

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TABAKALI AKIMLAR VE İSTANBUL BOĞAZI
HİDRODİNAMİĞİNİN SAYISAL MODELLEMESİ**

İnş. Müh. Mehmet N. ÖZTÜRK

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL (YTÜ)

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. YOĞUNLUK AKIMLARININ HİDROLİĞİ	3
2.1 Yoğunluk Akımları	3
2.2 Taşınım Türleri	3
2.3 Homojen ve Tabakalı Akım Teorisinde Kullanılan Temel Denklemler	4
2.4 Arayüzey Hidrodinamiği.....	5
2.5 Tabakalı Bir Akım Türü: Boğaz Akımları.....	8
2.6 Bir Boğaz Akımı Örneği-İstanbul Boğazı	8
2.6.1 Hidrolik Özellikleri.....	8
2.6.2 Hidrolojik Özellikleri.....	8
3. İSTANBUL BOĞAZI'NIN HİDRODİNAMİĞİ	10
3.1 İstanbul Boğazı'nın Hidrolojisi	10
3.2 İstanbul Boğazı'nın Hidroliği	20
3.3 İstanbul Boğazı Hidrodinamiği ile İlgili Ölçümler ve Değerlendirme	26
3.3.1 Ölçüm Sistemi.....	26
3.3.2 Değerlendirme.....	30
4. SAYISAL MODELLEME VE DEĞERLENDİRME	63
4.1 Mike 3 ile Hidrodinamik Modelleme.....	63
4.1.1 Hidrodinamik Modül.....	63
4.2 Dikdörtgen Kanal.....	65
4.2.1 Kanal Geometrisi ve Hidrodinamik Parametrelerin Tanımı Değerlendirme	65
4.2.2 Değerlendirme.....	69
4.2.2.1 Su Yüzü Değişimi	69
4.2.2.2 Tuzluluğun Değişimi.....	69
4.2.2.3 Hız Alanı	73
4.3 İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik Modellemesi	77
4.3.1 Sabit Eddy Türbülans Modeli ile Modelleme	77
4.3.1.1 İstanbul Boğazı'nın Geometrisi ve Hidrodinamik Parametreler	77
4.3.1.2 Modele Ait Sayısal Parametreler	80
4.3.1.3 Değerlendirme.....	80
4.3.1.3.1 Su Yüzü Değişimi	80
4.3.1.3.2 Tuzluluk Değişimi.....	81
4.3.1.3.3 Hız Alanı	81

4.3.2	k-ε Türlülans Modeli ile Modelleme	97
4.3.2.1	Modelde Kullanılan İstanbul Boğazı Batimetri ve Hidrodinamik Parametreler	97
4.3.2.2	Modelin sayısal Parametreleri	97
4.3.2.3	Değerlendirme	101
4.3.2.3.1	Su Yüzü Değişimi.....	101
4.3.2.3.2	Tuzluluk Değişimi.....	101
4.3.2.3.3	Hız Alanı	101
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	124
5.1	Sonuçlar.....	124
5.2	Öneriler.....	126
KAYNAKLAR.....		127
EKLER.....		129
Ek 1	Yoğunluk Akımları ve Taşınım (Abraham, 1983)	130
ÖZGEÇMİŞ.....		218



SİMGE LİSTESİ

a	Toplam su derinliği
a_s	Dar ve uzun kanalın derinliği
a_1	Üst tabaka kalınlığı
a_2	Alt tabaka kalınlığı
$a_{2,cr}$	Kritik alt tabaka kalınlığı
$a_{2,e}$	Alt tabaka denge kalınlığı
$a_{2,s}$	a_2 'nin yaklaşım kanalında sahip olduğu değer
$a_{2,\infty}$	Geniş kanalda sabit derinliğe sahip alt tabaka kalınlığı
A	Kanal enkesiti
B	Liman girişinin genişliği
\bar{c}	Derinlik boyunca ortalama konsantrasyon
\bar{c}	Ortalama konsantrasyon profili
c_0	Kafa kısmına ait ilk yayılma hızı
C	Chezy katsayısını
$D_{x,A}$	Kesitsel dispersiyon katsayısı
$D_{x,h}$	Ortalama derinlik boyunca dispersiyon katsayısı
D_x, D_z	Boyuna doğrultu ve buna dik doğrultudaki dispersiv taşınım için derinlik boyunca ortalama dispersiyon katsayısı
E_k	Δt periyodunda elde edilen kinetik enerji
E_p	Δt periyodundaki potansiyel enerji kaybı
E_{prod}	Birim akışkan kütlelerinin birim zamanda ürettiği türbülans miktarı
E_{pot}	Türbülans taşınımının devamı için düşey yönde birim zamanda birim akışkan kütlelerine aktarılan potansiyel enerji miktarı
F_{r1}, F_{r2}	Alt ve üst tabakanın densimetrik Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Su derinliği
H	Karakteristik düşey uzunluk
H_0	Tabanın düşey koordinatı;
k	Taban pürüzlülüğü
K_i	i yönündeki türbülans taşınımı için eddy difüzite katsayısı
K_t	Yanal doğrultuda türbülans taşınımı için eddy difüzitesi
K_y	Düşey yönde türbülans taşınımı için eddy difüzyitesi
\bar{K}_y	K_y 'nin derinlik boyunca ortalaması
l	Karışım uzunluğu
l_i	İçsel dalgaların boyu
L_i	Bloke edilmiş tuz kamaşının uzunluğu
M	Anlık deşarj edilen kütle
n	A düzlemine dik koordinat
p	Basınç
q	Dar kanaldan geçen birim debi
q_1, q_2	Alt ve üst tabakaların birim debisi
q_{fr}	Akarsuyun birim debisi
Q_1, Q_2	Sırasıyla Karadeniz'in Boğaz girişindeki üst ve alt tabakalardaki debi değerleridir
Ri	Richardson sayısı
Re	Reynolds sayısı
R	Hidrolik yarıçap
T_{top}	A düzlemi boyunca toplam taşınım

$T_{turb,n}$	Türbülans taşınımı
T	Dalga periyodu
T_c	Kesitsel karışım zamanı, enkesit için karışım
\bar{u}_x	Taşınımın olduğu doğrultudaki zamansal ortalama hız
$u(y)$	Akım hızının yatay bileşeni
u	Akım hızının yatay bileşeninin derinlik boyunca ortalama değeri
u_1	Üst tabakaya ait yatay hız bileşeninin ortalama değeri
u_2	Alt tabakaya ait yatay hız bileşeninin ortalama değeri
u_m	Kırılan içsel dalgalar nedeniyle arayüzeyde birim genişlikte birim zamanda alt ve üst tabaka arasında transfer edilen su miktarı
u_{e1}, u_{e2}	Alt ve üst tabaka arasındaki karışım hızları
$U(y)$	Akımın yatay yöndeki hız bileşeni
\bar{u}	Akım yönündeki zamansal ortalama hız miktarı
U	Karakteristik yatay hız
\bar{u}_i	i yönündeki zamansal ortalama hız bileşeni
u_*	Kayma hızı
\bar{U}_n	n doğrultusundaki zamansal ortalama hız
$\bar{U}_n \cdot c$	Advectif taşınım
$\bar{U}_{dalg a}$	\bar{U} 'nin dalga bileşeni
\bar{U}_{akarsu}	\bar{U} 'nin akarsu bileşeni
\bar{U}_{max}	\bar{U} 'nin dalga bileşeninin maksimum değeri
\bar{U}	Boyuna doğrultudaki ortalama hız profili
\bar{u}, \bar{w}	Boyuna doğrultu ve buna dik doğrultudaki derinlik boyunca ortalama hız bileşenleri
$v(y)$	Akım hızının düşey bileşeni
$V(y)$	Akımın düşey yöndeki hız bileşeni
W	Kanal genişliği
x	Yatay koordinat
x_i	i yönündeki koordinat
x_j	j yönüne dik yöndeki koordinat
y	Düşey koordinat
z	x doğrultusuna dik doğrultudaki koordinat
Δt	Zaman aralığı
ΔE_{kin}	Kinetik enerjideki azalma miktarı
ΔE_{pot}	Potansiyel enerjideki artma miktarı
$\Delta \rho$	Karakteristik yoğunluk farkı
Δu	Arakesit üzerindeki hız farkı
$\varepsilon_{i,j}$	Kinematik eddy viskozitesi
ε_y	Düşeyde momentum alışverişinden kaynaklı eddy viskozitesi
$\bar{\varepsilon}_y$	ε_y 'nin derinlik boyunca ortalaması
$\eta_{i,j}$	Dinamik eddy viskozitesi
κ	Von Karman sabiti (=0.4)
ν	Kinematik viskozite
λ_b	Taban pürüzlülük katsayısı
λ_i	Arakesit pürüzlülük katsayısı

τ_b	Taban kayma gerilmesi
τ_i	Arakesit kayma gerilmesi
$\tau_{i,t}$	Türbülansın momentum taşınımının yarattığı arakesit kayma gerilmesi
$\tau_{x,z}$	xz düzlemindeki türbülans kayma gerilmesi
τ_i	Başlangıç periyodu
ρ	Yaklaşık aynı değere sahip olduğu farzedilen üst ve alt tabaka yoğunluğu
ρ_1	Üst tabakanın yoğunluğu
ρ_2	Alt tabakanın yoğunluğu



KISALTIMA LİSTESİ

ADP	Acoustic Doppler Profiler
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
DLH	Demiryolları, Limanlar ve Havameydanları
E	East
ENE	East North East
ESE	East South East
EU	Ötrifikasyon Modülü
IRTC	Investment Recovery Trade Corp
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
HD	Hidrodinamik Modül
LNG	Liquiefied Natural Gas
N	North
NE	North East
NNE	North North East
NNW	North North West
NW	North West
PA	Ağır Metal Modülü
psu	Practical Salinity Unit
ppt	Parts Per Thousand
S	South
SE	South East
SSE	South South East
SSW	South South West
SW	South West
UTM	The Universal Transverse Mercator
W	West
WNW	West North West
WQ	Su Kalitesi Modülü
WSW	West South West

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Homojen akım	4
Şekil 2.2	İki tabakalı akım	4
Şekil 2.3	İki tabakalı akımda hız ve yoğunluk dağılımı (Sümer vd., 981)	7
Şekil 3.1	Tuna'nın debi değişim grafiği (Sur vd., 1994)	12
Şekil 3.2	Romanya Kıyısı'ndaki Selune'de su seviyesi (Sur vd., 1994)	13
Şekil 3.3	Tuna'nın aylık ortalama debisi ve Constanza Romanya'da tuzluluk değişimi (Sur vd.,1994)	13
Şekil 3.4	Yıllık ortalama Tuna debisi ve constanza Romanya'daki tuzluluk değişimi (Sur vd., 994)	13
Şekil 3.5	Boğaz'daki tuzluluğun zaman serileri a) 1954-56 günlük ölçümler b)1967-70 günlük ölçümlerin aylık ortalamaları (Sur vd., 1994)	16
Şekil 3.6	Yüzeyden ilk 10 m'de yıllık tuzluluk ölçümü (Sur vd., 1994).....	17
Şekil 3.7	Deniz yüzeyinden ilk 10 m'de ortalama mevsimsel tuzluluk değişimi (Sur vd., 1994)	17
Şekil 3.8	Barometrik basınç (Florya ve deniz seviyesi değişimleri); Eylül-Ekim, 1993 (Özsoy vd., 1996)	18
Şekil 3.9	Yeşilköy uzun dönem rüzgar istatistiği (Yüksel vd., 2003)	18
Şekil 3.10	Sarıyer uzun dönem rüzgar istatistiği (Yüksel vd., 2003)	19
Şekil 3.11	İstanbul Boğazı geometrisi ve kontrol kesitleri (Oğuz vd., 1990).....	24
Şekil 3.12	Yeşilköy meteoroloji istasyonunun verilerine göre uzun dönem dalga istatistiği (Yüksel vd., 2003)	25
Şekil 3.13	Sarıyer meteoroloji istasyonunun verilerine göre uzun dönem dalga istatistiği(Yüksel vd., 2003).....	25
Şekil 3.14	Beton blok üzerine yerleştirilmiş ADP akıntı ölçüm cihazı (Yüksel vd., 2003) ..	26
Şekil 3.15	Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları (Yüksel vd., 2003)	27
Şekil 3.16	Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları (Yüksel vd., 2003)	27
Şekil 3.17	Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları (Yüksel vd., 2003)	28
Şekil 3.18	Ölçüm istasyonlarının yeri (Dolmabahçe, Sarayburnu, Paşalimanı, Galatasaray Üniversitesi) (Yüksel vd., 2003).....	29
Şekil 3.19	Dolmabahçe istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü (a) hız profili (b) Yönsel değişim (c) İşaretleme (Yüksel vd., 2003)	33
Şekil 3.20	Galatasaray Üniversitesi istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü (a) Hız profili (b) Yönsel değişim (Yüksel vd., 2003).....	34
Şekil 3.21	Sarayburnu İstasyonu'nda kısa süreli akıntı ölçümü (a) Hız profili (b) Yönsel değişim (Yüksel vd., 2003).....	35
Şekil 3.22	Paşalimanı İstasyonu'nda kısa süreli akıntı ölçümü (a) Hız profili (b) Yönsel değişim (Yüksel vd., 2003).....	36
Şekil 3.23	İstanbul Boğazı'nda akıntı durumu (Yüksel vd., 2003)	37
Şekil 3.24	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	38
Şekil 3.25	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	39
Şekil 3.26	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	40
Şekil 3.27	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	41
Şekil 3.28	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	42
Şekil 3.29	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	43
Şekil 3.30	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	44
Şekil 3.31	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	45
Şekil 3.32	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	46

Şekil 3.33	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	47
Şekil 3.34	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	48
Şekil 3.35	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Mayıs-Haziran) (Yüksel vd., 2003)	49
Şekil 3.35	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Mayıs-Haziran) (Devam)	50
Şekil 3.36	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Temmuz-Ağustos) (Yüksel vd., 2003)	51
Şekil 3.36	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Temmuz-Ağustos) (Devam) .	52
Şekil 3.38	Boğazın, Marmara Denizi çıkışı Sarayburnu açıklarındaki sıcaklık değişimi (Yüksel vd., 2003)	53
Şekil 3.39	Boğazın, Marmara Denizi çıkışı Sarayburnu açıkları yüzey akıntı hızının değişimi (Yüksel vd., 2003).....	53
Şekil 3.40	İstanbul Boğazı Güneyi akıntı hızlarının kesit boyunca dağılımı (İSKİ, 2001) ...	54
Şekil 3.41	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Mayıs ve Haziran rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003).....	55
Şekil 3.42	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Temmuz rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003)	56
Şekil 3.43	Florya Meteoroloji İstasyonu Mayıs ve Haziran rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003)	57
Şekil 3.44	Florya Meteoroloji İstasyonu Temmuz rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003)	58
Şekil 3.45	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Mayıs ve Haziran basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003)	59
Şekil 3.46	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Temmuz basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003).....	60
Şekil 3.47	Florya Meteoroloji İstasyonu Mayıs ve Haziran basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003)	61
Şekil 3.48	Florya Meteoroloji İstasyonu Temmuz basınç değerleri değişimi (Yüksel vd., 2003)	62
Şekil 4.1	Mike 3-kullanıcı arayüzü	64
Şekil 4.2	Dikdörtgen kanal (boykesit)	66
Şekil 4.3	1-1 Kesiti su seviyesi değişim grafiği.....	67
Şekil 4.4	1-1 ve 2-2 kesiti için başlangıçta tanımlanan tuzluluk (grid serisi olarak tanımlanmakta olup bütün noktalarda sabit 18 psu değerini almaktadır; yatay ve düşey ağ aralıkları 1 m'ye karşılık gelmektedir)	67
Şekil 4.5	1-1 Kesiti için son zaman adımı tanımlanan tuzluluk (koyu bölgedeki değerler 35 psu. gri bölgedeki değerler 18 psu'ya karşılık gelmektedir; yatay ve düşey ağ aralıkları 1 m'ye karşı gelmektedir)	68
Şekil 4.6	2-2 Kesitinde son zaman adımı tanımlanan tuzluluk değeri (grid serisi: alttaki koyu bant 35 psu, üstteki gri bant 18 psu değerini göstermektedir).....	68
Şekil 4.7	Son zaman adımı için su yüzü değişimi (kararlı hal) (yatayda her bir aralık 20 m, düşeyde ise 0.1 m'yi göstermektedir).....	70
Şekil 4.8	Kanalın orta noktasındaki düşey boyunca tuzluluk değişimi (son zaman adımı) (yatayda her bir birim 2 m'ye karşılık gelmektedir).....	70
Şekil 4.9	Kanal boykesit ortasından geçen düzlem boyunca tuzluluk değişimi (son zaman adımı) (yatayda her bir aralık 20 m'ye karşılık gelmektedir)	71
Şekil 4.10	Kanal boykesiti boyunca arakesit düzleminin ilerleyişi (son zaman adımı)...	72
Şekil 4.11	Kanal boykesiti boyunca yatay hız bileşeninin (u) değişimi (son zaman adımı)	74
Şekil 4.12	Kanalın orta noktasındaki enkesiteki v hız bileşeninin değişimi (son zaman adımı) düşeyde her bir aralık 10 dm'ye karşılık gelmektedir).....	75

Şekil 4.13	Kanal boykesiti boyunca düşey hızın (w) değişimi.....	76
Şekil 4.14	İstanbul Boğazı'nın batimetrisi.....	78
Şekil 4.15	Modele sınır şartı olarak verilen Marmara girişindeki tuzluluk grafiği	79
Şekil 4.16	Modele sınır şartı olarak verilen Karadeniz girişindeki su seviyesinin değişim grafiği.....	80
Şekil 4.17	İstanbul Boğazı'nda su yüzü değişimi.....	83
Şekil 4.18	İstanbul Boğazı tuzluluk değişimi (bloke edilmiş tuz kaması).....	84
Şekil 4.19	Sarayburnu'ndan (Model girişinden .6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (50 kat büyütülmüş))	85
Şekil 4.20	Dolmabahçe'den (Model girişinden 12 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	86
Şekil 4.21	Arnavutköy'den (Model girişinden 16 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	87
Şekil 4.22	İstinye'den (Model girişinden 25.6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (100 kat büyütülmüş))	88
Şekil 4.23	Sarıyer'den (Model girişinden 28 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	89
Şekil 4.24	İstanbul Boğazı yüzeyindeki vektörel hız dağılımı (yatay (u) ve düşey (v) hızlar).....	90
Şekil 4.25	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 20 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	91
Şekil 4.26	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 30 m derinlikte vektörel hız dağılımı	92
Şekil 4.27	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 50 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	93
Şekil 4.28	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyde bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı.....	94
Şekil 4.29	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 15 m derinlikte (u-v) vektörel hız dağılımı.....	95
Şekil 4.30	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 30 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı	96
Şekil 4.31	İstanbul Boğazı'nın batimetrisi.....	98
Şekil 4.32	Modele sınır şartı olarak verilen Marmara girişindeki tuzluluk grafiği	99
Şekil 4.33	Modele sınır şartı olarak verilen Karadeniz girişindeki su seviyesi değişim grafiği.....	100
Şekil 4.34	İstanbul Boğazı'nda su yüzü değişimi	104
Şekil 4.35	İstanbul Boğazı tuzluluk değişimi	105
Şekil 4.36	Sarayburnu'ndan (Model girişinden 9 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	106
Şekil 4.37	Dolmabahçe'den (model girişinden 9.6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	107
Şekil 4.38	Arnavutköy'den (Model girişinden 18.5 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	108
Şekil 4.39	İstinye'den (Model girişinden 24.5 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	109
Şekil 4.40	Sarıyer'den (Model girişinden 30.5 km) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	110
Şekil 4.41	İstanbul Boğazı yüzeyindeki vektörel hız dağılımı (yatay (u) ve düşey (v) hızlar).....	111
Şekil 4.42	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 20 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	112
Şekil 4.43	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 30 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	113
Şekil 4.44	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 50 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	114
Şekil 4.45	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyde (u-v) vektörel hız dağılımı	115
Şekil 4.46	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 15 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı	116

Şekil 4.47	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 30 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı	117
Şekil 4.48	Boğaz'daki Güney Bölgesi'ndeki (x=30-80; y=80-110 ve z=106 (yüzey)) bileşke yatay (u-v) hızları	118
Şekil 4.49	x=60 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	119
Şekil 4.50	x=62 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	120
Şekil 4.51	x=64 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	121
Şekil 4.52	x=66 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	122
Şekil 4.53	x=68 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	123



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Karadeniz'in su kaynakları (km ³ /yıl) (Tolmazin, 1987).....	11
Çizelge 3.2	Akıntı ölçümleri.....	22
Çizelge 3.3	Debiler	22
Çizelge 4.1	Dikdörtgen kanalın geometrik özellikleri.....	66
Çizelge 4.2	Dikdörtgen kanal için tanımlanan sınır şartları	66
Çizelge 4.3	Sayısal parametreler.....	69
Çizelge 4.4	Modelin geometrik özellikleri	79
Çizelge 4.5	Modelle ilgili tanımlanan sınır şartları	79
Çizelge 4.6	Modelle ilgili sayısal parametreler	81
Çizelge 4.7	Modelin geometrik özellikleri	99
Çizelge 4.8	Modelle ilgili tanımlanan sınır şartları	99
Çizelge 4.9	Modelle ilgili sayısal parametreler	100



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Homojen akım	4
Şekil 2.2	İki tabakalı akım	4
Şekil 2.3	İki tabakalı akımda hız ve yoğunluk dağılımı (Sümer vd., 981)	7
Şekil 3.1	Tuna'nın debi değişim grafiği (Sur vd., 1994)	12
Şekil 3.2	Romanya Kıyısı'ndaki Selune'de su seviyesi (Sur vd., 1994)	13
Şekil 3.3	Tuna'nın aylık ortalama debisi ve Constanza Romanya'da tuzluluk değişimi (Sur vd.,1994)	13
Şekil 3.4	Yıllık ortalama Tuna debisi ve constanza Romanya'daki tuzluluk değişimi (Sur vd., 994)	13
Şekil 3.5	Boğaz'daki tuzluluğun zaman serileri a) 1954-56 günlük ölçümler b)1967-70 günlük ölçümlerin aylık ortalamaları (Sur vd., 1994)	16
Şekil 3.6	Yüzeyden ilk 10 m'de yıllık tuzluluk ölçümü (Sur vd., 1994).....	17
Şekil 3.7	Deniz yüzeyinden ilk 10 m'de ortalama mevsimsel tuzluluk değişimi (Sur vd., 1994)	17
Şekil 3.8	Barometrik basınç (Florya ve deniz seviyesi değişimleri); Eylül-Ekim, 1993 (Özsoy vd., 1996)	18
Şekil 3.9	Yeşilköy uzun dönem rüzgar istatistiği (Yüksel vd., 2003)	18
Şekil 3.10	Sarıyer uzun dönem rüzgar istatistiği (Yüksel vd., 2003)	19
Şekil 3.11	İstanbul Boğazı geometrisi ve kontrol kesitleri (Oğuz vd., 1990).....	24
Şekil 3.12	Yeşilköy meteoroloji istasyonunun verilerine göre uzun dönem dalga istatistiği (Yüksel vd., 2003)	25
Şekil 3.13	Sarıyer meteoroloji istasyonunun verilerine göre uzun dönem dalga istatistiği(Yüksel vd., 2003).....	25
Şekil 3.14	Beton blok üzerine yerleştirilmiş ADP akıntı ölçüm cihazı (Yüksel vd., 2003) ..	26
Şekil 3.15	Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları (Yüksel vd., 2003)	27
Şekil 3.16	Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları (Yüksel vd., 2003)	27
Şekil 3.17	Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları (Yüksel vd., 2003)	28
Şekil 3.18	Ölçüm istasyonlarının yeri (Dolmabahçe, Sarayburnu, Paşalimanı, Galatasaray Üniversitesi) (Yüksel vd., 2003).....	29
Şekil 3.19	Dolmabahçe istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü (a) hız profili (b) Yönsel değişim (c) İşaretleme (Yüksel vd., 2003)	33
Şekil 3.20	Galatasaray Üniversitesi istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü (a) Hız profili (b) Yönsel değişim (Yüksel vd., 2003).....	34
Şekil 3.21	Sarayburnu İstasyonu'nda kısa süreli akıntı ölçümü (a) Hız profili (b) Yönsel değişim (Yüksel vd., 2003).....	35
Şekil 3.22	Paşalimanı İstasyonu'nda kısa süreli akıntı ölçümü (a) Hız profili (b) Yönsel değişim (Yüksel vd., 2003).....	36
Şekil 3.23	İstanbul Boğazı'nda akıntı durumu (Yüksel vd., 2003)	37
Şekil 3.24	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	38
Şekil 3.25	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	39
Şekil 3.26	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	40
Şekil 3.27	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	41
Şekil 3.28	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	42
Şekil 3.29	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	43
Şekil 3.30	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	44
Şekil 3.31	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	45
Şekil 3.32	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	46

Şekil 3.33	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	47
Şekil 3.34	Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003).....	48
Şekil 3.35	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Mayıs-Haziran) (Yüksel vd., 2003).....	49
Şekil 3.35	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Mayıs-Haziran) (Devam).....	50
Şekil 3.36	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Temmuz-Ağustos) (Yüksel vd., 2003).....	51
Şekil 3.36	Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Temmuz-Ağustos) (Devam).....	52
Şekil 3.38	Boğazın, Marmara Denizi çıkışı Sarayburnu açıklarındaki sıcaklık değişimi (Yüksel vd., 2003).....	53
Şekil 3.39	Boğazın, Marmara Denizi çıkışı Sarayburnu açıkları yüzey akıntı hızının değişimi (Yüksel vd., 2003).....	53
Şekil 3.40	İstanbul Boğazı Güneyi akıntı hızlarının kesit boyunca dağılımı (İSKİ, 2001)...	54
Şekil 3.41	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Mayıs ve Haziran rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003).....	55
Şekil 3.42	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Temmuz rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003).....	56
Şekil 3.43	Florya Meteoroloji İstasyonu Mayıs ve Haziran rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003).....	57
Şekil 3.44	Florya Meteoroloji İstasyonu Temmuz rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003).....	58
Şekil 3.45	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Mayıs ve Haziran basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003).....	59
Şekil 3.46	Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Temmuz basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003).....	60
Şekil 3.47	Florya Meteoroloji İstasyonu Mayıs ve Haziran basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003).....	61
Şekil 3.48	Florya Meteoroloji İstasyonu Temmuz basınç değerleri değişimi (Yüksel vd., 2003).....	62
Şekil 4.1	Mike 3 kullanıcı arayüzü.....	64
Şekil 4.2	Dikdörtgen kanal (boykesit).....	66
Şekil 4.3	1-1 Kesiti su seviyesi değişim grafiği.....	67
Şekil 4.4	1-1 ve 2-2 kesiti için başlangıçta tanımlanan tuzluluk (grid serisi olarak tanımlanmakta olup bütün noktalarda sabit 18 psu değerini almaktadır; yatay ve düşey ağ aralıkları 1 m'ye karşılık gelmektedir).....	67
Şekil 4.5	1-1 Kesiti için son zaman adımı tanımlanan tuzluluk (koyu bölgedeki değerler 35 psu. gri bölgedeki değerler 18 psu'ya karşılık gelmektedir; yatay ve düşey ağ aralıkları 1 m'ye karşı gelmektedir).....	68
Şekil 4.6	2-2 Kesitinde son zaman adımı tanımlanan tuzluluk değeri (grid serisi: alttaki koyu bant 35 psu, üstteki gri bant 18 psu değerini göstermektedir).....	68
Şekil 4.7	Son zaman adımı için su yüzü değişimi (kararlı hal) (yatayda her bir aralık 20 m, düşeyde ise 0.1 m'yi göstermektedir).....	70
Şekil 4.8	Kanalın orta noktasındaki düşey boyunca tuzluluk değişimi (son zaman adımı) (yatayda her bir birim 2 m'ye karşılık gelmektedir).....	70
Şekil 4.9	Kanal boykesit ortasından geçen düzlem boyunca tuzluluk değişimi (son zaman adımı) (yatayda her bir aralık 20 m'ye karşılık gelmektedir).....	71
Şekil 4.10	Kanal boykesiti boyunca arakesit düzleminin ilerleyişi (son zaman adımı)...	72
Şekil 4.11	Kanal boykesiti boyunca yatay hız bileşeninin (u) değişimi (son zaman adımı).....	74
Şekil 4.12	Kanalın orta noktasındaki enkesiteki v hız bileşeninin değişimi (son zaman adımı) düşeyde her bir aralık 10 dm'ye karşılık gelmektedir).....	75

Şekil 4.13	Kanal boykesiti boyunca düşey hızın (w) değişimi.....	76
Şekil 4.14	İstanbul Boğazı'nın batimetrisi.....	78
Şekil 4.15	Modele sınır şartı olarak verilen Marmara girişindeki tuzluluk grafiği	79
Şekil 4.16	Modele sınır şartı olarak verilen Karadeniz girişindeki su seviyesinin değişim grafiği.....	80
Şekil 4.17	İstanbul Boğazı'nda su yüzü değişimi.....	83
Şekil 4.18	İstanbul Boğazı tuzluluk değişimi (bloke edilmiş tuz kaması).....	84
Şekil 4.19	Sarayburnu'ndan (Model girişinden .6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (50 kat büyütülmüş))	85
Şekil 4.20	Dolmabahçe'den (Model girişinden 12 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	86
Şekil 4.21	Arnavutköy'den (Model girişinden 16 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	87
Şekil 4.22	İstinye'den (Model girişinden 25.6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (100 kat büyütülmüş))	88
Şekil 4.23	Sarıyer'den (Model girişinden 28 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	89
Şekil 4.24	İstanbul Boğazı yüzeyindeki vektörel hız dağılımı (yatay (u) ve düşey (v) hızlar).....	90
Şekil 4.25	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 20 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	91
Şekil 4.26	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 30 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	92
Şekil 4.27	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 50 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	93
Şekil 4.28	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyde bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı.....	94
Şekil 4.29	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 15 m derinlikte (u-v) vektörel hız dağılımı.....	95
Şekil 4.30	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 30 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı	96
Şekil 4.31	İstanbul Boğazı'nın batimetrisi.....	98
Şekil 4.32	Modele sınır şartı olarak verilen Marmara girişindeki tuzluluk grafiği	99
Şekil 4.33	Modele sınır şartı olarak verilen Karadeniz girişindeki su seviyesi değişim grafiği.....	100
Şekil 4.34	İstanbul Boğazı'nda su yüzü değişimi.....	104
Şekil 4.35	İstanbul Boğazı tuzluluk değişimi	105
Şekil 4.36	Sarayburnu'ndan (Model girişinden 9 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	106
Şekil 4.37	Dolmabahçe'den (model girişinden 9.6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş)).....	107
Şekil 4.38	Arnavutköy'den (Model girişinden 18.5 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş)).....	108
Şekil 4.39	İstinye'den (Model girişinden 24.5 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	109
Şekil 4.40	Sarıyer'den (Model girişinden 30.5 km) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))	110
Şekil 4.41	İstanbul Boğazı yüzeyindeki vektörel hız dağılımı (yatay (u) ve düşey (v) hızlar).....	111
Şekil 4.42	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 20 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	112
Şekil 4.43	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 30 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	113
Şekil 4.44	İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 50 m derinlikte vektörel hız dağılımı.....	114
Şekil 4.45	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyde (u-v) vektörel hız dağılımı	115
Şekil 4.46	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 15 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı	116

Şekil 4.47	Dolmabahçe Bölgesi'nde yüzeyden 30 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı	117
Şekil 4.48	Boğaz'daki Güney Bölgesi'ndeki (x=30-80; y=80-110 ve z=106 (yüzey)) bileşke yatay (u-v) hızları	118
Şekil 4.49	x=60 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	119
Şekil 4.50	x=62 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	120
Şekil 4.51	x=64 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	121
Şekil 4.52	x=66 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	122
Şekil 4.53	x=68 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı	123



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Karadeniz'in su kaynakları (km ³ /yıl) (Tolmazin, 1987).....	11
Çizelge 3.2	Akıntı ölçümleri.....	22
Çizelge 3.3	Debiler	22
Çizelge 4.1	Dikdörtgen kanalın geometrik özellikleri.....	66
Çizelge 4.2	Dikdörtgen kanal için tanımlanan sınır şartları	66
Çizelge 4.3	Sayısal parametreler.....	69
Çizelge 4.4	Modelin geometrik özellikleri	79
Çizelge 4.5	Modelle ilgili tanımlanan sınır şartları	79
Çizelge 4.6	Modelle ilgili sayısal parametreler	81
Çizelge 4.7	Modelin geometrik özellikleri	99
Çizelge 4.8	Modelle ilgili tanımlanan sınır şartları	99
Çizelge 4.9	Modelle ilgili sayısal parametreler	100



ÖNSÖZ

Lisans, yüksek lisans ve özellikle tez çalışmam boyunca sahip olduğum tecrübe, bilgi ve desteği benden esirgemeyen, bu niteliklerine gelecekte de fazlasıyla ihtiyaç duyacağım hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın Yüksel'e teşekkür ederim.

Lisans, yüksek lisans ve tez çalışmam sırasında ihtiyaç duyduğum bilgi ve desteği benden esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Esin Çevik'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında değerli bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Dr. Işıkhan Güler, Doç. Dr. Ahmet Cevdet Yalçın ve İnş. Müh. Merih Özcan'a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, desteklerinden dolayı YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, DLH Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı, Avrasya Marmaray Konsorsiyumu ve DLH 4. Bölge Müdürü Dr. Haluk İbrahim Özmen'e teşekkür ederim.

İki senedir aynı çalışma ortamını paylaştığım ve desteklerini benden esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Lisans, Yüksek lisans ve tez çalışmamın sıkıntılı dönemlerinde manevi desteği benim için can simidi olan sevgili dostum Kubilay Cihan'a ve ailem olarak bildiğim ailesine tüm kalbimle teşekkür ederim.



ÖZET

İki tabakalı akım, akım alanı içerisinde farklı yoğunluğa sahip iki akışkan akımının bulunduğu akım sistemidir. İki tabaka birbirinden bir arakesit düzlemiyle ayrılmaktadır. Arakesit düzlemi her iki tabakaya ait akım ve akışkan özelliklerinin iç içe geçtiği, ani değişimlerin meydana gelebildiği, tabakalar arasında üç boyutlu momentum alış verişinin ve çok güçlü türbülans yapısının olduğu fiziksel bir hattır. Arakesite ait fiziksel ve geometrik özelliklerin belirlenmesi her şeyden önce alt ve üst tabaka akımı üzerinde etkili olan fiziksel parametrelerin ve bu parametrelere ait sayısal değerlerin doğru olarak belirlenmesine bağlıdır.

Bu çalışmada iki tabakalı bir akım sistemine sahip olan İstanbul Boğazı'nın üç boyutlu modelleme yapabilen Mike 3 paket programı yardımıyla modellenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla öncelikle karmaşık bir geometriye sahip İstanbul Boğazı'na nazaran oldukça basit dikdörtgen bir kanalda iki tabakalı akım modellenmiştir. Model sonuçlarının iki tabakalı akım şemasını doğru yansıttığı ve uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat İstanbul Boğazı üniform dikdörtgen bir kanalla kıyaslanamayacak kadar karmaşık bir geometriye ve üç boyutlu güçlü bir türbülans yapısına sahiptir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak Boğaz'ın sahip olduğu geometride Mike 3'ün gerektirdiği bazı basitleştirmeler yapılarak program sırasıyla sabit eddy ve k-ε türbülans modelleri kullanılarak oluşturulmuştur. k-ε türbülans modelinin İstanbul Boğazı'nın karmaşık akım yapısını yeterince benzeştirdiği görülmüştür. Modellerin kalibrasyonu yapılmamıştır. Çünkü çalışma kapsam olarak öncelikle İstanbul Boğazı'nın iki tabakalı üç boyutlu akım yapısını en iyi benzeştiren türbülans modelini araştırmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Tabakalı akım, yoğunluk akımı, İstanbul Boğazı, türbülans model, Mike 3

ABSTRACT

Stratified flows is a flow system which has two different flows with different density in flow area. Layers are separated from each other by an interval plane. Interval plane is a physical line on which properties of flow and fluid go through each other and there can occur sudden changing and momentum transfer between layers with strong three dimensional turbulence structure. For determining physical and geometric properties of interval plane, essentially, parameters which affect lower and upper layer flow and their values must be determined with sufficient accuracy.

In this work, three dimensional hydrodynamic modelling of Bosphorus which shows typical behaviours of stratified flows was done with Mike 3 package program. Mike 3 is capable on three dimensional modelling. To do that, first, an uniform rectangular channel which has simple geometry compare with Bosphorus was used for modelling. Model results gave very similar values and flow pattern to a typical stratified flow. But Bosphorus has very complex geometry and efficient turbulence motion in all dimensions different from an uniform rectangular channel. That's why, after doing some simplifications on Bosphorus bathymetry required Mike 3, program was run using Mike 3 constant eddy and k- ϵ turbulence model respectively. It was seen that k- ϵ turbulence model gave more sophisticated results similar to Bosphorus flow pattern. These models have not calibrated yet. Because this work's aim is to investigate most appropriate turbulence model for the strait

Keywords: Stratified flow, density current, Bosphorus, turbulence model, Mike 3

1. GİRİŞ

İstanbul Boğazı, Marmara Denizi ve Çanakkale Boğazı genel olarak “Türk Boğazları” olarak anılmaktadırlar. Boğazlar Karadeniz’i Akdeniz’e bağlaması bakımından tarihi ve siyasi önemi olan su yollarıdır. Avrupa ve Asya’yı ayıran deniz sınırı olmakla beraber, aynı zamanda iki kıtayı birbirine yaklaştırması bakımından coğrafi ve stratejik değer de taşırlar. Karadeniz’i Akdeniz’e ve dolayısıyla Karadeniz’i diğer açık denizlere bağlayan Boğazların tek deniz geçidi olmaları nedeniyle Türkiye’nin hayati haklarını ve savunmasını göz önünde bulundurmamak kaçınılmaz bir zorunluluktur. Çünkü Boğazlar Türkiye’nin hayat damarıdır, kalbidir ve varlığı ile yakından ilgilidir.

20 Temmuz 1936’da imzalanan Montreux Boğazlar Sözleşmesi ile Türkiye kendi gücüne dayanarak Boğazlar üzerinde savunmasını yapabilme gücüne kavuşmuştur.

Bu iki boğazdan İstanbul Boğazı gerek Türkiye’nin gerekse daha önceki uygarlıkların siyasi, kültürel, ticari ve sanayi başkenti olan İstanbul’un tam kalbinden geçmesi bakımından her çağda özel öneme sahip bir su yolu olmuştur.

İstanbul Boğazı üzerine yapılmış sayısız sanatsal ve edebi çalışmayla kültürel yaşamda hakettiği yeri almasına karşın, teknik ve mühendislik çalışmalar açısından aynı şeyi söylemek mümkün değildir. İstanbul Boğazı üzerine yapılmış teknik çalışmalar yeterli olmaktan uzaktır. Yine İstanbul Boğazı üzerine yapılmış literatür çalışmaları ve yayınlar içinde benzeri durum söz konusudur. İstanbul ve Türkiye’nin can damarı bu su yolunun sahip olduğu büyük ekonomik potansiyeli ülke ekonomisine kazandırmak taşıdığı ekonomik anlamdan öte ülkemiz açısından siyasi, kültürel ve stratejik olarak da anlam taşımaktadır.

İstanbul Boğazı’nda halihazırda var olan (rıhtımlar, yanaşma yapıları vs.) veya proje aşamasındaki mühendislik yapılarının (tüp geçit) fayda-maliyet açısından ülke ekonomisine sunacağı katkı Boğaz’ın fiziksel ve mühendislik özelliklerinin doğru ve detaylı bir tanımıyla mümkün görünmektedir.

Yapımına 2004 ilkbaharında başlanan Marmaray Boğaz tüp geçiş projesi İstanbul Boğazı’nda bugüne kadar yapılmış en büyük mühendislik yapısı olacaktır. Ayrıca bu proje Dünya üzerinde de yapılmış en büyük projelerden biri olmaktadır. İstanbul Boğazı tüp geçiş inşaatı türünün ilk örneği olmamasına karşın, İstanbul Boğazı gibi oldukça karmaşık bir akım yapısına sahip su yolu üzerinde inşaa ediliyor olması onu türleri içerisinde daha şimdiden oldukça özel bir yere koymaktadır. Tüplerin en uygun akım koşullarında süratli ve güvenli bir şekilde yerleştirilmeleri İstanbul Boğazı’ndaki bu karmaşık akım yapısının doğru ve iyi anlaşılmasına bağlıdır.

Bu amaçla İstanbul Boğazı'nın konumu geometrisinin özellikleri ve bu geometrinin meydana getirdiği akım yapısı üzerinde etkili olan parametre ve süreçler aşağıda ana hatlarıyla verilmiştir.

İstanbul Boğazı Karadeniz ile Marmara Deniz'i arasında uzanan, genişliği uzunluğuna göre oldukça küçük bir boğazdır. Boğaz'ın uzunluğu yaklaşık 31 km olup bir akarsu gibi menderesler çizer. Genişliği en dar kesitinde 0.6 km, yüzeyde ortalama 1.3 km olup dünya üzerindeki boğazlar arasında genişlik/uzunluk oranı en küçük olanlardan biridir. Boğaz boyunca derinlik önemli değişimler göstermektedir. Ortalama derinlik 36 m olmakla beraber derinliğin 100 m'yi aştığı çukurlar da mevcuttur. Boğaz'ın güney girişinin 2 km kadar kuzeyinde derinliğin 28 m ile 34 m arasında değiştiği bölgede bir eşik bulunmaktadır. Karadeniz çıkışında ise Boğaz'ın ortasında dar ve derin bir kanal bulunmaktadır.

İstanbul Boğazı iki tabakalı bir akım sisteminden oluşmaktadır. Bunlar Karadeniz'den Marmara'ya doğru güney yönündeki üst akıntı ve Marmara'dan Karadeniz'e doğru kuzey yönündeki alt akıntıdır. Bu akım sistemini oluşturan esas mekanizma Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki farklı hidrolojik şartlardır.

Karadeniz'e dökülen akarsuların getirdiği su ile bu deniz üzerine düşen yağışın toplamı Karadeniz'de meydana gelen yıllık buharlaşmadan fazladır. Meydana gelen bu su fazlalığı Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru İstanbul Boğazı boyunca dış akış olarak dengelenmektedir. Karadeniz'deki su fazlalığının Marmara Denizi ile aralarında meydana getirdiği kot farkı İstanbul Boğazı boyunca üst tabaka akımını oluşturan en önemli zorlayıcı etkidir.

Öte yandan Marmara'daki buharlaşma Karadeniz'e göre fazla olduğu için bu iki iç deniz arasında bir tuzluluk, dolayısıyla da yoğunluk farkı meydana gelmektedir. Tuzluluk değerleri zaman içinde değişmekle birlikte Marmara Denizi'nin tuzluluğu ortalama % 3.8, Karadeniz'in tuzluluğu ise % 1.7 kadardır. Dolayısıyla yoğunluğu daha fazla olan Marmara'nın suları bir yoğunluk akımı halinde alttan Karadeniz'e doğru hareket etmekte , böylece iki tabakalı bir akım sistemi meydana gelmektedir. Söz konusu iki tabakalı akım sisteminde arayüzeyin konumu alt ve üst tabaka akımlarının debilerine bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada iki tabakalı akımları üç boyutlu olarak modelleyebilen Mike 3 paket programı yardımıyla iki tabakalı bir akım olan İstanbul Boğazı'nın bilgisayar yardımıyla modelinin kurulması ve elde edilen sonuçların saha verileriyle (ölçüm sonuçları) karşılaştırılarak İstanbul Boğazı'na ait en gerçekçi modelin kurulması amaçlanmıştır. Bu tezin ekler kısmında Abraham'ın yoğunluk akımlarıyla ilgili çalışmasına yer verilmiştir.

2. YOĞUNLUK AKIMLARININ HİDROLİĞİ

2.1 Yoğunluk Akımları

Akışkanın yoğunluğundaki değişimden veya akışkanın sahip olduğu yoğunluk farklarından dolayı yerçekimi etkisiyle meydana gelen akışkan hareketleri “*homojen olmayan akımlar*”, “*tabakalı akımlar*” veya “*yoğunluk akımları*” olarak adlandırılmaktadır. Bir akışkan akımında yoğunluk farkının oluşmasını başlıca üç faktör etkilemektedir.

1. Tuzluluk farkı
2. Sıcaklık farkı
3. Basınç farkı

Yoğunluk akımları aşağıdaki belli başlı özelliklere sahiptirler;

1. Üç boyutlu akım
2. Akımın herhangi bir bölgesindeki yoğunluk farkı
3. Oluşumuna sebep oldukları tabakalarda hız farklılığına ve hidrostatik basınç gradyanından sapma.

2.2 Taşınım Türleri

Yoğunluk akımlarında akım ve/veya akışkan özelliklerinin taşınımı iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar:

Advektif Taşınım (Konvektif Taşınım): Akım alanı içerisinde, maddeler akıntı doğrultusunda hareket ederler. İşte bu tür akıntı etkisiyle meydana gelen taşınım advektif taşınım denir. Birim genişlik için advektif taşınım miktarı akıntı hızı ile dikkate alınan noktadaki madde konsantrasyonunun çarpımına eşit olmaktadır. Aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir.

$$T_{adv,x} = \bar{u}_x \bar{c} \quad (2.1)$$

burada

$T_{adv,x}$: taşınımın olduğu yönde birim genişlikte meydana gelen advektif taşınım miktarı

\bar{u}_x : taşınımın olduğu doğrultudaki zamansal ortalama hız

\bar{c} : zamansal ortalama konsantrasyon

Türbülans (Dispersiv) Taşınım: Akıntı yönü dışındaki diğer yönlerde de madde taşınımına neden olan esas mekanizma, türbülansın yarattığı eddy hareketidir. Eddy hareketinin meydana getirdiği madde taşınımına türbülans taşınımı denmektedir. Teorik olarak, eddy hareketi göz önüne alınan maddenin konsantrasyonunu azaltacak şekilde her yönde meydana

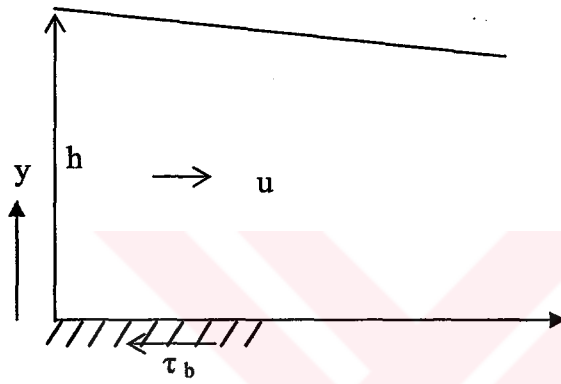
gelebilmektedir. Türbülans taşınımının miktarı genellikle dikkate alınan maddenin konsantrasyon gradyanına bağlı olarak değişim göstermektedir.

$$T_{turb,x} \propto \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (2.2)$$

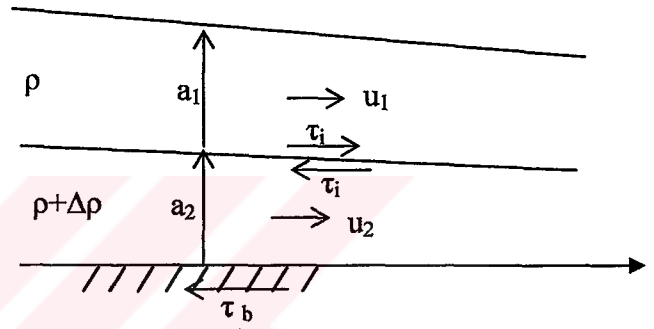
burada

$T_{turb,x}$: referans düzlemine dik birim genişlik boyunca akım doğrultusundaki türbülans taşınımı miktarını göstermektedir.

Homojen ve Tabakalı Akım Şemaları; Şekil 2.1’de homojen akım yapısı, Şekil 2.2’de ise iki tabakalı akım yapısına ait tipik özellikler gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Homojen akım



Şekil 2.2 İki tabakalı akım

2.3 Homojen ve Tabakalı Akım Teorisinde Kullanılan Temel Denklemler

Süreklilik Denklemi :

Homojen Akım:

$$\frac{\partial u(y)}{\partial x} + \frac{\partial v(y)}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

$u(y)$: akım hızının yatay bileşeni

$v(y)$: akım hızının düşey bileşeni

Su derinliği cinsinden:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

u : akım hızının yatay bileşeninin derinlik boyunca ortalama değeri

h : su derinliği

Tabakalı Akım:

Üst Tabaka için:

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} + \frac{\partial a_1 u_1}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

u_1 : üst tabakaya ait yatay hız bileşeninin ortalama değeri

a_1 : üst tabaka kalınlığı

Alt Tabaka için:

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} + \frac{\partial a_2 u_2}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

u_2 : alt tabakaya ait yatay hız bileşeninin ortalama değeri

a_2 : alt tabaka kalınlığı

Hareket Denklemi :

Homojen Akım:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\tau_b}{\rho h} + gS \quad (2.7)$$

τ_b : taban kayma gerilmesi

S : taban eğimi

Tabakalı Akım

Üst Tabaka için :

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \frac{\partial(a_1 + a_2)}{\partial x} = -\frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} + gS \quad (2.8)$$

Alt Tabaka için :

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \rho \frac{\partial(a_1 + a_2)}{\partial x} - \frac{\Delta \rho}{\rho_2} g \frac{\partial a_1}{\partial x} = -\frac{(\tau_b - \tau_i)}{\rho_2 a_2} + gS \quad (2.9)$$

burada

τ_i : arayüzey kayma gerilmesi

τ_b : taban kayma gerilmesidir.

2.4 Arayüzey Hidrodinamiği

Arayüzey fiziksel ve geometrik olmak üzere iki anlam taşımaktadır. Arayüzey alt ve üst tabaka akımını birbirinden ayıran fiziksel bir hattır. Aynı zamanda alt ve/veya üst tabaka kalınlığının konumla değişimini göstermesi bakımından da geometrik anlam taşımaktadır.

Arayüzey Kayma Gerilmesi:

$$\tau_i = \tau_{i,t} + \rho u_m \Delta u \quad (2.10)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır (Abraham, 1983)

τ_i : arayüzey kayma gerilmesi

$\tau_{i,t}$: türbülansın momentum taşınımının yarattığı arayüzey kayma gerilmesi

u_m : kırılan içsel dalgalar nedeniyle arayüzeyde birim genişlikte birim zamanda alt ve

üst tabaka arasında transfer edilen su miktarı

Δu : arayüzey üzerindeki hız farkı

ρ :birbirlerine yakın değerlere sahip alt veya üst tabaka yoğunluğu ($\Delta\rho/\rho \ll 1$)

Yoğunluk Froude Sayısı

Homojen akımda Froude sayısı u/\sqrt{gh} ifadesiyle verilmektedir. Burada u akımın yatay hız bileşeni, h ise su derinliğidir. Benzer şekilde tabakalı akım için Froude sayısı da (2.11) ifadesiyle verilmektedir.

$$Fr = Fr_1 + Fr_2 \quad (2.11)$$

$$Fr_1^2 = \frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} ga_1} \quad \text{ve} \quad Fr_2^2 = \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} ga_2} \quad (2.12)$$

Fr_1, Fr_2 : alt ve üst tabakanın densimetrik Froude sayısı

İrdelemeler:

- Haliç akımlarında haliç girişinde oluşan kritik kesitte (a_1 'in kritik ve a_2 'nin maksimum değer aldığı kesit) ve daha genel olarak iki tabakalı akımın toplam derinliğinin minimum olduğu kesitte (genişlik değişken ise genişliğin de minimum olduğu kesit) (2.11) ifadesi aşağıdaki sonucu vermektedir (Sümer vd.,1981):

$$Fr_1^2 + Fr_2^2 = 1 \quad (2.13)$$

- Tabakalı akımda nehir rejimi için $Fr_1 + Fr_2 < 1$, sel rejimi için $Fr_1 + Fr_2 > 1$ olmaktadır (Abraham, 1983).

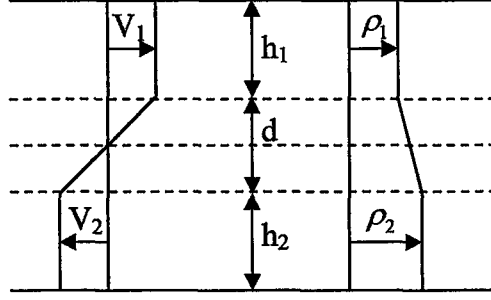
(2.13) denklemi aşağıdaki sonuçlara işaret etmektedir:

1) Arakesit düzlemi belirli bir mesafe boyunca eğimli olacak şekilde uzanmaktadır (genelde ise yatay olma eğilimindedir).

2) Uzun dalgalardan kaynaklı hız sifıra eşittir.

Arayüzeyin Karakteristikleri:

Gerçekte iki tabaka arasında bir arayüzey değil bir ara tabaka bulunduğunu kabul etmek gerekir. Şekil 2.3'de aratabakalı model için hız ve tuzluluk profilleri gösterilmiştir



Şekil 2.3 İki tabakalı akımda hız ve yoğunluk dağılımı (Sümer vd., 1981)

Böyle bir ara tabakanın varlığı iç dalgaların kararsızlığından doğan karışıma engel olduğu gibi türbülans dolayısıyla meydana gelen karışımın da şiddetini azaltmaktadır.

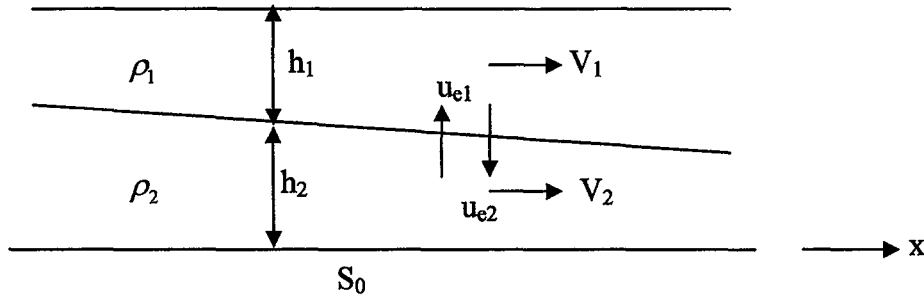
Richardson Sayısı:

Tabakalı akımda her bir tabakadaki toplam enerjinin karışımı sağlamak (karışım için gerekli potansiyel enerjiyi karşılamak) için kullanılan yüzde Richardson sayısı (Ri) olarak tanımlanmaktadır. Üst ve alt tabakanın Richardson sayıları şu ifadelerle hesaplanabilir:

$$Ri_1 = \frac{(\rho_2 - \rho_1)g \frac{h_1}{2} u_{e1}}{\tau_i V_1} \quad (2.14)$$

$$Ri_2 = \frac{(\rho_2 - \rho_1)g \frac{h_2}{2} u_{e2}}{\tau_i V_2 + \beta \tau_0 V_2} \quad (2.15)$$

Burada u_{e1} ve u_{e2} alt ve üst tabaka arasındaki karışım hızları (arayüzeyin birim alanından birim zamanda yukarıya ve aşağıya doğru geçen debiler) ve β , 1 den küçük bir katsayı olup karışım bölgesinden uzakta (tabanda) yaratılan türbülans enerjisinin karışıma katkısının daha az olduğunu göstermektedir (Sümer vd., 1981).



Şekil 2.4 Bir açık kanalda tek boyutlu, kararlı iki tabakalı akım şeması (Sümer vd., 1981)

2.5 Tabakalı Bir Akım Türü: Boğaz Akımları

Boğazlar iki iç denizi veya bir iç deniz ile okyanusu birbirine bağlayan yoğunluk akımına ait özellikler gösteren su yollarıdır. Boğaz akımlarında iki tabaka mevcuttur. Su, üstteki tabakada, az tuzlu denizden çok tuzlu denize; alttaki tabakada ise çok tuzlu denizden az tuzlu denize akmaktadır. Boğaz akımının önemli özellikleri şunlardır:

- Boğaz akımlarında bileşke akımı hidrolojik durum kontrol etmektedir (akım; beslenmesi az kaybı çok olan denize doğrudur)
- Üst tabaka akımı büyük oranda rüzgar tarafından kontrol edilmektedir.
- Alt tabaka akımı önemli ölçüde taban pürüzlülüğünün etkisindedir.

Boğaz akımını iki parametre etkilemektedir. Bunlar:

1. İç denizlerin hidrolojik durumu (yağışlar, akarsu debileri, buharlaşma)
2. Boğazın batimetrik özellikleri (şekli, genişliği, derinliği ve pürüzlülüğü)

2.6 Bir Boğaz Akımı Örneği-İstanbul Boğazı

İstanbul Boğazı Marmara Denizi ile Karadeniz'i birbirine bağlayan bir su yoludur. Genişliği 0.7 ile 3.5 km arasında değişmekte olup yüzeydeki ortalama genişliği 1.3 km dir. İstanbul Boğazı'nın genişliği derinliği boyunca kademeli olarak azalmakta olup 50 m derinlikteki genişliği 500 m ye kadar düşmektedir. Derinliği 30 ile 100 m arasında değişmektedir (Özsoy vd., 1988 ve 1999).

2.6.1 Hidrolik Özellikleri:

İstanbul Boğazı esas olarak iki tabakalı bir akım sisteminden oluşmaktadır. Bunlar:

- Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su kotu farkından kaynaklı güney yönündeki üst akıntı
- Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki yoğunluk (tuzluluk, sıcaklık) farkından kaynaklı kuzey yönündeki alt akıntı

2.6.2 Hidrolojik Özellikleri:

İstanbul Boğazı büyük oranda Karadeniz'in etkisini taşıyan çok fazla su hareketinin olduğu akıntılı bir rejime sahiptir. Hidrolojik şartlarını Karadeniz'in net tatlı su kaynakları, barometrik basınç farklılıkları ve rüzgar yapısı belirlemektedir (Özsoy vd., 1996). Karadeniz'in en önemli tatlı su kaynakları kuzey batısındaki Tuna, Dinyeper ve Dinyester nehirleridir. Karadeniz'e yönelik tatlı su akışının neredeyse yarısını tek başına

karşulamaktadır. Dinyeper ve Dinyester ise geriye kalan akışın yaklaşık 1/3 ü kadarını karşulamaktadır. Karadeniz'in su dengesi ile ilgili olarak yapılan araştırmalar bu denize dökülen nehirlerin getirdiği su ile deniz üzerine düşen yağışın toplamının denizden olan buharlaşmadan daha fazla olduğunu göstermektedir (Sümer vd., 1981). Su dengesi ile ilgili bilgiler su fazlalığının miktarını yeterli bir doğrulukla hesaplayacak ölçüde değildir. Bu miktarın her yıl farklı değerler alacağı söylenebilir. Bu su fazlalığı dolayısıyla dengeyi sağlamak üzere Karadeniz'den dışarıya doğru bir akım oluşturmaktadır.

Öte yandan Marmara'daki buharlaşma Karadeniz'e göre fazla olduğu için bu denizlerin tuzlulukları da farklı olmaktadır (Sümer vd., 1981). Tuzluluklar zaman içinde değişmekle birlikte ortalama değerler olarak Marmara'nın tuzluluğu %3.8, Karadeniz'in tuzluluğu ise %1.7 kadardır. Bu durumda Marmara'nın yoğunluğu daha fazla olan suları bir yoğunluk akımı halinde alttan Karadeniz'e doğru hareket etmekte, böylece iki tabakalı bir akım sistemi oluşmaktadır.

Barometrik basınç ile ilgili az sayıda eşzamanlı ölçüm bulunmaktadır. Yeşilköy meteoroloji istasyonundan elde edilen rüzgar verileri İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi girişinde hakim rüzgar yönünün SSW olduğunu göstermektedir. Sarıyer meteoroloji istasyonu rüzgar verileri ise İstanbul Boğazı'nın kuzey ucundaki hakim rüzgar yönünün NNE olduğunu göstermektedir. Ayrıca Karadeniz'de net izotropik akımın artmasıyla ve sürekli esen kuzey rüzgarlarının etkisiyle Boğaz'ın alt tabaka akımı bloke edilebilmektedir. Sürekli esen güney rüzgarlarının (Iodos) etkisiyle de üst tabaka akımı bloke edilebilmektedir ve rüzgarın şiddetine bağlı olarak üç tabakalı akım yapısı gelişebilmektedir, bu durum orkoz olarak bilinmektedir.

3. İSTANBUL BOĞAZI'NIN HİDRODİNAMİĞİ

3.1 İstanbul Boğazı'nın Hidrolojisi

İstanbul Boğazı iki tabakalı bir sistemdir ve büyük ölçüde Karadeniz'in özelliklerini taşıyan çok fazla su hareketinin olduğu akıntılı bir rejime sahiptir (Özsoy vd., 1996). Hidrolojik şartlarını Karadeniz'e giren net tatlı su kaynakları, barometrik basınç farklılıkları ve rüzgar yapısı belirlemektedir. Bunlar Boğaz akımı üzerinde etkili mekanizmalardır (Özsoy vd., 1996).

Yoğunluk farkından doğan yatay basınç gradyanı (baroclinic kuvvet) az yoğunluklu üst tabaka akımının Marmara denizine daha yoğun olan alt tabaka akımının ise Karadenize doğru meydana gelmesine sebep olmaktadır. Ayrıca Karadeniz ve Marmara denizi arasındaki su seviyesi farkının yarattığı yatay basınç gradyanı (barotropic kuvvet) akımın Karadeniz'den Marmara'ya doğru akmasına sebep olan ikinci etkidir. Barotropic kuvvet derinlikle sabittir ve sadece yerel yüzey eğimine bağlıdır.

Karadeniz kapalı bir havzadır. Yıllık yağış miktarı $300 \text{ km}^3/\text{yıl}$, yüzeysel akış $350 \text{ km}^3/\text{yıl}$ ve buharlaşma da yine $350 \text{ km}^3/\text{yıl}$ civarındadır. Giren akım fazlalığı Boğaz boyunca yıllık 300 km^3 lük net akış şeklinde dengelenmektedir (Ünlüata vd., 1990 ve Özsoy vd., 1996). Karadeniz'in önemli tatlı su kaynakları kuzey batısındaki Tuna, Dinyeper ve Dinyester nehirleridir. Tatlı suyun neredeyse yarısı Tuna nehri tarafından sağlanır (Özsoy vd., 1996). Karadeniz'e yönelik net tatlı su akışı büyük mevsimlik ve yıllık farklılıklar göstermektedir (Sur vd., 1994, Özsoy vd., 1996). Karadeniz'in su seviyesi ile Tuna nehrinin akışı arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Hatta büyük oranda Boğaz tarafından kontrol edildiği düşünülen yıllık zaman ölçeği üzerinde de bu nehrin akışı etkilidir (Sur vd., 1994, Özsoy vd., 1995, Özsoy vd., 1996).

Tolmazin (1987) Karadeniz'in oşinografik rejiminin öncelikle tatlı su fazlalığı tarafından kontrol edildiğine işaret etmektedir. Akarsuların taşıdığı tatlı su ve yağış, buharlaşmadan kaynaklı tatlı su kaybından çok daha fazladır (Çizelge 3.1). Karadeniz boyunca, yüzeye yakın tabakada akarsuların taşıdığı tatlı su ve buharlaşmadan daha fazla olan yağış nedeniyle tuzluluk düşüktür (Çizelge 3.1). Ancak Çizelge 3.1'deki değerler Karadeniz'e kuzeyden giren Don, Kuban, Dinyeper ve Dinyester nehirleri üzerinde Rusya tarafından büyük su yapıları inşa edilmeden önceki değerlerdir. Birçok hidroelektrik tesis ve rezervuar 1970'lerde tam kapasiteyle işletmeye açılmıştır (Tolmazin 1987). Özellikle yıllık akış miktarlarında bir azalma, böylece tatlı su kayıplarında da bir artış meydana gelmiştir. Tolmazin 1987'deki

öngörülerinden Karadeniz'in su kaynaklarındaki azalmanın 2000 yılı için 50-70 km³/yıl değerleri ile ortalamanın üzerinde gerçekleşeceğini belirtmiştir. Bu miktar bu güne kadar gerçekleşmiş akarsu deşarjının sadece %14-20 sini oluşturmaktadır. Tolmazin (1987) Karadeniz'de meydana gelen su girişindeki bu azalmanın denizin yüzey eğimini, dolayısıyla Boğaz'da üst akıntıya neden olan zorlayıcı kuvveti azaltacağı sonucunu çıkartmaktadır. Ancak bu etkilere dair herhangi bir gözlem gerçekleştirilmemiştir.

Çizelge 3.1 Karadeniz'in su kaynakları (km³/yıl) (Tolmazin, 1987)

	Möller (1982)	Bruevich (1960)	Solyankin (Alekin'den Alıntı, 1966)	Bogdanova (1969)
Akarsu akışı	328	350	346	-
Yağış	231	225	119	-
Boğaz'dan gelen akıntı	-	-	-	-
Azak Denizi'den gelen akıntı	-	-	-	-
Toplam	752	750	694	-
Fark	-	-	-	-
Buharlaşma	354	350	332	-
Boğaz boyu üst akıntı	398	400	340	357
Azak'a doğru dış akış	-	-	-	-
Toplam	752	750	704	-

Tuna nehri Karadeniz'e yönelik toplam akarsu akımının yaklaşık yarısını karşılayarak en büyük tatlı su kaynağıdır. Dinyester ve Dinyeper akarsularında bu oran Tuna nehrinin yaklaşık üçte biri mertebesinde olmaktadır. Geri kalan akarsuların toplam akışı ise tüm akarsuların akışının 1/5'i kadar küçük oranda olmaktadır (Sur vd., 1994). Sur vd. (1994) akarsu deşarjlarının Boğaz üzerindeki etkilerini yaptıkları araştırma ile yayımlamışlardır:

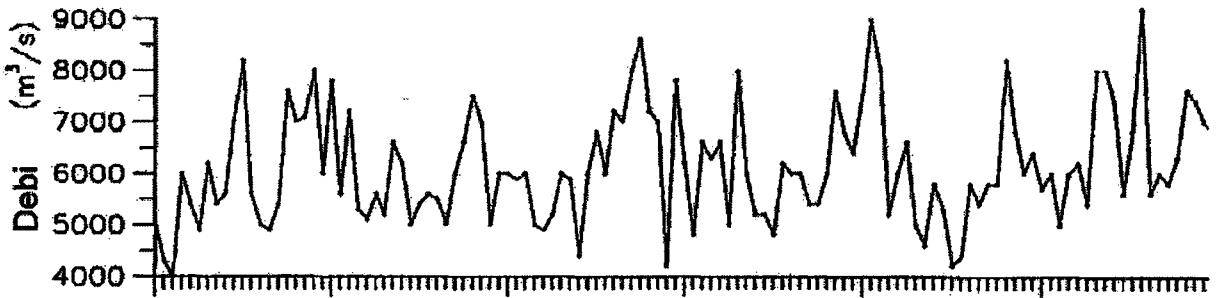
1- Tuna nehrinin yıllık ortalama deşarjı 4000-9000 m³/s (Şekil 3.1) arasında büyük salınımlar göstermektedir. Bu yıllık verilere ek olarak, akarsu deşarjındaki mevsimsel ortalama değişim \pm %30 mertebesinde olmaktadır. Bununla beraber maksimum mevsimlik deşarjın minimum mevsimlik deşarjın 3 katı olduğu sonucu çıkartılabilmektedir.

2-Tuna'nın Karadeniz'e getirdiği yıllık debi ortalama deniz seviyesinin mevsimlik seviyesi ve yılın değişik zamanlarındaki seviyesi üzerinde etkili olmaktadır (Şekil 3.2). Net tatlı su akışı uzun dönemde Boğaz'ın su seviyesi üzerinde de etkili olmaktadır.

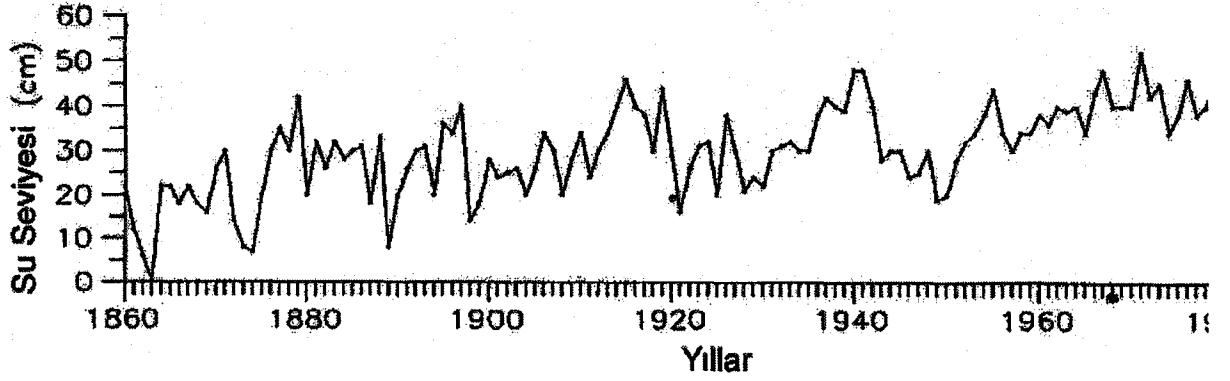
3-Aynı zamanda Köstence'de (Tuna'nın mansabında) ölçülen tuzluluktaki düşüş Tuna'nın mevsimlik ve yıllık deşarjı ile yakından ilgilidir (Şekil 3.3 ve 3.4). Sadece kuvvetli güney fırtınalarının suyunu kuzey batı kıyılarına doğru geri dönmesi dışında, Tuna'nın suyu havza yakınlarında çevrintili bir şekilde güneye doğru akmaktadır.

4-Anadolu kıyılarındaki tuzluluk değerleri kuzey batı kıyılarındaki tatlı suyun güney batı kıyılarına doğru ulaştığını göstermektedir. İlkbahardan yaza kadar değişik periyotlarla yapılan Boğaz'daki günlük ölçümler tuzluluğun düşük olduğunu göstermektedir (Şekil 3.5). Her ne kadar minimum tuzluluk Mart-Nisan başında ölçülmüşse de tuzluluktaki minimum değerler esas itibariyle Temmuz'dan Eylül'e kadar olan bir dönem boyunca yazın ölçülmektedir. Çünkü ortalama 10-20 cm/s'lik bir akıntı hızıyla Boğaz ile Tuna arasındaki 500 km'lik bir mesafe 1-2 ayda alınabilmektedir. Anadolu kıyılarındaki ölçülen minimum tuzluluğun zamanlaması ile ilgili düzensizlik ve gecikmeler kuzey batı yamacından güneye taşınan çevrintili yapıdaki suyun dispersiyon ve karışım etkilerinden kaynaklanabilmektedir.

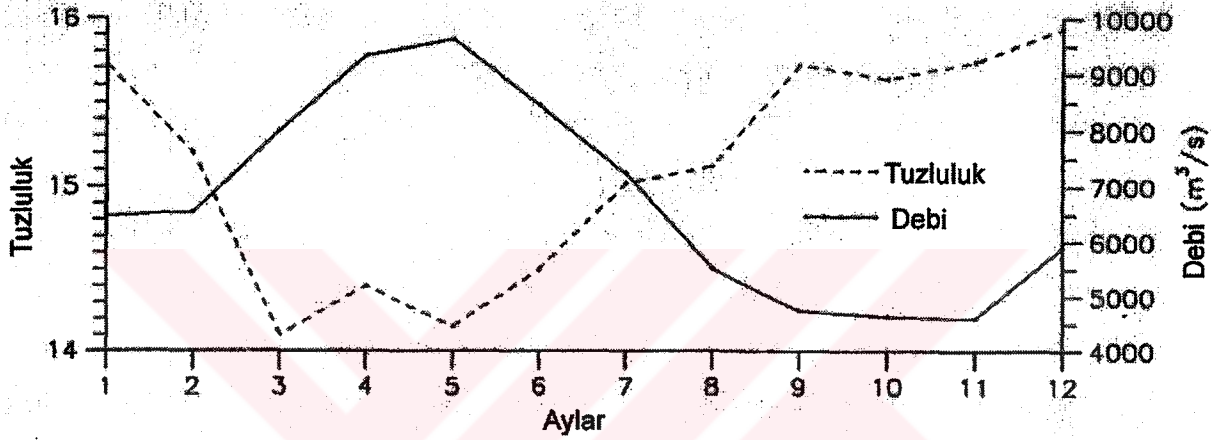
5-Şekil 3.6 ve 3.7'de Güney Batı Karadeniz'de (28°-32° Doğu meridyenleri, 41°-42° Kuzey paralelleri arası) 1985-1992 yılları boyunca Boğaz'daki istasyonlardan yapılan ve 10 m'lik yüzey tabakası boyunca akarsuların ortalama tuzluluk üzerindeki etkilerine dair ölçümler gösterilmektedir. Değerlerin çoğu Karadeniz'in güney batısındaki ortalama tuzluluğun 18 psu olduğunu göstermektedir. Tuzluluk her yılın Mart'tan Ağustos'a kadar değişik zamanlarında Tuna'nın etkilerinin bölgede hissedildiği istisnai şartlarda 16-17 psu'ya kadar düşmektedir.



