

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İSTANBUL BOĞAZI SU KALİTESİNİN MODELLENMESİ

İnşaat Yük. Müh. Berna AYAT

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

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi	:03 Aralık 2010
Tez Danışmanı	: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL (YTÜ)
Jüri Üyeleri	: Prof. Dr. Ferruh ERTÜRK (YTÜ) Prof. Dr. Mehmet Emin KARAHAN (Beykent Ü.) Prof. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ) Prof. Dr. Emine Beyhan YEĞEN (İTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ÖNSÖZ	xxi
ÖZET	xxii
ABSTRACT	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. İSTANBUL BOĞAZI	4
2.1. İstanbul Boğazı'nın Topoğrafyası	5
2.2. İstanbul Boğazı'nda Meteorolojik Koşullar	7
2.3. İstanbul Boğazı'nın Hidrolojisi ve Hidrodinamiği.....	11
3. DENİZ KİRLİLİĞİNİN SAYISAL MODELLEMESİ.....	32
4. İSTANBUL BOĞAZI'NDA SU KALİTESİ İZLEME VE MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	41
4.1. Önceki Çalışmalar	41
4.2. İSKİ (1997-2006) Su Kalitesi İzleme Çalışmaları	44
4.3. Su Kalitesi İzleme Çalışması Verilerinin Değerlendirilmesi	55
4.3.1 ÇO Verilerinin Değerlendirilmesi	55
4.3.2 Askıda Katı Madde Verilerinin Değerlendirilmesi	67
4.3.3 PO ₄ -P Verilerinin Değerlendirilmesi.....	74
4.3.4 Toplam P Verilerinin Değerlendirilmesi	82
4.3.5 NO ₃ -N Verilerinin Değerlendirilmesi	89
4.3.6 NO ₂ -N Verilerinin Değerlendirilmesi	98
4.3.7 Klorofil-a Verilerinin Değerlendirilmesi.....	105
5. MODELLEME ARAÇLARI	138
5.1. Mike3 Hidrodinamik Modeli.....	138
5.1.1 Kartezyen Koordinat Sisteminde Temel Denklemler	139

5.1.2	Taban Gerilmesi	147
5.1.3	Rüzgar Gerilmesi.....	148
5.1.4	Nümerik Çözüm	148
5.2.	Ecolab Modeli	152
5.2.1	Matematiksel Temelleri.....	152
5.2.2	Ecolab Adi Diferansiyel Denklemler Serisi	152
5.2.3	AD Araçları ile Entegrasyon	154
5.2.4	İntegrasyon Metodları	155
5.2.5	4. Mertebeden Runge Kutta.....	155
5.2.6	5. Mertebeden Kalite Kontrollü Runge Kutta	156
5.2.7	Ecolab'ın Bilimsel Altyapısı	156
5.2.8	Matematiksel Formülasyonlar	157
6.	İSTANBUL BOĞAZI SU KALİTESİNİN MODELLENMESİ	167
6.1.	Uygunluk Analizi	167
6.1.1	Sonuçlar.....	197
6.2.	İstanbul Boğazı için Hidrodinamik Model.....	198
6.2.1	Uygun Hesap Ağının Oluşturulması	199
6.2.2	Başlangıç ve Sınır Koşulları ile Zorlayıcı Koşulların Tanımlanması	201
6.2.3	Hidrodinamik Modelin Kalibrasyonu	210
6.2.4	Hidrodinamik Modelin Doğrulanması	221
6.2.5	Hidrodinamik Model Sonuçları.....	249
6.3.	İstanbul Boğazı için Su Kalitesi Modeli.....	282
6.3.1	Su Kalitesi Model Tanımı	282
6.3.2	İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modeline Ait Başlangıç ve Sınır Koşullarının Tanımlanması	295
6.3.3	İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modelinin Kalibrasyonu	307
6.3.4	İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modelinin Doğrulanması.....	322
6.3.5	İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modeli Sonuçları	385
7.	SONUÇLAR	397
8.	ÖNERİLER	404
	SÖZLÜK	405
	KAYNAKLAR.....	409
	ÖZGEÇMİŞ.....	416

SİMGE LİSTESİ

S	Tuzluluk
T	Sıcaklık
Q	Debi
C	Konsantrasyon
t	Zaman
U	x doğrultusundaki hız
V	y doğrultusundaki hız
w	z doğrultusundaki hız
K_i	i doğrultusundaki difüzyon katsayısı
K_h	Moleküler difüzyon katsayısı
K_v	Türbülans difüzyonu katsayısı
S_I	Kaynak
S_E	Kuyu
η	Su yüzü değişimi
IN	Toplam inorganik azot (mg N/l)
KSN	Azot için yarı doyumluk konsantrasyonu, algler ve bitkilerin fotosentezi için kısıtlama
KSP	Fosfor için yarı doyumluk konsantrasyonu, algler ve bitkilerin fotosentezi için kısıtlama
W_v	Rüzgar hızı (m/s)
H	Su derinliği (m)
$\bar{V}$	Derinlik boyunca ortalama akım hızı (m/s)
NH_3	Amonyak konsantrasyonu (mg/l)
K_4	20 °C'deki nitrifikasyon oranı (1/gün)
θ_4	Nitrifikasyon için sıcaklık katsayısı
HS_nitr	Nitrifikasyon için yarı doyumluk konsantrasyonu (mg O_2 /l)
Y_1	Oksijen için verim faktörü
Fotosentez	Gerçek üretim (g O_2 /m ² /gün)
P_{max}	Öğle vaktindeki maksimum üretim (g O_2 /m ² /gün)
τ	Öğleye göre günün gerçek zamanı
α	Gerçek rölatif gün uzunluğu
$t_{up,down}$	Güneşin doğuş ve batış zamanı
solunum	Bitki ve bakterilerin solunum oranı (g O_2 /m ² /gün)
R_1	20 °C'deki fotosentetik (ototrofik) solunum oranı (g O_2 /m ² /gün)
θ_1	Fotosentetik solunum/üretim için sıcaklık katsayısı
R_2	Canlılar ve bakteriler (heterotrofik) için solunum oranları
θ_2	Heterotrofik solunum için sıcaklık katsayısı
$F_1(H)$	Işık sönümlenme fonksiyonu
K	Işık sönümlenme katsayısı
BOİ	BOİ konsantrasyonu (mg O_2 /l)
K_3	20 °C'deki bozunma sabiti (1/gün)
θ_3	Arrhenius sıcaklık katsayısı
ÇO	Oksijen konsantrasyonu (mg O_2 /l)
HS_BOİ	BOİ için yarıdoygun oksijen konsantrasyonu (mg O_2 /l)
$BOİ_d$	Çözünmüş organik madde konsantrasyonu (mg O_2 /l)
$BOİ_s$	Askıda organik madde konsantrasyonu (mg O_2 /l)
$BOİ_b$	Tabanda katı madde halindeki organik madde konsantrasyonu (mg O_2 /l)

K_{d3}	20 °C'deki çözünmüş organik madde için bozunma sabiti (l/gün). Doğal olarak askıda BOI_s çözünmüş BOI_d 'den daha yavaş indirgenecektir
θ_{d3}	Arrhenius sıcaklık katsayısı (çözünmüş BOI)
K_{s3}	20 °C'deki askıda organik madde için bozunma sabiti (l/gün). Doğal olarak askıda BOI_s çözünmüş BOI_d 'den daha yavaş indirgenecektir
θ_{s3}	Arrhenius sıcaklık katsayısı (askıda BOI)
K_{b3}	Tabanda katı madde halindeki organik malzeme için bozunma katsayısı (l/gün)
θ_{b3}	Arrhenius sıcaklık katsayısı (katı madde halindeki BOI)
HS_SOD	Katı madde oksijen ihtiyacı için yarı doymuş oksijen konsantrasyonu (mg O_2 /l)
θ_3	Arrhenius sıcaklık katsayısı (katı madde oksijen ihtiyacı)
S_1	BOI_b için resuspension oranı (m/gün)
K_s	BOI_s için sedimantasyon oranı (m/gün)
UN_p	Bitkiler tarafından amonyum tüketimi (mg N/mg O_2)
UN_b	Bakteriler tarafından amonyum tüketimi (mg N/mg BOI)
Y_b	Katı maddeye dönüşmüş organik madde içerisindeki azot miktarı (NH_3 -N/mg BOI)
Y_d	Çözünmüş organik madde içerisindeki azot miktarı (NH_3 -N/mg BOI)
Y_s	Askıdaki organik madde içerisindeki azot miktarı (NH_3 -N/mg BOI)
F(N, P)	Besi maddelerinin fotosentez üzerindeki kısıtlayıcı etkisi
HS_ NH_3	Bakterilerin N alımı için yarı doymuşluk konsantrasyonu (mg N/l)
K_4	20°C'deki nitrifikasyon oranı (l/gün)
θ_4	Nitrifikasyon için sıcaklık katsayısı
HS_nitr	Nitrifikasyon için yarı-doymuşluk konsantrasyonu (mg O_2 /l)
NO_2	Nitrit konsantrasyonu (mg/l)
K_5	20°C'de nitritin nitrate dönüşümü için spesifik oran (l/gün)
θ_5	Nitritin nitrate dönüşümü için için sıcaklık katsayısı
K_6	Denitrifikasyon oranı (l/gün)
θ_6	Denitrifikasyon için Arrhenius sıcaklık katsayısı
UP_p	Bitkiler tarafından alınan fosfor (mg P/mg O_2)
UP_b	Bakteriler tarafından alınan fosfor (mg P/mg BOI)
Y_{b2}	Katı maddeye dönüşmüş organik madde içerisindeki fosfor (mg P/mg O_2)
Y_{d2}	Çözünmüş organik madde içerisindeki fosfor (mg P/mg O_2)
Y_{s2}	Askı halindeki organik madde içerisindeki fosfor (mg P/mg O_2)
HS_ PO_4	Bakterilerin fosfor alımı için yarı doymuşluk konsantrasyonu (mg P/l)
Klo	Klorofil-a konsantrasyonu (mg/l)
K_8	Klorofil-a'nın tüketimi (l/gün)
K_9	Klorofil-a'nın çökelişi (l/gün)
K_{10}	Klorofil-a/Karbon oranı (mg Klo/mg Karbon)
K_{11}	Karbon/Oksijen oranı (mg karbon/mg oksijen)
CF	Fekal Koliform konsantrasyonu (adet/100 ml)
K_{dF}	Fekal Koliform için azalma katsayısı (adet/gün)

KISALTMA LİSTESİ

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AKM	Askıda Katı Madde
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AT	Arıtma Tesisi
B	Batı
BGB	Batı Güneybatı
BKB	Batı Kuzeybatı
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
BSHM	Black-Sea Hydro-Meteorological Data
C	Karbon
CFL	Courant-Friedrich-Lévy
CTD	Conductivity-Temperature-Depth
ÇO	Çözünmüş Oksijen
DHI	Danish Hydraulic Institute
DHL	Delft Hydraulics Laboratory
DLH	Demiryolları, Limanlar, Havameydanları
D	Doğu
DB	Doğu-Batı
DKD	Doğu Kuzey Doğu
DGD	Doğu Güney Doğu
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecasts
FC	Fecal Coliform
G	Güney
GD	Güneydoğu
GB	Güneybatı
GGD	Güney Güneydoğu
GGB	Güney Güneybatı
GPS	Global Positioning System
H	Hidrojen
HD	Hidrodinamik Modülü
IRTC	Istanbul Rail/Tunnel Consultants
İSKİ:	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
K	Kuzey
KB	Kuzeybatı
KD	Kuzeydoğu
KG	Kuzey-Güney
KKD	Kuzey Kuzeydoğu
KKB	Kuzey Kuzeybatı
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LNG	Liquefied Natural Gas
METU	Middle East Technical University
MOH	Mutlak Ortalama Hata
MSLA	Mean Sea Level Anomaly
N	Azot
NO ₂	Nitrit
NO ₃	Nitrat
OKHK	Ortalama Kare Hataların Karekökü
OKFK	Ortalama Kare Farkların Karekökü
ÖAT	Ön Arıtma Tesisi

P	Fosfor
PAH	Polisiklik Aromatik Hidrokarbon
PO ₄	Fosfat
POC	Particulate Organic Carbon
ppb	Part Per Billion
ppm	Part Per Million
ppt	Part Per Thousand
psu	Practical Salinity Unit
R	Korelasyon Katsayısı
R ²	Determinasyon Katsayısı
SCRUM	S-Coordinates Rutgers University Model
SHODB	Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı
TAKM	Toplam Askıda Katı Madde
TEMA	Türkiye Erozyonla Mücadele Ağaçlandırma ve Doğal Varlıkları Koruma Vakfı.
TKE	Türbülans Kinetik Enerjisi
TN	Toplam Azot
TOC	Toplam Organik Karbon
TP	Toplam Fosfor
T/P	TOPEX/Poseidon Altimeter
TRIX	Trofik İndeks
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UN GESAMP	United Nations The Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection.
UTM	The Universal Transverse Mercator

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	İstanbul Boğazı	4
Şekil 2.2	İstanbul Boğazı batimetrisi.	5
Şekil 2.3	Kumköy Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).	8
Şekil 2.4	Şile Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).	9
Şekil 2.5	Tekirdağ Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).	10
Şekil 2.6	Göztepe Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).	11
Şekil 2.7	İstanbul Boğazı akıntıları.	12
Şekil 2.8	Karadeniz’e net tatlı su girişinin mevsimsel değişimi, Simonov ve Altman, (1991). Giren su debisinin deniz seviyesinde meydana getirdiği değişimler gösterilmiştir.	14
Şekil 2.9	(1) Tüm Karadeniz için mevsimsel su seviyesi değişimleri, Simonov ve Altman, (1991), (2) Boğaz’ın kuzeyi (3) Marmara Denizi’nin kuzeyi (4) Marmara Denizi’nin güneyi (5) Ege Denizi’nin kuzeyi, Alpar ve Yüce, (1998), (6) Akdeniz’in doğusu, Ovchinnikov vd., (1976). η: Su seviyesi değişimi.	15
Şekil 2.10	(a) 1993-1997 dönemine ait T/P MSLA (nokta nokta çizgi) ve BSHM (düz çizgi) ölçümlerinden elde edilmiş hacimsel değişimlerin aylık ortalama değerleri; (b) 1923-1997 dönemine ait gelgit ölçümleri ve BSHM verilerinden elde edilmiş ortalama hacim değişimleri; (c) (a) ve (b)’deki eğrilerin farkı, Peneva vd., (2001).	17
Şekil 2.11	Boğaz’ın üst tabaka akımı debisi (Q_1) (içi boş semboller), Boğaz’ın alt tabaka akımı debisine (Q_2) (içi dolu semboller) karşılık net taşınım Q	18
Şekil 2.12	Maderich ve Konstantinov (2002) tarafından geliştirilen model sonuçlarına göre, Boğaz’ın üst tabaka debisi Q_1 ve alt tabaka debisine Q_2 karşılık Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı.	19
Şekil 2.13	Model sonuçlarına göre Karadeniz’de Şubat ve Temmuz aylarında beklenen tuzluluk ve sıcaklık profilleri (_ _ : Şubat, ____: Temmuz), Maderich ve Konstantinov, (2002).	20
Şekil 2.14	Ölçüm İstasyonları, Yüksel vd. (2008).....	24
Şekil 2.15	B İstasyonunda farklı derinliklerde ölçülmüş kuzey ve güney yönündeki akıntı hızları, Yüksel vd. (2008).	25
Şekil 2.16	İstanbul Boğazı’nda oluşan farklı akıntı profilleri, Yüksel vd. (2008).....	25
Şekil 2.17	Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi, Yüksel vd. (2008).....	26
Şekil 2.18	B istasyonunda sırasıyla yüzeyden -1, -5, -10, -15, -18, -20, -23 ve -25 m derinliklerde elde edilmiş akıntı gülleri, Yüksel vd. (2008).	27
Şekil 2.19	Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki seviye farklarının sıklık analizi, Aydoğan vd. (2007).	29
Şekil 2.20	İstanbul Boğazı Karadeniz girişinde su seviyesine karşılık aylık ortalama Tuna	

	Nehri debisi, Aydoğan vd. (2007, 2010a).....	30
Şekil 2.21	İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi girişleri arasındaki mevsimsel ortalama su seviyesi farkının değişimi, Aydoğan vd. (2007).	31
Şekil 3.1	Su kalitesi modellemesine ait akış şeması, Kim vd., (2004).	34
Şekil 3.2	Denizel ortama dahil olan bir kimyasal maddenin maruz kaldığı süreçler, Kim vd., (2004).	35
Şekil 4.1	İstanbul Boğazı boyunca su kalitesi izleme istasyonları ve deşarj noktalarının konumları, Sur vd. (2004).	45
Şekil 4.2	K0 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	56
Şekil 4.3	K1 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	58
Şekil 4.4	B13 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	59
Şekil 4.5	B7 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	60
Şekil 4.6	B2 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	62
Şekil 4.7	M3 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	63
Şekil 4.8	MK İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	64
Şekil 4.9	M8 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.	65
Şekil 4.10	K3 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında AKM konsantrasyonlarının değişimi.	68
Şekil 4.11	K0 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM konsantrasyonlarının değişimi.	69
Şekil 4.12	B13 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM konsantrasyonlarının değişimi.	70
Şekil 4.13	B7 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM (mg/l) konsantrasyonlarının değişimi.	71
Şekil 4.14	B2 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM (mg/l) konsantrasyonlarının değişimi.	72
Şekil 4.15	M8 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında AKM (mg/l) konsantrasyonlarının değişimi.	73
Şekil 4.16	K3 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında PO ₄ -P konsantrasyonlarının değişimi.	75
Şekil 4.17	K0 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında PO ₄ -P konsantrasyonlarının değişimi.	76
Şekil 4.18	B13 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında PO ₄ -P konsantrasyonlarının değişimi.	77
Şekil 4.19	B7 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında PO ₄ -P konsantrasyonlarının değişimi.	78
Şekil 4.20	B2 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında PO ₄ -P konsantrasyonlarının değişimi.	80

Şekil 4.21	M8 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $PO_4\text{-P}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	81
Şekil 4.22	K3 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.....	83
Şekil 4.23	K0 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.....	84
Şekil 4.24	B13 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.....	85
Şekil 4.25	B7 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.....	86
Şekil 4.26	B2 İstasyonunda 2000-2006 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.....	87
Şekil 4.27	M8 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.....	89
Şekil 4.28	K3 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	91
Şekil 4.29	K0 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	92
Şekil 4.30	B13 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	93
Şekil 4.31	B7 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	94
Şekil 4.32	B2 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	95
Şekil 4.33	M8 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	97
Şekil 4.34	K3 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	98
Şekil 4.35	K0 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	99
Şekil 4.36	B13 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	100
Şekil 4.37	B7 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	102
Şekil 4.38	B2 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	103
Şekil 4.39	M8 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında $NO_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.....	104
Şekil 4.40	K3 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.....	108
Şekil 4.41	K0 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.....	109
Şekil 4.42	B13 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.....	110
Şekil 4.43	B7 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.....	111

Şekil 4.44	B2 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.	112
Şekil 4.45	M8 İstasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.	114
Şekil 4.46	K0 İstasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.	128
Şekil 4.47	B13 İstasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.	130
Şekil 4.48	B7 İstasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.	132
Şekil 4.49	B2 İstasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.	134
Şekil 4.50	M3 İstasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.	135
Şekil 4.51	M8 İstasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.	136
Şekil 5.1	Ağ üretimi.	149
Şekil 5.2	Çökelim sürecinin şematik tarifi.	154
Şekil 5.3	Su kolonu içerisinde ışığın sönümlenmesi fonksiyonu.	160
Şekil 6.1	Uygunluk analizi testleri.	167
Şekil 6.2	Uygunluk analizi testlerinde dikkate alınan kanal plan ve kesiti.	168
Şekil 6.3	Advektif- difüzyon denkleminin çözümü.	169
Şekil 6.4	Kanal içerisinde konsantrasyonun kanal boyunca farkı anlardaki dağılımı, dispersiyonu.	169
Şekil 6.5 1.	Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	171
Şekil 6.6 1.	Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	172
Şekil 6.7 1.	Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	172
Şekil 6.8 1.	Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	173
Şekil 6.9	1. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.	173
Şekil 6.10	2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	174
Şekil 6.11	2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	174
Şekil 6.12	2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	175
Şekil 6.13	2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	175
Şekil 6.14	2. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.	176
Şekil 6.15	3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	176
Şekil 6.16	3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	177
Şekil 6.17	3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	177
Şekil 6.18	3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	178

Şekil 6.19	3. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.....	178
Şekil 6.20	4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	180
Şekil 6.21	4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	180
Şekil 6.22	4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	181
Şekil 6.23	4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	181
Şekil 6.24	4. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.....	182
Şekil 6.25	5. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	182
Şekil 6.26	5. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	183
Şekil 6.27	5. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	183
Şekil 6.28	5. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	184
Şekil 6.29	5. Benzetim sonunda kanal ekseninde su seviyesinin değişimi.....	184
Şekil 6.30	6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	185
Şekil 6.31	6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	185
Şekil 6.32	6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	186
Şekil 6.33	6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	186
Şekil 6.34	6. Benzetim sonunda kanal ekseninde su seviyesinin değişimi.....	187
Şekil 6.35	Kanaldaki farklı tuzluluk değerleri için benzetimin başlamasından 2 dak. 30 s. sonra BOİ ve ÇO konsantrasyonunun değişimi.....	187
Şekil 6.36	Su seviyesi farkındaki değişime karşı BOİ konsantrasyonunun değişimi.....	188
Şekil 6.37	7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	190
Şekil 6.38	7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.	190
Şekil 6.39	7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	191
Şekil 6.40	7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.	191
Şekil 6.41	Çift tabakalı akım modelinde kullanılan kanal geometrisi ve yapılandırılmamış hesap ağı.....	193
Şekil 6.42	Benzetimin çeşitli anlarında BOİ konsantrasyonunun kanal tabanında eksendeki dağılımı.	194
Şekil 6.43	Benzetimin çeşitli anlarında ÇO konsantrasyonunun kanal tabanında eksendeki dağılımı.	194

Şekil 6.44	Benzetimin çeşitli anlarında klorofil-a konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.	195
Şekil 6.45	Benzetimin çeşitli anlarında NH_4 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.	195
Şekil 6.46	Benzetimin çeşitli anlarında NO_2 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.	196
Şekil 6.47	Benzetimin çeşitli anlarında NO_3 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.	196
Şekil 6.48	Benzetimin çeşitli anlarında PO_4 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.	197
Şekil 6.49	Benzetimin çeşitli anlarında Fekal Koliform konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.....	197
Şekil 6.50	Hibrit hesap ağları.....	200
Şekil 6.51	İstanbul Boğazı sayısal modeli için kullanılan hesap ağı.	201
Şekil 6.52	İstanbul Boğazı'nda ölçüm istasyonları.....	202
Şekil 6.53	D (Marmara Denizi Girişi) ve E (Karadeniz Girişi) istasyonlarında kaydedilen su seviyesi verileri.....	203
Şekil 6.54	Hidrodinamik modelde model alanı içerisinde başlangıç su yüzünün tanımlanan değişimi.	204
Şekil 6.55	Model alanının eksenini boyunca alınmış bir boykesitte hesap ağının düşey ayrıştırılması.....	205
Şekil 6.56	Model alanı içerisinde sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve tuzluluk (psu) başlangıç koşulları.	206
Şekil 6.57	Modelin Karadeniz sınırında sırasıyla sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve tuzluluk (psu) sınır koşulları.....	207
Şekil 6.58	Modelin Marmara Denizi sınırında sırasıyla sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve tuzluluk (psu) sınır koşulları.	207
Şekil 6.59	Hidrodinamik model bennzetiminde tanımlanan kaynakların model alanı içerisindeki konumları.	209
Şekil 6.60	Karşılaştırmalı benzetimlerden elde edilen R korelasyon katsayıları.....	212
Şekil 6.61	Kalibrasyon dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.	213
Şekil 6.62	1. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.	222
Şekil 6.63	2. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.	229
Şekil 6.64	3. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.	236
Şekil 6.65	4. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin	

	ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.	243
Şekil 6.66	Model alanı yüzey (-1m) katmanında hidrodinamik modelden hesaplanan akıntı haritaları.	253
Şekil 6.67	K0 istasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m ve 55m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.....	257
Şekil 6.68	B13 istasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m ve 55m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri....	261
Şekil 6.69	B7 istasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m ve 55m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.....	265
Şekil 6.70	B2 istasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m ve 35m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.	269
Şekil 6.71	M3 istasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m ve 20m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.....	271
Şekil 6.72	K0 istasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri. ..	273
Şekil 6.73	B13 istasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.	274
Şekil 6.74	B7 istasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri. ..	274
Şekil 6.75	B2 istasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri. ..	275
Şekil 6.76	M3 istasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.	275
Şekil 6.77	K0 istasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.	277
Şekil 6.78	B13 istasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.....	278
Şekil 6.79	B7 istasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.....	279
Şekil 6.80	B2 istasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.....	280
Şekil 6.81	M3 istasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.....	281
Şekil 6.82	Tüm deniz deşarjları için BOİ konsantrasyonu zaman serileri, Sur vd., (2004).	287
Şekil 6.83	K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında BOİ ve ÇO parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.	290
Şekil 6.84	K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında Klorofil-a ve NH ₄ parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.	291
Şekil 6.85	K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında NO ₂ ve NO ₃ parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.	292
Şekil 6.86	K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında PO ₄ ve FK parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.	293
Şekil 6.87	K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında TK parametresinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.	294
Şekil 6.88	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli ÇO başlangıç koşulu.	296
Şekil 6.89	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli Klorofil-a başlangıç	

	koşulu.....	297
Şekil 6.90	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli NO ₂ başlangıç koşulu.....	298
Şekil 6.91	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli NO ₃ başlangıç koşulu.....	299
Şekil 6.92	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli PO ₄ başlangıç koşulu.....	300
Şekil 6.93	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli FK başlangıç koşulu.....	301
Şekil 6.94	Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli TK başlangıç koşulu.....	302
Şekil 6.95	Karadeniz Sınırında durum değişkenlerine ait konsantrasyon sınır şartları. ..	303
Şekil 6.96	Marmara Denizi Sınırında durum değişkenlerine ait konsantrasyon sınır şartları.	305
Şekil 6.97	Marmara Denizi ve Karadeniz açık sınırlarında tanımlanan BOİ sınır şartı. .	307
Şekil 6.98	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda ÇO konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu.....	315
Şekil 6.99	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda Klorofil-a konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu.....	315
Şekil 6.100	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO ₂ konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu.....	316
Şekil 6.101	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO ₃ konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu.....	316
Şekil 6.102	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda PO ₄ konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu.....	317
Şekil 6.103	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda ÇO konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.....	319
Şekil 6.104	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda Klorofil-a konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	319
Şekil 6.105	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO ₂ konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.....	320
Şekil 6.106	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO ₃ konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.....	320
Şekil 6.107	Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda PO ₄ konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.....	321
Şekil 6.108	B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	322
Şekil 6.109	B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	323
Şekil 6.110	B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO ₂ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	324

Şekil 6.111	B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	325
Şekil 6.112	B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	326
Şekil 6.113	B13 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri doğrulama dönemi veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	327
Şekil 6.114	B13 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.	330
Şekil 6.115	K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	335
Şekil 6.116	K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	336
Şekil 6.117	K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_2 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	336
Şekil 6.118	K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	337
Şekil 6.119	K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	337
Şekil 6.120	K0 İstasyonunda ÇO veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	338
Şekil 6.121	K0 İstasyonunda Klorofil-a veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	339
Şekil 6.122	K0 İstasyonunda NO_2 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	340
Şekil 6.123	K0 İstasyonunda NO_3 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	341
Şekil 6.124	K0 İstasyonunda PO_4 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	342
Şekil 6.125	K0 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.	344
Şekil 6.126	B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	349
Şekil 6.127	B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	350
Şekil 6.128	B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_2 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	351
Şekil 6.129	B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	351
Şekil 6.130	B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.....	352
Şekil 6.131	B7 İstasyonunda ÇO veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	353
Şekil 6.132	B7 İstasyonunda Klorofil-a veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	354
Şekil 6.133	B7 İstasyonunda NO_2 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey	

	profiller üzerinde karşılaştırılması.	355
Şekil 6.134	B7 İstasyonunda NO ₃ veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	356
Şekil 6.135	B7 İstasyonunda PO ₄ veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	357
Şekil 6.136	B7 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.	359
Şekil 6.137	B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	364
Şekil 6.138	B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	365
Şekil 6.139	B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO ₂ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	365
Şekil 6.140	B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO ₃ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	366
Şekil 6.141	B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO ₄ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	367
Şekil 6.142	B2 İstasyonunda ÇO veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	368
Şekil 6.143	B2 İstasyonunda Klorofil-a veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	369
Şekil 6.144	B2 İstasyonunda NO ₂ veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	370
Şekil 6.145	B2 İstasyonunda NO ₃ veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	371
Şekil 6.146	B2 İstasyonunda NO ₃ veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	372
Şekil 6.147	B2 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.	374
Şekil 6.148	M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	377
Şekil 6.149	M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	377
Şekil 6.150	M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO ₂ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	378
Şekil 6.151	M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO ₃ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	378
Şekil 6.152	M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO ₄ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.	378
Şekil 6.153	M3 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması.	379
Şekil 6.154	M3 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.	382
Şekil 6.155	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında BOİ konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.	385
Şekil 6.156	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında ÇO konsantrasyonlarının yüzeyden 1	

	m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri. ..387
Şekil 6.157	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında Klorofil-a konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.....389
Şekil 6.158	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında NH_4 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.390
Şekil 6.159	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında NO_2 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.391
Şekil 6.160	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında NO_3 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.393
Şekil 6.161	Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında PO_4 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.395

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Boğaz'ın kuzey ve güney girişlerindeki debiler, Doğan vd. (2001).	22
Çizelge 2.2	Kısa süreli ölçüm istasyonlarına ait parametreler, Güler vd., (2006).	22
Çizelge 2.3	İstanbul Boğazı'nda ölçüm çalışmalarının yürütüldüğü istasyonlar ile ölçülen parametreler ve ölçüm periyotları.	24
Çizelge 3.1	Modellemede dikkate alınacak parametreler ve kullanılacak modüller.	39
Çizelge 4.1	Kirlilik yüklerinin dağılımı (Tüm Ülkeler), Sarıkaya vd., (1998)	42
Çizelge 4.2	İstanbul Boğazı-Karadeniz arasında kirlilik değişimi, Polat ve Tuğrul, (1995).	43
Çizelge 4.3	Üç tabakalı sistemde Rhodamine boya konsantrasyonları, Özsoy vd., (1998b)	43
Çizelge 4.4	İstanbul Boğazı boyunca su kalitesi izleme istasyonları, konumları ve özellikleri, Sur vd. (2004).	46
Çizelge 4.5	Su kalitesi izleme çalışmaları kapsamında izlenen parametreler ve özellikleri, Sur vd. (2004)	48
Çizelge 4.6	Su Kalitesi İzleme İstasyonları konumları ve özellikleri	49
Çizelge 4.7	İstanbul ili sınırları içerisindeki atıksu arıtma tesisleri ile deniz deşarjları ve özellikleri, Sur vd. (2005)	53
Çizelge 4.8	Modelleme çalışmasında dikkate alınan atıksu deşarj 2004 ve 2005 yılları çıkış karakteristikleri (ISKI).	54
Çizelge 4.9	Tuzluluk durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	115
Çizelge 4.10	Sıcaklık durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	116
Çizelge 4.11	Çözünmüş Oksijen durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	118
Çizelge 4.12	Klorofil-a durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	118
Çizelge 4.13	Nitrat (NO ₃) durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	119
Çizelge 4.14	Nitrit (NO ₂) durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	120
Çizelge 4.15	Fosfat (PO ₄) durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	121
Çizelge 4.16	Toplam Fosfat durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	122
Çizelge 4.17	Organik Azot durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	123
Çizelge 4.18	Toplam Azot durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.	124
Çizelge 4.19	Literatürde TRIX İndeksine göre ötrofikasyon riski değerlendirme ölçeği.	125
Çizelge 4.20	K0 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.	126
Çizelge 4.21	B13 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.	128
Çizelge 4.22	B7 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.	130
Çizelge 4.23	B2 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.	132
Çizelge 4.24	M3 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.	134
Çizelge 4.25	M8 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.	136
Çizelge 5.1	k-ε türbülans modeli deneysel sabitleri, Rodi (1984).	144
Çizelge 6.1	18 psu tuzluluk için farklı su yüzü eğimlerinde gerçekleştirilen benzetim parametreleri.	170
Çizelge 6.2	38 psu tuzluluk için farklı su yüzü eğimlerinde gerçekleştirilen benzetim	

	parametreleri.	179
Çizelge 6.3	Çoklu deşarj hali için benzetim parametreleri.	189
Çizelge 6.4	Hidrodinamik Model ve Ecolab Model parametreleri.	192
Çizelge 6.5	Su seviyesi ölçümlerinin istatistiksel değerlendirmesi.	203
Çizelge 6.6	Hidrodinamik Model kaynak noktalarının konum ve özellikleri.....	209
Çizelge 6.7	Model kalibrasyonu aşamasında benzetimler ve özellikleri.	211
Çizelge 6.8	Kalibrasyon parametreleri, alt ve üst limitleri ile kalibre edilmiş değerleri. ..	212
Çizelge 6.9	B istasyonunda 1 m aralıklı tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.....	220
Çizelge 6.10	1. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.	228
Çizelge 6.11	2. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.	235
Çizelge 6.12	3. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.	242
Çizelge 6.13	4. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.	249
Çizelge 6.14	Tüm istasyonlarda akıntı gülleri.	250
Çizelge 6.15	Tüm ölçüm dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.	256
Çizelge 6.16	Modelde dikkate alınan durum değişkenleri ile bunların zamansal ve uzamsal değişimlerini etkileyen süreçler ve bu süreçlerin içerdiği sabitler ile zorlayıcı etkenler.....	283
Çizelge 6.17	Ecolab Model sabitleri.	284
Çizelge 6.18	Ham evsel atıksuyun tipik özellikleri, Metcalf and Eddy, (2007)	288
Çizelge 6.19	Su Kalitesi modelinde tanımlanan İstanbul Boğazı boyunca deniz deşarjlarının çıkış karakteristikleri.....	288
Çizelge 6.20	Su Kalitesi modelinin hassasiyet analizinde kullanılan model sabitleri.	309
Çizelge 6.21	Hassasiyet analizi sonuçları, OKFK değerleri.	312
Çizelge 6.22	Su kalitesi modeli kalibrasyon parametrelerine ait literatür, baz model ve kalibre edilmiş değerleri.	313
Çizelge 6.23	B13 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.....	329
Çizelge 6.24	K0 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.....	343
Çizelge 6.25	B7 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.....	358
Çizelge 6.26	B2 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.....	373
Çizelge 6.27	M3 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.....	381

ÖNSÖZ

İstanbul, Asya ve Avrupa kıtaları arasındaki stratejik konumu, tarihi ve turistik değeri ve sahip olduğu iklimsel özellikleri ile yüzyıllardır pek çok medeniyetin insanları için bir cazibe merkezi olagelmıştır. Bu durum İstanbul’u günümüzdeki büyük nüfusu ve ağır sanayi yükü ile dünyanın en sorunlu anakentlerinden biri konumuna getirmiştir. Tabii tüm anakentler gibi İstanbul da gerek büyük nüfusunun, gerekse endüstriyel yükünün getirdiği önemli boyutta çevresel sorunlarla karşı karşıya kalmıştır. Bu yükün büyük bir kısmı da şehrin ortasından geçen ve uluslararası taşımacılık yüküne de maruz olan İstanbul Boğazı tarafından taşınmaya çalışılmaktadır.

Bu çalışmada İstanbul Boğazı’nın özel hidrodinamik yapısı içerisinde kirleticilerin yayılımı, dağılımı ve indirgenmelerine ilişkin süreçler üç boyutlu hidrodinamik ve su kalitesi modelleme yazılımları kullanılarak kalibre edilmiş, doğrulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Böylece yetkili kurumlar ve karar mekanizmaları için bir bilimsel kaynak oluşturulması amaçlanmıştır.

Tezin hazırlanması süresince gösterdiği maddi, manevi destek ve kıymetli rehberliği için tez danışmanım, hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın Yüksel’e teşekkür ederim. Kıymetli katkıları, yol göstericilikleri ve manevi destekleri için tez izleme jürimde yer alan hocalarım Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin Karahan ve Sayın Prof. Dr. Ferruh Ertürk’e teşekkür ederim. Her türlü katkıları, paylaşımları ve özverisi için sevgili dostum Burak Aydoğan’a teşekkür ederim. Bu çalışma onların sonsuz sabır, destek ve katkıları olmaksızın gerçekleşemezdi.

Çalışmanın amaçlarına ulaşabilmesi için gerekli olan verileri sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi’ne (İSKİ), Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları, Limanlar, Hava Meydanları Genel Müdürlüğü’ne ve Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı’na (SHODB) teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmama sağladığı maddi destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TÜBİTAK) teşekkür ederim. Sağlanan proje desteği için Yıldız Teknik Üniversitesi Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne teşekkür ederim.

Son olarak sonsuz sevgi, sabır ve destekleri ile bu çalışmayı gerçekleştirmemdeki maddi ve manevi katkıları için annem Ayten Ayat, babam Cemal Ayat ve adlarını tek tek sayamadığım tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Önemli bir uluslararası su yolu olan İstanbul Boğazı; Karadeniz ve Marmara Denizi'nden taşınan önemli bir kirlilik yükü ile İstanbul şehrinin evsel nitelikli atıksuları için alıcı ortam niteliği taşımaktadır. İstanbul Boğazı'nda kirliliğin kontrol edilmesi kendisi için olduğu kadar Karadeniz ve Marmara Denizleri için de hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle Boğaz'da yapılacak planlama çalışmalarına bir altlık oluşturması amacıyla en güncel modelleme teknikleri İstanbul Boğazı'na uygulanmıştır.

Bu çalışmada, İstanbul Boğazı'ndaki hidrodinamik yapı ve su kalitesi durum değişkenlerinin zamansal ve uzamsal değişimleri üç boyutlu olarak benzeştirilmiştir. Hidrodinamik benzetim için Mike3 ve su kalitesi için Ecolab modelleme yazılımını içeren üç boyutlu bileşik modelleme sistemi kullanılmıştır. Bileşik modelin kurulumu, kalibrasyonu ve doğrulanması aşamalarında ECMWF'ten alınan meteorolojik veriler, SHODB'den alınan batimetrik veriler, Marmaray Tüp Geçiş Projesi kapsamında İstanbul Boğazı'nda toplanan akıntı ve su seviyesi ölçümleri ile İSKİ tarafından İstanbul Boğazı'nda yürütülmekte olan Su Kalitesi İzleme çalışmaları kapsamında toplanan sıcaklık, tuzluluk ve su kalitesi durum değişkenlerine ait konsantrasyon ölçümleri kullanılmıştır. İstanbul Boğazı'nda akıntı hızları benzeştirilmiş, 24 farklı derinlikteki ölçüm verileri ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Su kalitesi durum değişkenlerinden Çözünmüş Oksijen, Klorofil-a, Nitrit, Nitrat ve Fosfat konsantrasyonları benzeştirilmiştir. Hassasiyet analizi yapılarak konsantrasyonların en hassas olduğu model parametreleri belirlenmiştir. Hassasiyet analizi sonucunda belirlenen kalibrasyon parametreleri kullanılarak sistematik bir kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli Boğaz boyunca beş farklı istasyonda ve farklı derinliklerde toplanan veriler kullanılarak doğrulanmıştır.

İstanbul Boğazı'nda ilk kez uygulanan üç boyutlu hidrodinamik ve su kalitesi bileşik modeli başarı ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrodinamik, su kalitesi, bileşik modelleme, İstanbul Boğazı, Mike3, Ecolab

ABSTRACT

WATER QUALITY MODELLING IN THE STRAIT OF ISTANBUL

Strait of Istanbul which is an important international waterway, is also a receiving aquatic environment for the pollution transported from Black Sea and the Sea of Marmara as well as domestic wastewater discharges originated from City of Istanbul. Controlling the pollution in the Strait of Istanbul is crucial for the Black Sea and the Sea of Marmara as well as itself. Therefore state of the art numerical modeling techniques were applied in the Strait of Istanbul, in order to develop a useful tool for planning and management studies.

In this study, hydrodynamic structure and three dimensional spatial and temporal variations of the water quality state variables in the Strait of Istanbul were simulated. 3D coupled modeling system including Mike3 for hydrodynamics and Ecolab for water quality was used. In order to setup, calibrate and validate the model, meteorological datasets from ECMWF, bathymetric data from SHODB, current velocities and surface elevations collected for Marmaray Tube Tunnel Project and datasets for temperature, salinity and concentrations of water quality state variables collected by ISKI within the Water Quality Monitoring studies were used. Simulated current velocities in the Strait of Istanbul were calibrated and validated by using the dataset including the current velocities at 24 different depths. Dissolved Oxygen, Chlorophyll-a, Nitrite, Nitrate and Phosphate were considered as water quality state variables and concentrations were simulated. Sensitivity analysis was carried out in order to determine the most sensitive model parameters. Water quality model calibration was performed by using these model parameters. Water quality model was validated by using concentration data collected at five different stations and different depths.

Coupled hydrodynamic and water quality modeling system which is applied in the Strait of Istanbul for the first time, was calibrated and validated successfully.

Keywords: Hydrodynamics, water quality, coupled modelling, Strait of Istanbul, Mike3, Ecolab

1. GİRİŞ

İstanbul Boğazı Karadeniz'i Marmara Denizi, Çanakkale Boğazı ve Ege Denizi ile Akdeniz'e bağlayan dar ve derin bir su yoludur. İki tabakalı özel bir akım yapısına sahiptir. Yüksek yoğunluğa sahip Marmara Denizi suları alt akıntı ile Karadeniz'e taşınırken, daha düşük yoğunluklu Karadeniz suları üst akıntı ile Marmara Denizi'ne taşınmaktadır. Yoğunluk farkı Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki tuzluluk farkından kaynaklanmaktadır. Karadeniz ~18 psu ve Marmara Denizi ise ~38 psu tuzluluğa sahiptir. Bu yoğunluk farkı Boğaz'daki alt akıntıyı oluşturmaktadır. Karadeniz su seviyesi Marmara Denizi'ne göre daha yüksektir. Bu su seviyesi farkı ise Boğaz'daki üst tabaka akımını kontrol etmektedir. Su seviyesi farkı meteorolojik etkilere ve Karadeniz'in hidrolojik değişimlerine bağlı olarak zaman içerisinde değişiklik göstermektedir. Böylesi değişiklikler Boğaz'daki alt ve üst tabaka akımının kalınlığını, ara kesit düzleminin yerini ve akıntının şiddetini etkilemekte zaman zaman iki tabakalı yapının ortadan kalkmasına dahi neden olabilmektedir.

Yüksek nüfus artışı ve artan endüstrileşme İstanbul Boğazı su kalitesini tehdit etmektedir. İstanbul şehrinin atıksuları ön arıtma tesislerinde işlendikten sonra derin deniz deşarjları yoluyla Boğaz'ın alt akıntısına verilmektedir. Ayrıca Karadeniz'den ve Marmara Denizi'nden de gelen ciddi boyutta bir kirlilik söz konusudur. İstanbul Boğazı'ndaki su kalitesi İSKİ adına İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri Enstitüsü'ndeki bir ekip tarafından 1996 yılından bu yana izlenmektedir. İzleme çalışmaları Karadeniz, Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'nda belirlenmiş istasyonlarda, çeşitli derinliklerde, aylık ya da mevsimlik anlık ölçümlerle gerçekleştirilmektedir. Bundan başka İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin master plan çalışmalarında kullanılmak üzere Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI) tarafından 1993 yılında hazırlanan bir sayısal model de İstanbul Boğazı üzerinde yapılan planlama ve gidilen tasarruflara altlık oluşturmaktadır. Ancak o günden bu yana değişen koşullar, artan kirlilik yükü ve gelişen teknoloji gereği İstanbul Boğazı'nda su kalitesinin durumunun yeniden değerlendirilmesi, sistemdeki besin maddelerinin ve diğer su kalitesi durum değişkenlerinin maruz kaldığı taşınım ve dönüşüm süreçlerinin anlaşılacak İstanbul Boğazı için uygun bir su kalitesi modelinin kalibre edilmesi bir zorunluluk halini almıştır. Böylesi bir model İstanbul Boğazı'nda yapılacak planlamalar için daha sağlıklı bir altlık oluşturacak ve sisteme dair bilinmeyenlere daha doğru yanıtlar verebilecektir.

İstanbul Boğazı gibi karmaşık akım yapısına sahip sistemlerde su kalitesi dinamiklerini yalnızca biyolojik ve kimyasal süreçlerle benzeştirebilmek ya da öngörebilmek mümkün değildir. Böylesi sistemlerde su kalitesi sıcaklık ve tuzluluk değişimleri, hidrodinamik

değişimler (dalga, akıntı, gel-git, türbülans karışımı, vb.), meteorolojik değişimler (rüzgâr, hava sıcaklığı, atmosferik basınç değişimleri, vb.) ve katı madde taşınım süreçlerinden de (birikim, tabandan su kolonuna ya da su kolonundan tabana geçiş, topaklaşma, vb.) etkilenmektedirler. Bu çalışmada İstanbul Boğazı'ndaki hidrodinamik yapıya da önemli ölçüde bağlı olan karmaşık su kalitesi süreçlerini anlamak için bileşik bir modelleme sistemi oluşturulmuştur. Bu çalışmanın öncelikli amacı en gelişmiş ve en güncel teknikleri ve verileri kullanarak İstanbul Boğazı'ndaki hidrodinamik yapıyı ve su kalitesi dinamiklerini ayrıntılı bir biçimde benzeştirebilmektir. Bu amaçla DHI tarafından geliştirilen Mike3 üç boyutlu hidrodinamik modelleme yazılımı ve Ecolab su kalitesi modelleme yazılımı bir arada kullanılmıştır. Her iki yazılım da dünyanın çeşitli yerlerinde su kütlelerinin hidrodinamiği ve su kalitesinin benzeştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak ilk kez bu çalışmada iki tabakalı akıntı yapısına sahip dar ve derin bir boğaz akımının hidrodinamiğinin ve su kalitesi dinamiklerinin benzeştirilmesinde kullanılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen İstanbul Boğazı Hidrodinamik ve Su Kalitesi Modelleme Sistemi, Marmaray Tüp Geçiş Projesi kapsamında toplanan meteorolojik veriler ve akıntı hızı verileri ile İSKİ Su Kalitesi İzleme Çalışması'ndan (Sur vd., 2004, 2005) elde edilen su kalitesi verileri kullanılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Doğrulan model İstanbul Boğazı üzerinde yetki sahibi olan kamu kuruluşları tarafından yönetim ve planlamada ya da özel kuruluşlarca bir projenin uygulanmasında ortaya çıkan veri gereksinimini karşılamak amacıyla kullanılabilecektir. Bu çalışmanın amaçları şunlardır:

- Mike3 ve Ecolab modelleme yazılımlarının dar ve derin boğazlar için uygunluğunun İstanbul Boğazı'na ait geniş bir veri seti kullanılarak test edilmesi,
- Tabakalı akımlarda su kalitesinin sayısal modellenmesi ile hidrodinamik koşulların su kalitesi parametreleri üzerindeki etkisinin detaylı olarak incelenmesi,
- İstanbul Boğazı üzerindeki çeşitli kirlilik etkilerinin benzeştirilmesi amacıyla doğrulanmış bir modelleme sisteminin uygulanabilirliğini göstermek,
- Yeni planlanacak deşarjların, mevcut deşarjlardaki değişimlerin ve diğer planlamaların İstanbul Boğazı ile etkileşim içerisinde olduğu Karadeniz ve Marmara Denizi su kalitesi üzerindeki etkilerinin kolaylıkla değerlendirilebileceği bir araç oluşturmak,

Yukarıda sayılan amaçlara yönelik olarak;

- Kasım 2004-Kasım 2005 arasındaki bir yıllık süre içerisinde İstanbul Boğazı'ndaki akıntı hızları, sıcaklık ve tuzluluk yapısı ile taşınım dinamiklerini benzeştirmek,
- Yine Kasım 2004-Kasım 2005 arasındaki bir yıllık süre içerisinde İstanbul

Boğazı'ndaki su kalitesi durum değişkenlerinin zamansal ve uzamsal dağılım ve değişimlerini benzeştirmek,

- Her bir model parametresinin su kalitesi süreçleri üzerindeki etkilerini belirlemek, en hassas parametreleri seçmek ve kalibrasyon için en uygun parametre setini belirlemek için hassasiyet analizi yapmak,
- Çok sayıdaki model kalibrasyon parametrelerinin dikkate alınabilmesi ve sistem üzerinde en etkili olanlarının belirlenebilmesi amacıyla sistematik bir kalibrasyon süreci geliştirmek.

Bu amaçları gerçekleştirmek için; 2. Bölümde İstanbul Boğazı model alanının genel özellikleri, iklimsel ve topoğrafik özellikleri ile hidrodinamiği ve hidrolojisi ayrıntılı biçimde ele alınmış, bunlarla ilgili olarak literatürde yeralan çalışmalar tartışılmıştır. 3. Bölümde genel olarak deniz kirliliğinin modellenmesine dair esaslara yer verilmiştir. 4. Bölümde İstanbul Boğazı'nda yürütülmüş su kalitesi izleme ve modelleme çalışmaları incelenmiş ve modelleme sürecinde izlenecek yöntem geliştirilmiştir. 5. Bölümde İstanbul Boğazı hidrodinamiği ve su kalitesinin modellenmesi amacıyla kullanılacak yazılımlar ile bunların dayandıkları fiziksel ve matematiksel esaslar ayrıntılı olarak irdelenmiştir. 6. Bölümde İstanbul Boğazı batimetrisinin ve hesap ağının oluşturulması ile hidrodinamik ve su kalitesi bileşik modelinin kurulumu kalibrasyonu ve doğrulanması aşamaları ile model sonuçlarının sunumuna yer verilmiştir. 7. Bölümde İstanbul Boğazı hidrodinamiği ve su kalitesi bileşik modeli çalışmalarında elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. 8. Bölümde bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında bundan sonra yapılacak çalışmalara yol göstermesi bakımından gerekli bulunan öneriler sıralanmıştır.

2. İSTANBUL BOĞAZI

İstanbul Boğazı, Karadeniz'i Marmara Denizi, Çanakkale Boğazı ve Ege Denizi yoluyla Akdeniz'e bağlayan dar, derin ve kıvrımlı bir suyoludur. Şekil 2.1'de gösterilen İstanbul Boğazı, Marmara Denizi ve Çanakkale Boğazı ile birlikte "Türk Boğazlar Sistemi"ni oluşturmaktadır. 01.05.1982 tarihinde yürürlüğe giren İstanbul Liman Tüzüğü'ne göre İstanbul Boğazı'nın sınırları kuzeyde Anadolu Feneri ve Rumeli Feneri'ni birleştiren hat ile Güneyde Ahırkapı Feneri'ni Kadıköy İnciburnu Feneri'ne birleştiren hat olarak kabul edilmektedir. Dünya üzerinde deniz taşımacılığının yapılabildiği en dar su yolu olma özelliğine sahip olan Boğaz yaklaşık 30 km uzunluğundadır. Boğaz'ın en geniş yerleri olan kuzey ve güney sınırları sırasıyla 3600 m ve 3220 m genişlikte iken en dar yeri 698 m genişliğindeki Anadolu Hisarı ile Rumeli Hisarı arasındaki kesittir. Boğaz'ın derinliği ana kanal boyunca 30 m ile 110 m arasında değişmektedir. En derin yeri Kandilli açıklarındadır.

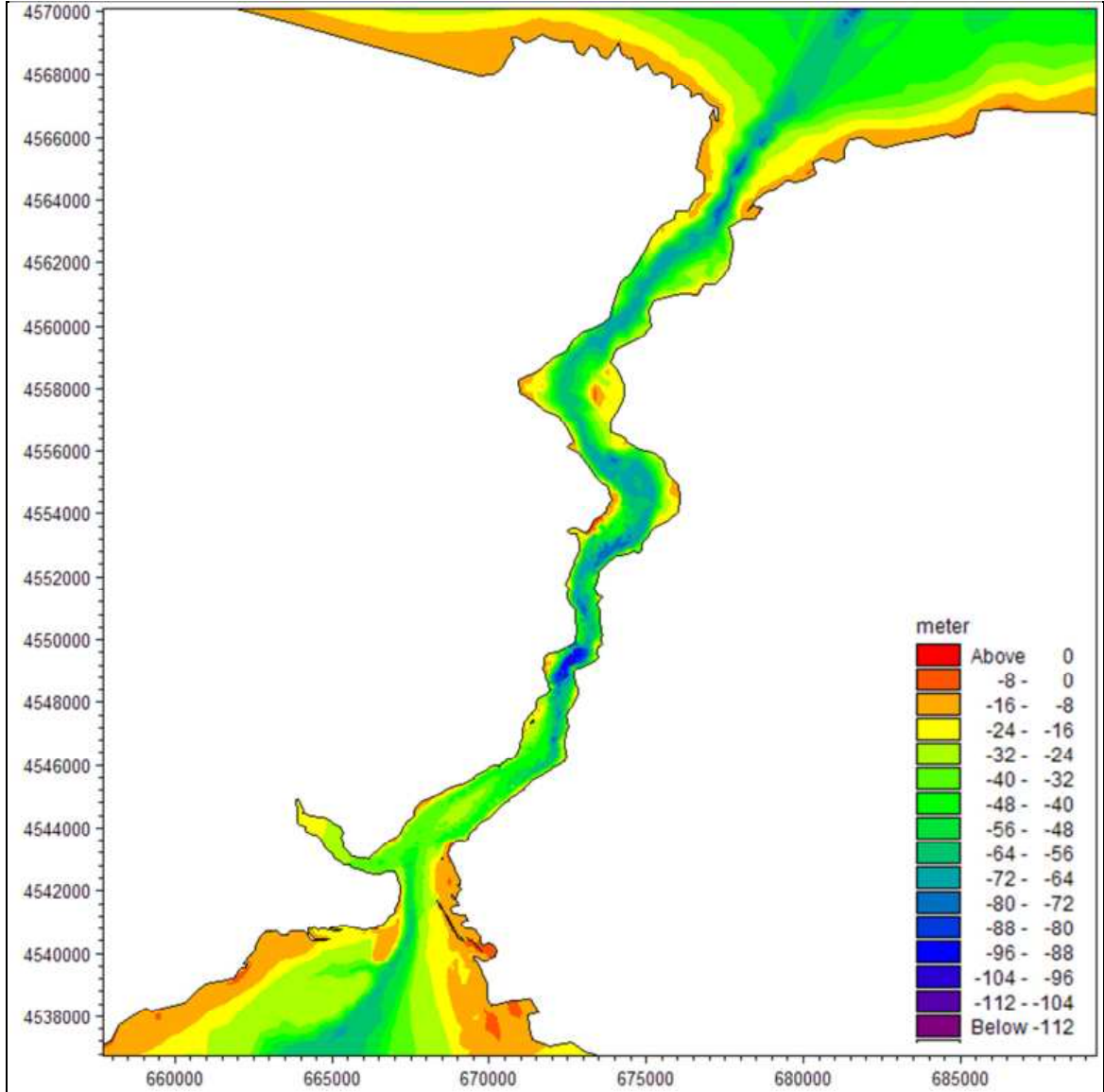


Şekil 2.1 İstanbul Boğazı

Boğaz'da ortalama derinlik 60 m'dir.

2.1. İstanbul Boğazı'nın Topoğrafyası

İstanbul Boğazı kıyıları oldukça girintili, çıkıntılı bir topoğrafyaya sahiptir. 12 civarında keskin kıvrıma sahip olan kıyıların kıvrılma açıları Kandili açıklarında 45° , Yeniköy açıklarında ise 80° 'yi bulmaktadır. Bu kıvrımlı yapı nedeniyle kıyıların uzunluğu Avrupa yakasında 55 km, Asya yakasında ise 35 km'yi bulmaktadır. Bu çalışmada İstanbul Boğazı'nda SHODB tarafından yapılan en güncel ölçümlere dayanan ve Şekil 2.2'de gösterilen batimetri kullanılmıştır.



Şekil 2.2 İstanbul Boğazı batimetrisi.

İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi ile birleştiği kesitlerde iki adet eşik bulunmaktadır. Eşikler Boğaz'daki akım karakteristiklerini etkilemektedir. Eşiklerden biri Marmara Denizi'nin kuzeyinde hemen Boğaz girişinde minimum ve maksimum 28-34 m.

derinlikleri arasında bulunmakta olup, her iki yanında birer 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 gittikçe 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., 1998).

Bu eşiklerden başka İstanbul Boğazı boyunca çeşitli adalar ve sığılıklar da mevcuttur. İstanbul Boğazı'nın güneyinde, Salacak Mevkii'nin 250 m kadar açığında Kızkulesi adası bulunmaktadır. Adanın etrafı kaya ve bankla çevrilidir, bank adanın doğusundaki sahile bir sığılık ile bağlanmaktadır. Kuzeye doğru gidildikçe Kuruçeşme açıklarında Kuruçeşme Bankları ve bunların üzerinde Kuruçeşme Adası bulunmaktadır. Bankların üzerindeki su derinliği 10m'den azdır, uzunluğu 400 m, genişliği ise 120 m'dir. Diğer bir ada, Bebek Koyu'nun merkezinde bulunan ve üzerinde Bebek Feneri'nin bulunduğu adadır. Bebek Bankı'nın ortalama uzunluğu 450 m, genişliği ise 120 m'dir. Bankın üzerindeki su derinliği 10 m ile 2.7 m arasında değişir. Adanın kıyıdan olan mesafesi 165 m'dir. Rumelikavağı açıklarında, yaklaşık 180 m uzunluğu ve 120 m genişliği olan Dikilikaya Bankları'nın üzerinde Dikilikaya adası bulunmaktadır. Boğaz'da Kuruçeşme, Dimi, Bebek ve Dikilikaya Banklarından başka, üzerlerinde ada veya adacık şeklinde yapıların bulunması sebebiyle "adalar" başlığı altında yer verilen ve özellikle büyük gemiler için tehlike oluşturan başka banklar da bulunmaktadır. Sarayburnu Banklarının, üzerindeki su derinliği 1-10 m arasında değişmektedir. Ortaköy Bankı, Ortaköy Burnu'nun 80 m açığına kadar uzanmaktadır. Yeniköy Bankı, diğer adıyla Koybaşı Sığılığı, İstinye Burnu ile Yeniköy Burnu boyunca uzanmaktadır. Yeniköy Burnu'ndan sonra kuzeybatıya doğru 350 m kadar devam etmektedir. Kıyıdan uzaklığı 100-250 m arasında değişmektedir. Büyükliman Bankı, Karataş Burnu'ndan Garipçe Burnu'na doğru yay gibi kıvrılarak uzanmaktadır. Kıyıdan 250 m mesafede bankın üstündeki su derinliği 3-5 m arasında değişmektedir.

Anadolu yakası kıyılarında güneyden kuzeye doğru ilk bank, Kızkulesi Bankı'dır. Daha yukarıda Göksu ya da Anadoluhisarı Bankı bulunmaktadır. Macar Bankı, Macar Burnu'nun kuzeydoğusuna doğru 400 m mesafede, 270 m uzunluk ve 120 m genişlikte, üzerindeki su derinliği yaklaşık 3.7-1.5 m olan bir banktır. Bunların yanı sıra, Poyrazköy'ün 700 m açığına kadar uzanan Poyraz Bankı, İncirköy'ün 480 m açığına kadar uzanan İncirköy Bankı,

Paşabahçe'nin 190 m açığına kadar uzanan Paşabahçe Bankı, Baltalimanı Deresi'nin yaklaşık 140 m açığına kadar uzanan Baltalimanı Bankı ve Mezar Burnu'nun yaklaşık 120 m açığına kadar uzanan Sarıyer Bankı bulunmaktadır.

2.2. İstanbul Boğazı'nda Meteorolojik Koşullar

İstanbul Boğazı'nda Akdeniz iklimi hâkimdir. Yazları nispeten kısa süreli olmak üzere sıcak ve kuraktır. Kışlar ılıman ve soğuktur. Hava sirkülasyonu bakımından oldukça hareketlidir ve hâkim yön kuzeydoğu-güneybatı doğrultusundadır. Boğaz eksenini boyunca oldukça büyük sirkülasyon söz konusudur. İstanbul Boğazı'nda Eylül ayından itibaren fırtınalar görülmeye başlamaktadır, Ocak ayında fırtınalar yoğun olarak görülmektedir. Genellikle Mart ayında yoğun sis oluşabilmektedir. İstanbul Boğazı'ndaki iklimsel koşullar ve yağış Boğaz'daki hidrodinamik yapıyı önemli boyutta etkilemektedir.

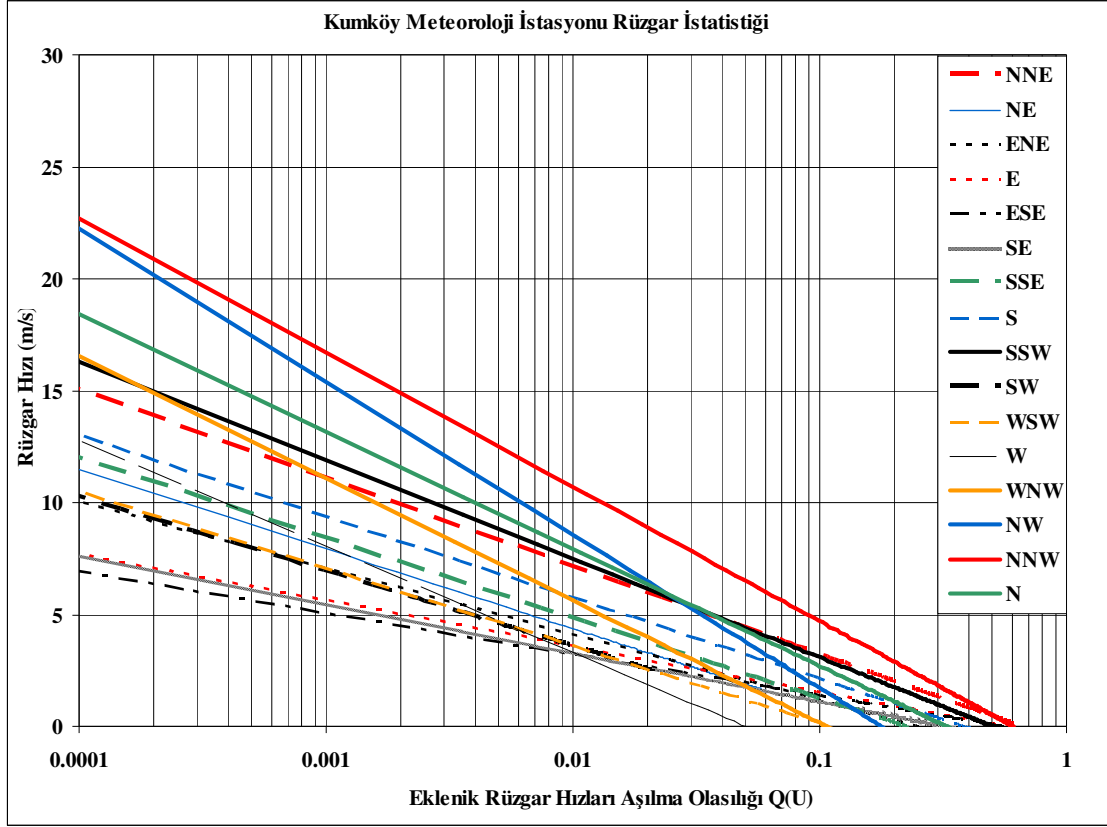
İstanbul'un hâkim rüzgârı kuzeydoğu yönünden esen poyrazdır. Uzun yıllar ortalama rüzgâr hızı 3.2 m/s'dir. Rüzgâr hızı Karadeniz kıyılarından güneye inildikçe azalmaktadır. İstanbul'da ölçülen en şiddetli rüzgâr 42.4 m/s olarak Şile Meteoroloji istasyonunda kaydedilmiştir. Yazları genel olarak poyraz, kışları karayel, yıldız ve lodos esmektedir. Kible ve lodos ile birlikte genellikle yağışlar görülmektedir. Lodos Marmara Denizi'nde karayel ve yıldız rüzgârları ise Karadeniz'de fırtınalara neden olmaktadır.

Yeşilköy ve Sarıyer meteoroloji istasyonlarından alınan veriler ile yapılan uzun dönem rüzgâr istatistiği sonuçları hâkim rüzgâr yönünün Boğaz'ın güney ucunda GGB, kuzey ucunda ise KKD olduğunu göstermektedir (Yüksel vd., 2006).

Altıok (2001) Kandilli Meteoroloji İstasyonu'na ait 1996-2000 yılları arasındaki verileri değerlendirmiştir. Buna göre, kuzeyli rüzgârların esme sıklığı %63, güneyli rüzgârların %27, doğulu rüzgârların %8 ve batılı rüzgârların esme sıklığı ise %2'dir. Kuzeyli rüzgârların esme sıklığı Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında %100'e ulaşmaktadır. Güneyli rüzgârlar ise daha çok sonbahar ve kış aylarında etkili olmaktadır.

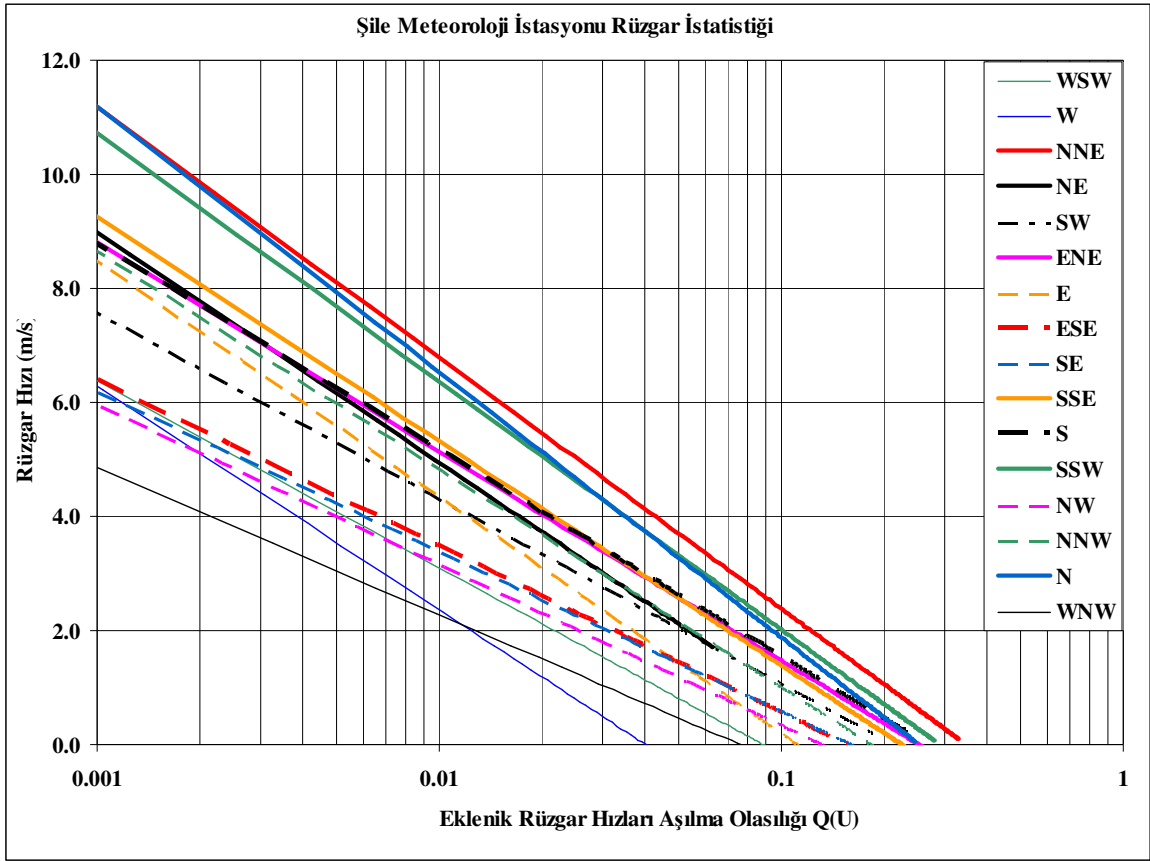
Yüksel vd. (2006) İstanbul Büyükşehir Belediyesi için İstanbul Mastır Plan çalışmaları kapsamında hazırladıkları raporda İstanbul'un farklı bölgelerindeki hâkim rüzgar karakteristiklerini belirlemişlerdir. Bu çalışma kapsamında Özhan ve Abdalla (1999) tarafından hazırlanan Türkiye Kıyıları için Rüzgâr ve Derin Deniz Dalga Atlası'ndan faydalanmış ve ayrıca İstanbul Kıyıları'ndaki rüzgâr istasyonlarında toplanan verileri de analiz etmişlerdir. Kumköy Meteoroloji İstasyonu'nun bulunduğu Kuzey-Doğu kıyıları için ölçümlere dayanarak elde edilen Eklenik Rüzgâr Hızları Aşılma Grafiği Şekil 2.3'te

gösterilmiştir. Buna göre bölgede rüzgârlar en fazla %15.4 KD, %9.8 KKD ve %7.6 DKD doğrultularından esmektedir. Bu sonuçlar Özhan ve Abdalla (1999)'da verilen rüzgâr gülü ile de uyumlu bulunmuştur.



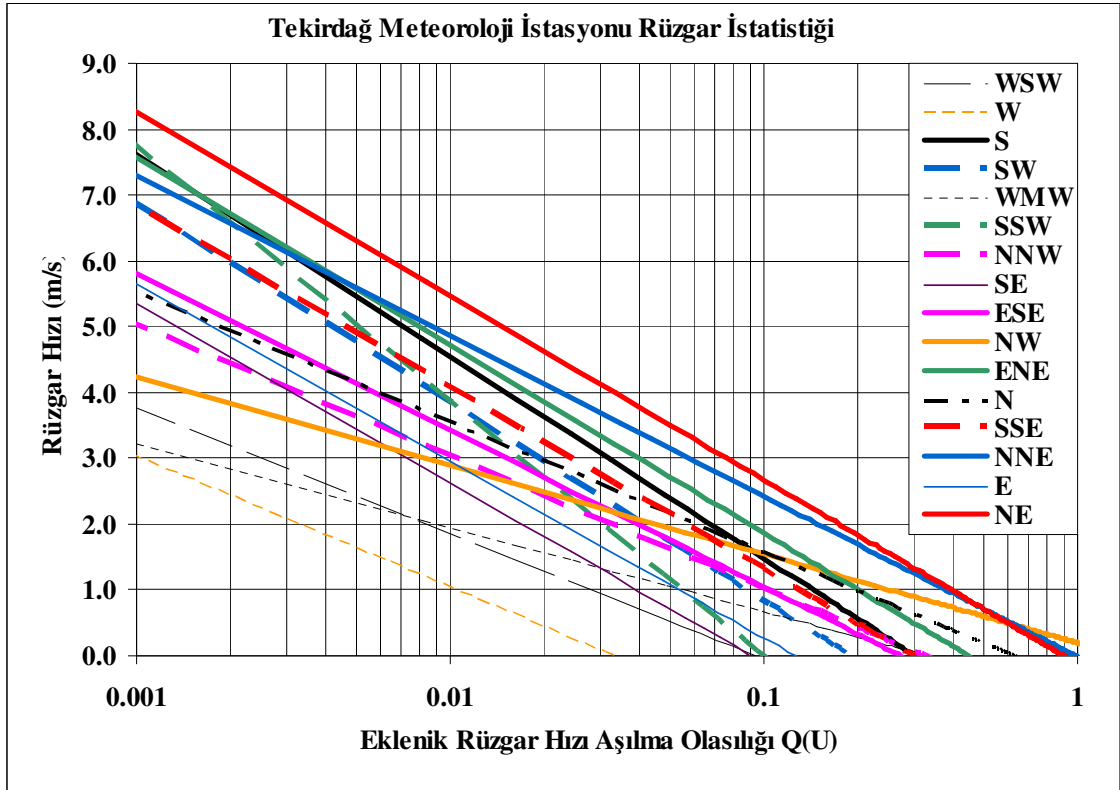
Şekil 2.3 Kumköy Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).

Araştırmacılar İstanbul'un Kuzey-Doğu kıyıları için Şile Meteoroloji İstasyonu'nda toplanan uzun dönemli verileri kullanmışlardır. Yine bu istasyona ait uzun dönemli rüzgâr hızlarının eklenik aşılma olasılıkları Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Rüzgârların en fazla %13.6 KD, %7.9 KKD ve %7.6 DDK doğrultularında olduğu görülmektedir.



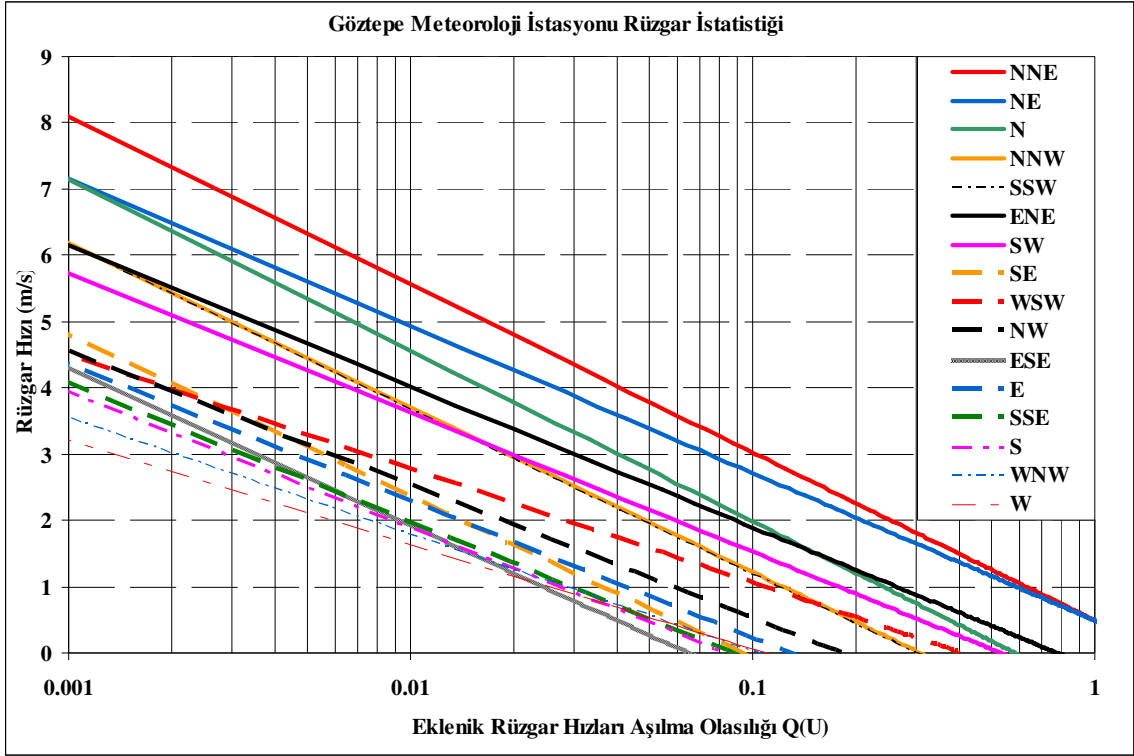
Şekil 2.4 Şile Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).

İstanbul'un Güney-Batı kıyıları için ise Tekirdağ Meteoroloji İstasyonu verileri kullanılmıştır. Elde edilen uzun dönemli rüzgâr hızlarının eklenik aşılma olasılıkları Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Bu bölgede rüzgârlar en fazla GB (%9.6), BBG (%5.5) ve GGB (%5.5) yönlerinden esmektedir.



Şekil 2.5 Tekirdağ Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).

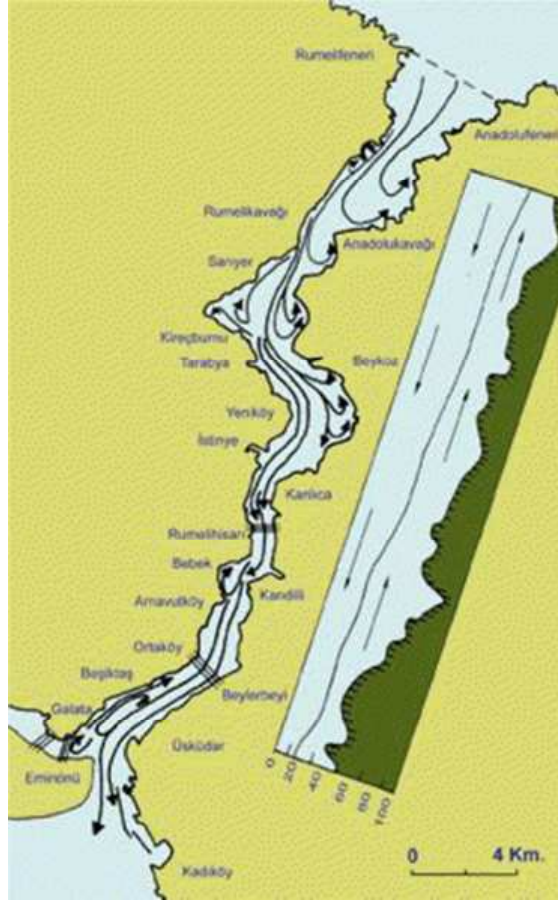
İstanbul'un güney doğu kıyıları için Göztepe Meteoroloji İstasyonu verileri değerlendirilmiştir. Elde edilen uzun dönemli rüzgâr hızlarının eklenik aşılma olasılıkları Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu bölgede rüzgârlar en fazla BGB (%7.0), B (%5.6) ve GB (%6.5) doğrultularında oluşmaktadır.



Şekil 2.6 Göztepe Meteoroloji İstasyonu uzun dönemli rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılıkları, Yüksel vd. (2006).

2.3. İstanbul Boğazı'nın Hidrolojisi ve Hidrodinamiği

İstanbul Boğazı iki tabakalı bir hidrodinamik akım yapısına sahiptir. Karadeniz'in az tuzlu (~18psu) suları üst akıntı ile Marmara Denizi'ne ve buradan Çanakkale Boğazı yoluyla Ege Denizi'ne ulaşırken, Marmara'nın daha tuzlu (~38psu) suları alt akıntı ile Karadeniz'e taşınmaktadır. Yoğunluk farkından doğan yatay basınç gradyanı (baroklinik kuvvet), az yoğunluklu üst tabaka akımının Marmara Denizi'ne ve daha yoğun olan alt tabaka akımının ise Karadeniz'e doğru hareket etmesine neden olmaktadır. Yine Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkının oluşturduğu yatay basınç gradyanı (barotropik kuvvet) su akışının Karadeniz'den Marmara'ya doğru yönelmesine neden olmaktadır. Barotropik kuvvet derinlikle sabittir ve sadece yerel yüzey eğimine bağlıdır. Alt ve üst tabakaları birbirinden ayıran arakesit derinliği meteorolojik ve hidrolojik etkilerle değişkenlik göstermektedir. İstanbul Boğazı'nın karakteristik akım yapısı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 İstanbul Boğazı akıntıları.

Artüz (2005) Türk Boğazlar Sistemi'ne dair oşinografik çalışmaları derlediği kronolojik çalışmasında Boğaz'daki iki tabakalı akıntı yapısına dair ilk yazılı kaynağın 1681 yılında Kont Marsilli'nin İsveç Kraliçesi Christina'ya yazdığı mektuplar olduğunu belirtmektedir. Kont Marsilli yüzeydeki akıntının tersi yönde bir alt akıntının fiziksel bir zorunluluk olduğu tezini öne sürmüş ve Marmara Denizi'ndeki su seviyesi değişimleri ile Boğaz'ın yüzey akıntıları üzerinde gözlemler yapmıştır. Üst tabaka akıntısı ile bazı koy ve körfezlerdeki çevrileri (eddyleri) gösteren akıntı haritaları hazırlamıştır. Daha sonra 1870 yılında Kaptan Spratt Boğaz'daki tuzluluğu da ölçerek boğazlarda böylesi bir alt akıntının olmasının mümkün olmayacağı sonucuna varmıştır. Boğaz'ın alt tabakasındaki çok tuzlu suyun ise ancak şiddetli rüzgârların etkisi ile sonbahar ve kış aylarında Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru taşınan bir su kütlesi olduğunu bildirmiştir. Daha sonra 1872 yılında İngiliz denizci W.J.L. Wharton Boğaz'da 3 farklı kesitte yoğunluk ve sıcaklık ölçümleri yaparak alt tabaka akıntısının kesinlikle var olduğunu ve bu akıntının hızı ve şiddetinin de üst tabaka akıntısına bağlı olarak değiştiğini bildirmiş ve ara tabakanın Boğaz'ın her iki girişindeki derinliğini tanımlamıştır. 1881 yılında benzer şekilde Boğaz'da binlerce ölçüm

yapan Rus Ordusu'ndan Makaroff da benzer sonuçlar elde etmiştir. O günlerden bugüne Boğaz'ın karmaşık hidrodinamik yapısı, bu yapı üzerinde etkili rüzgâr sistemleri, Boğaz'daki akıntı sistemleri ve bunların mevsimsel değişimleri farklı araştırmacılar tarafından oldukça yoğun bir şekilde çalışılmıştır: Möller (1928), Ulliyot ve Ilgaz (1946), Mengöl (1950), Pektaş (1956), Bogdanova (1961, 1965), Filippov (1965), Gunnerson ve Özturgut (1974), Bayazıt ve Sümer (1982), Büyüközden vd. (1983), Tolmazin (1985), Yüce (1988, 1990, 1996), Yüce ve Türker (1991), Ünlüata vd. (1990), Latif vd. (1991), Oğuz vd. (1990, 1991a, 1991b, 1992), Oğuz ve Rozman (1991), Özsoy vd. (1992, 1993), Akyarlı ve Arısoy (1994), Beşiktepe vd. (1994), Sur vd. (1994), Arısoy (1995), Di Iorio vd. (1995), Di Iorio ve Yüce (1997).

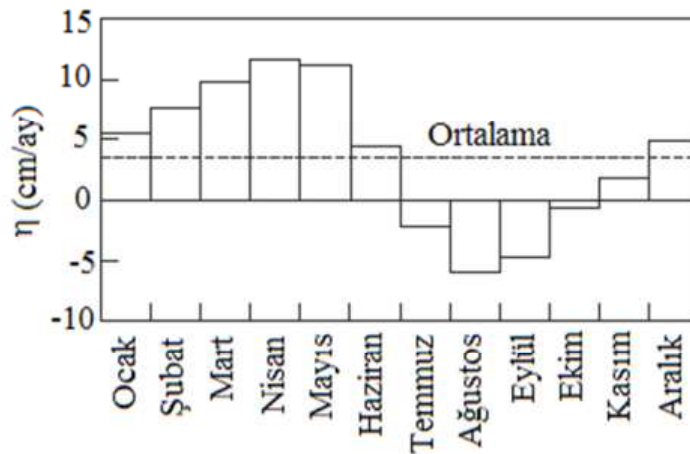
Ulliyot ve Pektaş (1952) yılında 1944-1952 yılları arasında topladıkları sıcaklık ve tuzluluk verilerini değerlendirmişlerdir. Boğazlarda özellikle kış koşullarının çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacıların gözlemleri Marmara Denizi'nden boşalan suyun miktarında yaz ve kış ayları arasında önemli farklılık olduğunu göstermektedir. Daha sonra Bayazıt ve Sümer (1982) Boğaz'daki iki tabakalı akım yapısını daha iyi anlamak için Boğaz'ın Karadeniz girişi yakınında 4 farklı kesitte ölçümler yapmış ve Marmara Denizi'nden kaynaklanan alt tabaka akımının tüm yıl boyunca Karadeniz'e ulaşmadığını bildirmişlerdir. Özellikle Karadeniz'e tatlı su girişinin arttığı ve bunun da Boğaz'a giren su debisini arttırdığı bahar aylarında Boğaz'ın alt tabaka akımının Karadeniz'e ulaşmadığını rapor etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar bu çalışmada hem ara tabaka hem de taban sürtünmesini dikkate alan iki tabakalı bir akım modeli geliştirmiş ve model sonuçlarının ölçümlerle iyi bir uyum sergilediğini bildirmişlerdir.

IRTC tarafından 1987 yılında hazırlanan 203 nolu Boğaz Tüp Geçışı için Fizibilite Çalışmaları ve Ön Tasarımlar isimli rapor kapsamında yapılan hidrografik incelemelerde boğazın iki tabakalı akım yapısı ile ilgili detaylı çalışmalar da yapılmıştır. İki tabakalı akım sistemine ait hidrolik ölçümler 1985 yılı boyunca ve 1986 yılı başlarında toplanmıştır. Gözlemler iki tabakalı akım yapısını doğrulamaktadır. Bu çalışma kapsamında alt tabakaya yerleştirilen akıntıölçer 1 m/s'nin üzerinde bir akıntı hızı kaydetmemiştir. Ölçümün yapıldığı 5 gün süreyle üst tabakada en fazla 1.66 m/s'lik bir akıntı hızı ölçülmüştür. 10/06/1985-20/07/1985 tarihleri arasında 28.5 m derinlikteki ölçümlerde noktasal hız değerleri ortalama 0.65 m/s olmak üzere 0.38- 0.94 m/s arasında kaydedilmiştir.

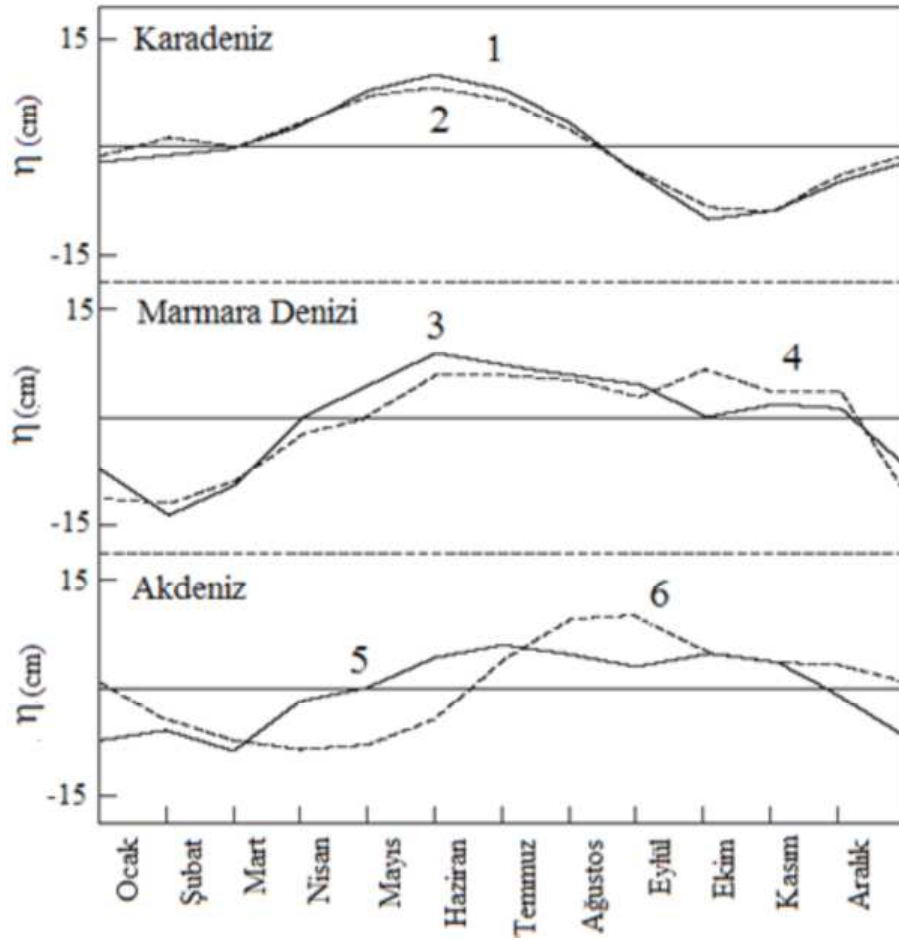
İstanbul Boğazı'ndaki akım yapısını oluşturan belli başlı kuvvetler Karadeniz'e giren net tatlı su kaynakları, barometrik basınç farklılıkları ve rüzgâr kabarmasıdır. Boğaz bu etkilere doğrusal olmayan güçlü tepkiler vermektedir. Söz konusu etkilerdeki doğrusal olmayan

değişimler ve belirgin çeşitliliklere bağlı olarak, Boğaz'daki akım yapısı da mevsimsel ve yıllık ölçeklerde oldukça değişken ve doğrusal olmayan tepkiler vermektedir.

Tolmazin (1987) Karadeniz'in oşinografik rejiminin öncelikle tatlı su fazlalığı tarafından kontrol edildiğine işaret etmektedir. Akarsuların taşıdığı tatlı su ve yağış, buharlaşmadan kaynaklı tatlı su kaybından çok daha fazladır. Ancak Karadeniz'e giren tatlı su kaynakları üzerinde inşa edilen çeşitli yapılar giren net tatlı su değerlerini azaltmıştır. Tolmazin (1987) Karadeniz'e su girişinde meydana gelen bu azalmanın denizin yüzey eğimini, dolayısıyla da Boğaz'da üst akıntıya neden olan zorlayıcı kuvveti azaltacağını belirtmiştir. Simonov ve Altman (1991) 1923-1995 arasındaki verileri değerlendirerek yaptıkları çalışma sonucunda Karadeniz'e giren net tatlı su debilerindeki mevsimsel değişimin neden olduğu su seviyesi değişimlerini Şekil 2.8'deki gibi vermişlerdir. Görüldüğü gibi mevsimsel değişimler yıllık ortalama değer in üç katı kadar olabilmektedir. Şekil 2.9'da Karadeniz'de (Simonov ve Altman, 1991), Boğaz'ın kuzeyinde, Marmara Denizi'nin kuzeyi ve güneyinde, Ege Denizi'nin kuzeydoğusunda (Alpar ve Yüce, 1998) ve Akdeniz'in doğusunda (Ovchinnikov vd, 1976) deniz seviyelerindeki mevsimsel değişimler gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Karadeniz'in en yüksek ve en düşük su seviyeleri, Nisan-Mayıs ve Ağustos-Eylül aylarındaki sırasıyla en yüksek ve en düşük debilerde tatlı su girişinin olmasını takiben (Şekil 2.8) sırasıyla Nisan-Mayıs ve Eylül-Ekim aylarında meydana gelmektedir. Doğu Akdeniz'de ise deniz seviyesi en yüksek ve en düşük değerlerine sırasıyla Ağustos ve Nisan aylarında ulaşmaktadır. Karadeniz'den Akdeniz'e uzanan bir çizgi boyunca deniz seviyesinde meydana gelen mevsimsel değişimler Karadeniz tipinden Doğu Akdeniz tipine doğru bir dönüşüm göstermektedir. Bu değişimler boğazlar boyunca su taşınımını da belirgin bir şekilde etkilemektedir.



Şekil 2.8 Karadeniz'e net tatlı su girişinin mevsimsel değişimi, Simonov ve Altman, (1991). Giren su debisinin deniz seviyesinde meydana getirdiği değişimler gösterilmiştir.



Şekil 2.9 (1) Tüm Karadeniz için mevsimsel su seviyesi değişimleri, Simonov ve Altman, (1991), (2) Boğaz'ın kuzeyi (3) Marmara Denizi'nin kuzeyi (4) Marmara Denizi'nin güneyi (5) Ege Denizi'nin kuzeyi, Alpar ve Yüce, (1998), (6) Akdeniz'in doğusu, Ovchinnikov vd., (1976). η : Su seviyesi değişimi.

Karadeniz $\sim 300 \text{ km}^3/\text{yıl}$ yağış, $\sim 350 \text{ km}^3/\text{yıl}$ yüzeysel akış ve $\sim 350 \text{ km}^3/\text{yıl}$ buharlaşma hacimlerine sahip kapalı bir havzadır. Yani Karadeniz'den Boğaz'a $\sim 300 \text{ km}^3/\text{yıl}$ hacminde bir su akışı söz konusudur (Ünlüata vd., 1990 ve Özsoy vd., 1996). Karadeniz'in önemli tatlı su kaynakları kuzey batısındaki Tuna, Dinyeper ve Dinyester Nehirleri'dir. Bu nehirlerin toplam debilerinin neredeyse yarısı Tuna Nehri tarafından sağlanmaktadır (Özsoy vd., 1996). Tuna Nehri'nin bu büyük debisi ile Karadeniz'in su seviyesi arasında güçlü bir korelasyon söz konusudur (Özsoy vd., 1996). Dinyester ve Dinyeper Nehirleri ise Tuna Nehri'nden gelenin üçte biri oranında bir tatlı su girişi sağlamaktadır. Geri kalan tüm diğer akarsular ise tüm tatlı su girişinin ancak 1/5'ini sağlayabilmektedir (Sur vd., 1994). Sur vd. (1994), akarsu deşarjlarının Boğaz üzerindeki etkilerini aşağıdaki gibi sıralamışlardır:

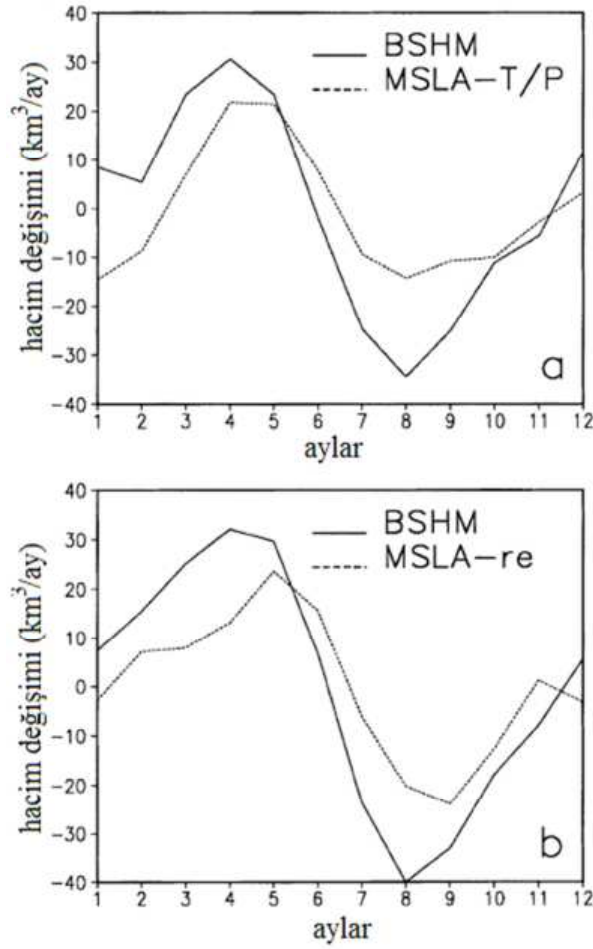
Tuna Nehri'nin yıllık ortalama deşarjı $4000\text{-}9000 \text{ m}^3/\text{s}$. arasında salınımlar göstermektedir.

Tuna Nehri ile Karadeniz'e giren yıllık debideki değişimler deniz seviyesinin değişmesine de neden olmaktadır. Net tatlı su akışı uzun dönemde Boğaz'ın su seviyesi üzerinde de etkili olmaktadır.

Tuna Nehri'nin mansabında tatlı su girişine bağlı olarak tuzlulukta önemli bir düşüş kaydedilmektedir. Tuna Nehri'nin suyu bazı istisnalar dışında havza yakınlarında çevrintili bir şekilde güneye doğru akmaktadır.

Karadeniz'in Anadolu kıyılarındaki tuzluluk değerleri kuzeybatı kıyılarındaki tatlı suyun güneybatı kıyılarına kadar ulaştığını göstermiştir.

Peneva vd. (2001) 1993-1997 yılları arasında TOPEX/Poseidon altimetre cihazı ile ölçümler yapmış ve bu ölçüm sonuçlarının mevcut yağış, buharlaşma, nehir girişleri vb veriler ile korelasyonunu araştırmışlardır. Araştırmacılar 1923-1997 yılları arasındaki hidro-meteorolojik veriler ve uzun dönem gelgit ölçümlerinden yola çıkarak deniz baseninin hacmindeki değişimi ve İstanbul Boğazı boyunca taşınımı belirlemişlerdir. İstanbul Boğazı'ndaki taşınımın mevsimsel genliğinin, tatlı su akısının 2/3'ü kadar olduğunu (Şekil 2.10), yıllık ölçeğe bakıldığında ise bu oranın 0.94 olduğunu bildirmişlerdir. Şekil 2.10'dan de açıkça görüldüğü gibi iklimsel değişimlerle uzun süreli verilerden elde edilen sonuçlar uygunluk göstermektedir. Yine şekle göre barotropik taşınım en yüksek değerine Mart-Nisan (T/P verilerine göre Ocak) ayında ve en düşük değerine de Ağustos ayında ulaşmaktadır (Peneva vd., 2001).

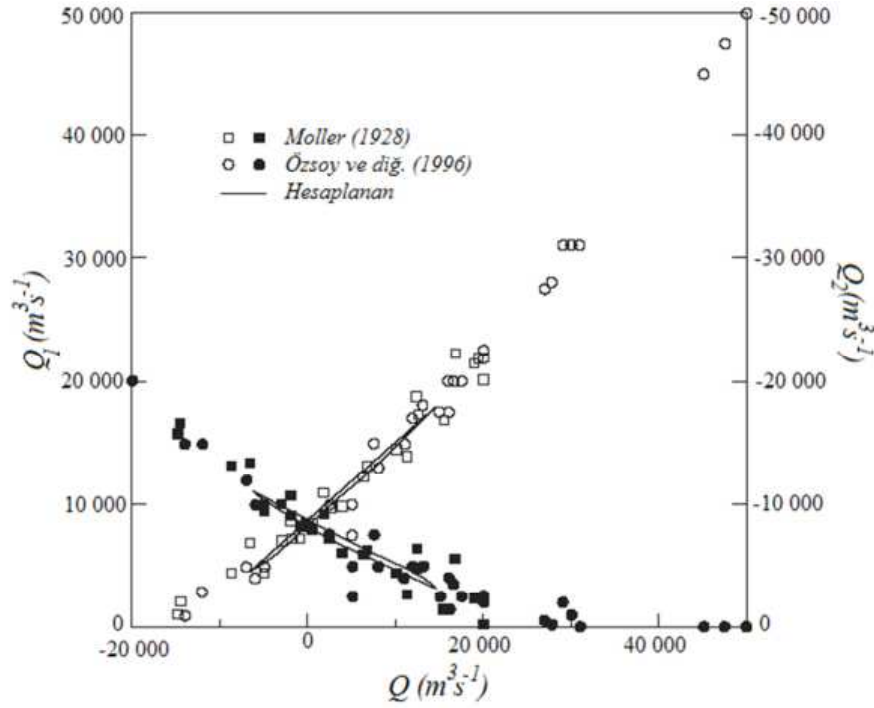


Şekil 2.10 (a) 1993-1997 dönemine ait T/P MSLA (Mean Sea Level Anomaly) (nokta nokta çizgi) ve BSHM (düz çizgi) ölçümlerinden elde edilmiş hacimsel değişimlerin aylık ortalama değerleri; (b) 1923-1997 dönemine ait gelgit ölçümleri ve BSHM (Black Sea Hydro-Meteorological) verilerinden elde edilmiş ortalama hacim değişimleri; (c) (a) ve (b)'deki eğrilerin farkı, Peneva vd., (2001).

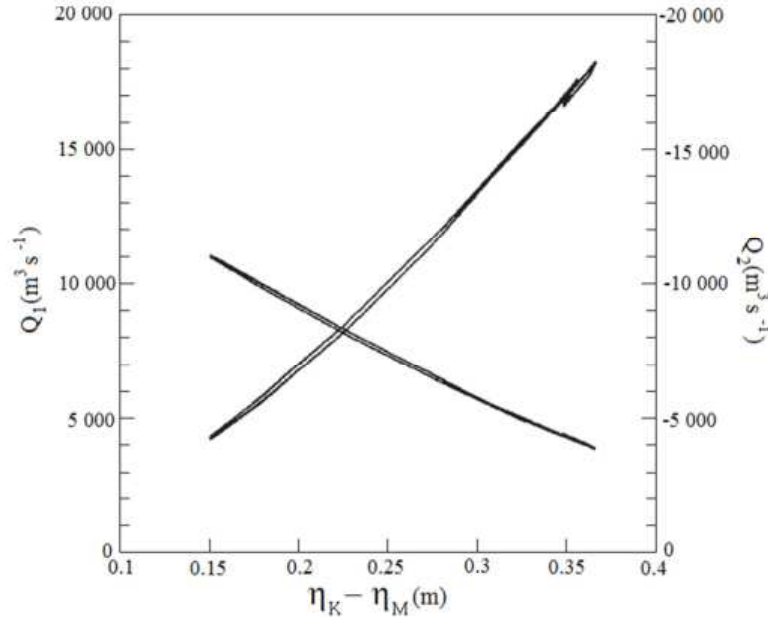
Maderich ve Konstantinov (2002) Karadeniz-İstanbul Boğazı sisteminin mevsimsel davranışını araştırmışlardır. Çalışma kapsamında Karadeniz için kurdukları modelde mevsimsel rüzgârlar, ısı akısı, tatlı su girişi ve Boğaz'ın alt akıntısını etkili parametreler olarak dikkate almışlardır. Yine Boğaz'ın iki tabakalı akım yapısını benzeştiren yarı kararlı bir hidrolik model kullanmış, arakesit ve taban sürtünmelerini de dikkate almışlardır. Bu çalışmada model, net barotropik taşınım yerine Boğaz boyunca su seviyesi değişimini vermektedir. Elde edilen benzetim sonuçları modelin soğuk ara tabaka oluşumu da dâhil olmak üzere Karadeniz'deki düşey mevsimsel yapılanmayı benzeştirebildiğini göstermiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bir dizi deneylerden elde edilen sonuçlara göre, Karadeniz'deki su seviyesi değişimi, tatlı su girişini 2 aylık bir gecikme ile takip etmektedir. Yine bu çalışma kapsamında yapılan benzetimlerden Boğaz'daki su seviyesi değişiminin

Marmara Denizi'ndeki mevsimsel su seviyesi değişimlerine de bağlı olduğu görülmüştür (Maderich ve Konstantinov, 2002).

Maderich ve Konstantinov (2002) yaptıkları çalışmada Karadeniz-İstanbul Boğazı sistemi için bir model geliştirmişler ve Boğaz'ın alt ve üst akım debileri (Q_1 ve Q_2) ile net barometrik debinin değişimini Şekil 2.11'de görüldüğü gibi literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalı olarak vermişlerdir. Yine model sonuçlarını Boğaz'ın alt ve üst akım debilerine (Q_1 ve Q_2) Karadeniz-Marmara Denizi arasında oluşacak su seviyesi farklarını da Şekil 2.11'de görüldüğü gibi ifade etmişlerdir. Hem Şekil 2.11 hem de Şekil 2.12'den görüldüğü gibi, Boğaz'ın üst ve alt tabakalarının sahip olduğu debiler ile Boğaz'ın her iki ucu arasındaki su seviyesi farkı arasında lineere yakın bir ilişki mevcuttur (Maderich ve Konstantinov, 2002).



Şekil 2.11 Boğaz'ın üst tabaka akımı debisi (Q_1) (içi boş semboller), Boğaz'ın alt tabaka akımı debisine (Q_2) (içi dolu semboller) karşılık net taşınım Q .



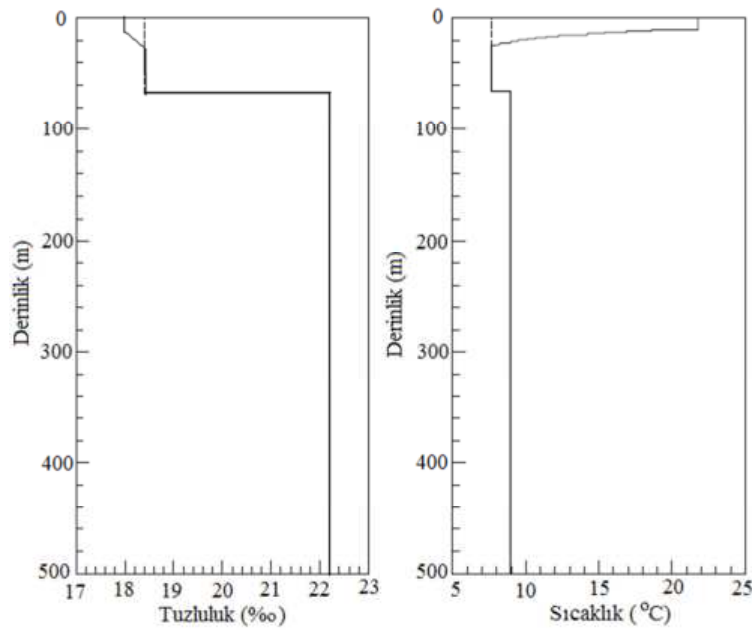
Şekil 2.12 Maderich ve Konstantinov (2002) tarafından geliştirilen model sonuçlarına göre, Boğaz'ın üst tabaka debisi Q_1 ve alt tabaka debisine Q_2 karşılık Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı.

İstanbul Boğazı'nda su seviyesi zamana bağlı olarak salınım göstermektedir. Boğaz'ın su seviyesinde meydana gelen düşük frekanslı değişimler 5-30 günlük salınımlar yapmaktadır (Yüce ve Alpar, 1994). Uzun süreli salınımlar Karadeniz'e tatlı su girişiyle, 5 günlük salınımlar ise orta ölçekli meteorolojik koşullarla ilişkilendirilmektedir. Boğaz'daki akım deniz seviyesi değişimlerine tedrici yanıtlar verirken, rüzgâr yönündeki değişimlere ani yanıtlar vermekte ve su kütlesi bloke olmaktadır (Beşiktepe vd., 1994). Karadeniz'den gelen net barotropik akımın artması durumunda veya devamlı meydana gelen kuzey rüzgârlarının etkisi ile Boğaz'ın alt tabakası bloke edilmektedir. Benzer şekilde güneyli rüzgârlar üst tabakanın bloke edilmesine, Marmara Denizi sularının Boğaz'a doğru ve hatta daha da ileri itilmesine neden olmaktadır. Böylece bloke edilen üst yüzeyin altındaki akış üç tabakalı bir akımın oluşmasına neden olmaktadır. Üst tabakada bloke edilen bu akım her iki uçtaki su seviyesi farkının azalmasıyla dengelenmektedir. Kuzeydoğulu rüzgârlar Boğaz'ın iki ucu arasındaki su seviyesi farkını arttırmaktadır (Andersen vd., 1997).

Karadeniz yüzey sularının tuzluluğu 17.5 ile 18.5 psu arasında değerler alırken Batı Karadeniz'de yüzey tuzluluğu nehir girişlerinin etkisiyle 16-17 psu değerlerine kadar düşmektedir (Sur vd., 1994). Dipte gözlenen yüksek sıcaklık ve tuzluluk Akdeniz suyunun göstergesidir. Akdeniz suyu 95-100 m derinlikte, yaklaşık $T=8.36^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $S=19.73$ psu tuzluluk değerlerinde kendini göstermektedir (Oğuz ve Rozman, 1991, Özsoy vd., 1991,

Özsoy vd., 1993).

Maderich ve Konstantinov (2002) Karadeniz için geliştirdikleri bir model ile Şubat ve Temmuz aylarındaki tuzluluk ve sıcaklık profillerini Şekil 2.13'te görüldüğü gibi vermişlerdir. Şekilden de görüldüğü gibi Karadeniz'in üst tabaka tuzluluk değeri 18 ppt'dir. Bu değer kademeli olarak artarak, Boğaz'ın 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. Bu azalmanın nedeni düşey yöndeki karışımdır. İstanbul Boğazı'nda akımın güneydeki daralan kesitten geçerken hızlanması nedeniyle alt tabakadan üst tabakaya girişimin artmasıyla üst tabakanın tuzluluğu artarken, Boğaz'ın kuzey ucunda alt tabakanın tuzluluğu azalmaktadır, (Özsoy vd., 2002). Bunun başlıca nedenleri Boğaz boyunca meydana gelen tedrici girişim ve daha sonra akımın Karadeniz'e ulaştığı yerdeki geniş ve düz kıta sahanlığında su hacminin artmasıdır, (Özsoy vd., 2001). Yine bu bölgede su seviyesi farkı 40 cm'ye ulaştığında Akdeniz suyunun bloke olduğu gözlemlenmiştir (Altıok, 2001).



Şekil 2.13 Model sonuçlarına göre Karadeniz'de Şubat ve Temmuz aylarında beklenen tuzluluk ve sıcaklık profilleri (_ _ : Şubat, ____: Temmuz), Maderich ve Konstantinov, (2002).

Özsoy vd, (1996), Ünlüata vd. (1990) tarafından yapılan uzun dönemli tuzluluk ölçümlerine dayanarak, İstanbul Boğazı boyunca iki tabakalı akıma ait kütle dengesini hesaplamışlardır. Buna göre ortalama üst tabaka debisi $\sim 600 \text{ km}^3/\text{yıl}$, alt tabaka debisi ise $\sim 300 \text{ km}^3/\text{yıl}$ civarındadır. Karadeniz'in kararlı tuz bütçesi, Q_1 ve Q_2 sırasıyla Karadeniz girişindeki üst ve alt tabaka debileri ve S_1 ve S_2 de yine Karadeniz girişindeki sırasıyla üst ve alt tabaka

tuzlulukları olmak üzere, $Q_1/Q_2=S_2/S_1=2$ oranını gerektirmektedir.

İstanbul Boğazı'nın yerel topoğrafik özellikleri de akım üzerinde oldukça etkilidir ve akım yapısını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Her iki uç bölgesindeki eşikler Boğaz'daki akım karakteristiklerini etkilemektedir. Eşiklerden biri Marmara Denizi'nin kuzeyinde hemen Boğaz girişinde minimum ve maksimum 28-34 m derinlikleri arasında bulunmakta olup her iki yanında bir kanal akımı oluşmasına neden olmaktadır. Eşiğin Anadolu tarafında Üsküdar kıyıları boyunca 40 m derinliğindeki kanal, mansabındaki 34 m derinlikteki eşik tarafından bloke edilmektedir. Bu kanal eşiğin ötesinde güneye doğru gittikçe 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., 1998a).

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., 1998a). Yine Özsoy vd. 3-6 Eylül 1998, 4-22 Mart 1999 ve 22 Temmuz-3 Ağustos 1999 tarihlerinde yaptıkları ADCP ve CTD ölçümleri ile Boğaz'da ana kanal ve şevlerindeki akıntı yapısını detaylı bir şekilde belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre yüzey akıntıları Boğazın güneyindeki dar kesimlerde yoğunlaşmakta ve ilk olarak doğu kesimdeki dar kanalı izlemekte, ardından da ana kanalı izleyerek batı kesime geçtikten sonra Marmara Denizi çıkışı yakınlarında bir su jeti oluşturmaktadır. Sığ kesimlerdeki sürekli gözlemlerle akıntıların çok sayıda çevriler (eddyler) ve geri dönüş akımları içerdiği belirlenmiştir. Yüzey akıntılarının şiddetindeki en büyük artış daralma bölgesinde ve Boğaz'ın güneyinde meydana gelmektedir, (Özsoy vd., 2002).

Boğaz'ın kıvrımlı geometrisi, Boğaz akımında rüzgâr yapısının kararsız etkileri, komşu havzalardaki değişiklikler, Boğaz boyunca yoğunluk farklılıkları ve tabakalar arası kütle alışverişinden kaynaklı karmaşık yapısı ikincil (sekonder) akımların ve çevrilerin (eddy) oluşmasına neden olmaktadır. Tabakaların kalınlığı, fiziksel özellikleri ve arakesit düzleminin konumundaki değişimler atmosfer koşullarına bağlı olarak ve Boğaz'a giren akımların etkisiyle değişmektedir. Kuzeyde Karadeniz'in suyu Boğaz'a ağustos ayında 50 m kalınlıkta ve 10-90 cm/s'lik bir akıntı hızı ile girerken, Temmuz ve Eylül ayları boyunca 40 m civarında bir kalınlık ve 5-60 cm/s'lik bir akıntı hızı ile girmektedir. Marmara'nın suyu Karadeniz'e ağustos ayında 50 m'nin altında ve 5-80 cm/s'lik hızla akmakta iken, Temmuz ve Eylül

aylarında 40 m'nin altında ve 5-100 cm/s'lik hızla akmaktadır. Boğaz'ın güney girişinde, Marmara'dan Boğaz'a giren alt tabaka akıntısının kalınlığı temmuz ve Eylülde 20 m'den fazla gerçekleşmektedir. Alt ve üst tabaka hızları bu kısımda 3 ay boyunca (Temmuz, Ağustos, Eylül) 100 cm/s'yi aşmıştır. Ağustosta Marmara'ya ulaşan üst tabaka akıntısının kalınlığı artıp (30 m), hızı 5-150 cm/s arasında değişirken alt tabakanın hızı 110 cm/s'den az olmuştur (Doğan vd., 2001). Boğaz'ın kuzey ve güney girişlerinde ADCP kullanılarak belirlenen debiler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Boğaz'ın kuzey ve güney girişlerindeki debiler, Doğan vd. (2001).

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

2003 yılında Güler vd. tarafından uzun süreli sürekli ölçümler elde edebilmek amacıyla çalışmalara başlanmıştır. Ölçümler ADCP akıntı ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz KG, DB doğrultularında yatay hızları, düşey doğrultudaki hız bileşenlerini ve tabandaki sıcaklığı ölçmüş, bileşke hız vektörünün doğrultusunu da vererek, akıntının yönünü belirlemiştir.

Sürekli ölçümlerden önce, Boğaz'ın güneyindeki dört farklı istasyonda (Dolmabahçe Sarayı, Galatasaray Üniversitesi, Sarayburnu açığı ve Paşalimanı açığı) kısa süreli ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm istasyonlarına ait parametreler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Kısa süreli ölçüm istasyonlarına ait parametreler, Güler vd., (2006).

İstasyonlar			Ölçüm Zamanı (saat)			Derinlik (m)	Tarih
İstasyon	Koordinatlar	Yer	Başlama zamanı	Deniz tabanına kurulma zamanı	Bitiş zamanı		
1	N 41°22'15" E 29°00'48"	Dolmabahçe Sarayı	13:16	13:24	14:50	-24.8	08/05/2003
4	N 41°26'42" E 29°14'08"	Galatasaray Üniversitesi	14:51	15:03	15:18	-42.8	08/05/2003
2	N 41°08'57" E 28°59'32"	Sarayburnu	16:26	16:28	17:13	-25.4	08/05/2003
3	N 41°08'85" E 29° 11'13"	Paşa Limanı	17:57	17:57	18:15	-24.6	08/05/2003
1(*)	N 41°21'69" E 28°59'95"	Dolmabahçe Sarayı	11:00	10:00	13:00	-25.0	09/05/2003- 02/07/2003 02/09/2003

*Her saat için 3 dakikalık örnek alınmıştır.

Dolmabahçe’de akım yüzeyde KD doğrultusunda akmakta buna karşılık yüzeyden 12 m derinlikte BGB doğrultusunda akmaktadır.

Galatasaray Üniversitesi açıklarında yapılan ölçüm sonuçları ise daha karmaşık bir akım yapısının oluştuğunu göstermektedir. Akıntı yüzeye yakın akım bölgesinde BGB doğrultusundan dip akımda KB’ya dönmektedir.

Sarayburnu istasyonunda akıntı doğrultusu KG istikametinde Marmara Denizi’ne doğrudur. KG hız bileşeni DB hız bileşenine göre hâkim konumdadır.

Paşalimanı istasyonunda ise akım doğrultusu GB yönündedir. Akıntı kıyıdan uzaklaşan istikamettedir. Ölçüm yapılan bölgede yüzeye yakın derinliklerde hızın daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

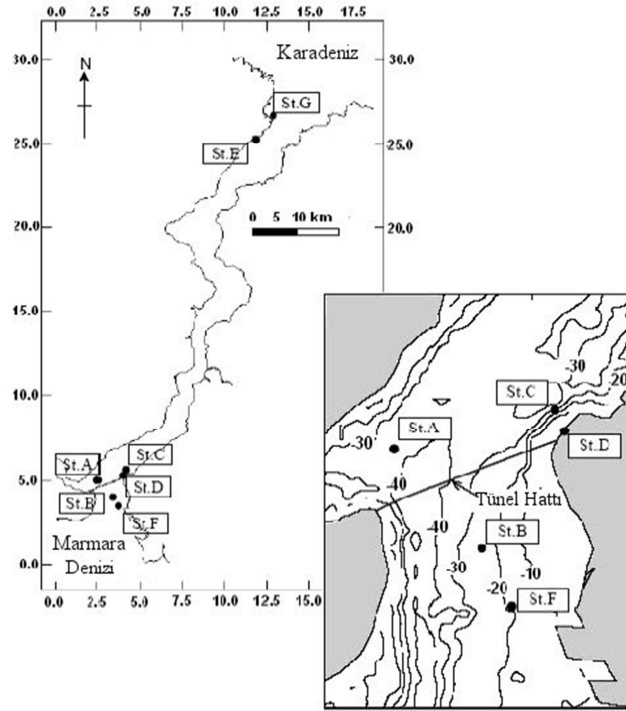
Ölçüm sonuçlarından da görüldüğü gibi Boğaz’ın sahip olduğu geometri akıntı yapısı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Boğaz kesitinin genişlediği Dolmabahçe-Galatasaray Üniversitesi açıklarındaki istasyonlarda akıntı saat akrebi yönünde dönmektedir.

Mayıs-Haziran aylarında yapılan ölçümler incelendiğinde akıntı hızının KG bileşeni DB bileşeninden daha büyüktür. Bileşke akıntı doğrultusu ise KD-BD doğrultusundadır. Ölçümün gerçekleştirildiği zaman aralığında en büyük 0.7 m/s’lik hız değeri elde edilmiştir. Zaman zaman derinlik boyunca KG bileşeni yön değiştirmektedir. Bu durum Karadeniz’den Marmara’ya doğru olan üst akımın Sarayburnu’ndan dönerek güneyden kuzeye doğru akmasından kaynaklanmaktadır.

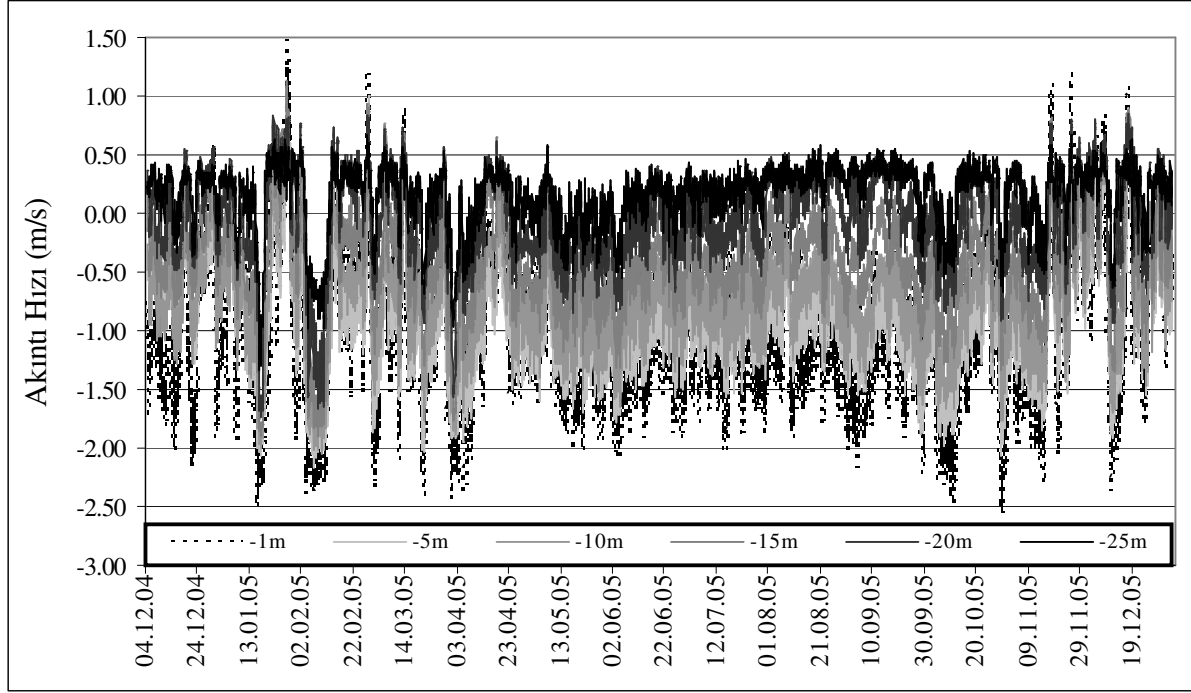
Temmuz-Ağustos ayı ölçümlerine bakıldığında ise, enine akımın genelde DB doğrultusunda meydana geldiği, ancak bu bileşenin derinlik boyunca zaman zaman yön değiştirerek DB doğrultusunda olduğu görülmüştür. Bu durum üst ve alt tabakalarda tamamen ters yönlerde meydana gelebilmektedir.

Sonuç olarak Dolmabahçe açıklığında saat akrebi doğrultusunda dönen, derinlik boyunca uniform olmayan ve meteorolojik koşullara karşı çok hassas olan bir akım yapısının olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm süresi boyunca dip akımının sıcaklığının da 8 ile 14 °C arasında değiştiği belirlenmiştir.

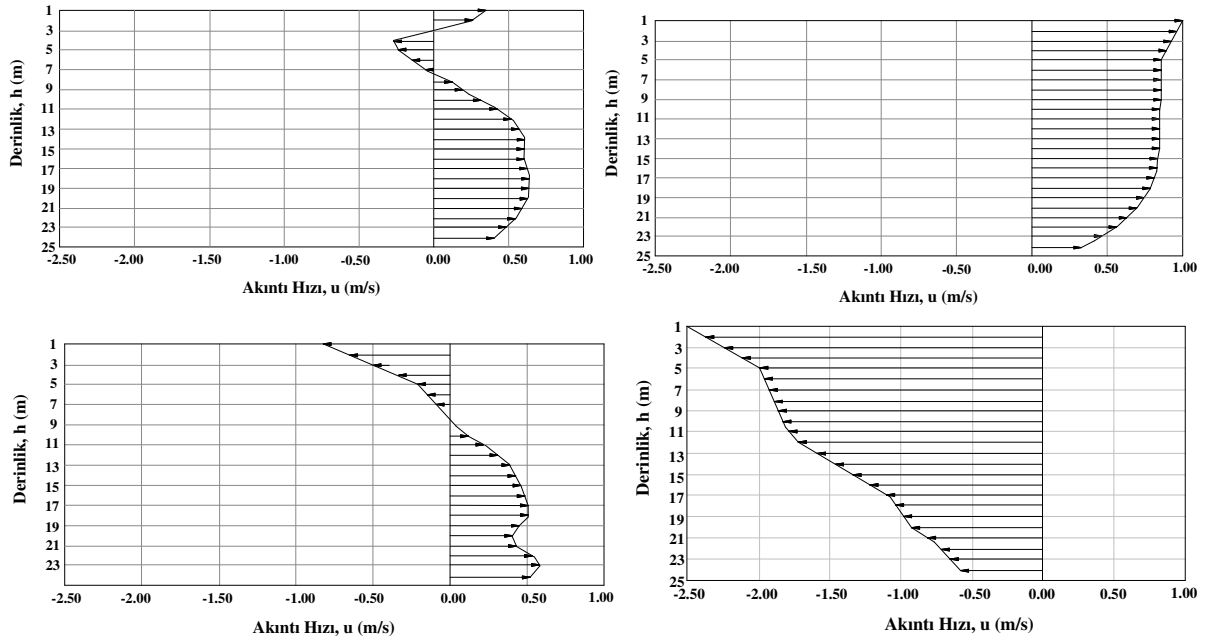
İstanbul Boğazı akıntı yapısına dair en uzun süreli ölçüm verileri ise Marmaray Tüp Geçiş Projesi kapsamında Ulaştırma Bakanlığı DLH Marmaray Bölge Müdürlüğü tarafından toplanmıştır. Şekil 2.14’te gösterilen istasyonlarda toplanan veriler, ölçüm aralıkları, ölçüm süreleri ve ölçüm konumları Çizelge 2.3’te verilmiştir. B istasyonunda toplanan akıntı hızlarına dair ölçüm verileri Yüksel vd. (2008) tarafından değerlendirilmiştir.



yapısının hâkim olduğu durumlarda akıntı hızı üst tabakadan başlayarak ara tabakaya kadar derinlikle azalmakta ve ara tabakadan itibaren tabana kadar aksi doğrultuda yeniden artmaktadır. Bunun dışında Boğaz'da belirli koşullar altında tek tabakalı ve üç tabakalı (tek yönlü ve 3 yönlü) akım yapıları da gözlemlenmiştir. Bu akım profillerine ait örnekler Şekil 2.16'da verilmiştir.

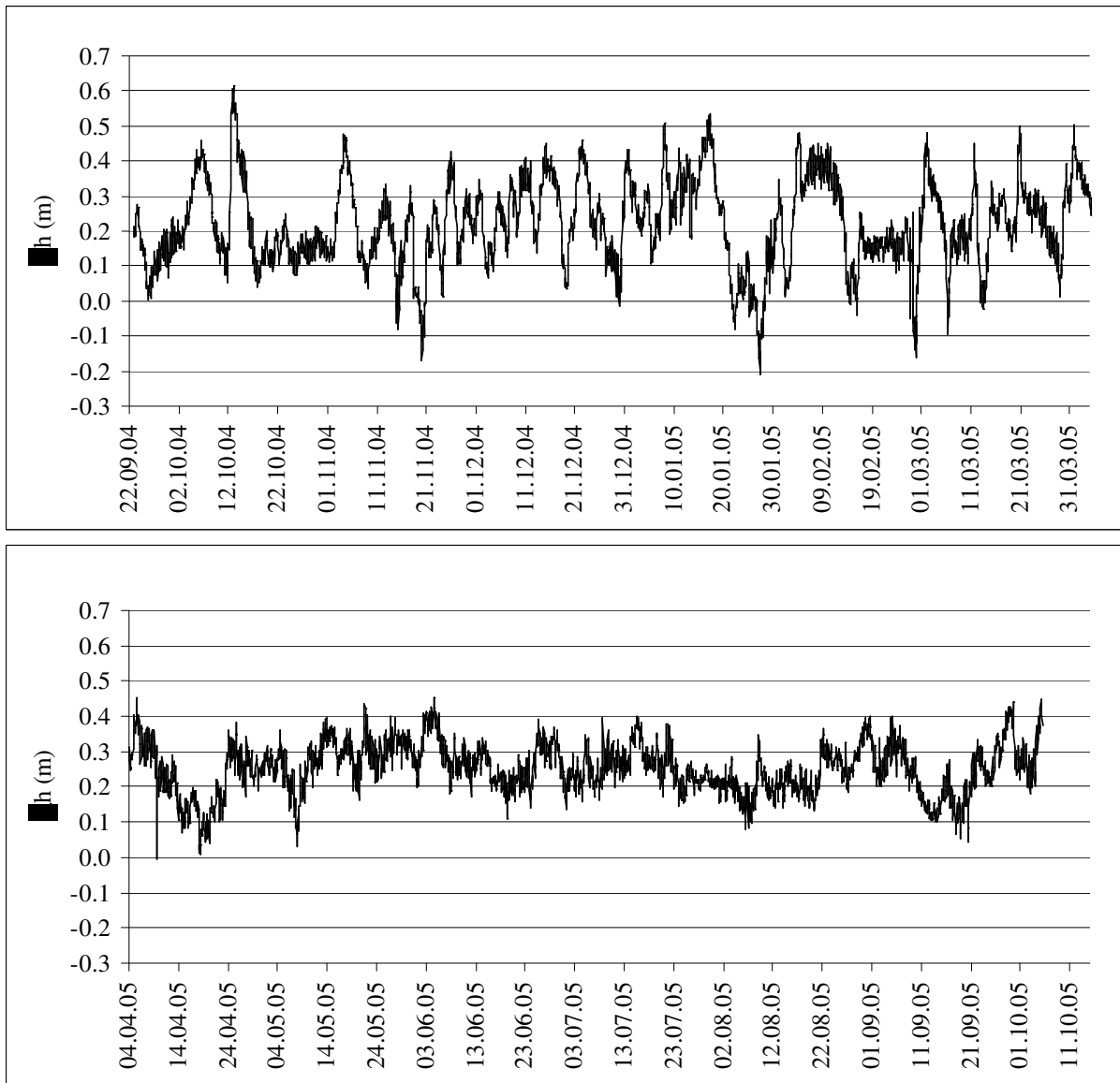


Şekil 2.15 B istasyonunda farklı derinliklerde ölçülmüş kuzey ve güney yönündeki akıntı hızları, Yüksel vd. (2008).



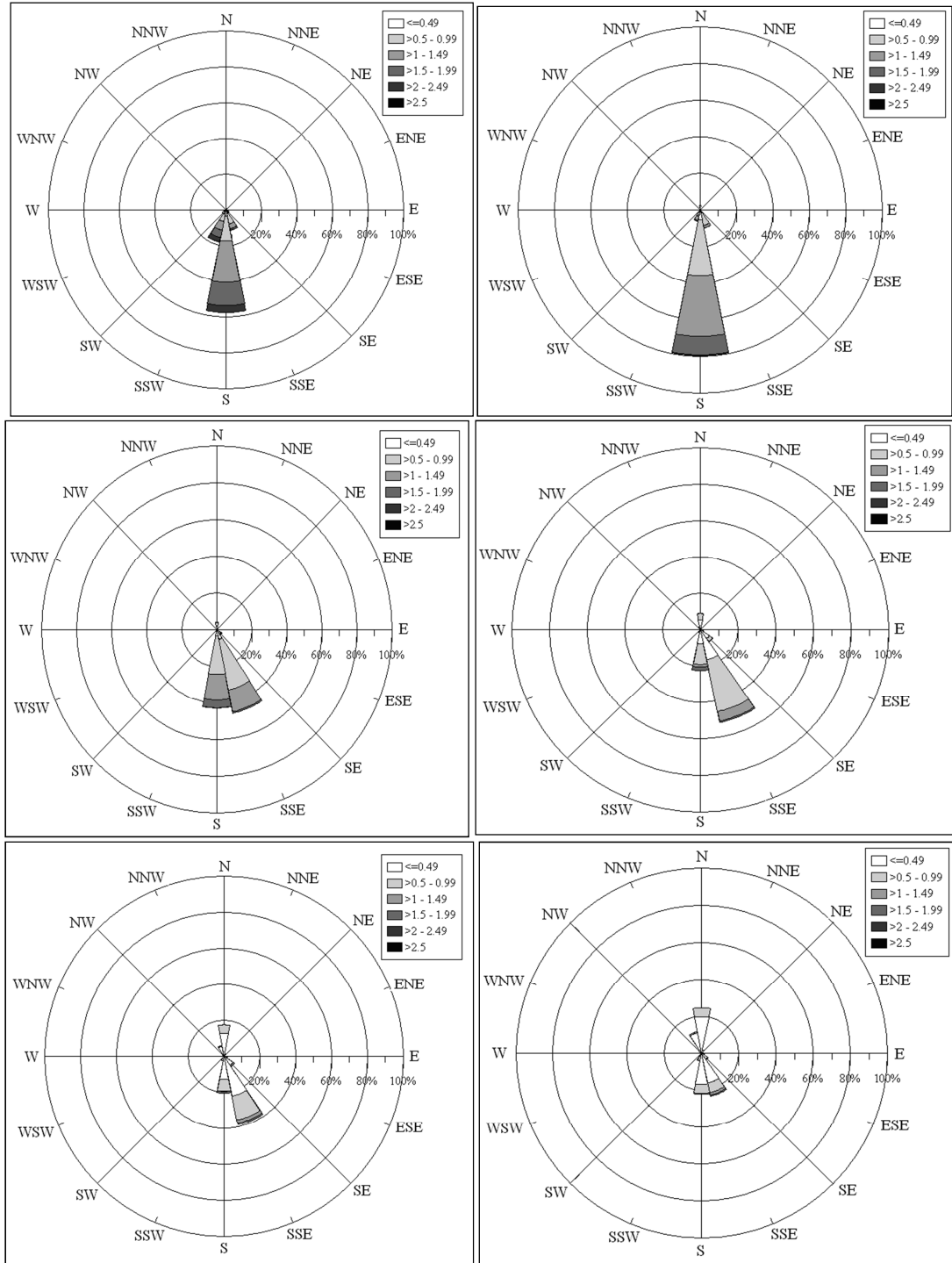
Şekil 2.16 İstanbul Boğazı'nda oluşan farklı akıntı profilleri, Yüksel vd. (2008)

Yüksel vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada E ve D istasyonlarında ölçülen su seviyesinin zamanla değişimi Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Su seviyesi farkı büyük ölçüde rüzgar kabarması şeklinde olmakla birlikte atmosferik basınç farklılıkları, gelgit ve uzun dönemli hidrolojik değişikliklerden de ileri gelmektedir. Su seviyesinin ölçüm süresi boyunca referans seviyesi etrafında -0.2 ile 0.6 m arasında salındığı gözlenmiştir. Yine bu verilerden Karadeniz su seviyesinin Marmara Denizi’ne göre genellikle daha yüksek olduğu görülmektedir. Su seviyesindeki ani değişimler meteorolojik etkiler ile oluşmaktadır. Şiddetli kuzeyli rüzgârlar Boğaz’ın Karadeniz girişinde su seviyesinin artmasına neden olurken, Marmara Denizi’nde su seviyesinin azaldığı görülmektedir.

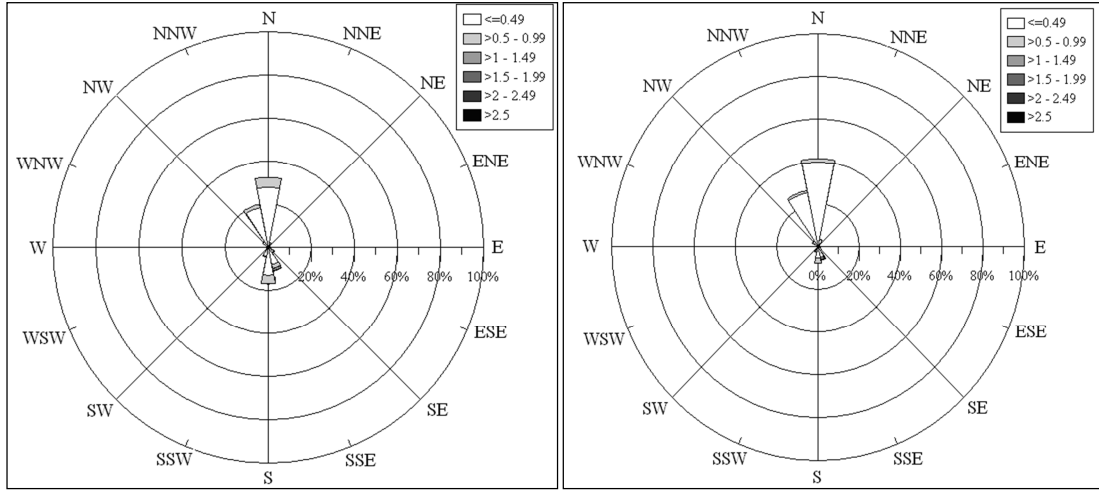


Şekil 2.17 Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki su seviyesi farkının zamanla değişimi, Yüksel vd. (2008).

Çalışmada ayrıca İstanbul Boğazı'nda sözü edilen ölçüm verileri değerlendirilerek akıntı gülleri çıkartılmıştır. B istasyonunda ölçülen akıntı verilerinden elde edilen akıntı gülleri Şekil 2.18'de verilmiştir.



Şekil 2.18 B istasyonunda sırasıyla yüzeyden -1, -5, -10, -15, -18, -20, -23 ve -25 m derinliklerde elde edilmiş akıntı gülleri, Yüksel vd. (2008).



Şekil 2.18 Devamı.

Şekil 2.18’de verilen akıntı gülleri her derinlikteki doğrultusal oluşma frekanslarını göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi -20 m derinliğe kadar üst tabaka hâkimiyetini korumaktadır. Ara tabakayı temsil eden bu derinliğe kadar akım kuzeyden güneye iken bu derinlikten itibaren GGD yönünde dönmekte ve alt tabakanın hâkim olmaya başlamasıyla birlikte akıntı KKB-K doğrultusunda oluşmaktadır.

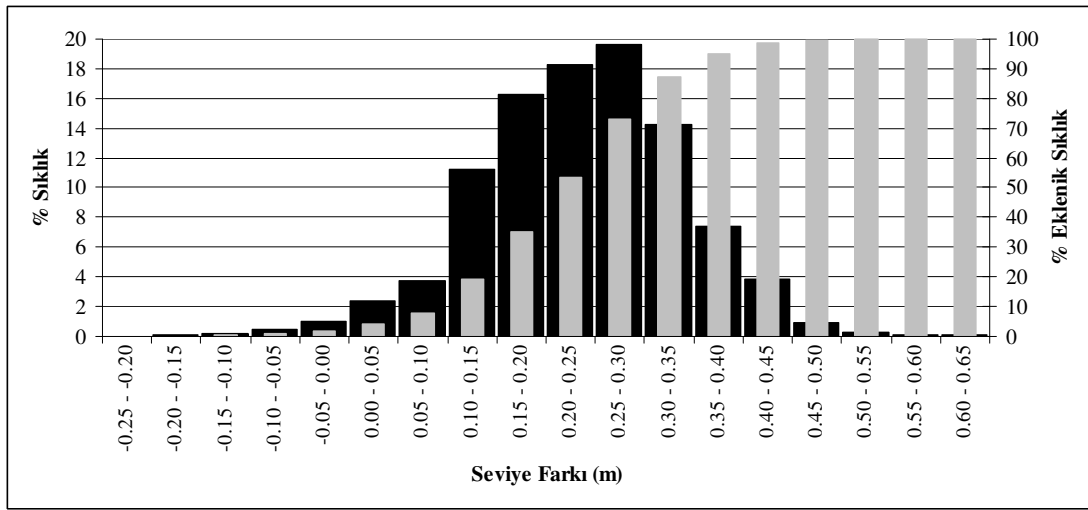
Ölçüm dönemi içerisinde yüzeyde (-1 m derinlikte) akıntı %19 GGB, %58 G ve %10 GGD yönünde oluşmuştur. -5 m derinlikte akıntı %80 G, %10 GGD ve %5 GB yönünden oluşmuştur. -10 m derinlikte akıntı yönü %42 S ve %45 GGD yönlerindedir. Şekilden de görüldüğü gibi -5m derinlikten -15 m derinliğe inerken hâkim akıntı yönü G’den GGD yönüne dönmekte ve yılın % 50 sinde bu derinlikte etkin yön GGD olmaktadır. Derinlik arttıkça tabakalı akım yapısına uygun olarak, akıntı yönleri de değişmektedir. -18 m de akıntı %20 G, %38 GGD ve %19 K yönünde olurken, -20 m de %28 K ve %10 KKB yönlerinde olmaktadır. -22 m derinlikte kuzeyli yönlerin hâkimiyeti artmaya devam etmekte ve akıntı %30 K ve %20 KKB yönlerinde olmaktadır. Ancak bu derinlikte halen G yönünde akıntı olduğu da görülmektedir. -25 m derinliğinde akıntıların %70’i kuzeyli yönlerde gerçekleşmiştir.

Akıntı güllerindeki değişim incelendiğinde ara tabakanın yıl boyunca değişmekle birlikte B istasyonunda gerçekleştirilen ölçüm döneminde çoğunlukla -15/-20 m derinliklerde olduğu görülmektedir.

Ölçümler üst tabaka akıntı hızının yüzeyde yılın 183 gününde 1 m/s’yi aştığını göstermiştir. Tabanda hem kuzey hem de güney yönündeki akıntı hızları yine ölçüm dönemi içerisinde sadece 14.6 gün için 0.5 m/s’nin üzerine çıkmıştır (Yüksel vd., 2008).

Yine Marmaray Tüp Geçişi Projesi kapsamında İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi girişlerinde D ve E istasyonlarında toplanan su seviyesi ölçümleri de Aydoğan vd. (2007) tarafından analiz edilmiştir. Analizlerde özellikle Boğaz'ın Karadeniz girişinde toplanan veriler harmonik analizlerle kısa ve uzun dönemli bileşenlerine ayrılarak, su seviyeleri üzerinde gelgit ve rüzgâr kabarması gibi etkiler kadar Karadeniz'in tatlı su kaynaklarının da etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

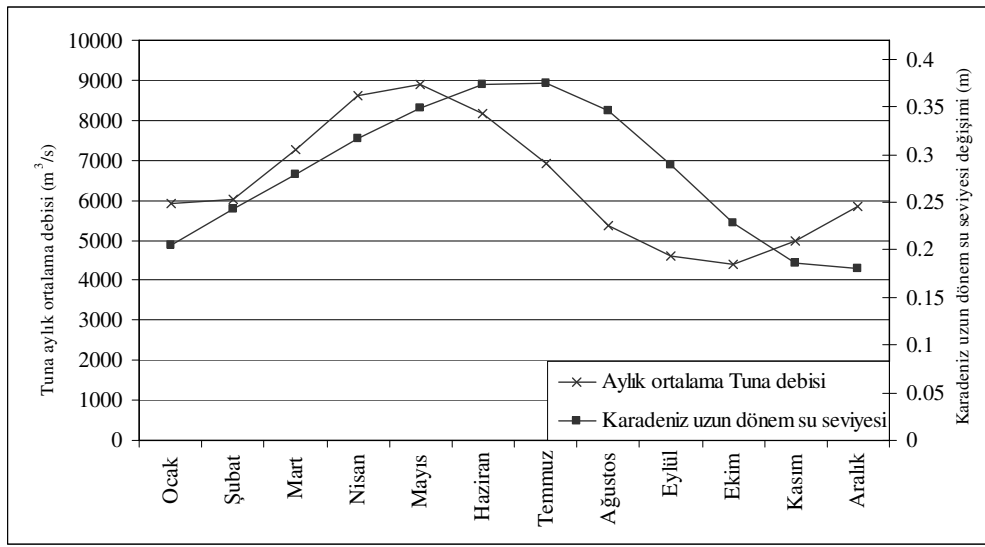
Aydoğan vd. (2007) tarafından Karadeniz girişi ile Marmara Denizi girişi arasında su seviyesi farkının ölçüm süresi boyunca -0.25 ile 0.65 m arasında değiştiği rapor edilmiştir. Su seviyesi farkının ortalama değeri 0.24m ve standart sapması 0.10m olarak bulunmuştur. İstanbul Boğazı'nın her iki girişinde ölçülen su seviyelerinden yola çıkılarak farklarının sıklık analizi yapılmıştır. Şekil 2.19'da verilen analiz sonuçlarına göre iki deniz arasındaki su seviyesi farkı ölçüm süresinin %1.73'ünde Marmara Denizi Karadeniz'den daha yüksek su seviyesine sahip olduğu bildirilmiştir. Ancak bu fark 0.21m'nin üzerine çıkmamaktadır. Yine ölçüm süresinin %0.44'ünde su seviyesi farkı 0.50 m'nin üzerine çıkmıştır.



Şekil 2.19 Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki seviye farklarının sıklık analizi, Aydoğan vd. (2007).

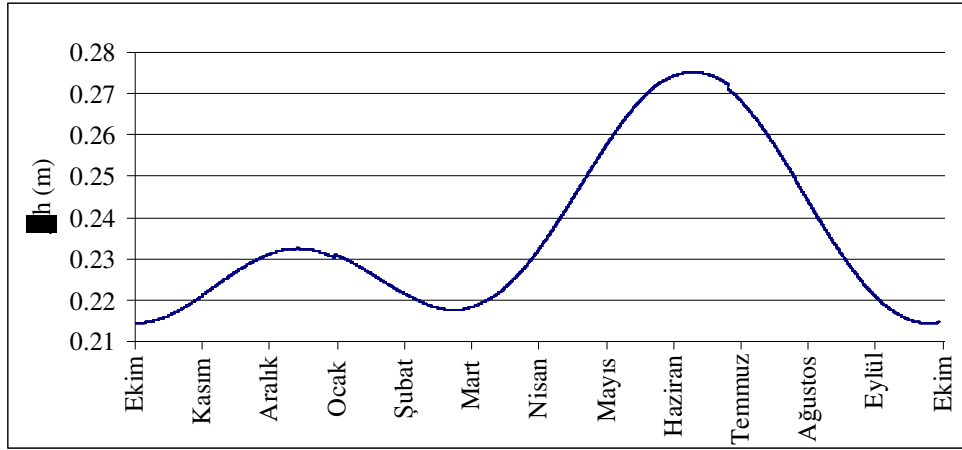
Aydoğan vd. (2007, 2010a) Boğaz'ın Karadeniz girişinde ölçülen su seviyesinin sinüzoidal bileşenlerini Fourier Analizi (Mike21 gelgit yazılımı) kullanarak belirlemiştir. Sonuç olarak 68 gel-git bileşenine ait faz ve genlik değerlerini tanımlamış, uzun dönem bileşenlerini belirlemiş ve kısa dönemli ana gel-git bileşenlerini tanımlamışlardır. Araştırmacılar İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişinde kısa periyotlu gel-gitten ileri gelen su seviyesi değişiminin 6cm mertebesinde olduğunu bildirmiştir.

Aydoğan vd. (2007, 2010a) gel-git analizi sonucunda belirlenen 68 adet bileşen içerisinde yıllık ve yarım yıllık periyoda sahip olan bileşenlerin toplamını Tuna Nehri'nin debisi ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar Şekil 2.20'de gösterilen sonuçlara dayanarak Karadeniz'e giren tatlı su debilerindeki mevsimsel artışların 1.5-2 aylık bir faz farkı ile İstanbul Boğazı Karadeniz girişinde su seviyesinde artışa neden olduğunu bildirmişlerdir. Su seviyesindeki uzun dönemli değişim incelendiğinde su seviyesinin en düşük ve en yüksek değerleri arasında 20cm'lik bir fark olduğu görülmektedir. İstanbul Boğazı Karadeniz girişinde su seviyesi en yüksek değerini Haziran – Temmuz aylarında alırken, en düşük su seviyesi de Kasım – Aralık aylarında oluşmaktadır.



Şekil 2.20 İstanbul Boğazı Karadeniz girişinde su seviyesine karşılık aylık ortalama Tuna Nehri debisi, Aydoğan vd. (2007, 2010a).

Aydoğan vd. (2007) ayrıca Karadeniz ile Marmara Denizi arasındaki mevsimsel ortalama su seviyesi farklarını da Şekil 2.21'de gösterildiği gibi hesaplamışlardır. Şekle göre mevsimsel ortalama su seviyesi farkları Haziran – Temmuz döneminde en büyük değerine ulaşmıştır. Mevsimsel ortalama su seviyesi farkının en büyük değeri 27.5 cm'ye ulaşırken ortalama değeri 23.6 cm ve en düşük değeri de 21.4 cm olmuştur.



Şekil 2.21 İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi girişleri arasındaki mevsimsel ortalama su seviyesi farkının değişimi, Aydoğan vd. (2007).

Aydoğan vd. (2007, 2010a) su seviyeleri üzerinde etkili olan rüzgâr kabarmasını da Mike 21 sayısal modelini kullanarak hesaplamışlardır. Araştırmacılar modelde ECMWF'ten alınan rüzgâr ve basınç haritaları kullanmıştır.

Son olarak Marmaray Tüp Geçiş projesi kapsamında toplanan verileri kullanan Aydoğan vd. (2010b) yapay sinir ağları tekniğini kullanarak İstanbul Boğazı'nda akıntı hızlarının tahmin edilmesi amacıyla bir model sistemi geliştirmişlerdir. Araştırmacılar geliştirilen modelin 1-12 saat sonraki akıntı hızlarını başarı ile tahmin ettiğini bildirmişlerdir. Aynı zamanda bu çalışma yapay sinir ağları yönteminin Boğaz akımlarında akıntı tahmini için kullanıldığı dünyada ilk çalışma özelliğini de taşımaktadır.

3. DENİZ KİRLİLİĞİNİN SAYISAL MODELLEMESİ

Deniz kirlenmesi, insanlar tarafından haliçler de dâhil olmak üzere tüm denizel ortamlara doğrudan veya dolaylı olarak, canlı kaynaklarına zarar veren, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratan, balıkçılık da dâhil olmak üzere denizlerdeki faaliyetleri engelleyen, deniz suyunun kullanımı ile ilgili kalitesini etkileyen ve rekreasyonel değerini azaltan madde ve ya enerji bırakılması olarak tanımlanmaktadır, (UN GESAMP). Deniz kirliliğinin başlıca kaynakları şöyle sıralanabilmektedir:

- Evsel ve endüstriyel atıksu deşarjları,
- Atıksu çamurlarının deşarjları,
- Kömürle çalışan ya da nükleer enerji santrallerinin soğutma suyu deşarjları,
- Kimyasal enerji istasyonlarından kaynaklanan endüstriyel atıklar ile nükleer enerji santrallerinden kaynaklanan radyoaktif atıkların deşarjları,
- Karadaki tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan atıklar. Bu tür atıklar, sudaki azot ve fosfor konsantrasyonlarının artmasına neden olmaktadır. Yine kıyı ve haliçlerdeki balık çiftlikleri de sudaki Pestisid, antibiyotik ve organik atık konsantrasyonlarının artmasına neden olmaktadır.
- Ticari limanlar ile yat limanlarında yeterince su sirkülasyonu olmaması da önemli bir kirlilik nedenidir.
- Gemi kazaları.

Deniz kirliliğinin modellenmesi çalışmalarının başlıca hedefleri basitçe aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Ekosistemlerin yapısını ve dinamiklerini daha iyi anlayabilmek,
- İnsan faaliyetlerinin su kalitesi üzerindeki etkilerini anlayabilmek,
- Su kalitesini geliştirebilmek için neler yapılması gerektiğine karar verebilmek,
- Ulusal ve uluslararası hukuksal düzenlemelere bir zemin oluşturabilmek.

Denizel ortamlarda kirleticiler maddelerin yayılımı ve dağılımı oldukça karmaşık bir süreçler silsilesinin etkisi altındadır. Doğadaki bir sistem hakkında fikir sahibi olabilmek için ilk akla gelen yaklaşım bu sistemin gözlemlerle izlenmesidir. Ancak sözünü ettiğimiz süreçlerin karmaşıklığı, değişkenliği, gözlem alanının genişliği, yeterli teknolojinin geliştirilememesi ve maliyetlerin yüksekliği bu tür bir çabayı önemli ölçüde engellemektedir. Bu durumda da matematik modellerin geliştirilmesi en uygun çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Matematik modellerin başlıca avantajları şöyle sıralanabilir:

- Fiziksel modellerde katı madde ve ağır metallerin taşınımı gibi problemlerde *ölçek sorunu* yaşanmaktadır (distorsiyonlu modeller). Oysa sayısal modellerde böyle bir problem yoktur.
- Sayısal modeller, fiziksel modellere ya da yerinde gözlemlere göre çok daha *ekonomiktir*. Fiziksel modeller ve ölçümler büyük laboratuvarlar, karmaşık elektronik cihazlar ve özel donanımlı teknik personel gerektirirler.
- Fiziksel modeller taşınabilir değildir. Oysa sayısal modeller internet aracılığıyla yüksek çözünürlüklü, renkli grafikler halinde oldukça *geniş kitlelere ulaşabilmektedir*.
- Fiziksel modeller yalnızca bir tek problem için üretilir ve başka problemlere uygulanamazlar. Oysa sayısal modeller yaygın olarak, hatta global ölçeklerde kullanılabilirler.

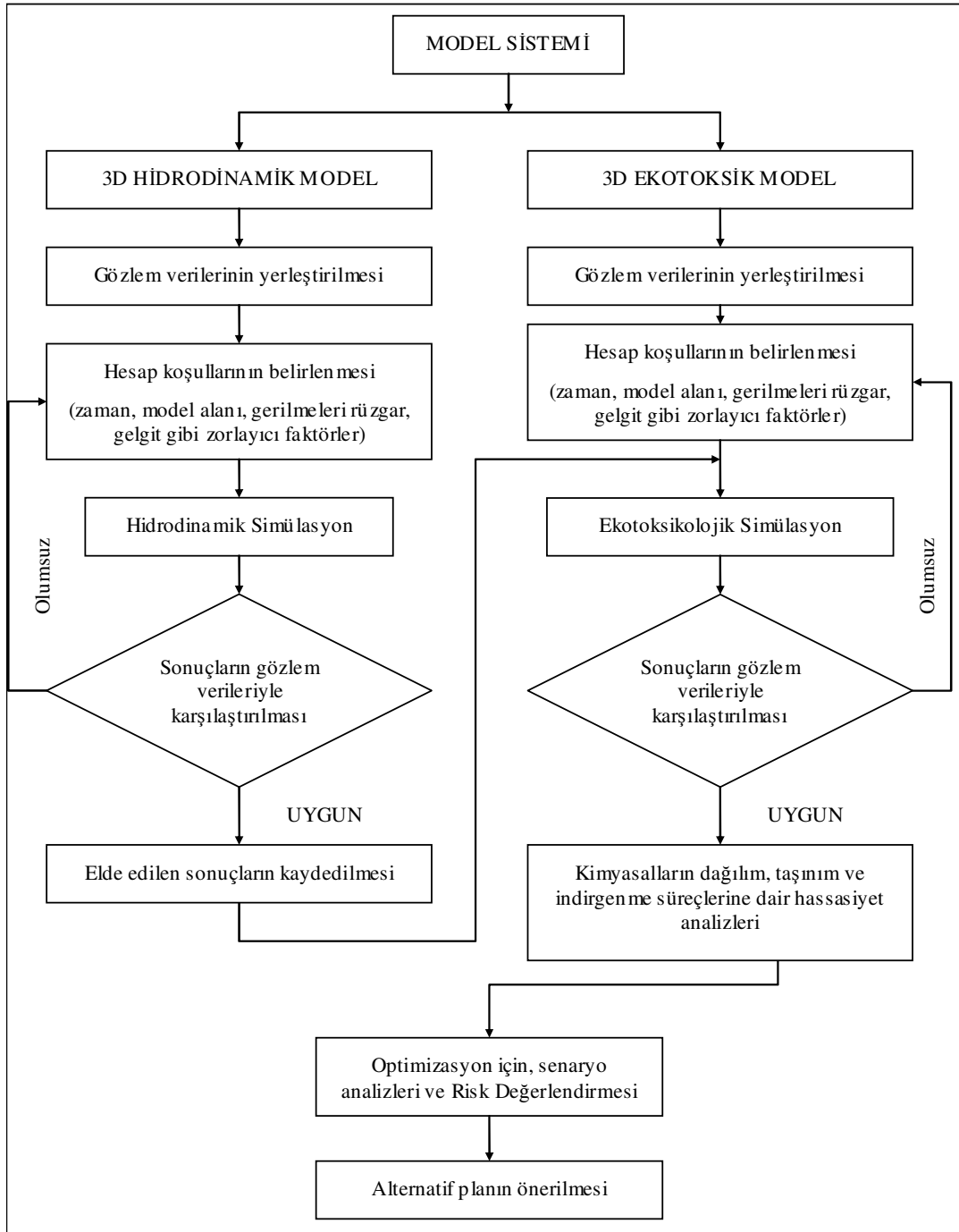
Sayısal su kalitesi modelleri kıyısal sistemlerin su kalitelerinin iyileştirilmesinde ve geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Deterministik modellerde su kolonu içerisindeki çözünmüş ve partikül halindeki kirleticinin yayılım ve dağılımının modellenmesinde kütle denge denklemleri esas alınmaktadır. Bir su kalitesi modelinin kurulumuna ait akış şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Kıyılardaki kirleticiler oldukça büyük çeşitlilik gösterebilmektedir. Bunda bölgenin coğrafik ve iklimsel koşulları kadar sosyoekonomik koşullar da etkili olmaktadır. Kıyı kentlerinde yürütülen ekonomik faaliyetler kirleticilerin başlıca özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Dolayısıyla tüm bu koşullar altında suya karışan kirletici maddeler organik ya da inorganik kökenli olabilmektedir. Bu farklı yapıdaki kirleticiler farklı taşınım süreçlerinin etkisinde kalacaktır. Kıyı alanlarında kirleticilerin yayılmasında başlıca iki süreç etkili olmaktadır:

- Fiziksel taşınım süreçleri,
- Biyojeokimyasal süreçler.

Organik kökenli kirleticiler fiziksel taşınım süreçleri ile su kütlesi içerisinde taşınır ve dispersiyona uğrarken, bu taşınım sırasında aynı zamanda biyolojik ve kimyasal değişimlerin de etkisinde kalmaktadırlar. İyi bir su kalitesi modeli her iki süreci de doğru bir şekilde benzeştirebilmelidir.

Denizel ortama dâhil olan bir kimyasal maddenin maruz kaldığı süreçlerin başlıcaları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

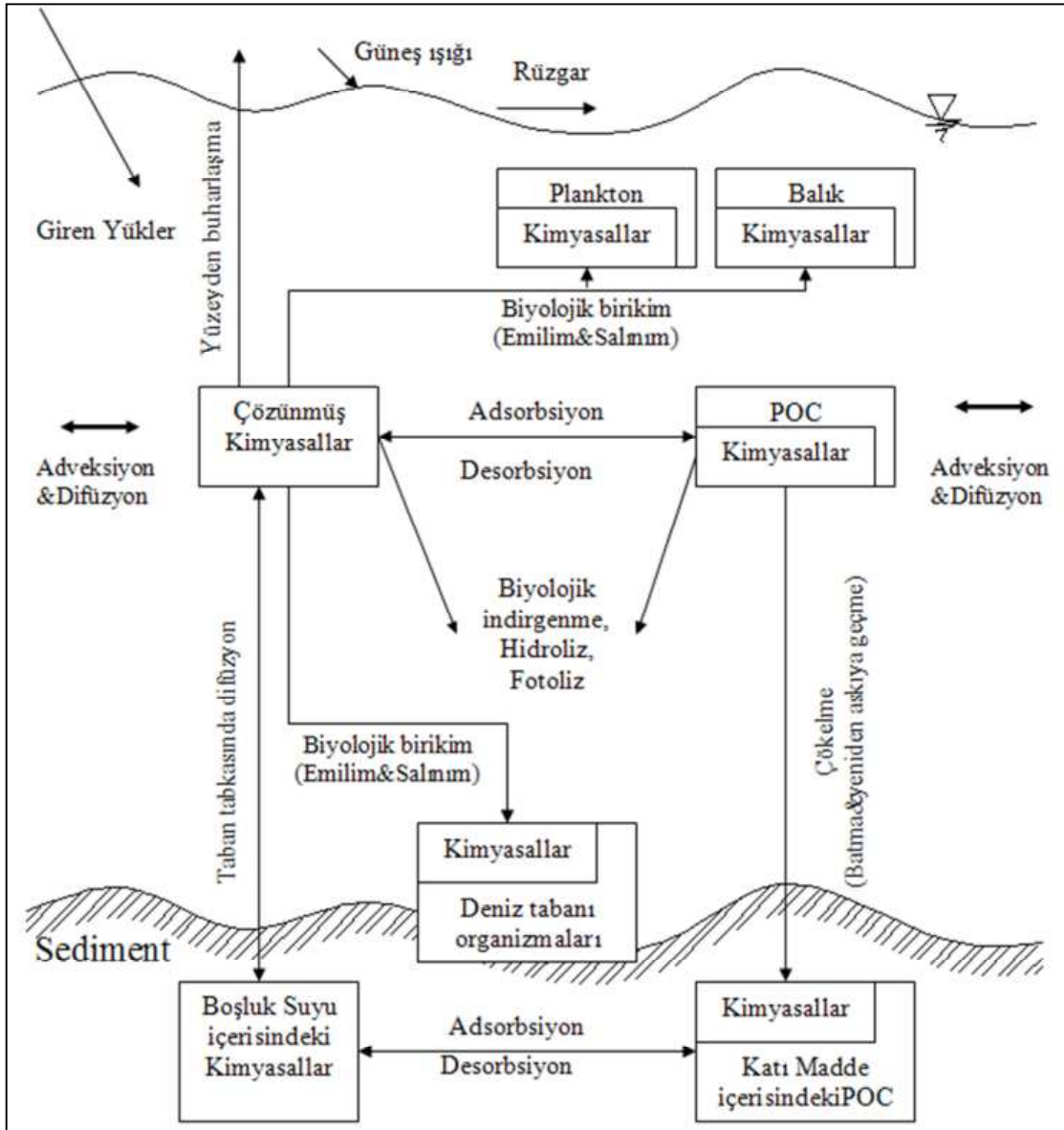


Şekil 3.1 Su kalitesi modellemesine ait akış şeması, Kim vd., (2004).

Su kalitesi modeli *Kütlenin Korunumu Prensibi* esasına dayanmaktadır. Kütlenin zaman içerisindeki değişimi fiziksel taşınım süreçleri ile biyojeokimyasal süreçler tarafından meydana getirilmektedir. Bu tanım basitçe aşağıdaki (3.1)'deki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(VC) = [\text{fiziksel taşınım süreçleri}] + [\text{biyojeokimyasal süreçler}] \quad (3.1)$$

Burada V akımın ortalama hızını ve C de taşınan maddenin konsantrasyonunu göstermektedir.



Şekil 3.2 Denizel ortama dahil olan bir kimyasal maddenin maruz kaldığı süreçler, Kim vd., (2004).

Shen vd. (2002), Japonya'nın Hakata Körfezi için bir hidrodinamik ve su kalitesi modeli geliştirmişlerdir. Model kirleticilerin sistem içerisindeki uzun dönemli taşınımı ve azalmasını benzeştirmektedir. Model kirletici partiküllerinin taşınımı ve çökmesini de dikkate almaktadır. Bulanıklık hesaplamalarına dayanarak, ışık geçirgenliğini de belirlemektedir. Araştırmacılar körfezde kirleticilerin taşınımını benzeştirebilmek için benzeştirilmesi gereken süreçleri üç başlık altında toplamışlardır: taşınım ve karışım süreçleri, su kalitesi parametrelerinin biyokimyasal etkileşimi ve besi maddesi döngüsü. Araştırmacılar Hakata Körfezi'ndeki sirkülasyonu ve tabakalanmayı benzeştirebilmek için üç boyutlu bir türbülans modeli geliştirmiş ve bu model sonuçlarını su kalitesi modelinde girdi olarak kullanmışlardır.

Bu su kalitesi modeli de oksijen koşullarını, besi maddesi dengesini ve birincil üretkenliği benzeştirmektedir. Sonuçta araştırmacılar k-ε türbülans modelinin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini, türbülans difüzyonunun kirleticilerin, askıda katı maddenin ve sıcaklığın taşınımında önemli olması nedeniyle 2 denklem k-ε türbülans modelinin daha iyi sonuç vereceğini bildirmişlerdir.

Fiziksel Süreçler

Kirletici kütlelerinin su kütlesi içerisinde taşınımı olayıdır. Bir akışkan kütlesi içerisinde, küçük hacimli bir başka akışkanın enjekte edildiğini düşünelim. Burada her iki akışkanın da aynı özgül kütleyle sahip olduğunu kabul edersek, ikinci akışkan birincisinin içerisinde yüzecektir. Alıcı akışkan ortamı durgun halde bile olsa, bu ortama dâhil edilen izleyici akışkan tedrici olarak, difüzyona uğrayacaktır. Bu durum, *moleküler difüzyon* olayının bir sonucudur. Difüzyon olayı oldukça yavaş gelişecektir. Eğer alıcı ortam hareket halinde ise ve Re sayısı da yeterince büyük ise, akım türbülanslı hale geçecek ve izleyicinin difüzyonu artacaktır. Türbülanslı bir akım ortamına belirli bir noktadan enjekte edilen izleyici akışkan kütlesi iki ayrı süreç içerisinde yayılacaktır: (1) akıma göre rölatif bir hızla yayılacaktır (adveksiyon), (2) türbülans etkisi ile karışacaktır (difüzyon). Böylece izleyici daha fazla seyrelmiş ve etki çapı da genişlemiş olacaktır. Türbülans difüzyonu, moleküler difüzyona göre birkaç kat daha şiddetlidir. Bu nedenle de moleküler difüzyon, türbülans difüzyonu yanında çoğu zaman ihmal edilmektedir. Adveksiyon ve türbülans difüzyon süreçlerinin kombinasyonu ile *dispersiyon* olayı meydana gelmektedir, (Yüksel, 1999).

Su kalitesi modeli için temel oluşturan fiziksel taşınım olayı, hidrodinamik modeller yardımıyla benzeştirilmektedir. Seçilecek hidrodinamik model sistem karakteristiklerine uygun olmalıdır. Yatay ve düşey gradyanların çok büyük olduğu kıyı sitemlerinde üç boyutlu hidrodinamik modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla oluşturulacak hidrodinamik model içerisinde adveksiyon, moleküler difüzyon ve türbülans difüzyonu mekanizmaları doğru parametrelerle ve doğru denklemlerle tanımlanmalıdır.

Fiziksel taşınım süreçlerinin modellenenebilmesi için aşağıdaki verilere gereksinim vardır:

Zorlayıcı koşullar:

Açık Sınır Şartları: Tuzluluk, su seviyesi ve sıcaklık. Bu veriler zaman serileri halinde tanımlanarak, benzetimde açık sınır şartı olarak kullanılmaktadır. Bunun için tüm parametrelere dair sürekli ölçümlere ihtiyaç vardır.

Meteorolojik koşullar: Rüzgar ve basınca dair sürekli ölçümlerden elde edilmiş

zaman serisi dosyaları hazırlanmalıdır.

Sisteme su kütlesi girişi: Giren suyun debisi ve sıcaklığına dair zaman serisi dosyaları hazırlanmalıdır.

Modelin kalibrasyonu ve doğrulanması: Modelin kalibrasyonu ve doğrulanması aşamalarında gelgit ölçümleri, su seviyesi verileri, akıntı hızı, tuzluluk ve sıcaklık verileri kullanılabilir. Yine bu verilerin de sürekli veriler olması gerekmektedir.

Görüldüğü gibi modelde kullanılacak tüm verilerin sürekliliği ve eşzamanlı olması oldukça önemlidir.

Biyojeokimyasal süreçler

Bu süreçler her bir kirletici için değişkenlik gösteren kinetik süreçlerdir. Bu nedenle su kalitesi modellerinde ampirik ifadelerle tanımlanmaktadır. Biyojeokimyasal süreçlerin modellenmesi için aşağıdaki verilere gereksinim vardır:

Zorlayıcı koşullar:

- Açık Sınır Şartları: Dikkate alınan tüm su kalitesi parametreleri için zaman serileri halinde hazırlanmış sürekli ölçümlerden elde edilmiş veri dosyalarına ihtiyaç vardır.
- Meteorolojik koşullar: Güneş ışığı biyojeokimyasal süreçler üzerinde etkili bir parametredir. Dolayısıyla güneş radyasyon yoğunluğu hakkında da bilgiye gereksinim vardır.
- Atmosferik yükler: Rölatif olarak küçük yüzey alanına sahip modellerde bu yüklerin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmayabilmektedir.
- Sisteme noktasal kaynaklardan dâhil olan yükler: Su kütlesi içerisinde ya da dışarısındaki noktasal kaynaklardan sisteme dâhil olan tüm su kalitesi parametrelerine dair veri dosyaları hazırlanmalıdır.
- Sisteme noktasal kaynaklar dışında dâhil olan yükler: Model alanına belirli bir noktadan dâhil olmayan yüklere dair veri dosyaları hazırlanmalıdır. Bu oldukça güç bir aşamadır. Bir arazi modelinden elde edilmiş verilere gereksinim duyulabilmektedir. Böyle bir modelde kendine has veriler gerektirecektir.
- Bentik akılar: Yine tüm çözünmüş su kalitesi parametreleri için hazırlanmış veri dosyalarına gereksinim vardır. Bu da bir bentik süreç modelinin kullanılmasını gerektirebilmektedir. Ancak kısa süreli benzetimler için (bir

yıldan daha az) gerek duyulmayabilmektedir.

Modelin kalibrasyonu ve doğrulanması: Modelin kalibrasyonu ve doğrulanması aşamalarında yine tüm su kalitesi parametrelerinin uzamsal ve zamansal değişimlerine dair sürekli ölçüm verileri kullanılmaktadır. Bundan başka Secchi disk derinliği, toplam katı madde ölçümleri, alg stokiometrisi verileri ile alg üretim hızı gibi veriler de kalibrasyon ve doğrulama amacıyla kullanılabilir.

Görüldüğü gibi modelde kullanılacak tüm verilerin sürekliliği ve eşzamanlı olması oldukça önemlidir.

Yine su kalitesi modelinde sisteme dâhil olan tüm kaynak ve kuyularda dikkate alınmalıdır. Tüm bu süreç ve faktörlerin etkisi ile su kütlesi içerisindeki kirletici konsantrasyonunun zaman içerisindeki değişimi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[- \left(\frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] + [S_I + S_E] \quad (3.2)$$

Burada, C konsantrasyon, t zaman, u , v , w , akımın sırasıyla x , y , z doğrultularındaki hız bileşenleri, K_x , K_y , K_z aynı doğrultulardaki difüzyon katsayıları ve S_I ve S_E ise içsel ve dışsal olarak sisteme dâhil olan kuyu ve kaynaklardır.

Su kalitesi izleme ve modelleme çalışmalarında dikkate alınacak parametreler üç grup altında aşağıdaki şekilde verilebilmektedir:

Fiziksel İndikatörler,

Askıda Katı Maddeler, kum gibi inorganik maddelerden oluşabileceği gibi, atıksu çamurları gibi organik kökenli de olabilmektedirler.

Bulanıklık, su içerisinde koloidal maddelerin varlığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.

Sıcaklık, biyokimyasal süreçlerin şekillenmesinde etkili olabildiği gibi akım ortamını da değiştirebilmektedir.

Renk, iletkenlik ve radyoaktivite gibi diğer fiziksel indikatörler.

Kimyasal İndikatörler,

Çözülmüş Oksijen, sucul yaşamın tüm formları için en önemli parametrelerden biridir.

Biyolojik Oksijen İhtiyacı, organik malzemelerin aerobik olarak indirgenmesi sırasında bakterilerin oksijen tüketimini ölçen bir parametredir.

Azot, biyolojik büyüme için temel nütrientlerden biridir. Azot doğada organik azot, amonyak, nitrit ve nitrat gibi farklı formlarda bulunabilmektedir.

Fosfor, yine biyolojik büyüme için temel nütrientlerden biridir. Doğada genellikle fosfat formunda bulunmaktadır. Organik fosfat ya da çözünmüş fosfor formunda da bulunabilmektedir.

Klorür, haliçlerde tuzluluk olarak görülmektedir.

Metaller, özellikle suda kolaylıkla çözünebilen arsenik, kadmiyum, krom, kurşun ve civa gibi toksik metaller tehlikelidir. Bu metaller özellikle endüstriyel deşarjlar, madencilik sektöründen kaynaklanan atıksular ve tarımsal atıksular ile su ortamına taşınmaktadır. Küçük miktarlarda bulunmakla birlikte besin zinciri içerisinde birikme özelliğine sahiptirler ve önemli zehirli etkiler gösterebilmektedirler.

Biyolojik İndikatörler,

Patojenler, başlıca Escherichia Coli olmak üzere tüm Fekal Koliform bakteri grubu.

Alg gibi diğer organizmaların modellenmesi de mümkündür.

İstanbul Boğazı uygulaması için benzetimi amaçlanan parametreler ve bunların modellenmesinde kullanılması öngörülen modeller Mike3 yazılımı için Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Kıyılarda kirleticilerin maruz kaldığı biyokimyasal süreçler matematik modellerde kinetik denklemlerle ifade edilmektedir. Bu süreçler, dolayısıyla da kinetik denklemler çoğu zaman lineer olmayan ifadelerdir.

Çizelge 3.1 Modellemede dikkate alınacak parametreler ve kullanılacak modüller.

Parametre	ÇO	BOİ	Azot	Fosfor	E. Coli	Klorofil-a
Mike3 Modül	WQ	WQ	WQ	WQ	WQ/AD	WQ

Not: WQ: Water Quality, AD: Advection-Dispersion, PA: Particle Analysis, SA: Spill Analysis

Eğer alg çoğalımının ve fitoplankton, zooplankton üretiminin de benzetimi amaçlanıyorsa Mike3 Ötrofikasyon modülü kullanılmalıdır. Ancak Mike3 WQ modülü içerisinde klorofil-a’nın modellenmesi ile birincil üretim hakkında fikir sahibi olunabilmekte ve ötrofikasyon modellenmesine gerek duyulmayabilmektedir. Ötrofikasyon daha çok göller ve haliçler gibi kapalı su ortamlarında yaşanan bir problem olup, su sirkülasyonun oldukça yoğun olduğu

İstanbul Boğazı Modeli'nde dikkate alınmayabilir. Ancak İstanbul Boğazı için genel bir su kalitesi modeli üretildikten sonra bazı yerel (örneğin haliç gibi) ölçekli modeller için çalışma imkanı bulunursa, ötrofikasyon olayı da dikkate alınabilir.

4. İSTANBUL BOĞAZI'NDA SU KALİTESİ İZLEME VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

4.1. Önceki Çalışmalar

İstanbul Boğazı her ikisi de kapalı denizler olan Karadeniz ve Marmara Denizi'ni birbirine bağlayan bir kanaldır. İstanbul Boğazı önemli debilere sahip atıksu deşarjlarına maruz kalmaktadır. İstanbul Boğazı'ndaki iki tabakalı akım yapısının hidrodinamik karakteri üzerinde pek çok değişken etkili olmaktadır. Ayrıca Boğaz'ın bağlantılı olduğu denizlerin dinamikleri de İstanbul Boğazı hidrodinamiğini ve dolayısıyla deşarj edilen atıkların Boğaz'ın hidrodinamik yapısı içerisindeki dağılımını etkilemektedir. Aynı şekilde Boğazlar boyunca meydana gelen su kütlelerinin değişimi ile Marmara ve Karadeniz ekosistemleri de etkilenmektedir.

İstanbul Boğazı kıyılarındaki atıksu deşarjları Boğaz'ın alt tabakasına verilmekte ve alt akıntı ile Karadeniz'e taşınmaktadır. Bu atıksuların bir kısmı düşey türbülans nedeniyle üst tabaka akımına karışarak, Marmara Denizi'ne geri dönmektedir. İstanbul Boğazı'nda alıcı ortam modelleme çalışmaları oldukça uzun bir geçmişe dayanmaktadır. Akça vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi için yapılan matematik modelleme çalışmaları incelenerek, İstanbul atıksu arıtma ve uzaklaştırma stratejileri açısından önem taşıyan konular değerlendirilmiştir. Çalışmada modelleme çalışmaları ile en olumlu, en olumsuz ve normal koşullar altında Boğaz'a yapılan deşarjların ne kadarının geri döneceği konusunda fikir sahibi olunabilmesinin önemli bir kazanım olduğu sonucuna varılmıştır. Yine Akça vd. (1998) modelleme çalışmalarını inceledikleri çalışmada normal koşullarda Boğaz'a Kadıköy'den yapılan deşarjların %15'inin, Riva'dan yapılan deşarjların ise %11'inin geri döndüğünü bildirmişlerdir. DHI tarafından 1993 yılında geliştirilen modele göre Kadıköy ve Yenikapı'dan deşarj edilen atıksuların %13-15'i Marmara Denizi'ne dönmektedir (Akça vd., 1998).

Karadeniz'den gelen kirlilik yükleri ve Marmara-Karadeniz etkileşimi de İstanbul Boğazı'ndaki su kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Dünyanın en büyük iç denizi olan Karadeniz anoksik bir su kütlesi konumundadır. Sularının %87-90'ı oksijenden yoksundur. Karadeniz sularının Boğaz yoluyla yenilenmesi zayıf ve içsel karışımın da az olması nedeniyle Karadeniz suyunun yenilenme süresi bin yıla yakın bir zaman almaktadır (Maderich ve Konstantinov, 2002). Karadeniz önemli boyuttaki bir kirlenme sorunu ile karşı karşıyadır. Karadeniz'e kıyısı olan ülkeler kirlenmenin önüne geçilmesi amacıyla bir araya

gelerek çeşitli çalışmalar başlatmışlardır. Bu kapsamda önemli miktarda veri toplanmış ve toplanmaktadır. Sarıkaya vd. (1998) Karadeniz’e kıyısı olan altı ülkeden toplanan verilere göre toplam evsel, endüstriyel ve nehir kaynaklı kirlenmeyi, temel kirletici yükler olan BOİ₅, TAKM, Toplam Azot (TN) ve Toplam Fosfor (TP) parametreleri cinsinden değerlendirmiş ve dağılımlarını Çizelge 4.1’deki gibi vermişlerdir.

Çizelge 4.1 Kirlilik yüklerinin dağılımı (Tüm Ülkeler), Sarıkaya vd., (1998)

Bileşen	BOİ ₅ (t/yıl) (%)		TAKM (t/yıl) (%)		Toplam N (t/yıl)	Toplam İnorg. N (t/yıl)	Toplam P (t/yıl)	
Evsel+End.	150,78	14.3	358,008	0.7	167.23	-	8.68	18.3
Ulusal Nehirler	55,32	5.3	5,494,408	10	49.53	11.77	4.95	10.4
Uluslararası Nehirler	844,77	80.4	48.855.000	89.3	386.64	33.93	33.78	71.3
TOPLAM	1,050,87	100	54.707.416	100	603.64	45.70	47.41	100

Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi toplam kirliliğin en önemli bölümü nehirler tarafından Karadeniz’e taşınmaktadır. Karadeniz’e boşalan akarsulardan Tuna Nehri en büyük debiye sahiptir. Dolayısıyla Karadeniz’e akarsularla taşınan kirlilikten büyük oranda Tuna sorumludur. Tuna Nehri’nin yıllık ortalama debisi 4000-9000 m³/s arasındadır (Alpar ve Yüce, 1998). Diğer önemli nehirler ise debileri Tuna’nın yaklaşık üçte biri kadar olan Dinyeper ve Dinyester nehirleridir. Karadeniz’e Türkiye kıyılarından boşalan nehirlerin debileri ise, 100-600 m³/s arasındadır. Altı ülkenin Karadeniz’e kıyısı olmakla birlikte bu nehirleri içerisinden geçtiği onbir ülkeden Karadeniz’e kirlilik ulaşmaktadır. Avrupa kıtasında oluşan kirliliğin yaklaşık olarak üçte birinin Karadeniz’e ulaştığı tahmin edilmektedir. Karadeniz’e Türkiye’den deşarj edilen kirlilik daha çok evsel kökenlidir.

Karadeniz’e gelen toplam yağ kirliliği 110.840 t/yıl olarak tahmin edilmektedir. Bunun 57.404 t/yıllık kısmı Karadeniz’e kıyısı olan ülkelerden deşarj edilirken, kaza sonucu yağ dökülmesi 136 t/yıl olarak geçmiş yılların ortalaması alınarak hesaplanmış ve gemilerden kaçak olarak yapılan deşarjlar dâhil edilmemiştir (Sarıkaya vd., 1998).

Boğazlar yoluyla Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki kirlilik değişimi Çizelge 4.2’deki gibi verilmiştir (Polat ve Tuğrul, 1995).

Çizelge 4.2 İstanbul Boğazı-Karadeniz arasında kirlilik değişimi, Polat ve Tuğrul, (1995).

	Toplam N (t/yıl)	Toplam P (t/yıl)	TOK (ton/yıl)
Marmara Denizi'ne	190,000	12,000	1,520,000
Karadeniz'e	60,000	10,000	350,000

Özsoy vd. (1998b) tarafından 1991-1993 yılları arasında yürütülen çalışmalarda, İstanbul Boğazı'nın normal iki tabakalı akımında ve tabakalardan birinin bloke olduğu aşırı durumu da içermek üzere, deşarj davranışlarını tanımlayan deneyler yapılmıştır. Deneylerde içerisine iz maddesi olarak Rhodamine boya katılmış atıksuyun dispersiyonu izlenmiştir. Boğaz'ın alt, üst ve ara tabakalarına ait dispersiyon katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.3'de gösterilmiştir (Özsoy vd., 1998b).

Çizelge 4.3 Üç tabakalı sistemde Rhodamine boya konsantrasyonları, Özsoy vd., (1998b)

Deney Tarihi	Deney Tipi	Maksimum Orta Tabaka Ortalaması			Maksimum Ölçülen			Dispersiyon Katsayısı E (m ² /s)
		ü. t. (ppb)	o. t. (ppb)	a. t. (ppb)	ü. t. (ppb)	o. t. (ppb)	a. t. (ppb)	
08/1992	Ani	0.16	0.63	52.3	0.75	0.68	81.6	171
09/1992	Sürekli	0.29	0.41	3.80	0.75	0.46	10.2	205
04/1993	Ani	0.18	0.92	21.0	1.45	5.76	63.8	90
11/1993	Ani	0.38	1.56	78.9	0.55	4.92	109.1	138

ü. t.: üst tabaka, o. t. : orta tabaka, a. t.: alt tabaka.

İstanbul Boğazı'ndaki hidrodinamik yapı ilk olarak Sümer ve Bakioğlu (1982) tarafından analitik bir model ile benzeştirilmiştir. Bu modelde araştırmacılar ara tabaka ve taban sürtünmelerini dikkate almışlardır. Saha verileri ile yaptıkları karşılaştırmalardan model sonuçlarının saha verileri ile oldukça iyi bir uyum gösterdiği sonucuna varmışlardır. Bu ilk model ara tabaka eğimini oldukça iyi tahmin etmektedir. Daha sonra Sözer ve Özsoy (2002), İstanbul Boğazı'nın hidrodinamik yapısını üç boyutlu olarak modellemişlerdir. 3 boyutlu bir model olan SCRUM'ı kullanılarak serbest yüzey dinamikleri kadar, karışım, adveksiyon ve eddy difüzyonu parametrelerinin de farklı değerlerinde çalışmışlardır. İdealize edilmiş geometrik ve hidrografik koşullar altında açık sınır şartlarının ve karışım parametrelerinin seçimine bağlı olarak boğaz akımının gösterdiği davranışları gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar açık sınır şartlarının seçiminin net akım doğrultusuna bağlı olduğu ve modellemede büyük özen gerektirdiği sonucuna varmışlardır. Etkili parametreler olarak, net su bütçesi, basınç ve rüzgâr kabarmasının dikkate alındığı bu modelde bloke olmuş akım

şartlarında akım doğrultuları da benzeştirilebilmiştir. Bu üç boyutlu model çalışmasında yatay ve düşey doğrultularda Laplace Difüzyonu kabulü yapılmış ve izleyiciler ve momentum için difüzyon katsayılarının $K_h=150-350 \text{ m}^2/\text{s}$, $K_v=10^{-6}-10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ arasındaki değerleri ile çalışılmıştır. Tüm benzetimlerde, stabilite şartının sağlanabilmesi için zaman adımı, baroklinik modda $\Delta t=5 \text{ s.}$ ve barotropik modda ise bunun 1/20'si kadar alınmıştır. Model davranışını test etmek için çeşitli başlangıç ve sınır şartları için denemeler yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda momentum ve izleyiciler için difüzyon katsayısı değerleri, $K_h=250 \text{ m}^2/\text{s}$, $K_v=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak elde edilmiştir.

Karadeniz ve Marmara Denizi'ni birbirine bağlayan ve aralarındaki su alışverişini sağlayan konumu ile İstanbul Boğazı bu denizlerin biyojeokimyasal özelliklerinin de etkisi altındadır. Yılmaz (2002) Türkiye denizlerinin biyojeokimyasal yapısını incelemiştir. Karadeniz'in yüzeydeki oksijenli tabakasının hemen altındaki derin basen suları sürekli oksijensizdir ve tabana doğru artan yüksek derişimlerde hidrojen sülfür (H_2S) içermektedir (Murray vd, 1989; 1995; Codispoti vd., 1991; Tuğrul vd., 1992; Saydam vd., 1993) . Karadeniz'de dikey karışımlar haloklinin üst sınırına kadar etkili olduğundan oksijenli yüzey tabakasından sülfürlü derin sulara Çözünmüş Oksijen (ÇO) taşınımı çok sınırlı olmaktadır. Karadeniz'de kıyısız alanlarda nehir girdilerine (Cociasu vd., 1996; 1997; Tuncer vd., 1998) paralel olarak düşey ve yatay taşınım mekanizmaları ile sedimandan olan girdiler besin tuzlarına kaynak oluşturmaktadır. Karadeniz'de birincil üretim yıl boyunca ilkbahar ve sonbaharda olmak üzere iki kez pik değerlere ulaşmaktadır (Vedernikov ve Demidov, 1993). Son 10-15 yıldır ayrıca yaz fitoplankton patlamaları ve yüksek düzeyde birincil üretim hem kıyılarda hem de açık Karadeniz sularında gözlenmiştir (Hay vd., 1990; Yılmaz vd., 1998a; 1998b).

4.2. İSKİ (1997-2006) Su Kalitesi İzleme Çalışmaları

İstanbul Boğazı'nın çeşitli noktalarında konumlanmış 49 istasyonda İSKİ tarafından 1997 yılından bu yana su kalitesi izleme çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmaların başlıca amaçları:

- Bir izleme sistemi oluşturarak, İstanbul için yapılan planlama çalışmalarına zemin hazırlamak,
- Proje sahası içerisindeki su ve katı maddelere ait fiziksel, kimyasal ve biyolojik analizleri gerçekleştirerek, Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'nın su kalitesi ve ekolojik yapısını belirlemektir.

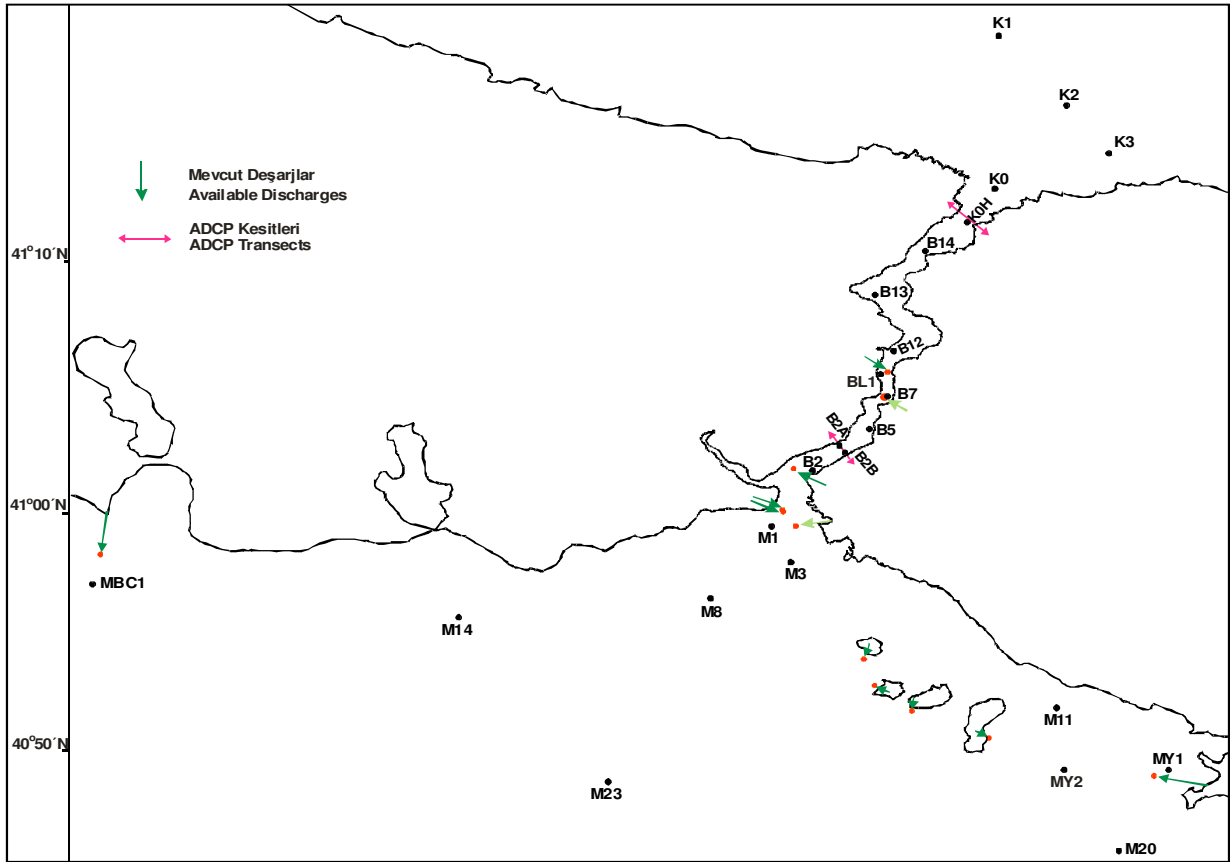
İzleme çalışmaları dâhilinde İstanbul Boğazı boyunca aylık ve Marmara ile Karadeniz

boyunca yerleştirilen istasyonlarda ise, mevsimlik veriler alınmaktadır. Bu mevsimlerde hava koşulları müsaade ettiğinde Şubat (kış), Mayıs (ilkbahar), Ağustos (yaz), Kasım (sonbahar) aylarında veri toplanmaktadır.

İzleme istasyonlarının seçiminde aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmuştur:

- Verilerin karşılaştırılması ve geçerliliğinin kontrol edilebilmesi için, daha önce izleme çalışmalarının yürütüldüğü istasyonlar,
- İstanbul çıkışında alt tabakadaki Marmara Denizi etkisinin gözlemlenebileceği istasyonlar,
- Karadeniz'in üst suyunun dispersiyon karakteristiklerinin değerlendirilmesi için uygun istasyonlar,
- İstanbul Boğazı boyunca sürekli izlemenin mümkün olabileceği istasyonlar,
- Mevcut ve planlanan deşarj sistemlerinin etkilerinin izlenmesi için uygun istasyonlar.

İzleme istasyonlarının yerleşimleri Şekil 4.1'de ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.1 İstanbul Boğazı boyunca su kalitesi izleme istasyonları ve deşarj noktalarının konumları, Sur vd. (2004).

Çizelge 4.4 İstanbul Boğazı boyunca su kalitesi izleme istasyonları, konumları ve özellikleri, Sur vd. (2004).

İstasyon	Konum Tanımı	Koordinatları	Deney	Amaç
M08	Marmara Denizi	40°56.40'N 28°55.66'E	Mevsimsel	MD-BMK Kontrol
M03	Marmara Denizi	40°58.00'N 28°59.80'E	Mevsimsel	MD-BMK Kontrol
M11	Marmara Denizi	40°51.80'N 29°10.50'E	Mevsimsel	AD Deşarj Kontrol
M14	Marmara Denizi	40°55.60'N 28°46.50'E	Mevsimsel	BÇ Açığı KÇ Kontrol
M20	Marmara Denizi	40°45.80'N 29°13.00'E	Mevsimsel	MD-Tuzla Kontrol
M23	Marmara Denizi	40°48.70'N 29°52.50'E	Mevsimsel	MD-Kontrol
MBC	Marmara Denizi	40°56.00'N 28°36.00'E	Aylık	Büyük Çekmece Kontrol
MY1	Marmara Denizi	40°50.60'N 29°13.60'E	Aylık	Tuzla Kontrol
MY2	Marmara Denizi	40°50.60'N 29°10.00'E	Aylık	Tuzla Kontrol
B2	İstanbul Boğazı	41°01.83'N 29°00.75'E	Aylık	Üsküdar Deşarj Kontrol
B7	İstanbul Boğazı	41°05.00'N 29°03.75'E	Aylık	Küçüksü-Göksu Kontrol
BL1	İstanbul Boğazı	41°07.85'N 29°03.45'E	Aylık	BL-Deşarj Kontrol
B13	İstanbul Boğazı	41°09.28'N 29°03.33'E	Aylık	Boğaz Deşarj Kontrol
K0	İstanbul Boğazı	41°13.50'N 29°08.00'E	Aylık	Boğaz Çıkış Kontrol
K1	Karadeniz	41°20.00'N 29°08.00'E	Mevsimsel	Karadeniz Kontrol
K3	Karadeniz	41°15.10'N 29°12.60'E	Mevsimsel	Riva Kontrol
K2	Karadeniz	41°17.10'N 29°10.90'E	Mevsimsel	Boğaz Çıkış Kontrol

MD-Marmara Denizi BMK-Boğaz-Marmara Çıkışı BL-Baltalimanı BÇ-Büyük Çekmece KÇ-Küçük Çekmece
AD-Adalar

Toplam 49 örnekleme istasyonu mevcuttur. Örnekleme derinlikleri uluslararası standartlar esas alınarak seçilmiş ve üst, orta ve alt tabakaları temsil etmelerine özen gösterilmiştir. Derinlikler: 0, 5, 25, 35, 50, 60 m olarak seçilmiştir.

R/V Arar gemisi ve örnekleme istasyonlarının konumları da GPS kullanılarak belirlenmiştir.

Proje amaçları doğrultusunda izlenecek parametrelerin seçiminde aşağıdaki esaslar dikkate alınmıştır:

- Su özelliklerini etkileyen ve model çalışmalarında gerekli meteorolojik parametreler,
- Işık yansımaları ve soğurmasını etkileyen parametreler,
- Tabakalaşmayı tanımlayan parametreler,
- Birincil üretkenliği etkileyen besin maddeleri,
- Canlı yaşamını etkileyen ve karakterize eden parametreler,
- Mikrobiyolojik kirlenmeyi tanımlayan parametreler,
- Organik kirlenmeyi tanımlayan parametreler,
- Birincil üretici ve tüketiciler,
- Su kalitesini tanımlayan parametreler,
- Katı madde kompozisyonunu tanımlayan parametreler.

Çalışma kapsamında izlenen parametreler ile ölçüm ve analizlerine dair özellikler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Su Kalitesi izleme istasyonlarının konumları ve bu istasyonlarda ölçülen parametreler ile ölçüm periyotları Çizelge 4.6’da verilmiştir. İstanbul Boğazı’na deşarj yapan atıksu arıtma tesisleri ile bunların çıkış konsantrasyonları ve deşarj tesislerinin özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Yine Çizelge 4.8’de herbir deniz deşarjına ait 2004 ve 2005 yılları aylık ortalama AKM, BOİ ve KOİ konsantrasyonları verilmiştir.

Çizelge 4.5 Su kalitesi izleme çalışmaları kapsamında izlenen parametreler ve özellikleri, Sur vd. (2004)

GRUBU	PARAMETRE	ÖRNEKLEME SEVİYESİ	ANALİZ	AÇIKLAMA
Meteorolojik	Hava Sıcaklığı	Gemi Üzeri	Yerinde	Gemiden
	Rüzgâr Hızı	Gemi Üzeri	Yerinde	Gemiden
	Basınç/Nem	Gemi Üzeri	Yerinde	Gemiden
Fiziksel	Su Sıcaklığı	BD	Yerinde	CTD ile ölçüm
	Tuzluluk	BD	Yerinde	CTD ile ölçüm
	Yoğunluk	BD	Yerinde	CTD ile ölçüm
	Akıntı	BD	Yerinde	Gemide
	Secchi Disk Derinliği	ÖD	Yerinde	Gemide
Kimyasal	Çözünmüş Oksijen	BD	Yerinde	Winkler
	AKM	BD	Laboratuarda	Ön İşlem Gemide
	TOK/POK	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
Azot	NO ₂ -N	BD	Laboratuarda	Oto analizör
	NO ₃ -N	BD	Laboratuarda	Oto analizör
	Organik N	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
	Toplam Organik N	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
	Toplam N	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
Fosfor	Çözünmüş İnorg. P	BD	Laboratuarda	Oto analizör
	Toplam P	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
	Partikül P	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
Silikat	Çözünmüş Si	BD	Laboratuarda	Oto analizör
Karbonat	Toplam Karbonat	Taban	Laboratuarda	Sediment
Toksik	PAH	BD	Laboratuarda	Su/Sediment
	Deterjan	BD	Laboratuarda	Su
Ağır Metal	Fe/Mn/Cu/Hg/Pb/Zn	BD	Laboratuarda	Askıda Maddede
	Fe/Mn/Cu/Hg/Cd/Pb	BD	Laboratuarda	Su
Biyolojik	Klorofil-a	ÖD	Laboratuarda	Ön İşlem Gemide
	Fitoplankton	ÖD	Laboratuarda	Kalitatif ve Kantitatif
	Zooplankton	ÖD	Laboratuarda	Kalitatif ve Kantitatif
	Fekal Koliform	ÖD	Yerinde	Membran Filtre
	Bentik Organizma	Taban	Laboratuarda	Kalitatif ve Kantitatif

BD: Belirlenen Derinliklerde, ÖD: Ölçülebilir Derinliklerde.

