

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTANBUL BOĞAZI'NIN HİDRODİNAMİĞİ ve SAYISAL
MODELLENMESİ**

İnşaat Yük. Müh. Mehmet N. ÖZTÜRK

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

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi: 03.12.2010

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

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Bedri ALPAR (İÜ)

: Prof. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ)

: Prof. Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER (ODTÜ)

: Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xviii
ÖNSÖZ.....	xix
ÖZET	xx
ABSTRACT	
1 GİRİŞ.....	1
2 TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ	4
2.1 Tabakalı Akımların Hidroliği	4
2.1.1 Tabakalı Akımlar	4
2.1.2 Taşınım Türleri	5
2.1.3 Richardson Sayısı (R_i)	5
2.1.4 Tabakalı Akımlarda Froude Sayısı (Fr)	6
2.1.5 Arakesit Hidrodinamiği	7
2.1.6 Tabakalı Akımlarda Temel Denklemler	8
2.2 Türbülanslı Akımlar.....	10
2.2.1 Temel Türbülans Denklemleri.....	12
2.2.2 Türbülanslı Akımların Davranışlarının Belirlenmesi	14
2.2.3 Türbülanslı Akımların Modellenmesi.....	15
2.2.4 Türbülans Denklemlerinin Çözüm Yöntemleri ve Modelleme	15
3 İSTANBUL BOĞAZI'NIN HİDRODİNAMİĞİ.....	19
3.1 İstanbul Boğazı ve Konu ile İlgili Çalışmalar	19
3.2 İstanbul Boğazı İklimi	24
3.2.1 Akıntı İklimi	27
3.2.2 Boğaz'a Giren Akım Koşullarının Etkisi	42
3.2.3 Akıntı Davranış Analizi.....	46
3.2.4 Kısa Dönemli Etkilerin Sayısal Modellemesi.....	53
3.3 Sonuçlar	57
4 MODELLEME	59
4.1 Temel Kavramlar	59
4.1.2 Model Kavramları Arasındaki İlişki	61
4.1.3 Modellemenin Aşamaları.....	61
4.1.4 Modelin Kurulması.....	62
4.1.4.1 Kavramsal Model Oluşturmak.....	63
4.1.5 Model Analizi	66

4.1.5.1	Hassasiyet Analizi	67
4.1.5.2	Modelin Özelleştirilmesi (Identification)	69
4.1.5.3	Modelin Kalibrasyonu	69
4.1.5.4	Belirsizlik Analizi	73
4.1.5.5	Modelin Doğrulanması (Validasyonu)	74
4.1.5.6	Model Kapsamının Belirlenmesi	74
4.1.6	Modelin Kullanılması	74
4.1.7	Sonuçların Yorumlanması	75
4.2	Sayısal Model	76
4.2.1	Hidrodinamik Model	76
4.2.2	Yapılandırılmış Ağ (Mike 3 HD) Yaklaşımı	78
4.2.3	Yapılandırılmış Ağ Yaklaşımında Hidrodinamik Denklemlerin Sayısal Formülasyonu	79
4.2.4	Yapılandırılmamış Ağ (Mike 3 HD FM) Yaklaşımı	84
4.2.5	Yapılandırılmamış Ağ Yaklaşımında Hidrodinamik Denklemlerin Sayısal Formülasyonu	87
4.3	Sayısal Modelin Uygunluk Testi	90
4.3.1	Yapılandırılmış Ağ Sisteminde Dikdörtgen Kesit Hali	91
4.3.1.1	Basit Dikdörtgen Kesit Hali (1. Durum).....	95
4.3.1.2	Sınır Geometrisinin Etkisi (2. Durum)	117
4.3.1.3	Kesit Değişiminin Etkisi (3. Durum).....	127
4.3.1.4	Sınır ve Başlangıç Koşullarının Etkisi (4. Durum).....	153
4.3.2	Yapılandırılmamış Ağ Sisteminde Dikdörtgen Kesit Hali	168
4.3.2.1	Başlangıç ve Sınır Koşullarının Etkisi (5. Durum).....	169
4.3.2.2	Su Seviyesi Değişiminde Süre Etkisinin Belirlenmesi.....	192
5	İSTANBUL BOĞAZI HİDRODİNAMİĞİNİN SAYISAL MODELİ	198
5.1	Modelin Kalibrasyonu	198
5.1.1	Yapılandırılmamış Ağ Yapısının Analizi	198
5.1.2	Su Seviyesi Sınır Şartlarının Hybrid (Melez) Modellemesi (Yapay Sınır Ağları)	209
5.1.3	Yatay Ağ Sisteminin İnceltilmesi	226
5.1.4	Tuzluluk ve Sıcaklık Sınır Koşullarının Belirlenmesi.....	232
5.1.5	Düşeyde Üniform Ağ Sisteminin İnceltilmesi.....	237
5.1.6	Rüzgar Alanının Değerlendirilmesi	241
5.2	Sayısal Model Parametrelerinin Genetik Algoritma Yöntemiyle Kalibrasyonu	248
5.2.1	Sayısal Model Parametreleri	248
5.2.2	Genetik Algoritmalar Yöntemi	253
5.2.3	Kalibrasyon Parametrelerinin Modellenmesi ve Değerlendirme	255
5.3	Sayısal Modelin Doğrulanması (Validasyon).....	275
6	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	283
6.1	Sonuçlar	283
6.2	Öneriler	289
	KAYNAKLAR	290
	ÖZGEÇMİŞ	293

SİMGE LİSTESİ

A_i	i. hücrenin alan/hacim oranı
B	Batıklık parametresi
b	Bias değeri
\bar{c}	Zamansal ortalama konsantrasyon
$c_{\varepsilon 1}$	Akım alanı içerisindeki logaritmik hız tabakası için k ve ε terimlerinin modellenmesi ile elde edilen bir katsayı
$c_{\varepsilon 2}$	Ağ türbülans yaklaşımı kullanılarak yarı deneysel yoldan elde edilen bir sabit
$c_{3\varepsilon}$	Batıklık katsayısı
c_{μ}	Deneysel bir sabit
c_f	Taban sürtünme katsayısı
c_s	Deniz suyundaki ses hızı
d	Çap
d	Sakin durumdaki su derinliği
D_h	Yatay difüzyon katsayısı
D_i	i doğrultusundaki difüzyon katsayısı
D_k	Taşınım terimi
ds	Sınır boyunca integral değişkeni
D_S	Tuzluluk için dispersiyon katsayısı
D_T	Sıcaklık için dispersiyon katsayısı
D_v	Türbülans kaynaklı düşey yöndeki difüzyon katsayısı
F	Yatay difüzyon terimi
Fr_1	Üst tabakanın yoğunluk Froude sayısı
Fr_2	Alt tabakanın yoğunluk Froude sayısı
Fr_k	Türbülans Froude sayısı
F_u, F_v	Yatay gerilme terimleri
G	Yoğunluk Froude sayısı
g_i	Yerçekimi vektörü
h_1	Üst tabakanın kalınlığı
h_2	Alt tabakanın kalınlığı
I	Viskoz olmayan (konvektif) akı
k	Kinetik enerji
k_s	Mutlak pürüz yüksekliği
l_m	Makro uzunluk ölçeği
L_c	Karakteristik uzunluk ölçeği
n	Sınıra dik normal vektör (dışa doğru)
N	Batıklık frekansı
N	Giriş sayısı
n_j	j. yüzey alanına ait normal vektörü
NS	i. hücrenin yüzey sayısı
P	Türbülans kinetik enerjisi üretim oranı
P	Akışkan basıncı
p_a	Atmosfer basıncı
Re	Reynolds sayısı
R_i	Richardson sayısı
s	Tuz konsantrasyonu
S	Tuzluluk
S	Kaynak debisinin değeri
S_i	S'nin i. hücrenin merkezinde depolanan ortalama hesap değeri
S_{ij}	i, j doğrultusundaki birim açısız deformasyonu

S_s	Kaynak teriminin tuzluluğu
SS	Kullanıldığı denkleme göre değişen kaynak-kuyu terimini
S_{xx}	Gerilme akısının x-x doğrultusundaki bileşeni
S_{xy}	Gerilme akısının x-y doğrultusundaki bileşeni
S_{yx}	Gerilme akısının y-x doğrultusundaki bileşeni
S_{yy}	Gerilme akısının y-y doğrultusundaki bileşeni
T	Sıcaklık
t	Zaman
$T_{adv,x}$	Taşımanın olduğu yönde birim genişlikte meydana gelen advektif taşınım miktarı
$T(e)$	Reynolds Gerilme tensörü
T_s	Kaynak teriminin sıcaklığı
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	Akımın üç doğrultudaki (x,y,z) ortalama hız bileşenleri
u', v', w'	Akımın sırasıyla x, y, z doğrultularındaki çalkantı hız bileşenleri
u_{e1}	Alt tabakanın üst tabakaya karışım hızı
u_{e2}	Üst tabakanın alt tabakaya karışım hızı
u_i	Akımın x_i doğrultusundaki hızı
U_i	U'nun i. hücrenin merkezinde depolanan ortalama hesap değeri
u_m	Kırılan içsel dalgalar nedeniyle ara kesitte birim genişlikte birim zamanda alt ve üst tabaka arasında transfer edilen su miktarı
\bar{u}_x	Taşımanın olduğu doğrultudaki zamansal ortalama hız
u_s	Kaynak debisinin x yönündeki hızı
V	Bileşke hız vektörü
V	Viskoz akı
V_1	Üst tabakanın kesitsel ortalama hızı
V_2	Alt tabakanın kesitsel ortalama hızı
v_s	Kaynak debisinin y yönündeki hızı
W	Ağırlıklar matrisi
X	Giriş matrisi
z_0	Taban pürüzlülük ölçeği
β	Karışım bölgesinden uzakta yaratılan türbülans enerjisinin karışıma katkısını gösteren ve 1'den küçük olan bir katsayı
Δu	Arakesit üzerindeki hız farkı
$\Delta \Gamma_j$	j. ara yüzeyin uzunluk/alan oranı
Δh	Su seviyesi farkı
δ	Kroneker delta
ε	Enerji kaybı terimi
$\varepsilon_{z,0}$	Homojen akımdaki düşey eddy viskozitesi katsayısı
ε_x	x yönündeki skaler eddy viskozitesi katsayısı
ε_y	y yönündeki skaler eddy viskozitesi katsayısı
ε_z	z yönündeki skaler eddy viskozitesi katsayısı
φ	Coğrafi enlem
Ω	A_i 'yi tanımlayan integral değişkeni
Ω	Dünyanın açısal hızı
Ω_{ij}	Coriolis tensörünü
χ	Von Karman sabiti
λ	Coğrafi boylam
μ	Orantı sabiti veya viskozite katsayısı veya viskozite
μ_t	Eddy viskozitesi
η	Su yüzü profili
ν_T	Türbülans eddy viskozitesi

ν_t	DüŖey yöndeki eddy viskozitesi
$\nu_{t,i}$	i doğrultusundaki eddy viskozitesi
ρ	Birbirlerine yakın değerlere sahip alt ve üst tabakanın özgül kütlesi
ρ_1	Üst tabakanın özgül kütlesi
ρ_2	Alt tabakanın özgül kütlesi
ρ_0	Suyun referans alınan özgül kütlesi
τ_i	Arakesit kayma gerilmesi
$\tau_{i,t}$	Türbülansın momentum taşınımının yarattığı arakesit kayma gerilmesi
σ_ε	Türbülans enerji kaybı (ε) için düzeltme faktörü
σ_k	Türbülans kinetik enerjisi (k) için düzeltme faktörü
σ_T	Prandtl sayısı
Γ_i	i. hücrenin sınırı
ω	Dünyanın açısal hızı

KISALTIMA LİSTESİ

AD	Alternatif Doğrultu
ADI	Alternating Direction Implicit
ADP	Acoustic Doppler Profiler
ADCP	Aqua Dopp Current Profiler
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
DHI	Danimarka Hidrolik Enstitüsü
DNS	Doğrudan Sayısal Çözüm
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EU	Ötrifikasyon Modülü
FM	Flexible Mesh
FSM	Fatih Sultan Mehmet
GA	Genetik Algoritma
GRDC	Global Runoff Data Center
HD	Hidro Dinamik
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
LES	Büyük Eddy Simülasyonu
N	North
NNW	North North West
NS	North South
PA	Ağır Metal Modülü
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
RMSE	Root Mean Square Error
SHOD	Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi
S	South
SE	South East
SSE	South South East
SSW	South South West
SW	South West
W	West
WQ	Su Kalitesi Modülü
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 (a) Homojen akım ve (b) tabakalı akım şemaları (Abraham, 1983)	4
Şekil 2.2 Bir açık kanalda tek boyutlu, kararlı iki tabakalı akım şeması (Sümer vd., 1981)	6
Şekil 2.3 tabakalı bir akımda hız ve yoğunluk profilleri (Sümer vd., 1981).....	8
Şekil 2.4 Türbülanslı akımda hızın ortalama ve çalkantı bileşenleri.....	13
Şekil 2.5 Türbülans modellerinin şematik ifadesi	16
Şekil 3.1 Tabakalı akımın şematik gösterimi	19
Şekil 3.2 (a) İstanbul Boğazı'nın uydu görüntüsü (b) Tuna (Danube), Dinyeper ve Dinyester nehirlerinin Karadeniz'deki konumları	20
Şekil 3.3 Ölçüm istasyonlarının İstanbul Boğazı'ndaki konumları.....	26
Şekil 3.4 B istasyonunda farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki hızların zamanla değişimi.....	29
Şekil 3.5 İki tabakalı akım yapısı, 23.01.2005 10:01 (sol taraf Marmara Denizi'ni, sağ taraf ise Karadeniz tarafını göstermektedir)	30
Şekil 3.6 A istasyonunda farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki hızların zamanla değişimi.....	31
Şekil 3.7 C istasyonunda farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki hızların zamanla değişimi.....	32
Şekil 3.8 Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı ($\Delta\eta$)	34
Şekil 3.9 B istasyonunda 16.01.2005 20:01'deki derinlik boyunca tek tabakalı hız profili (sol taraf Marmara Denizi'ni sağ taraf ise Karadeniz'i göstermektedir)	35
Şekil 3.10 14-18.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar hızlarının zamanla değişimi	35
Şekil 3.11 14-18.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar yönlerinin zamanla değişimi	36
Şekil 3.12 14-18.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi.....	36
Şekil 3.13 B istasyonunda 16.01.2005 20:01'deki derinlik boyunca tek tabakalı hız profili (sol taraf Marmara Denizi'ni sağ taraf ise Karadeniz'i göstermektedir)	37
Şekil 3.14 25-28.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar hızlarının zamanla değişimi	38
Şekil 3.15 25-28.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar yönlerinin zamanla değişimi	38
Şekil 3.16 25-28.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi.....	39
Şekil 3.17 15.02.2005 tarihinde 22:01'de ölçülmüş üç tabakalı akım yapısı (sol taraf Marmara Denizi'ni, sağ taraf ise Karadeniz'i göstermektedir)	39
Şekil 3.18 B istasyonunda -1 m derinlikte kuzey ve güney doğrultusundaki yıllık akıntının aylık oluşma süreleri ve yüzdeleri	40
Şekil 3.19 B istasyonunda -1 m kuzey ve güney doğrultusundaki akıntı hızlarının aylık ortalamaları	41
Şekil 3.20 B istasyonunda -1 m'de kuzey güney doğrultusunda 1 m/s üzerinde meydana gelen akıntıların aylık periyotları ve yüzdeleri.....	41
Şekil 3.21 Karadeniz'e dönük tatlı su deşarjları (a) aylık ortalama deşarj değişimleri (Global Runoff Data Centre (GRDC), 2007) ve (b) Tuna'nın aylık ortalama deşarjları ve Karadeniz'in aylık ortalama su seviyesi	43
Şekil 3.22 Tuna'nın aylık maksimum ve minimum deşarjının oluşma olasılıklarının yıllık değişimi.....	44
Şekil 3.23 K ₀ istasyonunda derinlik boyuca tuzluluk değişimi grafiği	45
Şekil 3.24 M ₈ istasyonunda derinlik boyuca tuzluluk değişimi grafiği.....	45

Şekil 3.25 B istasyonunda -1 m'de su seviyesi farkı ile akıntı hızı arasındaki korelasyon grafiği.....	46
Şekil 3.26 B istasyonunda -5, -10, -15, -20 ve -25 m'lerdeki su seviyesi farkı ile akıntı hızları arasındaki korelasyonlar	47
Şekil 3.27 B istasyonunda değişik derinliklerdeki akıntı gülleri.....	48
Şekil 3.28 B istasyonunda -1 m'de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği..	50
Şekil 3.29 B istasyonunda -10 m'de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği	50
Şekil 3.30 B istasyonunda -20 m'de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği	51
Şekil 3.31 B istasyonunda -25 m'de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği	51
Şekil 3.32 -1 m'de A, B ve C istasyonlarında N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı grafiği.....	52
Şekil 3.33 -15 m'de A, B ve C istasyonlarında N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı grafiği.....	52
Şekil 3.34 -25 m'de A, B ve C istasyonlarında N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı grafiği.....	53
Şekil 3.35 Rüzgar hızının İstanbul Boğazı üzerindeki vektörel dağılımı.....	54
Şekil 3.36 Temmuz 2005 için İstanbul Boğazı'ndaki gel git durumu.....	56
Şekil 3.37 E istasyonu su seviyesi değişimi ölçüm ve model sonuçları.....	56
Şekil 3.38 Kısa dönemli etkilere ait model sonuçları, ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının aylık ortalamaları	57
Şekil 4.1 Farklı model kavramları arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.2 Model kurulması aşamasındaki kavramsal başlıklar ve karşılıklı ilişkileri	63
Şekil 4.3 Kavramsal model oluşturma aşamasındaki işlem basamakları	64
Şekil 4.4 Kalibrasyon aşamasındaki temel kavramlar ve aralarındaki ilişki.....	71
Şekil 4.5 Model sonuçlarının yorumlanması aşamasındaki işlemler	76
Şekil 4.6 Yapılandırılmış ağ yaklaşımına kullanılan ağ geometrisi	78
Şekil 4.7 Arakawa C ağ sistemi.....	80
Şekil 4.8 Hidrodinamik denklemlerin zamansal merkezileştirme şeması.....	80
Şekil 4.9 Süreklilik denklemi için yatay düzlemdeki (x-y) ağ ayrıklaştırması	81
Şekil 4.10 x doğrultusundaki hareket denklemi için ağ notasyonu	82
Şekil 4.11 Yapılandırılmamış ağ yaklaşımında ağ geometrileri	85
Şekil 4.12 Sayısal modelin uygunluk testinde izlenen yol	92
Şekil 4.13 Tabakalı akım modelinin uygunluk testi için kullanılan farklı dikdörtgen kanal geometrileri	94
Şekil 4.14 1.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	96
Şekil 4.15 1.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	97
Şekil 4.16 1.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	97
Şekil 4.17 1.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	98
Şekil 4.18 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri..	98
Şekil 4.19 2. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk değişimi.....	99
Şekil 4.20 2. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk değişimi.....	99
Şekil 4.21 2.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	100
Şekil 4.22 2.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	100
Şekil 4.23 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri	101
Şekil 4.24 4.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	102
Şekil 4.25 4.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	102
Şekil 4.26 4.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	103
Şekil 4.27 4.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	103
Şekil 4.28 4.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri.	103
Şekil 4.29 5.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı.....	104
Şekil 4.30 5.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	104

Şekil 4.31 5.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	105
Şekil 4.32 .model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	105
Şekil 4.33 5.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri.	105
Şekil 4.34 6.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	106
Şekil 4.35 6.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	107
Şekil 4.36 6.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	107
Şekil 4.37 6.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	108
Şekil 4.38 6. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri	108
Şekil 4.39 7.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	109
Şekil 4.40 7.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı	109
Şekil 4.41 7.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	110
Şekil 4.42 7.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili	110
Şekil 4.43 7. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri	111
Şekil 4.44 8.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	112
Şekil 4.45 8. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	112
Şekil 4.46 8.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	113
Şekil 4.47 8.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	113
Şekil 4.48 .model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri	114
Şekil 4.49 9.model alternatifi için 31,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	115
Şekil 4.50 9.model alternatifi için 32,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	115
Şekil 4.51 9.model alternatifi için 31,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	116
Şekil 4.52 9.model alternatifi için 32,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	116
Şekil 4.53 9.model alternatifi için 31,000. ve 32,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri	117
Şekil 4.54 1.model alterbatifi için 26,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	119
Şekil 4.55 1.model alternatifi için 27,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	119
Şekil 4.56 1.model alternatifi için 26,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	110
Şekil 4.57 1.model alternatifi için 27,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	120
Şekil 4.58 .model alternatifi için 26,000. ve 27,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri	121
Şekil 4.59 2.model alternatifi için 17,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	122
Şekil 4.60 2.model alternatifi için 18,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi	122
Şekil 4.61 2.model alternatifi için 17,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	123
Şekil 4.62 2. model alternatifi için 18,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı	123
Şekil 4.63 2. model alternatifi için 17,000. ve 18,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri	124
Şekil 4.64 4. model alternatifi için 1,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	125
Şekil 4.65 4. model alternatifi için 2,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	126
Şekil 4.66 5. model alternatifi için 6,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	126
Şekil 4.67 5. model alternatifi için 7,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	127
Şekil 4.68 1. alternatif için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	128
Şekil 4.69 1 alternatif için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	129
Şekil 4.70 1. alternatif için 99,000. s'deki boykesit hız dağılımı	131
Şekil 4.71 1. alternatif için 100,000. s'deki boykesit hız dağılımı	131
Şekil 4.72 1. alternatif için 99,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı	132
Şekil 4.73 1. alternatif için 100,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı	132
Şekil 4.74 1. alternatif için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri.....	133
Şekil 4.75 2. alternatif için 86,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	134
Şekil 4.76 2. alternatif için 87,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	134
Şekil 4.77 2. alternatif için 86,000. s'deki boykesit hız dağılımı	136
Şekil 4.78 2. alternatif için 87,000. s'deki boykesit hız dağılımı	136
Şekil 4.79 2. alternatif için 86,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız	

dağılımı	137
Şekil 4.80 2. alternatif için 87,000. s'de eşik bölgesindeki ($x=2,000-2,700$ m) boykesit hız dağılımı	137
Şekil 4.81 2. alternatif için 86,000. ve 87,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri	137
Şekil 4.82 3. alternatif için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	138
Şekil 4.83 3. alternatif için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	138
Şekil 4.84 3. alternatif için 99,000. s'deki boykesit hız dağılımı	140
Şekil 4.85 3. alternatif için 100,000. s'deki boykesit hız dağılımı	140
Şekil 4.86 3. alternatif için 99,000. s'de eşik bölgesindeki ($x=2,000-2,700$ m) boykesit hız dağılımı	142
Şekil 4.87 3. alternatif için 100,000. s'de eşik bölgesindeki ($x=2,000-2,700$ m) boykesit hız dağılımı	142
Şekil 4.88 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri ...	142
Şekil 4.89 4. model alternatifi için 68,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	144
Şekil 4.90 4. model alternatifi için 69,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	144
Şekil 4.91 4. model alternatifi için 68,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	145
Şekil 4.92 4. model alternatifi için 69,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	146
Şekil 4.93 4. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki su yüzü profilleri	146
Şekil 4.94 5. model alternatifi için 64,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	147
Şekil 4.95 5. model alternatifi için 65,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	147
Şekil 4.96 5. model alternatifi için 64,000.s'deki boykesit hız dağılımı	148
Şekil 4.97 5. model alternatifi için 65,000.s'deki boykesit hız dağılımı	149
Şekil 4.98 5. model alternatifi için 64,000. ve 65,000. s'deki su yüzü profilleri	149
Şekil 4.99 6. model alternatifi için 74,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	150
Şekil 4.100 6. model alternatifi için 75,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	150
Şekil 4.101 6. model alternatifi için 74,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	151
Şekil 4.102 6. model alternatifi için 75,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	152
Şekil 4.103 6. model alternatifi için 74,000. ve 75,000. s'deki su yüzü profilleri	152
Şekil 4.104 2-2 kesiti su seviyesi sınır şartı	154
Şekil 4.105 1-1 kesiti tuzluluk sınır şartı	155
Şekil 4.106 2-2 kesiti tuzluluk sınır şartı.....	155
Şekil 4.107 1. model alternatifi için 35,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	156
Şekil 4.108 1. model alternatifi için 36,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	156
Şekil 4.109 1. model alternatifi için 35,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	157
Şekil 4.110 1. model alternatifi için 36,000.s'deki boykesit hız dağılımı	157
Şekil 4.111 1. model alternatifi için 35,000. ve 36,000. s'deki su yüzü profilleri	158
Şekil 4.112 2. model alternatifi için 97,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	158
Şekil 4.113 2. model alternatifi için 98,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	159
Şekil 4.114 2. model alternatifi için 97,000.s'deki boykesit hız dağılımı	159
Şekil 4.115 2. model alternatifi için 98,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	160
Şekil 4.116 2. model alternatifi için 97,000. ve 98,000. s'deki su yüzü profilleri	160
Şekil 4.117 3. model alternatifi için 68,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	161
Şekil 4.118 3. model alternatifi için 69,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	161
Şekil 4.119 3. model alternatifi için 68,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	162
Şekil 4.120 3. model alternatifi için 69,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	162
Şekil 4.121 3. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki su yüzü profilleri	163
Şekil 4.122 4. model alternatifi için 66,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	163
Şekil 4.123 4. model alternatifi için 67,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	164
Şekil 4.124 4. model alternatifi için 66,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	164
Şekil 4.125 4. model alternatifi için 67,000.s'deki boykesit hız dağılımı.....	165
Şekil 4.126 4. model alternatifi için 66,000. ve 67,000. s'deki su yüzü profilleri	165

Şekil 4.127 Yapılandırılmış ağ kullanan üç boyutlu model yaklaşımı ile bir boyutlu analitik model sonuçlarına göre Δh -Q ilişkisi	168
Şekil 4.128 1. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	170
Şekil 4.129 1. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	170
Şekil 4.130 1. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı	171
Şekil 4.131 1. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı.....	171
Şekil 4.132 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri	172
Şekil 4.133 2. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	172
Şekil 4.134 2. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	173
Şekil 4.135 2. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı	173
Şekil 4.136 2. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı.....	174
Şekil 4.137 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri	174
Şekil 4.138 3. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	175
Şekil 4.139 3. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	175
Şekil 4.140 3. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı	176
Şekil 4.141 3. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı.....	176
Şekil 4.142 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri	176
Şekil 4.143 4. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	177
Şekil 4.144 4. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı.....	177
Şekil 4.145 4. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı	178
Şekil 4.146 4. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı.....	178
Şekil 4.147 4. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri	178
Şekil 4.148 5.alternatif için 2-2 sınırında tanımlanan su seviyesi (Δh) farkı sınır şartı	181
Şekil 4.149 5.alternatif için t=125,000. s'deki ($\Delta h=0.10$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	182
Şekil 4.150 5.alternatif için t=125,000. s'de ($\Delta h=0.10$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı.....	182
Şekil 4.151 5.alternatif için t=185,000. s'deki ($\Delta h=0.20$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	183
Şekil 4.152 5.alternatif için t=185,000. s'de ($\Delta h=0.20$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı.....	183
Şekil 4.153 5.alternatif için t=245,000. s'deki ($\Delta h=0.30$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	184
Şekil 4.154 5.alternatif için t=245,000. s'de ($\Delta h=0.30$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı	184
Şekil 4.155 5.alternatif için t=305,000. s'deki ($\Delta h=0.40$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	185
Şekil 4.156 5.alternatif için t=305,000. s'de ($\Delta h=0.40$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı.....	185
Şekil 4.157 5.alternatif için t=365,000. s'deki ($\Delta h=0.50$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	186
Şekil 4.158 5.alternatif için t=365,000. s'de ($\Delta h=0.50$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı.....	186
Şekil 4.159 5.alternatif için t=425,000. s'deki ($\Delta h=0.60$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	187
Şekil 4.160 5.alternatif için t=425,000. s'de ($\Delta h=0.60$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı.....	187
Şekil 4.161 5.alternatif için t=80,000. s'deki ($\Delta h=0.10$ m) boykesit tuzluluk dağılımı.....	188
Şekil 4.162 5.alternatif için t=80,000. s'de ($\Delta h=0.10$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı.....	188
Şekil 4.163 5.alternatif için farklı zaman adımlarındaki su yüzü profilleri.....	189
Şekil 4.164 Bir ve üç boyutlu model yaklaşımları için su seviyesi değişimine bağlı olarak tabaka debilerinde meydana gelen değişim grafiği.....	191
Şekil 4.165 1. ve 2. durumda su seviyesinin zamanla değişimi	193
Şekil 4.166 10.03.05 23:00 tarihinde (1. durumun başlangıç anı) Marmara Denizi girişinde	

ölçülmüş derinlik boyunca hız profili	193
Şekil 4.167 11.03.05 17:00 tarihinde (1. durumun sonu) Marmara Denizi girişinde ölçülmüş derinlik boyunca hız profili.....	193
Şekil 4.168 27.08.05 03:00 tarihinde (2. durumun başı) Marmara Denizi girişinde ölçülmüş derinlik boyunca hız profili.....	194
Şekil 4.169 30.08.05 15:00 tarihinde (2. durumun sonu) Marmara Denizi girişinde ölçülmüş derinlik boyunca hız profili.....	194
Şekil 4.170 6. ve 7.model alternatifleri için 2-2 sınırındaki su seviyesi sınır şartı.....	195
Şekil 4.171 6. alternatif için su seviyesi farkının 20 cm (t=105,000.s) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili	196
Şekil 4.172 6. alternatif için su seviyesi farkının 40 cm (t=140,000.s) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili	196
Şekil 4.173 7. alternatif için su seviyesi farkının 20 cm (t=120,000.s) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili	197
Şekil 4.174 7. alternatif için su seviyesi farkının 40 cm (t=180,000.s) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili	197
Şekil 5.1 Sayısal modelin kalibrasyonunda izlenen yola ait akış şeması	198
Şekil 5.2 I. ve II. model alternatifleri için kullanılan yatay ağ ayrıklaştırılması (üçgen).....	200
Şekil 5.3 III. ve IV. model alternatifleri için kullanılan yatay ağ ayrıklaştırılması (hybrid)..	201
Şekil 5.4 Derinlik boyunca üniform ve üniform olmayan ortogonal ağ yapısı	202
Şekil 5.5 -1 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	204
Şekil 5.6 -1 m'de model alternatifi sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005).....	204
Şekil 5.7 -1.7 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	205
Şekil 5.8 -1.7 m'de model alternatifi sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005).....	205
Şekil 5.9 -5 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	206
Şekil 5.10 -5 m'de model alternatifi sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005).....	206
Şekil 5.11 -10 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	207
Şekil 5.12 -10 m'de model alternatifi sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005).....	207
Şekil 5.13 -20 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	208
Şekil 5.14 -20 m'de model alternatifi sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005).....	208
Şekil 5.15 Nöron modeli.....	210
Şekil 5.16 Biyolojik ve yapay sinir hücresi.....	211
Şekil 5.17 İstanbul Boğazı'ndaki ölçüm istasyonlarının konumları ve YSA ile su seviyesi sınır şartlarının belirlenmesi sırasında izlenen yola ait akış diyagramı	214
Şekil 5.18 Hidrodinamik sayısal modelden elde edilen I ve II noktalarındaki su seviyelerinin zamanla değişimi(22.02-01.05.2005)	215
Şekil 5.19 Marmara sınırında (M) su seviyesi ölçüm verileri ile YSA verileri arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)	215
Şekil 5.20 Karadeniz sınırında (K) su seviyesi ölçüm verileri ile YSA verileri arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)	216
Şekil 5.21 Hybrid yaklaşımla YSA kullanılarak modellenmiş M ve K'daki yeni su seviyesi	

sınır şartı (22.02-01.05.2005).....	217
Şekil 5.22 I noktası için hidrodinamik sayısal model ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon (22.02-01.05.2005).....	218
Şekil 5.23 II noktası için hidrodinamik sayısal model ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon (22.02-01.05.2005).....	219
Şekil 5.24 -1 m'de II., V. VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçümlere ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	220
Şekil 5.25 -1 m'de II., V. VI ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005).....	220
Şekil 5.26 -1.7 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçümlere ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	221
Şekil 5.27 -1.7 m'de II., V. ve VI. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005).....	221
Şekil 5.28 -5 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifine ve ölçümlere ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	222
Şekil 5.29 -5 m'de II., V. VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005).....	222
Şekil 5.30 -10 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ve ölçüm sonuçlarına ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	223
Şekil 5.31 -10 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005).....	223
Şekil 5.32 -15 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ve ölçüm sonuçlarına ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	224
Şekil 5.33 -15 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005).....	224
Şekil 5.34 -20 m'de II., V., VI ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarına ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005).....	225
Şekil 5.35 -20 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005).....	225
Şekil 5.36 VIII., IX. ve X. model alternatiflerinde kullanılan hassas ağ geometrileri.....	227
Şekil 5.37 -1 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005).....	228
Şekil 5.38 -5 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005).....	228
Şekil 5.39 -5 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005).....	229
Şekil 5.40 -23 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005).....	229
Şekil 5.41 -1 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005).....	230
Şekil 5.42 -5 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005).....	231
Şekil 5.43 -10 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005).....	231
Şekil 5.44 -15 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005).....	231
Şekil 5.45 -20 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005).....	232
Şekil 5.46 İstanbul Boğazı'ndaki yıllık ortalama veriler kullanılarak oluşturulmuş sıcaklık ve tuzluluk sınır şartları.....	233
Şekil 5.47 İSKİ (2004) verileri kullanılarak aylık ortalamalar şeklinde oluşturulmuş XII. model alternatifine ait tuzluluk sınır şartı.....	234
Şekil 5.48 İSKİ (2004) verileri kullanılarak aylık ortalamalar şeklinde oluşturulmuş XII. model alternatifine ait sıcaklık sınır şartı.....	234
Şekil 5.49 -1 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005).....	235

Şekil 5.50 -5 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005).....	235
Şekil 5.51 -10 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005).....	236
Şekil 5.52 -15 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005).....	236
Şekil 5.53 -20 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005).....	236
Şekil 5.54 -1 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005).....	238
Şekil 5.55 -5 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005).....	239
Şekil 5.56 -10 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005).....	239
Şekil 5.57 -15 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005).....	240
Şekil 5.58 -20 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005).....	240
Şekil 5.59 -23 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005).....	241
Şekil 5.60 Şubat-Mart 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi.....	243
Şekil 5.61 Nisan-Mayıs 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi.....	243
Şekil 5.62 Haziran-Temmuz-Ağustos 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi	244
Şekil 5.63 Şubat-Mart 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki v rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi.....	244
Şekil 5.64 Nisan-Mayıs 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki v rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi.....	245
Şekil 5.65 Haziran-Temmuz-Ağustos 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki v rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi	245
Şekil 5.66 Genetik algoritmanın genel akış şeması.....	255
Şekil 5.67 İstanbul Boğazı'nın kalibrasyonunda denenen sayısal modellere ait RMSE değerlerinin değişimi	273
Şekil 5.68 5. ve son model alternatifine ait ilk 7 model alternatifi için -5, -10 ve -15 m'lerdeki RMSE değerlerinin değişimi.....	273
Şekil 5.69 (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m için ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi.....	274
Şekil 5.70 1. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m'de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi	276
Şekil 5.71 2. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m'de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi	277
Şekil 5.72 3. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m'de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi	278
Şekil 5.73 4. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m'de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi	279
Şekil 5.74 A istasyonunda Mart 2005'de (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m'de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi.....	281
Şekil 5.75 C istasyonunda Mart 2005'de (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m'de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi	282

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 İstanbul Boğazı'ndaki ölçüm istasyonları ve ölçümü yapılan akım karakteristikleri.....	25
Çizelge 3.2 14-18.01.2005 tarihindeki fırtınaya ait fırtına karakteristikleri.....	36
Çizelge 3.3 14-18.01.2005 tarihindeki fırtınaya ait fırtına karakteristikleri.....	37
Çizelge 3.4 Harmonik gel git bileşenleri.....	55
Çizelge 4.1 Basit Dikdörtgen kanal kullanılarak oluşturulan model alternatiflerine ait parametreler ve değerleri	95
Çizelge 4.2 Sınırlarda ani ve kademeli genişleme hali için tanımlanan hidrodinamik parametreler ve değerleri	118
Çizelge 4.3 Açık sınırlarda farklı ani genişleme durumları için oluşturulan modellere ait hidrodinamik parametreler ve değerleri.....	125
Çizelge 4.4 4.4 Eşikli kanal durumu için model parametreleri	128
Çizelge 4.5 1. model alternatifi için 99,000. s'deki akım karakteristikleri	130
Çizelge 4.6 1. model alternatifi için 100,000. s'deki akım karakteristikleri	130
Çizelge 4.7 86,000. s'deki akım karakteristikleri.....	135
Çizelge 4.8 87,000. s'deki akım karakteristikleri.....	135
Çizelge 4.9 3. model alternatifi için 99,000. s'deki akım karakteristikleri	139
Çizelge 4.10 3. model alternatifi için 100,000. s'deki akım karakteristikleri	139
Çizelge 4.11 Model alternatifleri ve model parametrelerine ait değerler.....	143
Çizelge 4.12 Basit Dikdörtgen kanal kullanılarak oluşturulan model alternatiflerine ait sayısal parametreler ve değerleri	153
Çizelge 4.13 Yapılandırılmış ağ kullanılan üç boyutlu model alternatifleri için su seviyesi değişimine bağlı olarak tabakalara ait akım karakteristiklerinin değişimi	166
Çizelge 4.14 Bir ve üç boyutlu modellerde kullanılan kanal geometrileri ve tanımlanan sınır şartları	167
Çizelge 4.15 1., 2., 3. ve 4. model alternatiflerine ait sayısal parametreler ve değerleri.....	169
Çizelge 4.16 Yapılandırılmamış ağ kullanılarak $\Delta h=0.60$ m için kurulan modele ait sayısal parametreler ve değerleri	180
Çizelge 4.17 5. model alternatifi ($\Delta h=0.60$ m) için kanal ortası kesitteki ($x=16,000$ m) tabakalı akım karakteristikleri	189
Çizelge 4.18 Bir ve üç boyutlu modellerde kullanılan kanal geometrileri ve tanımlanan sınır şartları	190
Çizelge 4.19 seviyesi değişimine ait temel karakteristikler	192
Çizelge 4.20 Yapılandırılmamış ağ kullanılarak $\Delta h=0.40$ m için kurulan modele ait hidrodinamik parametreler ve değerleri.....	195
Çizelge 5.1 Model alternatifleri için yatayda ve düşeyde tanımlanan ağ geometrileri	202
Çizelge 5.2 1., 2., 3. ve 4. model alternatiflerine ait hidrodinamik parametreler ve aldıkları değerler	203
Çizelge 5.3 Farklı derinliklerde model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon değerleri (R).....	209
Çizelge 5.4 V., VI. ve VII. model alternatifleri için tanımlanan su seviyesi (η) sınır şartları.....	219
Çizelge 5.5 VIII., IX. ve X. model alternatiflerine ait ağ yapısı	227
Çizelge 5.6 XI. ve XII. model alternatiflerinde kullanılan model geometrileri ile tuzluluk ve sıcaklık sınır şartları.....	233
Çizelge 5.7 XI. ve XII. model alternatiflerinde kullanılan model geometrileri ile tuzluluk ve sıcaklık sınır şartları.....	238
Çizelge 5.8 Bölüm 5.1'de uygunluğu analiz edilmiş model parametreleri ve değerleri	247
Çizelge 5.9 Sayısal modelin kalibrasyon parametreleri ve değer aralıkları	249
Çizelge 5.10 Farklı araştırmacıların İstanbul Boğazı için dikkate aldıkları taban sürtünme	

katsayıları (Zaremba ve diğ., 2003)	250
Çizelge 5.11 k-ε türbülans modeline ait sabitler (Rodi, 1980)	252
Çizelge 5.12 Başlangıç popülasyonu bireyleri	257
Çizelge 5.13 -5 m için başlangıç popülasyonunun uygunluk değerlerine göre sıralaması.....	258
Çizelge 5.14 -10 m için başlangıç popülasyonunun uygunluk değerlerine göre sıralaması ..	258
Çizelge 5.15 -15 m için başlangıç popülasyonunun uygunluk değerlerine göre sıralaması ..	258
Çizelge 5.16 Çaprazlama işlemi sonrası ortaya çıkan yeni durum.....	260
Çizelge 5.17 Mutasyona işlemi sonrası oluşan yeni popülasyon	260
Çizelge 5.18 1. iterasyona ait model alternatifleri için -5 , -10 ve -15 m'lerdeki uygunluk sıralaması	261
Çizelge 5.19 2. iterasyona ait çaprazlama işlemi sonrası ortaya çıkan yeni durum	262
Çizelge 5.20 Mutasyon işlemi sonunda ortaya çıkan yeni bireyler	263
Çizelge 5.21 2. itersayon sonunda modellerin uygunluk dağılımı	264
Çizelge 5.22 2. iterasyon sonunda en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 modele ait model parametreleri	264
Çizelge 5.23 3. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri	265
Çizelge 5.24 3. itersayon sonunda modellerin uygunluklarına göre dağılımı	265
Çizelge 5.25 3. iterasyon sonunda en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 modele ait model parametreleri	267
Çizelge 5.26 4. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri	267
Çizelge 5.27 4. itersayon sonunda modellerin uygunluklarına göre dağılımı	268
Çizelge 5.28 4. iterasyon sonunda en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 modele ait model parametreleri	269
Çizelge 5.29 5. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri	269
Çizelge 5.30 5. iterasyon sonunda modellerin uygunluklarına göre dağılımı	270
Çizelge 5.31 Sayısal modelin kalibrasyonu amacıyla oluşturulan 5 adet model alternatifine ait -5, -10 ve -15 m'ler için 1. ile 7. sıradaki model alternatifleri arasında hız farkı	271
Çizelge 5.32 Genetik algoritmalar yöntemi kullanılarak İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonu amacıyla denenmiş model alternatifleri ve RMSE değerleri	271
Çizelge 5.33 Sayısal modelin geçerliliğini test etmek amacıyla dikkate alınan dönemler ve bu dönemler için oluşturulan modeller için -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki RMSE değerleri	275

ÖNSÖZ

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

Yüksek lisans ve doktora öğrenimim boyunca ihtiyaç duyduğum bilgi ve desteği benden esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Esin Çevik'e teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmam boyunca bilgi, tecrübe ve katkılarını benden esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Bedri Alpar'a, Prof. Dr. Ahmet Cevdet Yalçın'er'e ve Dr. Işıkhan Güler'e teşekkür erdim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, desteklerinden dolayı YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir Hidrografi Oşinografi Dairesi Başkanlığı, Avrasya Marmaray Konsorsiyumu, Marmaray Bölge Müdürü Dr. Haluk İbrahim Özmen'e teşekkür ederim.

Aynı çalışma ortamını paylaştığım ve desteklerini benden esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu çalışmamı beni koşulsuz şartsız seven ve destekleyen aileme adıyorum.

ÖZET

Boğazlar farklı akışkan özelliklerine sahip iki komşu denizi birbirine bağlayan su yollarıdır. Komşu denizler arasındaki yoğunluk (sıcaklık, tuzluluk vs.) ve su seviyesi farkı gibi farklı akışkan özellikleri boğazlarda genellikle iki tabakalı bir akım yapısının oluşmasına yol açmaktadır. Boğaz akımlarının dinamiğinin doğru anlaşılması ulaştırma, çevresel kirlilik, atık su deşarjı ve balıkçılık açısından büyük önem taşımaktadır.

Marmara Denizi ile Karadeniz'i birbirine bağlayan 31 km uzunluğundaki dar ve uzun bir su yolu olan İstanbul Boğazı tipik bir tabakalı akım yapısına sahiptir. Tabakalı akım yapısını kontrol eden esas mekanizma Marmara Denizi ve Karadeniz arasındaki yoğunluk ve su seviyesi farklarıdır. Daha yoğun olan Akdeniz suyu ile daha az yoğun olan Karadeniz suyu Boğaz boyunca bir değişim akımı oluşmasına yol açmaktadır.

Bu güne kadar İstanbul Boğazı'nın tabakalı akım yapısını modellemeye dönük çok sayıda sayısal model yaklaşımı söz konusu olmuştur. Ancak bu yaklaşımlardan hiç biri üç boyutlu olmadığı gibi elde edilen model sonuçlarının kalitesinin kıyaslanabileceği geniş çaplı ölçüm verilerinden de yoksundu. Bu çalışmada Mike 3 Flow Model FM (HD) paket programı kullanılarak İstanbul Boğazı akımı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sayısal modelin kalibrasyonunda genetik algoritmalar yöntemi kullanılmış ve kalibrasyon parametresi olarak taban pürüzlülük katsayısı (c_f), batıklık parametresi (c_{e3}) ve türbülans Prandtl sayısı (σ_T) dikkate alınmıştır. Kalibre edilen sayısal modelin gerek zamansal gerekse de konumsal olarak doğrulaması (validasyon) yapılmıştır. Zamansal doğrulama için kalibrasyon dönemi dışındaki Eylül 2004 ile 2005 arasındaki dört farklı dönem için Boğaz'ın akıntı yapısı modellenmiştir. Konumsal doğrulama için ise kalibre edilmiş model sonuçları kalibrasyonda kullanılmayan farklı bir akıntı ölçüm istasyonu sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hem kalibrasyon dönemine ait sonuçlar hem de konumsal ve zamansal doğrulama dönemlerine ait sonuçlar ölçümler ile büyük bir uyum göstermiştir. Kalibre edilen ve doğrulaması yapılan model sonuçlarına ait bileşke akıntı hızı için RMSE (Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü) değerleri cm/s mertebesinde değerler almıştır

Keywords: Tabakalı akımlar, İstanbul Boğazı, Mike 3 Flow Model FM, genetik algoritmalar, kalibrasyon, doğrulama

ABSTRACT

The Numerical Modeling of the Bosphorus Strait Flow Structure

A sea strait is a channel connecting two basins of different properties. The difference may arise owing to difference in density (salinity, temperature and/or sediment concentration) and water level difference. As a result of these differences a two layer flow structure occur generally in that kind of waterway. A proper understanding of the Dynamics of sea strait flow is very important associated with navigation, environmental pollution, waste-water discharge and fishing problems.

A typical example of the stratified flows is the Bosphorus. The Bosphorus is a long and narrow strait with a length of 31 km, connecting the Marmara Sea and the Black Sea. The stratified structure is largely controlled by two predominant mechanisms, namely the density and the water level differences between the Marmara Sea and the Black Sea. The Exchange occurs between more dense the Mediterranean water and the Black Sea water throughout the strait.

There are many numerical models attempting to explain the stratified flow structure of the Bosphorus. But none of them is three-dimensional. In this study, a three dimensional hydrodynamic model of the Bosphorus is performed by using Mike 3 Flow Model FM (HD) package program. The model were calibrated selecting the drag coefficient (c_f), the buoyancy parameter ($c_{\epsilon 3}$) and the turbulence Prandtl number (σ_T) as calibration parameters. The numerical model was also validated both temporally and spatially. For temporal validation, the results of the model were compared to the results of the current station which was used at calibration for the four different term of 2005. As to spatial validation the model results were compared to the different current station. Both the model results of the calibration and the validation terms are in good agreement with the measurements. The RMS (root mean square) errors of the calibrated and validated models vary only in the range of a few fold of 10 cm/s.

Keywords: Stratified flow, Bosphorus, Mike 3 Flow Model FM, genetic algorithms, calibration, validation

1. GİRİŞ

Çanakkale Boğazı ve Marmara Denizi ile birlikte “Türk Boğazlar” sisteminin bir parçası olan İstanbul Boğazı Karadeniz’i Marmara Denizi’ne ve dolayısıyla Akdeniz’e bağlayan tek deniz geçidi olması nedeniyle sadece ülkemiz için değil Karadeniz’e komşu ülkeler için de oldukça hayati bir önem taşımaktadır.

İstanbul Boğazı kıyıları tarih boyunca aralarında Doğu Roma İmparatorluğu ve Osmanlı İmparatorluğu’nun da bulunduğu değişik uygarlıklara yurt olmuştur. Parçası olduğu uygarlıklarda tarihsel, ekonomik ve stratejik önemini her zaman korumuş olan İstanbul Boğazı genç cumhuriyetimizin de en büyük kenti olan İstanbul’un içinden geçen doğal bir su yolu olması nedeniyle ülkemizin yurtdışı tanıtımlarında baş elemanlardan biri olarak kullanılmaktadır. Ülkemiz dışında Karadeniz’e komşu olan diğer ülkeler için de açık denizlerle tek su yolu bağlantısı olan İstanbul Boğazı, uluslararası deniz taşımacılığının yapıldığı en dar ve doğal su yolu olma özelliğini de taşımaktadır.

Yaklaşık 31 km uzunluğuna sahip olan ve genel olarak kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanan İstanbul Boğazı akış yolu boyunca akarsular gibi menderesler çizmekte ve uzunluğu boyunca farklı genişlik değerleri almaktadır. İstanbul Boğazı’nın genişliği ortalama 1.6 km olup en dar yerinde bu değer 0.7 km’ye düşmektedir. Boğaz dünya üzerindeki benzer su yolları içerisinde genişlik/uzunluk oranı en küçük olanlarından biridir. İstanbul Boğazı’nın derinliği uzunluğu boyunca önemli değişiklikler göstermektedir. Ortalama derinlik 40 m civarında olmakla birlikte derinliğin 100 m’yi aştığı çukurlar da mevcuttur. Boğaz’ın güney girişinin 3 km kadar kuzeyinde derinliğin 30 m civarında olduğu bir eşik bulunmaktadır. Karadeniz çıkışında ise Boğaz’ın ortasında dar ve derin bir kanal bulunmaktadır.

İstanbul Boğazı esas olarak iki tabakalı bir akım yapısına sahiptir. Bunlar üst ve alt tabaka akımlarıdır.

Üst tabaka akımı esas olarak Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkından kaynaklanmaktadır. Karadeniz’e dökülen nehirlerin (Tuna, Dinyeper, Dinyester) getirdiği tatlı su ile bu denize düşen yağışın toplamı denizden olan buharlaşmadan fazla olduğu için meydana gelen su fazlalığı Karadeniz’den Marmara’ya doğru bir akım oluşmasına neden olmaktadır.

Alt tabaka akımı ise esas faktörlerden biri olan Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki yoğunluk farkından kaynaklanmaktadır. Marmara Denizi’nin hidrolojik kaybı Karadeniz’e

göre daha fazla olduğu için iki deniz arasında tuzluluk farkı oluşmaktadır. Zamanla değişen bir karaktere sahip olmakla birlikte Marmara Denizi'nin ortalama tuzluluğu 38 psu, Karadeniz'inki ise 18 psu civarında değerler almaktadır. Tuzluluklar arasındaki bu fark Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru alttan bir yoğunluk akımı oluşmasına neden olmaktadır. Böylece iki tabakalı bir akım sistemi oluşmaktadır.

Öte yandan Karadeniz, Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'ndaki meteorolojik koşullara bağlı olarak Boğaz boyunca kuzey veya güney yönünde tamamen tek tabakalı homojen akım halleri de görülebilmektedir.

Avrupa'nın içinden geçerek sularını Karadeniz'e boşaltan akarsular (Tuna, Dinyeper, Dinyester vs.) geçtikleri ülkelerin atık sularını da Karadeniz'e taşımaktadır. Boğaz'ın akıntı rejiminden dolayı bu atıklar önce Boğaz sularına girmekte, oradan da Marmara Denizi'ne ulaşmaktadır. Bundan dolayı İstanbul Boğazı yıllar boyunca artarak devam eden bir kirlilik tehditiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu kirliliğe kıyısı boyunca var olan yerleşim bölgelerinin neden olduğu kirlilik ve Marmara Denizi üzerinden gelen seyrelmiş atık suların yol açtığı kirlilik de eklenince Boğaz'ın kirliliği alarm verir bir düzeye çıkmaktadır.

İstanbul Boğazı için çok önemli bir kirlilik tehditi de tehlikeli yük taşıyan tankerlerdir. Dünya yüzeyindeki tüm ülkelerin enerji gereksinimleri ve teknik gelişmeleri deniz yüzeyinden çok büyük miktarlarda petrol ürünlerinin taşınmasını zorunlu kılmaktadır. Denizlerde meydana gelen tanker kazaları denizlerin üzerinde yıllarca kaldırılamayacak kirliliğin oluşmasına neden olabilmektedir.

İstanbul Boğazı'ndan Montrö Sözleşmesi'nin imzalandığı 1936 yılında ortalama yılda 4 700 gemi geçerken, Denizcilik Müsteşarlığı'nın verilerine göre; bu rakam günümüzde yılda yaklaşık 55 bin gemi, 8 bin tankere ulaşmış olup; bu geçişler esnasında yaklaşık 150 milyon ton tehlikeli yük taşınmaktadır.

Türkiye'nin en önemli yerleşim birimi olan İstanbul açısından gerek deniz araçlarının kontrollü seyri gerekse su kalitesinin iyi bilinmesi Boğaz'daki seyir, can, mal ve çevre güvenliğinin sağlanması ve de deniz kirliliğinin önlenmesi açısından yaşamsal önem taşımaktadır. Seyir güvenliği için İstanbul Boğazı'nın akıntı yapısının yeterince iyi ve detaylı bilinmesi gerekmektedir. Bunun için yapılması gereken konumsal akıntı hız ölçümlerinin yanı sıra Boğaz'ın tamamındaki akıntı durumunun üç boyutlu olarak bilinmesi ve hatta ileri zamanlı doğru tahminlerin yapılmasıdır. Bu da ancak yapılacak doğru bir modelleme çalışması ile mümkündür

Bu çalışmada İstanbul Boğazı akımı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışma beş bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde tabakalı akımların genel teorisi özetlenmiş, tabakalı akımlara ait temel kavramlar ve hareket denklemleri açıklanmıştır. Yine bu bölümde türbülanslı akımların genel özellikleri ile farklı türbülans modelleme tekniklerinin avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde İstanbul Boğazı'nda Eylül 2004 ile Ocak 2006 tarihleri arasında Ulaştırma Bakanlığı tarafından Marmaray tüp geçit inşaatı kapsamında yapılmış olan 16 aylık akıntı ve su seviyesi ölçümleri ile meteorolojik ölçümler değerlendirilmiş ve Boğaz'ın akıntı yapısı analiz edilmiştir. Boğaz'ın güneyindeki üç adet akıntı ölçüm istasyonuna ait veriler kullanılarak ölçüm dönemi boyunca farklı derinliklerdeki akıntı hızlarının zamansal değişimi belirlenmiştir. Ayrıca istasyonlardan en uygun konumda olanına ait akıntı verileri kullanılarak farklı derinlikler için akıntı hızlarının 16 aylık dönem boyunca yönsel dağılımını ifade eden akıntı gülleri çıkartılmıştır.

Dördüncü bölüm ise üç alt başlıktan oluşturulmuştur. İlk olarak bir modelleme çalışmasına ait temel kavramlar ile süreçler tanımlanarak, süreçler arasındaki ilişkiler açıklanmıştır. İkinci alt başlık altında ise bu çalışmanın sayısal modelleme aşamasında dikkate alınmış olan iki farklı çözüm yöntemine (yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağ yaklaşımı) ait temel kabuller ve yaklaşımlar açıklanmıştır. Bu bölümde son olarak İstanbul Boğazı boyutlarına sahip basit dikdörtgen bir kanal ve iki farklı çözüm yöntemi dikkate alınarak sayısal modelin uygunluğu test edilmiştir.

Beşinci bölümde ise önceki bölümlerdeki deneyimler ışığında İstanbul Boğazı sayısal modeli kurulmuş ve İstanbul Boğazı'nın güneyindeki akıntı ölçüm istasyonunun Mart 2005'deki verileri kullanılarak sayısal model kalibre edilmiştir. Ayrıca kalibrasyon aşamasından elde edilen kalibrasyon parametrelerine ait uygun değerler kullanılarak kalibrasyon döneminden farklı üç dönem için sayısal modelin geçerliliği de test edilmiştir.

Altıncı bölümde ise önceki dört bölüm ışığında elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve İstanbul Boğazı sayısal modelinin daha da geliştirilmesi için yapılması gereken öneriler sıralanmıştır.

Çalışmanın sonucunda İstanbul Boğazı akıntı sistemi üç boyutlu olarak yeteri doğrulukta modellenmiştir.

2. TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ

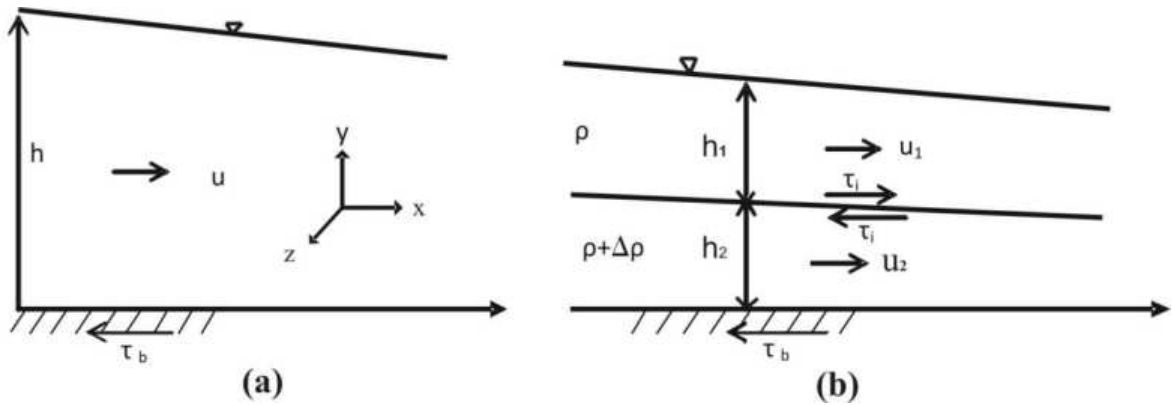
2.1 Tabakalı Akımların Hidroliği

2.1.1 Tabakalı Akımlar

Akışkan yoğunluğundaki değişimden veya akışkanın sahip olduğu yoğunluk farklarından dolayı yerçekimi etkisiyle meydana gelen akışkan hareketleri “yoğunluk akımları”, “tabakalı akımlar” veya “homojen olmayan akımlar” olarak adlandırılmaktadır (Yüksel ve Çevik, 2009). Yoğunluk farkının sebepleri:

- Akım alanında farklı akışkanların söz konusu olması
- Aynı akışkanda tuz miktarının farklı olması ($\frac{\Delta\rho}{\rho} \leq \%3$)
- Aynı akışkanda sıcaklık farkının olması ($\frac{\Delta\rho}{\rho} \leq \%05$)
- Aynı akışkanda katı madde konsantrasyonundaki farklılıktır

Şekil 2.1 (a)'da homojen akım, Şekil 2.1 (b)'de tabakalı akım yapısı ve bu akım yapısına ait tipik akım karakteristikleri görülmektedir. Şekillerde (1) indisi üst tabakanın (2) indisi ise alt tabakanın akım karakteristiklerini göstermektedir.



Şekil 2.1 (a) Homojen akım ve (b) tabakalı akım şemaları (Abraham, 1983)

Tabakalı akımların başlıca özelliklerini şunlardır: (i) üç boyutlu akıma, (ii) akımın herhangi bir bölgesinde yoğunluk farkının oluşmasına, (iii) oluşumuna sebep oldukları tabakalarda hız farklılığına ve basınç gradyanından sapmaya neden olmaktadır.

2.1.2 Taşınım Türleri

Yoğunluk akımlarında akım ve/veya akışkan özelliklerinin taşınımı iki yolla gerçekleşmektedir. Bunlar advectif (konvektif) taşınım ve difüfiz (moleküler difüzyon ve türbülans difüzyonu) taşınımlarıdır.

Advectif taşınım akım hızı ile akım doğrultusunda meydana gelen madde taşınımıdır. Birim genişlik için advectif taşınım miktarı akım hızı ile dikkate alınan noktadaki madde konsantrasyonunun çarpımına eşit olmaktadır.

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

burada

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

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

\bar{c} : zamansal ortalama konsantrasyon

Difüfiz taşınım ise moleküler difüzyon ve türbülansın yarattığı eddy hareketiyle akıntı yönü dışındaki diğer yönlere doğru meydana gelen madde taşınımıdır. Tabakalı akımlarda türbülans difüzyonu moleküler difüzyona göre daha etkili olmaktadır. Dolayısıyla çalışmanın bundan sonraki bölümünde difüfiz taşınım ile sadece türbülans difüzyonu kastedilecektir.

Teorik olarak eddy hareketinin dikkate alınan maddenin konsantrasyonunu azaltacak şekilde her yönde meydana gelmesi beklenmektedir. Difüfiz taşınımın miktarı genellikle dikkate alınan maddenin konsantrasyon gradyanına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Konvektif ve türbülans kaynaklı difüfiz taşınım arasındaki fark içine bir miktar boya enjekte edilmiş akışkan akımının davranışıyla açıklanabilmektedir. Boya ve akışkanın yoğunluğunun aynı olması koşuluyla, boya akıntı doğrultusunda gittikçe büyüyen bir renk topağı şeklinde yayılacaktır. Renk topağının akıntı hızı ile ana akım doğrultusunda ilerlemesi konvektif (advectif) taşınımı göstermektedir. Renk topağının gittikçe büyüyen şekli ise türbülansın eddy hareketinden kaynaklı difüfiz taşınımına bir örnektir.

2.1.3 Richardson Sayısı (R_i)

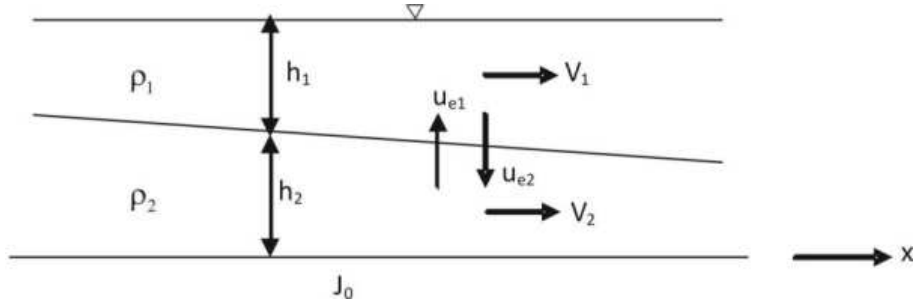
Tabakalı akımlarda akım yapısı genellikle Richardson sayısı ile tanımlanmaktadır. Richardson sayısı, tabakaların ayırım bölgesi olan ara tabaka enerjisine her bir tabakanın katkısının yüzdesel oranını göstermektedir. Diğer bir deyişle her bir tabakadaki toplam enerjinin

karışımı sağlamak (karışım için gerekli potansiyel enerjiyi karşılamak) için kullanılan yüzdesi Richardson sayısı (R_i) olarak tanımlanmaktadır (Sümer vd., 1981). R_i sayısının genel ifadesi (2.2)'de verilmiştir (Yüksel ve Çevik, 2009).

$$R_i = -\frac{g\partial\rho/\partial z}{\rho(\partial u/\partial z)^2} \quad (2.2)$$

$R_i > 0.25$ halinde tabakalanmış akım stabil haldedir.

Şekil 2.2'de görülen kararlı iki tabakalı bir açık kanal akımına ait üst ve alt tabakaların Richardson sayıları sırasıyla (2.3) ve (2.4) ifadeleriyle hesaplanabilmektedir:



Şekil 2.2 Bir açık kanalda tek boyutlu, kararlı iki tabakalı akım şeması (Sümer vd., 1981)

$$R_{i1} = \frac{(\rho_2 - \rho_1)g \frac{h_1}{2} u_{e1}}{\tau_i V_1} \quad (2.3)$$

$$R_{i2} = \frac{(\rho_2 - \rho_1)g \frac{h_2}{2} u_{e2}}{\tau_i V_2 + \beta \tau_0 V_2} \quad (2.4)$$

Burada sırasıyla u_{e1} ve u_{e2} üst ve alt tabakalar arasındaki karışım hızları (ara yüzeyin birim alanından birim zamanda alt ve üst tabakaya geçen debiler), V_1 ve V_2 üst ve alt tabakanın kesitsel ortalama hızlarını ve β , 1'den küçük bir katsayı olup karışım bölgesinden uzakta (tabanda) yaratılan türbülans enerjisinin karışıma katkısının daha az olduğunu göstermektedir (Sümer vd., 1981).

2.1.4 Tabakalı Akımlarda Froude Sayısı (Fr)

Serbest yüzeyli homojen akımlarda Froude sayısı $u/(g \times h)^{1/2}$ ifadesiyle tanımlanmaktadır. Burada u akımın yatay hız bileşenini, h ise su derinliğini göstermektedir. Tabakalı akımlarda Froude sayısı yerini yoğunluk Froude sayısı almakta ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$Fr = Fr_1 + Fr_2 \quad (2.5)$$

Burada sırasıyla Fr_1 ve Fr_2 üst ve alt tabakalara ait yoğunluk Froude sayılarıdır.

$$Fr_1^2 = \frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho}gh_1} \quad (2.6)$$

$$Fr_2^2 = \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho}gh_2} \quad (2.7)$$

Nehir rejimindeki tabakalı akımda $Fr_1+Fr_2 < 1$, sel rejimindeki tabakalı akımda ise $Fr_1+Fr_2 > 1$ olmaktadır (Abraham, 1983).

Haliç girişinde oluşan kritik kesitte (h_1 'in kritik ve h_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) (2.5) ifadesi aşağıdaki sonucu vermektedir (Sümer vd., 1981).

$$Fr_1^2 + Fr_2^2 = 1 \quad (2.8)$$

(2.8) ifadesi şu sonuçlara işaret etmektedir:

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

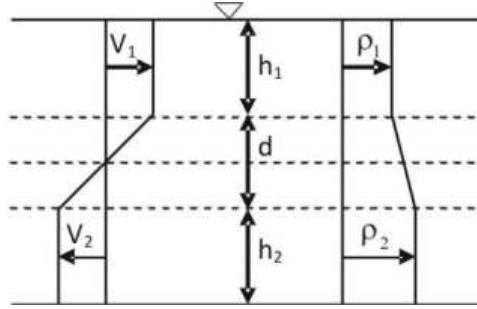
2.1.5 Arakesit Hidrodinamiği

Tabakalı akımlarda arakesit fiziksel ve geometrik olmak üzere iki anlam taşımaktadır. Arakesit alt ve üst tabaka akımlarını birbirinden ayıran fiziksel bir hattır. Aynı zamanda alt ve/veya üst tabaka kalınlıklarının konumla değişimini göstermesi bakımından da geometrik anlam taşımaktadır. Arakesit kayma gerilmesi (τ_i) (2.9) ifadesiyle tanımlanmaktadır (Abraham, 1983)

$$\tau_i = \tau_{i,t} + \rho u_m \Delta u \quad (2.9)$$

Burada $\tau_{i,t}$ türbülansın momentum taşınımının yarattığı arakesit kayma gerilmesi, u_m kırılan içsel dalgalar nedeniyle ara kesitte birim genişlikte birim zamanda alt ve üst tabaka arasında transfer edilen su miktarı, Δu arakesit üzerindeki hız farkı, ρ birbirlerine yakın değerlere sahip alt ve üst tabakanın özgül kütlesi ($\Delta\rho/\rho \ll 1$)

İki tabakalı akımda üst ve alt tabakaları ayıran arakesit gerçekte yoğunluğun (tuzluluk ve sıcaklık) ve hızın ani olarak değiştiği iyi tanımlanmış bir yüzey değildir (Sümer vd., 1981). Gerçekte gerek yoğunluk, gerekse hız iki tabaka arasında yavaş bir şekilde değişmektedir. Şekil 2.3'de ise tabakalı bir akımda derinlik boyuca hız ve yoğunluk profilleri verilmiştir.



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

Ara tabakadaki dalgaların stabilitesi düşüncesinden hareketle Abrams (1979) ara tabakanın kalınlığının toplam akım derinliğinin 1/4'ü kadar olması gerektiğini göstermiştir. Böyle bir ara tabakanın varlığı iç dalgaların kararsızlığından doğan karışıma engel olduğu gibi türbülans dolayısıyla meydana gelen karışımın da şiddetini azaltmaktadır.

2.1.6 Tabakalı Akımlarda Temel Denklemler

Tabakalı akımlar için en genel haldeki süreklilik denklemi (2.10) ifadesiyle verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.10)$$

Hidrostatik basınç dağılımı kabulü yapılarak ve eddy viskozitesi kavramı ($\tau = \rho \epsilon \partial u / \partial x$) uygulandığında tabakalı akımlar için 3 boyutlu Reynolds denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Yüksel ve Çevik, 2009).

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \varepsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.12)$$

$$p = \bar{\rho} g (h - z) = g \int_z^h dz \quad (2.13)$$

Yoğunluktaki değişim, tuz partikülleri için yazılan, konvektif ve difüzyif taşınım terimlerini içeren kütle dengesi eşitliği kullanılarak (2.14) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial u s}{\partial x} + \frac{\partial v s}{\partial y} + \frac{\partial w s}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_z = (1 + \alpha Ri^\beta) \varepsilon_{z,0} \quad (2.15)$$

Burada s:tuz konsantrasyonu, $\varepsilon_{z,0}$ homojen akımdaki düşey eddy viskozitesi katsayısı, Ri Richardson sayısı, α ve β katsayılarıdır. Başlangıç ve sınır şartlarının da tanımlanması ile bu denklemlerin akışkan partikülünün hızları (u, v, w) ve özgül kütlesi (ρ) üç boyutlu uzayda zamanın (t) fonksiyonu olarak elde edilebilmektedir. Çözüm için skaler eddy viskozitesi katsayıları ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$) da bilinmelidir.

Oluşan tabakalı akımın arakesiti boyunca oluşacak bir dalganın ilerleme hızı (2.16) ifadesiyle hesaplanabilmektedir (Sümer vd., 1981).

$$c = \frac{V_1 h_2 + V_2 h_1}{h_1 + h_2} \mp \sqrt{g \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) \left(\frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \right) - \frac{(V_2 - V_1)^2 h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^2}} \quad (2.16)$$

Burada sırasıyla V_1, h_1, ρ_1 üst tabakanın kesitsel ortalama hızını, kalınlığını ve özgül kütlesini, V_2, h_2, ρ_2 ise alt tabakanın kesitsel ortalama hızını, kalınlığını ve özgül kütlesini göstermektedir.

Kritik kesitte (h_1 'in kritik ve h_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) $c = 0$ şartından $Fr_1^2 + Fr_2^2 = 1$ sonucuna varılır.

$V_1=V_2=0$ olması halinde (2.16) ifadesi aşağıdaki forma indirgenmektedir.

$$c = \mp \sqrt{g \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) \left(\frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \right) - \frac{(V_2 - V_1)^2 h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^2}} \quad (2.17)$$

$h_2 \gg h_1$ halinde ise,

$$c = \mp \sqrt{g \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) h_1} \quad (2.18)$$

(2.18) ifadesi uzun dalgaların ilerleme hızı ile benzerlik göstermektedir. Ancak $\Delta\rho/\rho$ formunda bir indirgenme faktörü içermektedir. Arakesitteki içsel dalgalar $c=1$ m/s civarında değerler almaktadır. İçsel dalgaların genliği oldukça büyük olabilmektedir. Dolayısıyla arakesit dalgalarının oluşturduğu akıntılar çok büyük olabilmekte ve hatta gel-git akıntılarının hızlarını aşabilmektedir (Yüksel ve Çevik, 2009).

2.2 Türbülanslı Akımlar

İdeal akışkan sıkışamaz ve viskozitesi olmayan akışkan olarak tanımlanmaktadır. Gerçek akışkan ise sıkışabilen ve viskozitesi olan akışkandır. Viskozite akışkana ait bir özellik olup akışkan partikülleri arasındaki içsel dirence karşılık gelmektedir.

Gerçek akışkan akımında viskoz etkiler dolayısıyla akışkan katı cidarlara yapışmakta ve akışkan üzerinde etkili gerilmeler meydana gelmektedir.

Newton'un viskozite kanununa göre kayma gerilmesi ile hız gradyanı (akım yolu boyunca hızdaki değişim oranı) arasında aşağıdaki ifadelerde görüldüğü gibi doğrusal bir ilişki söz konusudur.

$$\tau \propto \frac{du}{dy} \quad (2.19)$$

Newtonian bir akışkan için:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.20)$$

ifadesi geçerli olmaktadır. Burada μ orantı sabiti, viskozite katsayısı veya viskozitedir. Her ne kadar bazı akışkanlarda μ sabiti gerilme veya hız gradyanıyla değişim gösterse de Newtonian bir akışkanda bu durum söz konusu değildir.

Gerçek akışkan akımı laminar ve türbülanslı akım olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş ise geçiş akımı adı verilen bir akımla olmaktadır. Bir akımın laminar mı, türbülanslı mı ya da geçiş akımı mı olduğuna söz konusu akım alanından alınan kontrol hacim üzerinde etkili atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıyla elde edilen boyutsuz Reynolds sayısına bakılarak karar verilmektedir. Reynolds sayısı ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$Re = \frac{\text{atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (2.30)$$

Burada ρ : akışkanın özgül kütlesi

u : ortalama hız

d : çap

μ : viskozite

Laminar akım akışkan viskozitesinin daha büyük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Re sayısının tanımından da anlaşılacağı gibi akım alanı içerisinde viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine baskın olduğu durumlarda (düşük hız ve Reynolds sayısı değerleri için) akım laminar olmakta iken atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere göre daha baskın olduğu akımlar (yüksek hız ve Reynolds sayılarında) türbülanslı karakter taşımaktadır.

Sonuç olarak laminar akım:

- Küçük Reynolds sayılarında
- Düşük hız değerlerine sahip
- Akım alanı içerisinde akışkan partiküllerinin doğrusal yörüngeler izledikleri
- Basit matematiksel analize imkan veren
- Doğada ve mühendislik yapılarında çok fazla karşılaşılmayan bir akımdır.

Doğadaki akımların çoğu türbülanslıdır. Buna örnek olarak atmosferdeki hava akımları, gezegen atmosferlerindeki hava hareketleri, bulutlar, okyanus akımları, akarsu akımları, güneşin fotosfer tabakası, galaktik toz hareketi ve ateşin hareketi buna örnek olarak verilebilmektedir. Aynı durum çoğu mühendislik akımları için de geçerlidir (uçak kanadı etrafındaki hava akımı, gemilerin dümen suyu, araba egzozu, bacalardan çıkan duman, boru hatları ve soba bacalarındaki akım vs.). Dolayısıyla akışkan hareketlerinin çoğu türbülanslı karakter taşımaktadır. Burada şu soru önem kazanmaktadır: türbülanslı akımı açıklayan net ve anlaşılır bir tanım yapıp yapılamayacağıdır.

Türbülanslı akımın tam bir tanımı yoktur. Sadece bazı karakteristik özelliklerinden bahsedilebilmektedir. Bu özellikler:

1. Düzensizlik: Türbülanslı akım düzensiz, rastgele ve kaotik yapıya sahiptir. Değişik ölçeklerde (eddy boyutları) geniş bir spektrum:

- En büyük eddyler akım geometrisiyle (sınır tabakası kalınlığı, jet çapı vs.) aynı mertebeden büyüklüğe sahiptirler.
- En küçük eddyler viskoz kuvvetler tarafından içsel enerjiye dönüştürülürler (yok edilirler.)

Türbülans sahip olduğu kaotik yapıya karşın deterministiktir ve Navier-Stokes denklemleri tarafından açıklanabilmektedir.

2. Difüzyon: Türbülanslı akımda difüzyon artar. Bunun sonucunda tabakalar arasındaki momentum alış verişi artar ve kaba gövdeli yapılarda (silindir, uçak kanadı, araba vs.) sınır tabakasından ayrılma olayını geciktirmektedir.

Artan difüzyon aynı zamanda kanal ve boru akımı gibi kapalı akımlarda akışa karşı direnci (sürtünme) artırmaktadır.

3. Üç Boyutluluk: Türbülanslı akım daima üç boyutludur

4. Dağılım: Büyük eddyler (çevrıntiler) şeklinde başlayan türbülans hareketi akım alanı içerisinde zamanla ve konumla küçük eddylere dönüşerek kaybolmaktadır. Küçük eddylerin sahip olduğu kinetik enerji iç enerjiye (ısı enerjisi) dönüşmektedir. Küçük eddyler kinetik enerjilerini daha büyük eddylerden onlara kendilerinden daha büyük eddylerden almaktadırlar. Büyük eddyler sahip oldukları enerjiyi ortalama akım büyüklüklerinden almaktadırlar (enerji şelalesi).

5. Büyük Reynolds Sayısı : büyük Reynolds sayısına sahip akımlar türbülanslı olma özelliği taşımaktadırlar. Re sayısı ifadesindeki özgül kütle (ρ) ve dinamik viskozite (μ) terimleri akışkana ait özellikleri ifade ederken, uzunluk (L) ve hız (U) terimleri ise akıma ait özellikleri ifade etmektedir.

Türbülans, laminar akım alanında oluşmaya başlayan tedirginliğin yeterince büyümesiyle oluşmaktadır. Yani kaynağını aslında laminar akımda oluşmaya başlayan stabilitesizlikten almaktadır. Hız alanında çalkantıya neden olan fiziksel mekanizmalar ortadan kalkarsa viskozitenin etkisiyle zamanla türbülans da ortadan kalkacaktır. Türbülansı yaratan ve güçlendiren en önemli mekanizma ortalama akım alanı içerisindeki sürtünme etkisidir. Diğer önemli mekanizma ise değişik şekillerde ortaya çıkan karışımdır. Jeofiziksel akımlar ve

patlamalarda akışkan kütleindeki yoğunluk değişimlerinden dolayı oluşan batıklık kuvvetleri tarafından da türbülans yaratılabilmektedir.

Yukarıda beş ana başlık altında sıralanan genel özellikleri dolayısıyla türbülans:

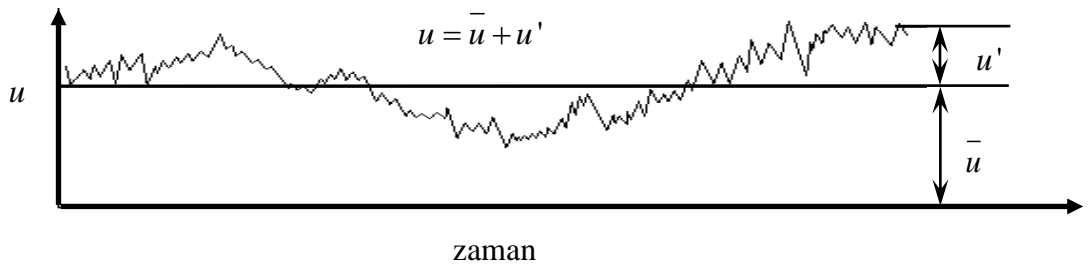
1. matematiksel olarak tanımlanması detaylı ve zordur
2. pratik problemlerin çözümünde tam bir teorik yaklaşımın kullanılması söz konusu değildir.

2.2.1 Temel Türbülans Denklemleri

Temel türbülans denklemleri iki temel prensibe dayanılarak ifade edilmektedir. Bunlar kütle korunumu prensibinin akışkan akımına uygulanmasıyla elde edilen süreklilik denklemi ve momentumun korunumu prensibinin yine akışkan akımına uygulanmasıyla elde edilen hareket denklemleridir.

Bu prensiplerden hareketle bir adet süreklilik ve üç adet hareket denklemi olmak üzere toplam 4 adet diferansiyel denklem yazılmaktadır.

Bu ifadeler tüm akışkan hareketlerini tam olarak tarif edebilmektedir. Ancak akışkan hareketinin üç boyutluluğu ve türbülans kaynaklı olarak sahip olduğu kararsız yapısı nedeniyle türbülanslı akımlarda bir takım stabilite sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek amacıyla temel denklemlerde kullanılan terimler ortalama akım terimi (zamansal ortalamalı terim) ve türbülans çalkantı terimi olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Şekil 2.4’de türbülanslı akımda yatay hız bileşeni için bu durum görülmektedir.



Şekil 2.4 Türbülanslı akımda hızın ortalama ve çalkantı bileşenleri

Buna göre türbülanslı akım için temel denklemler aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.31)$$

Burada \vec{V} : bileşke hız vektörü ($V(\bar{u} + u', \bar{v} + v', \bar{w} + w')$, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ akımın ortalama hız bileşenleri, u', v', w' ise çalkantı bileşenlerini göstermektedir.)

Hareket Denklemleri (Navier-Stokes Denklemleri):

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \bar{X} - \nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \vec{V} + [\nabla T^{(e)}] \quad (2.32)$$

$$T^{(e)} = \begin{bmatrix} -\overline{\rho u'^2} & -\overline{\rho u'v'} & -\overline{\rho u'w'} \\ -\overline{\rho u'v'} & -\overline{v'^2} & -\overline{\rho v'w'} \\ -\overline{\rho u'w'} & -\overline{\rho v'w'} & -\overline{\rho w'^2} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Burada $T^{(e)}$: Reynolds Gerilme tensörünü göstermektedir.

2.2.2 Türbülanslı Akımların Davranışlarının Belirlenmesi

Türbülanslı akımların davranışlarını belirleyebilmek amacıyla teorik, deneysel ve sayısal yaklaşım başlıklarıyla verilebilecek başlıca üç yaklaşımın varlığından söz edilmektedir. Her üç yöntem de kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Gelişim sırasına göre her biri ayrı ayrı değerlendirilecek olursa, teorik yöntemin avantajları:

- tam ve evrenseldir
- fiziksel olarak oldukça iyi bilinmektedir

Dezavantajları:

- sınır şartları idealleştirilmiştir
- karmaşık yapıya sahip akımlar ve türbülanslı akımların çözümünde çok nadir çözüm elde edilebilmektedir.

Deneysel araştırmanın avantajları:

- parametrik çalışmalar oldukça kolay yapılabilmektedir
- büyük ölçüde güvenilir ve kabul edilmiş bir yöntemdir
- olayda etkin parametrelerin birbiri üzerindeki etkileri hemen farkedilebilmektedir.

Dezavantajları:

- karmaşık ve pahalı bir yöntem olabilmektedir
- akıma ait bütün nicelikler ölçülememektedir

- akıma ait bazı nicelikler beklenmedik biçimde etkilenebilmektedir.

Sayısal benzeşimin avantajları:

- sınır şartları kolaylıkla değiştirilebilmektedir
- akım alanıyla ilgili eksiksiz bilgi verilebilmektedir
- genellikle daha ucuz olmaktadır

dezavantajları:

- bilgisayar kapasitesiyle sınırlanmıştır
- genelde evrensel değildir
- oldukça fazla tecrübe gerektirmektedir.

2.2.3 Türbülanslı Akımların Modellemesi

Bir türbülans modeli kurulmasının amacı zamansal ortalama akım denklemlerini kapamak amacıyla Reynolds gerilmelerini ve türbülans akılarını belirlemeye çalışmaktır.

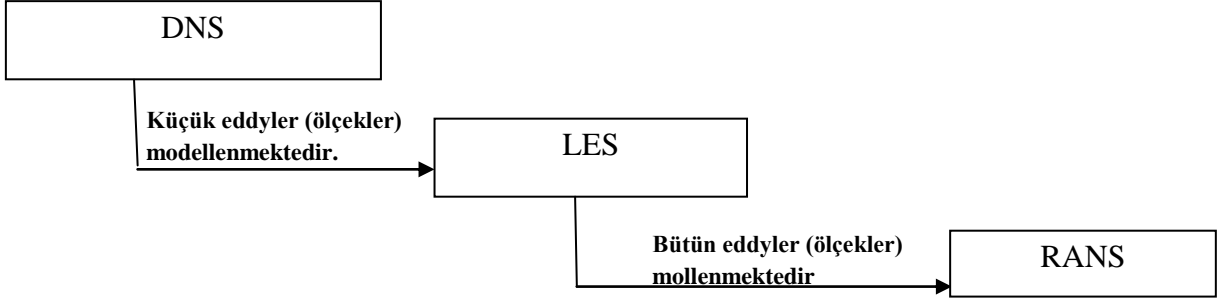
Mühendislik çalışmalarında debileri, basınç dağılımlarını ve sürtünme katsayılarını önceden belirleyebilmek için kullanılan bir türbülans modelinin en önemli önceliği akımın dinamik yapısı üzerinde en önemli etkiye sahip olan Reynolds gerilmelerini doğru belirleyebilmektir. Çoğu zaman bu kayma gerilmesi ($-\rho \overline{u'v'}$) değerini belirlemekle aynı anlama gelmektedir. Eğer diğer etkiler yanında türbülans etkisi ihmal edilebilir boyutta ise iyi bir türbülans modeli kullanmak gereksizdir. Ancak kayma gerilmesi değerinin tam olarak belirlemenin çok önem kazandığı sınır tabakadan ayrılmanın sözkonusu olduğu akımlar için iyi bir türbülans modeli kullanmak gerekmektedir.

2.2.4 Türbülans Denklemlerinin Çözüm Yöntemleri ve Modelleme

Türbülans denklemlerinin çözüm yöntemlerini üç ana başlık altında toplamak mümkündür.

Bunlar :

- **DNS (Doğrudan Sayısal Çözüm):** Akıma ait temel denklemler modelleme yapılmadan doğrudan çözülmektedir.
- **LES (Büyük Eddy Simülasyonu):** Küçük eddyler (ölçekler) modellenerek, büyük eddyler (ölçekler) ise hesaplanmaktadır.
- **RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes):** Taşınım denklemleri akıma ait büyüklüklerin ortalama değerleri ile ifade edilmekte ve türbülansa ait bütün eddyler (ölçekler) modellenmektedir.



Şekil 2.5 Türbülans modellerinin şematik ifadesi

RANS Modeli

Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri akıma ait ortalama hız (u, v, w) ve skaler büyüklükler (Φ) için taşınım denklemleridir.

Aynı zamanda türbülans çalkantıları da net momentum taşınımına ilave edilmekte (Reynolds gerilmeleri $-\overline{\rho uv}, -\overline{\rho u^2}, \dots$), ve eğer varsa ilave büyüklükler (*türbülans akıları* $-\overline{\rho v \phi}$ vs.) de eklenmektedir.

RANS denklemlerinde Reynolds gerilmeleri, türbülans taşınımı için ilave denklemlerin çözülmesi olarak bilinen kapama problemiyle elde edilmektedir. Model μ_t 'yi belirlemek için kullanılan taşınım denklemi sayısına göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre RANS modeli, lineer eddy viskozitesi (birinci dereceden) ve lineer olmayan eddy viskozitesi (ikinci dereceden) yaklaşımı olmak üzere iki ana alt bölüme ayrılmaktadır. Lineer eddy viskozitesi yaklaşımı 0 denklem, 1 denklem ve 2 denklem modelleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Sıfır Denklem Modeli : Hız ve uzunluk ölçeği cebrik olarak verilmektedir. Örneğin Prandtl karışım uzunluğu (1925)

$$l_m \cong L_c; \quad V = l_m \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \Rightarrow \mu_t = \rho l_m^2 \frac{\partial U}{\partial y} \quad (2.34)$$

Burada l_m : makro uzunluk ölçeği

L_c : karakteristik uzunluk ölçeği

μ_t : eddy viskozitesi

Bir Denklem Modeli: Cebrik olarak verilen hız ve uzunluk ölçeği için yarı deneysel taşınım denklemi tanımlanmaktadır.

$$V_c \propto \sqrt{k}, \quad L = k^{3/2} / \varepsilon \quad (2.35)$$

$$\mu_t \propto \rho V_c L_c = \rho c_\mu k^2 / \varepsilon \quad (2.36)$$

Burada k: kinetik enerji

ε : enerji kaybı terimi

c_μ : sabiti göstermektedir

İki Denklem Modeli: Taşınım denklemleri hem hız hem de uzunluk ölçekleri için tanımlanmıştır. Örneğin;

$$k - \varepsilon, \quad \mu_t = \rho c_\mu k^2 / \varepsilon \quad (2.37)$$

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve enerji kaybına (ε) ait kapalı formdaki genel ifadeler (2.38) ve (2.39) da verilmiştir.

$$\underbrace{\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i}}_{\text{iletim}} = \underbrace{\mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{\text{üretim}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\}}_{\text{yayımla}} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{\text{kayıp}} \quad (2.38)$$

iletim üretim yayılma kayıp

$$\underbrace{\rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}}_{\text{iletim}} = \underbrace{C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{\text{üretim}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\}}_{\text{yayımla}} - \underbrace{C_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right)}_{\text{kayıp}} \quad (2.39)$$

iletim üretim yayılma kayıp

Burada c_μ : deneysel bir sabit

$c_{\varepsilon 1}$: akım alanı içerisindeki logaritmik hız tabakası için k ve ε terimlerinin modellenmesi ile elde edilen bir katsayı

$c_{\varepsilon 2}$: ağ türbülans yaklaşımı kullanılarak yarı deneysel yoldan elde edilen bir sabit

σ_k : türbülans kinetik enerjisi (k) için düzeltme faktörü

σ_ε : türbülans enerji kaybı (ε) için düzeltme faktörü

Kayıp terimine ait asıl denklem çok daha karmaşıktır. k ve ε denklemlerinin modellenmiş formu aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \quad (2.41)$$

$$P_t = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \quad (2.42)$$

Model sabitleri :

c_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Standart k-ε modelinin sahip olduğu genel özellikler aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Endüstride en çok kullanılan modeldir.
- Avantaj ve dezavantajları oldukça iyi bilinmektedir.
- Yarı deneyseldir (k anlık mekanik enerjinin zamansal ortalama değeri ile elde edilmekte, ε ise fiziksel koşullar dikkate alınarak belirlenmektedir).
- Sadece türbülanslı akımlar için geçerlidir.
- Türbülanslı akımların büyük bir kısmında oldukça iyi sonuçlar vermektedir (endüstriyel akımlar, ısı transferi).

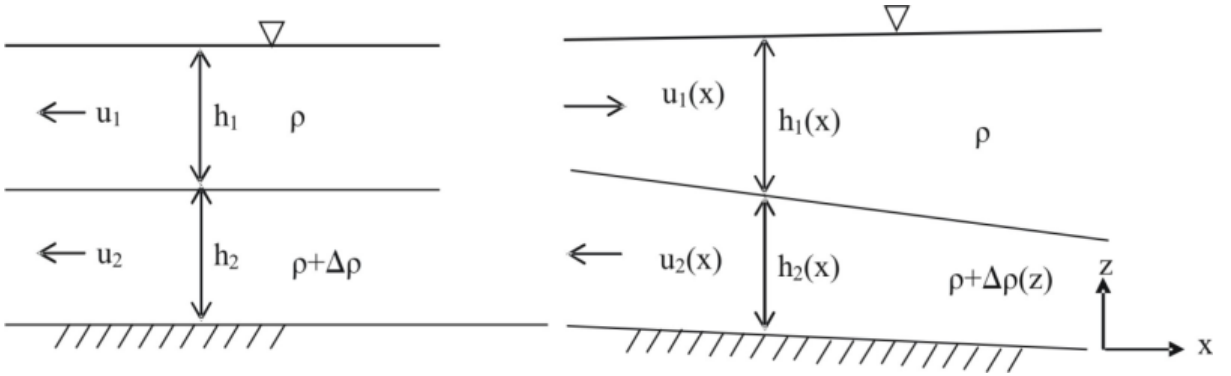
3. İSTANBUL BOĞAZI'NIN HİDRODİNAMİĞİ

3.1. İstanbul Boğazı ve Konu ile İlgili Çalışmalar

Bir akım alanı içerisinde yoğunluk farkından veya farklı yoğunluğa sahip akışkanların varlığından dolayı yerçekimi etkisiyle meydana gelen akışkan akımına homojen olmayan akım / yoğunluk akımı veya tabakalı akım olarak adlandırılmaktadır. Akım alanı içerisindeki yoğunluk farkı oluşmasına neden olan faktörler şunlardır:

- 1) Tuzluluk farkı: $\Delta\rho/\rho$ (yoğunluk farkının ortalama akışkan yoğunluğuna oranı) % 1-2 mertebesinde küçük değerler almaktadır
- 2) Sıcaklık farkı: $\Delta\rho/\rho$ ‰ 1-2 mertebesinde küçük değerler almaktadır
- 3) Katı madde konsantrasyonundaki farklılık

Tabakalı akım bir ara kesit ile birbirinden ayrılan farklı yoğunluğa sahip akışkan akımı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.1). Taban pürüzlülüğü, arakesit pürüzlülüğü, su derinliği ve basınç farkına neden olan tabakalar arasındaki yoğunluk farkı, hareket denklemlerinin çözümünde dikkate alınmalıdır. Süreksizliklerin yayılması da dikkate alınması gereken diğer parametredir.



Şekil 3.1 Tabakalı akımın şematik gösterimi

Tabakalı akım yapılarının görülebildiği boğaz akımlarının (örn.: İstanbul Boğazı, Cebelitarık Boğazı) hidrodinamik davranışını doğru tanımlamak özellikle ulaşım, çevre kirliliği, atık su deşarjı, denizaltı mühendislik yapıları ve balıkçılık açısından büyük önem taşımaktadır.

Şekil 3.2.a'da görülen İstanbul Boğazı, Marmara Denizi ile Karadeniz'i birbirine bağlayan 31 km uzunluğunda bir su yoludur. Yüzeydeki genişliği 0.7 km ile 3.5 km arasında değişmekte olup ortalama genişliği 1.3 km'dir. Derinliği ise 30 m ile 100 m arasında değişen değerler almaktadır. İstanbul Boğazı genel olarak iki tabakalı bir akım yapısına sahiptir. Bunlar Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru güney doğrultusundaki üst tabaka akımı ve

Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru kuzey doğrultusundaki alt tabaka akımlarıdır. Tabaka kalınlıkları ve hızları tüm akım derinliği boyunca zamanla önemli değişimler göstermektedir. Ayrıca Boğaz boyunca geometriden kaynaklı olarak akım doğrultuları değişim göstermektedir.



(b)



Şekil 3.2 (a) İstanbul Boğazı'nın uydu görüntüsü (b) Tuna (Danube), Dinyeper ve Dinyester nehirlerinin Karadeniz'deki konumları

İstanbul Boğazı'ndaki tabakalı akım yapısı esas olarak iki mekanizma tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi ve yoğunluk farklarıdır. Karadeniz ile Marmara Denizi arasında -20 cm ile 60 cm arasında değişen su seviyesi farkı ($\Delta\eta$) üst tabaka akımına neden olmaktadır (Yüksel vd., 2008). İki deniz arasındaki tuzluluk farkı ise alt tabaka akımına neden olmakta ve tabakalar bir ara kesit ile birbirinden ayrılmaktadır.

Ara tabakanın kalınlığı Boğaz'ın Marmara Denizi girişinde 10 m, Karadeniz girişinde ise 2 m civarında değerler almaktadır (Güler vd., 2006)

İstanbul Boğazı ile ilgili yapılan önceki çalışmalardan Boğaz'daki akıntı yapısının kısa ve uzun dönemli olarak oldukça değişken olduğu görülmüştür. Akıntı yapısı üzerinde kısa dönemli etkiye rüzgar yapısı, atmosfer basıncı farklılıkları ve gel-git neden olmaktadır. Karadeniz'in tatlı su kaynakları (Tuna, Dinyeper ve Dinyester nehirleri) ise akıntı yapısı üzerinde uzun dönemli etkiye neden olmaktadır (Şekil 3.2.b).

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'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, 1996).

Stanev ve Peneva (2002) son 70 yıl için Karadeniz'deki su seviyesi ile su dengesi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Su seviyesi ile su dengesinde uzun dönemde meydana gelen değişim arasında iyi bir korelasyon elde etmişlerdir.

Tuna nehri Karadeniz'in en büyük tatlı su kaynağıdır. Dinyester ve Dinyeper nehirleri için bu oran Tuna nehrinin yaklaşık üçte biri mertebesinde dir. Geri kalan akarsuların toplam akışı ise tüm akarsu akışının 1/5'i kadar küçük oranda olmaktadır (Sur vd., 1994).

Sur vd. (1994) akarsu deşarjlarının Boğaz üzerindeki etkilerini araştırmış ve şu sonuçlara varmışlardır:

1-Tuna nehrinin yıllık ortalama deşarjı $4000-9000 \text{ m}^3/\text{s}$ arasında değişen büyük salınımlar göstermektedir. Bu yıllık değişimlere 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 taşıdığı yıllık tatlı su debisi ile deniz seviyesindeki ortalama ve yıllık durum arasında oldukça yakın bir ilişki söz konusudur. 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 akarsu deşarjı ile yakından ilgilidir. Sadece kuvvetli güney fırtınalarının suyunu kuzey batı kıyılarına doğru geri püskürtmesi dışında, Tuna'nın suyu Karadeniz havzası boyunca çevrıntili bir şekilde güneye doğru akmaktadır.

4- İstanbul Boğazı'nda yılın değişik periyotlarında yapılan ölçümler tuzluluğun düşük olduğunu göstermektedir. Her ne kadar minimum tuzluluk Mart-Nisan başında ölçülmüşse de tuzluluktaki minimum değerler esas itibariyle Haziran'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.

Peneva vd. (2001) İstanbul Boğazı akım yapısının mevsimsel değişimini incelemişlerdir. Karadeniz'e dökülen nehirlerin, Karadeniz'in aldığı yağışın ve buharlaşmanın Boğaz'ın akım yapısı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Boğaz'daki maksimum taşınımın Mart-Nisan aylarında minimum taşınımın ise Ağustos ayında gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

İstanbul Boğazı uzunluğu boyunca farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahiptir. Her iki uç bölgesinde Boğaz'ın akım karakteristikleri üzerinde oldukça etkili olan iki eşik bulunmaktadır. Eşiklerden biri Marmara Denizi'nin kuzeyinde hemen Boğaz girişinde minimum ve maksimum 28 ile 35 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 1998). Çanakkale Boğazı'ndaki eşikler de akım yapısını benzer şekilde etkilemektedirler. Wesson ve Gregg (1994) eşiklerin Çanakkale Boğazı akım yapısı üzerindeki etkileri üzerine kapsamlı olarak çalışmışlardır.

Boğaz'ın her iki yakasında da Emirgan-Kanlıca ve Arnavutköy-Vanıköy 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 (Güler vd., 2006).

Üst tabakanın ortalama tuzluluğu 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 eşiğin bulunduğu bölgede 33 ppt değerine düşmektedir (Oğuz vd., 1990).

İstanbul Boğazı tabakalı akımının hidrodinamiğini açıklamak amacıyla değişik tarihlerde değişik araştırmacılar tarafından bir çok sayısal model çalışması yapılmıştır.

Gregg ve Özsoy (2002) İstanbul Boğazı akımının hidroluk mühendisliğindeki temel kabulleri ne oranda yansıttığını araştırmak amacıyla sinoptik akım bölgeleri ve akustik geri yansımali (backscatter) sistem kullanılarak elde edilmiş görüntüleri analiz ederek Boğaz akımı debi geçişini detaylı olarak incelemişlerdir. Güçlü karışım ve ana akımdaki ayrılmalar sonucunda Boğaz'daki tabakalı akımın basit bir kanal akımı olmaktan çok pürüzlülüğün önemli rol oynadığı bir kanal akımı olduğu sonucuna varmışlardır.

Özsoy vd. (2002) İstanbul Boğazı'na ait üç boyutlu bir akıntı haritası ile akıntı ve su seviyesi değişimine ait istatistiksel parametreler belirlemek amacıyla İstanbul Boğazı'nda bir dizi akıntı, yoğunluk ve su seviyesi ölçümü verilerini analiz etmişlerdir. Sonuçlar Boğaz akıntısının zamanla değişen kararsız bir yapıya sahip olduğunu ve kıyı boyunca akımın olmadığı ölü bölgelerin var olduğu ve eddy çevirilerinin oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca Boğaz'ın akıntı yapısının su seviyesinde meydana gelen değişime çok çabuk yanıt verdiği ve rüzgar doğrultusundaki ani değişimlerin alt ve üst tabaka akımlarının bloke olmasına yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Sözer ve Özsoy (2002) farklı karışım, adveksiyon ve eddy difüzyonu parametrelerinin tanımlanmasına olanak veren üç boyutlu bir okyanus akıntı modeli olan SCRUM yazılımı kullanmış ve İstanbul Boğazı'nın tabakalı akımını modellemişlerdir. İdealleştirilmiş Boğaz geometrisi kullanılarak farklı açık sınır şartlarının ve karışım parametrelerinin Boğaz akımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Açık sınır koşullarının akıntı yapısı için büyük önem taşıdığı ve açık sınırların net akım yönünden etkilendikleri sonucuna varmışlardır.

Örs ve Yılmaz (2003) İstanbul Boğazı'nda kirleticilerin taşınımını incelemek amacıyla iki boyutlu bir sayısal hidrodinamik model kullanmışlardır. Sayısal model sığ su denklemlerini

sonlu elemanlar yöntemiyle ayırıklaştırarak çözmekte ve yapılandırılmamış üçgen ağ elemanları kullanmaktadır. Rüzgarın kirleticilerin Boğaz'daki taşınımı üzerindeki etkisinin de modellenmesi amacıyla SHOD (1984) rüzgar verileri kullanılmıştır. Kirleticilerin birkaç saatlik zaman ölçeğinde Boğaz'ın büyük bölümünde yayıldıkları ve rüzgarın önemli olmakla birlikte zaman ölçeğinde önemli bir değişime yol açmadığı sonucuna varmışlardır.

Oğuz (2005) İstanbul Boğazı akımının içsel hidrolik yapısı ile ilgili olarak üç boyutlu bir modelleme çalışması yayınlamıştır. Çalışmada İstanbul Boğaz'ında maksimum değişim akımının üst tabaka kalınlığı ve hızının Boğaz'ın güney eşiği üzerinde 10 m ve 1 m/s, alt tabaka kalınlığı ve hızının ise kuzey eşiği üzerinde 10 m ve 1 m/s ve $g' = 0.1$ ($g' = (\Delta\rho/\rho) \times g$) m/s^2 koşulları için meydana geldiğini sonucuna varmıştır.

Güler vd., (2006) 2003 yılında İstanbul Boğazı'nın güneyindeki Dolmabahçe Sarayı, Sarayburnu, Paşa Limanı ve Galatasaray Üniversitesi açıklarında ADP akıntı ölçer kullanarak yapılan kısa ve uzun süreli akıntı ölçümleriyle bir çalışma yayınlamışlardır. Söz konusu istasyonlardan sadece Dolmabahçe Sarayı açıklarında uzun süreli (yaklaşık 4 ay) diğer istasyonlarda kısa süreli anlık akıntı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dolmabahçe Sarayı açıklarında Mayıs ve Eylül 2003 tarihleri arasında yapılan söz konusu akıntı ölçümleri İstanbul Boğazı'nda bugüne kadar yapılan ilk uzun süreli akıntı ölçümü olması bakımından önem taşımaktadır. Söz konusu ölçüm sonuçlarından dikkate alınan dönemde Dolmabahçe Sarayı açıklarında ortalama akıntı hızının 0.8 m/s değerini aldığı görülmüştür. Sarayburnu ve Paşalimanı istasyonlarındaki anlık akıntı hızları ise 1-1.5 m/s mertebesinde değerler almıştır.

İstanbul Boğazı ile ilgili daha önce yapılan çalışmalarda yeterli uzunlukta sürekli ölçümlerin bulunmaması ve akıntı yapısını tanımlayan hidrodinamik sayısal modellerin kurulmamış olmasından dolayı, Boğaz'ın akıntı yapısı yeteri düzeyde analiz edilememiştir. Bu çalışma İstanbul Boğazı'nda 15 ay boyunca yapılan akıntı ölçümlerini ve meteorolojik ölçümleri içermektedir. 15 aylık sürekli ölçüme dayalı söz konusu veriler kullanılarak Boğaz'ın akıntı iklimi açıklanmaya çalışılmış ve akıntı yapısı üzerinde kısa dönemli etkilerin önemi incelenmiştir. Elde edilen ölçüm verileri kullanılarak Boğaz hidrodinamiği için sayısal model kurulmuştur.

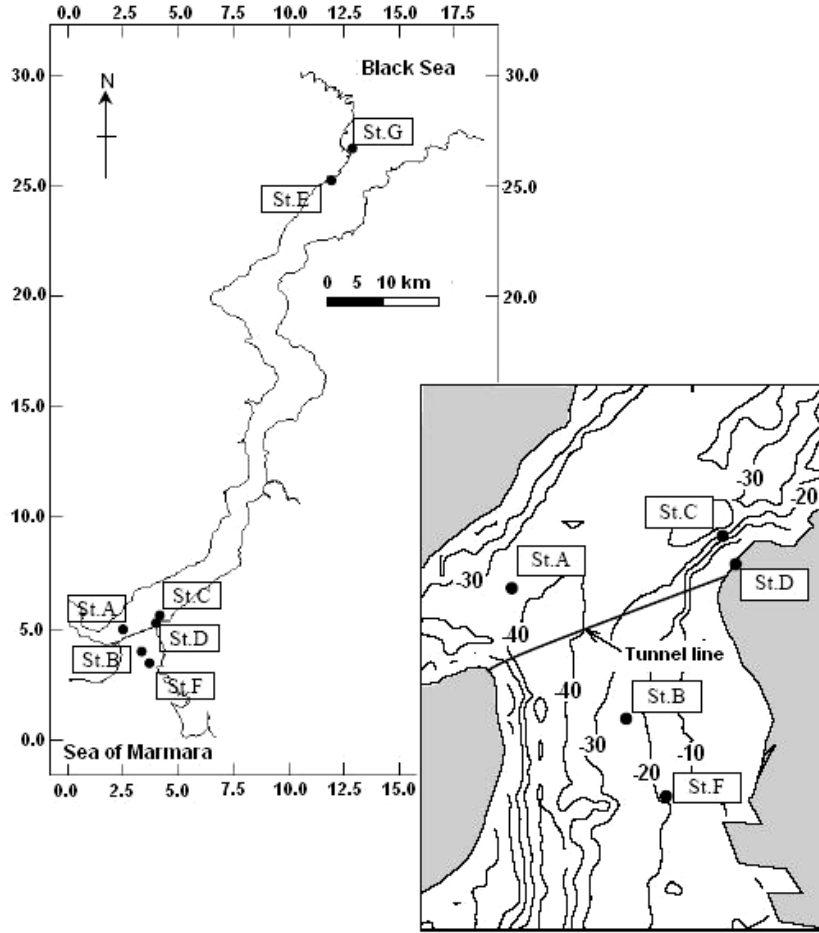
3.2. İstanbul Boğazı İklimi

İstanbul Boğazı'nda akıntı, rüzgar, su seviyesi, atmosfer basıncı, sıcaklık ve tuzluluk ölçümlerinin yapılması amacıyla oldukça kapsamlı bir çevresel izleme sistemi kurulmuştur. Söz konusu sistem Marmaray projesi kapsamında TAISEI (Japon) firması tarafından

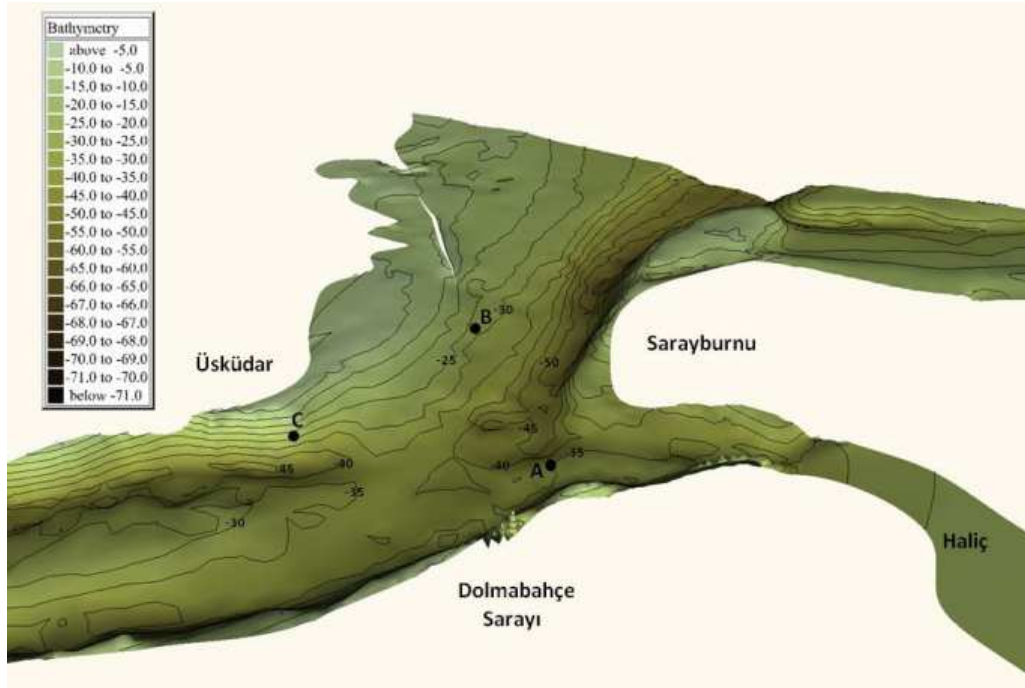
kurulmuştur. Ölçüm istasyonları ve ölçümü yapılan akım karakteristikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ölçüm istasyonlarının İstanbul Boğazı’ndaki konumları Şekil 3.3(a)’da görülmektedir. Şekil 3.3(b)’de ise akıntı istasyonlarının yerleştirildiği güney bölgesindeki İstanbul Boğazı taban topografyasının üç boyutlu değişimi ve akıntı istasyonlarının konumları görülmektedir. Akıntı ölçümleri için ADCP cihazı kullanılmıştır. ADCP cihazı üç parçadan oluşmaktadır. Bunlar: ADCP ana ekipmanı, çelik kafes ve beton bloktur. Cihazlar ölçüm konumlarına gemi ile götürülmüş ve bir vinç yardımıyla denize indirilerek deniz tabanına sabitlenmişlerdir. Çizelge 3.1’deki K_0 ve M_8 istasyonlarında ise 2004 ve 2005 yılları boyunca İSKİ tarafından deniz suyu tuzluluğu ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 3.1 İstanbul Boğazı’ndaki ölçüm istasyonları ve ölçümü yapılan akım karakteristikleri

İstasyon	Ölçüm Periyodu		Ölçülen karakteristik	Ölçüm aralığı	Konumu	Açıklama
	Başlangıç	Son				
A	24.09.04	03.01.06	Akıntı hızı ve doğrultusu (ADCP)	1 saat	41° 05' 26.7" N 28° 59' 20.9" E	Yerleştirildiği derinlik 35 m
B	24.09.04	03.01.06	Akıntı hızı ve doğrultusu (ADCP)	1 saat	41° 00' 52.4" N 28° 59' 53.6" E	Yerleştirildiği derinlik 26 m ve 13.11-04.12.04 tarihleri arasında ölçüm yok
C	24.09.04	03.01.06	Akıntı hızı ve doğrultusu (ADCP)	1 saat	41° 01' 35.1" N 29° 00' 30.1" E	Yerleştirildiği derinlik 29 m
D	25.09.04	05.01.06	Su seviyesi	1 saat	41° 01' 31.4" N 29° 00' 30.3" E	
E	22.09.04	05.01.06	Su seviyesi	1 saat	41° 12' 13" N 29° 05' 54" E	
F	18.11.04	04.01.06	Rüzgar hızı, doğrultusu, atmosfer basıncı	10 dakika	41° 00' 32.2" N 29° 00' 07.2" E	
G	19.11.04	05.01.06	Rüzgar hızı, doğrultusu, atmosfer basıncı	10 dakika	41°24" N 29°6' E	
K_0	09.04	09.05	Tuzluluk	aylık	41°13.50'N 29°08.00'E	İSKİ (2004 ve 2005)
M_8	09.04	09.05	Tuzluluk	aylık	40°56.40'N 28°55.66'E	İSKİ (2004 ve 2005)



(a) Ölçüm istasyonlarının konumları



(b) Akıntı hız ölçüm istasyonları

Şekil 3.3 Ölçüm istasyonlarının İstanbul Boğazı'ndaki konumları

Çizelge 3.1’de D ve E istasyonlarında uzun süreli sürekli su seviyesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla F ve G meteoroloji istasyonlarında Boğaz’ın güney ve kuzey girişlerindeki rüzgar hızı, doğrultusu ve atmosfer basıncı ölçümleri yapılmıştır. Söz konusu istasyonlarda kullanılan rüzgar sensörleri ile dikkate alınan örnekleme sürelerindeki (10 dk) ortalama rüzgar doğrultuları ile maksimum ve ortalama rüzgar hızları ölçülmüştür. Rüzgar doğrultusu sensörleri (Aanderaa 3590) ± 5 , rüzgar hızı sensörleri (Aanderaa 2740) ise $\pm \%2$ veya 0.2 m/s hassasiyet ile ölçüm yapmıştır. Sırasıyla F ve G istasyonları ile İstanbul Boğazı’nın güneyindeki ve kuzeyindeki rüzgar ölçümlerinin yapılması amaçlanmıştır. İstanbul Boğazı’ndaki ölçüm sistemi Asya ile Avrupa’yı birbirine bağlayan tüp geçit projesi kapsamında kurulmuş ve yeterince uzun süreli ölçümler yapılmıştır.

3.2.1 Akıntı İklimi

İstanbul Boğazı’nın Marmara Denizi girişine yakın bölgesindeki üç farklı akıntı istasyonunda 15 ay boyunca akıntı ölçümü gerçekleştirilmiştir. B istasyonuna ait farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki akıntı hızlarının zamanla değişimi Şekil 3.4’de görülmektedir. Negatif hızlar güney doğrultusundaki, pozitif hızlar ise kuzey doğrultusundaki hızları göstermektedir. Hızların -2.5 m/s ile 1.5 m/s arasında değişen değerler aldığı Şekil 3.4’ten görülmektedir. Maksimum hızlar yüzeyde (-1 m) ölçülmüştür. Üst tabaka hızları genellikle yüzeyden başlayarak üst ve alt tabakanın ayırım noktası olan ara kesite doğru azalmaktadır. Ara kesitten sonra yön değiştiren hızlar tabana doğru ters yönde artış göstermektedir. Derinlik boyunca hız değişiminin tipik bir örneği Şekil 3.5’de görülmektedir. B istasyonunda söz konusu ölçüm döneminde derinlik boyunca hız dağılımı için 4 farklı hız yapısı gözlenmiştir. Yılın % 31’inde güney doğrultusunda, % 2.2’sinde ise kuzey doğrultusunda tek tabakalı akım gözlenmiştir. İki ve üç tabakalı akımların bir yıllık dönem içerisindeki oranları ise sırasıyla % 65.3 ve % 1.5’dir.

A istasyonuna ait farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki akıntı hızlarının zamanla değişimi Şekil 3.6’da verilmiştir. Hızların 0.75 m/s ile -1 m/s arasında değişen değerler aldığı Şekil 3.6’dan görülmektedir. Güney doğrultusundaki üst tabaka hızları alt tabaka hızlarına göre daha büyük değerler almış ve maksimum hızlar yüzeyde (-1 m) ölçülmüştür.

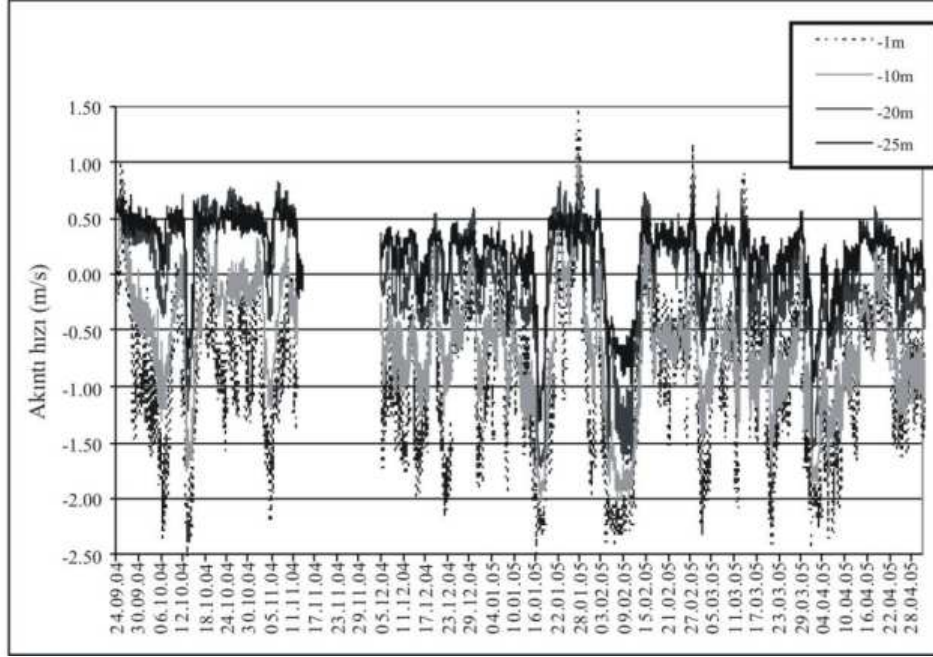
Yüksel vd. (2003) İstanbul Boğazı’nın güneyindeki dört farklı istasyonda (Dolmabahçe, Galatasaray Üniversitesi, Sarayburnu ve Paşalimanı açıklar) kısa süreli akıntı ölçümleri yapmışlardır. Derinlik boyunca hız profillerinden yüzeydeki güney doğrultusundaki akıntı bileşeninin zaman zaman yön değiştirdiği ve kuzeye döndüğünü görmüşlerdir. Bu durum

Karadeniz'den Marmara'ya doğru olan üst tabaka akımının Sarayburnu'ndan dönerek yön değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç Sarayburnu'na yakın yerleştirilen A istasyonunda yüzeydeki (-1 m) kuzey güney doğrultusundaki akıntı hızlarının (Şekil 3.5) B istasyonunda ölçülen akıntı hızlarından (Şekil 3.4) daha küçük olmasını açıklamaktadır.

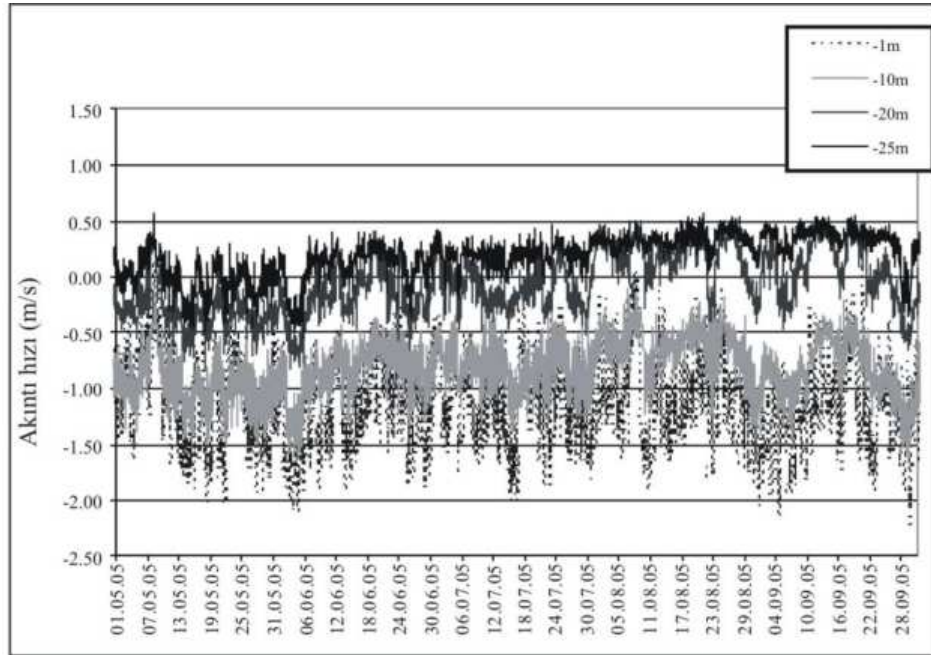
Şekil 3.7'de ise C istasyonuna ait farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki akıntı hızlarının zamanla değişimi görülmektedir. 15 aylık gözlem süresinin büyük bölümünde güney doğrultusunda tek tabakalı akım yapısının hakim olduğu Şekil 3.7'den görülmektedir. Bunun nedeni büyük oranda C istasyonunun konumlandırıldığı bölgedeki İstanbul Boğazı'nın geometrik ve batimetrik yapısından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.3'de İstanbul Boğazı'ndaki konumu görülen C istasyonunun bulunduğu bölgede Boğaz geometrisi ani olarak kıvrım yapmış ve doğrultu değiştirmiştir. Bu bölgede kıvrım nedeniyle meydana gelen merkezkaç kuvvetinin de etkisiyle iç ve dış kıyılarıdaki akım özellikleri farklılık gösterebilmektedir. Bu durum kuzey doğrultusundaki alt tabaka akımının Boğaz'ın bu bölgesinde dış kıyıya doğru yönelmesine ve iç kıyıya yakın C istasyonunda gözlem süresinin büyük bir bölümünde alt tabaka akım özelliklerinin ölçülememesine neden olmaktadır. Değişik derinlikler için A istasyonundaki kuzey-güney doğrultusundaki akıntı hızlarının değişimi (Şekil 3.6) de bu düşüncüyü desteklemektedir. A istasyonu kıvrımın dış kıyısına yakın olup bu istasyonda ölçülen kuzey doğrultusundaki alt tabaka hızları güney doğrultusundaki üst tabaka hızlarıyla yakın mertebelerde değerler almışlardır. B istasyonunda ise tabakalar arası hız farkı A istasyonundan daha büyük değerler almıştır (Şekil 3.4). Bu durumun da yine büyük oranda her iki istasyonun bulunduğu bölgedeki Boğaz taban topografyası ve geometrisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 3.3(b)).

Akıntı ölçümlerinin yapıldığı 15 ay boyunca D ve E istasyonlarında ise su seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Karadeniz girişindeki E istasyonu ile Marmara Denizi girişindeki D istasyonu arasındaki su seviyesi farkına ($\Delta\eta$) ait zaman serisi Şekil 3.8'de görülmektedir. Ölçüm periyodu boyunca su seviyesi farkı -0.20 m ile 0.60 m arasında değişen değerler almıştır. Ölçüm periyodunun büyük kısmında Karadeniz'in su seviyesi Marmara Denizi'nden daha büyük değerler almıştır. Su seviyesi farkı 4 bileşeni içermektedir. Bunlar (i) rüzgar kabarması ($\Delta\eta_w$), (ii) meteorolojik atmosfer basıncı ($\Delta\eta_p$), (iii) gel-git ($\Delta\eta_t$) ve (iv) uzun süreli hidrolojik değişimler (akarsu deşarjları) ($\Delta\eta_r$). İlk üç bileşen su seviyesinde kısa süreli değişime, sonuncu bileşen ise uzun süreli mevsimsel değişime neden olmaktadır. Şiddetli meteorolojik koşulların etkisiyle su seviyesindeki salınımın 2004'ün Ekim ayından başlayarak 2005'in Nisan ayna kadar arttığı Şekil 3.8'den görülmektedir. 2005 yılının Nisan ve Ekim ayları arasındaki dönemde ise su seviyesi farkının önceki döneme göre daha kararlı davranış

sergilediği görülmektedir. Akıntı hızlarındaki değişim için de benzer durum söz konusudur (Şekil 3.4).

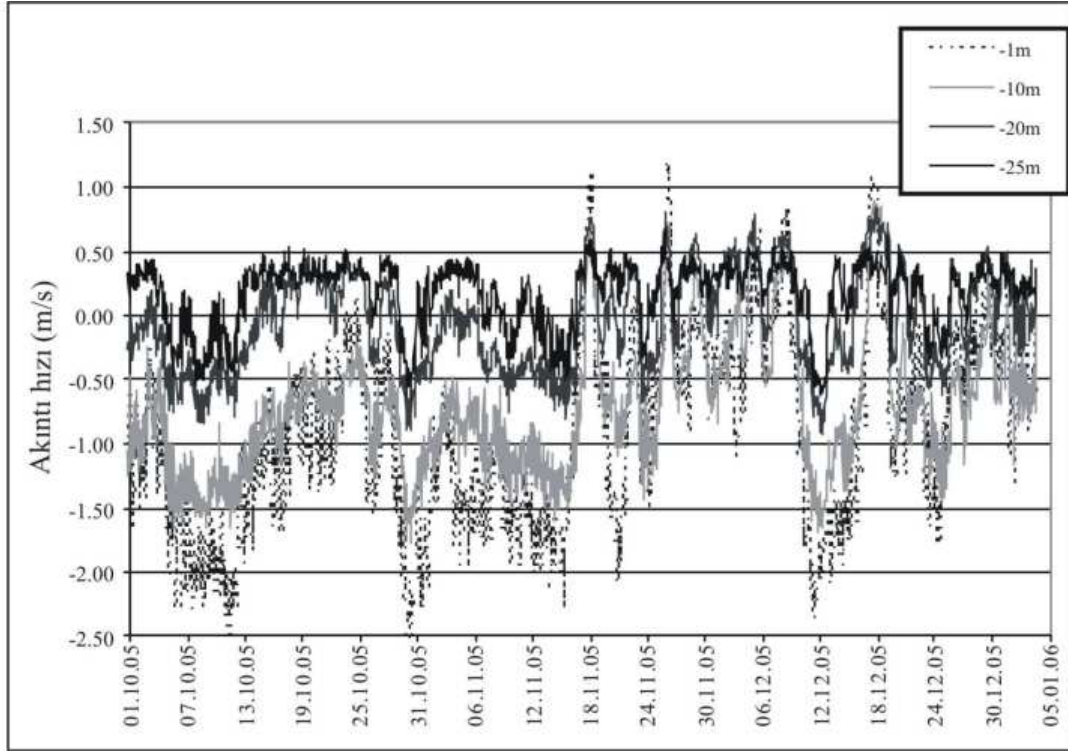


(a) 24.09.04-30.04.05



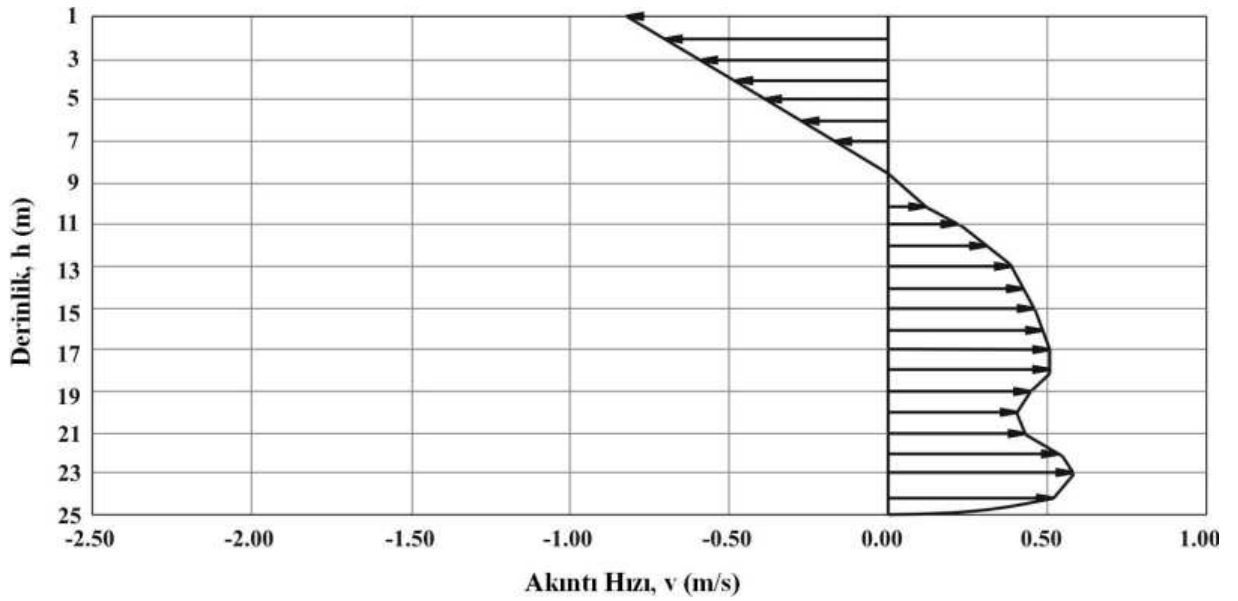
(b) 01.05.05-30.09.05

Şekil 3.4 B istasyonunda farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki hızların zamanla değişimi

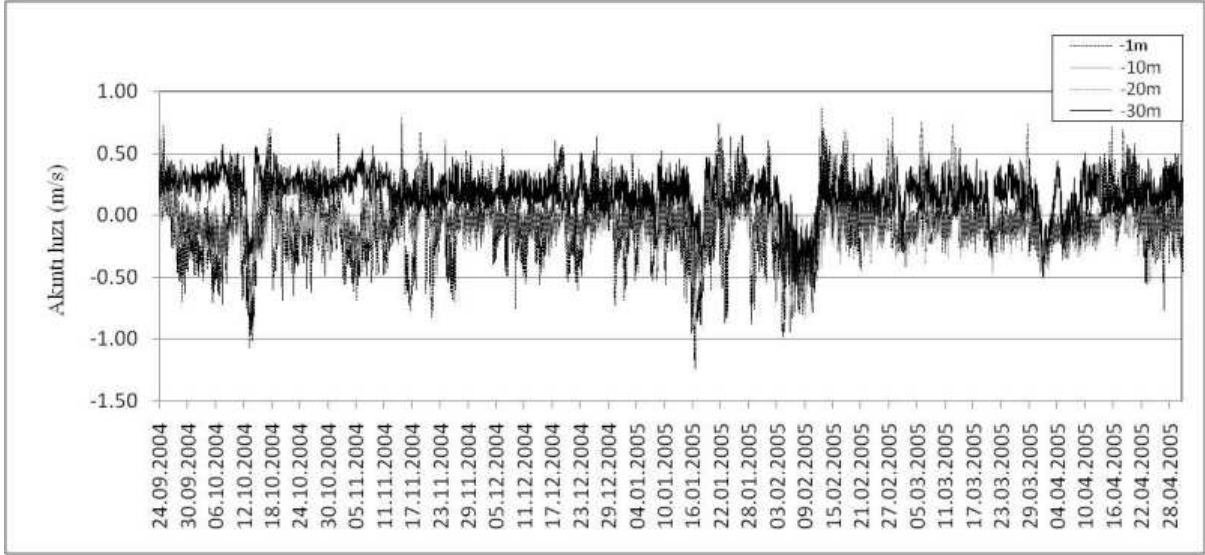


(c) 01.10.05-03.01.06

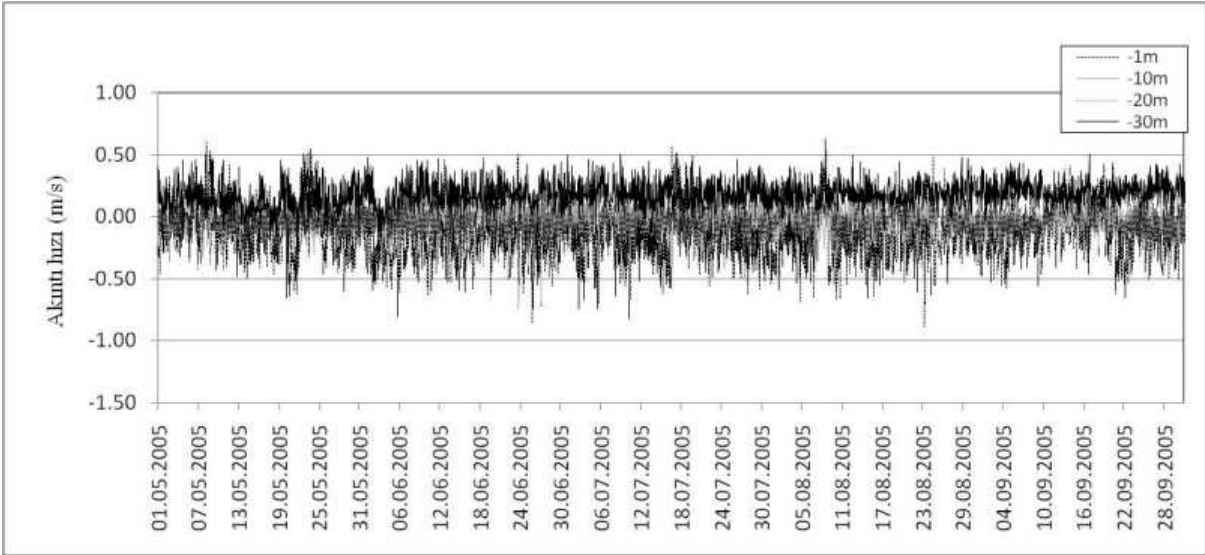
Şekil 3.4 Devam



Şekil 3.5 İki tabakalı akım yapısı, 23.01.2005 10:01 (sol taraf Marmara Denizi'ni, sağ taraf ise Karadeniz tarafını göstermektedir)

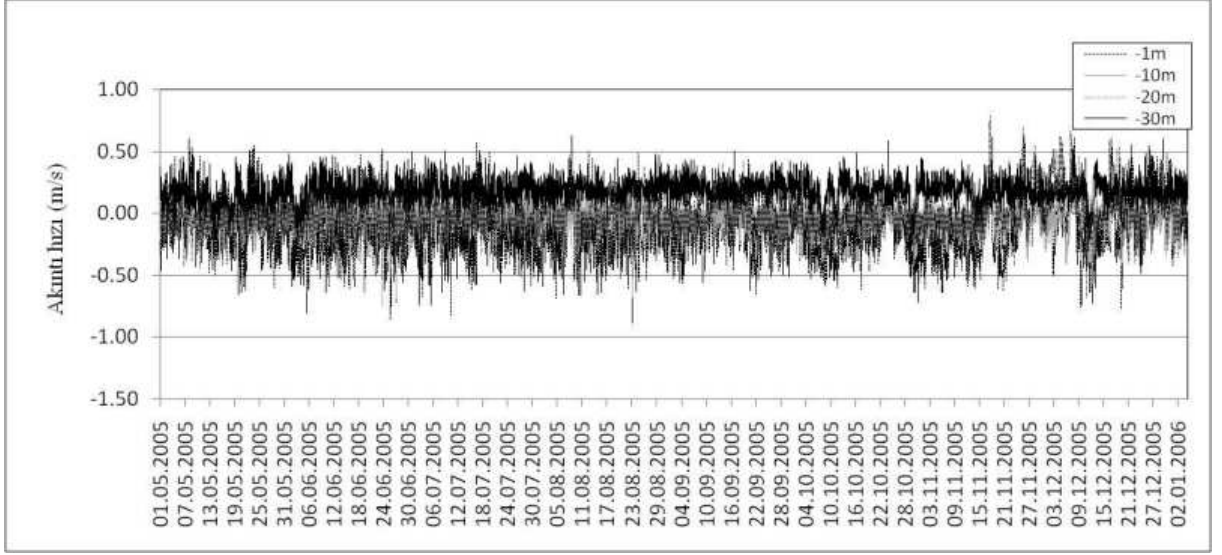


(a) 24.09.04-30.04.05



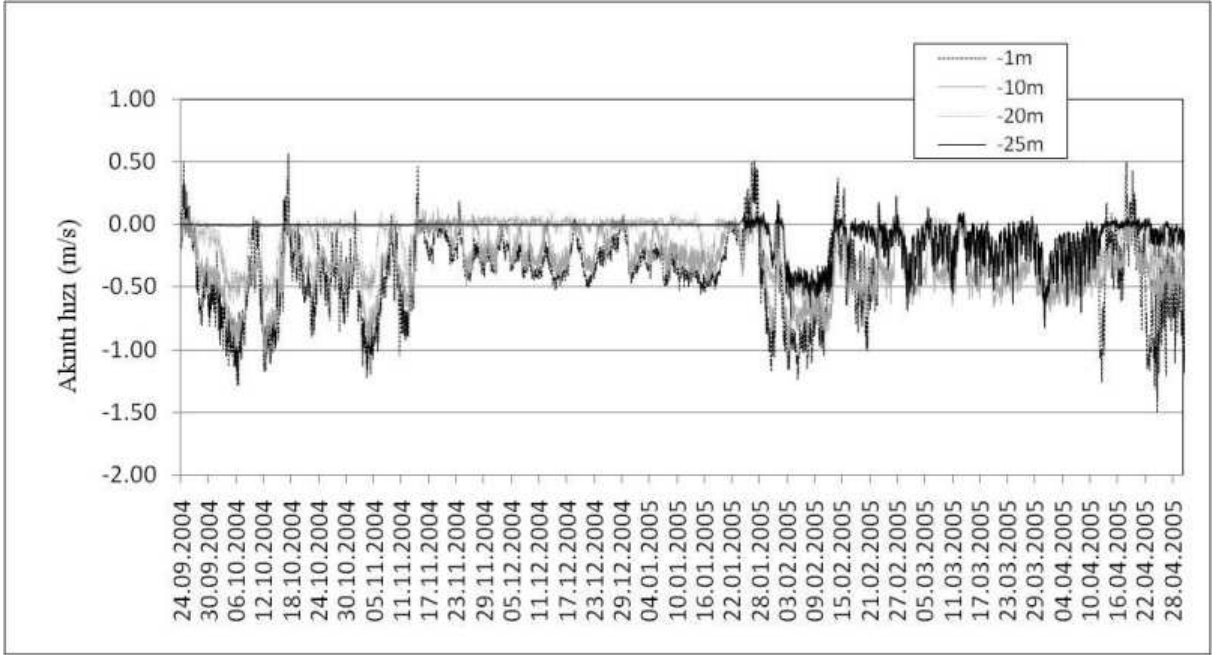
(b) 01.05.05-30.09.05

Şekil 3.6 A istasyonunda farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki hızların zamanla değişimi



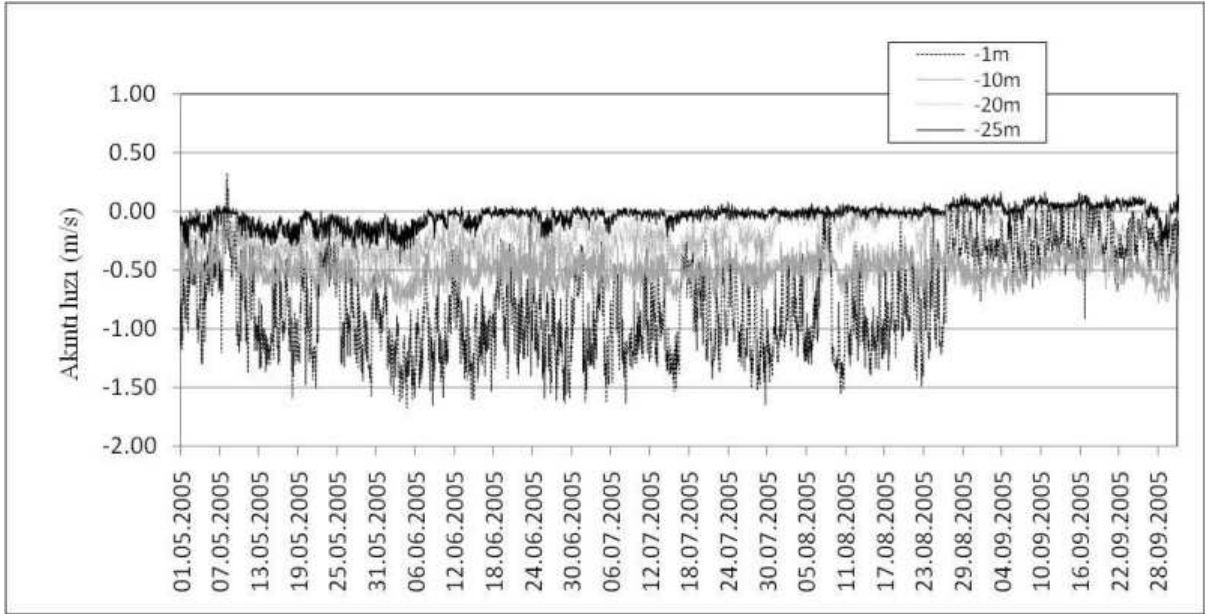
(c) 01.10.05-03.01.06

Şekil 3.6 Devam

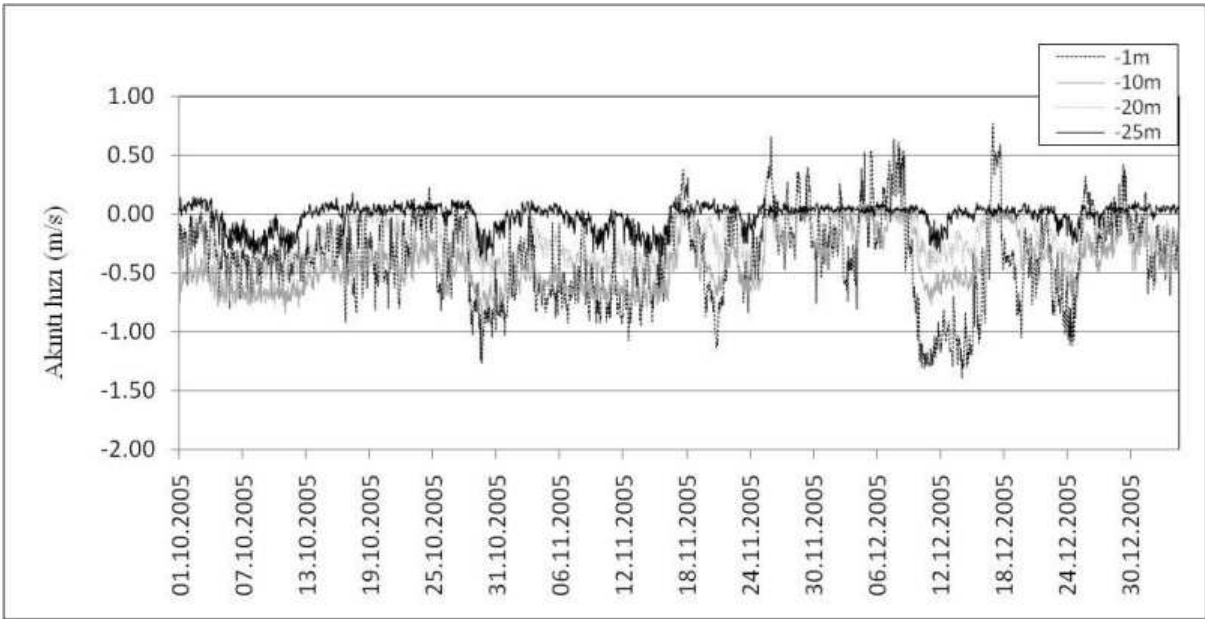


(a) 24.09.04-30.04.05

Şekil 3.7 C istasyonunda farklı derinliklerdeki kuzey-güney doğrultusundaki hızların zamanla değişimi

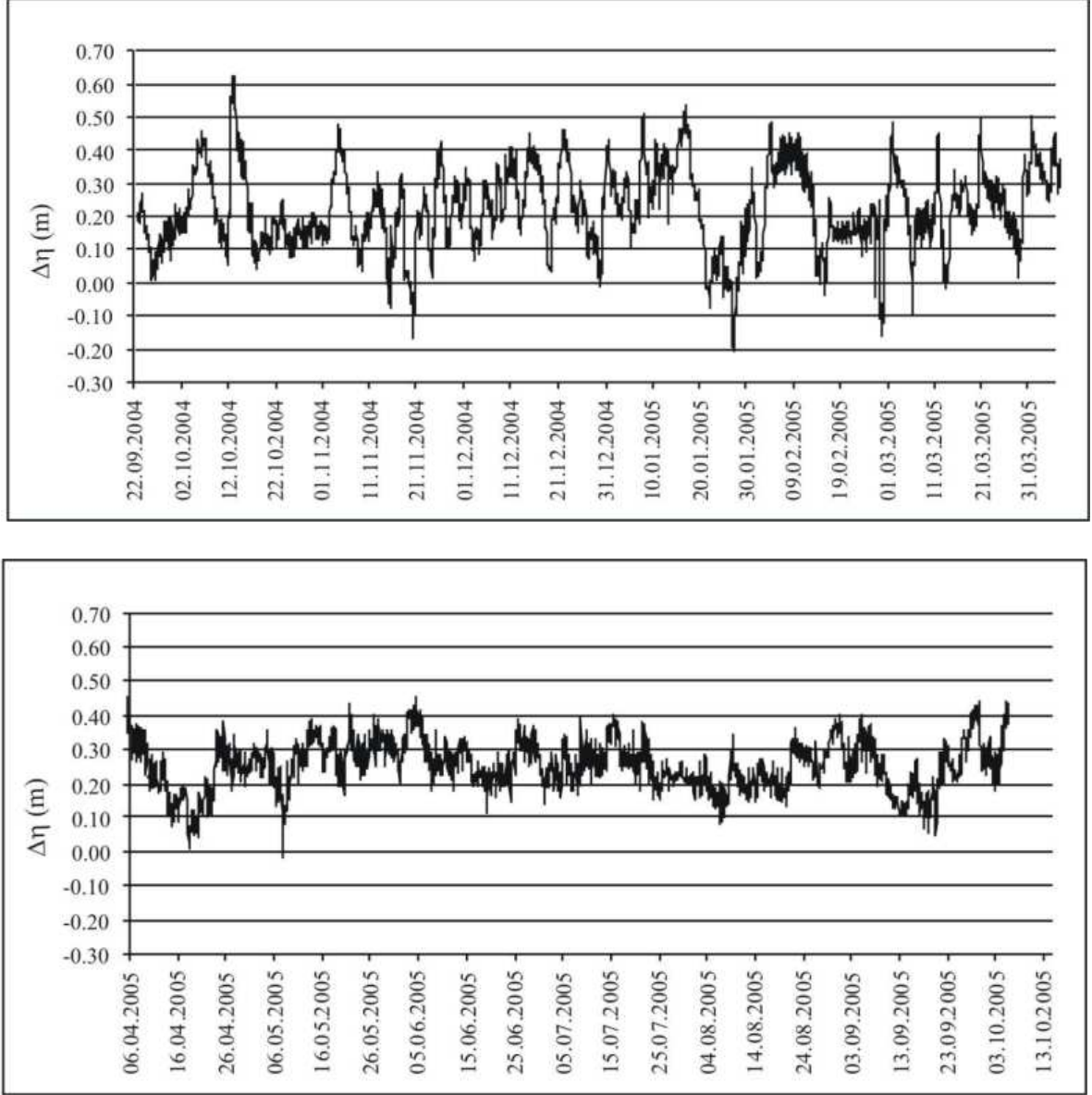


(b) 01.05.05-30.09.05



(c) 01.10.05-03.01.06

Şekil 3.7 Devam



Şekil 3.8 Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı ($\Delta\eta$)

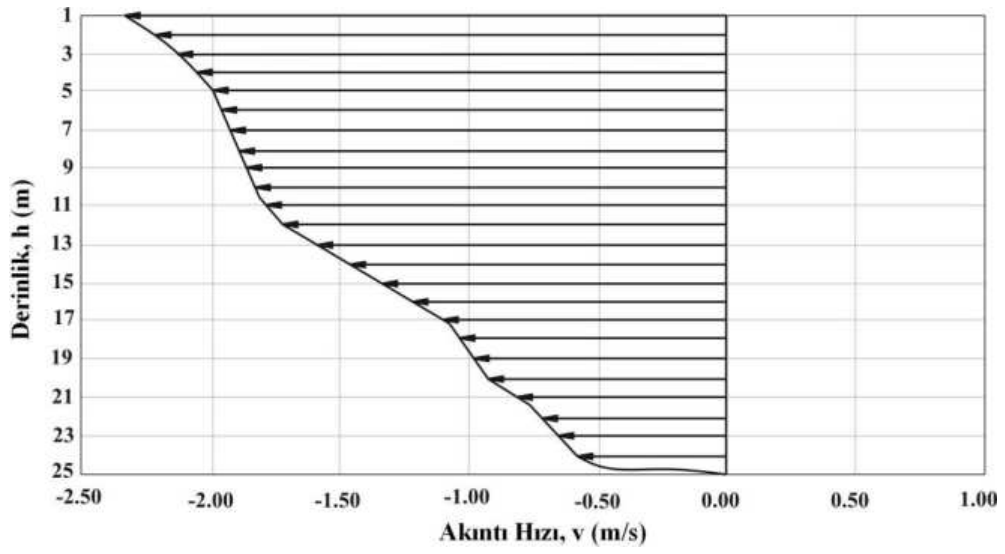
Ekstrem Meteorolojik Koşulların Etkisi:

1) Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru güney yönündeki tek tabaka akımı hali

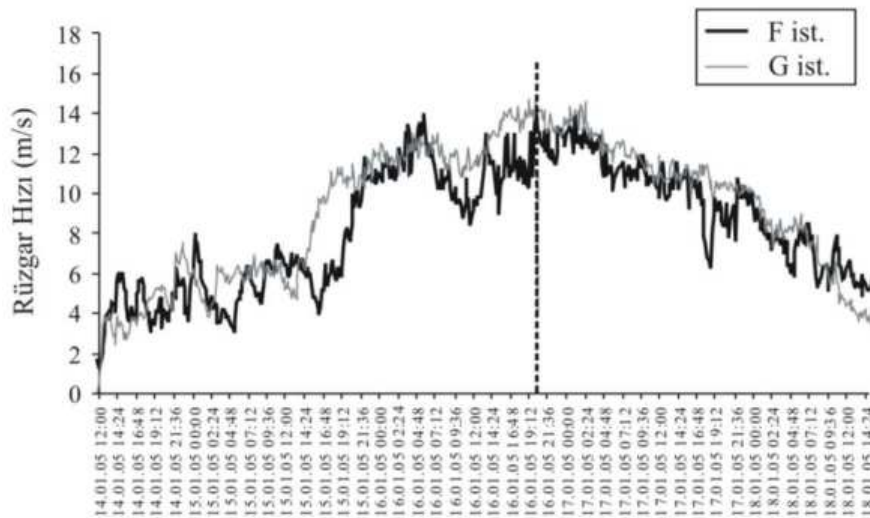
Fırtınalar gibi ekstrem meteorolojik koşullar İstanbul Boğazı'nda Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru güney doğrultusunda tek tabakalı akımın oluşmasına neden olabilmektedirler. Şekil 3.9'da tek tabakalı akım yapısına ait tipik bir hız profili görülmektedir. Dikkate alınan ölçüm anında (16.01.2005 20:01) yüzeyin 1 m altındaki güney yönündeki üst tabaka akım hızının 2.5 m/s mertebesine ulaştığı Şekil 3.9'dan görülmektedir.