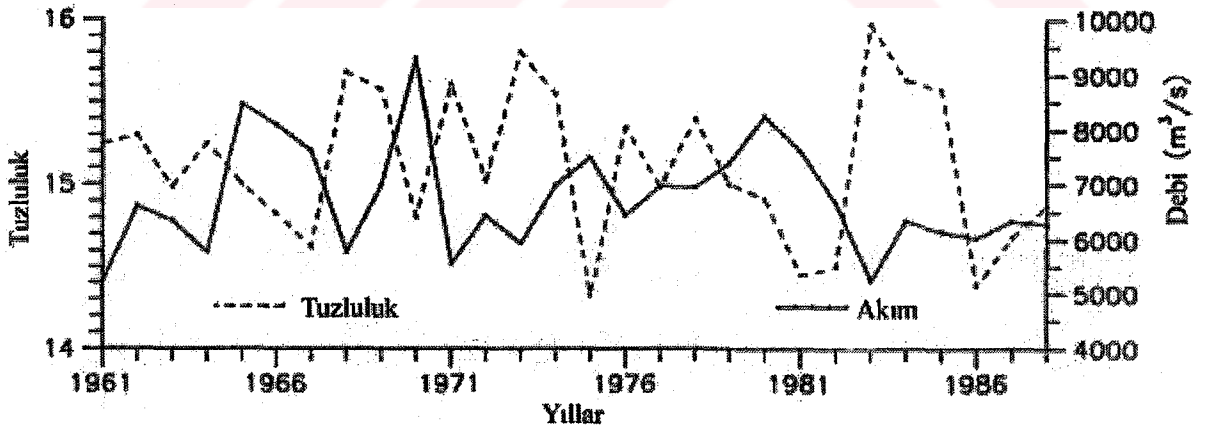
Şekil 3.1 Tuna'nın debi değişim grafiği (Sur vd., 1994)



Şekil 3.2 Romanya kıyısındaki Selune'de su seviyesi (Sur vd., 1994)



Şekil 3.3 Tuna'nın aylık ortalama debisi ve Constanza Romanya'da tuzluluk değişimi (Sur vd., 1994)



Şekil 3.4 Yıllık ortalama Tuna debisi ve Constanza Romanya'daki Tuzluluk değişimi (Sur vd., 1994)

Özsoy vd. (1996) da akarsu deşarjlarının Boğaz üzerindeki etkileri üzerine bir çalışma yayımlamışlardır. Bu çalışma şunu göstermektedir; Uzun dönem tuzluluk ölçümlerine göre Boğaz boyunca gerçekleşen iki tabakalı akım üst tabakada $600 \text{ km}^3/\text{yıl}$ civarında üst akım ve alt tabakada da $300 \text{ km}^3/\text{yıl}$ civarında alt akım şeklinde denge durumunda olmaktadır.

Karadenizde'deki kararlı tuzluluk durumu $Q_1/Q_2=S_1/S_2=2$ oranı ile verilmektedir. Burada Q_1S_1 ve Q_2S_2 sırasıyla Karadeniz'in Boğaz girişindeki üst ve alt tabakalardaki debi ve tuzluluk değerleridir. Türbülans nedeniyle alt tabakanın yaklaşık %25'i üst tabakayla, üst tabakanın ise yaklaşık %7'si alt tabakayla girişim yaptığı tahmin edilmiştir. Buna karşın kısa dönem değişimler meteorolojik ve hidrolojik olaylara bağlı olmaktadır.

Özsoy vd. göre (1996), hem tatlı su akışı hem de barometrik basınç farklılıkları Karadeniz'in su seviyesini aynı oranda kontrol eden etkili mekanizmalardır. Fakat bunlardan hangisinin öncelikli rol oynadığı açık değildir.

Özsoy vd. (1996) aynı zamanda Boğaz boyunca deniz seviyesi farklılıklarının barometrik basınçla ilgili olduğuna işaret etmektedirler. Marmara'da su seviyesindeki değişimlerle ilgili olarak yapılan basınç ölçümleri Şekil 3.8'de görüldüğü gibi yakın bir benzerlik ortaya koymaktadır. Fakat günümüzde bu şekildeki eş zamanlı ölçümlerin sayısı azdır

Yinede her iki yönde de en zayıftan en güçlüye kadar meydana gelen barotropik zorlamalara karşı Boğaz çok çabuk yanıt vermektedir. Normal koşullar altında her iki tarafta da hidrolik kontrol meydana gelmektedir. Karadeniz'den gelen net barotropik akımın artması durumunda veya devamlı meydana gelen kuzey rüzgarlarının etkisiyle, Boğaz'ın alt tabakası bloke edilmektedir. Benzer şekilde güney rüzgarları üst tabakanın hapsedilmesine, Boğaz'a doğru ve hatta Marmara Denizi tarafından Boğaz'a gönderilen suların da daha ileri itilmesine neden olmaktadır. Böylece bloke edilen üst yüzeyin altındaki akış üç tabakalı bir akımın oluşmasına sebep olmaktadır. Üst tabakada bloke edilen bu akım her iki uçtaki su seviyesi farkının azalmasıyla dengelenmektedir.

Sırasıyla Yeşilköy ve Sarıyer için uzun dönem rüzgar istatistiği sonuçları Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir. Rakamlar Boğaz'ın güney ucunda hakim rüzgar yönünün SSW, kuzey ucunda ise NNE olduğunu göstermektedir.

Atmosferdeki ısı farklılıkları nedeniyle, yüzey suyunun sıcaklığı Temmuz'dan Ağustos'a kadar olan zaman diliminde yaklaşık 1°C artmakta iken, Ağustos'tan Eylül'e kadar olan zaman diliminde ise 1°C civarında azalmaktadır (Doğan vd., 2001).

IRTC (1987) Çalışması'nın bir parçası olarak hazırlanan İstanbul Boğazı'ndaki katı madde taşınım analizi bulguları şu sonuçları içermektedir:

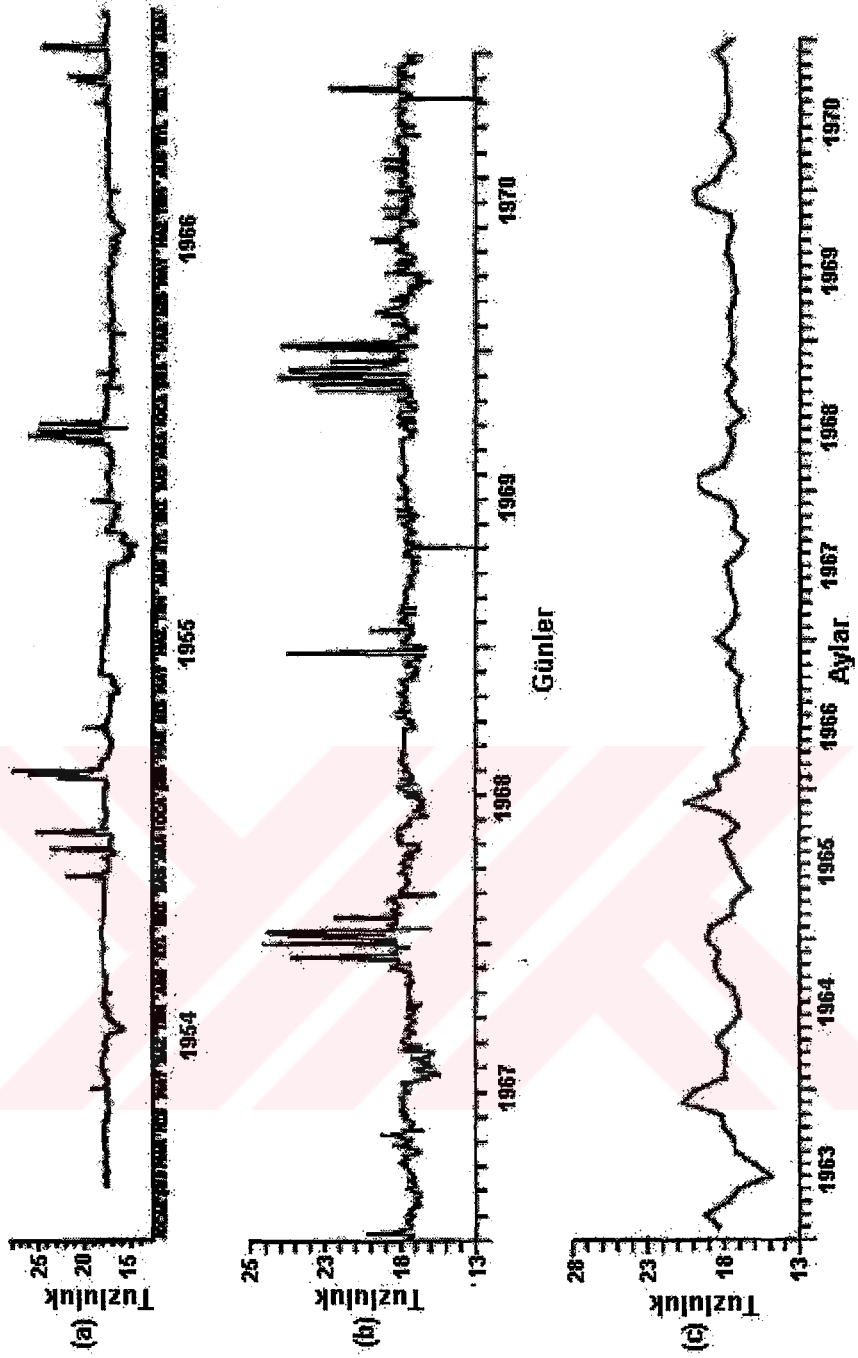
- Karadeniz kıyılarından gelen kıyı akıntısı 5 milyon $\text{m}^3/\text{yıl}$ olarak öngörülmüştür. Kıyı akıntısı tarafından Karadeniz'den taşınan katı madde üst tabaka akıntısı tarafından alt tabaka ile karşılaşacağı kısa mesafe boyunca taşınmış olacaktır. Katı madde alt tabaka

akıntısına ulaştıktan sonra sürüntü malzemesi olarak yeniden Karadeniz'e taşınmış olacaktır.

- Marmara Denizi kıyılarından gelen kıyı akıntısı 55000 m³/yıl olarak tahmin edilmiştir. Marmara Denizi'nden gelen kıyı akıntısının taşıdığı katı maddenin bir kısmı üst tabaka akıntısının etkisiyle Marmara Denizi'ne geri taşınıp yığılmaktadır. Geri kalan katı madde (27500 m³/yıl) alt akıntıya karışıp Boğaz boyunca sürüntü malzemesi olarak taşınmaktadır.
- Yerel katı madde hareketi Sarayburnu,Salacak arasında yıllık 16400 m³'lük bir sürüntü malzemesi oluşumuna sebep olmaktadır. Marmara Denizi'nden kaynaklı kıyı akıntısının taşıdığı katı madde ile yerel katı madde hareketinin toplamı tünelde 44000 m³/yıl'lık sürüntü malzemesi oluşumuna sebep olacağı belirtilmiştir.

Planlanan Tüp geçit inşası için yapılacak taramanın 45600 m³'lük katı maddenin yaklaşık %24'ü (14400 m³) askı malzemesi haline gelebilecek ve taban malzemesi olarak yığılabilecektir. Bu 500 m uzunluğunda ve 20 mm yüksekliğinde taban malzemesine karşı geleceği tahmin edilmektedir.

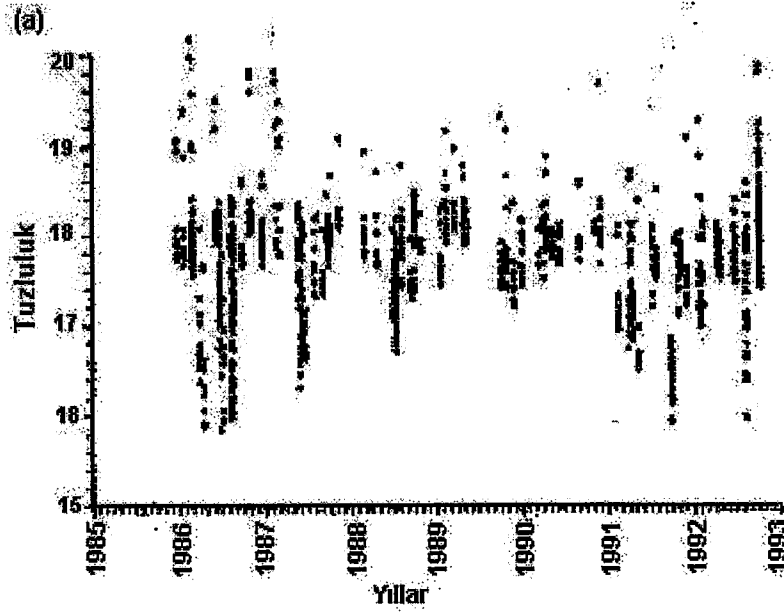
Yüksel vd. (1997 ve 1998a,1998b) Haliç'teki sedimantasyonun 03/1998 ile 08/98 tarihleri arasındaki 4 aylık periyot boyunca 200000 m³ civarında olduğunu göstermişlerdi. Katı madde esas itibariyle Alibeyköy ve Kağıthane derelerinden Haliç'e ve yoğunluk akıntıları vasıtasıyla da Boğaz'a taşınmaktadır. Buna karşın Boğaz'ın tüp geçit kesimindeki katı madde oranı henüz bilinmemektedir.



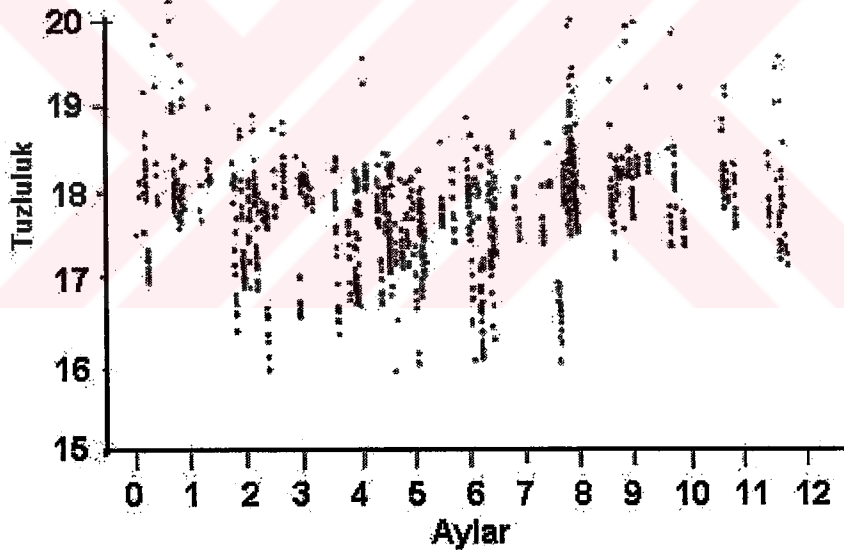
Şekil 3.5 Boğaz'daki tuzluluğun zaman serileri

a) 1954-56 günlük ölçümler

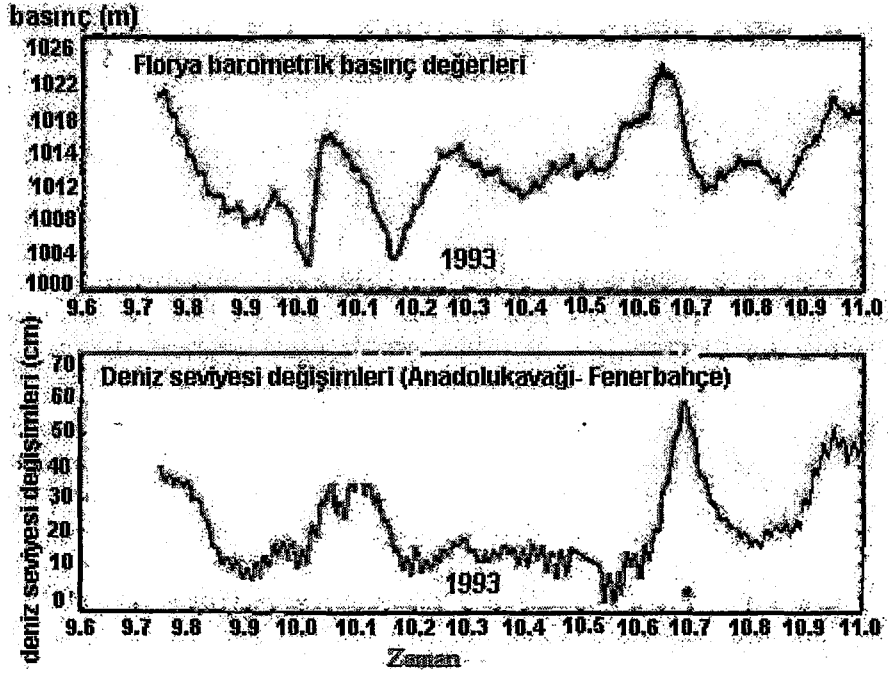
b) 1967-70 günlük ölçümler c) 1963-70 günlük ölçümlerin aylık ortalamaları (Sur vd., 1994).



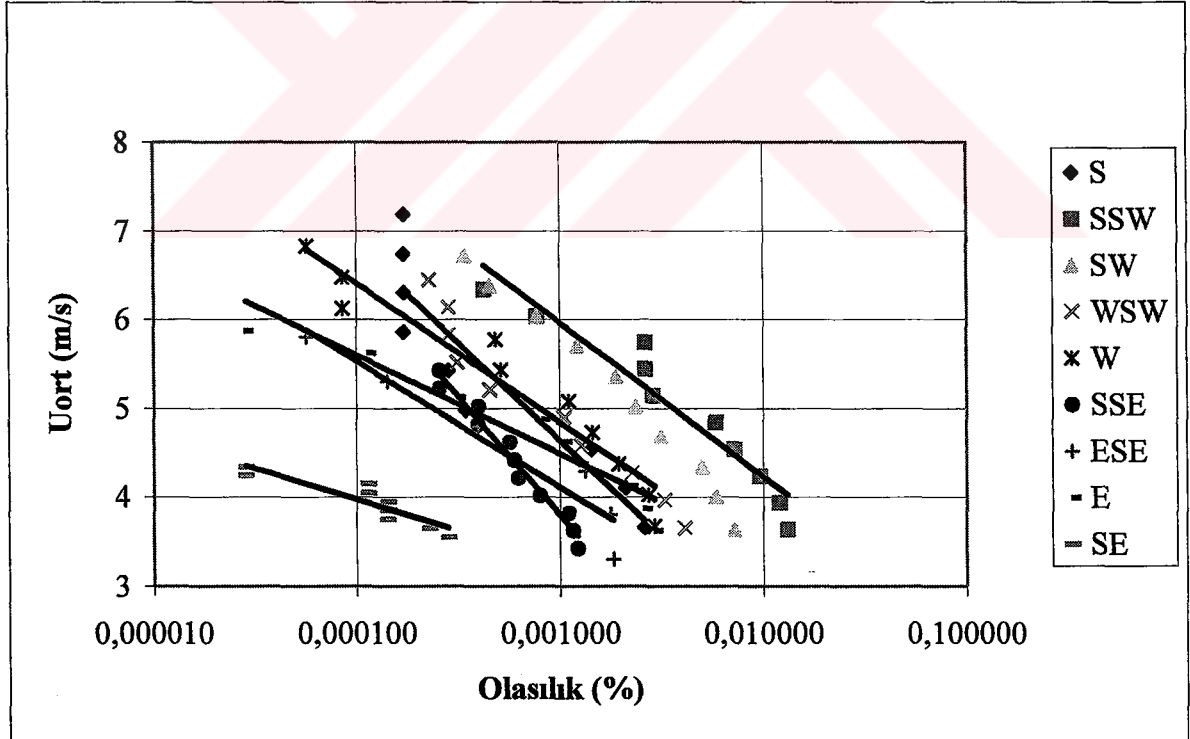
Şekil 3.6 Yüzeiden ilk 10 m'de yıllık Tuzluluk ölçümü (Sur vd., 1994).



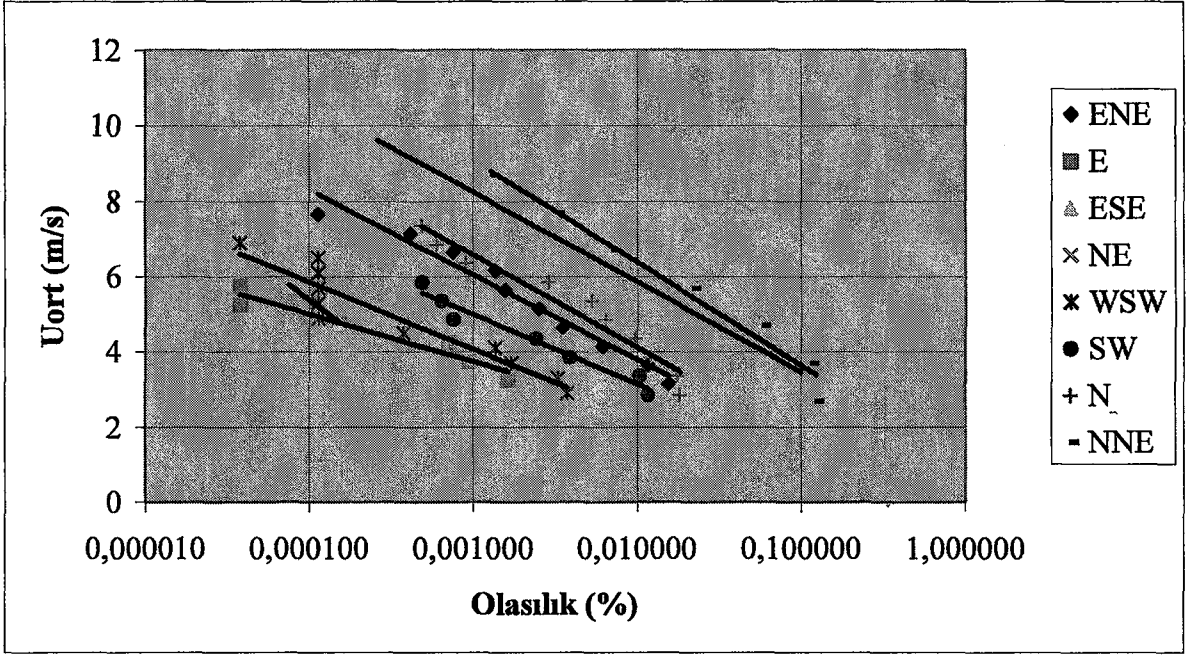
Şekil 3.7 Deniz yüzeyinden ilk 10 m'de ortalama mevsimsel tuzluluk değişimi (Sur vd., 1994).



Şekil 3.8 Barometrik basınç (Florya barometrik basınç ve Anadolu kavacağı-Fenerbahçe deniz seviyesi değişimleri; Eylül- Ekim, 1993) (Özsoy vd., 1996).



Şekil 3.9 Yeşilköy uzun dönem rüzgar istatistiği (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.10 Sarıyer uzun dönem rüzgar istatistiği (Yüksel vd., 2003)

3.2 İstanbul Boğazı'nın Hidroliği

İstanbul Boğazı Marmara ve Karadeniz'i birbirine bağlayan bir geçiş yoludur. Genişliği 0.7 ile 3.5 km arasında değişmekte olup yüzeydeki ortalama genişliği 1.3 km dir. Boğaz'ın genişliği derinliği boyunca kademe kademe azalmakta olup 50 m derinlikteki genişliği 500 m'ye kadar düşmektedir. Derinliği ise 30 ile 100 m arasında değişmektedir.

Boğaz'daki akıntı esas olarak iki tabakalı bir sistemden oluşmaktadır (1)Karadeniz'den Marmara'ya doğru güney yönündeki üst akıntı ve (2)Marmara'dan Karadeniz'e doğru kuzey yönündeki alt akıntı. Bu tabakalı yapıdaki akıntı büyük oranda iki ana mekanizma tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar yoğunluk ve su seviyesi farkıdır. Karadeniz Marmara Denizi'nden daha yüksektedir ve bu da üst akıntıyı yaratmaktadır. Karadeniz'e dökülen akarsuların taşıdığı tatlı su, barometrik basınç, buharlaşma ve yağış su seviyesindeki değişimleri etkilemekte olup, bu değişimler Boğaz'da akıntı şeklinde su transferine neden olmaktadır. Alt akıntı Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki tuzluluk farkından dolayı meydana gelmektedir. Türbülanslı arakesit düzlemi iki tabaka akımını birbirinden ayırmaktadır. Arakesit düzleminin kalınlığı Marmara Denizi girişinde 10 m, Karadeniz girişinde ise 2 m civarında olmaktadır.

İstanbul Boğaz'ı uzunluğu boyunca farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahiptir. Her iki uç bölgesinde de iki eşik bulunmaktadır. Eşikler Boğaz'daki akım karakteristiklerini etkilemektedir. Eşiklerden biri Marmara Denizi'nin kuzeyinde hemen Boğaz girişinde minimum ve maksimum 28 ile 34 m derinlikleri arasında bulunmakta olup her iki yanında bir kanal akımı oluşmasına neden olmaktadır. Eşiğin Anadolu tarafında Üsküdar kıyıları boyunca 40 m derinliğindeki kanal, mansabındaki 34 m derinlikteki eşik tarafından bloke edilmektedir. Bu kanal eşiğin ötesinde güneye doğru giderek derinleşerek Marmara Denizi ile Boğaz'ın birleşme bölgesindeki denizaltı kanyonuna eklenmektedir. Diğer eşik Boğaz'ın Karadeniz girişinin 3-4 km kuzeyinde olup 60 m derinlikte bulunmaktadır ve yaklaşık 2 km uzunluğa sahiptir. Bu eşik Boğaz'ın Karadeniz'deki doğal bir uzantısı gibi dar bir kanal şeklinde uzanmaktadır (Özsoy vd.,1988 ve 1999).

Boğaz'ın her iki yakasında da Emirgan-Kanlıca ve Arnavutköy-Vaniköy arasında küçük koylar ve daralma bölgeleri vardır. Her iki tabakadaki akım hızları daralma bölgelerinde artmakta ve yüzey akıntıları Boğaz'ın dar kesimlerinde maksimum 2 m/s'ye kadar çıkabilmektedir (Özsoy vd.,1998). Boğaz'ın kıvrımlı geometrisi, Boğaz akımında rüzgar yapısının kararsız etkileri, komşu havzalardaki değişiklikler, Boğaz boyunca yoğunluk

farklılıkları ve tabakalar arası kütle alış verişinden kaynaklı karmaşık yapısı sekonder ve eddy çevrimlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Üst tabakadaki tuzluluk Karadeniz'in bitiminde 18 ppt'dir. Bu değer kademeli olarak artarak güney çıkışında 23 ile 25 ppt değerine ulaşmaktadır. Alt tabakadaki tuzluluk Boğaz'ın güney ucunda Marmara Denizi'nde 38 ppt'dir. Bu değer kuzeydeki eşğin bulunduğu bölgede 33 ppt değerine düşmektedir (Oğuz vd., 1990).

Doğan vd.,(2001) Marmara girişinde alt tabakadaki tuzluluk (38 psu) aynı tabaka akımında meydana gelen düşey yöndeki karışım ve değişiklikler dolayısıyla Karadeniz çıkışında azalmaktadır (36 psu). Bu değerler alt tabakadaki suyun her ay Karadeniz'e ulaştığını göstermektedir. İstanbul Demiryolu/Tünel Danışmanlığı (IRTC, 1987) tarafından hazırlanan 203 No'lu Boğaz Tüp Geçidi için Fizibilite Çalışmaları ve Ön Tasarımlar isimli çalışma için yapılan Hidrografik İnceleme esnasında Boğaz'ın iki tabakalı akım rejimiyle ilgili detaylı analizlere girişilmiştir. Hidrografik İnceleme Boğaz ile ilgili önceki analizlerin sınırlı ölçümlere dayandırıldığını göstermiştir. Akım ölçümleri ve ilgili verileri toplamak için çok sayıda çalışma yapılmıştır. İki tabakalı akım sistemine ait hidrolik ölçümler 1985 yılında ve 1986 yılı başlarında toplanmıştır. Gözlemler iki tabakalı akım rejimini doğrulamaktadır. Uzun dönemli göstergeler tünel geçişinin olacağı bölgedeki akıntı hızlarını ve yönlerini vermektedir. Akıntı ölçümleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

IRTC (1987) çalışmasında alt tabakaya yerleştirilen akıntı ölçer hiç bir zaman 1m/s üzerinde hız kaydı yapmamıştır. Ölçümün yapıldığı 5 gün süreyle üst tabakadaki akıntı en fazla 1.66 m/s olarak ölçülmüştür. Akım ölçümleri için geliştirilen bir histogram 10/6/85'ten 20/7/85'e kadar bir süre boyunca 28.5 m derinlikteki noktasal hızları 0.38 ile 0.94 m/s arasında ve ortalamasını da 0.65 m/s olarak okumuştur.

Doğan vd. (2001) Ağustos'ta üst tabaka hızı ve kalınlığının arttığı buna karşın alt tabaka hızı ve kalınlığının ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Tabakaların kalınlığı, fiziksel özellikleri ve arakesit düzlemindeki azalış atmosfer koşullarına ve Boğaz'a giren akımlara bağlı olarak değişmektedir.

Kuzey'de Karadeniz'in suyu Boğaz'a Ağustos'ta 50 m kalınlık ve 10-90 cm/s hızla, Temmuz ve Eylül boyunca ise kalınlık 40 m civarında akıntı hızı ise 5-60 cm/s olmaktadır. Marmara'nın suyu Karadeniz'e Ağustos'ta 50 m'nin altında ve 5-80 cm/s hızla akmakta iken Temmuz ve Eylül aylarında ise 40 m'nin altında ve 5-100 cm/s hızla akmaktadır. Boğaz'ın güney girişinde, Marmara'dan Boğaz'a giren alt tabaka akıntısının kalınlığı Temmuz ve Eylül'de 20 m'den fazla gerçekleşmektedir. Alt ve üst tabaka hızları bu kısımda 3 ay boyunca

farklılıkları ve tabakalar arası kütle alış verişinden kaynaklı karmaşık yapısı sekonder ve eddy çevrimlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Üst tabakadaki tuzluluk Karadeniz'in bitiminde 18 ppt'dir. Bu değer kademeli olarak artarak güney çıkışında 23 ile 25 ppt değerine ulaşmaktadır. Alt tabakadaki tuzluluk Boğaz'ın güney ucunda Marmara Denizi'nde 38 ppt'dir. Bu değer kuzeydeki eşğin bulunduğu bölgede 33 ppt değerine düşmektedir (Oğuz vd., 1990).

Doğan vd.,(2001) Marmara girişinde alt tabakadaki tuzluluk (38 psu) aynı tabaka akımında meydana gelen düşey yöndeki karışım ve değişiklikler dolayısıyla Karadeniz çıkışında azalmaktadır (36 psu). Bu değerler alt tabakadaki suyun her ay Karadeniz'e ulaştığını göstermektedir. İstanbul Demiryolu/Tünel Danışmanlığı (IRTC, 1987) tarafından hazırlanan 203 No'lu Boğaz Tüp Geçidi için Fizibilite Çalışmaları ve Ön Tasarımlar isimli çalışma için yapılan Hidrografik İnceleme esnasında Boğaz'ın iki tabakalı akım rejimiyle ilgili detaylı analizlere girişilmiştir. Hidrografik İnceleme Boğaz ile ilgili önceki analizlerin sınırlı ölçümlere dayandırıldığını göstermiştir. Akım ölçümleri ve ilgili verileri toplamak için çok sayıda çalışma yapılmıştır. İki tabakalı akım sistemine ait hidrolik ölçümler 1985 yılında ve 1986 yılı başlarında toplanmıştır. Gözlemler iki tabakalı akım rejimini doğrulamaktadır. Uzun dönemli göstergeler tünel geçişinin olacağı bölgedeki akıntı hızlarını ve yönlerini vermektedir. Akıntı ölçümleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

IRTC (1987) çalışmasında alt tabakaya yerleştirilen akıntı ölçer hiç bir zaman 1m/s üzerinde hız kaydı yapmamıştır. Ölçümün yapıldığı 5 gün süreyle üst tabakadaki akıntı en fazla 1.66 m/s olarak ölçülmüştür. Akım ölçümleri için geliştirilen bir histogram 10/6/85'ten 20/7/85'e kadar bir süre boyunca 28.5 m derinlikteki noktasal hızları 0.38 ile 0.94 m/s arasında ve ortalamasını da 0.65 m/s olarak okumuştur.

Doğan vd. (2001) Ağustos'ta üst tabaka hızı ve kalınlığının arttığı buna karşın alt tabaka hızı ve kalınlığının ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Tabakaların kalınlığı, fiziksel özellikleri ve arakesit düzlemindeki azalış atmosfer koşullarına ve Boğaz'a giren akımlara bağlı olarak değişmektedir.

Kuzey'de Karadeniz'in suyu Boğaz'a Ağustos'ta 50 m kalınlık ve 10-90 cm/s hızla, Temmuz ve Eylül boyunca ise kalınlık 40 m civarında akıntı hızı ise 5-60 cm/s olmaktadır. Marmara'nın suyu Karadeniz'e Ağustos'ta 50 m'nin altında ve 5-80 cm/s hızla akmakta iken Temmuz ve Eylül aylarında ise 40 m'nin altında ve 5-100 cm/s hızla akmaktadır. Boğaz'ın güney girişinde, Marmara'dan Boğaz'a giren alt tabaka akıntısının kalınlığı Temmuz ve Eylül'de 20 m'den fazla gerçekleşmektedir. Alt ve üst tabaka hızları bu kısımda 3 ay boyunca

(Temmuz, Ağustos, Eylül) 100 cm/s yi aşmaktadır. Ağustos'ta Marmara'ya ulaşan üst tabaka akıntısının kalınlığı artıp (30 m), hızı 5 ile 150 cm/s arasında değişirken alt tabakanın hızı genelde 110 cm/s den daha az olmaktadır (Doğan vd., 2001). Boğaz'ın kuzey ve güney girişlerindeki debiler Çizelge 3.3'de verilmiştir (Doğan vd., 2001). Bu ölçümler esnasında ADCP kullanıldığı belirtilmiştir.

Çizelge 3.2 Akıntı ölçümleri

Periyot	Su Derinliği	Akıntı Ölçer Derinliği	Ortalama Hız	Akım Tabakası
10/6/85-20/7/85	41 m	28.5 m	0.644 m/s	Alt Tabaka
10/6/85-14/6/85	41 m	37.0 m	0.350 m/s	Alt Tabaka
4/8/85-9/8/85	41 m	28.5 m	0.760 m/s	Alt Tabaka
4/8/85-9/8/85	41 m	37.0 m	0.417 m/s	Alt Tabaka
26/1/86-30/1/86	7 m	5.0 m	0.866 m/s	Üst Tabaka

Çizelge 3.3 Debiler (Doğan vd., 2001)

Tabaka	Bölüm	Temmuz	Ağustos	Eylül
Üst (m ³ /s)	Kuzey	12627	14865	9744
Alt (m ³ /s)	Kuzey	7245	3379	7849
Üst (m ³ /s)	Güney	7965	17926	11951
Alt (m ³ /s)	Güney	6007	5656	6337

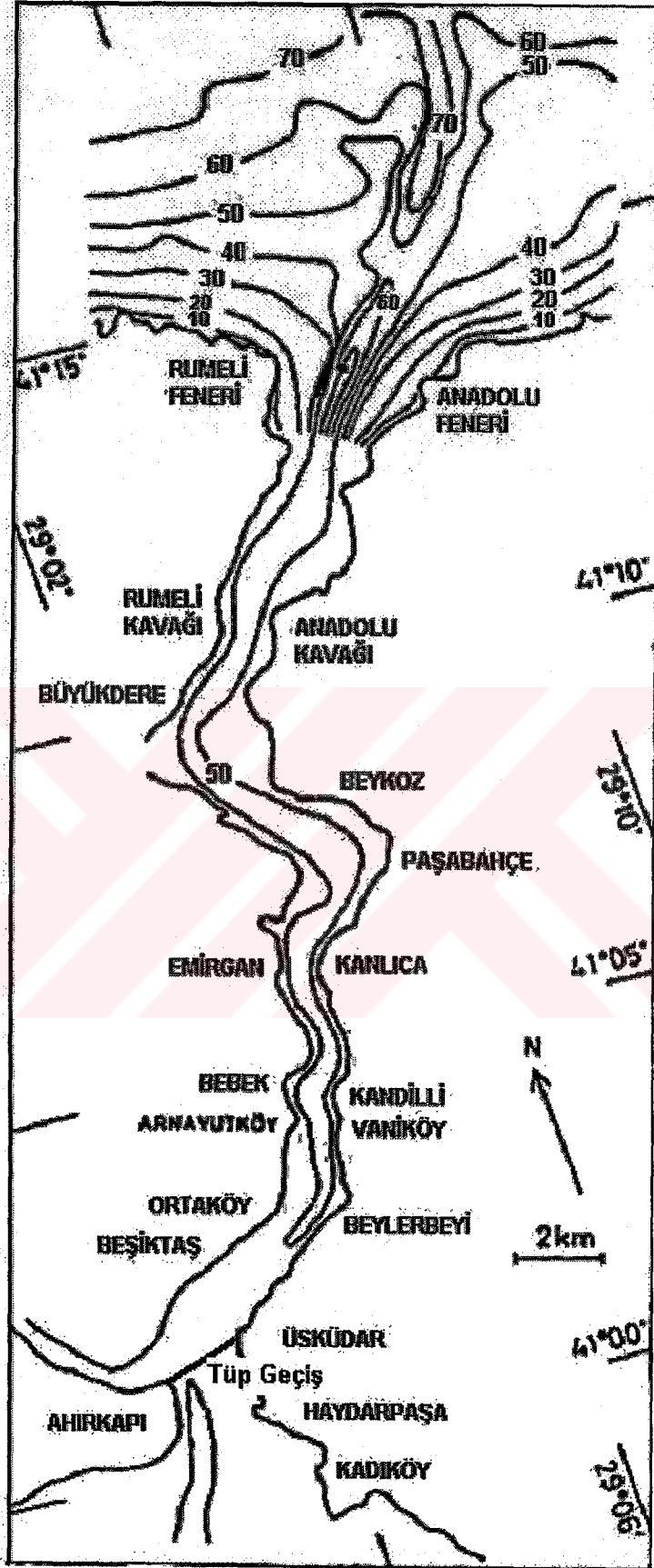
Oğuz vd. (1990), yıl boyunca değişik zamanlarda bir dizi istasyonda derinliğe bağlı olarak sıcaklık ölçümleri yapmışlardır. Ölçümler iki tabakalı akımın hem mevsimlik hem de kısa dönemli olarak var olduğunu göstermiştir.

Çalışma dikkatleri özellikle planlanan tüp geçitin hemen kuzeyinde boğazdaki bir daralma bölgesinin yarattığı hidrolik koşullara dikkat çekmektedir (Şekil 3.11). Hem yatayda hem de düşeyde daralma söz konusudur. Güney eşiğindeki hidrolik şartlar tünel hizasındaki akıntı hızlarında, alt ve üst tabaka akımı derinliklerinde büyük farklılıklar yaratmaktadır. Ayrıca daralma tünel hizasında tünel enkesiti boyunca üniform olmayan akım koşulları yaratmaktadır. Oğuz vd., (1990) tünel hizasının batı ucu civarında yüksek bir yüzey akıntısı meydana getiren yoğunlaşmış bir üst tabaka akımı tanımlamaktadırlar.

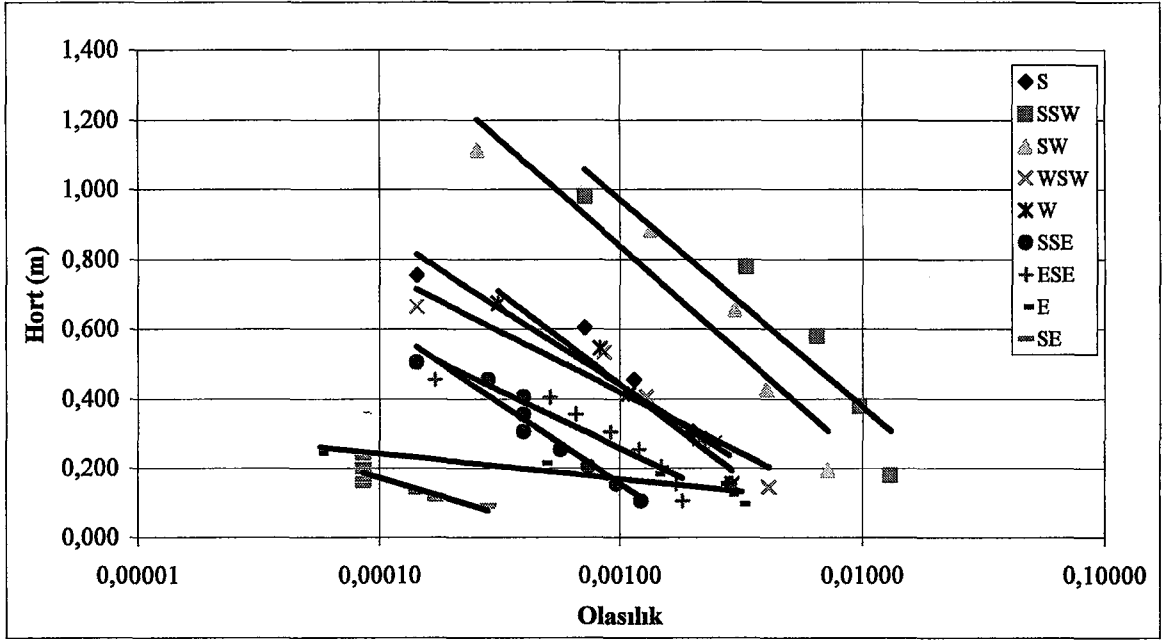
Marmara Denizi'ndeki dalga iklimi üzerine Akyarlı ve Yalçiner (1997) tarafından yapılan çalışmada 1997'de Marmara Ereğlisi'ne yakın özel bir bölge olan LNG terminali (İstanbul'un

30 km batısında) dikkate alınmıştır. Bu çalışmada uzun dönem ve ekstrem dalga istatistikleri sunulmuştur. Rüzgar ve dalgalarla ilgili istatistiksel dağılımlar Özhan ve Abdalla (2000) tarafından Marmara Denizi kıyıları için verilmiştir. Yüksel vd.'nin (2000 ve 2001a,b) 1999'daki Doğu Marmara depreminden sonra İzmit Körfezindeki deniz yapıları ve kıyı alanları için kullanılmak üzere Marmara Denizi için uzun dönem ve ekstrem dalga istatistikleri hazırlanmıştır. Ayrıca İzmit Körfezine atık su deşarjıyla ilgili deprem öncesi ve sonrası projeler için Yüksel vd. (1999 ve 2000a,b) tarafından ve Marmara Denizi'nde Boğaz çıkışının doğusunda yer alan Pendik'te Akarca Irmağı ağız düzenlemesi için yine Yüksel ve Çevik (2001,c) tarafından dalga istatistiği ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır.

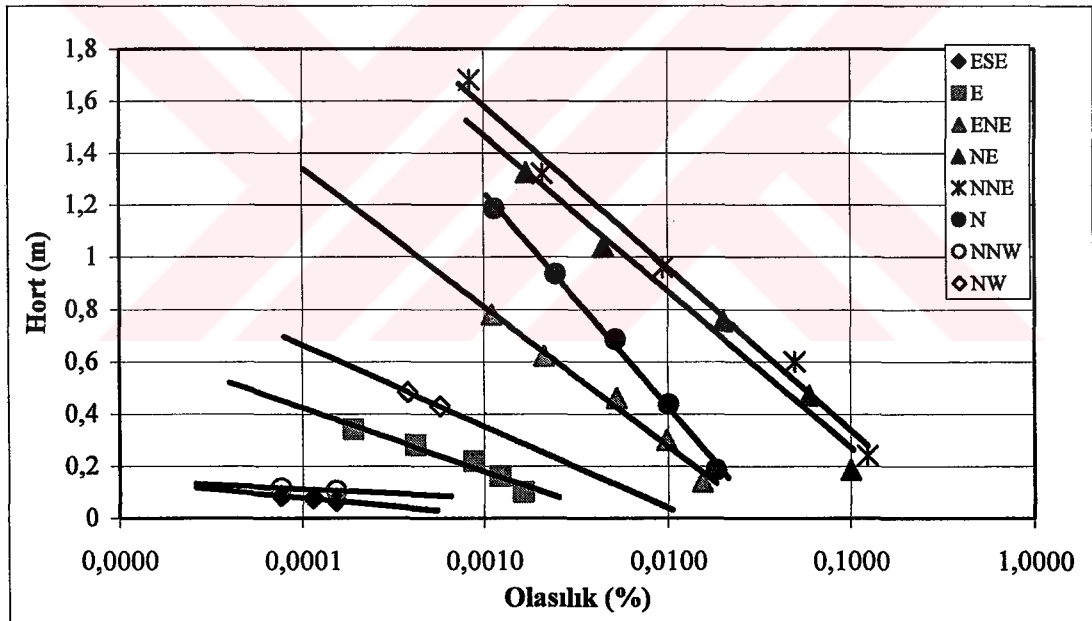
Tünel kesiti Boğaz'ın güney ucunda Marmara Denizi'nin ağzında yer alacaktır. Boğaz'ın girişi güney, güney batı ve güney doğudan esen rüzgarların yarattığı dalga etkilerine açıktır. Yapılan bu çalışmalardan uzun dönem dalga istatistiği için sırasıyla Yeşilköy ve Sarıyer meteoroloji istasyonları verilerine dayanan Şekil 3.12 ve 3.13'de dağılımlar gösterilmiştir. Rakamlar Boğaz'ın güney ucunda hakim dalga yönünün SSW olduğunu göstermektedir. Oysa kuzey ucunda hakim dalga yönü NNE'tir.



Şekil 3.11 İstanbul Boğazı geometrisi ve kontrol kesitleri (Oğuz vd., 1990)



Şekil 3.12 Yeşilköy meteoroloji istasyonunun verilerine göre uzun dönem dalga istatistiği (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.13 Sarıyer meteoroloji istasyonunun verilerine göre uzun dönem dalga istatistiği (Yüksel vd., 2003)

3.3 İstanbul Boğazı Hidrodinamiği ile İlgili Ölçümler ve Değerlendirme

3.3.1 Ölçüm Sistemi

İstanbul Boğazında bugüne kadar çeşitli zamanlarda akıntı hızı ölçümleri yapılmıştır ancak bunlar yeterince sistematik olmadığı gibi aralarında uzun süreli sürekli olan ölçümlerde mevcut değildir. Bu çalışmada uzun süreli sürekli ölçümlerin yapılması amaçlanmıştır.

Ölçümler sırasında ADP akıntı cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz deniz tabanına yerleştirilen 1.3 ton ağırlığındaki bir beton bloğun üzerine oturtulmuştur (Şekil 3.14, 3.15, 3.16 ve 3.17). Akıntı hız ölçümleri sırasında cihaz NS, EW doğrultularında ve dişey doğrultudaki hız bileşenlerinin yanısıra tabandaki sıcaklığıda ölçmektedir. Cihaz ölçüm sırasında bileşke hız vektörünün doğrultusunu verecek şekilde akıntının yönünü de belirliyebilmektedir.

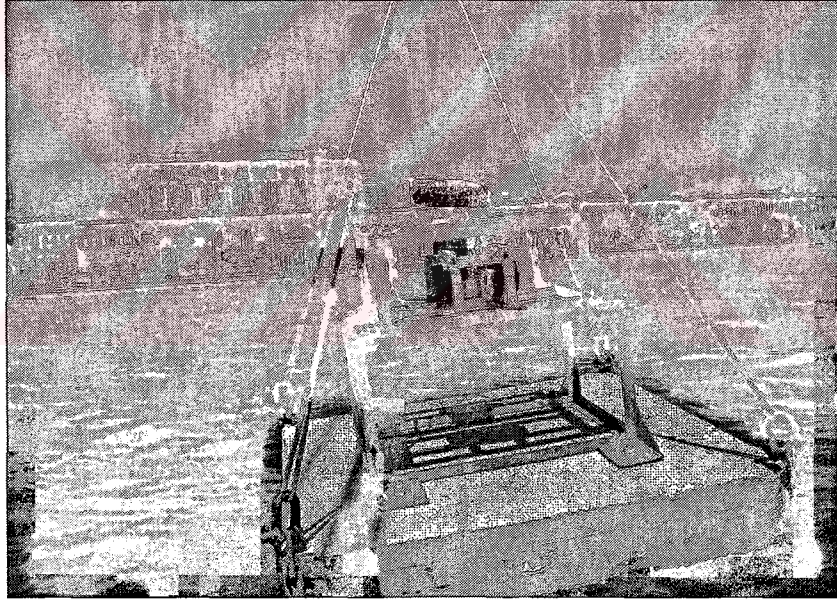
Sürekli akıntı hızı ölçümlerine başlamadan önce Boğazın güneyinde dört farklı istasyonda kısa süreli ölçümler yapılmıştır. Bu istasyonların yerleri Dolmabahçe sarayı, Galatasaray Üniversitesi açığı, Sarayburnu açığı ve Paşalimanı açığıdır, bu ölçüm istasyolarına ait bilgiler Çizelge 3.4’de verilmiştir, ayrıca istasyonların yerleri de Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



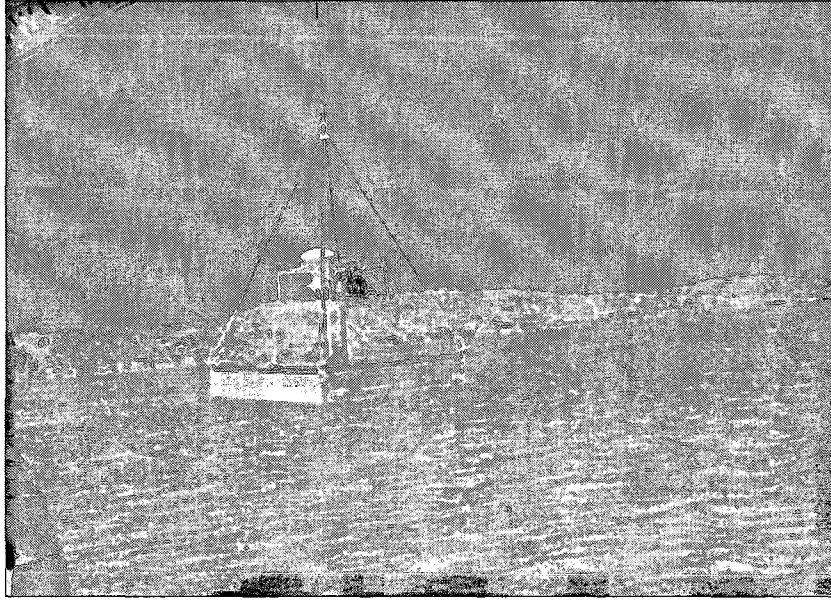
Şekil 3.14 Beton Blok üzerine yerleştirilmiş ADP akıntı ölçüm cihazı (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.15 Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları
(Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.16 Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları
(Yüksel vd., 2003)

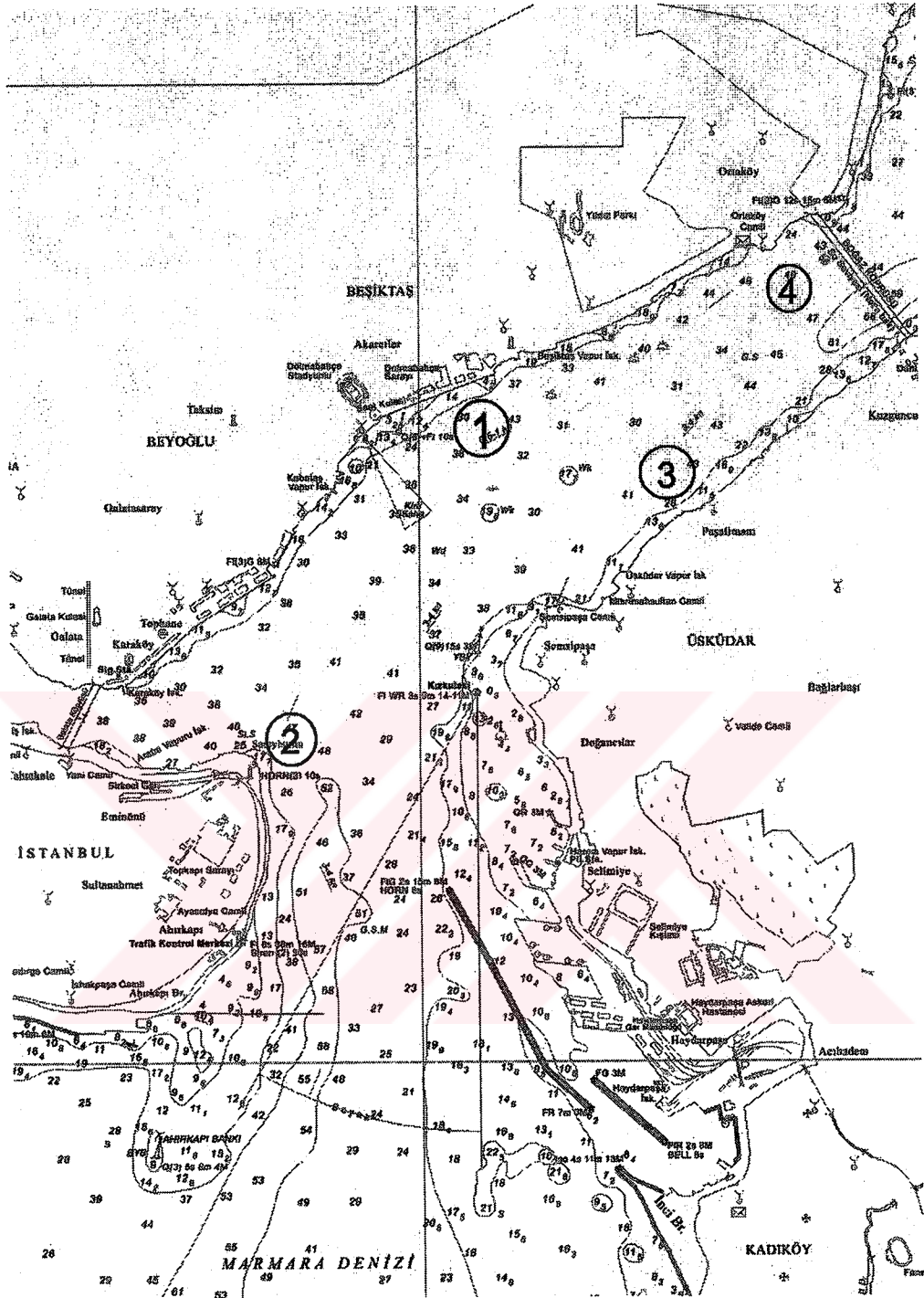


Şekil 3.17 Dolmabahçe açıklarında ADP'nin Boğaz tabanına yerleştirme çalışmaları
(Yüksel vd., 2003)

Çizelge 3.4 Ölçüm istasyonlarına ait bilgiler

İstasyonlar			Ölçüm Zamanı (saat)			Derinlik (m)	Tarih
İstasyon	Koordinatlar	Yer	Başlama zamanı	Deniz tabanına Kurulma zamanı	Bitiş zamanı		
1	N 41,02,215 E 029,00,048 668,224-45,957UTM	Dolmabahçe Sarayı	13:16	13:24	14:50	-24.8	08/05/2003
4	N 41,02,642 E 029,01,408 670,116_45,45,796 UTM34	Galatasaray Üniversitesi	14:51	15:03	15:18	-42.8	08/05/2003
2	N 41,00,857 E 028,59,323	Sarayburnu	16:26	16:28	17:13	-25.4	08/05/2003
3	N 41,00,885 E 029,01,113	Paşa Limanı	17:57	17:57	18:15	-24.6	08/05/2003
1(*)	N 41,02,169 E 028,59,950 0668,059,45,44,73 OUTM	Dolmabahçe Sarayı	11:00	10:00	13:00	-25.00	09/05/2003- 02/07/2003 02/09/2003

* Her saat için üç dakikalık örnek alınmıştır



Şekil 3.18 Ölçüm istasyonlarının yeri
(Dolmabahçe, Sarayburnu, Paşalimanı, Galatasaray Üniversitesi)
(Yüksel vd., 2003)

3.3.2. Değerlendirme

Şekil 3.19-3.22'de kısa süreli akıntı ölçümleri gösterilmiştir. Bu şekillerden Sarayburnu ve Pasalimanı açıklarındaki hız profilleri Dolmabahçe ve Galatasaray Üniversitesi açıklarındaki istasyonlara göre daha üniform dağılıma sahiptir. Ancak gerek Sarayburnu gerekse Pasalimanı istasyonlarındaki akıntı hızları daha büyüktür. Dolmabahçe ve Galatasaray Üniversitesi açıklarında akımın döndüğü akıntı hızı bileşenlerinden ve yönsel dağılımdan görülmektedir.

Dolmabahçe'de akım yüzeyde NE doğrultusunda akmakta buna karşılık yüzeyden 12 m derinde WSW doğrultusunda akmaktadır. Bu durum EW doğrultusundaki bileşke hızdan da görülmektedir ve bu doğrultudaki bileşke hızın şiddetide daha büyüktür (Şekil 3.19).

Galatasaray Üniversitesi açıklarında yapılan ölçüm sonuçları ise daha karmaşık bir akım yapısının oluştuğunu göstermektedir. Akıntı yüzeye yakın akım bölgesinde WSW doğrultusundan dip akımda NE' e dönmektedir (Şekil 3.20).

Sarayburnu istasyonunda, akıntı doğrultusu NS istikametinde Marmara Denizine doğrudur. NS hız bileşeni EW bileşenine göre hakim olduğu görülmektedir (Şekil 3.21).

Paşalimanı istasyonunda ise akım doğrultusu SW yönündedir. Akıntı kıyıdan uzaklaşan istikamettedir. Ölçüm yapılan bölgede yüzeye yakın derinliklerde hız daha büyük bulunmuştur (Şekil 3.22).

Bu ölçümler birlikte değerlendirildiğinde Boğazın sahip olduğu geometrinin akıntı yapısı üzerinde çok önemli etkisinin olduğu görülmektedir. Buna göre kesitin genişlediği Dolmabahçe- Galatasaray Üniversitesi açıklarındaki istasyonlarda akıntı saat akrebi yönünde dönmektedir, buna karşın Paşabahçe ve Sarayburnu açıklarında bulunan istasyonlarda Boğazın genel karakteristik özelliği olan akıntı doğrultusu Marmara Denizine doğrudur. Ancak akıntı ölçümlerinin yapıldığı tarihlerde dip akıntısı mevcut istasyonlarda Marmaradan Karadeniz istikametinde karakteristik oluşumu gözlenememiştir. Bu durum daha önce TC Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesinin gözlemleri ile uyum içindedir (Şekil 3.23).

İstanbul Boğazında daha önce uzun süreli ve sürekli ölçüm gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada 116 gün süre ile (09/05/2003-02/09/2003) 1299 akıntı verisi toplanarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Ölçümler akıntı yapısının en karmaşık olduğu istasyonlardan Dolmabahçe'ye yerleştirilmiştir. Ölçümler her saat başında 3 dakika süre ile kayıt alınacak şekilde yapılmıştır, üç dakikalık kayıtların ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Bu

istasyonda yapılan ölçümler değerlendirilmiş ve bazı kritik kayıtlar Şekil 3.24 ve 3.34 de gösterilmiştir.

Mayıs-Haziran dönemine ait şekiller incelendiğinde akıntı hızının WE bileşeni NS bileşeninden daha büyüktür. Meteorolojik koşullara bağlı olarak değişen akım yapısı Şekil 3.25’de görüldüğü gibi zaman zaman üst tabakada NS doğrultusunda olmasına rağmen genelde SN doğrultusundadır. Bileşke akıntı doğrultusu ise NE-WE istikametindedir. Ölçümün gerçekleştirildiği periyotta hız 0.7 m/s’lik büyüklüğe ulaşmaktadır. Zaman zaman derinlik boyunca NS bileşeni yön değiştirmektedir. Bu durum Karadeniz’den Marmara’ya doğru olan üst akımın Sarayburnu’ndan dönerek SN doğrultusunda akmasından kaynaklanmaktadır.

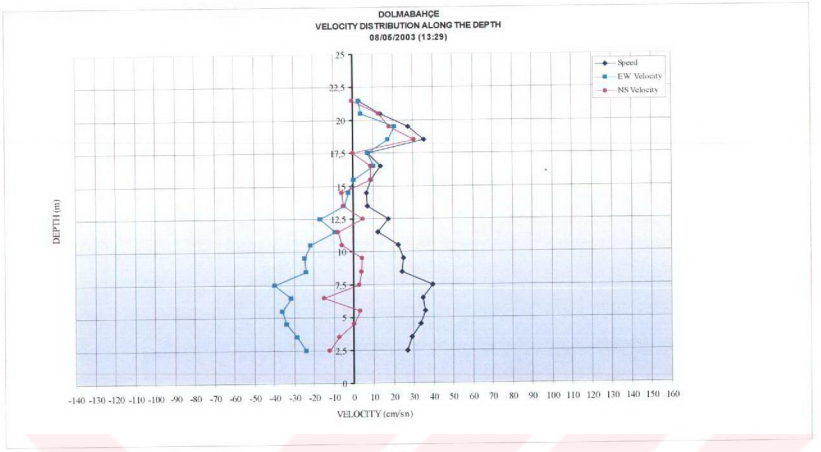
Temmuz Ağustos ayına ait veri ve şekiller incelendiğinde genelde akımın WE doğrultusunda meydana geldiği görülmektedir, ancak zaman zaman derinlik boyunca bu bileşen yön değiştirerek EW doğrultusunda da akımın oluştuğu görülmektedir. Bu durum üst ve alt tabakalarda tamamen zıt yönlerde meydana gelebilmektedir. Meteorolojik koşullara bağlı olarak değişen akım yapısı Şekil 3.33’te görüldüğü gibi zaman zaman üst tabakada NS doğrultusunda olmasına rağmen genelde SN doğrultusundadır. Akımın NS bileşeni zaman zaman derinlik boyunca yön değiştirmektedir. Ölçümün gerçekleştirildiği periyotta hız WE doğrultusunda 0.92 m/s’lik büyüklüğe ulaşmaktadır. Yine bu iki aylık periyotta WE bileşeni NS bileşeninden büyük olup bileşke hız 0.30 m/s’ mertebelerindedir (Şekil 3.35-37). Bu sonuçlardan Dolmabahçe açığında saat akrebi doğrultusunda dönen, derinlik boyunca üniform olmayan ve meteorolojik koşullara karşı çok hassas olan bir akım yapısının olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm süresi boyunca dip akımının sıcaklığı 8 ile 14°C arasında değişmiştir. Daha önceki kısa süreli ölçümlerde dip akımında sıcaklık tüm istasyonlarda 10°C civarındadır.

Şubat 2003 tarihinde Sarayburnu açıklarında yapılan ölçümler sırasında ise derinlik boyunca sıcaklık değişimi Şekil 3.38’de gösterilmiştir. Sıcaklık üst tabakada 8°C iken alt tabakada iki katına ulaşarak 16°C olmaktadır. Arakesit düzleminde lineer bir değişim mevcuttur ve arakesit tabakası -20 ile -30 m derinlikleri arasında yaklaşık 10m kalınlığa sahiptir. Bu bölgede yüzey akıntısının hızının değişimide Şekil 3.39’da gösterilmiştir. Akıntı hızı yüzeyde bu periyotta 4 knot (yaklaşık 2 m/s) ulaşmıştır.

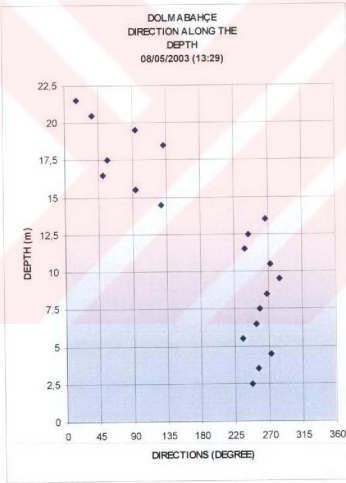
Şekil 3.40’da ISKI(2001) tarafından yapılan akıntı hızı ölçümleri gösterilmiştir. 12/07/2003 tarihinde yapılan ölçüm istasyonu bu çalışmada dikkate alınan Dolmabahçe ve Galatasaray

Üniversitesi akıntı ölçüm istasyonlarına yakın konumdadır ve B2A istasyonun batısında kalan kesitte akıntı hız ve doğrultuları bu çalışmada elde edilen ölçüm değerleriyle uyum içindedir.

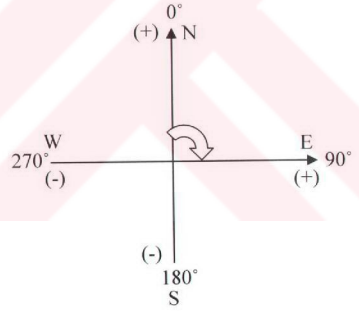
Şekil 3.41-42 Sarıyer ve Şekil 3.43-44 ise Florya meteoroloji istasyonlarında Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında ölçülen saatlik hızların değişimi görülmektedir. Sarıyer meteoroloji istasyonu Boğaz'ın kuzeyinde kalsa da, bu istasyon içerde kalması nedeniyle İstanbul Boğazı'nın Karadeniz çıkışındaki koşulları tam olarak yansıtmamaktadır. Buna rağmen iki uç istasyondaki meteorolojik koşulların karşılaştırılması açısından değerli verilere sahiptir. Rüzgar hızları incelendiğinde Boğaz'ın kuzeyinde Poyraz, güneyinde ise Lodos doğrultusunda esen rüzgarların hakim oldukları görülmektedir ve ölçüm periyodunda 6 m/s'lik hızlara ulaşmaktadır. Aynı istasyonlardaki basınç değişimleri ise Şekil 3.45-48'de verilmiştir. Basınç verileri incelendiğinde ise Florya istasyonundaki basınç değerlerinin Sarıyer istasyonundan daima 2 mb daha büyük olduğu görülmektedir. Basınç değişimleri her iki istasyonda aynı eğilime sahiptir. Bu şekillerden meteorolojik koşullardaki ani değişimlerin belirli bir faz farkı ile İstanbul Boğazı üzerinde etkisini gösterdiği görülmektedir. Örneğin Şekil 3.26'da 31 Mayıs 2003'te ölçülen hız Mayıs-Haziran döneminin en büyük hızlarından biridir ve bu tarihten yaklaşık 6 saat önce en büyük rüzgar hızı NW doğrultusunda Sarıyer'de ölçülmüştür. Aynı tarihte basınç değerleri en düşük değerine ulaşmıştır.