Çizelge 4.6 Su kalitesi izleme istasyonları konumları ve özellikleri

İstasyon	Konum Tanımı	Koordinatları	Deney	Amaç	Ölçülen Parametreler
M08	Marmara Denizi	40°56.40'N 28°55.66'E	Mevsimsel	MD-BMK Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Su Kolonunda Çözünmüş Metal Profilleri, AKM İçerisinde Metallerin Değişimi, Alt Tabakada Metallerin Ortalamaları, Alt Tabaka Suyunda AKM Alüminyum Yüzdesi ve Zenginleştirme Faktörleri, Civa Ölçümleri, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
M01	Marmara Denizi				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı,
M03	Marmara Denizi	40°58.00'N 28°59.80'E	Mevsimsel	MD-BMK Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
M11	Marmara Denizi	40°51.80'N 29°10.50'E	Mevsimsel	AD Deşarj Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
M14	Marmara Denizi	40°55.60'N 28°46.50'E	Mevsimsel	BÇ Açığı KÇ Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,

MD-Marmara Denizi

BMK-Boğaz-Marmara Çıkışı

BL-Baltalimanı

BÇ-Büyük Çekmece

KÇ-Küçük Çekmece

AD-Adalar

Çizelge 4.6 Devamı.

M20	Marmara Denizi	40°45.80'N 29°13.00'E	Mevsimsel	MD-Tuzla Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Çeşitlilik İndisi,
M23	Marmara Denizi	40°48.70'N 29°52.50'E	Mevsimsel	MD-Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı,
MBC	Marmara Denizi	40°56.00'N 28°36.00'E	Aylık	Büyük Çekmece Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
MY1	Marmara Denizi	40°50.60'N 29°13.60'E	Aylık	Tuzla Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Nütrient ve Klorofil-a Dikey Dağılımları, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
MY2	Marmara Denizi	40°50.60'N 29°10.00'E	Aylık	Tuzla Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
M21	Marmara Denizi				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri,
M24	Marmara Denizi				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri,

MD-Marmara Denizi

BMK-Boğaz-Marmara Çıkışı

BL-Baltalimanı

BÇ-Büyük Çekmece

KÇ-Küçük Çekmece

AD-Adalar

Çizelge 4.6 Devamı.

B2	İstanbul Boğazı	41°01.83'N 29°00.75'E	Aylık	Üsküdar Deşarj Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Nütrient ve Klorofil-a Dikey Dağılımları, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Su Kolonunda Çözünmüş Metal Profilleri, AKM İçerisinde Metallerin Değişimi, Alt ve Üst Tabakada Metallerin Ortalamaları, Alt ve Üst Tabaka Suyunda AKM Alüminyum Yüzdesi ve Zenginleştirme Faktörleri, Civa Ölçümleri, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
B5	İstanbul Boğazı				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı,
B7	İstanbul Boğazı	41°05.00'N 29°03.75'E	Aylık	Küçüksü-Göksu Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
BL1	İstanbul Boğazı	41°07.85'N 29°03.45'E	Aylık	BL-Deşarj Kontrol	Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı,
B12	İstanbul Boğazı				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı,
B13	İstanbul Boğazı	41°09.28'N 29°03.33'E	Aylık	Boğaz Deşarj Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
B14	İstanbul Boğazı				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri,
K0H	İstanbul Boğazı				Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri,

MD-Marmara Denizi BMK-Boğaz-Marmara Çıkışı BL-Baltalimanı BÇ-Büyük Çekmece KÇ-Küçük Çekmece AD-Adalar

Çizelge 4.6 Devamı

K0	İstanbul Boğazı	41°13.50'N 29°08.00'E	Aylık	Boğaz Çıkış Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Nütrient ve Klorofil-a Dikey Dağılımları, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Su Kolonunda Çözünmüş Metal Profilleri, AKM İçerisinde Metallerin Değişimi, Üst Tabakada Metallerin Ortalamaları, Üst Tabaka Suyunda AKM Alüminyum Yüzdesi ve Zenginleştirme Faktörleri, Civa Ölçümleri, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
K1	Karadeniz	41°20.00'N 29°08.00'E	Mevsimsel	Karadeniz Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Nütrient ve Klorofil-a Dikey Dağılımları, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
K3	Karadeniz	41°15.10'N 29°12.60'E	Mevsimsel	Riva Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Nütrient ve Klorofil-a Dikey Dağılımları, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
K2	Karadeniz	41°17.10'N 29°10.90'E	Mevsimsel	Boğaz Çıkış Kontrol	Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, ADCP Kesitleri, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
MKC	Marmara Denizi			Küçük Çekmece Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,
MK	Marmara Denizi			Kadıköy Kontrol	Yüzey ve Alt Tabaka Suyunda ÇO, Tuzluluk ve Sıcaklık Profilleri, Tabakalara Göre Ortalama Nütrient Değişimi, Yüzey ve Dip Suyunda AKM, Alt, Ara ve Yüzey Tabakalarında Koliform Dağılımı, Sedimentte petrol kirliliği, Petrol Kirliliğinin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Anionik Yüzey Aktif Maddenin Farklı Derinliklerdeki Miktarı, Bentik Tür Kompozisyonu, Çeşitlilik İndisi,

MD-Marmara Denizi

BMK-Boğaz-Marmara Çıkışı

BL-Baltalimanı

BÇ-Büyük Çekmece

KÇ-Küçük Çekmece

AD-Adalar

Çizelge 4.7 İstanbul ili sınırları içerisindeki atıksu arıtma tesisleri ile deniz deşarjları ve özellikleri, Sur vd. (2005)

Adı	Kapasitesi	2005 Yılında İşlem Gören Atıksu Miktarı	İşletme Yılı	Kirlilik Konsantrasyonları (mg/l)			Kirlilik Yükleri (kg/gün)			Deniz Deşarj Özellikleri				
	AKM			BOİ	KOİ	AKM	BOİ	KOİ	Boy (m)	Çapı (mm)	Deşarj Derinliği (m)	Koordinatları		
												Enlem	Boylam	
	(x10 ³ m ³ /gün)													
Yenikapı Ön AT	873	485 245	1988	242	196	452	211266	684432	394596	1180 (2400)	2×1600 (2×2200)	64	414837.72 415749.89	4541639.61 4541690.80
Baltalimanı Ön AT	625	384 757	1997	195	203	432	121875	507500	270000	435 (1200)	2×1600 (1600)	70	420850.14 421338.51	4552957.38 4552797.85
Büyükçekmece Ön AT	155	30 820	1998	228	167	408	35367	103620	63289	1897 (4753)	1600 (1600)	40	377358.97 376661.51	4540115.76 4538450.86
Küçükçekmece Ön AT	354	91 525	2003	224	234	502	79296	331344	177708	1058 (42)	1600 (1600)	27	393578.30 395841.10	4539352.70 4537765.52
Tuzla Biyolojik AT	150	234 075	1998	187	142	290	43772	33239	67882	2203 (976)	2200 (2200)	46	440186.93 437178.00	4521482.81 4522346.62
Üsküdar Ön AT	108	27 896	1992	301	361	622	8397	10070	17351	147	1600	47	416782.80 416878.70	4544147.34 4544362.23
Kadıköy Ön AT	833	333 482	2003	219	195	449	73033	65029	149733	2308 (67)	2200 (2200)	51.5	417350.44 415314.90	4540114.35 4541184.53
Küçüksu Ön AT	644	86 767	2004	231	191	385	20043	16572	33405	335 (1345)	2200 (2200)	67	421493.33 421138.56	4550032.83 4550112.48
Büyük Ada Ön AT	15	4 797	1997	200	220	500	959	1055	2398	2173	500	58	427406.83 429087.54	4526818.92 4526247.25
Heybeli Ada Ön AT	5	1 553	1998	200	220	500	311	342	776	1050	450	56	-	-
Kınalı Ada Ön AT	5	1 478	1999	200	220	500	296	325	739	1100	355	48	420355.32 420417.54	4530964.22 4530223.08
Burgaz Ada Ön AT	4.4	1 380	1999	200	220	500	276	304	690	945	350	39	420583.54 419669.76	4528246.71 4525194.00

Çizelge 4.8 Modelleme çalışmasında dikkate alınan atıksu deşarj 2004 ve 2005 yılları çıkış karakteristikleri (ISKI).

TESİS ADI	PARAMETRE (mg/l)	2004 YILI											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
YENİKAPI ÖAT	AKM	406	287	182	438	228	235	266	341	196	172	207	269
	BOİ		150	170	265	220	140	175	160	225	130	208	190
	KOİ	374	355	424	725	622	478	434	428	437	321	357	434
BALTALİMANI ÖAT	AKM	284	230	139	231	150	219	268	187	174	146	156	213
	BOİ	120	180	135	248	160	178	315	153	183	120	180	325
	KOİ	321	426	334	506	604	396	599	321	373	280	334	560
ÜSKÜDAR ÖAT	AKM							268	169	319	337	188	340
	BOİ										420	240	240
	KOİ								170		745	570	687
KADIKÖY ÖAT	AKM							225	130	298	242	291	534
	BOİ							250	140	380	210	185	135
	KOİ							775	230	626	376	374	476
KÜÇÜKSU ÖAT	AKM										322	198	310
	BOİ										370	125	85
	KOİ										564	234	294
TESİS ADI	PARAMETRE (mg/l)	2005 YILI											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
YENİKAPI ÖAT	AKM	188	260	304	234	360	272	170	212	221	190	185	101
	BOİ	190	160	300	250						240	230	125
	KOİ	378	383	611	540	610	700	400	568	476	455	448	250
BALTALİMANI ÖAT	AKM	220	203	192	207	188	162	226	179	189	252	198	198
	BOİ	290	130	170	190						220	230	225
	KOİ	590	306	372	444	434	424	347	363	357	439	464	422
ÜSKÜDAR ÖAT	AKM	274	571	376	285	365	335	326	248	214	262	192	230
	BOİ	380	360	490	380	430	450	243	270	210	420	330	270
	KOİ	651	571	980	710	812	867	392	487	426	536	510	404
KADIKÖY ÖAT	AKM	114	116	188	200	512	240	106	106	450	230	268	236
	BOİ	155	70	210	220	270	210	85	85	270	310	230	240
	KOİ	345	148	420	403	587	402	123	123	580	521	378	427
KÜÇÜKSU ÖAT	AKM	216	120	210	240	163	206	127	360	400	194	242	172
	BOİ	165	90	467	230	110	110		340	200	255	310	180
	KOİ	346	192	270	600	254	257	83	772	491	413	487	317

4.3. Su Kalitesi İzleme Çalışması Verilerinin Değerlendirilmesi

İstanbul Boğazı'nın tümü ile Karadeniz ve Marmara Denizi ile birleştiği yerlerde konumlandırılmış istasyonlardan İSKİ Su Kalitesi İzleme Çalışmaları kapsamında toplanan veriler derlenmiş, değerlendirilmiş ve sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

4.3.1 ÇO Verilerinin Değerlendirilmesi

2000-2006 yılları arasında Karadeniz Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı boyunca konumlanmış ölçüm istasyonlarının verileri incelendiğinde ÇO konsantrasyonunun en düşük 0.55 mg/l, en yüksek 13.12 mg/l ve ortalama 7.64 mg/l olduğu görülmektedir.

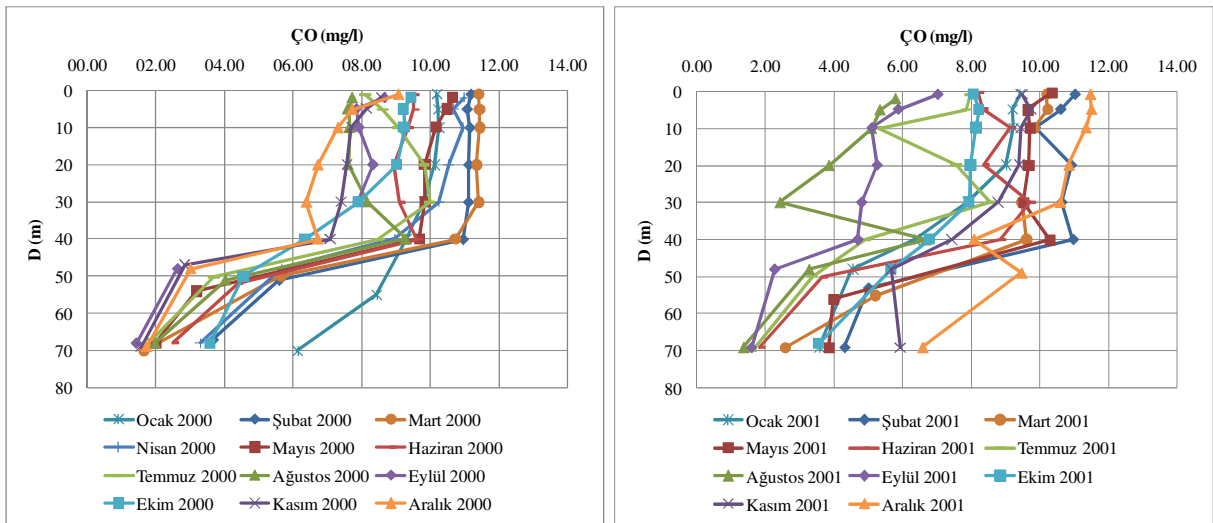
Genel olarak Karadeniz, Boğaz ve Marmara Denizi istasyonlarında yüzey suyundaki ÇO konsantrasyonu, 7 ile 12 mg/l arasında değişmektedir. Alt tabakada, üst tabaka ile karışımın azlığı ve yüksek AKM girdisi nedeniyle genel olarak düşük ÇO konsantrasyonu görülmektedir (Sur vd., 2004).

2000-2006 yılları boyunca Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara istasyonlarında yüzey suyundaki ÇO konsantrasyonunun yıl boyunca 6 mg/l'nin altına düşmediği görülmektedir. Yalnızca B13 istasyonunda 2001 yılında yüzey suyunda bu değerin altındaki konsantrasyonlar oluşmuştur.

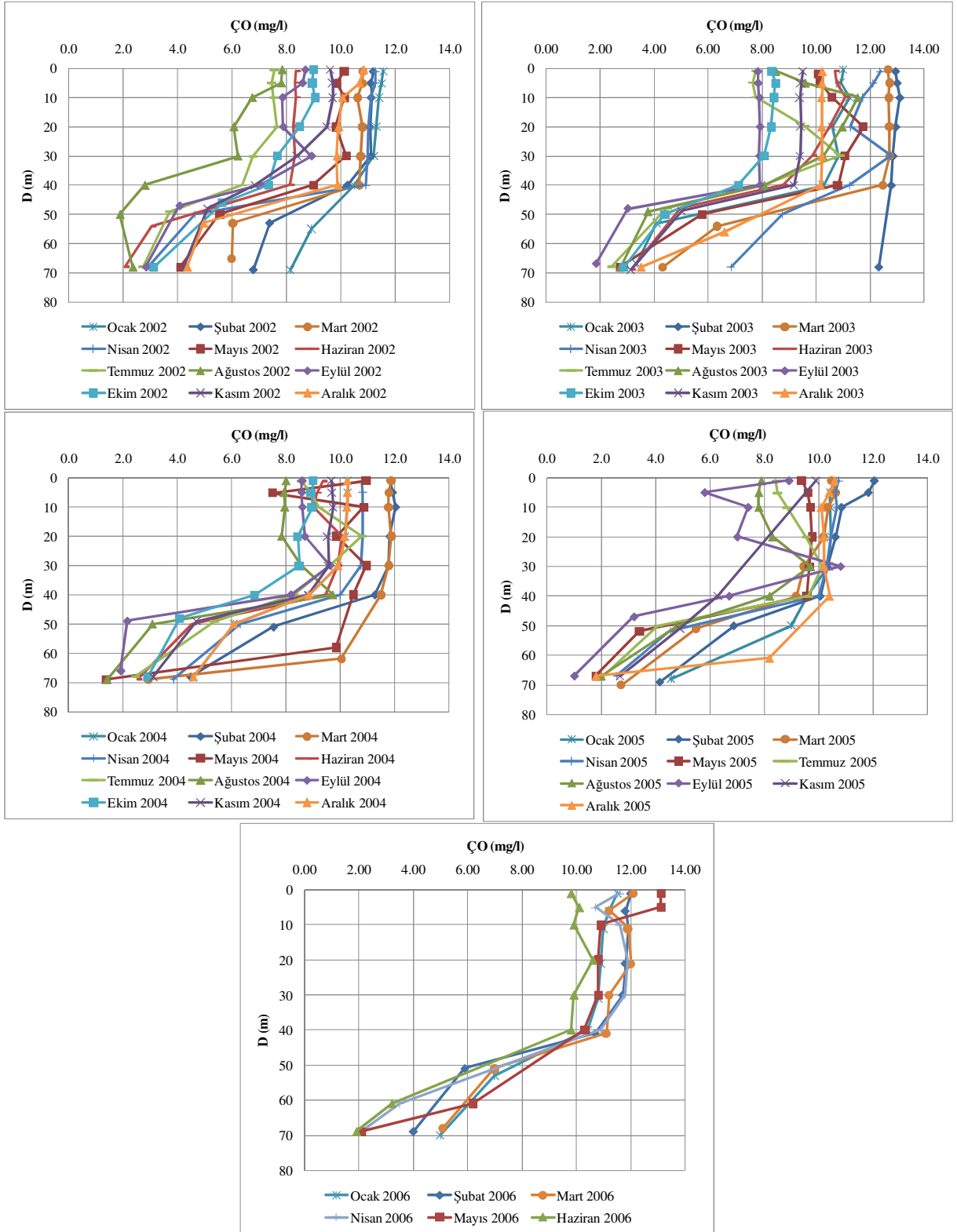
Boğaz istasyonlarında ölçülen ÇO profilleri net bir tabakalaşma göstermektedir. Üst tabaka ÇO konsantrasyonları 8-12 mg/l arasında değişirken, alt tabakadaki konsantrasyon değerleri genellikle 7 mg/l'nin altındadır. Ara tabakada karışım etkisiyle ÇO değerleri üst ve alt tabaka değerleri arasında değişmektedir. ÇO dağılımlarında gözlenen ara tabaka eğimi genel olarak tuzluluk arakesiti ile aynı eğilimi göstermektedir. Bu da sudaki ÇO konsantrasyonunun suyun sıcaklığı ve tuzluluğuna bağlı olarak değişmesinden ileri gelmektedir. Eldeki ölçüm sonuçları anlık değerler olduğundan ve aylık periyotlarla alındığından aşırı durumların gözlenmesi mümkün olmamaktadır.

2000-2006 yılları boyunca Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara istasyonlarında ÇO düşey profilleri incelendiğinde; K0 istasyonunda belirgin bir tabakalanma görülmektedir. Şekil 4.2'ye göre bu istasyonda ara tabaka 40-50. m'ler arasında oluşmaktadır. Şekil 4.3'e göre K1 istasyonunda 40 m'ye kadar üst tabaka akımının tüm yıllarda hâkim olduğu görülmekle birlikte, bu derinlikten itibaren 70 m'ye kadar başka bir ölçüm olmadığından ara tabakanın yeri hakkında net bir fikir edinilememektedir. Yalnızca Mayıs 2001 ölçümünde bir 40-45 m arasında dar bir arakesit görülmekle birlikte bunu genelleştirmek mümkün değildir. Yine Kasım 2005 ve Şubat 2006'da 50. m'de yapılan ölçümler de bu derinlikte üst tabakanın

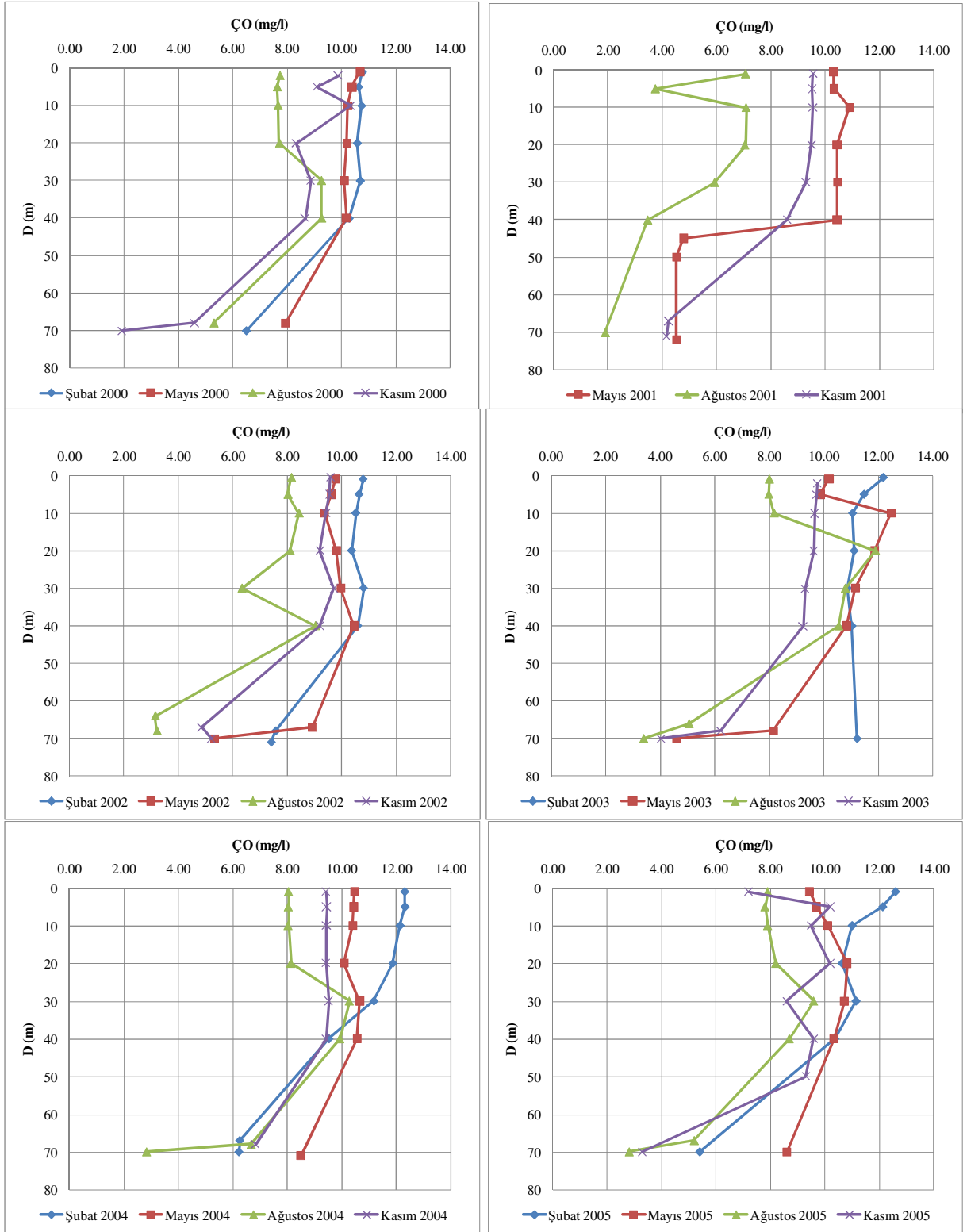
varlığını göstermektedir. Ancak bu verilerde genelleştirme için yeterli değildir. Şekil 4.4'te B13 istasyonundaki düşey ÇO profilleri değerlendirildiğinde ise ara tabakada özellikle 2002 yılında güçlü bir karışım gözlenmekte ve ara tabakanın yeri hakkında net bir şey söylemek zorlaşmaktadır. Ancak 2003, 2004, 2005 ve 2006 yılları ölçümlerine bakıldığında yine bazı aylarda güçlü karışım olmakla birlikte, ara tabakanın genel olarak 40 m'nin altında olduğu söylenebilir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da diğer Boğaz istasyonları olan B7 ve B2 istasyonlarındaki ÇO düşey profilleri gösterilmiştir. Her iki istasyonda da 2000-2006 yılları boyunca tabakalar arasında güçlü bir karışım olduğu görülmektedir. Bu iki istasyondaki ölçümler buralarda üst tabaka kalınlığının yılın önemli bir zamanında 20 m'den daha az olduğunu göstermektedir. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'de Marmara Denizi istasyonlarındaki ÇO düşey konsantrasyonları verilmiştir. M3 istasyonunda yıl boyunca güçlü bir karışım söz konusudur, net bir tabakalanma görülmemektedir. M8 istasyonunda ise ilk 10 m'de üst tabaka ve 30 m'nin altında alt tabaka görülmektedir. Ara tabakadaki karışıma bağlı olarak bu derinliklerin yıllar içerisinde değişim gösterdiği de yine Şekil 4.9'dan görülmektedir.



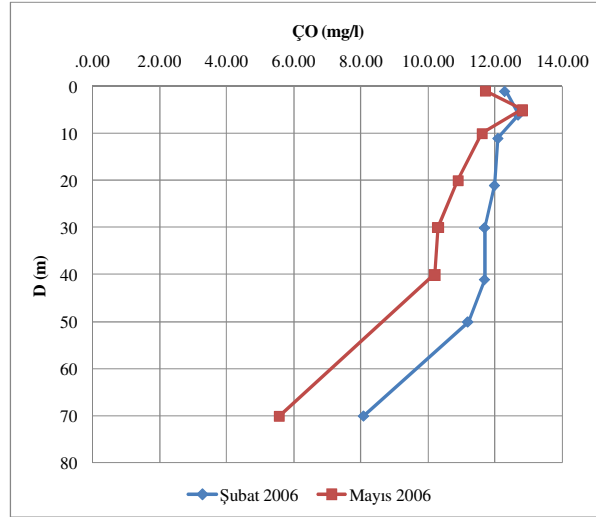
Şekil 4.2 K0 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



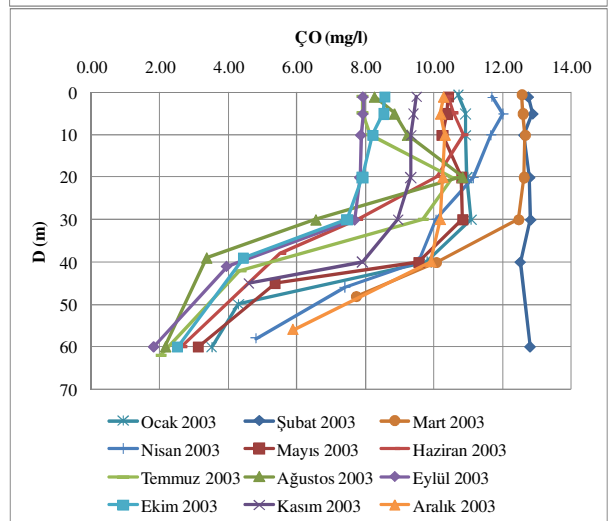
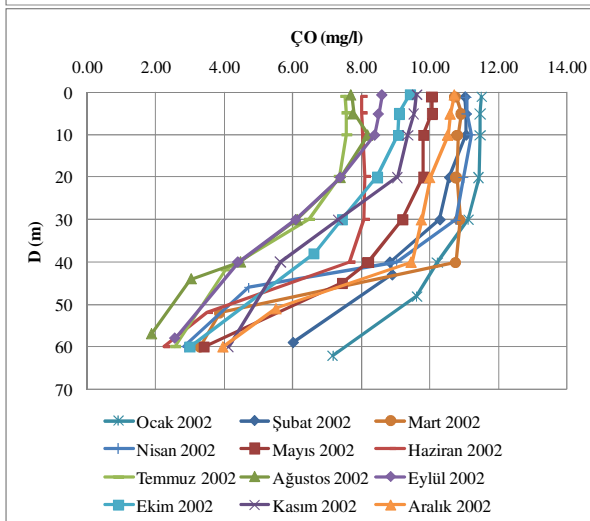
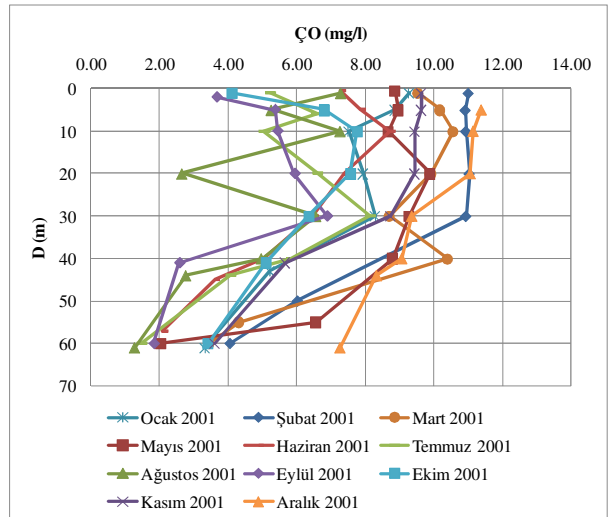
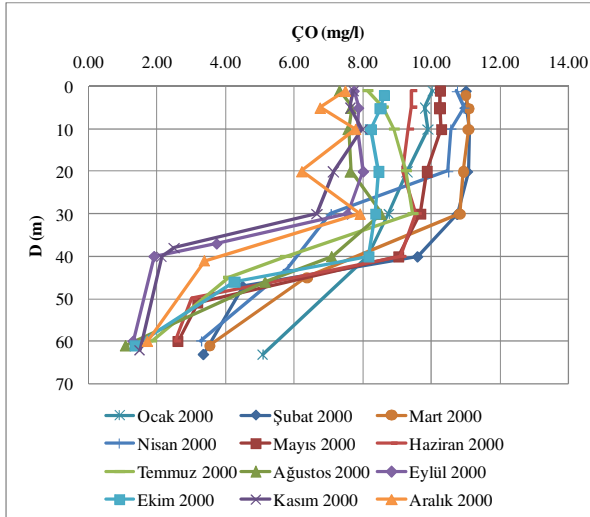
Şekil 4.2 Devamı.



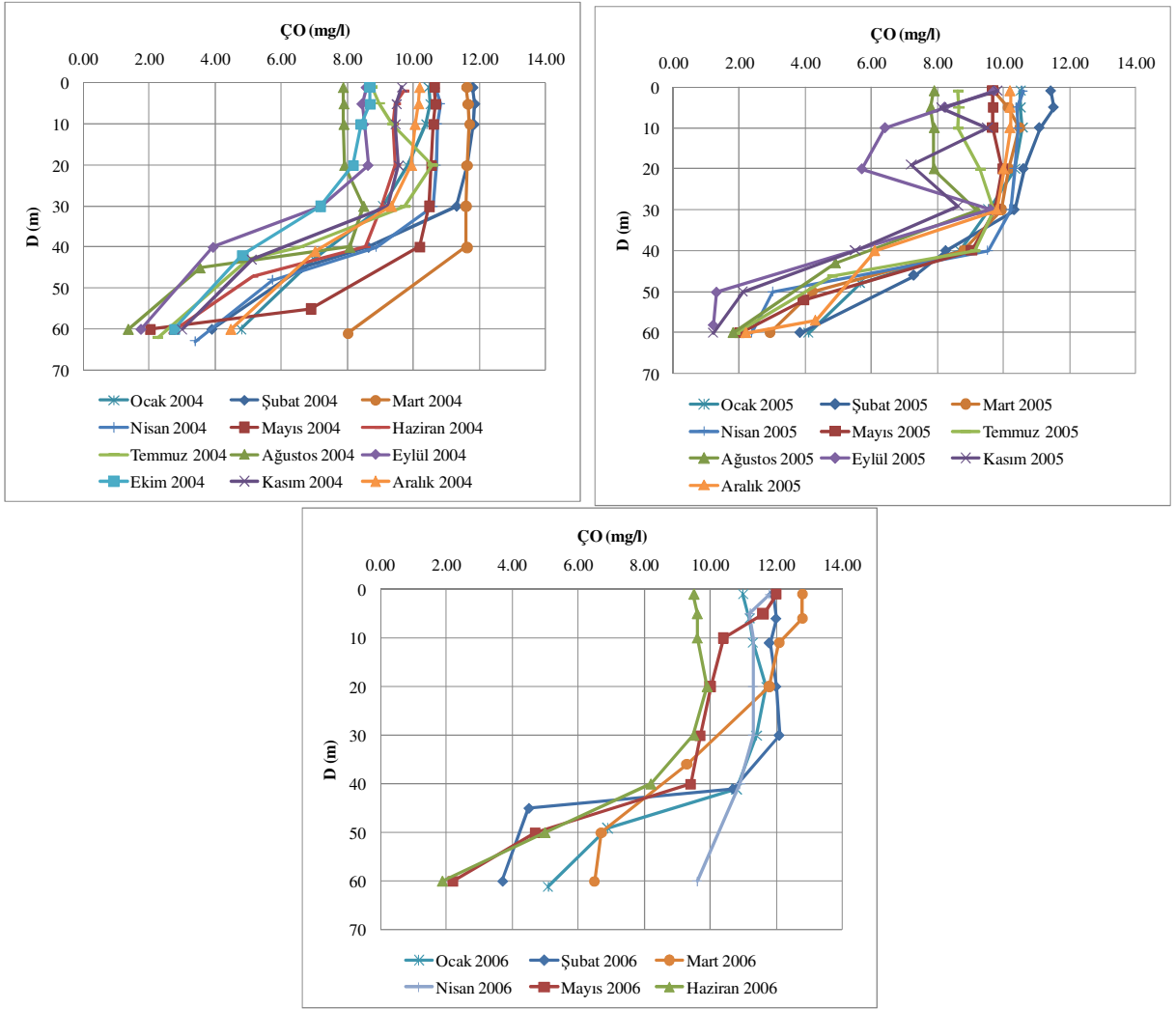
Şekil 4.3 K1 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



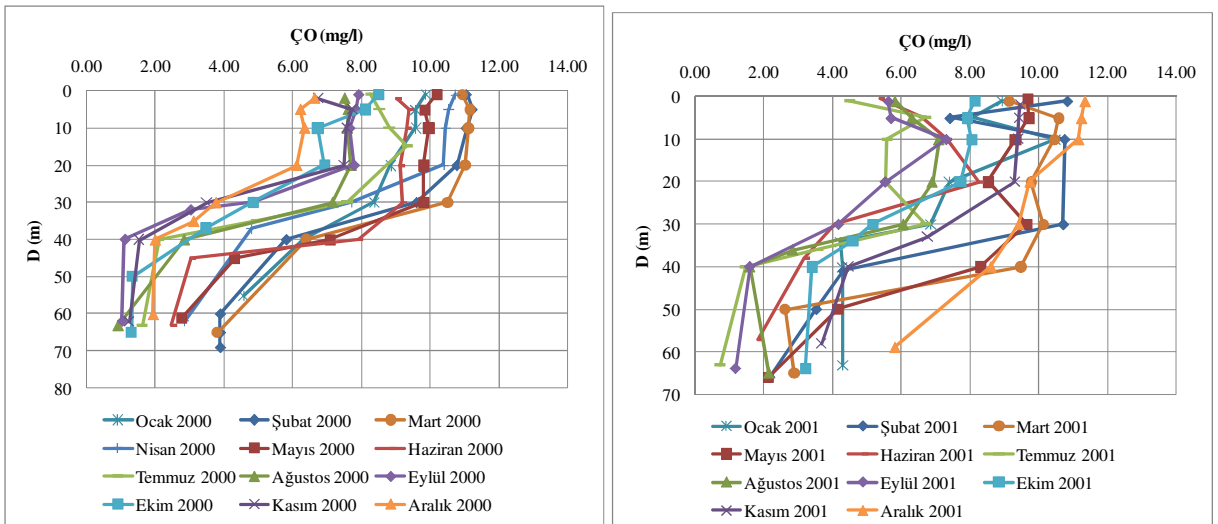
Şekil 4.3 Devamı.



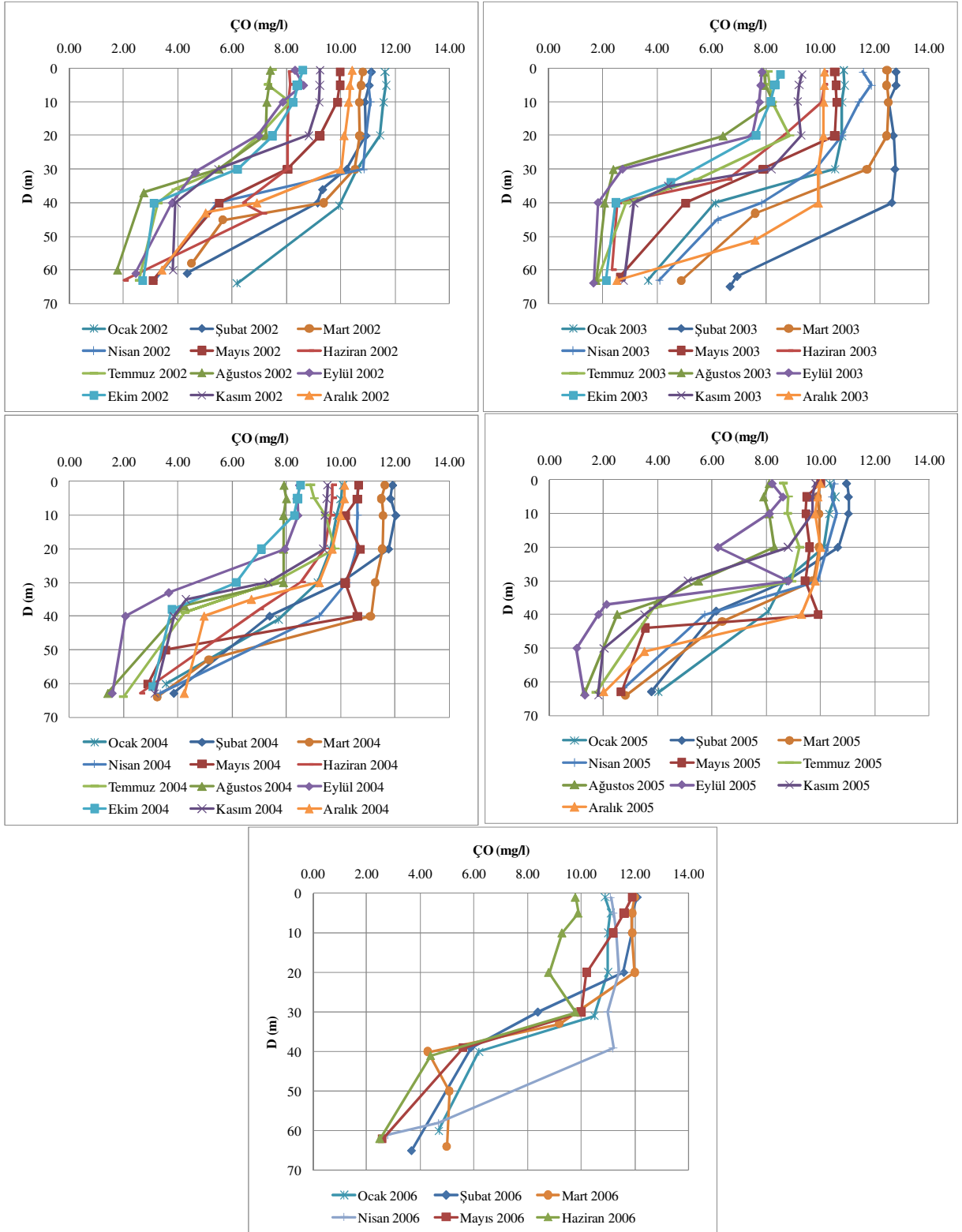
Şekil 4.4 B13 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



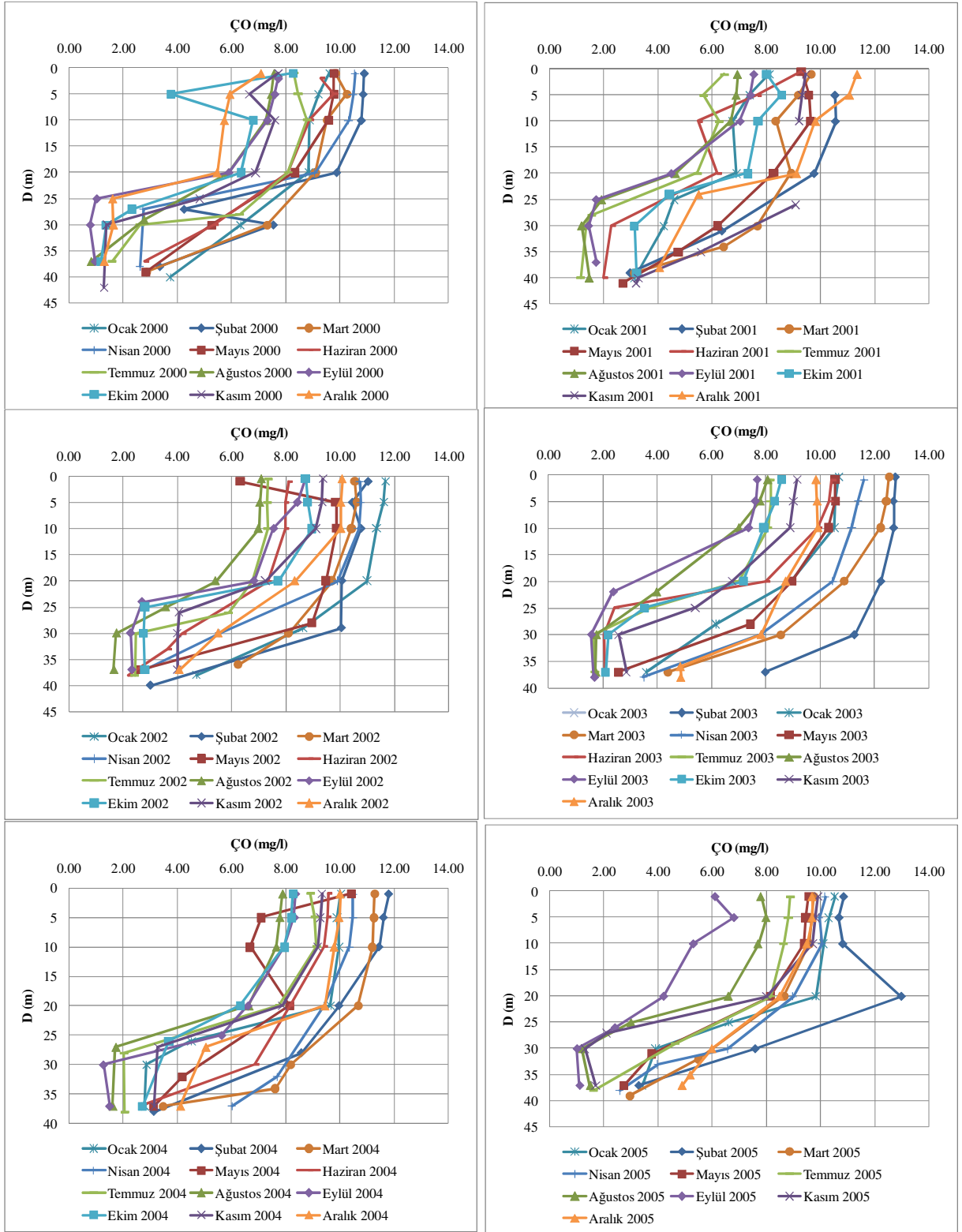
Şekil 4.4 Devamı.



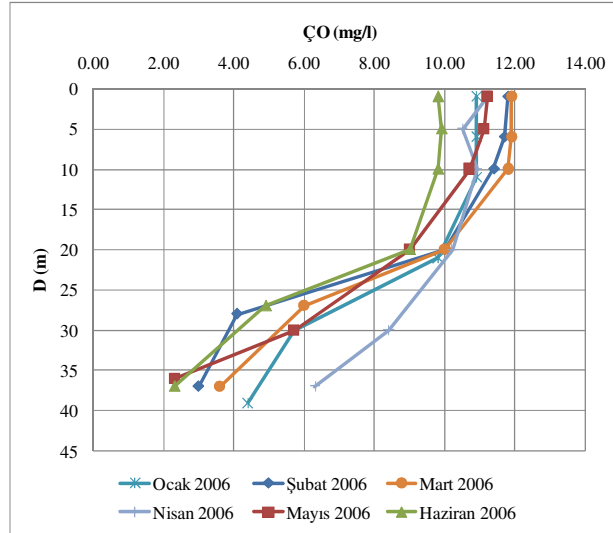
Şekil 4.5 B7 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



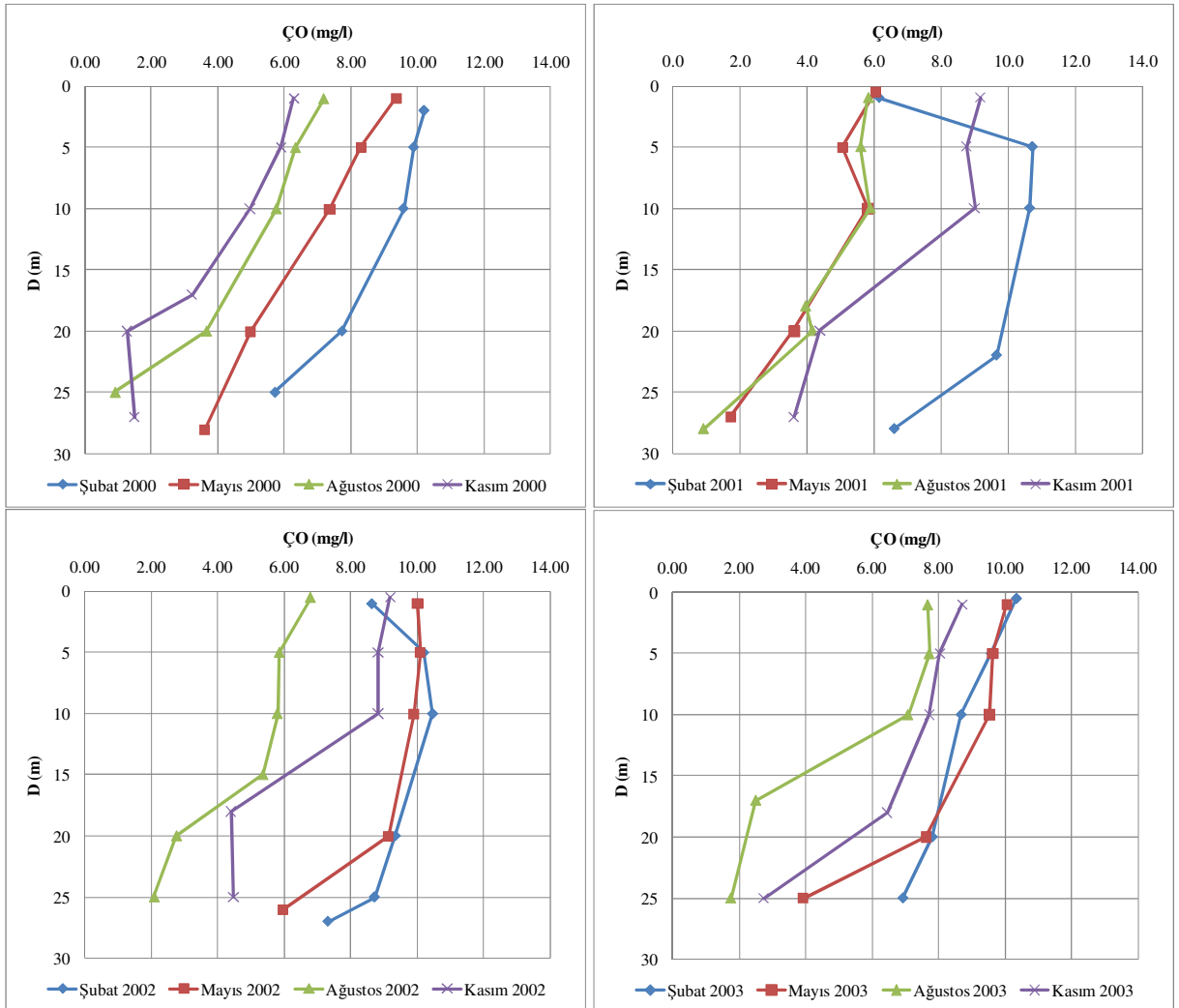
Şekil 4.5 Devamı.



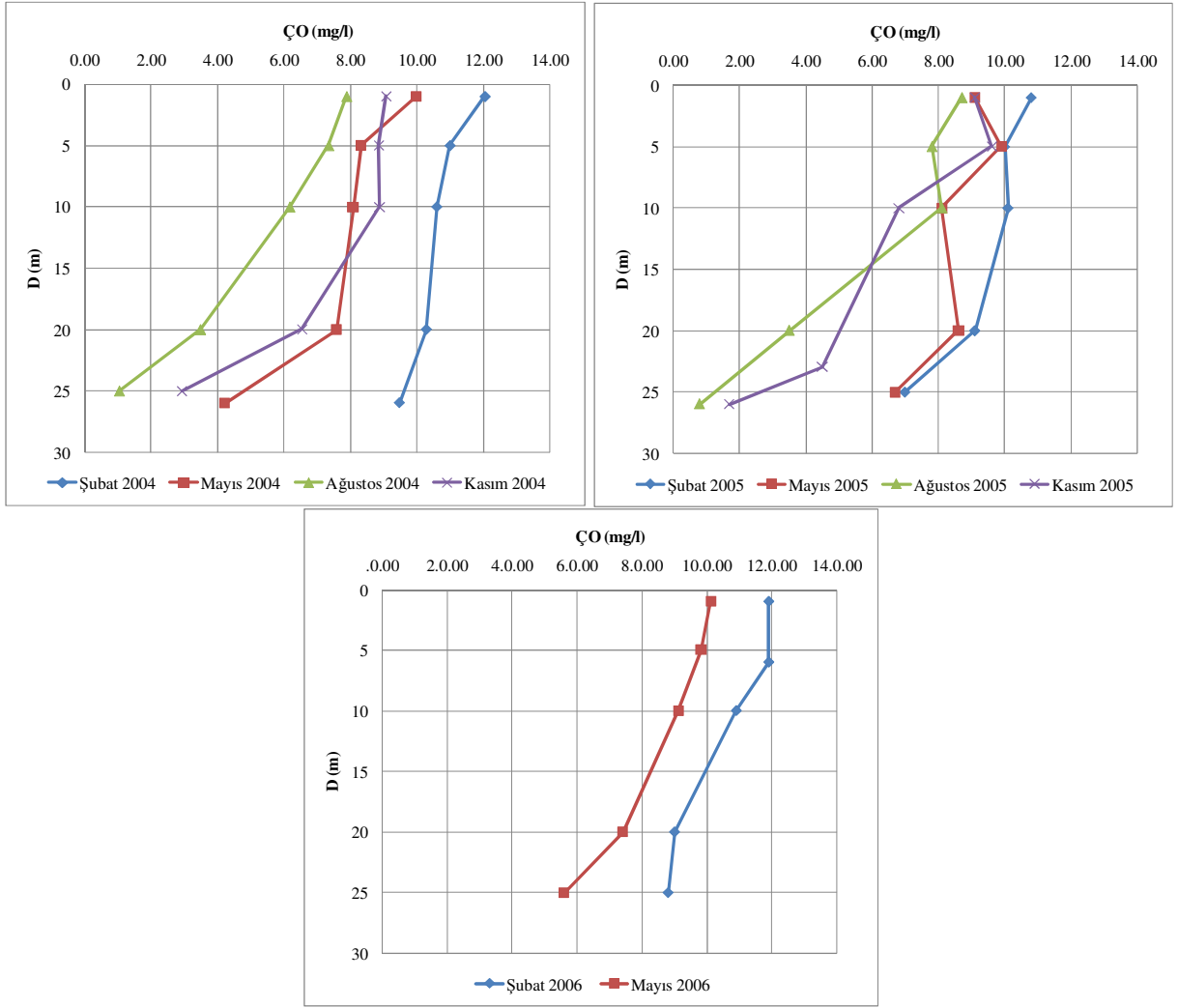
Şekil 4.6 B2 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



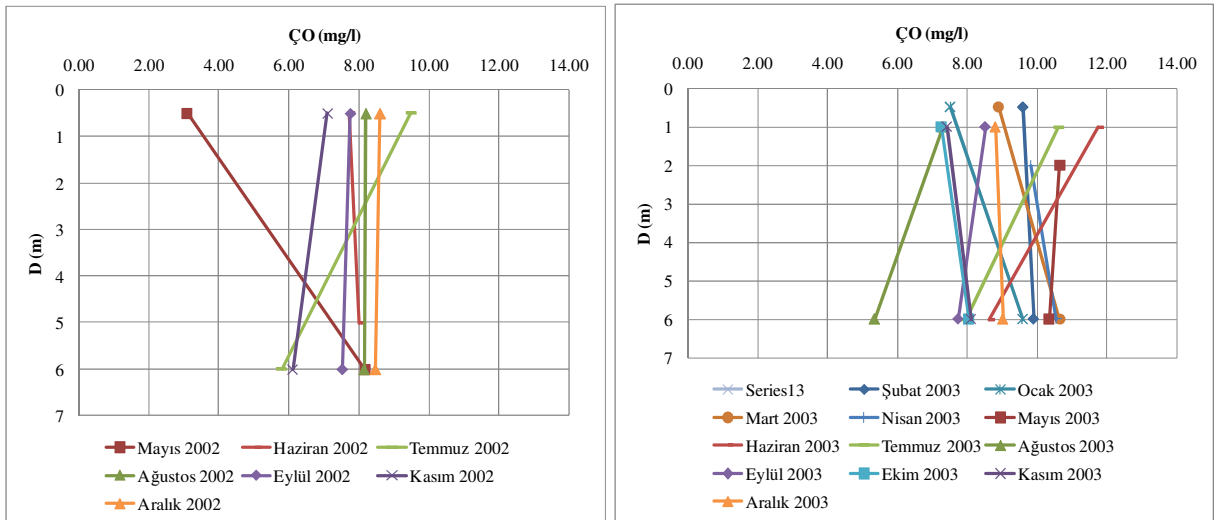
Şekil 4.6 Devamı.



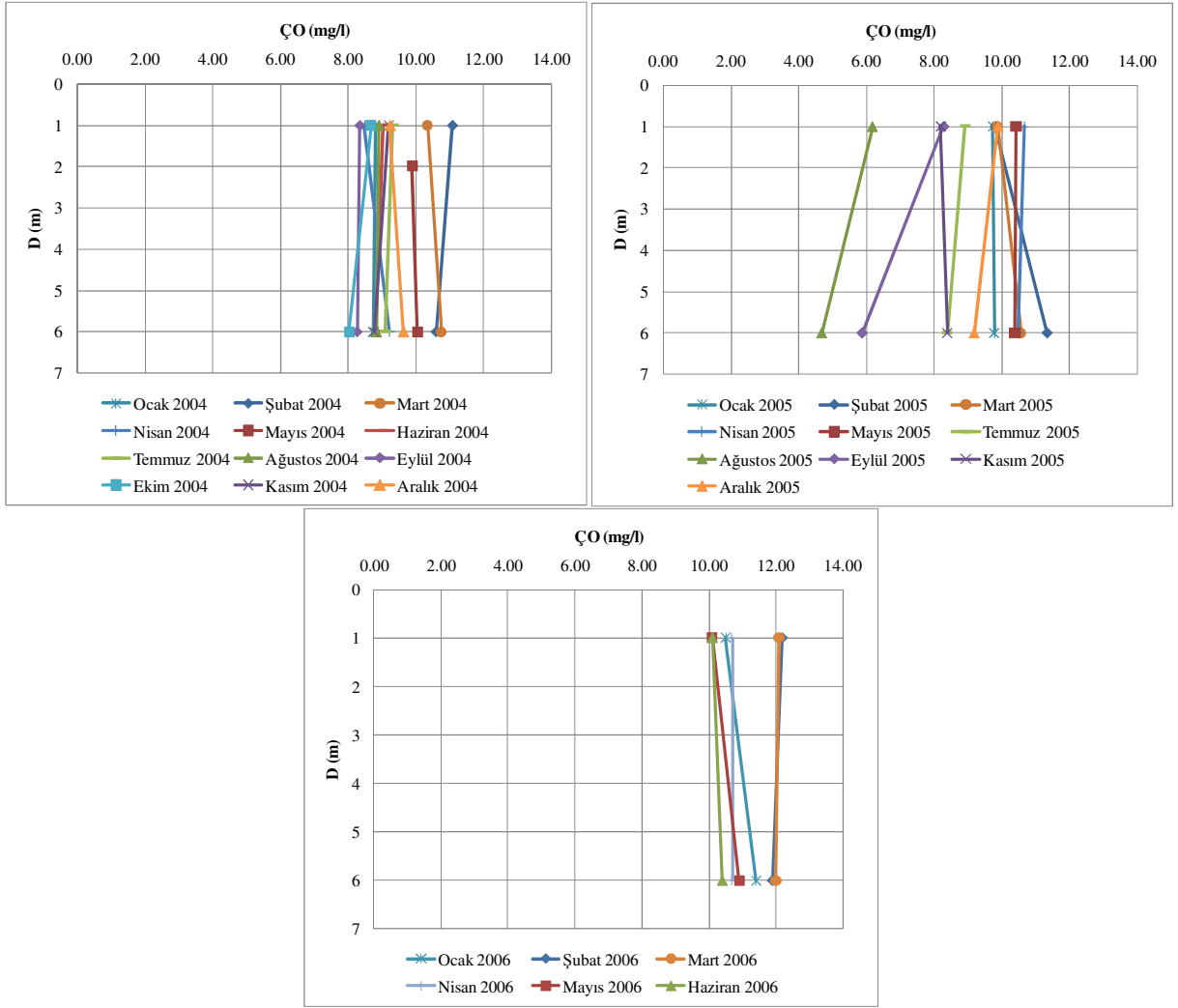
Şekil 4.7 M3 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



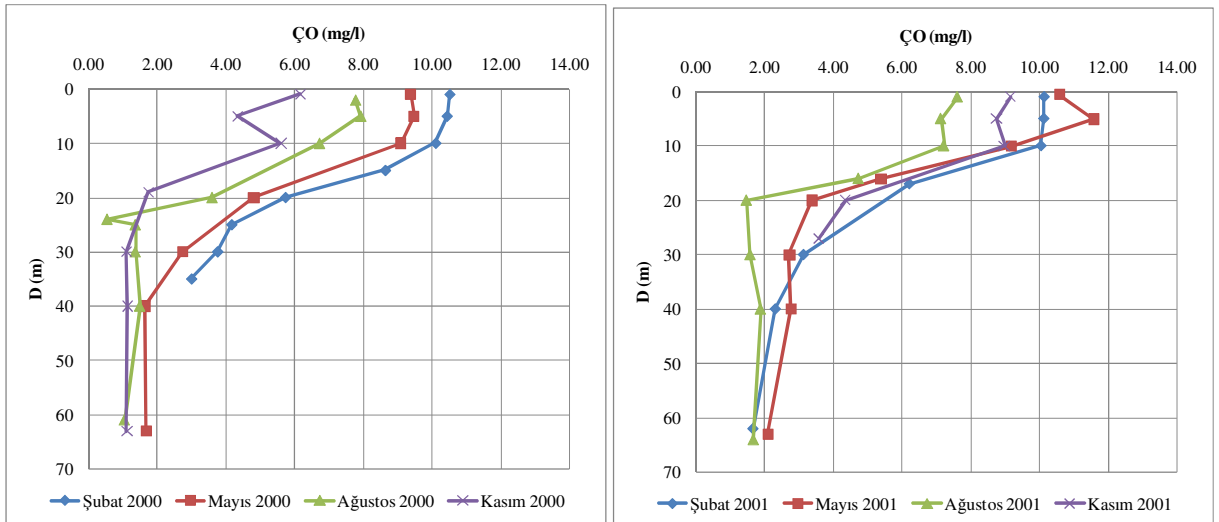
Şekil 4.7 Devamı.



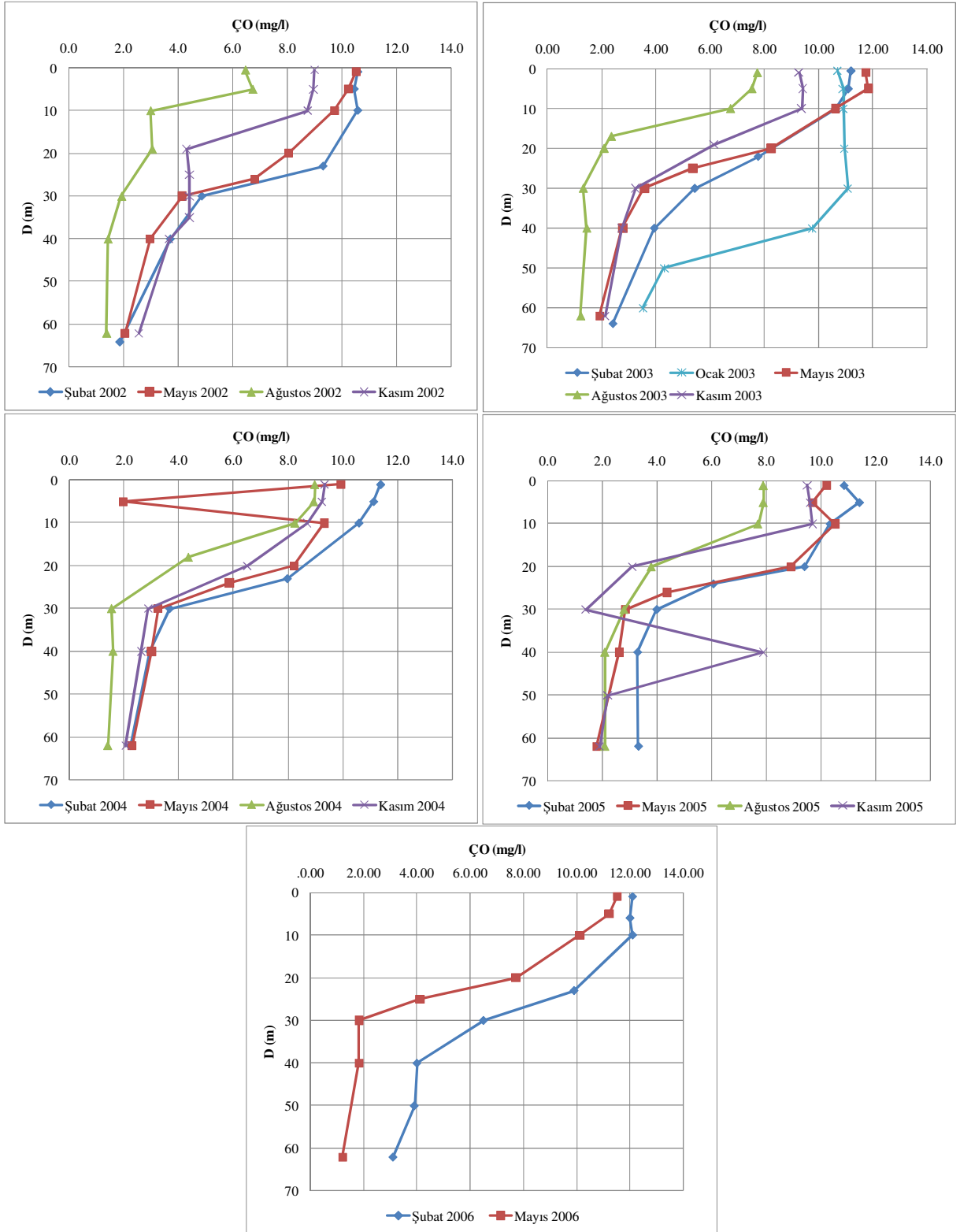
Şekil 4.8 MK istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.8 Devamı.



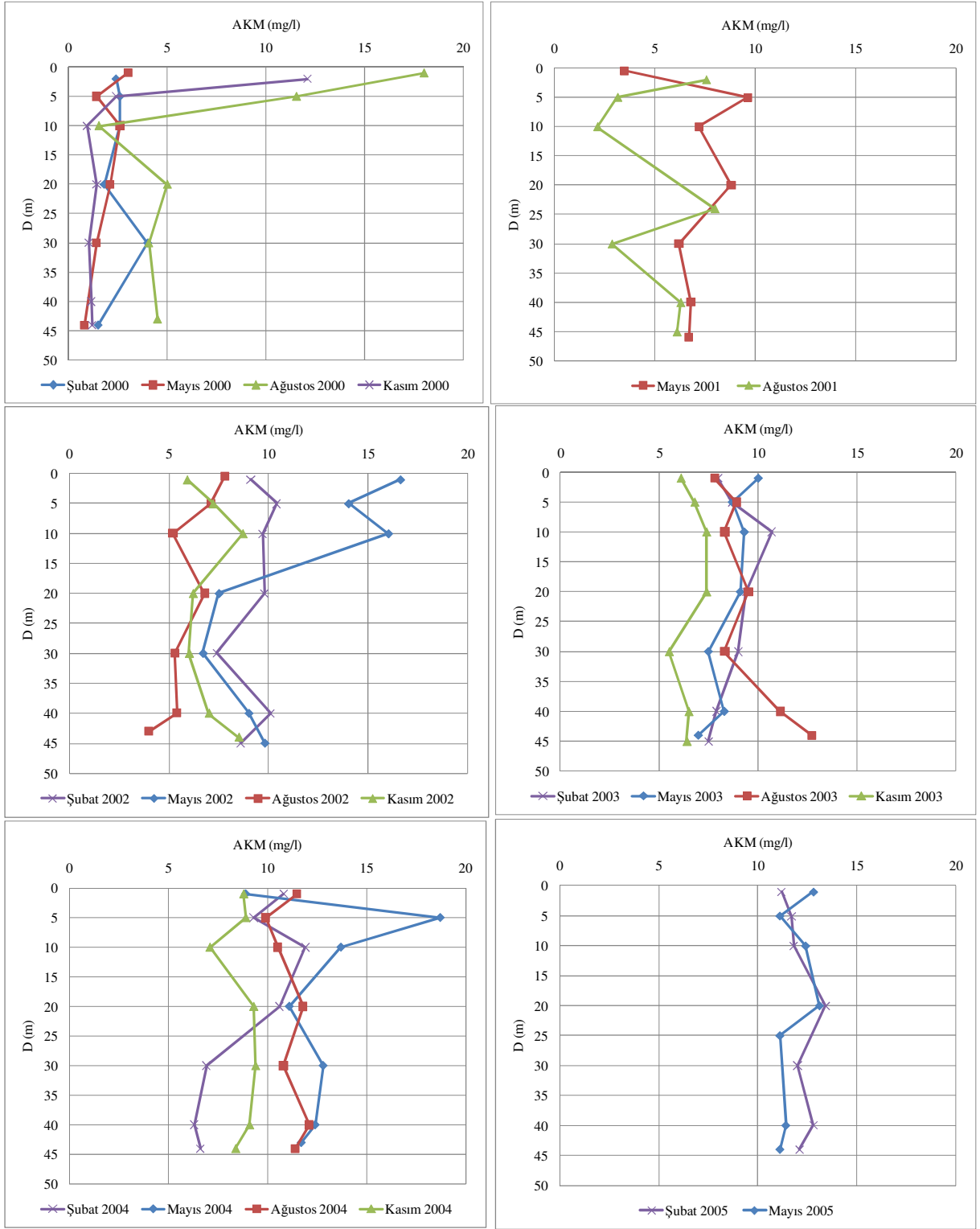
Şekil 4.9 M8 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ÇO konsantrasyonlarının değişimi.



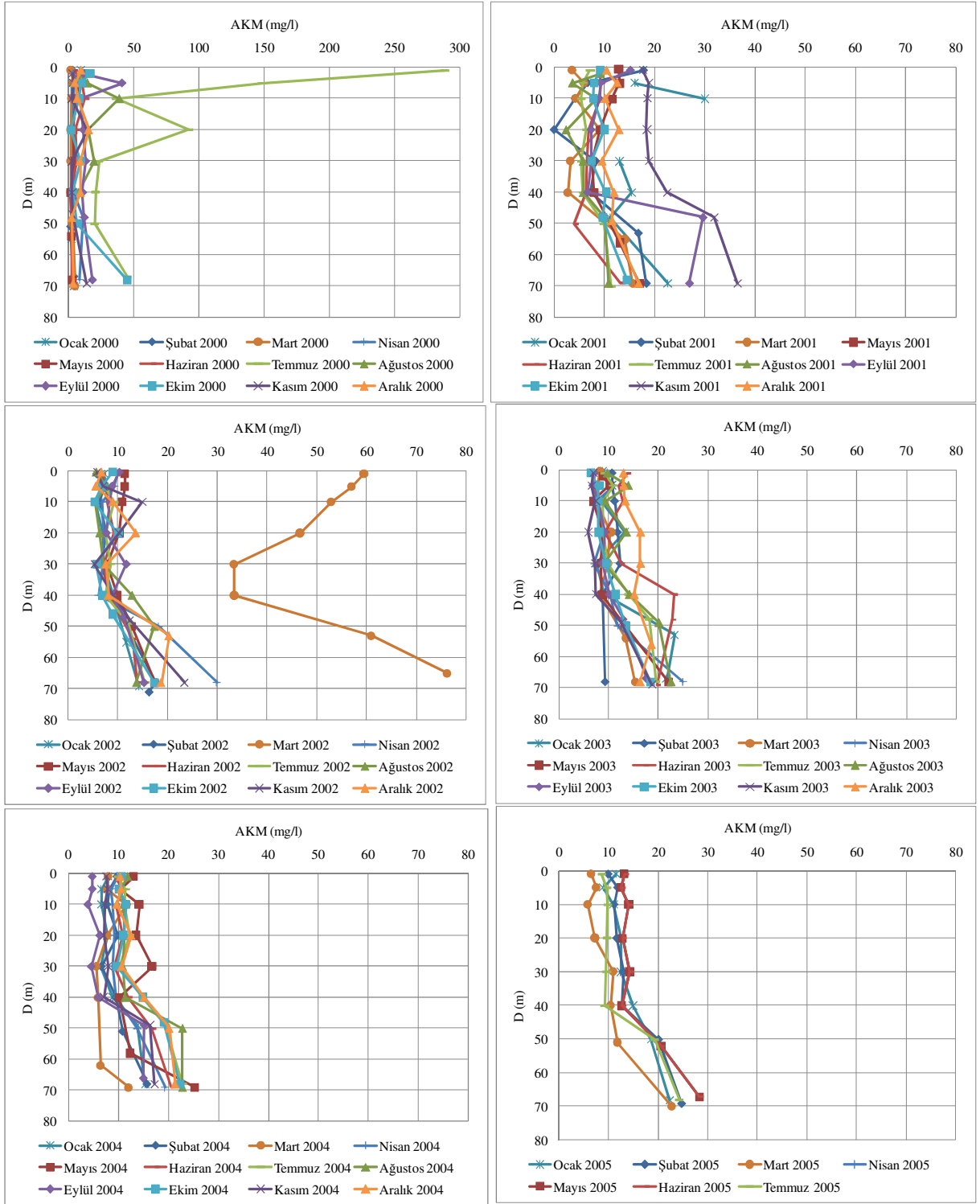
Şekil 4.9 Devamı.

4.3.2 Askıda Katı Madde Verilerinin Değerlendirilmesi

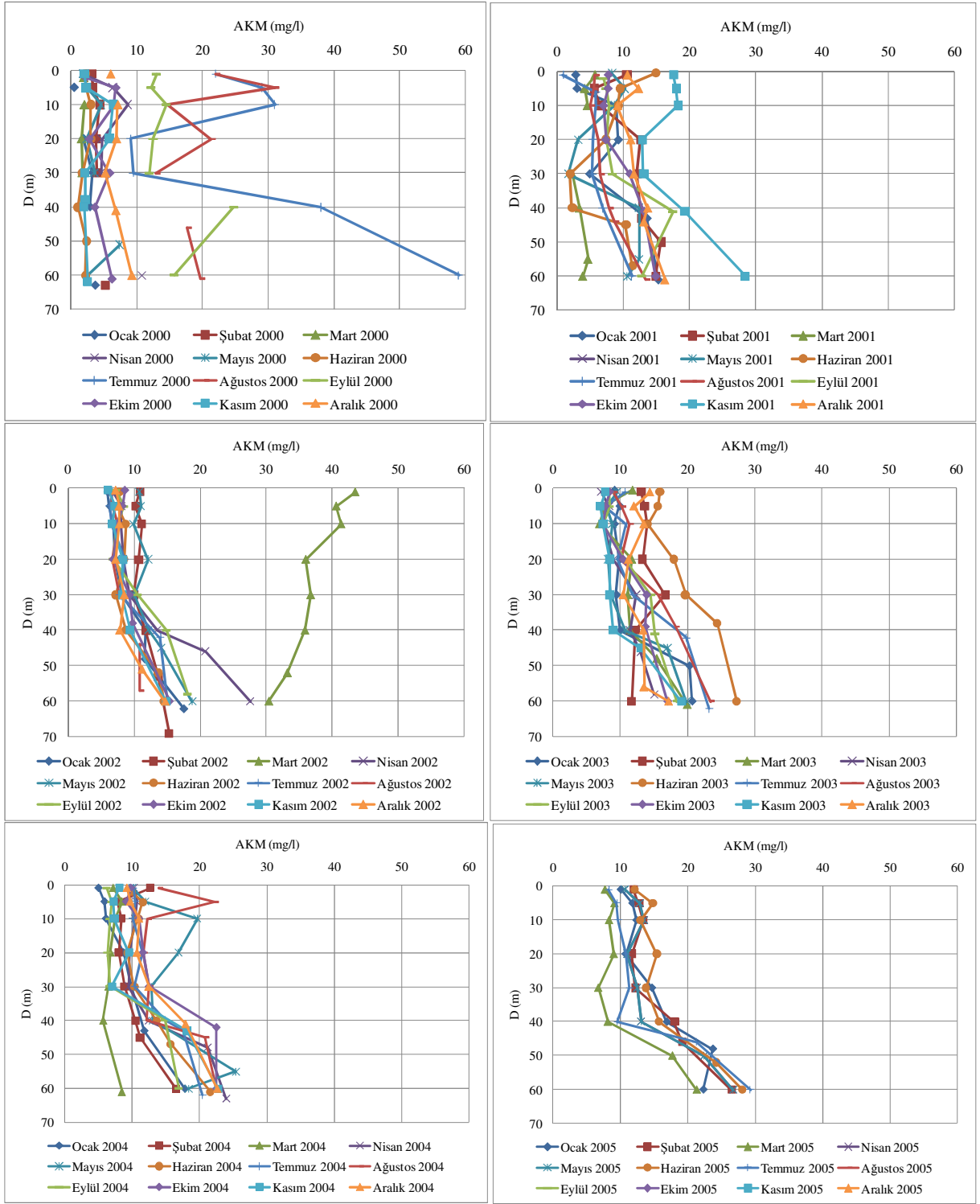
Şekil 4.10'da 2000-2005 yılları arasında İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişinde yer alan K3 istasyonunda mevsimlik olarak Askıda Katı Madde miktarları ölçülmüştür. Şekilden de görüldüğü gibi AKM konsantrasyonları derinlik boyunca önemli bir değişim göstermemektedir. Bu süre içerisinde ortalama AKM konsantrasyonu 8.06 mg/l olurken en düşük değeri 0.80 mg/l ve en yüksek değeri de 18.70 mg/l olmuştur. Yine Karadeniz girişindeki K0 istasyonunda AKM konsantrasyonlarının değişimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu istasyonda 2000-2005 yılları arasında AKM konsantrasyonu ortalama 12.53 mg/l, en düşük 0 ve en yüksek de 288.46 mg/l olmuştur. En yüksek konsantrasyon değerleri 2000 yılı Temmuz ayında yüzey suyunda gözlenmiş bunun dışında ise 2002 yılı Mart ayında ekstrem konsantrasyon değerleri görülmüştür. Şekil 4.12'de İstanbul Boğazı istasyonlarından B13 istasyonunda AKM konsantrasyonlarının değişimi gösterilmiştir. Bu istasyonda AKM konsantrasyonu ortalama 11.53 mg/l, en düşük 0.40 mg/l ve en yüksek 11.53 mg/l olmuştur. Bu istasyonda ölçülen konsantrasyon değerlerinde şiddetli değişimler gözlenmemektedir. Boğaz'daki bir diğer istasyon olan B7'de 2000-2005 yılları arasında aylık periyotlarla yapılan ölçümler Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bu istasyonda toplanan veriler AKM konsantrasyonunun ortalama değerinin 11.91 mg/l, en düşük değerinin 0.40 mg/l ve en yüksek değerinin de 131 mg/l olduğunu göstermektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te İstanbul Boğazı'ndaki diğer istasyonlar olan B7 ve B2'de ölçülen AKM konsantrasyonları verilmiştir. B2 istasyonunda 2000 yılı Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında yüksek konsantrasyon değerleri görülmektedir. Şekil 4.15'te İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi girişindeki M8 istasyonunda mevsimlik olarak ölçülmüş AKM konsantrasyonlarına bakıldığında yine 2000 yılı Ağustos ayında özellikle alt tabakada konsantrasyonun önemli miktarda arttığı görülmektedir. İstanbul Boğazı boyunca AKM ölçümü yapılan tüm istasyonlar bir arada değerlendirildiğinde ise 2000-2005 yılları arasında AKM konsantrasyonlarında birkaç aşırı değer dışında dikkat çekici bir değişim olmadığı söylenebilir. Bu aşırı artışların yoğun yağışlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



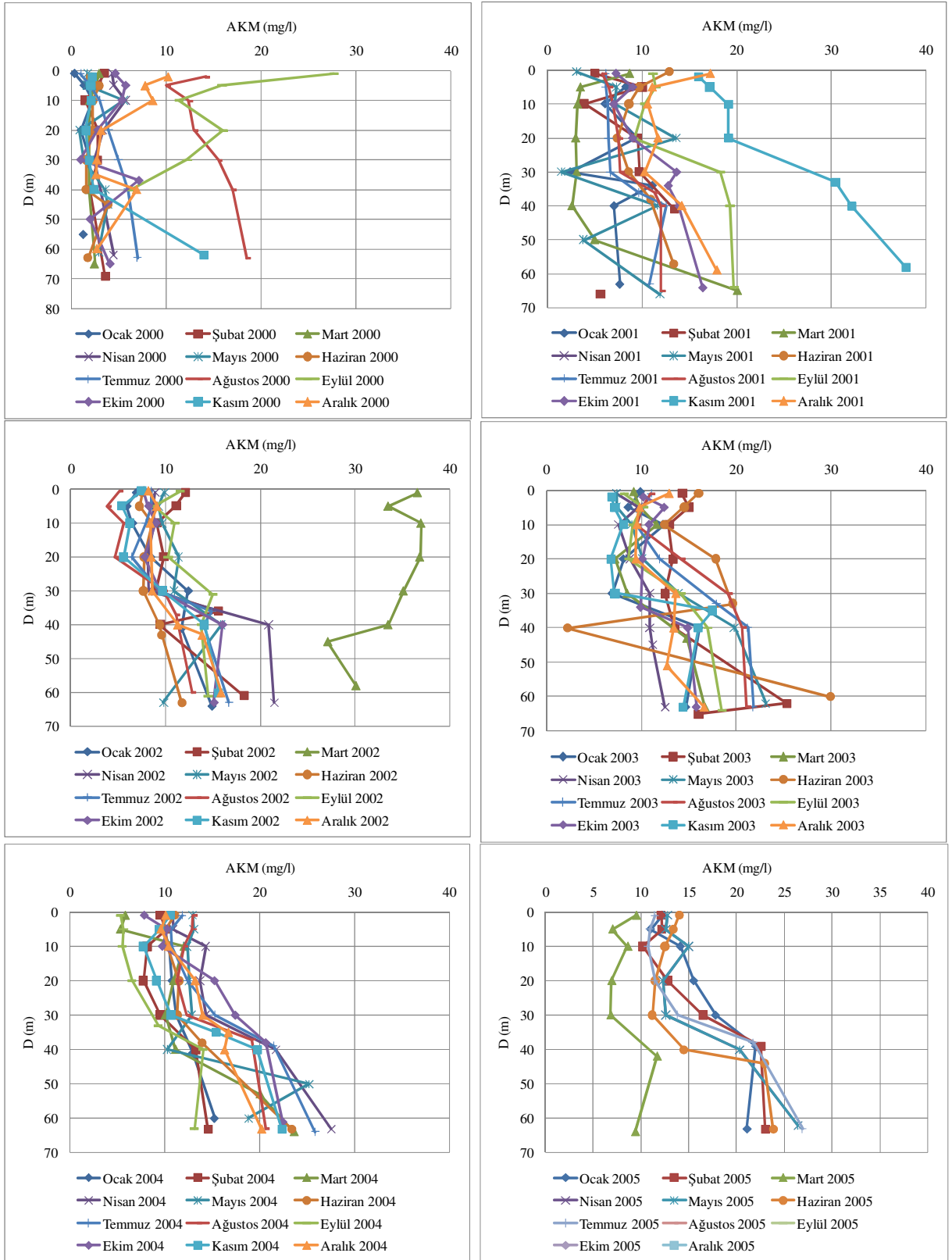
Şekil 4.10 K3 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında AKM konsantrasyonlarının değişimi.



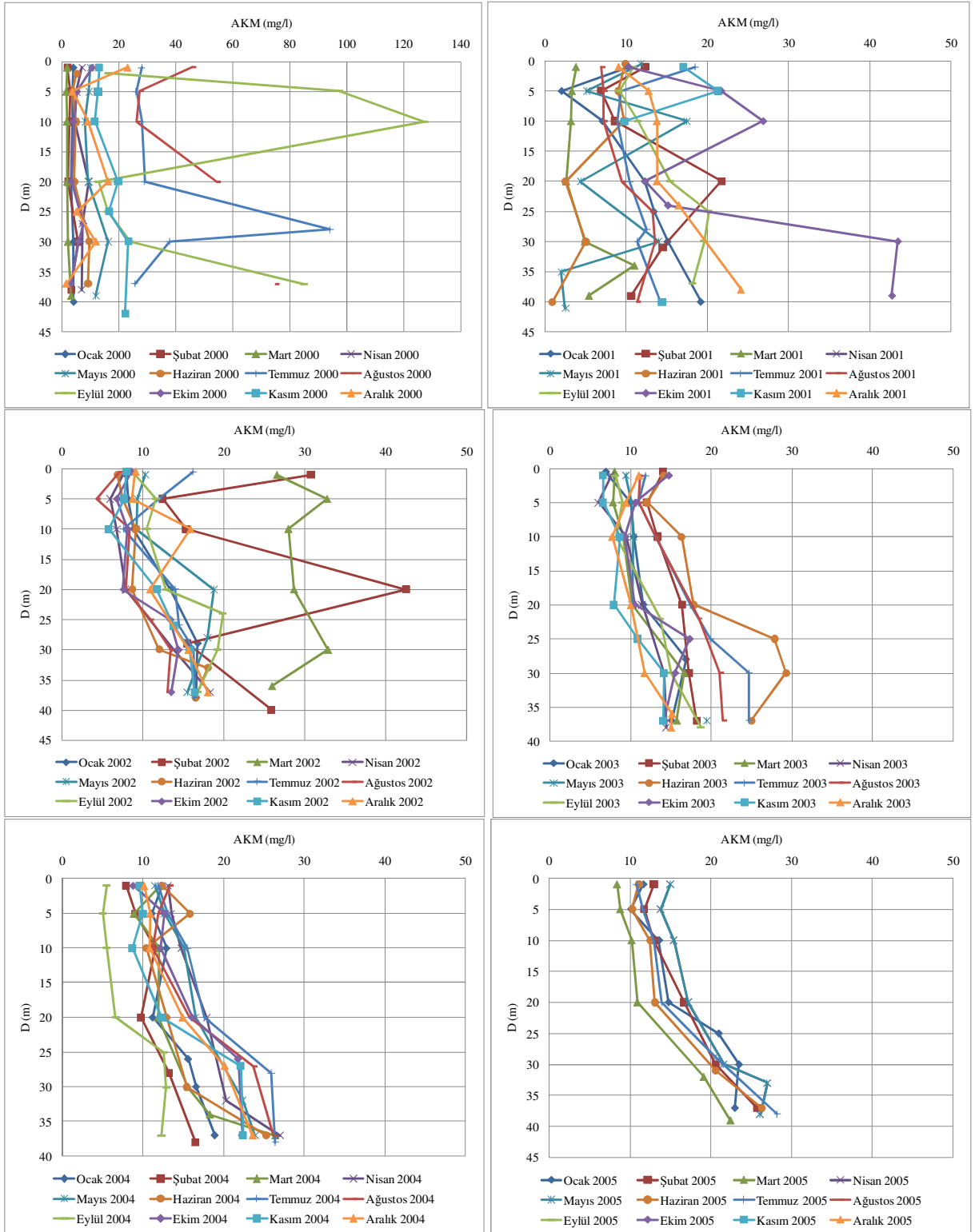
Şekil 4.11 K0 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM konsantrasyonlarının değişimi.



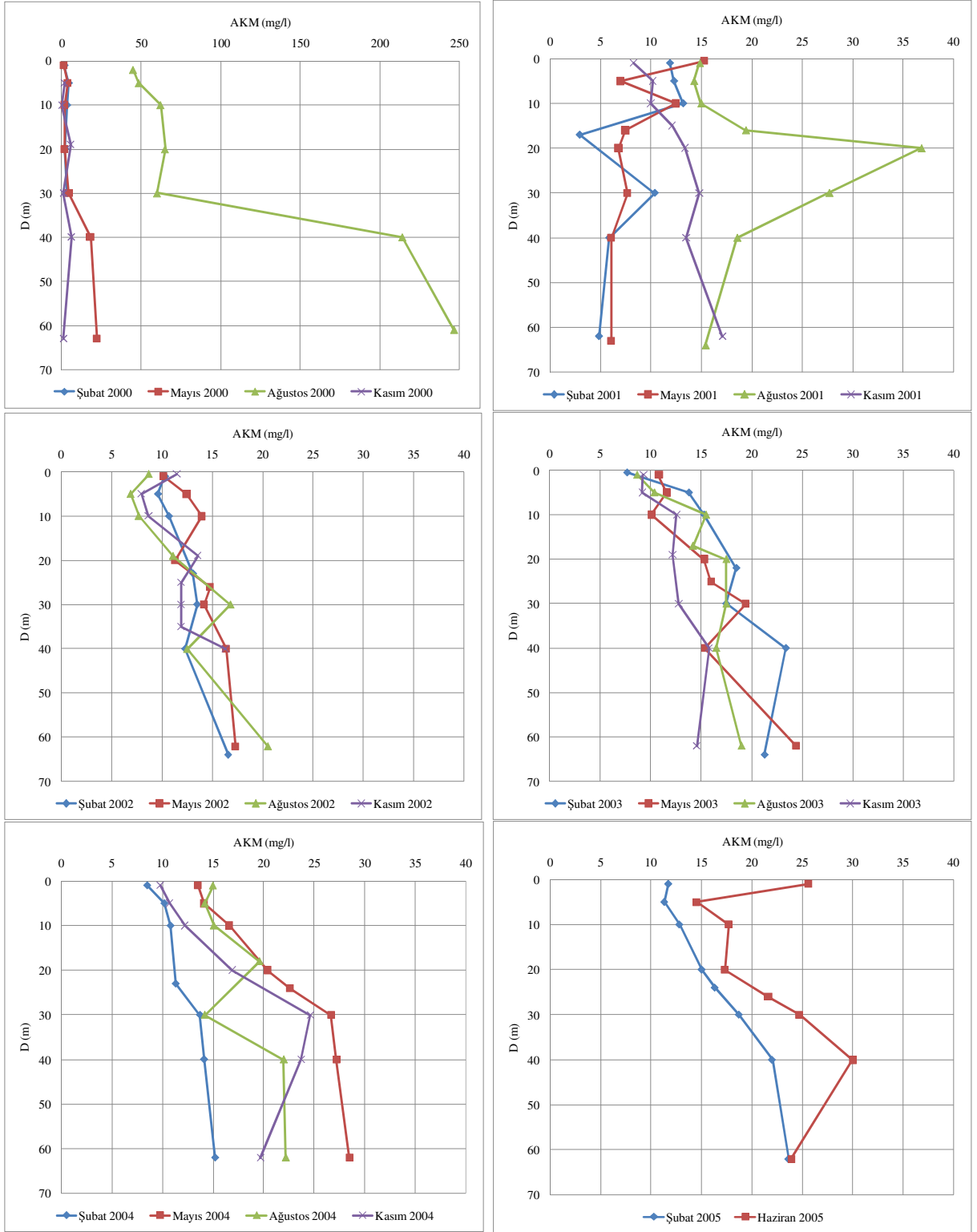
Şekil 4.12 B13 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.13 B7 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM (mg/l) konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.14 B2 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında AKM (mg/l) konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.15 M8 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında AKM (mg/l) konsantrasyonlarının değişimi.

4.3.3 PO₄-P Verilerinin Değerlendirilmesi

Fosfor fosfat iyonu halinde çözülmüş olarak, çözülmüş organik bileşenlerde, partikül halindeki organik bileşenlerde ya da canlı organizmaların bünyelerinde bulunmaktadır. Denizel ortamda yaşayan canlıların ölümü ile önemli miktarda çözülmüş fosfor açığa çıkmaktadır. Bu organik fosfatın büyük kısmı sucul ortamda orto fosfat olarak bulunmaktadır. Bundan başka organik çökeltiler içerisinde bulunan fosfor da bakteriler tarafından remineralize edilmektedir.

Deniz suyunda fosfor miktarı yaz aylarında en yüksek değerini alırken sonbaharda azalarak kış aylarında en düşük değerine ulaşmaktadır. Atık sulardaki yüksek fosfor miktarının başlıca sorumlusu deterjanlardır. Tarımda kullanılan gübrelerden ileri gelen ve yağmur suyu gibi yüzeysel sularla deniz ve göllere taşınan fosfor da alıcı ortamda birikmektedir. Arıtılmamış atıksuların %30-60 kadarı organik fosfor şeklindedir (Tilkan ve Balcı, 2006). Bundan başka kayaların erozyona uğraması ile doğal yolla da bir kısım fosfor alıcı ortamlara karışmaktadır.

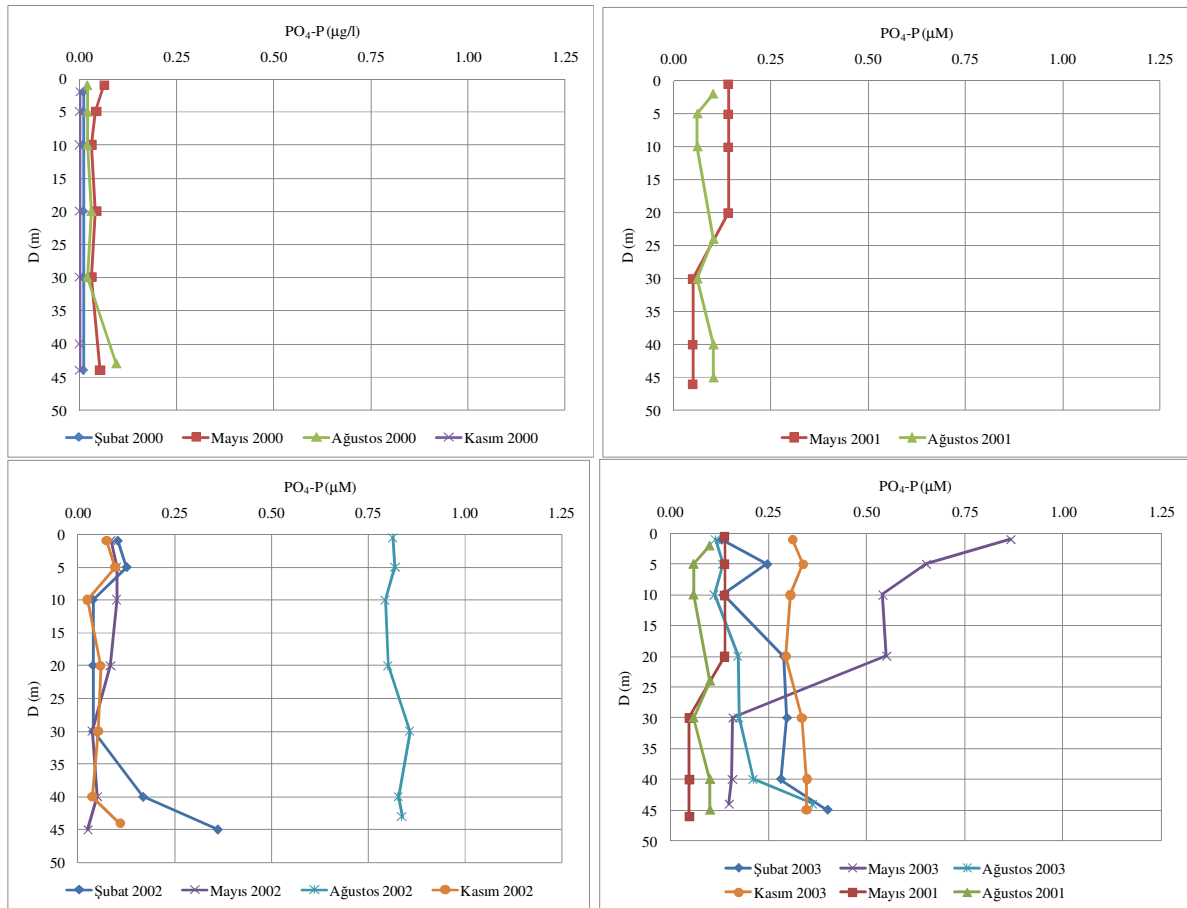
Fosfor sucul ortamlarda fosfat iyonları (ortofosfat, polifosfat, meta fosfatlar ve organik fosfatlar) şeklinde bulunmaktadır.

Orto fosfatın düşey dağılımına bakıldığında, oksijenli üst sulara düşük olan fosfat konsantrasyonu ışığın ulaşabildiği tabakanın altında organik maddedeki C:N:P oranına bağlı olarak artmaktadır.

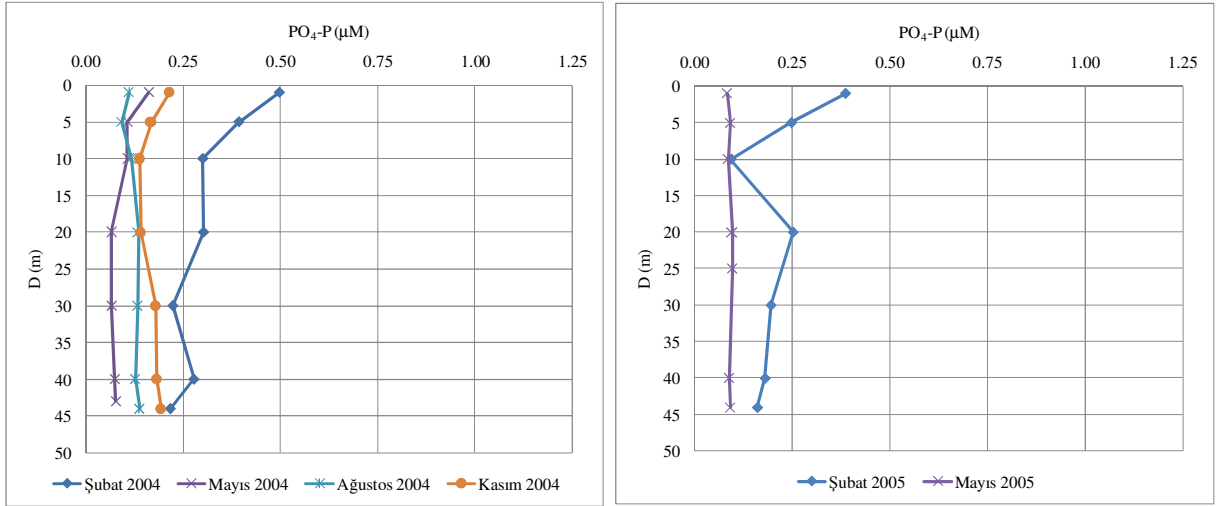
Sucul ortamlarda besi maddelerinin girişine ve organik madde döngüsüne bağlı olarak elementlerin oranları zamanla değişmektedir. Ortamda partikül halindeki fosfatın çözünmesi ile fosfat konsantrasyonu artarken, çözülmüş fosfatın ortamdaki partiküller tarafından adsorbe edilmesiyle de konsantrasyon azalmaktadır. Çözülmüş haldeki fosfat partiküller tarafından adsorbe oluncaya kadar bir takım biyojeokimyasal döngülerde kullanılmaktadır.

Şekil 4.16'da mevsimlik olarak veri toplanan K3 istasyonundan elde edilen orto fosfat konsantrasyon değerleri görülmektedir. Bu istasyonda 2002 yılı Ağustos ayında orto fosfat değerinde önemli bir artış görülmektedir. Bu artışın yoğun yağışların etkisi ile meydana geldiği düşünülmektedir. Benzer bir durum Mayıs 2003'de gözlenmiştir. Şekil 4.17'de K0 istasyonu orto fosfat ölçümleri verilmiştir. Bu verilere bakıldığında fosfat konsantrasyonlarının beklenildiği gibi üst tabakada düşük ve alt tabakada ise yüksek olduğu görülmektedir. 2002 Mart ve Ağustos aylarında ölçülmüş yüksek konsantrasyonlar yağışlara bağlanabilir. Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20'de Boğaz istasyonları olan sırasıyla B13, B7 ve B2'deki orto fosfat konsantrasyonlarının zamanla değişimleri gösterilmiştir. Bu veriler

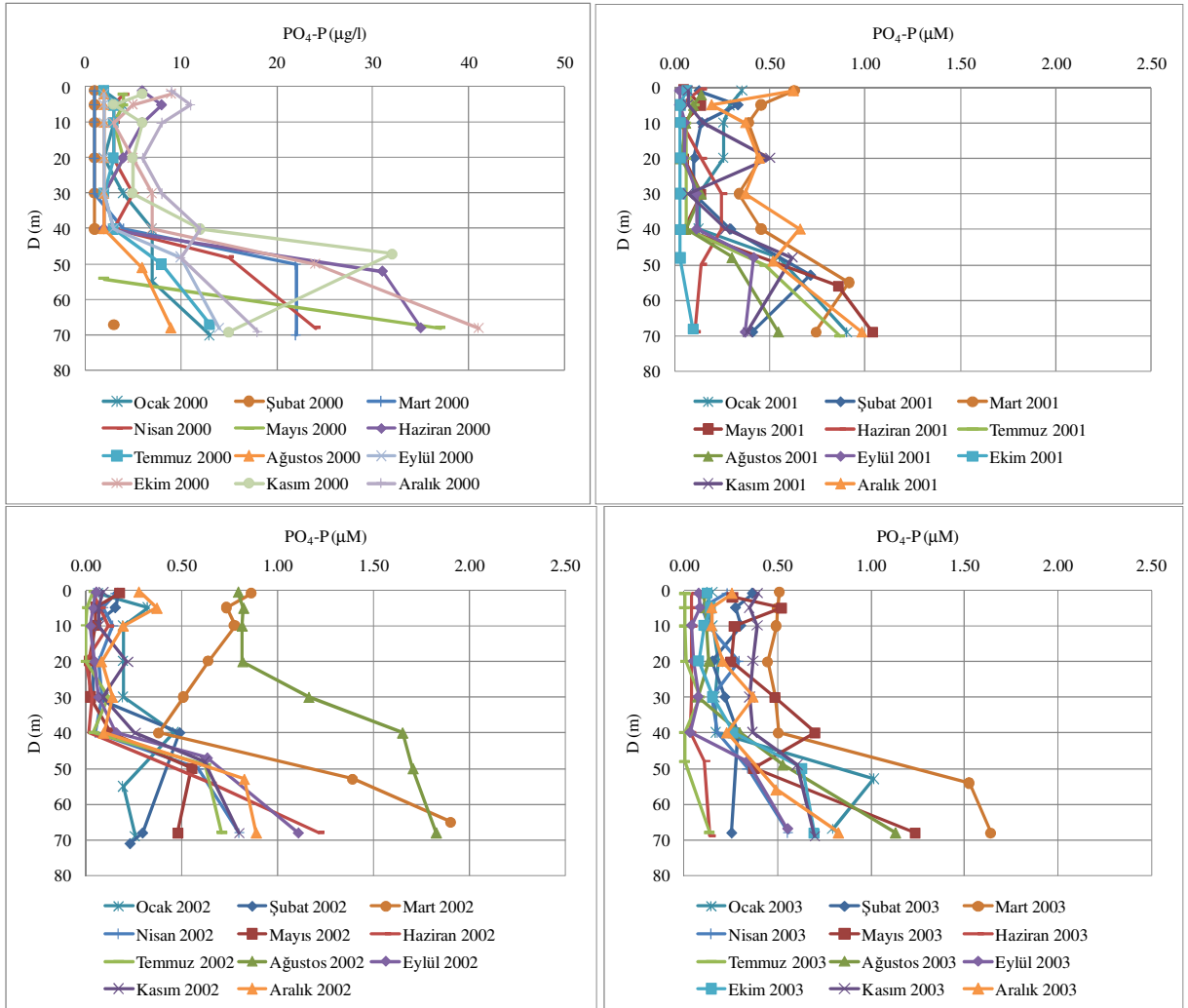
değerlendirildiğinde ortofosfat konsantrasyonlarının genellikle $1\mu\text{M}$ 'nin altında kaldığı görülmektedir. Bunun dışındaki durumların ise yağışlı mevsimlerde ortaya çıktığı düşünülmektedir. İstanbul Boğazı ile Marmara Denizi birleşiminde yer alan M8 istasyonunda ölçülen ortofosfat konsantrasyonları Şekil 4.21'de verilmiştir. Bu istasyonda ölçülen 2001, 2002 ve 2003 yılı konsantrasyonlarının genel eğilime uymadığı ve su kolonu boyunca rastgele dağılımlar gösterdiği görülmektedir. Tüm bu veriler bir arada değerlendirildiğinde 2000-2006 yılları süresince İstanbul Boğazı ile Marmara Denizi ve Karadeniz birleşimindeki istasyonlarda orto fosfat konsantrasyonlarının beklendiği gibi üst tabakada birincil üretime bağlı olarak düşük, alt tabakada ise daha yüksek seyrettiği, yağışlı mevsimlerde alıcı ortama nütrientlerin girişi ile konsantrasyonlarda artış olurken, birinci üretimin arttığı dönemlerde fosfatın biyokimyasal reaksiyonlarda kullanılmasıyla çözünmüş haldeki fosfat konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir.

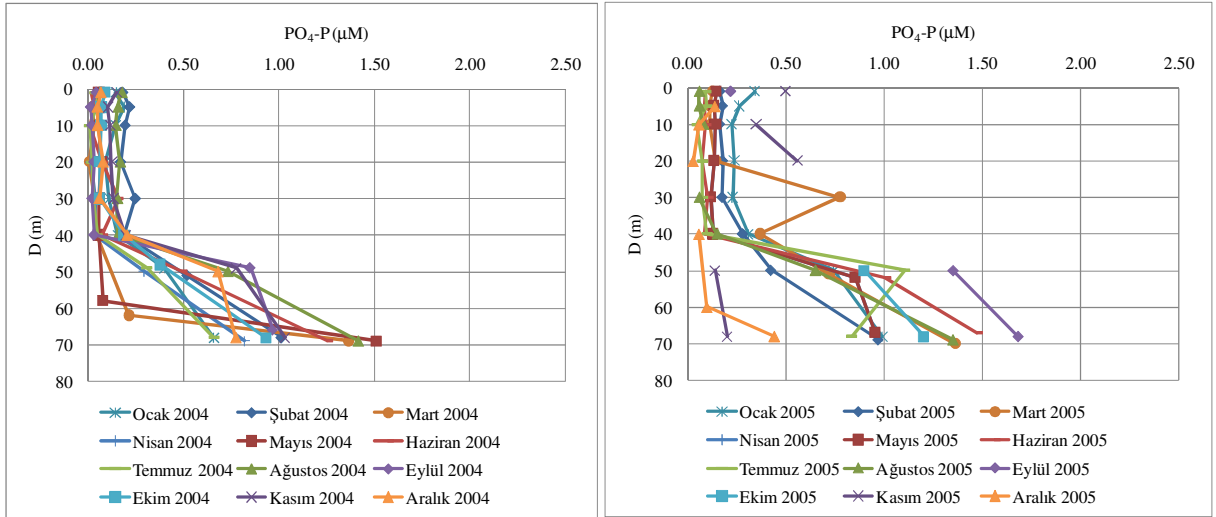


Şekil 4.16 K3 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{PO}_4\text{-P}$ konsantrasyonlarının değişimi.

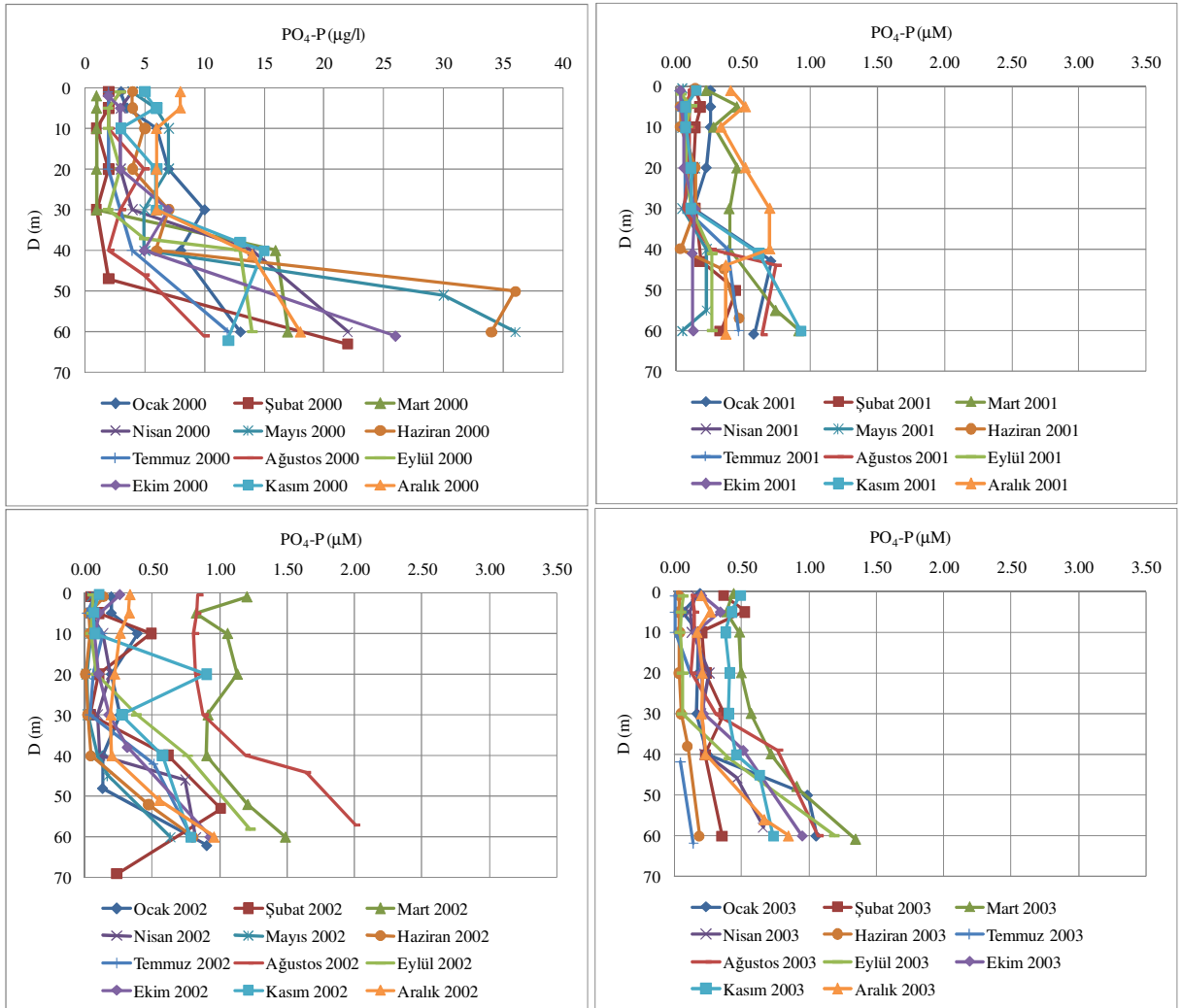


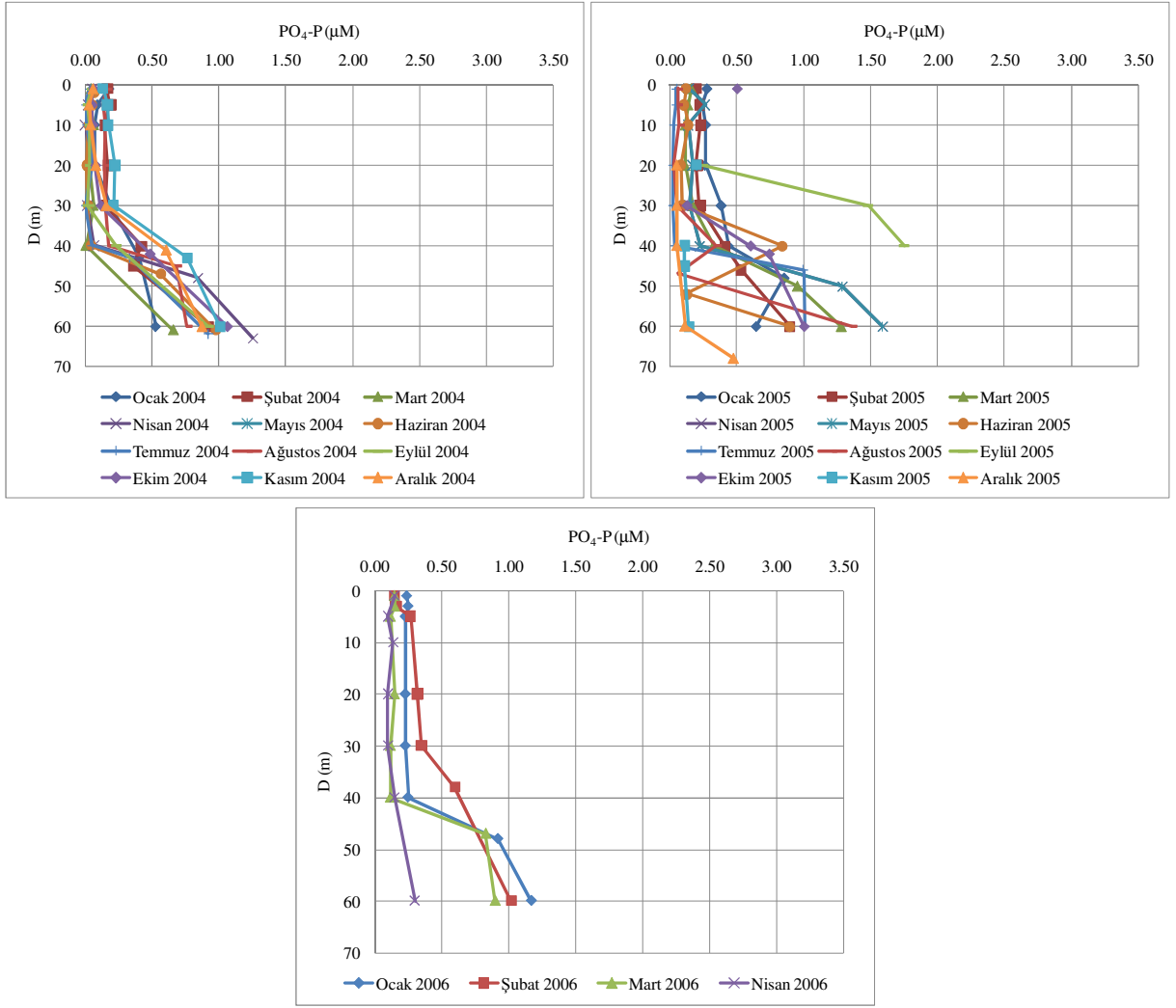
Şekil 4.16 Devamı.

Şekil 4.17 K0 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında PO₄-P konsantrasyonlarının değişimi.

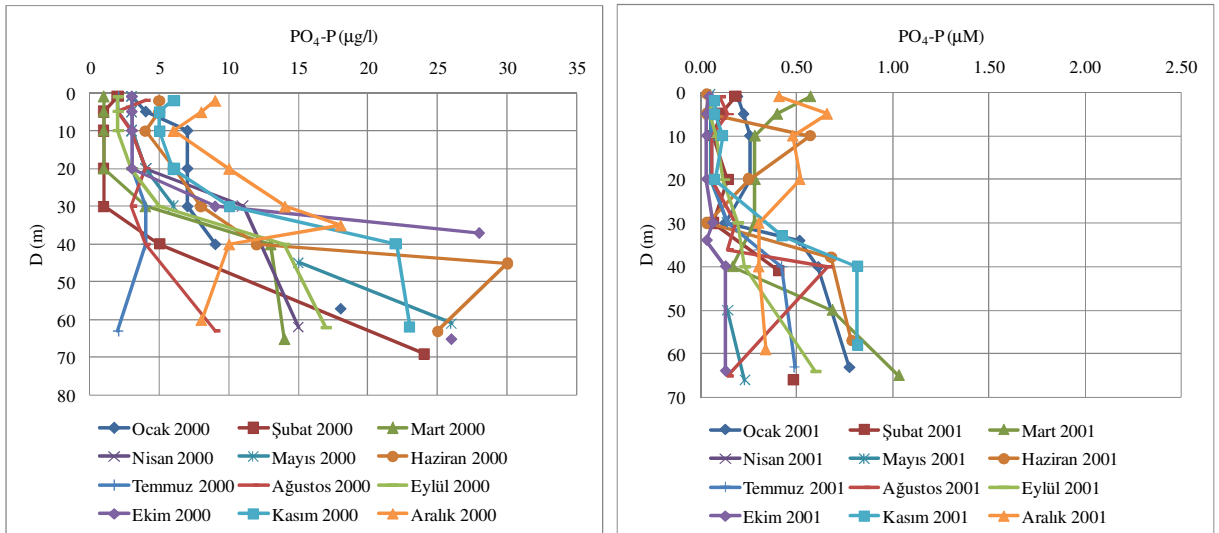


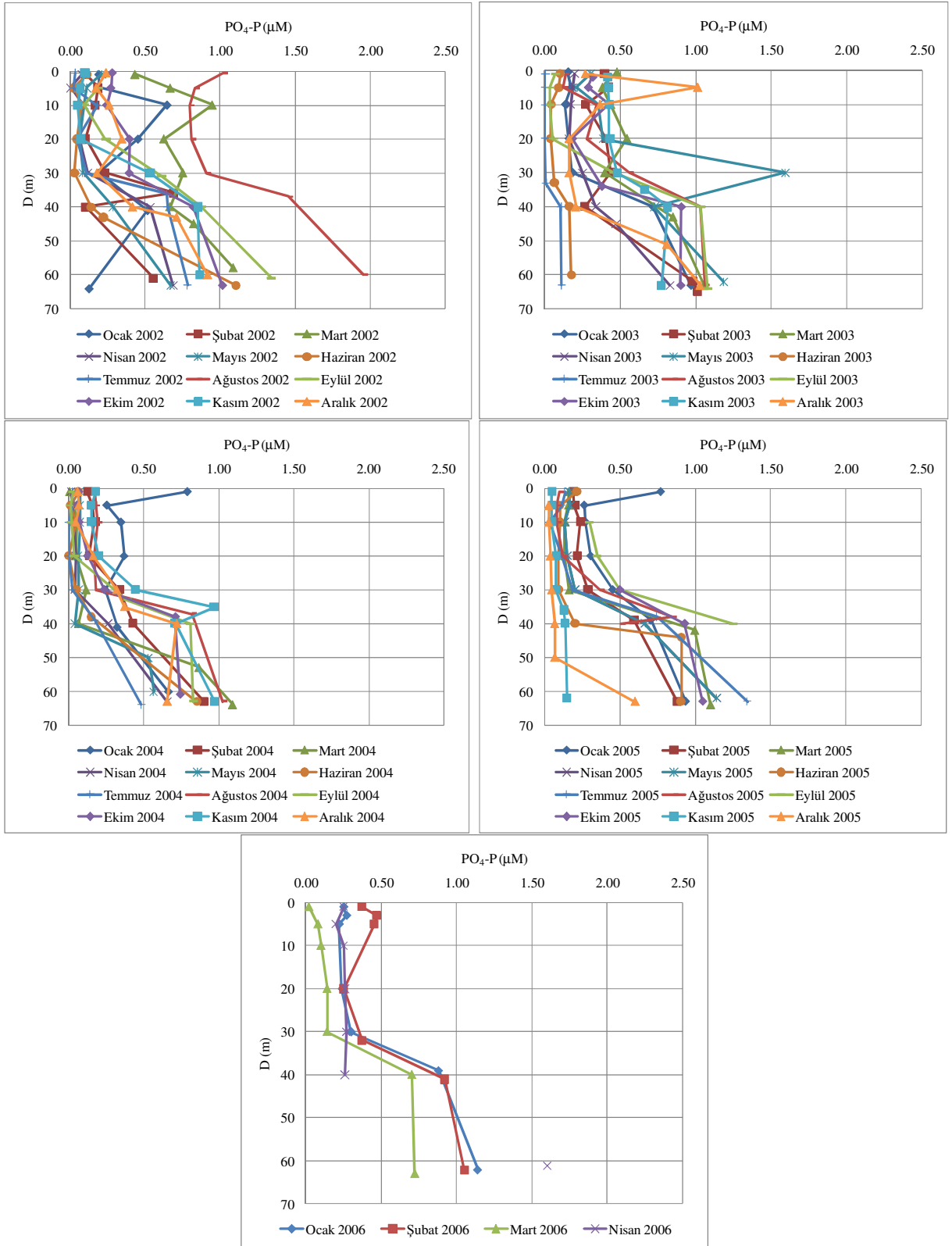
Şekil 4.17 Devamı.

Şekil 4.18 B13 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında PO₄-P konsantrasyonlarının değişimi.

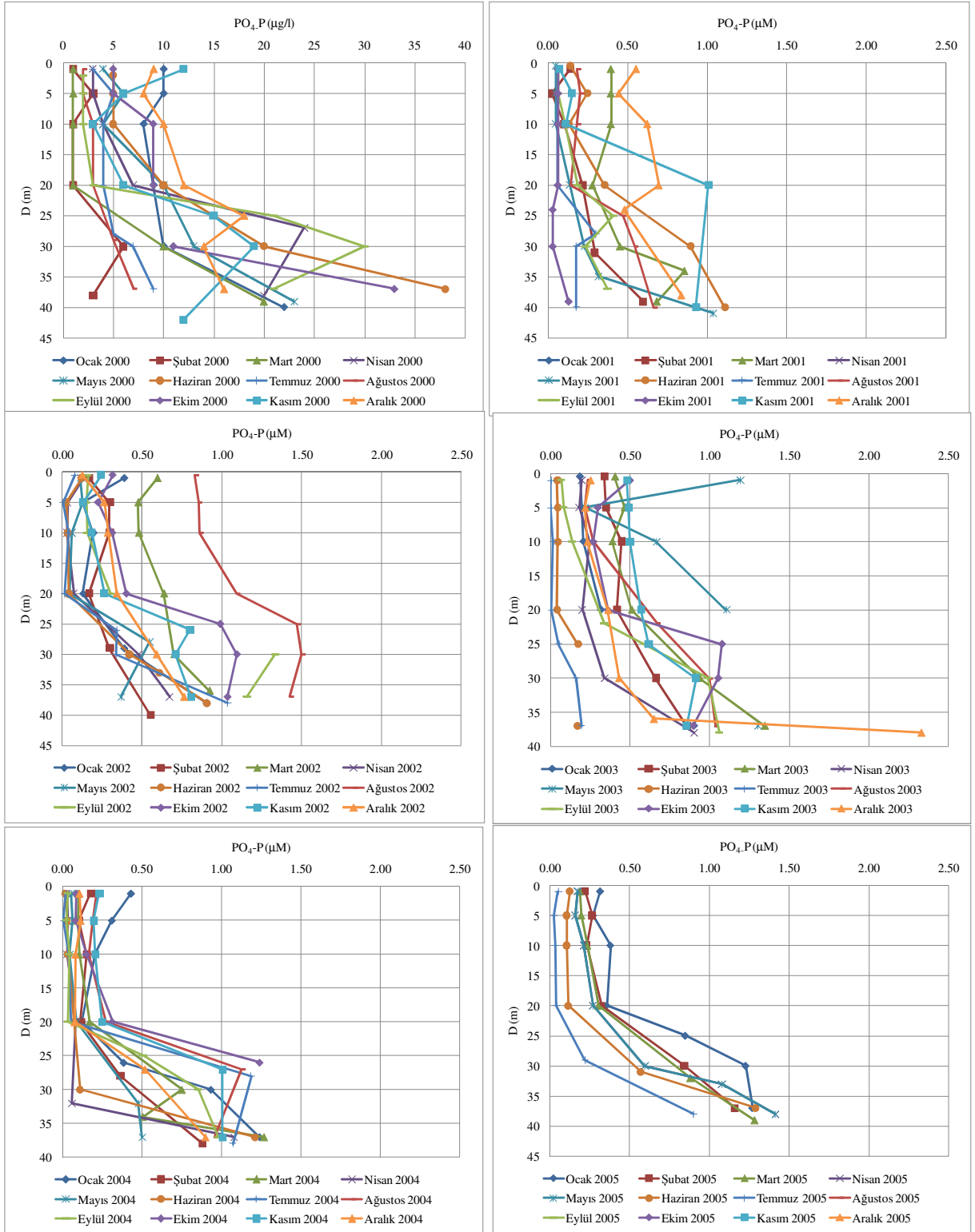


Şekil 4.18 Devamı.

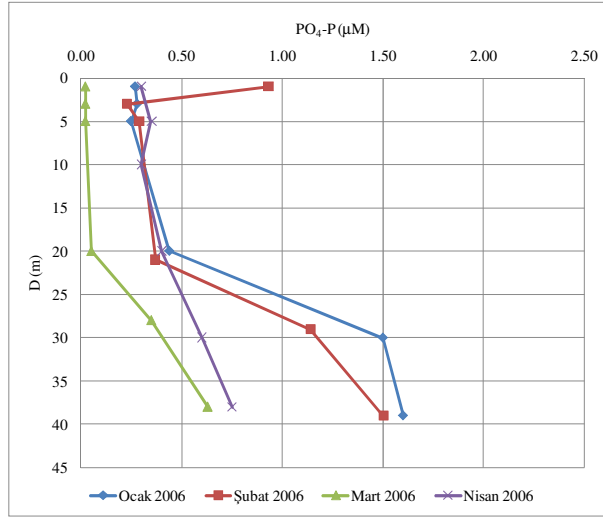
Şekil 4.19 B7 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında $PO_4\text{-P}$ konsantrasyonlarının değişimi.



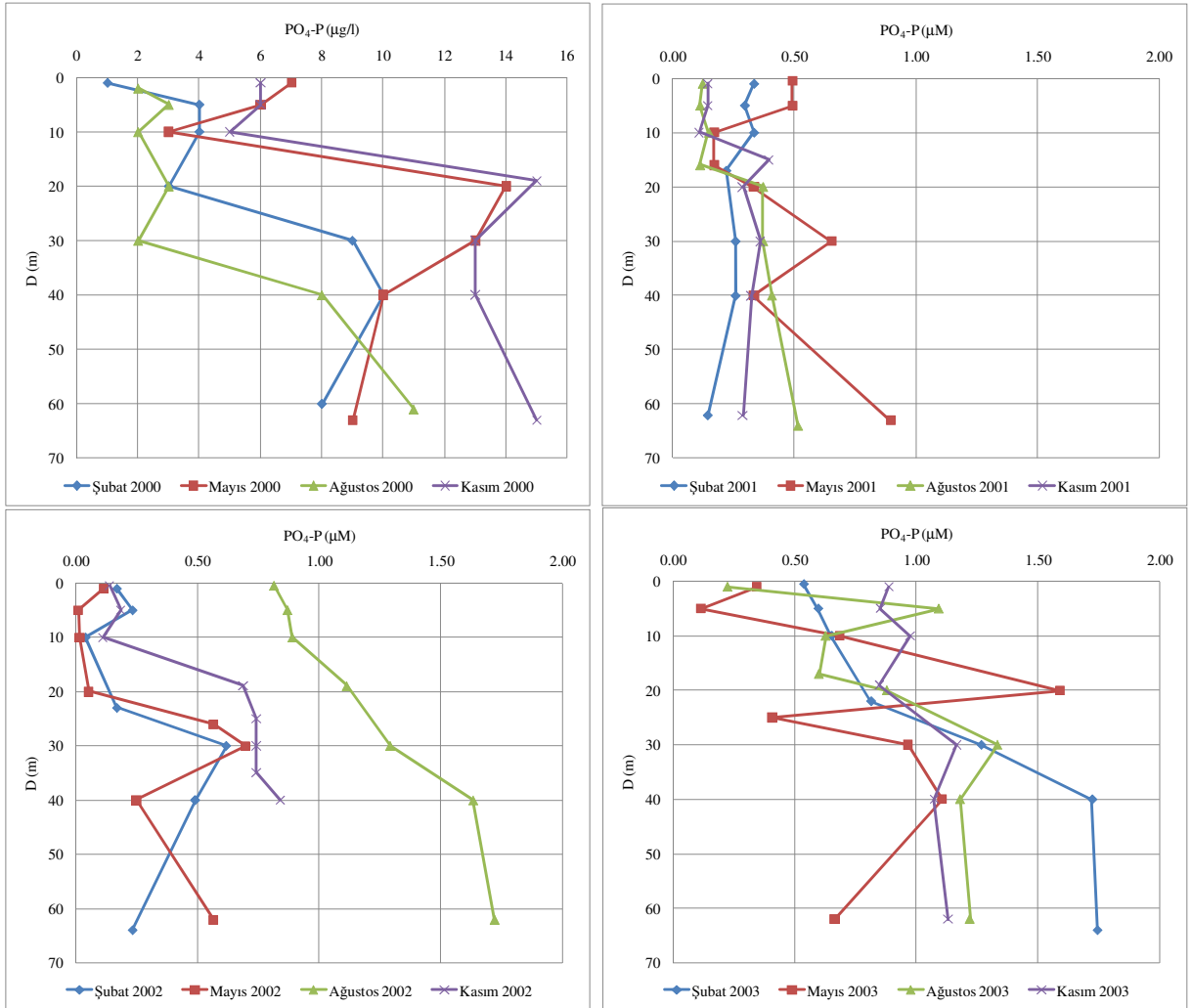
Şekil 4.19 Devamı.

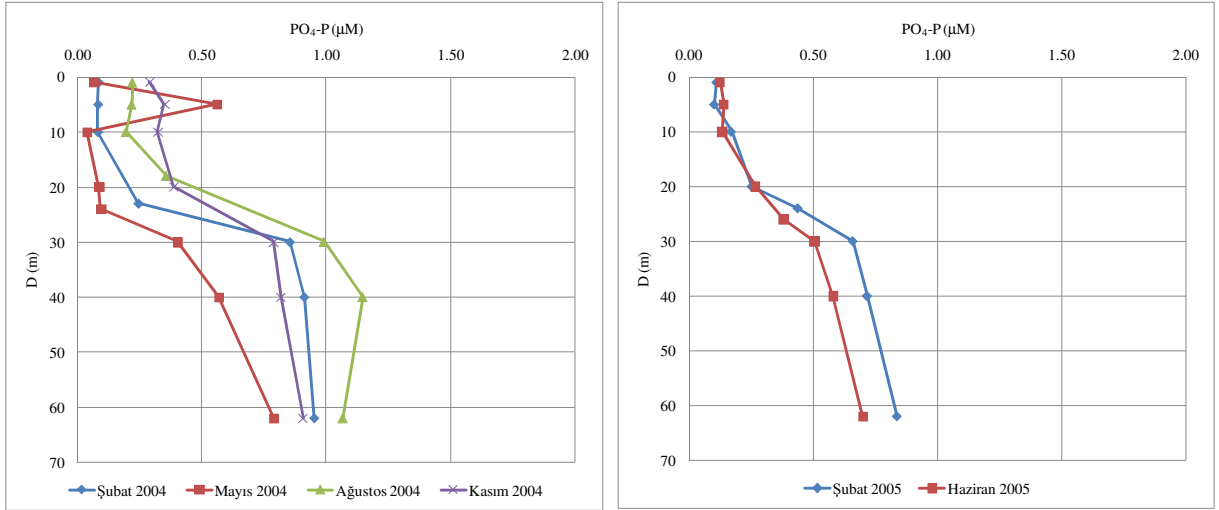


Şekil 4.20 B2 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında $PO_4\text{-P}$ konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.20 Devamı.

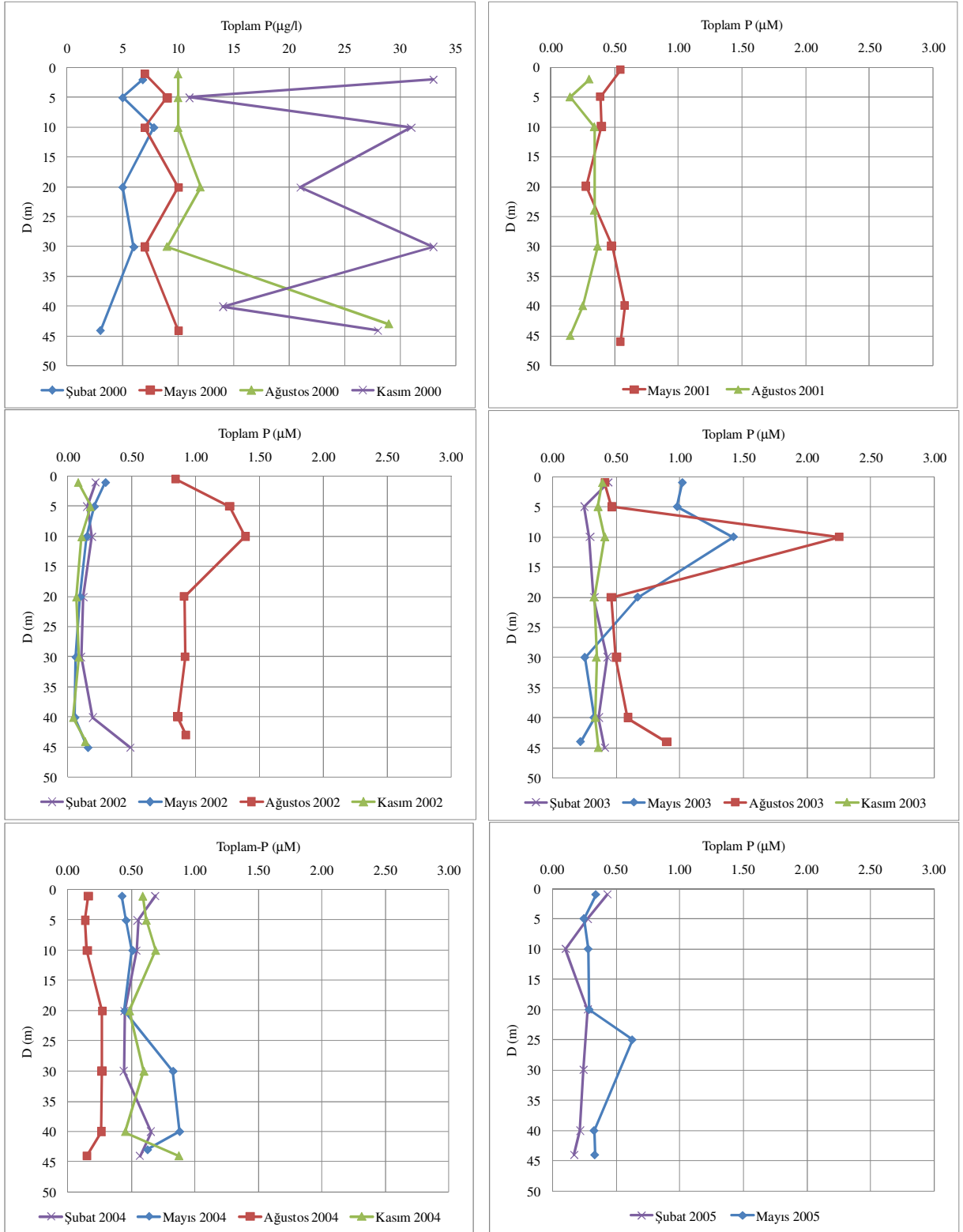
Şekil 4.21 M8 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında PO₄-P konsantrasyonlarının değişimi.



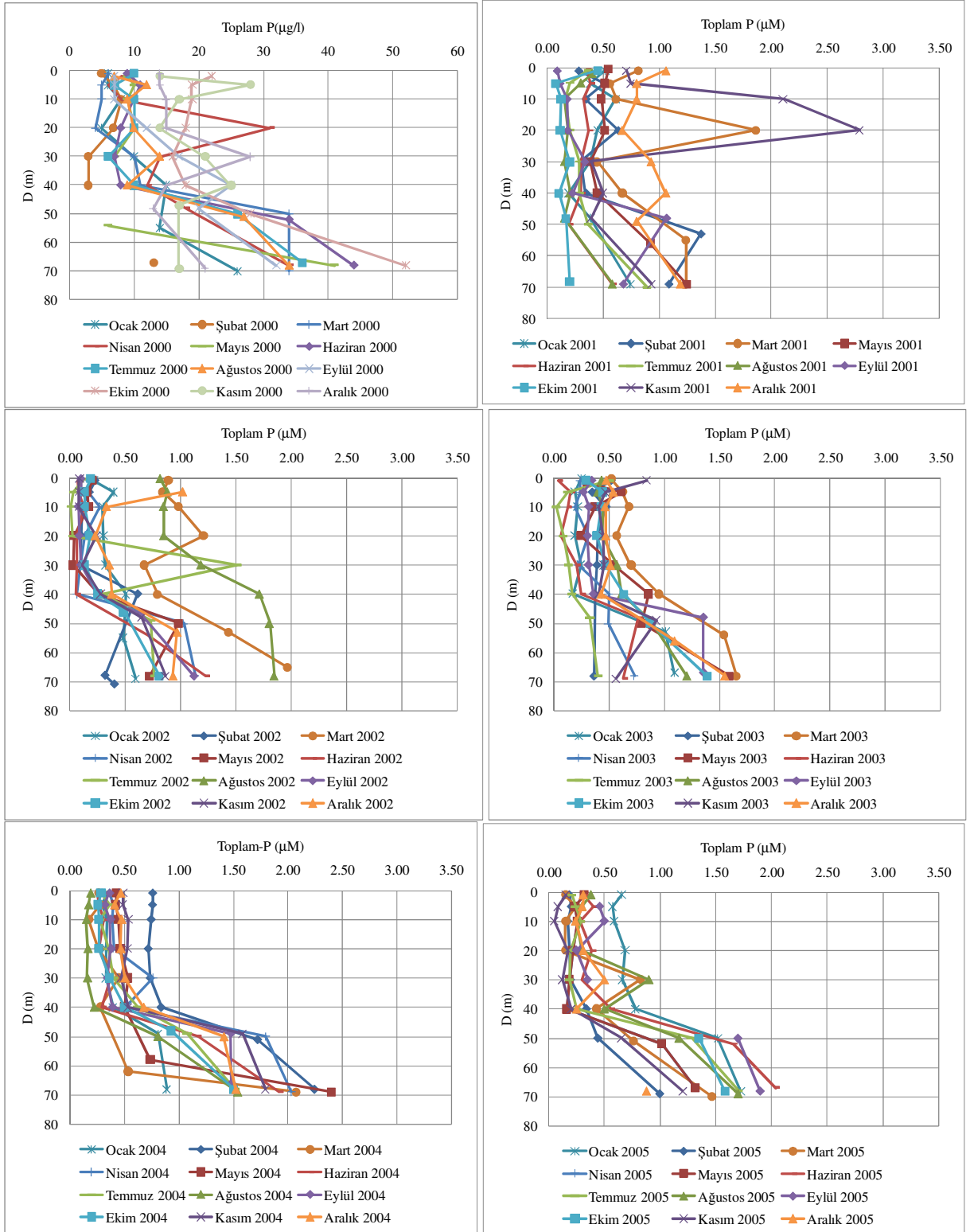
Şekil 4.21 Devamı.

4.3.4 Toplam P Verilerinin Değerlendirilmesi

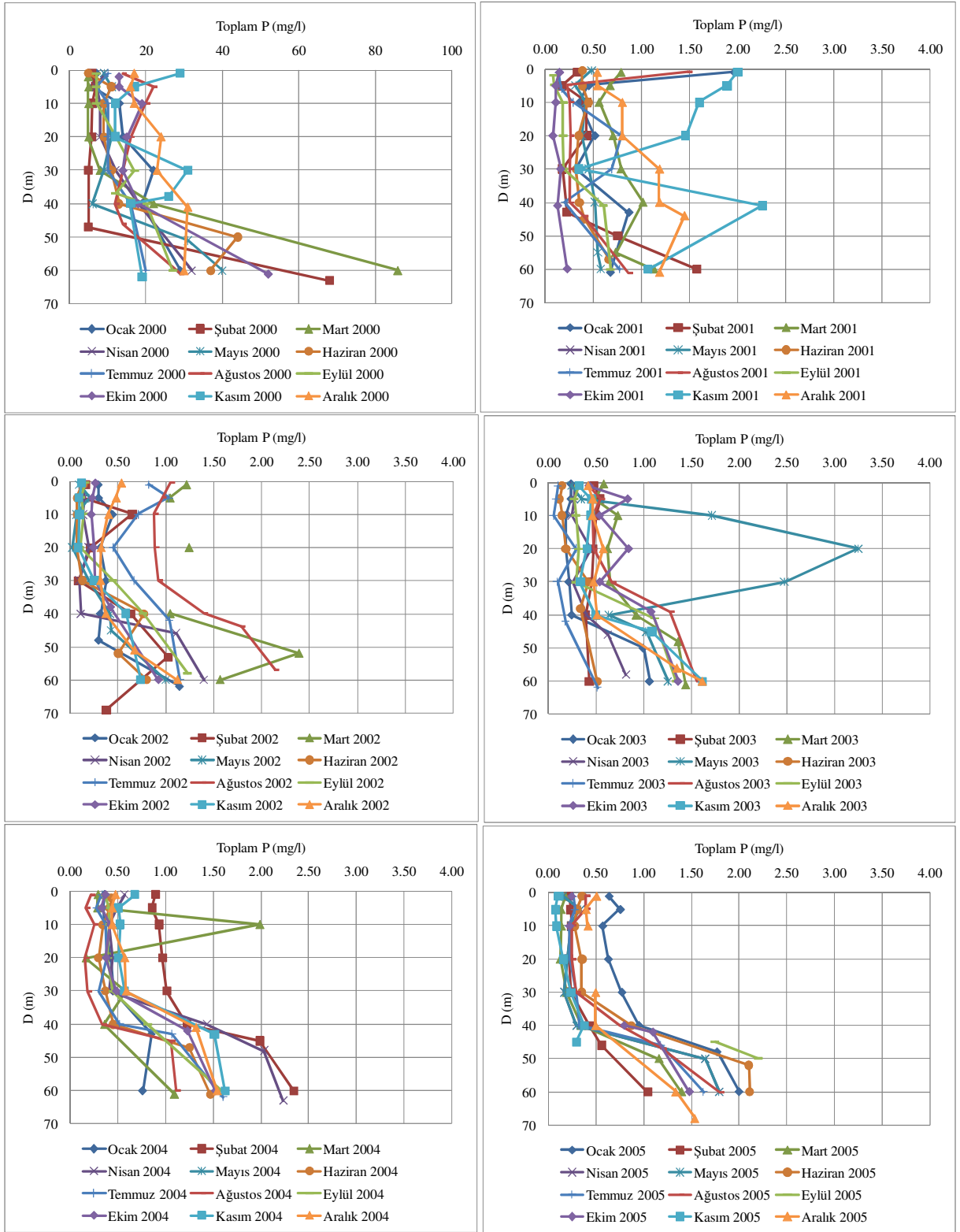
Şekil 4.22’de Karadeniz istasyonu olan K3’deki toplam fosfor konsantrasyonu değişimleri gösterilmiştir. Bu istasyonda yapılan ölçümler mevsimlik olduğundan aylık ölçümlerin yapıldığı K0 istasyonu verileri ile bir arada değerlendirilmesi daha doğru olacaktır. Şekil 4.23’te K0 İstanbul Boğazı-Karadeniz birleşiminde yer alan K0 istasyonundan toplanan veriler gösterilmiştir. Görüldüğü gibi her iki istasyonda da toplam fosfor konsantrasyonları yıl boyunca $3 \mu M$ ’nin üzerine çıkmamıştır. Bazı yıllarda yüksek konsantrasyonların Ağustos ve Aralık aylarında olduğu görülmektedir. Bu aylar yağışların yoğun olduğu aylardır. Yine bazı yıllarda Şubat ve Mayıs aylarında gözlenen yüksek konsantrasyonları ise Karadeniz’in tatlı su kaynaklarındaki debi artışları ile taşınan kirleticilere bağlamak mümkündür. Şekil 4.24, 4.25 ve 4.26’da İstanbul Boğazı istasyonları olan sırasıyla B13, B7 ve B2’deki toplam fosfor konsantrasyonları gösterilmiştir. 2000-2006 yılları süresince İstanbul Boğazı boyunca toplam fosfor konsantrasyonu beklenen bir eğilim izlemiş ve yüzeyde birincil üretime bağlı olarak düşük konsantrasyonlar gösterirken alt tabakada daha yüksek değerlerde seyretmiştir. Alt tabakadaki yüksek konsantrasyon değerleri burada birincil üretimin olmasından başka istasyonlar yakınındaki derin deşarjlara da bağlanabilir. Şekil 4.27’de verilen M8 istasyonu ölçüm değerleri de toplam fosfor konsantrasyonlarının İstanbul Boğazı’nın Marmara Denizi çıkışında da $2 \mu M$ ’nin altında kaldığını ve yıl boyunca boğaz istasyonlarındakine benzer bir eğilim izlediğini göstermektedir.



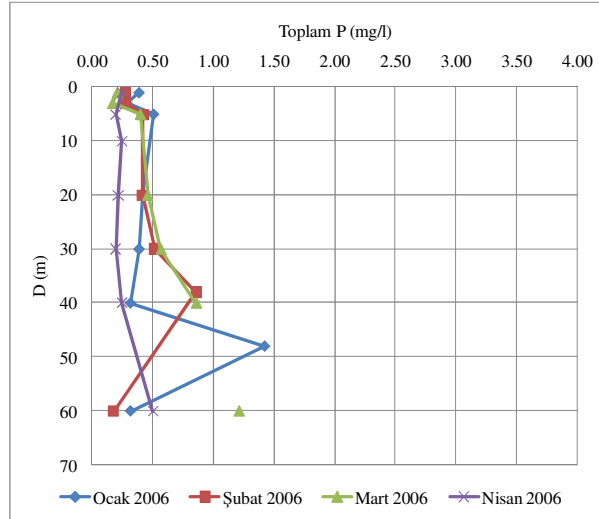
Şekil 4.22 K3 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.



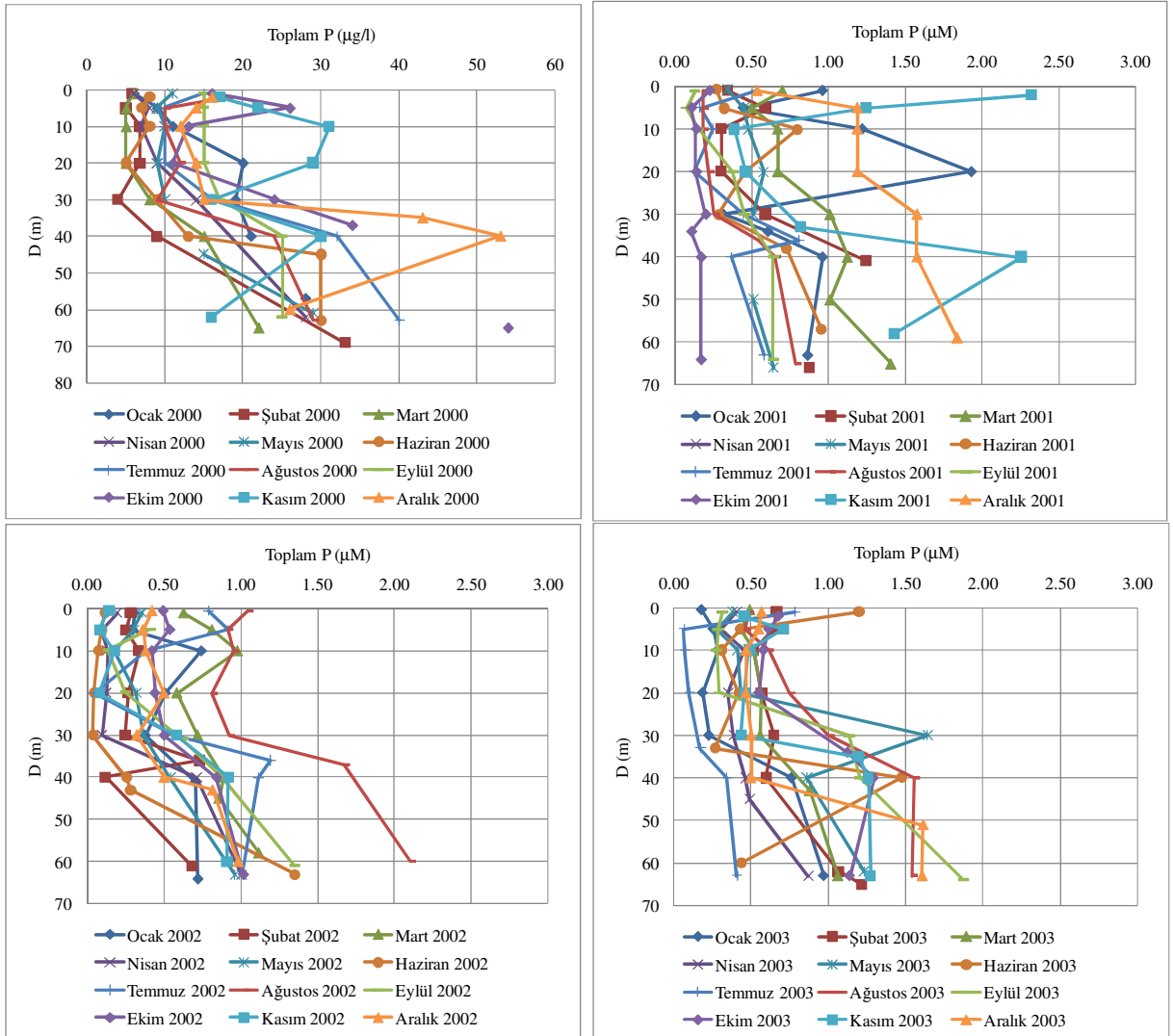
Şekil 4.23 K0 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.



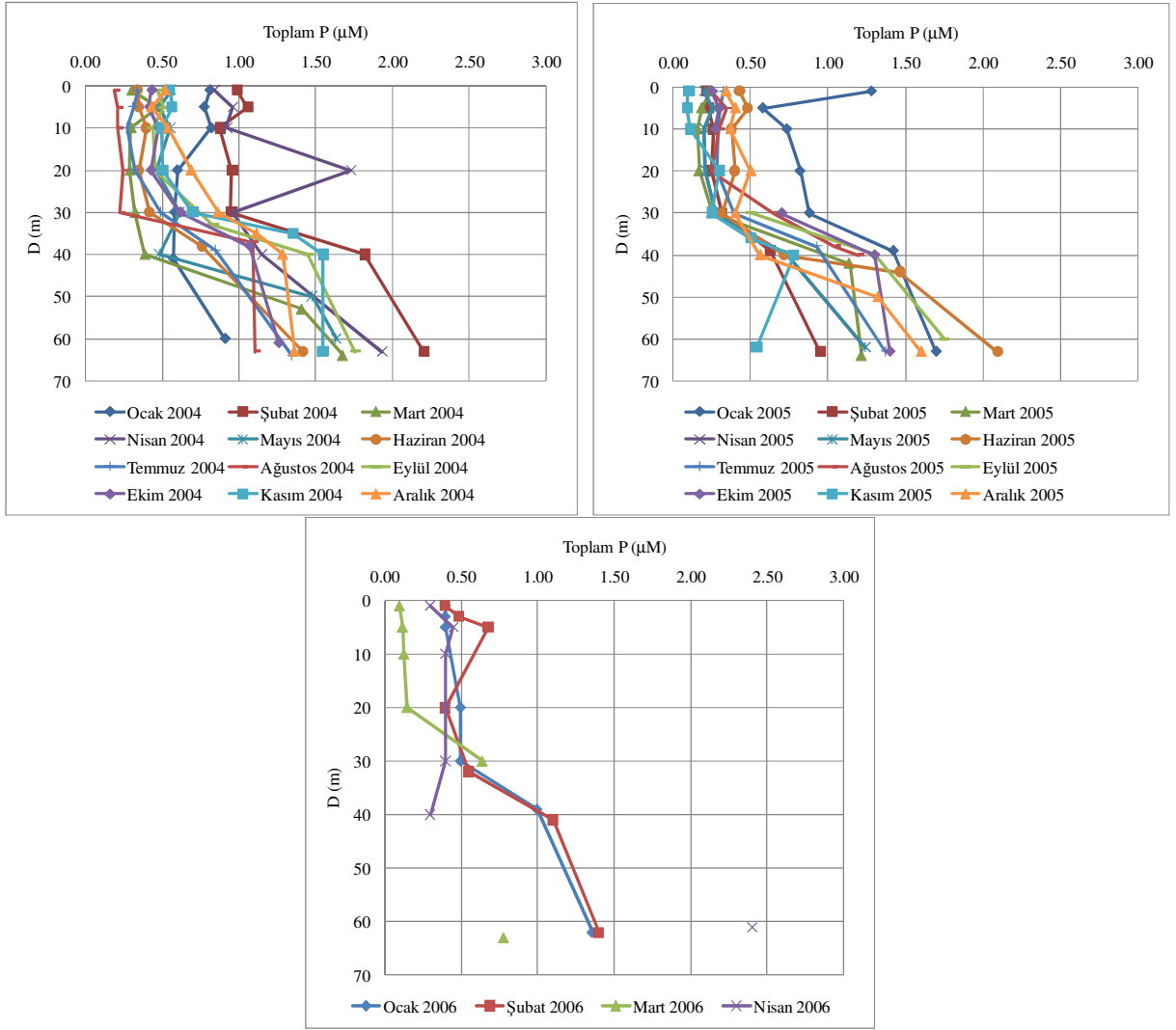
Şekil 4.24 B13 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.



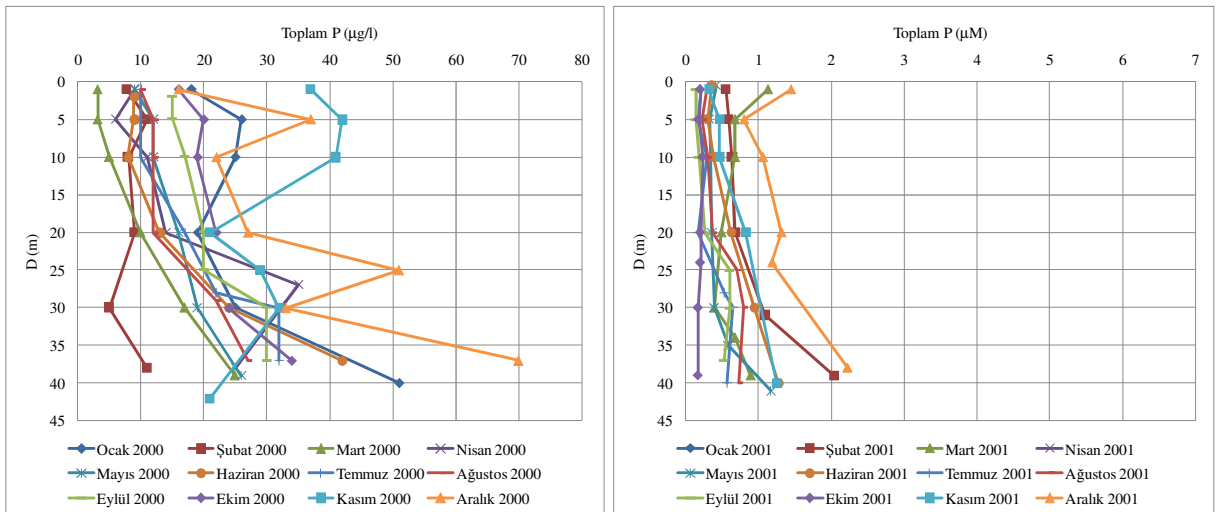
Şekil 4.24 Devamı.



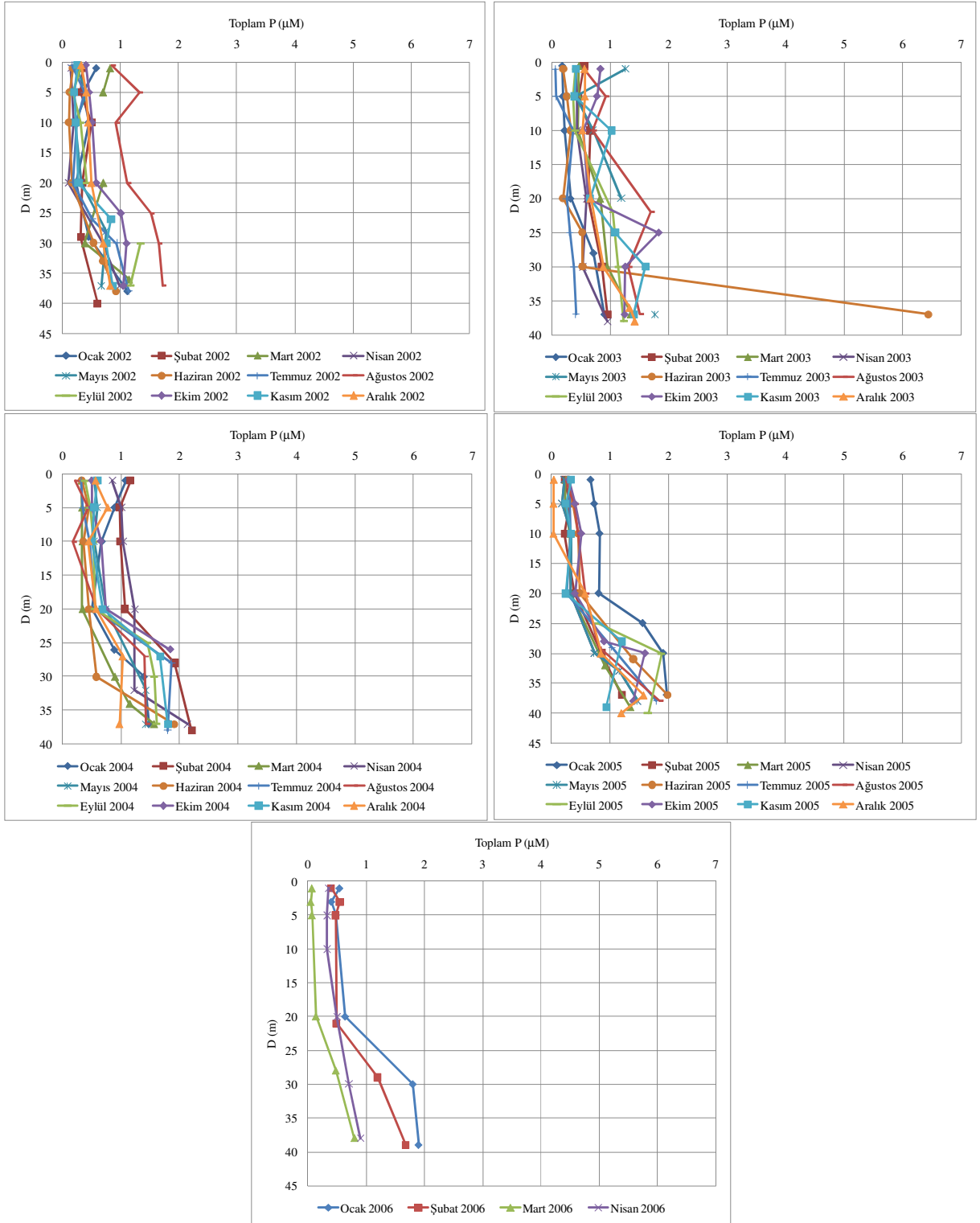
Şekil 4.25 B7 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.



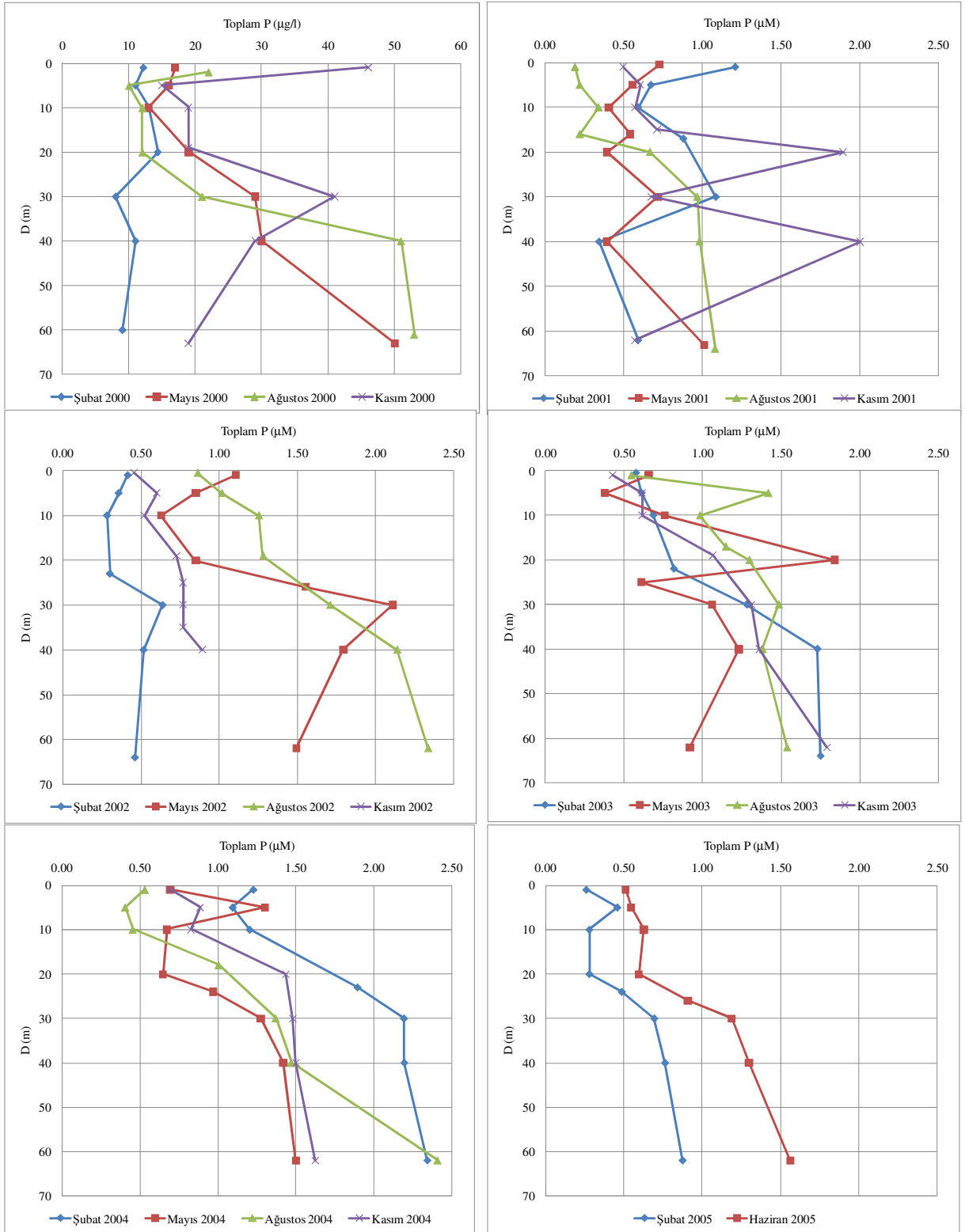
Şekil 4.25 Devamı.



Şekil 4.26 B2 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.26 Devamı.



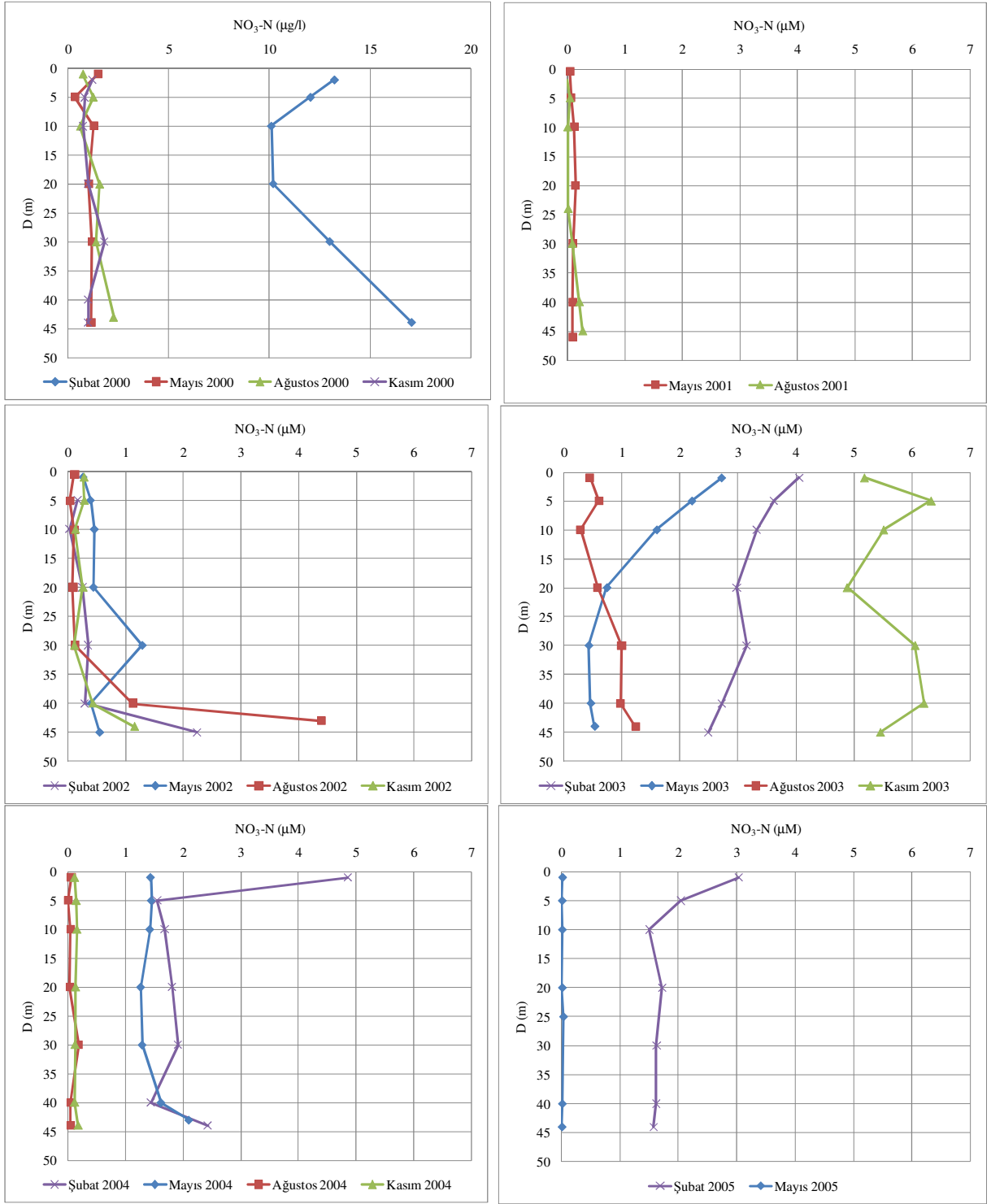
Şekil 4.27 M8 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Toplam P konsantrasyonlarının değişimi.

4.3.5 NO₃-N Verilerinin Değerlendirilmesi

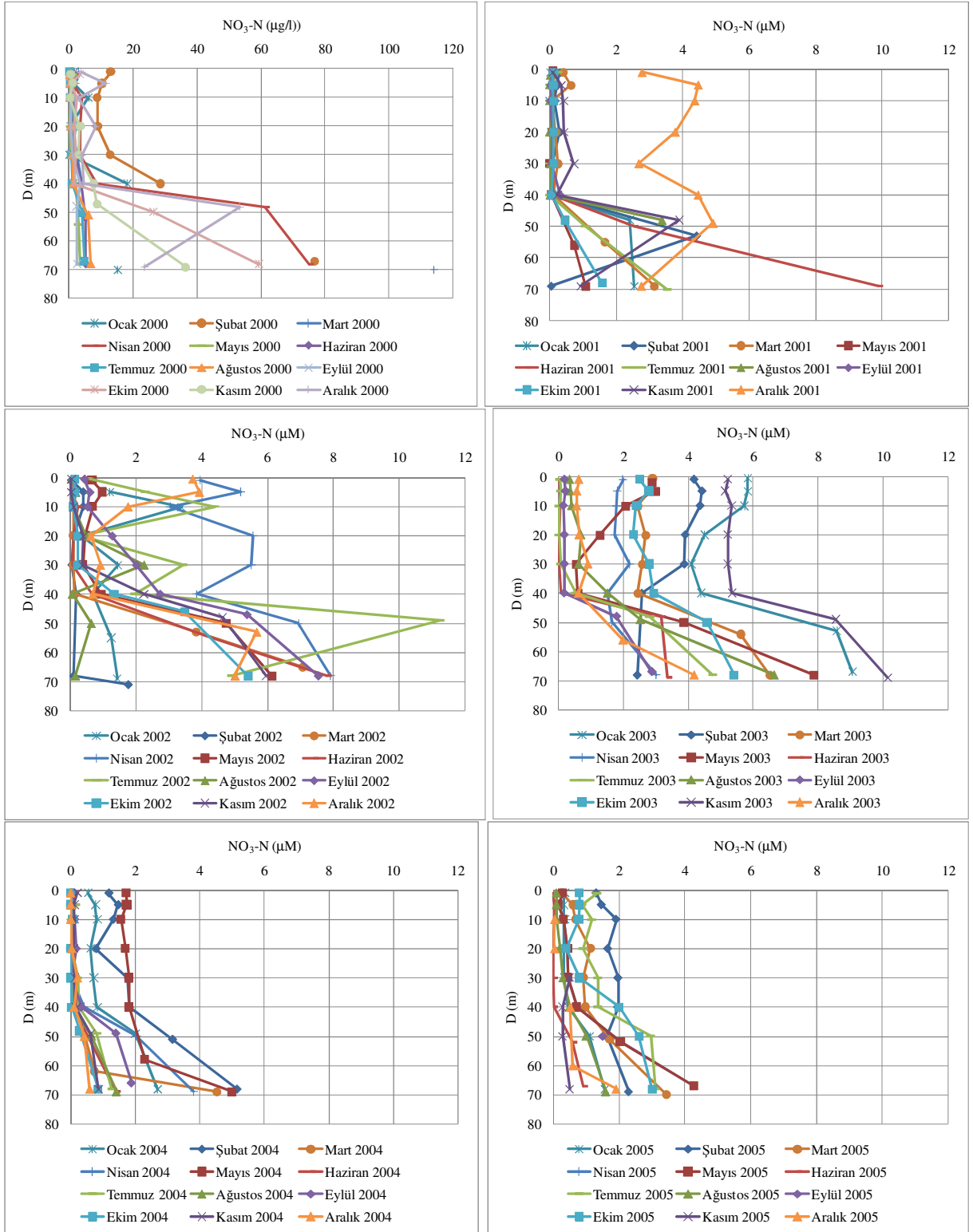
Azot deniz suyunda çözülmüş gaz, çözülmüş organik bileşik, askıda organik bileşik ya da mineraller şeklinde bulunmaktadır. NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻ tuzları halinde bulunmaktadır. Organik

azotun inorganik azota dönüştürülmesi ve NO_2^- ile NO_3^- arasındaki dönüşüm bakteriler tarafından gerçekleştirilmektedir. Azot içeren maddeler önce NH_3 'e ardından da NO_2 ve NO_3 'e dönüşmektedir. Aminoasitlerin, protein, amin ve üre gibi bileşiklerin hidrolizi sonucunda NH_3 açığa çıkmaktadır. NH_3 'ün NO_2^- 'ye yükseltgenmesi, sedimentlerde bulunan nitrifikant bakteriler fotokimyasal oksidasyon ya da yüzey katalizörleri eşliğinde çözünmüş oksijen yoluyla (kimyasal oksidasyon) olmaktadır. Alıcı ortamdaki organik azot, amonyak biyolojik süreçlerle önce nitrite sonra nitrata yükseltgenmektedir. Bu işleme nitrifikasyon denir. 1 g. $\text{NH}_4\text{-N}$ 'in nitrata kadar yükseltgenebilmesi için 4.57 g. O_2 kullanılmaktadır. Görüldüğü gibi nitrifikasyon süresince önemli miktarda O_2 harcanmaktadır. Bundan başka azot su ortamında ötrofikasyona da neden olabilmektedir. Azot ve fosfor yüzeysel sularda birincil üretimi sınırlayabilecek elementlerdir. Ortamdaki büyüme hızı bu ortamda en az bulunan besin tuzu tarafından belirlenmektedir. Genellikle denizlerde fosfor miktarı azota göre daha az olmaktadır. Dolayısıyla denizlerde birincil üretimi sınırlayıcı element çoğunlukla fosfordur. Denizlerde görülen ötrofikasyon olaylarından çoğu zaman azot sorumlu değildir. Deniz suyuna atmosferden azot oksitler ve NH_3 girişi de söz konusudur.

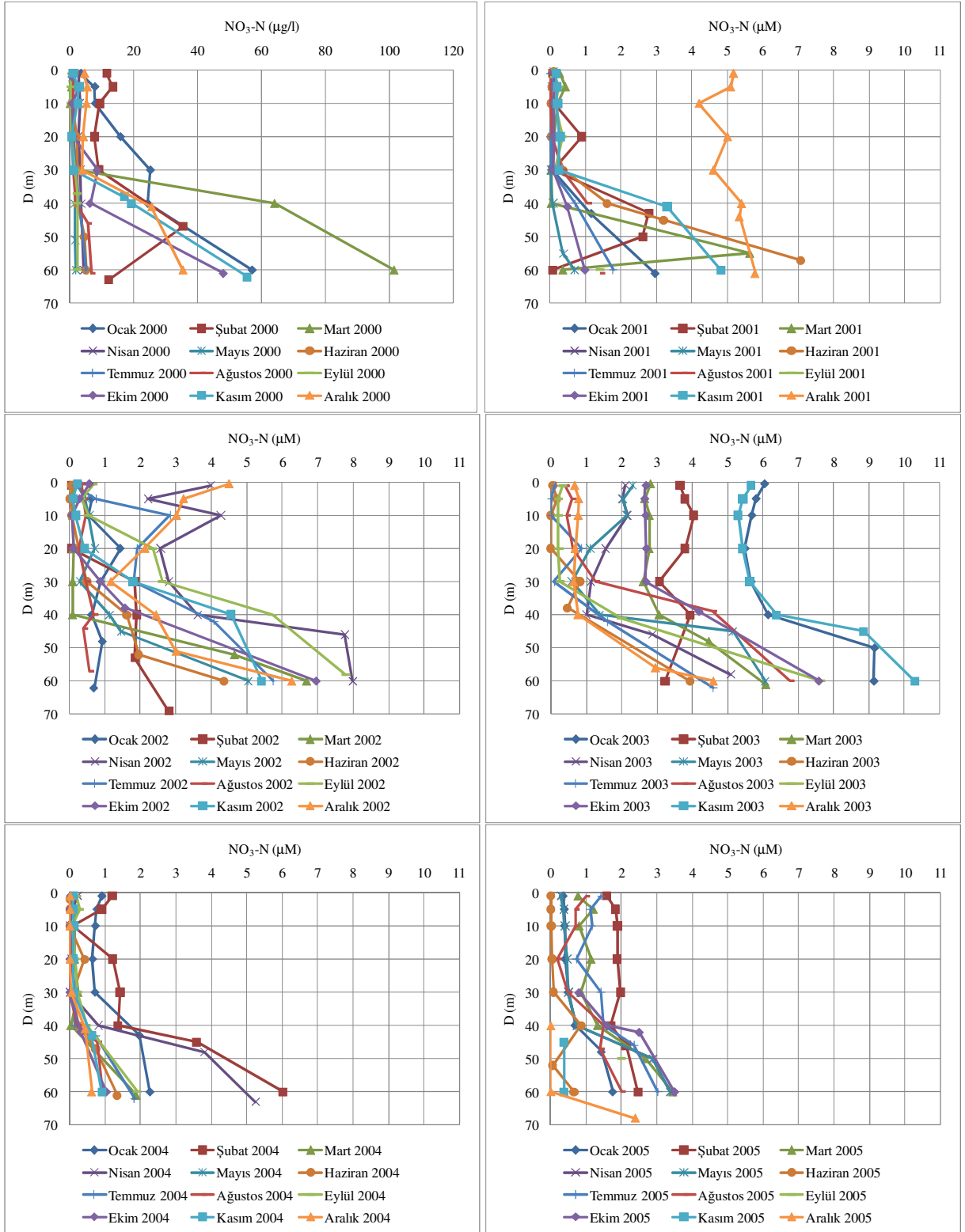
Şekil 4.28'de K3 istasyonunda ve Şekil 4.29'da K0 istasyonunda toplanan nitrat konsantrasyonu verileri gösterilmiştir. K3 istasyonunda 2000-2006 yılları arasında ve K0 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında yapılan ölçümler bir arada değerlendirildiğinde nitrat konsantrasyonlarının üst tabakada en çok 5 μM olurken, alt tabakada 10 μM 'nin üzerine ender olarak çıktığı görülmektedir. Alt tabakada yağışların çok olduğu aylarda nitrat konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. Bu durum yağışlar nedeniyle Boğaz'a dışarı girdisinin artmasından ileri gelmektedir. Şekil 4.30'da B13, Şekil 4.31'de B7 ve Şekil 4.32'de B2 Boğaz istasyonlarında ölçülen nitrat konsantrasyonu değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi yağışların bol olduğu bahar ayları ile Kasım ve Aralıkta alt tabakadaki nitrat konsantrasyonları da artmaktadır. Şekillerde verilen yıllar içerisinde ölçüm dönemlerinde nitrat konsantrasyonlarının İstanbul Boğazı istasyonlarında genellikle 10 μM 'nin altında kaldığı görülmektedir. İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi girişinde yer alan M8 istasyonunda yapılan nitrat ölçümleri Şekil 4.33'te verilmiştir. Bu istasyonda 2001 ve 2002 yıllarında ara tabakada nitrat konsantrasyonlarında artış olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşmasında ara tabakada birikim etkili olmaktadır.



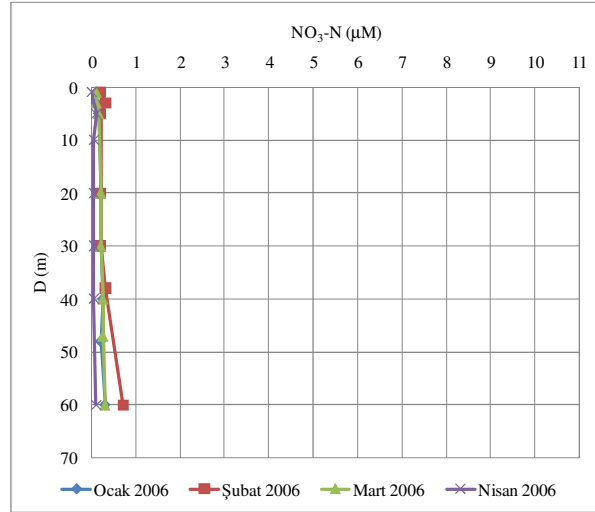
Şekil 4.28 K3 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.



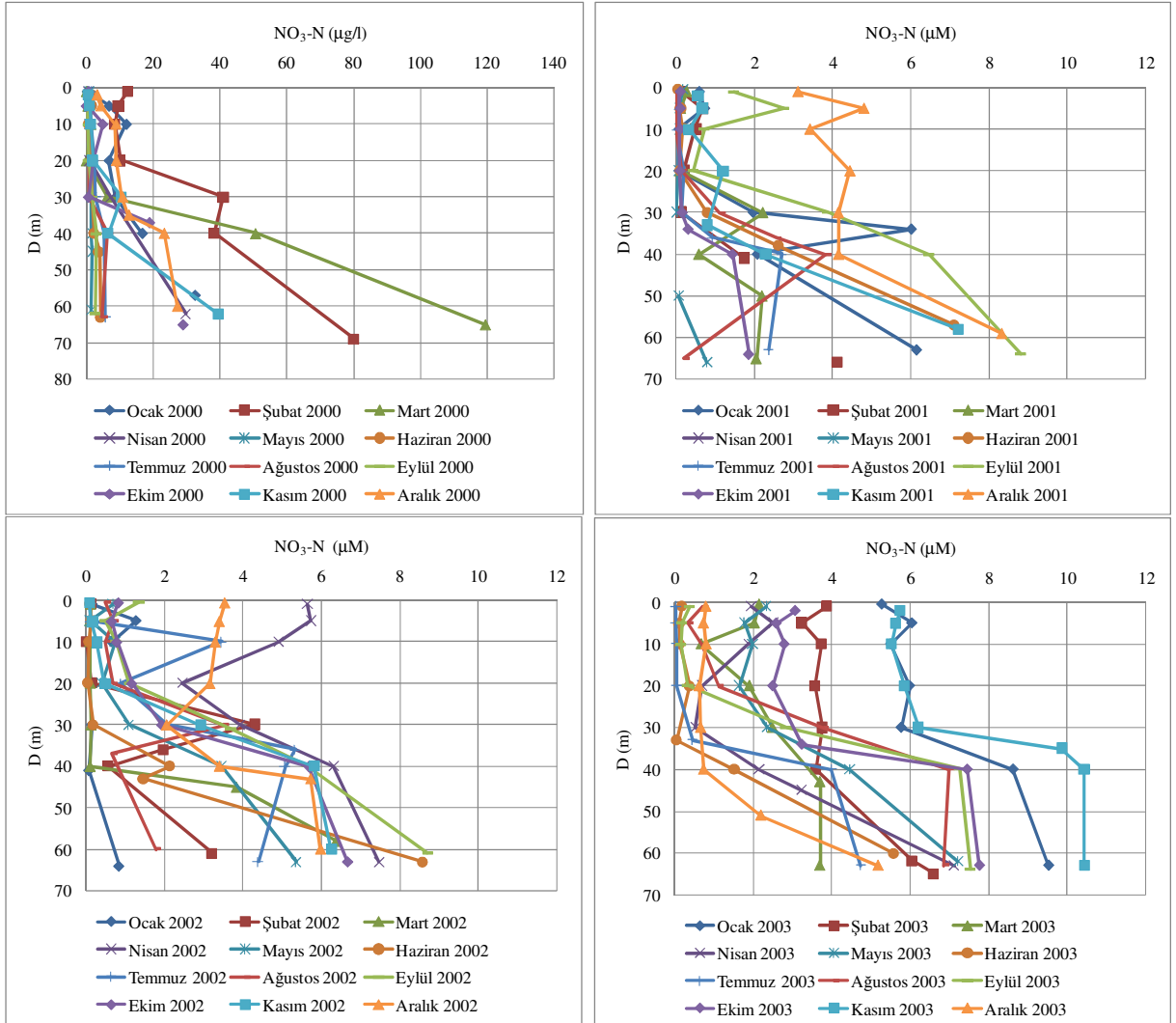
Şekil 4.29 K0 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.

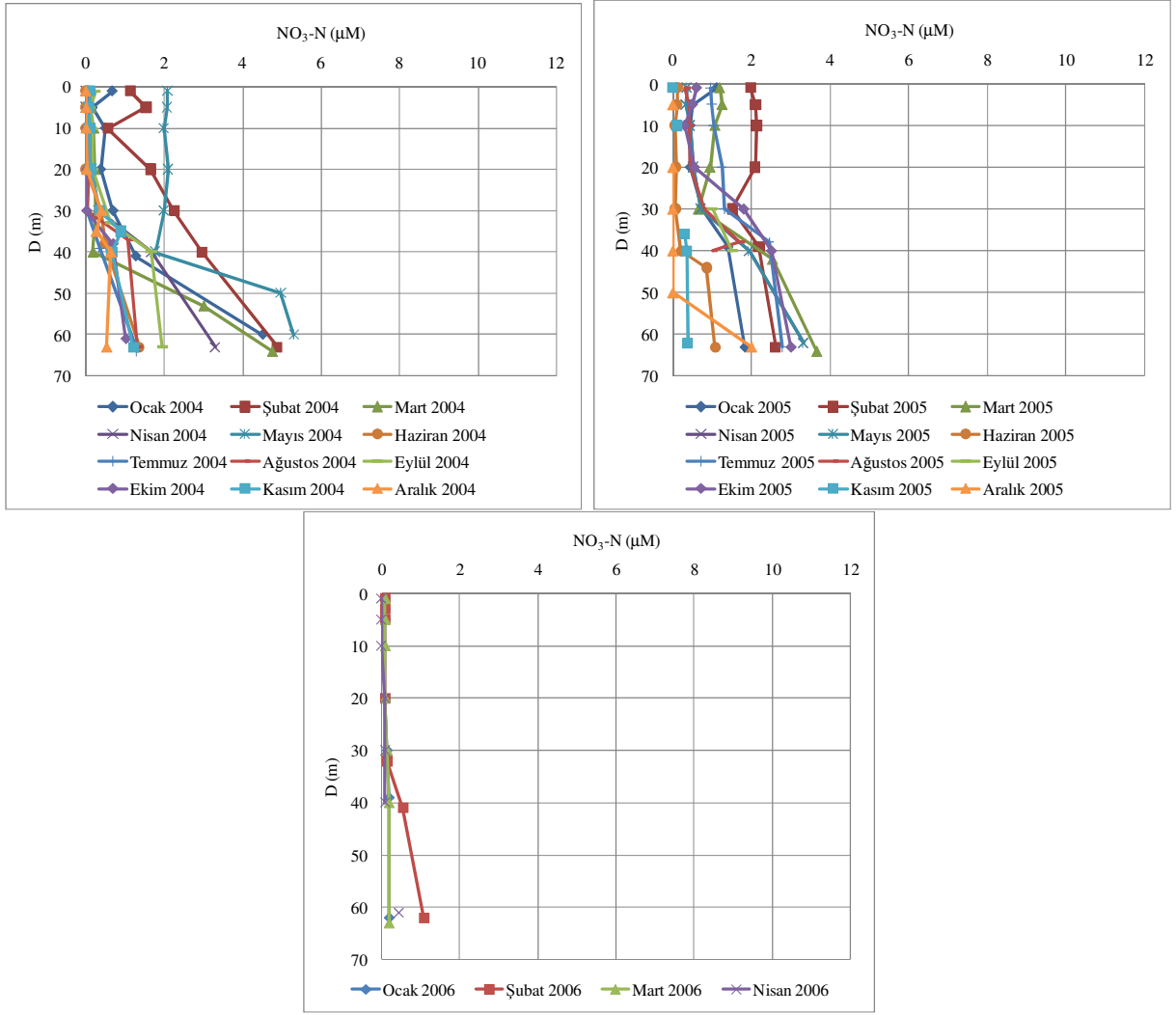


Şekil 4.30 B13 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.

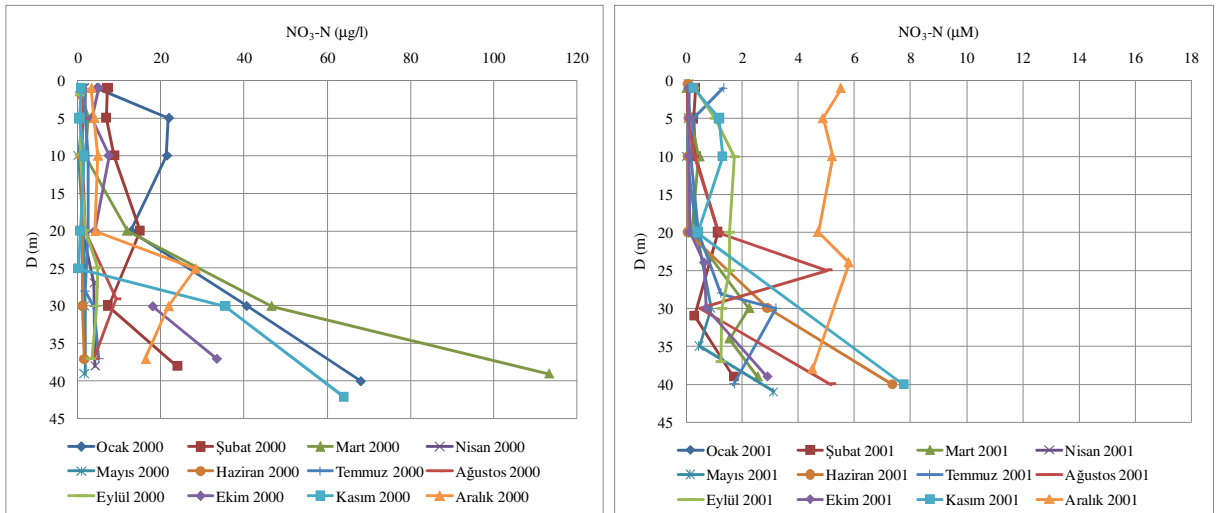


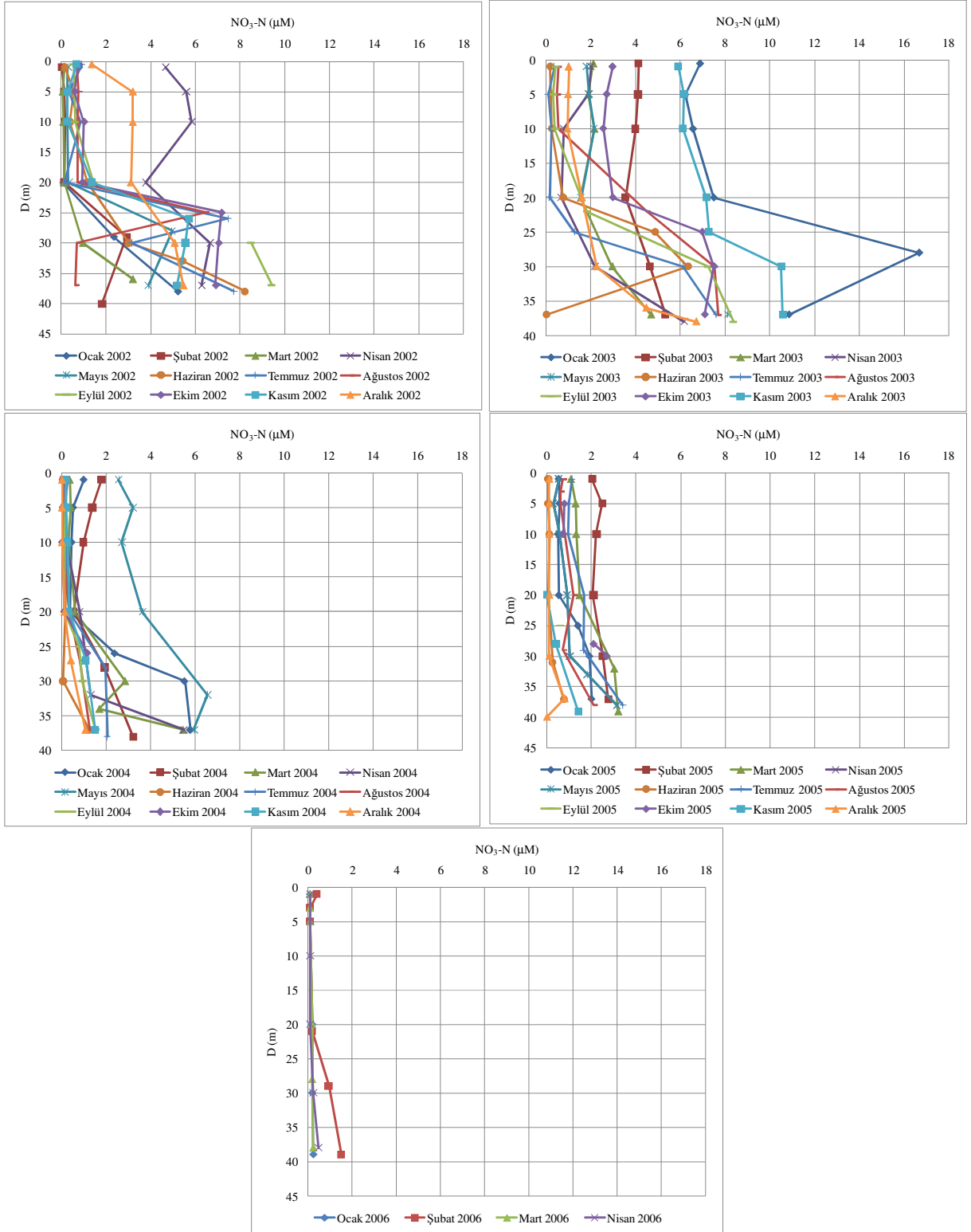
Şekil 4.30 Devamı.

Şekil 4.31 B7 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında NO₃-N konsantrasyonlarının değişimi.

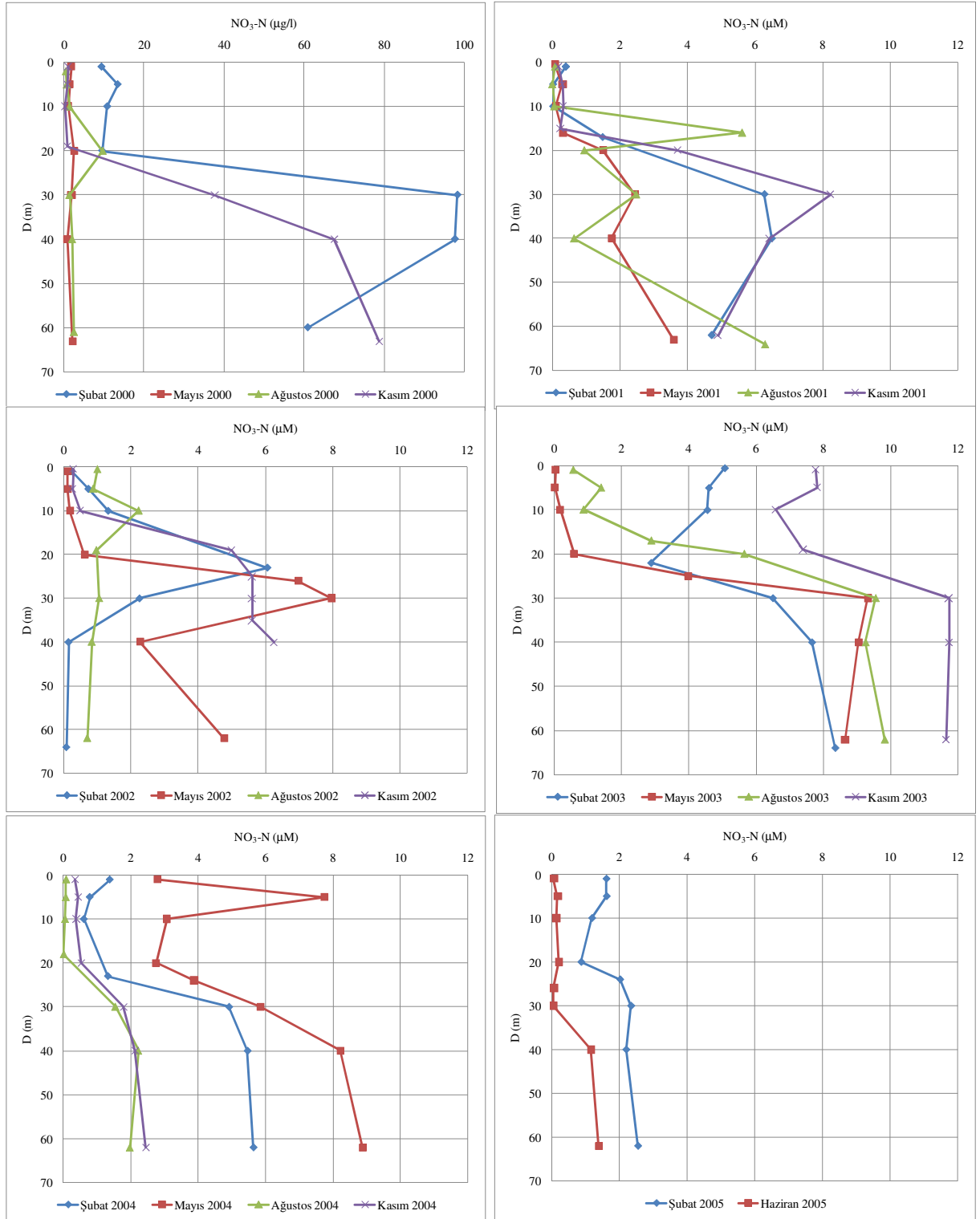


Şekil 4.31 Devamı.

Şekil 4.32 B2 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.



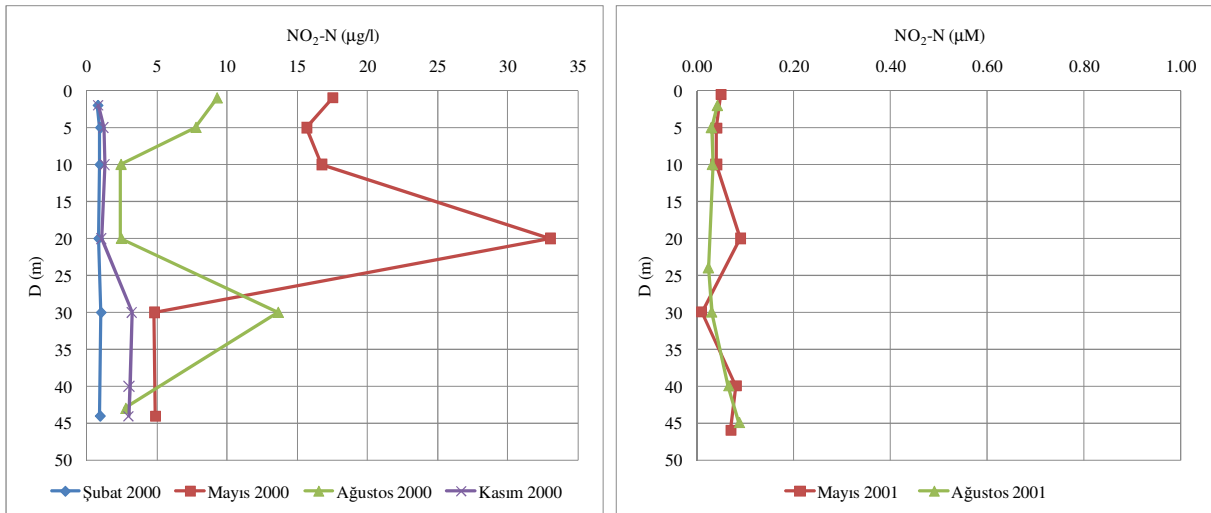
Şekil 4.32 Devamı.