Şekil 3.9'daki akıntı yapısının oluşmasına neden olan fırtınaya ait rüzgar hızlarının zamanla değişimi Şekil 3.10'da görülmektedir. Fırtınaya ait başlıca parametreler Çizelge 3.2'de

verilmiştir. Fırtınanın başlamasıyla rüzgar hızları artmış ve sırasıyla F ve G istasyonlarında 14.17 m/s ve 14.94 m/s değerlerine ulaşmıştır. NE yönündeki fırtınanın (Şekil 3.11) 98 saat boyunca etkili olduğu Çizelge 3.2’den görülmektedir. Ekstrem meteorolojik koşulların söz konusu olduğu zaman diliminde Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının ($\Delta\eta$) 0.5 m olduğu Şekil 3.12’den görülmektedir. Şekil 3.9’daki derinlik boyunca hız profili Çizelge 3.2’deki fırtına koşullarında meydana gelmiştir. Gözlemlerden su seviyesindeki ani değişimlerin ekstrem meteorolojik koşullardan kaynaklandığı görülmektedir. Güçlü kuzeyli rüzgarlar Boğaz’ın Karadeniz girişinde su seviyesinde kabarmaya (rüzgar kabarması) Marmara girişinde ise alçalmaya neden olmaktadır.



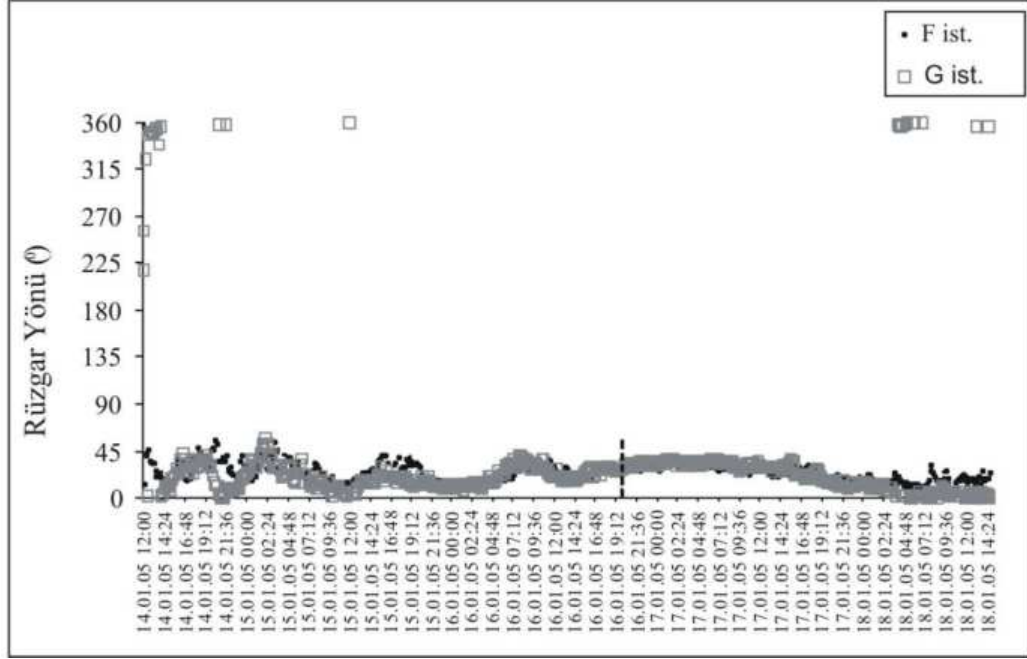
Şekil 3.9 B istasyonunda 16.01.2005 20:01’deki derinlik boyunca tek tabakalı hız profili (sol taraf Marmara Denizi’ni, sağ taraf ise Karadeniz tarafını göstermektedir)



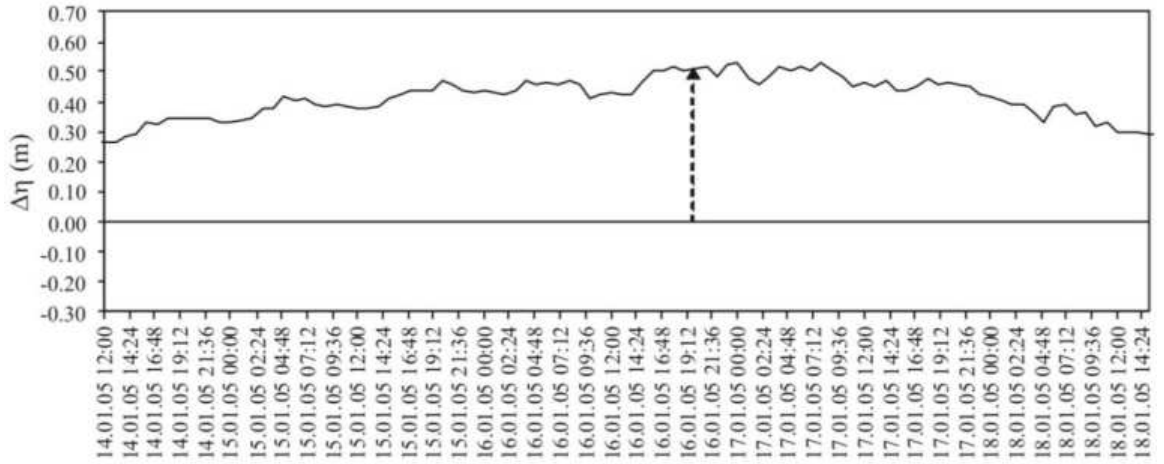
Şekil 3.10 14-18.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar hızlarının zamanla değişimi

Çizelge 3.2 14-18.01.2005 tarihindeki fırtınaya ait fırtına karakteristikleri

İstasyon	Fırtına Başlangıcı	Fırtına Sonu	Fırtına Süresi (saat)	Etkili yön	Maksimum rüzgar hızı (m/s)	Maks rüzgar zamanı	Beaufort ölçeği
F	14.01.05 12:00	18.01.05 14:24	98	NE	14.17	16.01.05 20:45	6-7
G	14.01.05 12:00	18.01.05 14:24	98	NE	14.94	16.01.05 20:05	6-7



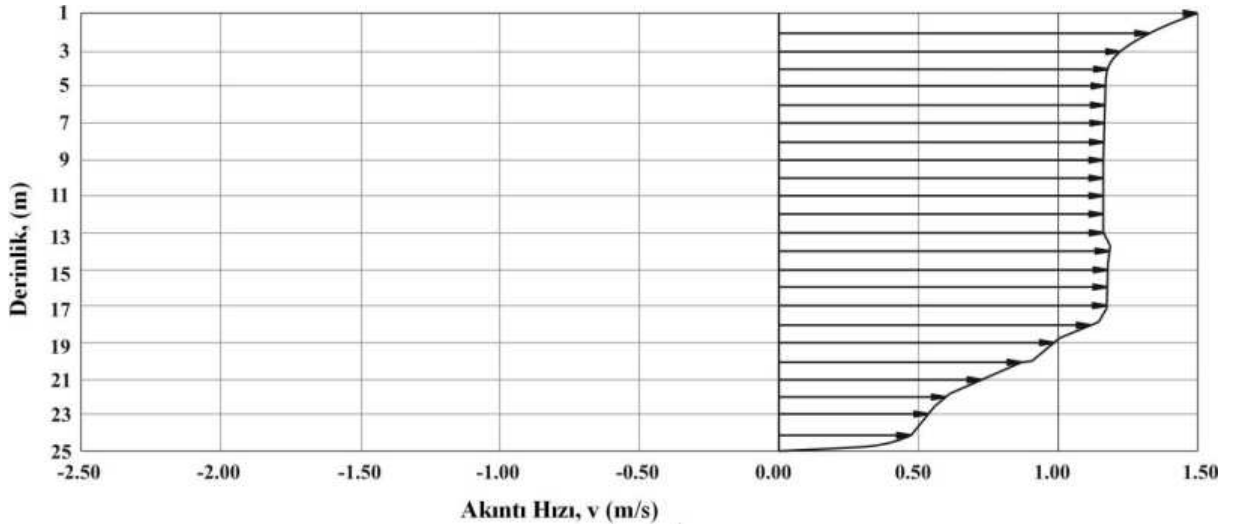
Şekil 3.11 14-18.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar yönlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.12 14-18.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi

2) Marmara Denizi'nden Karadenize doğru kuzey yönündeki tek tabaka akımı hali

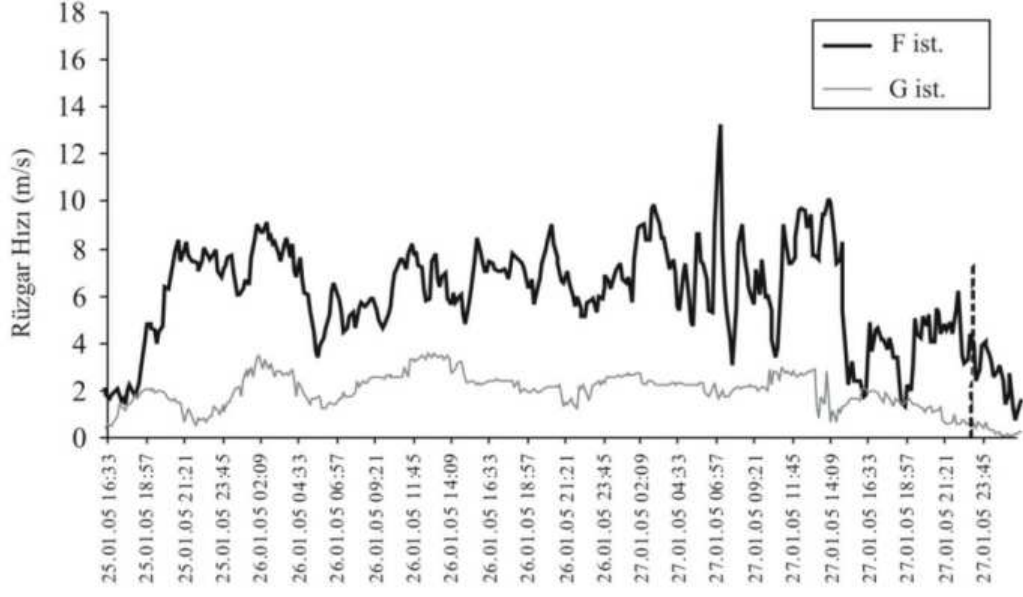
15 aylık gözlem periyodu boyunca Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru nadiren olsa da tek tabakalı akım hali gözlenmiştir. Çok şiddetli meteorolojik koşullar altında oluşan bu akım halinde -1 m'deki yüzey hızları zaman zaman 1 m/s'yi geçerek 1.5 m/s'ye ulaşmıştır. Bu akım haline ait B istasyonundan alınmış tipik bir hız profili Şekil 3.13'de görülmektedir. Söz konusu hız profilinin oluşmasına neden olan fırtınaya ait F ve G istasyonlarındaki rüzgar hızı ölçüm sonuçları Şekil 3.14'de görülmektedir. SSW yönünden etkili olan fırtına (Şekil 3.15) 55 saat boyunca sürmüştür ve F istasyonundaki maksimum rüzgar hızı 13.29 m/s olarak ölçülmüştür (Çizelge 3.3). Kuvvetli güneyli fırtınalar İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi ve Karadeniz girişlerinde su seviyesinde sırasıyla kabarma ve alçalmaya neden olmuştur. Dikkate alınan güneyli fırtına dönemi için Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi Şekil 3.16'da görülmektedir. Şekil 3.13'deki hız profilinin ölçüm anında Marmara Denizi su seviyesinin Karadeniz'deki su seviyesinden 10 cm fazla olduğu Şekil 3.16'dan görülmektedir.



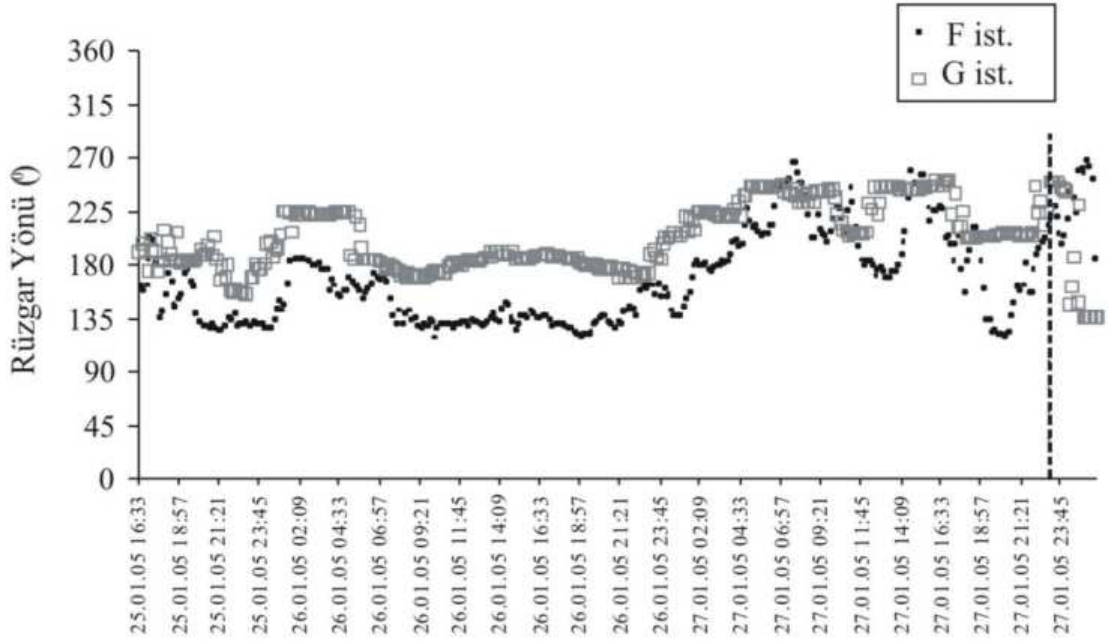
Şekil 3.13 B istasyonunda 16.01.2005 20:01'deki derinlik boyunca tek tabakalı hız profili (sol taraf Marmara Denizi'ni, sağ taraf ise Karadeniz tarafını göstermektedir)

Çizelge 3.3 14-18.01.2005 tarihindeki fırtınaya ait fırtına karakteristikleri

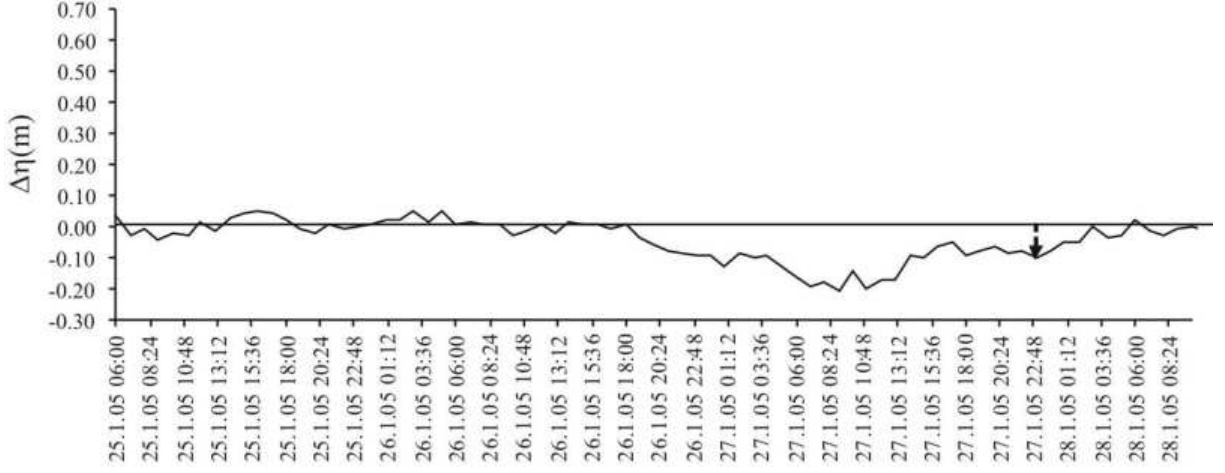
İstasyon	Fırtına Başlangıcı	Fırtına Sonu	Fırtına Süresi (saat)	Etkili yön	Maksimum rüzgar hızı (m/s)	Maks rüzgar zamanı	Beaufort ölçeği
F	25.01.05 16:33	28.01.05 23:45	55	SE-SSW	13.29	27.01.05 07:08	6-7
G	25.01.05 16:33	28.01.05 23:45	55	SW	3.62	26.01.05 12:45	2-3



Şekil 3.14 25-28.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar hızlarının zamanla değişimi



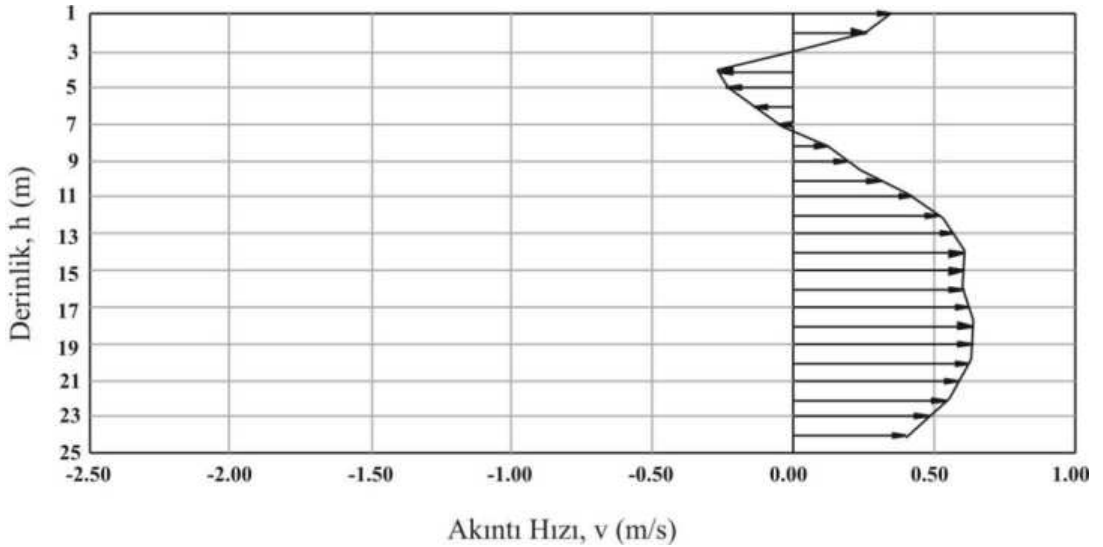
Şekil 3.15 25-28.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada F ve G istasyonlarındaki rüzgar yönlerinin zamanla değişimi



Şekil 3.16 25-28.01.2005 tarihleri arasındaki fırtınada Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi

3) Üç Tabakalı Akım Hali

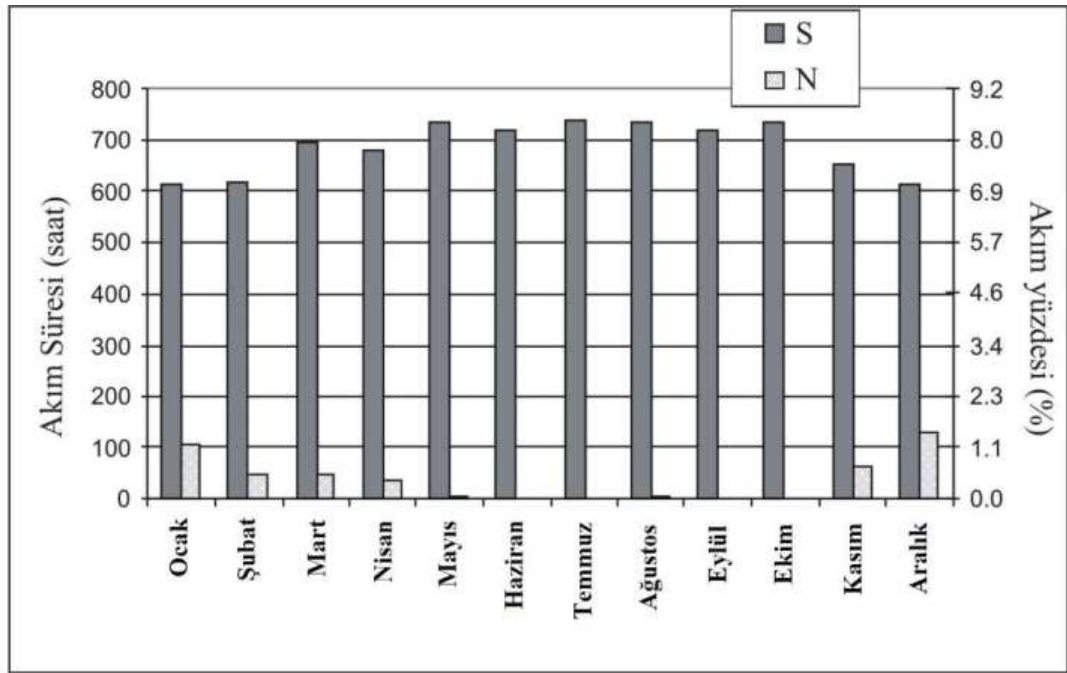
İstanbul Boğazı'nda görülen diğer tipik bir akım hali de derinlik boyunca üç tabakalı akım halidir. Kuvvetli güneyli rüzgarların üst tabaka akımının yüzeye yakın katmanlarını bloke edip kuzeye doğru hareket ettirmesiyle bu akım yapısı meydana gelmektedir. Söz konusu akım yapısına ait hız profili Şekil 3.17'de görülmektedir. Üç tabakalı akım halinde yüzeye yakın bölgede alt tabaka akımıyla aynı yönde kuzey yönünde bir akım, bu tabakadan ara kesite kadar olan bölgede güney yönünde bir akım ve ara kesit ile taban arasındaki derinliklerde ise kuzey yönünde bir akım yapısı oluşmaktadır.



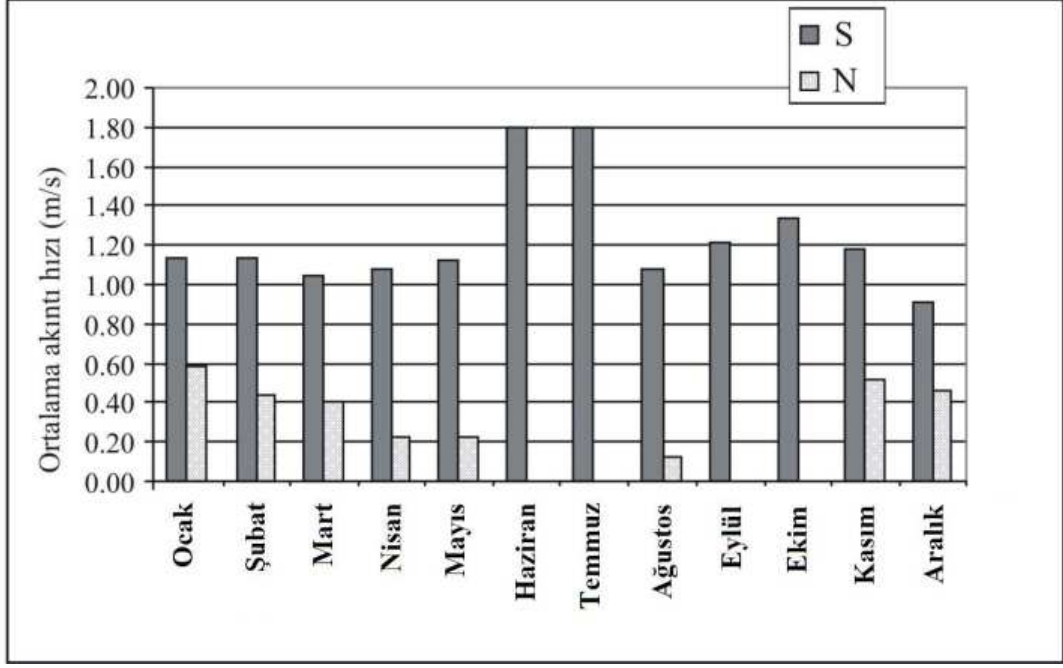
Şekil 3.17 15.02.2005 tarihinde 22:01'de ölçülmüş üç tabakalı akım yapısı (sol taraf Marmara Denizi'ni, sağ taraf ise Karadeniz tarafını göstermektedir)

B istasyonunda -1 m'de bir yılda kuzey ve güney yönündeki meydana gelen akıntı süreleri ve gerçekleşme yüzdeleri Şekil 3.18'de görülmektedir. Nadir olarak meydana gelen kuzey

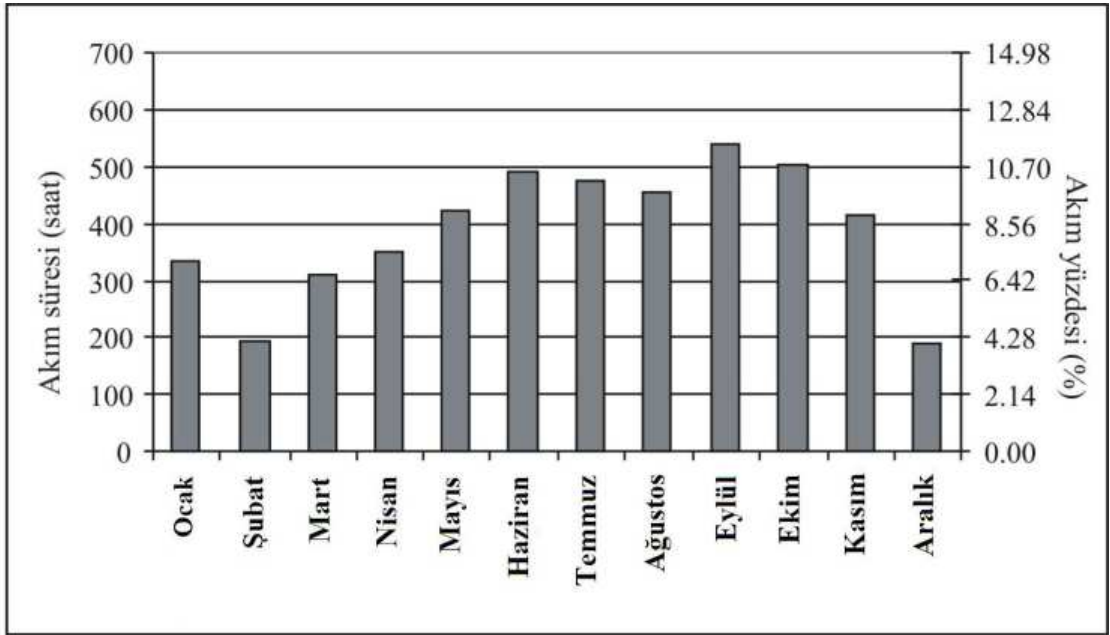
yönündeki akımın genellikle Kasım ile Mayıs ayları arasında olduğu Şekil 3.18'den görülmektedir. -1 m'deki kuzey ve güney yönündeki akıntı hızlarının aylık ortalamaları ise Şekil 3.19'da verilmiştir. Güney yönündeki ortalama hızlar genellikle 1 m/s'nin üzerinde değerler almış ve Haziran ile Temmuz aylarında ise en büyük hız ortalamalarına (1.80 m/s) ulaşmışlardır. Haziran ile Kasım ayları arası dönemde nadir olarak kuzey yönünde tek tabakalı akım olduğu Şekil 3.19'dan görülmektedir. B istasyonunda 1 yıllık dönemde 1 m/s'nin üzerindeki akıntı hızlarının aylara göre saatlik dağılımları ile oluşma yüzdeleri Şekil 3.20'de görülmektedir. Güney yönündeki akıntı Nisan ile Ekim ayları arasında artmış yılın geri kalanında ise azalmıştır.



Şekil 3.18 B istasyonunda -1 m derinlikte kuzey ve güney doğrultusundaki yıllık akıntının aylık oluşma süreleri ve yüzdeleri



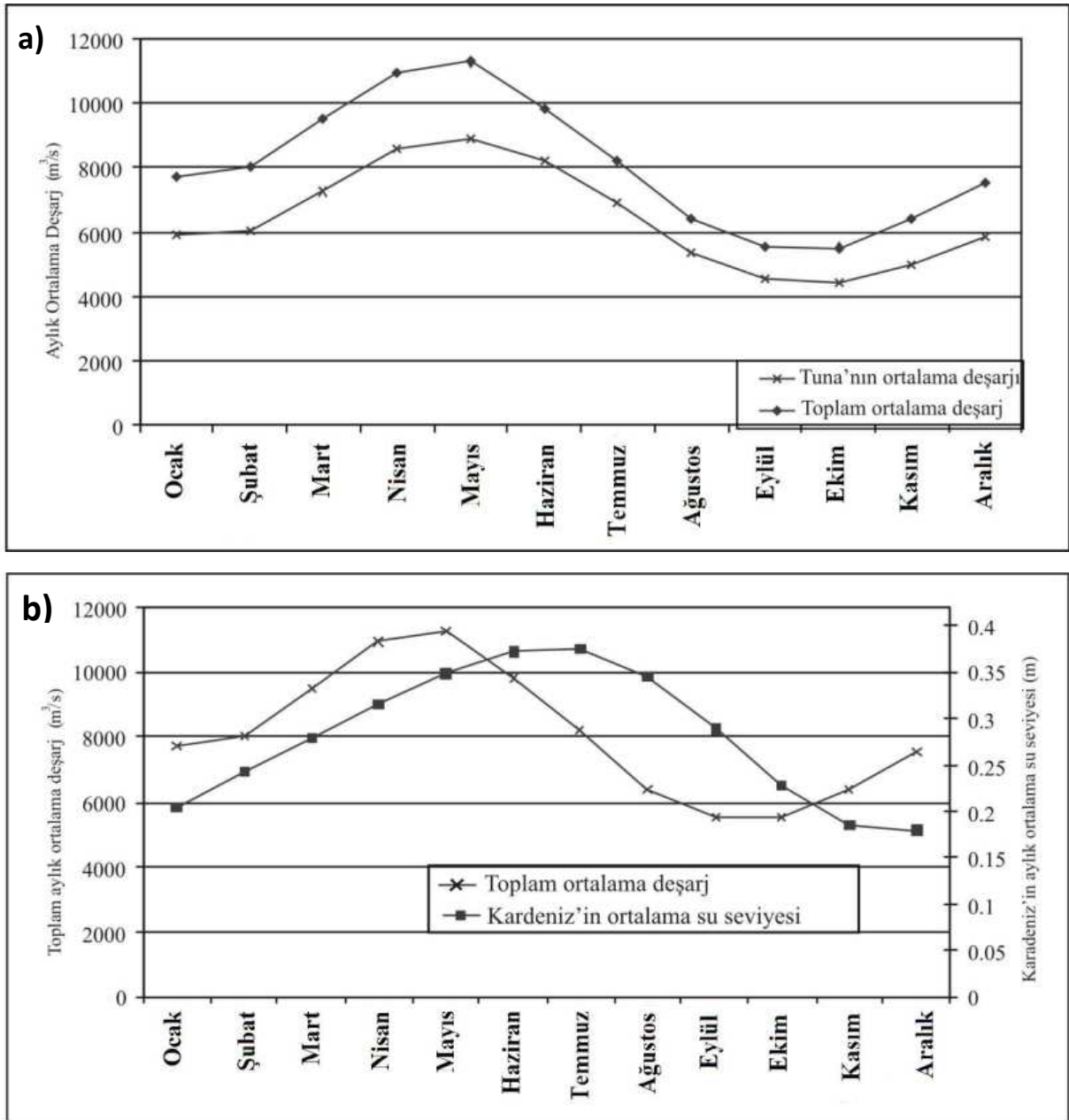
Şekil 3.19 B istasyonunda -1 m kuzey ve güney doğrultusundaki akıntı hızlarının aylık ortalamaları



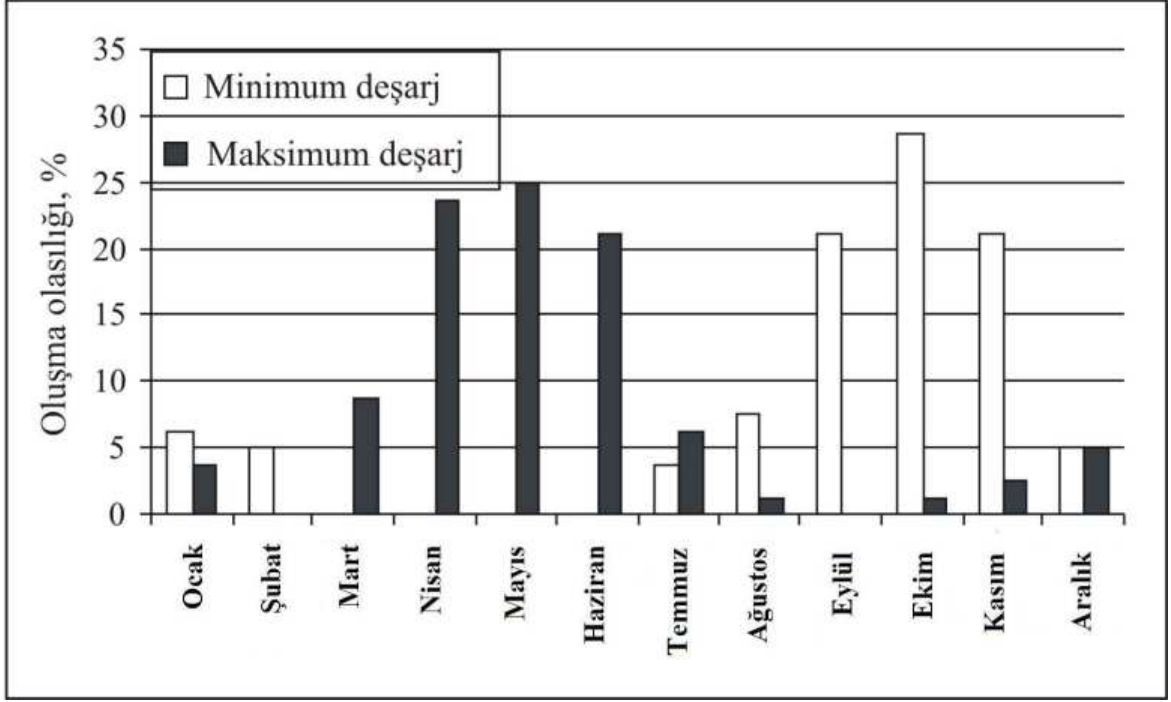
Şekil 3.20 B istasyonunda -1 m'de kuzey güney doğrultusunda 1 m/s üzerinde meydana gelen akıntıların aylık periyotları ve yüzdeleri

3.2.2 Boğaz'a Giren Akım Koşullarının Etkisi

Sur vd. (1994)'ün de aralarında bulunduğu araştırmacılar Boğaz ile ilgili yapmış oldukları daha önceki çalışmalarda Karadeniz'e giren net tatlı su debisinin uzun dönemde İstanbul Boğazı'nın ortalama su seviyesi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ancak önceki çalışmalarda tatlı su girişinin İstanbul Boğazı'ndaki su seviyesi değişimi üzerinde yarattığı böylesi bir etki ile uzun süreli ölçümlere yer verilmemiştir. Tuna, Dinyeper ve Dinyester akarsularının aylık ortalama deşarjları 1921 ile 2001 yılları arasındaki deşarj verileri analiz edilerek belirlenmiştir [1]. Sırasıyla Şekil 3.2(b) ve 3.21(a)'da her üç akarsuyun Karadeniz'deki konumları ve bir yıl boyunca aylık ortalama deşarjlarının değişimi görülmektedir. Yıl boyunca Tuna'nın aylık ortalama deşarjının 4,500-9,000 m³/s arasında değişen değerler aldığı Şekil 3.21(a)'dan görülmektedir. Her üç akarsuyun aylık toplam deşarjının ise 5,500-11,000 m³/s arasında değiştiği aynı şekilde görülmektedir. Karadeniz'e dönük tatlı su akışının büyük bir kısmı Tuna nehri tarafından karşılanmaktadır. Tuna'nın Karadeniz'e taşıdığı tatlı su miktarı diğer akarsuların % 80'i civarındadır. Şekil 3.22'de Tuna'nın aylık maksimum ve minimum deşarjının yıllık değişimi verilmiştir. Aylık maksimum ve minimum deşarjlar sırasıyla 15,000 ile 2,000 m³/s arasında değişim göstermektedir. Şubat ayından itibaren artmaya başlayan Tuna nehrinin deşarjı Mayıs ayında maksimum değerine ulaşmıştır. Minimum deşarj Ekim ayında gözlemlenmiştir. Ayrıca Boğaz'ın Karadeniz girişindeki E istasyonu su seviyesi ölçümlerinden aylık ortalama su seviyesi değişimleri elde edilmiştir (Şekil 3.21(b)). Şekil 3.22'de maksimum ve minimum aylık deşarjların oluşma olasılığı verilmiştir. Karadeniz girişindeki maksimum ve minimum su seviyeleri sırasıyla Temmuz ve Aralık aylarında gözlemlenmiştir (Şekil 3.21(b)). Ortalama su seviyesi değişimi ile Tuna debisinin Karadeniz'e girişi arasında 2 aylık bir faz farkı olduğu Şekil 3.21(b)'den görülmektedir. İstanbul Boğazı su seviyesinin Karadeniz'e dönük tatlı su girişinden kaynaklı etkiye uzun sürede cevap verdiği Şekil 3.21 (b)'den görülmektedir.



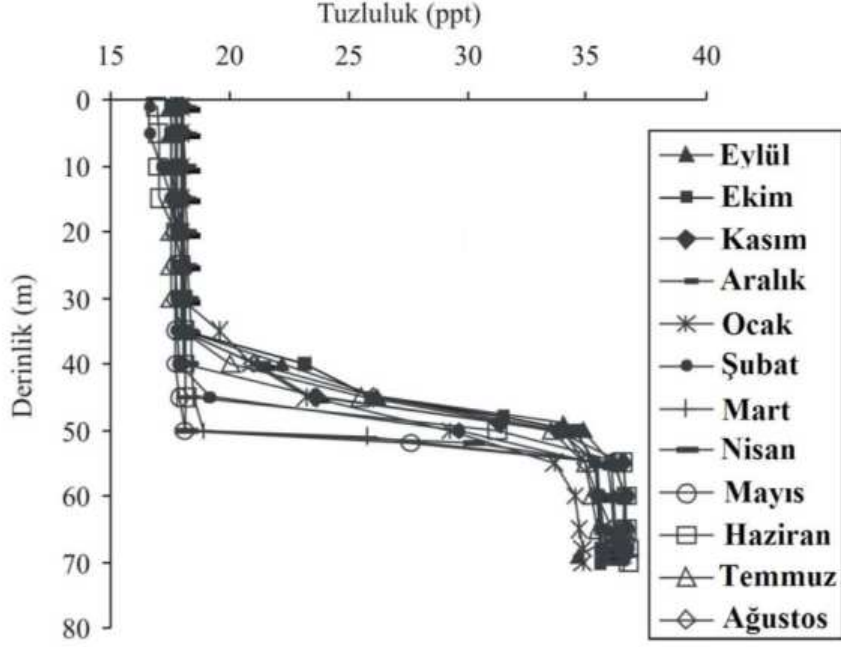
Şekil 3.21 Karadeniz'e dönük tatlı su deşarjları (a) aylık ortalama deşarj değişimleri [1] ve (b) Tuna'nın aylık ortalama deşarjları ve Karadeniz'in aylık ortalama su seviyesi



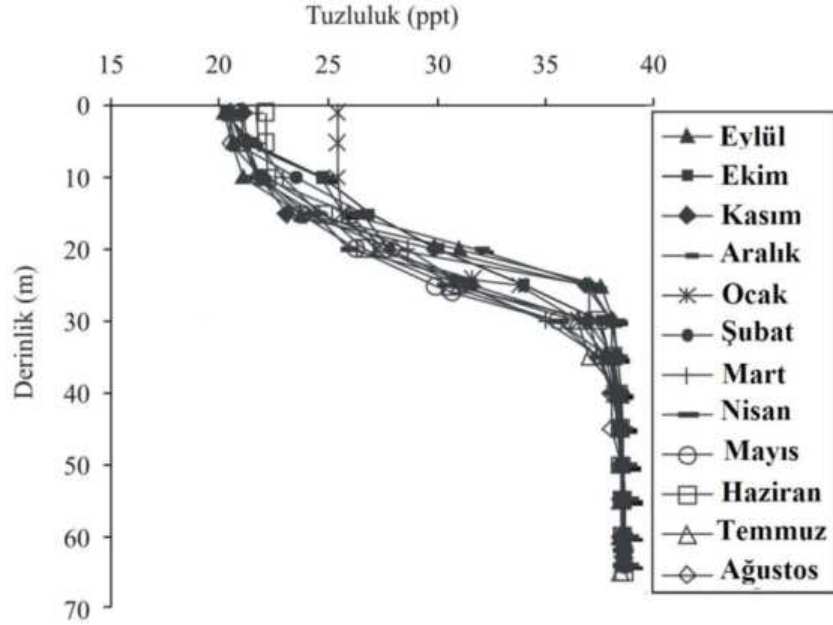
Şekil 3.22 Tuna'nın aylık maksimum ve minimum deşarjının oluşma olasılıklarının yıllık değişimi

İSKİ(2004, 2005) tarafından Eylül 2004 ile Ağustos 2005 tarihleri arasında İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişindeki K_0 ve Marmara girişindeki M_8 istasyonlarındaki yapılan derinlik boyunca tuzluluk ölçümü profilleri sırasıyla Şekil 3.23 ve 3.24'de verilmiştir. Ölçüm dönemi boyunca üst tabaka akımının tuzluluğunun 18 ppt, alt tabaka akımının ise 36.5 ppt civarında değerler almış oldukları Şekil 3.23'den görülmektedir. Ara tabaka kalınlığının üst sınırı -35 m ile -50 m arasında değişen değerler almış buna karşılık alt sınırı ise -50 m ile -55 m arasında değişen değerler almıştır. Böylece dikkate alınan dönem için ara tabaka kalınlığı maksimum 20 m minimum ise 5 m değerini almıştır. 20 m'lik maksimum ara tabaka kalınlığının gözlemlendiği Aralık ayında üst tabakanın kalınlığı 35 m civarında değer almıştır. Şubat ayı ile birlikte artmaya başlayan üst tabakanın kalınlığı 45 m'ye çıkmış Mart ayında ise 50 m'ye ulaşmıştır. Aynı dönemde ara tabaka kalınlığı azalarak Şubat ve Mart aylarında sırasıyla 10 m ve 5 m'ye inmiştir. Bu dönem Karadeniz'de su seviyesinin Şubat'tan başlayarak Haziran'a kadar artış gösterdiği Şekil 3.21(b)'deki dönemi kapsamaktadır. Ölçüm dönemi boyunca üst tabakanın tuzluluğunun 21 ppt civarında alt tabakanın tuzluluğunun ise 38 ppt civarında değerler aldığı Şekil 3.24'den görülmektedir. M_8 istasyonu Marmara Denizi'nde ve derin bir konumda olmasına karşın bu bölgede dahi biraz karışımın da içinde bulunduğu üst tabaka akımı olarak karakterize edilebilecek 5-10 m kalınlığında bir akım bölgesi varlığını korumuştur. Söz konusu akım bölgesinin ara tabaka akımını mı üst tabaka akımını mı karakterize ettiğini belirlemek oldukça zor olmaktadır. Alt tabaka akımının üst

sınırının -25 m ile -30 m arasında değiştiği Şekil 3.24'den görülmektedir. Şekil 3.24'den tuzluluğun Ocak ayında yüzeye yakın bölgede ve yüzeyde 25 ppt'ye çıktığı görülmektedir. Bu artışa Çizelge 3.3'de özetlenen güneyli rüzgarların yol açtığı fırtınaların meydana getirdiği karışımın neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.23 K₀ istasyonunda derinlik boyuca tuzluluk değişimi grafiği



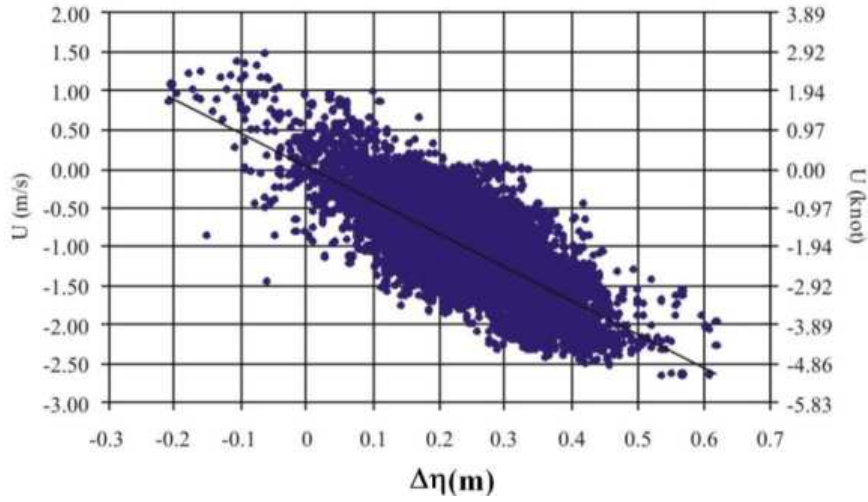
Şekil 3.24 M₈ istasyonunda derinlik boyuca tuzluluk değişimi grafiği

İstanbul Boğazı'ndaki akım yapısı üzerinde Ekim ile Nisan ayları arasındaki dönemde meteorolojik koşullar daha etkili olmuş, buna karşılık Nisan ile Ekim ayları arasında ise mevsimsel değişimlere neden olan ve uzun dönemli etki olarak adlandırılan Karadeniz'e

dönük tatlı su girişi daha etkili olmaktadır. Uzun dönemli mevsimsel değişimler İstanbul Boğazı'nda daha kararlı bir akım yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Kısa dönemli etki olarak adlandırılan meteorolojik koşullardaki değişimler ise İstanbul Boğazı su seviyesinin çalkantılı bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak oldukça değişken akıntı yapısı meydana gelmektedir. Kısa dönemli etkiler uzun dönemli değişimlerin üzerine eklenmektedir.

3.2.3 Akıntı Davranış Analizi

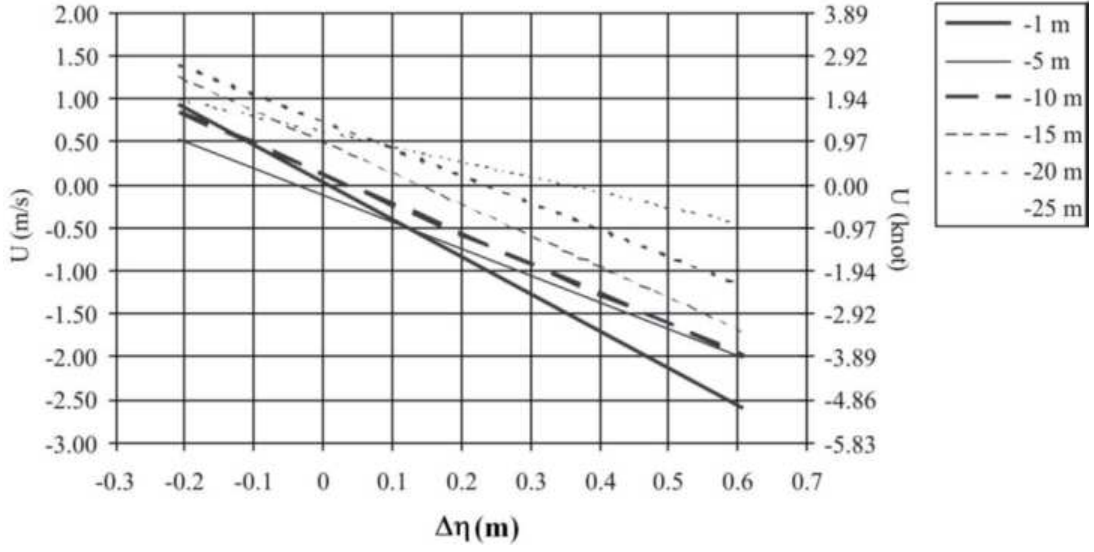
Meteorolojik koşullardan kaynaklı kısa dönemli etkiler ve Karadeniz'e yönelik tatlı su girişinden kaynaklı uzun dönemli etkiler İstanbul Boğazı'nın su seviyesi değişimi üzerinde en büyük etkiye sahip iki önemli mekanizmadır. İstanbul Boğazı'nda B istasyonunda -1 m'deki su seviyesi farkı ile akıntı hızı arasındaki korelasyon Şekil 3.25'den görülmektedir. Şekil 3.25'de su seviyesi farkına karşılık tüm doğrultulardaki akıntı hızları çizilmiştir. Şekil 3.25'deki negatif hızlar güney doğrultusundaki üst tabaka akımını, pozitif hızlar ise kuzey doğrultusundaki alt tabaka akımını göstermektedir. Negatif su seviyesi farkı Marmara Denizi'nin su seviyesinin Karadeniz'den daha yukarıda olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 3.25'deki su seviyesi farkı ile akıntı hızı arasındaki korelasyon en küçük kareler yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.25 B istasyonunda -1 m'de su seviyesi farkı ile akıntı hızı arasındaki korelasyon grafiği

Şekil 3.26'da ise B istasyonunda -5, -10, -15, -20 ve -25 m'lerdeki su seviyesi farkı ile akıntı hızları arasındaki korelasyonlar görülmektedir. B istasyonundaki genel akıntı yapısından -20 m civarında üst ve alt tabakaları birbirinden ayıran bir ara tabakanın var olduğu görülmektedir. Derinlere inildikçe korelasyon doğrularına ait eğimlerinin azaldığı Şekil

3.26'dan görülmektedir. Bu durum üst tabaka akımının Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı değişimlerine karşı daha hassas olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.26 B istasyonunda -5, -10, -15, -20 ve -25 m'lerdeki su seviyesi farkı ile akıntı hızları arasındaki korelasyonlar

Akıntı ölçümünün yapıldığı bölgedeki akıntı özelliklerini belirlemek amacıyla B istasyonunda değişik derinlikler (-1, -5, -10, -15, -18, -20, -23 ve -25 m) için akıntı gülleri oluşturulmuştur (Şekil 3.27). Her bir derinlikteki akıntı özelliklerinin birbirinden farklı oldukları göze çarpmaktadır. Şekil 3.27'deki ilk dört akıntı gülü üst tabaka akımı özelliklerini temsil etmektedir. -1 m'deki akımın bir miktar SW ve SE yönlerine sapmasına karşın esas olarak S yönünde olduğu Şekil 3.27 (a)'dan görülmektedir. Bu sapmanın rüzgar etkisiyle meydana geldiği düşünülmektedir. -5 m'de güney (S) yönündeki akımın -1 m'ye göre daha belirgin olduğu Şekil 3.27 (b)'den görülmektedir. -5 m'den sonraki derinliklerde akım yön değiştirmiş ve SSE'ye dönmüştür. Bu duruma aşağıdaki iki mekanizmanın yol açtığı düşünülmektedir:

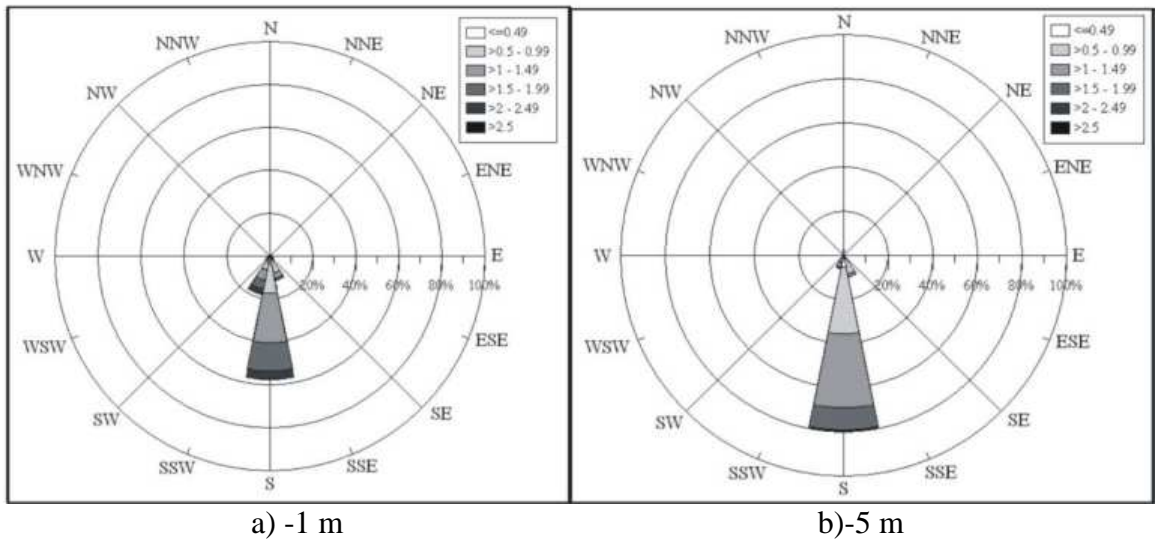
- Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru olan üst tabaka akımının Haliç'ten İstanbul Boğazı'na giren akımın etkisiyle SSE'ye doğru yönlendirilmesi. Bu etki Şekil 3.27 (c)-(e) ve kısmen de Şekil 3.27 (f)'den görülmektedir.
- Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle oluşan tali akım üst tabaka akımını dış kıyıya (batıya) doğru itmiş ve akımın yönü SSE'den S'ye dönmüştür. Bu mekanizma üst tabaka akımının özellikle ilk 5 m'si üzerinde etkili olmuş, bundan sonraki derinliklerde etkisi giderek azalmıştır.

Şekil 3.27 (e) ve (h)'de görüldüğü gibi ölçüm istasyonunun bulunduğu bölgede İstanbul Boğazı'nın doğrultusunun NS olmasına karşılık alt tabaka akımının yönü N-NNW'dir. Alt tabaka akımı İstanbul Boğazı'na Marmara girişinden N yönünde girmekte ancak bu bölgedeki

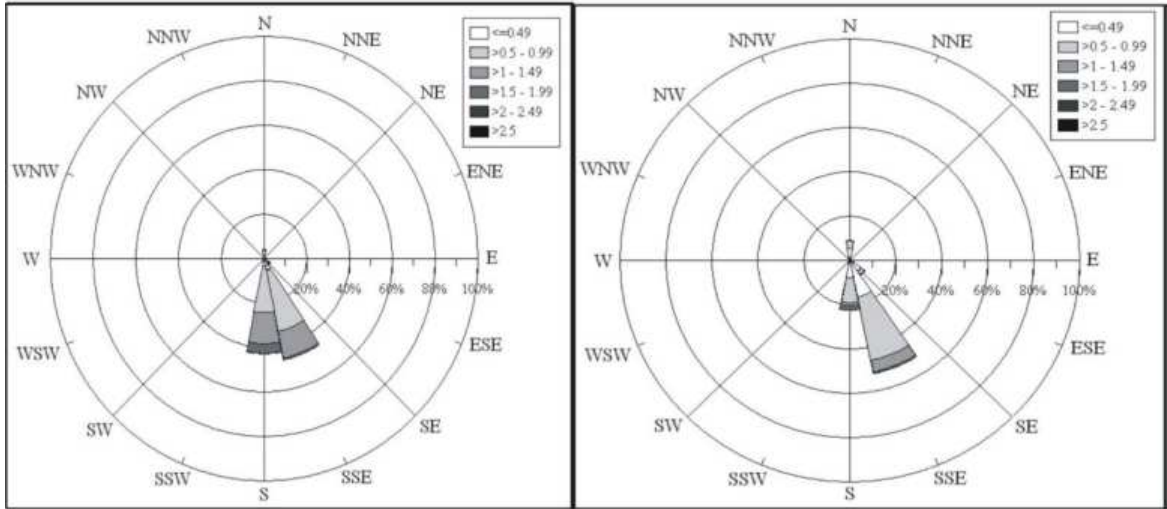
kıvrımlı geometrinin (Şekil 2(a)) etkisiyle dışa (batıya) doğru hareket ederek Haliç girişine doğru yönelmektedir. Bu akım yapısı ölçüm yapılan noktada akımın N-NNW yönünde gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Ölçümlerin değerlendirildiği dönem için B istasyonunda yüzeydeki (-1 m) akımın % 19'u SSW, % 58'i S ve % 10'u SSE yönünde meydana gelmiştir. -5 m'deki akıntı yönü yüzdeleri % 80 S, % 10 SSE, % 5 W ve -10 m'de ise % 42 S ve % 45 SSE'dir. -15 m'de akıntının yön değiştirdiği akıntı güllerinden görülmektedir. Akıntı yönü S'den SSE'ye dönmüş ve yılın % 50'sinde SSE yönünden meydana gelmiştir. Böylece -15 m'deki hakim akıntı yönünün SSE olduğu Şekil 3.27 (d)'den görülmektedir. Yine bu derinlikte kuzey yönündeki akıntılar da gözlenmektedir. -18 m gibi ara tabakaya karşılık gelebilecek derinliklerde ise tabakalı akım yapısına uygun olarak akıntı yönlerinde ve yüzdelerinde önemli değişimler meydana gelmiştir (Şekil 3.27 (e)). -18 m'deki akıntı yönü yüzdeleri % 20 S, % 38 SSE ve % 19 N değerlerini almıştır. -20 m'de ise güney (S) yönündeki akıntı yüzdeleri azalmış buna karşılık kuzey yönündeki akıntı yüzdeleri artmıştır (Şekil 3.27 (f)). -20 m'de kuzeyli akıntılar % 28 N ve % 10 NNW değerlerini almışlardır. -22 m'de ise neredeyse tamamen kuzeyli akıntılar hakim olmuş ve güneyli akıntılar nadiren gözlemlenmişlerdir. -22 m'deki hakim akıntı yönleri N ve NNW olup bu yönlerdeki akıntı yüzdeleri sırasıyla % 30 ve 20'dir (Şekil 3.27 (g)). -25 m'de kuzey yönündeki akıntılar tüm akıntılarının % 70'i olduğu Şekil 3.27 (h)'den görülmektedir.

Derinlikle akıntı güllerindeki değişimin de gösterdiği gibi B istasyonunun bulunduğu bölgede ara tabakanın derinliği yıl boyunca değişim göstermiş ve ölçüm periyodu boyunca -15 m ile -20 m arasında değişen değerler almıştır.

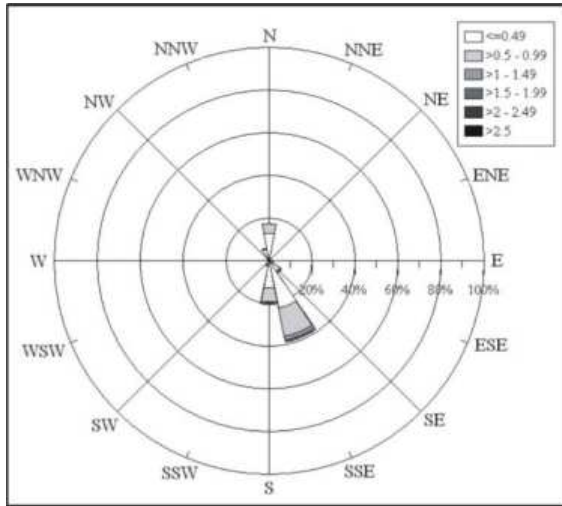


Şekil 3.27 B istasyonunda değişik derinliklerdeki akıntı gülleri

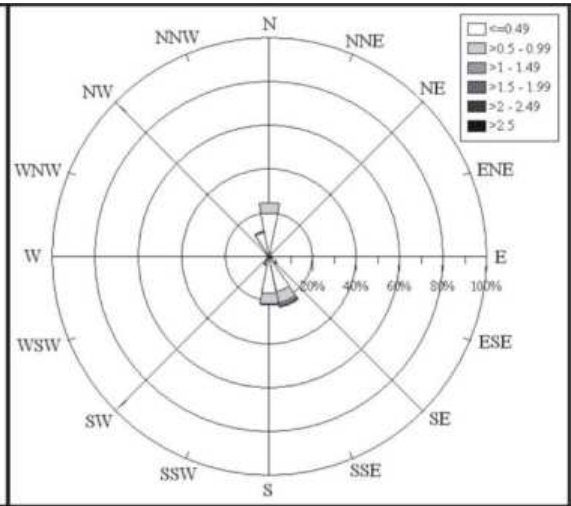


c) -10 m

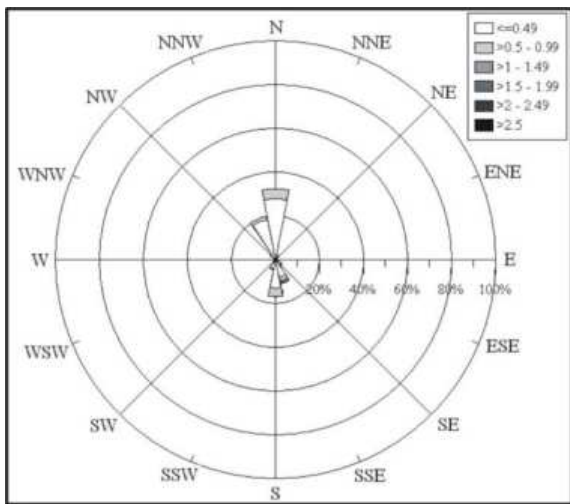
d) -15 m



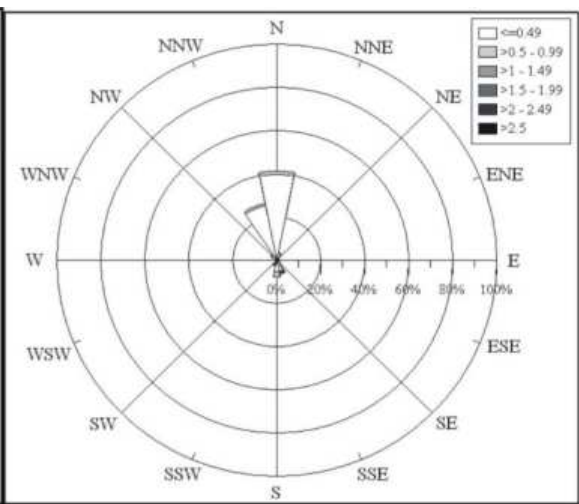
e) -18 m



f) -20 m



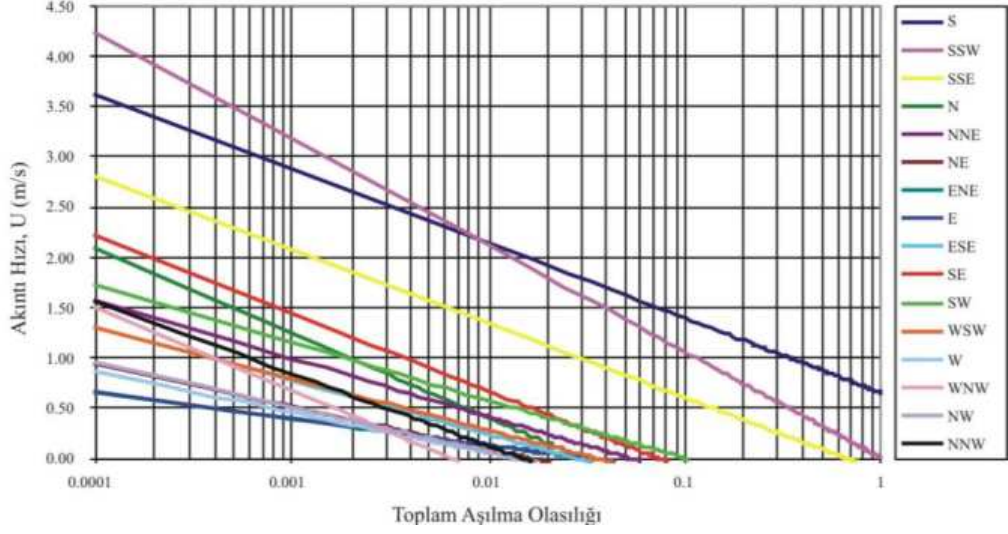
g) -23 m



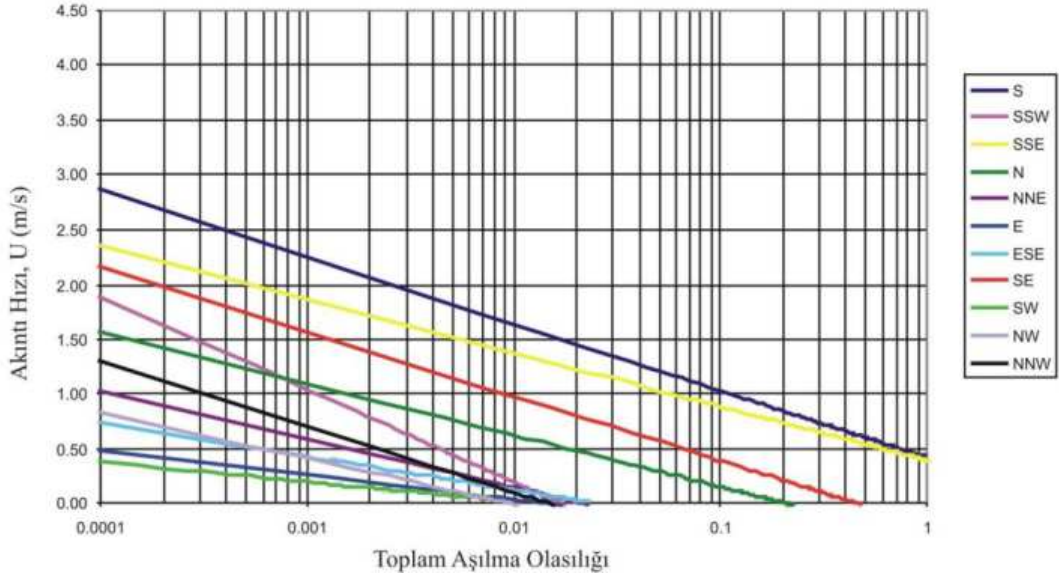
h) -25 m

Şekil 3.27 Devam

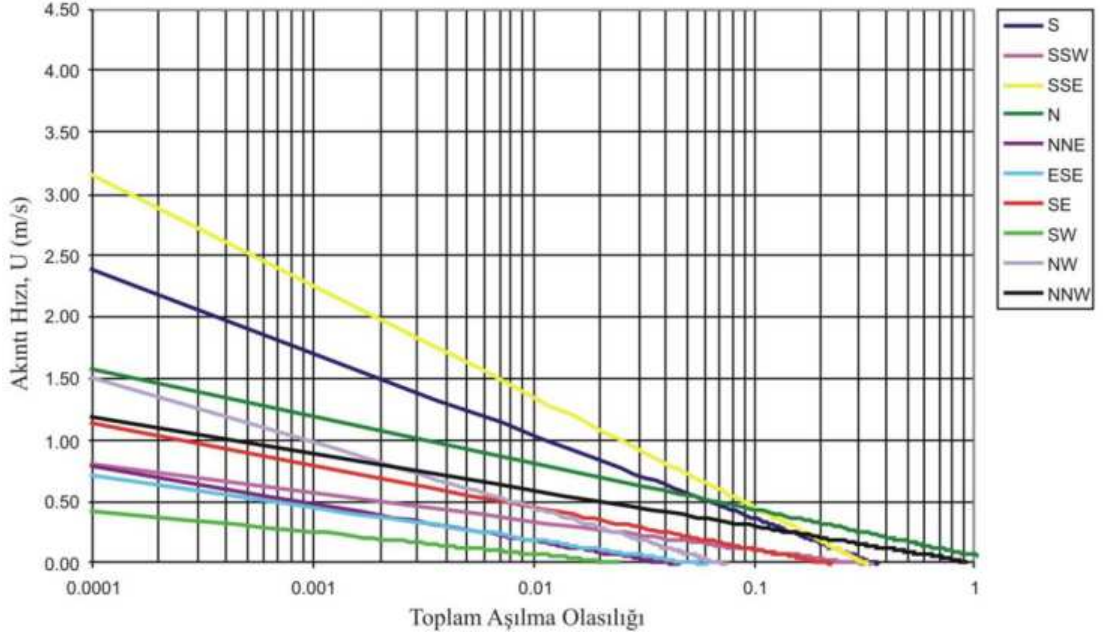
Sırasıyla Şekil 3.28-29-30 ve 31’de B istasyonunda -1, -10, -20 ve -25 m derinliklerdeki akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımları verilmiştir. Üst tabaka akımı için hakim akıntı yönünün SSE ve S, alt tabaka akımı için ise N ve NNW olduğu şekillerden görülmektedir. Yüzeyle üst tabaka akımı çoğunlukla güneyli (S) yönlerden akmıştır. Üst tabaka akımının ikincil yönü SE’dir. Bu durumun meydana gelmesine İstanbul Boğazı’nın Marmara Denizi girişindeki Boğaz geometrisinin kıvrımlı yapısının neden olduğu düşünülmektedir.



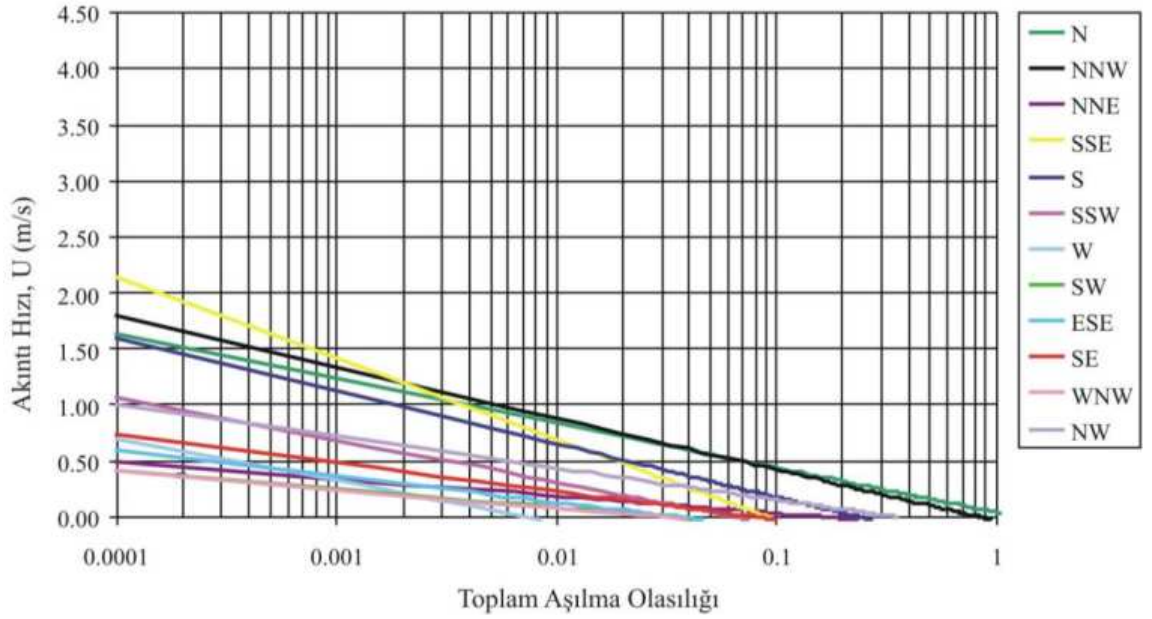
Şekil 3.28 B istasyonunda -1 m’de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği



Şekil 3.29 B istasyonunda -10 m’de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği



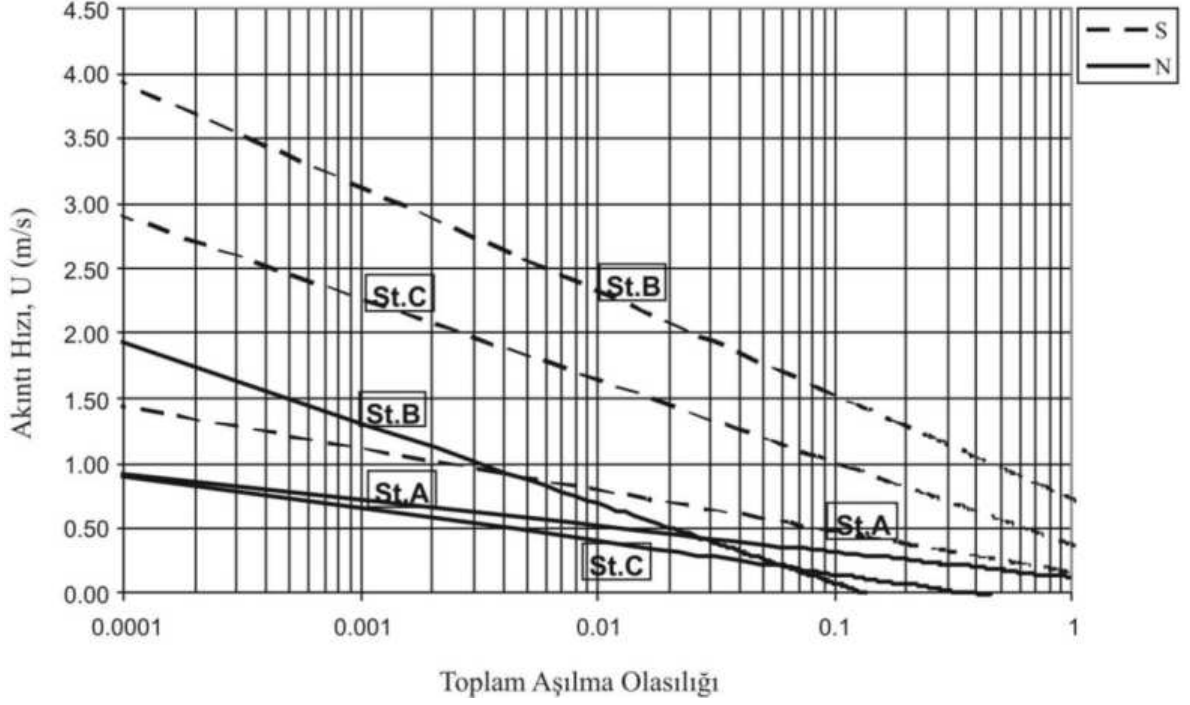
Şekil 3.30 B istasyonunda -20 m'de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği



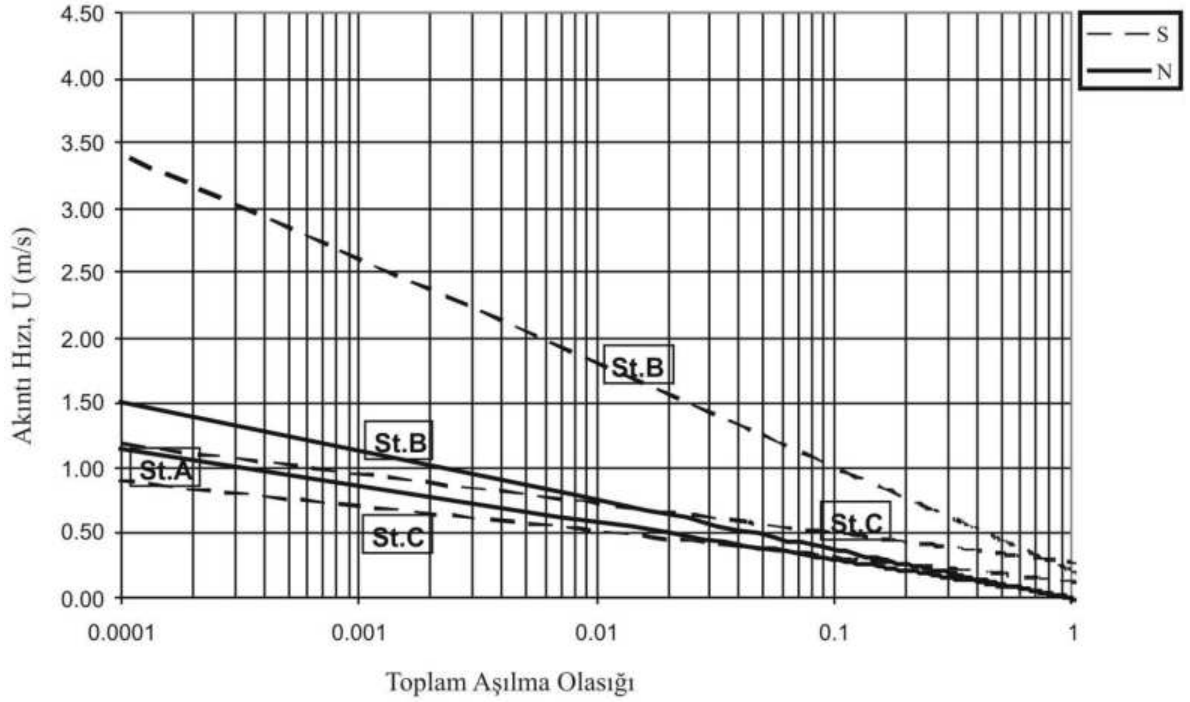
Şekil 3.31 B istasyonunda -25 m'de akıntı hızlarının yönsel aşılma olasılığı dağılımı grafiği

Sırasıyla Şekil 3.32-33-34'de A, B ve C istasyonlarındaki -1, -15 ve -25 m'lerdeki N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılıkları görülmektedir. Akıntı hızı B istasyonunda yılın 36 günü 1.5 m/s'nin üzerinde, 183 günü (yılın yarısı) ise 1 m/s'nin üzerinde değerler almıştır. Yine B istasyonunda yılın 175.2 saatinde (7.3 gün) 0.5 m/s'nin üzerinde kuzey doğrultusunda tek tabakalı akım hali gözlenmiştir. B istasyonunda tabanda yılın 14.6 gününde hem kuzey hem de güney doğrultusunda 0.5 m/s'nin üzerinde akıntı hızı gözlenmiştir. A, B ve C istasyonlarındaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı dağılımlarının birbirinden oldukça farklı oldukları Şekil 3.32-33-34'den görülmektedir. Bu

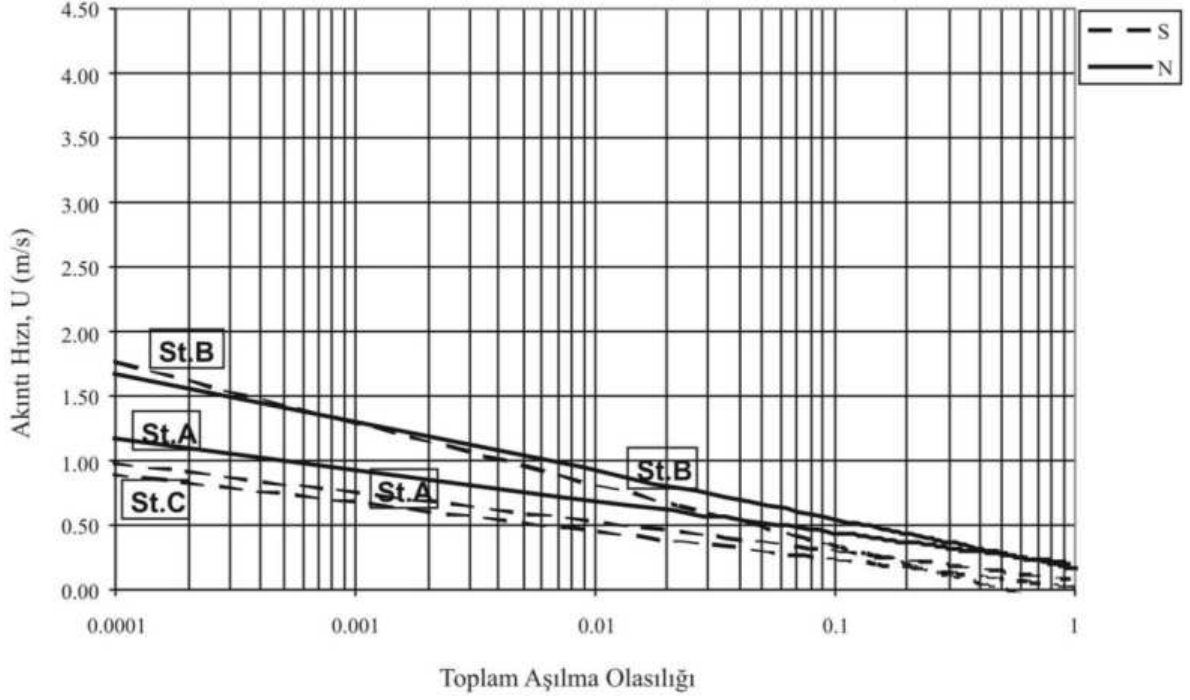
farklılık büyük oranda Boğaz geometrisi ve topografyasındaki değişimden kaynaklanmaktadır. B istasyonundaki akıntı yoğunluğunun diğer istasyonlardakilerden daha fazla olduğu Şekil 3.32-33 ve 34'den görülmektedir.



Şekil 3.32 -1 m'de A, B ve C istasyonlarında N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı grafiği



Şekil 3.33 -15 m'de A, B ve C istasyonlarında N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı grafiği



Şekil 3.34 -25 m’de A, B ve C istasyonlarında N-S doğrultusundaki akıntı hızlarının toplam aşılma olasılığı grafiği

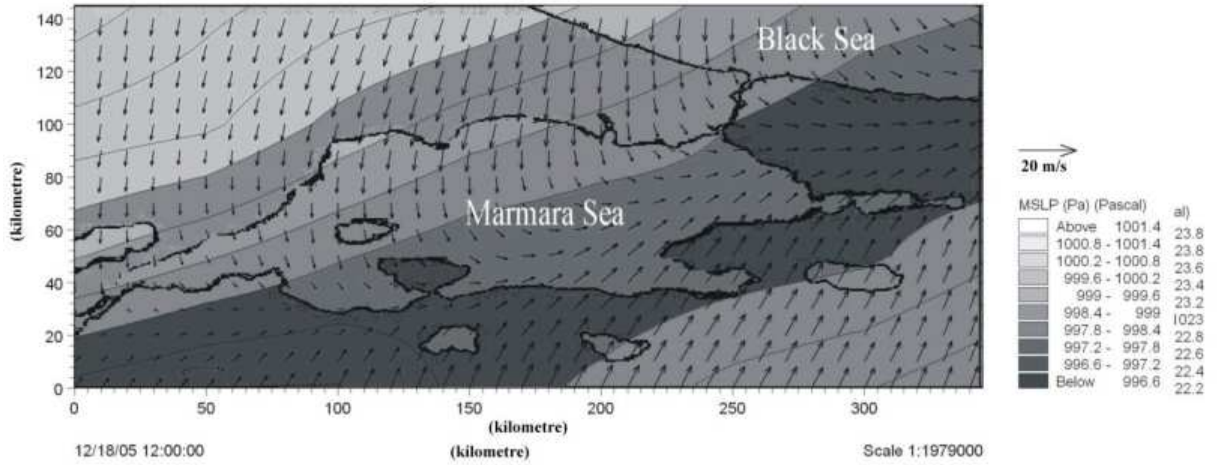
A istasyonundaki akıntı hızları ölçüm istasyonunun konumundan dolayı düşük değerler almıştır. Güneye doğru hareket eden Boğaz akımı Haliç’in girişindeki Sarayburnu’ndan dönerek kuzeye doğru yönelmiş ve bunun sonucunda A istasyonunda B istasyonuna göre daha düşük akıntı hızlarının meydana gelmesine neden olmuştur. Güler vd. (2006) ikincil akımın Boğaz’ın akıntı yapısı üzerindeki bu etkisine işaret etmişlerdir. A istasyonundaki ölçüm sonuçları da Güler vd. (2006) ile uyum içerisindedir. Her üç istasyonda da alt tabaka akıntı hızlarına ait toplam aşılma olasılığı doğrularının üst tabaka akıntısına ait doğrulara göre daha küçük eğimler aldıkları Şekil 3.32-33 ve 34’den görülmektedir. Bu durum büyük oranda üst tabaka akımına neden olan akım mekanizmasının (kısa ve/veya uzun dönemli etki sonucu su seviyesi farkındaki değişim) alt tabaka akımına neden olan akım mekanizmasına (yoğunluk farkı) göre daha dinamik bir karaktere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

3.2.4 Kısa Dönemli Etkilerin Sayısal Modellemesi

Rüzgar ve atmosfer basıncında meydana gelen değişimler kısa dönemli etkiler olarak adlandırılmaktadır. Kısa dönemli etkiler Karadeniz ile Marmara Denizi arasında su seviyesi farkında değişime neden olmaktadır. Su seviyesi farkındaki değişim ise İstanbul Boğazı’nın akıntı yapısını etkilemekte ve değiştirmektedir. Boğaz’ın akıntı yapısı Karadeniz ile Marmara Denizi üzerinde etkili olan fırtınanın gücü ve doğrultusu ve atmosfer basıncına bağlı olarak değişmektedir. Kuzeyli rüzgarlar Karadeniz’den Marmara Denizi’ne doğru güney

yönündeki üst tabaka akıntısının hızını artırmaktadır. Yeterince güçlü kuzeyli rüzgarlar alt tabaka akımını bloke edebilmekte ve B istasyonunun bulunduğu noktada tamamen üst tabaka akımının hakim olmasına yol açabilmektedir (Şekil 3.9). Ters durumda ise yeterince güçlü güneyli rüzgarlar güney yönündeki üst tabaka akımını bloke edebilmekte ve B istasyonunun bulunduğu noktada tamamen alt tabaka akımının hakim olmasına yol açabilmektedir (Şekil 3.13). Ancak söz konusu iki ekstrem durumun oluşmasına neden olan kritik meteorolojik koşulları (rüzgar hızı, doğrultusu ve atmosfer basıncı) belirlemek oldukça zor olmaktadır. Çünkü Boğaz'daki akıntı yapısı üzerinde Boğaz boyunca net tatlı su akışı gibi diğer kontrol mekanizmaları da etkili olmaktadır. Boğaz akımı üzerinde etkili kuvvetlerin süperpoze edilmesiyle İstanbul Boğazı'ndaki su seviyesi değişimleri ve akıntı yapısı belirlenmektedir.

İstanbul Boğazı'ndaki rüzgar yapısı Marmara ve Karadeniz'deki ECMWF (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) verileri kullanılarak benzeştirilmiştir. Marmara Denizi, Karadeniz ve İstanbul Boğazı üzerinde etkili olan rüzgar sürekli yön değiştirmekte ve bunun sonucunda oldukça karmaşık bir rüzgar iklimi ortaya çıkmaktadır. Rüzgar hız ve doğrultusunun model alanı üzerindeki değişimi ile ilgili bir örnek Şekil 3.35'de görülmektedir.



Şekil 3.35 Rüzgar hızının İstanbul Boğazı üzerindeki vektörel dağılımı

Kısa dönemli meteorolojik etkilerin su seviyesi değişimi üzerindeki etkisinin modellenmesi amacıyla iki boyutlu bir hidrodinamik sayısal model (Mike 21 HD) kullanılmıştır. Sayısal hidrodinamik model ile dalga ve su seviyesi kabarması ve alçalması benzeştirilmiştir. Hidrodinamik modeldeki gerilme akısı girdileri Mike 21 SW (Mike 21 Spectral Wave Model) yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

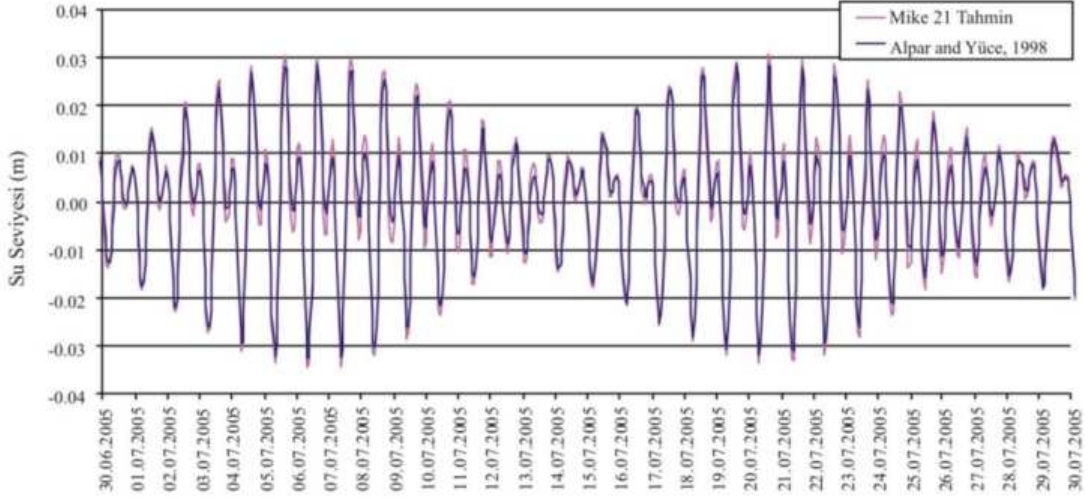
Mike 21 Flow Model FM (HD) okyanuslardaki, kıyı alanlarındaki ve haliçlerdeki akım yapısını modellemek amacıyla kullanılan iki boyutlu bir hidrodinamik sayısal modeldir.

Modelde sınır koşulları ve meteorolojik etiler gibi bazı dış kuvvetlerin tanımlanması gerekmektedir. Model ağ ayrıklaştırması için yapılandırılmamış esnek ağlar ve çözüm tekniği olarak da sonlu hacimler yaklaşımı kullanılmaktadır. Sonlu hacimler çözüm aşamasında optimum esneklik sağlayarak etkili sayısal bir çözüm uygulamaktadır. Ağ elemanları doğrusal üçgen geometrilere oluşturmaktadır.

Ayrıca sayısal hidrodinamik modelde su seviyesi üzerindeki gel git etkisi de incelenmiştir. E istasyonundaki su seviyesi ölçümlerinden İstanbul Boğazı'ndaki gel git salınımı hesaplanmıştır. Bunun için Mike 21'deki gel git analiz ve modülü kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Alpar ve Yüce'nin (1998) sonuçlarıyla karşılaştırılmışlardır. Çizelge 3.4'de tahmin edilen 38 gel git bileşeninden dördüne ait sonuçlar verilmiştir. Alpar ve Yüce (1998) İstanbul Boğazı'ndaki gel git değişimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Gel git salınımını hesaplamak için Anadolu Kavağı'nda (Şekil 3.2(a)) yapılan ölçümleri dikkate almışlardır. Gel git salınımlarının günlük periyotta ve küçük genlikli oldukları sonucuna varmışlardır. Bir gün periyotlu gel git dikkate alınarak Çizelge 3.4'deki dört önemli gel git bileşeni için Alpar ve Yüce (1998) ile Mike 21'in sonuçları Şekil 3.36'da birlikte verilmiştir. Her iki çalışmadaki sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde oldukları Şekil 3.36'da görülmektedir. Şekil 3.36'daki sonuçlar 2005 Temmuz dönemini kapsamaktadır.

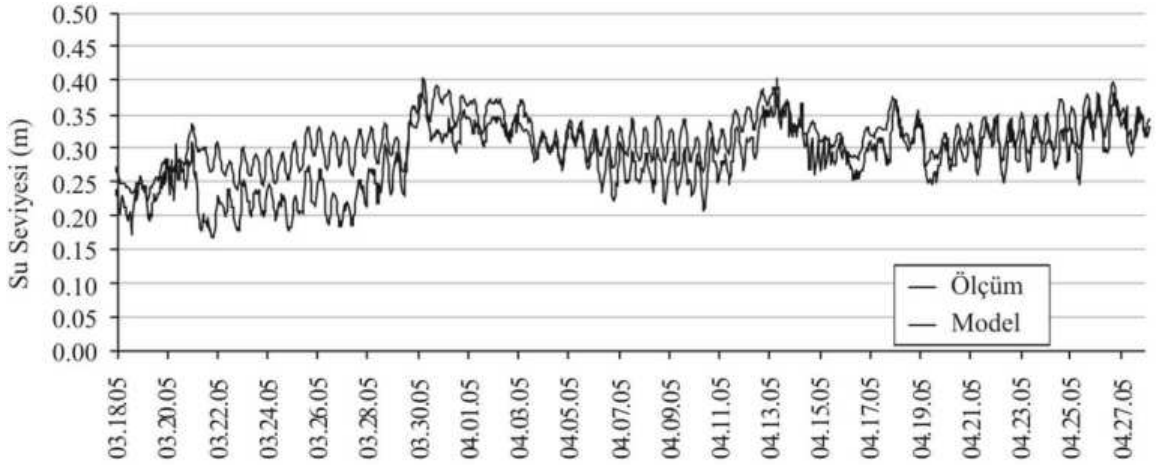
Çizelge 3.4 Harmonik gel git bileşenleri

İstasyon	Konumu	Gel git bileşenleri				Referans
		M ₂ genlik (m) Faz (°)	S ₂ genlik (m) Faz (°)	K ₁ genlik (m) Faz (°)	O ₁ genlik (m) Faz (°)	
E	41°12'13" N	0.015	0.0063	0.0091	0.006	
	29°05'54" E	83.39	97.39	103.71	104.43	
Anadolu Kavağı	41°30' N 29°15' E	0.0126 93	0.0052 101	0.001 110	0.0063 106	Alpar ve Yüce (1998)



Şekil 3.36 Temmuz 2005 için İstanbul Boğazı'ndaki gel git durumu

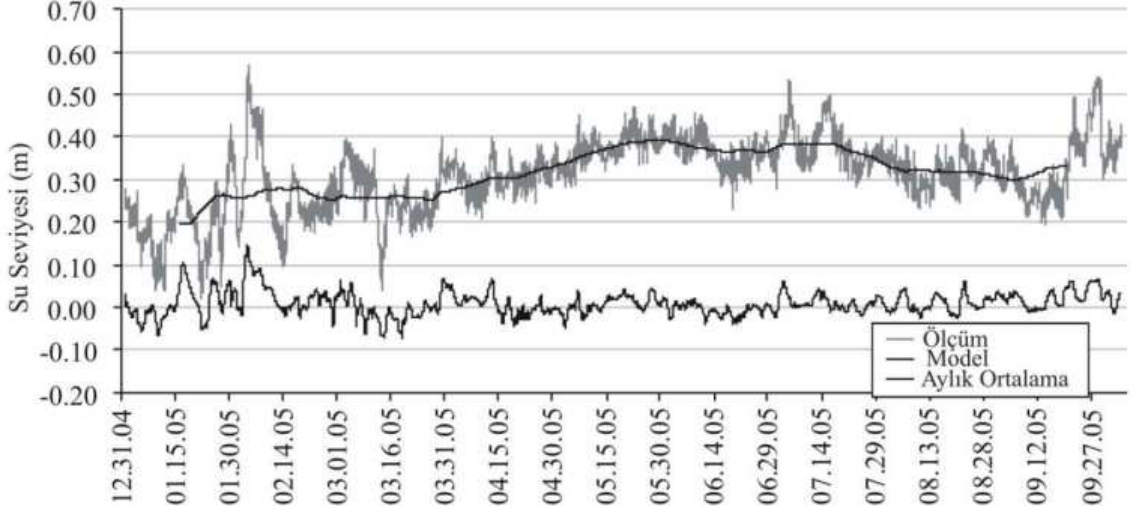
İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişindeki su seviyesi değişimine ait model sonuçları Şekil 37'de görülmektedir. Su seviyesi sonuçları rüzgar, dalga, atmosfer basıncı, gel git ve hidrolojik etkilerin tamamını içermektedir. Modelde meteorolojik girdi olarak ECMWF verileri, gel-git ve uzun dönem su seviyesi değişimi kullanılmıştır. E istasyonundaki su seviyesi değişimine ait ölçüm ve model sonuçlarının benzer eğilim gösterdikleri Şekil 37'den görülmektedir.



Şekil 3.37 E istasyonu su seviyesi değişimi ölçüm ve model sonuçları

Şekil 3.38'de kısa dönemli (rüzgar, dalga ve atmosfer basıncı) etkilere ait model sonuçları, ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının aylık ortalamaları birlikte verilmiştir. Kısa dönemli çalkantıların Ekim ile Nisan ayları arasındaki dönemde yılın geri kalan dönemine (yaz dönemi) göre daha etkili oldukları görülmektedir. Şekil 3.38'deki dönem Karadeniz'e dönük tatlı su deşarjından kaynaklanan uzun dönemli mevsimsel etkiyi de içermektedir. Uzun dönemli mevsimsel değişimin su seviyesi üzerindeki pozitif katkısı Nisan ile Ekim ayları arasındaki dönemi kapsamaktadır. Kısa dönemli etkiler uzun dönemli mevsimsel değişimin

yol açtığı su seviyesi üzerinde çalkantıya neden olmaktadır. Ancak yaz aylarında meteorolojik koşullardan dolayı kısa dönemli etkilerin su seviyesi üzerinde yarattığı çalkantıların genlikleri yılın geri kalan dönemine göre daha küçük olmaktadır. Ölçüm su seviyelerinin aylık ortalamalarından da görüldüğü gibi maksimum ortalama aylık su seviyesi minimum ortalama su seviyesinin neredeyse iki katı mertebesinde değer almıştır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 Kısa dönemli etkilere ait model sonuçları, ölçüm sonuçları ve ölçüm sonuçlarının aylık ortalamaları

3.3 Sonuçlar

1. Rüzgar ve atmosfer basıncından kaynaklı kısa dönemli meteorolojik etkinin İstanbul Boğazı akıntı yapısı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Kısa dönemli meteorolojik etki Ekim ile Nisan ayları arasındaki periyotta etkili olmakta buna karşılık yılın geri kalan bölümünde akıntı yapısı daha az değişken bir karakter göstermektedir (Şekil 3.4 ve 20). Karadeniz'e dökülen Tuna, Dinyeper ve Dinyester nehirlerinden kaynaklı tatlı su girişinin İstanbul Boğazı akıntı yapısı üzerindeki etkisi (uzun dönemli etki) iki aylık bir gecikmeyle meydana gelmektedir (Şekil 3.21). İstanbul Boğazı'nda yapılan akıntı ölçümleri tatlı su girişinden kaynaklı uzun dönemli etkinin İstanbul Boğazı akıntı yapısı üzerinde Nisan ile Ekim ayları arasındaki dönemde hakim olduğunu göstermiştir (Şekil 3.20-21).
2. İstanbul Boğazı'nda 15 ay boyunca su seviyesi ölçümü yapılmış ve ölçüm periyodu boyunca su seviyesinin -0.2 m ile 0.6 m arasında değişen değerler aldığı görülmüştür (Şekil 3.8).
3. Kuzeyli rüzgarlar İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişinde su seviyesinde kabarmaya güney girişinde ise alçalmaya neden olmaktadır (Şekil 3.10-12). Boğaz'daki söz

- konusu su seviyesi değişimleri akıntı hızlarında kısa süreli çalkantılara neden olmaktadır (Şekil 3.4 ve 3.8).
4. İki tabakalı akım durumunda üst tabaka akımının hızı derinlik boyunca yüzeyden başlayarak ara tabakaya kadar azalmakta, bu noktadan sonra tabana kadar alt tabaka hızı ters yönde artmaktadır (Şekil 3.5).
 5. İstanbul Boğazı'nın her iki girişi arasındaki su seviyesi farkı ile üst tabaka akıntı hızları arasında güçlü bir ilişki söz konusudur (Şekil 3.25 ve 3.26). Alt tabaka akımı için ise aynı güçlü ilişkiden söz edilememektedir (Şekil 3.26). Su seviyesi farkı üst tabaka akımı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmaktadır.
 6. Çalışmada dikkate alınan Marmara Denizi çıkışına yakın ölçüm istasyonunda üst tabaka akımı için hakim akıntı yönü genellikle S ve SSE, alt tabaka akımı için ise N ve NNW'dir (Şekil 3.27). Ancak yüzeyde hakim akıntı yönü sekonder akımın etkisiyle S&SSE'den S'ye sapmaktadır. Üst tabakadaki bu etki derinlik boyunca azalmaktadır. Marmara Denizi'nin girişindeki ölçüm istasyonunda sekonder akımın yönü saat akrebinin dönüş yönündedir. İstanbul Boğazı geometrisi İstanbul Boğazı'nda sekonder ve ters akım sistemlerinin oluşmasına yol açmaktadır.
 7. Ölçümler akıntının ölçüm periyodu boyunca yüzeyde yılda 183 gün boyunca 1 m/s'nin üzerinde değerler aldığı göstermiştir (Şekil 3.20). Hem kuzey doğrultusunda hem de güney doğrultusunda (tamamen üst tabaka akıntısının hakim olduğu durumda) meydana gelen taban akıntı hızı yılda sadece 15.6 gün boyunca 0.5 m/s'nin üzerinde değerler almıştır. Akıntı hızları büyük oranda kanal geometrisi ve taban topografyasından etkilenmektedir.
 8. İstanbul Boğazı'ndaki günlük periyotta ve küçük genliklere sahip gel git meydana gelmektedir (Şekil 3.36).
 9. Yaz ve kış mevsimlerindeki su seviyesi değişimleri söz konusu mevsimlerdeki aylık ortalamaların iki katı mertebesinde meydana gelmiştir (Şekil 3.38).

4. MODELLEME

4.1 Temel Kavramlar

Kurulacak hidrodinamik modele ait izlenecek temel aşamalar için kavramlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

Bir doğal sistemin bilimsel olarak üzerinde çalışılabilir formda sunulması işlemine model denir. Bu bir girdisi olan bilgisayar programı halinde sonlanır.

Bir modelin kurulması için gerekli olan aşamalar ve bu aşamalar sırasında yapılan işlemlerin tümüne modelleme denmektedir. Ancak bu kavram aynı zamanda bir modelle çalışmak olarak da kullanılmaktadır.

Bilgisayar ortamında değişik senaryolar için bir modelin çalıştırılmasına simülasyon yada benzeşim denilmektedir. Ancak bu kavram daha geniş anlamda bir bilgisayar üzerinde tüm sistemi benzeştirmek, örneklemek olarak da kullanılmaktadır. Bu pratikte modelleyicileri modeli daha basit fakat daha gerçekçi kılmak için bazı kabuller yapmak zorunluluğu ile karşı karşıya bırakmaktadır. Basitleştirmeler modeli daha çalışılabilir hale getirmektedir.

Modeller çok değişik şekillerde tanımlanabilirler; sıradan bir dille, grafik ve şekillerle ve matematiksel ifadelerle vs. Matematik modeller ise kavramsal modelin matematisel ifadesidirler. Matematik modellere cebrik denklemler, kısmi veya adi diferansiyel denklemler, sınır ağları, istatistiksel modeller veya bunların kombinasyonu örnek olarak verilebilmektedir.

Bir model zamansal değişimi içeriyor veya tanımlıyorsa (model parametreleri zamanla değişim gösteriyorsa) dinamik model olarak bilinmektedir. Tersisi durumda model kararlı veya statik model olarak isimlendirilmektedir. Bir matematik model bir veya daha fazla bağımsız ve bağımlı değişken içerebilmektedir. Dinamik bir modelde bağımsız değişken zaman iken, uzamsal bir model için konum boyutlarından en az biri de zaman ile beraber bağımsız değişken olmaktadır. Örneğin üç boyutlu dinamik bir model biri zaman üçü de konum olmak üzere dört adet bağımsız değişken içermektedir.

Bir modelin matematiksel olmayan temsili kavramsal model olarak adlandırılmaktadır. Kavramsal bir model oluşturulurken modelin yapısı tanımlanır ancak modeli oluşturan elemanlar arasındaki ilişki niceliksel (sayısal) olarak verilmez.

Bir modeli oluşturan matematiksel denklemler analitik veya sayısal yolla çözülebilmektedir. Bir matematik modelin bileşenleri (basınç, hız, yoğunluk, su seviyesi farkı) bir veya daha fazla durum değişkeni ile temsil edilirken bileşenler arası ilişki yardımcı değişkenler ile

tanımlanmaktadır. Durum değişkenlerindeki değişim (kısmi) diferansiyel denklemler ile tanımlanmaktadır. Yardımcı değişkenler ise cebrik denklemler veya doğrudan bir sayısal değer ile tanımlanmaktadır. Denklemler durum değişkenlerini, yardımcı değişkenleri, parametreleri (zamanla değişmeyen) veya diğer model bileşenlerini kullanabilmektedirler.

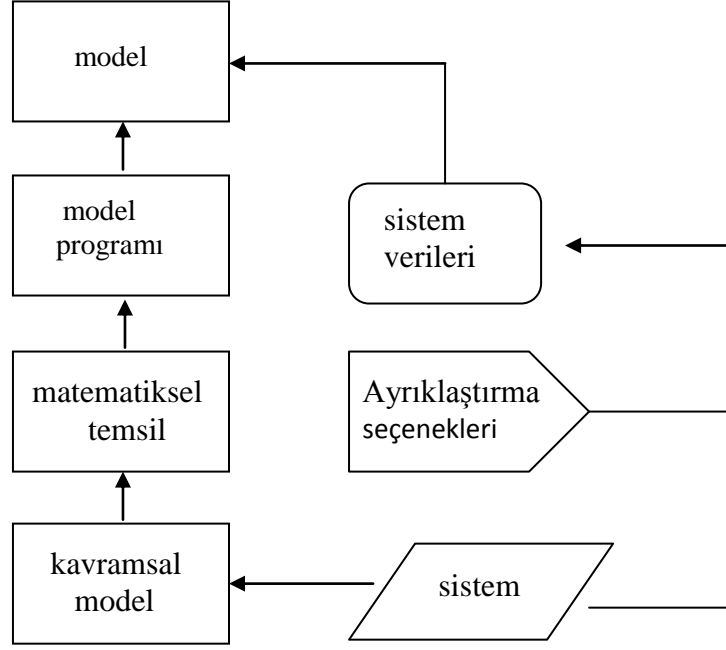
Bir kavramsal model bilgisayar modeline, modelle ilgili verilerin programa girilmesi ile aktarılmaktadır. Bunun için konumsal ayrıklaştırmayı da kapsayan bazı tercihlerin yapılması gerekmektedir. Ayrıklaştırma ile ilgili tercih dışında sistemi temsil etmek amacıyla girilen verilerin model programı tarafından desteklenmesi veya uygun bulunması gerekmektedir. Modelin bilgisayarda doğru olarak çalıştığıının kontrol edilmesi işlemini “**uygunluk**” (**verification**) olarak adlandırılmaktadır.

Modelin bilgisayara girilmesinin ardından model ile temsil ettiği sistem arasındaki benzerliğin artırılması gerekmektedir. Diğer bir deyişle model davranışı ile doğal sistem davranışını benzeştirecek şekilde ayarlamalar yapılması gerekmektedir. Bu aşama **kalibrasyon** olarak adlandırılmaktadır. Kalibrasyon işlemi, model sonuçlarıyla saha verilerinin karşılaştırılması sonucu her iki veri grubu arasındaki benzeşimi sağlamak amacıyla model parametrelerinin değiştirilmesi şeklinde yapılmaktadır. Kalibrasyon işlemi sık sık optimizasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Aynı optimizasyon teknikleri sık sık modelin “**özelleştirilmesi**” (**identification**) aşamasında da kullanılmaktadır (model çok karmaşık değilse ve sistem ölçümler aracılığıyla yeterince iyi biliniyorsa). Modelin özelleştirilmesi aşamasında tüm parametrelere ait ortalama değerler ve diğer kalibrasyon faktörleri belirlenmektedir. Modellemede “**hassasiyet analizi**”, belirsiz faktörlerin (kalibrasyon sırasında daha fazla benzerlik sağlamak amacıyla ayarlanması gereken faktörler) tanımlanması amacına hizmet etmektedir. Kalibrasyondan sonra geriye kalan farklılıklar incelenebilir ve model sonuçlarının tahmini önünde kalan belirsizliklere ait sayısal değerler belirlenmeye çalışılabilmektedir. Modellemede bu aşama “belirsizlik aşaması” olarak adlandırılmaktadır. Modelin geçerliliği, kalibrasyonu takiben belirsizlik analizi aşamasından elde edilen sonuçların ışığında kalibrasyon sırasında kullanılmayan bir dizi bağımsız veri kullanılarak test edilebilmektedir. Bu aşama aslında kalibrasyonun doğruluğunun test edildiği aşama olmakta olup modelin “**doğrulanması**” (**validasyonu**) olarak adlandırılmaktadır.

Özel bir problemi çözmek amacıyla modelleme ve simülasyonu da içeren tüm işlemlere modelleme projesi denilmektedir.

4.1.2 Model Kavramları Arasındaki İlişki

Şekil 4.1 değişik model kavramları arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4.1 Farklı model kavramları arasındaki ilişki

Kavramsal bir model sistem ile ilgili bilgiler temelinde geliştirilmekte ve matematiksel bir modelin alt yapısını oluşturmaktadır. Böyle bir model analitik veya sayısal olarak çözülebilmektedir. Sayısal çözüm tercihi durumunda modeli kurulacak sisteme bağlı olarak bir takım tercihler yapılmaktadır. Sayısal benzerlik sağlanması amacıyla matematiksel model (ayrıklaştırma) ve sayısal algoritma çifti zamana bağlı olarak ayrıklaştırılmaktadır. Modelin omurgası bu şekilde oluşturulduktan sonra daha hassas bazı ayarlamalar yapılarak modele oradan da uygun veriler girilerek bilgisayar programına aktarılmaktadır.

4.1.3 Modellemenin Aşamaları

Bir modelleme çalışması başlıca aşağıda sıralanan adımlardan oluşmaktadır:

1. Model raporu tutmak
2. Modelleme projesi oluşturmak
3. Modeli kurmak
4. Modeli analiz etmek
5. Modeli kullanmak
6. Sonuçları yorumlamak
7. Sonuçlarla ilgili rapor yazmak ve sonuçları dosyalamak

Model kurma safhasına geçilmeden önce kurulacak modelin kalitesi ile ilgili beklentileri saptamak çok önem kazanmaktadır. Kalite aşağıda ana başlıklarla sıralanan sorulara modelin vereceği cevaba göre belirlenmektedir.

- Çözümü aranan soruya verilen cevabın kalitesi (inandırıcılığı, yeterliliği)
- Model oluşturulurken yapılan analizlerin kalitesi
- Modelin kalitesi
- Kalibrasyonun kalitesi, özellikle kalibrasyonun ne zaman durdurulacağı ile ilgili kriter

4.1.4 Modelin Kurulması

Kavramsal olarak bir modeli tasarlamak mevcut ve gerekli verilerin analizi ile sistemin tanımlanmasını içermektedir. Şekil 4.2 model kurma aşamasındaki kavramsal başlıkları ve karşılıklı ilişkileri göstermektedir.

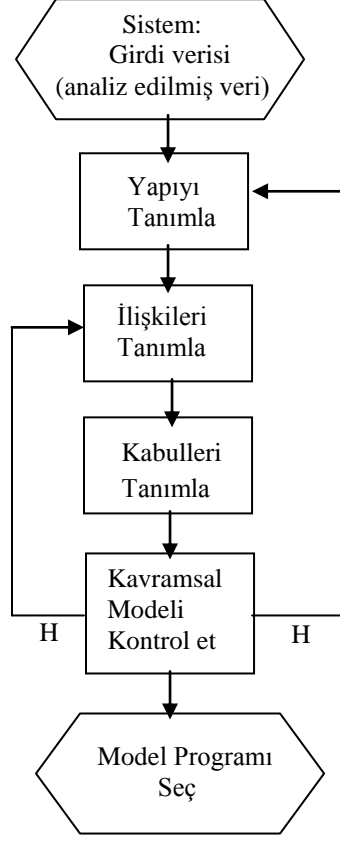
Model kurma aşamasının en önemli iki alt aşamaları sistemin tanımlanması ve veri analizi aşaması olmaktadır.

Sistem tanımı çözümü aranan problemin yeterli bir tanımının yapıp projenin hedefi belirlendikten ve yeterince veri temin edildikten sonra hangi olayın modelleneneceğine karar verilmesi şeklinde olmaktadır. Bu aşama genellikle doğadaki olayın fiziksel yönü ile ilgili olmaktadır.

Genel olarak bir sistem tanımlanırken aşağıda sıralanan işlemler yapılmaktadır:

- Sistemin birbiriyle ilişkili tüm parçaları (bileşenleri) bir araya toplanır,
- Bileşenler arasındaki karşılıklı ilişkiler tanımlanır,
- Sistem bileşenleri ile doğal çevre (sistemin bileşeni olmayan herşey) arasındaki ilişkiler tanımlanır.

Sistem ile onu kuşatan doğal çevre sistem sınırı adı verilen bir fiziksel hatla birbirinden ayrılmaktadırlar. Bu sınır çevresel olay ve süreçlerin sisteme transferinin gerçekleştirildiği bir hat olmaktadır. Bu aktarımın yumuşak bir geçiş şeklinde olması, keskin olmaması tavsiye edilmektedir.



Şekil 4.2 Model kurulması aşamasındaki kavramsal başlıklar ve karşılıklı ilişkileri

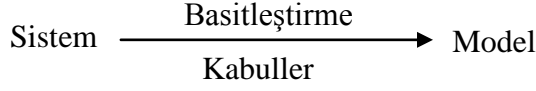
Veri analizi aşamasında bir modeli oluşturmak ve o modelde kullanılmak üzere gerekli veriler belirlenmektedir. Bu aşamada;

- Veriler sınıflandırılmakta (fiziksel alan verileri, ekstrem veriler)
- Girdi olarak kullanılacak veriler (başlangıç ve zaman serisi değerleri)
- Parametreler
- Ana hatları oluşturmak ve verilmesi gereken bir karara yardımcı olacak veriler belirlenmektedir (yada yukardakilerin kombinasyonu).

Bu aşamada programda kullanılacak kesin değerler saptanmamaktadır. Sonraki aşamalardaki duruma göre bu aşamaya tekrar geri dönülebilmektedir.

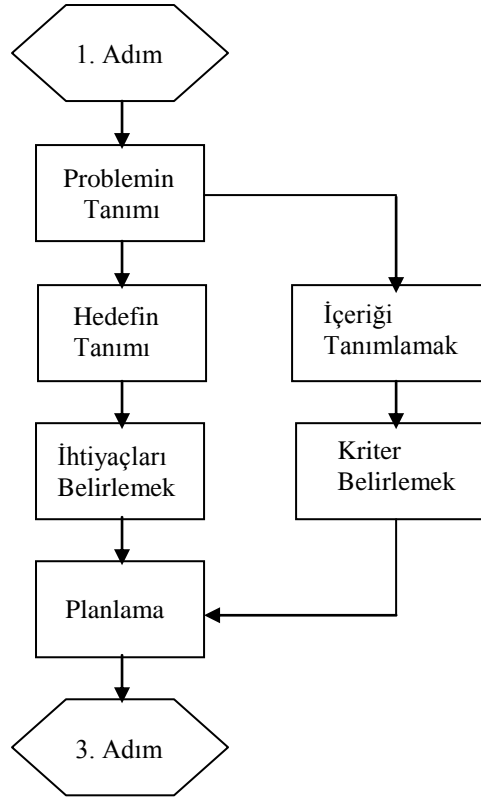
4.1.4.1 Kavramsal Model Oluşturmak

Kavramsal model modellemenin ilk adımıdır. Kavramsal model, metin veya matematiksel denklemler kullanarak model bileşenleri arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu aşamada grafik, diyagram ve çizimler kullanılabilir. Tüm bu işlemler her şeyin matematiksel olarak detaylı bir şekilde tanımlandığı bir modelin ortaya çıkmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu durum aşağıdaki gibi formüle edilebilmektedir.



Bu aşamadaki en önemli işlem sınırların tanımlanması (nereye yerleştirilecekleri, hangi bilgileri içerecekleri, çevresel etkileri ne şekilde içerecekleri vs.) olmaktadır. Yine bu aşamada zamansal ve konumsal tercihler de yapılmaktadır.

Kavramsal model oluşturma safhasında yapılacak işlemlerin şematik ifadesi karşılıklı ilişkileri Şekil 4.3'de görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil 4.3 Kavramsal model oluşturma aşamasındaki işlem basamakları

Kavramsal model oluşturma aşamasında temel işlem adımları ve herbir adımda yapılan belli başlı işlemler ana başlıklarıyla aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

Yapıyı Tanımlama: Girdi değişkenleri, durum değişkenleri, yardımcı değişkenler ve diğer değişkenler ve aralarındaki ilişki tanımlanmaktadır.

Model Seçimi: Modelin hangi alanda (kimyasal, fiziksel, ekolojik) yapılacağı ile ilgilidir. Ancak herşeyden önce bağımsız değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir (örneğin bir hidrodinamik modelde zaman ve bir veya daha fazla sayıda konum boyutu bağımsız değişkendir).

Kabul Yapma: Yapılan kabullerin hangi matematiksel ve fiziksel bilgiye dayanılarak yapıldığı açıkça belirtilmelidir. Yapılan kabullerin varsa başka modellerdeki örnekleri de verilmelidir.

Ayrıklaştırma: Modelin amacı (hedefi) ve eldeki mevcut veriye göre 0,1,2 ve 3 boyutlu tercih yapılabilmektedir. Gerçek bir ayrıklaştırma (konumsal ayrıklaştırma) ve ayrıklaştırma ile ilgili geri kalan tercihler yapılması gerekmektedir. Son olarak sayısal yaklaşım tercihi yapılmaktadır.

Sayısal Yöntem Tercihi: Denklem çözüm metotları (sayısal veya analitik) arasında tercihte bulunmaktır. Analitik metotlar daha hızlı olmakla beraber neredeyse uygulanmamaktadırlar. Sayısal metotlar arasında da değişik alternatifler (sonlu farklar, sonlu elemanlar vs.) mevcuttur. Bazen sayısal integrasyon şemaları arasında da tercih yapılabilmektedir. Sayısal metot ve şema tercihi çözümün stabilitesi üzerinde etkili olmaktadır.

Modeli Çalıştırmak: Hazırlanan modelin model programı yardımıyla bilgisayara aktarılması işlemidir. Bu aşama oldukça önem taşımaktadır. Çünkü yapılan hataların bilgisayarda takibi pek mümkün olmamaktadır. Bundan kaçınmak için yapılacak en işlevli şey programın el kitabına başvurmaktır.

Modelin Uygunluğu (Verification) : Matematiksel modelin (dolayısıyla aynı zamanda kavramsal modelin) etkili bir şekilde bir bilgisayar programına aktarılıp aktarılmadığı kontrol etmektir. Eldeki mevcut veriler ile modelin hedefi açısından problemin çözümünde uygulanacak en doğru model olup olmadığının belirlenmesidir. Bu durum, problemi oluşturan her bir kavramın özellikle tanımlanan verilerle kıyaslanmasıdır.

Doğrulama (Validation) ise modelin bağımsız bir veri dizisini uygun şekilde benzeştirip benzeştirmedığının kontrol edilmesidir (kalibrasyonda kullanılan bağımsız bir veri dizisi kullanılarak).

“Uygunluk” süreci aşağıdaki şekilde işlemektedir:

- Kullanılan programın akış şeması
- Boyut/birim analizi (sadece program modelcileri için)
- Model programı bünyesinde örnek bir programın çalıştırılması (ayrıklaştırma / şematizasyon için)
- Konumsal şematizasyonun kontrol edilmesi

Modelin uygunluğunun test edilmesi sadece modele duyulan güveni artırmaktadır. Yoksa kesin bir doğrulama değildir. Model programının çalışması sırasında hiç hata mesajı

vermemesi de oldukça önemli olmaktadır. Bu nedenle hata sebeplerini iyice anlamak ve gerekli tedbirleri almak çok önemli olmaktadır. Bu problemin üstesinden ancak program üreticisine danışarak veya modellemede zamanla deneyim kazanarak gelinebilmektedir.

Modellemenin bu aşamasında en yararlı uygulama ise çalıştırılması düşünülen modele benzer basit bir modeli çalıştırmaktır. Model programı içerisinde var olan modellenmesi düşünülen probleme benzer basit bir şablon programın çalıştırılıp elde edilen sonuçlar uygunluk ve beklentiler açısından değerlendirilir.

4.1.5 Model Analizi

Model analizi aktivitelerinin planlanması aşağıdaki başlıkları içermektedir:

- Global analiz
- Standart girdiler kullanarak modeli çalıştırmak
- Global davranış testi
- Kütle dengesinin uygunluğu
- Güç testi
- Hassasiyet analizi
- Modelin özelleştirilmesi (identification) (çoğu modelde nadiren uygulanır)
- Kalibrasyon
- Belirsizlik analizi
- Doğrulama

Yukarıdaki aşamalar tamamlandıktan ve modelin hedefine ulaşıp ulaşmadığı son bir kez kontrol edildikten sonra modelin vizyonu (geçerlilik koşulları ve yetenekleri) belirlenebilmektedir.

Modelin doğru çalıştığına dair genel bir kanıya ulaşmak için uygulanan 4 aşamalı basit testleri içeren aşama genel analiz olarak adlandırılmaktadır. Bunlar:

1. Standart girdilerle modeli bir kez çalıştırmak
2. Global davranış testi
3. Kütle dengesinin uygunluğu
4. Güç (robustness) testi

Standart verilerle modeli çalıştırmak aşamasında çıkacak sonuçları önceden bildiğimiz (elimizde varolan) bir alana ait (basit geometriye ve özelliklere sahip) verilerle model çalıştırılır ve sonuçların elimizdeki sonuçlarla uyumu kontrol edilmektedir. Bu aşamadaki

durumun çok iyi not edilmesi (modelin hangi versiyonunun kullanıldığı, hangi girdilerin kullanıldığı, hangi sonuçların elde edildiği vs.) tavsiye edilmektedir.

Global davranış testi aşamasında veri ve işlemlerdeki her değişikliğin model çıktıları üzerinde makul bir değişikliğe neden olup olmadığı (neden olması beklenmektedir) kontrol edilmektedir.

Kütle dengesi aşamasında modelci kütle veya enerji dengesini kontrol ettiğine dair ölçüm ve kontrol sonuçlarına sahip olmalıdır.

Güç testi aşamasında ise model ekstrem değerler verilerek çalıştırılır ki model gücünün sınırları belirlenebilsin. Yani modelin ekstrem koşullara karşı direncinin ölçülmesi aşamasıdır.

4.1.5.1 Hassasiyet Analizi

Model sonuçlarının girdiler, başlangıç şartları ve model parametrelerinden ne şekilde etkilendiklerinin belirlenmesi işlemidir (hangi faktörün model sonuçları üzerinde daha etkin olduğunun belirlenmesi işlemi). Bu aşamada yapılan işlemler kısaca şu şekilde formüle edilebilmektedir; Model sonuçları = $f(\text{girdi, başlangıç koşulları, parametreler})$. Şayet her üç parametredeki değişim model sonuçları üzerinde hiçbir değişime veya çok az değişime neden oluyorsa kurulan modelin (model yapısının) yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Ayrıca her üç unsurdaki değişimin gerçekçi sınırlar arasında olması gerekmektedir (değişim ortalama değerini veya standart sapmanın belirli bir yüzdesiyle sınırlanmalıdır).

Lineer olmayan modellerde maksimum ve minimum değerlerin sonuçlar üzerindeki etkisini kontrol etmek akılcı olmaktadır.

Ayrıca herbir faktörün tek tek ya da kombinasyonlarının etkisi göz önüne alınabilmektedir. Son olarak model davranışı hakkında bir karar verilmesi gerekmektedir, herbir faktörün ağırlığını belirlemek kadar seçilen periyotta çok önemli olmaktadır. Örneğin bunun için ortalama periyot, bir dizi anlık periyot veya en büyük sapmaların olduğu periyot dikkate alınabilmektedir. Örneğin periyot büyüdükçe başlangıç şartlarının model üzerindeki etkisi azalmaktadır.

Ne, neden ve nasıl yapılacağı sorusuna verdiği cevaplara bağlı olarak bir çok hassasiyet analizi metodu vardır. Bunların başlıcaları şunlardır;

- **Analitik Yöntem:** Eğer model denklemleri analitik olarak çözülmüşse bu yöntem kullanılmaktadır. Parametrelerin model sonuçları üzerindeki etkileri doğrudan hesaplanabilir ve grafik olarak sunulur.
- **Bağımsız Kabul Edilen Parametrelerin Bireysel Değişimi;** Her bir parametre bireysel olarak değişmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı model parametreleri arasındaki değişimi dikkate almayarak herbir parametrenin birbirinden bağımsız tek tek değişimini dikkate almasıdır.
- **Klasik Yöntem:** Her hangi bir faktörün herhangi bir anda ve konumdaki değeri nominal değeri etrafında lineerleştirilir. Böylece bir faktörün herhangi bir zamandaki ve konumdaki değeri tek koşurma ile türetilebilir. Bu yöntem herhangi bir faktörün değerinin nominal değerinden olan sapmaları çok küçük olduğunda uygulanmalıdır. En büyük dezavantajı faktörler arası etkileşimi çok az dikkate almasıdır.
- **Yüzeysel Davranış Yöntemi:** Kullanılacak katsayılar için modelden türetilen lineer bir yaklaşımdır. Bunun için sıklıkla 1. ve 2. mertebeden Taylor yaklaşımı kullanılmaktadır. İlk hesaplamada faktörler arası yaklaşım dikkate alınmazken ikinci yaklaşımda bu durum da dikkate alınmaktadır. En büyük dezavantajı henüz yeterince test edilmemiş olmasıdır (örneğin çapraz geçerlilik uygulanabilir).
- **Monte Carlo Analizi Yöntemi:** İstatistiksel dağılımlarına bağlı olarak tüm faktörler eş zamanlı olarak değiştirilmektedirler. Fakat bu işlem sistematik olarak yapılmamaktadır. Göreceli çok sayıda model adımının kullanılması gerekmektedir. Model sonuçları ile faktörler arasındaki ilişkiyi belirlemek için, bir sonraki adıma ait değerler önceki adıma ait değerlerden lineer olarak türetilmektedirler. Klasik yöntemden farklı olarak başlangıçta lineer ilişki kabulü yapılmamaktadır.
- **Yerel Hassasiyet Analizi Yöntemi:** Model sayısız defalar çalıştırılarak kabul edilebilir ve kabul edilemez olarak sınıflandırılacak iki ampirik dağılım elde edilmektedir. Bu işlem ileriki aşamalarda kullanılacak katsayılarla ilgili bir kestirimde bulunabilmek amacıyla yapılmaktadır.

Yukarıda sıralanan yöntemler arasında en uygun sonucu Analitik yöntem vermektedir. Fakat bu yöntemi kullanmak çoğu kez neredeyse imkansız olmaktadır. Herbir faktörün tek tek bağımsız kullanılması işi kolaylaştırmakla birlikte faktörlerin karşılıklı etkileşimini dikkate almaması çok gerçekçi olmamaktadır.

4.1.5.2 Modelin Özelleştirilmesi (Identification)

İdeal olarak bir model, sistemdeki (yada saha bilgisi) mevcut bilgileri esas alarak kurulmalıdır, buna modelin özelleştirilmesi denir. Eğer sahada yeterince ölçüm ve gözlem mevcut ise modele ait parametrelerin alacağı değerlerin büyük bir doğrulukla belirlenmesi mümkündür. Bu işlemin başarısı, modeli kurulacak bölgeye ait çok sayıda ve farklı türde veri olmasına bağlı olmaktadır. Bu durum uygulamada neredeyse imkansızdır. Çünkü genelde bölgeye ait yetersiz ve kısa süreli ölçümler bulunmakta veya çok sayıda parametrenin tanımlanması gerekmektedir.