(a)

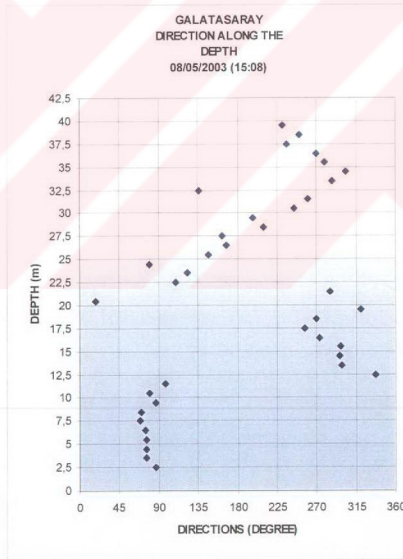
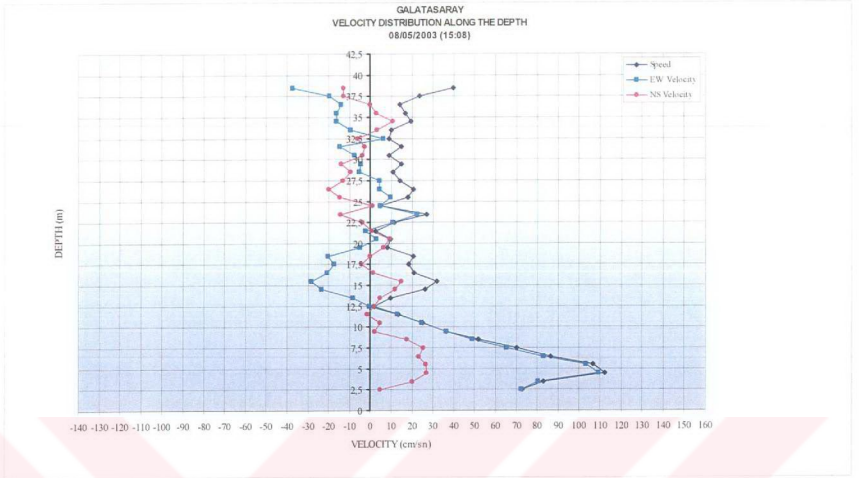


(b)

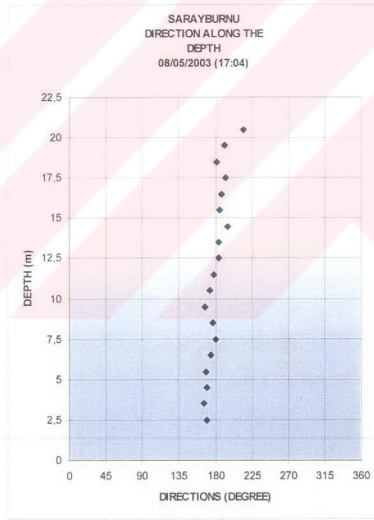
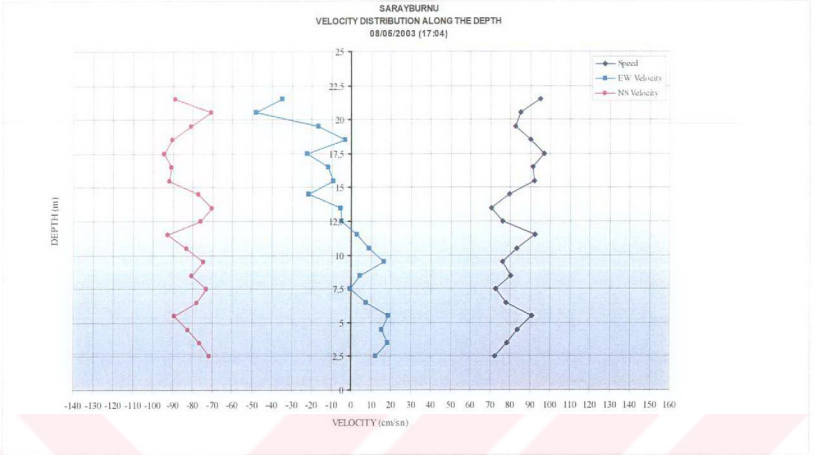


(c)

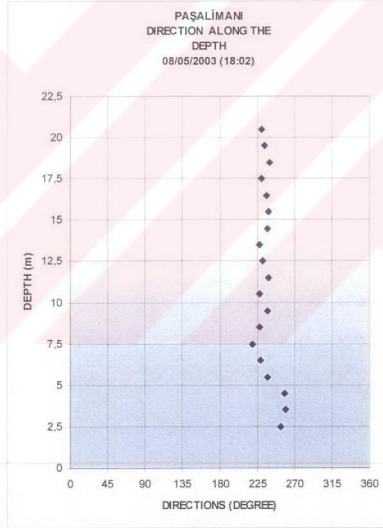
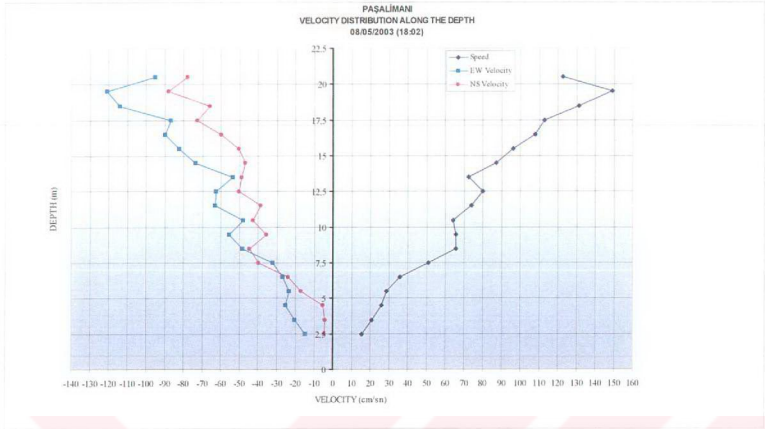
Şekil 3.19 Dolmabahçe istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü
(a) Hız profili (b) Yönsel değişim (c) İşaretlendirme
(Yüksel vd., 2003)



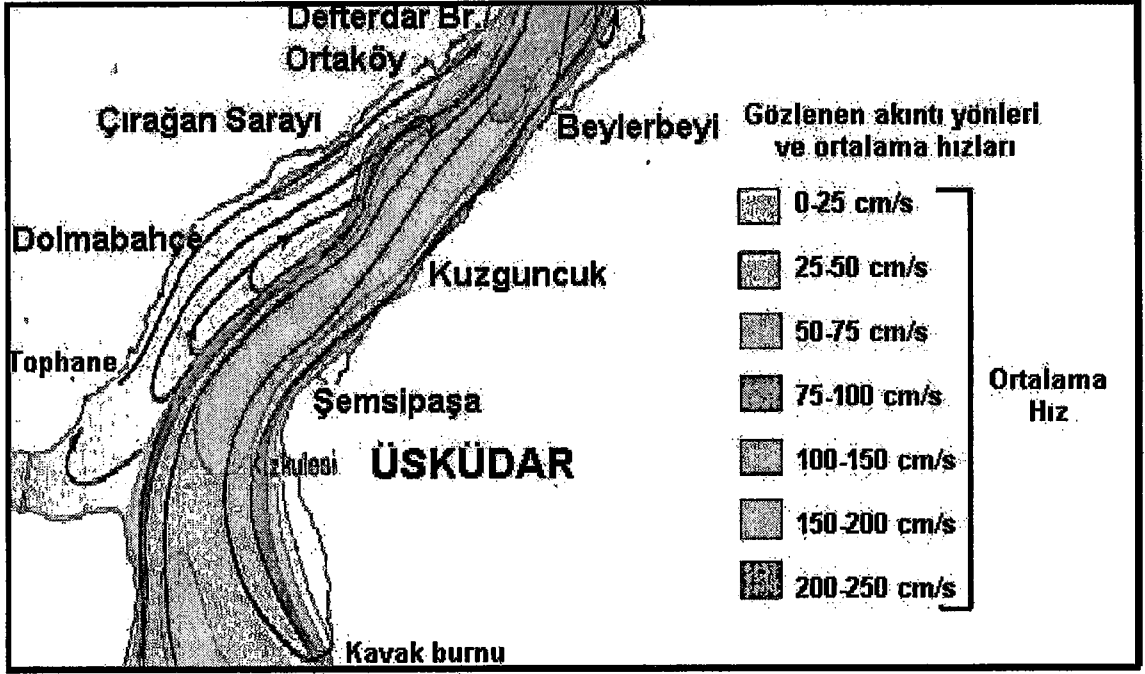
Şekil 3.20 Galatasaray Üniversitesi istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü
(a) Hız profili (b) Yönsel değişim
(Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.21 Sarayburnu istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü (Yüksel vd., 2003)
(a) Hız profili (b) Yönsel değişim

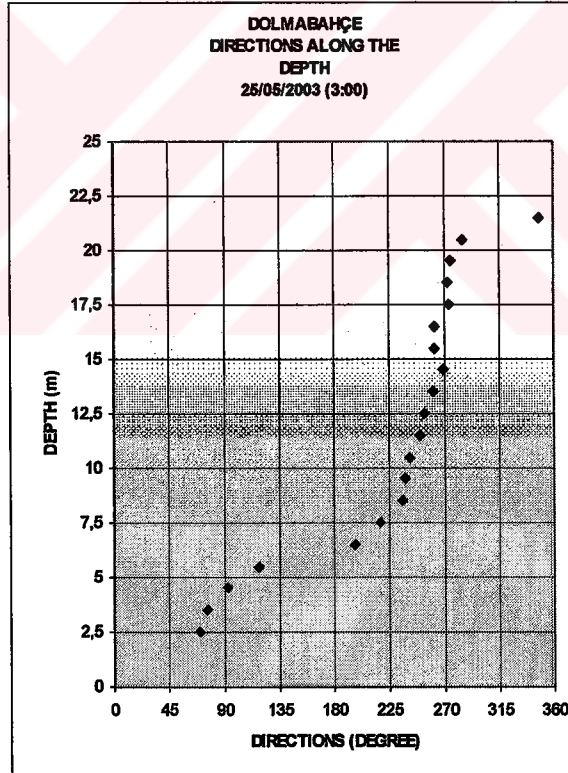
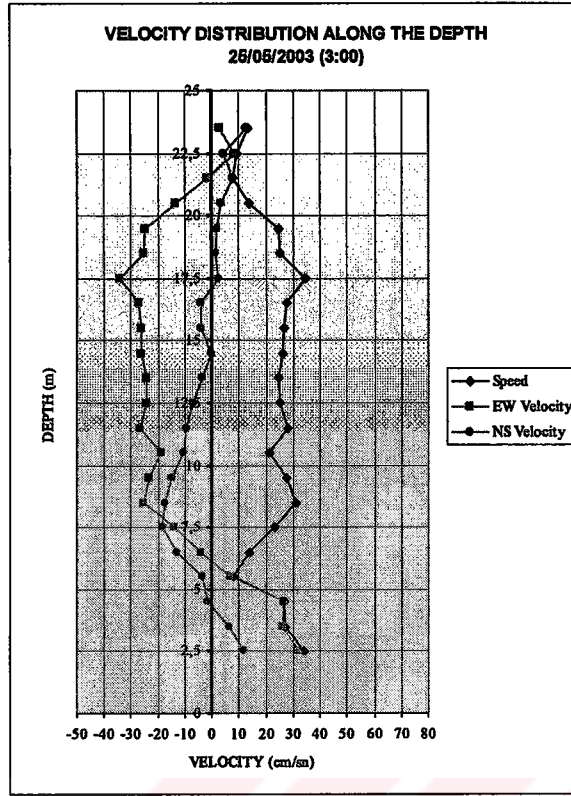


Şekil 3.22 Paşalimani istasyonunda kısa süreli akıntı ölçümü (Yüksel vd., 2003)
(a) Hız profili (b) Yönel değişim

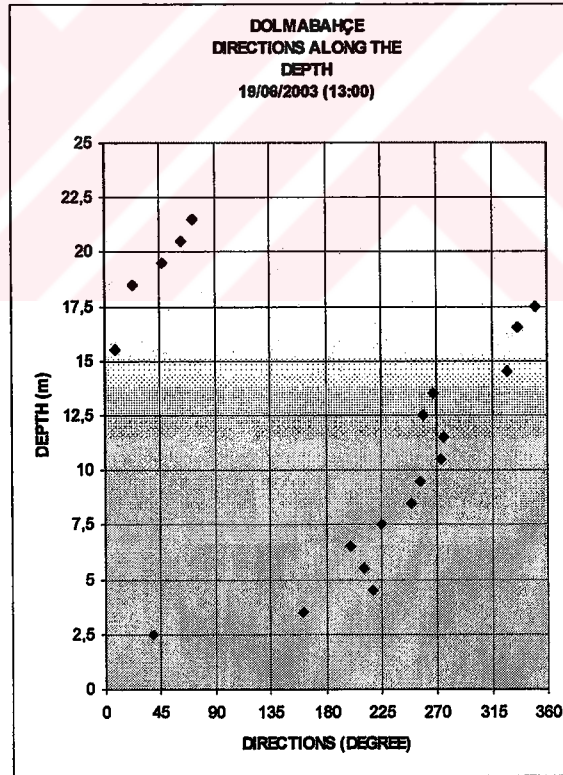
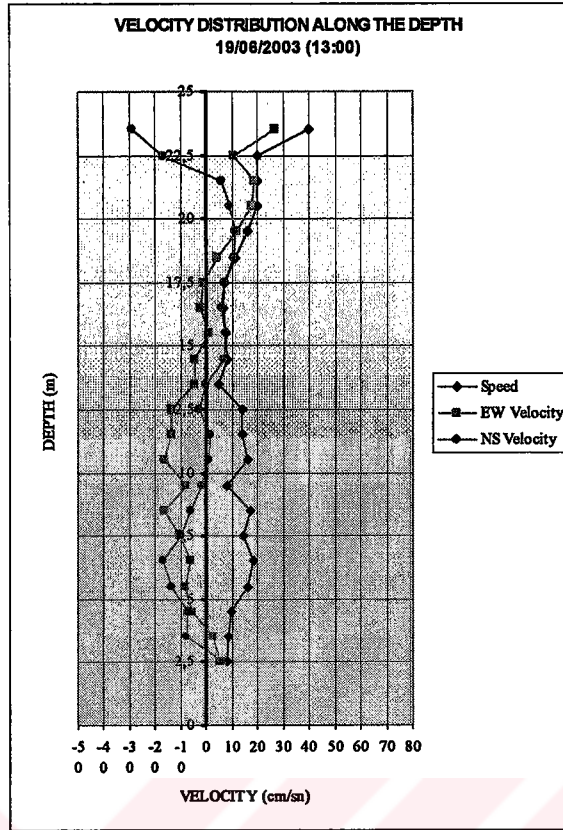


Şekil 3.23 İstanbul Boğazı'nda akıntı durumu (Yüksel vd., 2003)

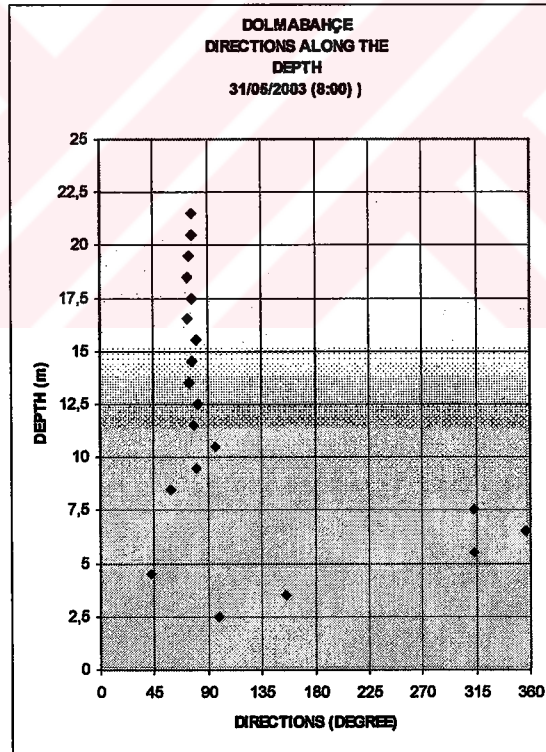
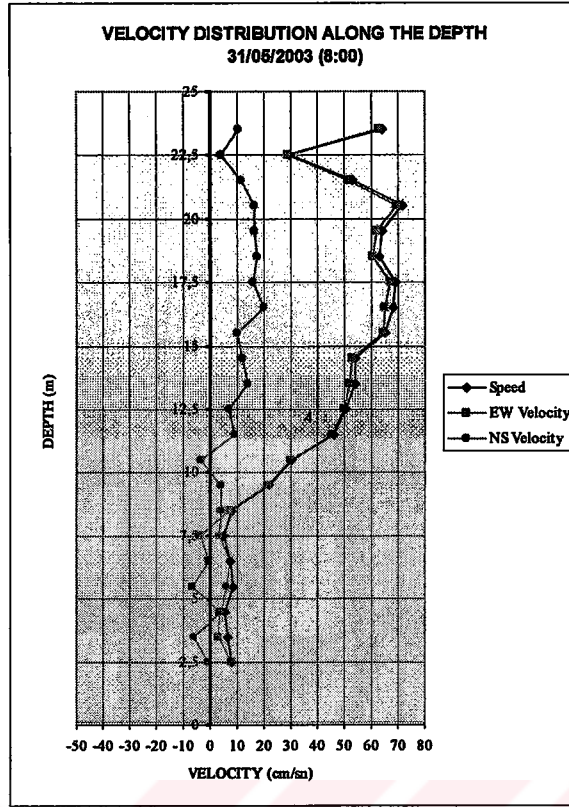
Şekil 3.31'de Dolmabahçe ölçüm istasyonundaki uzun süreli sürekli akım ölçümleri sonucunda akıntı hızları ve doğrultularının zamansal değişimi gösterilmiştir. Ölçümlerin değerlendirilmesi sırasında alet hatalarından kaçınmak amacıyla tabandan 2.5 m yüzeyden 2 m'lik bölgelerdeki ölçümler dikkate alınmamıştır. Tabandan belirli yükseklikte ölçüm değerlerinin dikkate alınmasının nedeni tabana yerleştirilen 1.5 yüksekliğindeki beton platform ve 1m yüksekliğindeki alet derinliğidir. Bu nedenle Şekil 3.31 (a)'da 23 m üzerindeki bölge dikkate alınmamalıdır. Şekil 3.32 ve 3.33'de sırasıyla Sarıyer (Kireçburnu) ve Florya Meteoroloji istasyonlarından alınan rüzgar hız kayıtları çizilmiştir. Ayrıca yine aynı Meteoroloji istasyonlarının kayıtlarından basınç değerlerinin değişimide Şekil 3.34 ve 3.35'de gösterilmiştir. Bu şekillerden meteorolojik değişimlerin İstanbul Boğazının akıntı yapısı üzerindeki etkileri görülebilmektedir.



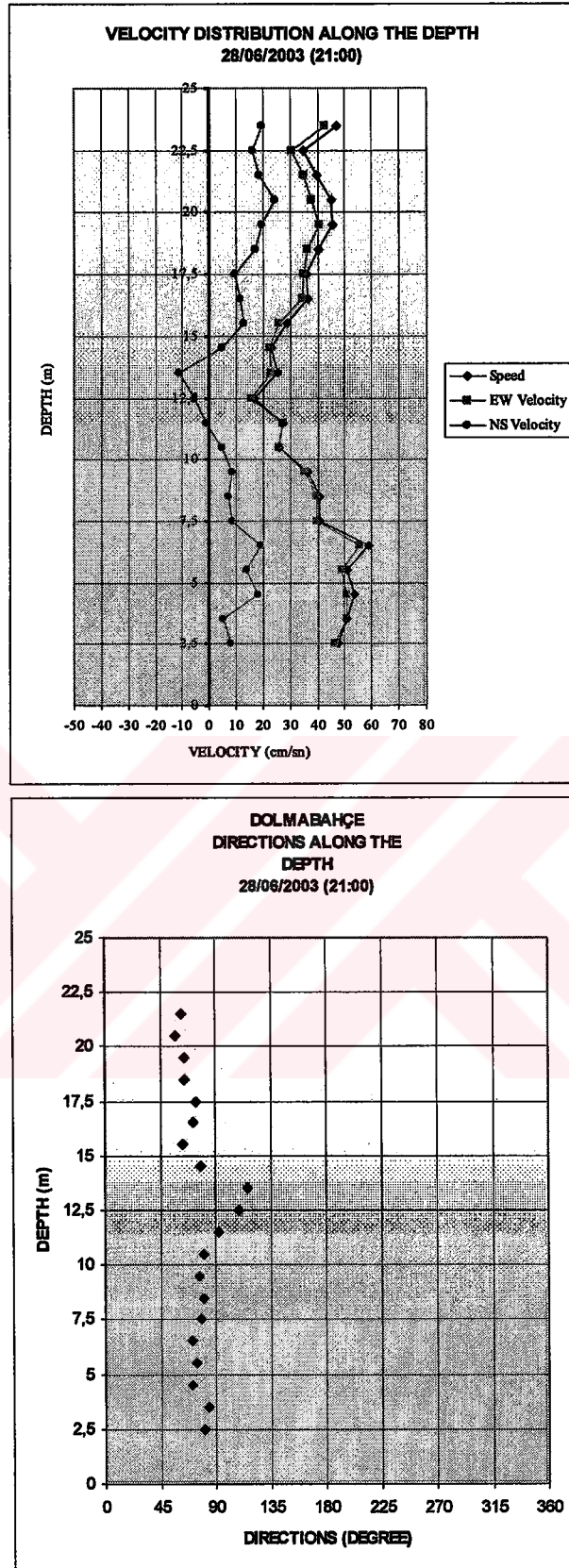
Şekil 3.24 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



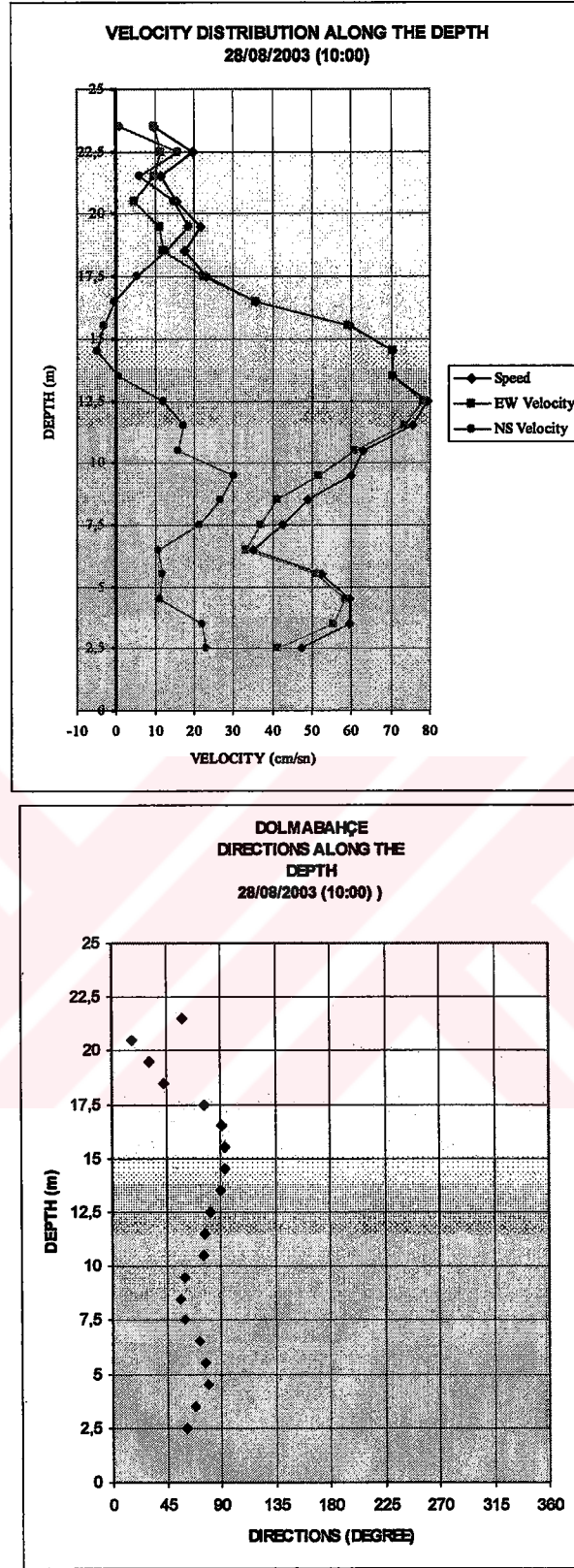
Şekil 3.25 Dolmabahçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



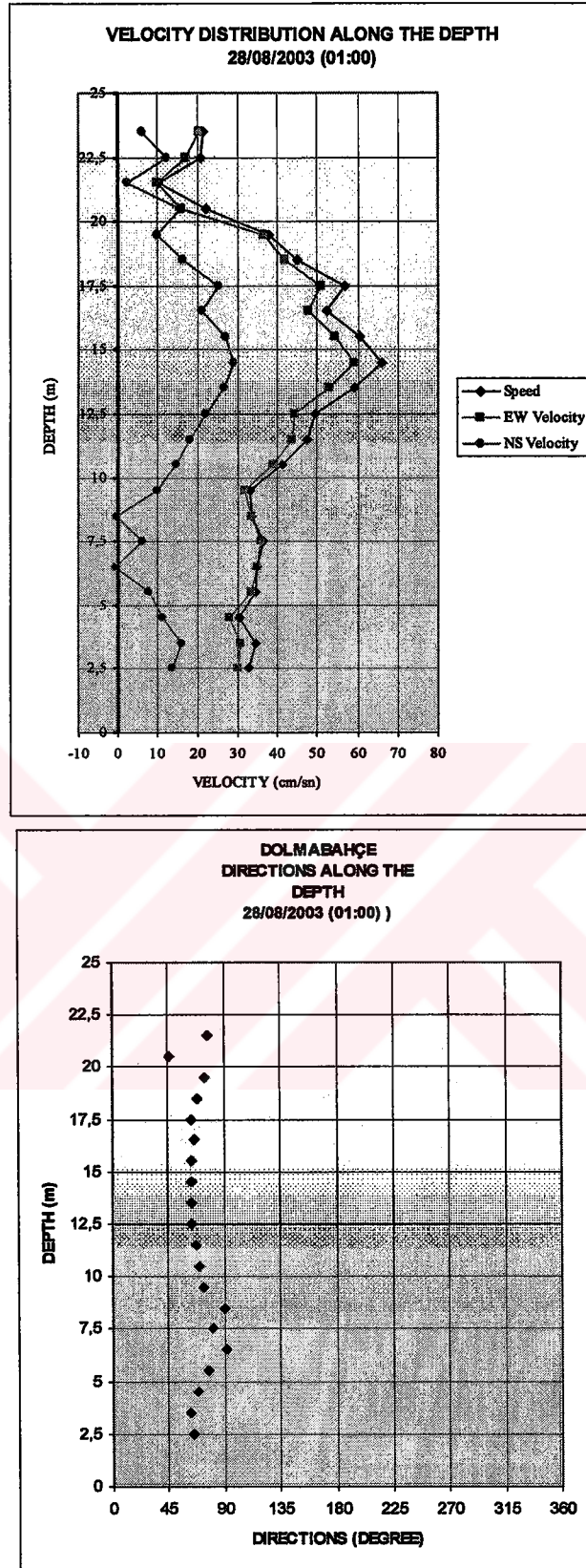
Şekil 3.26 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



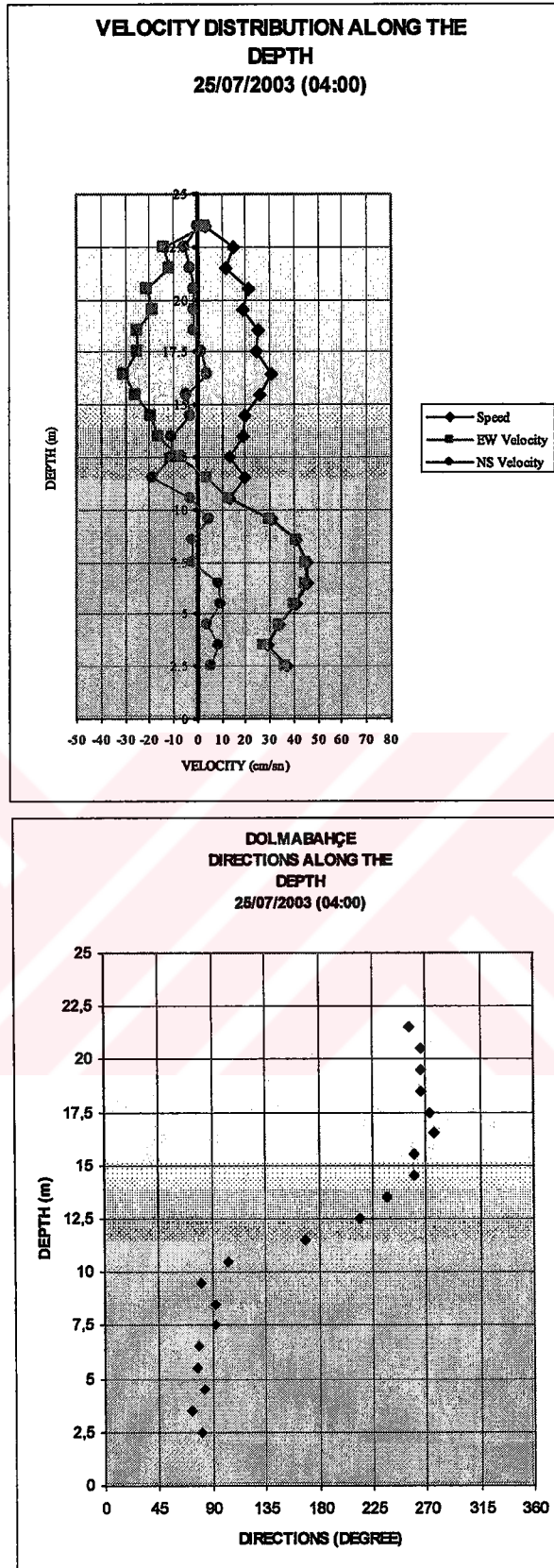
Şekil 3.27 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



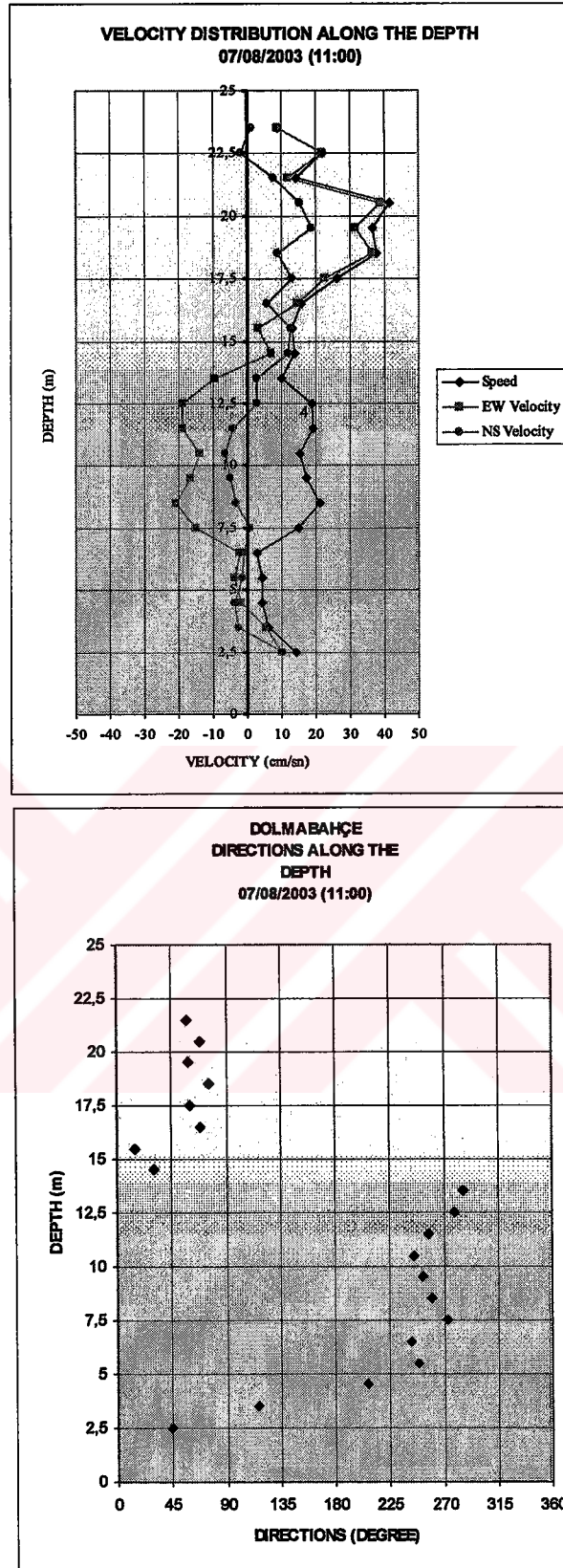
Şekil 3.28 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



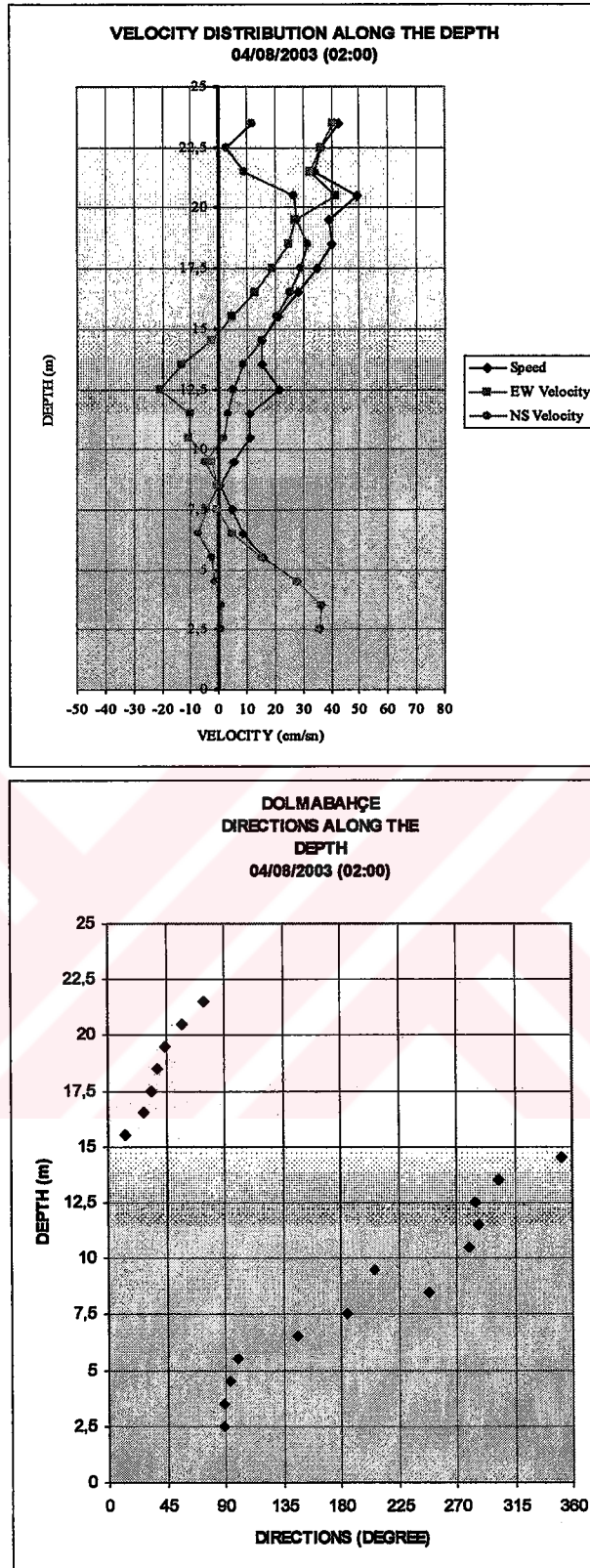
Şekil 3.29 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



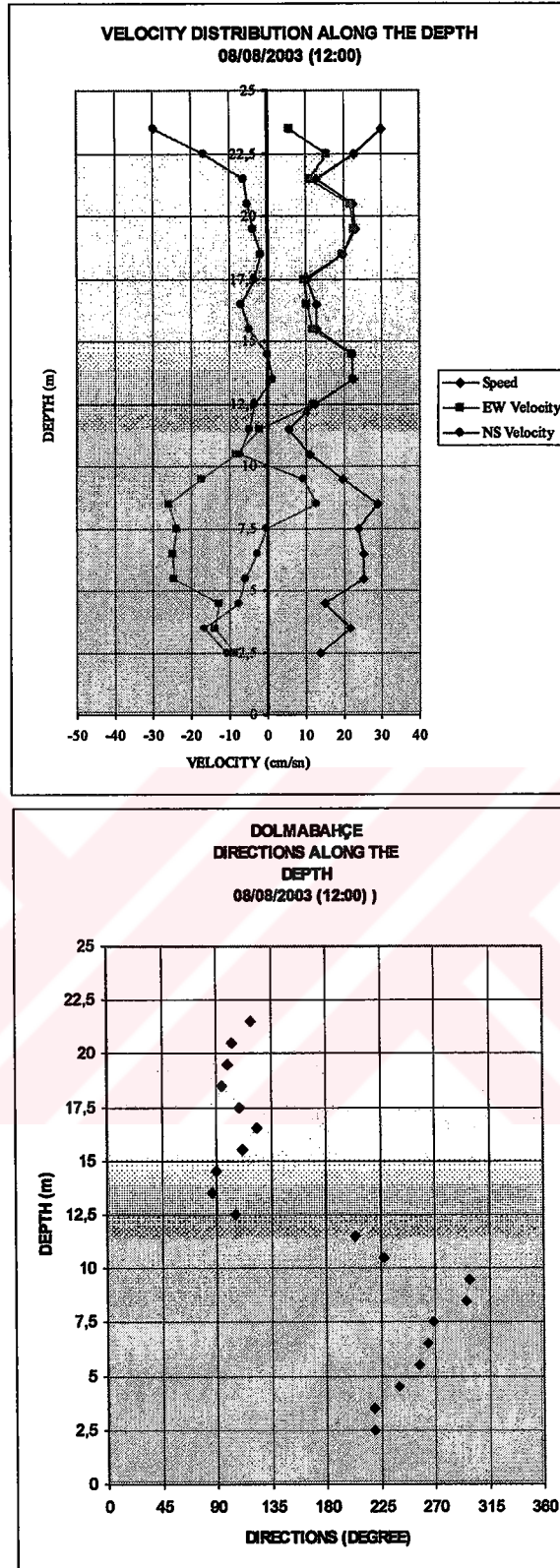
Şekil 3.30 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



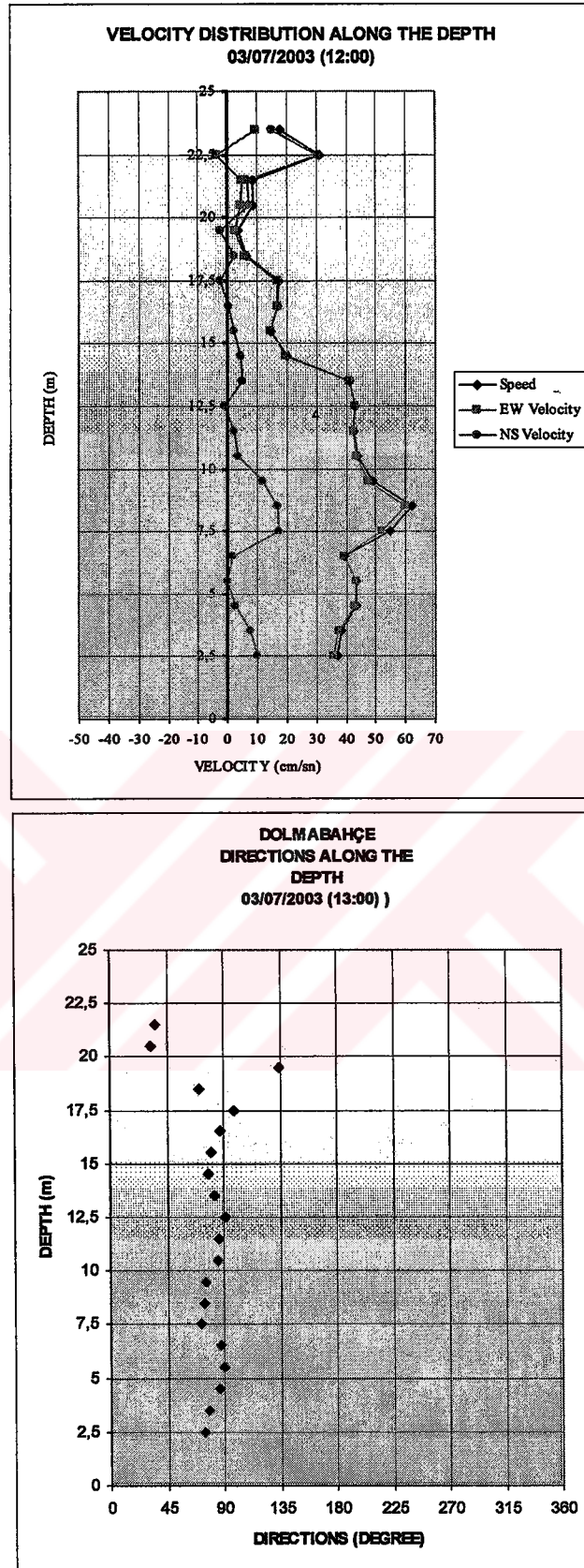
Şekil 3.31 Dolmabağci istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.32 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.33 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)

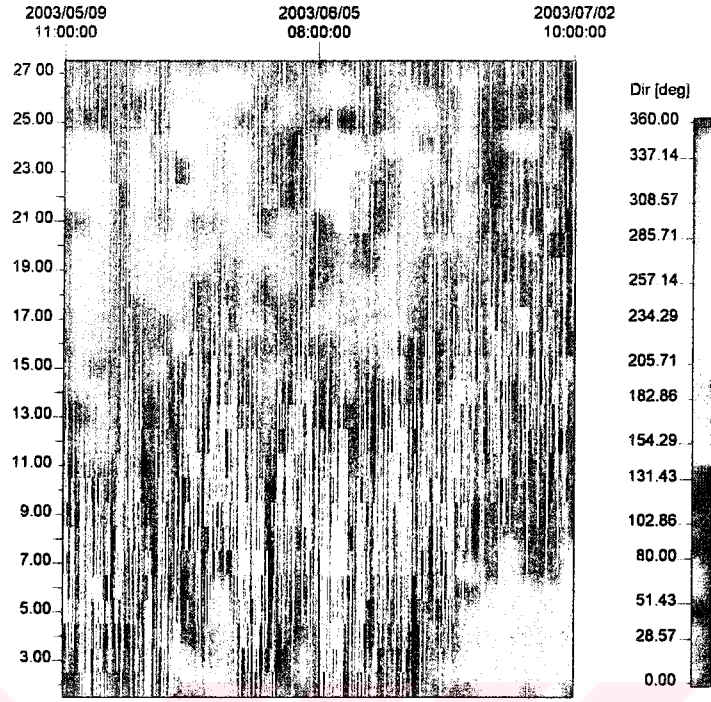


Şekil 3.34 Dolmabağçe istasyonunda yapılan sürekli ölçüm (Yüksel vd., 2003)

2003/ 7/10 15:51:45

[DOLBH001.ADP]

ADP Current Direction in Degrees

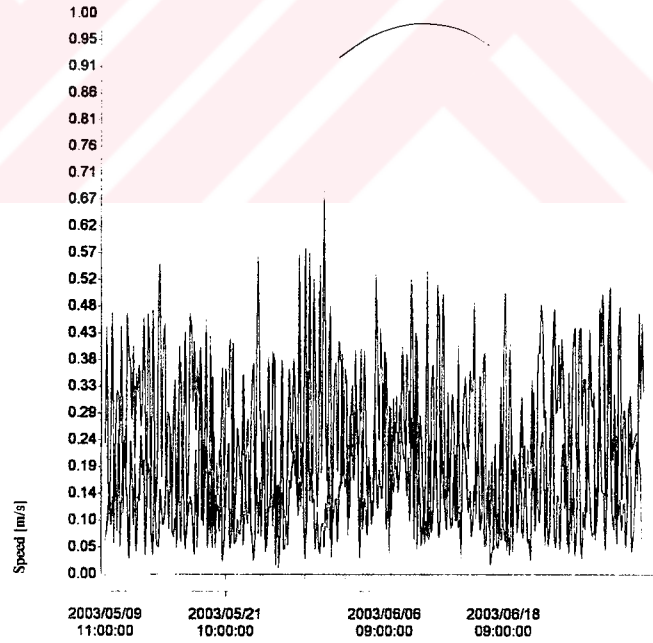


(a) Yönel değişim

2003/ 7/10 15:37:03

[DOLBH001.ADP]

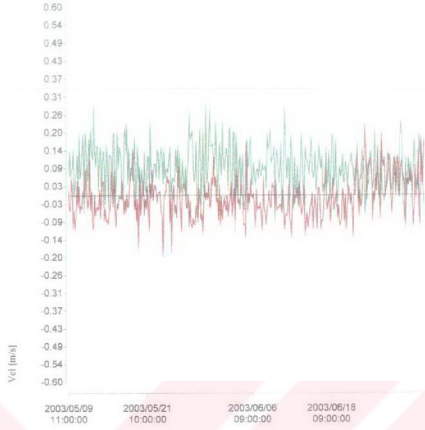
ADP Current Speed

(b) Bileşke hızın zamansal değişimi
(kırmızı tabandan 4m (-21m), yeşil tabandan 15m (-10m))Şekil 3.35 Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Mayıs-Haziran)
(Yüksel vd., 2003)

2003/7/10 15:33:07

ADP North/South Velocity

[DOLBH001 ADP]

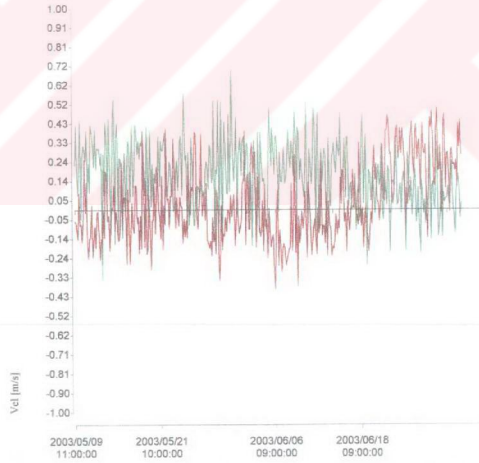


(c) NS hız bileşeni

2003/7/10 15:32:48

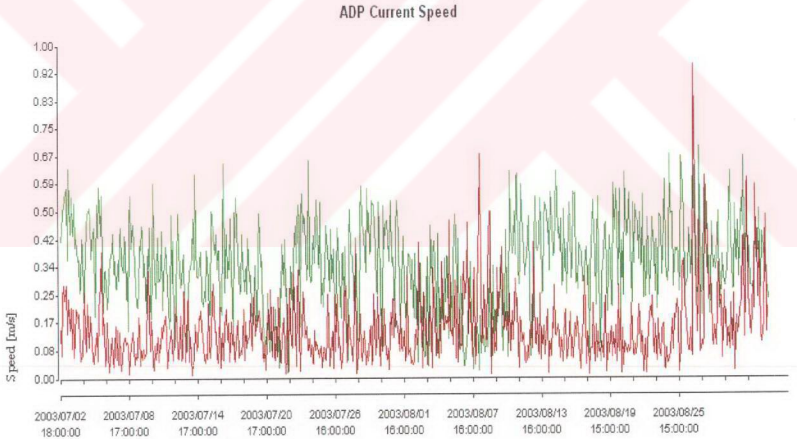
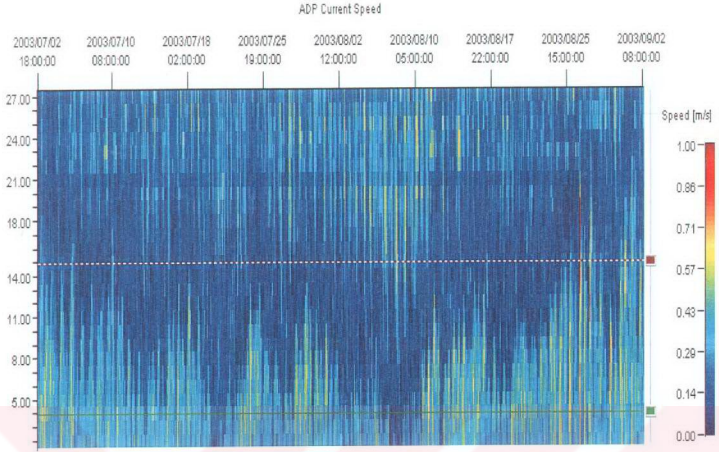
ADP East/West Velocity

[DOLBH001 ADP]



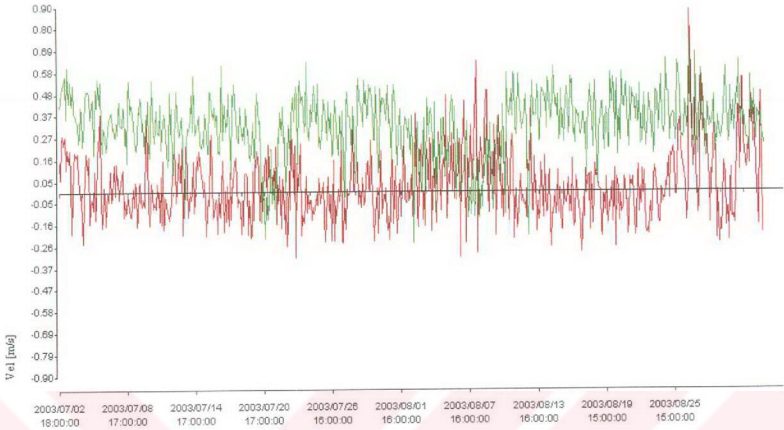
(d) EW hız bileşeni

Şekil 3.35 Devam



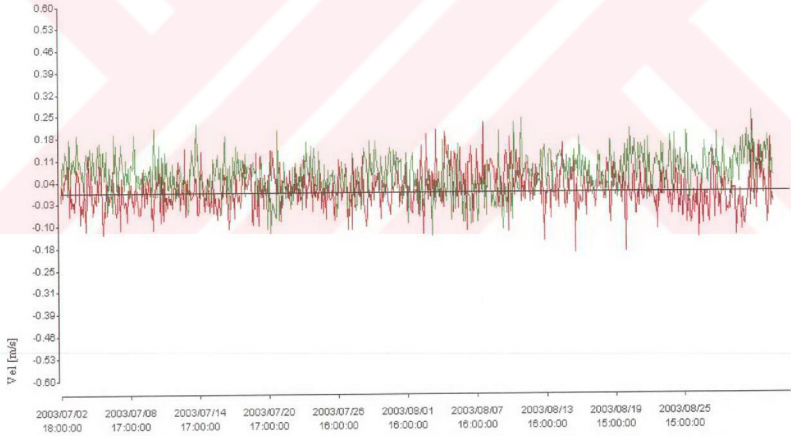
Şekil 3.36 Dolmabahçe uzun süreli sürekli ölçüm sonuçları (Temmuz-Ağustos)
(Yüksel vd., 2003)

ADP East West Velocity



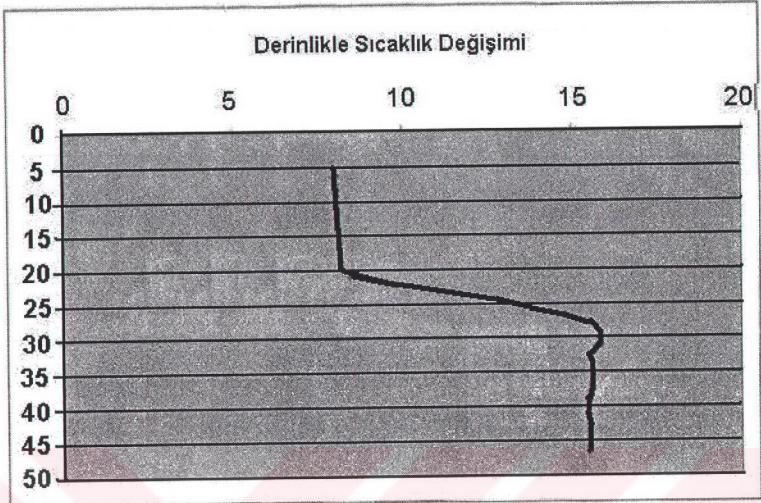
(c) EW bileşeni

ADP North/South Velocity

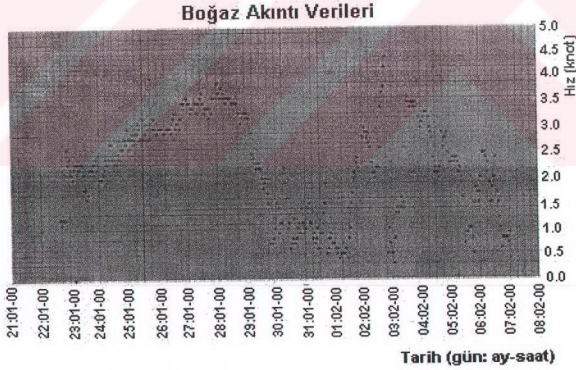


(d) NS bileşeni

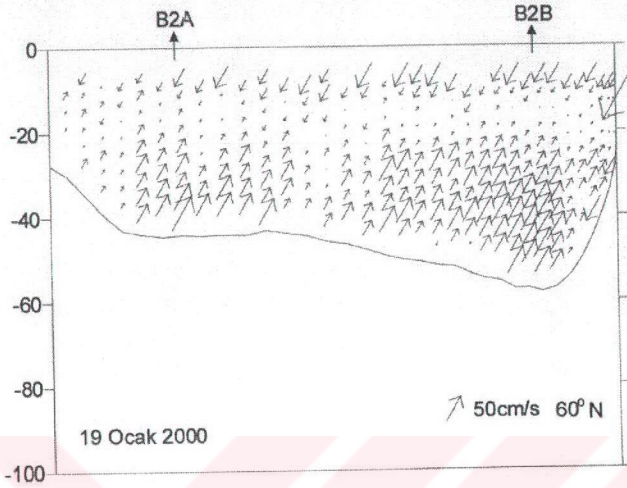
Şekil 3.37 Devam



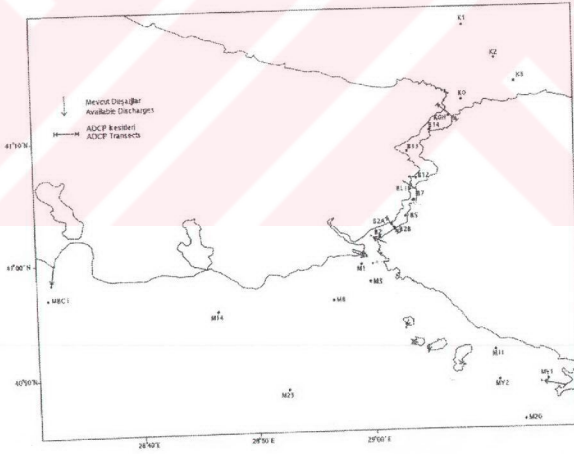
Şekil 3.38 Boğazın Marmara Denizi çıkışı Sarayburnu açıklarındaki sıcaklık değişimi (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.39 Boğazın Marmara Denizi çıkışı Sarayburnu açıkları yüzey akıntı hızının değişimi (Yüksel vd., 2003)

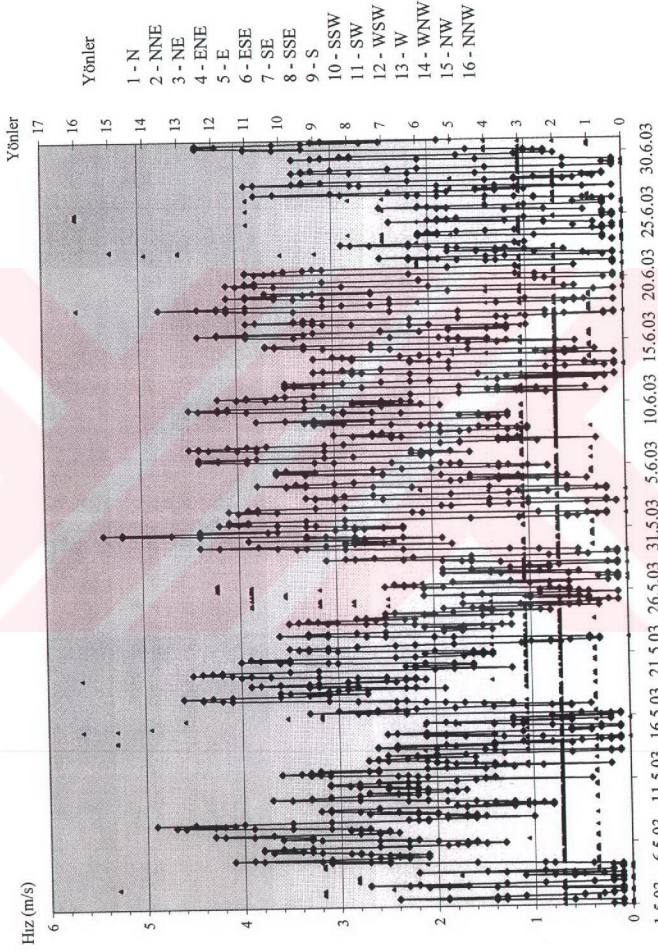


(a) Akıntı hızları

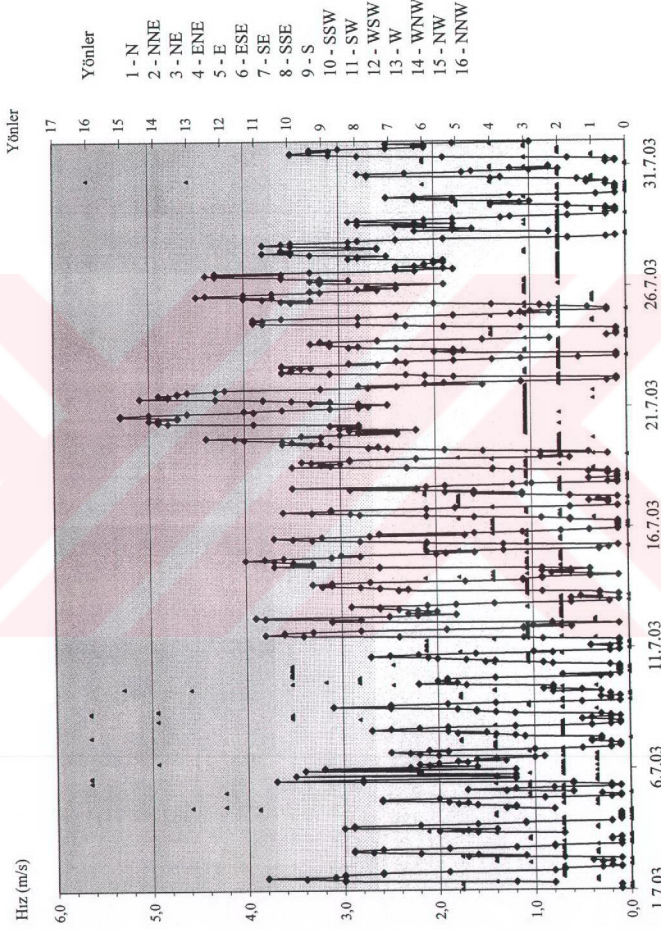


(b) Akıntı ölçüm istasyonlarının konumu

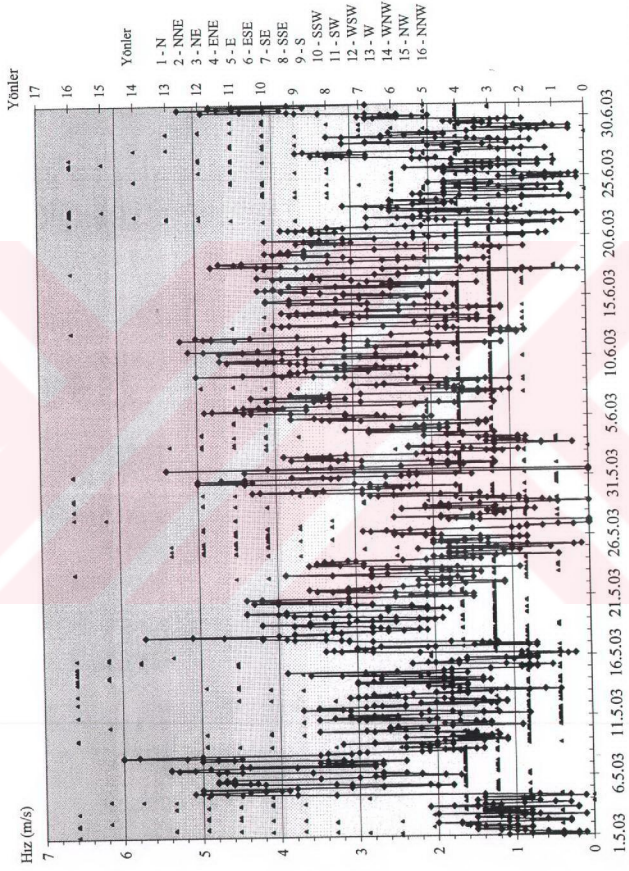
Şekil 3.40 İstanbul Boğazı Güneyi akıntı hızlarının kesit boyunca dağılımı (ISKİ, 2001)



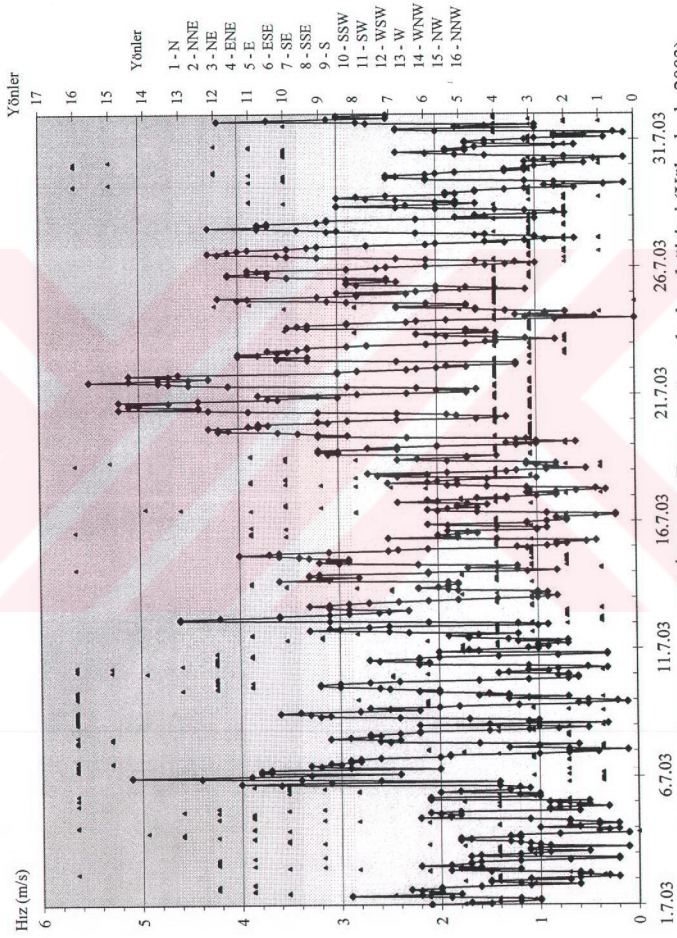
Şekil 3.41 Sarıyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Mayıs ve Haziran rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003)



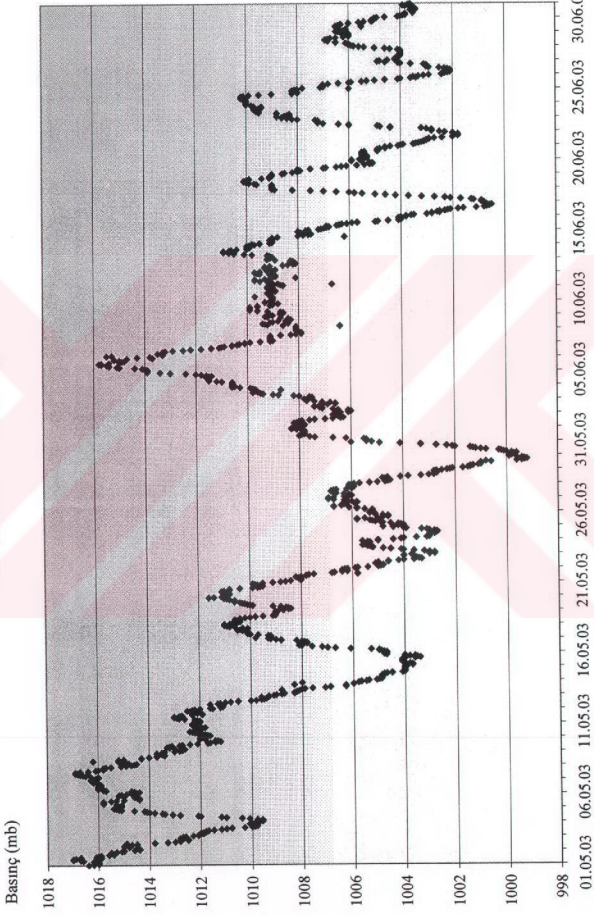
Şekil 3.42 Sanyer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Temmuz rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.43 Florya Meteoroloji İstasyonu Mayıs ve Haziran rüzgar hızları değişimi (Yüksel vd., 2003)

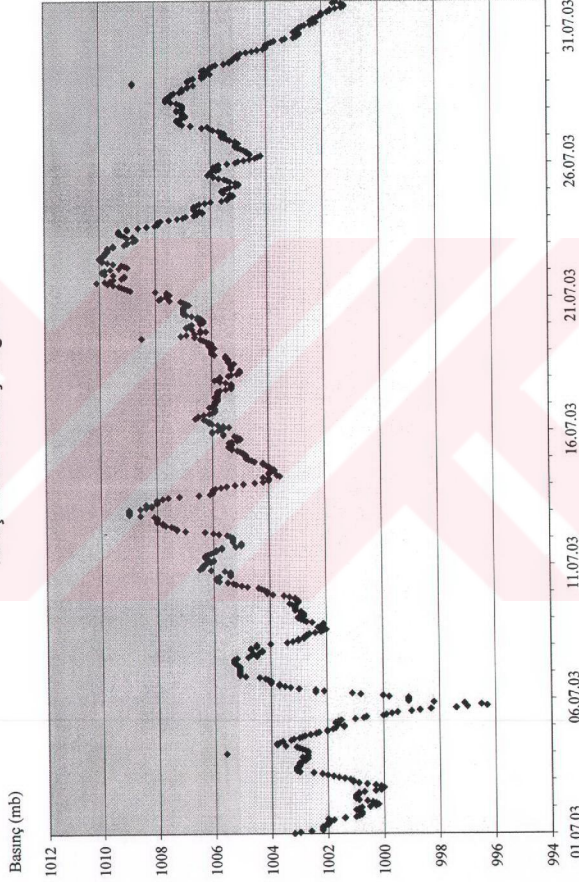


Kireç Burnu Basınç Değerleri

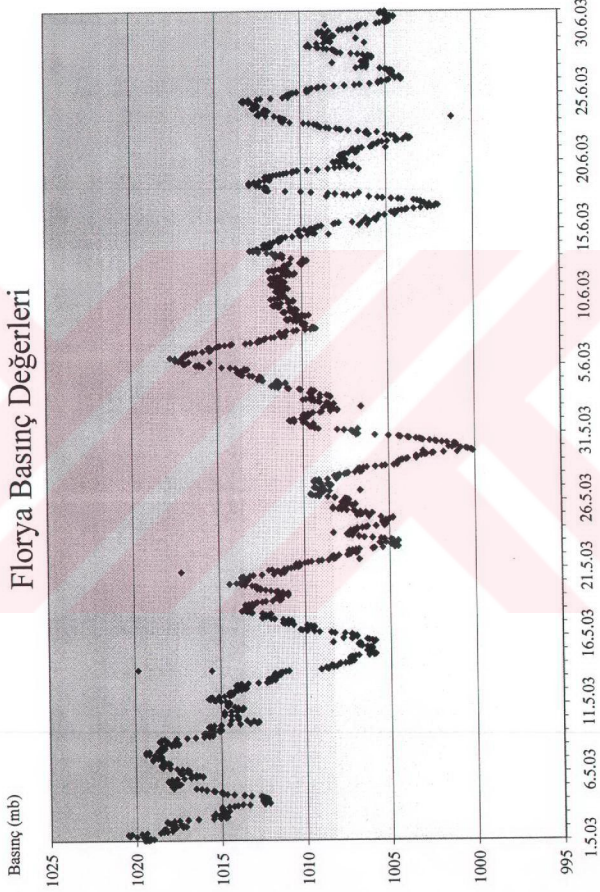


Şekil 3.45 Saryer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Mayıs ve Haziran basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003)

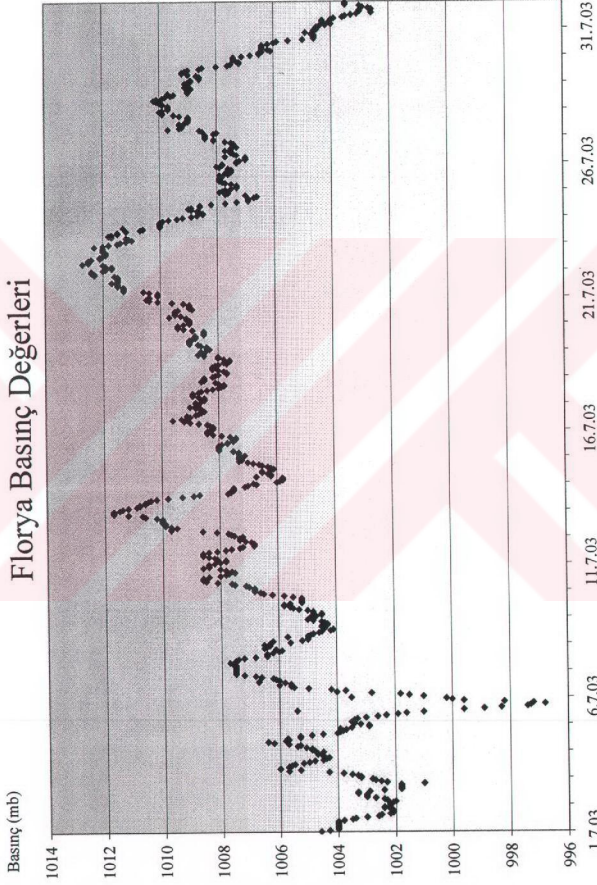
Kireç Burnu Basınç Değerleri



Şekil 3,46 Saryer Meteoroloji (Kireçburnu) İstasyonu Temmuz basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.47 Florya Meteoroloji İstasyonu Mayıs ve Haziran basınç değerlerinin değişimi (Yüksel vd., 2003)



Şekil 3.48 Florya Meteoroloji İstasyonu Temmuz Basınç Değerlerinin Değişimi (Yüksel vd., 2003)

4. SAYISAL MODELLEME ve DEĞERLENDİRME

4.1 Mike 3 ile Hidrodinamik Modelleme

Mike 3 üç boyutlu akım yapısını modelleyebilen genel bir modelleme sistemidir. Mike 3 hidrolik ve hidrolikle bağlantılı bir çok olayın tanımlanması ve modellenmesine olanak veren çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Mike 3'ün uygulama alanlarını üç ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar:

- Haliçler ve kıyılarda etkili hidrolik olaylar ve oşinografi: Bu ana başlık yoğunluk akımları, dalga hidroliği ve rüzgarın neden olduğu akıntuların modellenmesini içermektedir. Bunlara örnek olarak enerji santallerinin soğutma suyu sistemlerinin tasarımı, kıyı koruma çalışmaları ve denizaltı boru hatlarının tasarımı örnek verilebilir. Tüm bu yapı ve sistemlerin modellenmesinde Mike 3'ün Hidrodinamik Modülü kullanılmaktadır.
- Çevre hidroliği: Bu ana başlık kirleticilerin klasik advectif-dispersiv yayılımı simülasyonlarından kompleks kimyasal reaksiyonları da içeren su kalitesi simülasyonlarına kadar çevresel süreçlerle ilgili oldukça geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Bunlarla kastedilen yağmur suyu, atık su soğutma suyu deşarjlarının deniz yaşamı üzerinde yarattığı etkilerin (bakteri konsantrasyonları, ötrifikasyon, bakteriyel oksijen ihtiyacı-çözülmemiş oksijen konsantrasyonu vs..) modellenmesidir. Modelleme sırasında Mike 3'ün Hidrodinamik Modül (HD) veya Adveksiyon-Dispersiyon Modüllerinden en az birinin kullanılması gerekmektedir. Bu iki modüle ek olarak Su Kalitesi (WQ), Ötrifikasyon (EU) ve Ağır Metal (PA) Modülleri de kullanılabilir.
- Sediment Prosesi: Arazi ıslahı veya atık madde deşarjı sonucu ulaşım kanalları, liman ağızları, kıyılar ve akarsu üzerine kurulu limanlarda çamur gibi kohezif maddelerin taşınımı ve sedimentasyon problemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar için Mike 3 HD ve Kohezif Taşınım Modülü veya Partikül Modülü kullanılması uygun olmaktadır.

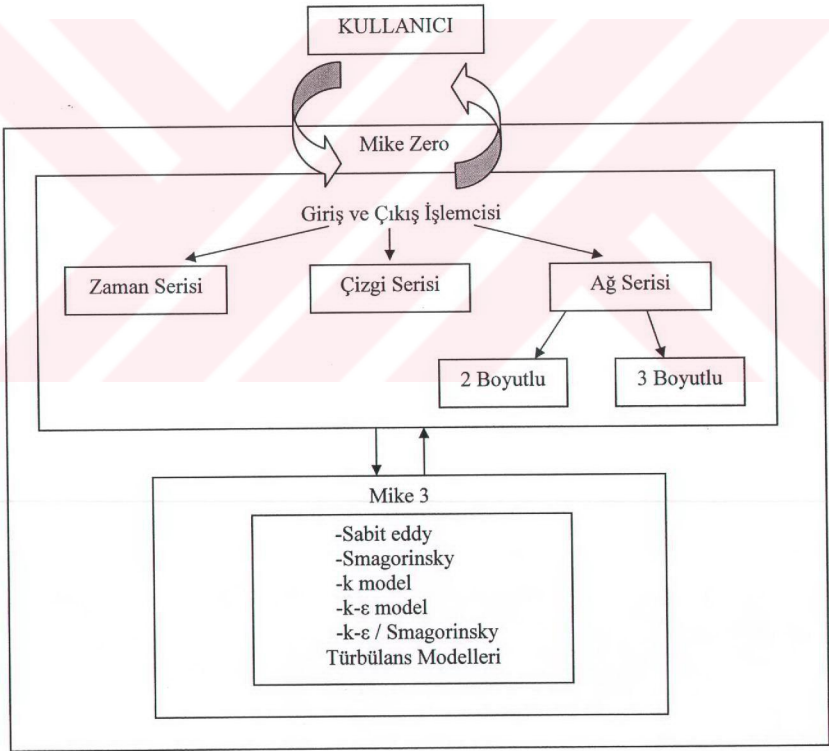
4.1.1 Hidrodinamik Modül

Mike 3 Hidrodinamik Modül (HD) aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Lineer olmayan üç boyutlu süreklilik ve momentumun korunumu denklemlerini çözmektedir.

- Yukarıdaki iki ana denkleme ikinci mertebeye hassasiyette Alternatif Doğrultulu Kapalı (ADI) sonlu farklar çözümü uygular.
- Smagorinsky eddy formülasyonu
- Bir denklem türbülans kapama problemi (k model)
- İki denklem türbülans kapama problemi (k- ϵ model)
- Düşeyde Bir Boyutlu Karışık k- ϵ , yatayda İki Boyutlu Smagorinsky formülasyonu
- Tuzluluk ve sıcaklığın taşınımında üçüncü mertebeden hassasiyete sahip açık sonlu farklar çözümü

Mike 3, Mike Zero Modülü'nde hazırlanan girdi verileri ile çalıştırılır, girdi verileri Şekil 4.1'de görüldüğü gibi farklı işlemciler yardımıyla hazırlanabilmektedir.



Şekil 4.1 Mike 3 kullanıcı arayüzü

4.2 Dikdörtgen Kanal

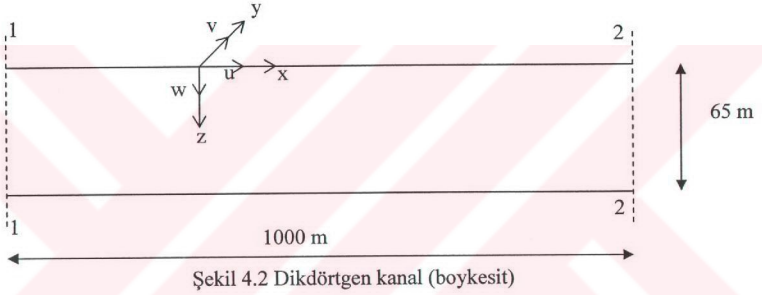
Boğaz hidrodinamiğinin modellenmesinden önce İstanbul Boğazı'nın boyutlarına benzer bir dikdörtgen kesitli kanal tanımlanarak iki tabakalı akım bu kanal boyunca oluşturulmuştur. Bu amaçla öncelikle İstanbul Boğazı için tanımlanacak sınır şartlarının benzerleri bu kanal içinde tanımlanmıştır. Geometrisi bilinen bu kanalda oluşan iki tabakalı akımın hidrodinamiği incelenmiştir.

4.2.1 Kanal Geometrisi ve Hidrodinamik Parametrelerin Tanımı

Şekil 4.2'de seçilen dikdörtgen kanalın boyutları ve koordinat sistemi gösterilmiştir. Kanalın tüm boyutları ile sayısal yöntem için seçilen ağ aralıkları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.2'de dikdörtgen kanala ait sınır şartları tuzluluk ve su seviyesi değişimleri olmak üzere Mike Zero işlemci dosyalarına uygun biçimde girdi değerleri tanımlanmıştır. Şekil 4.3'den görüldüğü gibi kanalın 1-1 kesitinde zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Su seviyesi değişimi 30 cm ye ulaştığında sabit kalmaktadır. Bu sınır şartı Mike Zero'da zaman serisi olarak tanımlanmaktadır. 2-2 kesitinde ise su seviyesi sabit tutulmuş ve değişimin olmadığı kabul edilmiştir. Böylece modellenenin başlangıcından 5.5 saat sonra iki kesit arasındaki su seviyesi farkı 30 cm ye ulaşmaktadır. Şekil 4.4'te ise gerek 1-1 kesiti ve gereksede 2-2 kesitindeki başlangıç tuzluluk değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.4 Mike Zero'nun ağ serisi giriş dosyasını göstermektedir. Bu şekil 1-1 ve 2-2 kesitlerindeki tuzluluğun modellenenin başlangıç şartı olarak bütün ağ noktalarında 18 psu olduğunu göstermektedir. Başlangıç şartı olarak verilen 18 psu tüm kanal boyunca tanımlanmıştır. Ancak tabakalı akımın kararlı olarak oluşabilmesi amacıyla 2-2 kesitinde 5 saat süresince $\Delta t=10$ dakika zaman aralıkları boyunca tuzluluk değerleri 0.7 psu artışla tabandan itibaren 50 m'de 35 psu olacak şekilde artırılmaya başlanmıştır. Daha yoğun olan alt tabakanın 1-1 kesitine bir tuzlu su kaması olarak ulaştığı zaman ön modelleme çalışmalarıyla tahmin edilerek 1-1 kesitinde de bu zaman periyodundan sonra tabandan itibaren 18 m derinlikte $\Delta t = 10$ dakika zaman aralıklarında tuzluluk değerleri 0.7 psu miktarlarında artırılmaya başlanmıştır. Bu sınır şartlarına ait $T = 30 \Delta t$ (300 dakika) zamanındaki değişimler Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de gösterilmiştir. Bu sınır şartlarının yukarıda belirtilen biçimde tanımlanmasının nedeni modelin stabil olarak çalışmasının istenmesinden kaynaklanmıştır. Eğer her iki sınırdaki tuzluluk değerlerinin zamansal değişimleri tanımlanmadan sabit verilmesi söz konusu olsaydı tuzlu su kamaları bloke olmaktadır ve model stabil olmayan çözüme sebep olmaktadır.

Modelleme Mike 3'ün sabit eddy türbülans seçeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mike 3'te tüm modellerin hidrostatik ve hidrostatik olmayan seçenekleri mevcuttur. Bu aşamada

modelleme için hidrostatik olmayan seçenek kullanılmıştır. Bu seçenek modelleme sırasında sıkışabilirlik etkilerini dikkate almaktadır. Çizelge 4.3'te modelleme sırasında dikkate alınan sayısal parametreler özetlenmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi x-y düzleminde 10'ar m'lik ağlar oluşturulurken düşeyde 1 m'lik ağ oluşturulmuştur. Simülasyon zamanı 96000 sn'dir. Çünkü simülasyonda tabakalı akımın tamamıyla gelişmesi ve bir süre kararlı halde oluştuğunun gözlemlenmesi istenmiştir. Bu amaçla simülasyon 96000 sn sonunda sona erdirilmiştir. Simülasyonda modelin stabilitesi için zaman aralığı 4 sn olarak, sabit eddy katsayısı ise Mike 3'ün verdiği sabit değer olan $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ olarak alınmıştır. Modellemede 64000 düğüm noktasında çözümüme gerçekleştirilmiştir.

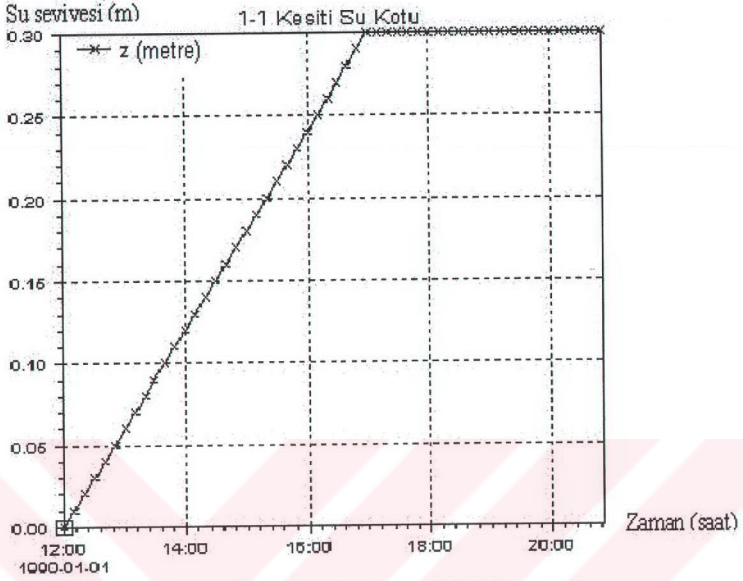


Çizelge 4.1 Dikdörtgen kanalın geometrik özellikleri

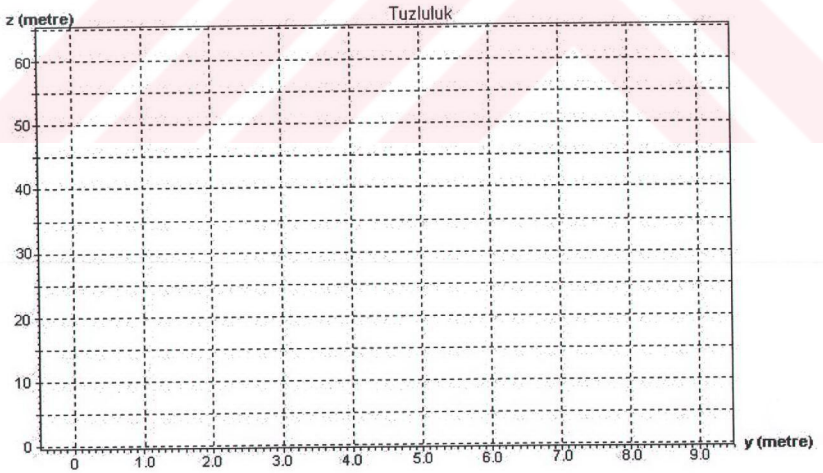
Uzunluk		1000 m
Genişlik		100 m
Derinlik		65 m
Ağ aralıkları	Yatay	10 m
	Düşey	10 m

Çizelge 4.2 Dikdörtgen kanal için tanımlanan sınır şartları

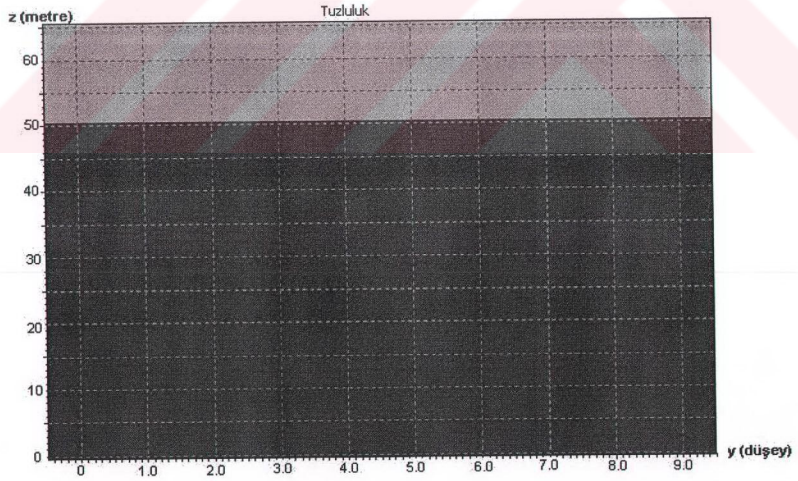
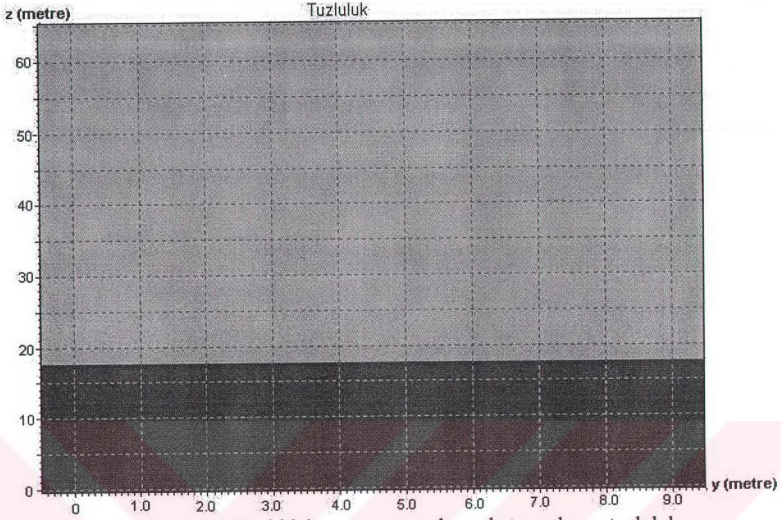
Özellik	Kesit	Değeri	Açıklama
Tuzluluk (psu)	1-1 Kesiti	18-35.5	Derinlik ve zamana bağlı değişen (grid serisi)
	2-2 Kesiti	18-35.5	
Su seviyesi (m)	1-1 Kesiti	0-0.3	Zaman serisi
	2-2 Kesiti	0	(sabit)



Şekil 4.3 1-1 Kesiti su seviyesi değişim grafiği



Şekil 4.4 1-1 ve 2-2 kesiti için başlangıçta tanımlanan tuzluluk (grid serisi olarak tanımlanmakta olup bütün noktalarda sabit 18 psu değerini almaktadır; yatay ve düşey ağ aralıkları 1 m ye karşılık gelmektedir)



Çizelge 4.3 Sayısal Parametreler

Modül seçimi	Non-Hidrostatik		Değişken yoğunluk		
Batimetri	Üniform dikdörtgen kanal (1000×500×65 m)		$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
			10	10	1
Simülasyon periyodu	Başlangıç	01.01.1990 12:00:00	Zaman adımı sayısı		24000
	Son	02.01.1990 14:40:00	Herbir zaman adımı aralığı		$\Delta t=4$ sn
Türbülans modeli	Sabit Eddy		$0.5 \text{ m}^2/\text{s}$		

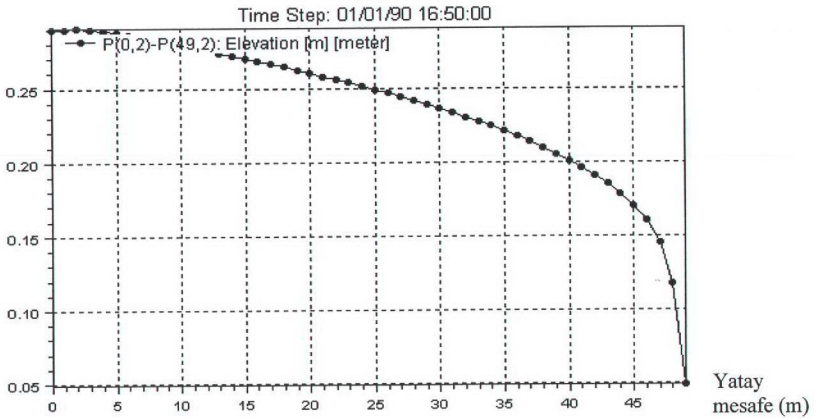
4.2.2 Değerlendirme

4.2.2.1 Su Yüzü Değişimi

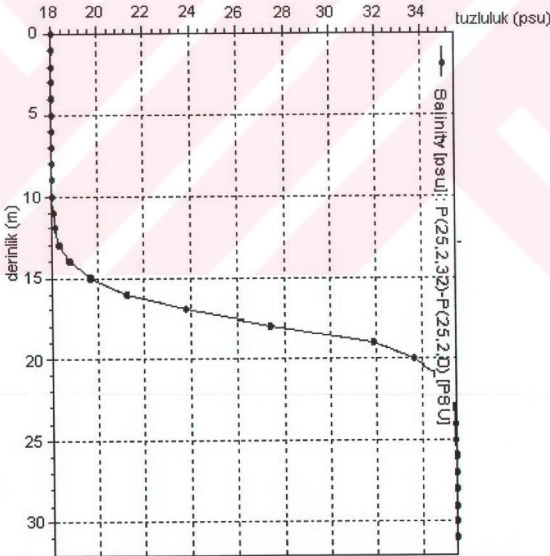
Dikdörtgen kesit hali için 96000 sn'nin sonunda elde edilen su yüzü değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi su yüzü değişimi 1-1 ve 2-2 kesitleri arası sınır şartında tanımlandığı gibi 0 ile 30 cm arasında değişim göstermektedir. Su yüzündeki değişim yatay basınç gradyanını (barotropik kuvvet) yaratmaktadır.

4.2.2.2 Tuzluluğun Değişimi

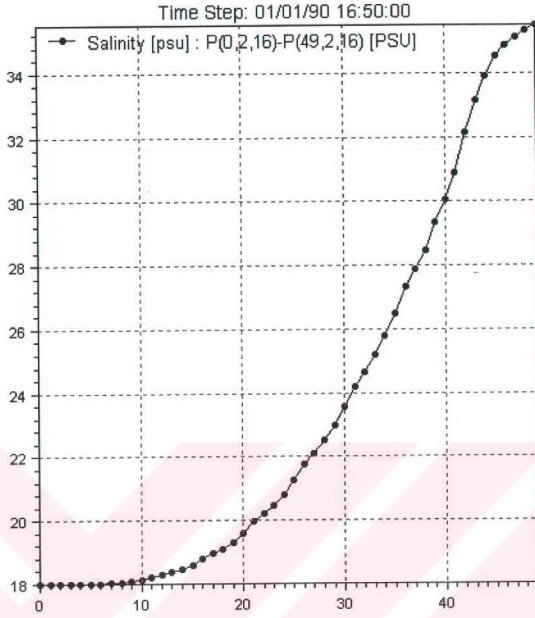
Şekil 4.8'de simülasyonun kararlı hale ulaşmasından sonra kanalın eksenindeki ($x = 500$. ve $y = 250$. m) derinlik boyunca tuzluluğun değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden alt ve üst akımların oluşturduğu tuzlu su kamaları açık olarak görülmektedir. Şekil 4.9'da ise kanalın 32 m derinlikteki eksenini boyunca tuzluluğun değişimi verilmiştir. Bu şekilden iki tabaka arasındaki arakesit düzlemi eğiminin almış olduğu kararlı hal görülmektedir. Şekil 4.10 kanal boyunca tüm derinliklerdeki kanal eksenini boyunca tuzluluğun değişimi görülmektedir. Bu şekilden gerek tabakalı akımın oluşumu gerekse arakesit düzlemindeki yoğunluk ve eğimin değişimi görülebilmektedir.



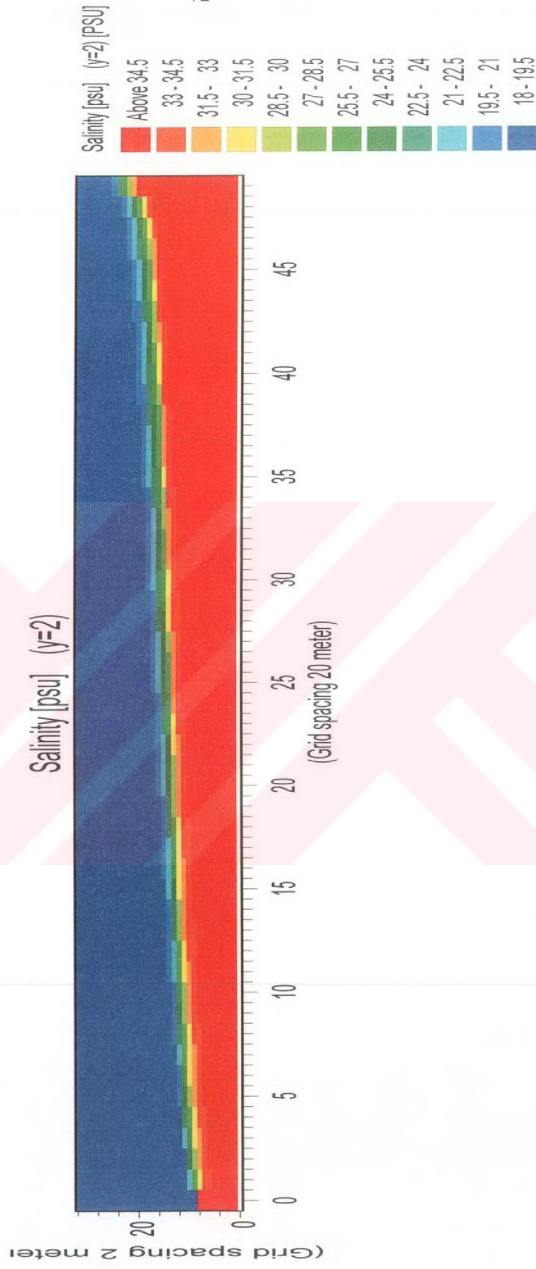
Şekil 4.7 Son zaman adımı için su yüzü değişimi (kararlı hal) (yatayda her bir aralık 20m, düşeyde ise 0.1 m yi göstermektedir)



Şekil 4.8 Kanalın orta noktasındaki düşey boyunca tuzluluk değişimi (son zaman adımı) (Yatayda her bir birim 2 m ye karşı gelmektedir.)



Şekil 4.9 Kanal boykesitinin ortasından geçen eksen boyunca tuzluluk değişimi (son zaman adımı) (yatayda herbir aralık 20 m ye karşı gelmektedir.)



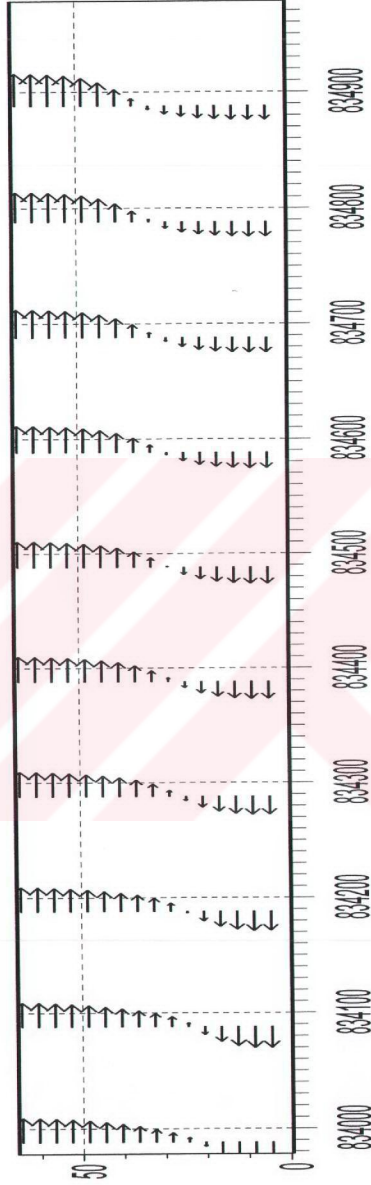
Şekil 4.10 Kanal boykesiti boyunca arakesit düzleminin ilerleyişi (son zaman admindında)

4.2.2.3 Hız Alanı

Şekil 4.11'de x eksenini boyunca (kanal eksenini boyunca) yatay hız bileşeninin (u) değişimi verilmiştir. Bu şekilde üst tabakadaki düşük yoğunluklu akımın 1-1 kesitinden 2-2 kesitine, alt tabakadaki yüksek yoğunluklu akımın ise 2-2 kesitinden 1-1 kesitine aktığı vektörel olarak görülmektedir. Kanalın 500. m'sinde alınan en kesitte y eksenini boyunca oluşan v hız bileşeninin değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi ana akım doğrultusuna dik ve ana akıma göre daha düşük şiddetle sekonder akım yapısının oluştuğu görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi kanal ekseninde üst akımda saat akrebi doğrultusunda alt akımda ise saat akrebinin tersi doğrultusunda sekonder akım oluşmaktadır. Düşey hız bileşeninin (w) değişimi ise Şekil 4.13'de verilmiştir. Yine bu şekilde de görüldüğü gibi düşey doğrultuda akım alanı oluşmaktadır. Ana akım doğrultusundaki hızın şiddetiyle karşılaştırıldığında daha düşük mertebedeki hız değerlerinin taban ve yüzey yakınında daha büyük mertebelere ulaştığı ve düşey hız bileşeni doğrultusunun üst akımda yüzeye doğru alt akımda ise tabana doğru olduğu görülmektedir. Bu durum her iki tabaka arasında momentum alışverişinin ve tüm kanal boyunca üç boyutlu türbülanslı bir akım yapısının meydana geldiğini göstermektedir.

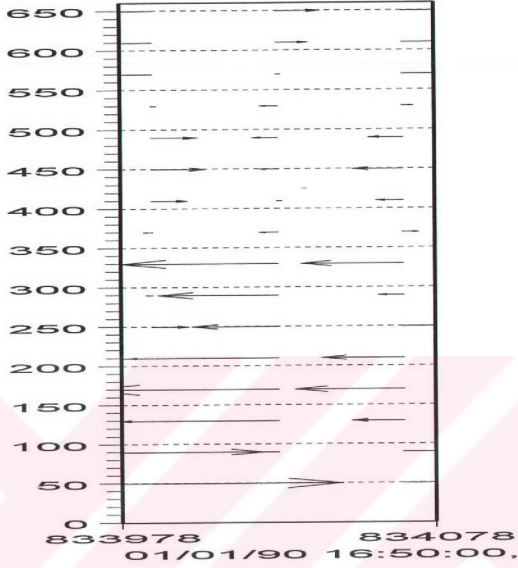
Dikdörtgen kesitli kanal hali için sabit eddy yaklaşımı ile elde edilen sonuçların tabakalı akım için bugüne kadar yapılan çalışmaların sonuçlarıyla uyum içinde olduğu görülmektedir.

• Yatay hız bileşeni (u)



Şekil 4.11 Kanal boykesiti boyunca yatay hız bileşeninin (u) değişimi (son zaman adımı)

- v hız bileşeni



Şekil 4.12 Kanalın orta noktasındaki enkesitteki v hız bileşenin değişimi (son zaman adımında) (düşeyde herbir aralık 10 dm ye karşı gelmektedir.)

- w hız bileşeni



01/01/90 16:50:00, Time step 0 of 0

Şekil 4.13 Kanal boykesiti boyunca düşey hızın (w) değişimi

4.3 İstanbul Boğazı'nın Hidrodinamik Modellemesi

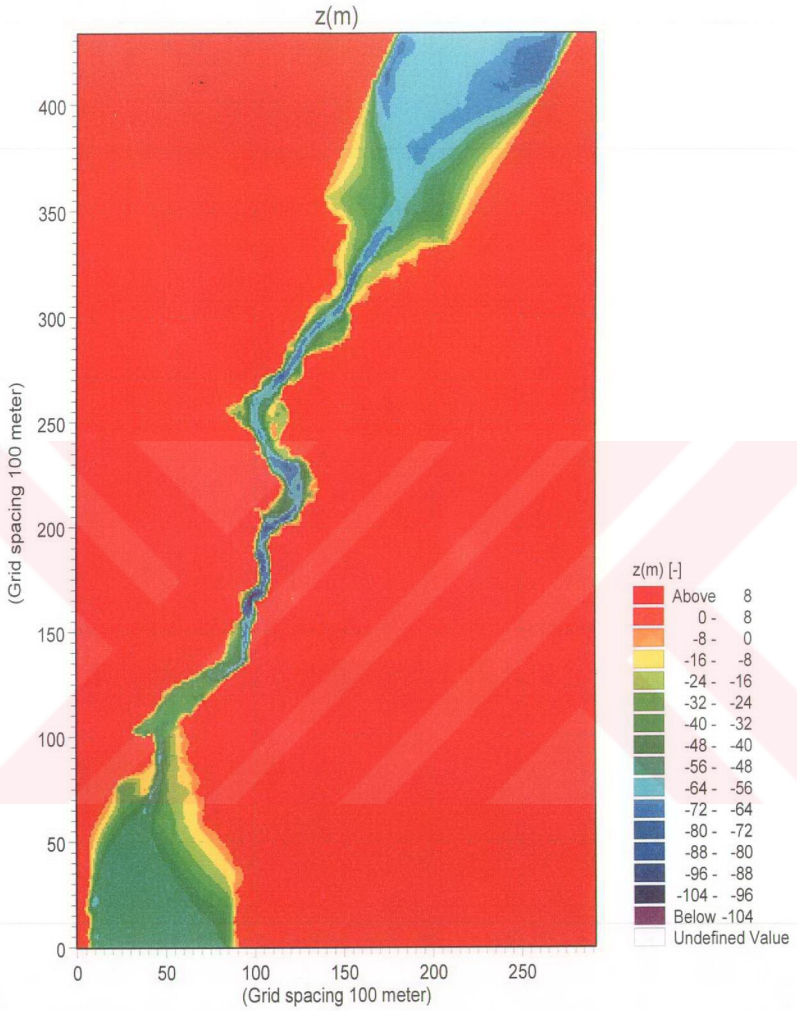
4.3.1 Sabit Eddy Türbülans Modeli ile Modelleme

Mike 3 hidrodinamik modülü sabit eddy, Smagorinsky, k model, k-e modeli ve karışık k-e / Smagorinsky türbülans modellerini içermektedir. Bunlardan öncelikle sabit eddy modeli İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısının modellenmesinde kullanılmıştır. İstanbul Boğazı'nın modellenmesine başlamadan önce modelde kullanılacak batimetri ve sınır şartlarının Mike Zero yardımıyla tanımlanması gerekmektedir. Bu aşamalar sırasıyla aşağıda belirtilmiştir.

4.3.1.1 İstanbul Boğazı'nın Geometrisi ve Hidrodinamik Parametreler

İkinci bölümde anlatıldığı gibi İstanbul Boğazı Karadeniz ve Marmara Denizi'ni birleştiren oldukça dar ve değişken geometriye sahip bir akım yoludur. Bu nedenle İstanbul Boğazı'nın geometri ve batimetrisinin çok iyi tanımlanması gerekmektedir. İstanbul Boğazı'na ait batimetri için Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı Seyir Hidrografi Oşinografi Dairesi'nin hazırlanmış olduğu sayısal batimetri haritaları kullanılmıştır. ASCII file formatındaki xyz koordinatları Mike Zero'ya okutulurak Şekil 4.14'deki İstanbul Boğazı batimetrisi elde edilmiştir. Çizelge 4.4'te İstanbul Boğazı'nın geometrik özellikleri tanımlanmıştır. Çizelgede model alanının uzunluğu belirlenirken, Mike Zero'da tanımlanan stabilite problemi ile karşılaşılmasını için İstanbul Boğazı uzunluğuna ilaveten iki uçtaki açık sınırlar gerçek konumlarına göre bir miktar uzatılmıştır. Model alanı genişliği olarak dikkate alınan model uzunluğunun yerleştirildiği dikdörtgen ağ sisteminin genişliğidir. Bu genişlik Şekil 4.14'te görülmektedir. İstanbul Boğazı'nın en derin noktası 106.7 m olarak belirlenmiş ve model tanımlanmıştır. Modelin ağ aralıkları yatayda 100 m düşeyde ise 1 m olarak belirlenmiştir. Modelin sınır şartları ise Çizelge 4.5'te özetlenmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi Boğaz'ın Marmara ve Karadeniz kesitlerindeki tuzluluk, sıcaklık ve su seviyesi parametreleri tanımlanmıştır. Tuzluluk Karadeniz girişinde 19 psu olarak tüm kesit ve zamanda sabit kabul edilmiştir. Marmara girişindeki tuzluluk ise zaman serisi olarak 19 psu'dan 35 psu'ya kadar 8 saat 20 dakikalık zaman periyodu boyunca değişim göstermektedir (Şekil 4.15). Su seviyesi değişimi zaman serisi olarak Karadeniz girişinde 0 ile 30 cm arasında 16 saatlik zaman aralığında değişim gösterirken, Marmara girişinde ise su seviyesi değiştirilmeksizin, sabit ve sifıra eşit kabul edilmiştir (Şekil 4.16).

Gerek Karadeniz gerekse Marmara girişlerinde su sıcaklıkları sırasıyla 7 ve 10 °C değerleri olarak sabit olarak tanımlanmışlardır.



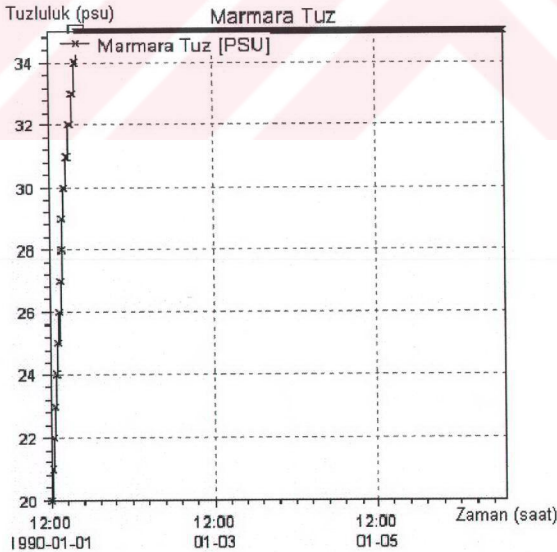
Şekil 4.14 İstanbul Boğazı'nın batimetrisi

Çizelge 4.4 Modelin geometrik özellikleri

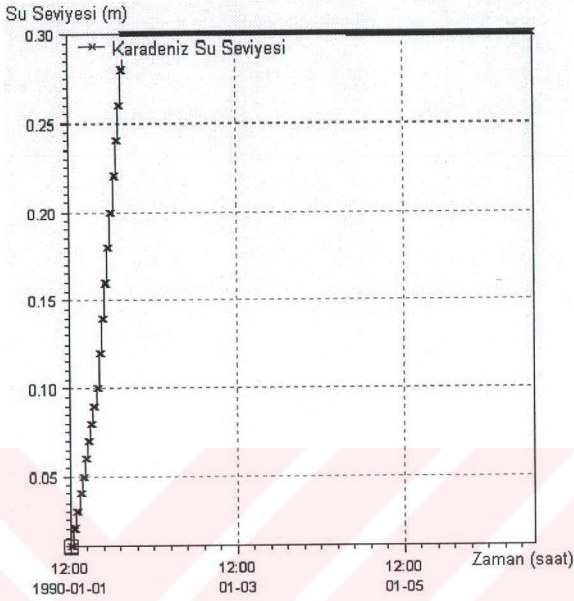
Model alanının genişliği (x)		29100 m
Model alanının uzunluğu (y)		43300 m
Maksimum derinlik		-106.7 m
Ağ aralığı	Δx	100 m
	Δy	100 m
	Δz	1 m

Çizelge 4.5 Modelle ilgili tanımlanan sınır şartları

Tuzluluk (PSU)	Karadeniz	19	Sabit
	Marmara	19-35	Zaman serisi
Su Seviyesi (m)	Karadeniz	0.00-0.30	Zaman serisi
	Marmara	0.00	Sabit
Sıcaklık (°C)	Karadeniz	7	Sabit
	Marmara	10	Sabit



Şekil 4.15 Modele sınır şartı olarak verilen Marmara girişindeki tuzluluk grafiği



Şekil 4.16 Modele sınır şartı olarak verilen Karadeniz girişindeki su seviyesinin değişim grafiği

4.3.1.2 Modele Ait Sayısal Parametreler

Mike Zero'da tanımlanan sınır şartları ve batimetri dosyaları Mike 3'ün Hidrodinamik Modülü'nün sabit eddy türbülans modeli seçilerek İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısı modelleneyecektir. Bunun için Çizelge 4.6'da sabit eddy türbülans modeline ait parametreler tanımlanmıştır. Modelde hidrostatik seçenek tercih edilmiştir. Simülasyon süresi 480000 sn'dir. Model parametrelerine göre sayısal modelin stabilitesi Courant sayısının 0,97 değerinde elde edilmiştir. Çözüm 852359 düğüm noktasında gerçekleştirilmiştir.

4.3.1.3 Değerlendirme

4.3.1.3.1 Su Yüzü Değişimi

Şekil 4.17'de İstanbul Boğazı boyunca su yüzü değişimi için modelin kararlı hale ulaştığı 70 saat 50 dakika zaman süresinin sonundaki değeri verilmiştir. Bu şekilde göre Karadeniz'in su seviyesinin Marmara Denizi'nden 30 cm yukarda olduğu kabul edilmiştir. Su seviyesi farkı İstanbul Boğazı'ndaki barotropik etkiyi benzeştirmektedir.

Çizelge 4.6 Modelle ilgili sayısal parametreler

Modül Seçimi	Hidrostatik		Değişken yoğunluk (değişken sıcaklıkve tuzluluk)		
			$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
Batimetri	İstanbul Boğazı Batimetrisi (Şekil 4.13- 29100 m×43300 m)		100	100	1
Simülasyon	Başlangıç	01.01.1990 12:00:00	Zaman adımı sayısı	160000	
	Son	07.01.1990 01:20:00	Herbir zaman adımı aralığı	$\Delta t=3$ sn	
	Max. Courant Number		0.971089		
Türbülans modeli	Sabit Eddy		0.5 m^2/s		
Taban pürüzlülüğü (m)	Sabit		0.30		
Tuzluluk Hesabı	Formül tercihi		Eddy visozitesi ile orantılı		
	Dispersiyon şeması		Derinlik boyunca kapalı		

4.3.1.3.2 Tuzluluk Değişimi

Simülasyon zamanı 157 saat 20 dakika olarak tanımlanmış olmasına rağmen 70 saat 50 dakikadan itibaren alt ve üst tuzlu su kamaları bloke olmuştur. Hidrodinamik Modül'ün sabit eddy türbülans modeli İstanbul Boğazı'nın düzensiz geometrisinde istenen tabakalı akımın oluşmasına müsaade etmemektedir. Modelin 70 saat 50 dakika zamanından sonra ilerlemediği ve tuzlu su kamalarının bloke olduğu belirlenmiştir. Bu hal Şekil 4.18'de İstanbul Boğazı boykesiti boyunca görülmektedir.

4.3.1.3.3 Hız Alanı

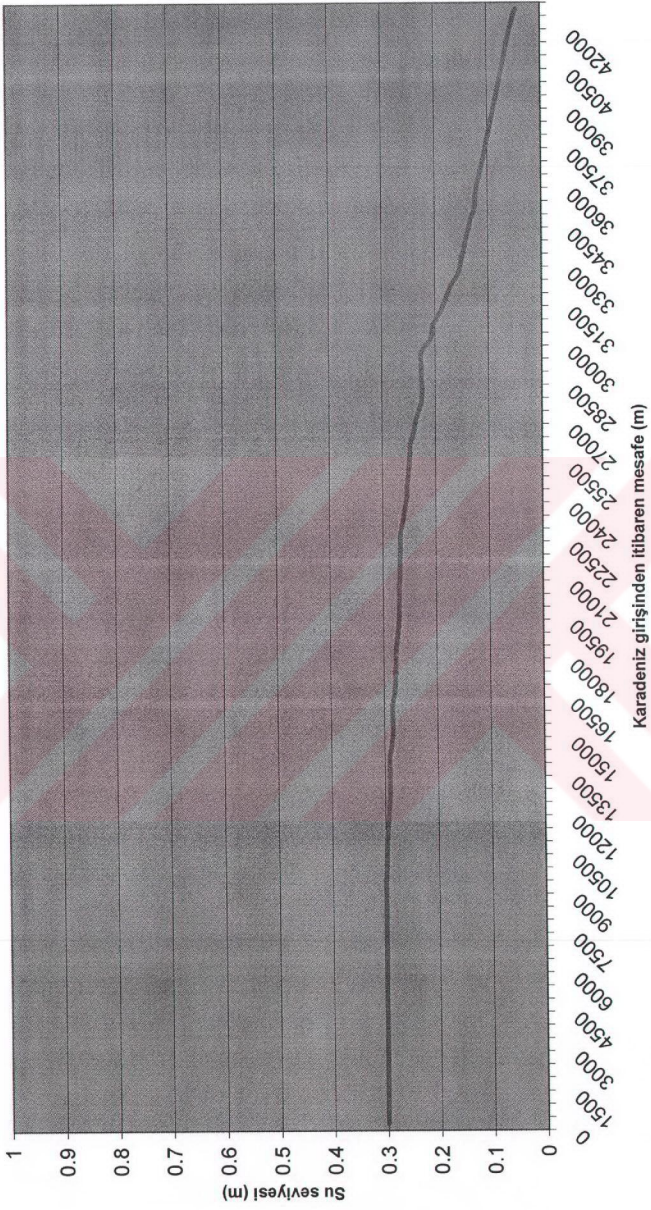
Sabit eddy türbülans modelinin İstanbul Boğazı'ndaki iki tabakalı akımın tam olarak oluşmasına müsaade etmemesine rağmen burada yoğunluk akımlarının bloke olduğu 157 saat 20 dakika zamanındaki hız alanları incelenmiştir. Şekil 4.19-23'de İstanbul Boğazı'nın tipik kesitleri olan Sarayburnu, Dolmabahçe, Arnavutköy, İstinye ve Sarıyer kesitlerinde x doğrultusundaki enine hız bileşeninin (u) değişimleri görülmektedir. Sarayburnu kesitindeki u hızlarının WE doğrultusunda olduğu, Dolmabahçe kesitinde üst akımda EW, alt akımda WE doğrultusunda olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Boğaz'ın geometrisinden kaynaklanan y doğrultusundaki ana akımın dönmesidir. Arnavutköy kesitinde ise üst akım EW, arakesitte WE alt akımda EW doğrultularında değişim göstermektedir. Arnavutköy kesiti Boğaz'ın en

dar kesitini oluşturmaktadır. İstinye kesitinde ise İstinye Koyu'nun bulunduğu bölgede ise akım EW doğrultusuna yönelmesine rağmen ana kanalda WE doğrultusunda olmaktadır. Sarıyer kesitinde ise EW doğrultusunda bir enine hız dağılımı oluşmuştur. Şekil 4.19'dan görüldüğü gibi Sarayburnu Boğaz'ın Marmara Deniz'i çıkışındaki en geniş kesittir. Bu kesit ana akım hızının (v) en büyük değerine ulaştığı kesitlerden biridir. Bu nedenle ana akım doğrultusuna dik u ve w hız bileşenleri rölatif olarak daha küçük değerler almaktadır.

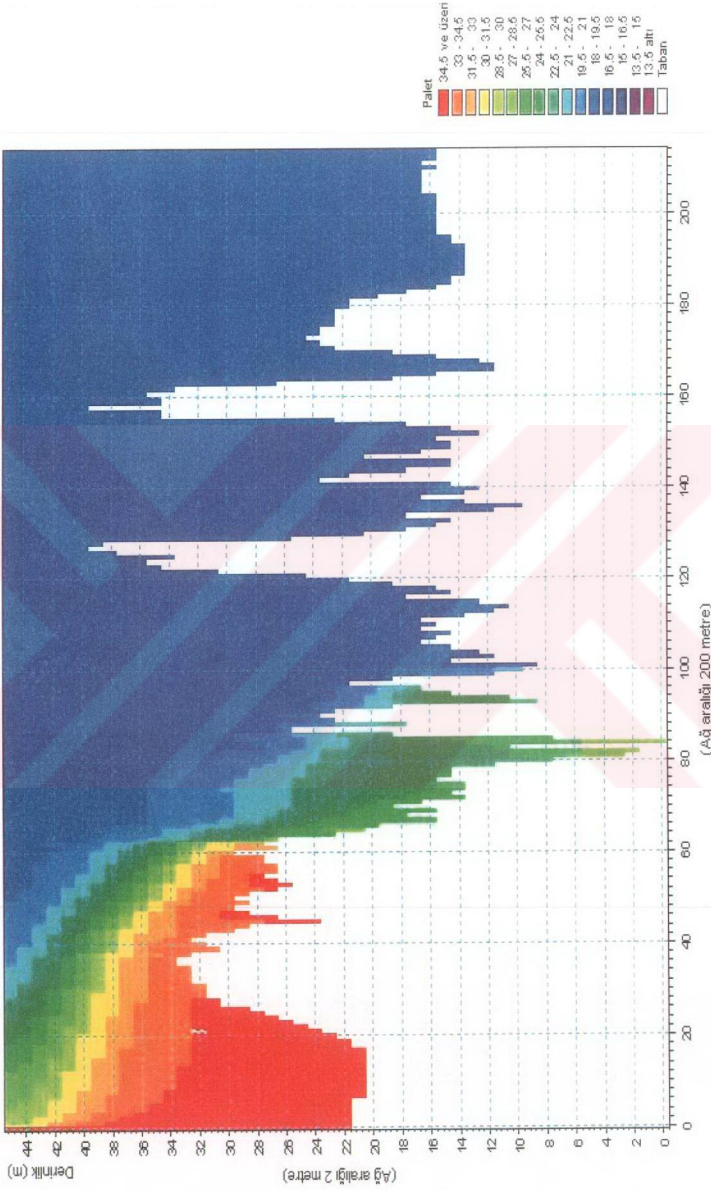
Şekil 4.24-27'de İstanbul Boğazı boyunca çeşitli derinliklerdeki y doğrultusunda yatay hız bileşenleri gösterilmiştir. Gerek yüzeydeki gerekse yüzeyden 20 m derinlikte akıntının Karadeniz'den Marmara'ya doğru olduğu ve hızların Sarıburnu ile Boğaz'ın en dar kesiti olan Arnavutköy kesitinde en büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Yüzeyden 30 ve 50 m derinliklerde alt akımın Marmara'dan Karadeniz'e doğru girdiği ancak tüm Boğaz boyunca yayılmadığı görülmektedir. Bu durum sabit eddy türbülans modelinin tabakalı akımı tam olarak modelleyememesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.28-30'da 9.6. ile 10. km'ler arasındaki Dolmabahçe bölgesinde yüzeyden itibaren çeşitli derinliklerdeki akıntı yapısı gösterilmiştir. Bu şekillerden Dolmabahçe önlerinde yüzeyde saat akrebinin tersi yönde tabanda ise saat akrebi yönünde dönen akımların meydana geldiği görülmektedir. Bu durum Haliç girişinin etkisiyle ana akımın dönmeye dolayısıyla meydana gelmektedir. Ancak bu durum Sabit Eddy Modeli'nin sirkülasyon alanlarını tam olarak benzeştirememesi nedeniyle gerçeği yansıtmamaktadır ve doğa ile uyum içinde değildir.

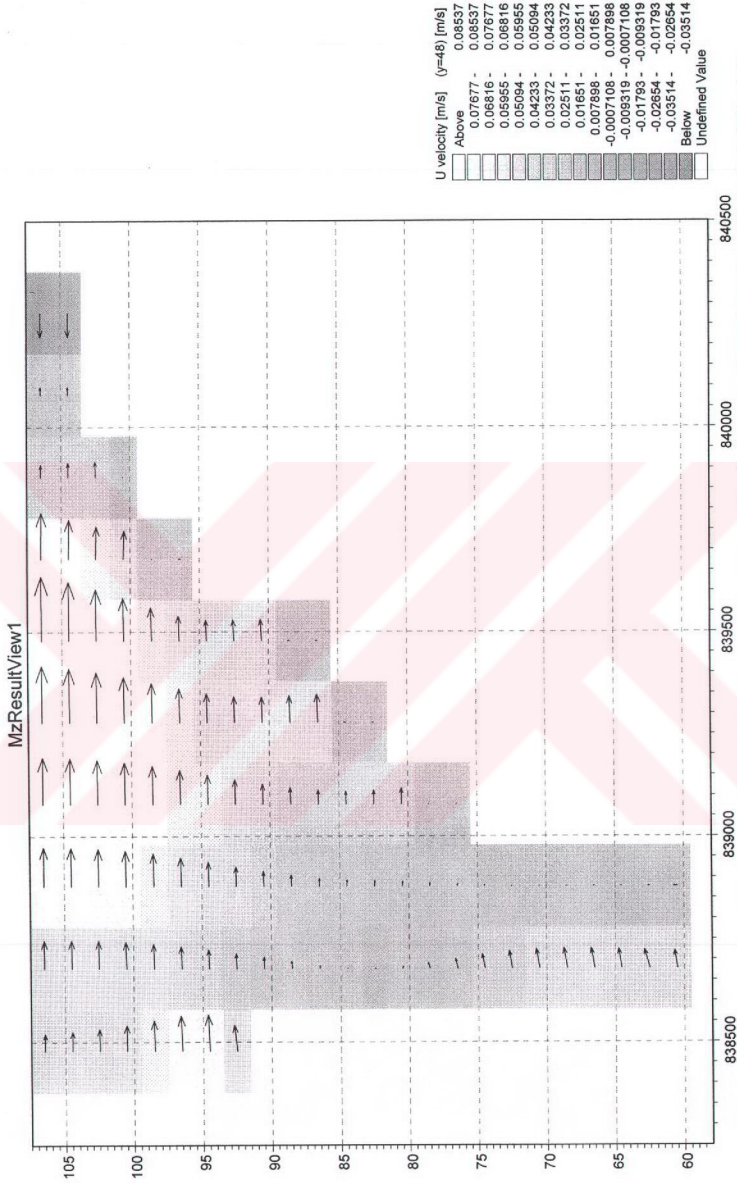
Her ne kadar sabit eddy türbülans modeli İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısını benzeştirmemiş olsa da oluşan akım yapısı dahi İstanbul Boğazı'nın genel akım karakteristikleriyle bir uyum içerisindedir.



şekil 4.17 İstanbul Boğazi'nda su yüzü değişimi

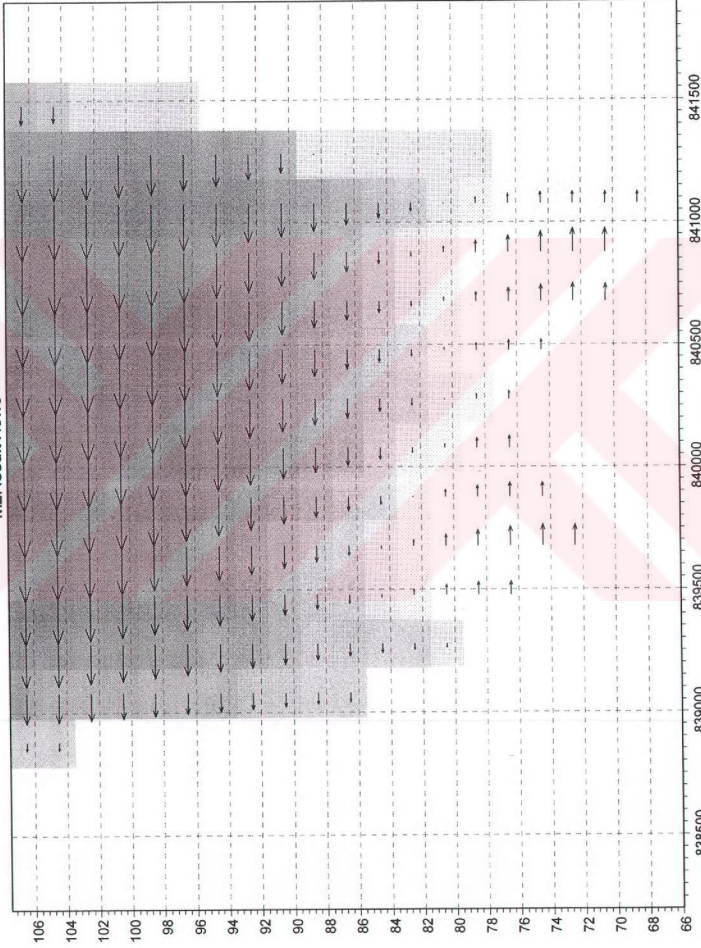


Şekil 4.18 İstanbul Boğazı tuzluluk değişimi (bloke edilmiş tuz kamasi)

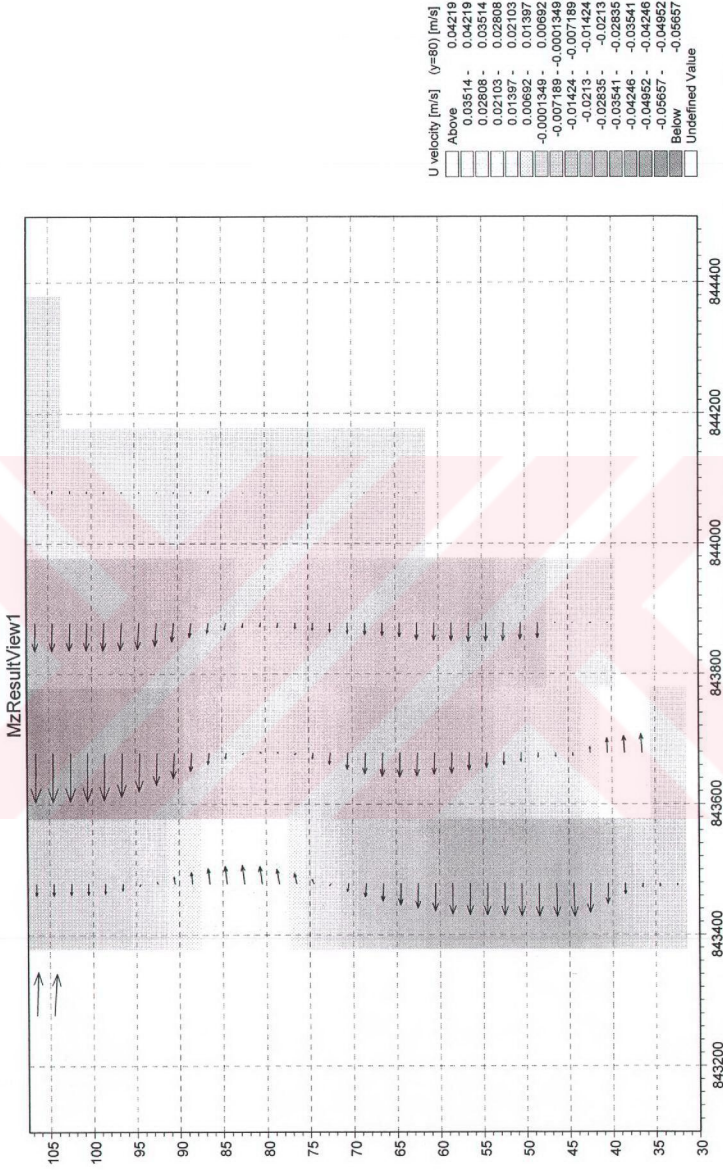


Şekil 4.19 Sarayburnu'ndan (Model girişinden 9.6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(50 kat büyütülmüş))

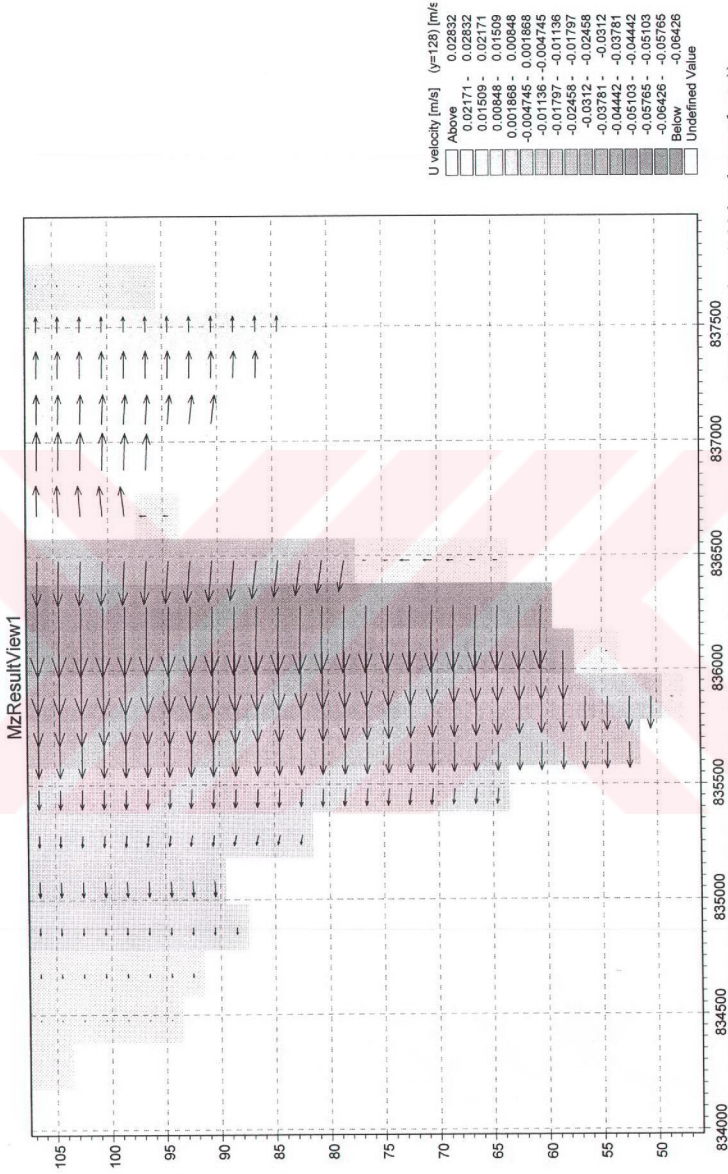
MzResultView3



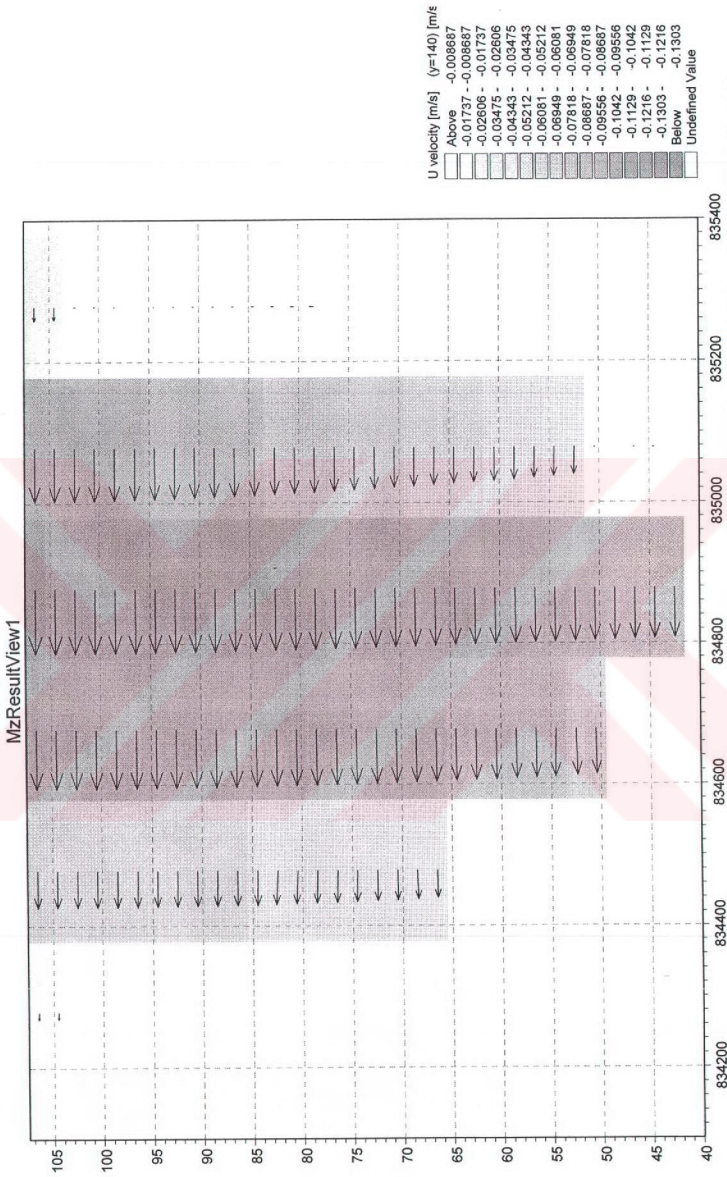
Şekil 4.20 Dolmabağçe'den (Model girişinden 12 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı (10 kat büyütülmüş))



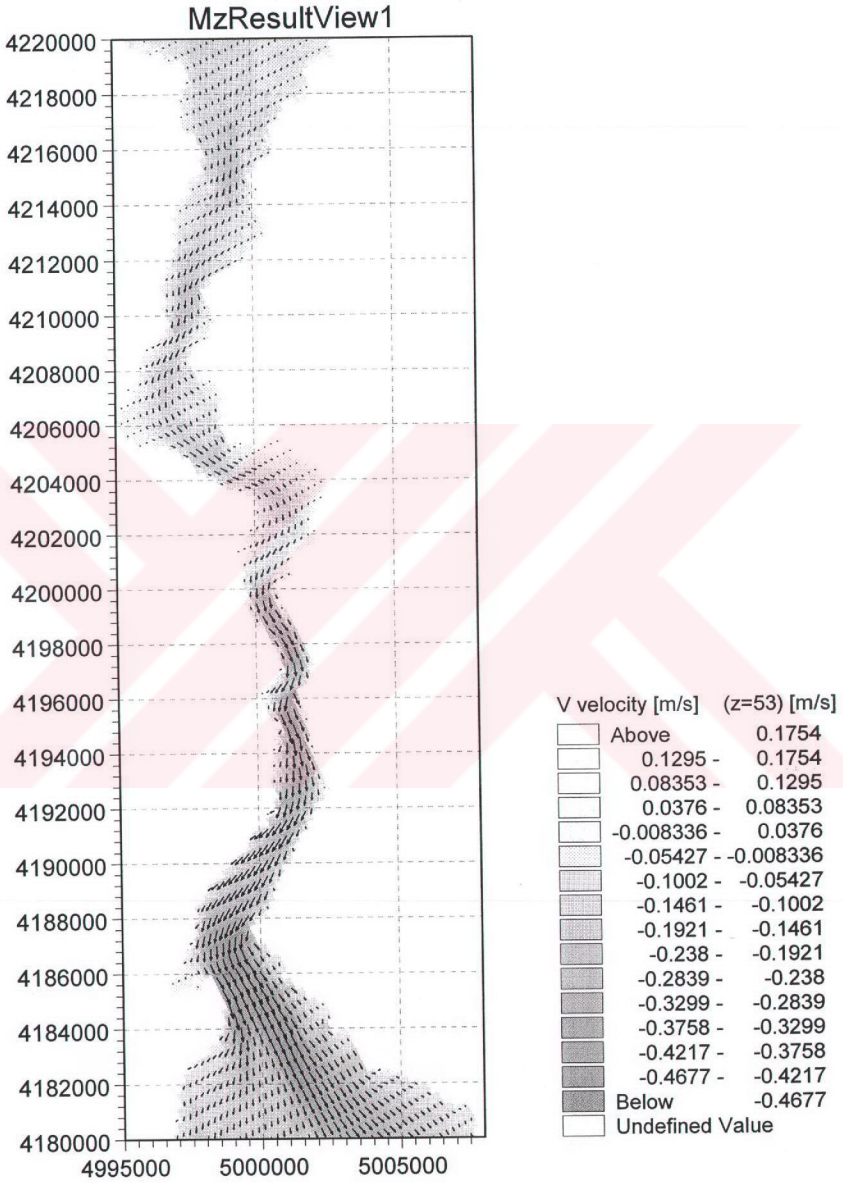
Şekil 4.21 Arnavutköy'den (Model girişinden 16 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(10 kat büyütülmüş))



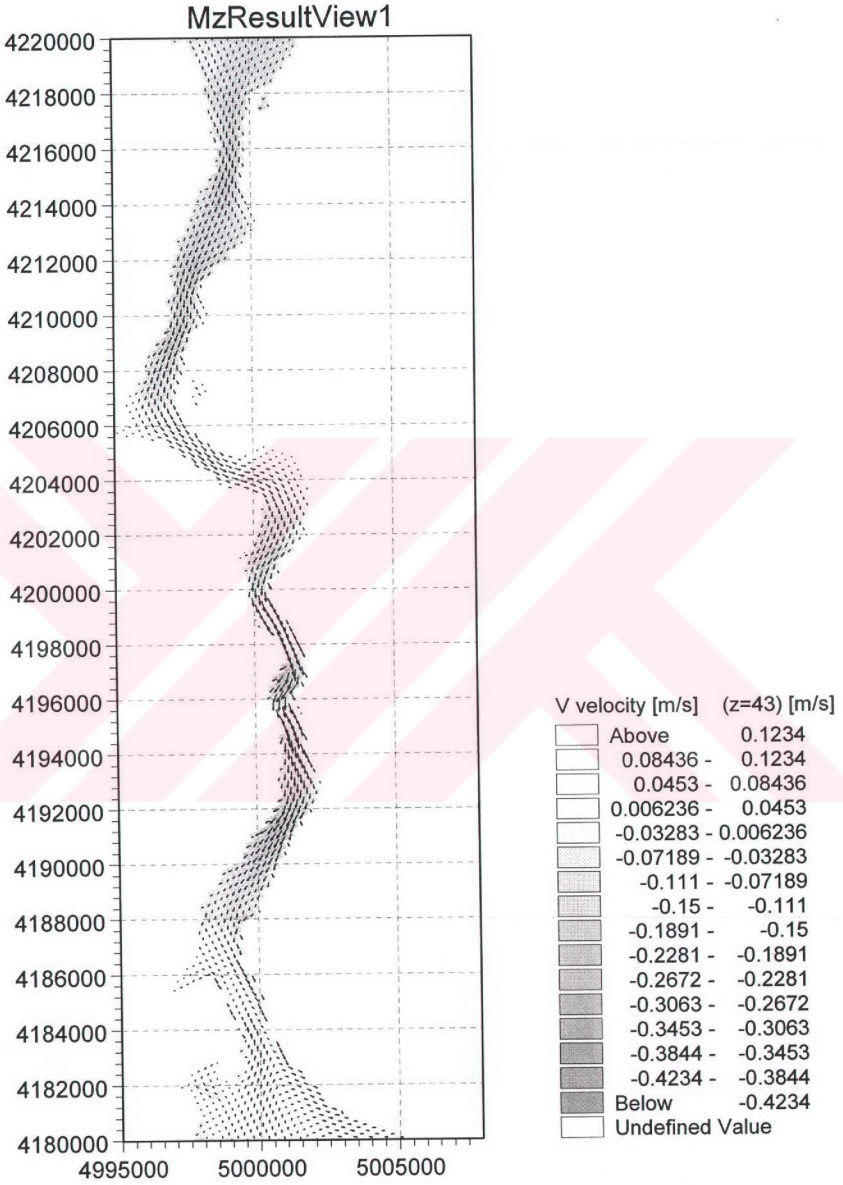
Şekil 4.22 İstinye'den (Model girişinden 25.6 km kuzey) bir kesit(u-w bileşke hızının vektörel dağılımı)(100 kat büyütülmüş)



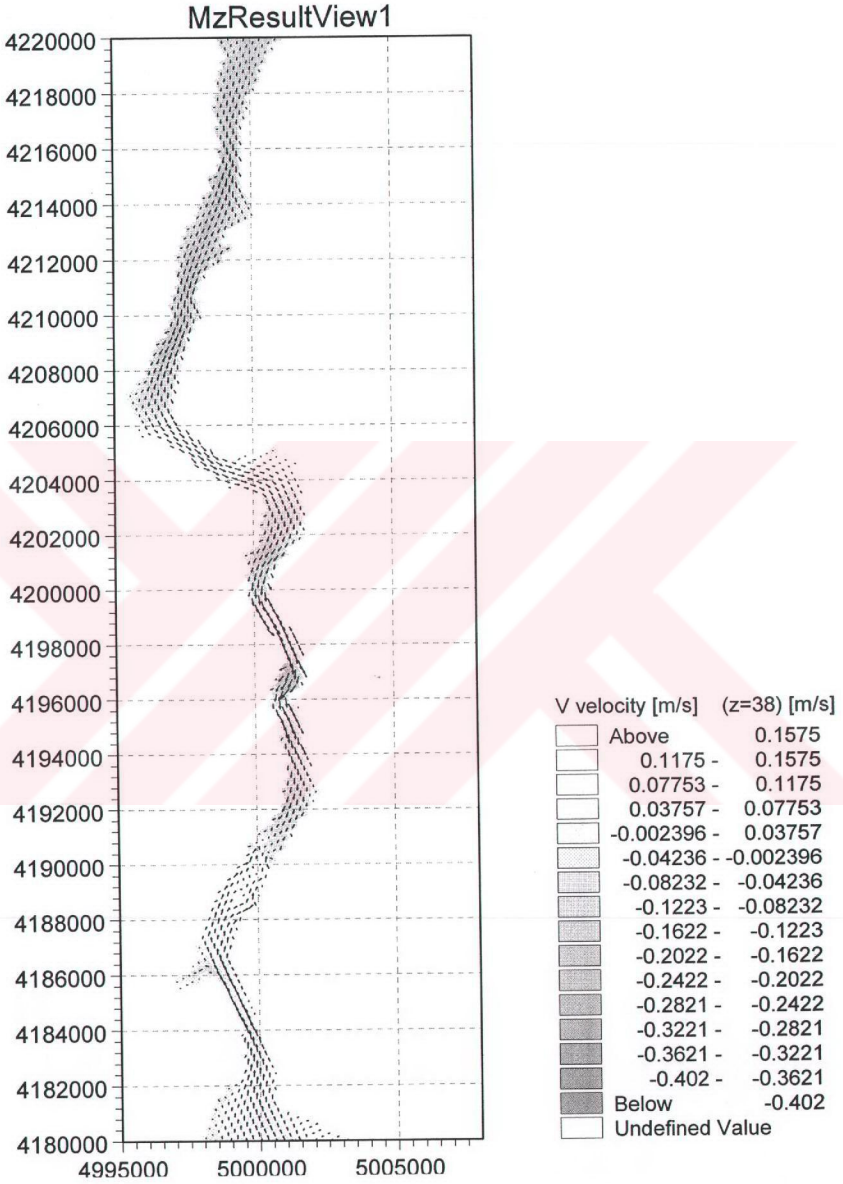
Şekil 4.23 Sanyer'den (Model girişinden 28 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(10 kat büyütülmüş))



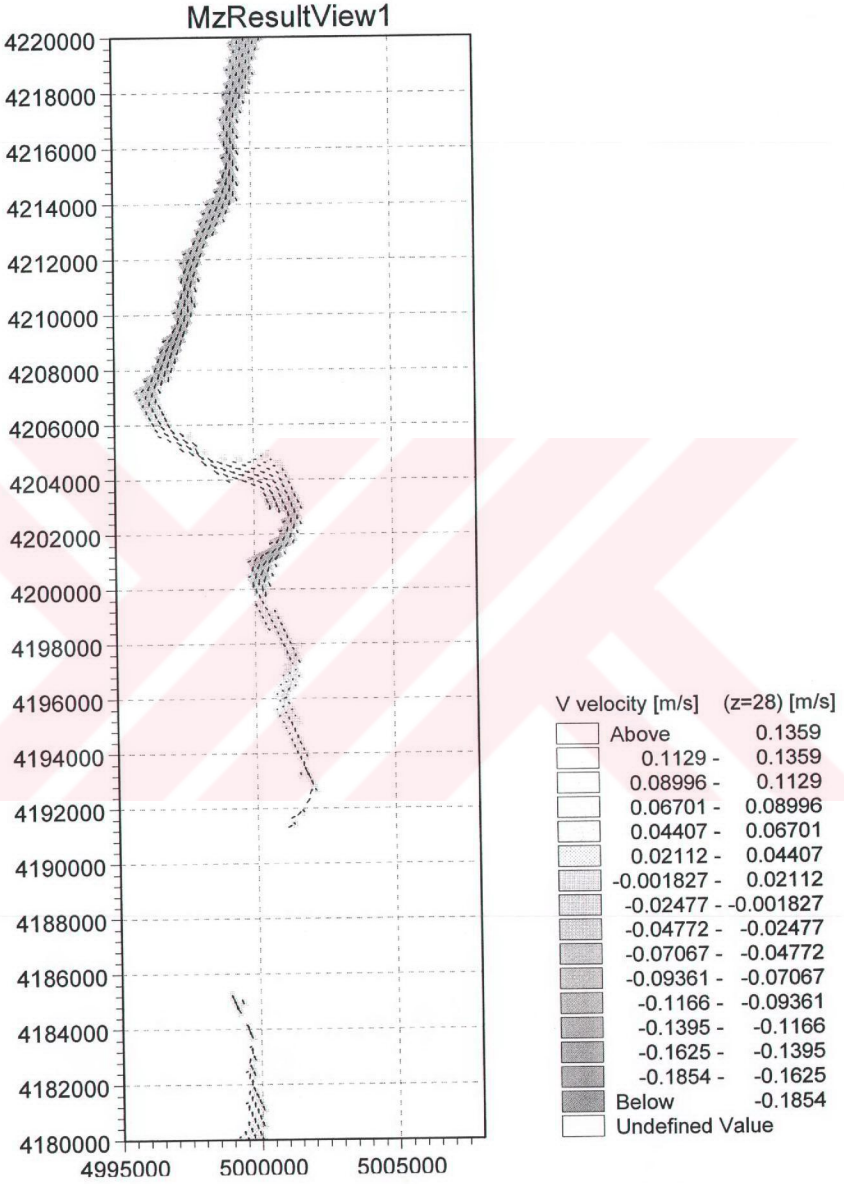
Şekil 4.24 İstanbul Boğazı yüzeyindeki vektörel hız dağılımı (yatay(u) ve düşey(v) hızlar)



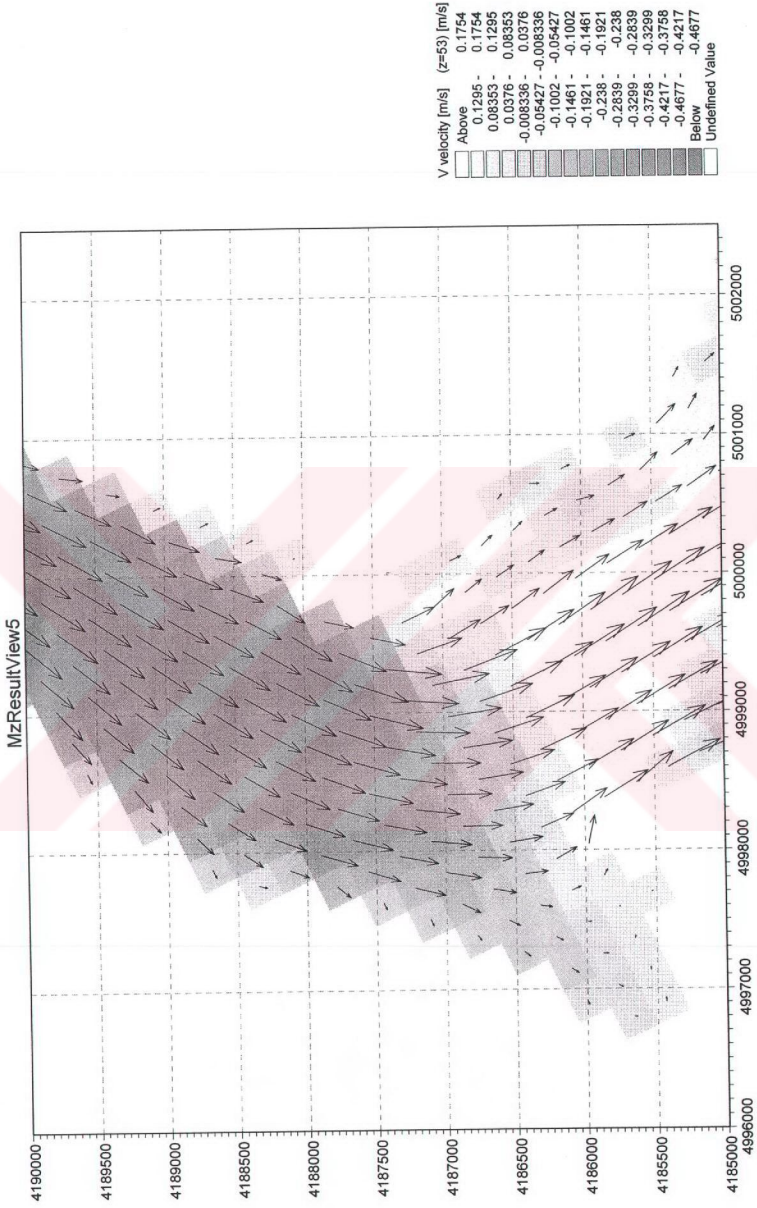
Şekil 4.25 İstanbul Boğazi'nda yüzeyden 20 m derinlikte vektörel hız dağılımı

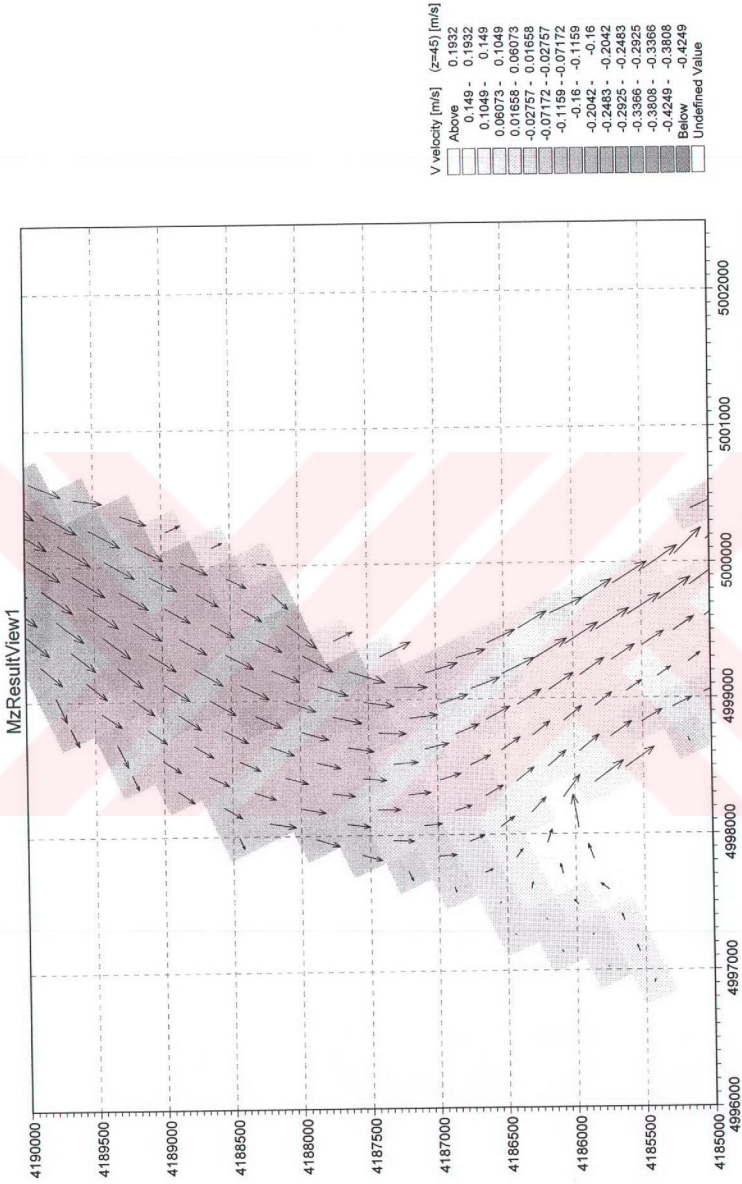


Şekil 4.26 İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 30 m derinlikte vektörel hız dağılımı

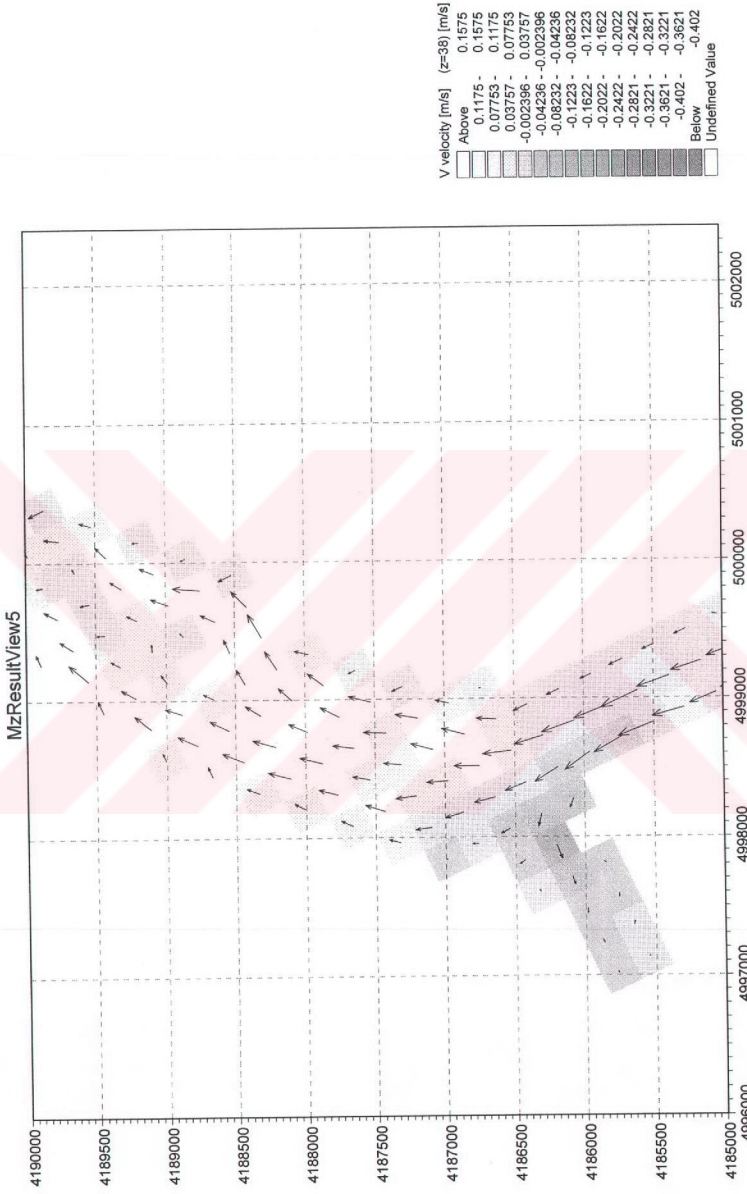


Şekil 4.27 İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 50 m derinlikte vektörel hız dağılımı





Şekil 4.29 Dolmabaçe Bölgesi'nde yüzeyden 15 m derinlikte bileşke (u-v) vektörel hız dağılımı



Şekil 4.30 Dolmabaçe Bölgesi'nde yüzeyden 30 m derinlikte bileşke(u-v) vektörel hız dağılımı

4.3.2 $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli ile Modelleme

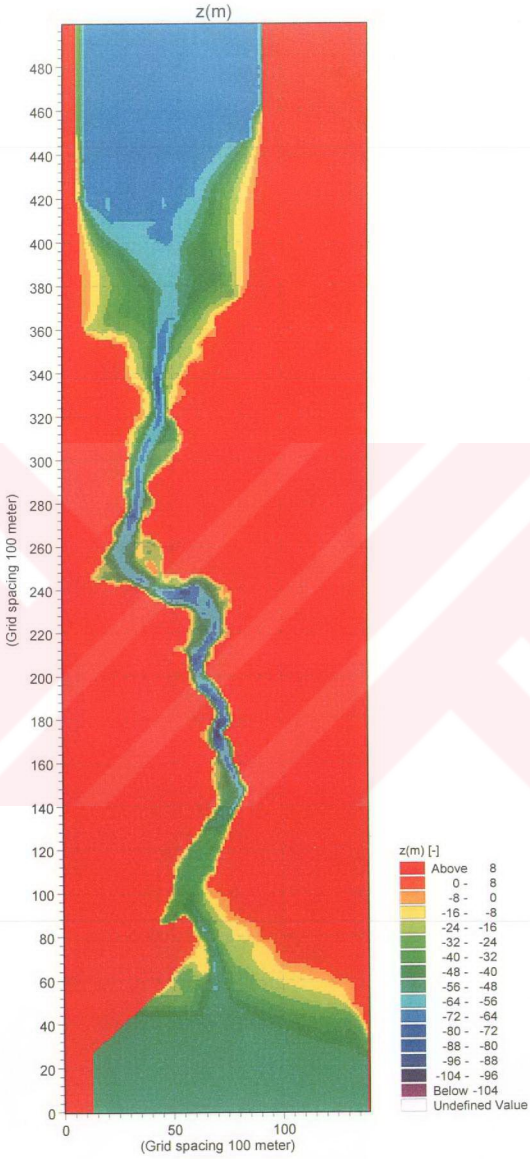
Bir önceki bölümde sabit eddy türbülans modelinin İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısını doğru modelleyememesinden dolayı Mike 3 Hidrodinamik Modülü'nün $k-\varepsilon$ türbülans modeli çalıştırılmıştır. Sabit eddy türbülans modelinin oldukça basit bir türbülans modeli olması nedeniyle İstanbul Boğazı'nın üç boyutlu tabakalı akımını modelleyememesi beklenen bir sonuçtur. Bu nedenle daha gelişmiş olan $k-\varepsilon$ türbülans modelinin Boğaz'ın genel hidrodinamik yapısını modellemesi beklenmektedir.

4.3.2.1 Modelde Kullanılan İstanbul Boğazı Batimetri ve Hidrodinamik Parametreler

Mike 3 Hidrodinamik Modül'ü ile yapılan ön çalışmalar sonucunda İstanbul Boğazı'nın giriş ve çıkış kesitlerinin yaratacağı stabilite problemlerinden kaçınılabilme amacıyla ve modelin giriş çıkış kesitlerine akımın dik girmesinin önerilmesi nedeniyle İstanbul Boğazı giriş çıkış akımlarına dik olacak biçimde uygun olarak döndürülmüştür. Şekil 4.31 İstanbul Boğazı'nın sayısal olarak dikkate alınan yeni geometrisi UTM koordinatları yardımıyla tanımlanmıştır. Çizelge 4.7 ve 4.8'de yeni duruma ait modelin geometrik özellikleriyle sınır şartları özetlenmiştir. Şekil 4.32 ve 4.33'de sırasıyla Marmara Denizi'nin girişindeki tuzluluk ile Karadeniz girişindeki su seviyesi değişimleri zaman serisi olarak 24 saatlik zaman aralığında verilmiştir.

4.3.2.2 Modelin Sayısal Parametreleri

$k-\varepsilon$ türbülans modeline ait sayısal parametreler Çizelge 4.9'da özetlenmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi ağ aralıkları sabit eddy türbülans modeline benzer olarak seçilmiş, simülasyon zamanı ise 188 000 sn olarak dikkate alınmıştır. Sayısal modelin Courant sayısı 0.63'tür. Bu modelde derinlik boyunca da açık şema yaklaşımı dikkate alınmıştır. Dikkate alınan tüm bu model parametreleri yapılan ön çalışmalar sonucunda modelin stabil olarak çalışmasını sağlayacak uygun girdiler olarak belirlenmiştir. Modelleme 1136814 düğüm noktasında yapılmıştır



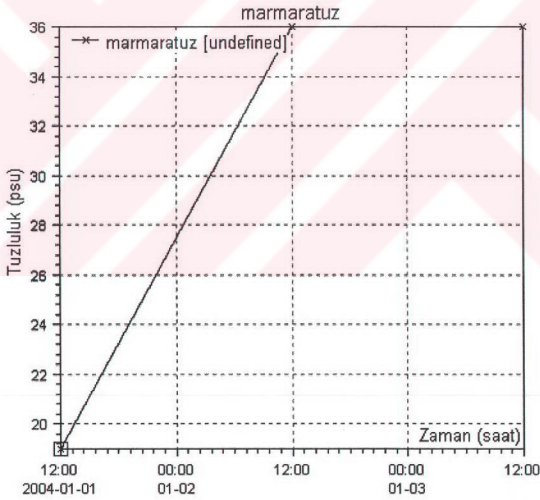
Şekil 4.31 İstanbul Boğazi'nin batimetrisi

Çizelge 4.7 Modelin geometrik özellikleri

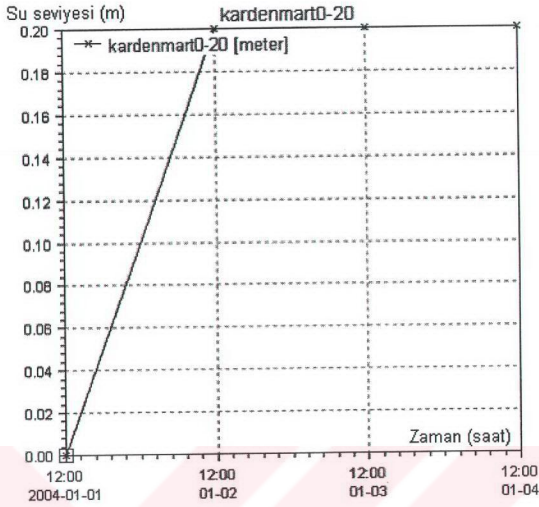
Model alanının uzunluğu (x)		13900 m
Model alanının genişliği (y)		49900 m
Maksimum derinlik		-102.20 m
Ağ aralığı	Düşey	100 m
	Yatay	100 m

Çizelge 4.8 Modelle ilgili tanımlanan sınır şartları

Tuzluluk (PSU)	Karadeniz	19	Sabit
	Marmara	19-36	Zaman serisi
Su Seviyesi (m)	Karadeniz	0.00-0.20	Zaman serisi
	Marmara	0.00	Sabit



Şekil 4.32 Modele sınır şartı olarak verilen Marmara girişindeki tuzluluk grafiği



Şekil 4.33 Modele sınır şartı olarak verilen Karadeniz girişindeki su seviyesi değişim grafiği

Çizelge 4.9 Modelle ilgili sayısal parametreler

Modüll Seçimi	Hidrostatik		Değişken yoğunluk (değişken sıcaklıkve tuzluluk)		
			$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
Batimetri	İstanbul Boğazı Batimetrisi (Şekil 4.30- 13900 m × 49900 m)		100	100	1
Simülasyon	Başlangıç	01.01.2004 12:00:00	Zaman adımı sayısı	94000	
	Son	03.01.2004 16:13:20	Herbir zaman adımı aralığı	$\Delta t=2$ sn	
	Max. Courant Number		0.633601		
Türbülans modeli	$k - \epsilon$				
Taban pürüzlülüğü (m)	Sabit		0.30		
Tuzluluk Hesabı	Formül tercihi		Eddy visozitesi ile orantılı		
	Dispersiyon şeması		Derinlik boyunca açık		

4.3.2.3 Değerlendirme

4.3.2.3.1 Su Yüzü Değişimi

Şekil 4.34'de simülasyon zamanı sonunda İstanbul Boğazı boyunca su yüzü değişimi gösterilmiştir. Boğaz'ın giriş ve çıkış kesitlerinin belirli mesafelerinde dikkate alınan açık kesitler göz önüne alınmaksızın İstanbul Boğazı Marmara girişi (43000 m) ve Karadeniz çıkışı (14000 m) arasındaki su yüzü değişimi incelendiğinde, Marmara girişine yakın bölgede su yüzünde küçük salınımların bulunduğu görülmektedir. Bunun nedeni modeldeki hidrostatik modülün akımın sıkışabilirlik etkilerini dikkate almamasından kaynaklanmaktadır.

4.3.2.3.2 Tuzluluk Değişimi

Şekil 4.35'de İstanbul Boğazı boyunca tuzlulukları birbirinden farklı alt ve üst akımların oluşumu görülmektedir. İstanbul Boğazı'nda iki tabakalı akım k-e türbülans modelinin çalıştırılması ile sabit eddy türbülans modelinin aksine gerçekleşmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 36 psu'luk Akdeniz suyu alt tabaka akımını 19 psu'luk Karadeniz suyu ise üst tabaka akımını oluşturmuş ve iki tabaka arasında bir arakesit düzlemi oluşmuştur. Ayrıca Karadenize çıkan Akdeniz suyunun seyredildiği şekilden görülmektedir. Bu durum İstanbul Boğazı'nda yapılan ölçümlerle uyum içerisinde.

4.3.2.3.3 Hız Alanı

Şekil 4.36-40'de Sarayburnu, Dolmabahçe, İstinye ve Sarıyer kesitlerindeki ana akım doğrultusuna dik hız dağılımları gösterilmiştir. Sarayburnu kesiti incelendiğinde üst akımın WE doğrultusunda olmasına karşın Marmara çıkışında bulunan eşişin Batı kıyısında EW doğrultusunda çok küçük şidete sahip hız alanlarının varlığı belirlenmiştir. Alt akımda ise eşişin doğu tarafında hızın EW, batı kısmında ise WE istikametine yöneldiği görülmektedir. Böylece eşişin doğu tarafında arakesit düzlemi boyunca saat akrebi yönünde batı tarafında ise saat akrebine ters yönde dönen bir akım alanı oluşmaktadır. Ana akım doğrultusuna dik bu sekonder akımın ulaştığı en büyük değer 0.5 m/s'dir. Dolmabahçe kesiti incelendiğinde üst akımın doğrultusunun WE alt akımın ise EW olduğu ve saat akrebi yönünde bir dönüşün söz konusu olduğu görülmektedir. Ancak Dolmabahçe kıyılarına yakın bölgede üst akım daha karmaşık bir yapı almaktadır. Bu bölgede üst akımın yüzeyde EW derinlere doğru WE ve alt akımda tekrar EW doğrultusunda hareket ettiği görülmektedir. Bunun nedeni ana akımın Haliç çıkışındaki Sarayburnu'ndan geriye dönmesidir. Elde edilen bu sonuç Dolmabahçe kıyılarındaki Mayıs-Ağustos 2003 aylarında yapılan sürekli ölçümlerle uyum içindedir.

İstanbul Boğazı'nın en dar kesiti olan Arnavutköy'de üst akımın WE, alt akımın EW doğrultusunda oluştuğu ve yine saat akrebinin dönüş doğrultusunda bir akım yapısını meydana getirdiği görülmektedir.

İstanbul Boğazı'nın en geniş kesitlerinden biri olan ve oldukça büyük bir koyun bulunduğu İstinye bölgesindeki ana akım doğrultusuna dik doğrultudaki akım yapısı oldukça karmaşık bir görüntüye sahiptir. Bunun nedeni bu kesitin düzensiz geometrisi ve İstinye Koyu'nda meydana gelen ana akımın dönüşünün bu hız dağılımını etkilemesidir. Koy bölgesinde üst akımın EW, ana kanal boyunca doğrultu değiştirerek WE ve kesitin doğu sahilinde ise yine EW doğrultusunda olduğu görülmektedir. Ana kanalın bulunduğu bölgede gözlemlenen iki tabakalı akımın alt tabakasında akımın EW doğrultusuna yöneldiği belirlenmiştir.

İstanbul Boğazı'nın Karadeniz çıkışı olan Sarıyer bölgesinde üst akımın genelde EW alt akımın ise WE doğrultusuna yöneldiği ve saat akrebinin ters istikametinde bir dönüş oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 4.41-47'de İstanbul Boğazı için xy düzlemindeki yatay hızların çeşitli derinliklerdeki değişimleri gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde yüzeyde Karadeniz suyunun Marmara'ya doğru aktığı ve Sarayburnu ile Arnavutköy kesitleri arasında en büyük değerlerine ulaştığı görülmektedir. Modelin çalıştırıldığı sınır koşullarında hızların en büyük 0.6 m/s'ye ulaştığı belirlenmiştir. Yüzeyden 20 m derinlikte alınan boykesitte artık Akdeniz suyunun Marmara'dan Karadeniz'e doğru ilerlediği gözlemlenmektedir. Ancak iki tabakanın arakesit düzleminin bir kama şeklinde eğimli bir karaktere sahip olması nedeniyle Karadeniz suyunun Boğaz'ın kuzey bölgesinde bu derinlikten Marmara'ya doğru aktığı görülmektedir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere meteorolojik koşullara bağlı olarak değişen arakesit koşullarında farklı derinliklerde ana akım doğrultusunda sekonder akıma dik saat akrebine ters doğrultuda dönen bir akımı meydana getirdiği anlaşılmaktadır. Bu kuvvetli dönen akımlar iki farklı yoğunluktaki Karadeniz ve Akdeniz sularının karışmasına neden olmaktadır. Ayrıca üç boyutlu Boğaz akımının çok güçlü bir türbülans karakterine sahip olduğunu göstermektedir.

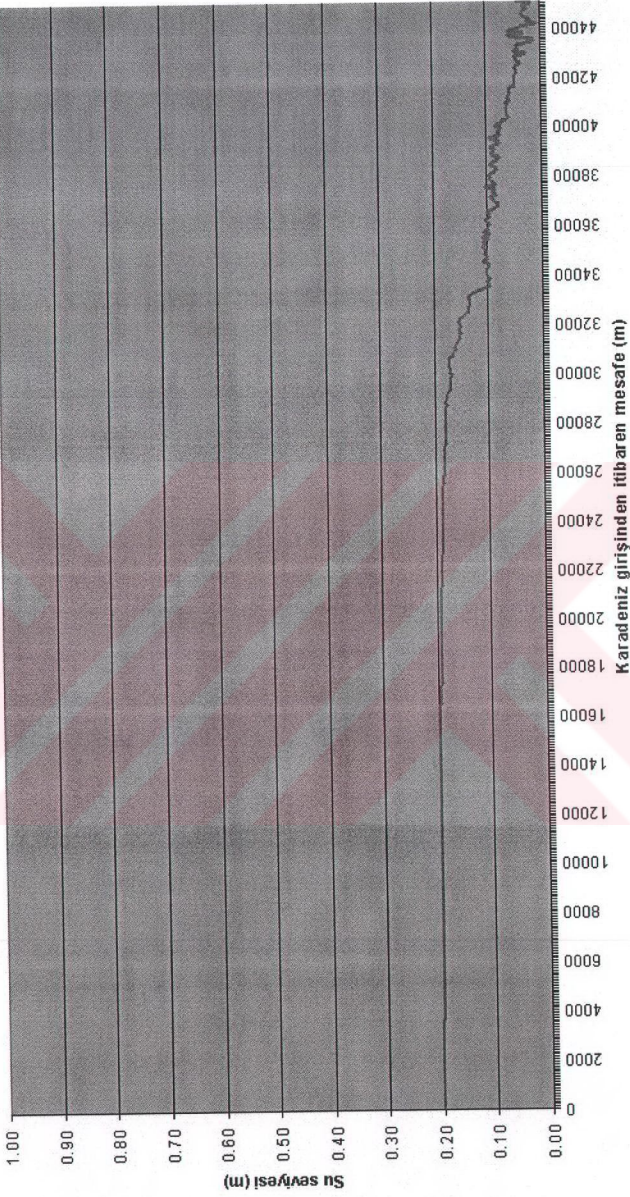
Sayısal modelin mevcut verilerine göre Akdeniz suyunun alt tabakada Marmara'dan Karadeniz'e doğru oluştuğu Şekil 4.43 ve 4.44'da görülmektedir. Alt tabakanın ulaştığı hızların en büyük değerinin 0.7 m/s olduğu bu sınır şartlarında belirlenmiştir.

Şekil 4.45-47'de İstanbul Boğazı boyunca Dolmabahçe ile Sarayburnu bölgesi arasındaki akım alanı daha yakından gösterilmiştir. Kuzeyden güneye doğru akan Karadeniz suyunun yüzeyde Sarayburnu'ndan dönerek saat akrebi yönünde dönen bir akım oluşturduğu,

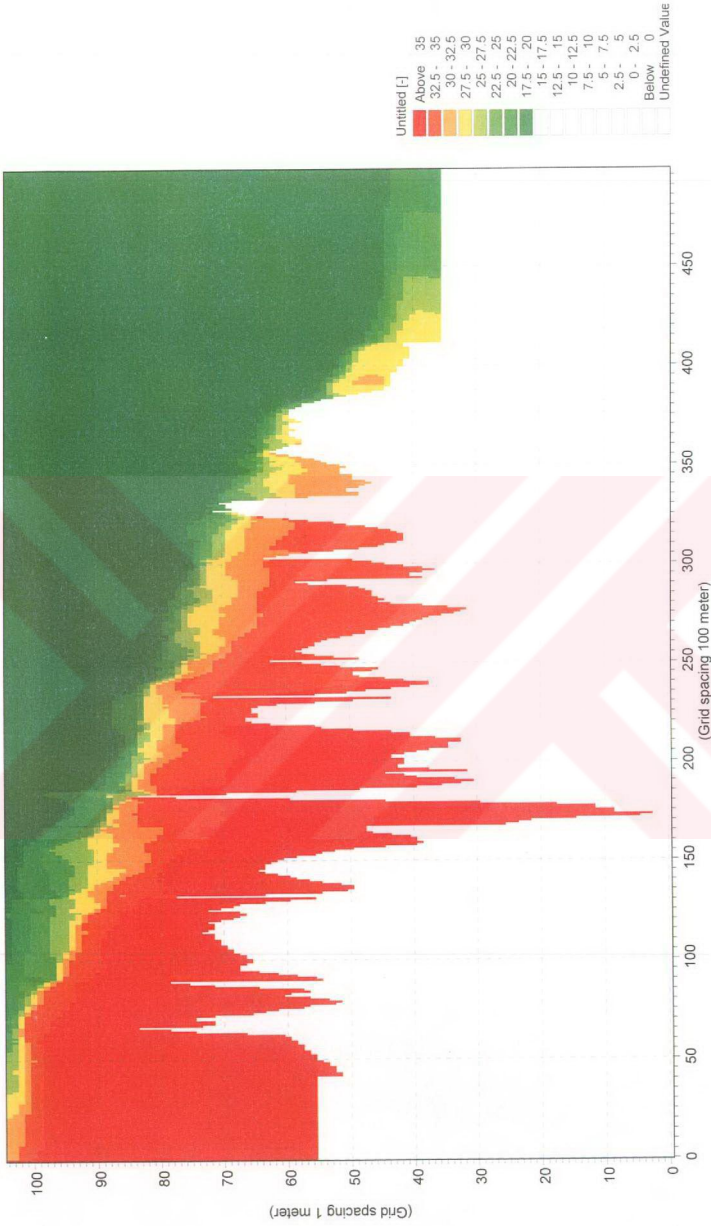
güneyden kuzeye doğru olan Akdeniz suyunun ise saat akrebine ters yönde dönen akım alanlarını oluşturduğu görülmektedir. Bu durum Dolmabahçe yakınlarında yapılan ADP ölçümleriyle uyum içerisindeydir.

Sarayburnu-Üsküdar arasında derinlik boyunca hız profillerini incelemek amacıyla Şekil 4.48-53 çizilmiştir. Şekil 4.48 hız profillerinin koordinatlarını ve İstanbul Boğazı'nın güney tarafına ait hız dağılımlarını göstermektedir. Şekil 4.48 Sarayburnu- Üsküdar arasında yüzey hızının Sarayburnu tarafında en büyük değerine ulaştığını göstermektedir. Bunun nedeni eğrisel geometriye sahip Boğaz'ın boyuna hız değişiminin batı kıyısına yerleşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum tipik olarak mendereslere benzemektedir. Şekil 4.50-53 ise farklı düzeylerdeki boyuna hız profillerini göstermektedir. Verilen sınırlarında alt ve üst tabaka akımı hız profillerinden görülmektedir. Üst tabaka akımı 1 m/s, alt tabaka akımı ise 0.42 m/s değerlerine ulaşmaktadır. Üst tabakada maksimum hız Sarayburnu'na yakın oluşmaktadır, ancak üst tabaka akımı alt tabakaya göre daha incedir. Üsküdar yakınında ise (doğu kıyısı) üst tabaka akımının kalınlığı artmaktadır. Buradan arakesit düzleminde enine eğimin de oluştuğu anlaşılmaktadır. Üniform olmayan hız dağılımı mendereslerde kıvrım etkisinden kaynaklanan hız dağılımına benzemektedir.

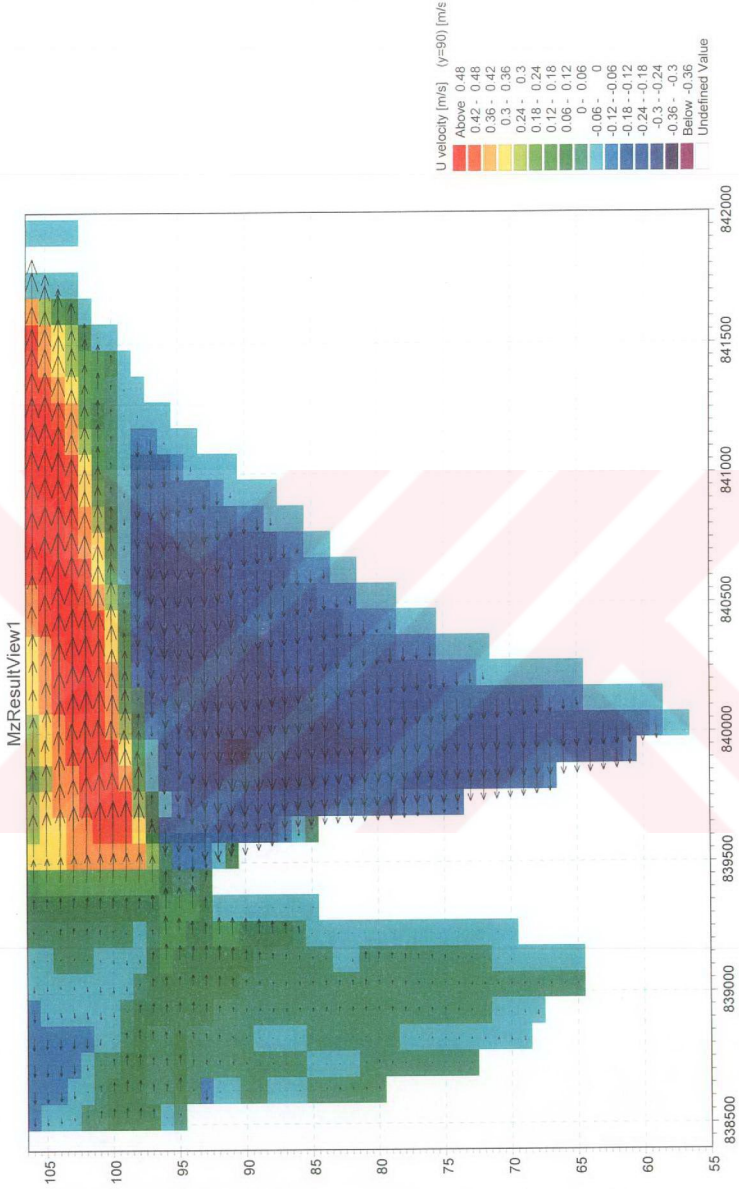
İstanbul Boğazı Su Yüzü Grafiği



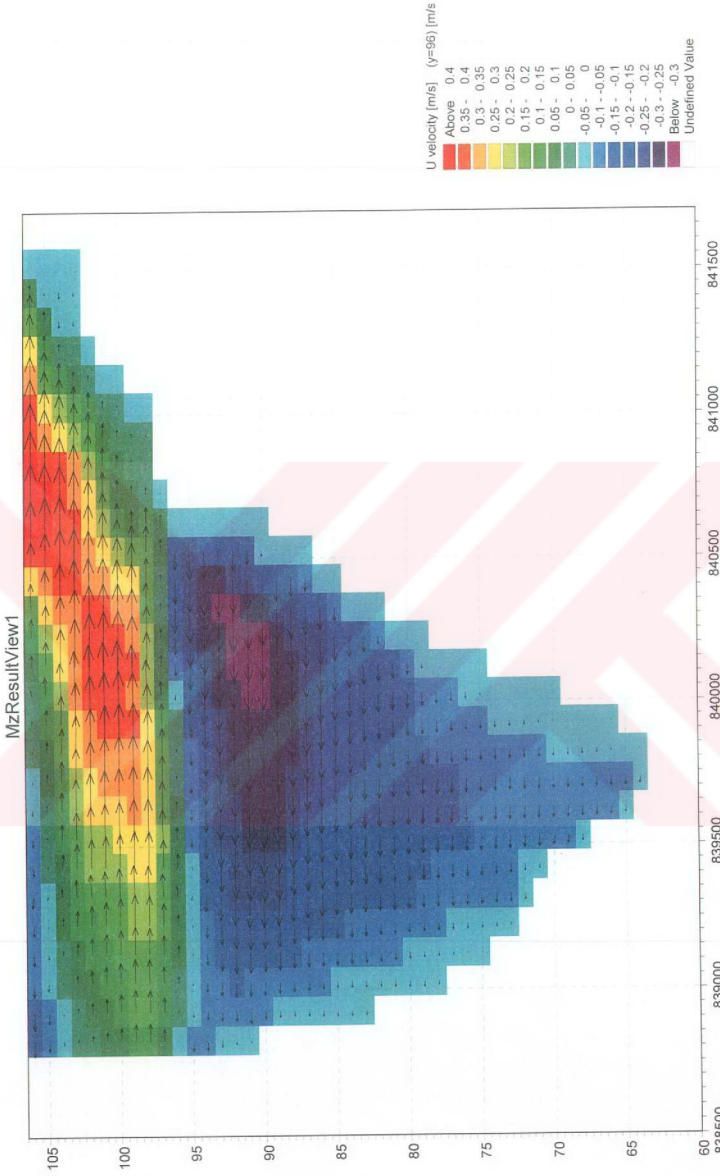
Şekil 4.34 İstanbul Boğazı'nda su yüzü değişimi



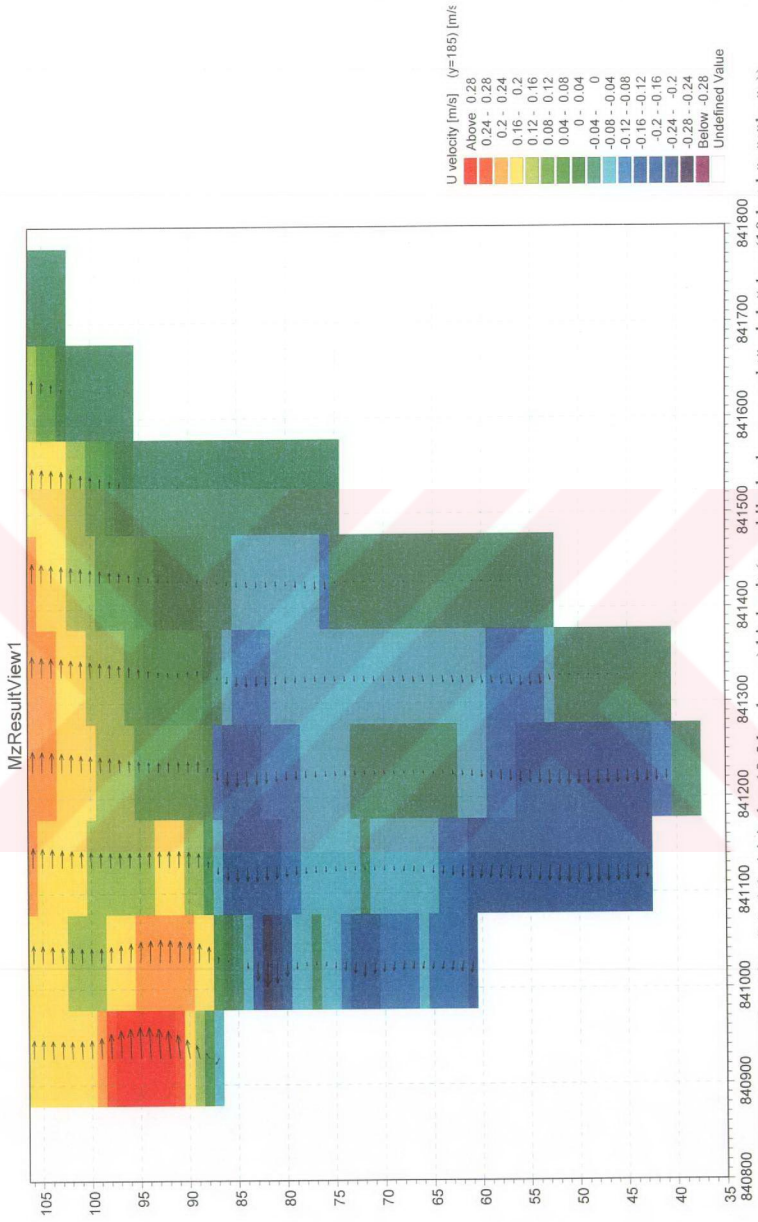
Şekil 4.35 İstanbul Boğazı tuzluluk değişimi

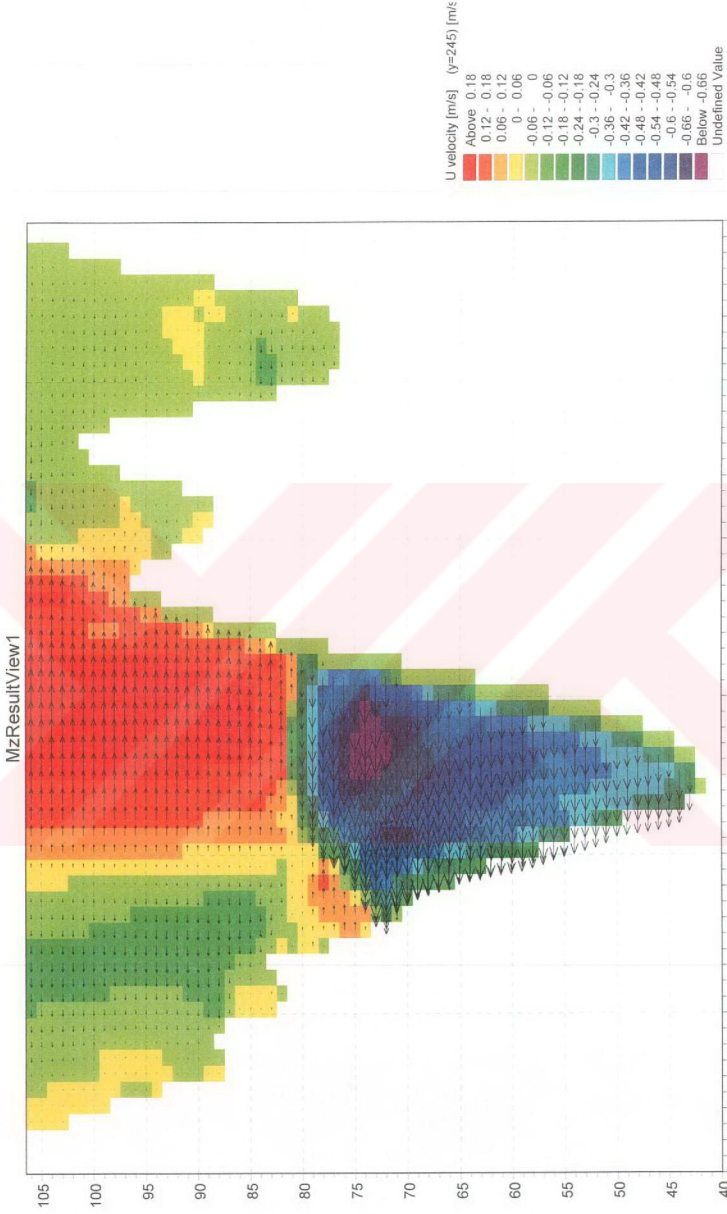


Şekil 4.36 Sarayburnu'ndan (Model girişinden 9 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(10 kat büyütülmüş))

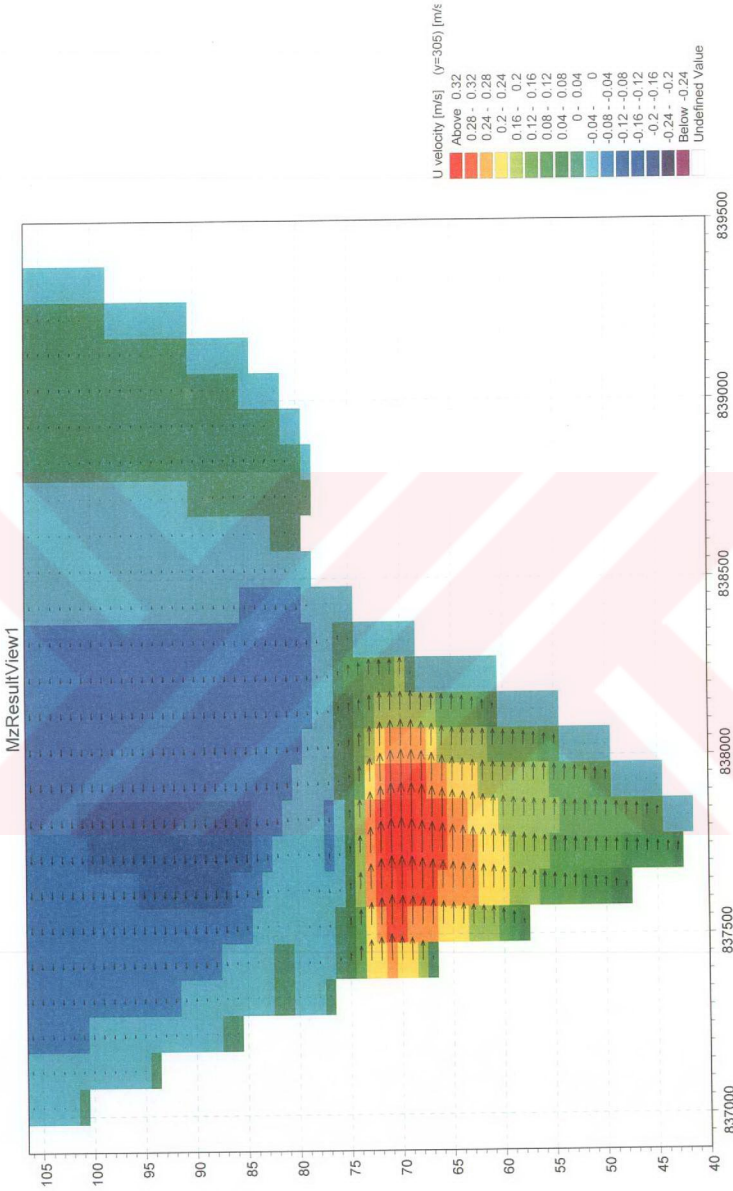


Şekil 4.37 Dolmabağçe'den (Model girişinden 9,6 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(10 kat büyütülmüş))

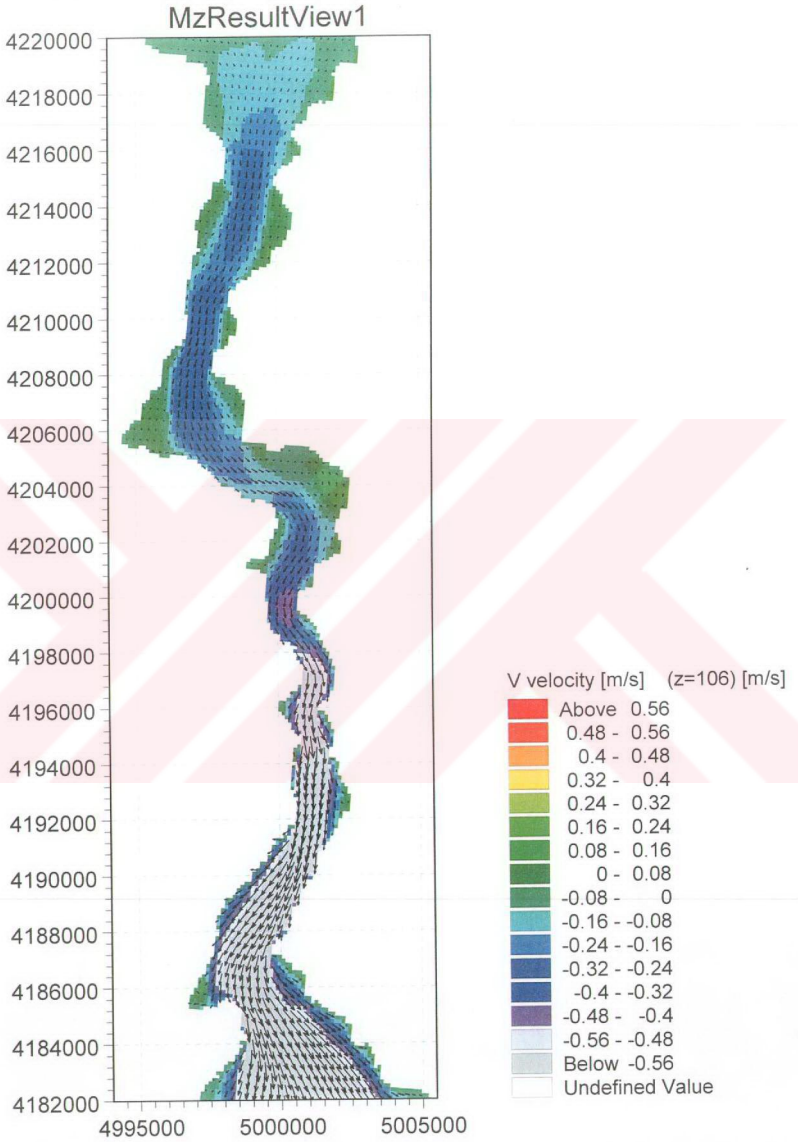




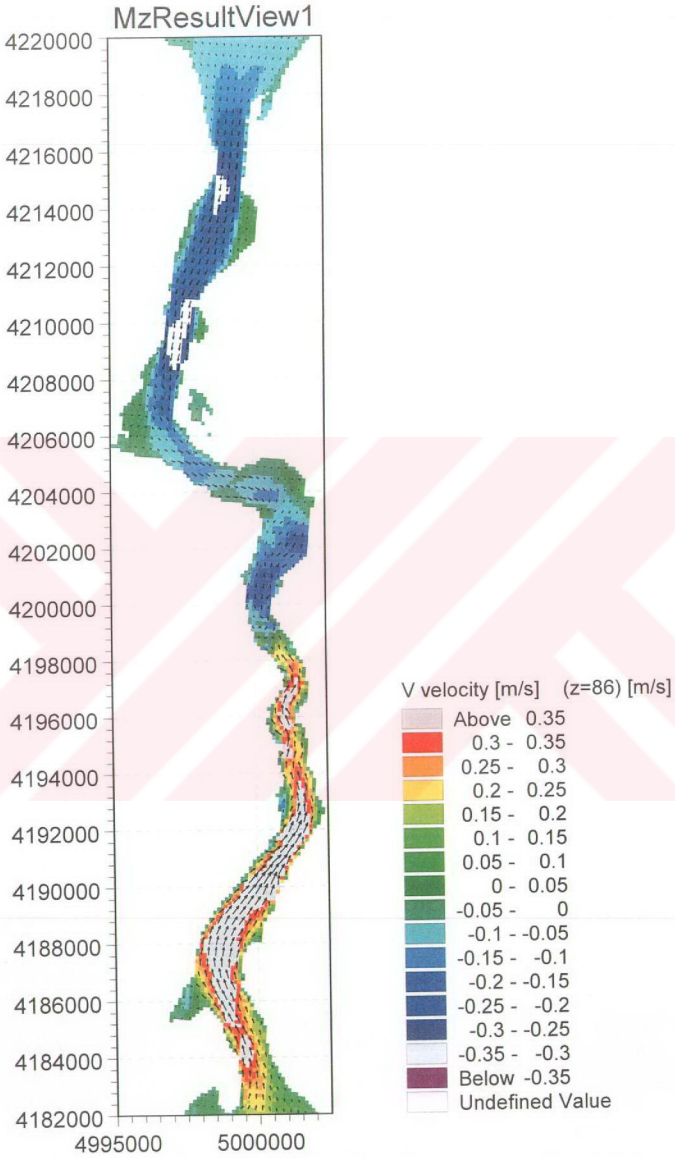
Şekil 4.39 İstinye'den(Model girişinden 24.5 km kuzey) bir kesit(u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(10 kat büyütülmüş))



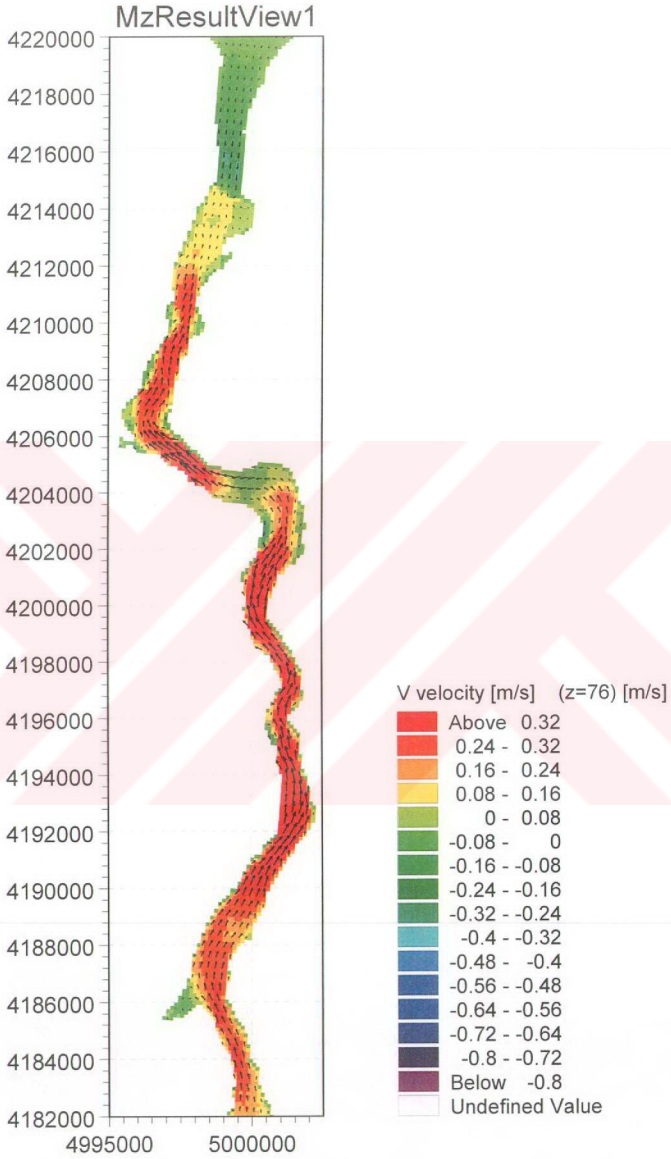
Şekil 4.40 Saryer'den (Model girişinden 30.5 km kuzey) bir kesit (u-w bileşke hızının vektörel dağılımı(10 kat büyütülmüş))



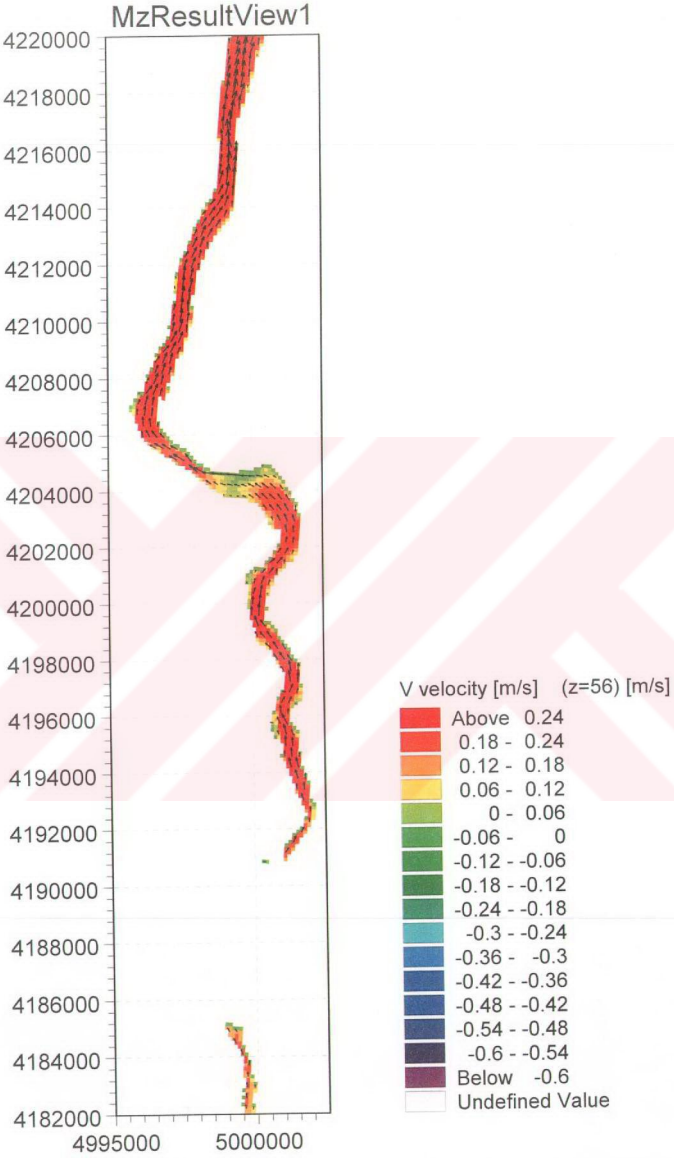
Şekil 4.41 İstanbul Boğazı yüzeyindeki vektörel hız dağılımı (yatay(u) ve düşey(v) hızlar)



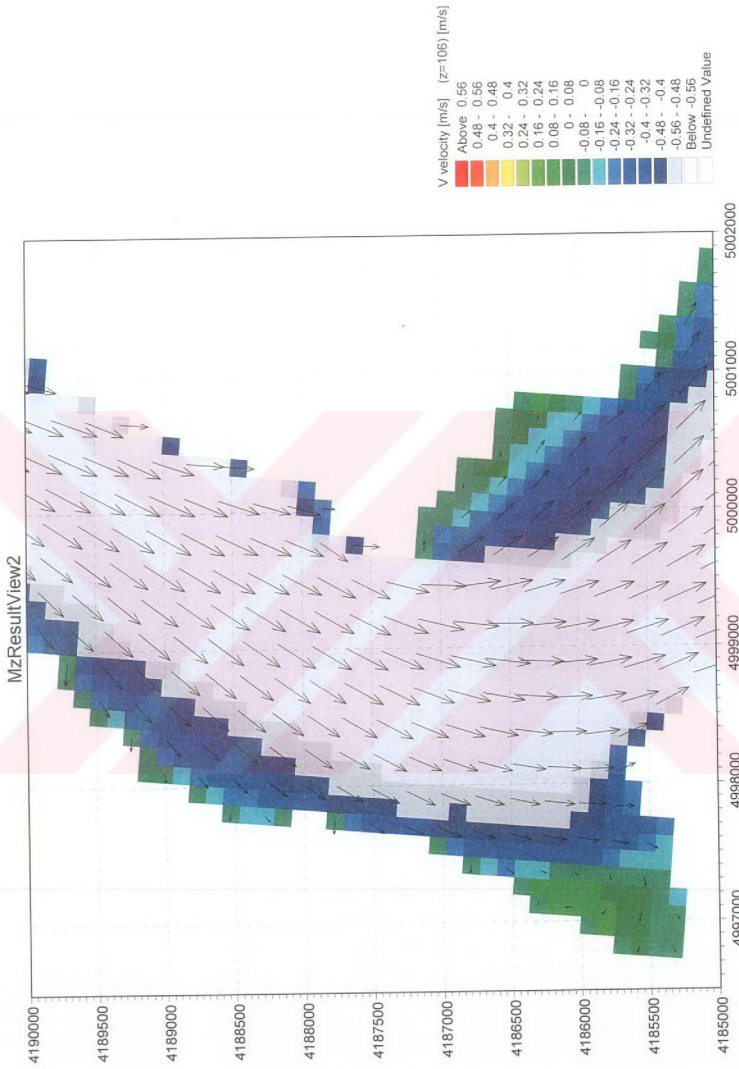
Şekil 4.42 İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 20 m derinlikte vektörel hız dağılımı



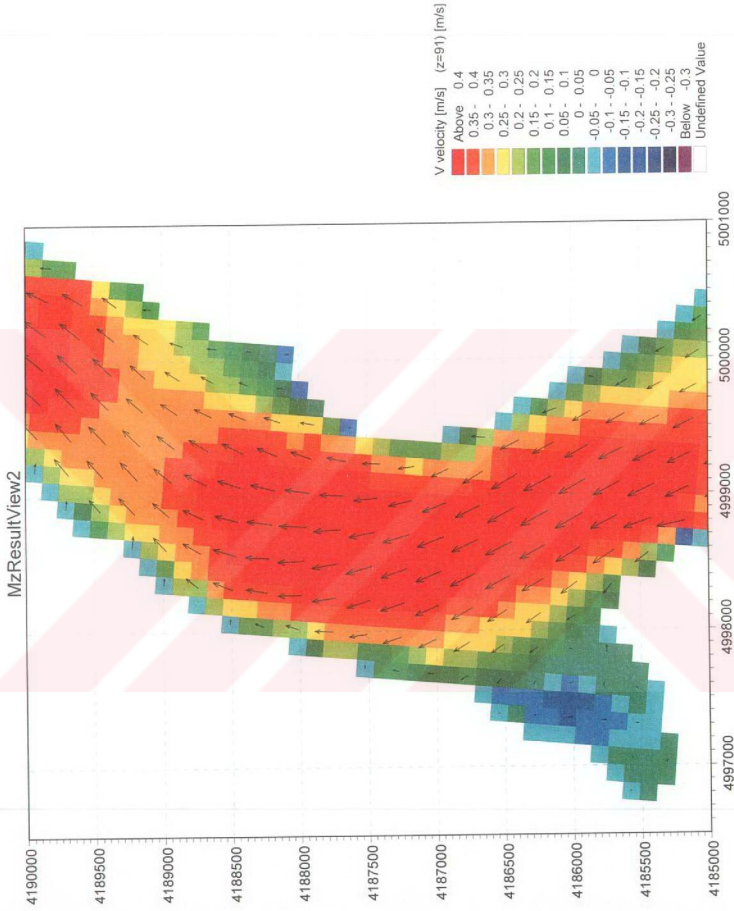
Şekil 4.43 İstanbul Boğazi'nda yüzeyden 30 m derinlikte vektörel hız dağılımı



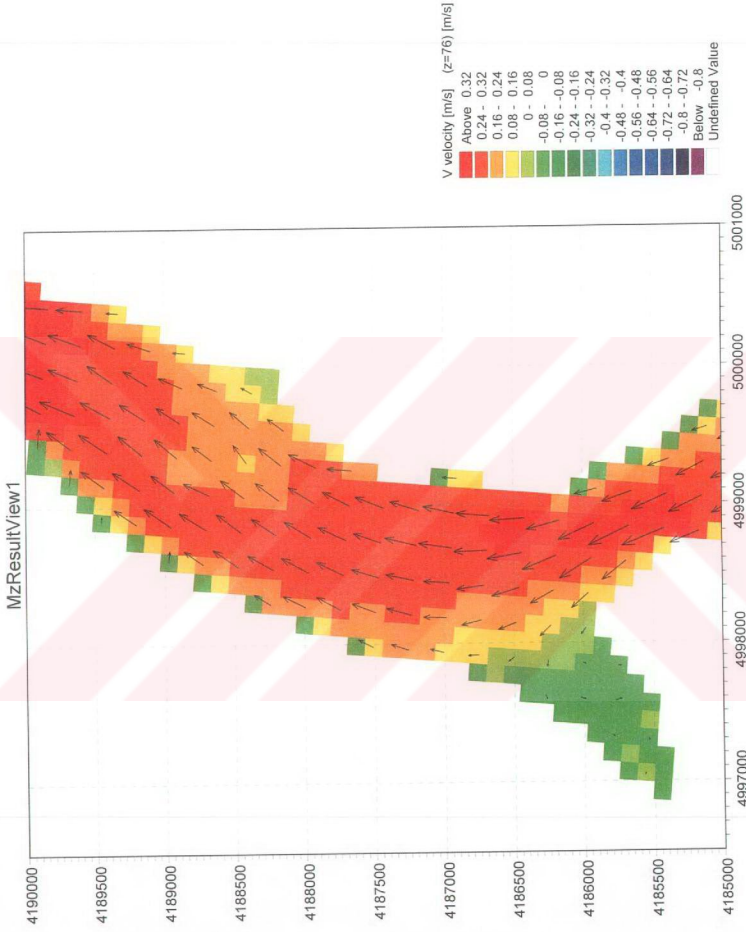
Şekil 4.44 İstanbul Boğazı'nda yüzeyden 50 m derinlikte vektörel hız dağılımı



Şekil 4.45 Dolmabahçe bölgesinde yüzeyde bileşke(u-v) vektörel hız dağılımı

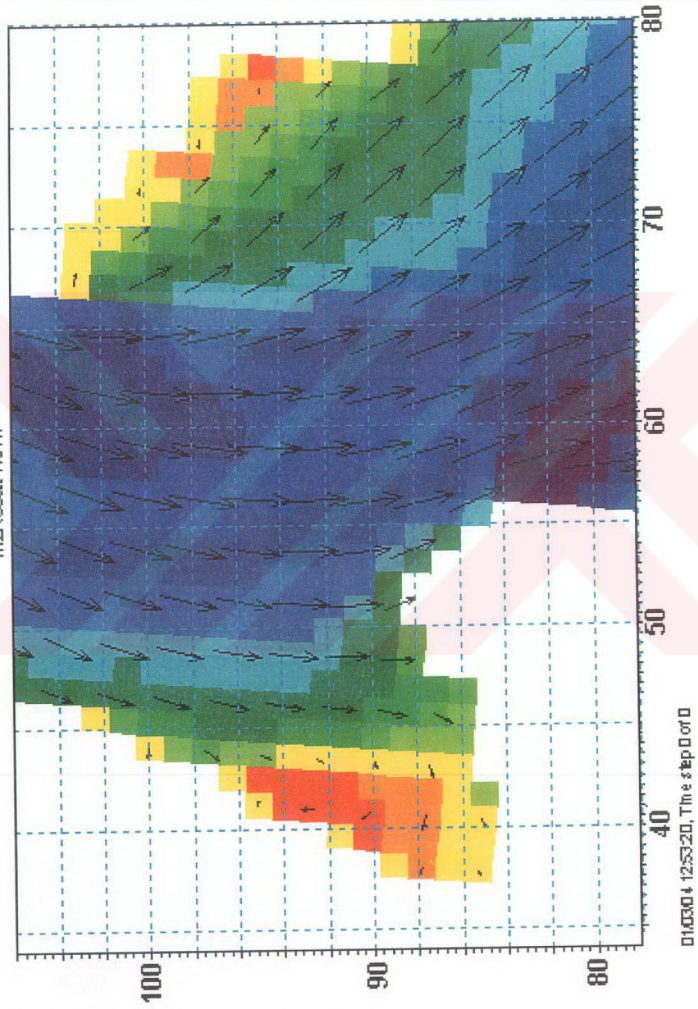


Şekil 4.46 Dolmabahçe bölgesinde yüzeyden 15 m derinlikte bileşke(u-v) vektörel hız dağılımı

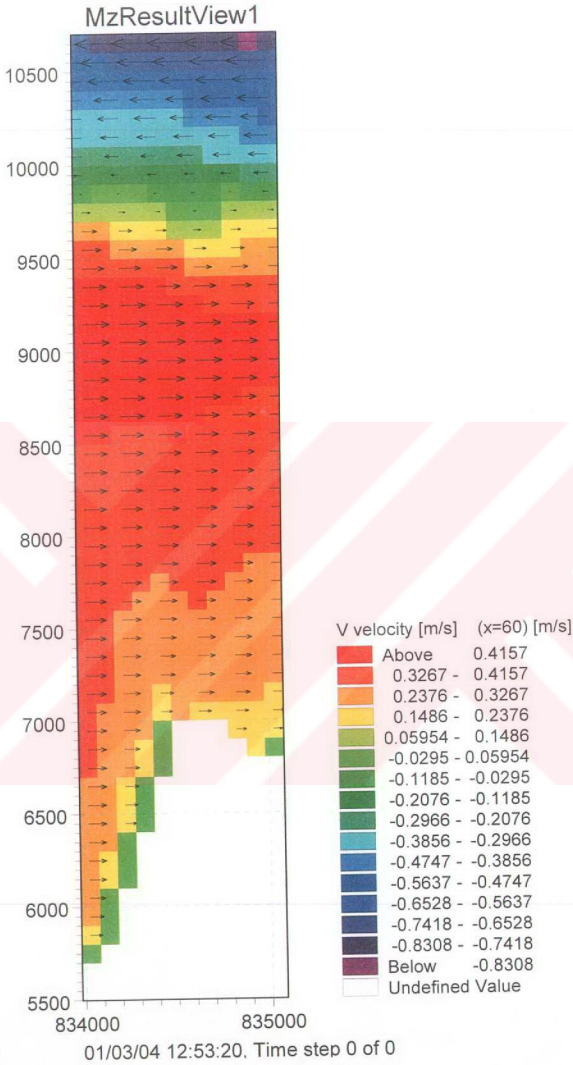


Şekil 4.47 Dolmabahçe bölgesinde yüzeyden 30 m derinlikte bileşke(u-v) vektörel hız dağılımı

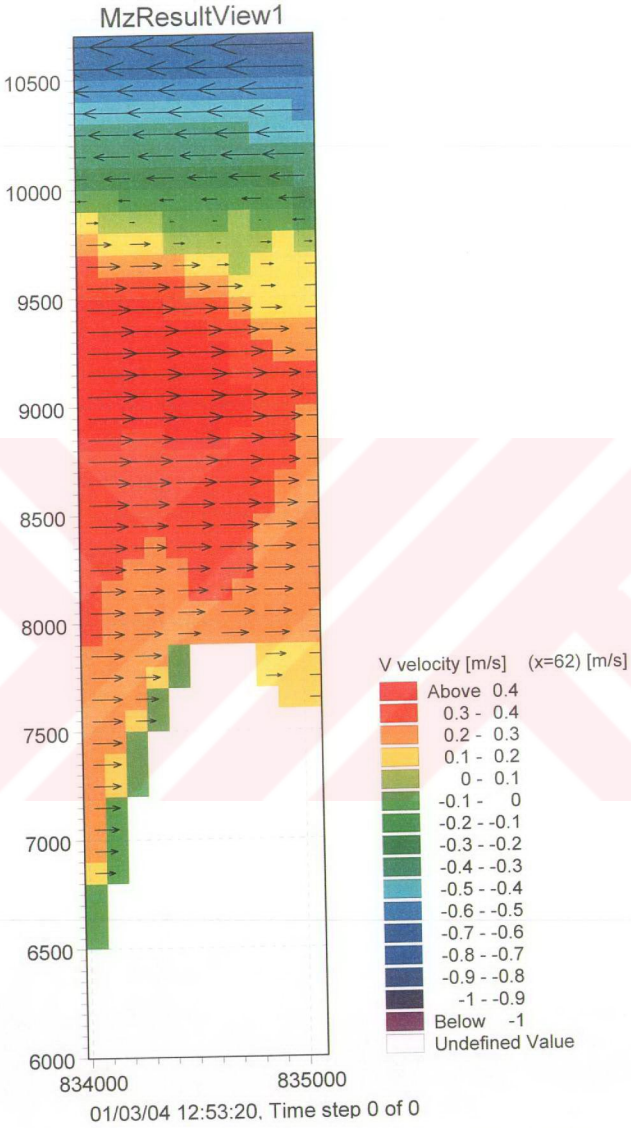
MzResultView1



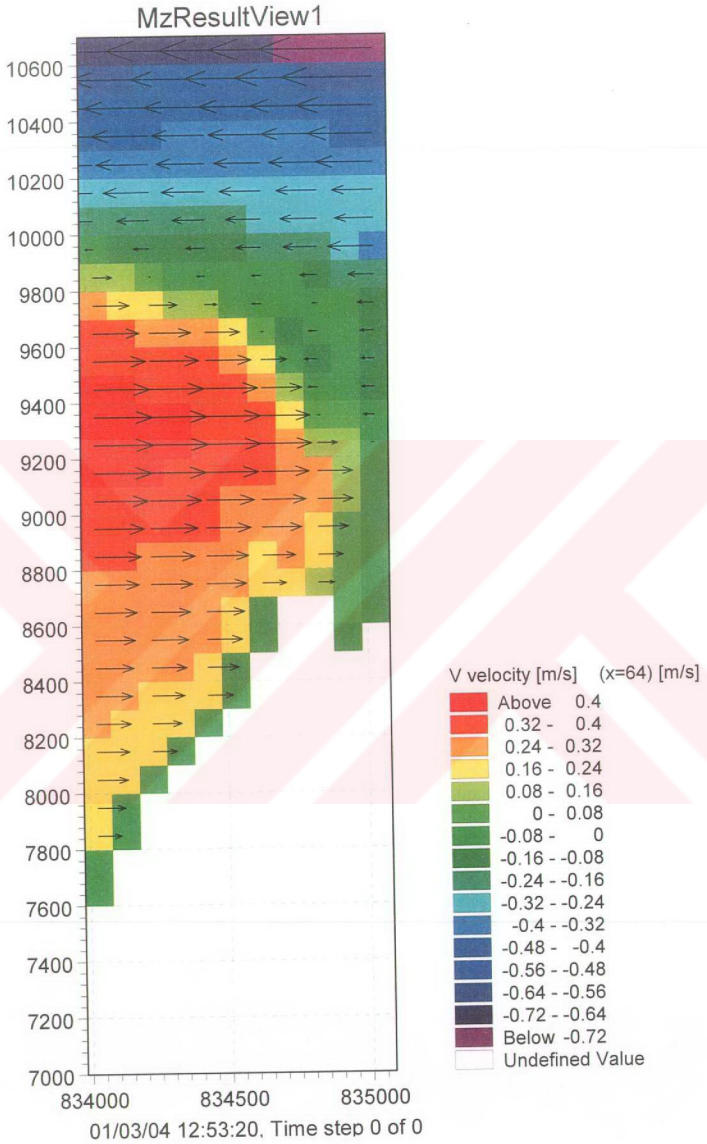
Şekil 4.48 Boğazdaki güney bölgesindeki ($x=35-80$; $y=75-106$ ve $z=106$ (yüzey)) bileşke yatay (u-v) hızları



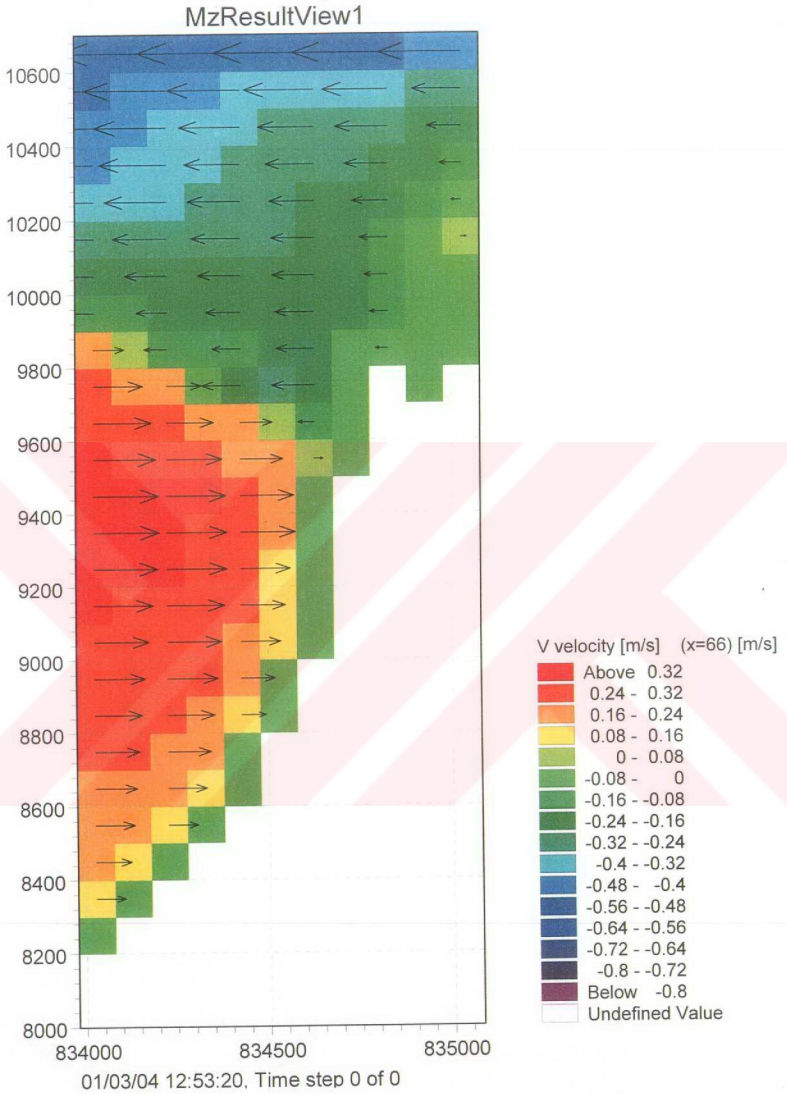
Şekil 4.49 $x=60$ ve $y=90-100$ arası derinlik boyunca hız dağılımı



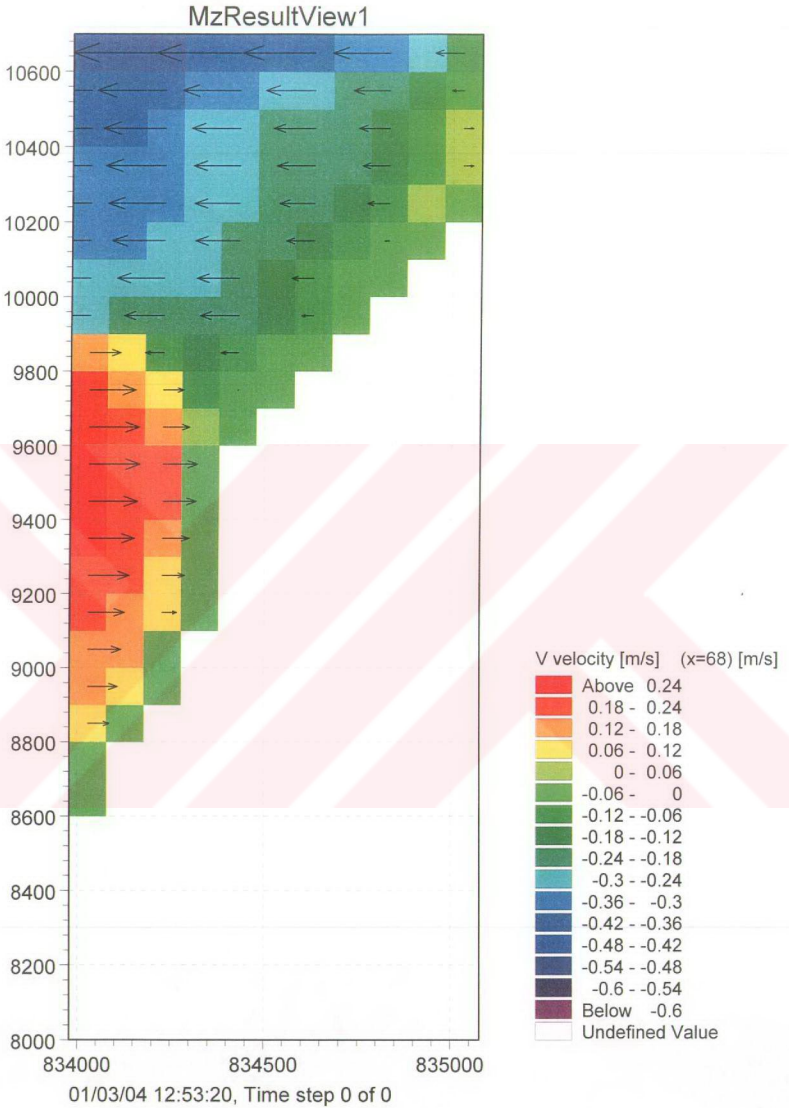
Şekil 4.50 x=62 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı



Şekil 4.51 $x=64$ ve $y=90-100$ arası derinlik boyunca hız dağılımı



Şekil 4.52 x=66 ve y=90-100 arası derinlik boyunca hız dağılımı



Şekil 4.53 $x=68$ ve $y=90-100$ arası derinlik boyunca hız dağılımı

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

İki tabakalı akıma sahip İstanbul Boğazı'nda daha az yoğun Karadeniz suyu üst tabaka akımı ile Marmara'ya daha yoğun olan Akdeniz suyu ise alt tabaka akımıyla Karadeniz'e doğru akmaktadır. Bu akımın oluşmasının iki önemli nedeni vardır. Bunlar, Marmara ve Karadeniz arasındaki su seviyesi farkının yarattığı barotropik kuvvet ile Karadeniz ve Akdeniz sularının yoğunluk farkının neden olduğu baroclinik kuvvetlerdir.

Üç boyutlu tabakalı akıma sahip İstanbul Boğazı'nın uzun dönemli hidrolik koşullardan ve kısa dönemli meteorolojik koşullardan etkilendiği bilinmektedir. İstanbul Boğazı'nın akım yapısını kontrol eden üç hidrolik kontrol kesit vardır. Bunlar Karadeniz ve Marmara Denizi'ndeki eşikler ve Arnavutköy civarında daralan kesittir. Bu çalışma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir:

1- DLH Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı, Yıldız Teknik Üniversitesi ve ODTÜ işbirliğinde Avrasya Marmaray Konsorsiyumu'nun yardımıyla İstanbul Boğazı'nda yapılan akıntı ölçümleri,

2- Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü desteğiyle yapılan sayısal modelleme çalışmasıdır.

01.05-31.08.2003 tarihleri arasında ADP yardımıyla Sarayburnu, Galatasaray Üniversitesi, Paşalimanı ve Dolmabahçe istasyonlarında kısa süreli ölçümler ile bu tarihler arasında sürekli olarak Dolmabahçe açığında yapılan akıntı hızı ölçümleri değerlendirildiğinde özellikle Sarayburnu ve Paşalimanı'nda çok güçlü üst tabaka akımının Marmara'ya doğru aktığı buna karşın Dolmabahçe ile Galatasaray Üniversitesi açıklarında Boğaz'ın geometrisinden dolayı dönen bir akım yapısı meydana geldiği görülmüştür.

Üç boyutlu tabakalı akım yapısını modelleme yeteneğine sahip olan Mike 3 yazılımının Hidrodinamik Modülü kullanılarak İstanbul Boğazı'nın sayısal modellemesi yapılmıştır. Hidrodinamik Modül'ün k-ε türbülans modelinin İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısını modelleyebildiği belirlenmiştir. Akıntı yapısının meteorolojik koşullardan çok etkilendiği belirlenmiştir.

Sayısal modelin gerçekleştirilmesinde sınır şartlarının oluşturulması modelin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca model parametrelerinin doğru seçilmesi gerekmektedir.

k-ε türbülans modeli Karadeniz ve Marmara su seviyesi farkının 20 cm, Karadeniz suyu tuzluluğunun 19 psu ve Akdeniz suyu tuzluluğunun ise 36 psu değerlerine sahip olduğu kabul edilerek çalıştırılmıştır. Bu çalışmada meteorolojik koşullar (rüzgar, basınç değişimi, sıcaklık vs.), hidrolojik koşullar ve dalga etkisi dikkate alınmamıştır.

Yapılan sayısal modelleme çalışmalarında Marmara girişindeki Akdeniz suyunun zamanla değişerek Akdeniz'in gerçek tuzluluk değeri olan 36 psu'ya simülasyon zamanının belirli bir periyodunda ulaşması buna karşılık Karadeniz suyunun 19 psu sabit değeri ile akıma katılması gerektiği, su seviyesi değişiminin ise Karadeniz'de zamanla yine simülasyon periyodunun belirli bir zamanında artmasının İstanbul Boğazı'nda tabakalı akımı oluşturabileceği belirlenmiştir. Bu durum İstanbul Boğazı'ndaki tabakalı akımın oluşumunda önce Akdeniz suyunun İstanbul Boğazı'na girdiğini göstermektedir. Çünkü Akdeniz suyunun sabit 36 psu değeriyle girmesi durumunda baroclinic kuvvetler Karadeniz suyunu bloke etmekte ya da çok yavaş ilerlemesine izin vermektedir. Bu sonuç İstanbul Boğazı'nda yapılan Boğaz'ın jeolojik oluşumu hakkındaki verilerle uyum içindedir.

İstanbul Boğazı'nın k-ε türbülans modeliyle modellenmesi sonucunda geometrinin değiştiği Dolmabahçe bölgesinde akım yapısındaki değişimler belirlenmiştir. Üst akımın saat akrebi yönünde alt akımın ise saat akrebinin tersi yönde döndüğü ve bu sonucun ADP ölçümleriyle uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Sarayburnu bölgesinde hidrolik kontrol kesitleri olan taban eşiklerinin akım yapısını etkilediği ve birbirlerine ters doğrultuda sekonder akımların yaratılmasına neden olduğu belirlenmiştir.

Diğer bir kontrol kesiti olan Arnavutköy bölgesinde ise saat akrebinin dönüş yönünde net bir sekonder akım meydana gelmektedir.

Meteorolojik koşullara göre değişen alt ve üst akım kalınlıkları bir kama biçiminde eğimli arakesite sahip olmaktadır. Bu arakesit düzleminde gerek ana akım doğrultusunda saat akrebinin tersi yönde gerekse ana akım doğrultusuna dik ve Boğaz'ın geometrisine bağlı olarak değişen doğrultularda dönen bir akım yapısı meydana gelmektedir. Makro türbülanslı bu akım yapısı iki tabakanın arakesit boyunca kuvvetli karışımına neden olmaktadır.

Arakesit düzleminde boyuna eğimin yanısıra enine eğimin de olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni İstanbul boğazı'nın kıvrımlı yapısından kaynaklanmaktadır. Bu yapı boyuna hızın değişiminde maksimum hız yörüngesinin de Boğaz'ın geometrisine bağlı olarak eksenden saparak kıyılarına yerleşmesine neden olmaktadır.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada İstanbul Boğazı'nın sayısal modellemesi k-ε türbülans modeli yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak diğer türbülans modelleme teknikleri de kullanılarak en uygun model sonuçlarının elde edilmesi uygun olacaktır.

Bu çalışmada kullanılan k-ε türbülans modeline ait sayısal parametrelerin farklı değerleri kullanılarak saha verileriyle nicel kalibrasyonlar yapılmalı ve doğru sayısal parametreler elde edilmelidir.

Kalibre edilen k-ε türbülans modeli farklı ve dikkate alınmayan sınır koşullarıyla doğrulanmalıdır.

Elde edilen sonuçlar için risk analizi çalışması yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

- Abraham, G., (1983), Reference notes on Density Currents and Transport Processes, IHE, Delft.
- Akyarlı, A., Yalçın, A.C., (1997), "A Wave Climate Study for an LNG Terminal near Marmara Ereğlisi, Turkey", Proceedings of 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May, 25-30, 1997, Vol:3, pp:272-291.
- Doğan, E. ve diğ., 2001.
- IRTC, (1987), "Hydrographic Research", Vol 1 and 2.
- İSKİ, (2001), "Water Quality Monitoring Third Progress Report", İstanbul.
- Oğuz, T., Özsoy, E., Latif, M.A., Sur, H.İ. ve Ünlüata, Ü.C., (1990), "Modelling of Hydraulically Controlled Exchange flow in the Bosphorus Strait", Journal of Physical Oceanography, Vol 20, No 7, July
- Özhan, E. ve Abdalla, S., (2000), "NATO TU Waves Project", Middle East Technical University, Ocean Engineering Research Center.
- Özsoy, E., Latif, M.A., Beşiktepe, Ş., Çetin, N., Gregg, M., Belekopytov, V., Goryachkin, Y., ve Vasile, D., (1988), "The Bosphorus Strait: Exchange Fluxes, Currents and Sea Level Changes", in Ecosystem Modelling as a Management Tool for Black Sea, NATO Science Series 2: environmental Security 1, pp: 367, Ivanov, L.I. ve Oğuz T., Kluwer Academic Pub., Dordrecht.
- Özsoy, E., Latif, M.A., Sur, H.İ. ve Goryachkin, Y., (1996), "A Review of the Exchange Flow Regime and Mixing in the Bosphorus Strait", Bulletin de l'Institut Oceanographique, Monaco, n^o Special, CIESM Science Series n^o2, pp 187-204
- Özsoy, E., Oğuz, T., Latif, M.A., Ünlüata, Ü., Sur, H.İ. ve Beşiktepe, Ş., (1988), "Oceanography of the the Turkish Straits, Institute of Marine Science, METU, Erdemli
- Özsoy, E., Latif, M.A., Tuğru, S., Ünlüata, Ü., (1995), "Exchanges with the Mediterranean, Fluxes and Boundary Mixing Processes in the Black Sea"-In; Les mers tributaries de Mediterranee, F. Briand ed., Bulletin de l'Institut Oceanographique, Monaco, n^ospecial 15, CIESM Science Series 1: 1-25.
- Sur, H.İ., Özsoy, E. ve Ünlüata, Ü., (1994), "Boundary Current Instabilities, Upwelling, Shelf Mixing and Eutrophication Processes in the Black Sea", Prog. Oceanography, Vol. 33, pp:249-302.
- Sümer, M., Çeçen, K., Bayazıt, M., Güçlüer, Ş., Doğrusal, M. ve Yüce, H., (1981), "İstanbul Boğazı'nın Oşinografik ve Hidrolik Etüdü-I", Tübitak Sualma Tesisleri Ünitesi Kesin Rapor No:24, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Ve Su Kuvvetleri Kürsüsü.
- Tolmazin, D., (1987), "Relative Effects on the Oceanography and Eology of the Black Sea due to Ongoing Soviet River Flow Modifications and Bosphorus Tunnel Project", Preliminary Report, Parsons Brinckerhoff Int. Inc.

Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M.A., Özsoy, E., (1990), "On the Physical Oceanography of Turkish Straits", -In; The Physical Oceanography of Sea Straits., Pratt L.J ed, NATO/ASI Series, Kluwer, Dordrecht, 25-60.

Yüksel ve diğ., (1997), "The Report for Hydrographic Measurement and Examination in Kağıthane, Alibeyköy and Küçükköy Rivers", YTÜ Civil Eng. Faculty.

Yüksel ve diğ., (1998b), "The Report for Determination of the Sedimentation in the North Part of Golden Horn", YTÜ Civil Eng. Faculty.

Yüksel ve diğ., (1998a), "The Report for Sedimentation and Sediment Rates in Kağıthane, Alibeyköy and Küçükköy Rivers", YTÜ Civil Eng. Faculty.

Yüksel ve diğ. (1999a), "Report form marine Research of Sea Outfall in Altınova and Karamürsel", YTÜ, Civil Eng. Faculty.

Yüksel, Y., Alpar, B.,Çevik, E., Özçoban, Ş., (2000a), "Evaluation Report of Marine Research for Altınova and Karamürsel Sea Outfalls after the Earthquake on 17.08.1999", YTÜ, Civil Eng. Faculty.

Yüksel, Y., Çevik, E., Çelikoğlu, Y., Özçoban, Ş., Bostan, T., (2000b), "The Redesign and Projects for Altınova and Karamürsel Sea Outfalls after the Earthquake in 1999", YTÜ, Civil Eng. Faculty.

Yüksel, Y.,Çevik, E.,(2001), "The Investigation on the Jetty of Akarca River Mouth in Pendik", YTÜ Vakfi.

Yüksel, Y., Kapdaşlı, S.,Kapdaşlı, I., Çevik, I., (1999b), "Design Report and projects for Altınova and Karamürsel Sea Outfall", YTÜ, Civil Eng. Faculty.

Yüksel, Y., Yalçınar, A.C., Çevik, E., Güler, I., Öztürk, M.N, Aydoğan, B., Arı, A., (2003), "İstanbul Boğazı için Bir Hidrodinamik Model Araştırması", YTÜ, Bilimsel Araş. Proj. Koordinatörlüğü.

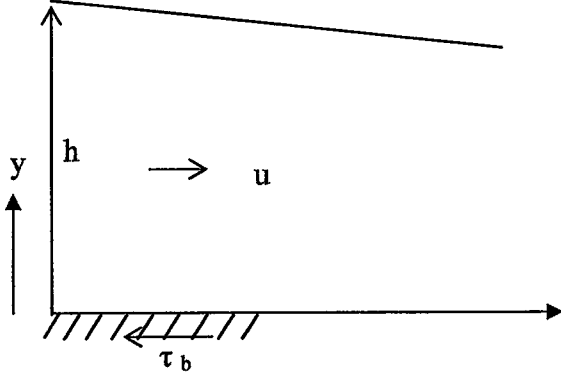
EKLER**Yoğunluk Akımları ve Taşınım (Abraham, 1983)**

1. İki Tabakalı Sistem
2. Arakesit Hidrodinamiği
3. Advektif Taşınım, Türbülans Taşınımı, Türbülans Kayma Gerilmesi
4. Dispersiv Taşınım
5. Adveksiyon-Difüzyon Denkleminin Çözümü
6. Değişim Akıntıları

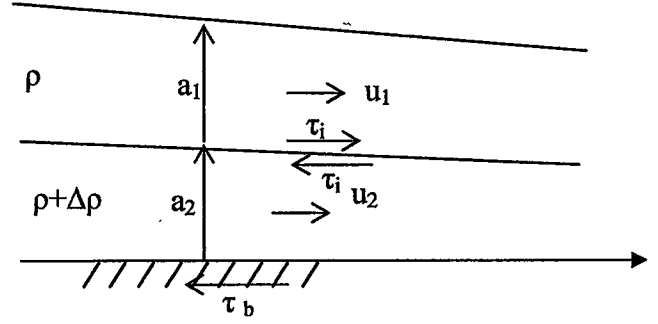


EK 1 YOĞUNLUK AKIMLARI VE TAŞINIMI¹

1.İki Tabakalı Sistem



Şekil ek 1.1 Homojen akım



Şekil ek 1.2 İki tabakalı sistem

1.1 Süreklilik Denklemleri

İlerde Bölüm 4.3'de de açıklanacağı gibi homojen bir akımda (Şekil ek 1.1) dikkate alınan elementer akışkan hacmi için süreklilik denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial U(y)}{\partial x} + \frac{\partial V(y)}{\partial y} = 0 \quad (1.1)$$

su derinliği cinsinden

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (1.2)$$

Burada;

$U(y)$: akımın yatay yöndeki hız bileşeni

$V(y)$: akımın düşey yöndeki hız bileşeni

u : yatay yöndeki hız bileşenlerinin ortalama değeri (derinlik boyunca ortalama)

h : su derinliği

x : yatay koordinat

y : düşey koordinat

t : zaman

¹ Reference Notes on Density Currents and Transport Processes G. Abraham, IHE, Delft, 1983

Benzer şekilde iki tabakalı bir akım sisteminde kalınlığı a_1 olan üst tabaka için süreklilik denklemi (Şekil ek 1.3):

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} + \frac{\partial a_1 u_1}{\partial x} = 0$$

burada;

a_1 : üst tabaka kalınlığı

u_1 : üst tabaka yatay hız bileşeninin ortalama değeri

Alt tabaka için süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} + \frac{\partial a_2 u_2}{\partial x} = 0 \quad (1.4)$$

Burada;

a_2 : alt tabaka kalınlığı

u_2 : alt tabakada yatay yöndeki hız bileşeninin ortalaması

1.2 Hareket Denklemleri

Homojen bir akımda elemanter hacim için yatay yöndeki hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\text{Sürtünme}}{\text{Kütle}} + gS \quad (1.5)$$

Burada;

p : basınç

g : yerçekimi ivmesi

S : taban eğimi ($\sin S \approx S$)

Hidrostatik basınç:

$$p = \rho g(h-y) \quad (1.6)$$

Böylece

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1.7)$$

Ayrıca

$$\frac{\text{Sürtünme}}{\text{Kütle}} = \frac{\tau_b dx}{\rho h dx} \quad (1.8)$$

Burada;

τ_b : taban kayma gerilmesidir (akım pozitif yönde olursa taban kayma gerilmesinin pozitif olduğu kabul edilmektedir.)

(1.7) ve (1.8) denklemleri (1.5) denkleminde yerine konulup derinlik boyunca integre edilmesinden (1.9) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\tau_b}{\rho h} + gS \quad (1.9)$$

(1.9) denkleminde U^2 'nin derinlik boyunca ortalamasının u^* u ya eşit olduğu kabul edilmektedir.

Üst tabakadaki elementer akışkan hacmi için yatay yöndeki hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\text{Sürtünme}}{\text{Kütle}} + gS \quad (1.10)$$

Hidrostatik basınç:

$$P = \rho_1 g (a_1 + a_2 - y) \quad (y > a_2) \quad (1.11)$$

Böylece

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} = g \frac{\partial (a_1 + a_2)}{\partial x} \quad (1.12)$$

Ayrıca

$$\frac{\text{Sürtünme}}{\text{Kütle}} = \frac{\tau_i dx}{\rho_1 a_1 dx} \quad (1.13)$$

burada;

ρ_1 : üst tabakanın yoğunluğu

τ_i : arakesit kayma gerilmesidir.

(1.12) ve (1.13) denklemleri (1.10) denkleminde yerine konularak integre edilimesiyle aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + g \frac{\partial(a_1 + a_2)}{\partial x} = -\frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} + gS \quad (1.14)$$

Alt tabakadaki elementer akışkan hacmi için yatay yöndeki hareket denklemi:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\text{Sürtünme}}{\text{Kütle}} + gS \quad (1.15)$$

Hidrostatik basınç:

$$p = \rho_1 g a_1 + \rho_2 g (a_2 - y) = \rho_2 g (a_1 + a_2 - y) - \Delta \rho g a_1 \quad (y < a_2) \quad (1.16)$$

burada;

ρ_2 : alt tabakanın kalınlığı

$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$

böylece

$$\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} = g \frac{\partial(a_1 + a_2)}{\partial x} - \frac{\Delta \rho}{\rho_2} g \frac{\partial a_1}{\partial x} \quad (1.17)$$

ayrıca

$$\frac{\text{Sürtünme}}{\text{Kütle}} = \frac{(\tau_b - \tau_i) dx}{\rho_2 a_2 dx} \quad (1.18)$$

(1.17) ve (1.18) denklemleri (1.15) denkleminde yerine koyulup integre edilmesiyle (1.19) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \rho \frac{\partial(a_1 + a_2)}{\partial x} - \frac{\Delta \rho}{\rho_2} g \frac{\partial a_1}{\partial x} = -\frac{(\tau_b - \tau_i)}{\rho_2 a_2} + gS \quad (1.19)$$

1.3 Temel Denklemlerin Özeti

Homojen bir akım için şimdiye kadar aşağıdaki denklemler elde edildi:

Denklemler	Bilinmeyenler
Süreklilik denklemi (1.2)	h, u
Hareket denklemi (1.9)	h, u, τ_b
2 adet denklem	3 adet bilinmeyen

Denklem sayısını bilinmeyen sayısına eşitlemek için τ_b , h ve u 'ya bağlı olarak ifade edilmelidir. Homojen akımda taban kayma gerilmesi Chezy katsayısına bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

$$\tau_b = \rho g \frac{u^2}{C^2} \quad (1.20)$$

burada C Chezy katsayısını göstermektedir. Deneylemlerden Chezy katsayısı aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$C = f(u, r, k, Re) \quad (1.21)$$

burada;

R : hidrolik yarıçap

k : taban pürüzlülüğü

Re : Reynolds sayısı

İki tabakalı bir akım için aşağıdaki denklemler elde edilmiştir:

Denklemler	Bilinmeyenler
Üst tabaka için süreklilik denklemi (1.3)	a_1, u_1
Alt tabaka için süreklilik denklemi (1.4)	a_2, u_2
Üst tabaka için hareket denklemi (1.14)	a_1, u_1, a_2, τ_i
Alt tabaka için hareket denklemi (1.19)	$a_1, a_2, u_2, \tau_i, \tau_b$
4 adet denklem	6 adet bilinmeyen

Denklem sayısını bilinmeyen sayısına eşitlemek için τ_i ve τ_b , a_1 , a_2 , u_1 , u_2 cinsinden ifade edilmiştir. Bunu yapabilmek için τ_b ve τ_i aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\tau_b = \frac{1}{8} \lambda_b \rho_2 u_2 |u_2| \quad (1.22)$$

$$\tau_i = \frac{1}{8} \lambda_i \rho (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (1.23)$$

burada;

λ_b : taban pürüzlülük katsayısı

λ_i : arakesit pürüzlülük katsayısı

ρ : yaklaşık aynı değere sahip olduğu farzedilen üst ve alt tabaka yoğunluğu

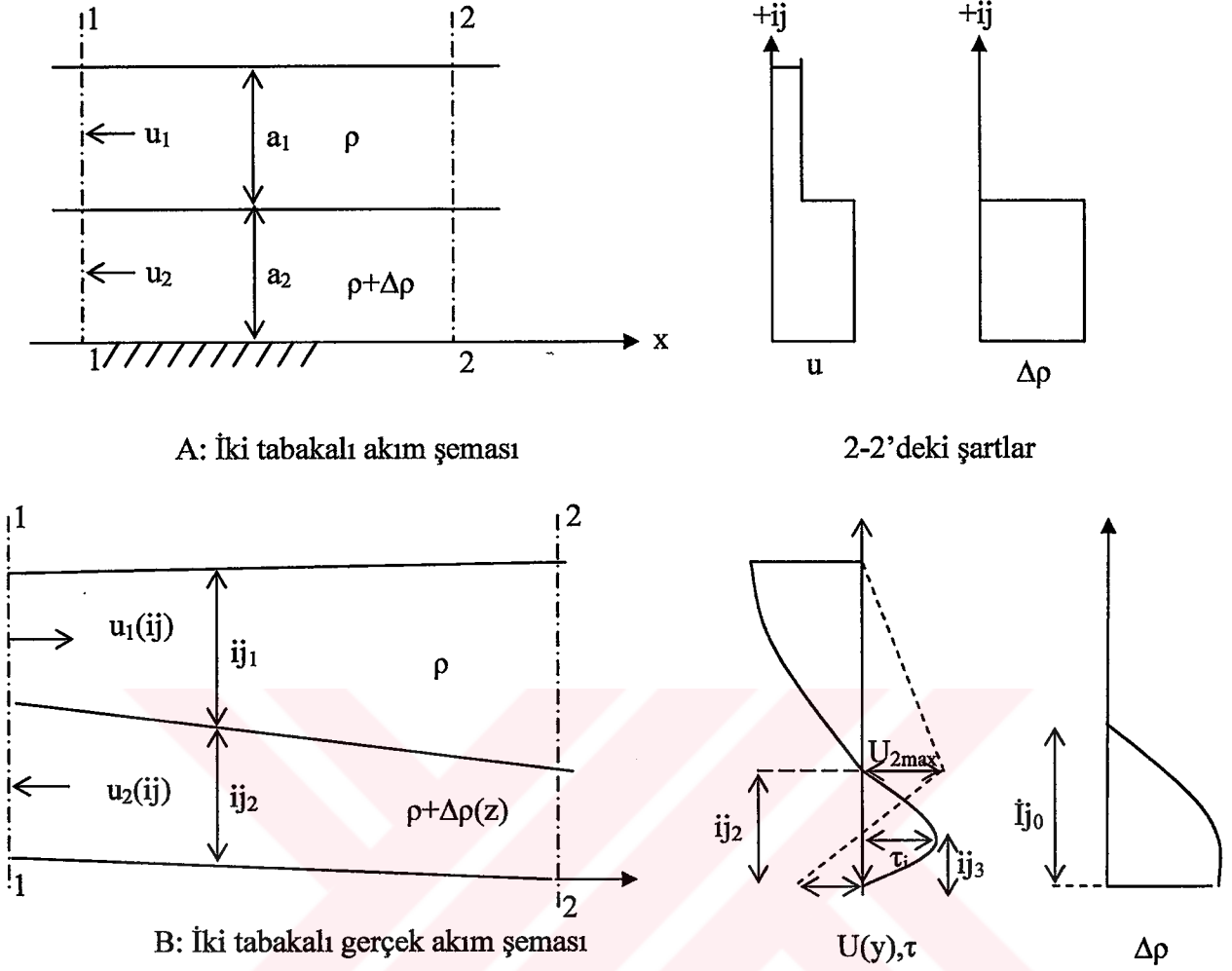
λ_b ve λ_i katsayılarının değerleri deneysel olarak elde edilmektedir.

Taban pürüzlülük katsayısı Chezy katsayısının fonksiyonudur.

$$\lambda_b = \frac{8g}{C^2} \quad (1.24)$$

Bunun anlamı (1.21) denklemindeki deneysel veriler alt tabakaya uygulanırsa bu denklemindeki u , R ve Re 'nin yerini alt tabakadaki u_2 hızı, R_2 ve Reynolds sayısının alacağıdır.

Alt ve üst tabakalardaki akımlar ters yönlü olursa, alt tabakada u_2 hızının maksimum ve türbülans kayma gerilmesinin sıfır olduğu yerde y_3 gibi bir seviyede ayrılma meydana gelebilmektedir (Şekil ek 1.3).



Şekil ek 1.3 Aynı yönlü ve ters yönlü akım olması durumu için hız, kayma gerilmesi ve yoğunluk dağılımı

Homojen bir akımda serbest yüzeyde U hızı maksimum değer alırken türbülans kayma gerilmesi sıfır değerini almaktadır. Bu nedenle (1.21) ve (1.24) denklemlerinden taban pürüzlülük katsayısını belirleyebilmek için alt tabakanın $y = 0$ ve $y = y_3$ ile sınırlanan bölümü y_3 derinliğine sahip homojen bir akım alanı olarak düşünülmüştür.

Alt ve üst tabaka akımının aynı yönde olduğu iki tabakalı bir akım için yukardaki kabul yapılamaz. Yukardaki yaklaşımla alt tabaka akımı yan duvarlar, arakesit düzlemi ve taban tarafından sınırlandırılan bir kapalı kanal akımı şeklinde düşünülebilmektedir. Bu yaklaşımdan hareketle (1.21) denklemi kullanılarak hidrolik yarıçap ve Reynolds sayısı saptanabilmektedir. Bu yaklaşım taban kayma gerilmesi ile arakesit kayma gerilmesi büyüklüklerinin yaklaşık aynı mertebede olduğunu daha iyi göstermektedir.

Prototip koşullarında ($Re > Re_{cr}$) C' 'nin değeri $60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}^{-1}$ mertebesinde olmaktadır. Bu değer (1.24) denkleminde yerine konacak olursa $\lambda_b \approx 0,2$ değerini almaktadır.

1.4 Kabarma Eğrileri

Karalı akım şartlarında ($\partial/\partial t = 0$) üst ve alt tabakalardaki hareket denklemleri aşağıdaki gibi olmaktadır:

üst tabakada (1.14 denkleminde)

$$u_1 \frac{du_1}{dx} + \rho \frac{d(a_1 + a_2)}{dx} = -\frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} + gS \quad (1.25)$$

denklem $\Delta\rho/\rho_2$ ile çarpıldıktan sonra şu hali almaktadır.

$$-\rho \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \frac{da_1}{dx} = \frac{\Delta\rho}{\rho_2} u_1 \frac{du_1}{dx} + \rho \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \frac{da_2}{dx} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} - \frac{\Delta\rho}{\rho_2} gS \quad (1.26)$$

alt tabakada (1.19 denkleminde)

$$u_2 \frac{du_2}{dx} + \rho \frac{d(a_1 + a_2)}{dx} - \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \frac{da_1}{dx} = -\frac{(\tau_b - \tau_i)}{\rho_2 a_2} + gS \quad (1.27)$$

(1.25) denklemini (1.27) denkleminde çıkartılıp (1.26) denkleminde yerine konulursa aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$-u_1 \frac{du_1}{dx} + u_2 \frac{du_2}{dx} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} u_1 \frac{du_1}{dx} + \rho \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \frac{da_2}{dx} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} - \frac{\Delta\rho}{\rho_2} = \frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} - \frac{(\tau_b - \tau_i)}{\rho_2 a_2} \quad (1.28)$$

idealleştirilmiş iki tabakalı bir akım sisteminde

$$\rho_1 \square \rho_2 \text{ ve } \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \square 1 \quad (1.29)$$

bu durumda (1.28) denklemini şu hale gelmektedir:

$$-u_1 \frac{du_1}{dx} + u_2 \frac{du_2}{dx} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \frac{da_2}{dx} = \frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} - \frac{(\tau_b - \tau_i)}{\rho_2 a_2} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} gS \quad (1.30)$$

kararlı akım koşullarında (1.3) ve (1.4) denklemleri aşağıdaki hali almaktadır:

$$\frac{du_1}{dx} = -\frac{u_1}{a_1} \frac{da_1}{dx} \quad (1.21)$$

ve

$$\frac{du_2}{dx} = -\frac{u_2}{a_1} \frac{da_2}{dx} \quad (1.32)$$

(1.31) ve (1.32) denklemlerini (1.30) denkleminde yerine konulursa

$$-\frac{u_2^2}{a_2} \frac{da_2}{dx} + \frac{u_1^2}{a_1} \frac{da_1}{dx} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \frac{da_2}{dx} = \frac{\tau_i}{\rho_1 a_1} - \frac{(\tau_b - \tau_i)}{\rho_2 a_2} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} gS \quad (1.33)$$

Üst ve alt tabakadaki hız farkları her iki tabakada birim su kütlesi üzerinde etkili kuvvet farkının bilinmesini gerektirmektedir. Arakesit kayma gerilmesi tabakalar arasındaki hız

farklarını azaltacak şekilde etki etmektedir. Dolayısıyla hızlar arasındaki bu farkın her iki tabaka üzerinde etkili basınç gradyanının farklı olmasından kaynaklandığı beklenmektedir.

Hidrostatik gradyanının üst tabakanın hızını artırıcı bir etki yapabilmesi için üst tabakada bir su yüzü eğimi olması gerekmektedir (denk. 1.12). Bu eğim alt tabakadaki hızın artışını da beraberinde getirmektedir. 1.12 ve 1.17 denklemlerinden her iki tabakadaki birim su kütlesi üzerinde etkili olan hidrostatik basınçtan kaynaklı kuvvet farkı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = \left(\frac{1}{\rho_2} \frac{dP}{dx} \right)_{alt\ tabaka} - \left(\frac{1}{\rho_1} \frac{dP}{dx} \right)_{üst\ tabaka} = -\frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \frac{da_1}{dx} \quad (1.34)$$

Bu farkın büyüklüğü her ne kadar arakesit düzleminin eğimine bağlı olsada büyük oranda alt ve üst tabaka arasındaki yoğunluk farkından kaynaklanmaktadır. Bu durum alt tabaka hızının üst tabaka hızından farklı olmasına neden olmaktadır. Böylece alt ve üst tabakalarda farklı değerlere sahip hızlar dolaylı olarak aynı mertebeden büyüklükler olan $\rho \frac{d(a_1 + a_2)}{dx}$ ve

$$-\frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \frac{da_1}{dx} \text{ ifadelerini göstermektedirler. (1.29) denklemini gereği bu durum aşğıdaki}$$

sonuçları yaratmaktadır.

$$\frac{da_1}{dx} \neq 0 \quad (1.35a)$$

$$\frac{da_1}{dx} \neq -\frac{da_2}{dx} \quad (1.35b)$$

$$\frac{d(a_1 + a_2)}{dx} \neq 0 \quad (1.35c)$$

(1.35) denklemini üst ve alt tabaka hızları arasında bir fark yakalamak için idealleştirilmiş koşullar sunmaktadır. (1.35) denklemini (1.33) denkleminde yerine yazarsak

$$\frac{da_2}{dx} = \frac{S + \frac{\tau_1}{\Delta\rho g a_1} - \frac{(\tau_b - \tau_1)}{\Delta\rho g a_2}}{1 - \frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1} - \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_2}} \quad (1.36)$$

(1.35) ve (1.36) denklemleri iki tabaka arasındaki hız farkıyla karakterize edilen akımlar için kabarma hesabı yapmamızı sağlamaktadır. İki tabakalı su kabarma eğrileriyle ilgili bir tartışma Rigter (1970) tarafından verilmiştir. Bununla ilgili örnekler (1.6), (1.7) ve (1.8) bölümlerinde verilecektir.

1.5 Alt Tabaka Denge Kalınlığı, Alt Tabaka Kritik Kalınlığı ve İçsel Hidrolik Sıçrama

Üst tabaka hareketsizken ($u_1=0$) alt tabaka denge ve kritik kalınlıkları (1.36) denklemi yardımıyla belirlenebilmektedir. Alt tabaka denge kalınlığı $da_2/dx=0$, kritik kalınlık ise $da_2/dx=\infty$ sonucunu vermektedir. Dolayısıyla

$$a_{2,e} = \frac{\tau_b - \tau_i}{\Delta\rho g S} - \frac{a_{2,e}}{a_1} \frac{\tau_i}{\Delta\rho g S} \quad (1.37)$$

ve

$$a_{2,cr} = \left[\frac{q_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g} \right]^{1/3} \quad (1.38)$$

veya

$$a_2 = a_{2,cr} \quad \text{için} \quad \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_2} = 1 \quad (1.39)$$

Burada

$a_{2,e}$: alt tabaka denge kalınlığı

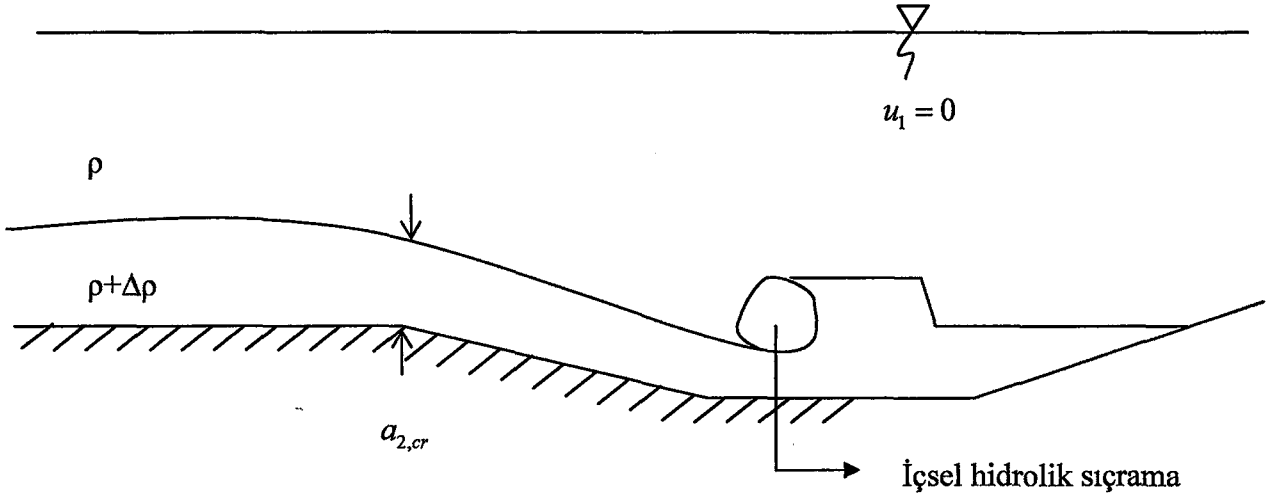
$a_{2,cr}$: kritik alt tabaka kalınlığı

q_2 : alt tabakanın birim debisi ($q_2=a_2 * u_2$)

(1.37), (1.38) ve (1.39) denklemlerindeki denge alt tabaka kalınlığı ile kritik alt tabaka kalınlığının homojen akım için bilinenler olduğu görülebilmektedir. Bu durum tabakalı akım için de geçerlidir. Ayrıca homojen bir akımda sel rejiminden nehir rejimine geçiş bir hidrolik sıçrama ile gerçekleşmektedir. Benzer şekilde tabakalı bir akımda da bu geçiş içsel bir hidrolik sıçrama ile meydana gelmektedir.

Homojen bir akımdaki hidrolik sıçrama, sıçramanın gerçekleştiği bölgedeki hava ile su arasında bir karışıma neden olmaktadır. Tabakalı bir akımdaki içsel hidrolik sıçrama da sıçrama bölgesinde alt ve üst tabaka arasında benzer bir etki yaratmaktadır.

İçsel hidrolik sıçrama ile ilgili bir örnek Şekil ek 1.4'te verilmiştir.



Şekil ek 1.4 Derin bir çukurda biriken alt tabakadaki akışkan (üst tabaka durgun)

$u_1 \neq 0$ durumunda kritik akım ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1} + \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_2} = 1 \quad (1.40)$$

İçsel hidrolik sıçrama ile ilgili detaylı bir çalışma Yih ve Guha (1955) ve Yih (1965) veya (1980) tarafından yapılmıştır.

Yoğunluk farkından kaynaklı akımın neden olduğu içsel hidrolik sıçrama oyulma çukuru oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durum bazı limanlarda gözlenmiştir (Europort ve Rotterdam limanları). Düşük gel-git oluşumu sırasında meydana gelen kanal boyu akım iki tabakalı akım olarak şematize edilebilmektedir (Rotterdam nehrinden gelen iç su yolu akımı üst tabaka, denizden Rotterdam nehrine doğru giren akım ise alt tabaka akımını temsil etmektedir) (Speekenbrink, 1976).

göre integrale edilir. İntegral sabitini bulabilmek için herhangi bir noktadaki x değerine karşılık gelen a_1 değerinin bilinmesi gerekmektedir.

Akarsu ağzının derinliğinde bir süreksizlik söz konusudur. Bu noktada da_1/dx büyük değerler alma eğilimindedir. Akarsu ağzındaki durum (1.45) denklemi uyarınca aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{q_{fr}^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} ga_1^3} = \frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} ga_1} = 1 \quad (1.46)$$

(1.46) denklemi şu şekilde de değerlendirilebilmektedir: Bölüm 2.3.2 de $u_2=0$ olduğu koşullarda $c_i=0$ olduğu görülecektir. Burada c_i uzun dalgalardan dolayı meydana gelen hızdır. (1.46) denkleminde verilen değerlerden daha büyük a_1 değerleri için uzun dalgalar akarsu ağzından mansabına doğru yayılacak şekilde içeri girebilmektedir. Irmak ağzında alt tabaka kalınlığı (1.46) denkleminde verilen üst tabaka kalınlığından daha küçük değerler alırsa tuzlu su akarsu ağzından içeri doğru girebilmektedir.

(1.45) ve (1.46) denklemleri yardımıyla bloke edilmiş tuz kaması tamamen tariflenebilmektedir.

$$\frac{a_1}{a_0} \left[\frac{1}{5F_0^2} \left(\frac{a_1}{a_0} \right)^4 - \frac{1}{4F_0^2} \left(\frac{a_1}{a_0} \right) + 1 \right] + 3(F_0)^{2/3} \left[\frac{1}{10}(F_0)^{2/3} - \frac{1}{4} \right] = \frac{\lambda_i x}{8 a} \quad (1.47)$$

ve

$$L_i = \frac{2a}{\lambda_i} \left[\frac{1}{5F_0} - 2 + 3F_0^{2/3} - \frac{6}{5}F_0^{4/3} \right] \quad (1.48)$$

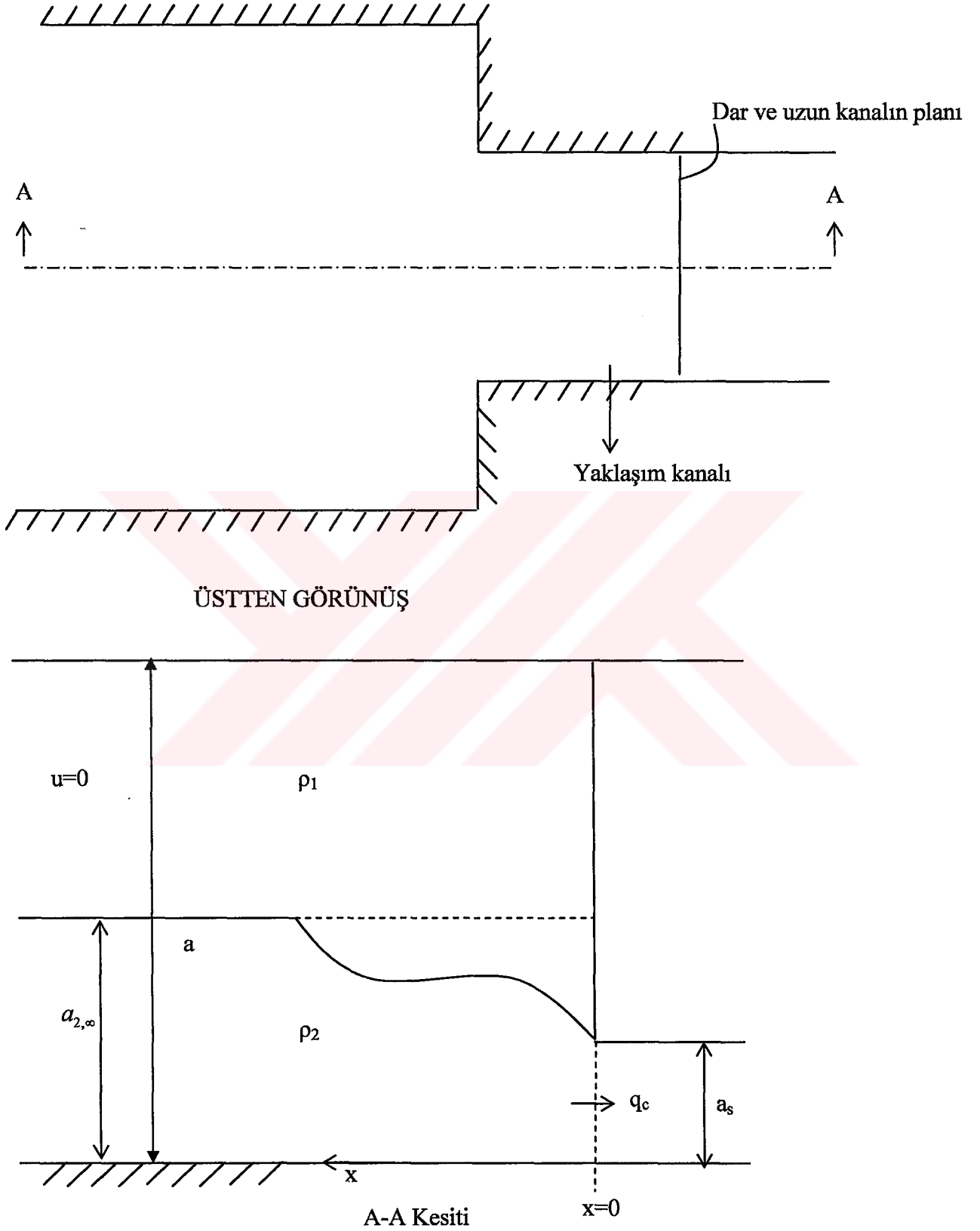
$$F_0^2 = \frac{q_{fr}^2}{a \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} ga \right)} \quad (1.49)$$

burada

L_i : bloke edilmiş tuz kamasının uzunluğu (Şekil ek 1.5).

(1.46) (akarsu ağzındaki tabaka kalınlığı), (1.47) (bloke edilmiş tuz kamasının şekli) ve (1.48) (bloke edilmiş tuz kamasının boyu) denklemlerinden elde edilen sonuçları doğrulayan deneysel çalışmalar literatürde mevcuttur (Şekil ek 1.6).

1.7 İki Tabkalı Sistemde Alçalma



Şekil ek 1.7 Dar ve uzun kanalın girişinde suyun kabarması

İki tabakalı bir akım sistemi gözönüne alalım. Alt tabakadaki akışkan dar ve uzun bir kanal boyunca akıyor olsun. Kararlı akım kabulü yapılsın. Yaklaşım kanalı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım dar ve uzun kanalla yaklaşık aynı genişliğe sahip kanalın giriş kısmındaki parçadan oluşmaktadır. İkinci kısım ise kanalın membasına kadar uzanan daha geniş bir parçadan oluşmaktadır. Yaklaşım kanalının tabanı yatay olup kanalın geniş kısmındaki su derinliği sabittir.

Cevabını aradığımız soru geniş kanalda verilen arakesit boyunca üst taakadan alt tabakaya herhangi bir şekilde akışkan geçişi olmaksızın alt tabakanın sabit a_s derinliği boyunca geçen maksimum akışkan miktarı belirlemektir. Bu problemde çözüm kolaylığı sağlaması açısından arakesit ve taban sürtünmeleri ihmal edilmektedir. Ayrıca alt tabakada beraberinde hidrostatik basınç dağılımını getiren düşey hız bileşeni de ihmal edilmektedir.

Alt tabaka akım dolayısıyla üst tabakadaki akışkana bir çekim uygulamaktadır. Fakat üst tabaka da durgun kabul edilerek ($u_1=0$) idealleştirilmektedir. Bu durumda (1.14) ve (1.19) denklemlerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

$$\frac{d(a_1 + a_2)}{dx} = 0 \quad (1.50)$$

ve

$$u_2 \frac{du_2}{dx} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \frac{da_2}{dx} = 0 \quad (1.51)$$

(3.51) denklemini x 'e göre integre edilirse aşağıdaki sonuç elde edilmektedir.

$$\frac{1}{2} u_2^2 + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_2 = c_2 \quad (1.52)$$

burada $c_2: L^2/T^2$ boyutundan integral sabitidir.

İkinci bölgede (geniş kanalın mansabına kadar olan bölge) $\frac{1}{2} u_2^2$ terimi ihmal edilebilir. Buna göre:

$$c_2 = \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_{2,\infty} \quad (1.53)$$

sonucu elde edilmektedir. Burada $a_{2,\infty}$, geniş kanalda sabit derinliğe sahip alt tabaka kalınlığını göstermektedir.

Süreklilik denkleminde (dar ve uzun kanala yakın bölgede);

$$q = a_2 u_2 \quad (1.54)$$

ifadesi yazılabilir. Burada q , dar ve uzun kanal boyunca geçen birim debidir.

(1.53) ve (1.54) denkleminin (1.52) denkleminde yerine konulmasıyla (1.55) denklemini elde edilmektedir.

$$\frac{1}{2} \frac{q^2}{a_2^2} + \frac{\Delta\rho}{\rho} g a_2 = \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_{2,\infty} \quad (1.55)$$

Bu noktada notasyona dikkat edilmelidir.

a_s : dar ve uzun kanalın derinliği

$a_{2,s}$: a_2 'nin yaklaşım kanalında sahip olduğu değeri göstermektedir.

Bu ayırım gözönüne alınarak (1.55) denklemini aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\frac{1}{2} \frac{q^2}{a_{2,s}^2} + \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_{2,s} = a_{2,\infty} \frac{\Delta\rho}{\rho} g \quad (1.56)$$

(1.56) denkleminde q debisinin çekilmesiyle aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

$$q = a_{2,s} \left[2 \frac{\Delta\rho}{\rho} g (a_{2,\infty} - a_{2,s}) \right]^{1/2} \quad (1.57)$$

ve

$$\frac{dq}{da_{2,s}} = \left(2 \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \right)^{1/2} \cdot \frac{1 (2a_{2,\infty}a_{2,s} - 3a_{2,s}^2)}{2 (a_{2,\infty}a_{2,s}^2 - a_{2,s}^3)^{1/2}} \quad (1.58)$$

Eğer $a_{2,s} = \frac{2}{3} a_{2,\infty}$ değerini alması durumunda $\frac{dq}{da_{2,s}} = 0$ olmaktadır. $a_{2,s}$ 'in bu değeri için

hesaplanan debi maksimum debidir.

$$q_{\max} = \left[\frac{\Delta\rho}{\rho_2} g \left(\frac{2}{3} a_{2,\infty} \right)^3 \right]^{1/2} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_{2,s} \right)^{1/2} \cdot a_{2,s} \quad (1.59)$$

veya

$$\frac{u_{2,s}^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_{2,s}} = 1 \quad (1.60)$$

burada

q_{\max} : $u_1=0$ durumu için yaklaşım kanalındaki maksimum birim debi

$u_{2,s} = q/a_{2,s}$

(1.60) denkleminin sonucundan hareketle (1.59) denklemiyle verilen debinin yaklaşım kanalının sonundaki kritik içsel akışa tekabül ettiği görülebilmektedir.

a_s dar kanalın yüksekliğini göstermektedir. Burada $a_s > \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ ve $a_s < \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ durumu için ayrı ayrı değerlendirme yapmak gerekmektedir.

$a_s > \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ durumu için:

(1.59) denkleminde verilen yaklaşım kanalından geçebilecek maksimum q debisi, $a_{2,s} = \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ olması durumunda mümkün olmaktadır. (1.59) denklemi üst tabakanın durgun olduğu ($u_1=0$) ve alt tabakada belli bir kabarmanın olacağı farzedilerek türetilmiştir. Fakat bu koşulların oluşması için bir arakesitin var olması gerekmektedir. Özetlersek $a_s > \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ durumunda q 'nun maksimum değeri (1.59) denkleminde elde edilememektedir. Ancak (1.55) denkleminde $a_2=a_s$ yazılmak suretiyle bu değer türetilmektedir.

Eğer $a_s > \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ ise

$$q_c = a_s \left[2 \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g (a_{2,\infty} - a_s) \right]^{1/2} \quad (1.61)$$

burada

q_c , a_s değerine karşı meydana gelen alçalma durumunda dar kanaldan geçecek maksimum q debisidir.

Yani

$$a_s = \frac{2}{3}a_{2,\infty} \text{ için } q_c = q_{\max} \quad (1.62)$$

$a_s < \frac{2}{3}a_{2,\infty}$ durumu için:

Bu koşulun gerçekleşmesi durumunda dar kanalda kısa bir mesafe boyunca a_2 değeri $\frac{2}{3}a_{2,\infty}$ değerine eşit olmaktadır. Bu durumda da $q_{\max} = q_c$ olmaktadır.

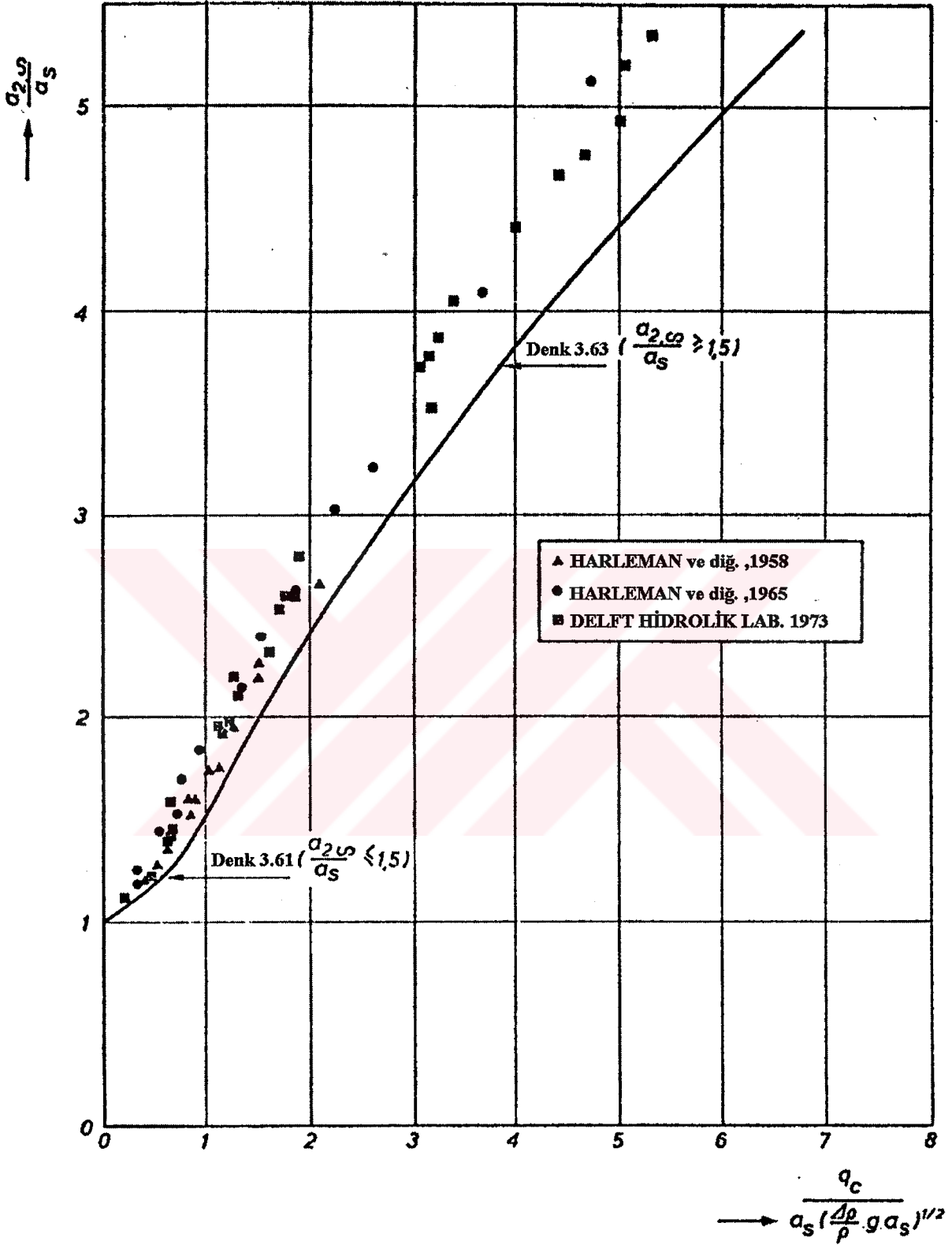
Yani

$$a_s < \frac{2}{3}a_{2,\infty} \text{ için } q_c = q_{\max} \quad (1.63)$$

Alt tabaka kalınlığı kısa bir mesafede $a_2 = \frac{2}{3} a_{2,\infty}$ değerinden $a_2 = a_s$ değerine doğru değişim göstermektedir.

(1.61) ve (1.62) denklemleri alt tabakada hidrostatik basınç ve üniform hızdaki sapmalar ihmal edilerek türetildiler. Bu nedenle (3.15) ve (3.17) denklemleriyle verilen q_c değerleri Şekil ek 1.8'de de görüldüğü gibi gerçek q_c değerlerini değil, belli bir üst sınıra karşılık hesaplanan q_c değerlerini temsil etmektedirler.

Buraya kadar incelenen teori Harleman ve Elder (1965) tarafından geliştirilen ve kullanılan teoriydi.



Şekil ek 1.8 Alçalmayla ilgili deneysel sonuçlar

1.7.2'de şimdiye kadar biraz değiştirilmiş bir alçalma problemi göz önüne alınmaktadır. Dar kanaldan geçen birim debi q olarak alınmıştır. Ayrıca aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

$$q_1 = (1-\alpha)q \quad \text{ve} \quad q_2 = \alpha q \quad (1.64)$$

q_1, q_2 : alt ve üst tabakaların birim debisi

q : dar kanaldan geçen birim debi

α : katsayı ($\alpha \leq 1$)

Burada çözülmeye çalışılan problem verilen bir α değerine karşılık dar kanaldan geçebilecek maksimum akışkan debisini elde etmektir.

Düzlem taban durumunda bu problemin çözümü için (1.64) denklemi (1.36) denkleminde yerine konulmasıyla aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\frac{da_2}{dx} = \frac{\frac{\tau_i}{\Delta \rho g a_1} - \frac{(\tau_b - \tau_i)}{\Delta \rho g a_2}}{1 - q^2 \left[\frac{\alpha^2}{\frac{\Delta \rho}{\rho} g a_1^3} + \frac{(1-\alpha)^2}{\frac{\Delta \rho}{\rho} g a_2^3} \right]} \quad (1.65)$$

Yaklaşım kanalının uzunluğu L (Şekil ek 1.7)

$$L = \int_{a_{2,\infty}}^{a_{2,s}} \frac{dx}{da_2} da_2 \quad (1.66)$$

(1.65) denkleminin (1.66) denkleminde yerine konulmasıyla (1.67) denklemi elde edilmektedir.

(1.67) denklemi q birim debisini, bilinenleri α , $a_{2,\infty}$ ve L olan $a_{2,s}$ 'in fonksiyonu olarak vermektedir. α ve $a_{2,s}$ 'in bilinenler olması durumunda (1.67) denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir:

$$L = f(a_{2,s}, q) \quad (1.68)$$

L uzunluğu sabit bir değer olduğu için

$$\frac{dL}{da_{2,s}} = \frac{\partial L}{\partial a_{2,s}} + \frac{\partial L}{\partial q} \frac{dq}{da_{2,s}} = 0 \quad (1.69)$$

Maksimum q debisi şu durumlar için elde edilmektedir:

$$\frac{dq}{da_{2,s}} = 0 \quad (1.70)$$

$$\frac{dL}{da_{2,s}} = 0 \quad (1.71)$$

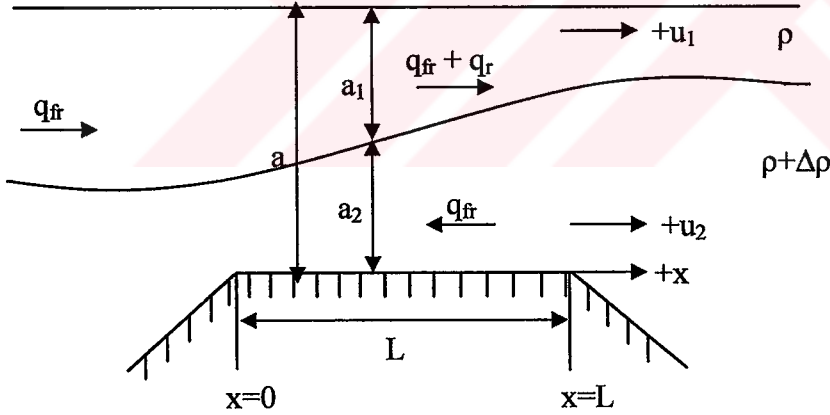
(1.44), (1.67) ve (1.71) denklemlerinden de görüleceği gibi aşağıdaki durum için de q debisinin maksimum değeri elde edilebilmektedir.

$$q^2 \left[\frac{\alpha^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g(a-a_{2,s})^3} + \frac{(1-\alpha)^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_{2,s}^3} \right] = 1 \quad (1.72)$$

Bu şu anlama gelmektedir: q maksimum değere sahipken (1.72) denklemi, (1.40) denkleminin dar kanalın suyla temas ettiği kesimdeki koşulların idealleştirilmesiyle elde edilmiştir.

Jirka (1979) bir takım eksik yönleri olan ($\alpha \neq 1$) alçalma prolemine sanki normal bir alçalma problemiymiş gibi ($\alpha = 1$) çözüm uygulamaktadır. Jirka'nın çözümü (1.72) denklemine dayanmaktadır.

1.8 Su Altında Kalmış Uzun Eşik (Şekil ek 1.9)



Şekil ek 1.9 Ters akıntıya neden olan yoğunluk

Rigter (1970) uzun bir eşik üzerinde belli bir genişlik boyunca yoğunluğun meydana getirdiği ters akıntı problemini çözmeye çalışmıştır. Rigter, q_{fr} debisine sahip tatlı su kaynağından tuzlu su kaynağına doğru net bir akışın olduğu koşullarda belli bir genişliğe sahip tatlı su ile tuzlu suyun birbirinden ayrıldığı uzun bir eşik üzerinde çalışmış. Eşik üzerinde küçük q_{fr} değerlerinde tuzlu su tatlı suya karışabilmektedir.

Rigter tuzlu sudan tatlı suya karışan birim zamandaki maksimum su miktarını, (1.72) denkleminin elde edilmesine olanak veren benzer bir yaklaşımla aşağıda ifade edilen şartın sağlanması durumu için elde etmiştir.

$x=0$ ve $x=L$ de (Şekil ek 1.9)

$$\frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho}ga_1} + \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho}ga_2} = 1 \quad (1.73)$$

q_{fr} 'nin maksimum değeri (1.73) denkleminin elde edildiği koşullar için belirlenebilmektedir. q_{fr} 'nin teorik değerleri ölçümlerlede doğrulanmıştır (Rigter, 1970).

1.9 Densimetrik Froude Sayısı

Bölüm (1.6) da verilen örnekte de görüleceği gibi su kabarma eğrisi probleminde bilinmeyenlerin bulunmasında kullanılan hesaplamalar genel olarak (1.36) denkleminin elde edilmesinde kullanılan hesaplamalardır. (1.36) denklemi a_1 'i (veya a_2 'yi) x 'in fonksiyonu olarak vermektedir. a_1 (veya a_2) x 'e göre integral alınmasıyla elde edilmektedir. Bölüm (1.6) ve (1.7.2) deki problemlerden birinde yapıldığı gibi bir integral sabitinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun anlamı a_1 'in (veya a_2 'nin) x 'e bağlı bir değerinin bilinmesi gerektiğidir. Bölüm (1.8) de tartışılan bir problemde ise iki integral sabitinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda a_1 'in (veya a_2 'nin) x 'e bağlı olarak iki noktadaki değerlerinin bilinmesine gerek duyulmaktadır.

Bölüm (1.6), (1.7) ve (1.8) deki örneklerden de görüleceği gibi a_1 'in (veya a_2 'nin) belli değerleri için (1.40) denklemi gereğince aşağıdaki ifadeler yazılabilmektedir:

$$Fr_1^2 + Fr_2^2 = 1 \quad (1.74)$$

$$Fr_1^2 = \frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho}ga_1} \quad \text{ve} \quad Fr_2^2 = \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho}ga_2} \quad (1.75)$$

Fr_1, Fr_2 : alt ve üst tabkanın densimetrik Froude sayısı

(1.74) denklemi şu sonuçlara işaret etmektedir:

- Arakesit düzlemi belli bir mesafe boyunca eğimli olacak şekilde uzanmaktadır (genelde ise arakesit düzlemi yatay olma eğilimindedir.)
- Uzun dalgalardan kaynaklı hız sıfıra eşittir.

Bu sonuçlar Bölüm (1.6) daki integral sabitinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.(1.74) denkleminde yoğunluğun maksimum debi geçişine sebep olduğu sonucuna da

varılmaktadır. Bu sonuçtan Bölüm (1.7) ve (1.8) deki integral sabitlerinin belirlenmesinde yararlanılmaktadır.

Homojen akımdaki Froude sayısı (u^2 / gh) da yukarıdaki sonuçla benzer bir sonuca işaret etmektedir.

Tabakalı akımda nehir rejimi için $Fr_1 + Fr_2 < 1$, sel rejimi için $Fr_1 + Fr_2 > 1$ olmaktadır.

2.Arakesit Hidrodinamiği

2.1 Türbülansın Kaynaklı İçsel Dalgalar

İçsel karışım sürecinde türbülans ile içsel dalgaların oynadıkları roller arasında bir ayırım yapılması gerekmektedir. Türbülansın önemli bir özelliği sabit yoğunluğa sahip bir akışkan ortamında yüzeye doğru gerçekleşecek şekilde momentum veya kütleli bir büyüklüğü (tuz gibi) taşıyabilme kabiliyetidir. İyi tabakalanmış bir akım alanında farklı tabakalar üzerinde bulunan noktalar arasındaki türbülans hareketi vardır ve türbülans enerjisi akışkanın hızıyla yavaş bir şekilde yayılmaktadır. Öte yandan dalgalar anlık tabakalanma yaratmak suretiyle kısa bir süre içinde olsa akışkanın yoğunluğunu değiştirebilmektedirler. Bu değişimin sürekliliği ancak türbülans etkisinin sönümlenmesiyle mümkün olabilmektedir. Dalgalar akışkan boyunca çok hızlı bir şekilde enerji transferi gerçekleştirmektedir. Yoğunluktaki değişim dalga hareketinin bu karakterinden dolayı periyodik olarak meydana gelmektedir.

Sonuç olarak, türbülans ve/veya kırılan içsel dalgaların meydana getirdiği arakesit kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\tau_i = \tau_{i,t} + \rho u_m \Delta u \quad (2.1)$$

burada

τ_i : arakesit kayma gerilmesi

$\tau_{i,t}$: türbülansın momentum taşınımının yarattığı arakesit kayma gerilmesi

u_m : kırılan içsel dalgalar nedeniyle arakesitte birim genişlikte birim zamanda alt ve üst tabaka arasında transfer edilen su miktarı

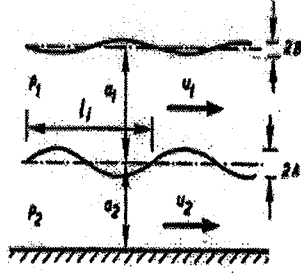
Δu : arakesit üzerindeki hız farkı

ρ : birbirlerine yakın değerlere sahip alt veya üst tabaka yoğunluğu ($\Delta\rho/\rho \ll 1$)

2.2 Arakesitte İçsel Dalgalar

2.2.1 Kısa Periyotlu Dalgalar

Şekil ek 2.1'de de görüldüğü gibi iki tabakalı bir akım sisteminde hem arakesitte hem de serbest yüzeyde salınımlı yapıda bir dalga oluşumu gözlenmektedir. İçsel dalgaları yayılma hızı c_i Harleman (1961) tarafından aşağıdaki şekilde verilmektedir.



Şekil ek 2.1 İki tabakalı akım sistemindedeki salınımlı dalga hareketi

$$c_i = \frac{Ru_2 + Tu_1}{R+T} \pm \left[\frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{k(R+T)} - \frac{RT}{(R+T)^2} (u_2 - u_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

burada

$$k = \frac{2\pi}{l_i} \quad (2.3)$$

$$R = \rho_2 \coth ka_2 \quad (2.4)$$

$$T = \rho_1 \left[\coth ka_1 - \frac{B/A}{\sinh ka_1} \right] \quad (2.5)$$

burada

l_i : içsel dalgaların boyu

Bundan sonra kullanılan notasyonların belirlenmesinde Şekil ek 2.1 ve Bölüm 1 esas alınmaktadır.

Arakesitteki ve serbest yüzeydeki dalgalar için genlik oranı ifadesi aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\frac{A}{B} = \cosh ka_1 - \frac{g \sinh ka_1}{k(u_1 - c_i)^2} \quad (2.6)$$

Birbirine paralel akıntıların olmaması durumunda ($u_1 = u_2 = 0$), hız ve genlik ifadeleri aşağıdaki hale gelmektedir.

$$c_i^2 = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{k(R+T)} \quad (2.7)$$

ve

$$\frac{A}{B} = \cosh ka_1 - \frac{g \sinh ka_1}{kc_i^2} \quad (2.8)$$

Üst üste binen akışkanların bilinen sınırlarındaki salınımlarla ilgili olarak yukardaki denklemlerin yardımıyla (2.9) ifadesi türetilmektedir.

$$c_i = \frac{\rho_2 u_2 + \rho_1 u_1}{\rho_2 + \rho_1} \pm \left[\frac{g}{k} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} - \frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} (u_2 - u_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Şu ana kadar kullanılan denklemler birinci mertebeden, çevrintisiz, lineer dalga teorisi kullanılarak türetilmiştir.

2.2.2 Uzun Periyotlu Dalgalar

Uzun periyotlu dalgalar için ka_1 ve ka_2 küçük değerler almaktadır. Bundan dolayı $\coth ka_1$ ve $\coth ka_2$ yerine sırasıyla $\frac{1}{ka_1}$ ve $\frac{1}{ka_2}$ yazılabilir. ρ_1 ve ρ_2 terimleri yanında $\rho_2 - \rho_1$ teriminin

ihmal edilmesiyle, (2.2) denklemini uzun periyotlu dalgalar için şu hali almaktadır:

$$c_i = \frac{u_1 a_2 + u_2 a_1}{a_1 + a_2} \pm \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} - \frac{(u_2 - u_1)^2 a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

Şekil ek 2.1 aynı zamanda Schief-Schönfeld'in (1953) ve Abbot-Torbe'un (1963) işaret ettiği gibi ((1.3), (1.4), (1.14) ve (1.19) denklemleri), iki tabakalı bir sisteme ait süreklilik ve hareket denklemleri terimlerini içermesi yönüyle de ele alınabilir.

(1.74) denkleminin idealleştirilmesiyle, (2.10) denkleminde uzun periyotlu dalgalar için birinin durgun kalacağı ($c_i = 0$) sonucu çıkmaktadır.

2.3 Arakesitte Stabilite Sorunu (Kırılan İçsel Dalgalar)

c_i hız terimi kararlı yapıya sahip dalgaların hızlarının hesaplanmasında gerçekçi sonuçlar vermektedir. Ancak (2.2) denkleminde de kolayca görüleceği gibi kök içerisindeki terim birinci terimden daha büyük olursa, hız çok büyük değerlere sahip olmaktadır. Bu durumda dalgaların kırılması beklenmektedir. Böylece içsel dalgaların kırılma koşulu aşağıdaki gibidir:

$$(u_2 - u_1)^2 > \frac{g(\rho_2 - \rho_1)(R + T)}{kRT} \quad (2.11)$$

(2.11) genel ifadesinden hareketle kısa ve uzun periyotlu dalgalar için kırılma koşulları sırasıyla (2.12) ve (2.13) ifadelerindeki gibi olmaktadır.

$$\frac{(u_2 - u_1)^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g l_i} > \frac{1}{\pi} \quad (2.12)$$

$$\frac{(u_2 - u_1)}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g(a_1 + a_2)} > 1 \quad (2.13)$$

(2.12) denklemi yeterince kısa dalga boyuna sahip kısa periyotlu bir dalganın kararsız bir arakesitin oluşturacağını göstermektedir. Bunun anlamı, belli koşullarda alt ve üst tabaka hızları arasındaki çok küçük bir farkın kararsız yapıda kısa dalgalar yaratacağıdır. Bu durum arakesitte bir karışımın oluşmasına neden olacaktır. Ancak bu karışım, aynı zamanda, stabil bir geçiş tabakası oluşumuna yol açacak olan stabilite faktörünün kendisi olacaktır (Abraham ve diğ., 1979).

2.4 Arakesit Kayma Gerilmesi ile İlgili Deneysel Veriler

2.4.2 Nehir Rejimine Sahip Tabakalı Akım

Arakesit kayma gerilmesi ile ilgili bu bölümde verilen bilgiler, aşağıdaki akım koşullarına sahip nehir rejimindeki tabakalı akım çalışmalarından elde edilmiştir.

- bloke edilmiş tuz kaması, (Şekil ek 2.2a), Schijf ve Schönfeld, (1953), Harleman, (1961)
- yüzeyde sıcaklık kaması, (Şekil ek 2.2b), Bata, (1957), Polk ve diğ., (1971)
- yoğunluk kaynaklı dönüş akımları, (Şekil ek 2.2c), Rigter, (1970), Holley ve Waddell, (1976).

$\Delta\rho/\rho \ll 1$ koşulluyla, karışımın söz konusu olmadığı nehir rejimindeki iki tabakalı bir akım probleminin çözümünden (bakınız Bölüm (1.6) ve (1.8), Harleman (1961) ve Rigter (1970))

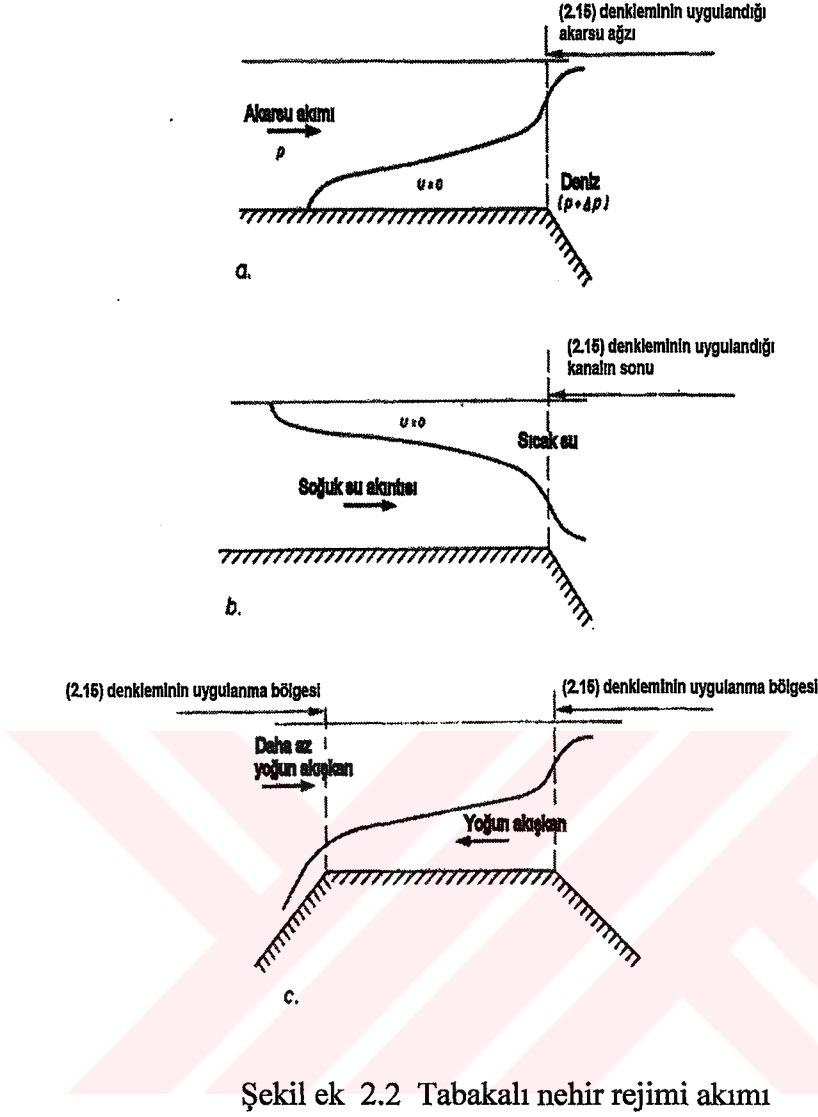
(2.14) ifadesindeki sonuç çıkmaktadır.

$$\frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1} + \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_2} \leq 1 \quad (2.14)$$

Sadece akımın kritik olduğu düşünülen bölgelerinde (2.15) ifadesi geçerli olmaktadır.

$$\frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_1} + \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g a_2} = 1 \quad (2.15)$$

Şekil ek 2.2 (2.15) denkleminin idealleştirildiği bölgeleri kapsamaktadır.



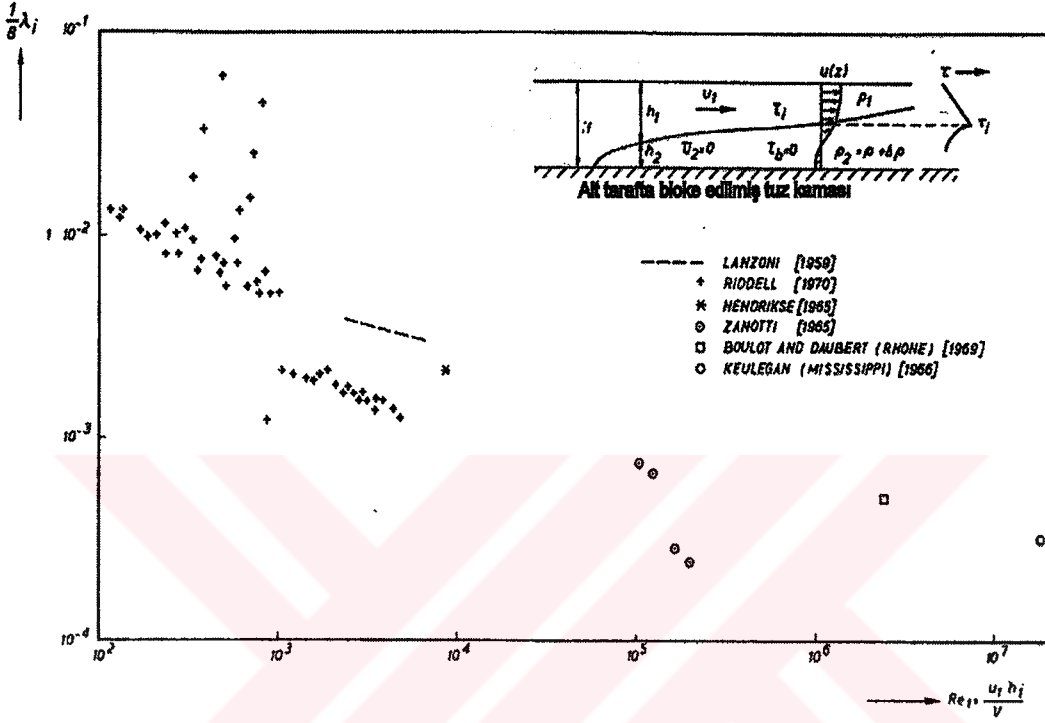
Şekil ek 2.2 Tabakalı nehir rejimi akımı

Göz önüne alınan tabakalı akım yapısında arakesit kayma gerilmesi üzerinde etkili unsur tabanın ve arakesitin yarattığı türbülanstır. Sonuç olarak arakesit kayma gerilmesi akımın türüne göre değişim göstermektedir. Arakesit kayma gerilmesi, stabil bir ara tabakanın gelişmesinden dolayı kırılan içsel dalgalardan etkilenmemektedir. Bu durum (2.14) denklemi esas alınarak savunulabilecektir (Abraham ve diğ., 1979).

Arakesit kayma gerilmesinin büyüklüğü ile ilgili deneysel veriler öncelikle bir literatür araştırmasından sonra elde edilmektedir (Delft Hidrolik Labaratuvarı, 1974). Bu araştırmaya bloke edilmiş tuz kaması, yüzeydeki sıcaklık kaması ve kapalı değişim akımları (yoğunluk kaynaklı dönüş akımlarına karşılık gelen) ile ilgili bilgiler vermektedir. Deneysel verilerin elde ediliş şekli ile ilgili ayrıntılar Abraham ve diğ.'leri tarafından verilmektedirler (1979).

2.4.3 Bloke Edilmiş Tuz Kaması

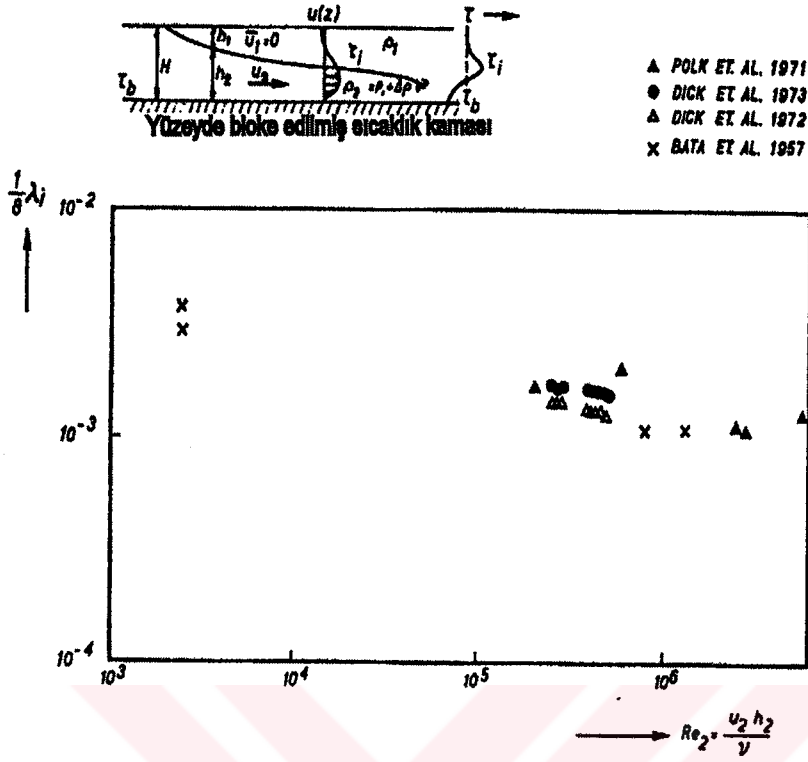
Şekil ek 2.3 bloke edilmiş tuz kamasının hem labaratuvar hem de saha ölçümü sonuçlarından elde edilen deneysel sonuçları (λ_i 'yi üst tabakanın Reynolds sayısı Re_1 'in fonksiyonu olarak) göstermektedir. Eldeki çok sayıda veriden çok azında Re_1 değerlerine karşılık olarak $1/8\lambda_i$ değerleri $4 \cdot 10^{-4}$ mertebelerinde olmaktadır.



Şekil ek 2.3 Bloke edilmiş tuz kaması: Arakesit kayma gerilmesi değerleri ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki

2.4.4 Yüzeyde Sıcaklık Kaması

Şekil ek 2.4 yüzeydeki sıcaklık kamasının hem labaratuvardaki hem de sahadaki ölçümlerinden elde edilen deneysel sonuçları (λ_i 'yi alt tabakanın Reynolds sayısı Re_1 'in fonksiyonu olarak veren) göstermektedir. λ_i , Re_2 'nin çoğu değeri için yaklaşık aynı sonucu vermektedir. $1/8\lambda_i$ $15 \cdot 10^{-4}$ mertebelerindedir.



Şekil ek 2.4 Yüzey sıcaklık kaması: Arakesit kayma gerilmesi ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki

2.4.5 Kapalı Değişim Akımları (yoğunluk kaynaklı dönüş akımları)

Şekil ek 2.5 kapalı değişim akımlarının hem labaratuvar hem de saha ölçümü sonuçlarından elde edilen deneysel sonuçları (λ_i 'yi Şekil ek 2.5'te tanımlanan Reynolds sayısı Re_3 'ün ($Re_3=2u_2h_2/\nu$)) fonksiyonu olarak göstermektedir. Deneysel veriler Reynolds sayısı ile ilgili çok sayıda sonucu içermektedir. Reynolds sayısının büyük değerleri için $1/8\lambda_i$ değerlerinin ortalaması 7.10^{-4} civarında olmaktadır.

2.4.6 Özet

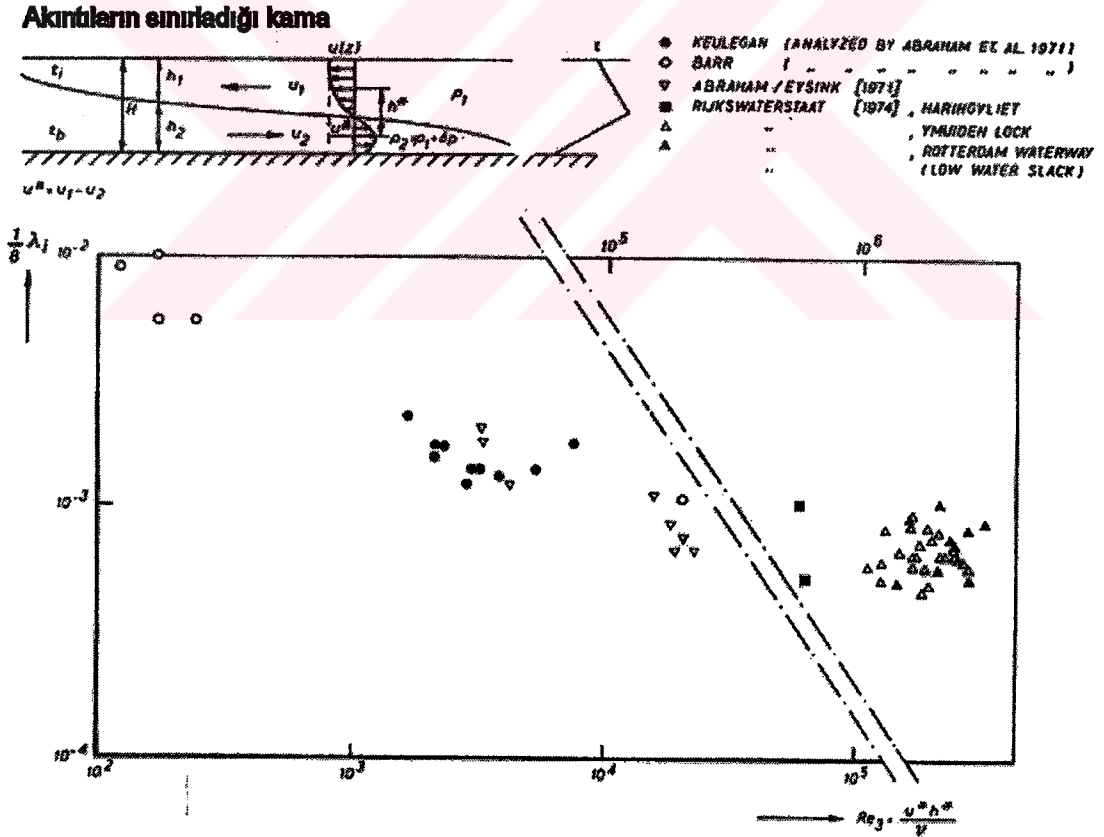
Yapılan ölçümlerden Reynolds sayısının büyük değerlerine karşılık λ_i 'nin küçük değerler aldığı, buna karşılık Reynolds sayısının çoğu değeri için λ_i 'nin belli bir değer civarında sabit kalma eğilimi gösterdiği sonucu çıkarılabilmektedir. Üç durum için elde edilen sabitler aşağıda verilmiştir.

- bloke edilmiş tuz kaması $\frac{1}{8}\lambda_i = 4.10^{-4}$

- yüzeyde sıcaklık kaması $\frac{1}{8}\lambda_i = 15.10^{-4}$ (2.16)

- kapalı değişim akımları $\frac{1}{8}\lambda_i = 7.10^{-4}$

Arakesit ve taban kayma gerilmelerinden kaynaklı türbülansın mevcut olduğu koşullarda, λ_i değerleri akımın tipine bağlı olarak değişim göstermektedir. Yüzey sıcaklık kamasının bulunduğu akım koşullarında alt ve üst tabaka hızları arasındaki fark Δu , tamamen alt tabakaya akımına bağlıdır. Bloke edilmiş tuz kamasının var olduğu koşullarda bu fark tamamen üst tabaka akımına bağlıyken, kapalı dönüşüm akımı koşullarında hem alt hemde üst tabaka akımı bu hız farkının değişimi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu üç tip akım, arakesit ve taban kayma gerilmelerinden kaynaklı türbülansın üzerlerinde yarattığı etkinin önemi açısından şu şekilde sıralanmaktadır: bloke edilmiş tuz kaması, kapalı dönüşüm akımı, yüzey sıcaklık kaması. Türbülansın akım tipleri üzerindeki etkisi ile ilgili sıralama (2.16) denklemindeki λ_i değerlerinden de görölmektedir. Bu durum arakesit kayma gerilmesinin büyüklüğünü sadece arakesitteki türbülansın değil aynı zamanda tabandan kaynaklı türbülansın da etkilediğı yönündeki kabulü desteklemektedir.



Şekil ek 2.5 Kapalı dönüş akımları; arakesit katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi

2.5 Arakesitteki Karışımla İlgili Deneyler

2.5.1 Nehir Rejimi

Lofquist (1960) durgun bir üst tabakanın altında $Re_2 \geq 1500$ olan hareketli bir alt tabakanın bulunduğu iki tabakalı akım sisteminde zorlanmış türbülans yaratmak yoluyla çalışmalar yapmıştır. Burada Re_2 aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$Re_2 = \frac{u_2 a_2}{\nu} \quad (2.17)$$

burada ν : kinematik viskozite

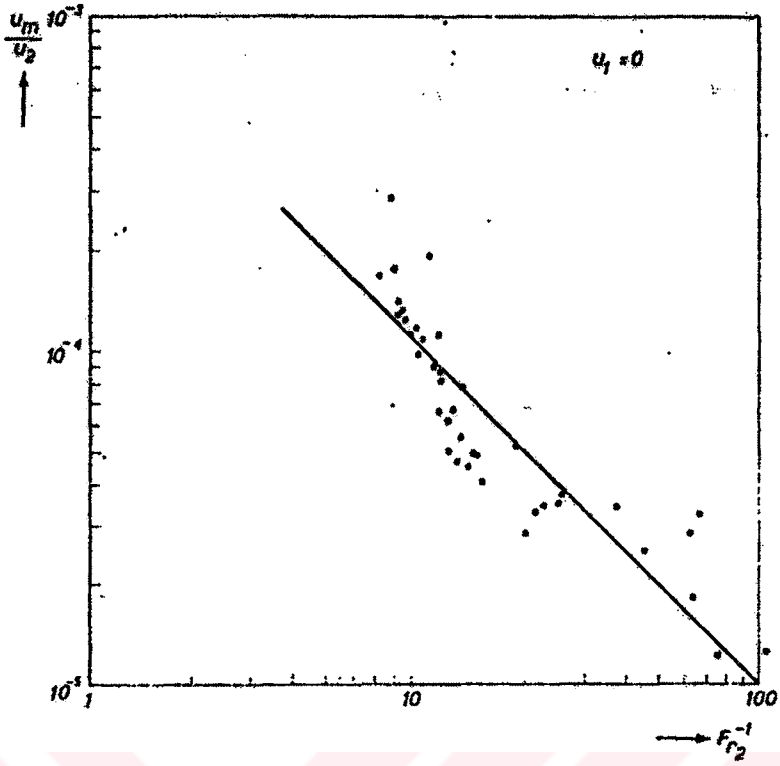
Arakesitte kayma gerilmesi ve karışımla ilgili gözlemler yapılmıştır. Şekil ek 2.6 u_1/u_2 parametresinin değerini Fr_2^{-1} 'nin fonksiyonu olarak vermektedir (denk. (1.75)). Lofquist'in ölçümlerinde $u_1=0$ olduğu için incelediği akım nehir rejimine sahip tabakalı akımdır ($Fr_1 + Fr_2 < 1$). Lofquist'in deneylerinde arakesit kayma gerilmesinin herşeyden önce türbülansın momentum taşınımından kaynaklandığı bulunmuştur ($\tau_{i,t} \gg \rho u_m \Delta u$)

2.5.2 Sel Rejimi

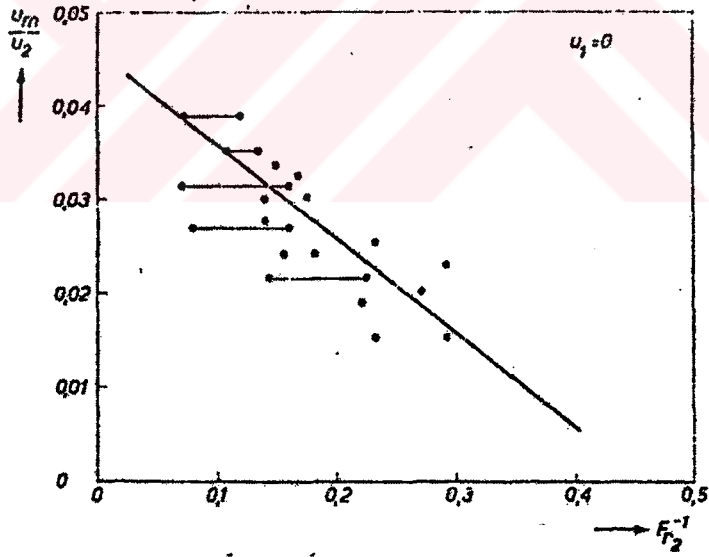
Ellison ve Turner (1959) eğimli tabana sahip derin bir tatlı su kütlelerinin altına doğru dalan tuzlu su hareketinin olduğu iki tabakalı bir akım sistemi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarında bütün deneylerinde aynı değere sahip olan tek bir u_2 ve a_2 değeri tanımlamışlardır. Şekil 4.7 u_1/u_2 'yi Fr_2^{-1} 'nin fonksiyonu olarak vermektedir. $Fr_2 > 1$ olduğundan, Ellison ve Turner'ın çalışmaları sel rejiminde iki tabakalı akımlar için geçerli olmaktadır. Şekil 4.6 ile 4.7'den de görülebileceği gibi tabakalı sel rejimindeki karışım nehir rejimindeki karışımdan daha büyük olma eğilimindedir.

2.6 Sonuç

Tabakalı akım ister sel rejiminde ister nehir rejiminde olsun, arakesitte meydana gelen olaylar (stabilite, karışım, kayma gerilmesi) her bir akım için tek tek o akımın geometrik ve hidrodinamik özelliklerinden etkilenmektedir (bkz. Bölüm 4.4.5). Günümüzde dahi kayma gerilmesi ile karışım arasında genel bir ilişki henüz mevcut olmamaktadır.



Şekil ek 2.6 Lofquist'in nehir rejiminde tabakalı akım üzerine deneyleri (1960)



Şekil ek 2.7 Ellison ve Turner'ın sel rejiminde tabakalı akım üzerine deneyleri (1960)

3 Advektif Taşınım, Türbülans Taşınımı, Türbülans Kayma Gerilmesi

3.1 Türbülans Taşınımına Karşılık Advektif Taşınım

Şekil 3.1'de içine bir miktar boya enjekte edilmiş akışkan akımı görülmektedir. Boya ile akışkanın yoğunluğu aynı olup, boya akıntı doğrultusunda gittikçe büyüyen bir renk topağı şeklinde yayılmaktadır. Renk topağının hareketi advektif taşınımı göstermektedir. Renk topağının gittikçe büyüyen şekli ise türbülans taşınımına bir örnektir.

3.1.1 Advektif Taşınım

Akım alanı içerisinde, maddeler akıntı doğrultusunda hareket ederler. İşte bu tür akıntı etkisiyle meydana gelen taşınım advektif taşınım denir. Birim genişlik için advektif taşınım miktarı akıntı hızı ile dikkate alınan noktadaki madde konsantrasyonunun çarpımına eşit olmaktadır. Ve aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

$$T_{adv,x} = \bar{u}_x \bar{c} \quad (3.1)$$

burada

$T_{adv,x}$: taşınımın olduğu yönde birim genişlikte meydana gelen advektif taşınım

\bar{u}_x : taşınımın olduğu doğrultudaki zamansal ortalama hız

\bar{c} : zamansal ortalama konsantrasyon

Advektif taşınımın miktarı ancak hız alanı belli ise bulunabilmektedir

3.1.2 Türbülans Taşınımı

Şekil 3.1'de a ile gösterilen eddy hareketi renk yumağı üzerinde büyütücü etki yapmaktadır. b ile gösterilen ile ters yöndeki eddy hareketi ise renk yumağının içerisine renksiz akışkan partiküllerini taşımak suretiyle renkli sıvının konsantrasyonunu azaltıcı etki yapmaktadır. Öyleyse bu örnekten akıntı yönü dışındaki diğer yönlere madde taşınımına neden olan esas mekanizmanın türbülansın yarattığı eddyler olduğu sonucu çıkmaktadır. Eddy hareketinin meydana getirdiği madde taşınımına türbülans taşınımı denmektedir. Teorik olarak, eddy hareketi göz önüne alınan maddenin konsantrasyonunu azaltacak şekilde her yönde meydana gelebilmektedir. Türbülans taşınımının miktarı genellikle dikkate alınan maddenin konsantrasyon gradyanına bağlı olarak değişim göstermektedir.

$$T_{turb,x} \propto \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (3.2)$$

burada $T_{turb,x}$: referans düzlemine dik birim genişlik boyunca x doğrultusundaki türbülans taşınımı

Türbülans taşınım miktarının belirlenebilmesi için öncelikle türbülans eddy alanına ait karakteristiklerin belirlenmesi gerekmektedir.

3.2 Türbülans Kayma Gerilmesi

Şekil 3.1’de eddy hareketinin bir parçası(a) renkli sıvıyı renksiz sıvının içerisine doğru taşıırken, diğer parça(b) bunun tersini yapmaktadır. Benzer şekilde eddyler farklı hızlara sahip akışkan kütleleri arasında madde transferi sağlamaktadırlar. Bunun sonucunda daha büyük hıza sahip akışkanın hızı azalırken, daha düşük hıza sahip akışkanın hızı artmaktadır. Bu etkinin değeri iki akışkanın birbiriyle temas ettiği düzlem üzerinde türbülans kayma gerilmesine eşittir. Bu nedenle türbülans momentum taşınımına aynı zamanda türbülans kayma gerilmesi de denmektedir. Türbülans kayma gerilmesinin büyüklüğünde de türbülans taşınımıyla benzerlik göstermektedir. Yani türbülans kayma gerilmesinin büyüklüğünü akım doğrultusundaki hız bileşeninin düşey boyunca değişimi belirlemektedir.

$$\tau_{x,z} \approx \frac{\overline{\partial u_x}}{\partial z} \quad (3.3)$$

burada

$\tau_{x,z}$: xz düzlemindeki türbülans kayma gerilmesi

z : x doğrultusuna dik doğrultudaki koordinat

Türbülans taşınımının belirlenmesinde olduğu gibi türbülans kayma gerilmesi miktarının belirlenebilmesi için de eddy alanına ait karakteristiklerin bilinmesi gerekmektedir.

3.3 Türbülans Taşınımı ve Türbülans Kayma Gerilmesi

Türbülans bir kez oluşmaya başladıktan sonra, sahip olduğu hareketin gelişi güzel karakterinden dolayı tam olarak tanımlanması mümkün olmamaktadır. Bu rastgele karakterinden dolayı türbülans ile ilgili tanımlamalar bir takım istatistiksel veriler kullanılarak yapılmaktadır. Bu amaçla türbülanslı akımda anlık hız, zamansal ortalama hız ile çalkantı hızının toplamı olarak ifade edilebilmektedir.

$$u = \bar{u} + u'(t) \quad (3.4)$$

burada

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (3.5)$$

T'nin çok büyük değerlerinde için çalkantı hızı u' 'nin değeri sıfır olmaktadır.

$$\overline{u'} = \frac{1}{T} \int_0^T u' dt \equiv 0 \quad (3.6)$$

Türbülansın anlık hız değeri üzerindeki etkisi (3.4), (3.5) ve (3.6) denklemleriyle verilmiştir.

Konsantrasyon ifadesi de hız ifadesine benzer şekilde ifade edilebilmektedir. Buna göre

$$c = \bar{c} + c'(t) \quad (3.7)$$

$$\overline{c'} = 0 \quad (3.8)$$

(3.4)'ten (3.8)'e kadar olan denklemler kullanılarak (3.9) ifadesine ulaşılmaktadır.

$$\overline{u_x c} = \overline{(u_x + u'_x)(\bar{c} + c')} = \overline{u_x c} + \overline{u'_x c'} \quad (3.9)$$

1 2

(3.9) denkleminin sağ tarafında 1 ile gösterilen terim advectif taşınımı göstermekte olup ortalama hız ve konsantrasyon terimlerini içermektedir. 2 numaralı terim türbülans taşınımını göstermektedir (bkz. Daily ve Harleman, 1965, Bölüm 16-2). Böylece türbülans taşınımı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$T_{turb,x} = \overline{u'_x c'} \quad (3.10)$$

Benzer şekilde türbülans kayma gerilmesi için aşağıdaki ifade yazılabilmektedir (bkz. Daily ve Harleman, 1965, Bölüm 11-3 ve 11-4).

$$\tau_{x,y} = \overline{\rho u'_x u'_y} \quad (3.11)$$

3.4 Yoğunluk Farkının Eddy Bölgesi Üzerindeki Etkisi

Akışkanın yoğunluğu düşey boyunca tabandan uzaklaştıkça azalmaktadır. Yatay ekseninde, eddy hareketinin başlayabilmesi için bir enerji gerekmektedir. Şekil 3.2 bu durumu göstermektedir. Eddy hareketinin a ile gösterilen parçası daha yoğun sıvı kesiminden daha az yoğun sıvı kesimine doğru madde taşınımına sebep olmaktadır. b ile gösterilen ise bu durumun tersinin oluşmasına sebep olmaktadır. Eddy hareketinin başlangıç koşulu enerji olduğuna göre, daha büyük miktarda enerjinin daha geniş bir eddy alanı oluşturması beklenmektedir. Bu durum düşeyde bir türbülans taşınımına neden olur (düşey yönde karışım) ve yatay yöndeki momentumun düşey boyunca değişimi (türbülans kayma gerilmesi), düşeydeki yoğunluk farklarını ortadan kaldırmaktadır.

Türbülansın tabakalı akım koşullarındaki davranışını incelemek için pek çok çalışma yapılmıştır. İlk çalışmalar (Richardson, 1920), akım koşulları ile bu koşulların yarattığı türbülans yapısı arasında bir kriter belirlenebilmesi amaçlanarak yapılmıştır. Bunun için, tabandan itibaren yoğunluğu lineer olarak azalan ve lineer bir hız diyagramına sahip eşit hacimli iki su kütlesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar I gibi bir mesafe boyunca iki su kütlesi arasında düşey boyunca gerçekleşen kütle transferinin incelenmesi ve sonuçlar çıkartılması şeklinde yapılmıştır. Düşey yöndeki bu kütle transferi tamamlandıktan sonra, daha yoğun sıvı özelliklerini aynen koruyarak, daha az yoğun sıvının başlangıçtaki konumuna sahip olmaktadır. Buna karşılık hız değeri ortalama bir değer civarında sabitlenmektedir (bkz. Ek 5.1, s.5-19).

Yukarda bahsedilen değişim, potansiyel enerjide meydana gelen bir artışla sonuçlanmaktadır. Bu artış aşağıdaki ifadeyle verilmektedir:

$$\Delta E_{pot} = \frac{d\bar{\rho}}{dy} g l^2 \quad (3.12)$$

Potansiyel enerjideki bu artışa karşılık kinetik enerjide bir azalma meydana gelecektir. Bu azalmanın miktarı (3.13) ifadesiyle verilmektedir.

$$\Delta E_{kin} = \frac{1}{4} \rho \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 l^2 \quad (3.13)$$

burada

ΔE_{pot} : potansiyel enerjideki artma miktarı

ΔE_{kin} : kinetik enerjideki azalma miktarı

g : yerçekimi ivmesi

\bar{u} : akım yönündeki zamansal ortalama hız miktarı

y : düşey koordinat (yukarı yön pozitif)

l : karışım uzunluğu (bkz. Ek 5.1)

Türbülansın devamı için (3.14) ifadesinde verilen şartın sağlanması beklenmektedir.

$$\Delta E_{pot} < \Delta E_{kin} \quad (3.14)$$

veya

$$Ri = \frac{g \frac{d\bar{\rho}}{dy}}{\rho \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2} < \frac{1}{4} \quad (3.15)$$

burada

Ri: boyutsuz Richradson sayısı

Yukarıdaki kriter (Long, 1972) boyut analizi açısından doğru olsa da, bu kriterin kritik bir durum için yapılan değerlendirmesi $\frac{1}{4}$ değerinin her durum için geçerli olmadığını göstermiştir.

Oldukça ani değişim gösteren bir arakesite sahip ($\frac{d\bar{\rho}}{dy} = \infty$, $\frac{d\bar{u}}{dy} = \infty$) tabakalı akımlarda

Richardson sayısı önemini kaybetmektedir. Bu durumda arakesitin stabilitesi, arakesit üzerindeki dalgalara veya kırılıp kırılmadıklarına bağlı olarak incelenebilmektedir (bkz. Bölüm 2.4).

Richardson sayısındaki düşey hız gradyanının, bölünmüş bir karakteristik düşey uzunluk boyunca karakteristik bir yatay hız gradyanıyla orantılı olacak şekilde değiştiği kabul edilmektedir. Aynı şekilde düşey yoğunluk gradyanının da aynı düşey karakteristik boyunca karakteristik bir yoğunluk farkıyla orantılı olacak şekilde değiştiği kabul edilmektedir. Richardson sayısının bu ikili yapısı (3.16) denklemindeki yoğunluk Froude sayısını (Fr_D) vermektedir.

$$Fr_D = \frac{U^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} gH} \quad (3.16)$$

burada

U : karakteristik yatay hız

H : karakteristik düşey uzunluk

$\Delta\rho$: karakteristik yoğunluk farkı

Bu yolla yoğunluk Froude sayısı boyutsuz bir büyüklük olarak elde edilmektedir.

3.5 Türbülans Kayma Gerilmesi

3.5.1 Eddy Viskozitesi

Buraya kadar incelenen metotlar, türbülanslı akım alanına ait karakteristikleri hesaplamak için ampirik hipotezlerden hareketle türbülans kayma gerilmesi ile hız bileşenleri arasında bir ilişki kurmaya çalışan metotlardır. Boussinesq (1877) bu konu üzerine çalışan ilk araştırmacıdır. Boussinesq eddy viskozitesini moleküler viskozite gibi skaler bir büyüklük

kabul ederek, türbülanslı akım için bir eddy viskozitesi tanımlamıştır. Bu çalışmayı takiben yapılan çalışmalar sonucu türbülans kayma gerilmesi ile ilgili aşağıdaki ifade verilmiştir.

$$\tau_{i,j} = \eta_{i,j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \varepsilon_{i,j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.17)$$

burada

$\eta_{i,j}$: dinamik eddy viskozitesi

$\varepsilon_{i,j}$: kinematik eddy viskozitesi

\bar{u}_i : i yönündeki zamansal ortalama hız bileşeni

x_i : i yönündeki koordinat

x_j : j yönüne dik yöndeki koordinat

Moleküler viskozite sıvının cinsine bağlıdır. Oysa eddy viskozitesi akımın türüne bağlı olmaktadır. Eddy viskozitesinin büyüklüğü deneylerden elde edilmelidir. Eddy viskozitesinin değeri ile güvenilir sonuçlar şu an için sadece boru akımı, dikdörtgen kesitli üniform açık kanal akımı, jetler ve de taban ve serbest yüzey etkisi hissetmeyen plumlar için varolmaktadır. Düzgün olmayan geometrik şekilli üç boyutlu kanal akımları ve değişmeyen bir tuzluluğa sahip tabakalı akımlar üzerinde çalışmalar ise henüz devam etmektedir.

3.5.2 Eddy Viskozitesi Dağılımı (Homojen Akımlarda)

Eddy viskozitesi akım alanı boyunca değişik değerler almaktadır. Akım tipine bağlı olarak aldığı değerler değişim göstermektedir.

Üniform bir akımın söz konusu olduğu dikdörtgen kesite sahip geniş bir kanal merkezinde eddy viskozitesi değerleri derinlik boyunca değişim göstermektedir. Dahası sadece düşey boyunca türbülans momentum değişiminin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Prandl bu tür akım koşullarında eddy viskozitesinin derinlik boyunca değişimini ifade etmek için karışım uzunluğu kavramını tanımlamıştır. Von Karman (1934) ise benzer bir amaçla κ gibi bir sabit tanımlamıştır. Üniform açık kanal akımında, derinlik boyunca eddy hareketinin yayılmasıyla hız arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla çok sayıda ve önemli deneysel çalışmalar yapılmıştır (Hinze 1959). Türbülans momentumunun düşey boyunca değişiminin eddy viskozitesinin değeri üzerindeki etkisini veren aşağıdaki denklemlerle bu deneysel çalışmaların bir özeti verilebilmektedir (Fiscer ve diğ., 1979, Bölüm 3.1).

$$\varepsilon_y = \kappa(1 - y/h)(y/h)hu_* \quad (3.18)$$

burada

ε_y : düşeyde momentum alışverişinden kaynaklı eddy viskozitesi

h : derinlik

u_* : kayma hızı

κ : Von Karman sabiti (=0.4)

Düşeydeki bu eddy derinlik boyunca ortalamasından (3.19) denklemini elde edilmektedir.

$$\overline{\varepsilon_y} = 0.067hu_* \quad (3.19)$$

burada

$\overline{\varepsilon_y}$: ε_y 'nin derinlik boyunca ortalaması

Üniform akım koşullarında sonlu bir derinliğe sahip, dikdörtgen kesitli kanallarda ana akım yönünü, türbülansın hem düşey hem de enine doğrultudaki bileşeni kontrol etmektedir. Difüzyonla ilgili yapılan ölçümlerin sonuçlarından, enine yöndeki eddy viskozitesi değişiminin düşey yöndeki eddy viskozitesi değişiminden daha büyük olması beklenmektedir. Bu durum akımın genişlik/derinlik oranına bağlı olarak değişmektedir. Homojen akımlarda eddy viskozitesinin değeri Bölüm 3.6.1'de tanımlanan (Fischer ve diğ.,1979, Bölüm 3.1) eddy difüzyon hızına eşit olarak alınabilmektedir. Bu araştırmacıların çalışmalarından hareketle (3.20) denklemini türetilebilmektedir.

$$\varepsilon_t = 0.15hu_* \quad (3.20)$$

burada

ε_t : enine yöndeki momentum alışverişinden kaynaklı eddy viskozitesi

(3.19) ve (3.20) denklemlerinden eddy viskozitesinin skaler bir büyüklük olmadığını görülmektedir.

Düzensiz geometrili, üç boyutlu kanal akımlarındaki ε ve η büyüklükleri tam olarak bilinmemektedir.

3.6 Bir Maddenin Türbülans Taşınımı

3.6.1 Eddy Difüzesi

Moleküler difüze katsayısıyla (Birinci Fick Kanunu) benzer şekilde verilen bir maddenin i yönündeki taşınımı bir eddy difüzesiyle ifade edilmektedir:

$$T_{turb,i} = -K_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \quad (3.21)$$

burada

K_i : i yönündeki türbülans taşınımı için eddy difüze katsayısı

Moleküler difüze akışkanın bir özelliğidir. Eddy difüzesi ise türbülans hareketinin durumuna bağlıdır (akımın bir özelliğidir). Eddy viskozitesinin değeri ile ilgili, ideal akım koşullarında az sayıda deneysel sonuç bulunmaktadır. Özellikle Bölüm 3.5.1'de eddy viskozitesi için geçerli olan hususlar eddy difüzesine de uygulanmaktadır.

3.6.2 Eddy Difüzesi Dağılımı (Homojen Akımlarda)

Eddy viskozitesinin değeri akım tipine bağlı olarak, akım alanı boyunca değişim göstermektedir.

Üniform akım koşullarına sahip dikdörtgen kesitli geniş bir kanal merkezinde eddy difüzesi sadece derinlikle değişim göstermektedir ve değeri Prantl'in karışım uzunluğu ifadesi veya Von Karman'ın benzer yaklaşımı kullanılarak belirlenebilmektedir. Düşey yöndeki momentum taşınımı için eddy difüzesinin (3.22) denklemiyle verilen hesabı tatmin edici olmaktadır.

$$K_y = \kappa(1 - y/h)(y/h)hu, \quad (3.22)$$

ve

$$\bar{K}_y = 0.067hu, \quad (3.23)$$

burada

K_y : düşey yönde türbülans taşınımı için eddy difüzesi

\bar{K}_y : K_y 'nin derinlik boyunca ortalaması

Üniform akım koşullarında sonlu bir derinliğe sahip, dikdörtgen kesitli kanallarda hem düşey doğrultuda hem de enine doğrultuda bir türbülans taşınımı olmaktadır. Enine doğrultudaki türbülans taşınımı için eddy difüzesi, akımın genişlik/derinlik oranına bağlı olmaktadır. Fischer ve diğ. (1979, Bölüm 3.5.1) bu konuyla ilgili yaklaşık bir değer vermektedir.

$$K_t \cong 0.15h u_* \quad (3.24)$$

(3.23) ve (3.24) denklemlerinden eddy difüzyonunun skaler bir büyüklük olmadığı görülmektedir.

Fischer ve diğ.'nin (1979, Bölüm 3.1.2) de işaret ettiği gibi, düzgün olmayan geometriye sahip kanallarda ve doğadaki akarsularda K 'nin değeri tam olarak bilinmemektedir. Bu tür kanallar ve akarsular için (3.25) ifadesi verilmiştir.

$$K_t \cong 0.6h u_* \pm 50\% \quad (3.25)$$

Burada K_t dispersiyon etkilerini içermektedir (bkz. Bölüm 4.5.3).

3.7 Tabakalı Yapıdaki Yoğunluğun Eddy Viskozitesi ve Difüzyonunun Üzerindeki Etkisi

3.7.1 Genel Hususlar

Kararlı tuzluluk ifadesi ile mesafe boyunca artış gösteren bir tuzluluk karakterize edilmektedir. Tabakalı yapıda, kararlı tuzluluğun olduğu bir ortamdaki türbülansla ilgili bir tartışma Philips (1969) ve Turner (1972) tarafından verilmektedir. Bu niteliksel olarak Bölüm 3.4'te de verilmiştir. Bu Bölümde de açıklandığı gibi, türbülansın devamını sağlayan koşul Richardson sayısı gradyanı ile ifade edilebilmektedir (denk. (3.15)). Ayrıca bu koşul aşağıdaki şekilde de ifade edilebilmektedir.

$$Rf = -\frac{K_y}{\varepsilon_y} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} < 1 \quad (3.26)$$

ile

$$\rho \varepsilon_y \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 = \tau_{x,y} \frac{\partial u}{\partial y} = E_{prod} \quad (3.27)$$

ve

$$-K_y g \frac{\partial \rho}{\partial y} = E_{pot} \quad (3.28)$$

burada

x : Ana akım yönündeki koordinat

E_{prod} : birim akışkan kütlelerinin birim zamanda ürettiği türbülans miktarı

E_{pot} : Türbülans taşınımının devamı için düşey yönde birim zamanda birim akışkan kütlelerine aktarılan potansiyel enerji miktarı

Rf değeri Richardson sayısının değişik bir formu olarak bilinmektedir. (3.26) denkleminin elde edildiği koşullar türbülansın yerel olarak kesintiye uğramasından dolayı tatmin edici bulunmamaktadır (Long, 1972). Genelde E_{prod} 'un önemli bir kısmı viskoz etkiler tarafından dağıtılmaktadır. Sonuç olarak Rf'nin maksimum değeri 0.1 (Odd ve Roger, 1978) ile 0.2 (Gartrell, 1980) arasında değişen mertebede olmaktadır.

Kararlı bir tuzluluk gradyanının sözkonusu olduğu koşullara sahip türbülanslı akımla ilgili henüz çok az şey bilinmektedir. (Fischer ve diğ.,1979, Bölüm 5.3.1) bu konuyla ilgili çok az sayıda değer vermişlerdir. Ayrıca verilen bu değerler elde edildikleri durumlar dışındaki diğer durumlar için kullanılamamaktadırlar.

Kararlı bir tuzluluk gradyanının söz konusu olduğu türbülanslı akım koşullarıyla ilgili çok az şey bilinmesinin bir nedeni de şudur: Turner'a (1973, Bölüm 2.3) göre homojen yapıya sahip (tek bir tabaka gibi olan) bir sınırdaki yayılan türbülans ile kararlı tabakalı bir yapıya sahip akışkan içerisinde yayılan türbülans arasında bir ayırım yapılması gerekmektedir. Bu durumla ilgili deneysel bulgular Bölüm 2.7.2'de verilmiştir. Bu deneysel bulgular, aynı Ri değerine sahip tabakalı akımlarda arakesitteki türbülans kayma gerilmesinin daha büyük olduğuna işaret etmektedir.

3.7.2 Tabakalı Yapıdaki Yoğunluğun Eddy Viskozitesi Üzerindeki Etkisi

Karelsen'in (1974) literatür taraması sonucu elde ettiği, ε ile Ri arasındaki ilişkiyle ilgili deneysel veriler Şekil 3.3'te verilmektedir. Deneysel dağılım Bölüm 3.7.1'de sabit bir yoğunluk gradyanına sahip akışkanlarda türbülansın anlaşılabilir olan davranışları ile ilgili yapılmış olan gözlemleri vermektedir.

3.7.3 Tabakalı Yapıdaki Yoğunluğun Eddy Difüzyon Üzerindeki Etkisi

Kararlı tabakalanmış yoğunluk yapısı akışkanın türbülans ile düşey yönde taşınmasını engellemektedir. Dolayısıyla bu durum hem türbülans kayma gerilmesi hem de türbülans taşınımı üzerinde azaltıcı etki yapmaktadır. Türbülans hareketi esnasında akışkan kümeleri arasında çarpışmalar meydana gelmektedir. Akışkan kümeleri sahip oldukları özellikleri kısa bir zaman periyodu için korusalar bile, çarpışmalar akışkan kümelerinin momentumlarını anlık olarak etkileyecektir. Kuvvetli yoğunluk farkının olduğu tabakalı akımlarda batıklık kuvvetleri akışkan kütlelerini, sahip oldukları özellikleri tamamen kaybetmeden ilk konumlarına geri getirebilmektedirler. Buna göre tabakalı yapıda bir yoğunluğun olduğu akım koşullarında dikkate alınan bir özelliğin değişimi momentum değişiminden daha yavaş işleyen bir süreçtir. Bu durum, K/ε oranıyla ilgili ilerleyen sayfalarda verilen bilgilerde de

görülebileceği gibi tabakalı bir yoğunluk yapısına sahip akımlarda neden $K \leq \varepsilon$ olduğunu açıklamaktadır.

Karelse'in (1974) literatür taramasından elde ettiği, düşeydeki türbülans alışverişiyle bağlantılı olarak eddy difüzyonunun tabakalı bir yapıdaki akım koşullarında sahip olduğu değerlerle ilgili deneysel sonuçlar Şekil ek 3.4 ve 3.5'te verilmektedir.



4 Dispersiv Taşınım

Notasyon:

Türbülansın dolaylı hız ve konsantrasyon ifadeleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$U = \bar{U} + U'(t)$$

ve

$$c = \bar{c} + c'(t)$$

Üst çizgi zamansal ortalamayı, “ ’ ” simgesi ise türbülansın neden olduğu çalkantıyı göstermektedir (bkz. Bölüm 1.3). İlerleyen bölümlerde üst çizgi sadece Bölüm 2.1’de hız ve konsantrasyon değerlerinin zamansal ortalamalarını göstermek için kullanılacaktır. Diğer bölümlerde zamansal ortalamayı ifade etmek için üst çizgi kullanılmayacaktır. Konumsal ortalamayı göstermek için ise çift üst çizgi kullanılacaktır.

4.1 Konumsal Ortalama Kullanılarak Bağımsız Değişkenlerin Sayısının Azaltılması

Literatürde “dispersiyon” veya “dispersiv taşınım” terimleri “türbülans taşınımı” terimiyle bir arada kullanılmaktadır. Burada şuna dikkat edilmelidir, türbülans taşınımı bir bölgedeki eddy hareketinden dolayı oluşan yerel bir harekettir. Diğer yandan dispersiv taşınım yerel bir büyüklük değildir. Difüzyonla taşınım göz önüne alınan bir nokta için belli bir değere sahipken, aynı noktadaki dispersiv taşınımın değeri ile ilgili kesin olarak bir şey söylenememektedir. Çünkü dispersiv taşınım, konumsal ortalama cinsinden bağımsız değişkenlerin sayısında bir azalmaya bağlı olmaktadır.

Göz önüne alınan bir düzlem boyunca bir maddenin toplam taşınımı (örneğin tuz) advectif taşınım (hız alanına bağlı olarak) ve türbülans taşınımının (eddy alanına bağlı olarak) toplamına eşit olmaktadır.

$$T_{top} = \int_A (\bar{U}_n \bar{c} + T_{turb,n}) dA \quad (4.1)$$

burada

T_{top} : A düzlemi boyunca toplam taşınım

dA : A düzlemi üzerindeki elemanter alan

n : A düzlemine dik koordinat

\bar{U}_n : n doğrultusundaki zamansal ortalama hız

Dispersiyon hesabı yapılırken, A düzlemi suyun herhangi bir yönündeki tüm kesit olarak alınabilmektedir (kesit boyunca ortalama dispersiyon). Bu iki şekilde mümkün olabilmektedir: ya sabit birim genişlik için tüm derinlik boyunca (derinlik boyunca ortalama dispersiyon) veya sabit birim derinlik boyunca tüm genişlik için (genişlik boyunca ortalama dispersiyon).

4.2 Bilinen Sınırlar Boyunca İntegrasyon (Leibnitz Kuralı)

Tanım gereği:

$$\frac{\partial f(x, y, t)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y, t) - f(x, y, t)}{\Delta x} \quad (4.6)$$

Şimdi aşağıdaki ifadeyi göz önüne alalım

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{a(x,t)} g(x, y, t) dy$$

burada $a(x,t)$: integralin üst sınırıdır.

(4.6) denklemini gereğince

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{a(x,t)} g(x, y, t) dy &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[\int_0^{a(x+\Delta x, t)} g(x + \Delta x, y, t) dy - \int_0^{a(x, t)} g(x, y, t) dy \right] = \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[\int_0^{a(x, t)} g(x + \Delta x, y, t) dy - \int_0^{a(x, t)} g(x, y, t) dy + \int_{a(x, t)}^{a(x+\Delta x, t)} g(x + \Delta x, y, t) dy \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

(4.7) denkleminde Δx sabit bir değerdir. Dolayısıyla

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[\int_0^{a(x, t)} g(x + \Delta x, y, t) dy - \int_0^{a(x, t)} g(x, y, t) dy \right] &= \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \int_0^{a(x, t)} \frac{\{g(x + \Delta x, y, t) - g(x, y, t)\}}{\Delta x} dy = \int_0^{a(x, t)} \frac{\partial g(x, y, t)}{\partial x} dy \end{aligned} \quad (4.8)$$

Ayrıca

$$\lim_{A \rightarrow B} \int_A^B f(x) dx = \lim_{A \rightarrow B} (B - A) f(A) \quad (4.9)$$

$A \rightarrow B$ 'ye gittiğinden $f(A) \rightarrow f(B)$ 'ye gitmektedir.

(4.9) denklemini uyarınca

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \int_{a(x,t)}^{a(x+\Delta x,t)} g(x+\Delta x, y, t) dy = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{a(x+\Delta x, t) - a(x, t)}{\Delta x} g(x, a, t) = g(x, a, t) \frac{\partial a}{\partial x} \quad (4.10)$$

(4.7), (4.8) ve (4.10) denklemleri (4.11) denklemini vermektedir.

$$\int_0^{a(x,t)} \frac{\partial g(x, y, t)}{\partial x} dy = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{a(x,t)} g(x, y, t) dy - g(x, y, t) \frac{\partial a}{\partial x} \quad (4.11)$$

4.3 İntegre Edilmiş Süreklilik Denklemi; Leibnitz Kuralının Uygulanması

Yanal hız bileşeninin ihmal edilmesiyle, su için hareketlilik denklemi aşağıdaki formu almaktadır.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (4.12)$$

burada

x, y : yatay ve düşey koordinat

U, V : yatay ve düşey hız bileşeni

(4.12) denkleminin düşey boyunca tabandan ($y=H_0$) su yüzüne kadar ($y=H$) integre edilmesiyle (4.13) denklemi elde edilmektedir.

$$\int_{H_0(x)}^{H(x,t)} \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] dy = 0 \quad (4.13)$$

H : su yüzünün düşey koordinatı; a değeri x ve t 'nin fonksiyonu

H_0 : tabanın düşey koordinatı; a sadece x 'in koordinatı

(4.11) denklemini uyarınca aşağıdaki ifade yazılabilmektedir.

$$\int_{H_0(x)}^{H(x,t)} \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] dy = \int_{H_0(x)}^{H(x,t)} \frac{\partial U}{\partial x} dy + V_{yüzey} - V_{taban} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \int_{H_0(x)}^{H(x,t)} U dy - U_{yüzey} \frac{\partial H}{\partial x} + U_{taban} \frac{\partial H_0}{\partial x} + V_{yüzey} - V_{taban} \quad (4.14)$$

Burada yüzey alt indisi su yüzünü ($y=H_0$) taban alt indisi ise su tabanını ($y=H$) göstermektedir.

$$V_{taban} = U_{taban} \frac{dH_0}{dx} \quad (\text{akım çizgisi}) \quad (4.15)$$

$$V_{yüzey} = U_{yüzey} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{akım çizgisi}) \quad (4.16)$$

(4.15) ve (4.16) denklemlerinin (4.14) denkleminde yerine konmasıyla (4.17) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{H_0(x)}^{H(x,t)} U dy + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4.17)$$

Su derinliği aşağıdaki ifadeyle verilmektedir.

$$h = H - H_0 \quad (4.18)$$

burada h: su derinliği

$\partial H_0 / \partial t = 0$ olması durumunda (4.18) denklemi aşağıdaki hale döner.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.19)$$

Tanım gereği derinlik boyunca ortalama hız aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\bar{U} = \frac{1}{h} \int_{H_0(x)}^{H(x,t)} u dy \quad (4.20)$$

(4.19) ve (4.20) denklemlerinin (4.17) denkleminde yerine konmasıyla (4.21) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \bar{U}h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4.21)$$

4.4 Tuzun Süreklilik Denklemi

4.4.1 Tuzun Süreklilik Denklemi

Aşağıdaki ifadeler türetilirken yanal yöndeki hız bileşeni ve türbülans taşınımı ihmal edilmiştir.

Tuz iç akışı AB düzlemi boyuncaadır (dış akış iç akışın tersi yöndedir) (bkz. Şekil ek 4.1):

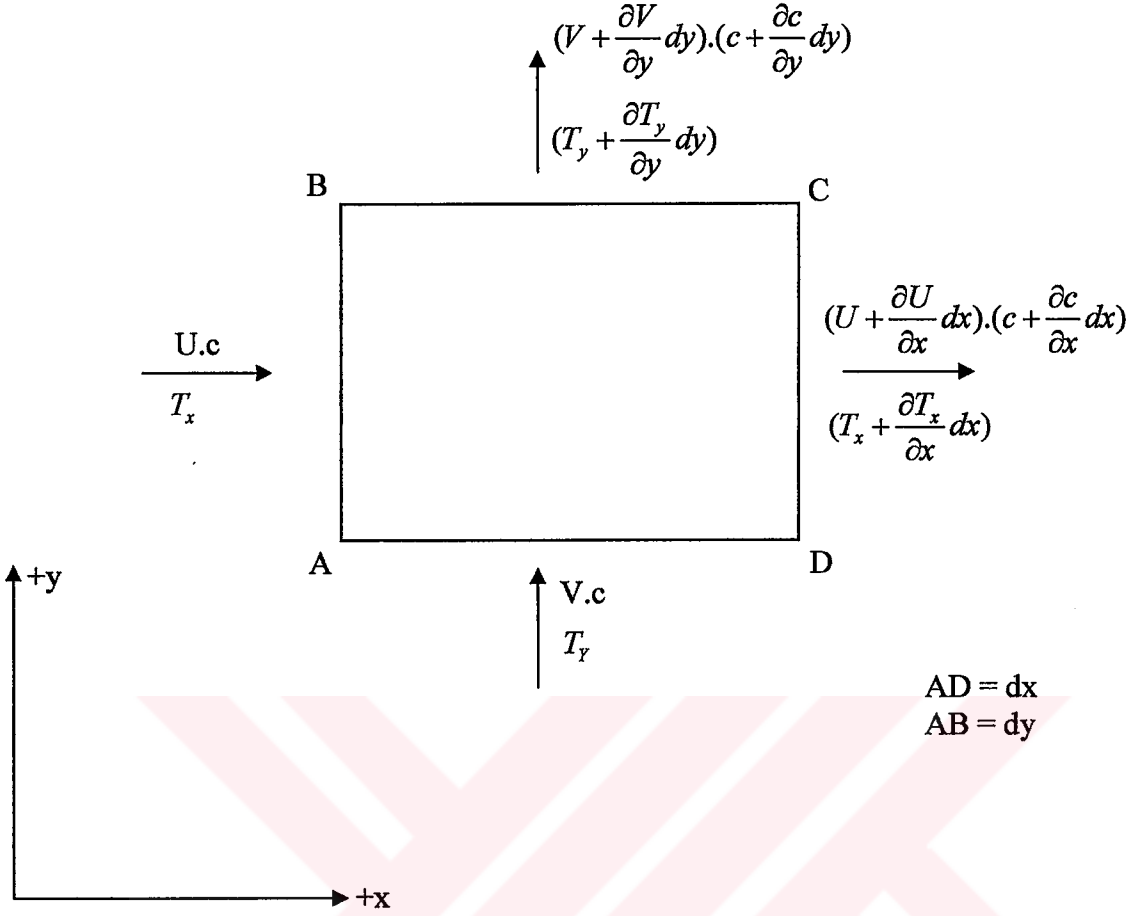
$$+(Uc + Tx)dydt \quad (a)$$

Burada

Uc : advectif taşınım

T_x, T_y : x ve y yönündeki türbülans taşınımı

c : konsantrasyon



Şekil ek 4.1 Tuzun süreklilik denkleminin bileşenleri

CD düzlemine giren tuz akımı:

$$-(U + \frac{\partial U}{\partial x} dx).(c - \frac{\partial c}{\partial x} dx)dydt - (T_x + \frac{\partial T_x}{\partial x} dx)dydt \quad (b)$$

AD düzlemine giren tuz akımı :

$$+(Vc + T_y)dydt \quad (c)$$

BC düzlemine giren tuz akımı:

$$-(V + \frac{\partial V}{\partial y} dy).(c + \frac{\partial c}{\partial y} dy)dxdt - (T_y + \frac{\partial T_y}{\partial y} dy)dxdt \quad (d)$$

ABCD elemanter hacminde tuz miktarındaki azalma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} dt dx dy \quad (e)$$

Tuzun süreklilik denklemi ABCD elemanter hacmi içerisinde tuz miktarındaki artış miktarının bu hacime giren toplam iç akışa eşit olduğunu göstermektedir. yanal hız bileşeni ve türbülans taşınım bileşeninin ihmal edilmesiyle şu sonuç ortaya çıkmaktadır: (a) + (b) +(c)

+ (d) = (e), veya

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uc + T_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vc + T_y) = 0 \quad (4.22)$$

4.4.2 Tuzun Birleşik Süreklilik Denklemi

(4.22) denkleminin düşey boyunca tabandan ($y=H_0$) su yüzüne kadar ($y=H$) integrasyonundan (4.22) ifadesi elde edilmektedir.

$$\int_{H_0(x)}^{H(x,t)} \left[\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uc + T_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vc + T_y) \right] dy = 0 \quad (4.23)$$

$$\int_{H_0(x)}^{H(x)} \frac{\partial c}{\partial t} dy = \frac{\partial}{\partial t} \int_{H_0}^H c dy - c_{yüzey} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial \bar{h}c}{\partial t} - c_{yüzey} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.24)$$

((4.11) denklemini hatırlayacak olursak x'e göre değişim söz konusu olmaktadır. Yukarıdaki denklemlerde ise x yerine t'ye göre bir değişim söz konusu olmaktadır ($\partial H_0 / \partial t = 0$).)

$$\int_{H_0(x)}^{H(x,t)} \frac{\partial}{\partial x}(Uc + T_x) dy = \frac{\partial}{\partial x} \int_{H_0}^H (Uc + T_x) dy - (U_{yüzey} \cdot c_{yüzey} + T_{x,yüzey}) \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$+ (U_{taban} \cdot c_{taban} + T_{x,taban}) \frac{dH_0}{dx} = \frac{\partial(\bar{U} \cdot \bar{c} + \bar{T}_x)h}{\partial x}$$

$$- (U_{yüzey} c_{yüzey} + T_{x,yüzey}) \frac{\partial H}{\partial x} + (U_{taban} c_{taban} + T_{x,taban}) \frac{dH_0}{dx} \quad (4.25)$$

$$\int_{H_0(x)}^{H(x,t)} \frac{\partial}{\partial y} (Vc + T_y) dy = (Vc + T_y)_{yüzey} - (Vc + T_y)_{taban} \quad (4.26)$$

Su yüzeyinde türbülans taşınımı su yüzüne paralel olarak gerçekleşmektedir. Böylece:

$$T_{y,yüzey} = T_{x,yüzey} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4.27)$$

Aynı sebeple tabandaki türbülans taşınımı için de aşağıdaki ifade yazılabilmektedir:

$$T_{y,taban} = T_{x,taban} \frac{\partial H_0}{\partial x} \quad (4.28)$$

(4.15), (4.16), (4.19), (4.24), (4.25), (4.26), (4.27) ve (4.28) denklemlerinin (4.23) denkleminde yerlerine konmasıyla (4.29) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{hc} + \frac{\partial}{\partial x} h(\overline{U.c} + \overline{T_x}) = 0 \quad (4.29)$$

Üniform olmayan hız ve konsantrasyon dağılımlarının mevcut olduğu durumlarda (haliçlerdeki gibi bir durum için) (4.3) denklemi uygulanmaktadır. Bunun sonucunda:

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{hc} + \frac{\partial}{\partial x} h\overline{U.c} + \frac{\partial}{\partial x} h\{(\overline{U.c} - \overline{U.c}) + \overline{T_x}\} = 0 \quad (4.30)$$

(4.21) denkleminin (4.30) denkleminde yerine konulmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial \overline{c}}{\partial t} + \overline{U} \frac{\partial \overline{c}}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} h\{(\overline{U.c} - \overline{U.c}) + \overline{T_x}\} = 0 \quad (4.31)$$

(4.31) denklemi tuzun, yanal yöndeki hız bileşeni, türbülans taşınım bileşeni ve su derinliği ile ilgili değişimlerin ihmal edilebildiği tek yönlü süreklilik denklemdir. Aksi durumda tek yönlü süreklilik denkleminin elde edilebilmesi için hem derinlik hem de genişlik boyunca integrasyon gerekli olmaktadır.

(4.31) denklemindeki son terim dispersiv taşınımın boyuna doğrultudaki gradyanını vermektedir.

4.5 Dispersiyon Katsayısı

4.5.1 Tanım

h ve \bar{U} , x ve t 'ye bağılı olarak verildiği zaman, (4.31) denkleminin çözümünden \bar{c} değeri elde edilmektedir. Böylece dispersiv taşınım değerinin h ve \bar{U} 'ya bağılı olarak ifade edilmesi sağlanmaktadır. Bunu yapabilmek için x yönünde derinlik boyunca ortalama konsantrasyon gradyanıyla dispersiv taşınım değeri arasındaki ilişkiye bağılı olarak bir dispersiyon katsayısı belirlenmelidir.

Derinlik boyunca ortalamadan

$$T_{disp} = h(\bar{U} \cdot \bar{c} - \bar{U} \cdot \bar{c} + \bar{T}_x) = -hD_{x,h} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (4.32)$$

burada

$D_{x,h}$: ortalama derinlik boyunca dispersiyon katsayısı.

(4.32) denkleminin (4.31) denkleminde yerine konmasıyla (4.33) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} hD_{x,h} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = 0 \quad (4.33)$$

Kesitsel ortalama taşınımın sözkonusu olması durumunda (4.32) denklemi aşağıdaki hale gelmektedir:

$$T_{disp} = A(\bar{U} \cdot \bar{c} - \bar{U} \cdot \bar{c} + \bar{T}_x) = -AD_{x,A} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (4.34)$$

burada

$D_{x,A}$: kesitsel dispersiyon katsayısı.

(4.32) denkleminde \bar{c} terimi \bar{c} 'nin derinlik boyunca ortalamasını göstermektedir. (4.34) denkleminde ise \bar{c} , \bar{c} 'nin kesitsel ortalamasını göstermektedir.

4.5.2 Dispersiyon Katsayısı Değerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde sabit enkesite ve su derinliğine (boyuna ve enine doğrultuda su derinliği sabit olan) sahip geniş bir dikdörtgen kanaldaki kararlı akım göz önüne alınmaktadır. Ayrıca yatay yöndeki hız bileşeni ve türbülans taşınımı bileşeni de ihmal edilmektedir. Buna ek olarak boyuna doğrultudaki hız bileşeninin sadece düşey koordinatın fonksiyonu olduğu ve kanal

genişliği boyunca aynı dūřeydeki boyuna hızların değişmediği kabul edilmektedir. Bu şartlar altında derinlik boyunca ortalamalar ile kesitsel ortalamalar aynı sonucu vermektedir. Ayrıca (4.12) denkleminde dolaylı aşağıdaki ifade yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad \text{ve} \quad V=0 \quad (4.35)$$

$t=0$ anında aniden ve üniform bir dağılıma sahip olacak şekilde kesite verilmektedir (bknz. şekil ek 4.2.a). şekil ek 4.2.b'de t_1 zaman sonra izleyicinin durumu görülmektedir. t_1 izleyicinin şekil ek 4.2.b'deki eddy hareketinden çok az etkilenmeye başlayabildiği küçük bir zaman dilimidir. Hızın büyük olduğu yerde izleyici daha uzun bir mesafe katederken, küçük olduğu yerde daha kısa bir mesafe katetmektedir. Sonuç olarak \bar{U} hızıyla hareket eden izleyicinin akıma verildiği $t=0$ anına göre izleyici için net bir taşınım sözkonusu olmaktadır.

Yeteri kadar uzun bir t_2 zaman periyodu sonunda izleyicinin derinlik boyunca dağılımında az veya çok bir üniformluk gözlenmektedir. Bu şekil ek 4.2.b'de görülen eddy hareketinden dolaylı olmaktadır. Derinlik boyunca konsantrasyon değeri denklem (4.36)'da verilmektedir.

$$c(y) = \bar{c} + c''(y) \quad (4.36)$$

(4.37) ifadesiyle verilen koşul tatmin edici olmaktadır.

$$|c''(y)| \ll |\bar{c}| \quad (4.37)$$

$t > t_2$ olduğundan, konsantrasyon dağılımını üzerinde boyuna doğrultuda advectif taşınım etkili olurken, dūřey doğrultuda türbülans taşınımı etkili olmaktadır. Ayrıca advectif taşınımın boyuna doğrultudaki etkisi türbülans taşınımının boyuna doğrultusundaki etkisinden büyük olmaktadır. Böylelikle

$$\left| \frac{\partial T_x}{\partial x} \right| \ll \left| \frac{\partial T_y}{\partial y} \right| \quad (4.39)$$

\bar{U} hızıyla hareket eden akışkanın referans seviyesine olan uzaklığını ölçmek için ξ diye bir koordinat tanımlanacak olursa

$$\xi = x - \bar{U}t \quad (4.40)$$

ve

$$\tau = t \quad (4.41)$$

Bu durumda

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{d\tau}{dx} + \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} = \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (4.42)$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dt} = \frac{\partial}{\partial \tau} - \bar{U} \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (4.43)$$

(4.42) ve (4.43) denklemleri (4.22) denkleminde yerine konursa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} + \frac{\partial c''}{\partial \tau} + U'' \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} + U'' \frac{\partial c''}{\partial \xi} + \frac{\partial T_x}{\partial \xi} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad (4.44)$$

(a) (b) (c) (d) (e) (f)

$$U(y) = \bar{U} + U''(y) \quad (4.45)$$

burada $U''(y)$: ortalama U değerinde derinlik boyunca oluşan sapmadır. Derinlik boyunca bu değer idealleştirilerek (4.46) deklemindeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\frac{1}{h} \int_0^h U''(y) dy = 0 \quad (4.46)$$

Bölüm 4.3'de anlatılanlar ışığında (4.44) denkleminin derinlik boyunca integre edilmesiyle (4.47) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} + U'' \frac{\partial c''}{\partial \xi} = 0 \quad (4.47)$$

(4.37) denklemi ξ 'un her değeri için geçerli olmaktadır. (4.48) denklemiyle ifade edilen durum doğru sonuç vermektedir.

$$\left| \frac{\partial c''}{\partial \xi} \right| \ll \left| \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} \right| \quad (4.48)$$

(4.48) denklemi, (4.44) denklemindeki (d) teriminin (c) terimi yanında ihmal edilebileceği sonucunu vermektedir. (4.47) denklemi (a) ile (d) terimlerinin aynı mertebede büyüklükler olduğunu göstermektedir. Böylece (a) terimi de (c) terimi yanında ihmal edilebilmektedir. Ayrıca (4.39) denkleminin sonucu gereği (e) terimi (f) terimi yanında ihmal edilebilmektedir. Sonuç olarak (4.44) denklemi (4.49) denkleme indirgenebilmektedir.

$$\frac{\partial c'}{\partial \tau} + U'' \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0 \quad (4.49)$$

(b) (c) (e)

(4.49) denklemindeki (b) terimi, (c) terimiyle aynı mertebede büyüklüğe sahip olduğu sürece (4.44) denklemindeki (a) teriminden daha büyük değere sahip olmaktadır. Bu durumda c'' teriminin zamanla değişimi \bar{c} ve $\partial \bar{c} / \partial \xi$ terimlerinin zamanla değişiminden daha hızlı olmaktadır. Bu şu anlama gelmektedir: c'' teriminin konuma göre dağılımı $\partial \bar{c} / \partial \xi$ değerine süratle adapte olmaktadır. Sonuçta, bir ilk yaklaşım olarak c'' terimi (4.49) denkleminde (b) terimi ihmal edilerek ve $\partial \bar{c} / \partial \xi$ sabit alınarak elde edilebilmektedir. Böylece düşeyde bir difüzyon katsayısı tanımlamak suretiyle $(K_y(y))$ (4.49) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$u'' \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} - \frac{\partial K_y(y)}{\partial y} \frac{\partial c''}{\partial y} = 0 \quad (4.50)$$

burada K_y : düşey yöndeki türbülans taşınımı için eddy difüzyon katsayısı

Düşey difüzyon katsayısı ve buna karşılık gelen düşey hız dağılımının y 'nin fonksiyonu olarak bilinenler olduğu varsayılarak, (4.50) denklemi çözülebilmektedir. Bu denklemin y 'ye göre iki kere integralinin alınmasıyla (4.51) ifadesi elde edilmektedir.

$$c'' = \int_0^y \frac{1}{K_y} \int_0^y U'' \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} dy dy \quad (4.51)$$

(4.36), (4.37), (4.45) ve (4.46) denklemlerinden

$$\overline{\overline{U.c}} - \overline{\overline{U.c}} = \overline{\overline{U^n.c^n}} \quad (4.52)$$

(4.52) denklemi ve (4.39) denkleminin mantığı gereği (4.32) denklemi (4.53) denklemine indirgenebilmektedir.

$$D_{x,h} = -\frac{1}{\frac{\partial c}{\partial x}} \overline{\overline{U^n.c^n}} \quad (4.53)$$

(4.42) ve (4.51) denklemlerinin (4.53) denkleminde yerine konmasıyla (4.54) denklemi elde edilmektedir.

$$D_{x,h} = -\frac{1}{h} \int_0^h U^n \int_0^y \frac{1}{K_y} \int_0^y U^n dy dy dy \quad (4.54)$$

Böylece düşeydeki hız dağılımı $u(y)$ ve bu hız dağılımına karşılık gelen düşey difüzyon katsayısı $K_y(y)$ 'nin bilinmesiyle, difüzyon katsayısının değeri yukarıdaki metot kullanılarak bulunabilmektedir. Sonuç dispersiyon katsayısı, (4.37) ve (4.39) denklemleriyle verilen sınırlamalar nedeniyle enjeksiyon noktasından belirli bir uzaklıktaki mesafe boyunca çok iyi sonuç verecek şekilde uygulanabilmektedir. Yukarıdaki işlemler Taylor tarafından uyarlanmıştır. Bununla ilgili daha detaylı çalışmalar Fisher ve diğ. tarafından Bölüm 2.1'de ele alınmıştır.

Bu bölümde göz önüne alınan problemde U^n x 'e göre değişmediği için, (4.42) ve (4.53) denklemlerinin (4.47) denkleminde yerine konmasıyla (4.55) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} - \frac{\partial D_{x,h}}{\partial \xi} \frac{\partial c}{\partial \xi} = 0 \quad (4.55)$$

Sonuç olarak $\overline{\overline{c}}$ 'nin ξ ve τ 'ya göre değişimi, (4.54) denkleminde $D_{x,h}$ 'ın yerine konmasından sonra (4.55) denkleminde bulunabilmektedir. (4.22) denkleminin çözümü ((4.54) denkleminde kullanılan $U(y)$ hız dağılımı ile bu hız dağılımına karşılık gelen $K_y(y)$ difüzyon katsayısı kullanılarak) $\overline{\overline{c}}$ 'yi ξ, y ve τ 'nın fonksiyonu olarak vermektedir. $\overline{\overline{c}}$ 'nin ξ ve τ 'ya göre değişimi $\overline{\overline{c}}$ 'nin derinlik boyunca ortalamasının alınmasıyla bulunabilmektedir. $\overline{\overline{c}}$ için, yukarıdaki çözümlerin kıyaslanmasından (4.54) ve (4.55) denklemlerinin enjeksiyon noktasından belli bir mesafe için tatmin edici sonuç verdiğini göstermiştir.

$$\frac{x_i}{\overline{\overline{U}}} \frac{K_y}{h^2} = 0.4 \quad (4.56)$$

burada

x_i : başlangıç mesafesi (örneğin (4.54) denkleminin uygulanabileceği enjeksiyon noktasından belli bir uzaklıktaki mesafe)

tanım gereği

$$\tau_i = \frac{x_i}{U} \quad (4.57)$$

burada τ_i : başlangıç periyodu

$\tau \geq \tau_i$ olduğundan (4.54) denklemi kullanılabilir (başlangıç mesafesi ve periyoduyla ilgili daha detaylı bir çalışma için bkz. Fiscer ve diğ., 1979, Bölüm 3.2.2 ve Bölüm 3.2.3).

4.5.3 Kararlı homojen akımda batmayan izleyicilerin dispersiyon katsayılarının değerleri için teorik çözümler

Bir önceki bölümde anlatılan ana hatlar ışığında aşağıdaki çözümler elde edilmektedir:

Sonsuz geniş açık kanal akımı (Elder, 1959) (ayrıca bkz. Fiscer ve diğ., 1979, Bölüm 2.2)

$$D_{x,h} = 5.9hu_* \quad (4.57)$$

burada

u_* : kayma hızı

Elder'in çözümü (3.22) denklemiyle verilen düşey yöndeki difüzyon katsayısı ve buna karşılık gelen hız dağılımındaki bir değişime dayanmaktadır. Bu çözüm yönteminde yanal doğrultuda bir hız bileşeni ve türbülans taşınımının olmadığı ve kanal derinliğinin sabit olduğu kabul edilmektedir.

(3.23) denkleminin (4.55) denkleminde yerine konmasıyla enjeksiyon noktasının ötesinde (4.57) denkleminin uygulanabileceği mesafe olarak (4.58) denkleminde ulaşılmaktadır.

$$\frac{x_i}{h} \approx 6 \frac{\bar{U}}{u_*} \quad (4.58)$$

$\bar{U} \approx 20u_*$ için (4.58) denkleminde $x_i \approx 120h$ olarak bulunur.

Akarsularda açık kanal akımı (Fiscer, 1973) (ayrıca bkz. Fiscer ve diğ., 1979, Bölüm 3.2)

$$D_{x,A} = (100 - 1000)hu_* \quad (4.59)$$

(4.59) denklemini düzensiz geometriye sahip, genişlik ve derinlik boyunca dispersiv taşınımı U ve c 'nin belirlediği akarsular için geçerli olmaktadır. (4.57) denklemindeki dispersiyon

katsayısı bu iki değerin sadece derinlik boyunca değişimiyle ilgilidir. Bu durum (4.59) denklemiyle verilen dispersiyon katsayısının (4.57) denklemiyle verilen dispersiyon katsayısından büyük olmasının nedenini açıklamaktadır.

(4.59) denklemi enjeksiyon noktasında olan mesafe (4.60) denklemiyle verilen x_i mesafesini geçtiği zaman kullanılabilir. (4.60)

$$\frac{x_i}{U} \frac{K_t}{W^2} = 0.4 \quad (4.60)$$

burada

W : kanal genişliği

K_t : yanal doğrultuda türbülans taşınımı için eddy difüzyonitesi

$K_t \approx 0.6hu_*$ ifadesinin (3.25 denkleminde) (4.60) denkleminde yerine konmasıyla (4.61) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{x_i}{W} \approx \frac{2}{3} \frac{W}{h} \frac{\bar{U}}{u_*} \quad (4.61)$$

(4.61) denklemi x ile ilgili önemli sayıda değer vermektedir. Örneğin $\bar{U} \approx 20u_*$, W=100 m ve h=4 m için $x_i \approx 320$ m (daha fazlası için bkz. Fiscer ve diğ., 1979, s.137-138)

Düzensiz geometriye sahip akarsularda yanal doğrultudaki dispersiyon değeriyse ilgili ölçümler (3.25) denklemi tarafından özetlenmektedir.

4.5.4 Homojen dalgalı akımda batmayan izleyicilerin dispersiyon katsayıları ile ilgili teorik çözümler

Dalgalı akımda \bar{U} zamanla değişim göstermektedir. Dolayısıyla dispersiyon katsayısı D_x de zamanla değişim göstermektedir. Ancak bu şartlarda bile henüz başlangıç periyodu hariç \bar{c} 'nin x ve t'ye göre değişimi, D_x 'in zamansal ortalama değerinin (4.31) denkleminde yerine konmasıyla türetilmektedir. Bu durum Goslinga ve Verboom (1979) tarafından gösterilmiştir. Bu iki araştırmacının çalışmaları Bölüm 5.1.3'de özetlenmektedir.

Bir akarsu tarafından beslenen çalkantılı yapıya sahip dalgalı akım için

$$\bar{U} = \bar{U}_{dalga}(t) + \bar{U}_{akarsu} \quad (4.62)$$

burada

$\overline{\overline{U}}_{dalga}$: $\overline{\overline{U}}$ 'nin dalga bileşeni; $\langle \overline{\overline{U}}_{dalga} \rangle = 0$

$\overline{\overline{U}}_{akarsu}$: $\overline{\overline{U}}$ 'nin akarsu bileşeni

$\langle \quad \rangle$: zamansal ortalama

bu tür akımlar için

$$\langle D_x \rangle = \langle D_{x,dalga} \rangle + D_{x,akarsu} \quad (4.63)$$

burada

$D_{x,dalga}$: akarsu beslemesi olmaksızın çalkantılı akımdaki D_x değeri ($\overline{\overline{U}}_{akarsu} = 0$)

$D_{x,akarsu}$: kararlı akarsu akımına ait D_x değeri ($\overline{\overline{U}}_{dalga} = 0$)

$\langle D_{x,dalga} \rangle$ teriminin kanal boyunca ortalamasıyla ilgili teorik ifadeler Holley ve diğ. (1970), Taylor III (1974) ve Goslinga-Verboom (1979) tarafından türetilmiştir. Holley ve diğ. çözümü Fisher ve diğ.'leri (1979) tarafından Bölüm 2.3 ve 5.2.2'de özetlenmektedir. Bu

çözümler $\frac{\langle D_{x,dalga} \rangle}{\overline{\overline{U}}_{max} T}$ nin değerini, $\frac{T_c}{T}$ nin fonksiyonu olarak vermektedir.

burada

$\overline{\overline{U}}_{max}$: $\overline{\overline{U}}$ 'nin dalga bileşeninin maksimum değeri

T : dalga periyodu

T_c : kesitsel karışım zamanı, enkesit için karışım (4.64) ifadesi ile verilmektedir.

$$T_c = \frac{1}{4} \frac{W^2}{\epsilon_t} \quad (4.64)$$

Teorik çözümler Şekil ek 4.3'de gösterilmektedir. $\delta > 3$ çözümleri arasındaki farklılıklar enkesitteki hız dağılımlarıyla ilgili farklı kabuller yapılmasından kaynaklanmaktadır.

$\langle D_{x,dalga} \rangle$ 'in zamansal ortalaması T_c/T oranı 1'e yakın değer aldığı zaman maksimum değerini almaktadır. T_c/T oranı 0 ve ∞ 'a gittiğinde ise $\langle D_{x,dalga} \rangle$ 'in zamansal ortalaması sıfıra gitmektedir. Bununla ilgili detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilecektir.

T_c ne kadar küçük değerler alırsa izleyicinin genişlik boyunca dağılımı da o kadar üniform olmaktadır. T_c 'nin sıfıra gitmesi durumunda $(c - \overline{c})$ de sıfıra gitmektedir. Bu durumda (4.48) denkleminde göre D_x değeri de sıfıra gitmektedir.

T_c ne kadar büyük değerler alırsa izleyici ile kendisine yakın akım çizgileri arasında o oranda küçük bir türbülans alış verişi olmaktadır. Bu durumda orada akım çizgileri boyunca sadece advektif taşınımın olması eğilimi artmaktadır. Bu şu anlama gelmektedir: izleyici herbir akım çizgisi boyunca herbir dalga periyodunda aynı mesafeyi katetmektedir ($\overline{U}_{akarsu}T$). Yani, bir dalga periyodu boyunca boyuna doğrultuda iki farklı izleyici partikülü arasındaki net mesafe aynı kalmaktadır. Bu durum D_x 'in sıfır olduğu sonucunu vermektedir.

$\overline{U}_{max} \gg \overline{U}_{akarsu}$ olduğu için yukarıdaki çözüm $\tau \geq \tau_i$ için kullanılabilir.

$$\tau_i \approx 0.4 \frac{W^2}{\langle K_i \rangle} \quad (4.65)$$

(4.65) denklemi, (4.56) denkleminde $K_i = \langle K_i \rangle$ alınıp (4.60) denkleminde yerine konmasıyla elde edilebilir. (5.25) denkleminde

$$\langle K_i \rangle \approx 0.4 h u_{*,max} \quad (4.66)$$

burada

$u_* : \overline{U} = \overline{U}_{max}$ olduğu zamanki u_* 'ın sahip olduğu değer

(4.66) denkleminin (4.65) denkleminde yerine konmasıyla (4.67) denklemi elde edilmektedir.

$$\tau_i \approx \frac{W^2}{u_{*,max} h} \quad (4.67)$$

(4.67) denklemiyle verilen τ_i değeri dalga periyodundan daha uzun olabilmektedir. Örneğin $W=1000$ m, $\overline{U} = 20u_*$, $\overline{U}_{max} = 1$ m/s ve $h=20$ m için (4.67) denklemi $\tau_i = 20T$ olarak vermektedir.

4.5.5 Sonuç

Belli bir durum için elde edilen dispersiyon katsayısının başka bir durum için de kullanılabilmesi için son durumda akım alanında geçerli olan dağılımın göz önüne alınan ilk durumdaki akım alanındaki dağılımla aynı olması gerekmektedir. Göz önüne alınan bir düzlemdeki her nokta için bu durum şu şekilde formüle edilmektedir:

$$\frac{c_1}{c_1} = \frac{c_2}{c_2} \quad (4.68)$$

Burada 1 ve 2 farklı iki durumu işaret etmektedir. Bu durum (4.53) denklemindeki duruma uymaktadır.

5. Adveksiyon-Difüzyon Denkleminin Çözümü

Bu bölüm sürekli veya anlık olarak akıma verilen izleyici hareketiyle ilgili kullanılan adveksiyon dispersiyon denkleminin ait çözümleri listelemektedir. Çözümler sırasında bazı kabuller yapılmaktadır. Bir boyutlu denklem çözümünde kanal kesitinin ve ortalama hız profilinin sabit olduğu varsayılmaktadır (bu iki özelliğin boyuna doğrultuda değişmediği kabul edilmektedir). İki boyutlu denklem çözümünde ise enkesit, enkesit derinliği ve derinlik boyunca ortalama hız değerinin sabit olduğu kabul edilmektedir (bu iki niceliğin boyuna ve enine doğrultuda değişmedikleri varsayılmaktadır).-

Ayrıca, bu bölüm dispersiyon katsayısının konsantrasyon dağılımındaki farklılıktan nasıl etkilendiğini gözler önüne sermektedir.

5.1 Bir Boyutlu Denklemin Çözümü

5.1.1 Bir Boyutlu Denklem

Sabit A kesiti ve x'ten bağımsız D_x terimi için (6.33) denklemi bir boyutlu olarak aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} = 0 \quad (5.1)$$

burada

\bar{c} : ortalama konsantrasyon profili

\bar{U} : boyuna doğrultudaki ortalama hız profili

x : boyuna doğrultudaki koordinat

t : zaman

D_x : boyuna doğrultudaki dispersiyon katsayısı (enkesit boyunca kesitsel ortalama alınarak bulunur)

Bir boyutlu denklemde D_x kesit boyunca ortalama alınarak belirlenmektedir. Alacağı değer ise Bölüm 4.5.2 ve 4.5.3'den (kararlı akarsu akımı) ve Bölüm 4.5.4'ten (dalgalı akım) bulunmaktadır.

5.1.2 İzleyicinin anlık olarak deşarjı

\bar{U} 'nun ve D_x 'in x 'e bağılı olarak değişim göstermediği sabit enkesitli bir açık kanal akımına izleyicinin anlık olarak deşarj edildiği düşünülmektedir.

(i) $x=x_1$ ve $t=0$ 'da anlık deşarj (düzlem kaynak)

$x=x_1$ 'de ve $t=0$ anında M kütlesine sahip bir izleyicinin akıma deşarj edildiği düşünülün. Deşarj edilen madde kanal enkesiti boyunca (düzlem kaynak) üniform bir dağılım göstermektedir. Deşarj edilen bu madde için (7.1) denklemi aşağıdaki şekilde çözülmektedir:

(a) D_x ve \bar{U} 'nun sabit olması durumunda

$$\bar{c} = \frac{M}{A(4nD_x t)^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{(x-x_1-\bar{U}t)^2}{4D_x t}\right\} \quad (5.2)$$

burada

A: kanal enkesiti

M: anlık deşarj edilen kütle

(b) D_x ve \bar{U} 'nun t 'nin fonksiyonu olması durumunda

$$\bar{c} = \frac{M}{A(4n \int_0^t D_x(t_1) dt_1)^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{(x-x_1 - \int_0^t U(t_1) dt_1)^2}{4 \int_0^t D_x(t_1) dt_1}\right\} \quad (5.3)$$

(ii) $x_1 < x < x_2$ ve $t=0$ 'da anlık deşarj

Şu ana kadar başlangıç için aşağıdaki koşullar geçerli olmaktadır.

$$x_1 < x < x_2 \text{ için } \bar{c} = c_i$$

$$x < x_1 \text{ için ve } x > x_2 \text{ için } \bar{c} = 0 \quad (5.4)$$

burada

\bar{c}_i : $x_1 < x < x_2$ durumu için başlangıç konsantrasyonu

(5.4) denklemindeki başlangıç koşullarında ve D_x 'in sabit olması durumu için (5.1) denklemi aşağıdaki hali almaktadır:

$$\bar{c} = \frac{1}{2} c_i \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{x-x_1-\bar{U}t}{(4D_x t)^{\frac{1}{2}}}\right\} - \operatorname{erf}\left\{\frac{x-x_2-\bar{U}t}{(4D_x t)^{\frac{1}{2}}}\right\} \right] \quad (5.5)$$

$$\text{erf } X = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (5.6)$$

Çizelge 5.1'de (5.14) denklemiyle tanımlanan hata fonksiyonunun değerleri görülmektedir.(5.5) denklemi, sabit D_x değerine sahip kararlı açık kanal (akarsu) akımına bırakılan bir maddenin \bar{c} konsantrasyonunu, belli bir uzunluk için x ve t 'ye bağlı olarak vermektedir. (5.4) denklemindeki başlangıç koşullarında akıma deşarj edilen madde konsantrasyonunu bir kaç adımda hesaplamak suretiyle ulaşılabilir ($x_1 < x < x_2$ aralığı her bir adım Δl olacak şekilde bölünürse her bir adımdaki deşarj edilen maddenin kütlesi $\bar{c}_i A \Delta l$ değerine eşit olmaktadır). Sonuç olarak göz önü alınan bir madde için çözüm, farklı anlık deşarjlara ait etkilerin bir araya getirilmesiyle bulunabilmektedir (herbir adımın çözümü denklem (5.2)'de verilmektedir).

Çizelge 5.1 Hata fonksiyonunun değerleri (denklem (5.6))

x	erf x	x	erf x
0.0	0.0	1.0	0.8427
0.1	0.1129	1.2	0.9103
0.2	0.2227	1.4	0.9523
0.3	0.3286	1.6	0.9763
0.4	0.4284	1.8	0.9891
0.5	0.5205	2.0	0.9953
0.6	0.6309	2.5	0.9996
0.7	0.6778	3.0	0.99998
0.8	0.7421		
0.9	0.7969		
1.0	0.8427	∞	1.0000

$x_2 = 0$ ve $x_2 = -\infty$ için (5.5) denklemi aşağıdaki hale gelmektedir:

$$\bar{c} = \frac{1}{2} \bar{c}_i [1 - \text{erf} \left\{ \frac{x - \bar{U}t}{(4D_x t)^{1/2}} \right\}] \quad (5.7)$$

Şekil 5.2 (5.7) denklemini göstermektedir.

5.1.3 Bir Boyutlu Denklemler (Devamı)

(4.40) ve (4.41) denklemlerinin (5.1) denkleminde yerine konulmasıyla (5.8) denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} = D_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \xi^2} \quad (5.8)$$

burada

ξ : \bar{U} hızıyla hareket eden referans düzleminde itibaren ölçülen boyuna doğrultudaki koordinat

τ : zaman (\bar{U} hızıyla hareket eden izleyici için)

Konsantrasyon dağılımının merkezi (7.4) denkleminde verilmektedir:

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{c} d\xi \quad (5.9)$$

burada

μ : ξ -kütle merkezinin değeri

D_x 'in sadece τ 'nin fonksiyonu olması durumunda (5.8) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu)^2 \frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} d\xi = D_x \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu)^2 \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \xi^2} d\xi \quad (5.10)$$

Eşitliğin sol tarafındaki zamana bağlı terimler integral dışına alınabilmektedir. Sağ tarafaki terim parçalara ayrılıp aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu)^2 \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \xi^2} d\xi = (\xi - \mu)^2 \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} \Big|_{-\infty}^{+\infty} - 2\bar{c}(\xi - \mu) \Big|_{-\infty}^{+\infty} + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{c} d\xi \quad (5.11)$$

İzleyicinin varolduğu sonlu bir mesafe boyunca $\xi = \pm\infty$ için $\bar{c} = 0$ ve $\partial \bar{c} / \partial \xi = 0$ olmaktadır.

Bu durumda (5.11) denklemi aşağıdaki hale gelmektedir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu)^2 \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} d\xi = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{c} d\xi \quad (5.12)$$

(5.12) denklemini (5.10) denkleminde yerine konulursa

$$2D_x(\tau) = \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu)^2 \bar{c} d\xi}{\int_{-\infty}^{+\infty} \bar{c} d\xi} = \frac{\partial}{\partial \tau} \sigma^2(\tau) \quad (5.13)$$

burada σ^2 : ξ 'ye göre konsantrasyon dağılımının varyansı ((5.13) denklemindeki ikinci ve üçüncü terim)

Sabit bir koordinat sistemi için, (4.41) denkleminin (5.13) denkleminde yerine konmasıyla aşağıdaki sonuç elde edilmektedir:

$$2D_x(t) = \frac{\partial}{\partial t} \sigma^2 \quad (5.14)$$

Dalgalı akımlar için (bkz. Bölüm 4.5.4) \bar{U} ve D_x zamana bağlı periyodik fonksiyonlar olmaktadır. Bunun sonucunda \bar{c} 'nin x ve t'ye göre değeri belirlenirken, D_x 'in zamana bağlı değeri hesaplarda kullanılmalıdır.

$$\xi = x - \int_0^t \bar{U}(t_1) dt \quad (5.15)$$

(5.3) ve (5.13) denklemleri kullanılarak (5.16) denklemi elde edilmektedir.

$$\sigma^2 = 2 \int_0^t D_x(t_1) dt \quad (5.16)$$

Dalgalı akımda D_x zamana bağlı periyodik bir fonksiyondur (zamansal ortalama değeri sıfırdan farklıdır). Dolayısıyla yeterince uzun bir başlangıç periyodundan sonra varyansın yaklaşık değeri aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\sigma^2 = 2 \langle D_x \rangle t \quad t > t_{\text{lim}} \quad (5.17)$$

burada $\langle D_x \rangle$: D_x 'in zamansal ortalama değeri

t_{lim} : t'nin alt limiti

(5.14) denklemi uyarınca bu şu anlama gelmektedir: $t \geq t_{\text{lim}}$ için \bar{c} 'nin x ve t'ye göre değişimi, sanki D_x terimi zamana göre sabit ve değeri $\langle D_x \rangle$ 'e eşitmiş gibi düşünülmektedir.

5.2 İki Boyutlu İçin Çözümler

5.2.1 İki Boyutlu Denklem

h , D_x ve D_z 'nin sabit değerleri için iki boyutlu denklem aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} - D_z \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} = 0 \quad (5.18)$$

burada

\bar{c} : derinlik boyunca ortalama konsantrasyon

x, y : boyuna doğrultuda ve buna dik doğrultudaki koordinatlar

\bar{u}, \bar{w} : boyuna doğrultu ve buna dik doğrultudaki derinlik boyunca ortalama hız bileşenleri

D_x, D_z : boyuna doğrultu ve buna dik doğrultudaki dispersiv taşınım için derinlik boyunca ortalama dispersiyon katsayısı

(5.18) denklemi, (4.22) denkleminde bir z boyutu tanımlayarak ve derinlik boyunca ortalaması alınarak elde edilebilmektedir (bkz. Holley ve diğ., 1972).

(5.18) denkleminde D_x ve D_z değerleri derinlik boyunca ortalama değerlerdir. D_x 'in yaklaşık değeri (4.57) denklemi kullanılarak da elde edilebilmektedir. D_z 'nin yaklaşık değeri ise (3.25) denklemiyle verilen K_t değerine eşit bir D_z değerinin aynı denklemde yerine konulmasıyla elde edilebilmektedir.

5.2.2 $x=x_1, z=z_1$ de ve $t=0$ anında açık kanal akımına anlık enjeksiyon (düşey çizgisel kaynak)

$x = x_1, z = z_1$ de ve $t=0$ anında M kütle sine sahip bir maddenin anlık olarak akıma enjekte edildiği düşünülmektedir. Enjekte edilen madde kanal derinliği boyunca üniform üniform bir dağılım göstermektedir (düşey çizgisel kaynak). Kanal derinliği, \bar{u} , D_x ve D_z 'nin sabit olduğu ve \bar{w} 'nin sıfır olduğu varsayılırsa (7.18) denklemi aşağıdaki hali almaktadır:

$$\bar{c} = \frac{M}{h4n(D_x D_y)^{\frac{1}{2}} t} \exp\left\{-\left\{\frac{(x-x_1-\bar{u}t)^2}{4D_x t} + \frac{(z-z_1)^2}{4D_z t}\right\}\right\} \quad (5.19)$$

(5.19) denklemi konsantrasyon dağılımı kenar etkilerini hissetmediği sürece geçerli olmaktadır.

5.2.3 Açık kanal akımına sürekli enjeksiyon

Bu bölümde kanal derinliği, \bar{u} , D_x ve D_z 'nin sabit \bar{w} 'nün ise sıfır olduğu kabul edilmektedir. Enjekte edilen malzeme kanal derinliği boyunca üniform bir dağılım göstermektedir.

- (i) $x = x_1, z = z_1$ 'de ve $t = 0$ anında açık kanal akımına sürekli enjeksiyon
(düşey çizgisel kaynak) (kenar etkisi yok)

Bu durum için D_x ihmal edilebilmektedir. Böylece (5.18) denklemi aşağıdaki duruma döner:

$$\bar{c} = \frac{Q}{h\{4n(x-x_1)uD_z\}^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{\bar{u}(z-z_1)^2}{4D_z t}\right\} \quad (5.20)$$

burada

Q : enjeksiyon kütle oranı

h : su derinliği

- (ii) Kanal kenarından açık kanala sürekli enjeksiyon (düşey çizgisel kaynak)

Kanalın bir kenarından ($x = 0, z = 0$) düşey çizgisel bir kaynak boyunca sürekli enjeksiyon durumu için (5.18) denkleminin çözümü aşağıdaki gibi olmaktadır (Holley ve diğ., 1972).

$$\bar{c} = \frac{Q}{h\{nxuD_z\}^{\frac{1}{2}}} \sum_{n=-\infty}^{n+\infty} \exp\left\{-\frac{\bar{u}(z-2nB)^2}{4D_z x}\right\} \quad (5.21)$$

burada B : kanal genişliği

x sonsuza gitmesi durumunda (5.21) denklemi aşağıdaki hale gelmektedir.

$$x > x_{lim} \text{ için } \bar{c} = \frac{Q}{hbu} \quad (5.22)$$

burada x_{lim} : x'in alt limiti

(7.22) denklemi, izleyicinin tüm kesite tamamen yayılması durumunu karakterize etmektedir.

(7.21) denklemi kullanılarak izleyicinin kanal boyunca dağılması için gerekli uzunluk (x_c)

bulunabilmektedir. x_c tanımlanırken, \bar{c}_0 'ın ($z = 0$ da \bar{c}) belli bir yüzdesine eşit olan \bar{c}_B ($z = B$ de \bar{c}) kriteri kullanılmaktadır. \bar{c}_B %2 alınırsa

$$\frac{x_c}{B} = 0.054 \frac{Bu}{D_z} \quad (5.23)$$

burada x_c : yukarıda tanımlanan geçiş mesafesi

Şekil 5.3 x_c/B 'yi B/H 'in fonksiyonu olarak vermektedir.

(3.21) denkleminde, x_c/B , \bar{c}_B/\bar{c}_0 'ın logaritmasıyla ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Örneğin $\bar{c}_B/\bar{c}_0 = \%1$ için (5.23) denkleminin sağ tarafı $\ln(0.02) / \ln(0.01) = 0.85$ ile çarpılmalıdır (Holley ve diğ., 1972).

(iii) $x = 0$ da ve $-b/2 < z < b/2$ bölgesinde (kenar etkileri yok) açık kanala sürekli enjeksiyon (sınırlı boydaki düzlem kaynak)

D_x 'in etkisi ihmal edilirse (5.18) denkleminin aşağıdaki hali almaktadır.

$$\bar{c} = \frac{1}{2} \frac{Q}{bhu} \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{z + \frac{1}{2}b}{2} \left(\frac{\bar{u}}{D_z x} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{z - \frac{1}{2}b}{2} \left(\frac{\bar{u}}{D_z x} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \right] \quad (5.24)$$

$$\bar{c}_0 = \frac{Q}{bhu} \operatorname{erf} \left\{ \frac{b}{4} \left(\frac{\bar{u}}{D_z x} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5.25)$$

burada $\bar{c}_0 : z = 0$ için \bar{c} 'nin alacağı değer

Brooks (1960), D_z 'nin yandan püskürtmenin ($L : D_z \infty L/b$ ve $D_z \infty (L/b)^{4/3}$) fonksiyonu olduğu iki durum için çözümler sunmaktadır.

5.2.3 İki Boyutlu Denklemler

Şimdiye kadar \bar{u} , h , D_z sabit alınırken, \bar{w} sifira eşit olarak alınmaktaydı. Akarsular için bu koşullar tatmin edici olmaktan uzaktırlar (bkz. Holley ve diğ., 1972). Burada şu soruya cevap aranmaktadır: akarsu kenarından sürekli enjeksiyon durumunda oluşan konsantrasyon dağılımı için D_z 'nin deneysel değerlerinin nasıl elde edileceğidir (bunun için idealleştirilmiş koşullardan elde edilen denklemlerden türetilen terimler hesaplarda kullanılmaktadır).

Holley ve diğ., (1972) bu problemi Bölüm 5.1.3 'tekine benzer şekilde D_x 'i ihmal ederek ve kararlı bir konsantrasyon dağılımı kabulüyle çözmektedir. Böylece (5.18) denkleminin (5.26) denklemindeki hale dönmektedir:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - D_z \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} = 0 \quad (5.26)$$

D_z 'nin değişimi (5.27) denklemindeki gibi ifade edilebilmektedir.

$$D_z = K \phi(\bar{u}, h) \quad (5.27)$$

burada

K : (5.27) denkleminin tanımlanan katsayı

ϕ : (5.27) denkleminin tanımlanan fonksiyonel ilişki

Kanal kenarındaki akım koşulları (4.15) denklemindeki akım koşullarına benzerlik göstermektedir ve (4.28) denklemini tatmin edici olmaktadır. Bu nedenle, (5.26) denkleminin z_0 'a göre ikinci momenti alınırsa (5.28) denkleminin elde edilmektedir:

$$\frac{d}{dx} \frac{\int_w h \bar{u} c (z - z_0)^2 dz}{Q} - \frac{2 \int_w h \bar{w} c (z - z_0) dz}{Q} = -2K \frac{\int_w h \phi \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} (z - z_0) dz}{Q} \quad (5.28)$$

burada

z_0 : akım çizgisini enjeksiyon noktası noktasında kesen koordinat (örneğin bir enjeksiyon için bir kanal kenarından diğer kenara mesafe)

w : kanal genişliği

Q : enjeksiyonun debisi

(5.28) denkleminin aşağıdaki şekilde de yazılabilmektedir.

$$\frac{d\sigma_3^2}{dx} - g(x) = 2Kf(x) \quad (5.29)$$

Burada σ_3^2 tanımından hareketle, $g(x)$ ve $f(x)$, (5.28) ve (5.29) denklemleri karşılaştırılarak görülebilmektedir. σ_3^2 teriminin, h , \bar{u} ve \bar{c} 'nin varyansı olduğuna dikkat edilmelidir.

σ_3^2 'nin değişimi izleyicinin hem ana akım yönüne dik dispersiyonundan hem de ana akım yönüne dik hız bileşeninden kaynaklanmaktadır. $g(x)$ fonksiyonu hız bileşeninin etkilerini kapsamaktadır. Böylece $(d\sigma_3^2/dx - g(x))$ farkı sadece dispersiyon etkilerini temsil etmektedir (etkili bir $g(x)$ değeri σ_3^2 'deki hız hız bileşeni etkilerini ortadan kaldırmaktadır.)

Derinlik ve hız değişimi etkilerinin hesaba katılması için bu büyüklüklere ait değerlerin mevcut olması ve ayrıca konsantrasyon dağılımı ölçümlerinin var olması gerekmektedir. h ve \bar{u} büyüklüklerine ait değerler bilindikten sonra \bar{w} 'nin değeri derinlik boyunca ortalama süreklilik denkleminin hesaplanabilmektedir. Artık $g(x)$ fonksiyonunun sahip olacağı değer hakkında değerlendirme yapılabilmektedir. σ_3^2 -x grafiğinden $d\sigma_3^2/dx$ değeri bulunabilmektedir.

Yukarıdaki metot Hollanda'daki ırmaklarda yapılan izleyici ölçümleriyle ilgili analizler sonucunda geliştirilmiştir (Holley ve Abraham, 1973). (3.25) denkleminin türetilmesinde kullanılan bu ölçümlerle ilgili sonuçlar Fiscer ve diğ. (1979) incelemesinde yer almaktadır (Bölüm 3.1.2).

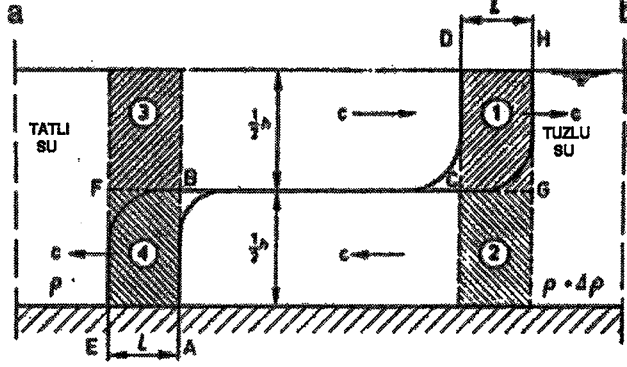
Yotsukura ve Sayre'nin (1976) geliştirdikleri metotta derinlik ve hız değişiminin hesaplanması için izleyicinin süreklilik denkleminin hesabı bir eğrisel koordinat sisteminde yapılmaktadır (dik koordinat sisteminin sabit değerlerini akım çizgileri temsil etmektedir). Böylece süreklilik denkleminin veri girişine ve σ_3^2 'nin boyuna doğrultudaki değişiminin hesabı için $g(x)$ fonksiyonunun hesaplanmasına gerek kalmamaktadır.

5.4 Sonuç

Dispersiyon-difüzyon denkleminin çözüm metodu Carlslaw ve Jaeger (1959) tarafından verilmektedir. Çözümlerle ilgili yapılan bir inceleme Fiscer ve diğ.'lerinin (1979) çalışmasında bulunabilmektedir (Bölüm 2.3).

6 Değişim Akıntıları

6.1 Akıntı Mekanizması



Şekil ek 6.1 Değişim akıntıları

Şekil ek 6.1 tatlı su ile tuzlu suyu ayıran kapak kaldırıldığı zaman oluşan akıntı mekanizmasını göstermektedir. Tuzlu su, tabana yakın bir yerden alttan tatlı suyun içine doğru girerken, tatlı su yüzeyden tuzlu suyun içine doğru girmektedir; somuçta zıt yönde iki akıntı meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra tuzlu suyun önündeki tatlı su ve tatlı suyun önündeki tuzlu su durgun olarak kalmaktadır.

Değişim akıntıları potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirmektedir; tuzlu su aşağıya doğru batarken tatlı su yukarıya doğru çıkmaktadır. Durgun haldeki tatlı ve tuzlu su hareket etmeye başlamaktadır.

Δt periyodu boyunca farklı iki yoğunluğa sahip su kütlelerinin $L = c \cdot \Delta t$ kadar yol katetdikleri farzedilmektedir. Bu zaman periyodunda kinetik enerjiye çevrilen potansiyel enerji miktarı ortama salınan enerji miktarına karşı gelmektedir. Bu olay gerçekleşirken tuzlu su 1'den 4'e inerken, tatlı su 4'ten 1'e çıkmaktadır. Kinetik enerjiye dönen potansiyel enerji (6.1) denklemleriyle verilmektedir.

$$E_p = \text{kuvvet} \cdot \text{yol} = c \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{2} h \quad \Delta \rho \cdot g \quad \frac{1}{2} h = \frac{1}{4} c \cdot h^2 \Delta \rho \cdot g \cdot \Delta t \quad (6.1)$$

$$\text{hacim} \quad \frac{\text{kuvvet}}{\text{hacim}} \quad \text{yol}$$

burada

E_p : Δt periyodundaki potansiyel enerji kaybı

c : tatlı ve tuzlu suyun baş tarafının yayılma hızı

Δt : periyot

h : su derinliği

$\Delta\rho$: tatlı ve tuzlu su arasındaki yoğunluk farkı

g : yerçekimi ivmesi

Başlangıçta durgun olan 1, 2, 3 ve 4 konumlarındaki suyun Δt periyodu süresince hareket etmesi sonucu kinetik enerji ifadesi elde edilmektedir.

$$E_k = \frac{1}{2} \text{ kütle} \cdot \text{hız}^2 = \frac{1}{2} 4c \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{2} h \cdot \rho \cdot c^2 =$$

$$= c^2 \cdot h \cdot \rho \cdot \Delta t \quad (6.2)$$

burada E_k : Δt periyodunda elde edilen kinetik enerji

ρ : tatlı veya tuzlu suyun yoğunluğu ($\Delta\rho / \rho \ll 1$)

Bir ilk yaklaşım olarak aşağıdaki ifade yazılabilmektedir:

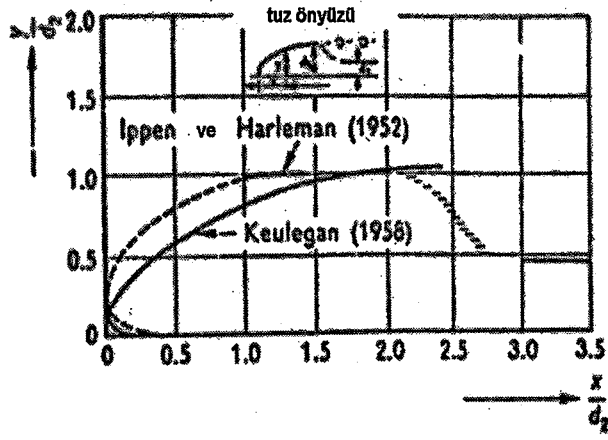
$$E_p = E_k \quad (6.3)$$

Bu durumu (6.4) ifadesi takip etmektedir.

$$c = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} gh \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

(6.4) denklemine göre

$h = 15$ m	$\Delta\rho = 24$ kg/m ³	$c = 0.9$ m/s
10 m	24 kg/m ³	0.8 m/s
8 m	24 kg/m ³	0.7 m/s
5 m	24 kg/m ³	0.6 m/s



Şekil ek 6.2 Tuz önyüzünün şekli

Şekil ek 6.2 tuzlu suyun ön tarafının tipik şeklini göstermektedir. Bu akıntı şeması tatlı su içerisindeki düşey hız bileşeni ve tuzlu su kafasında meydana gelen bir çevrinti tarafından karakterize edilmektedir. Bu durum kinetik enerjideki bir dağılımla ilgili olmaktadır. Sonuç olarak tatlı ve tuzlu kafalarının yayılma hızıyla ilgili yapılan deneysel çalışmalar bu hız değerlerinin (6.4) denklemiyle verilen hız değerlerinden daha küçük olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir (Yih, 1965) :

$$c_o = 0.45 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} gh \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.5)$$

burada c_o : kafa kısmına ait ilk yayılma hızı (kafa kısmının yayıldığı mesafenin küçük olduğu durumdaki hız)

Kinetik enerji aynı zamanda arakesit ve taban sürtünmeleri tarafından da dağıtılmaktadır. Sonuç olarak tatlı ve tuzlu su kafalarının kat ettikleri mesafe arttıkça yayılma hızları azalmaktadır. (Barr, 1963 ve Barr, 1967). Sürtünme kuvvetinin değeri Reynolds sayısına bağlı olmaktadır (Şekil ek 2.5).

$$\frac{c}{c_o} = f \left(\frac{x}{h}, Re_o \right) \quad (6.6)$$

burada x : kafa kısımlarının kat ettikleri yol

Re_o : (6.7) denklemiyle tanımlanan başlangıç Reynolds sayısı

$$Re_o = \frac{c_o h}{\nu} \quad (6.7)$$

burada ν : kinematik viskozite

Keulegan ve Barr tarafından yapılan deneyler aşağıda Abraham ve Eysink (1971) tarafından özetlenmektedir.

$$\frac{c}{c_0} = 0.9 \text{ için } Re_0 = 10^5 \quad \text{ve} \quad \frac{L}{h} = 120$$

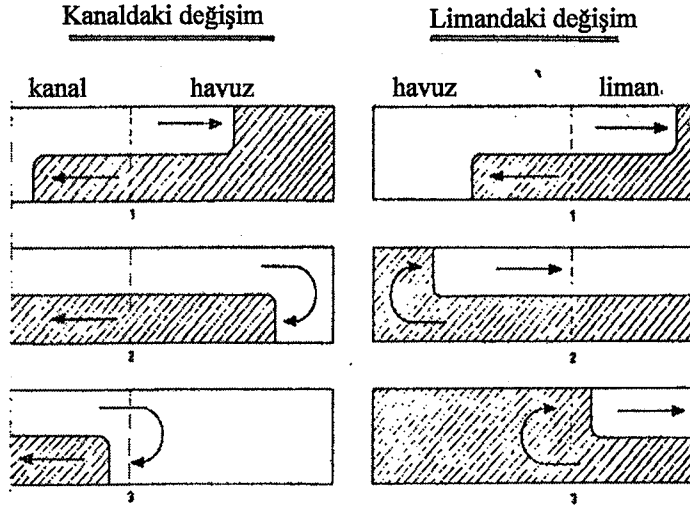
10^4	80
10^3	25

Böylece değişim akımlarında hidrolik modele ait ölçek belirlenirken viskozite etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

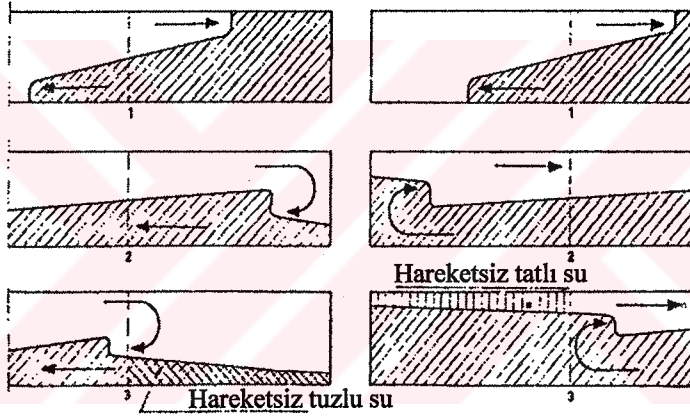
6.2 Ulaşım Kanalı Boyunca Tuz Girişi

6.2.1 Tanım

$\rho + \Delta\rho$ yoğunluğuna sahip tuzlu suyun bulunduğu bir liman baseniyle ρ yoğunluğunda tatlı suyun bulunduğu bir kanal arasında bulunan bir ulaşım kanalı göz önüne alınsın. Her iki taraftaki kapak kapalıyken ulaşım kanalında sadece tatlı su olduğu farzedilsin. Daha sonra liman tarafındaki kapak açılsın. Bu durumda Şekil ek 6.3'de değişim mekanizması görülen durum ortaya çıkmaktadır. Yani tatlı su tuzlu suyla yer değiştirmektedir. Yeterince uzun bir zaman periyodu sonunda dış kapak (liman tarafındaki kapak) kapatılırsa ulaşım kanalında artık sadece tuzlu su bulunmaktadır. Bu kez sadece iç kapak (tatlı suyun bulunduğu kanal tarafındaki kapak) açılacak olursa sefer kanalındaki tuzlu su, tatlı suyun bulunduğu kanalda yayılmaya başlayacaktır (Şekil ek 6.3).



A. İdealleştirilmiş şema

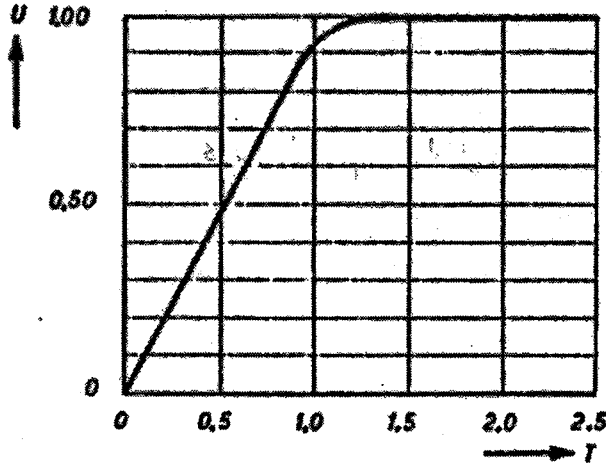


B. Basitleştirilmiş gerçek şema

Şekil ek 6.3 Havuzda meydana gelen değişim süreci

Yukarıdaki düşünceler ışığında, farklı yoğunluğa sahip iki su kütlelerini ayıran kapaklar tamamen kaldırılıp değişim sürecinin tamamlanması için yeterince uzun bir zaman periyodu geçtikten sonra:

- (i) ulaşım kanalındaki suyun hacmine eşit hacimde bir tuzlu su kanala nüfuz etmektedir.
- (ii) ulaşım kanalındaki suyun hacmine eşit hacimde bir tatlı su limanandaki tuzlu suya nüfuz etmektedir.



Şekil ek 6.4 Northern Lock Ijmuiden'in havuzunda değişim sırasında suyun sahip olduğu hız Şekil ek 6.4 değişim süreci sırasında ortaya çıkan deneysel sonuçları aşağıdaki boyutsuz parametreleri kullanarak göstermektedir:

U : değişimin büyüklüğü, örneğin ulaşım kanalındaki suya giren tatlı veya tuzlu su oranı

T : (6.8) denkleminde verilen zaman faktörü

$$T = \frac{t}{4L} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} gh \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.8)$$

burada t : kapakların açılmasından sonra geçen zaman

L : ulaşım kanalının uzunluğu

(6.4)-(6.5) ve (6.8) denklemlerinden farklı yoğunluğa sahip her iki su kütlelerinin baş taraflarının $T = \frac{1}{2}$ 'de kanalın kapağın kapalı olduğu ucuna ulaştıkları görülebilmektedir. Şekil ek 6.4'ten de görüleceği gibi kapalı kapaktan yansıyan su kütlelerinin yayılma hızı ile yaklaşan su kütlelerinin yayılma hızı birbirine eşit olmaktadır. $T < 1$ için şekil ek 6.4'teki eğrinin eğimi (6.5) denkleminin sonucuna uymaktadır.

Kapaklar açıldığı zaman liman tarafındaki su seviyesi sefer kanalındakinden fazla ise, su seviyeleri eşit oluncaya kadar limandan kanala doğru belli bir miktarda su girişi olmaktadır. Bu durum kanala tuzlu su girişiyle ilgili olarak meydana gelmektedir. Eğer kanaldaki su seviyesi liman tarafındaki su seviyesinden düşük ise kanala tuzlu su girişi olmamaktadır.

Yoğunluk farkından kaynaklı değişim tamamlandığı zaman, sefer kanalındaki kapakların açılmasıyla ortaya çıkan ulaşım tuzlu su girişi üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır .

6.2.2 Ulaşım kanalları boyunca tuzluluk girişini azaltmanın yöntemi

Sefer kanallarında tuzluluk girişini azaltmanın yolu Abraham ve diğ. (1965), de Vos (1969), Abraham ve v.d. Burgh (1964), Kolkman ve Slagter (1976) tarafından tanımlanmaktadır.

Burada ulaşım havuzunda karışık bir kanal sisteminin bulunduğu durum ile böyle bir kanal sistemine gerek duyulmayan durum arasında ayırım yapılmaktadır. Ulaşım kanallarının bulunduğu durumlar için ilk yaklaşım diğer yaklaşıma göre daha uygun olmaktadır.

Ulaşım etkilerinin sözkonusu olduğu durum ile ulaşım etkisinin sözkonusu olmadığı durum arasında da bir ayırım yapılmaktadır.

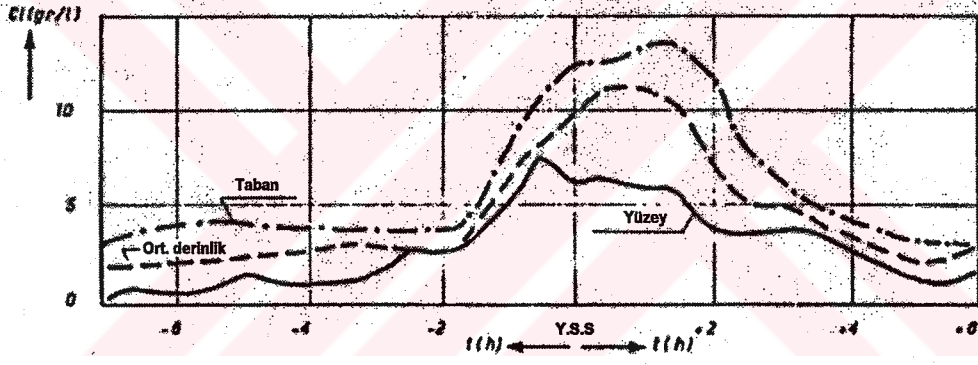
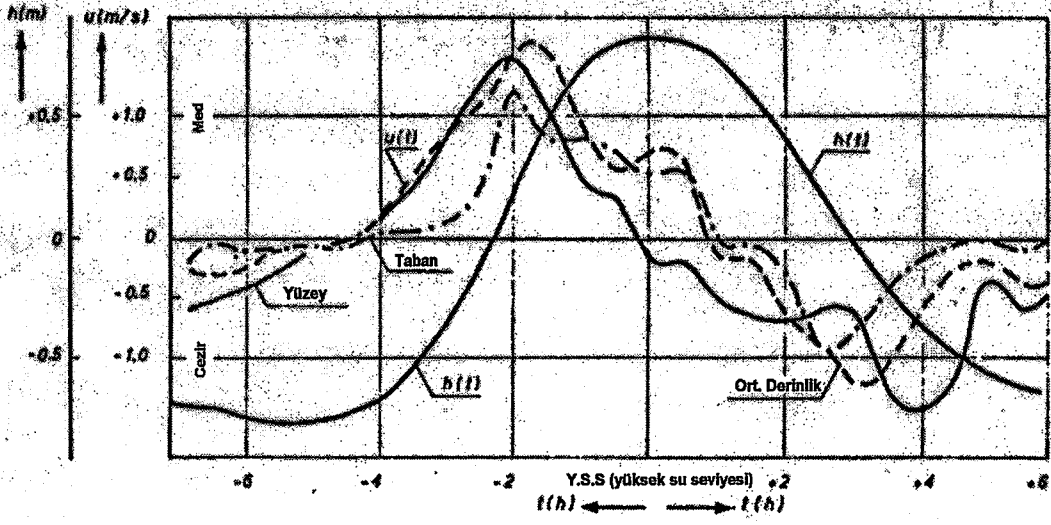
Ayrıca seyrelmenin söz konusu olduğu durumdaki tuzlu su girişi (ki bu tuzluluğun kanal boyunca ilerlemesine neden olmaktadır) ile seyrelmenin söz konusu olmadığı durum arasında da bir ayırım yapılması gerekmektedir. Eğer böyle bir seyrelme gerçekleşirse kanaldaki seyrelmiş suyun miktarı kanala giriş yapan ilk durumdaki tuzlu suyun miktarından büyük olacaktır. Şayet tuzluluğun kanala girişi su jeti şeklinde püskürerek olmuyorsa, genelde bu durum bir dezavantajdır.

6.3 Gel-git Etkisine Açık Akarsular Üzerine Kurulan Liman Basenleri

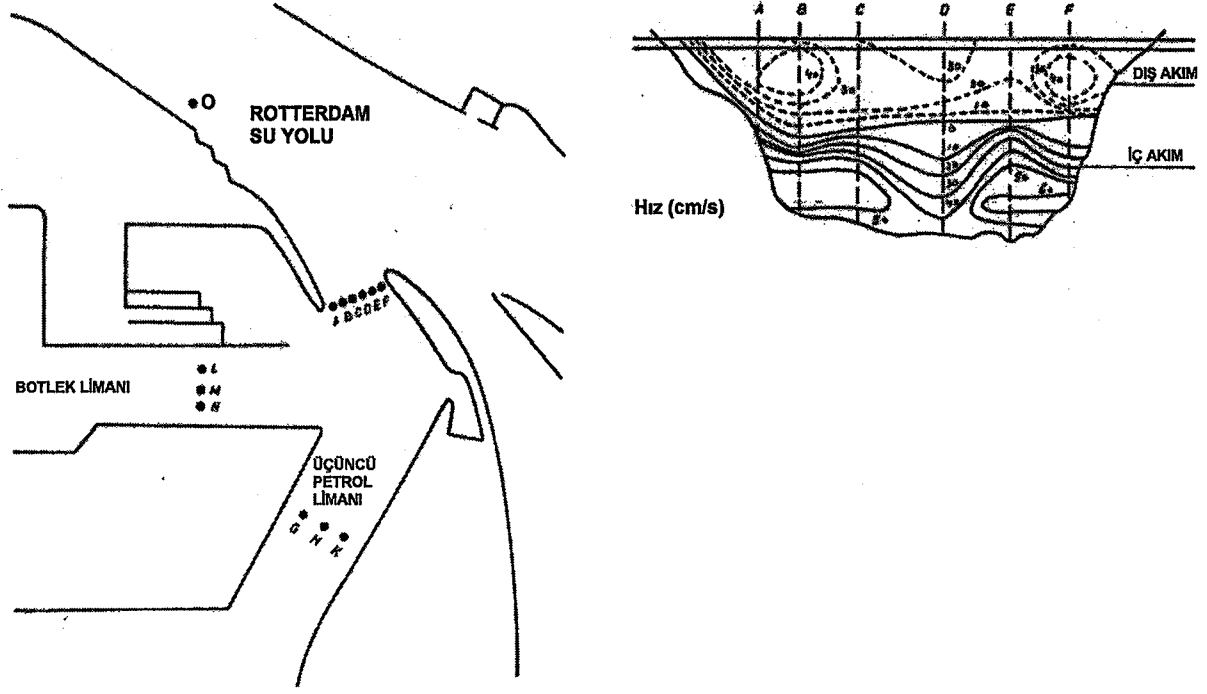
6.3.1 Tanım

Gel-git etkisine açık bir haliçte tuzluluk, hız ve su derinliği gel-git dalgasının periyodu boyunca değişim göstermektedir. Şekil ek 6.5, yerleşimi Şekil ek 6.6'da görülen Rotterdam Su Yolu'nda, Botlek (ve 3. Petrol) limanının giriş ağzındaki bir istasyonda bu değişimle ilgili yapılan gözlemleri göstermektedir. Sonuç olarak Botlek Limanının girişindeki akım koşulları aşağıdaki mekanizmalar tarafından belirlenmektedir:

- (i) gel-git dalgasının yükselmesi ve çekilmesi
- (ii) yoğunluk kaynaklı değişim akımları
- (iii) akarsu akımının neden olduğu düşey yöndeki eddy hareketi



Şekil ek 6.5 Gel-git periyodu boyunca akarsuda O noktasındaki derinlik (h), hız (u) ve klor (Cl) değişimi



Şekil ek 6.6 Yüksek gel-git durumunda Botlek Limanı ağzındaki noktalar ve bu noktalardaki hız dağılımları

Gel-git Dalgasının Yükselmesi (Girişi)

Gel-git yükselmesi ve çekilmesi gel-git periyodu boyunca su derinliğinde değişime neden olmaktadır. Liman baseni küçük olduğu için, limandaki su seviyesi ırmaktaki su seviyesini küçük bir gecikmeyle takip etmektedir. Böylece

$$Q_t = A \frac{dh}{dt} \quad (6.9)$$

burada

Q_t : su derinliğindeki değişiminden dolayı (eksi değer dış akışı göstermektedir) birim zamanda limana doğru akışa geçen su hacmi

A : liman baseni yüzey alanı

h : liman girişinde ölçülen su derinliği

Bu durumda oluşan hız ise (6.10) denklemindeki gibi elde edilmektedir.

$$V = \frac{A \frac{dh}{dt}}{Bh} \quad (6.10)$$

burada

B : liman girişinin genişliği

Yüksek (high water) ve düşük (low water) su seviyelerinin oluşması durumunda $dh/dt = 0$. Dolayısıyla yüksek ve düşük su seviyesi oluşması durumunda liman ağzı boyunca net bir akış yoktur.

Yoğunluk Kaynaklı Dönüş Akımları

Rotterdam Su Yolu'nda taşkın durumunda oluşan tuzluluk gel-git olayında suların çekilmesi (git) durumunda oluşan tuzluluktan daha büyük olmaktadır. Buradan taşkın sırasında akarsu tuzluluğunun akarsu üzerine kurulu limandaki tuzluluktan daha fazla olduğu sonucu çıkmaktadır. Sonuçta limandaki suyun tuzluluğu, sadece üzerine kurulduğu akarsuyun daha tuzlu suyu ile yer değiştirdiği zaman artış gösterebilmektedir. Liman basenindeki deniz tuzluluğu akarsuda meydana gelen tuzluluk değişimine verdiği tepki belli bir geçikmeyle meydana gelmektedir.

Yoğunluk farkından kaynaklı değişim akımları limandaki su kütlesi ile akarsu suyunun yer değiştirmesini sağlayan mekanizmalardan biri olmaktadır. Örneğin, limandaki suyun tuzluluğu akarsudaki suyun tuzluluğundan düşük tuzluluk değerine sahip ise akarsuya ait su tabana yakın bölgeden limana doğru girerken, liman suyu ise yüzeye yakın bir yerden üst akım şeklinde akarsuya girmektedir.

Bu durum en çok da, akarsudan limana doğru iç akışın sıfır değerini aldığı yüksek su seviyesinin oluşmasına yakın durum için dikkat çekici olmaktadır. Yüksek gel-git durumu için Botlek limanının ağzında meydana gelen akıntı şeması Şekil ek 6.6'da verilmektedir. Bu şemada tabana yakın bölgedeki iç akış ve yüzeye yakın bölgedeki dış akış kolaylıkla görülebilmektedir. Tabana yakın bölgedeki katı malzeme miktarı yüzeye yakın bölgedekinden daha fazla olduğu için, gel-git etkisine sahip haliçlerde, iç akış limana doğru katı malzeme taşınımının başlıca sebeplerinden biri olmaktadır (Allen ve Price (1959), Volmers (1976), Roelfzema ve van Os (1978)).

Gel-git kaynaklı akıntılar (6.11) denkleminde görüldüğü gibi net yoğunluk kaynaklı değişim akımlarının büyüklüğünü azaltıcı etki yaratmaktadırlar.

$$c_n = c - v \quad (6.11)$$

burada c_n : net yoğunluk kaynaklı akımın değeri.

Şekil ek 6.7 ve 6.8, c ve v 'nin (6.4) ve (6.10) denklemleriyle verildiği (6.11) denkleminin temel mantığını vermektedirler. Şekiller aşağıdaki akım rejimlerini göstermektedirler:

Rejim 1: yükselen gel-git etkisinde “tuzlu” akarsu suyu; tabandan limana doğru yoğunluk kaynaklı değişim akımını azaltıcı tuzlu su akışı

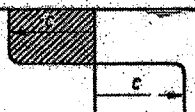
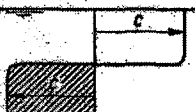


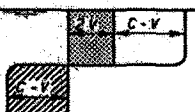
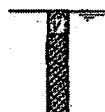

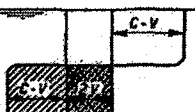



Rejim 2: yükselen gel-git etkisinde “tatlı” akarsu suyu; yüzeye yakın bölgeden limana doğru yoğunluk kaynaklı değişim akımını azaltıcı tatlı su akımı

Rejim 3: çekilen gel-git etkisinde “tuzlu” akarsu suyu; yüzeye yakın bölgeden liman dışına doğru yoğunluk kaynaklı değişim akımını azaltıcı tatlı su akımı

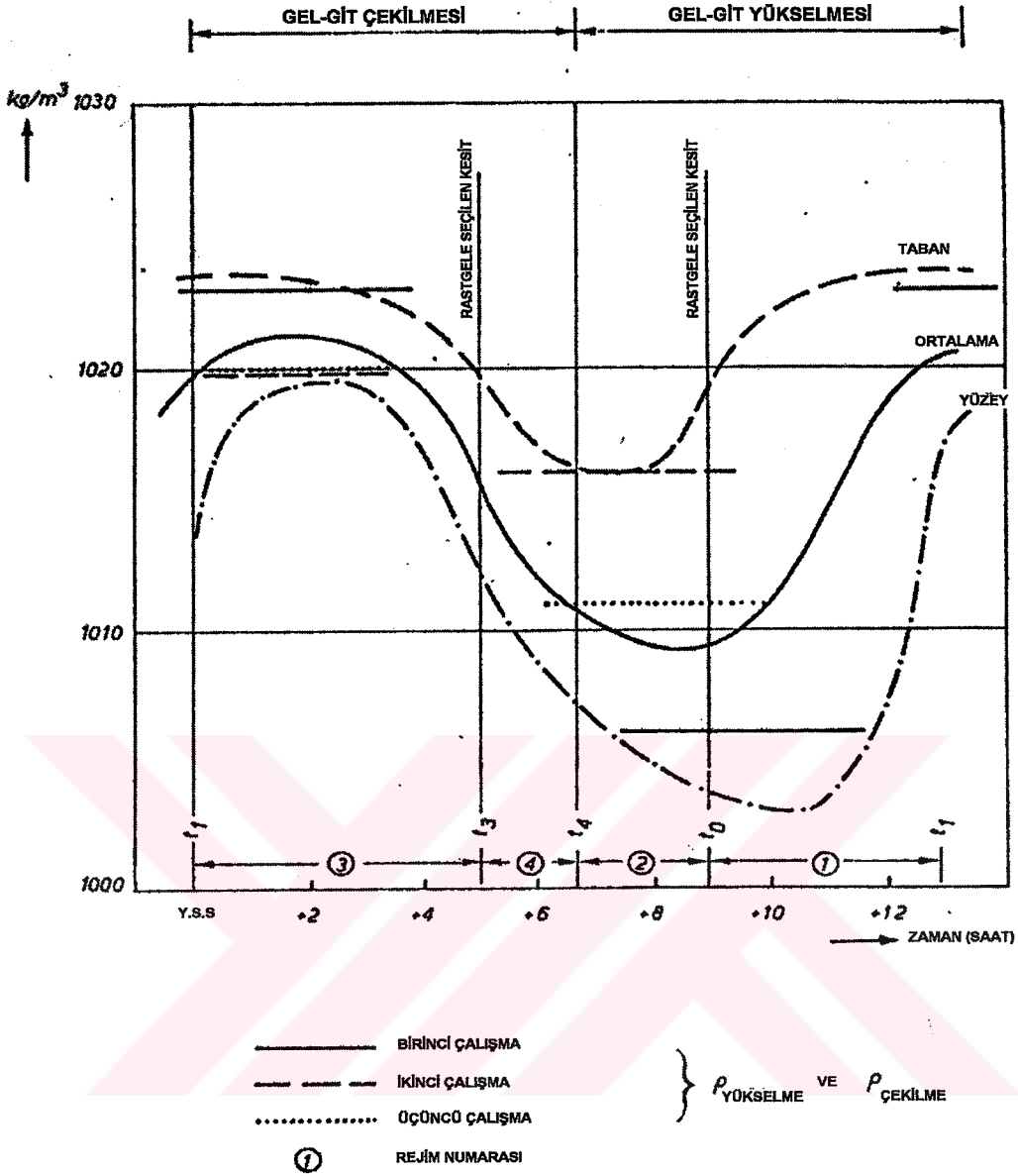
Rejim 4: çekilen gel-git etkisinde “tatlı” akarsu suyu; tabana yakın bölgeden liman dışına doğru yoğunluk kaynaklı değişim akımını azaltıcı tuzlu su akımı

Gel-git dalgasının yükselme ve alçalma periyodu kolaylıkla görülebilmektedir ($dh/dt > 0$ ve $dh/dt < 0$). Böylece rejim 1 ve 4'ün bitiş anını belirlemek kolay olmaktadır. Bu durumda akarsuya ne zaman tuzlu ve tatlı su girişi olduğu konusunda bir yargıya sahip olunmaktadır. Bu akarsu tuzluluğunda bir artış veya azalma meydana geldiği zaman olmaktadır (bknz. Şekil ek 6.8)

Aynı $\Delta\rho$ 'nun değerinin ne olduğu konusunda da bir yargıya sahip olunmaktadır. Üst limit belirlenirken, tabana yakın bölgedeki yoğunluk tuzlu akarsu periyodu boyunca meydana gelen yoğunluk, yüzeye yakın bölgedeki yoğunluk ise tatlı suya sahip akarsu periyodu boyunca meydana gelen yoğunluk alınarak elde edilmektedir (1.şema, Şekil ek 6.8). Alt limit belirlenirken ise yukarıda anlatılanların tersi yapılmaktadır (2.şema, Şekil ek 6.8). Bazı ortalamalar belirlenirken de her iki periyoda ait derinlik boyunca ortalamalar alınarak belirlenmektedir (3.şema, Şekil ek 6.8). Eğer yoğunluk değişimi tamamlanmışsa, yukarıdaki prosedür sonucunda elde edilen yoğunluk değerleri (6.11) denklemindeki c terimine ait değer belirlenmesinde kullanılmalıdır. Böylece genel olarak tuzlu akarsu periyodu sonunda liman tamamen tuzlu su ile dolarak veya tersi durumda tatlı akarsu periyodu sonunda değişim (su alış verişi) tamamlanmaktadır. Değişim sadece, (6.11) denklemindeki c teriminin değerini bulmak için farklı yoğunluk değerlerine sahip alt veya üst tabaka yoğunluklarından herhangi birinin kullanılması durumunda tamamlanmamış olur.

		Akarsu (tuzlu)	Akarsu (tatlı su)
			
YÜKSEK SU SEVİYESİ		REJİM 1 	REJİM 2 
DÜŞÜK SU SEVİYESİ		REJİM 3 	REJİM 4 
	 LİMAN DIŞINA DOĞRU AKINTI	 LİMAN İÇİNE DOĞRU AKINTI	 GEL-GİT DAĞILIMI (DOLMA VEYA BOŞALMA)

Şekil ek 6.7 Gel-git dalgasının dolması veya boşalması durumunda meydana gelen değişim akımının şeması ($(c-v)/c$ boyutsuzuyla çarpılarak küçültülmüş değerler)



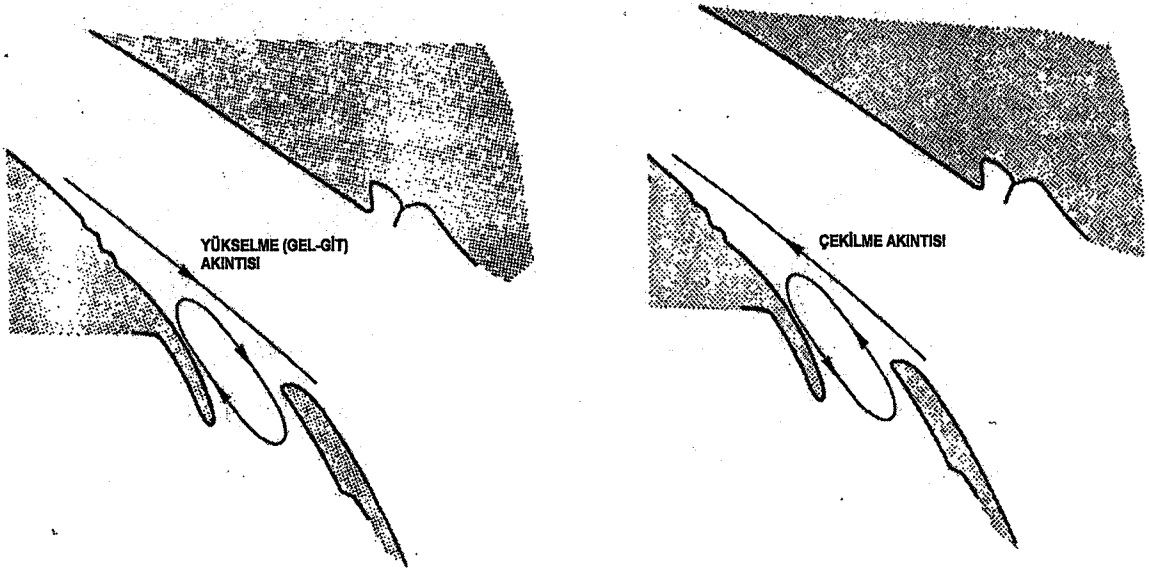
Şekil ek 6.8 Gel-git yükselmesi ve çekilmesi şeması

Akarsu akımının meydana getirdiği Eddyler

Yeterince güçlü bir akarsu akımı Şekil ek 6.9'dakine benzer eddyler yaratabilmektedir.

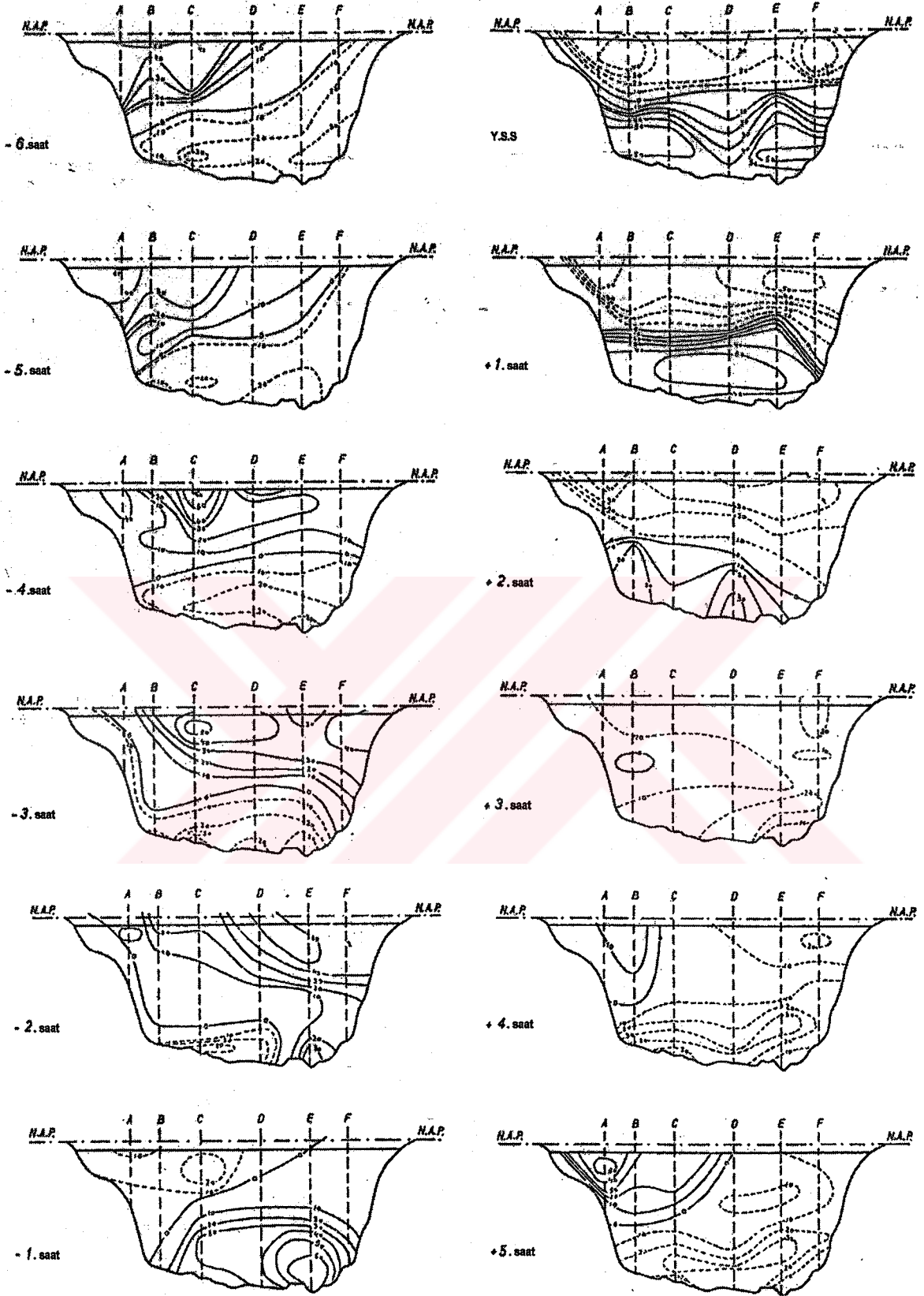
Gel-git'in birleşik etkileri, yoğunluk akıntıları ve eddyler

Yerleşimi Şekil ek 6.6'da verilen Botlek Limanı'nın girişindeki birleşik gel-git etkisi, yoğunluk akıntıları ve eddiler Şekil ek 6.10'da ve Çizelge 6.2'de görülmektedir. Bu şekil ve tablo bir gel-git dalgasının çeşitli anlarında hakim olan mekanizmanın ne olduğunu göstermektedir. Liman ağzındaki akım boyunca meydana gelen bu üç mekanizma ile ilgili dağılımların sonuçları Şekil ek 6.11'de özetlenmektedir

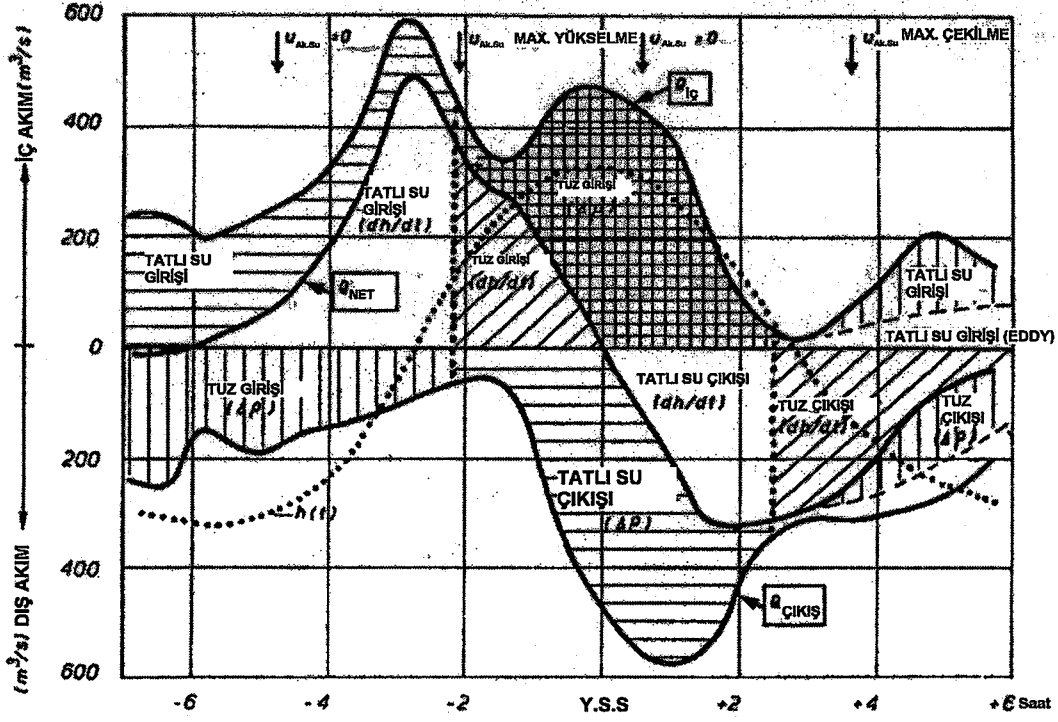


Şekil ek 6.9 Botlek Limanı'nın ağzında akarsu akımının oluşturduğu eddyler





Şekil ek 6.10 Botlek Liman ağzında yüksek gel-git seviyesine göre değişik zamanlardaki hız dağılımları(————— limana doğru akıntı, - - - - - liman dışına doğru akıntı)



Şekil ek 6.11 Botlek Liman ağzı boyunca net akım grafiği (ölçülmüş değerlerden)

Çizelge 6.2 Botlek Limanı ağzındaki akım yapısı

Zaman saat	u_{akarsu} m/s	dh/dt	Alt akıntı	Yüzey akıntısı
-6	-0,4	0	tuzlu su çıkışı (kenar etkisi)	İçeri doğru tatlı su (eddy)
-5	-0,1	0	tuzlu su çıkışı (kenar etkisi)	İçeri doğru tatlı su (eddy)
-4	0		tuzlu su çıkışı (kenar etkisi yok)	İçeri doğru tatlı su (eddy yok)
-3	+0,8	içerde max	tuzlu su çıkışı	tatlı su girişi
-2	+1,4	içerde max	tabanda az	tatlı su girişi (kenar etkisi)
-1.5				
-1	+1,0		tuzlu su girişi(kenar etkisi.)	tatlı su çıkışı
Y.S.S 0	+0,4	0	tuzlu su girişi	tatlı su çıkışı
+1	0		tuzlu su girişi	tatlı su çıkışı
+2	-0,6	dışarda max	tuzlu su girişi	tatlı su çıkışı
+3	-1,0	dışarda max	tuzlu su çıkışı	eddy oluşumu başlar
+4	-1,0		tuzlu su çıkışı	Eddy
+5	-0,6		tuzlu su çıkışı	biraz tatlı su girişi (eddy)
+6	-0,4	0	tuzlu su çıkışı (kenar etkisi)	tatlı su girişi (eddy)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 15.06.1978

Doğum yeri Sivas

Lise 1992-1995 Ahmet Vefik Paşa Lisesi

Lisans 1997-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek lisans 2001-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı,
Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2003-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi