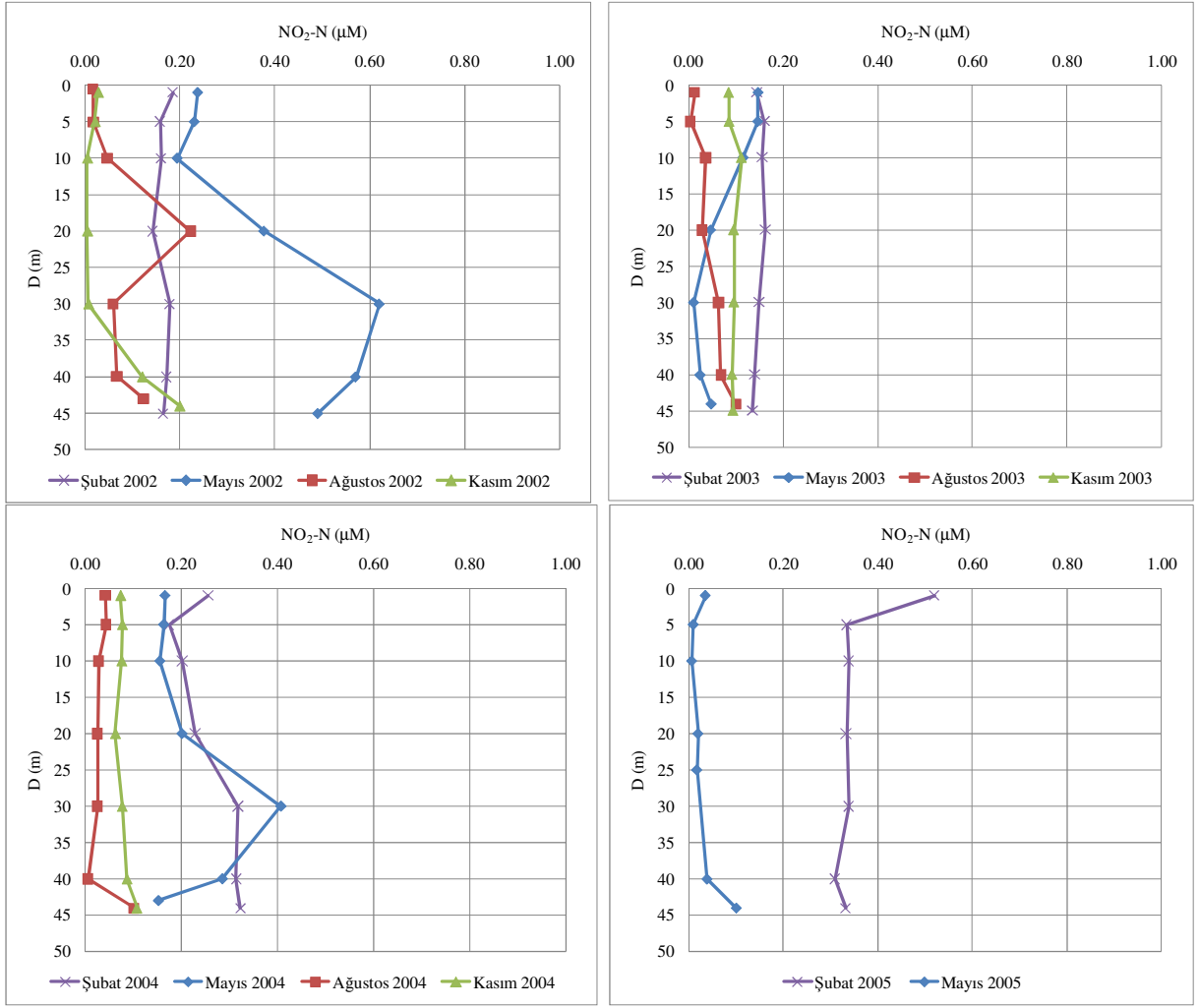
Şekil 4.33 M8 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_3\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.

4.3.6 NO₂-N Verilerinin Değerlendirilmesi

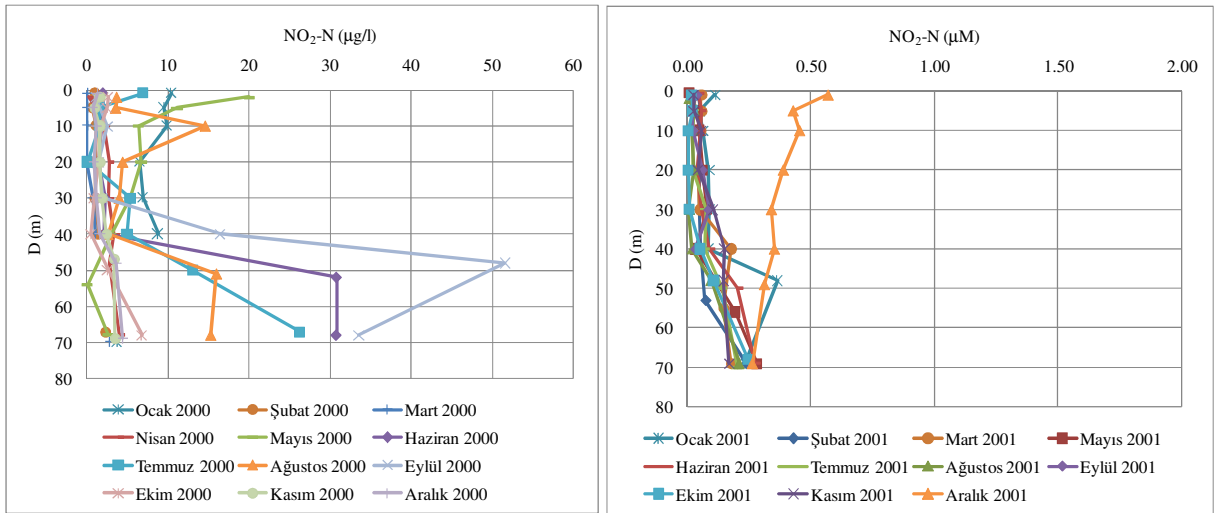
Şekil 4.34'te K3 istasyonunda ve Şekil 4.35'te K0 istasyonunda toplanan nitrit konsantrasyonu verileri gösterilmiştir. İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişiindeki bu istasyonların verileri bir arada değerlendirildiğinde nitrit konsantrasyonlarının yıl boyunca 1 μM 'nin altında seyrettiği görülmektedir. Diğer nütrient formlarında da olduğu gibi yüksek konsantrasyonların bahar ve kış aylarında en yüksek konsantrasyon değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.36'da B13 istasyonu, Şekil 4.37'de B7 istasyonu, Şekil 4.38'de B2 istasyonunda gerçekleştirilen nitrit konsantrasyonu ölçümlerinin sonuçları gösterilmiştir. İstanbul Boğazı boyunca yerleşmiş olan bu istasyonlara bakıldığında Ocak ve Aralık aylarında en yüksek konsantrasyonların olduğu görülmüştür. Bu da yağışlarla deşarj girdilerinde meydana gelen artışlara bağlı olarak açıklanabilmektedir. Yine bazı aylarda ara tabakada birikim görülmektedir. Boğaz'ın Marmara Denizi girişiindeki M8 istasyonunda toplanan veriler Şekil 4.39'da verilmiştir. Bu istasyonda yıllar boyunca en yüksek nitrit konsantrasyonu değerinin 0.3 μM olduğu görülmektedir. Veriler incelendiğinde 2003 yılı Ağustos ayında bu değer üzerine çıktığı özellikle ara tabakada konsantrasyonun 0.8 μM 'nin üzerine çıktığı görülmektedir.

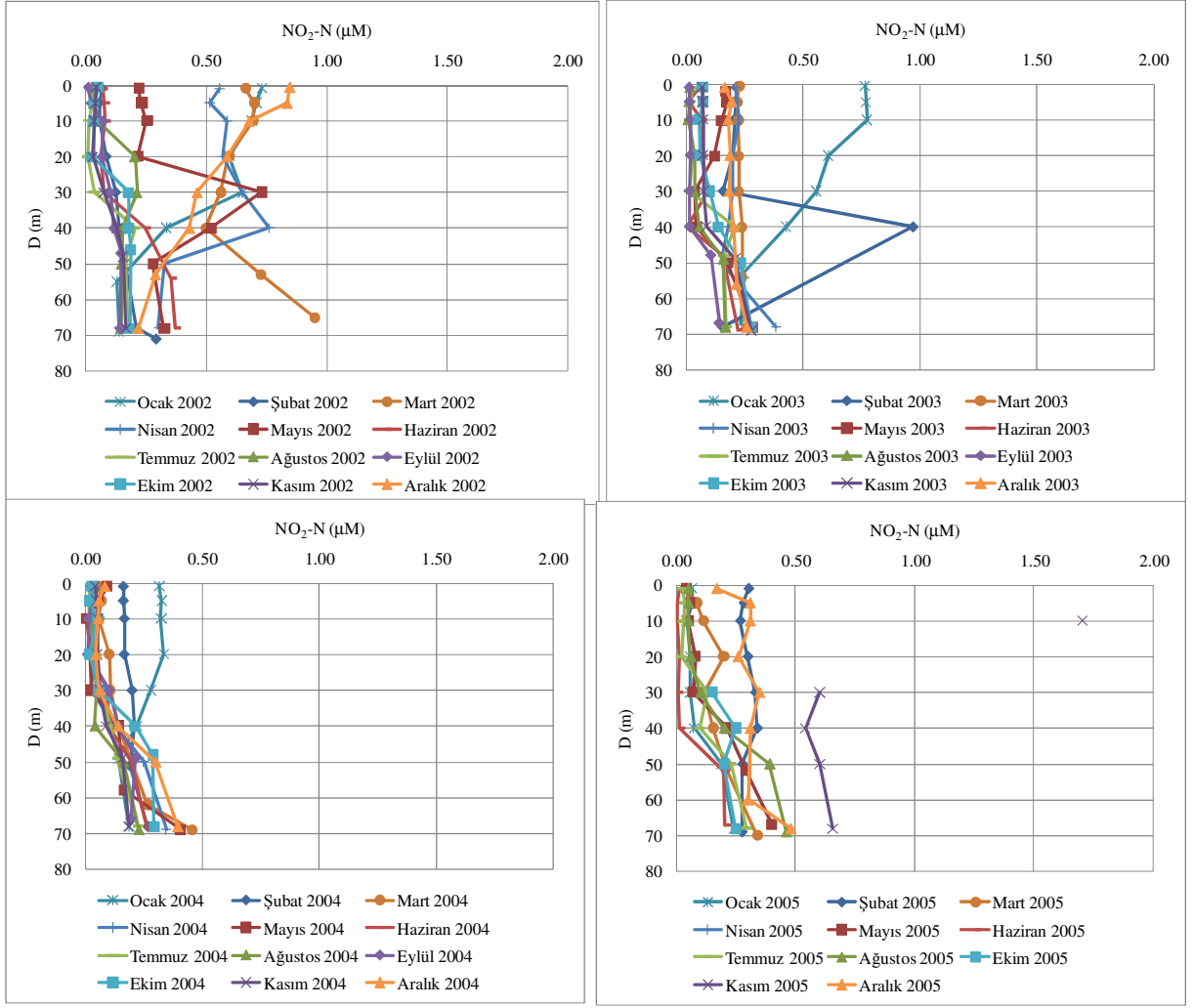


Şekil 4.34 K3 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında NO₂-N konsantrasyonlarının değişimi.

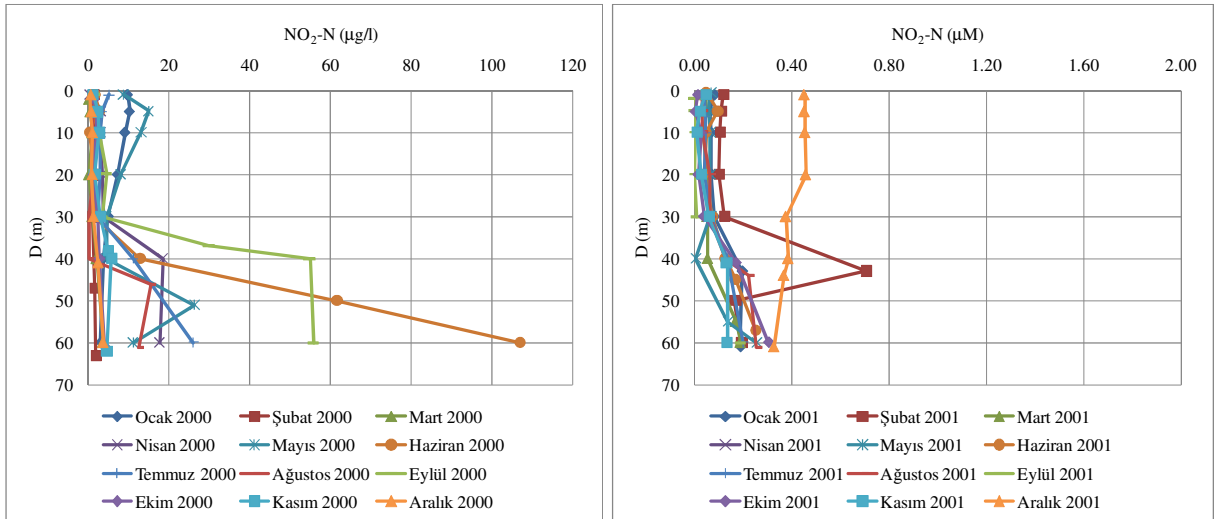


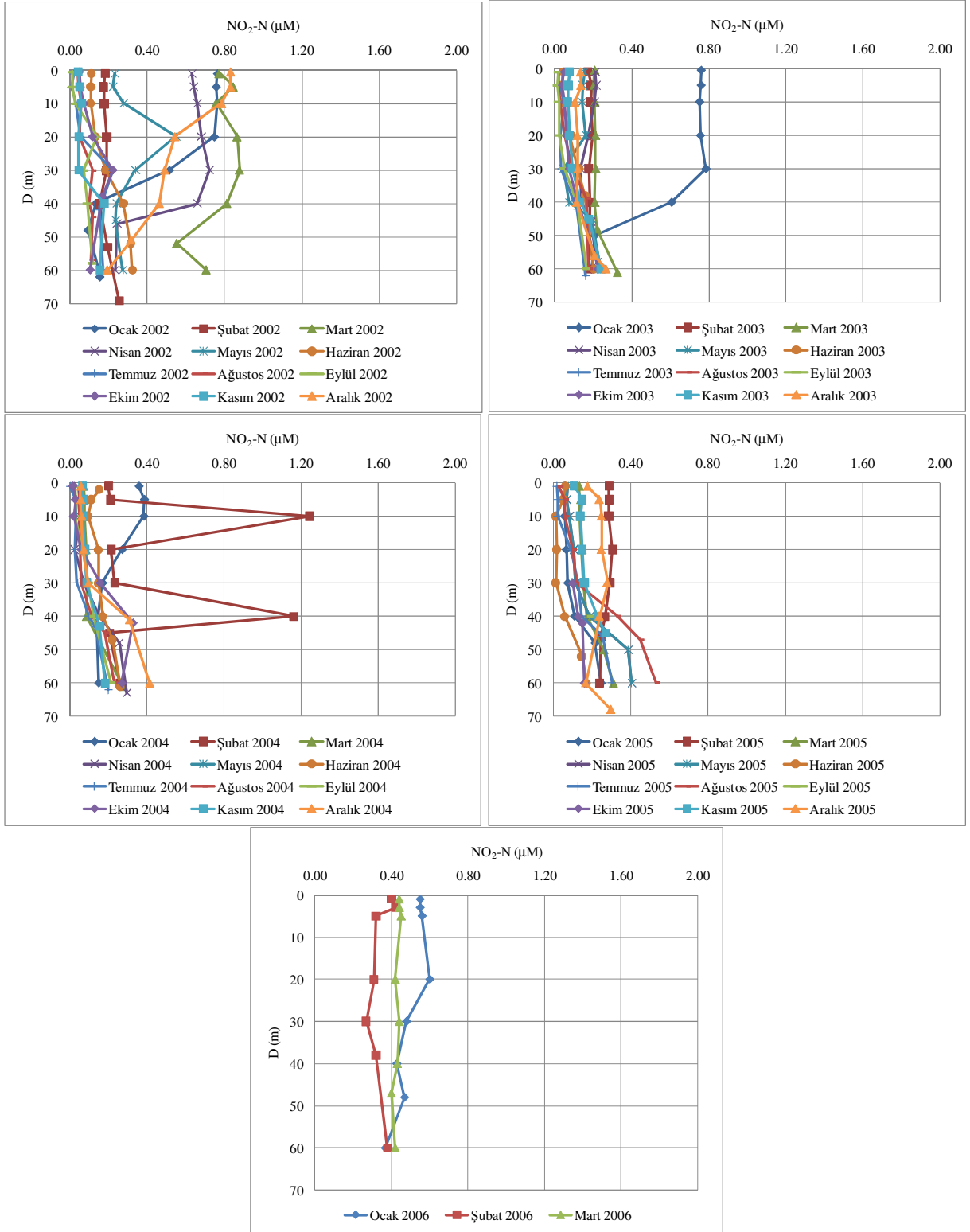
Şekil 4.34 Devamı.

Şekil 4.35 K0 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.

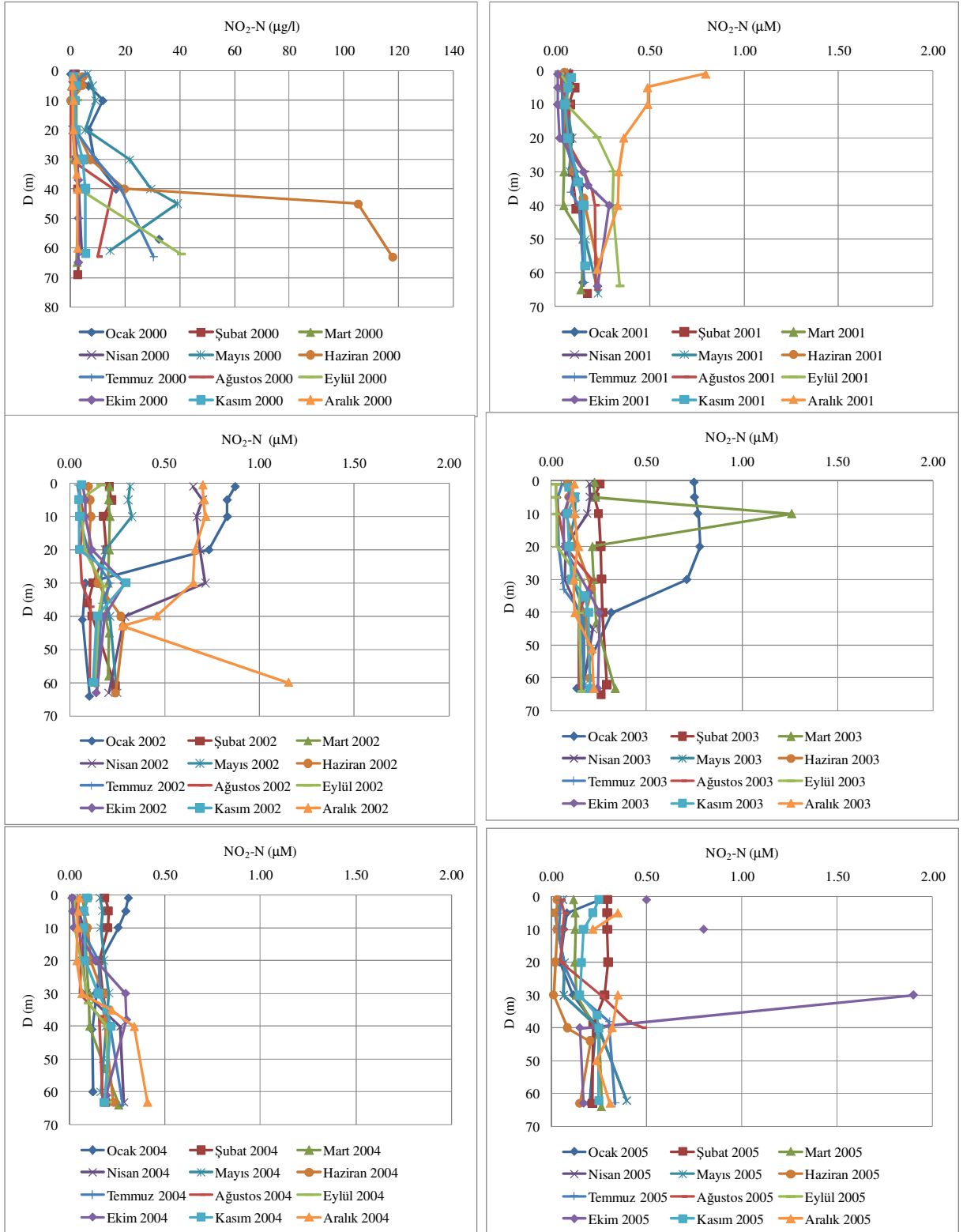


Şekil 4.35 Devamı.

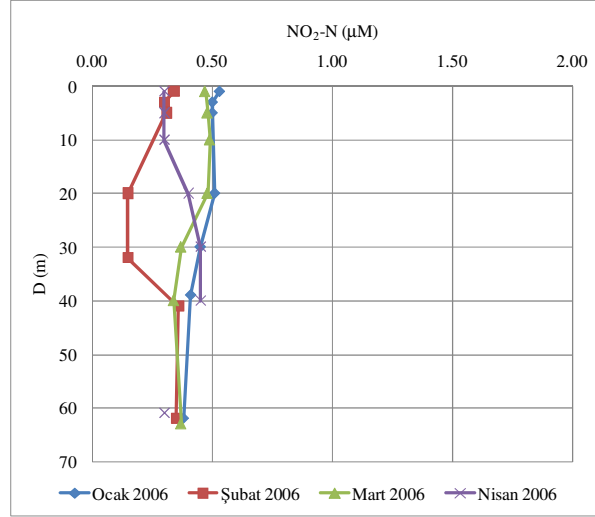
Şekil 4.36 B13 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.



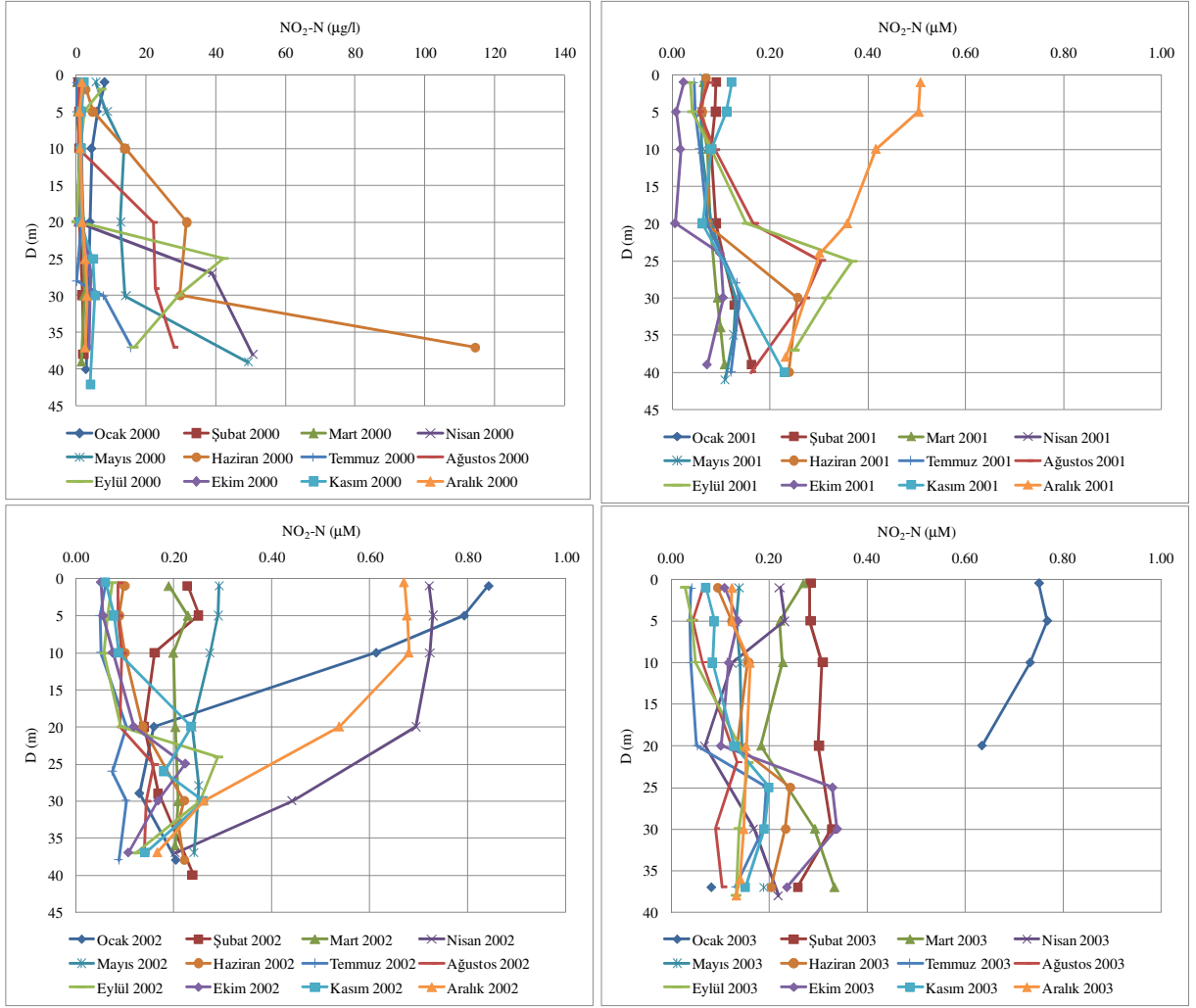
Şekil 4.36 Devamı.

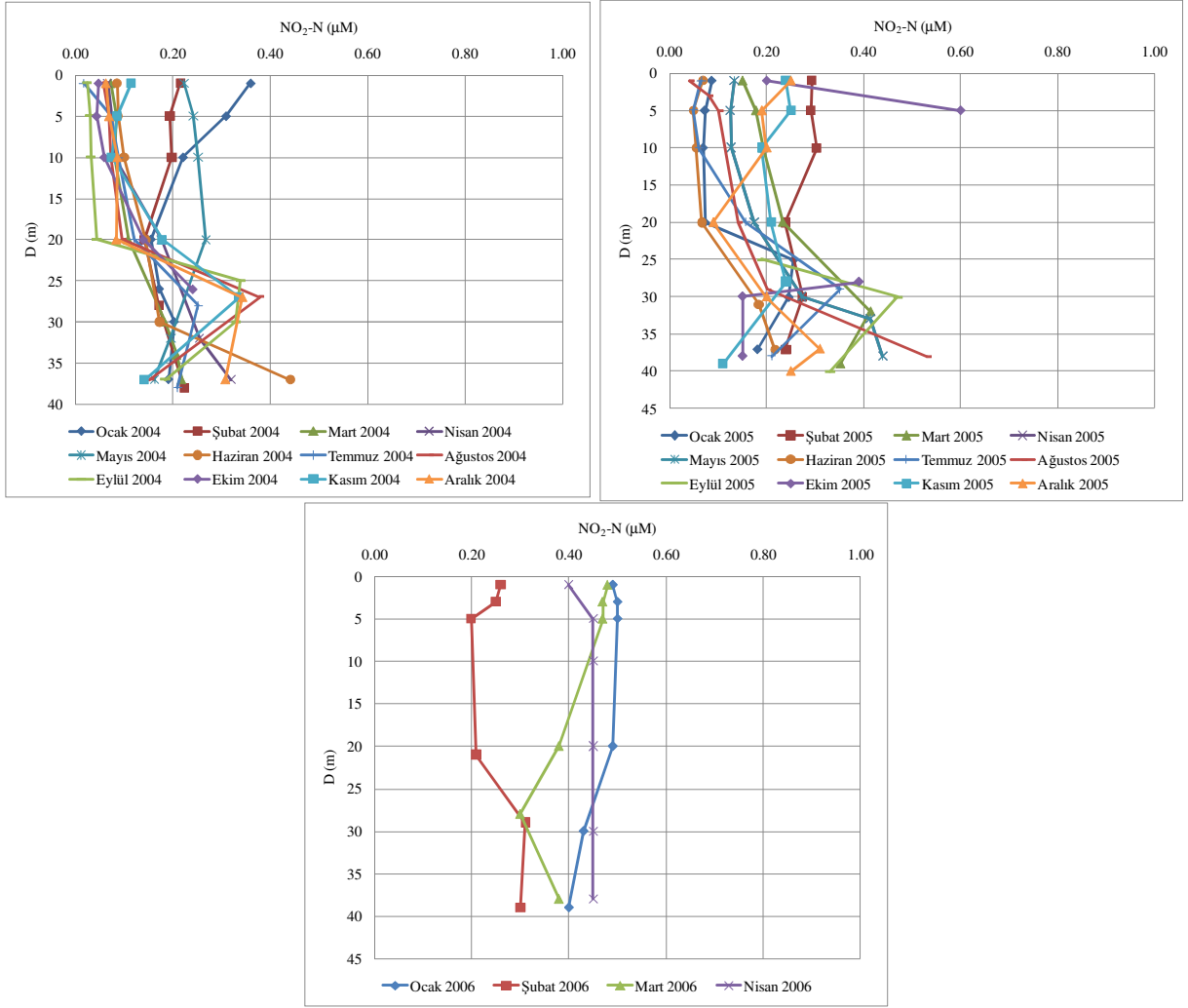


Şekil 4.37 B7 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.

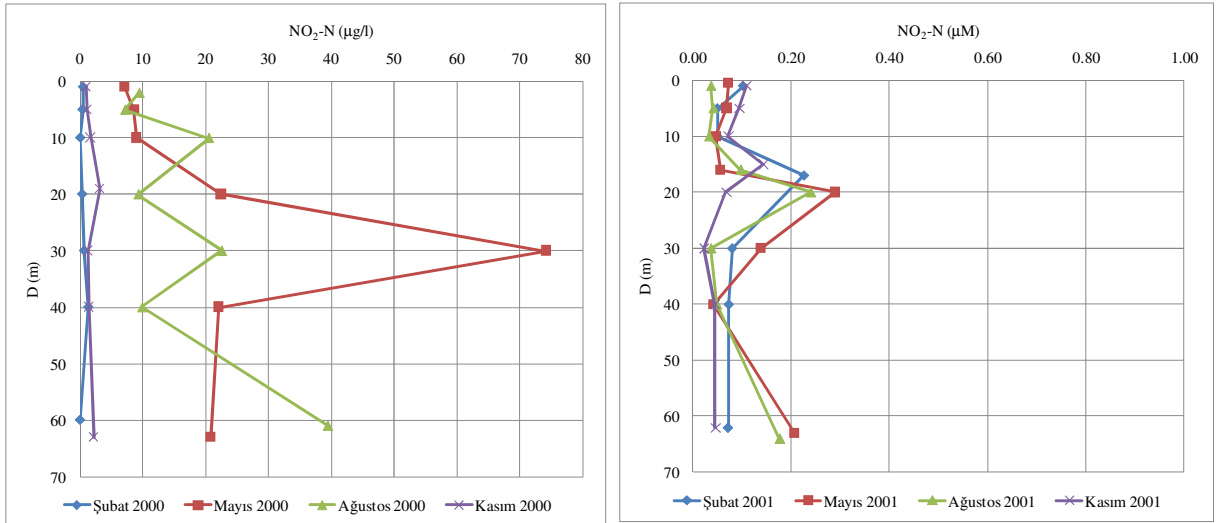


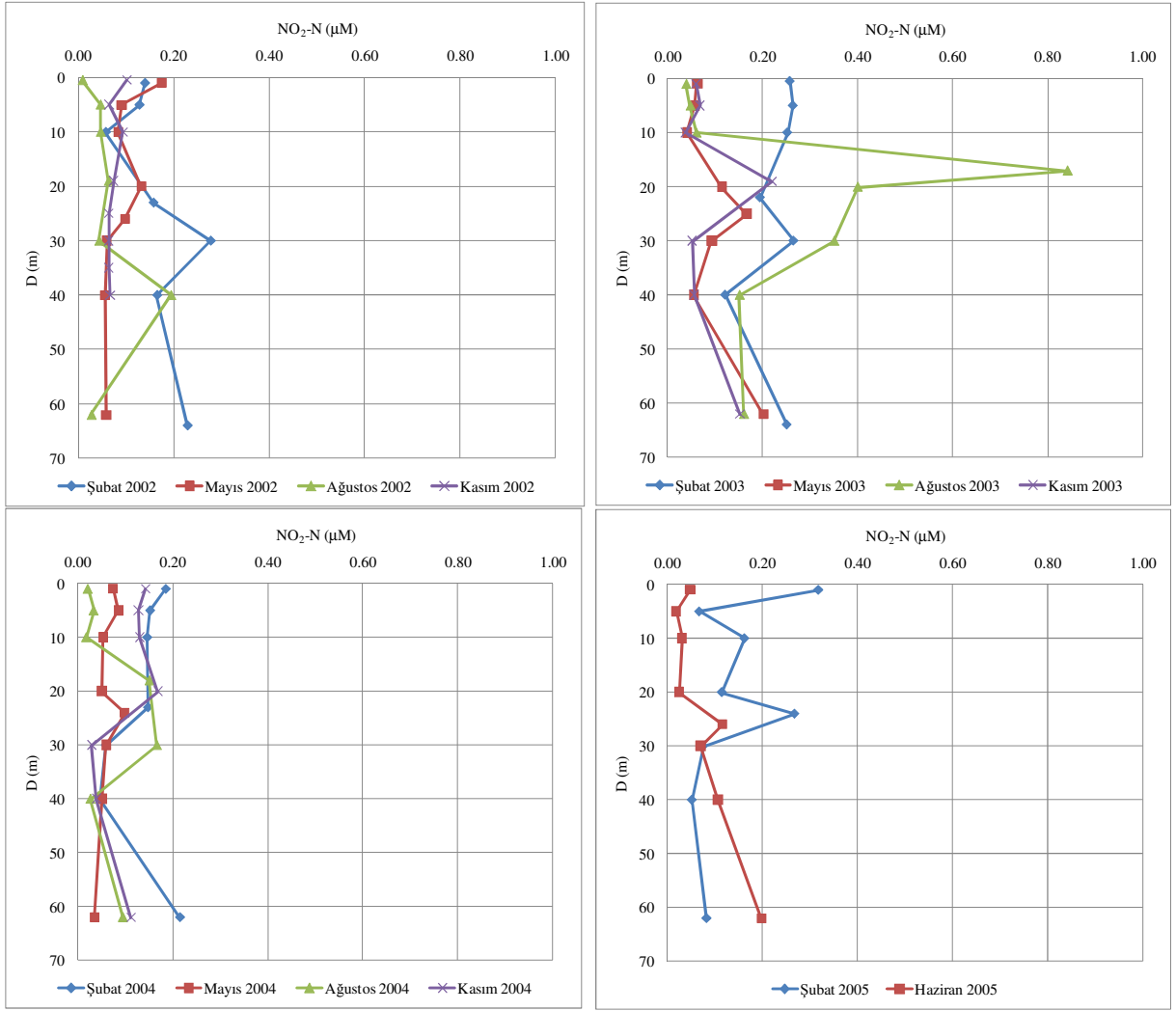
Şekil 4.37 Devamı.

Şekil 4.38 B2 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında NO₂-N konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.38 Devamı.

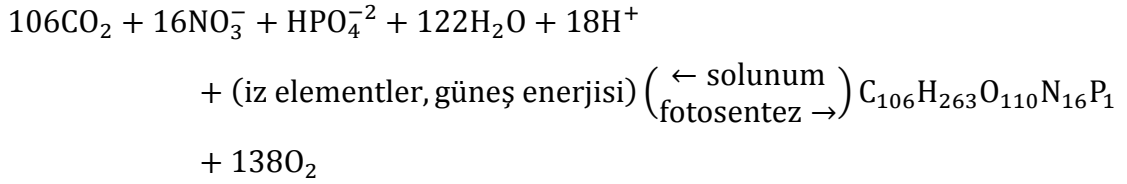
Şekil 4.39 M8 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında $\text{NO}_2\text{-N}$ konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.39 Devamı.

4.3.7 Klorofil-a Verilerinin Değerlendirilmesi

Klorofil-a sulara birincil üretimden sorumlu olan fitoplanktonların varlığının göstergesidir. Atıksular için alıcı ortam görevi üstlenen denizlerin organik madde yüklenmesinin yanı sıra fotosentez yapan tek hücreli canlılar olan fitoplanktonlar ile yüklenmesi de söz konusudur. Atıksulardaki azot ve fosfor fitoplanktonlar tarafından gerçekleştirilen birincil üretimi arttırmaktadır. Fitoplankton protoplazmasının atomik bileşimi C:N:P=106:16:1 şeklindedir. Fotosentetik bölgede fosfor, azot ve karbon sudan alınarak 106:16:1 oranında kullanılmaktadır. Yine tabanda çökelen fitoplanktonlar mineralize olurken karbon, azot ve fosfor aynı oranda suya geçmektedir. Ortalama fitoplankton formülü $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P_1$ 'dir. Denge halindeki bir ekosistemde organik maddenin üretim ve bozunması ile oksijen üretim ve tüketimi arasında aşağıdaki ampirik bağıntı geçerlidir.



Bu işlem sırasında gerekli olan C ve O elementleri atmosferdeki karbondioksitten karşılanmaktadır. Yine H ve O su moleküllerinden temin edilebilmektedir. Geriye kalan elementler ise sudaki sedimentlerden ya da çözünmüş tuzlardan sağlanmaktadır. Bu nedenle N ve P'ye duyulan gereksinim çok daha fazladır. Deniz suyunda bulunan elementleri miktarlarına göre sıralarsak azot<fosfor<silikat<karbon<demir<manganez olacaktır. Dolayısıyla deniz suyunda büyümeyi sınırlayan element azot olarak karşımıza çıkmaktadır.

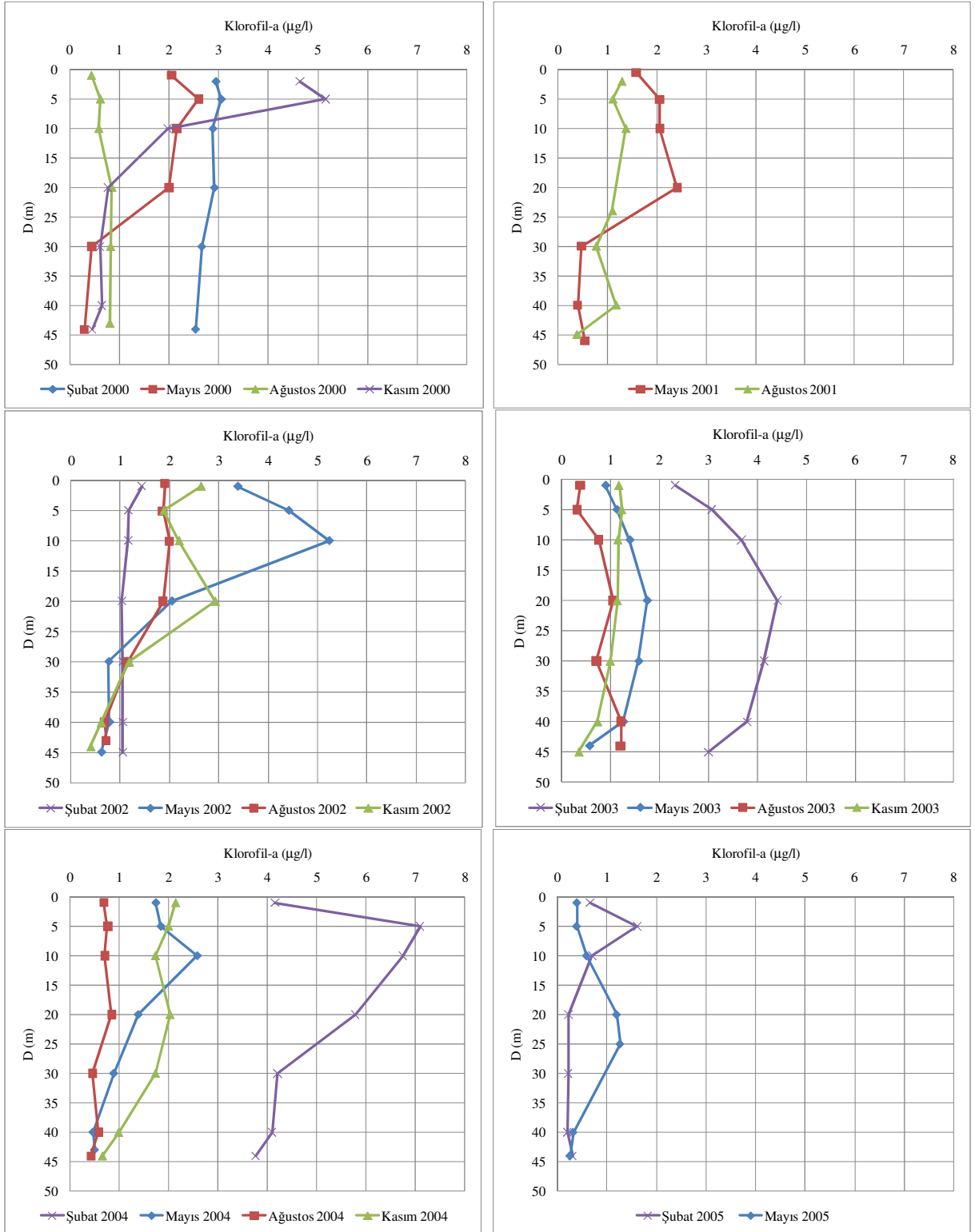
Sıcaklığın Büyümeyi Sınırlayıcı Etkisi

Deniz suyunun sıcaklığı, su yoğunluğuna, dolayısıyla su sütununun stabilitesine etki eden bir faktör olup, karışım süreçlerindeki rolü büyüktür. Ilıman denizlerde kış aylarında yüzeysel ve dip sular arasındaki sıcaklık farklılıkları, rüzgâr karışımını etkileyecek kadar önemli olmamakta ancak ilkbahar ve yaz aylarında yüzey suları ısındığı için dibe doğru bir tabakalaşma oluşmaktadır. Bu durumda karışım olayı tamamen engellenmekte ve sadece rüzgârın etkisinde kalan “epilimnion” denilen bölgede karışım olmaktadır. “hipolimnion” olarak adlandırılan dip kısım ile epilimnion arasında “termoklin adı verilen bölge yer almakta ve bu tabaka besin maddesi açısından zengin olan dip sularını, yeterli ışığa sahip yüzeysel sulardan ayırmakta ve fitoplankton büyümesi için gerekli iki faktör farklı tabalarda yer almaktadır. Sonbaharda ise yüzey suları soğumaya başladığından tabakalaşma ortadan kalkmakta ve rüzgârın karışım etkisi söz konusu olmaktadır. Mevsimsel olan bu çevrimler sonucu ilkbahar ve bazen de sonbaharda fitoplankton patlamaları oluşmaktadır. Kış aylarında ise düşük sıcaklıklar ve ışık şiddetleri fitoplankton üretimini sınırlandırıcı etki yapmaktadır. Fitoplanktonların optimum sıcaklığa kadar büyüme hızı ve biyolojik aktivitesi artmakta, optimum sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda ise düşmektedir. Birçok deniz ve tatlı su fitoplanktonları için optimum sıcaklık 18-25 °C arasındadır.

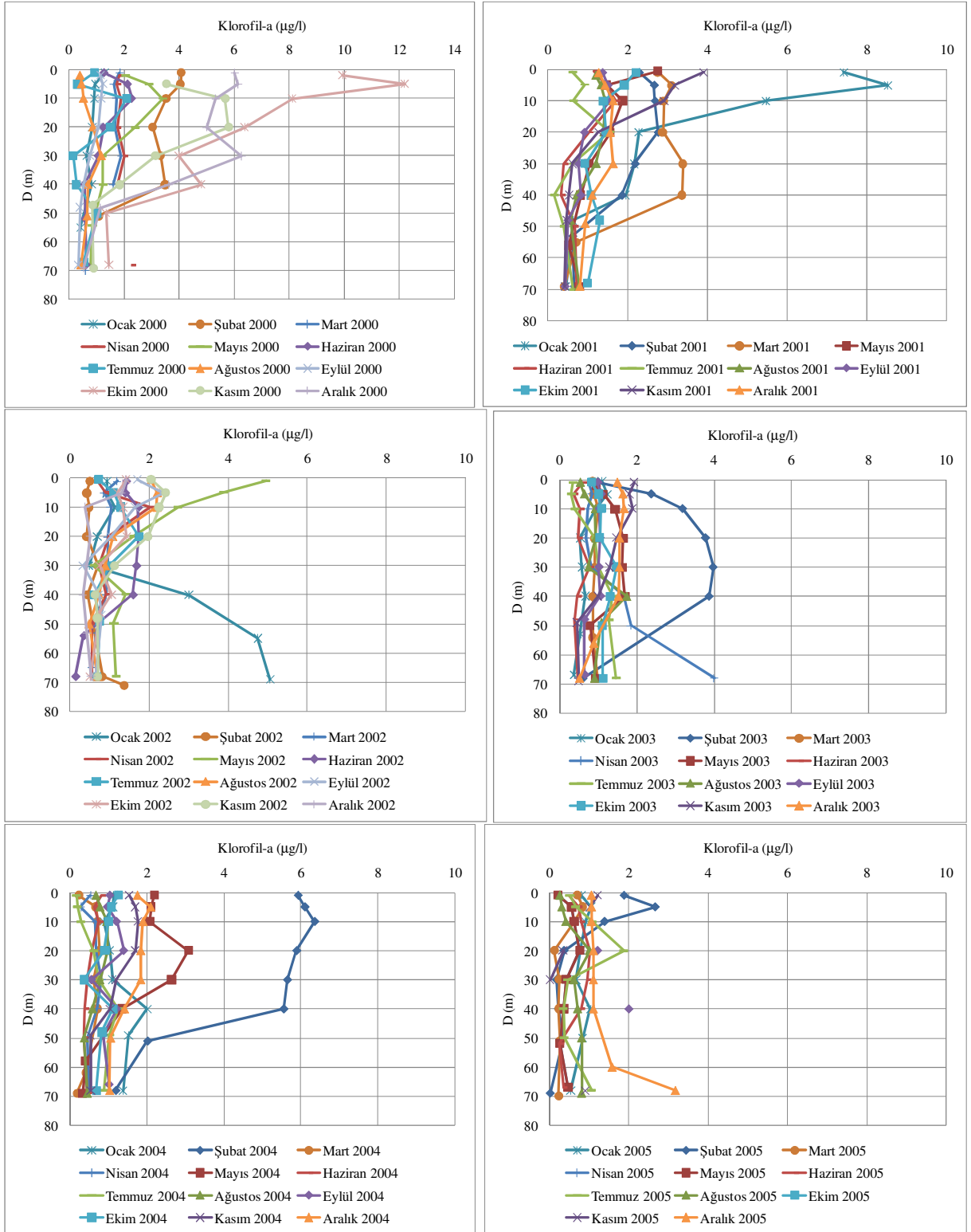
Ötrofikasyonun başladığı kıyı sularında fosfor konsantrasyonu 0.15 µM/l, yüksek derecede ötrofiye olmuş sistemlerde ise 0.3 µM/l mertebesine kadar yükselmektedir (UNEP, 1991). Deniz ortamında ötrofikasyon sınırı, yerel koşullara bağlı olmakla birlikte TON (toplam oksitlenmiş azot; NO₂-N+NO₃-N) için 0.20-0.40 mM/l olarak verilmektedir (UNEP, 1991). Çok kirli kıyı sularında ve ya akarsu ağızlarında 35 mM/l'yi aşan NO₃-N konsantrasyonlarına ve 20 mM/l'yi aşan NH₄-N konsantrasyonlarına rastlanabilmektedir (UNEP, 1991).haliçlerde

ve körfezlerde meydana gelen ötrofikasyonda azot ve fosfor elementlerinden hangisinin belirleyici olduğunu anlamak çözünmüş inorganik azotun çözünmüş inorganik fosfora oranı (N:P) oranı kullanılmaktadır. Bu oran 7'nin üzerinde ise ötrofikasyonun fosfor tarafından kontrol edildiği, 7'nin altında ise azot tarafından kontrol edildiği söylenebilmektedir (Fisher vd., 1992).

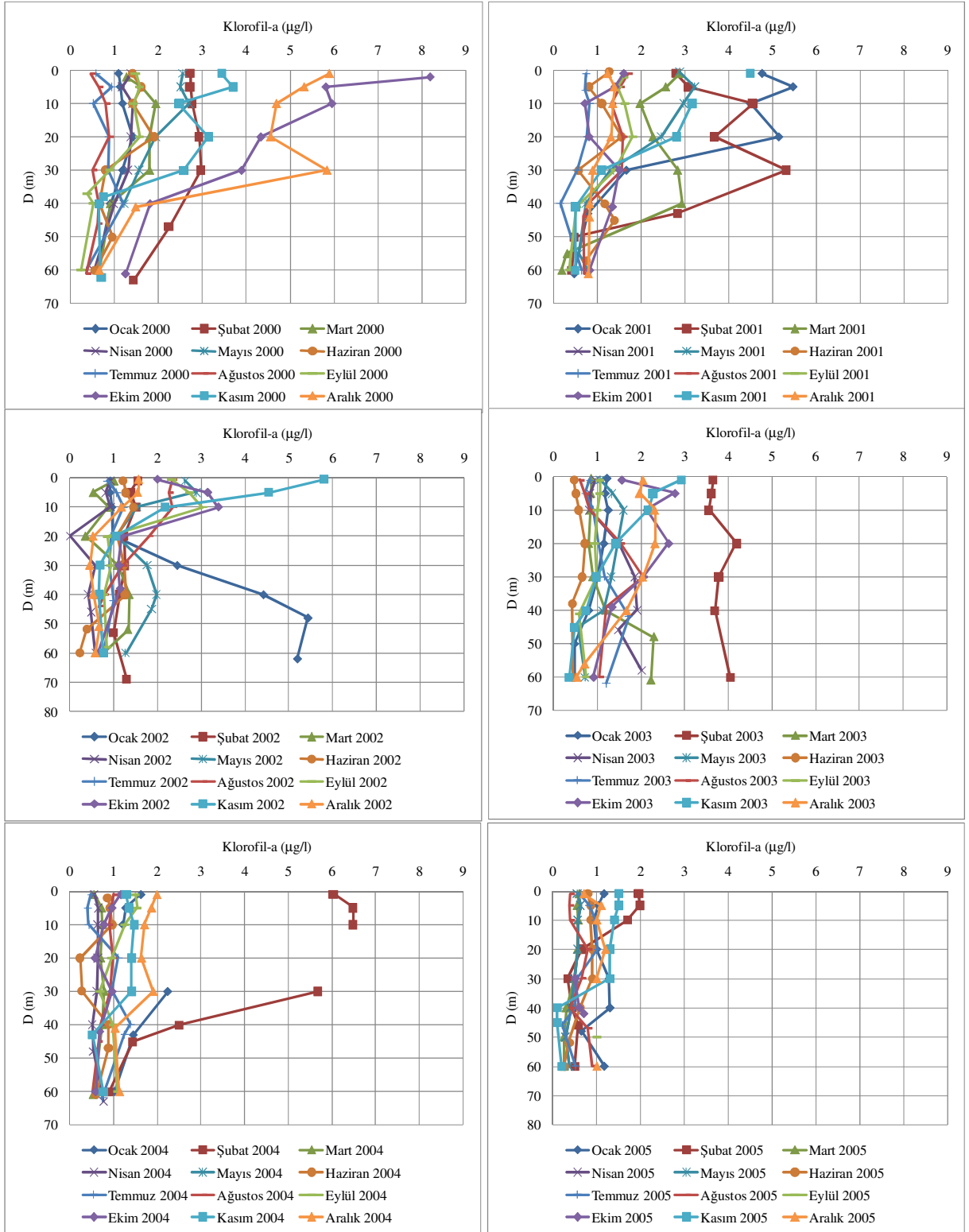
Şekil 4.40'ta K3 istasyonu klorofil-a ölçümleri verilmiştir. Dağılımlar incelendiğinde belirgin bir tabakalaşma göze çarpmamaktadır. Bu istasyonda her yılın Ağustos ve Mayıs aylarında klorofil-a değerleri oldukça düşük seyretmiştir. Bu da sözkonusu aylarda birincil üretimin düşük olduğunu göstermektedir. K3 istasyonunda mevsimlik veri toplandığından diğer aylar hakkında bilgi edinmek mümkün olmamaktadır. Yine Şekil 4.40'a göre en yüksek klorofil-a konsantrasyonu 2004 yılının Şubat ayında ölçülmüştür. İlkbahar aylarında yükselen fitoplanktonik aktivitenin bu yüksek konsantrasyon değerine neden olabileceği düşünülmektedir. Şubat ayında hafif geçen kış mevsimi ilkbahar fitoplanktonik aktivitesinin erken başlamasına neden olmuş olabilir. Yine İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ile birleştiği yerde bulunan K0 istasyonunda aylık periyotlarla toplanan klorofil-a verileri, Şekil 4.41'de verilmiştir. K0 istasyonunda ölçülen konsantrasyon değerleri K3'tekine oldukça benzer olmakla birlikte zaman zaman daha yüksek değerler ölçülmüştür. 2000 Ekim ve 2001 Ocak aylarında yüzey suyunda klorofil-a konsantrasyonlarının arttığı görülmektedir. Oysa beklenti bu konsantrasyonların kış aylarının sonu ile ilkbahar aylarında yüksek olması doğrultusundadır. Burada sıra dışı bir organik madde yüklemesi ile planktonik aktivitenin arttığı ve bu yüksek konsantrasyon değerlerine neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.42'de B13 istasyonu, Şekil 4.43'te B7 istasyonu ve Şekil 4.44'de B2 istasyonunda ölçülen klorofil-a konsantrasyonlarının düşey dağılımları gösterilmiştir. İstanbul Boğazı boyunca konumlanmış bu istasyonlardan toplanan verilere bakıldığında beklentiler doğrultusunda Şubat, Mart ve Mayıs gibi bahar aylarında birincil üretimin artmasına bağlı olarak klorofil-a konsantrasyonlarının arttığı, zaman zaman bu artışların Ocak ayına kayabildiği ve bazı yıllarda da sonbahar aylarında benzer artışların meydana geldiği görülmektedir. Mevsimsel olarak veri toplanan ve İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi ile birleştiği yerde bulunan M8 istasyonunda ölçülen Klorofil-a konsantrasyonları Şekil 4.45'te verilmiştir. Bu istasyonda net bir tabakalanma görülmektedir. Yüzeydeki yüksek konsantrasyon değerleri bu istasyonun yüzey sularının deni deşarjlarının yoğun etkisi altında olmasından kaynaklanmaktadır. Böylece bu bölgedeki yüksek organik madde girdisine bağlı olarak birincil üretim de yüksek seyretmektedir.



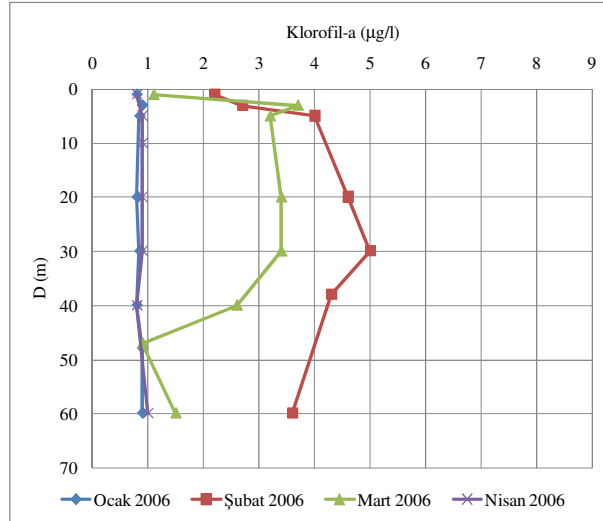
Şekil 4.40 K3 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.



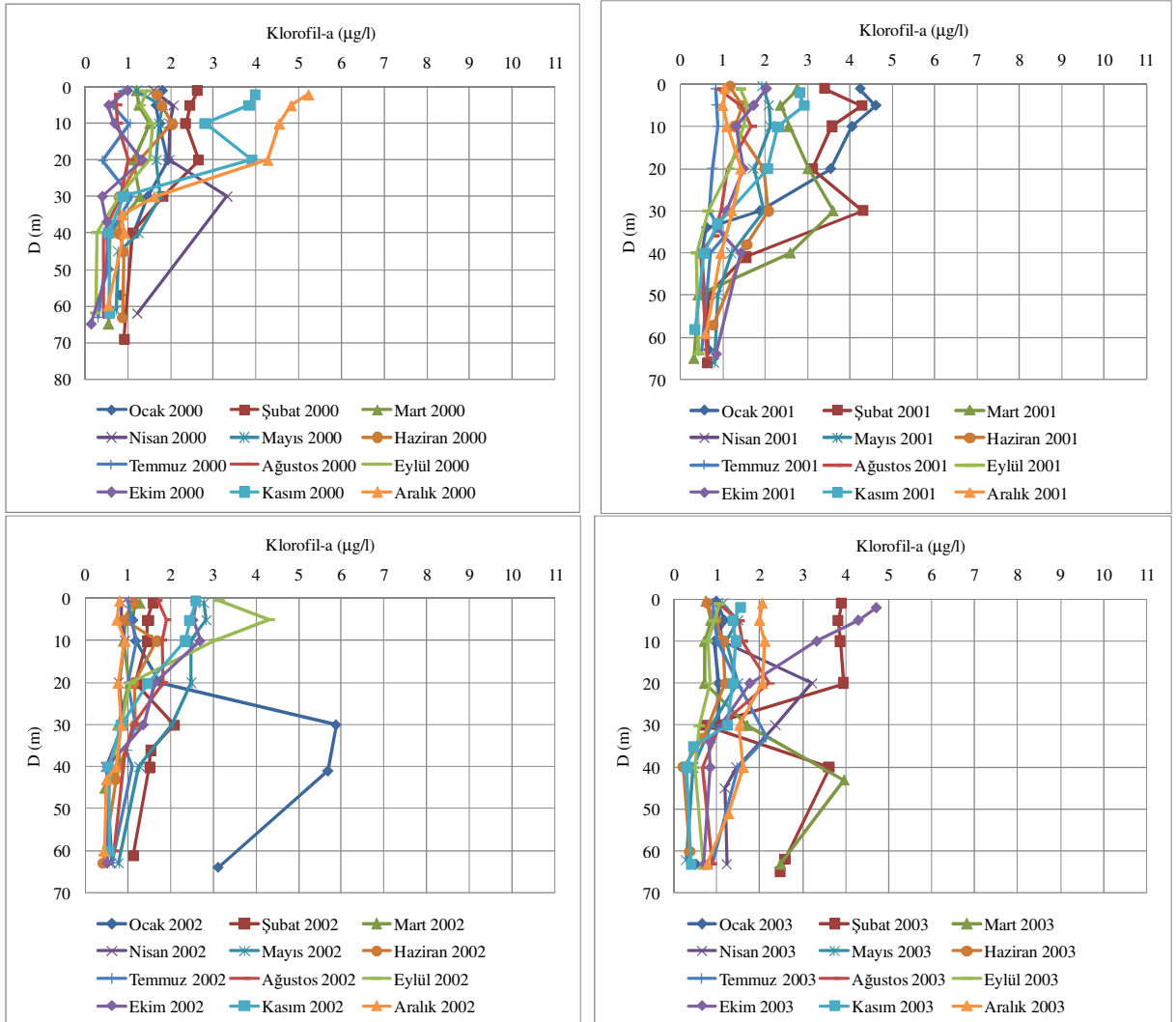
Şekil 4.41 K0 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.



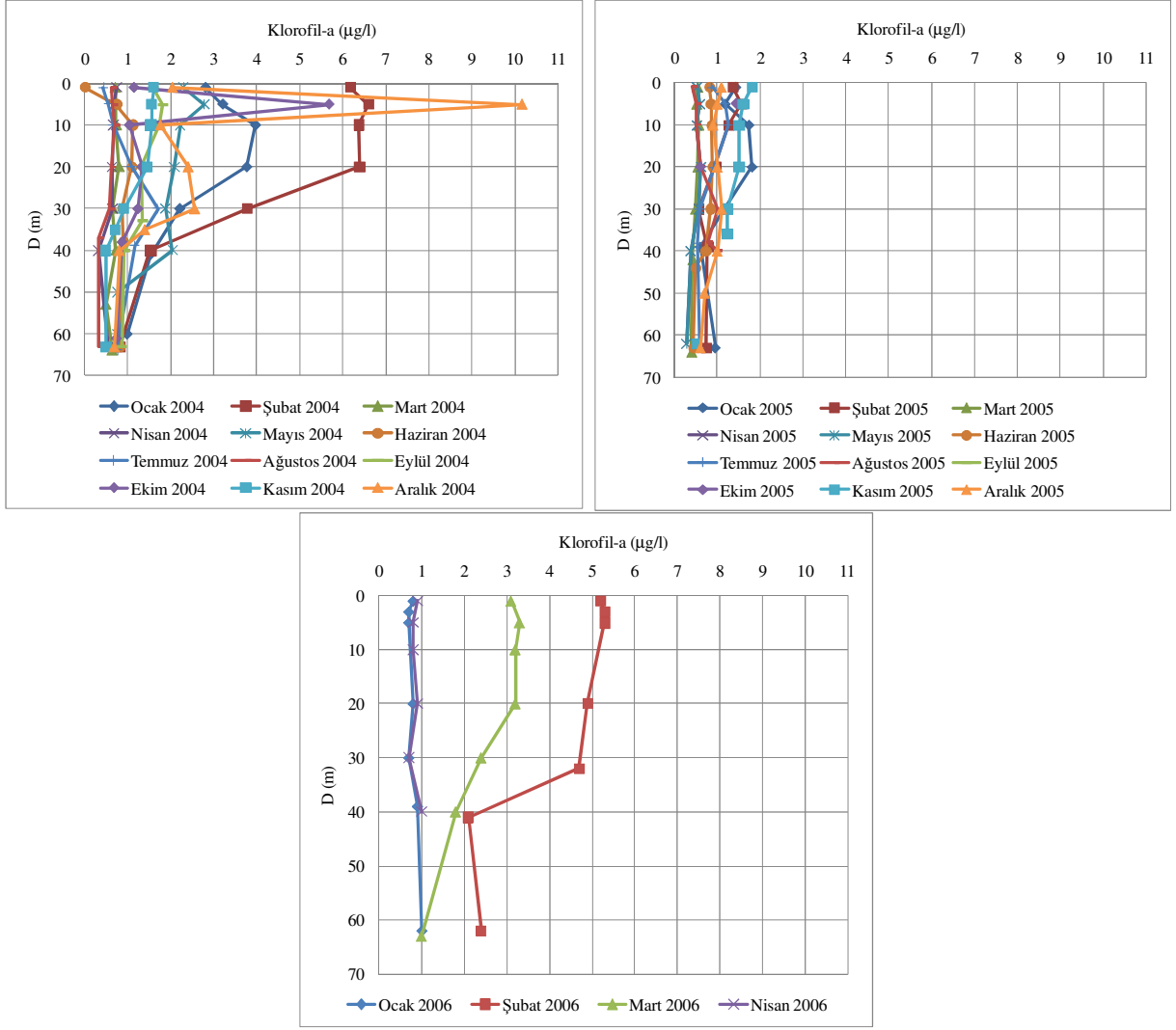
Şekil 4.42 B13 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.



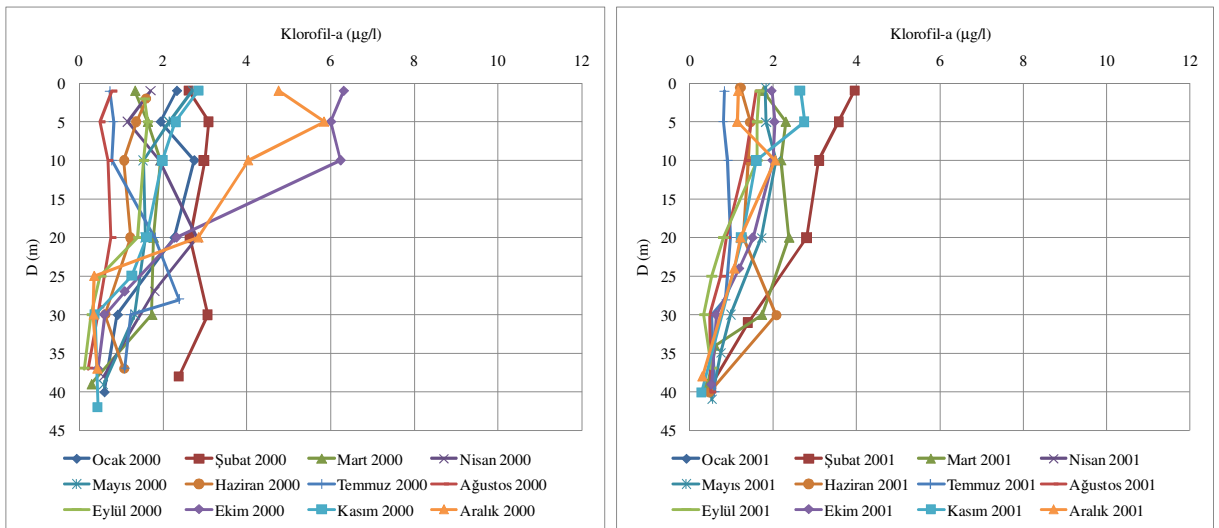
Şekil 4.42 Devamı.



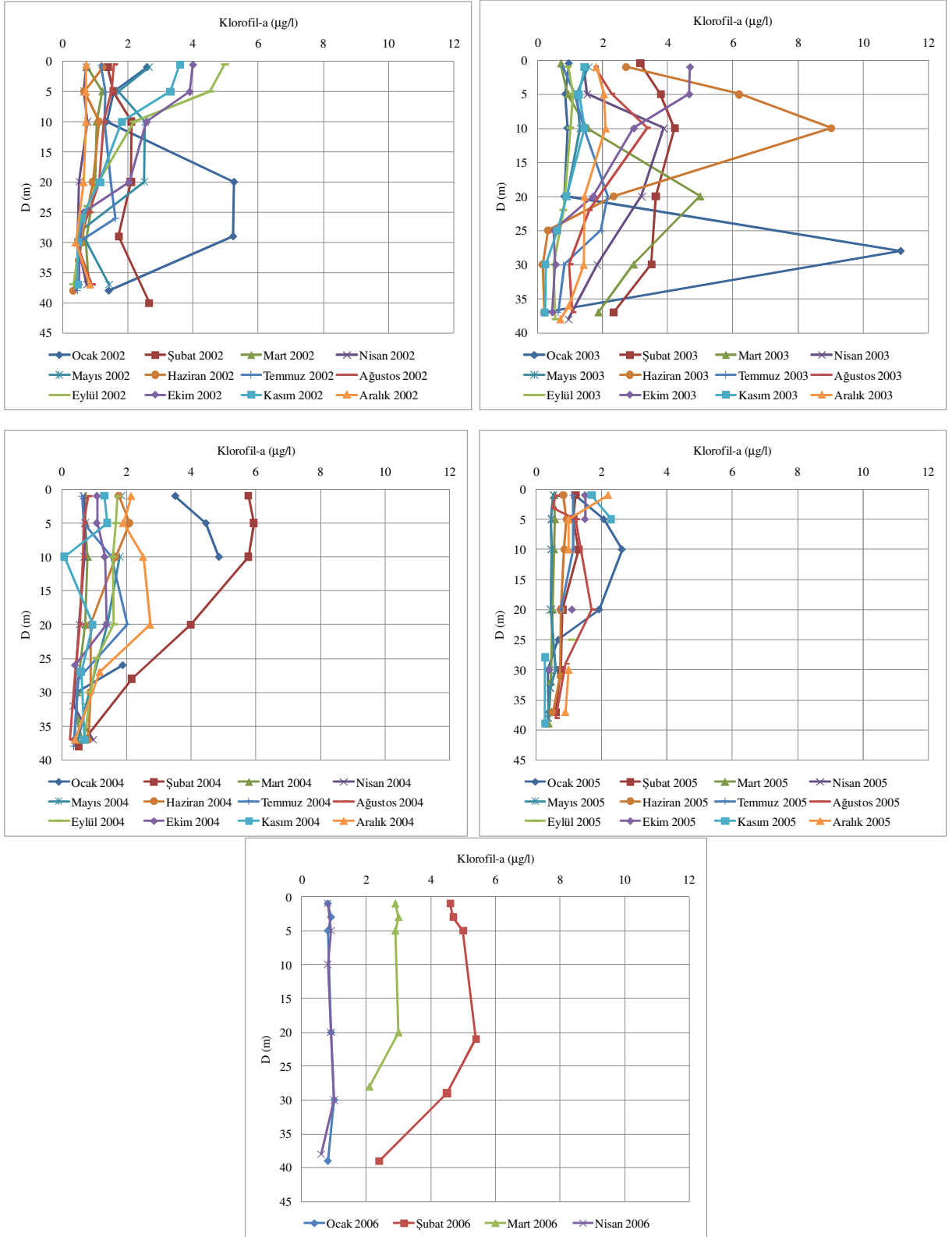
Şekil 4.43 B7 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.



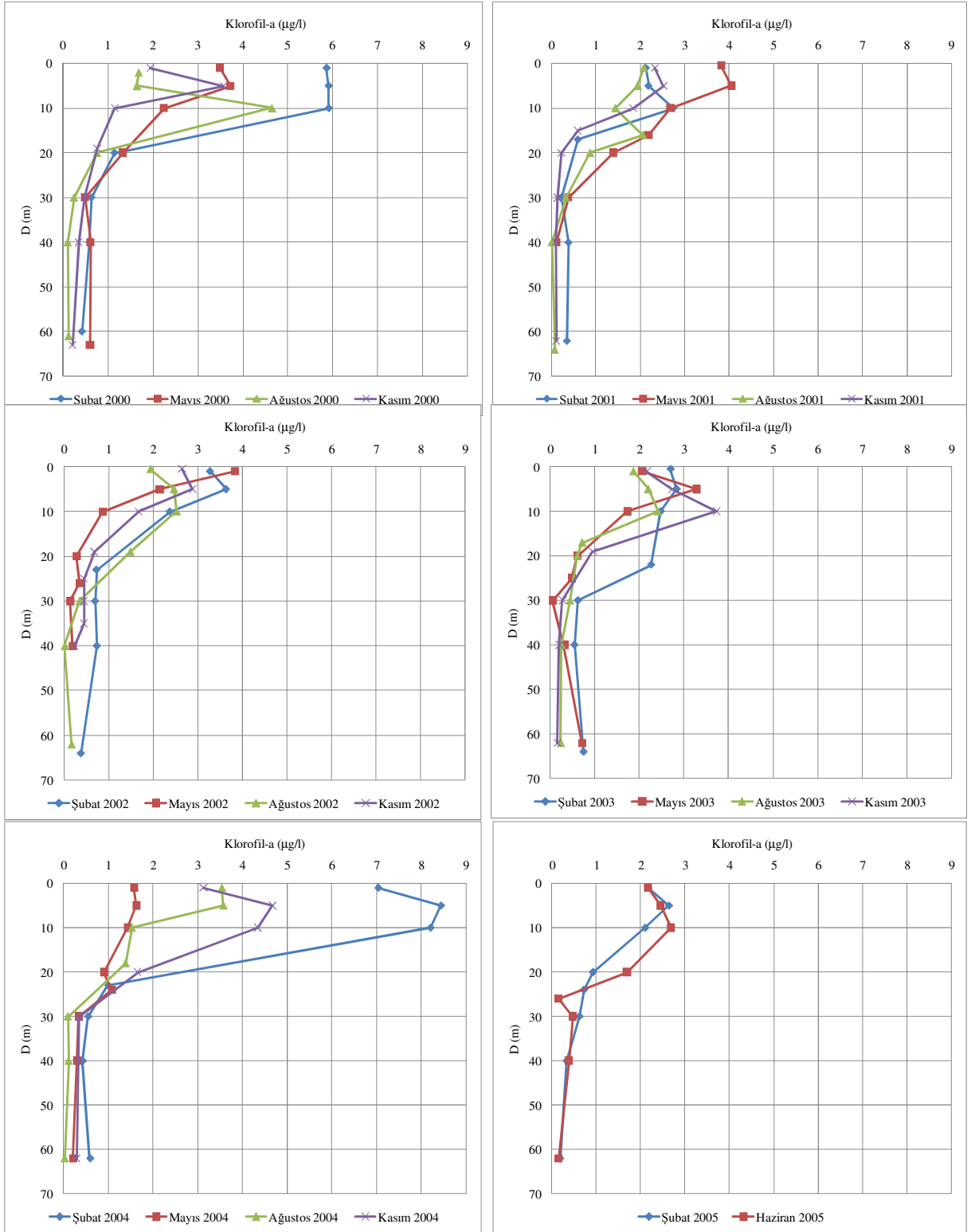
Şekil 4.43 Devamı.



Şekil 4.44 B2 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.



Şekil 4.44 Devamı.



Şekil 4.45 M8 istasyonunda 2000-2005 yılları arasında Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimi.

Bu çalışmada değerlendirilen tüm su kalitesi verilerinin istatistiksel özellikleri, durum değişkeni bazında değerlendirilmiştir. Dikkate alınan istasyonlarda tuzluluk parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Tuzluluk durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (psu)	En Büyük (psu)	Ort (psu)	Standart Sapma (psu)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (psu)	En Büyük (psu)	Ort (psu)	Standart Sapma (psu)
K1	1	14.00	17.99	17.19	0.86	K0	1	14.70	18.19	17.35	0.68
	5	16.18	18.05	17.38	0.50		5	15.00	18.23	17.39	0.59
	10	16.54	18.30	17.60	0.42		10	15.47	18.17	17.48	0.52
	15	16.81	18.11	17.62	0.37		15	16.11	18.20	17.53	0.44
	20	16.82	18.11	17.69	0.34		20	16.14	18.27	17.63	0.43
	25	17.14	18.13	17.81	0.29		25	16.17	18.27	17.68	0.41
	30	17.39	22.95	18.10	1.08		30	16.19	19.96	17.81	0.46
	35	17.60	23.73	18.22	1.27		35	16.71	20.51	18.11	0.80
	40	17.67	23.58	18.25	1.17		40	16.84	23.12	19.08	1.87
	45	17.80	23.90	18.33	1.28		45	16.97	27.70	21.24	3.54
	50	17.97	25.02	18.48	1.54		50	17.27	36.54	28.36	6.26
	55	17.90	27.14	18.59	1.97		55	17.28	37.18	33.39	5.06
	60	18.00	29.70	18.82	2.51		60	17.30	37.20	34.67	3.86
	65	18.12	33.77	21.09	3.99		65	17.35	37.21	35.33	2.75
B13	70	18.12	35.12	31.27	4.95	BL1	70	17.35	37.21	35.40	2.70
	1	15.27	18.27	17.45	0.56		1	10.79	23.53	17.65	1.37
	5	15.34	20.00	17.56	0.67		5	10.79	23.95	17.73	1.44
	10	16.30	21.20	17.63	0.68		10	10.79	24.21	17.77	1.41
	15	16.47	19.49	17.63	0.49		15	10.87	24.45	18.04	1.67
	20	16.51	23.73	18.04	1.16		20	11.00	25.11	18.54	2.32
	25	16.60	24.97	18.46	1.63		25	11.02	26.38	19.51	3.21
	30	16.82	26.26	19.37	2.47		30	11.04	30.75	21.04	4.27
	35	16.89	28.20	20.75	3.46		35	16.88	36.09	24.40	5.75
	40	17.08	35.22	23.83	5.27		40	17.08	37.44	29.22	6.75
	45	17.08	36.78	28.30	6.30		45	17.08	37.70	32.96	5.68
	50	17.08	37.55	32.72	5.49		50	17.08	37.73	34.67	4.85
	55	17.08	37.51	35.03	4.07		55	17.08	37.75	35.81	3.17
	60	17.10	37.51	35.82	3.36		60	17.08	37.76	36.24	2.79
B7	61	17.13	37.49	35.62	3.31	B2	65	17.08	37.79	36.49	2.66
	62	32.59	37.26	35.53	2.10		66	17.08	37.40	35.80	4.34
	1	15.61	23.44	17.81	1.13		1	15.89	23.39	18.19	1.00
	5	15.67	23.64	17.90	1.18		5	16.48	23.68	18.47	1.18
	10	16.33	23.98	18.07	1.35		10	17.38	25.23	19.39	1.81
	15	16.50	23.62	18.18	1.37		15	17.48	25.68	20.70	2.02
	20	16.58	26.82	19.09	2.57		20	18.25	31.37	23.08	2.30
	25	16.76	27.45	20.10	3.32		25	18.87	35.60	26.96	3.85
	30	16.95	31.82	22.25	4.62		30	19.89	38.11	32.98	5.44
	35	17.08	36.28	26.10	5.78		35	24.20	38.12	36.08	2.86
	40	17.08	37.40	30.78	6.14		37	29.69	38.18	37.35	1.39
	45	17.08	37.56	33.97	4.96		40	36.60	38.22	37.75	0.35
	50	17.09	37.83	35.37	3.90		42	37.07	38.19	37.76	0.39
	55	17.37	37.84	36.15	3.11		43	37.80	38.20	38.00	0.28
	60	26.69	37.84	36.67	1.57	M8	1	19.31	25.40	21.69	1.37

Çizelge 4.9 Devamı.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (psu)	En Büyük (psu)	Ort (psu)	Standart Sapma (psu)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (psu)	En Büyük (psu)	Ort (psu)	Standart Sapma (psu)
B7	65	30.38	38.09	36.96	1.23	M8	5	19.73	26.91	22.15	1.41
	69	36.62	37.53	37.18	0.32		10	20.20	28.21	23.25	1.72
MK	1	19.39	37.44	23.02	2.73		15	21.80	32.59	25.90	2.35
	5	19.77	37.44	23.94	3.15		20	24.00	37.90	30.28	3.40
	6	20.57	28.87	24.12	1.89		25	27.80	38.40	34.10	3.24
	8	20.57	28.87	24.40	1.77		30	28.80	38.49	36.46	2.36
M3	1	16.94	25.22	20.45	1.68		35	29.90	38.56	37.47	1.62
	5	17.34	26.18	22.25	1.92		40	35.41	38.60	38.16	0.56
	10	17.61	30.02	24.41	2.17		45	35.80	38.61	38.32	0.42
	15	18.88	35.14	26.76	2.40		50	36.60	38.63	38.42	0.31
	20	20.60	37.17	30.11	3.14		55	38.10	38.70	38.52	0.11
	25	23.53	38.08	33.74	3.43		60	38.34	38.90	38.56	0.09
	28	25.01	38.18	35.44	3.02		62	38.20	38.70	38.56	0.07
							64	38.57	38.61	38.59	0.02

Dikkate alınan istasyonlarda sıcaklık parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Sıcaklık durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (°C)	En Büyük (°C)	Ort (°C)	Standart Sapma (°C)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (°C)	En Büyük (°C)	Ort (°C)	Standart Sapma (°C)
K1	1	4.98	26.12	15.19	6.94	K0	1	3.11	27.05	14.39	7.13
	5	5.22	26.11	14.87	6.77		5	2.34	26.62	14.09	6.99
	10	5.00	26.11	14.42	6.72		10	2.36	26.27	13.77	6.72
	15	5.35	26.09	14.04	6.57		15	2.41	26.26	13.08	6.34
	20	4.90	26.07	12.74	6.04		20	2.42	25.96	12.43	6.10
	25	5.10	25.41	11.75	5.93		25	2.41	25.92	11.51	5.68
	30	5.20	23.33	10.51	4.27		30	2.41	25.74	11.00	5.32
	35	5.25	16.58	9.56	3.24		35	2.43	25.69	10.06	4.42
	40	5.30	14.39	9.20	2.80		40	2.47	22.33	10.18	4.01
	45	5.50	13.17	8.73	2.41		45	2.58	18.60	9.99	3.56
	50	6.38	12.52	8.44	1.83		50	2.66	17.13	11.74	3.24
	55	6.00	12.46	8.07	1.51		55	2.68	16.57	13.25	2.61
	60	6.10	12.18	8.00	1.38		60	2.74	16.51	13.73	2.31
	65	6.30	13.68	8.78	1.72		65	2.89	16.48	14.01	1.95
	70	6.29	15.62	12.71	2.62		70	2.93	16.48	14.16	1.90

Çizelge 4.10 Devamı.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (°C)	En Büyük (°C)	Ort (°C)	Standart Sapma (°C)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (°C)	En Büyük (°C)	Ort (°C)	Standart Sapma (°C)
B13	1	2.64	26.43	14.07	6.83	BL1	1	3.68	26.22	13.96	6.46
	5	2.64	26.41	13.95	6.80		5	3.68	26.17	13.93	6.40
	10	2.56	26.39	13.80	6.64		10	3.68	26.12	13.70	6.27
	15	2.55	26.32	12.88	6.25		15	3.69	26.11	13.35	6.02
	20	2.54	26.07	12.30	5.76		20	3.69	26.08	12.91	5.68
	25	2.54	25.95	11.54	5.22		25	3.68	26.02	12.59	5.31
	30	2.54	25.06	11.36	4.88		30	3.68	25.92	12.21	4.84
	35	2.54	23.03	10.72	4.10		35	6.34	24.76	12.15	3.88
	40	2.54	22.60	11.17	3.69		40	6.34	35.65	12.77	3.81
	45	2.54	16.73	11.74	3.02		45	6.41	37.47	13.87	3.48
	50	2.54	16.41	13.10	2.46		50	6.58	37.53	14.40	3.26
	55	2.55	16.30	13.88	2.22		55	9.95	37.61	14.77	2.97
	60	2.55	16.30	14.23	2.07		60	12.40	37.63	14.95	2.92
	61	2.62	16.30	14.12	2.10		65	12.60	16.15	14.65	0.76
	62	11.81	15.11	13.86	1.54		66	12.60	15.97	14.69	0.73
B7	1	2.56	26.52	13.81	6.65	B2	1	2.66	25.89	13.60	6.28
	5	2.56	26.29	13.67	6.54		5	2.71	25.67	13.50	6.14
	10	2.56	26.17	13.40	6.31		10	2.72	25.34	13.43	5.74
	15	2.55	26.06	12.90	5.99		15	2.77	24.44	12.56	5.28
	20	2.54	25.93	12.66	5.73		20	3.24	22.02	12.40	4.30
	25	2.54	25.58	12.16	5.49		25	3.63	18.20	12.15	3.22
	30	2.54	25.43	11.83	4.56		30	4.25	16.38	13.24	2.44
	35	2.55	18.98	11.91	3.32		35	8.37	16.36	14.20	1.57
	40	2.55	16.53	12.69	2.66		37	10.05	16.29	14.86	0.92
	45	2.54	16.28	13.45	2.36		40	14.51	16.27	15.05	0.34
	50	2.55	16.09	13.95	2.08		42	14.70	15.83	15.10	0.30
	55	2.71	16.09	14.25	1.81		43	14.99	15.09	15.04	0.07
	60	8.01	16.09	14.50	1.14	M8	1	4.99	26.09	14.64	6.21
	65	10.71	16.09	14.65	0.90		5	5.02	25.67	14.69	6.13
	69	14.67	15.05	14.89	0.16		10	5.21	25.83	14.20	5.56
MK	1	5.55	24.60	15.04	5.85		15	6.52	20.24	12.40	3.79
	5	7.22	24.40	15.21	5.54		20	7.19	16.93	11.72	2.68
	6	6.98	24.40	14.43	5.55		25	7.60	16.76	12.82	2.33
	8	7.34	24.04	15.07	5.42		30	8.75	16.46	14.13	1.72
M3	1	4.46	24.40	13.51	5.60		35	10.80	16.47	14.86	0.95
	5	6.08	22.15	13.43	4.99		40	13.24	16.27	15.18	0.43
	10	6.89	22.61	13.01	4.31		45	14.57	16.01	15.24	0.26
	15	6.78	21.04	12.19	3.57		50	14.80	15.66	15.21	0.21
	20	7.29	17.27	11.86	2.59		55	14.77	15.57	15.16	0.20
	25	7.31	16.51	12.83	2.38		60	14.76	15.46	15.09	0.18
	28	7.33	16.53	13.79	2.05		62	14.76	15.42	15.08	0.17
							64	14.92	15.34	15.09	0.16

Dikkate alınan istasyonlarda çözünmüş oksijen parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Çözünmüş Oksijen durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (mg/l)	En Büyük (mg/l)	Ort (mg/l)	Standart Sapma (mg/l)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (mg/l)	En Büyük (mg/l)	Ort (mg/l)	Standart Sapma (mg/l)
K0	1	5.82	13.1	9.89	1.54	B13	1	3.67	12.8	9.586	1.78858
	5	5.36	13.1	9.66	1.688		5	5.26	12.88	9.61967	1.67203
	10	4.9	13.1	9.63	1.77		10	5.04	12.66	9.60601	1.59856
	20	2.7	13	9.59	1.87		20	2.64	12.79	9.4696	1.79429
	30	2.44	12.9	9.67	1.751		30	6.1	12.82	9.16367	1.60924
	40	2.8	12.8	9.01	1.848		40	1.3	12.52	7.28007	2.4965
	55	1.89	12.3	5.25	2.061		60	1.2	12.8	4.52153	2.19479
	70	1	8.15	3.21	1.521		61	1.09	7.27	2.93717	1.45337
B7	1	4.51	12.8	9.51	1.732	B2	1	6.1	12.77	9.44378	1.53775
	5	5.72	12.8	9.52	1.62		5	3.76	12.7	9.28133	1.68002
	10	5.59	12.5	9.55	1.553		10	5.3	12.71	9.1062	1.6701
	20	5.55	12.7	9.25	1.685		20	2.37	12.97	8.12027	1.93151
	30	2.41	12.8	7.92	2.432		25	1.01	11.26	5.11	2.36589
	40	1.52	12.7	5.64	2.67		30	0.77	7.98	3.15553	1.63275
	50	0.93	9.16	3.44	1.717		40	0.95	4.9	2.39588	1.0413
	60	0.74	6.69	2.88	1.3						
M3	1	5.83	12.1	8.82	1.698	M8	1	6.16	12.1	9.68541	1.58276
	5	4.13	11.9	8.49	1.965		5	1.99	12	9.21581	2.26151
	10	3.28	10.9	8.04	1.98		10	2.99	12.1	8.93919	2.06222
	20	2.51	10.3	6.3	2.42		15	1.75	9.9	5.86189	2.38963
	25	0.8	9.48	4.35	2.603		20	0.55	6.8	3.73194	1.75808
							30	1.13	7.9	2.95181	1.31907
MK	1	3.09	12.2	9.13	1.606		40	1.12	4.43	2.35429	0.79228
	6	4.7	12	9.05	1.69		60	1.1	3.68	2.12026	0.71788

Dikkate alınan istasyonlarda klorofil-a parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 Klorofil-a durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µg/l)	En Büyük (µg/l)	Ort (µg/l)	Standart Sapma (µg/l)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µg/l)	En Büyük (µg/l)	Ort (µg/l)	Standart Sapma (µg/l)
K0	1	0.17	9.94	1.66	1.71	B13	1	0.40	8.19	1.79	1.51
	5	0.18	12.19	1.80	1.91		5	0.37	6.47	1.79	1.37
	10	0.28	8.12	1.75	1.47		10	0.40	6.48	1.74	1.30
	20	0.11	6.38	1.57	1.25		20	0.01	5.15	1.55	1.13
	30	0.15	6.28	1.31	1.19		30	0.27	5.85	1.53	1.25
	40	0.17	5.55	1.28	1.10		40	0.16	4.42	1.16	0.87

Çizelge 4.12 Devamı.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µg/l)	En Büyük (µg/l)	Ort (µg/l)	Standart Sapma (µg/l)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µg/l)	En Büyük (µg/l)	Ort (µg/l)	Standart Sapma (µg/l)
K0	55	0.24	4.75	0.80	0.61	B13	50	0.25	5.44	1.10	1.28
	70	0.02	5.06	0.87	0.82		60	0.18	5.20	0.90	0.84
B7	1	0.00	6.18	1.73	1.28	B2	63	0.52	1.44	0.85	0.33
	5	0.50	10.18	1.98	1.71		1	0.53	6.31	1.90	1.34
	10	0.50	6.38	1.76	1.18		5	0.45	6.20	1.96	1.47
	20	0.40	6.39	1.71	1.14		10	0.09	9.03	1.99	1.51
	30	0.38	5.88	1.43	1.05		20	0.45	5.40	1.69	1.11
	40	0.21	5.69	1.04	0.89		30	0.16	11.16	1.19	1.57
	65	0.12	3.11	0.75	0.55		40	0.13	2.66	0.70	0.54
M3	2	0.73	12.24	2.08	2.34	M8	1	1.58	7.04	2.88	1.36
	5	0.63	10.56	2.23	2.00		5	1.63	8.44	3.23	1.55
	10	0.73	8.74	2.15	1.63		10	0.87	8.21	2.76	1.72
	20	0.33	3.56	1.39	0.85		20	0.23	2.26	1.01	0.49
	25	0.01	1.12	0.70	0.30		30	0.05	0.69	0.38	0.18
MK	1	0.01	23.84	4.52	4.32		40	0.01	0.74	0.30	0.20
	6	1.19	17.82	4.68	4.01		60	0.03	0.74	0.30	0.21

Dikkate alınan istasyonlarda nitrat (NO₃) parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 Nitrat (NO₃) durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
K0	1	0.00	13.05	1.13	2.00	B13	1	0.00	11.53	1.20	1.96
	5	0.01	11.24	1.23	2.15		5	0.01	13.39	1.30	2.21
	10	0.01	8.86	1.17	1.78		10	0.01	9.15	1.22	1.93
	20	0.01	8.96	1.11	1.81		20	0.01	15.79	1.30	2.32
	30	0.00	12.96	1.24	1.94		30	0.01	25.13	1.66	3.38
	40	0.02	28.58	1.99	4.16		40	0.03	64.01	3.69	8.80
	55	0.10	61.07	4.90	10.05		50	0.06	35.34	4.77	7.93
	70	0.05	114.1	9.20	19.56		60	0.09	101.4	7.64	16.12
B7	1	0.00	12.27	1.13	1.90	B2	63	0.94	12.05	4.10	3.49
	5	0.00	9.53	1.24	1.89		1	0.01	7.19	1.29	1.73
	10	0.00	11.87	1.36	2.26		5	0.01	21.92	1.55	3.00
	20	0.01	10.15	1.31	2.02		10	0.01	21.48	1.66	3.11

Çizelge 4.13 Devamı.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
B7	30	0.01	40.98	2.55	5.21	B2	20	0.05	15.00	1.90	2.90
	40	0.07	50.73	4.78	8.16		30	0.07	46.74	5.46	8.79
	65	0.20	119.57	7.59	15.71		40	0.02	113.5	8.43	17.24
M3	2	0.01	7.00	1.27	1.60	M8	1	0.06	9.48	1.59	2.57
	5	0.01	7.34	1.48	2.00		5	0.00	13.55	2.00	3.44
	10	0.03	7.57	1.32	1.86		10	0.02	10.93	1.64	2.64
	20	0.01	14.35	2.63	3.45		20	0.00	9.71	2.97	2.99
	25	0.03	33.69	5.33	7.58		30	0.05	98.31	10.4	21.10
MK	1	0.00	10.14	2.10	2.51		40	0.15	97.67	11.5	23.73
	6	0.01	6.45	1.05	1.39		60	0.09	78.79	10.9	19.56

Dikkate alınan istasyonlarda nitrit (NO₂) parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.14’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.14 Nitrit (NO₂) durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
K0	1	0.01	19.99	0.85	2.78	B13	1	0.00	9.68	0.65	1.67
	5	0.00	11.10	0.63	1.78		5	0.00	14.94	0.83	2.23
	10	0.00	14.63	0.76	2.21		10	0.01	13.05	0.79	1.99
	20	0.01	6.69	0.53	1.25		20	0.00	8.05	0.70	1.52
	30	0.01	6.94	0.63	1.32		30	0.01	4.87	0.63	1.16
	40	0.00	16.50	0.85	2.31		40	0.01	54.78	2.01	7.19
	55	0.08	51.60	2.08	7.65		50	0.10	61.59	6.05	15.47
	70	0.14	33.57	2.21	6.42		60	0.11	107.0	3.93	14.90
B7	1	0.01	6.21	0.51	1.12	B2	63	0.20	1.95	0.47	0.56
	5	0.01	8.10	0.55	1.34		1	0.02	8.30	0.62	1.50
	10	0.01	11.87	0.62	1.78		5	0.01	8.82	0.57	1.39
	20	0.02	6.70	0.53	1.11		10	0.02	14.11	0.77	2.37
	30	0.01	21.59	1.06	3.05		20	0.01	31.77	1.31	4.78
	40	0.04	29.33	1.93	5.34		30	0.09	39.07	2.74	7.47
	65	0.10	117.79	3.71	15.65		40	0.07	114.3	4.41	16.32
M3	2	0.01	16.30	1.19	3.53	M8	1	0.01	9.45	0.91	2.42
	5	0.05	16.22	0.93	3.42		5	0.02	8.56	0.86	2.30
	10	0.04	17.04	0.99	3.60		10	0.02	20.52	1.48	4.66
	20	0.04	26.08	1.62	5.52		20	0.02	22.43	1.73	5.04
	25	0.03	32.47	2.38	7.09		30	0.02	74.09	4.57	16.24
MK	1	0.02	4.40	0.54	0.77		40	0.03	22.09	1.64	5.03
	6	0.02	0.57	0.17	0.14		60	0.03	39.43	2.95	9.26

Dikkate alınan istasyonlarda fosfat (PO₄) parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve

standart sapma değerleri izelge 4.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.15 Fosfat (PO₄) durum değişkenine ait istatistiksel zellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Bk (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Bk (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
K0	1	0.00	9.00	0.84	1.87	B13	1	0.01	8.00	0.74	1.45
	5	0.00	11.00	0.82	1.86		5	0.00	8.00	0.76	1.55
	10	0.00	8.00	0.72	1.53		10	0.00	7.00	0.76	1.50
	20	0.00	6.00	0.69	1.34		20	0.00	32.43	1.34	4.17
	30	0.02	8.00	0.74	1.57		30	0.01	10.00	1.00	2.03
	40	0.00	12.00	1.01	2.37		40	0.01	16.00	1.80	3.87
	55	0.00	32.00	3.00	6.79		50	0.13	36.00	4.67	10.41
	70	0.10	41.00	4.33	8.88		60	0.05	36.00	3.85	7.81
B7	1	0.00	9.00	0.86	1.67	B2	1	0.00	12.00	1.02	2.28
	5	0.00	8.00	0.72	1.42		5	0.00	10.00	0.96	2.02
	10	0.00	7.00	0.76	1.43		10	0.02	10.00	0.95	2.04
	20	0.00	10.00	0.90	1.88		20	0.00	12.00	1.32	2.75
	30	0.01	14.00	1.40	2.91		30	0.03	30.00	3.35	6.30
	40	0.04	28.00	2.28	5.06		40	0.13	38.00	4.08	7.97
	65	0.11	26.00	3.26	6.52	M8	1	0.07	7.00	0.96	1.85
M3	2	0.04	6.00	0.88	1.51		5	0.01	6.00	1.16	1.85
	5	0.06	10.00	1.18	2.34		10	0.02	5.00	0.89	1.38
	10	0.03	10.00	1.26	2.47		20	0.05	15.00	2.00	4.13
	20	0.04	18.00	2.39	4.75		30	0.26	13.00	2.31	3.89
	25	0.16	14.00	2.72	4.57		40	0.25	13.00	2.52	3.83
MK	1	0.05	11.80	1.84	3.05		60	0.14	15.00	2.65	4.10
	6	0.01	2.18	0.53	0.55						

Dikkate alınan istasyonlarda toplam fosfat parametresinin en küçük, en bk, ortalama ve standart sapma değerleri izelge 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 Toplam Fosfat durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
K0	1	0.04	22.00	1.98	4.05	B13	1	0.09	29.00	2.24	4.83
	5	0.04	28.00	2.15	4.82		5	0.08	22.00	2.17	4.47
	10	0.01	19.00	2.06	4.17		10	0.05	20.00	2.32	4.61
	20	0.03	31.00	2.35	5.25		20	0.03	24.00	2.41	4.79
	30	0.03	28.00	2.48	5.45		30	0.09	31.00	2.92	6.21
	40	0.06	25.00	2.52	5.54		40	0.12	31.00	3.34	6.62
	50	0.16	34.00	4.44	8.56		60	0.18	86.00	7.69	16.48
	70	0.20	52.00	6.46	12.44		1	0.07	37.00	2.66	5.98
B7	1	0.10	18.00	2.45	4.67	B2	5	0.05	42.00	3.27	7.93
	5	0.06	26.00	2.34	4.98		10	0.07	41.00	3.14	7.11
	10	0.07	31.00	2.32	4.98		20	0.10	27.00	3.32	6.49
	20	0.05	29.00	2.43	5.19		30	0.17	51.00	5.00	9.86
	30	0.04	24.00	2.73	5.34		40	0.58	51.00	8.19	13.15
	40	0.12	53.00	4.76	10.04		1	0.20	46.00	4.95	10.93
	60	0.17	54.00	6.15	11.57		5	0.23	16.00	2.94	4.99
							10	0.28	19.00	3.12	5.51
M3	2	0.20	21.00	2.76	5.39	M8	20	0.28	19.00	3.74	6.13
	5	0.20	47.00	4.42	10.51		30	0.64	41.00	5.50	10.67
	10	0.28	23.00	3.46	6.54		40	0.35	51.00	6.56	13.00
	20	0.22	22.00	3.94	7.02		60	0.46	53.00	7.37	15.25
	25	0.24	29.00	4.58	8.67						
MK	1	0.03	13.38	1.87	3.17						
	6	0.03	3.55	0.70	0.87						

Dikkate alınan istasyonlarda organik azot parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17 Organik Azot durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
K0	1	0.51	357.0	41.77	77.87	B13	1	0.50	363.0	41.93	78.42
	5	0.90	348.0	41.60	77.85		5	0.60	393.0	41.92	80.73
	10	0.66	367.0	41.41	78.35		10	0.70	380.0	48.29	91.60
	20	0.98	328.0	35.74	66.13		20	0.50	414.0	42.17	79.89
	30	0.05	341.0	46.75	89.21		30	0.44	332.0	51.85	94.71
	40	0.16	393.0	41.69	82.93		40	0.05	397.0	51.46	99.37
	50	0.11	363.0	45.37	84.90		60	0.05	319.0	50.65	92.26
	70	0.07	453.0	49.56	93.55		1	0.70	610.0	48.90	101.77
B7	1	0.50	350.0	46.34	82.47	B2	5	0.43	465.0	46.54	95.00
	5	1.10	422.0	45.55	87.46		10	1.00	461.0	45.58	90.53
	10	0.40	370.0	45.73	85.06		20	0.10	421.0	48.10	92.85
	20	0.81	434.0	42.68	83.73		30	0.05	343.0	46.16	88.09
	30	0.41	326.0	44.81	85.59		40	0.79	330.0	52.12	88.62
	40	0.03	365.0	40.42	78.23		1	0.44	307.0	52.97	90.67
	60	0.15	302.0	42.10	82.17		5	0.02	338.0	49.85	91.04
							10	1.44	317.0	52.37	96.77
M3	2	1.48	221.0	44.31	71.24	M8	20	0.06	271.0	53.09	96.46
	5	0.54	224.0	47.87	81.43		30	0.07	284.0	45.28	86.76
	10	1.47	234.0	45.44	74.69		40	0.06	255.0	39.54	68.37
	20	0.16	199.0	36.73	64.59		60	0.23	255.0	42.84	76.23
	25	1.45	235.0	34.66	61.79						
MK	1	0.02	187.3	11.97	32.23						
	6	0.02	136.1	8.64	22.94						

Dikkate alınan istasyonlarda toplam azot parametresinin en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.18 Toplam Azot durum değişkenine ait istatistiksel özellikler.

İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)	İstasyon	Derinlik (m)	En Küçük (µM)	En Büyük (µM)	Ort (µM)	Standart Sapma (µM)
K0	1	1.20	369.0	43.74	80.10	B13	1	1.10	376.0	43.72	79.97
	5	1.30	359.0	43.48	79.51		5	1.30	398.0	43.98	83.14
	10	0.90	383.0	43.36	80.31		10	1.30	397.0	50.27	93.55
	20	1.20	335.0	37.39	67.61		20	1.10	437.0	44.17	82.36
	30	1.10	348.0	48.63	90.68		30	0.90	362.0	53.90	97.51
	40	1.00	399.0	44.53	86.56		40	1.40	412.0	57.09	106.77
	50	1.69	399.0	53.88	96.51		60	1.50	374.0	61.50	109.49
	70	2.00	472.0	60.07	107.41		1	1.00	623.0	50.80	103.48
B7	1	1.00	359.0	48.10	84.06	B2	5	0.51	493.0	48.64	97.34
	5	1.87	438.0	47.33	89.06		10	1.20	487.0	47.99	93.50
	10	0.90	390.0	47.67	87.06		20	0.90	438.0	51.31	96.73
	20	1.50	445.0	44.45	85.39		30	1.00	374.0	53.28	97.25
	30	0.87	329.0	48.34	89.20		40	1.80	424.0	66.92	109.66
	40	1.50	387.0	47.01	86.64		1	1.69	317.0	55.56	92.84
	60	1.90	424.0	54.76	100.63		5	1.77	346.0	52.81	93.04
							10	1.61	339.0	55.62	101.10
M3	2	1.98	223.0	46.84	73.51	M8	20	1.29	296.0	57.86	101.49
	5	1.66	226.0	50.05	83.12		30	1.82	360.0	60.66	108.86
	10	1.74	253.0	47.82	77.31		40	2.35	278.0	53.04	80.77
	20	1.40	236.0	42.65	73.37		60	2.91	278.0	57.01	91.74
	25	2.93	269.0	41.53	69.66						
MK	1	0.10	198.1	19.55	35.25						
	6	0.10	137.1	12.61	23.50						

İSKİ tarafından toplanan su kalitesi verileri dikkate alınarak İstanbul Boğazı'nda su kalitesinin değerlendirilebilmesi için TRIX Su Kalitesi İndeksi (Vollenweider vd., 1998) kullanılmıştır. Su kalitesi indeksi karmaşık su kalitesi verilerinin değerlendirilebilmesi için oldukça kullanışlı bir araçtır. İstanbul Boğazı'nın besi maddesi zenginliği açısından durumunu tanımlayabilmek için bu çalışmada TRIX indeksi hesaplanmıştır. Bu indeks birincil üretimle doğrudan ilişkili iki durum değişkeninin (klorofil-a ve oksijen) ve ortamın besin zenginliğini gösteren iki durum değişkeninin (çözünmüş inorganik azot ve inorganik fosfor) kombinasyonu şeklinde tanımlanabilir. Bir başka deyişle TRIX İndeksi besin tuzları girdisine ve ortamdaki biyokütle üretimine bağlı olarak kıyasal sistemde neler olduğunu ve olabileceğini göstermektedir. Formüldeki dört değişkene göre hesaplanan TRIX indeksi değerleri, 0-10 arasında değişen katsayılarla ifade edilmektedir. Bu indeks aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$TRIX = \frac{[\log(Kl_a \times |ÇO\%| \times TİA \times F + k)]}{m}$$

Bu ifadede, F toplam inorganik fosforu (P-PO₄ µmol/l), TİA çözünmüş inorganik azotu (µmol/l), Kl_a klorofil-a konsantrasyonunu (µg/l), ve ÇO% ise suyun içerdiği oksijen miktarının oksijen doygunluk konsantrasyonundan sapma miktarının mutlak değeridir ve $|100-ÇO\%|$ şeklinde hesaplanmıştır. k ve m ölçek katsayılarıdır ve burada k=1.5, m=1.2 alınmıştır. Bu katsayıların amacı indeksin alt limit değerini belirlemektir. TRIX indeksi değerlendirme ölçeği literatürdeki farklı çalışmalar (Herrera-Silveira ve Morales-Ojeda, 2009; Penna vd., 2004) ve Türkiye’deki yasal düzenlemeler (Denizlerde Balık Çiftliklerinin Kurulamayacağı Hassas Alan Niteliğindeki Kapalı Koy ve Körfez Alanlarının Belirlenmesine İlişkin Tebliğ, 2007) esas alınarak Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19 Literatürde TRIX İndeksine göre ötrofikasyon riski değerlendirme ölçeği.

TRIX Değeri (TI)	Troofik Derecesi	Çevresel Anlamı	Kalite/Ötrofikasyon risk derecesi		
			Orijinal TRIX değerlendirmesi, Penna vd., 2004	Herrera-Silveira ve Morales-Ojeda, 2009	Çevre ve Orman Bakanlığı 2007
2-4	Düşük	Düşük Üretim	Yüksek Kalitede	İyi kalitede	Ötrofikasyon riski yok
4-5	Orta	Orta seviyede üretim	İyi Kalitede		Ötrofikasyon riski yüksek
5-6	Yüksek	Orta ve yüksek arasında üretim	Kötü Durumda	Orta kalitede	
6-8	En yüksek	Yüksek üretim	Çok Kötü durumda	Çok Kötü durumda	Ötrofik

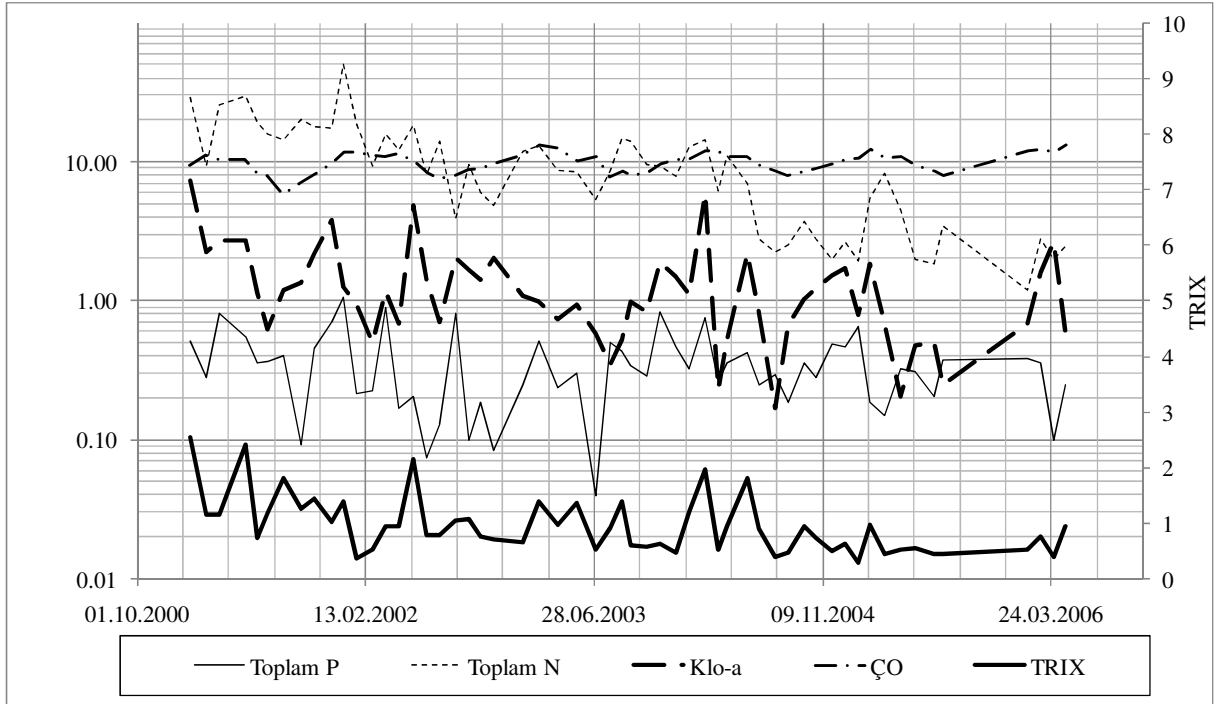
Sayısal model sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkate alınacak istasyonlar için Boğaz’ın tümünü temsil edebilecek istasyonlar seçilmiş ve buralardaki TRIX İndeks değerleri hesaplanmıştır. K0, B13, B7, B2, M3 ve M8 istasyonlarının besi maddesi zenginliği açısından TRIX indeksine göre değerlendirmeleri sırasıyla Çizelge 4.20-4.25’te verilmiştir. Yine aynı istasyonlar için TRIX indeksi değerlendirmesinde formülde yer alan değişkenlerin ve TRIX değerlerinin zamansal değişimleri Şekil 4.46-4.51’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.20 K0 İstasyonunda TRIX İndeksi Değerlendirilmesi.

Tarih	Toplam P (µM)	Toplam N (µM)	Klo-a (µg/l)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık (°C)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
19.01.2000	6.00	369.00	1.30	10.20	7.19	17.74	6.31	3.55
16.02.2000	5.00	164.00	4.08	11.20	7.19	17.84	2.94	3.33
09.03.2000	6.00	128.00	1.84	11.43	6.70	17.98	3.87	3.12
13.04.2000	8.00	145.00	1.81	10.99	9.15	17.85	6.00	3.42
10.05.2000	9.00	199.00	2.07	10.65	13.52	16.78	12.95	3.90
14.06.2000	9.00	141.00	1.28	9.51	20.17	17.09	16.31	3.69
12.07.2000	10.00	200.00	0.92	8.12	23.07	17.78	5.64	3.35
09.08.2000	7.00	224.00	0.41	7.73	24.38	17.81	3.20	2.76
13.09.2000	7.00	187.00	1.14	8.66	23.31	17.50	13.01	3.57
25.10.2000	22.00	338.00	9.94	9.45	15.54	16.41	4.54	4.60
13.12.2000	14.00	151.00	6.02	9.08	12.96	17.70	4.38	3.96
24.01.2001	0.52	29.36	7.41	9.44	8.75	17.85	9.83	2.54
28.02.2001	0.28	9.35	2.29	11.03	8.13	17.82	3.75	1.15
29.03.2001	0.82	25.70	2.76	10.22	9.59	17.85	0.39	1.16
24.05.2001	0.55	30.06	2.76	10.37	16.45	16.82	17.26	2.41
21.06.2001	0.36	19.38	1.16	8.24	20.04	17.54	0.78	0.74
11.07.2001	0.37	15.90	0.62	7.99	24.56	17.49	6.84	1.19
15.08.2001	0.41	14.50	1.21	5.82	26.13	16.82	20.15	1.80
25.09.2001	0.09	20.57	1.38	7.04	21.59	17.26	11.38	1.25
24.10.2001	0.45	18.22	2.21	8.07	19.34	17.26	2.84	1.44
29.11.2001	0.71	17.51	3.91	9.49	13.14	17.66	0.31	1.02
27.12.2001	1.06	50.96	1.28	11.49	5.57	16.71	0.65	1.39
23.01.2002	0.22	18.69	0.94	11.57	4.94	17.67	0.32	0.36
27.02.2002	0.23	9.45	0.50	11.20	7.01	17.93	2.54	0.52
27.03.2002	0.89	15.87	1.19	10.80	7.83	17.68	0.74	0.95
25.04.2002	0.17	12.22	0.69	11.27	9.60	16.12	8.72	0.96
29.05.2002	0.21	18.67	4.95	10.12	19.31	15.00	20.17	2.16
27.06.2002	0.07	8.08	1.43	8.35	23.62	16.09	8.73	0.79
24.07.2002	0.13	14.21	0.72	7.56	27.05	16.36	5.40	0.78
28.08.2002	0.82	3.90	2.04	7.85	23.32	17.66	2.55	1.05
26.09.2002	0.10	9.63	1.70	8.69	22.22	16.90	10.60	1.07
23.10.2002	0.19	6.02	1.42	9.00	17.31	17.44	4.01	0.75
20.11.2002	0.08	4.90	2.05	9.61	15.27	17.58	6.42	0.70
22.01.2003	0.25	12.02	1.10	11.01	7.37	17.44	1.40	0.65
28.02.2003	0.52	13.29	1.00	12.96	3.11	17.05	6.70	1.40
08.04.2003	0.24	8.82	0.75	12.40	5.49	17.11	8.68	0.98

Çizelge 4.20 Devamı.

Tarih	Toplam P (µM)	Toplam N (µM)	Klo-a (µg/l)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık (°C)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
21.05.2003	0.30	8.45	0.96	10.09	17.55	16.56	16.59	1.35
02.07.2003	0.04	5.39	0.59	10.74	16.13	17.95	21.43	0.52
01.08.2003	0.50	8.82	0.35	7.77	25.88	18.00	6.90	0.91
28.08.2003	0.43	14.82	0.54	8.52	24.18	18.01	13.43	1.40
17.09.2003	0.34	14.21	0.99	7.86	22.33	17.84	0.81	0.61
22.10.2003	0.29	9.58	0.83	8.36	18.10	17.92	1.51	0.58
19.11.2003	0.84	9.45	1.93	9.52	12.71	17.76	0.28	0.63
25.12.2003	0.47	7.96	1.51	10.25	9.45	17.94	0.39	0.47
21.01.2004	0.33	12.76	1.13	10.27	7.29	17.36	5.66	1.21
26.02.2004	0.76	14.36	5.93	11.84	5.26	17.58	3.47	1.96
24.03.2004	0.26	6.25	0.23	11.86	6.73	17.55	7.56	0.53
13.04.2004	0.36	11.01	0.53	10.78	9.82	18.00	5.74	0.94
27.05.2004	0.43	6.93	2.20	10.94	15.60	17.11	21.68	1.80
23.06.2004	0.25	2.80	0.82	9.34	21.89	17.05	18.21	0.90
28.07.2004	0.29	2.22	0.17	8.55	23.79	18.19	13.07	0.39
25.08.2004	0.19	2.54	0.68	8.01	24.29	17.47	6.53	0.47
30.09.2004	0.36	3.74	1.05	8.58	21.84	17.48	8.75	0.95
27.10.2004	0.28	2.78	1.25	9.00	18.32	17.54	6.29	0.74
30.11.2004	0.49	2.02	1.54	9.66	12.83	18.00	1.60	0.50
28.12.2004	0.47	2.67	1.75	10.27	10.36	17.93	2.00	0.64
26.01.2005	0.66	1.97	0.80	10.59	8.54	17.97	0.71	0.29
22.02.2005	0.19	5.53	1.88	12.06	5.96	16.62	6.65	0.97
24.03.2005	0.15	8.40	0.69	10.48	7.70	17.98	2.37	0.46
28.04.2005	0.32	4.56	0.21	10.74	11.44	17.78	9.29	0.53
31.05.2005	0.31	2.01	0.48	9.36	18.37	17.76	10.79	0.56
11.07.2005	0.21	1.86	0.50	8.44	23.40	17.00	10.00	0.45
01.08.2005	0.38	3.50	0.25	7.90	24.60	18.00	6.03	0.45
02.02.2006	0.39	1.20	0.70	12.00	6.40	17.90	8.17	0.52
03.03.2006	0.36	2.80	1.60	12.10	4.80	16.80	3.97	0.75
31.03.2006	0.10	2.00	2.70	11.60	6.00	17.00	2.93	0.41
25.04.2006	0.25	2.50	0.60	13.10	11.00	16.90	31.25	0.93



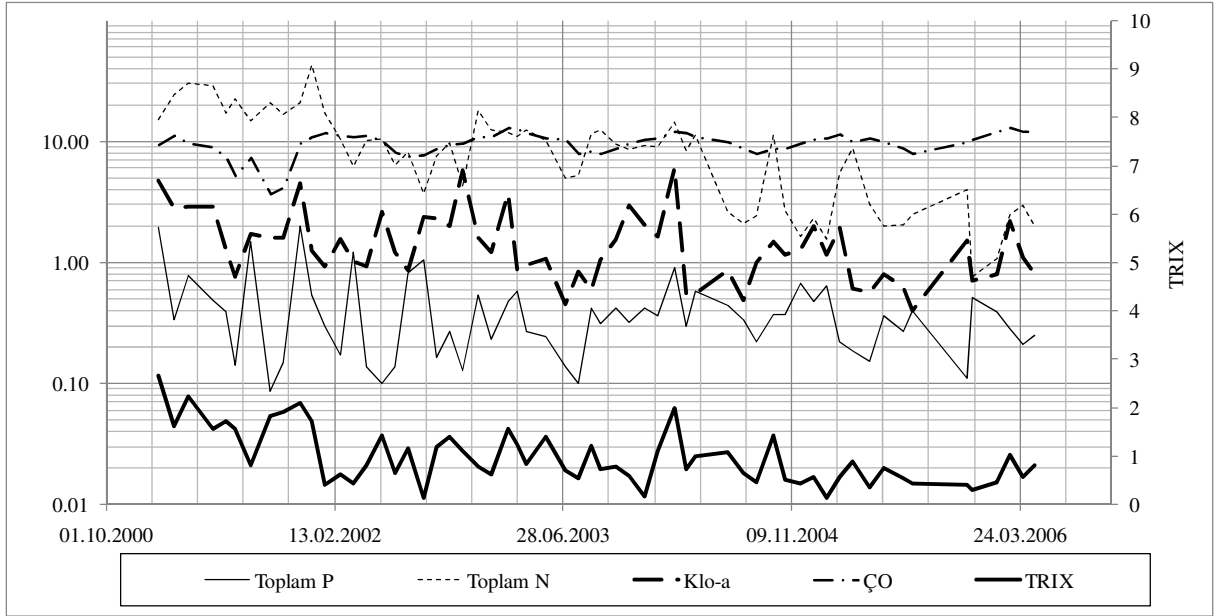
Şekil 4.46 K0 istasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.

Çizelge 4.21 B13 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.

Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Kilo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
12.07.2000	10.00	167.00	0.60	8.16	22.57	17.76	5.10	3.09
09.08.2000	14.00	167.00	0.47	7.34	24.00	17.75	2.79	2.90
13.09.2000	7.00	215.00	1.49	7.75	23.00	17.50	0.51	2.55
25.10.2000	13.00	272.00	8.19	8.64	15.63	16.60	4.13	4.23
15.11.2000	29.00	269.00	3.45	7.74	14.49	17.88	15.58	4.69
13.12.2000	17.00	170.00	5.90	7.51	12.91	17.74	20.99	4.63
24.01.2001	1.97	15.14	4.77	9.27	8.93	17.87	11.07	2.66
28.02.2001	0.34	24.56	2.80	11.01	8.20	17.89	3.78	1.63
29.03.2001	0.79	30.13	2.87	9.53	9.64	17.94	6.96	2.23
24.05.2001	0.48	28.75	2.89	8.85	15.56	16.71	1.88	1.57
21.06.2001	0.39	17.15	1.28	7.29	18.17	17.59	14.15	1.74
11.07.2001	0.14	22.50	0.75	5.23	23.50	17.57	31.47	1.57
15.08.2001	1.48	14.90	1.71	7.29	26.15	16.94	0.21	0.82
25.09.2001	0.09	20.97	1.61	3.67	21.58	17.32	53.76	1.83
24.10.2001	0.15	16.69	1.60	4.10	19.38	17.18	50.62	1.92
29.11.2001	2.00	21.10	4.49	9.63	13.10	17.66	1.71	2.09
27.12.2001	0.54	42.93	1.24	10.79	6.03	17.04	4.17	1.74
23.01.2002	0.30	17.42	0.93	11.50	4.85	17.92	0.36	0.43
27.02.2002	0.17	10.45	1.54	11.03	7.18	18.17	1.55	0.63
27.03.2002	1.22	6.29	1.01	10.75	7.84	17.56	0.23	0.43
25.04.2002	0.14	10.32	0.93	11.06	9.22	16.42	5.90	0.81
29.05.2002	0.10	10.46	2.62	10.05	19.10	15.27	19.02	1.45

Çizelge 4. 21 Devamı.

Tarih	Toplam P (μ M)	Toplam N (μ M)	Klo-a (μ g/l)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık (°C)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
27.06.2002	0.14	6.35	1.22	8.03	23.48	16.39	4.46	0.67
24.07.2002	0.83	8.21	0.87	7.54	26.43	16.52	3.95	1.16
28.08.2002	1.06	3.70	2.35	7.70	23.06	17.54	0.00	0.16
26.09.2002	0.16	7.68	2.33	8.61	21.86	17.18	8.98	1.20
23.10.2002	0.27	9.81	1.99	9.42	17.42	17.54	9.19	1.42
20.11.2002	0.13	4.28	5.80	9.61	15.19	17.64	6.29	1.11
26.12.2002	0.54	18.16	1.57	10.72	7.87	16.71	0.48	0.79
22.01.2003	0.23	12.45	1.21	10.71	7.42	17.56	1.17	0.62
28.02.2003	0.47	12.00	3.64	12.75	2.64	17.07	3.66	1.57
20.03.2003	0.58	11.14	0.85	12.57	3.78	17.14	5.39	1.24
08.04.2003	0.27	12.47	0.95	11.70	5.53	17.14	2.67	0.84
21.05.2003	0.24	10.25	1.06	10.40	16.68	16.79	18.15	1.41
02.07.2003	0.14	4.99	0.45	10.38	16.10	18.00	17.32	0.70
01.08.2003	0.10	5.23	0.83	7.90	25.19	17.60	6.99	0.55
28.08.2003	0.42	11.70	0.59	8.25	23.99	18.01	9.43	1.22
17.09.2003	0.31	12.57	1.05	7.92	22.28	17.91	1.52	0.74
22.10.2003	0.42	9.45	1.55	8.55	18.27	18.08	1.19	0.79
19.11.2003	0.32	8.67	2.92	9.47	12.82	17.90	0.47	0.60
25.12.2003	0.42	9.19	2.04	10.28	9.45	18.03	0.02	0.19
21.01.2004	0.36	9.18	1.62	10.47	7.34	17.42	3.65	1.11
26.02.2004	0.90	14.54	6.03	11.80	5.29	17.60	3.21	2.00
24.03.2004	0.29	8.33	0.55	11.61	6.37	17.73	4.46	0.73
13.04.2004	0.58	11.34	0.55	10.66	9.56	18.05	3.96	1.00
23.06.2004	0.44	2.64	0.86	9.71	20.13	17.16	18.73	1.09
28.07.2004	0.34	2.10	0.48	8.73	23.08	18.09	13.79	0.66
25.08.2004	0.22	2.45	0.99	7.88	23.81	17.56	3.88	0.46
30.09.2004	0.37	11.22	1.49	8.58	21.59	17.59	8.27	1.44
27.10.2004	0.37	2.70	1.16	8.67	18.28	17.75	2.42	0.53
30.11.2004	0.68	1.67	1.27	9.64	12.78	18.05	1.31	0.44
28.12.2004	0.48	2.32	1.98	10.20	10.47	17.97	1.58	0.58
26.01.2005	0.64	1.56	1.16	10.51	8.55	17.99	0.02	0.15
22.02.2005	0.22	5.56	1.95	11.43	6.00	16.94	1.38	0.57
24.03.2005	0.19	8.86	0.60	9.69	7.41	18.27	10.21	0.89
28.04.2005	0.15	3.04	0.56	10.58	10.43	17.83	5.18	0.38
31.05.2005	0.36	2.04	0.79	9.67	17.28	17.73	11.88	0.77
11.07.2005	0.27	2.04	0.62	8.61	22.12	16.98	9.42	0.56
01.08.2005	0.40	2.50	0.40	7.90	24.25	17.50	5.00	0.45
29.11.2005	0.11	4.00	1.50	9.80	12.75	17.50	2.59	0.42
10.12.2005	0.51	0.77	0.70	10.20	11.20	18.00	3.36	0.32
02.02.2006	0.39	1.10	0.80	11.90	6.00	17.60	5.98	0.46
03.03.2006	0.28	2.50	2.20	12.80	4.90	17.00	10.41	1.04
31.03.2006	0.21	3.00	1.10	11.80	6.20	17.00	5.24	0.59
25.04.2006	0.25	2.00	0.80	12.00	10.80	17.00	19.74	0.81



Şekil 4.47 B13 istasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.

Çizelge 4.22 B7 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.

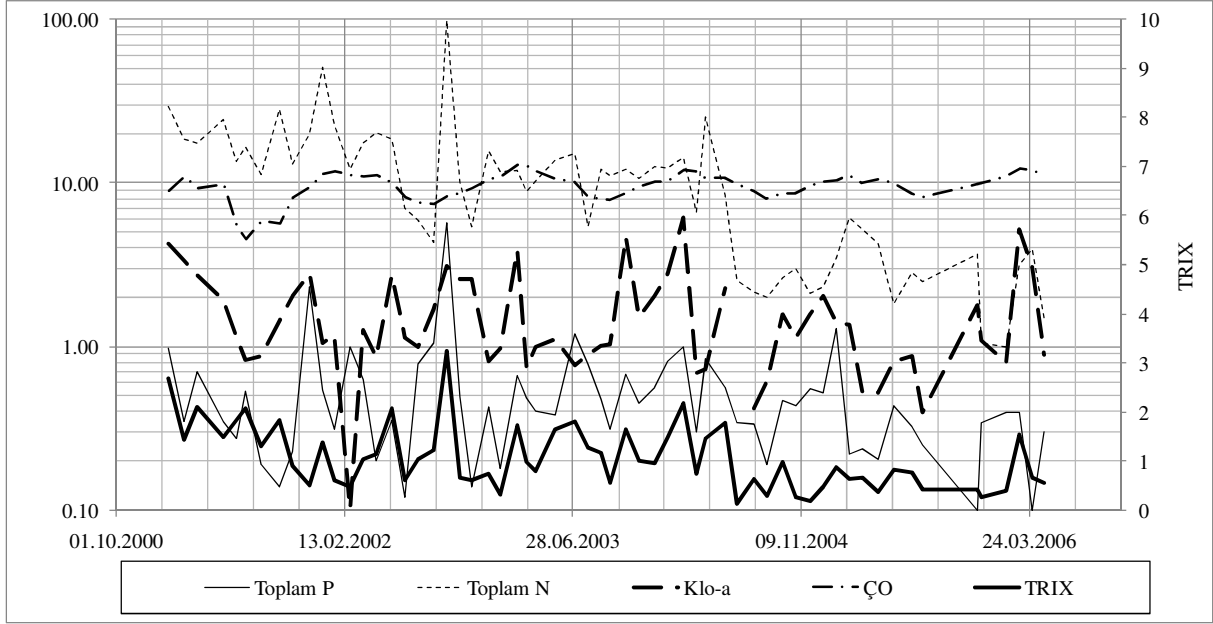
Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Kilo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
19.01.2000	6.00	359.00	1.79	9.87	7.41	18.67	8.31	3.76
17.02.2000	5.80	321.00	2.61	11.07	7.19	18.04	1.87	3.30
09.03.2000	6.00	275.00	1.19	10.93	6.86	17.95	0.31	2.32
13.04.2000	6.00	116.00	1.60	10.74	8.28	18.05	1.54	2.69
10.05.2000	11.00	190.00	1.20	10.20	12.05	17.40	5.02	3.42
14.06.2000	8.00	191.00	1.67	9.03	18.46	17.50	6.93	3.54
12.07.2000	15.00	200.00	0.86	8.29	22.62	17.72	6.86	3.54
09.08.2000	18.00	196.00	0.69	7.51	22.50	17.90	3.32	3.26
13.09.2000	15.00	230.00	1.40	7.93	22.78	17.54	2.42	3.39
25.10.2000	16.00	198.00	0.98	8.49	15.57	16.64	5.90	3.55
15.11.2000	17.00	209.00	3.96	6.74	14.38	17.96	26.63	4.65
13.12.2000	16.00	141.00	5.23	6.64	12.95	17.99	29.97	4.62
24.01.2001	0.97	29.43	4.25	8.94	8.96	18.01	14.10	2.69
28.02.2001	0.35	18.71	3.39	10.84	8.23	18.06	2.36	1.44
29.03.2001	0.71	17.49	2.78	9.16	9.73	18.33	10.16	2.12
24.05.2001	0.35	24.29	1.94	9.70	13.88	17.11	3.91	1.51
21.06.2001	0.28	13.58	1.17	5.39	17.48	17.67	37.40	1.85
11.07.2001	0.54	16.80	0.83	4.51	23.07	17.58	41.40	2.08
15.08.2001	0.19	11.30	0.89	5.84	26.07	17.04	19.80	1.33
25.09.2001	0.14	28.51	1.44	5.64	21.60	17.41	28.89	1.85
24.10.2001	0.23	13.12	2.04	8.16	19.33	17.31	1.76	0.91
29.11.2001	2.32	20.03	2.82	9.46	13.11	17.73	0.02	0.52
27.12.2001	0.54	50.96	1.06	11.36	6.20	17.42	1.59	1.40
23.01.2002	0.31	22.94	1.18	11.63	4.81	17.67	0.51	0.64

Çizelge 4.22 Devamı.

Tarih	Toplam P (µM)	Toplam N (µM)	Klo-a (µg/l)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık (°C)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
27.02.2002	1.00	12.10	0.10	11.14	7.05	17.83	2.02	0.50
27.03.2002	0.63	17.59	1.28	10.82	7.91	17.66	1.13	1.04
25.04.2002	0.20	20.39	0.86	11.13	9.23	16.51	6.67	1.16
29.05.2002	0.36	18.70	2.78	9.98	18.39	15.61	16.71	2.08
27.06.2002	0.12	7.04	1.14	8.11	22.99	16.43	4.50	0.64
24.07.2002	0.79	5.94	1.01	7.49	26.52	16.53	3.46	1.04
28.08.2002	1.05	4.33	1.69	7.42	22.91	17.56	3.90	1.25
26.09.2002	5.70	99.10	3.14	8.32	21.43	17.33	4.51	3.25
23.10.2002	0.50	10.08	2.59	8.62	17.42	18.36	0.39	0.68
20.11.2002	0.14	5.41	2.59	9.24	15.14	17.72	2.12	0.63
26.12.2002	0.42	15.82	0.82	10.44	8.55	17.15	1.20	0.76
22.01.2003	0.18	11.84	0.99	10.87	7.46	17.66	0.47	0.33
28.02.2003	0.66	12.01	3.89	12.81	2.56	17.11	3.97	1.75
20.03.2003	0.49	9.00	0.74	12.49	3.68	17.17	4.46	1.01
08.04.2003	0.40	10.31	1.01	11.59	5.59	17.28	1.95	0.82
21.05.2003	0.38	13.92	1.13	10.55	15.32	17.05	16.61	1.67
02.07.2003	1.20	15.11	0.77	10.15	14.50	18.57	11.19	1.83
01.08.2003	0.79	5.39	0.91	8.08	24.87	18.05	9.05	1.30
28.08.2003	0.48	12.21	1.03	7.94	23.47	18.05	4.26	1.19
17.09.2003	0.31	11.07	1.05	7.87	22.25	18.03	0.89	0.56
22.10.2003	0.67	12.27	4.71	8.53	17.41	23.44	2.40	1.65
19.11.2003	0.45	10.74	1.54	9.33	12.77	18.01	1.98	1.01
25.12.2003	0.57	12.70	2.05	10.17	9.49	18.22	0.90	0.97
21.01.2004	0.81	12.33	2.80	10.09	8.14	22.52	2.23	1.51
26.02.2004	0.99	14.49	6.18	11.92	5.49	17.48	4.72	2.18
24.03.2004	0.30	6.68	0.70	11.63	6.32	17.94	4.66	0.76
13.04.2004	0.84	25.26	0.74	10.66	9.42	18.16	3.68	1.48
27.05.2004	0.56	8.40	2.30	10.67	13.36	17.75	13.41	1.80
23.06.2004	0.34	2.55	0.00	9.69	19.66	17.27	17.44	0.15
28.07.2004	0.34	2.18	0.42	8.88	22.44	18.09	14.30	0.65
25.08.2004	0.19	2.02	0.62	7.92	23.39	17.64	3.60	0.31
30.09.2004	0.47	2.66	1.59	8.50	21.62	17.62	7.35	1.01
27.10.2004	0.43	3.03	1.14	8.52	18.14	17.94	0.49	0.29
30.11.2004	0.55	2.13	1.60	9.52	12.81	18.10	0.15	0.21
28.12.2004	0.52	2.32	2.04	10.15	10.38	18.04	0.93	0.48
26.01.2005	1.28	3.52	1.43	10.33	8.58	18.12	1.58	0.89
22.02.2005	0.22	6.13	1.36	10.97	6.09	17.09	2.39	0.64
24.03.2005	0.24	5.20	0.54	9.98	7.44	18.49	7.33	0.67
28.04.2005	0.20	4.25	0.52	10.51	9.85	17.96	3.14	0.39
31.05.2005	0.43	1.83	0.82	10.00	16.13	17.93	13.05	0.83
11.07.2005	0.32	2.85	0.88	8.62	21.72	17.05	8.73	0.78
01.08.2005	0.25	2.50	0.40	8.10	24.00	18.00	7.44	0.44
29.11.2005	0.10	3.70	1.81	9.80	12.70	18.00	2.78	0.44
10.12.2005	0.34	1.05	1.10	10.00	11.30	18.50	1.88	0.29

Çizelge 4.22 Devamı.

Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Klo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
02.02.2006	0.40	1.00	0.80	10.90	5.20	17.10	5.19	0.42
03.03.2006	0.40	3.20	5.20	12.10	7.10	17.20	10.52	1.55
31.03.2006	0.10	4.00	3.10	12.00	5.20	16.60	4.06	0.68
25.04.2006	0.30	1.50	0.90	11.10	9.80	17.10	8.23	0.57



Şekil 4.48 B7 istasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.

Çizelge 4.23 B2 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.

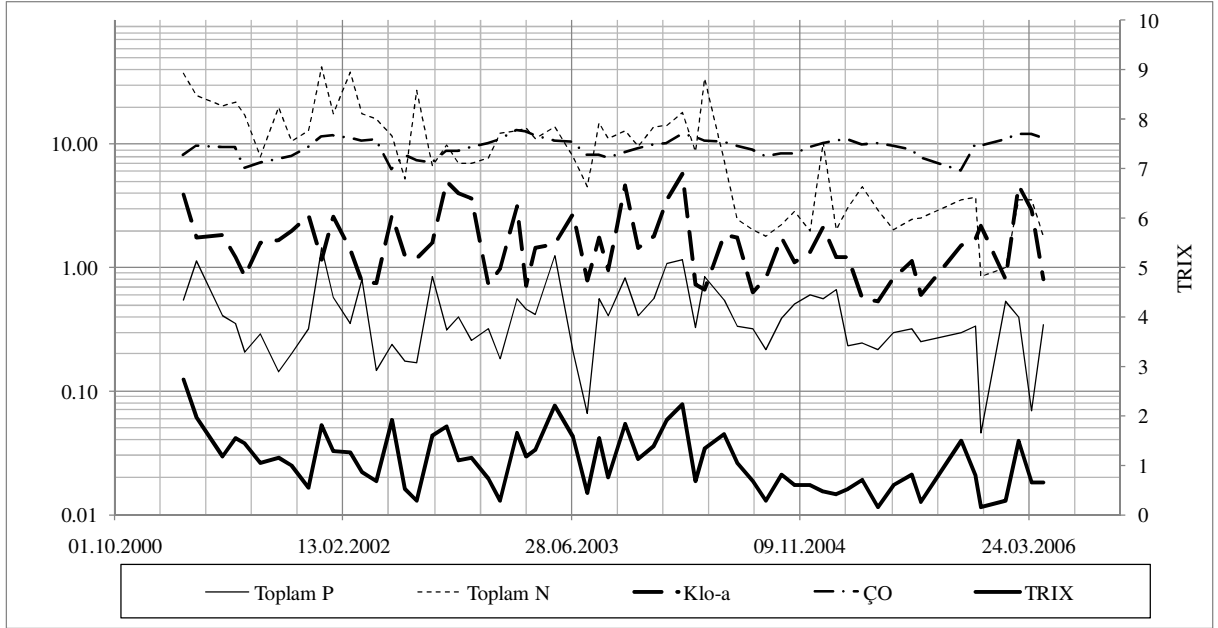
Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Klo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
19.01.2000	18.00	623.00	2.33	9.60	7.82	20.86	8.68	4.46
17.02.2000	7.80	192.00	2.62	10.90	7.37	18.49	1.05	3.01
09.03.2000	3.20	175.00	1.34	9.82	6.90	18.33	10.12	3.23
13.04.2000	9.00	98.00	1.71	10.55	8.32	18.34	0.01	1.07
10.05.2000	9.00	72.00	2.71	9.78	11.64	17.84	0.03	1.47
14.06.2000	9.00	219.00	1.60	9.28	16.81	18.19	6.61	3.60
12.07.2000	10.00	325.00	0.73	8.30	20.01	17.96	1.71	3.01
09.08.2000	10.00	246.00	0.79	7.56	21.85	18.11	3.80	3.22
13.09.2000	15.00	237.00	1.56	7.73	22.55	17.85	0.43	2.82
25.10.2000	16.00	272.00	6.31	8.27	15.56	17.22	8.04	4.45
15.11.2000	37.00	223.00	2.85	7.72	14.39	18.27	15.79	4.64
13.12.2000	16.00	170.00	4.77	7.09	12.93	18.22	25.15	4.59
28.02.2001	0.55	37.48	3.94	8.12	8.36	18.66	22.80	2.72
29.03.2001	1.13	24.63	1.76	9.66	9.85	18.78	4.72	1.97

Çizelge 4.23 Devamı.

Tarih	Toplam P (µM)	Toplam N (µM)	Klo-a (µg/l)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık (°C)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
24.05.2001	0.41	20.27	1.81	9.32	12.96	18.16	1.58	1.17
21.06.2001	0.36	22.06	1.21	9.32	16.94	17.90	7.16	1.54
11.07.2001	0.21	17.30	0.83	6.45	21.99	17.78	17.86	1.45
15.08.2001	0.29	7.80	1.60	6.96	25.89	17.19	4.74	1.06
25.09.2001	0.14	19.77	1.67	7.56	21.41	17.70	4.93	1.16
24.10.2001	0.20	10.57	1.96	8.02	19.22	18.08	3.23	0.98
29.11.2001	0.32	12.85	2.64	9.46	13.12	18.17	0.27	0.54
27.12.2001	1.45	42.04	1.15	11.36	6.33	17.77	2.14	1.82
23.01.2002	0.58	17.42	2.59	11.66	4.88	18.23	1.30	1.29
27.02.2002	0.36	38.50	1.39	11.02	7.18	18.32	1.56	1.25
27.03.2002	0.82	17.59	0.76	10.53	8.04	18.33	0.86	0.87
25.04.2002	0.15	15.73	0.74	10.72	9.14	17.14	2.92	0.68
29.05.2002	0.24	11.62	2.65	6.31	18.13	15.89	26.49	1.91
27.06.2002	0.17	5.24	1.23	8.09	21.86	17.28	2.46	0.52
24.07.2002	0.17	27.14	1.18	7.33	25.72	16.84	0.14	0.29
28.08.2002	0.85	6.63	1.58	7.10	21.93	18.48	9.32	1.60
26.09.2002	0.32	9.86	4.97	8.71	20.92	17.87	8.64	1.77
23.10.2002	0.40	7.02	4.00	8.72	17.46	18.49	1.72	1.10
20.11.2002	0.26	6.88	3.59	9.35	15.15	17.92	3.49	1.14
26.12.2002	0.33	7.59	0.73	10.08	8.89	17.97	3.32	0.73
22.01.2003	0.19	12.19	0.97	10.68	7.71	18.26	0.30	0.28
28.02.2003	0.56	12.90	3.16	12.77	2.66	17.31	4.05	1.64
20.03.2003	0.46	13.33	0.71	12.53	3.84	17.48	5.46	1.17
08.04.2003	0.42	11.10	1.43	11.60	6.25	19.61	5.30	1.30
21.05.2003	1.26	13.87	1.56	10.53	14.94	17.31	15.59	2.19
02.07.2003	0.21	7.94	2.72	10.41	15.39	18.82	16.43	1.56
01.08.2003	0.07	4.53	0.78	8.16	23.83	18.26	8.05	0.44
28.08.2003	0.56	14.75	1.75	8.05	22.74	18.90	4.74	1.54
17.09.2003	0.41	11.15	0.94	7.68	22.19	18.29	1.52	0.76
22.10.2003	0.84	12.85	4.68	8.57	17.55	23.39	3.15	1.84
19.11.2003	0.41	9.50	1.43	9.14	12.78	18.37	3.75	1.13
25.12.2003	0.57	13.70	1.80	9.83	9.68	18.98	3.30	1.40
21.01.2004	1.08	14.18	3.52	10.03	8.03	21.40	3.75	1.92
26.02.2004	1.16	18.00	5.78	11.81	5.44	17.81	3.82	2.22
24.03.2004	0.33	8.59	0.72	11.28	6.59	18.39	2.47	0.68
13.04.2004	0.85	33.40	0.66	10.49	9.39	18.42	2.10	1.35
27.05.2004	0.55	7.24	1.85	10.41	13.81	17.70	11.74	1.62
23.06.2004	0.34	2.47	1.76	9.57	17.69	17.50	11.51	1.05
28.07.2004	0.32	2.03	0.62	8.93	21.07	18.20	11.94	0.67
25.08.2004	0.22	1.77	0.82	7.88	22.87	18.12	2.31	0.29
30.09.2004	0.39	2.24	1.73	8.38	21.16	17.93	5.06	0.80
27.10.2004	0.51	2.86	1.09	8.28	18.05	18.33	2.30	0.59
30.11.2004	0.60	1.95	1.32	9.35	12.50	18.00	2.38	0.60
28.12.2004	0.57	10.20	2.15	10.02	10.38	18.36	0.17	0.46

Çizelge 4.23 Devamı.

Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Klo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
26.01.2005	0.67	2.03	1.21	10.53	8.71	18.72	1.02	0.42
22.02.2005	0.23	3.04	1.20	10.84	6.16	17.48	3.14	0.52
24.03.2005	0.24	4.45	0.55	9.74	7.60	18.84	9.00	0.70
28.04.2005	0.22	2.93	0.53	10.18	9.68	18.51	0.16	0.16
31.05.2005	0.30	2.01	0.83	9.56	16.06	18.05	7.99	0.62
11.07.2005	0.32	2.44	1.12	8.87	20.19	17.39	8.73	0.80
01.08.2005	0.25	2.50	0.60	7.80	23.00	18.00	1.46	0.26
27.10.2005	0.30	3.50	1.50	6.10	11.50	18.00	37.76	1.49
29.11.2005	0.34	3.70	1.70	9.90	12.50	18.00	3.36	0.78
10.12.2005	0.05	0.84	2.20	9.70	11.90	19.10	0.57	0.16
02.02.2006	0.54	1.00	0.80	10.90	6.40	18.20	1.56	0.28
03.03.2006	0.40	3.50	4.60	11.80	7.40	18.20	9.27	1.49
31.03.2006	0.07	3.50	2.90	11.90	6.20	17.40	6.39	0.65
25.04.2006	0.35	1.80	0.80	11.20	9.60	17.90	9.22	0.66



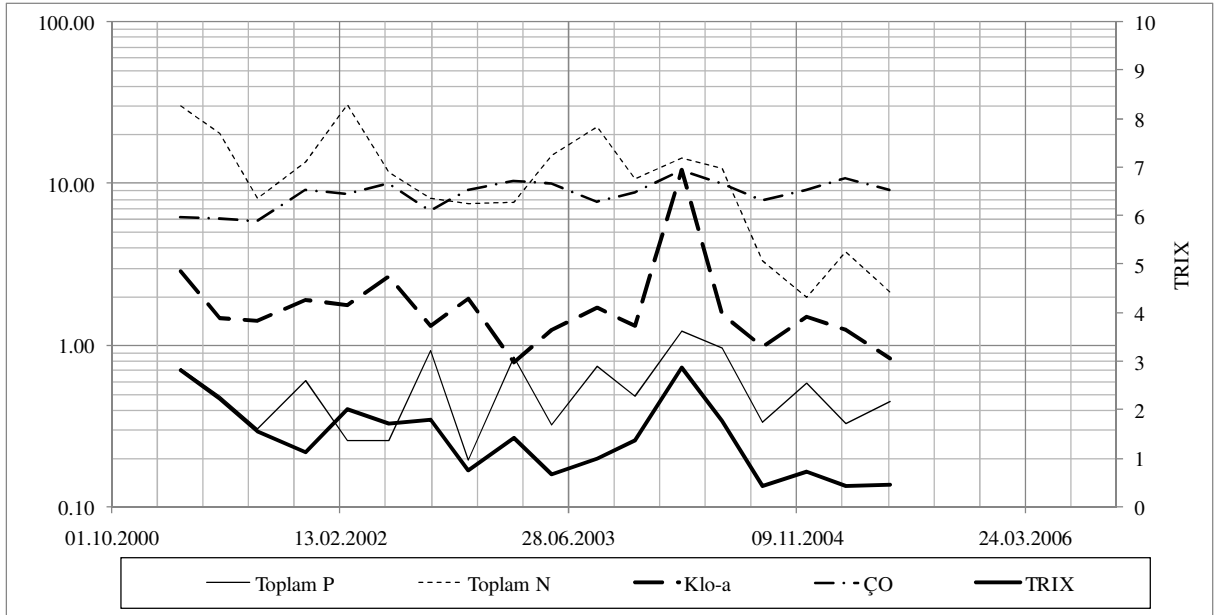
Şekil 4.49 B2 istasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.

Çizelge 4.24 M3 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.

Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Klo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
17.02.2000	5.80	151.00	1.96	10.20	7.70	20.07	3.73	3.17
11.05.2000	14.00	198.00	1.91	9.36	11.73	19.11	3.33	3.54
10.08.2000	10.00	196.00	0.73	7.19	20.16	20.72	10.16	3.47
15.11.2000	21.00	223.00	2.18	6.27	14.68	20.38	30.28	4.58

Çizelge 4.24 Devamı.

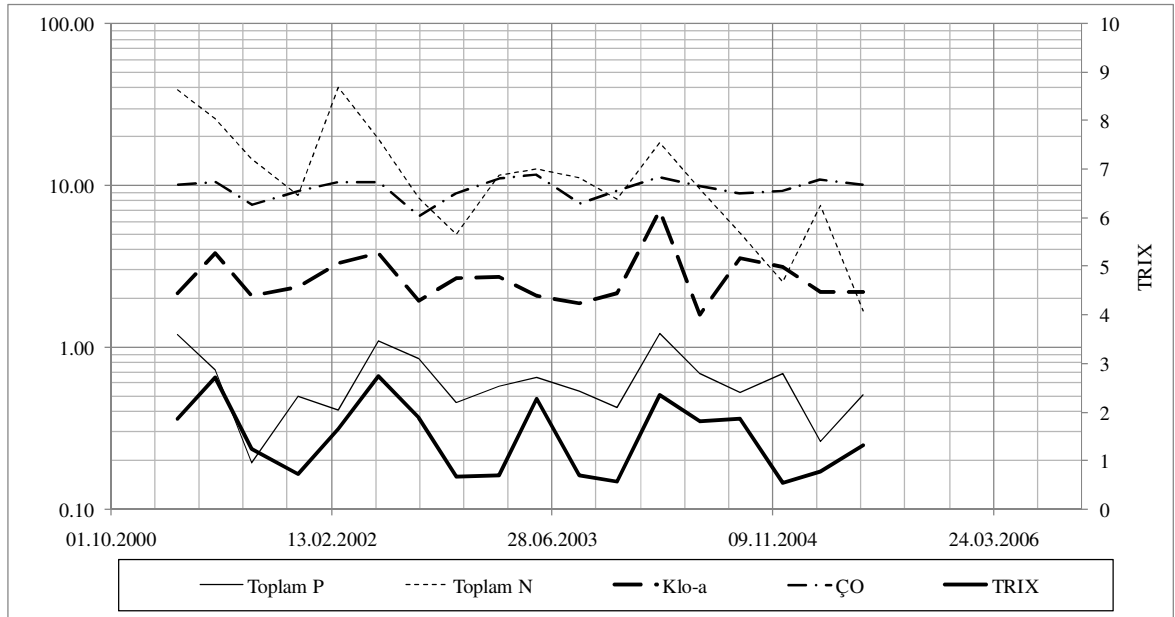
Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Klo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
28.02.2001	0.72	29.91	2.89	6.13	9.07	22.48	39.27	2.82
24.05.2001	0.48	20.27	1.48	6.03	13.06	22.95	34.27	2.25
15.08.2001	0.30	8.12	1.43	5.83	24.34	19.49	21.47	1.57
29.11.2001	0.61	13.57	1.93	9.16	12.96	21.39	1.35	1.13
27.02.2002	0.26	30.72	1.78	8.64	7.45	20.38	18.80	2.02
29.05.2002	0.26	11.62	2.69	10.01	16.63	18.58	14.81	1.74
29.08.2002	0.92	8.07	1.32	6.80	21.02	19.22	14.33	1.79
20.11.2002	0.20	7.56	1.94	9.19	15.23	18.65	2.34	0.76
27.02.2003	0.84	7.71	0.79	10.34	4.46	20.04	10.11	1.44
21.05.2003	0.32	15.05	1.27	10.06	7.72	26.79	0.82	0.68
28.08.2003	0.74	22.54	1.70	7.69	22.10	21.80	0.51	1.00
19.11.2003	0.48	10.73	1.32	8.70	13.17	20.66	6.27	1.37
01.03.2004	1.22	14.34	12.24	12.05	7.28	21.37	13.48	2.88
27.05.2004	0.96	12.31	1.58	9.98	13.27	20.06	7.37	1.79
26.08.2004	0.33	3.30	0.98	7.89	22.25	18.85	1.64	0.43
30.11.2004	0.58	1.98	1.50	9.06	12.97	19.90	3.28	0.71
22.02.2005	0.33	3.77	1.27	10.80	7.12	21.07	1.12	0.43
31.05.2005	0.45	2.12	0.83	9.10	15.65	19.20	2.60	0.46



Şekil 4.50 M3 istasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.

Çizelge 4.25 M8 İstasyonunda TRIX İndeksi değerlendirilmesi.

Tarih	Toplam P (μM)	Toplam N (μM)	Klo-a ($\mu\text{g/l}$)	ÇO (mg/l)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Tuzluluk (psu)	%ÇO	TRIX
17.02.2000	12.20	185.00	5.86	10.53	7.67	22.88	1.09	3.47
11.05.2000	17.00	144.00	3.49	9.39	13.62	21.12	2.47	3.60
10.08.2000	22.00	317.00	1.69	7.77	23.22	21.84	3.83	3.88
16.11.2000	46.00	276.00	1.94	6.16	15.00	20.98	30.77	4.90
01.03.2001	1.21	39.27	2.13	10.15	9.30	23.32	1.67	1.86
25.05.2001	0.73	25.98	3.82	10.60	16.97	22.35	25.25	2.72
16.08.2001	0.20	14.50	2.08	7.63	24.57	22.30	4.99	1.24
30.11.2001	0.50	8.76	2.34	9.23	12.70	22.37	0.56	0.72
27.02.2002	0.42	40.36	3.28	10.58	7.96	21.98	1.72	1.65
30.05.2002	1.10	19.36	3.83	10.50	17.83	19.32	24.05	2.75
29.08.2002	0.86	8.43	1.94	6.46	23.79	21.89	12.66	1.88
21.11.2002	0.46	4.97	2.64	8.99	15.29	19.69	0.87	0.69
27.02.2003	0.57	11.49	2.69	11.19	4.99	21.71	0.31	0.70
22.05.2003	0.66	12.72	2.06	11.73	15.45	20.26	32.53	2.29
29.08.2003	0.54	11.08	1.87	7.73	21.93	21.46	0.48	0.70
20.11.2003	0.43	8.27	2.16	9.27	12.94	20.97	0.45	0.58
26.02.2004	1.23	18.32	7.04	11.39	6.19	21.03	4.17	2.35
26.05.2004	0.69	9.50	1.58	9.93	16.03	21.25	14.27	1.81
25.08.2004	0.53	5.06	3.54	8.99	22.42	21.25	17.86	1.86
01.12.2004	0.69	2.54	3.13	9.34	13.03	21.05	0.55	0.55
23.02.2005	0.26	7.55	2.17	10.84	7.23	21.00	1.73	0.79
31.05.2005	0.51	1.69	2.16	10.22	17.07	20.99	20.03	1.33



Şekil 4.51 M8 istasyonu TRIX indeksi değerleri ve değerlendirme parametreleri.

Su kütelleri verimlilik dereceleri ve ekolojik özelliklerine göre üç temel gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar verimli (ötrofik), az verimli (oligotrofik) ve verimsiz (distrofik) olarak sınıflandırılmaktadır. Verimli su kütelleri bol besin ve buna bağlı olarak bol organizma barındırırlar. Bol organizma bol ölü organizmaları beraberinde getirir ve bu da zemin çamurunun artmasına ve taban topoğrafyasının değişmesine hatta sığ su kütellerinde bataklıklaşmaya kadar giden durumlara neden olmaktadır. Bu nedenle bu tür verimli su kütelleri yaşamının sonuna yaklaşmış su kütelleri olarak değerlendirilmektedir. Az verimli (oligotrofik) su kütelleri ise bu tür verimli su kütellerinin aksine iyi bir tabakalaşmanın olduğu, derin ve oksijenin su kolonu boyunca her derinlikte mevcut olduğu, ışık geçirgenliğinin belirli derinliğin altına inmediği ortamlardır. Işık tabana kadar ulaşmadığından taban organik madde ve organizmalar açısından çok zengin değildir. Üretken olmayan (distrofik) su kütelleri ise genellikle çok sığ ve besi maddeleri açısından çok fakir ortamlardır (Şahin, 2001). Çizelge 4.20-4.25 ve Şekil 4.46-4.51 arasında sunulan değerlendirmeler ışığında İstanbul Boğazı düşük üretkenliğe sahip yani oligotrofik bir su kütesidir.

5. MODELLEME ARAÇLARI

5.1. Mike3 Hidrodinamik Modeli

Mike3 Hidrodinamik modeli kıyı alanları ve okyanuslardaki akımların benzetimi amacıyla geliştirilmiştir. Yoğunluk değişimleri, batimetri ve meteorolojik koşullar, gelgit değişimleri, akıntılar ve diğer hidrografik şartlar gibi dış kuvvetleri dikkate alarak kararsız üç boyutlu akımları benzeştirmektedir.

Mike3 Hidrodinamik modülü, lineer olmayan üç boyutlu süreklilik ve momentumun korunumu denklemlerini çözmektedir. Bu iki ana denkleme ikinci mertebe hassasiyette Alternatif Doğrultulu Kapalı sonlu farklar çözümü uygulamaktadır. Smagorinsky eddy formülasyonu, bir denklem türbülans kapama problemi (k model), iki denklem türbülans kapama problemi (k-ε model), düşeyde bir boyutlu karışık k-ε model, yatayda iki boyutlu Smagorinsky formülasyonu ile çözüm yapabilmektedir. Tuzluluk ve sıcaklığın taşınımında üçüncü mertebeden hassasiyete sahip açık sonlu farklar çözümü gerçekleştirmektedir.

Newtonian akışkanların 3 boyutlu hidrodinamik modelinin kurulabilmesi için aşağıdaki koşullar dikkate alınmalıdır:

- Kütlelerin korunumu
- Momentumun korunumu
- Tuzluluk ve sıcaklığın korunumu
- Tuzluluk sıcaklık ve basınca ilişkin yoğunluk durum denklemi

Mike3'ün matematiksel esası kütlelerin korunumu, türbülans ve değişken yoğunluk etkilerini de içeren 3 boyuttaki Navier-Stokes Denklemleri ile tuzluluk ve sıcaklığın korunumuna dayanmaktadır.

Temel denklemlerin uzamsal ayrıklaştırılması için merkezi sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda model hacmi herhangi bir süreksizlik kalmayacak şekilde, birbiriyle girişimi olmayan hücelere bölünmektedir. Bunun için düşey düzlemde yapılandırılmış ve yatay düzlemde ise yapılandırılmamış ağ sistemi uygulanmaktadır. Böylece model hacmi yatay yüzeyi üçgen ve düşey yüzeyi ise dörtgen olan prizmatik elemanlardan oluşmaktadır.

Zamansal integrasyon için, yatay terimlerin açık, düşeydeki terimlerin ise kapalı olarak çözümlendiği yarı kapalı yaklaşım kullanılmaktadır.

5.1.1 Kartezyen Koordinat Sisteminde Temel Denklemler

5.1.1.1. Sıg Su Denklemleri

Model sistemi sıkışamaz akışkana ait Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerinin üç boyutlu çözümünü esasına dayanmaktadır. Bunu yaparken hidrostatik basınç kabulü ve Boussinesq yaklaşımını kullanmaktadır.

Yerel süreklilik denklemi (5.1)'de verildiği gibidir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (5.1)$$

x ve y doğrultularındaki yatay momentum denklemleri ise sırasıyla (5.2) ve (5.3)'te gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = & fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ & - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = & -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \\ & - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (5.3)$$

Bu ifadelerde t zaman, x , y ve z Kartezyen koordinatlar, η su yüzü değişimi, d sakin su derinliği, $h=\eta+d$ toplam su derinliği, u , v ve w sırasıyla x , y , z doğrultularındaki hız bileşenleri, $f=2\Omega \sin \phi$ Coriolis parametresi (Ω açısal hız ve ϕ coğrafik enlem), g yerçekimi ivmesi, ρ suyun yoğunluğu, s_{xx} , s_{xy} , s_{yx} ve s_{yy} radyasyon gerilmesi tensörü, v_t düşey türbülans (ya da eddy) viskozitesi, p_a atmosferik basınç, ρ_0 suyun referans yoğunluğudur. S noktasal kaynak debisi ve (u_s, v_s) bu deşarjların alıcı ortama giriş hızıdır. Yatay gerilme terimleri gradyan-gerilme bağıntısı kullanılarak tanımlanabilir. Böylece basitleştirilmiş olarak (5.4) ve (5.5)'deki gibi tanımlanabilir.

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (5.4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.5)$$

Bu ifadelerde A yatay eddy viskozitesini göstermektedir.

U , v ve w için yüzey ve taban sınır koşulları (5.6) ve (5.7)'de verildiği şekilde tanımlanabilir.

$z = \eta$ 'da;

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (5.6)$$

$z = -d$ 'de;

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (5.7)$$

Bu ifadelerde (τ_{sx}, τ_{sy}) ve (τ_{bx}, τ_{by}) rüzgar ve taban gerilmesinin x ve y bileşenleridir.

Hız alanı momentum ve süreklilik denklemleri ile elde edildikten sonra, toplam su derinliği, h yüzeyde kinematik sınır koşulu kullanılarak elde edilebilir. Bununla birlikte yerel süreklilik denkleminin düşey integrasyonundan daha sağlıklı bir ifade elde etmek mümkündür (5.8).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS + \hat{P} - \hat{E} \quad (5.8)$$

Bu ifadede $\hat{P}$ ve $\hat{E}$ sırasıyla yağış ve buharlaşma miktarları, $\bar{u}$ ve $\bar{v}$ derinlik boyunca ortalama hızlardır.

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (5.9)$$

Akışkan sıkışamaz kabul edildiğinden ρ basınçtan bağımsız, yalnızca sıcaklık, T ve tuzluluğa s bağlı olacaktır (5.10), (UNESCO, 1981).

$$\rho = \rho(T, s) \quad (5.10)$$

5.1.1.2. Tuzluluk ve Sıcaklığın Taşınım Denklemleri

Modelde sıcaklık T ve tuzluluk, S 'nin taşınımı için bilinen taşınım-difüzyon denklemleri kullanılmıştır (5.11) ve (5.12).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (5.12)$$

Bu ifadelerde D_v düşey türbülans (eddy) difüzyon katsayısı, $\hat{H}$ atmosfer ile su yüzü arasındaki sıcaklık değişimi için kaynak terimi, T_s ve s_s kaynağın sıcaklık ve tuzluluğu, F ise yatay difüzyon terimleridir (5.13).

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (5.13)$$

(5.13) ifadesinde D_h yatay difüzyon katsayısıdır. Difüzyon katsayıları eddy viskozitesine bağlı olarak (5.14)'te verildiği şekilde ifade edilebilir.

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \quad \text{ve} \quad D_v = \frac{v_t}{\sigma_T} \quad (5.14)$$

Bu ifadede σ_T Prandtl sayısındır. Pek çok uygulamada sabit olarak dikkate alınabilir (Rodi, 1984).

Sıcaklık için yüzey ve taban sınır koşulları (5.15) ve (5.16)'da verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$z = \eta$ 'da;

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho_0 c_p} + T_p \hat{P} + T_e \hat{E} \quad (5.15)$$

$z = -d$ 'de;

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (5.16)$$

Bu ifadelerde Q_n yüzeydeki net ısı akısı ve $c_p=4217\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{K})$ değerindeki suyu özgül ısısıdır. Benzer şekilde tuzluluk için yüzey ve taban sınır koşulları (5.17) ve (5.18)'de verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$z = \eta$ 'da;

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (5.17)$$

$z = -d$ 'de;

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (5.18)$$

Eğer atmosfer ile su arasındaki ısı değişimi de modelde dikkate alınacaksa, buharlaşma terimi (5.19)'da verildiği şekilde dikkate alınabilir.

$$\hat{E} = \begin{cases} \frac{q_v}{\rho_0 l_v} & q_v > 0 \\ 0 & q_v \leq 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

Bu ifadede q_v gizli ısı akısı ve $l_v=2.5 \times 10^6$ ise suyun gizli buharlaşma ısıdır.

5.1.1.3. Skaler Büyüklükler için Taşınım Denklemi

Modelde skaler bir büyüklük için korunum denklemi (5.20)'deki gibi verilmektedir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_c + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \quad (5.20)$$

Burada C skaler büyüklüğün konsantrasyonu, k_p skaler büyüklüğe ait doğrusal azalma oranı, C_s skaler büyüklüğün kaynak konsantrasyonu, D_v düşey difüzyon katsayısıdır. F_c yatay difüzyon katsayısı (5.21)'deki gibi tanımlanabilir.

$$F_c = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C \quad (5.21)$$

Yine bu ifadede D_h yatay difüzyon katsayısıdır.

5.1.1.4. Türbülans Modeli

Mike3 hidrodinamik modelinde türbülans eddy viskozitesi kavramı ile modellenmiştir. Eddy viskozitesi genellikle düşey ve yatay taşınım ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Mike3 modelinde birkaç farklı türbülans modeli kullanılabilir: sabit viskozite, düşeyde parabolik viskozite ve standart k-ε model (Rodi, 1984). Çoğu sayısal benzetimlerde seçilen uzamsal çözünürlüğe bağlı olarak küçük ölçekli türbülans benzeştirilememektedir. Bu tür türbülans ağ altı ölçekli modeller (sub-grid scale) kullanılarak hesaplanabilir.

Düşey Eddy Viskozitesi

Log-law dağılımdan elde edilen eddy viskozitesi (5.22) ifadesi kullanılarak hesaplanabilir.

$$\nu_t = U_\tau h \left(c_1 \frac{z+d}{h} + c_2 \left(\frac{z+d}{h} \right)^2 \right) \quad (5.22)$$

Bu ifadede $U_{\tau}=En$ *Büyük*($U_{\tau s}$, $U_{\tau b}$) ve c_1 ve c_2 ise sabitlerdir. $U_{\tau s}$ ve $U_{\tau b}$ yüzey ve taban gerilmesi kayma hızları, $c_1=0.41$ ve $c_2=-0.41$ 'dir.

Tabakalı akımlara dair model uygulamalarında batıklık etkileri de modele dahil edilebilir. Bunu, kararlı bir tabakalanmanın olduğu durumlarda eddy viskozitesinin sönümlenmesine bağlı olan Richardson Sayısı ile yapmak mümkündür. Sönümlenme genelleştirilmiş Munk-Anderson formülasyonu (Munk ve Anderson, 1948) ile (5.23)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\nu_t = \nu_t^* (1 + a Ri)^{-b} \quad (5.23)$$

Bu ifadede ν_t^* sönümlenmemiş eddy viskozitesidir ve Ri yerel Richardson sayısıdır (5.24).

$$Ri = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{-1} \quad (5.24)$$

$a=10$ ve $b=0.5$ olmak üzere deneysel sabitlerdir.

k- ϵ türbülans modelinde eddy viskozitesi k ve ϵ türbülans parametrelerinde elde edilir (5.25).

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.25)$$

Bu ifadede k birim kütle için türbülans kinetik enerjisini (TKE), ϵ ise TKE'nin sönümlenmesini temsil etmektedir. c_μ ise deneysel bir sabittir.

Türbülans kinetik enerjisi, k , ve TKE'nin sönümlenmesi terimi, ϵ , (5.26) ve (5.27) kullanılarak elde edilebilmektedir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \epsilon \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\epsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\epsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\epsilon}{\partial z} = F_\epsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \frac{\epsilon}{k} (c_{1\epsilon} P + c_{3\epsilon} B - c_{2\epsilon} \epsilon) \quad (5.27)$$

Bu ifadelerdeki kayma verimi, P, ve batıklık verimi, B (5.28) ve (5.29)'daki tanımlanmaktadır.

$$P = \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx \nu_t \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (5.28)$$

$$B = -\frac{\nu_t}{\sigma_t} N^2 \quad (5.29)$$

N Brunt-Vaisala frekansı ile (5.30)'da verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (5.30)$$

σ_t türbülans Prandtl sayısı ve σ_k , σ_ε , $c_{1\varepsilon}$ ve $c_{2\varepsilon}$ deneysel sabitlerdir. Yatay difüzyon terimleri F (5.31)'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \quad (5.31)$$

Yatay difüzyon katsayıları sırasıyla $D_h = A / \sigma_k$ ve $D_h = A / \sigma_\varepsilon$ olarak tanımlanabilir.

Formülasyonlarda verilen dikkatle kalibre edilmiş k- ε türbülans modeli deneysel sabitleri Çizelge 5.1'de listelenmiştir (Rodi, 1984).

Çizelge 5.1 k- ε türbülans modeli deneysel sabitleri, Rodi (1984).

c_μ	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$c_{3\varepsilon}$	σ_t	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	0	0.9	1.0	1.3

Yüzeyde türbülans kinetik enerjisi ve sönümlenme oranı için sınır koşulları rüzgar kayma hızına, U_τ bağlı olarak (5.32) ve (5.33)'teki gibi verilmektedir.

$z = \eta$, da;

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_\tau^2 \quad (5.32)$$

$$\varepsilon = \frac{U_\tau^3}{\kappa \Delta z_b} \quad U_\tau > 0$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad \varepsilon = \frac{(k \sqrt{c_\mu})^{3/2}}{a \kappa h} \quad U_\tau = 0 \quad (5.33)$$

Bu ifadelerde $\kappa=0.4$ von Karman Sabiti, $a=0.07$ deneysel sabit, Δz_s sınır koşulunun uygulandığı yerin yüzeyden mesafesidir. Deniz tabanında sınır koşulları (5.34)'teki gibi tanımlanmıştır.

$z = -d$ 'de :

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_\tau^2 \quad \varepsilon = \frac{U_\tau^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (5.34)$$

Δz_b sınır koşulunun uygulandığı yerin tabana olan mesafesidir

Yatay Eddy Viskozitesi

Pek çok model uygulamalarında yatay eddy viskozitesi için sabit eddy viskozitesi kullanılmaktadır. Bunu dışında Smagorinsky (1963) ağ altı ölçekteki taşınımları benzeştirebilmek için karakteristik uzunluk ölçeğine bağlı bir etkin eddy viskozitesi tanımı önermiştir (5.35).

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5.35)$$

Burada c_s sabit, l karakteristik uzunluktur ve deformasyon oranı (5.36)'da gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (5.36)$$

5.1.1.5. Kartezyen ve Sigma Koordinatlarda Temel Denklemler

Denklemler düşey σ -dönüşümü kullanılarak çözülmektedir (5.37).

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (5.37)$$

σ tabanda 0 ile yüzeyde 1 arasında değişmektedir. Koordinat dönüşümü (5.38) ve (5.39)'deki gibi bağıntılara işaret etmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (5.38)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial x} + \sigma \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial y'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial y} + \sigma \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \quad (5.39)$$

Bu yeni koordinat sisteminde temel denklemler (5.40), (5.41), (5.42), (5.43), (5.44), (5.45), (5.46) ve (5.47), 'de gösterildiği şekilde yazılmaktadır.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = hS \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial hvu}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{h_g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S \end{aligned} \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} = -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{h_g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \\ - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$\frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x'} + \frac{\partial hvT}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega T}{\partial \sigma} = hF_T + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + h\hat{H} + hT_s S \quad (5.43)$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{\partial hus}{\partial x'} + \frac{\partial hvs}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega s}{\partial \sigma} = hF_s + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) + hs_s S \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega k}{\partial \sigma} = hF_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega\varepsilon}{\partial \sigma} = hF_\varepsilon + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega C}{\partial \sigma} = hF_C + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) - hk_p C + HC_s \quad (5.47)$$

Dönüştürülmüş düşey hız (5.48)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (5.48)$$

Dönüştürülmüş düşey hız sabit σ seviyesi boyunca oluşan hızdır. Yatay difüzyon terimleri (5.49), (5.50) ve (5.51)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (5.49)$$

$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.50)$$

$$h(F_T, F_s, F_k, F_\varepsilon, F_C) \approx \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s, k, \varepsilon, C) \quad (5.51)$$

Serbest yüzey ve taban sınır koşulları (5.52) ve (5.53)'de gösterilmiştir.

$\sigma = 1$ 'de;

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (5.52)$$

$\sigma = 0$ 'da;

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (5.53)$$

Koordinat dönüşümü ile su derinliğinin belirlenmesi için kullanılan ifadede herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Dolayısıyla bu ifade (5.5)'te verildiği şekilde kullanılmaktadır.

5.1.2 Taban Gerilmesi

Mike3 hidrodinamik modelinde taban gerilmesi, $\bar{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$, ikinci dereceden sürtünme yasası ile belirlenmektedir (5.54).

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (5.54)$$

Bu ifadede c_f direnç katsayısı ve $\bar{u}_b = (u_b, v_b)$ taban üzerindeki akım hızıdır. Taban gerilmesine bağlı olarak oluşan sürtünme hızı (5.55)'te verilen ifade ile tanımlanmaktadır.

$$U_{tb} = \sqrt{c_f |\bar{u}_b|^2} \quad (5.55)$$

Üç boyutlu modellerde $\bar{u}_b$ deniz tabanından Δz_b kadar mesafedeki hızdır ve direnç katsayısı bu iki nokta arasında logaritmik hız dağılımı kabulüne bağlı olarak (5.56)'da verildiği şekilde belirlenmektedir.

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_0} \right) \right)^2} \quad (5.56)$$

Burada $\kappa=0.4$ von Karman sabiti ve z_0 taban pürüzlülüğü uzunluk ölçeğidir. Sınır yüzeyi pürüzlü ise, z_0 , pürüz yüksekliği, k_s 'e bağlı olarak (5.57)'deki gibi tanımlanabilir.

$$z_0 = m k_s \quad (5.57)$$

m yaklaşık 1/30'dur.

Manning sayısı da taban pürüz yüksekliği kullanılarak (5.58)'de verilen ifade ile hesaplanabilir.

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (5.58)$$

5.1.3 Rüzgar Gerilmesi

Yüzey gerilmesi, $\bar{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$, yüzeyin buzla kaplı olmadığı durumlarda rüzgâr tarafından meydana getirilmektedir. Gerilme (5.59)'da verilen ampirik bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\bar{\tau}_s = \rho_a c_d |u_w| \bar{u}_w \quad (5.59)$$

Bu ifadede ρ_a havanın özgül kütlesi, c_d direnç katsayısı ve $\bar{u}_w = (u_w, v_w)$ deniz yüzeyinden 10 m yukarıdaki rüzgâr hızıdır. Sürtünme hızı (5.60)'ta verilen ifade ile tanımlanmaktadır.

$$U_{ts} = \sqrt{\frac{\rho_a c_d |\bar{u}_w|^2}{\rho_0}} \quad (5.60)$$

Direnç kuvveti sabit olabildiği gibi rüzgar hızına bağlı olarak da tanımlanabilmektedir. Direnç kuvveti için Wu (1980) tarafından verilen deneysel ifade kullanılmıştır (5.61).

$$c_d = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} \leq w_b \\ c_b & w_{10} > w_b \end{cases} \quad (5.61)$$

Bu ifadede c_a , c_b , w_a ve w_b ampirik faktörler ve w_{10} ise su yüzeyinden 10 m yukarıdaki rüzgar hızıdır. Bu ampirik faktörlerin literatürde geniş kabul gören değerleri $c_a = 1.255 \times 10^{-3}$, $c_b = 2.425 \times 10^{-3}$, $w_a = 7$ m/s ve $w_b = 25$ m/s dir.

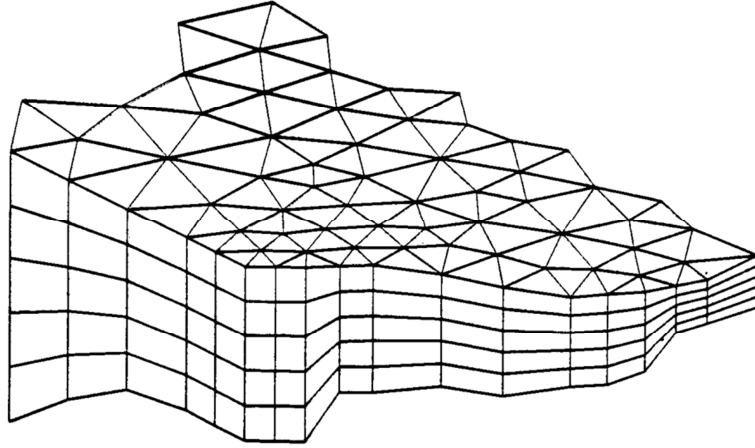
5.1.4 Nümerik Çözüm

5.1.4.1. Uzamsal Ayrıklaştırma

Nümerik çözüm düzleminde ayrıklaştırma sonlu hacimler yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Uzamsal model hacmi hiçbir süreksizlik kalmayacak şekilde elemanlara ayrıştırılmaktadır. Elemanlar birbiriyle çakışmamaktadır.

Üç boyutlu modellerde tabakalı ağ kullanılmaktadır. Hesap ağı düşeyde dikdörtgen, yatayda ise üçgen yüzeylere sahip prizmatik elemanlardan meydana gelmektedir. Böylece tüm

katmanlar aynı topolojik yapıya sahip olmaktadır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Ağ üretimi.

Sığ Su Denklemleri

Sığ su denklem takımı integral formda (5.62)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad (5.62)$$

Burada U korunan değişkenler vektörü, F akı vektör fonksiyonu ve S kaynak terimler vektörüdür.

Kartezyen koordinat sisteminde üç boyutlu sığ su denklemleri (5.63)'te görüldüğü şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_x^I}{\partial x'} + \frac{\partial F_y^I}{\partial y'} + \frac{\partial F_\sigma^I}{\partial \sigma} + \frac{\partial F_x^V}{\partial x} + \frac{\partial F_y^V}{\partial y} + \frac{\partial F_\sigma^V}{\partial \sigma} = S \quad (5.63)$$

Bu ifadede üst indisler I ve V sırasıyla viskoz olmayan ve viskoz akıları belirtmektedir. (5.61)'deki terimler (5.64)'te tanımlanmıştır.

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix},$$

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

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

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

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + fvh - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial y} + fuh - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

(5.61)'in i . hücre üzerinde integrasyonundan, Gauss teoremi de kullanılarak (5.65) elde edilir.

$$\int_{A_i} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_i} (F.n) ds = \int_{A_i} S(U) d\Omega \quad (5.65)$$

Burada A_i hücrenin hacmi, Ω integrasyon değişkeni, Γ_i i . hücrenin sınırı ve ds sınır boyunca integrasyon sabitidir. $\mathbf{n}$ sınır boyunca normal vektördür. Hacim integrali alınarak (5.66) yazılabilir.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{A_i} \sum_j^{NS} F.n \Delta \Gamma_j = S_i \quad (5.66)$$

Burada U_i ve S_i sırasıyla i . hücre merkezindeki ortalama değerler, NS hücre duvarlarının sayısı, $n_j j$. duvardaki birim normal vektör ve $\Delta\Gamma_j$ ise j . ara yüzün alanıdır.

Uzamsal ayrıklaştırma için birinci ya da ikinci mertebe şemalar kullanılabilmektedir.

Üç boyutlu modellerde hücre ara yüzlerinde konvektif akıların hesaplanmasında yaklaşık Riemann çözümü (Roe, 1981) kullanılmaktadır.

Taşıyım Denklemleri

Taşıyım denklemleri sıcaklık ve tuzluluk modelinde karşımıza çıkmaktadır. Üç boyutlu modellerde taşıyım denkleminin integral formu (5.67)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 U &= hC \\
 F^I &= [huC, hvC, h\omega C] \\
 F^V &= \left[hD_h \frac{\partial C}{\partial x}, hD_h \frac{\partial C}{\partial y}, h \frac{D_h}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] \\
 S &= -hk_p C + hC_s S
 \end{aligned} \tag{5.67}$$

Sonlu hacimler yöntemiyle ayrıklaştırılmış taşıyım denklemi (5.66)'da verilmiştir. Taşıyım denklemleri için de birinci ya da ikinci mertebeden çözüm uygulamak mümkündür.

Üç boyutlu modellerde düşük mertebeden çözüm basit birinci mertebeden upwind şemasını uygulamaktadır. Yüksek mertebeden çözüm ise yatay sınırlardaki doğru değerleri ikinci mertebeden doğrulukla hesaplayabilmek için yatay gradyanları da hesaplamaktadır.

5.1.4.2. Zamansal İntegrasyon

Denklemlerin genel formunu dikkate almaktadır (5.68).

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G(U) \tag{5.68}$$

Üç boyutlu benzetimlerde zamansal integrasyon yarı kapalı olarak gerçekleştirilmektedir. Yatay terimler açık ve düşey terimler ise açık ya da kapalı ya da kısmen kapalı olarak hesaba katılmaktadır. Genel yarı kapalı formdaki denklemler (5.69)'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G_h(U) + G_v(BU) = G_h(U) + G_v^I(U) + G_v^V(U) \tag{5.69}$$

Burada h ve v sırasıyla yatay ve düşey terimleri ifade eden alt indislerdir. Zamansal integrasyon için de düşük ya da yüksek mertebeden çözümler mümkündür.

5.1.4.3. Sınır Koşulları

Kapalı sınırlar boyunca normal akı değerleri tüm değişkenler için sıfırdır. Açık sınırlarda ise hidrodinamik model için sınır koşulları birim deşarj ya da suyüzü değişimi olarak tanımlanabilmektedir. Taşınım denklemleri için ise belirli bir değer ya da belirli bir değişim tanımlanabilmektedir.

5.2. Ecolab Modeli

5.2.1 Matematiksel Temelleri

Ecolab DHI tarafından geliştirilmiş olan sayısal modelleme yazılımlarının bir parçasıdır. Sucul ekosistemlerde su kalitesi, ötrofikasyon, ağır metaller ve ekolojik benzetimler gibi amaçlarla kullanılabilen oldukça geniş kapsamlı bir sayısal araçtır.

Ecolab, Mike benzetim yazılımları ile birlikte çalışmaktadır. Bu yazılım kimyasal ve ekosistem durum değişkenleri arasındaki etkileşim ve süreçleri tanımlamak amacıyla geliştirilmiştir. Yine durum değişkenlerinin sedimentasyonuna dair fiziksel süreçler de tanımlanabilmektedir.

Yine Ecolab modeli Adveksiyon-Dispersiyon modeli ile birlikte çalıştırılarak adveksiyon-dispersiyon süreçleri ile taşınım mekanizmalarının da Ecolab benzetiminde dikkate alınması sağlanmaktadır.

Ekosistem durum değişkenleri Ecolab içerisinde her bir değişkenin değişim miktarını tanımlayan bir seri birbirine bağlı adi diferansiyel denklemlerle formüle edilmiştir. Ecolab durum değişkenlerine, maruz kaldıkları süreçlere ve birbirleriyle etkileşimlerine dair tüm bilgiler Ecolab şablonları içerisinde kullanıcıya sunulmaktadır.

5.2.2 Ecolab Adi Diferansiyel Denklemler Serisi

Genel olarak her bir durum değişkeni için bir adi diferansiyel denklem tanımlanmıştır (5.70).

Bu adi diferansiyel denklem ait olduğu durum değişkeninin maruz kaldığı süreçleri tanımlamaktadır. Eğer bu süreç birden fazla durum değişkenini de etkiliyorsa ya da durum değişkenleri birbirlerinin ortamdaki varlıklarından etkileniyorsa, bu durumda diferansiyel denklemler sistemi birbirine bağlıdır.

Etkili süreçler bir takım sabitlere bağlı matematiksel ifadeler ve etkili kuvvetler de içerebilmektedir. Söz konusu bu sabitlerin ve etkili kuvvetlerin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Bu süreçler daima durum değişkenlerine ait konsantrasyonların

değişim miktarını tanımlamaktadır.

$$P_c = \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^n \text{süreç}_i \quad (5.70)$$

Burada; c Ecolab durum değişkeninin konsantrasyonunu ve n belirli bir durum değişkeni üzerinde etkili olan süreçlerin sayısını göstermektedir.

Ecolab Diferansiyel Denklemi Örneği:

Buradaki örnekte Siyanidin sadece sıcaklığa bağlı bir azalmaya maruz olduğu kabul edilmiştir.

$$\frac{dc_{\text{siyanid}}}{dt} = -\text{azalma}$$

$$\text{azalma} = K \cdot \Theta^{(\text{sıcaklık} - 20)} \cdot c_{\text{siyanid}}$$

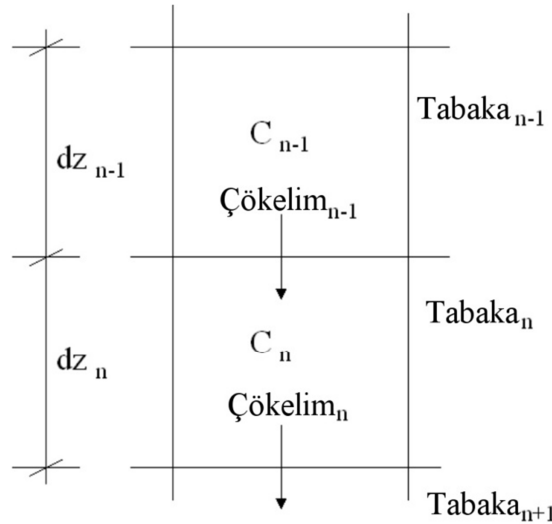
Burada K azalma katsayısı (gün^{-1}) ve Θ ise Arrhenius sıcaklık katsayısıdır.

Ecolab modellerinde iki tür süreç dikkate alınmaktadır: dönüşüm ve çökelim süreçleri. Dönüşüm herhangi bir sürecin komşu hücrelere bağlı olmayan noktasal bir tanımıdır. Çökelim ise durum değişkenlerinin komşu hücreler arasında su kolonu boyunca aşağıya doğru taşındığı bir süreçtir. Bu nedenle çökelim sürecinde bir durum değişkeninin konsantrasyonunun hesabı komşu hücrelerdeki değerlere bağlıdır. Yine modelde su kolonu içerisindeki ışık geçirgenliği de bu süreçler dışında özel bir ifade ile ele alınmaktadır. Model bazı süreçleri de su kolonu içerisinde belirli bir noktada dikkate almaktadır. Örneğin havalanma süreci yalnızca su yüzeyinde dikkate alınmaktadır. Diğer derinliklerde bu süreç dikkate alınmaz.

Tabakalı modellerde model alanı içerisinde düşey doğrultudaki hareketlerin hesabı alt ve üst tabakalara dair bilgi gerektirmektedir. Ecolab modelinde düşey hareket içeren süreç çökelimdir. Bu süreç durum değişkeninin su kolonu içerisinde tabana doğru taşınımını sağlamaktadır. Bu nedenle dönüşüm süreçlerindeki benzer, hücreden hücreye konsantrasyon değişimini $[\text{mg/l/d}]$ içeren bir ifade modele dahil edilmektedir. Çökelim sürecini dikkate alan bir diferansiyel denklem çözülürken Ecolab modeli çökelim sürecine dair ifadeyi (5.71)'de görüldüğü gibi denkleme dahil etmektedir.

$$\frac{dc_n}{dt} = \frac{-\text{çöke lim}_{n-1} \cdot dz_{n-1} + \text{çöke lim}_n \cdot dz_n}{dz_n} \quad (5.71)$$

Burada, çökelim_{n-1} , $n-1$. tabakadan n . tabakaya taşınan durum değişkeninin konsantrasyonundaki değişim miktarı için kullanıcı tarafından tanımlanan ifadedir. Genellikle $n-1$. tabakadaki konsantrasyonun bir fonksiyonu şeklinde tanımlanmaktadır. çökelim_n , n . tabakadan $n+1$. tabakaya taşınan durum değişkeninin konsantrasyonundaki değişim miktarı için kullanıcı tarafından tanımlanan ifadedir. Genellikle n . tabakadaki konsantrasyonun bir fonksiyonu şeklinde tanımlanmaktadır. dz_n ve dz_{n-1} ise sırasıyla n . ve $n-1$. tabakaların kalınlıklarıdır. Çökelim sürecinin şematik tarifi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Çökelim sürecinin şematik tarifi.

5.2.3 AD Araçları ile Entegrasyon

Advectif Ecolab durum değişkenlerinin dinamikleri, bir seri taşınım denklemleri ile ifade edilebilmektedir. Bu denklemler korunumlu olmayan kirletici halinde (5.72)’de gösterildiği gibi ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S_c + P_c \quad (5.72)$$

Burada c Ecolab durum değişkeninin konsantrasyonunu, u , v , w akımın hız bileşenlerini, D_x , D_y , D_z dispersiyon katsayılarını, S_c kaynak ve kuyuları, P_c ise Ecolab sürecini göstermektedir.

Durum değişkenleri Ecolab sürecini temsil eden P_c terimi içerisinde birbirleriyle doğrusal ya da doğrusal olmayan bağlantılar kurabilmektedir.

Taşınım denklemi tekrar düzenlenerek (5.73) elde edilmektedir.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = AD_c + P_c \quad (5.73)$$

Burada AD_c terimi durum değişkeninin konsantrasyonunda kaynak ve kuyular, adveksiyon ve dispersiyon süreçleri ile meydana gelen değişim miktarını temsil etmektedir.

Ecolab modeli yukarıdaki taşınım denklemlerinin zamansal integrasyonunu açık şema ile gerçekleştirmektedir.

Ecolab'da yaklaşık çözüm adveksiyon-dispersiyon teriminin AD_c herbir zaman adımında sabit kabul edilmesiyle elde edilmektedir.

Ecolab içerisinde tanımlanmış olan adi diferansiyel denklemler serisi hem ECO Lab süreçleri hem de adveksiyon-dispersiyon süreçleri ile meydana gelen değişim miktarının integrasyonu ile çözülmektedir (5.74).

$$c(t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} (P_c(t) + AD_c) \partial t \quad (5.74)$$

Adveksiyon-dispersiyonun katkısı da yaklaşık ifade ile elde edilmektedir (5.75).

$$AD_c = \frac{c^*(t + \Delta t) - c^n(t)}{\Delta t} \quad (5.75)$$

Burada ara konsantrasyon c^* korunumlu Ecolab durum değişkeninin Δt süresi içerisinde AD modülü ile taşınımından elde edilmektedir.

Taşınım denklemlerinin çözümünde kapalı şemanın kullanımı Ecolab içerisinde henüz mümkün değildir.

5.2.4 İntegrasyon Metodları

Ecolab modülü içerisinde şu integrasyon metodları mevcuttur: Euler, Runge Kutta 4, Kalite kontrollü Runge Kutta.

Euler İntegrasyon Metodu

Adi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan çok kolay bir çözüm yöntemidir. Euler metodu için genel ifade (5.76)'da verildiği gibidir.

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot f(x_n, y_n) \quad (5.76)$$

Bu ifade x_n 'den $x_{n+1} = x_n + h$ 'e y çözümünü hesaplamaktadır.

5.2.5 4. Mertebeden Runge Kutta

Adi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan klasik bir sayısal yöntemdir. Genellikle

Euler Metoduna göre daha yüksek bir doğruluğa sahiptir. Ancak uzun benzetim zamanları gerektirmektedir. 4. mertebeden Runge Kutta metodu her bir zaman adımında beş aşamada işlem yapmaktadır. Bu aşamalar (5.77), (5.78), (5.79), (5.80) ve (5.81)'de gösterilmiştir.

$$k_1 = h \cdot f(x_n, y_n) \quad (5.77)$$

$$k_2 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (5.78)$$

$$k_3 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \quad (5.79)$$

$$k_4 = h \cdot f(x_n + h, y_n + k_3) \quad (5.80)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} - O(h^5) \quad (5.81)$$

5.2.6 5. Mertebeden Kalite Kontrollü Runge Kutta

Yine adi diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Doğruluğu değerlendirilmekte ve eğer yeterli bulunmazsa düzeltilmektedir.

Her bir zaman adımı için fonksiyon altı aşamada hesaplamaktadır. Buraya kadar yöntem Cash-Karp Runge Kutta adımı olarak anılmaktadır. Daha sonra bu sonuç ile 4. mertebeden Runge Kutta arasındaki hata hesaplanmakta ve bu nedenle çözüm 5. mertebeden Runge Kutta çözümü olarak adlandırılmaktadır.

5.2.7 Ecolab'ın Bilimsel Altyapısı

Ecolab model şablonları su kirlenmesi ve çevresel problemlerle ilişkili fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri tanımlamaktadır. Şablonlar bakteri gibi suyun kalitesini tehdit eden bazı değişkenlerin konsantrasyonlarını, BOİ deşarjlarına bağlı olarak oksijen konsantrasyonundaki düşüşü, besi maddelerinin konsantrasyonlarındaki artışı, klorofil-besi maddesi etkileşimleri ve kimyasal bileşiklerin indirgenmesi gibi olayları tanımlamaktadır.

Ecolab adveksiyon-dispersiyon süreçlerini de içermektedir. Adveksiyon dispersiyon şemalarını kullanarak, incelenen parametrenin model alanı içerisinde her bir düğüm noktasındaki taşınımını benzeştirmektedir. Yine model sınırlarındaki konsantrasyonlar, deşarj noktalarındaki akım ve kirlilik parametreleri ile sıcaklık gibi verilere de modelde gereksinim duyulmaktadır.

Ecolab süreç denklemlerini “integrated two-step procedure” içerisinde “rational extrapolation

method” kullanarak adveksiyon-dispersiyon modeli ile çözmektedir. Burada sadece su kalitesi süreçleri tanımlanmış ve denklemleri verilmiştir.

Su kalitesi şablonları çeşitli çevresel araştırmalar için kullanılabilir:

- Evsel atıksu deşarjlarından ya da başka kaynaklardan ileri gelen bakteriyel kirlenme durumları ile ilgili çalışmalar,
- Farklı çevresel koşullara bağlı olarak bakterilerin yaşam sürelerinin belirlenmesi,
- BOİ, amonyak ve oksijen tüketimine neden olan diğer bazı maddelerin varlığından etkilenen ortamdaki oksijen koşullarının belirlenmesinde,
- Amonyak, nitrit, nitrat ve fosfat gibi inorganik maddeler arasındaki etkileşimler, yayılma, bozunma olaylarının araştırılmasında,
- Besi maddesi (azot ve fosfor) ve klorofil-a seviyelerindeki değişimlere bağlı olarak ötrofikasyon gelişme potansiyelinin belirlenmesi,
- Kimyasal maddelerin bozunması ve sonuç konsantrasyonları esasına dayanılarak etki değerlendirilmesi.

5.2.8 Matematiksel Formülasyonlar

Mike3 Ecolab şablonları tarafından aşağıdaki değişkenlerin modellenmesi mümkündür:

Çözünmüş BOİ	BOD _d
Askıda BOİ	BOD _s
Katı madde içerisindeki BOİ	BOD _b
Amonyak (NH ₄ ⁺ -N)	NH ₃
Nitrit (NO ₂ ⁻ -N)	NO ₂
Nitrat (NO ₃ ⁻ -N)	NO ₃
Çözünmüş Oksijen	ÇO
Fosfor	PO ₄
Fekal Koliform	C _F
Toplam Koliform	C _T

Kullanıcı tarafından tanımlanan diğer değişkenler (UDP₁, ...)

Bu parametrelere ait süreçler ve konsantrasyonlar güneş radyasyonu ve deşarjlar gibi dış faktörlerden etkilenebilmektedir.

Yukarıda adı geçen değişkenler en yüksek esnekliği sağlamak için farklı kombinasyonlar halinde modellenenilmektedir. Böylece farklı zorluk seviyelerinde modeller oluşturulabilmektedir. En basit model seviyesinde sadece BOİ ve ÇO modellenirken, en karmaşık model seviyesi tüm değişkenleri içermektedir.

Oksijen

Oksijen dengesi seçilen zorluk derecesiyle ilgilidir. Çözünmüş oksijen kütle dengesi için 4 zorluk seviyesi mevcuttur:

Seviye 1, Oksijen, basit tanımlama (5.82)'deki ifade ile yapılabilir.

$$\frac{d\text{ÇO}}{dt} = +\text{havalanma (sadece su yüzeyinde)} - \text{BOİ azalımı} + \text{fotosentez} - \text{solunum} - \text{katı madde oksijen ihtiyacı (sadece tabanda)} \quad (5.82)$$

Seviye 2, Oksijen, genişletilmiş tanımlama (5.83)'te gösterilmiştir.

$$\frac{d\text{ÇO}}{dt} = +\text{havalanma (sadece su yüzeyinde)} - \text{BOİ azalımı (1 ya da 3 bölüm)} + \text{fotosentez} - \text{solunum} - \text{katı madde oksijen ihtiyacı (sadece tabanda)} \quad (5.83)$$

Seviye 3, Oksijen besin maddeleri ile birlikte (5.84)'te gösterilmiştir.

$$\frac{d\text{ÇO}}{dt} = +\text{havalanma (sadece su yüzeyinde)} - Y_1 \text{ nitrifikasyon (Y}_1\text{: oksijen verim faktörü)} - \text{BOİ azalımı (1 ya da 3 bölüm)} + \text{fotosentez} - \text{solunum} - \text{katı madde oksijen ihtiyacı (sadece tabanda)} \quad (5.84)$$

Seviye 4, Oksijen besin maddeleri ve klorofil ile birlikte (5.85)'te gösterilmiştir.

$$\frac{d\text{ÇO}}{dt} = +\text{havalanma (sadece su yüzeyinde)} - Y_1 \text{ nitrifikasyon (Y}_1\text{: oksijen verim faktörü)} - \text{BOİ azalımı (1 ya da 3 bölüm)} + \text{fotosentez } F(N,P) \text{ (potansiyel besin maddesi kısıtlaması)} - \text{solunum} - \text{katı madde oksijen ihtiyacı (sadece tabanda)} \quad (5.85)$$

Oksijen Süreçleri

Havalanma su içerisindeki çözünmüş oksijen ile atmosfer arasındaki değişimi tanımlayan süreçtir. İlgili ifade su içerisinde oksijenin doymunluk seviyesini (C_s) esas almaktadır. Bu da suyun tuzluluk ve sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir.

Oksijen dengesini etkileyen bir diğer süreç de nitrifikasyondur. Çünkü nitrifikasyon sürecinde

amonyak nitrite dönüşürken oksijen tüketilmektedir.

Fotosentez sürecinde ise oksijen üretilmektedir. Bu süreç maksimum üretimin öğle vakti gerçekleştiği esasına dayanılarak işlemektedir. Yine üretim gününün farklı zamanlarında değişiklik göstermekte ve gün uzunluğuna göre de değişmektedir.

Sucul ortamda yaşayan ototrof ve heterotrof canlılar tarafından solunum yoluyla oksijen tüketilmektedir. Solunum yoluyla oksijen tüketim miktarı da yine sıcaklığa bağlıdır.

Sucul ortamda oksijen tüketimine neden olan bir başka süreç de yine organik maddenin bozunması sürecidir. Ortamdaki organik madde miktarı, oksijen konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlıdır.