4.1.5.3 Modelin Kalibrasyonu

Kalibrasyon model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki farkı en aza indirme işlemidir. Model kullanıcı tarafından tamamen tanımlanamadığı için kalibrasyon zorunlu hale gelmektedir. Hiçbir şey yapılamazsa en azından model sonuçlarıyla ölçüm değerleri arasındaki fark en aza indirilsin mantığı güdülmektedir. Belirsizlik analizi (kalibrasyondan sonraki aşama) yapılabilmesi için öncelikle bu aşamada kalibrasyonun ne zaman durdurulacağı ile ilgili bir kriter tanımlanmalıdır. İyi ve etkili bir kalibrasyon modelcinin bu konudaki deneyimine bağlı olmaktadır.

Ölçüm sonuçları ile model sonuçları arasındaki fark ne kadar az ise modelin o kadar iyi bir model olduğu düşünülmektedir. Bu bir yere kadar doğrudur. Çünkü mükemmel bir modeldeki farklar sadece ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır. Ancak uygulamada en az hatayı veren model her zaman en iyi model olmamaktadır.

Model sonuçlarının ölçüm sonuçlarından farklı olmasının pek çok nedeni bulunmaktadır (muhtemel yazılım hataları bunun içinde değildir). Bu hataların başlıca sebepleri aşağıda sıralanmıştır.

1. **Kavramsal hatalar:** Doğru olmayan model tanımlamaları (örneğin karmaşık bir yapıyı basitleştirme hatası, bazı etkilerin ihmal), matematiksel tanımlama veya kullanılan sayısal metottaki hatalar.
2. **Parametre hataları:** Çoğu model değeri tam olarak bilinmeyen çok sayıda parametrenin girilmesini gerektirmektedir.
3. **Ana kuvvetlerdeki hatalar:** Örneğin tanımlanan sınır şartlarındaki hatalar
4. **Sahada yapılan ölçüm hataları**

Modelleme uygulamalarında yukarıdaki hataların tümünü bütün açıklığıyla saptamak mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı oluşacak hataları en aza indirmek amacıyla veri asimilasyonu denilen teknik kullanılmaktadır.

Veri asimilasyonunun en önemli özelliği bir süreci veya olayı ifade ederken olayın fiziksel ve matematiksel tanımı ile olaya ait ölçüm bilgilerini optimum kullanmasıdır. Belirsizliğin kaynağı olan tüm faktörleri sayısal olarak ifade edebilmek (olasılık dağılımlarına bağlı olarak) en temel sorun olmaktadır. Veri asimilasyonu hem kalibrasyon hem de devamındaki aşamalarda elde edilecek sonuçlara dair kestirimde bulunabilme konusunda modelciye yardımcı olmaktadır. Ayrıca kalibrasyon ve durum kestirimindeki (gelecekte karşılaşılabilecek durumlar) belirsizlikler belirlenebilmektedir (bu ağ tasarımının belirlenmesi ve değerlendirilmesinde kullanılabilir).

Veri asimilasyon tekniğinin en büyük dezavantajı karmaşık bir yapıya sahip olması, kaynaklarda yeterince tanımlanamamaları ve kolayca ulaşılamamasıdır.

Doğru optimizasyon tekniğinin kullanılması şartıyla kalibrasyon genel olarak üç bölümden oluşmaktadır:

1. Optimizasyonu yapılacak parametrelerin seçilmesi
2. Optimum değerlerin hesabı
3. Optimizasyon sonuçlarının analizi

Doğru optimizasyon tekniğini bulabilmek için çoğu kez döngüde başa dönülmektedir. Şekil 4.4 kalibrasyon safhasındaki temel kavramları ve karşılıklı ilişkilerini göstermektedir.

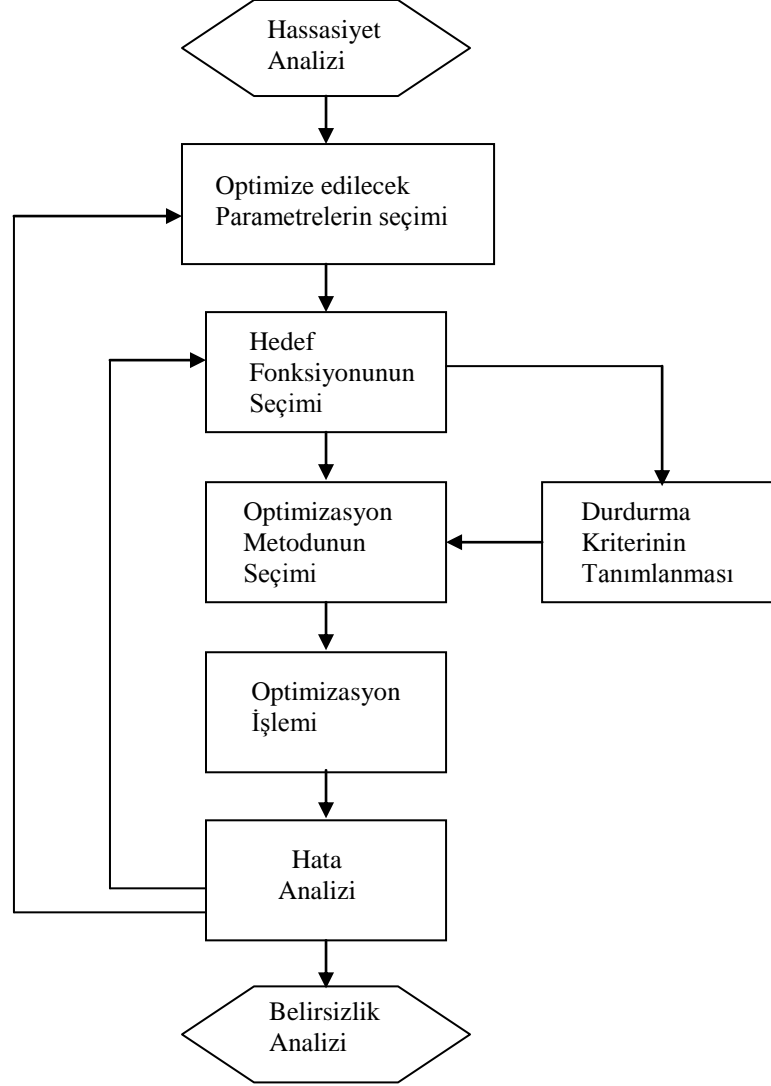
Çoğu model çok fazla sayıda parametreye sahip olmaktadır. Pek çok defa eldeki ölçümler bu çok sayıdaki parametreyi ifade etmekten uzaktır. Bunun üstesinden gelmenin yolu değişik metotlar kullanarak parametrelerin sayısını azaltmaktır. Bunu yapmanın en iyi yolu ise sabitler kullanmak veya bir parametre grubu oluşturup bu grup içindeki parametreleri birbiri cinsinden ifade etmektir.

Optimizasyonu yapılacak parametreler hassasiyet analizine göre belirlenmektedir. Optimizasyon parametreleri seçilirken:

1. Seçilen parametreler model sonuçları üzerinde etkili olmalıdır
2. Ölçümlerle doğruluğu kontrol edilmeli

Kalibrasyon sırasında saha ölçümleri ile model sonuçları arasında hata fonksiyonu tanımlanmalıdır. Hata fonksiyonu matematiksel olarak çeşitli yollar kullanılarak

formüleştirebilir. Model ve saha gözlemleri arasındaki sapmalar her zaman adımında ve konumda bir veya daha fazla değişken için işlenmelidir.



Şekil 4.4 Kalibrasyon aşamasındaki temel kavramlar ve aralarındaki ilişki

Optimizasyon İçin Yöntem Seçimi: Yöntemler genel olarak iki gruba ayrılmaktadırlar:

- Stokastik Yöntem: Basit bir matematiksel yapıya sahiptirler. Sadece belirli bir zaman periyodu için çözüm sağlayabilmektedir.
- Deterministik Yöntem: Uygulanması çok daha zor ve karmaşık yapılardır. Ancak kullanılan modelleme programı içerisinde bu seçenek mevcutsa uygulanması daha pratik olmaktadır.

Çok fazla parametrenin söz konusu olmadığı basit modellerde el ile optimizasyon uygulanmaktadır. El ile optimizasyonun avantajı modelleyicinin parametre değişimini görebilmesi ve kontrol edebilmesidir. Dezavantajı ise çok fazla parametrenin olduğu karışık modellerde çok pratik olmamasıdır.

Her parametrenin her zaman adımı ve her noktadaki değerinin önceki değerine bağlı olarak interpolasyonla bulunduğu optimizasyona otomatik interpolasyon adı verilmektedir. Bir bakıma olayda etkili parametre değerlerinin tahmin sistemi olarak düşünülebilir.

El ve otomatik optimizasyon arasında başlıca iki önemli fark göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki eğer model sonuçları üzerinde yeterince etkili parametre seçilemez veya dikkate alınması gereken parametre sayısı çok fazla ise otomatik optimizasyon arzulanan hata değerini vermeyeceğidir. Oysa el ile optimizasyonu kullanan modelciler parametre sayısını azaltarak veya gerçekte olayda etkili olan parametreleri hesap kolaylığı yüzünden dikkate almayarak minimum hata değerini yakalayabilmektedirler. Bu etkili olmakla birlikte bazen kabul edilebilir olmaktan uzaktır.

Uygulamada ise iterasyon sayısı veya kalibrasyon için harcanacak süre önceden belirtilmektedir. Ancak bu pek de arzu edilmeyen sonuçlara yol açabileceği için tavsiye edilmemektedir.

Optimizasyon işlemi başlangıçta belirlenen durdurma kriterine göre bitirilmektedir. Bunun için en iyi yöntem hedef fonksiyonu için bir başlangıç kriteri (değeri) belirlemektir. Model sonuçları ile ölçüm değerleri arasındaki fark optimizasyonu durdurma kriterinden küçükse optimizasyon durdurulur.

Ancak her zaman bu şartın sağlanması iyi bir kalibrasyon yapıldığını göstermemektedir. Unutulmamalıdır ki bu durum seçilen parametrelere göre değişiklik göstermektedir (sonuçta seçilen parametrelerin ve değerlerinin doğru olduğu ile ilgili kesin bir şey bu aşamada söylenememektedir).

Optimizasyon sonuçlarının analizine geçmeden önce iki koşulun sağlanması gerekmektedir:

1. Durdurma kriteri sağlanmalıdır
2. Hatalar küçük olmalı ve sistematik olmamalı (örneğin belli bir değer etrafında rastgele salınım gösteren bir karaktere sahip olmalı)

Şayet hesaplanan model sonuçları belli bir kriterden küçükse (örneğin belirlenen standart sapma değeri \times ölçülen değer) hidrodinamik bir model kusursuzmuş gibi değerlendirilebilir. Ancak örneğin tüm hesap değerleri ölçüm değerlerinden belli değerde daha büyükse bu sistematik bir hatadır.

Modelin kavramsal alt yapısı doğru kurulmuş ve optimizasyon için doğru parametreler seçilmişse hata değerleri makul sınırlar arasında kalacaktır. Tersisi durumda iki alternatif söz konusu olmaktadır.

1. Alternatif:

- Yeni bir hassasiyet analizi yapmadan diğer kalibrasyon faktörlerini (parametrelerini) de dikkate almak
- Yeni bir hassasiyet analizi yaparak diğer kalibrasyon faktörlerini de belirlemek

2. Alternatif:

- Geriye dönüp modeli değiştirmek
- Ayırıklaştırma şemasını gözden geçirip (gerekliyorsa) değiştirmek
- Sayısal yaklaşımı gözden geçirmek
- Kavramsal yapıyı gözden geçirmek
- Model kalitesiyle ilgili beklentiyi gözden geçirmek (kriteri gözden geçirmek)
- Daha fazla saha verisi toplamak veya mevcut fakat değerlendirilmeyen verileri de dikkate almak

Tüm bu tatmin edici olmaktan uzak kalibrasyon sonuçlarına rağmen, model belli durumlar için yine de kullanılabilir. Modelin güven verici olmaktan uzak olduğu akılda tutularak modelle ilgili kalan belirsizlikler belirsizlik analizi yardımıyla giderilmeye çalışılır.

4.1.5.4 Belirsizlik Analizi

Hassasiyet analizine benzemektedir. Aralarındaki tek fark hassasiyet analizinde herbir faktörün model üzerindeki etkisi belirlenirken, belirsizlik analizinde model sonuçları üzerinde belirsiz faktörlerin toplam etkisi dikkate alınmaktadır. Özetle kalibrasyon parametrelerindeki belirsizlikler (ve belirsizliğe neden olan diğer faktörler: kavramsal hatalar ve ana kuvvetlerdeki hataların belirsizliği) model sonuçlarındaki belirsizliğe çevrilmektedirler (yani örneğin parametrelerdeki belirsizliklerin model sonuçları üzerinde ne kadar belirsizliğe yol açtığı araştırılmaktadır).

Çok değişik belirsizlik analizi metotları vardır. Bazı durumlarda yazılımın kendi içinde bu analizi yapan seçenek de var olmaktadır.

Kullanılan metot büyük oranda kalibrasyon aşamasında kullanılan metoda bağlı olmaktadır. Klasik yöntemde kalibrasyon parametreleri vektöründeki belirsizlik değerleri bir matris-kovaryans matrisi yardımıyla ifade edildikten sonra model sonuçları için bir belirsizlik aralığı elde etmek amacıyla matris değerleri modele aktarılmaktadır. Ancak uygulamada oldukça basit bir yaklaşım olmaktadır. Diğer alternatifler maksimum-minimum yaklaşımı ve Monte Carlo yaklaşımıdır.

Ancak belirsizlik aralığı yapılan bazı tercihlere bağlı olarak oluşturulduğundan modellemede bir son (son aşama) değildir. Çünkü genellikle sadece parametrelere bağlı olarak bir belirsizlik aralığı bulunmaktadır. Buda verilerin değiştirilmesi durumunda (daha sonra bulunacak farklı veri değerleri için) önceki bulunan belirsizliğin de değişeceğini ve önemini kaybedebileceğini gösterir. Aynı zamanda belirsizlik aralığı kalibre edilmiş parametrelerin istatistiksel dağılımından elde edilmiş bazı kabullere de bağlı olmaktadır.

Parametre değerlerindeki hataların (logaritmik) normal dağılıma uyduğu kabul edilmektedir.

4.1.5.5 Modelin Doğrulanması (Validasyon)

Kalibrasyonu yapılan modelin yeterliliğinin kalibrasyonda kullanılmayan bir dizi bağımsız veri ile test edilmesidir. El ile kalibrasyonda bir zaman periyodu boyunca edinilen verilerin bir kısmı kalibrasyon için kullanılırken kalan kısım bağımsız veriler olarak doğrulamada kullanılmaktadır. Otomatik kalibrasyonda ise doğrulama safhasında kullanılacak veriler başlangıçta modele girilebilmektedir (örneğin var olan 9 aylık verinin 6 aylık kısmı modelin kalibrasyonu için kullanılırken geriye kalan 3 aylık veri doğrulamada kullanılmak üzere başlangıçta modele girilmektedir).

Yeterince iyi bir doğrulamanın yapıldığının söylenebilmesi için tüm doğrulama testlerinin yapılması gerekmektedir. Ancak bundan sonra “yeterince iyi” bir doğrulama yapıldığı söylenebilir (elbette yeterlilikten ne kastedildiğinin yani “yeterlilik faktörünün” önceden saptanmış olması gerekmektedir).

Şu önemli sonuç unutulmamalıdır ki modeller (doğrulanmış olsun ya da olmasın) geleceğe yönelik kesin tahminler yapmakda tam olarak kullanılamayabilirler (nerede ne zaman ne olacağı konusunda). Bu da model kullanımının en riskli yanı oluşturmaktadır.

4.1.5.6 Model Kapsamının Belirlenmesi

Model analizinin son aşamasıdır. Modelin hangi şartlarda geçerli ve güvenilir olduğunun ve modelin kendisi için tasarlandığı problemi çözüp çözemediğinin belirlenmesi aşamasıdır.

4.1.6 Modelin Kullanılması

Model yeterliliği için gerekli analizler (hassasiyet, kalibrasyon, belirsizlik, doğrulama) başarıyla tamamlandıktan sonra (modelci tarafından güvenilir bulunduktan sonra) her tür uygulamada kullanılabilir olmalıdır.

Modelin uygulanabilirlik koşulları belirtilmelidir. Bunlar arasında:

- Kullanılacak girdiler
- Test edilen modelin versiyonu
- Yapılan simülasyonun periyodu
- Referans modelinden sapmalar (standart girdiler)
- Sonuçların kalitesiyle ilgili beklentiler

Bir projede uygulanmış (güvenilir) modelin sonuçları belli açılardan analiz edilip doğrulanmalıdır:

- Ekstremlik ve sıradışılık açısından
- Model çıktılarının değişim aralığı açısından
- Beklenmedik sonuçlar açısından
- Sayısal hatalar ve hata mesajları açısından

4.1.7 Sonuçların Yorumlanması

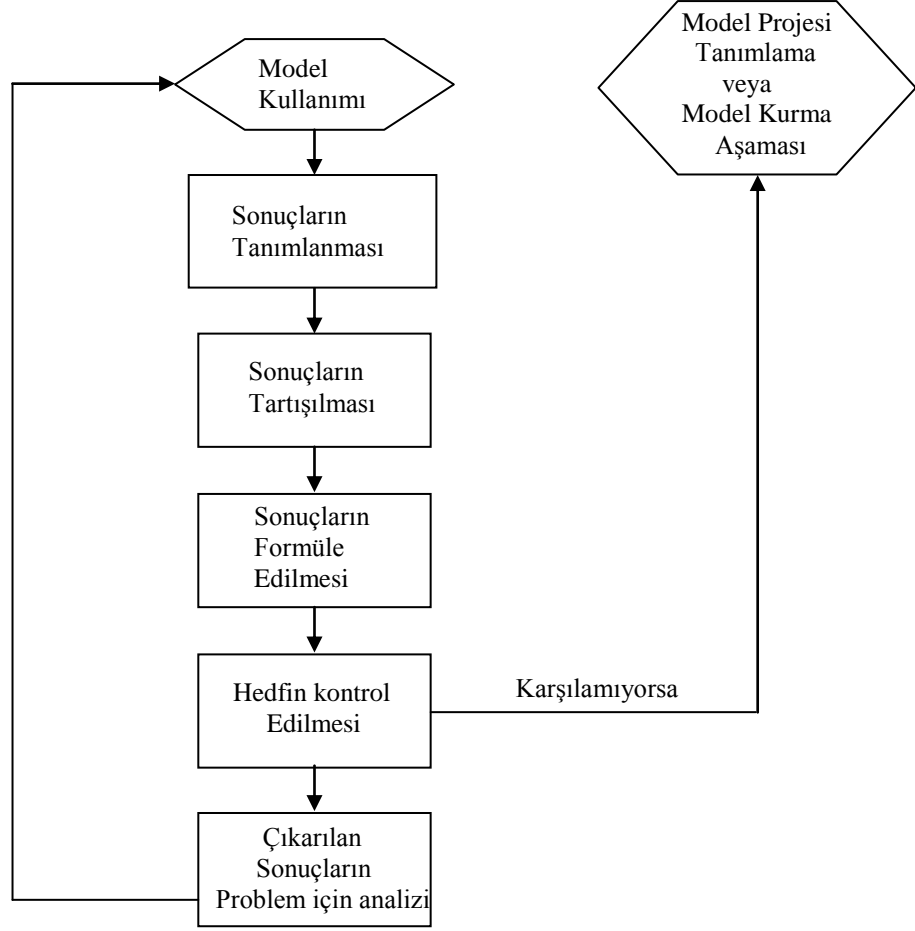
Şekil 4.5’de bu aşamada yapılan işlemler şematik olarak ifade edilmektedir. Sonuçlarla ilgili herhangi bir yargıya varmaksızın, yorumlamadan metin, grafik, tablo ve şekil olarak tanımlanması işlemi sonuçların tanımlanması olarak adlandırılmaktadır. Bu sonuçlar yardımıyla ilerideki model çalışmalarında da kullanılmak üzere şablon hazırlanması faydalı olmaktadır.

Bir sonraki aşama sonuçların tartışılması aşamasıdır. Bu aşamada benzer çalışmalardaki sonuçlarla mukayese yapılmaktadır. Farklı, beklenmedik veya ekstrem sonuçlar tartışılır ve varsa makul bir açıklama yapılmaya çalışılmaktadır.

Sonraki aşama ise sonuçların formüle edilmesi aşamasıdır. Modeli kurulan problem ile sonuçlar arasında doğrudan bir ilişki olmalı veya kurulmalıdır.

Son olarak başlangıçta konulan hedef kontrol edilmelidir. Bu sağlanmamışsa belirlenen hedef (beklenti) model sonuçlarına göre değiştirilir (modelleyen açısından bunda bir sorun olmamakla beraber model kullanıcısı firma veya kişi açısından genellikle kabul edilemez bir durumdur) veya model beklentiye göre değiştirilir (buda modelcinin yükünü, müşteri için ise maliyeti artırmaktadır).

Yukarıda açıklanan analizlerin tamamlanmasından sonra sonuçların özetlenmesi büyük önem kazanmaktadır. İnsanlar genellikle modelden elde edilen sonuçların en can alıcı ve önemli taraflarını şematik, istatistiksel ve yalın olarak yansıtan bir özetlemeyi tercih etmektedirler.



Şekil 4.5 Model sonuçlarının yorumlanması aşamasındaki işlemler

4.2 Sayısal Model

4.2.1 Hidrodinamik Model

İstanbul Boğazı tabakalı akımı DHI'nin (Danimarka Hidrolik Enstitüsü) geliştirdiği Mike 3 yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Mike 3 kıyı alanları, haliç, koy ve okyanus akımları gibi üç boyutlu akım yapısını modelleyebilen genel bir modelleme sistemidir. Değişken yoğunluk, batimetri ve dış kuvvetlerin (meteorolojik etkiler, gelgit kaynaklı su seviyesi değişimleri, akıntı ve diğer hidrografik koşullar) etkisini içeren üç boyutlu kararsız akımların modellenmesinde kullanılmaktadır. Mike 3 hidrolik ve hidrolikle ilgili 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 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.
- Katı madde taşınımı: Arazi ıslahı veya atık madde deşarjı sonucu ulaşım kanalları, liman ağızları, kıyıları ve akarsu üzerine kurulu limanlarda çamur gibi kohezif maddelerin taşınımı ve sedimentasyon problemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar için Mike 3 Hidrodinamik Modül ve Kohezif Taşınım Modülü veya Partikül Modülü kullanılması uygun olmaktadır.

Bir Newtonian akışkanın üç boyutlu modellemesi için aşağıdaki temel denklemler gerekmektedir:

- Kütle korunumu (1 denklem)
- Momentum korunumu (3 denklem)
- Sıcaklık ve tuzluluğun korunumu (2 denklem)
- Yerel yoğunluk (tuzluluk, sıcaklık ve basınç) ile ilgili durum denklemi (1 denklem)

Böylece 7 bilinmeyenli 7 denklem takımının çözülmesi gerekmektedir.

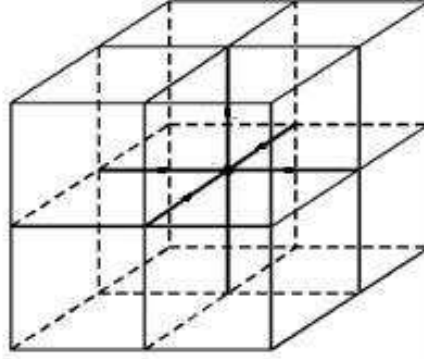
Mike 3'ün matematiksel temeli üç boyutlu türbülans ve değişken yoğunluk (sıcaklık, tuzluluk) etkilerini içeren durum denklemi, tuzluluk ve sıcaklığın korunumu denklemi, kütle korunumu ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri üzerine kurulmuştur.

Mike 3 Hidrodinamik Modül temel denklemlerin çözümünde iki farklı ağ yaklaşımı dikkate alınmaktadır. Bunlar yapılandırılmış (klasik Mike 3 HD) ve yapılandırılmamış (Mike 3 HD FM) ağ yaklaşımlarıdır.

4.2.2 Yapılandırılmış Ağ (Mike 3 HD) Yaklaşımı

Yapılandırılmış ağ, lineer olmayan üç boyutlu süreklilik ve momentumun korunumu denklemlerine ikinci merteye hassasiyette alternatif doğrultulu (AD) kapalı sonlu farklar çözümü uygulamaktadır. Tuzluluk ve sıcaklığın taşınımı için ise üçüncü merteye hassasiyette açık sonlu farklar çözümü uygulamaktadır.

Üç boyutlu modellerin çoğunda sıkışamaz akışkan kabulü yapılmaktadır. Ancak sıkışamaz akışkanlar için süreklilik denklemleri matematiksel olarak sorun yaratmaktadır. Modellerin çoğunda hidrostatik basınç dağılımı kabulü yapılarak bu sorunun üstesinden gelinmektedir. Hidrostatik basınç kabulü yapılarak akım alanı içerisindeki basınç değişimleri su seviyesindeki değişime çevrilmektedir. Buna karşın hidrostatik olmayan basınç dağılımının kullanıldığı yapılandırılmış ağ ise yapay sıkışabilirlik metodu adı verilen alternatif bir yaklaşım ile sıkışabilirlik etkisini dikkate almaktadır. Bu yöntemde denklemlerde bir yapay sıkışabilirlik terimi kullanılarak denklem takımı hiperbolik denklemlere çevrilmektedir. Hesap alanı dikdörtgen ağlara ayrılarak temel denklemler çözülmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Yapılandırılmış ağ yaklaşımına kullanılan ağ geometrisi

Yapılandırılmış ağ yaklaşımında kullanılan temel denklemler aşağıda özetlenmiştir:

$$\text{Süreklilik denklemi} \quad \frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = SS \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Hareket denklemi} \quad & \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + u_i SS \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\text{Tuzluluğun korunumu} \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (Su_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (D_s \frac{\partial S}{\partial x_j}) + SS \quad (4.3)$$

$$\text{Sıcaklığın korunumu} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (Tu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (D_T \frac{\partial T}{\partial x_j}) + SS \quad (4.4)$$

Burada ρ akışkanın yerel özgül kütleini, c_s deniz suyundaki ses hızını, u_i akımın x_i doğrultusundaki hızını, Ω_{ij} coriolis tensörünü, P akışkan basıncını, g_i yerçekimi vektörünü, v_T türbülans eddy viskozitesini, δ Kroneker deltayı, k türbülans kinetik enerjisini, S tuzluluğu, T sıcaklığı, D_s tuzluluk için dispersiyon katsayısını, D_T sıcaklık için dispersiyon katsayısını, t zamanı, SS kullanıldığı denkleme göre değişen kaynak-kuyu terimini göstermektedir.

(4.1) ve (4.2) denklemleri hidrodinamik denklemler, (4.3) ve (4.4) denklemleri adveksiyon-dispersiyon denklemleri olarak adlandırılmaktadır. İlk iki denklem hidrodinamik modül kullanılarak, diğer iki denklem ise adveksiyon-dispersiyon modülü kullanılarak çözülmektedir.

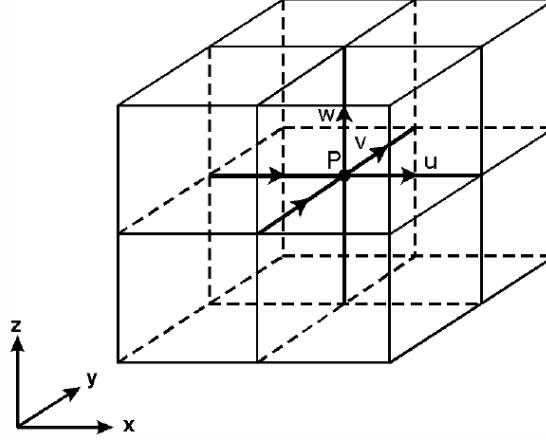
4.2.3 Yapılandırılmış Ağ Yaklaşımında Hidrodinamik Denklemlerin Sayısal Formülasyonu

Yapılandırılmış ağ yaklaşımı aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Hidrodinamik denklemleri (süreklilik ve hareket denklemleri) zamana ve konuma göre integre etmek için alternatif doğrultulu kapalı çözüm şeması (ADI-Alternating Direction Implicit Technique) kullanmakta ve her bir doğrultuda çift yönlü tarama yapmaktadır.
- Taşınım denklemlerini (tuzluluğun ve sıcaklığın taşınımı) üçüncü mertebeden hassasiyete sahip açık sonlu farklar yaklaşımı uygulayarak çözmektedir.
- Eddy viskozitesi kavramı kullanarak türbülans etkisi modellenmektedir. Bu amaçla farklı türbülans modelleme yaklaşımlarının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bunlar; Smagorinsky eddy formülasyonu, bir denklem modeli (k model), iki denklem modeli (k - ϵ model) ve düşeyde bir boyutlu k - ϵ , yatayda ise iki boyutlu Smagorinsky formülasyonu
- İterasyona başvurmaksızın, fark terimlerinin tümünü ve hesaplarda baskın etkiye sahip katsayıları merkezileştirerek kütleinin ve momentumun korunumu denklemleri için sıfır hata, enerjinin korunumunda ise ihmal edilebilir oranda hataya izin vermektedir

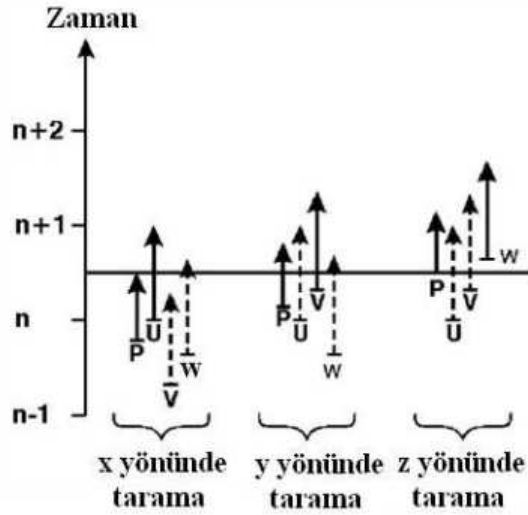
- Arakawa C-ağ ayrıklaştırması kullanarak tüm terimlerin çözümünde ikinci mertebeden hassasiyete sahip Taylor serisine açmaktadır.
- Tam, güvenilir ve oldukça hızlı çözüme imkan veren bir çözüm algoritması sunmaktadır

Fark terimleri Şekil 4.7’de görülen ağ yapısına sahip x,y,z düzleminde ifade edilmektedirler. Bu ağ sistemi Arakawa C-ağ sistemi olarak bilinmektedir.



Şekil 4.7 Arakawa C ağ sistemi

Şekil 4.8’de hidrodinamik denklemlerin ((4.1) ve (4.2)) zamansal merkezileştirmesinde kullanılan şema görülmektedir.

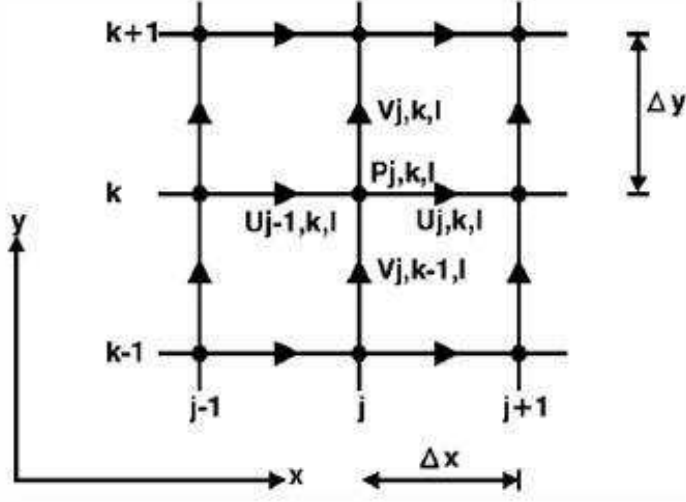


Şekil 4.8 Hidrodinamik denklemlerin zamansal merkezileştirme şeması

Süreklilik denklemi:

Şekil 4.9’da süreklilik denklemi için yatay ($x-y$) düzlemindeki ağ ayrıklaştırmasına ait şema görülmektedir ($x-z$ ve $y-z$ düzlemlerindeki de benzer şekildedir). Sırasıyla (4.5), (4.6) ve (4.7)’de ise süreklilik denklemine ait x , y ve z yönündeki ifadeler verilmiştir. İfadelerdeki her

bir terim ikinci mertebeden hassasiyetle Taylor serisine açılmakta ve sonlu farklar yöntemiyle çözülmektedir.



Şekil 4.9 Süreklilik denklemi için yatay düzlemdeki (x-y) ağ ayrıklaştırması

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\rho_{j,k,l} c_s^2} \left(\frac{P^{n+\frac{1}{2}} - P^{n-\frac{1}{6}}}{\frac{2}{3} \Delta t} \right)_{j,k,l} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^{n+1} + \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^n \right\}_{k,l} \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+\frac{1}{3}} + \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n-\frac{2}{3}} \right\}_{j,l} \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n+\frac{2}{3}} + \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n-\frac{1}{3}} \right\}_{j,k} = SS
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\rho_{j,k,l} c_s^2} \left(\frac{P^{n+\frac{5}{6}} - P^{n+\frac{1}{6}}}{\frac{2}{3} \Delta t} \right)_{j,k,l} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^{n+1} + \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^n \right\}_{k,l} \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+\frac{4}{3}} + \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+\frac{1}{3}} \right\}_{j,l} \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n+\frac{2}{3}} + \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n-\frac{1}{3}} \right\}_{j,k} = SS
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

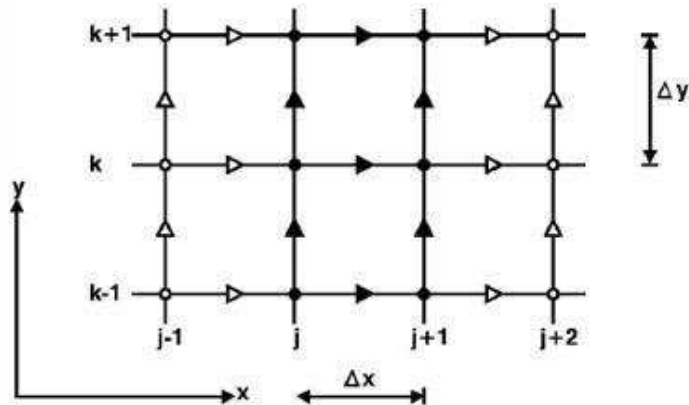
$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\rho_{j,k,l} c_s^2} \left(\frac{P^{n+\frac{7}{6}} - P^{n+\frac{3}{6}}}{\frac{2}{3} \Delta t} \right)_{j,k,l} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^{n+1} + \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^n \right\}_{k,l} \\
& + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+\frac{4}{3}} + \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+\frac{1}{3}} \right\}_{j,l} \\
& + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n+\frac{5}{3}} + \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n-\frac{2}{3}} \right\}_{j,k} = SS
\end{aligned} \quad (4.7)$$

Hareket denklemleri:

Momentumun korunumu prensibinden elde edilen hareket denkleminin kapalı formu (4.2) ifadesiyle verilmiştir. Hareket denkleminin x doğrultusundaki bileşeni ise (4.8)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u^2) + \frac{\partial}{\partial x} (uv) + \frac{\partial}{\partial x} (uw) + 2\omega v \sin(\varphi) - w \cos(\varphi) \sin(\lambda) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2v_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\
& - \frac{\partial}{\partial y} \left(v_T \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right\} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_T \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} - uSS = 0
\end{aligned} \quad (4.8)$$

Burada ω dünyanın açısal hızı, sırasıyla φ ve λ ise enlem ve boylamı göstermektedir. x doğrultusundaki hareket denklemini şu basit prensip kullanılarak sonlu farklara açılmaktadır: Zamansal terimler $(n+1/2)$ 'de merkezleştirilmekte, konumsal terimler ise u hızı için Şekil 4.10'da görüldüğü gibi (j,k,l) konumunda merkezleştirilmektedir.



Şekil 4.10 x doğrultusundaki hareket denklemini için ağ notasyonu

Aşağıda (4.8) ifadesindeki her bir terimin sonlu farklara açılmış hali verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} \right)_{j,k,l} - \frac{\Delta t^2}{24} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} + HOT(\text{yüksek mertebeden terimler}) \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} = \frac{(u^{n+1} \cdot u^n)_{j+1,k,l} - (u^{n+1} \cdot u^n)_{j-1,k,l}}{2\Delta x} - u \left[\frac{\Delta x^2}{3} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \Delta t^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} \right] + HOT \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y}(uv) = & \left[\left(\frac{u_{k+1}^a + u_k^b}{2} \right)_{j,l} \cdot v_{j+\frac{1}{2},k,l}^{n+1/2} - \left(\frac{u_k^a + u_{k-1}^b}{2} \right)_{j,l} \cdot v_{j+\frac{1}{2},k-1,l}^{n+1/2} \right] \cdot \frac{1}{\Delta y} + u \frac{\Delta t}{6} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial t} \\ & + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial t} + HOT \end{aligned} \quad (4.11)$$

Burada ileri tarama için $a=n$ ve $b=n+1$, geri tarama için ise $a=n+1$ ve $b=n$ 'dir.

$$v_{j+\frac{1}{2},k,l}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (v_j + v_{j+1})_{k,l}^{n+1/3} \quad (4.12)$$

$$v_{j+\frac{1}{2},k-1,l}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (v_j + v_{j+1})_{k-1,l}^{n+1/3} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y}(uw) = & \left[\left(\frac{u_{l+1}^a + u_l^b}{2} \right)_{j,k} \cdot w_{j+\frac{1}{2},k,l}^{n+1/2} - \left(\frac{u_l^a + u_{l-1}^b}{2} \right)_{j,k} \cdot w_{j+\frac{1}{2},k,l-1}^{n+1/2} \right] \cdot \frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{2} \Delta t w \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} \\ & + HOT \end{aligned} \quad (4.14)$$

Coriolis terimi:

$$\Omega_{ij} u_i = 2\omega \begin{bmatrix} 0 & \sin(\varnothing) & \cos(\varnothing)\sin(\lambda) \\ -\sin(\varnothing) & 0 & \cos(\varnothing)\sin(\lambda) \\ \cos(\varnothing)\sin(\lambda) & -\cos(\varnothing)\sin(\lambda) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} v = & \frac{1}{4} (v_{j,k} + v_{j,k-1} + v_{j+1,k} + v_{j+1,k-1})^{n+1/3} + \frac{\Delta t}{6} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ & + \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + HOT \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}
w = & \frac{5}{6} \frac{1}{4} (w_{j,l} + w_{j,l-1} + w_{j+1,l} + w_{j+1,l-1})^{n+2/3} \\
& + \frac{1}{6} \frac{1}{4} (w_{j,l} + w_{j,l-1} + w_{j+1,l} + w_{j+1,l-1})^{n-1/3} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \\
& + 5 \left(\frac{\Delta t}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + HOT
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Basınç teriminin hesabında ileri sonlu farklar yaklaşımı kullanılmaktadır.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{\frac{1}{2} (\rho_{j+1,k,l} + \rho_{j,k,l})} \left(\frac{P_{j+1,k,l} - P_{j,k,l}}{\Delta x} \right)^{n+1/2} \tag{4.18}$$

Kayma gerilmesi terimleri:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2v_T \frac{\partial u}{\partial x} \right\} \approx & \left[\frac{(u_{j+1} - u_j)_{k,l}^{n+1} + (u_{j+1} - u_j)_{k,l}^n}{\Delta x} - \frac{(u_j - u_{j-1})_{k,l}^{n+1} + (u_j - u_{j-1})_{k,l}^n}{\Delta x} \right] v_{T,j,k,l} \frac{1}{\Delta z} \\
& - \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v_T}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{3} \Delta x^2 \frac{\partial v_T}{\partial x} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - \left(\frac{\Delta t}{2} \right)^2 \frac{\partial v_T}{\partial x} \frac{\partial^3 u}{\partial t^2} - \frac{2}{3} \Delta x^2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^3 v_T}{\partial x^3} \\
& + HOT
\end{aligned} \tag{4.19}$$

y doğrultusundaki hareket denklemi P'nin (n+5/6) ve (n+1/6)'daki değerleri, v'nin (n+4/3) ve (n+1/3)'deki değerleri kullanılarak çözülmektedir. u ve w değerleri için ise bir önceki aşamada hesaplanan değerler kullanılmaktadır (u'nun (n+1) ve (n)'deki değerleri, w'nin (n+2/3) ve (n-1/3)'deki değerleri).

z doğrultusundaki hareket denkleminin çözümünde ise P'nin (n+7/6) ve (n+3/6)'daki değerleri, w'nin (n+5/3) ve (n+2/3)'deki değerleri kullanılmaktadır. u ve v için ise bir önceki adımda hesaplanmış değerler dikkate alınmaktadır (u'nun (n+1) ve (n)'deki değerleri, v'nin ise (n+4/3) ve (n+1/3)'deki değerleri).

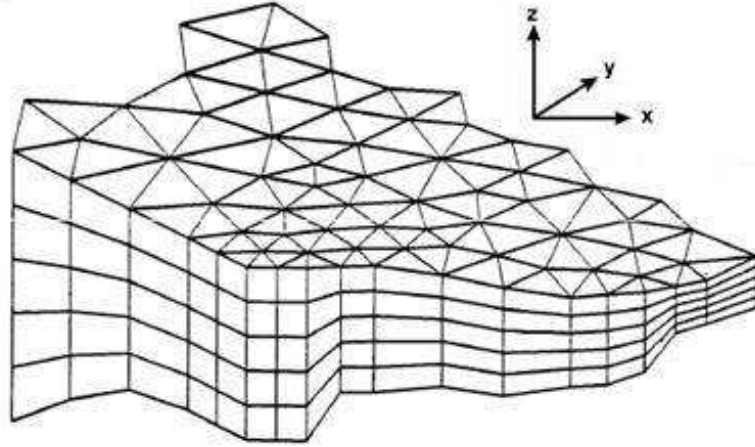
4.2.4 Yapılandırılmamış Ağ (Mike 3 HD FM) Yaklaşımı

Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Üç boyutlu Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerini Boussinesq yaklaşımı temelinde sıkışmaz akışkan ve hidrostatik basınç kabulü yaparak çözmektedir.
- Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı yatayda üçgen veya dörtgen, düşeyde ise üniform veya üniform olmayan ortogonal ağ geometrisine sahip elemanlardan oluşmaktadır

(Şekil 4.11). Temel denklemleri merkezi sonlu hacimler yaklaşımı kullanarak çözmektedir.

- Temel denklemlerin hesaplanmasında iki farklı hesap hassasiyeti kullanabilmektedir. Bunlar temel denklemlerin 1. mertebeden hassasiyetle çözüldüğü düşük mertebeli yaklaşım ile 2. mertebeden hassasiyetle çözüldüğü yüksek mertebeden yaklaşımlardır. Yüksek mertebeli yaklaşımda düşük mertebeli yaklaşıma göre hesap zamanını önemli oranda artmakta buna karşılık kesme hataları azalmaktadır.
- Eddy viskozitesi kavramı kullanarak türbülans etkisi modellenmektedir. Yapılandırılmamış ağ yaklaşımında yatay ve düşey eddy viskoziteleri için genellikle farklı yaklaşımlar dikkate alınmaktadır. Yatay eddy viskozitesi sabit bir değer şeklinde veya Smagorinsky formülasyonu ile tanımlanırken düşeyde üç farklı durum söz konusudur. Bunlar; Sabit eddy, derinlik boyunca logaritmik profil ve iki denklem modeli (k-ε).



Şekil 4.11 Yapılandırılmamış ağ yaklaşımında ağ geometrileri

Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı için sırasıyla (4.20), (4.21) ve (4.22)'de süreklilik denklemi ile x ve y doğrultularında hareket denklemleri, (4.25) ve (4.26)'da ise taşınım denklemleri (tuzluluk ve sıcaklığın taşınımı) görülmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\
& = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S
\end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\
& = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + F_v \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Burada x, y, z kartezyen koordinatları, t zamanı, η su yüzü profilini, d sakin durumdaki su derinliğini, $h = \eta + d$ toplam su derinliğini, u, v, w sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki hız bileşenlerini, $f = 2\Omega \sin\phi$ Coriolis parametresini (Ω dünyanın açısal hızı, ϕ coğrafi enlem), g yerçekimi ivmesini, ρ suyun özgül kütleini, S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} ve S_{yy} gerilme akısı bileşenlerini, v_t düşey yöndeki eddy viskozitesini, p_a atmosfer basıncını, ρ_0 suyun referans alınan özgül kütleini, S kaynak debisinin değeri, u_s ve v_s ise kaynak debisinin x ve y doğrultusundaki hızlarını göstermektedir. F_u ve F_v yatay gerilme terimleri olarak adlandırılmakta (4.23) ve (4.24) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \tag{4.23}$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \tag{4.24}$$

Burada A yatay doğrultudaki eddy viskozitesini göstermektedir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{H} + T_s S \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + H + s_s S \quad (4.26)$$

Burada \bar{H} su ile atmosfer arasındaki ısı alışverişine ait kaynak terimini, sırasıyla T_s ve s_s ise kaynak teriminin sıcaklığı ve tuzluluğunu, D_v düşey yöndeki türbülans kaynaklı difüzyon katsayısını, F yatay difüzyon terimlerini göstermektedir. D_v ve F sırasıyla (4.27) ve (4.28) ifadeleriyle verilmişlerdir.

$$D_v = \frac{v_t}{\sigma_T} \quad (4.27)$$

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (4.28)$$

Burada D_h yatay difüzyon katsayısını, σ_T ise Prandtl sayısını göstermektedir.

4.2.5 Yapılandırılmamış Ağ Yaklaşımında Hidrodinamik Denklemlerin Sayısal Formülasyonu

Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı hesap alanını merkezi sonlu hacimler yöntemi kullanarak çözmektedir. Bu yöntem temel denklemlerin hesabında iki farklı hesap yöntemine imkan vermektedir. Bunlar düşük ve yüksek mertebeli hesap şemalarıdır. Yüksek mertebeli hesap şeması temel denklemleri ikinci mertebeden hassasiyetle çözmekte, düşük mertebeli hesap şeması ise birinci mertebeden açık Euler metodu kullanarak çözmektedir.

Sığ su denklemlerinin çözümü:

Sığ su denklemlerinin integral formdaki genel ifadesi (4.29)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad (4.29)$$

Burada U korunum (conserved variables) değişkenleri vektörü, F akı vektörü ve S ise kaynak terimleri vektörünü göstermektedir.

3 boyutlu sığ su denklemlerinin kartezyen koordinatlardaki ifadesi (4.30)'da görülmektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x^I}{\partial x'} + \frac{\partial F_y^I}{\partial y'} + \frac{\partial F_\sigma^I}{\partial \sigma} + \frac{\partial F_x^V}{\partial x} + \frac{\partial F_y^V}{\partial y} + \frac{\partial F_\sigma^V}{\partial \sigma} = S \quad (4.30)$$

Burada sırasıyla V ve I indisleri viskoz ve viskoz olmayan (konvektif) akıları göstermektedir. Burada x' , y' ve σ sigma koordinat sistemindeki bağımsız değişkenleri göstermektedir. Yapılandırılmamış ağ yaklaşımında serbest yüzey değişimi sigma koordinat dönüşümü yapılarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (4.31)$$

σ 0 (tabanda, $z=z_b$) ile 1 (yüzeyde, $z=h$) arasında değişen değerler almaktadır.

(4.30) ifadesindeki diğer terimler aşağıdaki gibidir.

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \quad F_x^I = \begin{bmatrix} h\bar{u} \\ hu^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \\ huv \end{bmatrix}, \quad F_x^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{bmatrix}$$

$$F_y^I = \begin{bmatrix} h\bar{v} \\ hvu + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \\ hu^2 \end{bmatrix}, \quad F_y^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ hA \left(2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$F_\sigma^I = \begin{bmatrix} hw \\ hwu \\ h wv \end{bmatrix}, \quad F_\sigma^V = \begin{bmatrix} 0 \\ v_t \frac{\partial u}{\partial \sigma} \\ h \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \\ v_t \frac{\partial v}{\partial \sigma} \\ h \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + fvh - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial y} + fuh - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x} \right) \end{bmatrix}$$

(4.29) denklemi i . hücre boyunca integre edilmesiyle ve Gaus teoremi kullanılmasıyla (4.33) ifadesi elde edilmektedir.

$$\int_{A_i} \frac{\partial u}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_i} (F \cdot n) ds = \int_{A_i} S(U) d\Omega \quad (4.33)$$

Burada A_i i . hücrenin alan/hacim oranı, Ω A_i 'yi tanımlayan integral değişkeni, Γ_i i . hücrenin sınırı, ds sınır boyunca integral değişkeni, n sınıra dik normal vektör (dışa doğru). Her bir hücre elemanı için bir nokta etrafında dörtgenleştirme kuralı (**one point quadrature rule**) kullanılarak alan/hacim oranlarına bağlı olarak prizmatik hesap elemanının ağırlık merkezi belirlenmektedir. Orta nokta etrafında dörtgenleştirme kuralı kullanılarak (4.33) ifadesi yeniden düzenlenirse (4.34) ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{A_i} \sum_j^{NS} F \cdot n \Delta\Gamma_j = S_i \quad (4.34)$$

Burada sırasıyla U_i ve S_i U 'nun ve S 'nin i . hücrenin merkezinde depolanan ortalama hesap değerlerini, NS i . hücrenin yüzey sayısı, n_j j . yüzey alanına ait normal vektörü ve $\Delta\Gamma_j$ j . ara yüzeyin uzunluk/alan oranını göstermektedir.

Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı konumsal terimlerin hesaplanmasında birinci veya ikinci mertebeden çözüme olanak vermektedir. Konvektif terimlerin x '- y ' düzlemindeki hesabında yaklaşık Riemann çözümü yöntemi kullanılmaktadır. x '- y ' düzlemine dik ara yüzeyler için ise düşük mertebeden hesap şemasında 1. dereceden yukarı yönlü tarama yapılmaktadır. Yüksek mertebeden hesap şeması ise ara yüzeyin üstündeki ve altındaki hücrelerin ara yüzeylerine ait akı değerlerini kullanmaktadır.

Zamansal terimlerin ayrıklaştırmasında yarı kapalı hesap şeması kullanılmaktadır. Yataydaki terimlerin hesabında kapalı çözüm, düşeydeki terimlerin hesabında ise kapalı veya yarı kapalı çözüm uygulamaktadır. Sığ su denklemlerinin en genel haldeki ifadesi (4.35)'de görülmektedir. (4.36)'da ise bu genel ifadenin düşük mertebeli hesap şeması durumundaki hali görülmektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G(U) \quad (4.35)$$

$$U_{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t (G_v(U_{n+1}) + G_v(U_n)) = U_n + \Delta t G_h(U_n) \quad (4.36)$$

Burada h ve v indisleri sırasıyla yatay ve düşey terimleri göstermektedir. Yatay terimler birinci mertebeden açık Euler yaklaşımıyla, düşey terimleri ise kapalı şema kullanılarak ikinci mertebeden trapezoidal yaklaşımla çözülmektedir.

Yüksek mertebeli hesap şeması durumunda;

$$U_{n+\frac{1}{2}} - \frac{1}{4} \Delta t \left(G_v \left(U_{n+\frac{1}{2}} \right) + G_v(U_n) \right) = U_n + \frac{1}{2} \Delta t G_h(U_n)$$

$$U_{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t (G_v(U_{n+1}) + G_v(U_n)) = U_n + \Delta t G_h(U_{n+1/2}) \quad (4.37)$$

(4.37) ifadesindeki yatay terimler ikinci mertebeden Runge Kutta metoduyla çözülmektedir. Düşey terimler ise kapalı şema kullanılarak ikinci mertebeden trapezoidal yaklaşımla çözülmektedir.

Sonuç olarak yapılandırılmış ağ, lineer olmayan üç boyutlu süreklilik ve momentumun korunumu denklemlerine ikinci mertebeye hassasiyette alternatif doğrultulu kapalı sonlu farklar çözümü uygulamaktadır. Tuzluluk ve sıcaklığın taşınımı için ise üçüncü mertebeye hassasiyette açık sonlu farklar çözümü uygulamaktadır. Bu yaklaşımda hidrostatik olmayan basınç dağılımı kabulü yapılarak sıkışabilirlik etkileri dikkate alınmaktadır.

Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı üç boyutlu, sıkışamaz akışkan için hareket denklemlerini hidrostatik basınç dağılımı kabulü yaparak çözmektedir. Konumsal ayrıklaştırma için yatayda (x,y) yapılandırılmamış, düşeyde ise yapılandırılmış ağlar kullanmakta ve temel denklemlere merkezi sonlu hacimler çözümü uygulamaktadır. Hesap şemasının çözümünde zamansal terimlerin ayrıklaştırması için yarı kapalı, konumsal terimlerin ayrıklaştırması için ise yatayda açık, düşeyde kapalı çözüm uygulamaktadır.

4.3 Sayısal Modelin Uygunluk Testi

Kullanılan üç boyutlu sayısal hidrodinamik modelin kalibrasyonundan önce model uygunluk testinden geçirilmiştir. Bunun amacı sayısal modelin İstanbul Boğazı'ndaki yoğunluk farkından kaynaklanan tabakalı akım yapısını yeterince gerçekçi benzeştirip benzeştiremediğini kontrol etmektir. İstanbul Boğazı boyutlarına sahip dikdörtgen kesitli

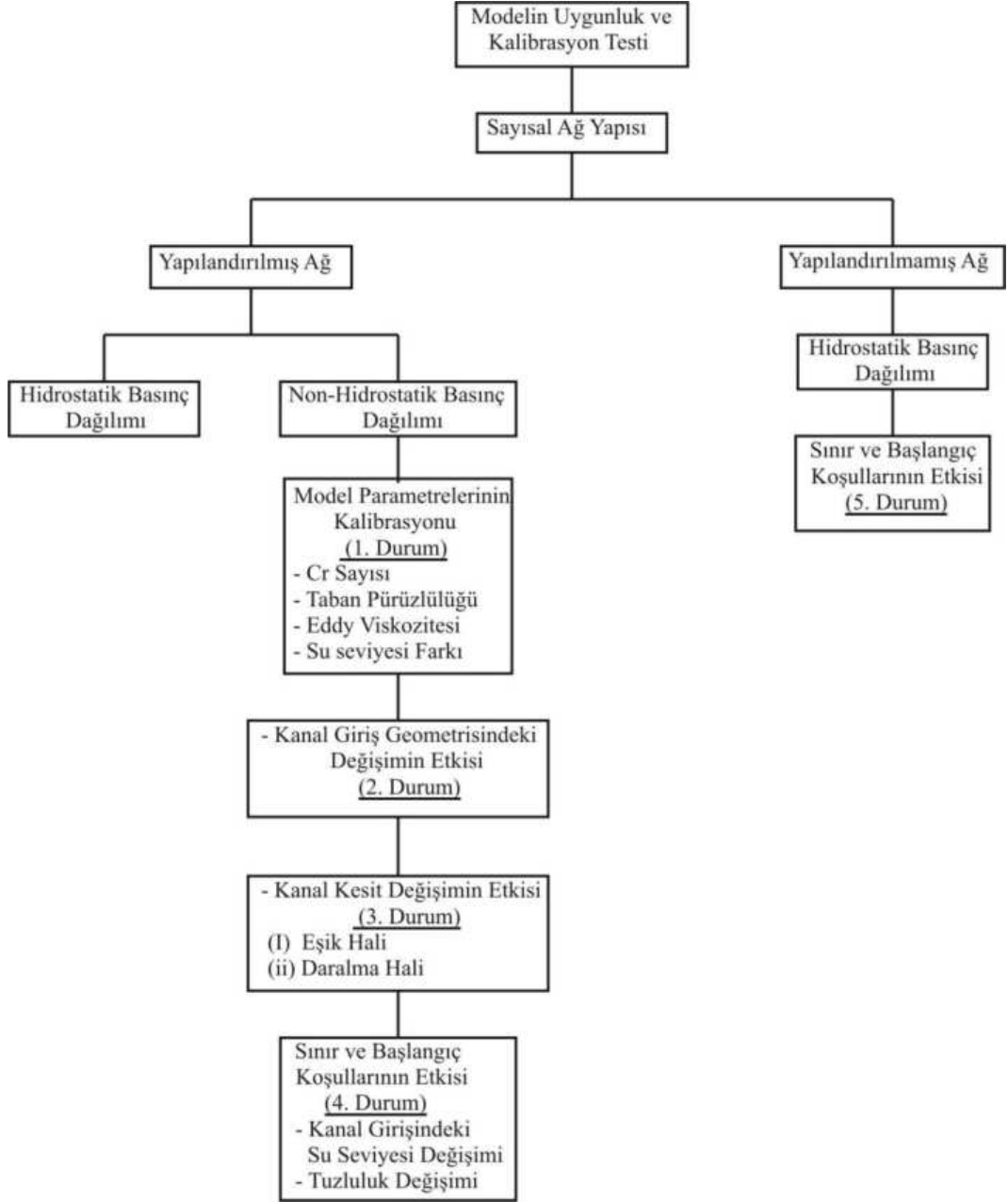
kanal geometrisi kullanılarak hesap süresinin kısaltılması sağlanmıştır. Böylece aynı zamanda farklı hidrodinamik parametrelerin, sınır koşullarının ve kanal geometrisindeki değişimlerin akım yapısı ve sayısal model stabilitesi üzerindeki etkileri incelenerek gerek modelin kalibrasyonunda etkin parametrelerin belirlenmesi gerekse tabakalı akımın hidrodinamik davranışının anlaşılması sağlanmıştır. Bu amaçla gerekli testlerde Şekil 4.12 'de verilen şema izlenmiştir.

Şemadan görüldüğü gibi sayısal modelde ana hatları Bölüm 4.2'de açıklanan iki farklı ağ yapısı (yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağ yapısı) kullanılmıştır. Öncelikle yapılandırılmış ağ yaklaşımı kullanılmıştır. Dikkate alınan stabil çözüm veren model alternatifleri yapılandırılmamış ağ sisteminde tekrar çalışılmamıştır. Bu bölümde Bölüm 5'de kullanılan İstanbul Boğazı için en uygun ağ yaklaşımının da belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.3.1 Yapılandırılmış Ağ Sisteminde Dikdörtgen Kesit Hali

İstanbul Boğazı tabakalı akımının modellenmesi için kurulması düşünülen modelin uygunluğunun test edilmesi amacıyla İstanbul Boğazı boyutlarına sahip dikdörtgen bir kanal geometrisi oluşturulmuştur. Dikdörtgen kanaldaki tabakalı akımın modellenmesi için çok sayıda model alternatifi oluşturulmuştur. Bu alternatiflerin herbirinde farklı model parametrelerinin yarattığı etki sistematik olarak incelenmiştir. Tüm model alternatifleri için kanal boyunca hidrostatik olmayan basınç dağılımının geçerli olduğu kabul edilmiş ve türbülans hesabında k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Oluşturulan model alternatifleri dört ana duruma ayrılmış ve herbir model alternatifi için tanımlanan kanal geometrisi Şekil 4.13'de verilmiştir.

1) 1. Durum; ağ boyutlarının, taban pürüzlülüğünün (k_s), eddy viskozitesinin ve su seviyesi farkının model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla Şekil 4.13'deki 1. durum kanal geometrisi için 9 ayrı model alternatifi denenmiştir.



Şekil 4.12 Sayısal modelin uygunluk testinde izlenen yol

2) 2. Durum; kanal giriş geometrisindeki değişimin tabakalı akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla Şekil 4.13'deki 2. durum kanal geometrileri için aşağıdaki kanal alternatifleri oluşturulmuştur:

a) Bir hazne-kanal sisteminde kanal hazne bağlantısının ani veya kademeli olmasının kanal ve açık sınırlardaki akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla Şekil 4.13'deki 2. durum (a) (ani genişleyen kanal) ve (b)'deki (kademeli genişleyen kanal) kanal geometrileri için iki ayrı model alternatifi çalıştırılmıştır.

b) Açık sınırlarda farklı genişleme miktarlarının (200 m, 400 m ve 600 m) ve açık sınırların konumundaki değişimin akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin

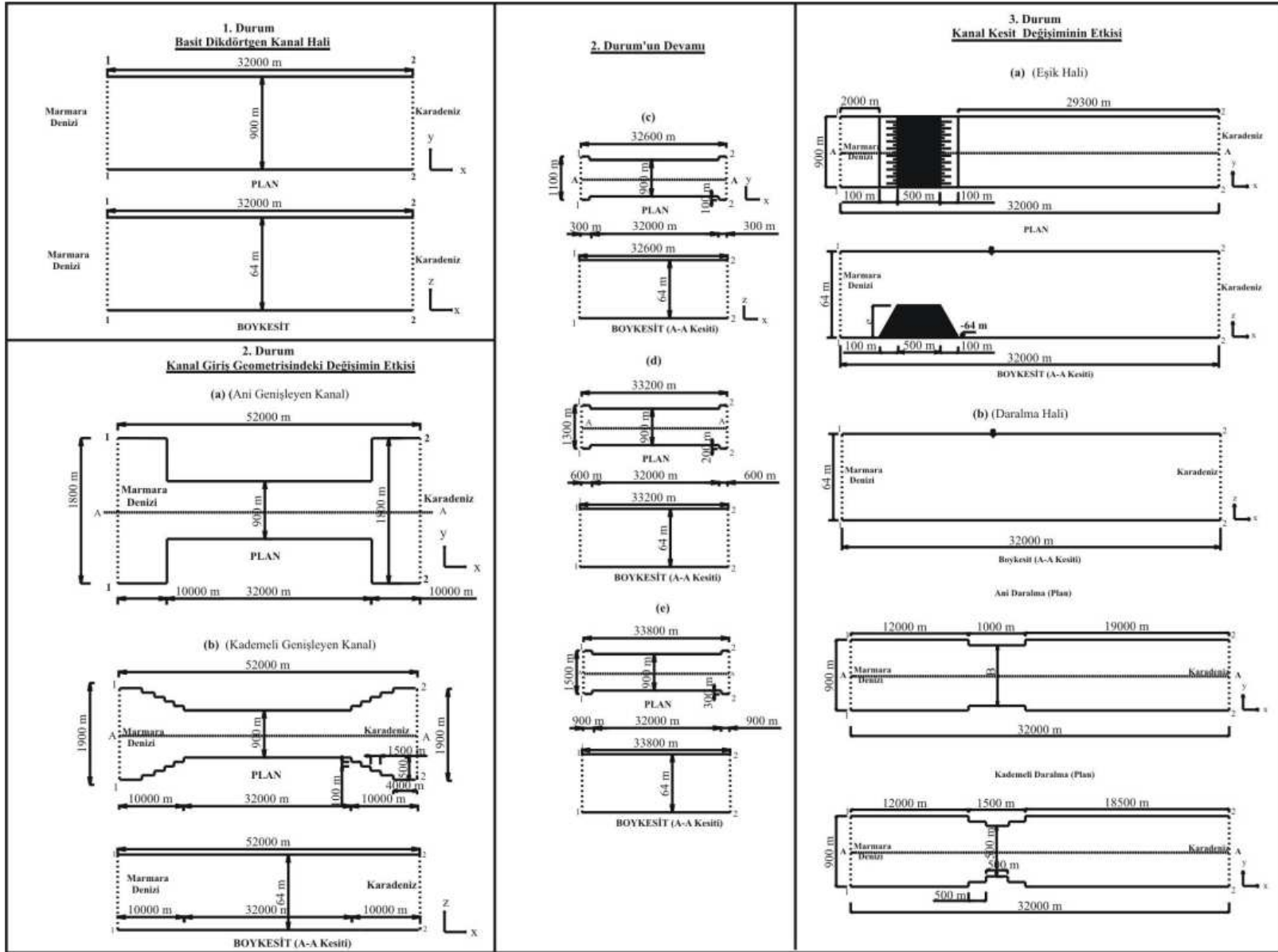
araştırılması amacıyla Şekil 4.13'deki 2. durum (c), (d) ve (e)'deki kanal geometrileri için üç ayrı model alternatifi çalıştırılmıştır.

3) 3. Durum; kanal kesit geometrisindeki değişimin tabakalı akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla Şekil 4.13'deki 3. durum kanal geometrileri için aşağıdaki kanal alternatifleri oluşturulmuştur:

a) Kanal tabanındaki eşik tabakalı akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla $e = 10, 20, 30$ m eşik yükseklikleri için Şekil 4.13'deki 3. durum (a)'daki kanal geometrisi (eşik hali) için üç ayrı model alternatifi çalıştırılmıştır.

b) Kanal genişliğindeki değişimin tabakalı akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla Şekil 4.13'deki 3. durum (b)'deki kanal geometrileri (ani ve kademeli daralma hali) için üç ayrı model alternatifi denenmiştir.

4) 4. Durum; sınır ve başlangıç koşullarının akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla Şekil 4.13'deki 1. durum kanal geometrisi için dört farklı model alternatifi denenmiştir.



Şekil 4.13 Tabakalı akım modelinin uygunluk testi için kullanılan farklı dikdörtgen kanal geometrileri

4.3.1.1 Basit Dikdörtgen Kesit Hali (1.Durum)

Çizelge 4.1’de görülen 9 ayrı model alternatifi için Şekil 4.13 ’de (1.durum) görülen 32 km uzunluğunda (x), 900 m genişliğinde (y) ve 64 m derinliğinde (z) basit bir dikdörtgen kanal oluşturulmuştur. Kanal yatay tabanlı ve uzunluğu boyunca sabit genişliğe sahiptir

Çizelge 4.1 Basit Dikdörtgen kanal kullanılarak oluşturulan model alternatiflerine ait parametreler ve değerleri

Model Alternatifleri			1. Alternatif	2. Alternatif	3. Alternatif	4. Alternatif	5. Alternatif
Ağ aralığı ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) (m)			200×200×1	100×100×1	50×50×1	100×100×1	100×100×1
Zaman Adımı Aralığı (Δt)(s)			1.5	1.0	0.5	1.0	1.0
Courant Sayısı (C_r)			0.2507	0.2507	0.2507	0.2507	0.2507
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
		2-2	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)
		2-2	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Pürüzlülük (ks) (m)			0.05 (sbt)	0.05 (sbt)	0.05	0.30 (sbt)	0.50 (sbt)
Eddy Viskozitesi Limitleri		x	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	2.dur. ile aynı	2.dur. ile aynı
		y	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	2.dur. ile aynı	2.dur. ile aynı
		z	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	2.dur. ile aynı	2.dur. ile aynı
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			38 (sbt)	38 (sbt)	38	38 (sbt)	38 (sbt)
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0	0	0	0
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Başarı ile çalıştığı süre (s)			100,000	100,000	650	100,000	100,000

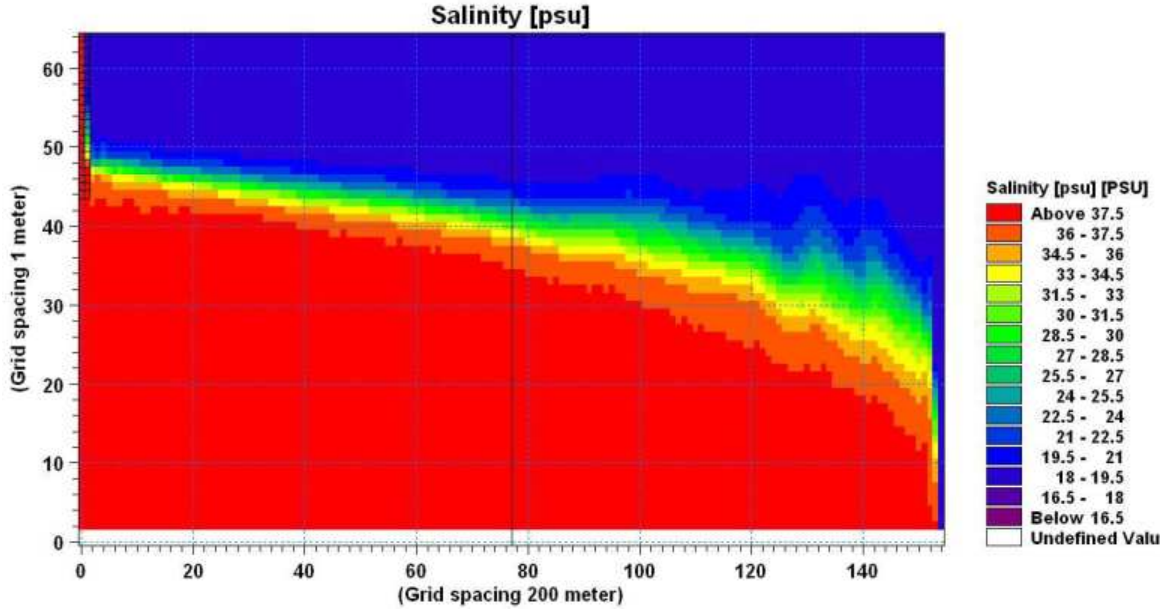
Çizelge 4.1’in Devamı

Model Alternatifleri			6. Alternatif	7. Alternatif	8. Alternatif	9. Alternatif
Ağ aralığı ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) (m)			100×100×1	100×100×1	100×100×1	100×100×1
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)			1.0	1.0	1.0	1.0
Courant Sayısı (C_r)			0.2507	0.2507	0.2507	0.2507
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
		2-2	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)
		2-2	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.45 (sbt)	0.50 (sbt)
Pürüzlülük (ks) (m)			0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Eddy Viskozitesi Limitleri		x	$1.8 \times 10^{-6} - 5 \times 10^5$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^5$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	8.dur. ile aynı
		y	$1.8 \times 10^{-6} - 5 \times 10^5$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^5$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	8.dur. ile aynı
		z	$1.8 \times 10^{-6} - 50$	$1.8 \times 10^{-6} - 10$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	8.dur. ile aynı
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0	0	0
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000	100,000	100,000
Başarı ile çalıştığı süre (s)			100,000	100,000	100,000	32,578

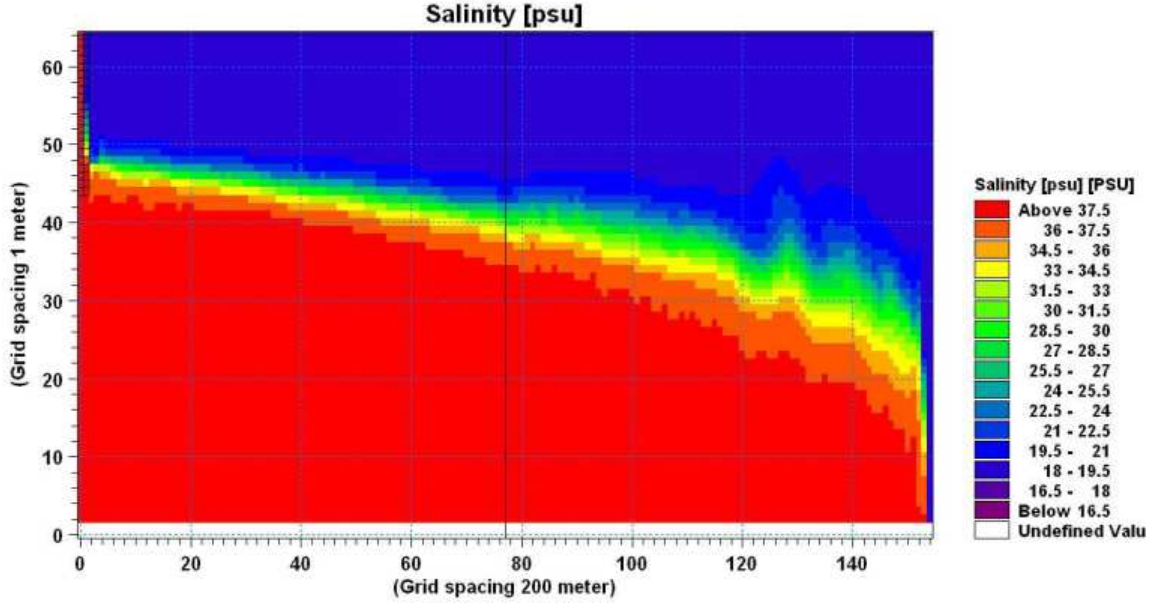
1) Uygun ağ boyutlarının belirlenmesi: Bunun için Çizelge 4.1’de görülen üç farklı model alternatifi sırasıyla ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) 200×200×1 m, 100×100×1 m ve 50×50×1 m’lik ağ boyutları kullanılarak modellenmiştir. Çizelge 4.1’den de görüldüğü gibi her üç alternatif için diğer model parametreleri sabit tutulmuştur. Ancak zaman adımı aralığının (Δt) 1.durumda 1.5 s, 2. alternatifte 1 s ve 3. alternatifte ise 0.5 s alınmasının nedeni her üç alternatif için de model stabilitesi üzerinde etkili olan Courant sayısının aynı değeri (0.2507) almasını sağlamaktır. 1.

ve 2. model alternatifleri simülasyon süresini hesap şeması stabilitesi bozulmadan, ağ aralığının ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) $50 \times 50 \times 1$ m olduğu 3. model alternatifi kısa bir süre çalıştıktan sonra hesap şeması stabilitesinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır.

Sırasıyla Şekil 4.14-15’de 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s’deki boykesit tuzluluk değişimi görülmektedir. Şekillerden son iki zaman adımındaki boykesit tuzluluk değişimlerinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği ve modelin tuzluluk değişimi için kararlı hale ulaştığı görülmektedir. Farklı yoğunluğa sahip tabakalar bir arakesit düzlemiyle birbirinden ayrılmaktadır. Arakesitin, 1-1 kesitinden 2-2 kesitine doğru kalınlığı gittikçe artan bir eğime sahip olduğu görülmektedir. Tabakalar arası karışım kanalın Karadeniz girişini karakterize eden 2-2 kesitine yakın bölgede daha güçlü olmaktadır.

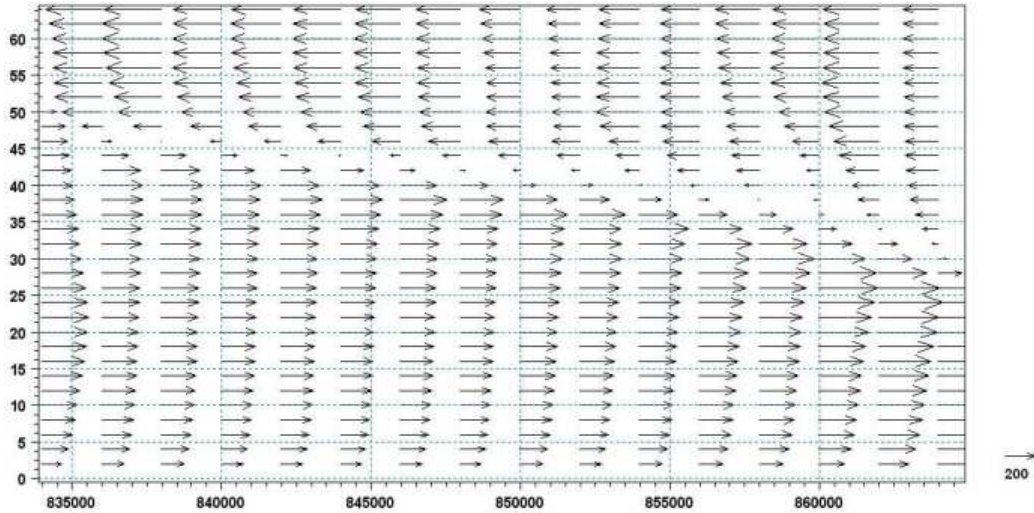


Şekil 4.14 1.model alternatifi için 99,000. s’deki boykesit tuzluluk değişimi

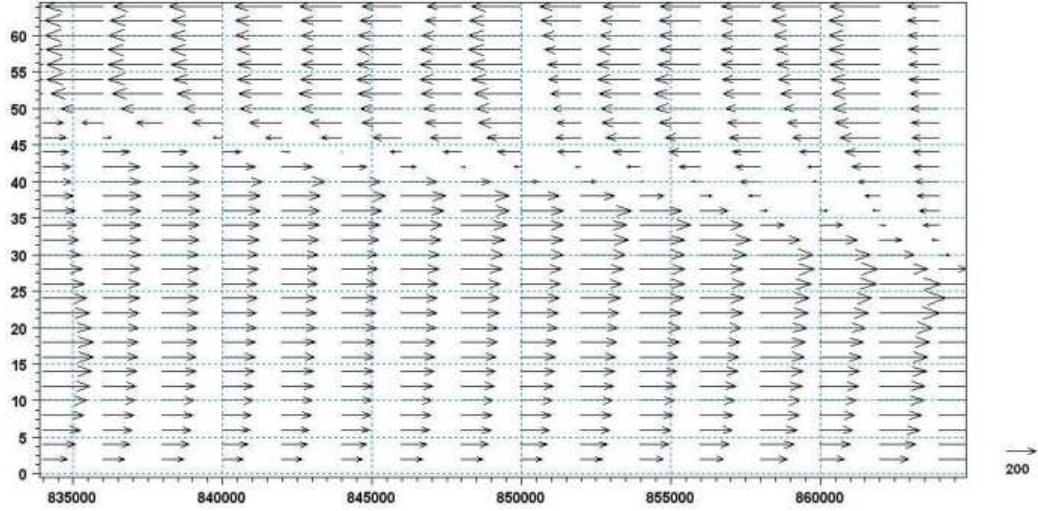


Şekil 4.15 1.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

Şekil 4.16-17'de 1. alternatif için ana akım doğrultusundaki akım hızının (u) boykesit boyunca değişimi görülmektedir. Hız değişimi tabakalı akım yapısına uygun sonuçlar vermiştir. Her iki zaman adımındaki hız profillerinin birbiriyle benzer sonuçlar verdiği ve modelin boykesit hız dağılımı için de kararlı hale ulaştığı söylenebilmektedir. Şekillerden tanımlanan sınır koşulları için üst tabaka kalınlığının 2-2 kesitinde 32 m, 1-1 kesitinde 12 m değerini aldığı görülmektedir. Böylece arakesitin eğimi $S_i = (32-12)/32000 = 6.25 \times 10^{-4}$ değerini almaktadır.

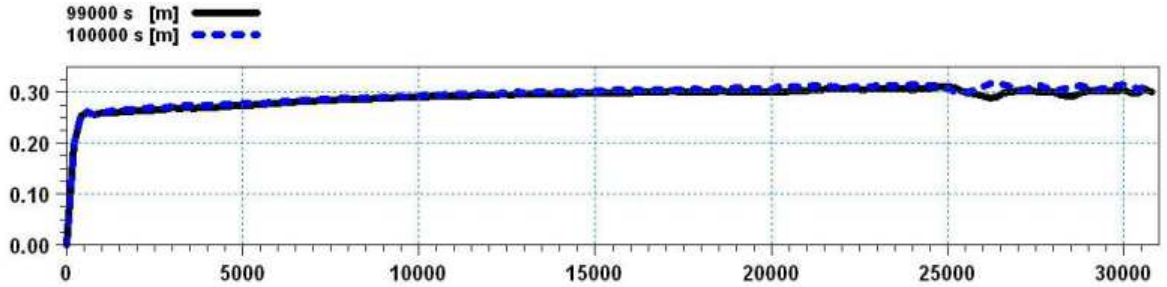


Şekil 4.16 1.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili



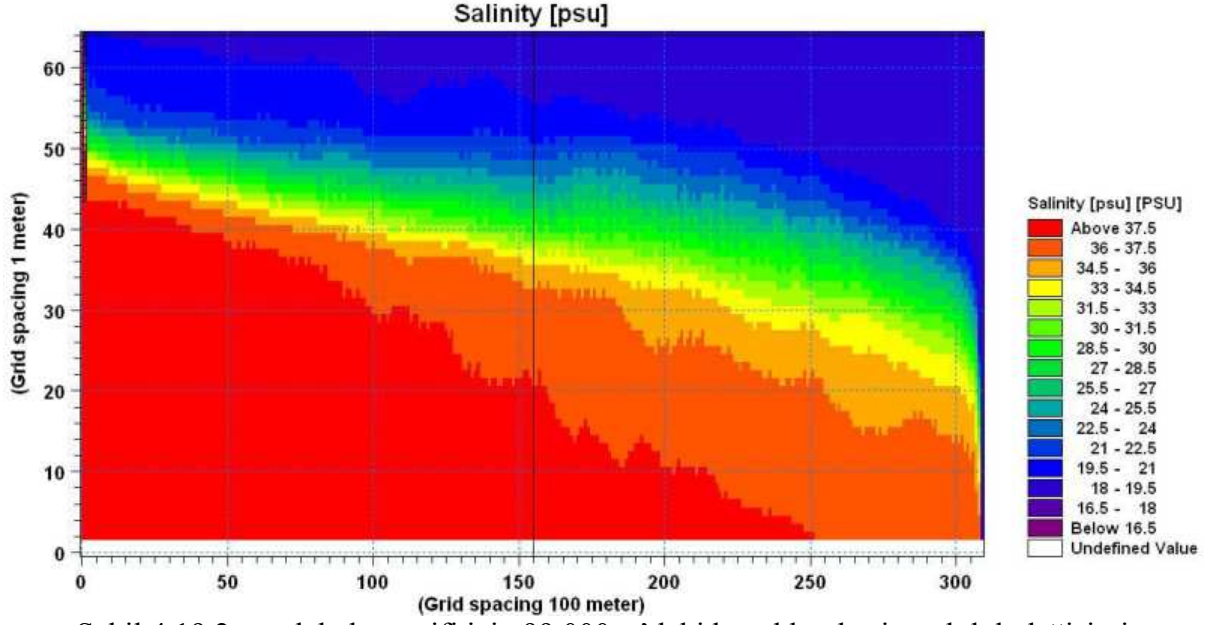
Şekil 4.17 1.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili

Şekil 4.18'de ise 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimi görülmektedir. Modelin su yüzü değişimi için kararlı hale ulaştığı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi su yüzü 1-1 ile 2-2 kesiti arasında ortalama 5 cm'lik su seviyesi farkına sahip olacak şekilde doğrusal olarak ilerlemiş ve 1-1 kesitine yakın bölgede 25 cm'lik ani bir düşüş göstermiştir. Bu durumun hidrostatik olmayan basınç dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir.

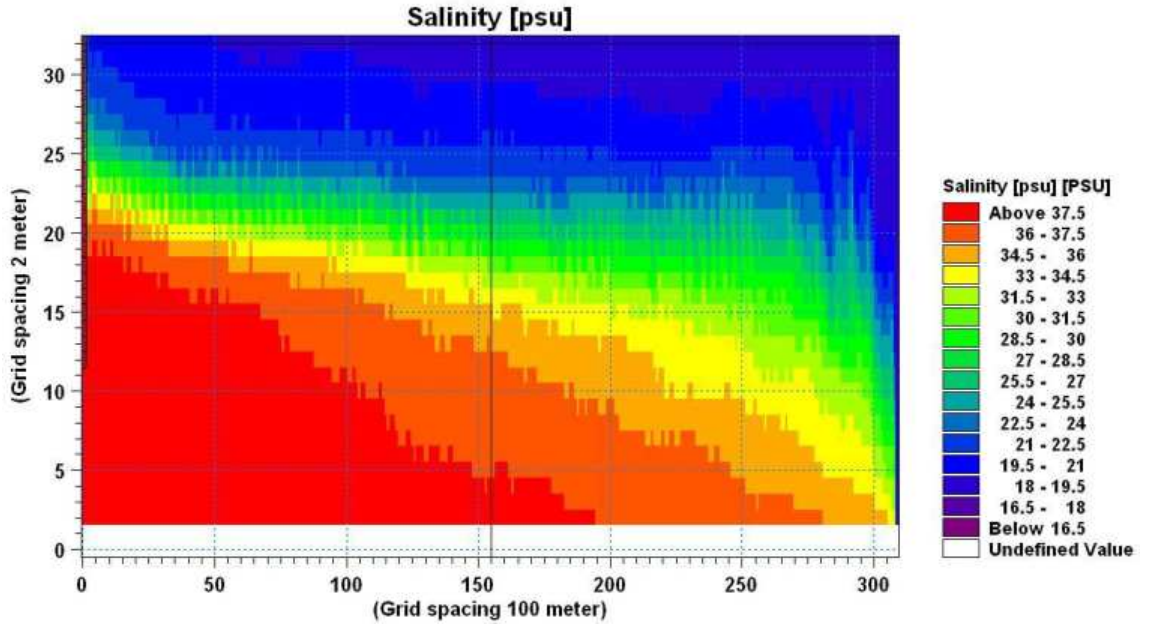


Şekil 4.18 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri

Şekil 4.19 ve 20'de ise 2.model alternatifi için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi görülmektedir. Şekillerden ara tabakanın derinlik boyunca akım alanının çok büyük bir kısmını kapladığı görülmektedir. Tabakalar arası karışımın etkisi 1-1 kesitinden 2-2 kesitine doğru giderek artmış, 2-2 kesitinde akım alanının yarısını kaplayacak boyutlara ulaşmıştır. 100,000. s'deki ara kesit kalınlığı 99,000. s'dekinden daha büyük olmaktadır.

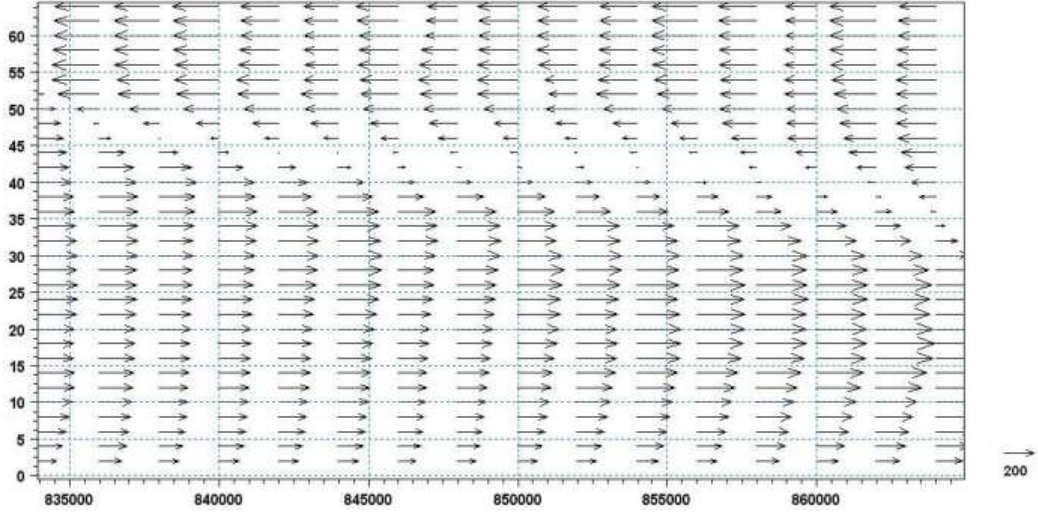


Şekil 4.19 2. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk değişimi

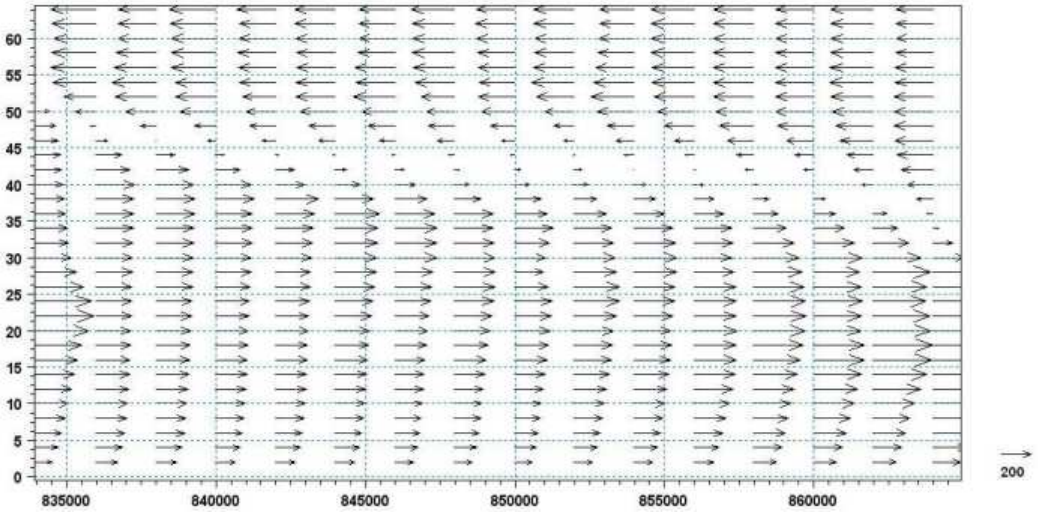


Şekil 4.20 2. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk değişimi

Şekil 4.21 ve 22'de 2.model alternatifi için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit hız dağılımları görülmektedir. Her iki şekilde de üst tabaka kalınlığı 1-1 kesitinde 29 m, 2-2 kesitinde 13 m değerini almaktadır. Bu durumda arakesit eğimi $S_i = (29-13)/32000 = 5 \times 10^{-4}$ dir. 2.alternatifte arakesit eğimi 1.alternatife ($S_i=6.25 \times 10^{-4}$) göre azalmış daha yatay bir hal almıştır. Bu sonuç 2.alternatifte tabakalar arasında karışımın 1.alternatife göre daha fazla olduğunu gösteren boykesit tuzluluk değişimiyle uyum göstermektedir.

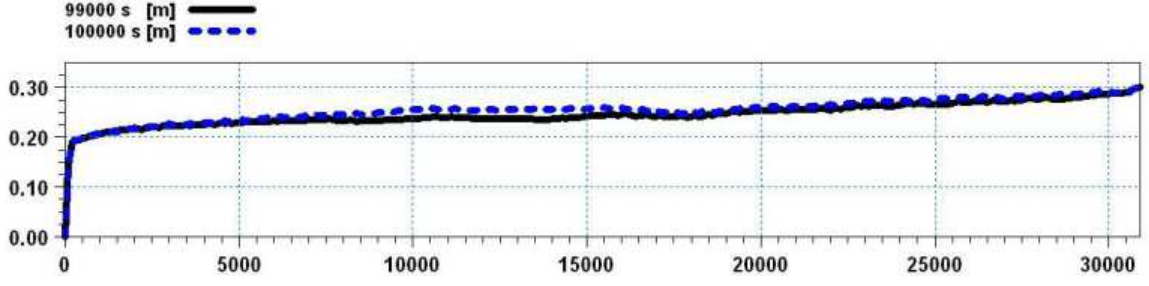


Şekil 4.21 2.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili



Şekil 4.22 2.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili

Şekil 4.23'de 2.alternatife ait 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimi sonuçları bir arada verilmiştir. Şekilden'de görüldüğü gibi ardışık iki zaman adımı için sonuçlar neredeyse çakışmaktadır. Bu durum modelin su yüzü değişimi için kararlı çözüme ulaştığını göstermektedir. Su yüzü profili 1-1 ve 2-2 kesitleri arasında ortalama 10 cm su seviyesi farkına sahip bir doğru şeklinde uzanmıştır. 1.alternatifte su yüzü profili yataya yakın bir doğru şeklindekiyken 2.alternatifte eğimi artan bir doğru şeklini almaktadır. 1.alternatifte göre su yüzündeki ani düşüş miktarı azalmıştır. Model 2.alternatifte 1.alternatifte göre başlangıçta tanımlanan su yüzü farkına daha uygun bir su yüzü profili vermektedir.



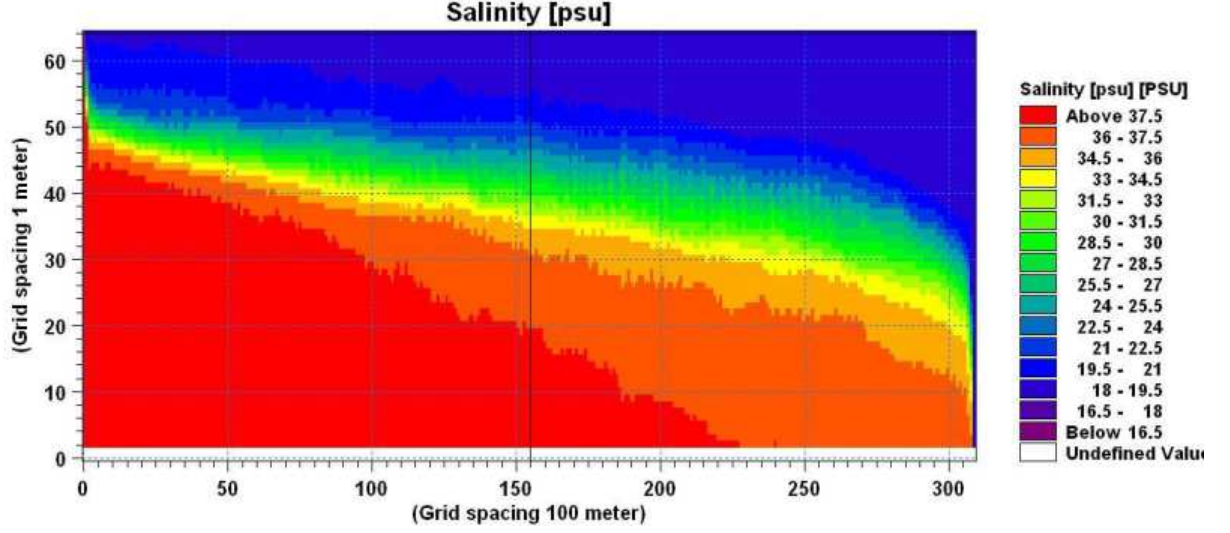
Şekil 4.23 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri

Her iki alternatife ait sonuçların (boykesit tuzluluk, hız ve kanal su yüzü değişimi) birarada değerlendirilmesinden ağ boyutlarının model sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Boykesit tuzluluk değişimi sonuçlarına göre arakesit kalınlığının 2.alternatifte (100×100×1 m ağ boyutları) 1.alternatifte (200×200×1 m'lik ağ boyutları) göre daha fazla olduğu, dolayısıyla derinlik boyunca karışımın 2.'sinde 1.'sine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Her iki alternatiften elde edilen boykesit hız dağılımı sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Arakesit 2.alternatifte 1.'sine göre daha küçük bir eğim değeri almaktadır. Kanal su yüzü değişimi sonuçlarına göre de 2.model alternatifi 1.'sine göre daha uygun sonuçlar vermektedir.

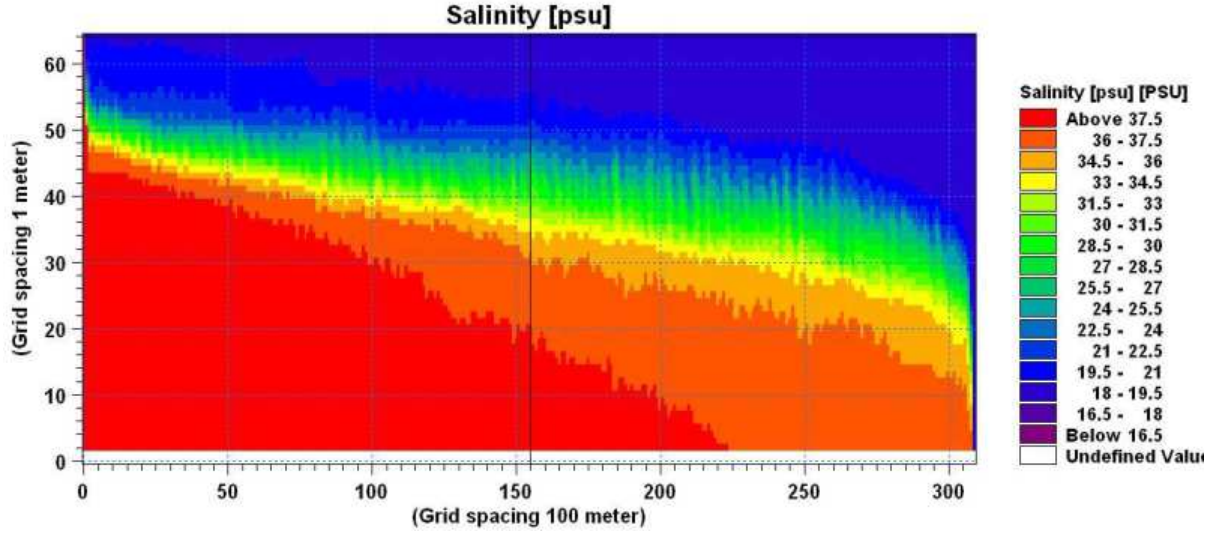
Sonuç olarak İstanbul Boğazı boyutlarına sahip basit geometriye sahip bir dikdörtgen kanaldaki tabakalı akımın modellenmesinde ($\Delta x \times \Delta y$) 100×100 m'lik ağlar kullanılması durumunda su yüzündeki ani değişim miktarı azalmaktadır, bu nedenle dikkate alınan ağ boyutlarının kaba ağa göre daha uygun olduğu görülmektedir.

2) Uygun taban pürüzlülüğü değerinin (k_s) belirlenmesi : 4. ve 5. model alternatifleri taban pürüzlülüğünün (k_s) model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle 1. ve 2. model alternatifi sonuçlarından uygun ağ ayırıştırması (100×100 m) belirlenmiş ve 4. ve 5. model alternatifleri için Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi diğer tüm model parametreleri sabit tutularak farklı k_s değerleri denenmiştir. k_s için sırasıyla 0.05 m (2.alternatif), 0.30 m (4.alternatif) ve 0.50 m (5.alternatif) değerleri denenmiştir. k_s 'in 0.05 m değeri pürüzsüz taban haline karşı gelmektedir, 0.30 m değeri ise taban pürüzlülüğü için tanımlanabilecek pürüzlü taban koşullarını karakterize etmektedir. Ancak tabana yakın bölgede logaritmik hız dağılımı kabulü yapıldığından, taban pürüzlülüğü (k_s) sadece tabandaki tanenin çapına eşit olmamakta aynı zamanda düşey ağ boyutuyla da ilgili olmaktadır (yani hem fiziksel hemde matematiksel bir anlam taşımaktadır). Dolayısıyla bu durum göz önüne alınarak 5.alternatifte k_s için 0.50 m değeri de dikkate alınmıştır.

Sırasıyla Şekil 4.24 ve 25’de 4.model alternatifi için ($k_s=0.30$ m) 99,000. ve 100,000.s’lerdeki boykesit tuzluluk değişimleri görülmektedir. Her iki zaman adımıdaki tuzluluk değişiminin 2.alternatifin ($k_s=0.05$ m, Şekil 4.19-20) aynı zaman adımlarındaki tuzluluk değişimine göre daha kararlı bir hale ulaştıkları Şekil 4.24 ve 25’den görülmektedir. Ayrıca arakesitin kalınlığı 2.alternatife göre azalmakla beraber çok önemli bir değişim göstermemiştir.

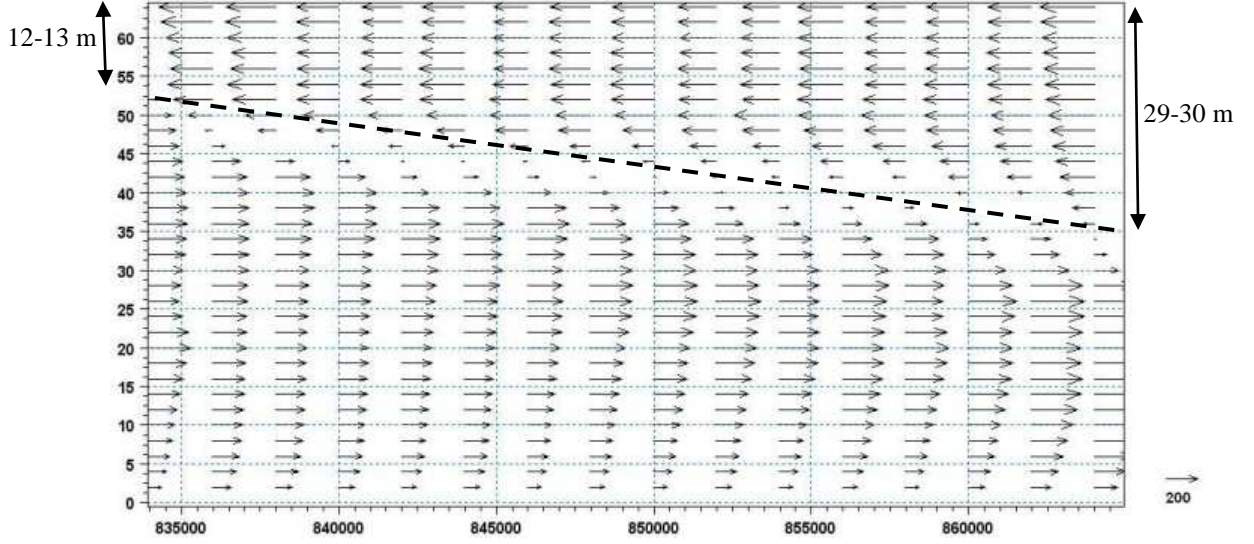


Şekil 4.24 4.model alternatifi için 99,000. s’deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

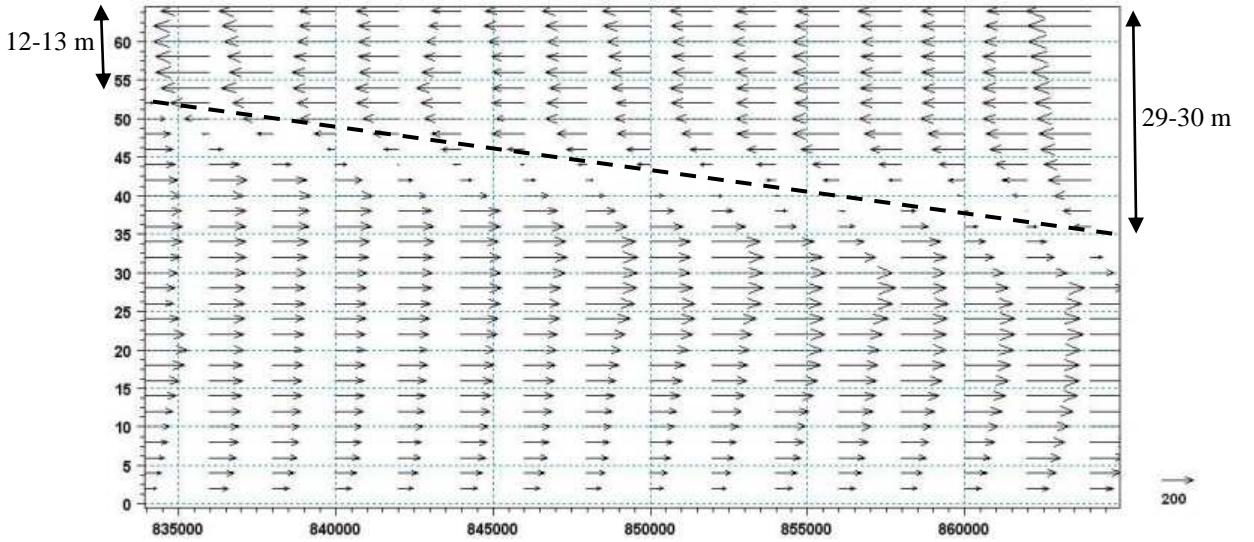


Şekil 4.25 4.model alternatifi için 100,000. s’deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

Şekil 4.26 ve 27’de ise sırasıyla 4.alternatif için 99,000. ve 100,000. s’lerdeki boykesit hız (u hızı) dağılımı verilmiştir. Şekillerden üst tabaka kalınlığının Marmara Denizi’ni karakterize eden 1-1 kesitinde 12-13 m, Karadenizi karakterize eden 2-2 kesitinde ise 29-30 m civarında olduğu görülmektedir. Bu durumda ortalama arakesit eğimi $S_i=(29-13)/32000=5 \times 10^{-4}$ civarında bulunmuştur ve 2.alternatife göre değişim göstermemiştir.

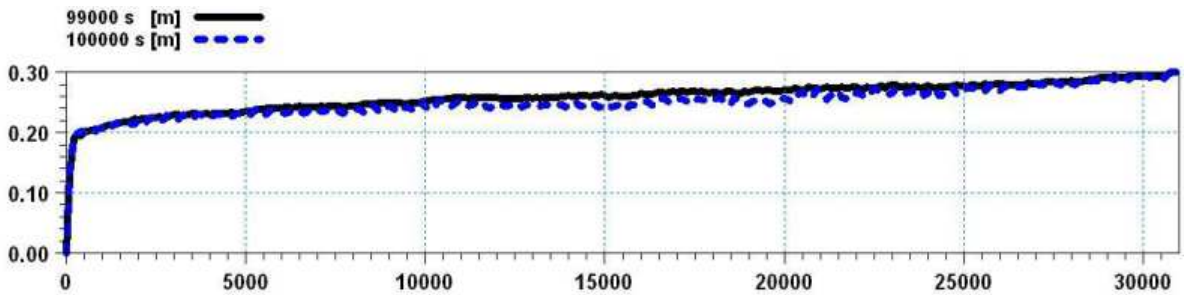


Şekil 4.26 4.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili



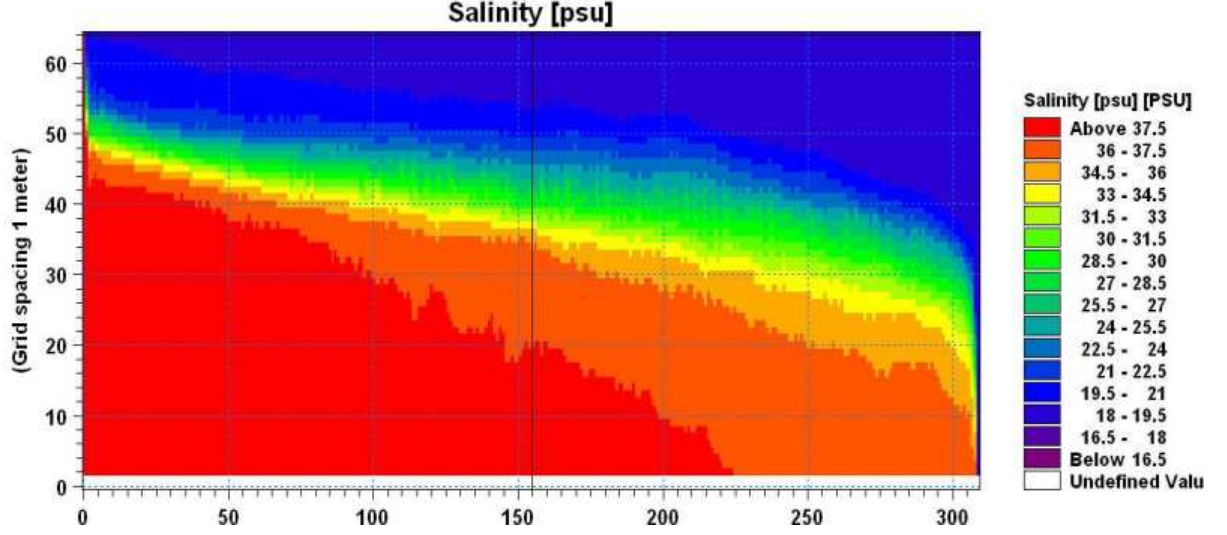
Şekil 4.27 4.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili

Şekil 4.28'de 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri görülmektedir. Her iki zaman adımıdaki su yüzü profilleri çakışmış ve 2.durumdaki (Şekil 4.23) model alternatifine göre önemli bir değişim göstermemiştir.

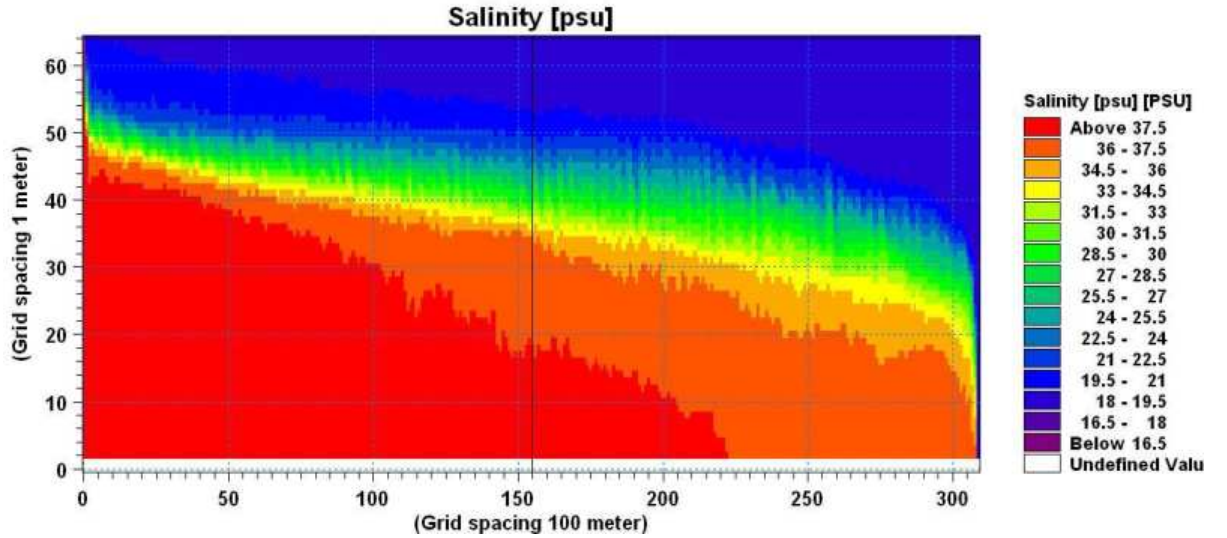


Şekil 4.28 4.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri

Şekil 4.29 ve 30'da sırasıyla 5. model alternatifi ($k_s=0.50$ m) için 99,000. ve 100,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi görülmektedir. Boykesit tuzluluk değişiminin 4.alternatif ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

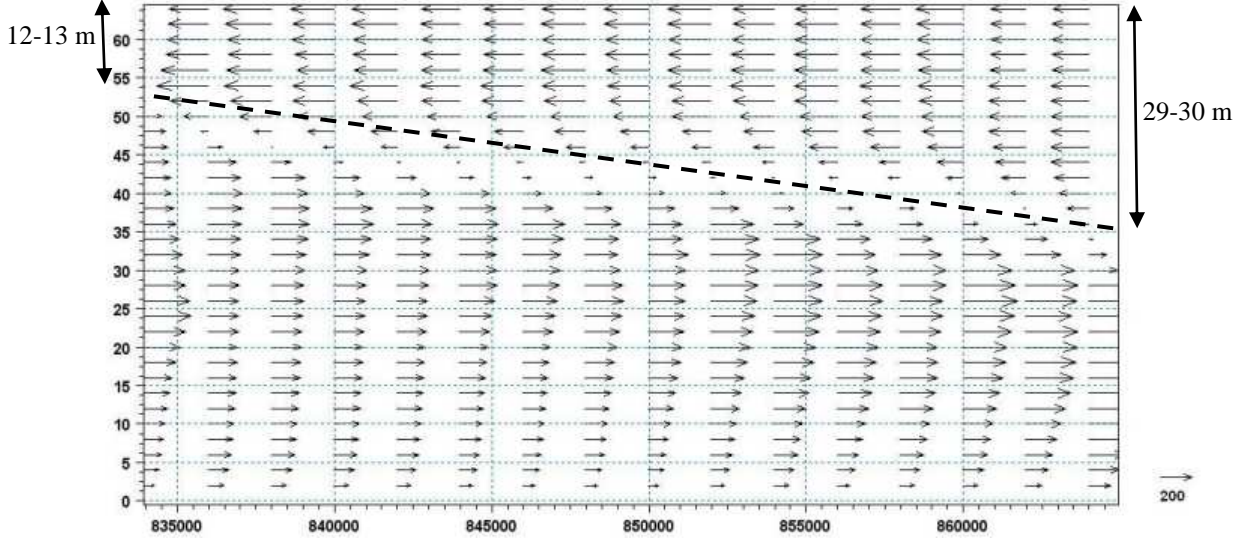


Şekil 4.29 5.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

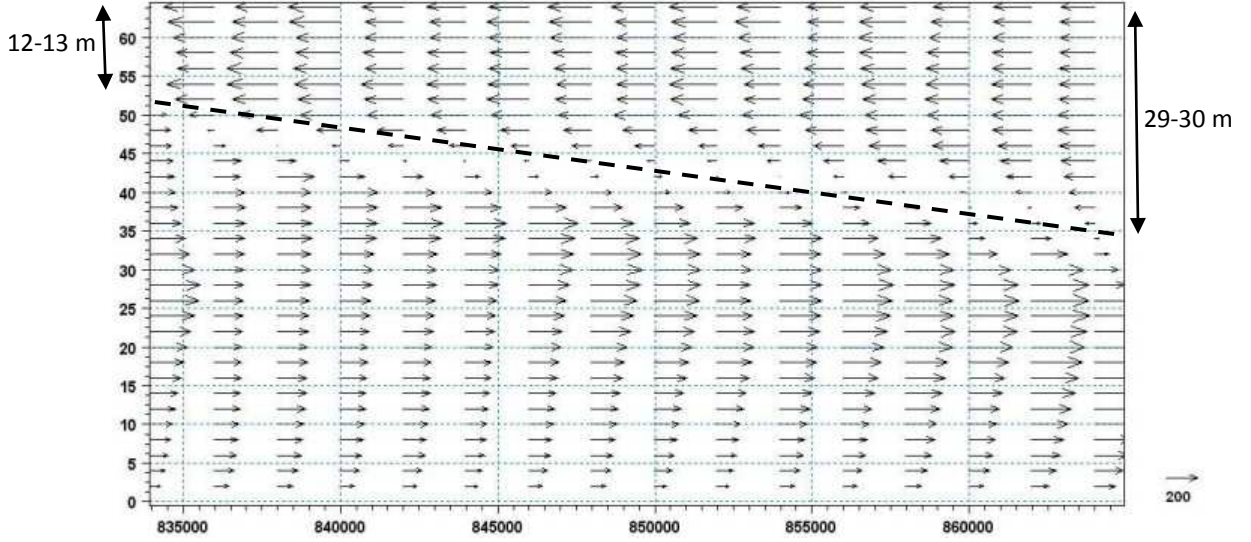


Şekil 4.30 5.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

Şekil 4.31 ve 32'de 5.model alternatifi için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit hız değişimleri görülmektedir. Şekillerden tabaka kalınlıklarının 4.alternatife göre önemli değişim göstermediği ve arakesit eğiminin $S_i=5 \times 10^{-4}$ civarında olduğu görülmektedir.

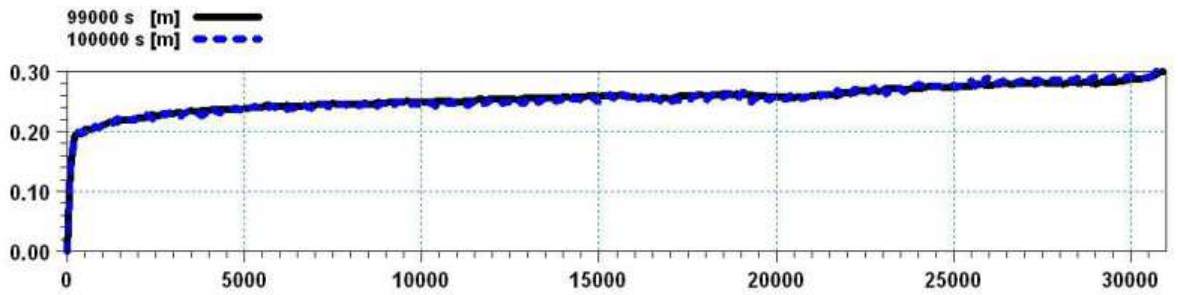


Şekil 4.31 5.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili



Şekil 4.32 5.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili

Şekil 4.33'de ise 5.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri görülmektedir. 4.alternatifteki ($k_s=0.30$ m, Şekil 4.28) su yüzü profilleri ile aynı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.33 5.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri

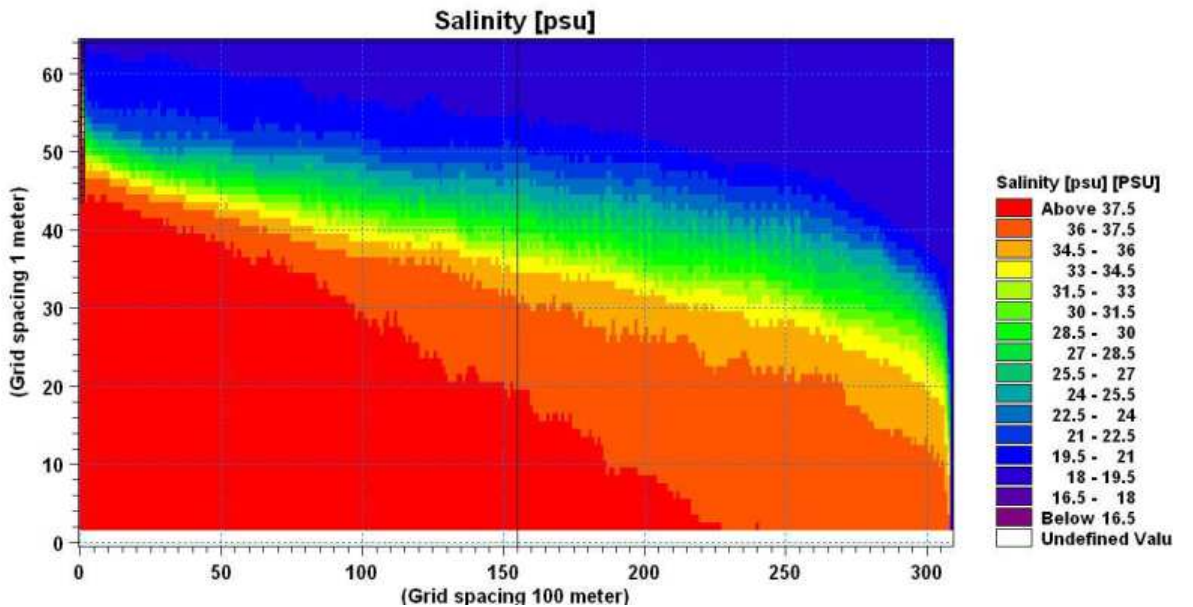
2., 4. ve 5.model alternatiflerine ait sonuçların birlikte değerlendirilmesinden ara tabaka kalınlığının pürüzlü taban ($k_s=0.30$ m) durumunda cilalı taban durumuna ($k_s=0.05$ m) göre biraz azaldığı, $k_s=0.50$ m için ise çok fazla değişim göstermediği görülmüştür. Bu sonuç taban pürüzlülüğünün ara tabakanın hidrodinamik yapısı üzerinde etkili parametre olduğunu göstermektedir.

3) Eddy Viskozitesinin etkisi: Eddy viskozitesi etkisinin değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 4.1'deki 6. ve 7.model alternatifleri oluşturulmuştur. Çizelge 4.1'deki ilk beş model alternatifi sonuçlarının (boykesit tuzluluk, hız değişimi ve kanal su yüzü değişimi) birlikte değerlendirilmesi sonucu 4.model alternatifi için kullanılan ağ ayırıklığı (100×100×1) ve taban pürüzlülüğünün ($k_s=0.30$) uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. 6. ve 7.model alternatifleri için 4.alternatifteki diğer tüm model parametreleri sabit tutularak sadece eddy viskozitesi limit değerlerindeki değişimin model sonuçları ve stabilitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

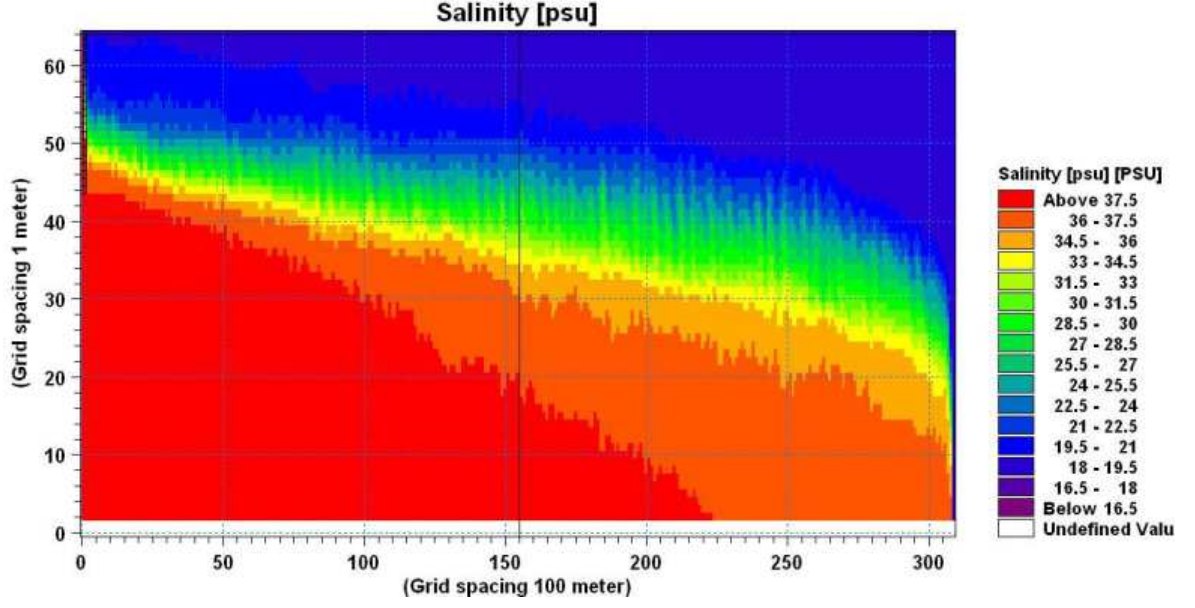
4.alternatifte eddy viskozitesi alt ve üst limitleri sırasıyla yatayda (x-y) $1.8 \times 10^{-6} - 10^6$ m²/s, düşeyde (z) ise $1.8 \times 10^{-6} - 100$ m²/s değerlerini almaktadır (Çizelge 4.1).

6.alternatifte her üç doğrultudaki (x, y, z) alt limitlerin değerleri değiştirilmemiştir. Ancak üst limit değerleri yarıya indirilmiştir (yatayda (x-y) 5×10^5 m²/s, düşeyde 50 m²/s).

Sırasıyla Şekil 4.34 ve 35'de 6.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit tuzluluk değişimleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi sonuçlar 4.model alternatifi sonuçlarıyla (Şekil 4.24 ve 25) benzerlik göstermektedir.

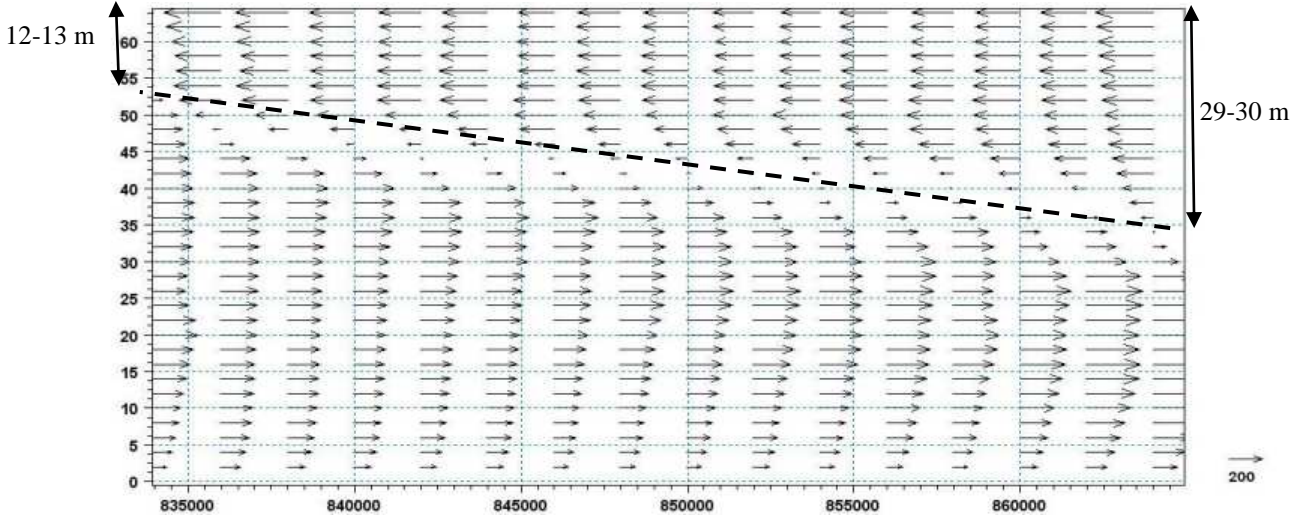


Şekil 4.34 6.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

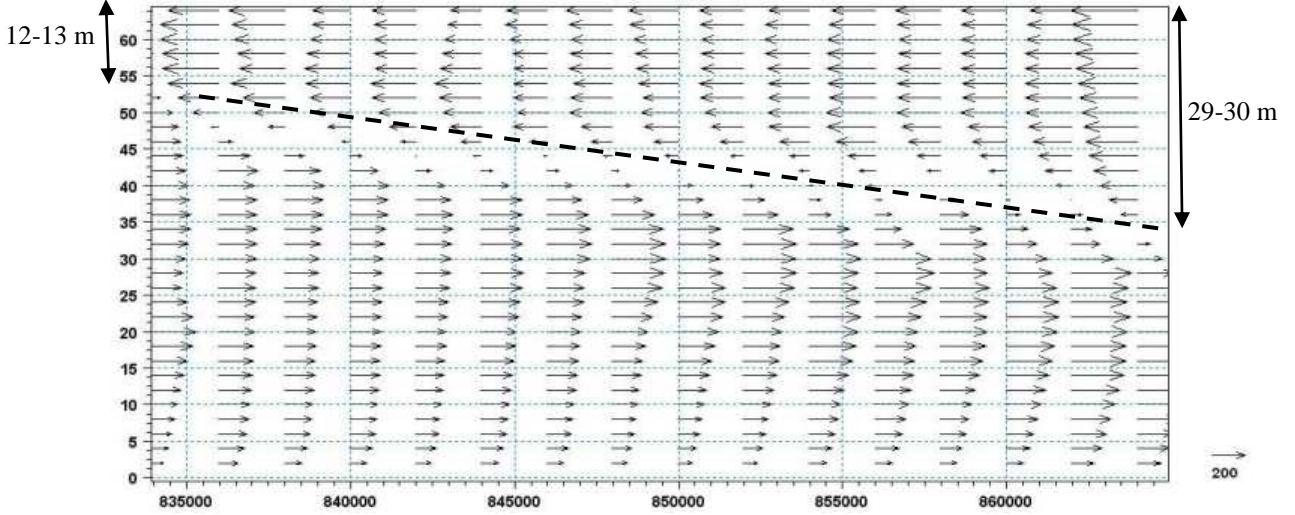


Şekil 4.35 6.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

Şekil 4.36 ve 37'de sırasıyla 6.alternatif için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit hız (u hızı) değişimi görülmektedir. Üst tabakanın kalınlığı 1-1 (Marmara) kesitinde 12-13 m, 2-2 (Karadeniz) kesitinde 29-30 m civarında değerler almaktadır. Arakesitin eğimi ortalama olarak $S_1=(30-13)/32000 \approx 5 \times 10^{-4}$ dir ve 4.alternatife çok yakın sonuç vermektedir.

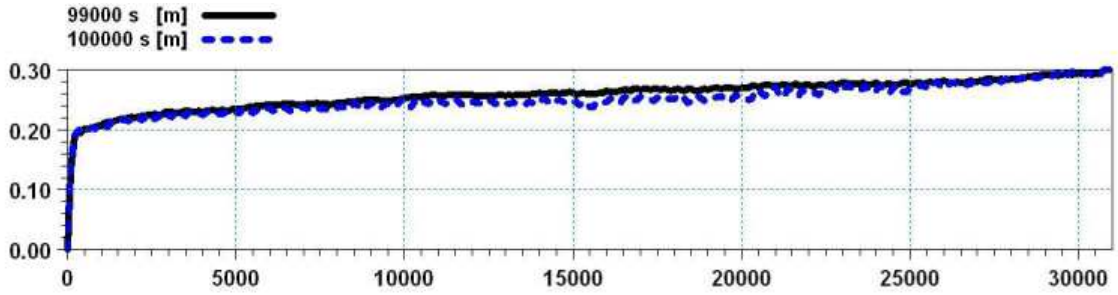


Şekil 4.36 6.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili



Şekil 4.37 6.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili

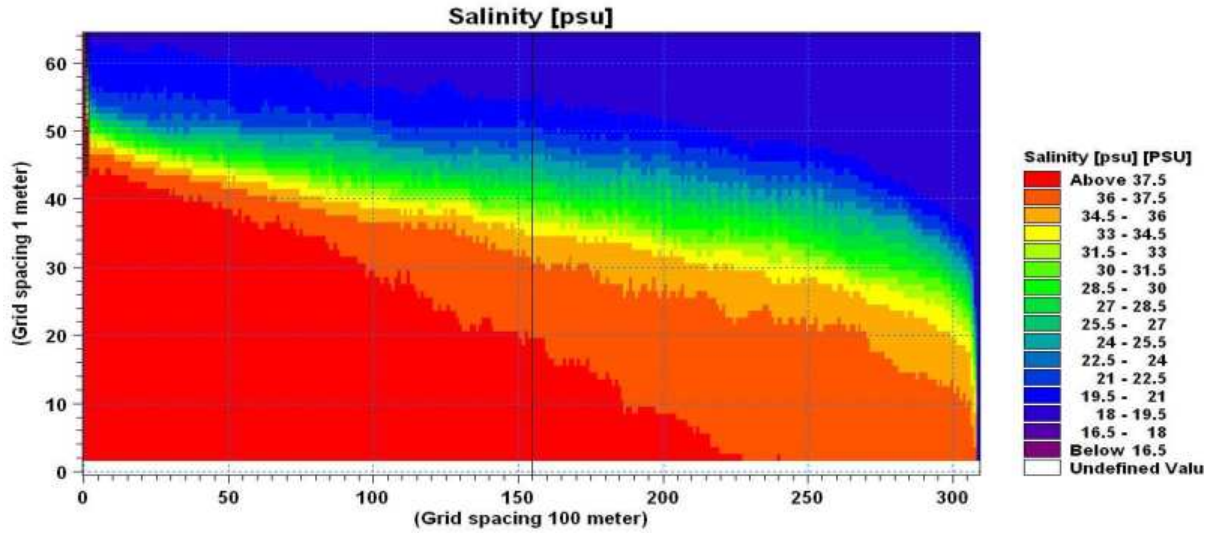
Şekil 4.38'de ise 6.alternatif için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri verilmiştir. Her iki zaman adımıdaki su yüzü profilleri çakışmaktadır. 4.alternatifteki su yüzü değişimiyle benzer sonuç elde edilmiştir.



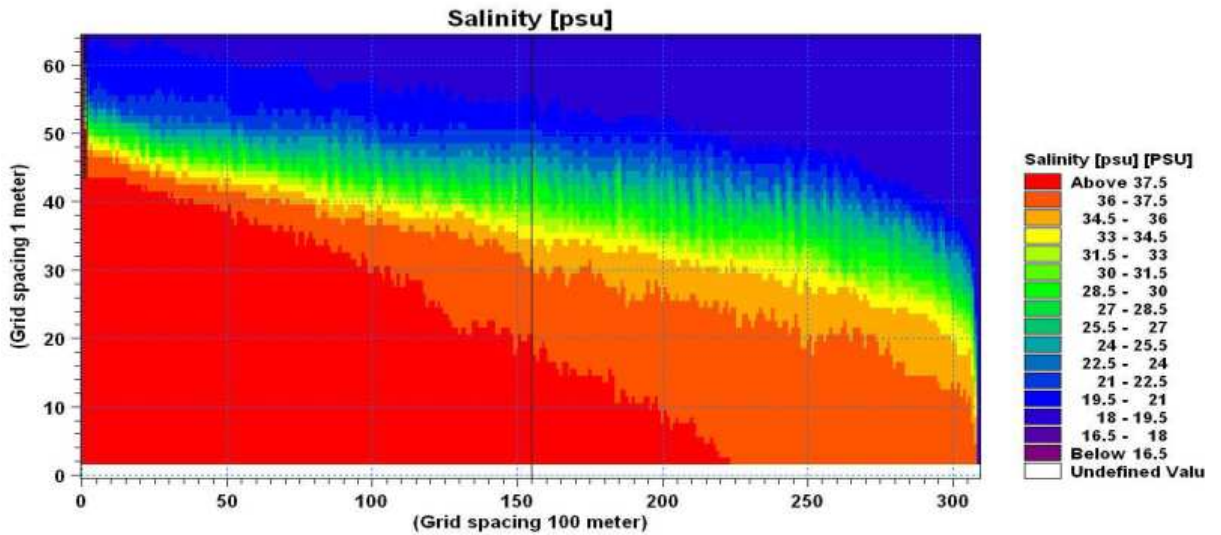
Şekil 4.38 6. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri

7.alternatif için eddy viskozitesinin alt ve üst limitleri sırasıyla yatayda (x-y) 1.8×10^{-6} - 10^5 , düşeyde (z) 1.8×10^{-6} - 10^2 m^2/s olarak tanımlanmıştır. 6.alternatife göre alt limit değerleri değiştirilmemiştir. Üst limitler ise her üç doğrultuda bir önceki durumun 1/5' ine indirilmiştir.

Şekil 4.39 ve 40'da 7.model alternatifi için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit tuzluluk dağılımları verilmiştir.

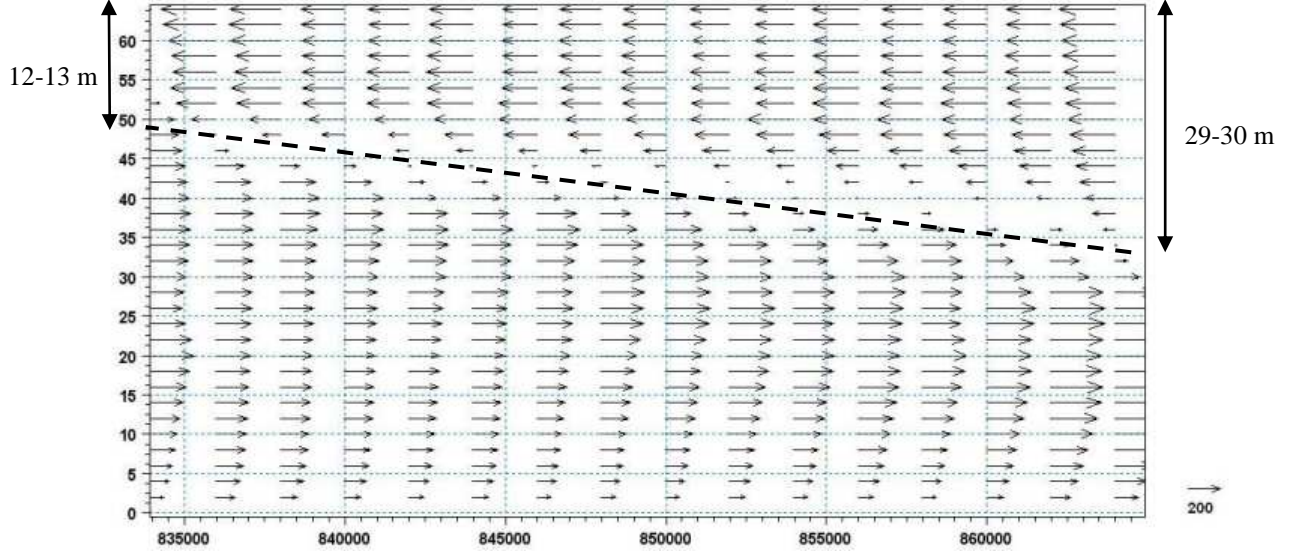


Şekil 4.39 7.model alternatifi için 99,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

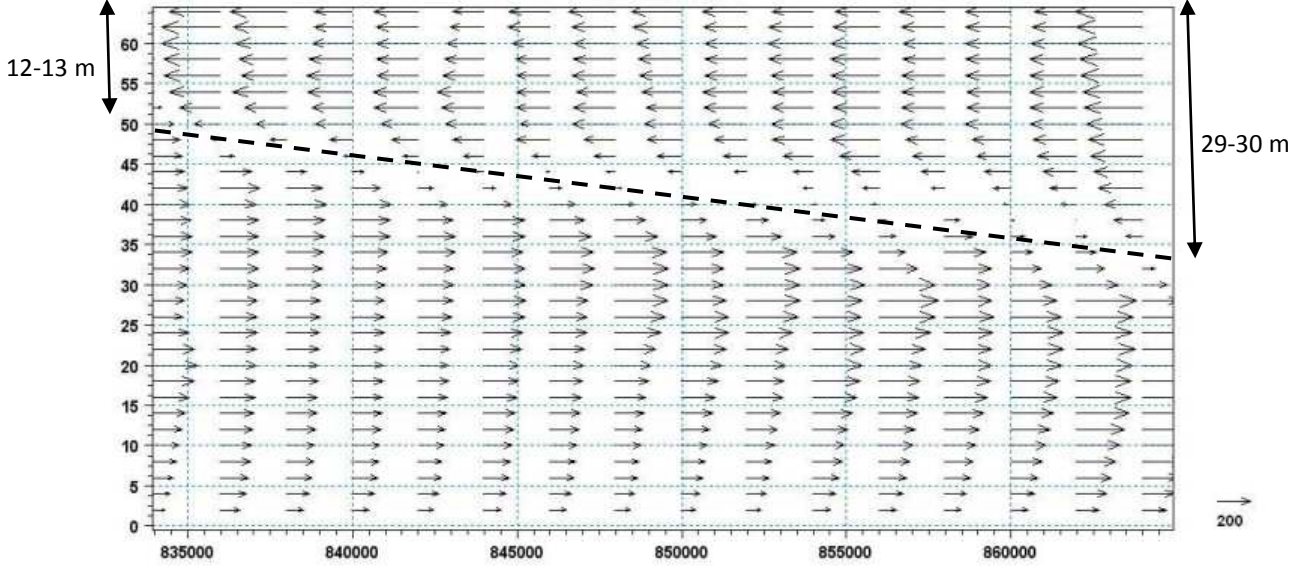


Şekil 4.40 7.model alternatifi için 100,000. s'deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı

Şekil 4.41 ve 42'de 7.alternatif için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit hız (u hızı) dağılımı görülmektedir. Üst tabaka kalınlığı 1-1 kesitinde 12-13 m, 2-2 kesitinde 29-30 m civarında değerler almaktadır. Bu durumda ortalama arakesit eğimi $S_i=5.3 \times 10^{-4}$ dir ve 6.alternatife yakın bir sonuç elde edilmiştir.



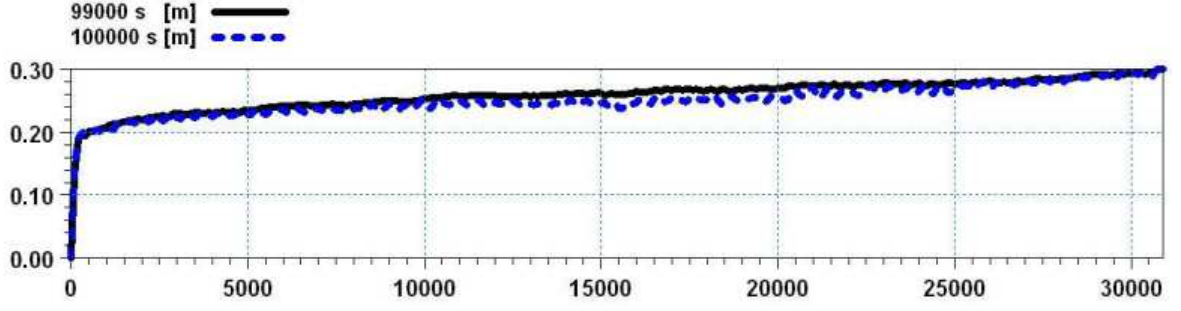
Şekil 4.41 7.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili



Şekil 4.42 7.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (yatay (u) hız) profili

Şekil 4.43'de 7.alternatif için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimi bir arada görülmektedir. Her iki zaman adımındaki su yüzü profilleri çakışmaktadır. 6.alternatif ile neredeyse aynı sonuç elde edilmiştir.

Sonuç olarak diğer tüm model parametrelerinin sabit kalması koşuluyla eddy viskozitesi üst limitindeki değişimin model sonuçları ve stabilitesi üzerinde önemli bir değişim yaratmadığı görülmüştür.



Şekil 4.43 7. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü değişimleri

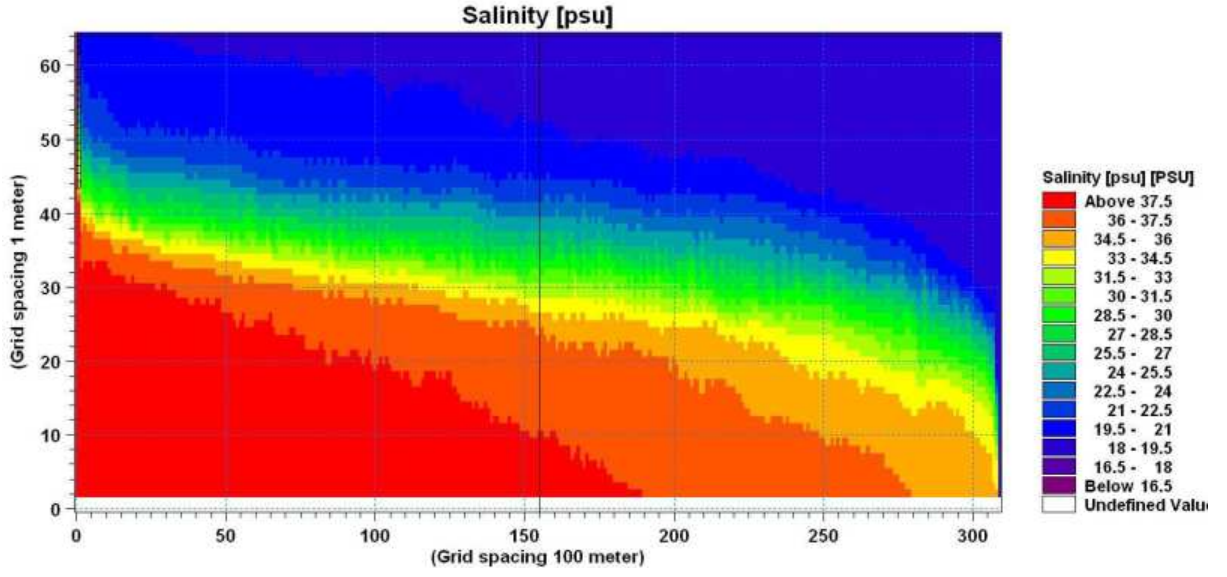
4) Sınır Şartlarındaki Değişimin Etkisi:

Çizelge 4.1'deki ilk 7 alternatif için Marmara (1-1 kesit) ve Karadeniz (2-2) sınırlarındaki su seviyesi farkları sırasıyla 0 m ve 0.30 m sabit değerleriyle tanımlanmıştır. Tüm model alternatiflerinin boykesit tuzluluk değişimleri ve hız dağılımlarından da görülebileceği gibi mevcut sınır şartlarında alt tabaka kalınlığı üst tabakaya göre daha büyük olmaktadır.

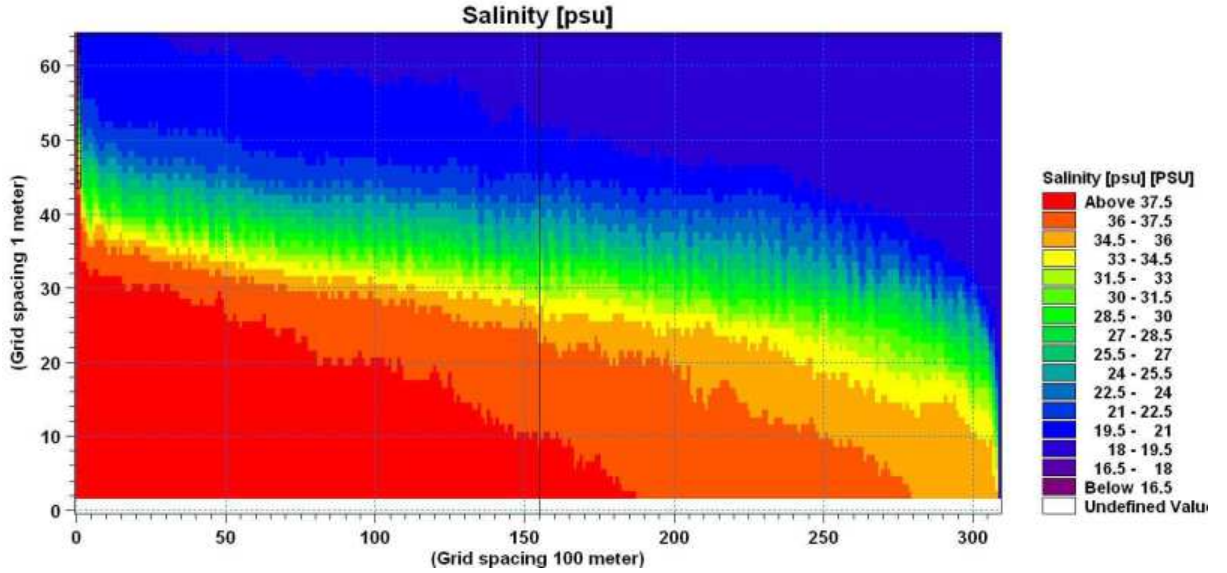
8. ve 9. model alternatifleri Karadeniz ve Marmara sınırları arasındaki su seviyesi farkının 0.30 m değerinden daha büyük olmasının model stabilitesi ve sonuçları üzerinde yaratacağı etkinin incelenmesi amacıyla oluşturulmuştur.

8.alternatif için tuzluluk sınır şartı 1-1 ve 2-2 kesitlerinde sırasıyla 38 ve 18 psu değerlerini almaktadır. Başlangıç tuzluluğu daha önceki alternatiflerde olduğu gibi 38 psu olarak tanımlanmıştır. Su seviyesi farkı simülasyon süresi boyunca sabit olup 1-1 ve 2-2 kesitlerinde sırasıyla 0 ve 0.45 m değerlerini almaktadır. Başlangıç su yüzü profili tanımlanmamıştır. Simülasyon zamanı (t) 100,000 s olarak tanımlanmış ve model bu süreyi hesap şeması stabilitesi bozulmadan tamamlamıştır.

Şekil 4.44 ve 45'de simülasyonun son iki zaman adımındaki (99,000. ve 100,000. s) boykesit tuzluluk değişimi görülmektedir. Tipik bir tabakalı akım yapısına uygun olarak üst ve alt tabaka akımı bir ara tabakayla birbirinden ayrılmaktadır. Ara tabaka kalınlığı Marmara sınırından (1-1 kesiti) Karadeniz sınırına doğru artmış ve doğrusala yakın bir gidiş izlemiştir. Her iki şekilden de tabakalar arasında güçlü bir karışımın meydana geldiği görülmektedir. Model boykesit tuzluluk değişimini benzeştirmiş ve kararlı hale ulaşmıştır.



Şekil 4.44 8.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

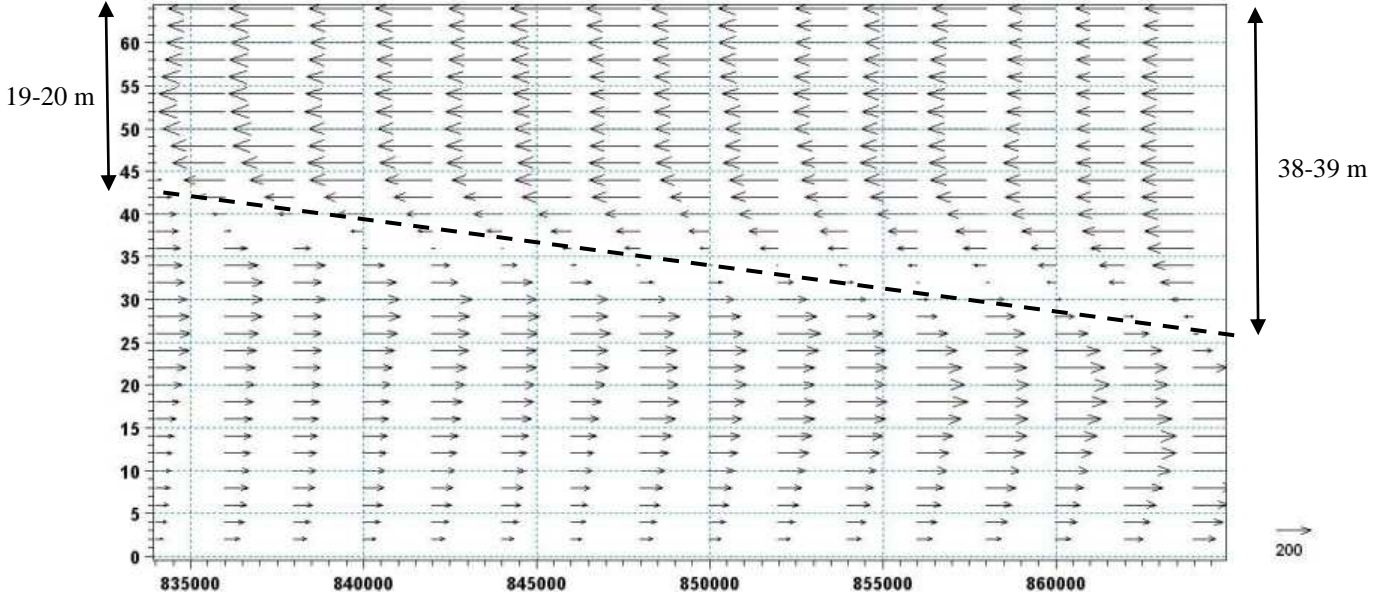


Şekil 4.45 8. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

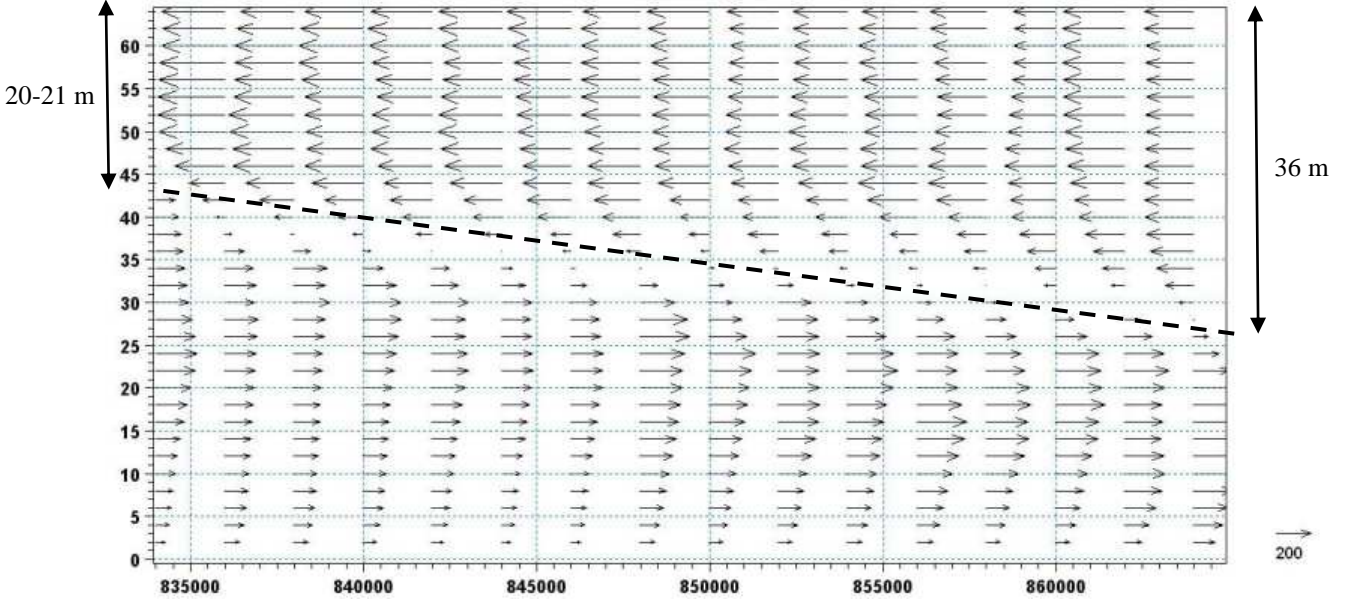
Şekil 4.46 ve 47'de simülasyonun 99,000. ve 100,000. s'lerindeki boykesit hız dağılımları görülmektedir. Boykesit tuzluluk değişimi sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

99,000. s'deki boykesit hız dağılımından üst tabaka kalınlığının Marmara (1-1) sınırında 19-20 m, Karadeniz (2-2) sınırında 38-39 m civarında değerler aldığı görülmektedir. Bu durumda arakesitin eğimi yaklaşık olarak $S_i = (38-19)/32000 = 5.9 \times 10^{-4}$ değerini almaktadır.

100,000. s'deki boykesit hız dağılımı sonuçlarına göre ise üst tabaka kalınlığı Marmara sınırında 20-21 m, Karadeniz sınırındaki ise 36 m civarında değerler almaktadır. Arakesitin eğimi $S_i = (36-21)/32000 = 5 \times 10^{-4}$ dir.

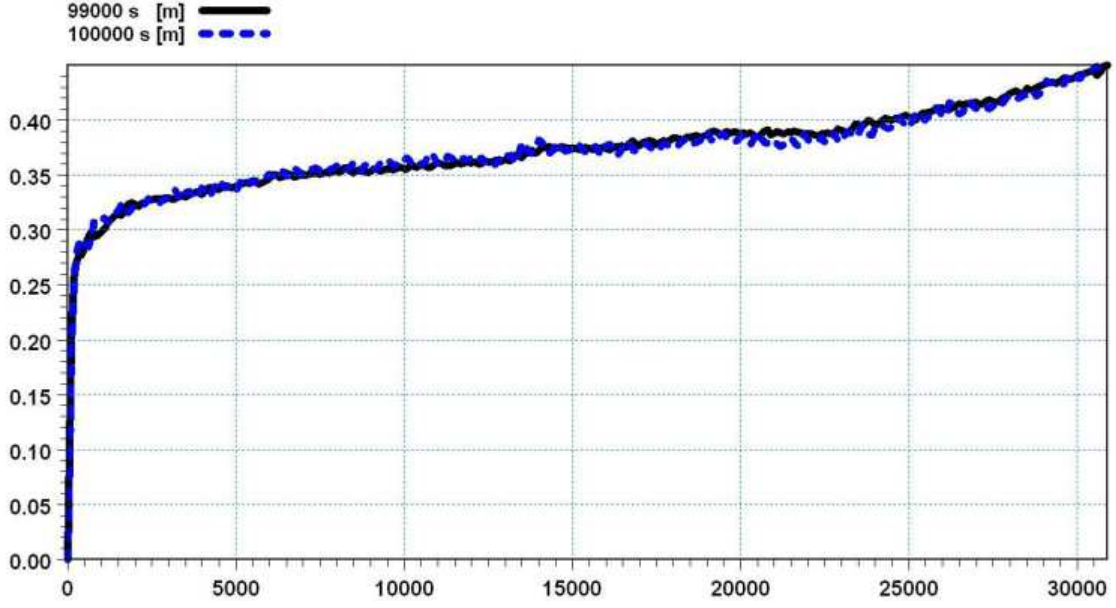


Şekil 4.46 8.model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı



Şekil 4.47 8.model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı

Şekil 4.48'de 8. alternatif için sırasıyla 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri verilmiştir. Her iki zaman adımıdaki su yüzü profilleri üst üste çakışmış ve Karadeniz ile Marmara Denizi arasında yaklaşık 15 cm kot farkı (Δh) oluşturacak şekilde doğrusal bir değişim göstermiştir.



Şekil 4.48 8.model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri

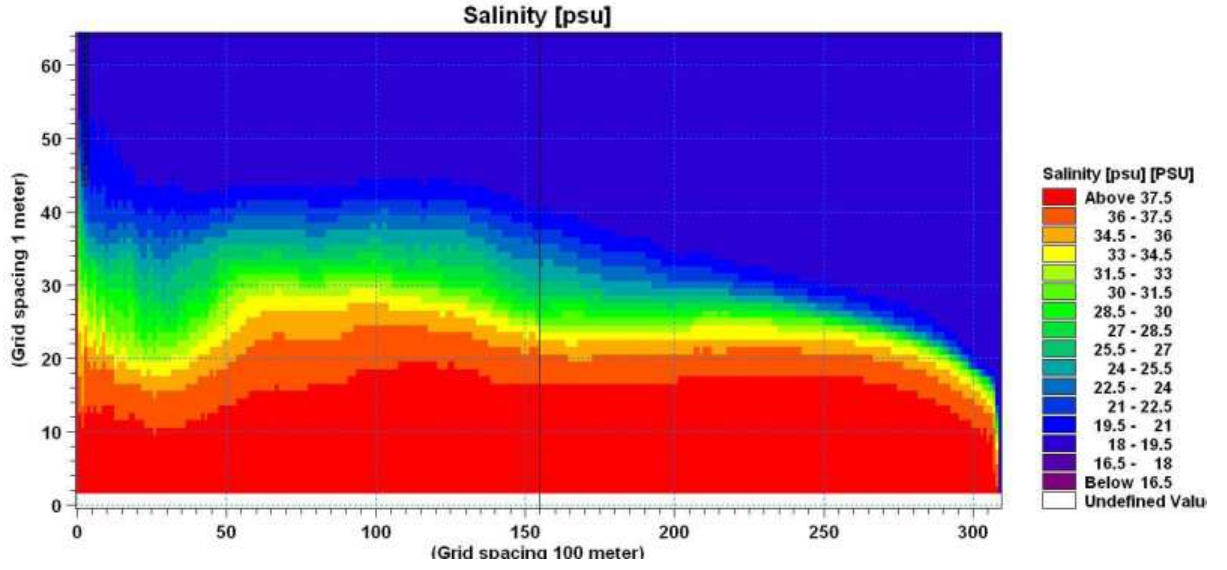
9.alternatifte 2-2 (Karadeniz) sınırı su seviyesi farkı dışındaki tüm model parametreleri 8.alternatifle aynı tutulmuştur. 2-2 sınırında su seviyesi farkı (Δh) simülasyon boyunca sabit olup 0.50 m değerini almaktadır.

Simülasyon süresi (t) 100,000 s tanımlanmış ancak model 32,578 s çalıştıktan sonra hesap şeması stabilitesinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır.

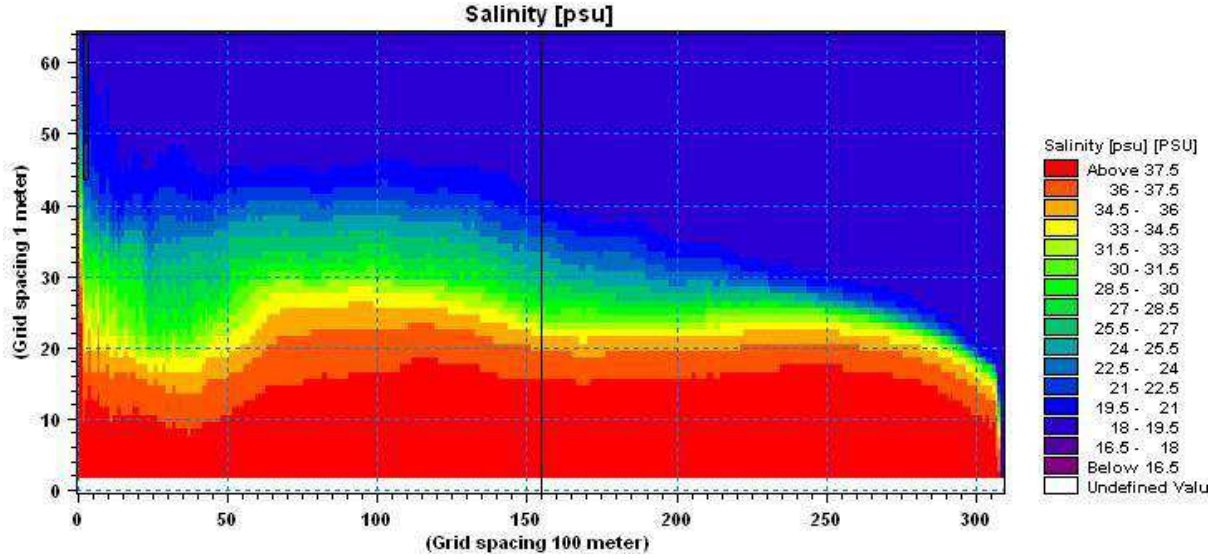
Sırasıyla Şekil 4.49 ve 50'de simülasyonun 31,000. ve 32,000. s'lerindeki boykesit tuzluluk dağılımları verilmiştir.

Şekil 4.49'den de görüldüğü gibi üst ve alt tabakayı birbirinden ayıran ara tabakanın kalınlığı Karadeniz (2-2 kesiti) sınırından Marmara (1-1) sınırına doğru artmaktadır. Marmara sınırına doğru tabakalar arası karışım daha güçlü olmaktadır. Üst tabaka kalınlığı alt tabakaya göre daha büyük olmakta ve arakesit hemen hemen yatay bir gidiş izlemektedir.

Simülasyonun 32,000. s'de ara tabaka kalınlığı bir önceki zaman adımına göre artmıştır (Şekil 4.50). Her iki zaman adımındaki sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde modelin boykesit tuzluluk değişimi açısından kararlı hale ulaşmadığı görülmektedir.

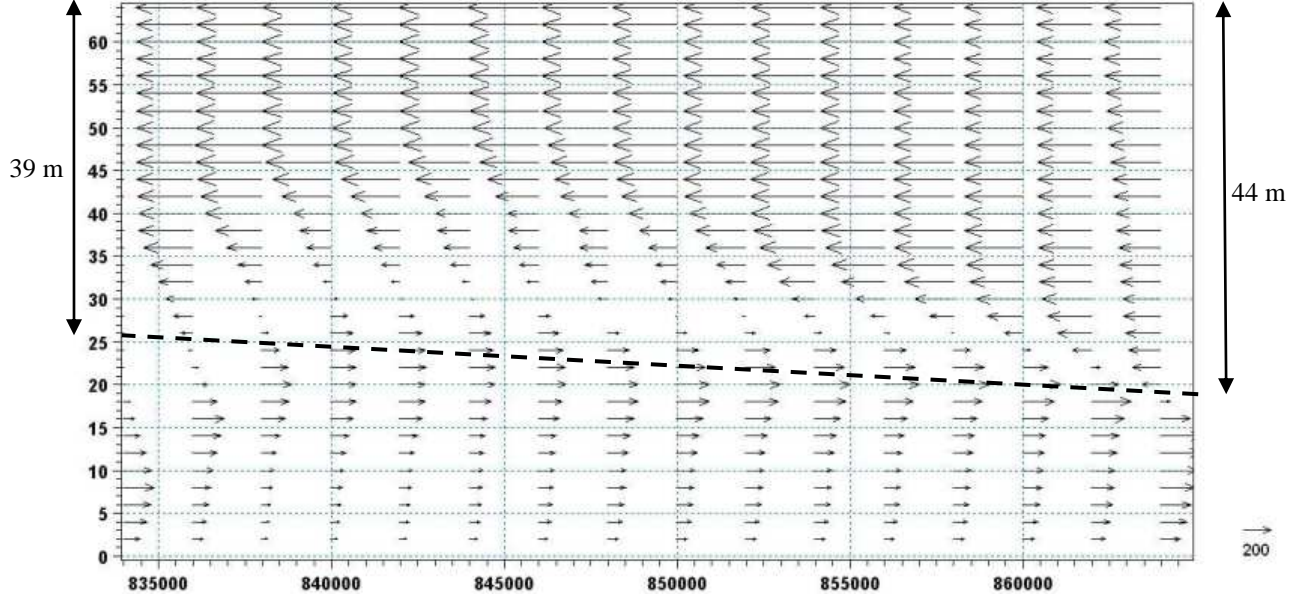


Şekil 4.49 9.model alternatifi için 31,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

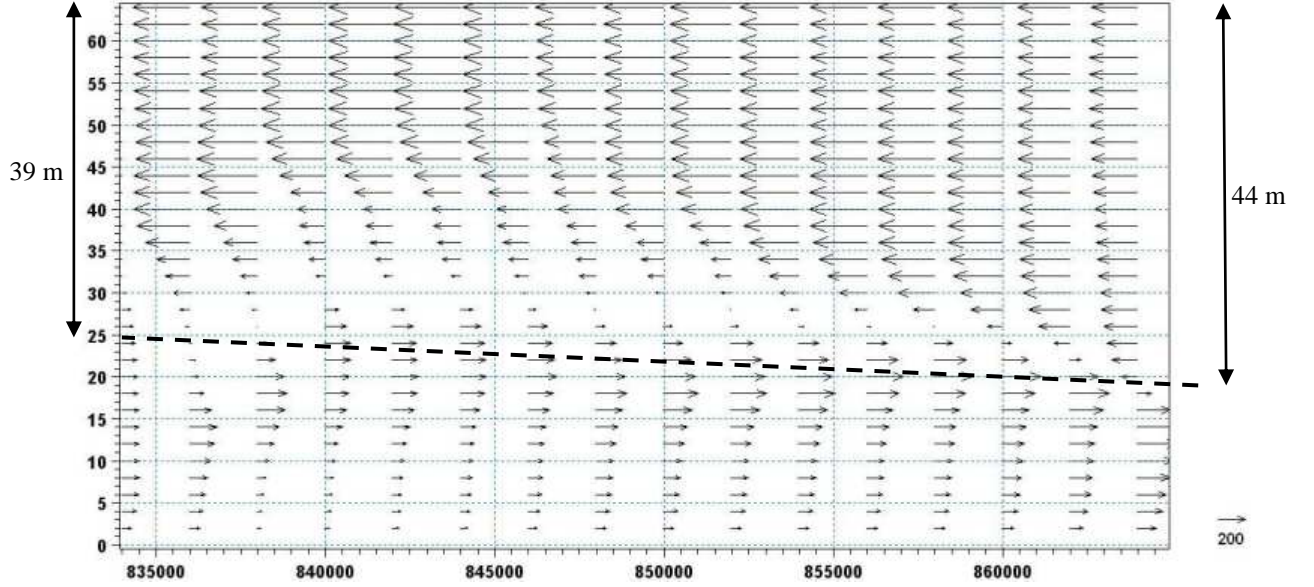


Şekil 4.50 9.model alternatifi için 32,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

Sırasıyla Şekil 4.51 ve 52'de 9.alternatif için 31,000. ve 32,000. s'lerdeki boykesit hız dağılımları görülmektedir. Hız dağılımı sonuçları tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum göstermektedir. Her iki zaman adımındaki sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde üst tabaka kalınlığının Karadeniz sınırında 44 m, Marmara sınırında ise 39 m değerini aldığı görülmüştür. Bu durumda arakesitin eğimi $Si = (44 - 39) / 32000 = 1.6 \times 10^{-4}$ dir.

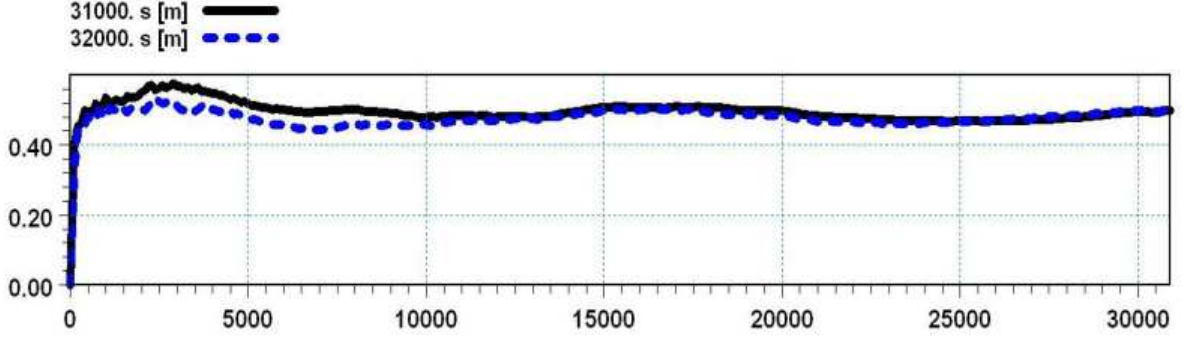


Şekil 4.51 9.model alternatifi için 31,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı



Şekil 4.52 9.model alternatifi için 32,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı

Şekil 4.53'de 9.alternatif için 31,000. ve 32,000. s'lerdeki su yüzü değişimleri bir arada verilmiştir. Su yüzü profili Karadeniz (2-2) sınırında 0.50 m değerinden başlayarak yataya yakın bir doğru şeklinde ilerlemiş, Marmara (1-1) sınırında yaklaşık 0.5 m'lik ani bir düşüş göstermiştir.



Şekil 4.53 9.model alternatifi için 31,000. ve 32,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri

8.model alternatifi sonuçlarının değerlendirilmesinden Karadeniz sınırı su seviyesi farkındaki artışın üst tabaka kalınlığında bir artışa neden olduğu görülmüştür. Su seviyesi farkındaki artış aynı zamanda su yüzü profilinin eğiminde de bir artış meydana getirmiştir.

9.model alternatifi Çizelge 4.1'de verilen hidrodinamik parametreler ve sınır şartı koşullarında modele ait hesap şeması stabilitesinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır.

Her iki alternatife ait model sonuçlarının birlikte değerlendirilmesinden su seviyesi farkının model sonuçları ve stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

4.3.1.2 Sınır Geometrisinin Etkisi (2.Durum)

1.durum model alternatiflerinde Şekil 4.13'de görülen basit geometriye sahip dikdörtgen kanal kullanılmış ve tabakalı akım üzerinde Çizelge 4.1'de verilen değişik hidrodinamik parametrelerin (ağ boyutları, taban pürüzlülüğü, eddy viskozitesi ve su seviyesi sınır şartlarındaki değişim) etkisi incelenmiştir.

2.duruma ait model alternatiflerinde ise Şekil 4.13'de görülen 2. durum (a) ve (b)'deki kanal geometrileri kullanılmış, sırasıyla açık sınırlara yakın bölgede sınır geometrisinin (ani ve kademeli genişleme) ve genişleme miktarlarının model stabilitesi ve sonuçları üzerinde yaratacağı etkinin incelenmesi amacıyla beş farklı model alternatifi çalışılmıştır.

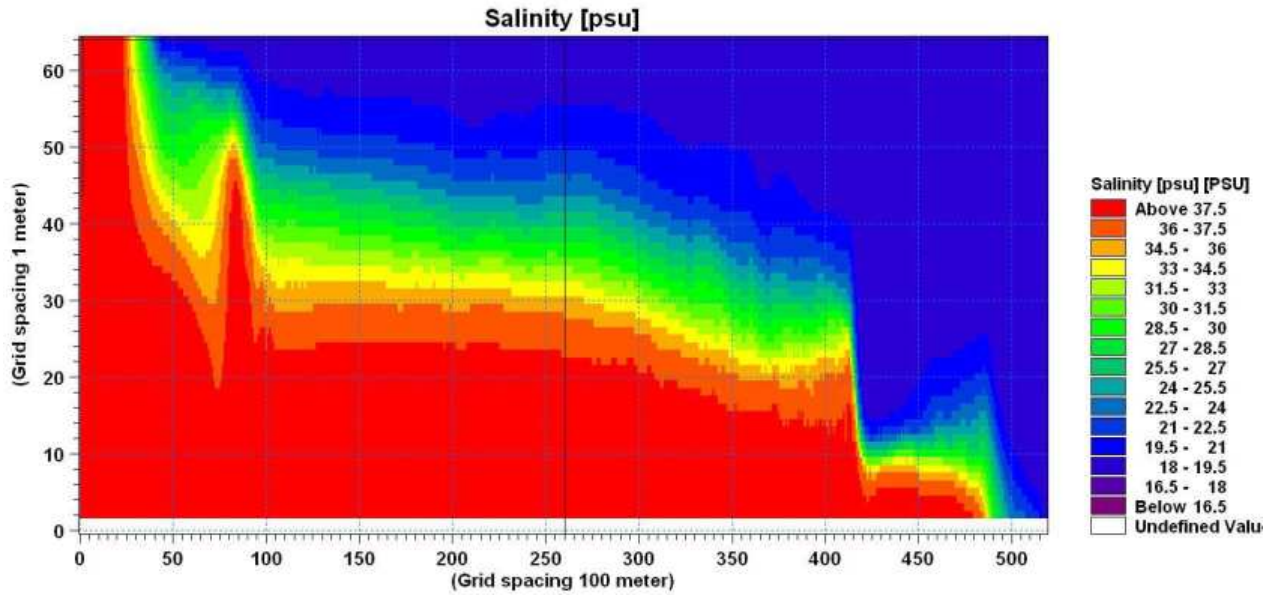
Sınırlardaki ani genişlemeli kanal hali için Şekil 4.13'de görülen 2. Durum (a)'daki (ani genişleyen kanal) kanal geometrisi kullanılarak 1. model alternatifi oluşturulmuştur. 32 km uzunluğunda, 900 m genişliğinde ve 64 m derinliğindeki kanal 1-1 ve 2-2 kesitlerine doğru ani olarak genişleyerek 1800 m'ye ulaşmış ve bu genişlikle 10 km boyunca devam etmiştir. Böylece kanalın toplam uzunluğu 52 km'ye ulaşmaktadır. 1.alternatif için tanımlanan sayısal parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Sınırlarda ani ve kademeli genişleme hali için tanımlanan hidrodinamik parametreler ve değerleri

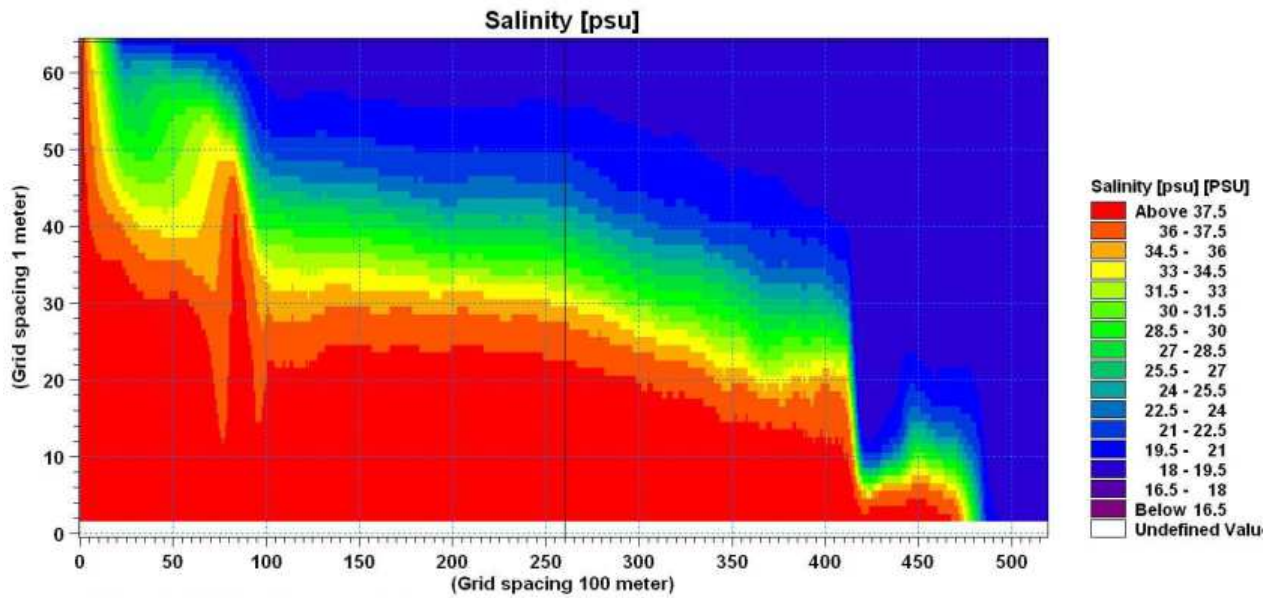
Model Alternatifleri			1. Alternatif	2. Alternatif
Batimetri (x×y×z) (m)			52,000×(900-1800)×64	52,000×(900-1800)×64
Ağ aralığı (Δx×Δy×Δz) (m)			100×100×1	100×100×1
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)			1.0	1.0
Courant Sayısı			0.2507	0.2507
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	38 (sbt)	38 (sbt)
		2-2	18 (sbt)	18 (sbt)
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0 (sbt)	0 (sbt)
		2-2	0.45 (sbt)	0.45 (sbt)
Pürüzlülük (ks) (m)			0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Eddy Viskozitesi Limitleri	x		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	y		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	z		$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			38	38
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000
Başarı ile çalıştığı süre (s)			27,811	18,478

1.alternatife ait hidrodinamik parametrelerden de görüleceği gibi 2. durum (a)'daki (ani genişleme) kanalın 1. durumdan (basit dikdörtgen kanal) tek farkı kanal geometrisidir. Diğer tüm parametreler Çizelge 4.1'deki 1.durum 8.alternatif ile aynı değerleri almaktadır.

Sırasıyla Şekil 4.54 ve 55'de 1.alternatife ait 26,000. ile 27,000. s'lerindeki boykesit tuzluluk dağılımları verilmiştir. Şekillerin birlikte değerlendirilmesinden sayısal modelin boykesit tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaşamadığı görülmektedir. Ara kesitin kalınlığı kanalın ani olarak genişlediği bölümlerde azalmış geri kalan bölümlerde ise artmıştır. Arakesitin kalınlığı Karadeniz (2-2) sınırından Marmara (1-1) sınırına doğru artmış ve kanalın her iki sınırına yakın daralma-genişleme kesitlerinde arakesitin gidişatında sıçramalar (ani alçalma ve yükselme) meydana gelmektedir. Marmara sınırına yakın genişleme bölgesinde alt tabaka kalınlığı 15 m civarında ani bir artış, Karadeniz'e yakın genişleme bölgesinde ise 14 m civarında ani bir düşüş göstermiştir

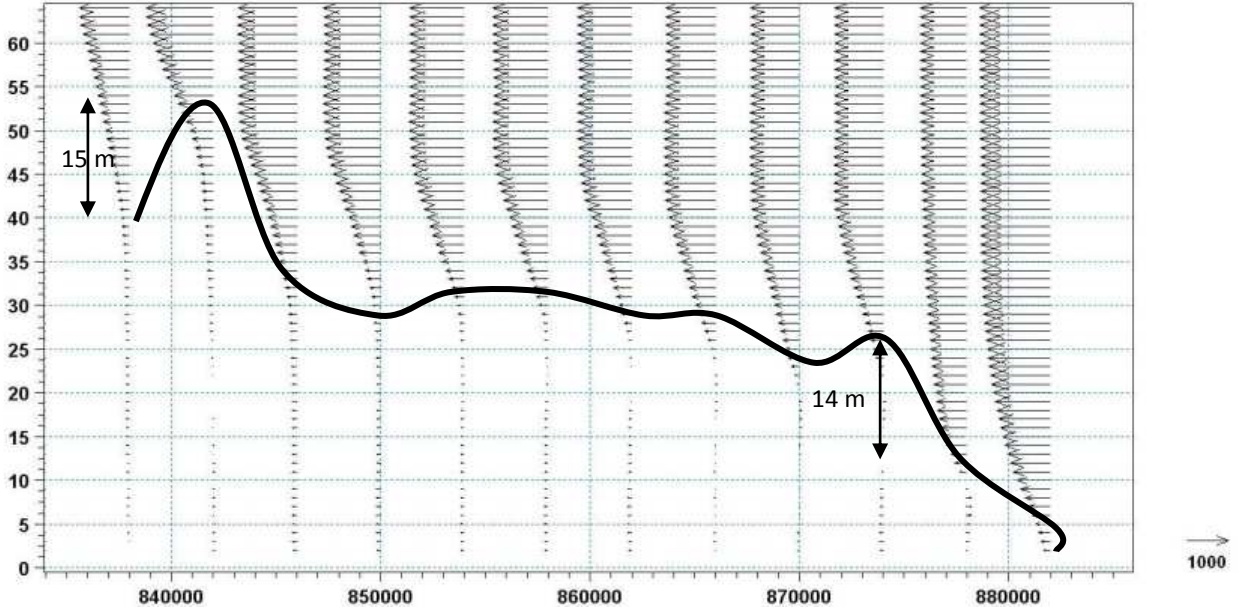


Şekil 4.54 1.model alterbatifi için 26,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

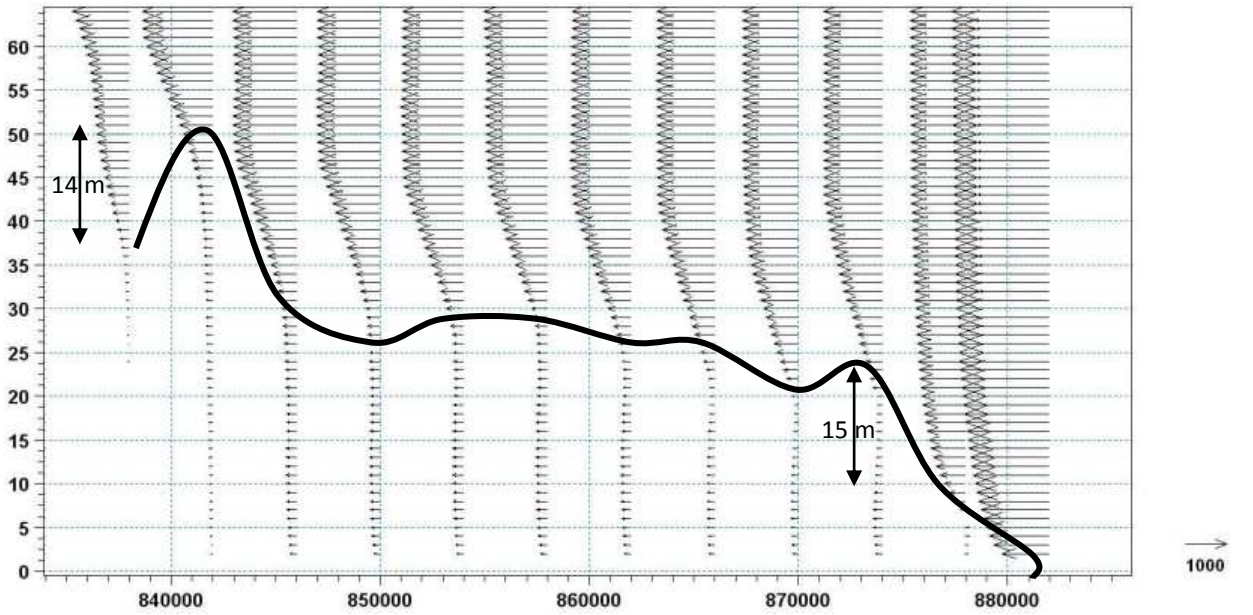


Şekil 4.55 1.model alternatifi için 27,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

Sırasıyla Şekil 4.56 ve 57'de ise 26,000. ile 27,000. s'lerdeki boykesit hız dağılımları görülmektedir. Hız dağılımlarından kanal boyunca tamamen üst tabaka akımının etkili olduğu görülmektedir. Derinlik boyunca hız alt tabaka boyunca üniform bir dağılım göstermiştir. Arakesitten itibaren logaritmik bir değişim gösteren hız dağılımı üst tabakalara doğru üniform bir hal almaktadır. Arakesitin kanal boyunca değişimi boykesit tuzluluk değişimi sonuçlarıyla uyum içerisindedir.



Şekil 4.56 1.model alternatifi için 26,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı



Şekil 4.57 1.model alternatifi için 27,000. s'deki boykesit hız (u) dağılımı

Tabakalı akımlarda Froude sayısı $G = F_1^2 + F_2^2 = \frac{u_1^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh_1} + \frac{u_2^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh_2}$ ifadesiyle tanımlanmakta

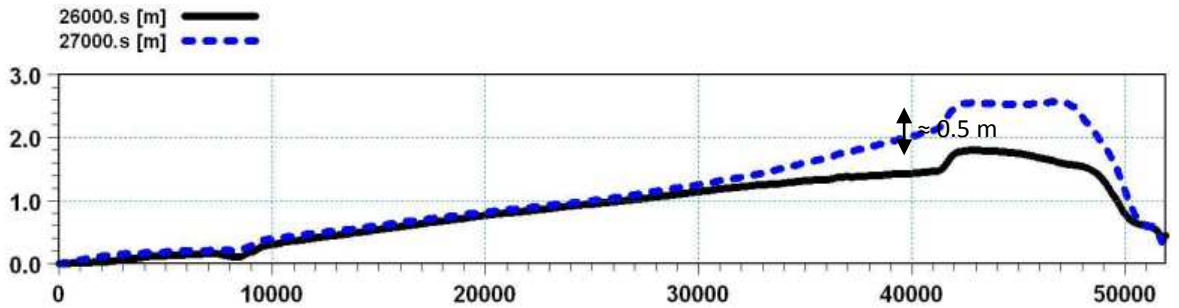
ve yoğunluk Froude sayısı (G) olarak bilinmektedir. $G < 1$ için akım nehir rejiminde, $G > 1$ için ise sel rejimindedir.

Burada sırasıyla u_1 ve u_2 üst ve alt tabaka hızlarını, h_1 ve h_2 ise tabaka kalınlıklarını göstermektedir. $(\Delta\rho/\rho)$ ise alt ve üst tabaka arasındaki ortalama yoğunluk farkı oranını göstermektedir. Bu çalışmada 1-1 kesitinin tuzluluğuna (38 psu) karşılık gelen yoğunluk

değeri ($\approx 1028 \text{ kg/m}^3$) alt tabakanın ortalama yoğunluğu, 2-2 kesitinin tuzluluk değerine karşılık gelen yoğunluk da üst tabakanın ortalama yoğunluğu (1014 kg/m^3) olarak alınmıştır. bu durumda yoğunluk farkı oranı ($\Delta\rho/\rho$) 0.014'dir.

1. model alternatifi için G'nin kanal boyunca değişimi hesaplanmış ve akımın nehir rejiminde olduğu görülmüştür. $t=26,000$. s'deki akım verilerinden bu değer 2-2 kesitinde ($x=50,000$ m) 0.30, daralma bölgelerinde ($x=10,000$ ve $41,000$ m) ≈ 0.06 , 1-1 kesitinde ise 0.03 olduğu görülmüştür. $t=27,000$.s'de ise bu değerler sırasıyla 2-2 kesiti, daralma bölgeleri ve 1-1 kesitinde 0.5, 0.08 ve 0.04'dir. Her iki zaman adımında da G, 2-2 kesiti ($x=50,000$ m) ile bu kesite yakın daralma bölgesi ($x=41,000$ m) arasında azalmış, kanalın geri kalan kısmında ise önemli bir değişim göstermemiştir.

Şekil 4.58'de 1.alternatife ait 26,000. ve 27,000. s'lerindeki kanal su yüzü profilleri bir arada verilmiştir. Karadeniz sınırına yakın genişleme bölgesinde ($x=41,000$ -52,000 m arası) su yüzünde bir kabarma meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgede her iki zaman adımında, su yüzü profilleri arasındaki fark 0.5 m mertebesindedir. Bu sonuç G'nin kanal boyunca değişimiyle uyum içerisindedir. Akımın hızı 2-2 kesitinden başlayarak daralma bölgesine ($x=41,000$ m) doğru önce azalmış, sonra artmış ve 1-1 kesitine doğru yeniden azalmıştır (Şekil 4.56-57). Buna karşılık su yüzü profili daralma bölgesine doğru kabarmış ve bu bölgeden itibaren 1-1 kesitine doğru ise doğrusal bir gidiş izleyecek şekilde azalmıştır. Model su yüzü değişimi açısından kararlı hale ulaşmamıştır.

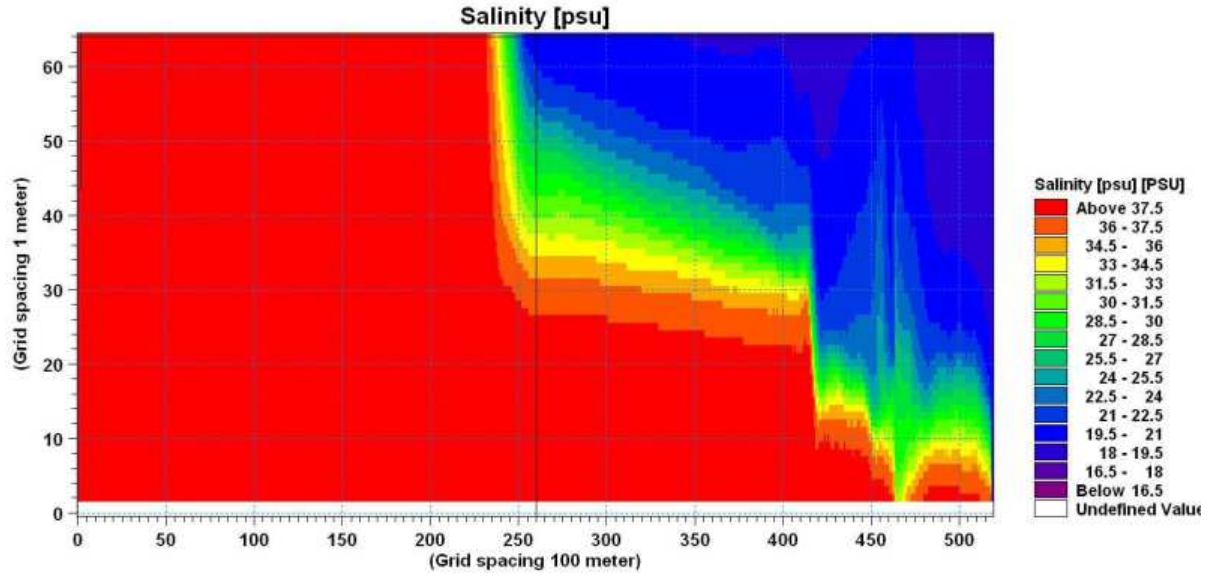


Şekil 4.58 1.model alternatifi için 26,000. ve 27,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri

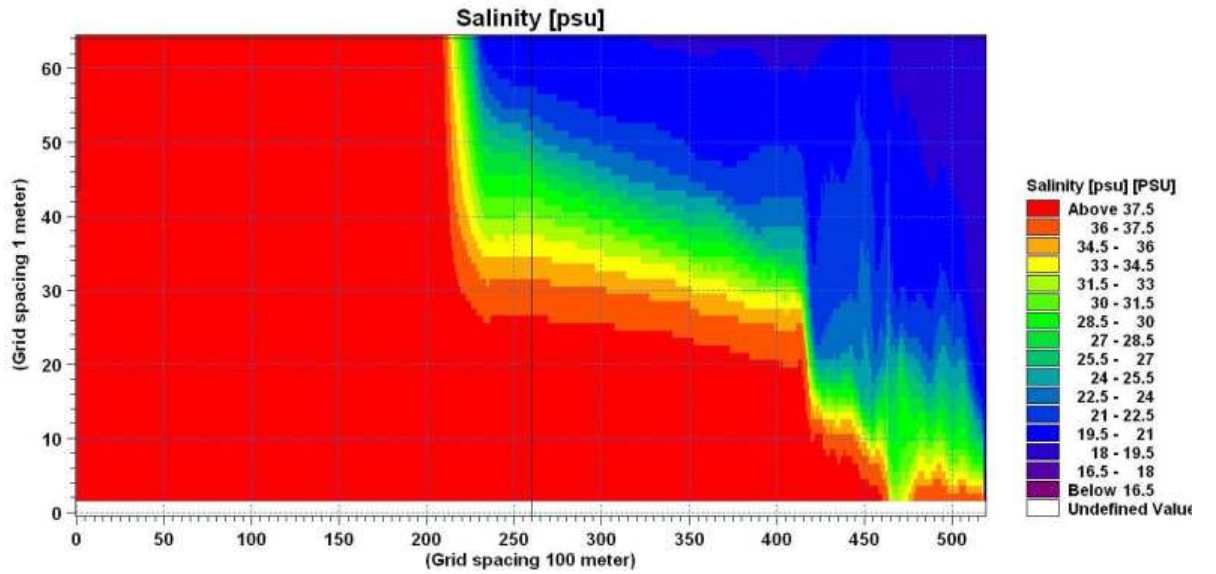
Sınırlardaki kademeli genişlemeli kanal hali için plan ve boykesiti Şekil 4.13'de görülen 2. durum (b)'deki kanal geometrisi kullanılmıştır. 2. durum (I)'deki kanal geometrisinden farklı olarak her iki açık sınırdan 10'ar km içerden 900 m sabit genişliğe sahip 32 km'lik kanal 6000 m boyunca her iki tarafından da 1500 m'de bir 100'er m genişletilerek toplamda 1000 m genişletilmiştir. Açık sınırlara doğru 4000 m boyunca kanalın genişliği sabit 1900 m değerini almaktadır.

Kademeli genişlemenin tabakalı akım yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla kurulan modele (2. alternatif) ait hidrodinamik parametreler ve bunların sahip olduğu değerler Çizelge 4.2'nin ikinci sütununda verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi model için kullanılan kanal geometrisi dışındaki tüm hidrodinamik parametreler 1.alternatif (ani genişlemeli kanal durumu) ile aynı değerleri almaktadır.

Sırasıyla Şekil 4.59 ve 60'da modelin 17,000. ve 18,000. s'lerindeki boykesit tuzluluk dağılımları görülmektedir. Tabakalı akım yapısı tüm kanal boyunca gelişmemiş ve model hesap stabilitesinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır.

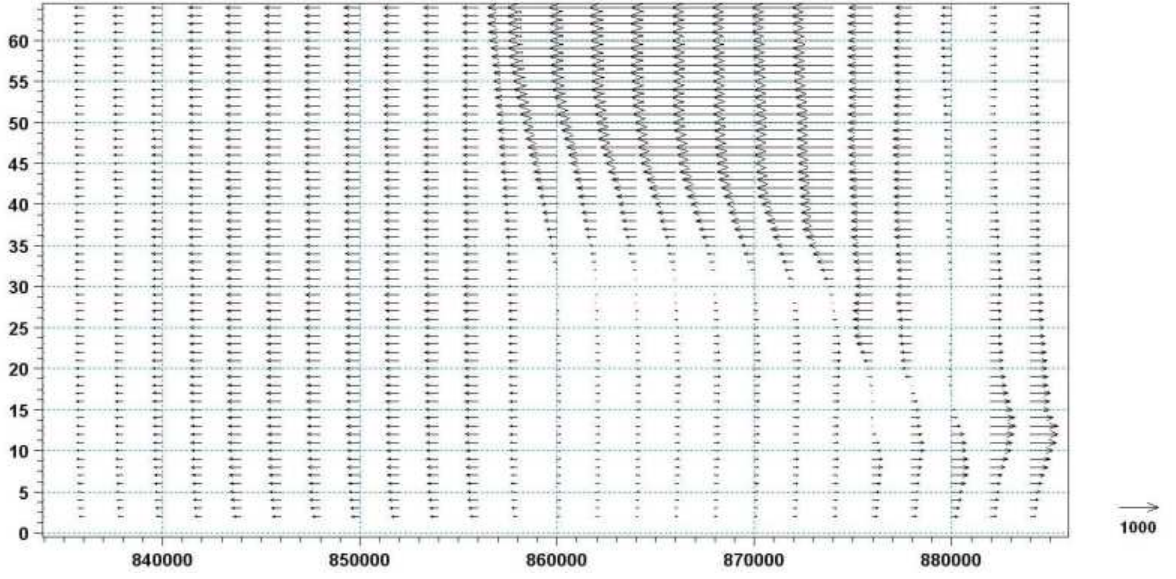


Şekil 4.59 2.model alternatifi için 17,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

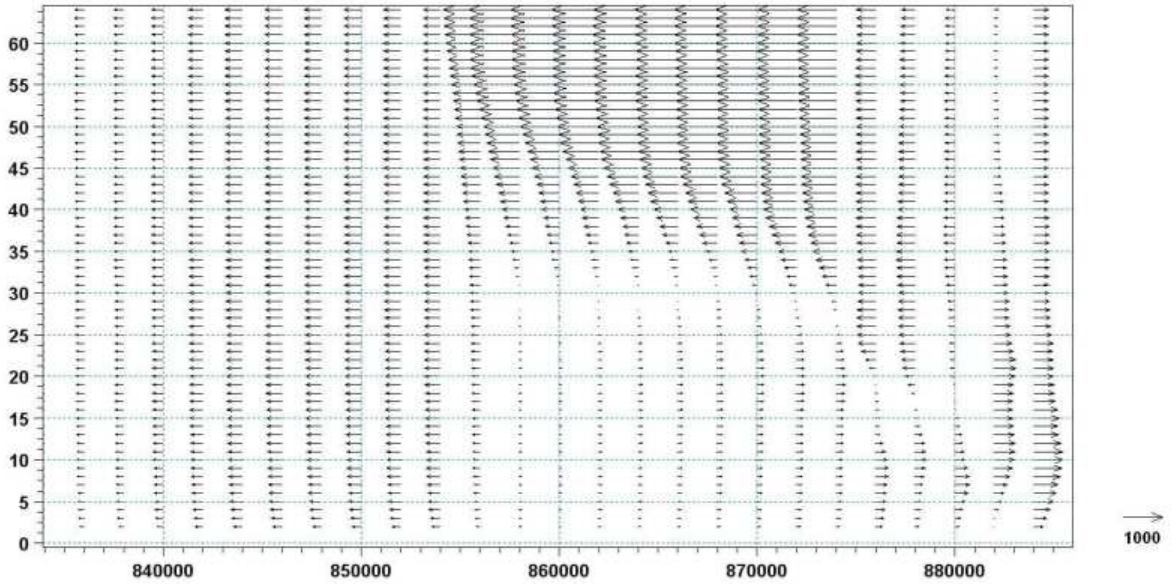


Şekil 4.60 2.model alternatifi için 18,000. s'deki boykesit tuzluluk değişimi

Şekil 4.61 ve 62’de ise sırasıyla 2. alternatifin 17,000. ve 18,000. zaman adımlarındaki boykesit boyunca hız dağılımları görülmektedir. Şekillerden tabakalı akım yapısına uygun hız profilinin yalnızca kanalın tabakalı akım yapısının olduğu bölgesinde geliştiği ve Marmara (1-1) sınırına yakın homojen akım bölgesinde üst tabaka akımıyla aynı yönde üniform akım dağılımının geçerli olduğu görülmektedir. Hız dağılımı Karadeniz sınırında (2-2 kesiti) homojen kanal akımının hız dağılımına uygun olarak tek doğrultuda (alt tabaka akımı doğrultusunda) gelişmiştir. Boykesit hız dağılımı sonuçları tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

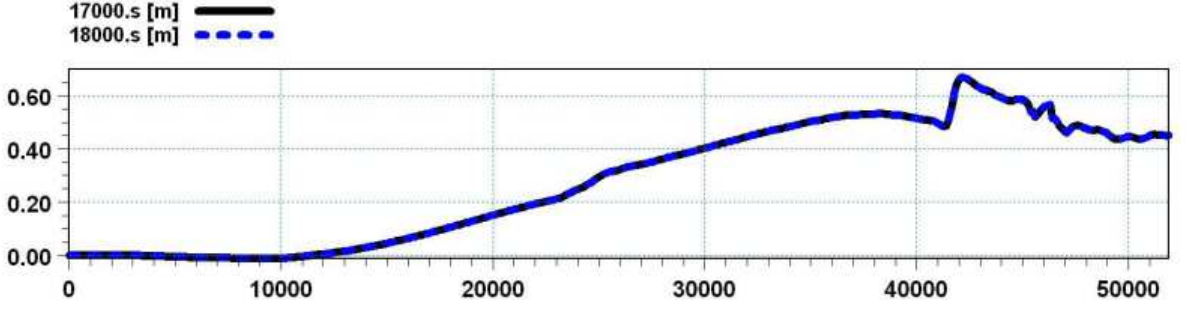


Şekil 4.61 2.model alternatifi için 17,000. s’deki boykesit hız (u) dağılımı



Şekil 4.62 2. model alternatifi için 18,000. s’deki boykesit hız (u) dağılımı

Şekil 4.63’de 2.alternatif için 17,000. ve 18,000. s’lerdeki kanal su yüzü değişimleri bir arada verilmiştir. Her iki zaman adımında da su yüzü profilleri çakışmaktadır.



Şekil 4.63 2. model alternatifi için 17,000. ve 18,000. s’lerdeki kanal su yüzü profilleri

Çizelge 4.2’deki 1. ve 2. model alternatiflerinde açık sınır geometrisinin model sonuçları ve stabilitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve ani genişlemeli kanal geometrisine sahip 1. alternatifin 2. alternatife göre daha uzun süre model stabilitesi bozulmadan çalıştığı görülmüştür. Açık sınırlardaki farklı ani genişleme miktarlarının dikdörtgen kanaldaki tabakalı akımın stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla sırasıyla Şekil 4.2’deki 2.durum (c), (d) ve (e)’deki kanal geometrileri için Çizelge 4.3’de görülen üç ayrı model alternatifi oluşturulmuştur. Her üç model alternatifinde açık sınırların genişlikler sırasıyla 200, 400 ve 600 m, uzunlukları ise 600, 1200, 1800 m artırılmıştır. Model alternatiflerinin tümünde kanal geometrisi hariç diğer tüm hidrodinamik parametreler 1. ve 2.model alternatifleri ile aynı değerleri almaktadır.

3.model alternatifi için 32 km uzunluğunda, 900 m genişliğinde ve 64 m derinliğindeki basit dikdörtgen kanal her iki açık sınırından da (1-1 ve 2-2 kesitleri) genişliği boyunca (y doğrultusunda) her iki tarafından 100’er m olmak üzere toplam 200 m genişletilmiş ve 300 m boyunca genişliği sabit kalacak şekilde uzatılmıştır (Şekil 4.13 2. durum (c)).

4.alternatifte ise her iki sınır iki tarafından y doğrultusunda 200’er m olmak üzere toplam 400 m genişletilmiş ve 600 m boyunca genişliği sabit kalacak şekilde uzatılmıştır (Şekil 4.13 2. durum (d)).

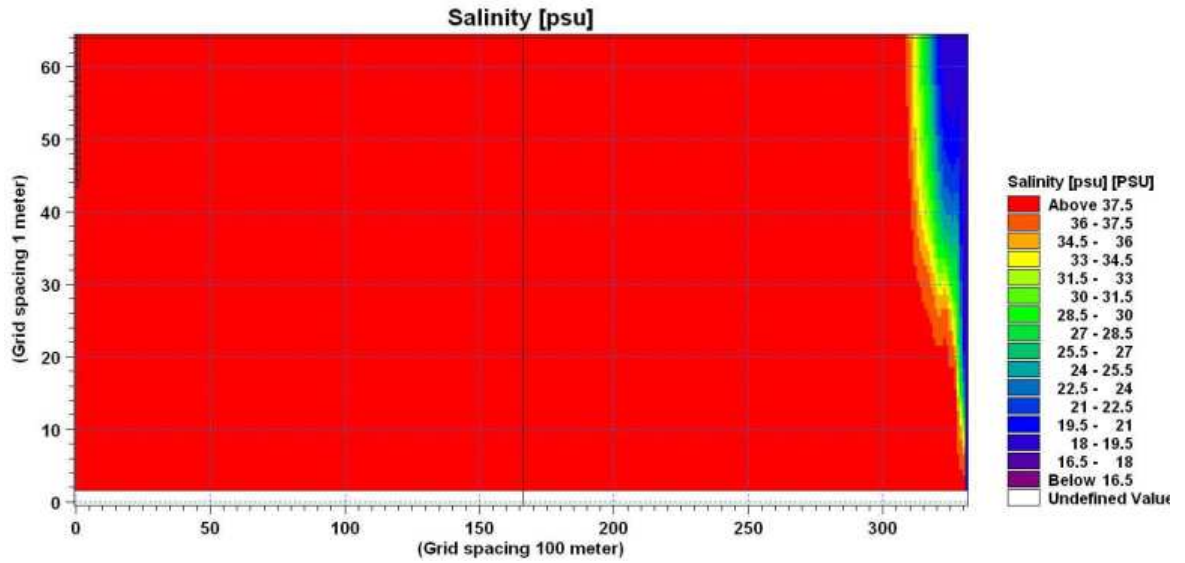
5.alternatifte her iki açık sınır genişliği (y) doğrultusunda 300’er m olmak üzere toplam 600 m genişletilmiş ve 900 m boyunca genişliği sabit kalacak şekilde uzatılmıştır (Şekil 4.13 2. durum (e)).

Çizelge 4.3 Açık sınırlarda farklı ani genişleme durumları için oluşturulan modellere ait hidrodinamik parametreler ve değerleri

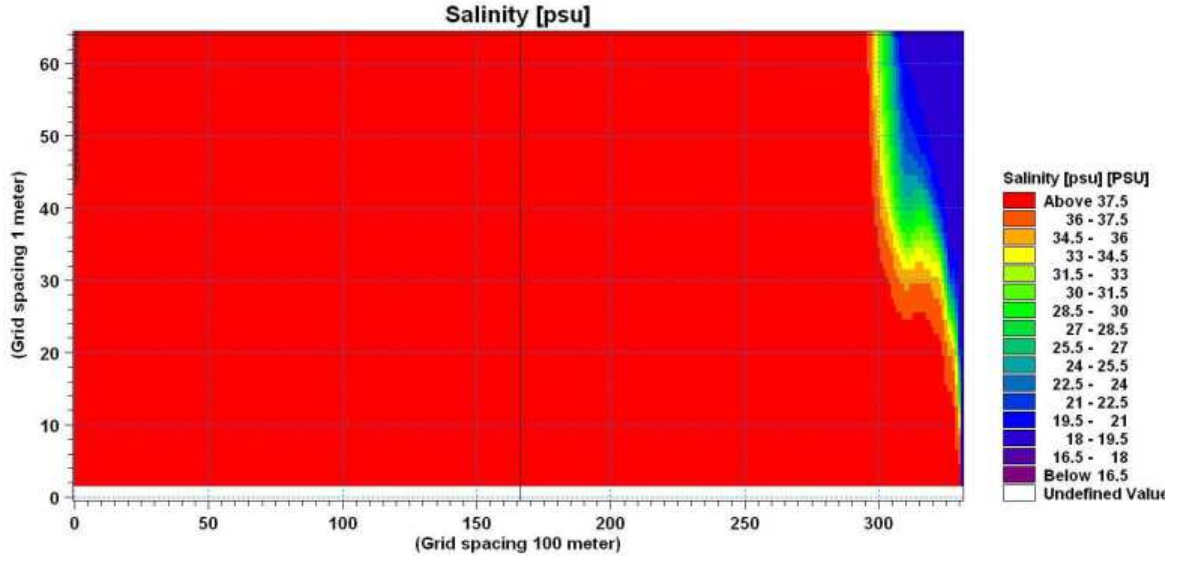
Model Alternatifleri			3. Alternatif	4. Alternatif	5. Alternatif
Batimetri ($x \times y \times z$)			32,600×(900-1100)×64	33,200×(900-1300)×64	33,800×(900-1500)×64
Ağ aralığı ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) (m)			100×100×1	100×100×1	100×100×1
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)			1.0	1.0	1.0
Courant Sayısı (C_r)			0.2507	0.2507	0.2507
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
		2-2	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)
		2-2	0.45 (sbt)	0.45 (sbt)	0.45 (sbt)
Pürüzlülük (k_s) (m)			0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Eddy Viskozitesi Limitleri	x		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	y		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	z		$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0	0
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000	100,000
Başarı ile çalıştığı süre (s)			414	2,644	7,860

Her üç model alternatifi de başlangıçta tanımlanan simülasyon sürelerini hesap şeması stabilitelelerinin bozulması sonucu tamamlayamamışlardır.

Sırasıyla Şekil 4.64 ve Şekil 65’de 4. model alternatifi için 1,000. ve 2,000. s’lerdeki boykesit tuzluluk dağılımları görülmektedir. Her iki şekilden de görüleceği gibi üst tabaka akımı Karadeniz sınırından itibaren çok az bir mesafe ilerlemiş, kanalın geri kalan kısmında tabakalı akım yapısı gelişmemiştir.

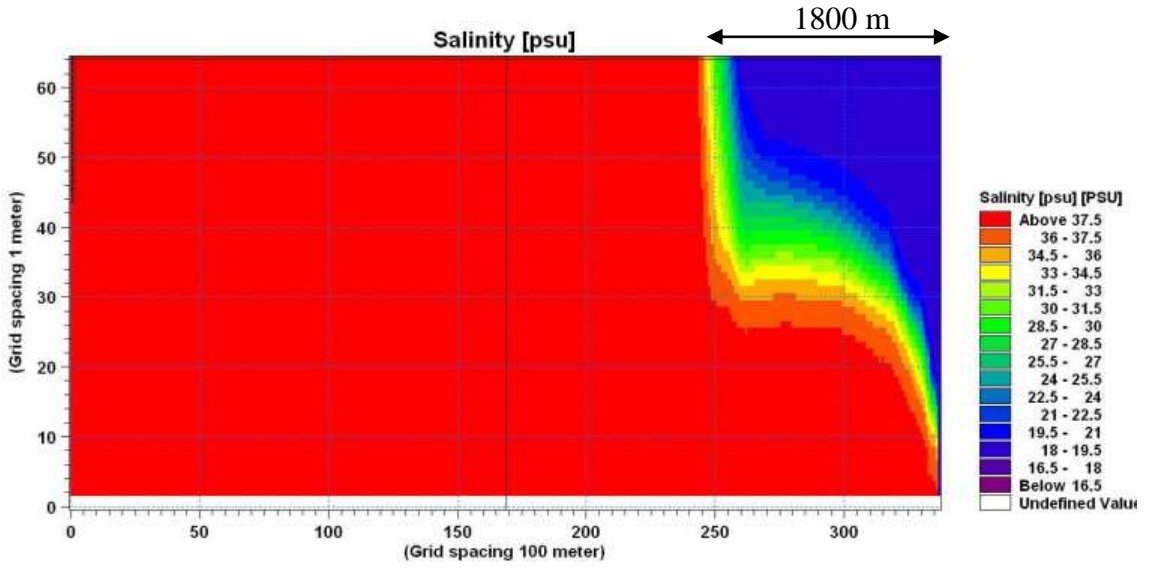


Şekil 4.64 4. model alternatifi için 1,000. s’deki boykesit tuzluluk dağılımı

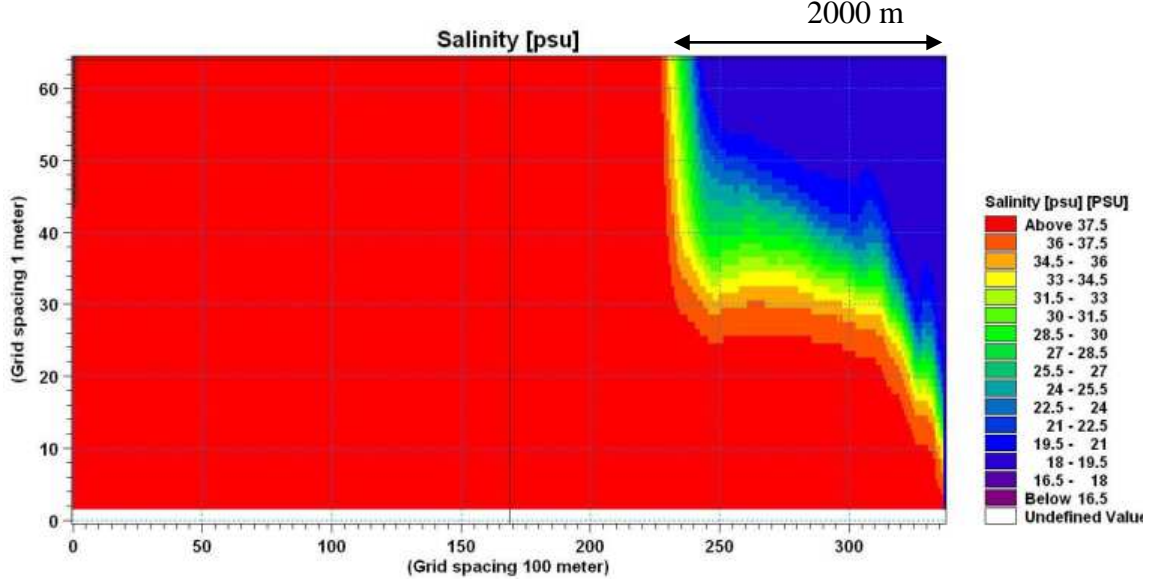


Şekil 4.65 4. model alternatifi için 2,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.66 ve 67'de 5.model alternatifinin 6,000. ve 7,000. s'lerindeki boykesit tuzluluk dağılımları görülmektedir. Şekillerden tabakalı akımın tüm kanal boyunca ilerleyemediği, Karadeniz (2-2 kesiti) sınırından içeriye doğru 1,800 ile 2,000m kadar ilerleyebildiği görülmüştür.



Şekil 4.66 5. model alternatifi için 6,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.67 5. model alternatifi için 7,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

3., 4. ve 5. model alternatifi sonuçlarından bir kanal akımında açık sınırlardaki ani genişleme miktarının ve açık sınırların konumunun bir kanaldaki tabakalı akım modelinin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

4.3.1.3 Kesit Değişiminin Etkisi (3.Durum)

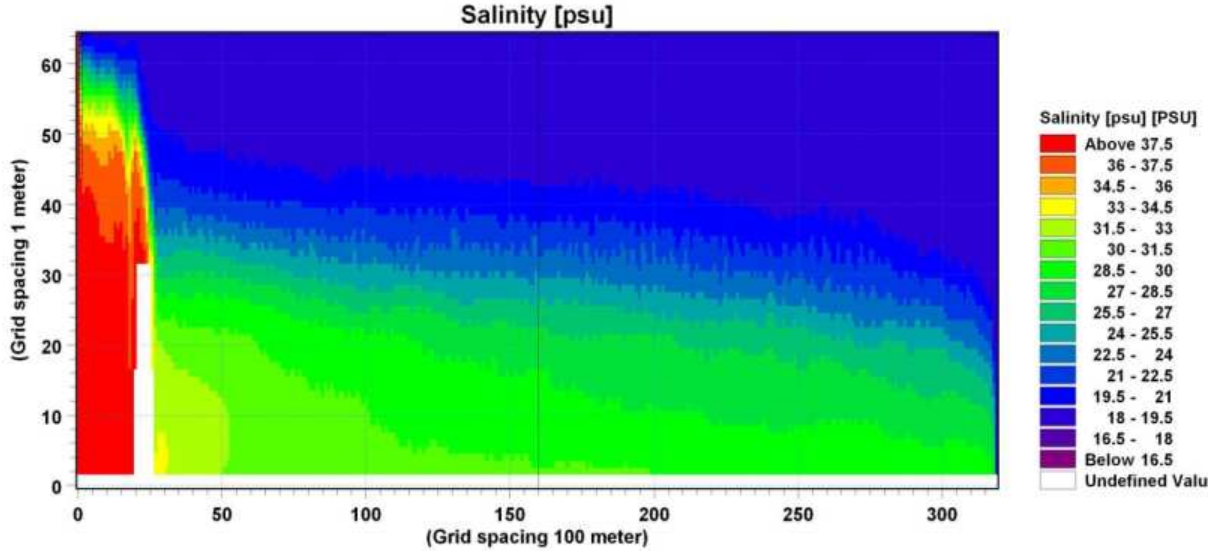
i) Eşik Hali

Kanal tabanına yerleştirilen eşğin akım yapısı ve su seviyesi değişimine etkisinin incelenmesi amacıyla Şekil 4.13'de görülen 3. durum (a)'daki (eşik hali) kanal geometrisi oluşturulmuştur. Kanalın 1-1 kesitinden 2000 m içeride 900 m genişliğinde ve 700 m uzunluğunda bir eşik yerleştirilmiştir. Sırasıyla $e=30$ m, 20 m ve 10 m eşik yükseklikleri için sayısal parametreleri Çizelge 4.4'de verilen üç ayrı model alternatifi oluşturulmuştur. Her üç model alternatifinde de eşik yüksekliği dışındaki tüm parametreler 1.durum 4. alternatif ile aynı değeri almaktadır.

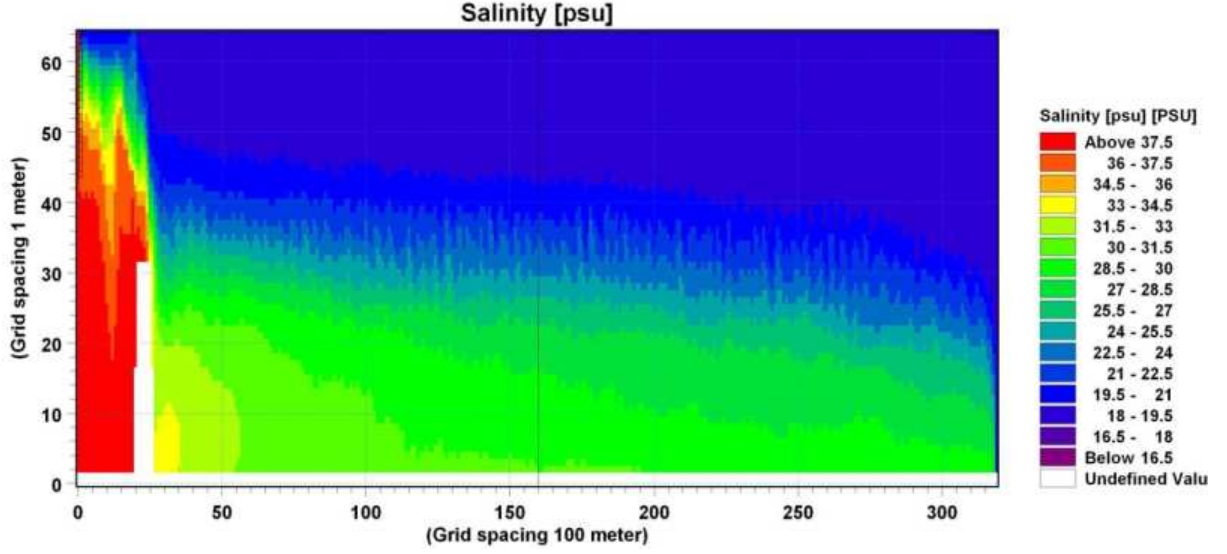
Sırasıyla Şekil 4.68 ve 69'de 1. alternatife ait son iki zaman adımındaki kanal boykesit tuzluluk değişimi görülmektedir. Arakesitin kalınlığı 1-1 kesitinden başlayarak eşığe doğru azalmaktadır. Eşğin üzerinde minimum değerine ulaşan ara kesit kalınlığı, eşikten başlayarak 2-2 kesitine doğru artmaktadır. Arakesitin eğimi kanal boyunca değişim göstermektedir. 1-1 kesitinden eşığe kadar eğimli bir gidiş izleyen arakesit eşik üzerinde ani bir düşüş göstererek eşğin hemen arkasında çok güçlü bir karışımın oluşmasına neden olmaktadır. Eşikten 2-2 kesitine doğru arakesit yataya yakın bir doğru şeklinde uzanmaktadır.

Çizelge 4.4 Eşikli kanal durumu için model parametreleri

Model Alternatifleri		1. Alternatif	2. Alternatif	3. Alternatif
Batimetri (x×y×z)		32,000×900×64	32,000×900×64	32,000×900×64
Eşik yüksekliği (e) (m)		30	20	10
Ağ aralığı (Δx×Δy×Δz) (m)		100×100×1	100×100×1	100×100×1
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)		1	1	1
Courant Sayısı (C _r)	Yatay	0.2507	0.2507	0.2507
	Düşey	25.07	25.07	25.07
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	38 (sbt)	38 (sbt)
		2-2	18 (sbt)	18 (sbt)
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0 (sbt)	0 (sbt)
		2-2	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Pürüzlülük (ks) (m)		0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Eddy Viskozitesi Limitleri	x	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	y	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	z	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)		38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
Başlangıç Su Yüzü profili (m)		0	0	0
Simülasyon Zamanı (t) (s)		100,000	100,000	100,000
Başarı ile çalıştığı süre (s)		100,000	87,326	100,000



Şekil 4.68 1. alternatif için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.69 1 alternatif için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.70 ve 71'de 1. model alternatifinin son iki zaman adımındaki boykesit hız dağılımları görülmektedir. Üst tabaka kalınlığı 2-2 kesitinden eşiğe kadar çok fazla değişim göstermemiş, eşik üzerinde aniden azalmış ve eşikten sonra tekrar artmıştır. Üst tabakanın ortalama hızı $u_{1,ort}=1$ m/s civarında olup en büyük değerine kesitin daraldığı eşik bölgesinde ulaşmaktadır ($u_{1,maks}=1.8$ m/s). Alt tabaka kalınlığı eşik üzerinde minimum değerine ulaşmaktadır. Bu bölgede alt tabakaya ait ortalama ve maksimum hızlar $u_{2,ort}=1.3$ ve $u_{2,maks}=3.1$ m/s değerlerini almaktadır. Eşik üzerinde ortalama üst ve alt tabaka kalınlıkları sırasıyla $h_1=20$ m ve $h_2=12$ m değerlerini almaktadır. Bu veriler ışığında eşik üzerinde $G=1.23$ (sel rejimi) olarak belirlenmiştir..

Kanal ortasında üst ve alt tabaka için kesitsel ortalama hızlar sırasıyla $u_{1,ort}=0.62$ m/s ve $u_{2,ort}=0.71$ m/s, tabaka kalınlıkları $h_1=29$ m ve $h_2=32$ m değerlerini almaktadır. G ise 0.21 değerini almaktadır. Akım kanal boyunca nehir rejiminde akmaktadır. Kanal boyunca farklı zaman adımlarındaki akım karakteristikleri Çizelge 4.5 ve 6'da gösterilmiştir.

Bu sonuçlardan eşiğin kanal akımı için kontrol kesiti gibi davrandığı görülmektedir. Nehir rejiminde akan alt tabaka akımı eşik üzerinde ($x=2,000-2,700$ m arası) hızlanarak sel rejimine geçmiş ve eşiğin mansabında ($x=2,700$ m) içsel hidrolik sıçrama gerçekleştirerek nehir rejimine dönmüştür. Şekil 4.72 ve 73'de eşik üzerindeki hız dağılımı sonuçları da eşiğin membasından başlayarak alt tabaka hızının arttığı tabaka kalınlığının ise azaldığı görülmektedir. Eşik hemen başlangıcında ve sonunda G kritik değerler (≈ 1) almıştır. Bu sonuç, tabakalı akım koşullarında su altında kalmış uzun bir eşik üzerindeki alt tabaka davranışı ile benzeşmektedir (Abraham, 1983).

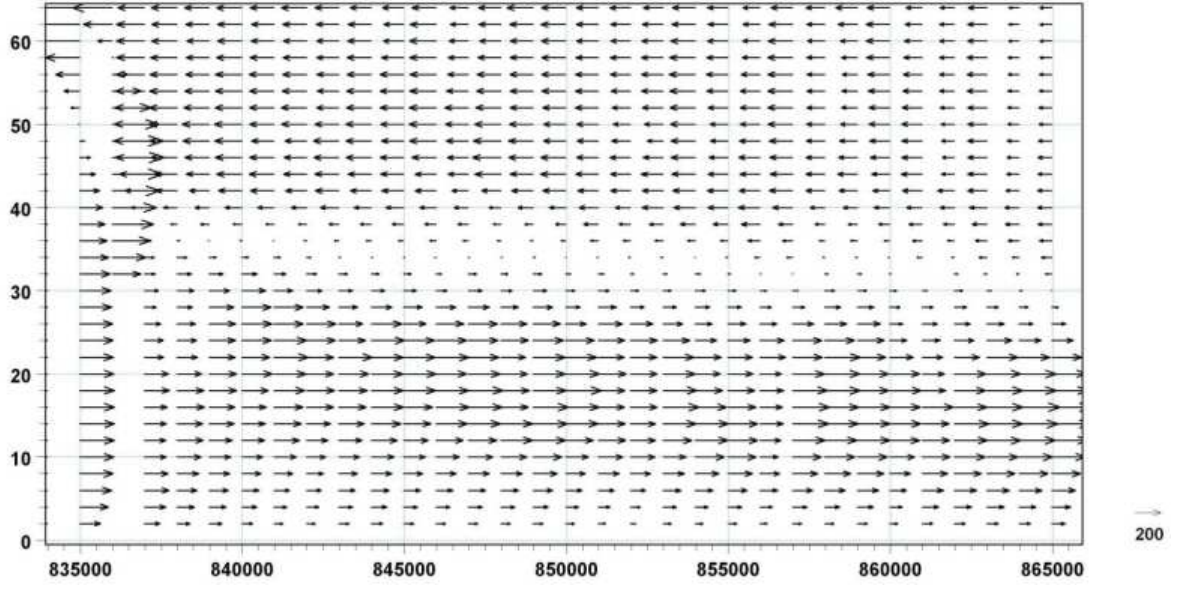
Benzer şekilde nehir rejiminde eşiğe yaklaşan üst tabaka akımının mevcut enerjisi eşiği geçmeye yetmemiş ve su seviyesi bir miktar kabarmıştır. Eşik üzerinde rejim değiştiren (sel rejimi) üst tabaka akımının hızı artmış su seviyesi ise azalmıştır. Eşiğin üzerinde sel rejiminde akan üst tabaka akımı eşiğin hemen mansabında ($x=2,000$ m) oluşan hidrolik sıçrama ile tekrar nehir rejimine geçmiştir (Şekil 4.74) . Su yüzü profilindeki bu değişim, bir eşiğe nehir rejiminde yaklaşan ve mevcut enerjisiyle eşiği geçemeyen homojen akıma ait su yüzü değişimiyle benzerlik göstermektedir.

Çizelge 4.5 1. model alternatifi için 99,000. s'deki akım karakteristikleri

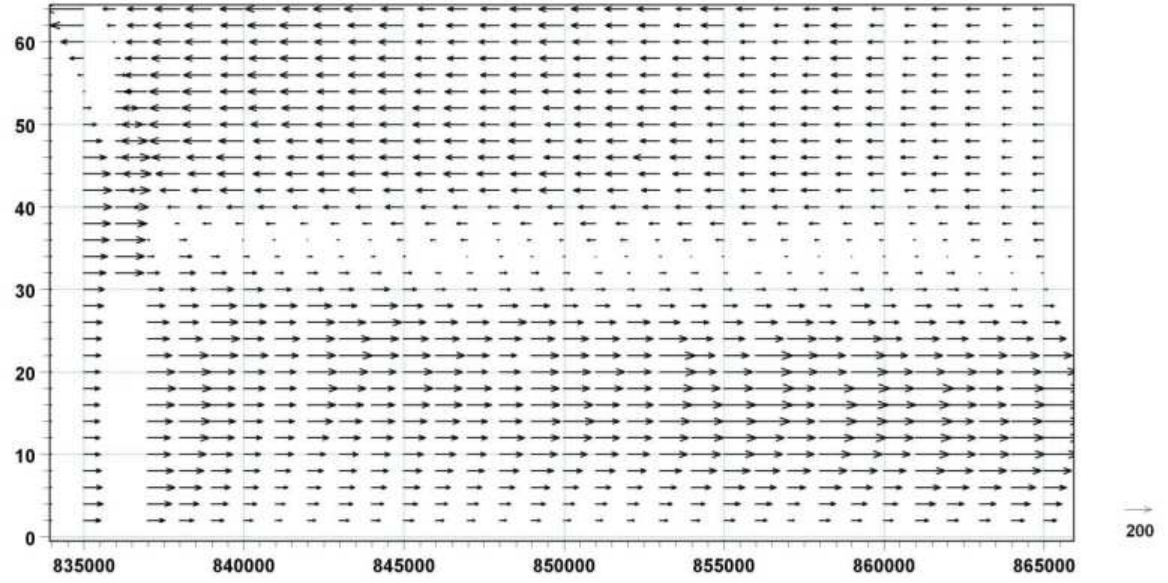
Kesit	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	h_1 (m/s)	h_2 (m/s)	G
1-1	0.92	-	63	-	0.01
Eşik ($x=2,400$ m)	0.77	1.31	20	12	1.23
Kanal ortası ($x=16,000$ m)	0.63	0.64	29	32	0.19
2-2	0.49	1.20	44	19	0.58

Çizelge 4.6 1. model alternatifi için 100,000. s'deki akım karakteristikleri

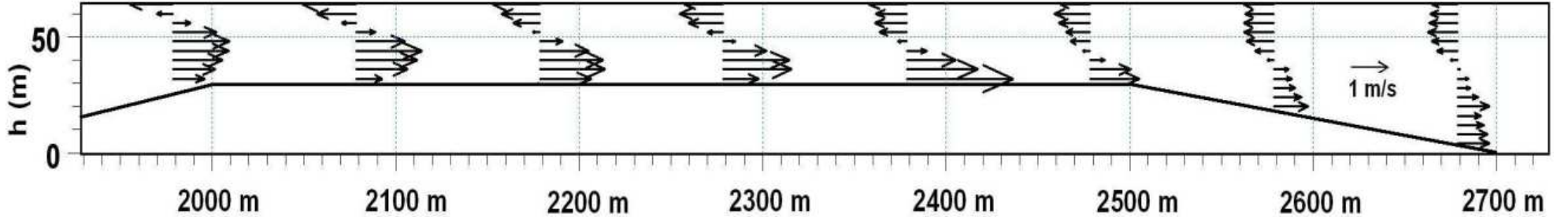
Kesit	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	h_1 (m/s)	h_2 (m/s)	G
1-1	0.91	-	63	-	0.09
Eşik ($x=2,100$ m)	0.83	1.18	20	12	1.07
Kanal ortası ($x=160,000$ m)	0.62	0.75	27	33	0.22
2-2	0.43	1.26	42	20	0.60



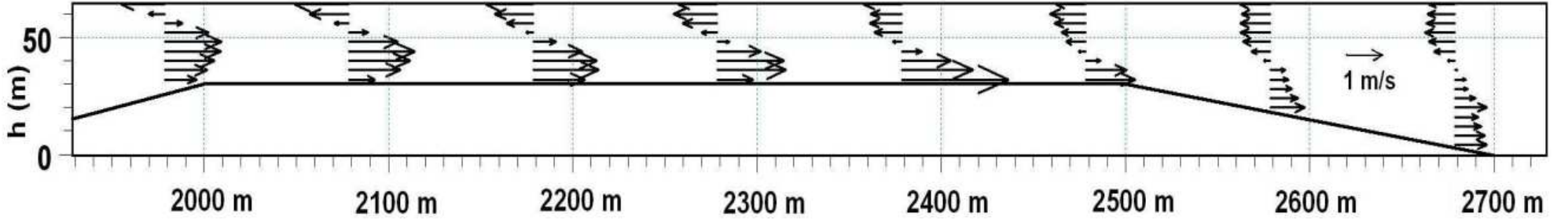
Şekil 4.70 1. alternatif için 99,000. s'deki boykesit hız dağılımı



Şekil 4.71 1. alternatif için 100,000. s'deki boykesit hız dağılımı



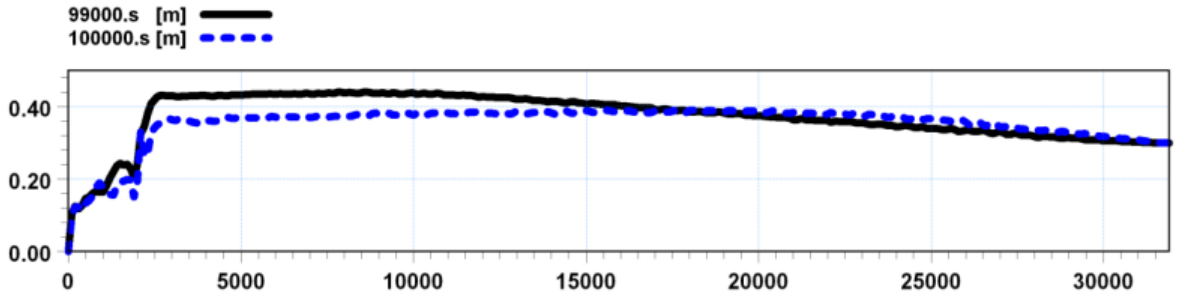
Şekil 4.72 1. alternatif için 99,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı



Şekil 4.73 1. alternatif için 100,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı

Şekil 4.74’de modelin son iki zaman adımındaki kanal su yüzü değişimi görülmektedir. 99,000. s’deki su yüzü değişiminden su seviyesinin 2-2 kesitinden başlayarak tedrici olarak arttığı görülmektedir (akım nehir rejimindedir). Akım, eşik üzerinde nehir rejiminden sel rejimine geçmiş ve su seviyesi ani olarak düşmüştür. Üst tabaka akımı eşğin mansabında ($x=2,000$ m) sonra hidrolik sıçramayla tekrar nehir rejimine dönmüştür. Buna karşılık su seviyesi eşikten sonra ani bir artış göstermiştir.

100,000.s’deki su yüzü değişiminden görüldüğü gibi 2-2 kesitinden başlayarak su seviyesi önce artmakta daha sonra eşığe doğru azalmaktadır. Eşığe doğru su seviyesi tekrar kabarmış eşik üzerinde ise akımın rejim değiştirmesine (nehir rejiminden sel rejimine) bağlı olarak su seviyesi ani bir düşüş göstermiştir. Eşikten sonra meydana gelen hidrolik sıçrama ile su seviyesinde ani bir artış görülmektedir. Su yüzünün zamanla değişim gösterdiği ve modelin kararlı hale ulaşamadığı görülmektedir.

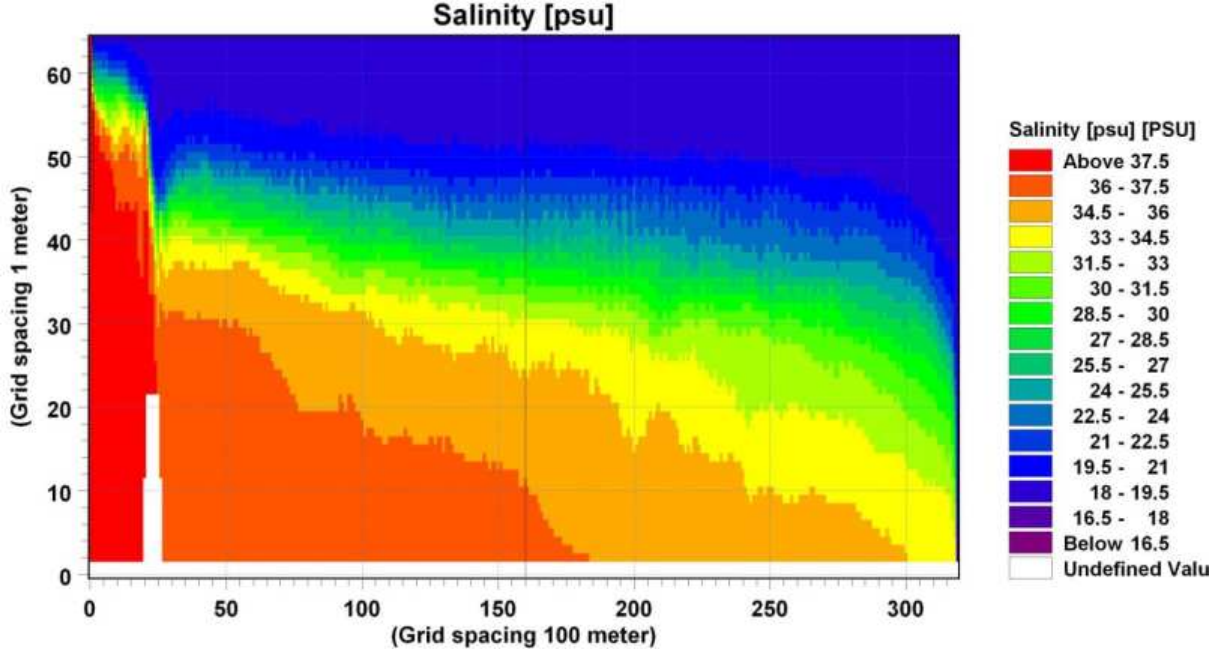


Şekil 4.74 1. alternatif için 99,000. ve 100,000. s’lerdeki kanal su yüzü profilleri

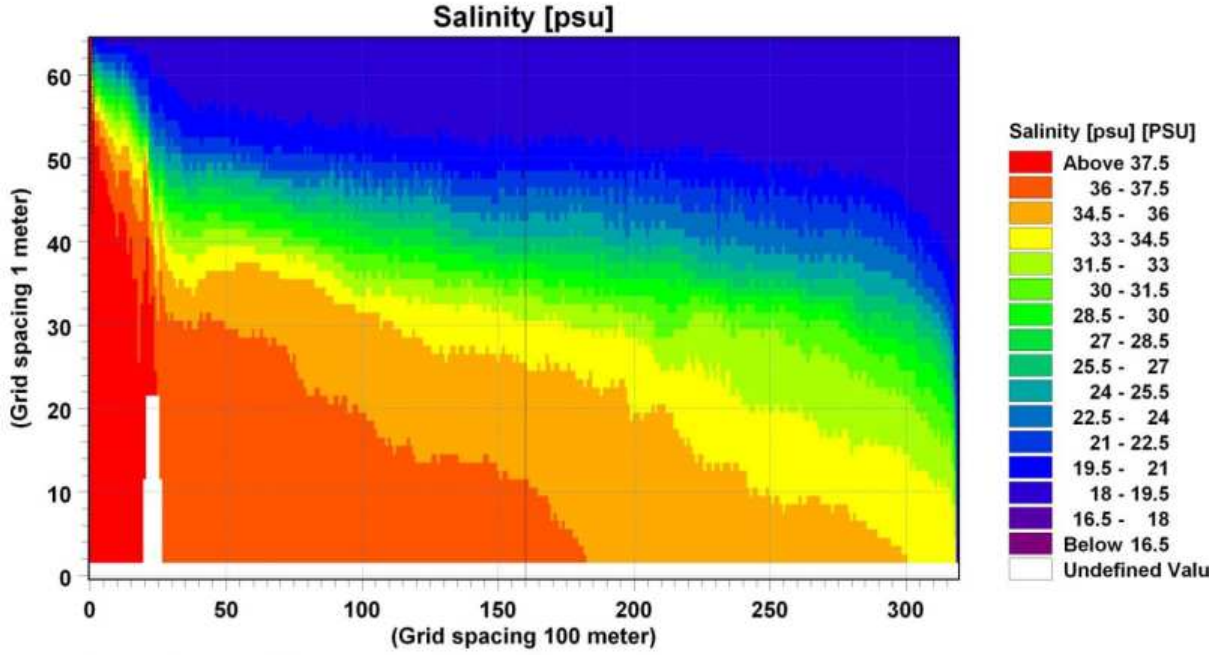
Sırasıyla Şekil 4.75(64) ve 76(65)’de 2. alternatifin son iki zaman adımındaki boykesit tuzluluk dağılımları görülmektedir. Üst ve alt tabakaları ayıran arakesitin konumu zamanla değişmiş, buna bağlı olarak da tabakaların kalınlıkları kanal boyunca farklılık göstermiştir. Ara tabaka 1-1 kesitinden 2-2 kesitine doğru eğimli olup, eşik üzerinde eğiminde ani bir artış meydana gelmiştir.

Sırasıyla Şekil 4.77 ve 78’de 2. alternatife ait 86,000. ve 87,000. s’deki kanal boykesit hız dağılımları görülmektedir. Üst ve alt tabakalara ait hızlar tabaka kalınlıklarının değişmesine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum boykesit tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum göstermektedir (Şekil 4.75 ve 76).

Şekil 4.79 ve 80’de ise sırasıyla 86,000. ve 87,000. s’de eşik üzerindeki boykesit boyunca hız dağılımları verilmiştir. Her iki şekilden alt tabaka kalınlığının (h_2) eşik boyunca giderek azaldığı ve eşik sonunda en küçük değerine ulaştığı, alt tabaka hızının (u_2) ise bunun tersi bir eğilim gösterdiği ve eşğin sonunda en büyük değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.75 2. alternatif için 86,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.76 2. alternatif için 87,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Çizelge 4.7 ve 8'de modelin son iki zaman adımına ait 1-1, 2-2 , kanal ortası ve eşik kesitlerindeki ortalama tabaka kalınlıkları, hızları ve G değerleri verilmiştir.

86,000.s akım değerlerinden 2-2 kesiti ve eşiğin kontrol kesiti gibi davrandığı, akımın 2-2 kesiti ile eşik arasında nehir rejiminde, 1-1 kesitinde sel rejiminde olduğu görülmektedir. Üst tabaka hızının en büyük, tabaka kalınlığının ise en küçük değerini aldığı 2-2 kesitinde akım sel rejimindedir. Eşiğe nehir rejiminde yaklaşan üst tabaka akımı eşikten önce bir miktar

kabarmış, eşik üzerinden geçerken rejim değiştirerek sel rejimine geçmiştir (Çizelge 4.7). Bu durum eşik ile 2-2 kesiti arasında su seviyesinde meydana gelen ani azalmayı açıklamaktadır.

Çizelge 4.8’de verilen 87,000. s’deki yoğunluk Froude sayısı değerlerinden 2-2 kesiti ile eşğin kontrol kesiti gibi ($G \approx 1$) davrandıkları görülmektedir. Akım 2-2 kesiti ile eşik arasında nehir rejiminde, 1-1 kesitinde ise sel rejimindedir. Üst tabaka akımı eşığe nehir rejiminde yaklaşmış, eşik üzerinde rejim değiştirerek sel rejimine geçmiştir. Çizelge 4.8’deki sonuçlar Şekil 4.81’de görülen modelin aynı zaman adımıdaki (87,000. s) su yüzü profiliyle uyum içerisinde dir.

2. alternatifte ait boykesit tuzluluk, hız ve su yüzü değişimi sonuçlarından, akım karakteristiklerinin zamanla değişim gösterdiği ve modelin kararlı çözüme ulaşmadığı görülmüştür.

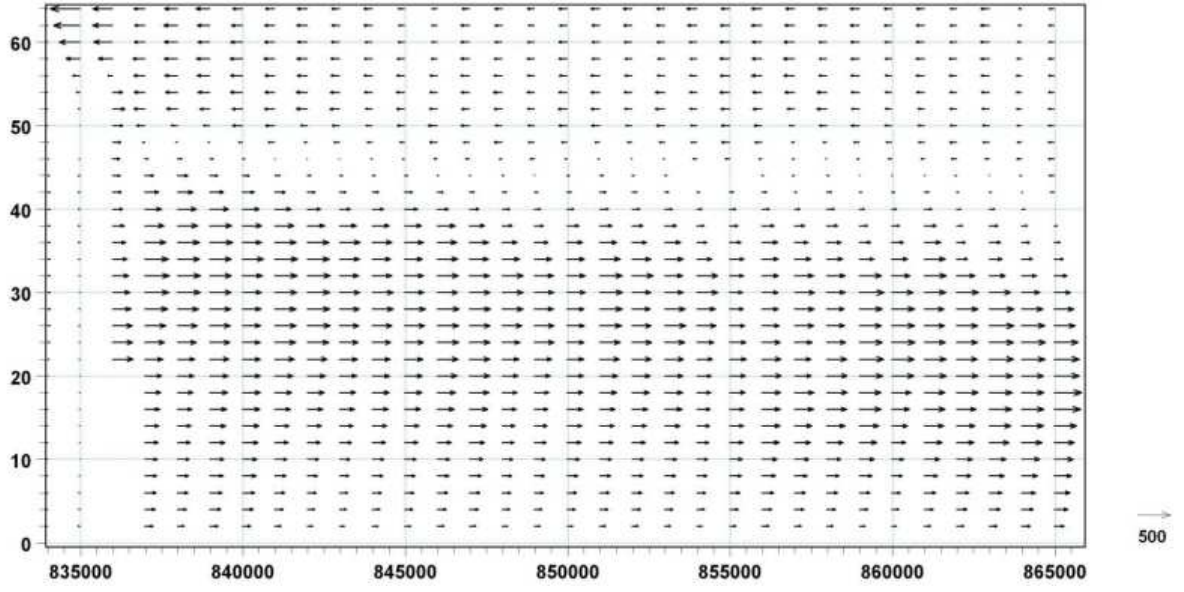
1. ve 2. model alternatiflerinin birlikte değerlendirilmesinden eşik yüksekliğinin akımın hidrodinamik davranışı ve modelin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. $e=30$ m eşik yüksekliğine sahip 1. model alternatifi tanımlanan 100,000 s’lik simülasyon zamanını hesap şemasının stabilitesi bozulmadan, $e=20$ m eşik yüksekliğine sahip 2. model alternatifi 87,000. s’de şemanın stabilitesinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.7 86,000. s’deki akım karakteristikleri

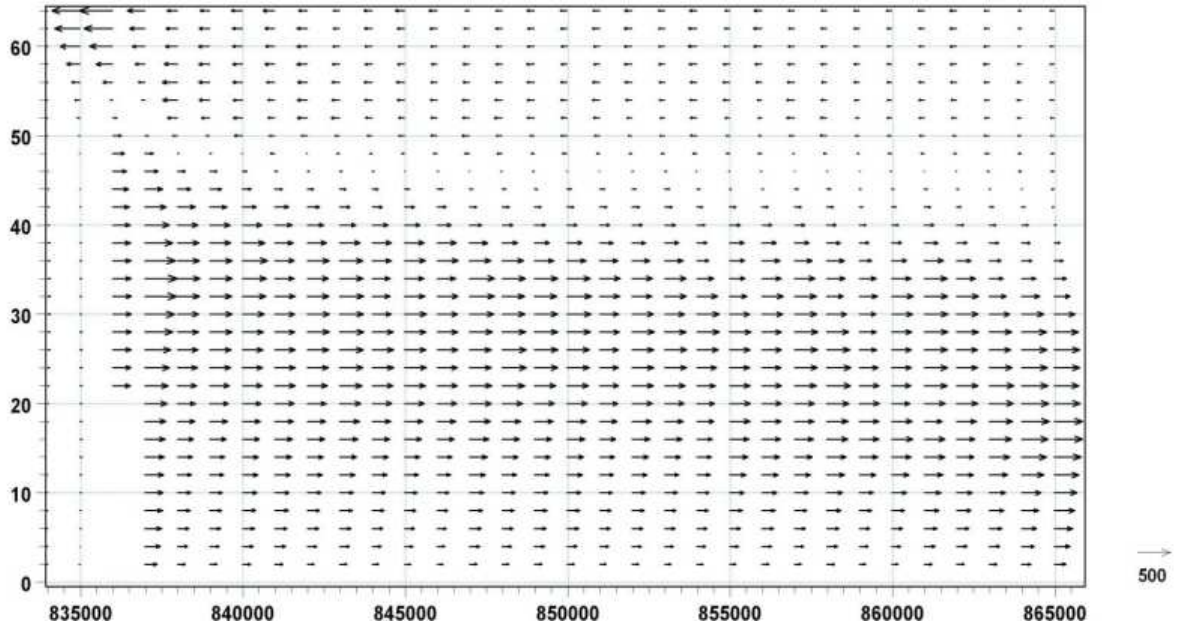
Kesit	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	h_1 (m/s)	h_2 (m/s)	G
1-1	1.14	1.05	8	53	1.31
Eşik ($x=2,400$)	0.58	1.7	21	22	1.05
Kanal ortası ($x=160,000$ m)	0.4	0.97	17	44	0.22
2-2	0.45	1.77	38	24	0.97

Çizelge 4.8 87,000. s’deki akım karakteristikleri

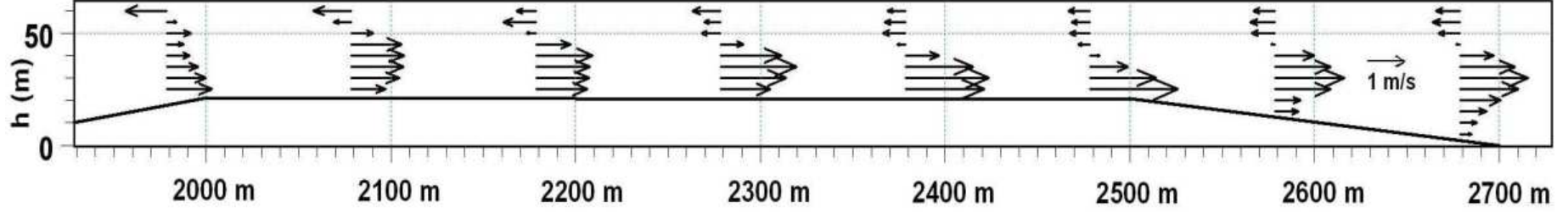
Kesit	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	h_1 (m/s)	h_2 (m/s)	G
1-1	1.11	1.35	5	57	2
Eşik ($x=2,100$ m)	1.28	0.72	14	27	0.97
Kanal ortası ($x=160,000$ m)	0.4	0.97	17	45	0.22
2-2	0.45	1.77	38	24	0.97



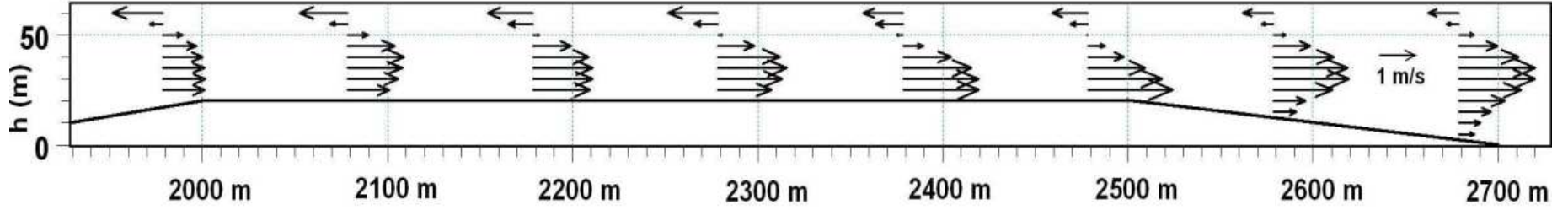
Şekil 4.77 2. alternatif için 86,000. s'deki boykesit hız dağılımı



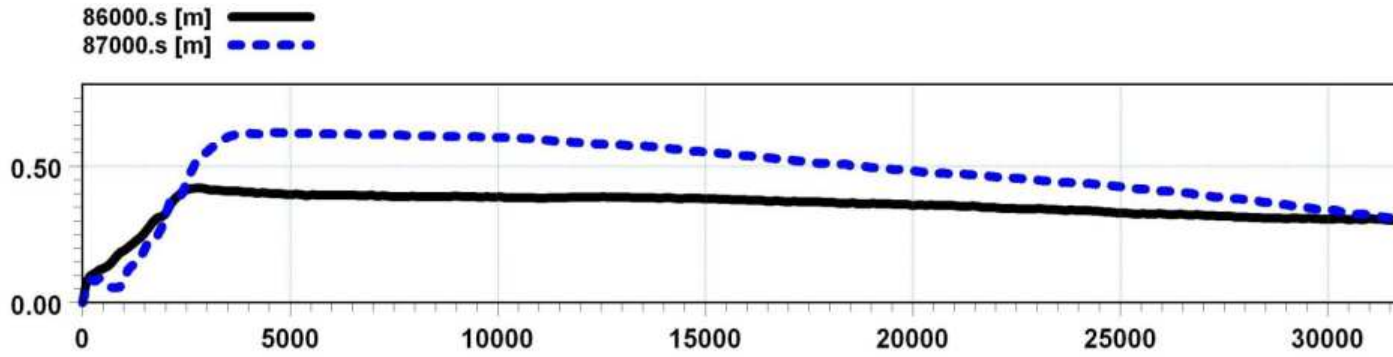
Şekil 4.78 2. alternatif için 87,000. s'deki boykesit hız dağılımı



Şekil 4.79 2. alternatif için 86,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı

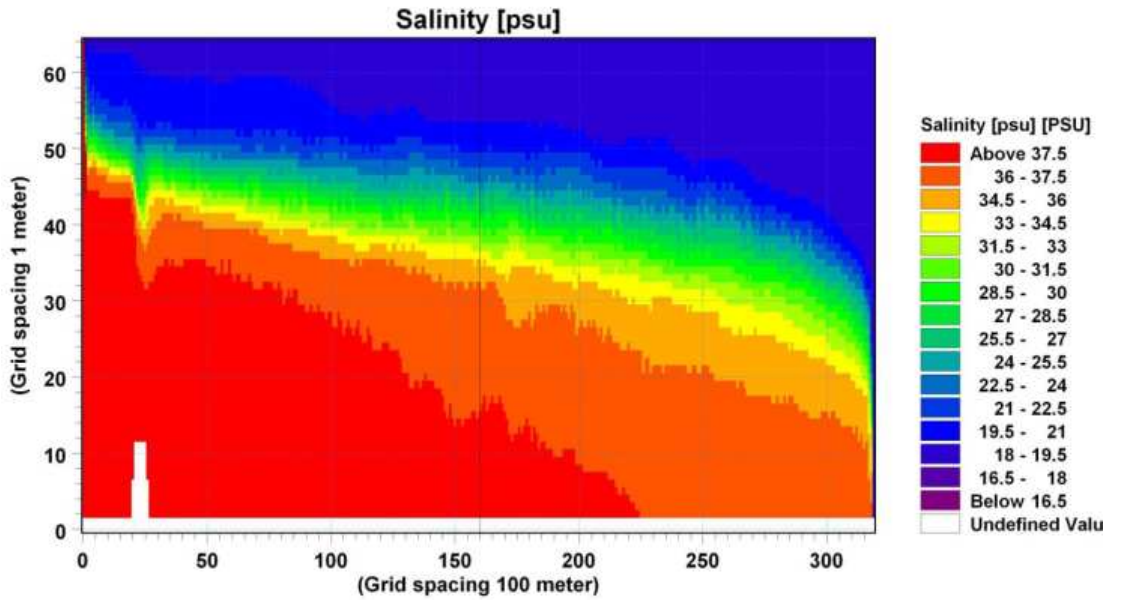


Şekil 4.80 2. alternatif için 87,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı

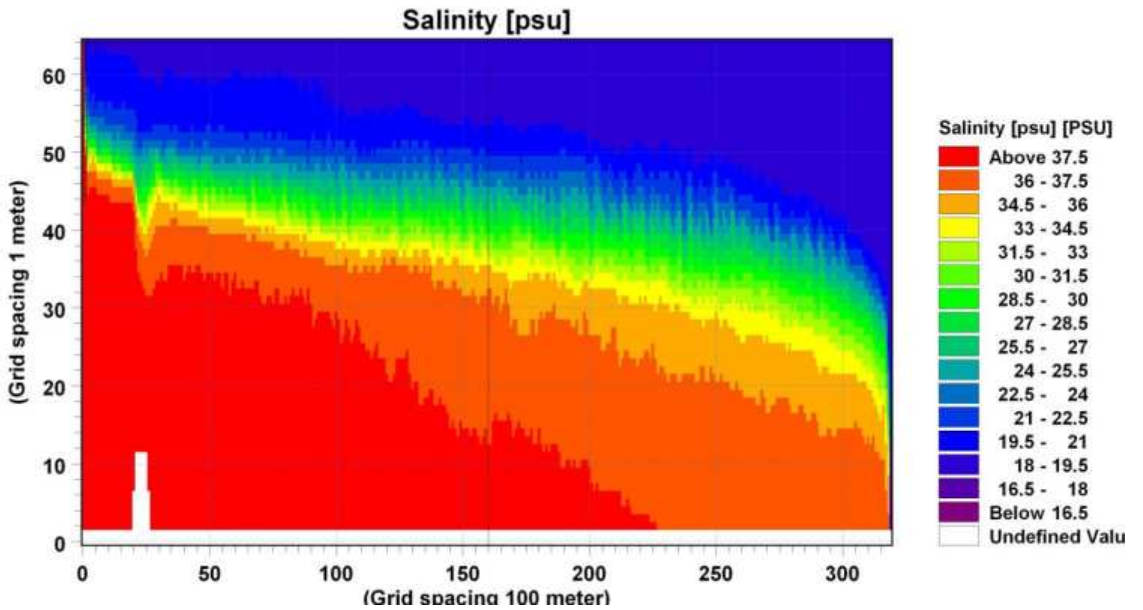


Şekil 4.81 2. alternatifi için 86,000. ve 87,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.82 ve 83’de ise 3. alternatifin son iki zaman adımıdaki (99,000. ve 100,000.s) boykesit tuzluluk dağılımı verilmiştir. Tabaka kalınlıkları kanal boyunca değişmektedir. Ara tabaka 1-1 kesitinden 2-2 kesitine doğru eğimli bir gidiş izlemiş, en büyük eğime eşik üzerinde ulaşmıştır. Ara tabakanın kalınlığı 1-1 kesitinden 2-2 kesitine doğru kademeli olarak artmış ve 2-2 kesitinde en büyük değerine ulaşmıştır. Boykesit tuzluluk dağılımlarından kanal boyunca tabakalar arasında güçlü bir karışımın olduğu görülmektedir. Son iki zaman adımıdaki tuzluluk dağılımı sonuçlarından üst, alt ve ara tabaka kalınlıklarının zamanla önemli bir değişim göstermediği ve modelin boykesit tuzluluk dağılımı için kararlı çözüme ulaştığı söylenebilmektedir.



Şekil 4.82 3. alternatif için 99,000. s’deki boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.83 3. alternatif için 100,000. s’deki boykesit tuzluluk dağılımı

Şekil 4.84 ve 85’de ise sırasıyla 3. model alternatifine ait son iki zaman adımıdaki kanal boykesit hız dağılımları verilmiştir. Kanal boyunca alt tabaka kalınlığının üst tabaka kalınlığından daha büyük olduğu, ve arakesitin 1-1 kesitinden 2-2 kesitine doğru eğimli olduğu görülmektedir. Bu durum boykesit tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

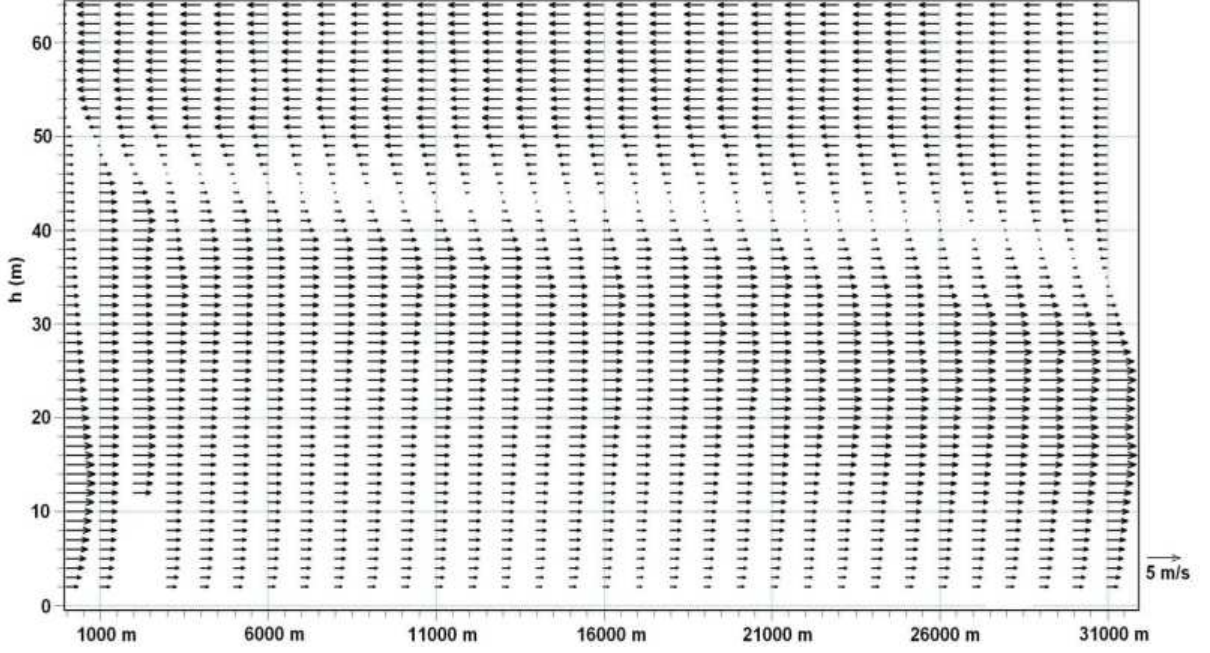
Sırasıyla Çizelge 4.9 ve 10’da modelin 99,000. ve 100,000.s’lerde 1-1, eşik, kanal ortası ve 2-2 kesitlerindeki üst ve alt tabakaya ait tabaka hızları, kalınlıkları ve G değerleri verilmiştir. Akım karakteristiklerinin 1-1 ve 2-2 kesitlerinde zamanla değişmediği, eşik ve kanal ortası kesitlerinde ise değiştiği görülmektedir. 1-1 ve 2-2 kesitlerinde sel rejiminde olan akım kanal boyunca nehir rejimindedir. Kanal boyunca nehir rejiminde akan akım, 1-1 ve 2-2 kesitlerinde aniden rejim değiştirmiş ve sel rejimine geçmiştir.

Çizelge 4.9 3. model alternatifi için 99,000. s’deki akım karakteristikleri

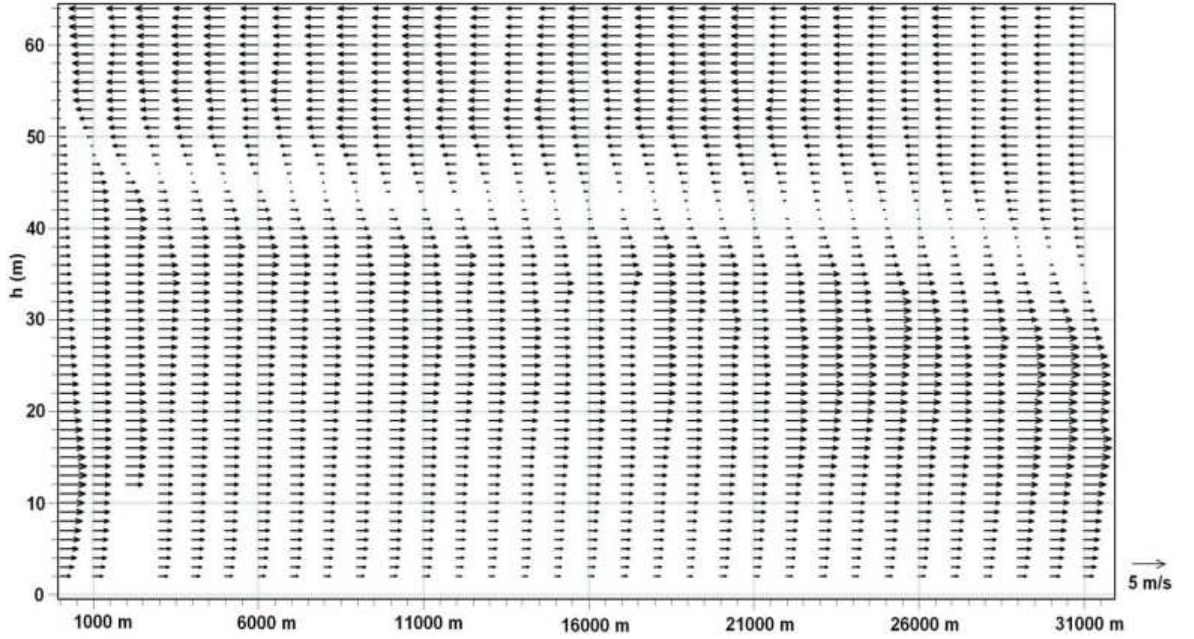
Kesit	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	h_1 (m/s)	h_2 (m/s)	G
1-1	1.55	0.7	12	50	1.5
Eşik (x=2,400)	0.89	1.11	22	30	0.55
Kanal ortası (x=160,000 m)	0.91	0.8	21	41	0.4
2-2	0.63	1.90	40	23	1.19

Çizelge 4.10 3. model alternatifi için 100,000. s’deki akım karakteristikleri

Kesit	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	h_1 (m/s)	h_2 (m/s)	G
1-1	1.56	0.73	12	50	1.52
Eşik (x=2,100 m)	0.98	1.09	22	30	0.60
Kanal ortası (x=160,000 m)	1.01	0.90	20	41	0.51
2-2	0.7	1.89	40	23	1.2



Şekil 4.84 3. alternatif için 99,000. s'deki boykesit hız dağılımı

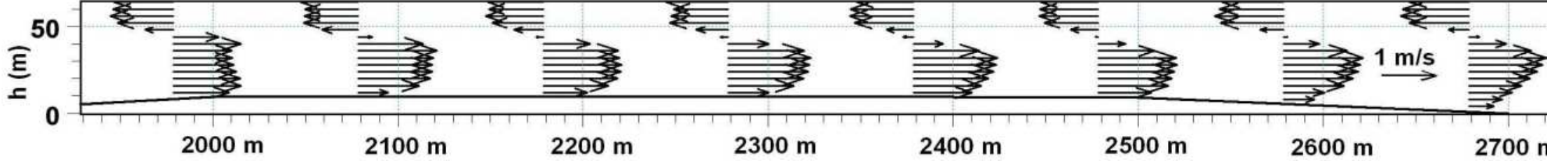


Şekil 4.85 3. alternatif için 100,000. s'deki boykesit hız dağılımı

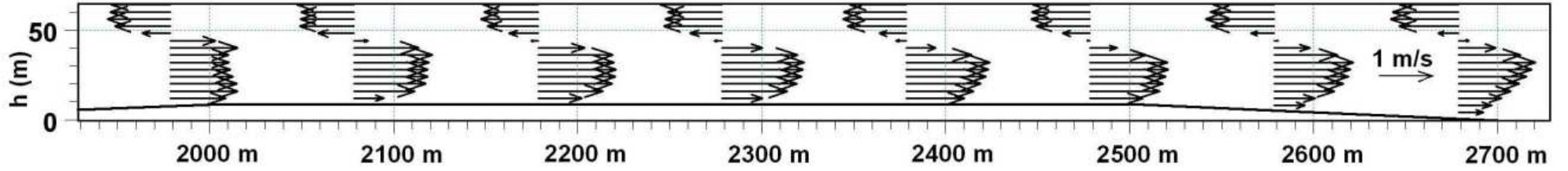
Sırasıyla Şekil 4.86 ve 87'de eşik üzerinde 99,000. ve 100,000.s'lerdeki boykesit hız dağılımları verilmiştir. Modelin hız dağılımı için kararlı hale ulaştığı ve eşik boyunca tabaka hızları ve kalınlıklarının önemli bir değişim göstermediği görülmektedir.

Şekil 4.88'de ise 99,000 ve 100,000. s'deki kanal boykesit su yüzü değişimi görülmektedir. Su yüzü 2-2 kesitinden başlayarak doğrusal olarak azalmış, eşik üzerinde bir miktar artış göstermiş ve 1-1 kesitinde ise 0.2 m civarında ani bir düşüş göstermiştir. Bu duruma kanal

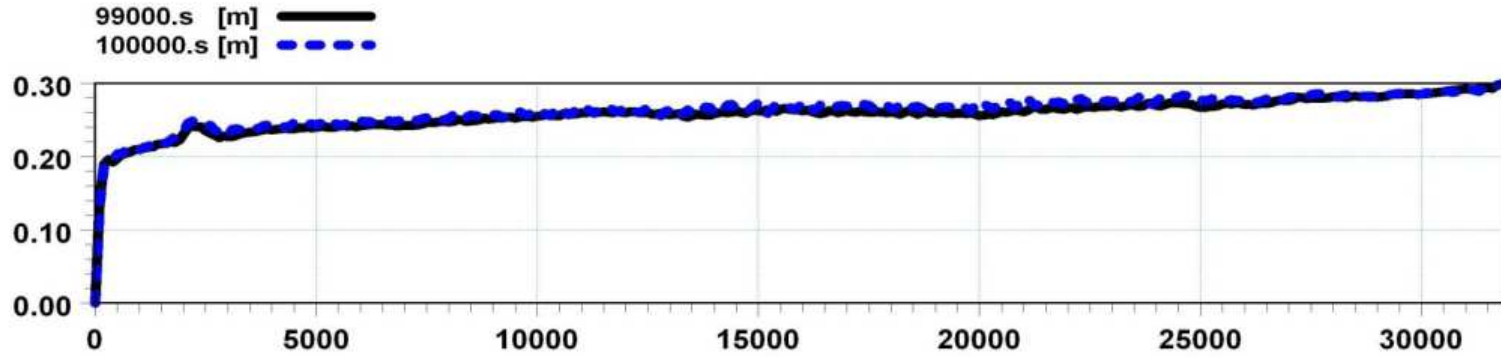
boyunca nehir rejiminde olan akımın 1-1 kesitinde sel rejimine geçmesi neden olmaktadır. Model su yüzü değişimi için kararlı hale ulaşmıştır.



Şekil 4.86 3. alternatif için 99,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı



Şekil 4.87 3. alternatif için 100,000. s'de eşik bölgesindeki (x=2,000-2,700 m) boykesit hız dağılımı



Şekil 4.88 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri

ii) Daralma Hali

Kanal kesit değişiminin tabakalı akım yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla Şekil 4.13’de görülen 3. durum (II)’deki (ani ve kademeli daralma) kanal geometrileri kullanılarak Çizelge 4.11’deki üç ayrı model alternatifi oluşturulmuştur. Her üç durumda da kanal geometrisi hariç diğer model parametreleri 1. model alternatifi ile aynı değerleri almaktadır. 4. ve 5. alternatifler için kanal planı Şekil 4.13’deki 3. durum (II)’deki ani daralan kanal geometrisi, 6. alternatif için ise Şekil 4.13’deki 3. durum (II)’deki kademeli daralan kanal geometrisi kullanılmıştır. 4. ve 5. alternatiflerinde 900 m’lik üniform kanal genişliği sırasıyla B=700 m ve 500 m’ye, 6. alternatifte ise kademeli olarak 500 m’ye düşürülmüştür. Ani kesit daralması (4. ve 5. alternatifler) 1-1 kesitinden 12,000 m içeride 1,000 m’lik uzunluk boyunca, kademeli daralma ise 1,500 m lik bir uzunluk boyunca gerçekleştirilmiştir. Böylece basit dikdörtgen kanal ile İstanbul Boğazı arasında geometrik benzeşimin sağlanması amaçlanmıştır (İstanbul Boğazı’nın en dar kesiti yaklaşık 600 m genişliğe sahip olup Marmara Denizi girişinden 12 km içeride gerçekleşmektedir).

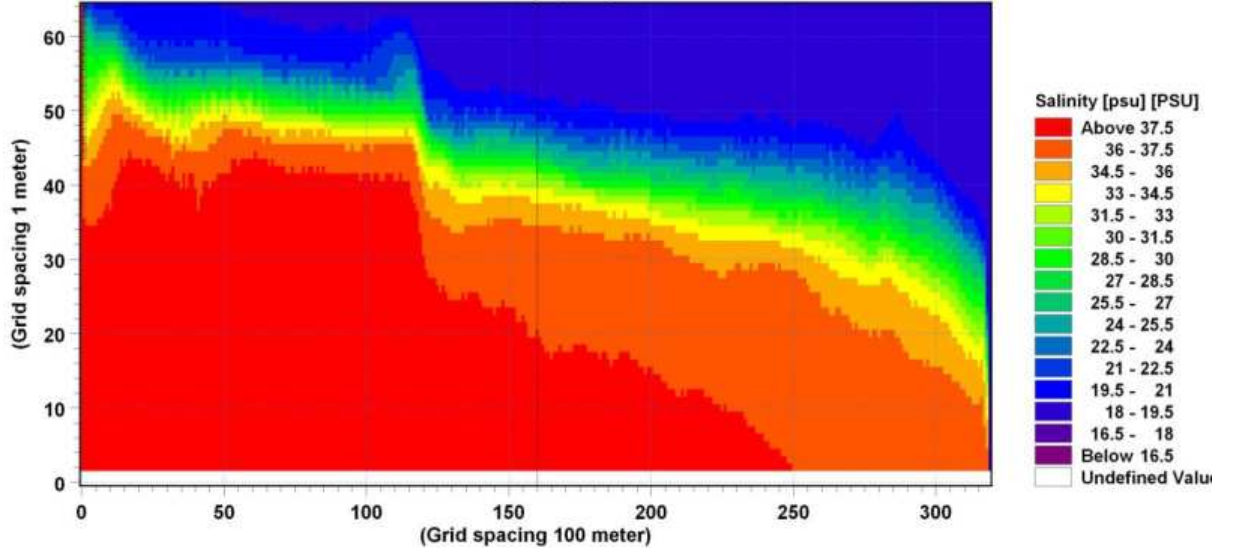
Çizelge 4.11 Model alternatifleri ve model parametrelerine ait değerler

Model Alternatifleri			4. Alternatif	5. Alternatif	6. Alternatif
Batimetri (x×y×z)			32,000×(900-700)×64	32,000×(900-500)×64	32,000×(900-700-500)×64
Daralma genişliği (B) (m)			700	500	700-500 (kademeli)
Ağ aralığı ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) (m)			100×100×1	100×100×1	100×100×1
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)			1	1	1
Courant Sayısı (C_r)	Yatay		0.2507	0.2507	0.2507
	Düşey		25.07	25.07	25.07
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
		2-2	18 (sbt)	18 (sbt)	18 (sbt)
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0 (sbt)	0 (sbt)	0 (sbt)
		2-2	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Pürüzlülük (ks) (m)			0.30 (sbt)	0.30 (sbt)	0.30 (sbt)
Eddy Viskozitesi Limitleri	x		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	y		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$
	z		$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			38 (sbt)	38 (sbt)	38 (sbt)
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0	0
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000	100,000
Başarı ile çalıştığı süre (s)			69,675	65,924	75,532

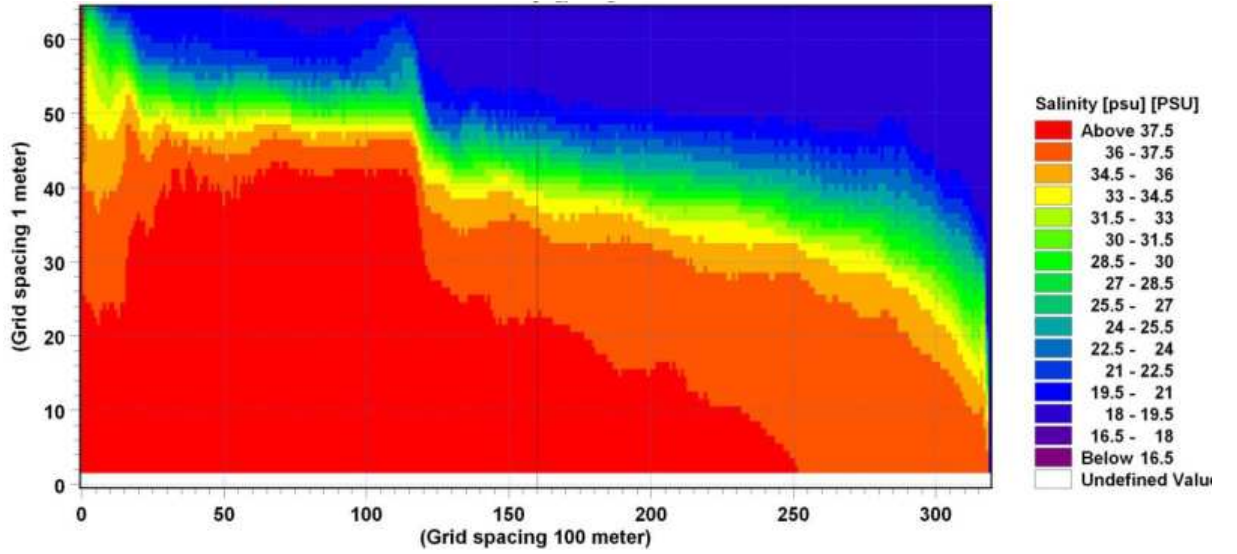
Her üç model alternatifi de tanımlanan simülasyon zamanını (t=100,000 s) tamamlayamamış ve hesap şeması stabilitelelerinin bozulmasıyla sonuçlanmışlardır.

Sırasıyla Şekil 4.89 ve 90’da 4. alternatif için 68,000. ve 69,000. s’deki kanal boykesit tuzluluk dağılımı görülmektedir. Daralma bölgesinde arakesit eğiminde ani bir artma

meydana gelmiştir. Arakesit, 1-1 kesiti ile daralma bölgesi arasında yataya yakın bir gidiş izlemiş, kanalın geri kalan kısmında 2-2 kesitine doğru ise artan bir eğimle uzanmıştır. Tabakalar arası karışımın ara tabaka kalınlığının büyük olduğu 1-1 kesiti bölgesi ve daralma ile 2-2 kesiti arasındaki bölgede daha güçlü olduğu görülmektedir.



Şekil 4.89 4. model alternatifi için 68,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.90 4. model alternatifi için 69,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

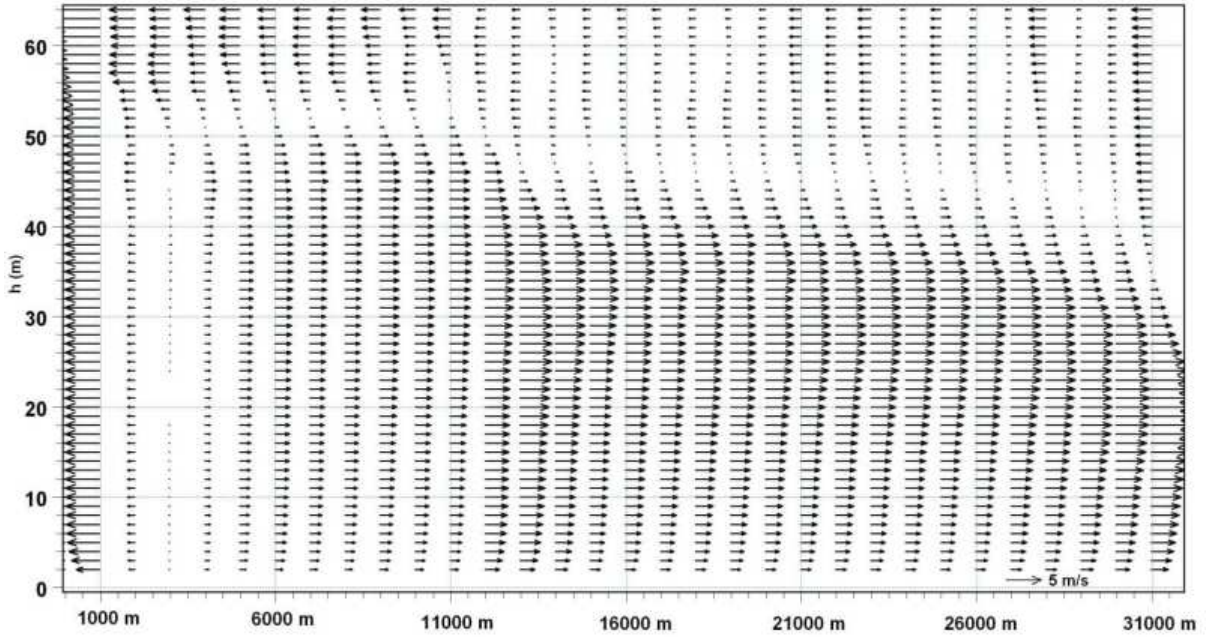
Sırasıyla Şekil 4.91 ve 92'de 4. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki kanal boykesit hız dağılımı görülmektedir. Kanalın büyük bir bölümünde tabakalı akım yapısına uygun bir hız dağılımı elde edilmiş, 1-1 kesitine yakın bölgede sadece üst tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Daralma bölgesinde üst tabaka kalınlığı ani olarak azalmış, alt tabaka kalınlığı artmıştır.

1-1 ve 2-2 kesitlerinde her iki zaman adımında G 'nin aldığı değerler sırasıyla 2.6 ve 1.1 olarak belirlenmiştir. Her iki sınır kesitindeki derinlik boyunca hız dağılımlarının incelenmesinden, akımın 1-1 kesitinde homojen akım (tamamen üst tabaka akımı doğrultusunda), kanalın geriye kalan kısmında ise tabakalı akım davranışı gösterdiği görülmüştür. Model 1-1 kesitinde tabakalı akım yapısını gerçekçi benzeştirememiştir. Bu nedenle 1-1 kesitinden itibaren 4,000 m'lik mesafe boyunca ($x=0-4,000$ m) G değerleri dikkate alınmamıştır.

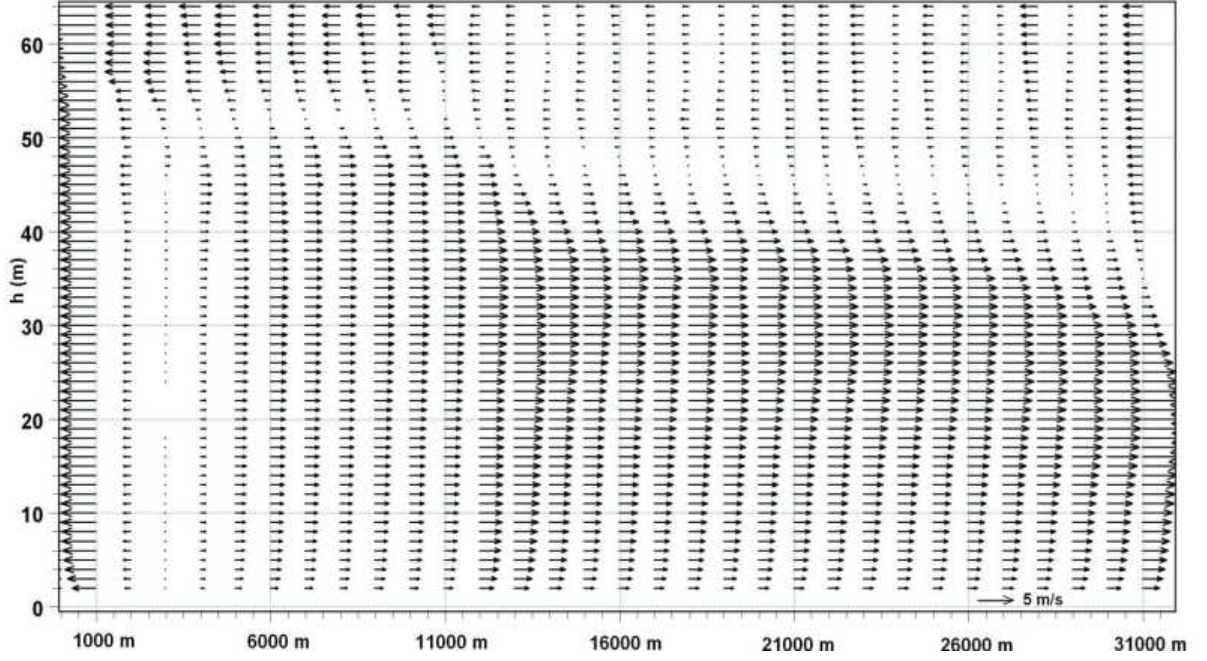
4. alternatif için $t=68,000$. s model sonuçlarından G 'nin $x=4,000$ m, kanal ortası ($x=16,000$ m) ve $x=32,000$ m kesitlerinde sırasıyla 0.6, 0.26 ve 0.3 değerlerini aldığı belirlenmiştir. Kesit daralmasının söz konusu olduğu $x=12,000-13,000$ m arasında ise bu değer 0.41'dir.

$t=69,000$. s'de G $x=4,000$ m, kanal ortası ve $x=32,000$ m kesitlerinde sırasıyla 0.6, 0.27 ve 0.32 değerlerini almıştır. Daralan kesitte ise bu değer 0.39 civarındadır.

Her iki zaman adımındaki G değerlerinin birlikte değerlendirilmesinden akımın $x=4,000-32,000$ m arasında nehir rejiminde, 1-1 kesitinde ise sel rejiminde aktığı görülmektedir.

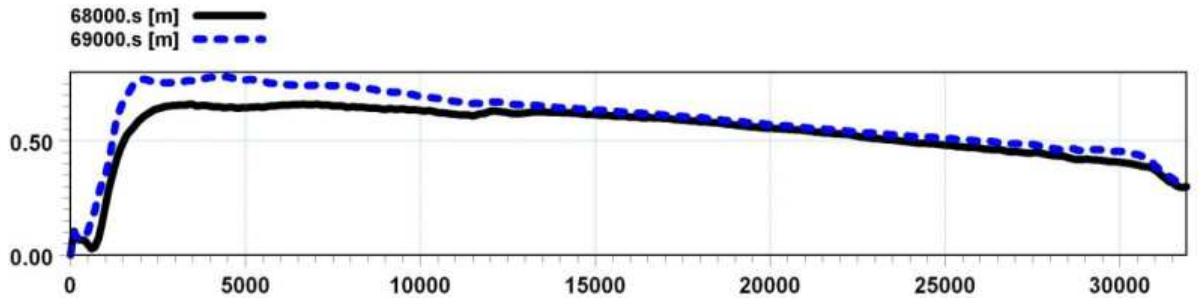


Şekil 4.91 4. model alternatifi için 68,000.s'deki boykesit hız dağılımı



Şekil 4.92 4. model alternatifi için 69,000.s'deki boykesit hız dağılımı

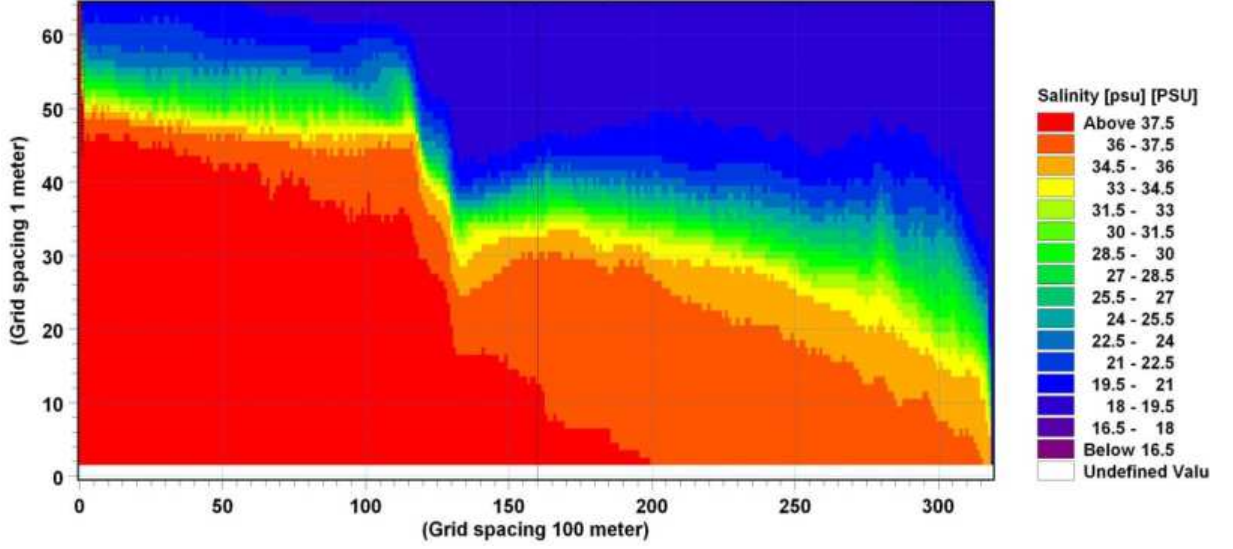
Şekil 4.93'de 4. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki su yüzü profilleri görülmektedir. Daralma bölgesine kadar su yüzü profilleri üst üste çakışmaktadır. Ancak daralma bölgesi ile 1-1 kesiti arasında su yüzü profilleri zamanla değişim göstermiştir. Bu durum modelin su yüzü değişimi için kararlı hale ulaşmadığını göstermektedir. Her iki zaman adımında da su yüzü 1-1 kesitine doğru önce kabarmış, akımın rejim değiştirmesine bağlı olarak (nehir rejiminden sel rejimine) ani bir düşüş göstermiştir. Bu durum G'nin aldığı değerlerle uyum içerisindedir. Ayrıca daralma bölgesi ile 1-1 kesiti arasında 68,000. s'de 0.65 m, 69,000.s'de ise 0.80 m civarında su seviyesi farkı oluşmuştur. Bu durum 1-1 kesitine yakın bölgede tamamen üst tabaka akımının hakim olduğunu gösteren hız dağılımı sonuçlarıyla (Şekil 4.91-92) uyum içerisindedir.



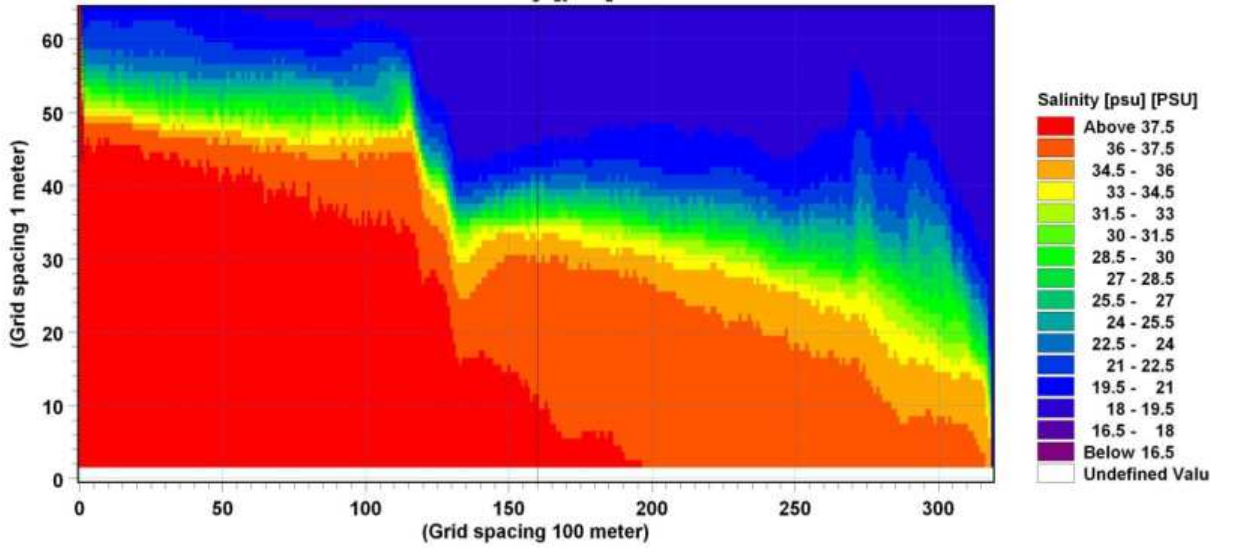
Şekil 4.93 4. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.94 ve 95'de 5. model alternatifi için 64,000. ve 65,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımları görülmektedir. Ara kesit 1-1 kesiti ile daralma bölgesi arasında yatay bir gidış izlenmiş, daralma bölgesinde eğiminde ani bir artış meydana gelmiş ve daralma

bölgesinin mansabı ile 2-2 kesiti arasında ise daha küçük bir eğimle uzanmıştır. Tuzluluk dağılımı sonuçlarından kanal boyunca tabakalar arasında karışımın çok güçlü olduğu görülmektedir. En güçlü karışımın tabaka kalınlığının en büyük değerini aldığı 2-2 kesitine yakın bölgede meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.94 5. model alternatifi için 64,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı



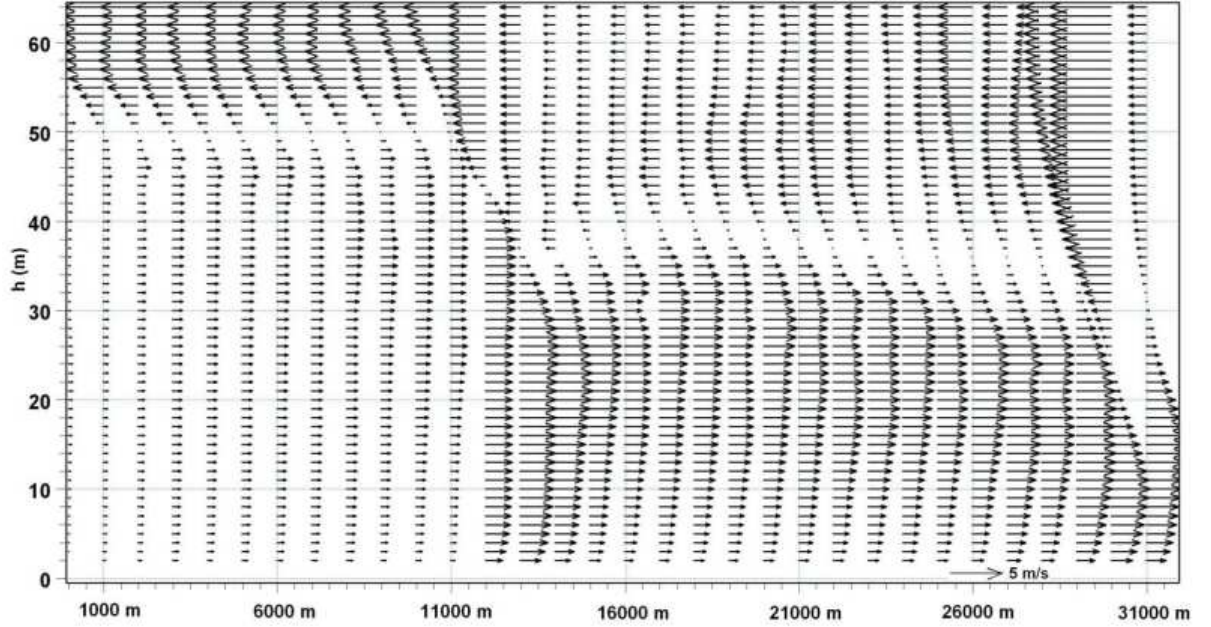
Şekil 4.95 5. model alternatifi için 65,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.96 ve 97'de 5. model alternatifi için 64,000. ve 65,000. s'deki kanal boykesit hız dağılımları görülmektedir. Şekillerden kanal boyunca tabaka kalınlıklarının ve ara kesitin konumunun oldukça değişken olduğu görülmektedir. Aynı zamanda daralma bölgesinde ara tabaka kalınlığı azalmış ve arakesit gibi davranmıştır. Bu bölgede tabakalara ait hız gradyanında büyük bir artış meydana geldiği görülmektedir.

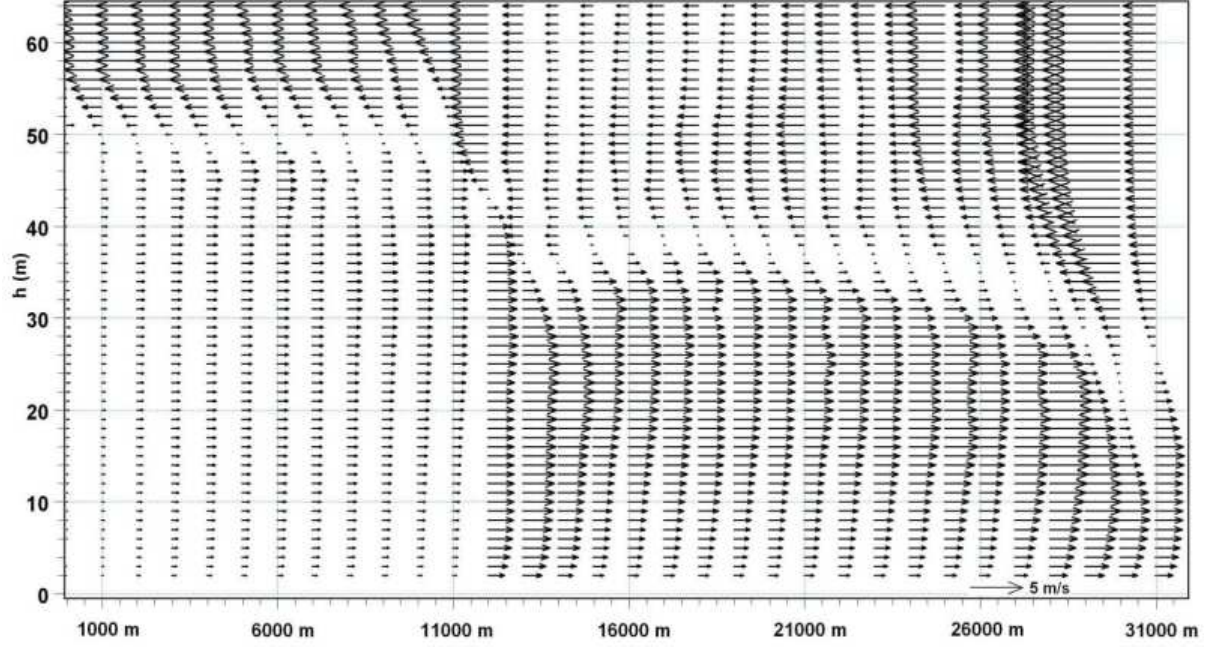
$t=64,000$. s için G sırasıyla 1-1, kanal ortası ($x=16,000$ m) ve 2-2 kesitlerinde 1.21, 0.19 ve 0.62 değerlerini almıştır. Daralan kesitte ($x=12,000-13,000$ m arası) ise bu değer 0.55 civarındadır.

$t=65,000$. s'de ise G sırasıyla 1-1, kanal ortası ve 2-2 kesitlerinde 1.06, 0.18 ve 0.65 olarak belirlenmiştir. Daralan kesitte ise bu değer 0.55 civarındadır.

Her iki zaman adımı için G'nin kanal boyunca değişiminden akımın 1-1 kesiti hariç nehir rejiminde olduğu görülmektedir. 1-1 kesiti kanal akımı için kontrol kesiti davranışı göstermiştir. Daralan kesite nehir rejiminde yaklaşan akımın enerjisi bu kesiti ($x=12,000-13,000$ m) geçmeye yeterli olduğundan su seviyesi kesit boyunca azalmış, hızı artmış buna karşılık akımın rejimi (nehir) değişmemiştir (Şekil 4.98). Bu sonuç literatür çalışmalarıyla uyum göstermektedir.

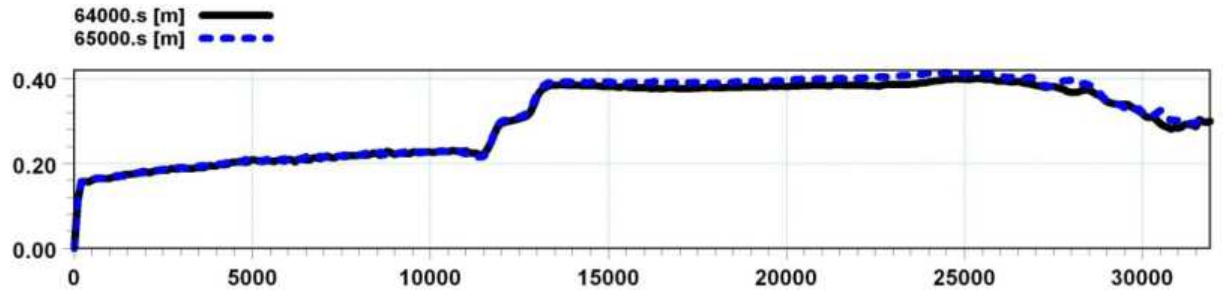


Şekil 4.96 5. model alternatifi için 64,000.s'deki boykesit hız dağılımı



Şekil 4.97 5. model alternatifi için 65,000.s'deki boykesit hız dağılımı

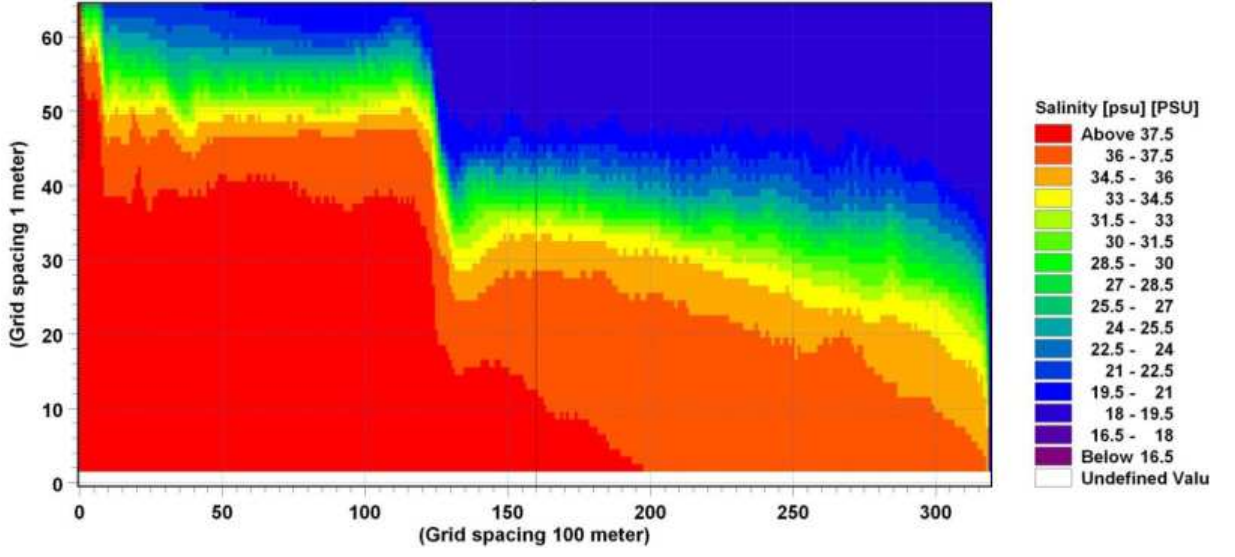
5.durum model için 64,000. ve 65,000. s'deki kanal su yüzü profilleri Şekil 4.98'de verilmiştir. Su yüzü 2-2 kesitine yakın bölgede kabarmış, daralma bölgesi boyunca büyük bir eğime sahip olacak şekilde alçalmış ve 1-1 kesitinde ani bir düşüş göstermiştir. Her iki zaman adımındaki su yüzü profilleri çakışmaktadır.



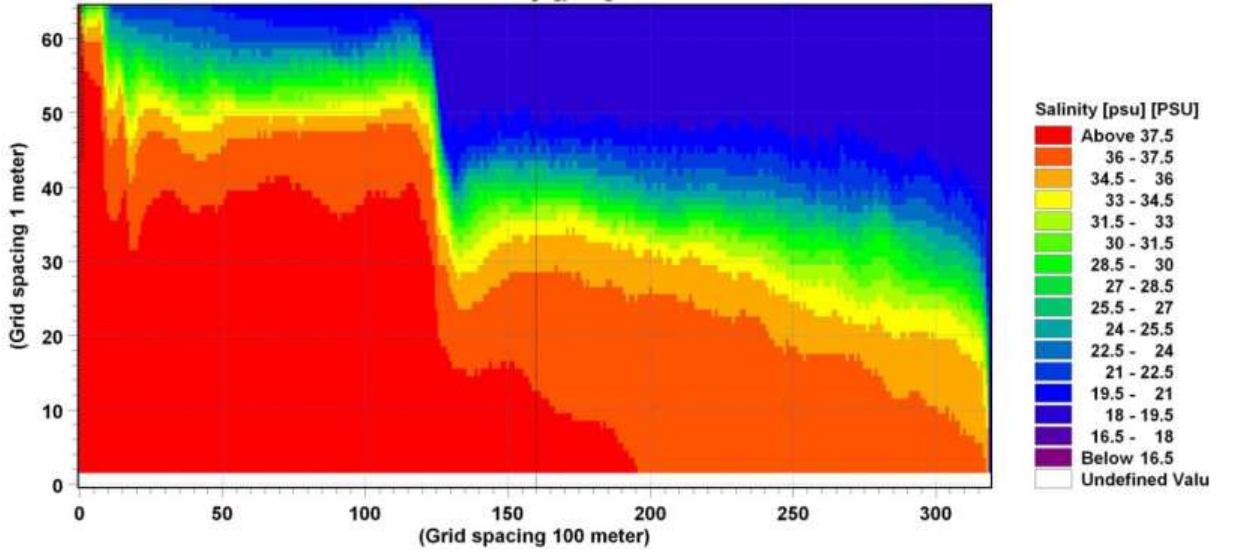
Şekil 4.98 5. model alternatifi için 64,000. ve 65,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.99 ve 100'de 6. model alternatifi için 74,000. ve 75,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımları görülmektedir. Her iki şekilden tabakalar arasında kanal boyunca çok güçlü bir karışımın olduğu görülmektedir. Ara tabaka 1-1 kesiti ile daralma bölgesi arasında yataya yakın, daralma bölgesi ile 2-2 kesiti arasında eğimli bir gidiş izlemiştir. 1,500 m'lik daralma bölgesinde ara tabakanın eğimi artmış, kalınlığı ise azalmıştır. Bu durum daralma bölgesi ile 2-2 kesiti arasındaki bölgede güçlü bir karışımın meydana gelmesiyle sonuçlanmıştır. 1-1 kesitinde ara tabaka eğiminde daralma bölgesindeki benzer bir artış meydana gelmiş ve bu bölgede tabakalara ait akım özelliklerinin çok hızlı değişim gösterdiği

bir arakesitle birbirlerinden ayrılmışlardır. Şekillerden boykesit tuzluluk dağılımının zamanla değişim gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.99 6. model alternatifi için 74,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

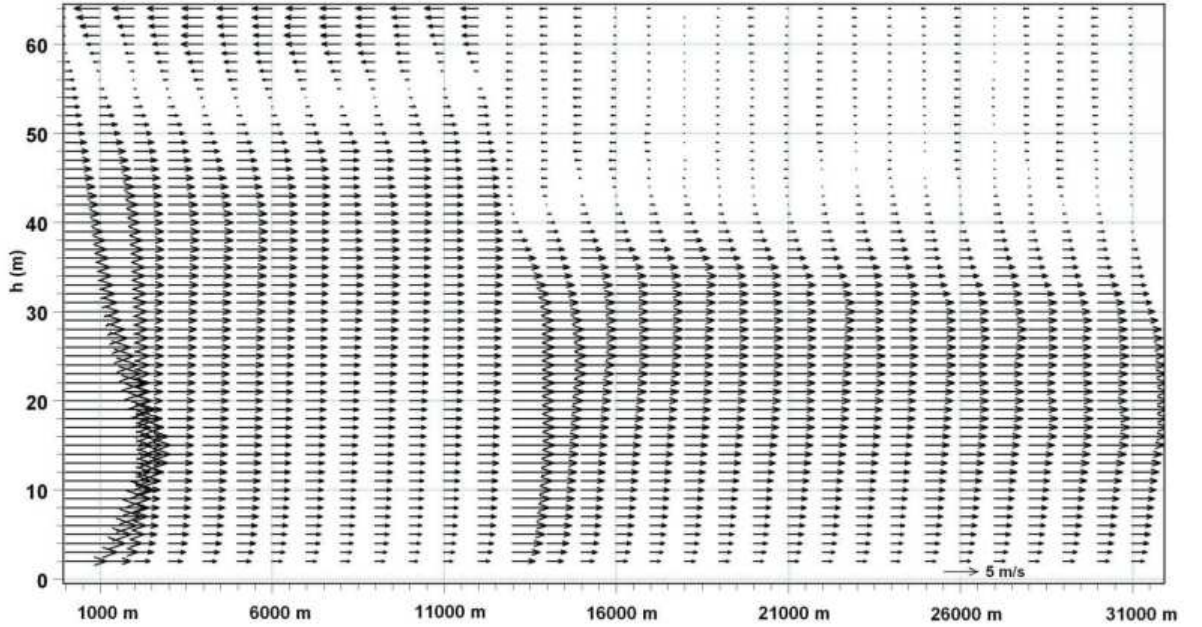


Şekil 4.100 6. model alternatifi için 75,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

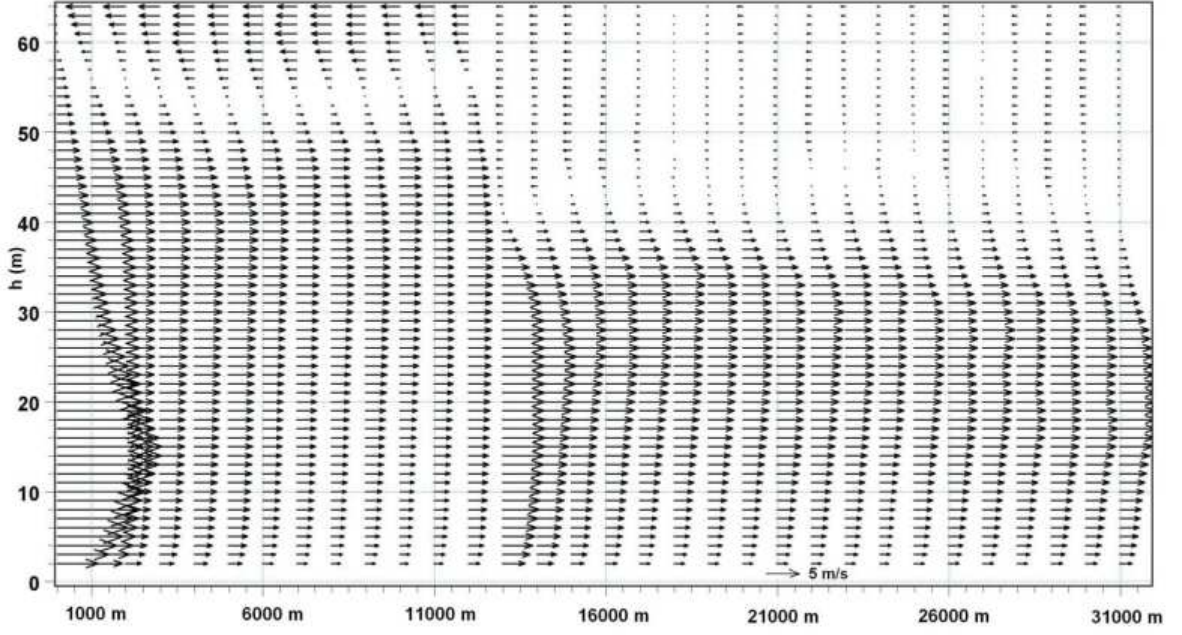
Sırasıyla Şekil 4.101 ve 102'de 6. model alternatifi için 74,000. ve 75,000. s'deki boykesit hız dağılımı görülmektedir. Kanal boyunca alt tabaka akımının daha etkin olduğu görülmektedir. Alt tabaka hızı 1-1 kesiti, daralma bölgesi ve 2-2 kesitlerinde derinlik boyunca oldukça değişken bir dağılım göstermiş ve en büyük değerlere bu bölgelerde ulaşmıştır. Üst tabaka akımı hızı 2-2 kesiti ile daralma bölgesi arasında çok küçük değerler almış, daralma bölgesi ile 1-1 kesiti arasında ise azalan tabaka kalınlığına bağlı olarak artış göstermiştir. Hız dağılımı sonuçları tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum göstermektedir. Hız dağılımının zamanla değişim göstermediği görülmüştür.

$t=74.000$. s'deki model sonuçlarından 1-1, kanal ortası ($x=16,000$ m) ve 2-2 kesitlerinde G sırasıyla 1.84, 0.23, 0.56 değerlerini almaktadır. G, kanal genişliğinin 700 m'ye düştüğü $x=12,000-12,500$ m arasında 0.38, $x=13,000-13,500$ m arasında ise 0.44'dir. Genişliğin 500 m'ye düştüğü $x=12,500-13,000$ m arasında ise bu değer 0.58'dir. Genişliğin 500 m'ye düştüğü kanal kesitindeki ($x=12,000-12,500$ m arası) akım hızı artmış (Şekil 4.101-102), su seviyesi ise azalmıştır (Şekil 4.103). Kanal boyunca nehir rejiminde akan akım 1-1 kesitinden önce rejim değiştirmiş ve sel rejimine geçmiştir.

$t=75,000$. s'deki model sonuçlarından 1-1, kanal ortası ve 2-2 kesitlerinde G sırasıyla 2.13, 0.23 ve 0.93 değerlerini almıştır. Daralan kesitte ise $t=74,000$. s'dekiler ile aynı sonuçları almıştır.

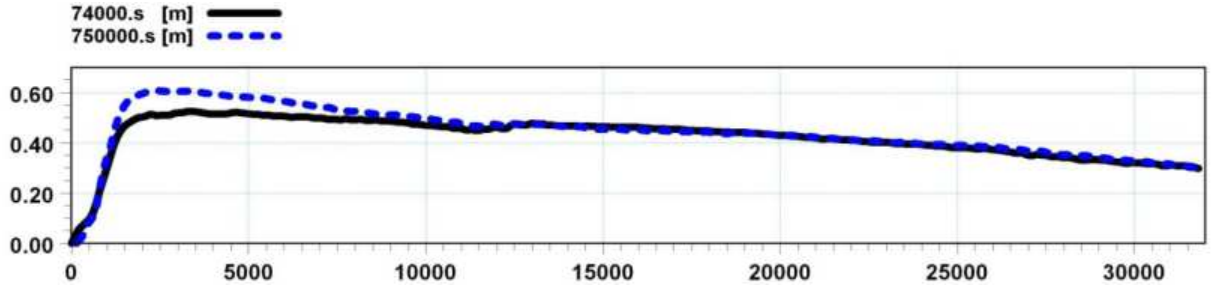


Şekil 4.101 6. model alternatifi için 74,000.s'deki boykesit hız dağılımı



Şekil 4.102 6. model alternatifi için 75,000.s'deki boykesit hız dağılımı

Şekil 4.103'de 6.durum model alternatifi için 74,000. ve 75,000.s'deki kanal su yüzü değişimi görülmektedir. Her iki zamandaki su yüzü profillerinin kanalın belli bir bölgesi (daralma bölgesi ile 1-1 kesiti arasındaki 8,000 m'lik uzunluk) hariç çakıştığı görülmektedir. Bu durum 75,000. s'de tabakalar arası momentum transferindeki artışa bağlı olarak tabaka kalınlığının artması (Şekil 4.99) ve bunun da bir önceki zaman adımına göre su seviyesi farkını artırmasıyla açıklanabilmektedir.



Şekil 4.103 6. model alternatifi için 74,000. ve 75,000. s'deki su yüzü profilleri

Her ne kadar modellere ait hesap şeması stabilitesi bozulmuş ve modeller tanımlanan simülasyon zamanlarını tamamlayamamışsa da her üç modele ait sonuçların bir arada değerlendirilmesinden, kanal kesitinde meydana gelen daralma miktarının ve daralan kesit geometrisinin model stabilitesi ve tabakalı akım karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

4.3.1.4 Sınır ve Başlangıç Koşullarının Etkisi (4. Durum)

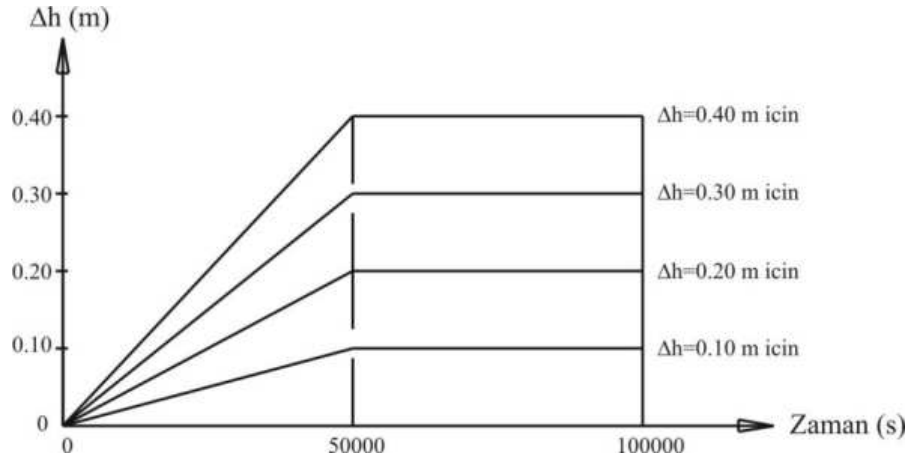
Değişik su seviyesi farkları (Δh) ve değişimleri ile tuzluluk sınır ve başlangıç koşullarının basit dikdörtgen bir kanaldaki akım yapısı, model stabilitesi ve sonuçları üzerinde yarattığı etkinin modellenmesi amacıyla sayısal parametreleri Çizelge 4.12’de görülen dört ayrı model alternatifi ($\Delta h=0.10, 0.20, 0.30$ ve 0.40 m için) denenmiştir. Modelleme için Şekil 4.13’de görülen basit dikdörtgen kanal geometrisi (1. Durum) kullanılmıştır

1-1 kesitinde dört ayrı model alternatifi için herhangi bir su seviyesi değişimi tanımlanmamıştır. 2-2 kesitinde ise su seviyesi değişimi Şekil 4.104’de görüldüğü gibi simülasyonun başlangıcından ($t=0$) 50,000.s’ye kadar zaman serisi olarak, geri kalan süre boyunca ise sabit değer olarak tanımlanmıştır.

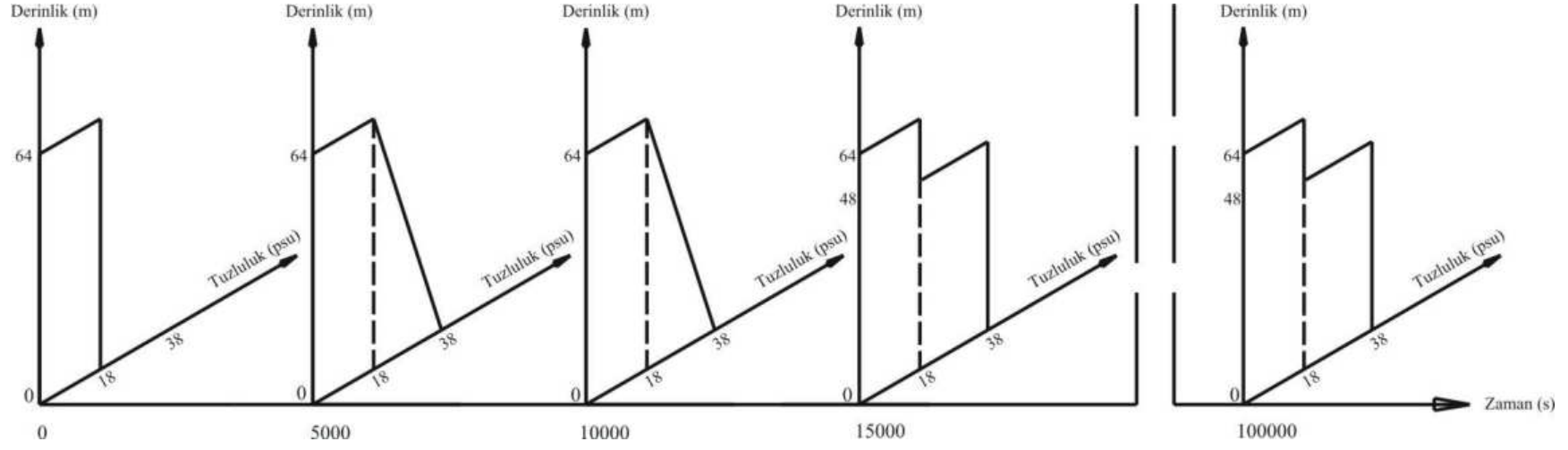
Çizelge 4.12’den de görüldüğü gibi tüm model alternatiflerinde tuzluluk sınır şartı zamanla değişen ağ serisi olarak dikkate alınmıştır. Şekil 4.105’den görüldüğü gibi 1-1 kesitinde tuzluluk sınır şartı herbiri 5000 s’den oluşan 20 zaman adımında derinlik boyunca değişimleri tanımlanmıştır. Herbir zaman adımının başlangıcında tanımlanan derinlik boyunca tuzluluk profilleri Şekil 4.105’de görülmektedir. 2-2 sınırında ise tuzluluk 50,000 s’lik iki zaman adımıyla tanımlanmıştır (Şekil 4.106). Böylece tabakalı akım yapısının sayısal modele uygun olan sınır koşulları oluşturulmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.12 Basit Dikdörtgen kanal kullanılarak oluşturulan model alternatiflerine ait sayısal parametreler ve değerleri

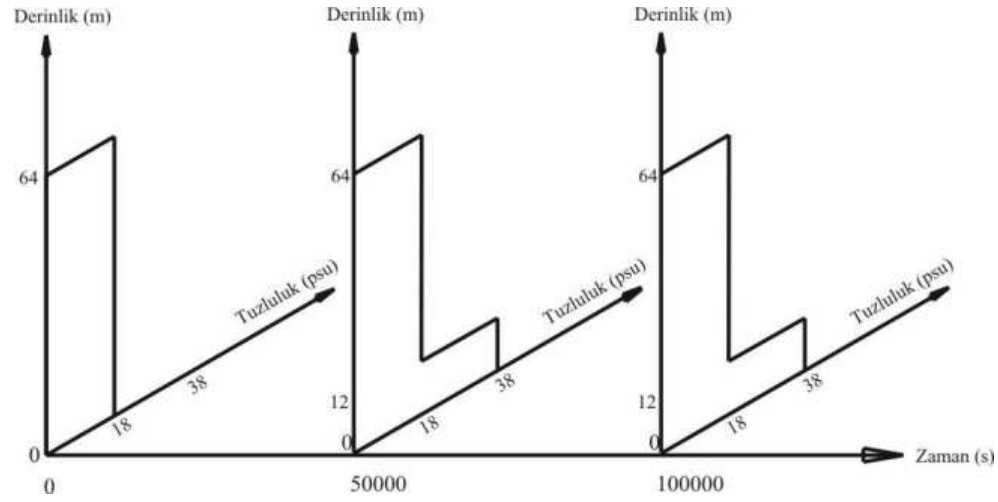
Model Alternatifleri			1. Alternatif	2. Alternatif	3. Alternatif	4. Alternatif	Açıklama
Ağ aralığı ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) (m)			100×100×1	100×100×1	100×100×1	100×100×1	
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)			1.0	1.0	1.0	1.0	
Courant Sayısı (C_r)	Yatay ($Cr_{x,y}$)		0.2507	0.2507	0.2507	0.2507	
	Düşey (Cr_z)		25.07	25.07	0.2507	0.2507	
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	18-38	18-38	18-38	18-38	Derinlik ve zamanla değişen ağ serisi
		2-2	18-38	18-38	18-38	18-38	
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0	0	0	0	zaman serisi
		2-2	0-0.10	0-0.20	0-0.30	0-0.40	
Pürüzlülük (ks) (m)			0.30	0.30	0.30	0.30	sabit
Eddy Viskozitesi Limitleri	x		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	
	y		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	
	z		$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			18	18	18	18	sabit
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0	0	0	sabit
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000	100,000	100,000	
Başarı ile çalıştığı süre (s)			37,121	99,058	69,805	67,787	



Şekil 4.104 2-2 kesiti su seviyesi sınır şartı

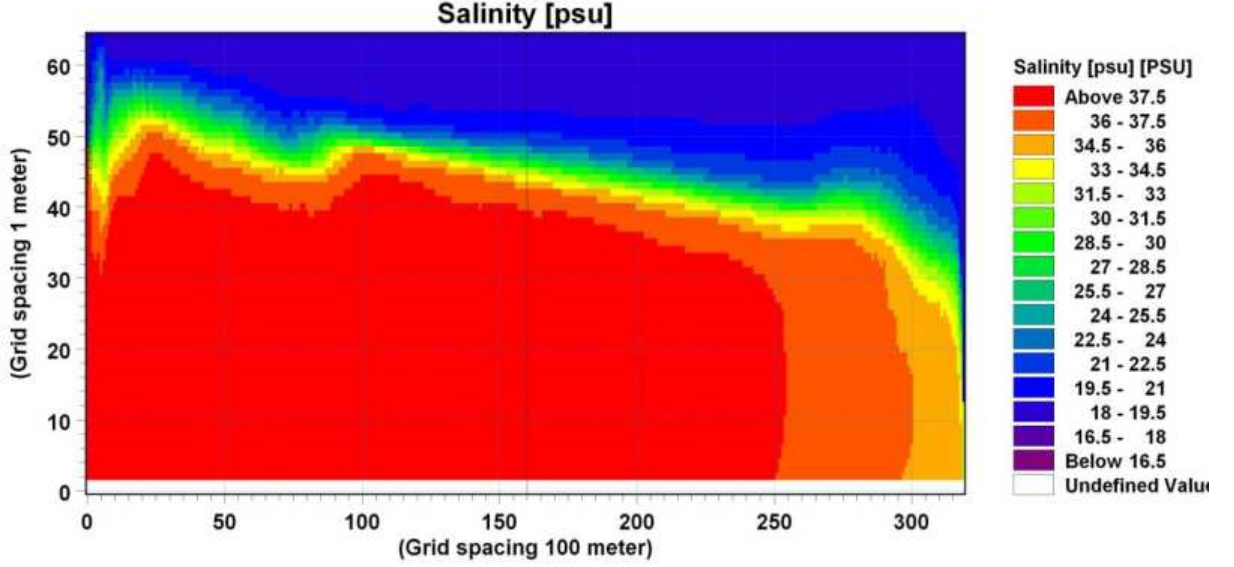


Şekil 4.105 1-1 kesiti tuzluluk sınır şartı

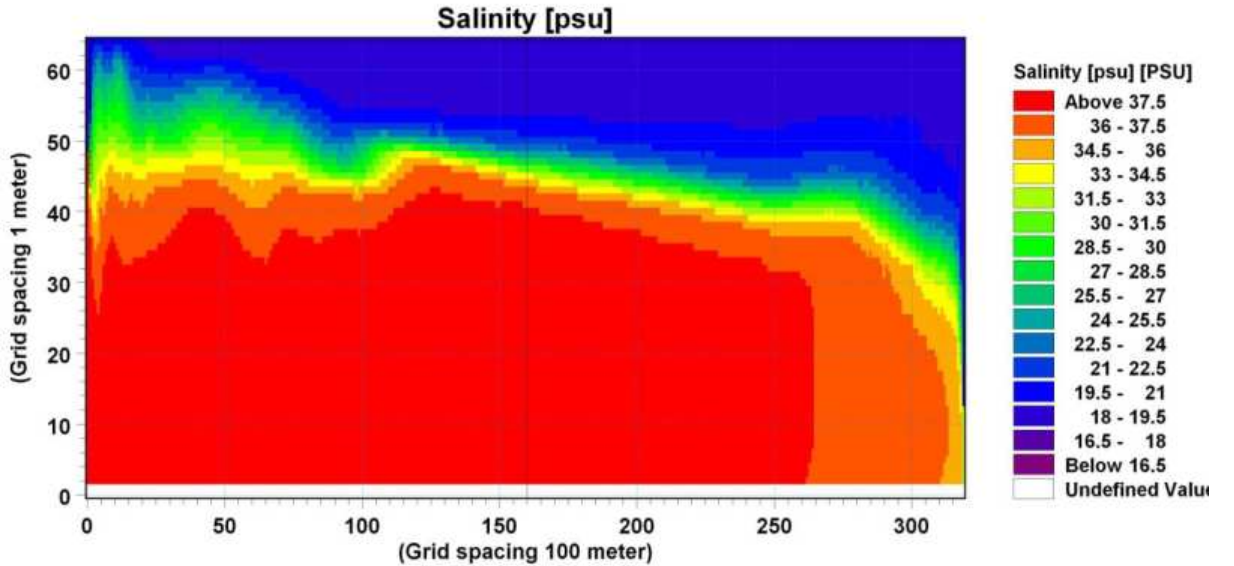


Şekil 4.106 2-2 kesiti tuzluluk sınır şartı

Sırasıyla Şekil 4.107 ve 108’de 1. model alternatifi 35,000. ve 36,000.s’deki boykesit tuzluluk değişimi görülmektedir. Kanal boyunca tabakalı akım yapısı gelişmiş ve 1-1 ile 2-2 sınırlarına yakın bölgede arakesitin eğimi artmıştır. Ara tabaka kalınlığı en büyük değerine 2-2 kesitine yakın bölgede ulaşmıştır. Ara tabaka kalınlığı zamanla değişim göstermektedir ve model tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaşamamıştır.

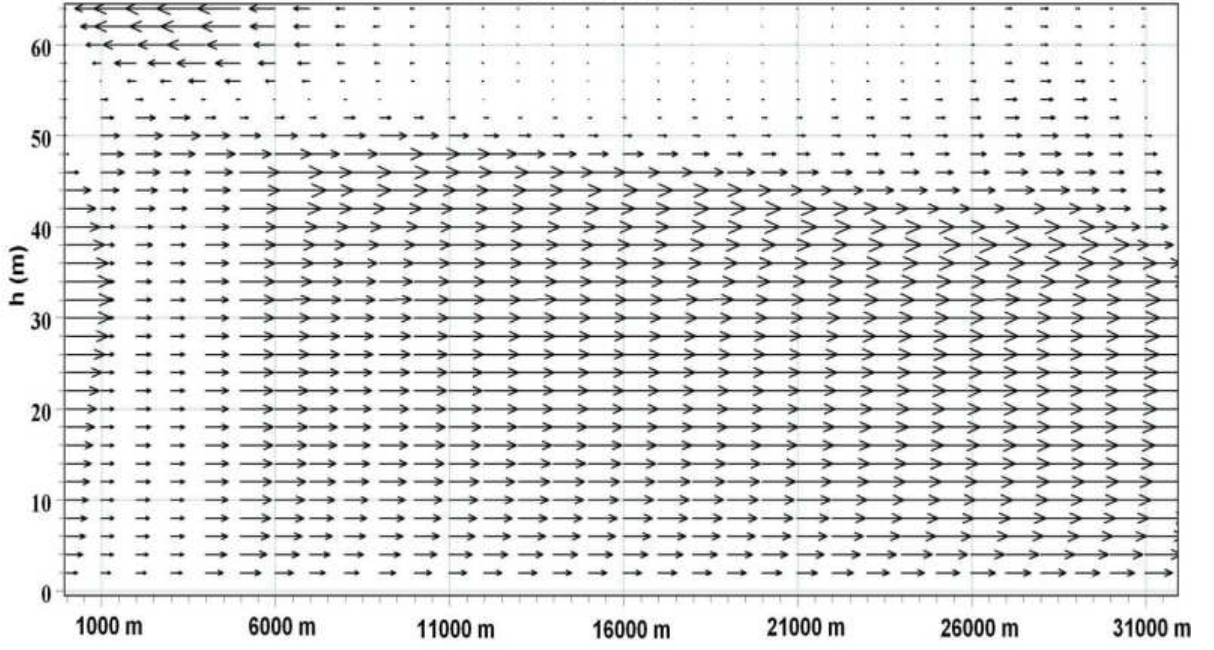


Şekil 4.107 1. model alternatifi için 35,000. s’deki boykesit tuzluluk dağılımı

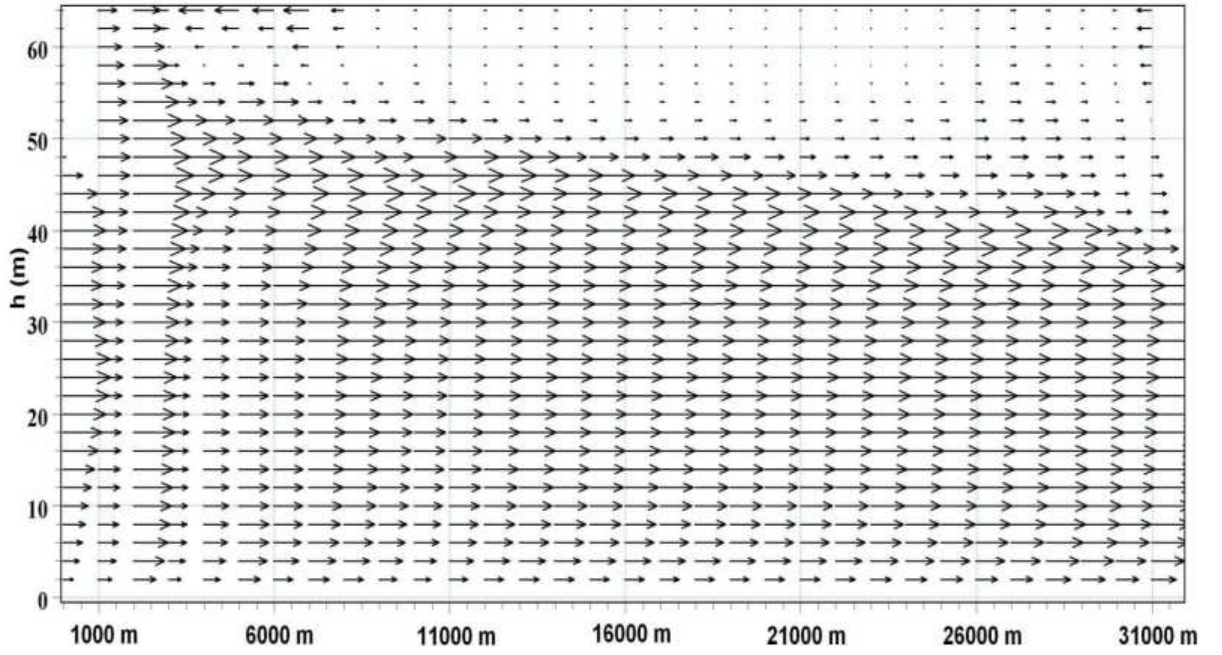


Şekil 4.108 1. model alternatifi için 36,000. s’deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.109 ve 110’da 1. model alternatifi için 35,000. ve 36,000. s’deki boykesit boyunca hız dağılımı verilmiştir. Model boykesit hız dağılımı için kararlı hale ulaşamamış ve akım alanında neredeyse tamamen alt tabaka akımı hakim olmuştur.

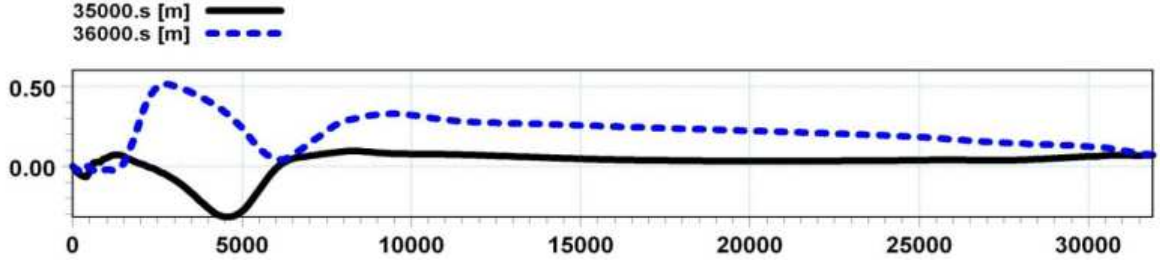


Şekil 4.109 1. model alternatifi için 35,000.s'deki boykesit hız dağılımı



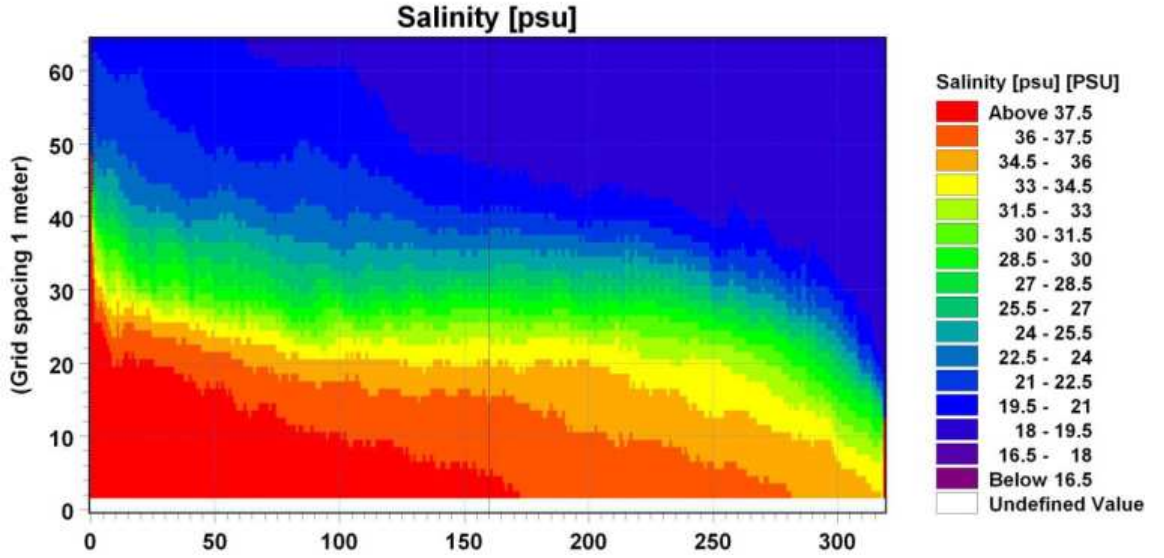
Şekil 4.110 1. model alternatifi için 36,000.s'deki boykesit hız dağılımı

Şekil 4.111'de ise 35,000. ve 36,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilinin değişimi bir arada görülmektedir. Her iki zaman adımı için su yüzü profillerinin çakışmadıkları, modelin su yüzü değişimi için kararlı hale ulaşamadığı görülmüştür.

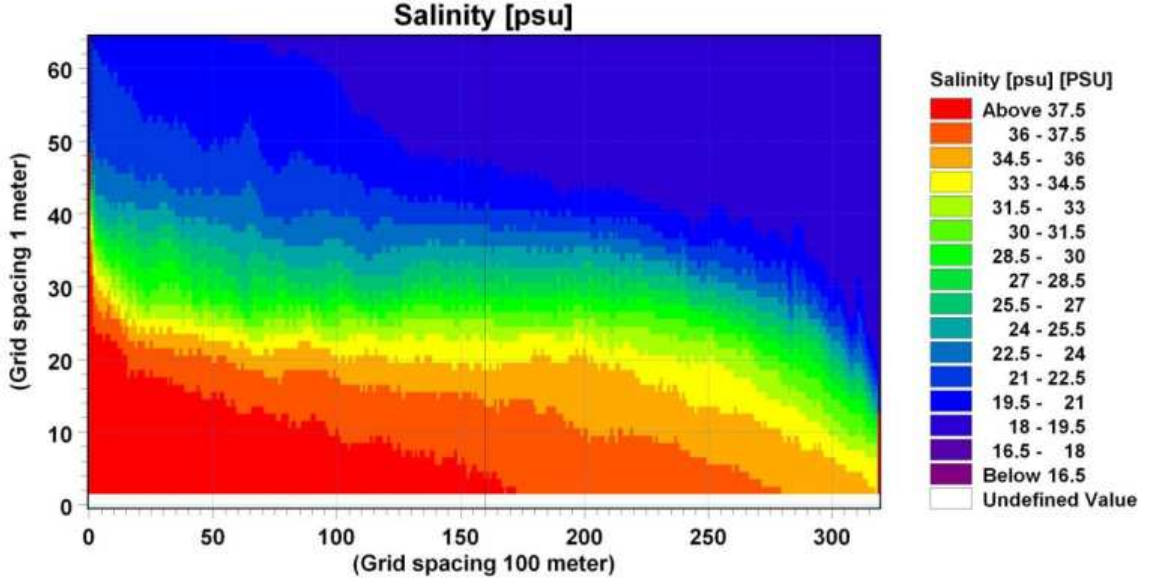


Şekil 4.111 1. model alternatifi için 35,000. ve 36,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla 4.112 ve 113'de 2. model alternatifi için 97,000. ve 98,000. s'lerdeki boykesit boyunca tuzluluk dağılımı görülmektedir. Tabakalar arası karışımın çok güçlü olduğu ve ara tabakanın akım alanının çok büyük bir bölümünü kapsadığı görülmektedir. Tabakalara ait tuzluluk değerleri zamanla önemli bir değişim göstermemiş, model tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır.

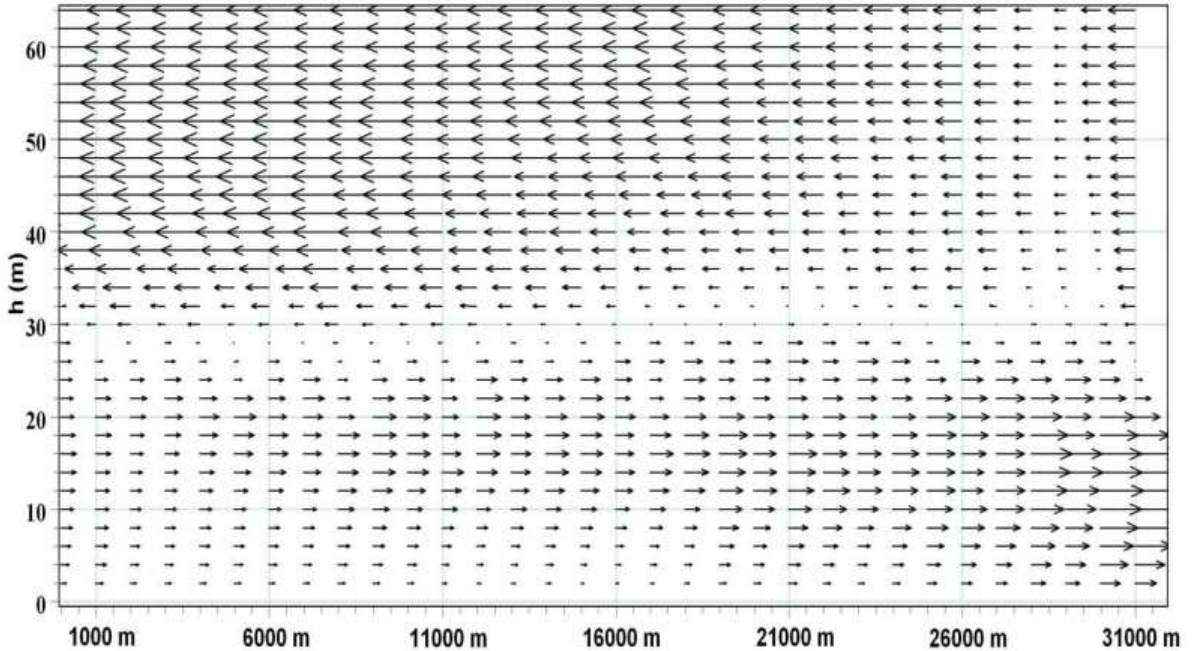


Şekil 4.112 2. model alternatifi için 97,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

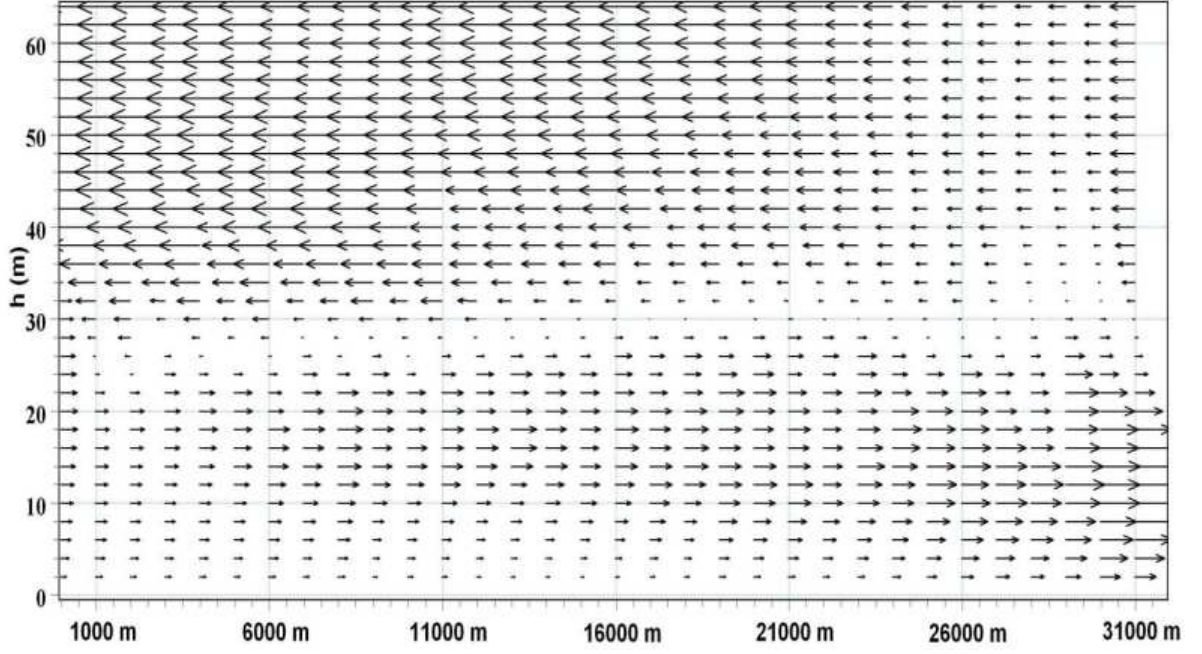


Şekil 4.113 2. model alternatifi için 98,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.114 ve 115'de 2. model alternatifi için 97,000. ve 98,000. s'deki boykesit boyunca hız dağılımı görülmektedir. Hız dağılımı sonuçlarından tabakalı akımın kanal boyunca varlığını koruduğu ve zamanla önemli bir değişim göstermediği görülmüştür. Model hız dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır. Bu durum boykesit tuzluluk dağılımıyla da uyum içerisinde.

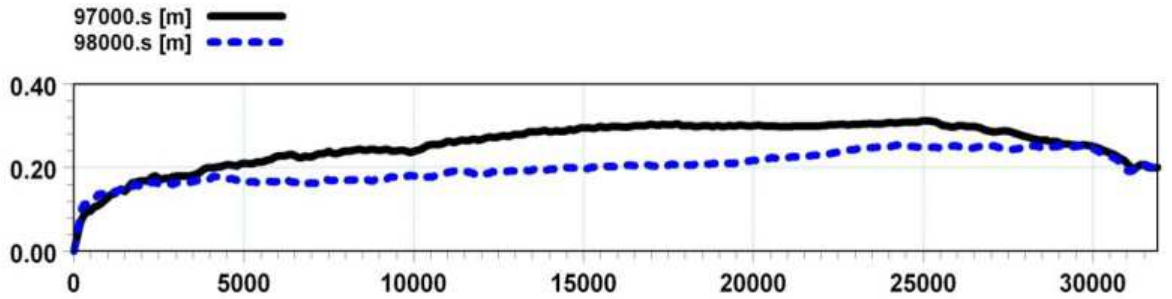


Şekil 4.114 2. model alternatifi için 97,000.s'deki boykesit hız dağılımı



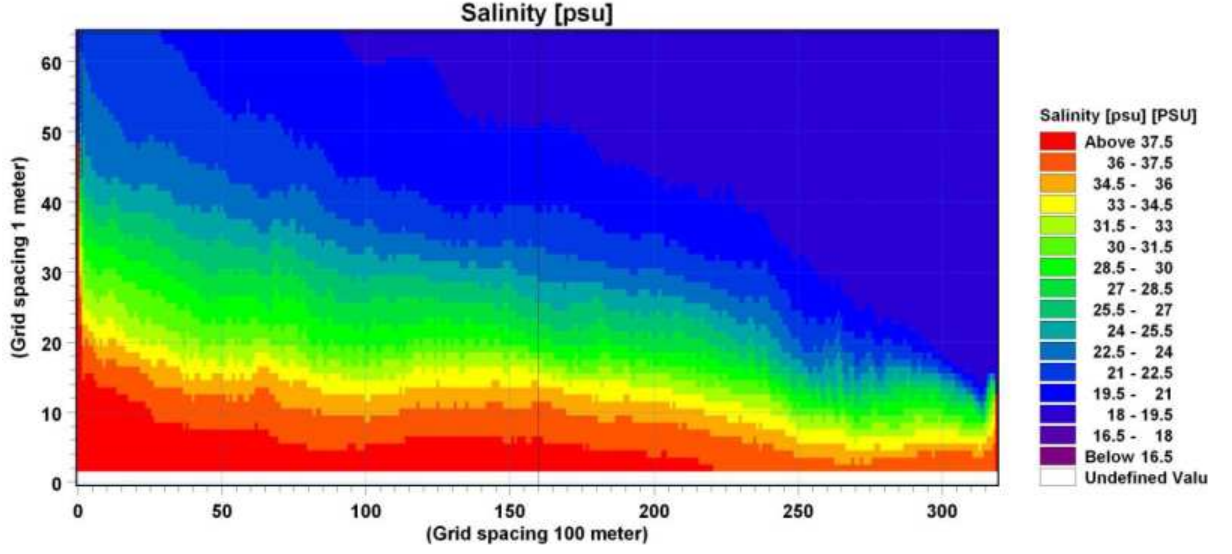
Şekil 4.115 2. model alternatifi için 98,000.s'deki boykesit hız dağılımı

Şekil 4.116'de 2. model alternatif için 97,000. ve 98,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri bir arada görülmektedir. Su yüzü 2-2 kesitinden başlayarak önce kabarmış kanal boyunca küçük eğimle uzanmış ve 1-1 kesitine yakın bölgede eğimi aniden artmıştır. Model su yüzü değişimi için kararlı hale ulaşamamıştır.

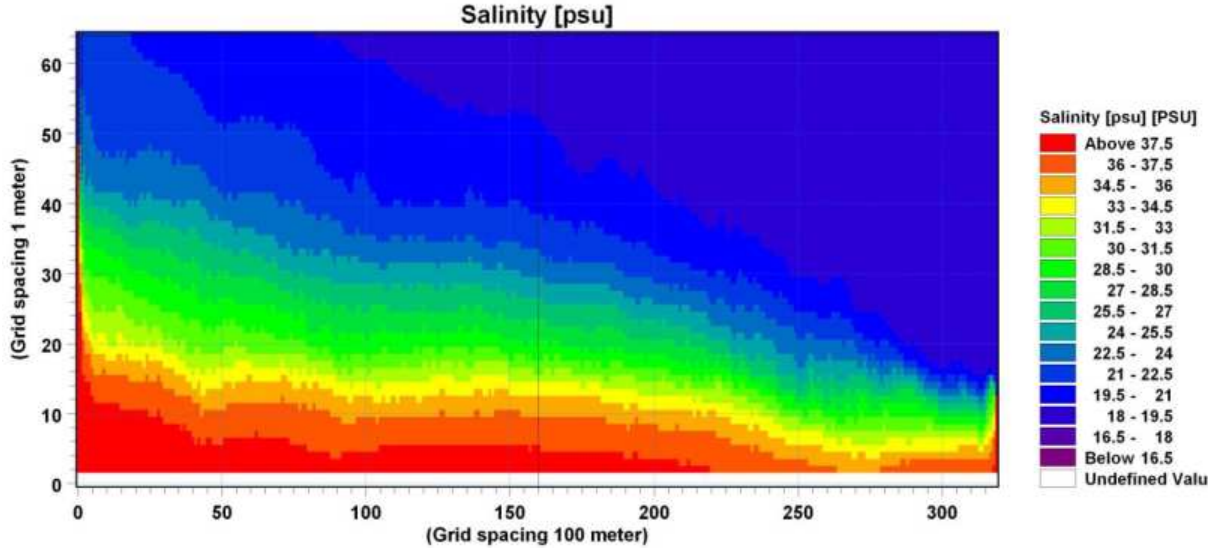


Şekil 4.116 2. model alternatifi için 97,000. ve 98,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.117 ve 118'de 3. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki boykesit boyunca tuzluluk dağılımı görülmektedir. Ara tabaka kalınlığı 2-2 kesitinden başlayarak artmış, 1-1 kesitine doğru bütün akım alanını kaplamıştır. Bu durum tabakalar arasında çok güçlü bir karışım olduğunu göstermektedir. Ara tabaka 2-2 kesitine doğru eğimli olacak şekilde uzanmıştır.

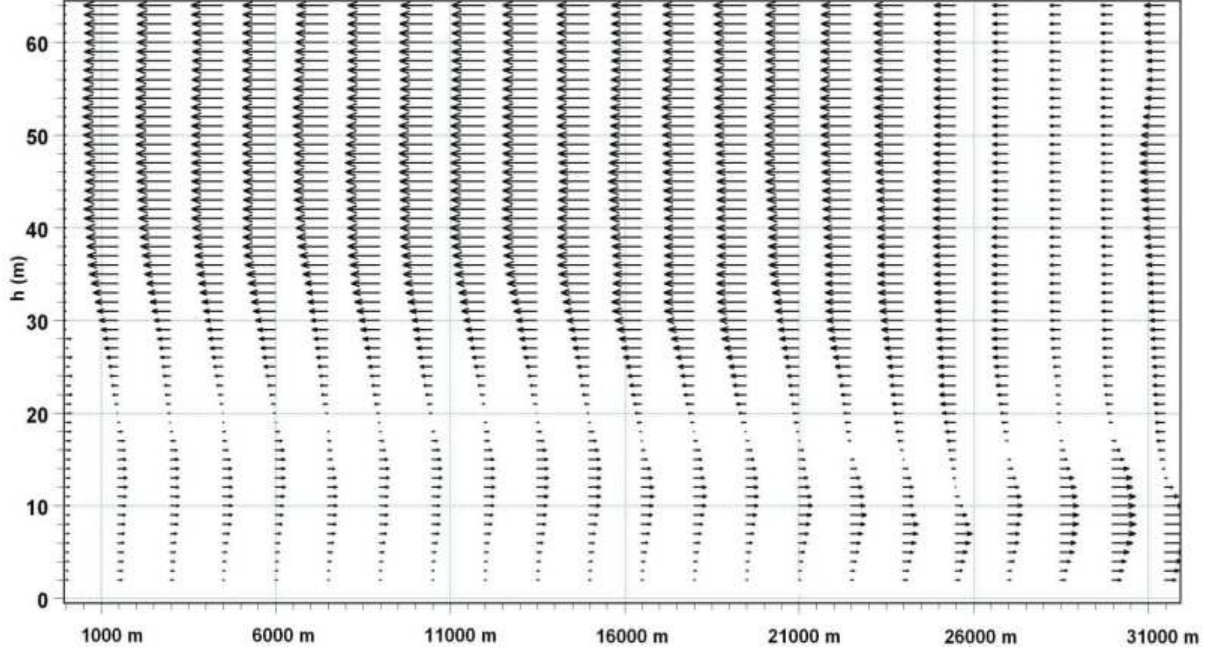


Şekil 4.117 3. model alternatifi için 68,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

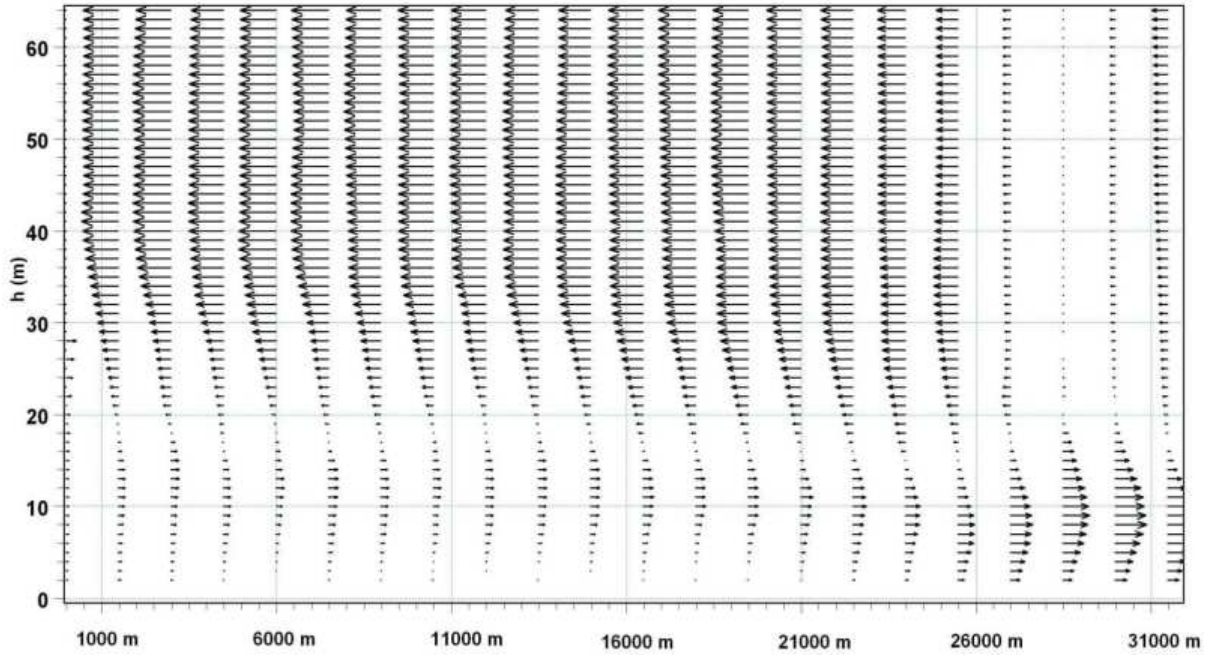


Şekil 4.118 3. model alternatifi için 69,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Şekil 4.119 ve 120'de sırasıyla 3. model alternatifinin 68,000. ve 69,000. s'lerdeki boykesit boyunca hız dağılımı verilmiştir. Hız dağılımı sonuçlarından akım alanında üst tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Hız dağılımı sonuçları özellikle 2-2 kesitine yakın bölgede zamanla değişim göstermektedir. Bu sonuçtan modelin hız dağılımı için kararlı hale ulaşmadığını belirlenmiştir.

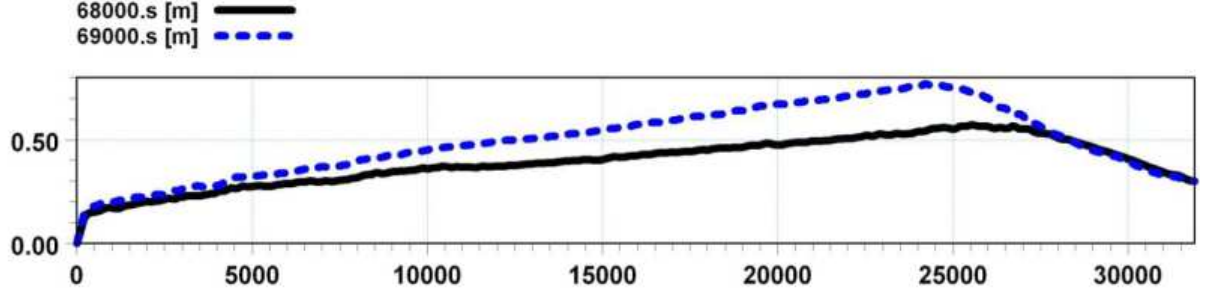


Şekil 4.119 3. model alternatifi için 68,000.s'deki boykesit hız dağılımı



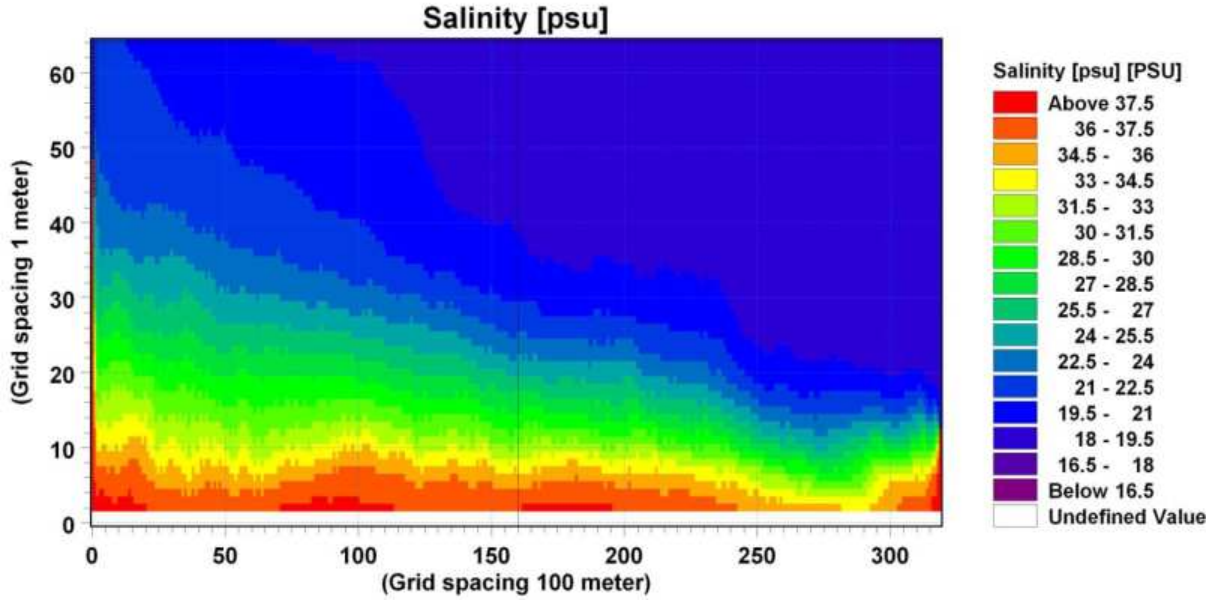
Şekil 4.120 3. model alternatifi için 69,000.s'deki boykesit hız dağılımı

Şekil 4.121'de ise 68,000. ve 69,000. s'lerdeki kanal su yüzü profilleri bir arada görülmektedir. Su yüzü her iki zaman adımında da 2-2 kesitinden başlayarak önce kabarmış, 1-1 kesitine kadar sabit eğimle ilerlemiş ve 1-1 kesitinde ise eğimi aniden artmıştır. Su yüzü profilleri zamanla değişim göstermiştir. Model su yüzü değişimi için kararlı hale ulaşamamıştır.

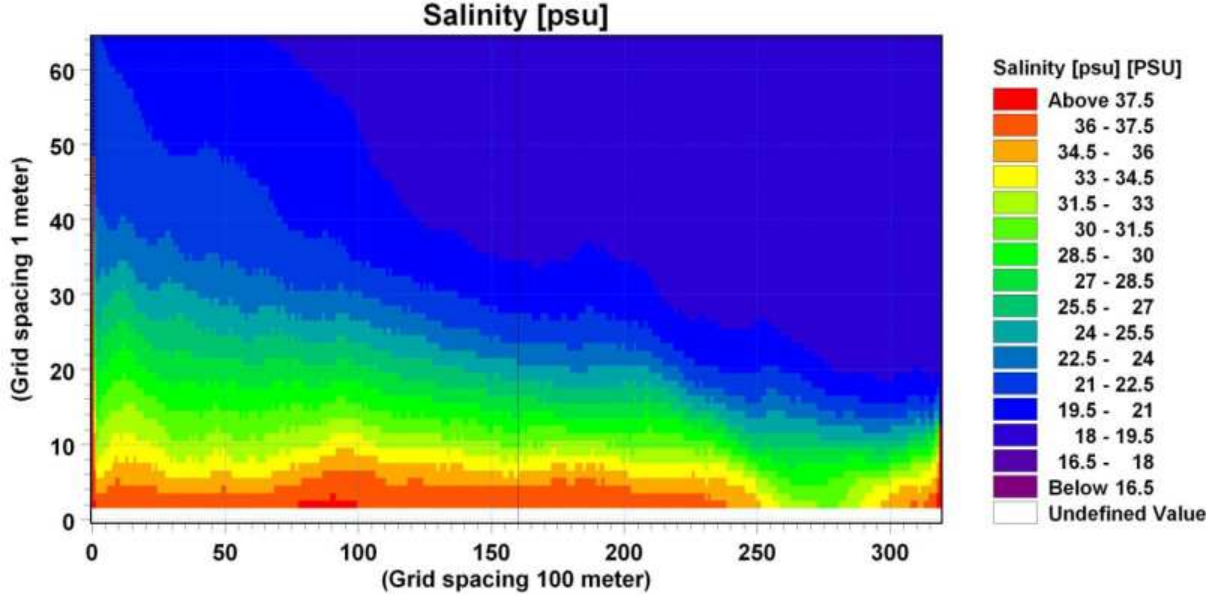


Şekil 4.121 3. model alternatifi için 68,000. ve 69,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.122 ve 123'de 4. model alternatifi için 66,000. ve 67,000. s'lerdeki kanal boyunca boykesit tuzluluk dağılımı görülmektedir. Ara tabaka kalınlığı 2-2 kesitinden başlayarak artmış, 1-1 kesitinde tüm akım derinliğini kaplamıştır. Kanal boyunca tuzluluk dağılımı zamanla değişmiş, model tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaşmamıştır.

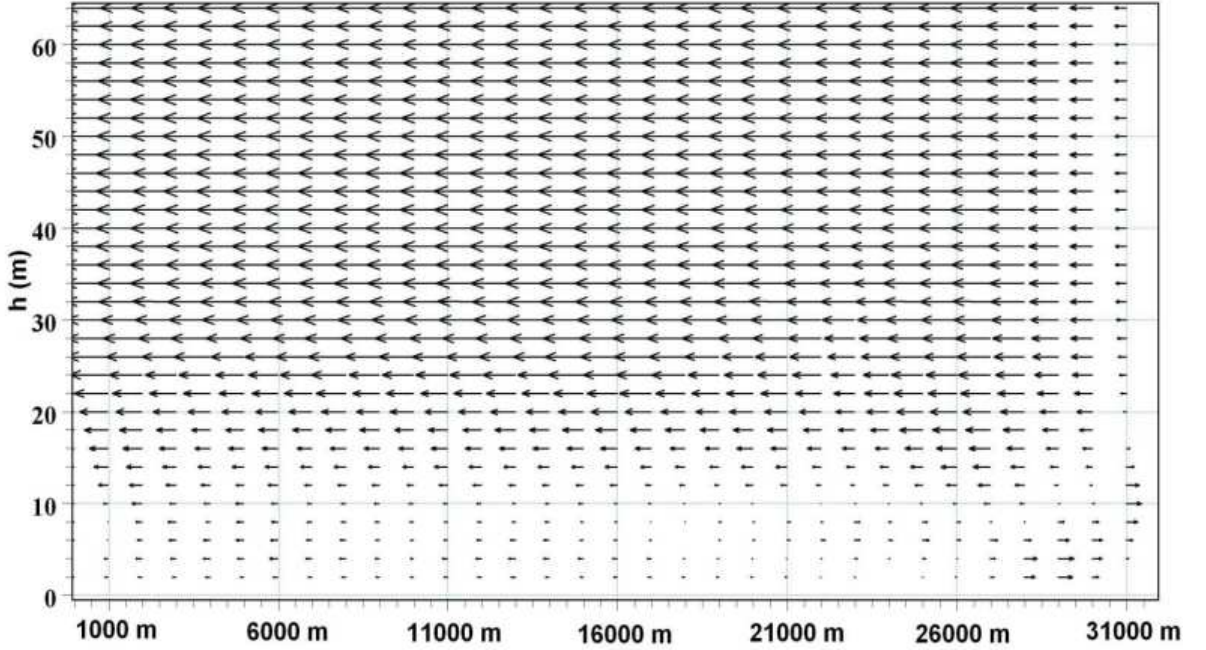


Şekil 4.122 4. model alternatifi için 66,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

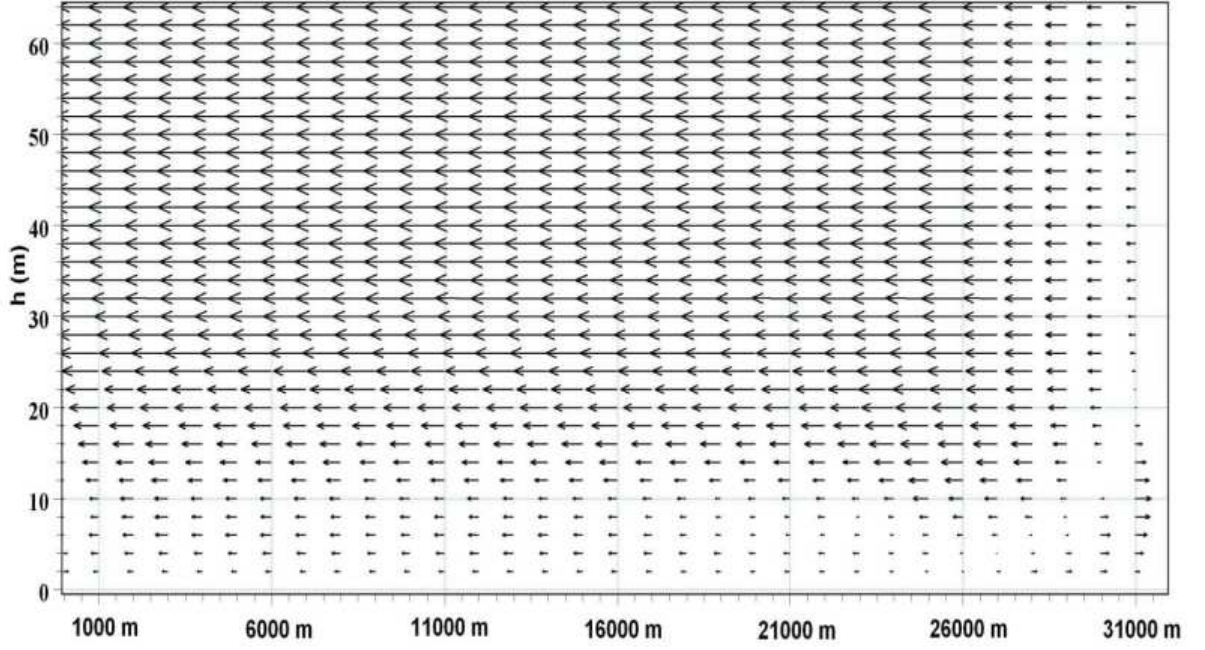


Şekil 4.123 4. model alternatifi için 67,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.124 ve 125'de 67,000. ve 68,000. s'lerdeki kanal boyunca boykesit hız dağılımı görülmektedir. Akım alanında tamamen üst tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Model hız dağılımı için kararlı hale ulaşamamıştır. Sonuçlar tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum içerisindedir.

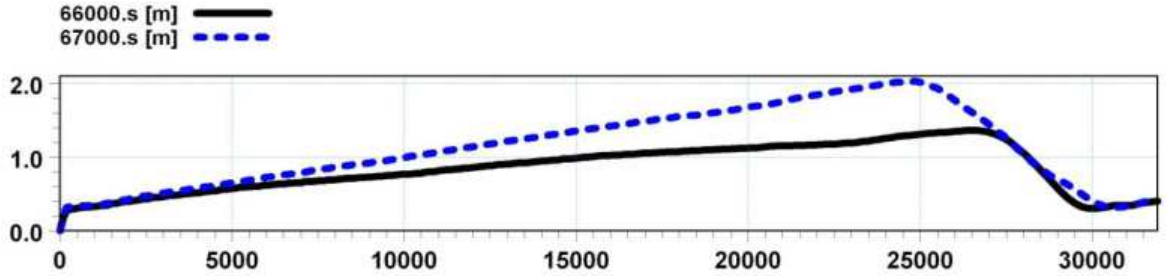


Şekil 4.124 4. model alternatifi için 66,000.s'deki boykesit hız dağılımı



Şekil 4.125 4. model alternatifi için 67,000.s'deki boykesit hız dağılımı

Şekil 4.126'da ise 4. model alternatifi için 66,000. ve 67,000.s'lerdeki kanal boyunca su yüzü profilinin değişimi görülmektedir. Su yüzünün zamanla değişim gösterdiği ve kararlı hale ulaşamadığı görülmüştür.



Şekil 4.126 4. model alternatifi için 66,000. ve 67,000. s'deki su yüzü profilleri

Dört model alternatifine ait sonuçların (boykesit tuzluluk, hız ve su yüzü değişimi) birlikte değerlendirilmesinden başlangıç ve sınır şartlarındaki değişimin model stabilitesi ve sonuçları üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip oldukları görülmüştür.

Bu bölümde ayrıca Çizelge 4.12'deki model alternatiflerine ait sonuçlar değerlendirilerek basit dikdörtgen bir kanaldaki tabakalı akım durumu için su seviyesi farkı (Δh) debi ilişkisi de belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla alt ve üst tabaka debileri, 2-2 kesitinde su seviyesi farkının (Δh) kararlı hale ulaştığı 50,000. s'de kanal ortasındaki ($x=16,000$ m) akım verileri değerlendirilerek belirlenmiştir. Ancak Çizelge 4.12'den de görüldüğü gibi su seviyesi farkının $\Delta h=0.10$ m tanımlandığı 1. alternatifte, su seviyesi farkı kararlı hale ulaşmadan hesap şeması stabilitesi bozulmasıyla sonuçlanmıştır. Bu durum için tabakalara ait debiler,

30,000. s'deki akım verileri kullanılarak belirlenmiştir. Söz konusu zaman adımı 2-2 ve 1-1 kesitleri arasında su seviyesi farkı $\Delta h=0.06$ m değerini almıştır.

Çizelge 4.13'de yapılandırılmış ağ yaklaşımının kullanıldığı üç boyutlu model alternatifleri (bu çalışma) için su seviyesi farklarına bağlı olarak tabakalara ait kesitsel ortalama hız, debi ve tabaka kalınlıkların değişimi görülmektedir

Çizelge 4.13 Yapılandırılmış ağ kullanılan üç boyutlu model alternatifleri için su seviyesi değişimine bağlı olarak tabakalara ait akım karakteristiklerinin değişimi*

Δh (m)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	h_1 (m)	h_2 (m)	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)
0.10	0.22	1.12	14	48	2772	48,038
0.20	0.99	0.78	20	41	17,766	28,856
0.30	1.56	0.42	27	35	37,908	13,230
0.40	1.67	0.31	30	29	45,090	7987

Şekil 4.127'de üç boyutlu yapılandırılmış ağ kullanılan model alternatiflerine ait (bu çalışma) Δh -Q sonuçları ile İstanbul Boğazı üzerine daha önce yapılmış bir boyutlu (1D) akım modeli (Sümer vd., 1981) sonuçları bir arada verilmiştir. Bir ve üç boyutlu modellere ait kanal geometrileri ve sınır şartları Çizelge 4.14'de verilmiştir.

Bir boyutlu akım modeli sonuçlarından $\Delta h \approx 11$ cm için üst tabaka akımının , $\Delta h \approx 46$ cm için ise alt tabaka akımının bloke olduğu görülmektedir.

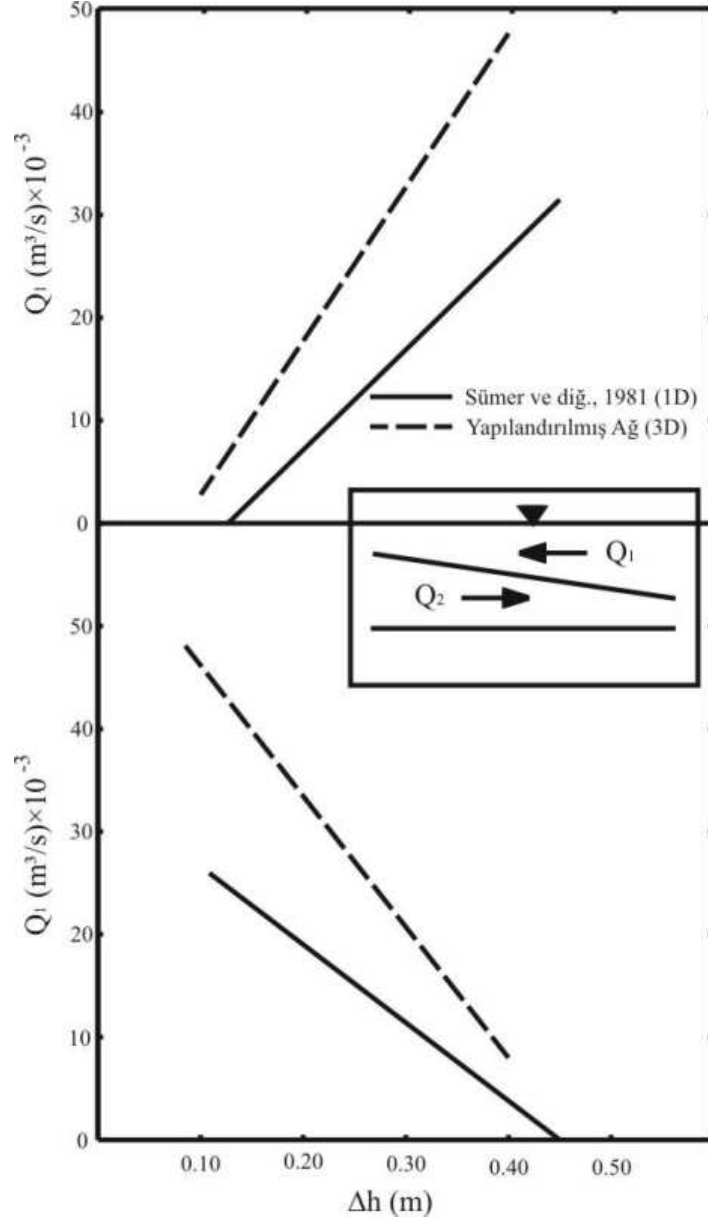
Yapılandırılmış ağların kullanıldığı üç boyutlu modellemeden Δh -Q eğrisi (Şekil 4.127) incelendiğinde üst tabaka akımının $\Delta h < 10$ cm, alt tabaka akımının ise $\Delta h = 40-45$ cm'de bloke olduğu görülmektedir. Şekil 4.127'den farklı model yaklaşımlarına ait sonuçların eğilimlerinin uyumlu oldukları görülmektedir. Ancak yapılandırılmış ağ yardımıyla gerçekleştirilen üç boyutlu sayısal modellemede şemaların stabilite problemleriyle karşılaşıldığı ve her ne kadar iki tabakalı akımın oluşmasına rağmen gerek su yüzü profillerinin gerekse akım yapısının yeterince gerçekçi akım alanını tam olarak benzeştirmedeği belirlenmiştir.

* (1) indisi üst tabaka, (2) indisi alt tabaka akım karakteristikliklerini göstermektedir.

Çizelge 4.14 Bir ve üç boyutlu modellerde kullanılan kanal geometrileri ve tanımlanan sınır şartları

Model		Bir Boyutlu (1D) (Sümer vd., 1981)	Üç boyutlu (3D) (Bu çalışma)	Açıklama
Kanal geometri (x-y-z) (m)		31,250×907×64.5	32,000×900×64	
Sınır Şartları	Yoğunluk Farkı** ($\Delta\rho/\rho$)	0.014	0.014	Marmara ve Karadeniz yoğunluk farkı 1D için sabit 0.014, 3D modelde üst tabaka akımının tuzluluğu 18, alt tabaka akımının ise 38 psu olarak tanımlanmıştır. Buna karşılık gelen yoğunluk farkı ise 0.014 değerini almaktadır.
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (cm)	11-46	10-40	1D modeller için 11-46 cm limit durumları arasında değişen su seviyesi farkına karşılık tabaka debileri hesaplanmıştır.

** ($\Delta\rho/\rho$) = $(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ ifadesiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.127 Yapılandırılmış ağ kullanan üç boyutlu model yaklaşımı ile bir boyutlu analitik model sonuçlarına göre Δh - Q ilişkisi

4.3.2 Yapılandırılmamış Ağ Sisteminde Dikdörtgen Kesit Hali

Bölüm 4.3.1’de yapılandırılmış ağ yaklaşımı ve non-hidrostatik basınç dağılımı kullanılarak dikdörtgen bir kanaldaki tabakalı akım üzerinde etkili olan model parametrelerine ait en uygun değerler belirlenmeye çalışılmıştır. Model parametrelerinin, kanal giriş geometrisindeki değişimin, kanal kesit değişiminin ve sınır ve başlangıç koşullarının etkisinin değerlendirilmesi amacıyla çok sayıda model alternatifi denenmiştir. Bu aşamada yapılandırılmış ağ sisteminin modelin uygunluğu üzerindeki etkisi de belirlenmiştir.

Bu bölümde ise yapılandırılmamış ağ yaklaşımı ve hidrostatik basınç dağılımı dikkate alınarak Şekil 4.12’deki 5. durum için yedi farklı model alternatifi oluşturulmuştur. İlk beş

model alternatifinde sınır ve başlangıç koşullarının model stabilitesi, sonuçları ve akım yapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son iki model alternatifinde (6. ve 7. alternatif) ise su seviyesi (Δh) değişim süresinin tabakalı akım yapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Önceki bölümde dikkate alınan ve uygunluğu test edilen model alternatifleri yapılandırılmamış ağ sisteminde tekrar çalışılmamıştır. Özellikle 1. durumda belirlenen hidrolik parametreler burada oluşturulan modellerde dikkate alınmıştır.

4.3.2.1 Başlangıç ve Sınır Koşullarının Etkisi (5. Durum)

Bölüm 4.3.1.4’de başlangıç ve sınır şartlarının dikdörtgen bir kanal akımı üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla yapılandırılmış ağ ve non-hidrostatik basınç dağılımı kullanılarak oluşturulan Çizelge 4.12’deki model alternatifleri stabil çözüme ulaşamamış ve hesap şemalarının bozulmasıyla sonuçlanmışlardır.

Çizelge 4.12’deki 4. durum model alternatifleri için kullanılan kanal geometrisi, başlangıç ve sınır şartları dikkate alınarak Çizelge 4.15’de görülen dört ayrı model alternatifi denenmiştir. Modellerde yapılandırılmamış ağ yaklaşımı ve hidrostatik basınç dağılımı dikkate alınmıştır.

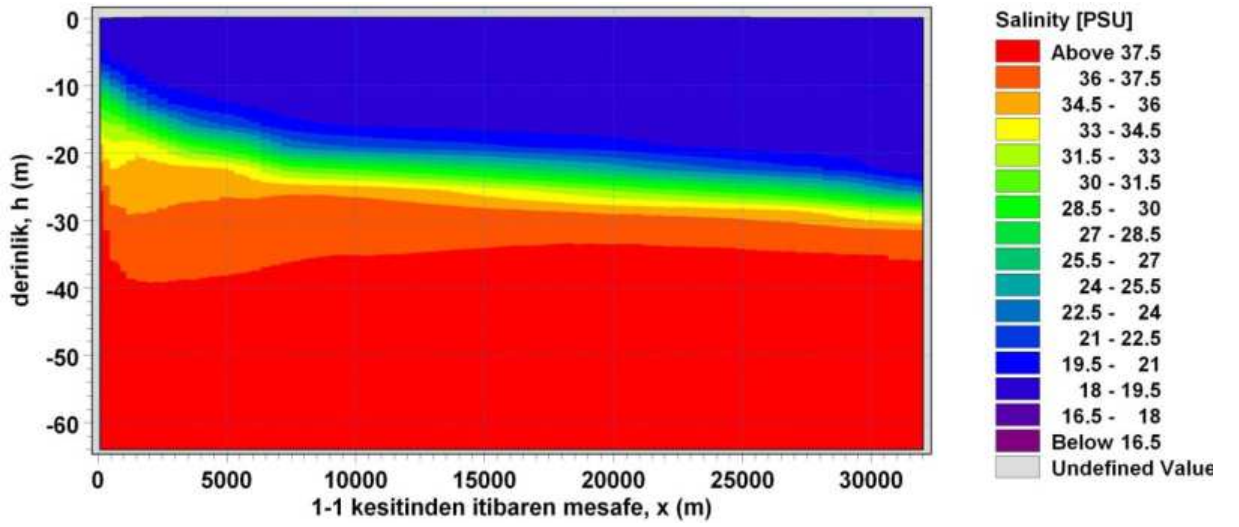
Çizelgeden de görüldüğü için bütün model parametreleri Çizelge 4.12 ile (4. durum model parametreleri) aynı değerleri almaktadır. Yapılandırılmamış ağ yaklaşımında farklı boyutlara sahip üçgen elemanlar kullanıldığı için ağ boyutlarında bir üniformluk söz konusu değildir ve ağ kanal geometrisine uyum sağlamaktadır. Bu nedenle Çizelgede ağ boyutları yerine bir tek zaman adımındaki hesap noktası sayısı belirtilmiştir.

Çizelge 4.15 1., 2., 3. ve 4. model alternatiflerine ait sayısal parametreler ve değerleri

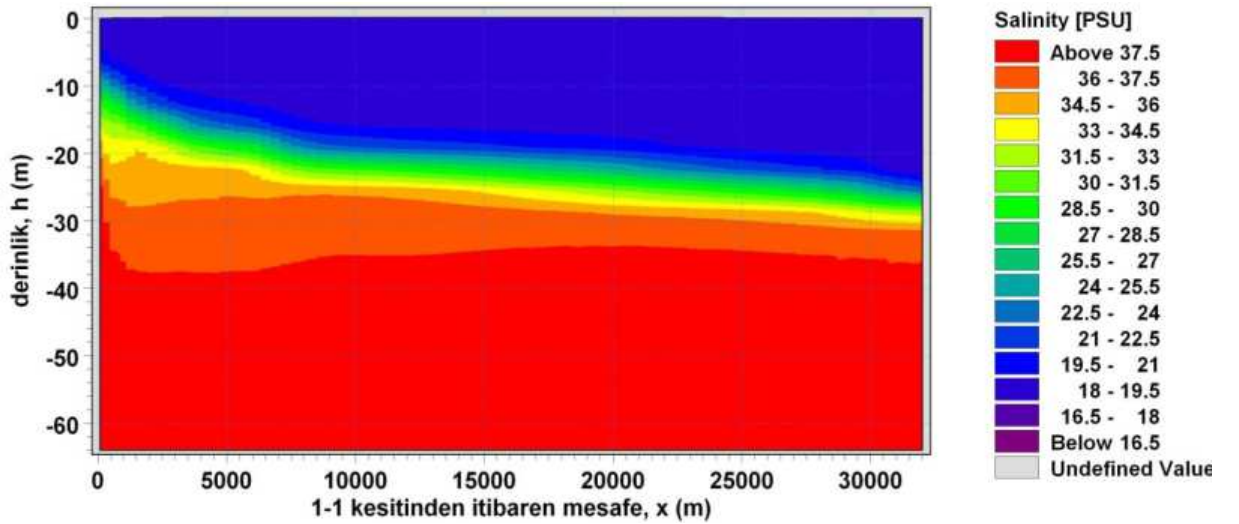
Model Alternatifleri			1. Alternatif	2. Alternatif	3. Alternatif	4. Alternatif	Açıklama
Batimetri ($x \times y \times z$) (m)			32,000×900×64	32,000×900×64	32,000×900×64	32,000×900×64	
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)			1.0	1.0	1.0	1.0	
Her bir zaman adımındaki hesap noktası sayısı			185,728	185,728	185,728	185,728	Yapılandırılmış ağda 201,600 hesap noktası kullanılmıştır
Courant Sayısı (C_r)			0.2507	0.2507	0.2507	0.2507	
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	1-1	18-38	18-38	18-38	18-38	Derinlik ve zamanla değişen zaman serisi
		2-2	18-38	18-38	18-38	18-38	
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	1-1	0	0	0	0	zaman serisi
		2-2	0-0.10	0-0.20	0-0.30	0-0.40	
Pürüzlülük (ks) (m)			0.30	0.30	0.30	0.30	sabit
Eddy Viskozitesi Limitleri	x		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	
	y		$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	
	z		$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)			18	18	18	18	sabit
Başlangıç Su Yüzü profili (m)			0	0	0	0	sabit
Simülasyon Zamanı (t) (s)			100,000	100,000	100,000	100,000	
Başarı ile çalıştığı süre (s)			100,000	100,000	100,000	100,000	

Çizelgeden de görüldüğü gibi yapılandırılmış ağ yaklaşımının kullanıldığı 4. durum model alternatiflerinin aksine yapılandırılmamış ağ yaklaşımı kullanılarak oluşturulan dört farklı model alternatifi de simülasyon sürelerini hesap şeması stabiliteyi bozulmadan tamamlamışlardır.

Sırasıyla Şekil 4.128 ve 129'da 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit boyunca tuzluluk dağılımları görülmektedir. Ara tabakanın kalınlığı ve tabakalar arası karışım 1-1 kesitine doğru artmıştır. Arakesit 1-1 sınırına yakın 7,500 m'lik kanal kesimi hariç yataya yakın bir gidiş izlemiştir. Her iki zaman adımında kanal boyunca tuzluluk dağılımı değişmemiş ve model tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır.

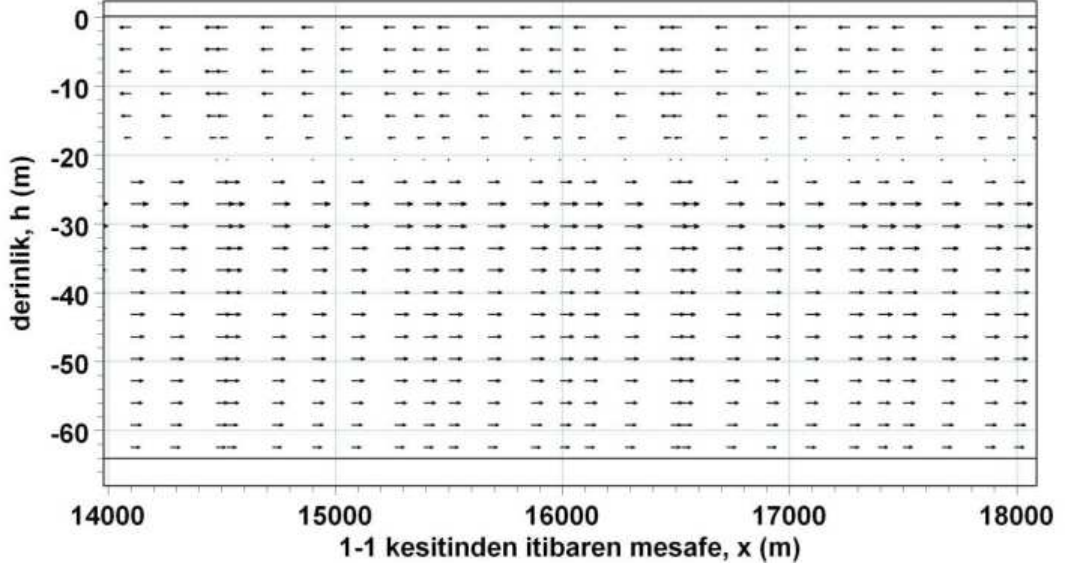


Şekil 4.128 1. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

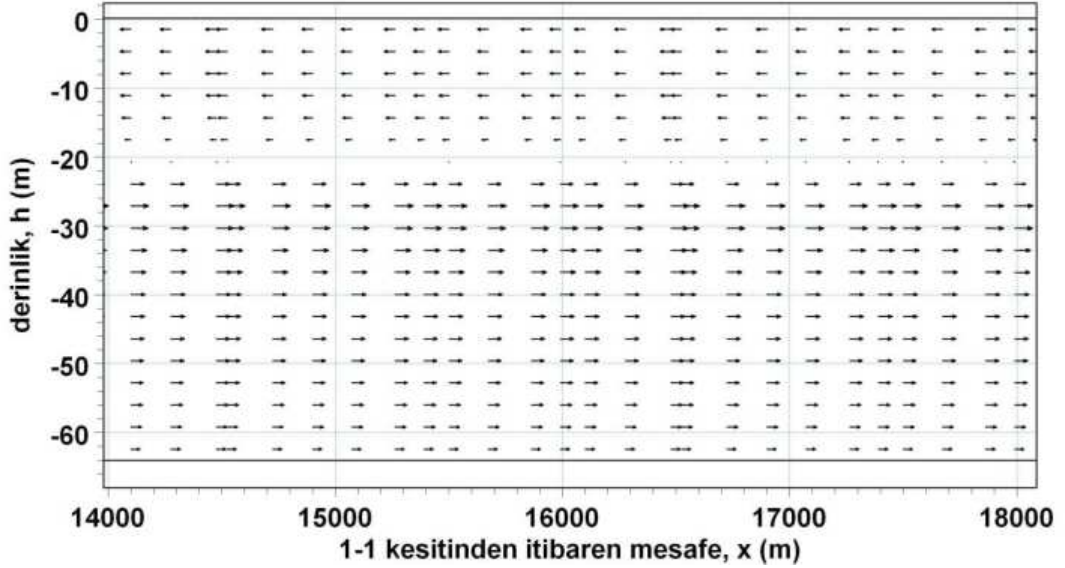


Şekil 4.129 1. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.130 ve 131’de 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s’lerdeki kanal ortası kesitteki ($x=14,000-18,000$ m arası) boykesit boyunca hız dağılımları görülmektedir. Şekillerden derinlik boyunca akım alanının büyük bir kısmında alt tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Alt tabakaya ait hız değerleri üst tabakadan daha büyüktür. 4000 m ($x=14,000-18,000$ m) uzunluğa sahip bu bölgede arakesitin yatay olduğu görülmektedir. Bu sonuç tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum içerisindedir. Hız dağılımı zamanla değişmemiş ve model hız dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır.

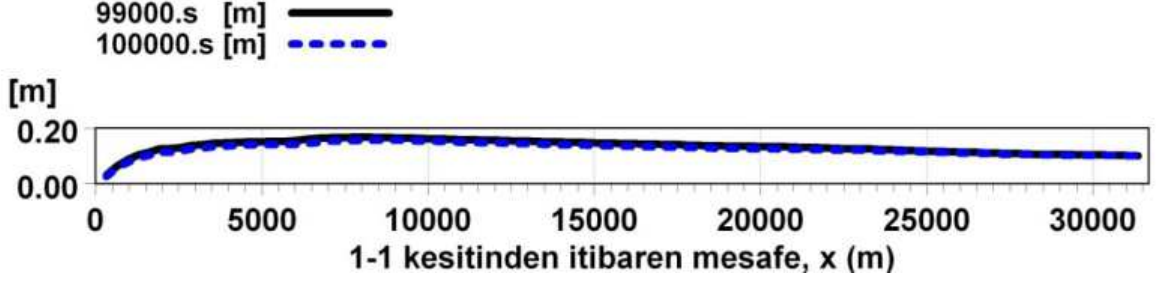


Şekil 4.130 1. model alternatifi için 99,000. s’deki kanal ortası ($x=14,000-18,000$ m) boykesit hız dağılımı



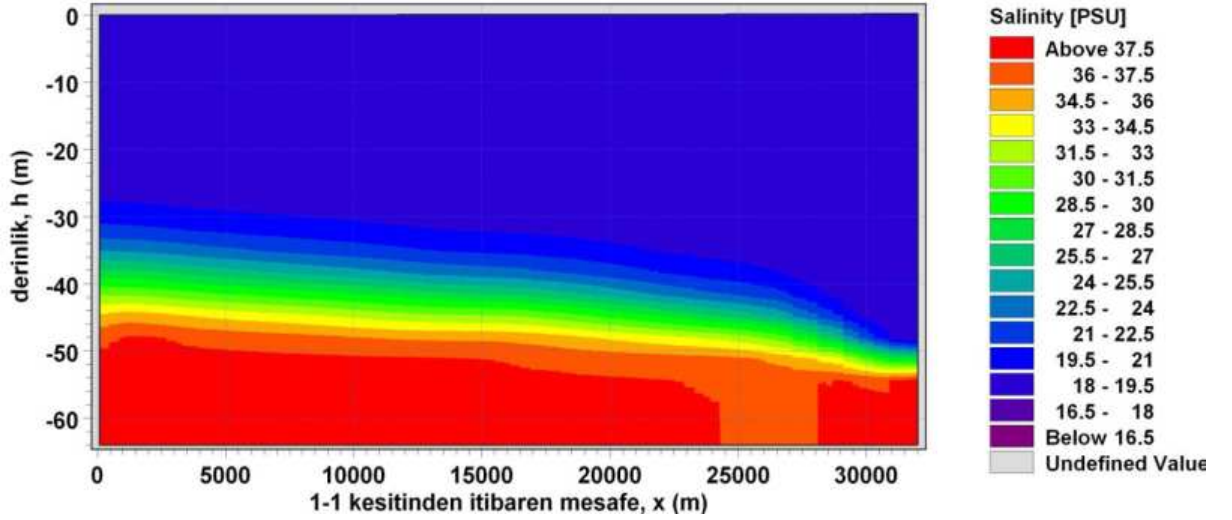
Şekil 4.131 1. model alternatifi için 100,000. s’deki kanal ortası ($x=14,000-18,000$ m) boykesit hız dağılımı

Şekil 4.132’de 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s’lerdeki kanal boyunca su yüzü profilleri verilmiştir. Su yüzü 2-2 kesitinden başlayarak kabarmış ($x=7,500-32,000$ m arası), 1-1 kesitine doğru ($x=0-7,500$ m) ise daha büyük bir eğimle alçalmıştır. Her iki zaman adımıdaki su yüzü profilleri üst üste çakışmış ve model su yüzü değişimi için kararlı hale ulaşmıştır.

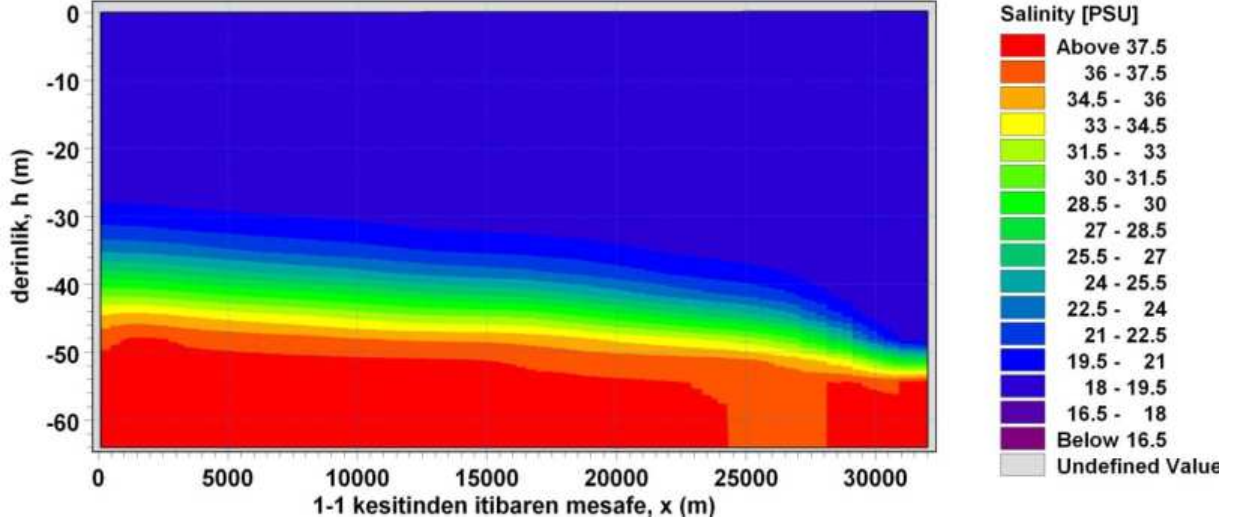


Şekil 4.132 1. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s’deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.133 ve 134’de 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s’lerdeki kanal ortası kesitteki ($x=14,00-18,000$ m) boykesit boyunca tuzluluk dağılımları görülmektedir. Kanalın büyük bir kısmında üst tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Ara tabakanın kalınlığı 2-2 sınırı hariç değişim göstermemiş ve ara tabaka yataya yakın bir gidiş izlemiştir. Kanal boyunca tuzluluk zamanla değişmemiş, model tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır.

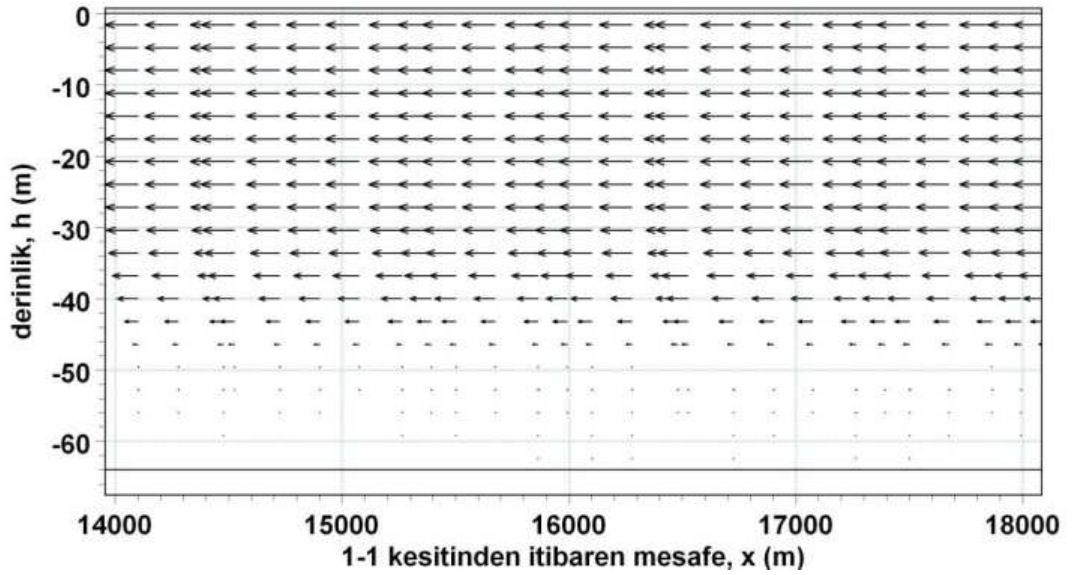


Şekil 4.133 2. model alternatifi için 99,000. s’deki boykesit tuzluluk dağılımı

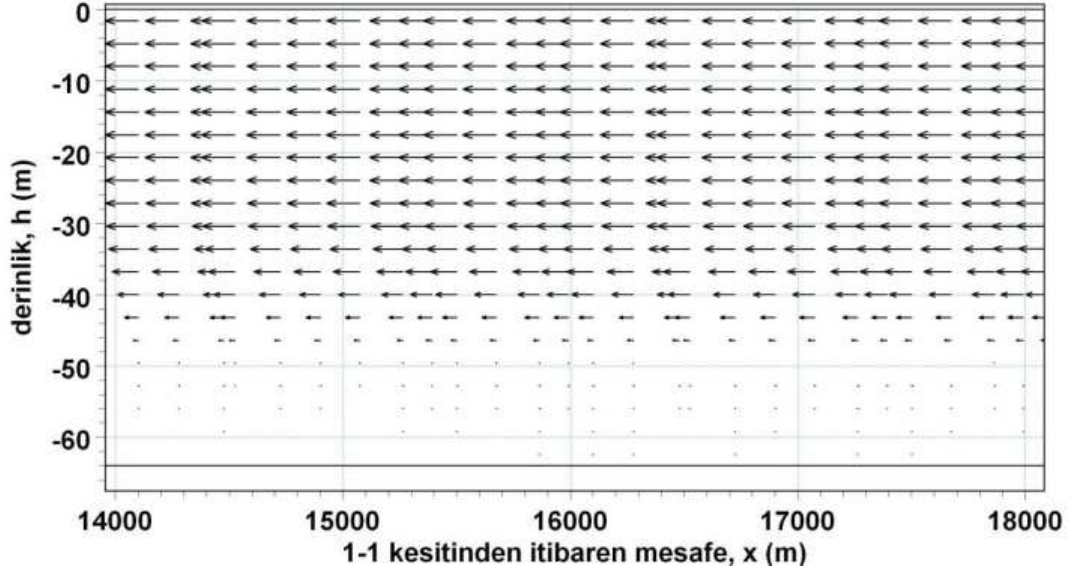


Şekil 4.134 2. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.135 ve 136'da 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit boyunca hız dağılımları görülmektedir. Kanal tabanına yakın yaklaşık 15 m'lik derinlik hariç kanal boyunca tamamen üst tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Üst tabaka kalınlığı ve hızı 1. alternatifte ($\Delta h=0.10$ m) göre artmış, alt tabaka ise tamamen kaybolmuştur. Hız dağılımında zamanla değişim meydana gelmemiş, model hız dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır.

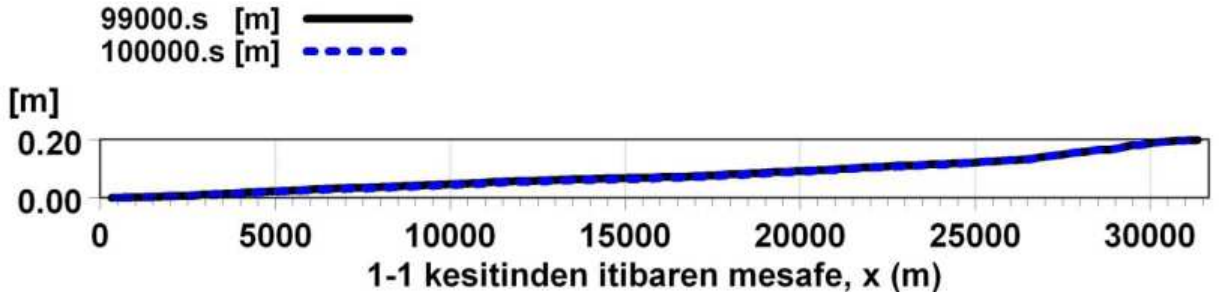


Şekil 4.135 2. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası ($x=14,000-18,000$ m) boykesit hız dağılımı



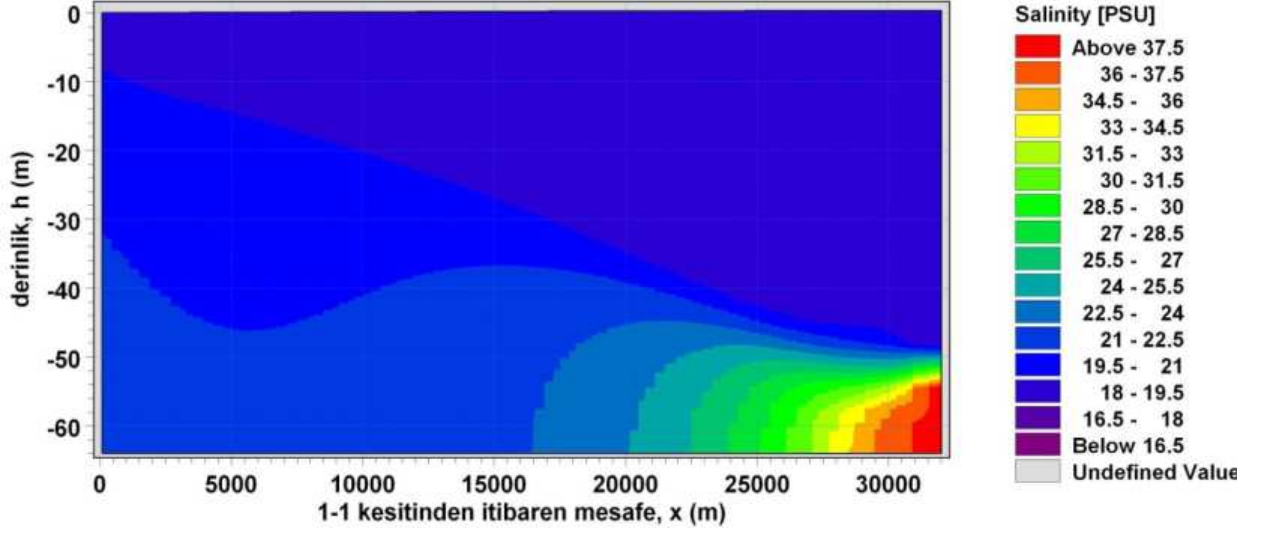
Şekil 4.136 2. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı

Şekil 4.137'de 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lereki kanal boyunca su yüzü profilleri birlikte verilmiştir. su yüzü 1-1 kesitine doğru sabit eğimle uzanmış ve zamanla değişmemiştir. Bu durum $\Delta h=0.20$ m su seviyesi farkına sahip 2. model alternatifinin su yüzü değişimi için kararlı hale ulaştığını göstermektedir.

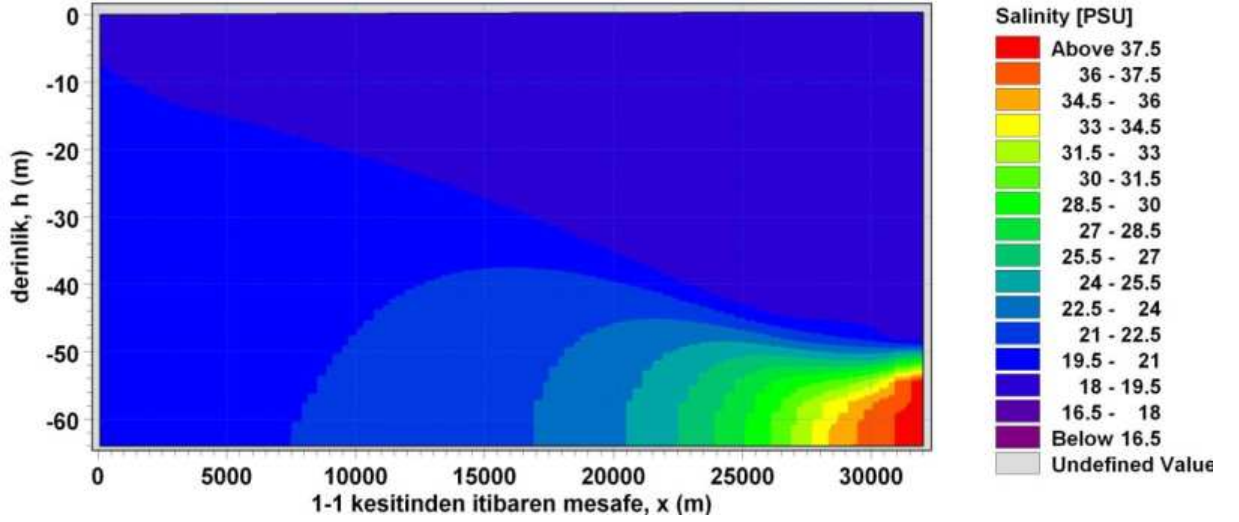


Şekil 4.137 2. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.138 ve 139'da 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit boyunca tuzluluk dağılımları verilmiştir. Kanal boyunca neredeyse tamamen üst tabaka tuzluluğunun hakim olduğu görülmektedir. Her iki zaman adımında kanal boyunca tuzluluk sabit kaldığı ve modelin tuzluluk dağılımı için kararlı hale ulaştığı Şekil 4.138 ve 139'dan görülmektedir.

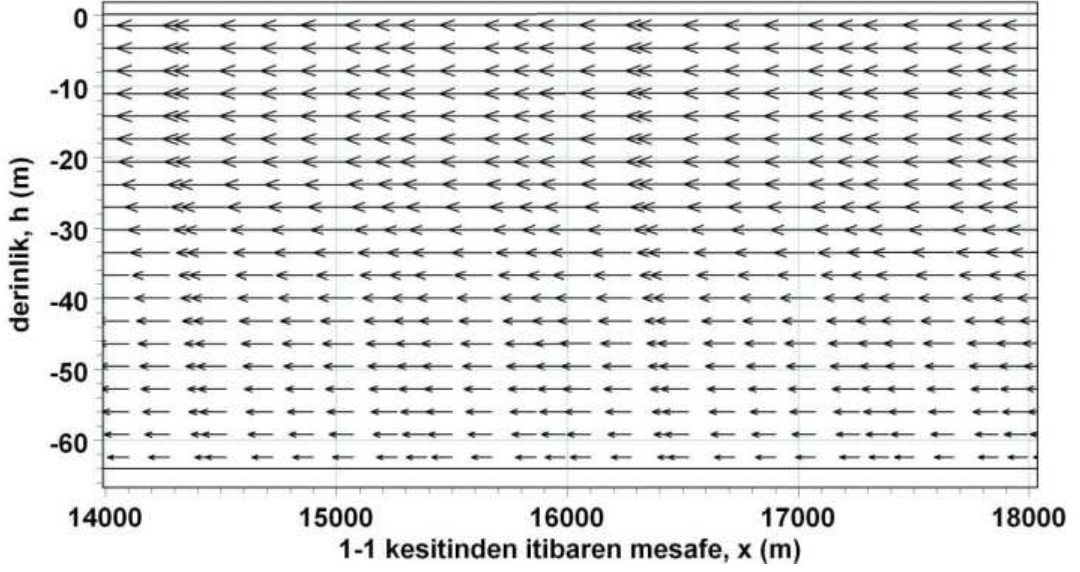


Şekil 4.138 3. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

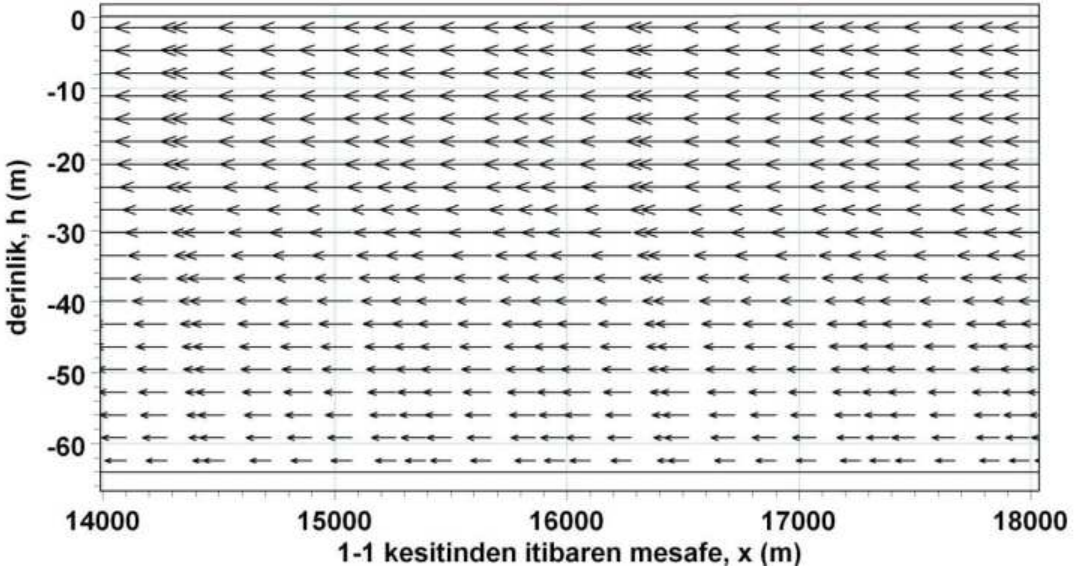


Şekil 4.139 3. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.140 ve 141'de 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit boyunca hız dağılımları görülmektedir. Akım alanına tamamen üst tabaka akımının hakim olduğu görülmektedir. Bu durum boykesit boyunca tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla uyum içerisindedir. Boykesit boyunca hız dağılımı zamanla değişmemiş ve model hız dağılımı için kararlı hale ulaşmıştır.

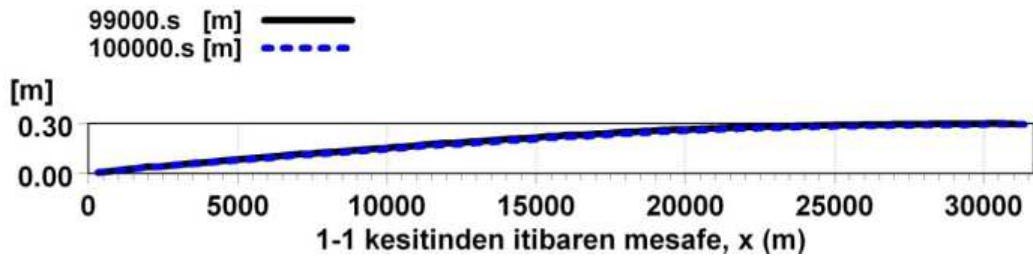


Şekil 4.140 3. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı



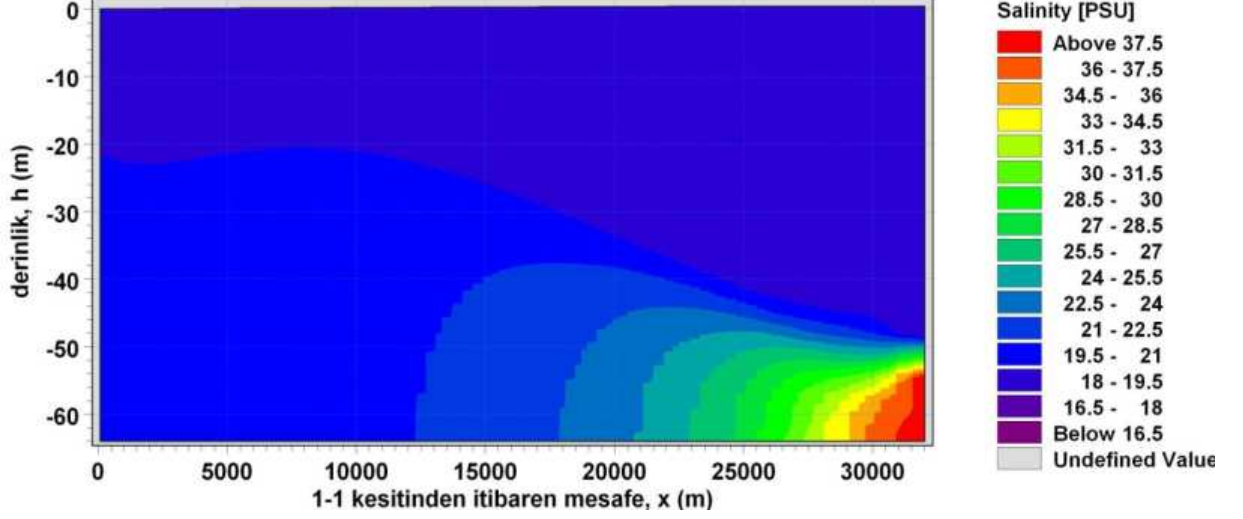
Şekil 4.141 3. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı

Şekil 4.142'de 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki kanal boyunca su yüzü profilleri bir arada verilmiştir. Her iki zaman adımındaki su yüzü profillerinin çakıştığı ve modelin su yüzü değişimi için kararlı hale ulaştığı görülmektedir.

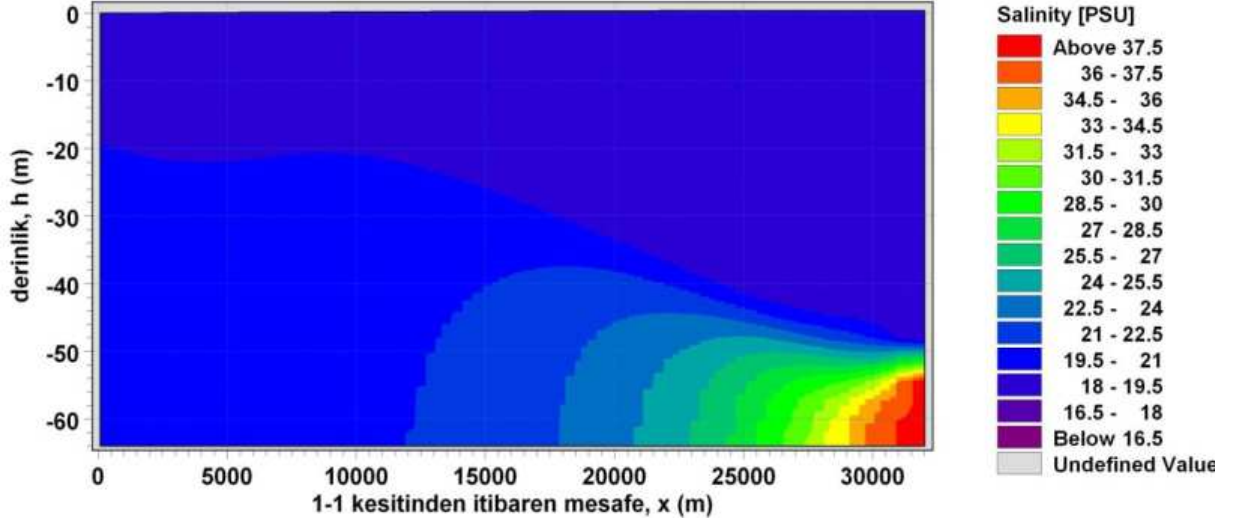


Şekil 4.142 3. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri

Sırasıyla Şekil 4.143 ve 144'de 4. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit boyunca tuzluluk dağılımları verilmiştir. Boykesit boyunca tuzluluk dağılımı 3. alternatifte ait tuzluluk dağılımı sonuçlarıyla (Şekil 4.138-139) yakın benzerlik göstermektedir.

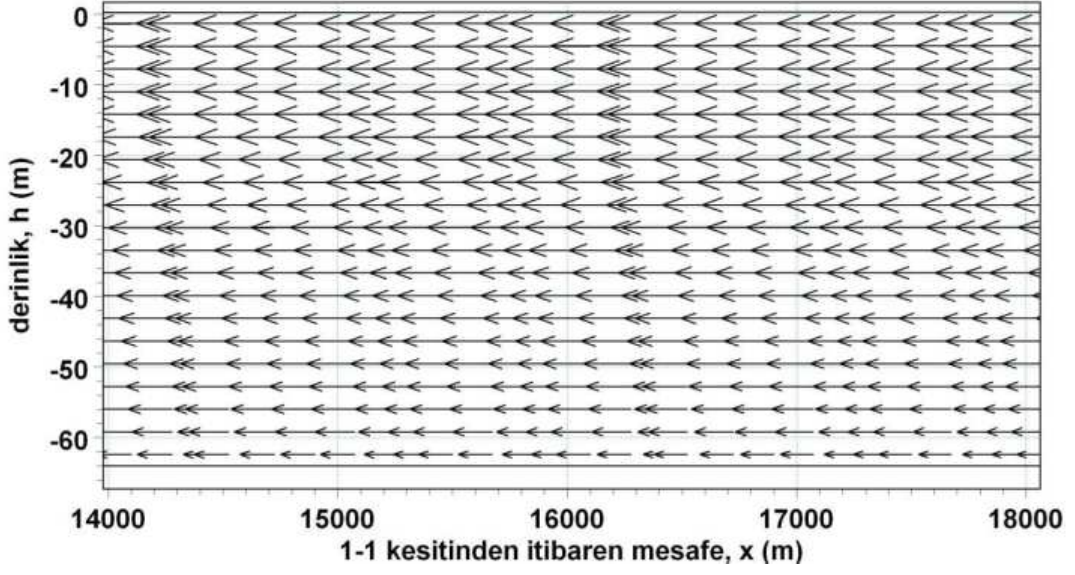


Şekil 4.143 4. model alternatifi için 99,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

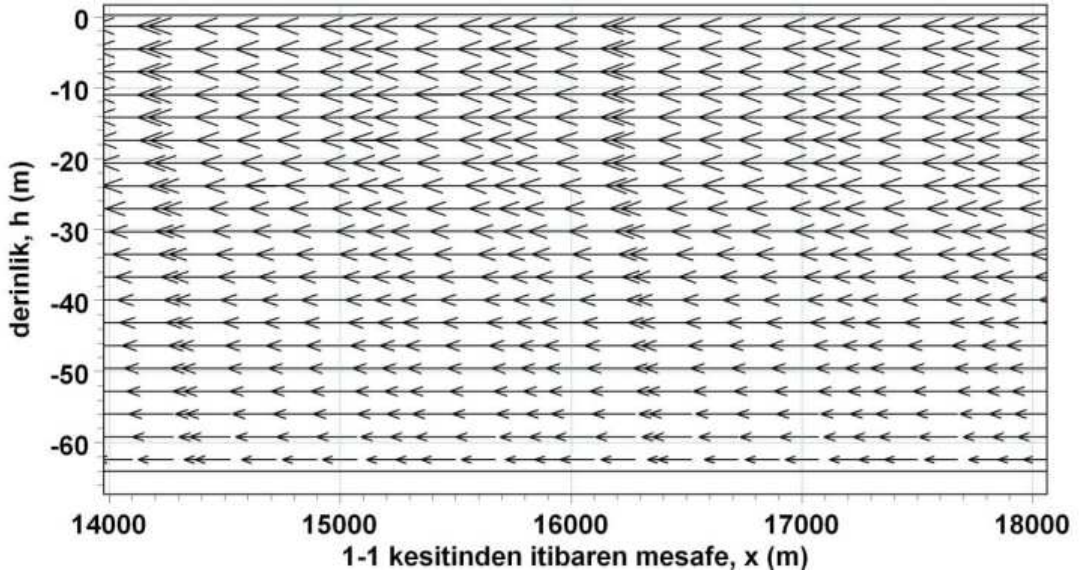


Şekil 4.144 4. model alternatifi için 100,000. s'deki boykesit tuzluluk dağılımı

Sırasıyla Şekil 4.145 ve 146'da 4. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'lerdeki boykesit boyunca hız dağılımı görülmektedir. Su seviyesi farkındaki artışa bağlı olarak akım hızı 3. alternatifte ($\Delta h=0.30$) m göre artmıştır. İki farklı zaman adımıdaki sonuçlardan modelin boykesit hız dağılımı için kararlı hale ulaştığı görülmektedir.

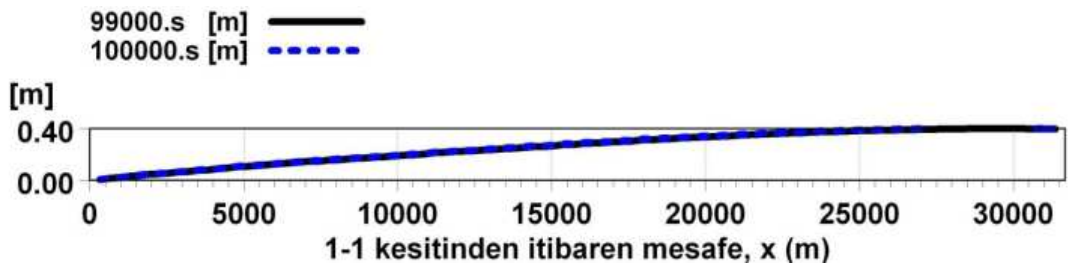


Şekil 4.145 4. model alternatifi için 99,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı



Şekil 4.146 4. model alternatifi için 100,000. s'deki kanal ortası (x=14,000-18,000 m) boykesit hız dağılımı

Şekil 4.147'de ise 4. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki kanal boyu su yüzü profili görülmektedir. Su yüzü profilinin zamanla değişmediği ve modelin su yüzü için karalı hale ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.147 4. model alternatifi için 99,000. ve 100,000. s'deki su yüzü profilleri

Sonuçların bir arada değerlendirilmesinden yapılandırılmamış ağ yaklaşımı kullanılan tüm model alternatiflerinin boykesit boyunca tuzluluk, hız ve kanal su yüzü profilleri için kararlı hale ulaştıkları görülmüştür. ayrıca tüm alternatifler yapılandırılmış ağ kullanılan 4. durum model alternatiflerinden farklı olarak simülasyon sürelerini hesap şeması stabiliteleri bozulmadan tamamlamışlardır. Bu durum bir kanaldaki tabakalı akım modeli için yapılandırılmamış ağ yaklaşımının yapılandırılmış ağ yaklaşımına göre sayısal modelleme açısından daha uygun olduğunu göstermektedir.

Ancak model alternatiflerine ait sonuçlardan $\Delta h=0.10$ m'lik su seviyesi farkına sahip 1. alternatif hariç kanal boyunca alt tabakanın bloke olduğu görülmüştür. Sırasıyla $\Delta h=0.20$, 0.30 , 0.40 m su seviyesi farkına sahip 2., 3. ve 4.model alternatiflerinde sadece üst tabaka akımı söz konusudur. Oysa gerek yapılandırılmış ağ yaklaşımı kullanılan 4. durum model alternatiflerinde, gerekse bir boyutlu analitik modelde (Şekil 4.127) $\Delta h=0.10$, 0.20 , 0.30 ve 0.40 m için kanal boyunca tabakalı akım söz konusu olmaktadır.

Bu durumun yapılandırılmamış ağ yaklaşımı kullanılan modeller için tanımlanan sınır ve başlangıç koşullarının tanımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum artan su seviyesi farkının (Δh) etkisiyle 2-2 sınırından giren daha az yoğun üst tabaka akımının, yoğunluk farkının etkisiyle 1-1 sınırından giren daha yoğun alt tabaka akımından daha güçlü olması ve alt tabaka akımını bloke ederek ters yönde hareket ettirmesiyle açıklanabilmektedir. Özellikle bu durumun $\Delta h > 0.10$ m durumu için geçerli olduğu görülmüştür.

Bu sonuçların ışığında 5. alternatif olarak Şekil 4.13'deki dikdörtgen kanal, yapılandırılmamış ağ yaklaşımı dikkate alınarak zamanla değişen $\Delta h=0.60$ m su seviyesi farkı için modellenmiştir. Model parametreleri Çizelge 4.16'da tanımlanmıştır.

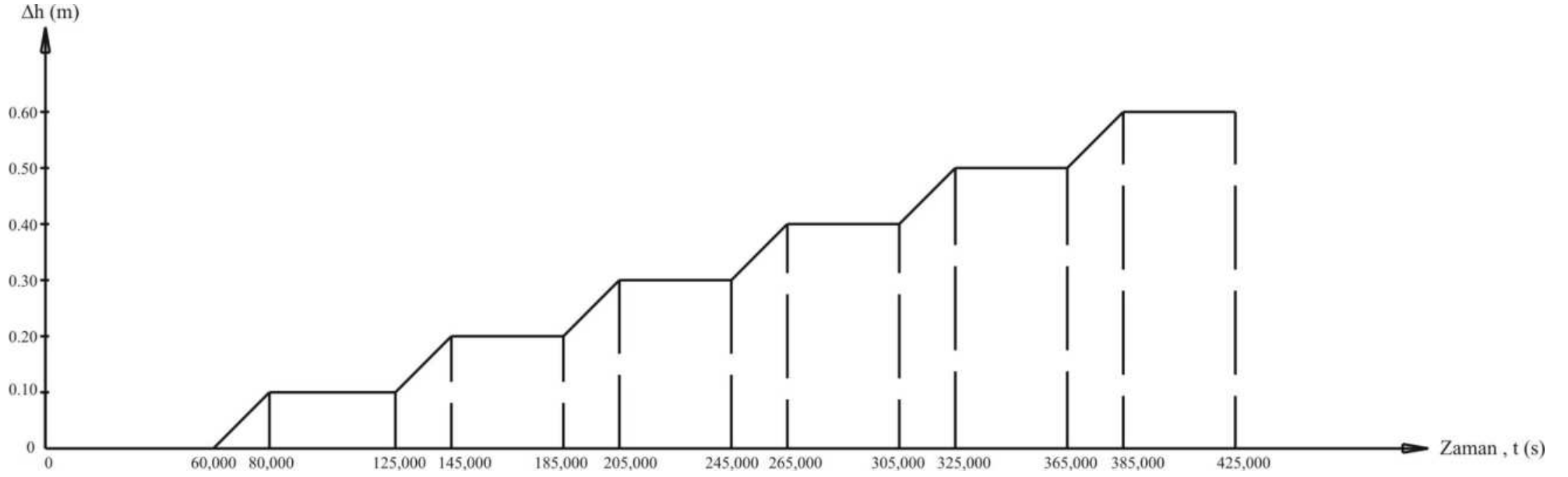
Çizelgeden de görüldüğü gibi 1-1 sınırında su seviyesi değişimi (Δh) tanımlanmamıştır. 2-2 sınırında ise alt tabaka akımının kanal boyunca ilerlemesi ve tabakalı akım koşullarının oluşmasının sağlanması için Şekil 4.148'de görüldüğü gibi zaman serisi olarak 13 aşamada tanımlanmıştır. Simülasyon başlangıcından itibaren 60,000 s boyunca herhangi bir su seviyesi değişimi tanımlanmamış, bundan sonra $\Delta h=0.10$ m'lik artışlar 20,000 s'lik zaman aralıklarında tanımlanmış ve her zaman aralığı sonunda su seviyesi farkı 40,000 s boyunca sabit tutulmuştur. Böylece her zaman adımı sonunda su seviyesi farkından kaynaklı üst tabaka akımının kanal boyunca ilerlemesi ve tabakalı akımın kararlı hale ulaşması amaçlanmıştır.

1-1 sınırında tuzluluk sabit 38 psu olarak tanımlanmıştır. 2-2 sınırında ise bu değer 18 psu'dur. Başlangıç tuzluluğu olarak 2-2 sınırındaki tuzluluk (18 psu) tanımlanmıştır. Böylece başlangıçta herhangi bir su seviyesi değişiminin tanımlanmadığı 60,000 s boyunca alt tabaka

akımının 2-2 sınırından girmesi ve kanal boyunca ilerlemesi sağlandıktan sonra üst tabaka akımının 1-1 sınırından kanala girmesi ve tabakalı akım yapısının oluşturulması amaçlanmıştır.

Çizelge 4.16 Yapılandırılmamış ağ kullanılarak $\Delta h=0.60$ m için kurulan modele ait sayısal parametreler ve değerleri

Model parametreleri		5.Alternatif	Açıklama	
Batimetri (x×y×z) (m)		32,000×900×64		
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)		1		
Herbir zaman adımıdaki hesap noktası sayısı		185,728		
Maks. Courant Sayısı (C_r)		0.2507		
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	Baş. Tuz	18	sabit
		1-1	38	
		2-2	18	
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	Baş.	0	
		1-1	0	sabit
		2-2	0-0.60	zaman serisi
Pürüzlülük (ks) (m)		0.30	sabit	
Eddy Viskozitesi Limitleri	x	$1.8 \times 10^{-6} - 106$		
	y	$1.8 \times 10^{-6} - 1,000,000$		
	z	$1.8 \times 10^{-6} - 100$		
Simülasyon Zamanı (t) (s)		425,000		
Başarı ile çalıştığı süre (s)		425,000		

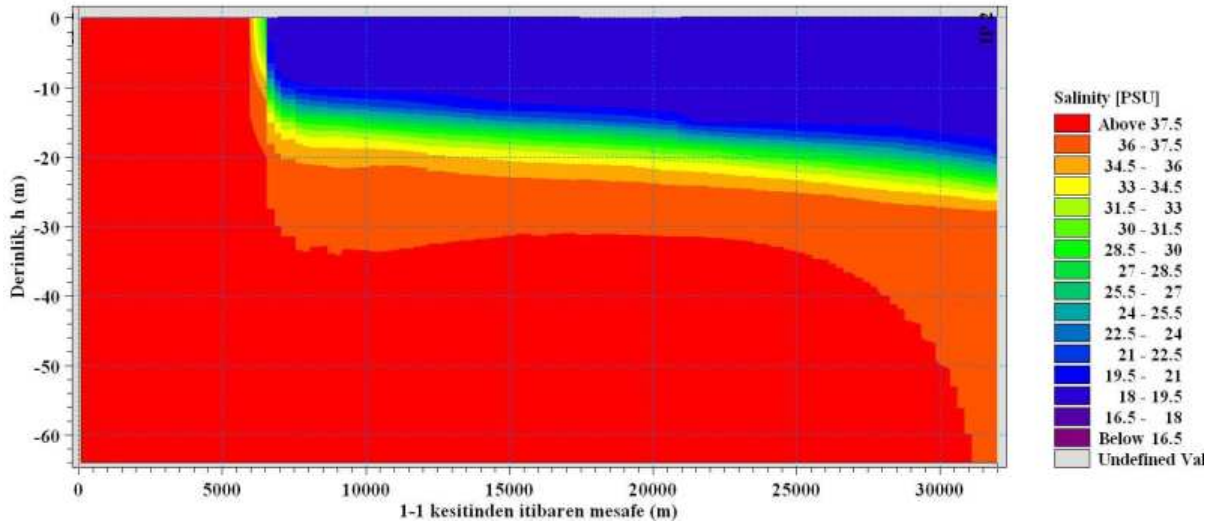


Şekil 4.148 5.alternatif için 2-2 sınırında tanımlanan su seviyesi (Δh) farkı sınır şartı

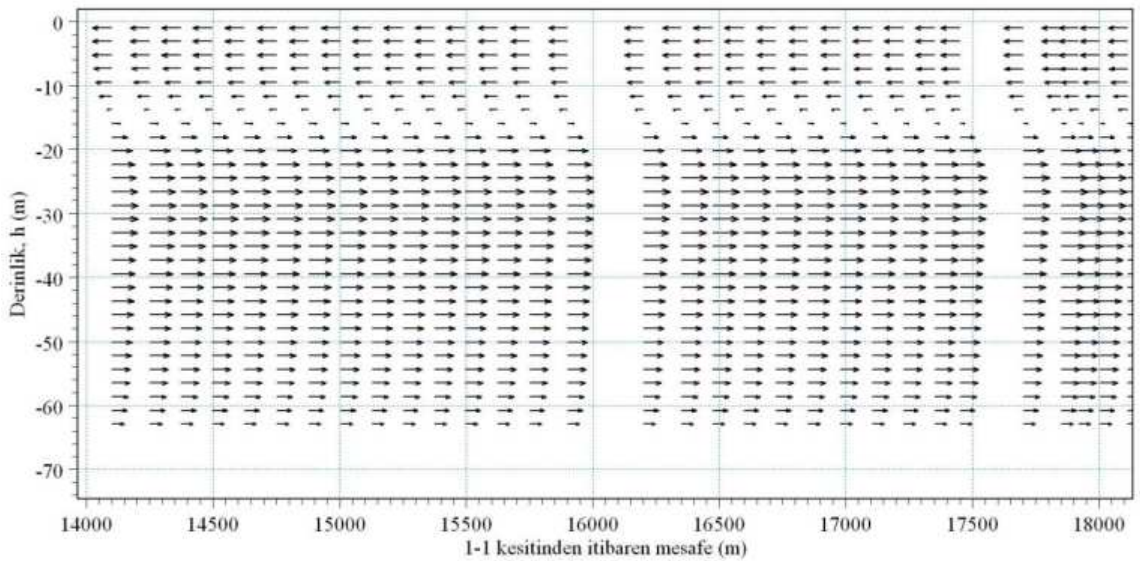
Her bir Δh (0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 ve 0.60 m) için tabakalara ait debiler, sırasıyla su seviyesi farklarının 2-2 sınırında sabit değerler aldığı ($t=125\ 000.$, $185\ 000.$, $245\ 000.$, $305\ 000.$, $365\ 000.$ ve $425\ 000.$ s) zaman adımlarında kanal ortasındaki ($x=16,000$ m) akım karakteristikleri (kesitsel ortalama hızlar ve kesit alanları) dikkate alınarak belirlenmiştir.

Şekiller bir arada değerlendirildiğinde $\Delta h=0.10-0.40$ m aralığında kanal boyunca tabakalı akımın geliştiği, $\Delta h > 0.40$ m durumunda ise tamamen üst tabaka akımının hakim olduğu alt tabakanın ise bloke edildiği görülmüştür.

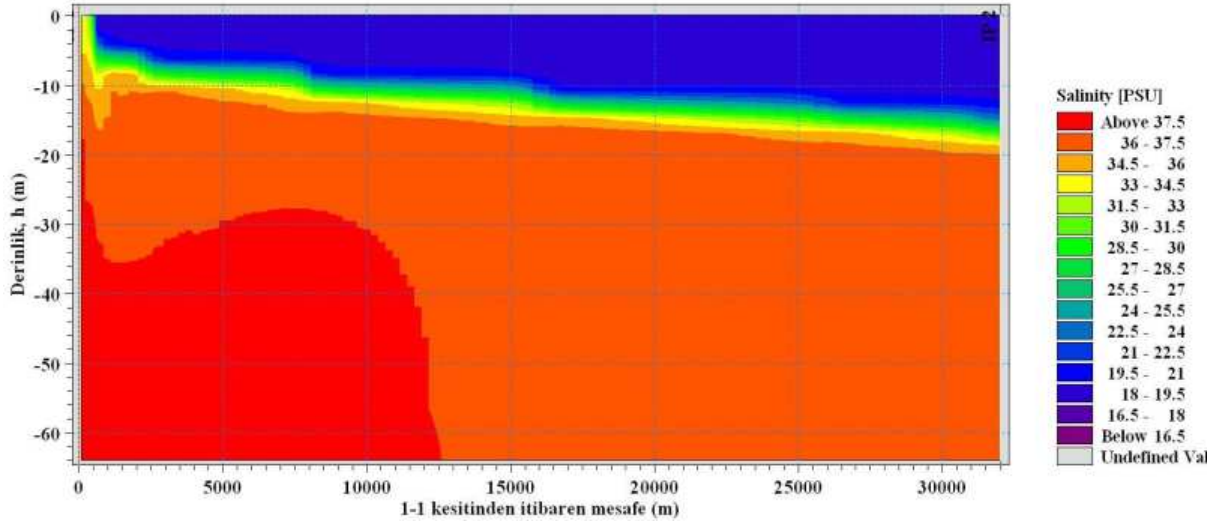
Sırasıyla Şekil 4.149-160'da söz konusu zaman adımlarındaki boykesit boyunca tuzluluk dağılımları ve kanal ortası kesitteki ($x=14,000-18,000$ m arası) boykesit boyunca hız profilleri görülmektedir.



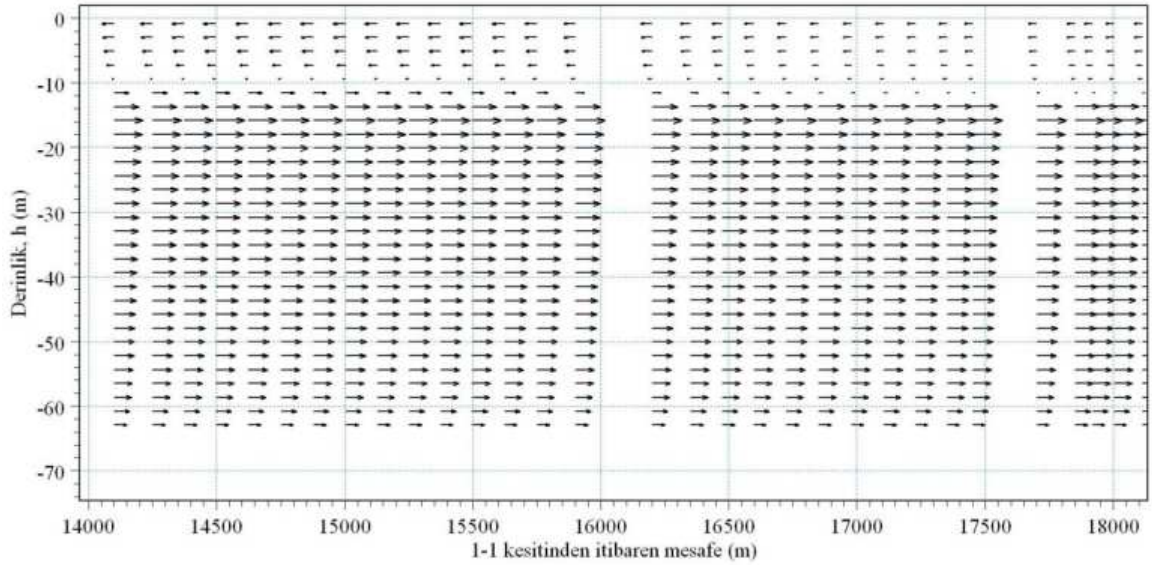
Şekil 4.149 5.alternatif için $t=125,000.$ s'deki ($\Delta h=0.10$ m) boykesit tuzluluk dağılımı



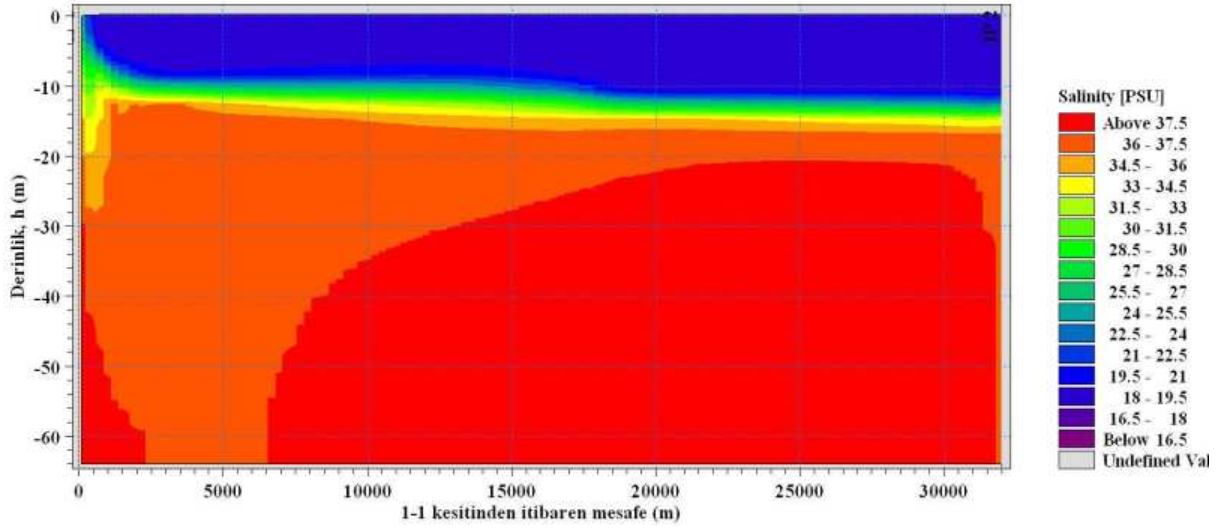
Şekil 4.150 5.alternatif için $t=125,000.$ s'de ($\Delta h=0.10$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı



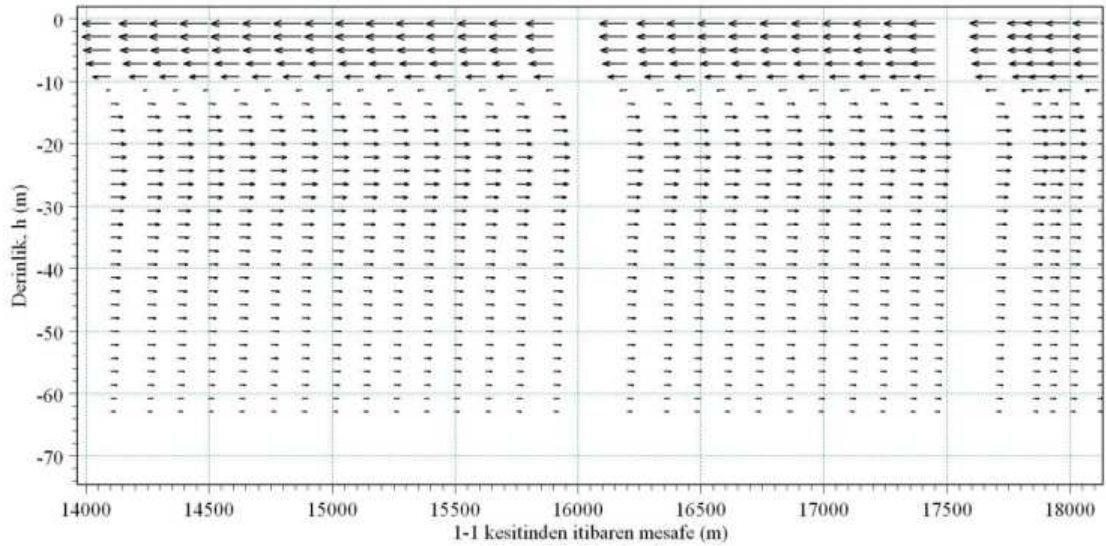
Şekil 4.151 5.alternatif için $t=185,000$. s'deki ($\Delta h=0.20$ m) boykesit tuzluluk dağılımı



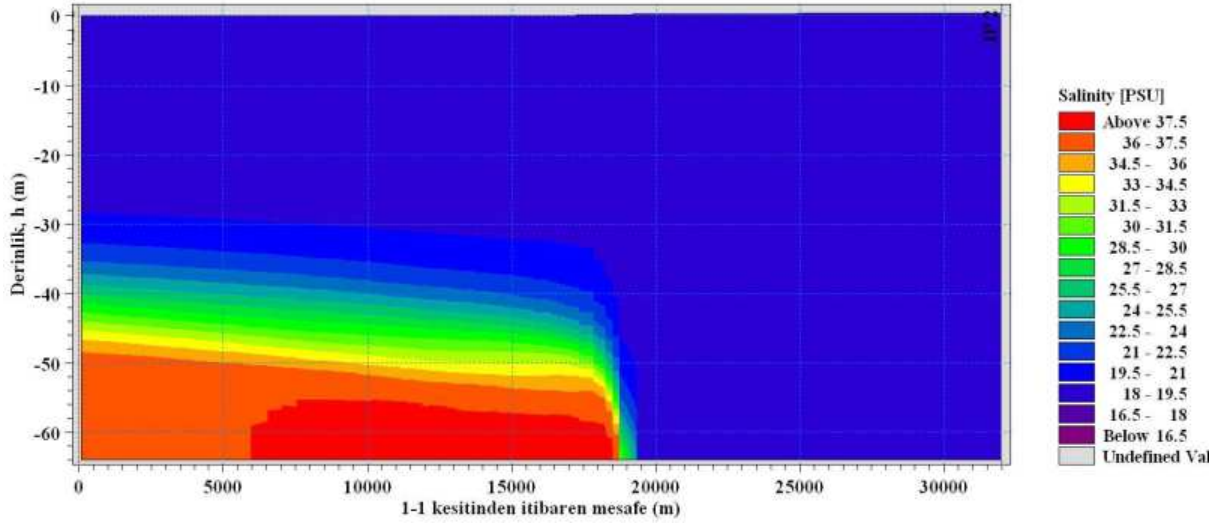
Şekil 4.152 5.alternatif için $t=185,000$. s'de ($\Delta h=0.20$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı



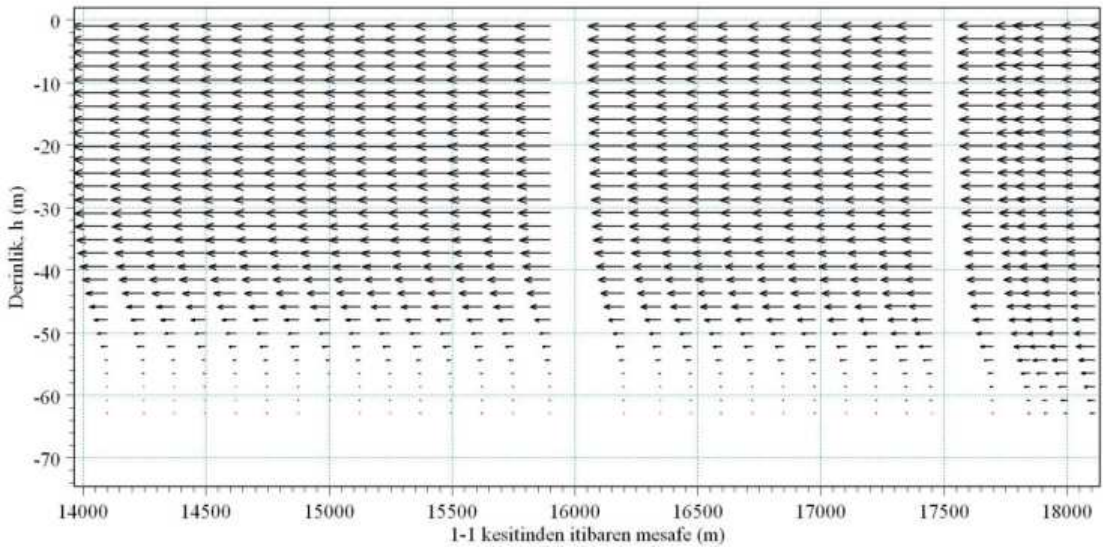
Şekil 4.153 5.alternatif için $t=245,000$. s'deki ($\Delta h=0.30$ m) boykesit tuzluluk dağılımı



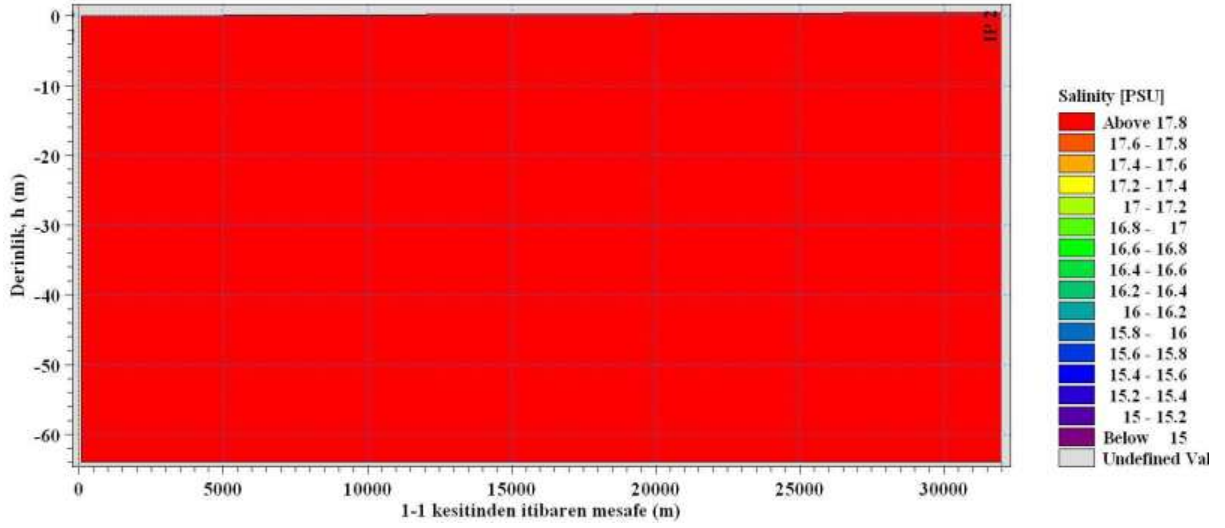
Şekil 4.154 5.alternatif için $t=245,000$. s'de ($\Delta h=0.30$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı



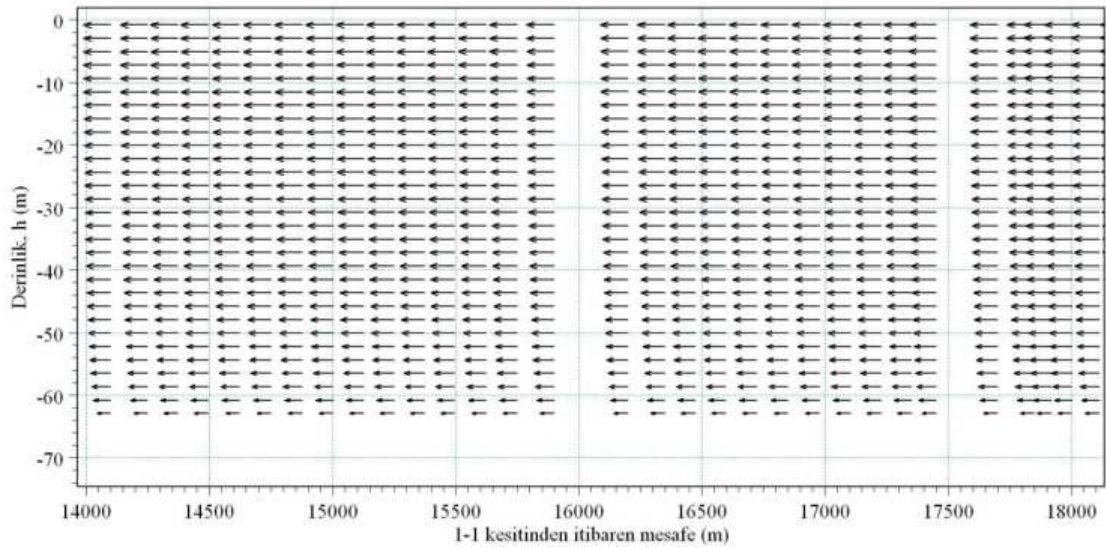
Şekil 4.155 5.alternatif için $t=305,000$. s'deki ($\Delta=0.40$ m) boykesit tuzluluk dağılımı



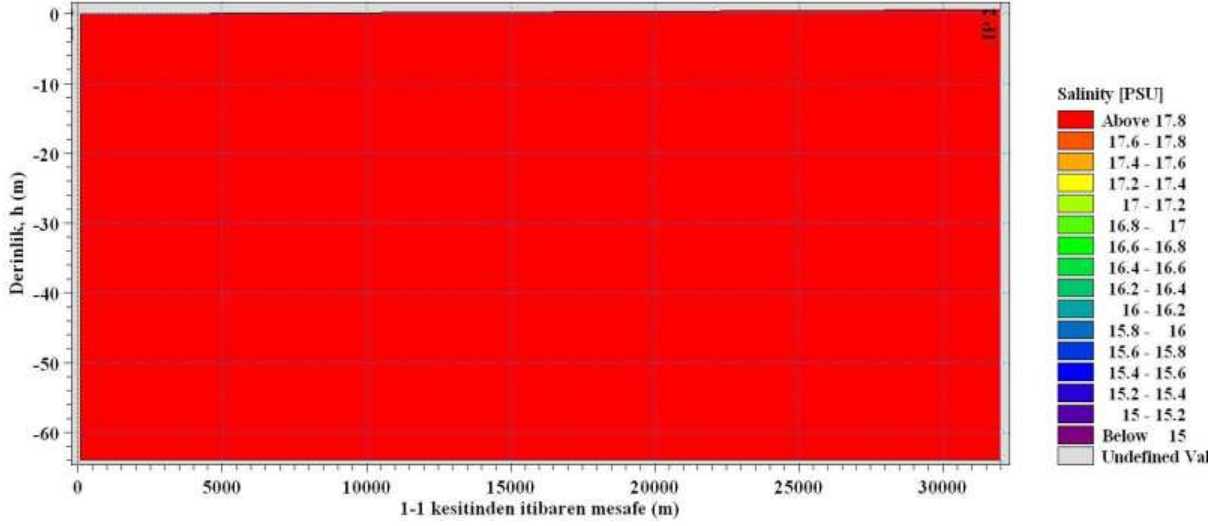
Şekil 4.156 5.alternatif için $t=305,000$. s'de ($\Delta h=0.40$) kanal ortası boykesit hız dağılımı



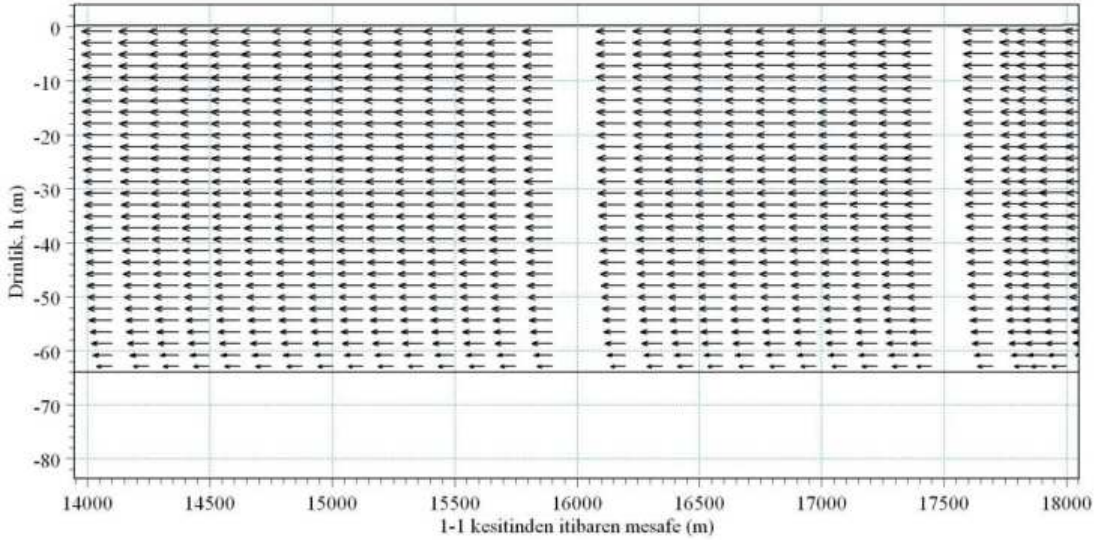
Şekil 4.157 5.alternatif için t=365,000. s'deki ($\Delta h=0.50$ m) boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.158 5.alternatif için t=365,000. s'de ($\Delta h=0.50$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı

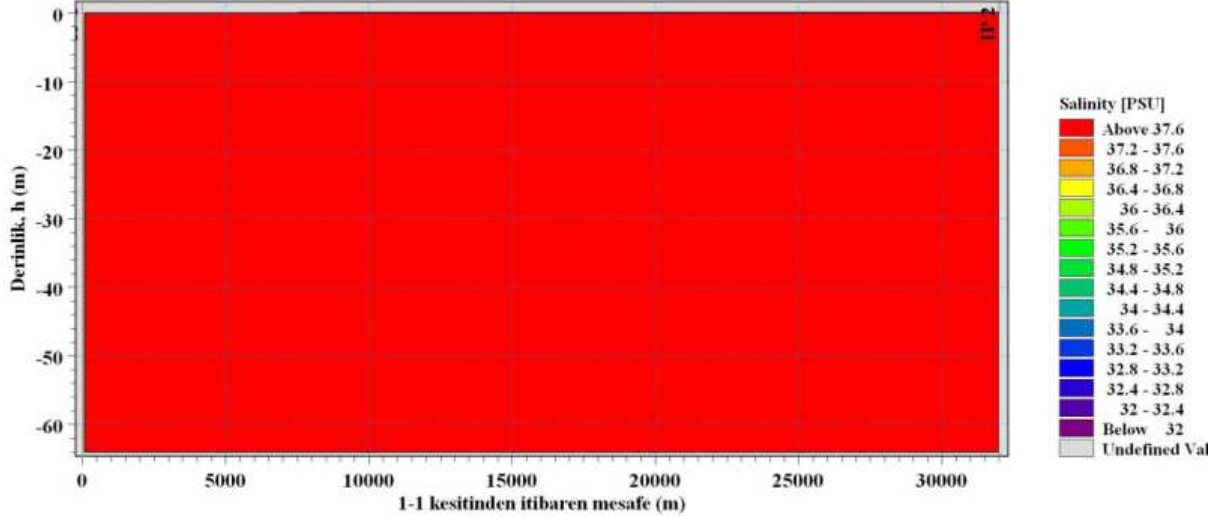


Şekil 4.159 5.alternatif için $t=425,000$. s'deki ($\Delta h=0.60$ m) boykesit tuzluluk dağılımı

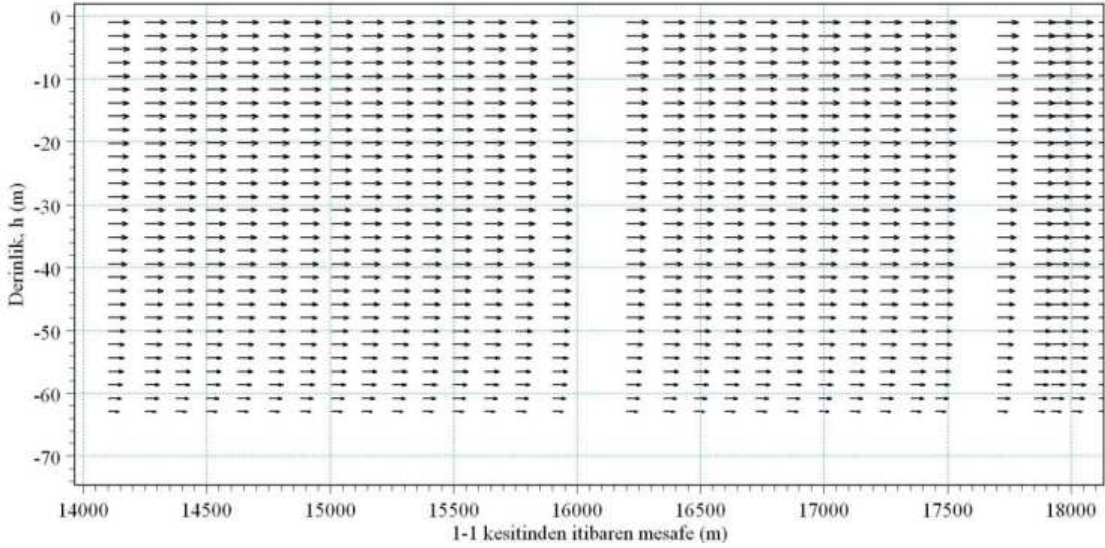


Şekil 4.160 5.alternatif için $t=425,000$. s'de ($\Delta h=0.60$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı

Şekil 4.161 ve 162'de ise su seviyesi farkının 2-2 kesitinde $\Delta h=0.10$ m'ye ulaştığı $t=80,000$. s'deki boykesit tuzluluk ve kanal ortasındaki kesitteki ($x=14,000-18,000$ m) hız profilleri verilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi Δh 'ın 0.10 m değerine ulaştığı zaman adımının başlangıcında kanal boyunca tamamen alt tabaka akımı (homojen akım) hakim olmaktadır. Oysa Δh 'ın $45,000$ s boyunca sabit değer aldığı bu sürenin sonunda ($t=125,000$. s) üst tabaka akımının kanal boyunca ilerlediği ve tabakalı akım yapısının oluştuğu görülmüştür. Böylece mevcut sınır şartları için $\Delta h=0.10$ m ve 0.40 m değerlerinin tabakalı akım için kritik değerler olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca sadece su seviyesi farkının oluşmasının değil bunun oluşma süresinin de akım koşullarını etkilediği görülmektedir. $\Delta h < 0.10$ m su seviyesi farkı için tamamen alt tabaka akımının hakim olduğu homojen akım koşulları meydana gelmektedir.



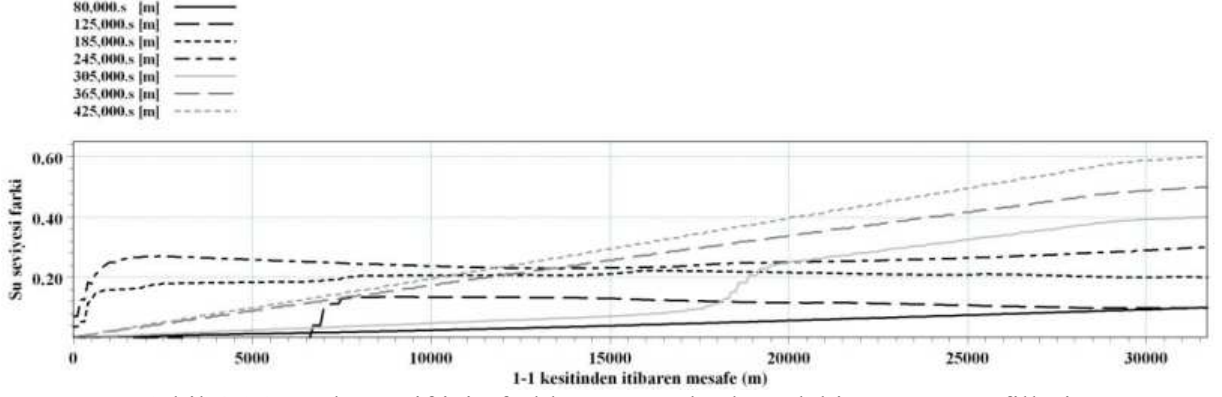
Şekil 4.161 5.alternatif için $t=80,000$. s'deki ($\Delta h=0.10$ m) boykesit tuzluluk dağılımı



Şekil 4.162 5.alternatif için $t=80,000$. s'de ($\Delta h=0.10$ m) kanal ortası boykesit hız dağılımı

Şekil 4.163'de ise sırasıyla Δh 'ın 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 ve 0.60 m değerlerini aldığı $t=125\ 000$., $185\ 000$., $245\ 000$., $305\ 000$., $365\ 000$. ve $425\ 000$. s'deki kanal ortası su yüzü profilleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi homojen akım koşullarında ($\Delta h=0.50$ ve 0.60 m için) su yüzü sabit eğimle doğrusal bir gidiş izlemiştir. Tabakalı akım koşullarında ise ($\Delta h=0.10$, 0.20 , 0.30 , 0.40 m) ise eğimde ani artışların meydana geldiği eğrisel bir gidiş izlemiştir. Eğimdeki bu ani değişimin büyük oranda ara tabakanın hidrodinamik yapısındaki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum tabakalar arası karışımın artmasına bağlı olarak ara tabaka kalınlığının arttığı kanal bölgelerinde meydana gelmektedir. Söz konusu bölgelerde üst tabaka kalınlığı azalmakta hızı ise artmaktadır. Bu durum beraberinde yüzey hızlarında bir artış meydana getirmektedir. Süreklilik denklemi gereği yüzey hızlarının arttığı bu bölgelerde su yüzü büyük bir eğimle aniden düşmektedir. Tabakalı akımın söz

konusu olduğu $\Delta h=0.10$ m (Şekil 4.149), 0.20 m (Şekil 4.151) ve 0.30 m'deki (Şekil 4.153) boykesit boyunca tuzluluk dağılımları ile aynı zaman adımlarındaki kanal su yüzü profilleri (Şekil 4.163) bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 4.163 5.alternatif için farklı zaman adımlarındaki su yüzü profilleri

Çizelge 4.17'de 5. model alternatifini için ($\Delta h=0.60$ m) kanal ortası kesitteki ($x=16,000$) tabakalı akım karakteristikleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.17 5. model alternatifini ($\Delta h=0.60$ m) için kanal ortası kesitteki ($x=16,000$ m) tabakalı akım karakteristikleri*

Δh (m)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	h_1 (m)	h_2 (m)	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)	Açıklama
0.10	0	0.30	0	63	0	17,180.1	t=80,000. s
	0.65	0.83	14	48	8,215.2	35,769.6	t=125,000. s
0.20	0.36	0.86	10	53	3,249	41,117.4	t=185,000. s
0.30	0.92	0.42	12	50	10,000	19,000	t=245,000. s
0.40	2.10	0	63	0	117,539.1	0	t=305,000. s
0.50	2.00	0	63	0	113,230	0	t=365,000. s
0.60	2.20	0	63	0	124,173	0	t=425,000. s

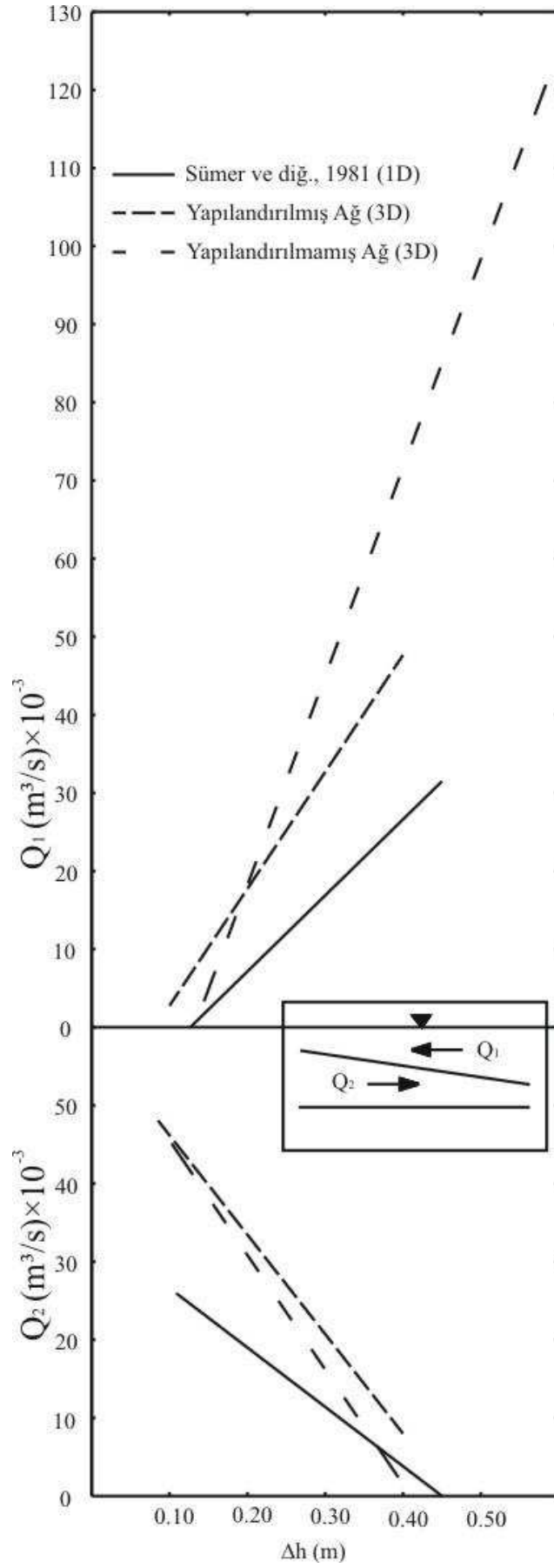
Şekil 4.164'de üç boyutlu yapılandırılmış ağ ve bir boyutlu analitik modele ait Δh -Q sonuçları (Şekil 4.127) ile üç boyutlu yapılandırılmamış ağa (5. alternatif) ait model sonuçları bir arada verilmiştir. Çizelge 4.18'de ise bir ve üç boyutlu modellere ait kanal geometrileri ve sınır şartları verilmiştir.

Şekil 4.164'den elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Her ne kadar yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağ yaklaşımının kullanıldığı üç boyutlu model sonuçlarına ait Δh -Q eğrisi benzer eğilim göstermişse de, yapılandırılmış ağ kullanılan modellerin tamamının hesap şeması stabilite bozulmuş, yapılandırılmamış ağ kullanılan modellerin ise hesap şeması stabilite bozulmamıştır. Bu durum İstanbul Boğazı tabakalı akımının modellenmesi amacıyla kurulması düşünülen sayısal model için en uygun ağ seçeneğinin yapılandırılmamış ağ yaklaşımı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.18 Bir ve üç boyutlu modellerde kullanılan kanal geometrileri ve tanımlanan sınır şartları

Model		Bir Boyutlu (1D) (Sümer vd., 1981)	Üç boyutlu (3D) (Bu çalışma)	Açıklama
Kanal geometri (x-y-z) (m)		31,250×907×64.5	32,000×900×64	
Sınır Şartları	Yoğunluk Farkı ¹ ($\Delta\rho/\rho$)	0.014	0.014	Marmara ve Karadeniz yoğunluk farkı 1D için sabit 0.014, 3D modelde üst tabaka akımının tuzluluğu 18, alt tabaka akımının ise 38 psu olarak tanımlanmıştır. Buna karşılık gelen yoğunluk farkı ise 0.014 değerini almaktadır.
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (cm)	11-46	10-40 (Yapılandırılmış ağ) 10-60 (yapılandırılmamış ağ)	1D modeller için 11-46 cm limit durumları arasında değişen su seviyesi farkına karşılık tabaka debileri hesaplanmıştır.

* ** $\Delta\rho/\rho = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ ifadesiyle hesaplanmıştır



Şekil 4.164 Bir ve üç boyutlu model yaklaşımları için su seviyesi değişimine bağlı olarak tabaka debilerinde meydana gelen değişim grafiği

4.3.2.2 Su Seviyesi Değişiminde Süre Etkisinin Belirlenmesi

5. durum 5. alternatife ait model sonuçlarından, bir kanaldaki tabakalı akım yapısı üzerinde sadece su seviyesi farkının (Δh) değil aynı zamanda su seviyesi değişim süresinin de etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Tabakalı akım 1., 2., 3. ve 4. model alternatiflerinde sadece $\Delta h=0.10$ m için, 5. model alternatifinde ise $\Delta h=0.10-0.40$ m aralığındaki su seviyesi farklarında da gelişmiştir.

Tipik bir tabakalı akım örneği olan İstanbul Boğazı için yapılan akıntı ölçümleri (U.B., 2005) de bu sonucu destekler niteliktedir.

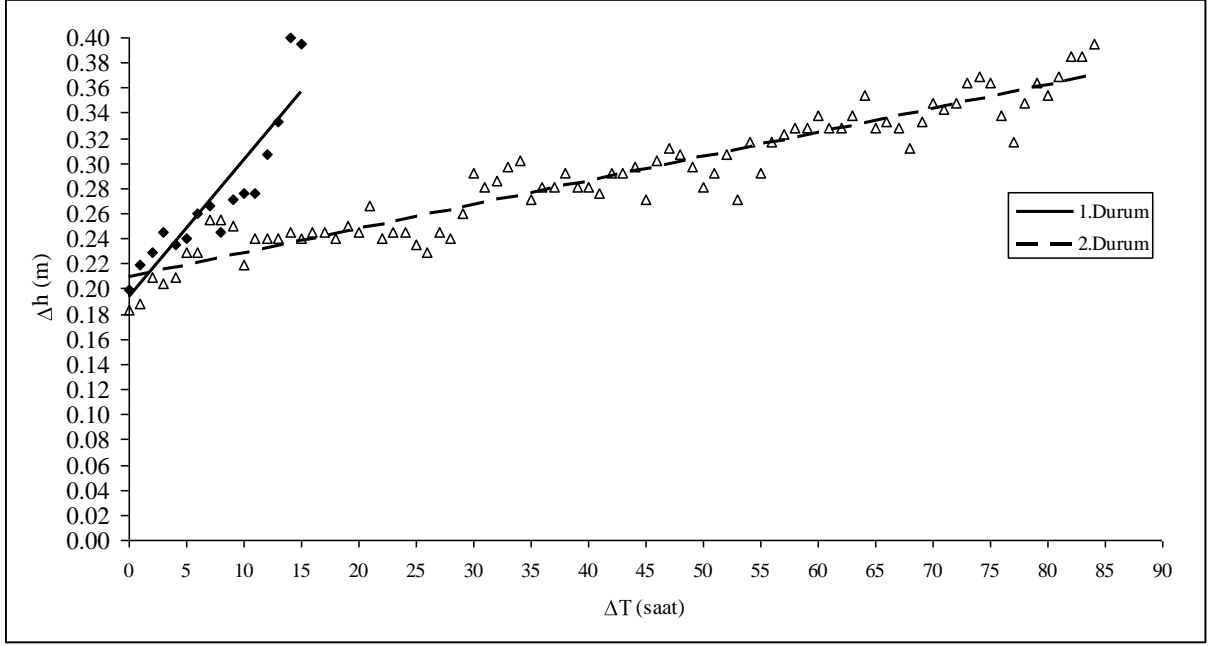
Su seviyesi değişim (Δh) süresinin İstanbul Boğazı'ndaki tabakalı akım yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla Mart ve Ağustos (2005) aylarında yapılan ölçümlerden (U.B., 2005) su seviyesindeki değişiminin 0.40 m olarak gerçekleştiği iki durum dikkate alınmıştır. Her iki durumda İstanbul Boğazı'nın iki girişi arasındaki su seviyesi farkı 0.20 m'den başlayarak 0.40 m'ye değişmiştir. Dikkate alınan iki dönem için su seviyesi değişimine ait temel karakteristikler Çizelge 4.19'da özetlenmiştir. Şekil 4.165'de ise su seviyesi farkının zamanla değişimi görülmektedir.

Çizelge 4.19 Su seviyesi değişimine ait temel karakteristikler

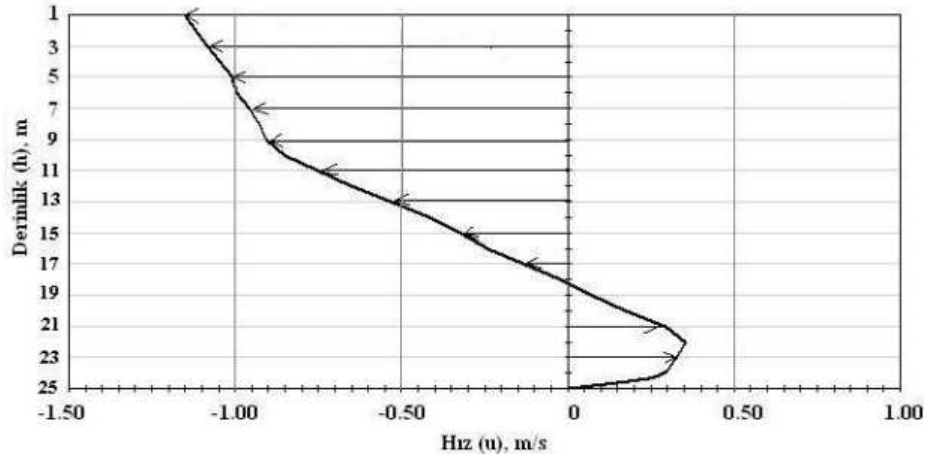
Dönem	Su seviyesi değişimi tarihi		Periyodu (saat)	Su seviyesi artışı (m)	Açıklama
	Başlangıç	Son			
1.Durum (Mart 2005)	10.03.05 23:00	11.03.05 14:00	15	0.20	Her iki durum da alındıkları döneme ait maksimum su seviyesi değişimini temsil etmektedirler.
2.Durum (Ağustos 2005)	27.08.05 03:00	30.08.05 15:00	84	0.20	

Çizelge 4.19 ve Şekil 4.165'den de görüldüğü gibi su seviyesinde meydana gelen 0.2 m'lik artış 1. ve 2. durumlarda sırasıyla 15 ve 84 saatte meydana gelmiştir.

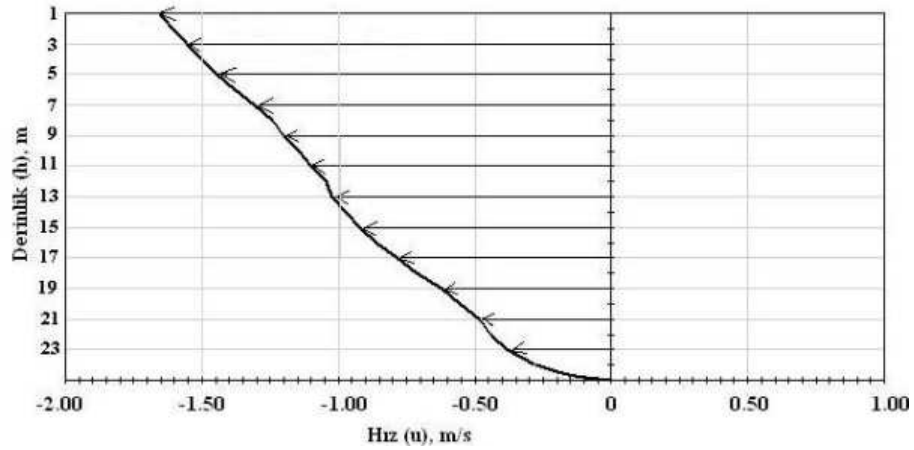
Sırasıyla Şekil 4.166 ve 167'de 1. durumun (Mart 2005), Şekil 4.168 ve 169'da ise 2.durum (Ağustos 2005) için su seviyesi değişiminin başında ve sonunda, İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi girişinde ölçülmüş derinlik boyunca hız profilleri görülmektedir.



Şekil 4.165 1. ve 2. durumda su seviyesinin zamanla değişimi



Şekil 4.166 10.03.05 23:00 tarihinde (1. durumun başlangıç anı) Marmara Denizi girişinde ölçülmüş derinlik boyunca hız profili

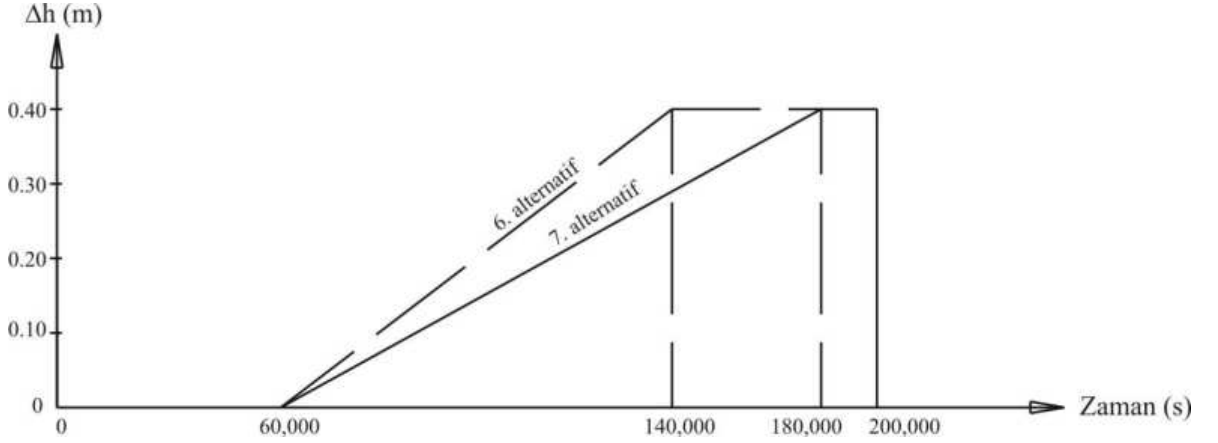


Şekil 4.167 11.03.05 17:00 tarihinde (1. durumun sonu) Marmara Denizi girişinde ölçülmüş derinlik boyunca hız profili

Şekilde görüldüğü gibi su seviyesinde 0.40 m'lik artış 3. ve 4.durumda sırasıyla 80,000 ve 120,000 s'de meydana gelecek şekilde zaman serisi olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.20 Yapılandırılmamış ağ kullanılarak $\Delta h=0.40$ m için kurulan modele ait hidrodinamik parametreler ve değerleri

Model Alternatifleri		6. alternatif	7. alternatif	Açıklama	
Batimetri (x×y×z) (m)		32,000×900×64	32,000×900×64		
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)		1	1		
Herbir zaman adımındaki hesap noktası sayısı		185,728	185,728		
Maks. Courant Sayısı (C_r)		0.2507	0.2507		
Sınır Şartları	Tuzluluk (PSU)	Baş. Tuz	18	18	sabit
		1-1	38	38	sabit
		2-2	18	18	sabit
	Su Seviyesi Farkı (Δh) (m)	Baş.	0	0	
		1-1	0	0	sabit
		2-2	0-0.40	0-0.40	Zaman serisi
Pürüzlülük (ks) (m)		0.30	0.30	sabit	
Eddy Viskozitesi Limitleri	x	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$		
	y	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$		
	z	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	$1.8 \times 10^{-6} - 100$		
Simülasyon Zamanı (t) (s)		200,000	200,000		
Başarı ile çalıştığı süre (s)		200,000	200,000		

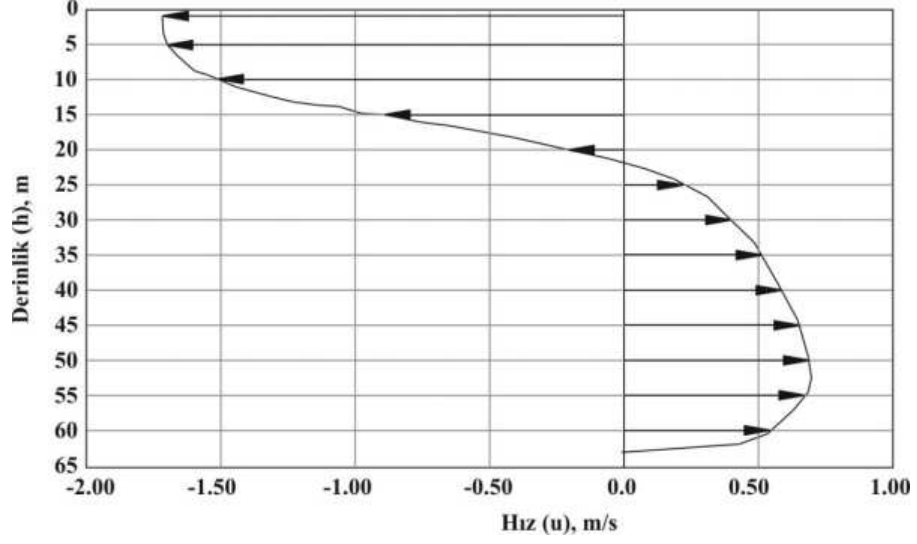


Şekil 4.170 6. ve 7.model alternatifleri için 2-2 sınırındaki su seviyesi sınır şartı

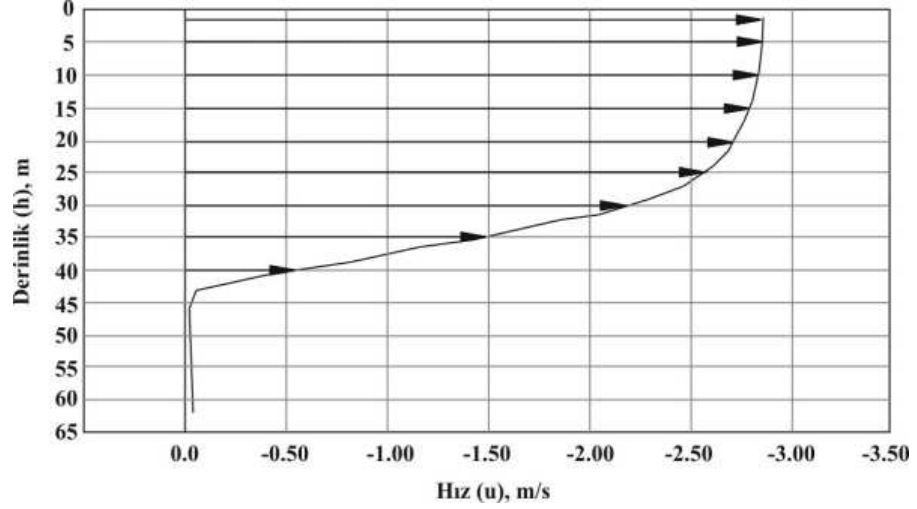
Sırasıyla Şekil 4.171 ve 4.172'de 6. alternatif için su seviyesi farkının $\Delta h=0.20$ ve 0.40 m değerini aldığı zaman adımlarında kanal ortası ($x=16,000$ m) kesitteki derinlik boyunca hız profilleri görülmektedir. Şekillerden $\Delta h=20$ cm için kanalda tabakalı akım, 40 cm için ise tek tabakalı akım yapısının söz konusu olduğu görülmektedir.

Sırasıyla Şekil 4.173 ve 4.174'de ise 7. alternatif için su seviyesi farkının $\Delta h=0.20$ ve 0.40 m değerini aldığı zaman adımlarında kanal ortası ($x=16,000$ m) kesitteki derinlik boyunca hız profilleri görülmektedir. 20 cm'lik su seviyesi değişiminin $120,000$ s'de gerçekleştiği 7.

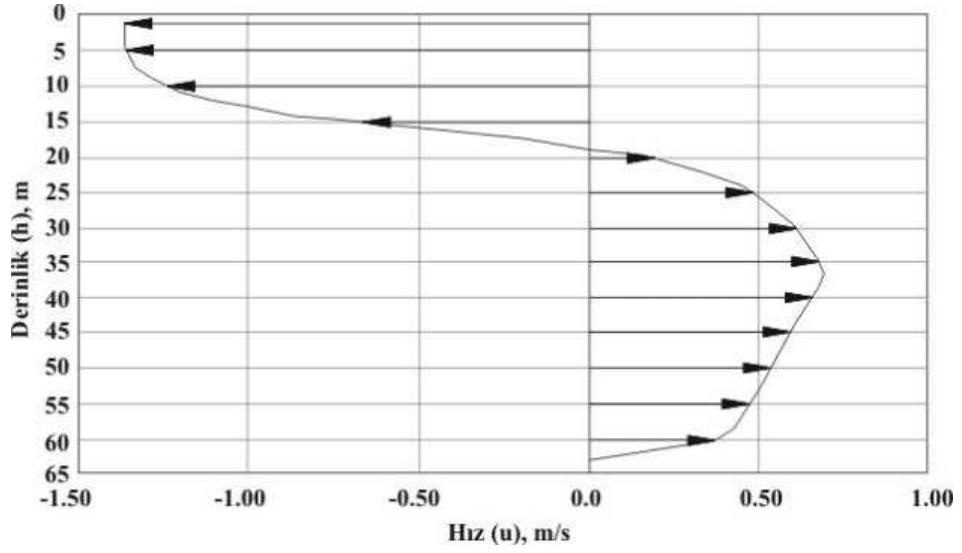
alternatifteki değişim periyodunun başında ve sonunda 6. alternatifin aksine tabakalı akımın varlığını koruduğu görülmüştür. Modelden elde edilen bu sonuç İstanbul Boğazı'ndaki ölçüm sonuçlarını desteklemektedir



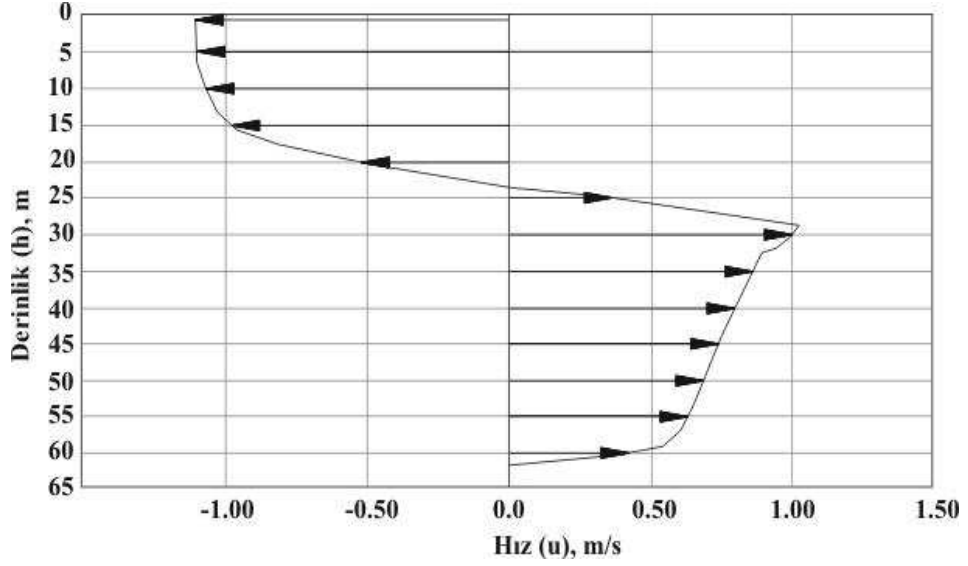
Şekil 4.171 6. alternatif için su seviyesi farkının 20 cm ($t=105,000.s$) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili



Şekil 4.172 6. alternatif için su seviyesi farkının 40 cm ($t=140,000.s$) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili



Şekil 4.173 7. alternatif için su seviyesi farkının 20 cm ($t=120,000.s$) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili

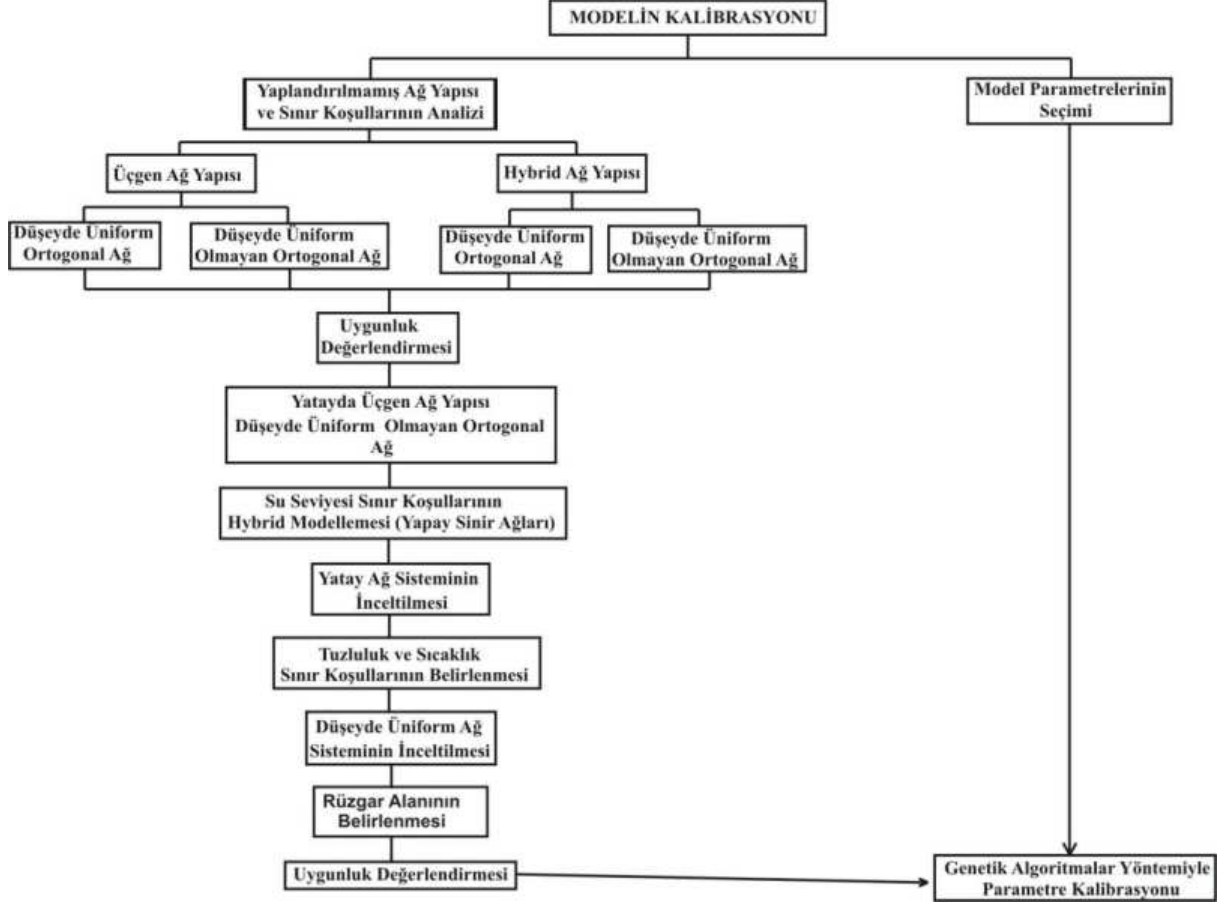


Şekil 4.174 7. alternatif için su seviyesi farkının 40 cm ($t=180,000.s$) olduğu zaman adımında kanal ortası kesitteki derinlik boyunca hız profili

5. İSTANBUL BOĞAZI HİDRODİNAMİĞİNİN SAYISAL MODELİ

5.1 Modelin Kalibrasyonu

Sayısal modelin kalibrasyonunda Şekil 5.1’deki akış şeması izlenmiştir.



Şekil 5.1 Sayısal modelin kalibrasyonunda izlenen yola ait akış şeması

5.1.1 Yapılandırılmamış Ağ Yapısının Analizi

Bölüm 4.3’de İstanbul Boğazı boyutlarına sahip basit dikdörtgen bir kanaldaki tabakalı akım yapısı yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağ yapıları dikkate alınarak modellenmiş ve değişik hidrodinamik parametrelerin (Cr sayısı, taban pürüzlülüğü, eddy viskozitesi, kanal geometrisi, sınır ve başlangıç koşulları) akım yapısı üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ağ yapısı kullanılarak oluşturulan uygun model alternatifleri sonuçlarından, yapılandırılmamış ağ yaklaşımı kullanılan model alternatiflerinin tabakalı bir kanal akımı için “uygun” sonuçlar vererek, daha iyi benzeştirdiği belirlenmiştir.

Bu bölümde kurulan sayısal modellerin tamamında yapılandırılmamış ağ yaklaşımı dikkate alınmış ve İstanbul Boğazı’na ait orijinal batimetri kullanılmıştır. Öncelikle yapılandırılmamış

ağ yaklaşımına ait farklı ağ geometrileri kullanılarak ağ yapısı analiz edilmiş ve en uygun yapılandırılmamış ağ geometrisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

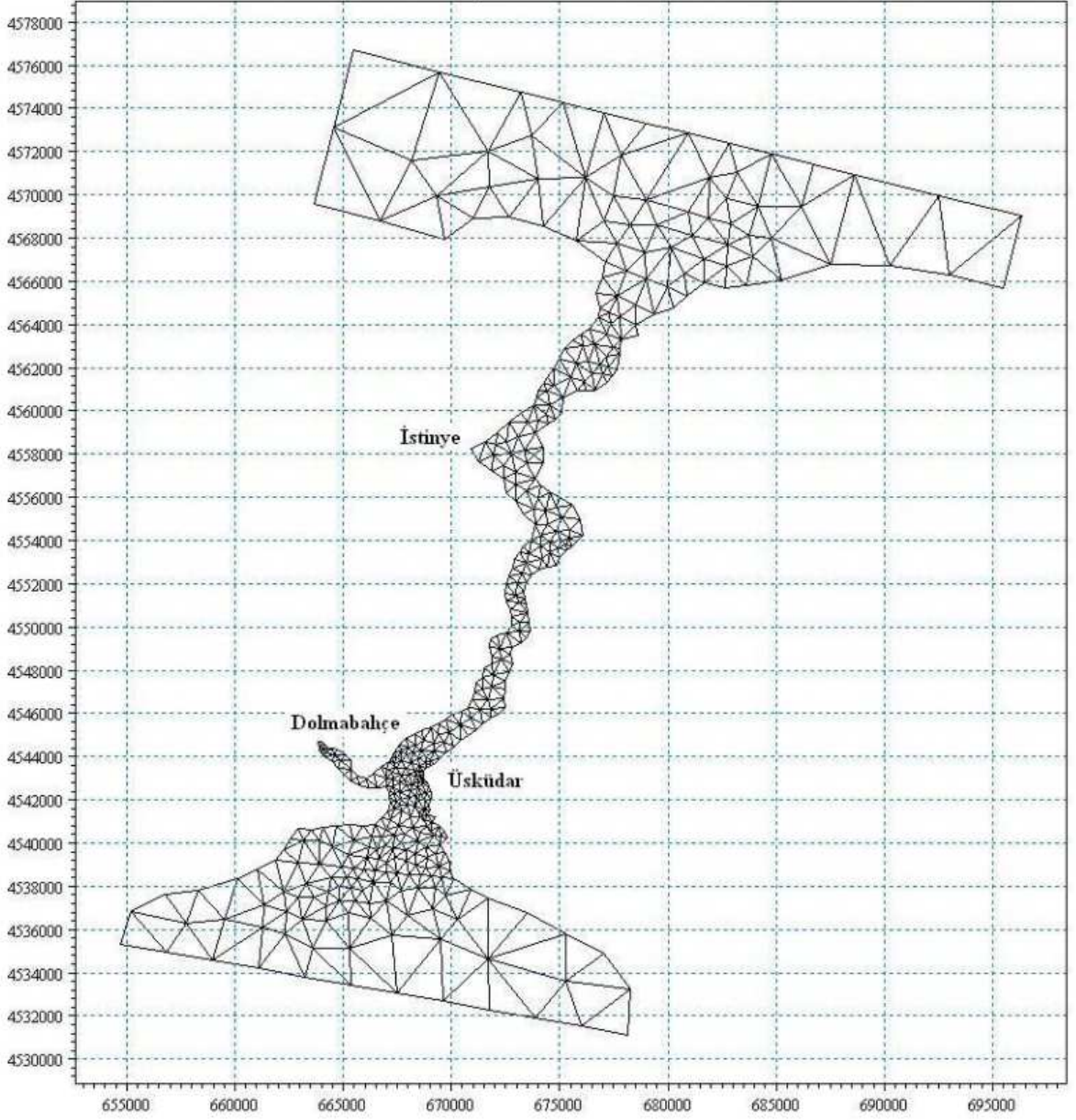
Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı 4 farklı ağ geometrisinin tanımlanmasına imkan vermektedir. Bunlar:

- Yatayda üçgen, düşeyde eşit aralıklı üniform ağ geometrisi
- Yatayda üçgen, düşeyde farklı aralıklara sahip üniform olmayan ağ geometrisi
- Yatayda üçgen ve dörtgen ağların birlikte tanımlandığı hybrid ağ geometrisi, düşeyde eşit aralıklı üniform ağ geometrisi
- Yatayda üçgen ve dörtgen ağların birlikte tanımlandığı hybrid ağ geometrisi, düşeyde farklı aralıklara sahip üniform olmayan ağ geometrisi

İstanbul Boğazı'na ait batimetri için Deniz Kuvvetleri komutanlığına bağlı Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi'nin hazırlamış olduğu sayısal batimetri haritaları kullanılmıştır. ASCII file formatındaki x-y-z koordinatları yapılandırılmamış yaklaşıma ait farklı geometriler dikkate alınarak MIKE ZERO'ya okutulmuş ve model alternatiflerinde kullanılan İstanbul Boğazı batimetrisi oluşturulmuştur. Sırasıyla Şekil 5.2 ve 5.3'de üçgen ve hybrid ağ geometrileri kullanılarak oluşturulmuş İstanbul Boğazı batimetrisi görülmektedir.

Modellere ait diğer sayısal parametreler için Bölüm 4.3'de uygunluk testi aşamasından elde edilen hidrodinamik parametrelere ait değerler kullanılmıştır.

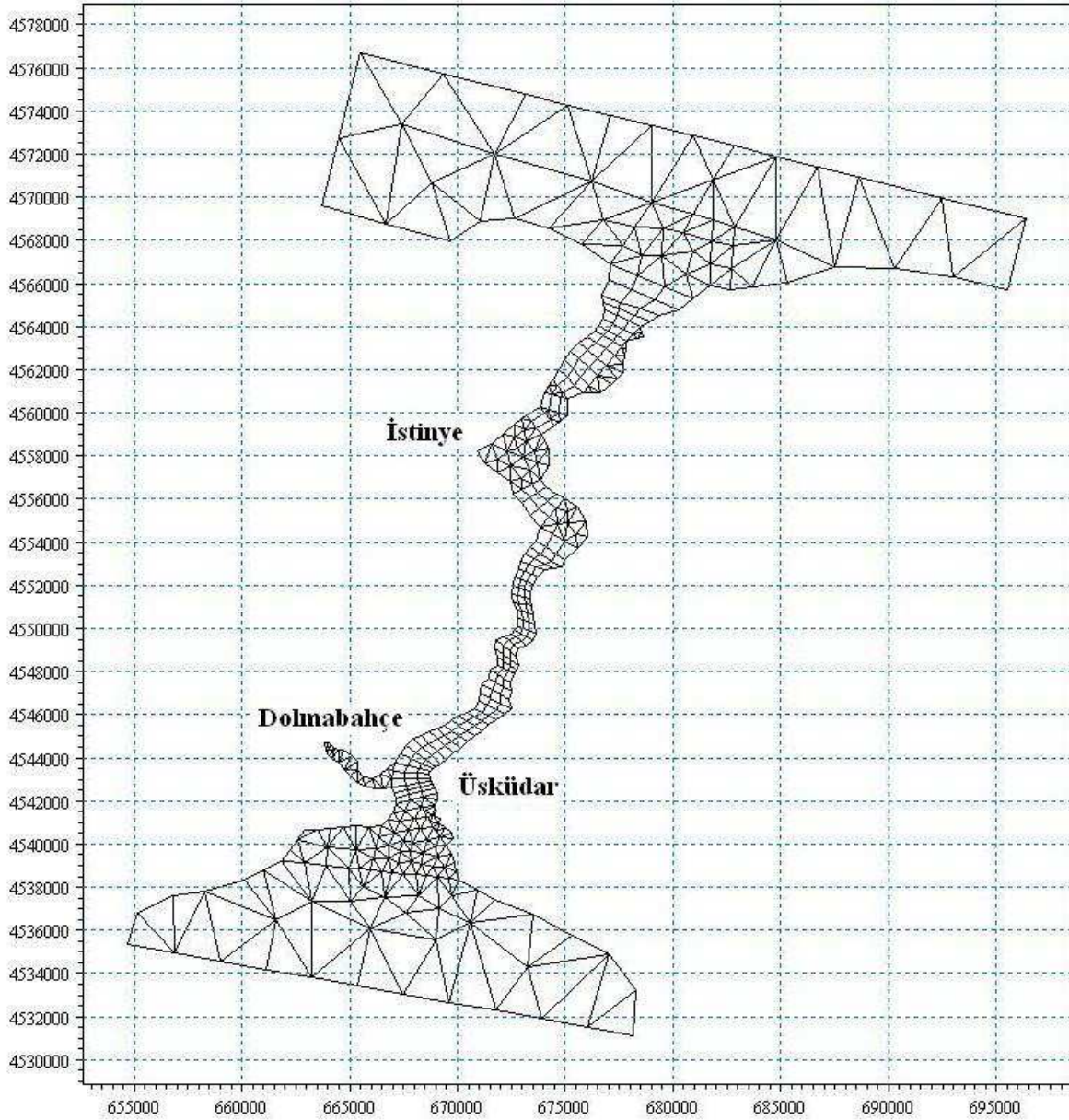
Yapılandırılmamış farklı ağ geometrilerinin İstanbul Boğazı sayısal modeli sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Çizelge 5.1'de görülen 4 adet model alternatifi denenmiştir. Çizelge 5.1'den de görüleceği gibi 1. ve 2. model alternatifleri için yatayda üçgen ağ geometrisi kullanılmıştır. 3. ve 4. model alternatiflerinde ise yatay ağ ayrıklaştırması için üçgen ve dörtgen ağ geometrilerinin birlikte kullanıldığı hybrid yaklaşım tercih edilmiştir. Hybrid ağ ayrıklaştırması durumunda; Boğaz genişliğinin ani değişim gösterdiği bölgeler (Arnavutköy bölgesi, İstinye-Sarıyer arası bölge) ile kıyı çizgisinin karmaşık olduğu bölgelerde (Haliç, Üsküdar ve Boğaz'ın Marmara girişi) üçgen ağ geometrisi kullanılmıştır. Boğaz genişliğinin çok fazla değişmediği (Dolmabahçe-Arnavutköy ve İstinye-Rumeli Hisarı arası bölge) veya kademeli değişim gösterdiği bölgelerde (Boğaz'ın kuzey girişi) ise dörtgen ağ geometrisi kullanılmıştır. Şekil 5.2'de I. ve II. model alternatifleri için kullanılan yatay ağ ayrıklaştırılması, Şekil 5.3'de ise III. ve IV. model alternatifleri için kullanılan yatay ağ ayrıklaştırmaları görülmektedir.



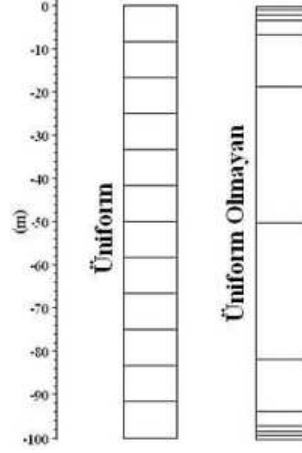
Şekil 5.2 I. ve II. model alternatifleri için kullanılan yatay ağ ayrıklaştırılması (üçgen)

Derinlik boyunca (düşeyde) ise 1. ve 3. model alternatifleri için üniform ortogonal, 2. ve 4. model alternatiflerinde için ise üniform olmayan ortogonal ağ geometrileri kullanıldığı Çizelge 5.1'den görülmektedir. Şekil 5.4'de üniform ve üniform olmayan ortogonal ağ yapısı görülmektedir. Üniform ortogonal ağ yapısı durumunda (1. ve 3. alternatifler) dikkate alınan herhangi bir akım derinliğindeki tabaka aralıkları birbirine eşit değerler almaktadırlar. Üniform tabaka aralığı akım derinliğinin tabaka sayısına bölünmesiyle belirlenmektedir. Üniform olmayan ortogonal ağ yapısı durumunda ise tabaka aralıkları derinlik ortasından başlayarak tabana ve yüzeye doğru kalınlıkları azalacak şekilde gittikçe sıklaştırılmıştır. Böylece derinlik boyunca ağ hassasiyeti derinliğin ortasından başlayarak tabana ve yüzeye doğru arttırılmıştır. Bununla taban ve rüzgar pürüzlülüğü etkisiyle oldukça değişken bir

karaktere sahip olan tabana ve yüzeye yakın bölgedeki akım yapısının daha hassas modellenmesi amaçlanmıştır. Model alternatiflerinin tamamında de derinlik boyunca 25 tabaka tanımlanmıştır (Çizelge 5.1).



Şekil 5.3 III. ve IV. model alternatifleri için kullanılan yatay ağ ayrıklaştırılması (hybrid)



Şekil 5.4 Derinlik boyunca üniform ve üniform olmayan ortogonal ağ yapısı

Çizelge 5.1 Model alternatifleri için yatayda ve düşeyde tanımlanan ağ geometrileri

Alternatifler	Yatay Ağ Ayrıklaştırılması	Düşey Ağ Ayrıklaştırılması	Açıklama
1.Alternatif	Üçgen ağ geometrisi	Üniform ortogonal (25 tabaka)	Derinlik boyunca üniform düşey ağ çözünürlüğü
2.Alternatif	Üçgen ağ geometrisi	Üniform olmayan ortogonal (25 tabaka)	Taban ve yüzeye doğru gittikçe sıklaşan düşey ağ çözünürlüğü (derinliğin ortasından başlayarak tabana ve yüzeye doğru simetrik)
3.Alternatif	Hybrid (üçgen ve dörtgen ağlar)	Üniform ortogonal (25 tabaka)	Derinlik boyunca üniform düşey ağ çözünürlüğü
4. Alternatif	Hybrid (üçgen ve dörtgen ağlar)	Üniform olmayan ortogonal (25 tabaka)	Taban ve yüzeye doğru gittikçe sıklaşan düşey ağ çözünürlüğü (derinliğin ortasından başlayarak tabana ve yüzeye doğru simetrik)

Çalışmanın bu bölümünde farklı ağ yapılarının model sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle bütün model alternatiflerinde ağ yapısı dışındaki model parametreleri aynı değeri alacak şekilde tanımlanmışlardır. Çizelge 5.2’de model alternatifleri için tanımlanan hidrodinamik parametreler ve aldıkları değerler görülmektedir.

Şekil 5.2 ve 5.3’deki model geometrileri ve Çizelge 5.2’deki sayısal parametreler kullanılarak Çizelge 5.1’deki 4 farklı ağ ayrıklaştırması için İstanbul Boğazı’nda 22.02.2005-01.05.2005 tarihleri arasındaki 2 aylık akıntı yapısı modellenmiştir. Modellerden elde edilen farklı derinlikler için kuzey güney doğrultusundaki v akıntı hızları İstanbul Boğazı’nın güneyindeki B istasyonundaki akıntı hızlarıyla karşılaştırılmıştır. B istasyonundaki su derinliği 26 m’dir ve bu istasyonda akıntı hız ve doğrultu ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 5.2 1., 2., 3. ve 4. model alternatiflerine ait hidrodinamik parametreler ve değerleri

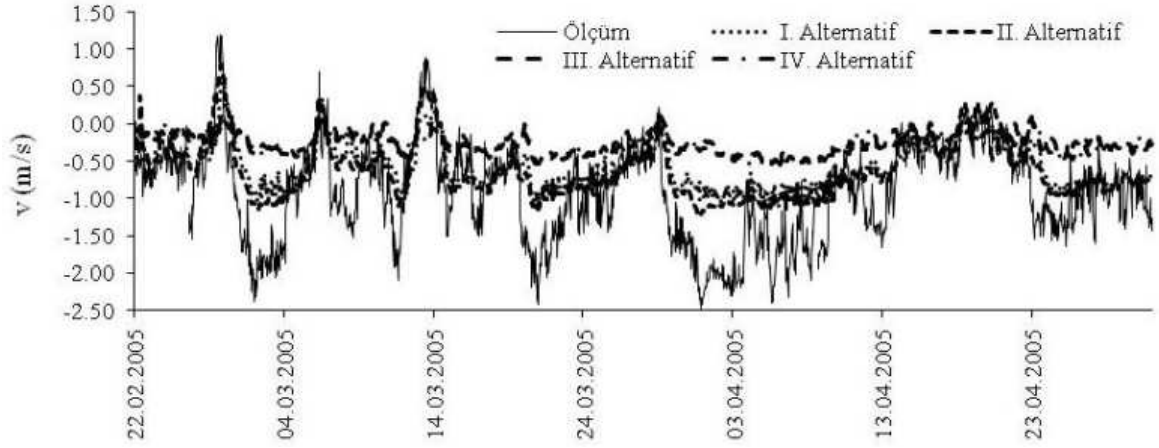
Model Parametreleri		Değerleri	Açıklama
Model alanı (x×y×z) (m)		45,500×49,000×(0-114.5)	
Zaman Adımı Aralığı (Δt) (s)		600	
Maksimum Courant Sayısı (C _r)		0.5	
Tuzluluk (PSU)	Marmara	18-38	Marmara sınırında yüzeyden 15 m'ye kadar 18 psu, 15 m'den tabana kadar 38 psu. Karadeniz sınırında ise yüzeyden 40m'ye kadar 18 psu, 40'den tabana kadar 35 psu olacak şekilde derinlikle değişen profil serisi
	Karadeniz	18-38	
Su seviyesi değişimi (η)		Ölçüm verisi	22.02-01.05.2005 tarihleri arasındaki Boğaz'ın Marmara ve Karadeniz girişlerindeki su seviyesi ölçümleri kullanıldı
Pürüzlülük (ks) (m)		0.30	sabit
Rüzgar sürtünme katsayısı (c _D)		min	ECMWF rüzgar verileri kullanılmış. c _D minimum (7 m/s) ve maksimum (25 m/s) rüzgar hızları için sırasıyla 1.255×10^{-3} ve 2.425×10^{-3} , ara değerler için doğrusal değişen değerler almaktadır.
		maks	
Eddy Viskozitesi Limitleri	x	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	
	y	$1.8 \times 10^{-6} - 10^6$	
	z	$1.8 \times 10^{-6} - 100$	
Başlangıç Tuzluluğu (PSU)		18-38	Üç boyutlu değişken
Başlangıç Su Yüzü profili (m)		0-20	Marmara sınırında 0, Karadeniz sınırında 0.20 m arasında doğrusala yakın gidiş
Simülasyon Zamanı (t) (s)		5,788,800	2 Ay
Başarı ile çalıştığı süre (s)		5,788,800	

Şekil 5.5'de -1 m'deki model alternatiflerine ait akıntı hızı (v) sonuçları ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi görülmektedir. I. ve II. alternatiflerin III. ve IV. model alternatiflerine göre ölçümlerle daha yakın sonuçlar verdikleri görülmektedir.

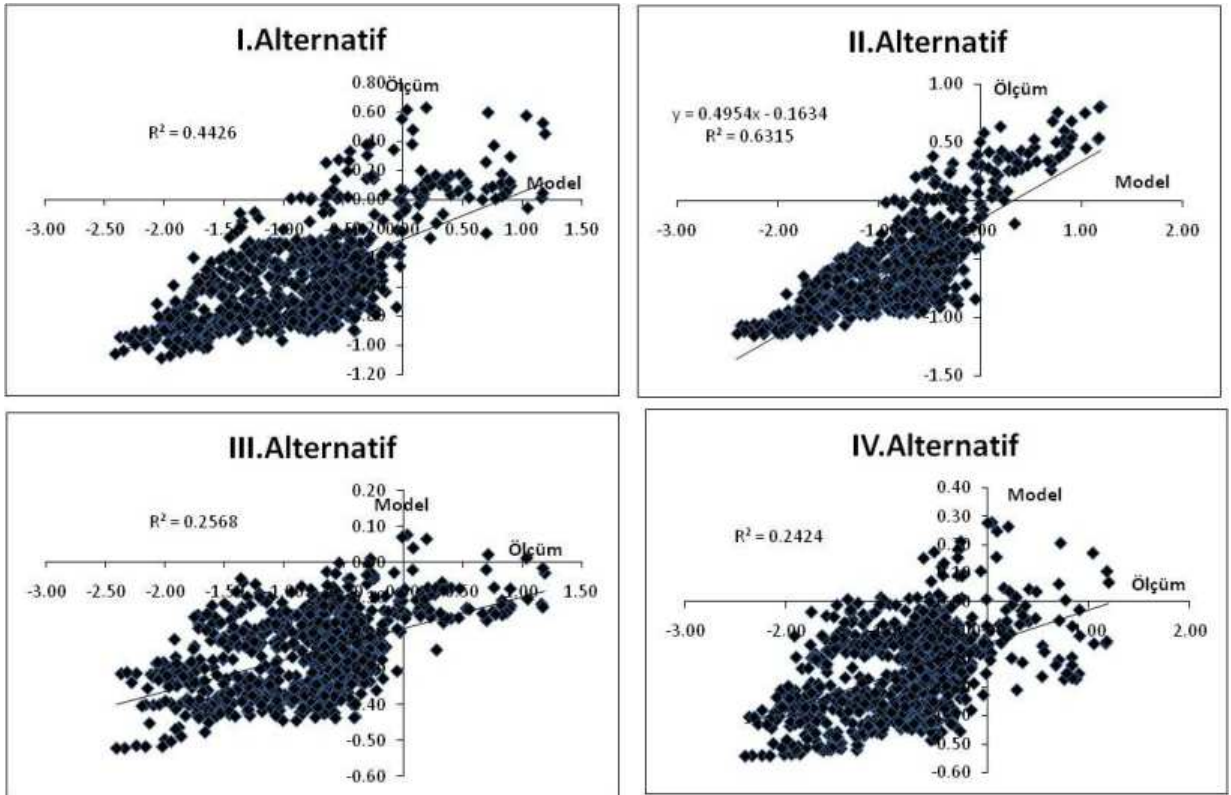
Şekil 5.6'da ise model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri birlikte verilmiştir. Model alternatifleri ile ölçümler arasındaki en yüksek korelasyonu II. model alternatifinin yakaladığı görülmektedir. Yatayda hybrid ağ geometrisinin kullanıldığı III. ve IV. alternatiflerde ise korelasyonların oldukça düşük değerler aldıkları Şekil 5.6'dan görülmektedir.

Şekil 5.7'de ise -1.7 m derinlikteki v hızlarının zamanla değişimi verilmiştir. Yüzeye yakın bu derinlikte de I. ve II. alternatiflerin ölçümlere III. ve IV. alternatiflere göre daha yakın sonuçlar verdikleri görülmektedir. Bu derinlikte I. ve II. model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçlarının -1 m'ye göre (Şekil 5.5) daha yakın oldukları Şekil 5.7'den görülmektedir.

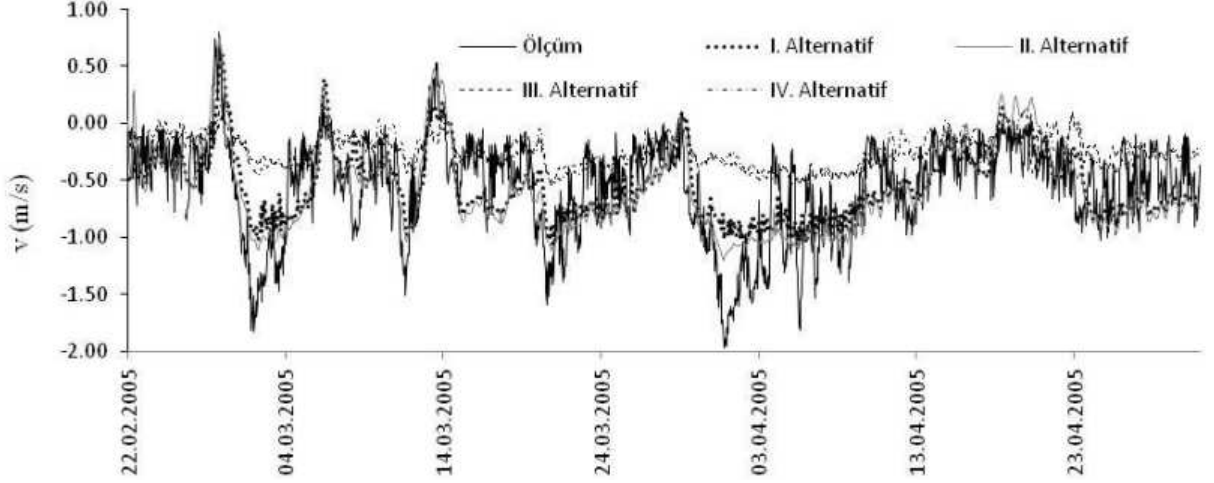
Model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki en iyi korelasyonun -1.7 m için de II. model alternatifinde yakalandığı Şekil 5.8'den görülmektedir.



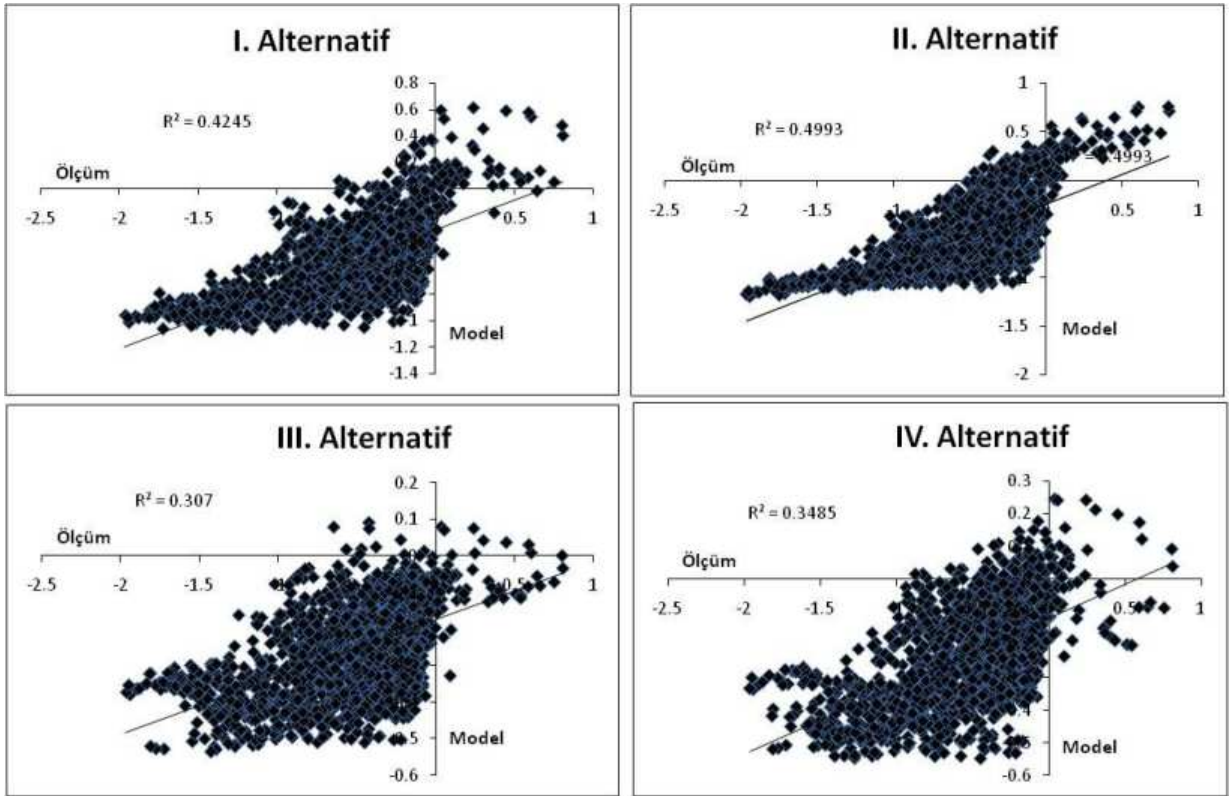
Şekil 5.5 -1 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



Şekil 5.6 -1 m'de model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)



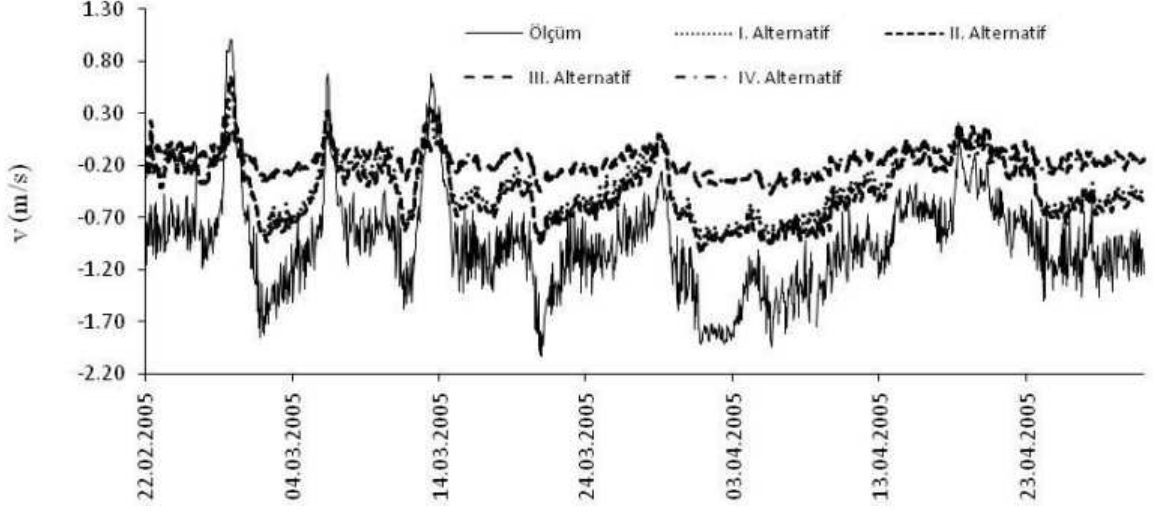
Şekil 5.7 -1.7 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



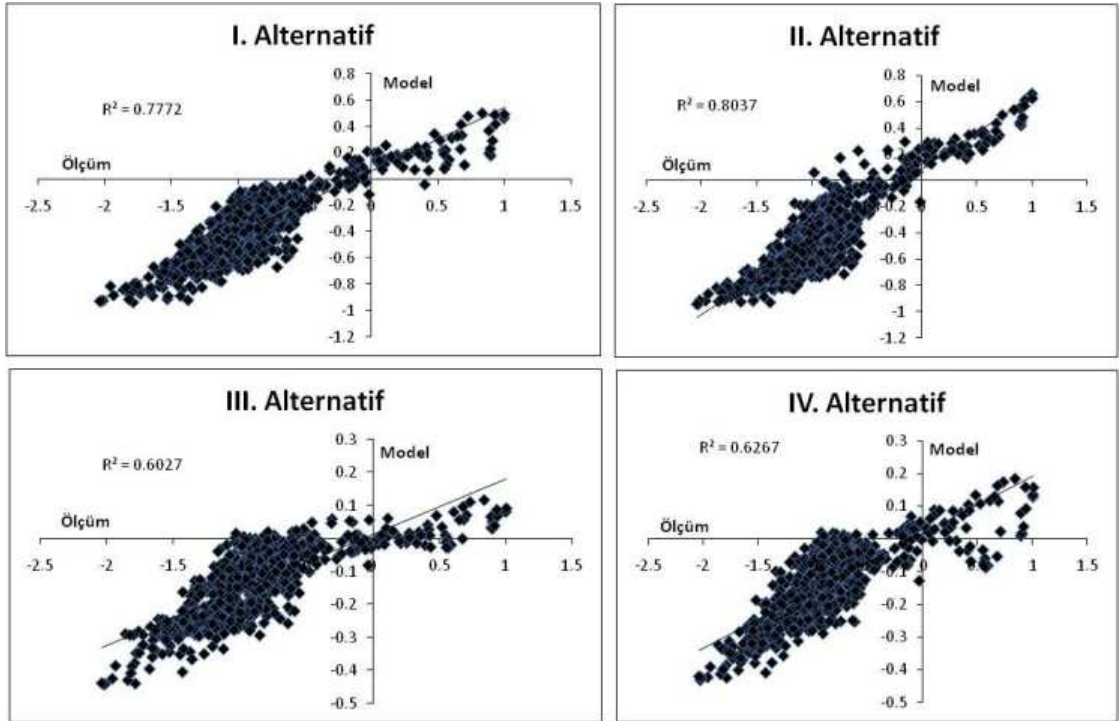
Şekil 5.8 -1.7 m'de model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)

Şekil 5.9'da -5 m'de model alternatiflerine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi görülmektedir. -1 ve -1.7 m'dekine benzer şekilde I. ve II. model alternatifleri sonuçları III. ve IV. model alternatifleri sonuçlarına göre ölçümlere daha yakın değerler almışlardır. III. ve IV. model alternatiflerinin I. ve II. model alternatifleri ve ölçüm sonuçlarına göre daha kararlı bir davranış sergiledikleri Şekil 5.9'dan görülmektedir.

Şekil 5.10'da ise her bir model alternatifini için -5 m'deki model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının korelasyonu grafikleri birlikte verilmiştir. Bütün model alternatiflerinde modeller ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonların önceki iki derinliğe göre daha yüksek oldukları ancak en yüksek korelasyonun yine II. model alternatifinde yakalandığı Şekil 5.10'dan görülmektedir.



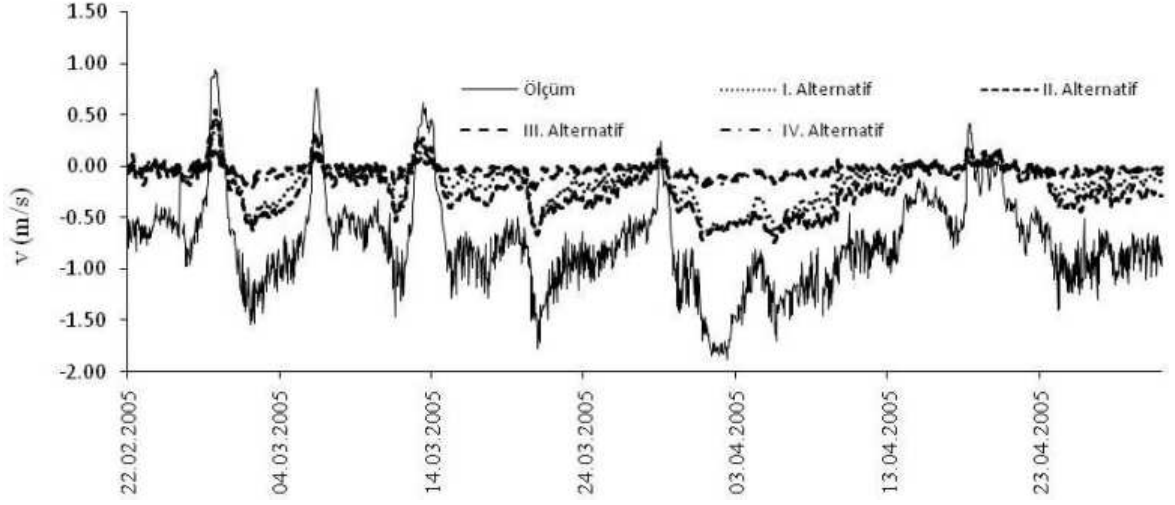
Şekil 5.9 -5 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



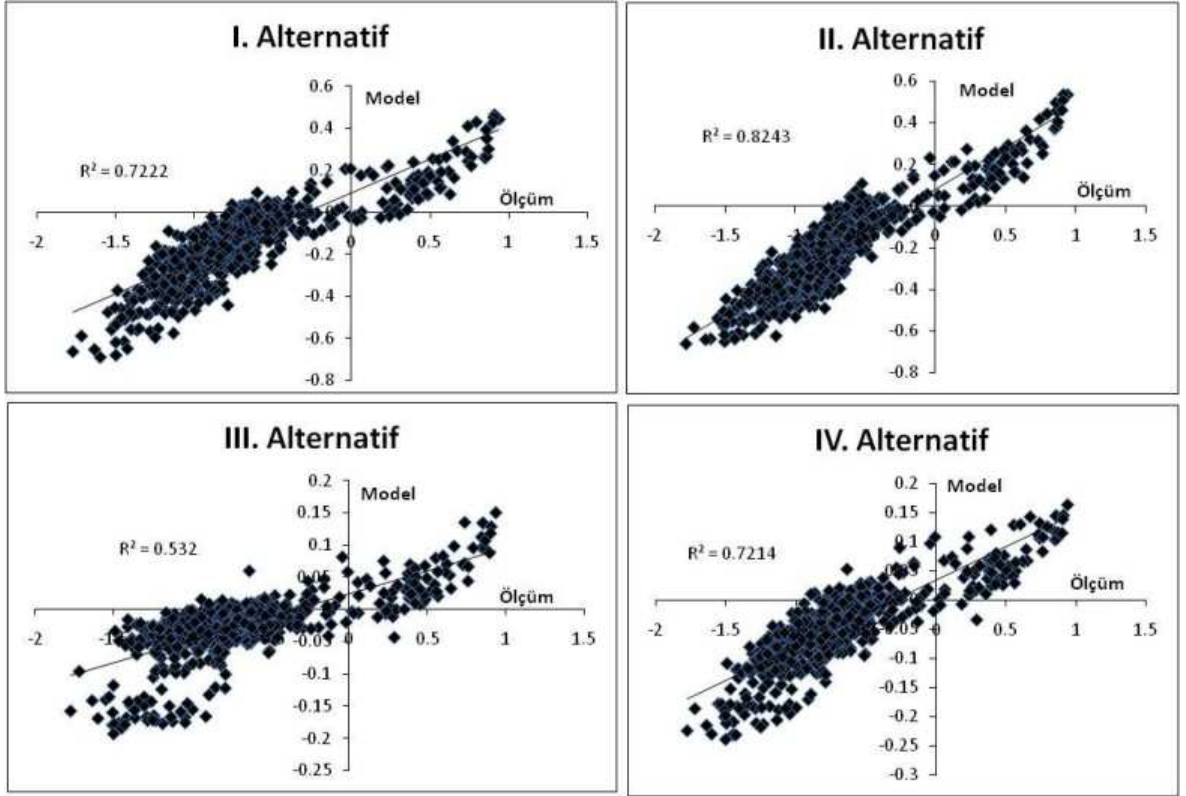
Şekil 5.10 -5 m'de model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)

Şekil 5.11'de -10 m'deki model alternatiflerine ait akıntı (v) hızları ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi, Şekil 5.12'de ise model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının korelasyonu

grafikleri birlikte verilmiştir. Ölçümlerle model alternatifleri arasında en yakın sonucun II. model alternatifinde elde edildiği her iki şekilden de görülmektedir.



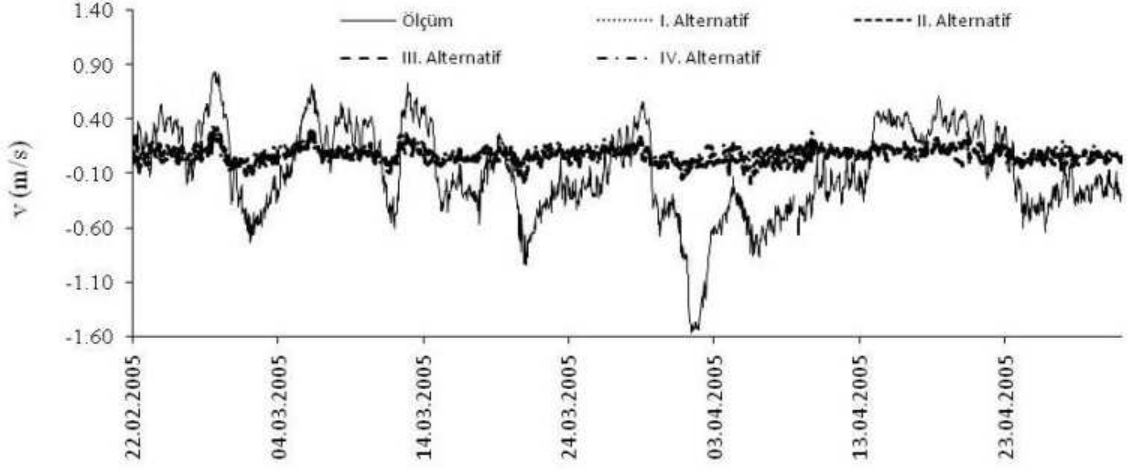
Şekil 5.11 -10 m'de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



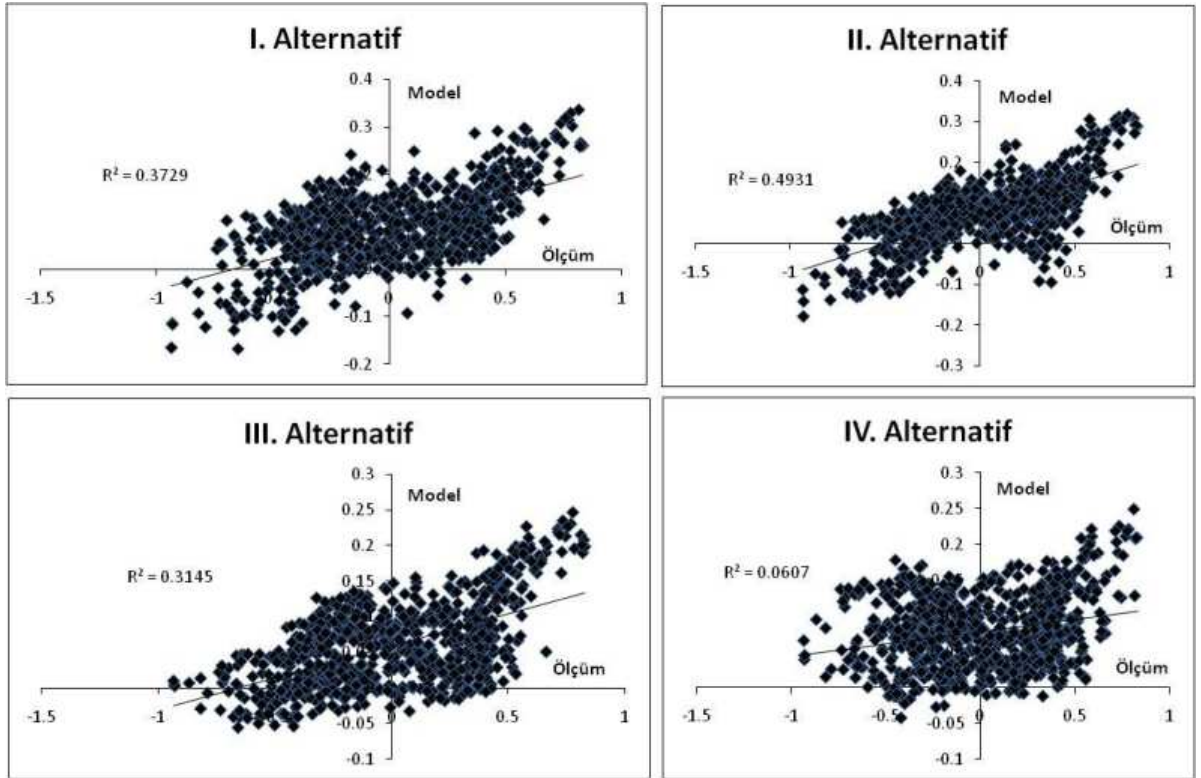
Şekil 5.12 -10 m'de model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)

Şekil 5.13'de ise -20 m'deki model alternatiflerinden elde edilen hızlar ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi görülmektedir. Model alternatiflerine ait hızların oldukça düşük mertebelerde oldukları ve birbirlerine yakın değerler aldıkları Şekil 5.13'den görülmektedir.

-20 m’de model sonuçları ile ölçüm verileri arasındaki en iyi korelasyonun (R) yatayda üçgen, düşeyde ise üniform olmayan ortogonal ağ geometrisinin kullanıldığı II. model alternatifinde elde edildiği Şekil 5.14’den görülmektedir.



Şekil 5.13 -20 m’de kuzey-güney doğrultusundaki model ve ölçüm hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



Şekil 5.14 -20 m’de model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)

Çizelge 5.3’de farklı derinliklerdeki (-1, -1.7, -5, -10, -15 ve -20 m) model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon değerleri bir arada verilmiştir. Bütün derinliklerde model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki en yüksek korelasyona yatayda üçgen,

düşeyde ise üniform olmayan ortogonal ağ geometrisinin tanımlandığı II. model alternatifinde ulaşılmıştır (Çizelge 5.3). Sonuçların birlikte değerlendirilmesinden genellikle yüksek korelasyonların üçgen ağ geometrisinin kullanıldığı I. ve II. model alternatiflerinde yakalandığı görülmüştür. I. ve II. model alternatifleri içerisinde en yüksek korelasyon ise derinlik boyunca üniform olmayan ortogonal ağ geometrisinin kullnıldığı II. alternatifte elde edilmiştir. Böylece yatayda üçgen düşeyde ise üniform olmayan ortogonal ağ geometrisinin sayısal model için en uygun ağ geometrisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.3 Farklı derinliklerde model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon değerleri (R)

Derinlik (m) Alternatif	-1 m	-1.7 m	-5 m	-10 m	-15 m	-20 m	Açıklama	
1. alternatif	0.67	0.65	0.88	0.85	0.84	0.61	Yatay ağ	Üçgen
							Düşey ağ	Üniform ortogonal
2. alternatif	0.79	0.71	0.90	0.91	0.89	0.70	Yatay ağ	Üçgen
							Düşey ağ	Üniform olmayan ortogonal
3. alternatif	0.51	0.55	0.78	0.73	0.72	0.56	Yatay ağ	Hybrid
							Düşey ağ	Üniform ortogonal
4. alternatif	0.49	0.59	0.79	0.85	0.57	0.25	Yatay ağ	Hybrid
							Düşey ağ	Üniform olmayan ortogonal

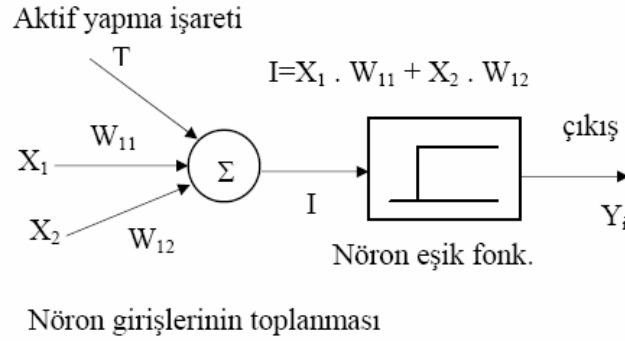
5.1.2 Su Seviyesi Sınır Şartlarının Hybrid (Melez) Modellemesi (Yapay Sınır Ağları)

Uygun ağ geometrisinin belirlenmesinin yanı sıra sınır ve başlangıç koşullarına ait parametrelerin de doğru tanımlanması bir sayısal modelin doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir. Bu ise söz konusu noktalarda yeterli ve kaliteli ölçüm verisinin olmasıyla mümkün olmaktadır. Ancak uygulamadan kaynaklı bazı zorluklardan dolayı sınır koşulunu tanımlayacak ölçüm istasyonları her zaman sayısal modelleme açısından arzu edilen konumlarda bulunmamaktadırlar. Bu durumda sayısal modelin açık sınırlarında oluşabilecek hesap hataları ve stabilite problemlerinden en az etkilenmesi için model sınırlarının ölçümlerin gerçekleştirildiği gerçek konumlarının ötesinde tanımlanması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Ancak bu durumda sayısal modele sınır şartı olarak girilmesi düşünülen ölçüm verileri gerçek konumlarından farklı konumlarda tanımlanmış olmaktadır. Çizelge 5.1'deki I., II., III. ve IV. model alternatiflerine ait su seviyesi sınır şartları bu şekilde tanımlanmıştır. Yani gerçekte model alanı içerisinde yapılan su seviyesi ölçümleri dikkate alınan model sınırlarında tanımlanmışlardır. Ölçüm verilerinin olmadığı model sınırlarında mümkün olduğu kadar en doğru sınır şartlarının tanımlanması için ölçüm noktası ile model sınırları arasında bir ilişkinin kurulması gerekmektedir.

Çalışmanın bu aşamasında su seviyesi ölçüm noktaları ile model sınırları arasındaki ilişki yapay sinir ağları yöntemi (YSA) kullanılarak modellenmiştir.

YSA'nın temel prensibi, mevcut örneklerden yararlanarak olayları öğrenme ve yeni durumlara karşı uygun yanıtlar üretmeye dayanmaktadır. İnsan beyni örnek alınarak geliştirilen bu yöntemde, öğrenme yapay sinir hücreleri (nöronlar) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Çözümü istenen probleme bağlı olarak bir sinir ağı birden fazla ara katmandan ve her katmanda değişik sayıda sinir hücresinden oluşabilir. Ağın giriş katmanında girdiler ağırlıklandırılarak uygun bir aktivasyon fonksiyonundan geçirildikten sonra ara katmandaki sinir hücrelerine iletilirler. Ara katmanda oluşan girdiler de yeniden ağırlıklandırılıp uygun aktivasyon fonksiyonu ile varsa diğer ara katmana, yoksa çıkış katmanına iletilirler. Burada her bir katmanda farklı bir aktivasyon fonksiyonu kullanmak olasıdır.

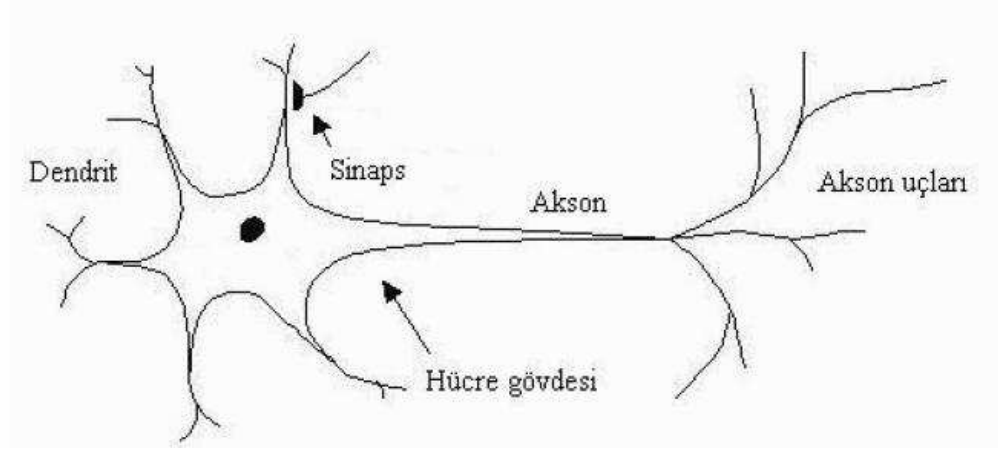
YSA, esas olarak biyolojik nöronların basitleştirilmiş bir şekilde matematiksel olarak modellenmesine dayanmaktadır. Nöron modelinde; bir nöron/işlem elemanı (Şekil 5.15), kendine gelen girişleri toplayan ve sadece girişlerin toplamı iç eşik değerini aştığında çıkış üreten bir işlem elemanıdır (Özbay, 1999). Nöron girişlerindeki işaretler alınmakta ve ağırlık vektörleri ile çarpılarak toplanmaktadır. Eğer toplanan işaret gücü, eşik fonksiyonunu geçiyorsa bir çıkış işareti üretilir. YSA, bu basit nöronların (düğümlerin ya da ünitelerin) birbirleri ile bağlanarak bir ağa dönüştürülmesiyle meydana getirilmektedir.



Şekil 5.15 Nöron modeli

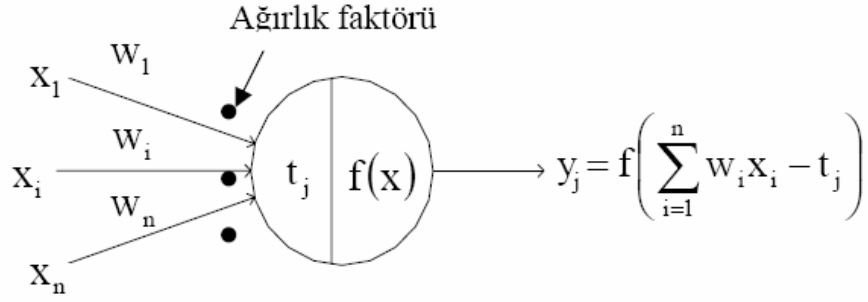
Biyolojik ve yapay sinir hücreleri arasındaki benzeşim (Şekil 5.15) incelendiğinde, hücreler arasındaki bağlantılar (hücreye gelen ve hücreden çıkan uyarımlar) akson ve dendritlere karşılık gelmektedir. Ağırlık faktörleri (w_i) ise sinaplara benzetilmektedir. Ayrıca sınır değerler (t_j) de hücre içi kararlılık haline karşılık gelecek şekilde oluşturulmaktadır. Yapay sinir hücresinde, ağırlık faktörünün etkisine bağlı olarak (w_1, w_2, \dots, w_n) hücreye gelen uyarımlar (x_1, x_2, \dots, x_n) hücre içi denge durumu veya sınır değeri (t_j) de dikkate alınarak doğrusal olmayan

bir aktivasyon fonksiyonu $f()$ yardımıyla çıktı şeklinde uyarımlara (y_j) dönüştürülmektedir (Şekil 5.16b) (Kirkegaard ve Rytter (1993) ve Kröse (1996)).



a) Biyolojik sinir hücresi

Şekil 5.16 Biyolojik ve yapay sinir hücresi



b) Yapay sinir hücresi

Şekil 5.16 Devam

Bu modele göre, bir nöron N tane ağırlıklandırılmış girişi toplamakta ve sonucu lineer olmayan bir fonksiyondan geçirmektedir. Matematiksel olarak (5.1)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$y_i = \sum_i^N x_i w_i + b_i \quad (5.1)$$

burada;

b = Bias değeri,

w = Ağırlıklar matrisi,

x = Giriş matrisi,

N = Giriş sayısıdır.

Ağırlıklar matrisi (5.2) eşitliği, giriş matrisi ise (5.3) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$W = w_1, w_2, w_3, \dots, w_n \quad (5.2)$$

$$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (5.3)$$

Birimin çıkışı bu toplamın (5.4) eşitliği ile verilen doğrusal olmayan bir fonksiyondan geçirilmesi ile hesaplanmaktadır.

$$y = f(y_i) \quad (5.4)$$

Fonksiyonun uygulanması ile birimin çıkışı (5.5) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\left(\sum_i^N x_i w_i + b_i\right)}} \quad (5.5)$$

Aktivasyon Fonksiyonu, YSA'ya doğrusal olmayan bir yapı kazandırmak için ara ve çıkış tabakalarında kullanılan matematiksel bir fonksiyondur. Su seviyesinin tanımlandığı sınır şartlarının YSA ile modellendiği bu çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant hiperbolik işlemci (tan-sigmoid) fonksiyonu kullanılmıştır.

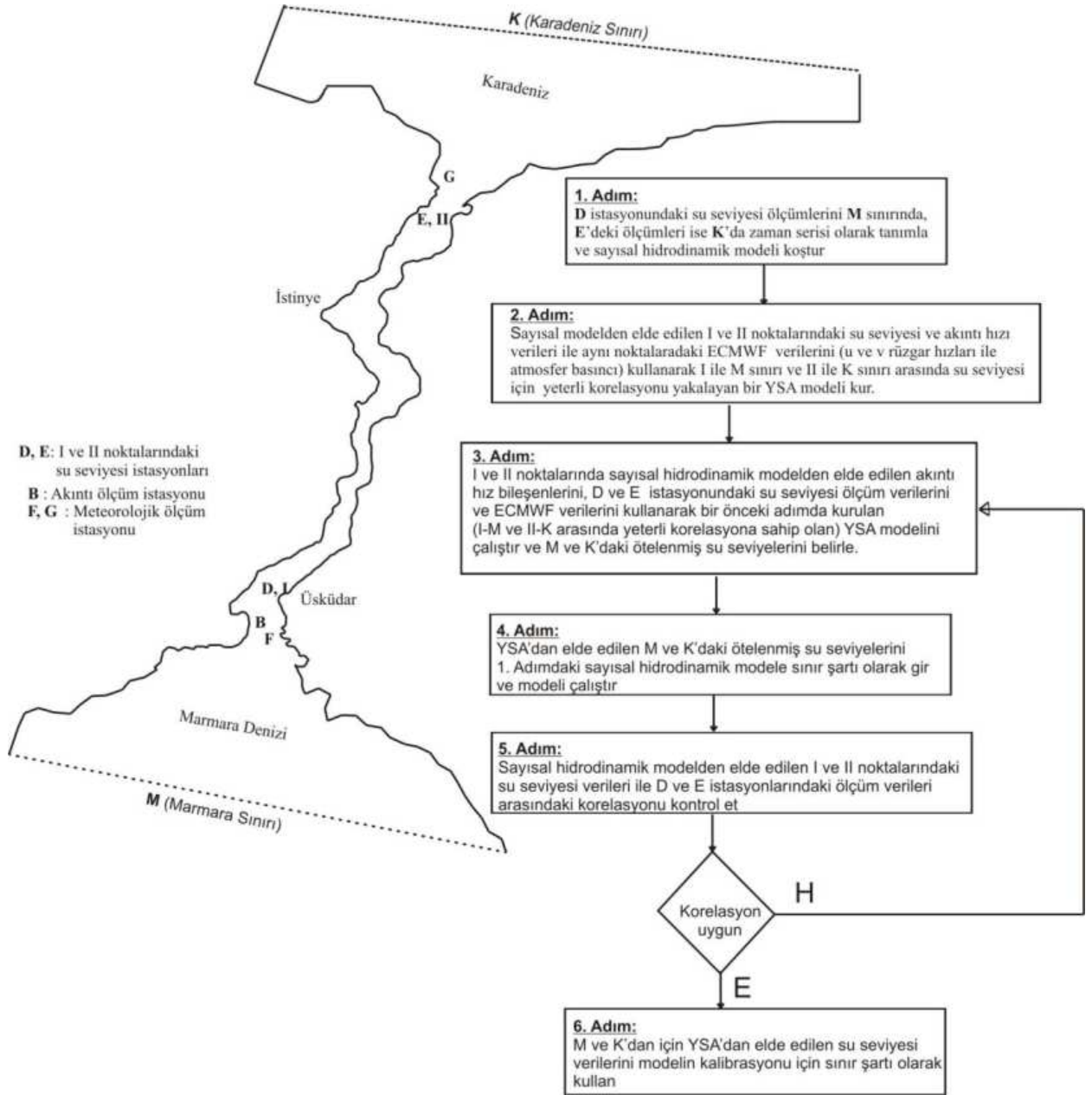
Yapay sinir ağları uygulamaları genellikle eğitime ve test olmak üzere iki aşamada oluşturulur. Eğitim aşaması, katmanlar arasındaki ağırlık faktörlerinin ve sınır değerlerin bir eğitim algoritması yardımıyla hata seviyesi kabul edilebilir bir düzeye gelinceye kadar iteratif olarak düzeltilmesinden meydana gelir; ağırlık faktörlerindeki değişim, öğrenme olarak da tanımlanabilir. Test aşamasında ise eğitim aşamasında kullanılmayan girdi ve çıktı verileri kullanılarak ağın performansı ölçülür (Golden, 1996).

Kullanım amaçlarına göre değişik tiplerde yapay sinir ağları bulunmaktadır. Sınıflandırma, kümeleme, modelleme ve tahmin gibi değişik işlemlerde kullanılan yapay sinir ağlarının en büyük avantajları doğrusal olmayan sistemleri modelleyebilmesi; bilgiyi paralel olarak işleyebilmesi ve yeni durumlara uyum sağlayabilme yeteneği olarak verilebilmektedir (Kalagirou, 1999)

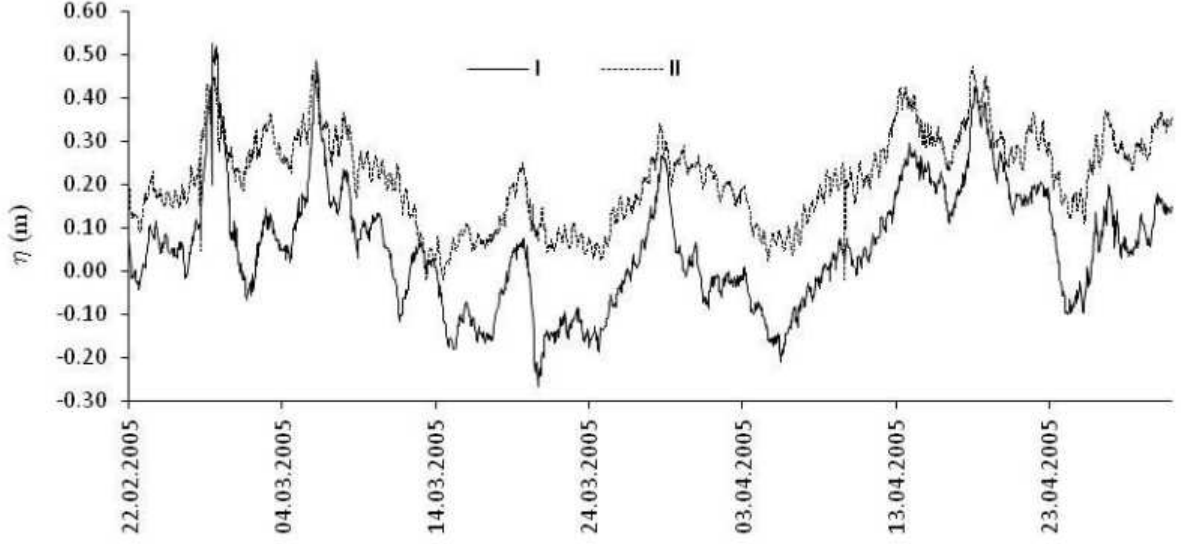
Sırasıyla Şekil 5.17 'deki D ve E su seviyesi ölçüm istasyonlarının bulunduğu I ve II noktalarındaki model sonuçları ile M ve K model sınırları arasındaki ilişki tanjant hiperbolik işlemci (tan-sigmoid) aktivasyon fonksiyonu kullanılarak yapay sinir ağları (YSA) yöntemi ile modellenmiştir. İstanbul Boğazı'ndaki diğer ölçüm istasyonlarının konumu ve su seviyesi sınır şartlarının modellenmesine ait 6 aşamalı akış diyagramı Şekil 5.17'de görülmektedir.

1. Aşama: Marmara (M) ve Karadeniz (K) sınırlarında su seviyesi sınır şartı olarak sırasıyla D ve E su seviyesi ölçüm istasyonlarından alınan 22.02-01.05.2005 tarihleri arasındaki ölçüm verileri girilerek 3 boyutlu hidrodinamik sayısal model oluşturulmuştur. I ve II noktalarından elde edilen hidrodinamik sayısal modele ait su seviyesi değişimleri Şekil 5.18'de görülmektedir.

2. Aşama: Sayısal modelden elde edilen I ve II noktalarındaki su seviyesi değişimi, akıntı hızları (u ve v hızları) ve ECMWF verileri (u ve v rüzgar hızları ile atmosfer basıncı sonuçları) kullanılarak sırasıyla Marmara (M) ve Karadeniz (K) sınırlarındaki su seviyeleri ile söz konusu altı parametre arasında yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak bir ilişki tanımlanmıştır. Diğer bir deyişle I'deki akıntı hızları (u, v), su seviyesi verileri (η) ve aynı noktadaki ECMWF verileri (rüzgar hızı bileşenleri ile atmosfer basınçları) bilinmesiyle M'deki su seviyesi değişimi hesaplanabilmektedir. Benzer durum II ile K arasında geçerlidir. YSA'da parametre sayısının fazla olması dikkate alınan iki nokta arasında ilişkiyi güçlendirdiği için I noktasına ait 6 parametre (η , akıntı hızları (u, v), ECMWF rüzgar (u, v) hızları ve atmosfer basıncı) dikkate alınmıştır. Şekil 5.19 ve 5.20'de sırasıyla I ile M ve II ile K arasında YSA kullanılarak elde edilen korelasyonlara ait grafikler görülmektedir.

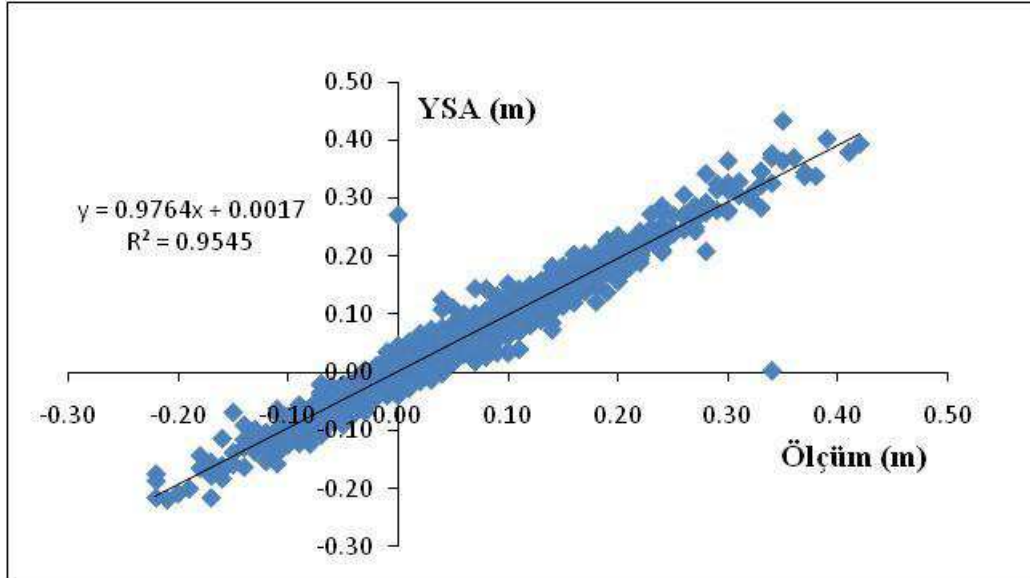


Şekil 5.17 İstanbul Boğazı'ndaki ölçüm istasyonlarının konumları ve YSA ile su seviyesi sınır şartlarının belirlenmesi sırasında izlenen yola ait akış diyagramı

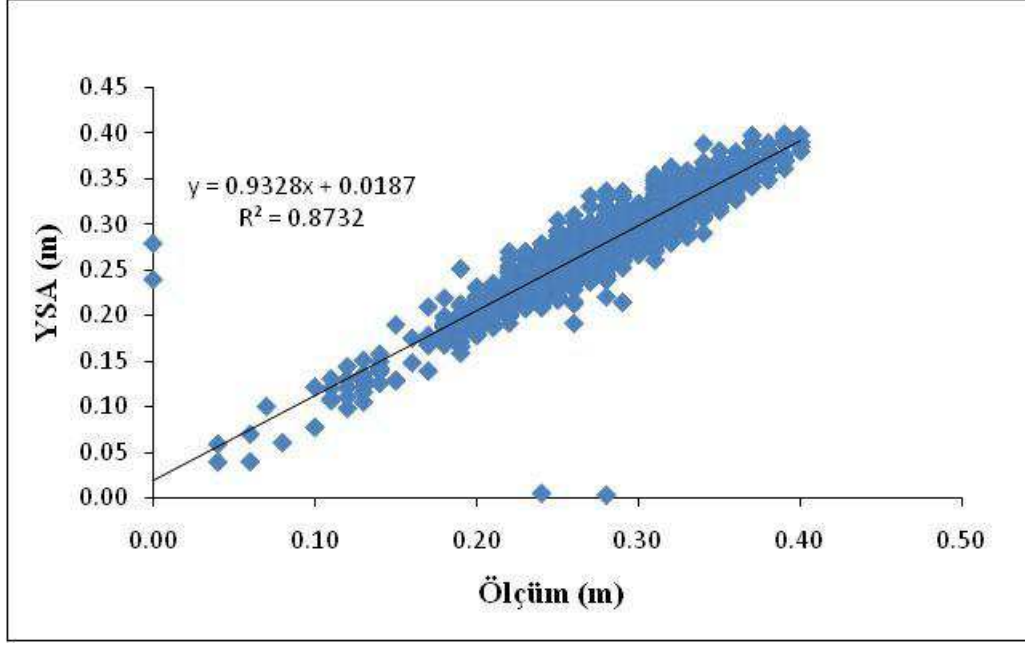


Şekil 5.18 Hidrodinamik sayısal modelden elde edilen I ve II noktalarındaki su seviyelerinin zamanla değişimi(22.02-01.05.2005)

Sırasıyla Şekil 5.19 ve 20’de M ve K için YSA’dan elde edilen su seviyesi verileri ile hidrodinamik sayısal modele sınır şartı olarak girilen su seviyesi ölçüm verileri (D ve E istasyonlarındaki) arasındaki korelasyon grafikleri görülmektedir. Her iki sınırda da ölçüm verileri ile YSA verileri arasında çok yüksek bir uyumun olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayıları (R) Marmara sınırında (M) 0.98, Karadeniz sınırında (K) ise 0.93 civarında değerler almıştır.



Şekil 5.19 Marmara sınırında (M) su seviyesi ölçüm verileri ile YSA verileri arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)

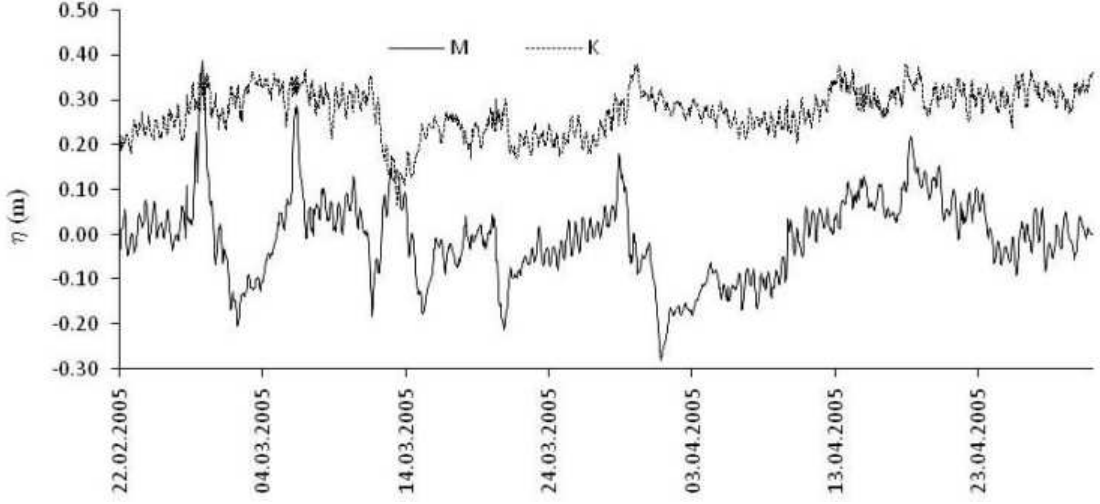


Şekil 5.20 Karadeniz sınırında (K) su seviyesi ölçüm verileri ile YSA verileri arasındaki korelasyon grafiği (22.02-01.05.2005)

3. Aşama: Bu aşamada oldukça yüksek korelasyona sahip olan 2. aşamada elde edilen aynı YSA modelinde su seviyesi (η) değişimi için model sonuçlarının yerine I ve II noktalarındaki ölçüm verileri girdi olarak kullanılmış ve sırasıyla M ve K sınırlarındaki ötelenmiş su seviyesi (η) değişimleri elde edilmiştir.

Bu işlem yapılırken su seviyesi için I ve II noktalarındaki hidrodinamik sayısal model verilerinin yerine ölçüm verileri kullanılmıştır. Ölçüm verisinin olmadığı bu noktalarda akıntı hızları ve meteorolojik (rüzgar hızları ve atmosfer basıncı) veriler için ise sırasıyla I ve II'deki hidrodinamik sayısal model sonuçları ve ECMWF verileri kullanılmıştır. Böylece I ve II noktalarındaki ölçüm ve sayısal hidrodinamik model verilerinin birlikte kullanıldığı hybrid (melez) bir yaklaşımla M ve K'daki yeni su seviyesi (η) sınır şartları modellenmiştir.

Hybrid bir yaklaşım kullanılarak YSA ile modellenmiş M ve K'daki yeni su seviyesi sınır koşulları Şekil 5.21'de görülmektedir.



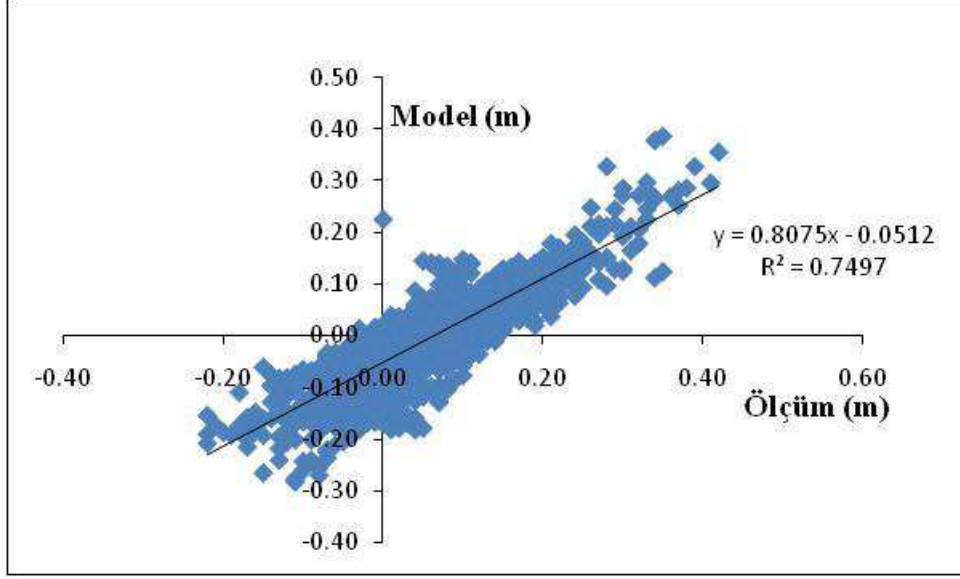
Şekil 5.21 Hybrid yaklaşımla YSA kullanılarak modellenmiş M ve K'daki yeni su seviyesi sınır şartı (22.02-01.05.2005)

4. Aşama: Şekil 5.21'de görülen YSA ile modellenmiş su seviyesi değişimleri 1. Aşamadaki hidrodinamik sayısal modele sınır (M ve K sınırları) koşulları olarak girilmiş ve model çalıştırılmıştır.

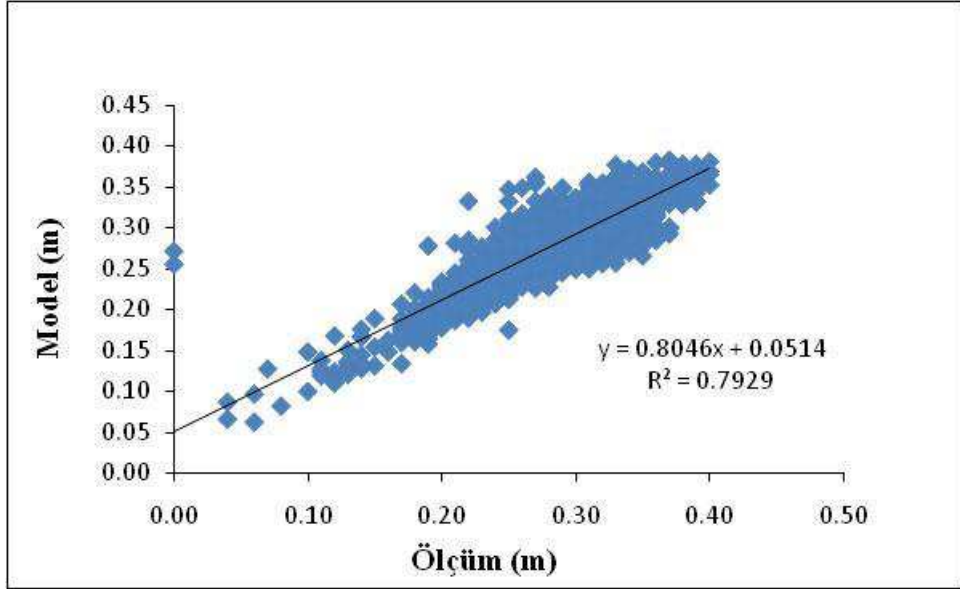
5. Aşama: Böylece 4 aşamanın sonucu olarak sırasıyla I ve II'deki hidrodinamik sayısal modelden elde edilen su seviyesi (η) değişimlerinin yine aynı noktalardaki D ve E istasyonlarındaki ölçüm verileriyle aralarındaki korelasyon kontrol edilmiştir.

Sırasıyla Şekil 5.22 ve 23'de I ve II noktaları için hidrodinamik sayısal model-ölçüm verileri arasındaki korelasyonlar görülmektedir. I noktası için korelasyon (R) 0.87, II noktası için ise 0.89 değerini almıştır. Söz konusu zaman diliminde (22.02-01.05.2005) Boğaz'ın güneyindeki I noktasında hidrodinamik sayısal model ile ölçüm arasındaki uyumun daha yüksek olduğu görülmektedir.

6. Aşama: I ve II noktalarındaki model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonların yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece 5. aşamadaki hidrodinamik sayısal model için su seviyesi (η) sınır şartı olarak Şekil 5.21'deki su seviyesi değişimlerinin kullanılmasına karar verilmiştir



Şekil 5.22 I noktası için hidrodinamik sayısal model ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon (22.02-01.05.2005)



Şekil 5.23 II noktası için hidrodinamik sayısal model ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon (22.02-01.05.2005)

Bir önceki aşamada sayısal hidrodinamik model için en uygun ağ geometrisinin belirlenmesi amacıyla 4 farklı model alternatifi oluşturulmuş ve yatayda üçgen, düşeyde ise üniform olmayan ortogonal ağ geometrisinin en uygun seçenek (II. alternatif) olduğu sonucuna varılmıştı. Model alternatiflerinin tamamında su seviyesi sınır şartı olarak söz konusu dönemdeki D ve E istasyonlarındaki ölçüm verileri tanımlanmıştı.

Çalışmanın bu aşamasında ise en uygun su seviyesi sınır şartının belirlenmesi amacıyla Çizelge 5.4'de görülen 3 farklı model alternatifi denenmiştir. Model alternatiflerine ait diğer

hidrodinamik parametreler I., II., III. ve IV. model alternatifleriyle aynı değerleri almış (Çizelge 5.2) ancak ağ geometrisi için II. alternatif dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.4’de V. VI. ve VII. model alternatiflerinde kullanılan su seviyesi sınır şartları özetlenmiştir.

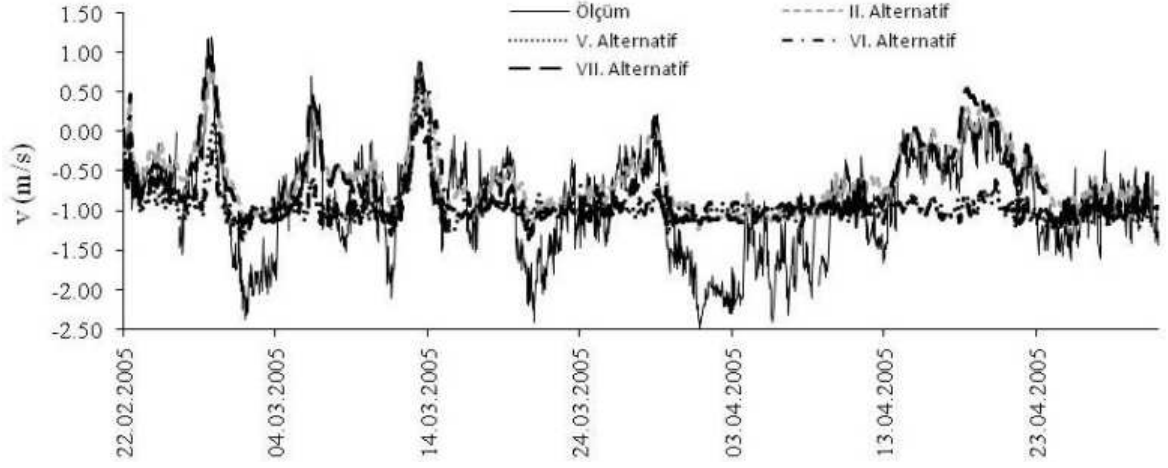
Çizelge 5.4 V.,VI. ve VII. model alternatifleri için tanımlanan su seviyesi (η) sınır şartları

Alternatif	Marmara	Karadeniz	Açıklama
V	YSA	YSA	22.02.-01.05.2009 tarihleri arasındaki dönem verileri
VI	YSA	Ölçüm	
VII	Ölçüm	YSA	

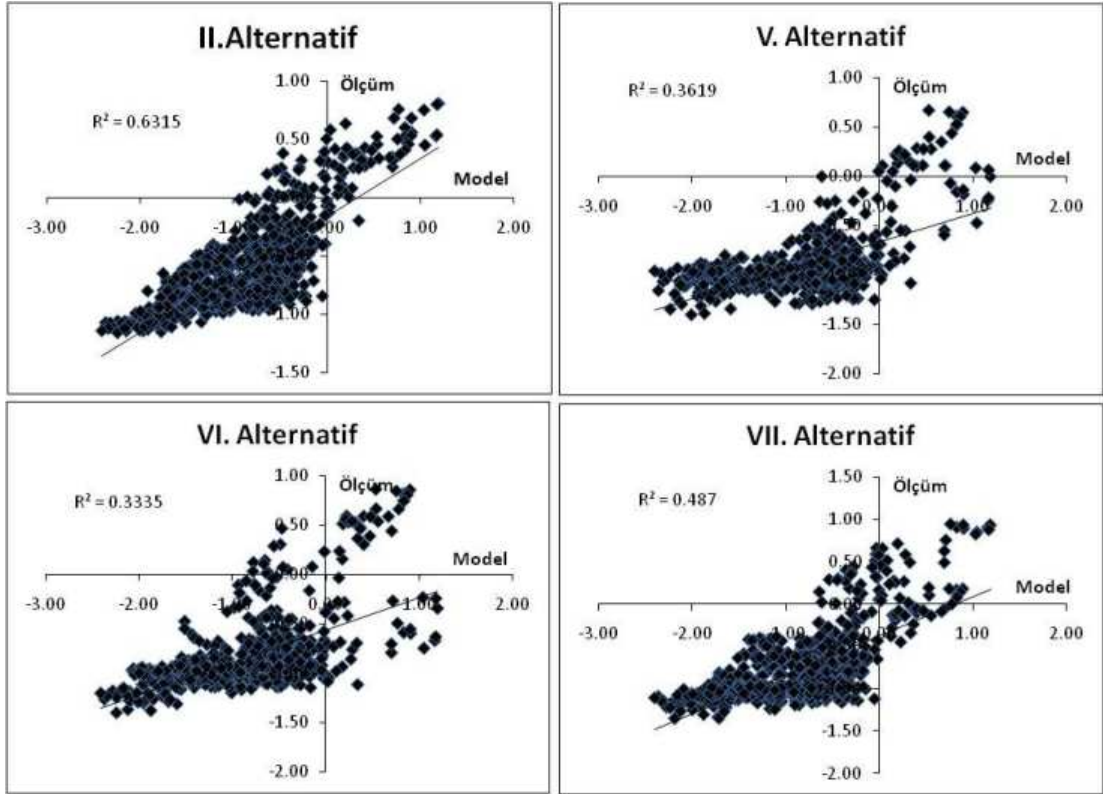
V., VI. ve VII. model alternatifleri kullanılarak İstanbul Boğazı’nın 22.02-01.05.2005 tarihleri arasındaki akım yapısı modellenmiştir. Farklı derinliklerdeki (-1, -1.7, -5, -10, -15 ve -20 m) II., V., VI. ve VII. model alternatifleri sonuçları ile ölçüm sonuçları birlikte değerlendirilmiştir.

-1 m’deki II., V., VI. ve VII. model alternatiflerine ve ölçümlere ait kuzey-güney doğrultusundaki (v) akıntı hızlarının zamanla değişimi Şekil 5.24’de verilmiştir. Su seviyesi ölçümlerinin (η) sınır şartı olarak tanımlandığı II. model alternatifine ait akıntı hızlarının V. VI. ve VII. alternatiflere göre ölçümlerle daha yakın sonuçlar verdikleri Şekil 5.24’den görülmektedir.

Şekil 5.25’de ise -1 m’de her dört model alternatifleri ile ölçüm verileri arasındaki korelasyonlar görülmektedir. Şekil 5.24’e uygun olarak ölçümlerle en yüksek korelasyon II. model alternatifinde elde edilmiştir. V. VI. ve VII. model alternatiflerinde ölçümlerle model sonuçları arasındaki korelasyon katsayılarının II. model alternatifine göre daha düşük değerler aldıkları Şekil 5.25’den görülmektedir.

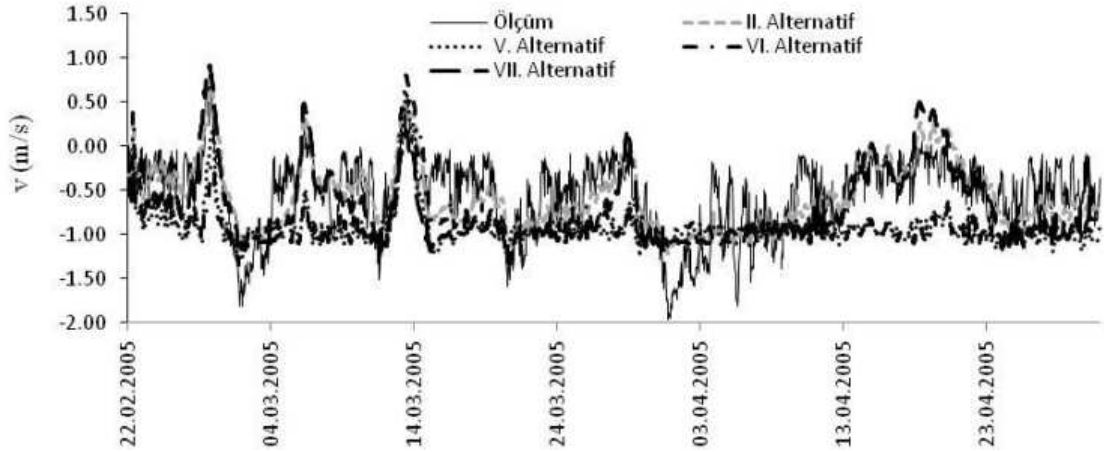


Şekil 5.24 -1 m'de II., V. VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçümlere ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)

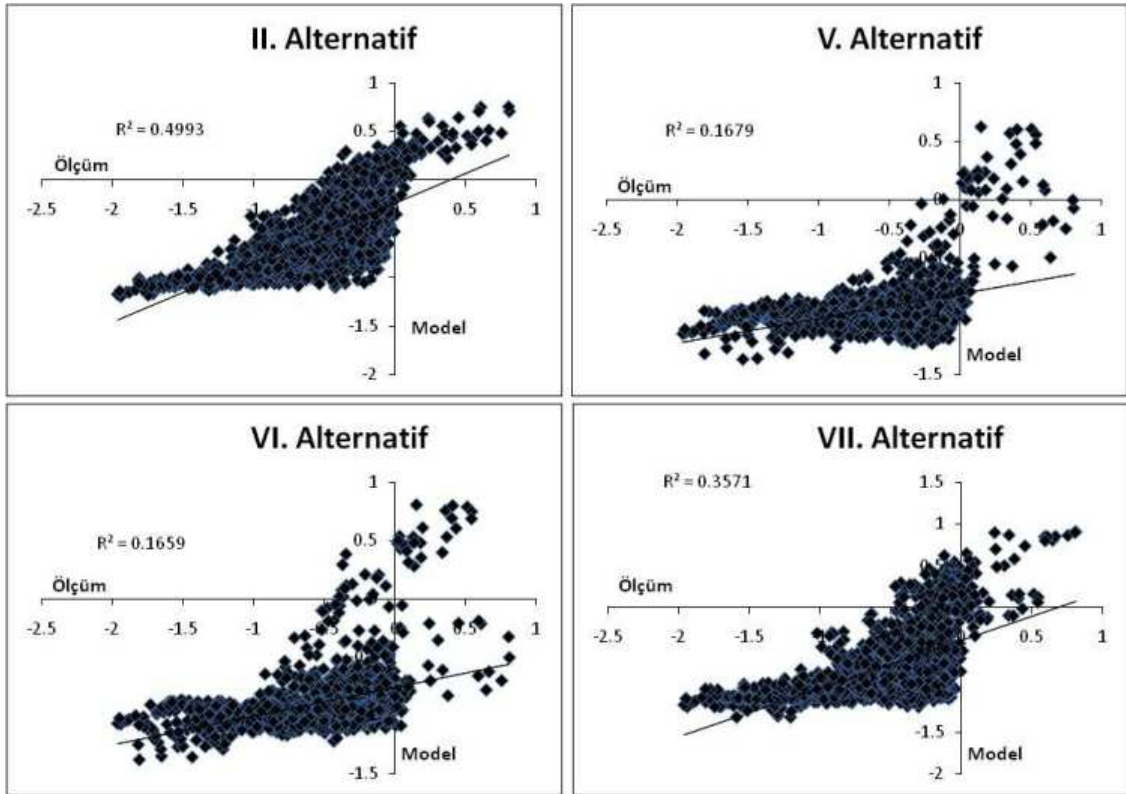


Şekil 5.25 -1 m'de II., V. VI ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005)

Şekil 5.26'da -1.7 m'deki II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ve ölçümlere ait v akıntı hızlarının zamanla değişimi birlikte verilmiştir. Şekil 5.27'de ise her üç model alternatiflerine ait akıntı hızı sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri görülmektedir. Model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonlar -1 m'ye (Şekil 5.25) göre azalmış ancak en yüksek korelasyon yine II. model alternatifinde yakalanmıştır (Şekil 5.27). II. ve VII. model alternatiflerine ait v hızlarının ölçümlerle aynı mertebede olduğu Şekil 5.26'dan görülmektedir.

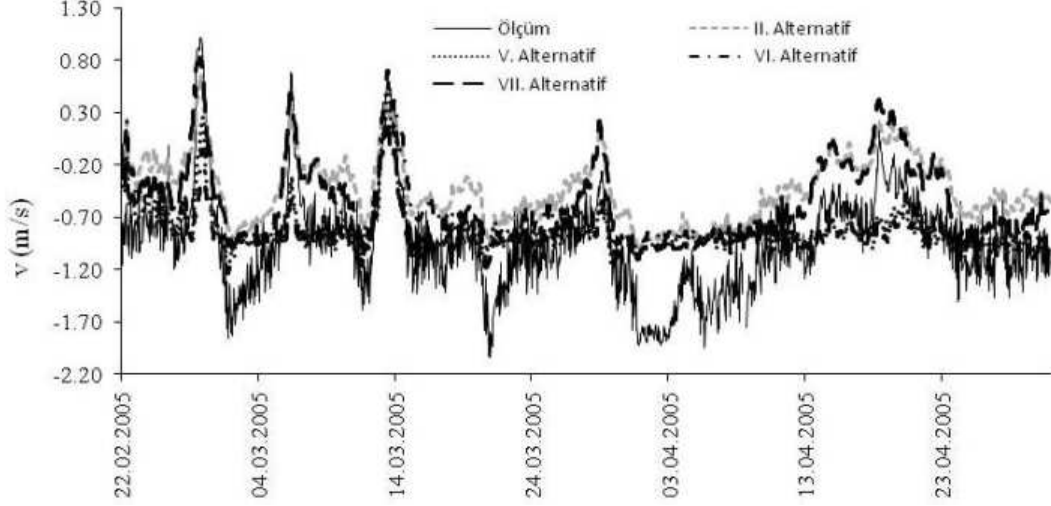


Şekil 5.26 -1.7 m’de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçümlere ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)

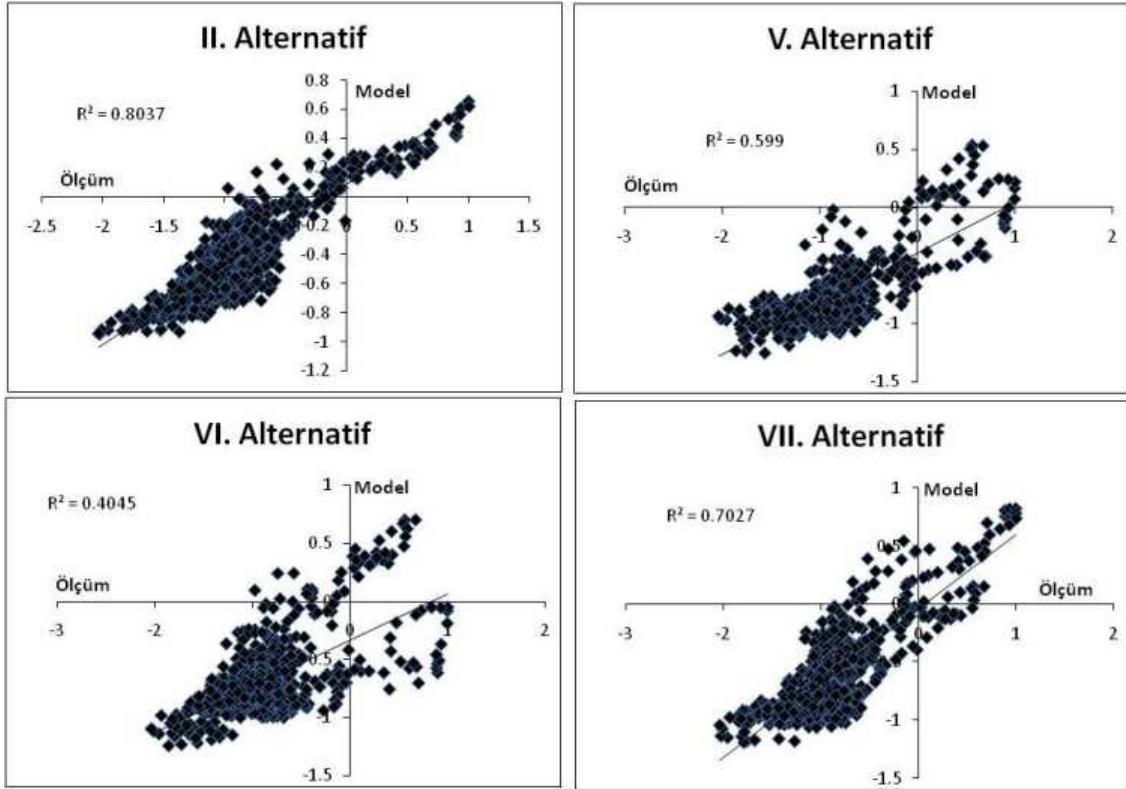


Şekil 5.27 -1.7 m’de II., V. ve VI. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005)

Sırasıyla Şekil 5.28 ve 5.29’da -5 m’de her dört model alternatifini ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi ve model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyonlara ait grafikler görülmektedir. Bu derinlikte de II. model alternatifini diğer iki model alternatifine göre ölçümlerle daha yüksek bir korelasyon elde etmiştir (Şekil 5.29).

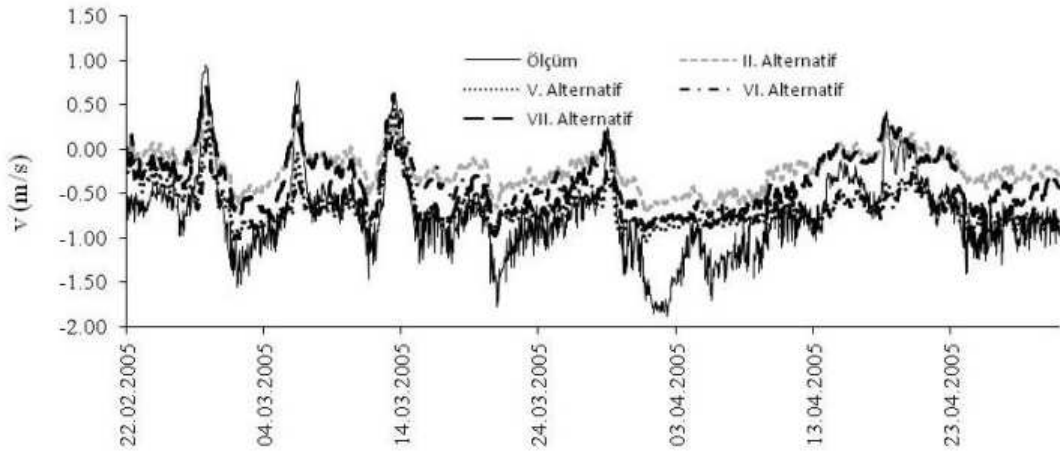


Şekil 5.28 -5 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifine ve ölçümlere ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)

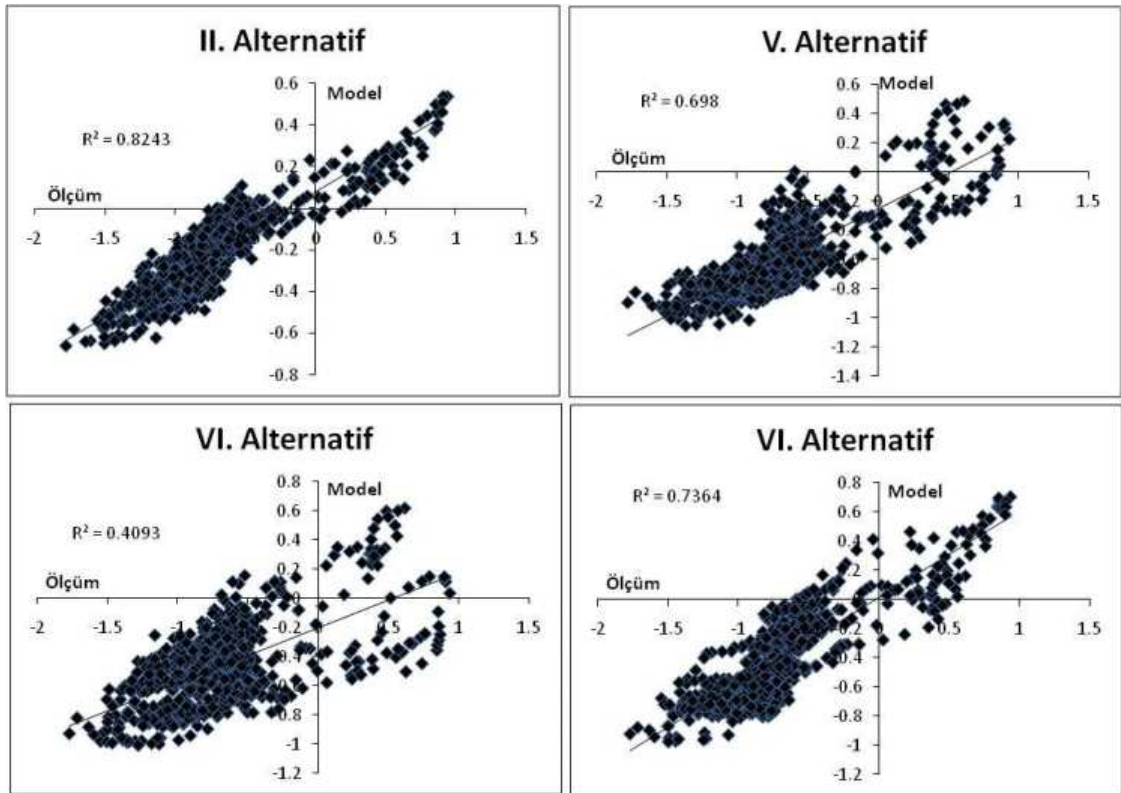


Şekil 5.29 -5 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005)

Şekil 5.30'da -10 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatiflerine ait akıntı hızları ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi, Şekil 5.31'de ise model ve ölçüm sonuçlarına ait korelasyon grafikleri birlikte verilmiştir. Model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki en büyük korelasyon katsayısının II. model alternatifinde yakalandığı Şekil 5.31'den görülmektedir. II. alternatif sonuçlarının ölçümlerle benzer eğilim göstermekle beraber daha düşük hız değerleri verdiği Şekil 5.30'dan görülmektedir.

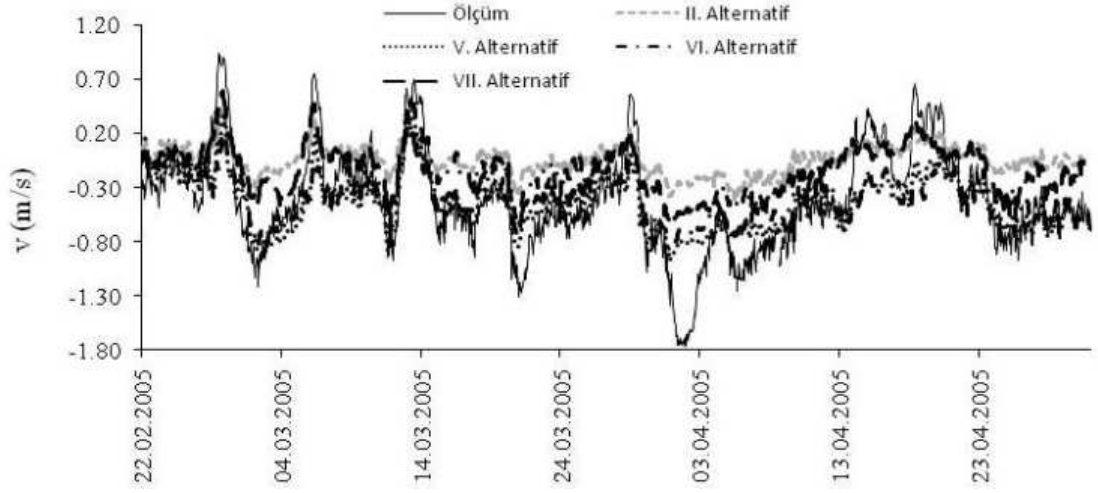


Şekil 5.30 -10 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ve ölçüm sonuçlarına ait hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)

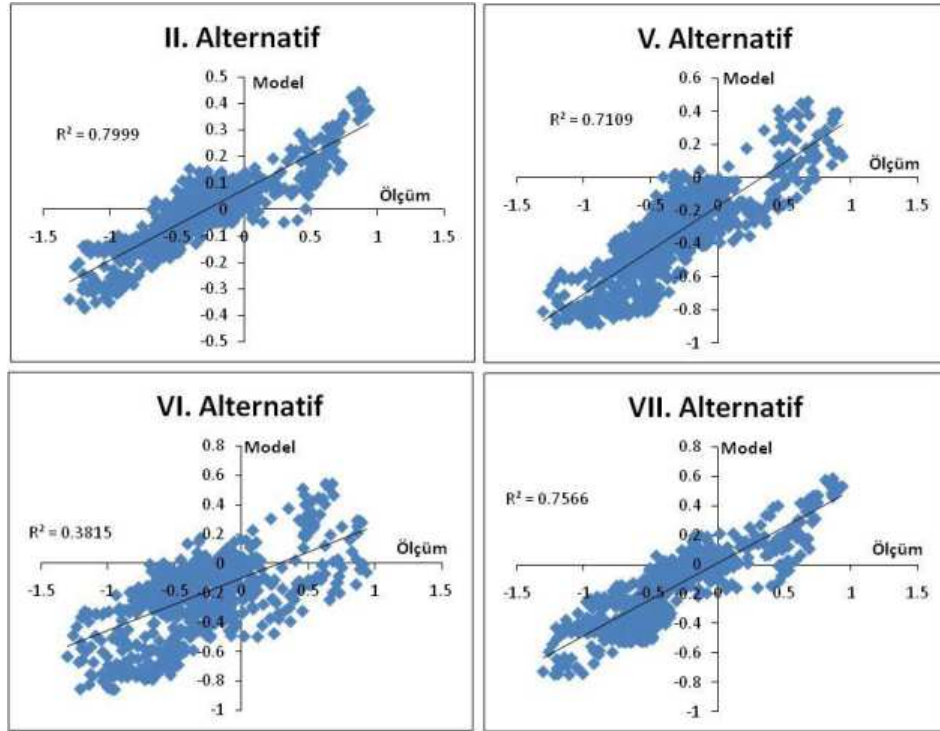


Şekil 5.31 -10 m'de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005)

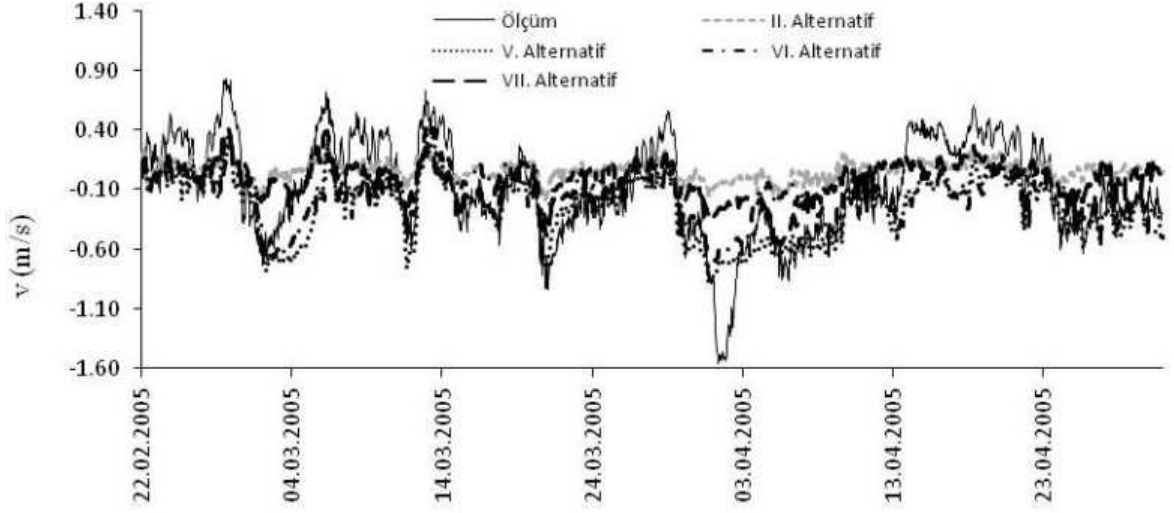
Sırasıyla Şekil 5.32 ve 5.33'de -15 m'deki model alternatiflerine ait akıntı hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi ve modeller ile ölçüm değerleri arasındaki korelasyon grafikleri görülmektedir. Şekil 5.34 ve 5.35'de ise -20 m'de aynı parametrelere ait grafikler görülmektedir. Şekillerin birlikte değerlendirilmesinden -15 m'de II. model alternatifinin, -20 m'de ise Marmara sınırında ölçüm, Karadeniz sınırında ise YSA ile ötelenmiş su seviyesi sınır şartının kullanıldığı VII. model alternatifinin ölçümlerle en yüksek korelasyonu yakaladıkları görülmektedir.



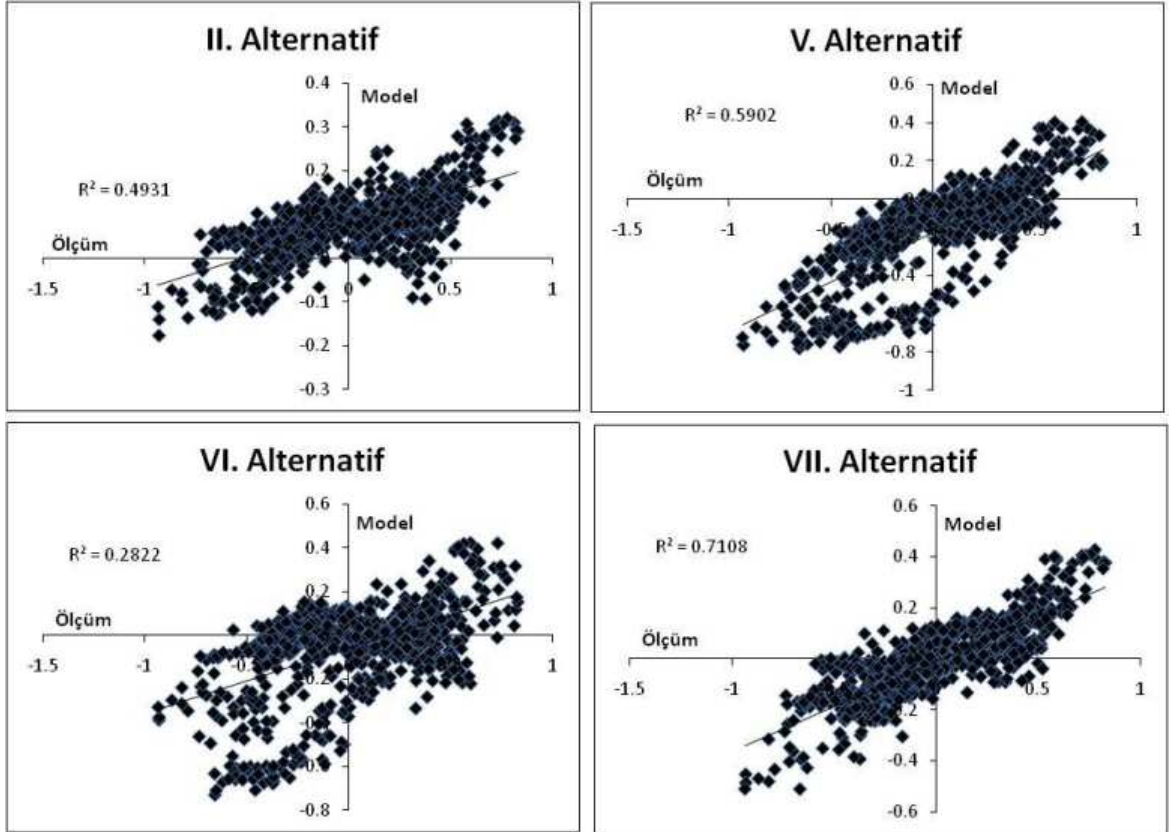
Şekil 5.32 -15 m’de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ve ölçüm sonuçlarına ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



Şekil 5.33 -15 m’de II., V., VI. ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005)



Şekil 5.34 -20 m'de II., V., VI ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarına ait v hızlarının zamanla değişimi (22.02-01.05.2005)



Şekil 5.35 -20 m'de II., V., VI ve VII. model alternatifleri ile ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (22.02-01.05.2005)

Dikkate alınan tüm derinliklerdeki akıntı hızları birlikte değerlendirildiğinde -20 m dışındaki derinliklerde su seviyesi sınır şartı olarak ölçümlerin tanımlandığı II. model alternatifinden elde edilen model hızlarının ölçümlerle en iyi korelasyonu yakaladıkları görülmüştür. -20 m'de ise ölçümlerle en yüksek korelasyonu VII. model alternatifi yakalamıştır. II. model alternatifi -5 m, -10 m ve -15 m'lerde $R^2 \approx 0.80$ mertebesinde yüksek değerler, tabana ve

yüzeye yakın derinliklerde ise daha düşük değerler almıştır. VII. model alternatifi ise yüzeye yakın -1 m ve -1.7 m’de düşük korelasyon değerleri almış buna karşılık diğer derinliklerde ise $R^2=0.70-0.75$ mertebelerinde değişen yüksek değerler almıştır. II. model alternatifi yüzeye yakın derinliklerde (-1 m, -1.7 m) ölçümlerle aynı mertebede hız değerleri elde etmiş (Şekil 5.25 ve 5.27) buna karşın diğer derinliklerde ise ölçümlere göre daha düşük hızlar elde etmiştir (Şekil 5.28, 30, 32 ve 34).

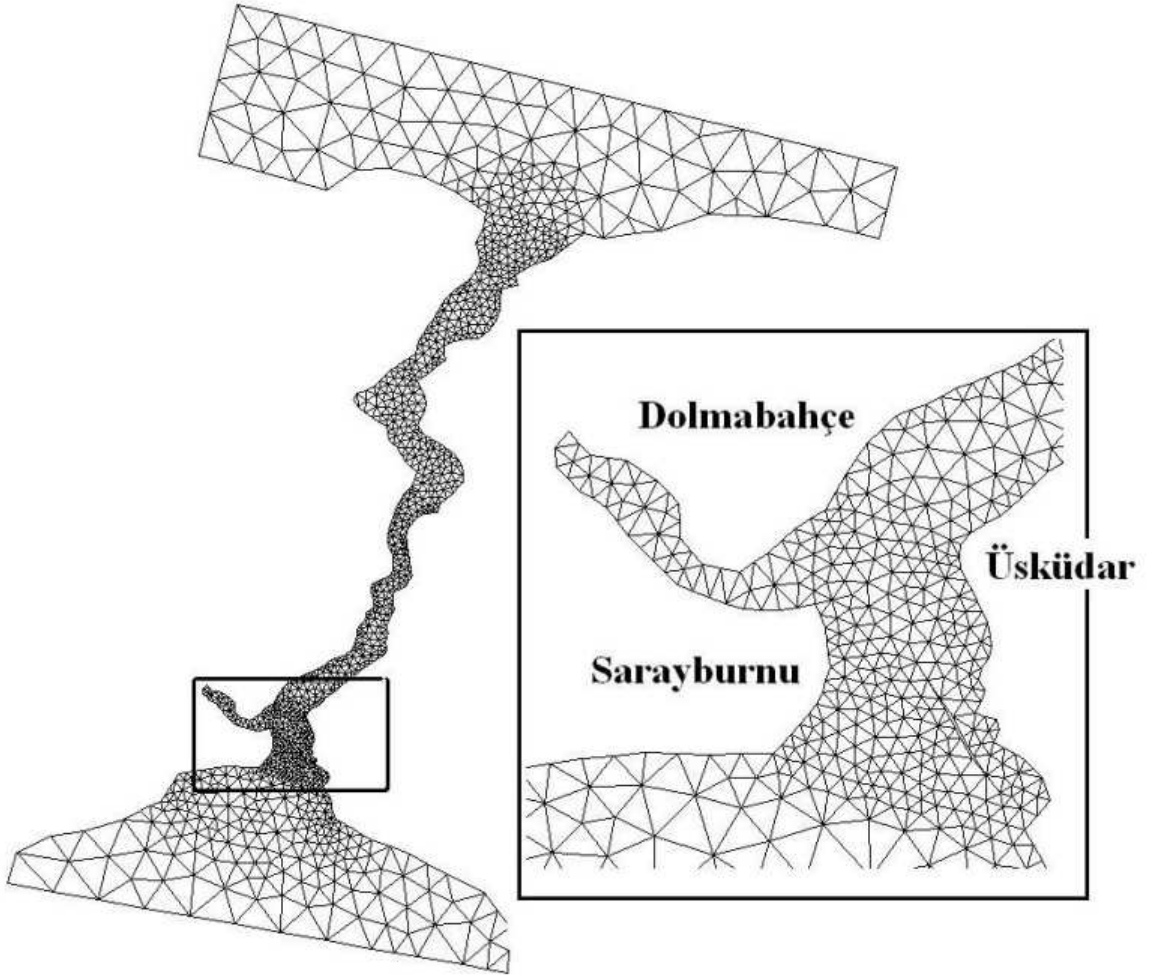
En uygun su seviyesi sınır şartının (η) belirlenmesi amacıyla değerlendirilen II., V., VI. ve VII. model alternatifi sonuçlarından ise ölçüm verilerinin kullanıldığı II. model alternatifinin -20 m dışındaki derinliklerde diğer alternatiflere göre ölçümlerle en yüksek korelasyonu elde ettiği görülmüştür. Böylece İstanbul Boğazı sayısal modelinde sırasıyla Marmara ve Karadeniz sınırında su seviyesi sınır şartı olarak doğrudan Boğaz’ın güneyindeki ve kuzeyindeki su seviyesi ölçüm verilerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

5.1.3 Yatay Ağ Sisteminin İnceltilmesi

Gerek yapılandırılmamış ağ yapısının analiz edildiği I. ve II. model alternatiflerinde gerekse en uygun su seviyesi sınır şartlarının belirlenmesi amacıyla oluşturulan V., VI. ve VII. model alternatiflerinin tamamında akım alanı yatayda 763 üçgen ağ elemanı kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı derinliklerdeki akıntı hızlarının zamanla değişimini veren şekillerden de görüldüğü gibi model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında önemli bir fark söz konusudur. Bu durumun ağ geometrisinin yeterince hassas olmamasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Daha hassas ağ yapısının model sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla üçgen ağ yapısı Çizelge 5.5’de görülen üç adet inceltilmiş üçgen ağ yapısına sahip yeni model alternatifleri denenmiştir. Bu aşamada öncelikle model alternatiflerinin tamamında düşey ağ yapısı için üniform olmayan 25 tabaka kullanılmış yatayda ise ilk yedi model alternatifinde (I-VII) kullanılan ve 763 üçgen ağ elemanından oluşan kaba ağ yapısına ait ağ boyutları küçültülerek daha hassas ağ yapıları oluşturulmuştur. Çizelge 5.5’den de görüleceği gibi ağ hassasiyeti VIII. model alternatifinden başlayarak X. model alternatifine doğru artırılmıştır. Akıntı ölçüm istasyonlarının bulunduğu İstanbul Boğazı’nın güney bölgesindeki akıntıyı daha hassas modelleyebilmek amacıyla bu bölgede daha küçük ağ geometrileri kullanılmış ve ağ hassasiyeti artırılmıştır (Şekil 5.36). Model alternatiflerine ait diğer hidrodinamik parametreler bu bölümdeki ilk 7 model alternatifi ile aynı değerleri alacak şekilde tanımlanmış ve 22.02-15.03.2005 tarihleri arasındaki İstanbul Boğazı akımı modellenmiştir.

Çizelge 5.5 VIII., IX. ve X. model alternatiflerine ait ağ yapısı

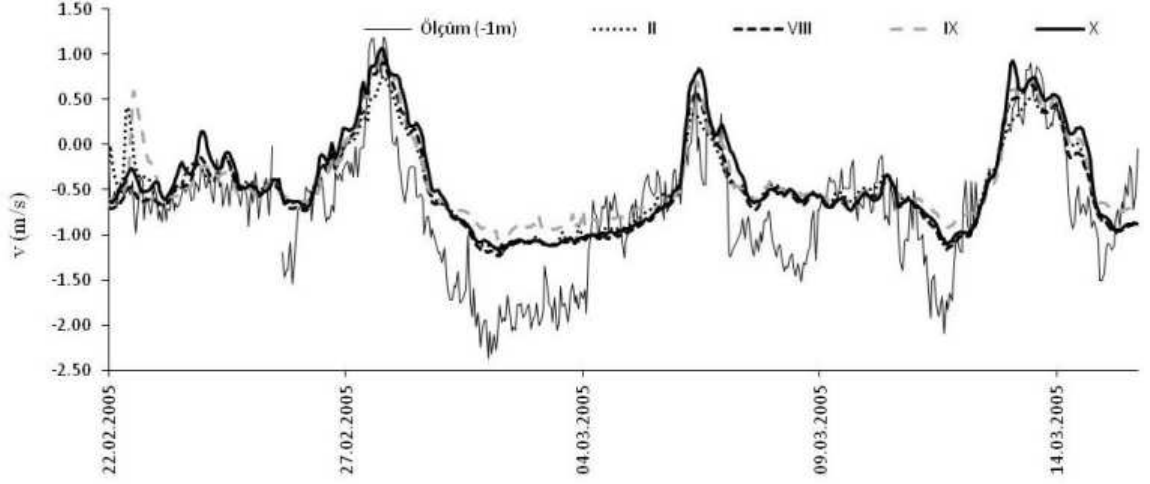
Alternatifler	Yatay Ağ Ayrıklaştırılması	Düşey Ağ Ayrıklaştırılması	Açıklama
VIII	Üçgen ağ (1390 ağ elemanı)	Üniform olmayan ortogonal (25 tabaka)	22.02-15.03.2005 tarihleri arasındaki akıntı yapısı modellenmiştir.
IX	Üçgen ağ (1777 ağ elemanı)		
X	Üçgen ağ (2047 ağ elemanı)		



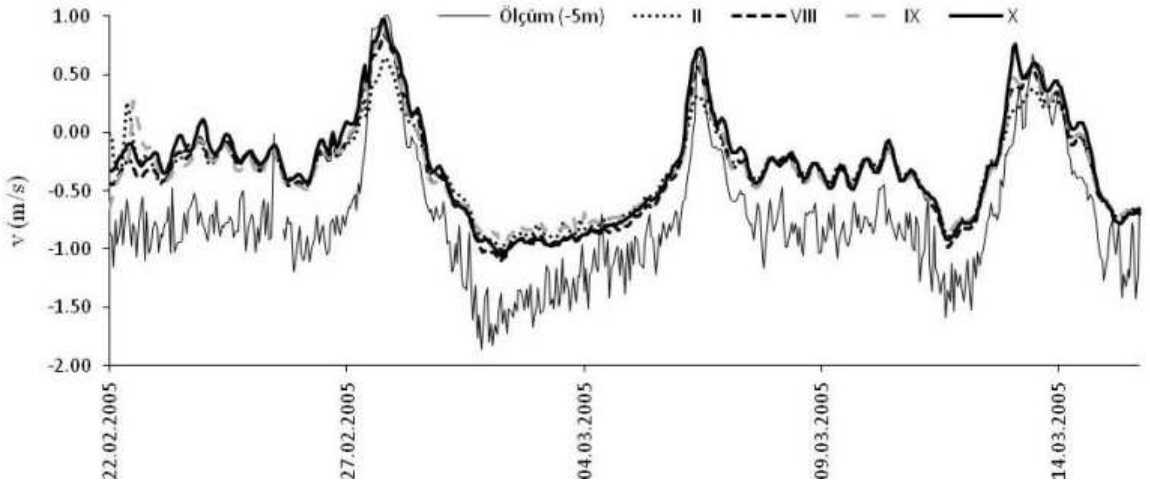
Şekil 5.36 VIII., IX. ve X. model alternatiflerinde kullanılan hassas ağ geometrileri

Sırasıyla Şekil 5.37-40'da II., VIII., IX. ve X model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının -1, -5, -15 ve -23 m derinliklerdeki zamanla değişimleri görülmektedir. Sonuçların birlikte değerlendirilmesinden II., VIII. ve IX. model alternatiflerine göre yatayda daha hassas ağ geometrisinin tanımlandığı X. model alternatifinin ölçüm sonuçları ile en büyük uyumu yakaladığı görülmektedir. Bu sonuçlar yatayda ağın hassasiyeti arttıkça hidrodinamik modelin daha gerçekçi sonuç verdiğini göstermektedir. Modellerin tamamının özellikle yüzeyde (-1 m)

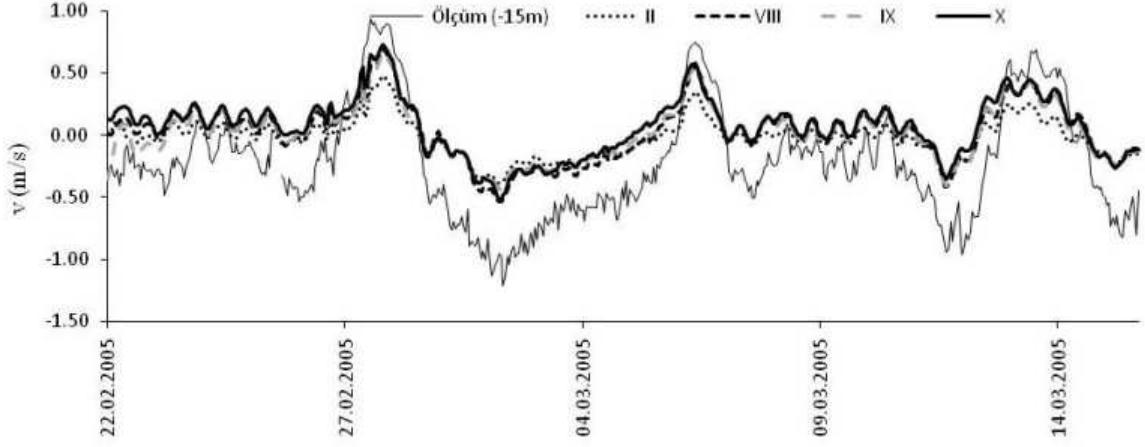
ve tabana yakın (-23 m) bölgede diğer derinliklere göre ölçümlere daha yakın sonuçlar elde ettikleri Şekil 5.36-39'dan görülmektedir. Bu sonuca derinlik boyunca yüzeye ve tabana yakın akım bölgesinde daha hassas ağ yapısının kullanılması neden olmuştur. -1 ve -5 m derinlikler için X. model alternatifi pozitif yöndeki pik hızlarda (kuzeye doğru alt tabaka akımı yönündeki hızlar) ölçümlerle aynı mertebede değerler almıştır. Negatif piklerde ise ölçümlerden daha küçük değerler elde etmiştir.



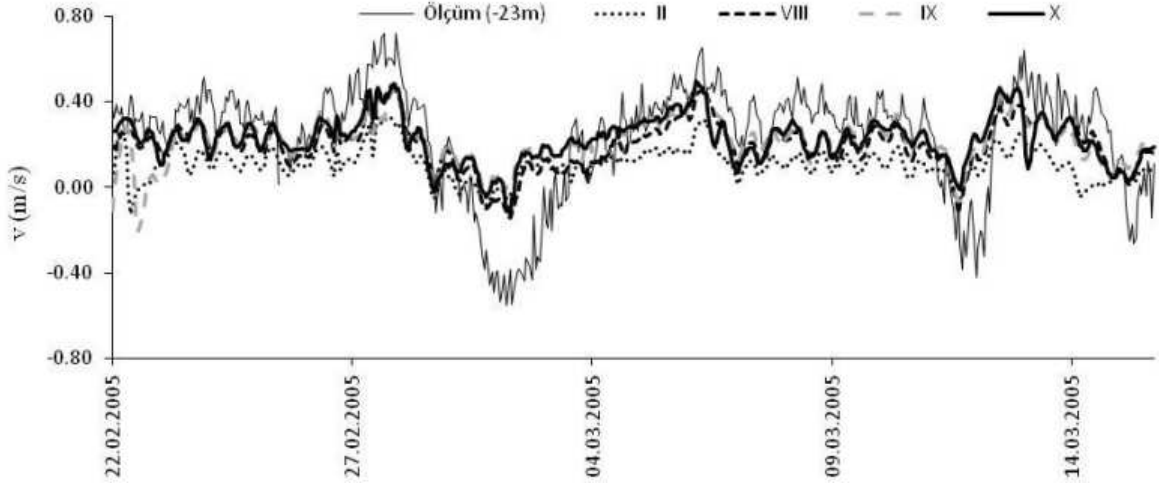
Şekil 5.37 -1 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005)



Şekil 5.38 -5 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005)



Şekil 5.39 -15 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005)



Şekil 5.40 -23 m'deki II., VIII., IX. ve X. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (22.02-15.03.2005)

VIII., IX. ve X. model alternatifleri sonuçlarından yatayda 2047 adet üçgen ağ geometrisinin tanımlandığı hassas ağ yapısının ölçümlerle en büyük benzeşimi özellikle tabana ve yüzeye yakın akım bölgesinde elde ettiği görülmüştür. Diğer derinliklerde (-5 m ve -15 m) ise ölçümlerle benzer eğilimi yakalamasına karşılık ölçümlerden oldukça farklı değerler almıştır. Bu sonuç yalnızca yatayda değil düşeyde de daha hassas ağ geometrisi tanımlamanın gerekliliğini ortaya koymuştur.

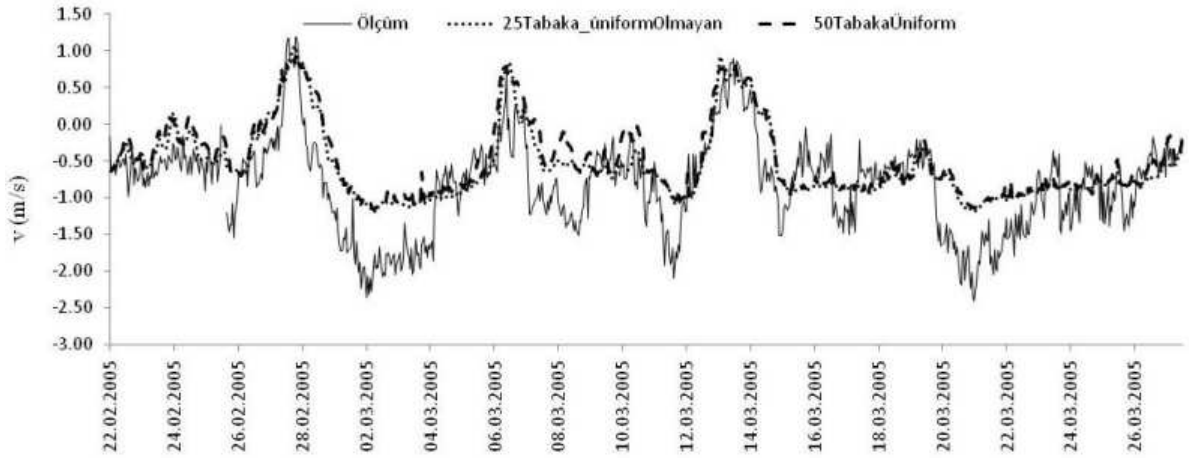
Bu amaçla yatayda 2047 üçgen ağ elemanından oluşan hassas ağ geometrisi kullanılarak akım alanının derinlik boyunca üniform 50 tabakadan meydana geldiği yeni bir model alternatifleri denenmiştir. Derinlik boyunca üniform tabakalanma durumunda üniform olmayan tabakalanma durumuna göre Boğaz'ın geometrisine ve ağ yapısına bağlı olarak tabana ve yüzeye yakın akım bölgesinde tabaka kalınlıkları artmakta ve ağ hassasiyeti azalabilmektedir. Üniform ağ yaklaşımında tabana ve yüzeye yakın bu bölgelerde azalan ağ hassasiyetini

artırmak için derinlik boyunca tabaka sayısı artırılmıştır. Ayrıca derinlik boyunca üniform ağ yapısı kullanılarak yüzeye ve tabana yakın akım bölgesi dışındaki derinliklerdeki akım alanının üniform olmayan tabakalanma durumuna göre daha hassas modellenmesi amaçlanmıştır.

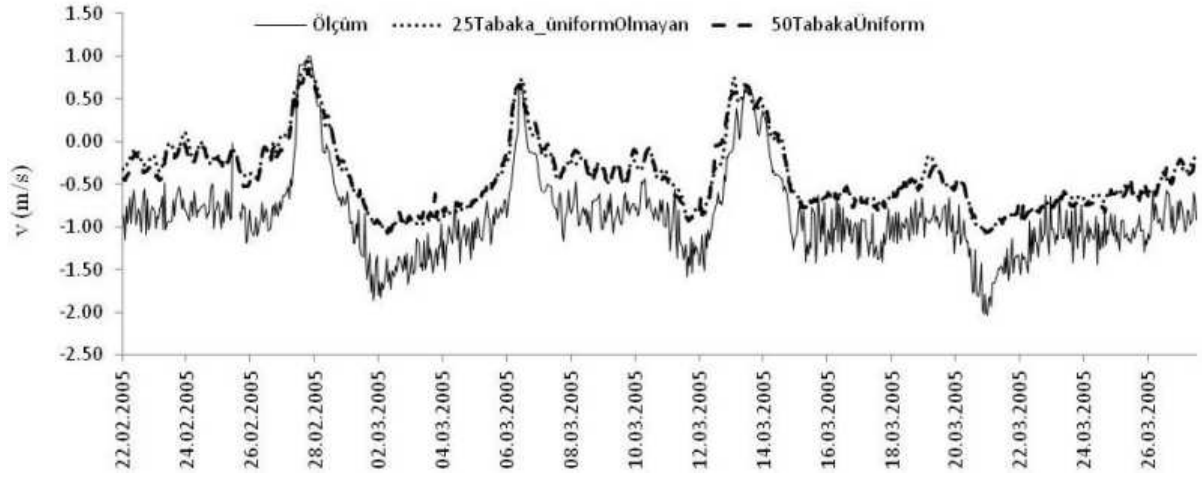
Sırasıyla Şekil 5.41-45’de -1m, -5m, -10 m, -15 m ve -20 m’deki üniform olmayan 25 tabaka, üniform 50 tabaka ve ölçümlerden elde edilen v akıntı hızlarının 22.02-27.03.2005 tarihleri arasındaki değişimleri görülmektedir.

Şekillerin birlikte değerlendirilmesinden yüzeye (Şekil 5.41) ve tabana yakın (Şekil 5.45) akım derinliklerinde üniform olmayan 25 tabakalı modelin üniform 50 tabakalı model ile yakın sonuçlar elde ettikleri görülmektedir. Bu sonuç derinlik boyunca üniform ağ geometrisi durumunda tabaka sayısının artırılmasıyla yüzey ve tabana yakın akım bölgesinin üniform olmayan akım durumundaki kadar hassas modellenebildiğini göstermektedir.

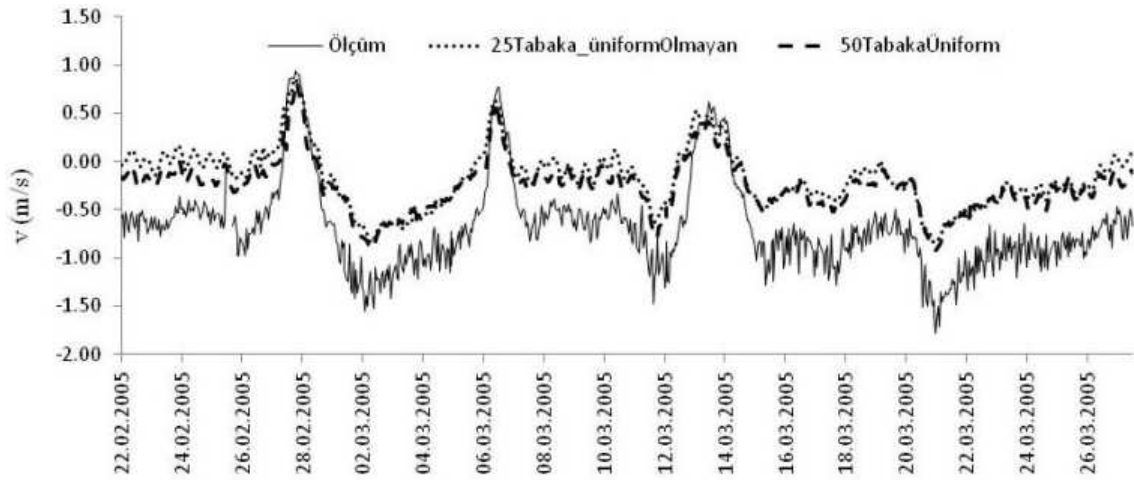
-5 m, -10 m ve -20 m akım derinliklerinde ise üniform 50 tabakadan oluşan model alternatifinin üniform olmayan duruma göre ölçümlerle daha yakın sonuçlar elde ettiği Şekil 5.42-44’den görülmektedir.



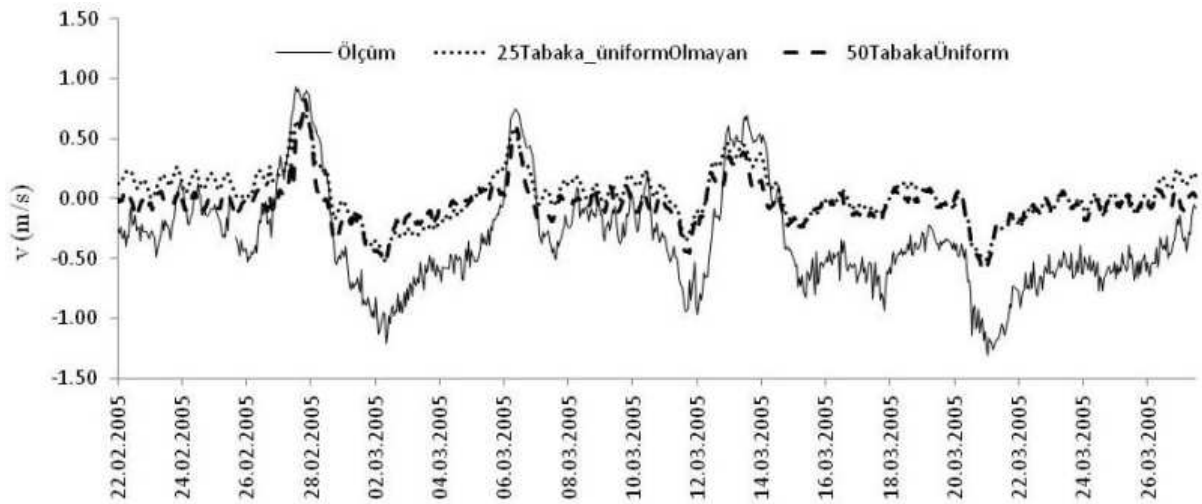
Şekil 5.41 -1 m’deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005)



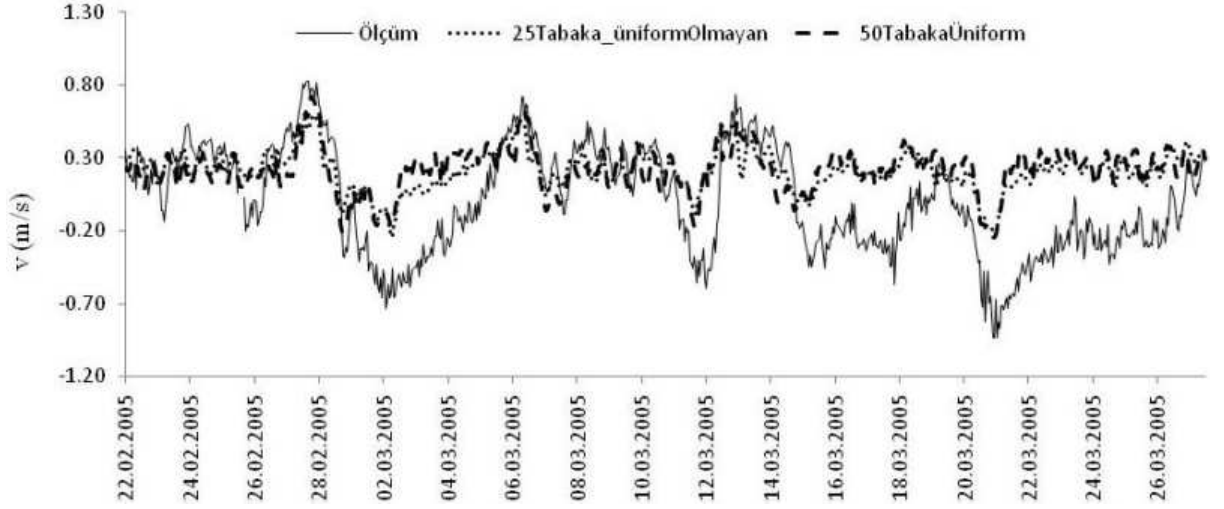
Şekil 5.42 -5 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005)



Şekil 5.43 -10 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005)



Şekil 5.44 -15 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005)



Şekil 5.45 -20 m'deki v akıntı hızlarının zamanla değişimi (22.02-27.03.2005)

Derinlik boyunca üniform 50 tabakadan oluşan model alternatifinin üniform olmayan 25 tabakalı model alternatifine göre bütün derinliklerde ölçümlerle daha yakın sonuçlar vermesine karşılık model sonuçları ölçüm sonuçları arasında önemli farklar söz konusudur. Bu durumun tuzluluk ve sıcaklık için tanımlanan sınır şartlarından kaynaklandığı düşünülmüş ve derinlik boyunca farklı tabaka sayılarının model sonuçları üzerindeki etkisi denenmeden önce yeni ve denenmemiş tuzluluk ve sıcaklık sınır şartlarının model sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

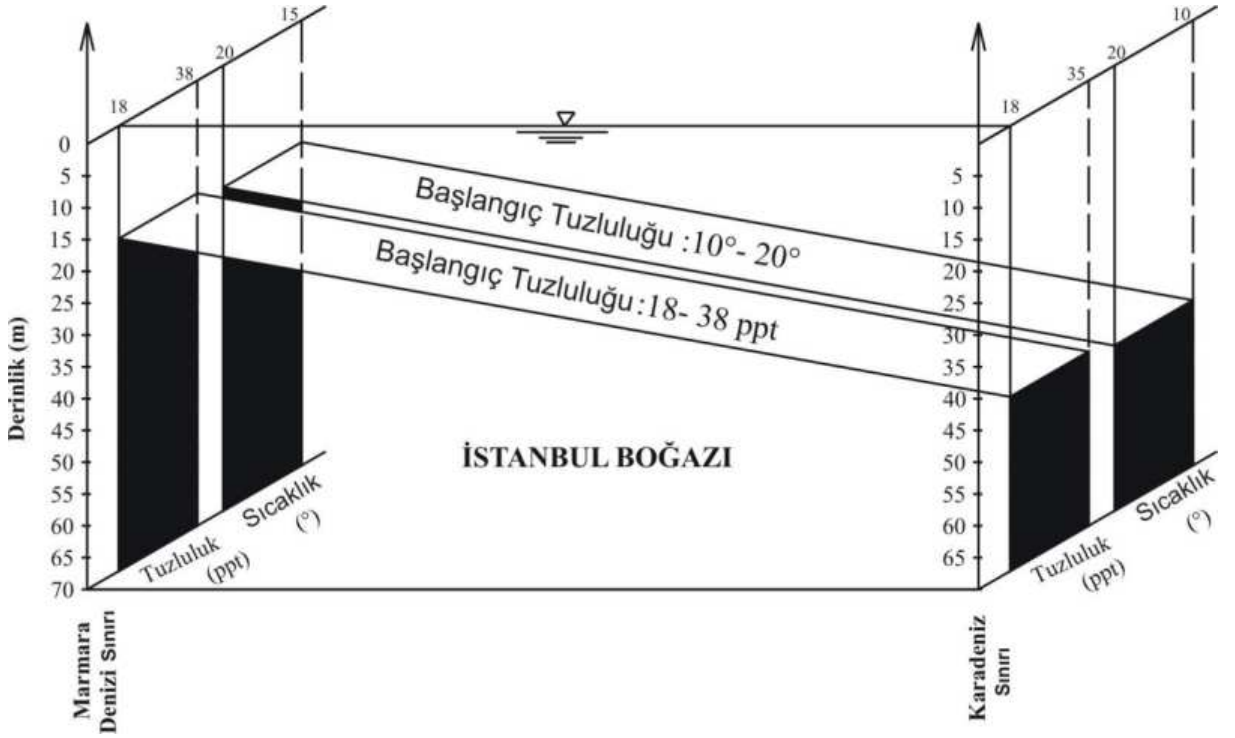
5.1.4 Tuzluluk ve Sıcaklık Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Bu bölümde denenmiş 11 adet model alternatiflerinin tamamında tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı olarak İstanbul Boğazı'ndaki yıllık ortalama tuzluluk ve sıcaklık profilleri tanımlanmıştır (Şekil 5.46). Başlangıç tuzluluğu olarak ise sınır şartlarına uygun olarak üç boyutlu tuzluluk ve sıcaklık dağılımı tanımlanmıştır. Sıcaklık ve tuzluluk sınır şartları oluşturulurken tabakalara ait yıllık ortalama sıcaklık ve tuzluluk verileri her ay için aynı değeri alacak şekilde sabit profil serisi olarak tanımlanmışlardır. Bu durumda Marmara ve Karadeniz sınırlarında tabakalı akım yapısının oluşmasına izin verecek şekilde yılın her ayı için aynı tuzluluk ve sıcaklık profilleri tanımlanmakta aylık değişimlerin etkisi dikkate alınmamaktadır. Başlangıç tuzluluğu ve sıcaklığı ise sınır şartlarına uygun olarak Boğaz boyunca değişken ve üç boyutlu olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.46).

Tuzluluk ve sıcaklık sınır şartlarındaki değişimin model sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla Çizelge 5.6'da görülen XII. model alternatifi denenmiştir. Çizelge 5.6'dan da görüldüğü gibi yatay ağ geometrisi için bu bölümde denenmiş ve ölçümlerle en uygun sonucu vermiş olan 2047 üçgen ağ, düşey ağ geometrisi için ise üniform 50 tabaka

kullanılmıştır. Tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı dışındaki sayısal model parametreleri bu bölümde denenmiş 11 adet model alternatifi ile aynı değerleri almaktadır (Çizelge 5.2).

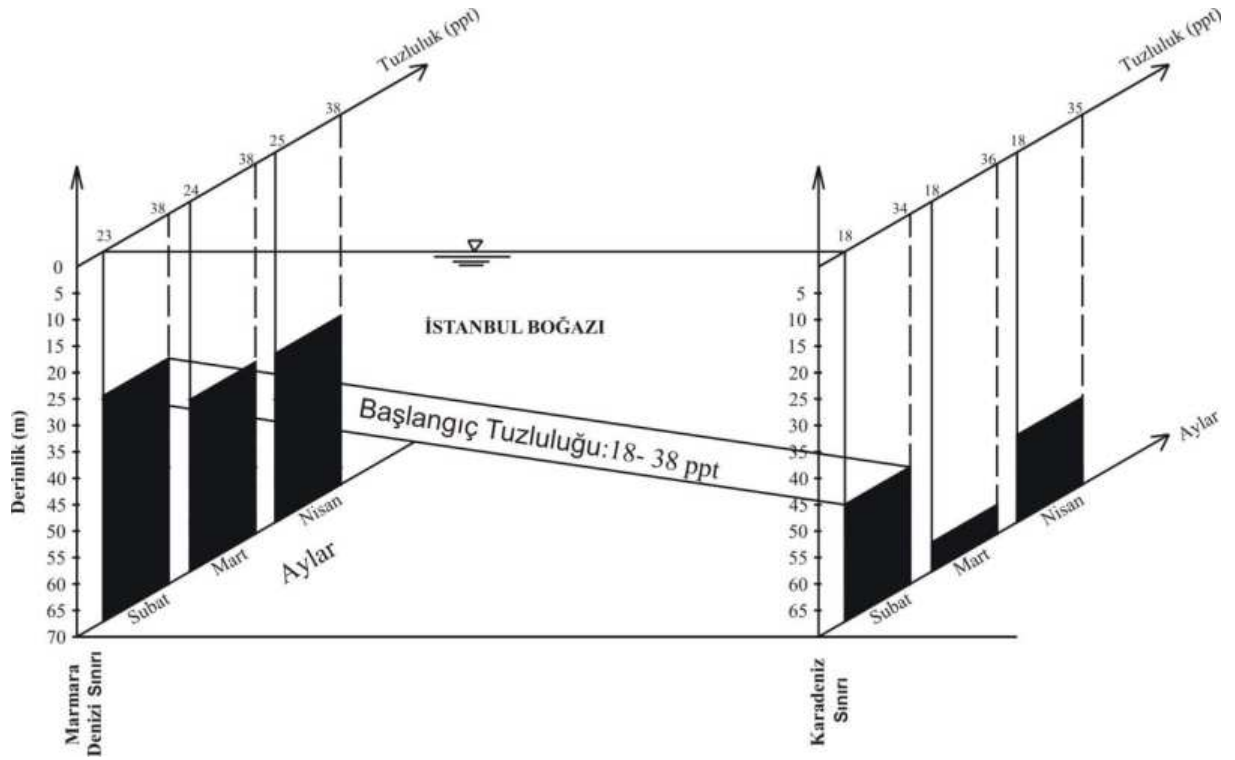
Tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı olarak ise İSKİ (2004) tuzluluk ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Bu amaçla İSKİ'nin 2004 yılı boyunca her ayın değişik zamanlarında yapmış olduğu derinlik boyunca anlık tuzluluk ve sıcaklık ölçümlerine ait profiller idealleştirilmiş ve ölçümün yapıldığı ayın ortalama tuzluluğu ve sıcaklığı olarak dikkate tanımlanmıştır (Şekil 5.47-48).



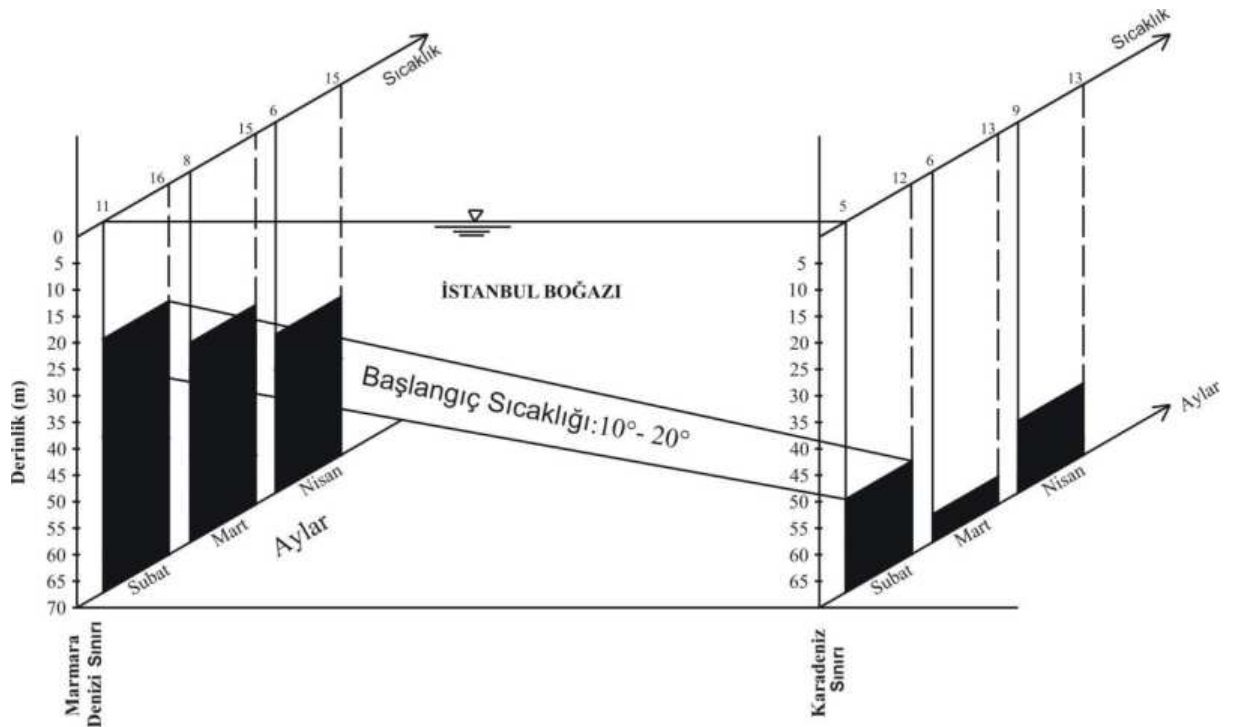
Şekil 5.46 İstanbul Boğazı'ndaki yıllık ortalama veriler kullanılarak oluşturulmuş sıcaklık ve tuzluluk sınır şartları

Çizelge 5.6 XI. ve XII. model alternatiflerinde kullanılan model geometrileri ile tuzluluk ve sıcaklık sınır şartları

Alternatifler	Yatay Ağ Ayırıklaştırılması	Düşey Ağ Ayırıklaştırılması	Tuzluluk ve Sıcaklık Sınır Şartları
XI	Üçgen ağ (2047 ağ elemanı)	Üniform ortogonal (50 tabaka)	Şekil 5.42'de görülen <u>yıllık</u> ortalama tuzluluk ve sıcaklık sınır koşulları tanımlanmıştır
XII	Üçgen ağ (2047 ağ elemanı)	Üniform ortogonal (50 tabaka)	Şekil 5.43-44'de görülen <u>aylık</u> ortalama tuzluluk ve sıcaklık sınır koşulları tanımlanmıştır



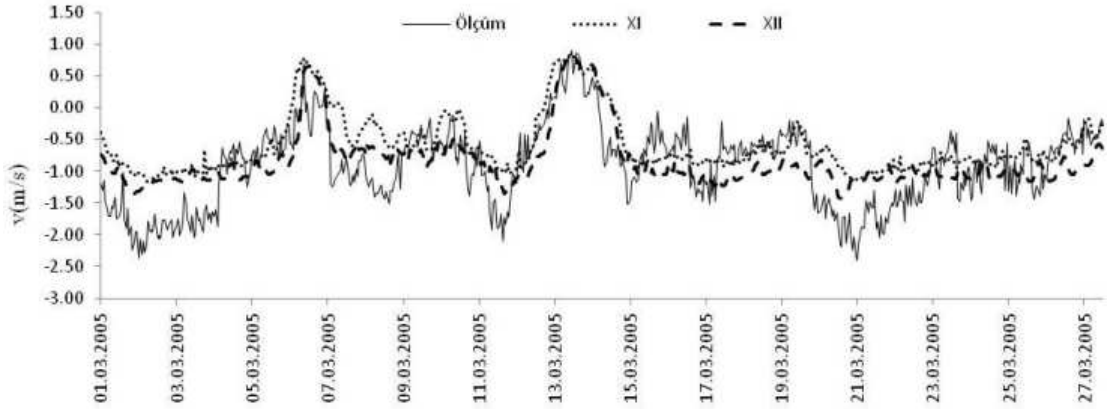
Şekil 5.47 İSKİ (2004) verileri kullanılarak aylık ortalamalar şeklinde oluşturulmuş XII. model alternatifine ait tuzluluk sınır şartı



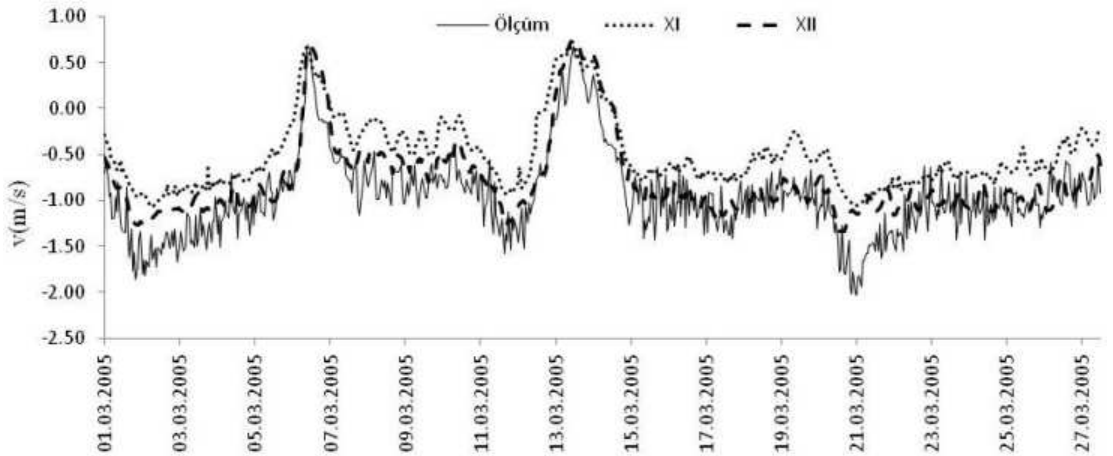
Şekil 5.48 İSKİ (2004) verileri kullanılarak aylık ortalamalar şeklinde oluşturulmuş XII. model alternatifine ait sıcaklık sınır şartı

Şekil 5.47 ve 48'deki tuzluluk ve sıcaklık sınır şartları kullanılarak XII. model alternatifi koşturulmuş ve Mart 2005'deki 1 aylık akıntı yapısı modellenmiştir. Şekil 5.49-53'de aylık ortalama sıcaklık ve tuzluluk değerlerinin sınır şartı olarak tanımlandığı XII. model alternatifine ait v akıntı hızları ile yıllık ortalama tuzluluk ve sıcaklık değerlerinin sınır şartı olarak tanımlandığı XI. model alternatifine ait v akıntı hızı sonuçları ile ölçüm sonuçlarının -1 m, -5 m, -10 m, -15 m ve -20 m derinliklerdeki zamanla değişimleri birlikte verilmiştir.

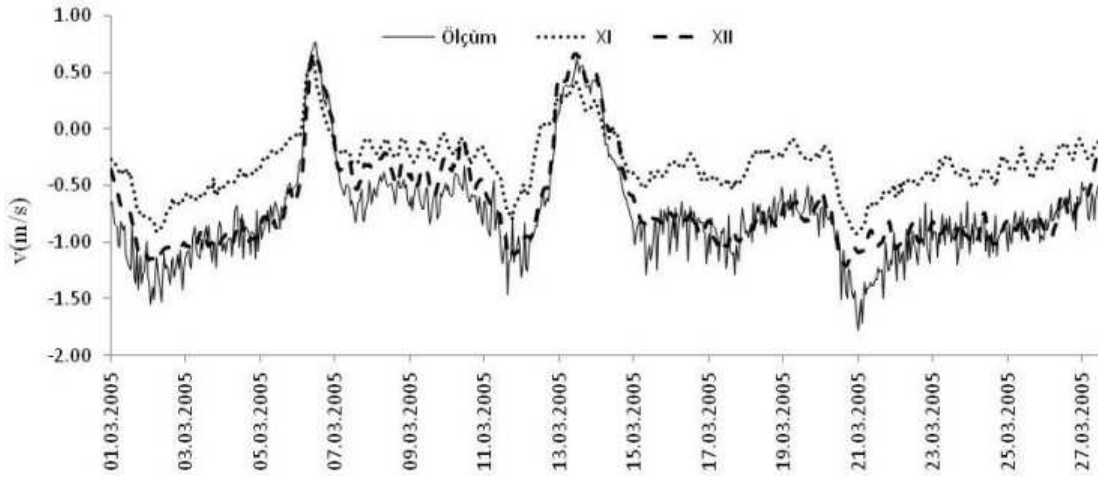
Farklı derinliklerdeki akıntı hızlarının zamanla değişimi grafiklerinden dikkate alınan bütün derinliklerde XII. model alternatifi sonuçlarının XI. model alternatifine göre ölçümlere daha yakın sonuçlar elde ettikleri görülmektedir. Özellikle alt tabaka akımı doğrultusundaki pozitif pik hızlarda dikkate alınan bütün derinliklerde ölçümler ile XII. model alternatifi hızları aynı mertebede değerler almıştır (Şekil 5.49-53). XII. model alternatifi ile ölçümler arasındaki en büyük uyumu yüzeye ve tabana yakın derinlikler (-1 m, -5 m ve -20 m) dışındaki derinliklerde (-15 m, -20 m) sağlamaktadır.



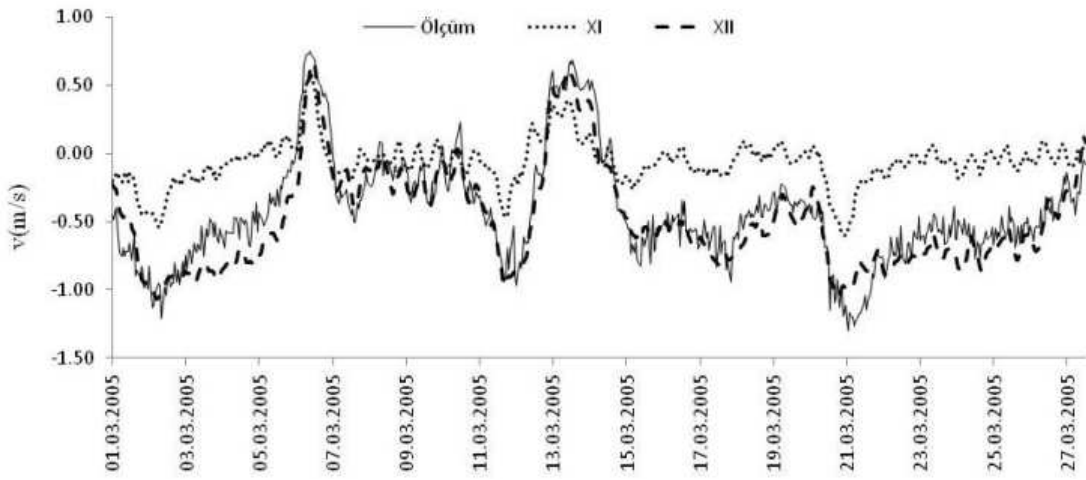
Şekil 5.49 -1 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005)



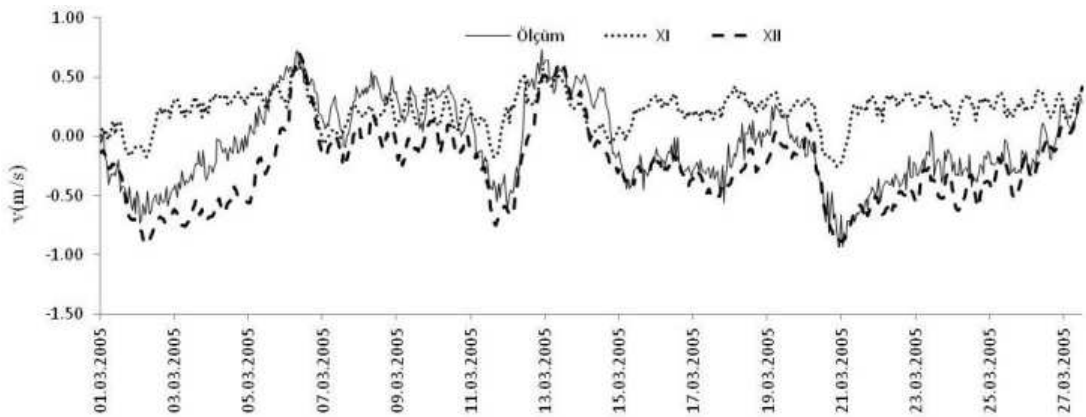
Şekil 5.50 -5 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005)



Şekil 5.51 -10 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005)



Şekil 5.52 -15 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005)



Şekil 5.53 -20 m'deki XI., XII. model alternatifine ait v hızları ile ölçüm hızlarının zamanla değişimi (01-30.03.2005)

Farklı tuzluluk ve sıcaklık sınır ve başlangıç koşullarının model sonuçları üzerindeki etkisinin denendiği XII. model alternatifine ait değişik derinliklerdeki akıntı hızı değişimlerinden tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı için aylık ortalama değerlerin tanımlandığı model sonuçlarının ölçüm sonuçları ile benzeşimi önemli oranda arttırdığını göstermektedir (Şekil 5.49-53). Bu sonuç bir sayısal modelleme çalışmasında modellenmesi düşünülen akım alanının fiziğine uygun sınır ve başlangıç şartlarını tanımlamanın model ile ölçüm arasındaki benzeşimi büyük oranda arttırdığını göstermektedir. Bu durum modeli kurulacak akım alanına ait çok sayıda ve hassas ölçüm olmasıyla mümkün olmaktadır. Tuzluluk ve sıcaklık sınır şartlarının model sonuçları üzerindeki bu etkisi, İstanbul Boğazı akıntı yapısı üzerinde yoğunluk farkının da etkili (barotropik etki) olduğunu göstermektedir.

5.1.5 Düşeyde Üniform Ağ Sisteminin İnceltilmesi

Bölüm 5.1.3'de yatayda farklı üçgen ağ geometrilerinin model sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiş ve 2047 üçgen ağ elemanının oluşan X. model alternatifi ölçümlerle en büyük benzeşimi göstermiştir. Söz konusu model alternatifinde akım alanı derinlik boyunca üniform olmayan 25 tabakadan oluşturulmuştur. Ancak farklı derinliklerdeki model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının değişimi grafiklerinden X. model alternatifinin yüzeye ve tabana yakın akım bölgesi dışındaki derinlikleri yeterince hassas modelleyemediği görülmüştür. Yüzeye ve tabana yakın akım bölgesindeki ağ hassasiyetinin korunması aynı zamanda geri kalan derinliklerdeki akımın da daha hassas modellenebilmesi için düşeyde üniform ağ yapısı kullanılmış ve tabaka sayısı iki katına çıkartılmıştır. Farklı derinliklerdeki model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının değişiminden derinlik boyunca üniform 50 tabakadan oluşan XI. model alternatifinin ölçümlerle daha uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Bölüm 5.1.4'de ise yatayda 2047 üçgen ağ, düşeyde üniform 50 tabakalı ağ yapısı kullanılmış ve farklı tuzluluk ve sıcaklık sınır şartlarının model sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla İSKİ (2004)'ün derinlik boyunca yapmış olduğu sıcaklık ve tuzluluk ölçümleri idealleştirilerek kullanılmış ve aylık ortalama tuzluluk ve sıcaklık profilleri oluşturulmuştur. Oluşturulan tuzluluk ve sıcaklık profilleri kullanılarak XII. model alternatifi denenmiştir. Model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birlikte değerlendirilmesinden bu bölümde denenmiş olan 12 adet model alternatifi içinden ölçümlerle en yüksek uyumu XII. model alternatifinin verdiği görülmüştür.

Bu bölümde düşeyde farklı ve dikkate alınmayan tabaka sayılarının model sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla Çizelge 5.7'de görülen iki farklı model alternatifi daha denenmiştir. Model alternatiflerinin tamamında derinlik boyunca üniform ağ yapısı

kullanılmıştır. Diğer sayısal model parametreleri için XII. model alternatifi ile aynı değerler tanımlanmış ve 01.03-27.03.2005 tarihleri arasındaki 27 günlük akım yapısı modellenmiştir.

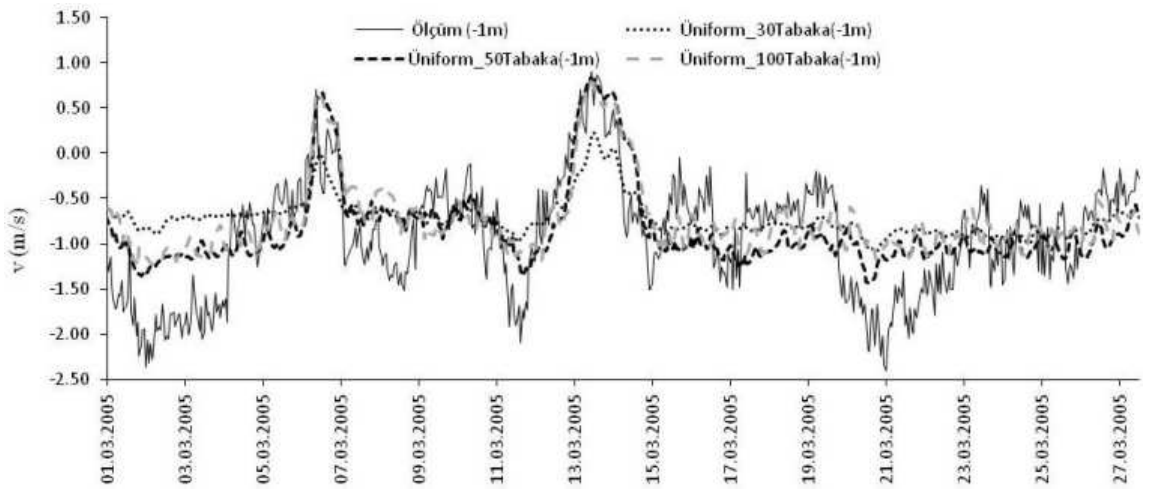
Çizelge 5.7 XIII. ve XIV. model alternatifleri için tanımlanan ağ yapısı

Alternatifler	Yatay Ağ Ayırıklaştırılması	Düşey Ağ Ayırıklaştırılması	Açıklama
XIII	Üçgen ağ (2047 ağ elemanı)	Üniform ortogonal (30 tabaka)	01.03-27.03.2005 tarihleri arasındaki akıntı yapısı modellenmiştir.
XIV		Üniform ortogonal (100 tabaka)	

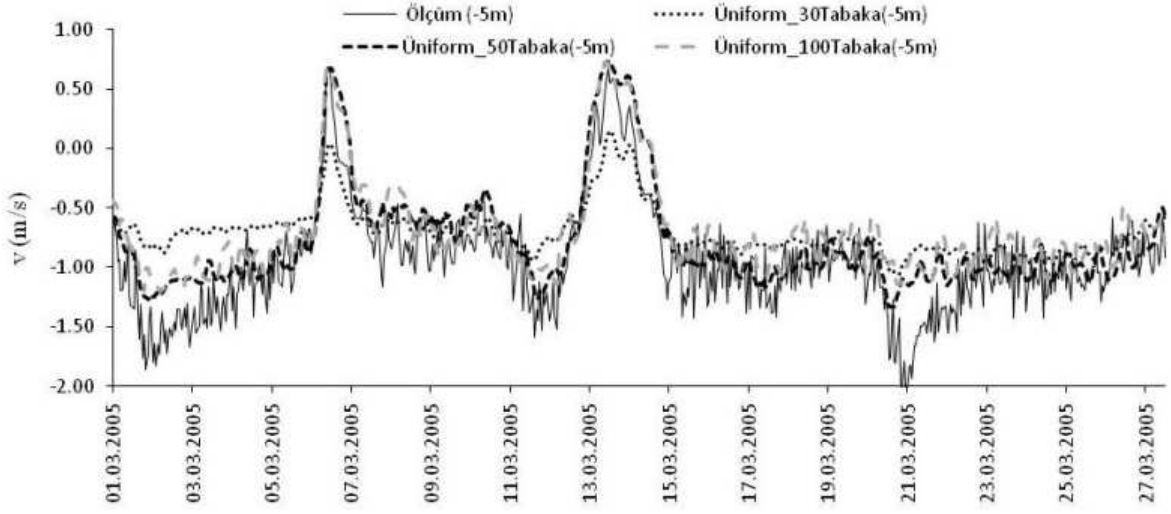
Sırasıyla 5.54-59'de XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm hızlarının -1, -5, -10, -15, -20 ve -23 m'lerdeki zamanla değişimleri birlikte verilmiştir.

Şekil 5.54'de -1 m'deki model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi görülmektedir. Üniform 30 tabakanın tanımlandığı XIII. model alternatifi dışındaki diğer model alternatifleri pozitif pik hızlarda ölçüm sonuçları ile aynı mertebede değerler almıştır. Negatif pik hızlarda (üst tabaka akımı yönündeki hızlar) ise model alternatiflerinin tamamı ölçümlerden önemli oranda sapmıştır. Negatif pik hızlarda derinlik boyunca üniform 50 tabakanın tanımlandığı XII. model alternatifi ölçümlere en yakın sonuçları elde etmiştir.

Şekil 5.55'de -5 m'deki ölçüm ve model sonuçlarının zamanla değişimi görülmektedir. -1 m'deki gibi derinlik boyunca üniform 50 tabakanın tanımlandığı XII. model alternatifi diğer model alternatiflerine göre ölçümlere daha yakın sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca XII. model alternatifi -1m'dekine benzer şekilde pozitif pik hızlarda negatif pik hızlara göre ölçümlerle daha yakın sonuçlara ulaşmıştır.

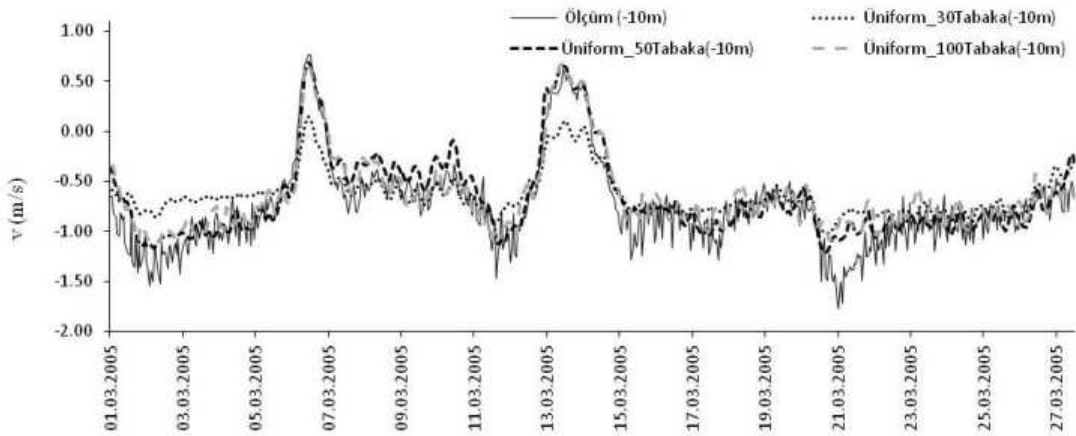


Şekil 5.54 -1 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005)

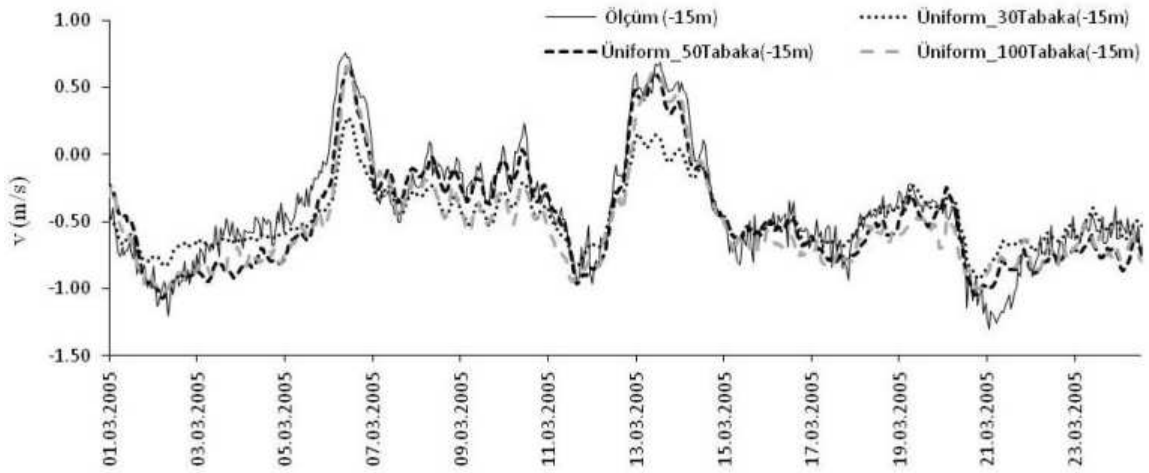


Şekil 5.55 -5 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005)

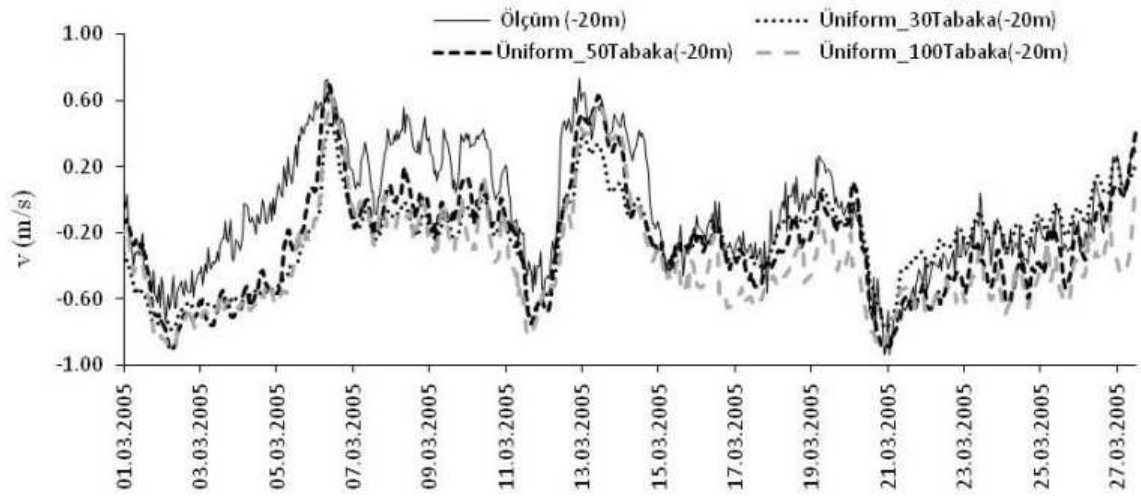
Sırasıyla Şekil 5.56-57 ve 58'de -10, -15 ve -20 m'lerdeki model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi birlikte verilmiştir. Söz konusu derinliklerin tamamında derinlik boyunca üniform 50 ve 100 tabakanın tanımlandığı XII. ve XIV. model alternatiflerinin XIII. model alternatifine göre ölçümler ile daha yakın sonuçlar elde ettikleri Şekil 5.56-58'den görülmektedir. XII. ve XIV. model alternatifleri içinden ölçümlerle en yakın sonucu ise derinliğin üniform 50 tabaka tanımlandığı XII. model alternatifi elde etmiştir. -1 m ve -5 m'den farklı olarak -10, -15 ve -20 m derinliklerde XII. ve XIV. model alternatifleri sadece pozitif pik hızlar için değil, negatif pik hızlar için de ölçümler ile aynı mertebede sonuçlara ulaşmıştır. Bu sonuç tabana ve yüzeye yakın akım bölgeleri dışındaki ara katmanlarda derinlik boyunca üniform ağ geometrisinin ölçümlerle üniform olmayan duruma göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 5.56 -10 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005)

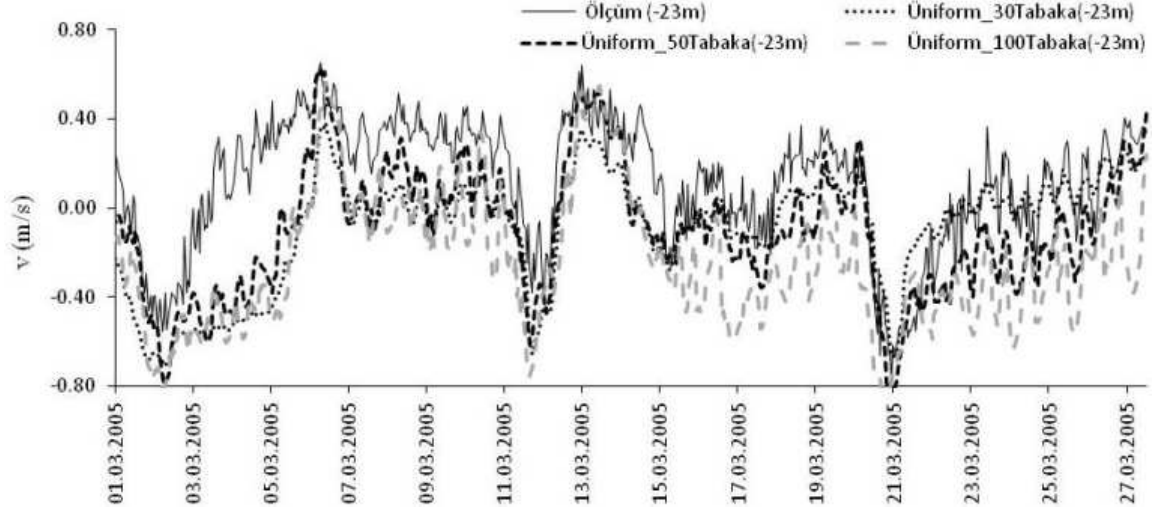


Şekil 5.57 -15 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005)



Şekil 5.58 -20 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005)

Şekil 5.59'da -23 m'deki model ve ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi bir arada görülmektedir. Tabana yakın bu derinlik için de düşeyde üniform 50 tabakanın tanımlandığı XII. model alternatifinin diğer model alternatiflerine göre ölçümlerle daha yakın sonuçlara ulaştığı Şekil 5.59'dan görülmektedir. XII. model alternatifi -10, -15 ve -20 m'lerdeki kadar olmasa da -23 m'de de pozitif ve negatif pik hızlar için ölçümlerle yakın mertebede değerler almıştır.



Şekil 5.59 -23 m'deki XII., XIII. ve XIV. model alternatifleri ile ölçüm sonuçlarının zamanla değişimi (01.03-27.03.2005)

Derinlik boyunca farklı tabakalanma durumları için denenmiş olan 3 farklı model alternatifini içinden derinlik boyunca üniform 50 tabakanın tanımlandığı model alternatifinin özellikle ara katmanlarda (-10, -15 ve -20 m) ölçümler ile çok yakın sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Yüzey (-1m) ve tabanda (-23 m) ise ara derinliklerdeki kadar olmasa da ölçümlerle en yakın sonucu yine 50 tabakalı (XII. alternatif) model alternatifini elde etmiştir.

Sonuç olarak İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonunda ağ yapısı olarak yatayda 2047 adet üçgen ağ, düşeyde ise 50 katmandan oluşan üniform ortogonal ağ yapısının kullanılmasının Boğaz'daki akıntı yapısını yeterince hassas modelleyebileceği sonucuna varılmıştır.

5.1.6 Rüzgar Alanının Değerlendirilmesi

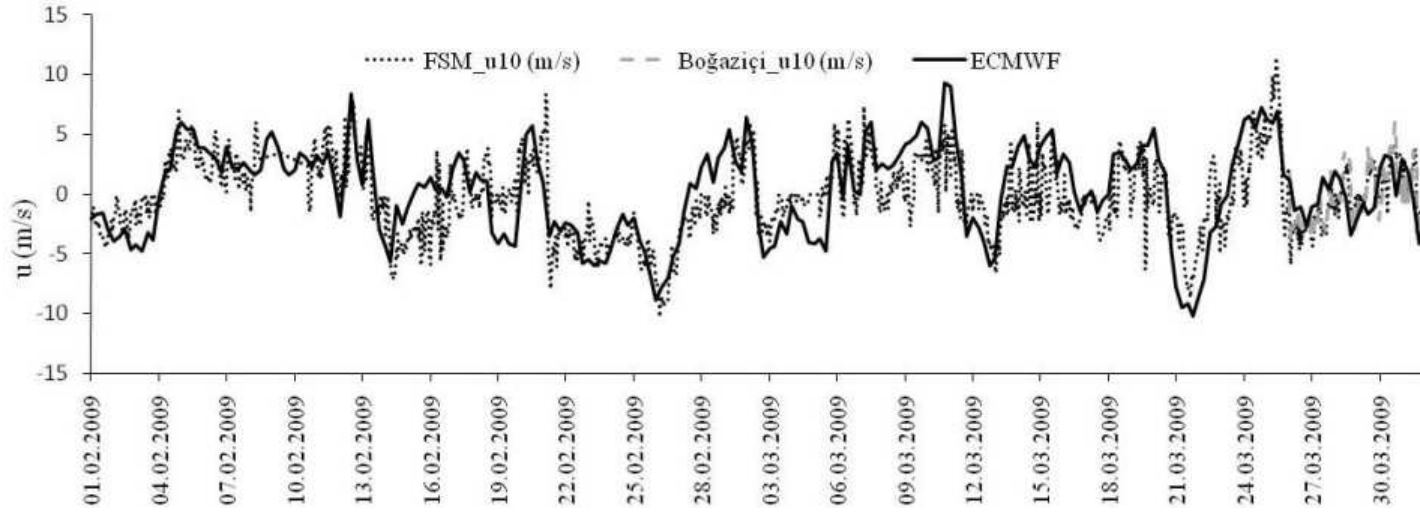
Bu bölümde denenmiş olan 14 adet model alternatifinin tamamında İstanbul Boğazı'ndaki rüzgar yapısı ECMWF rüzgar verileri kullanılarak benzeştirilmiştir. ECMWF u ve v rüzgar hız bileşenlerine ve atmosfer basıncına ait altışar saatlik ortalama değerleri içermektedir. ECMWF rüzgar verilerinin İstanbul Boğazı'ndaki rüzgar yapısını yeterince gerçekçi benzeştirip benzeştiremediğini araştırmak amacıyla Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen Boğaziçi ve FSM köprülerindeki 2009 yılı rüzgar ölçümleri değerlendirilmiştir. Bu amaçla FSM köprüsü için saatlik sürekli ölçümlerin bulunduğu 01.02.-31.08.2009 tarihleri arasındaki 7 aylık dönem, Boğaziçi köprüsü için ise 26.03-31.08.2009 tarihleri arasındaki 5 aylık dönem dikkate alınmıştır. Her iki köprüde rüzgar ölçümü deniz seviyesinden 70 m yükseklikte yapılmıştır. Söz konusu ölçüm verileri (5.1) ifadesi kullanılarak deniz seviyesinden 10 m yükseklikteki eşdeğer rüzgar hızlarına çevrilmişlerdir.

$$U(10)=U(Z)\times(10/Z)^{1/7} \quad (5.1)$$

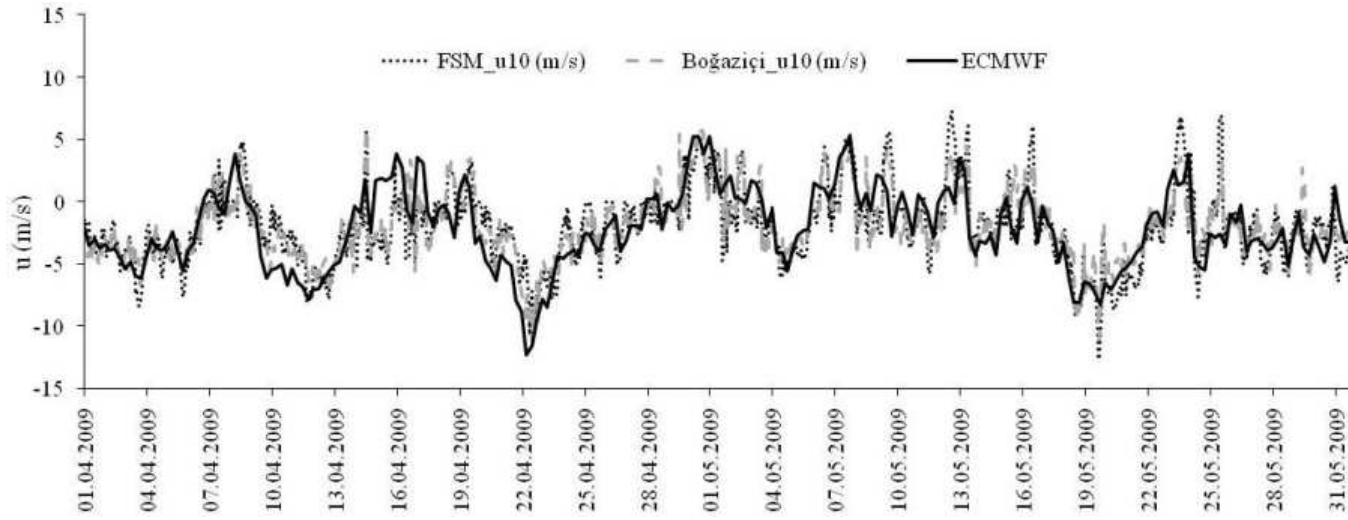
Burada $U(Z)$: Deniz yüzeyinden Z m yükseklikteki rüzgar hızını, Z ölçüm yüksekliğini ve $U(10)$ ise deniz yüzeyinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızını göstermektedir.

Sırasıyla Şekil 5.60-62'de Şubat-Mart, Nisan-Mayıs-Haziran ve Temmuz-Ağustos 2009 dönemlerine ait ECMWF, FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hızı bileşeninin zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 5.63-65'de ise v rüzgar hızı bileşeninin zamanla değişimi görülmektedir.

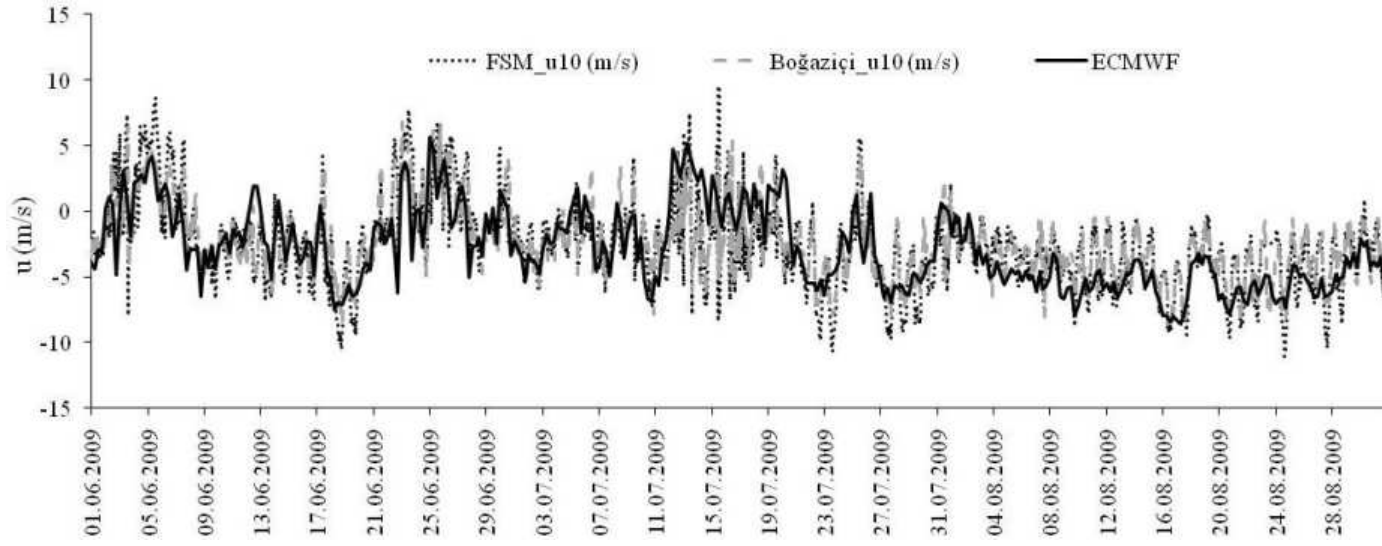
Şekillerin birlikte değerlendirilmesinden 6 saatlik ortalamalardan oluşan ECMWF rüzgar hızı bileşenlerinin 1 saatlik periyotla ölçülen FSM ve Boğaziçi köprülerindeki rüzgar hızı bileşenleriyle dikkate alınan dönemin büyük bölümünde yakın mertebede değerler aldıkları Şekil 5.56-61'de görülmektedir. Böylece ECMWF rüzgar hızlarına ait sonuçların İstanbul Boğazı'ndaki rüzgar yapısını yeterince gerçekçi benzeştirdiği görülmüş ve İstanbul Boğazı sayısal modelinde rüzgar verisi olarak ECMWF rüzgar verilerinin tanımlanmasına karar verilmiştir.



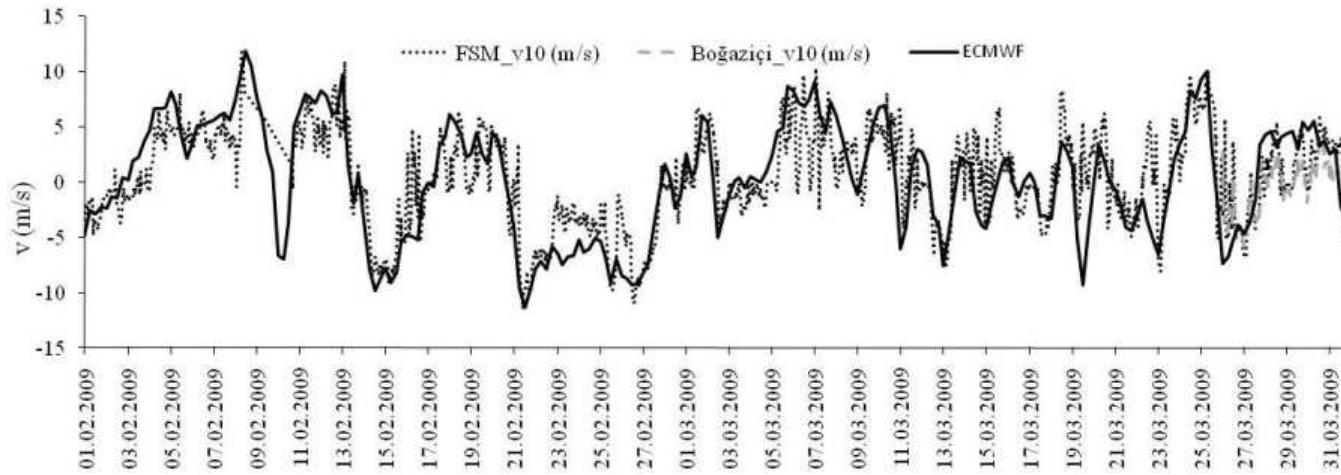
Şekil 5.60 Şubat-Mart 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi



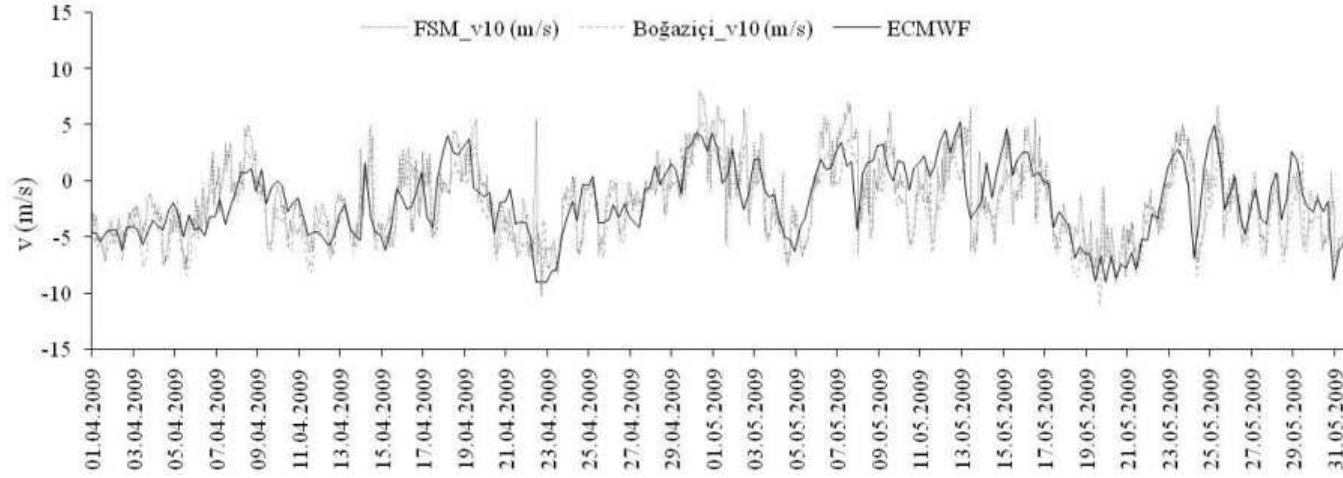
Şekil 5.61 Nisan-Mayıs 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi



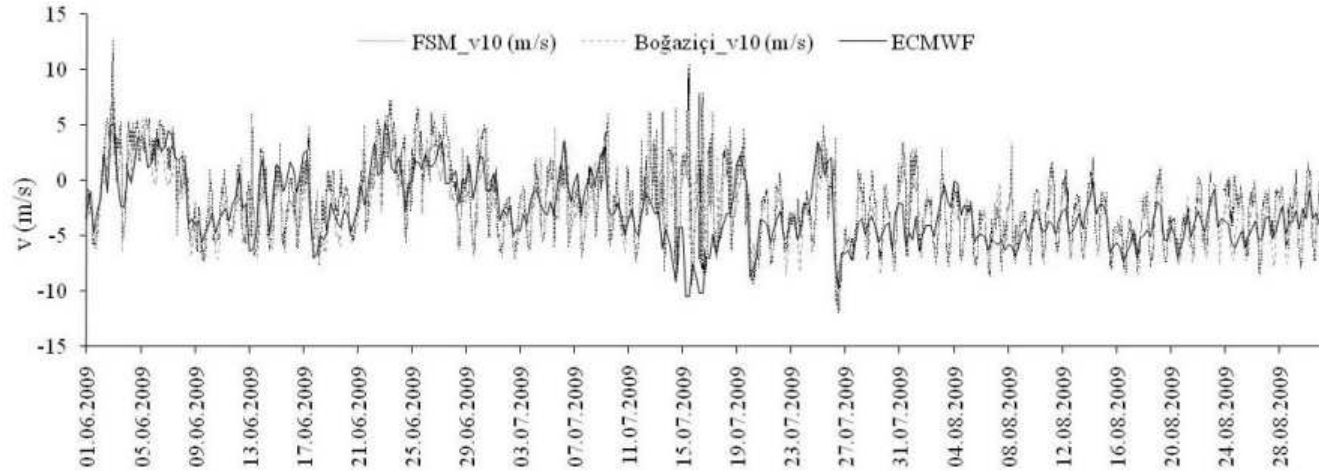
Şekil 5.62 Haziran-Temmuz-Ağustos 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki u rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi



Şekil 5.63 Şubat-Mart 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki v rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi



Şekil 5.64 Nisan-Mayıs 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki v rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi



Şekil 5.65 Haziran-Temmuz-Ağustos 2009 döneminde ECMWF ile FSM ve Boğaziçi köprülerindeki v rüzgar hız bileşeninin zamanla değişimi

Bu bölüm kapsamında Şekil 5.1'deki akış şeması izlenmiş ve Bölüm 5.2'de kalibre edilecek olan İstanbul Boğazı sayısal modeline ait ağ yapısı, su seviyesi farkı, tuzluluk ve sıcaklık sınır şartları ile rüzgar yapısı gibi temel model parametrelerine ait uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir.

Uygun ağ yapısının belirlenmesi amacıyla yatayda yapılandırılmamış üçgen ve hybrid ağ geometrileri, düşeyde ise üniform ve üniform olmayan ortogonal ağ yapısının dikkate alındığı 4 adet model alternatifi koşturulmuştur. Uygunluk değerlendirmesi sonucunda yatayda üçgen düşeyde ise üniform olmayan ortogonal ağ yapısının en uygun ağ seçeneği olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı sayıda üçgen ağ elemanları için koşturulan 3 adet model alternatifi içinde ölçümler ile en büyük benzeşimi ise yatayda 2047 ağ elemanından oluşan model alternatifi elde etmiştir.

Derinlik boyunca uygun ağ yapısının belirlenmesi için öncelikle üniform ve üniform olmayan ağ yapısı dikkate alınmış ve yüzey ile tabana yakın akım bölgesinde üniform olmayan ağ yapısının, geri kalan akım alanında ise üniform ağ yapısının ölçümler ile daha yakın sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Hem yüzeye ve tabana yakın akım bölgesinde hem de geri kalan akım alanında hassasiyetin artırılması için üniform ağ geometrisi kullanılarak tabaka sayısı iki katına (50 tabaka) çıkartılmıştır. Derinlik boyunca üniform 50 tabakanın tanımlandığı model alternatifi derinlik boyunca farklı ağ yapılarının denendiği model alternatiflerine göre bütün derinliklerde daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Farklı tabaka sayılarının model sonuçları üzerinde etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla derinlik boyunca üniform 30, 50 ve 100 tabakanın tanımlandığı 3 adet model alternatifi koşturulmuş ve 50 tabakanın tanımlandığı model alternatifinin ölçümler ile en yakın sonucu elde ettiği görülmüştür.

Uygun su seviyesi sınır şartlarının belirlenmesi için esas olarak iki durum analiz edilmiştir. Bunlardan birincisinde su seviyesi sınır şartı olarak doğrudan ölçüm verileri kullanılmış ikincisinde ise hybrid bir yaklaşımla YSA kullanılarak elde edilmiş olan ötelenmiş su seviyesi verileri kullanılmıştır. Ayrıca Marmara sınırında ölçüm verilerinin Karadeniz sınırında YSA ile ötelenmiş su seviyesi verilerinin, Marmara sınırında YSA ile ötelenmiş verilerin Karadeniz sınırında ölçüm verilerinin su seviyesi sınır koşulu olarak tanımlandığı iki adet model alternatifi daha koşturulmuştur. Ölçümler ile en uygun sonuca su seviyesi sınır şartı olarak ölçüm verilerinin tanımlandığı model alternatifinde ulaşılmıştır.

Tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı için iki durum dikkate alınmıştır. İSKİ (2004)'ün İstanbul Boğazı'nın Karadeniz çıkışı ve Marmara çıkışında yılın her ayının belli günlerinde yapmış olduğu tuzluluk ve sıcaklık profillerinin aylık ortalamalar olarak tanımlandığı model

alternatifi, tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı olarak yıllık ortalamaların tanımlandığı model alternatifine göre ölçümlerle daha yakın sonuçlar elde etmiştir. Böylece kalibrasyon aşamasında sıcaklık ve tuzluluk sınır şartı olarak dikkate alınacak olan zaman diliminin ait olduğu ayın ortalama tuzluluk ve sıcaklık değerinin dikkate alınmasına karar verilmiştir.

Bölüm 5.1’de denenmiş olan model alternatiflerinin tamamında İstanbul Boğazı’ndaki rüzgar yapısı ECMWF rüzgar verileri kullanılarak benzeştirilmiştir. ECMWF 6’şar saatlik rüzgar hızı atmosfer basıncı bileşenlerinden meydana gelmektedir. ECMWF’in İstanbul Boğazı’ndaki rüzgar yapısını yeterince hassas temsil edip etmediğini araştırmak amacıyla Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü’nün Boğaziçi ve FSM köprülerinde yapmış olduğu rüzgar ölçümleri kullanılmıştır. Bu amaçla FSM köprüsünde saat başı yapılan sürekli ölçümlerin bulunduğu 01.02-31.08.2009 tarihleri arasındaki 7 aylık dönem ile Boğaziçi köprüsünde saat başı sürekli ölçümlerin bulunduğu 26.03-31.08.2009 tarihleri arasındaki 5 aylık dönem ve ECMWF’e ait aynı dönemdeki veriler birlikte değerlendirilmiştir. ECMWF rüzgar verilerinin 6’şar saatlik ortalamalardan oluşmasına karşılık dikkate alınan dönemin büyük bölümünde FSM ve Boğaziçi köprülerindeki rüzgar ölçüm verileri ile yakın mertebede değerler aldıkları görülmüş ve ECMWF’in İstanbul Boğazı’ndaki rüzgar yapısını yeterince hassas yansıttığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.8’de Bölüm 5.1’de uygunluğu analiz edilmiş model parametreleri ve değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 5.8 Bölüm 5.1’de uygunluğu analiz edilmiş model parametreleri ve değerleri

Model Parametresi	Açıklama
Ağ Geometrisi	Yatayda 2047 üçgen ağ geometrisi, düşeyde üniform 50 tabaka
Su seviyesi sınır şartı	Marmara sınırında D istasyonundaki, Karadeniz sınırında E istasyonunu su seviyesi ölçüm verileri (Şekil 5.17)
Tuzluluk ve sıcaklık sınır şartı	İSKİ (2004) verileri idealleştirilerek oluşturulmuş aylık ortalama tuzluluk (Şekil 5.43) ve sıcaklık (Şekil 5.44) profilleri
Rüzgar	ECMWF rüzgar ve atmosfer basıncı alan verileri

5.2 Sayısal Model Parametrelerinin Genetik Algoritmalar Yöntemiyle Kalibrasyonu

5.2.1 Sayısal Model parametreleri

Kalibrasyon model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki farkı en aza indirme işlemidir. Model kullanıcı tarafından tamamen tanımlanamadığı için kalibrasyon zorunlu hale gelmektedir. Kalibrasyon aşamasında kullanılan optimizasyon yöntemleri en genel halde deterministik yöntemler ve istatistiksel yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Deterministik optimizasyon metotları yerel minimuma veya maksimuma yakınsayan algoritmalarıdır. Türevsel hesaplamalar veya türevsel yaklaşımlar örnek olarak verilebilir. Rastsal araştırma algoritmaları (örnek: genetik algoritmalar) gibi istatistiksel metotlar ise global minimumu veya maksimumu bulmada bazı stratejileri ve rasgele sayıları kullanırlar. Son yıllarda bilgisayarların hızlarındaki artış bu algoritmaların uygulama sahasına girmesine neden olmuştur.

Doğru optimizasyon tekniğinin kullanılması şartıyla kalibrasyon genel olarak üç bölümden oluşmaktadır:

4. Optimizasyonu yapılacak parametrelerin seçilmesi
5. Optimum değerlerin hesabı
6. Optimizasyon sonuçlarının analizi

Bu çalışmada İstanbul Boğazı'nın sayısal modeli genetik algoritmalar yöntemiyle kalibre edilmiştir. Kalibrasyonda dikkate alınan model parametreleri ve bunlara ait değer aralıkları Çizelge 5.9'da özetlenmiştir. Bunlardan taban sürtünme katsayısı (c_f) tabakalı akım hızları ve debileri üzerinde, türbülans Prandtl sayısı (σ_t) yoğunluğun difüzyon taşınımında ve batıklık katsayısı (c_{3e}) ise akım alanında derinlik boyunca oluşan tabakalaşma üzerinde etkili olmaktadır. Akım alanı üzerinde etkili olan $k-\epsilon$ türbülans modeline ait diğer sabitler için literatürde önerilen değerler dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.9 Sayısal modelin kalibrasyon parametreleri ve değer aralıkları

Kalibrasyon Parametresi	Değer aralığı		Açıklama
Taban sürtünme katsayısı (c_f)	min.	0.0071	$k_s=30$ cm tam pürüzlü akım koşullarında sırasıyla maksimum (-114.5 m), ortalama (-40 m) ve minimum akım derinlikleri (-4 m) için (4) ifadesinden hesaplanmıştır. Akım alanı derinliği boyunca üniform 50 tabakadan oluşturulmuştur.
	ort.	0.0104	
	maks.	0.083	
Türbülans Prandtl sayısı (σ_t)	min..	0.86	(5.6) ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır.
	maks.	1.4	
Batıklık katsayısı (c_{e3})	min..	0	Standart k-ε modelinde 0 değerini almaktadır.
	maks.	1.44	

Taban sürtünme katsayısı (c_f):

Alt tabakaya ait akım karakteristikleri üzerinde etkili olan taban kayma gerilmesi ($\overline{\tau_b}$) (5.2) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$\overline{\tau_b} = \rho_o \times c_f \times |\overline{u_b}| \times \overline{u_b} \quad (5.2)$$

Burada $\overline{u_b}$ tabandan Δz_b kadar yukarıdaki (dikkate alınan sayısal ağda tabana en yakın hesap noktası) akım hızını göstermektedir. Bu bölgede logaritmik hız dağılımının geçerli olduğu kabul edilmektedir. c_f ise taban sürtünme katsayısı olup (5.3) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\chi} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_0}\right)\right)^2} \quad (5.3)$$

Burada $\chi=0.4$ von Karman sabitini, z_0 ise taban pürüzlülük ölçeğini göstermektedir. z_0 (5.4) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$z_0 = m \times k_s \quad (5.4)$$

Hidrolik pürüzlü akımda $m \approx 1/30$ değerini almaktadır. Burada k_s mutlak pürüz yüksekliğini göstermektedir. Çizelge 5.9'un ikinci satırındaki c_f 'in minimum, ortalama ve maksimum değerleri tam pürüzlü akım koşullarındaki ($k_s=30$ cm) maksimum (-114.5 m), ortalama (-40

m) ve minimum (-4 m) akım derinliklerine karşılık gelen Δz_b değeri kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.10'da farklı araştırmacıların İstanbul Boğazı için dikkate aldıkları taban sürtünme katsayıları görülmektedir (Zaremba vd., 2003). Bu çalışmada elde edilen taban sürtünme katsayılarının Çizelge 5.9'da verilen değerlerle uyumlu oldukları görülmüştür.

Çizelge 5.10 Farklı araştırmacıların İstanbul Boğazı için dikkate aldıkları taban sürtünme katsayıları (Zaremba vd., 2003)

Uzunluk L (km)	Ortalama derinlik,h (m)	c_f	Araştırmacı
30	60	0.0046	Defant (1961)
30	60	0.03	Assaf&Hecht (1974)
20	20	0.002	Pratt (1986)
31	40	0.012	Maderich&Efroimson (1990)
30	50	0.0046	Oğuz vd., (1990)

Türbülans Prandtl sayısı (σ_t):

Bölüm 2.1'de de açıklandığı gibi akışkan akımında akım veya akışkana ait özelliklerin taşınımı konveksiyon ve difüzyon ile gerçekleşmektedir. Konveksiyon akımın ortalama hızıyla akış yolu boyunca taşınımı izah etmektedir. Bu olaya örnek olarak bir akışkan içinde çözünmüş bir maddenin akışkan ortamı içinde konsantrasyonu değişmeksizin taşınması verilebilir. Difüzyon ise bir maddenin akımın ortalama hızı ile taşınırken moleküler difüzyon, türbülans difüzyonu ve bir kesit içinde akımın hızındaki değişim (diferansiyel konveksiyon) dolayısıyla yayılmasıdır. Bu olaya örnek olarak ise başlangıç konsantrasyonu yüksek olan bir maddenin belli bir mesafe taşındıktan sonra konsantrasyonunun düşmesi verilebilir (Yüksel, 1999).

Pratik uygulamalarda moleküler difüzyonun etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda geriye dispersiyon olarak da adlandırılan türbülans difüzyonu ve diferansiyel konveksiyon kalmaktadır (Yüksel, 1999).

Difüzyon katsayıları yatayda ve düşeyde farklı değerler alabilmektedir. Yatay ve düşey difüzyon katsayıları söz konusu doğrultulardaki eddy viskozitelerinin bir ölçek faktörü ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Ölçek faktörü $1/\sigma_t$ ifadesiyle hesaplanmakta ve σ_t türbülans

Prandtl sayısını göstermektedir. Türbülans Prandtl sayısı akım alanında yoğunluğun (sıcaklık ve tuzluluk) difüzyon taşınımı üzerinde etkili bir boyutsuz parametredir.

$$D_i = \frac{\nu_{t,i}}{\sigma_t} \quad (5.5)$$

Burada D_i i doğrultusundaki difüzyon katsayısını, $\nu_{t,i}$ i doğrultusundaki eddy viskozitesini göstermektedir.

Literatürde türbülans Prandtl sayısı viskoz difüzyonun termal difüzyona oranıyla tanımlanan boyutsuz bir sayıdır. Prandtl sayısının 1'den büyük değerlerinde viskoz difüzyon, 1'den küçük değerlerinde ise termal difüzyon daha etkili olmaktadır. Dikkate alınan akışkana bağlı olarak değişmekle birlikte deneysel çalışmalardan türbülans Prandtl sayısının 0.7-0.9 arasında değerler aldığı belirlenmiştir (Kays, 2005). Rodi (1980) ise σ_t 'yi 0.9 olarak dikkate almıştır.

Türbülans Prandtl sayısı ile ilgili Venayagamoorthy vd. (2003) yaptıkları başka bir çalışmada ise σ_t 'yi, türbülans Froude sayısına (Fr_k) bağlı olarak (5.6) ifadesiyle tanımlanmışlardır. Söz konusu çalışmada öncelikle Shih vd. (2000)'in homojen akım koşullarında DNS yaklaşımı kullanarak geliştirdikleri türbülans modeline ait sonuçların ışığında standart k- ϵ türbülans modeline ait sabitler türbülans Froude sayısının (Fr_k) fonksiyonu olarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra modifiye edilmiş k- ϵ katsayıları kullanılarak tabakalı bir açık kanal akımı modellenmiştir. Elde edilen k- ϵ modeline ait sonuçlar Garg vd. (2000) ile Shih (2003)'ün LES ve DNS kullanarak modelledikleri tabakalı açık kanal akımı sonuçlarıyla bir arada değerlendirilmiştir. Özellikle zayıf ve orta şiddette tabakalaşmanın söz konusu olduğu durumlarda çalışmanın iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

$$\sigma_t = \begin{cases} 1.4 & Fr_k \leq 0.35 \\ 1.4 - 0.55(1 - \exp(-7(Fr_k - 0.35))) & Fr_k > 0.35 \end{cases} \quad (5.6)$$

$$Fr_k = \frac{\epsilon}{Nk} \quad (5.7)$$

Burada k türbülans kinetik enerjisini (TKE), ϵ kayıp oranını ve N ise batıklık frekansını göstermektedir. Söz konusu çalışmada $0 \leq Fr_k \leq 1$ için k- ϵ türbülans modeline ait parametrelerin değişimi incelenmiştir. $Fr_k \leq 0.35$ kuvvetli tabakalanmayı $Fr_k > 0.35$ ise daha zayıf tabakalanmayı diğer bir deyişle güçlü bir karışımı göstermektedir.

$Fr_k \leq 0.35$ için σ_t 'nin üst limiti 1.4, $Fr_k=1$ için ise alt limit karşı gelen 0.86 değeri almaktadır.

Batıklık katsayısı ($C_{\epsilon 3}$):

Bu çalışmada dikkate alınan sayısal çözümde türbülans modeli yatayda ve düşeyde farklı yaklaşımlar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Türbülansın hesabında yatayda Smagorinsky (1963), düşeyde ise k-ε türbülans modelleri kullanılmıştır.

Smagorinsky (1963) ifadesi karakteristik bir uzunluk ölçeğine bağlı olarak (5.8) ifadesinde görülen ikincil bir eddy viskozitesi (sub-grid eddy viscosity, A) tanımlamaktadır.

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5.8)$$

Burada c_s 0.25-1 aralığında değerler alabilen bir sabiti, l karakteristik bir uzunluğu (burada hesabı yapılan noktadaki yatay ağ boyutunu), S_{ij} ise birim açısız deformasyonu göstermektedir.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.9)$$

Düşey yöndeki eddy viskozitesinin (ν_t) hesabında k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.10)$$

Sırasıyla k ve ε (5.11) ve (5.12) ifadelerinden elde edilmektedirler.

$$\frac{dk}{dt} = P - \varepsilon - B + D_k \quad (5.11)$$

Burada P TKE'nin üretim oranını, B batıklık parametresini ve D_k ise taşınım terimini göstermektedir.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = c_{\varepsilon 1} \frac{P\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - c_{\varepsilon 3} \frac{B\varepsilon}{k} + D_\varepsilon \quad (5.12)$$

C_μ , $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , $c_{\varepsilon 3}$ ve σ_t k-ε türbülans modelinin ampirik katsayıları olup ilk beş parametrenin aldığı değerler Çizelge 5.11'de görülmektedir (Rodi, 1980).

Çizelge 5.11 k-ε türbülans modeline ait sabitler (Rodi, 1980)

C_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Eddy viskozitesinin tanımlanması için geriye kalan iki parametre olan türbülans Prandtl sayısı (σ_t) ve batıklık katsayısı ($c_{\varepsilon 3}$) ile ilgili olarak farklı yaklaşımlar söz konusudur. σ_t ile ilgili olarak farklı iki yaklaşıma yukarıda değinilmiş ve Venayagamoorthy vd. (2003) tarafından önerilen ifade kullanılarak bu parametreye ait limit değerler daha önce tanımlanmıştır.

Batıklık parametresi $c_{\varepsilon 3}$ için farklı araştırmacılar farklı değerler önermişlerdir. Rodi (1987)

$0 < c_{\varepsilon 3} < 0.29$, Baum&Caponi (1992) 1.14 değerini önermiş, Burchard&Baumert (1995) ise söz konusu parametrenin negatif değerler dahi alabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Venayagamoorthy vd. (2003) ise (5.13) ifadesini önermişlerdir.

$$c_{\varepsilon 3} = \left\{ \begin{array}{l} 1.44 \\ 1.44 - 9.6(Fr_k - 0.35) \\ 6.4(Fr_k - 0.5) \\ 1.92 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} Fr_k < 0.35 \\ 0.35 < Fr_k < 0.5 \\ 0.5 < Fr_k < 0.8 \\ Fr_k > 0.80 \end{array} \right\} \quad (5.13)$$

(5.13) ifadesi özellikle zayıf ve orta şiddetteki tabakalanmada ($0.35 < Fr_k < 0.50$) iyi sonuçlar verdiği için $c_{\varepsilon 3}$ 'ün üst limiti $Fr_k \geq 0.35$ için 1.44, alt limit ise $Fr_k=0.5$ için 0 olarak hesaplanmıştır.

5.2.2 Genetik Algoritmalar Yöntemi

Genetik algoritmalar, stokastik bir arama yöntemi olup en iyi olan yaşar prensibine dayalı olarak, biyolojik sistemlerin gelişim sürecinden esinlenerek geliştirilmiştir. Biyolojik süreci modelleyerek fonksiyonları optimize eden evrim algoritmalarıdır. Genetik algoritmalar, düzensiz arama yöntemlerine bazı önemli değişimler katmakta olup biyoloji ve genetik biliminden terminolojiler kullanmaktadır (Gündemir, 2006). Her bir ferdi, kromozomlar şeklinde temsil eden popülasyonlardan oluşur. Popülasyonun uygunluğu belirli kurallar dahilinde maksimize veya minimize edilir.

Bu yöntemin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Sürekli ve ayrık parametreleri optimize eder.
- Türevsel bilgiler gerekmez.
- Maliyet fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırır.
- Çok sayıda parametrelerle çalışma imkanı vardır.
- Paralel PC 'ler kullanılarak çalıştırılabilir.
- Karmaşık maliyet fonksiyon parametrelerini, lokal minimuma veya maksimuma takılmadan optimize edebilir.

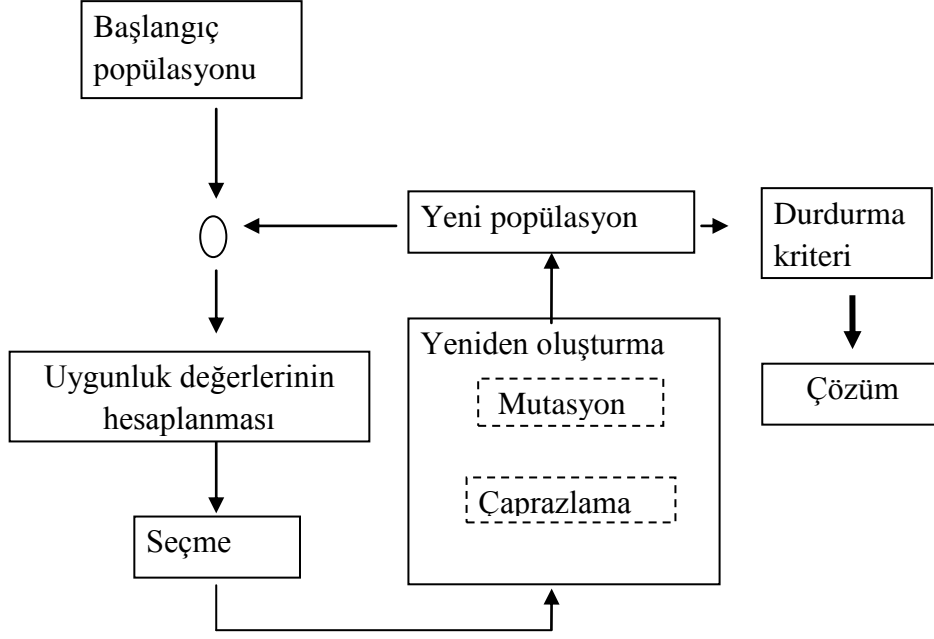
Genetik algoritmalar yöntemi üç temel işlemden (operatör) meydana gelmektedir: (1) Seçim, (2) Çaprazlama ve (3) Mutasyon.

Bu yöntemde her çözüm bir dizi olarak kodlanmakta ve bireylerin bir yığını ile çözüme ulaşılmaktadır. Bireyler uygunluk değerlerinin büyüklüğüne göre (örneğin ölçüm ile en düşük RMSE veya en yüksek korelasyon ve regresyon değerine sahip ölçüm-model sonucu (birey), çok sayıdaki modelden oluşan bir dizideki en uygun bir bireydir) daha büyük bir olasılıkla seçilmektedirler. Seçim operatörü ile seçilmiş olan bireyler çaprazlama havuzuna girmeye hak kazanırken seçilmeyen bireyler elenmektedirler.

Çaprazlama, eşleme sürecinde seçilen bireylerden bir ve birden fazla yeni birey (nesil) oluşturma işlemine denmektedir. En yaygın olarak kullanılan yol çaprazlanan iki bireyden iki tane yeni nesil elde edilmesidir. Çaprazlama ile yüksek uygunluk değerlerine sahip bireylerde bulunduğu kabul edilen iyi özelliklerin sonraki nesillere daha fazla sayıda geçirilmesi ve böylece daha yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin oluşturulması amaçlanmaktadır.

Mutasyon ise yığılda çeşitlilik yaratabilmek, çaprazlama sonucu kaybolabilen iyi özellikleri geri kazanabilmek ve global optimuma ulaşabilmek için bireylerdeki kodların (örneğin model parametreleri) belli bir olasılıkla değişime uğratılmasıdır.

Mutasyon görünüşte genetik algoritmanın dayanak noktasıdır, ancak etkisi bir çözüm üzerindedir. Bu da yalnız başına başarılı olmasını zorlaştırmaktadır. Çok düşük bir mutasyon olasılığı toplumda bazı özelliklerin kaybolmasına yol açabilmektedir. Bu durum en iyi sonuçların bulunmasına engeldir. Ancak yüksek bir mutasyon olasılığı ise mevcut çözümleri bozarak sonuca ulaşmayı zorlaştırabilmektedir. Çaprazlama ve mutasyon olasılıkları için kesin bir değer yoktur. Mutasyon için 0.05-0.001, çaprazlama için ise 0.5-1.0 aralığında değişen değerler kullanılmaktadır (Altunkaynak ve Esin, 2004). Şekil 5.66'da genetik algoritmalar yöntemindeki genel akış şeması görülmektedir.



Şekil 5.66 Genetik algoritmanın genel akış şeması

Optimizasyon işlemi başlangıçta belirlenen durdurma kriterine göre bitirilmektedir. Bunun için en çok başvurulan yöntem hedef fonksiyonu için bir başlangıç kriteri (değeri) belirlemektir. Model sonuçları ile ölçüm değerleri arasındaki fark optimizasyonu durdurma kriterinden küçükse optimizasyon durdurulur.

Ancak her zaman bu şartın sağlanması iyi bir kalibrasyon yapıldığını göstermemektedir. Unutulmamalıdır ki bu durum seçilen parametrelere göre değişiklik göstermektedir (sonuçta seçilen parametrelerin ve değerlerinin doğru olduğu ile ilgili kesin bir şey bu aşamada söylenememektedir).

Genetik algoritmaların en önemli dezavantajı gerçekleştirilmesi gereken çok sayıda amaç fonksiyonunu hesaplamasıdır. Her iterasyon için yığındaki tüm bireylerin uygunluk değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamalar çok zaman gerektirmektedir ve genellikle genetik algoritmayı kısıtlayan unsur olmaktadır. Bu dar boğaz hesaplamaların birbirlerine bağlı olmamalarından dolayı paralel bir yaklaşım ile aşılabilmektedir. Diğer bir dezavantajı ise stokastik bir arama tekniği olması ve teorik olarak belirli bir problemin optimum çözümünü garanti etmiyor olması.

5.2.3 Kalibrasyon Parametrelerinin Modellenmesi ve Değerlendirme

Sayısal modelin kalibrasyonunda c_f , σ_t ve c_{e3} parametreleri dikkate alınarak genetik algoritmalar yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm ile model sonuçları arasındaki benzeşimin hesabında RMSE'nin (hataların kareli ortalamalarının karekökü) dikkate alınmıştır. Diğer bir

deyişle modellerin ölçümlerle uygunluğu model ile ölçüm sonuçları arasındaki RMSE değerlerine bakılarak belirlenmiştir.

Durdurma kriteri olarak iterasyon sayısı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada kalibrasyon işleminin 5 iterasyon sonunda bitirilmesi öngörülmektedir. Her bir iterasyonda çok sayıda model çözümünün gerekli olması ve bu durumun çok zaman alması durdurma kriterinin iterasyon sayısı ile sınırlandırılmasını zorunlu kılmıştır.

Genetik algoritmalar yöntemi önceki bölümde değinildiği gibi seçim, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç temel operatörden oluşmaktadır. Seçim işlemi ile başlayıp mutasyon ile sona eren her bir basamak bir iterasyonu göstermektedir. Ancak bu üç operatörün işlerlik kazanması için bir başlangıç yığını oluşturmak gerekmektedir.

Başlangıç yığını belli sayıdaki model çözümünden oluşmaktadır. Daha öncede açıklandığı gibi bu yöntemde her bir model parametresi bir kromozomu, her bir model sonucu bir bireyi ve n sayıdaki model sonucu da bir yığını temsil etmektedir. Kalibrasyon ile en güçlü kromozomlardan (en iyi benzeşime karşılık gelen model parametreleri) oluşan en iyi bireyin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu bölümde İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonunda için -5 m, -10 m ve -15 m'lerdeki akıntı hızları için model ile ölçüm sonuçları arasındaki en büyük uygunluk araştırılacaktır. Bu amaçla parametreleri Çizelge 5.12'de görülen n=7 bireylik bir başlangıç yığını (popülasyonu) oluşturulmuştur. Çizelge 5.12'den de görüldüğü gibi ilk üç birey için c_f 'nin sırasıyla minimum, ortalama ve maksimum değerleri σ_t ve $c_{\epsilon 3}$ 'ün ise ortalama değerleri dikkate alınmıştır. Sırasıyla 4. ve 5. bireylerde $c_{\epsilon 3}$ 'nin minimum ve maksimum değerleri, c_f ve $c_{\epsilon 3}$ 'nin ise ortalama değerleri dikkate alınmıştır. 6. ve 7. bireylerde ise σ_t 'nin sırasıyla minimum ve maksimum değerleri, geriye kalan iki parametrenin ortalama değerleri dikkate alınmıştır. Böylece başlangıç popülasyonunda her üç parametreye ait minimum, ortalama ve maksimum değerler dikkate alınmış 7 adet model alternatifini oluşturulmuştur. Model alternatifleri kullanılarak İstanbul Boğazı'ndaki 01.03-31.03.2005 tarihleri arasındaki 1 aylık akıntı yapısı modellenmiştir.

Çizelge 5.12 Başlangıç popülasyonu bireyleri

Birey no	Birey	Açıklama
1	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	$f_1=\{C_{f,\min.}, \sigma_{t,\text{ort.}}, c_{\varepsilon 3,\text{ort.}}\}$
2	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	$f_2=\{C_{f,\text{ort.}}, \sigma_{t,\text{ort.}}, c_{\varepsilon 3,\text{ort.}}\}$
3	$f_3=\{0.083, 1.13, 0.72\}$	$f_3=\{C_{f,\text{maks.}}, \sigma_{t,\text{ort.}}, c_{\varepsilon 3,\text{ort.}}\}$
4	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	$f_4=\{C_{f,\text{ort.}}, \sigma_{t,\text{ort.}}, C_{\varepsilon 3,\min.}\}$
5	$f_5=\{0.0104, 1.13, 1.44\}$	$f_5=\{C_{f,\text{ort.}}, \sigma_{t,\text{ort.}}, C_{\varepsilon 3,\text{maks.}}\}$
6	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	$f_6=\{C_{f,\text{ort.}}, \sigma_{t,\min.}, c_{\varepsilon 3,\text{ort.}}\}$
7	$f_7=\{0.0104, 1.44, 0.72\}$	$f_7=\{C_{f,\text{ort.}}, \sigma_{t,\text{maks.}}, c_{\varepsilon 3,\text{ort.}}\}$

Modellerin ölçümlerle olan uygunluğu değerlendirilirken RMSE (Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü) istatistiksel hata fonksiyonu kullanılmıştır.

RMSE genelleştirilmiş bir standart sapmadır ve sapmalar serisinin kareli ortalamasının kareköküne eşittir. Bu istatistiksel hata fonksiyonu ile değişken veya seri değerleri arasındaki fark ve ilişki işaret problemi yaşanmadan kolayca araştırılabilir. Bilimsel araştırmalarda sağlıklı sonuçlar verdiği için yaygın şekilde kullanılır (Gündemir, 2006). RMSE (5.14) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(OBS_i - SIM_i)^2]} \quad (5.14)$$

Aranılan uygunluk kriteri, ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki farkın minimize edilmesi ve mümkün olduğunca sonucun sifıra yaklaşması şeklinde tarif edilir

RMSE hata fonksiyonu kullanılarak B akıntı ölçüm istasyonuna ait üç farklı derinlikteki ölçülen akıntı hızları ile 7 farklı modeldeki B istasyonuna karşılık gelen noktadaki model akıntı hızlarının uygunluğu belirlenmiştir. Çizelge 5.13-15'de -5m, -10 m ve -15 m derinliklerdeki RMSE hata fonksiyonlarının değerleri görülmektedir.

Buna göre -5 m ve -10 m derinliklerde $f\{C_{f,\text{ort.}}, \sigma_{t,\text{ort.}}, C_{\varepsilon 3,\min.}\} = f_4\{0.0104, 1.13, 0\}$ parametre takımından oluşan 4 nolu model alternatifi ölçümlerle en uygun sonucu elde etmiş, 7 nolu model ise en düşük uyumu elde etmiştir. -15 m'de ise ölçümler ile en büyük uyumu $f\{C_{f,\min.}, \sigma_{t,\text{ort.}}, c_{\varepsilon 3,\text{ort.}}\} = f_1\{0.0071, 1.13, 0.72\}$ parametre takımından oluşan 1 nolu model elde etmiştir (Çizelge 5.15). Yüzeyden itibaren artan derinlikle birlikte ölçüm ile model akıntı hızları arasındaki uyumun arttığı Çizelge 5.13-15'deki RMSE değerlerinin değişiminden görülmektedir.

Çizelge 5.13 -5 m için başlangıç popülasyonunun uygunluk değerlerine göre sıralaması

Yeni birey no	Önceki birey no	Birey	RMSE
1	4	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	0.293
2	6	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	0.339
3	1	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	0.473
4	2	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	0.475
5	3	$f_3=\{0.083, 1.13, 0.72\}$	0.503
6	5	$f_5=\{0.0104, 1.13, 1.44\}$	0.555
7	7	$f_7=\{0.0104, 1.4, 0.72\}$	0.617

Çizelge 5.14 -10 m için başlangıç popülasyonunun uygunluk değerlerine göre sıralaması

Yeni birey no	Önceki birey no	Birey	RMSE
1	4	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	0.215
2	6	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	0.249
3	1	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	0.347
4	2	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	0.351
5	3	$f_3=\{0.083, 1.13, 0.72\}$	0.382
6	5	$f_5=\{0.0104, 1.13, 1.44\}$	0.436
7	7	$f_7=\{0.0104, 1.4, 0.72\}$	0.486

Çizelge 5.15 -15 m için başlangıç popülasyonunun uygunluk değerlerine göre sıralaması

Yeni birey no	Önceki birey no	Birey	RMSE
1	1	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	0.175
2	2	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	0.178
3	4	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	0.178
4	6	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	0.185
5	5	$f_5=\{0.0104, 1.13, 1.44\}$	0.190
6	3	$f_3=\{0.083, 1.13, 0.72\}$	0.214
7	7	$f_7=\{0.0104, 1.4, 0.72\}$	0.238

Çizelge 5.13-15'de İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonu için başlangıç yığını oluşturmak amacıyla 7 farklı model alternatifini oluşturulmuş ve RMSE fonksiyonu kullanılarak

modellerin -5 m, -10 m ve -15 m derinlikler için uyumu belirlenmiştir. -5 ve -10 m derinlikler için model-ölçüm çiftlerinin uygunluk sırasının aynı, -15 m'de ise farklı olduğu Çizelge 5.13-15'den görülmektedir. -15 m'de özellikle de ilk 5 model alternatifi için RMSE değerlerinin birbirine çok yakın değerler aldıkları Çizelge 5.15'den görülmektedir. En büyük RMSE değeri ile en küçüğü arasındaki fark -5 m'de (Çizelge 5.13) 0.324 m/s, -10 m'de (Çizelge 5.14) 0.271 m/s ve -15 m'de (Çizelge 5.15) ise 0.063 m/s değerini almaktadır. Dikkate alınan ilk iki derinlikten farklı olarak -15 m'de ölçüm-model uygunluk sıralamasının değişmesi tüm derinlikler için geçerli olan bir tek uygunluk sıralaması belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Ancak Çizelge 5.15'den de görüldüğü gibi 1,2,4,6 ve 5. modellere ait RMSE sonuçları birbirine yakın değerler almaktadır. Bu nedenle bu derinlik için de ilk iki derinlikteki uygunluk sıralamasının geçerli olduğu kabul edilmiştir.

Çaprazlama aşamasında ise rasgele sayı üreticisi kullanılarak çaprazlamaya tabi tutulacak bireyler (modeller) ve çaprazlanacak model parametreleri belirlenmiştir. Çaprazlanacak modeller belirlenirken 1 ile 7 arasında, çaprazlanacak model parametresini oluştururken ise 1 ile 3 arasında rasgele sayılar oluşturulmuştur. Çaprazlama aşaması sonunda ortaya çıkan durum Çizelge 5.16'da özetlenmiştir. Çizelge 5.12'deki 7 bireylik başlangıç popülasyonuna ek olarak çaprazlamadan da 4 yeni birey oluşturulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken 4 yeni bireye ait sayısal modellerin henüz koşturulmadığı ve uygunluklarının (RMSE değerlerinin) hesaplanmadığıdır. Koşturulacak olan yeni modeller mutasyon aşamasından sonra belirlenecektir. Çaprazlama aşaması sonunda oluşan 9 ve 11 no'lu bireylerin 4 no'lu birey ile aynı oldukları Çizelge 5.16'dan görülmektedir.

Çeşitlilik sağlanması ve 4 no'lu bireyden farklı iki yeni bireyin elde edilmesi için Çizelge 5.16'daki 9 ve 11 nolu bireyler mutasyona uğratılmıştır. Mutasyona uğratılacak model parametreleri rasgele belirlenmiş ve mutasyon oranı olarak ise parametrelere ait üst ve alt limitler (Çizelge 5.9) arasındaki farkın belirli bir yüdesi dikkate alınmıştır. Bu çalışmada mutasyon oranı taban pürüzlülüğü (c_f), türbülans Prandtl sayısı (σ_t) ve batıklık katsayısı (c_{e3}) için sırasıyla % 2, % 10 ve % 10 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu değişimin parametre değerlerine artış olarak mı azalma olarak mı yansıtılacağı da yine rasgele belirlenmiştir. Bu amaçla çeşitliliğin sağlanması için 9. bireyin 3. parametresi (c_{e3}) % 10 azaltılmış, 11. bireyin 2. parametresi (σ_t) ise % 10 artırılmıştır. Mutasyon işlemi sonucunda ortaya çıkan yeni durum Çizelge 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.16 Çaprazlama işlemi sonrası ortaya çıkan yeni durum

Yeni birey no	Birey	Açıklama
1	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	Çizelge 5.13-15'den alındı (RMSE değerleri hesaplandı)
2	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	
3	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	
4	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	
5	$f_3=\{0.083, 1.13, 0.72\}$	
6	$f_5=\{0.0104, 1.13, 1.44\}$	
7	$f_7=\{0.0104, 1.4, 0.72\}$	
8	$f_8=\{0.0071, 0.86, 0.72\}$	Çizelge 5.13-15'deki 2 ile 3 no'lu bireylerin 1. parametreleri (c_f) çaprazlandı (RMSE 'leri hesaplanmadı). (4, 9 ve 11 no'lu bireyler aynı)
9	$f_9=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	
10	$f_{10}=\{0.0071, 1.13, 0\}$	Çizelge 5.13-15'deki 1 ile 3 no'lu bireylerin 1. parametreleri (c_f) çaprazlandı (RMSE 'leri hesaplanmadı) (11,4 ve 9 no'lu bireyler aynı)
11	$f_{11}=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	

Çizelge 5.17 Mutasyona işlemi sonrası oluşan yeni popülasyon

Birey no	Birey	Açıklama
1	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	Çizelge 5.13-15'den alındı (RMSE değerleri hesaplandı)
2	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	
3	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	
4	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	
5	$f_3=\{0.083, 1.13, 0.72\}$	
6	$f_5=\{0.0104, 1.13, 1.44\}$	
7	$f_7=\{0.0104, 1.4, 0.72\}$	
8	$f_8=\{0.0071, 0.86, 0.72\}$	Çaprazlamada oluştu (mutasyon yok)
9	$f_9=\{0.0104, 1.13, 0.576\}$	Çaprazlamada oluştu (mutasyon var)(3. Parametre (c_{e3}) üst ve alt limitlerinin farkının % 10'u oranında azaltıldı)
10	$f_{10}=\{0.0071, 1.13, 0\}$	Çaprazlamada oluştu (mutasyon yok)
11	$f_{11}=\{0.0104, 1.076, 0.72\}$	Çaprazlamada oluştu (mutasyon var)(2. Parametre (σ_t) üst ve alt limitlerinin farkının % 10'u oranında azaltıldı)

Genetik algoritmalar yönteminde seçim, çaprazlama ve mutasyondan meydana gelen her bir hesap adımı bir iterasyona karşılık gelmektedir Çizelge 5.18'de Çizelge 5.17'deki 11 adet

model alternatifine (1. iterasyon) ait -5 m, -10 m ve -15m'deki uygunluk sıralaması görülmektedir. Bu çalışmada her bir iterasyon adımı sonunda modeller uygunluklarına göre sıralanır ve başlangıç yığınındaki model sayısı kadar model ile bir sonraki iterasyon adımındaki hesaplamalar yapılmıştır. Dolayısıyla 2. iterasyona başlarken 1. iterasyon sonundaki en ölçümler ile en büyük uyumu gösteren Çizelge 5.18'deki ilk 7 birey tutulmuş geri kalan 4 birey ise elenmiştir.

Çizelge 5.18'den de görüldüğü gibi -5 m ve -10 m derinliklerde modellerin uygunluk sıralaması ilk 2 birey dışında değişmemiştir. 4 ve 10 numaralı bireyler -10 m'de sadece 0.002 m/s'lik bir farkla sıralandıkları için bu derinlikte de -5 m'deki uygunluk sıralamasının geçerli olduğu kabul edilmiştir.

-15 m derinlikte modellerin uygunluk sıralaması -5 ve -10 m'lerden farklılık göstermiştir. Ancak Çizelge 5.18'den de görüldüğü gibi söz konusu derinlikteki ilk 7 modele ait uygunluk değerleri dikkate alınan ilk iki derinlikten farklı olarak birbirine çok yakın değerler almıştır. 1 no'lu birey ile 9 no'lu birey arasındaki fark sadece 0.015 m/s'dir. Bu nedenle -15 m'deki derinlikteki uygunluk sıralamasının da -5 m ile aynı olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 5.18 1. iterasyona ait model alternatifleri için -5 , -10 ve -15 m'lerdeki uygunluk sıralaması

1. iterasyon					
-5 m		-10 m		-15 m	
Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)
10	0.287	4	0.215	1	0.175
4	0.293	10	0.217	2	0.178
6	0.339	6	0.249	4	0.178
9	0.405	9	0.296	10	0.180
11	0.440	11	0.323	6	0.185
1	0.473	1	0.347	11	0.186
2	0.475	2	0.351	9	0.190
3	0.503	3	0.382	5	0.190
8	0.522	5	0.436	3	0.214
5	0.555	7	0.486	7	0.238
7	0.617	8	0.572	8	0.435

Çizelge 5.19'da 1. iterasyon sonrası ortaya çıkan yeni durum (2. iterasyonuna ait seçim aşamasına karşılık gelmektedir) ve 2. iterasyona ait çaprazlama sonucu ortaya çıkan yeni durum görülmektedir. Çizelge 5.19'un ikiknci sütunundaki fonksiyonlara ait alt indisler söz konusu fonksiyonun bir önceki aşamadaki birey numarasını göstermektedir.

Çizelge 5.19 2. iterasyona ait çaprazlama işlemi sonrası ortaya çıkan yeni durum

2. iterasyon		
Birey no	Seçim	Çaprazlama
1	$f_{10}=\{0.0071, 1.13, 0\}$	Çizelge 5.18'den alındı (RMSE değerleri hesaplandı)
2	$f_4=\{0.0104, 1.13, 0\}$	
3	$f_6=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	
4	$f_9=\{0.0104, 1.13, 0.576\}$	
5	$f_{11}=\{0.0104, 1.076, 0.72\}$	
6	$f_1=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	
7	$f_2=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	

Çizelge 5.19 Devam

2. iterasyon		
Birey no	Seçim	Çaprazlama
8	$f=\{0.0071, 1.076, 0\}$	Çizelge 5.19'daki 1-5 nolu bireylerin 2. parametresi (σ_t) çaprazlandı. (yeni birey)
9	$f=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	Çizelge 5.19'daki 1-5 nolu bireylerin 2. parametresi (σ_t) çaprazlandı. (7. birey ile aynı)
10	$f=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	Çizelge 5.19'daki 2-3 nolu bireylerin 3. parametresi (c_{E3}) çaprazlandı. (7. birey ile aynı)
11	$f=\{0.0104, 0.86, 0\}$	Çizelge 5.19'daki 2-3 nolu bireylerin 3. parametresi (c_{E3}) çaprazlandı. (yeni birey)
8	$f=\{0.0071, 1.076, 0\}$	Çizelge 5.19'daki 1-5 nolu bireylerin 2. parametresi (σ_t) çaprazlandı. (yeni birey)

Çizelge 5.19'dan da görüldüğü gibi 9. ve 10. bireyler 7. bireyler ile aynı parametrelerden oluşmaktadır. Çeşitliliğin sağlanması amacıyla rasgele sayı üreticisi kullanılmış ve 9. bireyin 1. parametresi (c_t) % 2 azaltılmış, 10. bireyin ise 3. parametresi (c_{E3}) % 10 oranında artırılmıştır. 8 ve 11. bireyler yeni bireyler oldukları için herhangi bir mutasyona

uğrılmamışlardı. Mutasyon işlemi sonrası ortaya çıkan yeni bireyler ve bu bireylere ait parametre değerleri Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20 Mutasyon işlemi sonunda ortaya çıkan yeni bireyler

Birey No	Parametre
8	$f=\{0.0071, 1.076, 0\}$
9	$f=\{0.0089, 1.13, 0.72\}$
10	$f=\{0.0104, 1.13, 0.864\}$
11	$f=\{0.0104, 0.86, 0\}$

Çizelge 5.20’deki 4 farklı modelin -5, -10 ve -15 m’lerdeki uygunluk değerleri hesaplanmış ve aynı derinliklerdeki için uygunluk değerleri daha önce hesaplanmış olan Çizelge 5.19’daki ilk yedi model alternatifi ile birlikte Çizelge 5.21’de verilmiştir. Bilindiği gibi 3. iterasyonun seçim aşamasında Çizelge 5.21’de verilen ve 2. iterasyonun sonunda sonucunda oluşan en uygun ilk 7 birey dikkate alınacaktır.

$f=\{0.0104, 0.86, 0\}$ parametre takımından oluşan 11 no’lu bireyin her üç derinlik için de ölçümlerle en yüksek uyumu elde ettiği Çizelge 5.21’den görülmektedir. 8, 9 ve 10 no’lu yeni bireylerin uygunlukları ise -5, -10 ve -15 m derinliklerde farklılık göstermekle birlikte sadece 8 no’lu birey -5 m derinlik için ilk 7 birey içerisinde (7. birey olarak) yer alabilmiştir. -5 m ve -10 m derinliklerde ise 8, 9 ve 10 no’lu bireylerden hiç biri 3. iterasyonun seçim aşamasında dikkate alınacak olan ilk 7 birey arasında yer almamıştır.

Çizelge 5.21’den de görüldüğü gibi uygunluk sıralaması sonucu -5 m’de 7. sırada yer alan 8 no’lu birey ile 8. sırada yer alan 6 no’lu bireylerin uygunlukları (RMSE) birbirine çok yakın değerler almaktadır. Diğer iki derinlikte ise 8 no’lu bireyin 6 no’lu birey ile kıyaslanamayacak miktarda ölçümlerden önemli oranda saptığı Çizelge 5.21’den görülmektedir. Bundan dolayı -5 m derinlikte 6 ile 8 no’lu bireylerin uygunluk sıraları değiştirilmiş ve 6 no’lu bireyin -5 m’de en uygun 7. birey olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca daha önce de açıklandığı gibi model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki farkın -5 m derinlikte daha büyük olması ve diğer iki derinlikte (özellikle de -15 m’de) ilk 7 modele ait uygunluk değerlerinin birbirine daha yakın değerler almalarından dolayı -5 m’deki uygunluk sıralamasının -10 ve -15 m’ler için de geçerli olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 5.22 ‘de yukarıda açıklananlar ışığında her üç derinlik için geçerli olan uygunluk sıralaması ve model parametreleri ile modellerin önceki aşmadaki uygunluk sırası ve yeni durumdaki uygunluk sırası verilmiştir.

Çizelge 5.21 2. itersayon sonunda modellerin uygunluk dağılımı

2. iterasyon					
-5 m		-10 m		-15 m	
Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)
11	0.266	11	0.201	11	0.163
1	0.287	2	0.215	6	0.175
2	0.293	1	0.217	7	0.178
3	0.339	3	0.249	2	0.178
4	0.405	4	0.296	1	0.18
5	0.44	5	0.323	3	0.185
8	0.462	6	0.347	5	0.186
6	0.473	7	0.351	4	0.19
7	0.475	10	0.510	10	0.257

Çizelge 5.21 Devam

2. iterasyon					
-5 m		-10 m		-15 m	
Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)
10	0.636	8	0.559	9	0.400
9	0.734	9	0.631	8	0.445

Çizelge 5.22 2. iterasyon sonunda en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 modele ait model parametreleri

Yeni birey no	Önceki birey no	Model parametreleri	RMSE (m/s)		
			-5 m	-10 m	-15 m
1	11	$f=\{0.0104, 0.86, 0\}$	0.266	0.201	0.163
2	1	$f=\{0.0071, 1.13, 0\}$	0.287	0.217	0.18
3	2	$f=\{0.0104, 1.13, 0\}$	0.293	0.215	0.178
4	3	$f=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	0.339	0.249	0.185
5	4	$f=\{0.0104, 1.13, 0.576\}$	0.405	0.296	0.19
6	5	$f=\{0.0104, 1.076, 0.72\}$	0.44	0.323	0.186
7	6	$f=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	0.473	0.347	0.175

Çizelge 5.22’de 2. iterasyon sonrası ortaya çıkan yeni durum aynı zamanda 3. iterasyona ait seçim aşamasını ifade etmektedir. Çaprazlama ve mutasyon sonrası ortaya çıkan yeni durum Çizelge 5.23’de özetlenmiştir. Çizelge 5.23’ün 1. sütunundaki 8 ve 9 no’lu bireyler sırasıyla Çizelge 5.22’deki 3 ve 4 no’lu bireylerin 2. parametrelerinin (σ_t) karşılıklı değiştirilmesiyle (çaprazlanmasıyla) elde edilmiştir. 10 ve 11 no’lu bireyler ise sırasıyla 1 ve 7 no’lu bireylerin 1. parametrelerinin (c_f) karşılıklı çaprazlanmasıyla elde edilmiştir. Çizelge 5.23’deki 8 no’lu birey Çizelge 5.20’deki 11 no’lu birey ile aynı parametrelerden oluşmaktadır. Bu nedenle mutasyon aşamasında 8 no’lu bireyin 3. parametresi ($c_{\epsilon 3}$) % 10 artırılarak mutasyona uğratılmıştır. Böylece yeni ve daha önce denenmemiş bir birey elde edilmiştir. Yine Çizelge 5.23’deki 9 no’lu birey Çizelge 5.17’deki 1. birey ile aynı model parametrelerine sahiptir. Bu nedenle mutasyon aşamasında 9 no’lu bireyin 3. parametresi ($c_{\epsilon 3}$) % 10 artırılmış ve daha önce dikkate alınmamış yeni bir parametre kombinasyonu elde edilmiştir.

Çizelge 5.23’deki 10 no’lu birey ise yeni bir birey olduğu için her hangi bir mutasyona uğratılmamıştır. 11 no’lu birey ise Çizelge 5.17’deki 4 no’lu birey ile aynı parametrelerden oluşmaktadır. Çeşitliliğin sağlanması amacıyla 11 no’lu bireyin 2. parametresi (σ_t) % 10 oranında artırılarak mutasyona uğratılmıştır.

Böylece Çizelge 5.23’de özetlenen çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda model parametreleri Çizelge 5.23’ün 2. sütununda görülen 4 adet yeni model alternatifi oluşturulmuştur.

Çizelge 5.23 3. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri

Çaprazlama	Mutasyon
$f_8=\{0.0104, 0.86, 0\}$	$f_8=\{0.0104, 0.86, \mathbf{0.144}\}$
$f_9=\{0.0104, 1.13, 0\}$	$f_9=\{0.0104, 1.13, \mathbf{0.144}\}$
$f_{10}=\{0.0071, 0.86, 0\}$	$f_{10}=\{0.0071, 0.86, 0\}$
$f_{11}=\{0.0104, 1.13, 0.72\}$	$f_{11}=\{0.0104, \mathbf{1.184}, 0.72\}$

Çizelge 5.24’de 3. iterasyon sonunda -5, -10 ve -15 m derinlikler için model alternatiflerine ait uygunluk sıralaması verilmiştir. Üç farklı derinlik için uygunluk sıralamasından da görüldüğü gibi sadece 10 no’lu model alternatifi her üç derinlikte de en uygun ilk 7 model alternatifi arasında yer alabilmiştir. 11 no’lu model alternatifi ise sadece -15 m’de ilk 7 model alternatifi içerisinde yer alabilmiştir. Diğer iki derinlikte ise ölçüm sonuçlarından önemli oranda sapma göstererek -5 m’de 11., -10 m’de ise 9. sırada yer almıştır.

-15 m derinlikteki uygunluk sıralamasından da görüldüğü gibi ilk 9 model alternatifi için en düşük ve en yüksek uygunluk değerleri arasındaki fark (1 ve 7 no'lu bireyler) 0.012 m/s'dir. 6. sıradaki 11 no'lu bireyin uygunluk değeri ile 7. sıradaki 5 no'lu bireyin uygunluk değeri farkı ise 0.005 m/s'dir. Dolayısıyla -15 m derinlikte bir sonraki iterasyonun seçim aşamasına kalacak olan ilk 7 birey için model parametrelerindeki değişim ilk iki derinlik kadar belirleyici olmamaktadır. Bu sonuçtan hareketle her üç derinlik için de ilk 7 birey için -5 ve -10 m derinliklerdeki uygunluk sıralamasının geçerli olduğu varsayılmıştır. Bir sonraki aşamanın seçim aşamasına kalan ilk 7 birey için -5 ve -10 m'de uygunluk sırasının aynı olduğu Çizelge 5.24'den görülmektedir.

Çizelge 5.24 3. itersayon sonunda modellerin uygunluklarına göre dağılımı

3. iterasyon					
-5 m		-10 m		-15 m	
Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)
1	0.266	1	0.201	1	0.163
10	0.268	10	0.203	10	0.165
2	0.287	2	0.217	3	0.178
3	0.293	3	0.215	2	0.18
4	0.339	4	0.249	4	0.185
5	0.405	5	0.296	11	0.185
6	0.44	6	0.323	5	0.19
8	0.459	7	0.347	6	0.186
7	0.473	11	0.405	7	0.175
9	0.486	8	0.557	8	0.442
11	0.539	9	0.576	9	0.443

Çizelge 5.25'de yukarıda açıklananlar ışığında her üç derinlik için geçerli olan uygunluk sıralaması, model parametrelerine ait değerler, modellerin önceki aşmadaki uygunluk sırası ve yeni durumdaki uygunluk sırası verilmiştir. Çizelge 5.25'de özetlenen durum aynı zamanda 4. iterasyonun seçim aşamasına kalan 7 adet bireyi ve parametre değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.26'da ise 4. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda meydana gelen yeni durum özetlenmiştir. Çizelge 5.26'nın 1. sütunundaki 8 ve 9 no'lu bireyler sırasıyla Çizelge 5.25'deki 1. ve 2. bireylerin birinci parametrelerinin (c_f) çaprazlanmasıyla elde edilmişlerdir. Elde edilen 8. bireye ait parametre kombinasyonu Çizelge 5.25'deki 2. birey ile

aynı, 9. bireye ait parametre kombinasyonu ise Çizelge 5.25'deki 1. birey ile aynı değerlere sahiptir. Çeşitliliğin sağlanması ve yeni bireyler elde edilmesi amacıyla 8. bireye ait c_f değeri % 2 oranında arttırılarak mutasyona uğratılmış ve Çizelge 5.26'nın 2. satır 2. sütunundaki yeni birey elde edilmiştir. 9. bireye ait mutasyon işlemi ise ikinci parametrenin (σ_t) % 10 artırılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Böylece Çizelge 5.26'nın 3. satır 2. sütunundaki yeni birey elde edilmiştir.

Çizelge 5.26'nın 1. sütunundaki 10. ve 11. bireyler ise sırasıyla Çizelge 5.25'deki 3. ve 7. bireylerin 3. parametrelerinin ($c_{\epsilon 3}$) çaprazlanmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen 11 no'lu bireye ait parametre kombinasyonu daha önce denenmiş herhangi bir bireye ait olmadığından mutasyona uğratılmamış ve aynen korunmuştur. Çizelge 5.26'nın 4. satır 1. sütunundaki 10 no'lu birey ise Çizelge 5.22'deki 7. birey ile aynı parametre kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu nedenle söz konusu bireye ait 3. parametre ($c_{\epsilon 3}$) % 10 artırılarak mutasyona uğratılmış ve Çizelge 5.26'nın 4. satır 2. sütunundaki yeni birey elde edilmiştir.

Çizelge 5.25 3. iterasyon sonunda en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 modele ait model parametreleri

Yeni birey no	Önceki birey no	Model parametreleri	RMSE (m/s)		
			-5 m	-10 m	-15 m
1	1	$f=\{0.0104, 0.86, 0\}$	0.266	0.201	0.163
2	10	$f=\{0.0071, 0.86, 0\}$	0.268	0.203	0.165
3	2	$f=\{0.0071, 1.13, 0\}$	0.287	0.217	0.18
4	3	$f=\{0.0104, 1.13, 0\}$	0.293	0.215	0.178
5	4	$f=\{0.0104, 0.86, 0.72\}$	0.339	0.249	0.185
6	5	$f=\{0.0104, 1.13, 0.576\}$	0.405	0.296	0.19
7	6	$f=\{0.0104, 1.076, 0.72\}$	0.44	0.323	0.186

Çizelge 5.26 4. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri

Çaprazlama	Mutasyon
$f_8=\{0.0071, 0.86, 0\}$	$f_8=\{0.00862, 0.86, 0\}$
$f_9=\{0.0104, 0.86, 0\}$	$f_9=\{0.0104, 0.914, 0\}$
$f_{10}=\{0.0071, 1.13, 0.72\}$	$f_{10}=\{0.0071, 1.13, 0.864\}$
$f_{11}=\{0.0104, 1.076, 0\}$	$f_{11}=\{0.0104, 1.076, 0\}$

Çizelge 5.27’de 4. iterasyon sonrası -5, -10 ve -15 m derinlikler için modellere ait uygunluk sıralaması görülmektedir. Her üç derinlik için uygunluk sıraları değişmekle birlikte 3. iterasyonun mutasyon aşaması sonunda elde edilen 8, 9 ve 11 no’lu yeni bireylerin ilk 7 model alternatifi içerisinde yer aldıkları Çizelge 5.27’den görülmektedir. 5. ve son iterasyonun seçim aşamasına kalan en uygun ilk 7 model alternatifine ait 7. ve 1. model alternatifleri arasındaki RMSE farkı -5 m’de 0.027 m/s, -10 m’de 0.016 m/s ve -15 m’de 0.017 m/s değerlerini almaktadır. -5 m’deki model-ölçüm uygunluk farkı diğer iki derinliğe göre daha büyük olduğu için bu derinlikteki uygunluk sıralamasının -10 ve -15 m’de geçerli olduğu kabul edilmiştir.

Yukarıdaki açıklama uygun olarak her üç derinlik için geçerli olan uygunluk sıralaması, model parametrelerine ait değerler, modellerin önceki aşmadaki uygunluk sırası ve yeni durumdaki uygunluk sırası Çizelge 5.28’de verilmiştir. Çizelge 5.28’de özetlenen durum aynı zamanda 5. iterasyonun seçim aşamasındaki durumu özetlemektedir.

Çizelge 5.27 4. itersayon sonunda modellerin uygunluklarına göre dağılımı

4. iterasyon					
-5 m		-10 m		-15 m	
Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)
1	0.266	1	0.201	1	0.163
8	0.267	2	0.203	9	0.163
2	0.268	8	0.204	2	0.165
9	0.272	9	0.206	8	0.166
11	0.285	4	0.215	11	0.176
3	0.287	11	0.217	4	0.178
4	0.293	3	0.217	3	0.180
5	0.339	5	0.249	5	0.185
6	0.405	6	0.296	6	0.19
7	0.44	7	0.323	7	0.186
10	0.635	10	0.510	10	0.259

Çizelge 5.29’da 5. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucu ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.29'daki 8 ve 9 no'lu bireyler Çizelge 5.28'deki 1 ve 2 no'lu bireylerin 1. parametrelerinin (c_f) çaprazlanması ve elde edilen bireylere ait yine aynı parametrelerin % 2 artırılarak mutasyona uğratılması ile elde edilmişlerdir.

Çizelge 5.29'daki 10 ve 11 no'lu bireyler elde edilirken Çizelge 5.28'deki 2 ve 4 no'lu bireylerin 2. parametreleri önce çaprazlanmış, elde edilen bireylerden 10 no'lu bireyin 2. parametresi (σ_t) % 10 ve 11 no'lu bireyin 1. parametresi (c_f) % 2 azaltılarak mutasyona uğratılmıştır.

Böylece 5. iterasyona ait yukarıda belirtilen çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda model parametreleri Çizelge 5.29'un 2. sütununda görülen daha önce denenmemiş 4 adet yeni model alternatifi elde edilmiştir.

Çizelge 5.28 4. iterasyon sonunda en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 modele ait model parametreleri

Yeni birey no	Önceki birey no	Model parametreleri	RMSE (m/s)		
			-5 m	-10 m	-15 m
1	1	$f=\{0.0104, 0.86, 0\}$	0.266	0.201	0.163
2	8	$f=\{0.00862, 0.86, 0\}$	0.267	0.204	0.166
3	2	$f=\{0.0071, 0.86, 0\}$	0.268	0.203	0.165
4	9	$f=\{0.0104, 0.914, 0\}$	0.272	0.206	0.163
5	11	$f=\{0.0104, 1.076, 0\}$	0.285	0.217	0.176
6	3	$f=\{0.0071, 1.13, 0\}$	0.287	0.217	0.180
7	4	$f=\{0.0104, 1.13, 0\}$	0.293	0.215	0.178

Çizelge 5.29 5. iterasyona ait çaprazlama ve mutasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler ve parametre değerleri

Çaprazlama	Mutasyon
$f_8=\{0.00862, 0.86, 0\}$	$f_8=\{0.0101, 0.86, 0\}$
$f_9=\{0.0104, 0.86, 0\}$	$f_9=\{0.0119, 0.86, 0\}$
$f_{10}=\{0.00862, 0.914, 0\}$	$f_{10}=\{0.00862, 0.968, 0\}$
$f_{11}=\{0.0104, 0.86, 0\}$	$f_{11}=\{0.00888, 0.86, 0\}$

Çizelge 5.30'da 5. iterasyon sonunda -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki modellerin uygunluk sıralaması verilmiştir. Çizelge 5.29'daki dört adet yeni model alternatifinin -5 m dışındaki derinliklerde ilk 7 model alternatifi içerisinde yer aldıkları Çizelge 5.30'dan görülmektedir. -5

m’de ise 10 no’lu model alternatifi dışındaki üç adet yeni model alternatifi ilk 7 model alternatifi içerisinde yer bulabilmişlerdir.

Ölçümler ile olan uygunluklarına göre sıralanan 1. ve 7. sıradaki model alternatifleri arasındaki farkın -5, -10 ve -15 m’lerde sırasıyla 6 mm/s, 5 mm/s ve 6 mm/s değerlerini aldığı Çizelge 5.30’den görülmektedir.

Çizelge 5.31’de İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonu amacıyla bu bölümde denenmiş olan beş adet iterasyona ait -5, -10 ve -15 m’lerdeki 1. ve 7. model alternatifleri arasındaki hız farkları verilmiştir. Başlangıçtaki iterasyonlarda 1. ve 7. model alternatifleri arasında cm/s mertebesinde olan hız farkınının 5. iterasyon sonunda her üç derinlik için de mm/s mertebesine düştüğü Çizelge 5.31’den görülmektedir.

Çizelge 5.30 5. iterasyon sonunda modellerin uygunluklarına göre dağılımı

5. iterasyon					
-5 m		-10 m		-15 m	
Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)	Birey No	RMSE (m/s)
1	0.266	1	0.201	1	0.163
2	0.267	3	0.203	4	0.163
3	0.268	2	0.204	2	0.166
11	0.270	11	0.204	3	0.165
9	0.270	8	0.205	10	0.167
8	0.272	9	0.205	8	0.167
4	0.272	10	0.206	11	0.169
10	0.274	4	0.206	9	0.169
5	0.285	7	0.215	5	0.176
6	0.287	5	0.217	7	0.178
7	0.293	6	0.217	6	0.18

Çizelge 5.31 Sayısal modelin kalibrasyonu amacıyla oluşturulan 5 adet model alternatifine ait -5, -10 ve -15 m'ler için 1. ile 7. sıradaki model alternatifleri arasında hız farkı

İterasyon no	-5 m'deki hız farkı (m/s)	-10 m'deki hız farkı (m/s)	-15 m'deki hız farkı (m/s)
1	0.188	0.136	0.015
2	0.207	0.146	0.023
3	0.174	0.122	0.027
4	0.027	0.016	0.017
5	0.006	0.005	0.006

Çizelge 5.32'de İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonu amacıyla bu bölümde denenmiş olan 27 adet model alternatifi, model alternatiflerine ait parametre değerleri ile bu model alternatiflerinin -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki RMSE değerleri bir arada verilmiştir.

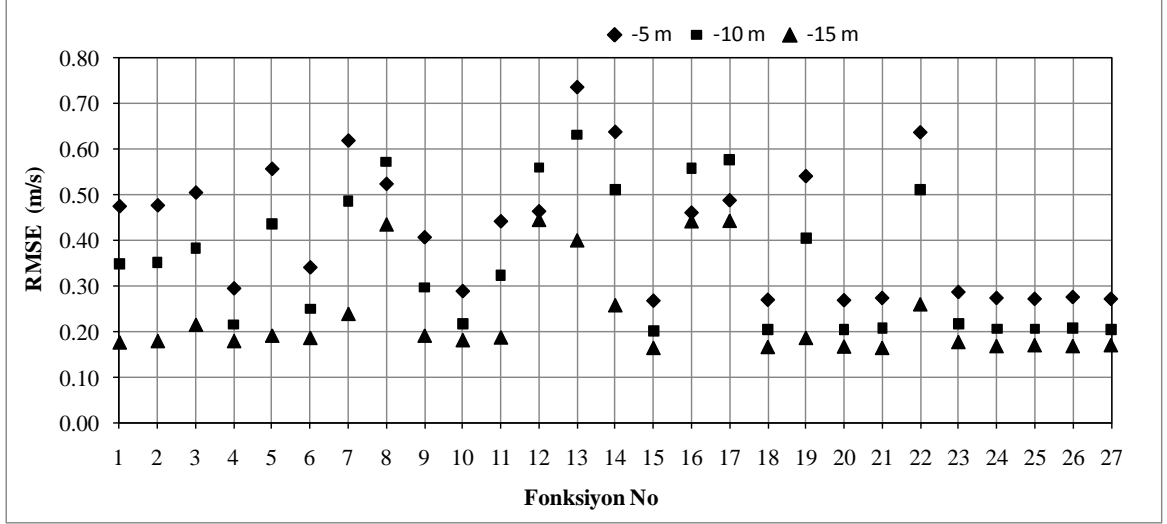
Çizelge 5.32 Genetik algoritmalar yöntemi kullanılarak İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonu amacıyla denenmiş model alternatifleri ve RMSE değerleri

Model	Parametreler			RMSE (m/s)		
	c_f	σ_T	$c_{3\epsilon}$	-5 m	-10 m	-15 m
f ₁	0.0071	1.13	0.72	0.473	0.347	0.175
f ₂	0.0104	1.13	0.72	0.475	0.351	0.178
f ₃	0.083	1.13	0.72	0.503	0.382	0.214
f ₄	0.0104	1.13	0	0.293	0.215	0.178
f ₅	0.0104	1.13	1.44	0.555	0.436	0.19
f ₆	0.0104	0.86	0.72	0.339	0.249	0.185
f ₇	0.0104	1.4	0.72	0.617	0.486	0.238
f ₈	0.0071	0.86	0.72	0.522	0.572	0.435
f ₉	0.0104	1.13	0.576	0.405	0.296	0.19
f ₁₀	0.0071	1.13	0	0.287	0.217	0.18
f ₁₁	0.0104	1.076	0.72	0.44	0.323	0.186
f ₁₂	0.0071	1.076	0	0.462	0.559	0.445
f ₁₃	0.0089	1.13	0.72	0.734	0.631	0.4
f ₁₄	0.0104	1.13	0.864	0.636	0.51	0.257
f ₁₅	0.0104	0.86	0	0.266	0.201	0.163
f ₁₆	0.0104	0.86	0.144	0.459	0.557	0.442
f ₁₇	0.0104	1.13	0.144	0.486	0.576	0.443

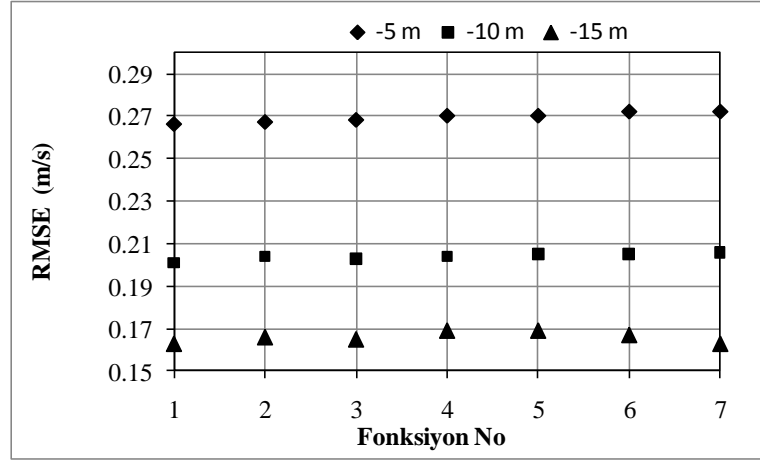
f ₁₈	0.0071	0.86	0	0.268	0.203	0.165
f ₁₉	0.0104	1.184	0.72	0.539	0.405	0.185
f ₂₀	0.00862	0.86	0	0.267	0.204	0.166
f ₂₁	0.0104	0.914	0	0.272	0.206	0.163
f ₂₂	0.0071	1.13	0.864	0.635	0.51	0.259
f ₂₃	0.0104	1.076	0	0.285	0.217	0.176
f ₂₄	0.0101	0.86	0	0.272	0.205	0.167
f ₂₅	0.0119	0.86	0	0.27	0.205	0.169
f ₂₆	0.00862	0.968	0	0.274	0.206	0.167
f ₂₇	0.00888	0.86	0	0.27	0.204	0.169

Şekil 5.67’de ise Çizelge 5.32’deki 27 model alternatifinin her üç derinlik için RMSE değerleri bir arada görülmektedir. Model alternatiflerine ait her üç derinlikteki RMSE değerlerinin değişiminden -5 m için en küçük ve en büyük değerlerin sırasıyla 0.27 m/s (15 no’lu model) ve 0.75 m/s civarında değerler aldığı Şekil 5.67’den görülmektedir. -10 m için en küçük ve en büyük RMSE değerleri sırasıyla 0.20 m/s (15 no’lu model) ve 0.63 m/s (13 no’lu model), -15 m’de ise 0.16 m/s (15 no’lu model) ile 0.45 m/s (12 no’lu model) civarında değerler almaktadır.

Çizelge 5.32’deki 15, 20, 18, 27, 25, 24, 21 no’lu bireyler sırasıyla 5. ve son iterasyondaki en yüksek uygunluğa sahip ilk 7 bireye karşılık gelmektedir. Şekil 5.68’de söz konusu modellere ait -5, -10 ve -15 m’lerdeki RMSE değerlerinin değişimi görülmektedir. Uygunluk değerlerinin değişiminden RMSE değerlerinin -5 m’de 0.27 m/s, -10 m’de 0.21 m/s ve -15 m’de 0.17 m/s değeri civarında sabitlendiği Şekil 5.68’den görülmektedir. Bu sonuçtan modellere ait uygunluk dağılımının 5. iterasyon sonunda karalı hale ulaştığı görülmüş ve sayısal modelin kalibrasyonu bu aşamada sonlandırılmıştır.

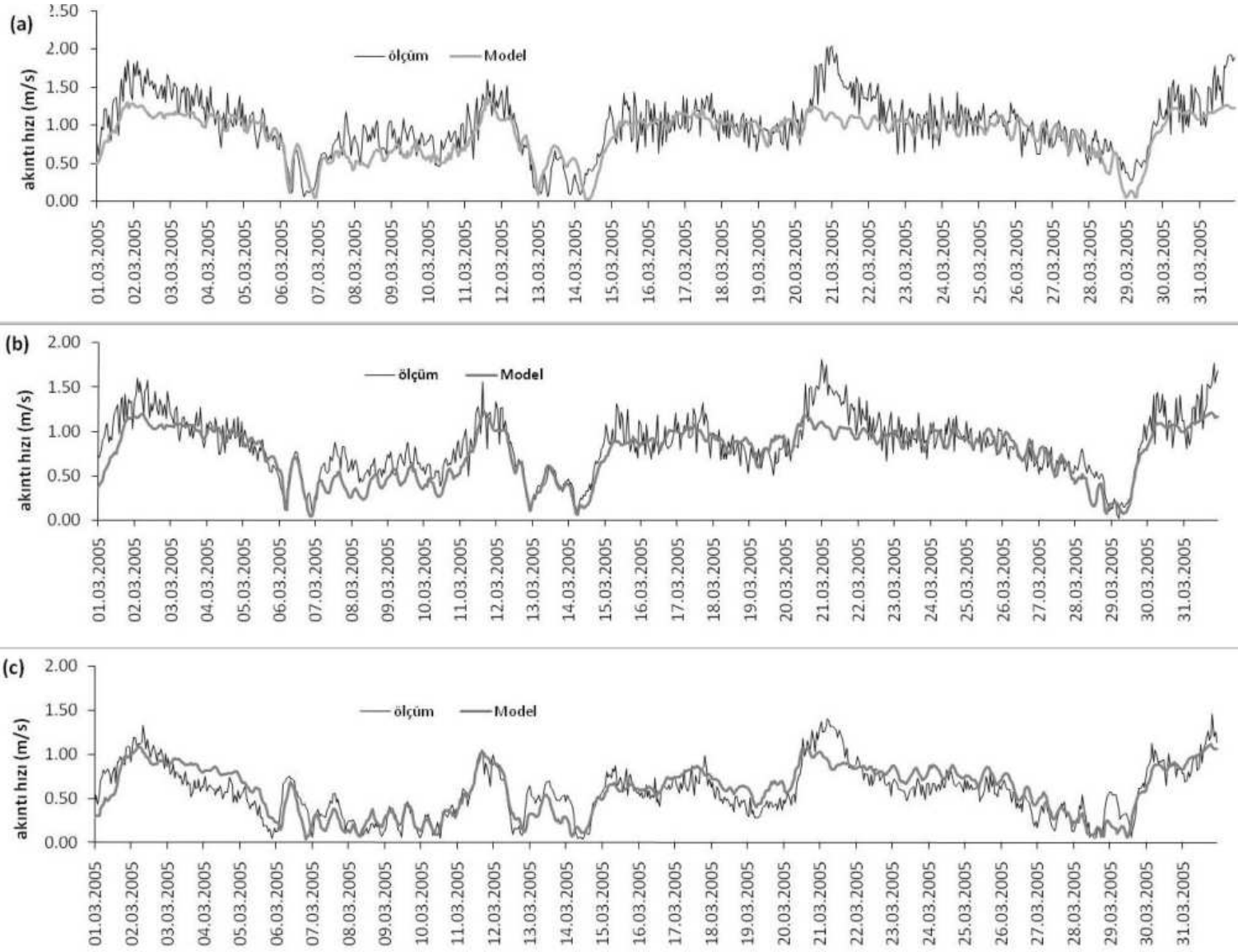


Şekil 5.67 İstanbul Boğazı'nın kalibrasyonunda denenen sayısal modellere ait RMSE değerlerinin değişimi



Şekil 5.68 5. ve son model alternatifine ait ilk 7 model alternatifi için -5, -10 ve -15 m'lerdeki RMSE değerlerinin değişimi

Sırasıyla Şekil 5.69.(a), (b) ve (c)'de 5 iterasyon sonunda ölçümler ile en yüksek uyumu elde eden model alternatifi ile ölçüm sonuçlarının -5, -10 ve -15 m'lerdeki zamanla değişimleri bir arada verilmiştir. Her üç derinlikde de model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının yakın mertebede değerler almışlardır. Ölçüm ile model sonuçları arasındaki en büyük farkın 20-23 Mart 2005 tarihleri arasındaki dönemde meydana geldiği Şekil 5.69 (a)-(c)'den görülmektedir. Söz konusu dönem için sayısal modelin -5 m'de derinlikte -10 ve -15 m'ye göre daha kararlı bir hız yapısı elde etmiştir. Kalibrasyon dönemi olarak seçilen 2005'in Mart ayında maksimum hız -5 m derinlikte ve 2 m/s olarak ölçülmüş. Buna karşılık maksimum model hızı ise yine aynı derinlikte ve 1.5 m/s mertebesinde değer almıştır.



Şekil 5.69 (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m için ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi

5.3 Sayısal Modelin Doğrulaması (Validasyon)

Bölüm 5.2’de kalibre edilen ve ölçümler ile en uygun çözümü veren sayısal model parametrelerinin geçerliliğini test etmek amacıyla 2004 ile 2005 yıllarına ait 4 farklı dönem için İstanbul Boğazı akıntı yapısı modellenmiştir. Bu amaçla 24.09-15.10.2004 arasındaki 21 günlük dönem ile Ocak, Nisan ve Temmuz 2005 tarihlerindeki 1’er aylık akıntı yapısı modellenmiştir. Akıntı yapısı modellenen dönemler belirlenirken her mevsime ait bir zaman aralığının dikkate alınması amaçlanmıştır.

Sayısal modellere ait sınır ve başlangıç koşulu olarak söz konusu dönemlere ait tuzluluk, sıcaklık verileri (İSKİ, 2004-05) ile su seviyesi ölçüm verileri (U.B., 2005) kullanılmıştır. Geri kalan model parametreleri için Bölüm 5.2’de kalibre edilmiş olan sayısal modele ait model parametreleri kullanılmıştır.

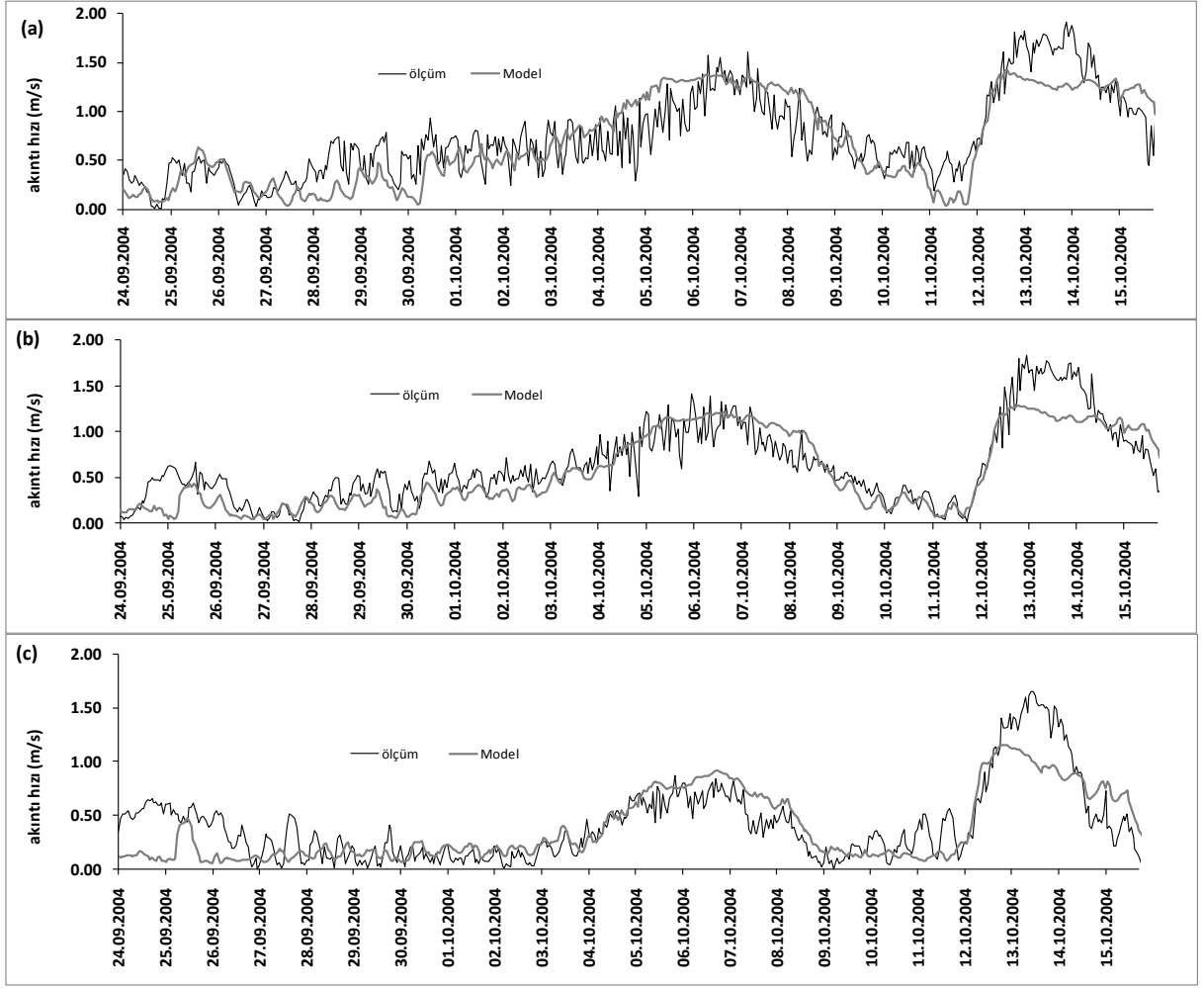
Çizelge 5.33’de her bir dönem için -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki model akıntı hızlarına ait RMSE değerleri verilmiştir. RMSE değerlerinin değişiminden 4 dönem içerisinde ölçümlerle en yüksek uyumun -5 ve -10 m’de 24 Eylül-15 Ekim arasındaki 1.dönemde, -15 m’de ise 4. Dönemde (Temmuz 2005) yakalandığı görülmektedir. Aynı simülasyon zamanlarına sahip 2005 yılına ait diğer üç dönem içerisinde ölçümlerle en büyük uyuma Temmuz 2005 döneminde ulaşılmıştır.

Çizelge 5.33 Sayısal modelin geçerliliğini test etmek amacıyla dikkate alınan dönemler ve bu dönemler için oluşturulan modeller için -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki RMSE değerleri

Dönem	RMSE (m/s)			Açıklama
	-5 m	-10 m	-15 m	
1. Dönem	0.265	0.215	0.228	Sürekli ölçümlerin bulunduğu 24.09-15.10.2004 tarihleri arası dönem dikkate alındı
2. Dönem	0.374	0.27	0.237	Ocak 2005
3. Dönem	0.34	0.292	0.25	Nisan 2005
4. Dönem	0.30	0.246	0.21	Temmuz 2005

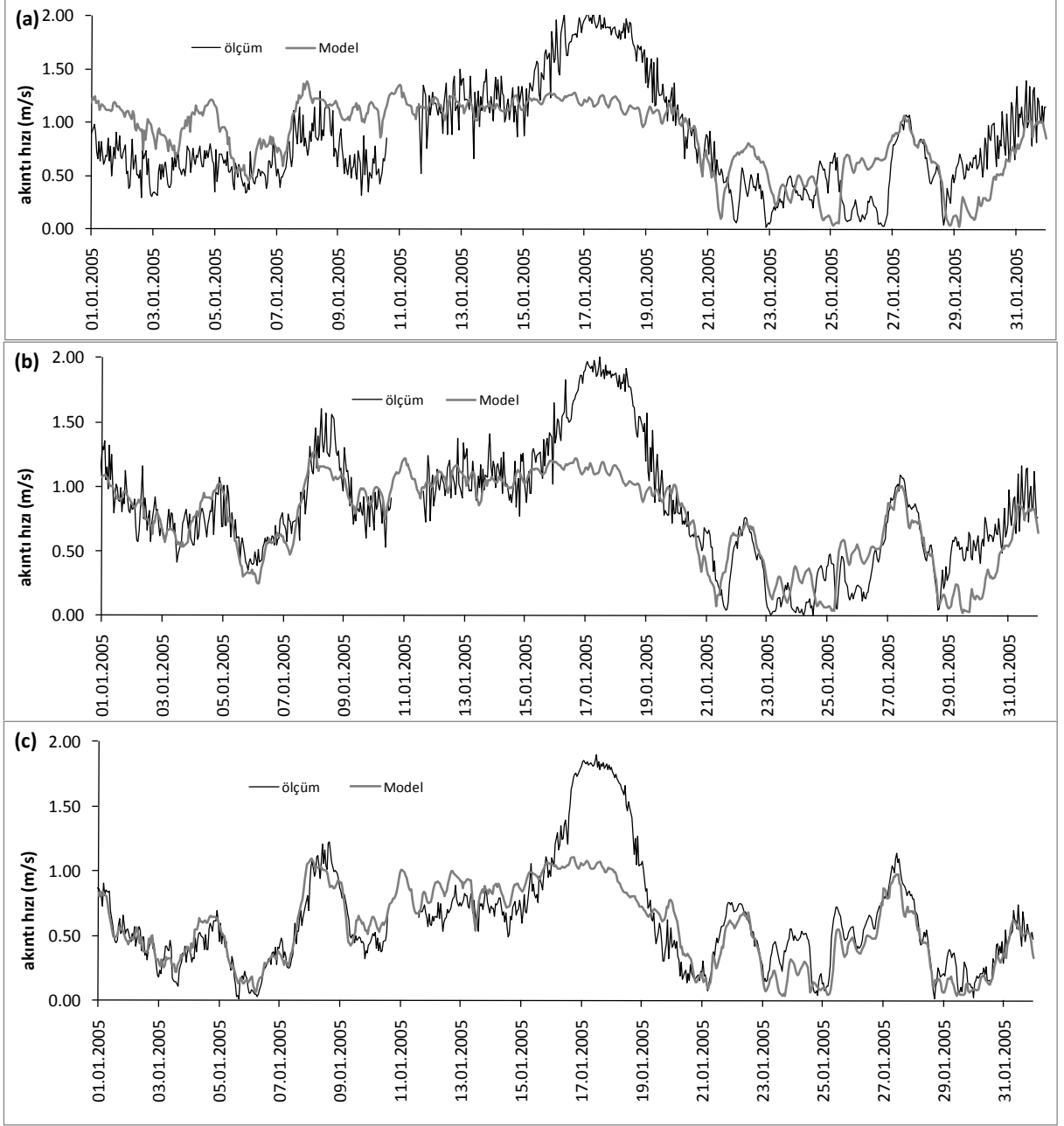
Sırasıyla Şekil 5.70 (a)-(b) ve (c)’de 1. Döneme ait -5, -10 ve -15 m’lerdeki model ile ölçüm akıntı hızlarının zamanla değişimi bir arada görülmektedir. Her üç derinlikteki akıntı hızlarının zamanla değişiminden 24 Eylül-15 Ekim 2004 tarihleri arasındaki üç haftalık dönemde İstanbul Boğazı’nın son derece kararsız bir akım yapısına sahip olduğu görülmektedir. Maksimum akıntı hızları 13-14 Ekim 2004 tarihlerinde ve her üç derinlik için

de 2 m/s olarak ölçülmüştür. Aynı dönem için sayısal modelden elde edilen akıntı hızları ise -5, -10 m’de 1.5 m/s, -15 m’de ise 1.2 m/s civarında değerler almıştır.



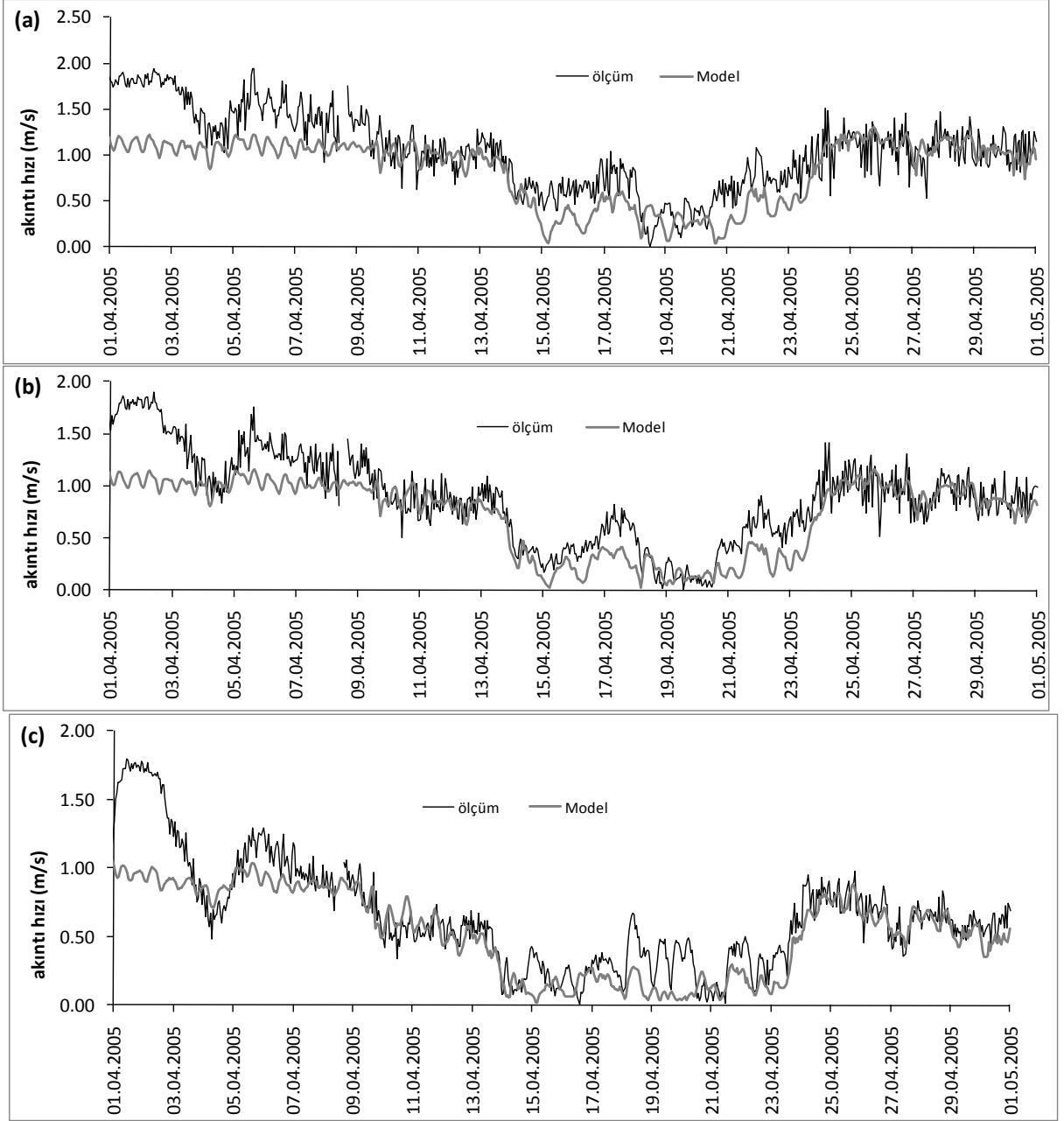
Şekil 5.70 1. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m’de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi

Sırasıyla Şekil 5.71 (a)-(b) ve (c)’de Ocak 2005’i kapsayan 2. Döneme ait -5, -10 ve -15 m’lerdeki ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi görülmektedir. Model ile ölçüm hızları arasındaki benzerliğin -10 ile -15 m’de -5’ye göre daha yüksek olduğu Şekil 5.71’den görülmektedir. Bu sonuç Çizelge 5.33’ün 2. satırındaki sonuçlarla da uyum içerisindedir. Model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki en büyük fark 15-20 Ocak tarihleri arasındaki dönemde meydana gelmiştir. Söz konusu dönemler arasında maksimum akıntı hızları her üç derinlik için de 2 m/s civarında ölçülmüştür. Model sonuçları ise 1 m/s civarında değerler almışlardır.



Şekil 5.71 2. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m’de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi

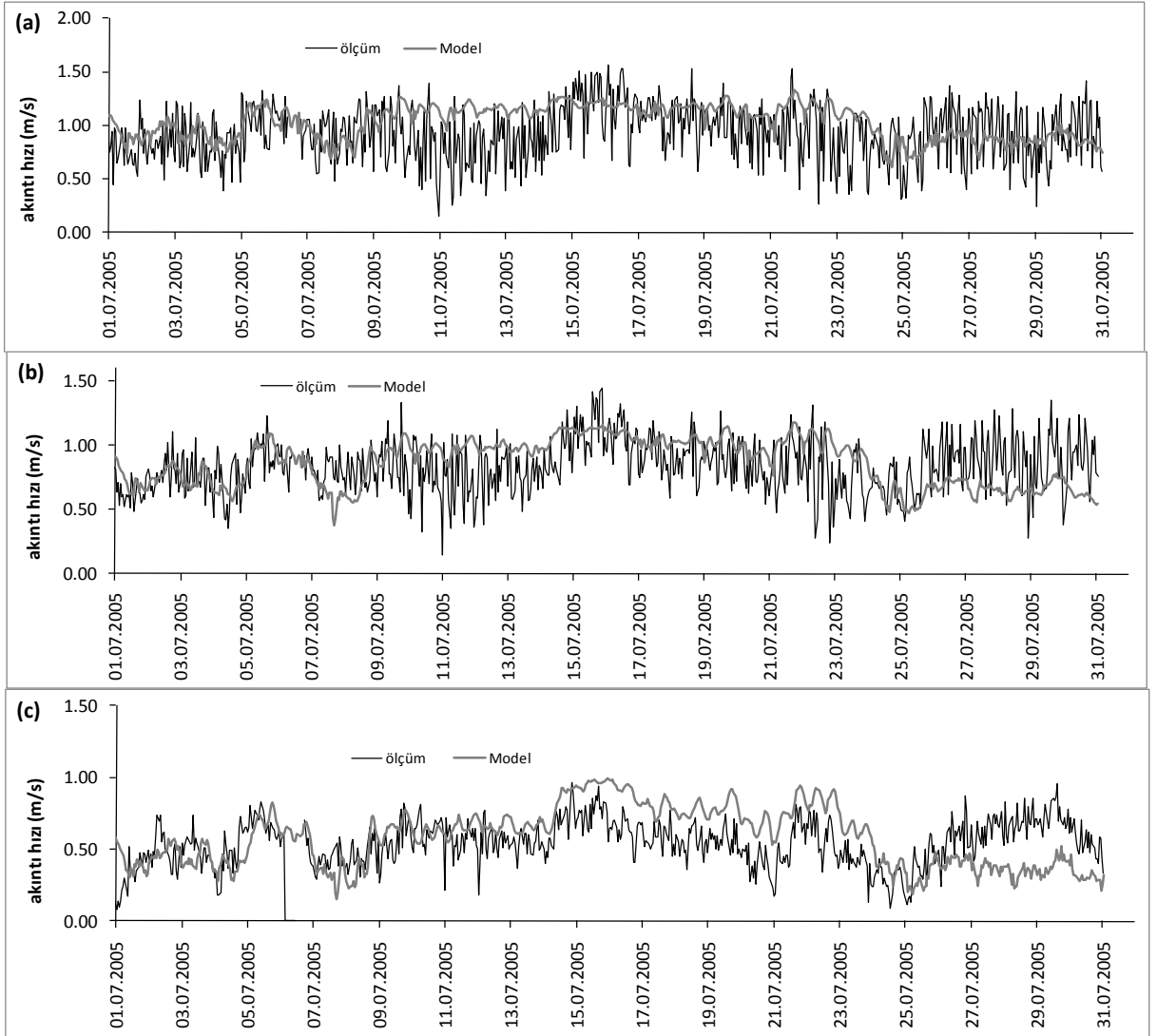
Sırasıyla Şekil 5.72 (a)-(b) ve (c)’de Nisan 2005’e (3. dönem) ait ölçüm ve model akıntı hızlarının her üç derinlik için zamanla değişimleri görülmektedir. Özellikle Nisan ayının ilk on günlük döneminde her üç derinlik için de modelin kararlı bir hız dağılımı elde ettiği ve ölçümlerden önemli miktarda saptığı Şekil 5.68’den görülmektedir. Geri kalan 20 gün boyunca ise sayısal modele ait akıntı hızı sonuçları ölçümlerle benzer eğilim göstermiş ve yakın mertebelerde değerler elde etmiştir. Nisan 2005’e ait -5, -10 ve -15 m’deki akıntı hızlarının zamanla değişiminden yılın bu döneminde İstanbul Boğazı’nın son derece çalkantılı ve oldukça değişken karakterde bir akım yapısına sahip olduğu Şekil 5.68’den görülmektedir.



Şekil 5.72 3. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m’de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi

Sırasıyla Şekil 5.739 (a)-(b) ve (c)’de Temmuz 2005’e (4. dönem) ait -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki model ile ölçüm akıntı hızlarının zamanla değişimi birlikte verilmiştir. Oldukça çalkantılı bir karaktere sahip olan akıntı yapısının, dikkate alınan diğer üç döneme göre daha kararlı bir davranış gösterdiği Şekil 5.73’den görülmektedir. Bu durumun söz konusu dönemde İstanbul Boğazı’ndaki meteorolojik koşulların diğer üç döneme göre daha ılıman olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Her üç derinlikte de model sonuçları ölçümlerle benzer eğilim göstermiş ve aynı mertebede değerler almıştır.

Bir önceki bölümde kalibre edilen sayısal modele ait RMSE değerleri -5, -10 ve -15 m’de sırasıyla 0.266, 0.201 ve 0.163 m/s’idi. Validasyon aşamamasında ise her üç derinlik için en düşük RMSE değerleri sırasıyla 0.265 (1. dönem), 0.215 (1. dönem) ve 0.21 m/s (4. dönem) değerlerini almıştır. -5, -10 ve -15 m derinlikler için sayısal modelin validasyonunda dikkate alınan 4 farklı dönem ile kalibrasyon dönemi (Mart 2005) arasındaki RMSE değerlerinin farkı sırasıyla 1. dönem için 0.001, 0.014 ve 0.065 m/s, 2. dönem için 0.108, 0.069 ve 0.074 m/s, 3.dönem için 0.074, 0.091 ve 0.087 m/s, 4. dönem için 0.034, 0.045 ve 0.047 m/s değerlerini almaktadır. Böylece Mart 2005 verileri kullanılarak kalibre edilen sayısal modelin kalibrasyon dönemi dışındaki diğer dönemler için de İstanbul Boğazı akıntı yapısını yeterince hassas modelleyebildiği sonucuna varılmıştır.

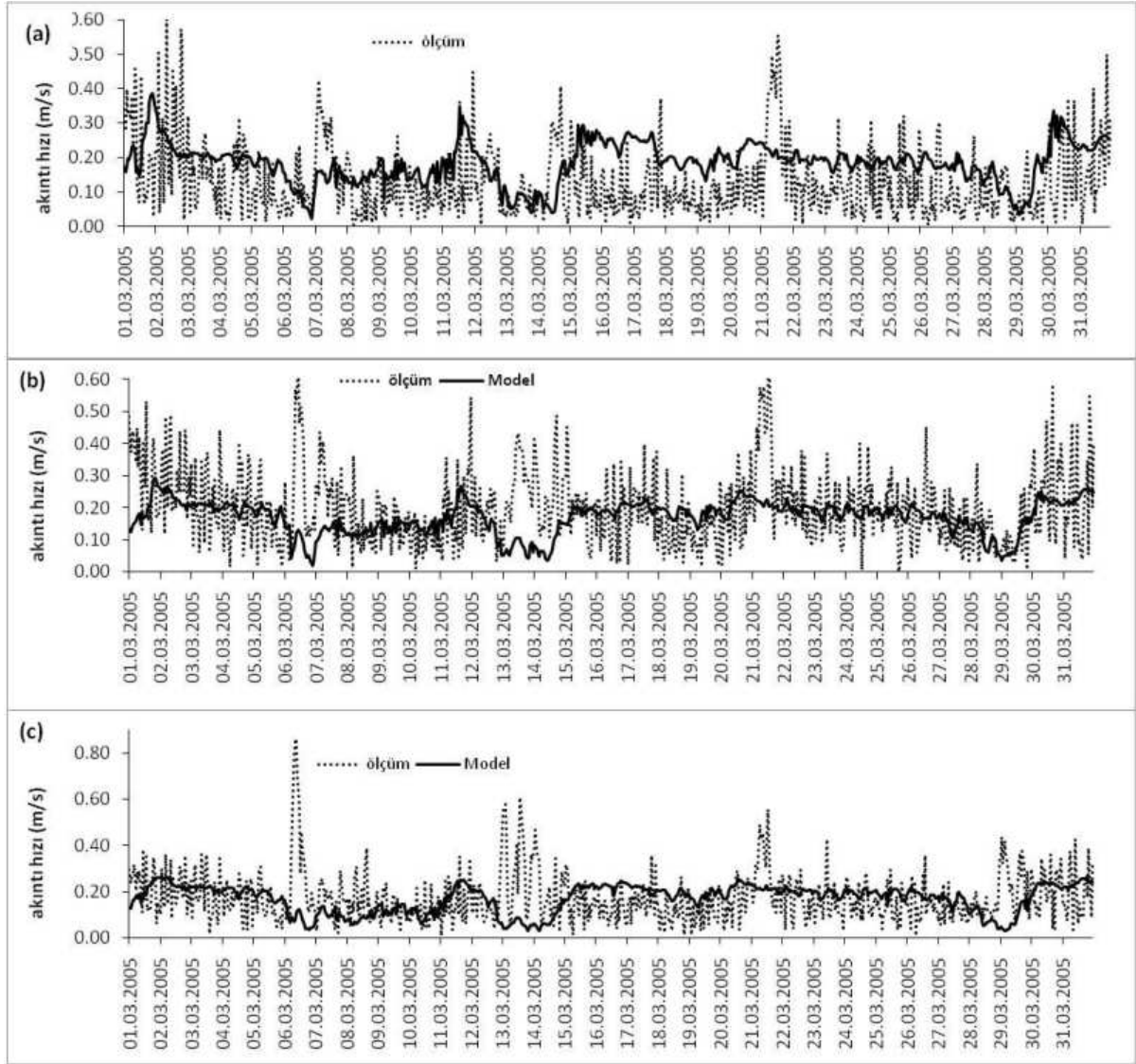


Şekil 5.73 4. Dönem için (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m’de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi

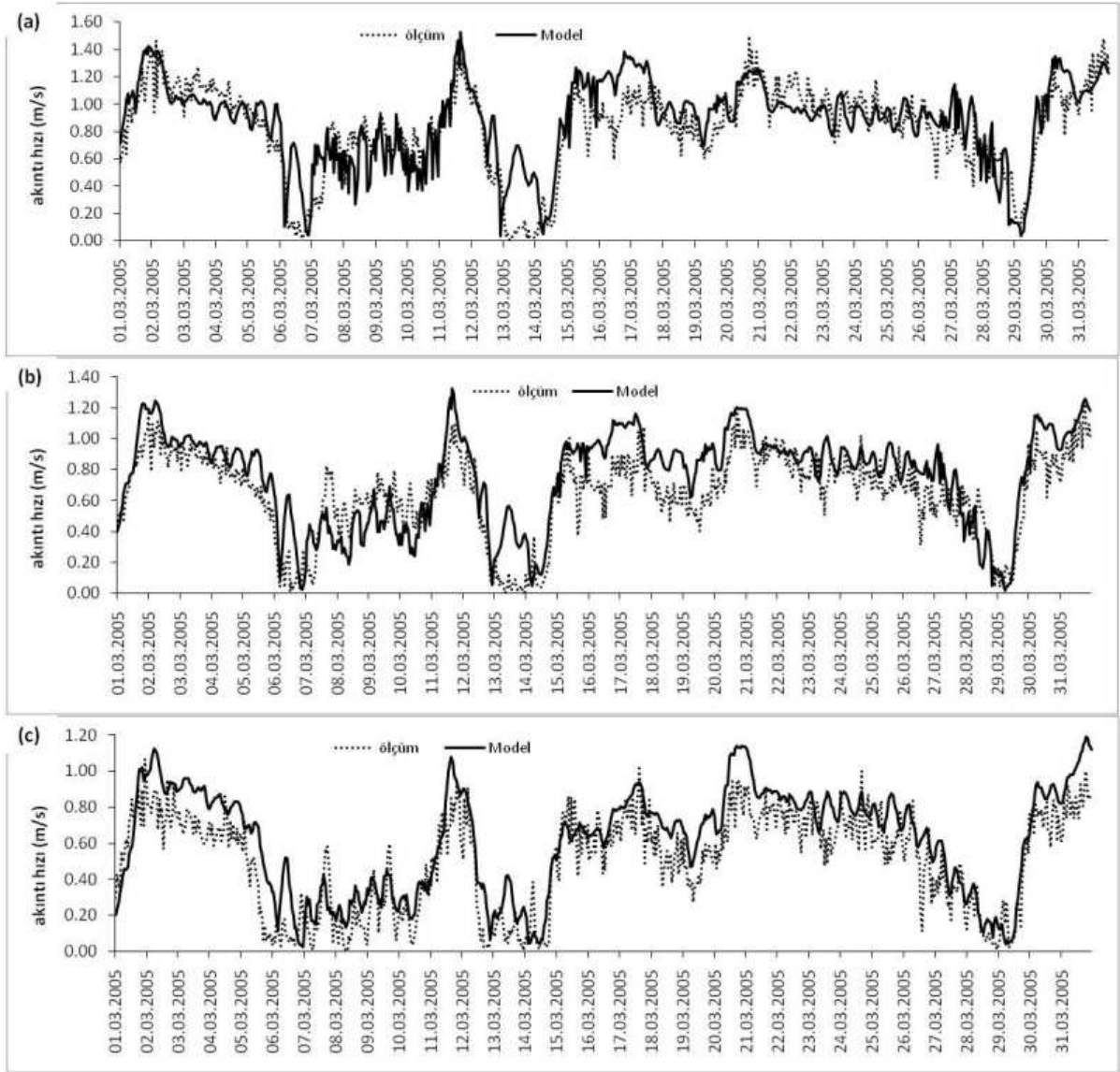
Sırasıyla Şekil 5.74 ve 75’de ise A ve C akıntı ölçüm istasyonlarındaki -5, -10 ve -15 m’lerdeki akıntı hızlarının Mart 2005 dönemi için zamanla değişimleri verilmiştir. Söz konusu dönem için A istasyonundaki RMSE değerleri sırasıyla -5, -10 ve -15 m’ler için 0.123, 0.124 ve 0.132 m/s olarak hesaplanmıştır. C istasyonunda aynı derinliklerdeki RMSE değerleri ise -5, -10 ve -15 m’de sırasıyla 0.204, 0.201 ve 0.173 m/s’dir. Şekil 5.70 ve 71’in birlikte değerlendirilmesinden model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki benzerliğin C istasyonunda A istasyonuna göre daha büyük olduğu görülmektedir. Her iki istasyon için -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki RMSE değerlerinin değişiminden ise model ile ölçüm sonuçları arasındaki farkın C istasyonunda A istasyonuna göre daha küçük olduğu görülmüştür. Bu durum her üç derinlik için A istasyonundaki ortalama hızların C istasyonunkilerden daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Ortalama akıntı hızları dikkate alındığında A istasyonunda model ile ölçüm arasındaki hız farkı sırasıyla -5, -10 ve -15 m’de 0.051, 0.03 ve 0.07 m/s olarak hesaplanmıştır. C istasyonunda her üç derinlikteki ortalama hız farkları ise 0.055, 0.105 ve 0.117 m/s olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Şekil 5.74 ve 75’in birlikte değerlendirilmesinden pik hız değerleri arasındaki farkın C istasyonunda A istasyonuna göre daha büyük olduğu kolayca görülmektedir. Maksimum hızlar için -5, -10 ve -15 m’lerdeki hız farkları A istasyonunda sırasıyla 0.217, 0.363 ve 0.595 m/s, C istasyonunda ise 0.028, 0.095 ve 0.122 olarak hesaplanmıştır.

A ve C istasyonlarındaki Mart 2005 dönemi için farklı derinliklerdeki RMSE değerlerinin değişiminden, kalibre edilen sayısal modelin Boğaz’ın farklı konumlardaki akıntı yapısını da yeterince hassas modelleyebildiği görülmüştür.

Akıntı ölçüm istasyonlarının konumlandırıldığı İstanbul Boğazı’nın güneyinde taban topografyası son derece değişken olup akış yolu da ani olarak değişmektedir. Genel olarak akış yolu kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda olan İstanbul Boğazı bu bölümde ani olarak doğrultu değiştirip kuzey-güney doğrultusunda akmaktadır. Boğaz geometrisindeki ve taban topografyasındaki bu değişimin yerel hız farklılıklarına neden olduğu A, B ve C istasyonlarındaki akıntı ölçüm sonuçları ile model sonuçlarındaki değişimden de görülmektedir.



Şekil 5.74 A istasyonunda Mart 2005’de (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m’de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi



Şekil 5.75 C istasyonunda Mart 2005’de (a) -5 m (b) -10 m (c) -15 m’de ölçüm ile model akıntı hızlarının zamanla değişimi

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

İstanbul Boğazı genel olarak iki tabaklı bir akım yapısına sahiptir. Bu akıntı yapısına barotropik ve baroklinik kuvvetler neden olmaktadır. Bunlardan üst tabaka akımı Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru akmakta ve Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının yarattığı barotropik kuvvet bu akım üzerinde daha etkili olmaktadır. Alt tabaka ise Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru akmakta ve bu akıntıyı ise Karadeniz ile Akdeniz arasındaki yoğunluk farkının neden olduğu baroklinik kuvvet daha fazla kontrol etmektedir.

Üç boyutlu bir yapıya sahip olan İstanbul Boğazı akımının uzun dönemli hidrolik koşulların yanı sıra kısa dönemli meteorolojik koşullardan da etkilendiği bilinmektedir. İstanbul Boğazı'nın güneyindeki B akıntı ölçüm istasyonu verilerinin Eylül 2004 ile Ocak 2006 arasındaki 16 aylık analizinden şiddetli meteorolojik koşulların akıntı yapısını büyük oranda değiştirdiği görülmüştür. Şiddetli fırtınalar sonucunda meydana gelen kısa dönemli meteorolojik koşullar iki tabakalı akım yapısını değiştirmekte ve tamamen kuzey veya güney doğrultusunda tek tabakalı akım yapılarının gelişmesine neden olmaktadır. Bu ölçüm döneminde gözlem periyodunun % 31'inde tamamen güney doğrultusunda, % 2.2'sinde ise tamamen kuzey doğrultusunda tek tabakalı akım yapısı Boğaz boyunca hakim olmuştur. Bu dönemin % 65.3'ünde ise iki tabakalı akım gözlemlenmiştir. İstanbul Boğazı tabakalı akım yapısındaki söz konusu değişim büyük oranda kısa dönemli meteorolojik etkilerin Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkında meydana getirdiği değişimden kaynaklanmaktadır. İstanbul Boğazı akımı üzerinde Tuna debisi etkisinin görülmeye başlandığı Nisan ayının ortasından Ekim ayına kadarki 5.5-6 aylık dönemde Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı 0.10-0.40 m arasında değişen pozitif değerler almaktadır. Söz konusu dönemde büyük oranda iki tabakalı akım yapısı görülmekle birlikte zaman zaman meydana gelen kuvvetli kuzeyli rüzgarların etkisiyle İstanbul Boğazı boyunca tamamen üst tabaka akımının hakim olduğu tek tabakalı akım hali de görülebilmektedir. Yılın geri kalan bölümünde (Ekim-Nisan) ise Boğaz'ın her iki ucundaki su seviyesi farkı üzerinde dolayısıyla da akıntı yapısı üzerinde büyük oranda kısa dönemli meteorolojik koşullar belirleyici olmaktadır. Yılın bu döneminde etkili olan şiddetli meteorolojik koşullar sonucunda Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı -0.20 ile +0.60 m arasında değişen değerler alabilmektedir. Yılın söz konusu döneminde şiddetli güneyli fırtınaların etkisiyle İstanbul Boğazı için ekstrem bir akıntı hali olan kuzey doğrultusunda tek

tabakalı akım hali de yine bu dönemde görülmektedir. Genellikle maksimum 1.5-2 m/s mertebesinde değerler alan üst tabaka hızları yılın bu döneminde kuvvetli kuzeyli rüzgarların etkisiyle 2.5 m/s'ye çıkabilmekte, maksimum 0.5-1 m/s mertebesinde değerler alan alt tabaka hızları ise kuvvetli güneyli rüzgarların etkisiyle 1.5 m/s'ye ulaşabilmektedir.

İstanbul Boğazı'nın taban topografyası ve geometrisi de tabakalı akım yapısı üzerinde etkili olmaktadır. Boğaz'da akım yapısını kontrol eden üç hidrolik kontrol kesiti bulunmaktadır. Bunlar İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi ve Karadeniz çıkışlarındaki eşikler ve Arnavutköy civarındaki daralan kesittir. Her ne kadar söz konusu bölgelerde doğrudan yapılan ölçümler olmamakla birlikte, Boğaz boyutlarına sahip basit dikdörtgen kanaldaki sayısal model sonuçları bu kesitlerin kontrol kesiti gibi davrandıklarını göstermektedir.

Bu çalışmada üç boyutlu tabakalı akım yapısını modelleyebilme yeteneğine sahip olan Mike 3 yazılımının Hidrodinamik Modülü kullanılarak İstanbul Boğazı'nın sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal modelleme esas olarak üç bölümde gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla sayısal modelin uygunluk testi, kalibrasyon ve doğrulama (validasyon) aşamalarıdır.

Sayısal modelin uygunluk testi için İstanbul Boğazı boyutlarına sahip basit dikdörtgen kanal geometrisi farklı ağ seçenekleri kullanılarak sayısal modelin farklı model parametrelerinin değişimi karşısındaki davranışı incelenmiştir. Ağ yapısı olarak yapılandırılmış ve yapılandırılmamış olmak üzere iki farklı ağ yapısı dikkate alınmıştır. Yapılandırılmış ağ yaklaşımında hidrostatik olmayan, yapılandırılmamış ağ yaklaşımında ise hidrostatik basınç dağılımı kabulü yapılmıştır. Öncelikle yapılandırılmış ağ yaklaşımı ve hidrostatik olmayan basınç dağılımı kabulü yapılarak test edilen model parametreleri ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Ağ boyutları, taban pürüzlülüğü (k_s), eddy viskozitesi ve su seviyesi farkının model stabilitesi ve sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla 9 adet model alternatifi 100,000 s'lik simülasyon zamanları tanımlanarak koşturulmuştur. Modellerin tamamında başlangıçta bir su yüzü profili tanımlanmamış ve başlangıç tuzluluğu olarak ise sabit 38 psu değeri dikkate alınmıştır. Türbülans yapısının hesabında ise k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Değerlendirilen farklı model parametrelerinin sadece model sonuçları (tabaka kalınlıkları, boykesit hız ve tuzluluk dağılımları) üzerinde değil aynı zamanda modellerin stabilitesi üzerinde de etkili oldukları görülmüştür.
- Kanal giriş geometrisinin ani veya kademeli olmasının model sonuçları ve stabilitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla 5 farklı model alternatifi denenmiş ve

koşturulan model alternatifleri tamamı hesap şeması stabiliteilerinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır. Buna karşın fiziksel koşulları yansıtmayan dikdörtgen kanal alternatiflerinin denendiği model alternatiflerinde stabilite problemi yaşanmamıştır.

- Kanal kesit değişiminin tabakalı akım yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla farklı eşik yükseklikleri ($e=10, 20$ ve 30 m eşik yükseklikleri) ve daralma miktarları (200 ve 400 m ani daralma ve 400 m kademeli daralma durumları) için 6 adet model alternatifi koşturulmuştur. Farklı eşik yükseklikleri için koşturulan üç model alternatifinden bir tanesi ($e=20$ m), daralma durumu için koşturulan modellerin ise tamamı hesap şeması stabiliteilerinin bozulmasıyla sonuçlanmıştır. Kanal boyunca 1 'den küçük değerler alan yoğunluk Froude sayısının (G) eşik ve daralma bölgesinde eşik yüksekliğine ve daralma miktarına bağlı olarak 1 civarında ve 1 'den büyük değerler aldığı görülmüştür. Bu durum kanal genişliği ve derinliğinin değiştiği akım bölgesinin kontrol kesiti gibi davrandığını göstermiştir. Söz konusu akım bölgelerinde tabaka hızları ile su yüzü eğimlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir.
- Farklı su seviyesi ve tuzluluk sınır koşulları ile farklı tuzluluk başlangıç koşulunun tabakalı akım karakteristikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için 4 adet model alternatifi denenmiştir. Bundan öncekilerden farklı olarak model alternatiflerinin tamamında ($\Delta h=0.10, 0.20, 0.30$ ve 0.40 m) iki sınır arasındaki su seviyesi farkları zaman serisi olarak tanımlanmıştır. Ayrıca tuzluluk sınır şartı da bundan önceki modellerde olduğu gibi sabit değil, yüzeyde 18 psu tabanda ise 38 psu değerini alacak şekilde derinlik ve zamanla değişen ağ serisi olarak tanımlanmıştır. Başlangıç tuzluluğu ise sabit 18 psu olarak tanımlanmıştır. $100,000$ s'lik simülasyon zamanları için koşturulan model alternatiflerinin tamamı hesap şeması stabiliteilerinin bozulmasıyla sonuçlanmışlardır. Model alternatiflerinin başarıyla çalıştığı son iki zaman adımındaki simülasyon sonuçlarından sınır ve başlangıç koşullarındaki değişimin kanal boyunca tabakalı akım karakteristiklerini önemli oranda değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca su seviyesi farkına bağlı olarak hesaplanan tabaka debilerinin değişiminden $\Delta h < 10$ cm için üst tabaka akımının $\Delta h > 40$ cm için ise alt tabaka akımının bloke olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç Sümer vd. (1981)'in İstanbul Boğazı için geliştirdikleri bir boyutlu analitik model sonuçlarını desteklemektedir.

Sayısal modelin uygunluğunun test edilmesi amacıyla yapılandırılmış ağ yaklaşımı ve non-hidrostatik basınç dağılımının kullanıldığı model alternatiflerinin büyük bölümünün hesap şeması stabiliteilerinin bozulmasıyla sonuçlandığı görülmüştür. Bundan dolayı farklı bir ağ

yapısının model sonuçları ve stabilitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yapılandırılmamış ağ yapısı ve hidrostatik basınç dağılımı kullanılarak 4 model alternatifi daha denenmiştir. Model alternatiflerine ait tüm model parametreleri yapılandırılmış ağ yaklaşımı dikkate alınarak denenilen 4 model alternatifi ile aynı değerleri almıştır. Model alternatiflerinin tamamı simülasyon zamanlarını hesap şeması stabiliteyi bozulmadan başarı ile tamamladıkları görülmüştür. Model alternatiflerine ait boykesit tuzluluk, hız ve su yüzü değişimi sonuçlarından yapılandırılmamış ağ yaklaşımının yapılandırılmış ağ yaklaşımına göre tabakalı akım yapısını daha gerçekçi benzeştirdiği görülmüştür. Bunun sonucunda İstanbul Boğazı tabakalı akımının sayısal modellemesinde yapılandırılmamış ağ yaklaşımı ve hidrostatik basınç dağılımının dikkate alınması sonucuna varılmıştır. Ayrıca Karadeniz ve Marmara Denizi arasında su seviyesi farkının $\Delta h=60$ cm olarak tanımlandığı sayısal modele ait model sonuçlarından kanal boyunca tabakalı akım yapısının $10 \text{ cm} \leq \Delta h \leq 40 \text{ cm}$ için gelişebildiği görülmüştür. Sırasıyla $\Delta h < 10 \text{ cm}$ ve $\Delta h > 40 \text{ cm}$ için ise üst ve alt tabaka akımlarının bloke oldukları sonucuna varılmıştır.

Yapılandırılmamış ağ yaklaşımı kullanılarak basit bir dikdörtgen kanaldaki tabakalı akım yapısının modellenmesi sonucu elde edilen diğer önemli bir sonuç ise su seviyesi farkı oluşum süresinin tabakalı akım yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğudur. Bu amaçla aynı su seviyesi farkındaki artışın farklı sürelerde meydana geldiği iki durum modellenmiştir. Sayısal modellere ait boykesit hız dağılımı sonuçlarından su seviyesi farkının kısa sürede meydana geldiği durumlarda kanal boyunca tek tabakalı akımın hakim olduğu, su seviyesi farkındaki artışın daha uzun sürede meydana geldiği ikinci durumda ise tabakalı akım yapısının varlığını koruduğu gözlenmiştir. Bu sonuç tabakalı akım yapısının su seviyesi değişim süresine kısa sürede yanıt verdiğini göstermektedir.

İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonundan önce ise Deniz Kuvvetleri Komutanlığı SHOD'dan elde edilen verilerle oluşturulmuş orijinal İstanbul Boğazı batimetrisi kullanılarak sayısal model bir takım testlerden geçirilmiştir. Aşağıda kısaca özetlenen bu testler sonucunda İstanbul Boğazı sayısal modeli için uygun su seviyesi sınır koşulları ve ağ çözünürlüğü belirlenmiştir. Model alternatiflerinin tamamında yapılandırılmamış ağ yaklaşımı ve hidrostatik basınç dağılımı dikkate alınmıştır.

Sayısal modelleme tekniği açısından model sınırı olarak tanımlanan akım bölgesinde veya bu noktalara yeterince yakın konumlarda ölçüm verisi bulunması bu noktaların fiziksel özelliklerinin doğru tanımlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada ölçüm verilerinden hareketle İstanbul Boğazı sayısal modeli için uygun su seviyesi sınır koşullarının

belirlenmesi amacıyla yapay sinir ağı (YSA) kullanılmış ve açık sınırlardaki su seviyesi değerleri hesaplanmıştır. Ancak doğrudan ölçüm verilerinin su seviyesi sınır şartı olarak tanımlandığı model alternatifleri sonuçları YSA ile ötelenmiş su seviyesi verilerinin tanımlandığı model alternatifleri sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bundan dolayı sayısal modellemenin geri kalan bölümünde su seviyesi sınır şartı olarak doğrudan ölçüm verileri kullanılmıştır.

Sayısal model için uygun ağ boyutlarının belirlenmesi amacıyla ise yatay ve düşey düzlemde çok sayıda farklı ağ çözünürlükleri denenmiş ve sayısal model sonuçlarının ağ geometrisindeki değişimden büyük oranda etkilendiği görülmüştür. Bu amaçla denenmiş olan pek çok ağ alternatif içerisinde yatayda 2047 üçgen ağ elemanı düşeyde ise üniform 50 tabakadan oluşan ağ çözünürlüğünün üç boyutlu İstanbul Boğazı akımını yeterince hassas modelleyebildiği görülmüştür. Artan ağ hassasiyetinin model sonuçlarının kalitesini artırmakla birlikte hesap zamanını da önemli oranda artırdığı görülmüştür.

İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonu için genetik algoritmalar yöntemi kullanılmıştır. Yapılan sayısal modelleme çalışmasında Marmara ve Karadeniz için tuzluluk ile sıcaklık sınır şartı olarak İSKİ (2004, 2005) ölçüm verileri kullanılarak hazırlanmış olan tuzluluk-sıcaklık profilleri kullanılmıştır. Su seviyesi sınır şartı olarak ise İstanbul Boğazı'nın Marmara ve Karadeniz çıkışlarında yapılmış olan su seviyesi ölçümlerine ait veriler tanımlanmıştır.

Genetik algoritmalar yöntemiyle kalibrasyon işleminde kalibrasyon parametresi olarak taban sürtünme katsayısı (c_f), türbülans Prandtl sayısı (σ_t) ve batıklık katsayısı (c_{e3}) parametreleri dikkate alınmıştır. Bunlardan taban sürtünme katsayısı (c_f) tabakalı akım hızları ve debileri üzerinde, türbülans Prandtl sayısı (σ_t) yoğunluğun difüzyif taşınımında ve batıklık katsayısı (c_{e3}) ise akım alanında derinlik boyunca oluşan tabakalaşma üzerinde etkili olan sayısal model parametreleridir.

Bu çalışmada tam pürüzlü akım koşulları dikkate alınarak hesaplanan taban sürtünme katsayısının (c_f) 0.0071-0.083 arasında değişen değerler aldığı görülmüştür. Söz konusu değer aralığı farklı araştırmacıların (Zaremba vd., 2003) İstanbul Boğazı için dikkate almış oldukları değerler ile aynı mertebededir. Sayısal modelin 0.0104 pürüzlülük katsayısı değeri için en uygun sonucu verdiği belirlenmiştir.

Yoğunluk Froude sayısının (Fr_k) fonksiyonu olan türbülans Prandtl sayısı (σ_t) akım alanında yoğunluğun (sıcaklık ve tuzluluk) difüzyif taşınımı üzerinde etkili bir boyutsuz parametre olduğu bilinmektedir. Sayısal modelin kalibrasyonu aşamasında kuvvetli tabakalanmaya

karşılık gelen $Fr_k \leq 0.35$ için σ_t 'nin üst limiti 1.4, zayıf tabakalanmaya karşılık gelen $Fr_k=1$ için ise alt limit 0.86 olan değerleri dikkate alınmış ve zayıf tabakalanmayı yansıtan 0.86 değerinin uygun sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bunun nedenlerinden birisi meteorolojik koşulların akıntı yapısı üzerindeki etkisidir.

Batıklık katsayısı için $0.35 < Fr_k < 0.50$ aralığında model kalibrasyonunun iyi sonuçlar verdiği için sırasıyla $Fr_k=0.35$ ve 0.5 için Venayagamoorthy vd. (2003) ifadesi kullanılarak batıklık katsayısının (c_{e3}), alt ve üst limitleri 0 ve 1.44 olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmada en iyi sonuçların $c_{e3}=0$ için elde edildiği görülmüştür.

Yukarıdaki üç adet kalibrasyon parametresi ve genetik algoritmalar yöntemi kullanılarak Mart 2005'deki 1 aylık İstanbul Boğazı akıntı yapısı modellenmiştir. Kalibrasyon aşamasında 27 adet farklı model alternatifi koşturulmuş ve modellere ait akıntı hızı sonuçları İstanbul Boğazı'nın güneyindeki B akıntı ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model alternatiflerinin ölçümlerle uygunluğu belirlenirken RMSE (Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü) istatistiksel hata fonksiyonu kullanılmıştır. Model alternatiflerinin tamamına ait RMSE değerlerinin değişiminden model sonuçlarının kalibrasyon parametrelerinin aldığı değerlerden önemli oranda etkilendikleri görülmüştür.

Kalibrasyon aşamasındaki en uygun model alternatifine ait -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki RMSE değerleri sırasıyla 0.266, 0.201 ve 0.163 m/s değerlerini almıştır. Kalibre edilmiş ve en uygun çözüme ulaşmış olan söz konusu model alternatifine ait kalibrasyon parametreleri sonuç olarak $c_f=0.0104$, $\sigma_t=0.86$ ve $c_{3e}=0$ değerlerini almışlardır.

Sayısal modelin doğrulama (validasyon) aşamasında ise kalibre edilmiş sayısal model parametreleri kullanılarak kalibrasyon dönemi dışındaki 4 farklı dönem için İstanbul Boğazı akımı modellenmiştir. Modellere ait -5, -10 ve -15 m derinliklerdeki RMSE değerlerinin sırasıyla 0.27-0.37, 0.22-0.29 ve 0.21-0.25 m/s aralığında değiştiği görülmüştür. Farklı derinliklerdeki RMSE değerlerinden kalibre edilen modelin kalibrasyon dönemi dışındaki akıntı yapısını da yeterince hassas benzeştirdiği görülmüştür.

Yine Mart 2005 dönemi için İstanbul Boğazı'nın güneyindeki farklı konumlara yerleştirilmiş A ve C akıntı ölçüm istasyonlarında ise sayısal modelin RMSE değerleri sırasıyla -5 m'de 0.12 ve 0.20 m/s, -10 m'de 0.12 ve 0.20 m/s, -15 m'de ise 0.13 ve 0.17 m/s olmuştur. Birbirlerine yakın konumlandırılmış olan akıntı ölçüm istasyonlarına ait bu sonuç taban topografyası ve Boğaz geometrisinin akıntı yapısı üzerinde ne denli önemli bir etkiye sahip olduğunu gözler önüne sermektedir.

İstanbul Boğazı'nın sayısal modelinin uygunluk, kalibrasyon ve doğrulama aşamalarına ait model sonuçlarından İstanbul Boğazı akıntı yapısı üzerinde komşu denizlerdeki hidrolojik ve meteorolojik koşullar ile Boğaz taban topografyasındaki değişimin en büyük etkiye sahip oldukları görülmüştür. Uzunluğu ve genişliği boyunca son derece değişken olan topografik yapı akıntı yapısında da önemli yerel farklılıklar oluşmasına neden olmaktadır. Diğer önemli bir parametrenin ise Boğaz'ın türbülans yapısı olduğu, türbülansı karakterize eden kalibrasyon parametrelerindeki (σ_t , c_{3e}) değişimin model sonuçları üzerinde yarattığı etkiden görülmüştür.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada İstanbul Boğazı sayısal modelinin kalibrasyonunda kalibrasyon parametresi olarak taban sürtünme katsayısı (c_f), türbülans Prandtl sayısı (σ_t) ve batıklık katsayısı (c_{e3}) dikkate alınmış ve kalibrasyon yöntemi olarak ise genetik algoritmalar yöntemi kullanılmıştır. Ancak farklı kalibrasyon teknikleri ve model parametreleri kullanılarak model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki benzeşimin daha fazla artırılması uygun olacaktır.

Yine bu çalışmada sayısal modelin kalibrasyonu ve doğrulaması için İstanbul Boğazı'nın güneyindeki üç adet akıntı ölçüm istasyonu verileri dikkate alınmıştır. Kalibre edilmiş model sonuçlarının Boğaz'ın değişik konumlarındaki akıntı ölçüm sonuçlarıyla da karşılaştırılması sayısal model parametrelerinin doğruluğunu artıracaktır.

Ayrıca ağ hassasiyeti ile başlangıç ve sınır koşullarının model sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için daha hassas bir ağ yapısı ve dikkate alınmayan sınır koşulları için ölçüm ile model sonuçlarının uyumu incelenmelidir.

Son olarak Türk Boğazlar sistemi (Çanakkale Boğazı, Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı) ve Karadeniz'i de içerecek şekilde bir makro sayısal modelin kurulması etkileşim halinde olan bütün sistemin karşılıklı ilişkisinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Abraham, G., Karelse, M. ve Van Os, A.G., (1979), "On the magnitude of interfacial shear of subcritical stratified flows in relation with interfacial stability", *Jour. of Hyd. Res.*, 17: 4
- Alpar, B. ve Yuce, H., (1998) "Sea-Level Variations and their Interactions between the Black Sea and the Aegean Sea" *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46: 609-619.
- Altunkaynak, B. ve Esin, A., (2004), "The Genetic Algorithm Method for Parameter Estimation in Nonlinear Regression", *Gazi University Journal of Science*, 17(2):43-51.
- Baum, E. ve Caponi, E.A., (1992), "Modelling the effects of buoyancy on the evolution of geophysical boundary layers", *J. Geophys. Res.*, 97: 15513-15527.
- Burchard, H. ve Baumert, H., (1995), "On the performance of a mixed-layer model based on the k- ϵ turbulence closure", *J. Geophys. Res.*, 100: 8523-8540.
- Geeraert ve Plant W.L. (1990), *Surface Waves and fluxes, Volume 1- Current theory*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Garg, R.K., Ferziger, J.H., Monismith, S.G. ve Koseff, J.R., (2000), "Stably stratified turbulent channel flows:I. Stratification and turbulent suppression mechanism", *Phys. Fluids*, 12: 2569-2594.
- Golden, R.M., (1996), *Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design*, Massachusetts Institute of Technology Press., Boston, USA.
- Gregg M.C. ve Özsoy, E., (2002), "Flow, water mass changes and hydraulics in the Bosphorus", *Journal of Geophysical Research*, 107: 3016-3023.
- Guler, I., Yuksel, Y., Yalciner, A.C., Cevik, E. ve Ingerslev, C., (2006), "Measurement and Evaluation of the Hydrodynamics and Secondary Currents in and near a Strait Connecting Large Water Bodies-A Field Study", *Journal of Ocean Engineering*, 33: 1718-1748.
- Gündemir, S. ve Yüksel, Y., (2006), İki Boyutlu Kıyı Alanı Hidrodinamik Model Kalibrasyonu Mike 21 HD Örneği, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri.
- Kays, William, Crawford, M. ve Weigand, B., (2005)., *Convective Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, McGraw-Hill, USA.
- Kirkegaard, P.H. ve Rytter, A., (1993), *The Use of Neural Networks for a Damage Detection and Location in a Steel Member*, *Neural Networks and Combinatorial Optimization in Civil and Structural Engineering*, Micle Press, U.K.
- Kröse, B. ve Van der Smagt, P., (1996), *An Introduction to Neural Networks*, The University of Amsterdam, Amsterdam.
- Oğuz, T., Özsoy, E., Latif, M. A., Sur, H. İ. ve Ünlüata Ü., (1990) "Modelling of Hydraulically Controlled Exchange Flow in the Bosphorus Strait", *Journal of Physical Oceanography*, 20: 945-965.

Oguz, T., (2005), "Hydraulic Adjustments of the Bosphorus Exchange Flow", *Geophysical Research Letters*, 32: 1-5.

Örs, H. ve Yılmaz, S.L., (2003), "Oil Transport in the Turkish Straits System: A simulation of Contamination in the Istanbul Strait", *Energy Sources*, 25:1043-1052.

Özbay, Y., (1999), *Fast Recognition of ECG Arrhythmias*, Ph.D Thesis, Institute of Natural and Applied Science, Selçuk University.

Özsoy, E., Oğuz, T., Latif, M.A., Ünlüata, CÜ., Sur, H.İ., ve Beşiktepe, Ş., (1988), *Oceanography of the Turkish Straits-Second Annual Report, vol.1, Physical Oceanography of Turkish Straits*, Institute of Marine Science, METU, Erdemli.

Özsoy, E., Latif, M.A., Tuğru, S., ve Ünlüata, Ü., (1995), "Exchanges with the Mediterranean, fluxes and Boundary Mixing Process in the Black Sea" –In; *Les mers tributaries de Mediterranee*, F. Briand ed., *Bulletin de l'institut oceanographique, Monaco*, n° special 15, *CIESM Science Series* 1:1-25.

Özsoy, E. Latif, M.A., Sur, H.I. ve Goryachkin, (1996), "A review of the exchange flow regime and mixing in the Bosphorus Strait", *Bulletin de l'Institut Oceanographique*, n° special, *CIESM Science Series* nu 2: 187-204.

Özsoy, E., Latif, M.A., Beşiktepe, Ş., Çetin, N., Gregg, M., Belekopytov, V., Goryachkin, Y., ve Vassile, D., (1998), *The Bosphorus Strait: Exchange Fluxes, Currents and Sea-Level changes*, in: L.I. Ivanov and T.Oğuz, Editors, *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, *NATO Science Series 2: Environmental Security*, vols. 1 and 2, Kluwer Academic Pub., Dordrecht.

Özsoy, E., Latif, M.A. ve Beşiktepe, Ş., (2002), "The current system of the Bosphorus Strait based on recent measurements", *The 2nd Meeting on the Physical Oceanography of Sea Straits*, 15-19 Nisan 2002, Villefranche.

Peneva, E., Stanev, E., Belokopytov, P. ve Le Traon, Y., (2001), "Water Transport in the Bosphorus Straits Estimated from Hydro-Meteorological and Altimeter Data; Seasonal to Decadal Variability", *Journal of marine Systems*, 31: 21-33.

Rodi, W. (1980), *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review*, Special IAHR Publication, Rotterdam.

Rodi, W., (1987), *Turbulence models and their application in Hydraulics-A state of the art review*, Int. Assoc. Hydr. Res., Rotterdam.

Shih, L.H., (2003), *Numerical simulations of stably stratified turbulent flow*, Phd dissertation, Dept. of Civil and Env. Engr., Stanford Univ.

Sözer, A. ve Özsoy, E., (2002), *A three-dimensional model of Bosphorus Strait dynamics*, *The 2nd Meeting on the Physical Oceanography of Sea Straits*, 15-19 Nisan 2002, Villefranche.

Stanev, V., E. ve Peneva, E., (2002), "Regional Sea Level Response to Global Climatic Change; Black Sea Examples", *Global and Planetary Change*, 32: 33-47.

Sur, H.İ., Özsoy, E. ve Ünlüata, Ü., (1994) “Boundary Current Instabilities, Upwelling, Shelf Mixing and Eutrophication Processes in the Black Sea”, Prog. Oceanography, 33: 249-302.

Sur, H.İ., Okuş, E., Güven, K.C., Yüksek, A., Altıok, H., Kıratlı, N., Ünlü, S., Taş, S., Aslan-Yılmaz, A., Yılmaz, N., Övez, S., Müftüoğlu, A. E., Karhan, Ü., Demirel, N., Cumalı, S. ve Aksu, A., (2004), Water Quality Monitoring Annual Report, ISKI (The Istanbul Water and Sewage Authority), Istanbul.

Sur, H.İ., Okuş, E., Güven, K.C., Yüksek, A., Altıok, H., Kıratlı, N., Ünlü, S., Taş, S., Aslan-Yılmaz, A., Yılmaz, N., Övez, S., Müftüoğlu, A. E., Karhan, Ü., Demirel, N., Cumalı, S. ve Aksu, A., (2005), Water Quality Monitoring Annual Report, ISKI (The Istanbul Water and Sewage Authority), Istanbul.

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, İstanbul.

Tolmazin, D., (1987), Relative Effects on the Oceanography and Ecology of the Black Sea Due To Ongoing Soviet River Flow Modifications and the Bosphorus Tunnel Project, Preliminary report, Parsons Brinkerhoff Int. Inc.

Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M.A. ve 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.

Wesson, J.C. ve Gregg, M.C., (1994) “Mixing at Camarinal Sill in the Strait of Gibraltar”, Journal of Geophysical Research, 99: 9847-9878.

Venayagamoorthy, S.K., Koseff, J.R., Ferziger, J.H. ve Shih, L.H., (2003), “Testing of RANS turbulence models for stratified flows based on DNS data”, Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs.

Yüksel, Y., (1999), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Hidrolik, YTÜ Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

Yüksel, Y., Ayat, B., Öztürk, M.N., Aydoğan, B. Güler, I., Çevik, E.O. ve Yalçiner, A.C., (2008), “Responses of the stratified flows to their driving conditions”, Ocean Engineering, 35: 1304-1321.

Yüksel, Y. ve Çevik, E.Ö., (2009), Kıyı Mühendisliği, Beta Basım A.Ş., İstanbul.

Zaremba, L.J., Lawrence, G.A. ve Pieters, R., (2003), “Frictional two-layer Exchange flow”, J. Fluid Mech., 474: 339-354.

İnternet Kaynağı

[1] Global Runoff Data Centre (GRDC), (2007), Federal Institute of Hydrology, Koblenz, Germany. (<http://grdc.bafg.de>).

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	15.06.1978	
Doğum yeri	Zara/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
Doktora	2004-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı
Çalıştığı kurum		
	2003-Devam ediyor	YTÜ İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi