında bir artış gözlenirken, Lodos rüzgarının hakim olduğu zaman diliminde ise üst tabaka akımı yavaşlamakta, hatta kimi zaman tam tersi

istikamette seyrine devam etmektedir. Şekil 4.5 ve 4.6'de rüzgar hız vektörleri gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 4.5'teki durumda üst tabaka akım hızında bir artış görülmesi muhtemeldir. Şekil 4.6'da ise hızı 10 m/s'nin üstüne çıkan bir Lodos tipi rüzgarın hız vektörleri görülmektedir.



Şekil 4.5 : Poyraz'ın hakim olduğu bir zaman dilimine ait rüzgar hız vektörleri.

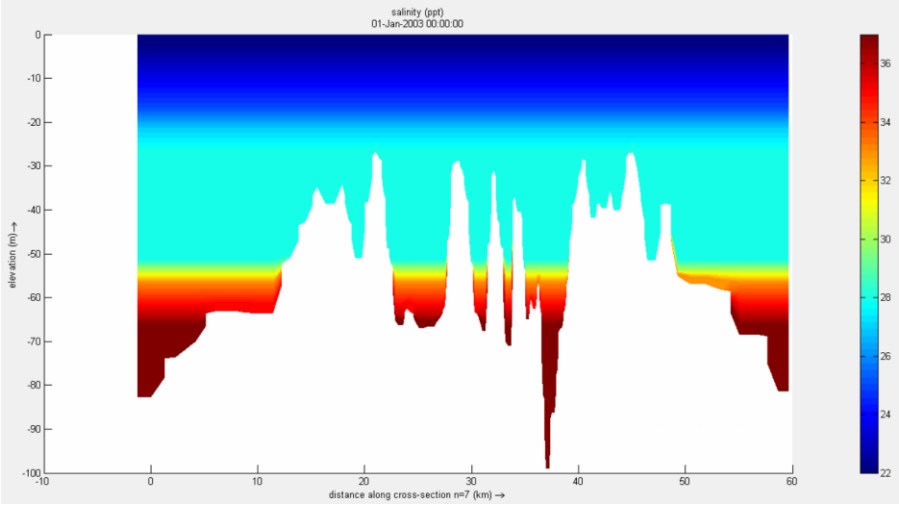


Şekil 4.6 : Lodos'un hakim olduğu bir zaman dilimine ait rüzgar hız vektörleri.

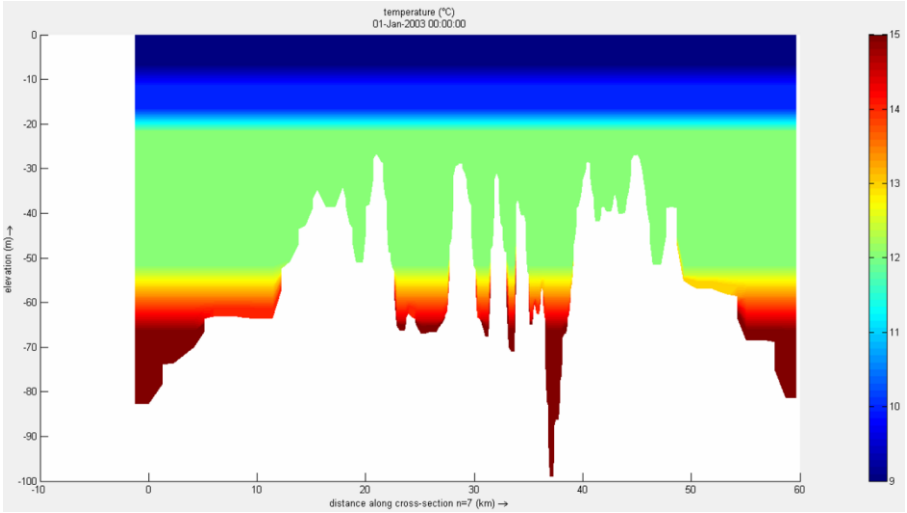
4.2.4 Başlangıç koşulları

İstanbul Boğazı, tabakalı akım yapısına sahip olması dolayısıyla, hidrodinamik modelde tabakalar arasındaki sıcaklık ve tuzluluk farkı mümkün olduğunca gerçekçi olarak tanımlanmalıdır. Bu sebeple başlangıç koşulları oldukça önem kazanmaktadır. Başlangıç koşulu olarak tanımlanan değişkenler şöyle sıralanabilir: Su seviyesi, Akım hızı, Tuzluluk ve Sıcaklık değerleri. Su seviyesi ve Akım hızı değerleri, başlangıçta 0 m ve 0 m/s olarak tanımlanmıştır. Çünkü model çalıştırılmaya başlandıktan kısa bir süre sonra bu iki parametre gerçek değerlerine yakınsayabilmektedir.

Burada Tuzluluk ve Sıcaklık, tabakalaşmada en mühim rolü oynadığı için, başlangıç koşulu olarak bu değerlerin tayini ön plana çıkmaktadır. Başlangıç koşullarının hidrografik verileri olan tuzluluk ve sıcaklık değerlerinin menşei, İSKİ'nin 2003 yılında Marmara, İstanbul Boğazı ve Karadeniz'de yaptığı muhtelif ölçümlerdir. Bu ölçümlerden yola çıkılarak 01.01.2003 00:00:00 tarihi için uygun koşullar belirlenmiştir. Şekil 4.7'de, başlangıç tuzluluk değerlerini gösteren boykesit kontür grafiği verilmiştir. Buna göre, tuzluluk değerleri 22 ppt ile 37 ppt arasında değişmektedir. Şekil 4.8'de ise başlangıç sıcaklık değerlerini gösteren boykesit kontür grafiği verilmiştir. Grafikte, sıcaklık değerlerinin 9 ila 15 ^{o}C arasında değiştiği görülmektedir. Başlangıç tarihi olarak 01.01.2003 00:00:00 belirlendiği için kış mevsiminin koşullarına uygun bir başlangıç koşulu oluşturulmuştur. Üst tabakanın alt tabakalara nisbeten daha düşük sıcaklık değerine sahip olması, bu uygunluğun önemli bir alametidir.



Şekil 4.7 : İstanbul Boğazı'nın başlangıç tuzluluk değerlerini gösteren boykesit.



Şekil 4.8 : İstanbul Boğazı'nın başlangıç sıcaklık değerlerini gösteren boykesit.

4.2.5 Sınır koşulları

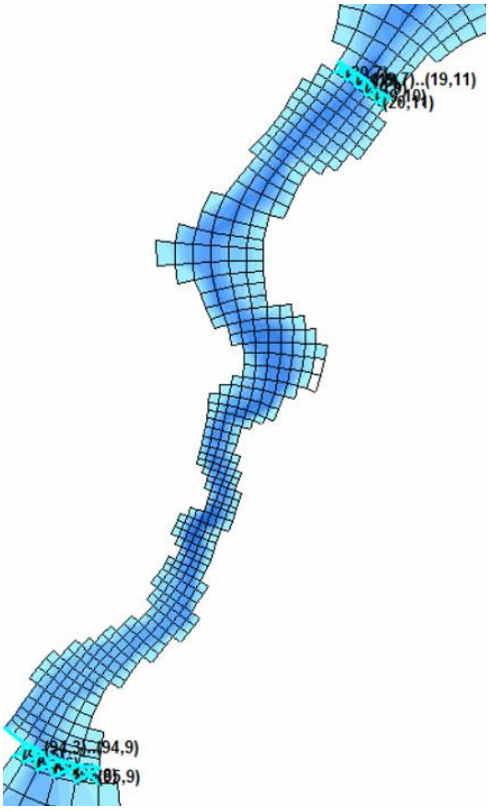
Tabakalı akımın oluşumunda alt tabaka ile üst tabaka arasındaki yoğunluk farkının etkisi olduğu gibi, İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney uçları arasındaki su seviyesi farkının da etkisi mevcuttur. Bu su seviyesi farkı dolayısıyla akım, su seviyesinin yüksek olduğu bölgeden su seviyesinin düşük olduğu bölgeye doğru seyreder. İstanbul Boğazı özelinde ise Karadeniz tarafındaki su seviyesi, Marmara Denizi tarafındaki su seviyesine göre daha yüksektir. Bu yüzden, Hidrodinamik modelde sınır koşulu olarak su seviyesi değerleri girilmiştir. Bu su seviyesi değerleri, Şekil 3.7 ve 3.8'de verilmiştir.

Su seviyesinin yanında tuzluluk ve sıcaklık değerlerini de sınır şartı için girmek uygun görülmüştür. Zira, her ay ve dahi her mevsim, tabakalaşma derinlikleri değişebilmektedir. Bu durumun hidrodinamik modelde gösterilebilmesi, ancak tuzluluk ve sıcaklık değerlerinin sınır şartı olarak girilmesiyle mümkün olmaktadır. Bu tuzluluk ve sıcaklık değerleri Şekil 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'da gösterilmiştir.

4.2.6 Gözlem istasyonları

Delft3D'de yapılan hidrodinamik analizleri bütüncül olarak görüntülemek belirli bir fikir vermektedir. Fakat, noktasal bazda yapılan ölçümler kimi zaman daha net sonuçlara ulaştırabilmektedir. Bu mülahaza ile İstanbul Boğazı'nda gözlem istasyonları kullanılmıştır. İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney girişlerinde yapılan

debi ölçümlerinin varlığı bilinmektedir. Bu ölçümlere binaen, Şekil 4.9'da görüldüğü üzere, İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney girişlerine 5'er adet gözlem istasyonu ve 1'er adet gözlem enkesiti tayin edilmiştir.



Şekil 4.9 : İstanbul Boğazı'nda kurulan gözlem istasyonları.

5. DUYARLILIK ANALİZİ VE MODEL SONUÇLARI

Modelin çalıştırılması ve koşturulma sürecinin ardından sonuçların irdelenmesi üzerinde durulması gerekmektedir. Bu bölümde DELFT3D yazılımının hassaslığından ve İstanbul Boğazı'nda yapılan ölçümlerin girdi olarak kullanılmasıyla ortaya çıkan sonuçlardan bahsedilecektir.

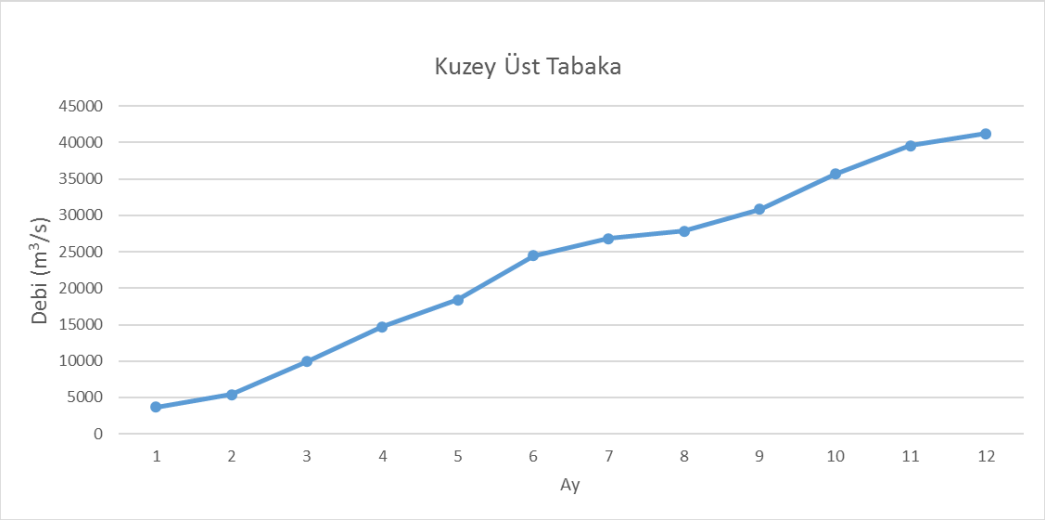
5.1 Duyarlılık Analizi

İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modelinin farklı sınır koşulları için farklı sonuçlar ortaya çıkaracağı açıktır. Bu sebeple ana modelde Pendik ve Anadolu Kavağı'nda ölçülmüş olan su seviyesi değerleri, duyarlılık analizi kapsamında yapılan hesaplamalar için değiştirilmiştir. Duyarlılık analizi çalışmalarında su seviyesi farkı ile debinin nasıl değiştiği gözlenmiştir.

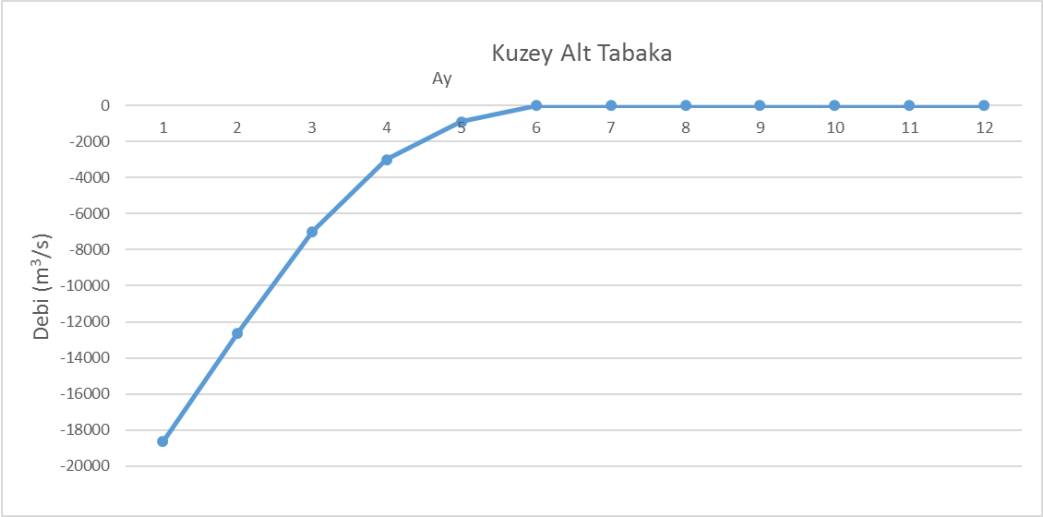
5.1.1 Karadeniz'in baskın olduğu durum

Anadolu Kavağı ve Pendik'te yapılan su seviyesi ölçümlerine göre, Karadeniz'e daha yakın tarafta bulunan Anadolu Kavağı'nda ölçülen su seviyesi değerleri Pendik'te yapılan ölçümlere göre –genel olarak- daha yüksektir. Buradan anlaşılan o ki, yılın genelinde Karadeniz tarafındaki su seviyesi değerleri, Marmara Denizi tarafındaki değerlerden daha büyüktür. Bundan dolayı, öncelikle Karadeniz'in daha baskın olduğu durum test edilmek istenmiştir. Bu duyarlılık analizi test modelinde Marmara Denizi tarafı sınırında su seviyesi değerleri yılın tamamında 0 m'dir. Karadeniz tarafı sınırında ise su seviyesi değeri, 1 Ocak 2003 Saat 00:00'da 0 m'den başlatılıp her saatte bir 10^{-4} m artarak, son zaman dilimi olan 1 Ocak 2004 Saat 00:00'da 0.876 m'ye ulaşmaktadır. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait boğazın kuzey kısmındaki üst tabaka ve alt tabaka debilerinin aylık bazda ortalamalarının grafiği verilmiştir. Karadeniz tarafı sınırının su seviyesinin düzenli bir şekilde artışı, üst tabaka debilerinde de düzenli bir artış meydana getirmiştir. Öyle ki, yıl sonunda aylık ortalama debi değeri 40000 m^3/s'yi dahi geçmiştir.

Alt tabaka debi değerinde ise –üst tabakanın aksine- sürekli bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalma, Haziran ayında alt tabaka debisinin 0 m^3/s olması ile nihayet bulmuş, ve alt tabaka debisi tamamen bloke olmuştur. Alt tabaka debisinin tamamen bloke olduğu tarih 5 Haziran 2003'tür, ve bu tarihte Karadeniz sınırı tarafındaki su seviyesi 37.3 cm mertebesindedir.

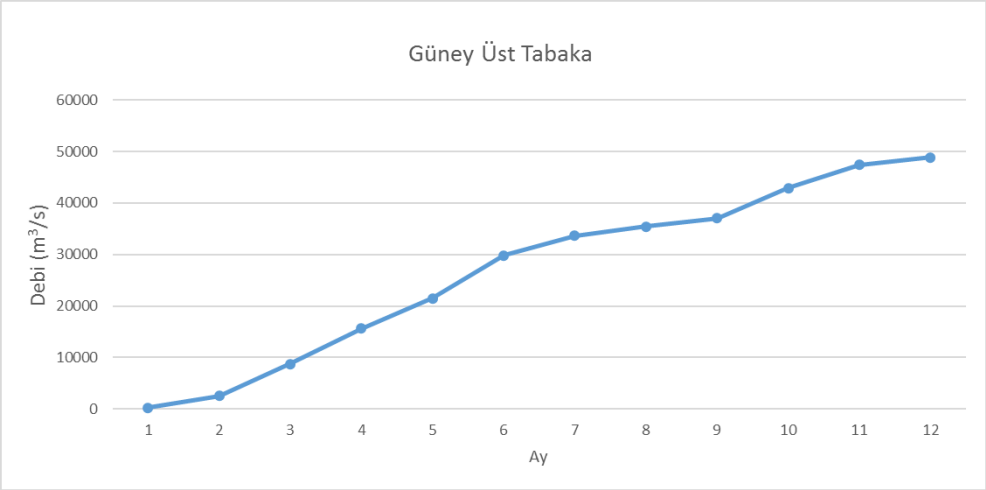


Şekil 5.1 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği.



Şekil 5.2 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği.

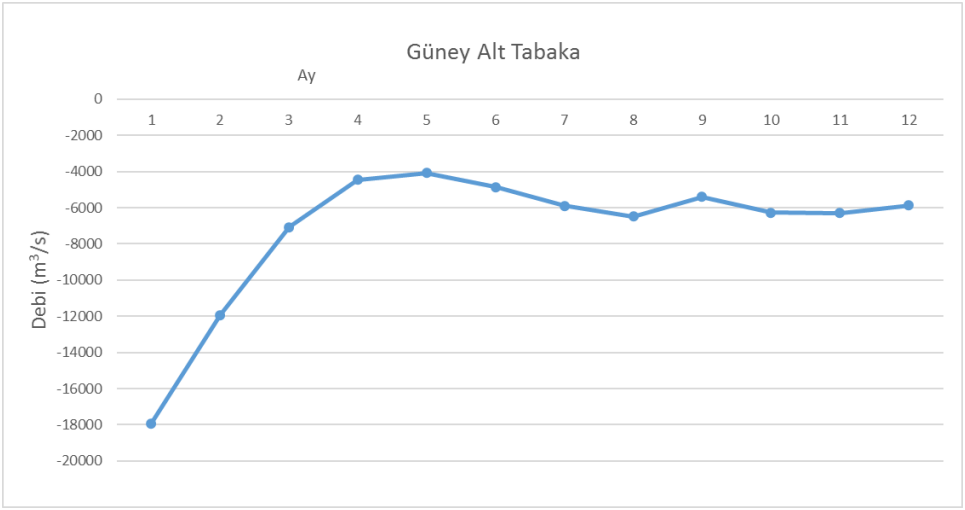
İstanbul Boğazı'nın kuzey kısmında gözlemlenen değerler ne kadar önem taşıyorsa, güney kısmındaki değerler de en az kuzeydekiler kadar önem taşımaktadır. Bu sebeple Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait güney kısmında gözlemlenen debi değerleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir. Burada ilk göze çarpan, üst tabaka debisinin –tıpkı kuzeydeki gözlem noktasında gözlendiği gibi- sürekli artmasıdır. Ortalama aylık üst tabaka debisi, kuzeyde gözlenen değerlere göre bir nebze daha yüksek olarak tespit edilmiş ve 50000 m^3/s'ye yaklaşmıştır. Bunun sebebi, bu debinin gözlendiği enkesitin azami alışverişin sağlandığı güney eşiğine çok kısa bir mesafede bulunmasıdır. Eşik üzerinden jet halinde mansaba doğru ilerleyen üst tabaka akımının debisinde artış olması gayet normal olarak değerlendirilmelidir.



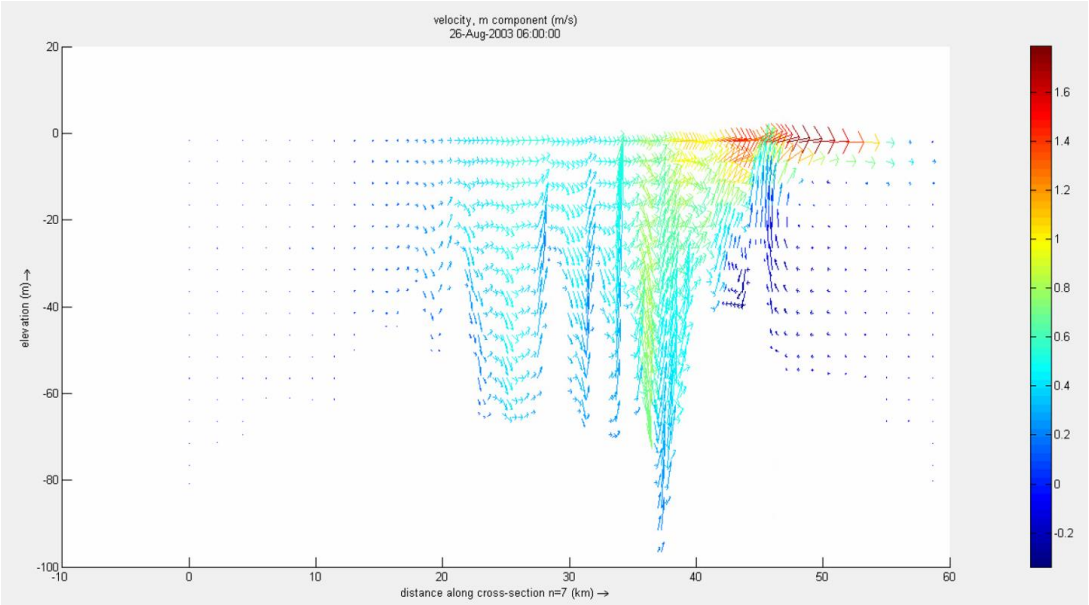
Şekil 5.3 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği.

Bir başka dikkat çeken husus, İstanbul Boğazı'nın güney kısmında gözlenen debi değerlerinin –kuzeydeki durumun aksine- 0 m^3/s değerini almamasıdır. Bu durum, mevcut gözlem istasyonunun İstanbul Boğazı'nın güney eşiğinin güney kısmında kalması sonucu gerçekleşmiştir. Zira alt tabaka blokajının meydana geldiği bölge tam da güney eşiğinin olduğu yerdir. Burada alt tabaka sularının neredeyse tamamı üst tabaka sularına karışmakta ve Marmara Denizi'ne geri dönmektedir. Şekil 5.5'te İstanbul Boğazı'nın boykesitindeki hız vektörleri gösterilmiştir. Şeklin sağ tarafı Marmara Denizi'ni, sol tarafı ise Karadeniz'i göstermektedir. Tam 45. Km'de yer alan eşiğin olduğu kısma dikkat edilirse, üst tabaka hız değerlerinin bu bölgede maksimum

olduğu, ve alt tabaka debisinin ise tam bu kısımda üst tabakaya karışıp bloke olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4 : Karadeniz'in baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği.

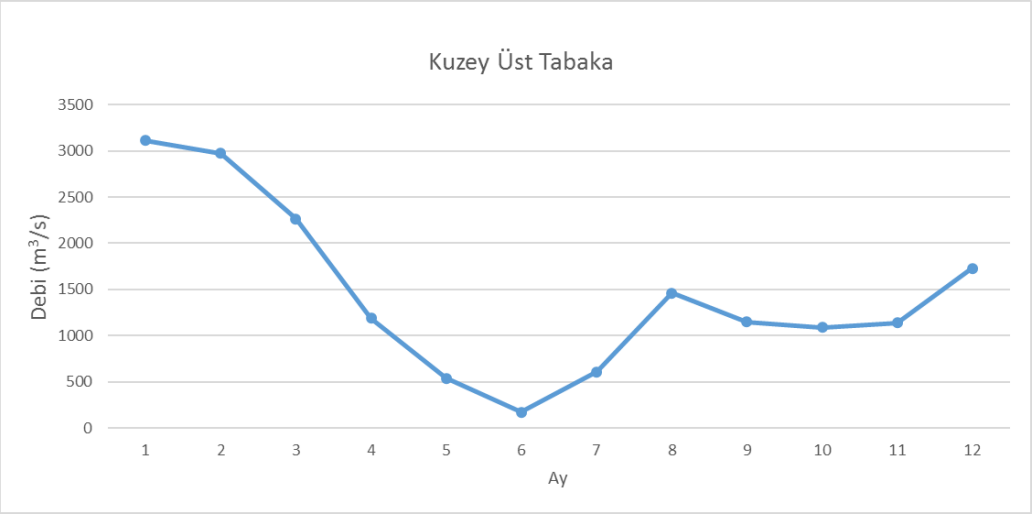


Şekil 5.5 : Karadeniz'in baskın olması halinde 26.08.2003 tarihinde İstanbul Boğazı boykesiti hız vektörleri.

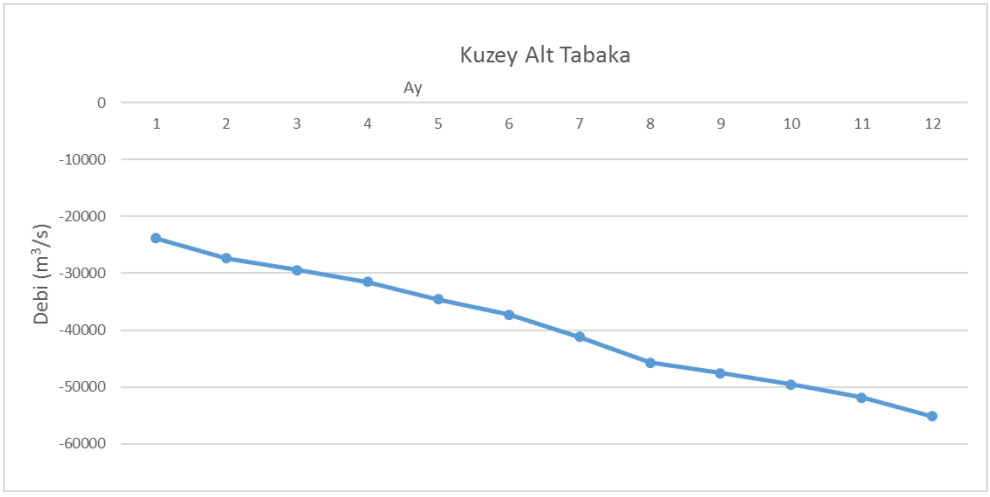
5.1.2 Marmara Denizi'nin baskın olduğu durum

Karadeniz'in baskın olduğu duruma alternatif olarak, kurulan modelin hassasiyetini test etmek amacıyla Marmara Denizi tarafının baskın olduğu bir sınır şartı oluşturulmuştur. Bu duruma göre, Karadeniz tarafı sınırında yıl boyunca su seviyesi sabit ve 0 m'dir. Marmara Denizi tarafı sınırında ise 1 Ocak 2003 Saat 00:00'da 0 m olarak seçilen su seviyesi değeri her saatte bir 10^{-4} m arttırılarak, son saat değeri olan 1 Ocak 2004 Saat 00:00'da 0.876 m'ye çıkmıştır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'te İstanbul Boğazı'nın kuzey kısmında gözlenen, Marmara Denizi'nin baskın olduğu duruma ait üst ve alt tabaka debi değerleri verilmiştir. Burada ilk dikkati çeken, alt tabaka debisinin sürekli bir artış göstermesidir. Öyle ki, aylık ortalama debi değeri Aralık ayı itibariyle 60000 m^3/s'ye yaklaşmaktadır. Bunun su seviyesi farkının artışından kaynaklandığı belirtilmelidir.

İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde gözlenen üst tabaka debisi ise yılın hiçbir döneminde 0 m^3/s olmamaktadır. Karadeniz'in baskın olduğu durumda alt tabaka debisi bir süre sonra bloke olurken Marmara Denizi'nin baskın olduğu durumda boğazın kuzeyindeki üst tabaka debisinin 0 m^3/s olmaması ancak yoğunluk gradyanı ile açıklanabilir. Şunu da ilave etmek gerekir ki, İstanbul Boğazı'ndaki gözlem istasyonu kuzey eşiğinin kuzeyinde olması sebebiyle, üst tabaka debisinin kuzey eşiğinin olduğu bölgede bloke olup alt tabaka akımına karışarak Karadeniz'e ulaştığını göstermemektedir. Bu bakımdan bu gözlem istasyonundaki değerler bloke olmadan hemen önceki debi değerleridir.

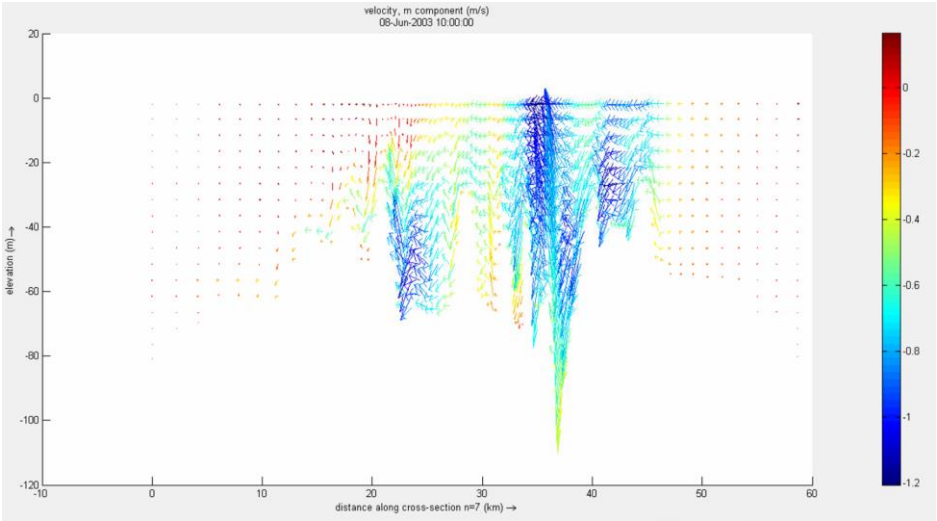


Şekil 5.6 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği.



Şekil 5.7 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın kuzey kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği.

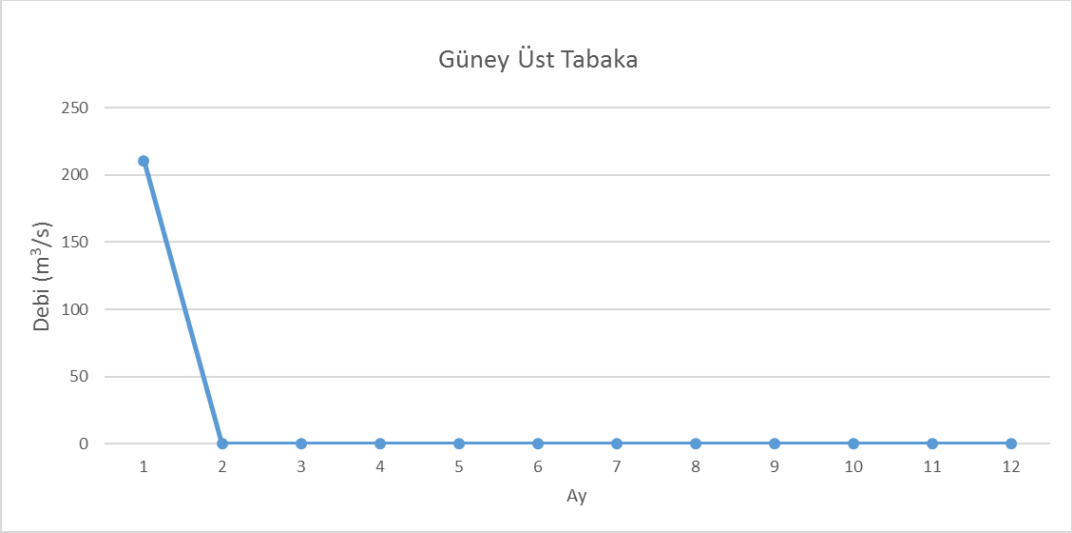
Şekil 5.8'de Marmara Denizi tarafı su seviyesinin baskın olduğu duruma ait boğaz boykesitindeki hız vektörleri gösterilmiştir. Mevcut şekilden görüldüğü üzere alt tabaka debisi boğazın büyük kısmını domine etmiş, ve üst tabaka debisine geçiş imkanı tanımamıştır. Öyle ki, Karadeniz'den gelen üst tabaka akımı bu kuvvetli alt tabaka kütlesiyle karşılaşınca yolunu değiştirmekte ve düşey yöndeki hız vektörleriyle alt tabaka akımına karışmaktadır. Böylece üst tabaka akımının blokajı gerçekleşmiş olmaktadır. Kuzeydeki gözlem istasyonu, bu blokaj bölgesinin kuzeyinde yer aldığı için, yoğunluk gradyanı dolayısıyla oluşan düşük debiler bu istasyonun gözlem değerleri olarak belirmiştir.



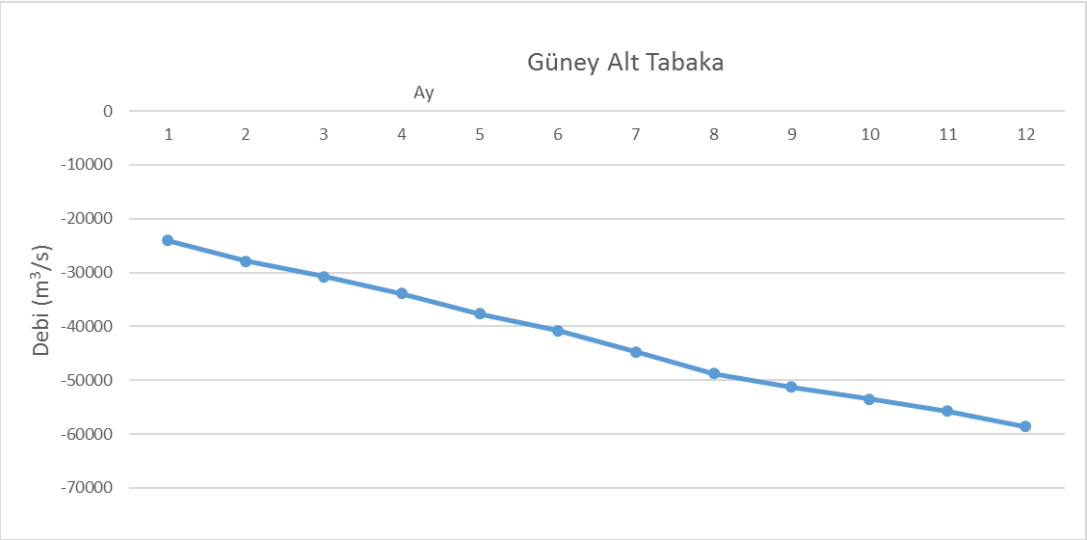
Şekil 5.8 : Marmara'nın baskın olması halinde 08.06.2003 tarihinde İstanbul Boğazı boykesiti hız vektörleri.

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da İstanbul Boğazı'nın güney kısmındaki üst ve alt tabaka gözlem değerleri verilmiştir. İstanbul Boğazı'nın güney kısmındaki gözlem istasyonu verilerine göre üst tabaka debisi yılın 1. Ayında 200 m^3/s'yi biraz aşarken yılın geri kalanında üst tabaka debisi tamamen bloke olmuştur. Bu blokajın gerçekleştiği yer İstanbul Boğazı'nın kuzeyindeki eşik bölgesi olduğundan güney eşiğinin dahi güneyinde olan gözlem istasyonlarında bu debilerin gözlenememesi son derece normaldir.

Güneydeki gözlem istasyonu tarafından ölçülen alt tabaka debileri ise kuzeyde ölçülen değerlerle yaklaşık aynı çıkmıştır. Böylece boğaz hattı boyunca alt tabaka debilerinde bir değişim olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre, Marmara Denizi tarafındaki su seviyesi yükseldikçe debi değerleri artmakta ve tıpkı kuzeydeki gözlem istasyonunda olduğu gibi yıl sonunda 60000 m^3/s değerine yaklaşmaktadır.



Şekil 5.9 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki üst tabaka debi-zaman grafiği.



Şekil 5.10 : Marmara'nın baskın olduğu duruma ait Boğaz'ın güney kesimindeki alt tabaka debi-zaman grafiği.

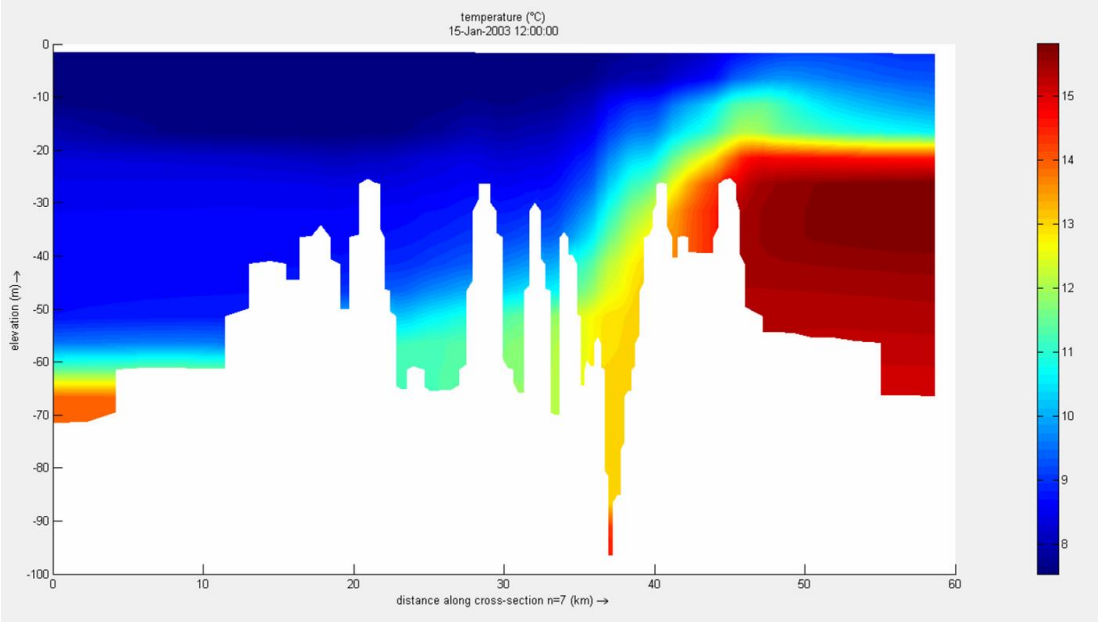
5.2 Hidrodinamik Model Sonuçları

Model kurulumu esnasında tayin edilen parametreler ve girdiler, İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modelinin sonuçlarının sağlıklı bir şekilde temin edilebilmesi için hayati derecede önemli olmuştur. Model sonuçları 4 farklı parametreyi içermektedir. Bunlar şöyle sıralanabilir: Sıcaklık, Tuzluluk, Hız ve Debi.

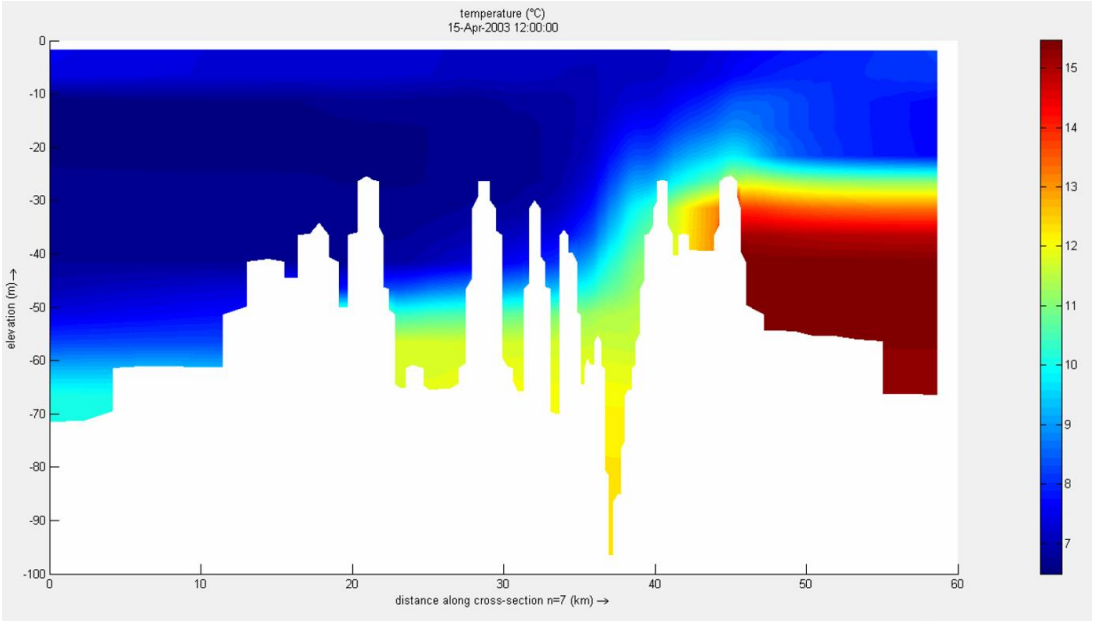
5.2.1 Sıcaklık profilleri

Tabakalı akım koşullarının hakim olduğu İstanbul Boğazı'nda, sıcaklık profilleri de bu yapıya uygun bir görünüm arzetmektedir. Şekil 5.11'de kış mevsimini temsilen 15 Ocak tarihli, Şekil 5.12'de bahar mevsimini temsilen 15 Nisan tarihli, Şekil 5.13'de yaz mevsimini temsilen 15 Temmuz tarihli, Şekil 5.14'te 15 Ekim tarihli boykesit sıcaklık profilleri verilmiştir. Sıcaklık profilleri dikkatle incelenirse, kış mevsiminde üst tabaka 8-9 ^{o}C civarında, alt tabaka ise Marmara tarafında 20-25 m'nin altında 15 ^{o}C, Karadeniz tarafında 60 m'nin altında 14 ^{o}C'dir. Bahar döneminde Tuna nehrinin debisinin artmasıyla birlikte üst tabaka kalınlığında bir artış meydana gelecektir. Bu sebeple Karadeniz tarafında 70 m derinlikte maksimum sıcaklık 10 ^{o}C olurken, Marmara Denizi tarafında sıcaklık tabakalaşması 30 m'nin altında başlamaktadır. Yaz mevsiminde diğer 3 mevsimdeki durumdan daha farklı bir vakıa ortaya çıkmaktadır. Bu ise tabaka sayısının –en azından sıcaklık bakımından- 3'e yükselmesidir. Yükselen atmosfer sıcaklığıyla birlikte atmosfere yakın bölgede olan su tabakasının sıcaklığında

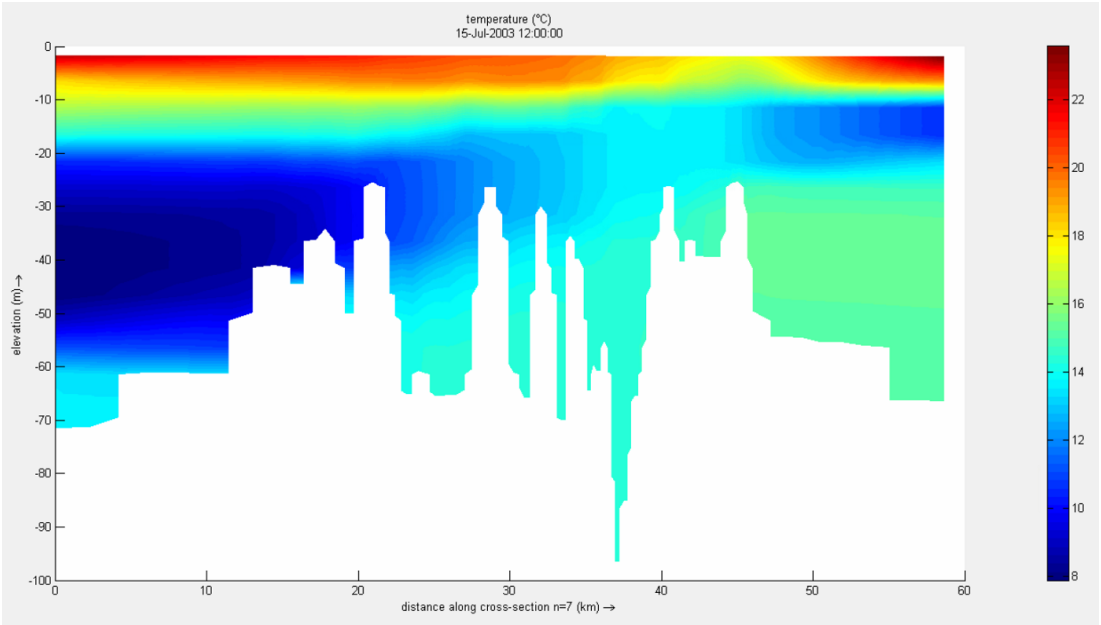
atmosfer sıcaklığına paralel olarak bir artış gözlenmektedir. Bu tabaka, yaklaşık 5 m kalınlığındadır ve 22 ^{o}C'den daha büyük sıcaklık değerlerine sahiptir. Yüzey tabakasının bir altında ise, sıcaklığı 8-10 ^{o}C arasında olan, ve Karadeniz tarafında 40 m, Marmara Denizi tarafında 10 m derinliğe sahip olan ara tabaka yer almaktadır. En altta ise 14 – 15 ^{o}C sıcaklığa sahip olan alt tabaka yer almaktadır. Güz mevsiminin gelişiyle birlikte Tuna Nehri'nin debisinde bir azalma görüleceğinden üst tabaka kalınlığı azalmaktadır. 18-19 ^{o}C sıcaklık değerlerine sahip olan üst tabakanın kalınlığı, Karadeniz tarafında yaklaşık 45 m, Marmara Denizi tarafında ise takriben 10 m'dir. Güz döneminde alt tabaka sıcaklığı 15 ^{o}C'dir. Bu sebeple genel olarak alt tabaka sıcaklığının çok az değiştiği söylenebilir.



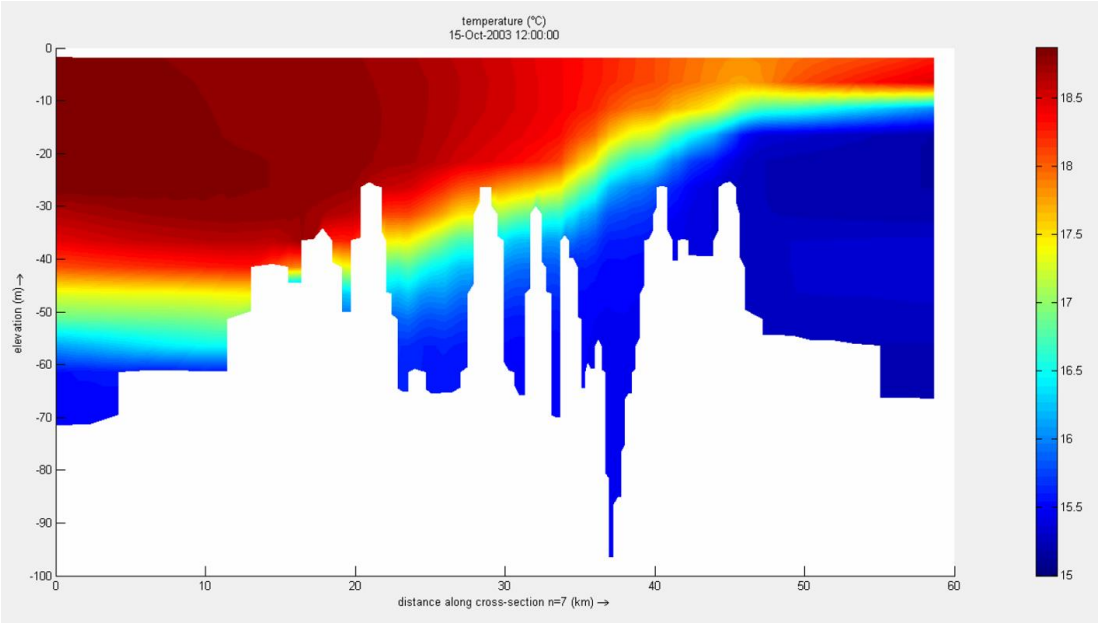
Şekil 5.11 : 15 Ocak 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili.



Şekil 5.12 : 15 Nisan 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili.

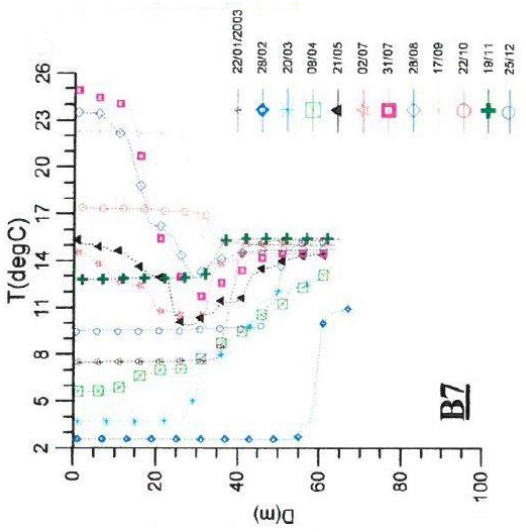


Şekil 5.13 : 15 Temmuz 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili.



Şekil 5.14 : 15 Ekim 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti sıcaklık profili.

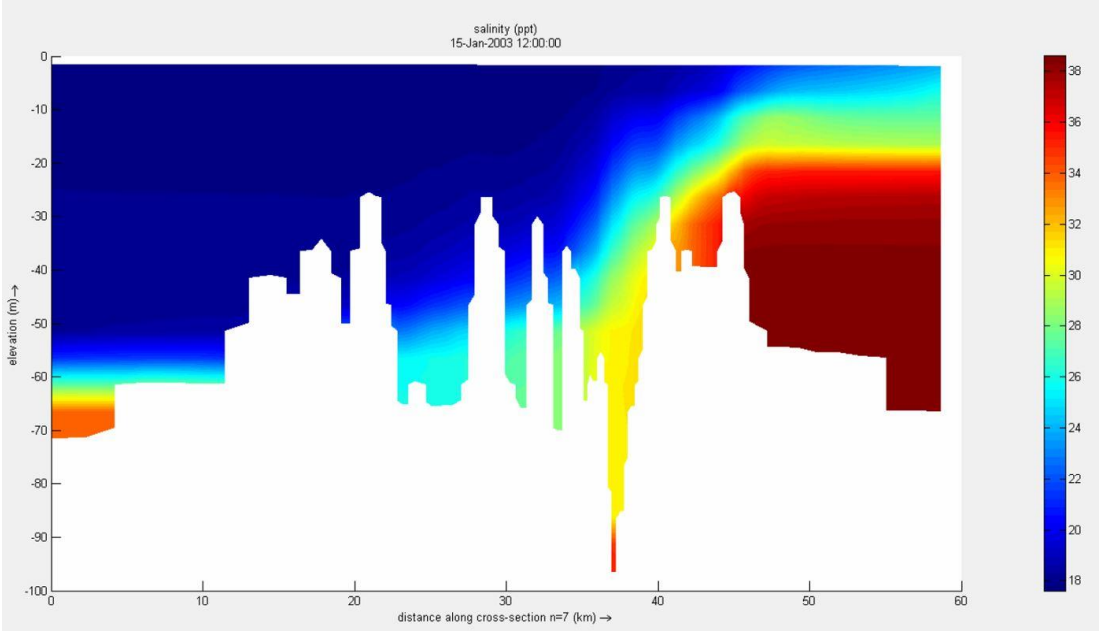
Şekil 5.15'te İstanbul Boğazı'nda 2003 yılında ölçülmüş sıcaklık değerleri verilmiştir. Burada yatay eksen derinlik, düşey eksen ise sıcaklık değeridir. Yılın 12 farklı gününde yapılmış olan ölçümler, sıcaklığın derinlikle değişimini göstermektedir. İSKİ'nin ölçümlerine dayanan bu sıcaklık tablosuyla bu çalışma kapsamında hazırlanan hidrodinamik model sonucunda elde edilen sıcaklık profilleri büyük oranda uyuşmaktadır. Bu ise İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik modelinin güvenilirliğini gösteren delillerden biridir.



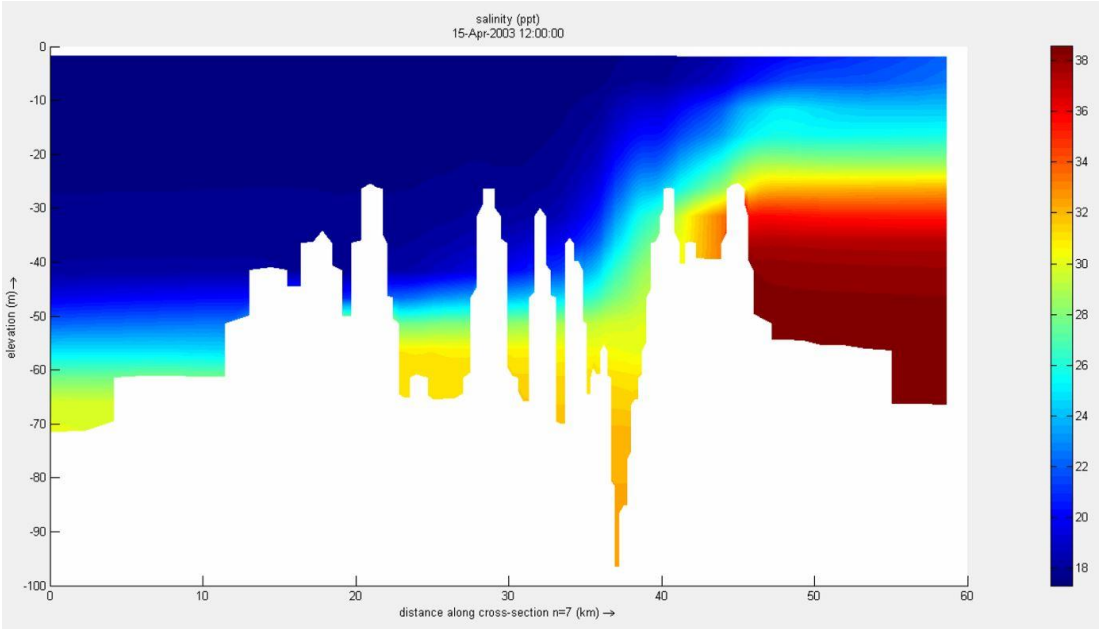
Şekil 5.15 : 2003 yılının 12 farklı gününe ait İstanbul Boğazı'ndaki sıcaklık değerleri (İSKİ, 2004).

5.2.2 Tuzluluk profilleri

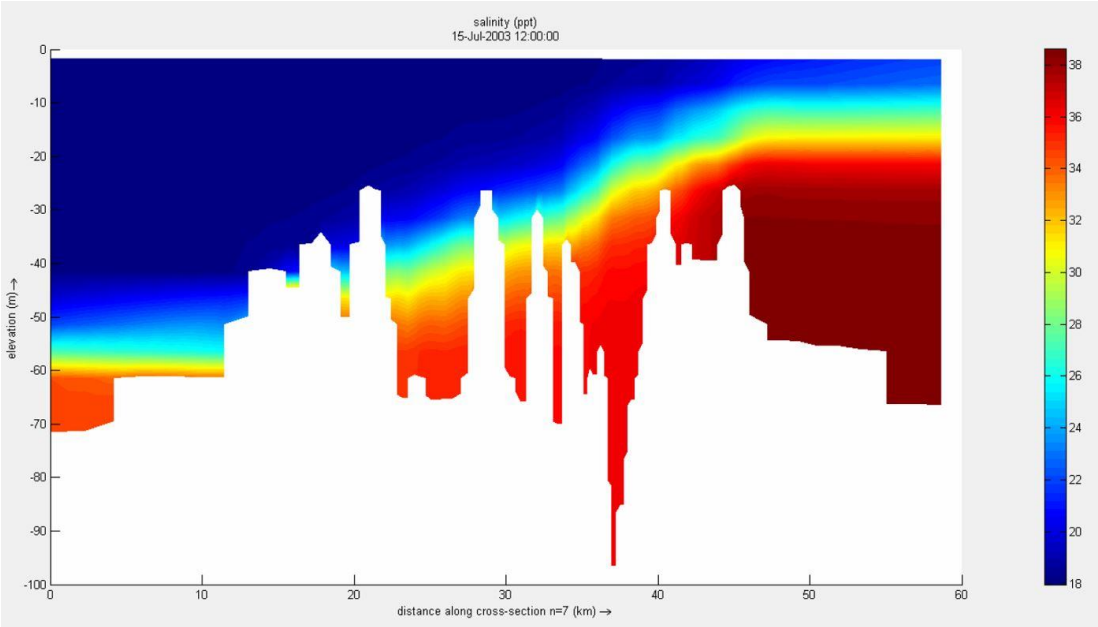
Hidrodinamik modelin önemli çıktılarından biri tuzluluk değerleridir. Tuzluluk değerlerine ait profiller Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir. Tuzluluk profilleriyle ilgili dikkat çeken ilk husus, -tıpkı sıcaklıkta olduğu gibi- iki tabakalı bir yapının varlığıdır. Üst tabaka tuzluluk değerleri 18 ppt civarında iken, alt tabaka tuzluluk değerleri 38 ppt etrafında seyretmektedir. Tabaka derinlikleri model alanının içinde bölgeden bölgeye değiştiği gibi, mevsimden mevsime de değişmektedir. Kış ve Bahar aylarında Tuna Nehri'nden gelen tatlı su debisi arttığı için İstanbul Boğazı üst tabaka debisinde bir artış meydana gelmektedir. Bu ise İstanbul Boğazı'nın genelinde tuzluluğu azalttığı gibi, üst tabaka derinliğinde de bir artışa sebep olmaktadır. Tuzluluk profilleri dikkatle incelendiğinde, Kış mevsimindeki üst tabaka derinliğinin Bahar mevsimindekine göre daha az olduğu, ve Bahar ayında alt tabaka tuzluluklarının dahi azaldığı görülmektedir. Fakat yine de Tuna Nehri'nden gelen bu tatlı su deşarjı, Marmara Denizi alt tabakasının tuzluluğunu sınırlı bir miktarda etkilemektedir. Bahar ayında artan tatlı su debisi daha çok Karadeniz ve İstanbul Boğazı'nın alt tabakalarını ve –pek tabii olarak- üst tabakalarını etkilemektedir. Yaz mevsiminin gelişiyle birlikte Tuna Nehri'nin Karadeniz'e olan etkisinde hatırı sayılır bir azalma olmaktadır. Bunun sonucunda üst tabaka derinliğinde azalma ve alt tabaka tuzluluk değerlerinde artış meydana gelmektedir. Üst tabaka debisinin en az olduğu Güz Mevsiminde ise üst tabaka derinliğinin azalmasının yanında alt tabakanın baskınlığı artacak, ve Marmara Denizi tarafındaki üst tabaka sularının tuzluluğunda gözle görülür bir artış vuku bulacaktır. Karadeniz tarafında Ocak ayında 60 m'ye yaklaşan üst tabaka su derinliği Ekim ayında 45 m'ye düşmektedir.



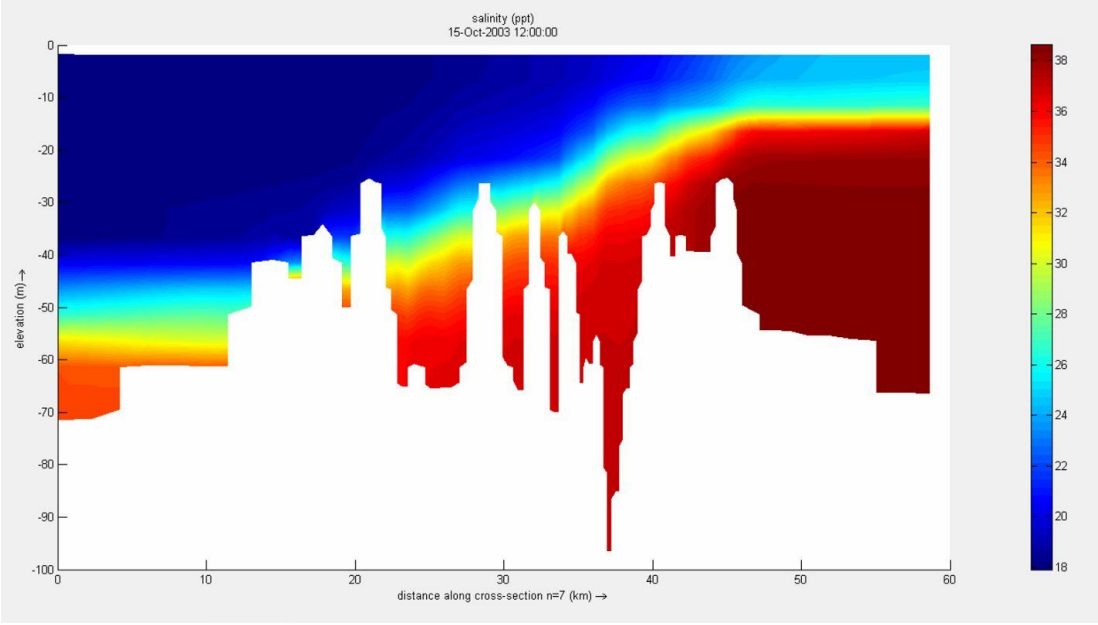
Şekil 5.16 : 15 Ocak 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili.



Şekil 5.17 : 15 Nisan 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili.

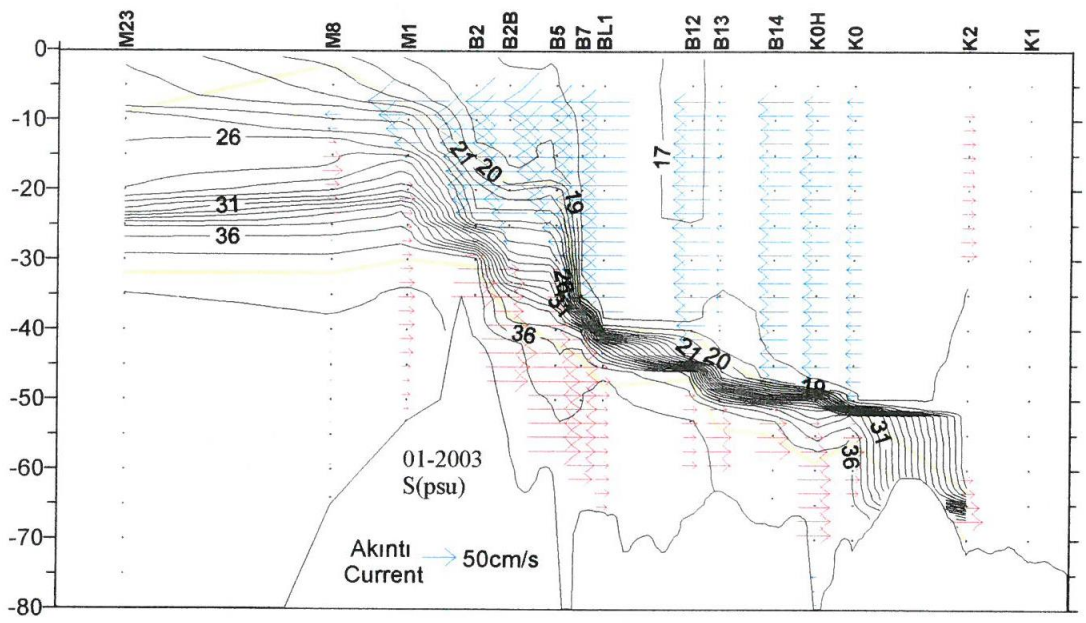


Şekil 5.18 : 15 Temmuz 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili.

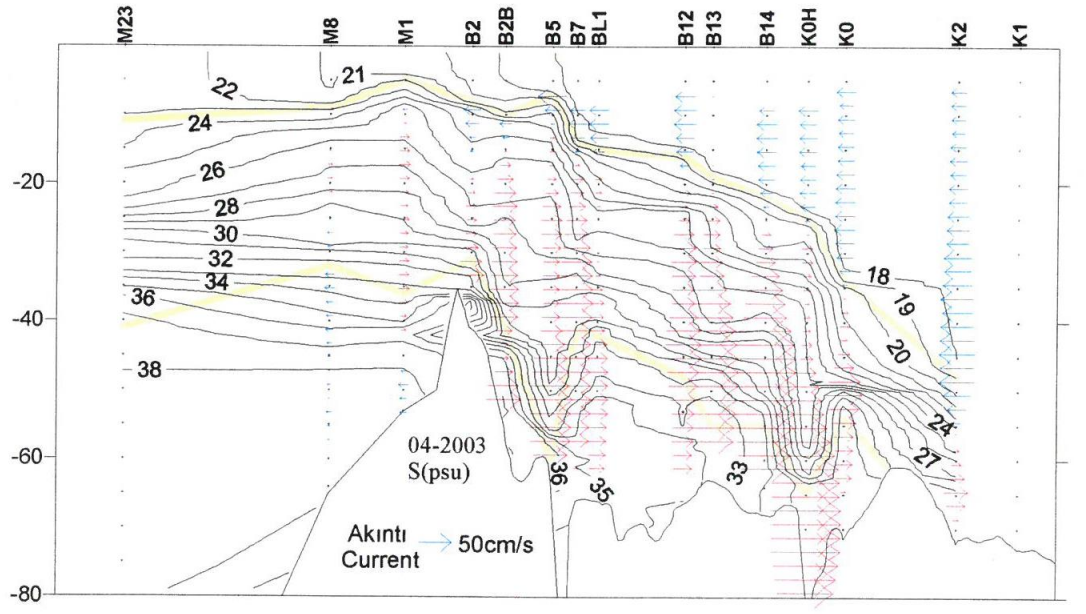


Şekil 5.19 : 15 Ekim 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti tuzluluk profili.

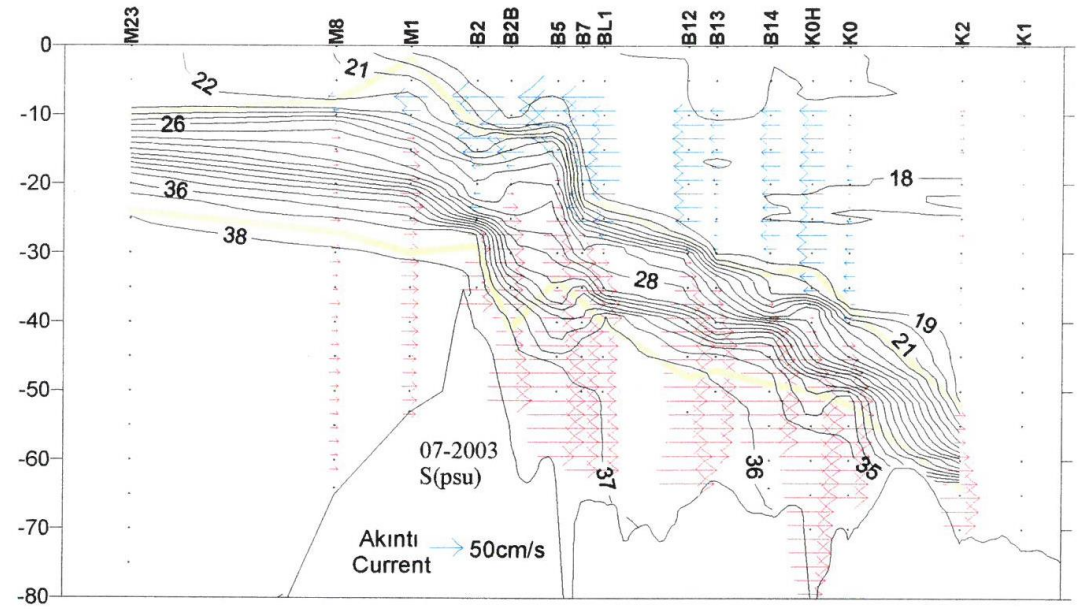
Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te İSKİ'nin 2003 yılına ait su kalitesi raporunda yer alan İstanbul Boğazı'nın tuzluluk boykesitleri verilmiştir. Model sonuçları ile bu grafiklerin büyük oranda uyuşması, hidrodinamik modelin hassasiyetini göstermesi bakımından önemlidir.



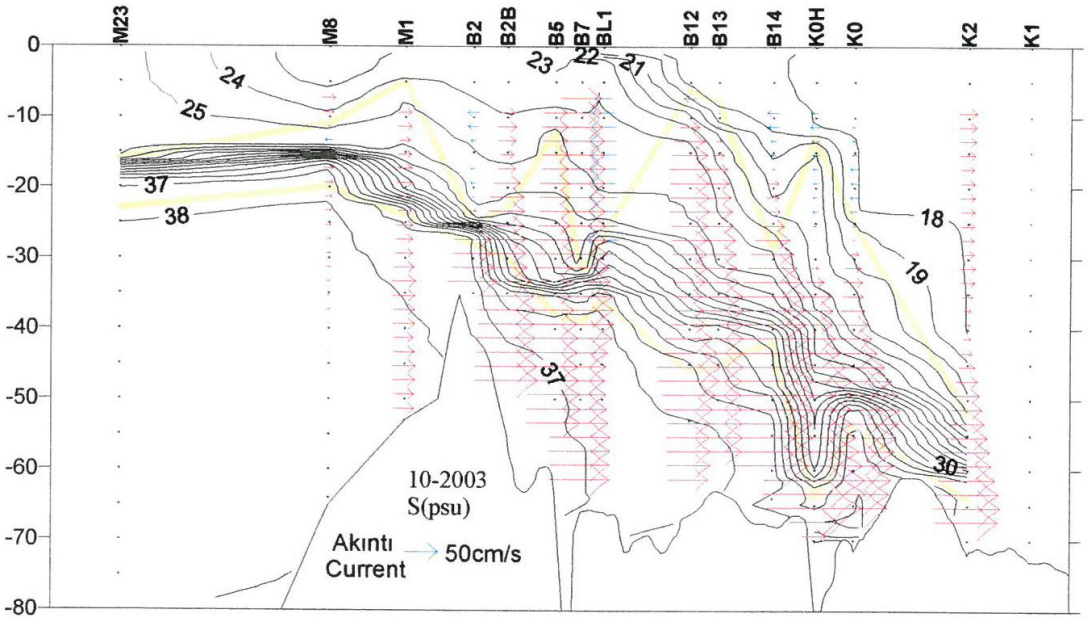
Şekil 5.20 : İstanbul Boğazı'nda Ocak ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004).



Şekil 5.21 : İstanbul Boğazı'nda Nisan ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004).



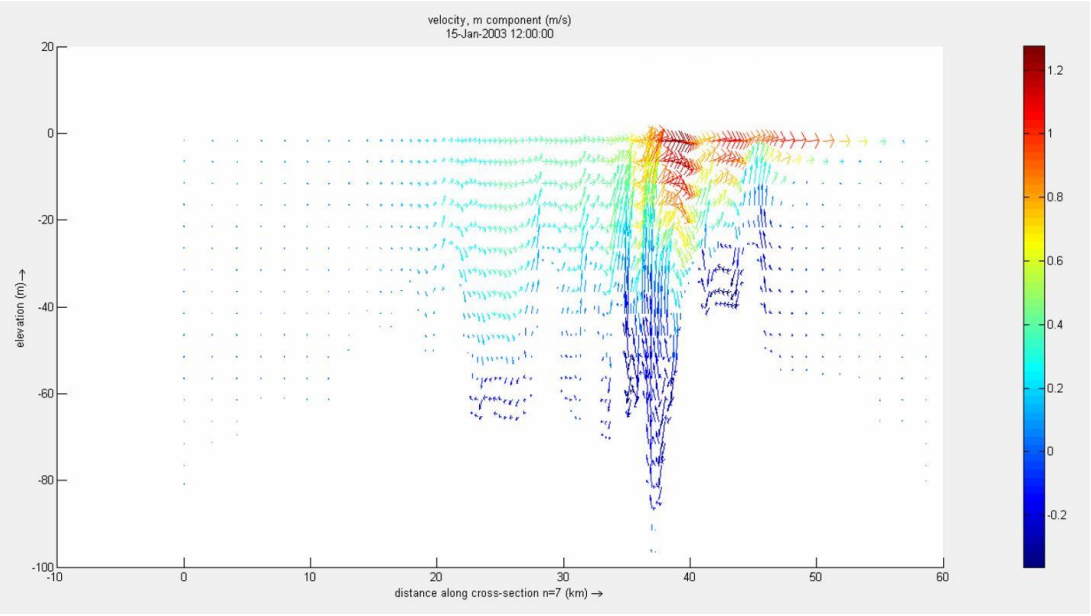
Şekil 5.22 : İstanbul Boğazı'nda Temmuz ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004).



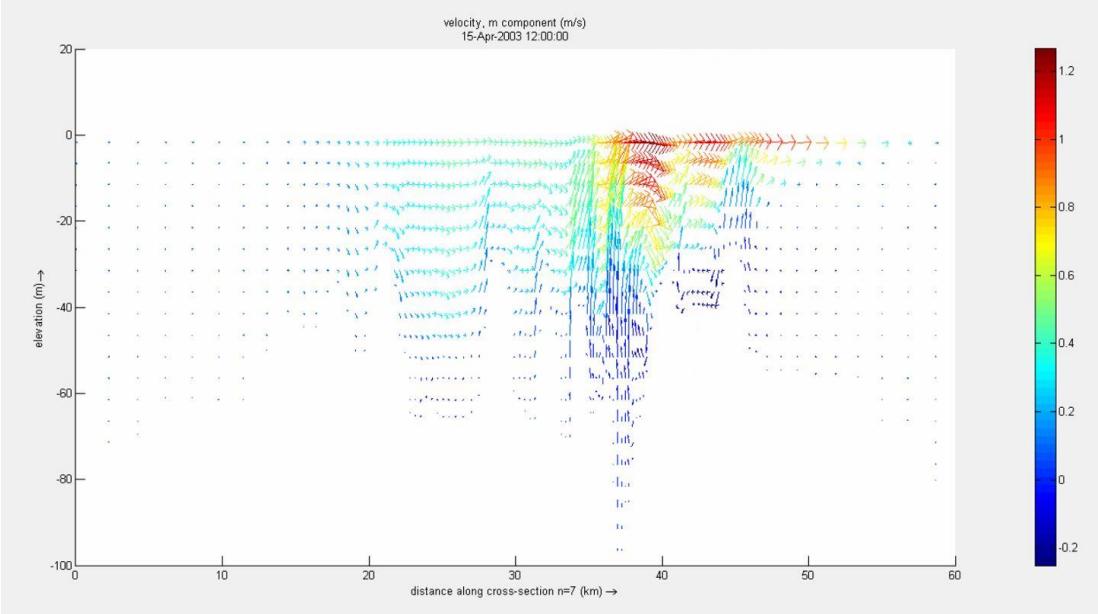
Şekil 5.23 : İstanbul Boğazı'nda Ekim ayına ait boykesit tuzluluk değerleri (İSKİ, 2004).

5.2.3 Hız profilleri

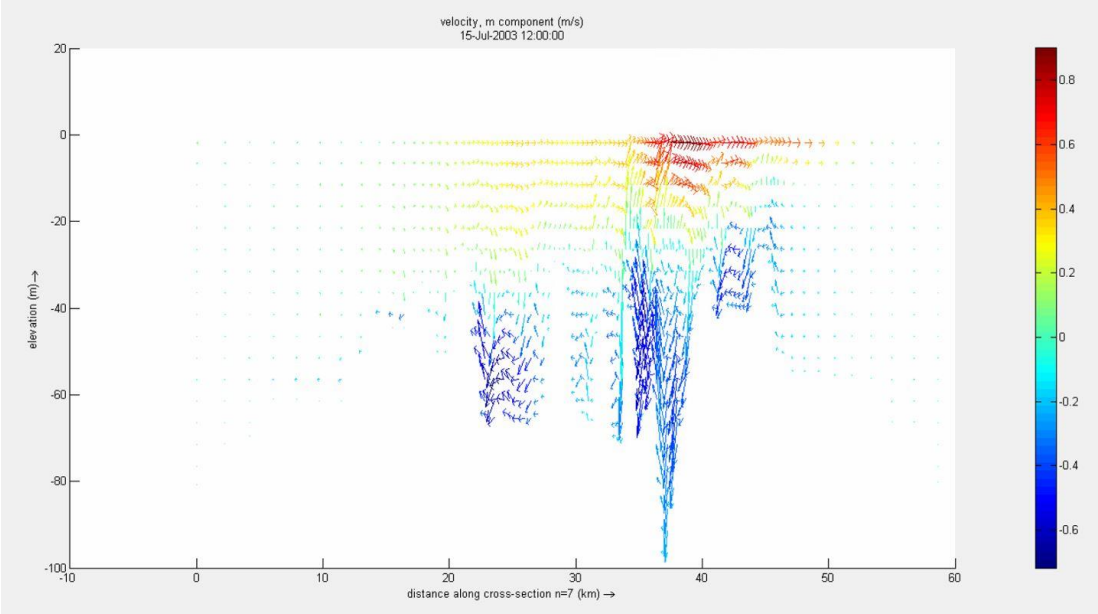
Hidrodinamik yapının en önemli unsurlarından birisi hızdır. Vektörel bir büyüklük olan hız, yönü ve şiddetiyle su kütlesinin hareketi konusunda fikir vermesi bakımından anlamlı bir parametredir. İstanbul Boğazı'nda tabakalı akım koşullarının oluşup oluşmadığını, su kütlelerinin hangi yönde ve ne şiddette hareket ettiğini gösteren hız parametresi derinlemesine incelenmeye fazlasıyla layıktır. Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de İstanbul Boğazı'na ait 4 ayrı mevsim için 4 boykesit hız profili verilmiştir. Şekillerden anlaşıldığı kadarıyla üst tabaka hızının maksimum olduğu bölgeler, güney eşiği ve daralmanın olduğu bölgelerdir. Zira, bu bölgelerde hem kesit genişliği, hem de üst tabaka derinliği azalmaktadır. Bu iki kritik bölge, üst tabaka hızlarının yüksek olduğu bölgeler olmalarının yanı sıra alt tabaka hızları için de büyük bir önem taşımaktadır. Bunun sebebi, güneyden kuzeye doğru seyreden alt tabaka akımının bir kısmının burada üst tabakaya karışarak güneye doğru geri yönelmesidir. Çeçen ve diğ'nin (1982), alt tabaka akımlarının her zaman Karadeniz'e ulaşmadığı yolundaki tespitleri ile örtüşmesi bakımından bu sonuçlar kayda değer bir nitelik taşımaktadır. Dönemsel bazda bir inceleme yapılmak istenirse, Tuna Nehri'nin Karadeniz'e olan etkisinin arttığı Kış ve Bahar mevsimlerinde üst tabaka hızlarının arttığı rahatlıkla söylenebilir. Yaz ve Güz mevsimlerinde ise üst tabaka hızlarının azaldığı, ve alt tabaka akım hızlarının arttığı görülmektedir. Özellikle güz mevsiminde alt tabaka akım hızları yaz mevsimine göre daha da artmaktadır.



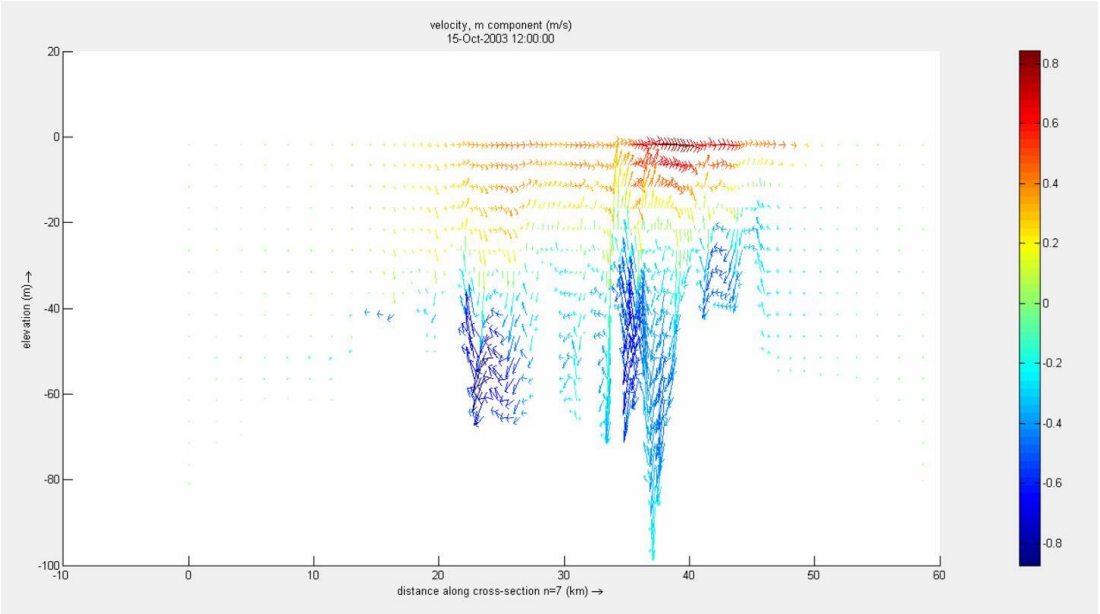
Şekil 5.24 : 15 Ocak 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili.



Şekil 5.25 : 15 Nisan 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili.

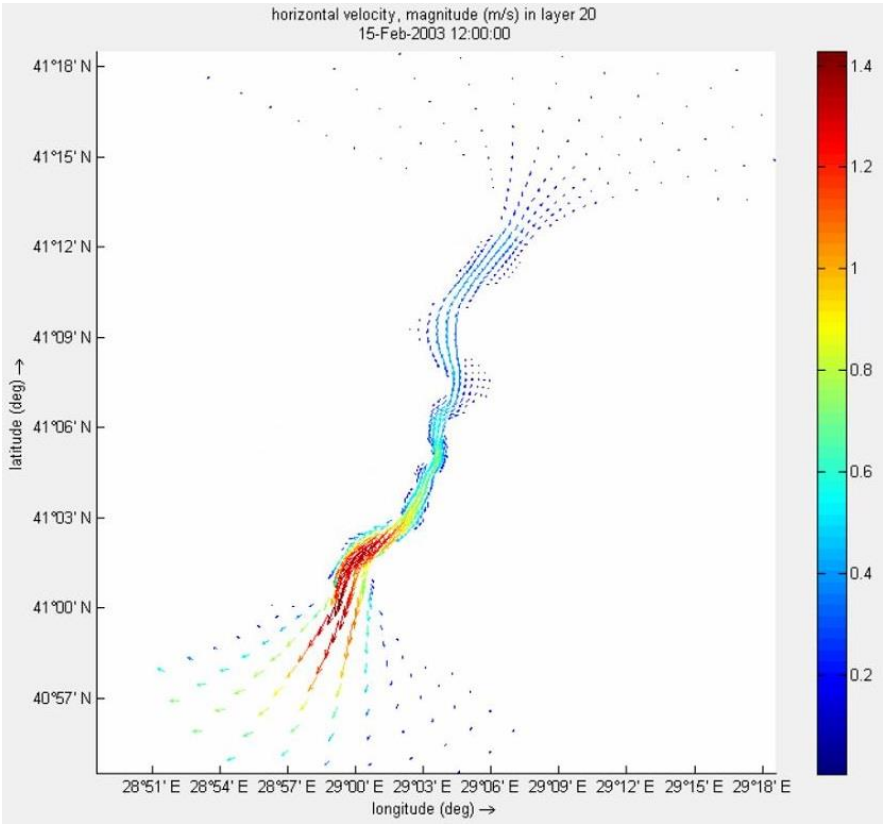


Şekil 5.26 : 15 Temmuz 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili.

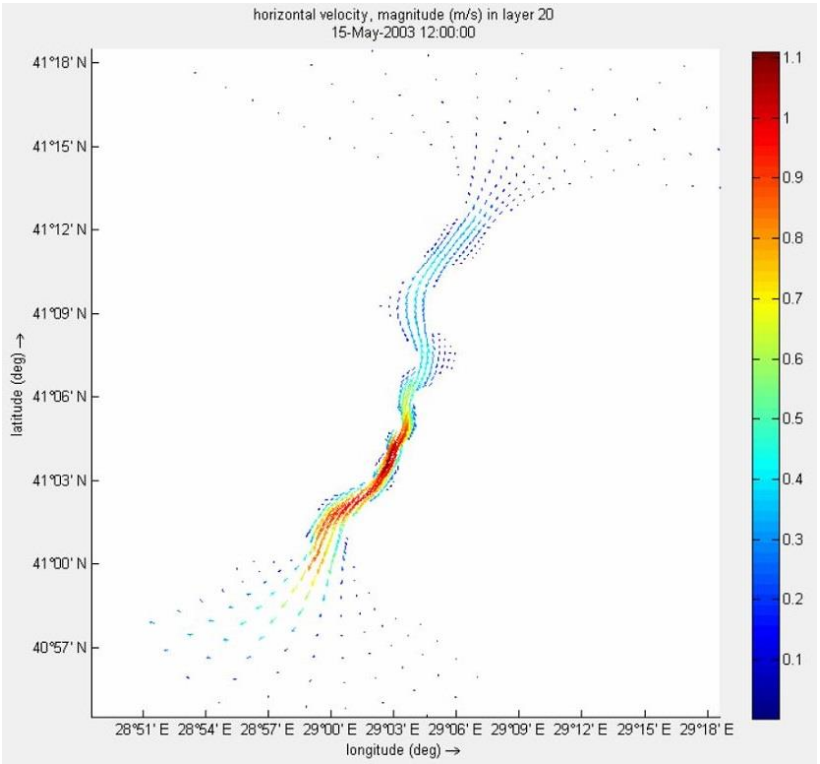


Şekil 5.27 : 15 Ekim 2003 tarihine ait İstanbul Boğazı boykesiti hız profili.

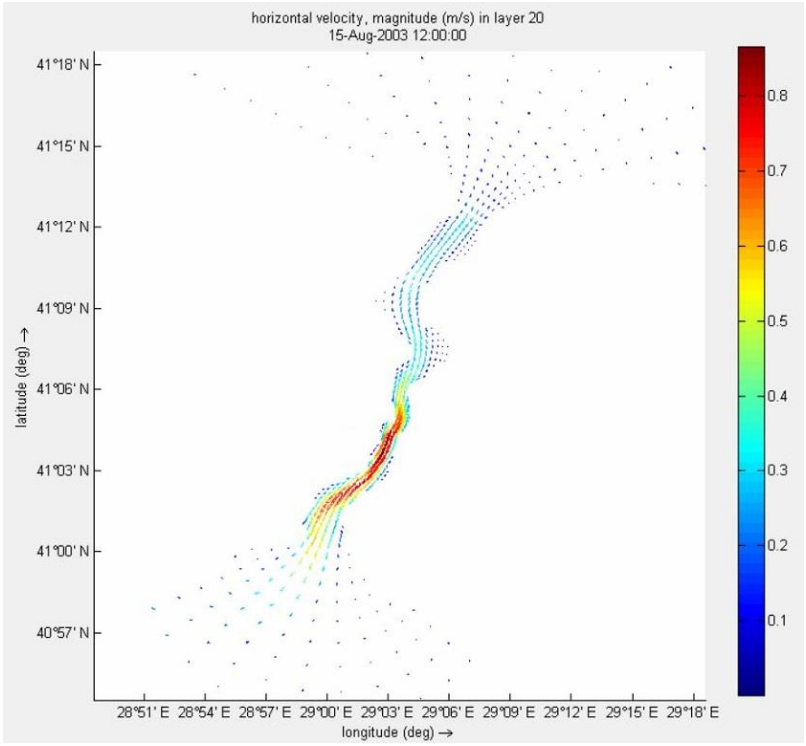
Belirli bir boykesiti incelemenin yanında tabakalardaki yatay hız dağılımını tam anlamıyla görebilmek için belirli bir derinlikteki plan-görünümlü hız vektörlerini vermek yerinde olacaktır. Bu maksatla Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de 5 m derinlikteki hız vektörleri plan görünümünde ve Şubat, Mayıs, Ağustos ve Kasım aylarında verilmiştir. Derinliğin 5 m seçilmesinin sebebi, üst tabakadaki maksimum hızların bu bölgede cereyan etmesinden kaynaklanmaktadır. Şubat ve Mayıs aylarında hız değerleri –Tuna Nehri'nin debisinin artması dolayısıyla- yüksek iken Ağustos ayında düşük değerler almaktadır. Kasım ayında ise kış mevsimine yaklaşıldığı için hız değerlerinde yeniden bir artış görülecektir. Bölgesel bazlı incelendiğinde özellikle İstanbul Boğazı'nın güney kısmındaki eşik civarında ve daralma bölgesinde yüksek hızların varlığı gözlenmektedir. İstanbul Boğazı'nın Karadeniz'e yakın olan bölgelerinde ise kesitin geniş ve derinliğin büyük olması gibi sebeplerden ötürü hız değerleri nispeten daha düşüktür. İstanbul Boğazı'nın iki kıyısına yakın olan bölgelerdeki hızların 0'a yakın olduğu da gözlenen bir diğer vakıadır. Bu, modelin güvenilirliği ile ilgili olumlu değerlendirmeler yapılabilmesi için bir veri teşkil etmektedir.



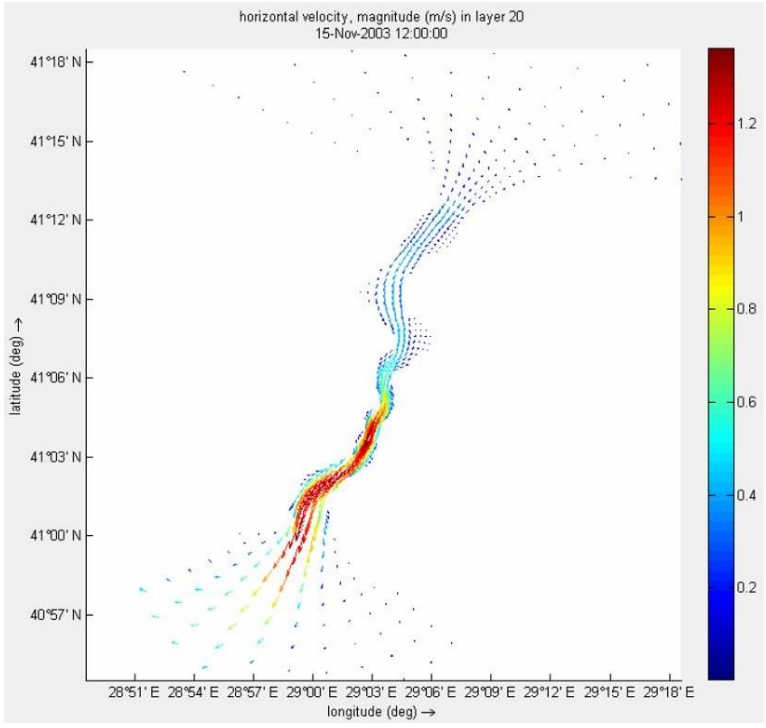
Şekil 5.28 : 15 Şubat 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri.



Şekil 5.29 : 15 Mayıs 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri.

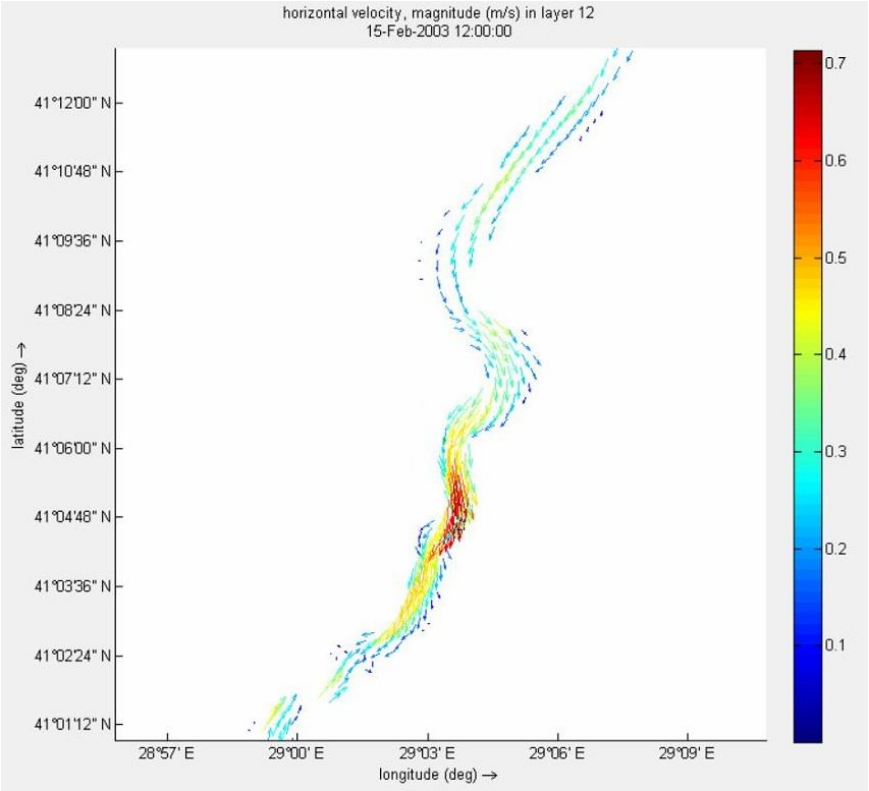


Şekil 5.30 : 15 Ağustos 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri.

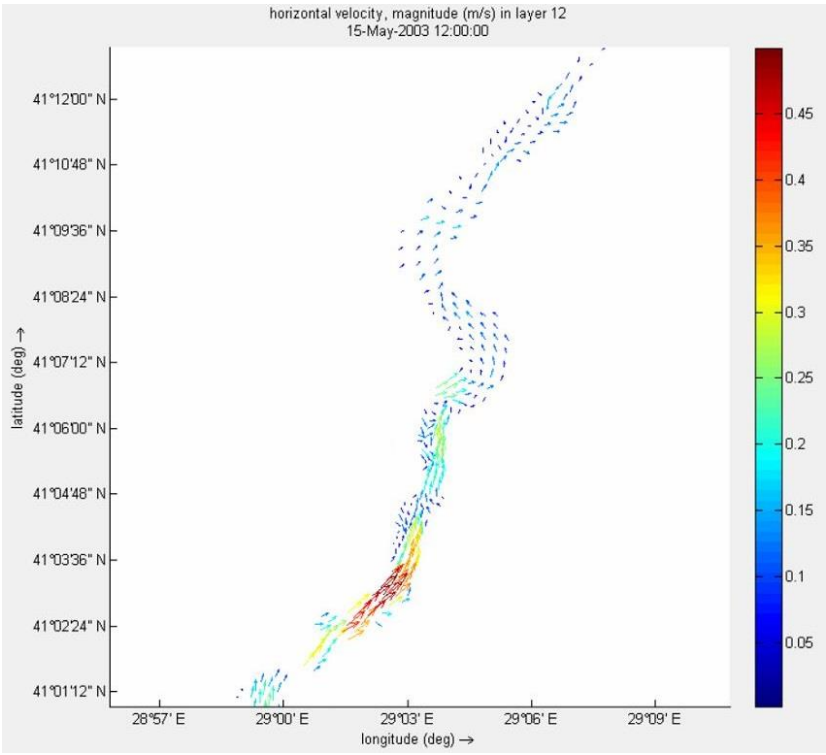


Şekil 5.31 : 15 Kasım 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 5 m derinlikte hız vektörleri.

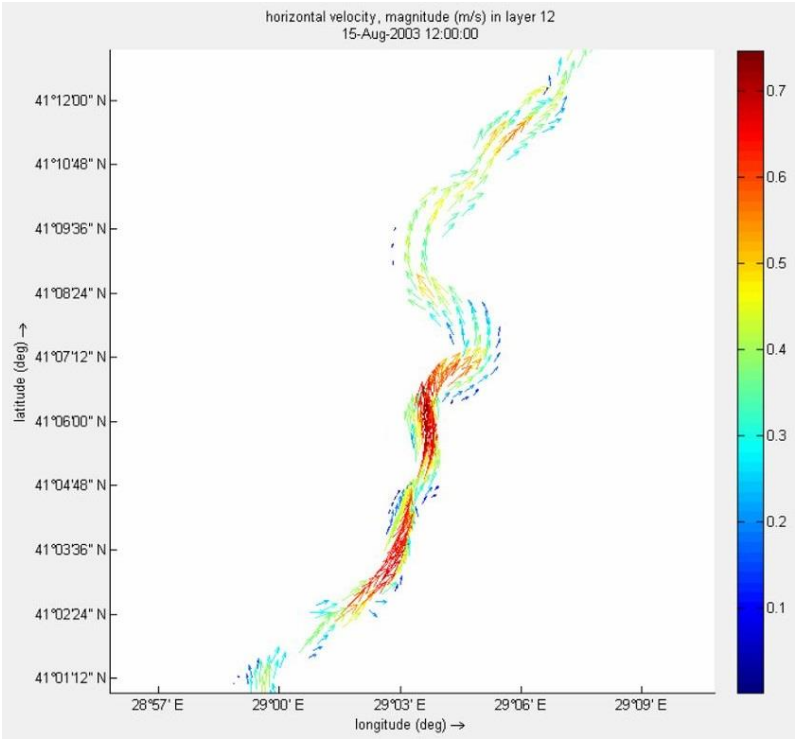
İstanbul Boğazı'nın alt tabakasındaki hidrodinamik koşulların incelenebilmesi için bu tabakanın en az bir kesitine ait hız vektörlerinin incelenebilmesi gereklidir. Bu kapsamda 45 m derinlikteki hız vektörlerinin gösterilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'de 45 m derinlikteki hız vektörleri, Şubat, Mayıs, Ağustos ve Kasım ayları için verilmiştir. 45 m derinlik, alt tabaka akımının güneyden kuzeye doğru olan güzergahının kapsamında olan bir derinliktir. Buna rağmen Şubat ayındaki hız vektörleri incelendiğinde bunun tam tersi olan bir vakıanın cereyan ettiği görülür. Şubat ayında Tuna Nehri'nin İstanbul Boğazı'na olan etkisinin artmasıyla alt tabaka akımı bloke olmaktadır. Bu blokaj bölgesi ise Şekil 5.32'de görüldüğü üzere güney eşiğidir. Güney eşiğinin güneyinde hız vektörleri kuzeye doğru iken, kuzeyindeki hız vektörleri güney yönünü göstermektedir. Mayıs ayında her ne kadar üst tabaka hızları yüksek olsa da, alt tabakanın bloke olduğu bir durum görülmemektedir. Bu yüzden Mayıs ayında alt tabaka akımı düzenli olarak Karadeniz istikametine doğru seyretmektedir. Ağustos ayında Tuna Nehri'nin etkisinin azalması, alt tabaka akım hızlarının artmasına yol açmaktadır. Öyle ki, eşik ve daralma bölgelerinde bu hız değerleri 0.7 m/s değerine ulaşmaktadır. Kasım ayında vaki olan durum ise oldukça ilginçtir. Bu ayda, Karadeniz kaynaklı üst tabaka akımı ile Marmara Denizi kaynaklı alt tabaka akımı, Akıntı Burnu-Kandilli Burnu önlerinde karşılaşmaktadırlar ve deyim yerindeyse bir "beraberlik durumu" yaşamaktadırlar. Kasım ayının son günlerinde son bulan bu müsabaka, alt tabaka akımının baskın gelmesi ve üst tabaka akımının 45 m'den daha sığ kısımlara çekilmesiyle neticelenmiştir.



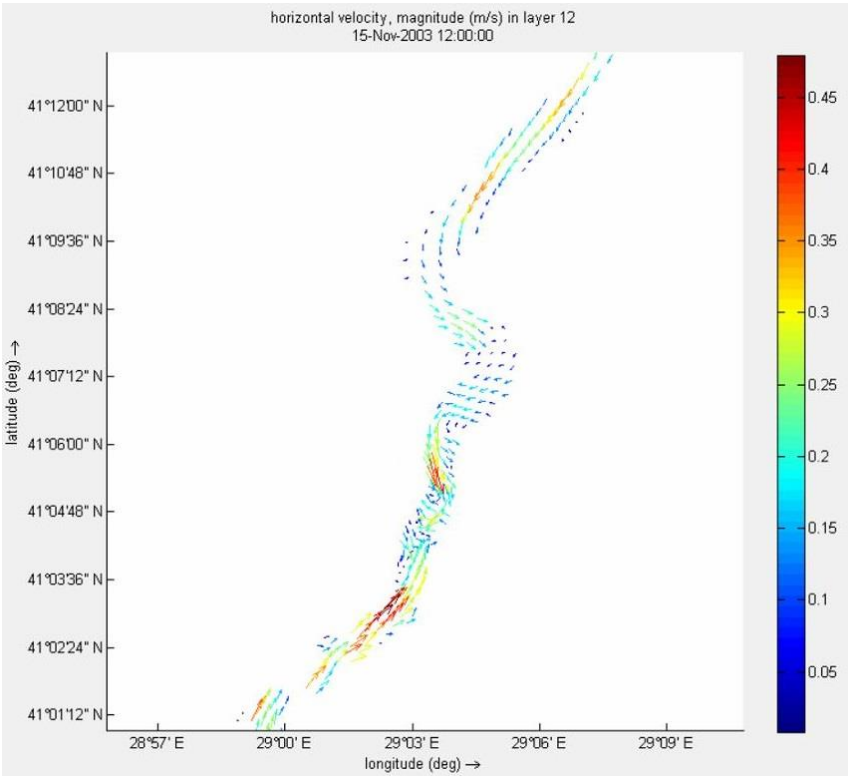
Şekil 5.32 : 15 Şubat 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri.



Şekil 5.33 : 15 Mayıs 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri.



Şekil 5.34 : 15 Ağustos 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri.



Şekil 5.35 : 15 Kasım 2003 tarihinde İstanbul Boğazı'nda 45 m derinlikte hız vektörleri.

Yukarıda verilen vektörel formdaki hız büyüklükleri her ne kadar model sonuçları hakkında fikir verse de aylık bazda ortalamalar konusunda bilgi vermemektedir. Bu sebeple İstanbul Boğazı'nın Kuzey ve Güney bölgelerindeki gözlem istasyonlarında ölçülmüş aylık ortalama hız değerlerini vermek anlamlı olacaktır.

Kuzeydeki gözlem istasyonu, kuzey eşiğinin hemen kuzeyinde yer almaktadır. Çizelge 5.1'te Kuzeydeki gözlem istasyonuında gözlenen aylık ortalama hız değerleri üst tabaka ve alt tabaka için ayrı ayrı verilmiştir. Alt tabaka hızlarının negatif değerler alması, vektörel bir ifade olması dolayısıyla ters yönlü olmasından kaynaklanmaktadır. Aylık ortalama üst tabaka hız değerleri genel olarak 0.14-0.16 m/s bandında yer almaktadır. Fakat Şubat ve Ekim ayları birer istisna teşkil etmektedir. Şubat ayında Karadeniz tarafındaki su seviyesinin yükselmesi ile aylık ortalama hız değeri 0.18 m/s'yi aşmaktadır. Ekim ayında ise Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının azalması dolayısıyla alt tabaka akımının debisi ve dolayısıyla hızı artmakta olup aylık ortalama üst tabaka akım hızı 0.12 m/s'den dahi düşük bir değer almaktadır. Kuzeydeki gözlem istasyonunda gözlenen aylık ortalama alt tabaka akım hızları, mevsimden mevsime ciddi değişiklik göstermektedir. Tuna Nehri'nin İstanbul Boğazı'na olan etkisinin yüksek olduğu kış ve bahar dönemlerinde 0.1 m/s'den daha düşük değerler alan aylık ortalama alt tabaka akım hızları, Temmuz ve Ekim ayları arasında 0.1 m/s değerini aşmaktadır. Öyle ki, Ekim ayında alt tabaka ortalama akım hızı yaklaşık 0.17 m/s'yi bulmaktadır.

Çizelge 5.1 : İstanbul Boğazı'nın Kuzeyinde gözlenen Aylık Ortalama Hız Değerleri.

Kuzey	Üst Tabaka Hızı (m/s)	Alt Tabaka Hızı (m/s)
Ocak	0.1645	-0.0692
Şubat	0.1835	-0.0269
Mart	0.1570	-0.0175
Nisan	0.1518	-0.0396
Mayıs	0.1670	-0.0343
Haziran	0.1604	-0.0613
Temmuz	0.1406	-0.1246
Ağustos	0.1459	-0.1388
Eylül	0.1674	-0.1009
Ekim	0.1173	-0.1691
Kasım	0.1552	-0.0704
Aralık	0.1673	-0.0592

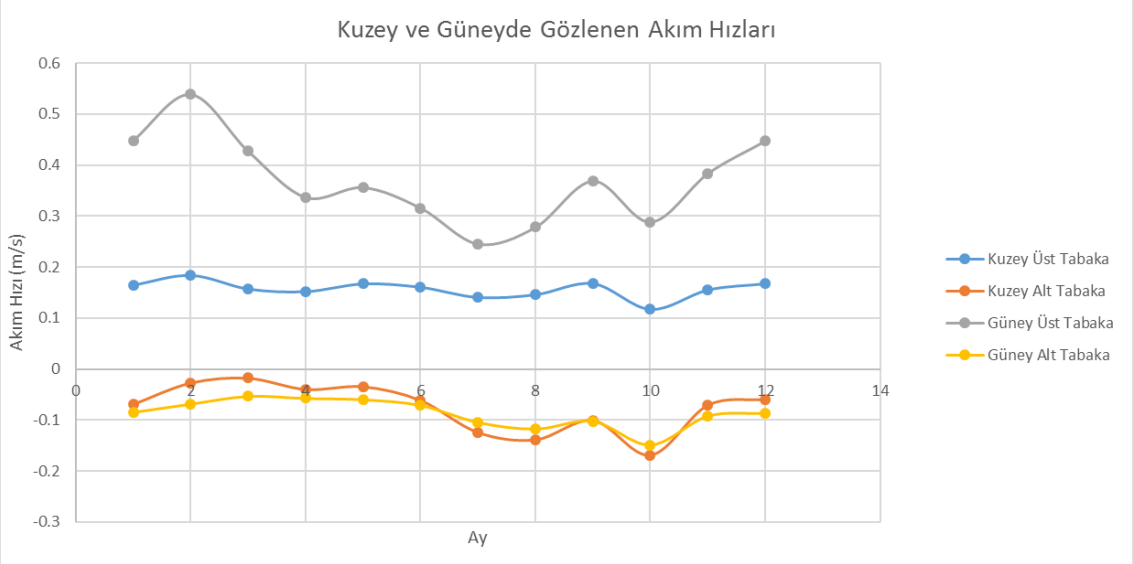
İstanbul Boğazı'nda akım hızlarının aylık ortalama bazda gözlendiği bir diğer istasyon güneydeki istasyondur. Güney istasyonu, güney eşiğinin hemen güneyinde yer almaktadır. Çizelge 5.2'de güney istasyonunda gözlenen aylık ortalama üst tabaka ve alt tabaka akım hızları verilmiştir. Tıpkı kuzey istasyonunda gözlenen hız değerlerinde olduğu gibi, burada da Kış ve Bahar mevsimlerinde üst tabaka akım hızları, Yaz ve Güz aylarında ise alt tabaka akım hızları yüksektir. Fakat kuzey istasyonundaki ölçümlerle güney ölçümleri arasında nicel olarak önemli farklar bulunmaktadır. Güney istasyonundaki aylık ortalama akım hızları, -özellikle üst tabakada- kesitin darlığı ve derinliğin azlığı dolayısıyla kuzey ölçümlerine göre çok daha yüksektir. Mesela, Ocak ayında kuzeydeki aylık ortalama üst tabaka akım hızı değeri 0.165 m/s iken, güneydeki aylık ortalama üst tabaka akım hızı değeri 0.449 m/s olmuştur. Bu ise Karadeniz kaynaklı üst tabaka akımının, nispeten geniş ve derin olan İstanbul Boğazı'nın kuzey bölgelerinde düşük hızlarda seyrettiği, daha dar ve sığ olan güney kısımlarda ise yüksek hızlarla yoluna devam ettiği bilgisine ulaşmamızı sağlar. Yılın diğer aylarında –Temmuz hariç- güneydeki üst tabaka akım hızı ile kuzeydeki üst tabaka akım hızı arasında 2 ila 3 kat fark vardır. Temmuz ayında ise güneydeki aylık ortalama akım hızı değeri, kuzeydeki mukabilinin 1.74 katı olmakla diğer aylardaki oranı yakalayamasa da, bu oranın 2'ye yakın bir değer olması sebebiyle yüksek bir değer olarak kabul edilmesi mümkündür.

Aralık, Ocak ve Şubat gibi Tuna Nehri debisinin arttığı zaman dilimlerinde güneydeki aylık ortalama üst tabaka hızının 0.4 m/s'yi, hatta 0.5 m/s'yi aştığı görülmektedir. Bu değerlerin kuzeydeki mukabil değerlere göre yüksek olması, güney eşiğinin güneyindeki bölgede kesitin darlığından ve derinliğin azlığından kaynaklanmaktadır. Kuzeydeki hız değeri gözlemlerine göre aylık ortalama üst tabaka değerinin en düşük olduğu ay Ekim ayı idi. Fakat Güneydeki gözlem istasyonunda gözlenen değerlere göre en düşük aylık ortalama üst tabaka akım hızı Temmuz ayındadır. Bu durumun sebebi incelendiğinde, Temmuz ayındaki üst tabaka akımının Ekim ayındakine nispeten daralma ve güney eşiği bölgelerinde daha çok alt tabakaya karıştığı görülecektir. Bu ise, kuzeydeki akım hızı değerleri yüksek çıkarken, güneydeki değerlerin düşük çıkmasını açıklaması bakımından anlamlı bir sonuç teşkil etmektedir. Alt tabaka akım hızlarında, Şekil 5.36'da görüldüğü üzere, kuzey ve güney istasyonları arasında büyük farklar görülmez. Büyük farklılıklar üst tabaka akım hızlarında görülmektedir ki, bu durum güneydeki gözlem kesitinin dar ve sığ bir bölgede yer

almasından, ve yine bu bölgede üst tabaka akım derinliğinin kuzeydekine nispeten daha az olmasından kaynaklanmaktadır.

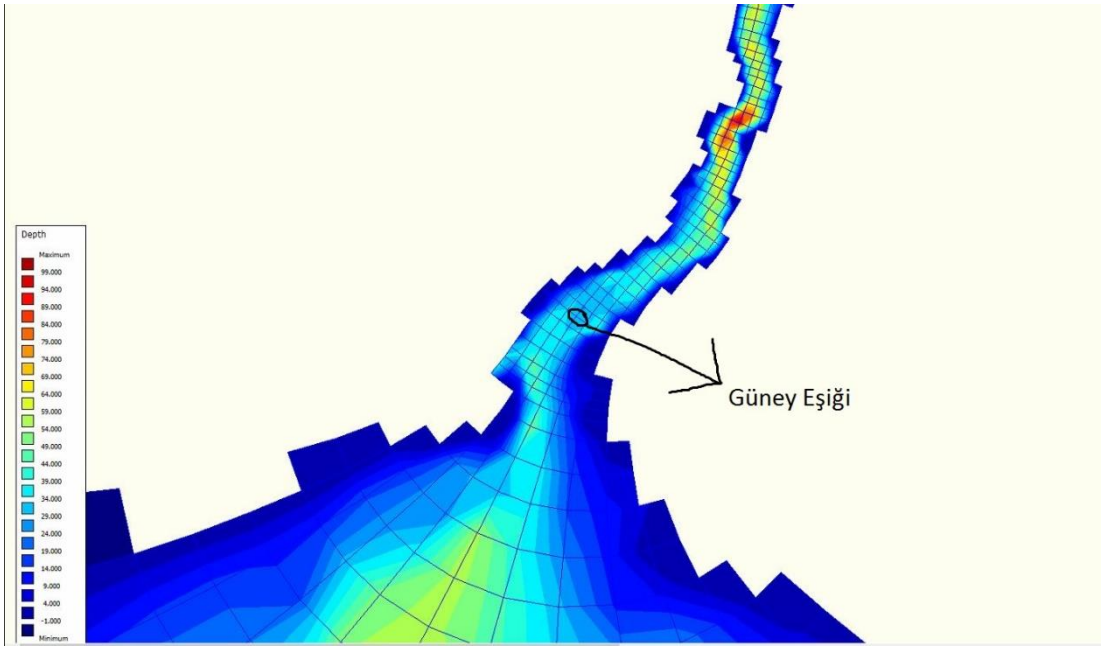
Çizelge 5.2 : İstanbul Boğazı'nın Güneyinde gözlenen Aylık Ortalama Hız Değerleri.

Güney	Üst Tabaka Hızı (m/s)	Alt Tabaka Hızı (m/s)
Ocak	0.4485	-0.0847
Şubat	0.5384	-0.0684
Mart	0.4273	-0.0532
Nisan	0.3367	-0.0573
Mayıs	0.3562	-0.0598
Haziran	0.3158	-0.0711
Temmuz	0.2453	-0.1046
Ağustos	0.2783	-0.1175
Eylül	0.3687	-0.1025
Ekim	0.2885	-0.1489
Kasım	0.3838	-0.0919
Aralık	0.4474	-0.0866



Şekil 5.36 : İstanbul Boğazı'nda gözlenen aylık ortalama akım hızları.

Hidrodinamik modelde güney eşiği üzerindeki atmosfere yakın taraftaki su kütlesinde (üst tabakada) hızlar sıklıkla 1 m/s'yi aşmaktadır. Şekil 5.37'de güney eşiğinin konumu verilmiştir. Şekil 5.24-5.27'den anlaşıldığı üzere, güney eşiğinin üzerindeki atmosfere yakın kısımdaki hız değerleri çok yüksektir. Kesitin darlığı ve derinliğin azlığı bu hız yüksekliğinde başlıca faktörlerdir.

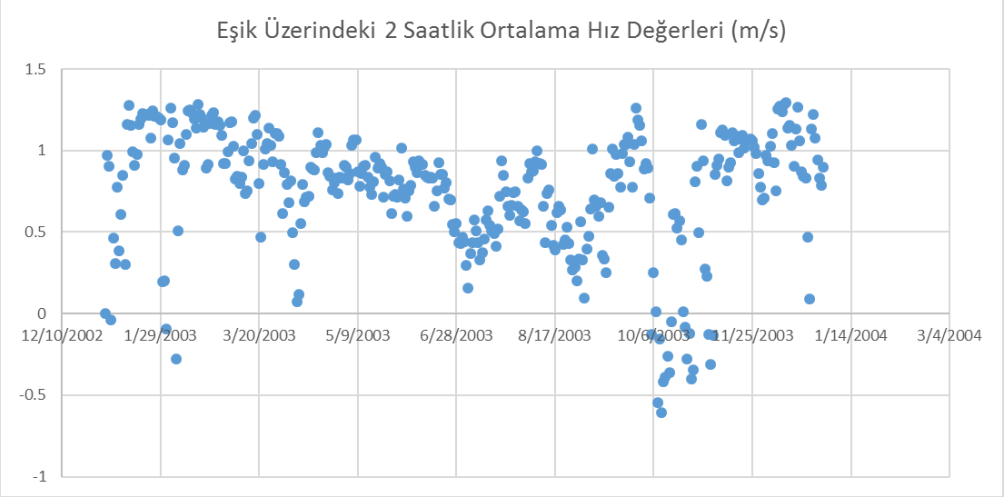


Şekil 5.37 : İstanbul Boğazı'nda güney eşiğinin konumu.

Güney eşiğinin üzerindeki üst tabaka akımının hız değerlerini grafiğe dökmek, mevsim değişikliklerinin boğazın hidrodinamik yapıya nasıl etki ettiğini göstermesi bakımından faydalı görülmüştür. Şekil 5.38'de eşik üzerindeki üst tabaka akımının hız değerleri 2 saatlik ortalama şeklinde verilmiştir. Bu grafikten, üst tabaka akımının ne zaman arttığı ve ne zaman azaldığı rahatlıkla görülebilmektedir. Kış ve Bahar aylarında genellikle hız değerleri 1 m/s'ye yakın değerler almaktadır. Aralık, Ocak ve Şubat aylarında 1 m/s'yi aşan hız değerleri sıklıkla görülmektedir. Yaz aylarına doğru düzenli olarak azalan hız değerleri, Eylül ayında artış gösterse de, Ekim ayında dip noktaya ulaşmaktadır. Daha sonra Kasım'dan itibaren başlayan artış Aralık ayıyla birlikte devam etmektedir.

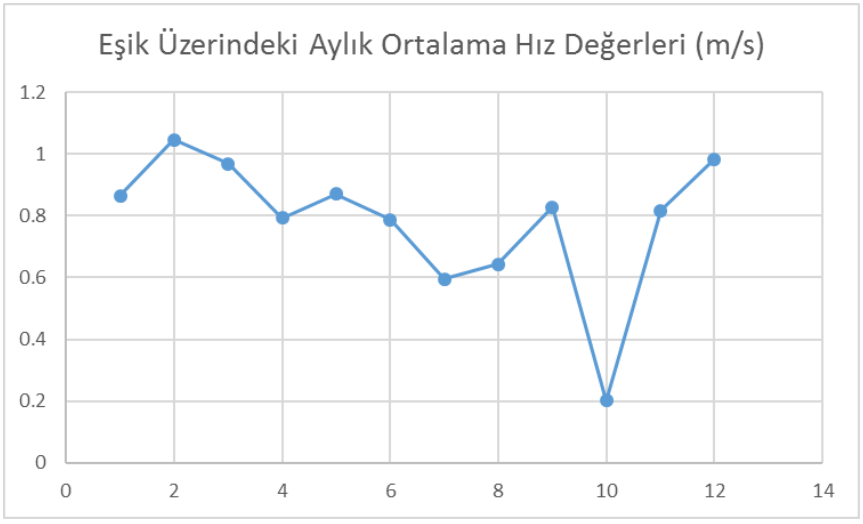
Üst tabaka akımının –en azından güney eşiği üzerinde- ne zaman bloke olduğu ise yine grafikten rahatlıkla anlaşılmaktadır. Güney Eşiği üzerindeki hız değerlerinin negatif olduğu iki dönem mevcuttur. Bunlardan ilki Ocak-Şubat ayları, ikincisi ise Ekim ayıdır. Ocak-Şubat aylarında Lodos rüzgarının etkisini arttırmasıyla "Orkoz" denilen hadise vuku bulur. Orkoz, İstanbul Boğazı'ndaki atmosfere yakın olan üst tabaka akımının Lodos rüzgarı sebebiyle güney istikametine doğru seyrinin kesilip, hız değerlerinin 0'a yakın olması, yahut negatif değerler almasıdır. Negatif değerden kasıt ise, akımın Marmara Denizi istikameti yerine Karadeniz istikametine doğru

seyretmesidir. Ocak ve Şubat aylarında Lodos rüzgarının esmesiyle Orkoz vakıası meydana gelse de, bu dönemde genel olarak hız vektörleri Marmara Denizi istikametini yüksek değerlere sahip olarak göstermektedir. Eşik üzerindeki üst tabaka akımının hız değerinin negatif olduğu diğer ay Ekim ayıdır. Bu dönemde Tuna Nehri'nden gelen tatlı su deşarjı azalmakta, ve Marmara Denizi'nden Karadeniz istikametine doğru seyreden alt tabaka akımı üst tabakayı tamamen bloke edebilmektedir. Bunun sonucunda Marmara Denizi istikametine doğru seyretmekte olan üst tabaka akımı yön değiştirerek Karadeniz'e yönelir. Ne var ki bu süreç, bir yıl içerisinde nadiren görülebilmektedir.



Şekil 5.38 : Güney eşiği üzerindeki 2 saatlik ortalama hız değerleri.

İstanbul Boğazı'nın Güney eşiği üzerindeki üst tabaka hızlarının aylık ortalama değerleri, mevsim değişimlerinin hidrodinamik yapıya olan etkisini göstermesi bakımından anlamlıdır. Şekil 5.39'da güney eşiği üzerindeki aylık ortalama hız değerleri verilmiştir. 2 saatlik ortalamaların verildiği grafikte ekstrem değerler gözlenirken, aylık ortalamaların verildiği grafikte ise ayların ve mevsimlerin değişimi sonucu oluşan trend gözlenmektedir. Aylık ortalama hız değerlerinin kış ve bahar aylarında yüksek, yaz ve güz aylarında düşük değerler aldığı ilk bakışta farkedilmektedir. Özellikle Ekim ayında aylık ortalama akım hızı değeri minimal düzeye ulaşmıştır. Bunun sebebi alt tabaka debisinin baskınlığını arttırması ve İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney sınırı arasındaki su seviyesi değerlerinin asgari seviyeye inmesidir.



Şekil 5.39 : Güney eşiği üzerindeki aylık ortalama hız değerleri.

5.2.4 Debi değerleri

Marmara Denizi ve Karadeniz arasındaki su transferinin mahiyetini ve İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısını tam olarak anlayabilmek için debi değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Modelin fiziksel bakımdan anlamlı olduğunu söyleyebilmek için ise, İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney gözlem istasyonlarında ölçülen gerçek debi değerleri ile hidrodinamik modeldeki kuzey ve güney istasyonlarında gözlenen debi değerlerinin birbirleriyle büyük oranda örtüşmesi gerekmektedir.

İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güneyindeki gözlem istasyonlarında tespit edilen aylık ortalama üst tabaka ve alt tabaka debileri Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiştir. Daha önce verilen aylık ortalama akım hızlarıyla uyum içinde olan debi değerleri, aylık bazda değişmektedir. Kış ve Bahar aylarında üst tabaka debileri yüksek değerler almaktadır. Şubat ayı, bu yüksekliğin doruk noktasını teşkil etmektedir. Haziran ayı sonrasında ortaya çıkan üst tabaka debisinin azalması süreci her ne kadar Eylül ayında kesintiye uğrasa da, Ekim ayında minimum değerde tamamlanarak, Kasım ayından itibaren artışa geçmektedir. Aylık ortalama alt tabaka debileri ise Kış ve Bahar mevsimlerinde düşük değerler almaktadır. Özellikle Mart, Nisan ve Mayıs aylarında alt tabaka debileri 5000 m^3/s'nin üzerine çıkamayacak kadar küçüktür. Temmuz-Ekim arasında kalan trendde ise alt tabaka debileri yavaş yavaş artmakta, ve bu değer Ekim ayında maksimum değere ulaşmaktadır.

Çizelge 5.3 : İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde gözlenen aylık ortalama debi değerleri.

Kuzey	Üst Tabaka Debisi (m^3/s)	Alt Tabaka Debisi (m^3/s)
Ocak	20746	-5412
Şubat	27295	-1469
Mart	22754	-733
Nisan	16886	-3265
Mayıs	17631	-2560
Haziran	14772	-5071
Temmuz	9729	-12282
Ağustos	9677	-14201
Eylül	13456	-9858
Ekim	7089	-20199
Kasım	15456	-6794
Aralık	18866	-4943
Ortalama	16196	-7232

İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde gözlenen aylık ortalama debiler ile güneyinde gözlenen aylık ortalama debiler arasında ciddi farklar mevcuttur. Örnek vermek gerekirse, Ocak ayında Karadeniz'den İstanbul Boğazı'na 20746 m^3/s olarak giren su, İstanbul Boğazı'nın güneyinden 23085 m^3/s olarak çıkmaktadır. Bunun en önemli sebebi alt ve üst tabakalar arasındaki karışımdır. Güney eşiğinin bulunduğu bölge ile 700 m genişliğe sahip olan en dar bölge, bu karışımın vuku bulduğu esas bölgelerdir. Güneydeki çıkışta ekstradan gelen 2339 m^3/s'lik debi, alt tabaka akımının eşik ve daralma bölgesi gibi kritik bölgelerden birinde üst tabakaya katılması sonucunda ortaya çıkmıştır. Alt tabaka akımı, güney eşiğinin üzerinden İstanbul Boğazı'nın içine girmeye teşebbüs ederken tamamen içeri giremeyip, kütlesinin hatırı sayılır bir kısmını üst tabakaya kaptırmaktadır. Eşiği geçebilip İstanbul Boğazı'nın Karadeniz istikametinde yoluna devam eden alt tabaka akımı ise –eğer daralma bölgesinde kütle kaybı yaşamazsa-, Kuzey eşiğine doğru seyrederek Karadeniz'in sularıyla buluşmaktadır. Kuzey ve Güneyde yapılan gözlemlerdeki debi değerlerinin birbirlerinden farklı olmasının başlıca sebebi, alt ve üst tabakalar arasındaki karışım ve katılma olayıdır

Çizelge 5.4 : İstanbul Boğazı'nın güneyinde gözlenen aylık ortalama debi değerleri.

Güney	Üst Tabaka Debisi (m^3/s)	Alt Tabaka Debisi (m^3/s)
Ocak	23085	-7700
Şubat	31046	-5216
Mart	25788	-3768
Nisan	18379	-4758
Mayıs	19636	-4565
Haziran	15651	-5948
Temmuz	7941	-10496
Ağustos	7911	-12434
Eylül	13730	-10134
Ekim	4991	-18101
Kasım	17224	-8561
Aralık	21545	-7623
Ortalama	17244	-8275

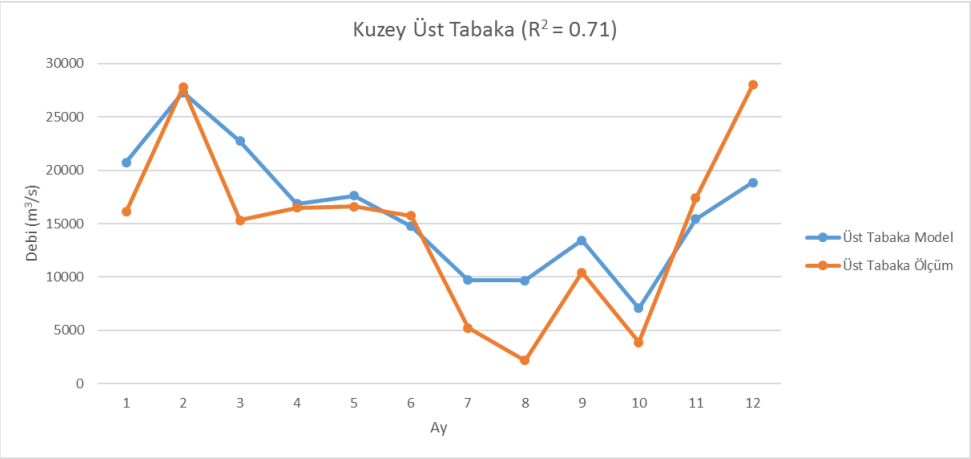
Kurulan hidrodinamik modelin sağlamlık ve güvenilirliğini test etmek amacıyla, modelde gözlenen debi değerleriyle İstanbul Boğazı'nda ölçülen debi değerleri arasındaki ilişkiyi irdelemek gerekli bulunmuştur. Çizelge 5.5'te İstanbul Boğazı'nda gözlenen aylık ortalama debi değerleri verilmiştir. Yalnız burada Ocak, Şubat, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım ve Aralık aylarındaki değerler İSKİ'nin 2003 yılı su kalitesi izleme raporundan, Mart, Nisan, Mayıs ve Haziran aylarındaki debi değerleri ise Altıok'un (2015) çalışmasından alınmıştır. Esasen debi değerlerinin tamamının İSKİ raporundan alınması uygun olurdu. Fakat bahsedilen raporda Mart-Haziran arasındaki debi değerleri, su seviyesi değerleriyle uyuşmamakta, ve Şubat ile Temmuz arasında cereyan etmesi gereken trendi bozmaktadır. Bu sebeple bu 4 ay için gerekli olan debi verileri 10 yıllık ölçümlerden temin edilen aylık ortalamaların verildiği Altıok'un (2015) çalışmasından temin edilmiştir. Böylece 2003 yılı için sağlıklı bir mikyas elde edilmiş, ve hidrodinamik modelin sonuçlarının test edilebilmesi önünde herhangi bir engel kalmamıştır.

Çizelge 5.5'te verilen aylık ortalama ölçülmüş debi değerleri, İstanbul Boğazı'nın hidrodinamiği hakkında fikir edinilebilmesi açısından oldukça elverişlidir. Kış ve Bahar aylarında üst tabaka debisi yükselip alt tabaka debisi düşerken, Yaz ve Güz mevsimlerinde bunun tam tersi cereyan etmektedir. Bu bakımdan ölçülen debilerle hidrodinamik modelde gözlenen debiler büyük oranda uyum arz etmektedir.

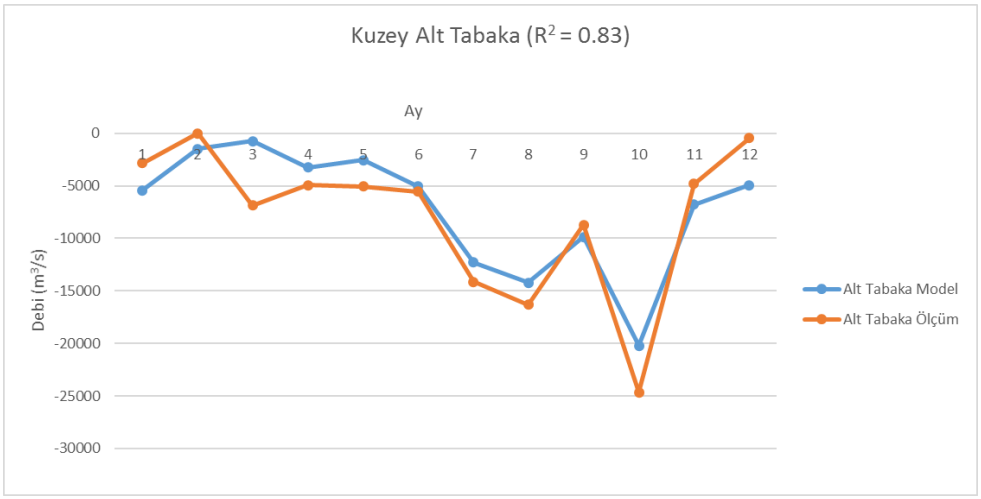
Çizelge 5.5 : İstanbul Boğazı'nın güney ve kuzeyinde ölçülen aylık ortalama debi değerleri (İSKİ, 2004 ve Altıok, 2015).

	Üst Tabaka Debisi Kuzey (m^3/s)	Alt Tabaka Debisi Kuzey (m^3/s)	Üst Tabaka Debisi Güney (m3/s)	Alt Tabaka Debisi Güney (m3/s)
Ocak	16100	-2850	20000	-5870
Şubat	27800	0	30217	-1957
Mart	15320	-6860	16190	-6240
Nisan	16510	-4930	19150	-4860
Mayıs	16610	-5050	18410	-4980
Haziran	15740	-5530	17590	-5730
Temmuz	5220	-14130	8696	-9348
Ağustos	2180	-16300	3261	-12174
Eylül	10435	-8700	11957	-11304
Ekim	3900	-24650	0	-19130
Kasım	17400	-4800	13913	-6522
Aralık	28000	-435	33261	-1304
Ortalama	14601	-7853	16054	-7452

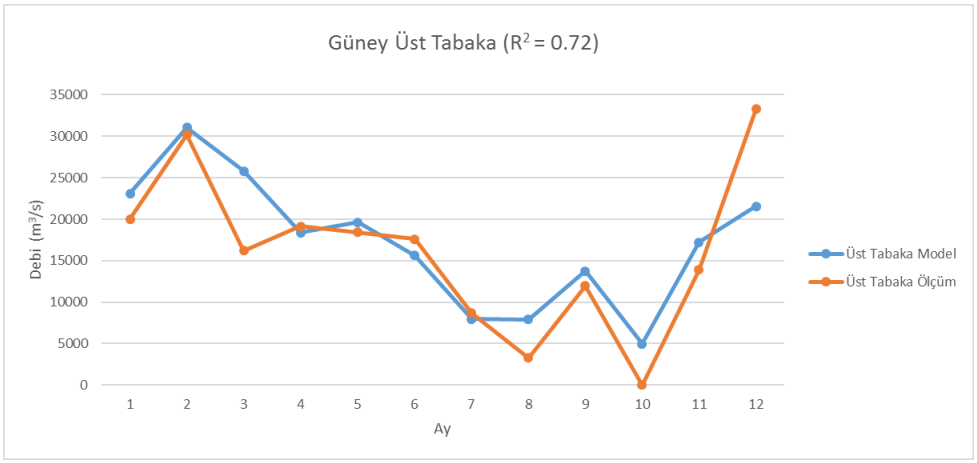
Model sonuçları ile İstanbul Boğazı'nda bilfiil ölçülmüş debileri grafikte göstermenin daha faydalı olacağı düşünüldüğünden Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'te Üst Tabaka ve Alt Tabaka debilerinin kuzey ve güneydeki ölçüm ve modelden alınan değerleri verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere ölçüm ve model debileri arasında büyük bir uyum mevcuttur. R^2 ifadesiyle parantez içlerinde verilen değerler Korelasyon katsayısının karesidir. Korelasyon katsayıları ise sırası ile söylenecek olursa, 0.84, 0.91, 0.85 ve 0.88'dir



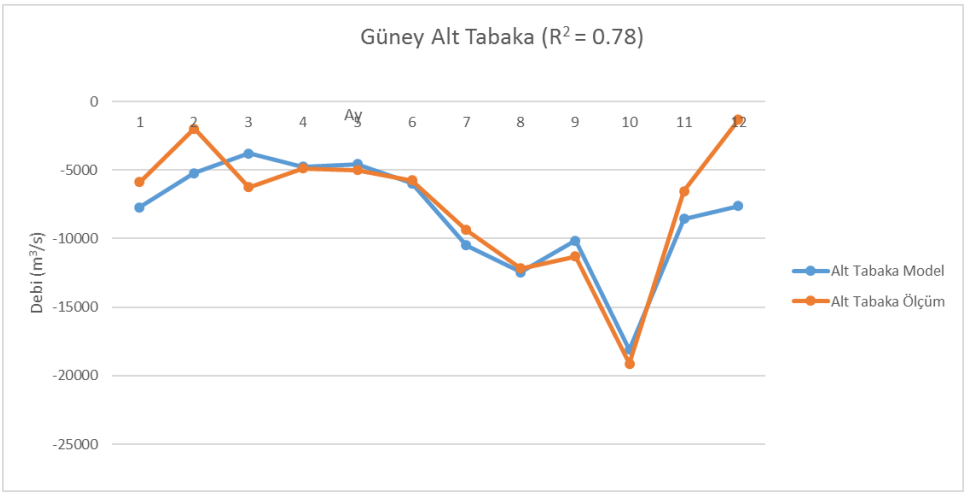
Şekil 5.40 : İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde ölçüm ve modelin üst tabaka debileri.



Şekil 5.41 : İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde ölçüm ve modelin alt tabaka debileri.

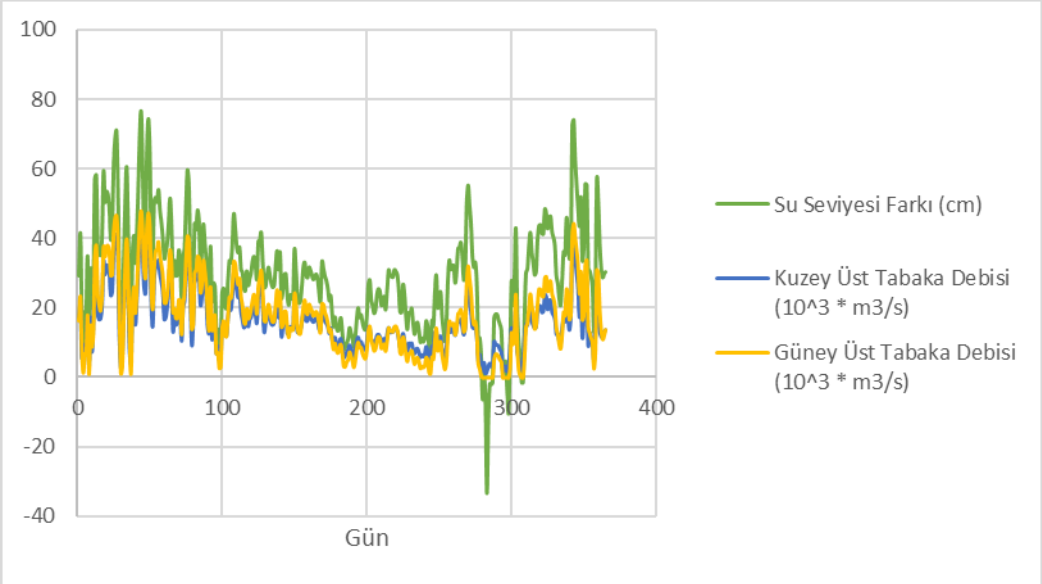


Şekil 5.42 : İstanbul Boğazı'nın güneyinde ölçüm ve modelin üst tabaka debileri.



Şekil 5.43 : İstanbul Boğazı'nın güneyinde ölçüm ve modelin alt tabaka debileri.

Bu modelleme çalışmasının en önemli sonuçlarından biri, İstanbul Boğazı'nın Kuzey ve Güney sınırları arasındaki su seviyesi farkı ile Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru seyreden üst tabaka akımının debisi arasında %90'ın üzerinde bir korelasyon değerine ulaşılması oldu. Şekil 5.44'te İstanbul Boğazı'nın iki ucu arasındaki su seviyesi farkı değerleri ile kuzey ve güneydeki gözlem istasyonlarında gözlenen üst tabaka akımı debileri günlük ortalama olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere bu üç parametre arasında büyük bir uyum mevcuttur. Öyle ki, Su Seviyesi Farkı ile Kuzey üst tabaka akımı arasındaki korelasyon %94.3, Su Seviyesi Farkı ile Güney üst tabaka akımı arasındaki korelasyon %95.4, Kuzey ve Güney üst tabaka akımları arasındaki korelasyon ise %98.4'tür. Yüksek korelasyon katsayısı değerlerinden anlaşılan o ki, İstanbul Boğazı'nın üst tabaka akımını kontrol eden en büyük faktör Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkıdır. Esasen, su seviyesi farkının İstanbul Boğazı'nın üst tabaka debilerini kontrol ettiği daha önceden bilinen bir hususdu. Fakat model sonuçlarının gerçek durumdaki koşullarla uyum arz ettiğini ortaya çıkarması bakımından bu vakıa dikkat çekicidir.



Şekil 5.44 : Günlük su seviyesi farkı ve kuzey ve güneydeki üst tabaka akımı debisi.

Çizelge 5.6'da aylık ortalama su seviyesi farkı değerleri ile üst ve alt tabaka akımlarına ait kuzey ve güneyde gözlenen debiler verilmiştir. Çizelgenin en altında ise debi değerleri ile su seviyesi farkı değerleri arasında hesaplanan korelasyon katsayıları mevcuttur. Korelasyon katsayılarından ilk bakışta anlaşılan – daha önce de belirtildiği

gibi – üst tabaka akımı debileriyle su seviyesi farkları arasındaki ilişkinin çok kuvvetli olduğudur. Üst tabaka akımının korelasyon katsayıları %95 civarında değerler alarak su seviyesi farkı ile arasındaki ilişkinin çok yüksek olduğunu ispat etmiştir. Alt tabaka akımlarının su seviyesi farkı ile arasındaki korelasyon değerleri %70-80 mertebelerindedir. Bu değerler, üst tabaka akımlarının korelasyon katsayılarından daha düşük olsa da, yine de arada büyük bir münasebet olduğunu göstermesi bakımından dikkate değerdir. Bu ilişkinin üst tabaka debisindeki kadar kuvvetli olmayışı, boğazın –kuzey ve güney- iki tarafı ve –alt ve üst- iki tabakası arasındaki tuzluluk değerlerinin müessir bir rol üstlenmesi sebebiyledir. Bununla ilgili örnek olarak Temmuz ve Ağustos ayları verilebilir. İki aydaki ortalama su seviyesi değerleri ve üst tabaka akım debileri birbirlerine neredeyse eşittir. Fakat Ağustos ayında İstanbul Boğazı'nın iki tarafı arasındaki tuzluluk farkı değerleri Temmuz ayındakilere göre daha yüksek olduğundan alt tabaka debisi daha yüksek çıkmıştır.

Alt tabaka debilerinin güney ve kuzey gözlem istasyonlarında farklı değerler almaları bir başka dikkat çekici vakıadır. Burada bir blokaj durumundan bahsetmek faydalı olacaktır. Tuna Nehri'nden gelen tatlı su deşarjı arttığında Karadeniz'in su seviyesi yükselmekte, ve bu, İstanbul Boğazı'nın üst tabaka akımı debisinin artması şeklinde kendisini göstermektedir. Üst tabaka akımı debisinin artışı ise alt tabaka akımının azalmasında veya tamamen bloke olmasında önemli rol sahibidir. Marmara Denizi'nden gelen alt tabaka akımı önce güney eşiğini, sonra ise daralma bölgesini geçerek Karadeniz istikametine yönelmektedir. Üst tabaka akımının arttığı durumlarda ya eşik ve daralma bölgelerinde, veya Boğaz'ın daha kuzey noktalarında alt tabaka akımının üst tabaka akımına karışarak Marmara Denizi istikametine geri döndüğü görülür. Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs, Haziran, Eylül, Kasım ve Aralık aylarında kuzey ve güneyde gözlenen alt tabaka akımı debilerinde görülen fark, üst tabaka akımı debisinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Üst tabaka akımının debisinin yüksek olduğu zaman dilimlerinde alt tabakanın üst tabakaya katılarak bloke olması, ve Karadeniz kaynaklı üst tabaka akımına karışması söz konusudur. Böylece, güneyden gelen alt tabaka akımının çok az bir kısmı kuzey gözlem istasyonuna ulaşabilir. Temmuz, Ağustos ve Ekim ayları gibi ortalama su seviyesi farkının 20 cm'den daha az olduğu aylarda ise kuzeydeki gözlenen alt tabaka debileri daha yüksek değerler alır. Bundan anlaşılan, üst tabaka akımının yüksek olduğu dönemlerde alt tabaka sularının üst tabakaya katılımının yüksek olduğu, ve üst tabaka akımı debisi

değerinin düşük olduğu aylarda ise alt tabaka akımının üst tabakaya katılımının yüksek olduğudur. Temmuz, Ağustos ve Ekim aylarında Güney alt tabaka debisinin Kuzey alt tabaka debisinden yaklaşık 2000 m^3/s daha az olması, üst tabaka akımı sularının alt tabakaya karışarak alt tabaka debisini arttırdığı anlamına gelmektedir.

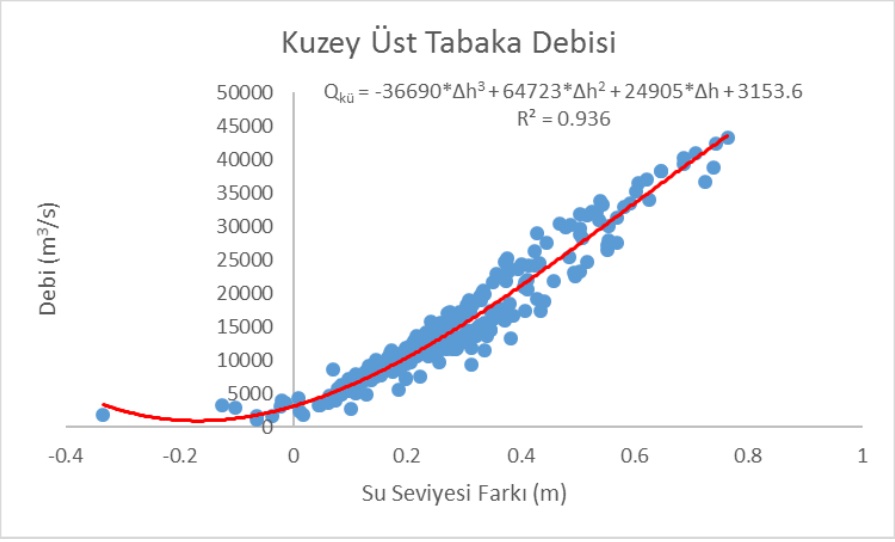
Çizelge 5.6 : Aylık su seviyesi farkı ve debi ortalamaları.

Ay	Su Seviyesi Farkı (m)	Kuzey Üst Tabaka (m^3/s)	Kuzey Alt Tabaka (m^3/s)	Güney Üst Tabaka (m^3/s)	Güney Alt Tabaka (m^3/s)
O	0.38	20746	-5412	23085	-7700
Ş	0.47	27295	-1469	31046	-5216
M	0.37	22754	-733	25788	-3768
N	0.28	16886	-3265	18379	-4758
M	0.3	17631	-2560	19636	-4565
H	0.25	14772	-5071	15651	-5948
T	0.17	9729	-12282	7941	-10496
A	0.17	9677	-14201	7911	-12434
E	0.29	13456	-9858	13730	-10134
E	0.12	7089	-20199	4991	-18102
K	0.33	15456	-6794	17224	-8561
A	0.41	18866	-4943	21545	-7623
Korelasyon Kats.		0.946	0.824	0.957	0.711

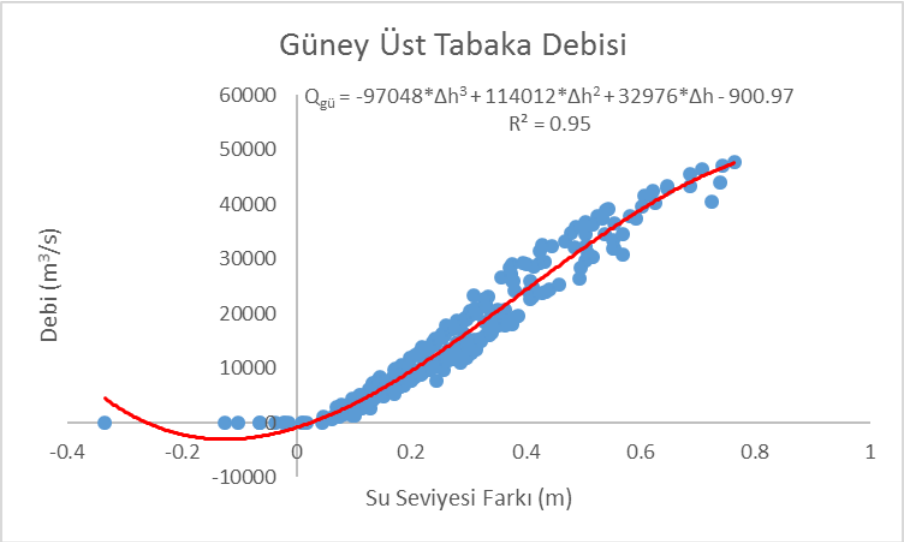
İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısının modellenmesinden çıkarılan sonuçlardan bir diğeri, alt tabaka akımı debilerinin üst tabaka akımı ve Karadeniz ile Marmara Denizi ve üst tabaka ile alt tabaka arasındaki tuzluluk farkları tarafından kontrol edildiği oldu. Aylık ortalama akım debisi değerlerine bakıldığında üst tabaka akımı debilerinin arttığı aylarda alt tabaka debilerinin azaldığı, üst tabaka akımı debilerinin azaldığı aylarda ise alt tabaka debilerinin arttığı görülmüştür. Fakat Karadeniz'in tuzluluğunun Marmara Denizi'ne göre daha az olması, ve alt tabakanın tuzluluğunun

üst tabakaya göre fazla olması, alt tabaka akımının oluşmasında en mühim faktörlerdendir.

Üst tabaka debileri ile su seviyesi farkı arasında yüksek korelasyonun bulunması, bu iki parametre arasında matematiksel bir ilişki kurulabileceği anlamına gelmektedir. Bu sebeple 12 ay boyunca günlük ortalama şeklinde elimizde bulunan veriler Eğitim ve Test verileri olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim verileri, regresyon analizinin bizzat tatbik edileceği veriler olup, ekstrem değerleri içermelidir. Test verileri ise Eğitim verileri ile yapılan regresyon analizi sonucu hesaplanan regresyon eğilim çizgisi denkleminin güvenilirliğini ölçmek için oluşturulmuştur. 12 aylık verinin 9 aylık kısmı Eğitim verisi, 3 Aylık kısmı ise Test verisi olarak seçilmiştir. Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da Eğitim verilerinin üst tabaka debileri düşey eksene, yine eğitim verilerinin su seviyesi farkı yatay eksene işaretlenerek saçılma diyagramında regresyon analizi yapılmıştır. Kuzey ve Güney üst tabaka debileri ile su seviyesi farkı değerleri arasında 3. Dereceden denklemler kurulmuş, ve bu denklemlerin R^2 değerlerinin sırasıyla 0.936 ve 0.95 olduğu görülmüştür. Bu ise, İstanbul Boğazı'nın kuzey ve güney ucu arasındaki su seviyesi farklarını ölçtükten sonra, şekillerde verilen denklemlerde "Δh" yerine bu su seviyesi farkı değerleri konursa, debi değerlerinin çok yüksek bir ihtimalle gerçeğe yakın olarak hesaplanacağı anlamına gelmektedir.

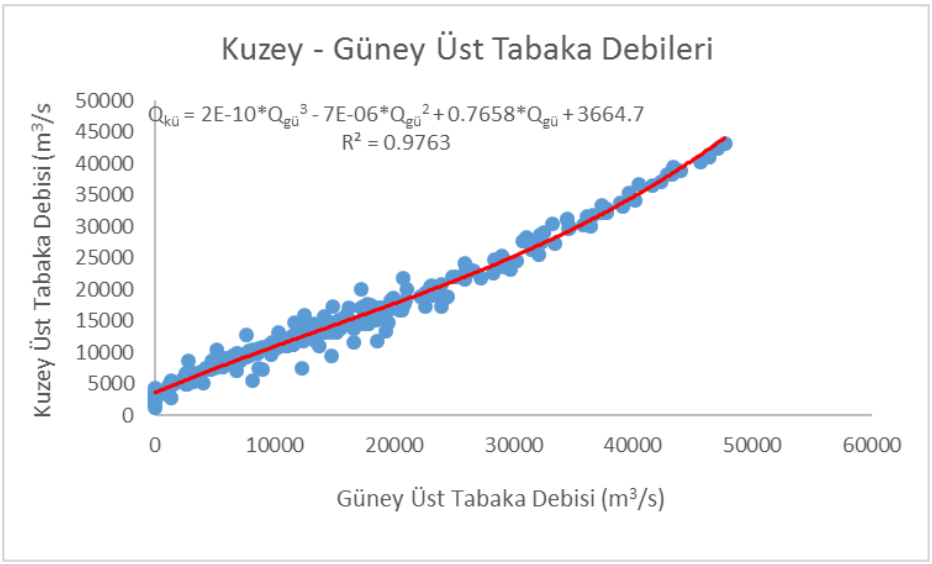


Şekil 5.45 : Kuzey üst tabaka debisi ile su seviyesi arasındaki regresyon eğrisi.

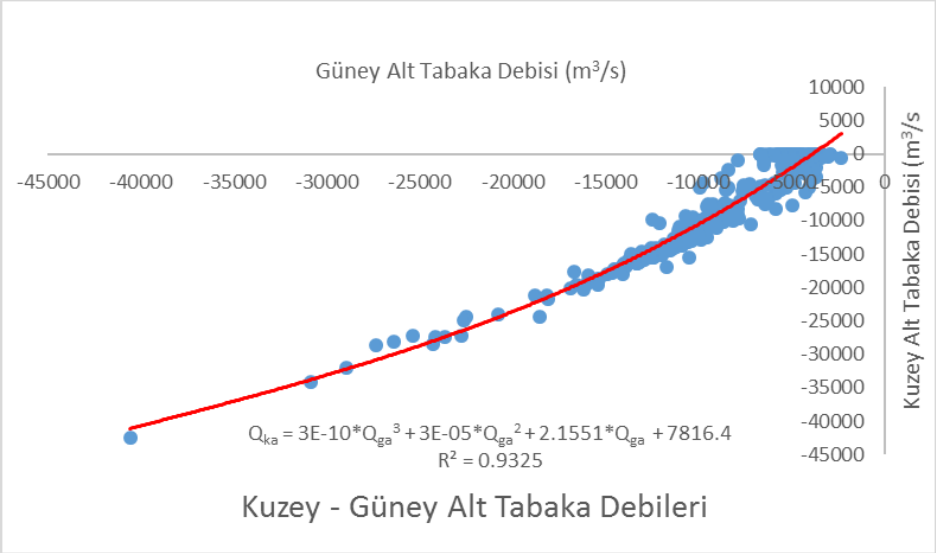


Şekil 5.46 : Güney üst tabaka debisi ile su seviyesi arasındaki regresyon eğrisi.

Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de İstanbul Boğazı'nın Üst ve Alt tabakalarında ayrı ayrı olmak üzere, Kuzey ve Güneyde gözlenen Eğitim verilerindeki debilerin regresyon eğrileri verilmiştir. Üst tabaka debileri için 3. dereceden bir regresyon eğrisi oluşturulduğunda R^2 değeri %98'e yakın çıkmakta, alt tabaka debileri için 3. dereceden bir regresyon eğrisi oluşturulduğunda R^2 değeri %93'ü aşmaktadır. Buradan anlaşılan, üst tabaka debilerinin kendi içindeki uyumunun alt tabaka debilerine nispeten çok daha fazla olduğudur. Oluşturulan bu regresyon eğrileri vasıtasıyla İstanbul Boğazı'nın kuzeyinde yapılan bir debi ölçümü ile güneyde gözlenmesi beklenen debi değeri tahmin edilebilir. Elbette bunun tam tersi de, yani güneyde yapılan bir ölçümden sonra kuzeydeki debinin tahmini de mümkündür.

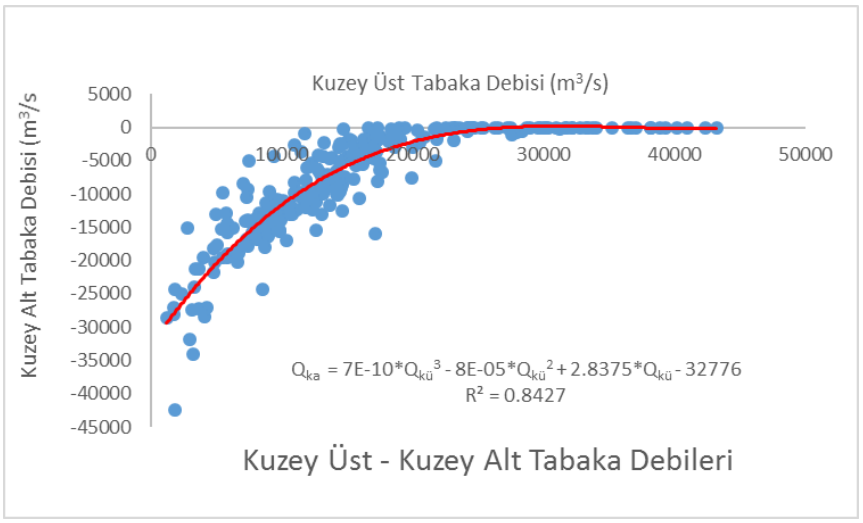


Şekil 5.47 : Kuzey ile güney üst tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi.

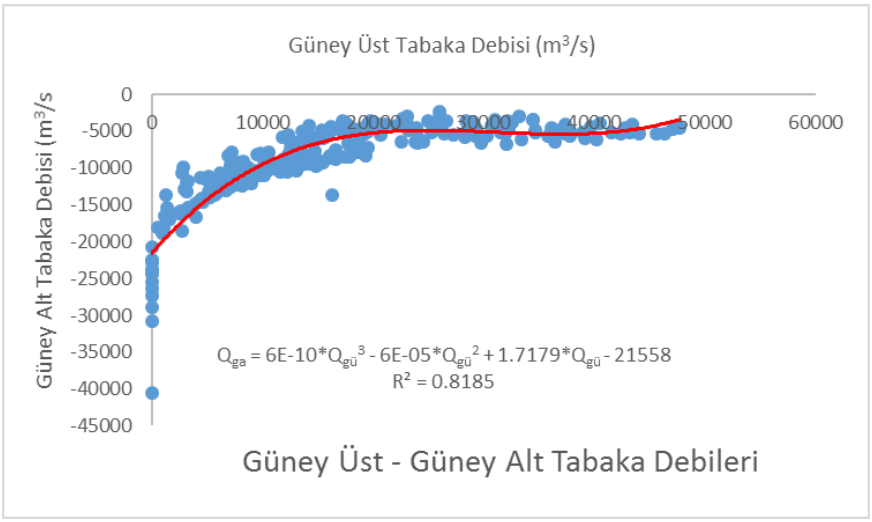


Şekil 5.48 : Kuzey ile güney alt tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi.

Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'de Kuzey ve Güneyde ayrı ayrı olmak üzere Eğitim verileri için, üst ve alt tabaka debilerinin kendi aralarındaki saçılma diyagramları ve regresyon eğrileri verilmiştir. Kuzeydeki ve güneydeki Eğitim verilerinin debilerinin her ikisi için de 3. Dereceden bir regresyon eğrisi seçilmiş olup, R^2 değerleri sırasıyla %84 ve %82'dir. Her ne kadar bu değerler %90'ı aşamasa da, üst tabaka debisi ile alt tabaka debisini tahmin edebilmek yine de mümkün olabilmektedir. Üst tabaka ile alt tabaka arasındaki ilişkiyi gösteren bir denklem olarak regresyon eğrisi denklemi, ölçümlerde karşılaşılabilecek hatalara karşı alt tabaka debisinin daha güvenilir olarak hesaplanmasında önemli bir faktör olarak düşünülmüştür. Zira bir araştırmacı, İstanbul Boğazı'ndaki su seviyeleri farkını ölçtüğünde buradan Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'daki regresyon denklemleriyle üst tabaka debilerini hesapladıktan sonra, üst tabaka debilerinin alt tabaka debileri ile olan ilişkisini belirten Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'deki regresyon denklemleriyle alt tabaka debileri için yaklaşık değerler belirleyebilir. Bu değerler her ne kadar yaklaşık olsa da, alt tabaka debileri hakkında fikir vermesi dolayısıyla oldukça dikkat çekicidir.



Şekil 5.49 : Kuzey üst ile alt tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi.



Şekil 5.50 : Güney üst ile alt tabaka debileri arasındaki regresyon eğrisi.

Şekil 5.45 ile Şekil 5.50 arasında verilen 6 grafikte, Eğitim verileri için saçılma diyagramları ve regresyon eğilim eğrileri verilmiştir. Bulunan sonuçlar tatmin edici olmakla birlikte, bir doğrulamadan geçirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Doğrulama amacıyla regresyon eğilim denklemleriyle test verileri için hesap yapmak, ve bu hesaplamaların ardından gözlenen değerlerle tahmin değerleri arasındaki ilişkiyi ve uyum derecesini incelemek yerinde olacaktır. Bu uyum derecesi, korelasyon katsayısının karesiyle gösterilmektedir.

Eğitim verileri ile oluşturulan regresyon eğrileri ile Test verileri için tahminlerde bulunulmuş, ve bu tahminlerin gerçek değerlerle uyum oranı, yani R^2 değeri ortaya konulmuştur.. Su Seviyesi farkının kuzey ve güney üst tabaka debileri ile olan korelasyon katsayılarının kareleri sırasıyla 0.837 ve 0.886'dır. Kuzey ve Güneyde gözlenen üst tabaka akımları ile alt tabaka akımları için R^2 değerleri sırasıyla 0.962 ve 0.886'dır. Son olarak Üst ve Alt tabakaların kendi aralarındaki saçılma diyagramlarında R^2 değerleri kuzey ve güney için sırasıyla 0.822 ve 0.755'tir.

Çizelge 5.7'de, yukarıda teferruatı açıklanan regresyon analizindeki regresyon eğilim denklemi ve Eğitim ile Test verileri için R^2 değerleri verilmiştir. Üst tabaka debileri ile su seviyesi arasında ve kuzey ve güneydeki üst ve alt tabaka debileri arasında %90'ı aşan R^2 değerleri olduğu görülmektedir. Bu ise, su seviyesinden üst tabaka debisinin tahmininin, ve kuzeydeki üst tabaka debisinden güneydeki üst tabakanın debisinin tahmininin, regresyon eğilim eğrisi denklemi ile yapılabileceğini göstermektedir. Üst tabaka debilerinden alt tabaka debilerini tahmin etmek mümkün olsa da, R^2 değerlerindeki nispeten düşük değerlerden anlaşıldığı kadarıyla, isabet etme ihtimali diğer durumlardakine nazaran daha azdır.

Çizelge 5.7 : Regresyon analiz tablosu.

Mukayese	Regresyon Eğilim Eğrisi Denklemi	R^2 - Eğitim	R^2 - Test
$Q_{kü}$ - Δh	$Q_{kü} = -36690*\Delta h^3 + 64723*\Delta h^2 + 24905*\Delta h + 3153.6$	0.936	0.837
$Q_{gü}$ - Δh	$Q_{gü} = -97048*\Delta h^3 + 114012*\Delta h^2 + 32976*\Delta h - 900.97$	0.95	0.886
$Q_{kü}$ - $Q_{gü}$	$Q_{kü} = 2E\text{-}10*Q_{gü}^3 - 7E\text{-}06*Q_{gü}^2 + 0.7658*Q_{gü} + 3664.7$	0.9763	0.962
Q_{ka} - Q_{ga}	$Q_{ka} = 3E\text{-}10*Q_{ga}^3 + 3E\text{-}05*Q_{ga}^2 + 2.1551*Q_{ga} + 7816.4$	0.9325	0.886
Q_{ka} - $Q_{kü}$	$Q_{ka} = 7E\text{-}10*Q_{kü}^3 - 8E\text{-}05*Q_{kü}^2 + 2.8375*Q_{kü} - 32776$	0.8427	0.822
Q_{ga} - $Q_{gü}$	$Q_{ga} = 6E\text{-}10*Q_{gü}^3 - 6E\text{-}05*Q_{gü}^2 + 1.7179*Q_{gü} - 21558$	0.8185	0.755

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında İstanbul Boğazı'nın sağlıklı bir hidrodinamik modelinin kurulması öngörülmüştür. Batimetri, Su seviyesi, sıcaklık ve tuzluluk gibi sınır ve başlangıç şartları ile diğer fiziksel parametreler, hidrodinamik model için hayati önemde olduğundan, bu veriler mümkün olduğunca ölçümler doğrultusunda modele aktarılmıştır. Sınır şartları, başlangıç şartları ve sair parametrelerin modele dahil edilmesiyle tuzluluk, sıcaklık gibi hidrografik parametrelerin, ve hız, debi gibi hidrodinamikle alakalı parametrelerin model tarafından gerçeğe yakın bir şekilde oluşturulması modelin başlıca hedefidir. Model çıktılarının analiz edilmesiyle bu hedefe ulaşıldığı anlaşılmıştır. Özellikle Tabakalı Akım koşullarının sağlanıp, hidrodinamik ve hidrografik parametrelerin buna uygun profillerde oluşması, modelin güvenilirliği açısından olumlu bir gelişmedir. Ölçüm değerleriyle yüksek korelasyon katsayılarına ve uyuma sahip olan model çıktıları, İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik modelinin sağlıklı bir şekilde kurulduğunun en büyük delili sayılmalıdır.

İstanbul Boğazı'nın güney eşiği ve bu eşiğin kuzeyinde kalan daralma bölgesi Hidrolik kontrol noktaları olarak isimlendirilmektedir. Bu noktalarda hız değerleri artmakta, ve üst tabaka akımı ile alt tabaka akımı arasında karışım ve katılma olayları cereyan etmektedir. Özellikle hız profil sonuçları dikkatle incelendiğinde güney eşiğinde ve daralma bölgesinde bu vakıanın tıpkı gerçek ölçüm ve gözlem sonuçlarındaki gibi olduğu görülmektedir. Yani hidrolik kontrol noktaları, kurulan modelde gerçekteki hallerine uygun bir şekilde davranmıştır.

Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su kütlesi transferinin nicelik bakımından değerlendirilmesini mümkün kılan debi değerleri, modelin önemli bir çıktısıdır. Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru seyreden bir üst tabaka akımı debisi, ve Marmara Denizi'nden Karadeniz istikametine yönelen bir alt tabaka akımı debisi olarak iki adet debi parametresi mevcuttur. Karadeniz'den Marmara'ya yönelen akıma üst tabaka akımı, Marmara Denizi'nden Karadeniz'e seyir halinde olan akıma ise alt tabaka akımı denmiştir. Debi değerlerinin aylık bazda ortalamaları alındığında ölçüm sonuçlarıyla aralarında yüksek korelasyonların olduğu görülmüştür. Kuzeydeki üst ve

alt tabaka akımları için $R^2 = 0.71$ ve $R^2 = 0.83$'tür. Güneydeki üst ve alt tabaka akımları için ise sırasıyla $R^2 = 0.72$ ve $R^2 = 0.78$'dir. Bulunan bu yüksek korelasyon katsayıları, modelin ölçüm verileriyle uyuşma oranının yüksek olduğunu göstermesi bakımından anlamlıdır.

Hidrografik parametreler olarak adlandırılan Tuzluluk ve Sıcaklık parametreleri, modelin önemli çıktıları arasındadır. Tuzluluk ve Sıcaklıkla ilgili boykesit profilleri çıkarıldığında -tıpkı gerçek durumdaki gibi- üst tabaka akımı ile alt tabaka akımı arasındaki fark ortaya çıkmıştır. Tuzluluk ele alınırsa, üst tabaka Karadeniz'in tatlı sularıyla dolu olduğu için az tuzlu, alt tabaka ise Marmara'nın tuzlu sularıyla dolu olduğu için çok tuzludur. Sıcaklıkla ilgili olarak, alt tabaka sıcaklıkları genel olarak 14-15 ^oC civarında seyretmekte, üst tabaka ise mevsimden mevsime değişmektedir. Kış mevsiminde 8-9 ^oC civarında değerler alan üst tabaka suları, Yaz mevsimi geldiğinde 20 ^oC'nin üzerine çıkmaktadır. Fakat Yaz mevsiminde 20 ^oC sıcaklığın üzerinde olan yüzey tabakasıyla 14-15 ^oC sıcaklığı civarında değerler alan alt tabaka arasında –kış mevsiminden kalan- 8-9 ^oC sıcaklığında –nispeten soğuk- bir ara tabaka olduğu söylenmelidir. Karadeniz tarafındaki üst tabaka kalınlığı ile Marmara Denizi tarafındaki üst tabaka kalınlığı birbirinden farklıdır ve bu farklılık da mevsimden mevsime değişmektedir. Üst tabaka akımının yüksek olduğu zaman dilimlerinde üst tabaka kalınlığı artmakta, bunun aksi yaşanan durumlarda ise üst tabaka derinliği azalmaktadır. Bu mevsimsel farklılık da tıpkı gerçekteki gibi cereyan ettiğinden modelin sağlıklı bir şekilde kurulduğu düşünülmektedir.

Hidrodinamik model sonuçlarından üst tabaka debisi ile İstanbul Boğazı'nın Kuzey ve Güneyi arasındaki su seviyeleri farkı arasında çok yüksek korelasyonların olduğu anlaşılmıştır. Kuzey ve Güney üst tabaka debileri ile Su seviye farkı arasında çizilen saçılma diyagramlarından elde edilen eğilim çizgisi denkleminin R^2 değerleri, %92 ve %94 olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayılarının karelerinin %90'ın üzerinde olduğunun görülmesi, eğilim çizgisi denklemi kullanılarak su seviyesi farkından üst tabaka akımının debisinin bulunabileceğini veya tahmin edilebileceğini göstermektedir.

Modelleme çalışması ardından ortaya konulacak öneriler şu şekildedir:

- Yeterli miktarda veri bulunamaması nedeniyle 1 yıl olarak seçilen model koşturma süresi daha uzun zaman dilimleri seçilerek çalıştırılmalıdır. Böylece

İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısı hakkında daha sağlıklı bir fikir elde edilebilir.

- Sadece İstanbul Boğazı yerine Türk Boğazlar Sistemi'nin (İstanbul Boğazı, Marmara Denizi ve Çanakkale Boğazı) tamamını kapsayacak bir modelin kurulması, Boğazların hidrodinamik yapısı ve birbirlerine olan etkilerinin analizi için faydalı olacaktır.
- Veri eksikliği ve hataları konusunda yaşanan sıkıntıları hafifletmek maksadıyla ölçüm konusunda daha hassas davranılmalı, ve bu ölçümler (örneğin debi ölçümü) mevcut periyotlar azaltılarak daha güvenilir bir tarzda yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Akay O. (2002), *Hydrodynamic Simulation of the Bosphorus (M. Sc. Thesis)*, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul.

Altıok H. & Kayışoğlu M. (2015), Seasonal and Interannual Variability of Water Exchange in the Strait of Istanbul, *Mediterranean Marine Science, 16/3, pp. 636-647.*

Armi L. (1986), The Hydraulics of Two Flowing Layers with Different Densities, *J . Fluid Mech.* (1986), *vol.* 163, *pp. 27-58.*

Armi L. & Farmer D.M. (1986), Maximal Two Layer Exchange Through a Contraction with Barotropic Net Flow, *J. Fluid Mech.* (1986), *vol.* 164, *pp.* 27-51.

Artüz L., Artüz B., Gürseler G., Mater B., Okay A ve Okay N. (2007), *Bilimsel Açıdan Marmara Denizi*, (L. Artüz Ed.), Ankara, Türkiye Barolar Birliği.

Bayazıt M. & Sümer M. (1982), İstanbul Boğazı'nın Oşinografik ve Hidrolik Etüdü – II, T.B.T.A.K. Su Alma Ünitesi Kesin Rapor No: 28, İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.

Beşiktepe Ş., Sur H.İ., Özsoy E., Latif M.A., Oğuz T. and Ünlüata Ü. (1994), The circulation and hydrography of the Marmara Sea, *Prog. Oceanog.* Vol. 34, pp. 285-334.

Çeçen K., Bayazıt M., Sümer M., Güçlüer Ş., Doğusal, M. ve Yüce H. (1981), İstanbul Boğazı'nın Oşinografik ve Hidrolik Etüdü – I, T.B.T.A.K. Su Alma Ünitesi Kesin Rapor No: 24, İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik ve Su Kuvvetleri Kürsüsü.

Delft3D-FLOW, Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments, User Manual, 2014

Evliya Çelebi b. Derviş Mehemmed Zıllî (2011), *Evliya Çelebi Seyahatnamesi,* (S.A. Kahraman, Y. Dağlı, R. Dankoff, Z. Kurşun ve İ. Sezgin, Haz.) İstanbul, Yapı Kredi Yayınları (Orijinal Bas. 1896).

Farmer D.M. & Armi L. (1986), Maximal Two Layer Exchange Over a Sill and Through the Combination of a Sill and Contraction with Barotropic Flow, *J . Fluid Mech, vol.* 164, *pp. 53-76.*

Gregg M.C., Özsoy E. and Latif M.A. (1999), Quasi-Steady Exchange Flow in the Bosphorus, *Geophysical Research Letters, Vol. 26, No. 1, pp. 83-86.*

Gregg M.C. & Özsoy E. (2002), Flow, Water Mass Changes, and Hydraulics in the Bosphorus, *Journal of Geophysical Research, Vol. 107, no. C3, 3016, 10.1029/2000JC000485.*

Jarosz E., Teague W.J., Book J.W. and Beşiktepe Ş. (2011), Observed volume Fluxes in the Bosphorus Strait, *Geophysical Research Letters, Vol. 38, L21608, doi:10.1029.*

Kocaman S. (2007), *Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi* (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Latif M.A., Özsoy E., Oğuz T. and Ünlüata Ü. (1991), Observations of the Mediterranean Inflow into the Black Sea, *Deep-Sea Research,Vol. 38,* Suppl 2. *pp. 5711-5723.*

MEMPIS Consortium (2006). Environmental Master Plan and Investment Strategy for the Marmara Sea Basin - Turkey, Water Quality Modeling of the Sea of Marmara, Model Development and Scenario Simulations. European Investment Bank and Turkish Ministry of Environment & Forestry.

Mercan D.E. (2006), *Beyşehir Gölü'nün Hidrodinamik Modellemesi* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Oğuz T., Özsoy E., Latif M.A., Sur H.İ., and Ünlüata Ü. (1990), Modelling of Hydraulically Controlled Exchange Flow in the Bosphorus Strait, *American Meteorological Society, pp. 945-965.*

Özsoy E., Beşiktepe Ş. and Latif M.A. (2000), Türk Boğazlar Sistemi'nin Oşinografisi, İstanbul, Marmara Denizi 2000 Sempozyumu.

Öztürk İ. (2011), *Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı*, İstanbul, Su Vakfı.

Öztürk M. (2010), *İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamiği ve Sayısal Modellenmesi* (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Sözer A. (2013), *Numerical Modeling of the Bosphorus Exchange Flow Dynamics (Doctorate Thesis)*, Middle East Technical University, Institute of Marine Science, Ankara.

Schonewille H. (2006), *3D Numerical Simulation of a Harbour Flow: Applied to Waalhaven, Port of Rotterdam (M. Sc. Thesis)*, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences – Environmental Fluid Mechanics Section, Delft.

Sur H.İ., Özsoy E. and Ünlüata Ü. (1994), Boundary Current Instabilities, Upwelling, Shelf Mixing and Eutrophication Processes in the Black Sea, *Prog. Oceanog. Vol. 33, pp. 249-302.*

Sur H. İ., Okuş E., Güven K.C., Yüksek A., Altıok H., Kıratlı N., Ünlü S., Taş S., Aslan-Yılmaz A., Yılmaz N., Övez S., Müftüoğlu A. E., Karhan Ü., Öz İ. and Demirel N. (2004), Water Quality Monitoring, Annual Report. Submitted to: İstanbul Water and Sewerage Administration (ISKI). Istanbul University, Institute of Marine Sciences and Management, İstanbul.

Sümer M. & Bakioğlu M. (1981), Sea-Strait Flow With Special Reference to Bosphorus, İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.

Türk Boğazları Oşinografi Atlası (2009), Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı, İstanbul.

Yüksel Y., Ayat B., Öztürk M.N., Aydogan B., Guler I., Cevik E.O., and Yalçıner A.C. (2008), Responses of the Stratified Flows to their Driving Conditions – A Field Study, *Ocean Engineering, pp. 1304-1321.*

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Melih Koşucu

Doğum Tarihi ve Yeri : 23.06.1989, İstanbul Fatih

E-posta : kosucu@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2016, İTÜ, İnşaat Mühendisliği ABD, Hidrolik ve Su Kaynakları Programı