Kirletici kaynaklarından gelmeyen organik malzemenin bozunmasına bağlı olarak ortaya çıkan katı madde oksijen ihtiyacı ayrıca tanımlanmıştır. Katı madde oksijen ihtiyacının sadece oksijen konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlı olduğu kabul edilmektedir. Düşük oksijen konsantrasyonlarında bu süreçleri benzeştirebilmek için Michaelis-Menten ifadesi kullanılmaktadır ((5.86), (5.87), (5.88), (5.89), (5.90), (5.91), (5.92), (5.93), (5.94) ve (5.95)).

$$\text{Havalanma} = K_2 (C_s - \zeta \text{CO}) \quad (5.86)$$

$$\text{Nitrifikasyon} = K_4 \cdot NH_3 \cdot \theta_4^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta \text{CO}}{\zeta \text{CO} + HS_nitr} \quad (5.87)$$

$$\text{Fotosentez} = \begin{cases} P_{max} \cdot F_1(H) \cdot \cos 2\pi(\tau / a) \cdot \theta_1^{(T-20)}, & \text{eger } \tau \in [t_{up}, t_{down}] \\ 0 & , \text{eger } \tau \notin [t_{up}, t_{down}] \end{cases} \quad (5.88)$$

$$\text{Solunum} = R_1 \cdot F_1(H) \cdot \theta_1^{(T-20)} + R_2 \cdot \theta_2^{(T-20)} \quad (\text{seviye 1-3}) \quad (5.89)$$

$$\text{Solunum} = R_1 \cdot F_1(H) \cdot F(N, P) \cdot \theta_1^{(T-20)} + R_2 \cdot \theta_2^{(T-20)} \quad (\text{seviye 4}) \quad (5.90)$$

$$\text{BOI indirgenmesi} = K_3 \cdot \text{BOI} \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta \text{CO}}{\zeta \text{CO} + HS_BOI} \quad (5.91)$$

$$\text{BOI}_d \text{ indirgenmesi} = K_{d3} \cdot \text{BOI}_d \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta \text{CO}}{\zeta \text{CO} + HS_BOI} \quad (5.92)$$

$$\text{BOI}_s \text{ indirgenmesi} = K_{s3} \cdot \text{BOI}_s \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta \text{CO}}{\zeta \text{CO} + HS_BOI} \quad (5.93)$$

$$\text{BOI}_b \text{ indirgenmesi} = K_{b3} \cdot \text{BOI}_b \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta \text{CO}}{\zeta \text{CO} + HS_BOI} \quad (5.94)$$

$$\text{Katı madde oksijen ihtiyacı} = \frac{\zeta O}{HS_SOD + \zeta O} \cdot \theta_3^{(T-20)} \quad (5.95)$$

Fotosentezdeki besi maddesi kısıtlaması potansiyeli besi maddesi kısıtlama fonksiyonu ile tanımlanmaktadır (5.96).

$$F(N, P) = \frac{2}{\frac{IN}{IN + KSN} + \frac{PO_4}{PO_4 + KSP}} \quad (5.96)$$

Su içerisindeki oksijenin doygunluk seviyesi tuzluluk ve sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve (5.97)'deki ampirik ifade ile verilmektedir.

$$C_s = 14.652 - 0.0841.S + T \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0.00256.S - 0.41022 \\ + T \cdot (0.007991 - 0.0000374.S - 0.000077774.T) \end{array} \right\} \quad (5.97)$$

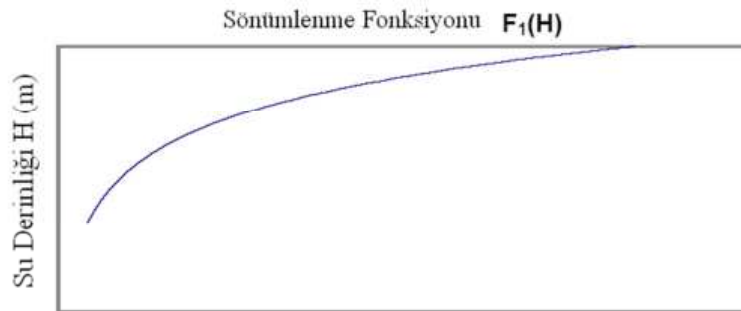
Havalanma sürecinde K_2 katsayısı rüzgar hızı W_v , akım hızı $\bar{V}$ ve su derinliği H 'a bağlıdır (5.98).

$$\begin{aligned} K_2 &= 3.93.V^{0.5} / H^{1.5} + W / H \text{ (1/s)} \\ W &= 0.728.W_v^{0.5} - 0.371.W_v + 0.0372.W_v^2 \text{ (m/s)} \end{aligned} \quad (5.98)$$

Fotosentez ile oksijen üretimi ve ototrofik solunum, ototrofların ışık gereksinimlerine bağlı olarak su derinliğiyle değişmektedir. Mike3'te derinlik değişimi Lambert Beer Law kullanılarak modellenmektedir. Bu ifade de ışığın su kolonu boyunca sönümlenmesini tanımlayan ışık sönümlenme katsayısını gerektirmektedir. Lambert Beer Law ya da ışık sönümlenme fonksiyonu (5.99)'da gösterilmiştir.

$$F_1(H) = e^{-k.H} \quad (5.99)$$

Şekil 5.3'te su derinliğine karşılık ışık sönümlenme fonksiyonunun değişimini göstermektedir.



Şekil 5.3 Su kolonu içerisinde ışığın sönümlenmesi fonksiyonu

Biyolojik Oksijen İhtiyacı

Organik madde için kütle dengesi ifade edilirken BOİ'nin dikkate alınacak türlerine göre bir ya da üç denklem kullanılabilir.

Biyolojik Oksijen İhtiyacı Dengesi

Sadece bir tür BOİ'nin dikkate alınması halinde (5.100) ifadesi yazılabilir.

$$\frac{dBOI}{dt} = -BOI_{azalma} \quad (5.100)$$

Üç tür BOİ'nin dikkate alınması halinde, eğer çözünmüş, askıda ve katı madde halindeki BOİ seçilmiş ise denge denklemleri (5.101)'de gösterildiği gibi olmaktadır.

Çözünmüş BOİ konsantrasyonunu tanımlayan denge ifadesi,

$$\frac{dBOI_d}{dt} = -BOI_d azalma \quad (5.101)$$

Askıda BOİ konsantrasyonunu tanımlayan denge ifadesi (5.102)'de gösterilmiştir.

$$\frac{dBOI_s}{dt} = -BOI_s azalma - resuspension + sedimentasyon \quad (5.102)$$

Katı madde halindeki BOİ konsantrasyonunu tanımlayan denge ifadesi (5.103)'te gösterilmiştir.

$$\frac{dBOI_b}{dt} = -BOI_b azalma - resuspension + sedimentasyon \quad (5.103)$$

BOİ süreçleri (5.104), (5.105), (5.106) ve (5.107)'de gösterilmiştir.

$$BOI_{azalımı} = -K_3 \cdot BOI \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta O}{\zeta O + HS - BOI} \quad (5.104)$$

$$BOI_d azalımı = -K_{d3} \cdot BOI_d \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta O}{\zeta O + HS - BOI} \quad (5.105)$$

$$BOI_s azalımı = -K_{s3} \cdot BOI_s \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta O}{\zeta O + HS - BOI} \quad (5.106)$$

$$BOI_b azalımı = -K_{b3} \cdot BOI_b \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta O}{\zeta O + HS - BOI} \quad (5.107)$$

Resuspension, S_1 , akım hızının ($\bar{V}$), kritik bir değeri aştığı ($\bar{V}_1$) anda gerçekleşmektedir (5.108). Resuspension zaman içerisinde sabit olarak meydana gelmektedir. Akım hızı kritik değerin altına düştüğünde ise sedimantasyon meydana gelmektedir.

$$\text{resuspension} = S_1 \cdot \text{BOI}_b / H \quad (5.108)$$

Akıda haldeki BOİs'in katı madde haline geçmesi akım hızının ($\bar{V}$), kritik bir akım hızının ($\bar{V}_1$) altına düşmesiyle gerçekleşmektedir. Birinci mertebeden bir süreç olarak tanımlanmaktadır (5.109).

$$\text{sedimantasyon} = K_s \cdot \text{BOI}_s / H \quad (5.109)$$

Amonyum

Amonyum Dengesi

Amonyum kütle dengesini tanımlayan denge ifadesi (5.110)'da gösterilmiştir.

$$\frac{d\text{NH}_3}{dt} = +\text{BOI bozunumundan kaynaklanan amonyum} - \text{nitrata dönüşen amonyum} - \text{bitkilerce tüketilen amonyum} - \text{bakterilerce tüketilen amonyum} + \text{heterotrofların solunumu} \quad (5.110)$$

Amonyum Süreçleri

BOİ bozunumu sonucu amonyum üretimi, bir bölüm ya da üç bölüm BOİ dikkate alınması halinde sırasıyla (5.111) ve (5.112) denklemleri ile ifade edilebilmektedir.

$$\text{BOİ azalımı} = Y_{\text{BOI}} \cdot K_3 \cdot \text{BOI}_3^{\theta_3^{(T-20)}} \cdot \frac{\text{ÇO}}{\text{ÇO} + \text{HS} - \text{BOI}} \quad (5.111)$$

$$\begin{aligned} & + Y_b \cdot K_{b3} \cdot \text{BOI}_b \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{\text{ÇO}}{\text{ÇO} + \text{HS} - \text{BOI}} \\ \text{BOİ azalımı} = & + Y_d \cdot K_{d3} \cdot \text{BOI}_d \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{\text{ÇO}}{\text{ÇO} + \text{HS} - \text{BOI}} \\ & + Y_s \cdot K_{s3} \cdot \text{BOI}_s \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{\text{ÇO}}{\text{ÇO} + \text{HS} - \text{BOI}} \end{aligned} \quad (5.112)$$

Nitrifikasyon sürecinde amonyumun nitarata dönüşümü (5.113) ifadesi ile tanımlanmaktadır.

$$\text{Amonyumun Nitrata Dönüşümü} = K_4 \cdot \text{NH}_3 \cdot \theta_4^{T-20} \quad (5.113)$$

Bitkiler tarafından amonyum tüketimi (1.-3.) seviyeler için (5.114) ve 4. seviye için (5.115) ifadeleri ile tanımlanmaktadır.

$$\text{Bitkiler tarafından amonyum tüketimi} = UN_p \cdot (P - R_1 \cdot \theta_1^{(T-20)}) \quad (1.-3.\text{seviye}) \quad (5.114)$$

$$\text{Bitkiler tarafından amonyum tüketimi} = UN_p \cdot (P - R_1 \cdot \theta_1^{(T-20)}) \cdot F(N, P) \quad (4.\text{seviye}) \quad (5.115)$$

Bakteriler tarafından amonyum tüketimi BOİ'nin 1 bölümünün dikkate alınması halinde (5.116) ve 3 bölümünün dikkate alınması halinde ise (5.117) ifadeleri ile tanımlanmaktadır.

$$\text{Bakteriler tarafından amonyum tüketimi} = UN_b \cdot K_3 \cdot BOİ_3 \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot \frac{NH_3}{NH_3 + HS - NH_3} \quad (5.116)$$

$$\begin{aligned} & UN_b \cdot K_{b3} \cdot BOİ_{b3} \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{NH_3}{NH_3 + HS - NH_3} \\ \text{Bakteriler tarafından amonyum tüketimi} = & +UN_b \cdot K_{d3} \cdot BOİ_{d3} \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{NH_3}{NH_3 + HS - NH_3} \quad (5.117) \\ & +UN_b \cdot K_{s3} \cdot BOİ_{s3} \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{NH_3}{NH_3 + HS - NH_3} \end{aligned}$$

Son olarak heterotrof organizmalar tarafından solunum yoluyla bir miktar amonyum girdisi sağlanmaktadır (5.118).

$$\text{Heterotrof Organizmaların Solunumu} = UN_p \cdot R_2 \cdot \theta_2^{(T-20)} \quad (5.118)$$

Burada BOİ azalımı terimi verim faktörü Y dışında oksijen ve BOİ dengesinde verildiği gibidir. Y, BOİ azalımından elde edilen amonyum miktarıdır.

Nitrit

Nitrit Dengesi

Nitrit kütle dengesini etkileyen reaksiyonlar (5.119)'da verilmiştir.

$$\frac{dNO_2}{dt} = +\text{amonyumun nitrite dönüşümü} - \text{nitritin nitrata dönüşümü} \quad (5.119)$$

Nitrit Süreçleri

$$\text{Amonyumun Nitrite Dönüşümü} = K_4 \cdot NH_3 \cdot \theta_4^{(T-20)} \cdot \frac{\zeta O}{\zeta O + HS - \text{nitr}} \quad (5.120)$$

$$\text{Nitritin Nitrata Dönüşümü} = K_5 \cdot NO_2 \cdot \theta_5^{(T-20)} \quad (5.121)$$

Nitrat

Nitrat Dengesi

Nitrat kütle dengesini etkileyen reaksiyonlar (5.122)'de verilmiştir.

$$\frac{dNO_2}{dt} = +\text{amonyumun nitrite dönüşümü} - \text{nitritin nitrata dönüşümü} \quad (5.122)$$

Nitrat Süreçleri

Nitritin Nitrata dönüşümüne dair süreç (5.121)'de verildiği gibidir. Denitrifikasyon süreci ise (5.123)'teki ifade ile verilebilir.

$$\text{Denitrifikasyon} = K_6 \cdot NO_3 \cdot \theta_6^{(T-20)} \quad (5.123)$$

Fosfor

Fosfor Dengesi

BOİ fosfor içermektedir. BOİ bozunumu sırasında bu fosfor ortofosfat halinde açığa çıkmaktadır.

Alg üretimi sırasında ortofosfat tüketimi dikkate alındığında ortofosfat konsantrasyonları için temel denklem (5.124)'te gösterildiği gibi olmaktadır.

$$\frac{dPO_4}{dt} = +\text{BOİ bozunumu ile açığa çıkan fosfor} - \text{bitkilerce tüketilen fosfor} - \text{bakterilerce tüketilen fosfor} - \text{heterotrof organizmaların solunumu ile tüketilen fosfor}. \quad (5.124)$$

Fosfor Süreçleri

BOİ bozunumu sırasında açığa çıkacak fosfor, BOİ'nin 1 bölümünün ya da üç bölümünün dikkate alınması hali için sırasıyla (5.125) ve (5.126)'da verilen eşitlikler ile tanımlanmaktadır.

$$\text{BOİ bozunumundan açığa çıkan Fosfor} = K_3 \cdot BOI \cdot Y_2 \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4} \quad (5.125)$$

$$+ K_{b3} \cdot BOI_b \cdot Y_{b2} \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4}$$

$$\text{BOİ bozunumundan açığa çıkan Fosfor} = +K_{d3} \cdot BOI_d \cdot Y_{d2} \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4} \quad (5.126)$$

$$+ K_{s3} \cdot BOI_s \cdot Y_{s2} \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4}$$

Bitkiler tarafından fosfor tüketimine dair ifade (5.127)'de verilmiştir.

$$\text{Bitkiler tarafından Fosfor tüketimi} = UP_p \cdot (P - R_1 \cdot \theta_1^{(T-20)}) \cdot F(N, P) \quad (5.127)$$

Bakteriler tarafından fosfor tüketimi ifadeleri ise BOİ'nin 1 bölümünün ya da 3 bölümünün dikkate alınması halleri için sırasıyla (5.128) ve (5.129)'da verilmiştir.

$$\text{Bakteriler tarafından Fosfor tüketimi} = UP_b \cdot K_3 \cdot BOI_3 \cdot \theta_3^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4} \quad (5.128)$$

$$+ UP_b \cdot K_{b3} \cdot BOI_b \cdot \theta_{b3}^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4}$$

$$\text{Bakteriler tarafından Fosfor tüketimi} = +UP_b \cdot K_{d3} \cdot BOI_d \cdot \theta_{d3}^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4} \quad (5.129)$$

$$+ UP_s \cdot K_{s3} \cdot BOI_s \cdot \theta_{s3}^{(T-20)} \cdot \frac{PO_4}{PO_4 + HS - PO_4}$$

Son olarak heterotrof organizmaların solunumu yoluyla tüketilen fosfor ise (5.130)'da verilen ifade ile elde edilmektedir.

$$\text{Heterotrof organizmaların solunumu ile tüketilen Fosfor} = UP_p \cdot R_2 \cdot \theta_2^{(T-20)} \quad (5.130)$$

Klorofil-a

Klorofil-a Dengesi

Klorofil-a üretiminin karbon ve oksijen üretimi ile orantılı olduğu kabul edilmiştir. Klorofil-a/Karbon oranı için sabit bir değer kabul edilmiştir. Klorofil-a'nın tüketimi ve sedimantasyonu da modelde dikkate alınmıştır ((5.131) ve (5.132)).

$$\frac{dKlo}{dt} = +\text{net klorofil üretimi} - \text{klorofil tüketimi} - \text{klorofilin sedimantasyonu} \quad (5.131)$$

$$\frac{dKlo}{dt} = +(P - R_1 \theta_1^{(T-20)}) \cdot K_{11} \cdot F(N, P) \cdot K_{10} - K_8 \cdot Klo - K_9 / H \cdot Klo \quad (5.132)$$

Bakterilere Dair Süreçler

Ecolab modeli Fekal Koliform ve Toplam Koliform bakterilerinin dağılım ve yayılımlarını tanımlamaktadır. Bakterilerin ölümü (5.133) ifadesi ile tanımlanmaktadır.

$$\text{Bakterilerin Ölümü} = \frac{dC_F}{dt} = -K_{dF} \cdot C_F \quad (5.133)$$

Burada azalma katsayısı sıcaklık ve tuzluluğa bağlı olduğu kadar ortamdaki ışık koşullarına da bağlıdır. Su kolonu içerisindeki ışık koşulları Beer Kanunu ile tanımlanan azalma

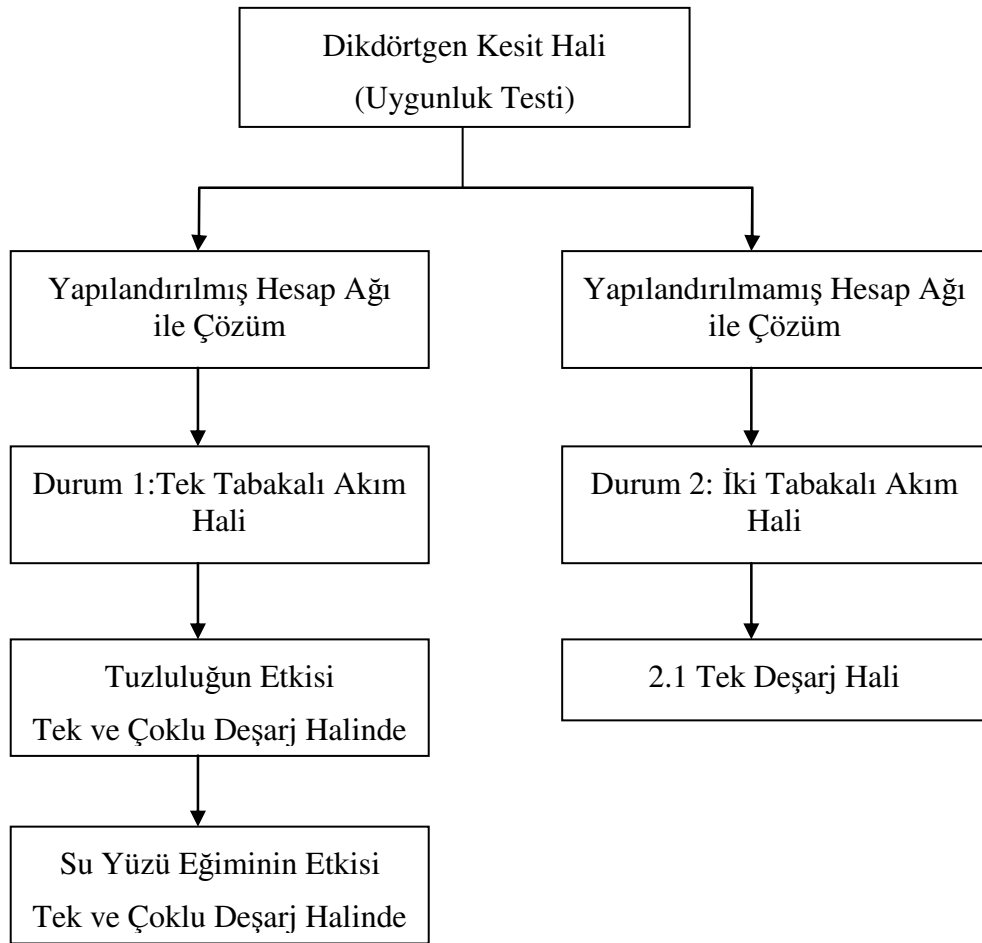
katsayısının belirlenmesinde en önemli faktördür (5.134).

$$f_z = f_0 \cdot e^{-\mu \cdot z} \quad (5.134)$$

6. İSTANBUL BOĞAZI SU KALİTESİNİN MODELLENMESİ

6.1. Uygunluk Analizi

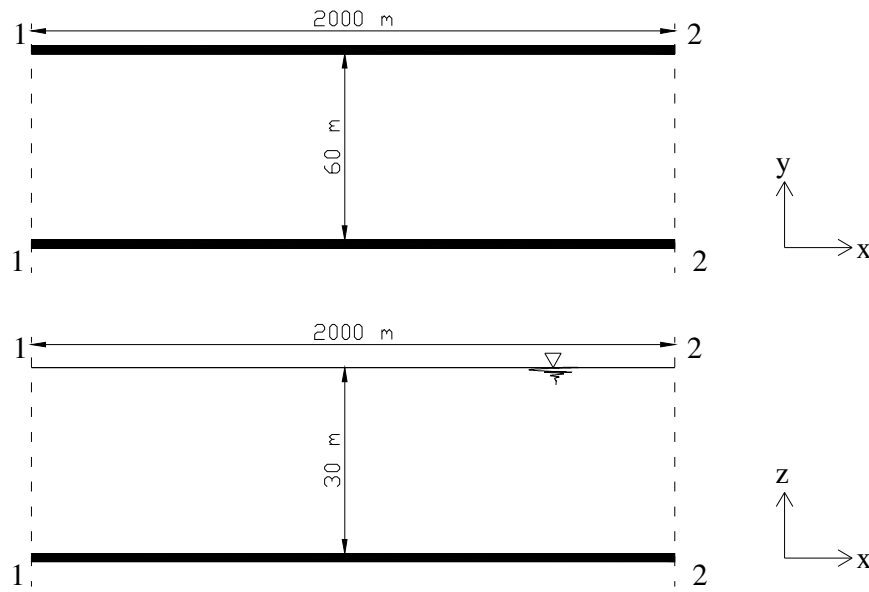
İstanbul Boğazı'nda su kalitesinin belirlenebilmesi için, öncelikle kullanılacak modelin Mike3 Hidrodinamik ve Ecolab modellerinin uygunluğunun ortaya konulması amacıyla basitleştirilmiş bir kanal geometrisi dikkate alınmış ve böylece bir dikdörtgen kanal üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Uygunluk testi çalışmaları Şekil 6.1'de gösterilen şema üzerinde özetlenmiştir.



Şekil 6.1 Uygunluk analizi testleri.

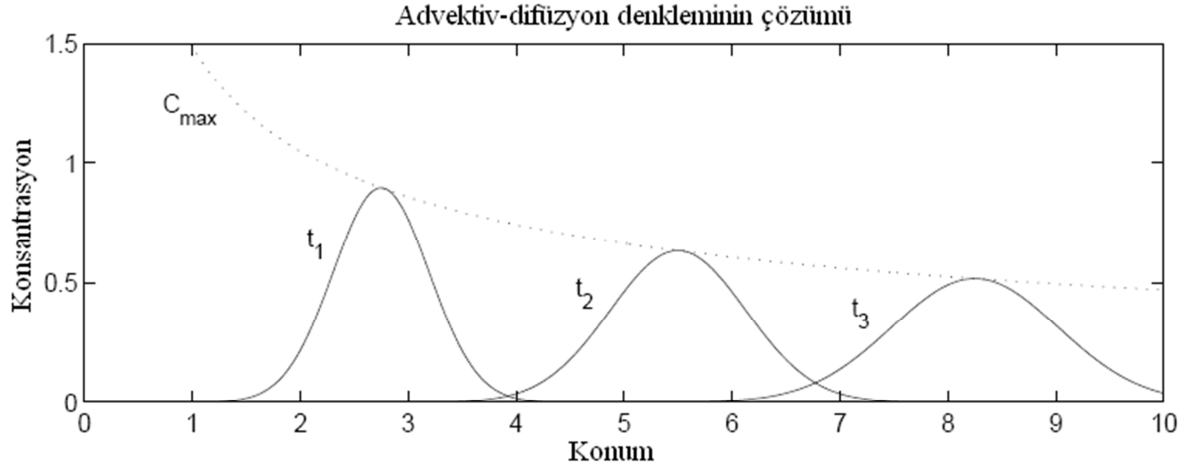
Geometrisi Şekil 6.2'de gösterilen kanalın 700. m'sinde tabanda yerleştirilmiş bir kaynaktan $9.64 \text{ m}^3/\text{s}$ debiye sahip atıksu deşarjı benzeştirilmiştir. Söz konusu deşarj 195 mg/l BOI konsantrasyonuna sahiptir ve ÇO içeriği ise 0'dır. Benzetimler sırasıyla Marmara Denizi ve Karadeniz'in tuzluluğunu temsil eden 18 psu ve 38 psu için 0.10 m, 0.20 m ve 0.30 m su seviyesi farkları için gerçekleştirilmiştir. Böylece su kalitesini temsil etmek üzere seçilen

Biyolojik Oksijen İhtiyacı ve Çözünmüş Oksijen parametrelerinin kanal içerisindeki dağılımlarının su seviyesi farkından ne şekilde etkilendiği ortaya koyulmuştur. Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de her bir benzetimin parametreleri verilmiştir. Bu aşamada mevcut olan Mike3 hidrodinamik modeli yapılandırılmış ağ ile çözüm yapmaktadır. Sonlu farklar yöntemini kullanmaktadır. Uygunluk analizinde ilk benzetimlerde sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılandırılmış ağ ile çözüm gerçekleştirilmiştir. İki tabakalı hidrodinamik modele geçildiğinde yapılandırılmamış ağ ile çözüm ve sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla çift tabakalı akım sonlu hacimler yöntemi kullanılarak yapılandırılmamış ağ ile modellenmiştir.



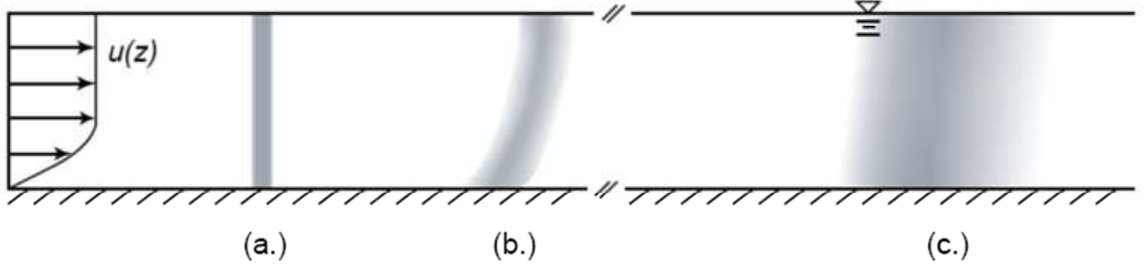
Şekil 6.2 Uygunluk analizi testlerinde dikkate alınan kanal plan ve kesiti

Kanalda yapılandırılmış ağ ile çözülen tek boyutlu akım koşullarında elde edilen dağılımlar, advectif difüzyon taşınımının bilinen dağılımına uymaktadır. Advectif difüzyon denkleminin çözümünden Şekil 6.3’de görülen zamana ve konuma bağlı değişim elde edilmektedir. Görüldüğü gibi atıksu difüzyon etkisiyle Gauss eğrisi şeklinde bir dağılım sergilemektedir. Bu dağılım moleküler difüzyon ve türbülans difüzyonunun etkisiyle oluşmaktadır. Türbülans difüzyonu moleküler difüzyona göre her zaman daha büyüktür. Oluşan bu Gauss eğrisi şeklindeki dağılım akımın etkisi ile kanal boyunca ilerler. Bu da adveksiyon olayı olarak adlandırılmaktadır. Adveksiyon ile taşınan dağılımın şekli devam eden difüzyon etkisiyle farklılaşmaya da devam etmektedir. Benzetimler sonucunda elde edilen dağılımlar literatürdeki (Yüksel, 1999) bu davranışla uyum içerisindedir.

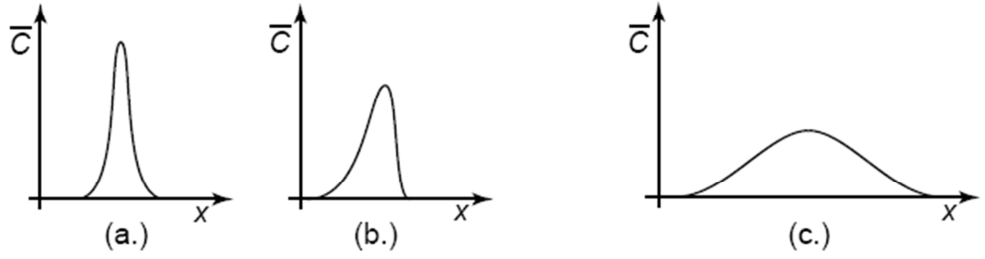


Şekil 6.3 Advektif- difüzyon denkleminin çözümü.

Kanal boykesiti



Derinlik ortalamalı konsantrasyon dağılımları

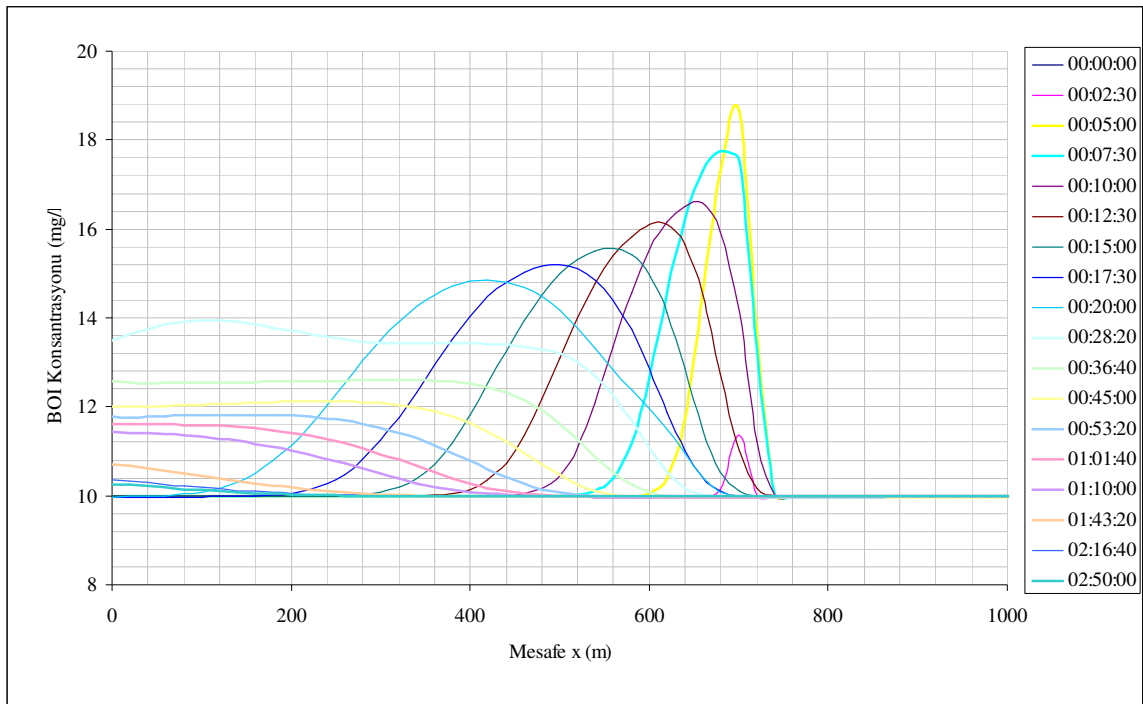


Şekil 6.4 Kanal içerisinde konsantrasyonun kanal boyunca farkı anlardaki dağılımı, dispersiyonu.

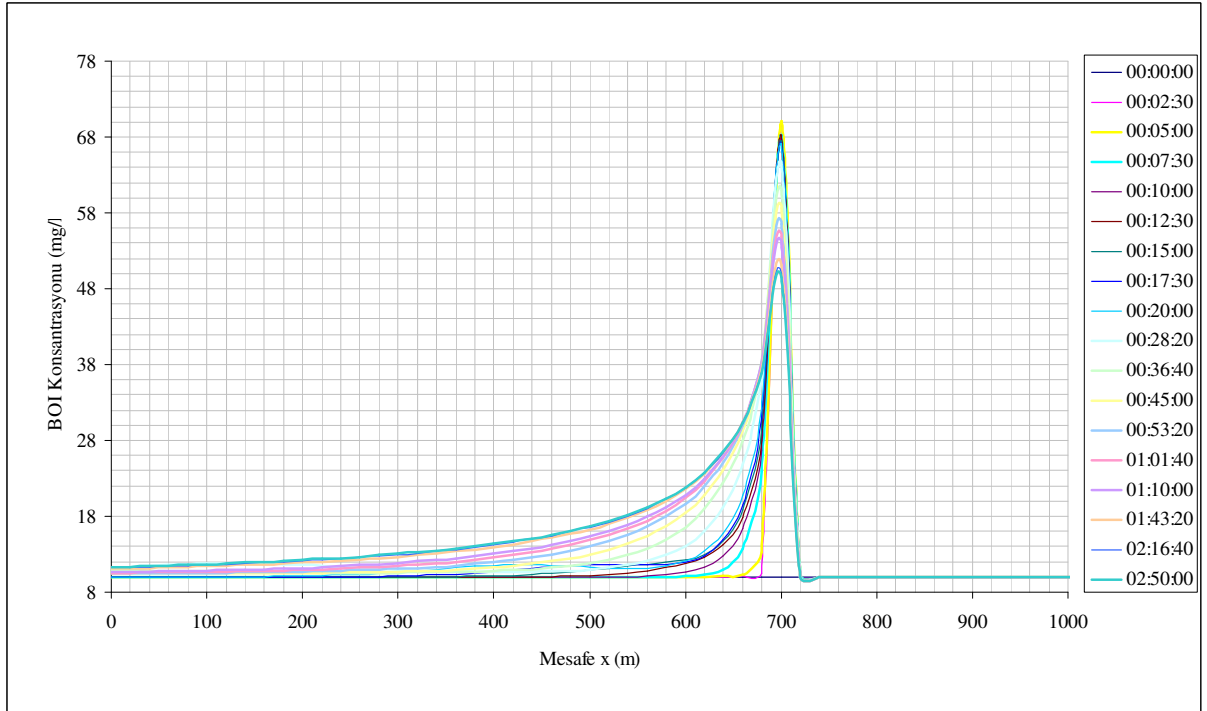
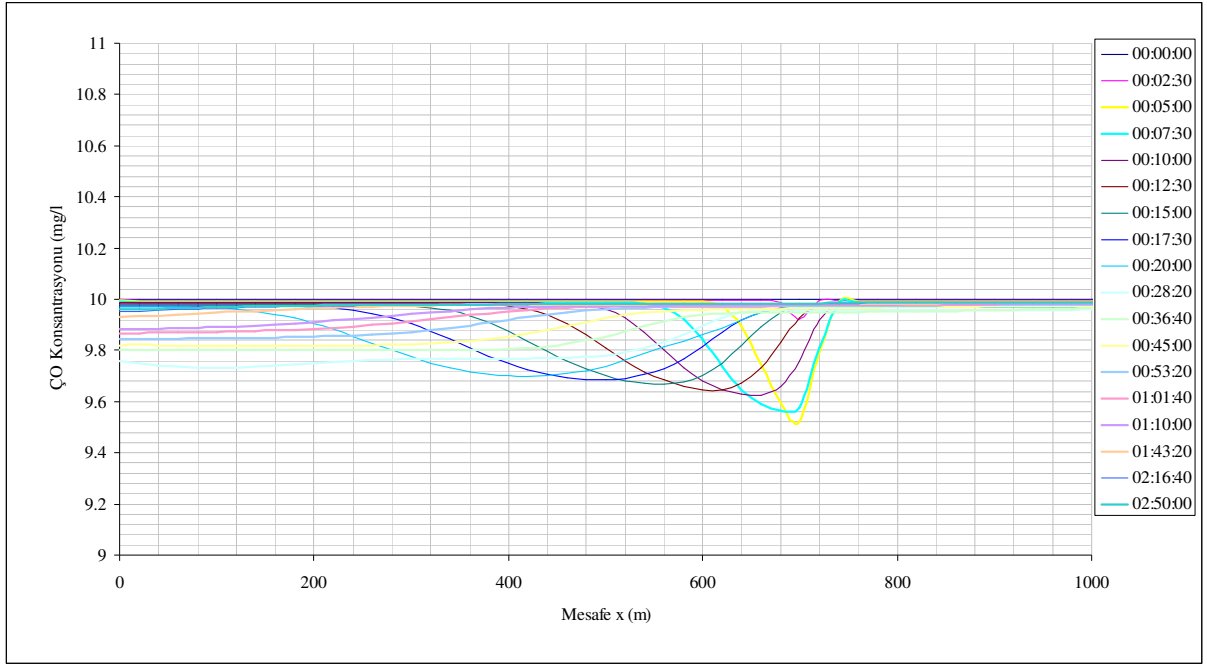
Çizelge 6.1 18 psu tuzluluk için farklı su yüzü eğimlerinde gerçekleştirilen benzetim parametreleri.

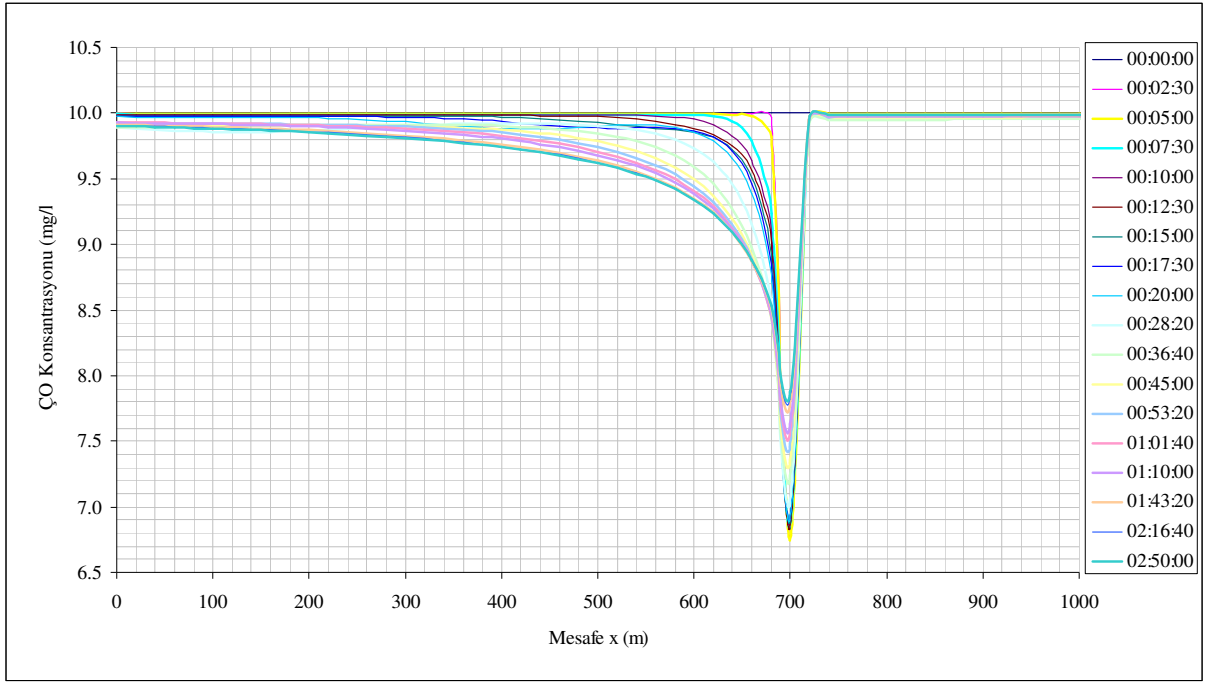
Modül Seçimi	Hidrostatik						
Taşıyım Şeması	3D UPWIND						
Batimetri	Dikdörtgen Kanal (2000×70×30) (m)		ΔX (m)		ΔY (m)		ΔZ (m)
			20		10		1
Benzetim							
	Başlangıç	14.06.2006 00:00:00	Zaman Adımı Sayısı				30 000
			Başarıyla Çalıştığı Süre				30 000
	Bitiş	14.06.2006 04:10:00	Zaman Adımı Aralığı (s)				0.5
	En Büyük. Courant Sayısı		X		Y		Z
0.43			0.86		8.6		
Türbülans Modeli	Sabit Eddy Viskozitesi		0.5				
Ecolab Modeli	Mike21/3 WQ Simple		BOİ, ÇO				
Model Sınır Şartları							
	1. Sınır Şartı		2. Sınır Şartı				
Su Seviyesi (m)	0		1. Benzetim		0.10		
			2. Benzetim		0.20		
			3. Benzetim		0.30		
Tuzluluk (psu)	18		18				
BOİ (mg/l)	10		10				
ÇO (mg/l)	10		10				
Model Başlangıç Koşulları							
Su Seviyesi (m)	0						
Tuzluluk (psu)	18						
Taban Pürüzlülüğü (m)	0.05						
BOİ (mg/l)	10						
ÇO (mg/l)	10						
Deşarj Koşulları							
Deşarj Konumu (1 sınırından olan uzaklık (m))	Debi (m³/s)	Deşarj Hızı (m/s)	Tuzluluk (psu)	BOİ (mg/l)	ÇO (mg/l)	Deşarj Yatay Doğrultusu	Deşarj Düşey Doğrultusu
700	9.64	2.54	0	195	0	0	-

Çizelge 6.1’de verilen model koşullarında 1 numaralı benzetimden elde edilen Biyolojik Oksijen İhtiyacı ve Çözülmüş Oksijen parametrelerinin kanal ekseninde yüzeyde ve tabandaki dağılımları Şekil 6.5, 6.6, 6.7 ve 6.8’de verilmiştir. Şekil 6.9’da kanal içerisinde su yüzü eğimi görülmektedir. Şekil 6.5’den görüldüğü gibi BOİ konsantrasyonu yüzeydeki en yüksek değerini deşarj edildiği noktada almakta ve daha sonra difüzyon ve adveksiyon etkileriyle konsantrasyon akımla birlikte ötelenirken daha geniş bir banda yayılmakta ve pik konsantrasyon değeri de azalmaktadır. Benzer eğilim Şekil 6.6’da verilen ÇO parametresinde de görülmektedir. Kanal tabanındaki dağılımlara bakıldığında ise, deşarj konumunda daha yüksek pik konsantrasyonlar görülmektedir. 2. ve 3. benzetimlerde su seviyesi farkının daha yüksek değerlerinde konsantrasyonlara bakıldığında ise Şekil 6.10 ve 6.15’den görüldüğü gibi BOİ konsantrasyonu yüzeyde benzetimin aynı anında daha düşük pik değerler almakta ve daha hızlı seyreterek kararlı bir konsantrasyon değerine ulaşmaktadır. Benzer eğilim 6.11 ve 6.16’da verilen çözülmüş oksijen değişimlerinde de görülmektedir. Taban konsantrasyonlarında ise Şekil 6.12, 6.13, 6.17 ve 6.18’den görüldüğü gibi su seviyesi farkındaki artışlar daha az hissedilmektedir.

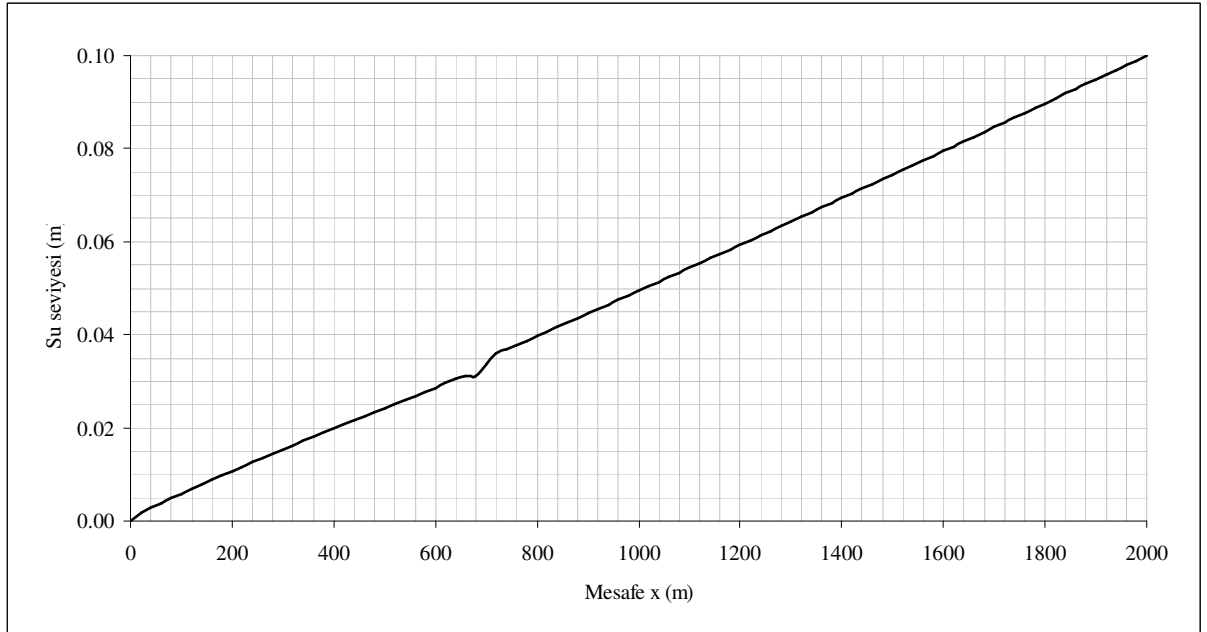


Şekil 6.5 1. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.

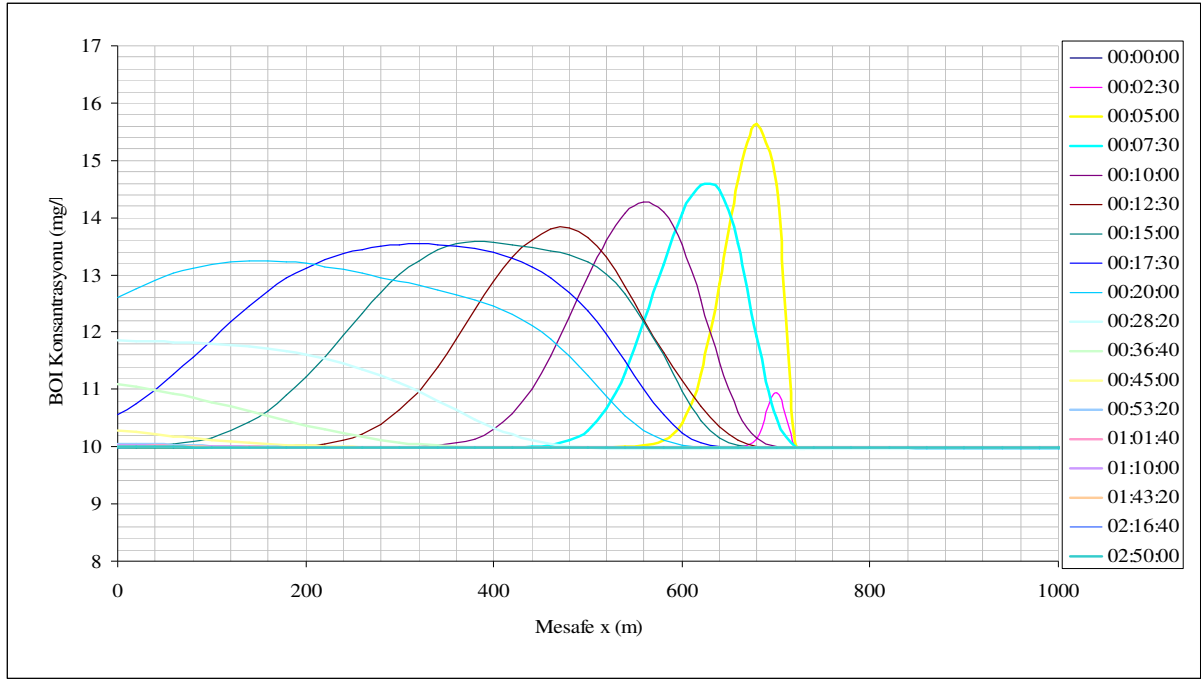




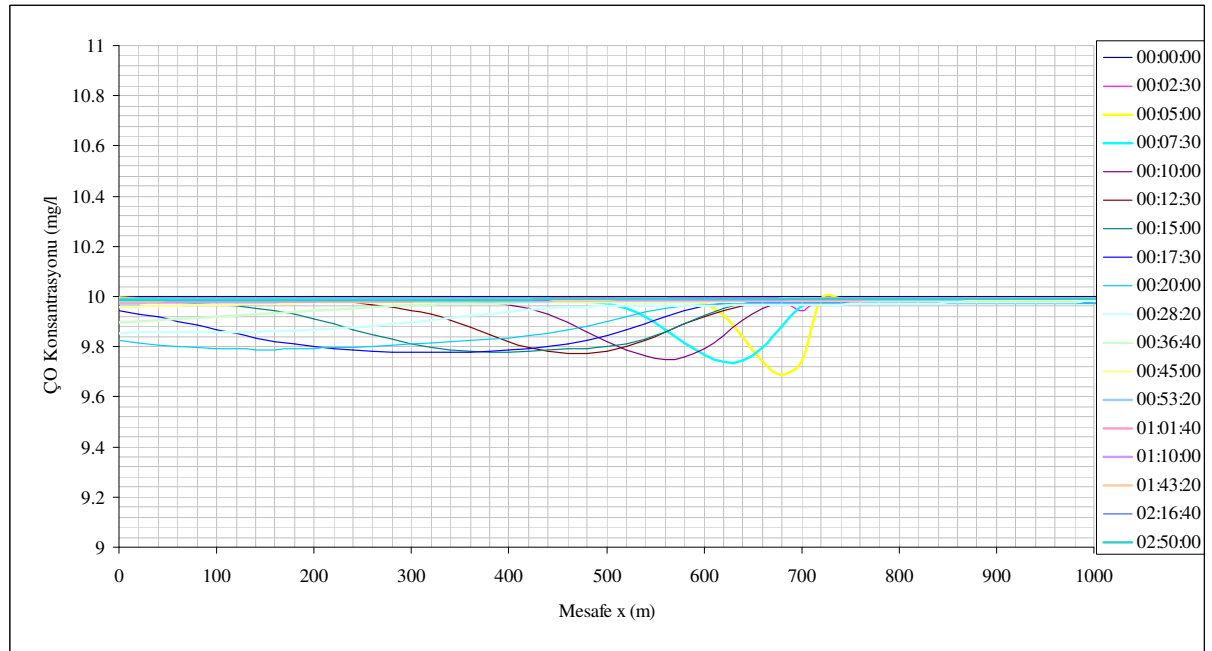
Şekil 6.8 1. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



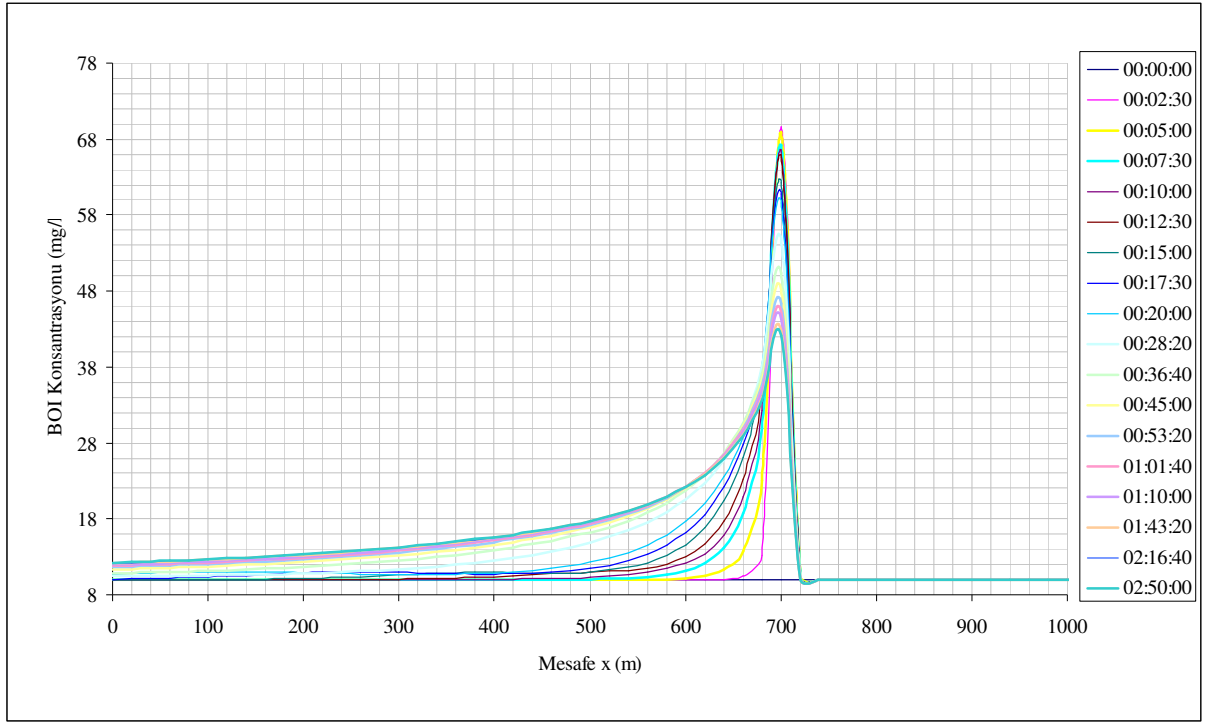
Şekil 6.9 1. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.



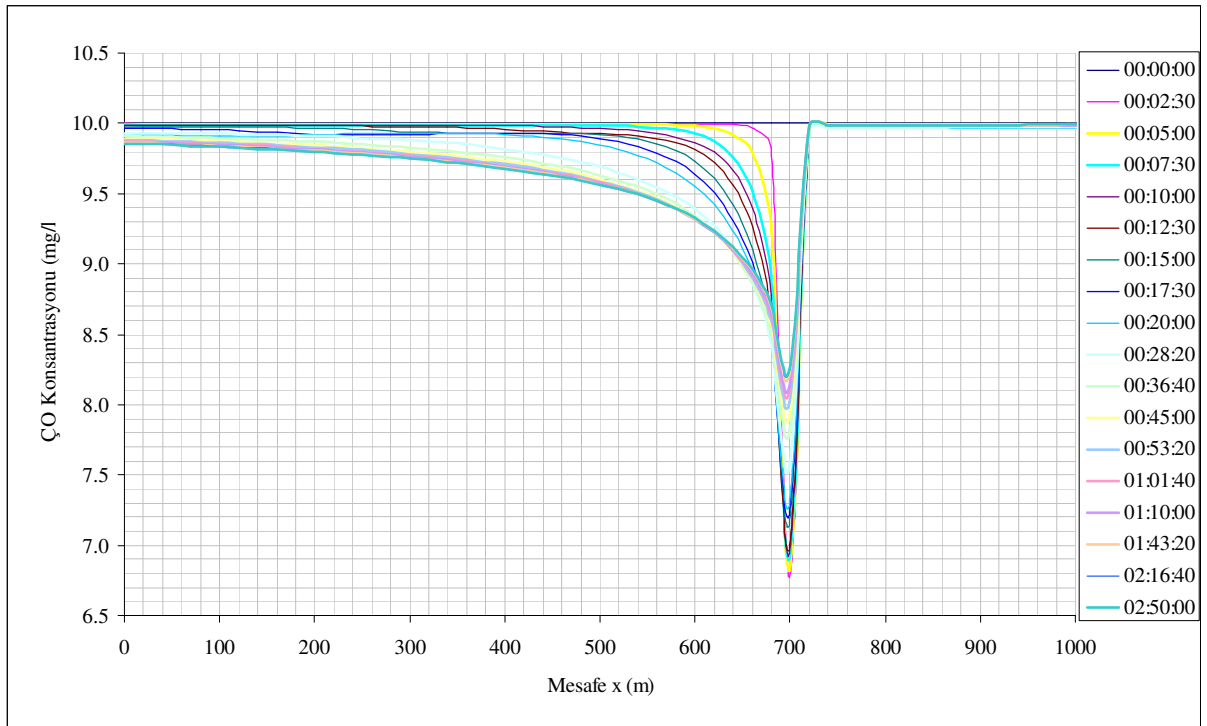
Şekil 6.10 2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



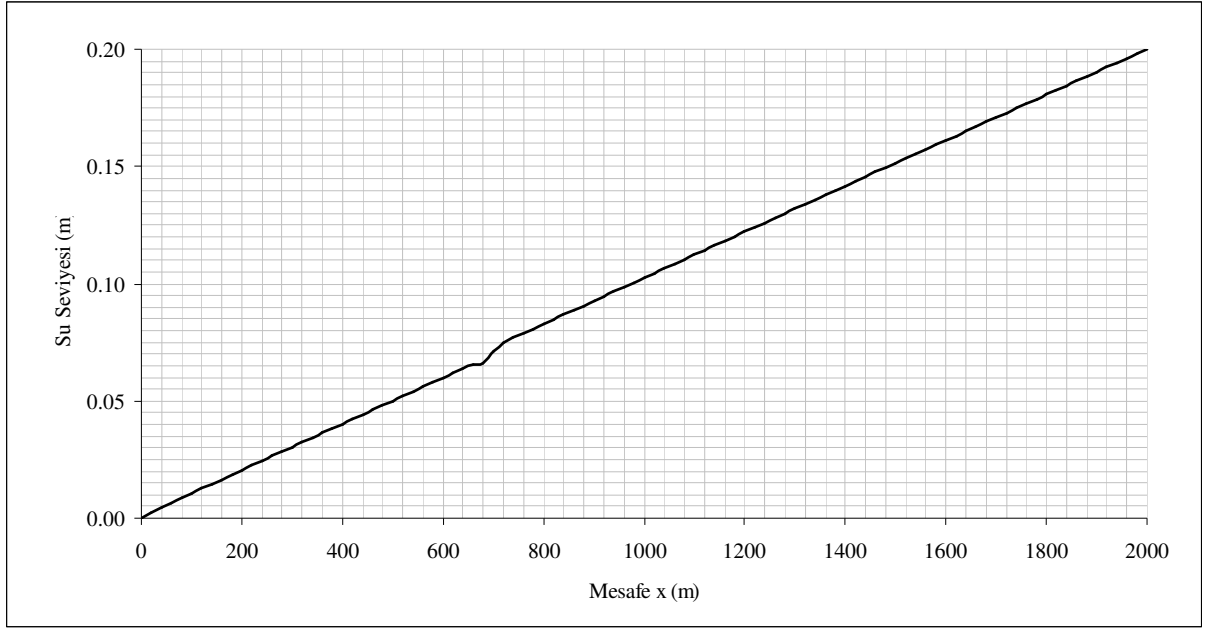
Şekil 6.11 2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



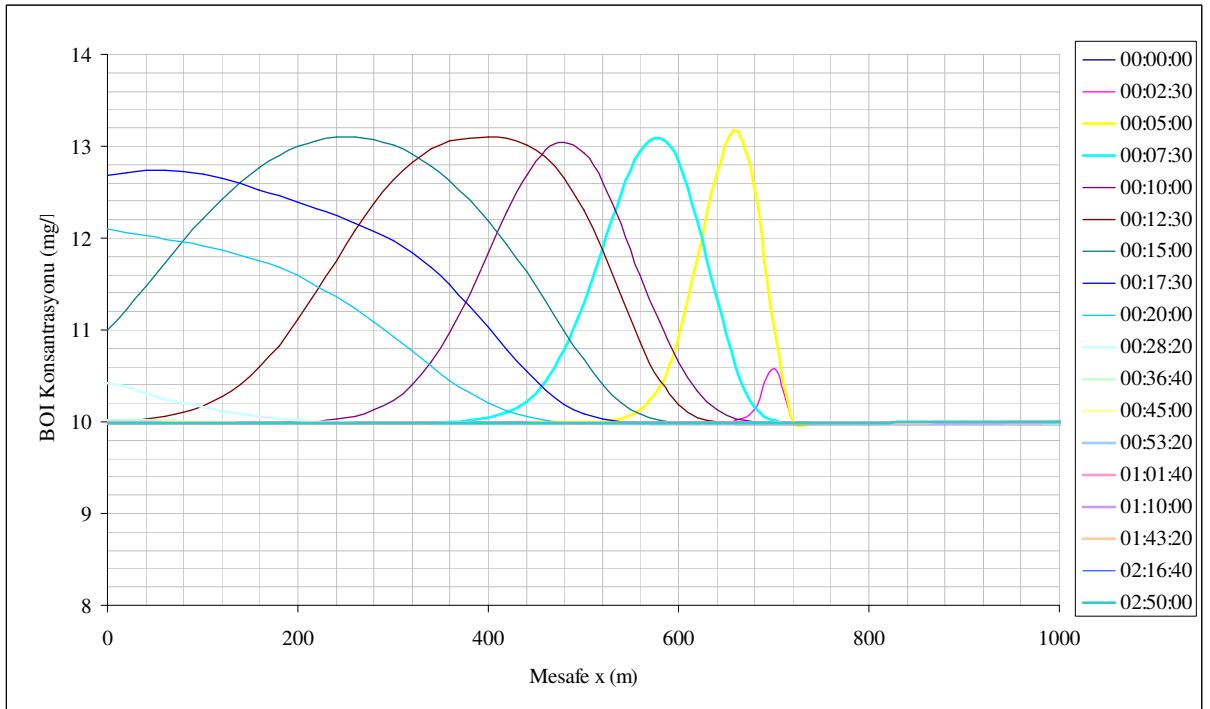
Şekil 6.12 2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



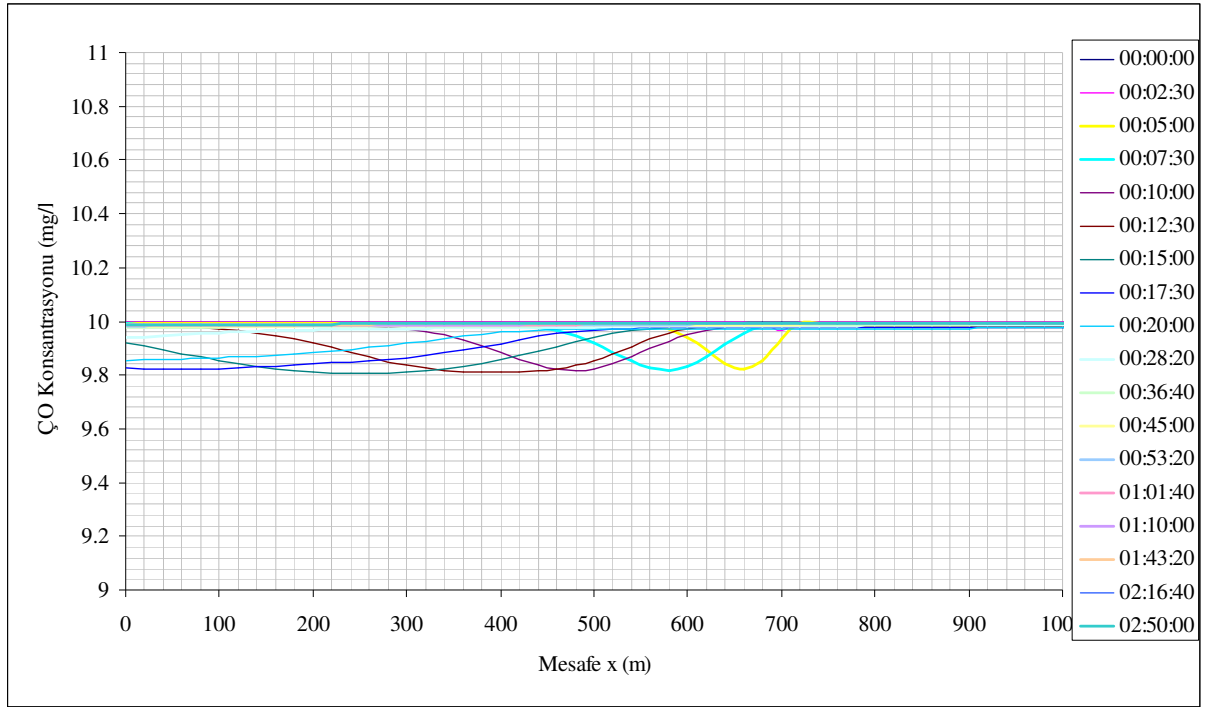
Şekil 6.13 2. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



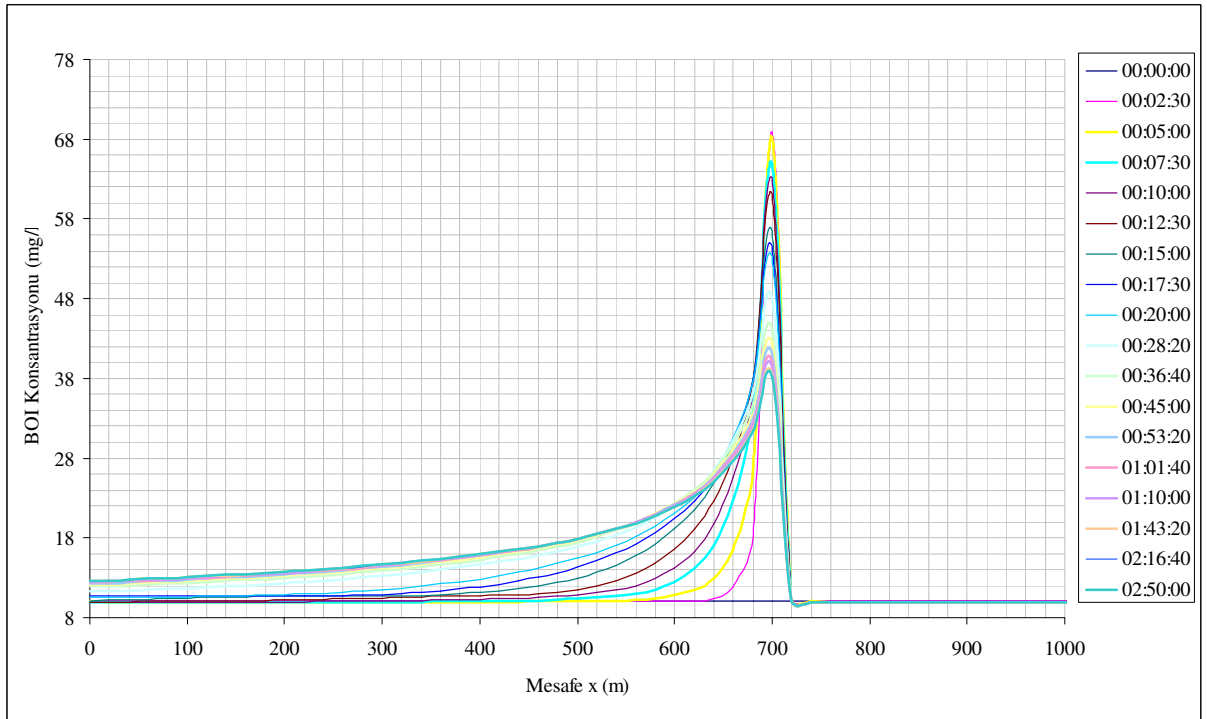
Şekil 6.14 2. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.



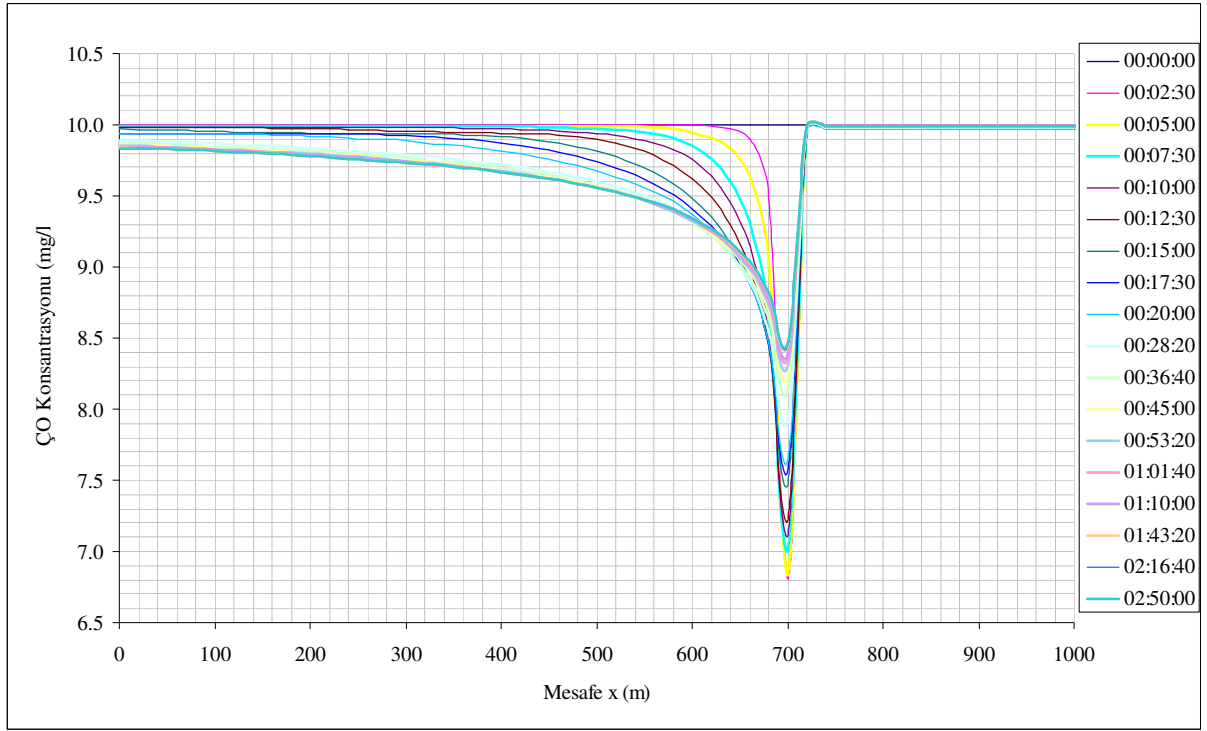
Şekil 6.15 3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



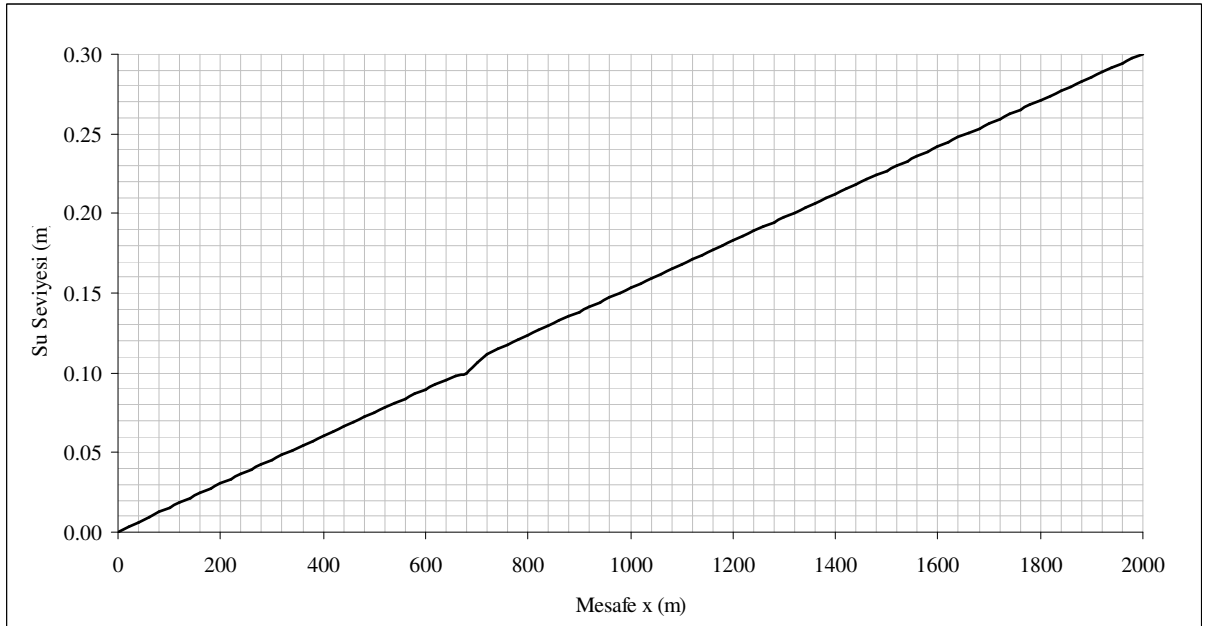
Şekil 6.16 3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



Şekil 6.17 3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



Şekil 6.18 3. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.

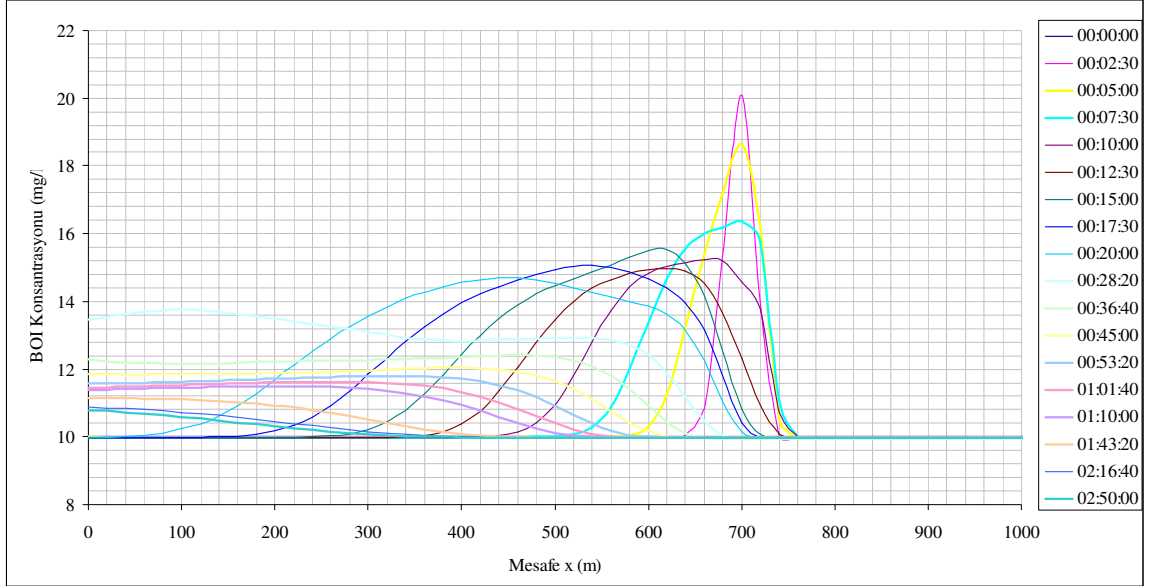


Şekil 6.19 3. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.

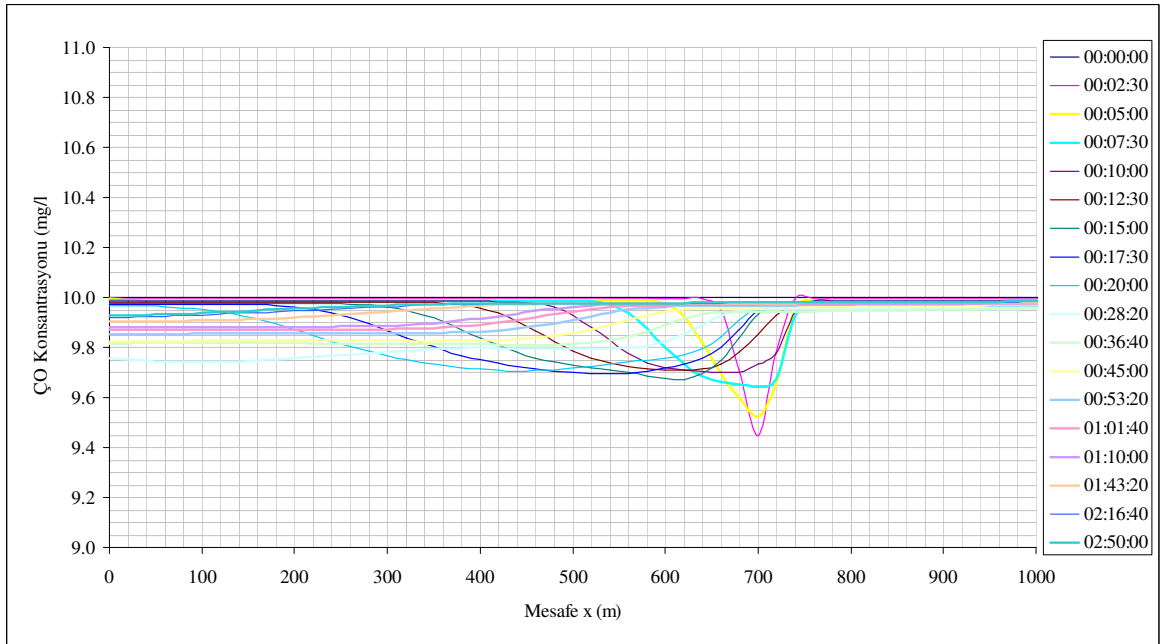
Çizelge 6.2 38 psu tuzluluk için farklı su yüzü eğimlerinde gerçekleştirilen benzetim parametreleri.

Modül Seçimi	Hidrostatik						
Taşıyım Şeması	3D UPWIND						
Batimetri	Dikdörtgen Kanal (2000×70×30) (m)		ΔX (m)		ΔY (m)		ΔZ (m)
			20		10		1
Benzetim							
	Başlangıç	14.06.2006 00:00:00	Zaman Adımı Sayısı				30 000
			Başarıyla Çalıştığı Süre				30 000
	Bitiş	14.06.2006 04:10:00	Zaman Adımı Aralığı (s)				0.5
	En Büyük. Courant Sayısı		X		Y		Z
			0.43		0.86		8.6
Türbülans Modeli	Sabit Eddy Viskozitesi		0.5				
Ecolab Modeli	Mike21/3 WQ Simple		BOİ, ÇO				
Model Sınır Şartları							
	1. Sınır Şartı		2. Sınır Şartı				
Su Seviyesi (m)	0		4. Benzetim			0.10	
			5. Benzetim			0.20	
			6. Benzetim			0.30	
Tuzluluk (psu)	38		38				
BOİ (mg/l)	10		10				
ÇO (mg/l)	10		10				
Model Başlangıç Koşulları							
Su Seviyesi (m)	0						
Tuzluluk (psu)	38						
Taban Pürüzlülüğü (m)	0.05						
BOİ (mg/l)	10						
ÇO (mg/l)	10						
Deşarj Koşulları							
Deşarj Konumu (1 sınırından olan uzaklık (m))	Debi (m³/s)	Deşarj Hızı (m/s)	Tuzluluk (psu)	BOİ (mg/l)	ÇO (mg/l)	Deşarj Yatay Doğrultusu	Deşarj Düşey Doğrultusu
700	9.64	2.54	0	195	0	0	-

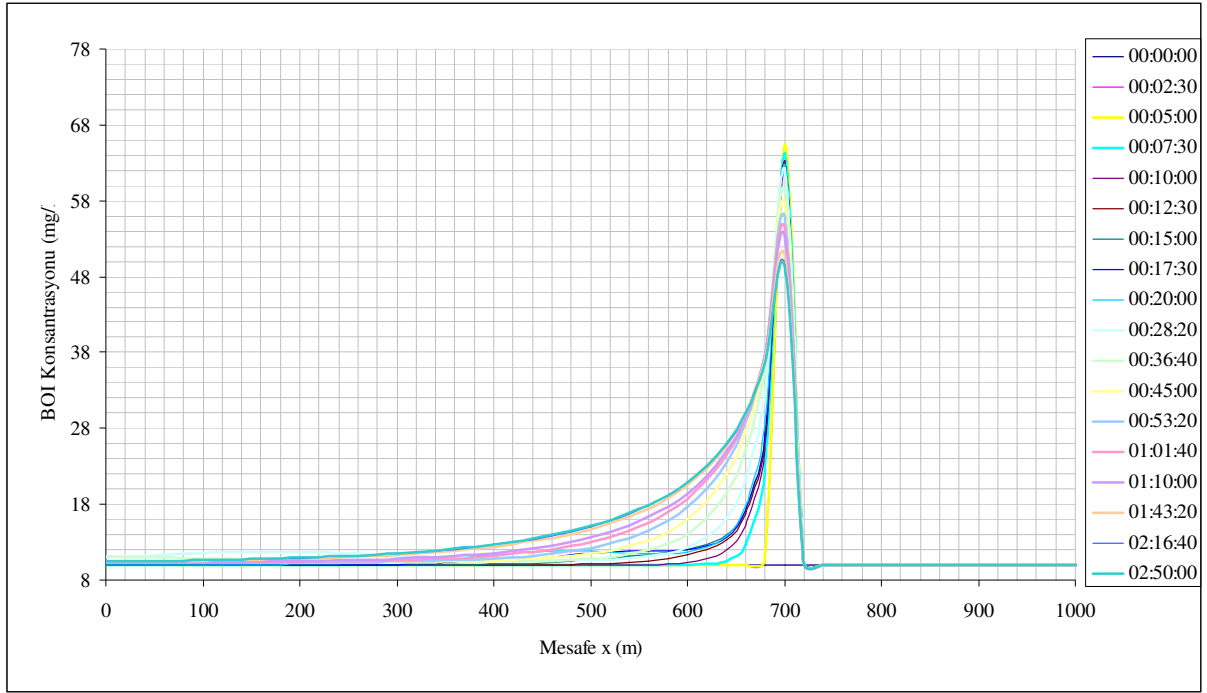
Çizelge 6.2’de verilen model koşullarında bu kez kanalda tuzluluk değeri Marmara Denizi tuzluluğunu temsil eden 38 psudur. Çizelge 6.2’de verilen 4., 5. ve 6. benzetimlerde bu kez bu tuzluluk değerinde su seviyesinin konsantrasyonlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 6.20-6.34’de sunulmuştur. Genel olarak bu daha yüksek tuzluluk değerinde konsantrasyonlar daha hızlı bir şekilde kanal yüzeyine ulaşmaktadır.



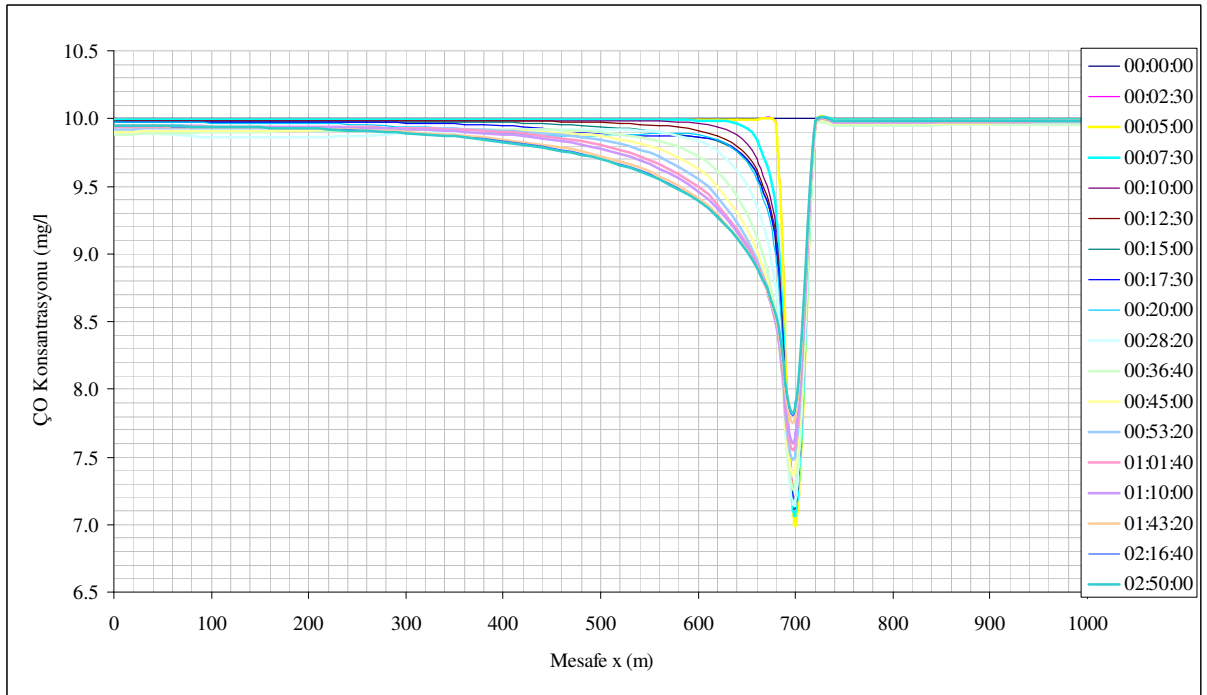
Şekil 6.20 4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



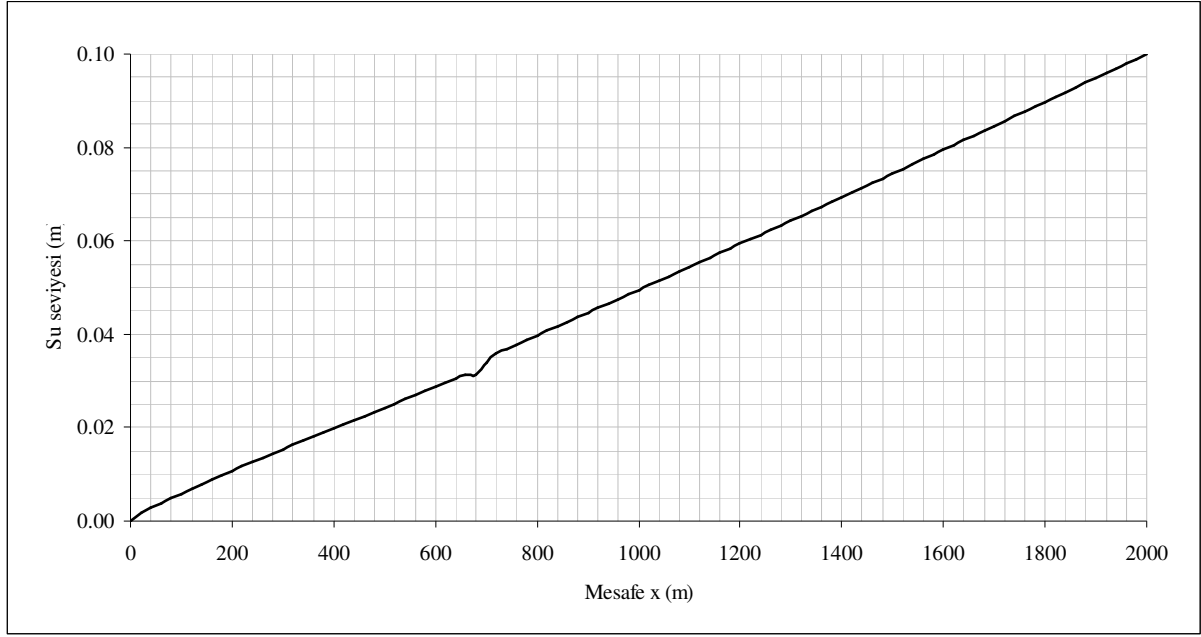
Şekil 6.21 4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



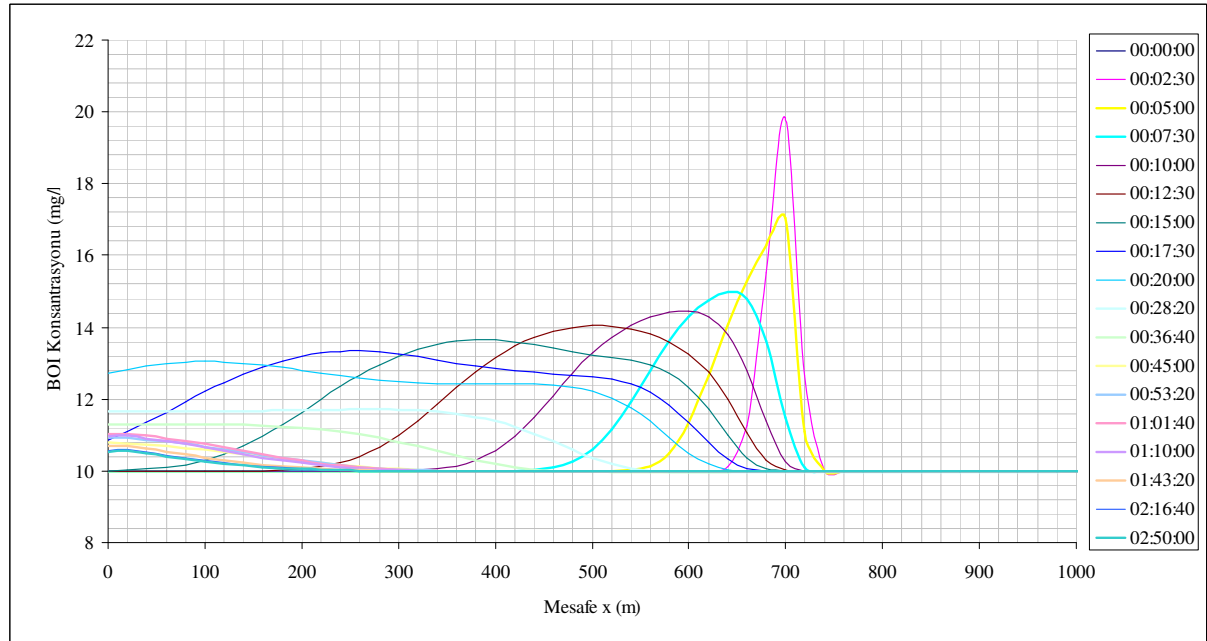
Şekil 6.22 4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



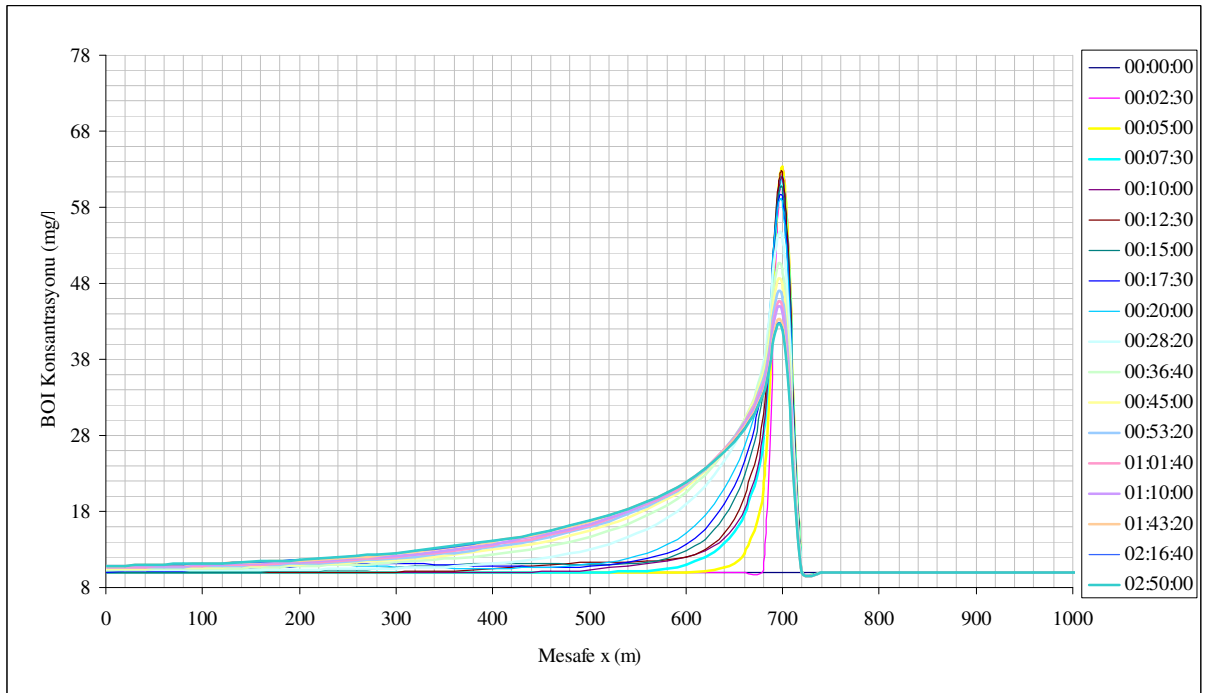
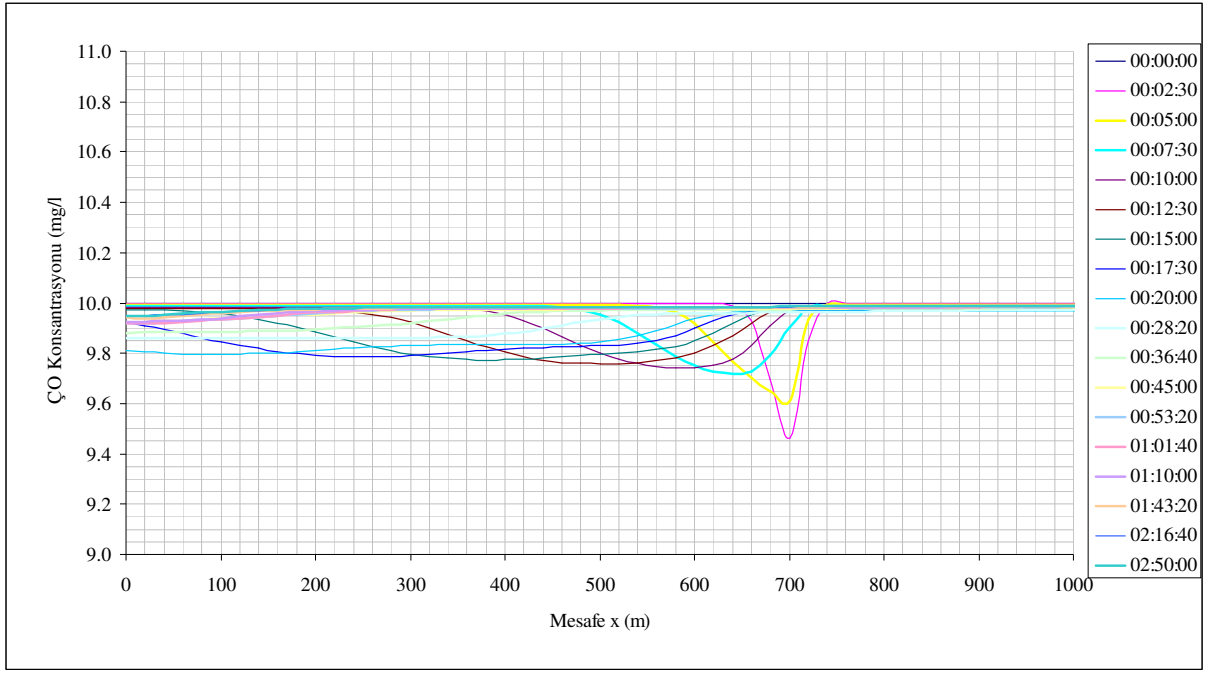
Şekil 6.23 4. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.

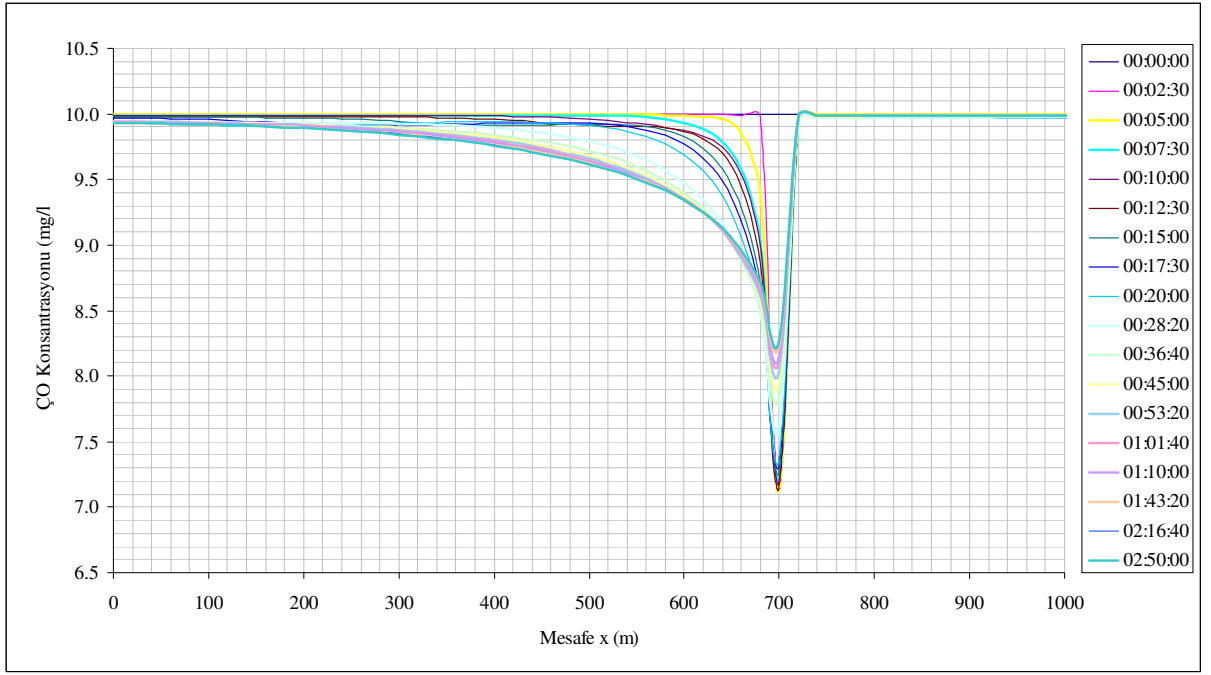


Şekil 6.24 4. Benzetim sonunda kanal ekseninde su yüzü eğimi.

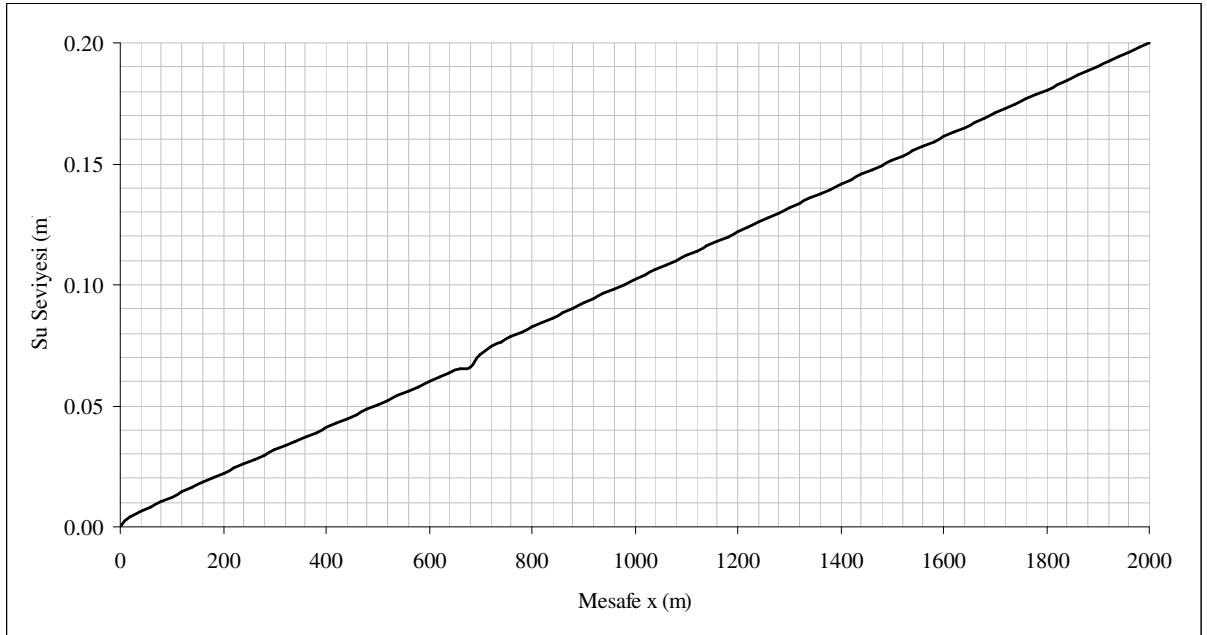


Şekil 6.25 5. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.

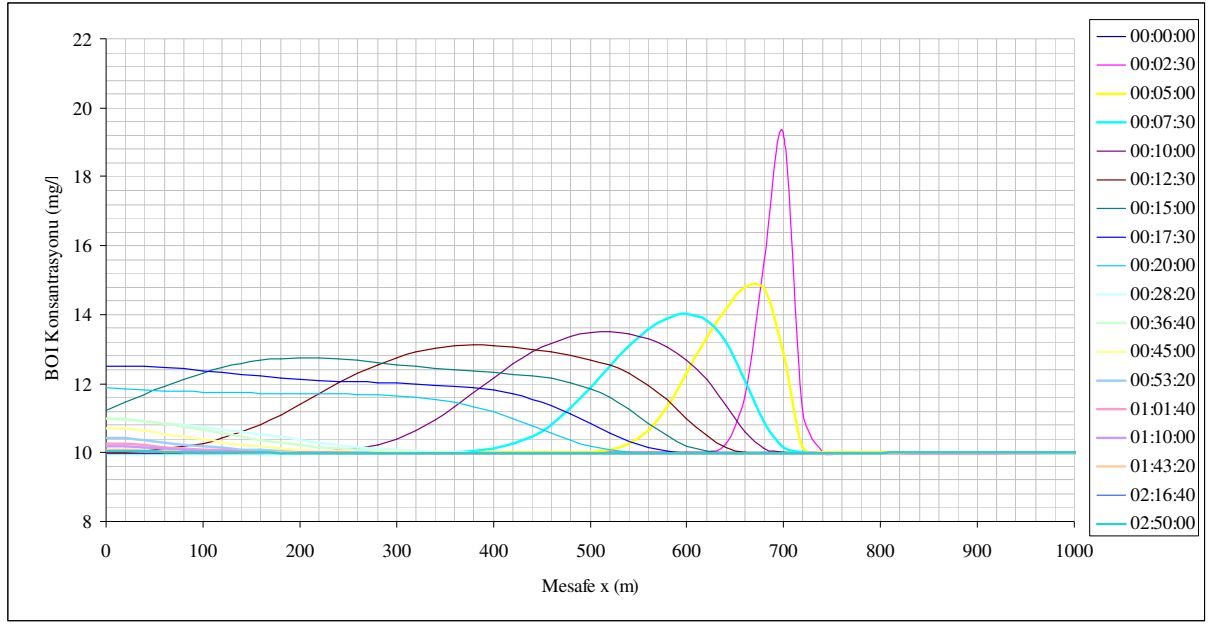




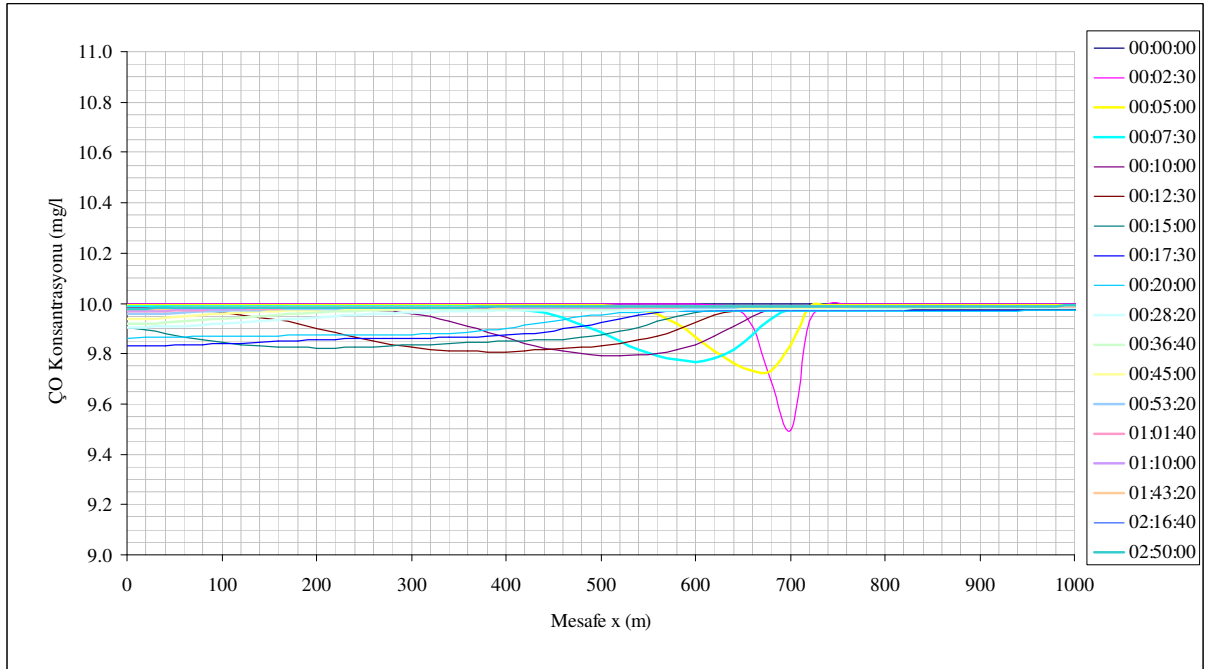
Şekil 6.28 5. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



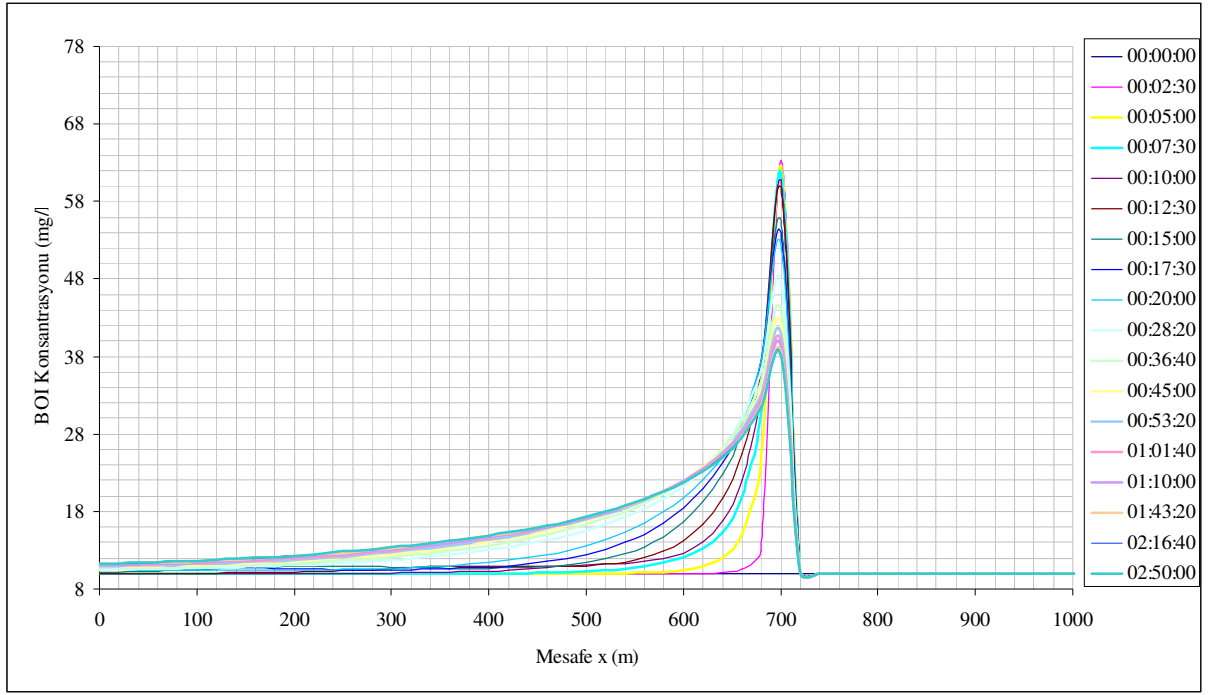
Şekil 6.29 5. Benzetim sonunda kanal ekseninde su seviyesinin değişimi.



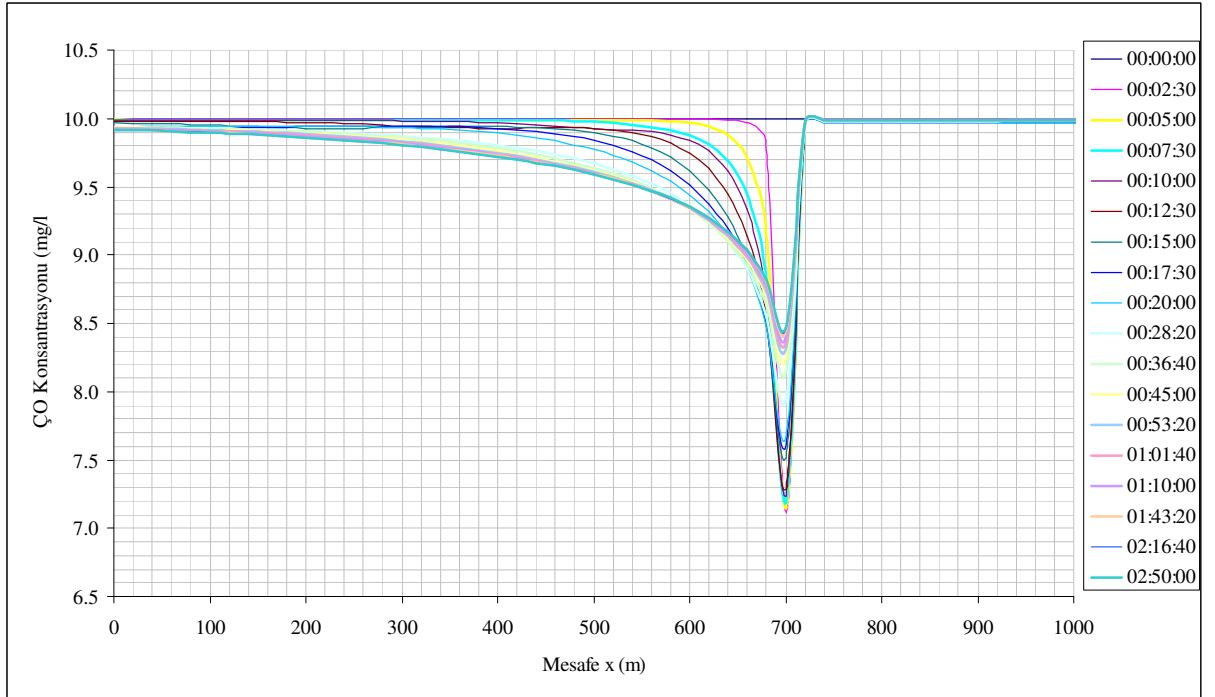
Şekil 6.30 6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



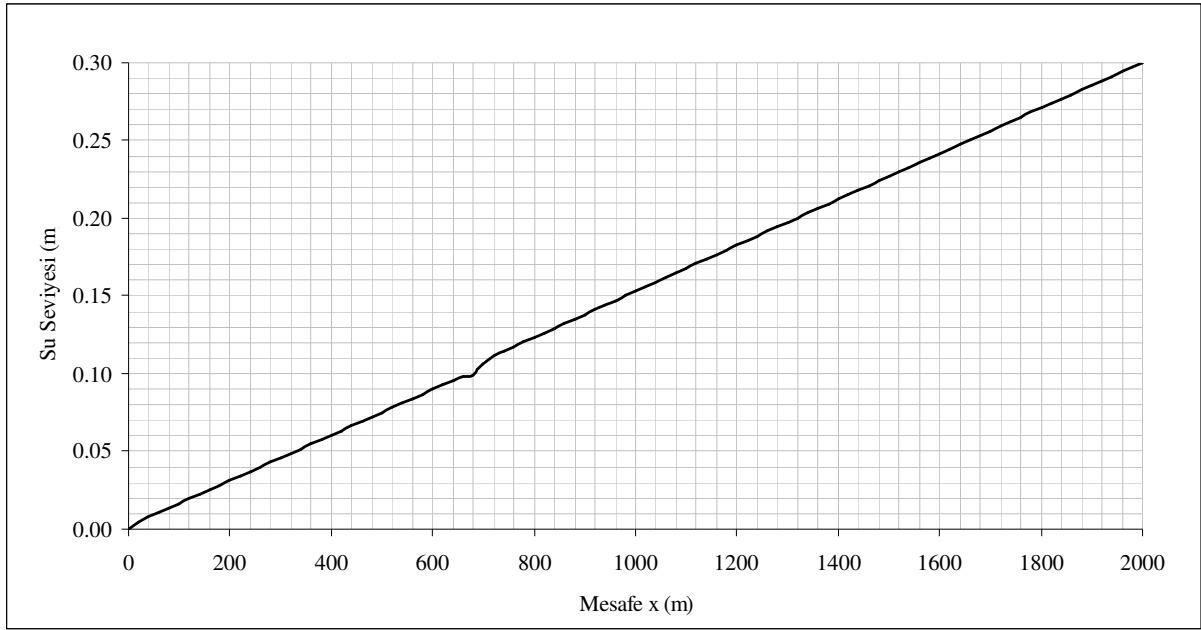
Şekil 6.31 6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



Şekil 6.32 6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.

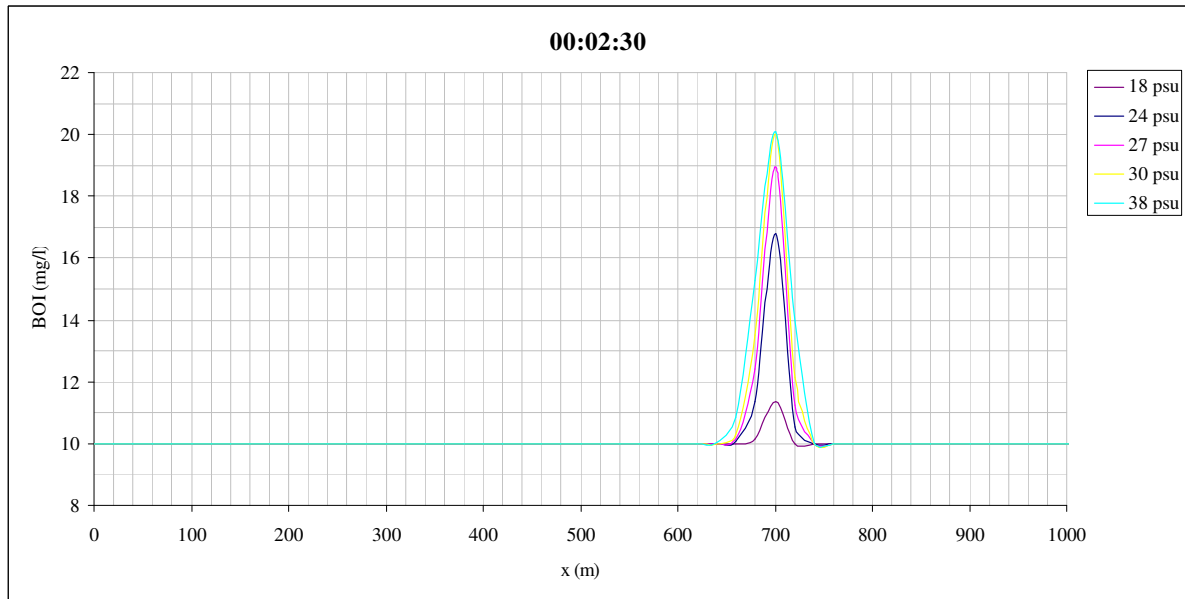


Şekil 6.33 6. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.

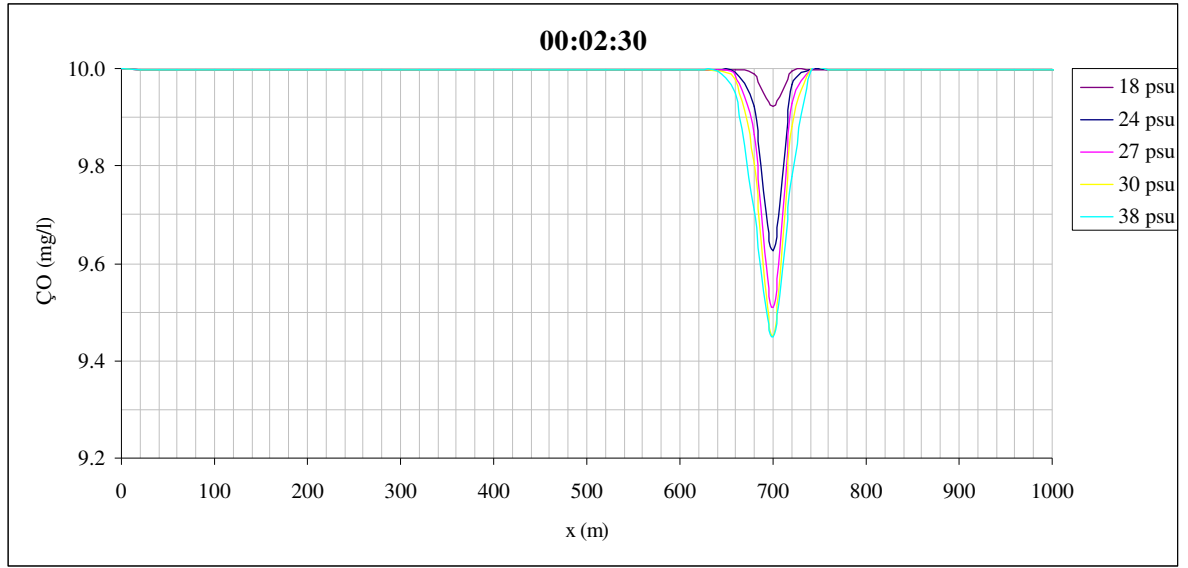


Şekil 6.34 6. Benzetim sonunda kanal ekseninde su seviyesinin değişimi.

Kanal içerisindeki tuzluluğun, kirletici parametrelerin kanaldaki yayılımı üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için farklı tuzluluk değerlerinde yapılan benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.35'te verilen karşılaştırma grafiğinden de görüldüğü gibi, tuzluluk arttıkça benzetimin aynı anında daha yüksek BOİ konsantrasyonları görülmektedir. Yine benzer şekilde tuzluluk arttıkça ÇO konsantrasyonu da düşmektedir. Tuzluluğun artmasıyla kanaldaki suyun yoğunluğu artmakta ve böylece deşarj edilen su daha hızlı yükselmektedir.

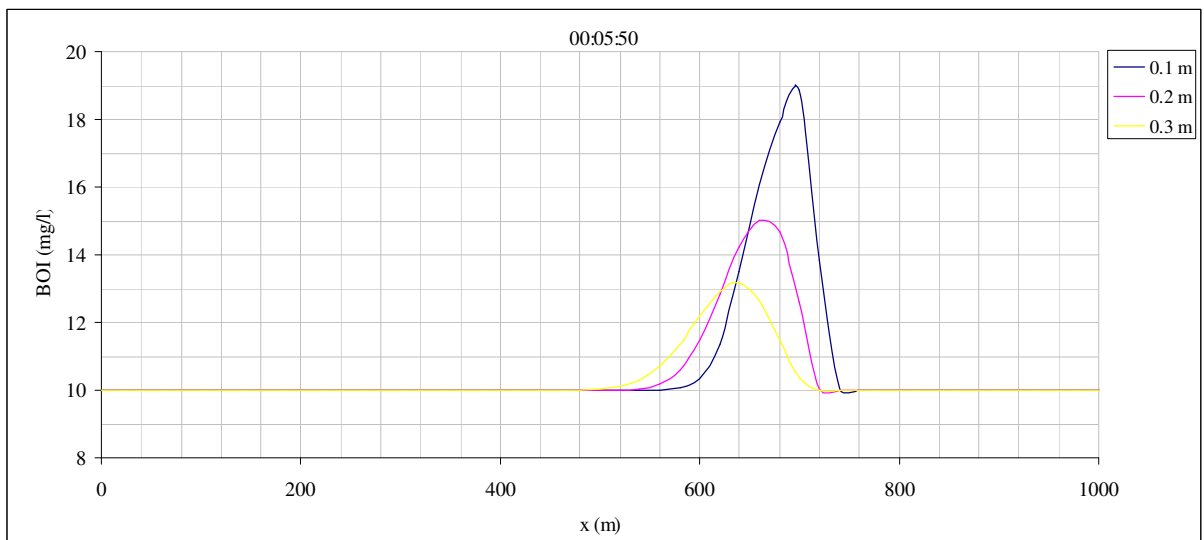


Şekil 6.35 Kanaldaki farklı tuzluluk değerleri için benzetimin başlamasından 2 dak. 30 s. sonra BOİ ve ÇO konsantrasyonunun değişimi.



Şekil 6.35 Devamı.

Benzer şekilde su seviyesindeki değişimlerin de konsantrasyonlar üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için 0.1 m, 0.2 m ve 0.3 m su seviyesi farkı için yapılan benzetimlerden 5 dakika 50 s sonunda elde edilen sonuçlar Şekil 6.36'da verilmiştir. Görüldüğü gibi su seviyesi farkı arttıkça yüzeye ulaşan BOİ konsantrasyonu miktarı azalmaktadır. Su seviyesi farkının artmasıyla yatay akıntı hızı artmakta öylece konsantrasyon kanal boyunca ilerlediğinden yüzeye çıkışı gecikmekte ve seyrelmeye uğramaktadır. Yine su seviyesi farkı arttıkça yüzeyde kanal ekseninde en yüksek konsantrasyonunun oluştuğu konum da değişmektedir.



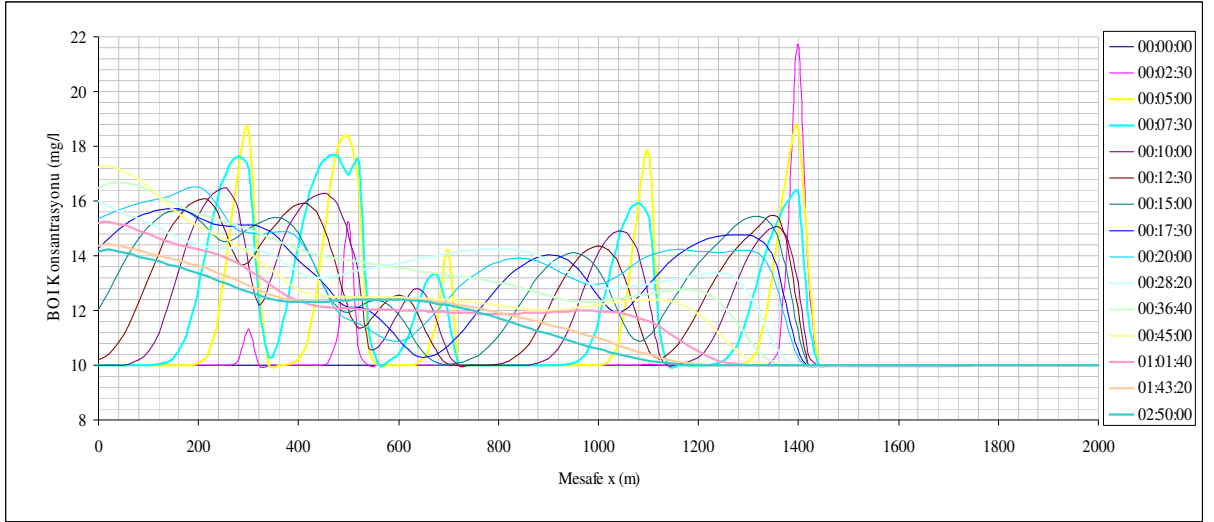
Şekil 6.36 Su seviyesi farkındaki değişime karşı BOİ konsantrasyonunun değişimi.

Yine aynı kanalda bu kez birden fazla deşarj halinde ortaya çıkacak durum incelenmiştir. Bu çalışmaya ait benzetimlerin özellikleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

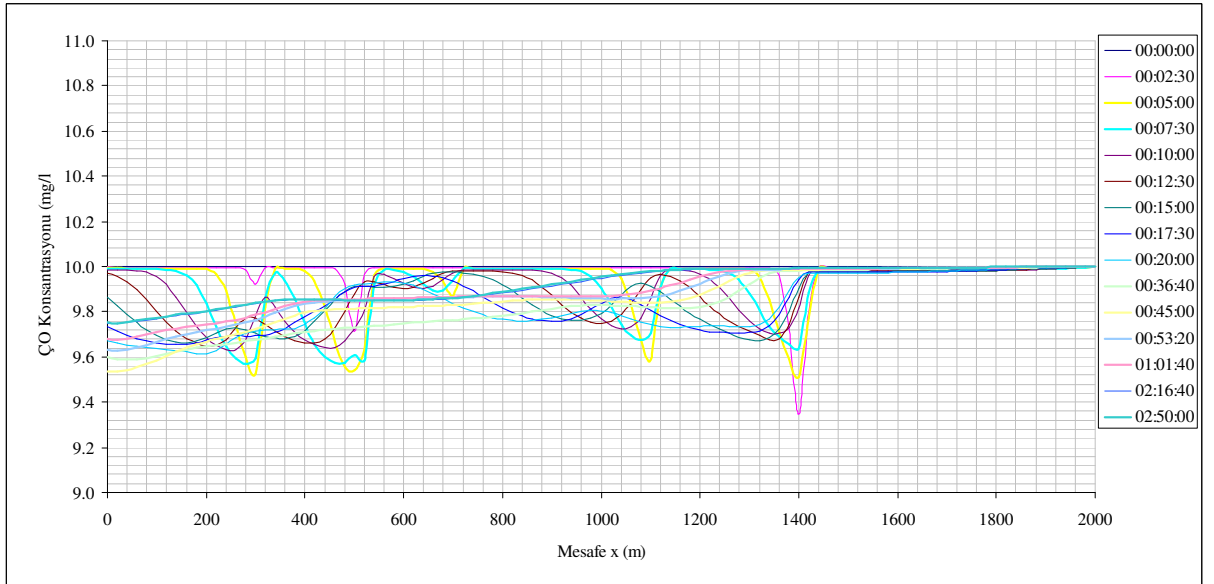
Çizelge 6.3 Çoklu deşarj hali için benzetim parametreleri.

Modül Seçimi	Hidrostatik						
Taşıyım Şeması	3D UPWIND						
Batimetri	Dikdörtgen Kanal (2000×70×30) (m)		ΔX (m)		ΔY (m)		ΔZ (m)
			20		10		1
Benzetim							
	Başlangıç	14.06.2006 00:00:00	Zaman Adımı Sayısı			30 000	
			Başarıyla Çalıştığı Süre			30 000	
	Bitiş	14.06.2006 04:10:00	Zaman Adımı Aralığı (s)			0.5	
	En Büyük. Courant Sayısı		X		Y		Z
			0.43		0.86		8.6
Türbülans Modeli	Sabit Eddy Viskozitesi		0.5				
Ecolab Modeli	Mike 21/3 WQ Simple		BOİ, ÇO				
Model Sınır Şartları							
	1. Sınır Şartı		2. Sınır Şartı				
Su Seviyesi (m)	0		0.10				
Tuzluluk (psu)	7. Benzetim	18	7. Benzetim			18	
BOİ (mg/l)	10		10				
ÇO (mg/l)	10		10				
Model Başlangıç Koşulları							
Su Seviyesi (m)	Tuzluluk (psu)		Taban Pürüzlülüğü (m)		BOİ (mg/l)		ÇO (mg/l)
0	38		0.05		10		10
Deşarj Koşulları							
Deşarj Konumu (1 sınırından olan uzaklık (m))	Debi (m³/s)	Deşarj Hızı (m/s)	Tuzluluk (psu)	BOİ (mg/l)	ÇO (mg/l)	Deşarj Yatay Doğrultusu	Deşarj Düşey Doğrultusu
300	9.64	2.54	0	195	0	0	-
500	10.10	5.02	0	196	0	180	-
700	1.25	0.62	0	361	0	0	-
1100	7.23	4	0	203	0	0	-
1400	7.45	1.96	0	191	0	180	-

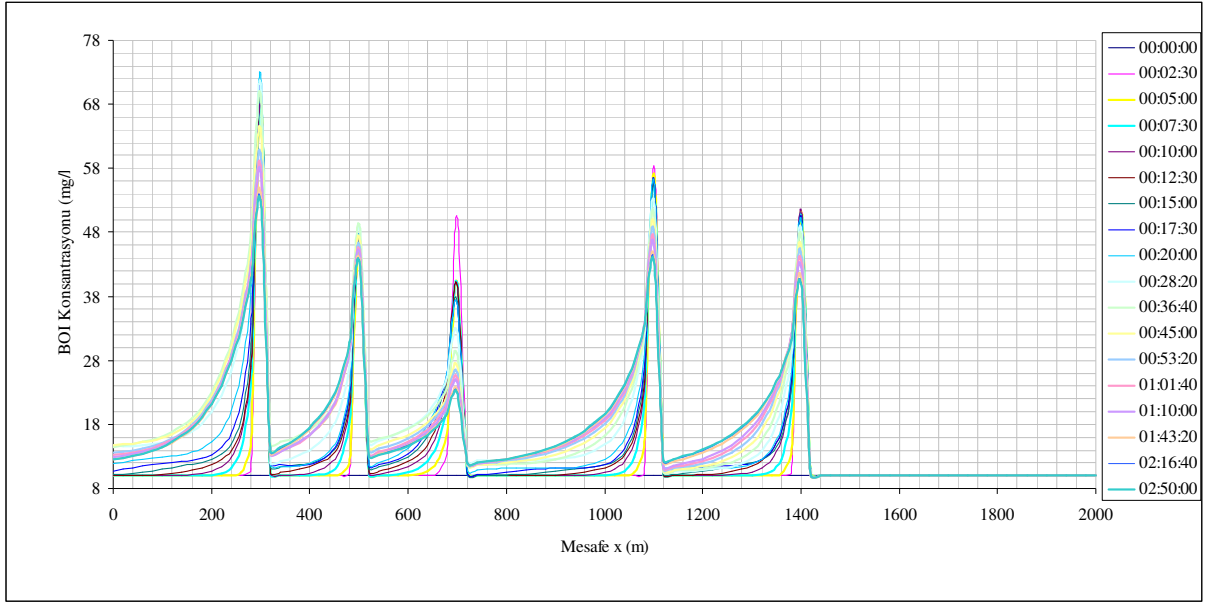
Çizelge 6.3'te özellikleri verilen benzetimin sonucunda kanal tabanında ve yüzeyinde BOİ ve ÇO dağılımları elde edilmiş sonuçlar Şekil 6.37-6.40'ta verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi birden fazla deşarj olması halinde kanal yüzeyinde deşarjların girişiminden dolayı kanal içerisinde daha yüksek konsantrasyonlar gözlenmektedir. Kanal tabanındaki dağılımlara bakıldığında ise Şekil 6.39 ve Şekil 6.40'tan görüldüğü gibi girişim henüz başlamamıştır ve deşarjların herbiri tekil dağılımlar sergilemektedir.



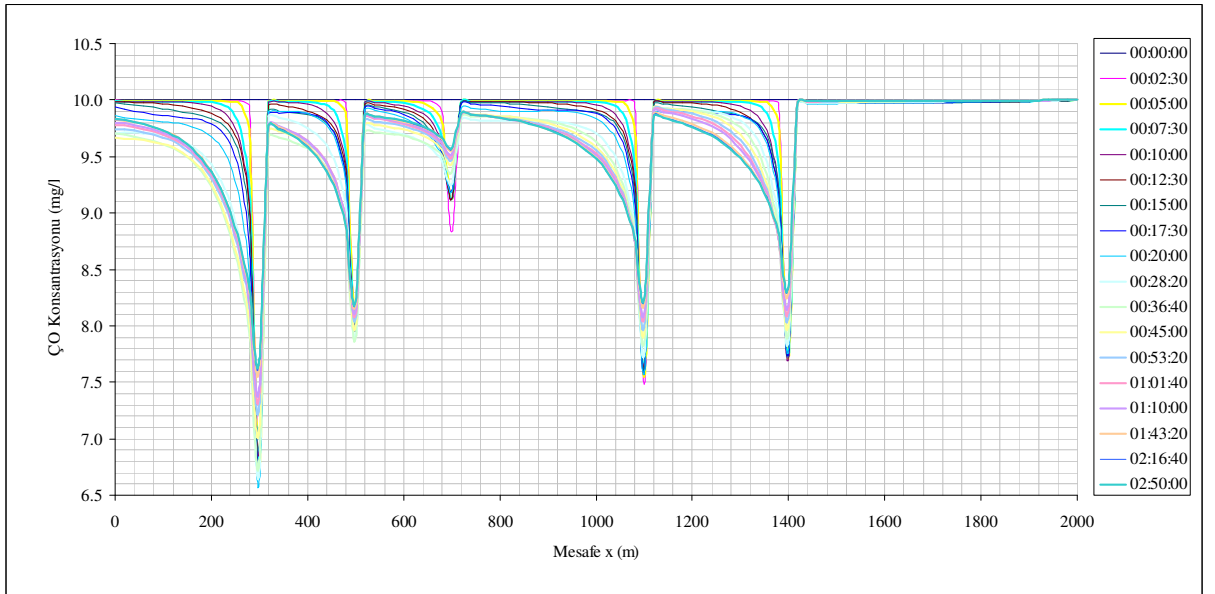
Şekil 6.37 7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



Şekil 6.38 7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde yüzeyde değişimi.



Şekil 6.39 7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında BOİ konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.



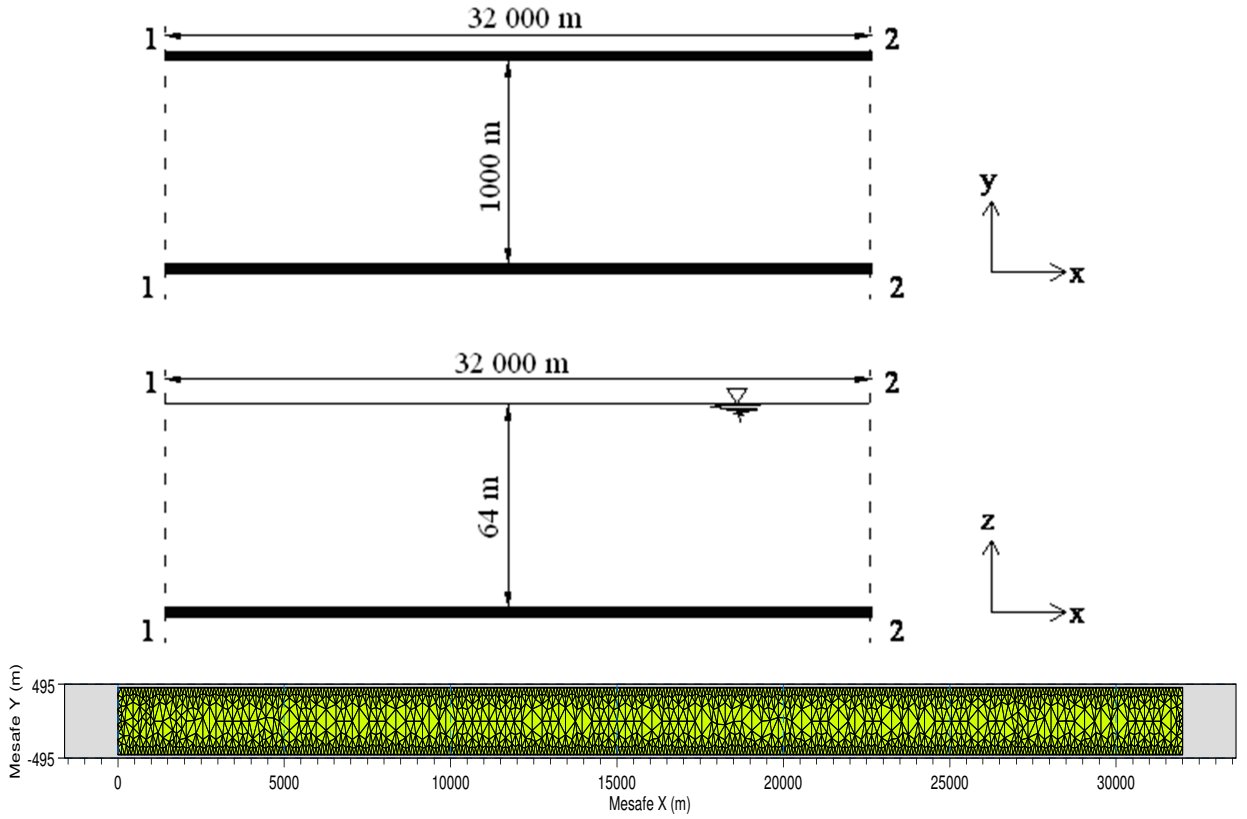
Şekil 6.40 7. Benzetimin çeşitli zaman adımlarında ÇO konsantrasyonunun kanal ekseninde tabanda değişimi.

Yukarıda verilen tek tabakalı akım koşullarının değerlendirilmesinin ardından, farklı bir kanalda yapılandırılmamış ağ kullanılarak çift tabakalı akım yapısı benzeştirilmiştir. Kanal geometrisi ve kullanılan yapılandırılmamış ağ Şekil 6.41’de verilmiştir. Bu çift tabakalı akım modeli için İstanbul Boğazı geometrisini benzeştirebilmesi açısından 32 km uzunluğunda, 1 km genişliğinde ve 64 m derinliğinde dikdörtgen bir kanal seçilmiştir. Oluşturulan yapılandırılmamış hesap ağı 1781 düğüm noktası ve 2902 hücreden meydana gelmektedir. Bu

model alanı içerisinde kanal tabanına 16. km’de ve kanal ekseninde 100 m³/s’lik debiye sahip bir atıksu deşarjı yerleştirilmiştir. Çizelge 6.4’te bu benzetime ait hidrodinamik model ve Ecolab model parametreleri verilmiştir. Bu çizelgede verilen konsantrasyon değerleri İSKİ ve İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri Enstitüsü’nün ortaklaşa yürüttükleri Su Kalitesi İzleme çalışmalarından yola çıkılarak belirlenmiştir.

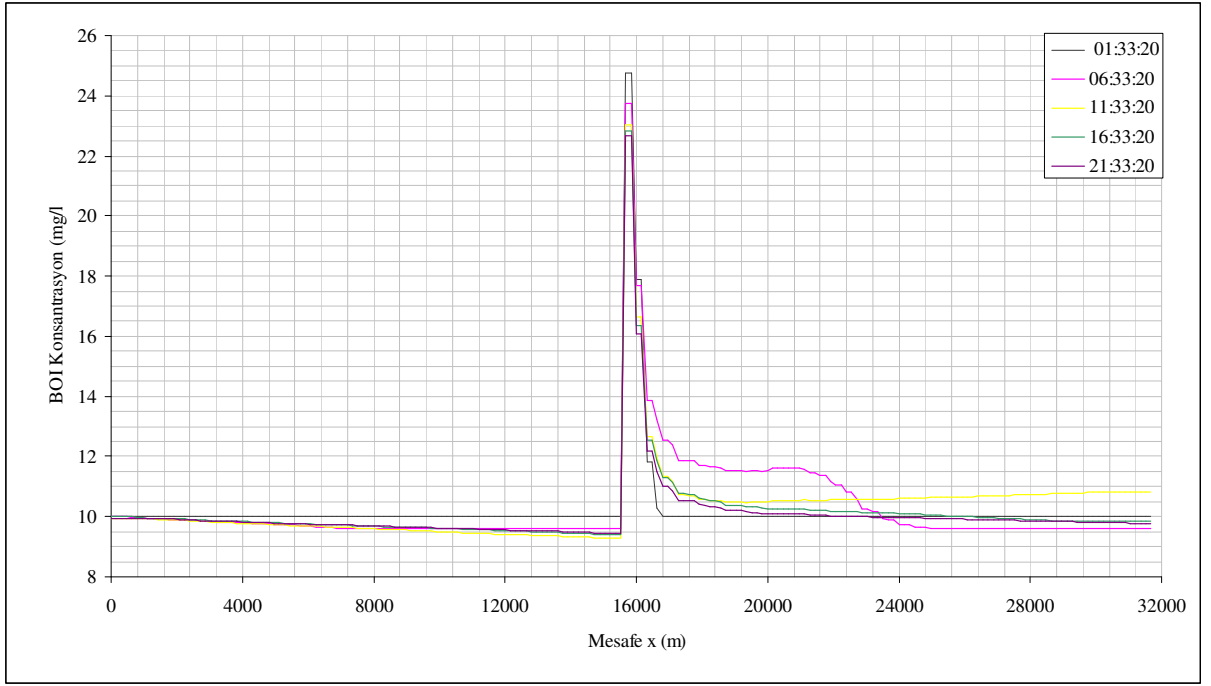
Çizelge 6.4 Hidrodinamik Model ve Ecolab Model Parametreleri.

HİDRODİNAMİK Model Parametreleri						
Benzetim Süresi		86 400 s		Zaman Adımı	1 s	
En Büyük Courant Sayısı		0.25		Taban Pürüzlülüğü	0.3 m	
Kaynak (Kanalın ortasında tabanda)		100 m ³ /s		Başlangıç Şartı	Su Seviyesi	0
					Tuzluluk	18 psu
Sınır Şartları	1 Sınırı	Su Seviyesi (m)	0			
		Tuzluluk (psu)	38			
	2 Sınırı	Su Seviyesi (m)	0.22			
		Tuzluluk (psu)	18			
Ecolab Modeli Parametreleri						
Model		Mike3 with nutrients and chlorophyll-a				
İntegrasyon Yöntemi		Euler				
Parametre		Deşarj Konsantrasyonu (mg/l)	Marmara Sınırı (1 numaralı sınır) Değeri (mg/l)	Karadeniz Sınırı (2 numaralı sınır) Değeri (mg/l)	Başlangıç Değeri (mg/l)	
BOİ		200	10	10	10	
ÇO		0	10	10	10	
Klorofil-a		0	0.003	0.001	0.001	
Amonyum (NH ₄)		0.02	0.02	0.02	0.02	
Nitrit (NO ₂)		1	0.2	0.35	0.15	
Nitrat (NO ₃)		10	1	1	1.03	
Fosfat (PO ₄)		3	0.01	0.01	0.31	
Fekal Koliform		150 000	36 000	17 000	24 000	
Toplam Koliform		200 000	50 000	20 000	25 000	

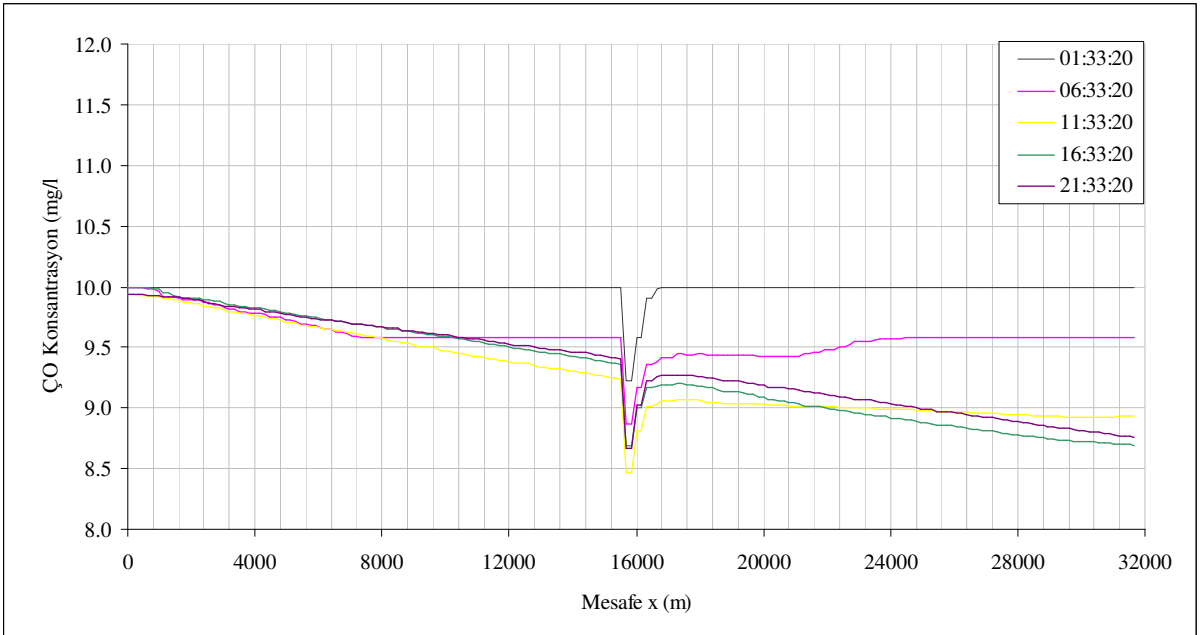


Şekil 6.41 Çift tabakalı akım modelinde kullanılan kanal geometrisi ve yapılandırılmamış hesap ağı.

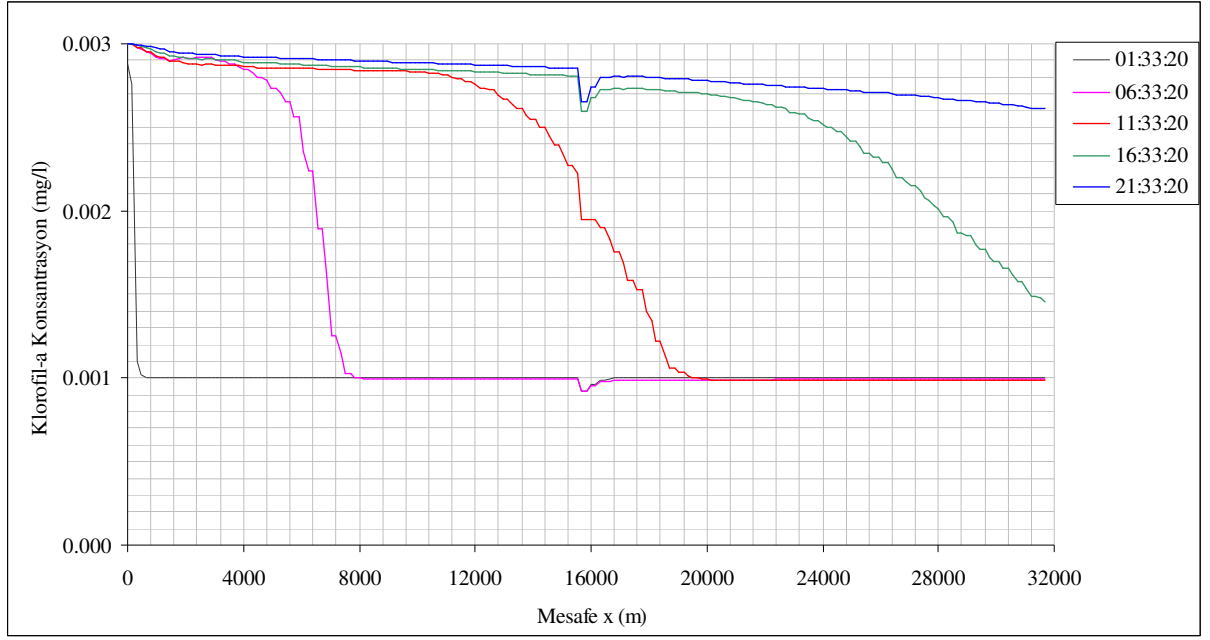
Benzetim sonucunda biyolojik oksijen ihtiyacı, çözülmüş oksijen, klorofil-a, amonyum, nitrit, nitrat, fosfat, fekal koliform parametrelerinin kanal içerisindeki dağılımları elde edilmiştir. Burada sözkonusu parametrelerin kanal tabanındaki dağılımları verilmiştir. Akım ortamı iki tabakalı olduğundan derin deşarjlarla ortama verilen atıksu alt tabakada kalmış üst tabakaya ulaşmamıştır. Şekil 6.42’de BOİ konsantrasyonunun kanal tabanındaki dağılımı görülmektedir. Dağılıma bakıldığında adveksiyon ve dispersiyon etkileri açıkça görülmektedir. Yine BOİ dağılımı ile uyumlu bir davranış gösteren çözülmüş oksijen dağılımı da Şekil 6.43’te görülmektedir. Şekil 6.44-49’da klorofil-a, amonyum, nitrit, nitrat, fosfat, fekal koliform parametrelerinin dağılımları verilmiştir.



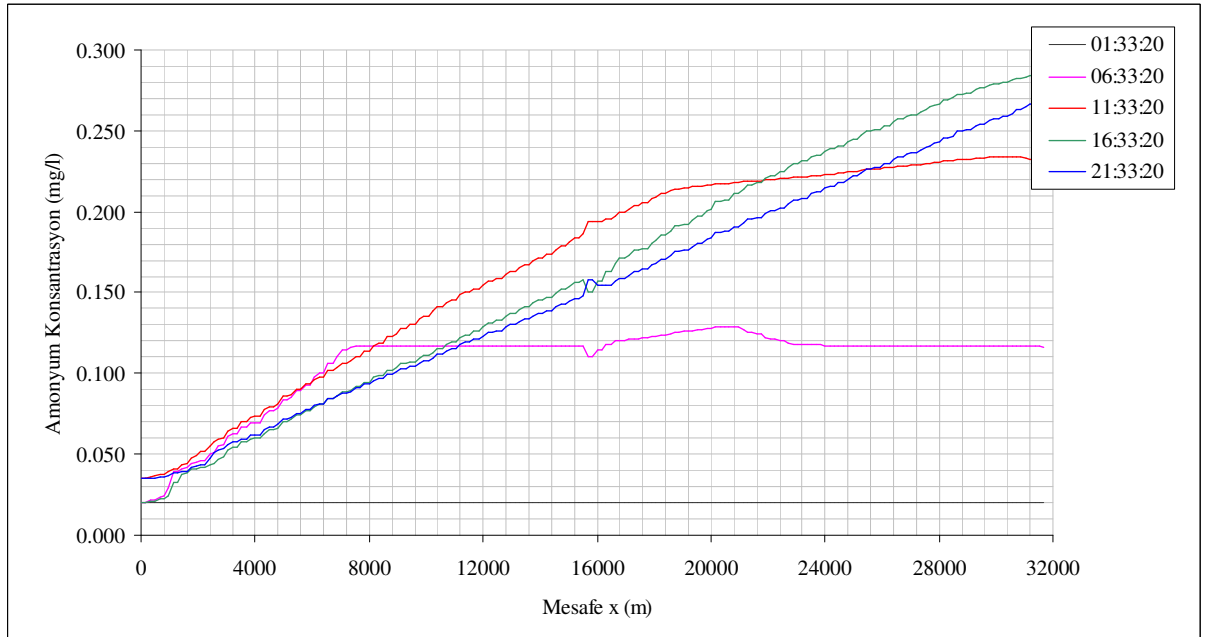
Şekil 6.42 Benzetimin çeşitli anlarında BOİ konsantrasyonunun kanal tabanında eksendeki dağılımı.



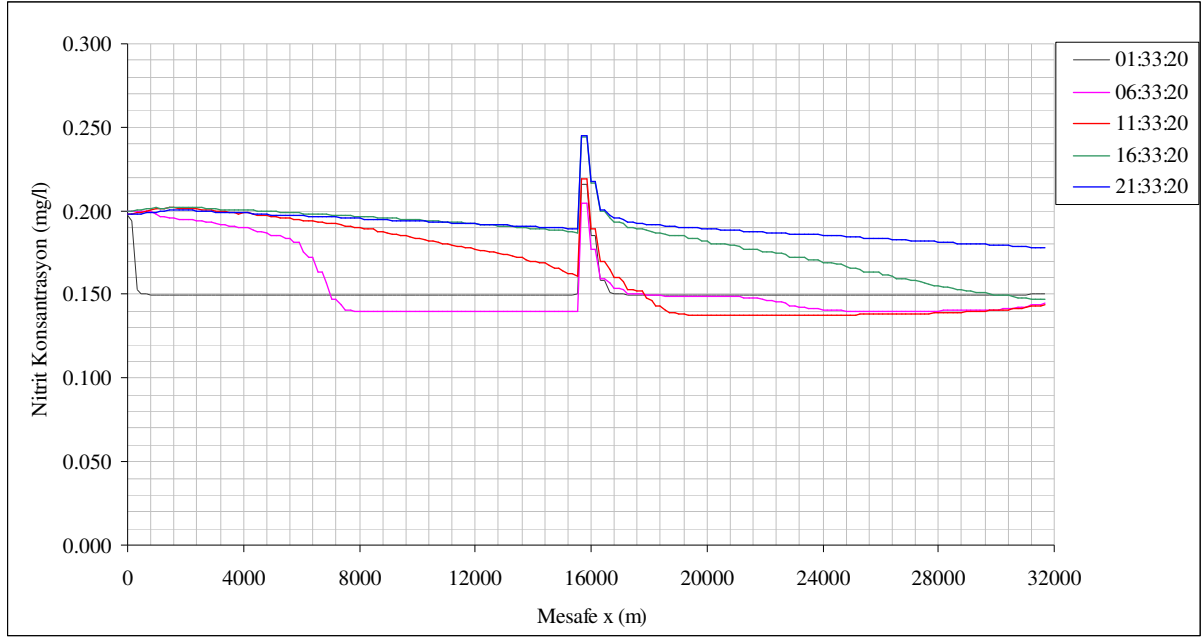
Şekil 6.43 Benzetimin çeşitli anlarında ÇO konsantrasyonunun kanal tabanında eksendeki dağılımı.



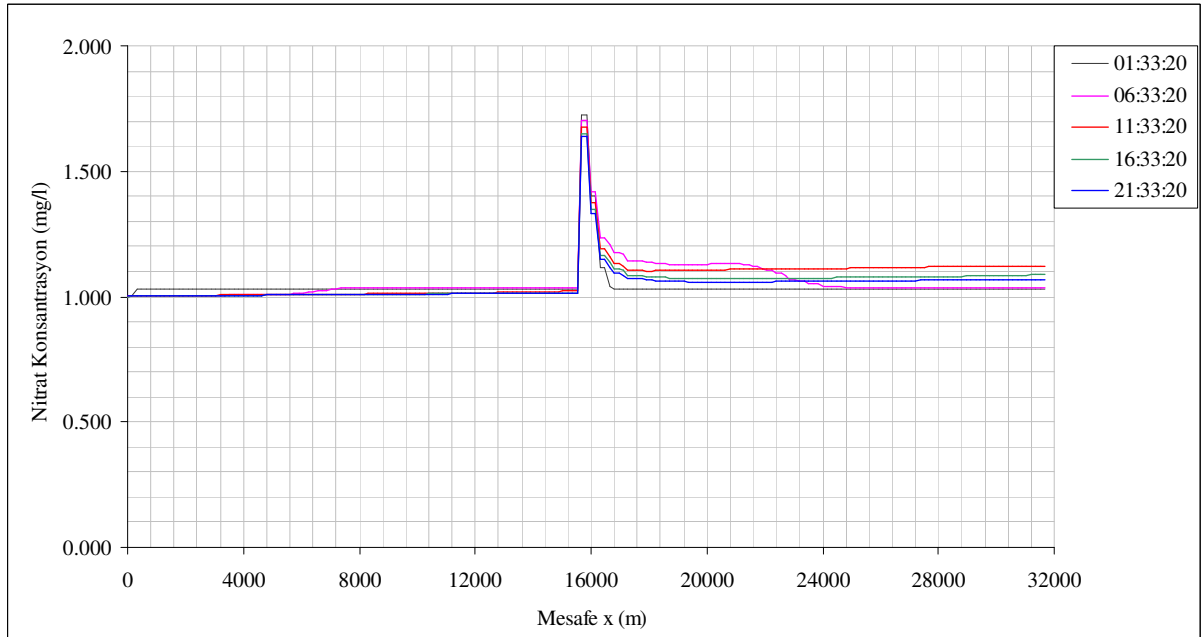
Şekil 6.44 Benzetimin çeşitli anlarında klorofil-a konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.



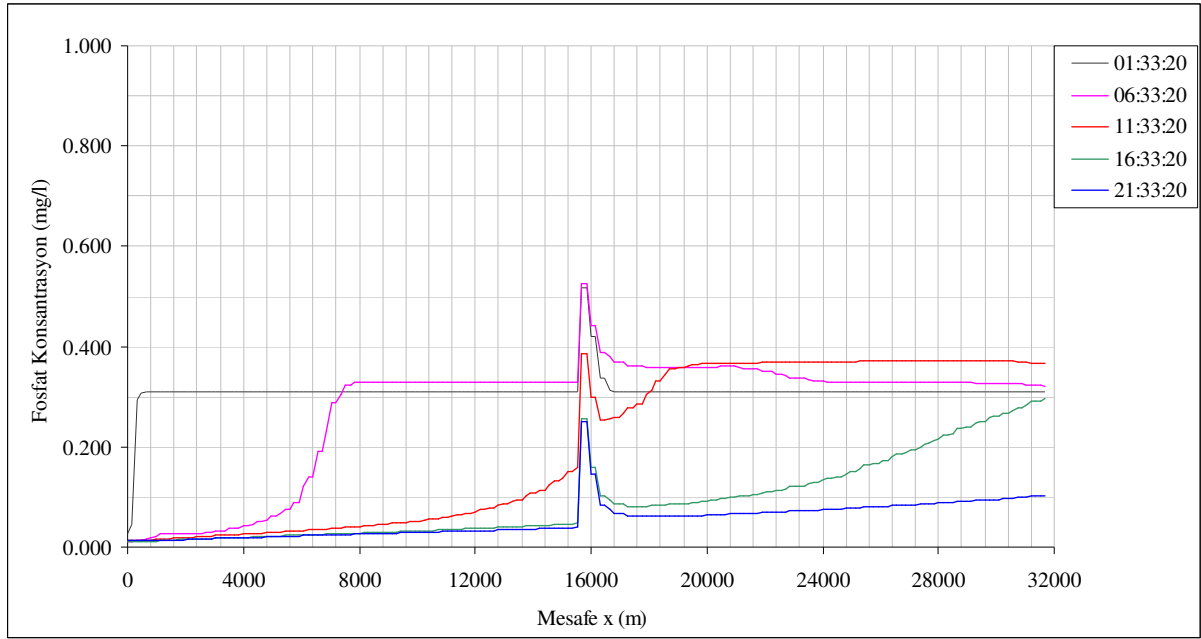
Şekil 6.45 Benzetimin çeşitli anlarında NH_4 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.



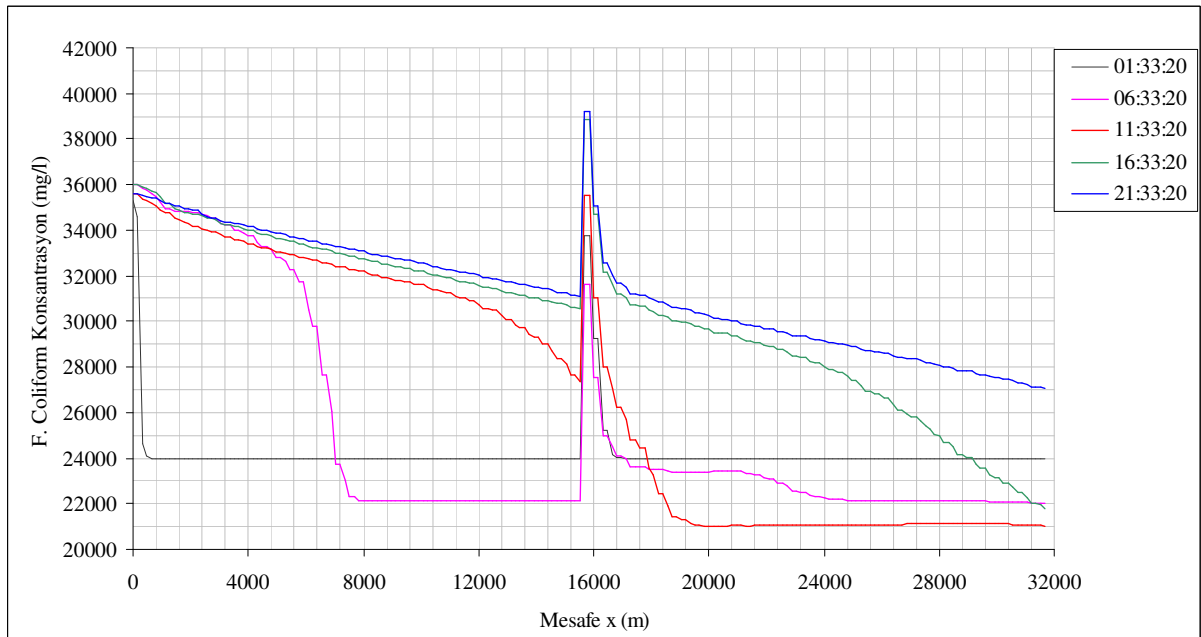
Şekil 6.46 Benzetimin çeşitli anlarında NO_2 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.



Şekil 6.47 Benzetimin çeşitli anlarında NO_3 konsantrasyonunun kanal tabanında eksenindeki dağılımı.



Şekil 6.48 Benzetimin çeşitli anlarında PO₄ konsantrasyonunun kanal tabanında eksendeki dağılımı.



Şekil 6.49 Benzetimin çeşitli anlarında Fekal Koliform konsantrasyonunun kanal tabanında eksendeki dağılımı.

6.1.1 Sonuçlar

İstanbul Boğazı'nın tabakalı hidrodinamik yapısı içerisinde Boğaz'a verilen derin deşarjlardan kaynaklanan kirliliğin su kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında İstanbul Boğazı'nın hidrodinamiği sabit derinlikli bir dikdörtgen kanal üzerinde uygun sınır

ve başlangıç koşulları ile Mike3 hidrodinamik modeli kullanılarak benzeştirilmiştir. Boğaz'daki akım yapısını kontrol eden başlıca faktörler olan tuzluluk ve su seviyesinin deşarjların yayılımı ve dağılımındaki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

İstanbul Boğazı üzerinde yerleştirilmiş beş adet atıksu ön arıtma tesisi ile ilişik olduğu Marmara Denizi ve Karadeniz'den gelen önemli boyutta bir kirlenme ile karşı karşıyadır.

Boğaz'ın akımını kontrol eden önemli parametrelerden ilki tuzluluktur. Marmara Denizi ~38 psu ve Karadeniz ise ~18 psu tuzluluğa sahiptir. Boğazdaki akım yapısı oldukça değişkendir ve dolayısıyla tuzluluk zaman içerisinde değişim göstermektedir. Yapılan benzetimlerde farklı tuzluluk değerlerinin su kalitesi parametrelerine BOİ ve ÇO'e ait konsantrasyonlar üzerinde oldukça önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Deşarjlar yüksek tuzluluk değerlerinde yüzeye daha hızlı ulaşmaktadır.

Boğaz akımını kontrol eden bir diğer parametre ise Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki su seviyesi farkıdır. Bu su seviyesi farkı kısa ve uzun dönemli olarak değişebilmektedir. Ortalama değerinin 0.30 m civarında olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada 0.10 m, 0.20 m ve 0.30 m su seviyesi farkları için akımın BOİ ve ÇO konsantrasyonlarının davranışı incelenmiştir. Su seviyesi farkının yüksek olduğu akım koşullarında deşarjlardan çıkan konsantrasyonların akım hızının artmasına bağlı olarak kanal içerisinde çok daha hızlı bir şekilde ilerlediği görülmüştür.

Yapılan benzetimlerde elde edilen BOİ ve ÇO dağılımlarının literatürde verilen advectif-dispersif dağılımı temsil eder şekilde Gauss dağılımı gösterdiği görülmüş ve Mike3 hidrodinamik modelinin İstanbul Boğazı hidrodinamiğinin benzeştirilmesi için uygunluğu ortaya konulmuştur.

Gerçekleştirilen çift tabakalı akım benzetimiyle kanal içerisinde BOİ, ÇO, Klorofil-a, NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , FK parametrelerinin dağılımları elde edilmiştir. Çift tabakalı akım halinde konsantrasyonların üst tabakaya geçmediği, İstanbul Boğazı için düşünülen basitleştirilmiş geometrik kesit olan dikdörtgen kesitli kanal halinde alt tabaka ile Karadeniz'e taşındığı görülmüştür.

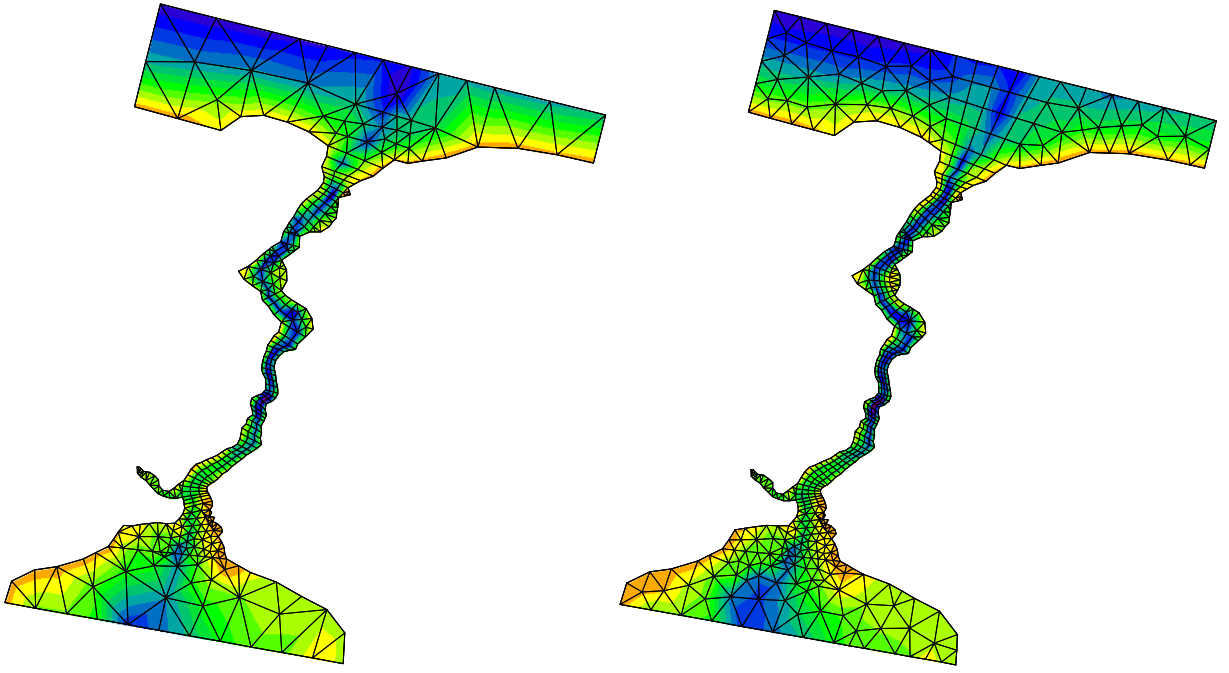
6.2. İstanbul Boğazı için Hidrodinamik Model

İstanbul Boğazı'ndaki akıntı sistemi Marmara Denizi ve Karadeniz arasındaki yoğunluk farkı ve su seviyesi farkı ile meteorolojik etkiler tarafından kontrol edilmektedir. Dünyanın en dar

su yollarından biri olan İstanbul Boğazı hidrodinamiğinin benzeştirilebilmesi amacıyla Bölüm 5’de ayrıntılı olarak anlatılan Mike3 hidrodinamik modelleme yazılımı kullanılmıştır. Bu bölümde anlatılan model uygulamaları; 1. İstanbul Boğazı için uygun hesap ağının belirlenmesi, 2. Hidrodinamik model başlangıç ve sınır koşulları ile zorlayıcı koşulların tanımlanması, 3. Hidrodinamik modelin kalibrasyonu, 4. Hidrodinamik modelin doğrulanması aşamalarını kapsamaktadır.

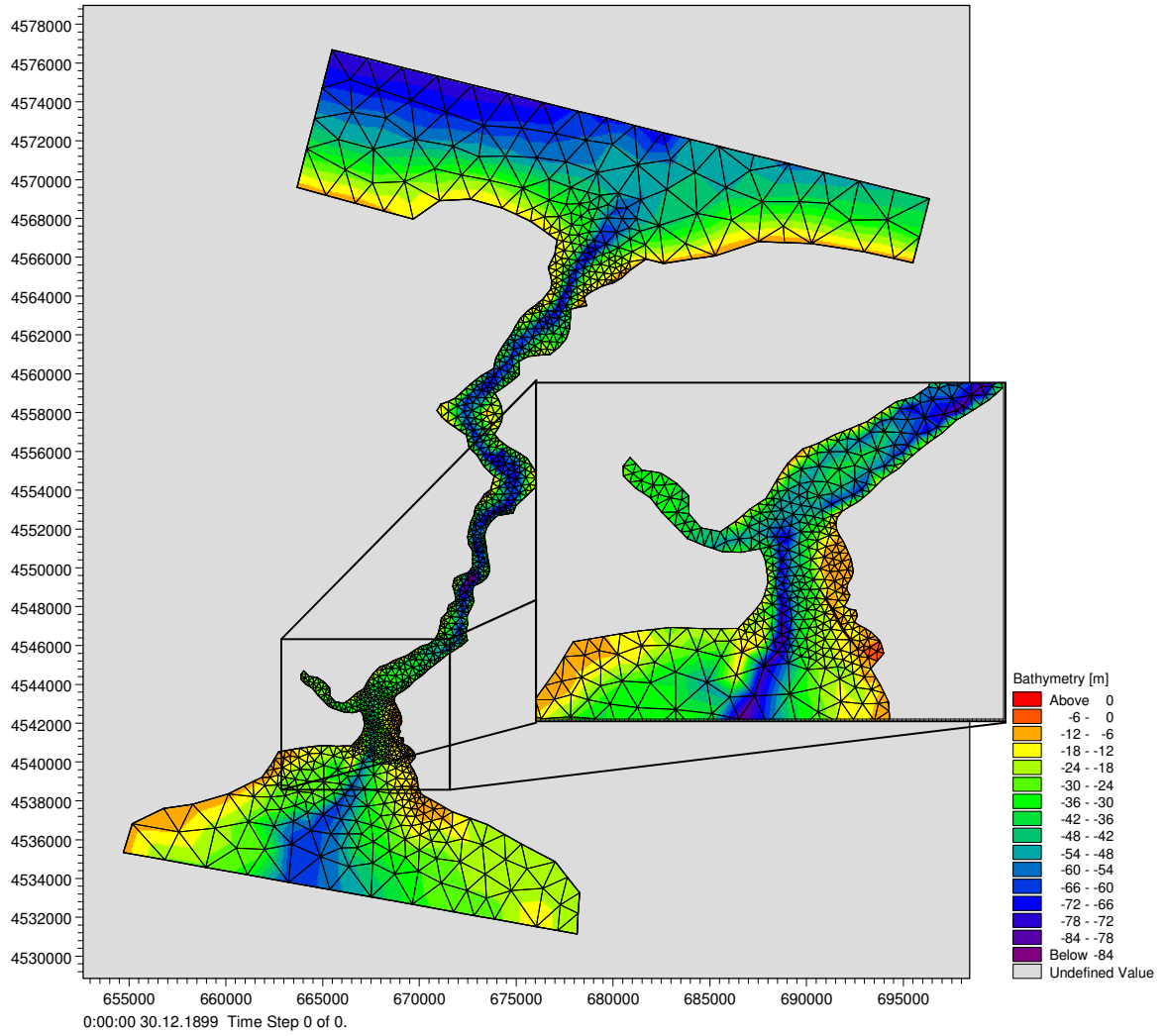
6.2.1 Uygun Hesap Ağının Oluşturulması

İstanbul Boğazı hidrodinamiğinin başarılı bir şekilde benzeştirilebilmesi için Boğaz’ın batimetrisini en doğru biçimde temsil eden mümkün olan en yüksek çözünürlüklü hesap ağının oluşturulması gerekmektedir. Modelin stabilite sorunu yaşamaması için model sınırları hem Karadeniz hem de Marmara Denizi içlerine doğru bir miktar genişletilmiştir. Elde edilen hesap ağının sınırları yaklaşık olarak Karadeniz’de 30 km ve Marmara Denizi’nde 22 km. genişliğindedir. Bu çalışmada DHI Mike Zero Mesh Generator yazılımı kullanılarak çok sayıda farklı hesap ağları üretilmiştir. Bu çalışmada uygun hesap ağının elde edilmesinde yapılandırılmış ve yapılandırılmamış hesap ağları değerlendirilmiştir. Yapılandırılmış hesap ağı dikdörtgen elemanlardan oluşmaktadır. Yapılandırılmamış hesap ağı ise model alanını üçgen elemanlara bölmektedir. İstanbul Boğazı’nın oldukça girintili-çıkıntılı kıyıları düşünüldüğünde hesap ağının tamamen dikdörtgen elemanlardan oluşturulması uygun bir yöntem olmayacaktır. Bu nedenle bu çalışmada yalnızca üçgen elemanlardan oluşan yapılandırılmamış hesap ağı ile hem üçgen hem de dikdörtgen elemanların bir arada kullanıldığı hibrit hesap ağı üzerinde çalışılmıştır. Hibrit ağda ana akımın ilerlediği Boğaz eksenindeki ana kanalda düzgün dikdörtgen elemanlar ve girintili-çıkıntılı kıyılar boyunca üçgen elemanlar kullanılarak Boğaz topoğrafyasına en uygun hesap ağının oluşturulması amaçlanmıştır. Böylece kıyılardaki küçük koy ve körfezler de mümkün olduğunca hesap ağına dâhil edilmeye çalışılmıştır. Üretilen iki farklı hibrit hesap ağı Şekil 6.50’de gösterilmiştir. Şekil 6.50’deki kaba hibrit hesap ağı 485 düğüm noktası ve 533 elemandan oluşmaktadır. İnce hibrit ağ ise 670 düğüm noktası ve 744 elemandan oluşmaktadır. Kaba hibrit ağ üzerinde yapılan benzetimlerde model alanı içerisindeki akıntı hızlarının ölçümlere göre oldukça düşük hesaplandığı görülmüş ve hesap ağının inceltilmesi ile bu sorunun üstesinden gelinmeye çalışılmıştır. Ancak ince hibrit ağ ile de bir miktar iyileşme kaydedilmekle birlikte akıntı hızları yine ölçümlere göre oldukça düşük mertebelerde kalmıştır. Bunun üzerine yapılandırılmamış ağ alternatiflerinin denenmesine geçilmiştir.



Şekil 6.50 Hibrit hesap ağları.

Üretilen pek çok farklı hesap ağı arasından model benzetimlerinin çalışma süresi ile sonuçların doğruluğu arasında bir optimizasyon yapılarak uygun hesap ağı seçilmiştir. Seçilen hesap ağı 1246 düğüm noktası ve 2047 elemandan oluşmaktadır. Hesap ağının tamamlanması için gereken batimetrik veriler Türkiye Cumhuriyeti Deniz Kuvvetleri Komutanlığı SHODB tarafından toplanan en güncel yüksek çözünürlüklü ölçümlerden elde edilmiştir. Veriler “Natural Neighbourhood” yöntemi kullanılarak interpolate edilmiştir. Böylece model alanına ait batimetri ve seçilen yapılandırılmamış hesap ağı Şekil 6.51’de gösterilmiştir.



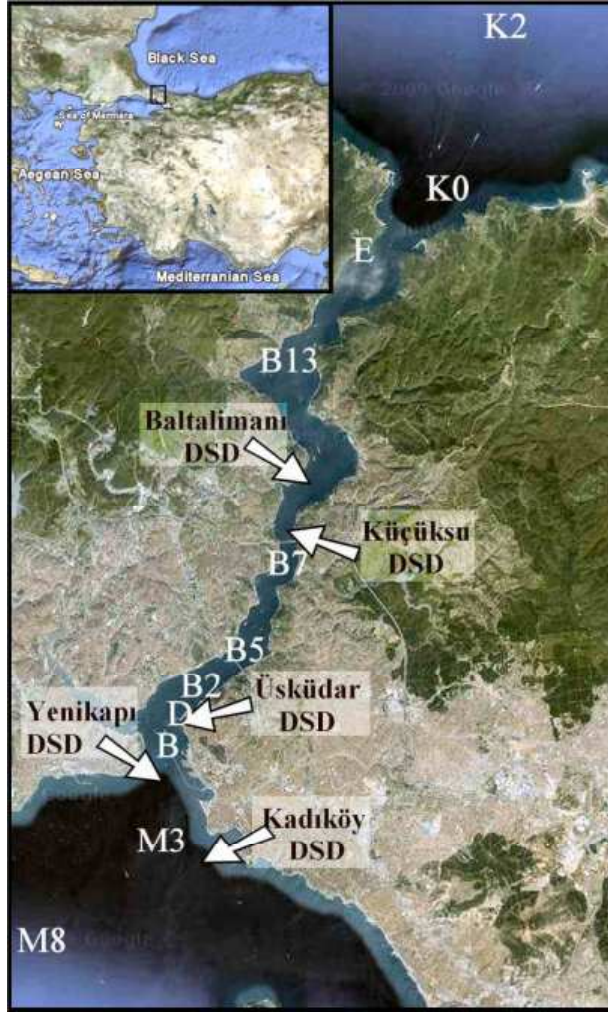
Şekil 6.51 İstanbul Boğazı sayısal modeli için kullanılan hesap ağı.

6.2.2 Başlangıç ve Sınır Koşulları ile Zorlayıcı Koşulların Tanımlanması

İstanbul Boğazı hidrodinamik modeli üzerinde etkin olan başlıca zorlayıcı kuvvetler; Marmara Denizi ve Karadeniz arasındaki su seviyesi farkı, bu iki deniz arasındaki yoğunluk farkı ve model alanı üzerindeki atmosferik basınç ve rüzgâr alanlarıdır. Model benzetimlerinde bu etkilerin dâhil edilebilmesi için her iki açık model sınırlarında su seviyeleri ile tuzluluk profilleri tanımlanmıştır. Deniz yüzeyinden 10 m yukarıdaki atmosferik basınç ve rüzgâr alanları tanımlanmıştır.

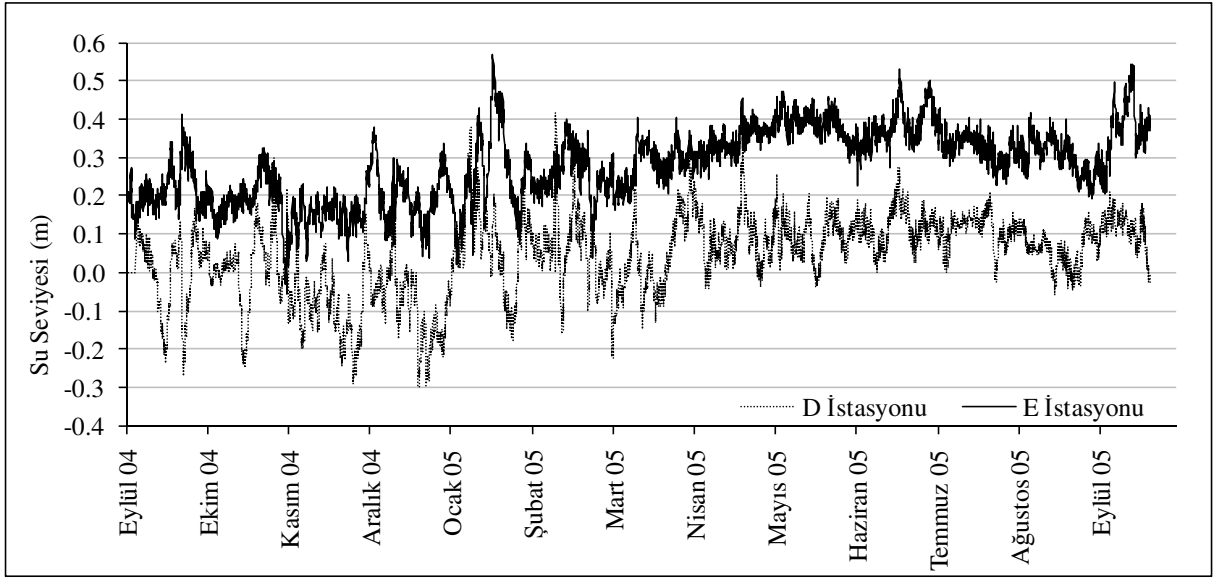
Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma Bakanlığı tarafından Marmaray projesi kapsamında İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ve Marmara Denizi ile birleştiği kesitlerde su seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Su seviyesi verileri 22.09.2004-05.10.2005 tarihleri arasındaki yaklaşık 1 yıllık dönem içerisinde 1 saatlik aralıklarla D ve E istasyonlarında toplanmıştır. D ve E istasyonları İstanbul Boğazı'nda konumlandırılmış diğer hidrodinamik ve su kalitesi ölçüm istasyonları ile

birlikte Şekil 6.52’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ölçüm istasyonları model sınırlarına göre bir miktar içeridedir. Ancak açık denizde su seviyesi ölçümü oldukça zor olduğundan ve İstanbul Boğazı’nda toplanmış en güncel, en uzun süreli ve model sınırlarına en yakın su seviyesi ölçümleri olduğundan bu çalışmada bu veriler kullanılmıştır.



Şekil 6.52 İstanbul Boğazı’nda ölçüm istasyonları.

Yine 1 yıllık süre boyunca D ve E istasyonlarında toplanan ölçüm verileri Şekil 6.53’de bir arada görülmektedir. Şekil 6.53’de gösterilen veriler incelendiğinde Karadeniz’in Marmara Denizi’ne göre daha yüksek su seviyesine sahip olduğu, E istasyonunda kaydedilen verilerin 1 yıllık ölçüm dönemi içerisinde yalnızca Kasım 2004’de olmak üzere bir kez sıfırın altına düştüğü görülmektedir. Yine D istasyonu verilerinin ise sıfır etrafında salınım gösterdiği görülmektedir.



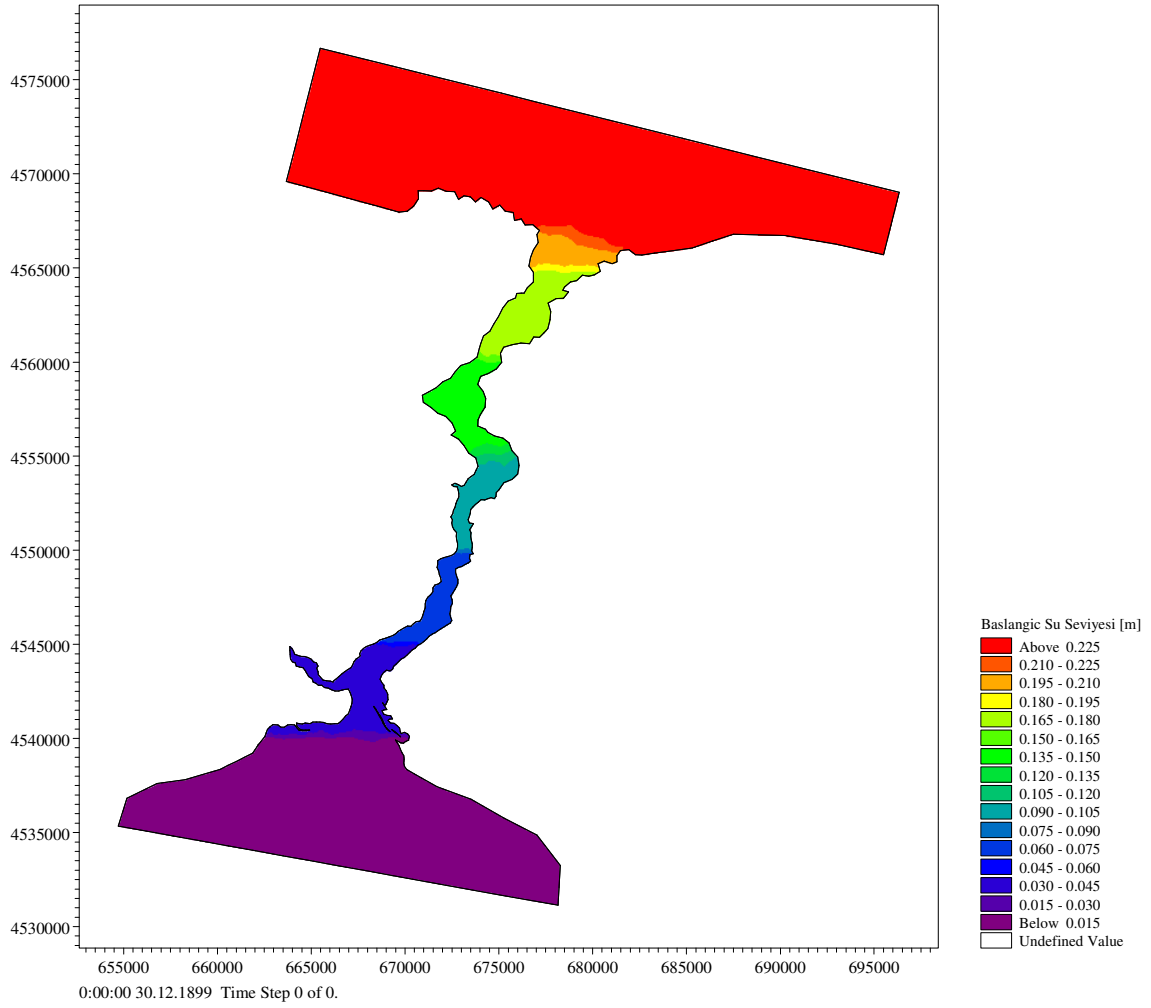
Şekil 6.53 D (Marmara Denizi Girişi) ve E (Karadeniz Girişi) istasyonlarında kaydedilen su seviyesi verileri.

Şekil 6.53’de gösterilen su seviyesi verilerine dair istatistiksel değerlendirme Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5 Su seviyesi ölçümlerinin istatistiksel değerlendirmesi.

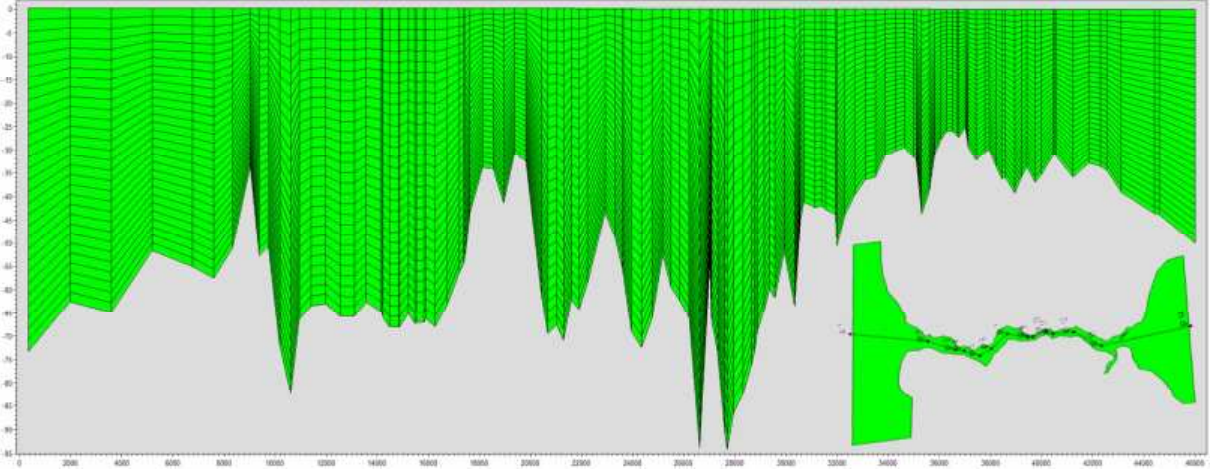
İstasyon Adı	İstasyon Konumu	Ölçüm Yöntemi	En Büyük Değer (m)	En Küçük Değer (m)	Ortalama Değer (m)	Standart Sapma (m)
D	41°01’31.4’’N 29°00’30.3’’E	CTD	0.42	-0.30	0.04	0.11
E	41°12’13’’N 29°05’54’’E	CTD	0.57	-0.06	0.28	0.10
Fark (E-D)	-	-	0.62	-0.21	0.24	0.10

Çizelge 6.5’den görüldüğü gibi Boğaz’ın iki ucu arasındaki su seviyesi farkı 1 yıl içerisinde en büyük 0.62 m ve ortalama 0.24 m olmuştur. Şekil 6.53’den görüldüğü gibi zaman zaman Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki fark sıfır olmuş kimi zaman da Marmara Denizi su seviyesi Karadeniz su seviyesinden daha büyük olmuştur. Bu çalışmada hidrodinamik modelin başlangıç su yüzü tanımlaması bu veriler doğrultusunda Şekil 6.54’de gösterildiği gibi yapılmıştır. Model alanı içerisindeki başlangıç su seviyesi Marmara Denizi’nde 0, Karadeniz’de ise 0.24 m olacak şekilde Boğaz boyunca tedrici biçimde artan bir değer olarak tanımlanmıştır. D istasyonunda toplanan su seviyesi ölçüm verileri modelin Marmara Denizi girişindeki açık sınır koşullarını ve E istasyonunda toplanan su seviyesi ölçüm verileri de modelin Karadeniz girişindeki açık sınır koşullarını oluşturmaktadır.



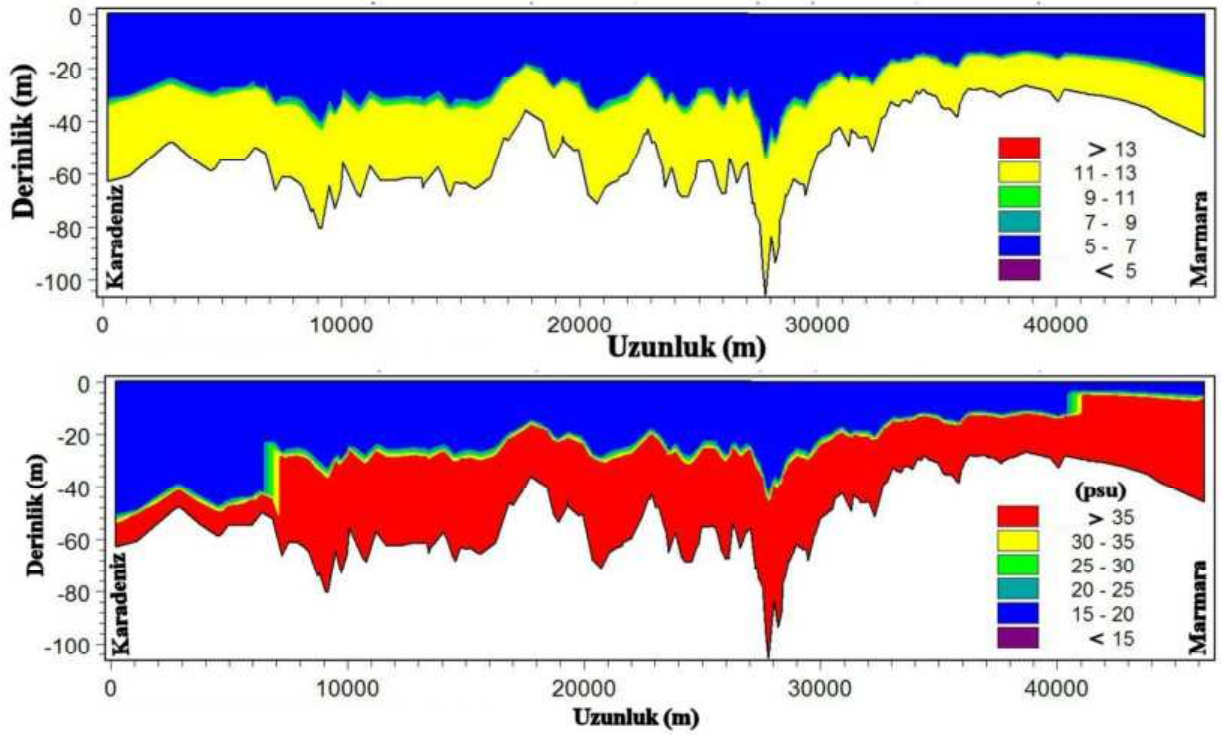
Şekil 6.54 Hidrodinamik modelde model alanı içerisinde başlangıç su yüzünün tanımlanan değişimi.

İstanbul Boğazı hidrodinamik modeli düşeyde 30 tabakaya bölünmüştür. 30 tabaka Boğaz'daki çift tabakalı karmaşık akım yapısını mümkün olan en yüksek doğrulukta benzeştirmek üzere seçilmiştir. Çalıştırılan ön modellerde tabaka sayısının artırılması ile model sonuçlarında iyileşme gözlemlendiği görülmekle birlikte hesap süresi bu iyileşmeye göre oldukça fazla artmaktadır. Dolayısıyla gerçekçi hesap süreleri ile çalışabilmek için hidrodinamik model düşeyde 30 katmandan oluşturulmuştur. Katmanlar Boğaz boyunca her bir enkesitte derinlik boyunca eşit yüksekliktedir ve derinlik boyunca herhangi bir katmanda inceltmeye gidilmemiştir. Bunun nedeni; Boğaz tabanında yerleştirilmiş olan derin deniz deşarjlarından akım ortamına boşalan su kalitesi değişkenlerinin tüm derinlik boyunca taşınımlarının doğru bir şekilde ve her katman için aynı doğrulukta benzeştirilmesini sağlamaktır. Boğaz ekseni boyunca alınmış bir boykesit, düşey ayrıklaştırmanın daha net görülebilmesi açısından Şekil 6.55'de gösterilmiştir.



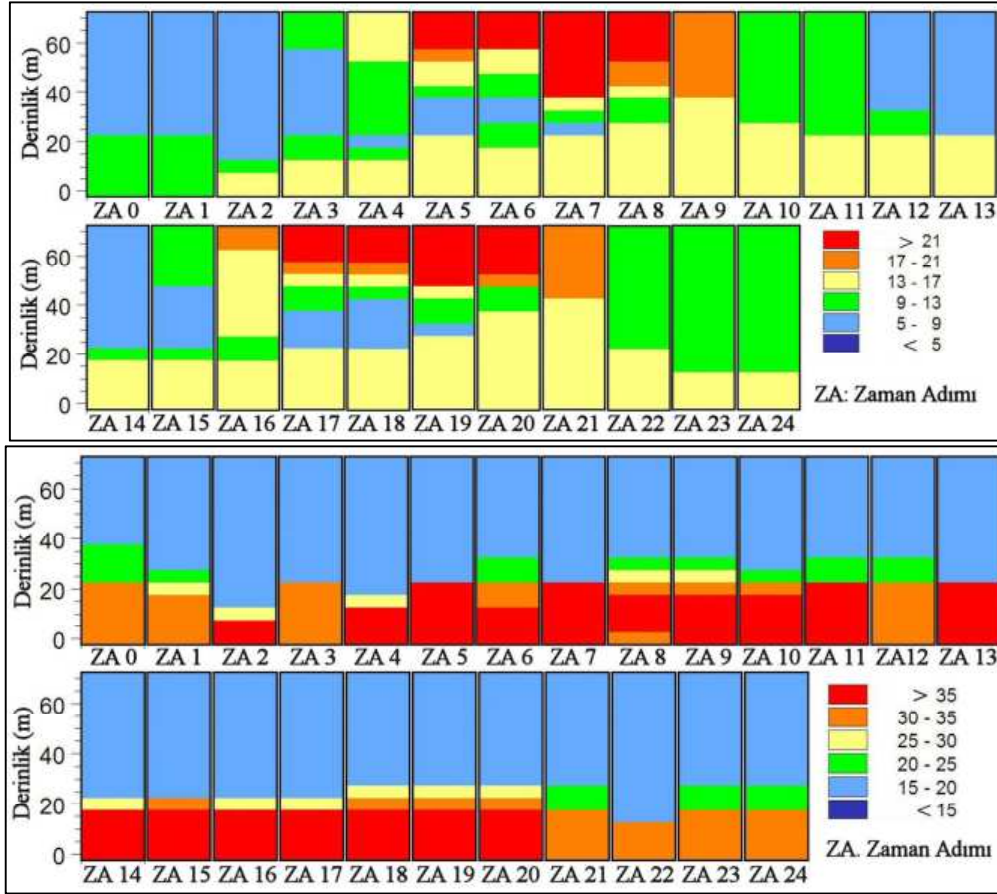
Şekil 6.55 Model alanının ekseni boyunca alınmış bir boykesitte hesap ağının düşey ayrıklaştırılması.

Baroklinik benzetimler başlangıç koşullarının çözüm üzerindeki etkilerini en aza indirmek ve modelin “warm up” süresini azaltmak için gerçekçi başlangıç sıcaklık ve tuzluluk alanlarını gerektirmektedir. Model hacmi içerisinde başlangıç sıcaklığı üst tabakada (yüzeyden itibaren 13 katman) sabit 7°C ve alt tabakada (tabandan itibaren 13 katman) sabit olarak 13°C olarak tanımlanmıştır. Ara tabakada ise bu iki değer interpolasyonu ile elde edilen değerler kullanılmıştır. Burada belirtilen sıcaklık başlangıç koşulunun belirlenmesinde İSKİ Su Kalitesi İzleme Çalışması 2004 verilerinden yararlanılmıştır (Sur vd., 2004). Başlangıç tuzluluğunun belirlenmesinde de benzer yol izlenerek tabakalı bir tuzluluk profili tanımlanmıştır. Tuzluluk üst tabakada (yüzeyden itibaren 13 katman) 18 psu, alt tabakada (tabandan itibaren 13 katman) 38 psu olarak tanımlanmış ve ara tabaka boyunca bu iki değer arasında interpolate edilmiştir. Model alanı içerisindeki sıcaklık ve tuzluluğun başlangıçtaki dağılımı Şekil 6.56’da gösterilmiştir.

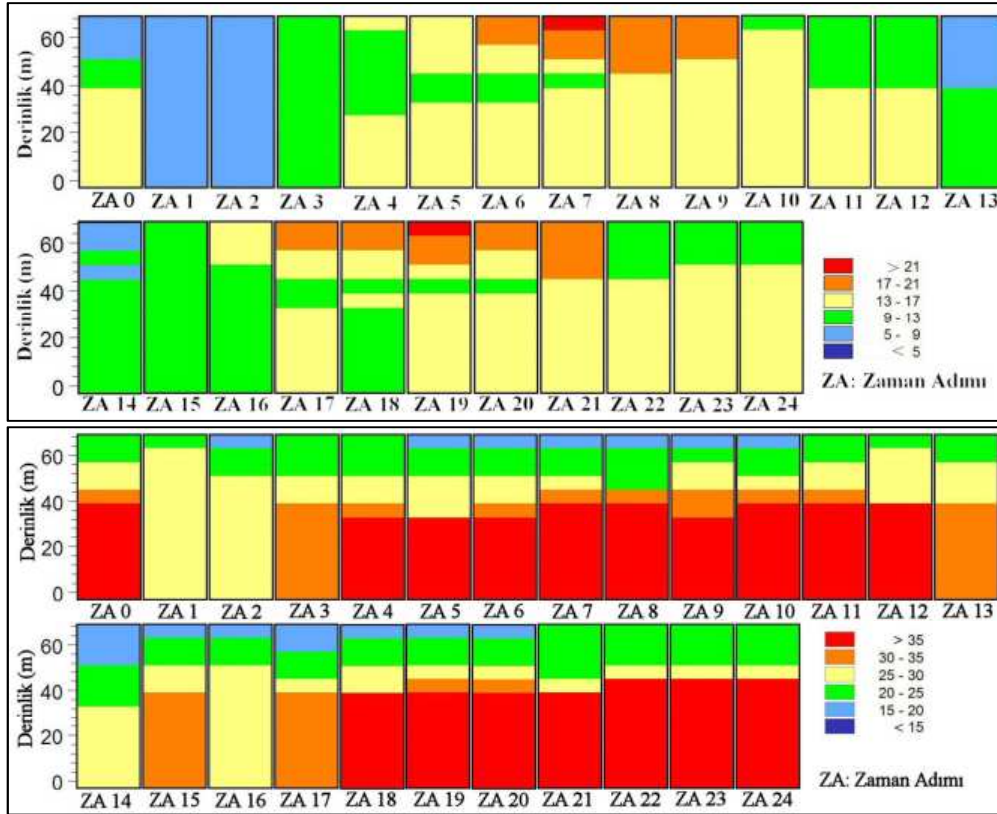


Şekil 6.56 Model alanı içerisinde sıcaklık (°C) ve tuzluluk (psu) başlangıç koşulları.

Sıcaklık ve tuzluluk sınır koşulları ise her iki sınırdaki İSKİ Su Kalitesi İzleme Çalışması 2004 raporunda sunulan ölçümlerden faydalanılarak oluşturulmuştur (Sur vd., 2004). Her iki sınırdaki en yakın istasyonlardaki derinlik boyunca ölçülmüş sıcaklık ve tuzluluk değerleri kullanılmıştır. Dolayısıyla sınır enkesiti boyunca yalnızca bir noktada ölçüm verisi vardır. Bu nedenle sınır koşulları oluşturulurken enkesit boyunca değişim tanımlanmamıştır. Yine 1 yıllık süre içerisinde kısıtlı sayıda ölçüm mevcuttur. Model sınırlarındaki istasyonlarda ölçümler mevsimsel ve model alanı içerisindeki istasyonlarda ise aylıktır. Dolayısıyla zamansal boyutta da interpolasyon yapılmıştır. Modelin Karadeniz sınır koşulları İSKİ Su Kalitesi İzleme istasyonlarından K2 istasyonunda toplanan veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Modelin Marmara Denizi sınırında ise yine aynı çalışma kapsamında kullanılan bir diğer istasyon olan M8 istasyonu verileri kullanılmıştır. Her iki açık sınırdaki ölçüm verileri zamansal interpolasyon kullanılarak 15 günlük zaman adımları şeklinde düzenlenmiş ve sınır koşulları oluşturulmuştur. Modelin Karadeniz ve Marmara Denizi sınırlarındaki sıcaklık sınır koşulları Şekil 6.57’de ve tuzluluk sınır koşulları da Şekil 6.58’de gösterilmiştir.



Şekil 6.57 Modelin Karadeniz sınırında sırasıyla sıcaklık (°C) ve tuzluluk (psu) sınır koşulları.



Şekil 6.58 Modelin Marmara Denizi sınırında sırasıyla sıcaklık (°C) ve tuzluluk (psu) sınır koşulları.

Hidrodinamik modelde başlıca zorlayıcı faktör olarak model alanı üzerindeki atmosferik basınç ve rüzgâr alanları dikkate alınmıştır. Atmosferik basınç ile rüzgâr U (doğu-batı) ve V (kuzey-güney) hız bileşenlerine dair 6 saat aralıklı veriler ECMWF tarafından yapılan meteorolojik model tahminlerinden elde edilmiştir. ECMWF tahminleri 2.5° aralıklı haritalardan alınarak model hesap ağı üzerinde interpolate edilmiştir. Rüzgar kuvvetinin model alanı üzerinde oluşturduğu yüzey gerilmesi, $\bar{\tau}_s$ Denklem 6.1’de verilen ifade ile hesaplanmaktadır.

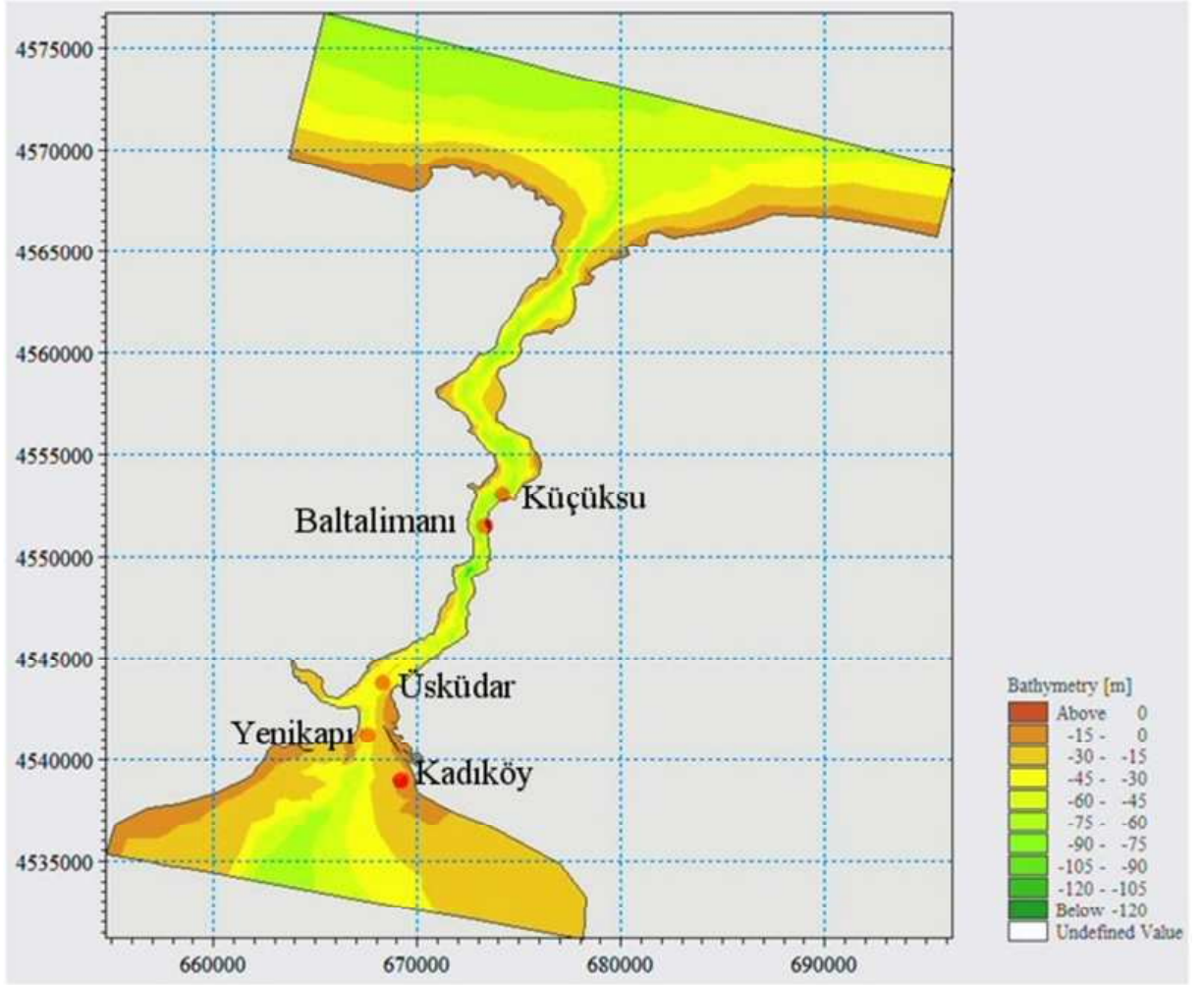
$$\bar{\tau}_s = \rho_a c_d |\mathbf{u}_w| \bar{\mathbf{u}}_w \quad (6.1)$$

Bu ifadede ρ_a havanın özgül kütlesi, c_d hava için ampirik sürtünme katsayısı ve $\bar{\mathbf{u}}_w = (u_w, v_w)$ ise su yüzeyinden 10 m yukarıdaki rüzgar hızıdır. C_d sürtünme katsayısı oldukça belirsiz olduğundan, bu çalışmada sürtünme katsayısının parameterizasyonu için literatürde geniş kabul gördüğü hali ile Wu (1980, 1994) tarafından verilen ampirik denklem kullanılmıştır. Sözü edilen ifade Denklem 6.2’de verilmiştir.

$$c_d = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} \leq w_b \\ c_b & w_{10} > w_b \end{cases} \quad (6.2)$$

Bu ifadede c_a , c_b , w_a ve w_b ampirik faktörler ve w_{10} ise su yüzeyinden 10 m yukarıdaki rüzgar hızıdır. Bu ampirik faktörlerin literatürde geniş kabul gören değerleri $c_a = 1.255 \times 10^{-3}$, $c_b = 2.425 \times 10^{-3}$, $w_a = 7$ m/s ve $w_b = 25$ m/s dir. Bu değerler açık deniz uygulamaları için oldukça iyi sonuç vermektedir. Ancak bu çalışmanın konusu olan dar su yolu benzeri akımlarda sözkonusu ampirik katsayıların belirlenmesine dair literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla katsayılar varsayılan değerleri ile dikkate alınmıştır.

Hidrodinamik model alanı içerisinde beş adet derin deniz deşarjı mevcuttur. Bu derin deniz deşarjları model hacminin tabanında tanımlanmıştır. Model alanı içerisindeki konumları Şekil 6.59’da gösterilmiştir. Bu kaynakların özellikleri Çizelge 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.59 Hidrodinamik model benzetiminde tanımlanan kaynakların model alanı içerisindeki konumları.

Çizelge 6.6 Hidrodinamik Model kaynak noktalarının konum ve özellikleri.

Kaynak Adı	Koordinatı		Debi (m ³ /s)	Tuzluluk (psu)	Sıcaklık (°C)
	Enlem	Boylam			
Küçükusu	674167	4553062	1	0	10
Baltalımanı	673308	4551498	4.45	0	10
Üsküdar	668306	4543761	0.32	0	10
Yenikapı	667524	4541182	5.62	0	10
Kadıköy	669166	4538994	3.86	0	10

Modellerde zaman adımı en kritik CFL sayısı 0.5'i aşmayacak şekilde değişkendir. Buna göre sıg su denklemlerinin çözümünde zaman adımı en büyük 1.34 s ve en küçük 0.67 s değerlerini alırken taşınım denklemlerinin çözümünde ise en büyük 600 s ve en küçük 50 s değerlerini almıştır. Model stabilite sorunu yaşamamıştır.

Model hacmi içerisinde suyun yoğunluğu hem sıcaklığın hem de tuzluluğun bir fonksiyonu

olarak dikkate alınmıştır. Çözümde yatayda Smagorinsky formülasyonu kullanılmıştır. Minimum ve maksimum eddy viskozitesi parametreleri sırasıyla 1.8×10^{-6} ve $10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$ alınmıştır. Düşey eddy viskozitesi ise k- ϵ formülasyonu ile tanımlanmıştır ve minimum ve maksimum eddy viskoziteleri sırasıyla 1.8×10^{-6} ve $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir.

6.2.3 Hidrodinamik Modelin Kalibrasyonu

Uygun hesap ağının üretilmesi, başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması ile model alanı içerisindeki zorlayıcı kuvvetlerin tanımlanmasının ardından hidrodinamik modelin kalibrasyonu aşamasına geçilmiştir.

Hidrodinamik modelin Smagorinsky sabiti, taban pürüzlülüğü, yatay ve düşeydeki dispersiyon ölçek faktörleri ile sınır ve başlangıç koşullarına karşı hassasiyeti incelenmiştir. Bunun için çok sayıda farklı benzetimler yapılmıştır. Burada bunlardan dokuz benzetim özetlenmiştir. Her bir benzetim için başlangıç ve sınır koşulları ile Smagorinsky sabiti, yatay ve düşey dispersiyon ölçek faktörleri ile taban pürüzlülüğü değerleri Çizelge 6.7’de gösterilmiştir. Tüm benzetimler aynı ölçüm dönemini içermektedir. Ölçüm dönemi (01.11.2004 01:00-12.11.2004 03:00) 267 adet saatlik akıntı verisi içermektedir.

Yapılan benzetimlerden elde edilen sonuçlar en uygun model parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla karşılaştırılmıştır. Burada yapılan tüm değerlendirmeler ölçüm verilerinin mevcut olduğu B istasyonu için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen model sonuçları B istasyonunda ölçülen akıntı hızları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda benzetim sonucu elde edilen veri serisi ile ölçümlerden elde edilen veri serisi arasındaki korelasyon katsayısı R esas alınmıştır. Korelasyon katsayısı R aşağıda verilen ifade ile hesaplanmıştır.

$$R(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

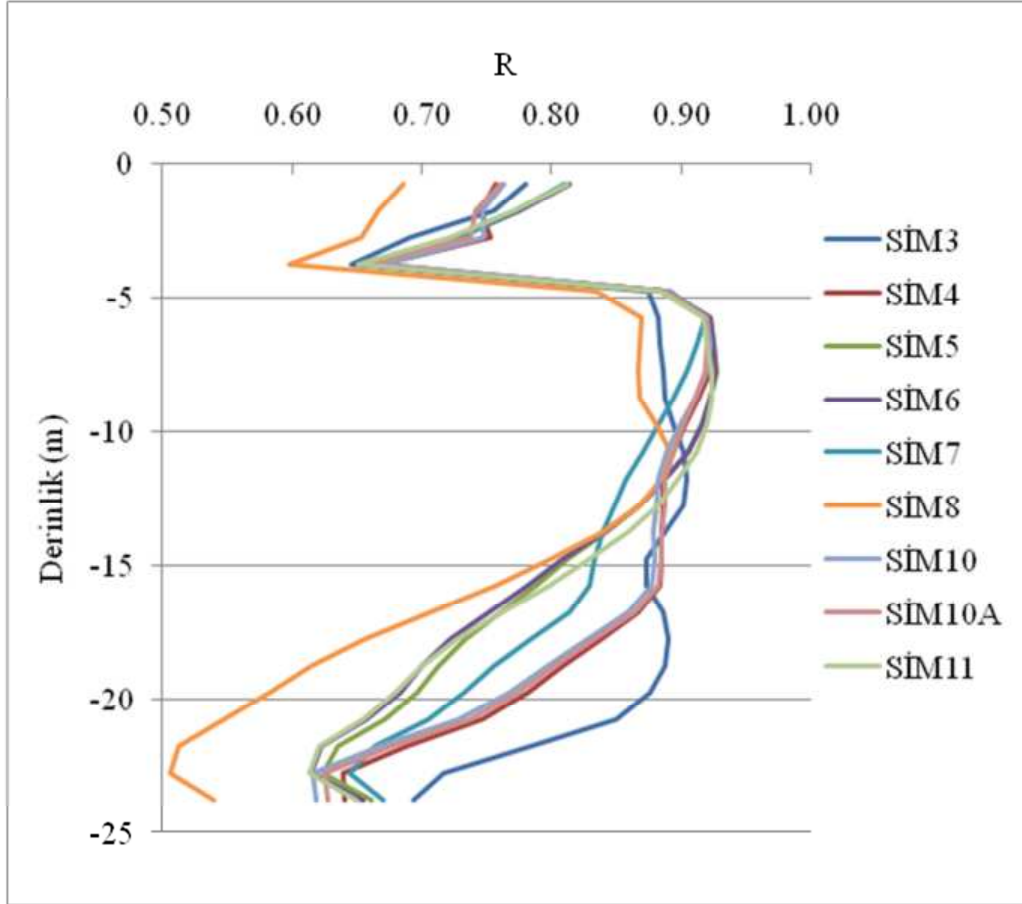
Bu ifadede x ve y her bir veri setindeki değerleri $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ise veri setlerinin ortalama değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.7 Model kalibrasyonu aşamasında benzetimler ve özellikleri.

Benzetim No	Başlangıç Koşulu	Sınır Koşulları	Taban Pürüzlülüğü (m)	Smagorinsky Sabiti	Dispersiyon Ölçek Faktörü	
					Yatay	Düşey
Sim3	Başlangıçta hızlar 0, tedrici değişen su seviyesi*	Su seviyesi, tabakalı sıcaklık, tabakalı tuzluluk	0.45	0.28	1	1
Sim4	Başlangıç benzetimi	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.30	0.28	0	0
Sim5	Başlangıç benzetimi	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.30	0.28	1	1
Sim6	Başlangıç benzetimi	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.30	0.24	1	1
Sim7	Yatay ara tabaka, hızlar 0, tedrici değişen su seviyesi*	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.30	0.24	1	1
Sim8	Yatay ara tabaka, hızlar 0, tedrici değişen su seviyesi*	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.05	0.28	1	1
Sim10	Başlangıç benzetimi	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.05	0.24	0	0
Sim10a	Başlangıç benzetimi	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0.05	0.28	0	0
Sim11	Başlangıç benzetimi	Su seviyesi, Tabakalı sıcaklık, sabit tuzluluk	0	0.28	1	1

Karşılaştırmalar Boğaz'ın B istasyonunun bulunduğu kesitindeki ana akım doğrultusu olan Kuzey-Güney yönündeki hız bileşeni (V) için gerçekleştirilmiştir. Tüm benzetimlerden elde edilen V hız bileşeni değerleri ile aynı derinlikteki ölçüm değerleri arasındaki korelasyon katsayıları Şekil 6.60'ta verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi üst ve ara tabakalar için tüm benzetimlerden elde edilen korelasyon katsayıları birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Ancak alt tabaka söz konusu olduğunda sim3 belirgin bir biçimde öne

çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı İstanbul Boğazı'nda su kalitesinin modellenmesi olduğundan ve Boğaz boyunca atıksu derin deniz deşarjları ile alt tabakaya verildiğinden alt tabakanın mümkün olan en yüksek doğrulukla benzeştirilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen aşamaları için sim3'ün esas alınması uygun bulunmuştur.



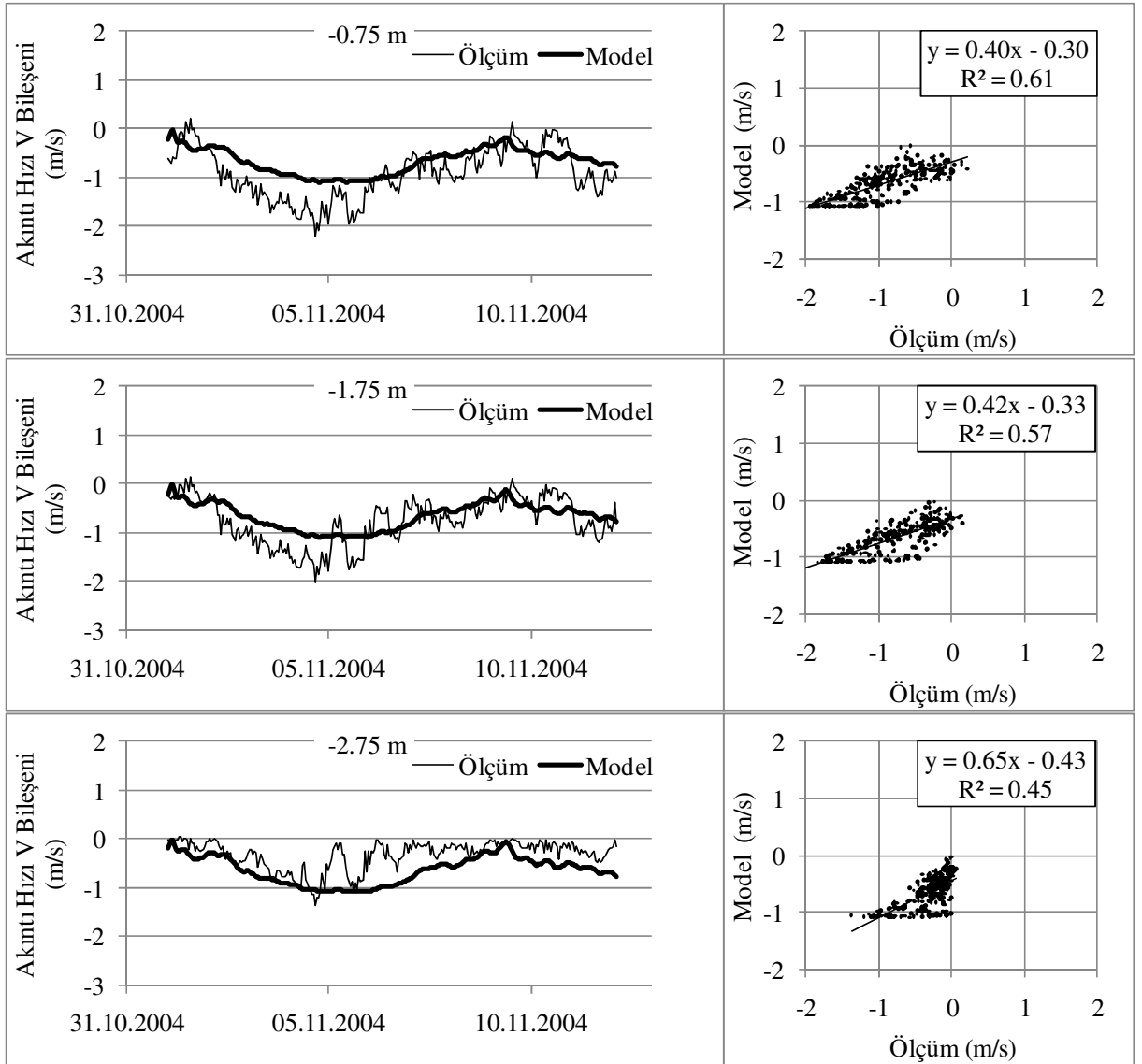
Şekil 6.60 Karşılaştırmalı benzetimlerden elde edilen R korelasyon katsayıları.

Hidrodinamik model Smagorinsky sabiti, taban pürüzlülüğü, yatay ve düşeydeki dispersiyon ölçek faktörü parametreleri ile kalibre edilmiştir. Sonuç olarak bu parametrelere ait elde edilen kalibre edilmiş değerler Çizelge 6.8'de verilmiştir.

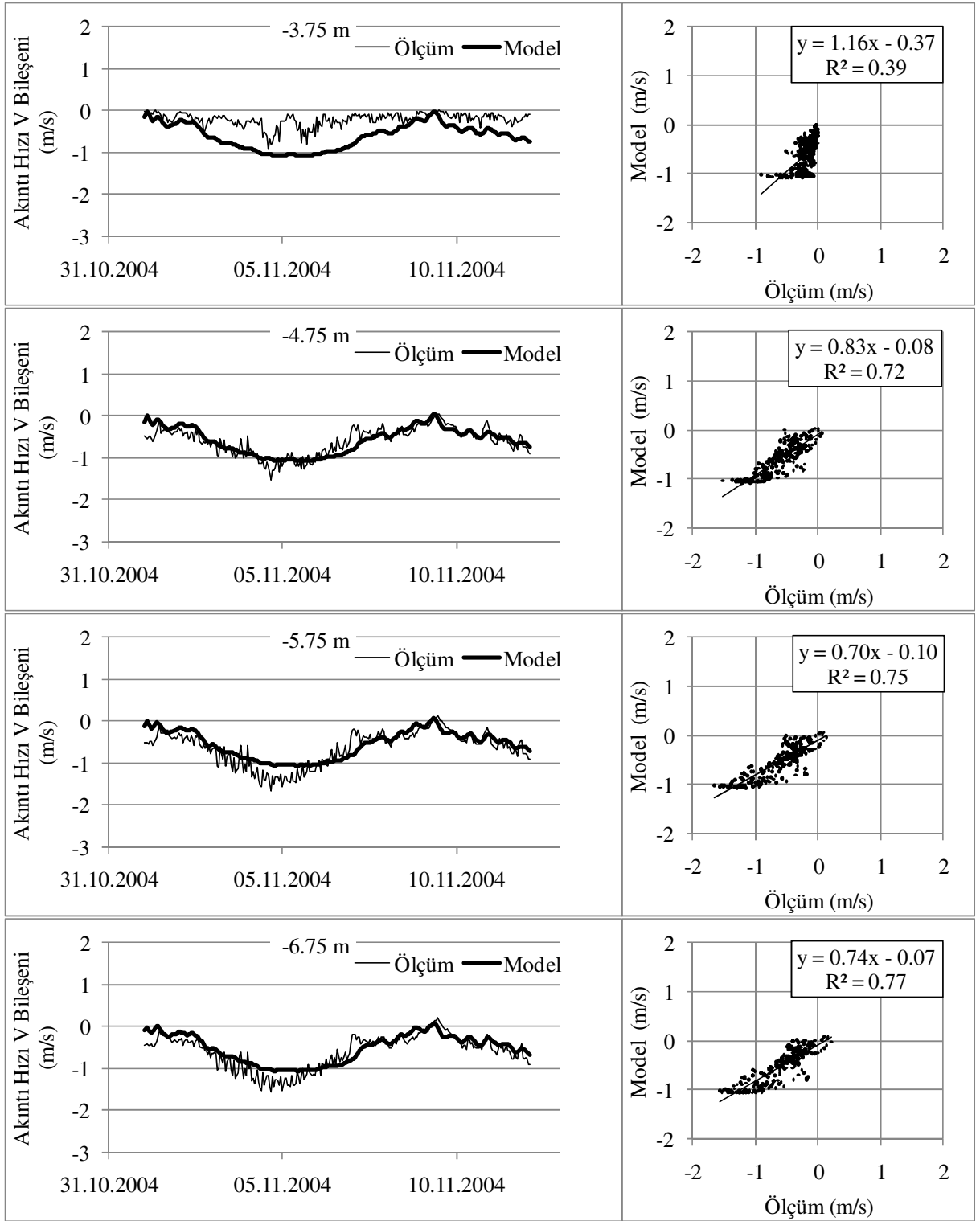
Çizelge 6.8 Kalibrasyon parametreleri, alt ve üst limitleri ile kalibre edilmiş değerleri.

Parametre Adı	Üst Limit Değeri	Alt Limit Değeri	Kalibre Edilmiş Değer
Smagorinsky Sabiti	1	0.25	0.28
Taban Pürüzlülüğü (m)	-	0	0.45
Yatay Dispersiyon Ölçek Faktörü	1	0	1
Düşey Dispersiyon Ölçek Faktörü	1	0	1

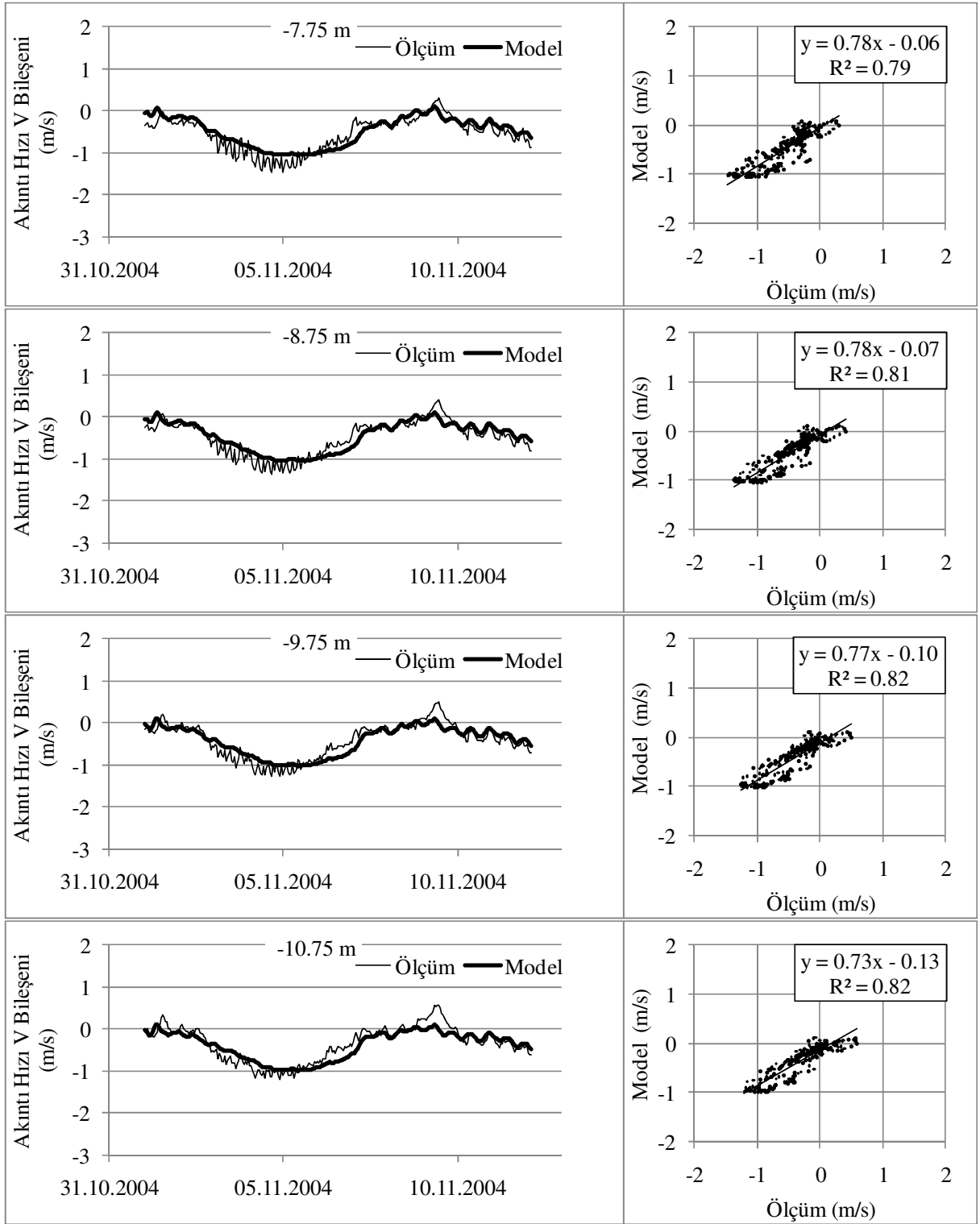
Model parametrelerindeki manipölasyon sonucunda hidrodinamik modelin kalibrasyon parametrelerine ait sonuç değerler belirlenmiştir. Belirlenen kalibre edilmiş model parametreleri için kalibrasyon dönemi içerisinde model sonuçları ile ölçümler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar B istasyonunda akıntının V hız bileşeni için zaman serileri halinde şekil 6.61'de verilmiştir. Yine şekil 6.61'de V akıntı hız bileşeninin ölçülen ve modellenen değerlerine ait dağılım grafikleri verilmiş ve bu grafikler üzerinde veriler arasındaki determinasyon katsayıları gösterilmiştir.



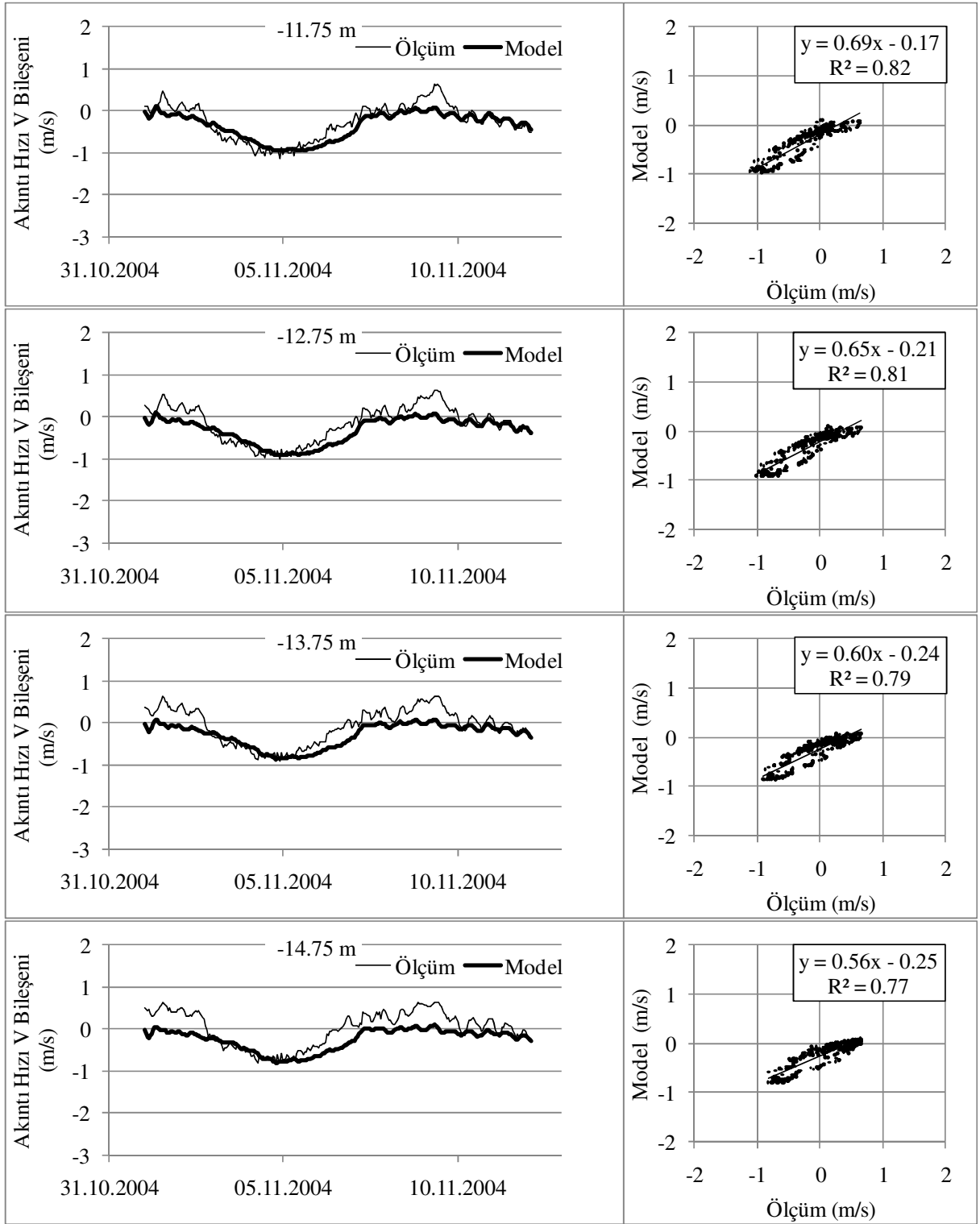
şekil 6.61 Kalibrasyon dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.



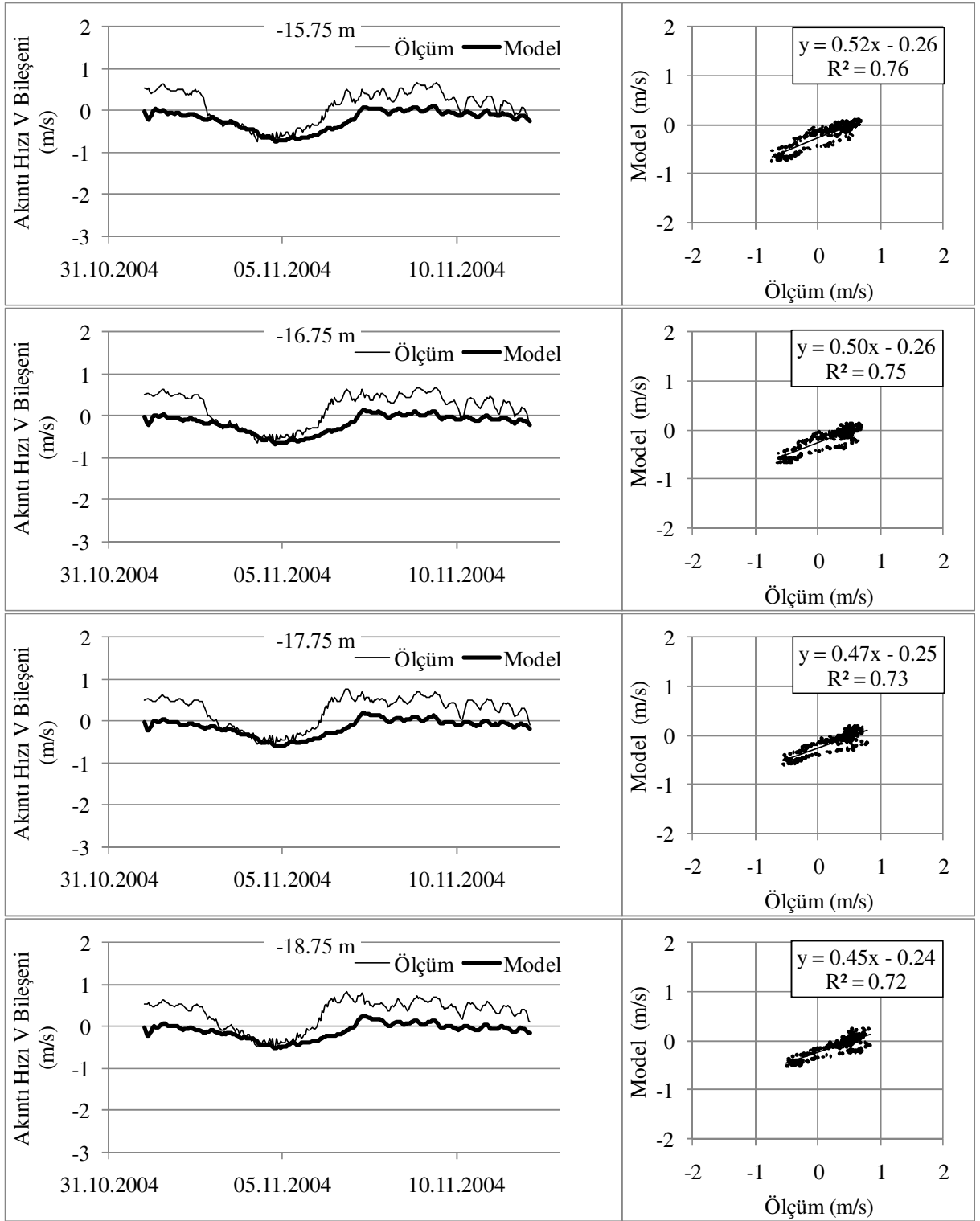
Şekil 6.61 Devamı.



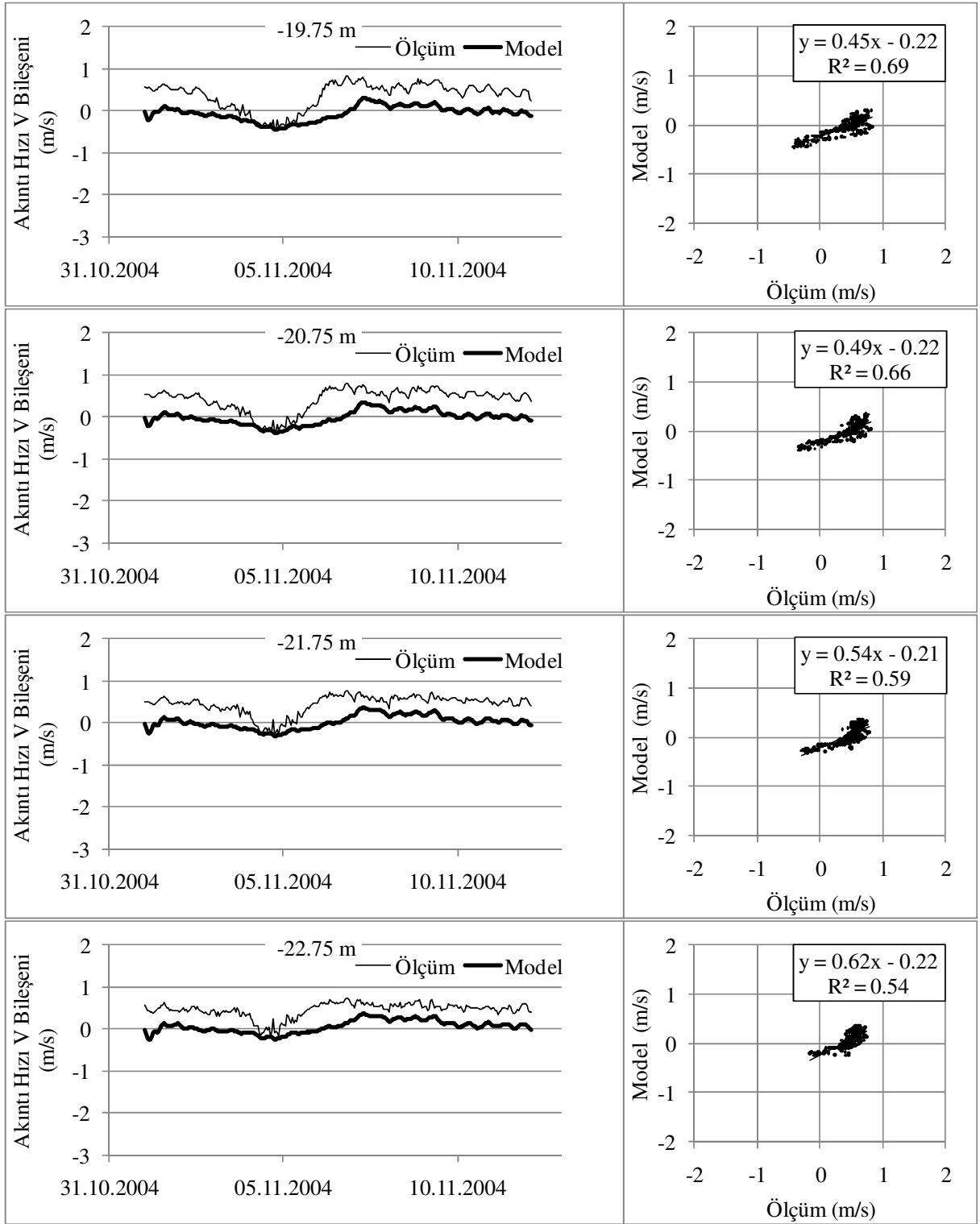
Şekil 6.61 Devamı.



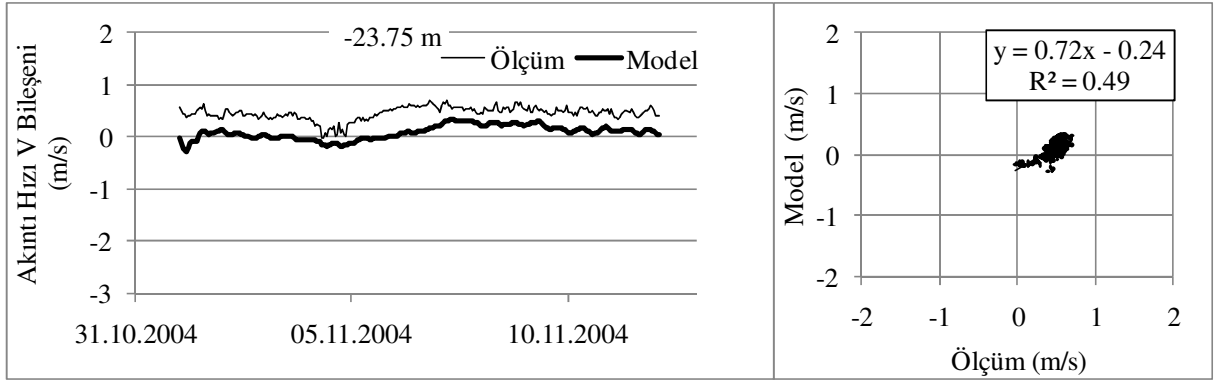
Şekil 6.61 Devamı.



Şekil 6.61 Devamı.



Şekil 6.61 Devamı.



Şekil 6.61 Devamı.

Şekil 6.61’den de görüldüğü gibi kalibrasyonu tamamlanan hidrodynamic model, kalibrasyon dönemi için akıntı hızlarının benzeştirilmesinde oldukça iyi bir yaklaşım elde etmiştir. Stow vd. (2009) birleştirilmiş hidrodynamic ve su kalitesi modellerinin performanslarının değerlendirilmesi için altı farklı ölçüt tanımlamıştır. Bu çalışmada model performansı bu ölçütler kullanılarak değerlendirilecektir. Ancak bu çalışmada hidrodynamic model akıntı hız bileşeni esas alınarak kalibre edildiğinden ve bu büyüklük pozitif ve negatif değerler alabildiğinden doğru bir değerlendirme yapabilmek için bu ölçütlerin ancak üçü kullanmıştır. korelasyon katsayısı (R) Denklem 6.3’te, ortalama kare hataların karekökü (OKHK) Denklem 6.4’te ve mutlak ortalama hata (MOH) Denklem 6.5’te tanımlanmıştır.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}} \quad (6.3)$$

$$OKHK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - G_i)^2}{n}} \quad (6.4)$$

$$MOH = \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - G_i|}{n} \quad (6.5)$$

Bu ifadelerde; n:gözlemlerin sayısını, G_i : n adet gözlemden i.yi, T_i : n adet tahminden i.yi ve $\bar{G}$ ve $\bar{T}$ ise sırasıyla gözlem ve tahmin verilerinin ortalamasını göstermektedir. Çizelge 6.9’da dikkate alınan tüm derinlikler için yukarıda tanımlanan ölçütlerin kalibrasyon aşaması için hesaplanan değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 6.9 B istasyonunda 1 m aralıklı tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.

Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)	Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)
-0.75	78	0.44	0.37	-12.75	90	0.25	0.20
-1.75	75	0.35	0.30	-13.75	89	0.29	0.24
-2.75	67	0.39	0.32	-14.75	88	0.34	0.28
-3.75	62	0.47	0.40	-15.75	87	0.38	0.32
-4.75	85	0.18	0.14	-16.75	86	0.41	0.35
-5.75	87	0.22	0.18	-17.75	86	0.44	0.38
-6.75	88	0.21	0.17	-18.75	85	0.46	0.41
-7.75	89	0.19	0.15	-19.75	83	0.47	0.43
-8.75	90	0.18	0.14	-20.75	81	0.46	0.43
-9.75	90	0.18	0.14	-21.75	77	0.44	0.42
-10.75	90	0.19	0.15	-22.75	73	0.41	0.40
-11.75	90	0.21	0.17	-23.75	70	0.38	0.37

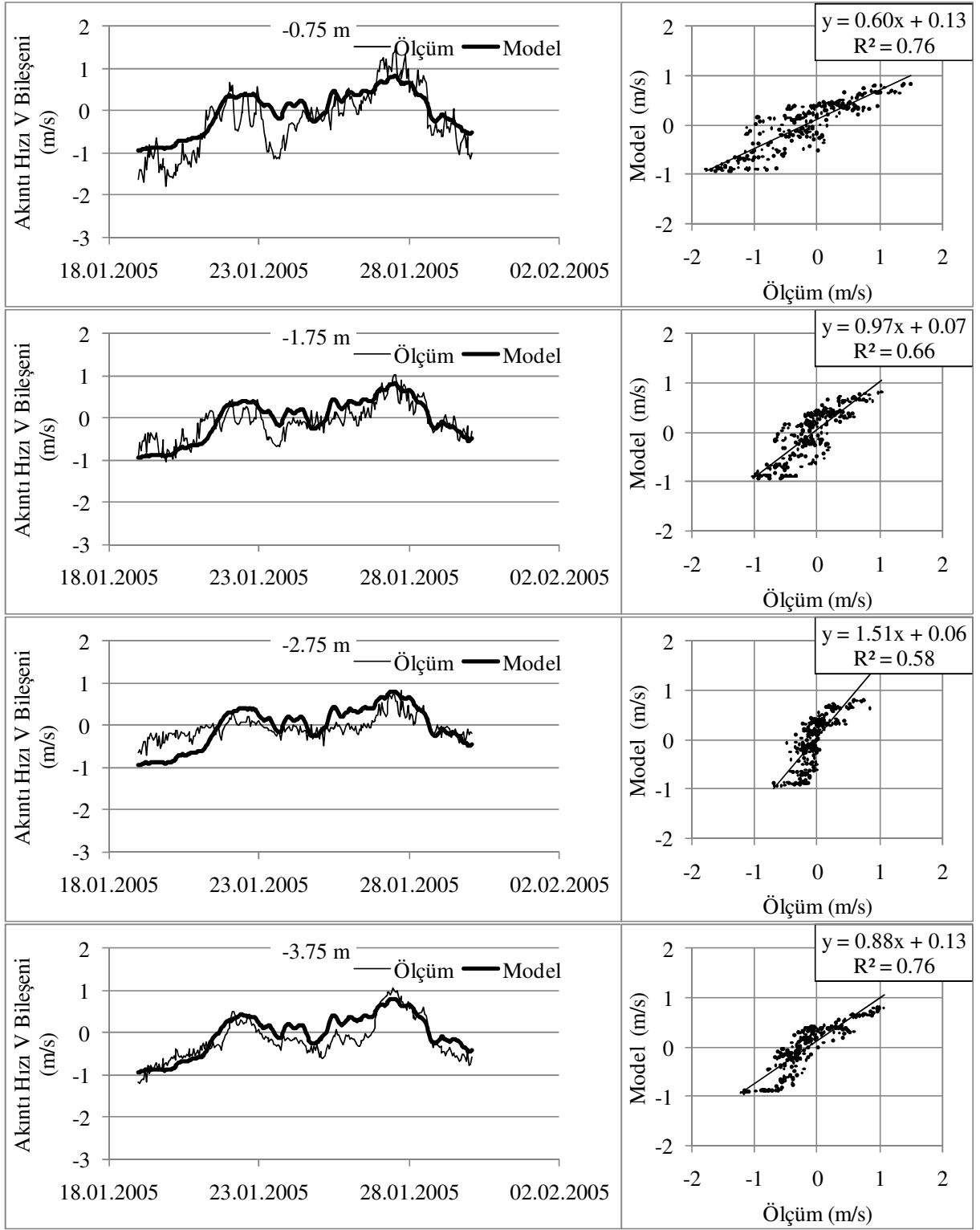
Çizelge 6.9 değerlendirildiğinde R katsayısının 0.62 ile 0.90 aralığında değiştiği görülmektedir. Ancak yüzeyden itibaren 4.75 m'ye kadar ölçülen akıntı hızlarının herhangi bir nedenle bir ölçüm hatası içerdiği düşünülmektedir. Çünkü bu derinliklerde akıntı hızlarının ölçüm periyodu olan bir yıllık süre içerisinde daima sıfırın etrafında salındığı görülmekte ve bu durum gerçekçi bulunmamaktadır. Dolayısıyla ilk 5 derinlik dışındaki ölçütler değerlendirildiğinde korelasyon katsayısının tüm derinliklerde %90'a yakın değerler aldığı ancak yaklaşık olarak 20. m'den sonra azalmaya başladığı ve tabanda %70 değerine dek azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak kurulan hidrodinamik model İstanbul Boğazı tabanı yakınında akıntı hızlarını benzeştirmekte diğer derinliklere göre daha düşük bir başarı göstermiştir. Bunun olası nedenlerinden biri kullanılan hesap ağının yeterli çözünürlükte olmamasıdır. Ancak bu çalışmada çok fazla sayıda model koşturmaları için gerekli sürenin sağlanabilmesi için oluşturulan model hesap ağı daha fazla inceltilememiştir. İstanbul Boğazı akım alanı içerisindeki daha küçük ölçekli çevrilerin yakalanabilmesi açısından düşeyde çok daha fazla katmanlı bir hesap ağı oluşturmak model sonuçlarında bir miktar iyileşme sağlayabilir. Bununla birlikte model doğruluğu açısından yatay ve düşey boyutlar arasında belirli bir oranın da korunması gerekmektedir. Dolayısıyla düşeyde yapılacak bir inceltme yatay ayırıklaştırmada da bir inceltmeyi gerekli kılacaktır. Bu da model hesap sürelerini önemli boyutta arttıracaktır. Yine İstanbul Boğazı'nın oldukça girintili çıkıntılı taban topografyasını, belirli bir yaklaşımla oluşturulan hesap ağında tam olarak dikkate almak mümkün değildir. Bunun yanı sıra taban pürüzlülüğü gibi hem zamansal hem de uzamsal olarak değişen bir büyüklüğe ait belirsizlikler de burada sözü edilen hataların bir kaynağını

oluşturmaktadır. Çizelge 6.9'da tüm derinlikler için OKHK ve MOH değerleri de incelendiğine korelasyon katsayısına benzer bir eğilim rahatlıkla görülmektedir. Hidrodinamik model İstanbul Boğazı akım alanı içerisindeki akıntı hızlarını 0.15 m/s mertebesinde bir yakınlıkla benzeştirirken, tabanda MOH değerleri 0.40 m/s'ye ve OKHK değerleri de 0.45 m/s'lere ulaşmaktadır. Ölçüm dönemi içerisinde İstanbul Boğazı'nda yüzey akıntısının 2.5 m/s ve taban akıntısının da 1.5 m/s mertebelerine ulaştığı göz önünde tutulduğunda hataların kabul edilebilir mertebelerde olduğu sonucuna varılabilmektedir.

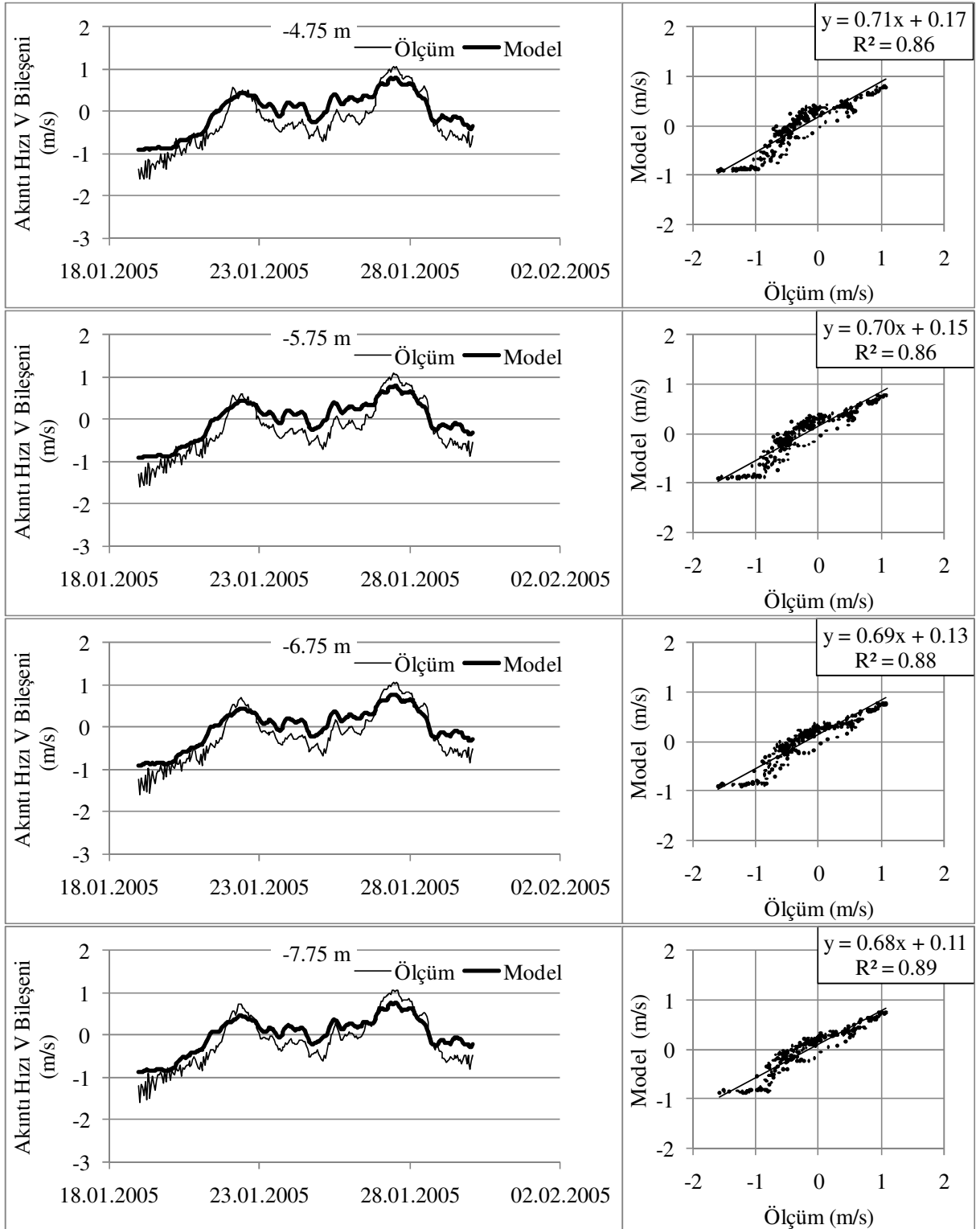
Bu değerlendirmeler ışığında elde edilen kalibrasyon parametrelerinin kalibre edilmiş değerleri ile sağlanan model doğruluğunun yeterli olduğuna karar verilmiştir.

6.2.4 Hidrodinamik Modelin Doğrulanması

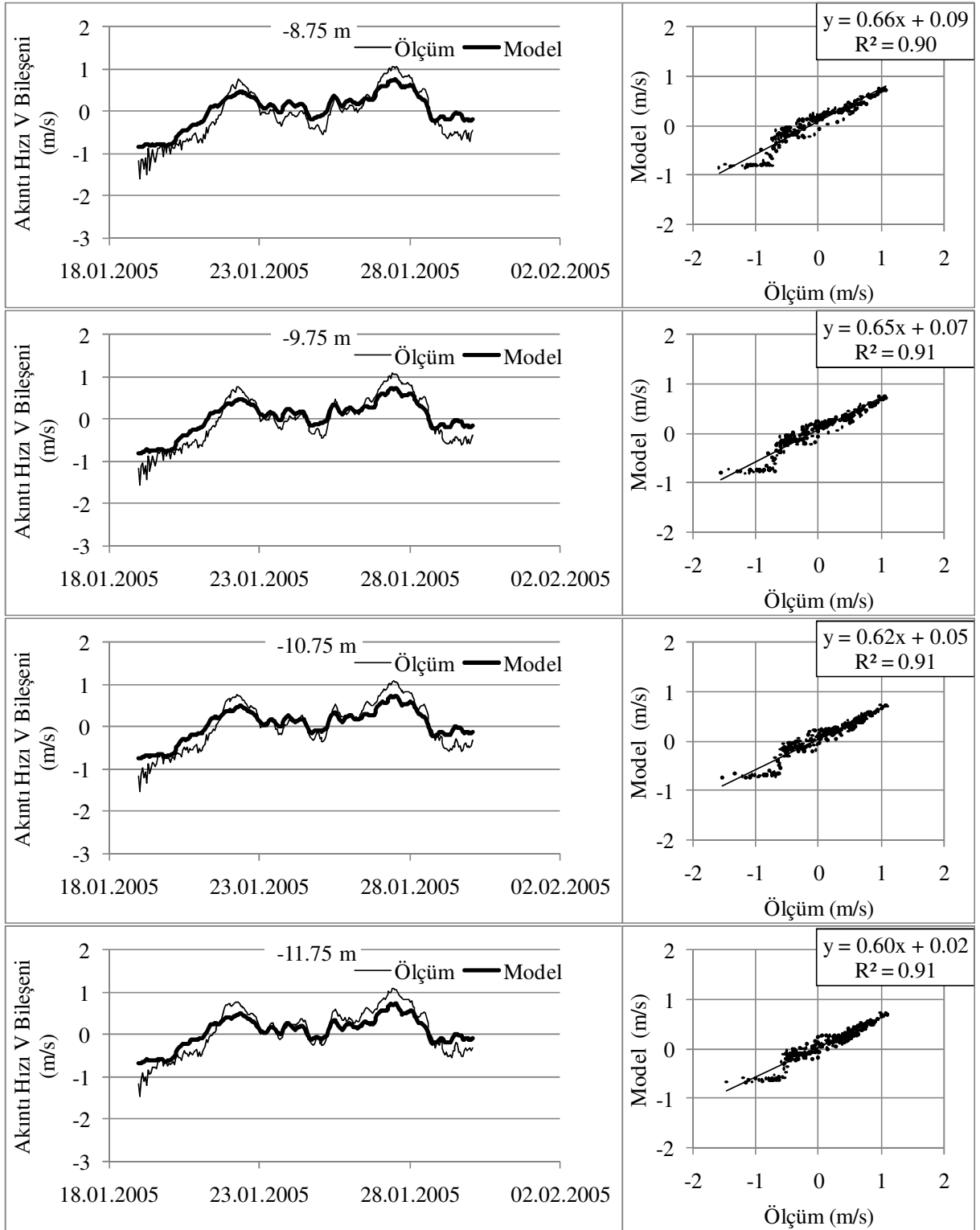
Kalibrasyonu yapılan hidrodinamik model farklı ölçüm dönemlerine ait veriler ile doğrulanmıştır. Modelin doğrulanması için bir yıllık veri seti içerisinde çeşitli akım durumlarını temsil eden, her biri 267 adet saatlik akıntı verisi içeren farklı dönemler belirlenmiştir. Bu dönemlerdeki farklı meteorolojik koşullar altında oluşan akıntı yapılarının değerlendirilmesi ve model doğruluğunun sınanması amaçlanmıştır. Yine modelin doğrulanması aşamasında da B istasyonundaki ölçümlerden toplanan V akıntı hız bileşeni verileri kullanılmıştır. Modelin doğrulanmasında ilk olarak kış mevsimini temsil etmek üzere Ocak ayına ait bir veri seti kullanılmıştır ve sonuçlar Şekil 6.62'de gösterilmiştir. Şekil 6.62'de 1. doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları verilmiştir.



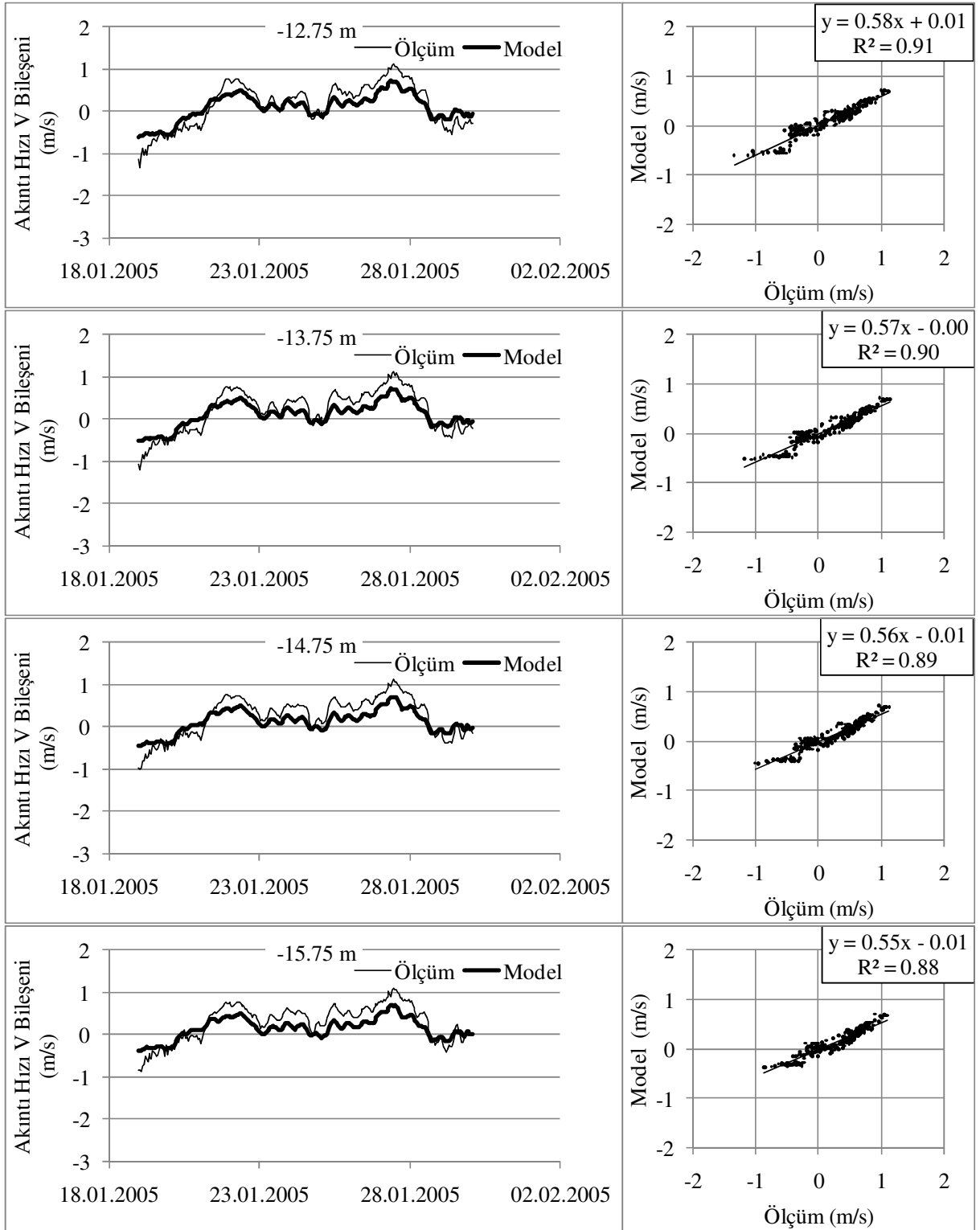
Şekil 6.62 1. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.



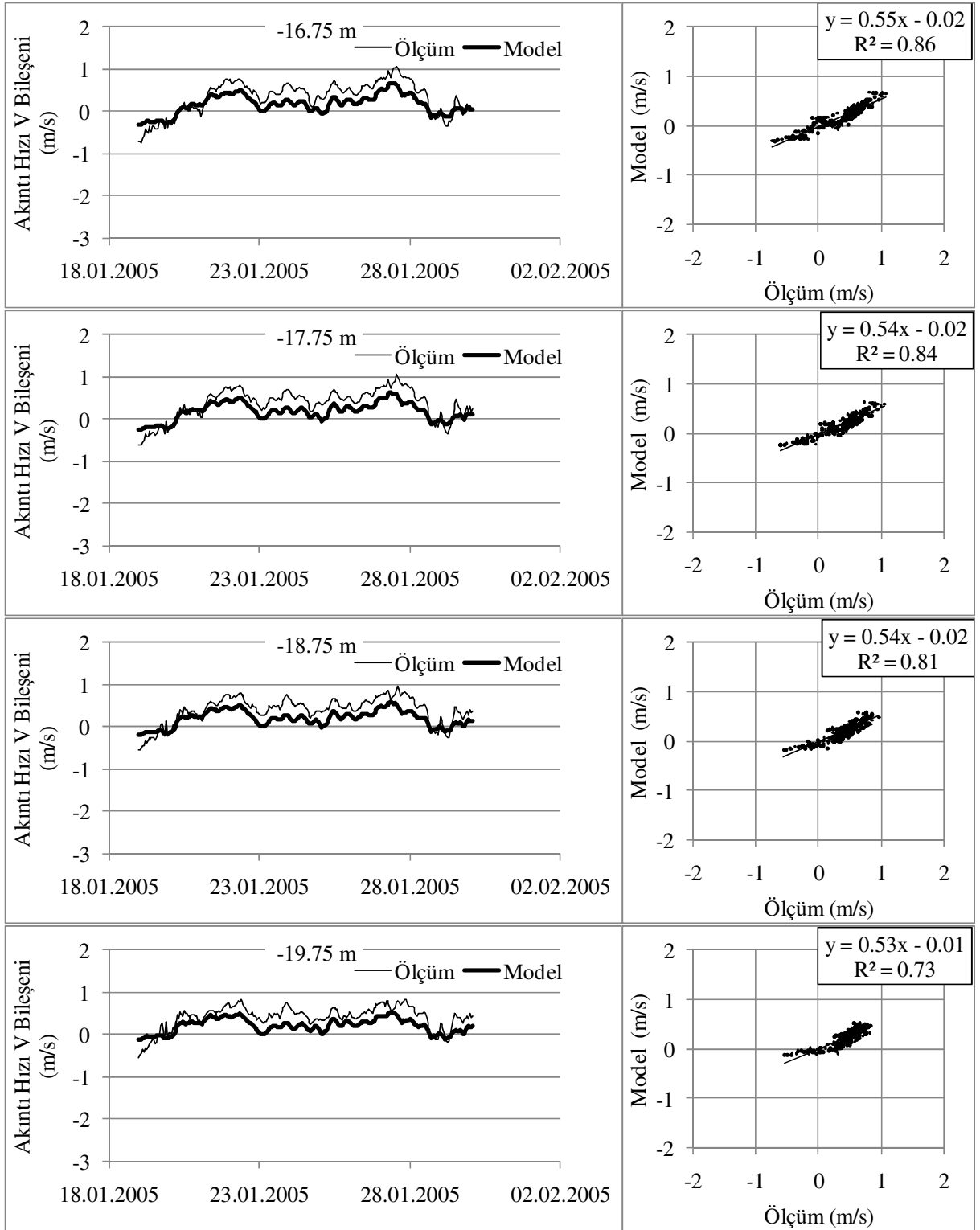
Şekil 6.62 Devamı.



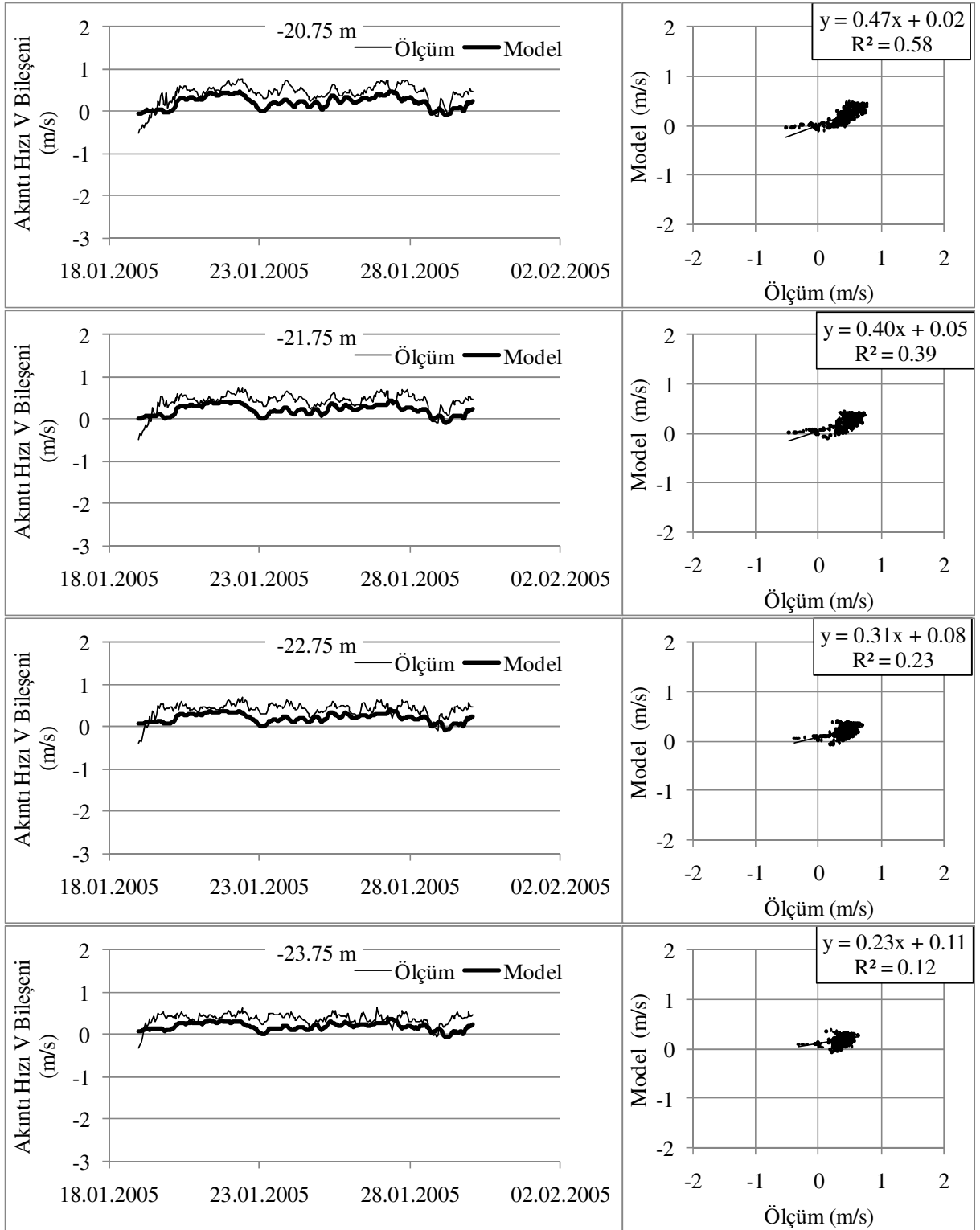
Şekil 6.62 Devamı.



Şekil 6.62 Devamı.



Şekil 6.62 Devamı.



Şekil 6.62 Devamı

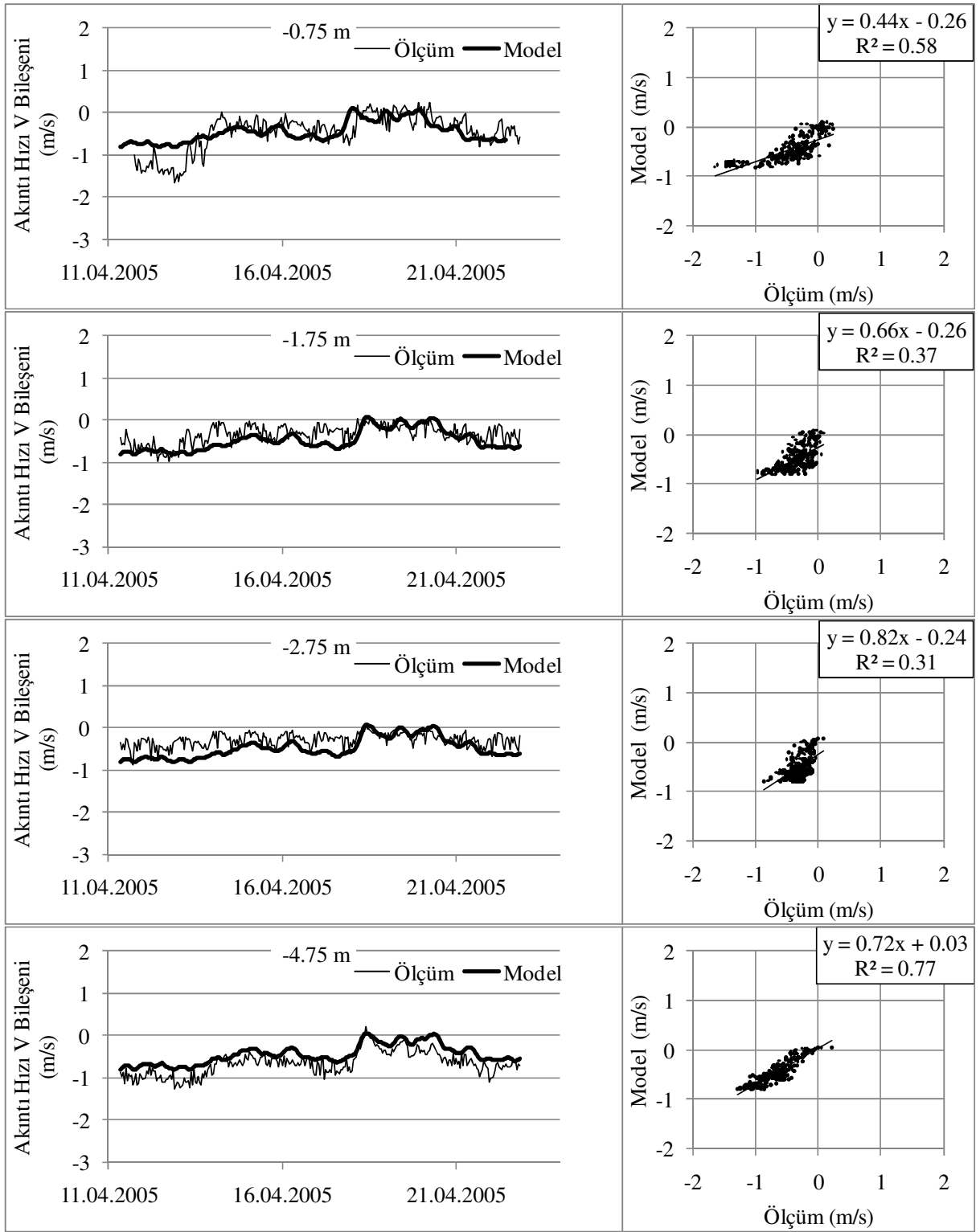
Model doğruluğu tüm dönemler için kalibrasyon aşamasında da kullanılan R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. 1. Doğrulama dönemi ve tüm derinlikler için adı geçen ölçütler Çizelge 6.10'da bir arada verilmiştir.

Çizelge 6.10 1. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.

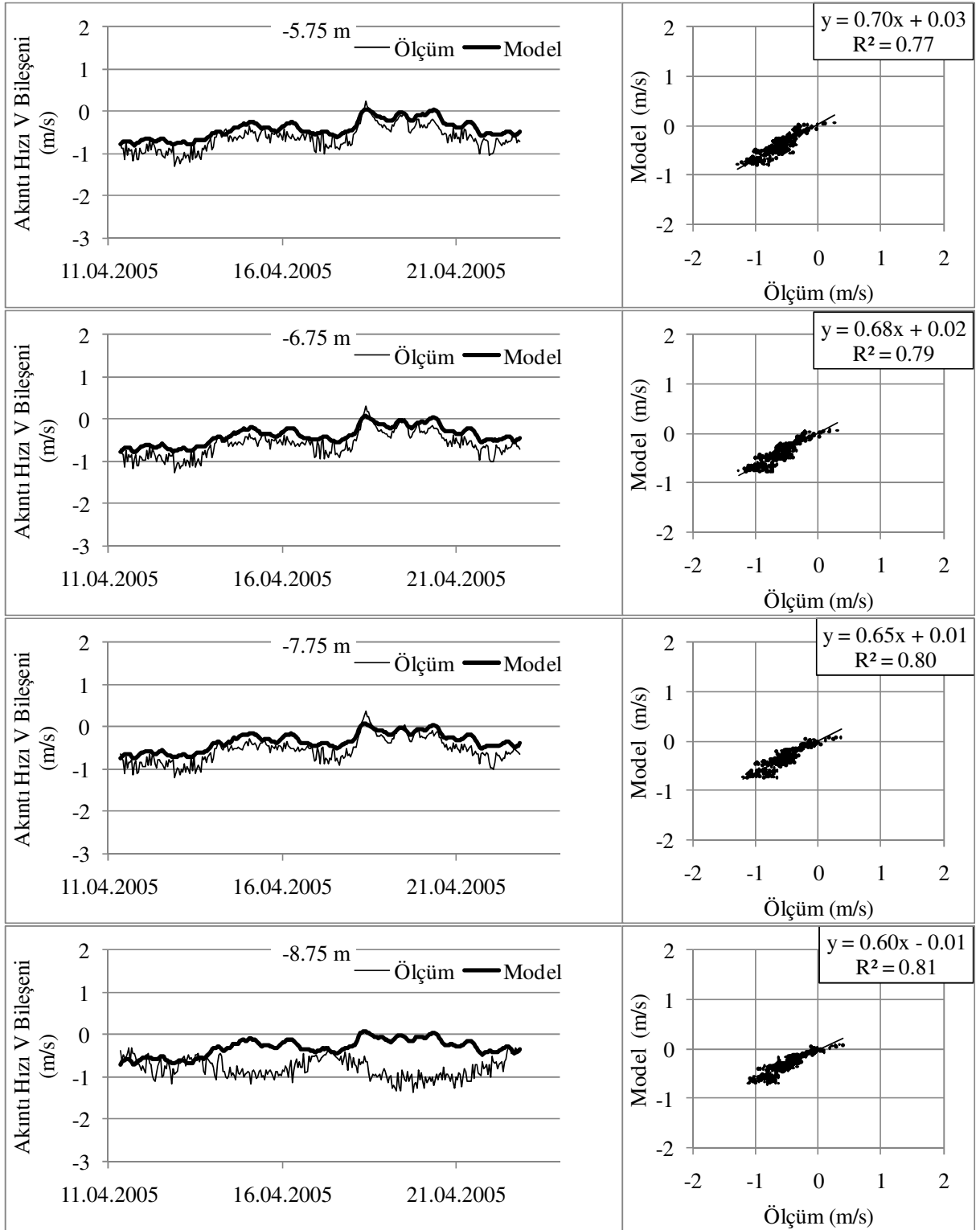
Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)	Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)
-0.75	87	0.44	0.36	-12.75	95	0.24	0.21
-1.75	81	0.30	0.24	-13.75	95	0.25	0.22
-2.75	76	0.34	0.29	-14.75	94	0.25	0.22
-3.75	87	0.28	0.24	-15.75	94	0.25	0.23
-4.75	93	0.35	0.31	-16.75	93	0.26	0.23
-5.75	93	0.33	0.29	-17.75	92	0.26	0.23
-6.75	94	0.31	0.27	-18.75	90	0.25	0.23
-7.75	94	0.29	0.25	-19.75	86	0.25	0.23
-8.75	95	0.27	0.23	-20.75	76	0.26	0.23
-9.75	95	0.25	0.21	-21.75	63	0.26	0.23
-10.75	96	0.24	0.20	-22.75	48	0.25	0.22
-11.75	95	0.24	0.20	-23.75	34	0.23	0.20

Kış aylarını temsil etmek üzere seçilen 1. Doğrulama dönemi için model sonuçları ile ölçüm verileri arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayıları yalnızca tabana en yakın iki derinlikte düşük değerler vermiştir. Bu eğilim kalibrasyon dönemi için tabandaki hızlara ait kalibrasyon katsayılarındaki düşüş eğilimi ile uyum içerisinde. Tabii model doğruluğunun değerlendirilmesinde yalnızca kalibrasyon katsayılarının değerlendirilmesi yeterli değildir. Çizelge 6.10'da verilen OKHK değerlerine bakıldığında en yüksek değer yüzeyde olduğu görülmektedir. Yüzeyde akıntı hızlarında kısa dönemli değişimlere ya da çalkantılara neden olan pek çok farklı faktör söz konusudur. Yine MOH değerlerine de bakıldığında OKHK ile benzer değişimler gösterdiği görülmektedir.

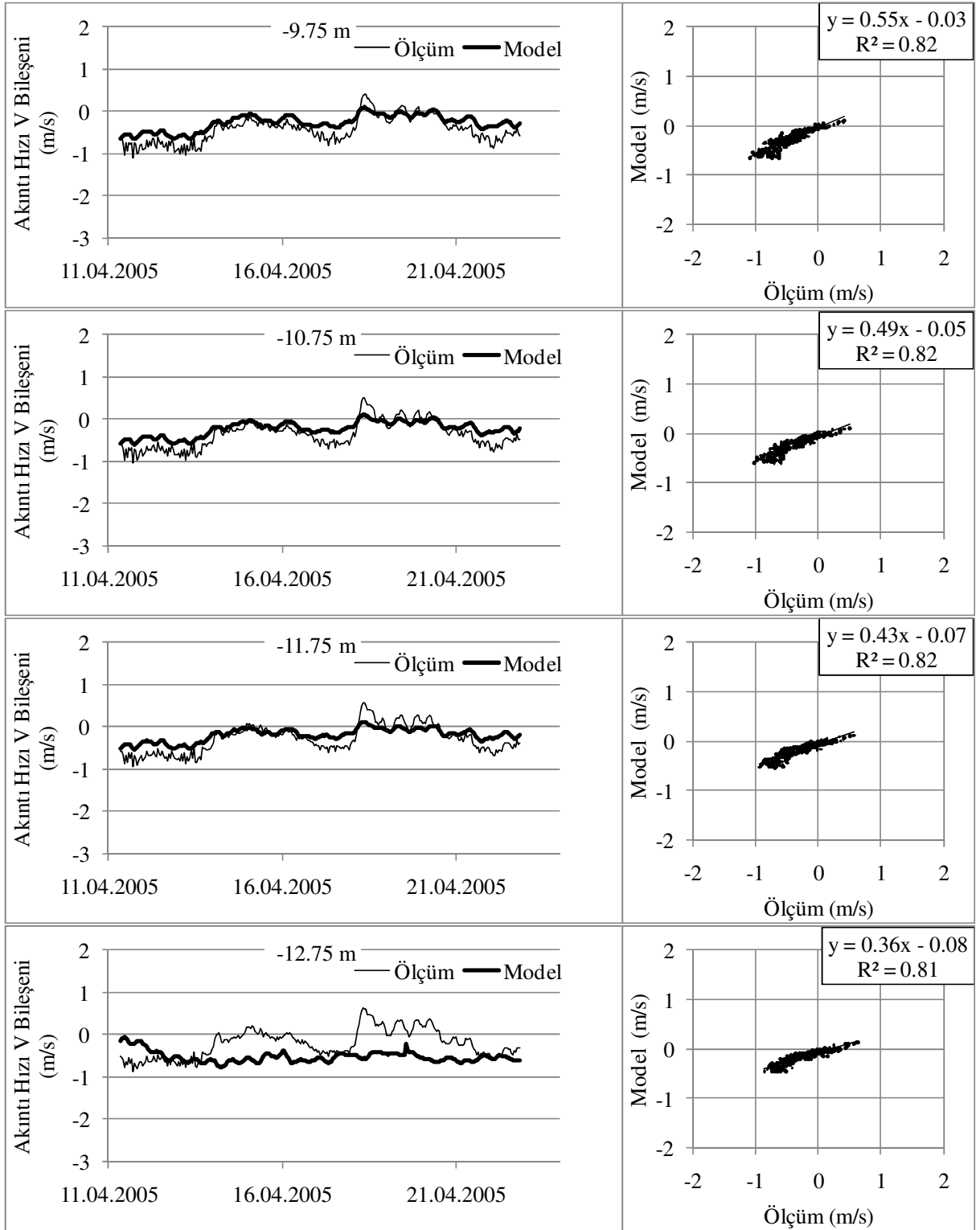
Model doğrulanmasında bahar aylarını temsil etmesi bakımından Nisan ayına ait yine 267 adet akıntı verisi içeren bir dönem seçilmiştir ve sonuçlar Şekil 6.63'te gösterilmiştir. Şekil 6.63'te 2. doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları verilmiştir.



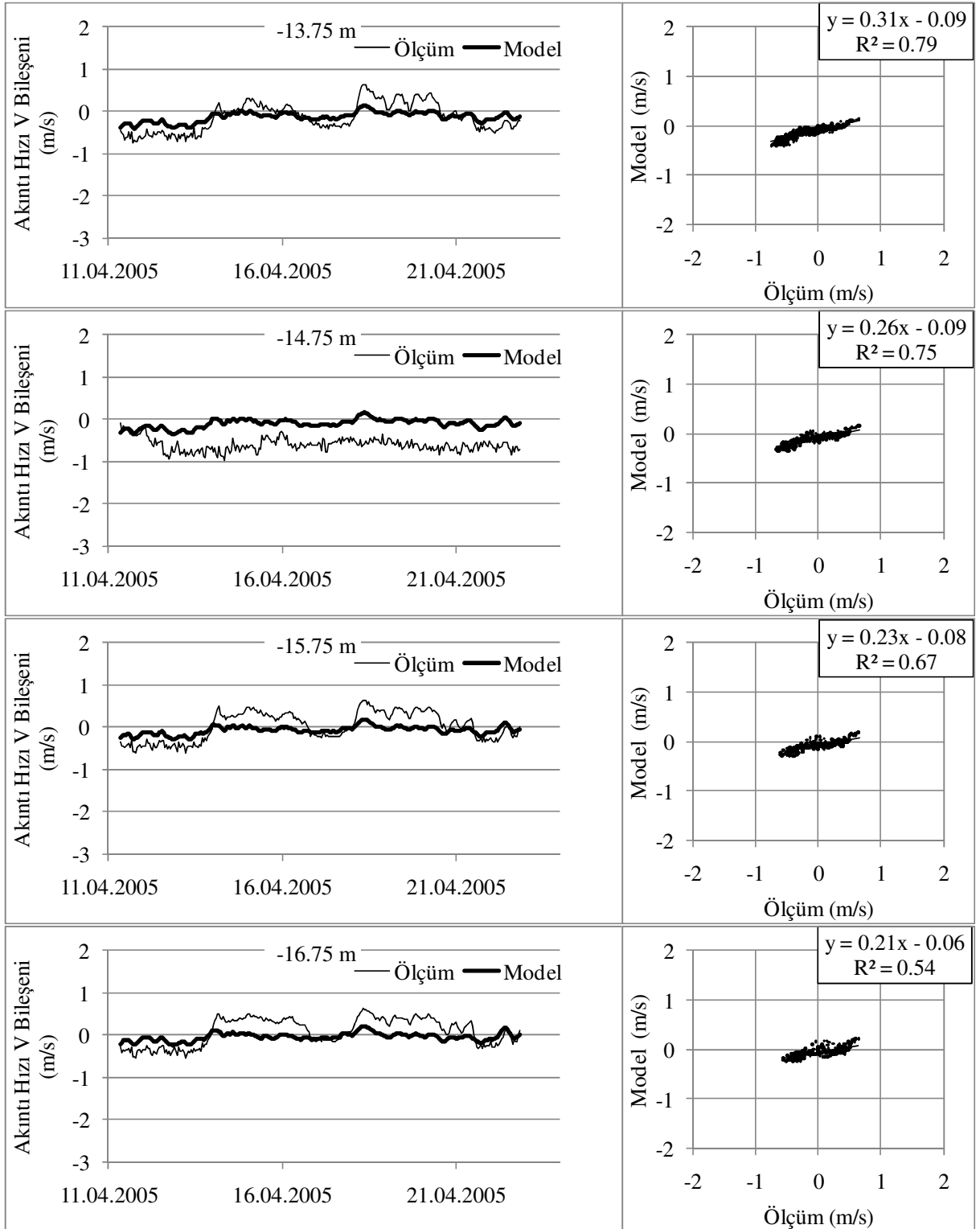
Şekil 6.63 2. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.



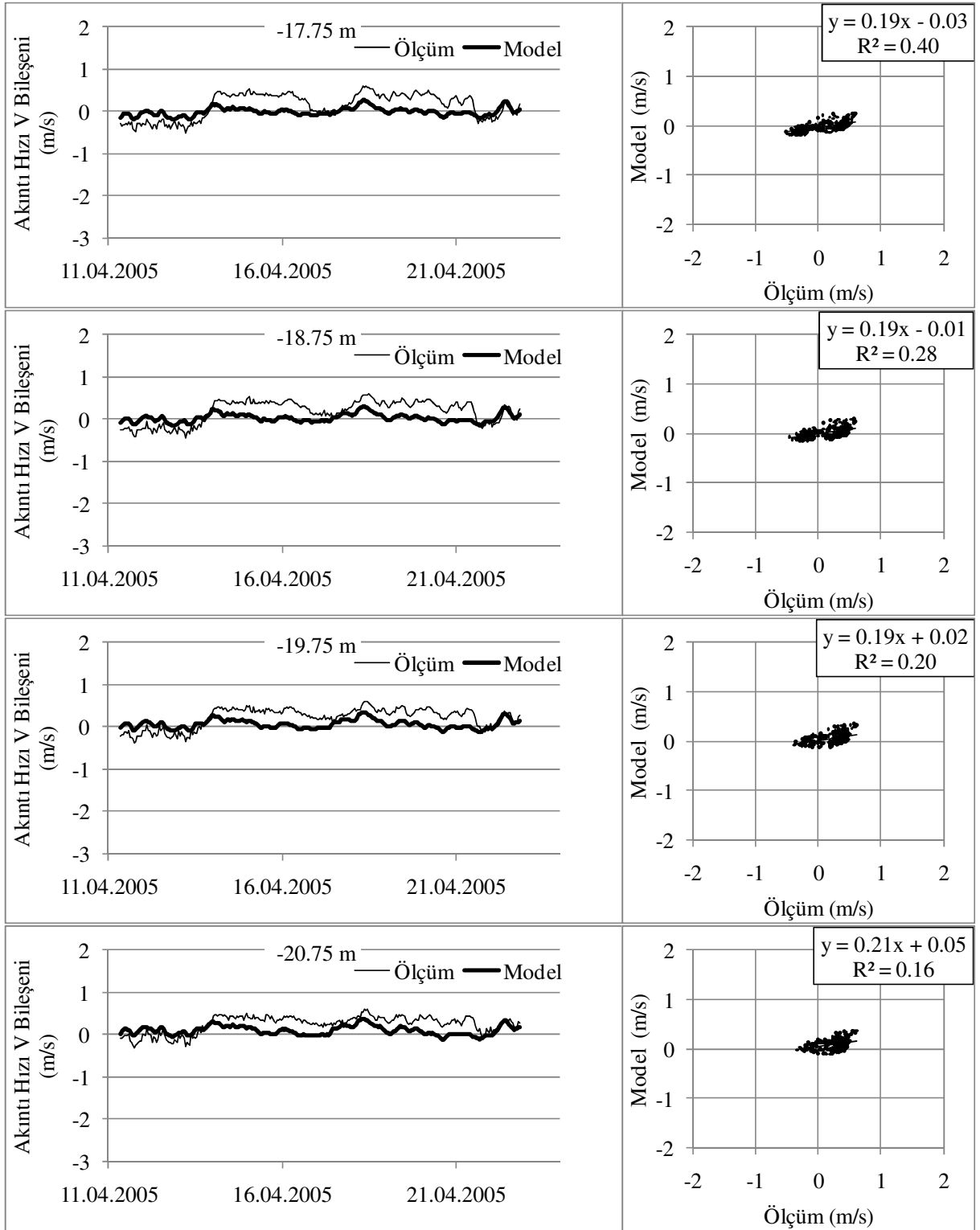
Şekil 6.63 Devamı.



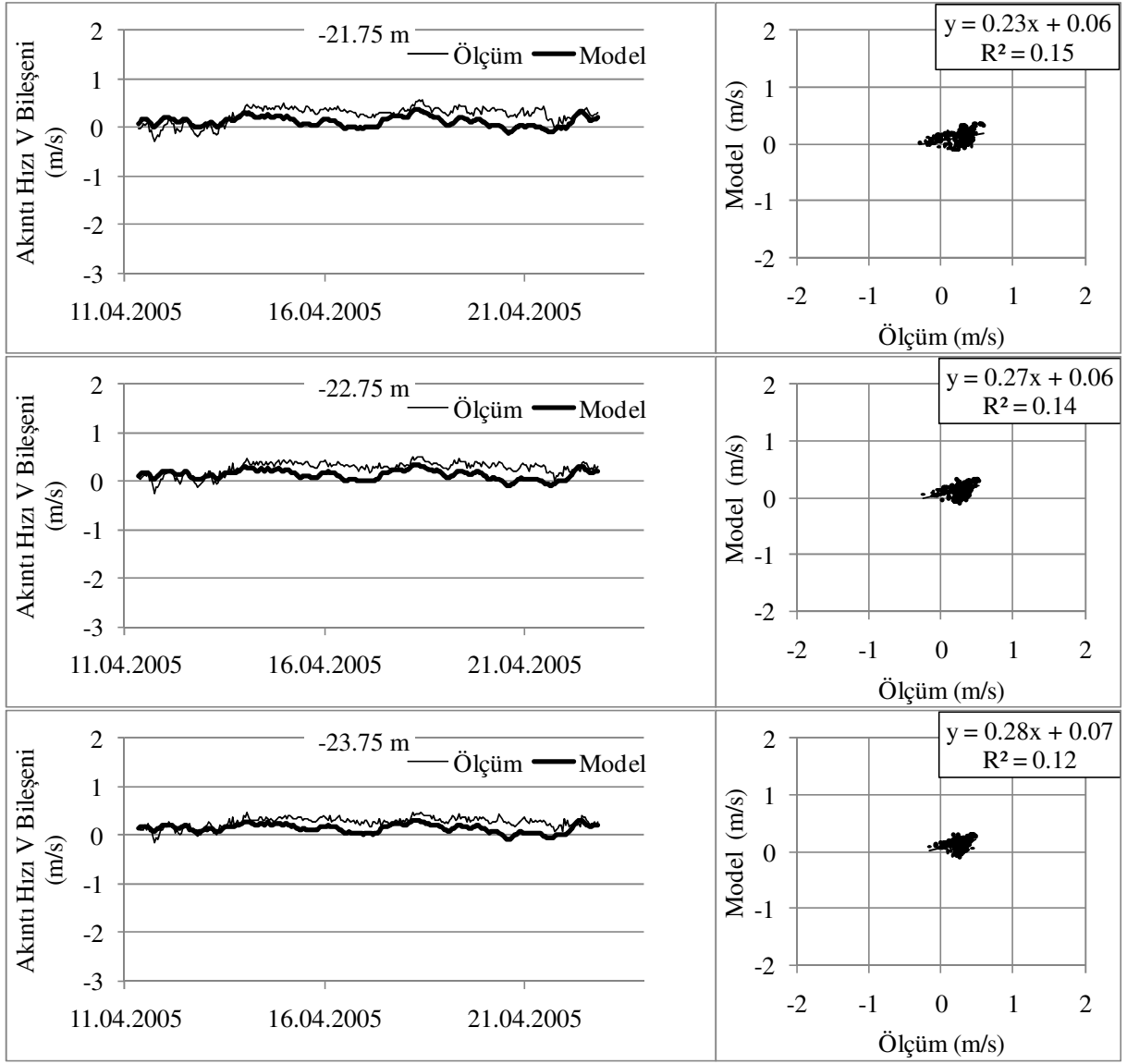
Şekil 6.63 Devamı.



Şekil 6.63 Devamı.



Şekil 6.63 Devamı.



Şekil 6.63 Devamı.

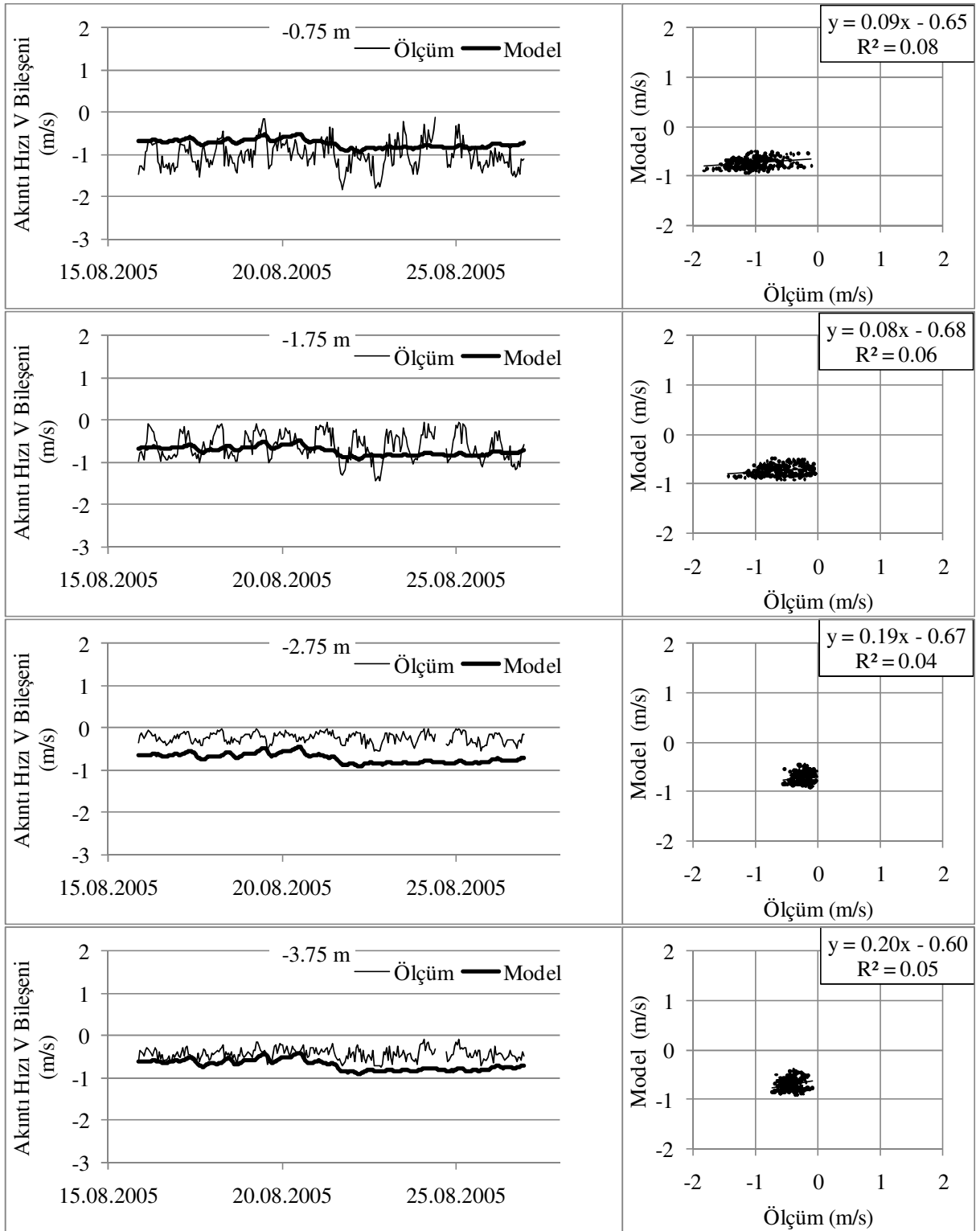
Model doğruluğu tüm dönemler için kalibrasyon aşamasında da kullanılan R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. 2. Doğrulama dönemi ve tüm derinlikler için adı geçen ölçütler Çizelge 6.11’de bir arada verilmiştir.

Çizelge 6.11 2. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.

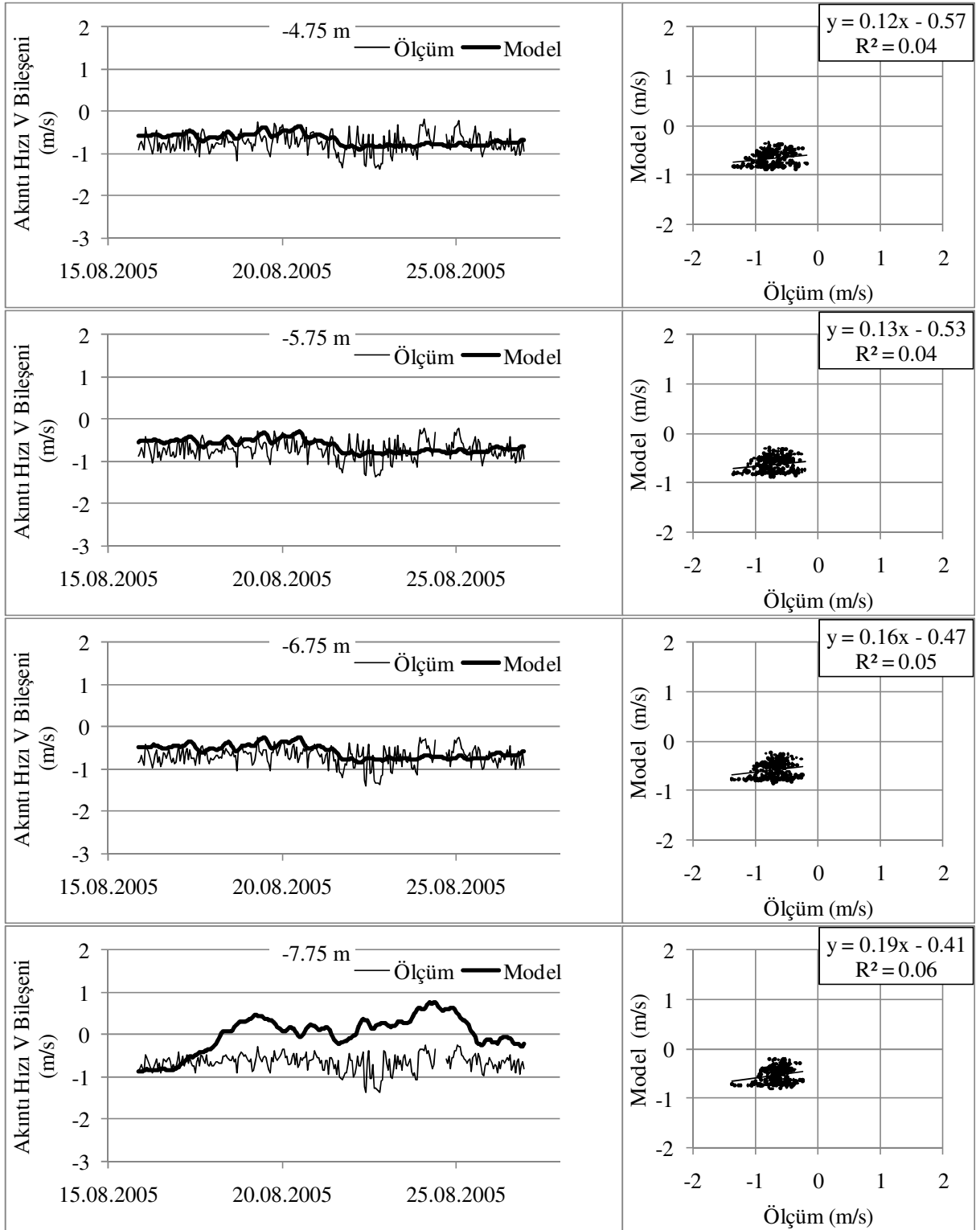
Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)	Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)
-0.75	76	0.29	0.22	-12.75	90	0.22	0.19
-1.75	59	0.25	0.20	-13.75	89	0.24	0.21
-2.75	54	0.28	0.23	-14.75	86	0.26	0.23
-3.75	88	0.18	0.16	-15.75	81	0.28	0.25
-4.75	87	0.25	0.22	-16.75	72	0.29	0.26
-5.75	88	0.25	0.22	-17.75	62	0.29	0.26
-6.75	89	0.25	0.22	-18.75	52	0.28	0.25
-7.75	90	0.24	0.21	-19.75	45	0.26	0.24
-8.75	90	0.23	0.20	-20.75	41	0.24	0.22
-9.75	91	0.23	0.19	-21.75	40	0.22	0.19
-10.75	91	0.22	0.18	-22.75	39	0.19	0.17
-11.75	90	0.22	0.18	-23.75	36	0.17	0.15

2. Doğrulama dönemi ilkbahar aylarını temsil etmek üzere seçilmiştir. Şekil 6.63'te gösterilen zaman serileri bu doğrulama dönemi için de model sonuçları ile ölçüm verileri arasında oldukça büyük bir yakınlık yakalandığını göstermektedir. Çizelge 6.11'de özetlenen niceliksel değerlendirmelere bakıldığında ölçümler ile model sonuçları arasında hemen hemen tüm derinliklerde oldukça yüksek bir kalibrasyon olduğu, ancak 19 m'den sonra kalibrasyon değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yine tüm derinliklerde OKHK değerleri ortalama 0.25 m/s civarında hesaplanmış ve en büyük 0.29 m/s ile en küçük 0.17 m/s değerlerini almıştır. Genel olarak 2. Doğrulama dönemi için de model sonuçlarının ölçümlerle iyi bir uyum yakaladığı görülmüştür.

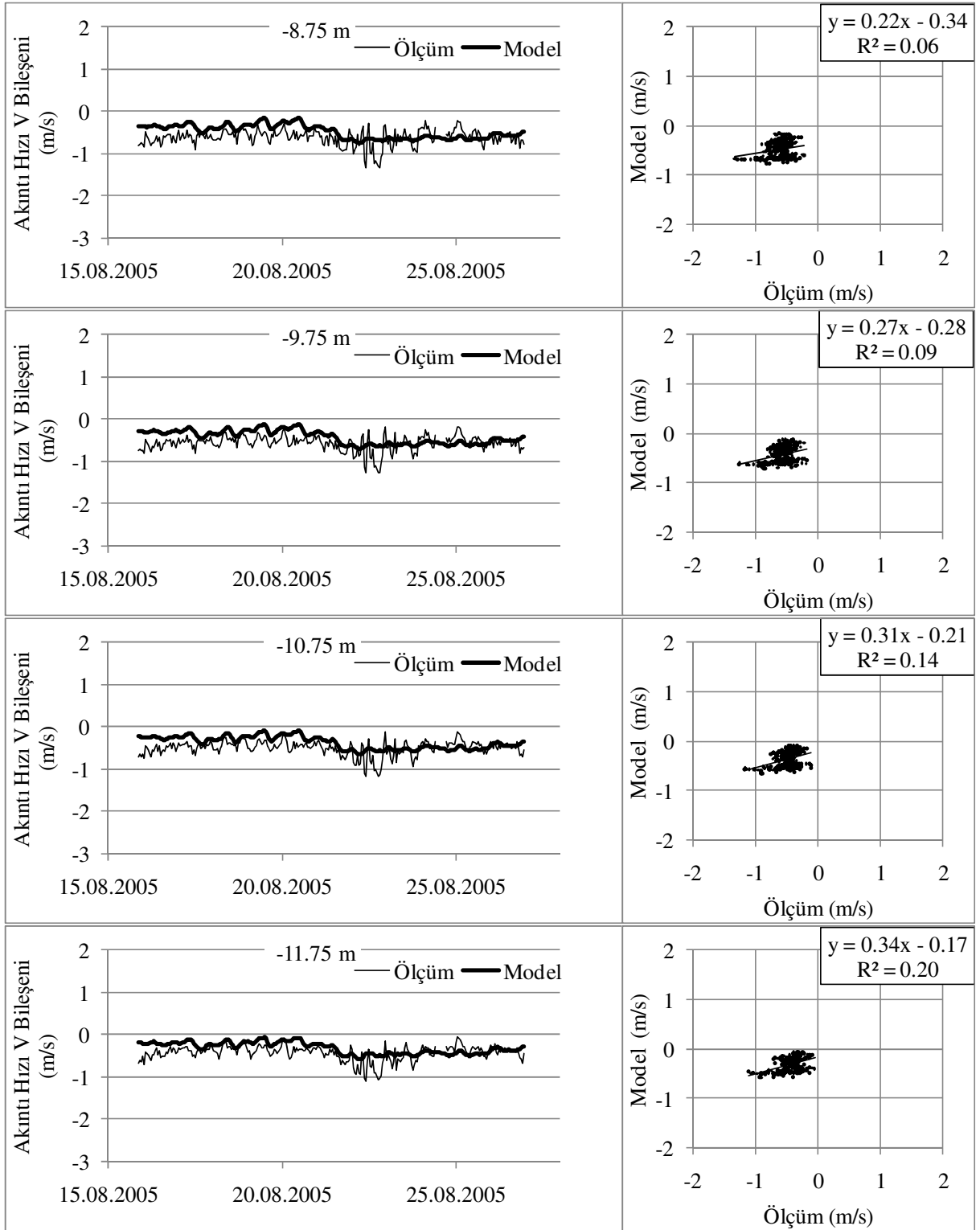
Model doğrulanmasında yaz aylarını temsil etmesi bakımından Ağustos ayına ait yine 267 adet akıntı verisi içeren bir dönem seçilmiştir ve sonuçlar Şekil 6.64'te gösterilmiştir. Şekil 6.64'te 3. doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları verilmiştir.



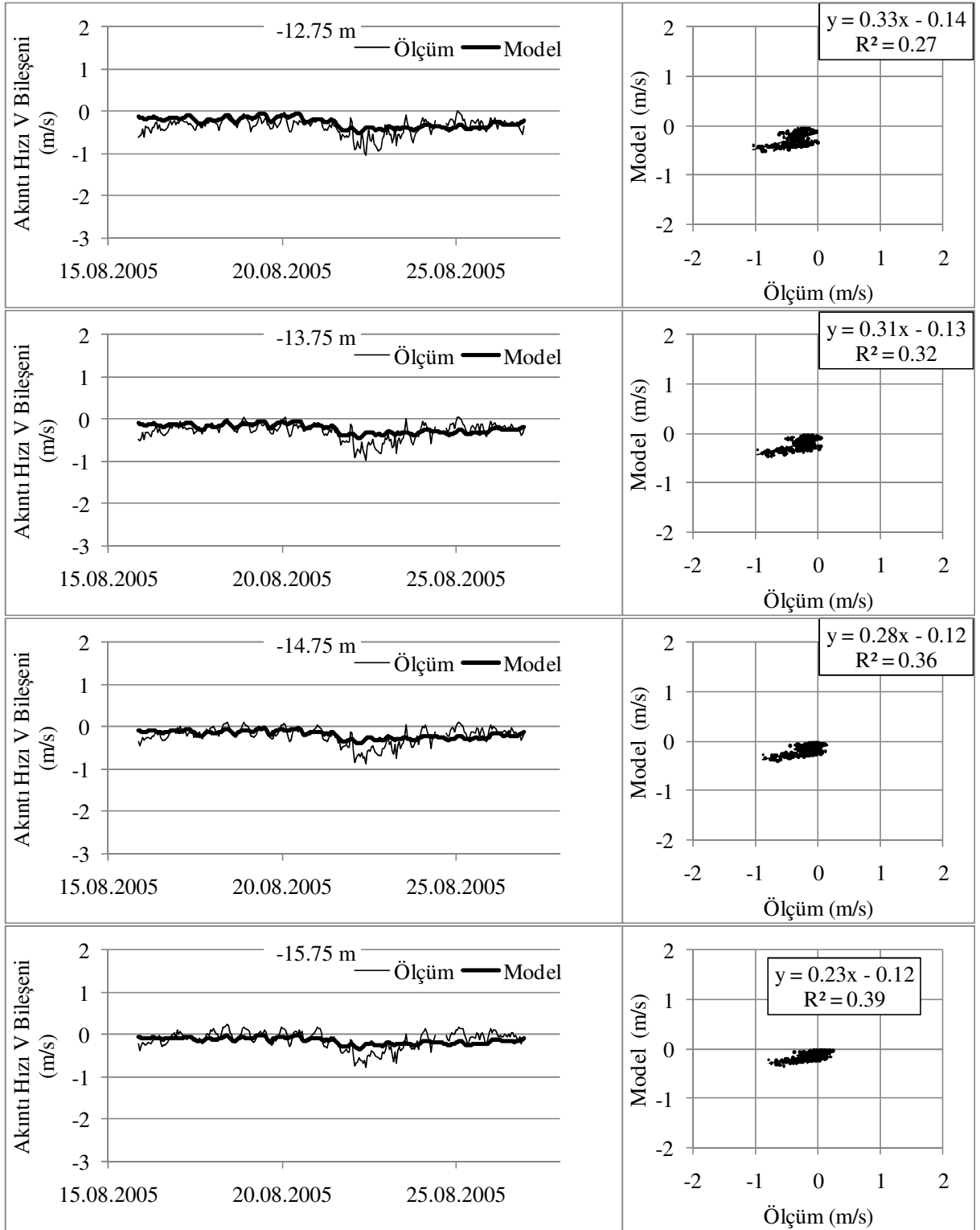
Şekil 6.64 3. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.



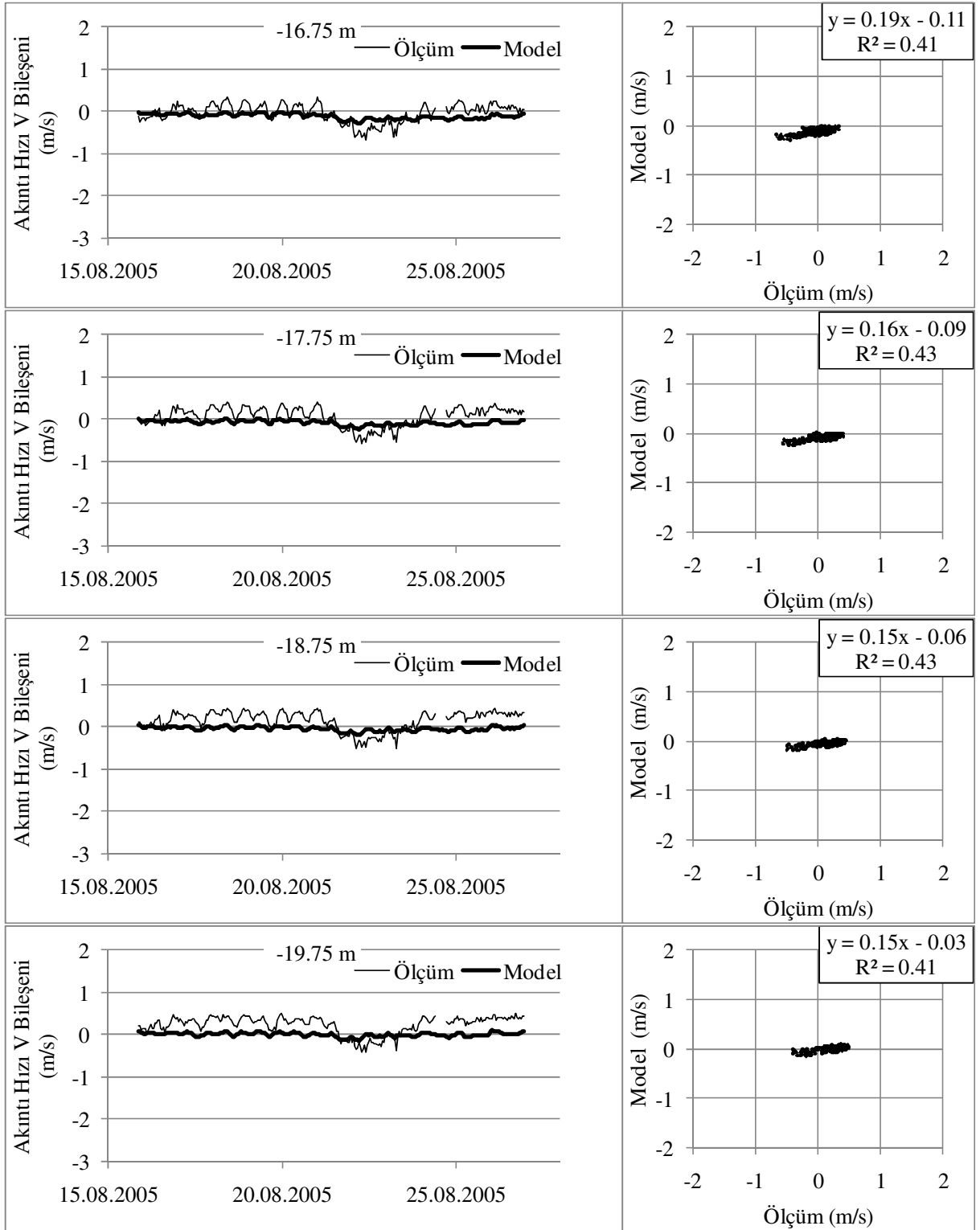
Şekil 6.64 Devamı.



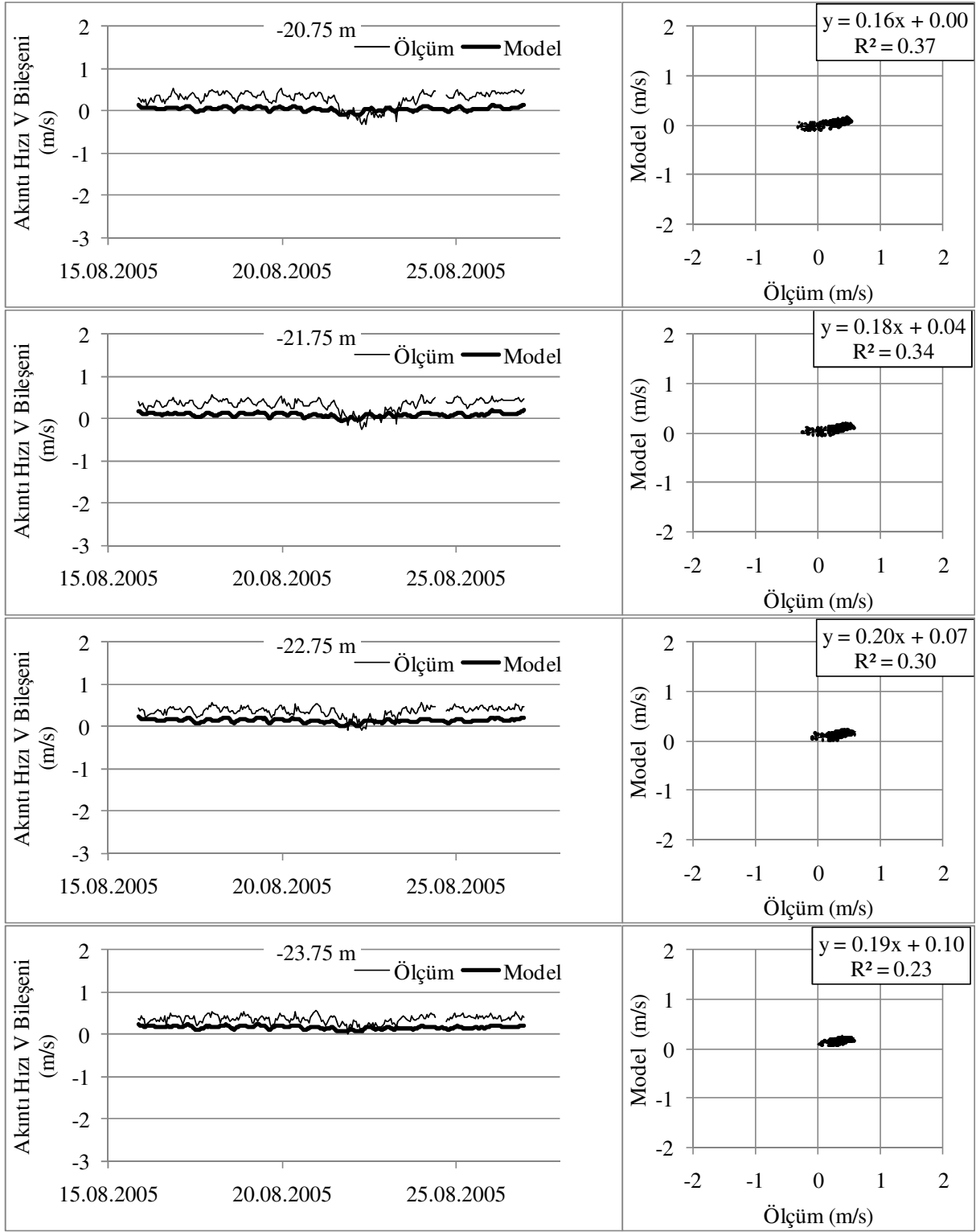
Şekil 6.64 Devamı.



Şekil 6.64 Devamı.



Şekil 6.64 Devamı.



Şekil 6.64 Devamı.

Model doğruluğu tüm dönemler için kalibrasyon aşamasında da kullanılan R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. 3. Doğrulama dönemi ve tüm derinlikler için adı geçen ölçütler Çizelge 6.12’de bir arada verilmiştir.

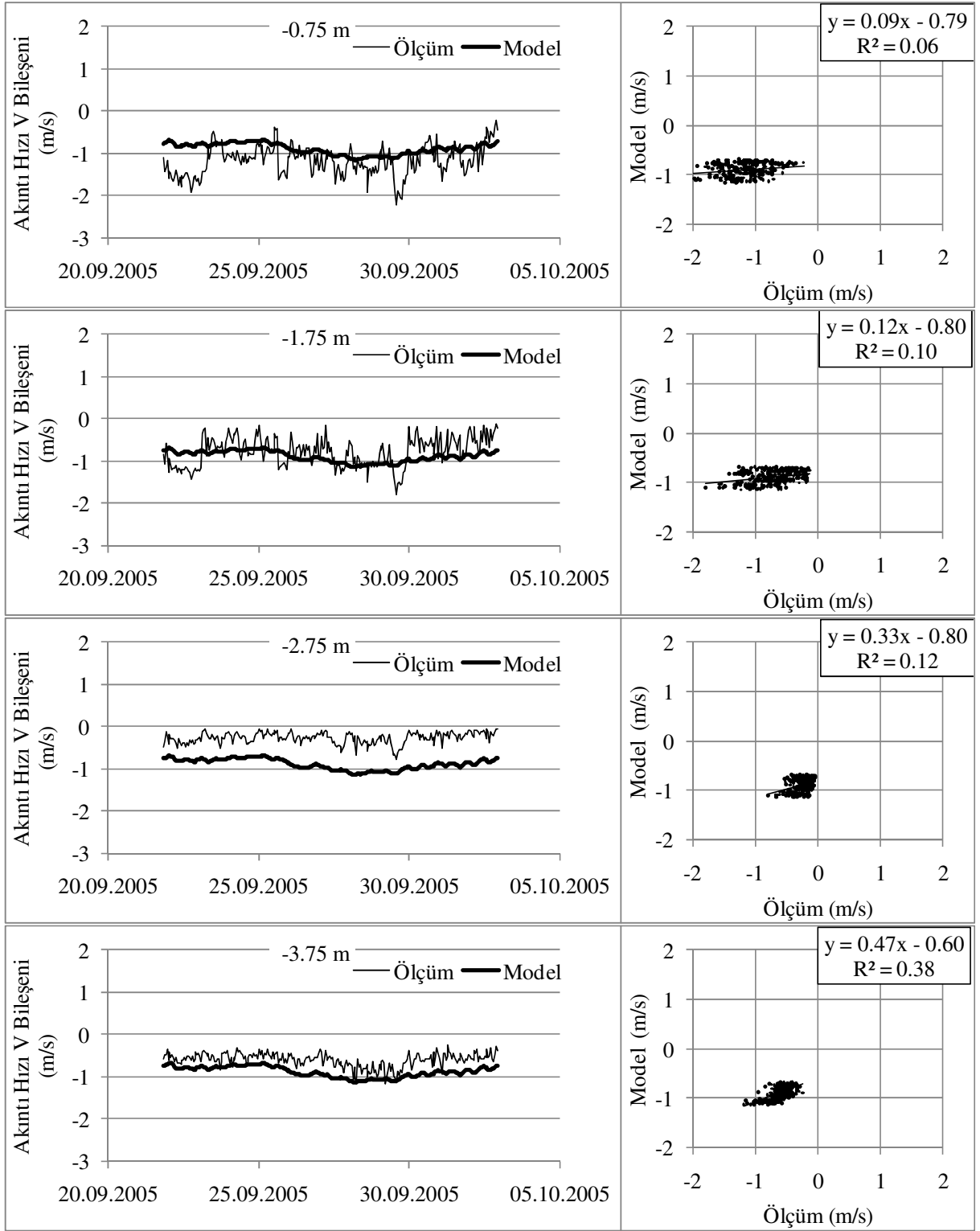
Çizelge 6.12 3. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.

Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)	Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)
-0.75	28	0.42	0.36	-12.75	52	0.19	0.15
-1.75	25	0.34	0.27	-13.75	57	0.17	0.14
-2.75	21	0.51	0.49	-14.75	60	0.16	0.13
-3.75	22	0.33	0.28	-15.75	62	0.17	0.14
-4.75	21	0.28	0.23	-16.75	64	0.20	0.17
-5.75	21	0.29	0.23	-17.75	65	0.24	0.20
-6.75	22	0.28	0.23	-18.75	66	0.27	0.24
-7.75	24	0.28	0.23	-19.75	64	0.29	0.26
-8.75	25	0.27	0.22	-20.75	61	0.28	0.26
-9.75	30	0.26	0.21	-21.75	59	0.26	0.25
-10.75	37	0.24	0.20	-22.75	55	0.24	0.22
-11.75	45	0.22	0.18	-23.75	48	0.21	0.20

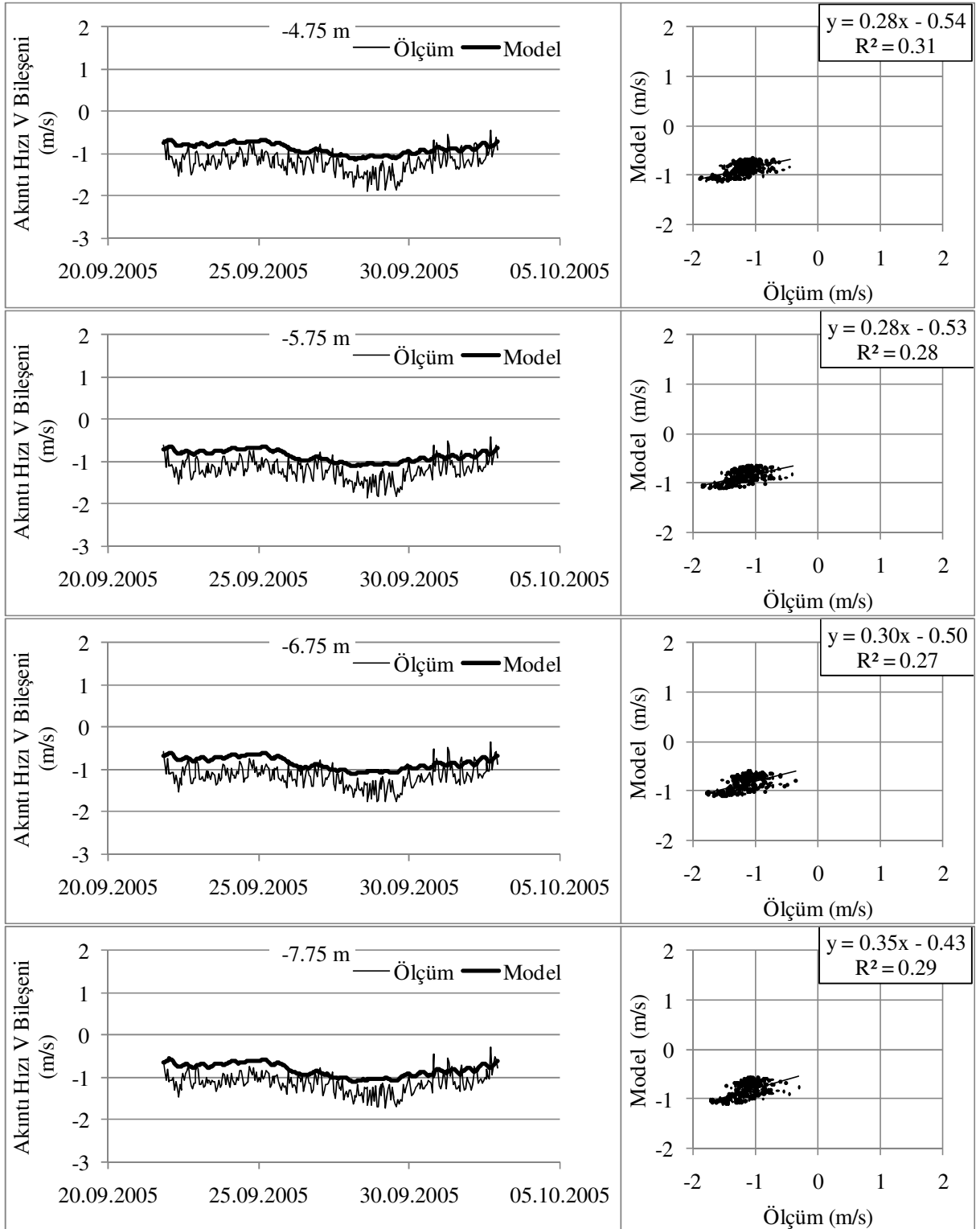
3. Doğrulama dönemi Ağustos ayı verilerini kapsamaktadır ve yaz ayları için model doğruluğunun test edilmesi amacıyla seçilmiştir. Şekil 6.64'ten de görüldüğü gibi doğrulama dönemi boyunca hem modellenen hem de ölçülen akıntı hızları çok fazla değişmemiş ve belli bir değer etrafında salınım göstermiştir. Model sonuçları ölçümleri ortalama değerini ve değişim eğilimini yakalamakla birlikte ölçümlerdeki salınımları benzeştirememiştir. Bunun başlıca nedeni, bu tarz çalkantıların en önemli nedeni olan meteorolojik koşulların model içerisindeki tanımıdır. Bu çalışmada meteorolojik koşullar 6 saatlik ortalamalar şeklinde, ECMWF'ten alınmış veriler kullanılarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla daha küçük periyotlu değişimlerin burada oluşturulan hidrodinamik model tarafından yakalanması da mümkün olmamıştır. R korelasyon katsayılarının düşük olduğu, OKHK ve MOH'ların ise daha büyük olduğu görülmektedir. Ancak kullanılan meteorolojik verilerin zamansal çözünürlüğü göz önünde tutulduğunda model sonuçlarının anlık çalkantıları benzeştirememesi beklenen bir sonuçtur. Hidrodinamik model ortalama akıntı hızlarını ise başarılı bir şekilde benzeştirmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında hidrodinamik model 3. Doğrulama dönemi için de başarılı bulunmuştur.

Model doğrulanmasında sonbahar aylarını temsil etmesi bakımından Eylül ayına ait yine 267 adet akıntı verisi içeren bir dönem seçilmiştir ve sonuçlar Şekil 6.65'te gösterilmiştir. Şekil 6.65'te 4. doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon

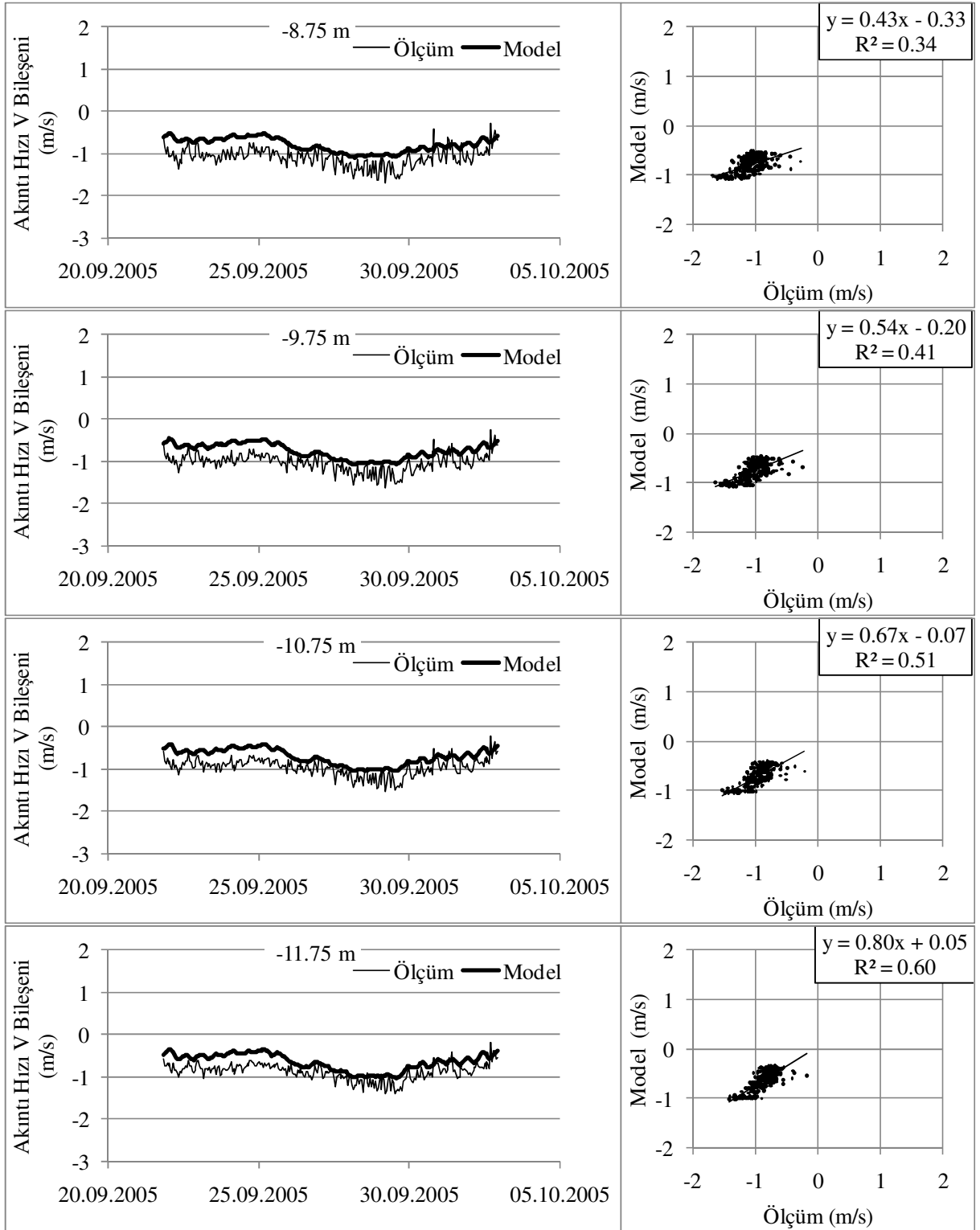
katsayıları verilmiştir.



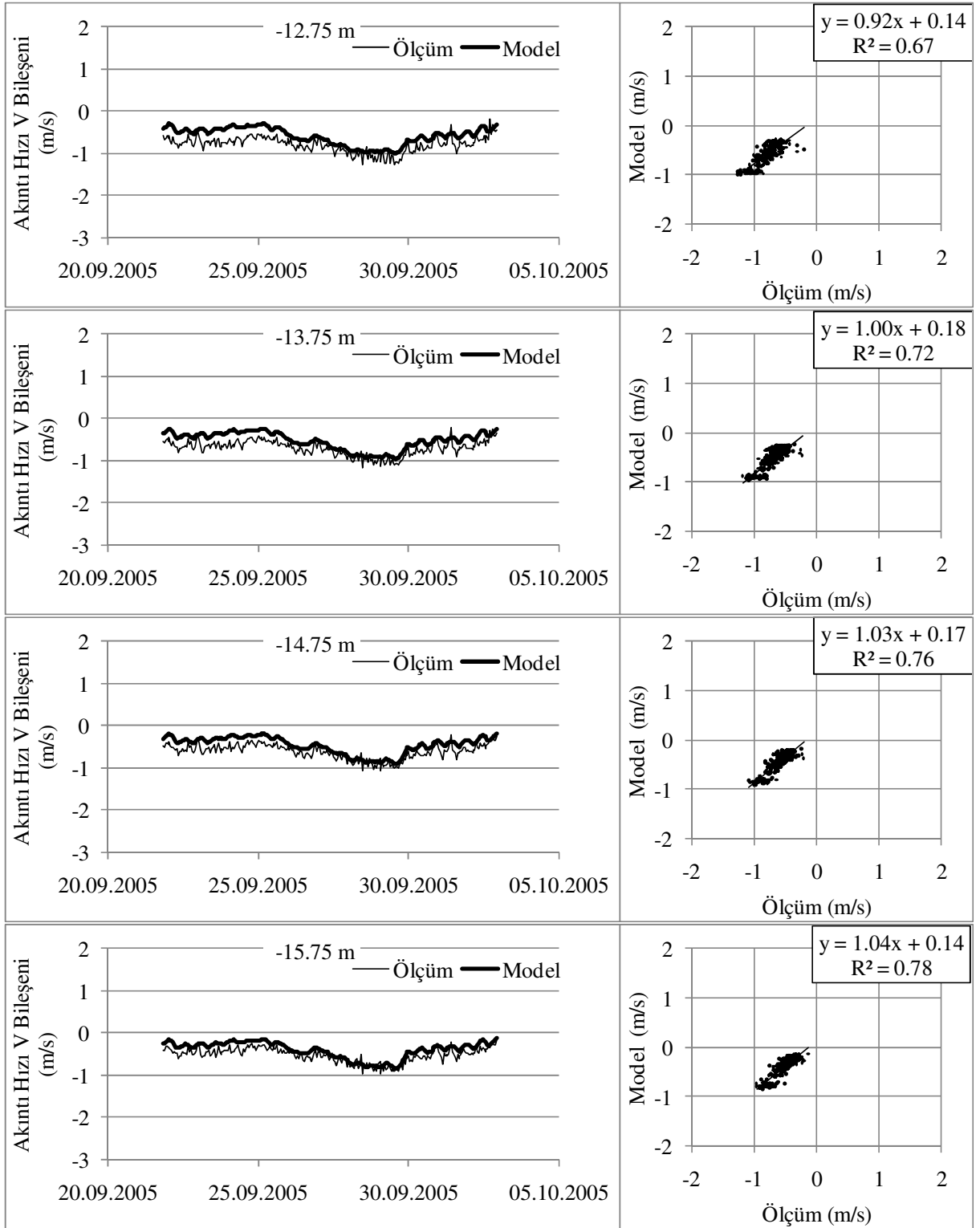
Şekil 6.65 4. Doğrulama dönemi içerisinde B istasyonundaki V akıntı hız bileşenlerinin ölçülen ve modellenen değerlerinin karşılaştırılması için yüzeyden (-0.75 m), tabana (-23.75 m) kadar bir metrelik aralıklarla tüm derinliklerdeki zaman serileri, dağılım grafikleri ve determinasyon katsayıları.



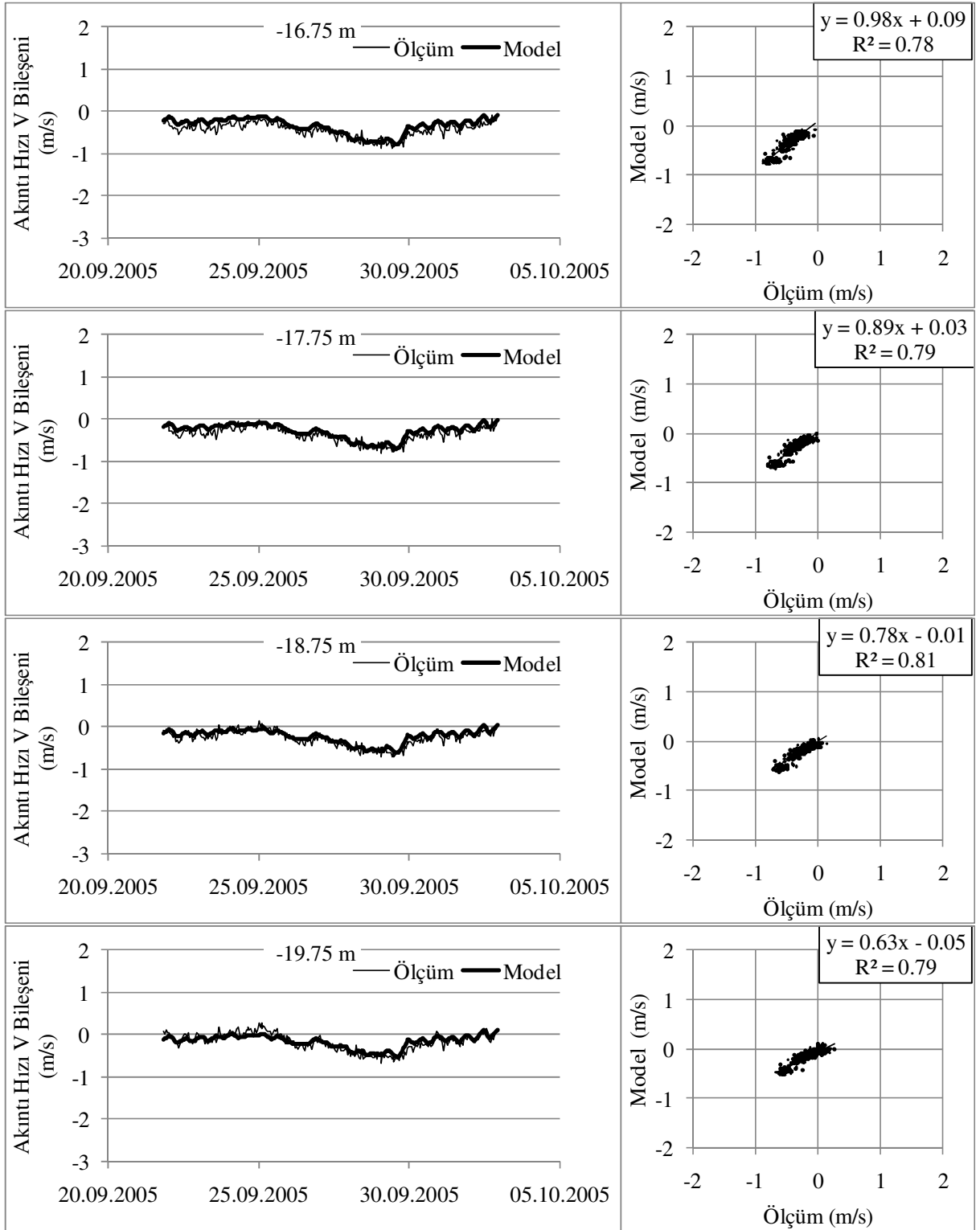
Şekil 6.65 Devamı.



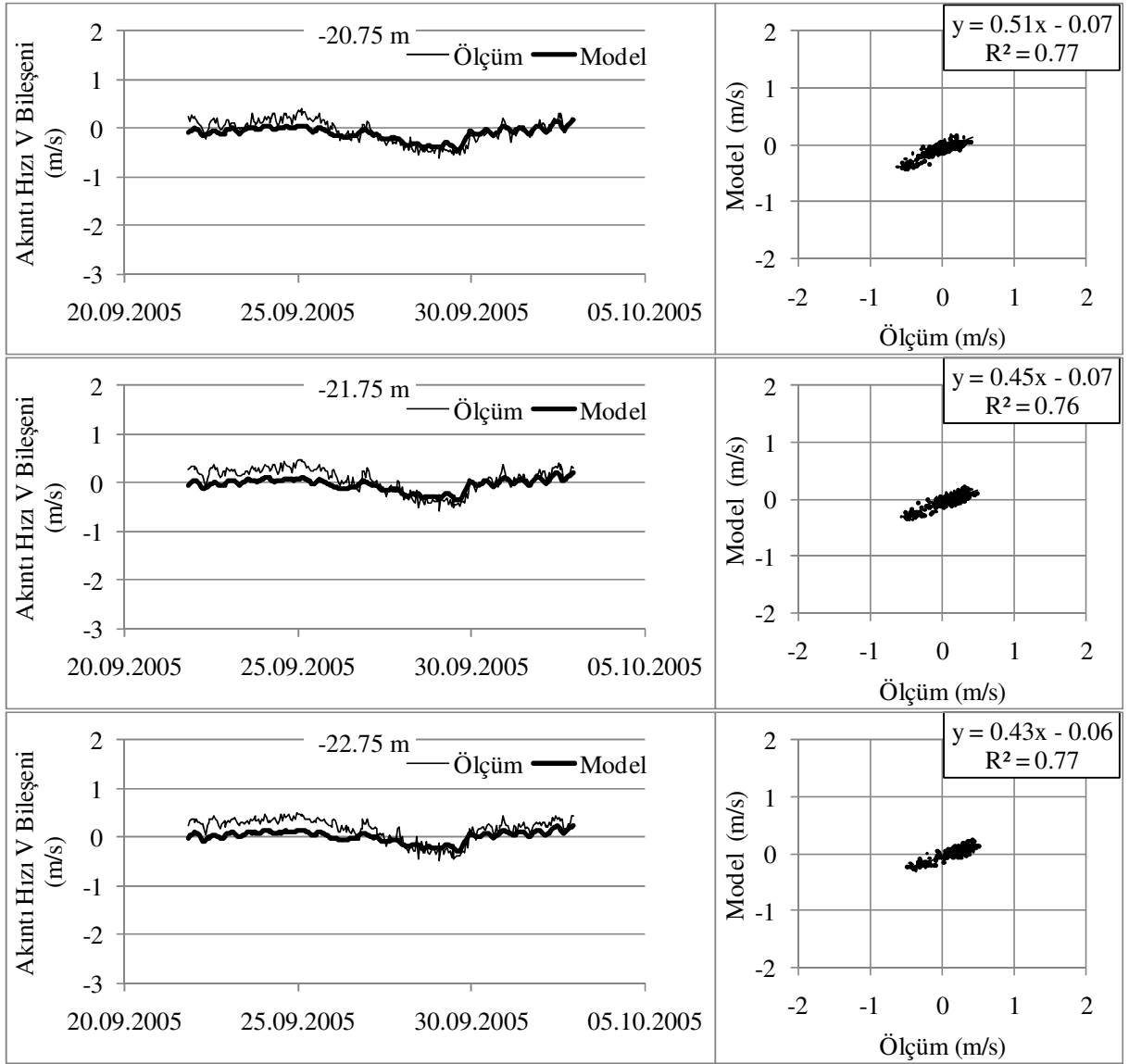
Şekil 6.65 Devamı.



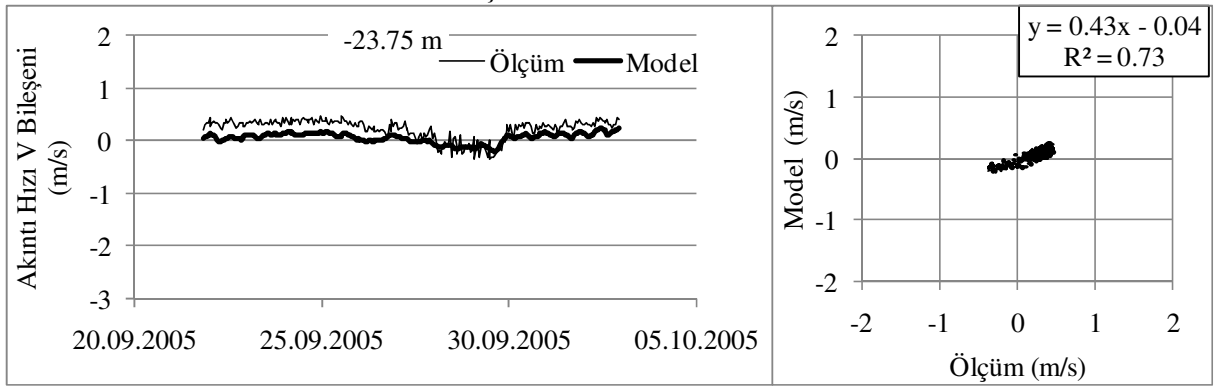
Şekil 6.65 Devamı.



Şekil 6.65 Devamı.



Şekil 6.65 Devamı.



Şekil 6.65 Devamı.

Model doğruluğu tüm dönemler için kalibrasyon aşamasında da kullanılan R, OKHK ve

MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. 4. Doğrulama dönemi ve tüm derinlikler için adı geçen ölçütler Çizelge 6.13’de bir arada verilmiştir.

Çizelge 6.13 4. Doğrulama dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.

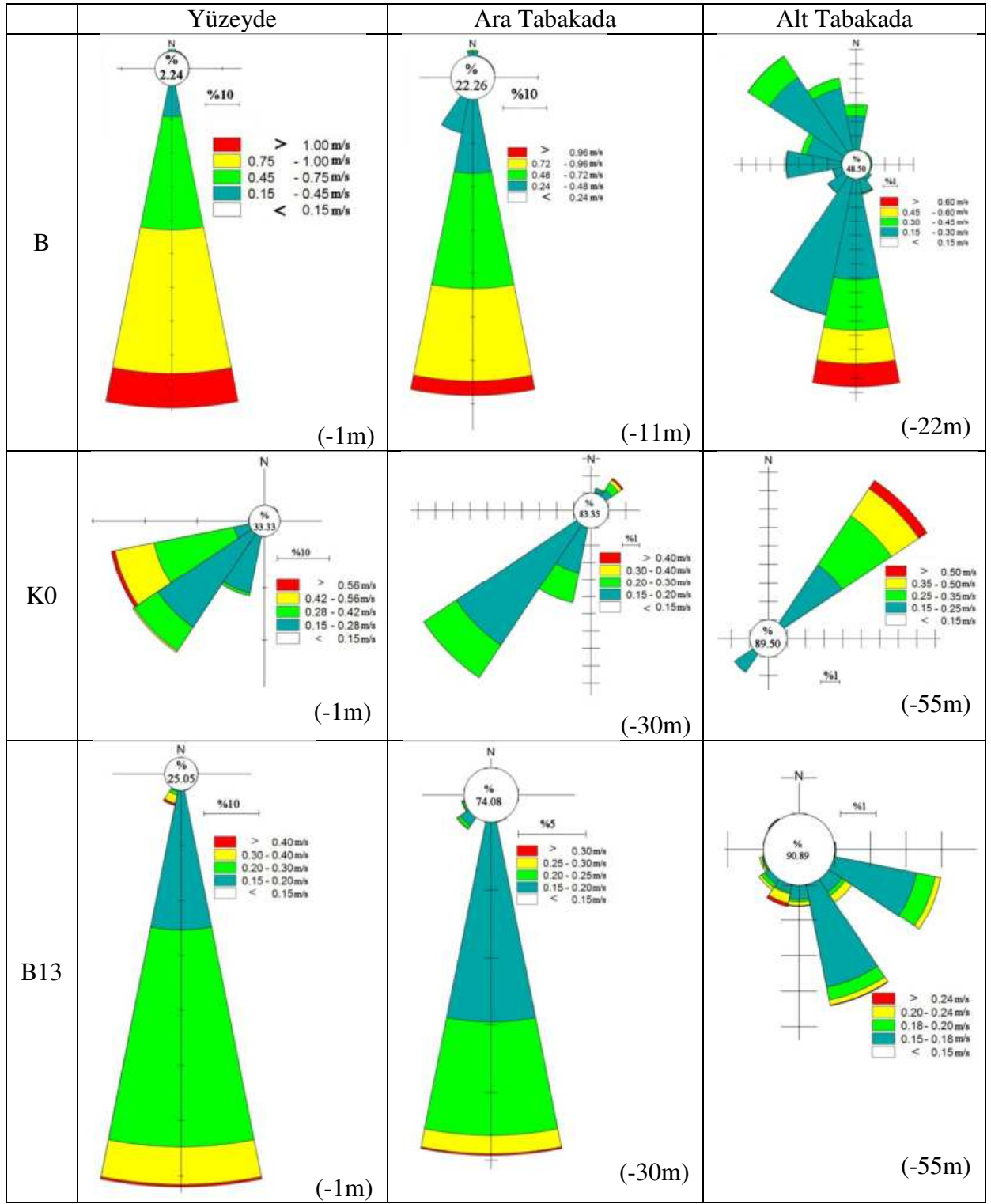
Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)	Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)
-0.75	23	0.44	0.36	-12.75	82	0.23	0.21
-1.75	31	0.34	0.28	-13.75	85	0.21	0.18
-2.75	35	0.64	0.62	-14.75	87	0.18	0.16
-3.75	62	0.31	0.29	-15.75	88	0.15	0.13
-4.75	55	0.38	0.34	-16.75	88	0.13	0.11
-5.75	53	0.38	0.34	-17.75	89	0.11	0.09
-6.75	52	0.37	0.33	-18.75	90	0.09	0.07
-7.75	54	0.36	0.32	-19.75	89	0.10	0.08
-8.75	58	0.34	0.30	-20.75	88	0.14	0.12
-9.75	64	0.32	0.28	-21.75	87	0.18	0.16
-10.75	71	0.29	0.26	-22.75	88	0.21	0.19
-11.75	77	0.26	0.24	-23.75	85	0.21	0.19

Hidrodinamik modelin doğrulanması amacıyla seçilen son dönem olan 4. Doğrulama dönemi için Şekil 6.65’ten de görüldüğü gibi ölçülen ve modellenen akıntı hızları arasında oldukça iyi bir uyum sağlanmıştır. Hidrodinamik model ortalama hızları oldukça iyi benzeştirirken, çalkantıları benzeştirmekte zorluk çekmiştir. Bunun nedeni daha önce de tartışıldığı gibi meteorolojik koşulların tanımlanmasında kullanılan zamansal çözünürlüktür. Çizelge 6.13 incelendiğinde, korelasyonların yüzeyden itibaren ilk altı metre boyunca düşük olduğu, daha sonra ise artarak %90’lara kadar ulaştığı görülmektedir. OKHK değerleri alt tabakada oldukça düşük değerler kaydetmiş, hatta yüzeyden 18.75 m derinlikte 0.09 m/s olmuştur. MOH değerleri de benzer şekilde 0.07 m/s’ye kadar düşmüştür. Hem Şekil 6.65 hem de Çizelge 6.13 bir arada değerlendirilerek hidrodinamik model oldukça başarılı bulunmuştur.

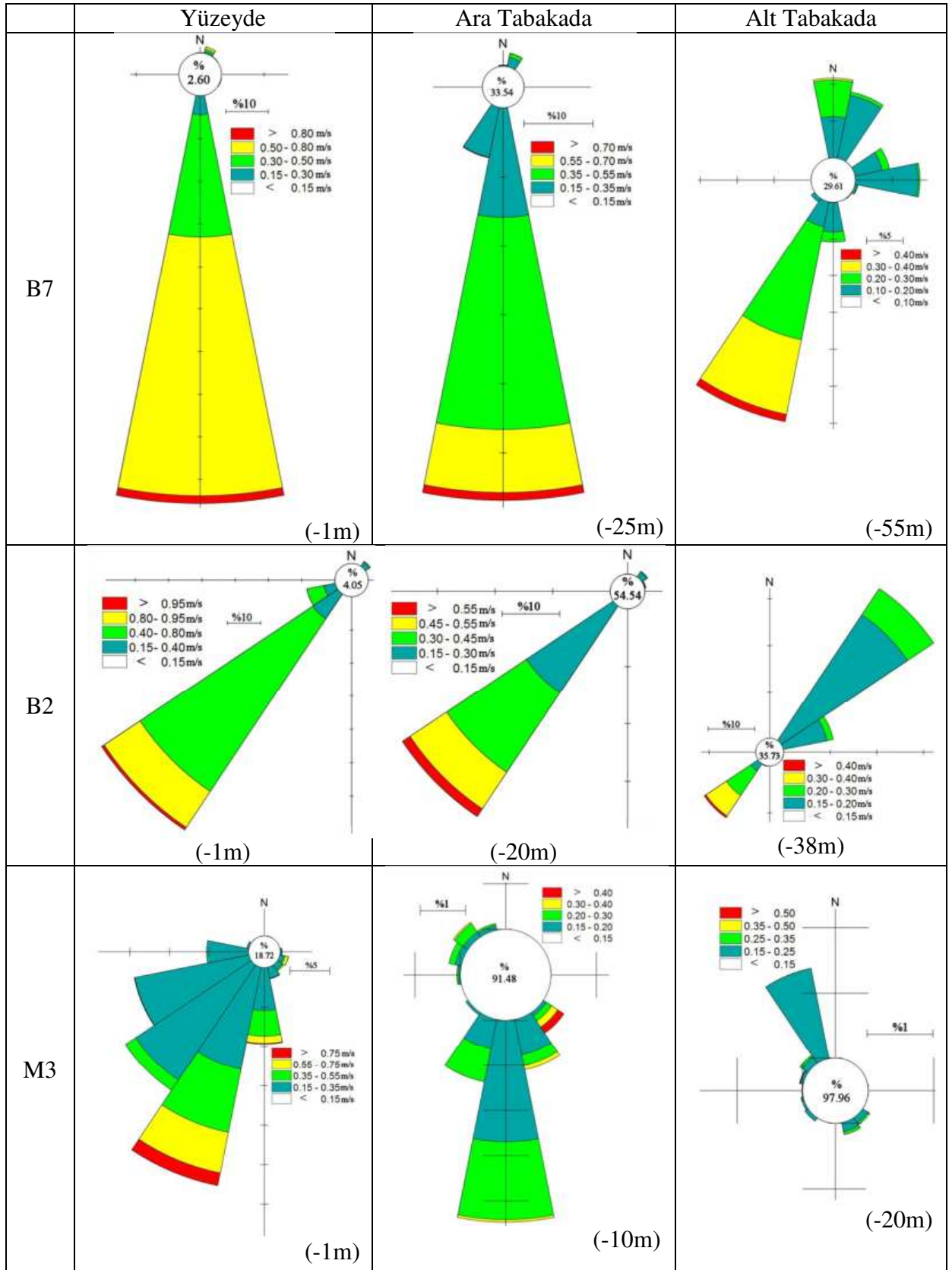
6.2.5 Hidrodinamik Model Sonuçları

Hidrodinamik model benzetimleri ile İstanbul Boğazı model alanı içerisindeki sıcaklık, tuzluluk, su seviyesi ve akıntı değişimleri belirlenmiştir. Hidrodinamik model hem su kalitesi hem de hidrodinamik verilerin her ikisinin aynı anda mevcut olduğu bir yıllık dönem için çalıştırılmıştır. Buna göre hidrodinamik model çıktılarından akıntı hız ve yönleri, akıntı verilerinin toplandığı B istasyonu ve su kalitesi durum değişkenlerine dair verilerin toplandığı K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında; yüzeyde, ara tabakada ve alt tabakada olmak üzere üç farklı derinlikteki akıntı gülleri üzerinde Çizelge 6.14’te verilmiştir.

Çizelge 6.14 Tüm istasyonlarda akıntı gülleri.

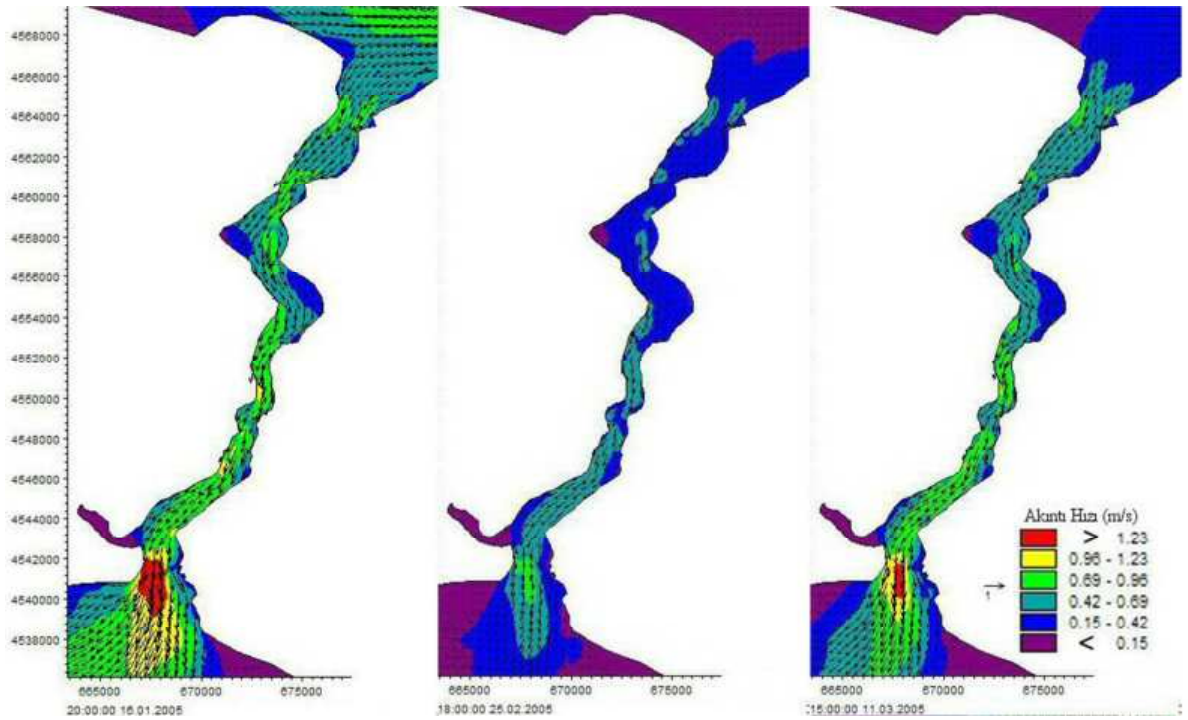


Çizelge 6.14 Devamı.

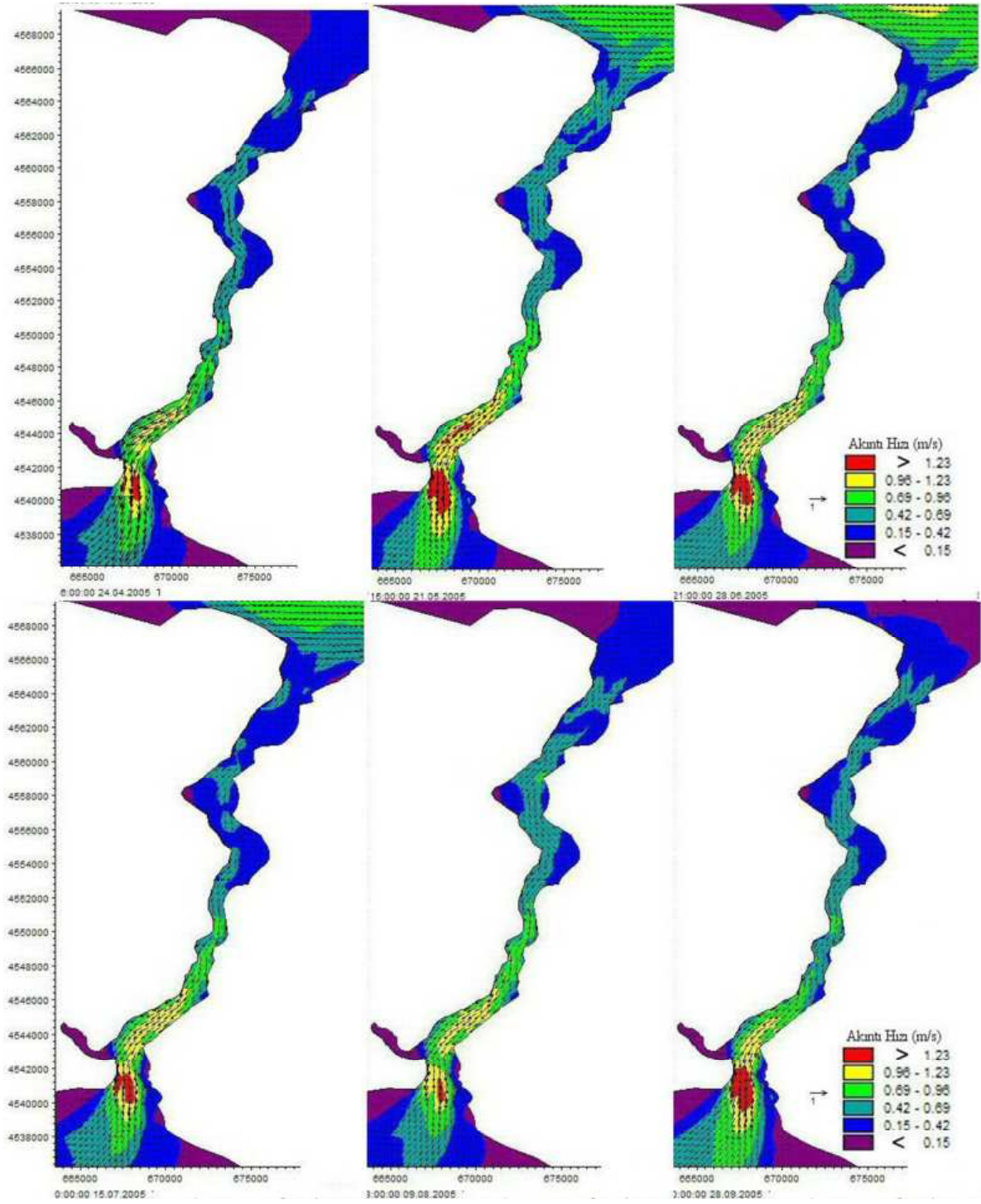


Çizelge 6.14’de model alanı içerisinde dikkate alınan her bir istasyonda model sonucunda hesaplanan akıntı hızları yönleri ve şiddetlerine göre akıntı gülleri üzerinde gösterilmiştir. Tüm istasyonlarda ve tüm derinliklerde 0.15 m/s’nin altındaki hızlar sakin durum olarak kabul edilmiş ve akıntı gülünün merkezinde %’si verilmiştir. Farklı derinliklerde ve farklı istasyonlarda akıntı hızları oldukça değişken olabildiğinden her bir akıntı gülü için kendine özgü bir sınıflandırma verilmiştir. Çizelge 6.14’de verilen akıntı güllerinin İstanbul Boğazı’nın bilinen karakteristik akıntı yapısını yansıttığı açıkça görülmektedir. Yüksel vd. (2008) B istasyonunda toplanan ölçüm verilerini benzer şekilde değerlendirmiştir. Hidrodinamik model sonuçlarından elde edilen Çizelge 6.14’deki akıntı gülleri Yüksel vd. (2008)’de sunulan ve ölçümlere dayanan akıntı gülleri ile oldukça iyi bir uyum sergilemektedir. Bu çalışmada dikkate alınan diğer istasyonlarda ise sürekli bir akıntı ölçümü mevcut değildir. Bu nedenle karşılaştırma yapılamamıştır. Çizelge 6.14 incelendiğinde yüzeyde B, B13, B7 istasyonlarında akıntının hakim yön dilimi Kuzey-Güney olduğu görülmektedir. K0 ve M3 istasyonlarında ise akıntı yönünün yüzeyde Batı-Güney arasındaki daha geniş bir yön dilimi içerisinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu iki istasyon Boğaz’ın dışında, K0 Boğaz’ın Karadeniz’e, M3 ise Marmara Denizi’ne açıldığı yerlerde konumlanmıştır. Dolayısıyla buradaki hakim akıntı yönünün saçılım göstermesi beklenen bir sonuçtur. K0 istasyonunda yüzey akıntısı Karadeniz ana akıntı yapısından ayrılan bir kolun Boğaz aracılığı ile Akdeniz’e açılmak üzere Boğaz’a girişi ile şekillenmektedir. Burada Karadeniz’in rim akıntısı doğu- batı yönündedir. K0 istasyonunda yüzey akıntısı bu etkiler altında şekillenmektedir. M3 istasyonunda ise Boğaz’da Marmara Denizi’ne boşalan yüzey akıntısı bir kanalda geniş bir hazneye boşalmanın etkisi ile akıntı yönünde sözkonusu saçılımları sergilemektedir. B2 istasyonunda ise yüzey akıntısı neredeyse her zaman Güneybatı yönündedir. Bu durum Boğaz’ın topoğrafik yapısından ileri gelmektedir. Bu istasyon Boğaz’ın Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultusunda uzanan bir kesitin tam ortasında yer almaktadır. Akıntı bu kesitte Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultusundaki bir kanalda ilerlemektedir. Karadeniz’in Marmara’dan daha yüksek oluşu nedeni ile de bu istasyonda akıntı neredeyse her zaman Güneybatı yönünde ilerlemektedir. Çizelgenin ikinci kolunda verilen ara tabaka akıntı gülleri ise küçük saçılımlar sergilemekle birlikte yüzeydekine benzer bir dağılım göstermektedirler. Alt tabakada ise akıntı yönleri çoğu istasyonda büyük bir saçılım göstermektedir. Boğaz’ın nispeten kuzeyinde sayılabilecek B13 istasyonunda alt tabaka akım Doğu-Batı yön dilimi içerisinde oldukça geniş bir saçılım göstermekte ve her yönde oluşabilmektedir. Yine onun yakınındaki B7 istasyonunda da akıntı yönü değişiklik göstermekle birlikte çoğunlukla Güneybatı yönünde oluşmuştur. M3 istasyonunda alt tabaka

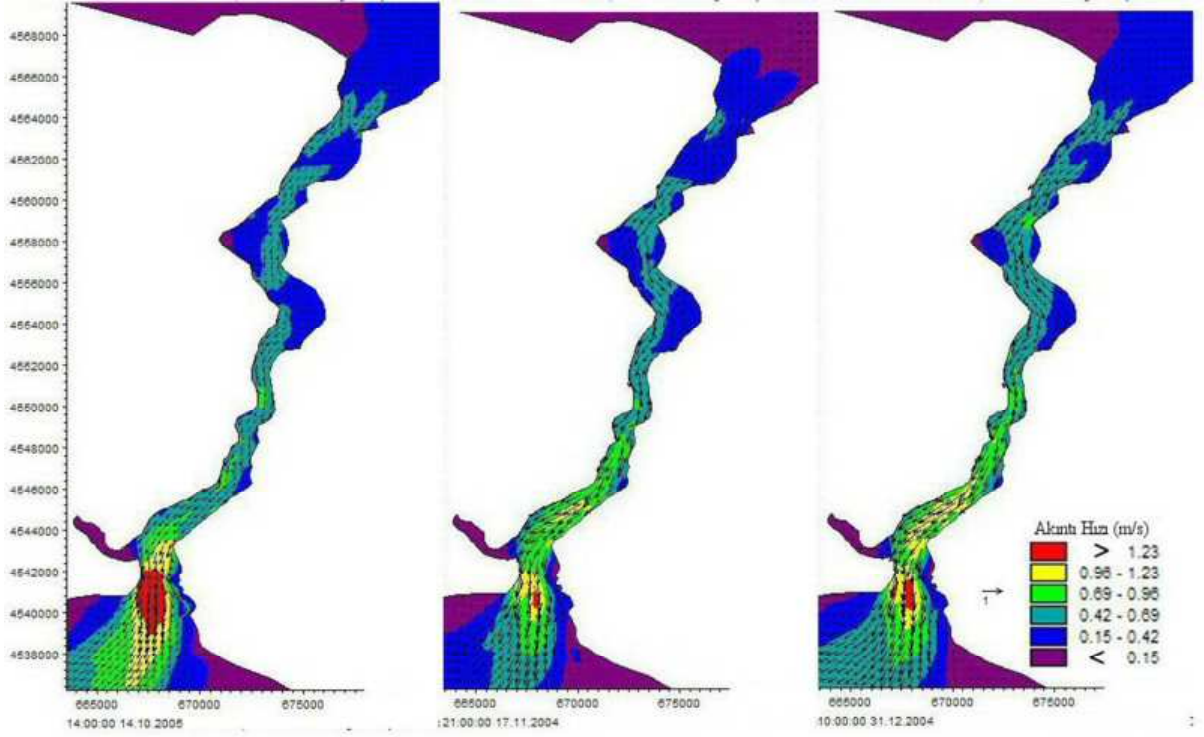
akımı yoğun olan Marmara Denizi suyunun kuzeye doğru ilerlemesi ile meydana gelmektedir. Boğaz'ın karakteristik akıntı yapısına uygun bir davranış göstermektedir. B2 istasyonunda da alt tabaka akımı iki tabakalı yapıya uygun olarak çoğunlukla Kuzeydoğu yönünde ilerlerken, alt tabakanın bloke olduğu ve üst tabaka akımının tüm Boğaz'ı kapladığı durumlarda Güneybatı yönünde oluşmuştur. Bu durumun tüm veri seti içerisindeki oluşma yüzdesi de azımsanamayacak kadar önemlidir. Bir başka ilginç durum da B2 istasyonunda ortaya çıkmıştır. B2 istasyonunda üst tabaka akımı derinlik boyunca bu kesitin topoğrafik yapısına uygun olarak dönmekte ve tabanda yine oldukça geniş bir yön diliminde akmaya devam etmektedir. Bu sistem üzerinde B istasyonunun bulunduğu kesitte topografyadan kaynaklanan ikincil akımların önemli bir etkisi sözkonusudur. Tüm istasyonlarda akıntı gülleri Boğaz'ın bilinen akıntı karakteristikleri ile uyum göstermektedir. Yine modellenen 1 yıllık dönem içerisinde her ay için örnek bir akıntı haritası Şekil 6.66'da verilmiştir. Şekilde yalnızca yüzey akıntı hızları ve vektörleri gösterilmiştir.



Şekil 6.66 Model alanı yüzey (-1m) katmanında hidrodinamik modelden hesaplanan akıntı haritaları.



Şekil 6.66 Devamı.



Şekil 6.66 Devamı.

Hidrodinamik modelin kapsadığı dönem içerisinde birbirinden oldukça farklı akım alanları oluşmuştur. Burada hepsinin sunulması mümkün olmadığından her ay için bir örnek akıntı haritası sunulmuştur. Akıntı haritaları üzerinde model alanı içerisinde akımın şiddetlendiği ve yavaşladığı yerler ile akım doğrultuları rahatlıkla görülmektedir. Yine İstanbul Boğazı'nın girintili çıkıntılı topoğrafyasının etkisi ile oluşan ölü hacimler, akımın neredeyse durduğu kesitler akıntı haritaları üzerinde görülmektedir.

1 yıllık tüm veri seti için B istasyonunda tüm derinliklerde ölçülen akıntı hızları ile modelden hesaplanan akıntı hızları R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler Çizelge 6.15'de bir arada sunulmuştur.

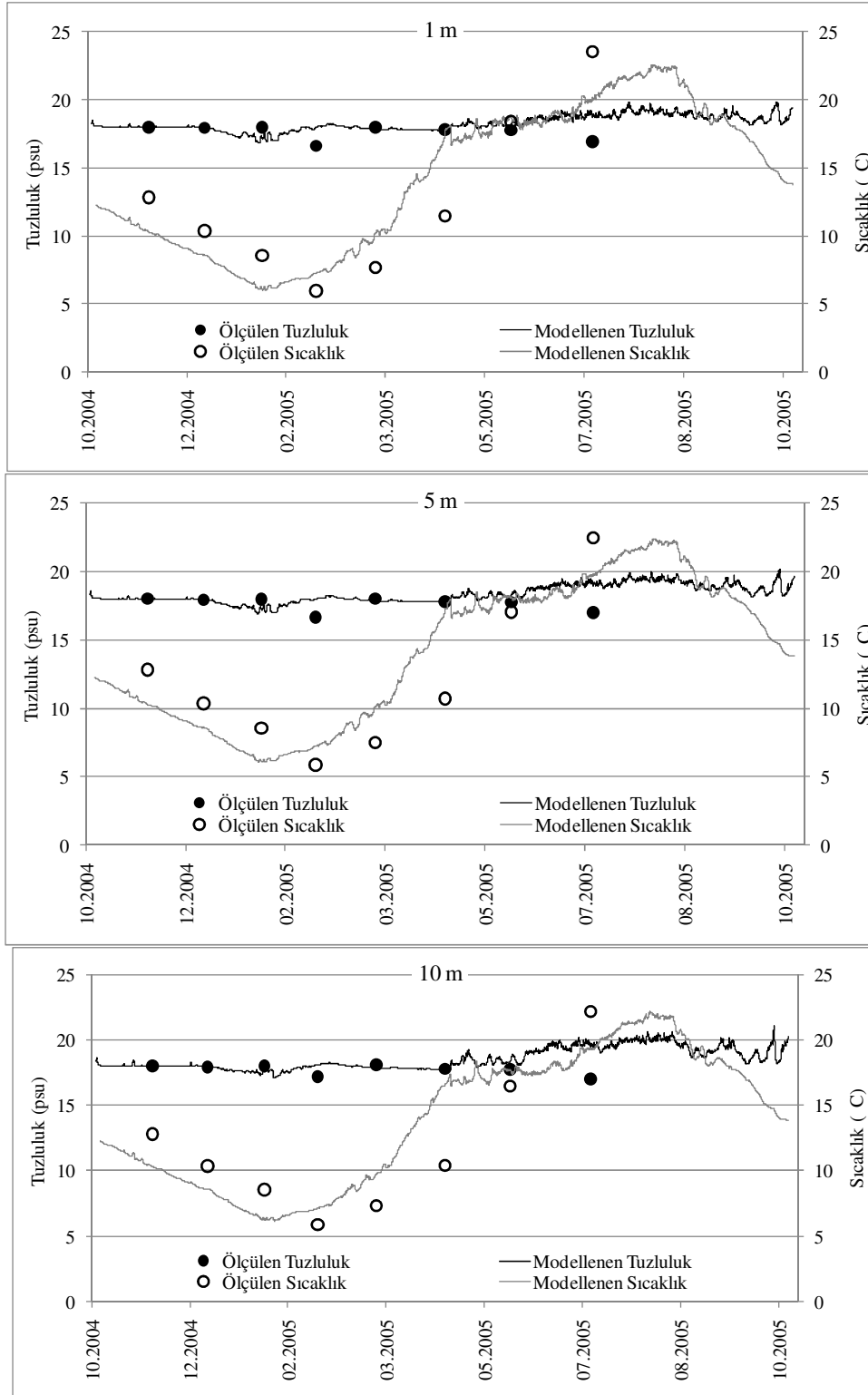
Çizelge 6.15 Tüm ölçüm dönemi için B istasyonunda 1m aralıklı olarak tüm derinlikler için ölçüm ve model sonuçları arasındaki R, OKHK ve MOH değerleri.

Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)	Derinlik (m)	R (%)	OKHK (m/s)	MOH (m/s)
-0.75	67	0.56	0.46	-12.75	78	0.33	0.26
-1.75	57	0.42	0.34	-13.75	78	0.32	0.25
-2.75	45	0.48	0.42	-14.75	77	0.31	0.24
-3.75	50	0.39	0.30	-15.75	77	0.30	0.23
-4.75	67	0.43	0.34	-16.75	76	0.30	0.23
-5.75	73	0.42	0.33	-17.75	75	0.29	0.22
-6.75	74	0.41	0.32	-18.75	73	0.29	0.22
-7.75	75	0.39	0.31	-19.75	71	0.29	0.23
-8.75	76	0.38	0.30	-20.75	68	0.28	0.23
-9.75	77	0.37	0.29	-21.75	66	0.28	0.22
-10.75	77	0.36	0.28	-22.75	63	0.26	0.21
-11.75	78	0.35	0.27	-23.75	61	0.24	0.18

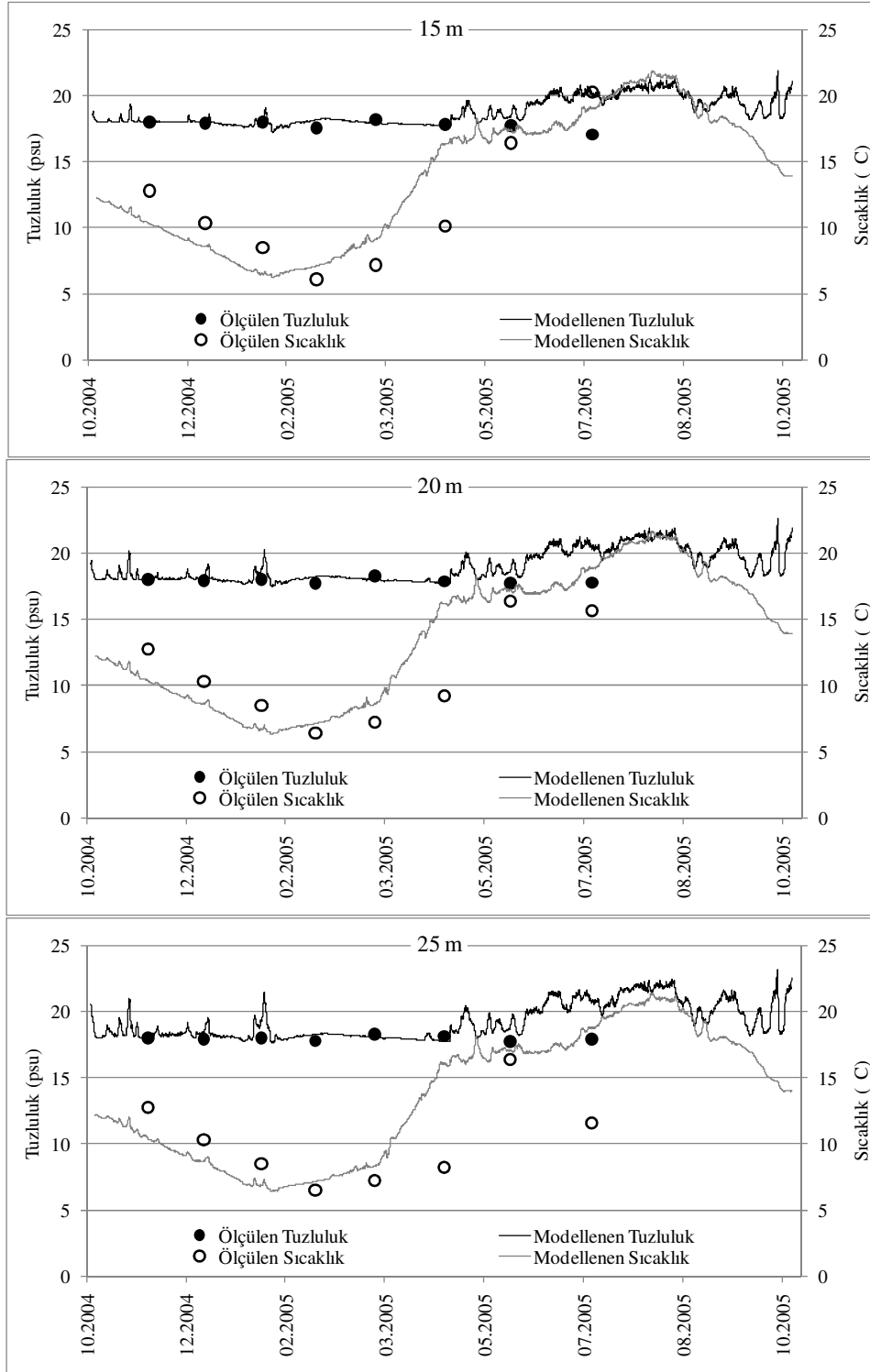
Çizelge 6.15'te verilen sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde model sonuçları ile ölçümlerin birbiri ile genel olarak iyi bir uyum sergilediği görülmektedir. Ancak belirli derinliklerde korelasyon katsayılarının düştüğü ve hataların arttığı görülmektedir. Öncelikle yüzeyden itibaren ilk beş katmanda düşük korelasyon ve yüksek hata değerleri dikkati çekmektedir. Bu derinliklerde ölçümlerden kaynaklanan bir hata olduğu düşünülmektedir. Altıncı metreden itibaren korelasyon katsayıları artmakta ve hatalar azalmaktadır. Kurulan hidrodinamik model bu derinlikler için oldukça iyi bir benzetim sağlamıştır. Tabanda yine korelasyon katsayılarının azaldığı görülmektedir. Bunun da başlıca sebebi İstanbul Boğazı'nın taban karakteristiklerine ait belirsizliklerin çok fazla olması ve dolayısıyla hidrodinamik model kurulumunda taban karakteristiklerinin tam olarak dikkate alınamamasıdır.

Hidrodinamik modelde elde edilen akıntı alanlarının tartışılmasının ardından, modelden elde edilen diğer fiziksel büyüklükler olan sıcaklık ve tuzluluk değişimlerinin tartışılması gerekmektedir. İstanbul Boğazı'nda sıcaklık ve tuzluluk ölçümleri İSKİ tarafından belirli istasyonlarda ve derinlik boyunca aylık ya da mevsimsel olarak izlenmektedir. Dolayısıyla 1 yıllık benzetim süresi içerisinde herhangi bir istasyonda tuzluluk ya da sıcaklık ile ilgili olarak elimizde 4 ya da 12 adet ölçüm verisi mevcuttur. Bu çalışmada hidrodinamik modelden hesaplanan sıcaklık ve tuzluluk alanlarının doğrulanması yalnızca bu veriler kullanılarak yapılabilmektedir. Şekil 6.67'de K0, Şekil 6.68'de B13, Şekil 6.69'da B7, Şekil 6.70'te B2 ve Şekil 6.71'de M3 istasyonlarında ölçülmüş sıcaklık ve tuzluluk değerleri ile hidrodinamik model sonuçları zaman serileri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Zaman serileri 5 m aralıklarla

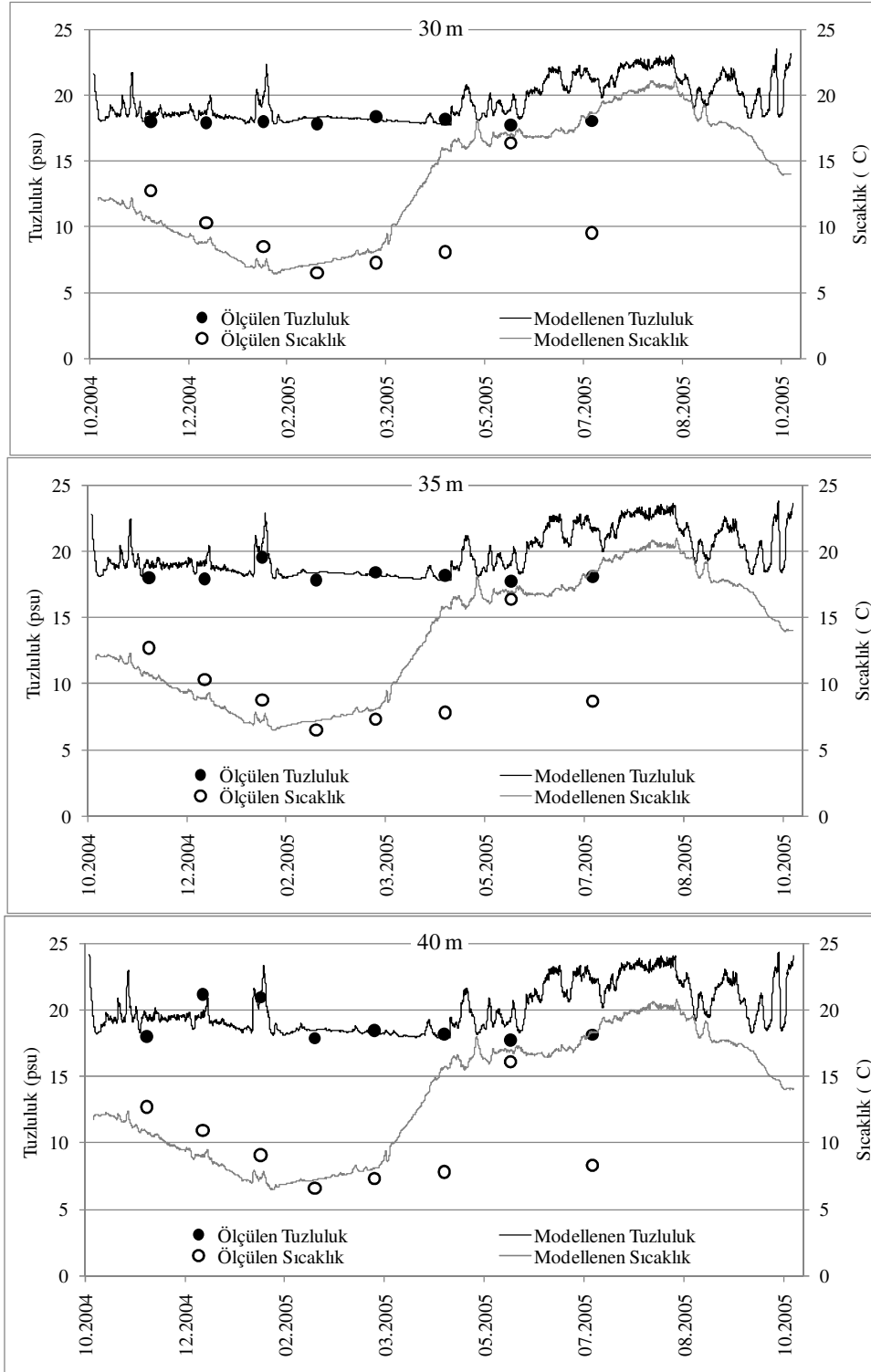
tüm derinlikler için oluşturulmuştur.



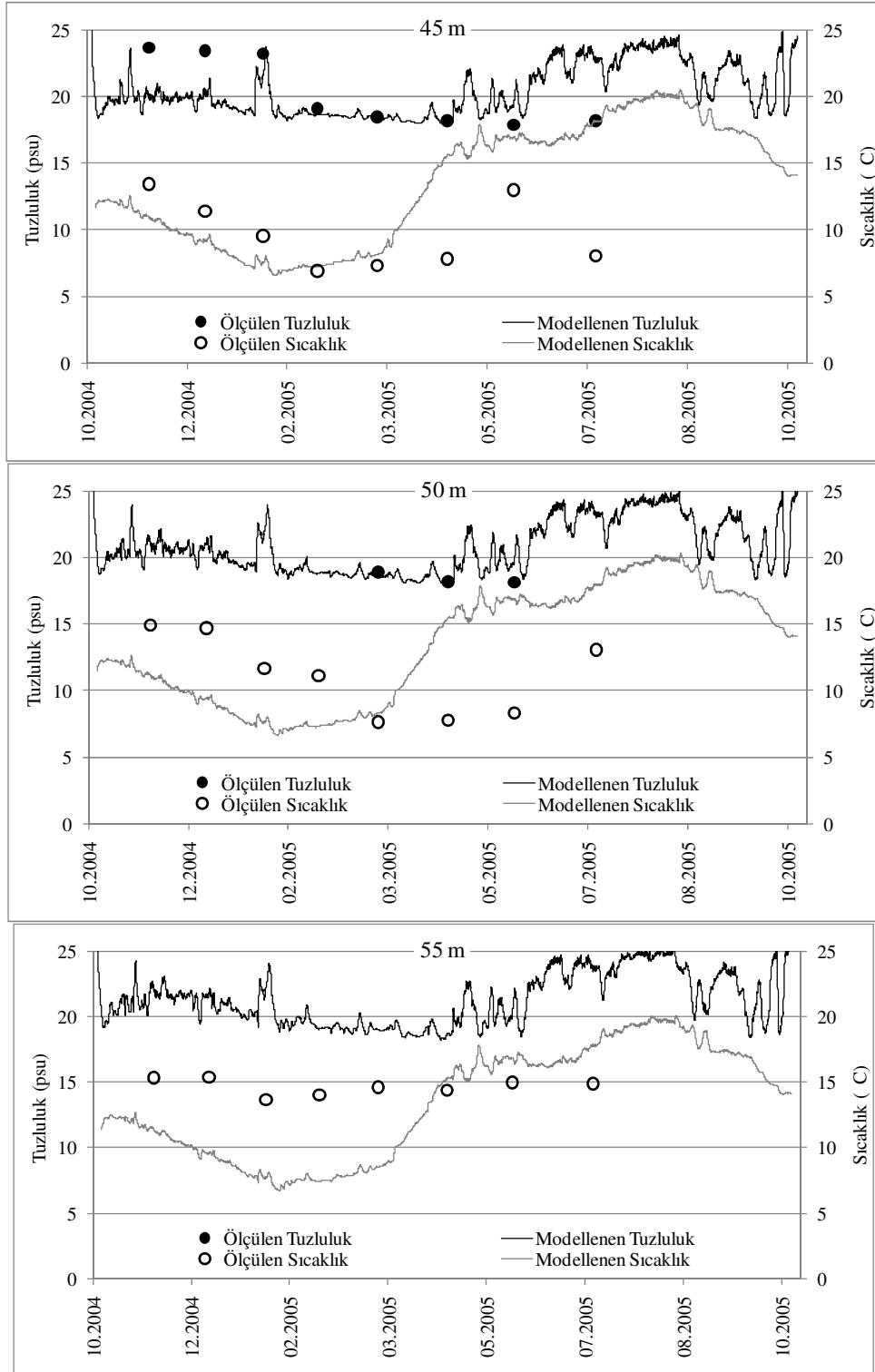
Şekil 6.67 K0 İstasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m ve 55m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.



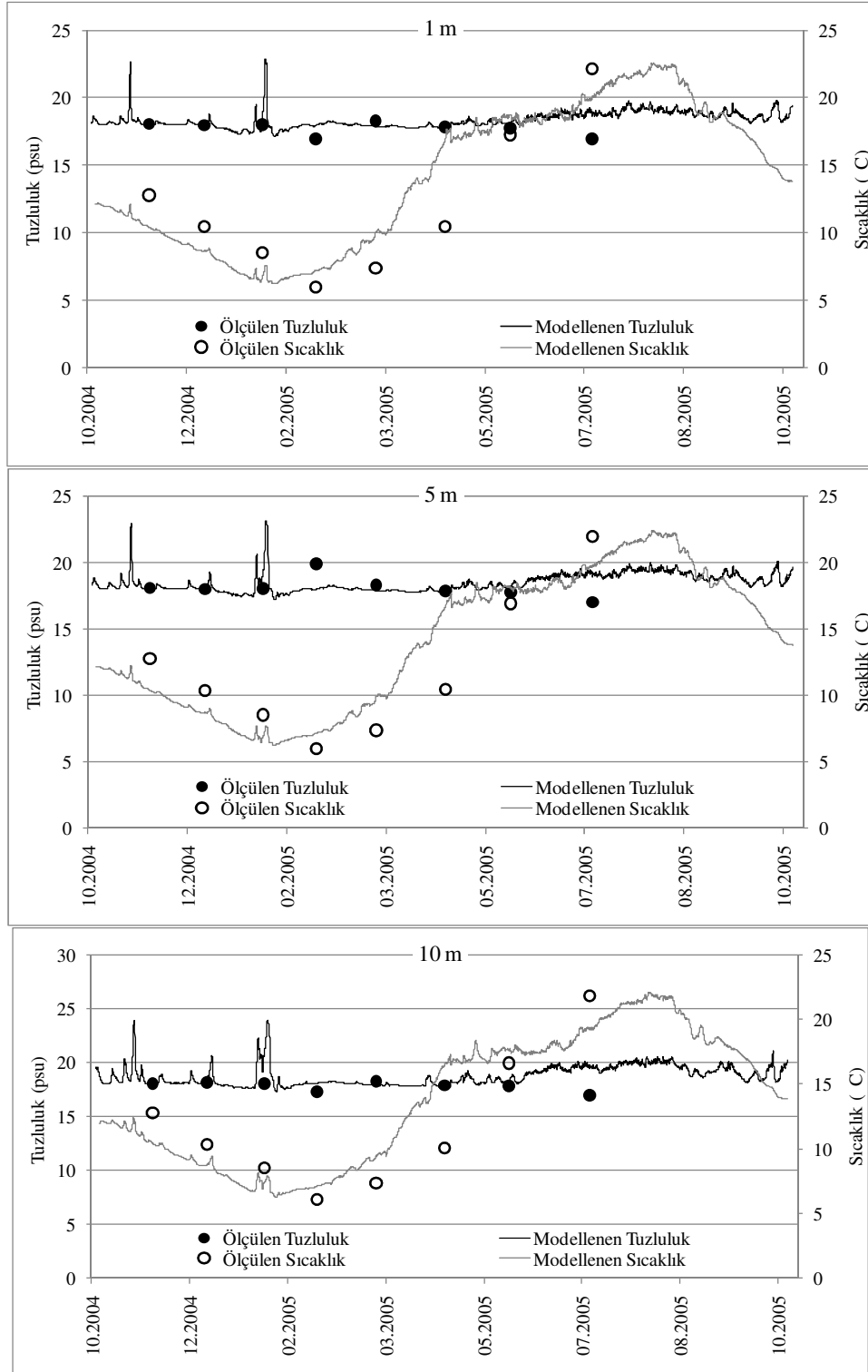
Şekil 6.67 Devamı.



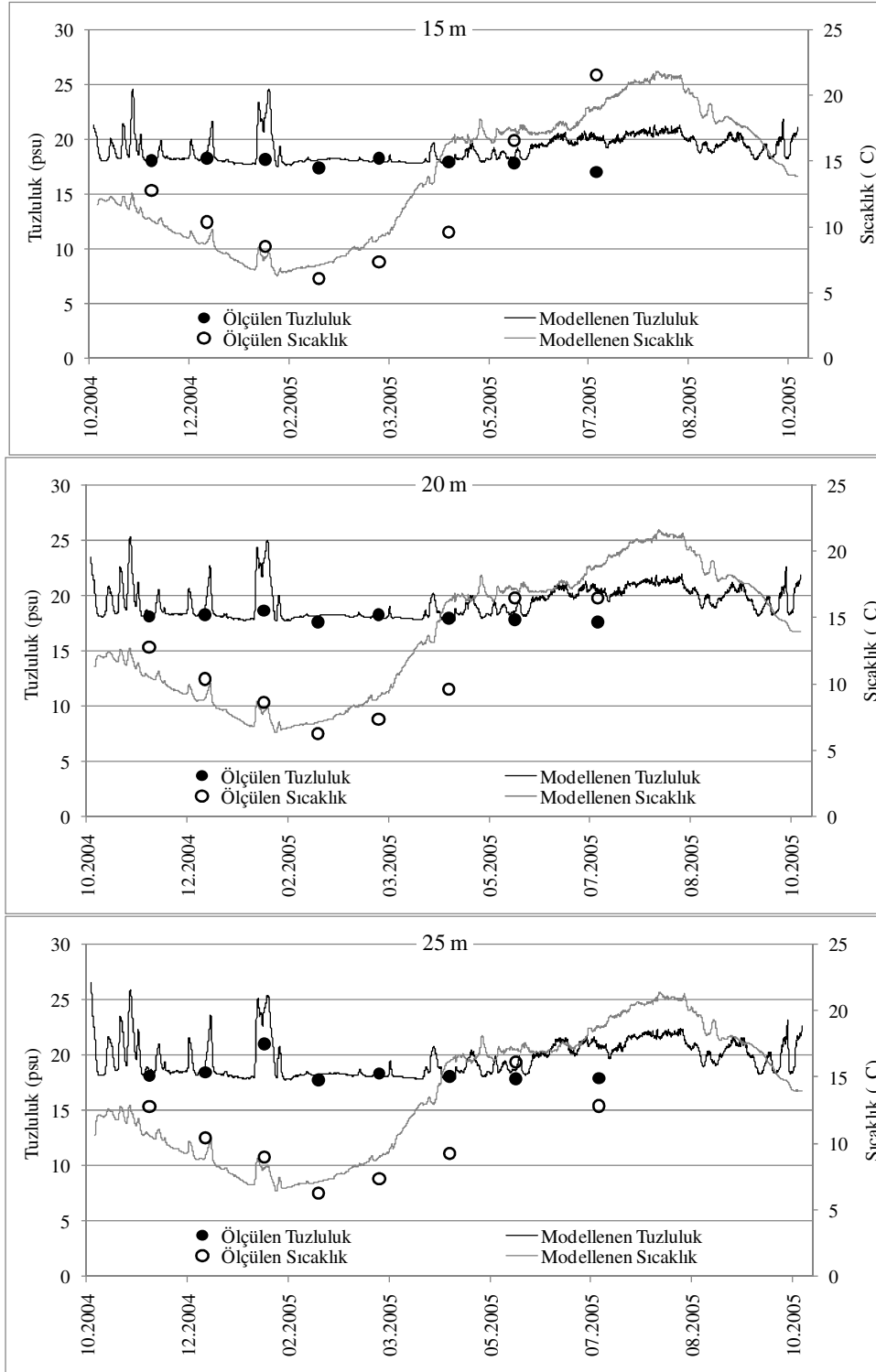
Şekil 6.67 Devamı.



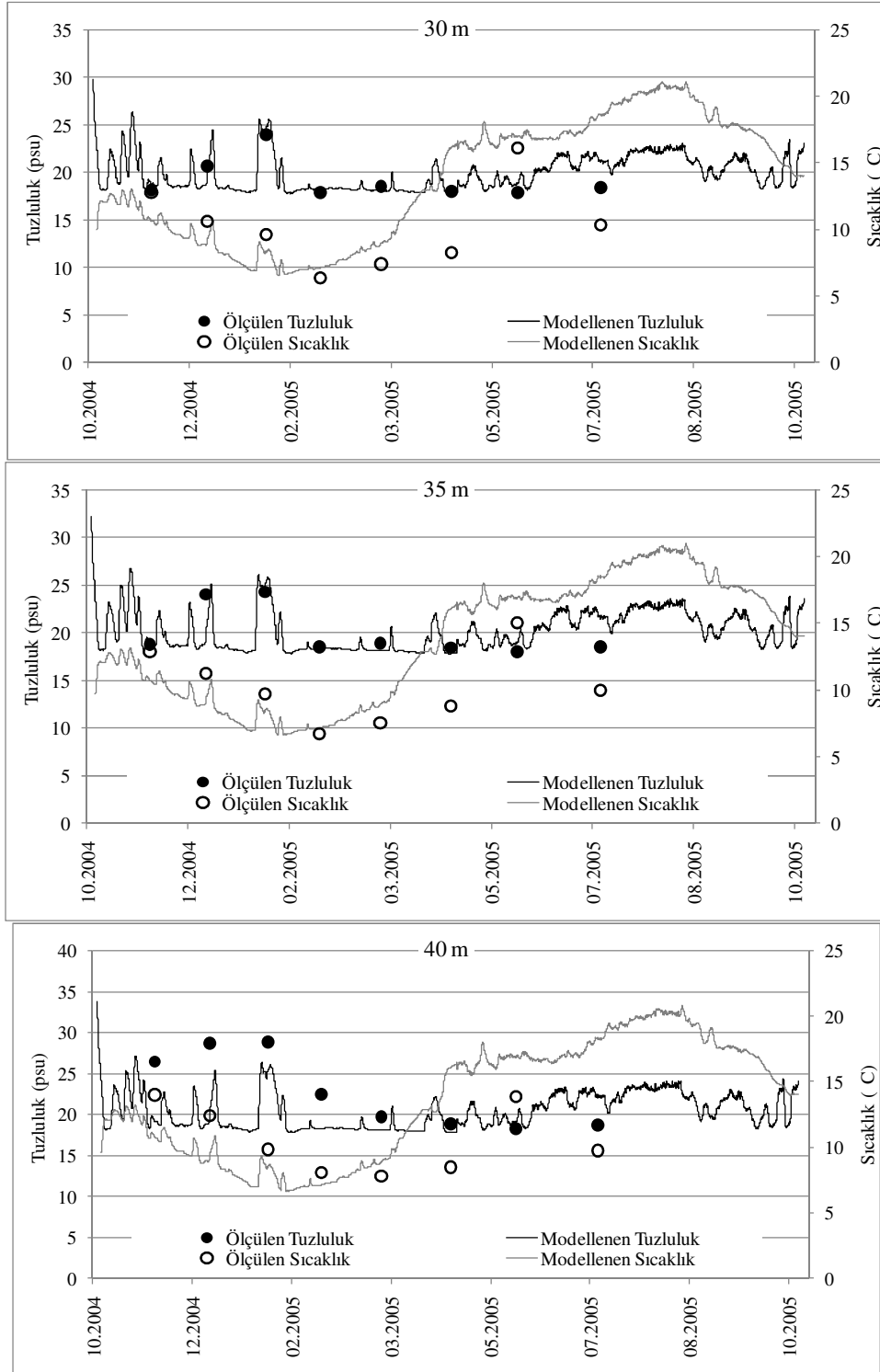
Şekil 6.67 Devamı.



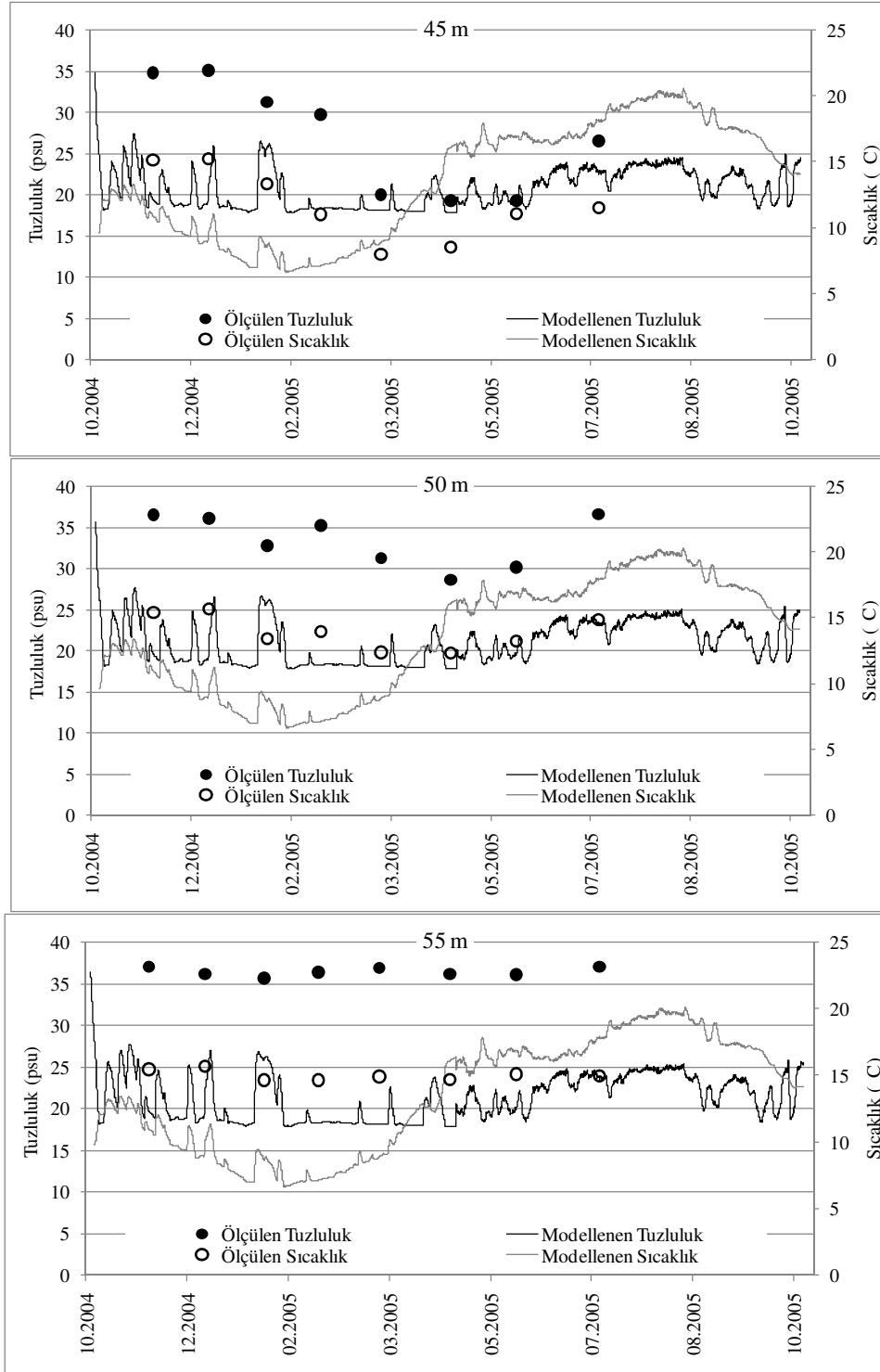
Şekil 6.68 B13 İstasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m ve 55m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.



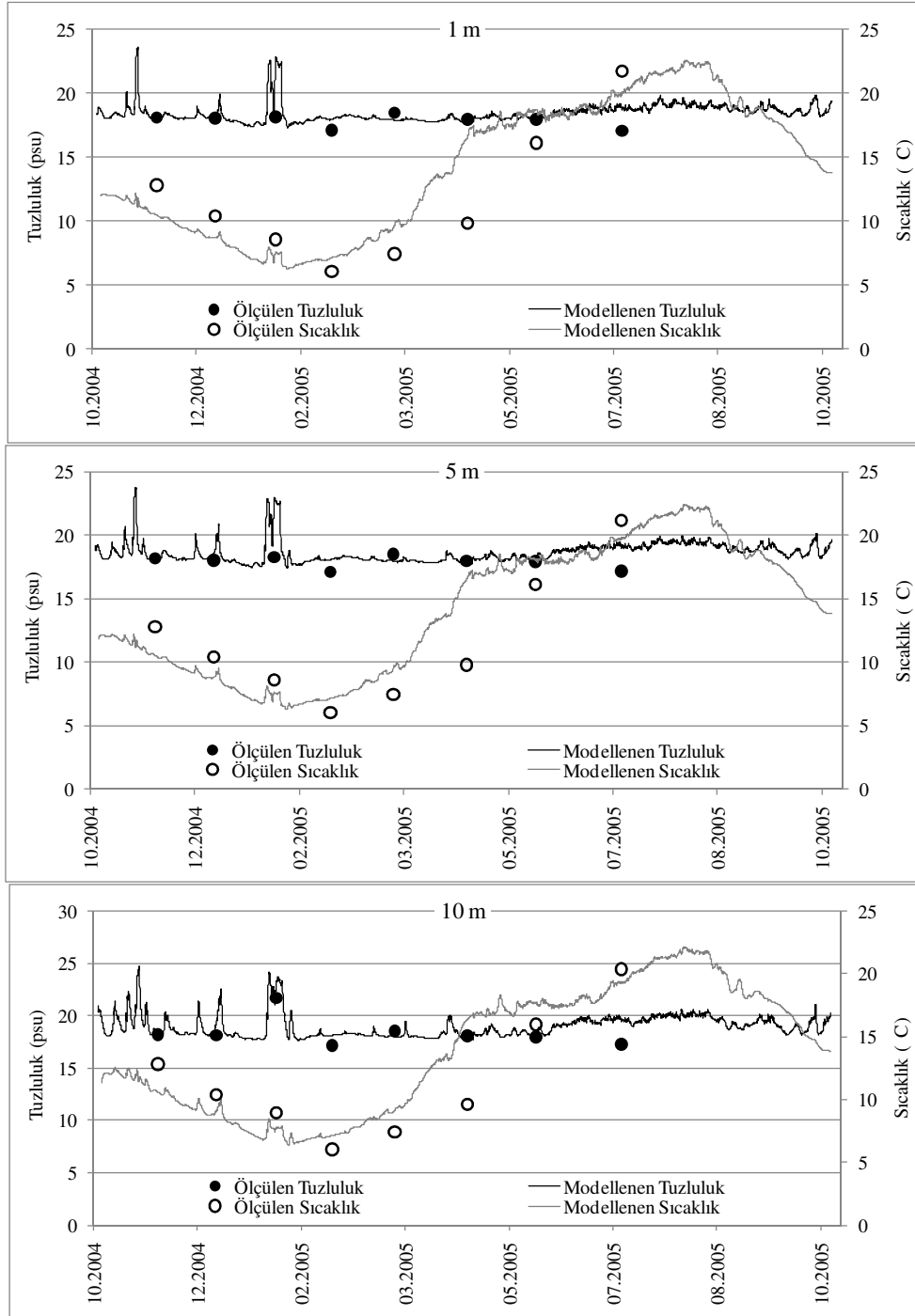
Şekil 6.68 Devamı.



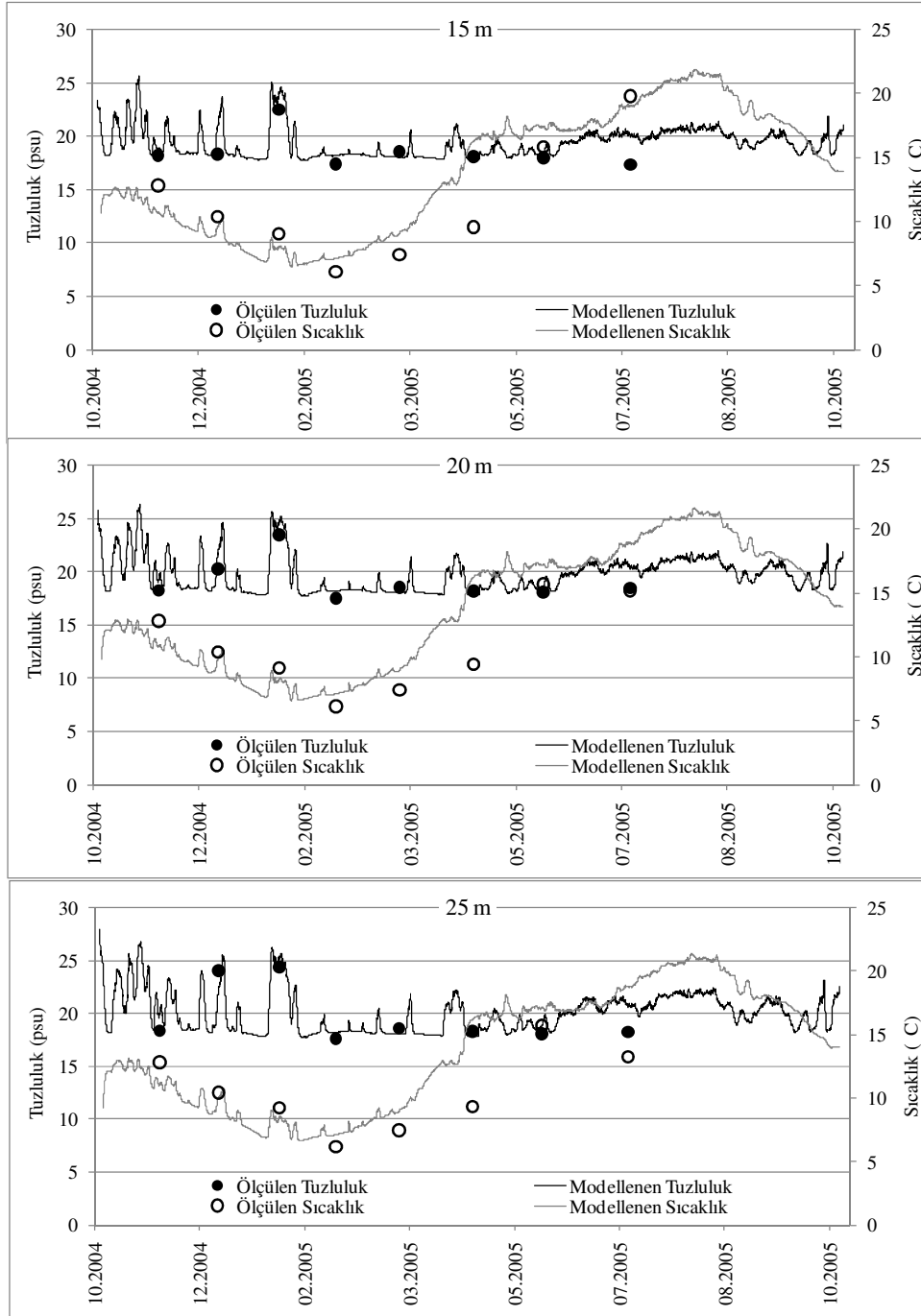
Şekil 6.68 Devamı.



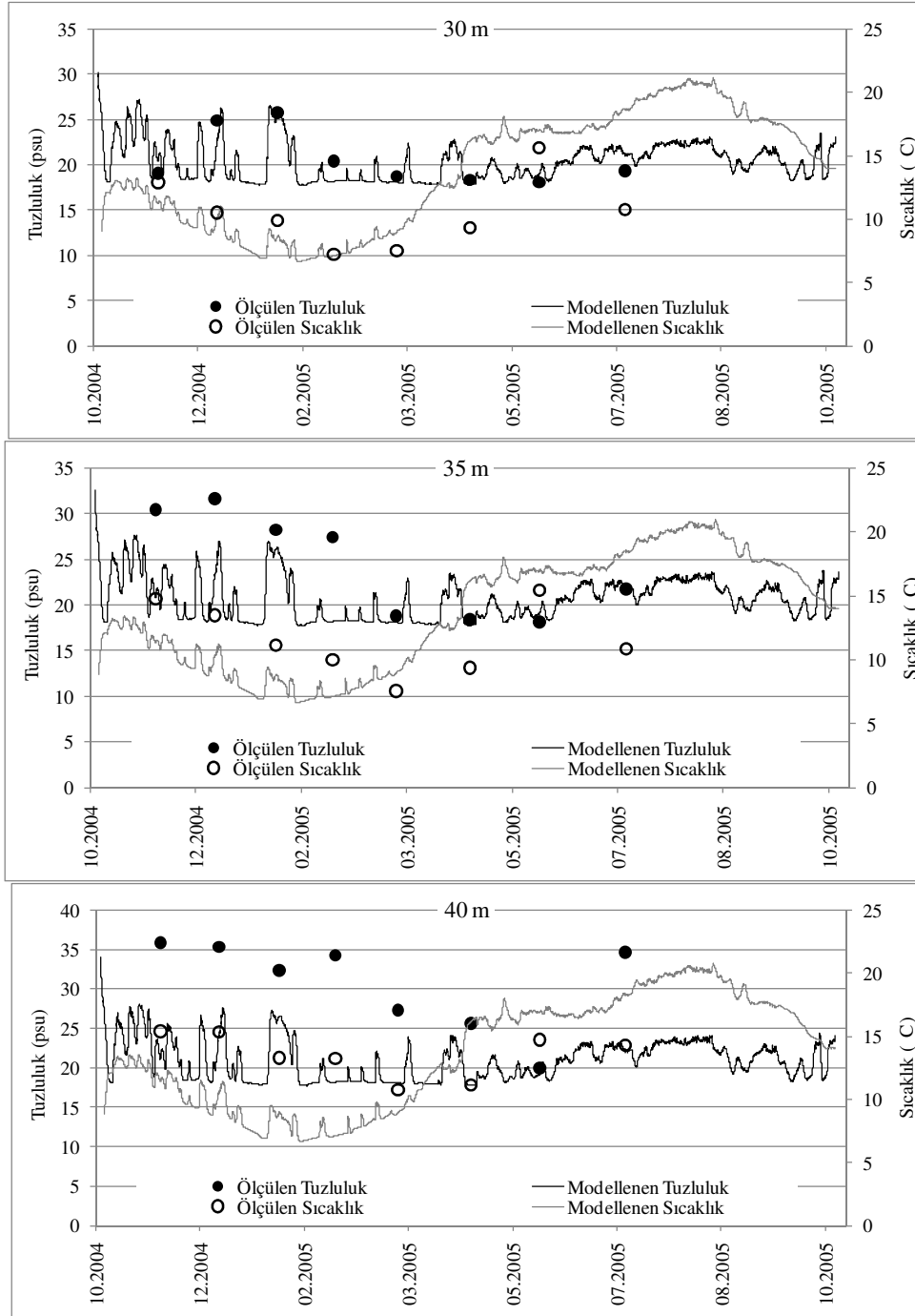
Şekil 6.68 Devamı.



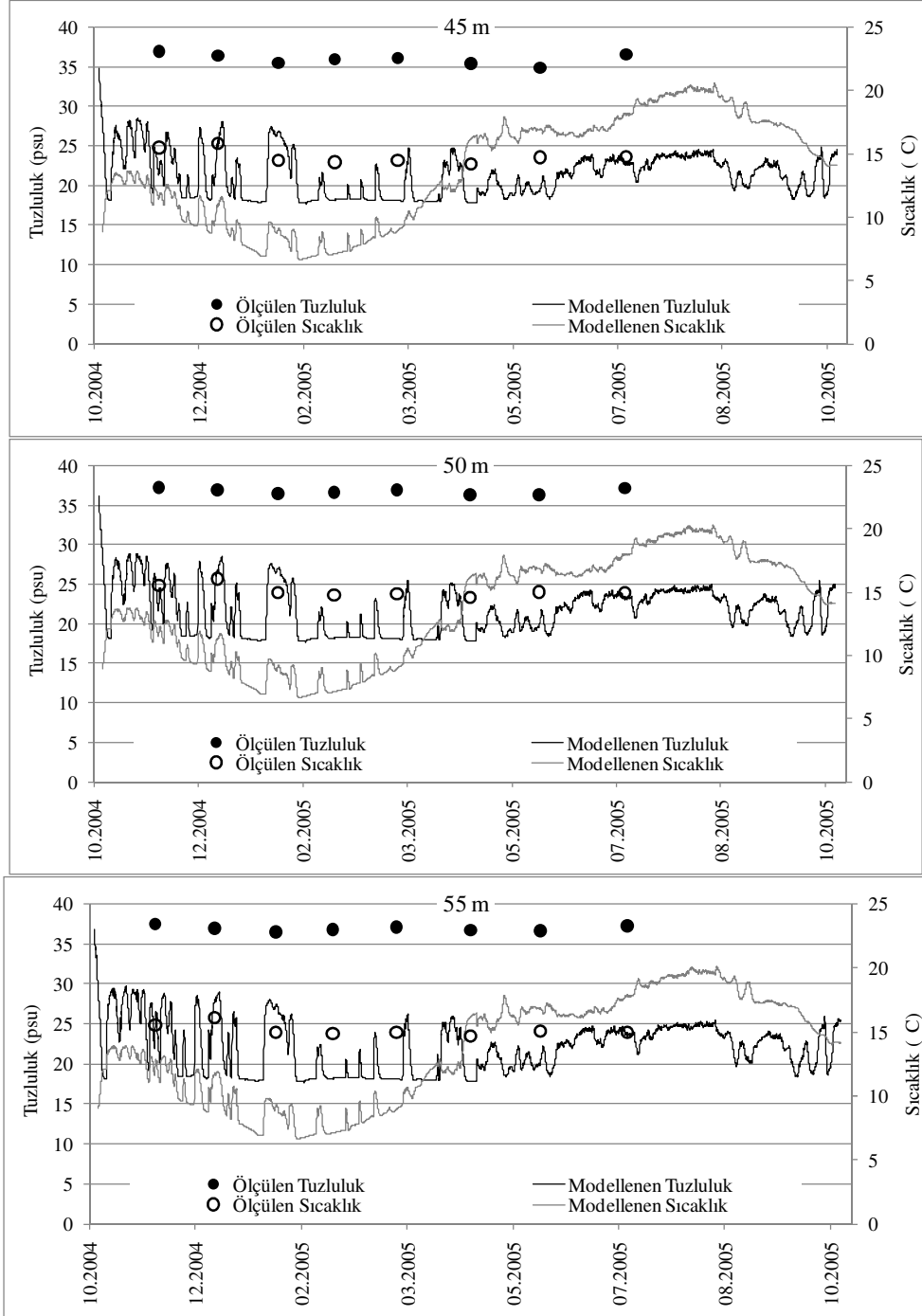
Şekil 6.69 B7 İstasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m ve 55m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.



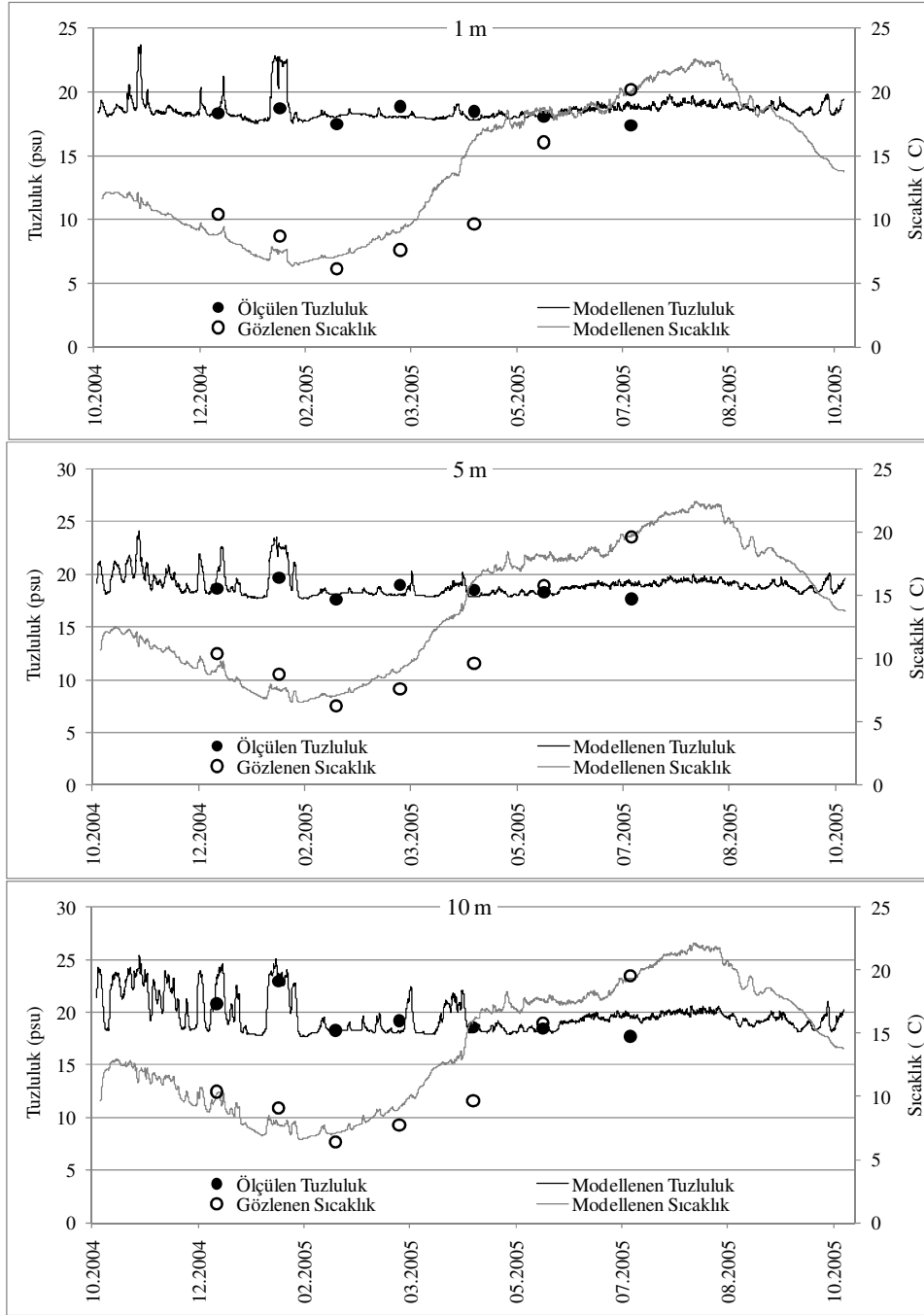
Şekil 6.69 Devamı.



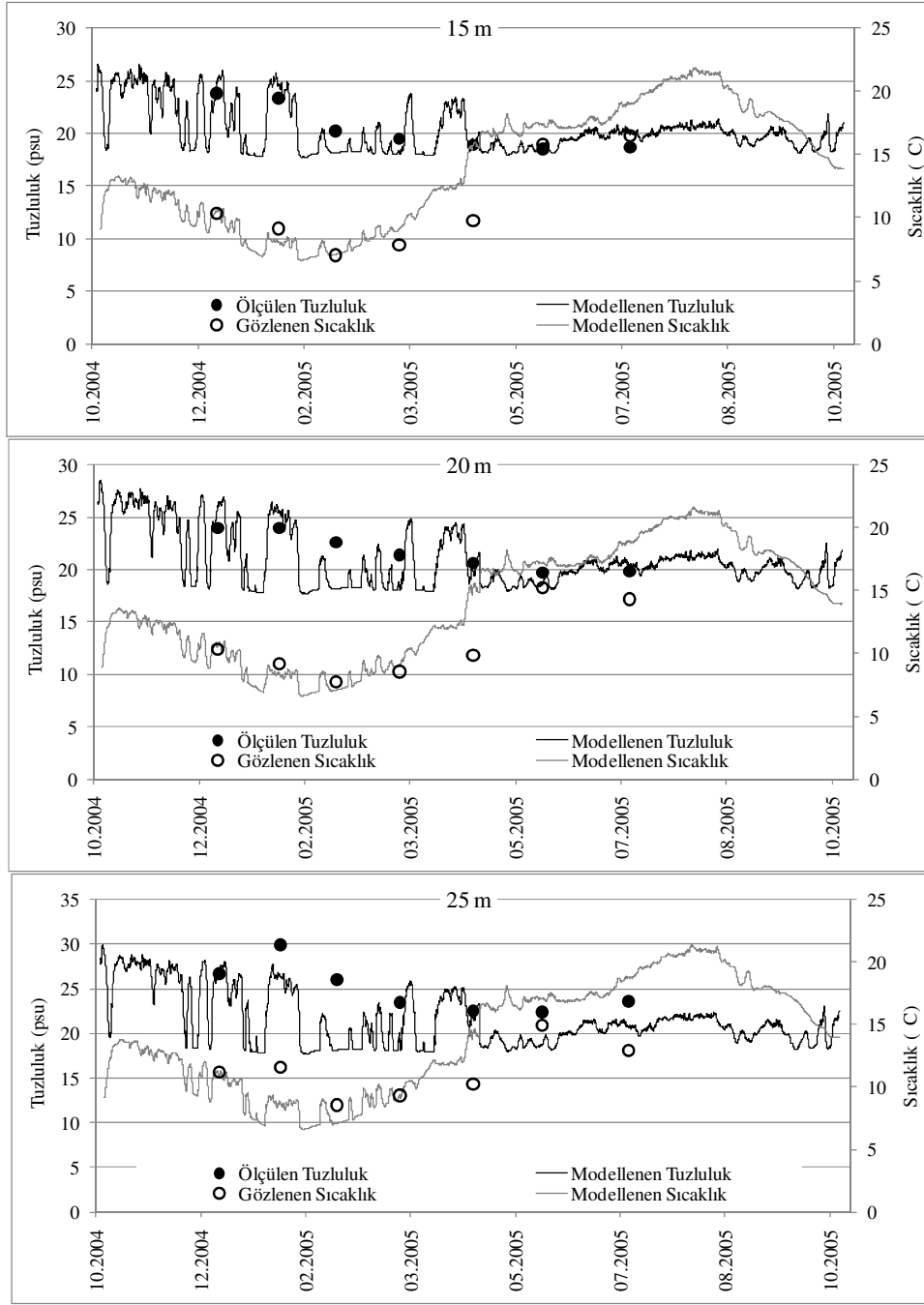
Şekil 6.69 Devamı.



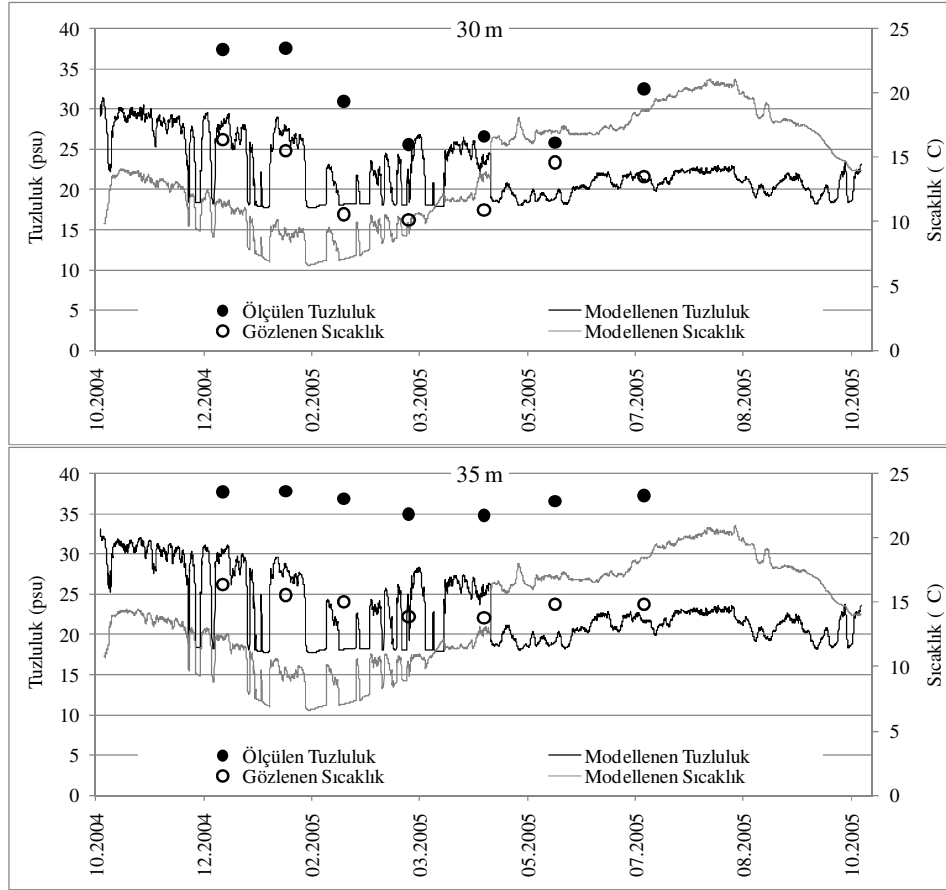
Şekil 6.69 Devamı.



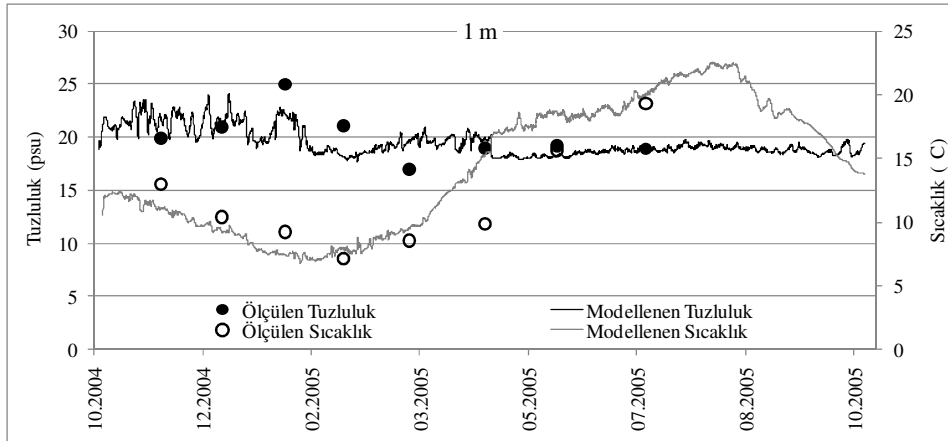
Şekil 6.70 B2 İstasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m ve 35m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.



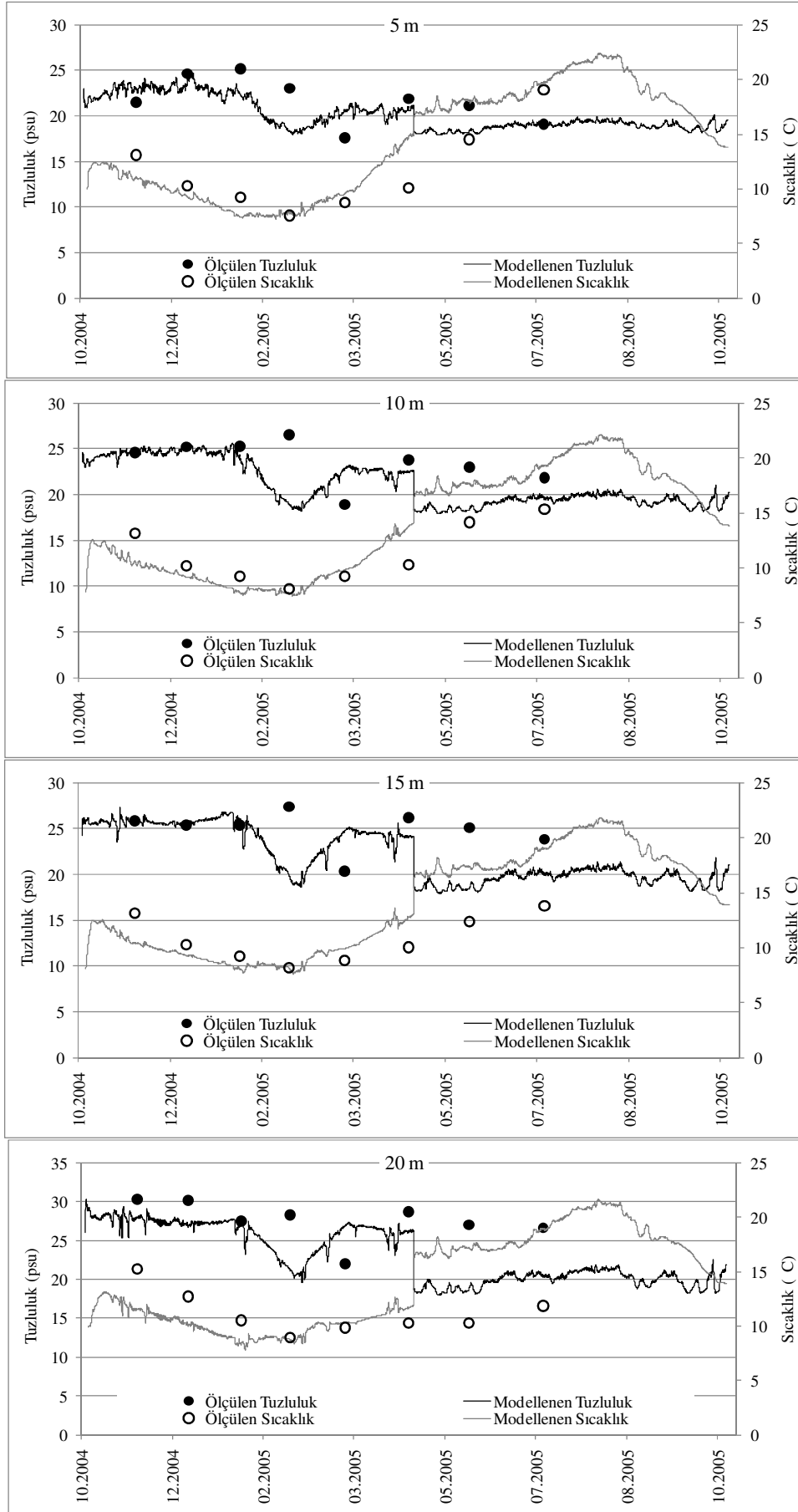
Şekil 6.70 Devamı.



Şekil 6.70 Devamı.

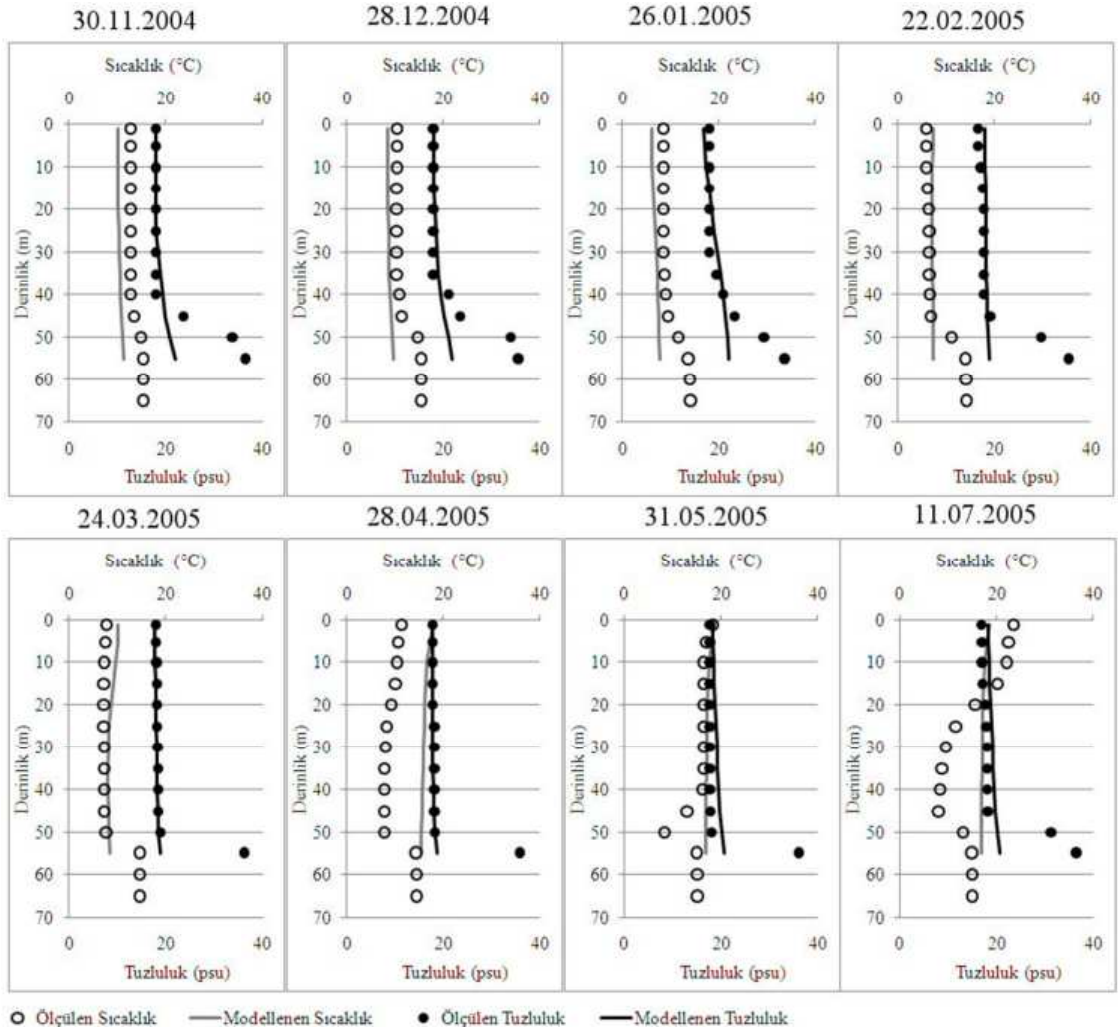


Şekil 6.71 M3 İstasyonunda 1m, 5m, 10m, 15m ve 20m derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin zaman serileri.

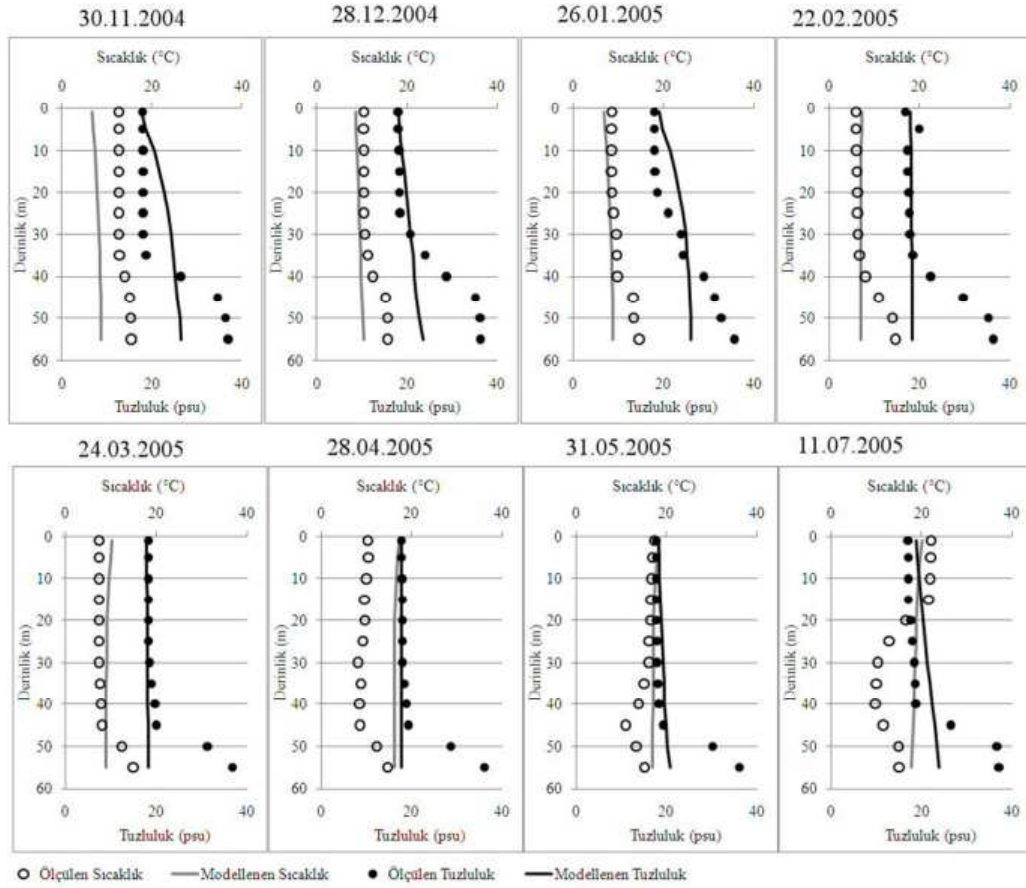


Şekil 6.71 Devamı.

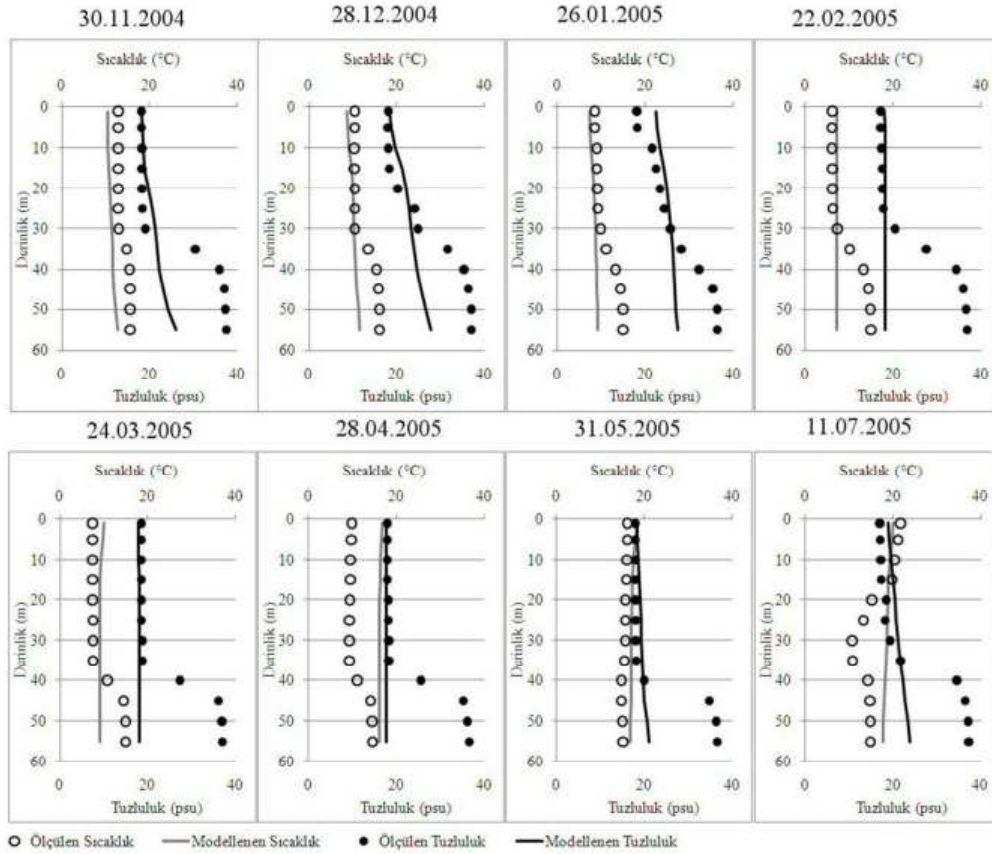
Ölçüm dönemi içerisinde tüm istasyonlarda toplanan sıcaklık ve tuzluluk verileri model sonuçları ile düşey profiller üzerinde de karşılaştırılmıştır. Her bir ölçüm tarihi için tüm istasyonlarda birer düşey profil çizilmiştir. Şekil 6.72’de K0, Şekil 6.73’te B13, Şekil 6.74’te B7, Şekil 6.75’te B2 ve Şekil 6.76’da M3 istasyonu verilerine ait düşey profiller gösterilmiştir.



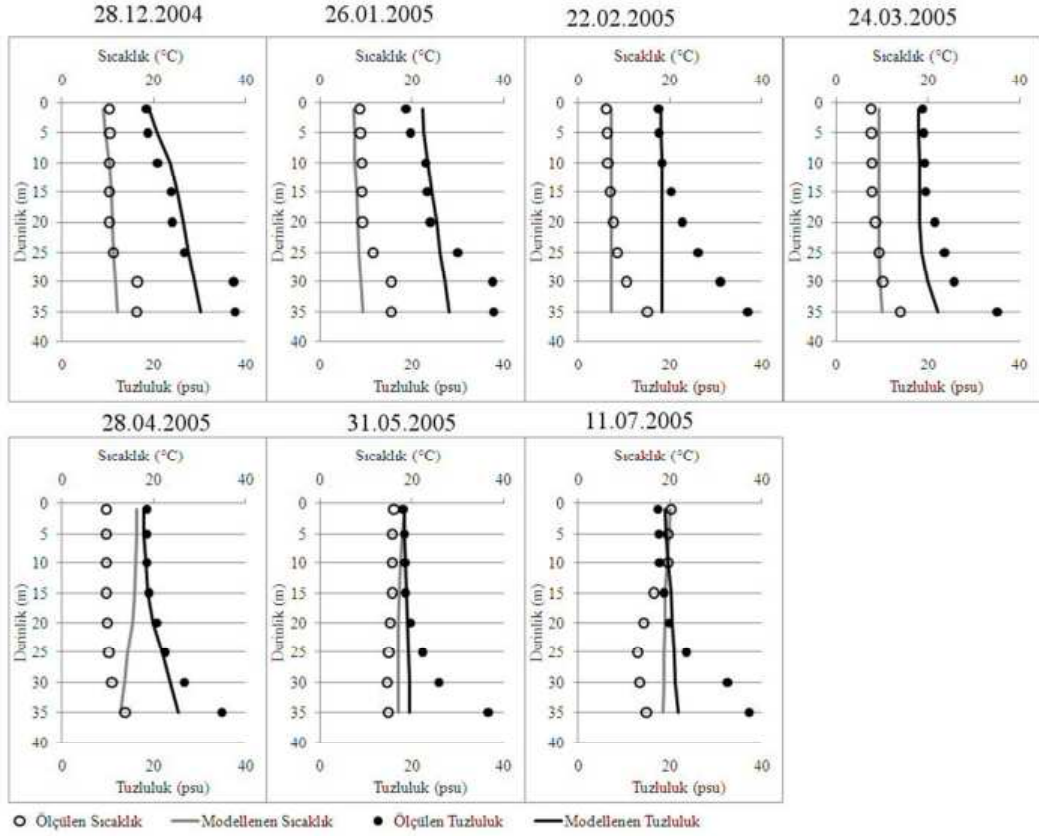
Şekil 6.72 K0 İstasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.



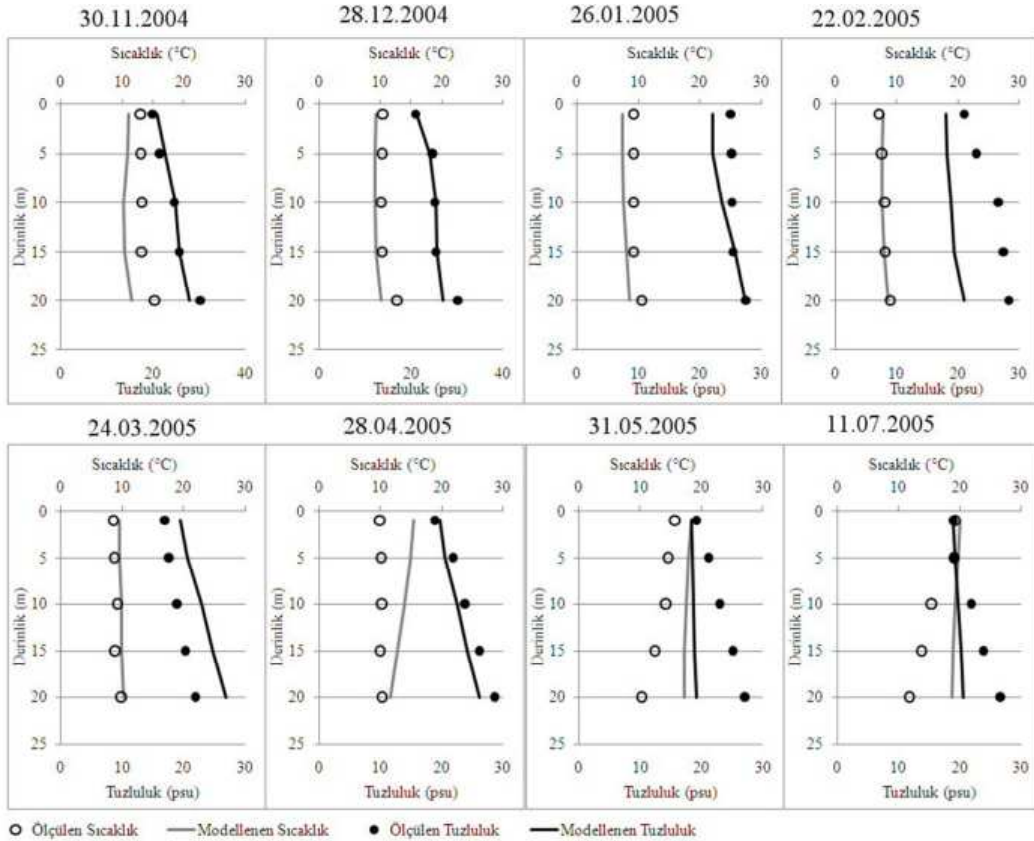
Şekil 6.73 B13 İstasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.



Şekil 6.74 B7 İstasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.



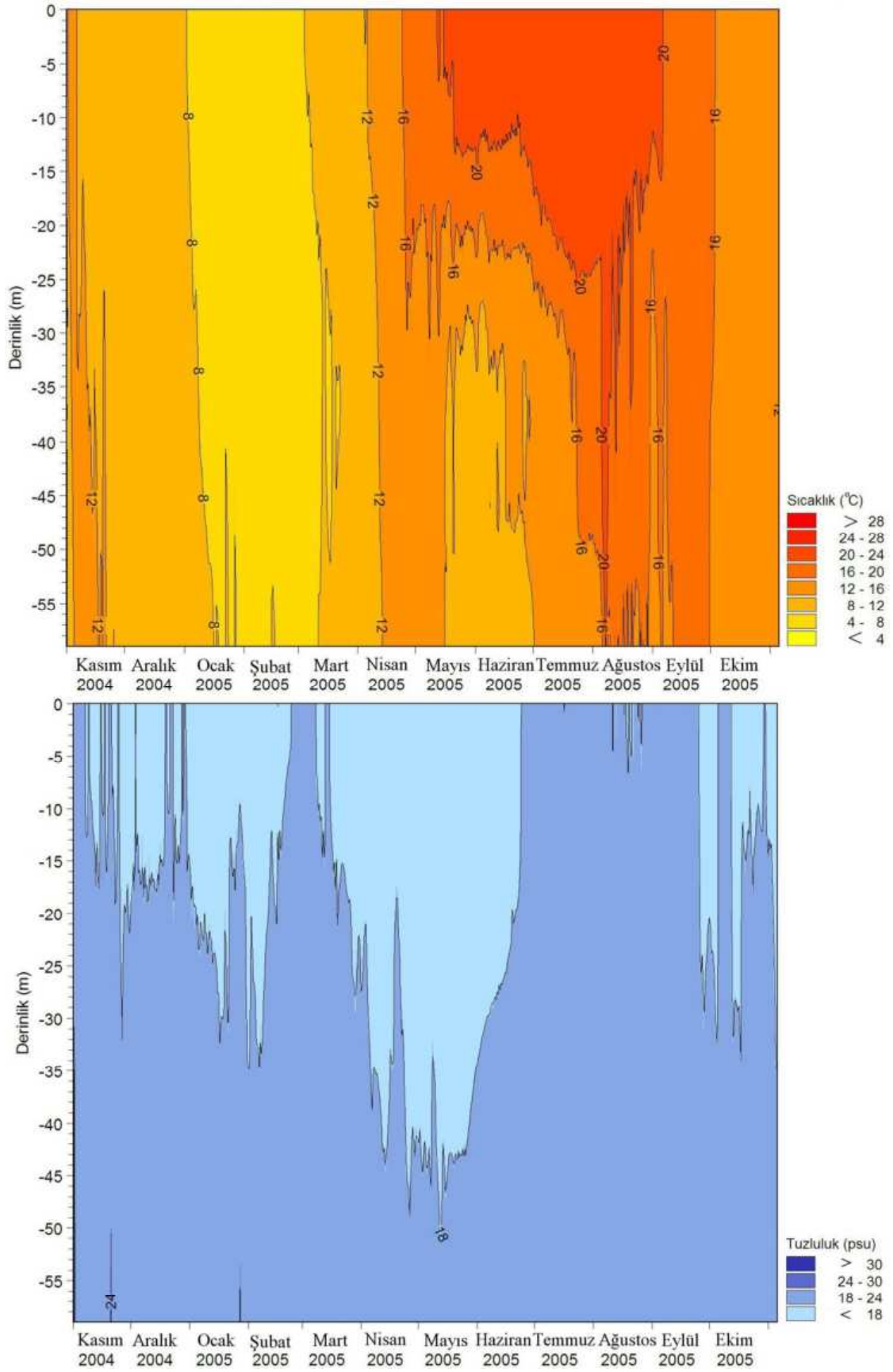
Şekil 6.75 B2 İstasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.



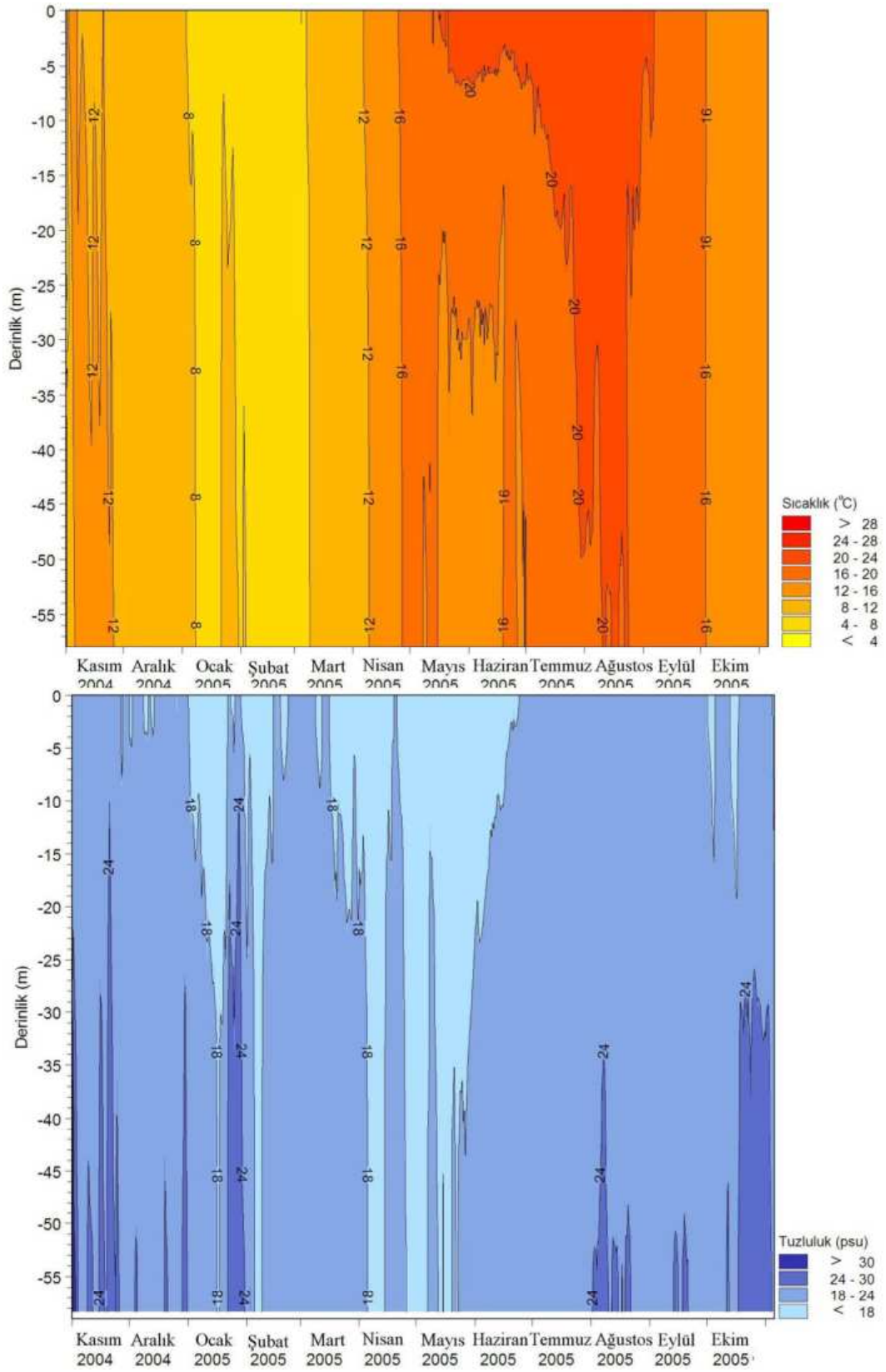
Şekil 6.76 M3 İstasyonunda ölçülen ve modellenen sıcaklık-tuzluluk düşey profilleri.

Şekil 6.67 - Şekil 6.76 bir arada değerlendirildiğinde bu çalışmada sunulan hidrodinamik modelin İstanbul Boğazı model alanı içerisinde sıcaklık ve tuzluluk dağılımlarını hem uzamsal hem de zamansal boyutta benzeştirmekte oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Ancak modelin tabana yakın derinliklerde sıcaklık ve tuzluluk tabakalanmasını tam olarak benzeştiremediği ve model alanı içerisinde oldukça yüksek bir difüzyon olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedeni Mike3 hidrodinamik model yazılımının kullandığı türbülans alt modeli ve bu modelde kullanılan katsayılarıdır. Modelde düşey doğrultuda kullanılan türbülans modeli ve ilgili katsayılar Bölüm 5'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Tabakalı akımlarda düşey türbülansın doğru modellenmesi ve türbülans katsayılarının doğru bir şekilde kalibre edilmesi bir zorunluluktur. Bu durum Venayagamoorthy vd. (2003) ve Zhang vd. (2006) tarafından da önemle vurgulanmıştır. Ancak tuzluluk ve sıcaklık verilerinin yetersizliği kurulan hidrodinamik modelin tuzluluk ve sıcaklığa karşı kalibrasyonuna izin vermemektedir. Dolayısıyla bu noktada zamansal ve uzamsal çözünürlüğü daha yüksek ölçüm verilerine gereksinim vardır.

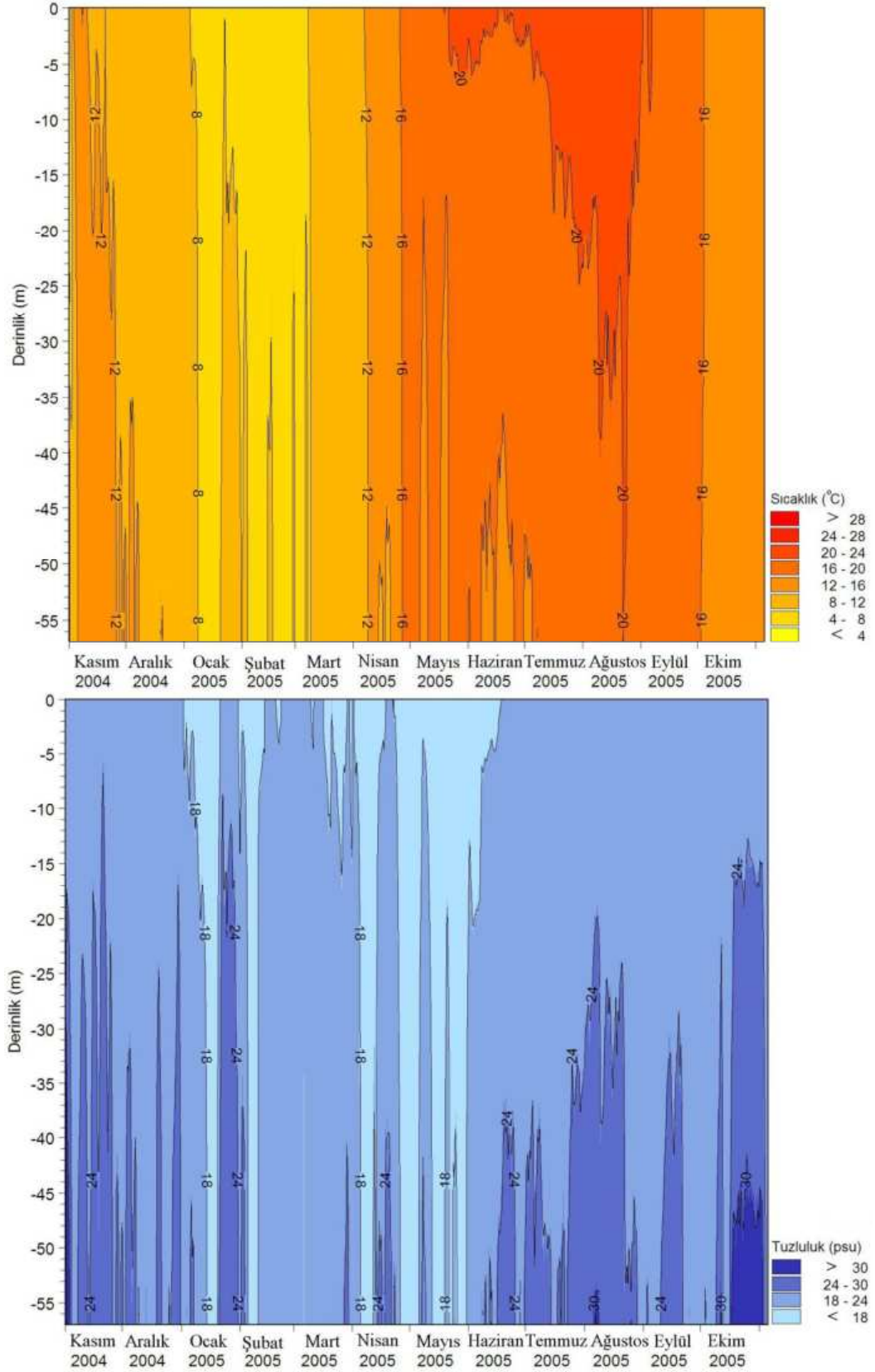
Şekil 6.77'de K0, Şekil 6.78'de B13, Şekil 6.79'da B7, Şekil 6.80'de B2 ve Şekil 6.81'de M3 istasyonlarında hidrodinamik model sonucunda elde edilen sıcaklık ve tuzluluk profilleri benzetim dönemi boyunca eşkonsantrasyon grafikleri üzerinde sunulmuştur.



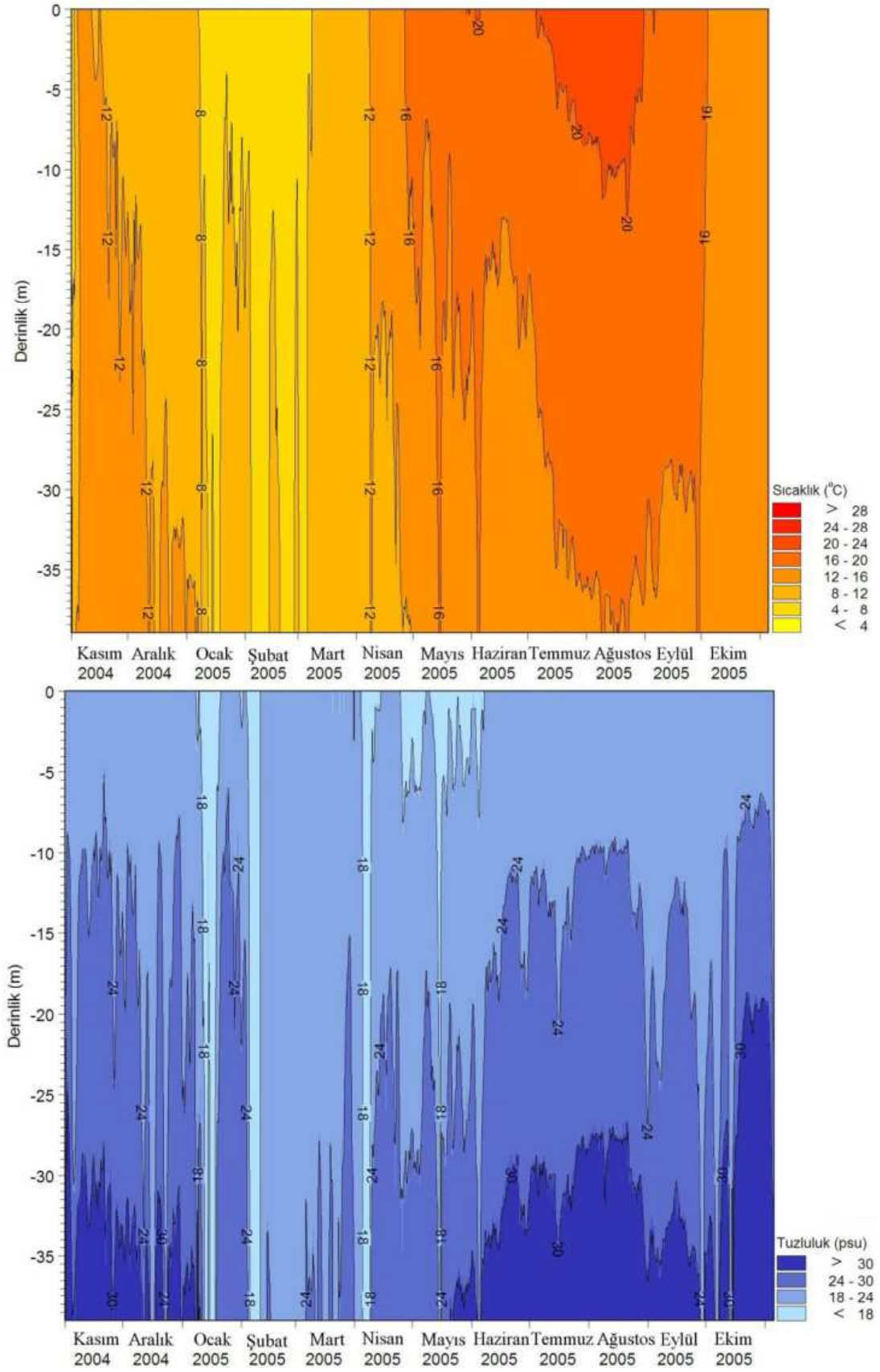
Şekil 6.77 K0 İstasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.



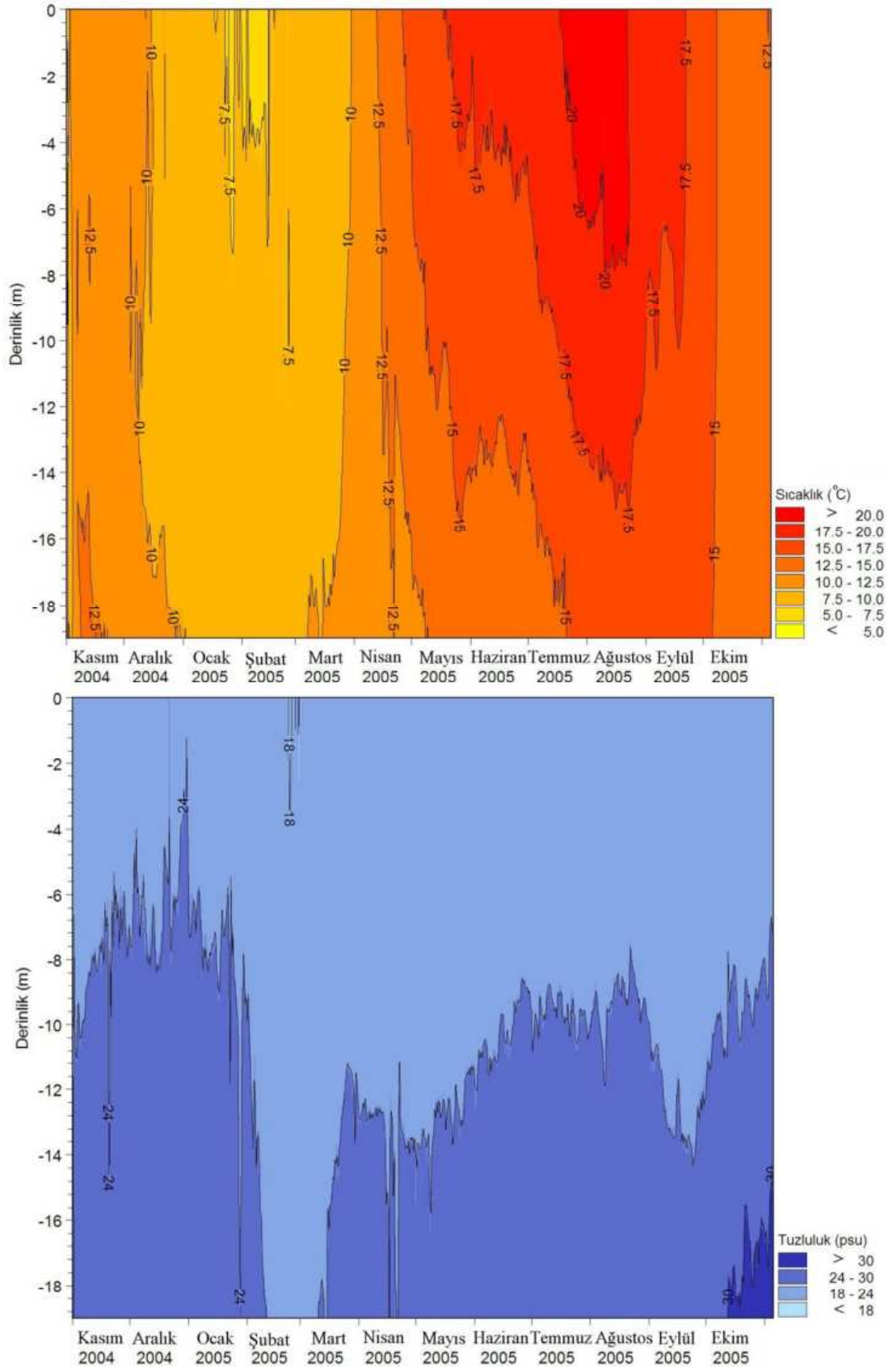
Şekil 6.78 B13 İstasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.



Şekil 6.79 B7 İstasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.



Şekil 6.80 B2 İstasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.



Şekil 6.81 M3 İstasyonunda sıcaklık ve tuzluluk profillerinin zamansal değişimi.

Şekil 6.77-Şekil 6.81’de verilen grafiklerde İstanbul Boğazı’nda K0, B13, B7, B2 ve M3

istasyonlarında hidrodinamik model süresince sıcaklık ve tuzluluğun düşey profil boyunca değişimi görülmektedir. Hidrodinamik model sonuçlarında daha önce de açıklanan yüksek düşey difüzyona rağmen, zayıf da olsa tuzluluk ve sıcaklık tabakalanması görülmektedir. Bir Karadeniz istasyonu olan K0'da tuzluluk üst tabakada karakteristik değer olan 18 psu olurken, alt tabakada 24 psu'yu geçmemektedir. Yılın önemli bir kısmında da yüzeyde 18-24 psu arasındaki tuzluluğa sahip su akmaktadır. Bu sonuçlar da yüksek düşey difüzyona işaret etmektedir. Benzer şekilde Marmara Denizi istasyonu olan M3 istasyonunda da yüksek bir düşey karışım sonucu daha homojen bir tuzluluk yapısı görülmektedir. Üst tabakada tuzluluğun 18-24 psu aralığında ve alt tabakada da 24-30 psu aralığında olduğu görülmektedir. Boğaz istasyonları incelendiğinde ise tuzluluğun yine zaman içerisinde derinlik boyunca oldukça farklı düşey profiller oluşturduğu görülmektedir. Hidrodinamik modelin zorlayıcı kuvvetlerinin (meteorolojik etkiler ya da su seviyesi farkı vb.) etkisi ile zaman zaman oluşan alt ya da üst tabaka blokajı halini de bu profillerden görmek mümkündür.

6.3. İstanbul Boğazı için Su Kalitesi Modeli

İstanbul Boğazı'ndaki su kalitesi hâlihazırda su kalitesi izleme programı kapsamında izlenmekte ve değerlendirilmektedir. İSKİ tarafından İstanbul Boğazı boyunca farklı istasyonlarda yürütülmekte olan Su Kalitesi İzleme Çalışmaları ve bu çalışmalar kapsamında 2000-2005 yılları arasında elde edilen sonuçlar Bölüm 4'de ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada İstanbul Boğazı için bir su kalitesi modelinin kurulması için Su Kalitesi İzleme çalışmaları kapsamında 2004 ve 2005 yıllarında toplanan ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. İstanbul Boğazı model alanı içerisinde su kalitesi durum değişkenlerinin dağılım ve değişimlerinin belirlenebilmesi amacıyla bu çalışmada DHI tarafından geliştirilen Ecolab modelleme yazılımı kullanılmıştır. Yine bu yazılıma ve bilimsel altyapısına dair geniş bilgi Bölüm 5'te verilmiştir. Bu bölümde anlatılan model uygulamaları; 1. Su kalitesi model tanımı, 2. İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modeline ait başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması, 3. Su kalitesi modelinin kalibrasyonu, 4. Su kalitesi modelinin doğrulanması aşamalarını kapsamaktadır.

6.3.1 Su Kalitesi Model Tanımı

Bu çalışmada İstanbul Boğazı su kalitesinin modellenmesi amacıyla seçilen sayısal model içerdği dokuz adet su kalitesi durum değişkeninin benzeştirilmesi için 21 süreci dikkate almaktadır. Bunu yaparken 13 yardımcı değişken, 42 sabit ve 6 zorlayıcı parametre dikkate alınmıştır. Burada su kalitesi durum değişkenlerini etkileyen sabitler zaman içerisinde

değişmeyen büyüklüklerdir. Oysa zorlayıcı parametreler model alanı içerisinde hem uzamsal hem de zamansal olarak değişken büyüklüklerdir. Modelde dikkate alınan durum değişkenleri ve bunların zamansal ve uzamsal değişimlerini etkileyen süreçler ile zorlayıcı etkenler Çizelge 6.16’da gösterilmiştir. Yine model süreçleri içerisinde kullanılan 42 adet sabit de Çizelge 6.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.16 Modelde dikkate alınan durum değişkenleri ile bunların zamansal ve uzamsal değişimlerini etkileyen süreçler ve bu süreçlerin içerdiği sabitler ile zorlayıcı etkenler.

Durum Değişkenleri	Sembol	Süreçler	Uzamsal Değişimi	Zorlayıcı Etkenler	Yardımcı değişkenler	Uzamsal Değişimi
Biyolojik Oksijen İhtiyacı	BOİ	Havalanma	Yatay	Sıcaklık	Oksijen doygunluk konsantrasyonu	Yatay ve düşey
Çözünmüş Oksijen	ÇO	Su Kolonu İçerisinde Fotosentez	Yatay ve Düşey	Tuzluluk	Havalanma oranı	Yatay ve düşey
Klorofil-a	Klo	Bitkilerin solunumu	Yatay ve düşey	Su Derinliği	Günlük değişimler için güneş aydınlatma faktörü (5 adet)	-
Amonyum	NH ₄	BOİ azalımı	Yatay ve düşey	Tabakanın Su Derinliği	Bağıl gün uzunluğu	-
Nitrit	NO ₂	Katı madde oksijen ihtiyacı	Yatay	Rüzgar Hızı	Besi maddesi kısıtlama faktörü	Yatay ve düşey
Nitrat	NO ₃	BOİ bozunumundan amonyum salınımı	Yatay ve düşey	Yatay Akıntı Hızı	Düşey ışık dağılımı	Yatay ve düşey
Fosfat	PO ₄	BOİ bozunumundan fosfat salınımı	Yatay ve düşey		Sıcaklık, tuzluluk ve ışık düzeltme faktörü	Yatay ve düşey
Fekal Koliform	FK	Bitkilerin N alımı	Yatay ve düşey		NH ₄ , NO ₂ ve NO ₃ toplamı	Yatay ve düşey
Toplam Koliform	TK	Bitkilerin P alımı	Yatay ve düşey			
		Bakterilerin N alımı	Yatay ve düşey			
		Bakterilerin P alımı	Yatay ve düşey			
		Amonyumdan nitrite nitrifikasyon oranı	Yatay ve düşey			

Çizelge 6.16 Devamı.

Durum Değişkenleri	Sembol	Süreçler	Uzamsal Değişimi	Zorlayıcı Etkenler	Yardımcı değişkenler	Uzamsal Değişimi
		Nitritten nitrata nitrifikasyon oranı	Yatay ve düşey			
		Denitrifikasyon oranı	Yatay ve düşey			
		Nitrifikasyonun oksijen ihtiyacı	Yatay ve düşey			
		Klorofil-a üretimi	Yatay ve düşey			
		Klorofil-a'nın solunumu	Yatay ve düşey			
		Klorofil-a'nın ölümü	Yatay ve düşey			
		Klorofil-a'nın çökmesi	Yatay ve düşey			
		Toplam koliformun azalması	Yatay ve düşey			
		Fekal koliformun azalması	Yatay ve düşey			

Çizelge 6.17 Ecolab Model Sabitleri.

Parametre	Açıklama	Süreç	Birimi	En Küçük	En Büyük	Varsayılan
kd3	20 °C'deki Çözünmüş BOİ 1. mertebeden azalma miktarı	BOİ	/gün	0	5	0.5
tetad3	Çözünmüş BOİ için azalma miktarına dair sıcaklık katsayısı	BOİ	Boyutsuz	1	1.2	1.07
hdobd	Yarı-doygunluk oksijen konsantrasyonu	BOİ	mg/l	0	20	2
SD	Secchi Disk Derinliği	Oksijen	m	-	-	-
pmax	Öğlen vaktindeki maksimum oksijen üretim miktarı	Oksijen	m ² /gün	0	40	2
fi	Zaman düzeltme faktörü	Oksijen	saat	-3	3	0
resp	Bitkilerin solunum miktarı	Oksijen	m ² /gün	0	30	0
teta2	Solunum için sıcaklık katsayısı	Oksijen	Boyutsuz	1	1.2	1.08
mdo	Solunum için yarı-doygunluk oksijen konsantrasyonu	Oksijen	mg/l	0	4	2

Çizelge 6.17 Devamı.

Parametre	Açıklama	Süreç	Birimi	En Küçük	En Büyük	Varsayılan
B1Sed	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı	Oksijen	/m ² /gün	0	30	0.5
tetab1	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı için Sıcaklık Katsayısı	Oksijen	Boyutsuz	1	1.2	1.07
mdosed	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı için yarı doygunluk konsantrasyonu	Oksijen	mg/l	0	4	2
k4	20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı (amonyumdan nitrite)	Nitrifikasyon	/gün	0	10	0.05
k7	20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı (nitritten nitrata)	Nitrifikasyon	/gün	0	2	1
teta4	Sıcaklık katsayısı (amonyumdan nitrite)	Nitrifikasyon	Boyutsuz	1	1.2	1.088
teta7	Sıcaklık katsayısı (nitritten nitrata)	Nitrifikasyon	Boyutsuz	1	1.2	1.088
y1	Nitrifikasyonun Oksijen İhtiyacı (amonyumdan nitrite)	Nitrifikasyon	gO ₂ /gNH ₄ -N	3.42	3.42	3.42
y2	Nitrifikasyonun Oksijen İhtiyacı (nitritten nitrata)	Nitrifikasyon	gO ₂ /gNO ₂ -N	1.14	1.14	1.14
hdonit	Yarı-doygun Oksijen Konsantrasyonu	Nitrifikasyon	mg/l	0	20	2
y2d	Çözünmüş haldeki BOİ'nin bozunumundan kaynaklanan amonyum miktarı	Amonyum	g NH ₄ -N/g BOİ	0	2	0.3
Nplant	Bitkiler tarafından alınan NH ₃ -N miktarı	Amonyum	gN/gÇÖ	0	0.2	0.066
Nbact	Bakteriler tarafından alınan NH ₃ -N miktarı	Amonyum	gN/gÇÖ	0	1	0.109
hsnh4	N alımı için yarı doygunluk konsantrasyonu	Amonyum	mg/l	0	5	0.05
k6	20°C de 1. mertebeden denitrifikasyon katsayısı	Nitrat	/gün	0	10	0.1
teta6	Denitrifikasyon miktarı için sıcaklık katsayısı	Nitrat	Boyutsuz	1	1.4	1.16
y3d	Çözünmüş BOİ içerisindeki Fosfor içeriği	Fosfor	gP/gBOİ	0	0.1	0.06
Pplant	Bitkiler tarafından alınan PO ₄ -P miktarı	Fosfor	gP/gÇÖ	0	0.1	0.0091

Çizelge 6.17 Devamı.

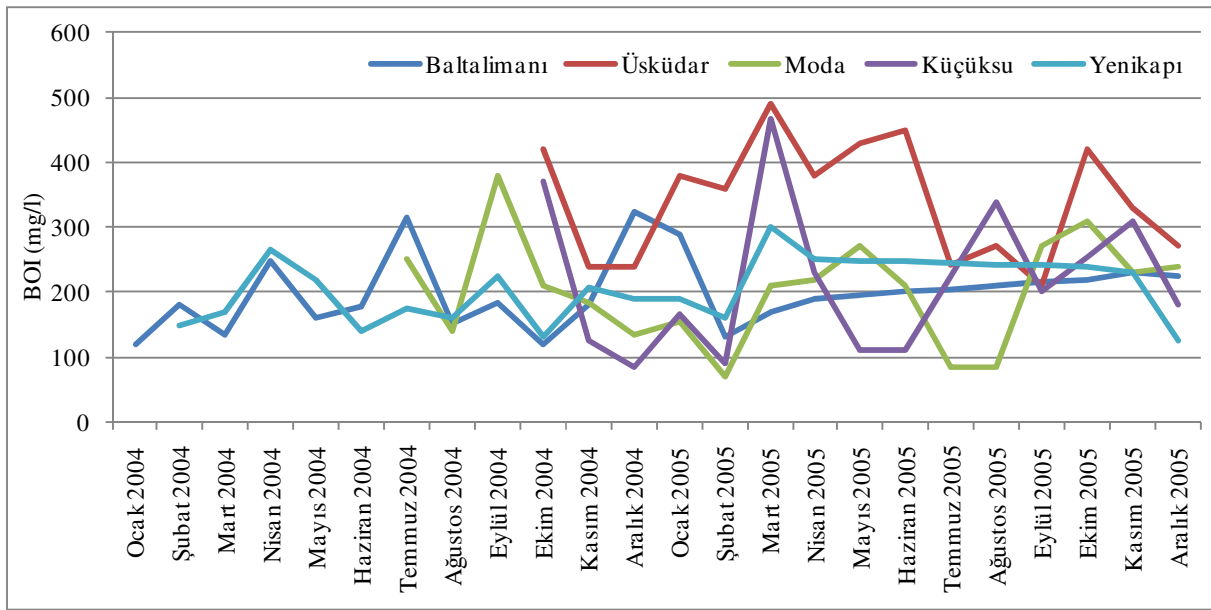
Parametre	Açıklama	Süreç	Birimi	En Küçük	En Büyük	Varsayılan
Pbact	Bakteriler tarafından alınan PO ₄ -P miktarı	Fosfor	gP/gÇO	0	0.1	0.015
hsphos	P alımı için yarı doygunluk konsantrasyonu	Fosfor	mg/l	0	2	0.005
ksn	Nitrojen için yarı doygunluk konsantrasyonu	Klorofil	-	0	1	0.05
ksp	Fosfor için yarı doygunluk konsantrasyonu	Klorofil	-	0	1	0.01
k10	Klorofil-a/Karbon oranı	Klorofil	mgCHL/mg C	0.01	0.04	0.025
k11	Birincil üretimde Karbon/Oksijen oranı	Klorofil	mgC/mgO	0.2	0.4	0.2857
k8	Klorofil-a'nın ölüm miktarı	Klorofil	/gün	0	0.1	0.01
k9	Klorofil-a'nın çökme oranı	Klorofil	m/gün	0	2	0.2
Parametre	Açıklama	Süreç	Birimi	En Küçük	En Büyük	Varsayılan
KcoliF	Fekal Koliformun 20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı	Koliform	/gün	0	10	0.8
KcoliT	Toplam Koliformun 20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı	Koliform	/gün	0	10	0.8
tetaT	Azalma miktarı için sıcaklık katsayısı	Koliform	Boyutsuz	1	1.2	1.09
tetaS	Azalma miktarı için tuzluluk katsayısı	Koliform	Boyutsuz	1	1.2	1.006
tetaI	Azalma miktarı için ışık katsayısı	Koliform	Boyutsuz	1	20	7.4
rio	Öğlen vaktinde maksimum güneşlenme	Koliform	kW/m ²	0	2	0.1

Çizelge 6.16'da verilen zorlayıcı kuvvetler hidrodinamik model sonuçlarından alınarak su kalitesi modeli için kullanılmaktadır.

Su kalitesi modelinin kurulumunda diğer bir önemli nokta dispersiyonun tanımlanmasıdır. Üç boyutlu modellerde akım alanı içerisindeki çevrilere bağlı olarak meydana gelen yatay dispersiyon ve taban etkisinden kaynaklanan türbülansın yarattığı düşey dispersiyon ayrı ayrı dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada hem yatay hem de düşey dispersiyon eddy viskozitesine

belirli bir oranla bağılı olacak şekilde tanımlanmıştır. Orantı katsayısı tüm su kalitesi durum değişkenleri için 1 alınmıştır.

İstanbul Boğazı su kalitesi modelinde model alanı içerisinde beş adet kaynak noktası tanımlanmıştır. Bu noktaların model alanı içerisindeki konumları Bölüm 6.2.2’de Şekil 6.59’da gösterilmiş ve yine debileri de Çizelge 6.6’da verilmişti. Su kalitesi modelinde dikkate alınan BOİ konsantrasyonları İSKİ tarafından sağlanan verilerden elde edilmiş zaman serileri şeklinde tanımlanmıştır. Herbir deniz deşarjı için çıkış BOİ konsantrasyonları Şekil 6.82’de zaman serileri üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 6.82 Tüm deniz deşarjları için BOİ konsantrasyonu zaman serileri, Sur vd., (2004).

BOİ dışındaki durum değişkenlerine dair ölçülmüş verilere ulaşılamadığından nütrientler, klorofil-a ve koliform durum değişkenleri için literatürde verilen evsel atıksu karakteristiklerine ait konsantrasyon değerleri kullanılmıştır. Söz konusu bilgiler Çizelge 6.18’de verilmiştir.

Çizelge 6.18 Ham evsel atıksuyun tipik özellikleri, Metcalf and Eddy, (2007)

Su Kalitesi Durum Değişkeni	Birim	Konsantrasyon		
		Zayıf	Orta	Kuvvetli
Toplam Katı	mg/l	350	720	1200
Toplam Çözünmüş Katı	mg/l	250	500	850
Sabit	mg/l	145	300	525
Uçucu	mg/l	105	200	325
Askıda Katı	mg/l	100	220	350
Sabit	mg/l	20	55	75
Uçucu	mg/l	80	165	275
Çökebilir Katılar	mg/l	5	10	20
BOİ ₅ (20 °C)	mg/l	110	220	400
Toplam Organik Karbon (TOK)	mg/l	80	160	290
KOI	mg/l	250	500	1000
Azot (Toplam N olarak)	mg/l	20	40	85
Organik Azot	mg/l	8	15	35
Serbest Amonyum Azotu	mg/l	12	25	50
Nitrit Azotu*	mg/l	0.1	0.1	0.1
Nitrat Azotu*	mg/l	0.5	0.5	0.5
Fosfor (Toplam Fosfor Olarak)	mg/l	4	8	15
Organik	mg/l	1	3	5
İnorganik	mg/l	3	5	10
Klorürler	mg/l	30	50	100
Sülfat	mg/l	20	30	50
Alkalinite (CaCO ₃ Olarak)	mg/l	50	100	200
Yağ-Gres	mg/l	50	100	150
Toplam Koliform	adet/100ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Uçucu Organik Bileşikler	µg/l	<100	100-400	>400

*Henze vd. 1995'ten alınmıştır.

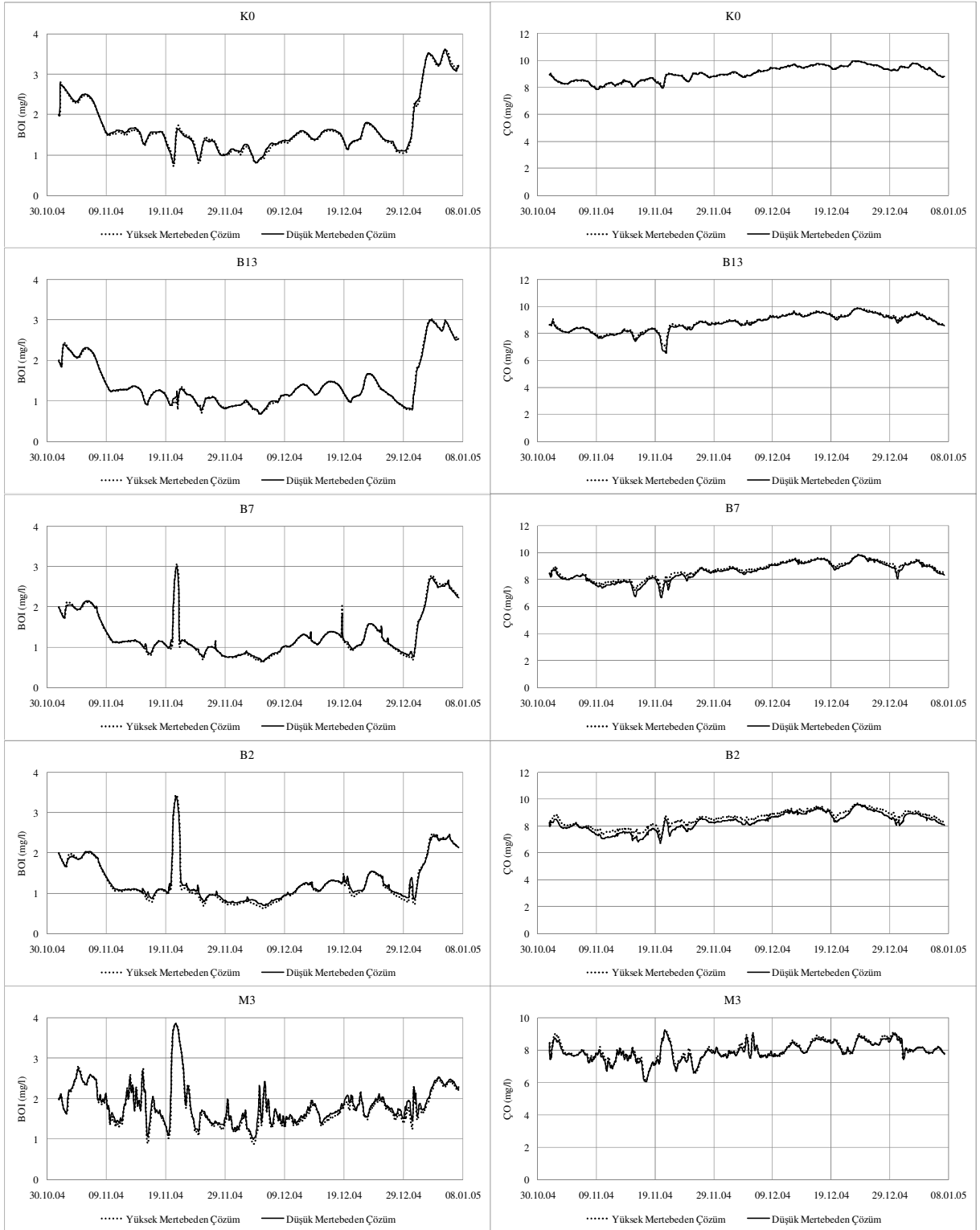
Yine modelde dikkate alınan BOİ dışındaki durum değişkenlerinin bu kaynaklardan çıkış konsantrasyonları İstanbul Boğazı için kurulan su kalitesi modelinde tanımlandığı hali ile Çizelge 6.19'de verilmiştir. Çizelge 6.19'da fekal koliform değerleri toplam koliformun 1/10'u mertebesinde olduğu kabul edilerek belirlenmiştir.

Çizelge 6.19 Su Kalitesi modelinde tanımlanan İstanbul Boğazı boyunca deniz deşarjlarının çıkış karakteristikleri.

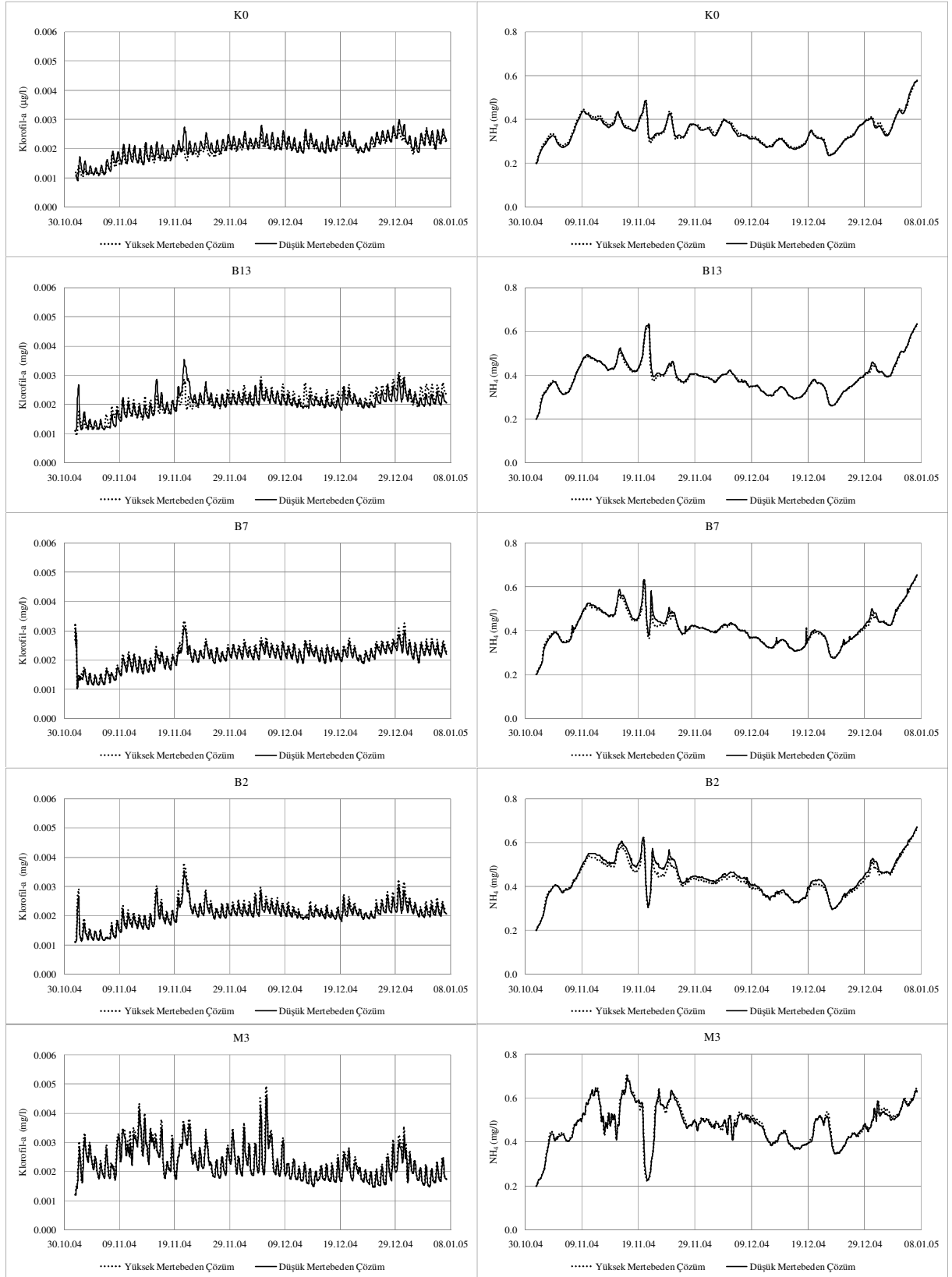
Deşarj Adı	ÇO (mg/l)	Klorofil-a (mg/l)	Amonyum (mg/l)	Nitrit (mg/l)	Nitrat (mg/l)	Fosfat (mg/l)	FK (adet/100 ml)	TK (adet/100 ml)
Kadıköy	0	0	25	0.1	0.5	3	10 ⁶	10 ⁷
Yenikapı	0	0	25	0.1	0.5	3	10 ⁶	10 ⁷
Üsküdar	0	0	25	0.1	0.5	3	10 ⁶	10 ⁷
Baltalimanı	0	0	25	0.1	0.5	3	10 ⁶	10 ⁷
Küçüksu	0	0	25	0.1	0.5	3	10 ⁶	10 ⁷

Sıg su ve taşınım (adveksiyon-dispersiyon) denklemlerinin zamansal integrasyonu yarı kapalı hesap şeması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada yatay terimler açık ve düşey terimler ise kapalı hesap şeması kullanılarak ele alınmıştır. Açık şema kullanılırken ortaya çıkan stabilite kısıtlaması nedeniyle zaman adımı CFL sayısını 1'in altında tutacak şekilde seçilmiştir. Buna göre tüm benzetim dönemi içerisinde sıg su denklemleri için en küçük zaman adımı 0.69 s, en büyük zaman adımı 1.40 s ve ortalama zaman adımı da 1.36 s olmuştur. Taşınım denklemleri için ise zaman adımı en küçük 11.54 s, en büyük 600 s ve ortalama 36.34 s olmuştur.

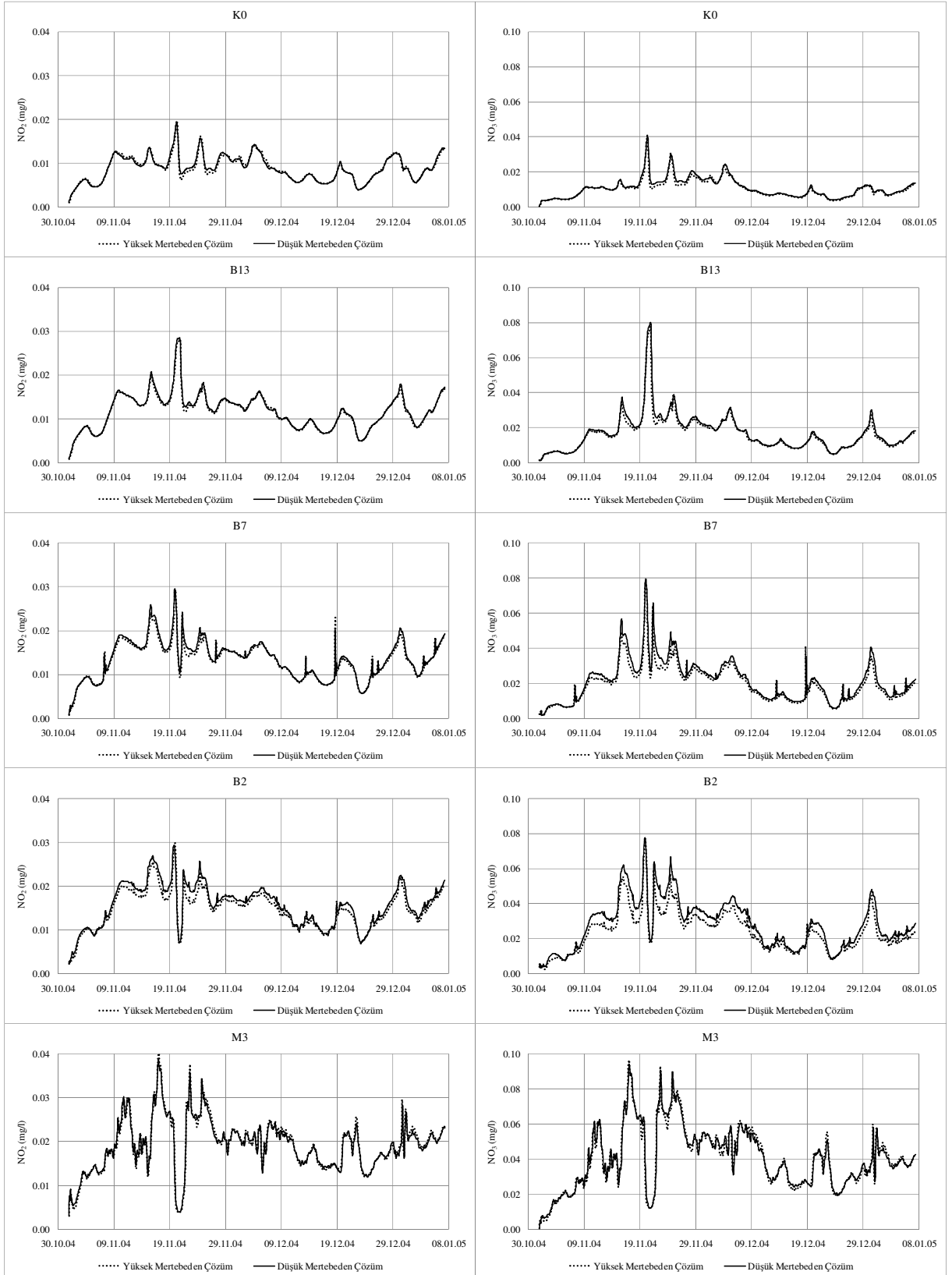
Yine modelde kullanılan sayısal hesap şemasının mertebesi de benzetim zamanı ile model doğruluğu üzerinde etkili bir parametredir. Yüksek mertebeden çözüm model doğruluğunu artırırken hesap süresini de önemli ölçüde arttırmaktadır. Yalnızca zamansal ya da uzamsal integrasyonda yüksek mertebeden çözüm yapmakla hesap süresi iki katına çıkarken, hem zamansal hem de uzamsal integrasyonda yüksek mertebeden çözüm kullanmak hesap süresini dört katına kadar arttırabilmektedir. Bu noktada yüksek mertebeden çözümün sonuçlar üzerinde meydana getireceği iyileşme ile hesap süresinde meydana getireceği artış arasında bir optimizasyon yapmak gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada öncelikle yüksek mertebeden çözümün model sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Hem zamansal hem de uzamsal integrasyonda yüksek mertebeden çözüm gerçekleştirilmiştir. Burada uygun yöntemi seçebilmek için model Kasım 2004-Ocak 2005 dönemi için her iki yöntemle de çalıştırılmış ve sonuçların karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Her iki yöntemin verdiği model çıktıları tüm istasyonlarda yüzeyden -1 m aşağıdaki konsantrasyon değerlerinin tüm su kalitesi durum değişkenleri için üst üste çizdirilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.83, Şekil 6.84, Şekil 6.85, Şekil 6.86, ve Şekil 6.87'de gösterilmiştir.



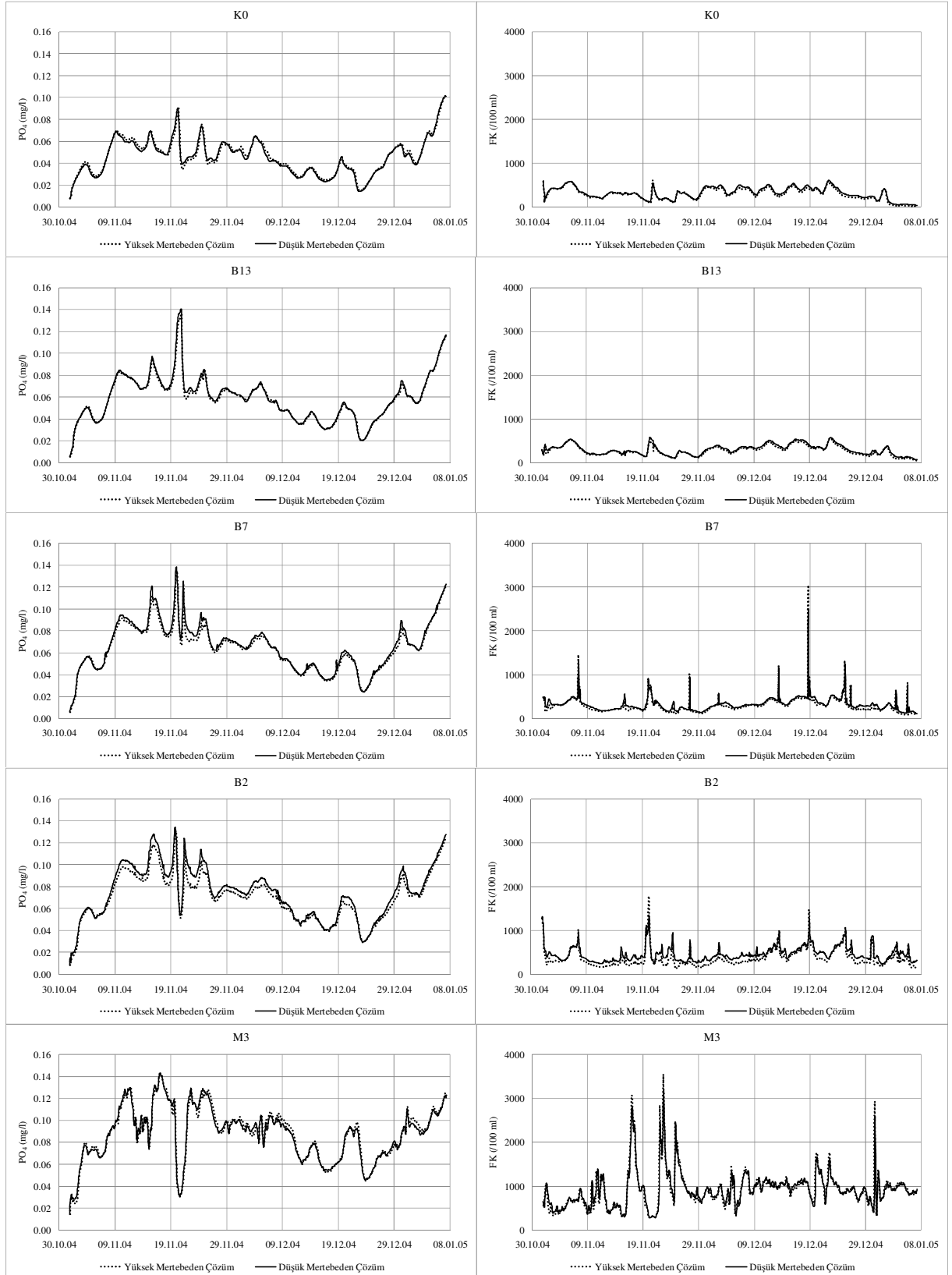
Şekil 6.83 K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında BOİ ve ÇO parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.



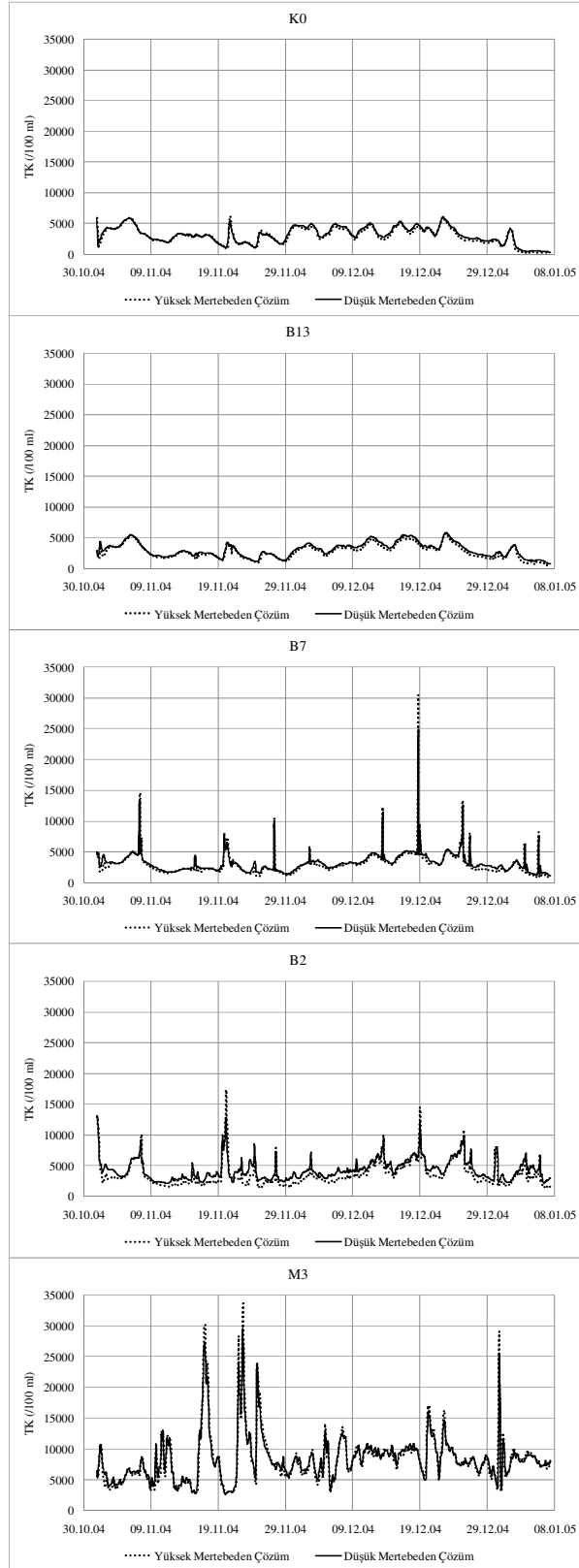
Şekil 6.84 K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında Klorofil-a ve NH_4 parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.



Şekil 6.85 K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında NO_2 ve NO_3 parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.



Şekil 6.86 K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında PO_4 ve FK parametrelerinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.

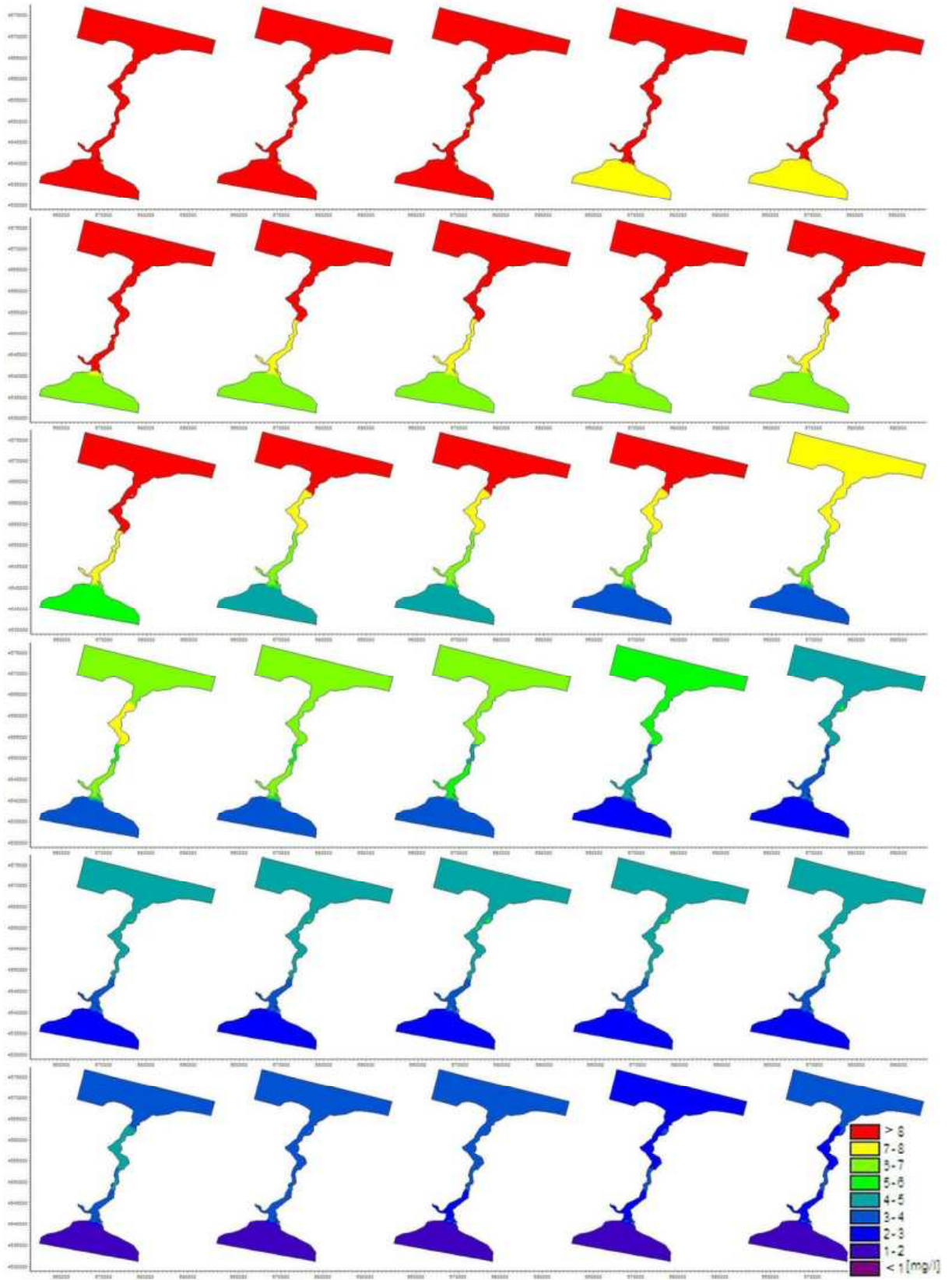


Şekil 6.87 K0, B13, B7, B2 ve M3 istasyonlarında TK parametresinin yüksek ve düşük mertebeden çözümler için aldığı konsantrasyon değerlerine ait zaman serileri.

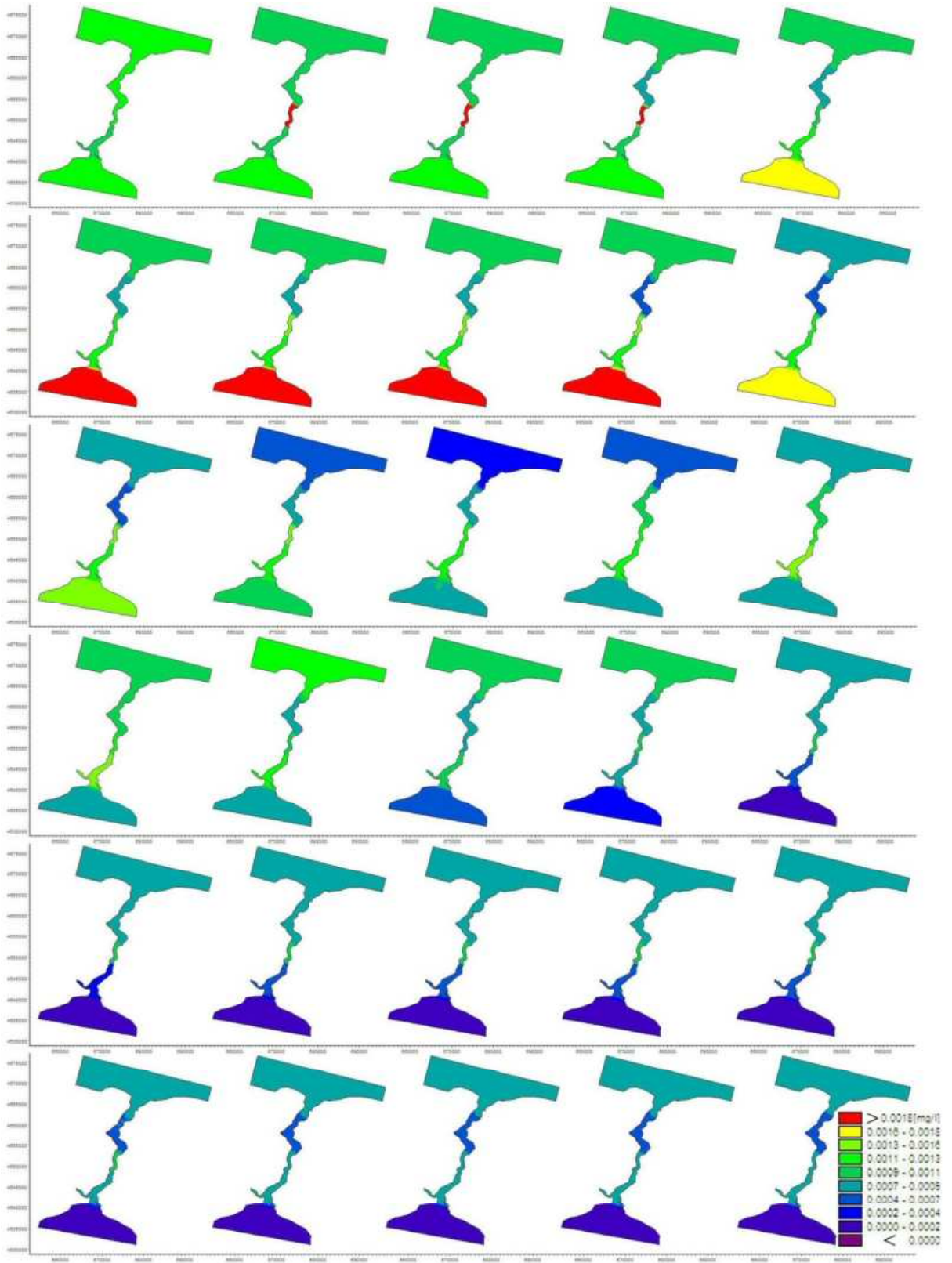
Şekillerden de görüldüğü gibi yüksek mertebeden çözüm hesap süresini dört katına çıkartırken sonuçları oldukça az değiştirmektedir. Model alanının sınıra yakın kısımlarında düşük ve yüksek mertebeden çözümler neredeyse aynı sonuçları verirken, model alanının daha içerisindeki kısımlardaki konsantrasyonlarda çok küçük olmakla birlikte gözle görülebilecek bir farklılık söz konusu olmaktadır. En büyük farklar ise B7 ve B2 istasyonlarında NO_2 , NO_3 ve PO_4 konsantrasyonlarında görülmektedir. Ancak yüksek mertebeden çözümün benzetim süresinde meydana getireceği artış dikkate alındığında bu farklar ihmal edilebilir mertebelere düşmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada düşük mertebeden çözüm yapan hızlı algoritma kullanılmıştır.

6.3.2 İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modeline Ait Başlangıç ve Sınır Koşullarının Tanımlanması

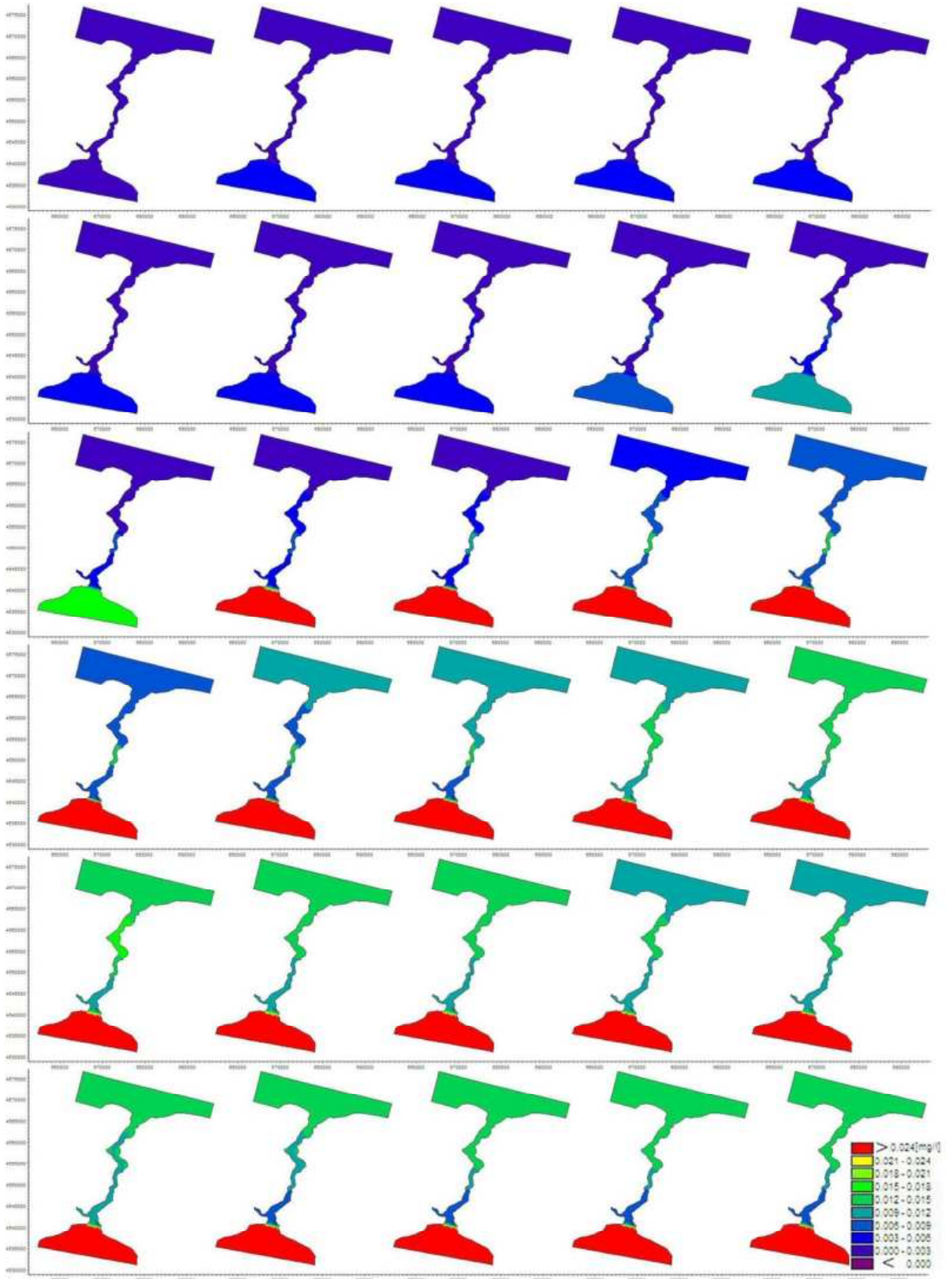
İstanbul Boğazı Su Kalitesi modelinin doğruluğunu belirleyecek önemli faktörler modelin başlangıç ve sınır koşullarının doğru belirlenmesidir. Bu çalışmada kurulan su kalitesi modeli için durum değişkenlerinin model alanı içerisindeki konsantrasyonlarının uzamsal dağılımlarının belirlenmesinde ve yine model sınırlarındaki zamansal değişimlerinin tanımlanmasında İSKİ tarafından İstanbul Boğazı'nda yürütülen su kalitesi izleme çalışmalarından elde edilen ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Bu veriler Bölüm 4.2'de sunulmuş ve ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Su kalitesi izleme çalışmaları kapsamında toplanan BOİ verilerinin konumları ve derinlikleri değişken olduğundan BOİ parametresi için bu verilerden faydalanmak mümkün olmamış ve BOİ başlangıç konsantrasyonu model alanı içerisinde sabit 2 mg/l olarak kabul edilmiştir. Yine NH_4 durum değişkenine dair elde mevcut bir ölçüm verisi olmadığından bu değişkenin de model alanı içerisindeki başlangıç konsantrasyonu sabit 0.2 mg/l olarak kabul edilmiştir. Buna göre her bir su kalitesi durum değişkeni için hazırlanan model başlangıç koşulları Şekil 6.88-6.94'te gösterilmiştir.



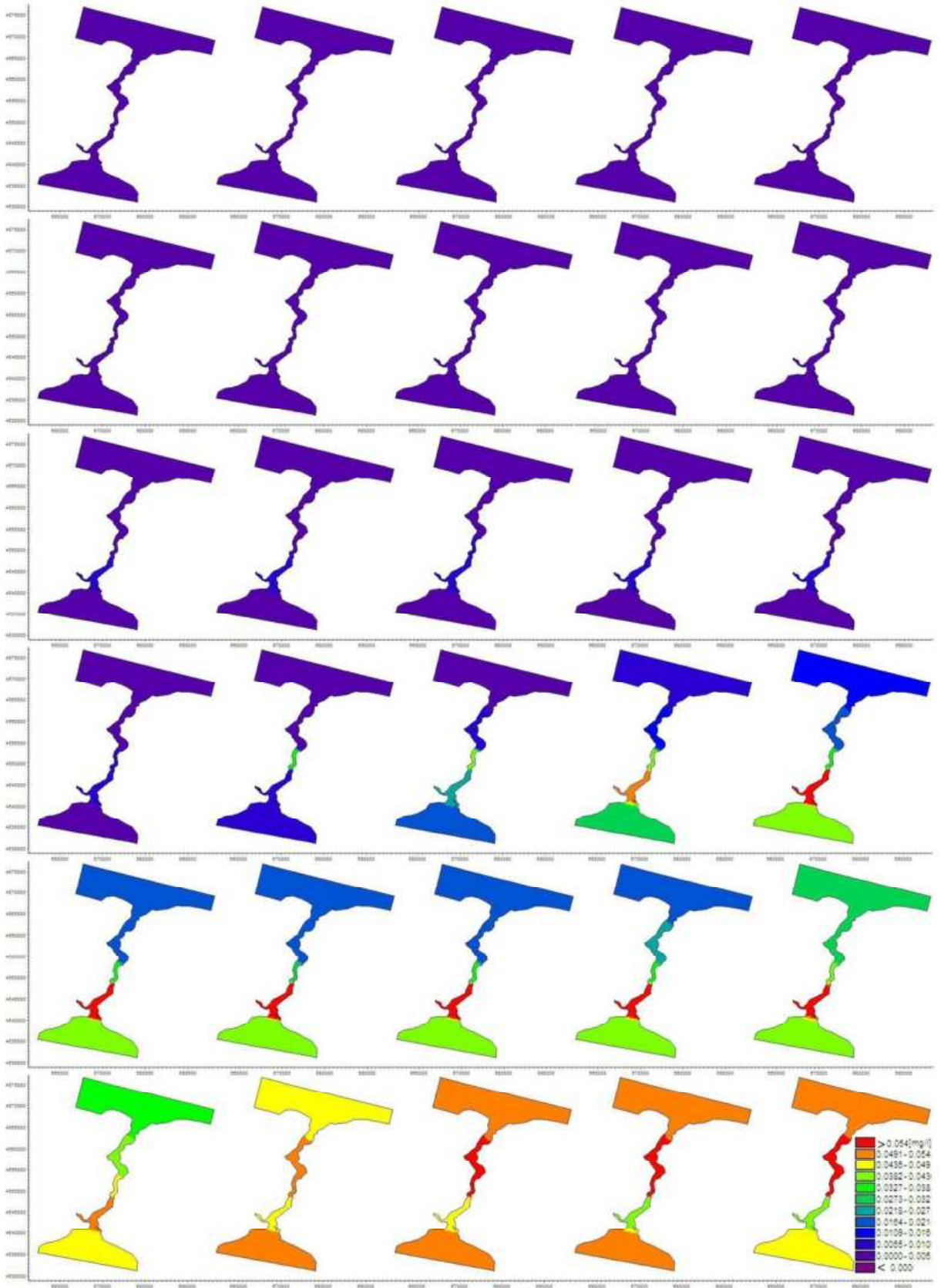
Şekil 6.88 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli ÇO başlangıç koşulu.



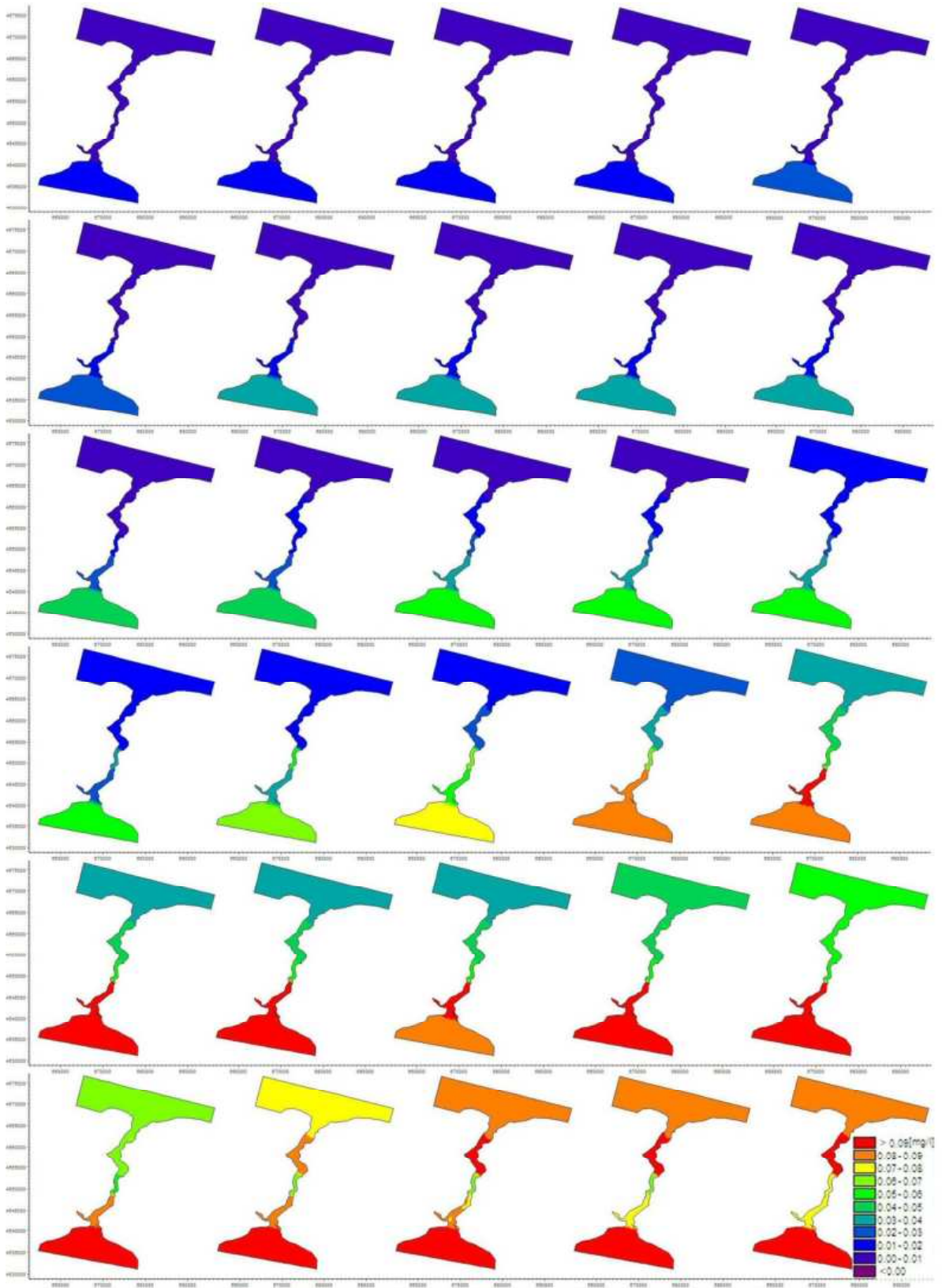
Şekil 6.89 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli Klorofil-a başlangıç koşulu.



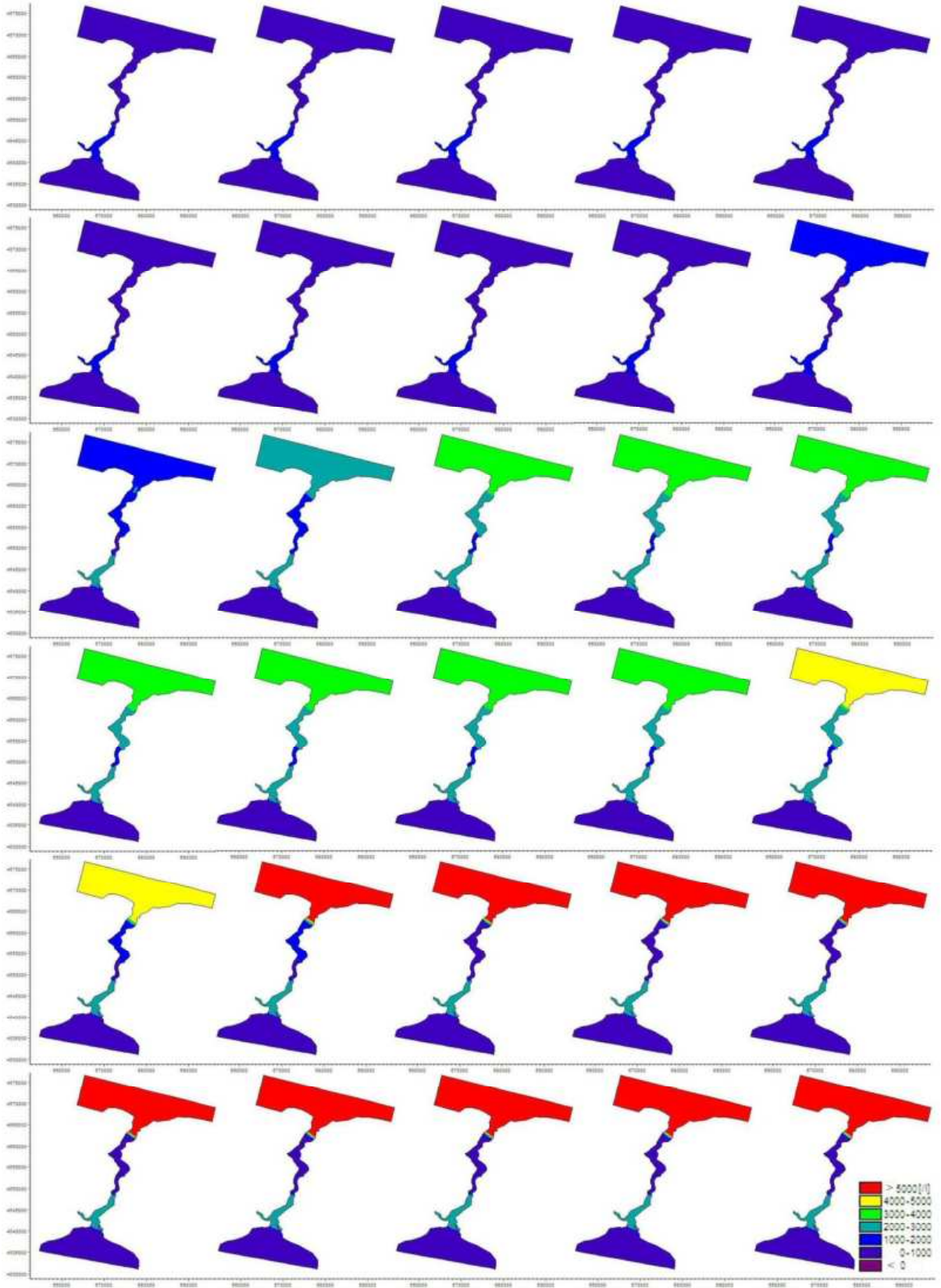
Şekil 6.90 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli NO₂ başlangıç koşulu.



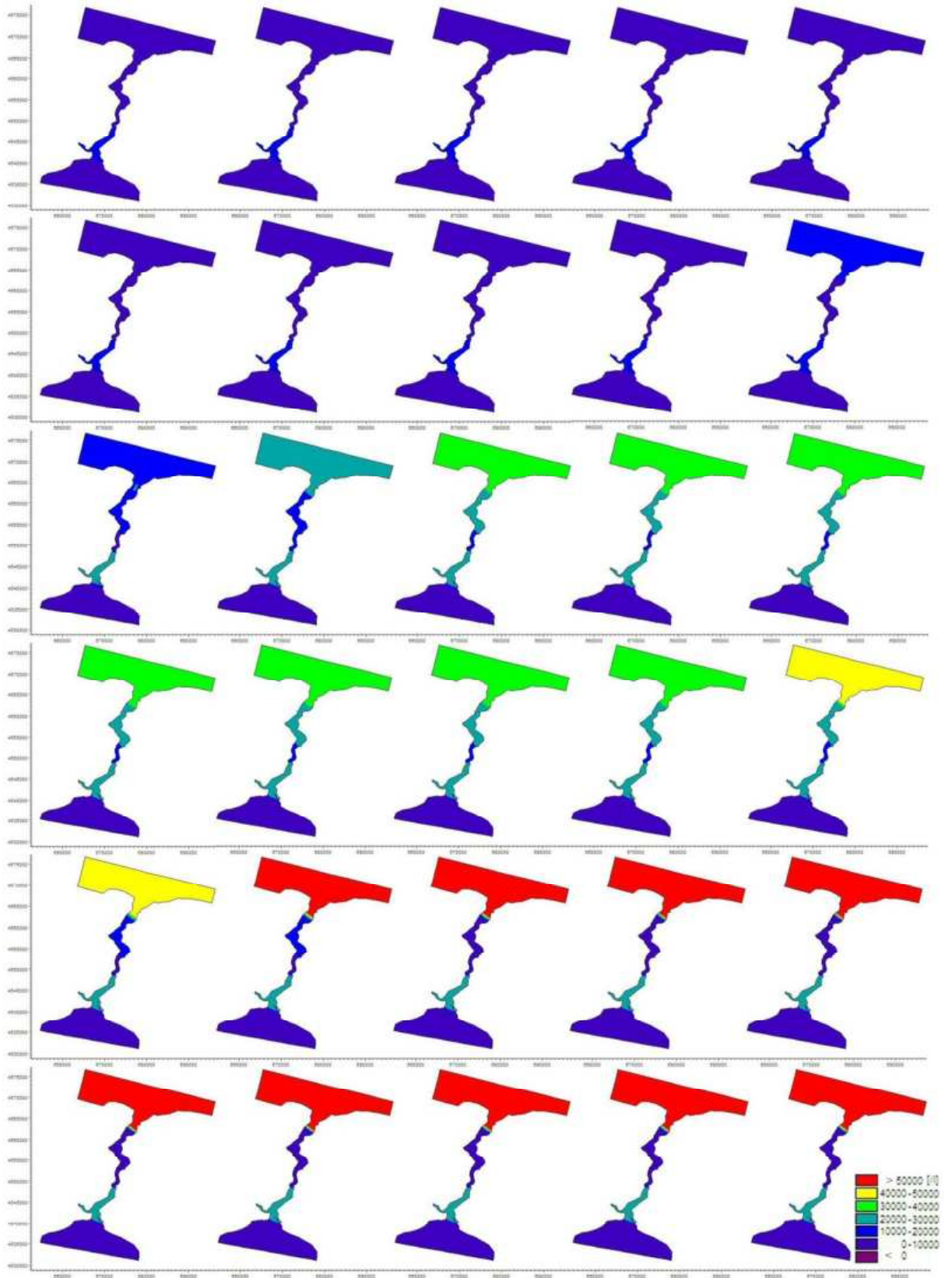
Şekil 6.91 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli NO_3 başlangıç koşulu.



Şekil 6.92 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli PO₄ başlangıç koşulu.

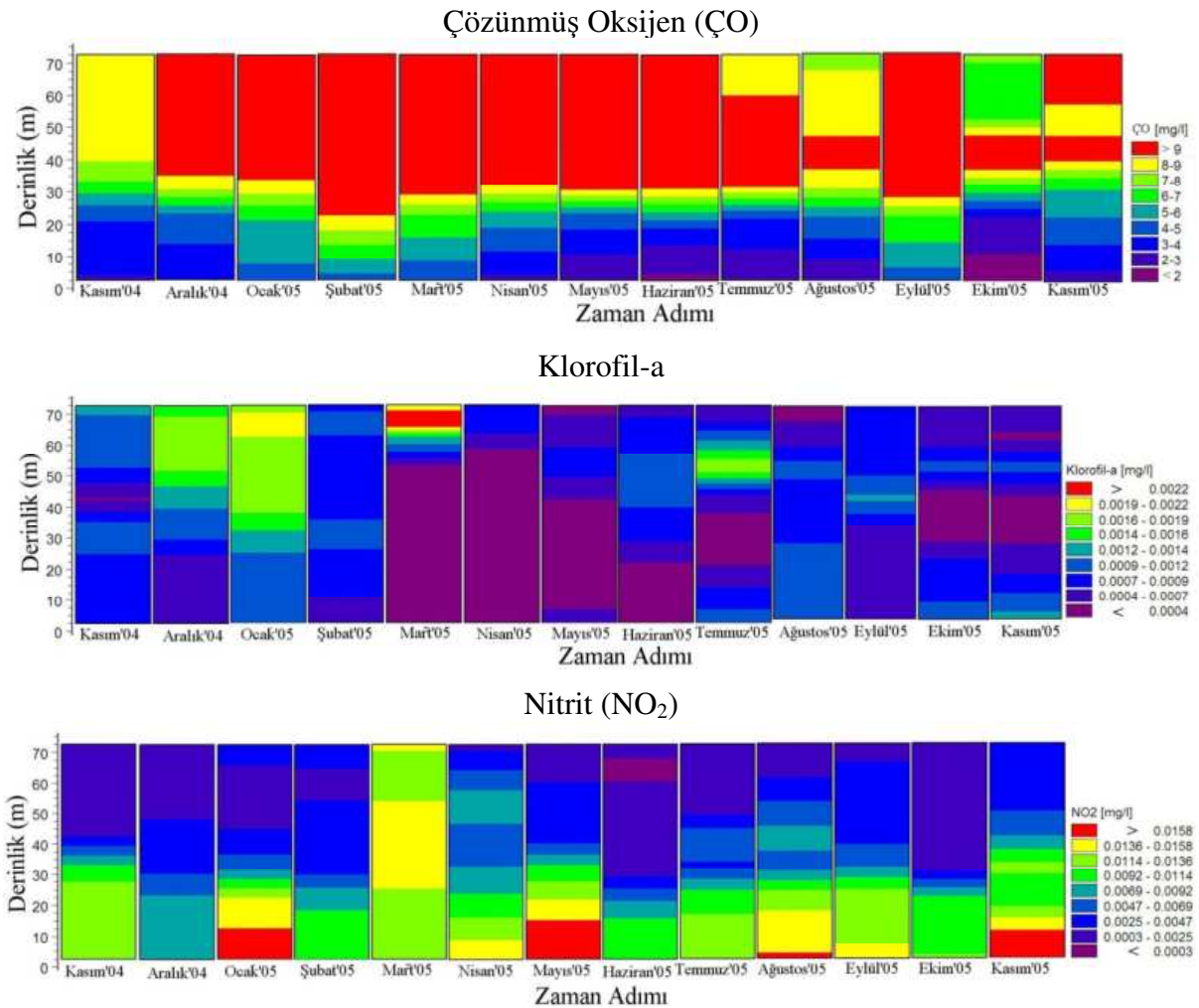


Şekil 6.93 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli FK başlangıç koşulu.

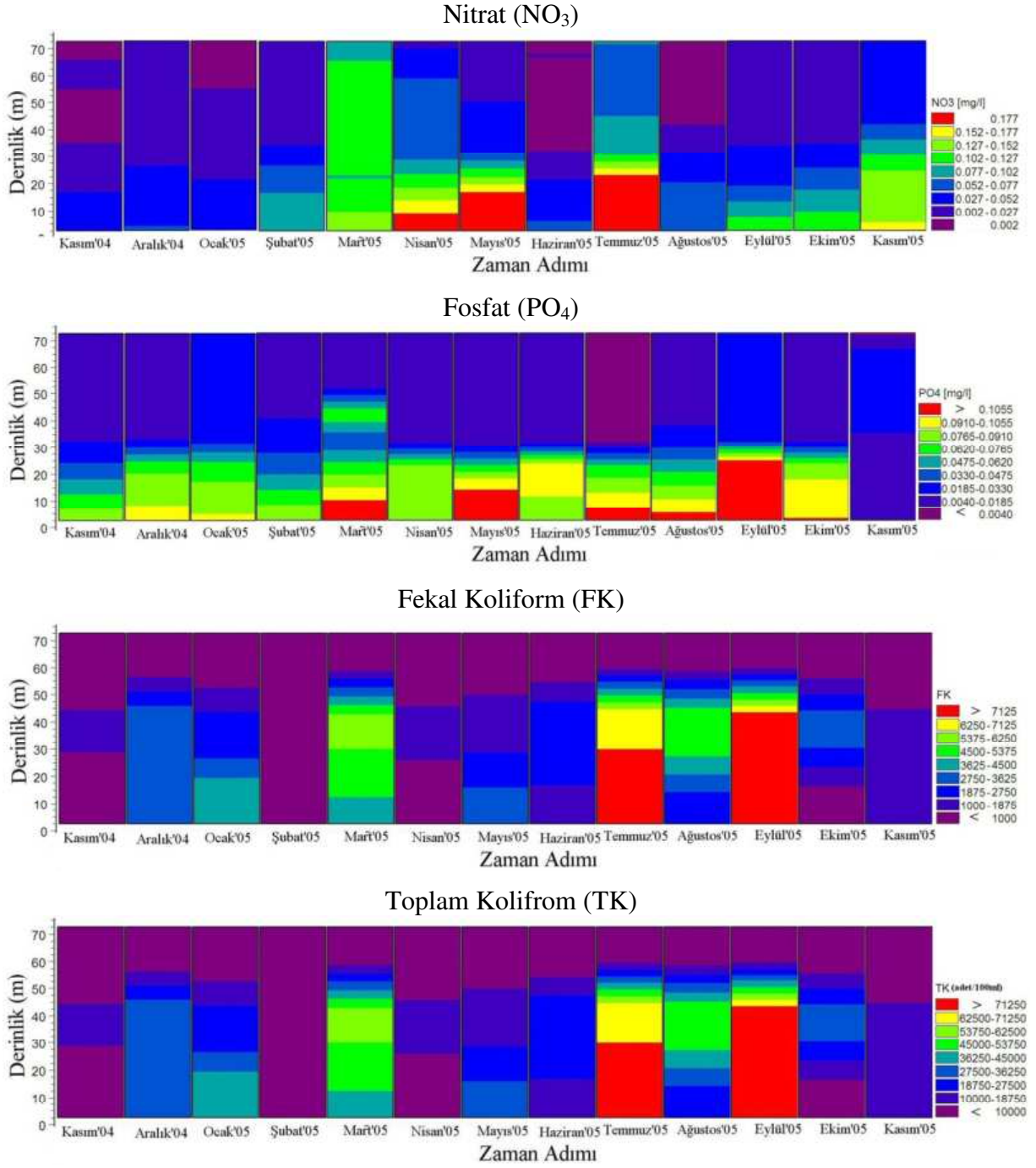


Şekil 6.94 Yüzeyden tabana kadar 30 katman için su kalitesi modeli TK başlangıç koşulu.

Yine İstanbul Boğazı su kalitesi modelinin Karadeniz ve Marmara Denizi açık sınırlarında su kalitesi durum değişkenlerinin konsantrasyon değerleri buralardaki sınır koşullarını oluşturmaktadır. Sınır koşullarının belirlenmesinde de İSKİ su kalitesi izleme çalışması ölçümlerinden yararlanılmıştır. Karadeniz açık sınırında sınır koşullarının belirlenmesinde bu sınıra en yakın istasyon olan K2 istasyonu verilerinden ve Marmara Denizi açık sınırında ise bu sınıra en yakın istasyon olan M8 istasyonu ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Ölçümler yalnızca bir noktada derinlik boyunca alındığından sınır enkesiti boyunca interpolate edilmiştir. Modelin Karadeniz açık sınırında tanımlanan tüm su kalitesi durum değişkenlerine ait konsantrasyon değerleri Şekil 6.95'te ve Marmara Denizi açık sınırını oluşturan konsantrasyon değerleri ise Şekil 6.96'da gösterilmiştir.

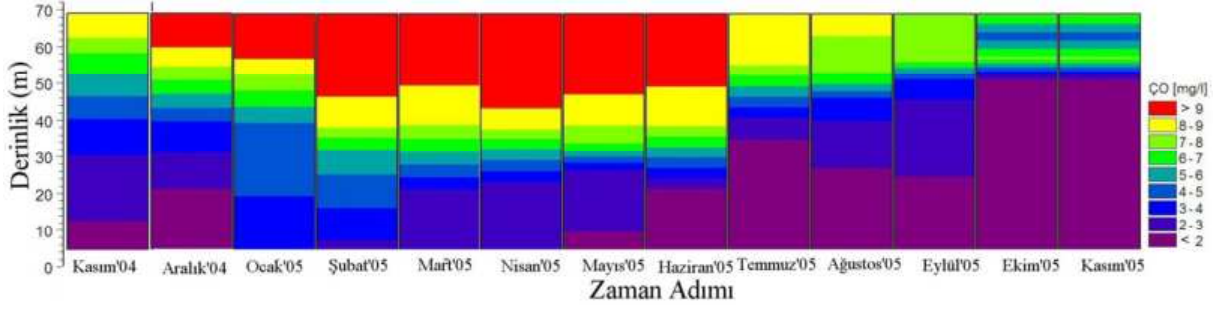


Şekil 6.95 Karadeniz Sınırında durum değişkenlerine ait konsantrasyon sınır şartları.

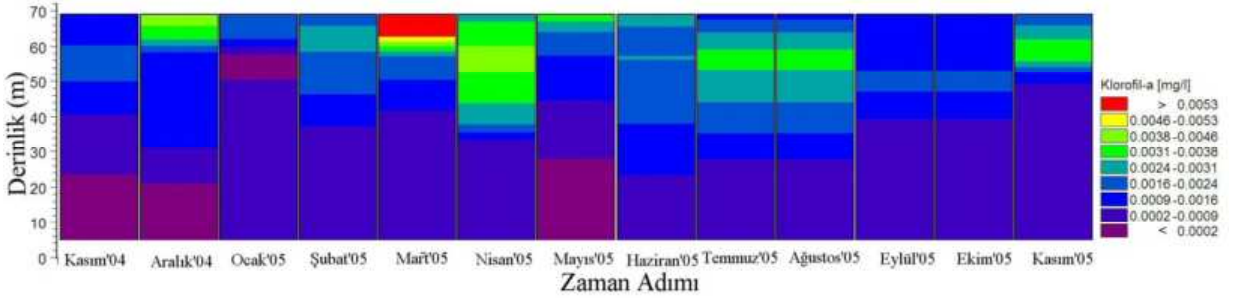


Şekil 6.95 Devamı.

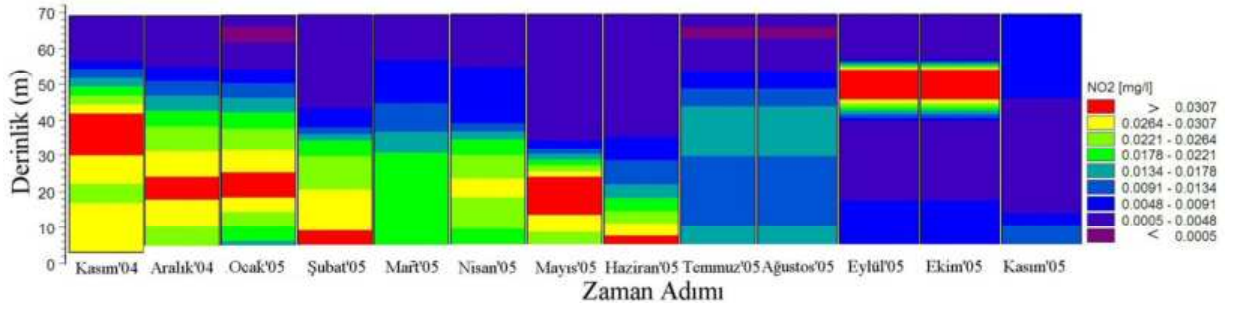
Çözülmüş Oksijen (ÇO)



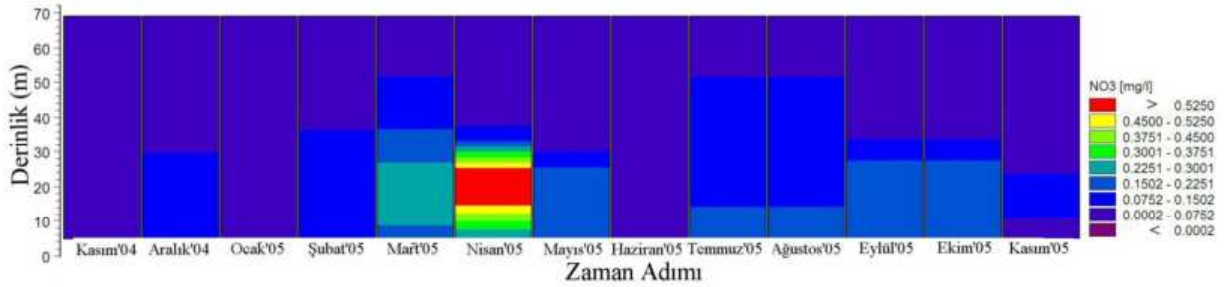
Klorofil-a



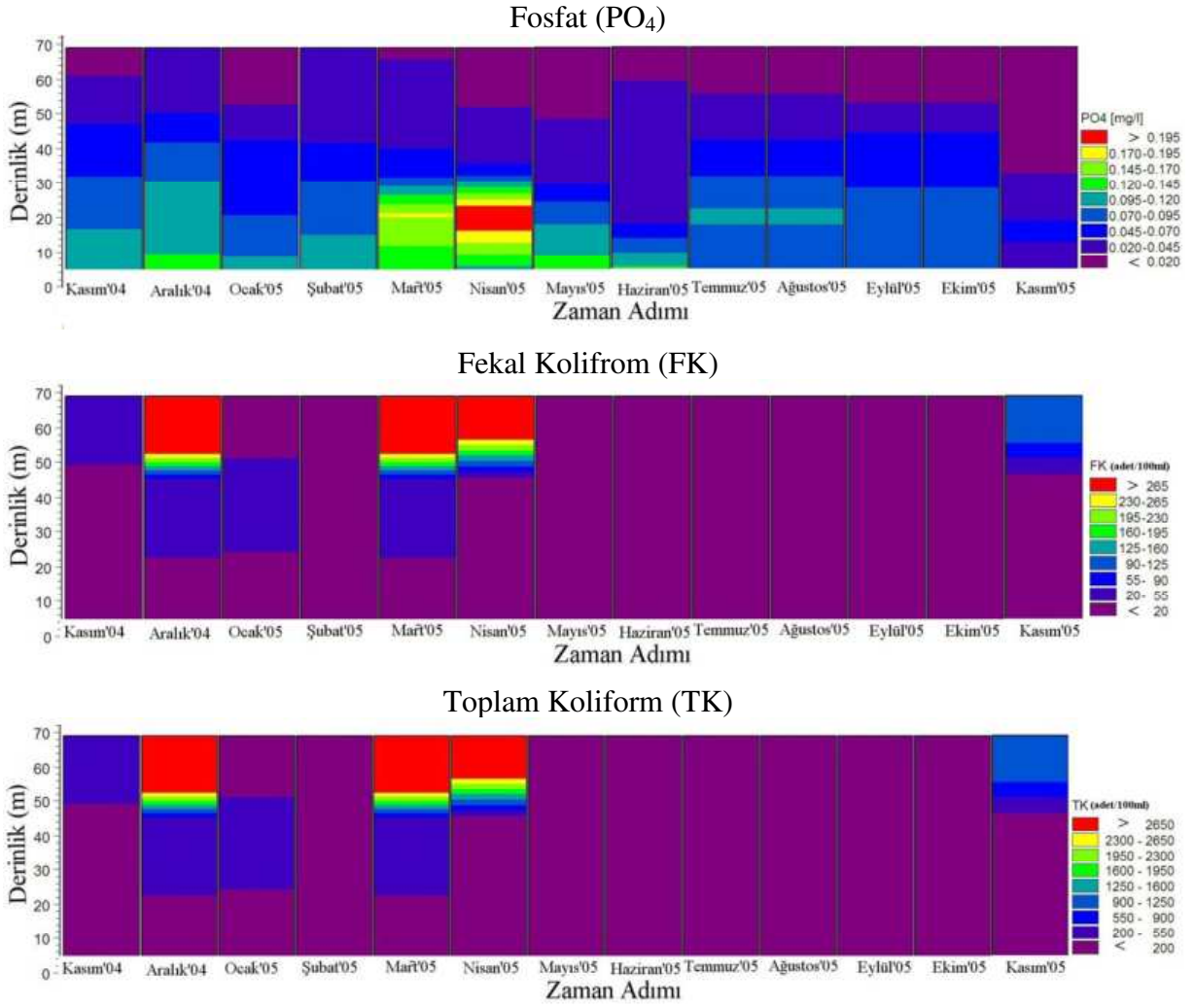
Nitrit (NO₂)



Nitrat (NO₃)

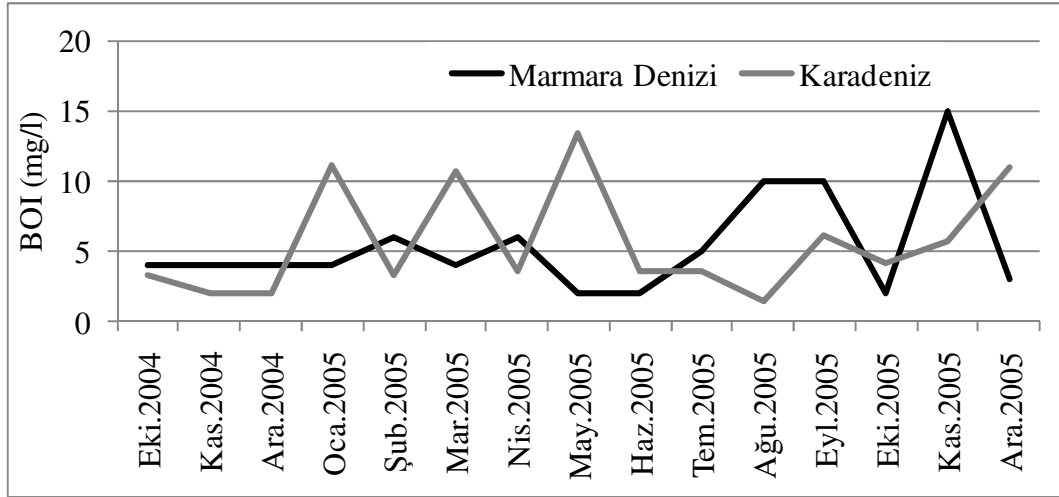


Şekil 6.96 Marmara Denizi Sınırında durum değişkenlerine ait konsantrasyon sınır şartları.



Şekil 6.96 Devamı.

Yine başlangıç koşulunda olduğu gibi BOİ ve NH₄ konsantrasyonları konusunda belirsizlik hâkimdir. Bununla birlikte raporlar bir kısım BOİ ölçümleri içermektedir. Bu ölçümlerden faydalanılarak her iki açık sınırdaki da BOİ konsantrasyonları Şekil 6.97’de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Ancak NH₄ durum değişkenine dair herhangi bir ölçüm verisi mevcut değildir. Bu nedenle sınırlarda 0.2 mg/l sabit konsantrasyon değeri tanımlanmıştır.



Şekil 6.97 Marmara Denizi ve Karadeniz açık sınırlarında tanımlanan BOİ sınır şartı.

6.3.3 İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modelinin Kalibrasyonu

Günümüzde su kalitesi modelleri su kaynaklarının yönetiminde önemli bir araç olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu modellerin çoğu hidrodinamik benzetimlerini kavramsal ya da fiziksel esaslı olarak tanımlanmış süreçlerle oldukça iyi yaklaşımlarla gerçekleştirirken, su kolonu içerisinde madde taşınımı ya da birincil üretime dair süreçlerle ilgili kavramsal belirsizlikler oldukça fazladır. Su kalitesi süreçlerine dair parametre değerleri, uzamsal ve zamansal değişkenliğe, ölçüm hatalarına, veri eksikliğine ya da fazla basit bir model tanımına bağlı olarak sıklıkla belirsizdir (Rode vd., 2007). Bu durum model kalibrasyonunu gerekli kılmaktadır.

Kalibrasyon süreci ve dolayısıyla modelin üreteceği tahminler model parametrelerinin doğru belirlenmesi ile yakından ilişkilidir. Kalibre edilmiş bir model çalışılan sucul sisteme ait belirsizliklere de cevap verebilmelidir. Bu nedenle kalibrasyon sadece belirli bir hedef fonksiyonu minimize eden parametre setini bulmayı amaçlamamalıdır. Modeller genellikle doğrusal olmadığından bu da çok zor olmakla birlikte, kalibrasyon süreci aynı zamanda parametrelere ait belirsizliklerin de giderilmesine hizmet etmelidir. Kalibrasyon verilerinin yetersiz olduğu durumlarda yeterli doğrulukta optimize edilmiş bir parametre setinin belirlenmesi zor olmaktadır. Bu durum her biri hedef fonksiyonda bir yerel minimum veren birden fazla parametre setinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte veri gereksinimleri üzerinde yapılan çalışmalar parametrelerin belirlenmesinde çok miktarda veri gereksiniminin kaçınılmaz olmadığını göstermiştir (Kuczera, 1982; Gupta ve Sorooshian, 1985). Çoğu durumda kalibrasyonda birden fazla çıktı değişkeninin kullanılması da parametre belirlenmesine olumlu katkı sağlamaktadır (Gupta vd., 1998). Sorooshian vd. (1983)

yaptıkları çalışmada; kalibrasyon veri setinin uzunluğundan çok içerdiği veri kalitesinin parametre belirlemede daha önemli olduğunu, zaman serisinin uzunluğunun sürece ancak marjinal bir katkı sağlayabildiğini ortaya koymuşlardır.

İstanbul Boğazı için geliştirilecek bir su kalitesi modelinin kalibrasyonunda kullanılabilecek pek çok parametre mevcuttur. Bu parametrelerin tümünün kalibrasyonda kullanılması oldukça zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu nedenle modelin potansiyel kalibrasyon parametrelerine olan hassasiyetinin belirlenmesi ve bunlardan model üzerinde en etkili olanlarının seçilip kalibrasyonda kullanılması için hassasiyet analizi ön değerlendirilmesinin yapılması gerekli görülmüştür.

Kalibrasyon için model alanı içerisindeki beş istasyondan B13 istasyonunda toplanan su kalitesi verileri kullanılacaktır. Bu istasyon model sınırlarından yeterince uzakta olduğundan sınırlardaki düzensizliklerden etkilenmeyeceği düşünülerek kalibrasyon istasyonu olarak seçilmiştir. Kurulan modelin sınır koşulları 1 yıllık veri setine dayandığından bunun 6 aylık kısmının kalibrasyon ve geri kalan 6 aylık kısmının ise modelin doğrulanması için kullanılması uygun görülmüştür. Buna göre model, kalibrasyon parametrelerinde öngörülen belirli bir değişim miktarı için ve her bir parametre için 01.11.2004-01.05.2005 tarihleri arasındaki dönemi kapsayacak şekilde çalıştırılmıştır. Model kalibrasyon parametresi olarak kullanılabilecek model sabitleri Çizelge 6.20’de gösterilmiştir. Herbir kalibrasyon parametresinin varsayılan değeri, parametrenin en küçük ve en büyük değerleri arasındaki farkın %20 si kadar arttırılarak, bu manipülasyonun model çıktısı olan su kalitesi durum değişkenlerinin konsantrasyon değerlerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Her bir model benzetiminde yalnızca bir tek parametre değiştirilmiştir. Tüm model benzetimlerinde model kurulum esasları, hesap ağı, başlangıç ve sınır koşulları ile kaynak konsantrasyonları aynıdır ve bu çalışmada Bölüm 6.3’te anlatıldığı gibidir. Kalibrasyon parametrelerinin varsayılan değerlerini içeren ilk model bu çalışmada baz model olarak anılacaktır. Çalıştırılan her bir modelin sonuçları B13 istasyonunda -1 m derinlikte, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak model performansındaki değişimler gözlenmiştir. Bunun için her bir benzetim sonuçlarının baz modelden sapma miktarı Ortalama Kare Farkların Karekökü (OKFK) kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 6. 6).

$$OKFK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - B_i)^2}{n}} \quad (6.6)$$

Bu ifadede; n:verilerin sayısını, B_i: n adet baz model verisinden i., T_i: n adet tahminden i. ve

$\bar{B}$ ve $\bar{T}$ ise sırasıyla baz model ve tahmin verilerinin ortalamasını göstermektedir. Elde edilen OKFK değerleri anlaşılabilirliği arttırmak için baz model sonucunda elde edilen konsantrasyonların en büyüğü ile en küçüğü arasındaki farkla normalize edilmişlerdir. Hassasiyet analizinde kullanılan model sabitleri ile bu sabitlerin literatürdeki en büyük, en küçük değerleri ve baz model ile test modellerinde tanımlanan değerleri de yine Çizelge 6.20’de gösterilmiştir. Çizelgede her bir model benzetimi harf ve sayılardan oluşan kodlarla adlandırılmıştır. Harfler parametrenin dâhil olduğu süreci ve sayılarda benzetim sayısını sembolize etmektedir. Sonuçlar Çizelge 6.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.20 Su kalitesi modelinin hassasiyet analizinde kullanılan model sabitleri.

Parametre	Açıklama	Süreç	En Küçük	En Büyük	Baz Model Değeri	Test Model Değeri	Test Model Adı
kd3	20 °C’deki Çözünmüş BOİ 1. mertebeden azalma miktarı, (/gün)	BOİ	0	5	0.5	1.5	B1
tetad3	Çözünmüş BOİ için azalma miktarına dair sıcaklık katsayısı	BOİ	1	1.2	1.07	1.11	B2
hdobod	Yarı-doygunluk oksijen konsantrasyonu, (mg/l)	BOİ	0	20	2	6	B3
pmax	Öğlen vaktindeki maksimum oksijen üretim miktarı, (m ² /gün)	Oksijen	0	40	2	10	O1
resp	Bitkilerin solunum miktarı, (m ² /gün)	Oksijen	0	30	0	6	O2
teta2	Solunum için sıcaklık katsayısı	Oksijen	1	1.2	1.08	1.12	O3
mdo	Solunum için yarı-doygunluk oksijen konsantrasyonu, (mg/l)	Oksijen	0	4	2	2.8	O4
B1Sed	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı, (/m ² /gün)	Oksijen	0	30	0.5	6.5	O5
tetab1	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı için Sıcaklık Katsayısı	Oksijen	1	1.2	1.07	1.11	O6
mdosed	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı için yarı doygunluk konsantrasyonu, (mg/l)	Oksijen	0	4	2	2.8	O7
k4	20 °C’deki 1. mertebeden azalma miktarı (amonyumdan nitrite) , (/gün)	Nitrifikasyon	0	10	0.05	2.05	N1
k7	20 °C’deki 1. mertebeden azalma miktarı (nitritten nitrata) , (/gün)	Nitrifikasyon	0	2	1	1.2	N2
teta4	Sıcaklık katsayısı (amonyumdan nitrite)	Nitrifikasyon	1	1.2	1.088	1.128	N3
teta7	Sıcaklık katsayısı (nitritten nitrata)	Nitrifikasyon	1	1.2	1.088	1.128	N4

Çizelge 6.20 Devamı.

Parametre	Açıklama	Süreç	En Küçük	En Büyük	Baz Model Değeri	Test Model Değeri	Test Model Adı
hdonit	Yarı-doygun Oksijen Konsantrasyonu, (mg/l)	Nitrifikasyon	0	20	2	5.6	N5
y2d	Çözünmüş haldeki BOİ'nin bozunumundan kaynaklanan amonyum miktarı, (g NH ₄ -N/g BOİ)	Amonyum	0	2	0.3	0.7	A1
hsnh4	N alımı için yarı doyumluk konsantrasyonu, (mg/l)	Amonyum	0	5	0.05	1.05	A2
k6	20°C de 1. mertebeden denitrifikasyon katsayısı, (/gün)	Nitrat	0	10	0.1	2.1	Ni1
teta6	Denitrifikasyon miktarı için sıcaklık katsayısı	Nitrat	1	1.4	1.16	1.24	Ni2
y3d	Çözünmüş BOİ içerisindeki Fosfor içeriği, (gP/gBOİ)	Fosfor	0	0.1	0.06	0.08	F1
hsphos	P alımı için yarı doyumluk konsantrasyonu, (mg/l)	Fosfor	0	2	0.005	0.405	F2
k8	Klorofil-a'nın ölüm miktarı, (/gün)	Klorofil	0	0.1	0.01	0.03	K1
k9	Klorofil-a'nın çökme oranı, (m/gün)	Klorofil	0	2	0.2	0.6	K2
KcoliF	Fekal Koliformun 20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı, (/gün)	Koliform	0	10	0.8	2.8	Ko1
KcoliT	Toplam Koliformun 20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı, (/gün)	Koliform	0	10	0.8	2.8	Ko2
tetaT	Azalma miktarı için sıcaklık katsayısı	Koliform	1	1.2	1.09	1.13	Ko3
tetaS	Azalma miktarı için tuzluluk katsayısı	Koliform	1	1.2	1.006	1.046	Ko4
tetaI	Azalma miktarı için ışık katsayısı	Koliform	1	20	7.4	11.2	Ko5

Kalibrasyon sürecinde ve öncesinde hassasiyet analizi sürecinde de sabitlerin manipülasyonu süreçler arasında belirli bir sıra izlenerek gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon ve hassasiyet sürecinde sabitler aşağıdaki sıra ile manipüle edilmiştir:

- BOİ-ÇO süreçlerindeki model sabitleri,
- Bozunma oranları,
- Havalanma sürecine dair sabitler,
- Üretim/solunum süreçlerine dair sabitler,

- Nitrifikasyon sürecine dair sabitler.
- Besi Maddeleri;
- BOİ içeriği,
- Nitrifikasyon/denitrifikasyon,
- Emilim süreçleri.
- Koliformlar.

Çizelge 6.21 değerlendirildiğinde tüm su kalitesi durum değişkenleri üzerinde etkili kalibrasyon parametreleri ve etki mertebeleri hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. BOİ sürecine dair kalibrasyon parametrelerindeki manipülasyonlar TK ve FK dışındaki tüm durum değişkenleri üzerinde önemli ölçüde etkili olmuştur. Bu parametreler kalibrasyon sürecinde mutlaka dikkate alınmalıdır. Yine oksijen süreçleri içerisinde yeralan p_{max} ve $resp$ parametrelerinin de model sonuçlarını etkilediği ve kalibrasyon sırasında dikkate alınmaları gerektiği görülmektedir. Model sonuçları üzerinde önemli etkiye sahip diğer bir parametre de nitrifikasyon sürecinde yer alan azalma katsayısı k_4 'tür. Bu model sabitinin özellikler NO_2 konsantrasyonları üzerindeki etkisi dikkat çekicidir. Yine kalibrasyon parametresi olarak dikkate alınmalıdır. Bunlardan başka NH_4 konsantrasyonlarının amonyum sürecinde yer alan y_{2d} katsayısına, NO_3 'ün nitrat sürecinde yer alan k_6 ve $teta_6$ katsayılarına, fosfor konsantrasyonlarının ise özellikle y_{3d} model sabitine hassasiyet gösterdiği görülmektedir. Fekal ve toplam koliform sayılarının ise sadece $teta_S$ ve $teta_T$ model sabitlerine karşı hassas olduğu yine Çizelge 6.21'den rahatlıkla görülmektedir.

Çizelge 6.21 Hassasiyet analizi sonuçları, OKFK değerleri.

Test Model Numarası	BOİ	ÇO	Klorofil-a	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	FK	TK	Toplam
B1	0.25	0.28	0.01	0.31	0.16	0.04	0.29	0	0	1.34
B2	0.07	0.09	0.01	0.09	0.05	0.01	0.09	0	0	0.41
B3	0.06	0.07	0	0.08	0.04	0.01	0.07	0	0	0.33
O1	0	0.07	1.00	0.05	0.02	0.01	0.12	0	0	1.27
O2	0.03	0.66	0.63	0.16	0.07	0.04	0.08	0	0	1.67
O3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O5	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01
O6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O7	0	0	0	0.10	0	0	0	0	0	0.10
N1	0.01	0.22	0	0.34	5.21	1.3	0.01	0	0	7.19
N2	0	0	0	0	0.04	0.01	0	0	0	0.05
N3	0	0	0	0.01	0.10	0.03	0	0	0	0.14
N4	0	0	0	0	0.07	0.02	0	0	0	0.09
N5	0	0.01	0	0.01	0.04	0.05	0	0	0	0.11
A1	0	0.02	0.01	0.77	0.48	0.15	0	0	0	1.43
A2	0	0	0	0.11	0.07	0.02	0	0	0	0.20
Ni1	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0.25
Ni2	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01
F1	0	0	0.01	0	0	0	0.16	0	0	0.17
F2	0	0	0	0.01	0	0	0.09	0	0	0.10
K1	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0.03
K2	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0.03
Ko1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ko2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ko3	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.06	0.12
Ko4	0	0	0	0	0	0	0	0.10	0.10	0.20
Ko5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hassasiyet analizinden elde edilen bilgiler daha etkili ve sistematik bir kalibrasyon yapılmasını sağlamıştır. Hassasiyet analizi sonuçlarına göre sistematik bir kalibrasyon yapabilmek için model öncelikle en etkili beş model sabiti olan kd3, pmax, resp, k4 ve y2d parametrelerine karşı kalibre edilmiştir. Diğer parametreler ise Çizelge 6.21’den de görüldüğü gibi belirli durum değişkenlerini etkilediklerinden yalnızca ilgili durum değişkeninin ileri seviye kalibrasyonu için kullanılmışlardır. Bu şekilde 100’den fazla benzetim gerçekleştirilmiştir. Benzetimler sonucu model parametrelerinin kalibre edilmiş değerleri, literatür ve baz değerleri ile birlikte Çizelge 6.22’de verilmiştir.

Çizelge 6.22 Su kalitesi modeli kalibrasyon parametrelerine ait literatür, baz model ve kalibre edilmiş değerleri.

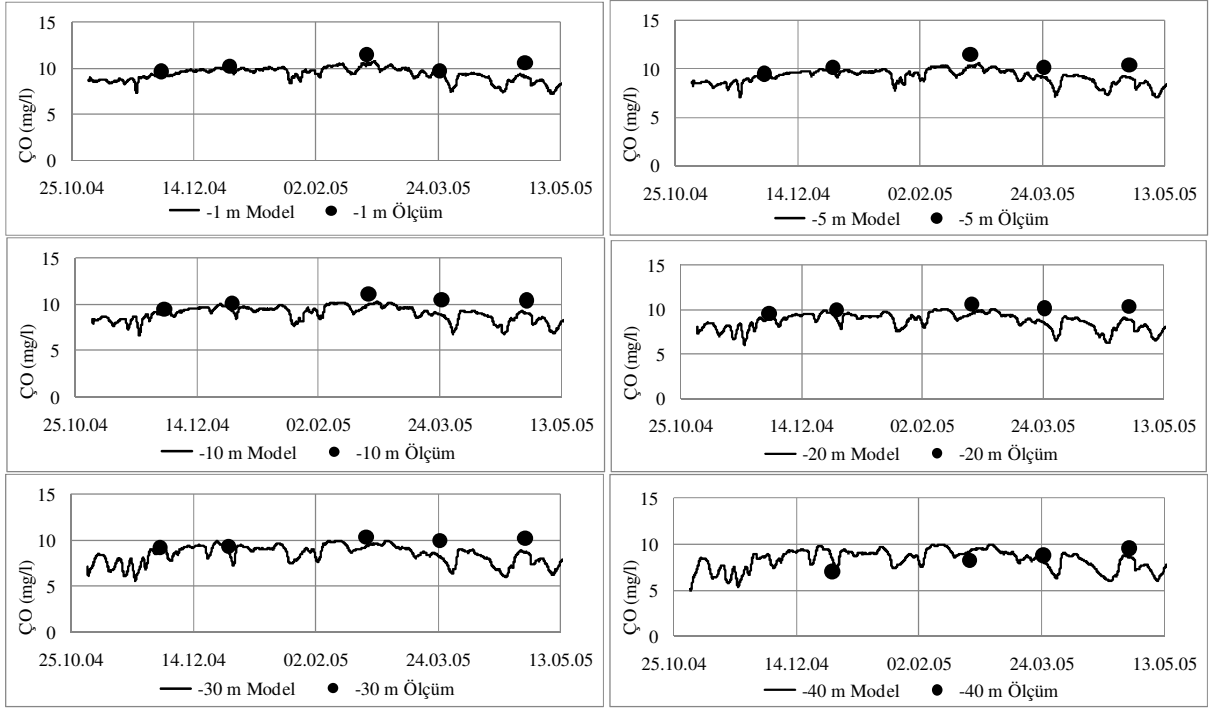
Parametre	Açıklama	Süreç	En Küçük	En Büyük	Kalibre Edilmiş Değeri
kd3	20 °C'deki Çözünmüş BOİ 1. mertebeden azalma miktarı, (/gün)	BOİ	0	5	0.2
tetad3	Çözünmüş BOİ için azalma miktarına dair sıcaklık katsayısı	BOİ	1	1.2	1.07
hdobd	Yarı-doygunluk oksijen konsantrasyonu, (mg/l)	BOİ	0	20	2
pmax	Öğlen vaktindeki maksimum oksijen üretim miktarı, (m ² /gün)	Oksijen	0	40	2
resp	Bitkilerin solunum miktarı, (m ² /gün)	Oksijen	0	30	0
teta2	Solunum için sıcaklık katsayısı	Oksijen	1	1.2	1.08
mdo	Solunum için yarı-doygunluk oksijen konsantrasyonu, (mg/l)	Oksijen	0	4	2
B1Sed	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı, (/m ² /gün)	Oksijen	0	30	0.5
tetab1	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı için Sıcaklık Katsayısı	Oksijen	1	1.2	1.07
mdosed	Katı maddenin Oksijen İhtiyacı için yarı doygunluk konsantrasyonu, (mg/l)	Oksijen	0	4	2
k4	20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı (amonyumdan nitrite) , (/gün)	Nitrifikasyon	0	10	0.05
k7	20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı (nitritten nitrata) , (/gün)	Nitrifikasyon	0	2	1
teta4	Sıcaklık katsayısı (amonyumdan nitrite)	Nitrifikasyon	1	1.2	1.2
teta7	Sıcaklık katsayısı (nitritten nitrata)	Nitrifikasyon	1	1.2	1.088
hdonit	Yarı-doygun Oksijen Konsantrasyonu, (mg/l)	Nitrifikasyon	0	20	2
y2d	Çözünmüş haldeki BOİ'nin bozunumundan kaynaklanan amonyum miktarı, (g NH ₄ -N/g BOİ)	Amonyum	0	2	0.3
hsnh4	N alımı için yarı doygunluk konsantrasyonu, (mg/l)	Amonyum	0	5	0.05
k6	20°C de 1. mertebeden denitrifikasyon katsayısı, (/gün)	Nitrat	0	10	0.1
teta6	Denitrifikasyon miktarı için sıcaklık katsayısı	Nitrat	1	1.4	1.16
y3d	Çözünmüş BOİ içerisindeki Fosfor içeriği, (gP/gBOİ)	Fosfor	0	0.1	0.01
hsphos	P alımı için yarı doygunluk konsantrasyonu, (mg/l)	Fosfor	0	2	0.005
k8	Klorofil-a'nın ölüm miktarı, (/gün)	Klorofil	0	0.1	0.05
k9	Klorofil-a'nın çökeltme oranı, (m/gün)	Klorofil	0	2	0.2
KcoliF	Fekal Koliformun 20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı, (/gün)	Koliform	0	10	Kalibre edilemedi

Çizelge 6.22 Devamı.

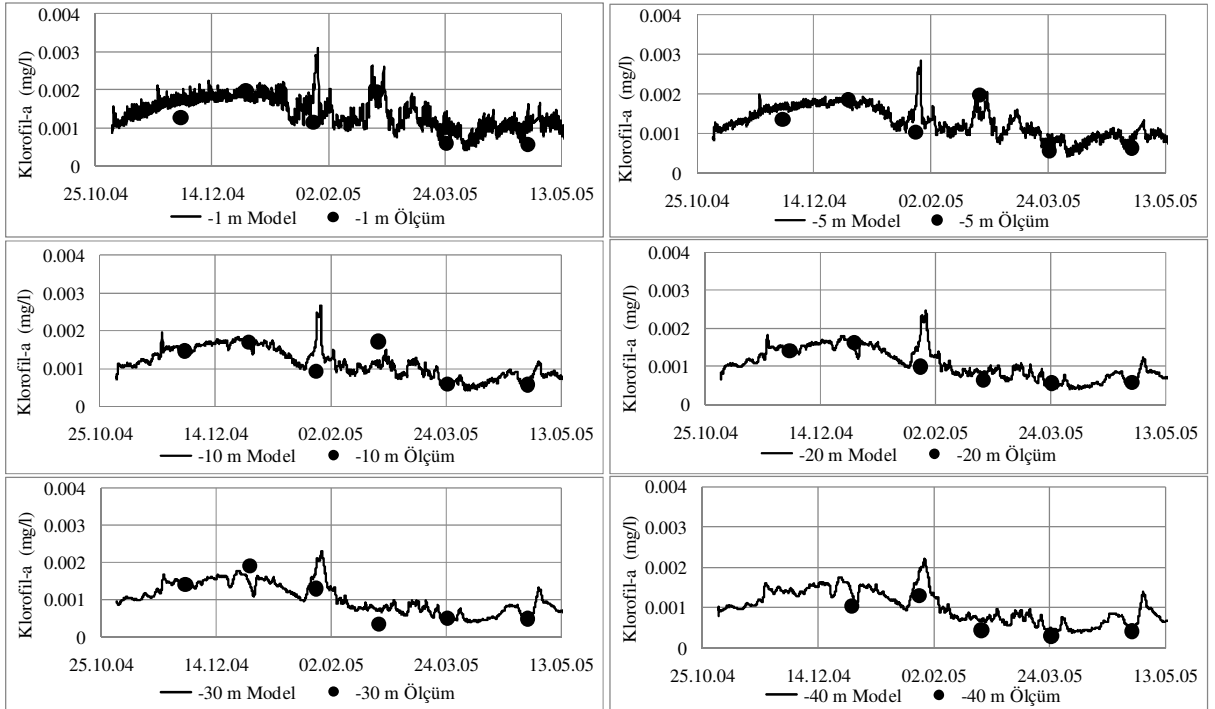
Parametre	Açıklama	Süreç	En Küçük	En Büyük	Kalibre Edilmiş Değeri
KcoliT	Toplam Koliformun 20 °C'deki 1. mertebeden azalma miktarı, (/gün)	Koliform	0	10	Kalibre edilemedi
tetaT	Azalma miktarı için sıcaklık katsayısı	Koliform	1	1.2	Kalibre edilemedi
tetaS	Azalma miktarı için tuzluluk katsayısı	Koliform	1	1.2	Kalibre edilemedi
tetaI	Azalma miktarı için ışık katsayısı	Koliform	1	20	Kalibre edilemedi

Çizelge 6.22'de de görüldüğü gibi BOİ, NH₄ ve Koliformlar dışındaki tüm su kalitesi durum değişkenleri başarı ile kalibre edilmiştir. BOİ ve NH₄ durum değişkenlerine ait yeterli sayıda ve uygun çözünürlükte ölçüm verisi elde edilemediğinden bu durum değişkeninin kalibrasyonu yapılamamıştır. Benzer şekilde bu çalışmada kullanılan ölçüm verileri NH₄ konsantrasyonlarını içermediğinden bu durum değişkeninin de kalibrasyonu yapılamamıştır. Yine FK ve TK durum değişkenlerine ait ölçümler su kalitesi izleme raporlarında yüzey, ara tabaka ve alt tabaka şeklinde tanımlanmış, belirli derinliklerde verilmemiştir. Buna rağmen mevcut verilerle hazırlanan sınır ve başlangıç koşulları hazırlanarak bu su kalitesi durum değişkenleri modelde dikkate alınmıştır. Ancak model sınırlarında ve model alanı içerisinde büyük ölçüde uzamsal ve zamansal interpolasyonlar ile verilerin kullanılması mümkün olabilmektedir. Kalibrasyon aşamasına gelindiğinde yapılan manipülasyonların hiçbirinde gerçekçi model sonuçları ile ölçümler arasında gerçekçi bir benzerlik yakalanamamıştır. Bu aşamadan itibaren FK ve TK durum değişkenlerinin model çalışması dışında tutulmasına karar verilmiştir.

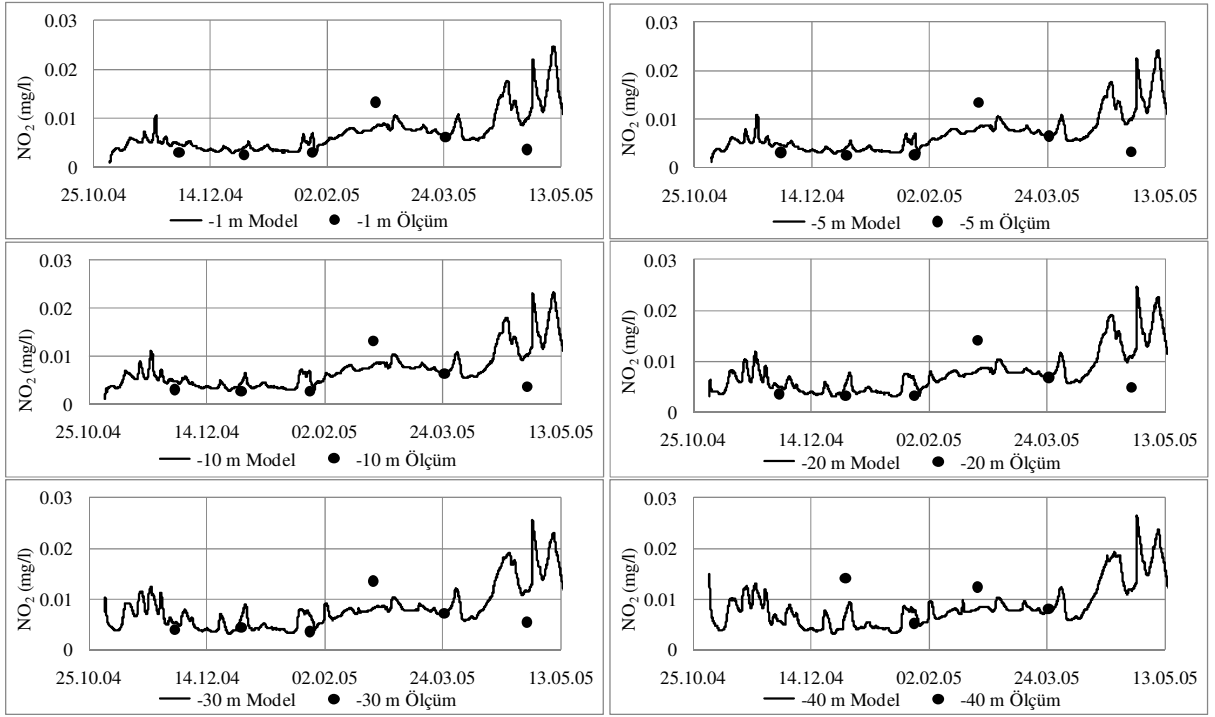
Şekil 6.98-6.102'de su kalitesi modelinin kalibrasyon aşaması sonuçları gösterilmiştir. Buna göre kalibrasyon için seçilen B13 istasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için su kolonu boyunca belirli derinliklerde model sonuçları ile ölçüm verileri zaman serileri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Model sonuçları ile ölçüm verileri arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu görülmektedir.



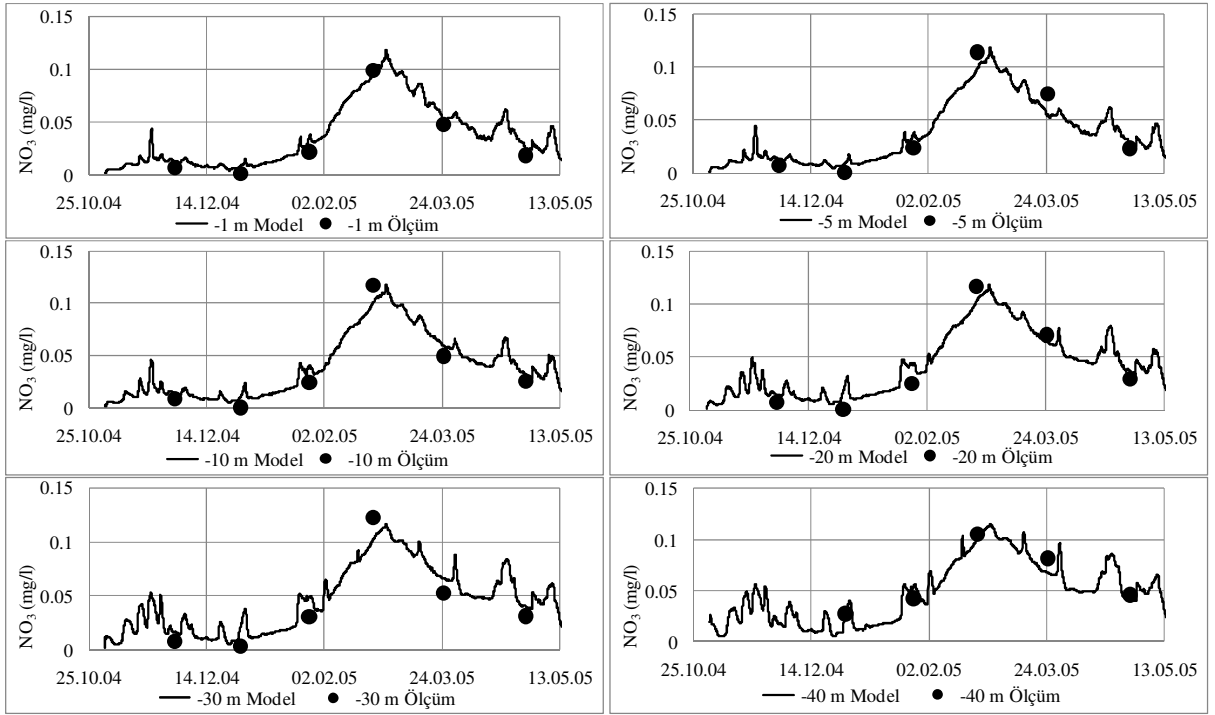
Şekil 6.98 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda ÇO konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



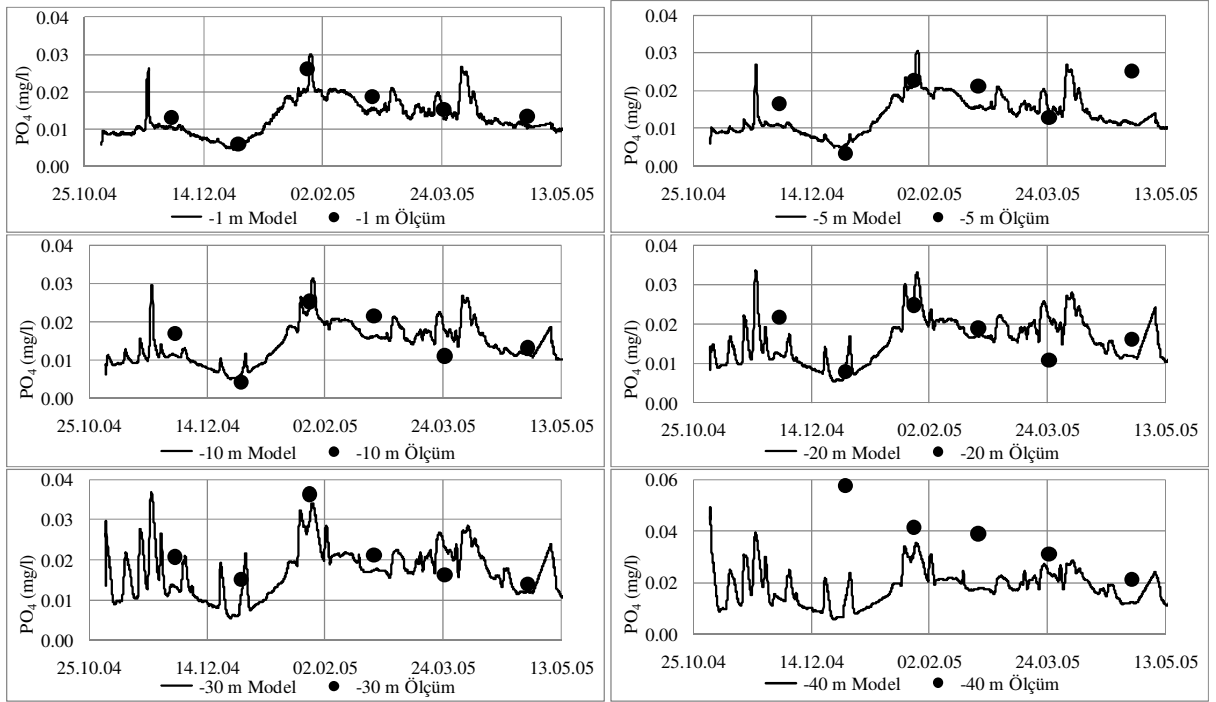
Şekil 6.99 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda Klorofil-a konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.100 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO_2 konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.101 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO_3 konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

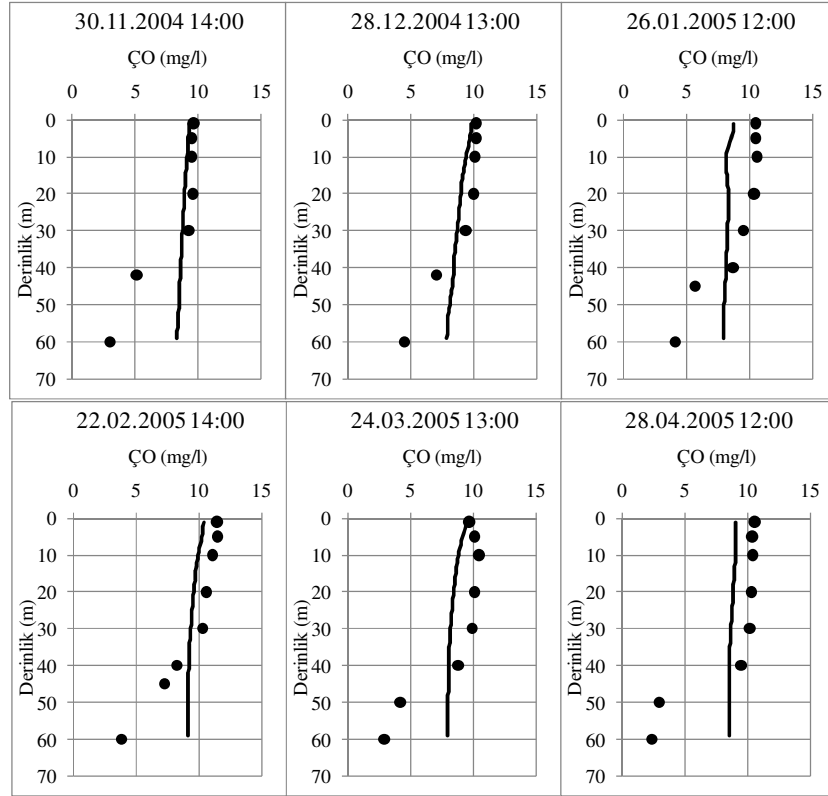


Şekil 6.102 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda PO_4 konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin uyumu. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

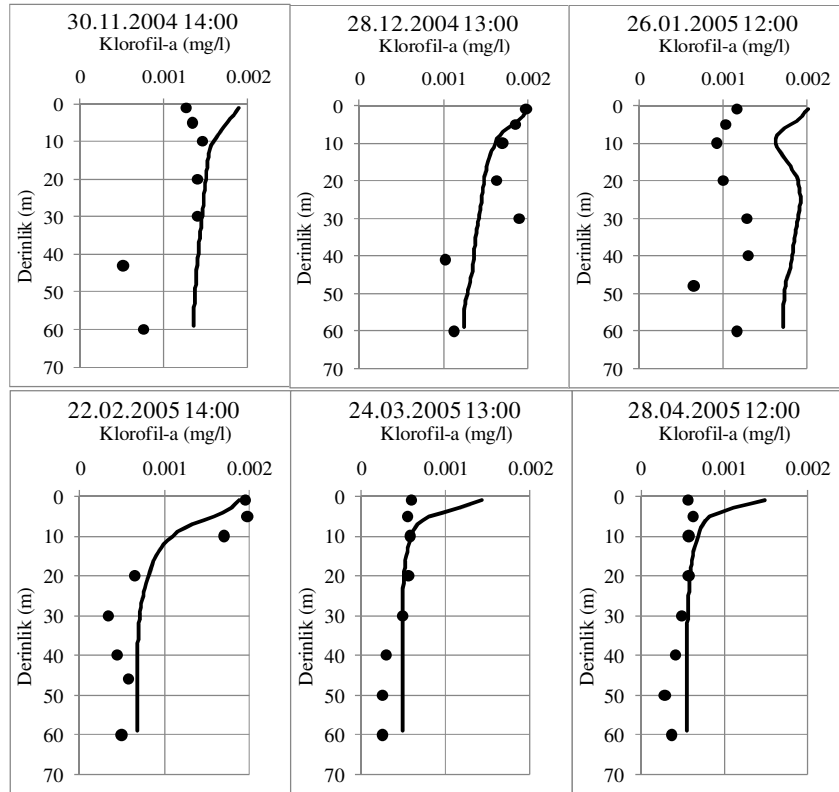
Şekil 6.98-6.102'den görüldüğü gibi model sonuçları, ölçümlerle iyi bir uyum sergilemektedir. Bu şekillerde kalibrasyon istasyonu olan B13 istasyonunda -1 m, -5 m, -10 m, -20 m, -30 m ve -40 m derinliklerde karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu derinliğin altındaki derinlikler için veri sayısı karşılaştırma yapmak için yetersizdir. Bunun nedeni ölçüm verilerinin her bir ölçüm dönemi için farklı derinliklerde toplanmış olmasıdır. Şekil 6.98'den görüldüğü gibi kalibrasyon süresince $ÇO$ konsantrasyonlarında dikkat çekici bir değişim olmamıştır. En yüksek konsantrasyon değeri üst tabakalarda Şubat ve alt tabakalarda ise Mart ayında ölçülmüştür. Model sonuçları ölçümlerdeki eğilimi başarı ile benzeştirmiştir. Yine $ÇO$ konsantrasyonları ölçüm sonuçlarında olduğu gibi model sonuçlarında da derinliğin azalmasıyla azalmaktadır. Su kalitesi modeli $ÇO$ durum değişkeni açısından başarı ile kalibre edilmiştir. Şekil 6.99'da verilen klorofil-a konsantrasyonları da model sonuçları ile ölçümler arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Klorofil-a konsantrasyonları beklendiği üzere derinlikle azalmaktadır. Bu eğilim ışık geçirgenliğinin derinlikle azalmasından ileri gelmektedir. Model klorofil-a durum değişkeninin karakteristik özelliği olan çalkantılı yapıyı başarı ile benzeştirmiştir. Model kalibrasyonu klorofil-a durum değişkeni açısından da tüm derinlikler için başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Şekil 6.100'de NO_2 konsantrasyonlarının kalibrasyon sonucu elde edilen değerleri ile ölçüm değerleri karşılaştırılmıştır. Model sonuçları ile ölçümler arasındaki uyum bu durum değişkeni için de

oldukça tatmin edicidir. Ancak kalibrasyon süresinin sonunda ölçümler ile model sonuçları arasında bir sapma gözlenmektedir. Benzer yapı yüzeyden itibaren tüm derinlikler boyunca aynı eğilimi korumaktadır. Konsantrasyonlar dikkate alınan derinlikler boyunca önemli bir değişim göstermemiştir. Bu durum ölçüm verileri ile de desteklenmektedir. Şekil 6.101’de gösterilen NO_3 durum değişkenine ait model ve ölçüm konsantrasyonları incelendiğinde ise aralarında mükemmele yakın bir uyum görülmektedir. Kalibrasyon sonucunda su kalitesi modeli NO_3 konsantrasyonlarını yüksek bir doğrulukla tahmin benzeştirebilmiştir. Hem ölçümler hem de model sonuçları konsantrasyonların derinlikle çok küçük bir değişim gösterdiğine işaret etmektedir. Bu durum değişkenine ait en yüksek konsantrasyon değeri kalibrasyon dönemi içerisinde Şubat ayında gözlenmiştir. Son olarak Şekil 6.102’de PO_4 konsantrasyonlarının kalibrasyon dönemi içerisindeki değişimlerine bakıldığında zaman içerisinde oldukça değişken olan konsantrasyon değerlerinin model tarafından başarı ile benzeştirildiği görülmektedir. Yalnızca -40 m derinlikte ölçümler ile model sonuçları arasında bir miktar sapma olduğu görülmektedir. Tabana yakın kabul edilebilecek bu derinlikteki sapmanın tabana yakın bölgede hidrodinamik modelin sergilediği yüksek difüzyondan ileri geldiği düşünülmektedir. Su kalitesi modelinin doğrulanması aşamasında daha doğru bir değerlendirme yapmak mümkün olabilecektir.

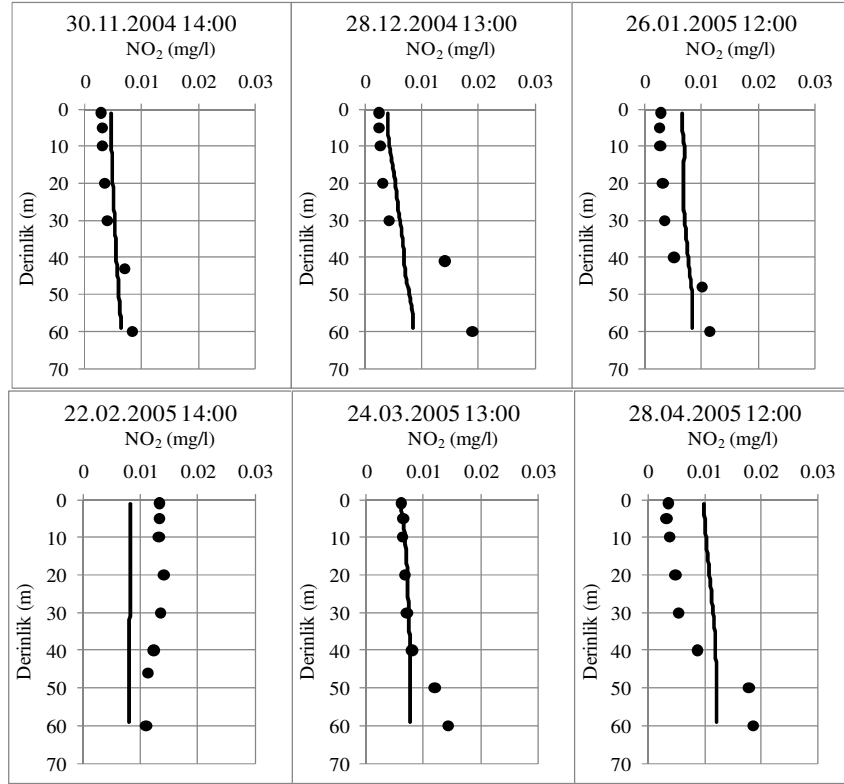
Kalibrasyon istasyonu olan B13 istasyonunda zaman serileri üzerinde ölçümlerle model sonuçlarının karşılaştırılması aşamasında taban yakınındaki derinliklerde karşılaştırma yapabilme imkanı olmamıştır. Bu nedenle mevcut veri seti içerisindeki her bir ölçüm zamanı için düşey profiller elde edilerek tabana yakın derinliklerin değerlendirmesi yapılmıştır. İstanbul Boğazı’nda su kalitesi durum değişkenleri belirli istasyonlarda aylık ve diğer bazı istasyonlarda ise mevsimlik ölçümler ile izlenmektedir. Şekil 6.103-6.107’de bu anlık olarak ölçülen düşey profiller model sonuçlarında aynı ana karşılık gelen düşey profiller ile karşılaştırılmıştır.



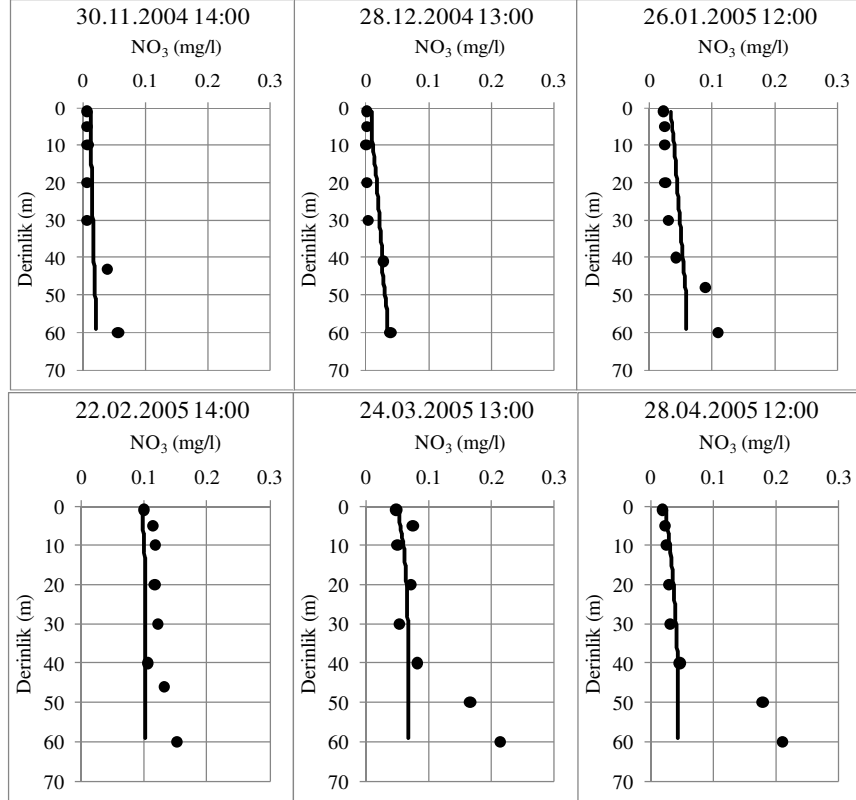
Şekil 6.103 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda ÇO konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



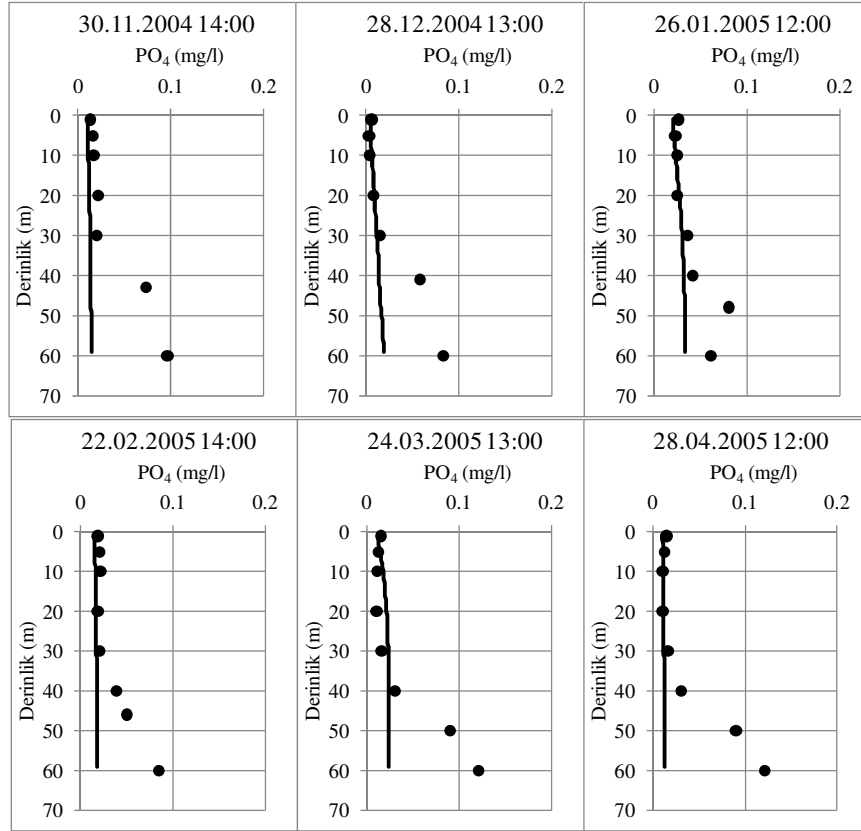
Şekil 6.104 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda Klorofil-a konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.105 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO_2 konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.106 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda NO_3 konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



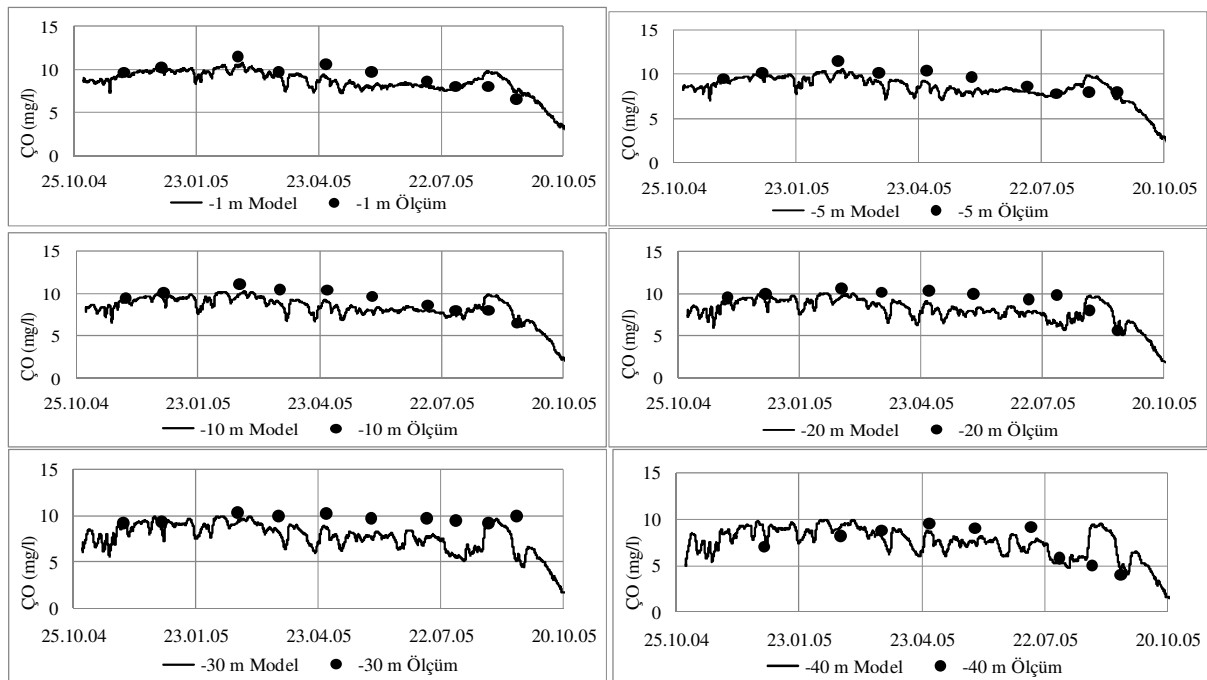
Şekil 6.107 Kalibrasyon aşaması sonucunda B13 istasyonunda PO_4 konsantrasyonlarına dair model sonuçları ile ölçüm verilerinin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.103'te gösterilen CO konsantrasyonlarına ait ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması dikkate alındığında modelin -40 m derinliğe kadar ölçülen konsantrasyonları oldukça iyi bir yakınlıkla benzeştirirken bu derinliğin altında ise ölçümler ile model sonuçları arasında önemli bir sapmanın olduğu görülmektedir. Bu durumun besi maddesi konsantrasyonları için de benzer olduğu diğer profillerden görülmektedir (Şekil 6.105, Şekil 6.106 ve Şekil 6.107). Alt tabaka yakınındaki bu sapmanın başlıca nedenlerinden bir tanesi Bölüm 6.2'de açıklanan hidrodinamik modelin yüksek difüzyonudur. Bu yüksek difüzyonun nedenleri ve sonuçları yine ilgili bölümde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Hidrodinamik modelde yaşanan bu sıkıntı nütrient ve çözünmüş oksijen durum değişkenlerinin konsantrasyonlarında da açığa çıkmıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın hidrodinamik model kısmında yapılacak iyileştirmeler ile su kalitesi modelinde de daha iyi tahminler elde edileceği düşünülmektedir. Bir başka olası neden ise kaynak konsantrasyonlarındaki belirsizliktir. Bu çalışmada Boğaz tabanındaki deşarjların kaynak konsantrasyonlarına dair ayrıntılı bir bilgi elde edilemediğinden literatürdeki kaynaklardan faydalanılarak belirlenen tahmini kaynak konsantrasyonları kullanılmıştır. Deniz tabanında yer alan kaynaklardan çıkan

konsantrasyonlarda bu nedenle ortaya çıkacak bir sapma da doğal olarak kendini en çok alt tabaka konsantrasyonları üzerinde gösterecektir. Alt tabaka ÇO ve nütrient konsantrasyonlarında gözlenen bu sapmalar dışında düşey profiller için ölçümlerle model sonuçları arasında oldukça iyi bir benzerlik yakalanmıştır. Kalibrasyon aşaması sonucunda en iyi sonuçların Klorofil-a ve NO_3 konsantrasyonları için elde edildiği görülmektedir.

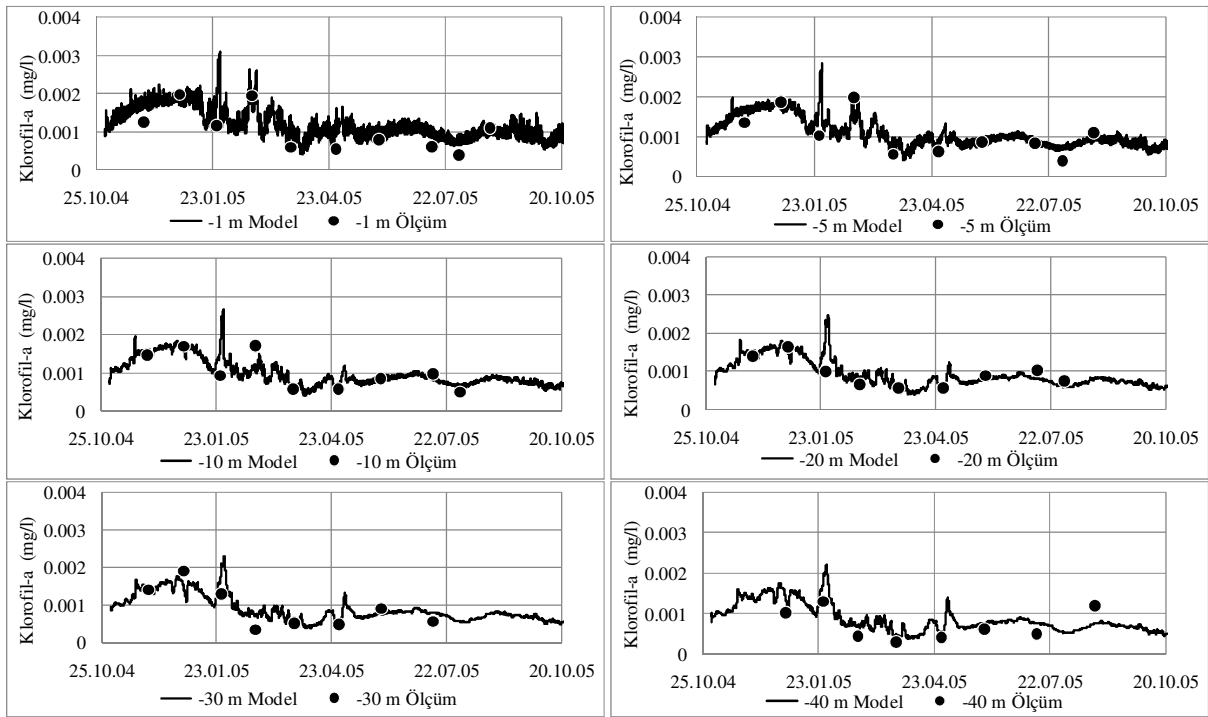
6.3.4 İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modelinin Doğrulanması

İstanbul Boğazı su kalitesi modelinin kalibrasyonunun tamamlanmasının ardından modelin doğrulanması aşamasına geçilmiştir. Modelin doğrulanması aşamasında model sabitlerinin kalibrasyon sonunda elde edilen ve Çizelge 6.22’de verilen değerleri kullanılmış ve sözkonusu değerler hiçbir benzetimde değiştirilmemiştir. Benzer şekilde model esasları, başlangıç ve sınır koşullarında da herhangi bir şekilde değişiklik yapılmamıştır. Su kalitesi modelinin doğrulanması aşamasında benzetimler kalibrasyon için seçilen B13 istasyonunda 01.05.2005-01.11.2005 aralığını kapsayan altı aylık veri seti ile, diğer istasyonlarda ise 01.11.2004-01.11.2005 aralığını kapsayan bir yıllık tüm veri seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. B13 istasyonunda doğrulama veri seti için model sonuçlarının ölçüm verileri ile karşılaştırılması zaman serileri ve düşey profiller kullanılmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Şekil 6.108-6.112’de B13 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada olduğu zaman serileri tüm derinlikler ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için verilmiştir.



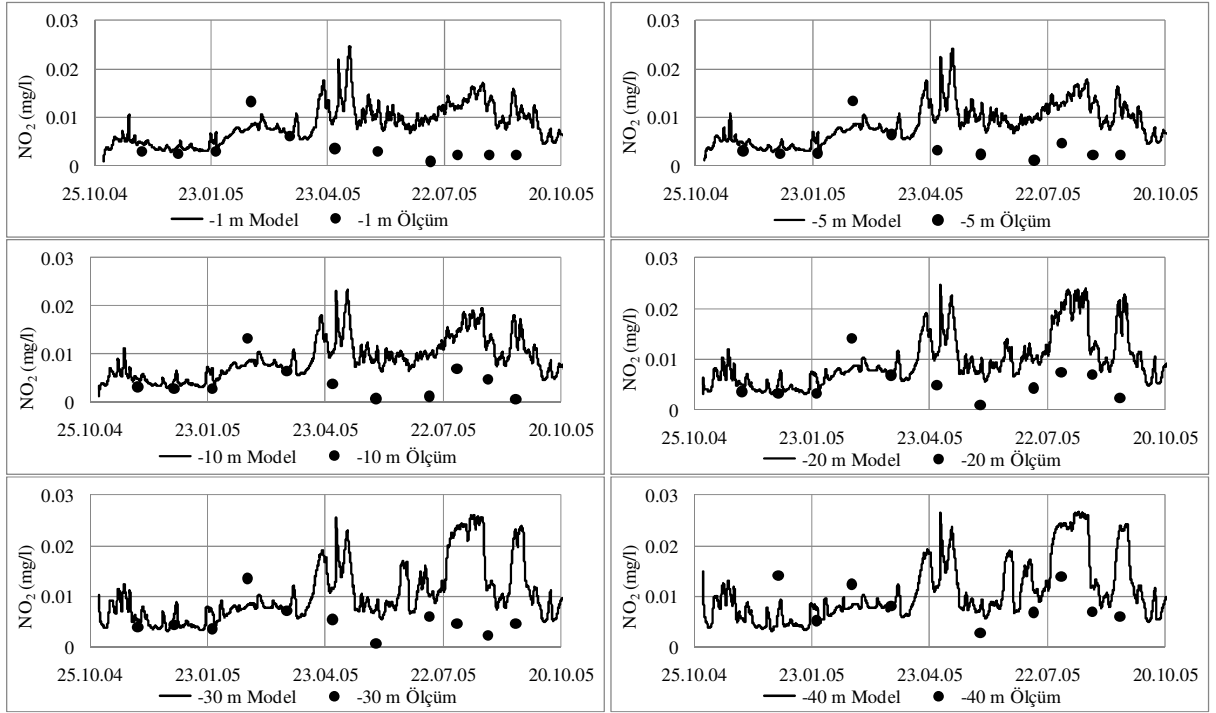
Şekil 6.108 B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.108’de gösterilen karşılaştırmalardan da görüldüğü gibi model B13 istasyonu için kalibrasyon aşamasında ortaya koyduğu doğruluğu, doğrulama aşamasında da sergilemiştir. ÇO konsantrasyonları yine tüm katmanlarda oldukça iyi bir yakınlıkla benzeştirilmiştir. ÇO konsantrasyonlarının kalibrasyon süresinde olduğu gibi doğrulama süresinde de çok önemli bir değişiklik göstermediği görülmektedir. Ancak hem model hem de ölçüm sonuçları Temmuz ayından sonra konsantrasyonlarda tüm tabakalarda açıkça görülebilen bir düşüş eğilimine işaret etmektedir. Özellikle yüzeyden 40 m derinlikte ÇO konsantrasyonunun 5 mg/l’nin altına düştüğü ve düşüşün benzetim süresince devam ettiği görülmektedir.



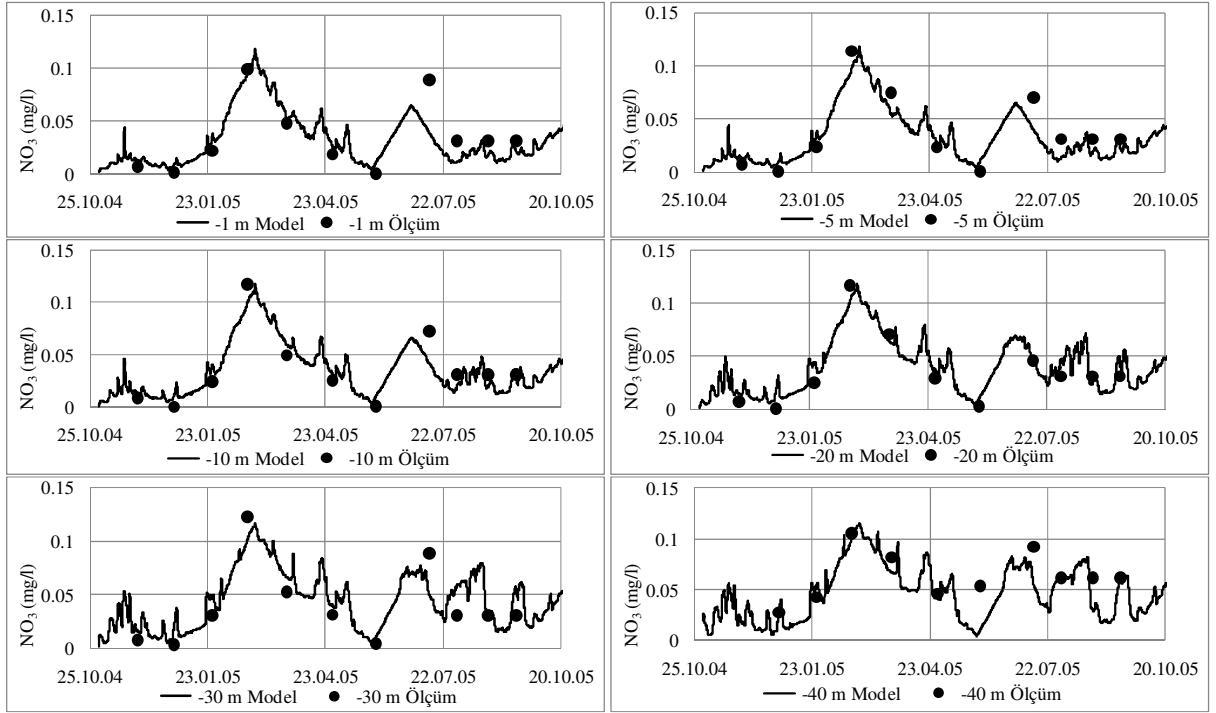
Şekil 6.109 B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.109’da B13 istasyonunda klorofil-a durum değişkeninin kalibrasyon ve doğrulama süreçleri içerisinde hem ölçülen hem de modellenen konsantrasyon değişimleri gösterilmiştir. Yine modelin klorofil-a durum değişkeni için de kalibrasyon aşamasında sergilediği doğruluğu, doğrulama aşamasında da gösterdiği gözlenmektedir. Modelin doğrulanması için seçilen yılın ikinci altı aylık kısmında klorofil-a konsantrasyonlarının ilk altı aylık döneme göre daha kararlı ve düşük değerlerde seyrettiği görülmektedir. Bu durum yılın ikinci yarısında fitoplanktonik aktivitenin düştüğünü ve birincil üretim ile nütrient tüketiminin azaldığına işaret etmektedir.



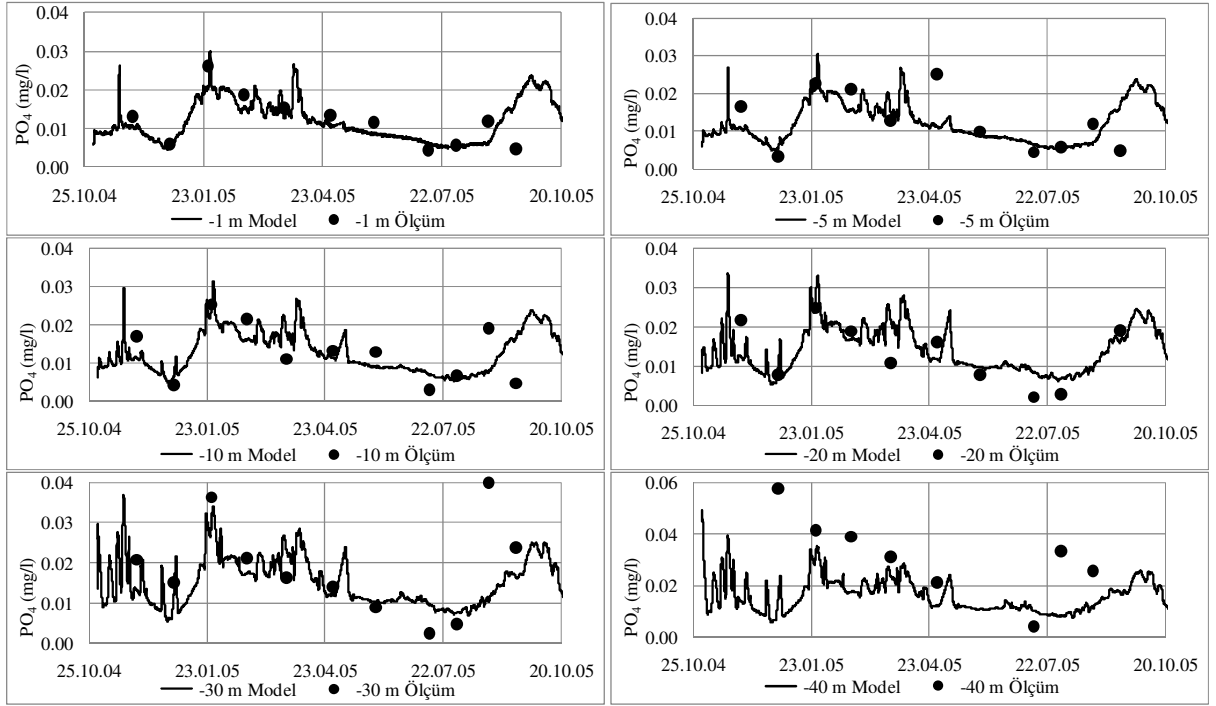
Şekil 6.110 B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_2 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.110 incelendiğinde NO_2 konsantrasyonlarının benzeştirilmesinde su kalitesi modelinin kalibrasyon aşamasındaki doğruluğu yeterince yakalayamadığı görülmektedir. Zaman serileri incelendiğinde Nisan ayından itibaren konsantrasyonların ani bir biçimde arttığı ve Haziran ayının başlaması ile yeniden düştüğü ve ardından Ağustos ayından itibaren yine çarpıcı bir artış kaydettiği görülmektedir. Bilindiği gibi Nisan-Mayıs ve Ağustos-Ekim ayları İstanbul için oldukça yağışlı geçen aylardır. Yağışlı mevsim boyunca hem atmosferden suya azot girişi hem de yüzeysel akışla Boğaz'a taşınan nütrient miktarları önemli ölçüde artmaktadır. Bu girdiler azot formlarından en çok nitrit konsantrasyonlarını etkilemektedir. Su kalitesi modeli NO_2 konsantrasyonlarındaki bu azalma ve artış eğilimlerini yakalamakla birlikte konsantrasyon değerlerini biraz yüksek tahmin etmiştir. Burada atmosferden suya azot girişi ve yüzeysel akış ile konsantrasyon değerlerinde meydana gelen artışa dair belirsizliklerin rol oynadığı düşünülmektedir.



Şekil 6.111 B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

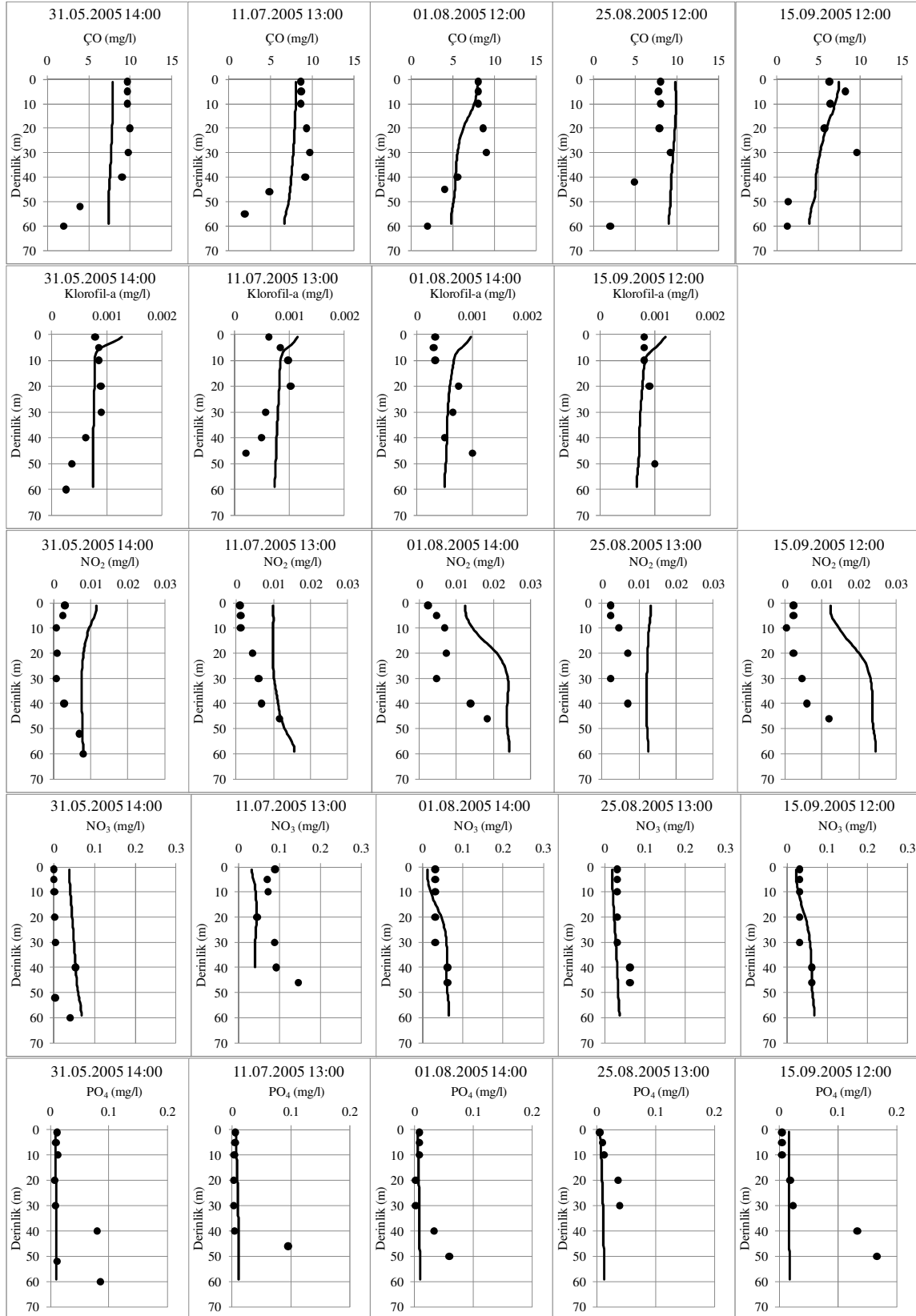
Şekil 6.111'den görüldüğü gibi su kalitesi modeli NO_3 konsantrasyonlarını tüm derinliklerde yüksek bir başarı ile benzeştirmiştir. Yıl boyunca NO_3 konsantrasyonlarının B13 istasyonunda oldukça değişken bir seyir izlerken, derinlik boyunca ise önemli bir değişim sergilemediği görülmektedir.



Şekil 6.112 B13 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.112'ye bakıldığında PO_4 konsantrasyonlarının da kalibrasyon aşamasında olduğu gibi oldukça iyi bir yaklaşımla benzeştirildiği görülmektedir. Ancak yüzeyden 40 m derinlikte derin deşarjların etkisi ile artan taban konsantrasyonlarının benzeştirilmesinde model doğruluğunun düştüğü görülmektedir.

B13 istasyonunda doğrulama veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada görülebildiği düşey profiller Şekil 6.113'te gösterilmiştir.



Şekil 6.113 B13 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri doğrulama dönemi veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri
—: model sonuçları.

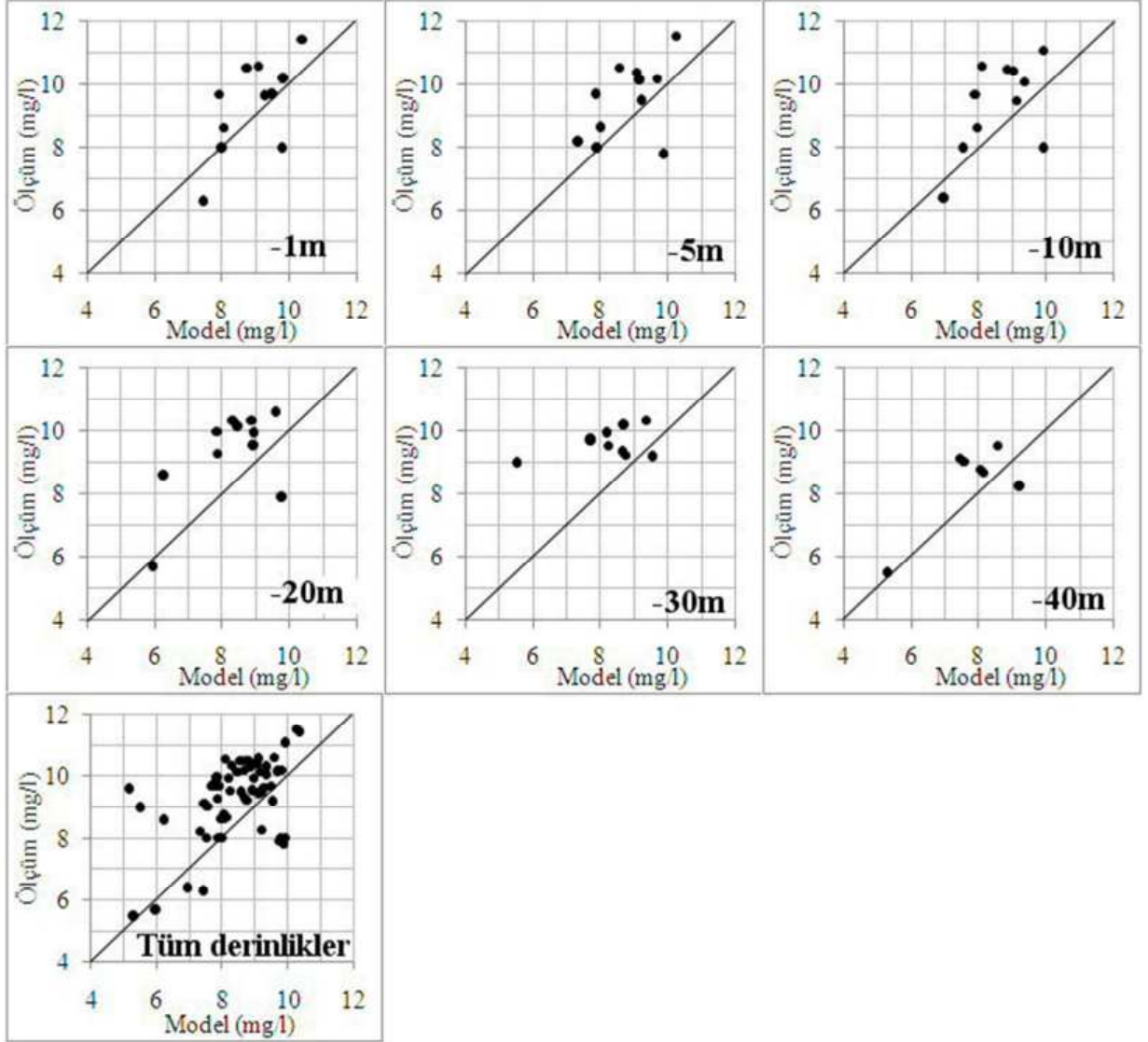
Şekil 6.113'te verilen düşey profiller de model sonuçları ile ölçüm verileri arasında zaman serilerinde gözlenen uyumu desteklemektedir. Yine benzer şekilde tabana yakın yerlerde model sonuçlarının ölçümlerden saptığı görülmektedir. Bu durumun başlıca nedenleri daha önce de tartışıldığı gibi hidrodinamik modelde yaşanan düşey difüzyon sorunu ile kaynak konsantrasyonlarındaki belirsizliklerdir. Kalibre edilmiş su kalitesi modelinin doğrulanması amacıyla sonuçların görsel sunumundan sonra istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. Tüm istasyonlarda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçümler arasındaki uyumun niceliksel değerlendirmesini yapabilmek amacıyla R^2 , OKHK ve OKHK (%) ölçütleri hesaplanmıştır. Yine veriler üzerinden geçirilen bir eğilim doğrusuna ait denklemler elde edilmiştir. Bu denklemlerde y: ölçüm verisi ve x: model sonucudur. Herbir istasyon için sonuçlar su kalitesi durum değişkeni bazında ve derinlik boyunca sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan veri seti aylık ve mevsimlik ölçümlerden oluştuğundan herbir derinlik için en çok 12 en az 4 veri mevcuttur. Bunun dışındaki bazı nedenlerle eksik olan veriler de veri sayısını azaltmaktadır. Bu nedenle daha doğru bir değerlendirme sağlayabileceği düşünülerek doğruluk ölçütleri bir kez de tüm derinlikleri içeren veri seti kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar B13 istasyonu için Çizelge 6.23'te gösterilmiştir. Çizelge 40 m'nin altındaki derinliklerde veri sayılarının çok azalması nedeniyle dikkate alınmamıştır. Ölçütlerin hesaplanmasına esas teşkil eden verilerin saçılım diyagramı üzerinde sunumu ise Şekil 6.114'te verilmiştir.

Çizelge 6.23, Şekil 6.114 ile birlikte değerlendirildiğinde B13 istasyonunda en yüksek determinasyon katsayıları ile en düşük hata değerlerinin klorofil-a ve NO_3 konsantrasyonlarında elde edildiği görülmektedir. Bu iki durum değişkenini CO ve PO_4 durum değişkenleri izlemektedir. NO_2 durum değişkeni ise en düşük korelasyon katsayıları ve en büyük hata değerlerini vermiştir ki bu durum hem zaman serileri hem de profil serilerinde açıkça görülmüştü. PO_4 durum değişkeni için ise korelasyon katsayıları -20 ve -40 m derinliklerde çok düşük olmakla birlikte hatalar kabul edilebilir mertebededir.

Çizelge 6.23 B13 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.

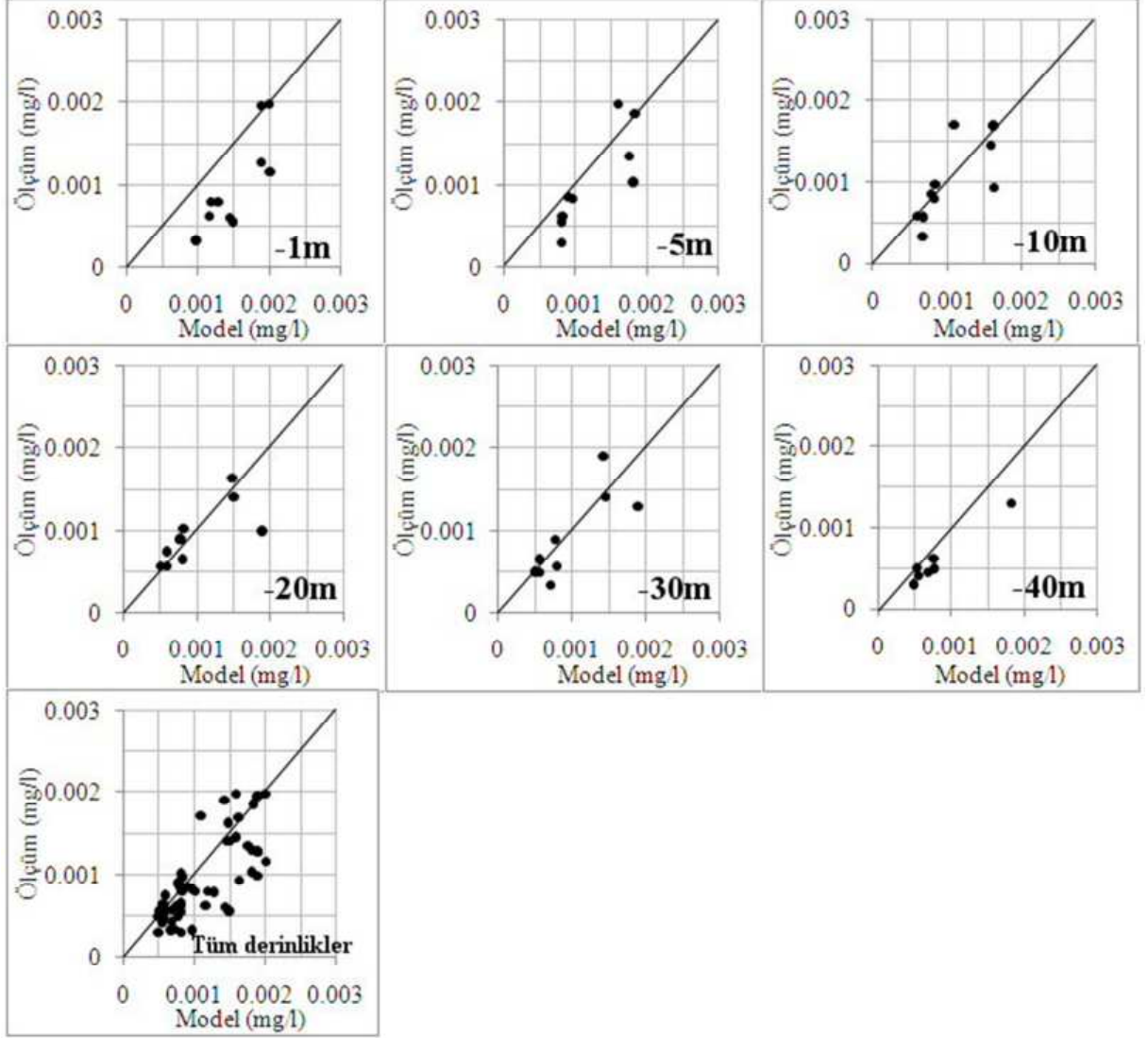
Durum Değişkeni	ÇO				Klorofil-a			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.41	1.16	23	1x+0.42	0.69	0.00063	38	1.24x-0.00088
-5 m	0.25	1.25	34	0.64x+3.90	0.67	0.00036	22	0.82x+0.00021
-10 m	0.31	1.36	29	0.81x+2.35	0.53	0.00032	24	0.82x+0.00014
-20 m	0.35	1.57	32	0.70x+3.55	0.53	0.00031	29	0.54x+0.00041
-30 m	0.15	2.10	159	0.15x+8.38	0.67	0.00030	19	0.87x+0.00006
-40 m	0.60	1.57	38	0.84x+1.89	0.96	0.00026	26	0.70x+0.00002
Tüm Derinlikler	0.27	1.53	29	0.56+4.58	0.56	0.00039	23	0.74x+0.00010
Durum Değişkeni	NO ₂				NO ₃			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.04	0.00678	55	-0.22x+0.0058	0.48	0.02374	24	0.90x+0.0057
-5 m	0.02	0.00696	57	-0.16x+0.0054	0.70	0.01918	17	1.15x-0.0012
-10 m	0.00	0.00717	56	-0.06x+0.0047	0.70	0.01812	16	1.12x-0.0055
-20 m	0.00	0.00799	60	0.03x+0.0048	0.80	0.01738	15	1.25x-0.0189
-30 m	0.00	0.00936	72	-0.04x+0.0055	0.52	0.02559	22	1.11x-0.0135
-40 m	0.13	0.00926	84	0.19x+0.0054	0.33	0.02172	29	0.60x+0.0338
Tüm Derinlikler	0.01	0.00770	56	0.07x+0.0042	0.60	0.02104	17	1.05x-0.0025
Durum Değişkeni	PO ₄							
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)				
-1 m	0.53	0.00297	14	0.96x+0.00133				
-5 m	0.34	0.00623	29	0.85x+0.00309				
-10 m	0.40	0.00536	24	0.79x+0.00257				
-20 m	0.11	0.00980	29	0.56x+0.00767				
-30 m	0.30	0.01018	27	0.97x+0.00384				
-40 m	0.00	0.04667	36	0.33x+0.04238				
Tüm Derinlikler	0.20	0.01225	16	0.93x+0.00432				

Çözülmüş Oksijen (ÇO)

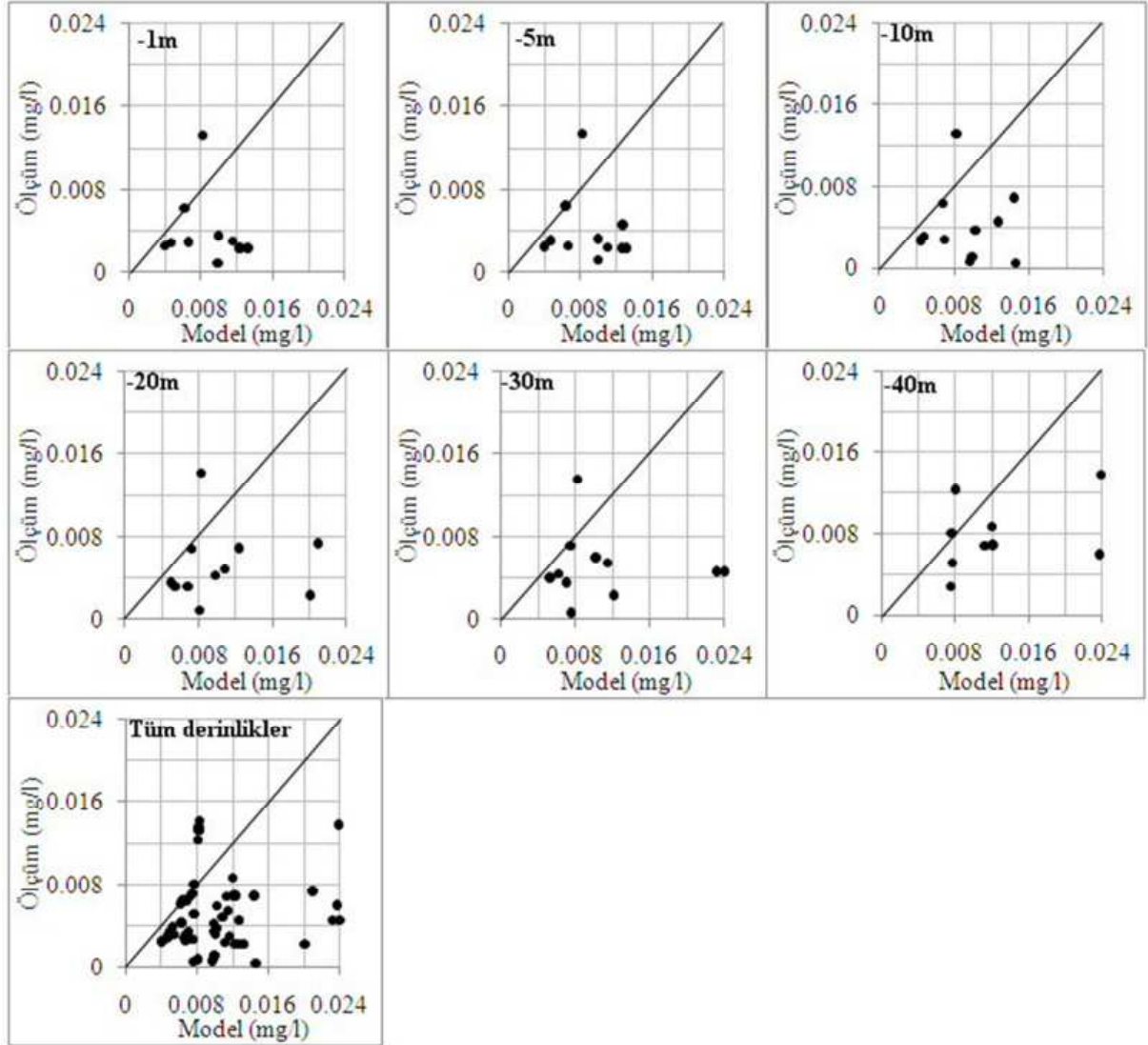


Şekil 6.114 B13 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.

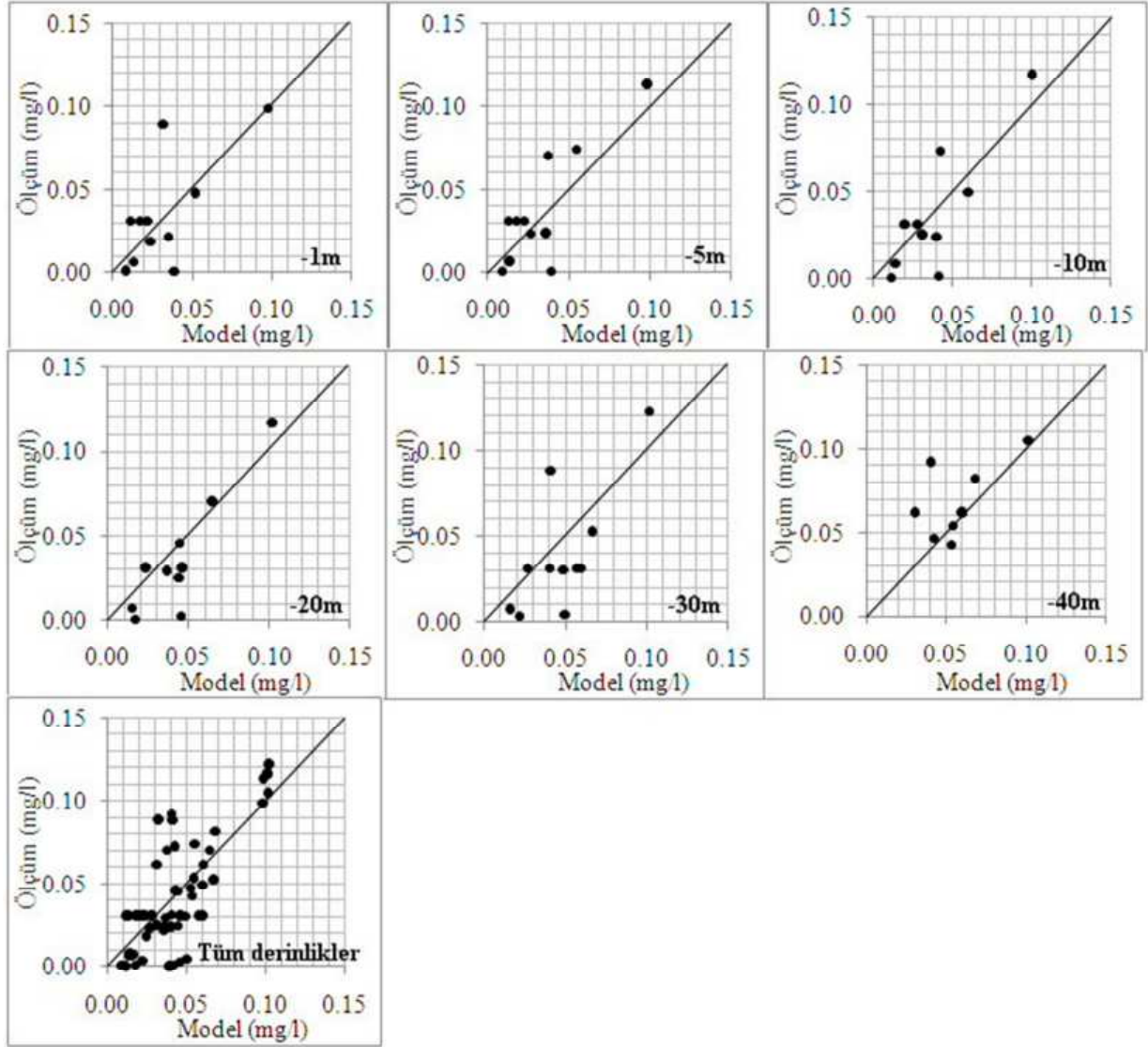
Klorofil-a



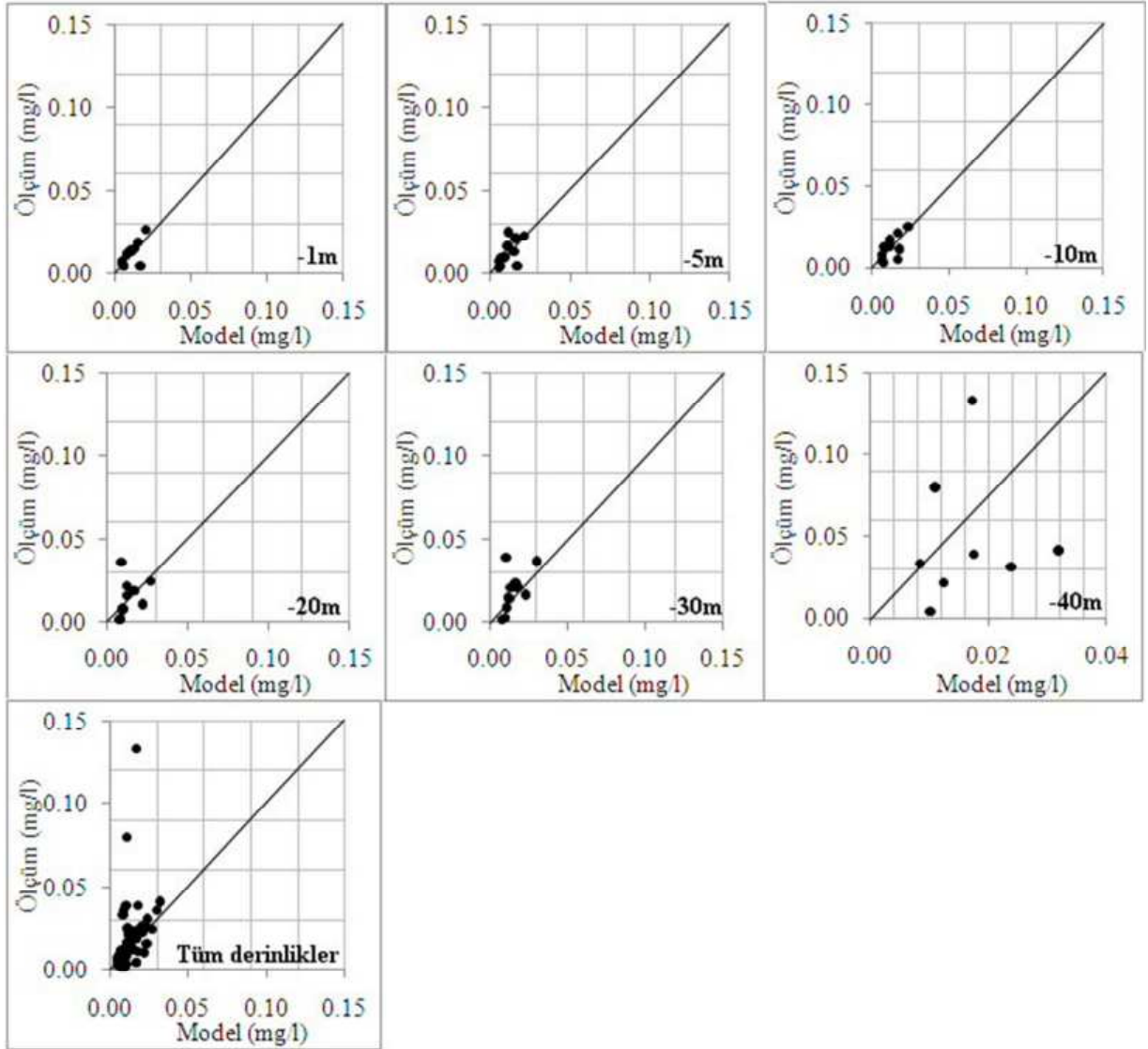
Şekil 6.114 Devamı.

Nitrit (NO_2)

Şekil 6.114 Devamı.

Nitrat (NO_3)

Şekil 6.114 Devamı.

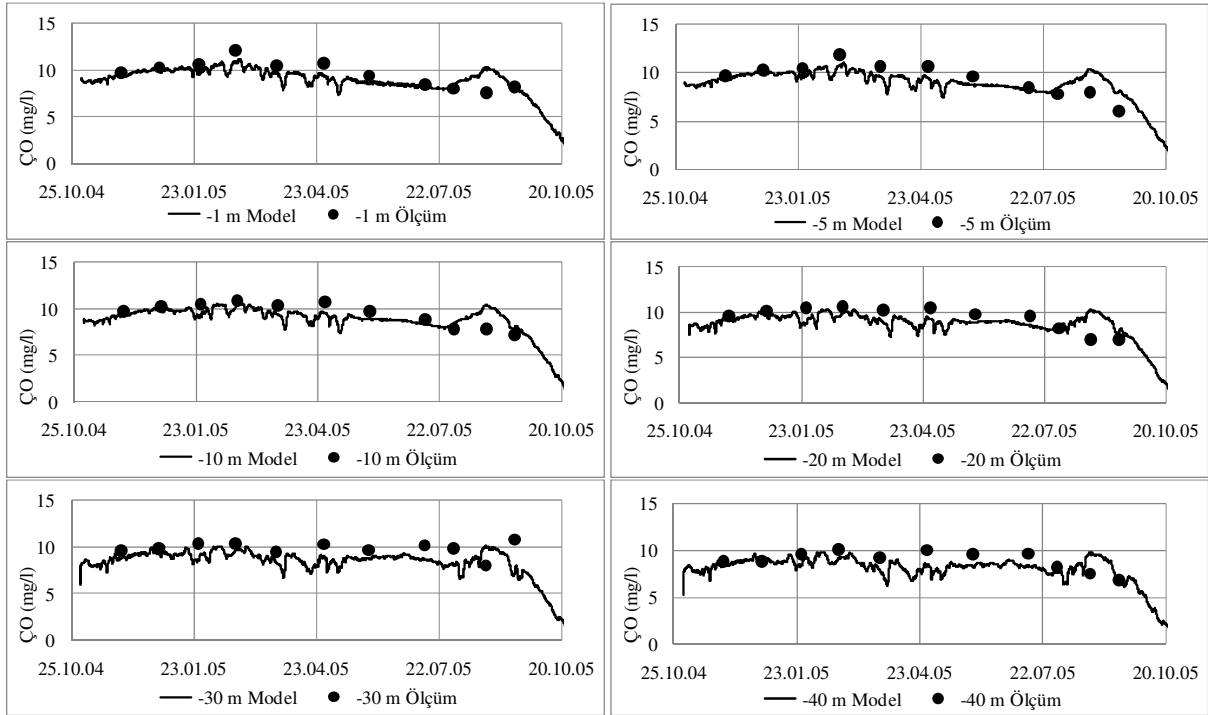
Fosfat (PO_4)

Şekil 6.114 Devamı.

Su kalitesi modeli kalibrasyon istasyonu olan B13 istasyonunda ikinci altı aylık veri seti kullanılarak doğrulanmıştır. Modelin doğrulama aşamasında sonuçlar kalibrasyon dönemi verileri ile birlikte tüm veri seti için değerlendirilmiştir.

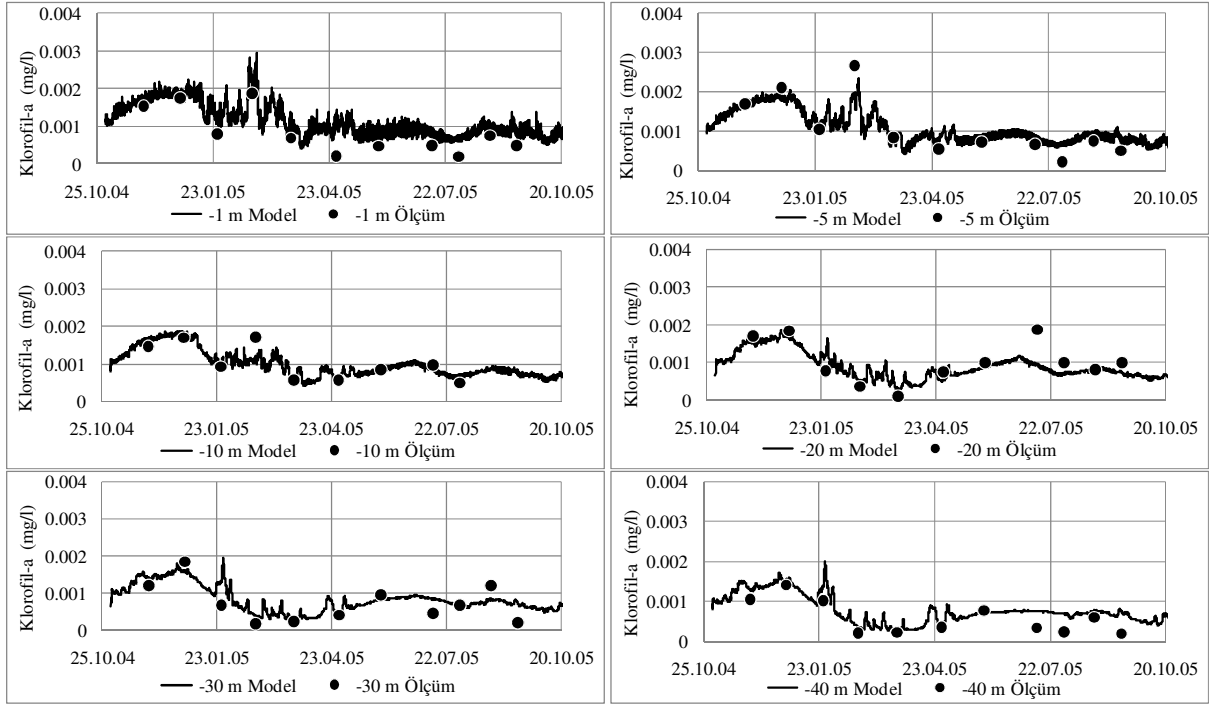
İstanbul Boğazı su kalitesi modelinin doğrulanmasına diğer su kalitesi izleme istasyonlarındaki ölçüm verilerinin model sonuçları ile karşılaştırılmasıyla devam edilmiştir. İstasyonlar kuzeyden güneye doğru tek ele alınarak değerlendirilmiştir. Modelin Karadeniz sınırına en yakın istasyon olan K0 istasyonunda 1 yıllık veri seti için model sonuçlarının ölçüm verileri ile karşılaştırılması yine zaman serileri ve düşey profiller kullanılarak yapılmıştır. Şekil 6.115-6.119'da K0 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile

ölçüm verilerinin bir arada olduğu zaman serileri farklı derinlikler (-1 m, -5 m, -10 m, -20 m, -30 m, -40 m ve tüm derinlikler) ve tüm su kalitesi durum değişkenleri (ÇO , Klorofil-a, NO_2 , NO_3 ve PO_4) için verilmiştir.



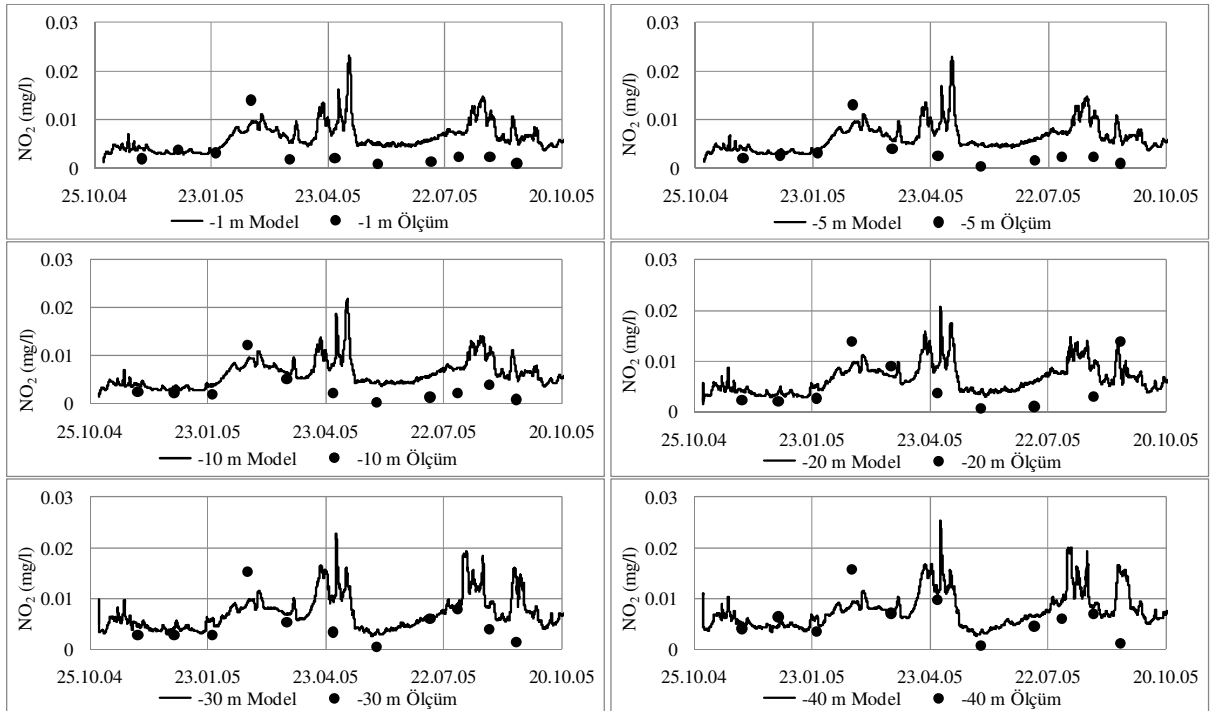
Şekil 6.115 K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.115'te İstanbul Boğazı'nın Karadeniz'e açıldığı yerde bulunan K0 istasyonunda ölçülen ÇO konsantrasyonlarının model sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir. Sonuçlar ölçümlerle tüm derinliklerde uyum göstermektedir. Yine K0 istasyonunda hem ölçülen hem de modellenen konsantrasyon değerleri B13 istasyonundakilerle benzerlik göstermektedir. Bu iki istasyonun birbirlerine olan yakınlığı ve bulundukları konumda sıcaklık, tuzluluk ve diğer fiziksel özelliklerin benzerliği bu durumu gerçekçi kılmaktadır.



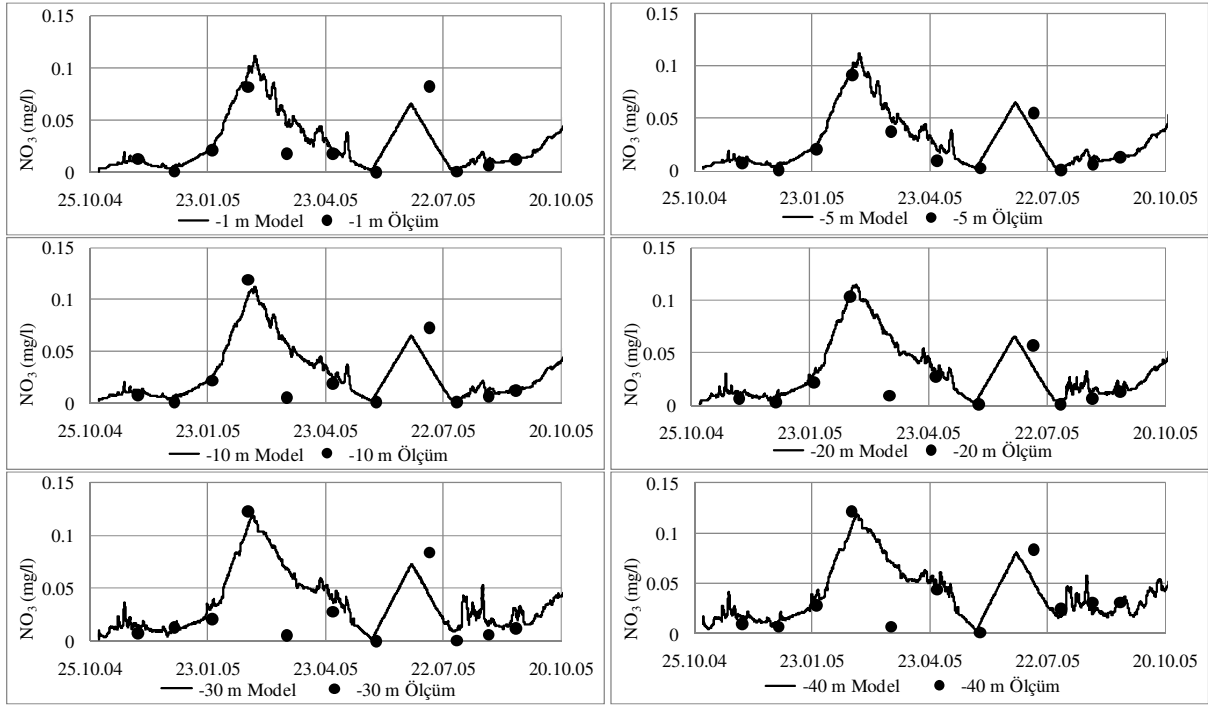
Şekil 6.116 K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.116’da K0 istasyonunda ölçülen klorofil-a konsantrasyonlarının model sonuçları ile karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Yine model doğrulaması amacıyla yapılan bu karşılaştırmada da model sonuçları ölçümlerle oldukça iyi bir uyum sergilemektedir.



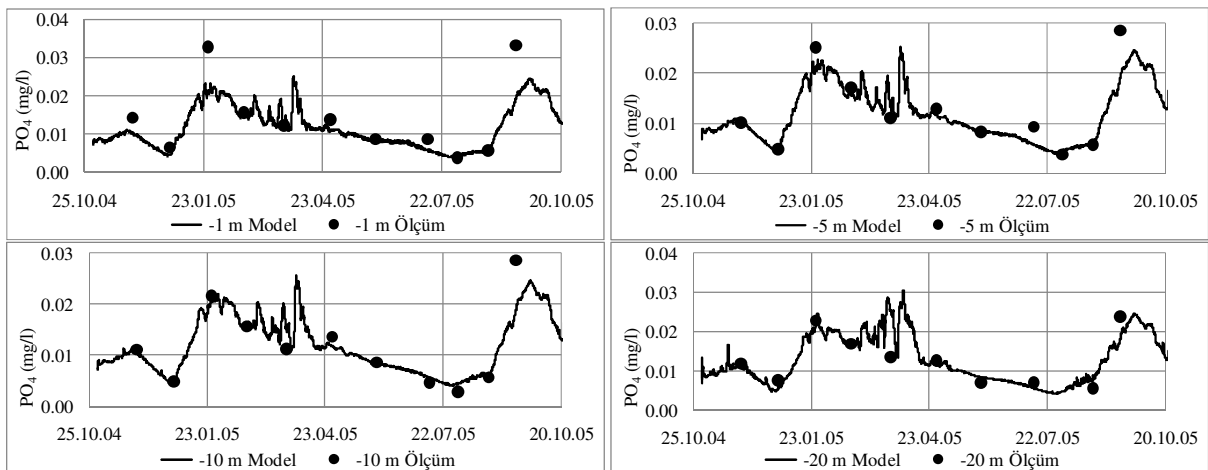
Şekil 6.117 K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO₂ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

K0 istasyonunda NO_2 konsantrasyonları için elde edilen karşılaştırma sonuçları ise B13 istasyonuna göre daha iyi bir benzeşimi göstermektedir. Ancak yine de yılın ikinci altı aylık dönemi için model tahminleri ölçüm sonuçlarına göre daha yüksektir (Şekil 6.117).

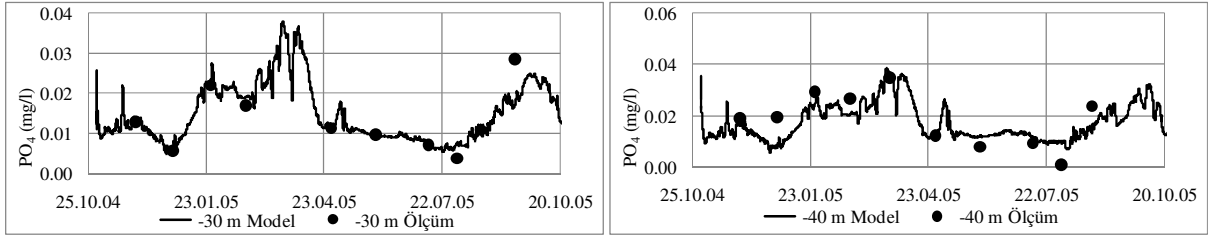


Şekil 6.118 K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.118’de gösterilen karşılaştırma sonuçları yine K0 istasyonunda NO_3 konsantrasyonlarının da model tarafından yüksek doğrulukla benzeştirildiğini göstermektedir.

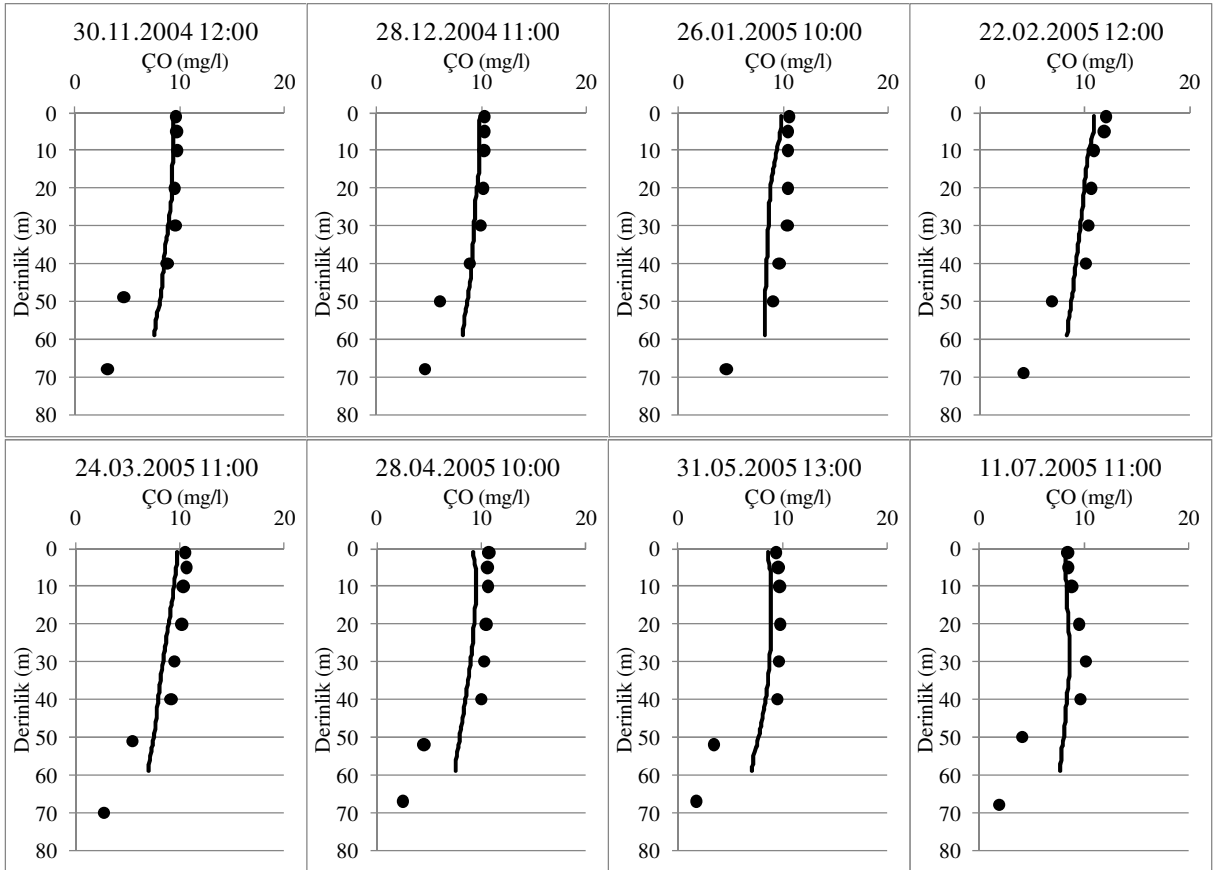


Şekil 6.119 K0 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

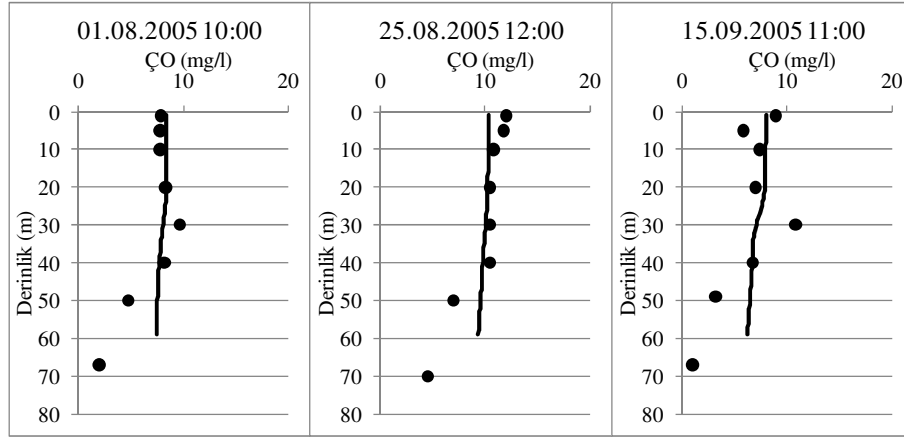


Şekil 6.119 Devamı.

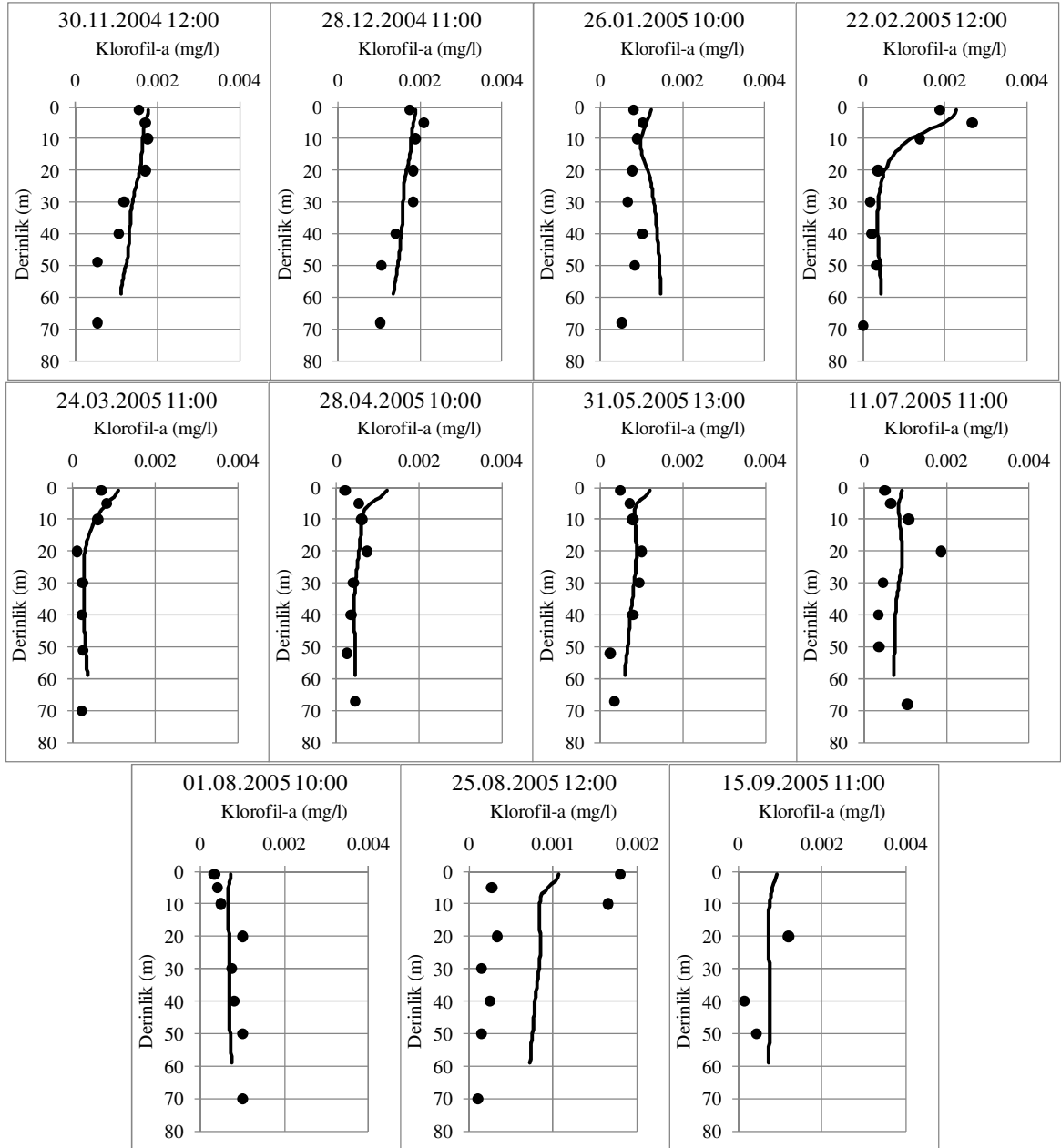
Son olarak PO_4 durum değişkeni için de ölçülen konsantrasyonlar ile sonuçları yüksek bir benzerlik sergilemektedir (Şekil 6.119). Dolayısıyla İstanbul Boğazı'nın Karadeniz ile birleştiği kesitteki bir istasyon olan K0 istasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları ile ölçüm verileri arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. K0 istasyonunda yine tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada görülebildiği düşey profiller Şekil 6.120-6.124'te gösterilmiştir.



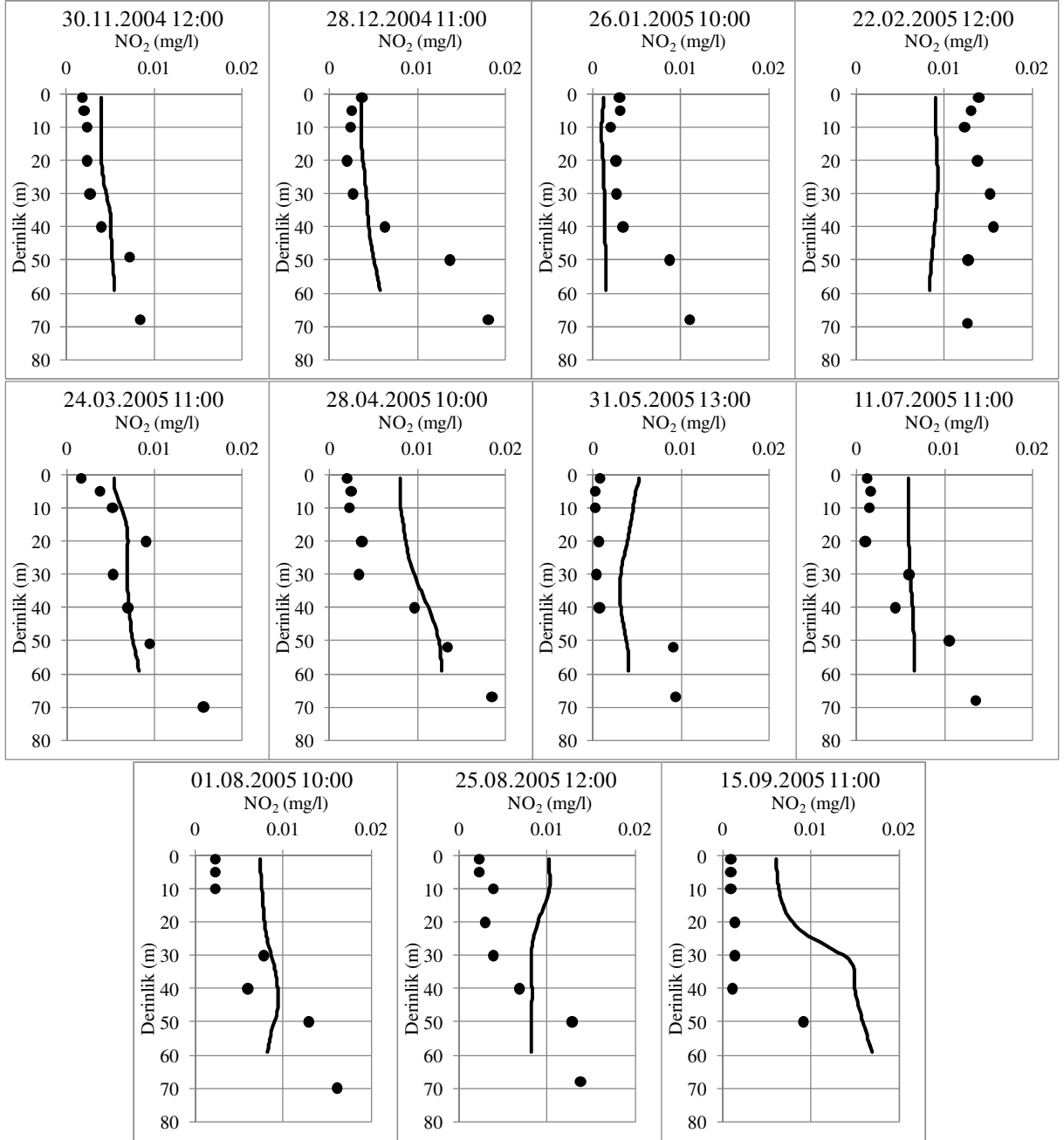
Şekil 6.120 K0 İstasyonunda ÇO veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



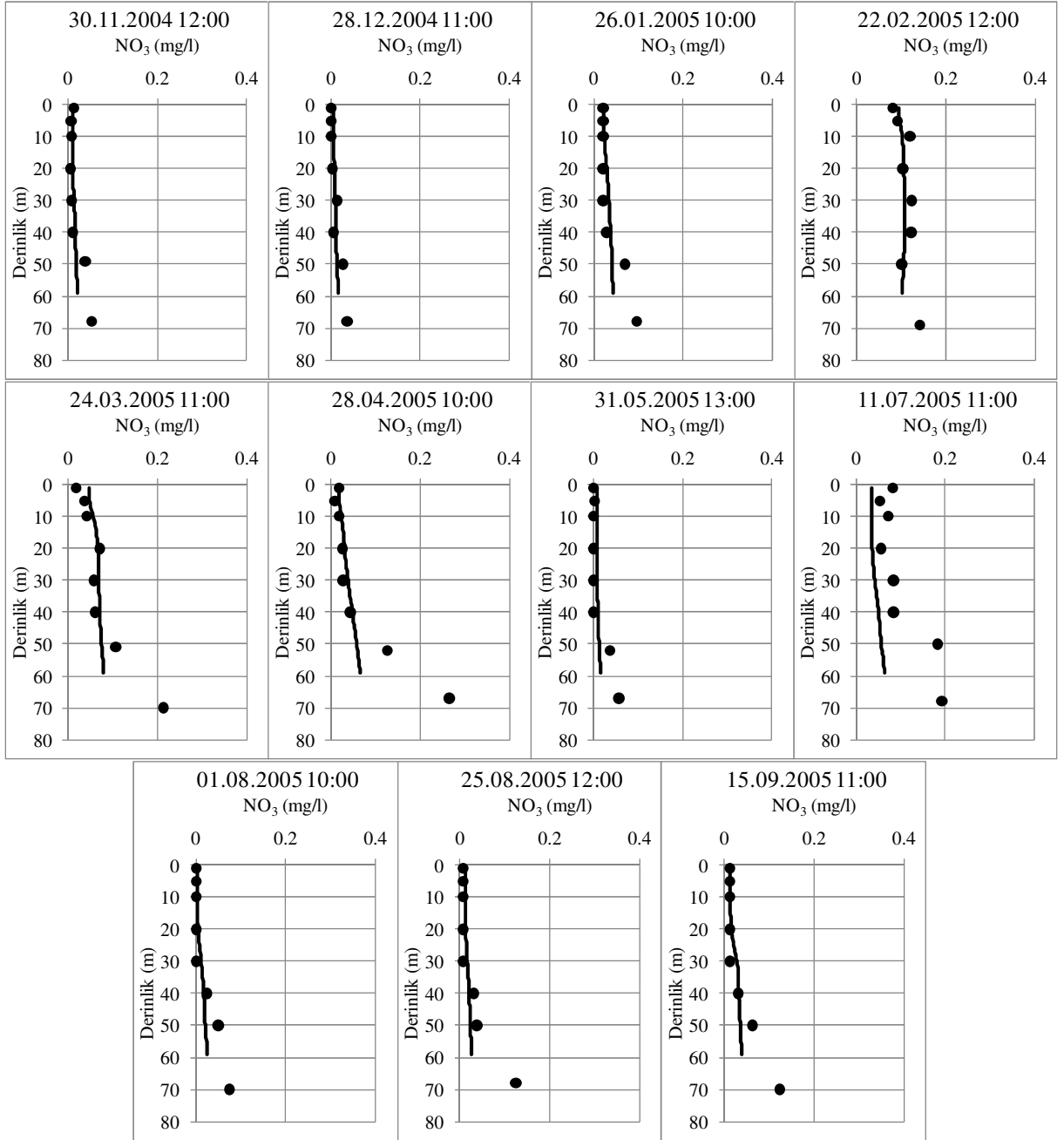
Şekil 6.120 Devamı.



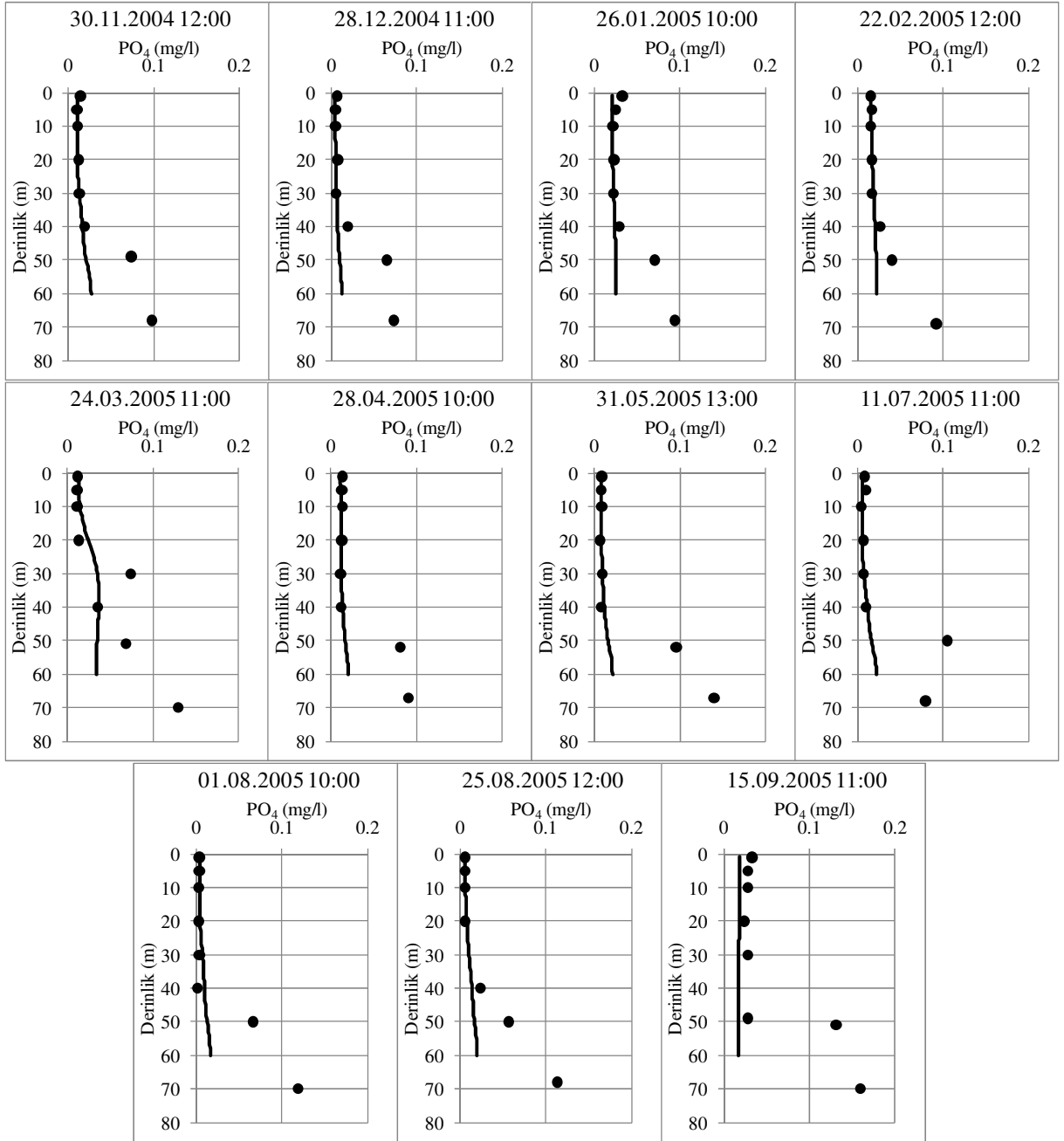
Şekil 6.121 K0 İstasyonunda Klorofil-a veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.122 K0 İstasyonunda NO_2 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.123 K0 İstasyonunda NO_3 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.124 K0 İstasyonunda PO_4 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

K0 istasyonu için Şekil 6.120-6.124'te verilen düşey profiller de model sonuçları ile ölçüm verileri arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ancak bazı durum değişkenleri için tabana yakın derinliklerde model sonuçlarının ölçümlerden saptığı görülmektedir. Yine K0 istasyonu için de sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. Çizelge 6.24'te K0 istasyonunda tüm veri seti için R^2 , OKHK ve OKHK (%) ölçütleri ile model sonuçları ile ölçümler arasındaki bağıntıyı tanımlayan denklemler verilmiştir. Ölçütlerin hesaplanmasına esas teşkil eden verilerin saçılım diyagramı üzerinde

sunumu ise Şekil 6.125'te gösterilmiştir.

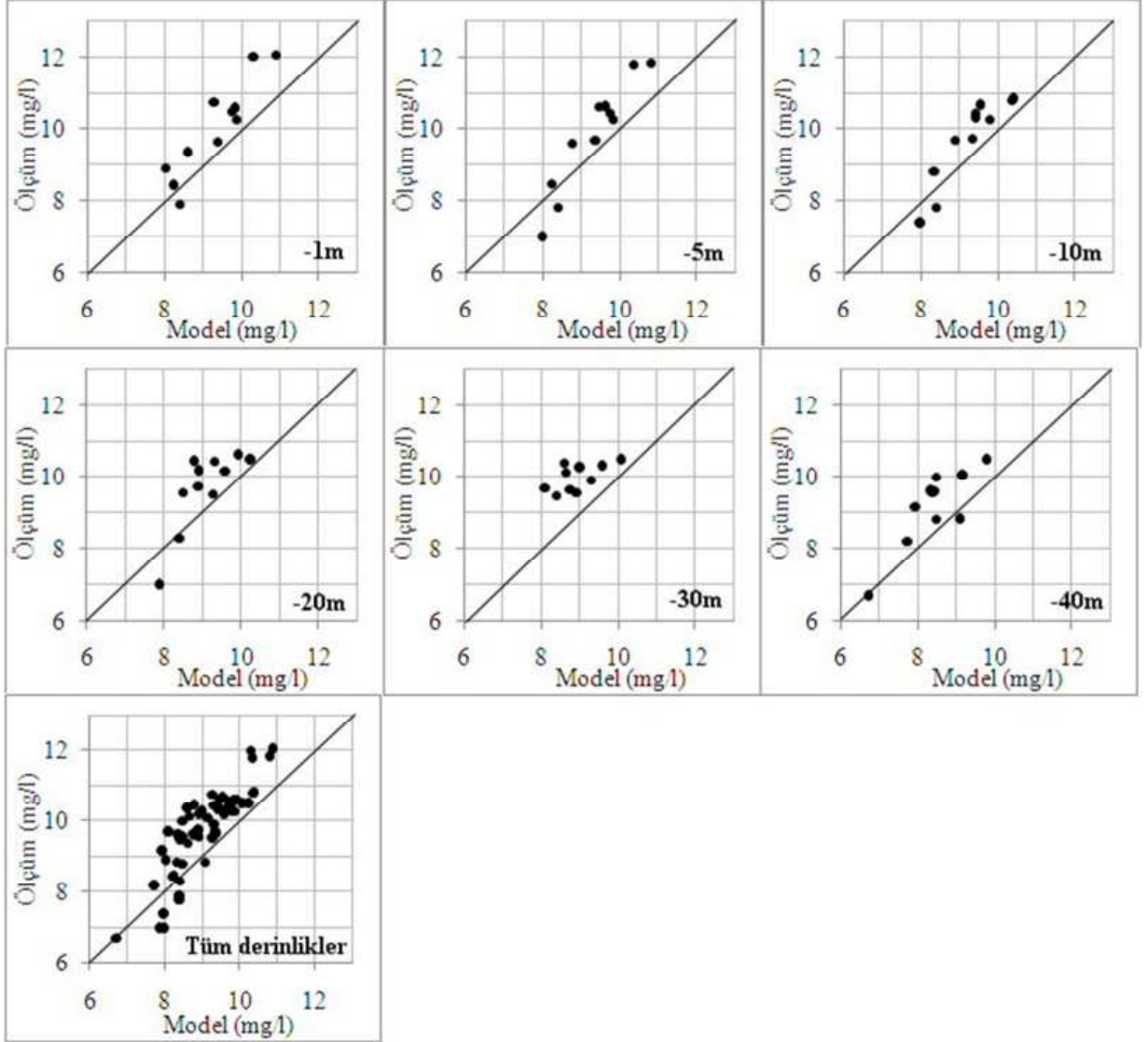
Çizelge 6.24 K0 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.

Durum Değişkeni	ÇO				Klorofil-a			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.85	0.92	22	1.35x-2.50	0.65	0.0005	30	1.03x-0.00056
-5 m	0.91	0.87	18	1.65x-5.59	0.78	0.00033	14	1x10x-0.00073
-10 m	0.83	0.71	21	1.37x-2.97	0.92	0.00027	19	1.57x0.00007
-20 m	0.62	0.92	25	1.27x-1.79	0.73	0.0004	23	1.05x+0.00004
-30 m	0.36	1.15	110	0.39x+6.48	0.56	0.00034	20	1.07x0.00015
-40 m	0.70	0.96	25	1.10x-0.03	0.66	0.00032	25	0.97x0.00011
Tüm Derinlikler	0.72	0.93	22	1.19x-1.04	0.66	0.00037	14	1.03x-0.00014
Durum Değişkeni	NO ₂				NO ₃			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.10	0.00461	35	0.46x+0.0011	0.64	0.01819	22	0.91x+0.0006
-5 m	0.12	0.00443	35	0.44x+0.0005	0.93	0.00801	9	1.02x-0.0035
-10 m	0.22	0.00413	34	0.57x-0.0003	0.88	0.01360	12	1.20x-0.0049
-20 m	0.23	0.00396	30	0.73x-0.0005	0.95	0.00806	8	1.08x-0.0045
-30 m	0.07	0.00490	33	0.32x+0.00025	0.84	0.01629	13	1.19x-0.0089
-40 m	0.05	0.00459	31	0.24x+0.0042	0.88	0.01371	11	1.14x-0.0036
Tüm Derinlikler	0.13	0.00451	29	0.46x+0.0011	0.85	0.01331	11	1.10x-0.0042
Durum Değişkeni	PO ₄							
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)				
-1 m	0.89	0.00408	14	1.63x-0.00334				
-5 m	0.90	0.00337	14	1.31x-0.00193				
-10 m	0.86	0.00318	12	1.26-0.00233				
-20 m	0.68	0.00393	19	0.82x+0.00192				
-30 m	0.86	0.01228	18	2.15x-0.01284				
-40 m	0.63	0.00700	21	0.99+0.0021				
Tüm Derinlikler	0.73	0.00643	9	1.38x-0.00291				

Çizelge 6.24'ten açıkça görüldüğü gibi bu istasyonda model doğruluğu B13 istasyonuna göre daha yüksektir. Korelasyon katsayıları NO₂ durum değişkeni dışında ortalama 0.80 doğruluğa işaret ederken hatalar ise %25'in altında kalmıştır. Oldukça karmaşık bir modelleme alanı olan su kalitesi modellemesi açısından sonuçlar oldukça iyidir. NO₂ durum değişkeni için ise

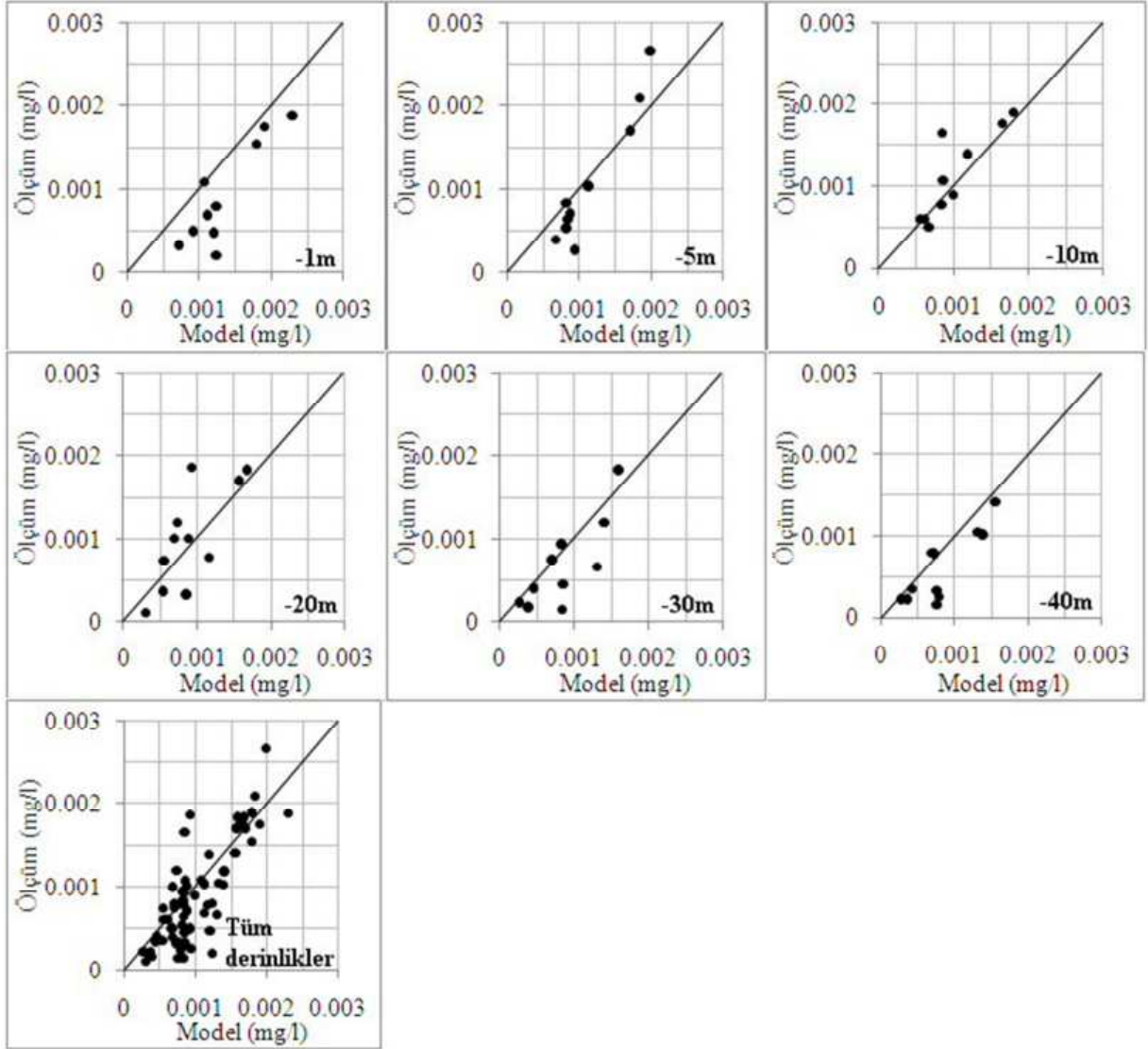
determinasyon katsayıları düşük olmakla birlikte hem zaman serileri hem profil serileri model sonuçları ile ölçümler arasındaki benzerliği ortaya koymaktadır. Yine bağıl hata değerleri de bu tip modeller için kabul edilebilir boyuttadır. Bu parametre için % hata değeri %35'in altında kamıştır.

Çözünmüş Oksijen (ÇO)

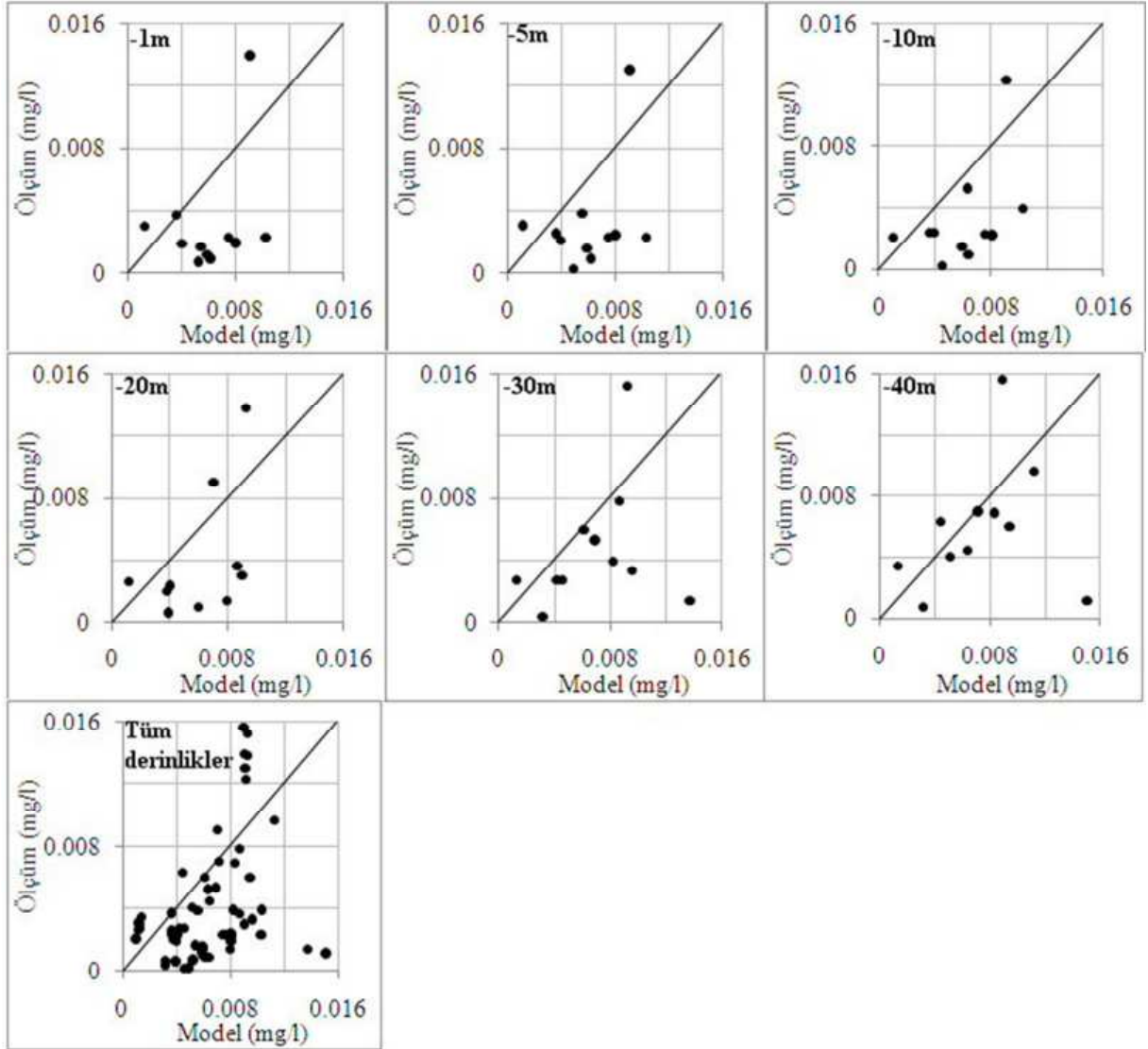


Şekil 6.125 K0 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.

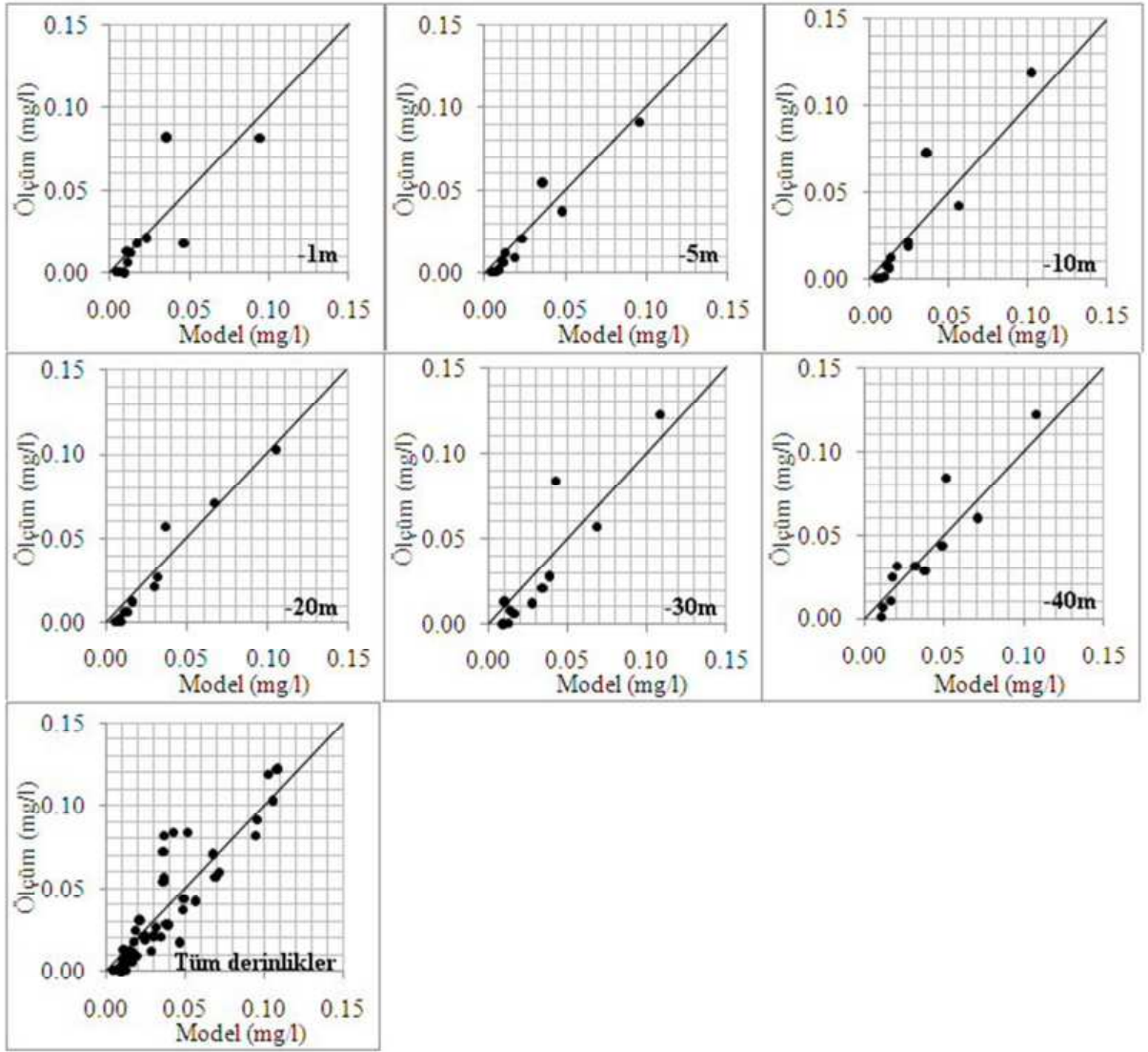
Klorofil-a



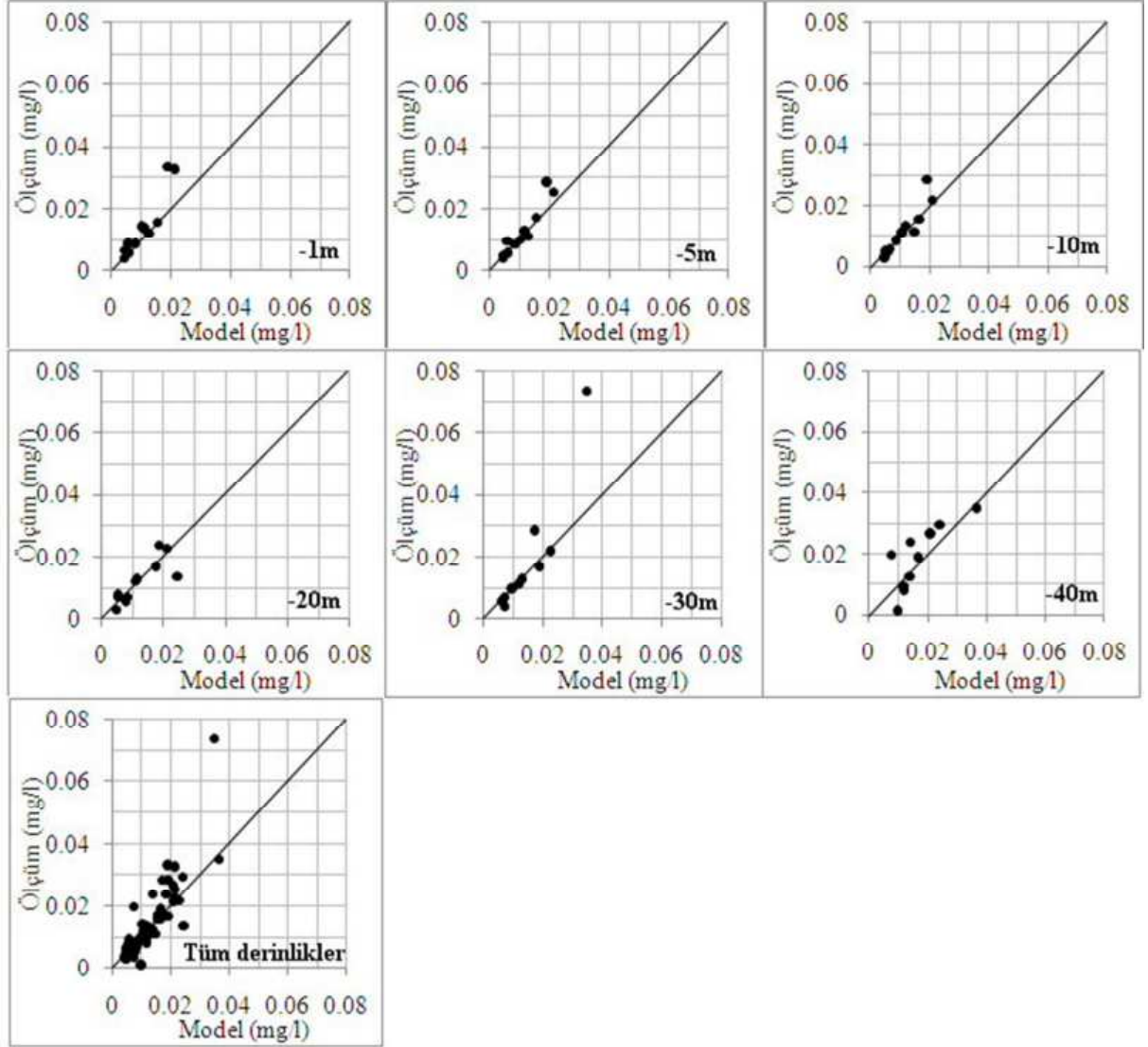
Şekil 6.125 Devamı.

Nitrit (NO_2)

Şekil 6.125 Devamı.

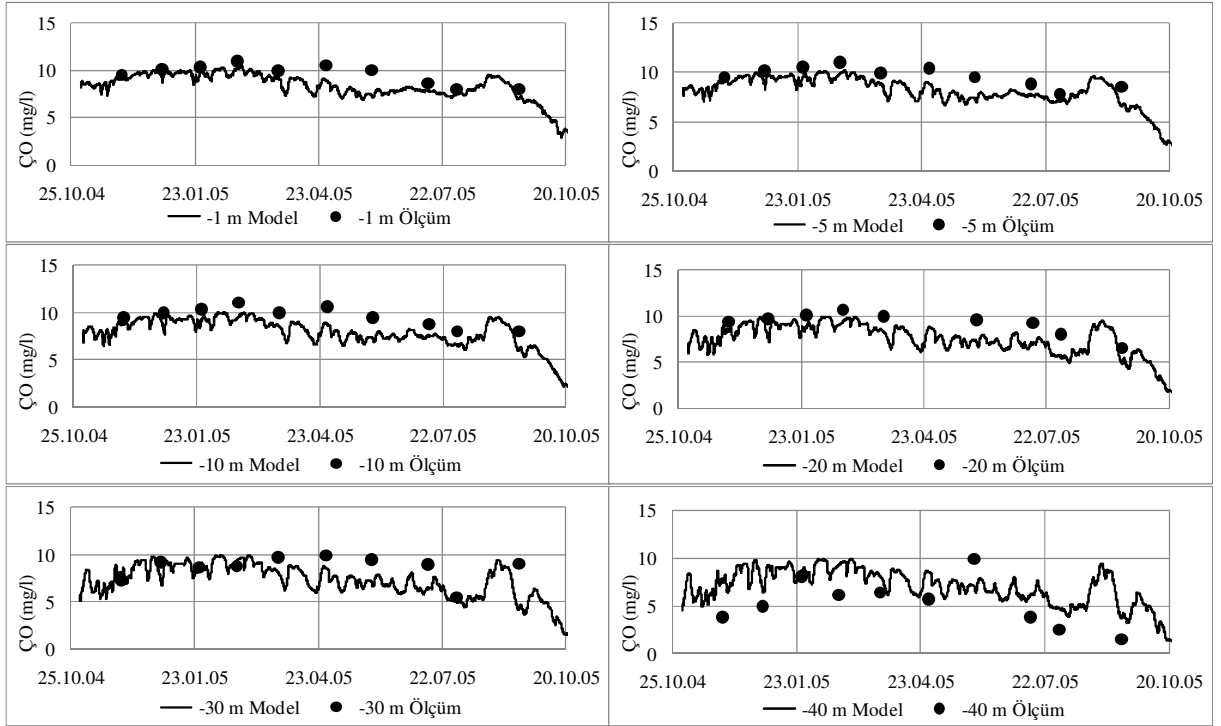
Nitrat (NO_3)

Şekil 6.125 Devamı.

Fosfat (PO_4)

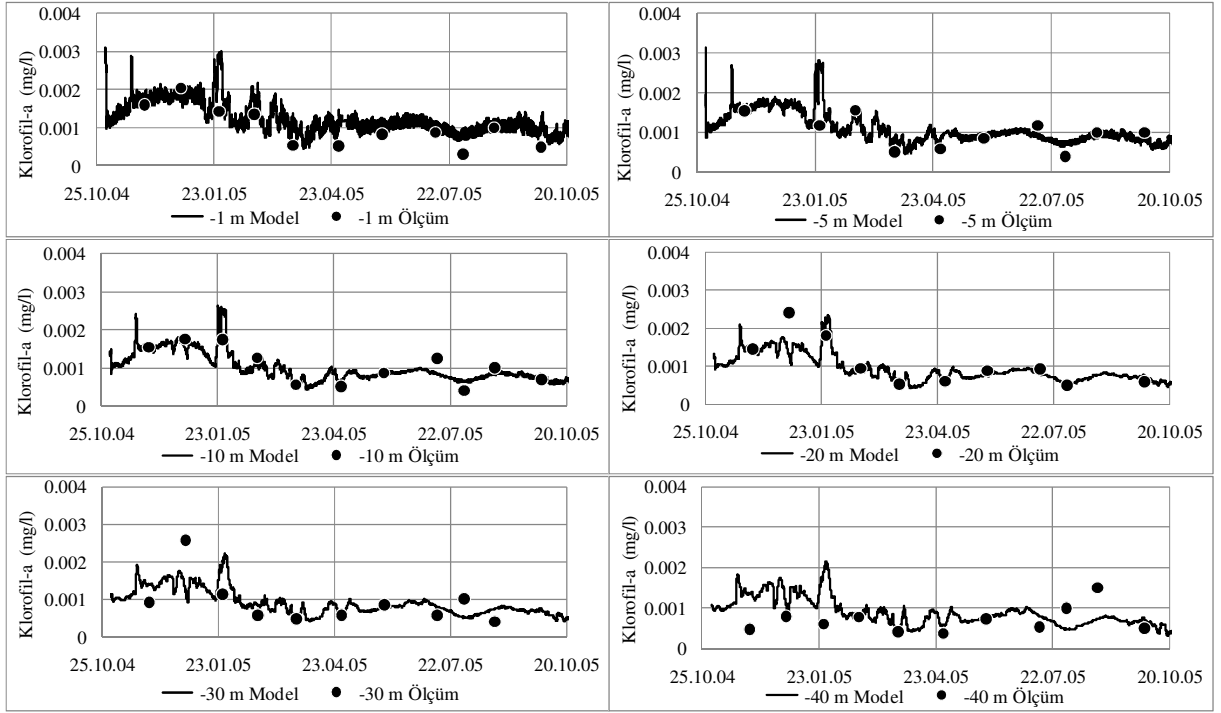
Şekil 6.125 Devamı.

B13 ve K0 istasyonunda model doğruluğunun test edilmesinden sonra Karadeniz sınırında güneye doğru üçüncü istasyon olan B7 istasyonunda aynı testler tekrarlanmıştır. Şekil 6.126-6.130'da B7 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada olduğu zaman serileri farklı derinlikler (-1 m, -5 m, -10 m, -20 m, -30 m, -40 m ve tüm derinlikler) ve tüm su kalitesi durum değişkenleri (ÇO , Klorofil-a, NO_2 , NO_3 ve PO_4) için verilmiştir.



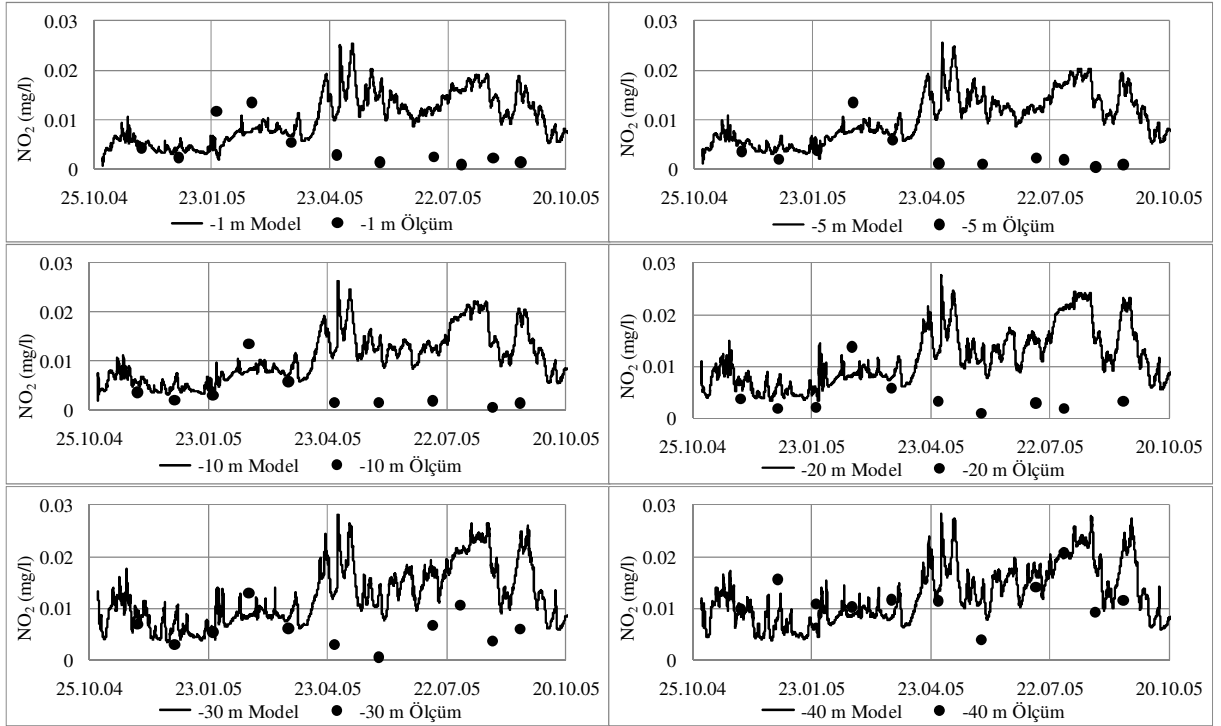
Şekil 6.126 B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Boğaz'ın ortasında yeralan B7 istasyonunda ölçümlerin model sonuçları ile karşılaştırılmasına bakıldığında yine model ile ölçümler arasında oldukça iyi bir uyum gözlenmektedir (Şekil 6.126). Ancak bu istasyonda yüzeyden 40 m derinlikte model sonuçları ile ölçümler arasındaki uyumun bir miktar bozulduğu görülmektedir. Bu derinlikte ölçüm sonuçlarının diğer derinliklere göre daha düzensiz bir yapı sergilediği modelin ise diğer derinliklere benzer bir değişim izlediği görülmektedir. Bu durum model sonuçları ile ölçümler arasındaki sapmanın İstanbul Boğazı ara tabakasında oluşan herhangi bir çalkantının hidrodinamik modelde yakalanamaması ile açıklanabilir. -40 m derinlik dışında diğer tüm derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının hem ölçümlerle hem de model sonuçları ile ortaya konan değişimi K0 ve B13 istasyonları ile genel bir benzerlik göstermektedir. ÇO konsantrasyonlarının tüm derinliklerde Temmuz ayından itibaren düştüğü, -40 m derinlikte ise Eylül ayında 2 mg/l'nin altına düştüğü görülmektedir. ÇO konsantrasyonlarındaki bu düşüş eğilimi de model tarafından başarı ile benzeştirilmiştir.



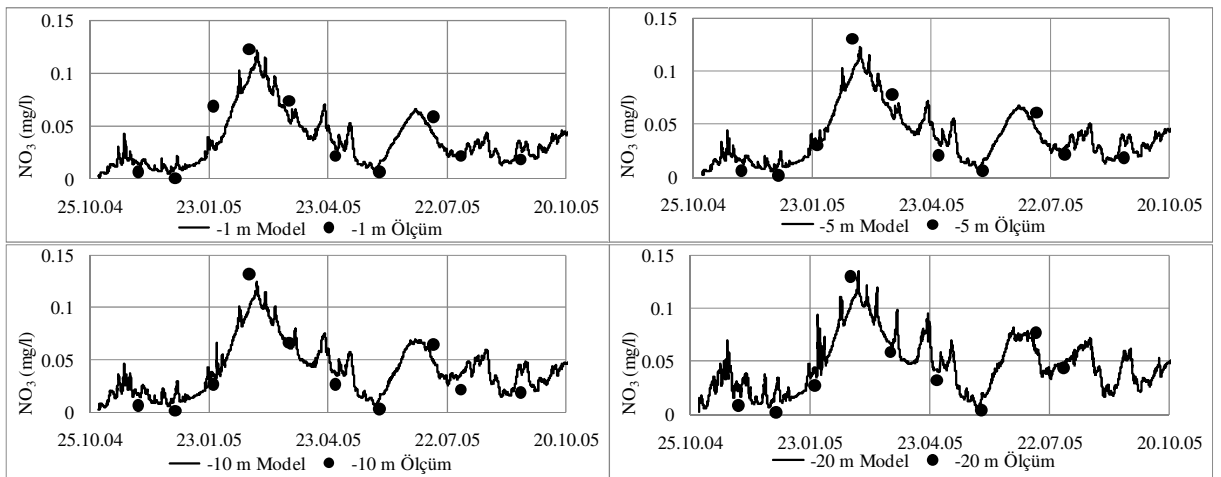
Şekil 6.127 B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.127’de ise yine B7 istasyonunda klorofil-a değişkeni için model sonuçları ile ölçümlerin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Sonuçlar ile ölçümler arasındaki uyum model doğruluğunu destekler niteliktedir. Yine -40 m derinlikte ölçüm verilerinde ÇO konsantrasyonlarındakine benzer bir saçılım görülmektedir. Oysa model sonuçları bu saçılımı desteklemekten uzaktır. Bu duruma yine ÇO konsantrasyonlarının değerlendirilmesi aşamasında yapılan değerlendirme ile hidrodinamik modelin yakalayamadığı bir çalkantının neden olduğu düşünülmektedir. B7 istasyonunda da hem ölçümler hem de model sonuçları diğer istasyonlardaki konsantrasyon dağılımlarına benzer bir yapı sergilemektedir.

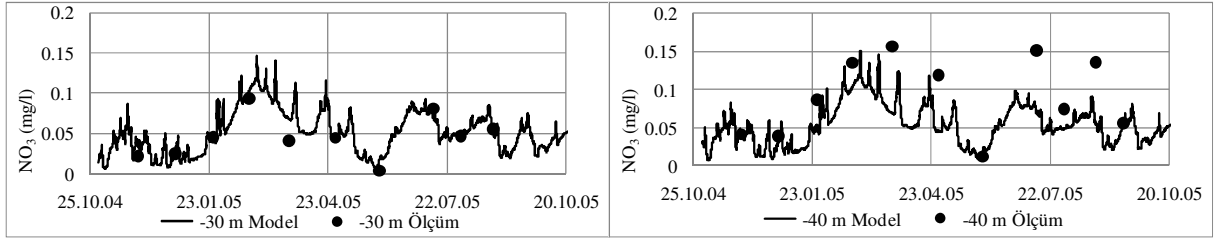


Şekil 6.128 B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_2 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Şekil 6.128'e bakıldığında NO_2 konsantrasyonlarına ait ölçüm ve model sonuçlarının zamansal değişimlerinde şu ana kadar gözlenen sapmanın B7 istasyonunda da ortaya çıktığı görülmektedir. Yine model kalibrasyon dönemi için ölçüm sonuçlarını benzeştirirken, doğrulama dönemi için ölçümlere göre oldukça yüksek değerler hesaplamasına karşın -40 m derinlikte model doğruluğu en yüksek olmuştur.

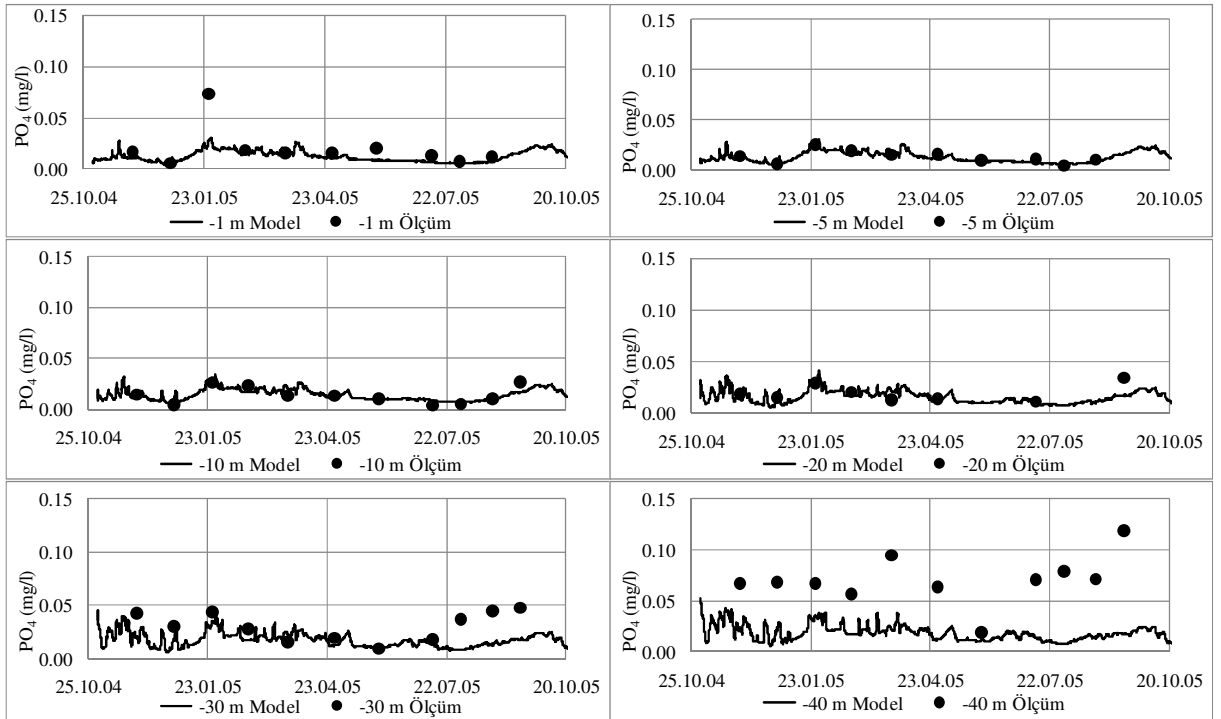


Şekil 6.129 B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.129 Devamı.

B7 istasyonu için de NO_3 konsantrasyonları oldukça iyi bir yaklaşımla benzeştirilmiştir (Şekil 6.129). Yine NO_3 konsantrasyonlarında diğer istasyonlardakine benzer bir dağılımın Boğaz'ın iç kesimlerinde yer alan B7 istasyonunda da geçerliliğini koruduğu görülmektedir.

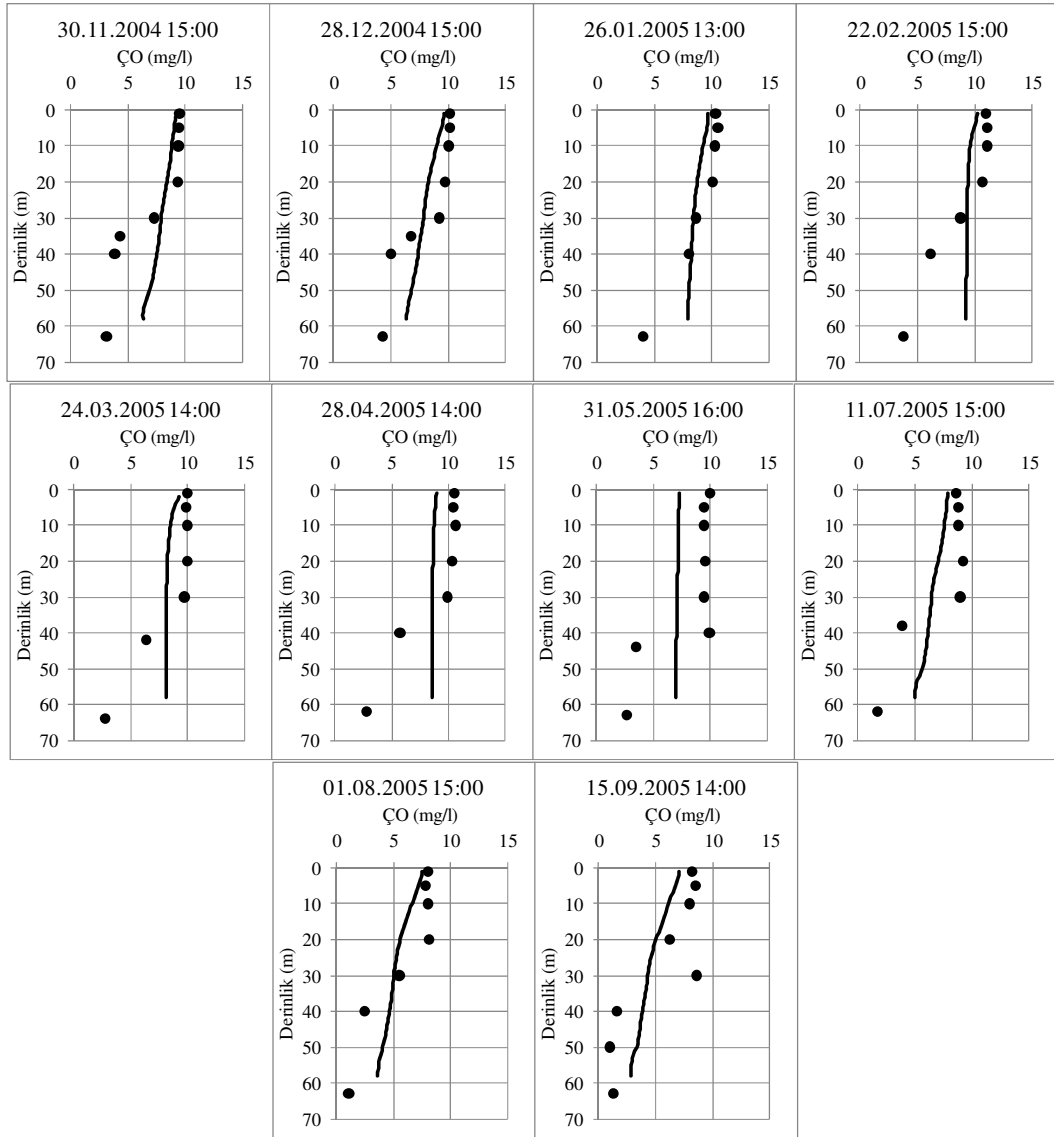


Şekil 6.130 B7 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

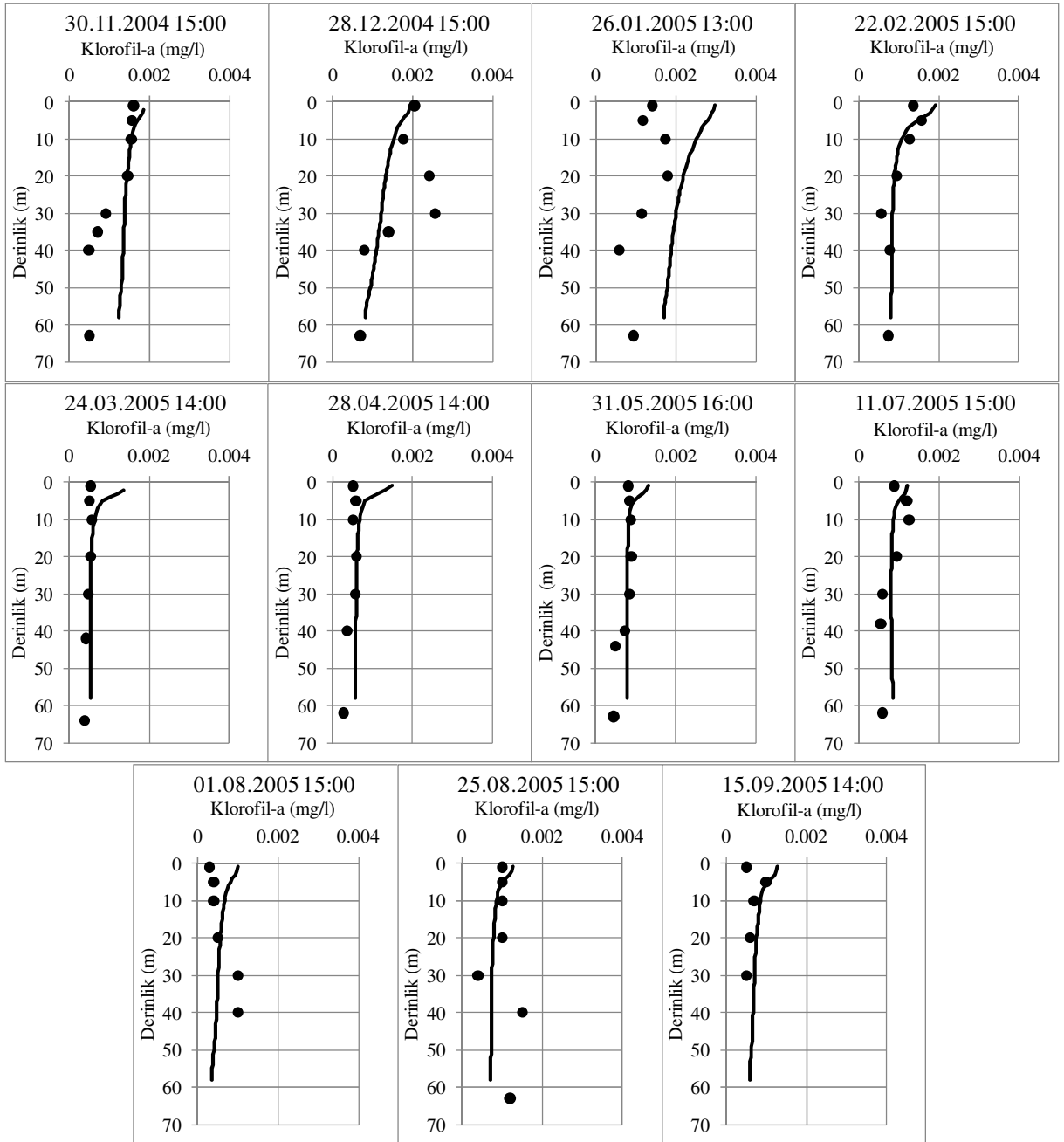
B7 istasyonunda son olarak modellenen PO_4 konsantrasyonlarının ölçümlerle karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Su kalitesi modeli bu istasyonda da PO_4 konsantrasyonlarını başarı ile benzeştirmiştir. Ancak yine -40 m derinlikte ölçülen PO_4 konsantrasyonları model tarafından benzeştirilememiştir. Bu derinlikteki dağılımlara bakıldığında çok yüksek konsantrasyonların ölçüldüğü görülmektedir. Ancak model böyle bir eğilim yakalamamıştır. Burada PO_4 konsantrasyonlarının böylesine çarpıcı bir şekilde artmasına neden olan faktörün bilinmesi gerekmektedir. Bu faktörün bu çalışmada dikkate

alınanlar dışında sıra dışı bir etki olduğu düşünülmektedir. Yine yüzeyden -1m derinlikte Ocak ayında yüksek bir PO_4 konsantrasyonunun kaydedildiği görülmektedir. Ancak yıl boyunca böyle bir verinin tekrar kaydedilmediği de görülmektedir. Dolayısıyla bu durumun da sıra dışı anlık bir etki ile oluştuğu düşünülmektedir.

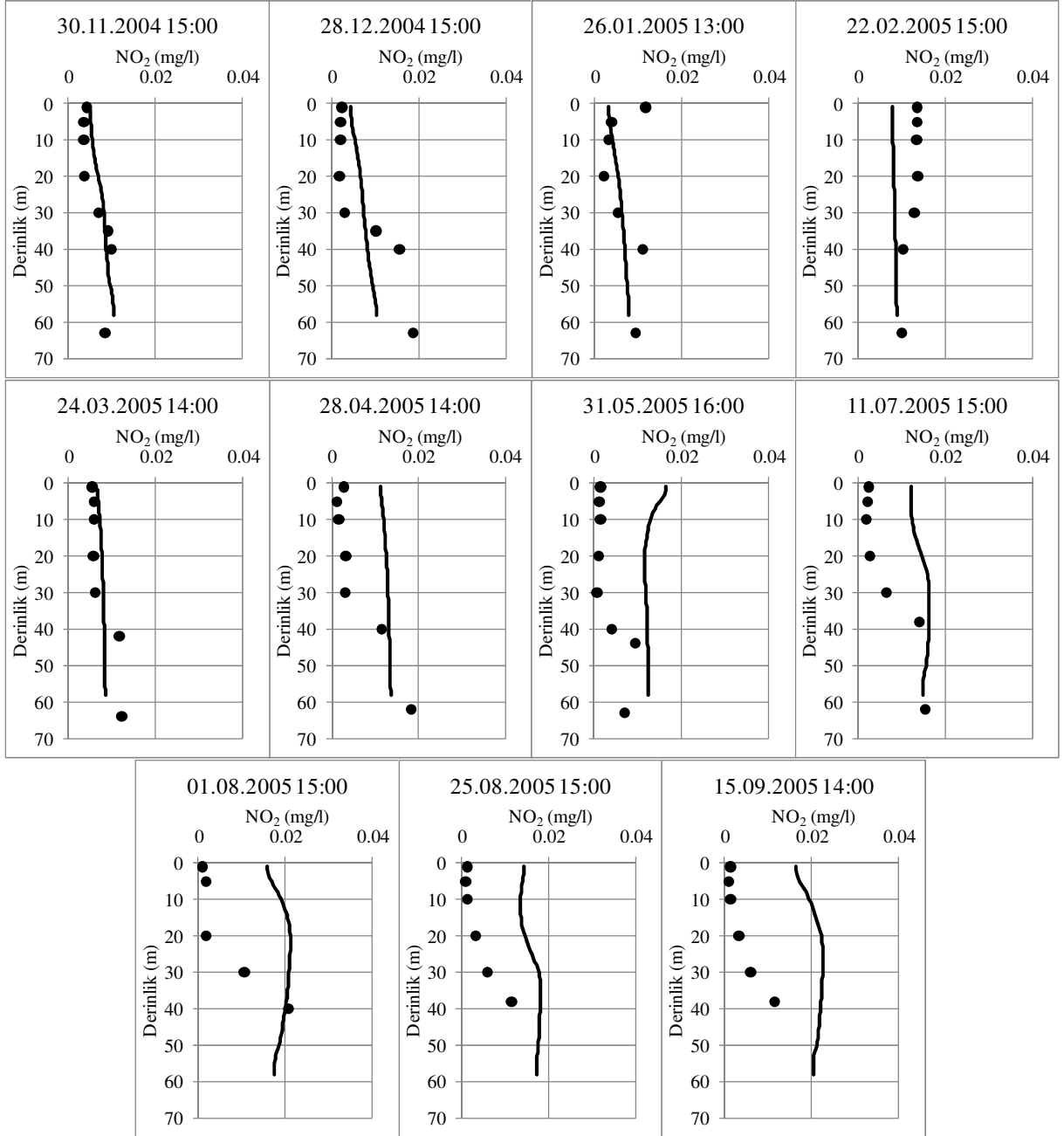
Şekil 6.126-6.130'dan K0 ve B13 istasyonlarında olduğu gibi B7 istasyonunda da model sonuçlarının ölçümlerle oldukça iyi bir uyum sergilediği görülmektedir. B7 istasyonu Boğaz'ın orta kısmında yer almaktadır. Dolayısıyla üretilen su kalitesi modelinin bu bölgedeki geçerliliğinin test edilmesi açısından önemli bir istasyondur. Ancak model doğruluğunun tam olarak test edilebilmesi için düşey profillere de bakılmalıdır. B7 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada görülebildiği düşey profiller Şekil 6.131-6.135'te gösterilmiştir.



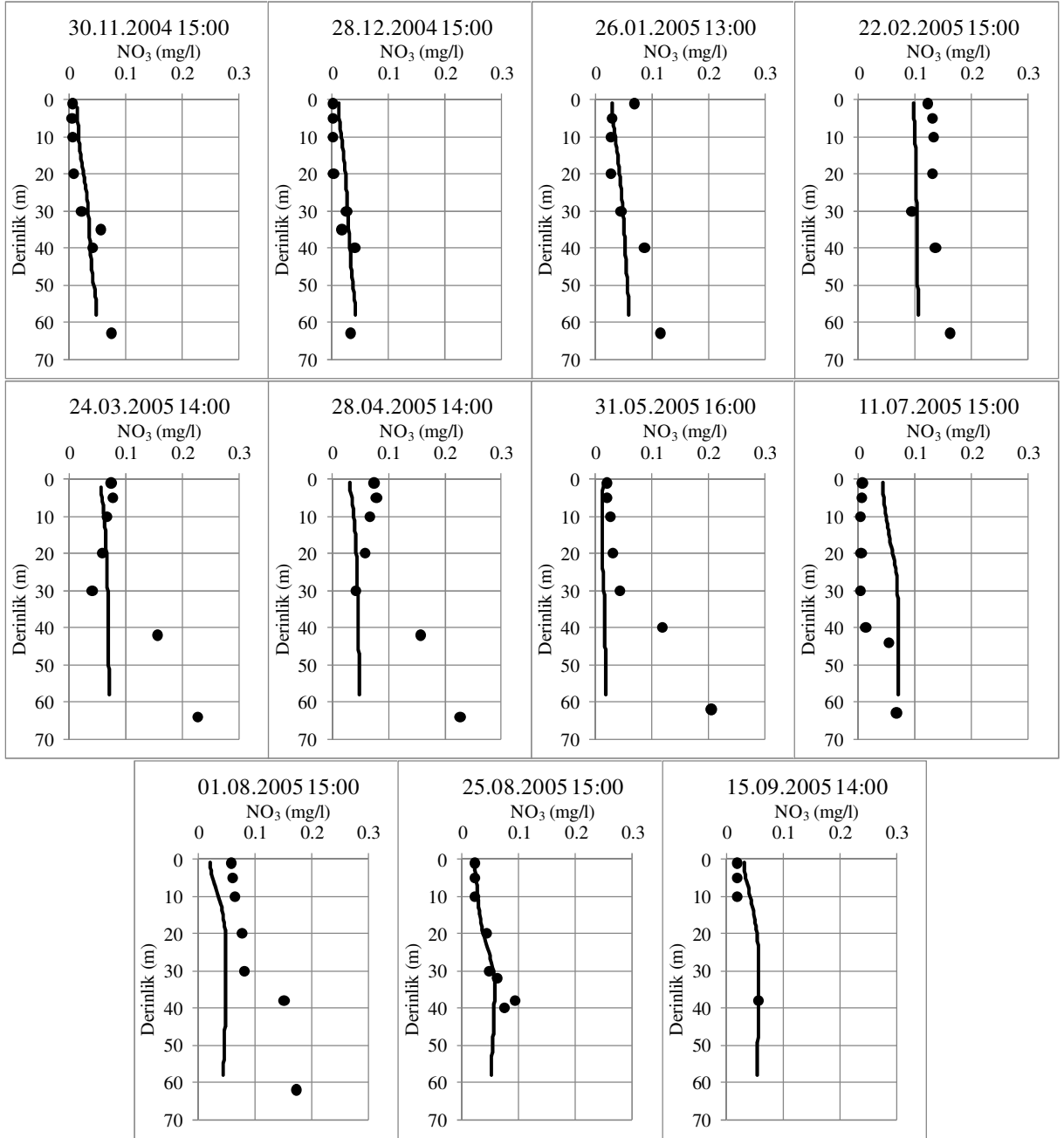
Şekil 6.131 B7 İstasyonunda ÇO veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



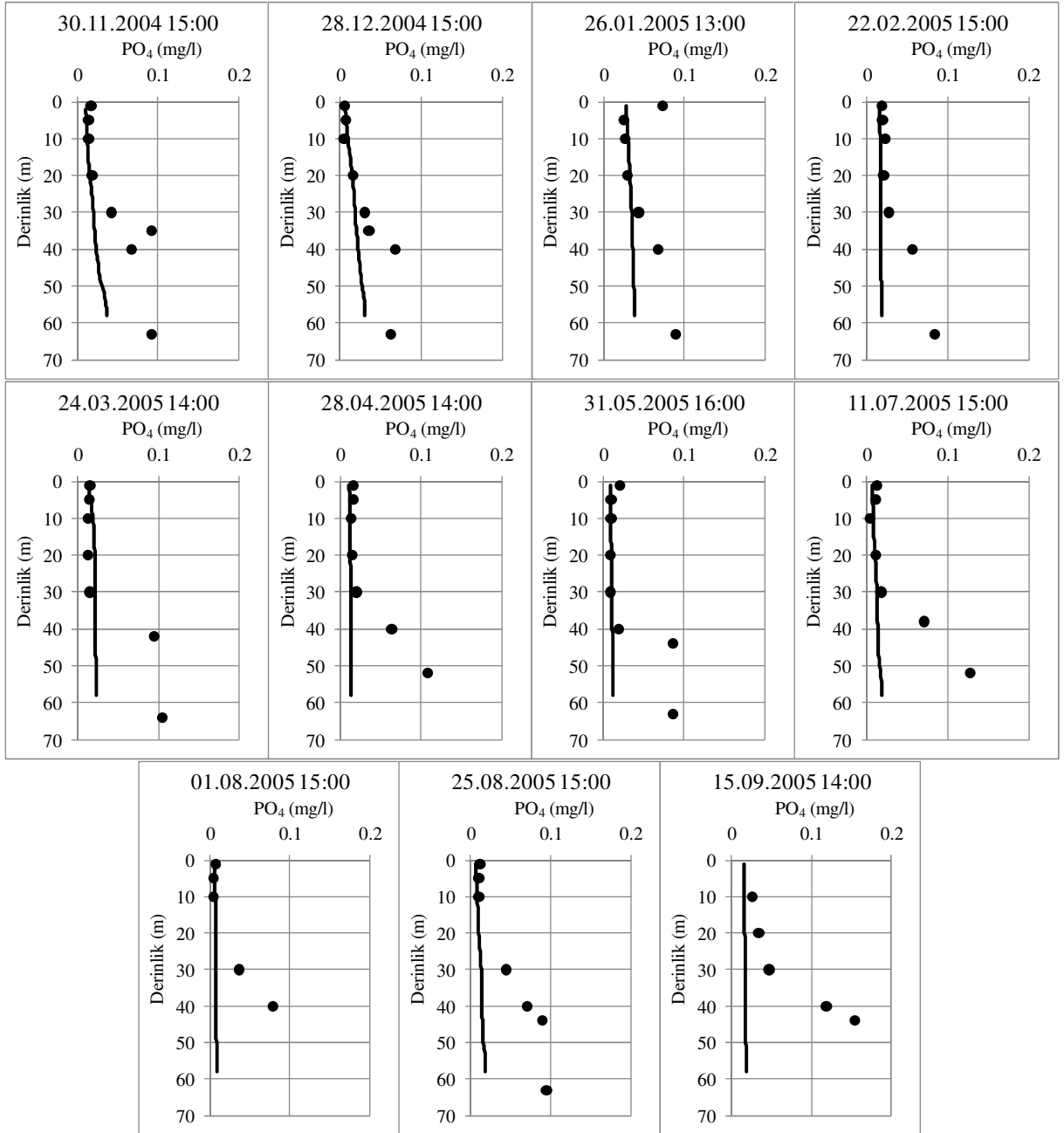
Şekil 6.132 B7 İstasyonunda Klorofil-a veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.133 B7 İstasyonunda NO₂ veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.134 B7 İstasyonunda NO_3 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.135 B7 İstasyonunda PO_4 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

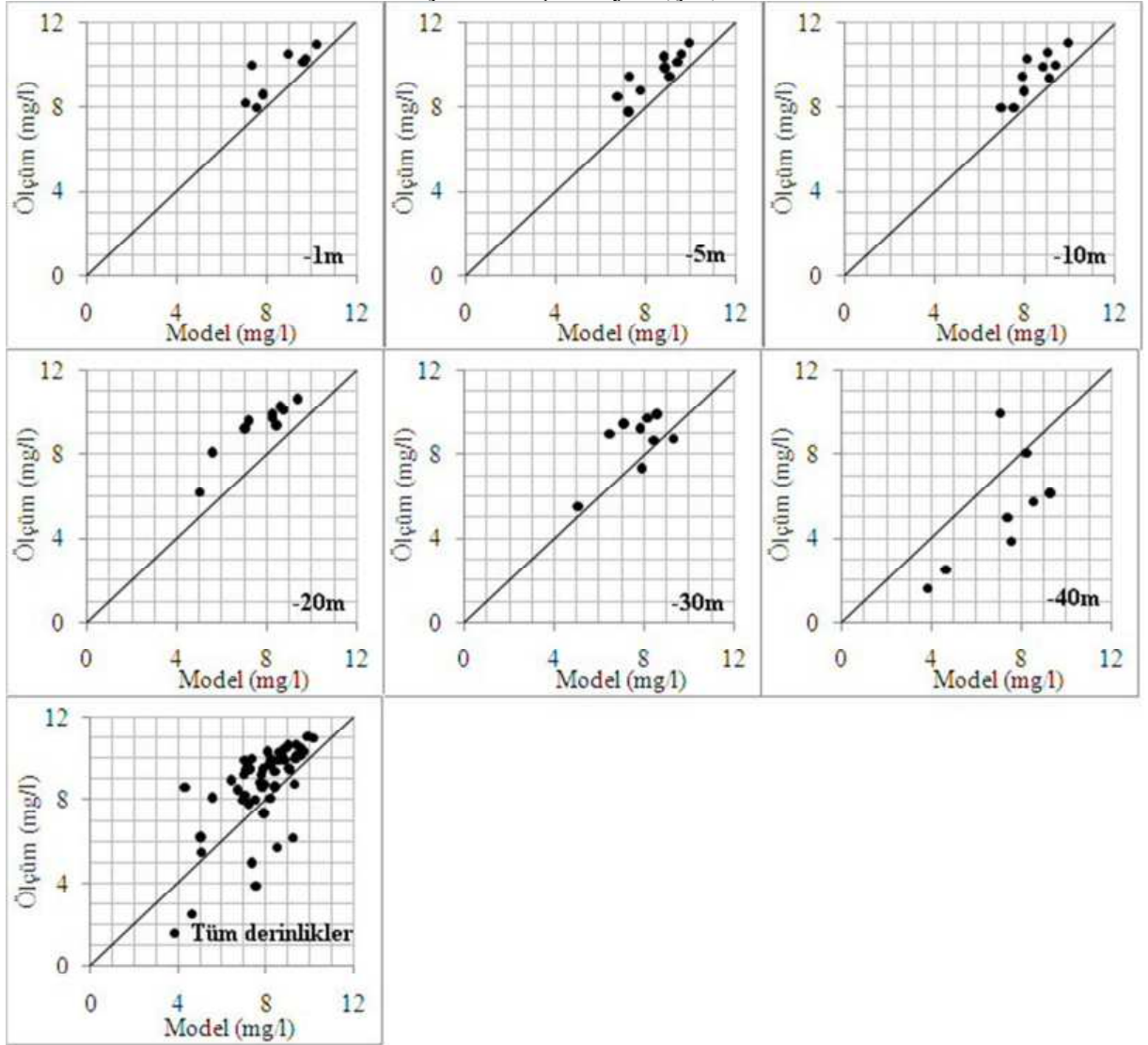
B7 istasyonu için Şekil 6.131-6.135'te verilen düşey profiller de model sonuçları ile ölçüm verileri arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ancak bazı durum değişkenleri için tabana yakın derinliklerde model sonuçlarının ölçümlerden saptığı görülmektedir. $ÇO$, Klorofil-a ve nütrient konsantrasyonlarının ölçümlerde ortaya konulan tabakalı yapısı model tarafından benzeştirilememiştir. Burada en önemli faktör hidrodinamik modelin yüksek difüzyona bağlı olarak Boğaz model alanı içerisindeki güçlü tabakalanmayı yeterince benzeştirememesidir. B7 istasyonu için R^2 , OKHK ve OKHK (%) ölçütleri ile

model sonuçları ile ölçümler arasındaki bağıntıyı tanımlayan denklemler Çizelge 6.25'te verilmiştir. Ölçütlerin hesaplanmasına esas teşkil eden verilerin saçılım diyagramı üzerinde sunumu ise Şekil 6.136'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.25 B7 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.

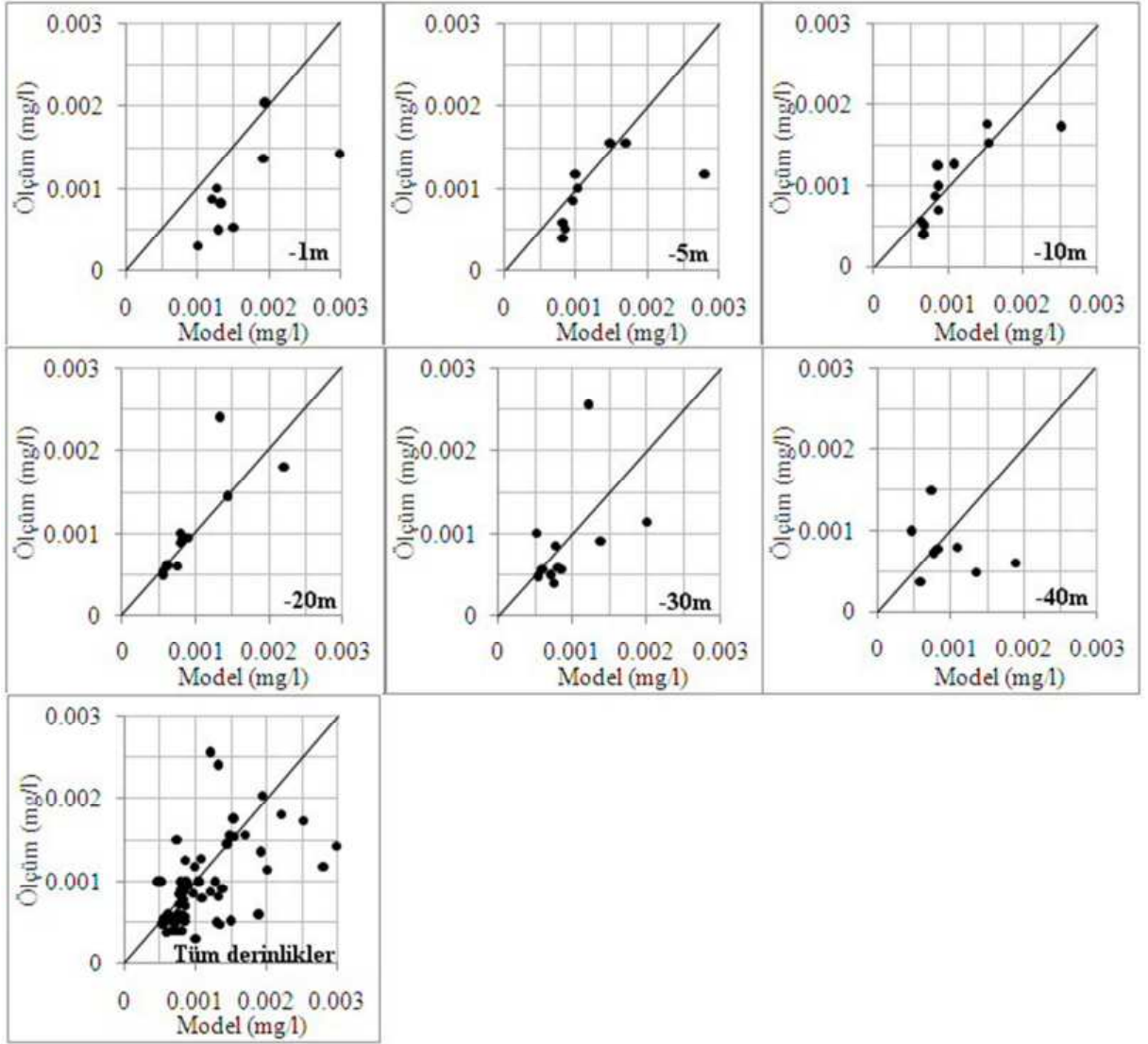
Durum Değişkeni	ÇO				Klorofil-a			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.66	1.27	43	0.76x+3.15	0.45	0.00076	44	0.61x+0.00001
-5 m	0.75	1.27	39	0.78x+3.05	0.33	0.00055	47	0.38x+0.00050
-10 m	0.70	1.22	40	0.93x+1.64	0.69	0.00030	22	0.72x+0.00027
-20 m	0.86	1.75	39	0.85x+2.85	0.63	0.00036	19	0.96x+0.00013
-30 m	0.40	1.93	44	0.69x+3.33	0.20	0.00055	25	0.61x+0.00031
-40 m	0.19	2.73	33	0.74x+0.30	0.12	0.00065	58	-0.26x+0.00103
Tüm Derinlikler	0.44	1.75	58	0.94x+1.34	0.28	0.00054	24	0.48x+0.00042
Durum Değişkeni	NO ₂				NO ₃			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.46	0.01102	88	-0.63x+0.0114	0.84	0.01977	16	1.39x-0.0080
-5 m	0.19	0.01006	77	-0.33x+0.0067	0.96	0.01561	12	1.55x-0.0192
-10 m	0.14	0.00946	73	-0.30x+0.0064	0.94	0.01639	13	1.52x-0.0250
-20 m	0.06	0.01072	84	-0.15x+0.0056	0.95	0.01618	13	1.51x-0.0283
-30 m	0.01	0.0924	75	0.05x+0.0052	0.85	0.01125	13	1.00x-0.0054
-40 m	0.11	0.00745	44	0.33x+0.0075	0.62	0.04323	35	1.48x+0.0085
Tüm Derinlikler	0.01	0.00958	47	-0.11x+0.0064	0.77	0.02212	16	1.40x-0.0142
Durum Değişkeni	PO ₄							
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)				
-1 m	0.91	0.01695	25	2.70x+0.00851				
-5 m	0.85	0.00288	14	0.81x+0.00350				
-10 m	0.63	0.00489	21	0.98x+0.00037				
-20 m	0.37	0.00676	27	0.74x+0.00614				
-30 m	0.11	0.01831	48	0.61x+0.02009				
-40 m	0.01	0.05346	54	0.35x+0.06158				
Tüm Derinlikler	0.26	0.02059	27	1.39x+0.00492				

Çözünmüş Oksijen (ÇO)

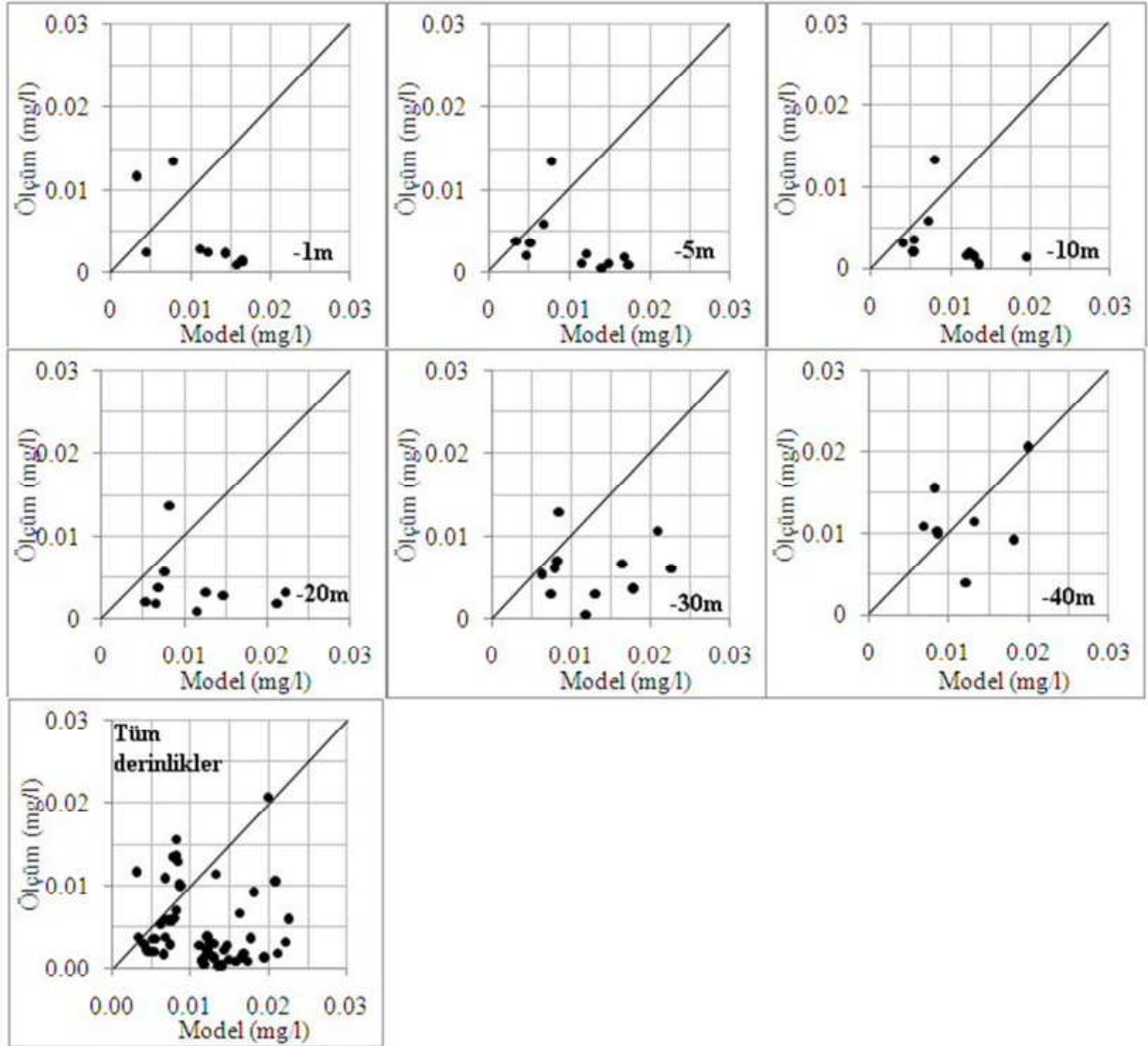


Şekil 6.136 B7 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değışkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.

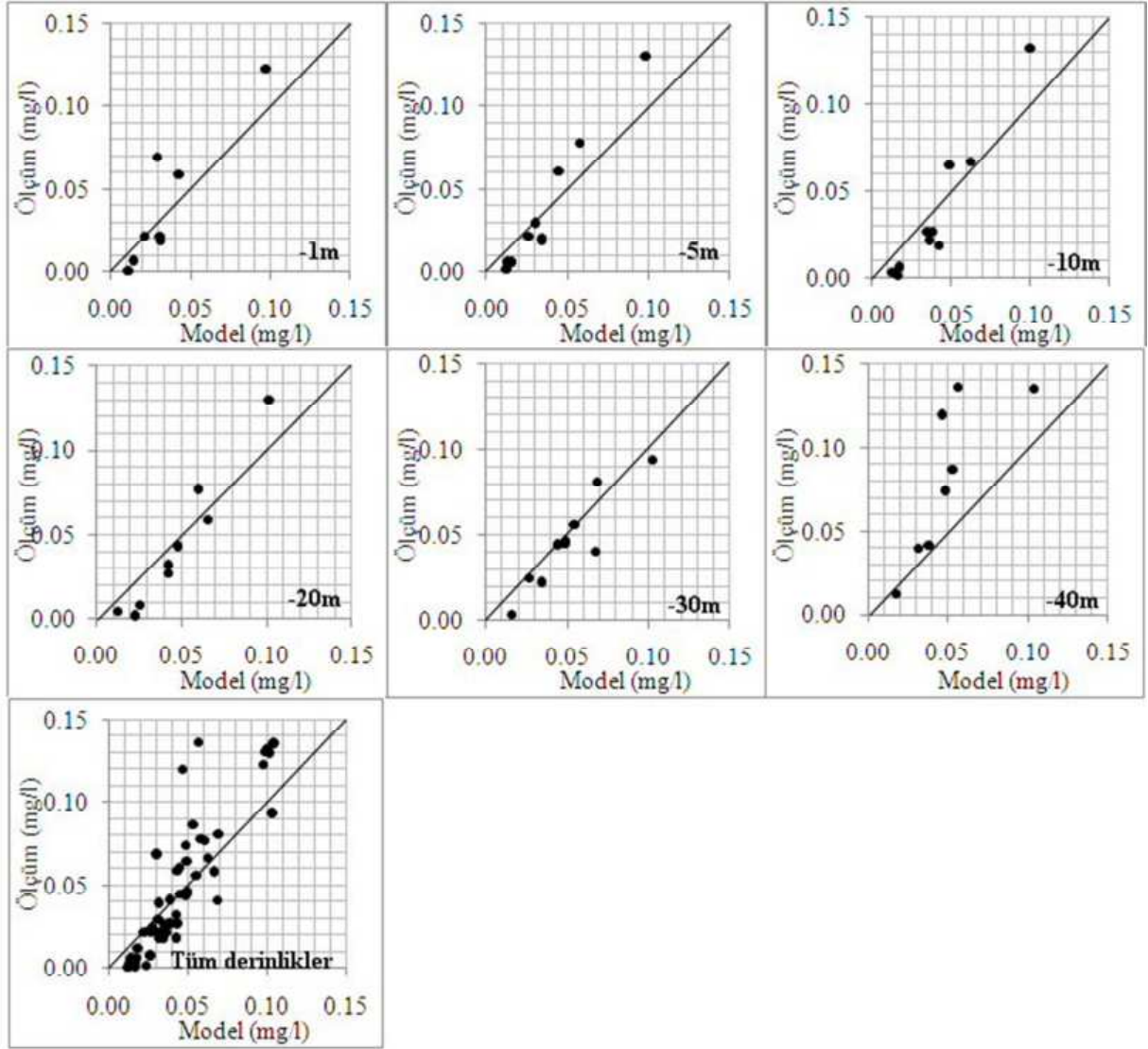
Klorofil-a



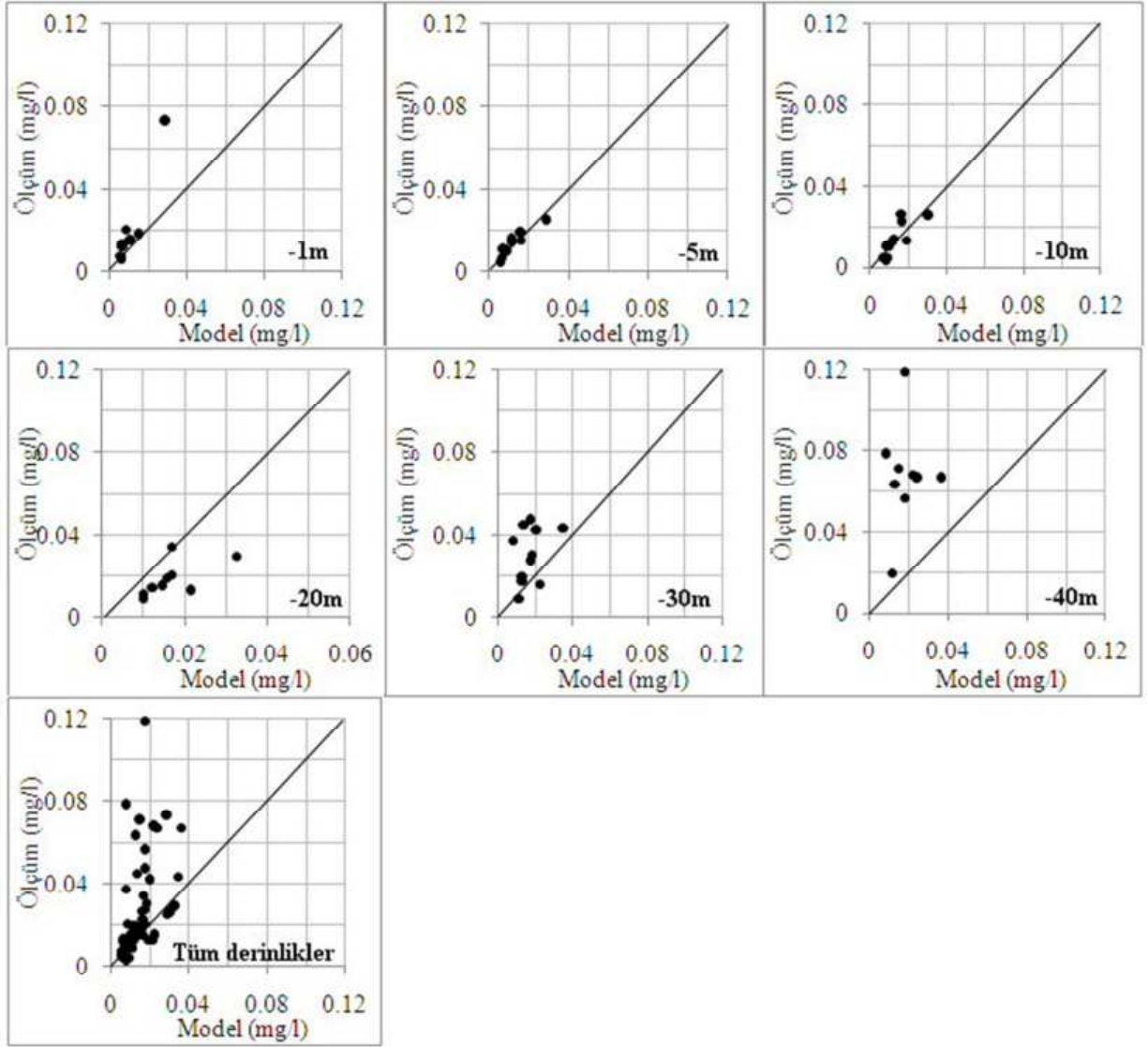
Şekil 6.136 Devamı.

Nitrit (NO_2)

Şekil 6.136 Devamı.

Nitrat (NO_3)

Şekil 6.136 Devamı.

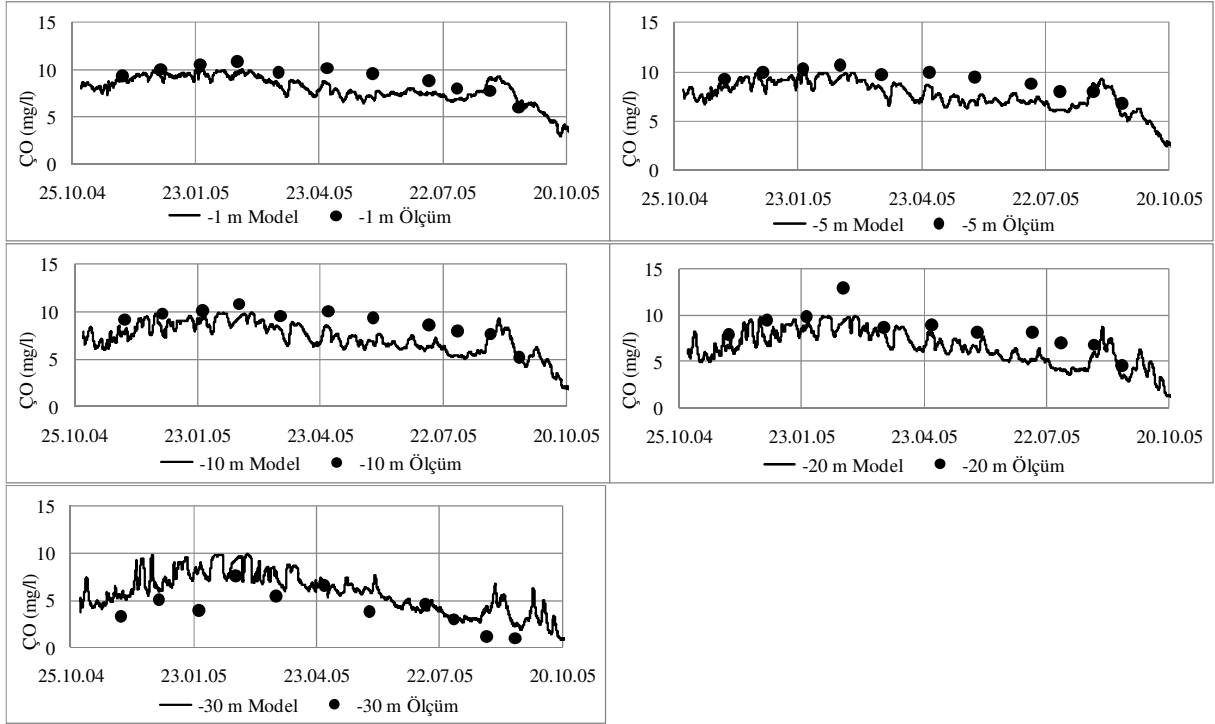
Fosfat (PO_4)

Şekil 6.136 Devamı.

Çizelge 6.25 ve Şekil 6.136 bir arada değerlendirildiğinde diğer istasyonlardakine benzer bir model doğruluğu tablosu ile karşı karşıya kalınmaktadır. NO_2 konsantrasyonları düşük korelasyon katsayıları, yüksek OKHK değerleri ile bir arada görülmektedir. Model sırasıyla Klorofil-a, NO_3 ve CO konsantrasyonlarını yüksek doğrulukla benzeştirmektedir. PO_4 konsantrasyonlarının tahmininde ise üst tabakalarda oldukça yüksek korelasyon katsayıları ile düşük hata değerleri elde edilmekle birlikte, -30 m ve -40 m derinliklerde korelasyonun azaldığı ve hataların arttığı görülmektedir.

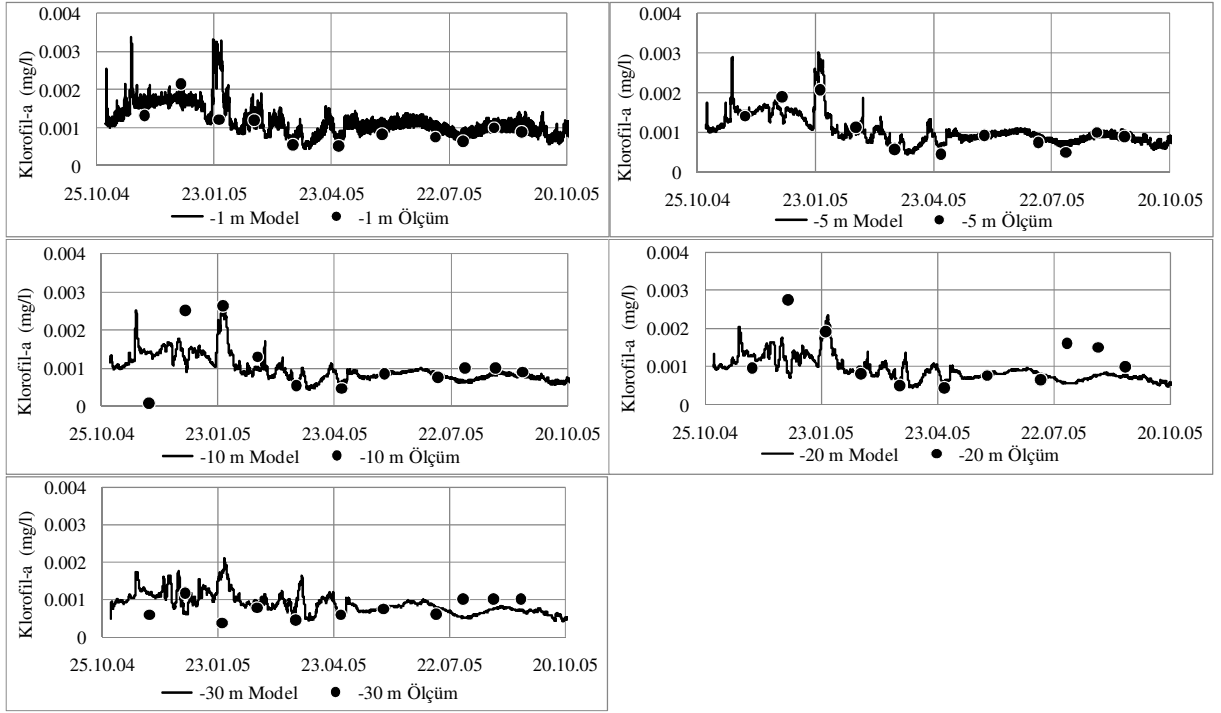
Dolayısıyla bu çalışmada gerçekleştirilen İstanbul Boğazı su kalitesi modeli Boğaz'ın iç kesimlerinde yer alan ve sınır etkilerinden uzak olan B7 istasyonunda da doğruluk testini başarı ile geçmiştir.

B13, K0 ve B7 istasyonlarında model doğruluğunun test edilmesinden sonra Karadeniz sınırında güneye doğru dördüncü ve Boğaz içerisindeki son istasyon olan B2 istasyonunda aynı testler tekrarlanmıştır. Şekil 6.137-6.141’de B2 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada olduğu zaman serileri farklı derinlikler (-1 m, -5 m, -10 m, -20 m, -30 m ve tüm derinlikler) ve tüm su kalitesi durum değişkenleri (ÇO , Klorofil-a, NO_2 , NO_3 ve PO_4) için verilmiştir.



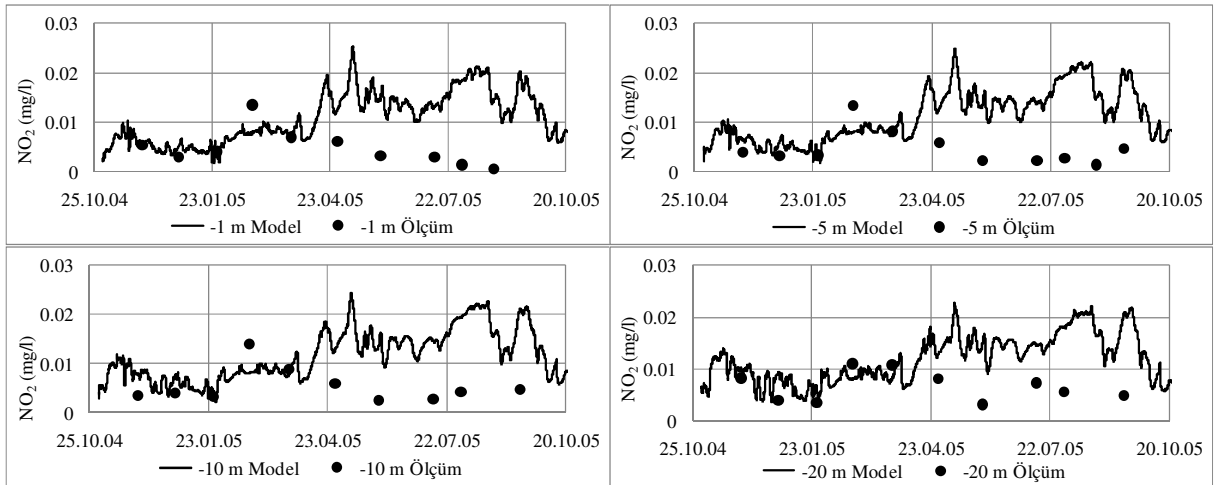
Şekil 6.137 B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

B2 istasyonu diğer istasyonlara göre daha sığ bir konumda yer almaktadır. Dolayısıyla bu istasyonda veriler -30m derinliğe kadar değerlendirilebilmiştir. Şekil 6.137’de gösterilen B2 istasyonunda ölçümler ile model sonuçlarının karşılaştırılması değerlendirildiğinde, Boğaz’ın güney çıkışına yakın sayılabilecek bir istasyonda da ÇO konsantrasyonlarının zamansal gelişiminin Boğaz boyunca diğer istasyonlarda sergilenenle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ölçüm verilerine göre B2 istasyonunda Şubat ayında 13 mg/l konsantrasyon değerinin kaydedildiği görülmektedir. Bu değer ölçüm veri seti için de İstanbul Boğazı için de sıra dışı bir değerdir. Yine bu istasyonda da ölçüm verilerinde diğer istasyonlarda Temmuz ayından sonra kaydedilen düşüş eğilimi gözlenmektedir. Ölçümlerde -30m derinlikte konsantrasyon değerlerinin 2 mg/l’nin altına düştüğü görülmektedir. Ancak model bu keskin düşüşü kısmen benzeştirebilmiştir.

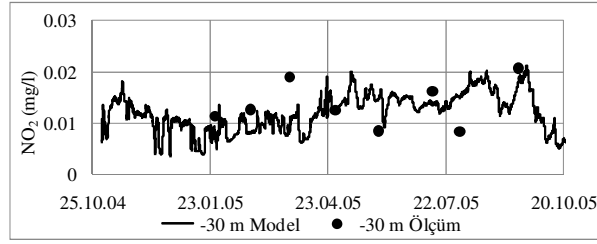


Şekil 6.138 B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

Ölçülen Klorofil-a konsantrasyonlarının model sonuçları ile karşılaştırılması değerlendirildiğinde modelin B2 istasyonunda da ölçüm verilerini oldukça iyi benzeştirdiği görülmektedir. Klorofil-a konsantrasyonlarının bu istasyonda diğerlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Yine de konsantrasyon değerlerinin Boğaz boyunca tüm istasyonlarda kaydedilene benzer bir zamansal gelişim izlediği söylenebilir. Model sonuçları da bu yöndeki ölçümleri desteklemektedir.

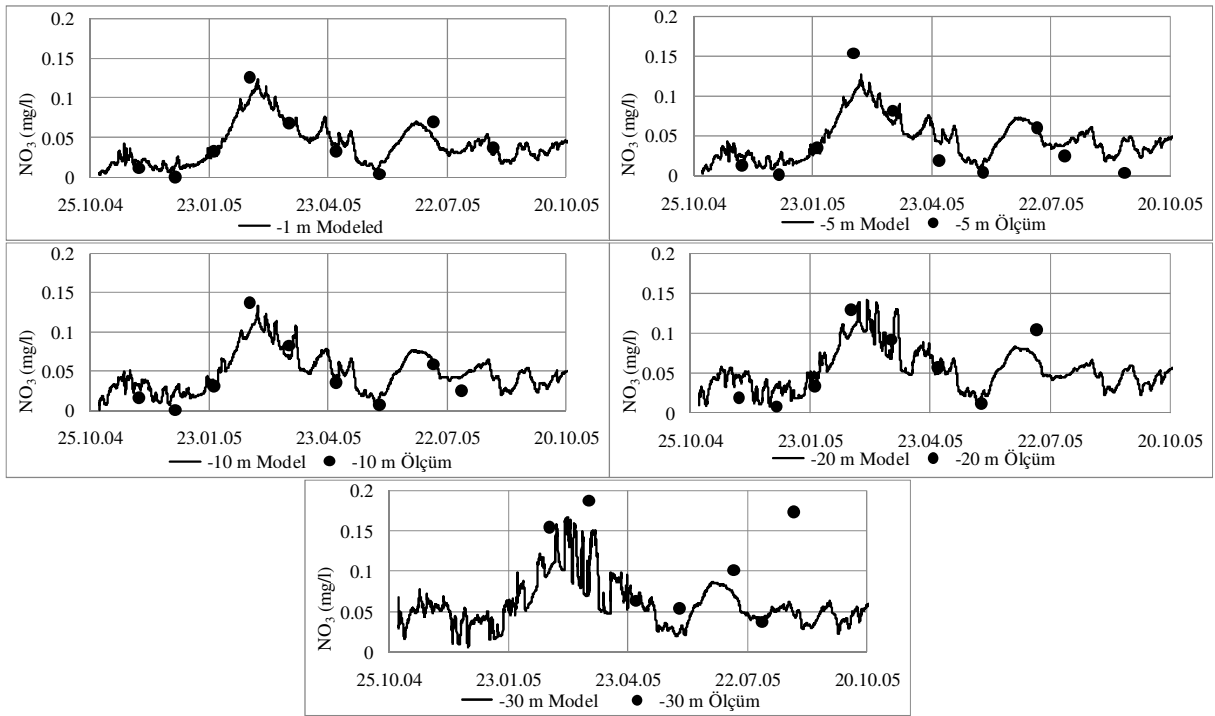


Şekil 6.139 B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO₂ konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



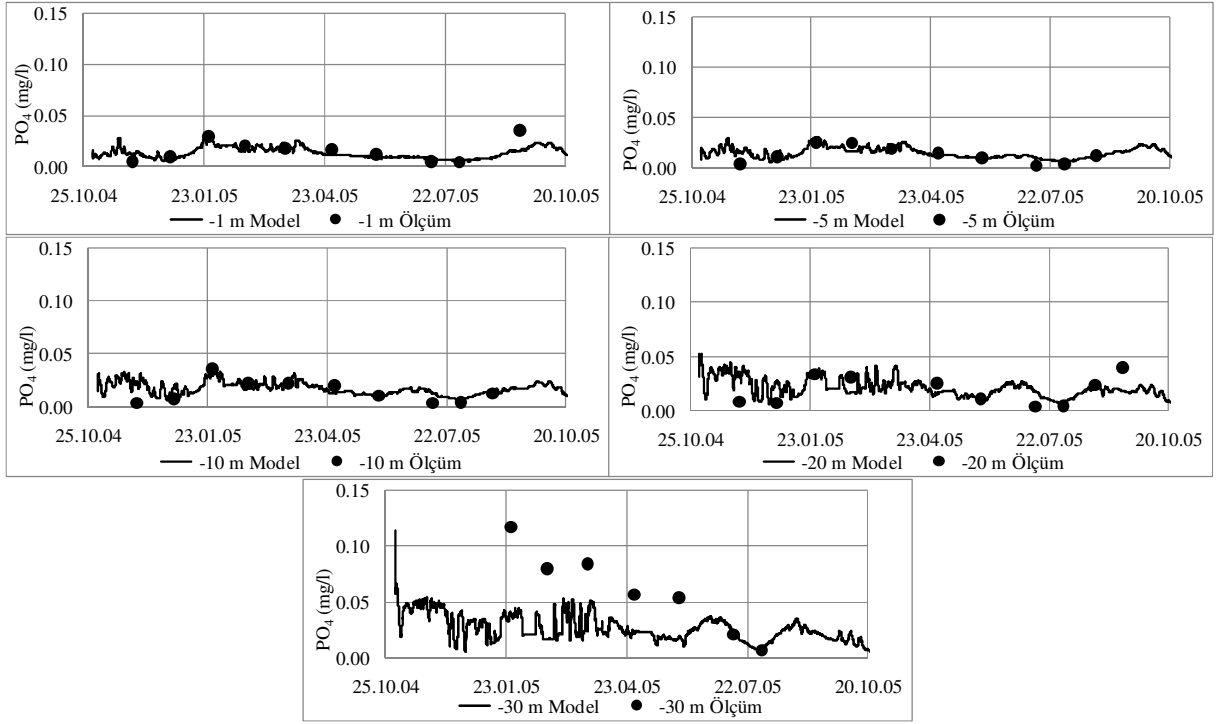
Şekil 6.139 Devamı.

NO_2 konsantrasyonlarına gelindiğinde Şekil 6.139'dan görüldüğü gibi yılın ikinci 6 aylık kısmında ölçüm verileri ile model sonuçları arasında yine belirli bir fark mevcuttur. NO_2 konsantrasyonlarının zamansal değişimleri göz önünde tutulduğunda yine modelin ölçümlere göre daha yüksek konsantrasyonlar tahmin ettiği görülmektedir.



Şekil 6.140 B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

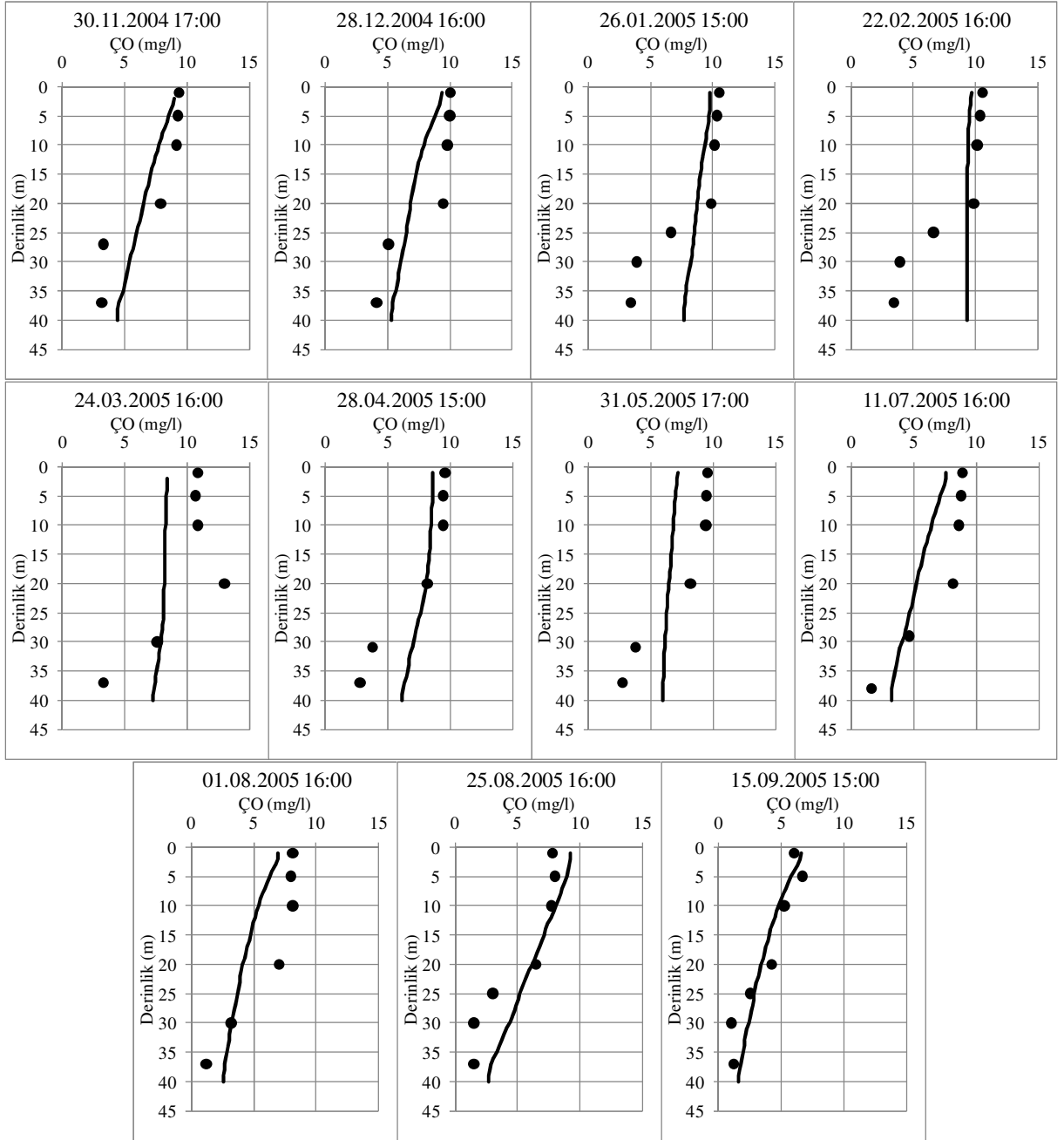
B2 istasyonunda NO_3 konsantrasyonları da oldukça iyi bir yakınlıkla tahmin edilmiştir (Şekil 6.140). Yüzeyden 30m derinlikte ölçülen konsantrasyon değerlerinin model sonuçlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Boğaz alt tabakasında derin deniz deşarjlarından ileri gelen yüksek konsantrasyonlar her zaman mümkün olmakla birlikte bu çalışmada kaynak konsantrasyonları bir takım belirsizlikler içerdiğinden, böylesi yüksek konsantrasyonların model tarafından tahmin edilememesi de olasıdır.



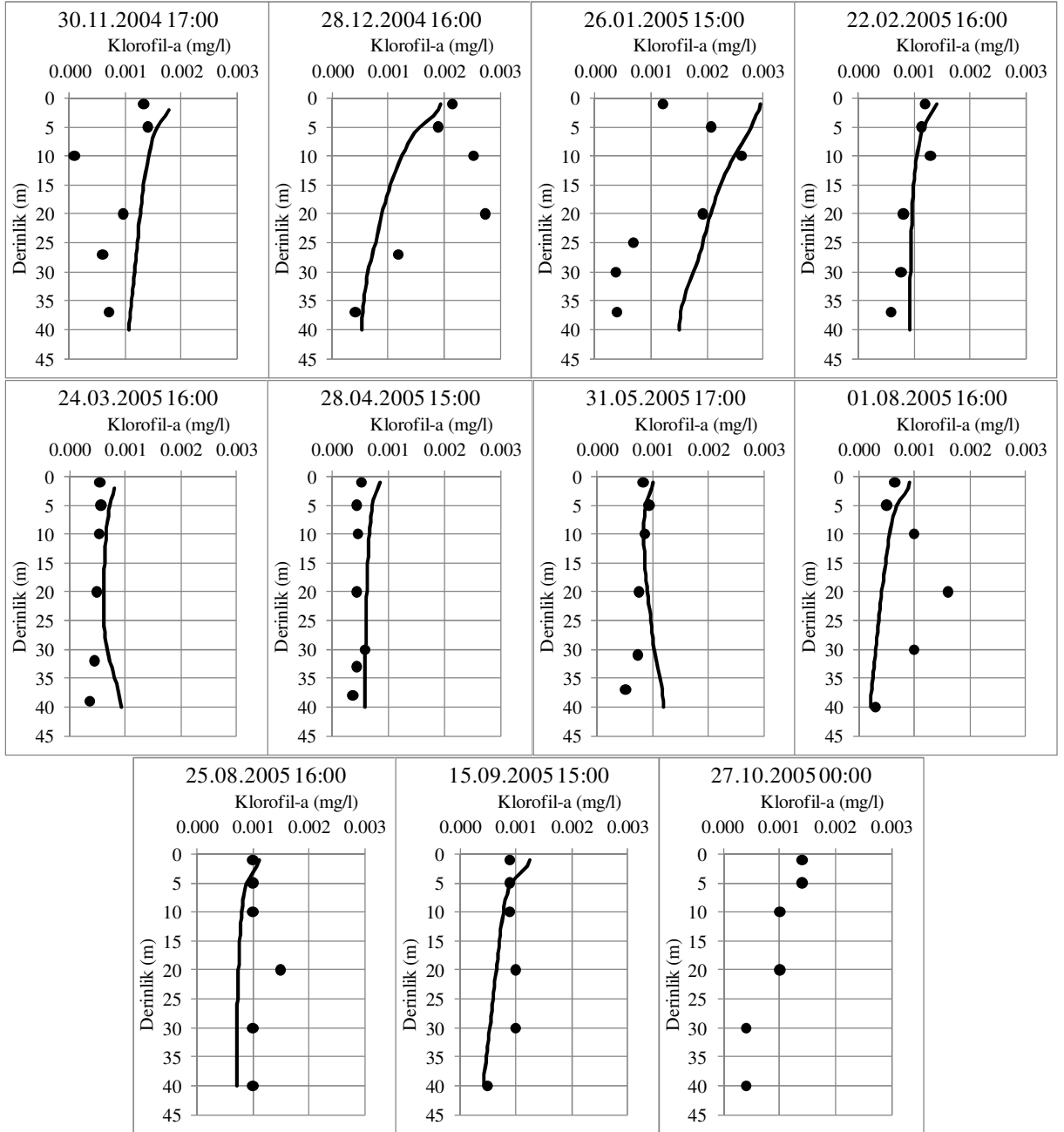
Şekil 6.141 B2 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

B2 istasyonunda PO_4 konsantrasyonlarının ise ilk 20 m’de yüksek bir doğrulukla tahmin edildiği görülmektedir (Şekil 6.141). Bununla birlikte yüzeyden 30 m derinlikte yine ölçümlerle ortaya konulan yüksek konsantrasyonların model tarafından yakalanamadığı görülmektedir. Burada NO_3 konsantrasyonlarında olduğu gibi kaynak konsantrasyonlarındaki belirsizliklerin rol oynadığı düşünülmektedir.

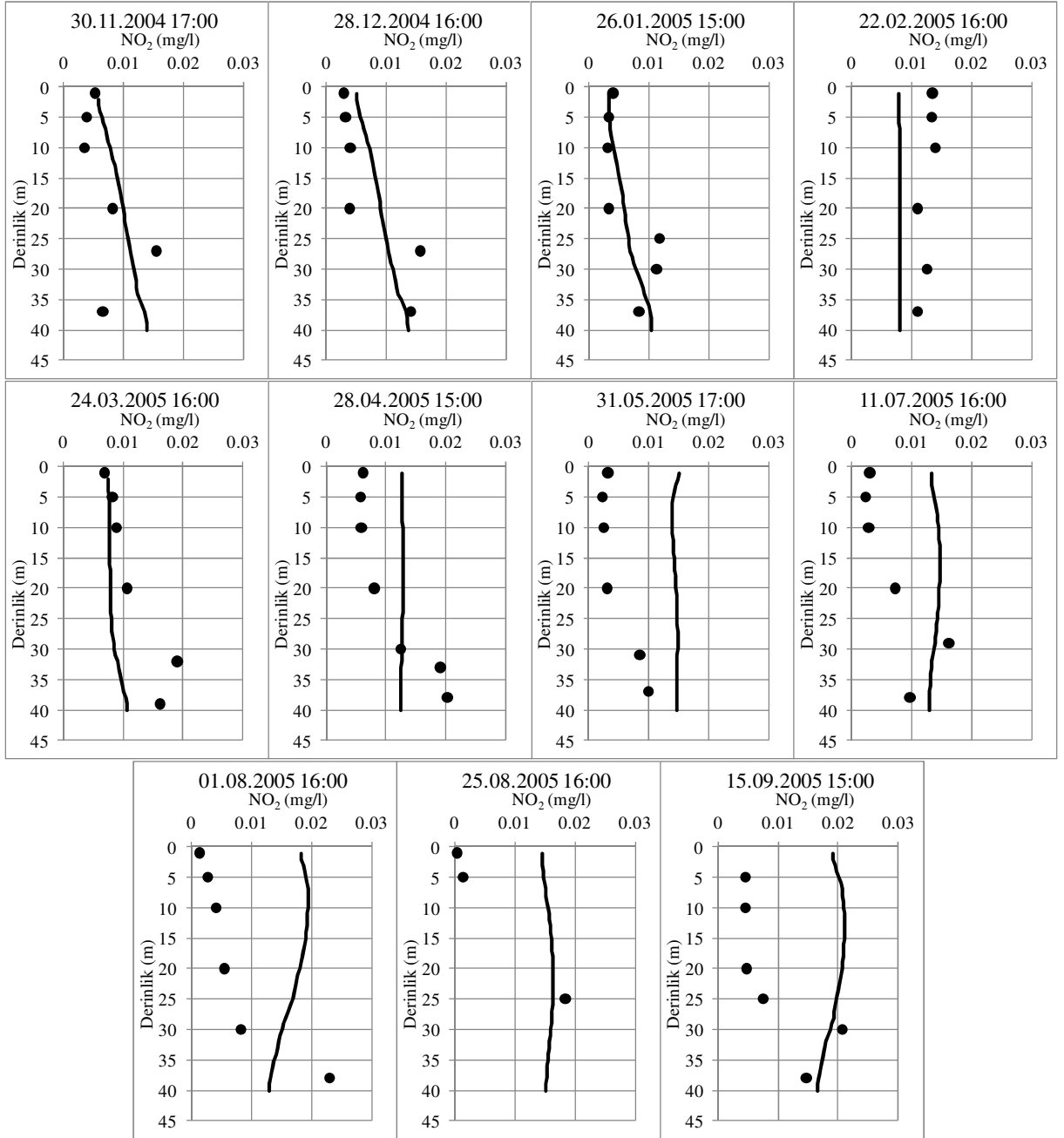
Şekil 6.137-6.141’den diğer istasyonlarda olduğu gibi B2 istasyonunda da model sonuçlarının ölçümlerle oldukça iyi bir uyum sergilediği görülmektedir. B2 istasyonu Boğaz’ın en güney kısmında yer almaktadır. B2 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada görülebildiği düşey profiller Şekil 6.142-6.146’da gösterilmiştir.



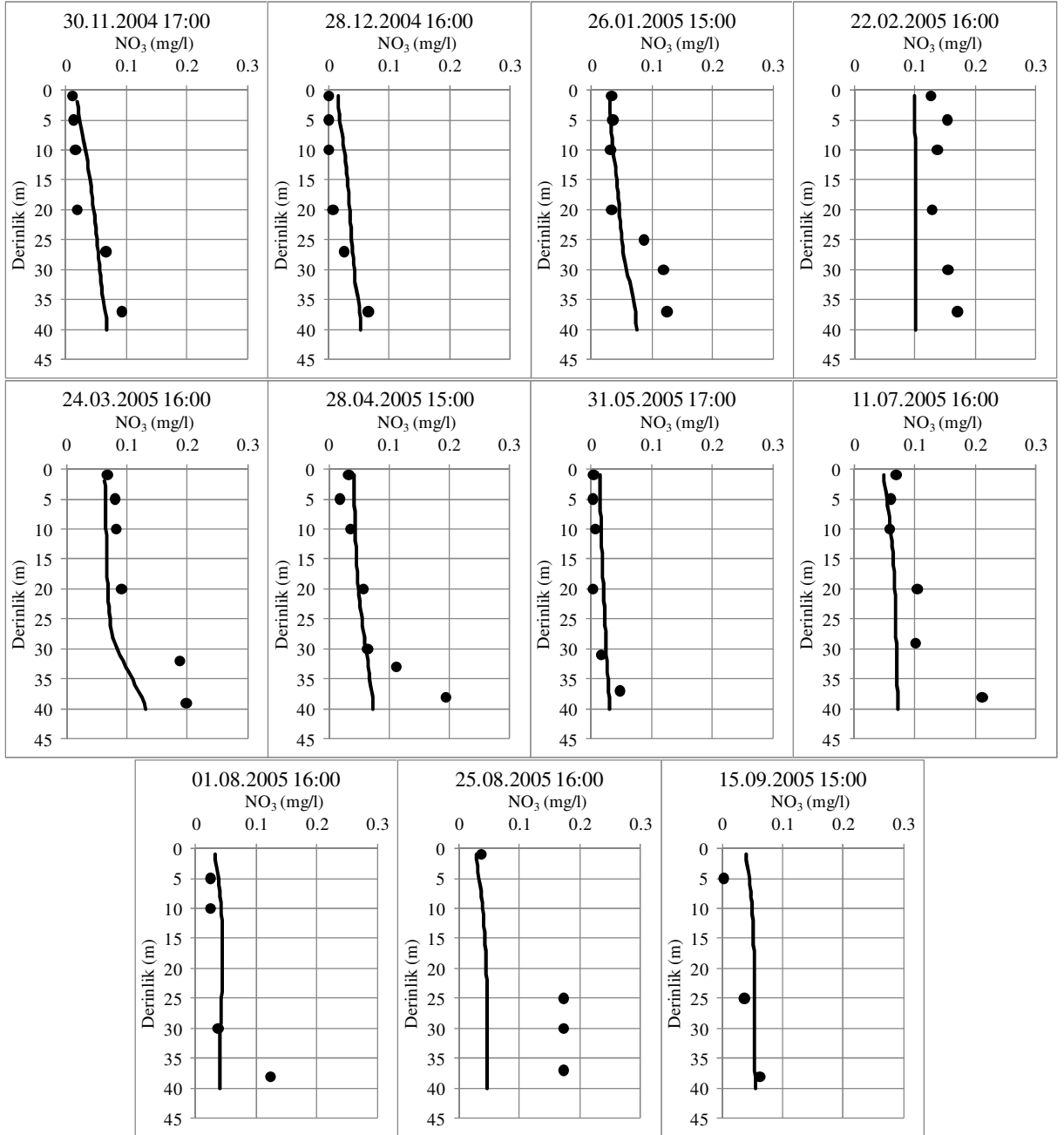
Şekil 6.142 B2 İstasyonunda ÇO veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



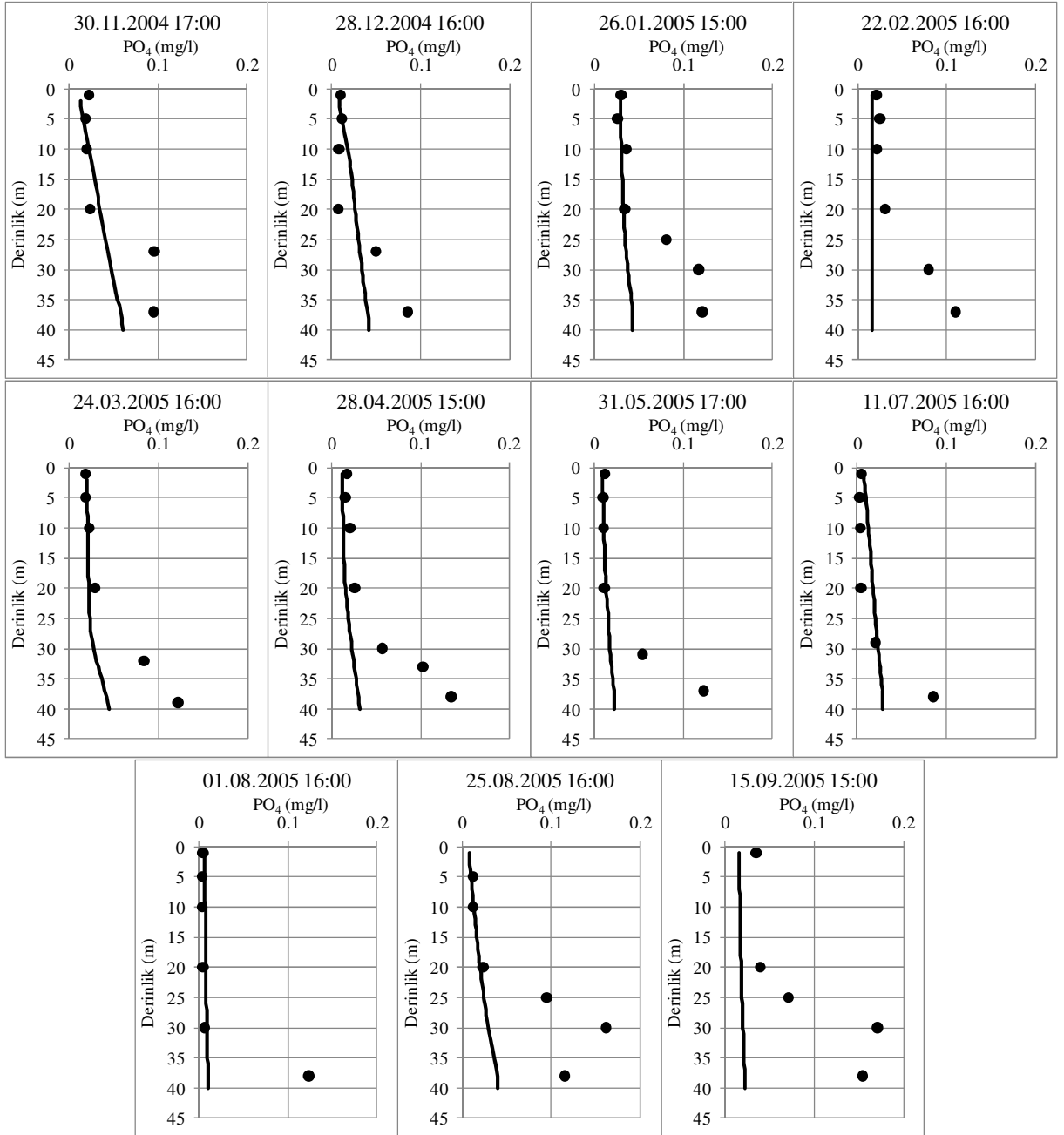
Şekil 6.143 B2 İstasyonunda Klorofil-a veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.144 B2 İstasyonunda NO_2 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.145 B2 İstasyonunda NO_3 veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



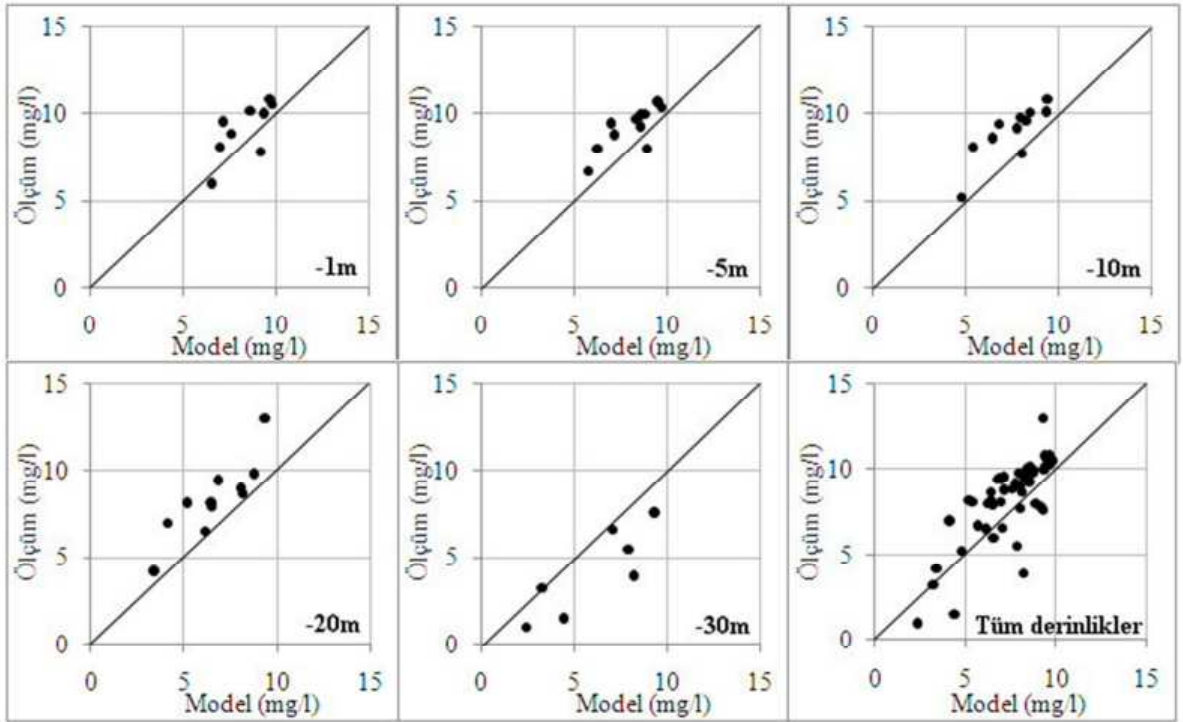
Şekil 6.146 B2 İstasyonunda NO_3^- veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

B2 istasyonu için de Şekil 6.142-6.146'da verilen düşey profillerde de model sonuçları ile ölçüm verileri arasında tatmin edici bir uyumun yakalandığı, ancak yine alt tabaka konsantrasyonlarındaki saçılımın bu istasyonda da varlığını koruduğu görülmektedir. B2 istasyonu için R^2 , OKHK ve OKHK (%) ölçütleri ile model sonuçları ile ölçümler arasındaki bağıntıyı tanımlayan denklemler Çizelge 6.26'da verilmiştir. Ölçütlerin hesaplanmasına esas teşkil eden verilerin saçılım diyagramı üzerinde sunumu ise Şekil 6.147'de gösterilmiştir.

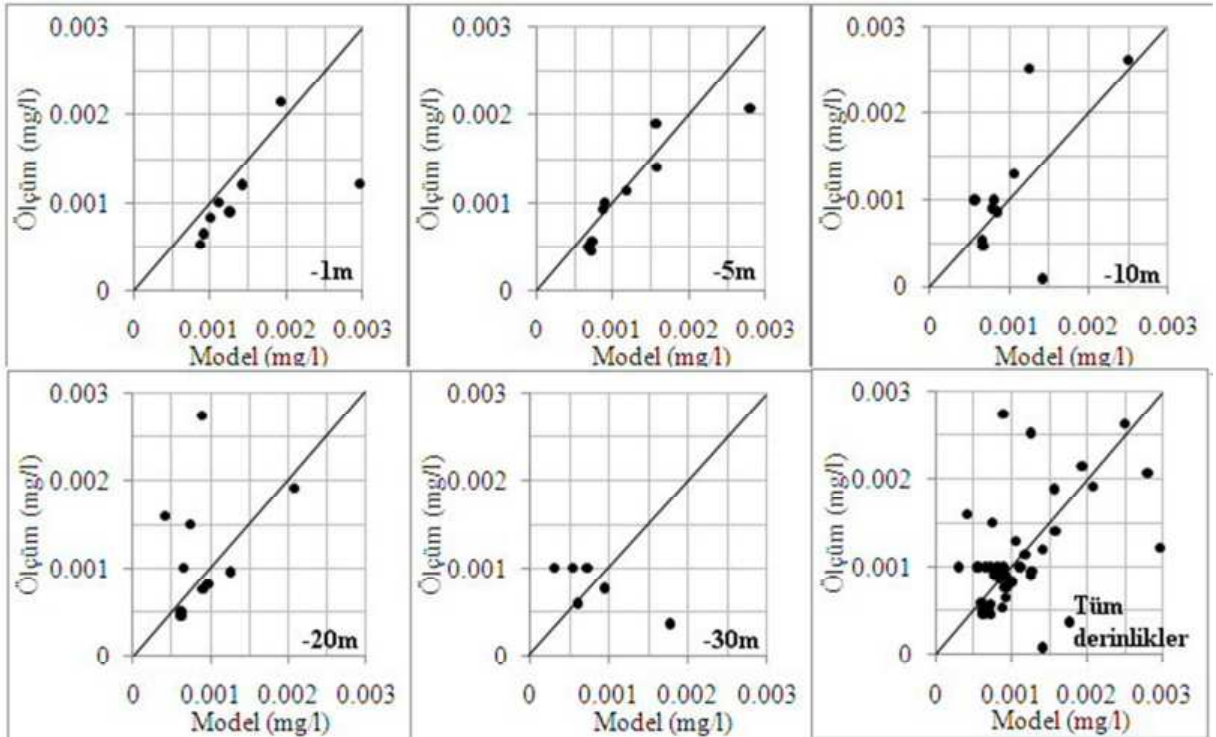
Çizelge 6.26 B2 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.

Durum Değişkeni	ÇO				Klorofil-a			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.49	1.33	28	0.86x+1.92	0.33	0.00072	45	0.41x+0.00047
-5 m	0.60	1.40	35	0.70x+3.55	0.82	0.00028	18	0.78x+0.00016
-10 m	0.67	1.69	30	0.84x+2.64	0.41	0.00061	24	0.93x+0.00015
-20 m	0.73	2.02	23	1.00x+1.70	0.09	0.00076	33	0.47x+0.00080
-30 m	0.71	2.33	35	0.78x-0.56	0.65	0.00068	107	-0.42x+0.00113
Tüm Derinlikler	0.58	1.76	15	1.00x+0.82	0.23	0.00063	24	0.50x+0.00054
Durum Değişkeni	NO ₂				NO ₃			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.15	0.01005	77	-0.30x+0.0077	0.95	0.01530	12	1.45x-0.0146
-5 m	0.09	0.00978	82	-0.19x+0.0068	0.87	0.02478	16	1.76x-0.0365
-10 m	0.06	0.00937	82	-0.16x+0.0072	0.96	0.01827	13	1.68x-0.0349
-20 m	0.09	0.00817	103	-0.18x+0.0088	0.89	0.02417	19	1.83x-0.0432
-30 m	0.28	0.00408	33	0.52x+0.0066	0.18	0.06756	50	1.03x+0.0461
Tüm Derinlikler	0.15	0.00890	44	-0.11x+0.0074	0.74	0.03133	18	1.70x-0.0282
Durum Değişkeni	PO ₄							
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)				
-1 m	0.63	0.00755	25	1.21x+0.00113				
-5 m	0.70	0.00415	18	1.00x+0.00018				
-10 m	0.69	0.00566	17	1.28x-0.00523				
-20 m	0.11	0.01183	33	0.51x+0.01073				
-30 m	0.36	0.09286	57	3.87x+0.01156				
Tüm Derinlikler	0.21	0.03471	21	2.05x-0.00222				

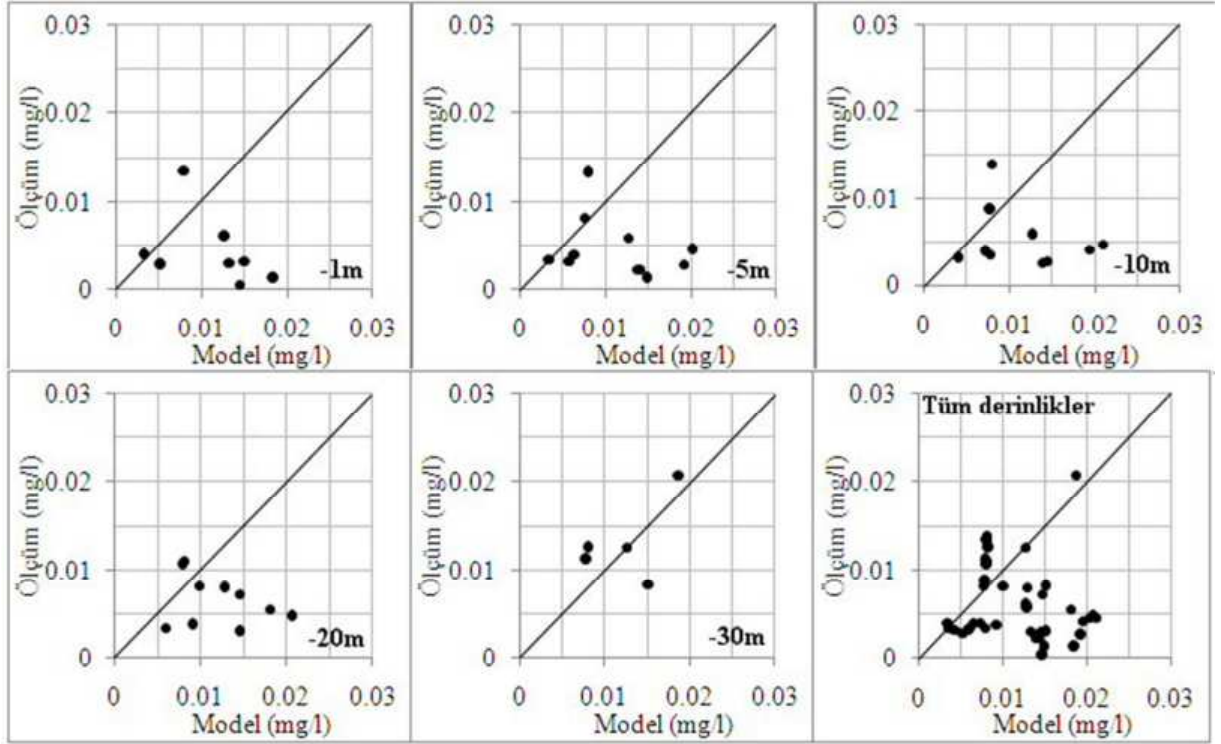
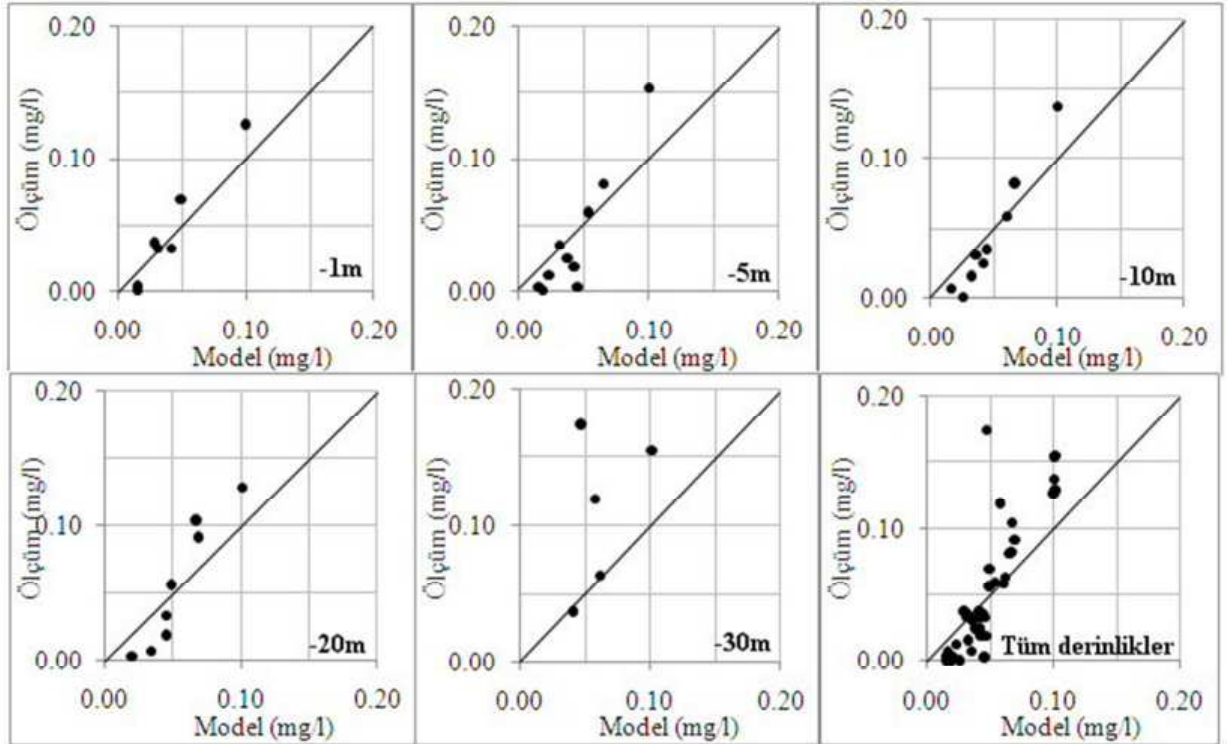
Çözülmüş Oksijen (ÇO)



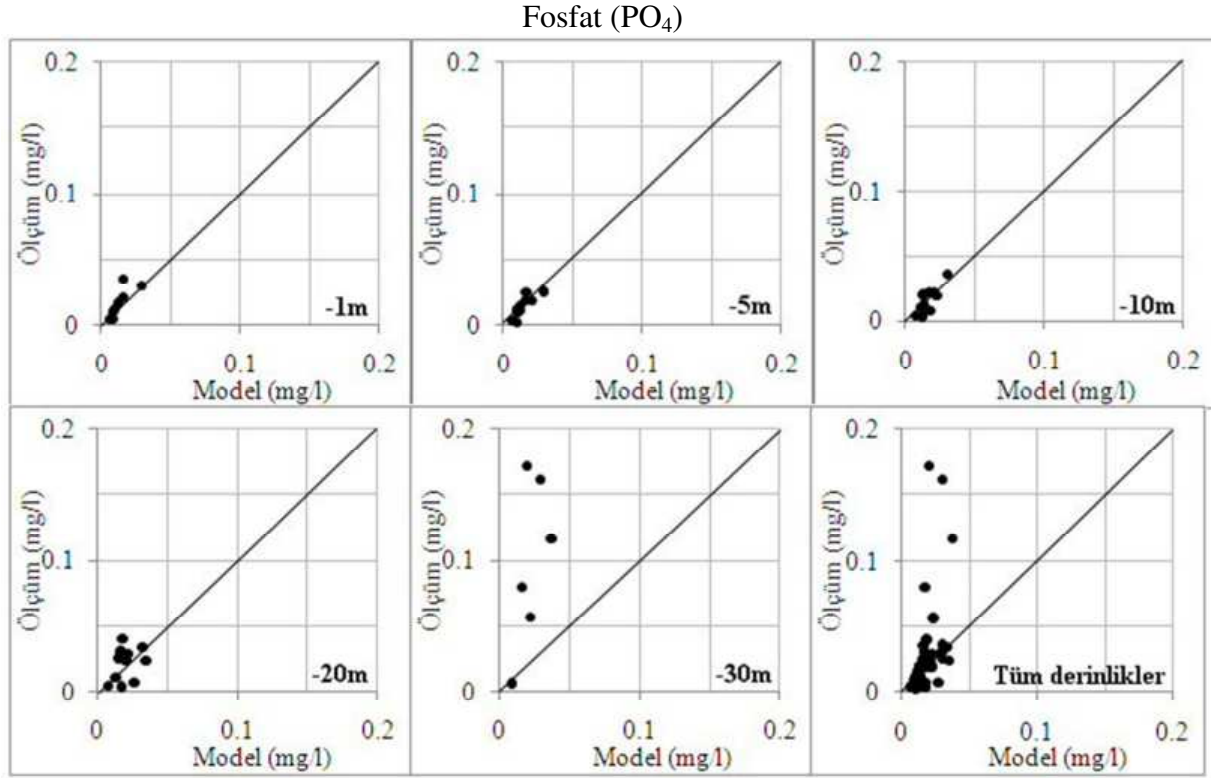
Klorofil-a



Şekil 6.147 B2 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.

Nitrit (NO_2)Nitrat (NO_3)

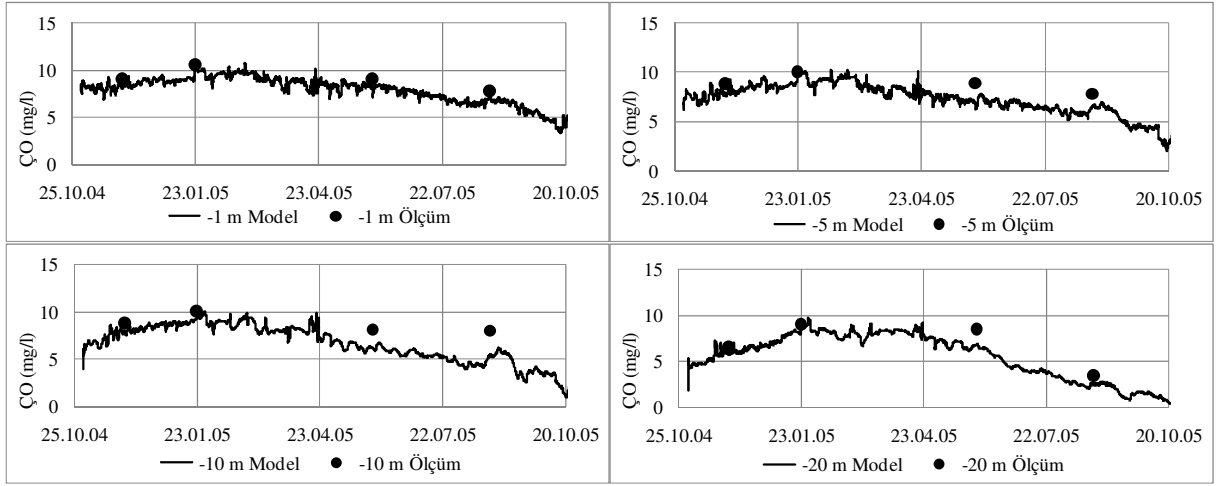
Şekil 6.147 Devamı.



Şekil 6.147 Devamı.

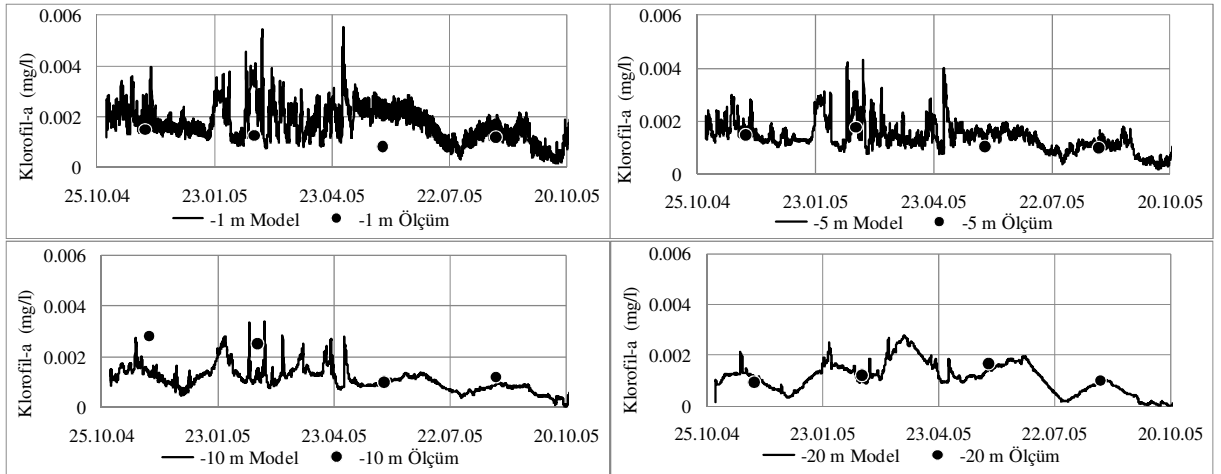
Çizelge 6.26 ile Şekil 6.147 bir arada değerlendirildiğinde modelin NO_2 konsantrasyonları dışında belirli bir doğruluğu B2 istasyonunda da yakaladığı görülmektedir.

Model doğruluk testleri en son Boğaz'ın Marmara Denizi'ne açıldığı yerde bulunan M3 istasyonunda toplanan veriler kullanılarak tekrarlanmıştır. M3 istasyonu ölçümlerin mevsimlik yapıldığı bir istasyon olduğundan mevcut veri sayısı bu istasyon için oldukça düşüktür. Şekil 6.148-6.152'da M3 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada olduğu zaman serileri farklı derinlikler (-1 m, -5 m, -10 m, -20 m ve tüm derinlikler) ve tüm su kalitesi durum değişkenleri (ÇO , Klorofil-a, NO_2 , NO_3 ve PO_4) için verilmiştir.

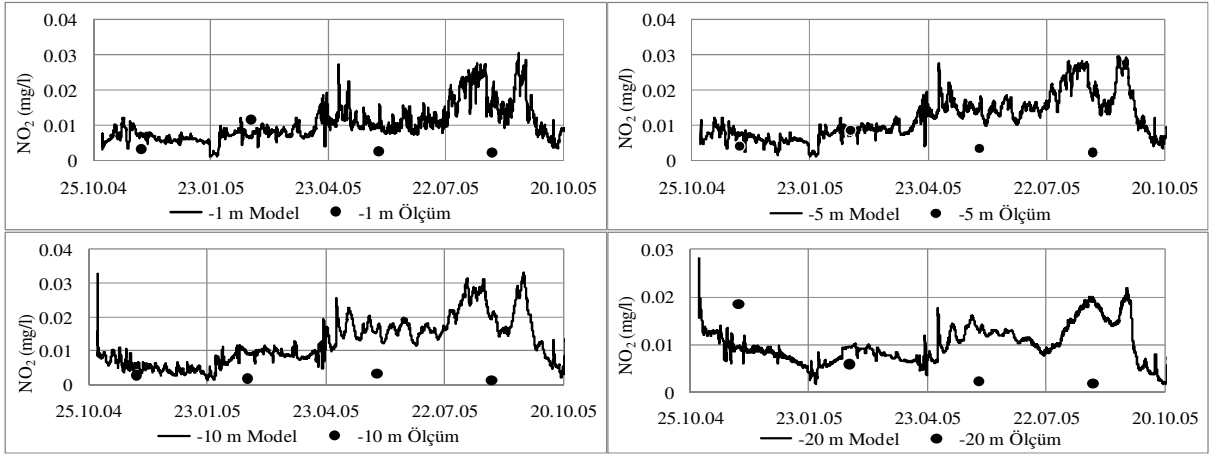


Şekil 6.148 M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde ÇO konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.

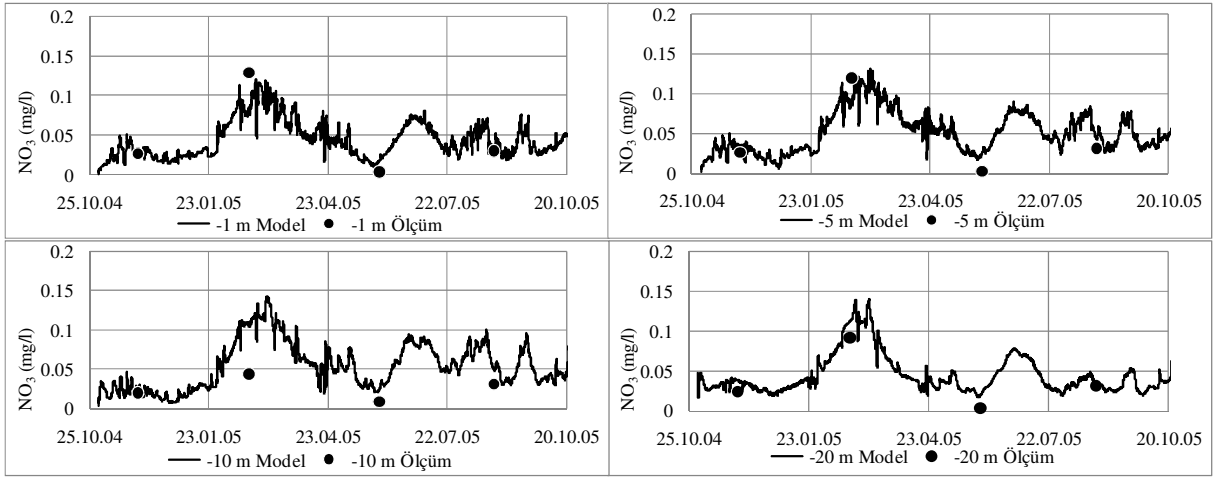
Şekil 6.148'e bakıldığında sık bir konumda yer alan M3 istasyonunda da ÇO oksijen konsantrasyonlarının oldukça iyi bir yakınlıkla benzeştirildiği görülmektedir. M3 istasyonu hidrodinamik yapısı ile de diğer istasyonlardan ayrılmaktadır. Bu istasyonda düşeyde tuzluluk ve sıcaklık tabakalanması yüksek karışıma bağlı olarak diğer istasyonlara göre daha zayıftır. Bu zayıf tabakalanma su kalitesi durum değişkenlerinde de gözlenmektedir.



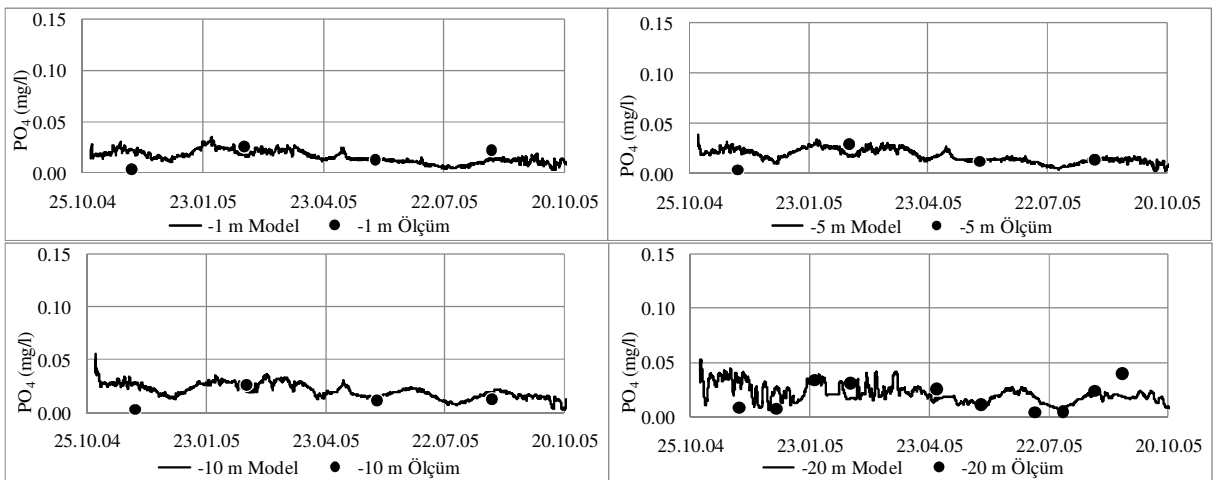
Şekil 6.149 M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde Klorofil-a konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.150 M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_2 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



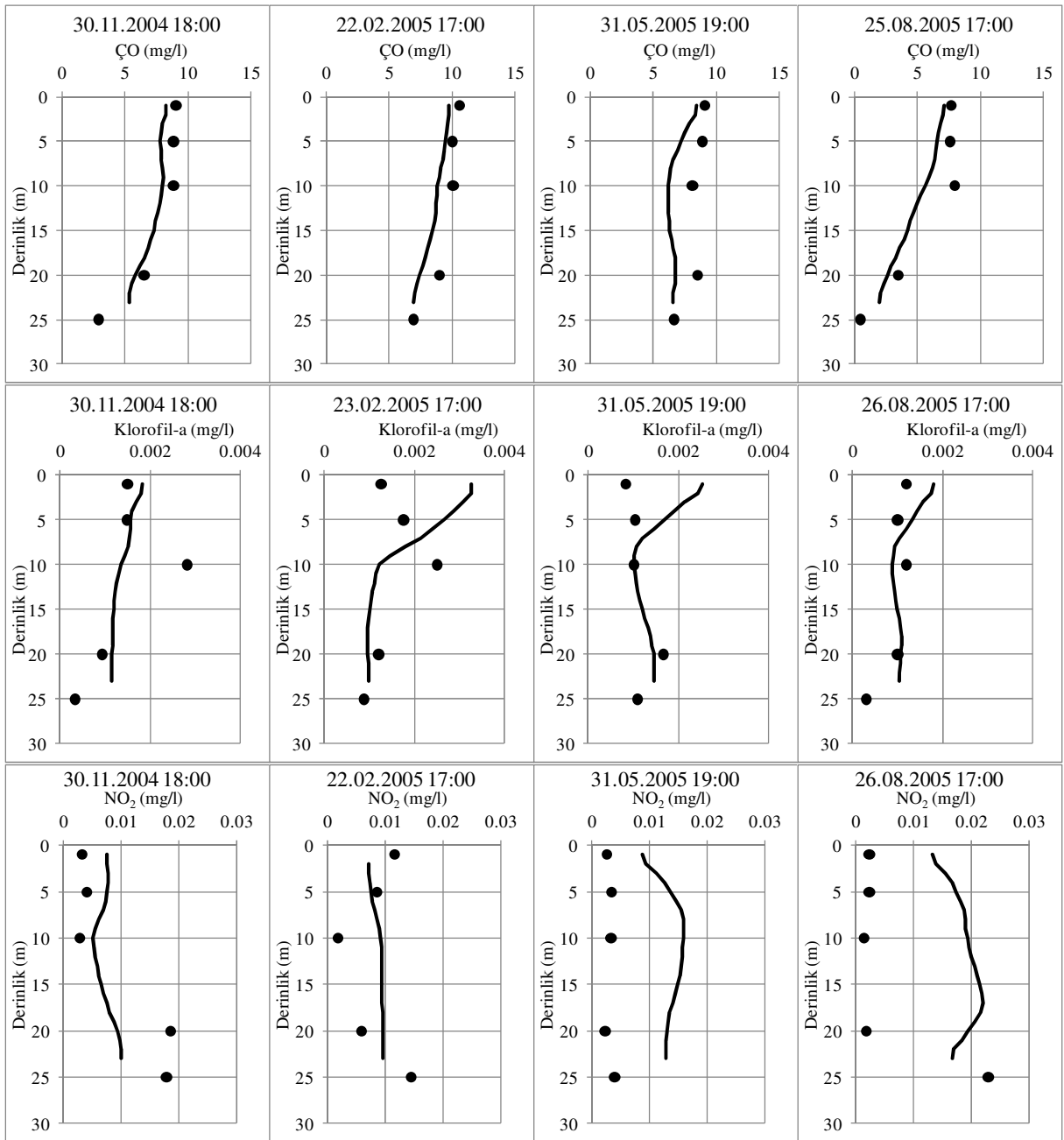
Şekil 6.151 M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde NO_3 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



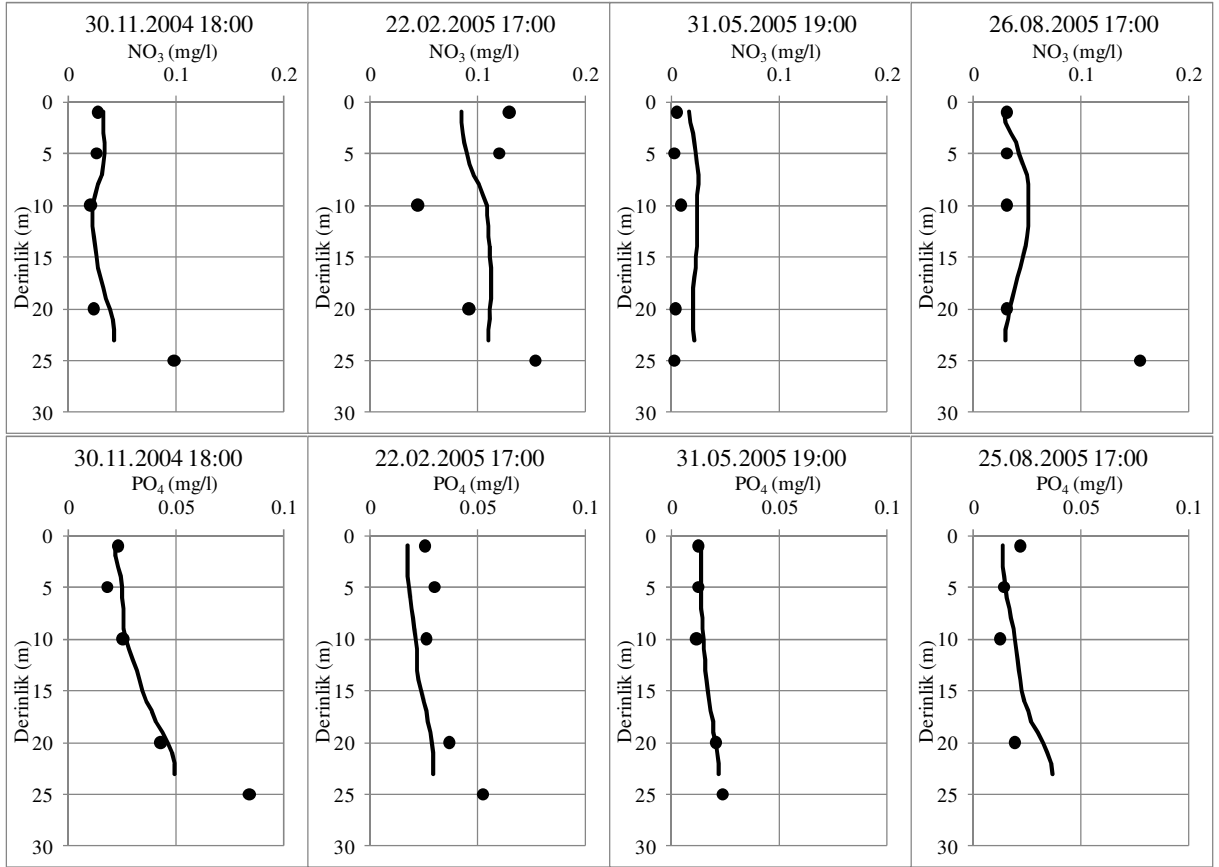
Şekil 6.152 M3 İstasyonunda tüm veri seti için farklı derinliklerde PO_4 konsantrasyonlarının değişimine dair zaman serileri.

M3 istasyonunda Klorofil-a, NO_3 ve PO_4 konsantrasyonları da oldukça iyi bir doğrulukla benzeştirilmiştir. NO_2 konsantrasyonlarında ise tüm model alanı içerisinde gözlenen sorun M3 istasyonunda da devam etmektedir. Modelin yine yılın ikinci altı aylık kısmında modelin ölçümlere göre daha yüksek konsantrasyonlar hesapladığı görülmektedir.

M3 istasyonunda tüm veri seti için model sonuçları ile ölçüm verilerinin bir arada görülebildiği düşey profiller Şekil 6.153'te gösterilmiştir.



Şekil 6.153 M3 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri veri seti için model sonuçları ile ölçümlerin düşey profiller üzerinde karşılaştırılması. •: ölçüm verileri —: model sonuçları.



Şekil 6.153 Devamı.

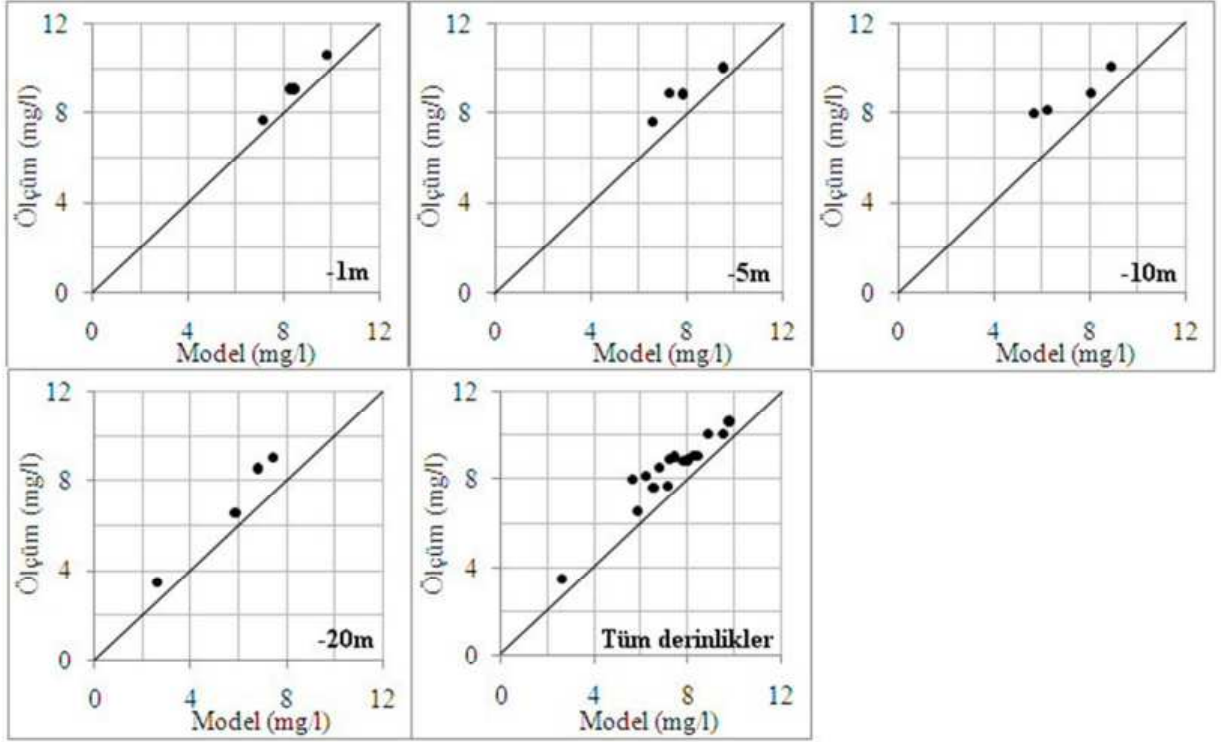
Şekil 6.153'te gösterilen düşey profillerde su kalitesi durum değişkenlerinin, M3 istasyonundaki yüksek karışım sonucu oluşan zayıf tabakalı hidrodinamik yapıya uygun olarak zayıf bir tabakalanma sergiledikleri görülmektedir. Ağustos ve Mayıs ayları dışında tüm düşey profillerin ölçümlerle iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir.

M3 istasyonu için R^2 , OKHK ve OKHK (%) ölçütleri ile model sonuçları ile ölçümler arasındaki bağıntıyı tanımlayan denklemler Çizelge 6.27'de verilmiştir. Ölçütlerin hesaplanmasına esas teşkil eden verilerin saçılım diyagramı üzerinde sunumu ise Şekil 6.154'te gösterilmiştir.

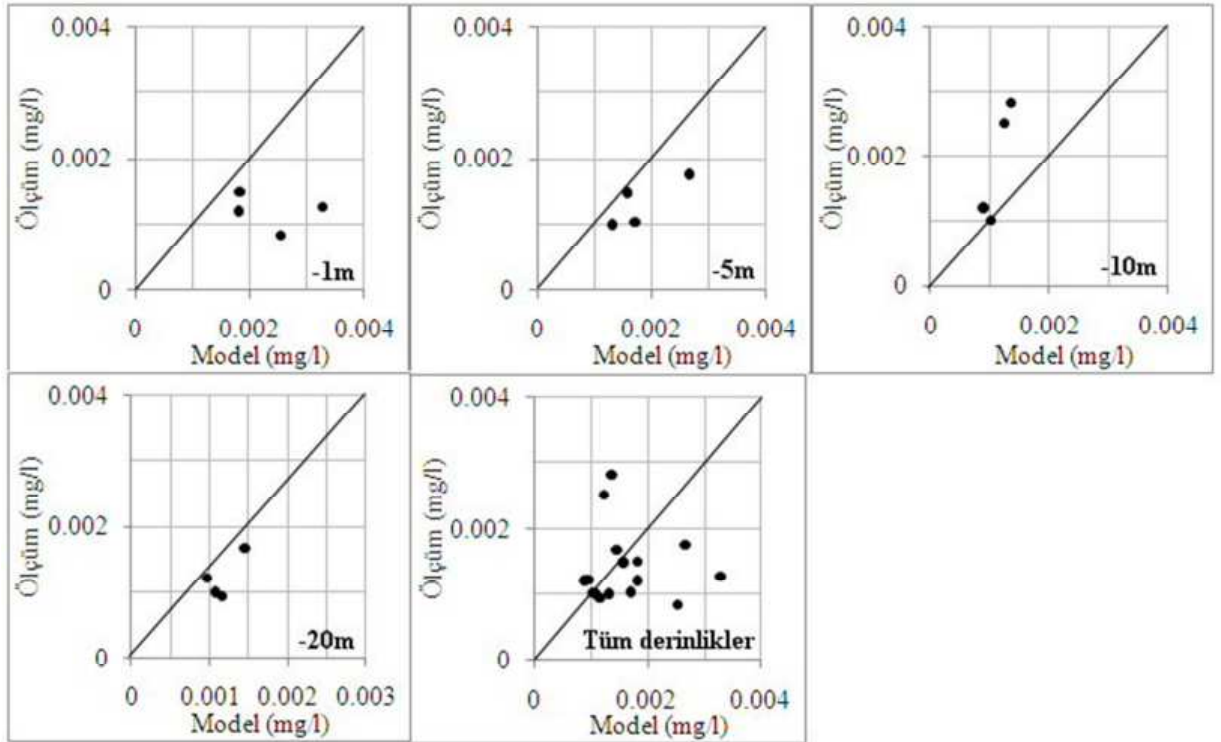
Çizelge 6.27 M3 İstasyonunda tüm su kalitesi durum değişkenleri için farklı derinliklerde model doğruluk ölçütleri.

Durum Değişkeni	ÇO				Klorofil-a			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	1.00	0.72	25	1.10x-0.14	0.08	0.001358	203	-0.11x+0.00147
-5 m	0.89	1.13	46	0.75x+3.04	0.65	0.00059	77	0.50x+0.00040
-10 m	0.89	1.69	82	0.59x+4.50	0.88	0.00098	54	4.06x-0.00267
-20 m	0.97	1.32	24	1.16x+0.32	0.54	0.00020	28	1.18x-0.00017
Tüm Derinlikler	0.90	1.30	13	0.90x-1.84	0.00	0.00084	33	-0.03x-0.00145
Durum Değişkeni	NO ₂				NO ₃			
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)
-1 m	0.32	0.00702	76	-0.9083x+0.0133	0.99	0.02302	18	1.81x-0.0253
-5 m	0.55	0.00931	149	-0.4174x+0.0094	0.99	0.01903	16	1.71x-0.0358
-10 m	0.10	0.01161	593	-0.0445x+0.0029	0.84	0.03443	98	0.35x+0.0082
-20 m	0.41	0.01144	69	-1.0672x+0.0209	0.97	0.01493	17	0.91x-0.0087
Tüm Derinlikler	0.16	0.00951	44	-0.3930x+0.0093	0.65	0.03893	25	0.98x-0.0076
Durum Değişkeni	PO ₄							
Derinlik	R ²	OKHK (mg/l)	OKHK (%)	Denklem (y=)				
-1 m	0.30	0.00602	47	0.76x+0.00819				
-5 m	0.10	0.00693	40	0.48x+0.01017				
-10 m	0.66	0.00453	31	1.28x-0.00745				
-20 m	0.49	0.00790	33	0.75x+0.00568				
Tüm Derinlikler	0.52	0.01370	19	0.74x-0.00603				

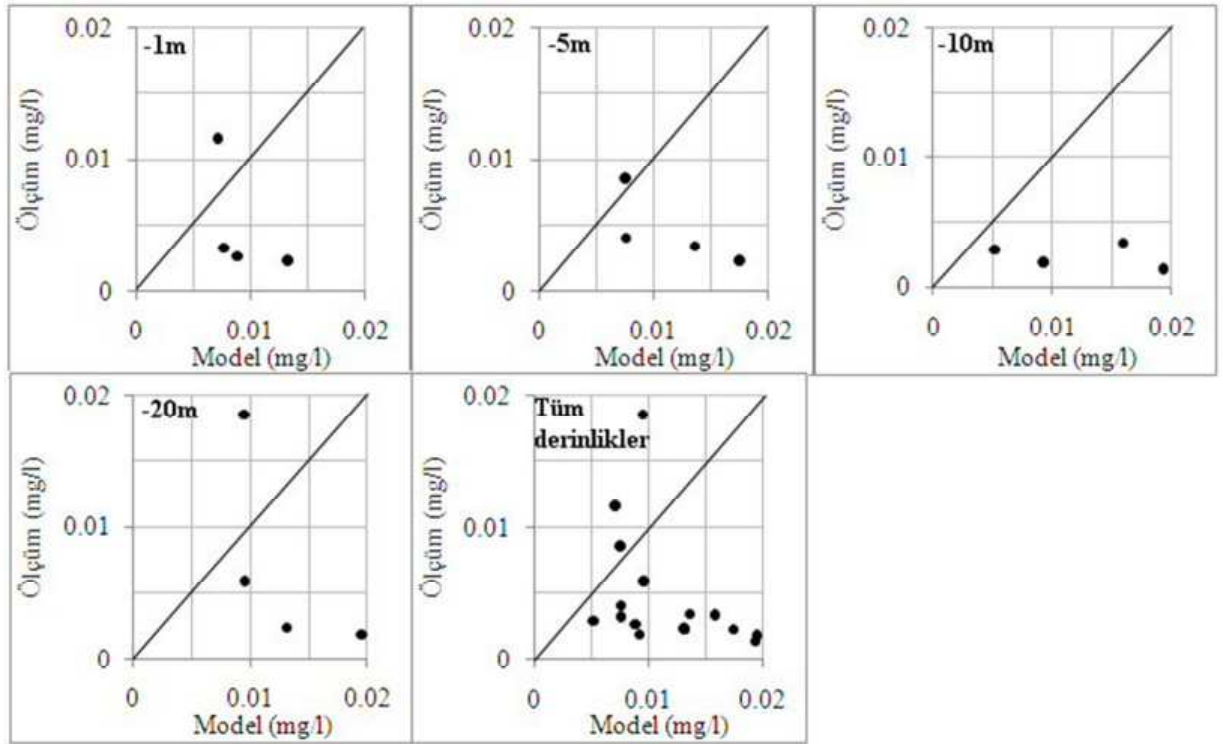
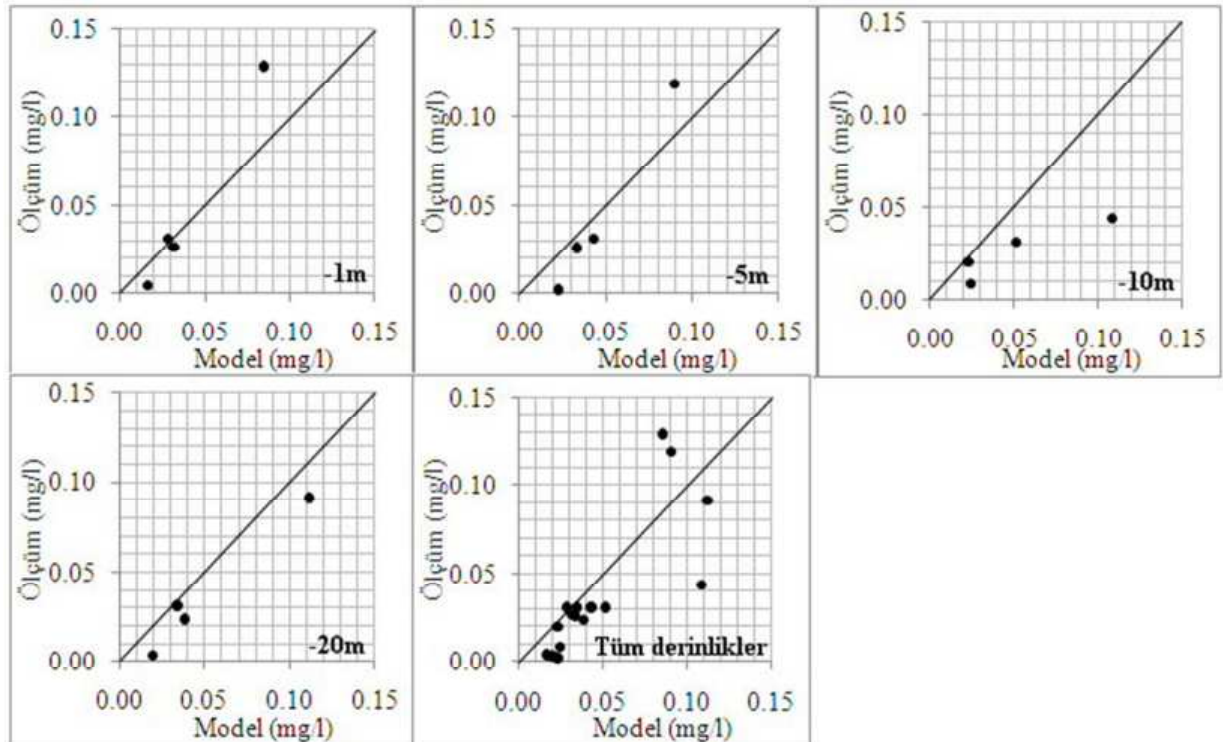
Çözünmüş Oksijen (ÇO)



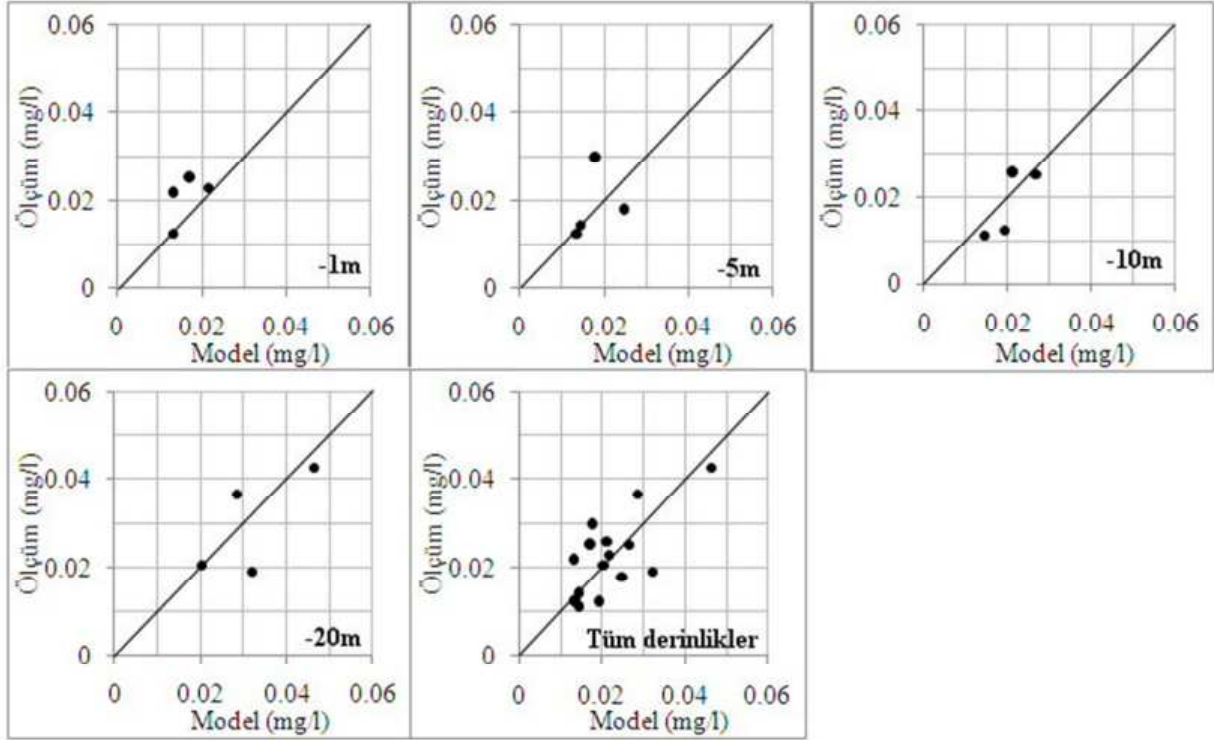
Klorofil-a



Şekil 6.154 M3 İstasyonunda tüm veri seti ve tüm su kalitesi durum değişkenleri için model sonuçları-ölçüm verileri saçılım diyagramları.

Nitrit (NO_2)Nitrat (NO_3)

Şekil 6.154 Devamı.

Fosfat (PO₄)

Şekil 6.154 Devamı.

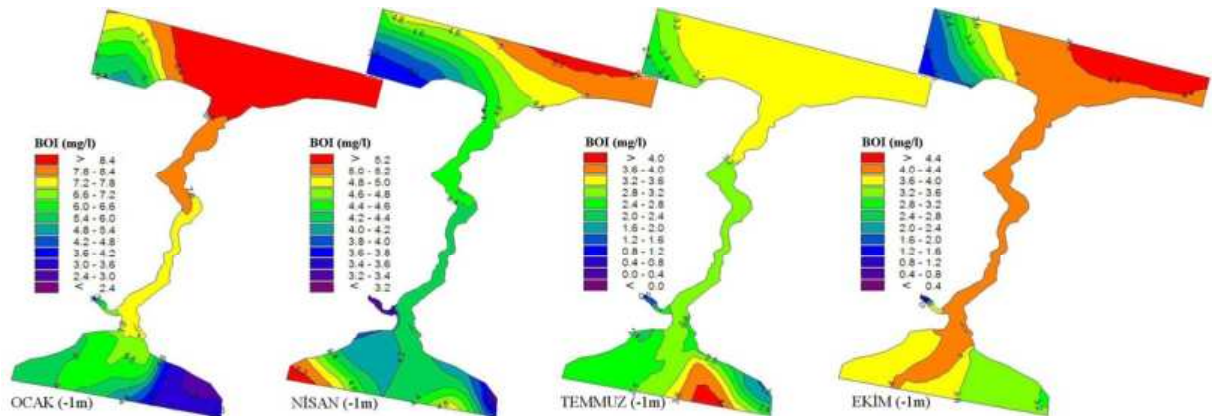
Çizelge 6.27 ve Şekil 6.154 bir arada değerlendirildiğinde modelin CO , NO_3 ve PO_4 konsantrasyonları için oldukça iyi bir benzeşim sağladığı görülmektedir. NO_2 konsantrasyonları için ise en düşük korelasyon katsayıları ile en yüksek OKHK değerlerini verdiği görülmektedir. Bu sonuçlar da yine model alanı içerisindeki diğer istasyonlarda elde edilen model doğruluğu sonuçlarını desteklemektedir.

Üretilen İstanbul Boğazı su kalitesi modelinin doğruluğunun sınanması için su kalitesi izleme çalışmalarında kullanılan tüm istasyonlarda ölçülen veriler, model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çok yönlü ve doğru bir değerlendirme yapabilmek için sonuçlar zaman serileri, düşey profiller, farklı doğruluk ölçütleri (R^2 , OKHK, OKHK (%)) ve saçılım diyagramları kullanılarak incelenmiştir. Genel olarak İstanbul Boğazı su kalitesi modelinin model alanı içerisindeki su kalitesini benzeştirmekte yüksek bir doğruluk sergilediği görülmüştür. Özellikle CO , Klorofil-a, NO_3 ve PO_4 konsantrasyonlarının tahmininde büyük bir doğruluk yakalanmıştır. NO_2 parametresi için ise yılın ilk altı aylık döneminde yakalanan yüksek doğruluğun ikinci altı aylık dönemde sağlanamadığı görülmüştür. Burada en etkili nedenin kaynak konsantrasyonlarındaki dikkate alınamayan bir değişim olduğu düşünülmektedir. Bundan başka yine tabana yakın derinliklerde ölçülen konsantrasyon değerlerinin su kalitesi modeli tarafından tahmin edilemediği görülmüştür. Bunun en önemli

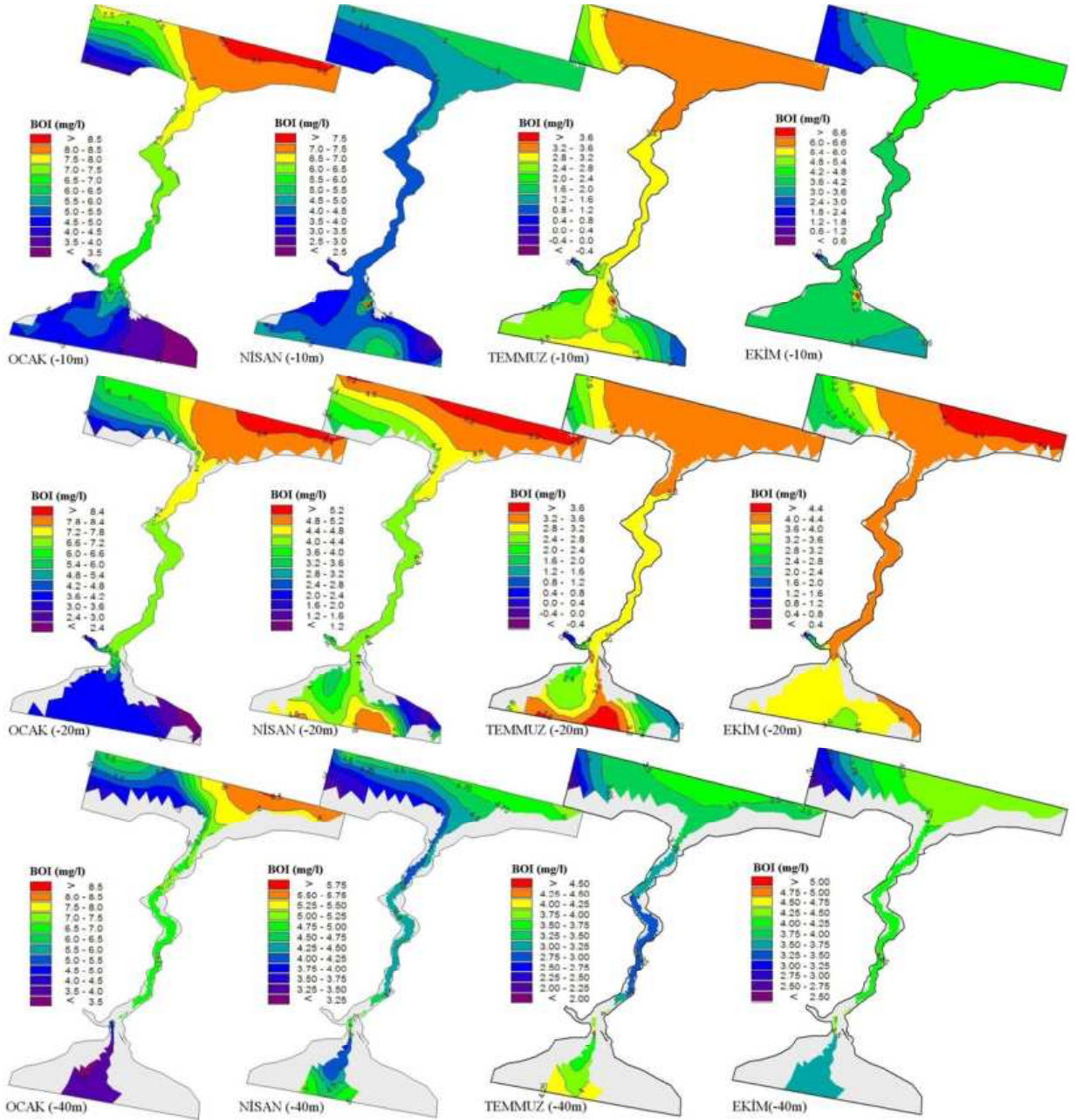
nedeni ise hidrodinamik modelden ileri gelmektedir. Bölüm 6.2’de de anlatıldığı gibi hidrodinamik modelde bu çalışmada uygulanan tekniklerle üstesinden gelinemeyen bir yüksek düşey difüzyon sorunu ile karşılaşmıştır. Bu durum Boğaz’daki güçlü tabakalanma yerine model alanı içerisinde zayıf bir tabakalanmanın oluşmasına neden olmuştur. Bu da sıcaklık-tuzluluk tabakalanmasını etkilediği gibi akıntı hızlarında da belli bir miktar hataya neden olmuştur. Hidrodinamik yapıdaki bu sıkıntılar, su kalitesi durum değişkenlerinin sergilediği tabakalı yapının model sonuçlarında yakalanamaması ile ortaya çıkmıştır. Bir başka olası neden ise kaynak konsantrasyonlarındaki belirsizliklerdir.

6.3.5 İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modeli Sonuçları

İstanbul Boğazı Su Kalitesi Modelinin doğrulanmasının ardından modelin ürettiği sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada model 01.11.2004-01.11.2005 arasındaki 1 yıllık süre için çalıştırılmıştır. Bu süre içerisinde İstanbul Boğazı model alanı içerisinde BOİ, ÇO, Klorofil-a, NO_2 , NH_4 , NO_3 ve PO_4 durum değişkenlerine ait zamansal ve uzamsal dağılımlar elde edilmiştir. Model alanı içerisinde herhangi bir konumda, herhangi bir derinlikte ve 1 yıllık süre içerisinde herhangi bir saatte herhangi bir su kalitesi durum değişkenine ait konsantrasyon değerinin model çıktılarında elde edilmesi mümkündür. Ancak burada hepsini vermek mümkün olmayacağından her mevsimden seçilen bir zaman adımı için -1 m, -10 m, -20 m, -40 m derinliklerde yukarıda sayılan yedi durum değişkeninin model alanı içerisindeki dağılımları verilmiştir. Şekil 6.155’te BOİ konsantrasyonları gösterilmiştir. Bu çalışmada ölçüm verilerinin uygun olmaması nedeniyle BOİ durum değişkeni açısından modelin doğruluğu test edilememiştir. Ancak BOİ süreçlerinde etkin olan model sabitleri kalibre edilmiştir. Bu nedenle bu bölümde BOİ konsantrasyonlarının da değerlendirmesine yer verilmiştir.



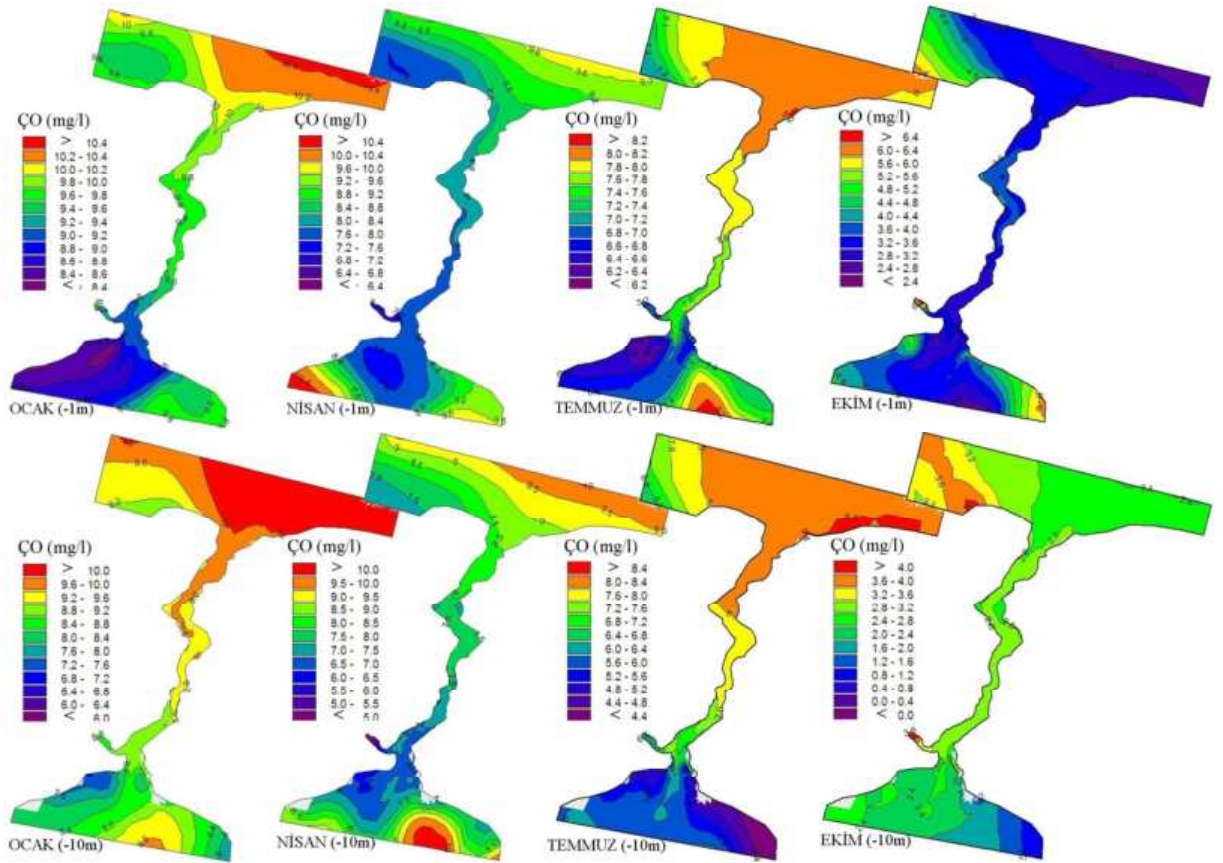
Şekil 6.155 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında BOİ konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.



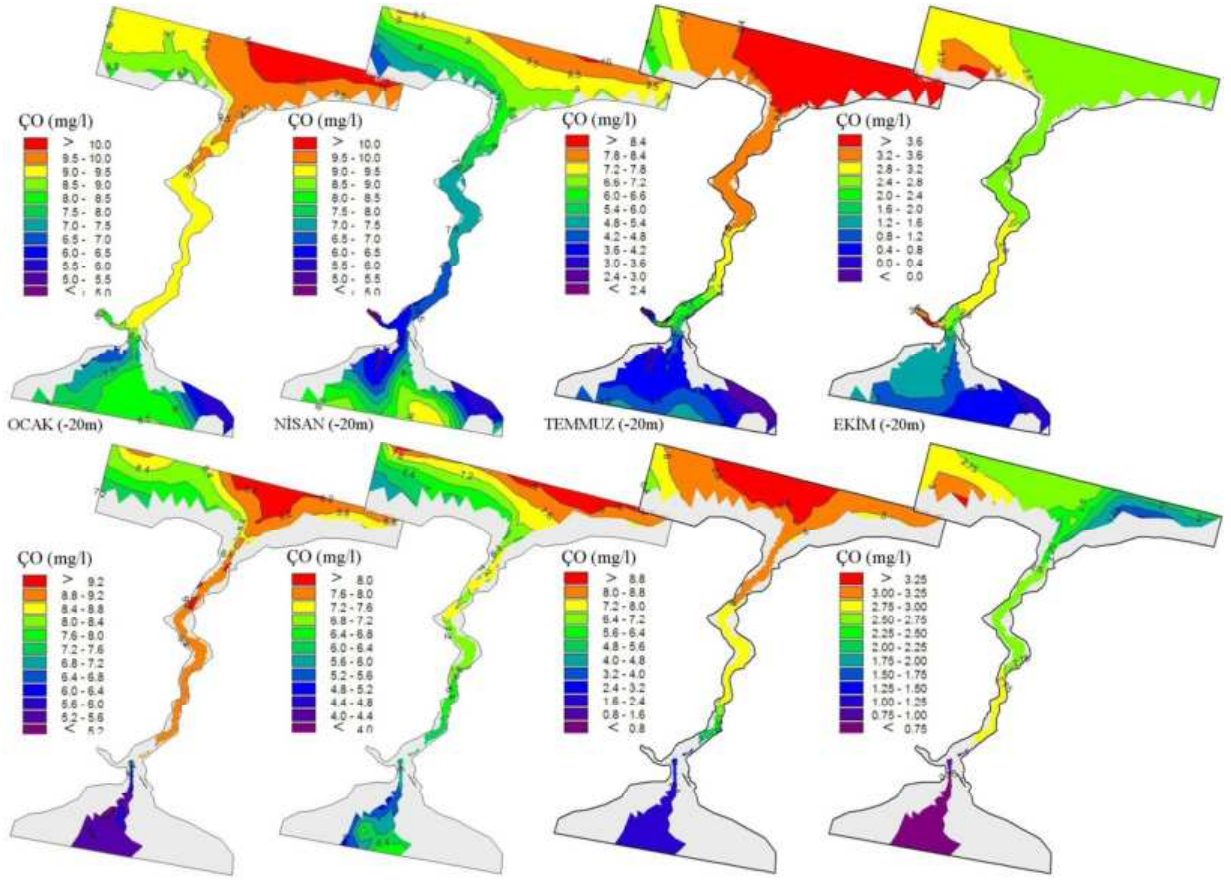
Şekil 6.155 Devamı.

Şekil 6.155'te ilk olarak yüzeyden 1m derinlikteki konsantrasyon değerleri her bir mevsimi temsilen Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarından seçilen birer zaman adımı için verilmiştir. Buna göre verilen dağılımlar arasında en yüksek konsantrasyonların Ocak ayında olduğu görülmektedir. Yine Ocak ayındaki veriler BOİ konsantrasyonlarının model alanı içerisindeki en yüksek değerlerinin Karadeniz ve en düşük değerlerinin de Marmara Denizi açık sınırlarında olduğunu göstermektedir. Nisan ayına gelindiğinde ise Marmara Denizi açık sınırında da konsantrasyonların arttığı ve her iki sınırda da 5 mg/l'nin üzerinde konsantrasyon değerleri görüldüğü dikkati çekmektedir. Temmuz ayında konsantrasyon değerlerinin düştüğü

ve 4 mg/l'nin üzerindeki konsantrasyonların yalnızca Marmara Denizi açık sınırında olduğu görülmektedir. Ekim ayında ise tüm modele alanı içerisinde 6.5 mg/l'nin altında kaldığı görülmekte, en yüksek konsantrasyon değerinin ise Haydarpaşa kıyılarında (-10 m) derinlikte olduğu dikkati çekmektedir. Tüm aylar için BOİ konsantrasyonları derinlikle artmaktadır. Bu durum derin deniz deşarjlarının etkisine işaret etmektedir. Karadeniz'de açık sınırında üst tabakada görülen yüksek konsantrasyonlar Karadeniz'in tatlı su kaynakları ile taşınan kirliliğin etkisi ve alt tabakadaki yüksek konsantrasyon değerlerinin de İstanbul Boğazı boyunca yerleştirilen derin deniz deşarjlarından kaynaklanan kirliliğin etkisi ile olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.156'da Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında Boğaz'ın -1 m, -10 m, -20 m ve -40 m derinliklerinde su kalitesi modeli ile hesaplanan ÇO konsantrasyonlarının uzamsal dağılımları verilmiştir.

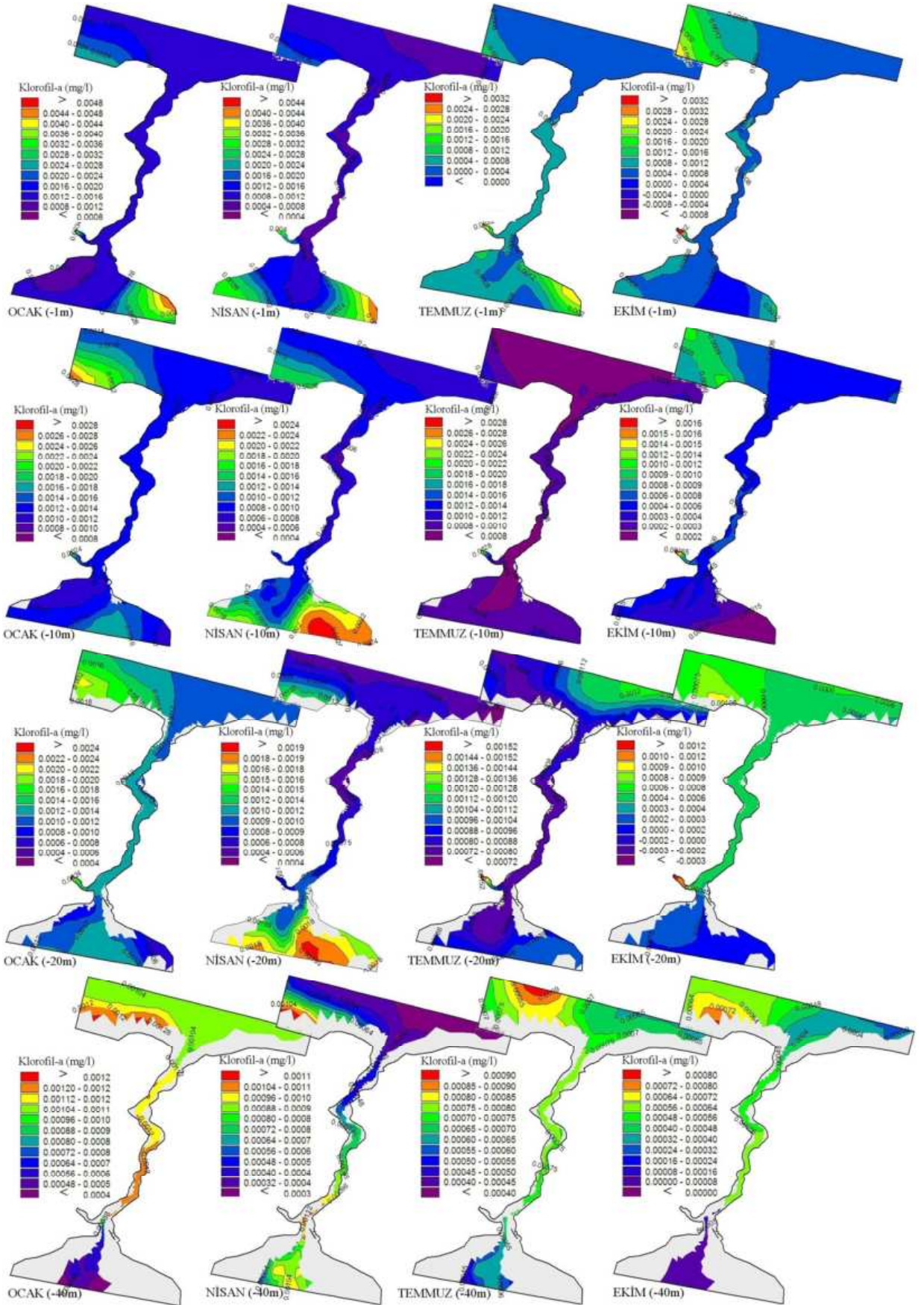


Şekil 6.156 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında ÇO konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.



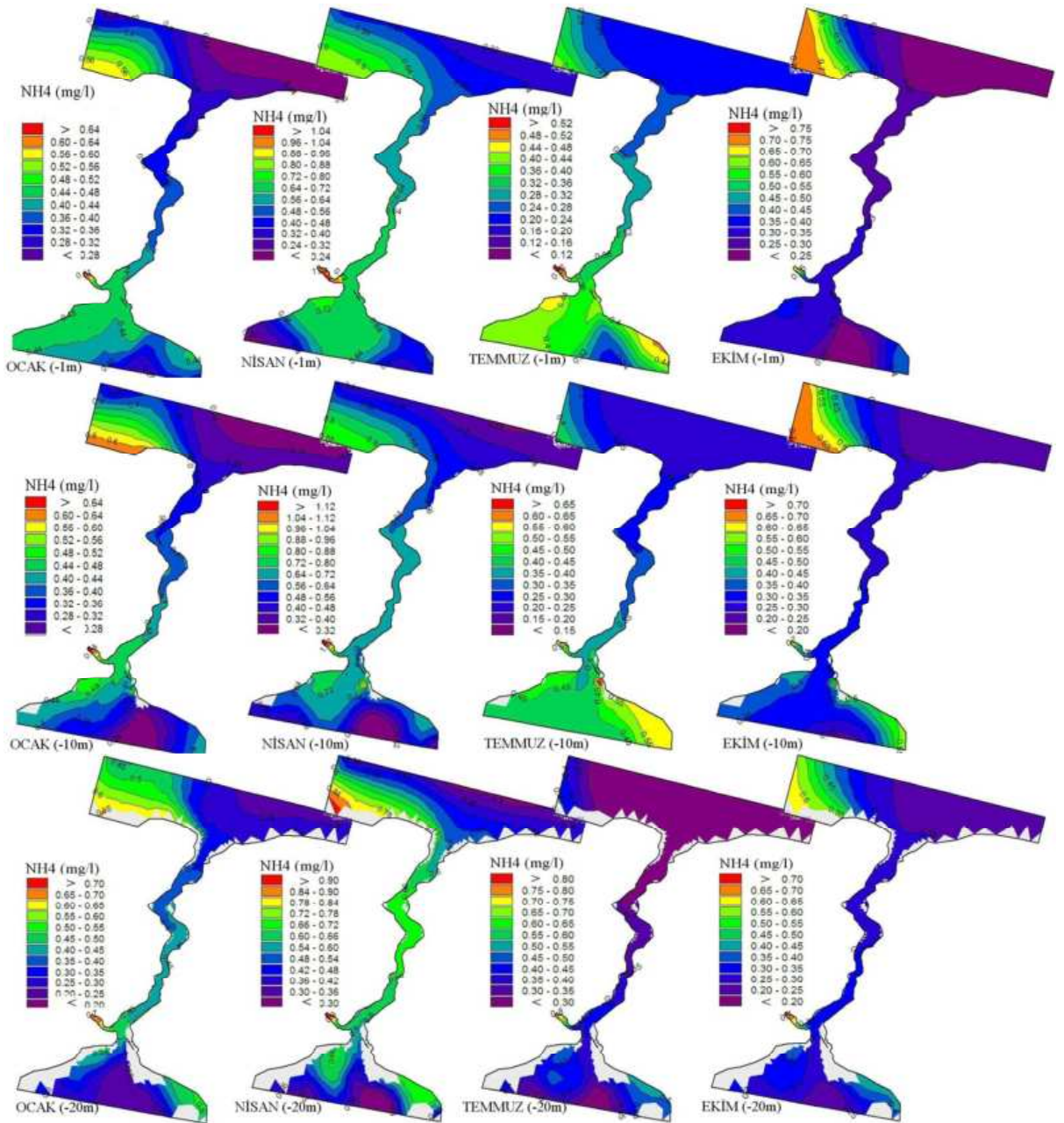
Şekil 6.156 Devamı.

Şekil 6.156'dan görüldüğü gibi, ÇO konsantrasyonları Boğaz'ın kuzeyinden güneyine gidildikçe azalmaktadır. Bu eğilim tüm derinliklerde geçerliliğini korumaktadır. Özellikle Marmara Denizi ve Haliç'te ÇO konsantrasyonlarının zaman zaman 2 mg/l'nin altına düştüğü görülmektedir. Ekim ayında -10m ve daha derin kısımlarda Marmara Denizi açık sınırı yakınlarında ÇO konsantrasyonlarının 0'a kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum Marmara Denizi'ndeki aşırı kirlenmeye de işaret etmektedir. ÇO tüm sucul sistemlerde canlı yaşamı açısından kritik ve önemli bir parametredir. Türk Boğazlar Sistemi'nde gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Sonuçlar zamansal düzlemde ele alındığında en yüksek ÇO konsantrasyonlarının Ocak ayında olduğu görülmektedir. Bu durum sıcaklıkların düşmesi ile oksijen çözünürlüğünün artmasından ileri gelmektedir. Şekil 6.157'de BOİ ve ÇO durum değişkenleri için yapılan uzamsal ve zamansal değerlendirmeler bu kez Klorofil-a durum değişkeni için yapılmıştır.

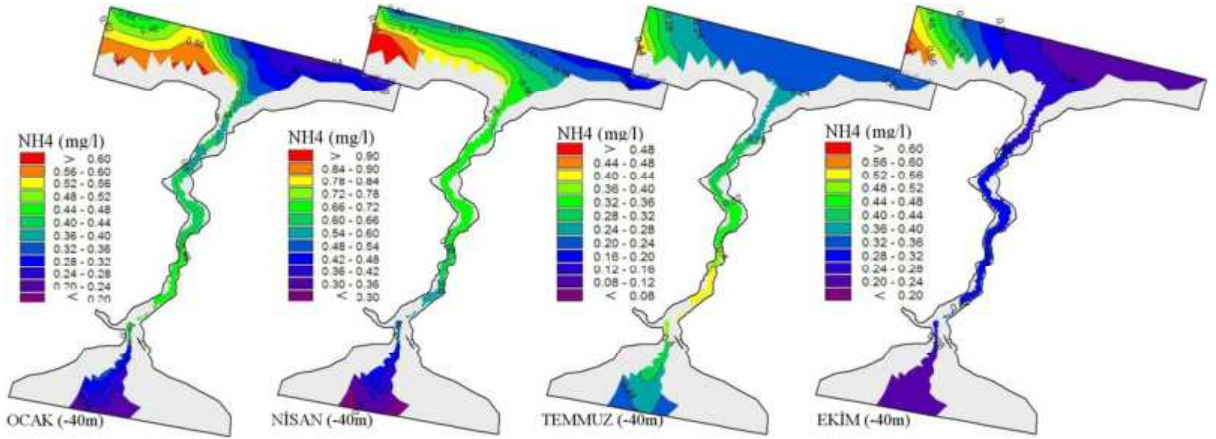


Şekil 6.157 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında Klorofil-a konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.

Klorofil-a durum değişkeni sucul sistemlerde birincil üretimin bir göstergesidir. Bu nedenle izlenmesi ve tahmini önemlidir. Birincil üretimin gerekliliklerinden bir diğeri de ışık olduğundan Şekil 6.157’de dikkate alınan tüm zaman adımları için en yüksek klorofil-a konsantrasyonlarının yüzeye yakın derinliklerde hesaplandığı ve derinlik azaldıkça konsantrasyonların da azaldığı görülmektedir. En yüksek konsantrasyonların Marmara Denizi açık sınırında ve yakınlarında oluştuğu görülmektedir. Bu da birincil üretimin fazlalığına dolayısıyla da kirlenmenin fazlalığına işaret etmektedir. Nutrientler fitoplanktonik aktivite ile tüketilmektedir. Şekil 6.158’de İstanbul Boğazı model alanı içerisinde NH_4 konsantrasyonlarının uzamsal ve zamansal değişimleri gösterilmiştir.

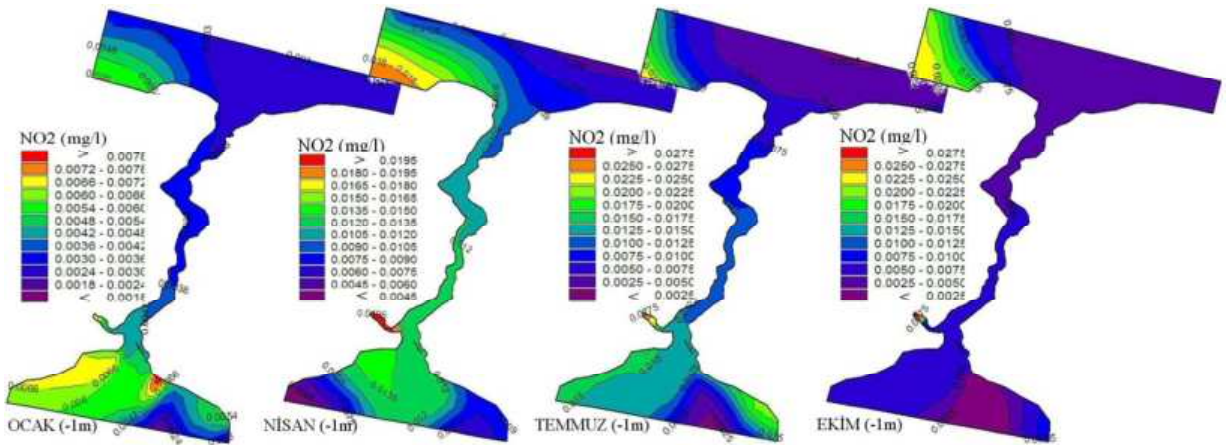


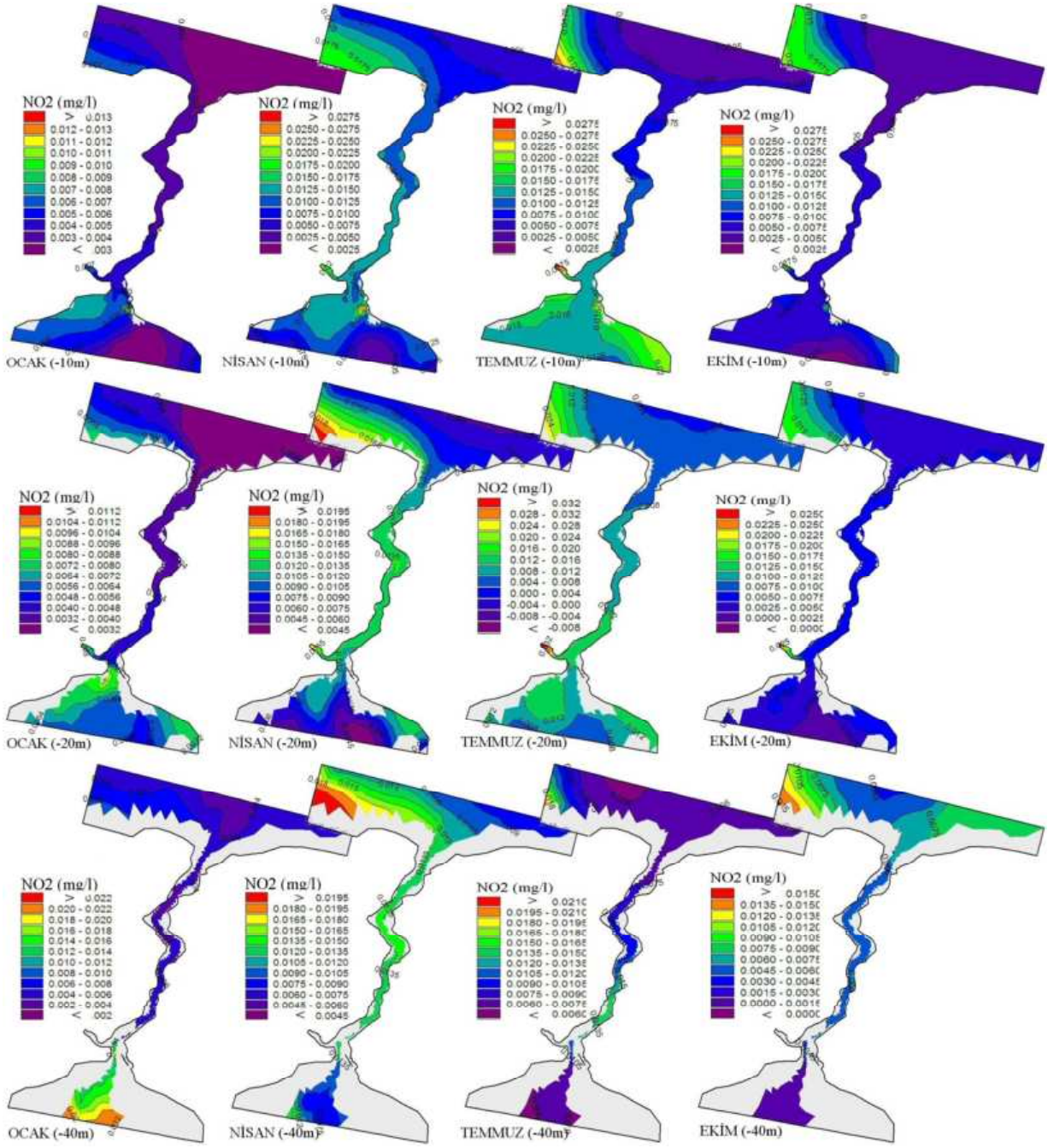
Şekil 6.158 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında NH_4 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.



Şekil 6.158 Devamı.

Yine mevcut ölçümler olmadığından model tarafından hesaplanan NH_4 konsantrasyonlarının da doğrulanması yapılamamıştır. Ancak modelde dikkate alınan amonyum ve nitrifikasyon süreçlerinde yer alan sabitlerin kalibrasyonu yapıldığından bu bölümde amonyum iyonu konsantrasyonlarına da yer verilmiştir. Amonyum konsantrasyonlarının genellikle 1.5 mg/l'nin altında kaldığı görülmektedir. En yüksek konsantrasyon değerlerinin ise tüm aylarda ve tüm derinliklerde Haliç'te olduğu görülmektedir. Haliç bölgesindeki hidrodinamik yapı incelendiğinde burada akıntı hızlarının oldukça düşük ve kısmen akıntısız bir bölge kabul edilebileceği görülmektedir. Bu durum da bu bölgede konsantrasyonların birikimine zemin hazırlamaktadır. Genel olarak İstanbul Boğazı model alanı içerisinde NH_4 konsantrasyonlarının kabul edilebilir değerler içerisinde olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 6.159'da NO_2 konsantrasyonlarının İstanbul Boğazı içerisindeki uzamsal ve zamansal değişimlerine yer verilmiştir.

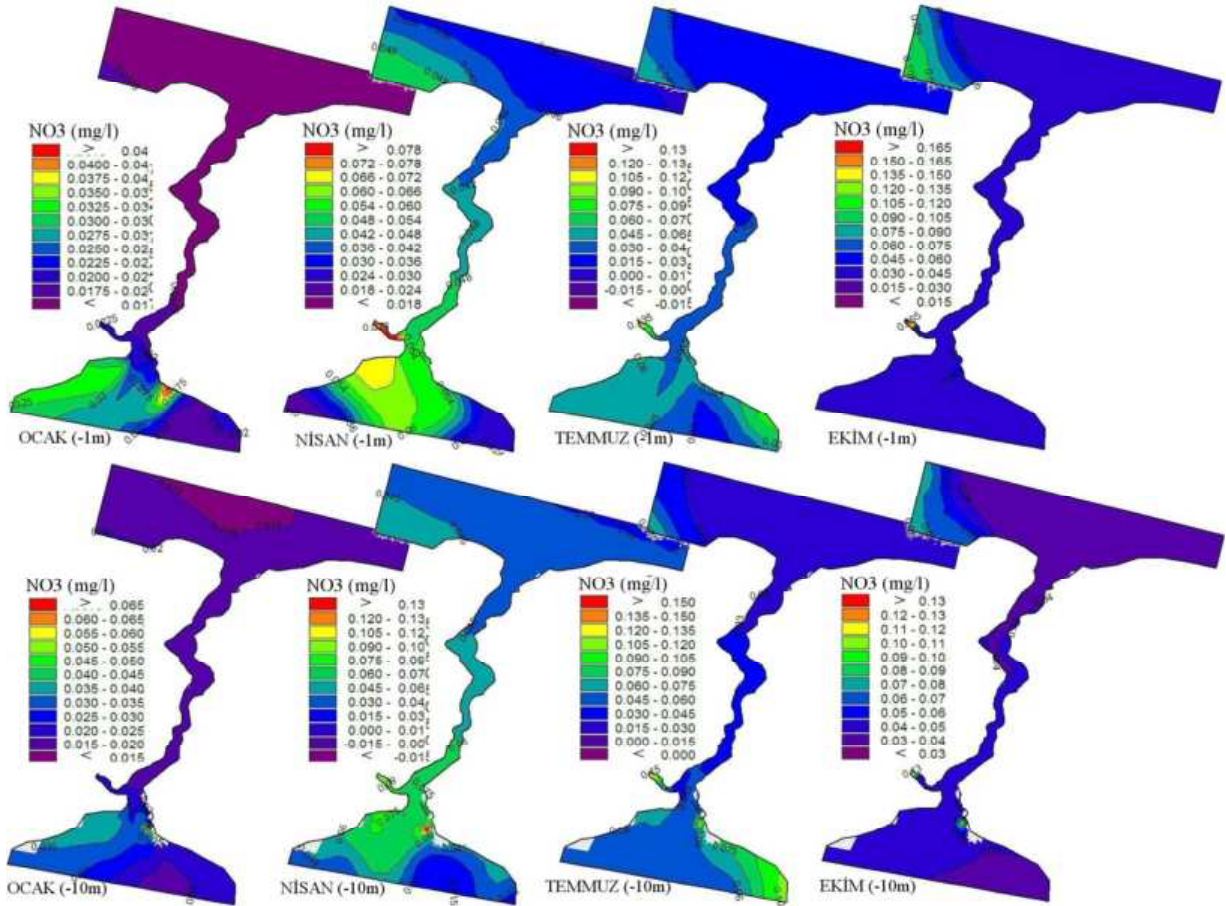
Şekil 6.159 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında NO_2 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.



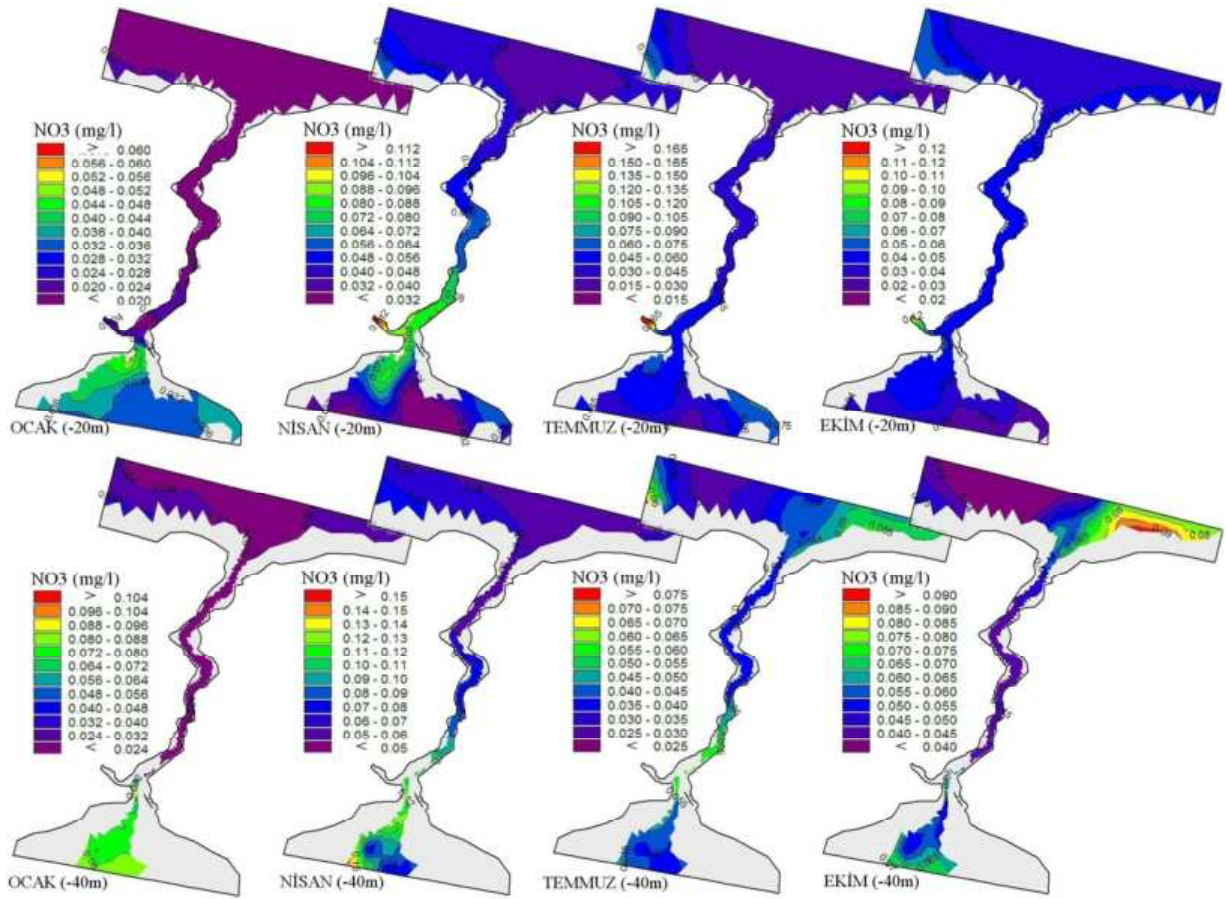
Şekil 6.159 Devamı.

Bu çalışmada oluşturulan İstanbul Boğazı su kalitesi modelinin en düşük doğrulukla benzeştirdiği parametre NO_2 olmuştur. Şekil 6.159'da gösterilen dağılımların yorumlanmasında bu nokta göz önünde tutulmalıdır. Burada verilen dağılımlardan Ocak ve Nisan aylarına ait dağılımlar kalibrasyon dönemi içerisinde kalmaktadır. Bu dönem genel olarak yüksek bir doğrulukla benzeştirilmiştir. Ancak yılın geri kalan kısmında model konsantrasyonları ölçümlere göre daha yüksek tahmin etmiştir. Ocak ve Nisan aylarına bakıldığında NO_2 konsantrasyonlarının en yüksek 0.03 mg/l değerine kadar çıktığını

göstermektedir. Ve en yüksek konsantrasyon değerlerinin Haliç ve Haydarpaşa açıklarında olduğu görülmektedir. Haliç'teki yüksek konsantrasyonların o bölgedeki akım yapısının ve düşük akıntı hızlarının etkisinden ve Haydarpaşa'daki yoğunluğun ise güneybatılı (lodos) fırtınaların etkisi ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Güneyli rüzgârların etkisi ile düşey karışım artmakta ve özellikle bu bölge bozulan tabakalı yapı içerisinde derin deniz deşarjlarından kaynaklanan kirlilik üst tabakalara rahatlıkla taşınabilmektedir. Bundan başka yağışlı havaların etkisiyle yüzeysel akışla ve havalanma ile suya önemli miktarda azot girişi olmakta, ve bu durum da NO_2 konsantrasyonlarını etkilemektedir. Dolayısıyla meteorolojik etkiler ve onların etkisiyle ortaya çıkan hidrodinamik yapı, su kalitesi durum değişkenlerinin Boğaz'daki dağılımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 6.160'ta NO_3 konsantrasyonlarının model alanı içerisindeki zamansal ve uzamsal değişimi verilmiştir.

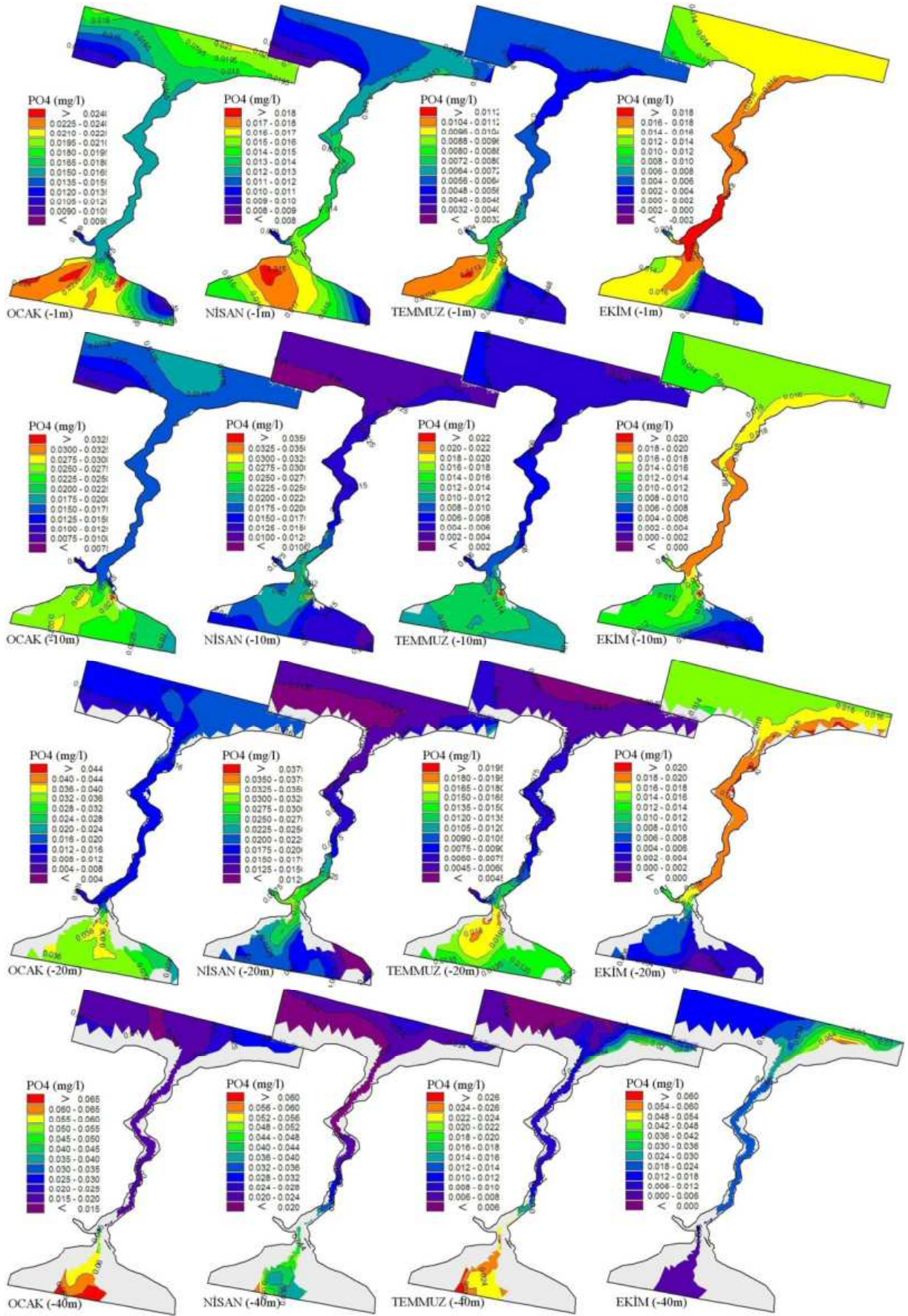


Şekil 6.160 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında NO_3 konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.



Şekil 6.160 Devamı.

İstanbul Boğazı su kalitesi modeli NO_3 konsantrasyonlarının benzeştirilmesinde korelasyon katsayısı 0.90'lara varan yüksek bir doğruluk yakalamıştır. Buna dayanarak Şekil 6.160'ta verilen dağılımların değerlendirmesi yapıldığında konsantrasyonların 0.20 mg/l'nin altında kaldığı görülmektedir. Yüksek konsantrasyon değerlerinin Boğaz'ın iç kısımları ile Marmara Denizi açık sınırı yakınlarında olduğu görülmektedir. Şekle bakıldığında konsantrasyonların bölgesel olarak artışlar gösterdiği, bunun yanı sıra model alanı içerisinde genel olarak düşük değerlerde seyrettiği dikkati çekmektedir. Özellikle Haliç ve Kadıköy açıklarında birikimler görülmektedir. Haliç'teki birikimin en önemli nedeni Boğaz'daki akıntı yapısıdır. Akıntıların etkisiyle konsantrasyonlar model alanı içerisinde taşınırken bir yandan da girintili, çıkıntılı Boğaz kıyıları boyunca oluşan ölü noktalarda ya da başka bir deyişle akıntı hızlarının çok düşük olduğu yerlerde birikimler oluşmaktadır. Kadıköy açıklarında ise derin deniz deşarjının etkisi burada su kolonundaki şiddetli karışım ile birleşerek yüksek konsantrasyon değerlerinin üst tabakalara ulaşmasına neden olmaktadır. Model alanının bu kısmında görülen şiddetli karışımın en önemli nedenlerinden biri bölgede hâkim olan güneyli rüzgarlardır. Son olarak Şekil 6.161'de PO_4 konsantrasyonlarının model alanı içerisindeki uzamsal ve zamansal değişimleri verilmiştir.



Şekil 6.161 Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında PO₄ konsantrasyonlarının yüzeyden 1 m, 10 m, 20 m ve 40 m derinliklerde model alanı içerisindeki değişimleri.

Bu çalışmada dikkate alınan son nütrient PO_4 'tür. PO_4 'ün de İstanbul Boğazı model alanı içerisindeki en önemli kaynağı derin deniz deşarjlarıdır. Bu çalışmada üst ve ara tabakadaki PO_4 konsantrasyonları başarı ile benzeştirilmiştir. Şekil 6.161 incelendiğinde yüksek konsantrasyon değerlerinin genellikle model alanının güneyinde olduğu görülmektedir. Konsantrasyonlardaki bu artışa yine derin deniz deşarjlarının model alanının bu kısmındaki yüksek düşey karışım ile su kolonu boyunca difüze olması neden olmaktadır. Konsantrasyonlar genel olarak 1 mg/l'nin altında kalmaktadır ve derinlik arttıkça konsantrasyonlarda önemli bir artış meydana gelmektedir.

Tüm model sonuçları bir arada değerlendirildiğinde İstanbul Boğazı'ndaki akıntı yapısının ve bu akıntı yapısını şekillendiren su seviyesi ve yoğunluk farkı ile meteorolojik koşulların su kalitesi durum değişkenlerinin konsantrasyon dağılımları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR

İstanbul Boğazı'nın yoğunluk ve su seviyesi farkından kaynaklanan iki tabakalı özel akım yapısı içerisinde su kalitesi durum değişkenlerinin dağılım, değişim ve dönüşümlerinin benzeştirilmesi amacı ile hidrodinamik ve su kalitesi modellerini içeren 3 boyutlu bileşik bir modelleme sistemi kurulmuştur. Model sisteminin kurulmasında, başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesinde Ulaştırma Bakanlığı DLH Marmaray Bölge Müdürlüğü tarafından toplanan oşinografik ve meteorolojik veriler ile İSKİ tarafından toplanan su kalitesi durum değişkenlerine ait veriler kullanılmıştır (Sur vd., 2004, 2005). Model alanı üzerinde hâkim atmosferik basınç alanları ve rüzgâr hız ve yön değişimleri gibi meteorolojik veriler ECMWF'ten elde edilmiştir. Hidrodinamik model; taban pürüzlülüğü, Smagorinsky katsayısı ve yatay ve düşey dispersiyon ölçek parametreleri ile kalibre edilmiştir. Su kalitesi modeli ise çok sayıda kalibrasyon parametresinin mevcut olması nedeniyle hassasiyet analizi sonucunda belirlenen parametreler kullanılarak kalibre edilmiştir. İstanbul Boğazı ile Boğaz'ın Karadeniz ve Marmara Denizi girişlerinde akıntı, sıcaklık ve tuzluluk değişkenleri ile su kalitesi durum değişkenlerine ait zamansal ve uzamsal dağılım ve değişimler benzeştirilmiş ve 2004-2005 yıllarına ait veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Üretilen hidrodinamik ve su kalitesi modellerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- İstanbul Boğazı'nın karmaşık batimetrisini ve girintili çıkıntılı kıyılarını en uygun yaklaşıklıkla temsil edebilecek yüksek çözünürlüklü bir hesap ağı üretilmiştir. Üretilen hesap ağı Boğaz'daki hidrodinamik yapının, sıcaklık ve tuzluluk alanları ile su kalitesi durum değişkenlerinin konsantrasyonları benzeştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Doğru hesap ağının üretilmesinde farklı ağ sistemleri kullanılmıştır. Dikdörtgen elemanlardan oluşan yapılandırılmış hesap ağı İstanbul Boğazı'nın girintili çıkıntılı kıyı yapısı ve oldukça değişken taban topoğrafyası nedeniyle uygun sonuçlar vermemiştir. Elde edilen hız alanları Boğaz'daki akım yapısını yansıtmamaktadır. Bunun ardından Boğaz ekseninde ana akım kanalı boyunca yapılandırılmış ağın kullanıldığı ve kıyılarda ise yapılandırılmamış ağ sisteminin kullanıldığı bir hibrit hesap ağı oluşturulmuştur. Ancak hibrit hesap ağı da Boğaz'ın akıntı hızlarını benzeştirmede yetersiz kalmış ve gerçekçi olmayan oldukça düşük hız değerleri vermiştir. Son olarak model alanının yapılandırılmamış elemanlardan oluşan hesap ağı ile ayrıklaştırılmasına karar verilmiştir. Üretilen farklı çözünürlükteki pek çok hesap ağı içerisinde gerçekçi bilgisayar zamanları ile çalıştırılacak en hassas hesap ağı seçilmiştir. Yapılan çalışmada hesap ağının model doğruluğu üzerinde oldukça büyük etkiye sahip olduğu

görülmüştür. Model hesap ağı kadar model sınırlarının da model sonuçları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada model sınırları İstanbul Boğazı sınırlarının dışına çıkılarak, kuzeyde Karadeniz ve güneyde ise Marmara Denizi'nin içlerine doğru bir miktar genişletilmiştir. Böylece model sınırlarında yaşanabilecek bazı düzensizliklerin akım ilerledikçe model alanı içerisinde etkisiz kalması sağlanmıştır.

- Hidrodinamik model; taban pürüzlülüğü, Smagorinsky sabiti, yatay ve düşey dispersiyon ölçek parametrelerine karşı kalibre edilmiştir. İstanbul Boğazı'nın taban pürüzlülüğüne dair net bir veri olmadığından taban pürüzlülüğü kalibrasyon parametresi olarak seçilmiştir. 0-1 m arasındaki taban pürüzlülükleri dikkate alınmıştır. Kalibrasyon süreci sonunda 0.45 m taban pürüzlülüğü değerinin en uygun sonuçları verdiği görülmüştür. Hidrodinamik modelde yatay eddy viskozitesinin belirlenmesinde Smagorinsky ifadesi kullanılmıştır. Bu ifadede Smagorinsky sabiti kalibrasyon parametresi olarak seçilmiştir. Smagorinsky sabitinin literatürde tanımlanan aralığı 1-0.25'dir. Bu çalışmada Smagorinsky sabiti için kalibre edilmiş değer 0.28 olarak elde edilmiştir. Düşey eddy viskozitesinin hesabında k-ε eddy viskozitesi modeli kullanılmıştır. Smagorinsky ve k-ε gibi eddy viskozitesi modellerinin kullanıldığı durumlarda, yatay ve düşey dispersiyonun hesabında sabit dispersiyon katsayısı yerine eddy viskozitesi ile ölçeklendirilmiş dispersiyon katsayısı kullanılması model doğruluğunu arttırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yatay ve düşey dispersiyon ölçek parametreleri kalibrasyon parametresi olarak seçilmiştir. Yatay ve düşey dispersiyon ölçek parametrelerinin kalibre edilmiş değerleri 1 olarak elde edilmiştir. Model kalibrasyonunda B istasyonunda toplanan akıntı verilerinden, bu istasyondaki ana akım doğrultusu olan kuzey-güney yönlü akıntı esas alınmıştır. Geliştirilen İstanbul Boğazı Hidrodinamik modeli kalibrasyon dönemi (01.11.2004-12.11.2004) içerisinde Boğaz'daki iki tabakalı akıntı sistemini oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin etmiştir. Sonuçlar yüzeyden itibaren 1 m aralıklarla 24 ayrı derinlikte R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Kalibrasyon dönemi içerisinde en yüksek R değeri %90 olarak yüzeyden 8.75 m ile 12.75 m derinlikler arasında elde edilmiştir. Yüzeyde R değeri %78 olmuştur. En düşük R değeri ise %62 ile yüzeyden 3.75 m derinlikte elde edilmiştir. En düşük OKHK ve MOH değerleri sırasıyla 0.18 m/s ve 0.14 m/s olarak yine ara tabakada elde edilmiştir. En yüksek OKHK ve MOH değerleri sırasıyla ise 0.47 m/s ve 0.43 m/s olarak tabana yakın derinliklerde elde edilmiştir.

- Hidrodinamik model 4 farklı dönem için doğrulanmıştır. Her bir mevsim için kalibrasyon dönemi ile aynı uzunlukta 4 ayrı veri seti oluşturulmuştur. Model sonuçları yine yüzeyden itibaren 1 m aralıklarla 24 farklı derinlikte R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak

ölçümlerle karşılaştırılmıştır. İstanbul Boğazı hidrodinamik modeli doğrulama sonuçları değerlendirildiğinde oldukça başarılı bulunmuştur. Ancak akıntı hızlarının çok düşük olduğu yaz aylarında R değerlerinde düşme ve OKHK ile MOH değerlerinde artış gözlenmiştir. Bunun pek çok farklı nedeni vardır. Öncelikle hem kalibrasyon hem de doğrulama dönemlerine ait zaman serileri incelendiğinde ölçüm sonuçlarındaki yüksek çalkantının model sonuçlarında olmadığı görülmektedir. Ölçüm verileri 1 saat aralıklı olmasına karşın, model kurulumunda kullanılan rüzgâr alanları 6 saat ortalama meteorolojik model sonuçlarından elde edilmiştir. Bu nedenle model çoğunlukla ani meteorolojik değişimlerden kaynaklanan bu çalkantıları yakalayamamıştır. Ancak ortalama akıntı hızını her zaman oldukça iyi bir doğrulukla benzeştirmiştir. Akıntı hızlarının düşük olduğu dönemlerde bu durum model doğruluğunun azalmasına ve hataların artmasına neden olmuştur. Hidrodinamik model sonuçları ile ölçümler arasındaki farkların önemli bir başka nedeni de ölçüm istasyonlarının konumundan kaynaklanmaktadır. Ölçüm süreci içerisinde ADCP cihazı belirli bir dönem kayıt yaptıktan sonra yerinden alınıp bakımı yapıldıktan sonra tekrar yerleştirilmektedir. İşte bu aşamada cihazın konumunda farklılıklar meydana gelebilmektedir. Bu durumda ölçüm sürecinde meydana gelebilecek başka bir takım hatalarla birlikte sonuçlar üzerinde etkili olmaktadır.

- İstanbul Boğazı hidrodinamik modeli 1 yıllık veri seti için çalıştırılmış ve bu sonuçlara ait akıntı gülleri ile akıntı haritaları oluşturulmuştur. Yine tüm veri seti R, OKHK ve MOH ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar oldukça tatmin edici bulunmuştur.
- Bu çalışmada İstanbul Boğazı model alanı içerisindeki sıcaklık ve tuzluluk değişkenlerinin kalibrasyonu veri yetersizliği nedeniyle mümkün olmamıştır. Ancak modelin doğrulanması amacıyla modelden elde edilen sıcaklık ve tuzluluk profilleri çeşitli istasyonlarda aylık olarak ölçülmüş profiller ile karşılaştırılmıştır. Yine veriler ölçümlerde mevcut derinlikler için zaman serileri halinde de değerlendirilmiştir. Hidrodinamik model, model alanı içerisindeki sıcaklık ve tuzluluk alanlarını oldukça iyi bir doğrulukla benzeştirilmiştir. Ancak tabanda ölçümlerle model sonuçları arasında oldukça önemli sapmalar görülmüştür. Değerlendirmeler düşey difüzyonun çok yüksek olduğunu ve alt tabakadaki tuzluluğun su kolonu içerisinde hızla dağıldığını göstermektedir. Bu durumun modelin, hesap ağının düşey ayrıklaştırmasında kullandığı σ -layer yönteminden ileri geldiği düşünülmektedir. İstanbul Boğazı'nın karmaşık topoğrafyası nedeni ile hem yatay hem de düşey ayrıklaştırma sonucunda oluşan hücre boyutları birbirinden çok farklı olabilmektedir. Bu durumda model alanı içerisinde nümerik difüzyonun artmasına neden olmaktadır. Yine sıcaklık ve tuzluluk parametresinin değerlendirilmesinde model sonuçları ile ölçüm sonuçları

arasında bir miktar faz farkı görülmüştür. Bunun nedeni sıcaklık ve tuzluluk verilerinin belirli bir aralıkla toplanmamış olması model yazılımının ise sınır koşullarının oluşturulmasında sabit aralıklı veri gerektirmesidir.

- Tüm veri seti için hidrodinamik modelin çalıştırılması ile elde edilen sıcaklık ve tuzluluk dağılımları eşsıcaklık ve eşkonsantrasyon eğrileri kullanılarak değerlendirilmiştir.
- İstanbul Boğazı'nın tabakalı hidrodinamik yapısı içerisinde Boğaz'a verilen derin deşarjlardan kaynaklanan kirliliğin su kalitesi üzerindeki etkisi basit dikdörtgen kanal üzerinde araştırılmıştır. İstanbul Boğazı'nın hidrodinamiği sabit derinlikli bir dikdörtgen kanal üzerinde uygun sınır ve başlangıç koşulları ile Mike3 hidrodinamik modeli kullanılarak benzeştirilmiştir. Boğaz'daki akım yapısını kontrol eden başlıca faktörler olan tuzluluk ve su seviyesinin deşarjların yayılımı ve dağılımındaki etkisi incelenmiştir. İstanbul Boğazı üzerinde yerleştirilmiş beş adet atıksu ön arıtma tesisi ile ilişik olduğu Marmara Denizi ve Karadeniz'den gelen önemli boyutta bir kirlenme ile karşı karşıyadır. Boğaz'ın akımını kontrol eden önemli parametrelerden ilki tuzluluktur. Marmara Denizi ~38 psu ve Karadeniz ise ~18 psu tuzluluğa sahiptir. Boğazdaki akım yapısı oldukça değişkendir ve dolayısıyla tuzluluk zaman içerisinde değişim göstermektedir. Yapılan benzetimlerde farklı tuzluluk değerlerinin su kalitesi parametrelerine BOİ ve ÇO'e ait konsantrasyonlar üzerinde oldukça önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Deşarjlar yüksek tuzluluk değerlerinde yüzeye daha hızlı ulaşmaktadır.

Boğaz akımını kontrol eden bir diğer parametre ise Marmara Denizi ile Karadeniz arasındaki su seviyesi farkıdır. Bu su seviyesi farkı kısa ve uzun dönemli olarak değişebilmektedir. Ortalama değerinin 0.30 m civarında olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada 0.10 m, 0.20 m ve 0.30 m su seviyesi farkları için akımın BOİ ve ÇO konsantrasyonlarının davranışı incelenmiştir. Su seviyesi farkının yüksek olduğu akım koşullarında deşarjlardan çıkan konsantrasyonların akım hızının artmasına bağlı olarak kanal içerisinde çok daha hızlı bir şekilde ilerlediği görülmüştür.

Yapılan benzetimlerde elde edilen BOİ ve ÇO dağılımlarının literatürde verilen advectif-dispersif dağılımı temsil eder şekilde Gauss dağılımı gösterdiği görülmüş ve Mike3 hidrodinamik modelinin İstanbul Boğazı hidrodinamiğinin benzeştirilmesi için uygunluğu ortaya konulmuştur.

Gerçekleştirilen çift tabakalı akım benzetimiyle kanal içerisinde BOİ, ÇO, klorofil-a, NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , FK parametrelerinin dağılımları elde edilmiştir. Çift tabakalı akım halinde konsantrasyonların üst tabakaya geçmediği, İstanbul Boğazı için düşünülen basitleştirilmiş

geometrik kesit olan dikdörtgen kesitli kanal halinde alt tabaka ile Karadeniz'e taşındığı görülmüştür.

- Su kalitesi modellerinin kalibrasyonunda hassasiyet analizi önemli bir yere sahiptir. Model dinamikleri üzerinde en etkili kalibrasyon parametrelerinin seçilmesi sistematik bir kalibrasyon sağlayarak hem doğruluğu arttırmakta hem de zamandan ciddi bir tasarruf sağlamaktadır.
- Üretilen su kalitesi modeli başarı ile kalibre edilmiştir. Yapılan hassasiyet analizi sonucunda model süreçlerinin en çok BOİ ve ÇO süreçlerinde yeralan model sabitlerine hassasiyet gösterdiği görülmüştür. Fekal Koliform ve Toplam Koliform durum değişkenleri ise yine veri yetersizliği nedeniyle kalibre edilememiştir. Kalibrasyon sonucunda model sabitlerinin kalibre edilmiş değerleri Çizelg 6.22'de verilmiştir.
- Kalibrasyon sonucunda İSKİ su kalitesi izleme çalışmaları 2004-2005 raporlarından sağlanan veriler ile model doğruluğu sınanmıştır (Sur vd., 2004, 2005). ÇO, Klorofil-a, NO₂, NO₃ ve PO₄ durum değişkenlerine ait konsantrasyonların doğruluğu test edilmiştir. BOİ ve NH₄ konsantrasyonları verilerin mevcut olmayışı ya da yetersizliği nedeni ile doğrulanamamıştır. ÇO, Klorofil-a, NO₃ ve PO₄ durum değişkenlerine ait konsantrasyon değerleri üst ve ara tabakada büyük bir doğrulukla benzeştirilmiştir. NO₂ ise diğer durum değişkenlerine göre model doğruluğunun daha düşük olduğu su kalitesi durum değişkeni olmuştur. Yılın ilk altı ayı için model sonuçları ölçümlerle oldukça iyi bir uyum göstermesine rağmen ikinci altı aylık dönem için doğruluk düşmüştür. Burada modelde dikkate alınmayan kaynakların etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle yağışlı havalarda suya gerek atmosferden azot girişi gerekse yüzeysel akış ile taşınım arttığından nitrit konsantrasyonlarında önemli değişimler olmaktadır. Bu kaynakların dikkate alınamamasının model doğruluğu üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.
- Yine su kalitesi modelinin doğrulanması aşamasında taban yakınındaki yüksek nütrient konsantrasyonlarının tahmininde model sonuçları ile ölçüm verileri arasında sapmalar olduğu görülmüştür. Bunun en önemli nedenleri hidrodinamik modeldeki yüksek düşey difüzyon ve kaynak konsantrasyonlarındaki belirsizliktir.
- Su kalitesi modeli sonuçları Karadeniz'e tatlı su kaynakları ile taşınan kirliliğin Boğaz üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu kirlilik Karadeniz açık sınırında ve yakınında hesaplanan konsantrasyonlarda görülebilmektedir.
- Hidrodinamik model ile su kalitesi modeli bir arada değerlendirildiğinde ise Boğaz'daki akıntı yapısı ile bu akıntıyı etkileyen fiziksel faktörlerin, su kalitesi durum değişkenlerinin model alanı içerisindeki zamansal ve uzamsal dağılımlarını etkilediği açıkça

görülmektedir. Boğaz'ın girintili çıkıntılı kıyıları boyunca oluşan ölü bölgeler konsantrasyonların birikmesine zemin hazırlamaktadır. Bundan başka oluşan çevrintiler ile konsantrasyonlar model alanı içerisinde farklı dağılımlar göstermektedir. Yine Boğaz'ın Marmara Denizi ile birleştiği kesitte meydana gelen yüksek düzey karışımın konsantrasyonların hızla yüzeye ulaşmasına neden olduğu görülmektedir. Güneyli rüzgarlar bu karışımı arttırmaktadır.

- Su kalitesi durum değişkenlerinin model alanı tabanındaki yüksek konsantrasyonlarının nedeni derin deniz deşarjlarıdır. Derin deniz deşarjları Türk Boğazlar Sistemi için su kalitesi durum değişkenlerinin önemli bir kaynağını oluşturmaktadır. Bir sucul sistem için su kalitesi modeli kurulurken sınır ve başlangıç koşulları ölçümlerle sağlanırken kaynak konsantrasyonlarının da yüksek doğrulukla sağlanması çok önemlidir. Bu çalışmada söz konusu kaynak konsantrasyonları elde edilememiş ve bunun yerine literatürde verilen karakteristik değerler kullanılmıştır. Derin deniz deşarjlarına ait debi, sıcaklık, tuzluluk ve su kalitesi durum değişkeni konsantrasyonlarının mümkün olan en yüksek zamansal çözünürlükte ve titizlikle kaydedilmesi gerekmektedir.

- Model sonucunda elde edilen su kalitesi durum değişkenlerinin İstanbul Boğazı içerisindeki dağılım ve değişimleri incelendiğinde meteorolojik koşulların bu yapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yağışlı mevsimlerde yüzeysel taşınım ile İstanbul Boğazı alıcı ortamına giren önemli miktardaki besi maddeleri konsantrasyonların artmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde fırtınalı mevsimlerde alt ya da üst tabaka hızlarının artması ile birlikte su kalitesi durum değişkenlerinin Boğaz model alanı içerisindeki konsantrasyonları değişiklik göstermektedir. Yine Mayıs ayından itibaren Ağustos ayına dek Karadeniz'e tatlı su taşıyan büyük nehirlerin debilerindeki artış İstanbul Boğazı'nın Karadeniz girişinde su seviyesinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum kuzeyli rüzgarların neden olduğu fırtınalarla birleştiğinde üst tabaka kalınlığını arttırmaktadır. Bu durum zaman zaman alt tabakanın blokajına neden olmaktadır. Böylece alt tabaka akımına yapılan deşarjların taşıdığı kirletici konsantrasyonları planlandığı gibi Karadeniz'e ulaşamamakta, Marmara Denizi'ne taşınmaktadır.

- İstanbul Boğazı'nın özel iki tabakalı akım yapısı su kalitesi durum değişkenlerinin taşınımı üzerinde oldukça etkilidir. Derin deniz deşarjları alt tabaka akımına verilmekte ve advektif taşınım ile Karadeniz'in anoksik alt tabakasına taşınmaları öngörülmektedir. Bu durum İstanbul Boğazı'nda iki tabakalı akıntı yapısının mevcut olduğu durumlarda geçerlidir. Genellikle alt ve üst tabakalar arasında keskin bir arakesit mevcuttur. Bu arakesit kirliliğin yüzeye taşınmasını engellemektedir. Ancak mevsimsel ve meteorolojik koşullar ile iki

tabakalı akıntı yapısı değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle İstanbul Boğazı'nın Marmara Denizi ile birleştii kesitte, oldukça yüksek düşey karışım olduğu görölmektedir. Bunun nedeni önemli ölçüde bu bölgede hakim olan güneyli (lodos) rüzgarlardır. Bu kesitteki deşarjlarda İstanbul Boğazı model alanı içerisindeki diğer derin deniz deşarjlarına göre daha sık bölgelerde yerleştirilmiştir. Bu durum alt tabakadaki yüksek deşarj konsantrasyonlarının düşey karışımın da etkisi ile kolayca yüzeye taşınabilmesi sonucunu doğurmaktadır.

8. ÖNERİLER

Bu çalışmada sunulan İstanbul Boğazı Hidrodinamik ve Su Kalitesi bileşik modeli İstanbul Boğazı hidrodinamiğini ve bu hidrodinamik yapı içerisinde su kalitesi değişim ve dağılımlarını oldukça başarılı bir biçimde benzeştirmiş olmakla birlikte sucul sistemin ve sisteme ait dinamiklerin daha doğru kavranabilmesi ve model sonuçlarının ileriye yönelik planlamalarda başarı ile kullanılabilmesi için yapılması gereken çalışmalar vardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında aşağıda sıralanan öneriler geliştirilmiştir:

- İstanbul Boğazı su kalitesinin doğru modellenmesi için birincil öncelik Boğaz'ın hidrodinamik ve hidroliğinin en doğru şekilde benzeştirilmesidir. Bunun için farklı hidrodinamik model alternatifleri değerlendirilmelidir. İstanbul Boğazı'nın iki tabakalı özel akıntı yapısı farklı türbülans modelleri ve ağ yapıları kullanılarak çalışılmalıdır.
- İstanbul Boğazı zamansal çözünürlüğü yüksek bir tuzluluk-sıcaklık veri seti ile kalibre edilmelidir.
- İstanbul Boğazı hem Karadeniz hem de Marmara Boğazı ve Çanakkale Boğazı kanalı ile Akdeniz ile etkileşim içerisindedir. Dolayısıyla tüm sistemi içine alan farklı ölçeklerdeki model alternatifleri oluşturulmalı ve üzerinde çalışılmalıdır.
- Bu çalışmada hidrodinamik modelin kalibrasyonu ve doğrulanmasında Boğaz'ın yalnızca belirli bir bölgesinde ölçülmüş oşinografik veriler kullanılmıştır. İstanbul Boğazı hidrodinamik modelinin geliştirilebilmesi için akıntı, su seviyeleri, sıcaklık ve tuzluluk parametrelerine dair hem uzamsal hem de zamansal çözünürlüğü daha yüksek ve daha uzun süreli verilere ihtiyaç vardır. Mevcut ölçüm programları bu doğrultuda geliştirilmeli ve hem eşzamanlı hem de sürekli olmak koşulu ile yeni ölçüm programları oluşturulmalıdır. Daha ayrıntılı oşinografik verilerin toplanması ile İstanbul Boğazı'ndaki hidrolik koşullar daha doğru bir şekilde ortaya konulabilir ve böylece su kalitesi modellerinin iyileştirilmesi mümkün olabilir.
- Gerek mevcut verilerin değerlendirilmesinde gerekse veri toplanmasında kurumlar arası işbirliği sağlanmalıdır. Mevcut veri tabanlarının ilgililerin erişimine açılması için çaba gösterilmelidir. Sayısal modellemede kaydedilen ilerlemeler saha verileri ile doğrulanmalı ve değerlendirilmelidir.
- Sayısal modelleme günümüzde doğal kaynakların değerlendirilmesinde ve geleceğin planlanmasında önemli bir araç haline gelmiştir. Sayısal modelleme çalışmaları doğal kaynaklar üzerindeki her tür planlama ve tasarrufta kullanışlı ve pratik bir araç olarak geleneksel çalışmalarla birlikte değerlendirilmelidir.

SÖZLÜK

Adsorpsiyon: Moleküllerin katı yüzeylere tutunması.

Aerobik: Serbest oksijenin varlığında yaşayan ya da aktif olabilen organizma; suda çözünmüş oksijenin oksitleyici olarak hareket ettiği durum.

Alg: Sucul ortamlarda yaşayan tek hücreli organizmalardır.

Anaerobik: Serbest oksijenin bulunmadığı koşullarda yaşama ve büyüme yeteneğine sahip organizma; serbest oksijenin bulunmadığı koşullar.

Anoksik: Oksijenden yoksun.

Bakterisit: İstenmeyen bakterileri öldürmek için kullanılan kimyasal bileşik.

Bentik: Deniz tabanı ekosistemi. Bentik bölge içerisinde yaşayan canlılar *bentoz* olarak isimlendirilmektedir.

Biota: Belirli bir bölgede ya da çevrede bulunan bitki ve hayvan yaşamının bütünü.

Biyoakümüülasyon: Biyoyoğunlaşma.

Biyojeokimyasal döngü: Kimyasal elemanların fiziksel çevre ile organizmalar arasındaki döngüsü.

Biyokütle: Belirli bir alan ya da hacimdeki canlı organizmaların toplam kütlesi ya da miktarı.

Biyolojik arıtma: Atıksuyun mikroorganizmalar kullanılarak arıtılması.

BOİ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı): Organik kirliliğin bir ölçüsü olarak kullanılan bir ifade. Bir su ve ya atıksu ortamındaki organik maddelerin biyokimyasal süreçlerle tam ayrışmaları için bu işlevi gerçekleştiren mikroorganizmaların, suyun birim hacmi başına gereksinim duydukları oksijen miktarı. Evsel atıksu işleme süreçlerinin etkinliğini ölçmede de kullanılır.

Bulanıklık: Suda ve havada asılı bulunan maddelerin neden olduğu, güneş ışınlarının ortama girme ve bitkilerin büyüme düzeylerini denetleyen, içme suyu kalitesi açısından çok zararlı ortam koşulları.

Çözünmüş Oksijen: Su veya atıksu içerisinde çözünmüş halde bulunan oksijen miktarı.

DDT: Diklorodifeniltrikloreten'in kısa yazılışı. Son derece kuvvetli bir böcek öldürücüdür. Kalıntıları yaklaşık 15 yıl varlığını sürdürebilir.

Ekoloji: Organizmaların birbirleriyle ve çevreleriyle olan ilişkilerini inceleyen bilim dalı.

Eser elementler: Havada, suda ve yiyeceklerde çok düşük yoğunluklarda bulunan kurşun,

bakır, çinko, arsenik, civa ve vanadyum vb. elementler.

Fauna: Yeryüzünde ekolojik olarak sınırlanabilir bir yaşam mekânında bulunan bütün hayvanları ifade eden bir terimdir.

Fosfat: Doğal olarak bulunan fosfor içeren bileşiklerdir. Göl, nehir ve denizler gibi su kaynaklarında aşırı fosfor birikmesi, bitkilerin sudaki yaşamı kesintiye uğratacak kadar çok büyümesine yol açabilir ve böylece ötrofikasyon süreci ile karşı karşıya kalınır. Çevre kirliliğine yol açan temel fosfor kaynaklarından biri deterjanlardır.

Fotoliz: Işık etkisiyle ayrışma.

Gaz kromotograf: bir gaz ve ya sıvı karışım içerisindeki maddelerin (gazların ve uçucu sıvıların) oranlarını belirleyebilen analiz cihazı.

Halojen: Kimyasal yapı açısından benzerlik gösteren ve hepsi çok çabuk tepkimeye giren, kimi zaman bilinen en zehirli kimyasallar olan klorine hidrokarbonlar ve sentetik organik kimyasallar gibi yeni bileşenler oluşturan ve beş elementten (florin, klorin, bromin, iyot ve astatin) oluşan grup.

Haloklin: Tabakalı bir su kütlesi içerisinde tuzluluk farkının en yüksek olduğu tabaka.

Hidrokarbonlar: Genellikle fosil yakıtlarda ve bu maddelerin kısmen yanmasından oluşan ürünlerde, sözgelimi petrole işleyen taşıtların egzoz gazlarında bulunan ve yalnızca karbon ve hidrojenden oluşan organik bileşikler.

Hidroliz: Bir molekülün kovalent bağlarının su ile parçalanarak ayrılan kısımların birine H diğerine OH grubunun eklenmesidir.

Kemosentez: Bazı bakteriler, güneş ışınları olmadan, inorganik maddeleri oksitlemek suretiyle, kendileri için gerekli, enerji bakımından zengin organik maddeleri elde ederler. Buna kemosenetiz denir.

KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı): Bir su örneğindeki organik ve oksitlenebilir inorganik bileşikleri yükseltgemek için gerekli oksijen miktarını ölçen, suyun kalitesi ile ilgili bir gösterge.

Manganez: İnsanlar da dâhil olmak üzere birçok canlı için gerekli bir ağır metal.

Nitrat: Genellikle bir nitrojen, üç oksijen atomunda oluşan (NO_3) azot içeren bileşiklerdir. Nitrojen döngüsünün doğal bir parçası olarak nitritlerin dönüşümüyle oluşurlar.

Nütrient (Besi maddesi): Azot, fosfor gibi organizmaların yapı taşlarını oluşturan temel

elementlerin ortak adı.

Oksidant: Oksijen içeren ve oksijenin yeni maddeler oluşturmak için kimyasal reaksiyona girmesini kolaylaştıran madde.

Ötrofikasyon: Bir ekosistemin tamamında ve ya ekosistemin belirli kısımlarında besi maddelerinin artması, zenginleşmesi olayını niteleyen bir terimdir. Bir ekosistemde besi maddelerinin verimini ve fotosentez ürünlerini arttırma hususunda etkili olan tüm süreçlerin toplu ifadesidir. Örnek: deterjanlı sularla göllerde fosfatın artması ve buna bağlı olarak su bitkilerinin biyolojik kitlesinin artması.

Patojen: Hastalık yapıcı özelliği olan mikroorganizma ve ya madde.

Pestisid: Bitki ve hayvanları zararlılardan korumak için mücadele amacıyla kullanılan kimyasal ilaçlar ve etki maddelerinin hepsini birden ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Bütün herbisit ve insektisitleri kapsamakta olup “biosid” karşılığı kullanılan bir terimdir.

Petrokimyasal: Petrolden türetilen madde ve ya malzeme, bir tür hidrokarbon. Hidrojen ve karbon atomlarından oluşan kimyasal. En çok tanınan petrokimyasallar arasında asetik asit, aseton, benzin, formaldehit, etilen, etilen diklorit, metanol, fenol, polietilen, polivinil klorid, stiren, vinil klorid vs. sayılabilir.

Petrol Yayılımı (Oil Spill): Tankerlerle ham petrol taşınımı sırasında ya da deniz dibi sondaj platformlarında oluşabilecek kazalarda denize dökülen büyük miktarlarda ham petrolün meydana getirdiği tabaka veya alan.

Petrol Sızıntısı (Oil Slick): Gemilerin limanlardaki faaliyetlerinin yol açtığı su yüzeyindeki nisbeten küçük miktarlardaki petrol.

Plankton: Denizler gibi su kütleleri içerisinde hareket eden canlılardır. Bitkisel kökenli olanları *fitoplankton*, hayvansal kökenli olanları ise *zooplankton* olarak adlandırılmaktadır.

Secchi Diski: Su sütunu içerisinde güneş ışığının nüfuz ettiği derinliğin ölçülmesi için kullanılan 20 cm çapındaki disk.



Sintine: Deniz taşıtlarının her türlü atıksuyudur. Evsel kaynaklı olabildiği gibi yağ, yakıt gibi atıkları da içermektedir.

Termoklin: Tabakalı bir su kütlesi içerisinde sıcaklık değişiminin en hızlı gerçekleştiği tabaka.

Üreticiler: Biyolojik kütleleri üretme ve değiştirme yeteneğine sahip organizmalardır. Ototrof

organizmalar birincil üreticiler ve heterotrof organizmalar ise ikincil üreticiler olarak adlandırılmaktadır. Ototrof organizmalar, inorganik maddelerden organik madde üreten canlılardır. Eğer bu üretim için güneş enerjisi kullanılırsa, bunlara *fotoototrof*, kimyasal enerji kullanılırsa *kemoototrof* denilmektedir. İkincil üreticiler ise birincil üreticilerin meydana getirdiği organik maddelerle beslenerek bunlardan yeni ürünler meydana getirirler.

Kaynak: Çevre ve Orman Bakanlığı, TEMA Ekolojik ve Botanik Terimler Sözlüğü.

KAYNAKLAR

- Akça, L., Öztürk, İ. ve Aydın, A. F., (1998), “İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi Alıcı Ortam Modelleme Çalışmaları”, Büyükşehirlerde Atıksu Yönetimi ve Deniz Kirlenmesi Kontrolü Sempozyumu, 18-20 Kasım 1998, İstanbul.
- Akyarlı, A. ve Arısoy, Y., (1994), “Oceanographic Measurements for the Tube Tunnel Crossing of the Bosphorus”, 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, 10-15 April 1994, Osaka.
- Alpar, B. ve Yüce, H., (1998), “Sea Level Variations and Their Interactions Between the Black Sea and the Aegean Sea”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46:609-619.
- Altıok, H., (2001), “İstanbul Boğazı Karadeniz Çıkışında Su Kütlelerinin Mevsimsel Değişimi (1996-2000)”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü Fiziksel Oşinografi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Andersen, S., Jakobsen, F. M. ve Alpar, B., (1997), “The Water Level in the Bosphorus Strait and its Dependence on Atmospheric Forcing”, *German Journal of Hydrography*, 49(4):466-475.
- Arısoy, Y., (1995), “İstanbul Boğazı’nda Yapılan Uzun Süreli Akıntı ve Deniz Seviyesi Gözlemlerinin Analizi”, *Tr. J. of Engineering Sciences*, 19:75-86.
- Artüz, L., (2005), “A Chronological Review of the Oceanographic Investigations of the Turkish Straits”, *Oceanata, DER-MAR*.
- Aydoğan, B., Ayat, B., Öztürk, M.N., Yüksel, Y. ve., Çevik, E.Ö., (2007), “İstanbul Boğazı Su Seviyesi Değişimlerinin Modellenmesi”, 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 25-28 Ekim 2007, İzmir, Türkiye.
- Aydoğan, B., Ayat, B. ve Yüksel, Y., (2010a), “Analysis and Modelling of Water Level Changes in Bosphorus Entrance of the Black Sea”, *Proceedings of Water 2010 Conference*, 5-7 July 2010, Quebec City.
- Aydoğan, B., Ayat, B., Öztürk, M.N., Çevik, E.Ö. ve Yüksel, Y., (2010b), “Current velocity Forecasting in Straits with Artificial Neural Networks, a Case Study:Strait of İstanbul”, *Ocean Engineering*, 37(5-6):443-453.
- Bayazıt, M. ve Sümer, B. M., (1982), “Oceanographic and Hydraulic Investigations of the Bosphorus”, Vol.II Final Report (TÜBİTAK), İTÜ, s:23.
- Beşiktepe, Ş. T., Sur, H. İ., Özsoy, E., Latif M. A., Oğuz, T. ve Ünlüata, Ü., (1994), “the Circulation and Hydrography of the Marmara Sea”, *Progress in Oceanography*, 34:285-334.
- Bogdanova, A. B. K., (1961), “the Distribution of Mediterranean Waters in the Black Sea”, *Deep Sea Research*, 10:665-672.
- Bogdanova, A. B. K., (1965), “Seasonal Fluctuations and Distribution of the Mediterranean Waters in the Black Sea. Basic Features, Geological Structure of the Hydrologic Regime”, Translation; 1960, Institute of Modern Languages, Washington D.C.
- Büyüközden, A., Yüce, H. ve Bayraktar, T., (1983), “Akdeniz Suyunun İstanbul Boğazı Boyunca ve Karadeniz’de İncelenmesi”, Cilt I, II. TÜBİTAK Çevre Araştırmaları Grubu Ara ve Sonuç Raporları.
- Cociasu, A., Dorogan, L., Humborg, C., ve Popa, L., (1996), “Long-term Ecological Changes in Romanian Coastal Waters of the Black Sea”, *Marine Pollution Bulletin*, 32:32-38.
- Cociasu, A., Diaconu, V., Popa, L., Nae, L., Buga, L., Dorogan, L. ve Malciu V., (1997),

“Nutrient Stock of the Romanian Coastal Shelf of the Black Sea in the Last Three Decades”, In: Özsoy, E., ve Mikaelyan, A. (eds.), *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic and North Sea*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 27:49-63.

Codispoti, L.A., Friederich, G.E., Murray, J.W. ve Sakamoto, C.M., (1991), “Chemical Variability in the Black Sea: Implications of Continuous Vertical Profiles that Penetrated the Oxic/Anoxic Matter”, *Deep Sea Research*, 38:691-710.

Delft Hydraulics Laboratory, (1996), “Integrated Water Resources Management Azov Sea”

Di Iorio, D., Akal, T., Sellschopp, J., Guerrini, P., Yüce, H. ve Gezgin, E., (1995), “Oceanographic Measurements of the West Black Sea”, 26th November- 14th December.

Di Iorio, D. ve Yüce, H., (1997), “Observations of Mediterranean Flow into the Black Sea”, *Saclantcen Report*, SR-269, *Saclant Undersea Research Centre Report*, 33p.

Doğan, E., Sur, H.İ., Sarıkaya, H.Z., Öztürk, İ., Güven K.C., Kurter, A., Yüce, H., Okuş, E. ve Alpar, B., (2001), *Water Quality Monitoring Annual Report*, Istanbul University Institute of Marine Sciences and Management, İstanbul.

Filippov, D. M., (1965), “the Cold Intermediate Layer in the Black Sea”, *Oceanology*, 5(4):47-51.

Fisher, R.V., Peele, E.R., Ammerman, J.W. ve Harding, (1992), “Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay”, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 82:51-63.

Giovanardi, F. ve Vollenweider, R.A., (2004), “Trophic Conditions of Marine Coastal Waters: experience in applying the Trophic Index TRIX to two areas of the Adriatic and Tyrrhenian seas”, *Journal of Limnology*, 63(2):199-218.

Gunnerson, C. G., ve Özturgut, E., (1974), “The Bosphorus. The Black Sea Geology, Chemistry and Biology, Memoir No.20”, *The American Association of Petroleum Geologists*, 99-113.

Gupta, V.K., ve Sorooshian, S., (1985), “Uniqueness and Observability of Conceptual Rainfall-Runoff Model Parameters. The Percolation Process Examined”, *Water Resources Research*, 19: 269–276.

Gupta, H.V., Sorooshian, S. ve Yapo, P.O., (1998), “Toward Improved Calibration of Hydrological Models. Multiple and Noncommensurable Measures of Information”, *Water Resources Research*, 34:751–763.

Güler, I., Yüksel, Y., Yalçın, A.C., Çevik, 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”, *Ocean Engineering*, 33:1718-1748.

Hay, B.J., Honjo, S., Kempe, S., Ittekkot, V.A., Degens, E.T., Konuk, T., ve İzdar, E., (1990), “Interannual Variability in Particle Flux in the Southwestern Black Sea”, *Deep Sea Research*, 37:911-928.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, C. M. ve Marias, G., (1995), “Activated Sludge Model No:2”, *IAWQ Sci and Tech Report No:3*, London, England.

Herrera-Silveira, J.A. ve Morales-Ojeda, S.M., (2009), “Evaluation of the Health Status of Coastal Ecosystem in Southeast Mexico: Assessment of Water Quality, Phytoplankton and Submerged Aquatic Vegetation”, *Marine Pollution Bulletin*, 59(1-3):72-86.

IRTC, (1987), *Feasibility Studies and Preliminary Designs Bosphorus Railroad Tunnel and Istanbul Metro System Project- Task 203- Hydrographic Survey, Volume 1*, İstanbul.

- Kim, D. M., Nakada, N., Horiguchi, T., Takada, H., Shiraishi, H. ve Nakagusi, O., (2004), "Numerical Simulation of Organic Chemicals in a Marine Environment Using a Coupled 3D Hydrodynamic and Ecotoxicological Model", *Marine Pollution Bulletin*, 48:671-678.
- Kuczera, G., (1982), "On the relationship of the reliability of parameter estimation and hydrological time series data used in calibration", *Water Resources Research*, 18:146-154.
- Latif, M., Özsoy, E., Oğuz, T. ve Ünlüata, Ü., (1991), "Observations of the Mediterranean Inflow into the Black Sea", *Deep Sea Research*, 38(2):711-733.
- Maderich, V. ve Konstantinov, S., (2002), "Seasonal Dynamics of the System Sea-Strait: Black Sea- Bosphorus Case Study", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55:183-196.
- Mengöl, S., (1950), "Oşinografi", Ulaştırma Bakanlığı, Yüksek Denizcilik Okulu, Seri:4, Sıra:22.
- Metcalf ve Eddy, (2003), *Waste Water Disposal and Reuse*, McGraw Hill, New York.
- Möller, A. M., (1928), "Hydrographische unter Suchungen in Bosphorus and Dardanellen", *Veroff. Insr. Meeresk, Berlin Univ., Neue Folge A.*, 18:284.
- Munk, W. ve Anderson, E., (1948), "Notes on the Theory of the Thermocline", *Journal of Marine Research*, 7:276-295.
- Murray, J.M., Jannasch, H.W., Honjo, S., Anderson, R.F., Reeburgh, W.S., Top, Z., Friederich, G.E., Codispoti, L.A. ve İzdar, E., (1989), "Unexpected Changes in the Oxic/Anoxic Interface in the Black Sea", *Nature*, 338:411-413.
- Murray, J.M., Codispoti, L.A. ve Friederich, G.E., (1995), "Oxidation-Reduction Environments: The Suboxic Zone in the Black Sea", In: *Aquatic Chemistry*, Huang, C.P., Omelia, C.R. and Morgan, J.J. (eds), *ACS Advances in Chemistry Series*, 244:157-176.
- 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.
- Oğuz, T. ve Rozman, L., (1991), "Characteristics of the Mediterranean Underflow in the Southwestern Black Sea Continental Shelf/Slope Region", *Oceanologica Acta*, 14:433-444.
- Oğuz, T., Latif, M. A., Sur, H. İ., Özsoy, E. ve Ünlüata, Ü. (1991a), "on the Dynamics of the Southern Black Sea", In E. Izdar ve J. W. Murray, eds, *Black Sea Oceanography*, Nato-ASI Series, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.
- Oğuz, T., Latun V. S., Latif, M. A., Vladimirov, V. V., Sur, H. İ., Markov, A. A., Özsoy, E. Kotovshchikov, B. B. ve Ünlüata, Ü., (1991b), "Circulation in the Surface and Intermediate Layers of the Black Sea", *Deep Sea Research*, 39:312-324.
- Oğuz, T., Violette, P. ve Ünlüata, Ü. (1992), "the Upper Layer Circulation of the Black Sea: Its Variability as Inferred from Hydrographic and Satellite Observations", *Journal of Geophysical Research*, 97:12569-12584.
- Ovchinnikov, I.M., Plakhin, E.A., Moskalenko, L.V., Negliad, K.V., Osadchii, A.S., Fedoseev, A.F., Krivoschey, V.G. ve Voitava, K.V., (1976), "Hydrology of The Mediterranean Sea", *Hydrometeorological Publishers, Leningrad*, sf: 430.
- Özhan, E. ve Abdalla, S., (2000), "NATO TU Waves Project", Middle East Technical University, Ocean Engineering Research Center.
- Özsoy, E., Top, Z., White, G. ve Murray, J., (1991), "Double Diffusive Intrusions, Mixing and Deep Sea Convection Processes in the Black Sea", *The Black Sea Oceanography*, E.

- İzdar ve J. M. Murray (Ed), Nato/Asi Series, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 17-42.
- Özsoy, E., Latif, M. A., Beşiktepe, Ş., Oğuz, T., Salihoğlu, İ., Gaines, A. F., Tuğrul, S., Baştürk, Ö., Saydam, C., Yemenicioğlu, S. ve Yılmaz, A., (1992), "Monitoring Via Direct Measurements on the Modes of Mixing and Transport of Wastewater Discharges into the Bosphorus Underflow", METU, Institute of Marine Sciences, Second Progress Report, Sponsored by İSKİ.
- Özsoy, E., Ünlüata, Ü. ve Top, Z., (1993), "the Evolution of Mediterranean Water in the Black Sea: Interior Mixing and Material Transport by Double Diffusive Intrusions", *Progress in Oceanography*, 31:275-320.
- Özsoy, E., Latif, M. A., Sur, H.İ., ve Goryachkin, Y., (1996), "A review of the exchange flow regime and mixing in the Bosphorus Strait", *Bulletin de l'Institut oceanographique*, Monaco, n° special 17: 187-204.
- Özsoy, E., Latif, M. A., Beşiktepe, Ş., Çetin, N., Gregg, N. Belokopytov, V., Goryachkin, Y. ve Diaconu, V. (1998a). The Bosphorus Strait: Exchange Fluxes, Currents and Sea-Level Changes, in: L. Ivanov and T. Oğuz (editors), *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, NATO Science Series 2: Environmental Security 47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1:367 + 2:385.
- Özsoy, E., Latif M. A., Beşiktepe Ş. ve Gaines A. F., (1998b), "İstanbul Boğazı Atıksu taşınım ve Karışımının Doğrudan Ölçümleri", *Büyükşehirlerde Atıksu Yönetimi ve Deniz Kirlenmesi Kontrolü Sempozyumu*, 18-20 Kasım, İstanbul.
- Özsoy, E., Di Iorio, D., Gregg, M. C. ve Backhaus, J. O., (2001), "Mixing in the Bosphorus Strait and the Black Sea Continental Shelf: Observations and A Model of the Dense water Outflow", *Journal of Marine Systems*, 31:99-135.
- 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*, 15th-19th April 2002, Villefranche/France.
- Pektaş, H., (1956), "the Influence of the Mediterranean Water on the Hydrology of the Black Sea", 4th Technical Papers Meeting, *Mediterranean General Fisheries Council*, s:15.
- Peneva, E., Stanev, E., Belokopytov, V. ve Le Traon, P.-Y., (2001), "Water Transport in the Bosphorus Straits Estimated From Hydro-Meteorological and Altimeter Data: Seasonal to Decadal Variability", *Journa of Marine Systems*, 31:21-33.
- Penna, N., Capellacci, S. ve Ricci, F., (2004), "the Influence of the Po River Discharge on Phytoplankton Bloom Dynamics Along the Coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea", *Marine Pollution Bulletin*, 48:321-326.
- Polat, S. Ç. ve Tuğrul, S., (1995), "Nutrient and Organic Carbon Exchanges Between the Black and Marmara Seas through the Bosphorus Strait", *Continental Shelf Research*, 15:1115-1132.
- Rode, M., Suhr, U. ve Wriedt, G. W., (2007), "Multi-Objective Calibration of a River Water Quality Model-Information Content of a Calibration Data", *Ecological Modelling*, 204:129-142.
- Rodi, W., (1984), *Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics*, IAHR, Delft, the Netherlands.
- Roe, P.L., (1981), "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference-Schemes", *Journal of Computational Physics*, 43:357-372.

Sarıkaya, H.Z., Okuş, E., Çitil, E. ve Sevimli, M. F., (1998), “Karadeniz’den Gelen Kirlilik Yükleri ve Marmara Karadeniz Etkileşimi”, Büyükşehirlerde Atıksu Yönetimi ve Deniz Kirlenmesi Sempozyumu”, 18-20 Kasım 1998, İstanbul.

Saydam, C., Tuğrul, S., Baştürk, Ö. ve Oğuz, T., (1993), “Identification of the Oxidic/Anoxic Interface by Isopycnal Surfaces in the Black Sea”, *Deep Sea Research*, 40(7):1405-1412.

Shen, Y., Zheng, Komatsu, T. ve Kohashi, N., (2002), “a Three-Dimensional Numerical Model of Hydrodynamics and Water Quality in Hakata Bay”, *Ocean Engineering*, 29:461-473.

Simonov, A. I. ve Altman, E. N. (eds), (1991), “Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas of USSR. IV, Black Sea, pt1, Hydrometeorological Conditions”, Hydrometeorological Publishers, S. Petersburg, 430 pp.

Smagorinsky, J., (1963), “General Circulation Experiment with the Primitive Equations”, *Monthly Weather Review*, 91(3):99-164.

Sorooshian, S., Gupta, V.K. ve Fulton, J.L., (1983), “Evaluation of Maximum Likelihood Parameter Estimation Techniques for Conceptual Rainfall-Runoff Models: Influence of Calibration Data Variability and Length on Model Credibility”, *Water Resources Research*, 29 (4): 1185–1194.

Stow, C.A., Jolliff, J., McGillicuddy, D., Doey, S.C., Allen, J.I., Friedrichs, M.A.M., Rose, K.A. ve Wallhead, P., (2009), “Skill Assessment for Coupled Biological/Physical Models of Marine Systems”, *Journal of Marine Systems*, 76:4-15.

Sözer, A. ve Özsoy, E., (2002), “a Three-Dimensional Model of Bosphorus Strait Dynamics”, The 2nd Meeting on the Physical Oceanography of Sea Straits, 15th-19th April 2002, Villefranche/France.

Sur, H. İ., Özsoy, E. ve Ünlüata, Ü., (1994), “Boundary Current Instabilities, Upwelling, Shelf Mixing and Eutrophication Processes in the Black Sea”, *Progress in 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*, Istanbul University Institute of Marine Sciences and Management, İstanbul.

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*, Istanbul University Institute of Marine Sciences and Management, İstanbul.

Sümer, B.M. ve Bakioğlu, M., (1982), “Sea-Strait Flow with Special Reference to Bosphorus”, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Şahin, Y. (2001), *Ekoloji, Bilim Teknik* Yayınevi, İstanbul.

Tilkan, E. ve Balcı, A., (2006), “Göcek Koylarında Azot-Fosfor Dağılımı ve Ötrofikasyon”, Türkiye’nin Kıyı ve Deniz Alanları VI. Ulusal Konferansı, Türkiye Kıyıları 06 Bildiriler Kitabı Cilt II, syf. 527-534, 7-11 Kasım 2006, Muğla.

Tolmazin, D., (1985), “Changing Coastal Oceanography of the Black Sea II: Mediterranean Effluent.”, *Progress in Oceanography*, 15:277-316.

Tolmazin, D., (1987), “Relative Effects on the Oceanography and Ecology of the Black Sea due to Ongoing Soviet River Flow Modifications and Bosphorus Tunnel project”, Preliminary

Report, Parsons Brinckerhoff Int. Inc.

Tuğrul, S., Baştürk, Ö., Saydam, C. ve Yılmaz, A., (1992), "Changes in the Hydrochemistry of the Black Sea Inferred from Water Density Profiles", *Nature*, 359:137-139.

Tuncer, G., Karakaş, T., Balkaş, T. İ., Gökçay, C.F., Aygün, S., Yurteri, C. ve Tuncel, G., (1998), "Land-Based Sources of Pollution Along the Black Sea Coast of Turkey: Concentrations and Annual Loads to the Black Sea", *Marine Pollution Bulletin*, 36(6):409-423.

Ulyott, P. ve Ilgaz, O., (1946), "The Hydrography of the Bosphorus: an Introduction", *Geog. Rev.*, 36:44-60.

Ulyott, P. ve Pektaş, H., (1952), "a Note on the Yearly Temperature and Salinity Cycle in the Dardanelles", *Hidrobiologi, Pub. Of the Hydrobiol. Res. Inst. Univ. Istanbul*, A1:19-34, İstanbul.

UNEP (1991), "The State of the World Environment", United Nations Environment Programme, Nairobi, 48p.

UNESCO, (1981), "The Practical Salinity Scale 1978 and the International Equation of State of Seawater 1980", *ONESCO Technical Papers in Marine Science*, 36:1981.

Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M. ve Özsoy, E., (1990), "on the Physical Oceanography of the Turkish Straits", In Pratt, L., editor, *The Physical Oceanography of Sea Straits*, Dordrecht, the Netherlands, Kluwer, 25-60.

Vedernikov, V.I. ve Demidov, A.B., (1993), "Primary Production and Chlorophyll in the Deep Regions of the Black Sea", *Oceanology*, 33:229-235.

Venayagamoorthy, S. K., Koseff, J. R., Ferziger, J. R. ve Shih, L. H., (2003), "Testing of RANS turbulence models based on DNS data", *Center for Turbulence Research Annual Research Briefs 2003*, Stanford University, 127-138.

Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G. ve Rinaldi, A., 1998, "Characterization of the Trophic Conditions of Marine Coastal Waters with Special Reference to the New Adriatic Sea : Proposal for a Trophic Scale, Turbidity and Generalized Water Quality Index", *Environmetrics* 9, 329-357.

Wu, J., (1980), "Wind Stress Coefficients Over Sea Surface and Near Neutral Conditions-A Revisit", *Journal of Physical. Oceanography*, 10:727-740.

Yılmaz, A., Tuğrul, S., Polat, Ç., Ediger, D., Çoban, Y. ve Morkoç, E., (1998a), "on the Production, Elemental Composition (C, N, P) and Distribution of Photosynthetic Organic Matter in the Southern Black Sea", *Hydrobiologia*, 363:141-156.

Yılmaz, A., Yunev, O.A., Vedernikov, V.I., Moncheva, S. ve Bologa, A.S., (1998b), "Typical and Extreme Phenomena of Spatial Distribution of Chlorophyll-a in Various Seasons of 1990-1995 Period", In: *Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea*, Ivanov, L.I. and Oğuz, T. (eds), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1:105-120.

Yılmaz, A., (2002), "Türkiye Denizleri'nin Biyojeokimyası: Dağılımlar ve Dönüşümler", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26:219-235.

Yüce, H., (1988), "Investigation of the Mediterranean Water in the Black Sea", *İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Coğrafya Enstitüsü Bülteni*, 5:121-157.

Yüce, H., (1990), "Investigation of the Mediterranean Water in the Strait of Istanbul (Bosphorus) and the Black Sea", *Oceanologica Acta*, 13(2):177-186.

Yüce, H. ve Türker, A., (1991), “Marmara Denizi’nin Oşinografik Özellikleri ve Akdeniz Suyunun Karadeniz’e Girişi”, Çevre Sempozyumu Tebliğleri, Rotary Club, İstanbul.

Yüce, H. ve Alpar, B., (1994), “Investigation of Low Frequency Sea Level Changes at the Strait of Istanbul (Bosphorus)”, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 18:233-238.

Yüce, H., (1996), “Mediterranean Water in the Strait of Istanbul (Bosphorus) and the Black Sea Exit”, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 43:597-616.

Yüksel Y., (1999), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Hidrolik, YTÜ Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

Yüksel, Y., Çevik, E., Demir, A., Ertek, A., Yalçiner, A.C., Özmen, H.İ., Öngür, T., Eriş, İ., Ayat, B. ve Üzmez, Z., (2006), İstanbul Kıyı ve Liman Alanları (İstanbul Kıyı Alanları Yönetimi), Teknik Rapor, Bimtaş, İstanbul Büyük Şehir Belediyesi.

Yüksel, Y. Çevik, E., Ertürk, F., Ayat, B., ve Aydoğan, B., (2007), “İstanbul Boğazı Hidrodinamiğinin Su Kalitesine Etkisinin Modellenmesi’ YTÜ Araştırma Fonu Proje Raporu, İstanbul.

Yüksel, Y., Ayat, B., Öztürk, M.N., Aydoğan, B., Güler, I., Çevik, E.Ö. ve Yalçiner, A.C., (2008), “Responses of the Stratified Flows to Their Driving Conditions-A Field Study”, Ocean Engineering, 35(13):1304-1321.

Zhang, Q. Y., (2006), “Comparison of Two Three-Dimensional Hydrodynamic Modeling Systems for Coastal Tidal Motion”, Ocean Engineering, 33(2):137-151.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.07.1979	
Doğum yeri	Tekirdağ	
Lisans	1997-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü
	1999-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Müh. Prog.
Doktora	2004-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Müh. Prog.

Çalıştığı kurum

2003-Devam ediyor. YTÜ İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi