

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ BOYUTLU KIYI ALANI
HİDRODİNAMİK MODEL KALİBRASYONU
MIKE 21 HD ÖRNEĞİ**

İnşaat Mühendisi, Suat GÜNDEMİR

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. ÇALIŞMANIN AMACI	1
1.1 Giriş	1
1.2 Mike 21 Hidrodinamik Modelleme Sistemi ve Denklem Takımları	4
1.2.1 Genel	4
1.2.2 Kütle Denklemleri	5
1.2.2.1 “X” Yönlü Kütle Denklemi	5
1.2.2.2 “Y” Yönlü Kütle Denklemi	6
1.2.3 Momentum Denklemleri	7
1.2.3.1 Zamana Bağlı Terim	8
1.2.3.2 Konvektif ve Kısmi Momentum Düzeltme Terimleri	8
1.2.3.3 Yerçekimi Terimi	8
1.2.3.4 Taban Direnci Terimi	9
1.2.3.5 Momentum Yayılım Katsayısı (Eddy Vizkozitesi) Terimi	9
1.2.3.6 Coriolis Kuvveti Terimi	9
1.2.3.7 Rüzgar Sürtünmesi Terimi	9
1.2.3.8 Atmosfer Basıncı Terimi	10
2. HİDRODİNAMİK KALİBRASYON TEKNİKLERİ	11
2.1 Giriş	11
2.2 Hidrodinamik Model Kalibrasyon Problemi	11
2.3 Kalibrasyon Süreci ve İlgili Formüller	12
2.3.1 Model Parametrelerinin Hazırlanması	14
2.3.1.1 Veri Toplama	14
2.3.1.2 Veri Analizi	14
2.3.1.3 Model Batimetrisi	19
2.3.1.4 Sınır Verileri	19
2.3.2 Hassasiyet Analizi ve Kalibrasyon Parametrelerinin Seçimi	20
2.3.2.1 Taban Sürtünme Katsayısı	22
2.3.2.2 Eddy Vizkozitesi	23
2.3.2.3 Rüzgar Sürtünme Katsayısı	24

2.3.3	Kalibrasyon Kriterinin Belirlenmesi (Kalibrasyon hedefleri)	25
2.3.3.1	Tek-Hedefli Kalibrasyon	25
2.3.3.2	Çok-Hedefli Kalibrasyon.....	26
2.3.4	Hedef Fonksiyonların Tespiti (Hata fonksiyonları).....	31
2.3.4.1	Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü (Root Mean Square Error)	32
2.3.4.2	Ortalama Hata (Average Error)	32
2.3.4.3	Bağıl Hata (Relative Error).....	32
2.3.4.4	Seriler Arası Korelasyon ve Regresyon ilişkisi	33
3.	OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ	35
3.1	Giriş	35
3.2	Bir Optimizasyon Problemini Çözümlemekte Kullanılan Yaklaşımlar	36
3.2.1	Yerel Optimizasyon Teknikleri	37
3.2.2	Global Optimizasyon Teknikleri	38
3.3	Temel Global Optimizasyon Yöntemleri.....	39
3.3.1	Alan Kümeleme Metotları (Space covering methods)	39
3.3.2	Düzensiz Arama Metotları (Random search methods).....	40
3.3.2.1	Doğrudan Düzensiz Arama (Uniform örnekleme)	41
3.3.2.2	Kontrollü Düzensiz Arama (CRS).....	41
3.3.3	Genetik Algoritmalar (Evolutionary strategies and genetic algorithms).....	42
3.3.4	Karma Populasyon Gelişimi (Shuffled complex evolution algorithm)	43
3.3.5	Kümeleme Yaparak Bir Çok Yerel Aramalara (Multistart) Bağlı Metotlar	45
3.3.6	Diğer Metotlar	46
4.	SAYISAL MODELLEME	47
4.1	Giriş	47
4.2	Mike 21 ile Hidrodinamik Modelleme	47
4.2.1	Modele Esas Temel Kaynak Veriler	48
4.3	Hidrodinamik Modül	48
4.4	Model Bölgesi ve Ölçüm Noktalarının Dağılımı	49
4.5	Arazi Ölçümleri	50
4.5.1	Deniz Suyu Seviyesinin İzlenmesi	50
4.5.2	Akıntı Ölçümleri.....	50
4.5.3	Tuzluluk Ölçümleri.....	50
4.5.4	Rüzgar Ölçümleri	53
4.5.5	Deniz Suyu Sıcaklık Verileri.....	53
4.6	Mevcut Ölçümlerin Analizi ve Bölge Hidrodinamiğine Katkısı.....	55
4.6.1	Model Bölgesi Kurgusu.....	55
4.6.2	Deniz Suyu Seviyesi Analizi	56
4.6.3	Akıntı Ölçümleri Analizi	59
4.6.4	Uzun Dönem Saatlik Ortalama Rüzgar Ölçümleri Analizi	62
4.6.5	“Ağustos Ayı” Saatlik Ortalama Rüzgar Ölçümleri Analizi	64
4.7	Model Kalibrasyonu	69
4.7.1	Test 1	70
4.7.2	Test 2	74
4.7.3	Test 3	78
4.7.4	Test 4	82
4.7.5	Test 5	86
4.7.6	Test 6	90
4.7.7	Test 7	94

4.8	Pareto Eğrisi	98
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
5.1	Kalibrasyon Sonuçları	101
5.2	Öneriler	104
	KAYNAKLAR.....	105
	EKLER	107
EK 1:	Saatlik ortalama rüzgar verilerini içeren Ağustos 1999 kayıtlarının bir kopyası	108
EK 2:	Modellenen akıntı hızı ve yönleri için hız gruplarının yönsel dağılım frekans tabloları	111
EK 3	Mike 21 Hidrodinamik modül temel denklemleri ve çözüm algoritması.....	119
	ÖZGEÇMİŞ.....	126

SİMGE LİSTESİ

u	x yönündeki hız bileşeni
v	y yönündeki hız bileşeni
w	z yönündeki hız bileşeni
ρ	akışkan özgül kütlesi
γ	akışkan özgül ağırlığı
t	zaman
m	kütle
a	ivme
p	basınç kuvveti
$\vec{V}$	hız vektörü
X	x yönündeki kütleli kuvvet
Y	y yönündeki kütleli kuvvet
Z	z yönündeki kütleli kuvvet
g	yerçekimi ivmesi
ϕ	hız potansiyel fonksiyonu
C_R	Courant sayısı
c	hız büyüklüğü
Δt	zaman adımı
Δx	hesap ağı açıklığı
h	su derinliği
f	hata fonksiyon değeri
S	hassasiyet büyüklüğü
C	chezy sayısı
M	manning sayısı
E	eddy vizkozitesi katsayısı
C_w	rüzgar sürtünme katsayısı
W	deniz seviyesinden 10 m yukarıda esen rüzgar hızı
ψ	kalibrasyon parametresi
θ	parametreler takımı
θ_{opt}	optimum parametreler takımı
Θ	parametreler uzayı
w_i	farklı kalibrasyon hedefleri için atanmış ağırlık katsayıları
f_{agg}	farklı kalibrasyon hedeflerini bir arada temsil eden hata fonksiyon değeri
$g_i(f_i)$	farklı kalibrasyon hedeflerini genel bir ölçek ile ifade eden dönüşüm fonksiyonu
ε	dönüşüm sabiti
σ	standart sapma
r	korelasyon katsayısı
α	regresyon doğrusu lineer fonksiyon sabiti
β	regresyon doğrusunun eğimi
y_k	türetilmiş parametreler takımı
$P(t)$	parametreler takımı alt kümesi

KISALTMA LİSTESİ

DHI	Danish Hydraulic Institute (Danimarka Hidrolik Enstitüsü)
GOP	Global Optimization
HD	Hydrodynamic
HOT	Higher Order Terms (Yüksek Mertebeli Terimler)
OBS	Observed (Gözlemlenmiş veriler)
RE	Relative Error (Nispi Hata)
RMSE	Root Mean Square Error (Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü)
SCE	Shuffled Complex Evolution (Karma Popülasyon Gelişimi)
SIM	Simulated (Modellenmiş veriler)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Hesap Ağı, (Mike 21 User Guide,2004).....	5
Şekil 1.2 Zamansal ortalama, (Mike 21 User Guide,2004).....	6
Şekil 1.3 Hesap ağı notasyonu, x yönündeki momentum denklemi (Mike 21 User Guide,2004)	7
Şekil 2.1 El ile yapılan (manuel) kalibrasyon süreci.....	12
Şekil 2.2 Hidrodinamik model kurgusu.....	14
Şekil 2.3 Veri değerlendirme ve zaman serisi analizi	18
Şekil 2.4 Rüzgar sürtünme katsayıları.....	25
Şekil 2.5 İki hedefli optimizasyon için Pareto eğrisi (düzgün değişen dağılım), (Madsen and Jacobsen,2001)	27
Şekil 2.6 İki hedefli optimizasyon için Pareto eğrisi (ani değişen dağılım), (Madsen and Jacobsen,2001).....	29
Şekil 2.7 Pareto eğrisi değerlendirme şeması.....	31
Şekil 2.8 Dağılım diyagramı.....	34
Şekil 3.1 Otomatik kalibrasyon şeması	37
Şekil 3.2 Analitik ve türev esaslı bir fonksiyon için global ve yerel minimumlar	38
Şekil 3.3 Çok-ekstrem değerli çözüm uzayı.....	39
Şekil 4.1 Model bölgesi.....	49
Şekil 4.2 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş su seviyesi değişimi.....	51
Şekil 4.3 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş deniz suyu tuzluluk oranı.....	52
Şekil 4.4 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş deniz suyu sıcaklıkları	54
Şekil 4.5 Model alanı.....	56
Şekil 4.6 Ağustos 1999 dönemi için üretilmiş sentetik gel-git bileşeni	58
Şekil 4.7 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş akıntı kayıtlarından üretilmiş akıntı gülü	59
Şekil 4.8 Ağustos 1999 dönemi akıntı ölçümleri (-3.5 m)	60
Şekil 4.9 Bölgesel meteoroloji istasyonu kayıtlarına göre düzenlenmiş rüzgar gülü (1991-1996).....	62
Şekil 4.10 “Ağustos 1999” dönemi saatlik ortalama rüzgar kayıtlarından üretilmiş rüzgar gülü	64
Şekil 4.11 “1991-1996” yılları arası Ağustos ayları için saatlik ortalama rüzgar kayıtlarından üretilmiş ortalama rüzgar gülü.....	65
Şekil 4.12 Ağustos 1999 dönemi saatlik rüzgar kayıtları.....	66
Şekil 4.13 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.14 Test-1 model sonucuna bağlı akıntı gülü	73
Şekil 4.15 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.16 Test-2 model sonucuna bağlı akıntı gülü	77
Şekil 4.17 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.18 Test-3 model sonucuna bağlı akıntı gülü	81
Şekil 4.19 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	83
Şekil 4.20 Test-4 model sonucuna bağlı akıntı gülü	85
Şekil 4.21 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	87
Şekil 4.22 Test-5 model sonucuna bağlı akıntı gülü	89
Şekil 4.23 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.24 Test-6 model sonucuna bağlı akıntı gülü	93
Şekil 4.25 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması.....	95
Şekil 4.26 Test-7 model sonucuna bağlı akıntı gülü	97
Şekil 4.27 Optimum Pareto Eğrisi.....	99

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Tercihi ağırlık katsayıları	30
Çizelge 3.1 Değişim aralıkları ve tavsiye edilen değerleri eşliğinde algoritmik parametreler (n: Kalibrasyon parametrelerinin sayısı).....	45
Çizelge 4.1 Model bölgesi önemli gel-git harmonik sabitleri	57
Çizelge 4.2 Ölçülmüş akıntı kayıtlarının yönler göre dağılımı (Ağustos 1999).....	61
Çizelge 4.3 Uzun dönem rüzgar kayıtlarının yönler göre dağılımı (1991-1996)	63
Çizelge 4.4 Kısa dönem rüzgar kayıtlarının yönler göre dağılımı (Ağustos 1999).....	67
Çizelge 4.5 “1991-1996” yılları arası Ağustos ayları için saatlik ortalama rüzgar kayıtlarının yönler göre dağılımı	68
Çizelge 4.6 Model ve kalibrasyon parametreleri	70
Çizelge 4.7 Model ve kalibrasyon parametreleri	74
Çizelge 4.8 Model ve kalibrasyon parametreleri	78
Çizelge 4.9 Model ve kalibrasyon parametreleri	82
Çizelge 4.10 Model ve kalibrasyon parametreleri	86
Çizelge 4.11 Model ve kalibrasyon parametreleri	90
Çizelge 4.12 Model ve kalibrasyon parametreleri	94
Çizelge 4.13 Her bir parametreler takımı için hesaplanmış hata fonksiyon değerleri	98
Çizelge 5.1 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-1)	112
Çizelge 5.2 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-2)	113
Çizelge 5.3 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-3)	114
Çizelge 5.4 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-4)	115
Çizelge 5.5 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-5)	116
Çizelge 5.6 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-6)	117
Çizelge 5.7 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-7)	118

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca sahip olduğu, tecrübe, bilgi ve desteği benden esirgemeyen, hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL' e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca sahip oldukları tecrübe, bilgi ve desteği benden esirgemeyen, değerli patronlarım Sayın Merih ÖZCAN ve K. Tunç GÖKÇE' ye ayrıca teşekkür ederim

Tez çalışmalarına başladığım tarihten bu zamana kadar her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve şu an tek tek isimlerini sayamayacağım tüm arkadaşlarıma ve bu süreçte usanıp beni yalnız bırakana da, her şeye ama her şeye rağmen teşekkürlerimi sunuyor ve bu tezi ithaf ediyorum.

Hayatım boyunca sürekli yanımda olan ve desteklerini hep içimde hissettiğim sevgili ailemin tüm bireylerine kucak dolusu sevgilerimi sunuyor ve bu tezi ayrıca onların adına da ithaf ediyorum.

Suat GÜNDEMİR

Ocak 2006

ÖZET

Günümüzde, Hidrolik ve Çevre Mühendisliği dallarındaki bir çok çalışma için sayısal modelleme artık sürekli olarak kullanılan bir araç olmuştur. Dolayısı ile günümüze değin uygulanan fiziksel ölçekli modeller artık yerini matematik modellere bırakmaktadır.

Geliştirilen herhangi bir matematik modelin uygulanmasının önündeki en büyük endişe, “kalibrasyon” olarak ta bilinen model parametreleri uyum sürecidir. Hidrodinamik bir model için “model kalibrasyonu”, su seviyesi, akıntı hızı ve yönü gibi hidrodinamik parametreler üzerinde, ölçülmüş ve modellenmiş değerler arasındaki farkı minimum yapan bir uyum ile başarılabilir. Söz konusu uyumu desteklemek için ise, “hataların kareli ortalamalarının karekökü (RMSE)” gibi istatistiksel ölçümlere dayalı hata fonksiyonları dikkate alınmalıdır.

Geleneksel model kalibrasyon tekniği, parametre ayarlarının deneme yanılma yöntemi kullanılarak yapıldığı, el ile olan uygulamadır. Ancak el ile uygulanacak bir kalibrasyon, bağımsız model parametrelerinin sayısına ve bu parametreler arası etkileşim derecesine bağlı olarak oldukça usandırıcı ve zaman tüketici bir görev olabilmektedir.

Son yıllarda, zaman tüketici bu sürecin yerini alabilecek otomatik kalibrasyon yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar halen yürütülmektedir. Otomatik kalibrasyon yöntemi, ölçülmüş ve modellenmiş değerler arasındaki farkı karşılaştıran hedef fonksiyonların optimizasyonunu gerektirir. Dolayısı ile kalibrasyon problemi bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilmekte ve çözüm algoritmaları bu doğrultuda geliştirilmektedir.

Bu çalışma ile, günümüzde yaygın şekilde uygulanan hidrodinamik kalibrasyon teknikleri ve optimizasyonu konusu üzerinde durulmuştur. Hidrodinamik modelleme sisteminin bir parçası olan MIKE 21 HD modelleme yazılımı ilerleyen aşamalarda kullanılmıştır. Model parametrelerinin temininden kalibrasyon parametrelerinin seçimine, hedef fonksiyonların tespitinden optimizasyon algoritmalarının tercihine kadar bir çok farklı adım üzerinde yoğunlaşmıştır. Anlatılanları desteklemek üzere örnek bir uygulama çalışması sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Hidrodinamik kalibrasyon, otomatik kalibrasyon, optimizasyon, Mike 21 Hd, sayısal modelleme

ABSTRACT

Recently, numerical models have become very popular tools applicable to many problems in hydraulic and environmental engineering. They are replacing physical scale models which were commonly applied in the past.

The most important concern in front of being put into practice of any developed numerical modeling is the process of model parameter adjustments, also known as “calibration”. The calibration of the model for an hydrodynamic model would be achieved if there is a good match that make discrepancy between observed and simulated values of the following hydrodynamic parameters minimum : (1) surface elevation, (2) current speed and (3) current direction. However, in order to support the match involved, error functions concerning with statistical measurements such as “root mean square error (RMSE)” must be considered.

The traditional method of model calibration is the process in which parameter adjustments is applied manually by using a trial and error procedure. The process of manual calibration, however, may be a very tedious and time consuming task, depending on the number of free model parameters and the degree of parameter interaction.

In recent years, many research studies have been carried out to develop automated calibration methods that would replace this time-consuming process. The automatic calibration schemes generally involve optimization of an objective function that compares discrepancy between observed and simulated values. So, calibration problem is treated as an optimization problem and solution algorithms are developed in this direction.

In this present study, the hydrodynamic model calibration and parameter optimization techniques are reviewed. MIKE 21 HD modeling software is used throughout the study to carry out test runs. The study focuses on different steps of model calibration including determination of input parameters, selection of calibration parameters, evaluation of objective functions and the choice of optimization algorithms. A case study is also presented to provide a practical application of the presented theoretical work.

Key Words: Hydrodynamic calibration, automatic calibration, optimization, Mike 21 Hd, numerical model

1. ÇALIŞMANIN AMACI

1.1 Giriş

Yürütülen çalışma kapsamında, “Mike 21 Hidrodinamik Modelleme Sistemi ve Denklem Takımları ” başlığı altında incelenen konular ile, temel hidrodinamik denklemler verilmiştir. Kütlelerin korunumu prensibi gereği “süreklilik denklemi”nin tanımı ve Newton’un ikinci hareket kanunu gereği “momentumun korunumu denklemleri”nin izahı, temel bilgiler kapsamında sunulmuştur.

“Hidrodinamik kalibrasyon teknikleri” isimli yazımız ile literatürde kullanılan kalibrasyon kavramları üzerinde durulmuştur. Model ve kalibrasyon parametrelerinin tespitinden hassasiyet analizlerine, kalibrasyon hedeflerinin belirlenmesinden hedef fonksiyonların seçimine kadar bir çok konuda, genel olduğu kadar teknik açıdan doyurucu ve oldukça faydalı bilgilere değinilmiştir.

Geleneksel yöntemler içerisinde oldukça yaygın biçimde uygulanan tek-hedefli kalibrasyon anlayışının yerine, farklı kalibrasyon hedeflerinin eşzamanlı optimizasyonuna olanak sağlayan çok-hedefli kalibrasyon anlayışı ile, incelenen konuya farklı bir boyuttan yaklaşılmıştır.

Hidrodinamik bir sistem içerisinde kalibre edilecek unsurlar, ölçülmüş hidrodinamik parametreler sayısı yanı sıra, ölçülmüş noktaların model alanı içerisindeki toplam sayısı ve dağılımı ile yakından ilintilidir. Dolayısı ile kalibrasyon problemi, yukarıda da izah edildiği gibi birden fazla kalibrasyon hedefini birlikte değerlendirmeye olanak sağlayacak bir çözümler sistemi içerisinde düşünülmelidir.

Bunun anlamı, çözümler sistemi içerisinde herhangi bir hidrodinamik parametre için (mesela su seviyesi değişimi gibi) ulaşılan uygunluk derecesine mukabil, bir başka hidrodinamik parametre için (mesela akıntı hızı gibi) tatmin edici uygunluk düzeyinin yakalanıp yakalanmadığı endişesine verilecek yanıttır.

Yada bir başka açıdan konuyu değerlendirmek gerekirse, model alanı içerisinde mevcut ölçüm noktalarından herhangi biri için yakalanan uygunluk derecesi, bir diğer ölçüm noktası içinde aynı uygunluğu sergileyebiliyor mu sorusuna verilecek yanıt, yine benzer şekilde değer kazanmaktadır.

Gözler önüne serilen bu endişeler için verilebilecek en güzel cevap ise Pareto çözümler sisteminin tespitinde yatmaktadır.

Pareto çözümler sistemi otomatik kalibrasyon çalışmalarının temelini oluşturan bir çözüm mekanizmasıdır. Pareto çözümler sisteminin değerlendirilmesi kapsamında, seçilecek kalibrasyon hedeflerinin tipi ve sayısı önem kazanmaktadır. Seçilmiş bütün kalibrasyon hedefleri için en yüksek uygunluğu veren birleştirilmiş hedef fonksiyon değeri, optimum parametreler takımı $f_{agg}(\theta_{opt})$ ile temsil edilmektedir. Tespit edilen fonksiyon değeri Pareto optimum olarak kabul görmektedir.

Genel olarak, Pareto çözümler sisteminin tespiti ile ulaşılan sonuç dikkatle yorumlandığında, aslında çözümün tek bir parametreler takımından ibaret olmadığı, buna karşın aynı oranda güzel sonuçlar verebilen lineer olmayan bir çözümler sisteminin varlığı dikkatleri çekmektedir.

“Optimizasyon teknikleri” isimli konu başlığı altında, el ile yapıldığında oldukça usandırıcı ve zaman tüketici olan kalibrasyon sürecini otomatikleştirebilecek bazı yöntemler üzerinde durulmuştur. Henüz evrensel bir optimizasyon algoritmasının varlığından söz edilemeyen günümüzde, uygulamada yakaladıkları başarı ile literatüre geçmiş bazı önemli optimizasyon teknikleri, en genel hatları ile değerlendirilmiştir.

Analitik olarak izah edilemeyen bir çok problemler olabileceği gibi birden çok ekstrem değerlere sahip hedef fonksiyonların varlığı kaçınılmazdır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinin uygulanabilir olmadığı böylesi durumlarda, çok-ekstrem değerli optimizasyon problemi olarak Global Optimizasyon yöntemini (GOP) dikkate almak en doğru yaklaşım olarak görülebilmektedir.

“Sayısal modelleme” başlıklı yazı kapsamında, yukarıda da kısaca değinmeye çalıştığım ve ilerleyen bölümlerinde ise ayrıntılarıyla açıkladığım araştırma konuları üzerine, örnek bir uygulama çalışması yürütülmüş ve ulaşılan sonuçlar yorumlanmıştır.

Hidrodinamik akıntı koşullarının araştırılması, gerekli kalibrasyon çalışmalarının yürütülebilmesi ve uygulama çalışmasının sağlam bir zemine oturtulabilmesi amacı ile ölçülmüş arazi verilerine sahip bir model bölgesi seçilmiştir.

Bölge hidrodinamiğinin tespiti ve model kalibrasyonunun eş zamanlı arazi verileriyle yürütülebilmesi amacı ile, model bölgesi içerisinde koordinatları belirlenmiş bir kayıt istasyonundan ve yerel meteoroloji istasyonundan, bölgesel akıntı koşullarını ve rüzgar iklimini yansıtan veriler, Ağustos 1999 dönemi itibari ile temin edilmiştir.

Çalışma esnasında Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI) tarafından geliştirilmiş MIKE 21 modelleme yazılımı kullanılmıştır. Sonuçların yorumlanması esnasında Microsoft Excel ve Visual Basic Editörü ile yazdığım özel programlara baş vurulmuştur.

Temennim odur ki, üzerinde çalışılmış ve Türkçe kaynaklar açısından oldukça bakir kalmış bu tez çalışması, başka arkadaşlarımızın çalışmalarına da esin kaynağı olur ve daha yeni fikirlerin doğmasına katkıda bulunur.

1.2 Mike 21 Hidrodinamik Modelleme Sistemi ve Denklem Takımları

1.2.1 Genel

Mike 21 Hidrodinamik modül, koylarda, körfezlerde ve sahil bölgelerinde su seviyesi ve akım koşullarını benzeştirmek için kullanılan sayısal bir modelleme sistemidir. Hidrodinamik modül ile tek tabakalı, kararsız ve iki boyutlu akımları benzeştirmek mümkündür.

Aşağıda belirtilen ve düşeyde integre edilen kütle ve momentumun korunumu denklemleri, su seviyesi ve akım değişimlerini ifade etmektedir. (Mike 21 User Guide,2004)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q \\ & - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega p \\ & - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Burada denklemlerde kullanılan semboller:

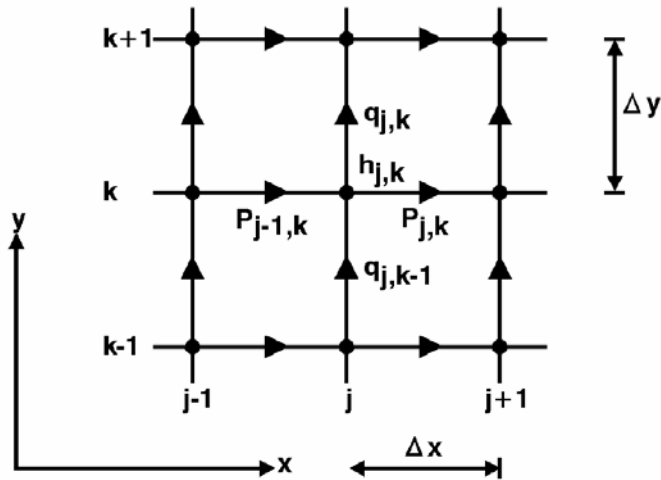
$h(x,y,t)$	: su derinliği ($h=\zeta-d$, m)
$d(x,y,t)$	: zamanla değişen su derinliği (m)
$\zeta(x,y,t)$	: su yüzü kotu (m)
$p,q(x,y,t)$	: x ve y yönlerindeki akılar ($m^3/s/m$)= (u_h,v_h) ; $(u,v)=x$ ve y yönlerindeki kesitsel ortalama hızlar
$C(x,y)$	: Chezy katsayısı ($m^{1/2}/s$)
g	: yerçekimi ivmesi (m/s^2)
$f(V)$	: rüzgar sürtünme faktörü
$V,V_x,V_y(x,y,t)$	: x ve y yönlerindeki rüzgar hızı ve bileşenleri (m/s)
$\Omega(x,y)$	: Coriolis parametresi, enlem bağımlı (s^{-1})
$p_a(x,y,t)$	: atmosfer basıncı ($kg/m/s^2$)
ρ_w	: su yoğunluğu (kg/m^3)
x,y	: uzamsal koordinatlar (m)
t	: zaman (s)
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	: efektif sürtünme kuvveti gerilme bileşenleri

Yukarıda verilen (1.1), (1.2) ve (1.3) denklem takımları ile bu denklem takımlarını oluşturan diferansiyel bileşenler ve nümerik eşlenikleri aşağıda incelenmiştir. Böylece kalibrasyona esas model parametrelerinin çözüm sistemi içerisindeki yeri ve model sonuçlarına katkısı araştırılmıştır. Ayrıca uygulanan hidrodinamik model çözüm sistemine ait algoritma, Ek-3'de verilmiştir.

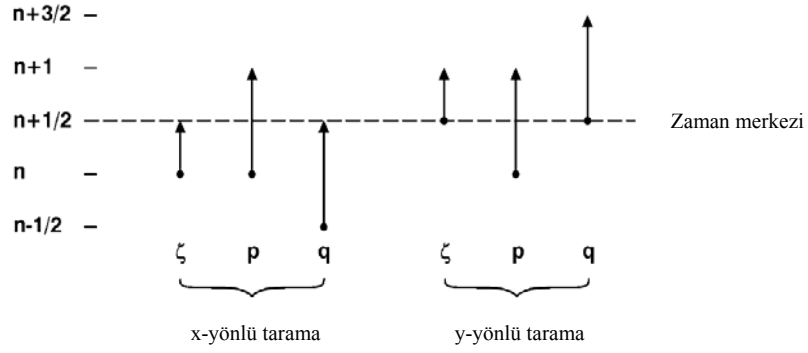
1.2.2 Kütle Denklemleri

1.2.2.1 “X” Yönlü Kütle Denklemi

(1.1) ile verilen denklem takımı x yönü için Taylor serisine açılırsa ;



Şekil 1.1 Hesap Ağı, (Mike 21 User Guide,2004)



Şekil 1.2 Zamansal ortalama, (Mike 21 User Guide,2004)

Sırasıyla, Şekil (1.1) ve Şekil (1.2)'de verilen hesap ağı ve zaman dilimleri gereği, (1.1) denklemi (1.4)'e dönüşür.

$$\left. \begin{aligned} & 2 \cdot \left(\frac{\zeta^{n+1/2} - \zeta^n}{\Delta t} \right)_{j,k} + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{p_j - p_{j-1}}{\Delta x} \right)^{n+1} + \left(\frac{p_j - p_{j-1}}{\Delta x} \right)^n \right\}_k \\ & + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{q_k - q_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+1/2} + \left(\frac{q_k - q_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n-1/2} \right\}_j = 2 \cdot \left(\frac{d^{n+1/2} - d^n}{\Delta t} \right)_{j,k} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

1.2.2.2 “Y” Yönlü Kütle Denklemi

(1.1) ile verilen denklem takımı y yönü için Taylor serisine açılırsa ;

$$\left. \begin{aligned} & 2 \cdot \left(\frac{\zeta^{n+1} - \zeta^{n+1/2}}{\Delta t} \right)_{j,k} + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{p_j - p_{j-1}}{\Delta x} \right)^{n+1} + \left(\frac{p_j - p_{j-1}}{\Delta x} \right)^n \right\}_k \\ & + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{q_k - q_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+3/2} + \left(\frac{q_k - q_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+1/2} \right\}_j = 2 \cdot \left(\frac{d^{n+1} - d^n}{\Delta t} \right)_{j,k} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Sırasıyla, Şekil (1.1) ve Şekil (1.2)'de verilen hesap ağı ve zaman dilimleri gereği, (1.1) denklemi (1.5)'e dönüşür.

Her bir taramanın tamamlanmasının ardından su derinliği, yüzey kotu ve batimetriye göre kesin değerler için güncelleştirilir. Böylece x yönlü tarama sonrasında $h^{n+1/2} = \zeta^{n+1/2} - d^{n+1/2}$

ve y yönlü tarama sonrasında $h^{n+1} = \zeta^{n+1} - d^{n+1}$ eşitliklerine ulaşılır. Ancak, Taylor serisine açılmıdan ötürü kaynaklanan genel kesme hataları, benzeşim modeli sonuçlarının ölçülmüş değerlere göre kabul edilebilir bir sapma ile farklılık göstermesine neden olur.

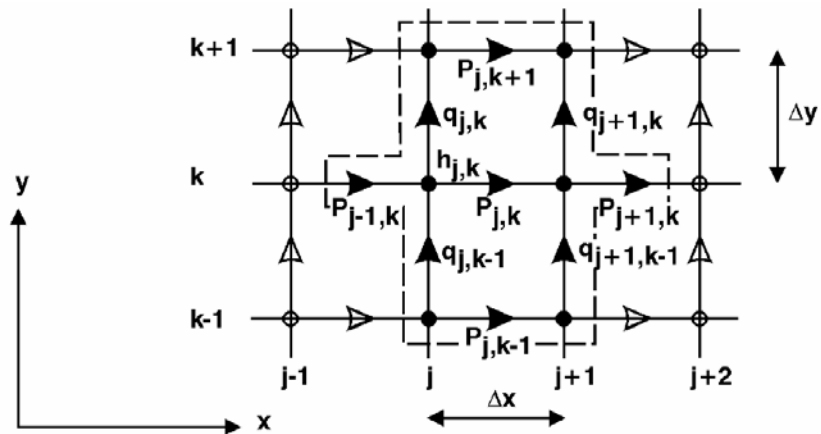
1.2.3 Momentum Denklemleri

Denklem tanımlarında, “y” yönündeki momentum denklemi “x” yönündeki momentum denklemine benzer olduğu için x yönü esas alınmıştır.

Momentum denkleminin x yönündeki bileşeni,

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{I}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q \\ & - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

eşitliğini çözerek akım deseni (akıntı yönü ve hızı gibi) üzerinde meydana gelen değişimleri araştırır.



Şekil 1.3 Hesap ağı notasyonu, x yönündeki momentum denklemi (Mike 21 User Guide,2004)

(1.6) denklem takımını oluşturan diferansiyel bileşenler tek tek incelendiğinde aşağıdaki bilgilere ulaşmak mümkün olmaktadır.

1.2.3.1 Zamana Bağlı Terim

Denklem (1.6)'da verilen ilk terim zamana bağlı bir terimdir. Bu terime sonlu farklar yaklaşımı, Şekil (1.3) ve Şekil (1.2)'de verilen hesap ağı ve zaman dilimleri gereği, Denklem (1.7)'deki gibi uygulanır.

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \left(\frac{p^{n+1} - p^n}{\Delta t} \right)_{j,k} - \frac{\Delta t^2}{24} \cdot \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} + HOT \quad (1.7)$$

Denklem (1.7) içerisindeki yüksek mertebeli terimler (HOT) ihmal edilir. Standart hidrodinamik benzeşim modelleri için eşitliğin sağ tarafındaki birinci terim yeterlidir. Ancak ilgili problemin tipine göre yüksek doğruluk gerektiren çözümlerde, ikinci teriminde çözüm şemasına dahil edilmesi gerekli görülmektedir.

1.2.3.2 Konvektif ve Kısmi Momentum Düzeltme Terimleri

Gel-git hareketi mertebesinde zamana bağlı değişimlerde, düzeltme terimleri son derece küçük olmaktadır. Bundan dolayı söz konusu terimlerin temel çözüme belirgin derecede katkıda bulunmayacağı belirtilmektedir. (Mike 21 User Guide,2004)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q}{h} \right) \quad (1.8)$$

1.2.3.3 Yerçekimi Terimi

Yer çekimi terimine bağlı yaklaşım, Denklem (1.9) ve (1.10)'daki gibidir.

$$gh\zeta_x \approx g \left(\frac{h_{j,k} + h_{j+1,k}}{2} \right)^n \left(\frac{\zeta_{j+1,k} - \zeta_{j,k}}{\Delta x} \right)^{n+1/2} \quad (1.9)$$

$$gh\zeta_x \approx FDS + g \left[\frac{\Delta t}{2} \zeta_x \zeta_t - \frac{\Delta t^2}{8} \zeta_{xx} \zeta_x - \frac{\Delta x^2}{8} h_{xx} \zeta_x - \frac{\Delta x^2}{24} h \zeta_{xxx} \right] + HOT \quad (1.10)$$

Burada FDS, (1.9) denkleminin sağ tarafıdır.

Denklem (1.10) içerisindeki yüksek mertebeli terimler (HOT) ihmal edilir. Standart hidrodinamik benzeşim modelleri için eşitliğin sağ tarafındaki birinci terim yeterlidir. Ancak ilgili problemin tipine göre yüksek doğruluk gerektiren çözümlerde, ikinci teriminde çözüm şemasına dahil edilmesi gerekli görülmektedir.

1.2.3.4 Taban Direnci Terimi

Taban sürtünmesi Chezy formülü ile temsil edilir.

$$\frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \quad (1.11)$$

Chezy sayısı (C), Manning sayısından (M) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C=M.h^{*1/6} \quad (1.12)$$

1.2.3.5 Momentum Yayılım Katsayısı (Eddy Vizkozitesi) Terimi

Pürüzlü batimetri ve kıvrımlı kıyı alanlarından geçen akımların yapısında meydana gelen düzensizlikler, aşağıda belirtilen momentum yayılım katsayısı terimi ile hesaplara dahil edilir.

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] \quad (1.13)$$

1.2.3.6 Coriolis Kuvveti Terimi

Dünyanın dönmesinden kaynaklanan ve rüzgarın hareket yönü üzerinde etkili coriolis kuvveti, aşağıdaki terim ile hesaplara dahil edilir. Hareket yönü üzerindeki sapma miktarı, rüzgarın hızı ve bulunduğu enlem ile yakından ilintilidir.

$$\Omega.q \quad (1.14)$$

1.2.3.7 Rüzgar Sürtünmesi Terimi

Rüzgar sürtünmesi terimi (1.15) denklemini çözümler.

$$f(v).V.V_x \quad (1.15)$$

Buradaki tüm değişkenler her hesap noktasında bilinirler

1.2.3.8 Atmosfer Basıncı Terimi

Atmosfer basıncına bağlı değişimler (1.16) denklemi ile hesaplara dahil edilir.

$$\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) \quad (1.16)$$

Yukarıda verilen kısmi diferansiyel denklemleri nümerik olarak integre etmek için türevli terimler sonlu farklar yaklaşımlarıyla yer değiştirir ve elde edilen nihai denklemler uygun sınır şartlar dahilinde çözülür.

Hidrodinamik modelleme sistemleri, modeli besleyen bazı parametrelerin (Sınır şartları: su seviyesi ve akıntı hızı gibi) hazırlanmasını gerektirir. Bu veriler, arazi ölçümlerinden temin edilerek modele girilir. Ancak bazı model parametrelerini (eddy vizkozitesi , rüzgar sürtünme katsayısı ve taban sürtünmesi gibi) fiziksel olarak arazi ölçümlerinden türetmek mümkün değildir. Böylesi durumlarda belirsiz parametreler, literatürde sahip oldukları değer aralıkları dikkate alınarak modele uygulanır ve en uygun değeri belirlenir. Bu süreç *model kalibrasyonu* olarak isimlendirilir.

Unutulmamalıdır ki, modelleme bir yaklaşım problemi olduğundan, elde edilen hesap değerlerinin ölçülmüş verilerle uyumunu sağlamak, kurulan modelin kalibre edilmesi gereğini kaçınılmaz kılmaktadır. Ancak doğru kalibre edilmiş bir hidrodinamik model ile güvenilir sonuçlara ulaşmak daima mümkündür.

İlerleyen konu kapsamında, yukarıda bahsi geçen hata terimlerinden ve benzeri belirsizliklerinden kaynaklanan modelleme kusurları ve bu kusurların iyileştirilmesinde kullanılan “*kalibrasyon*” sürecinden bahsedilecektir.

2. HİDRODİNAMİK KALİBRASYON TEKNİKLERİ

Genel

İlerleyen konu kapsamında, MIKE 21 Hidrodinamik model kalibrasyon kavramı ve süreci üzerine genel ve anlaşılması kolay tanımlar üzerinde durulmuştur. El ile yapılan (manuel) ve otomatik kalibrasyon sürecini çeşitli yönleri ile ele alan ve uygulamada karşılaşılan problemler üzerine her iki sürecin olumlu ve olumsuz taraflarını gözler önüne seren bilgiler sunulmuştur. Farklı kalibrasyon hedeflerinin eşzamanlı optimizasyonuna imkan tanıyan çok-hedefli kalibrasyon problemleri ile olaya farklı bir boyuttan yaklaşılmaya çalışılmıştır. Anlatılanları desteklemek üzere genel bir uygulama modeli ve sonuçları üzerine edinilen tespitler yorumlanmıştır.

2.1 Giriş

Doğal olayların matematik modelini kurmakta karşılaşılan en temel unsurlardan biri, model parametrelerine ait değerlerin seçimi ya da bir optimizasyon problemi olarak ta formüle edilebilen model kalibrasyonu sürecidir.

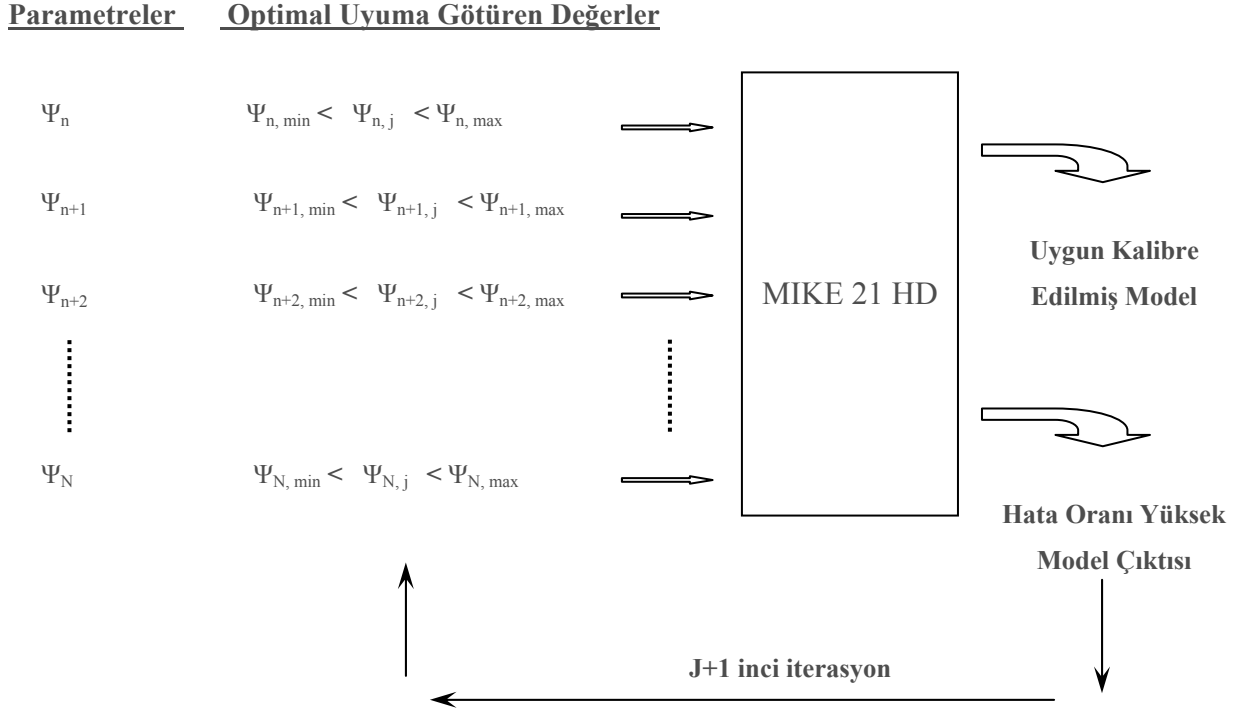
Herhangi bir fiziksel sisteme ait bir modelin kalibrasyon süreci ile hedeflenen amaç, önceden bilinmeyen yada kesin olarak ölçülemeyen bazı parametrelerin modeldeki değerlerini saptamaktır. Bu amaç, kurulan modeli hazırlanan veri dosyaları ile beslemek ve hesaplanan çıktı değerlerini fiziksel sistemde ölçülmüş değişken değerleri ile karşılaştırmak sureti ile başarılır. Aralarındaki fark ise bilinmeyen model parametreleri olan bağımsız değişkenler ile bir optimizasyon problemi çözümüyle minimize edilmeye çalışılır.

2.2 Hidrodinamik Model Kalibrasyon Problemi

Geleneksel şekli ile hidrodinamik model kalibrasyonu, deneme-yanılma metodu ile model parametreleri üzerinde el ile yapılabilecek uygulamalar şeklinde yorumlanabilir (Bkz. Şekil 2.1). Şekil içerisinde yer alan ψ_n notasyonu farklı kalibrasyon parametrelerini temsil etmekte olup, $n=1 \dots N$ 'e kadar kalibrasyon parametrelerinin sayısını göstermektedir. Ancak, el ile uygulanacak bir kalibrasyon süreci, bağımsız model parametrelerinin sayısına ve bu parametreler arası etkileşim derecesine bağlı olarak oldukça usandırıcı ve zaman tüketici bir görev olabilir.

İlgili konunun öznelliği nedeni ile model simülasyonlarının güvenilirliğini açık bir şekilde değerlendirmek oldukça zordur. Sonuç olarak daha etkili ve daha nesnel otomatik kalibrasyon

yöntemlerinin geliştirilebilmesi için bir çok araştırmalar bu alana kaydırılmaktadır.



Şekil 2.1 El ile yapılan (manuel) kalibrasyon süreci

Hidrodinamik modelleme ile otomatik kalibrasyon usulleri üzerine yapılan uygulamalar son yıllarda oldukça artmıştır. Söz konusu usuller farklı uygulama alanlarında ve çeşitli şekillerde halen geliştirilmektedir.

2.3 Kalibrasyon Süreci ve İlgili Formüller

En genel hatlarıyla, el ile yapılan (manuel) ve otomatik kalibrasyon sürecine giden yolda izlenecek bazı yöntemleri, aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Model parametrelerinin hazırlanması
 - a) Veri toplama
 - b) Veri analizi
 - i. Zaman Serisi Analizleri
 - ii. Veri Değerlendirme Teknikleri (Data Assimilation)
 - c) Model batimetrisi
 - d) Sınır verileri

- Hassasiyet analizi ve kalibrasyon parametrelerinin seçimi

Hidrolik oluşumun fiziğine bağlı olarak ve uygulanacak hassasiyet analizi gereği:

- a) Taban sürtünme katsayısı
- b) Eddy vizkozitesi
- c) Rüzgar sürtünme katsayısı
- Kalibrasyon kriterlerinin belirlenmesi (Kalibrasyon hedefleri)
 - a) Tek-hedefli kalibrasyon (örneğin yalnızca su seviyesi değişimi)
 - b) Çok-hedefli kalibrasyon (su seviyesi değişimi, akıntı hızı ve yönü)
- Hedef fonksiyonların tespiti (Hata fonksiyonları)
 - a) Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü (RMSE)
 - b) Ortalama hata
 - c) Bağlı Hata
 - d) Seriler arası Korelasyon ve Regresyon ilişkisi
- Optimizasyon algoritmasının seçimi
 - a) Yerel (local) optimizasyon
 - b) Global optimizasyon
 - i. Takım (alan) kümeleme metotları (Set (space) covering methods)
 - ii. Düzensiz arama metotları (Random search methods)
 - Doğrudan düzensiz arama (Pure direct random search)
 - Kontrollü düzensiz arama (Controlled random search)
 - iii. Genetik algoritmalar (Evolutionary and genetic algorithms)
 - iv. Shuffled complex evolution algorithm
 - v. Kümeleme yaparak birçok yerel aramalara (multistart) bağlı metotlar
 - vi. Diğer metotlar
- Kurulan ve kalibre edilen modelin sınanması (Validation)
- Üretim
- Raporlama
- Sunum
- Kabul

2.3.1 Model Parametrelerinin Hazırlanması

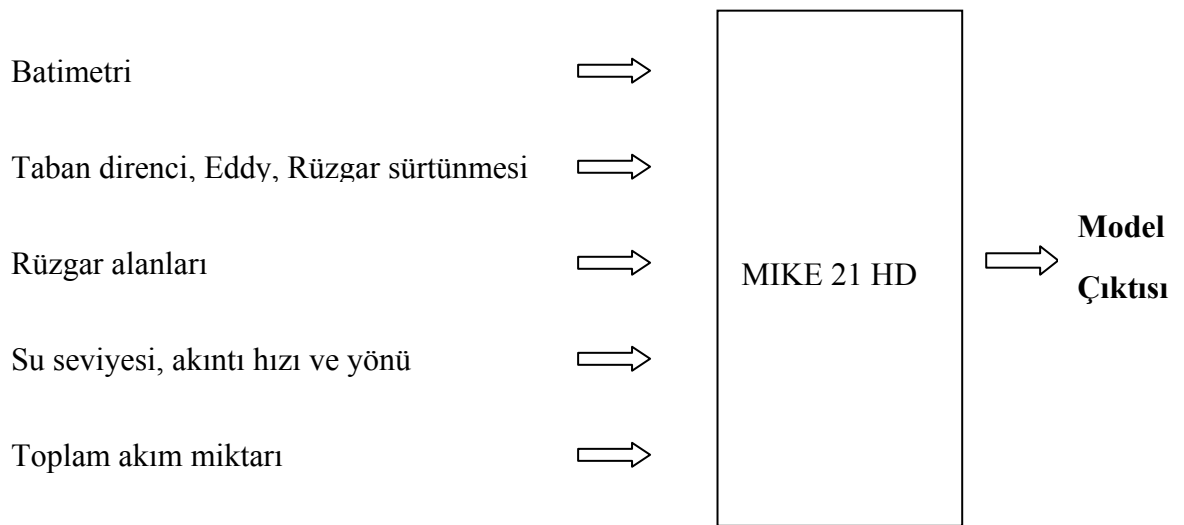
2.3.1.1 Veri Toplama

MIKE 21 HD gibi hidrodinamik modelleme sistemleri, model kurgusu esnasında kullanıcı tarafından belirtilecek bir çok model parametrelerinin hazırlanmasını gerektirir. Bu parametrelerden kimisi arazi verilerinden, kimisi meteorolojik verilerden ve kimisi de seyir haritalarından temin edilebilir. Ancak, tüm model parametrelerinin belirlenmesine tam katkı sağlayabilecek kapsamlı arazi verisi nadiren mevcuttur. Buna ilaveten, bazı model parametreleri daha çok fikirsel bir yapı arz etmekte olup arazi verileri ile doğrudan değerlendirilemezler.

2.3.1.2 Veri Analizi

Model parametrelerinin hazırlanması esnasında arazi verileri, en belirgin değişimleri tanımlamak üzere kullanılmalıdır. Bunu başarmak ise, aşağıda belirtilen uygun parametre sınıfları ile fikirsel bir model oluşturmakla sağlanabilir.

- Su seviyesi ölçümleri
- Akıntı hızı ölçümleri
- Akıntı yönü ölçümleri
- Deniz suyu sıcaklığı ölçümleri
- Deniz suyu tuzluluk oranı ölçümleri
- Rüzgar ölçümleri



Şekil 2.2 Hidrodinamik model kurgusu

Yukarıda maddeler halinde sayılan her bir sınıf için bazı parametreler doğrudan arazi verileri ile değerlendirilebilirken, diğerleri kalibrasyona bağlı olabilir. Bu nedenle asıl uğraşılması gereken şey, düzgün bir kalibrasyon problemi çıkarabilmek için oldukça sade, fakat aynı zamanda ana model parametrelerinin hesap alanı içerisindeki değişimlerine vakıf olabilecek kadar da kapsamlı bir model kurgusuna ulaşabilmektir. Şekil 2.2’ de modeli besleyen ana model parametreleri şematik olarak gösterilmektedir.

Hiç şüphe yok ki, yukarıda bahsi geçen ve ileriki bölümlerde kalibrasyon çalışmalarında kullanılacak bu ölçümlerin, akıntı özelliklerinin düzgün kabul edildiği ve ani değişimlerden uzak bölgelerden temin edilmesi en isabetli davranış olacaktır. Bunun nedeni, mevcut sayısal modellerin açık sınırlarda belli başlı bazı kabuller yapmış olmasından ve yazılan programların bir diferansiyel denklemler takımı olarak ani değişimlere gereken yanıtı vermekte zorlanmasından kaynaklanmaktadır. Dikkat gerektiren bu hususlar sayesinde, stabilitesi yüksek simulasyon sonuçlarına ve daha düzgün bir kalibrasyon problemine ulaşmak elbette mümkün olacaktır.

a) Zaman Serisi Analizleri

Önceki bölümde maddeler halinde sayılan tüm bu ölçümler, belirli bir dönemi kapsayan ve “zaman serisi” olarak bilinen düzenli ve ardışık ölçümler topluluğudur. Zaman serisi analizlerinin iki temel amacı vardır:

- Ardışık gözlemler ile temsil edilen olgunun doğasını saptamak
- Zaman serisi değişkenlerinin gelecekteki değerlerini önceden tahmin etmek

Diğer bir çok analizlerde olduğu gibi, zaman serisi analizlerinde de ölçülen serinin sistematik bir seyirden (genellikle tanımlanabilir bir bileşenler takımı) ve serinin saptanmasını zorlaştıran düzensiz sinyallerden oluştuğu varsayılır. Pek çok zaman serisi analiz teknikleri, seri gidişatını daha da belirginleştirmek için bu düzensiz sinyalleri ölçülen serilerden ayıklayan faydalı yöntemler içermektedir. Zaman serileri iki temel bileşen ile ifade edilebilir (Şekil 2.3) :

- Eğilim bileşeni
- Periyodik bileşen

Herhangi bir seriye ait eğilim bileşeni, zamanla değişen fakat en azından ölçüm dönemi içerisinde kendini yinelemeyen lineer veya genellikle non-lineer değişimi temsil eder. Periyodik bileşen ise ilerleyen zaman içerisinde sistematik aralıklar ile kendisini yineleyen değişimleri temsil eder. Bu iki zaman serisi bileşenleri, gerçek zamanlı ölçüm verileri

içerisinde bir arada bulunabilirler.

Zaman serisi analizleri, özellikle hesap alanı dışında kalan ölçümlerin varlığı ve rüzgar, yağmur ve sıcaklık değişimleri gibi çevresel tedirginliklerin katkısı durumunda, hidrodinamik ölçümler ve analizler içerisinde var olan gerçek (periyodik) sinyallerin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Zaman serisi verilerine has en belirgin özellik, ardışık gözlemlerin genellikle bağımsız olmadığı ve analizlerde gözlem değerlerini zamansal sıralamalarına göre hesaba katma gerekliliğidir. Ardışık gözlemlerin bağımlı olması durumunda, geçmiş gözlemlerden yola çıkarak gelecekteki değerleri önceden kestirmek mümkün olabilir. Eğer ki, herhangi bir zaman serisi önceden kesin olarak tahmin edilebiliyorsa, deterministik bir zaman serisi olarak nitelendirilebilir. Ancak birçok zaman serisi, gelecekteki değerlerin geçmişteki değerlerle kısmen saptanabilmesi nedeni ile stokastik olarak da değerlendirilebilmektedirler. Bu durumda önceden kesin tahminler yapabilmek imkansızdır ve böylesi bir düşünce, yerini, gelecekteki değerlerin geçmişte edinilen bilgilerle koşullu bir olasılığa sahip olduğu fikri ile değiştirmelidir.

b) Veri Değerlendirme Teknikleri (Data Assimilation)

Veri değerlendirme işlemi, modellenecek sisteme ait bilgileri düzenlemek amacı ile sahadan alınan ölçüm değerlerinin olası belirsizliklerden arınması ve model dinamikleri ile tam bir uyum sergilemesi için uygulanan bir iyileştirme yöntemidir.

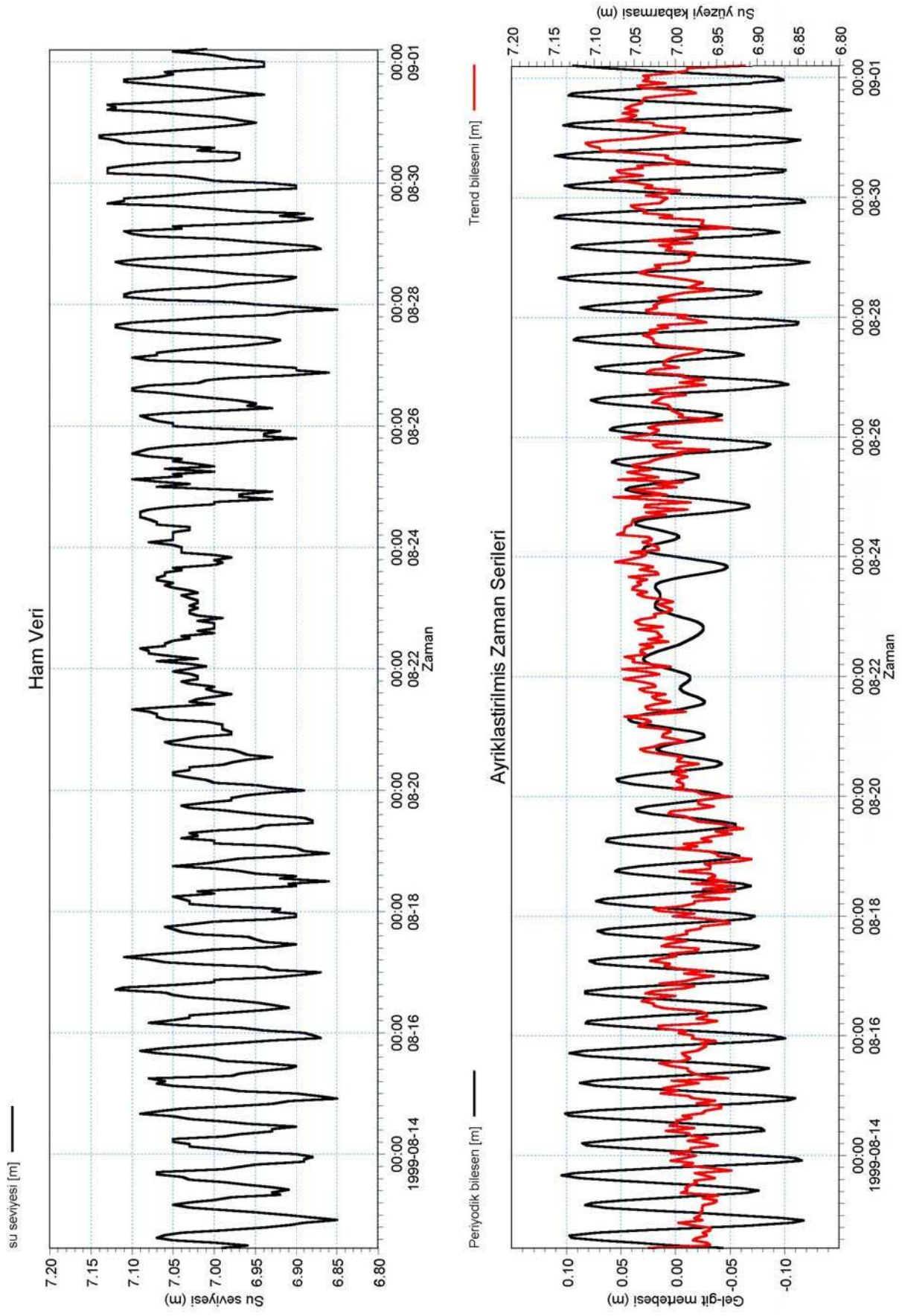
İki boyutlu modelleme sistemi MIKE 21 içerisinde yer alan veri değerlendirme modülü sayesinde, hidrodinamik model çözümlerinde su seviyesi değişimlerinin iyileştirilmesi ve model dinamikleri ile uyumlu hale getirilmesi, oldukça kısıtlı ölçüm verilerine rağmen mümkündür.

Veri değerlendirme modülü uygulama ve tasarım amaçlı çalışmalarda geçmişe yönelik (hindcasting) tahminlerde kullanılabileceği gibi, gerçek zamanlı ve ileriye yönelik (forecasting) tahmin çalışmalarının bir parçası olarak ta kullanılabilmektedir. Modül her iki durumda da, modeli kurulacak sisteme ait iyileştirilmiş bir tahmin ve buna bağlı belirsizlik unsurunu verebilmektedir. Sonuçlar model dinamikleri ve ölçülmüş veri değerlerinin yanı sıra bunların rölatif belirsizlikleri ile uyum içerisinde.

Sistem belirsizliklerini modellemekte kullanılan yaklaşım, genellikle model hatalarının, zorlayıcı terimler olarak ta adlandırılan başlangıç sınır koşullarına bağlı hatalar olduğu varsayımına dayalıdır. Genellikle açık sınırlar boyunca, gel-git' e bağlı su seviyesi değişimleri

oldukça yüksek bir doğruluk ile elde edilebilmektedir (Bkz. Şekil 2.3). Oysaki, meteorolojik etkilerden kaynaklanan değişimler (mesela, model alanı dışında oluşmuş bir fırtına gibi) büyük hatalar içerebilirler. Meteorolojik etkenlere bağlı zorlayıcı unsurlardan kaynaklanan hatalar, kısmen de olsa meteorolojik gözlemlerin belirsizliği ile izah edilebilir. Tüm bu belirsizliklere ayrıca rüzgar basınç bileşenlerinin fiziksel tanımı ve rüzgar sürtünme katsayısı tespit yöntemleri de dahil edilebilir.

Tüm bu değerlendirme çalışmaları ile ulaşılabilecek sonuç, geçmişe yada ileriye yönelik tahmin çalışmalarında, model için iyileştirilmiş bir başlangıç sınır koşulu sağlayabilmektir.



Şekil 2.3 Veri değerlendirme ve zaman serisi analizi

2.3.1.3 Model Batimetrisi

Hidrodinamik model için model alanında su derinliklerini tanımlamak, hiç şüphe yok ki modelleme süreci içerisinde yerine getirilen en önemli görevdir. Bu nedenle, batimetriyi hazırlamada harcanacak birkaç saatlik bir tasarruf, ileride belki günlerce sürebilecek bir kalibrasyon süreci ile karşı karşıya kalınmasına neden olabilir. Batimetriyi kurmada takip edilebilecek aşağıda belirtilen birkaç husus ile ileride karşılaşılabilecek bir çok problemlerden kaçınmak mümkündür (Mike 21 Hd, User Guide, 2004) .

- Açık sınırlarda belli başlı bazı kabuller yapıldığı için açık sınırdan 5-10 ağ noktası uzaklıkta akıntı şekli düzgün olmalıdır. Yani açık sınırlara yakın tüm bölgelerde batimetri düzgün olmalıdır.
- Seçilen ağ aralığı, benzeştirilmek istenen akış için önemli olan tüm batimetrik değişimleri yansıtabilecek çözünürlükte olmalı ve ideal Courant katsayısını sağlamalıdır.

Courant sayısı:

$$C_R = c \cdot \Delta t / \Delta x \quad (2.1)$$

c : Hız büyüklüğü (m/sn)

Δt : Zaman adımı (sn)

Δx : Ağ aralığı (m)

Bir gel-git dalgası için gerekli hız formülü :

$$c = (g \cdot h)^{1/2} \quad (2.2)$$

g : Yerçekimi ivmesi (m/sn²)

h : Su derinliği (m)

Courant sayısının (2.1) ve (2.2) eşitliklerine dayanarak en fazla 5'e kadar değerler alması model stabilitesi açısından gerekli olabilir.

2.3.1.4 Sınır Verileri

Batimetrisinin tanımlanması nasıl ki modelleme sürecinin en önemli görevlerinden biri ise hidrodinamik sınır koşullarının tanımı da bu sürecin ikinci en önemli görevidir. Tanımlanacak iyi bir sınır koşulu, elde edilecek daha doğru sonuçlar ve karşılaşılabilecek daha az stabilize problemleri anlamına gelmektedir.

Mike 21 HD hemen hemen düzlemsel akışı veren kısmi diferansiyel denklemleri çözümler ve diğer tüm diferansiyel denklemler gibi sınır koşulları gerektirir. Bilinmeyen değişkenler

“yüzey seviyesi” ve “x” ve “y” doğrultularındaki akı yoğunlukları olduğu için, uygulamada, her bir zaman adımı için açık sınır boyunca tüm ağ noktalarında bu üç değişkenden ikisi modele girilmelidir. Ancak birçok uygulamada yalnızca yüzey seviyesi ve genel akım doğrultusu veya sınırdan geçen toplam akım ve genel akım doğrultusu bilinir.

Sınır değerleri girdisi olarak oluşturulabilecek iki kombinasyon mümkündür.

- Su seviyesi ve akış doğrultusu girilir.

Su seviyesi açık sınır boyunca sabit veya değişken olabilir. Zamanla değişim sabit, sinüzoidal veya zaman serisi veya konum serisi veri dosyalarında belirlendiği gibi değişebilir.

Akım yönleri program içinde otomatik olarak sınıra dik alınabileceği gibi konum serisi veri dosyasından da okutulabilir. Veri dosyası sınır boyunca her bir ağ noktası için bir yön içermelidir.

- Sınırdan geçen toplam akım debisi ve akış doğrultusu girilir.

Toplam akım zamanla sabit olabilir, sinüzoidal bir değişim gösterebilir veya zaman serisi veri dosyası şeklinde girilebilir. Sınır boyunca her bir ağ noktasında toplam akımın dağılımı, derinliğe göre Mike 21 tarafından hesaplanır.

Akım yönleri program içinde otomatik olarak sınıra dik alınabileceği gibi konum serisi veri dosyasından da okutulabilir. Veri dosyası sınır boyunca her bir ağ noktası için bir yön içermelidir.

2.3.2 Hassasiyet Analizi ve Kalibrasyon Parametrelerinin Seçimi

Modellenen değerlerin mevcut gözlem verileri ile karşılaştırıldığında hangi parametrelerin daha duyarlı olduğunu araştırmak için “hassasiyet” analizleri yürütülebilir. Her bir parametreye göre modellenmiş değerlerdeki değişimi ölçen hassasiyet analizleri, yeni versiyon MIKE 21 AUTOCAL modülü içerisinde yer almaktadır.

Hassasiyet analizleri, hangi parametrelerin sonuca daha duyarlı olduğunu tespit ve sabit değerlere atanabileceğine karar vermek için başlangıç model çalışmalarında kullanılabilir (M.C.Hill,1998). Ancak böylesi bir analizin sonuçları çok dikkatli yorumlanmalıdır. Kullanılan hassasiyet analizleri parametre değerlerine bağlıdır ve bundan dolayı bazı başlangıç parametre değerleri ile değerlendirilen hassasiyet istatistikleri, diğer parametre takımlarını kullanarak elde edilen istatistiklerden çok farklı olabilir. Tüm bunlara ilaveten

hassasiyet analizleri, parametreler arası korelasyon etkileşimini doğru şekilde hesaba katmamaktadır. Bunun anlamı, duyarsız gibi görünen parametrelerin model davranışı için önemli olan diğer parametreler ile ciddi ilişkilere sahip olabileceği ihtimalidir (Madsen,2000a).

Yeni versiyon MIKE 21 AUTOCAL modülü bir tek hassasiyet analiz metodu içermektedir:

- Yerel hassasiyet analizi

Yerel hassasiyet analizi, belirlenmiş bir parametre takımı civarında model parametrelerinin hassasiyetini araştırır ve parametreler uzayı içerisinde yalnızca o noktadaki parametrelerin önemi hakkında bilgi verir.

Fark Yaklaşımı

Model çıktısına göre bir parametrenin hassasiyeti (2.3) eşitliğinde gösterildiği gibi ifade edilir (Mike 21 Autocal, 2004) .

$$S_i = \frac{\partial f}{\partial \theta_i} \quad (2.3)$$

Burada f hesaplanmış model çıktısı olup, $\theta_i = \{ \psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_N \}$ olmak üzere dikkate alınan model parametreler takımını temsil etmektedir. Burada ψ kalibrasyon parametresidir. Hassasiyet analizi, önceden belirlenmiş parametreler takımı ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$) civarında değerlendirilir. Burada n parametreler takımı sayısıdır.

Otokalibrasyon modülü içerisinde, hassasiyet katsayılarını değerlendirmek üzere sonlu farklar yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu nedenle, üç farklı seçenek mevcuttur.

İleri Sonlu Farklar Yaklaşımı:

$$S_i = \frac{f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i + \Delta \theta_i, \dots, \theta_n) - f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n)}{\Delta \theta_i} \quad (2.4)$$

Geri Sonlu Farklar Yaklaşımı:

$$S_i = \frac{f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i) - f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i - \Delta \theta_i, \dots, \theta_n)}{\Delta \theta_i} \quad (2.5)$$

Merkezi Sonlu Farklar Yaklaşımı:

$$S_i = \frac{f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i + \Delta\theta_i, \dots, \theta_n) - f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i - \Delta\theta_i, \dots, \theta_n)}{2\Delta\theta_i} \quad (2.6)$$

Burada $\Delta\theta_i$ parametreler takımına ait değişim miktarı olup, başlangıç parametre değerlerinin bir katsayısı yada parametre değişim aralıklarının bir katsayısı olarak hesaplanabilir.

Hassasiyet katsayılarının hesabı, ileri ve geri sonlu farklar yaklaşımları esas alındığında en az $n+1$ adet model değerlendirmesini gerekli kılarken, merkezi sonlu farklar yaklaşımının uygulanması durumunda, en az $2n+1$ adet model değerlendirmesini gerektirir.

Kalibrasyon süreci, tanımlı parametre değerleri ile gerçeği yansıtmaktan oldukça uzak sonuçlanır ise, model veri tabanı gözden geçirilmeli ve sadece bir kaç kalibrasyon parametresi içeren daha sade bir fikirsel model tanımlanmalıdır. Diğer taraftan, eğer model, gözlemler ile yansıtılan değişimi yeterince tanımlayamıyor ise, temel model parametrelerinin gruplara ayrılması yada farklı süreçlerin kalibrasyona dahil edilmesi göz önüne alınmalıdır.

2.3.2.1 Taban Sürtünme Katsayısı

MIKE 21 Hidrodinamik modül içerisinde taban direncini belirleyen iki belirgin faktör Chezy ve Manning sayılarıdır. Bu iki parametreden biri tercih edilerek sistem algoritmasında çözüme gidilir. Her iki durumda da kullanılan taban direnci formülü denklem (2.7)'deki gibidir (Mike 21 Hd, User Guide, 2004).

$$\frac{g \cdot u \cdot |u|}{C^2} \quad (2.7)$$

Direnç katsayısı olarak Manning sayısı tercih edilirse, uygulanacak Chezy dönüşümü denklem (2.8)'deki gibidir.

$$C = M \cdot h^{1/6} \quad (2.8)$$

Burada;

C: Chezy sayısı ($m^{1/2}/sn$)

M: Manning sayısı ($m^{1/3}/sn$)

h: Su derinliği (m)

'dir.

Su derinliği rölatif değişimi önemli mertebelerde ise, Manning sayısının tanımlanması ile daha kesin sonuçlara ulaşılması muhtemeldir. Manning sayısı değişim aralığı 20-40 m^{1/3}/sn değerleri ile sınırlı olup, başka hiç bir bilgi yoksa 32 m^{1/3}/sn değeri ile temsil edilmesi tavsiye edilmektedir.

Eğer Chezy sayısının kullanılması gerekli ise, model kalibrasyonu 30-50 m^{1/2}/sn değişim aralığındaki değerler ile sağlanabilmektedir.

Taban direnci formülünün tanımı gereği aşağıdaki iki sonuca varılabilir.

- Ufak direnç katsayıları (seçilecek manning yada chezy sayısı) taban sürtünmesini artırır.
- Büyük direnç katsayıları (seçilecek manning yada chezy sayısı) taban sürtünmesini azaltır.

Eğer ki, sınır koşulları gerçeği yansıtmıyor ve bu noktalarda stabilite problemleri yaratıyorsa, sınır boyunca daha yüksek dirençli ve yaklaşık 2-4 hesap ağı eninde ufak bir bandın tanımlanması gerekebilir. 5-10 m^{1/3}/sn değerlerinde alınabilecek Manning sayıları ile başarılı sonuçlara ulaşılması mümkündür. Ancak bu metoda yalnızca, sınır değerlerini düzeltebilmek mümkün değilse başvurulmalıdır. Çünkü ufak direnç katsayılı bölge ve yakınlarında edinilen simulasyon sonuçlarına şüphe ile yaklaşılması tavsiye edilmektedir.

2.3.2.2 Eddy Vizkozitesi

Eddy viskozitesinin en belirgin özelliği, kısa dalga boylu salınımlar üzerindeki direnç etkisidir. Bu sayede akıntı hızı ve su derinliği gibi kalibrasyon parametreleri üzerinde tanımlı bir kontrol kurulmasına katkıda bulunur.

MIKE 21 Hidrodinamik modülü ile, eddy vizkozitesini içeren denklemleri iki şekilde kullanmak mümkündür. Bunlar :

- Akı tabanlı formül

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ E \frac{\partial P}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ E \frac{\partial P}{\partial y} \right\} \quad (\text{x- momentum}) \quad (2.9)$$

P: x yönündeki akı (m³/sn/m)

E: Eddy vizkozitesi katsayısı (m²/sn)

- Hız tabanlı formül

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ h \cdot E \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h \cdot E \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad (2.10)$$

u: x yönündeki hız büyüklüğü (m/sn)

h: Su derinliği (m)

Birinci formülün yalnızca sabit derinlikli uygulamalarda doğru sonuçlar yansıttığı ve akıntı yapısındaki bozulmalardan kaçınmak için itina ile uygulanması gereği belirtilmektedir.

Hız tabanlı formülün ise daha doğru olmasına rağmen, algoritma içerisinde uygulanmasının daha zor olduğu uyarılardan anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, sistemin bilinmeyen değişkenler olarak hız yerine akı yoğunluğunu kullanmasıdır. Bundan dolayı hız tabanlı formül önceki zaman adımında edinilen hız değerlerini kullanarak işlemine devam etmektedir. Bu da eddy vizkozitesi katsayısı büyük olması durumunda stabilite problemlerine yol açmaktadır. Katsayı değerlerinin aşağıdaki kriteri sağlaması stabilite açısından istenmektedir.

$$\frac{E \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (2.11)$$

2.3.2.3 Rüzgar Sürtünme Katsayısı

MIKE 21 Hidrodinamik modül ile model alanı üzerinde esen rüzgar etkisi, aşağıda belirtilen cebirsel denklem ile ifade edilebilir (Mike 21 Hd, User Guide, 2004).

$$C_w = \frac{\rho_{hava}}{\rho_{su}} W^2 \quad (2.12)$$

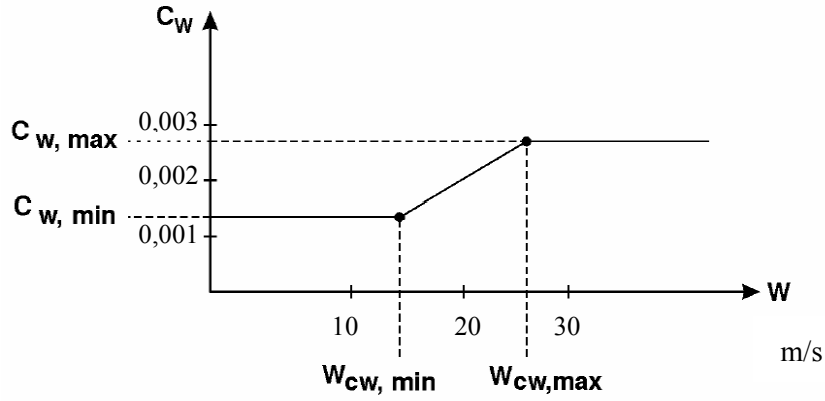
C_w : Rüzgar sürtünme katsayısı

ρ : Yoğunluk (oransal eşitliği 1/800)

W: Deniz yüzeyinden 10 m yukarıda esen rüzgar hızı (m/sn)

0.0026 değeri için rüzgar sürtünme katsayısının, açık denizlerde orta dereceli ve güçlü esen rüzgarlar altında oldukça güzel sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Ancak zayıf esen rüzgarlar için daha küçük katsayıların kullanılması da mümkündür.

Eğer ki, değişen rüzgar hızlarının varlığı söz konusu ise, değişen rüzgar sürtünme katsayısı değerlerinin de belirtilmesi ayrıca gerekli olabilir.



Şekil 2.4 Rüzgar sürtünme katsayıları

Sonuç itibari ile, rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısının lineer değişim olasılığı hesaba dahil edilir. Ancak Şekil 2.4’de gösterildiği gibi sürtünme katsayısı eğrisi üzerinde tanımlanan iki nokta önceden belirtilmelidir.

2.3.3 Kalibrasyon Kriterinin Belirlenmesi (Kalibrasyon hedefleri)

2.3.3.1 Tek-Hedefli Kalibrasyon

Analitik izahı olmayan, kalibre edilecek modelin koşturulması ile hesaplanan, hesaplanmış ile ölçülmüş sonuçlar arasındaki farkı minimum yapan, bir “ f ” hata fonksiyonu düşünelim :

$$f = f (\psi_1 , \psi_2 , \psi_3 , \psi_n , \psi_N) \quad (2.13)$$

$$\psi_{n, min} < \psi_n < \psi_{n, max} \quad (n = 1,2,3,.....N)$$

ψ_n = Kalibrasyon parametreleri

N = Toplam parametre sayısı

$\psi_{n, min} ; \psi_{n, max}$ = Sınır değer aralıkları

θ parametreler kümesi olmak üzere;

$$\theta = \{ \psi_1 , \psi_2 , \psi_3 , \psi_n , \psi_N \}$$

$$\theta_{opt} \propto \text{Min} \{ f (\theta) \} \quad , \quad \theta \in \Theta \quad (2.14)$$

θ_{opt} = Optimum parametreler takımı

Optimum parametreler takımı bir optimizasyon problemi çözümleyerek bulunur. Bu durumda optimizasyon problemi, θ' 'nin muhtemel parametreler uzayı Θ ile kısıtlı olduğu varsayımına dayanılarak sınırlandırılır. Parametreler uzayı genellikle, her bir parametre için en düşük ve en yüksek limitler belirleyerek bir hiperküp olarak tanımlanır. Bu sınırlar, fiziksel ve matematiksel kısıtlamalara, sistemin fiziksel özellikleri hakkında edinilen ve modelleme tecrübelerinden kazanılan bilgiye göre seçilir. Muhtemel parametreler uzayı, farklı parametreler arasındaki korelasyon hakkında önceki bilgileri kullanarak bir hiperellipsoid olarak ta tanımlanabilir (Kuczera, 1997).

Otomatik kalibrasyon “sınırsız” bir optimizasyon problemi olarak ta ifade edilebilir. Bu durumda, parametreler hakkında önceki simulasyonda edinilen bilgi, hedef fonksiyon içerisine parametrelerin önceki tahminlerinden sapmasını ölçen bir hata fonksiyonu eklenmesi ile kullanılabilir (M.C. Hill, 1998).

2.3.3.2 Çok-Hedefli Kalibrasyon

Genel olarak her türlü kalibrasyon sürecine uygulanabilen ve otomatik optimizasyon için de benimsenen ve en yaygın biçimde kullanılan hedef fonksiyon tipi, ölçülmüş değerler ile benzeştirilmiş model sonuçları arasındaki hataların kareleri toplamının ortalama değerleri üzerinden karekökünün alındığı (Root Mean Square Error) fonksiyon tipidir. Ancak, tek bir performans kriterine (örneğin, su seviyesi değişimi gibi) bağlı kalarak yapılabilecek bir kalibrasyon, genellikle gözlemler ile yansıtılan sistemin bir çok önemli özelliklerini ifade etmekte yetersiz kalabilir. Bu nedenle son zamanlarda, farklı bir çok “Kalibrasyon Hedeflerinin” (örneğin, su seviyesi değişiminin yanısıra akıntı hızı ve yönü de dahil) eşzamanlı optimizasyonuna izin veren otomatik yöntemler geliştirilmektedir (Gupta et al., 1998; Madsen, 2000b).

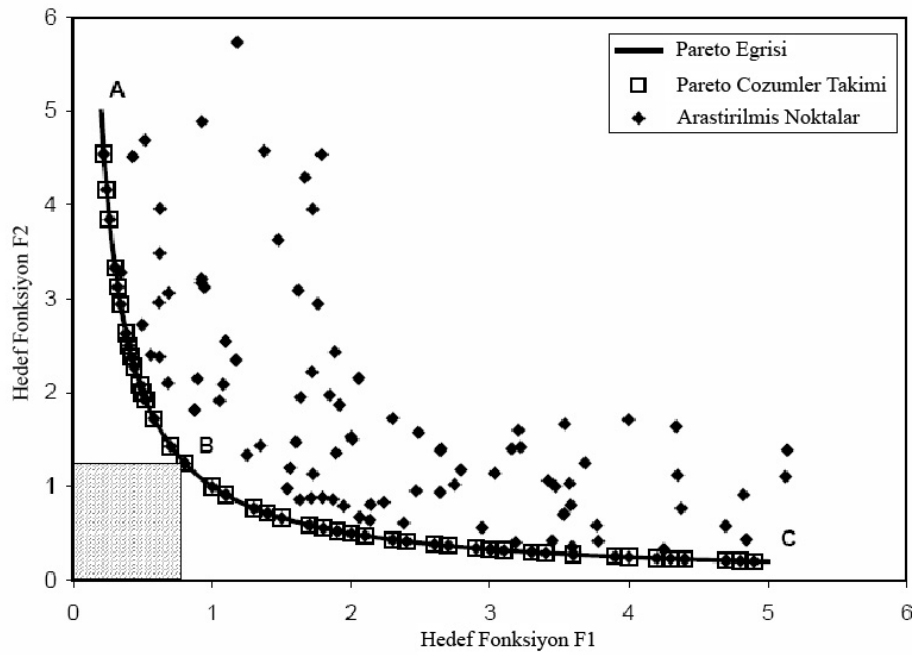
Birden fazla kalibrasyon hedefinin (çok-hedefli kalibrasyon durumu) gözetilmesi durumunda, model kalibrasyonu genellikle aşağıdaki esaslara dayanarak uygulanabilir:

- Ölçülmüş hidrodinamik parametre sayısı; su seviyesi değişimi, akıntı hızı ve yönü gibi,
- Ölçüm noktalarının sayısı ve dağılımı; yani, model alanı içerisinde birkaç noktada birden alınmış ölçümler,
- Simülasyondan edinilen hidrodinamik veri sayısı; yani, akıntı hızı, yönü ve su seviyesi gibi hidrodinamik sürecin çeşitli sonuçlarını ölçen hedef fonksiyonlar durumu,

Seçilen kalibrasyon hedeflerinin tipi ve sayısına göre , kalibrasyon problemi denklem (2.15) ile gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$\text{Min } \{f_1(\theta), f_2(\theta), f_3(\theta), \dots, f_m(\theta)\}, \quad \theta \in \Theta \quad (2.15)$$

Burada $f_i(\theta)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) birbirinden farklı hedef fonksiyonları temsil etmektedir. Denklem (2.15) dikkatle incelendiğinde, mevcut çözümün tek bir parametreler takımından ibaret olmayacağı açıkça görülmektedir. Buna karşın farklı hedef fonksiyonları arasındaki çeşitli etkileşimlere göre “Pareto Çözümler Takımı” olarak bilinen lineer olmayan bir çözüm sistemine sahip olduğu da Şekil 2.5’ den anlaşılabilmektedir. Pareto eğrisi sırası ile f_1 ve f_2 isimli iki hedef fonksiyonlu basit bir model kalibrasyonu için Şekil 2.5’ de gösterilmiştir. Grafik üzerinden de anlaşılabileceği gibi Pareto eğrisi üzerindeki noktalar, başka hiçbir noktanın sahip olamadığı özelliklere yani, hem f_1 hem de f_2 için geçerli en küçük değerler noktasına (B noktası) sahiptir. Pareto eğrisi boyunca A’ dan C’ ye hareket edildiğinde büyüyen f_1 değerlerine karşılık daha küçük f_2 değerlerine ulaşılması ise kuvvetle muhtemeldir.



Şekil 2.5 İki hedefli optimizasyon için Pareto eğrisi (düzgün değişen dağılım),
(Madsen and Jacobsen, 2001)

Çok-hedefli bir kalibrasyon problemi çözümlenmek istendiğinde, problem genellikle çeşitli hedef fonksiyonları bir araya getiren skaler bir büyüklük tanımlayarak, tek-hedefli bir kalibrasyon problemine dönüştürülür. Denklem (2.16) ile ifade edildiği gibi ağırlıklı bir ortalama düşünmekle böylesi bir toplu ölçüme gidilmesi muhtemeldir.

$$f_{agg}(\theta) = \sum w_i f_i(\theta) \quad , \quad \sum w_i = 1 \quad , \quad i=1,2,\dots,m \quad (2.16)$$

Burada w_i değerleri farklı kalibrasyon hedefleri için atanmış ağırlıklardır. Pareto eğrisinin bütününe araştırmak için, farklı ağırlık değerleri (w_i) kullanarak uygulanmış birkaç optimizasyon koşturması, denklem (2.16) 'daki gibi tek-hedefli optimizasyon problemine indirgenmiş ölçümlere uyarlanabilir.

Pratik uygulamalarda, Pareto değerler takımının tamamını hesap etmek oldukça zor ve zahmetli olabilir. Bu durumda sadece optimal çözüm aralıkları ile ilgilenmek en doğrusudur. Bunu başarmak ise, dikkate alınan model uygulamasına bağlı olmak şartı ile, belirli kalibrasyon hedeflerine verilen rölatif öncelikleri yansıtacak ağırlık değerlerini doğru belirlemekle sağlanabilir. Ayrıca, verilen ağırlıklar ölçüm hatalarını da yansıtabilmelidir, yani daha küçük ağırlıklar daha büyük hatalı ölçümlere, daha büyük ağırlıklar da daha küçük hatalı ölçümlere verilmelidir. Bununla beraber, öncelik f_i değerlerinin kendisine bağlı olduğu için, ağırlık değerlerinin seçimi, değişime kapalı bir kriter değildir. Mesela, eğer tüm ağırlık değerleri (w_i) birbirine eşit olsa, daha büyük ağırlıklar dolaylı bir şekilde daha büyük f değerli kalibrasyon hedefine verilmiş olur. Bu durum ise eğri gidişatının ve dolayısı ile optimum Pareto noktasının tespitinde yanıltıcı sonuçlar doğurabilir.

Farklı kalibrasyon hedeflerinin birleştirilerek tek-hedefli bir optimizasyon problemine indirgenmesinde dikkatleri çekebilecek önemli bir husus vardır. Mesela öyle ki, iki ayrı nitelik ve ölçekte sayılabilecek su seviyesi (metre) ve akıntı yönü (derece) değişimlerini dikkate alan bir kalibrasyon problemi düşünelim. O halde, bu iki kalibrasyon hedefi arasındaki uyumsuzluğu ortadan kaldırıp genel bir ölçek ile ifade edilmelerini sağlayan ortak bir dönüşüm denkleminin izahı gerekli olmaktadır.

$$f_{agg}(\theta) = \sum w_i g_i (f_i(\theta)) \quad , \quad \sum w_i = 1 \quad (2.17)$$

Burada $g_i (.)$, farklı kalibrasyon hedeflerinin genel bir ölçek ile ifade edilmelerini sağlayan dönüşüm fonksiyonudur. Bu dönüşüm fonksiyonu genel bir mesafe ölçeğine göre:

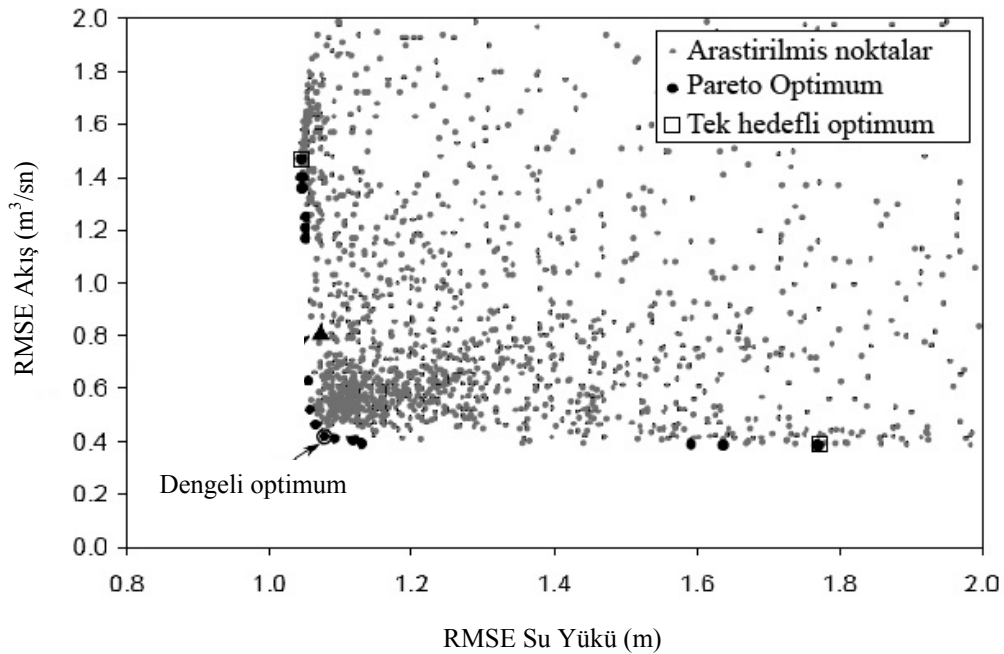
$$g_i (f_i(\theta)) = \frac{f_i(\theta)}{\sigma_i} + \varepsilon_i \quad (2.18)$$

olarak ifade edilebilir. Burada σ_i , başlangıç popülasyonuna ait i ' inci hedef fonksiyon değerinin standart sapması olarak temsil edilirken, ε_i ise bir dönüşüm sabiti olarak

verilmektedir.

$$\varepsilon_i = \max \left\{ \min \left\{ \frac{f_j}{\sigma_j}, j = 1, 2, \dots, m \right\} \right\} - \min \left\{ \frac{f_i}{\sigma_i} \right\} \quad (2.19)$$

Pareto eğrisinin tahmini ve mevcut kalibrasyon hedeflerinin analizi için bir dizi testin yürütülmesi şarttır. Bu testler kalibrasyon koşturmalarından ibarettir. Uygulanacak testlerden en az iki tanesinin, eğri uzantılarının tahmininde mevcut kalibrasyon hedeflerini ayrı ayrı dikkate alması ve her biri için ayrı ayrı minimum değerlerini hesaplaması istenir. Denklem (2.16) ile de ifade edildiği gibi farklı ağırlık değerleri için uygulanacak diğer testler ile eğrinin orta kısımlarının tahmini amaçlanmaktadır.



Şekil 2.6 İki hedefli optimizasyon için Pareto eğrisi (ani değişen dağılım),
(Madsen and Jacobsen, 2001)

Pareto eğrisini Şekil 2.6'ya göre yorumlamak gerekirse, ani bir değişim ile köşegen bir yapı arzettiği kolayca farkedilebilir. Bunun anlamı, fiziksel sistemi temsil eden kalibrasyon hedeflerinden yalnızca bir tanesinin uygulanması durumunda, diğer kalibrasyon hedefinin oldukça uyumsuz bir benzeşim yansıtabileceği olasılığıdır. Buna karşın Şekil 2.5 ile temsil edilen eğri, kalibrasyon hedeflerinden birinin performansında görülebilecek ufak bir değişim ile, diğeri için belirgin bir düzelme imkanı sağlamaktadır. Ayrıca çıkarılabilecek bir diğer sonuç, optimum çözüme, kalibrasyon hedeflerine verilebilecek eşit ağırlık değerleri ile varılabileceği ihtimalidir.

Uygulamada takip edilecek yöntemleri ufak bir örnek ile izah ederek durumu daha da netleştirmek mümkündür. Öyle ki, hidrodinamik bir model simülasyonu neticesinde çıkan su seviyesi ve akıntı hızı değişimlerinin kalibrasyonunu ele alalım. Ölçülmüş değerler ile modellenmiş değerler arasındaki farkı hesaplayan ve her iki kalibrasyon hedefi için ortak olan uygun bir hedef fonksiyon (RMSE gibi) belirleyelim.

Bahsi geçen her iki parametre için kalibrasyon probleminin birbirinden bağımsız olduğu düşünülemez. Çünkü dikkate alınan kalibrasyon parametreleri ($\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n, \dots, \psi_N$) ile kurulabilecek parametreler takımı (θ), mesela su seviyesi değişimi için minimum bir çözüm sunarken, akıntı hızı değişimini aynı netlikte yansıtamayabilir. Bu durum, yalnızca su seviyesi değişimi gibi tek bir performans kriteri üzerine kurulan kalibrasyon problemlerinde, sistemin davranışını gerçekçi bir şekilde değerlendirmeye yetmez. O halde, denklem (2.20)'de verildiği üzere, her iki kalibrasyon hedefi için ağırlıklı ortalamaların alındığı birleştirilmiş bir hata fonksiyonu düşünelim.

$$f_{agg}(\theta) = w_h f_h(\theta) + w_v f_v(\theta) \quad (2.20)$$

f_h ve f_v : sırası ile su seviyesi ve akıntı hızı değişimlerine ait hata fonksiyonları

w_h ve w_v : sırası ile su seviyesi ve akıntı hızı değişimlerine ait “atanmış” ağırlıklar

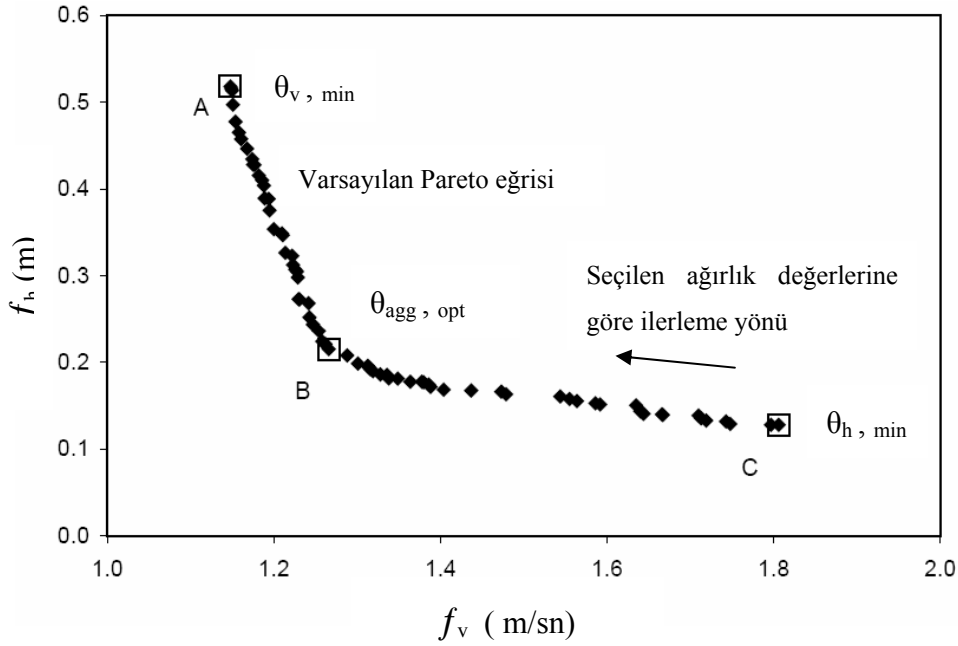
olmak üzere; $f_h < f_v$ ise, eğri deseninin tahmini için koşturulacak her bir program, denklem (2.20) ile izah edilen ağırlık değerlerini, tercih hakkı saklı kalmak üzere aşağıdaki tablo ile kullanmak zorundadır.

Çizelge 2.1 Tercihi ağırlık katsayıları

w_v	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
w_h	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

Burada karıştırılmaması gereken en önemli unsur, her iki ucu kalibrasyon parametreleri için ayrı ayrı minimum değerleri temsil eden “varsayılan Pareto eğrisi” üzerinde ağırlık değerlerinin ne şekilde kullanılacağıdır. Öyle ki, ağırlık değerleri ancak bu iki uç değer belirlenmesinden sonra yukarıda bahsedilen esaslara göre uygulanabilecektir.

Unutulmamalıdır ki, dikkate alınan ağırlık değerleri ile varsayılan eğri üzerindeki araştırılan noktalar, değer itibari ile önceden tespit edilir ve koşturulacak programlar yardımı ile kalibrasyon parametreleri değiştirilerek bu değer yada civarına yaklaşılmaya çalışılır. Bu işlem tüm ağırlık katsayıları için eğri desenini yansıtan parametreler takımı tespit edilinceye kadar yürütülür. Sonuçta tüm kalibrasyon parametreleri için dengeli çözümü veren optimum parametreler takımı, eğri üzerinden okunur.



Şekil 2.7 Pareto eğrisi değerlendirme şeması

Şekil 2.7 'de gösterilen Pareto eğrisi değerlendirme şeması ile tüm bu anlatılanları kısaca özetlemek mümkündür.

2.3.4 Hedef Fonksiyonların Tespiti (Hata fonksiyonları)

Otomatik kalibrasyon şeması, ölçülmüş değerler ile modellenmiş değerler arasındaki farkı hesaplayan uygun hedef fonksiyonların optimizasyonunu gerektirir. Hidrodinamik model kalibrasyonları için genellikle belli bir dönemi kapsayan su seviyesi değişimleri, akıntı hızı, akıntı yönü ve yoğunluk farkı ölçümleri önceden mevcuttur. Amaç, ölçüm ve simulasyon sonuçları arasındaki ilişkiyi izah eden etkili bir istatistiksel fonksiyon yada fonksiyonlar grubu belirlemektir.

2.3.4.1 Hataların Kareli Ortalamalarının Karekökü (Root Mean Square Error)

RMSE genelleştirilmiş bir standart sapmadır ve sapmalar serisinin kareli ortalamasının kareköküne eşittir. Bu istatistiksel hata fonksiyonu ile değişken veya seri değerleri arasındaki fark ve ilişki işaret problemi yaşanmadan kolayca araştırılabilir. Bilimsel araştırmalarda sağlıklı sonuçlar verdiği için yaygın şekilde kullanılır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(OBS_i - SIM_i)^2]} \quad (2.21)$$

Aranılan uygunluk kriteri, ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki farkın minimize edilmesi ve mümkün olduğunca sonucun sıfıra yaklaşması şeklinde tarif edilir.

2.3.4.2 Ortalama Hata (Average Error)

Ortalama hata, ölçülmüş ve hesaplanmış seriler arasındaki mutlak sapmaların aritmetik ortalaması olarak düşünülebilir.

$$AE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |OBS_i - SIM_i| \quad (2.22)$$

Aranılan uygunluk kriteri, seriler arasındaki farkın minimize edilmesi ve mümkün olduğunca sonucun sıfıra yaklaşması şeklinde tarif edilir

2.3.4.3 Bağlı Hata (Relative Error)

Her ne kadar yukarıda belirtilen iki istatistiksel fonksiyon, net ortalama hata değerlerini tespit etmekte faydalı olsa da, oluşan hatanın önem derecesini belirlemekte yeterli hassasiyeti sağlayamazlar. Bu nedenle, hesap edilen yaklaşım ile kesin değerlere ne denli yaklaşıldığını belirleyen yeni bir bağlı hata fonksiyonunun tanımı şarttır.

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N |OBS_i - SIM_i|}{\sum_{i=1}^N |OBS_i|} \times 100 \quad (2.23)$$

Aranılan uygunluk kriteri, ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki farkın minimize edilmesi ve mümkün olduğunca sonucun sıfıra yaklaşması şeklinde tarif edilir.

2.3.4.4 Seriler Arası Korelasyon ve Regresyon ilişkisi

a) Korelasyon

Korelasyon katsayısı, seriler arası ilişkinin doğrusal olduğu kabulü ile kullanılan bir ölçüdür. Bilimsel araştırmalarda en sağlıklı sonuçları verdiği için yaygın şekilde kullanılır. Korelasyon katsayısı ile, iki seri içerisindeki değerlerin ortalamadan farkları esas alınarak, değişimlerin incelenmesi mümkündür.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS}) * (SIM_i - \overline{SIM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2 * \sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i * Y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_i^2 * \sum_{i=1}^N Y_i^2}} \quad (2.24)$$

Aralarında korelasyon araştırılacak gözlenmiş ve hesaplanmış serilerin standart sapmaları veya varyansları zaten hesaplanmış ise korelasyon katsayısının belirlenmesinde aşağıda verilen formül kolaylık sağlayacaktır.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N X_i * Y_i}{N * \sigma_{OBS} * \sigma_{SIM}} \quad (2.25)$$

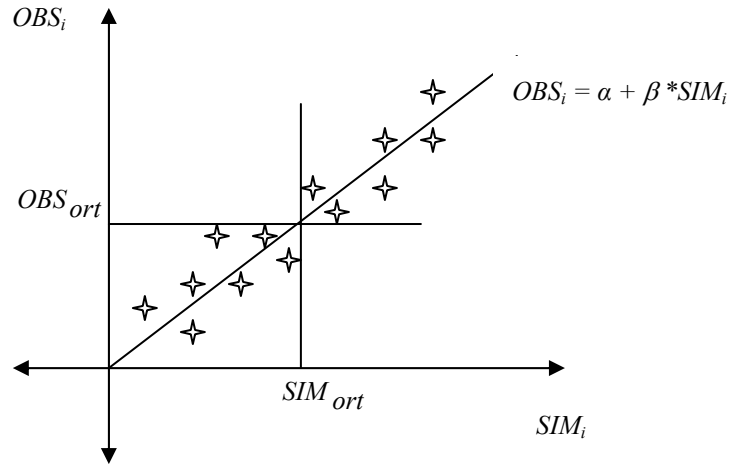
Korelasyon katsayısının değeri (-1) ve (+1) arasında değişir. Sonucun bir çıkması iki seri arasında tam bir ilişki bulunduğuna, sıfır çıkması ise ilişkinin bulunmadığı anlamına gelir. Pozitif değerli ilişki değişimlerin aynı yönde, negatif değerli ilişki ise değişimlerin zıt yönlü olduğunu belirtir.

b) Regresyon

Regresyon iki seri arasındaki ortalama bir ilişkinin matematiksel bir yol ile ifadesidir.

Şekil 2.8' de verilen dağılım diyagramı gereği, noktaların durumu ve genel seyri, iki seri arasında ilişki olup olmadığını ve varsa ilişkinin hangi fonksiyon tipine uyduğunu açıkça gösterir. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi aralarında doğrusal bir ilişki bulunan iki seri, ilişkinin fonksiyonel şeklini yansıtmaları açısından denklem (2.26) ile ifade edilebilir.

$$OBS_i = \alpha + \beta * SIM_i \quad (2.26)$$



Şekil 2.8 Dağılıma diyagramı

Burada β regresyon doğrusunun eğimi olup denklem (2.27) yada (2.28) ile tespit edilirken, α lineer fonksiyon sabiti olup denklem (2.29) ile hesaplanır.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (SIM_i - SIM_{ort}) * (OBS_i - OBS_{ort})}{\sum_{i=1}^N (SIM_i - SIM_{ort})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N SIM_i * OBS_i}{\sum_{i=1}^N SIM_i^2} \quad (2.27)$$

$$\beta = \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{sim}} * r \quad (2.28)$$

$$\alpha = OBS_{ort} - \beta * SIM_{ort} \quad (2.29)$$

Seriler arası korelasyon ve regresyon ilişkisini yansıtan tüm bu denklemler ile ulaşılması gereken uygunluk kriterleri ise denklem (2.30) 'da verilmiştir.

$$\alpha \approx 0 \quad \beta \approx 1.0 \quad r^2 \approx 1.0 \quad (2.30)$$

Yukarıda tanımlanan istatistiksel fonksiyonların tümü için, OBS_i i anındaki ölçülmüş değerleri, SIM_i ise i anındaki hesaplanmış değerleri temsil etmektedir. N notasyonu ile ise kalibrasyon periyodu içerisindeki toplam zaman adımlarının sayısı dikkate alınmaktadır.

3. OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

Genel

Optimizasyon canlı cansız tüm varlıkların davranışları içerisinde kaçınılmaz bir yere sahip olan ve yaşamın her köşesine nüfus etmiş belirleyici bir uygunluk kriteridir. Öyle ki, bir yatırımcı en yüksek gelire en düşük risk faktörü ile ulaşmanın yollarını ararken, fiziksel sistemin en küçük yapı taşları olan moleküller girdikleri kimyasal reaksiyonlar ile enerjilerini minimize etme gayreti içerisindeyler.

3.1 Giriş

Optimizasyon fiziksel sistemlerin analizinde, önemli bir araç olma özelliği taşımaktadır. Bu aracı kullanmak bazı hedeflerin (hidrodinamik bir sistem içerisinde akıntı hızı ve yönü gibi.) saptanmasını gerektirir. Bu hedefler ise herbiri tek bir sayı ile temsil edilebilen nicelik veya nicelikler topluluğudur. Belirlenen her bir hedef, *değişken yada bilinmeyenler* olarak isimlendirilen belli sistem özelliklerine bağlıdır. Amaç ise bu hedefleri optimize eden değişken değerlerini bulmaktır ve genellikle bu değişkenler belirli değer aralıkları ile sınırlıdır.

Optimizasyon problemi aşağıda belirtilen üç temel unsurun birleşmesi ile meydana gelir. Bu unsurların belli bir problem için saptanması süreci ise *modelleme* olarak bilinir.

- a) Maksimize yada minimize edilmek istenen bir *hedef fonksiyon*
- b) Hedef fonksiyonun değerini etkileyen *bilinmeyenler yada değişkenler takımı*
- c) Her bir bilinmeyenin belli değerler almasına izin veren *sınır değerler takımı*

Henüz evrensel bir optimizasyon algoritmasının varlığından söz etmek mümkün olmamakla birlikte, daha çok herbiri optimizasyon probleminin tipine göre geliştirilmiş sayısız algoritmalar bahsetmek mümkündür. Genellikle, inceleme konusu probleme uygun algoritma seçimi kullanıcının sorumluluğu altındadır. Bu seçim, problemin çözüm performansını belirleyen önemli bir faktördür.

Herhangi bir optimizasyon algoritması kurulan modele uygulandıktan sonra, çözüme ulaşmadaki başarısının saptanabilmesi gereklidir. Çoğu hallerde, mevcut değişkenler takımının gerçekten problemin çözümü olduğunu kontrol etmek üzere *uygunluk koşulları (optimality conditions)* olarak bilinen matematiksel ifadeler kullanılmaktadır. Eğer uygunluk koşulları sağlanamamış ise bunlar mevcut çözüm tahmininin nasıl düzeltilebileceği konusunda faydalı bilgiler de verebilmektedirler.

Sonuç olarak kurulan model, çözümün model ve veri değişimlerine duyarlılığını gösteren *hassasiyet analizleri* gibi teknikler uygulanarak düzeltilebilir.

Otomatik model kalibrasyonu, geleneksel uygulama tarzına bakıldığında, tek bir optimum parametreler takımının (θ_{opt}) varolduğu hipotezine dayandırılmıştır. Ancak ilgili konuya, Bölüm 2’de de değinildiği gibi *çok-hedeflilik* kapsamında yaklaşıldığında, farklı hedefler arasındaki etkileşim nedeni ile eşdeğer düzeyde güzel sonuçlar veren birçok parametre kombinasyonlarının aslında varolduğu anlaşılmaktadır.

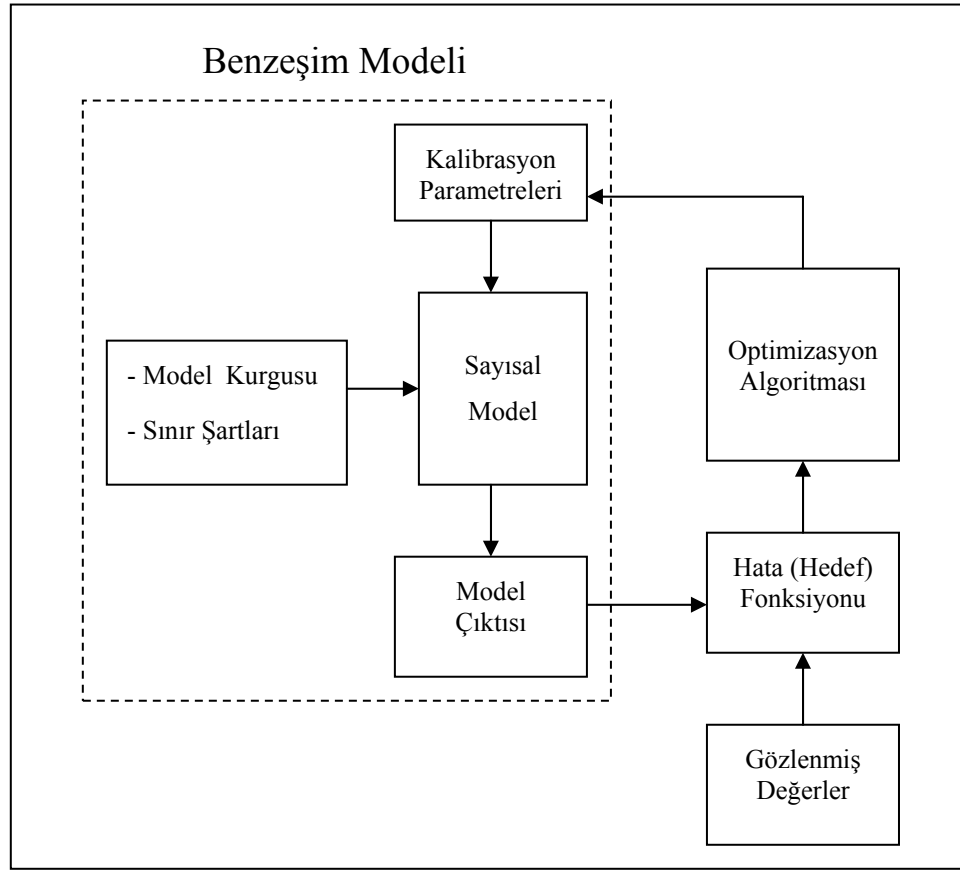
İlerleyen konu kapsamında, MIKE 21 HD (Hidrodinamik) ve diğer modelleme yazılımları için geliştirilmiş otomatik bir kalibrasyon yöntemi üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu yöntem, uygulanan yoğun bir araştırma-geliştirme faaliyetleri sonucunda AUTOCAL adı altında sunulan yeni versiyon bir modül ile DHI modelleme paketi içerisindeki yerini almıştır. Farklı kalibrasyon hedeflerinin eş zamanlı optimizasyonu için uyarlanmış ve populasyon gelişimine dayalı bir global optimizasyon metodu olan Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritması (Duan et al., 1992) genel hatları ile değerlendirilmiştir. Yerel ve Global optimizasyon teknikleri için geliştirilmiş en temel yaklaşımlara kısaca değinilmeye çalışılmıştır.

3.2 Bir Optimizasyon Problemini Çözümlemekte Kullanılan Yaklaşımlar

Optimizasyon problemleri, geleneksel uygulama yöntemleri incelendiğinde, analitik olarak izah edilebilen ve tek bir minimum değere sahip olan hedef fonksiyonların lineer yada non-lineer optimizasyon teknikleri ile çözümü esasına dayandırılmaktadır.

Ancak, analitik olarak izah edilemeyen bir çok problem olabileceği gibi birden çok ekstrem değerlere sahip hedef fonksiyonların varlığı da kaçınılmazdır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinin uygulanabilir olmadığı böylesi durumlarda, çok-ekstrem değerli optimizasyon problemi olarak Global Optimizasyon’u (GOP) dikkate almak en doğrusu olmaktadır.

Yukarıda bahsedildiği üzere, Global Optimizasyon problemlerinin en tipik örneği ise parametreler tespiti olarak ta bilinen **otomatik model kalibrasyonu**’dur (Solomatine 1995,1998). Bu taktirde hedef fonksiyon, model çıktısı ve gözlenmiş veri arasındaki farkı yansıtan hataların kareli ortalamalarının karekökü (RMSE) olarak kolayca temsil edilebilmektedir.



Şekil 3.1 Otomatik kalibrasyon şeması

Tüm bu anlatılanlar ışığında optimizasyon problemleri aşağıda belirtilen iki başlık altında gruplanarak değerlendirilmektedir.

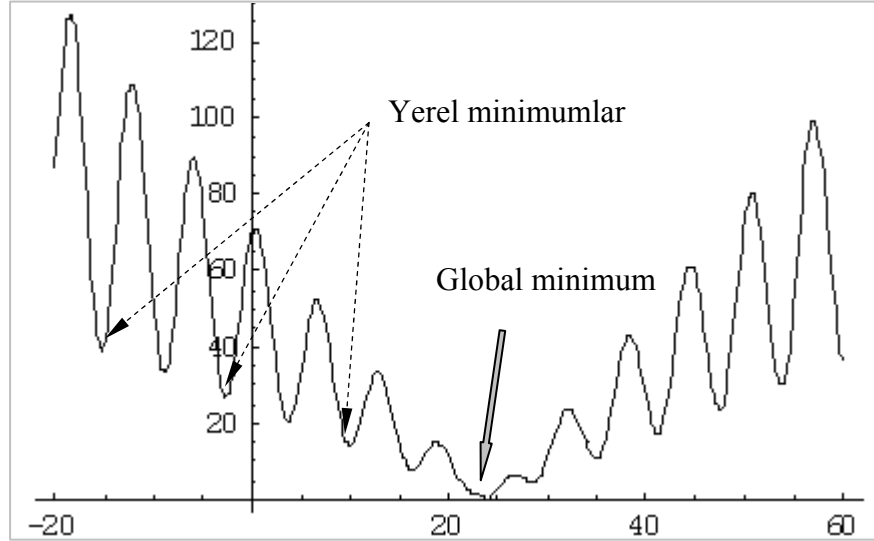
- a) Yerel optimizasyon teknikleri
- b) Global optimizasyon teknikleri

3.2.1 Yerel Optimizasyon Teknikleri

Yerel arama teknikleri deterministik yöntemlerden ibaret olup, tek-ekstrem değerli fonksiyonların optimizasyonu için oldukça uygundur. Bu teknikler iki temel gruba ayrılabilir.

- a) Türev esaslı (gradient-based) arama yöntemleri
- b) Doğrudan (direct) arama yöntemleri

Türev esaslı yöntemler yalnızca, hedef fonksiyonun analitik bir tanımı mevcut ise (Şekil 3.2) ve kısmi türevlerini hesap etmek kolay ise uygulanabilecek bir yöntemdir. Bunlar olası bir başlangıç noktasından başlayan sayısal algoritmalarıdır ve en yakın yerel optimum ile birleşirler.



Şekil 3.2 Analitik ve türev esaslı bir fonksiyon için global ve yerel minimumlar

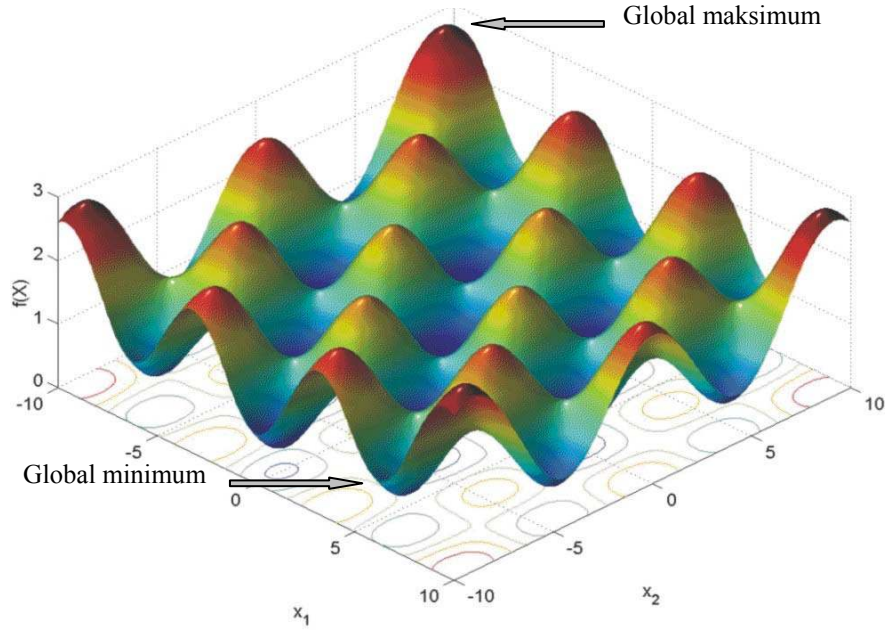
Doğrudan arama yöntemlerinin uygulanmasında ihtiyaç duyulan tek bilgi, hedef fonksiyonun değerleridir. Bu yöntemler türev alma yerine, n boyutlu Euclid uzayının her bir yönünde lineer bir şekilde ilerleyen araştırmayı esas alır. Burada n optimize edilecek kalibrasyon parametrelerinin sayısıdır. Doğrudan arama yöntemleri içerisinde en popüler olanı Nelder ve Mead (1965) tarafından geliştirilen *downhill simplex* algoritmasıdır.

Daha öncede belirtildiği gibi, yerel arama yöntemleri çok-ekstrem değerli fonksiyonların optimizasyonu için uygun değildir. Ancak, basit arama uzaylarındaki etkinlikleri nedeni ile yönteme esas prensipleri birkaç global optimizasyon algoritmaları içerisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3.2.2 Global Optimizasyon Teknikleri

Global optimizasyon teknikleri, çok-ekstrem değerli bir fonksiyonun global optimum çözümünü tespit etmeyi hedefler.

Bu yöntemler genellikle olası parametreler uzayı içerisinde düzensiz noktalar yığını esas alınarak, hedef fonksiyonun bu noktalarda değerlendirilmesini gerektirir. Her bir değerlendirmenin sonrasında *deterministik* ve *probabilistik* yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılarak noktalar yığınının amaca uygun değişimi gerçekleştirilir. Uygulanacak optimizasyon teknikleri global optimum ile yalnızca asimptotik bir birleşmeyi garanti eder.



Şekil 3.3 Çok-ekstrem değerli çözüm uzayı

3.3 Temel Global Optimizasyon Yöntemleri

Mevcut Global Optimizasyon yöntemlerini aşağıda belirtilen gruplar içerisinde değerlendirmek uygun olmaktadır.

3.3.1 Alan Kümeleme Metotları (Space covering methods)

Bu metotlar kapsamında parametreler uzayının (Θ), N adet alt-küme'den oluştuğu düşünülür.

$$\theta = \{ \psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_k, \dots, \psi_n \}$$

$$\Theta = \{ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{opt}, \dots, \theta_k, \dots, \theta_N \}$$

$$\Theta \subset \sum_{k=1}^N \theta_k \quad (3.1)$$

Burada,

Ψ : Kalibrasyon parametresi,

θ : Kalibrasyon parametrelerini içeren alt-küme eşlemi,

θ_{opt} : Optimum parametreler takımı,

Θ : Parametreler uzayı,

Bu taktirde hedef fonksiyon, herbiri bir alt-küme yi yansıtan N adet temsili noktada değerlendirilmiş olur. Böylece fonksiyon değerini en küçük yapan nokta, global değer in yaklaşık bir tahmini olarak kabul görür.

$$\theta_{opt} \propto \text{Min} \{f(\theta)\} \quad , \quad \theta \in \Theta \quad (3.2)$$

Burada $f(\theta)$, n-boyutlu Euclid uzayında sonlu aralıklı bir bölgede tanımlanmış bir hata fonksiyonu olup, n notasyonu ile optimize edilecek parametrelerin sayısı temsil edilmektedir.

$$\Theta = \{ \theta \in \mathbb{R}^n \wedge \theta \subset \psi \text{ olmak üzere } a \leq \psi \leq b \} \quad (3.3)$$

Burada a ve b ile kalibrasyon parametreleri bileşen aralıkları temsil edilmektedir.

Eğer ki; önceden seçilmiş tüm noktalar $\{ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{opt}, \dots, \theta_k \}$ ve fonksiyon değerleri $\{f(\theta_1), f(\theta_2), f(\theta_3), \dots, f(\theta_{opt}), \dots, f(\theta_k)\}$ bir sonraki θ_{k+1} noktasının seçiminde kullanılıyor ise, bu taktirde algoritma *ardışık (aktif) kümeleme algoritması* olarak, böylesi bir bağımlılık yok ise *pasif kümeleme algoritması* olarak anılır. Ancak bu algoritma tiplerinin yetersiz olduğu yapılan araştırmalarda gözlenmiştir.

3.3.2 Düzensiz Arama Metotları (Random search methods)

Düzensiz arama metotları stokastik bir arama yöntemi olup kabaca iki başlık altında incelenmeleri mümkündür.

- a) Doğrudan düzensiz arama (üniform örnekleme)
- b) Kontrollü düzensiz arama (CRS)

Düzensiz arama metotlarından bir çoğu aşağıda belirtilen adımlarda yürütülebilir.

0. Adım : İterasyon sayısı $k=0$ ' a atanarak θ_0 noktası seçilir.
1. Adım : $y_k = \theta_k + r_k$ olmak üzere yeni bir (yada birkaç) değerlendirme noktası oluşturulur. Burada r_k , ortalaması μ_k olan bir dağılımdan gelişigüzel çekilmiş bir vektörü temsil etmektedir.
2. Adım : Bir sonraki θ_{k+1} noktasının seçiminde aşağıda verilen koşulun sağlanması gerekir.

$$\theta_{k+1} = \begin{cases} y_k, & \text{eğer } f(y_k) < f(\theta_k) \\ \theta_k, & \text{aksi taktirde} \end{cases} \quad (3.4)$$

3. Adım : Uygunluk kriteri sağlandığı takdirde durulur, aksi takdirde iterasyon sayısı bir arttırılarak ($k=k+1$) 1. Adım'a geri dönlür.

3.3.2.1 Doğrudan Düzensiz Arama (Uniform örnekleme)

Paremetreler uzayı içerisinde yer alan üniform bir dağılımdan N adet nokta seçilir ve $f(\theta)$ hata fonksiyonu bu noktalarda değerlendirilir. Hesap edilen en küçük fonksiyon değeri $f(\theta_{opt})$ olarak kabul görür. Eğer f fonksiyonu sürekli ise, bu takdirde, optimum değer ile asimptotik bir birleşme şeklinin varolduğu düşünülebilir. Ancak fonksiyon değerlendirme sayısının n (kalibrasyon parametresi sayısı) ile üstel olarak artış göstermesi kaçınılmazdır. Bu açıdan değerlendirme noktalarının tespitini, bir sonraki noktanın seçiminde önceden bilinen fonksiyon değerlerini hesaba katan ardışık bir tarz içinde gerçekleştirmek algoritmanın işleyişine belirgin bir iyileşme sağlayabilir.

Takım (Alan) kümeleme yöntemlerine benzerliği nedeniyle bu yaklaşım *ardışık (aktif) düzensiz arama (sequential (active) random search)* olarak anılır, fakat geleneksel şekli ile *uyarlanabilir düzensiz arama yöntemi (adaptive random search)* olarak ta bilinir.

Birbirinden farklı *düzensiz arama metotları*, ortalama değer μ_k 'nın seçimine ve 2. Adım'da kullanılan koşula bağlıdır. Bunlardan en tabii olanı, $f(\theta_1), \dots, f(\theta_k)$ hedef fonksiyon değerlerine bağlı olan ortalama değer μ_k 'nın seçilmesi olacaktır. Bu durumda arama *uyarlanabilir düzensiz arama yöntemi (adaptive random search, ARS)* olarak anılır (Schumer and Steiglitz 1968, Pronzato et al. 1981).

Genellikle bu yöntem ile uygulanan fikir aşağıdaki gibidir. Arama uzayı içerisinde seçilen θ_k parametreler takımı, aranan optimum parametreler takımı θ_{opt} 'dan oldukça uzak ise; arama işlemi, daha büyük varyanslı r_k vektörü seçilerek uygulanmalıdır. Eğer seçilen nokta θ_k , aranan nokta θ_{opt} 'a yakın ise daha detaylı bir arama için daha küçük varyanslı bir vektör tercih edilmelidir.

3.3.2.2 Kontrollü Düzensiz Arama (CRS)

Kontrollü düzensiz arama yöntemi W.L. Price (1965,1983) ismi ile birlikte anılır olmuş bir yöntemdir. Adı geçen yöntemle ait birkaç algoritma birden geliştiren Price'a göre, parametreler uzayı içerisinde çekilecek yeni bir değerlendirme noktası, önceden çekilmiş noktalardan seçilmiş düzensiz bir altküme nazarında oluşturulur. Her bir iterasyonda çekilen yığın (parametreler takımı) bir populasyon örneğinden alınır ve bir sonraki değerlendirme

noktası, geriye kalan noktaların merkezindeki bir noktanın yansıması olarak oluşturulur. Başlangıçta oluşturulan parametreler takımı içerisindeki en kötü nokta, değerlendirilen bu son noktadan daha kötü ise, bunların birbirleri ile ikame edilerek değiştirilmesi gerekir.

Bu yöntem ile takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir.

1. Adım : N adet düzensiz noktadan oluşan bir $A = \{ \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_a, \dots, \theta_b, \dots, \theta_N \}$ kümesi oluşturulur ve f hedef fonksiyonu bu noktalarda değerlendirilir.
2. Adım : En kötü fonksiyon değeri f_a 'ya karşılık gelen θ_a noktası ve en iyi fonksiyon değeri f_b 'ye karşılık gelen θ_b noktası tespit edilir.
3. Adım : Belirlenen fonksiyon değerlerinin ağırlık merkezine karşılık gelen θ_G parametre takımı tespit edilir. Seçilecek yeni bir değerlendirme noktası $\theta_P = 2\theta_G - \theta_{k+1}$ (k: 0,1,2,3.....N) eşitliği gereğince iterasyona dayalı bir hesap ile belirlenir.
4. Eğer θ_P parametre takımını oluşturan bileşenler belirtilen sınır değerlerin dışında kalırsa, iterasyon bir arttırılarak yeniden gerçekleştirmek üzere 3. Adım'a geri dönülür.
5. θ_P noktasında hedef fonksiyon değeri f_P tespit edilir. Eğer $f_P > f_a$ ise 3. Adım'a geri dönülür.
6. Seçilen A kümesi içerisinde f_P noktası en kötü f_a noktası ile ikame edilir.
7. Uygunluk kriteri sağlanamadı ise 2. Adıma geri dönülür.

3.3.3 Genetik Algoritmalar (Evolutionary strategies and genetic algorithms)

Genetik algoritmalar, stokastik bir arama yöntemi olup en iyi olan yaşar prensibine dayalı olarak, biyolojik sistemlerin gelişim sürecinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Genetik algoritmalar, düzensiz arama yöntemlerine (random search) bazı önemli değişimler katmakta olup biyoloji ve genetik biliminden terminolojiler kullanmaktadır.

Genetik algoritma tekniği, çözüm uzayının büyüklüğüne rağmen iyi bir çözüme kısa zamanda yakınsamaktadır. Genetik algoritma üç temel işlemten (operatörden) meydana gelmektedir: (1) Seçim, (2) Çaprazlama ve (3) Mutasyon. Genetik algoritmada her çözüm bir dizi (birey) olarak kodlanmakta ve bireylerin bir yığını ile çözüme ulaşılmaktadır. Bireyler uygunluk değerlerinin yüksekliğine göre daha büyük bir olasılıkla seçilmektedir. Seçim operatörü ile seçilmiş olan bireyler çaprazlama havuzuna girmeye hak kazanırlarken seçilemeyen bireyler yok olmaktadır. Amaç yüksek uygunluk değerlerine sahip bireylerde bulunduğu kabul edilen iyi özelliklerin çaprazlama sonucunda ebeveynlerden sonraki nesillere daha fazla sayıda geçirilmesi yoluyla daha yüksek uygunluk değerlerine sahip bireylerin oluşturulmasını

sağlamaktır. Çaprazlama bir olasılık değeri ile yapılmaktadır. Eğer çaprazlama meydana gelmez ise ebeveynler aynen bir sonraki yığına aktarılmaktadırlar. Yığında çeşitlilik yaratabilmek, çaprazlama sonucunda kaybolabilen iyi özellikleri geri kazanabilmek ve global optimuma ulaşabilmek için bireylerdeki kodlar belli bir olasılık ile değişime (mutasyon) uğratılmaktadırlar. Genetik algoritmanın bu işleyişi önceden belirlenen bir durdurma koşulu sağlanıncaya kadar devam etmektedir.

Bu yöntem ile takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir.

0. Adım : Populasyon sayısı $t=0$ 'a atanır.
1. Adım : N adet nokta belli bir kurala göre parametreler uzayı (Θ) içerisinde çekilerek bir $P(t)$ kümesi oluşturulur ve populasyon başlatılır.
2. Adım : Populasyonun her noktasında fonksiyon değerleri hesap edilerek başlangıç populasyonu değerlendirilir.
3. Adım : Çaprazlama operatörüne göre $P(t)$ kümesinden alınan uygunluğu yüksek noktalar, oğul olarak bilinen (offsprings) yeni bireylerin oluşumunda kullanılmaktadır. Üretilen bu yeni bireyler ise $P_1(t)$ adı altında oluşturulan populasyona dahil edilirler.
4. Adım : Mutasyon operatörüne göre $P_1(t)$ kümesinden alınan bazı noktaların koordinatları değiştirilir ve üretilen bireyler $P_2(t)$ adı altında oluşturulan populasyona dahil edilirler.
5. Adım : $P_2(t)$ populasyonunun tüm noktalarında fonksiyon değerleri hesap edilir.
6. Adım : Seçim operatörü kullanılarak bir sonraki $P(t+1)$ populasyonu oluşturulmak üzere $P_2(t)$ kümesinden en iyi noktaların seçimi yapılır.
7. Adım : Eğer uygunluk kriteri sağlanamaz ise t bir artırılarak 3. Adıma geri dönülür, aksi takdirde iterasyona son verilir.

3.3.4 Karma Populasyon Gelişimi (Shuffled complex evolution algorithm)

Karma populasyon gelişim metodu, aşağıda belirtilen dört adet algoritmanın gücünü birleştiren yeni bir global optimizasyon yöntemidir. Bunlar:

- Downhill simplex (Nelder ve Mead, 1965)
- Controlled random search (Price, 1965)
- Competitive evolution (Holland, 1975)
- Complex shuffling

algoritmalarıdır.

Bu yöntem ile takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir.

1. Adım : θ_i ($i=1,2,3,\dots,m$) parametreler takımından oluşan bir başlangıç populasyonu olası parametreler uzayı (Θ) içerisinde gelişigüzel bir şekilde seçilir. Her bir kalibrasyon parametresinin en düşük ve en yüksek limit değerleri tanımlanır. Her bir parametre takımı için hedef fonksiyon değeri $f_i = f(\theta_i)$ hesaplanır. Oluşturulan başlangıç populasyonu $s=p.m$ boyutuna sahiptir. Burada “p” populasyon (complexes) sayısını, “m” ise herbir populasyondaki noktaların (θ_i) sayısını temsil etmektedir.
2. Adım : s adet nokta hedef fonksiyon değerlerine göre küçükten büyüğe doğru $\{f(1)<f(2)<\dots<f(s)\}$ sıralanır. s adet değerlendirme noktası p adet populasyona bölünür. $\{f(1), f(p+1), \dots, f((s-1)p+1)\}$ hedef fonksiyon değerlerine karşılık gelen noktalar 1. populasyonu, $\{f(2), f(p+2), \dots, f((s-1)p+2)\}$ hedef fonksiyon değerlerine karşılık gelen noktalar ise 2. populasyonu oluşturur ve benzer şekilde devam edilir.
3. Adım : p adet populasyon içerisindeki noktalardan gelişigüzel seçilerek q boyutlu bir alt-populasyon oluşturulur. Alt-populasyona dahil edilecek bir noktanın olasılığını belirlemek için üçgen bir olasılık dağılımı kullanılır. Böylece hedef fonksiyon değeri ne kadar küçükse, seçilecek noktanın olasılığı o denli büyütülür. Alt-populasyon, simplex algoritmasına göre ve β defa geliştirilir (oğul bireylerin oluşumu).
4. Adım : Sisteme s adet noktalı yeni bir populasyon dahil edilerek yeniden 2. Adım takip edilir.
5. Adım : Uygunluk kriteri sağlanıncaya kadar 2, 3 ve 4. Adımlara devam edilir.

Algoritmik parametreler

Karma populasyon gelişim metodu için geliştirilmiş algoritmik parametreler ve olası değişim aralıkları ile tavsiye edilen değerleri Çizelge 3.1’ de gösterilmektedir (Mike 21 Autocal,2004).

Çizelge 3.1 Değişim aralıkları ve tavsiye edilen değerleri eşliğinde algoritmik parametreler (n: Kalibrasyon parametrelerinin sayısı)

Parametre	Tanımı	Değişim aralığı	Tavsiye edilen değeri
p	Populasyon sayısı	$p \geq 1$	-
m	Bir populasyondaki nokta sayısı	$m \geq 2$	$2n+1$
q	Bir alt-populasyondaki noktaların sayısı	$2 \leq q \leq m$	$n+1$
β	Yeni bir populasyon karmasından önce herbir populasyon için atılan değerlendirme adımlarının sayısı	$\beta \geq 1$	$2n+1$
$p_{\min}$	Arama ilerledikçe izin verilen maksimum populasyon sayısı	$1 \leq p_{\min} \leq p$	p

3.3.5 Kümeleme Yaparak Bir Çok Yerel Aramalara (Multistart) Bağlı Metotlar

Bu yöntemle bağlı algoritmaların temel fikri, belli noktalarda uygulanan bir çok yerel aramalara ve sonrasında seçilecek global optimum yaklaşımına dayanmaktadır. Burada, potansiyel başlangıç noktalarının tespiti, önceden yapılacak bir kümeleme ile yerel minimuma esas çekim alanlarının bulunmasına dayalıdır. Çekim alanı civarında en düşük fonksiyon değerli $f_i = f(\theta_i)$ noktaları seçilerek bu noktalar etrafında belli bir yerel (local) arama yöntemi uygulanır ve bu sayede global optimuma $f(\theta_{opt})$ ulaşılmaya çalışılır.

Bu yöntem ile takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir.

1. Adım : θ_i ($i=1,2,3,\dots,m$) parametreler takımından oluşan bir başlangıç populasyonu olası parametreler uzayı (Θ) içerisinde gelişigüzel bir şekilde seçilir ve bu noktalardaki fonksiyon değerleri hesap edilir.
2. Adım : En düşük fonksiyon değerlerini veren en iyi noktalar seçilerek başlangıç populasyonu indirgenir. Bu noktalar içinden yerel (local) aramaya esas potansiyel başlangıç noktaları seçilerek en elverişli yerel arama yöntemi uygulanır.

3. Adım : Seçilen bir uygunluk kriteri durulup durulmayacağını yada 1. Adım'a dönülüp dönlmeyeceğini gösterir. Bulunan en düşük fonksiyon değeri yerel minimum noktası, global optimum noktası için bir yaklaşımı temsil eder.

3.3.6 Diğer Metotlar

Yukarıda bahsi geçen global optimizasyon yöntemleri dışında, aşağıda isimleri verilen optimizasyon yöntemleri de bilinen teknikler arasında yer almaktadırlar.

- a) Simulated annealing
- b) Yörünge teknikleri (Trajectory techniques)
- c) Tunneling approach
- d) Stokastik hedef fonksiyon modeline dayalı analiz metotları (Analysis methods based on a stochastic model of the objective function)

4. SAYISAL MODELLEME

4.1 Giriş

Bu bölümde, uygulamada kullanılan hidrodinamik model ve kalibrasyon çalışmaları, Danimarka Hidrolik Enstitüsü (Danish Hydraulic Institute, DHI) tarafından geliştirilmiş MIKE 21 modelleme yazılımına ait Hidrodinamik Modül kullanılarak yürütülmüştür.

4.2 Mike 21 ile Hidrodinamik Modelleme

MIKE 21 HD iki boyutlu serbest yüzeyli akışlar için tasarlanmış bir modelleme sistemidir. Tabakalaşmanın ihmal edildiği her türlü denizlerde, kıyı bölgelerinde, körfezlerde, akarsu ağzlarında ve göllerde meydana gelen hidrolik ve çevresel olayların simülasyonu için uygulanabilir. Hidrodinamik modül ile çeşitli zorlayıcı etkenler karşısında su seviyesinde meydana gelen değişimleri ve akış özelliklerini benzeştirmek mümkün olmaktadır. Hidrodinamik modül temel parametrik bileşenler olarak :

- Taban direnci,
- Rüzgar direnci,
- Barometrik basınç gradyanı,
- Coriolis kuvveti,
- Momentum dağılımı,
- Modele giren ve çıkan debi kaynakları,
- Buharlaşma,
- Dinamik olarak değişen ıslak ve kuru hesap alanı,
- Dalga gerilme akıları

gibi değişkenlerin incelenmesini gerektirir.

MIKE 21 HD modülü, kartezyen sistemde x ve y doğrultularında sabit ağ aralıkları ile dizilmiş ve sonlu farklar metodu dikkate alınarak yazılmış bir modelleme programıdır. Bundan dolayı model alanı dörtgen olarak tercih edilmelidir. Bu nedenle, hesap noktalarının kare yada dikdörtgen ağ sistemi şeklinde girilmesi gerekmektedir.

4.2.1 Modele Esas Temel Kaynak Veriler

Temel Parametreler

- Batimetri
- Simülasyon periyodu
- Açık sınırı belirten yerel konum koordinatları
- Modele giren ve çıkan debi kaynakları
- Dinamik olarak değişen ıslak ve kuru hesap alanı

Hidrodinamik Parametreler

- Başlangıç deniz yüzeyi seviyesi
- Hidrodinamik sınır şartı değerleri
- Modele giren ve çıkan hidrodinamik debi değerleri
- Eddy vizkozitesi
- Taban sürtünmesi direnç katsayısı
- Dalga gerilme akısı kuvvetleri
- Rüzgar koşulları

4.3 Hidrodinamik Modül

Mike 21 Hidrodinamik modül, koylarda, körfezlerde ve sahil bölgelerinde su seviyesi ve akış koşullarını benzeştirmek için kullanılan sayısal bir modelleme sistemidir. Hidrodinamik modül ile tek tabakalı, kararsız ve iki boyutlu akışları benzeştirmek mümkündür.

Hidrodinamik modül, konum ve zamana bağlı kütle ve momentumun korunumu denklemlerini integre etmek için Alternatif Doğrultu Metodu (Alternating Direction Implicit, ADI) olarak bilinen tekniği kullanır. Her bir yön ve her bir ağ hattı boyunca meydana gelen denklem matrisleri çift tarama (Double Sweep) yöntemi ile çözümlenir. MIKE 21 Hidrodinamik modül temel denklemleri ve çözüm algoritması Ek 3' de kısaca sunulmuştur.

4.4 Model Bölgesi ve Ölçüm Noktalarının Dağılımı

Doğru bir hidrodinamik kalibrasyon, model bölgesi içerisinde kalan en az bir adet ölçüm noktasının varlığını gerektirir. Seçilen ölçüm noktalarının bölge içerisindeki dağılımı ise uygulanan kalibrasyonun doğruluğu ile orantılı olup, bölge hidrodinamiğinin gerçekçi temsil edilmesinde son derece önemlidir.

Hidrodinamik akıntı koşullarının araştırılması ve gerekli kalibrasyon çalışmalarının yürütülebilmesi amacı ile ölçülmüş arazi verilerine sahip bir model bölgesi seçilmiştir.

Bölge hidrodinamiğinin tespiti ve model kalibrasyonunun eş zamanlı arazi verileriyle yürütülebilmesi amacı ile, model bölgesi içerisinde koordinatları belirlenmiş bir kayıt istasyonundan ve yerel meteoroloji istasyonundan, bölgesel akıntı koşullarını ve rüzgar iklimini yansıtan veriler, Ağustos 1999 dönemi itibarı ile temin edilmiştir.



Şekil 4.1 Model bölgesi

4.5 Arazi Ölçümleri

Model bölgesi içerisinde, koordinatları belirli bir noktadan toplanan arazi verileri aşağıda sunulan maddeler halinde verilmiştir.

- 1) 12/08/1999 saat 11:00 ve 01/09/1999 saat 05:40 tarihleri arasında, ölçüm koordinatları belli bir noktadaki gel-git ölçer cihazı ile tespit edilmiş:
 - a. Su seviyesi değişimleri,
 - b. Akıntı hızı ve yönü,
 - c. Tuzluluk ölçüm değerleri,
- 2) Bölgesel meteoroloji istasyonundan alınmış saatlik ortalama rüzgar verileri kayıtları:
 - a. 1991-1996 uzun dönem kayıtları
 - b. Ağustos 1999 kısa dönem kayıtları
- 3) Ağustos 1999 deniz suyu sıcaklık verileri kayıtları

4.5.1 Deniz Suyu Seviyesinin İzlenmesi

Model bölgesi içerisinde gel-git değişimini tahmin etmek üzere, su seviyesi ölçümleri kullanılmıştır. Şekil 4.2’de Ağustos 1999 dönemi itibari ile 21 günlük sürede, her 10 dakikada bir kaydedilmiş su seviyesi zaman serisi verilmiştir.

Mevcut veriden, gel-git değişiminin yarım-günlük (semi-diurnal) olduğu ve yaklaşık maksimum 10-11 cm mertebelerinde bir genlik ile hareket ettiği anlaşılmaktadır. Daha sonraki modelleme çalışmalarında bu veri, gel-git’ e bağlı akıntı koşullarını temsil etmek üzere kullanılacaktır.

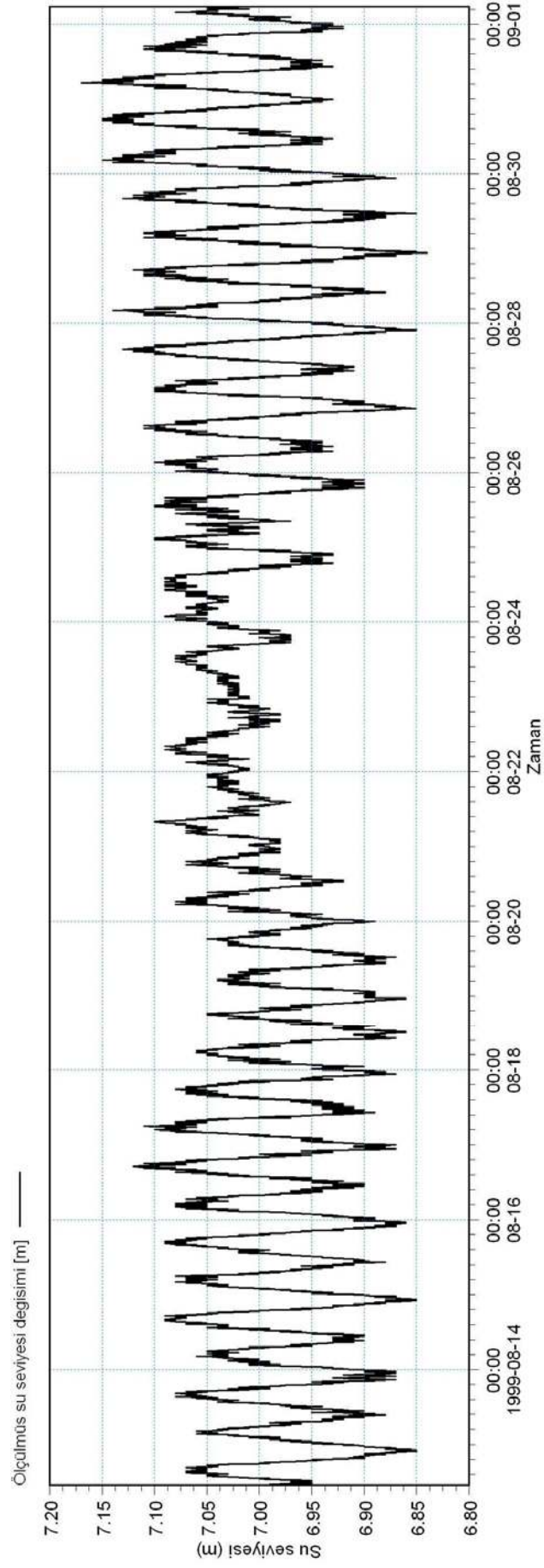
4.5.2 Akıntı Ölçümleri

Model bölgesi içerisinde 7 metre derinlikli bir noktada akıntı ölçüm istasyonu tesis edilerek Ağustos 1999 dönemi itibari ile 21 günlük sürede, -3.5 metre derinliğindeki akıntı koşulları (akıntı hızı ve yönü gibi) her 10 dakikada bir ölçülerek kaydedilmiştir.

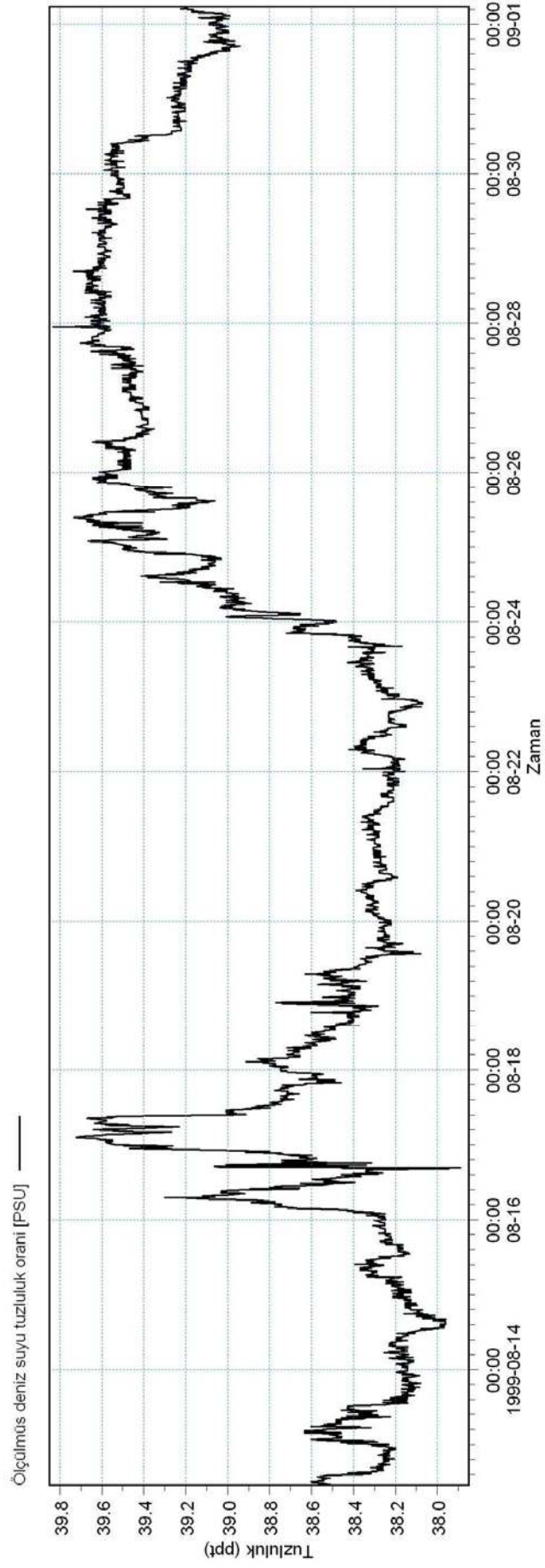
4.5.3 Tuzluluk Ölçümleri

Model bölgesi içerisinde Ağustos 1999’da kaydedilen tuzluluk ölçümleri Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Kaydedilen ortalama tuzluluk oranı 38.8 ppt iken, maksimum değer ancak 39.8 ppt’ ye ulaştığı görülmektedir.

Buradan çıkarılacak en önemli sonuç ise, yoğunluk farkına bağlı belirgin bir akım özelliğinin model bölgesi içerisinde gözlenmeyeceği olasılığıdır.



Şekil 4.2 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş su seviyesi değişimi



Şekil 4.3 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş deniz suyu tuzluluk oranı

4.5.4 Rüzgar Ölçümleri

Model bölgesi üzerinde hakim rüzgarların etkisi, bölgesel meteoroloji istasyonundan temin edilmiş uzun dönem (1991-1996) saatlik ortalama rüzgar verilerinden ve Ağustos 1999 dönemi için kaydedilmiş rüzgar verilerinden öğrenilmeye çalışılmıştır.

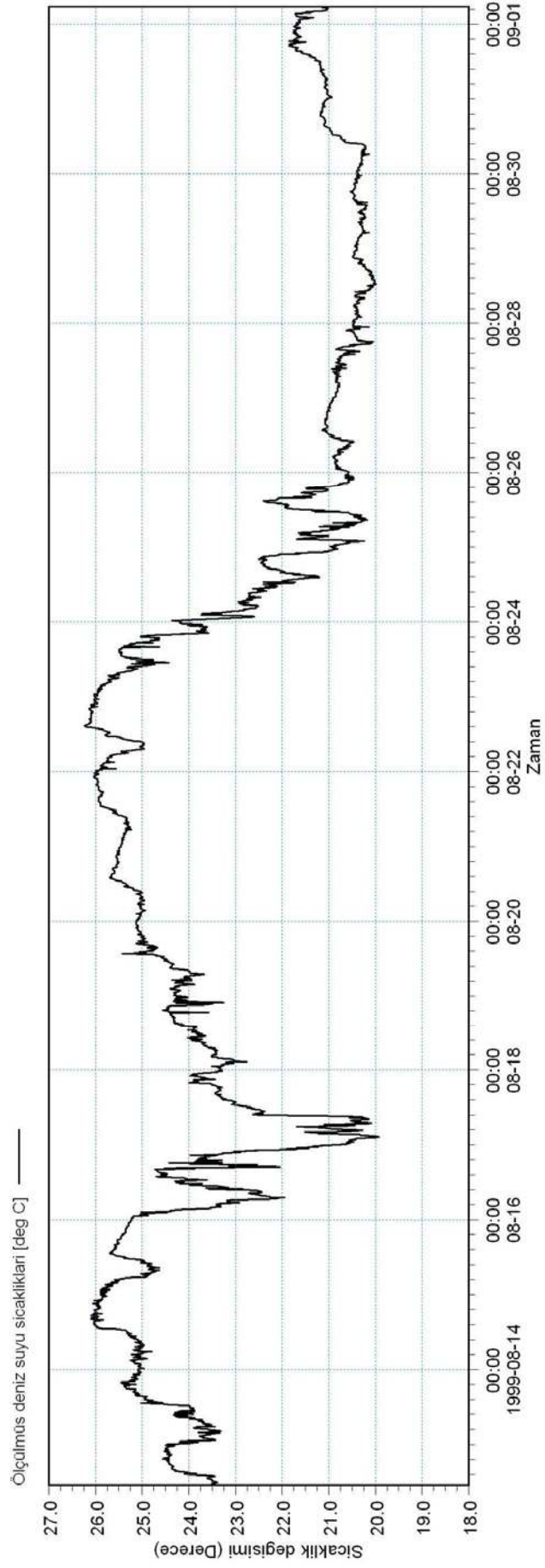
Saatlik ortalama rüzgar verilerini içeren Ağustos 1999 kayıtlarının bir kopyası Ek-1 'de verilmektedir.

Ağustos 1999 dönemi rüzgar kayıtları, aynı zaman periyodu için geçerli, akıntı koşulu verileri, su seviyesi değişimi, sıcaklık ve tuzluluk oranı ölçümlerinin mevcut olması nedeni ile oldukça değerli bir veri olma özelliği taşımaktadır.

4.5.5 Deniz Suyu Sıcaklık Verileri

Model bölgesi içerisinde Ağustos 1999'da -3.5 metre derinlikte kaydedilen deniz suyu sıcaklık ölçümleri Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Kaydedilen ortalama sıcaklık değerinin 23.11°C olduğu hesap edilirken, maksimum değerin ancak 26.23°C' ye ulaştığı görülmektedir.

Buradan çıkarılacak en önemli sonuç ise, deniz suyu sıcaklık farkına bağlı belirgin bir akım özelliğinin model bölgesi içerisinde gözlenmeyeceği olasılığıdır.



Şekil 4.4 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş deniz suyu sıcaklıkları

4.6 Mevcut Ölçümlerin Analizi ve Bölge Hidrodinamiğine Katkısı

Elde mevcut ve yukarıda açıklanmaya çalışılan verilerin tümü, Danimarka Hidrolik Enstitüsü (Danish Hydraulic Institute, DHI) tarafından geliştirilmiş MIKE 21 Hidrodinamik modülü kullanılarak bilgisayar ortamında benzeşimi yapılabilecek formata getirilmiştir.

4.6.1 Model Bölgesi Kurgusu

Hidrodinamik model Şekil 4.5’de görüldüğü gibi tüm model alanı fiziksel şartlarını düzgün yansıtacak şekilde sayısallaştırılmıştır. Model alanı gerçek kuzeye göre saat yönünün tersinde 45 derece döndürülerek uygun sınır şartının yakalanması amaçlanmıştır. Model alanı, ağ açıklığı 20 metre olan ve 180x145 düğüm noktası ile temsil edilen 3.6x2.9 km’ lik bir alanı kapsamaktadır. Her bir düğüm noktasındaki derinlikler Seyir Hidrografi ve Oşinografi Daire Başkanlığı tarafından çıkarılmış deniz seyir haritalarından ve bölge üzerinde yürütülen en son batimetrik ölçüm değerlerinden sayısallaştırılarak elde edilmiştir. Model alanı güneyinde kalan açık sınır “suni kara“ ile çevrilerek, hidrodinamik açıdan elverişli akım koşulları yaratılmaya çalışılmıştır.

Ağ açıklığının ve zaman adımının belirlenmesinde, model stabilitesi için Bölüm 2’de anlatılan ideal Courant sayısı eşitlikleri kullanılmıştır. Maksimum Courant sayısı olarak tarifnelerde belirtilen “5“ sayısal değeri dikkate alınmıştır.

$$C_R = c \cdot \Delta t / \Delta x \quad (4.1)$$

$$c = (g \cdot h)^{1/2} \quad (4.2)$$

Model alanı içerisindeki en büyük derinlik yaklaşık 50 metre ve yerçekimi ivmesi 9.81 m/s² alınırsa hız büyüklüğü:

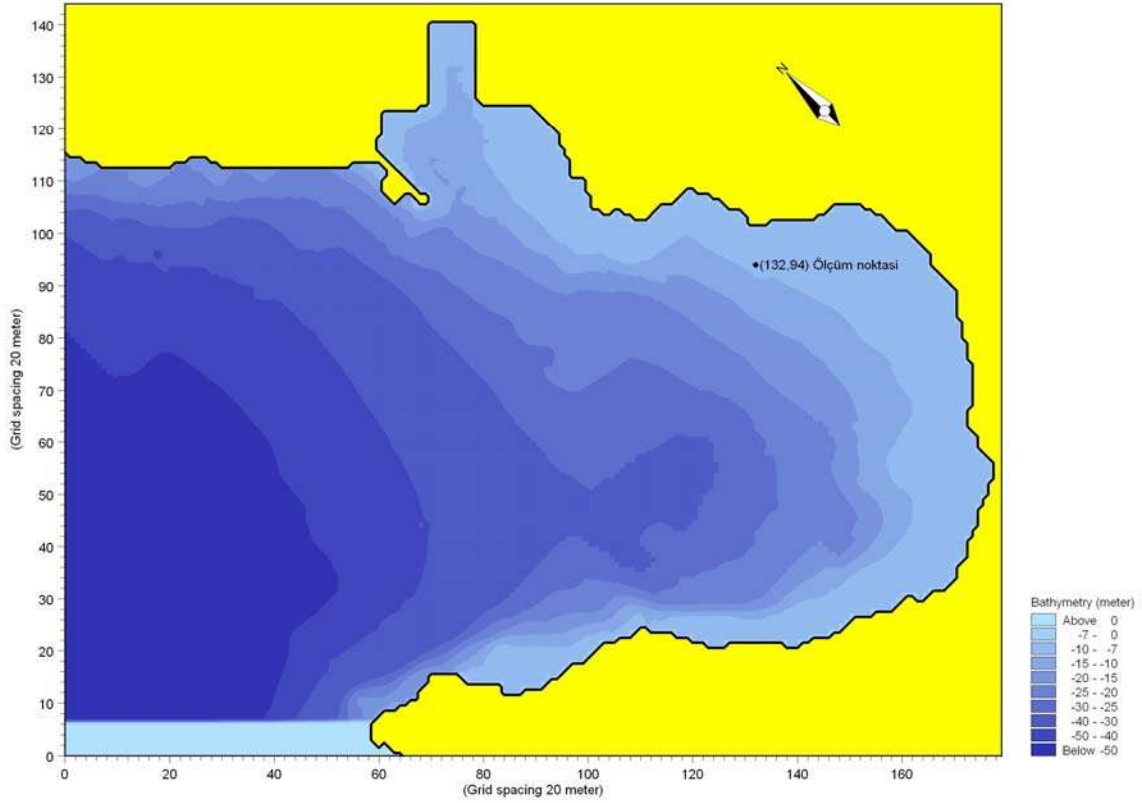
$$c = (9.81 \cdot 50)^{1/2} = 22.14 \text{ m/sn} \quad (4.3)$$

çıkar. Buradan denklem (4.1) gereği, 20 metre ağ açıklığı için stabil Δt zaman adımı çekilecek olursa:

$$5 = 22.14 \frac{\Delta t}{20} \quad (4.4)$$

$$\Delta t = \frac{5 \cdot 20}{22.14} \approx 5 \text{ sn} \quad (4.5)$$

sonucuna ulaşılır.



Şekil 4.5 Model alanı

4.6.2 Deniz Suyu Seviyesi Analizi

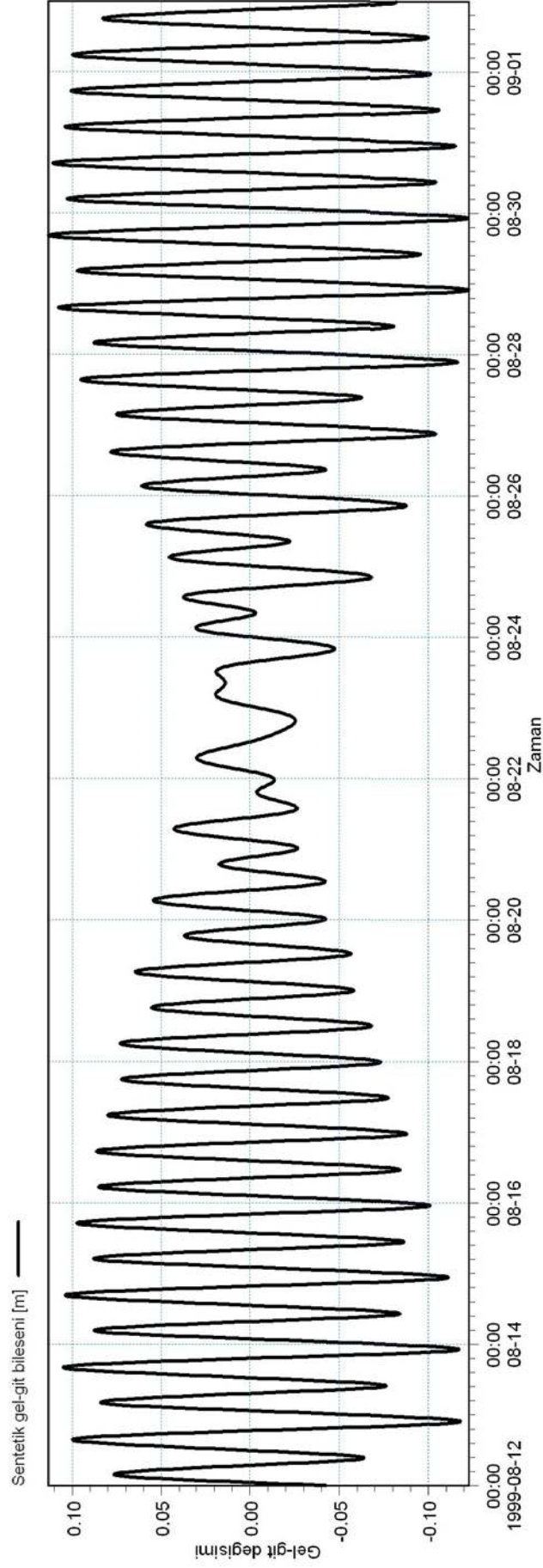
Model bölgesi içerisinde gel-git değişimini tahmin etmek üzere, su seviyesi ölçümleri kullanılmıştır. Gel-git ölçer cihazı kullanılarak 10’ar dakika aralıklar ile okunmuş mevcut ölçüm verileri, MIKE 21 modülü içerisinde yer alan, veri değerlendirme modülleri sayesinde zaman serisi formatında analiz edilmiştir.

Uygulanan analiz ile ölçülmüş su seviyesi değişimlerini içeren zaman serisi dosyası (*.dfs0 formatında), veri değerlendirme modülüne sokularak, gel-git oluşumuna bağlı düzenli ve periyodik sinyallerin, düzensiz bileşenlerden ayrıştırılması amaçlanmıştır (Şekil 2.3). Veri değerlendirme modülü, aldığı zaman serisini analiz ettikten sonra gel-git oluşumuna esas “altı” adet (isteğe bağlı) harmonik sabit değerlerini bir çıktı dosyası halinde sunmaktadır. Mevcut verilerden ve analizlerden ulaşılan harmonik sabitler aşağıda Çizelge 4.1’ de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1 Model bölgesi önemli gel-git harmonik sabitleri

No	Sembol	Genlik (m)	Faz Açısı (Derece)
1	M2	0.0508	60.69
2	S2	0.0442	129.79
3	K1	0.0179	-15.10
4	O1	0.0153	-52.25
5	F4	0.3809	114.66
6	F6	4.1992	-17.26

Bir sonraki aşama ise, deniz suyu seviyesi ölçüm sinyallerinden elde edilen bu yöresel harmonik sabitleri kullanarak, sınırdan yüklenebilecek ve yöresel akıntı düzenini temsil edebilecek sentetik bir gel-git sinyalinin üretilmesidir. Eldeki harmonik sabitleri kullanarak kısa, orta ve uzun vadede sentetik gel-git sinyallerinin oluşumunu sağlamak mümkündür. Üretilen ve sınır şartı olarak kullanılacak gel-git bileşeni zaman serisi Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

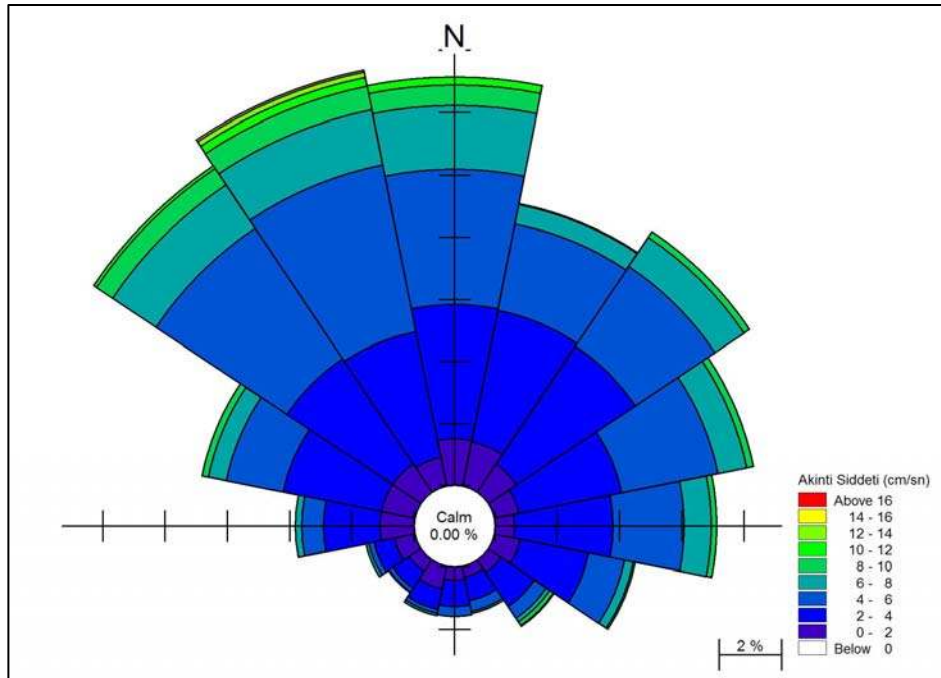


Şekil 4.6 Ağustos 1999 dönemi için üretilmiş sentetik gel-git bileşeni

4.6.3 Akıntı Ölçümleri Analizi

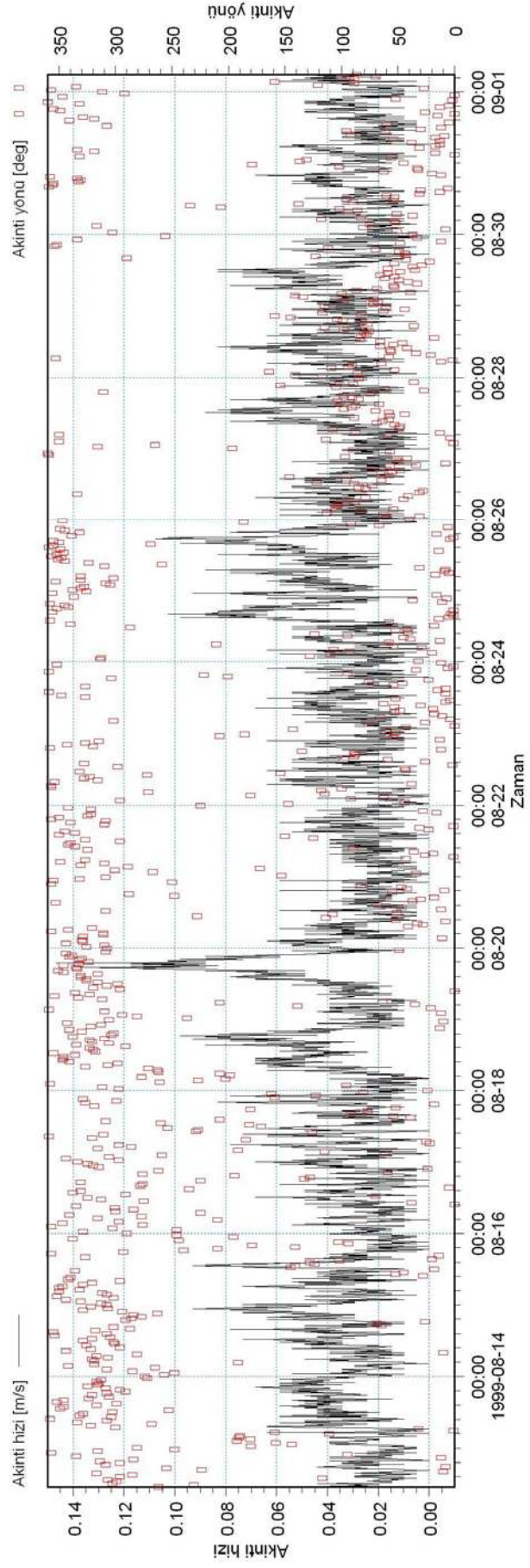
Model bölgesi içerisinde ölçüm noktasında -3.5 m derinlikte okunan akıntı koşulu parametreleri Şekil 4.8’de zaman serisi veri dosyası olarak gösterilmektedir. Şekil 4.7’de ise akıntı koşullarını temsil eden zaman serileri, yönsel dağılımları ve hız gruplarına göre bir akıntı gülü şeklinde görülebilmektedir. Akıntı gülünü oluşturmak için kullanılan veri tabanı ayrıca Çizelge 4.2’ de sunulmaktadır. Çizelge ile sunulan tablo, Microsoft Excel Visual Basic Editörü ile yazılmış bir program sayesinde analiz edilmiştir. Bu program sayesinde, hız ve yön büyüklüklerine sahip mevcut zaman serileri ayrıştırılabilmektedir. Mevcut seri ve akıntı gülü incelendiğinde:

- -3.5 metre derinliğinde alınan okumalarda, ortalama akıntı hızı olarak 3.24 cm/s ve maksimum akıntı hızı olarak ise 14.67 cm/s değerlerini görmek mümkündür.
- Kaydedilmiş akıntı ölçümlerinin büyük bir çoğunluğunun Kuzeybatı-Kuzeydoğu yönlerine karşılık gelen 315°-45° lik yönsel etki alanı ile dar bir yelpazede salınım göstermekte olduğu anlaşılmaktadır.
- Ölçüm bölgesi içerisinde hakim akıntıların, Kuzey-Kuzeybatı (%13.65), Kuzey (%13.02) ve Kuzeybatı (%12.67) yönlü akıntılar olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.7 Ağustos 1999 dönemi ölçülmüş akıntı kayıtlarından üretilmiş akıntı gülü

Okunan akıntı koşulu parametreleri (akıntı hızı ve yönü) uygun formatlarda düzenlenerek benzeşimi yapılmış hidrodinamik model sonuçlarının kalibre edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 4.8 Ağustos 1999 dönemi akıntı ölçümleri (-3.5 m)

Çizelge 4.2 Ölçülmüş akıntı kayıtlarının yönlerle göre dağılımı (Ağustos 1999)

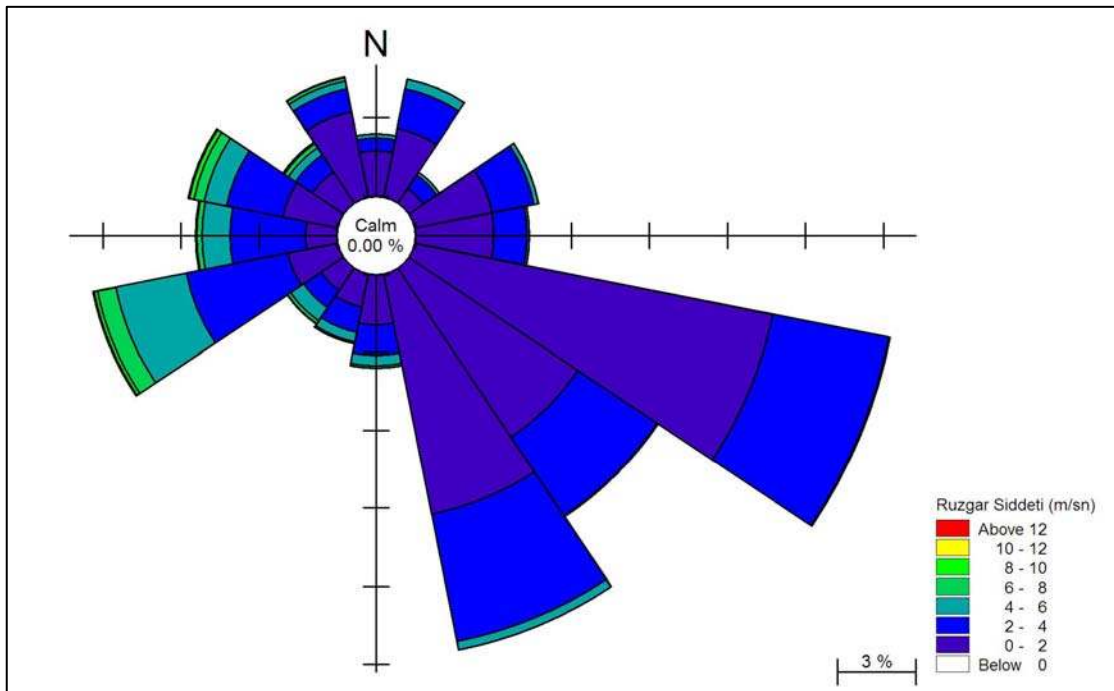
Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
Sakin																		
0 < u <= 1	40	42	31	23	18	24	14	10	12	21	13	19	31	31	31	27		387
1 < u <= 2	58	61	62	44	37	31	19	15	18	11	11	11	27	49	43	52		549
2 < u <= 3	65	62	69	52	53	33	18	7	6	8	7	8	25	43	74	66		596
3 < u <= 4	71	45	55	52	40	24	9	7	5	3	3	5	13	27	74	93		526
4 < u <= 5	53	36	33	38	25	10	4	3	4	1	1		7	26	70	63		374
5 < u <= 6	35	15	24	18	21	7	3	1		1	1	2	5	14	26	33		206
6 < u <= 7	23	3	8	9	4	1	1	1		1		1	1	3	22	18		96
7 < u <= 8	9	1	3	5	4	1	3							6	11	16		59
8 < u <= 9	10		3	1	1	1	1								7	6		30
9 < u <= 10	4						1								3	2		10
10 < u <= 11	3															6		9
11 < u <= 12																4		4
12 < u <= 13																1		1
13 < u <= 14																1		1
14 < u <= 15																1		1
Toplam	371	265	288	242	203	132	73	44	45	46	36	46	109	199	361	389	0	2,849
Yüzde	%13.02	%9.30	%10.11	%8.49	%7.13	%4.63	%2.56	%1.54	%1.58	%1.61	%1.26	%1.61	%3.83	%6.98	%12.67	%13.65	%0.00	%100.00

4.6.4 Uzun Dönem Saatlik Ortalama Rüzgar Ölçümleri Analizi

Bölgesel rüzgar iklimini belirlemek amacı ile, meteoroloji istasyonundan temin edilen uzun dönem (1991-1996) saatlik ortalama rüzgar kayıtları analiz edilmiştir. Aşağıda Şekil 4.9’da, rüzgar hızlarının yönsel dağılımı bir rüzgar gülü şeklinde verilmektedir. Rüzgar gülünde yer alan sektörlerin büyüklüğü; o yönlerden esen rüzgarların yoğunluğunu, renk kotları ise; o yönlerden esen rüzgarların şiddeti ile temsil edilmektedir. Rüzgar gülünü oluşturmak için kullanılan veri tabanı ayrıca Çizelge 4.3’ de sunulmaktadır.

Rüzgar ikliminin genel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- En sık esen rüzgarlar Doğu-Güneydoğu (%18.64), Güney-Güneydoğu (%14.76), Güneydoğu (%11.55), Batı-Güneybatı (%9.61) yönlerinden kaydedilmiştir.
- Diğer taraftan en şiddetli rüzgarların Batı-Güneybatı, Batı ve Batı-Kuzeybatı yönlerinden estiği görülmektedir. 1991-1996 ölçümleri içerisinde, en yüksek saatlik ortalama rüzgar hızı Batı-Güneybatı yönünde 16 m/s olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.9 Bölgesel meteoroloji istasyonu kayıtlarına göre düzenlenmiş rüzgar gülü (1991-1996)

Çizelge 4.3 Uzun dönem rüzgar kayıtlarının yönlerle göre dağılımı (1991-1996)

Hız (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
Sakin																	25	25
0 < u <= 1	524	350	143	423	612	1754	913	959	289	268	234	286	153	469	464	1200		9,041
1 < u <= 2	289	1066	216	1175	971	5623	3203	4012	728	420	321	739	490	666	290	546		20,755
2 < u <= 3	145	378	167	565	520	2137	1682	2046	412	302	204	1000	798	678	253	285		11,572
3 < u <= 4	118	427	167	306	159	268	252	566	211	219	218	1100	723	485	162	188		5,569
4 < u <= 5	54	175	56	81	38	22	22	130	135	128	192	877	369	301	93	100		2,773
5 < u <= 6	27	34	9	13	10	1	4	45	81	74	126	571	204	164	91	77		1,531
6 < u <= 7	4	2	2	1		2		7	32	32	55	281	79	125	61	58		741
7 < u <= 8	4	1						1	9	10	18	109	30	87	28	11		308
8 < u <= 9									1	3	7	43	9	58	19	6		146
9 < u <= 10											3	21	6	28	11	7		76
10 < u <= 11		1									1	15	2	20	6			45
11 < u <= 12											2	3		6		1		12
12 < u <= 13												6	2			1		9
13 < u <= 14												2		2				4
14 < u <= 15																		0
15 < u <= 16												1						1

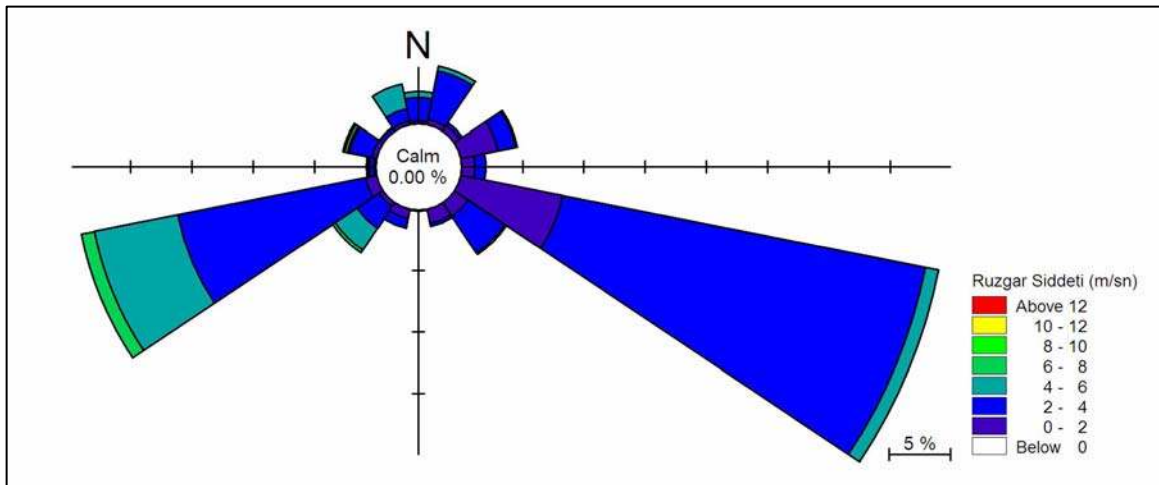
Toplam	1,165	2,434	760	2,564	2,310	9,807	6,076	7,766	1,898	1,456	1,381	5,054	2,865	3,089	1,478	2,480	25	52,608
Yüzde	%2.21	%4.63	%1.44	%4.87	%4.39	%18.64	%11.55	%14.76	%3.61	%2.77	%2.63	%9.61	%5.45	%5.87	%2.81	%4.71	%0.05	%100.00

4.6.5 “Ağustos Ayı” Saatlik Ortalama Rüzgar Ölçümleri Analizi

Bu bölümde, Ağustos ayı rüzgar verileri uzun ve kısa dönem kayıtları dikkate alınarak incelenmiştir. Ağustos 1999 dönemi, saatlik ortalama rüzgar verilerinin bir kopyası Ek 1’ de verilmiş olup, buna ait zaman serileri Şekil 4.12’de sunulmaktadır. Şekil 4.10’da ise esen rüzgarlara ait yönsel dağılım, bir rüzgar gülü şeklinde görülebilmektedir. Rüzgar gülünü oluşturmak için kullanılan veri tabanı ayrıca Çizelge 4.4’de sunulmaktadır.

Eldeki verilerden aşağıdaki şu sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Maksimum saatlik ortalama rüzgar hızı, Batı-Kuzeybatı yönünden 15/08/1999 tarih ve 14:00 saati itibari ile 7.4 m/s olarak kaydedilmiştir. Oysaki maksimum anlık rüzgar hızı 23/08/1999 tarih ve 12:20 saati itibari ile Batı yönünden 12.7 m/s ile kaydedilmiştir.
- Ağustos 1999 dönemi itibari ile kaydedilen ortalama rüzgar hızı 1.95 m/s olarak saptanmıştır.
- Rüzgarların sıklıkla Doğu-Güneydoğu (%39.78) ve Batı-Güneybatı (%24.60) yönlerinden estiği anlaşılmaktadır.

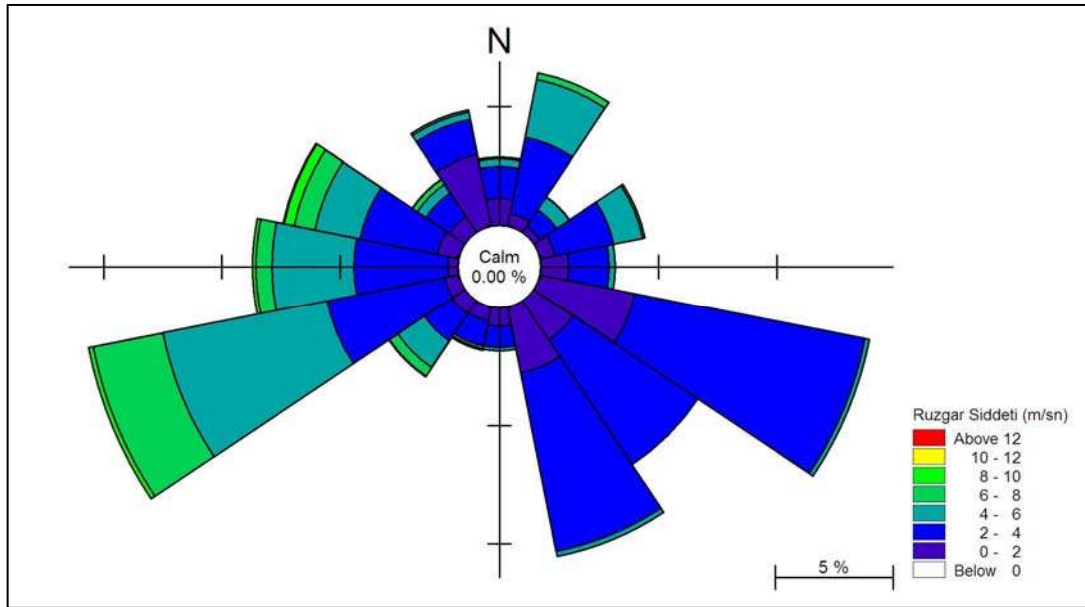


Şekil 4.10 “Ağustos 1999” dönemi saatlik ortalama rüzgar kayıtlarından üretilmiş rüzgar gülü

Meteoroloji istasyonundan temin edilen “1991-1996” uzun dönem rüzgar kayıtları, Ağustos ayları için aylık bazda değerlendirilmiştir. Bu dönem içerisinde Ağustos aylarında kaydedilen rüzgarların yönler göre dağılımı Çizelge 4.5’de verilmiştir. Esen rüzgarların şiddetlerine göre gruplandırılmış yönsel dağılımı, ayrıca rüzgar gülü olarak Şekil 4.11’de sunulmuştur.

Yapılan incelemelerden şu sonuçlara ulaşmak mümkündür:

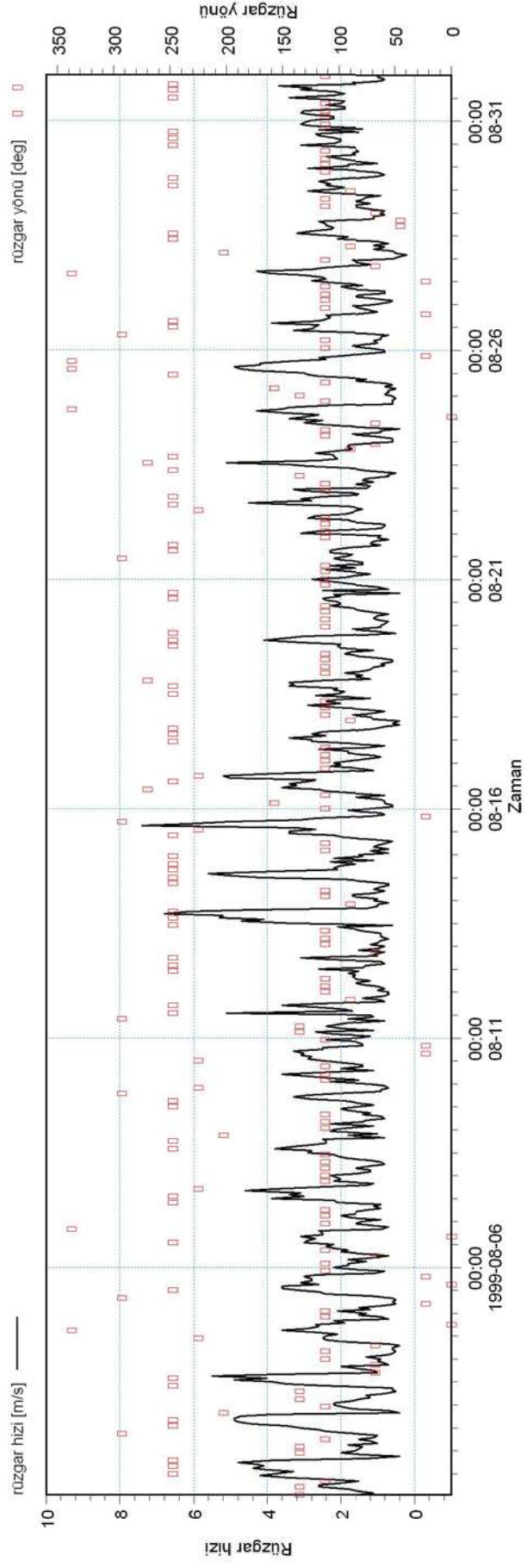
- Maksimum saatlik ortalama rüzgar hızı, 11 m/sn hızla Batı-Kuzeybatı yönünden 6 yıl içerisinde bir defa kaydedilmiştir. Ayrıca, saatlik ortalama hızı 7 m/sn' den büyük rüzgarların bu süre içerisinde toplam 41 saat estiği anlaşılmaktadır. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, Ağustos ayı içerisinde 7 m/sn' den büyük rüzgarların oluşma olasılığının bu durumda yaklaşık %1 olduğu anlaşılmaktadır. Oysaki bu değer Ağustos 1999 dönemi için %0.1 düzeyinde kalmaktadır.
- Rüzgarların sıklıkla Batı-Güneybatı (%15.99), Doğu-Güneydoğu (%14.23), Güney-Güneydoğu (%10.79), Batı (%8.72) ve Güneydoğu (%8.38) yönlerinden estiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.11 “1991-1996” yılları arası Ağustos ayları için saatlik ortalama rüzgar kayıtlarından üretilmiş ortalama rüzgar gülü

Uzun dönem rüzgar kayıtlarından türetilen Ağustos ayları rüzgar gülü, istatistiksel bir yaklaşım olarak görülebilir. Ancak Şekil 4.11 ve Şekil 4.9’da verilen rüzgar gülleri dikkatle incelendiğinde, Ağustos ayı rüzgar verileri ortalamalarının, bölgesel rüzgar koşullarını oldukça muntazam yansıttığı dikkati çekmektedir. Buna karşın, Ağustos 1999 saha ölçüm verilerine göre düzenlenmiş rüzgar gülünün ise (Şekil 4.10), uzun dönem Ağustos ayları ortalamalarını yansıtmaktan uzak olduğu anlaşılmaktadır.

Bu durumun çarpıcı sonuçları, kurulacak modelin kalibrasyonu safhasında, kendisini oldukça yakından hissettirecektir.



Şekil 4.12 Ağustos 1999 dönemi saatlik rüzgar kayıtları

Çizelge 4.4 Kısa dönem rüzgar kayıtlarının yönler'e göre dağılımı (Ağustos 1999)

Hız (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
Sakin																		
0 < u <= 1	1	3	4	23	8	63	10	9	1	6	3	7	1	3		2		144
1 < u <= 2	1	9	1	9	5	171	21	2		6	5	37		8	1	2		278
2 < u <= 3	13	21	1	2	2	54	6				11	79	3	6	1	6		205
3 < u <= 4	4	3		1		8	1				12	36		1	1	8		75
4 < u <= 5											4	16	1			7		28
5 < u <= 6											2	6	1	1				10
6 < u <= 7												2		1				3
7 < u <= 8														1				1
Toplam	19	36	6	35	15	296	38	11	1	12	37	183	6	21	3	25	0	744
Yüzde	%2.55	%4.84	%0.81	%4.70	%2.02	%39.78	%5.11	%1.48	%0.13	%1.61	%4.97	%24.60	%0.81	%2.82	%0.40	%3.36	%0.00	%100.00

Çizelge 4.5 “1991-1996” yılları arası Ağustos ayları için saatlik ortalama rüzgar kayıtlarının yönlerle göre dağılımı

Hız (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
Sakin																		
0 < u <= 1	48	25	14	29	53	182	90	127	35	27	30	28	19	42	36	136		921
1 < u <= 2	29	100	17	79	56	354	215	258	32	36	47	79	64	82	24	41		1,513
2 < u <= 3	31	45	21	33	20	87	67	84	9	13	15	146	113	66	29	27		806
3 < u <= 4	12	77	25	44	10	8		9	6	5	27	173	100	58	12	8		574
4 < u <= 5	2	33	3	12	1	1		1			33	142	54	29	7	6		324
5 < u <= 6	2	13	1	4						2	14	99	22	23	7	2		189
6 < u <= 7				1						1	5	35	8	16	4	2		72
7 < u <= 8	1										2	7	6	14	1			31
8 < u <= 9												1	1	6				8
9 < u <= 10														1				1
10 < u <= 11														1				1
Toplam	125	293	81	202	140	632	372	479	82	84	173	710	387	338	120	222	0	4,440
Yüzde	%2.82	%6.60	%1.82	%4.55	%3.15	%14.23	%8.38	%10.79	%1.85	%1.89	%3.90	%15.99	%8.72	%7.61	%2.70	%5.00	%0.00	%100.00

4.7 Model Kalibrasyonu

Bölgesel akıntı koşullarını doğru tahmin etmek ve güvenilir bir hidrodinamik model kurmak üzere, hazırlanmış model ve kalibrasyon parametreleri saha ölçümleri ile kalibre edilmiştir.

Önceki bölümlerde ele alındığı üzere, Ağustos 1999 dönemi içerisinde kaydedilmiş su seviyesi, akıntı ve rüzgar ölçümleri, kalibrasyon süreci içerisinde kullanılmıştır. Veri kalitesine aşırı müdahale etmeksizin, mevcut veri takımını incelemek üzere, 12 Ağustos ve 30 Ağustos tarihleri arasındaki dönem, hedef kalibrasyon dönemi olarak seçilmiştir.

Uygulanan kalibrasyon çalışmaları ve senaryolarda, seçilmiş kalibrasyon dönemine ait rüzgar kayıtları, Denklem (4.6)' da verilen Hsu (1985) eşitliği ile deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilerek, üretilen sentetik gel-git dalgası ile birlikte modele girilmiştir. Kurulan hidrodinamik model, taban sürtünmesi, rüzgar sürtünme katsayısı ve eddy viskozitesi gibi kalibrasyon parametrelerini değiştirerek, ölçülmüş ve modellenmiş değerler arasındaki uyum sağlanana kadar, tekrar tekrar koşturulmuştur.

$$U_{deniz} = 3 * U_{kara}^{2/3} \quad (4.6)$$

Kalibrasyon sürecine bağlı olarak yürütülen hassasiyet analizleri sonucunda, model bölgesine ait hidrodinamik parametrelerin, taban sürtünmesinden çok, rüzgar sürtünme katsayısı ve eddy viskozitesine bağlı değişimlerden etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Hata oranlarını yansıtmak ve ulaşılan uygunluk derecesini tespit etmek üzere, Bölüm 2' de ayrıntılı şekilde izah edilen hedef fonksiyonlar içerisinde, hataların kareli ortalamalarının karekökü (RMSE, Denklem 2.21), bağıl hata (RE, Denklem 2.22) ve ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki ilişkiyi veren korelasyon katsayısı (r, Denklem 2.24) kullanılmıştır .

Uygulanan *kalibrasyon hedefleri* kapsamında, **su seviyesi değişimi**, **akıntı hızı** ve **yönü** olmak üzere üç ayrı hidrodinamik parametre üzerinde durulmuş olup, bunlara ait modellenmiş ve ölçülmüş değerler arasındaki uygunluk bir bütün olarak incelenmiştir. Bu sayede, çok hedefli kalibrasyon yaklaşımı gereği, hidrodinamik sistemin tüm bileşenleri dikkate alınarak ulaşılan uygunluk derecesi tespit edilmeye çalışılmıştır.

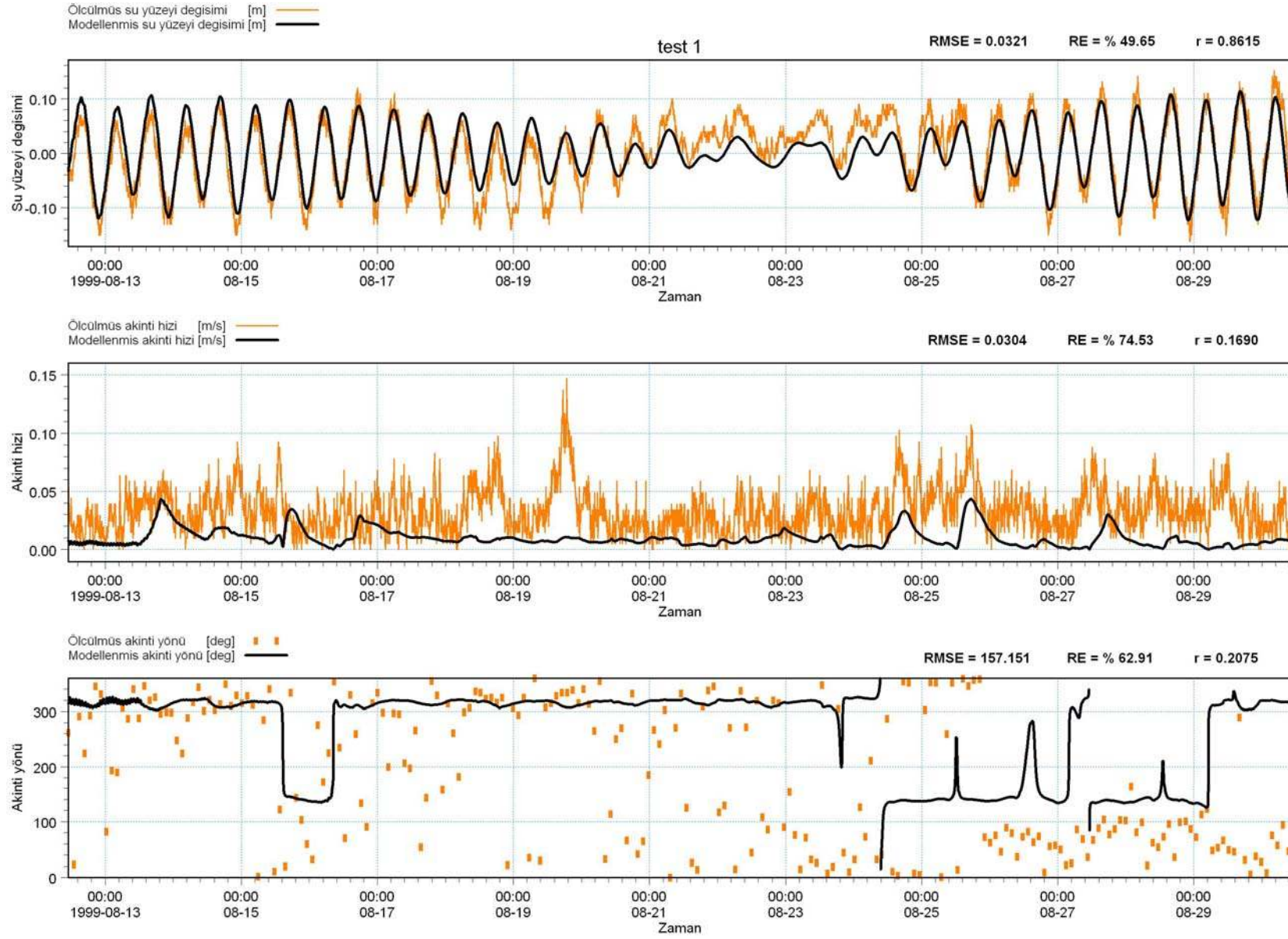
Uygulanan testler ve neticesinde varılan sonuçlar, aşağıda ayrı ayrı ele alınmış olup çizelge ve grafikler ile izah edilmiştir. Optimum parametreler takımını tespit etmek üzere Pareto eğrisi çizilmiştir.

4.7.1 Test 1

Eldeki mevcut veriler değerlendirildiğinde, kalibrasyon parametreleri için Çizelge 4.6’da seçilen bir başlangıç değer takımı dikkate alınmıştır. Söz konusu kalibrasyon parametreleri sabit tutularak, model parametrelerinin nihai hale getirilmesi amaçlanmıştır. Model parametreleri içerisinde verilen “temel” parametrelerin Çizelge 4.6’da gösterildiği gibi kalmasında bir sakınca görülmemiştir. “Hidrodinamik” parametreler içerisinde ise “su seviyesi” değişimi ve “sınır şartı” tüm model çalışmalarında Çizelge 4.6’da verildiği gibi kullanılmıştır. Nihai halde, Bölgesel Meteoroloji İstasyonundan temin edilen rüzgar verilerinin doğrudan mı, yoksa deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilerek mi kullanılacağına “test 1” ve “test 2” sonuçlarına bakılarak karar verilmiştir.

Çizelge 4.6 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		Δt = 5 sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri (Şekil 4.12)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ ₁	ψ ₁	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	1	1 - 40	m ² /s
	ψ ₂	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	32	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ ₃	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.13 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

Uygulanan birinci test ile, Şekil 4.13’de verilen ve her bir hidrodinamik parametre için ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki farkı yansıtan grafikler üretilmiştir. Her bir grafik için üç ayrı hata fonksiyon değerleri, grafiklerin sağ üst köşelerinde hesap edilmiştir.

Daha öncede belirtildiği gibi, 12 Ağustos ve 30 Ağustos tarihleri arasındaki dönem, hedef kalibrasyon dönemi olarak seçildiği için, bu dönem içerisinde kalan toplam 2593 adet veri, hata fonksiyon değerlerinin tespitinde kullanılmıştır. Hem ölçülmüş hem de modellenmiş değerler için 10’ar dakika çözünürlüklü zaman serileri dikkate alınmıştır. Böylece iki seri arasındaki eşzamanlı karşılaştırmaya olanak sağlanmıştır. Hata fonksiyon değerlerinin hesabında Microsoft Excel’ de hazırlanmış tablolardan faydalanılmıştır. Hazırlanan tablo ile, hedef kalibrasyon dönemine ait ölçülmüş veriler, model sonuçlarından gelen hesaplanmış veriler ile karşılaştırılarak, yukarıda bahsi geçen üç ayrı hata fonksiyonu bazında sonuca gidilmiştir.

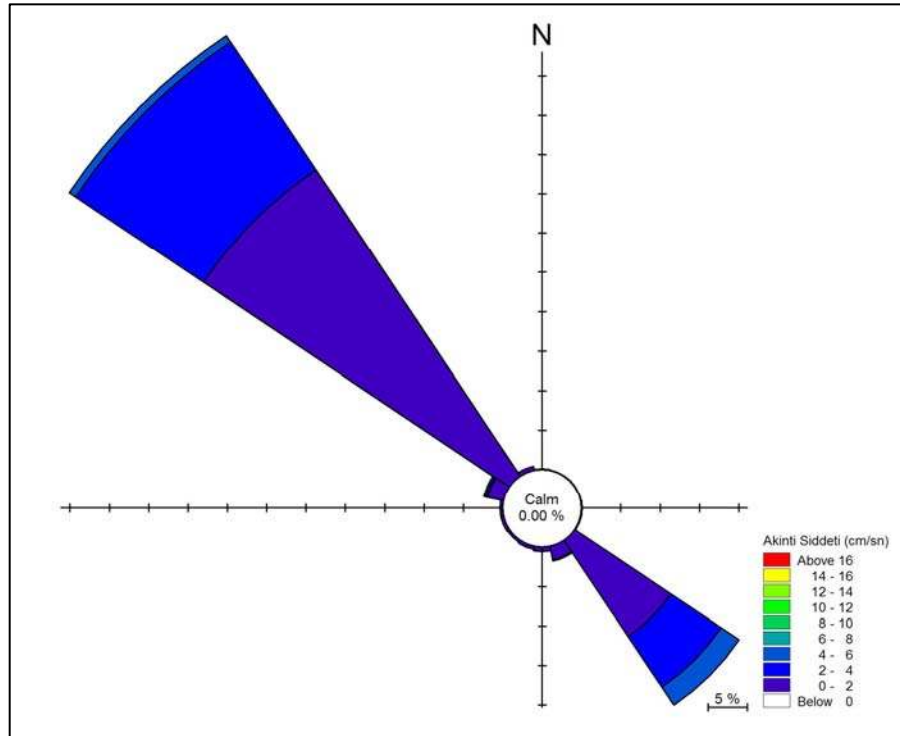
Mevcut hatırlatmalar ışığında Şekil 4.13 incelenecek olursa;

- a. Diğer kalibrasyon hedefleri ile karşılaştırıldığında, ölçülmüş ve modellenmiş veriler arasındaki en belirgin uyum, hiç kuşkusuz su yüzeyi değişiminde gözlenmektedir. Bunu, seriler arası ilişkiyi yansıtan korelasyon katsayılarını inceleyerek görmek mümkündür. Bu durum, bölgesel akıntı koşulları içerisinde su yüzeyi değişiminin, belirgin derecede ‘gel-git’ e bağlı olduğu hissini uyandırmaktadır.
- b. Şekil 4.13 içerisinde ikinci grafik ile temsil edilen akıntı hızı zaman serisi, ölçülmüş ve modellenmiş değerler bazında değerlendirildiğinde zayıf bir ilişki sergilemektedir. Bu sonuca hesaplanmış hata fonksiyon değerlerine bakarak ulaşmak mümkündür. Ölçülmüş ve modellenmiş serilere ait ortalama akıntı hızı değerlerinin sırası ile 3.24 cm/sn ve 1 cm/sn oldukları hesap edilmiştir. Ayrıca, kalibrasyon dönemi içerisinde ölçülmüş seri ile yakalanan pik değerlere, modelleme aşamasında ulaşamadığı da dikkatleri çekmektedir.
- c. Şekil 4.13 içerisinde üçüncü grafik ile temsil edilen akıntı yönü zaman serisi, ölçülmüş ve modellenmiş değerler bazında değerlendirildiğinde zayıf bir ilişki sergilemektedir. Ancak, modellenen akıntı yönünün modele verilen kısa dönem rüzgar verileri ile uyumlu bir akıntı deseni oluşturduğu da dikkati çekmektedir.

Modellenen akıntı hızı ve yönü için, Microsoft Excel Visual Basic Editörü ile yazılmış bir zaman serisi analiz programı ile, hız gruplarının yönsel dağılımı tablo halinde çıkarılmıştır. Çıkarılan tablo Ek-2’ de sunulmuştur. Çıkarılan dağılım uygun formata getirilerek, MIKE 21

modelleme paketi içerisinde yer alan LITPACK modülü yardımı ile Şekil 4.14’de verilen akıntı gülü şekline getirilmiştir.

Aşağıda çıkarılan akıntı gülü ile, modellenen bölgenin hidrodinamik bileşenlerinden olan akıntı hızı ve yönü daha görsel bir hale getirilmiştir. Böylece Şekil 4.7’de verilen ve ölçülmüş akıntı parametrelerini yansıtan akıntı gülü ile, mevcut modelin sonucunda ulaşılan akıntı parametrelerine ait akıntı gülü arasında, daha somut bir kıyaslama yapılabilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.14 Test-1 model sonucuna bağlı akıntı gülü

Test-1 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntıların, Kuzeybatı (%67.37) ve Güneydoğu (%25.14) yönlü akıntılar olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu sonuç, Şekil 4.7 ile verilen ölçülmüş verilere bağlı akıntı gülüne göre, akıntı hızı ve yönü açısından model sonucunun oldukça zayıf bir ilişki yansıttığını ayrıca ortaya koymaktadır.

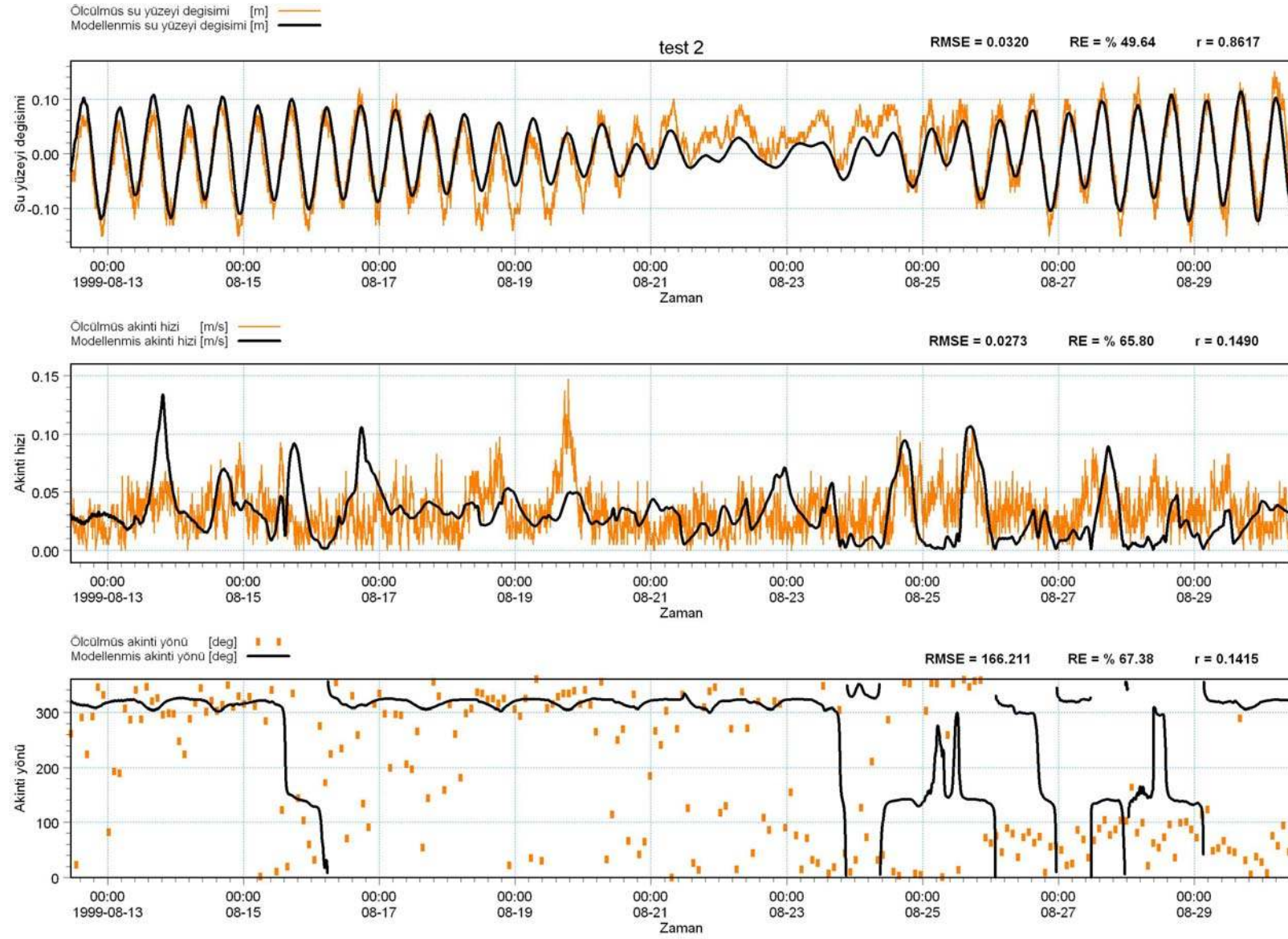
Bu açıdan bir sonraki çalışma, Bölgesel Meteoroloji İstasyonundan temin edilen rüzgar verilerinin, deniz üzeri eşdeğer hızına (Denklem 4.6) çevrilerek kullanılmasını gerektirmiş ve kalibrasyon süreci devam ettirilmiştir.

4.7.2 Test 2

Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi diğer tüm veriler “test 1” ile uyumlu olmak üzere, Bölgesel Meteoroloji İstasyonundan temin edilen rüzgar hızı verileri, Denklem (4.6) ile deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilerek modele girilmiştir.

Çizelge 4.7 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		Δt = 5 sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilmiştir (Denklem 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ ₂	ψ ₁	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	1	1 - 40	m ² /s
	ψ ₂	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	32	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ ₃	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.15 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

Uygulanan bu ikinci test ile, Şekil 4.15’de verilen ve her bir hidrodinamik parametre için ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki farkı yansıtan grafikler üretilmiştir. Hata fonksiyon değerleri, grafiklerin sağ üst köşelerinde verilmiştir.

Hata fonksiyonları, bir önceki bölümde açıklandığı gibi tespit edilmiştir. Hedef kalibrasyon dönemine ait ölçülmüş veriler, model sonuçlarından gelen hesaplanmış veriler ile karşılaştırılarak, yukarıda bahsi geçen üç ayrı hata fonksiyonu bazında sonuca gidilmiştir.

Şekil 4.13 ve 4.15’de sağ üst köşede yer alan hata fonksiyonları incelendiğinde, rüzgar verilerinin deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilerek modele girilmesi ile, su seviyesi değişimi ve akıntı yönleri üzerinde ciddi bir değişim gözlenmemesine karşın, akıntı hızlarında %10’a varan bir nispi düzelmeden bahsetmek mümkündür. Aşağıda verilen eşitlikler ile söz konusu iyileşmeyi görmek mümkündür.

$$f_{RE}(\theta_2) = \%49.64 < f_{RE}(\theta_1) = \%49.65 \quad (\text{su seviyesi değişimi})$$

$$f_{RE}(\theta_2) = \%65.80 < f_{RE}(\theta_1) = \%74.53 \quad (\text{akıntı hızı})$$

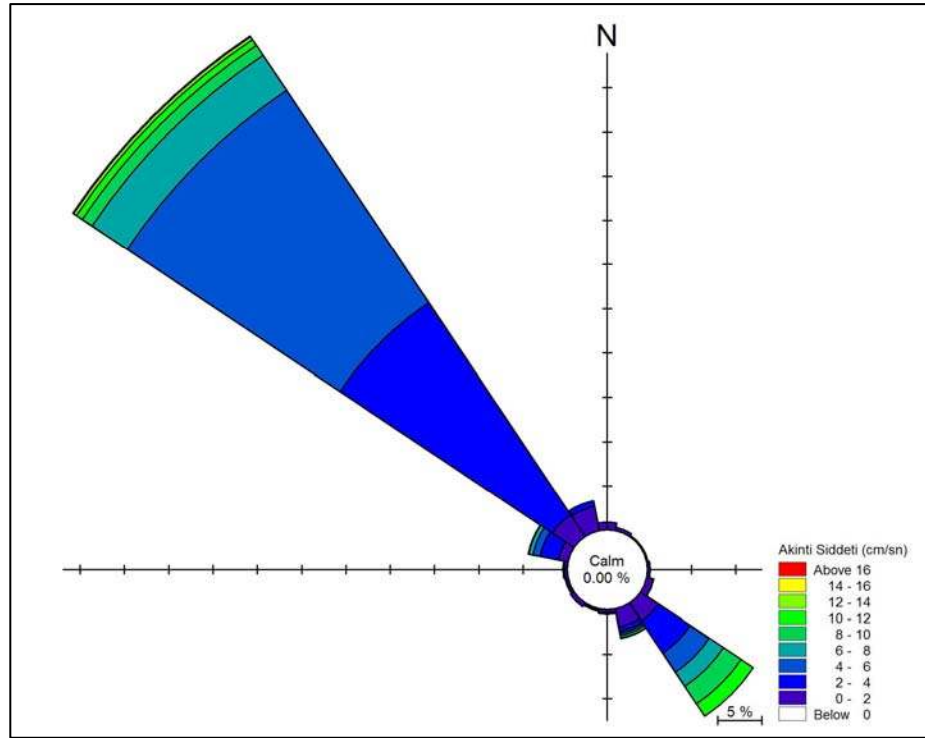
$$f_{RE}(\theta_2) = \%67.38 > f_{RE}(\theta_1) = \%62.91 \quad (\text{akıntı yönü})$$

Burada $f_{RE}(\theta_j)$ rölatif hata fonksiyonu olup, $\theta_j = \{ \psi_1, \psi_2, \psi_3 \}$ olmak üzere dikkate alınan model parametreler takımını temsil etmektedir.

Mevcut hatırlatmalar ışığında Şekil 4.15 incelenecek olursa;

- Su yüzeyi değişiminde yine iyi bir uyum yakalanmaktadır. Bunu yukarıda karşılaştırılan su seviyesi değişimine ait bağıl hata fonksiyonları ile görmek mümkündür.
- Akıntı hızı zaman serisi, ölçülmüş ve modellenmiş sonuçlar bazında değerlendirildiğinde bir önceki teste göre yaklaşık %10 iyileşme göstermesine rağmen, yine zayıf bir ilişki sergilemektedir. Modellenmiş seriye ait ortalama akıntı hızı değeri 3.17 cm/sn olarak hesap edilmiştir. Ayrıca, kalibrasyon dönemi içerisinde ölçülmüş seri ile yakalanan pik değerlere, modelleme aşamasında kısmen de olsa ulaşıldığı dikkatleri çekmektedir. Ancak, Batı-Güneybatı’dan esen rüzgarlar için, ölçülmüş akıntı hızlarında gözlenen pik değerlere model sonuçlarında rastlanamaması, dikkatleri çeken bir diğer husustur.
- Akıntı yönü benzeşiminin, hem bir önceki teste hemde ölçülmüş değerlere göre yetersiz kaldığı dikkati çekmektedir.

Modellenen akıntı hızı ve yönü için hız gruplarının yönsel dağılımı Ek-2' de sunulmuştur. İlgili akıntı gülü aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.16 Test-2 model sonucuna bağlı akıntı gülü

Test-2 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntılarının, Kuzeybatı (%68.18) ve Güneydoğu (%15.31) yönlü akıntılar olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu sonuç, Şekil 4.7 ile verilen ölçülmüş verilere bağlı akıntı gülüne göre, akıntı hızı ve yönü açısından model sonucunun oldukça zayıf bir ilişki yansıttığını ayrıca ortaya koymaktadır.

Ancak 1.test ile karşılaştırıldığında, akıntı hızı için yakalanmış yaklaşık %10 mertebelerindeki iyileşmenin bir neticesi olarak, bundan sonraki çalışmalarda rüzgar verilerinin deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilerek kullanılmasına karar verilmiştir.

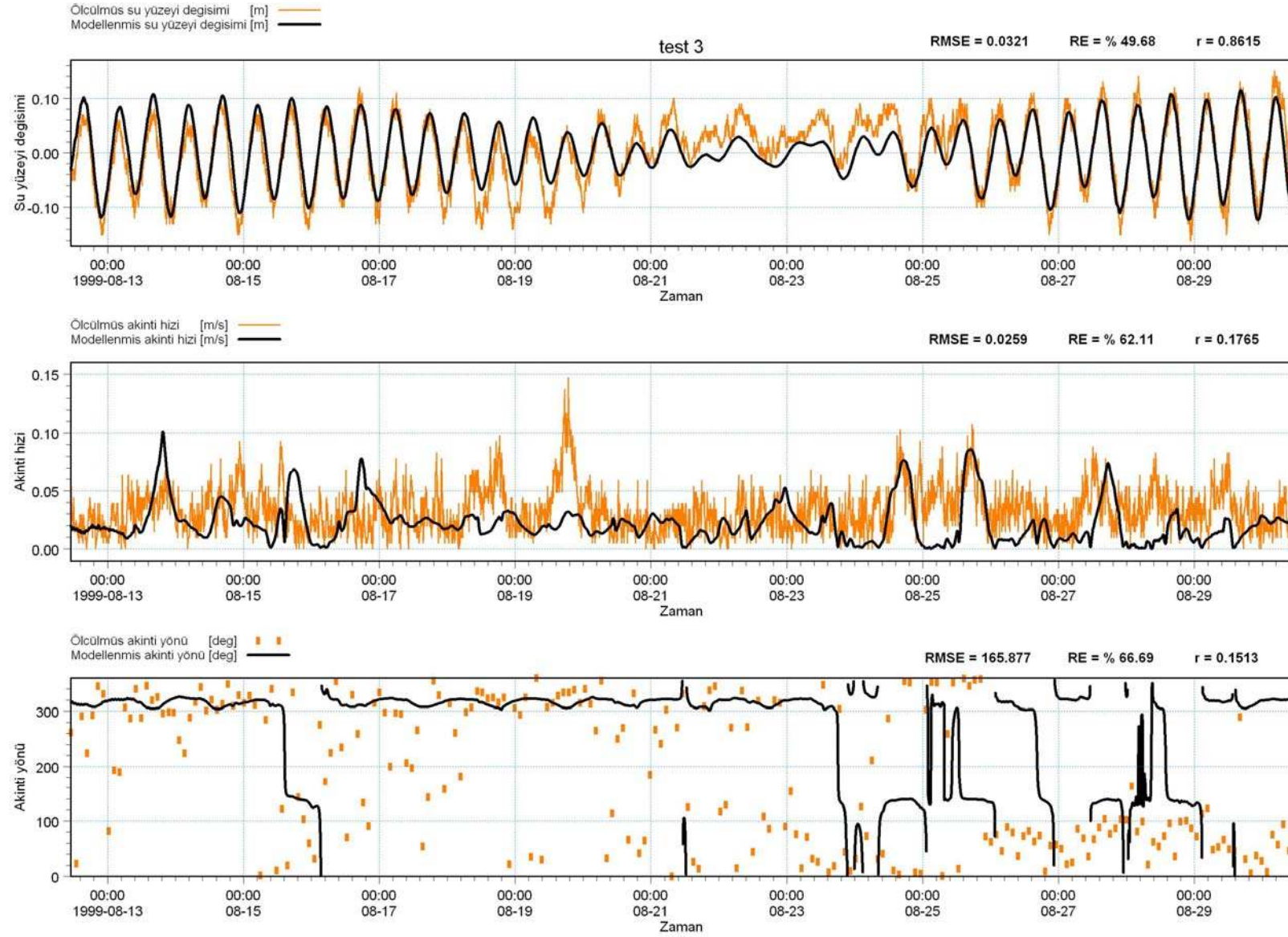
4.7.3 Test 3

İkinci test ile ulaşılan müspet netice, model parametreleri içerisinde rüzgar verilerinin, deniz üzeri eşdeğer hız değeri ile kullanılmasının uygun olduğunu göstermiştir. Bütün testlerde rüzgarın katkısı, maksimum sürtünme katsayısı ile temsil edilmiştir. Bu nedenle, yürütülmüş diğer testlerde, model parametreleri yukarıda izah edilen şekillerde sabit tutularak, kalibrasyon parametrelerinin model üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Uygulanmış bu üçüncü test ile eddy viskozitesi 2' ye çıkarılmış ve olası değişimler seçilen kriterler altında gözlenmiştir.

Çizelge 4.8 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		Δt = 5 sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilmiştir (Denklem 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ ₃	ψ ₁	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	2	1 - 40	m ² /s
	ψ ₂	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	32	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ ₃	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.17 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

Model sonucunda, Şekil 4.17’de verilen ve her bir hidrodinamik parametre için ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki farkı yansıtan grafikler üretilmiştir. Her bir grafik için hesaplanan hata fonksiyonları şekil üzerinde verilmektedir.

Şekil 4.15 ve 4.17 için hata fonksiyonları incelendiğinde, su seviyesi değişimi üzerinde ciddi bir değişim gözlenmemesine karşın, akıntı hızı ve yönü için dikkate alınan hata fonksiyonları bazında, oldukça ufak oranlarda iyileşmeden bahsetmek mümkündür. Aşağıda verilen eşitlikler ile söz konusu iyileşmeleri görmek mümkündür.

$$f_{RE}(\theta_3) = \%49.68 > f_{RE}(\theta_2) = \%49.64 \quad (\text{su seviyesi değişimi})$$

$$f_{RE}(\theta_3) = \%62.11 < f_{RE}(\theta_2) = \%65.80 \quad (\text{akıntı hızı})$$

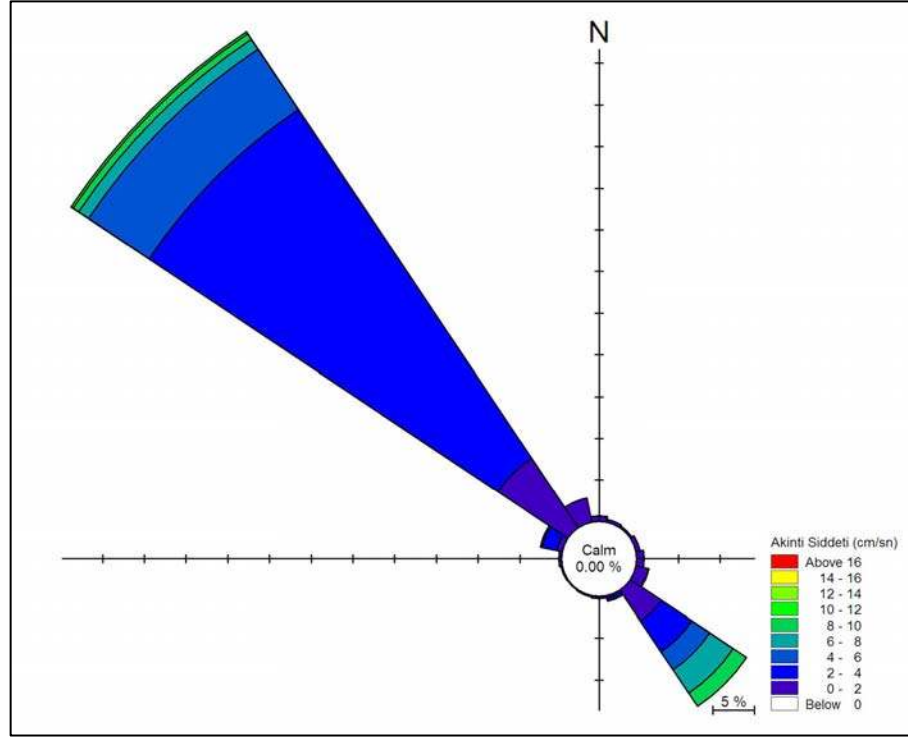
$$f_{RE}(\theta_3) = \%66.69 < f_{RE}(\theta_2) = \%67.38 \quad (\text{akıntı yönü})$$

Mevcut hatırlatmalar ışığında Şekil 4.17 incelenecek olursa;

- a. Su yüzeyi değişimindeki uyumun ufak bir farklılığa rağmen korunduğu görülebilmektedir.
- b. Modellenmiş akıntı hızı zaman serisi incelendiğinde, test 1 ve test 2’ ye göre kısmi oransal iyileşme yakalandığı, ancak hidrodinamik sistemin karakteristik özelliklerinin tam olarak yansıtamadığı görülmektedir. Modellenmiş ortalama akıntı hızının 2.20 cm/sn olduğu hesaplardan anlaşılmaktadır. Pik değerlere kısmen ulaşıldığı ve modelin Batı-Güneybatı’dan esen rüzgarlara kısmen karşılık verdiği, ulaşılan bir diğer önemli sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.
- c. Modele girilen sınır şartların ve uygulanan kalibrasyon parametrelerinin akıntı yönü üzerinde etkili olamadığı anlaşılmaktadır.

Test-3 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntıların, Kuzeybatı (%71.69) ve Güneydoğu (%16.74) yönlü akıntılar olduğu ortaya çıkmaktadır (Bkz. Şekil 4.18).

Modellenen akıntı hızı ve yönü için üretilen hız gruplarının yönsel dağılımı Ek-2’de sunulmuş olup, ilgili akıntı gülü aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.18 Test-3 model sonucuna bağlı akıntı gülü

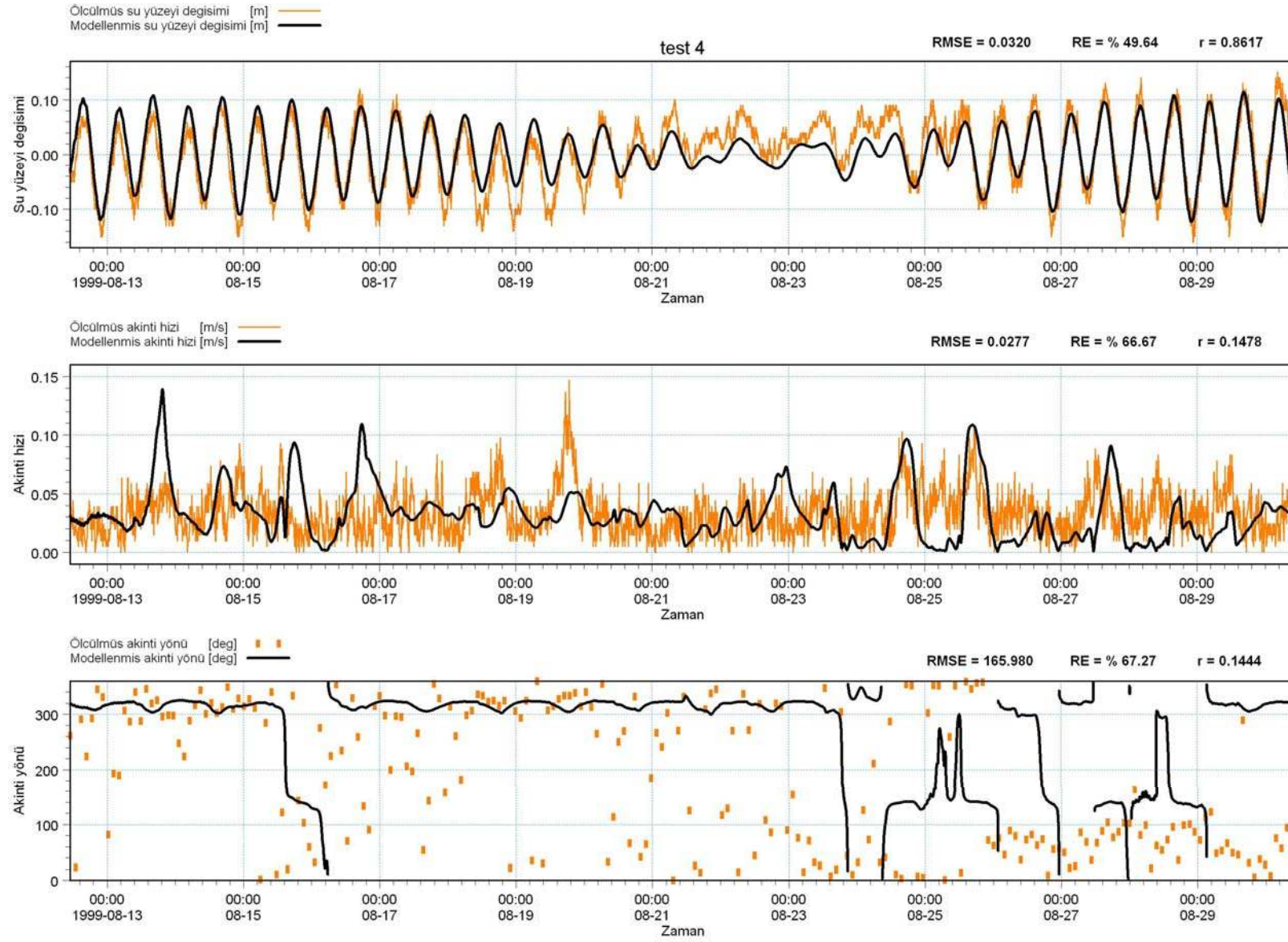
4.7.4 Test 4

Uygulanan ilk üç test ile, eddy vizkozitesi değişim aralığının 1 ve 2 arasındaki değerler için model bölgesi akıntı koşullarını düzgün yansıttığı ve 2' den büyük değerler için akıntı hızında oldukça büyük düşüşler gösterdiği anlaşılmıştır.

Uygulanmış bu dördüncü test ile eddy viskozitesi 1, taban direncini temsil eden manning sayısı ise $34 \text{ m}^{1/3}/\text{sn}$ alınarak olası değişimler seçilen kriterler altında gözlenmiştir.

Çizelge 4.9 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		Δt = 5 sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilmiştir (Denklem 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ ₄	ψ ₁	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	1	1 - 40	m ² /s
	ψ ₂	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	34	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ ₃	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.19 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

Test 4 model sonucu Şekil 4.19’da verilen grafik ile çekilmiş olup, ilgili hata fonksiyon değerleri şekil üzerinde gösterilmektedir.

Şekil 4.17 ve 4.19 için hata fonksiyonları incelendiğinde, su seviyesi değişimi üzerinde ciddi bir değişim gözlenmemesine karşın, akıntı hızı ve yönü için dikkate alınan hata fonksiyonları bazında, oldukça ufak oranlarda kötüleşmeden bahsetmek mümkündür. Aşağıda verilen eşitlikler ile söz konusu kötüleşmeyi görmek mümkündür.

$$f_{RE}(\theta_4) = \%49.64 < f_{RE}(\theta_3) = \%49.68 \quad (\text{su seviyesi değişimi})$$

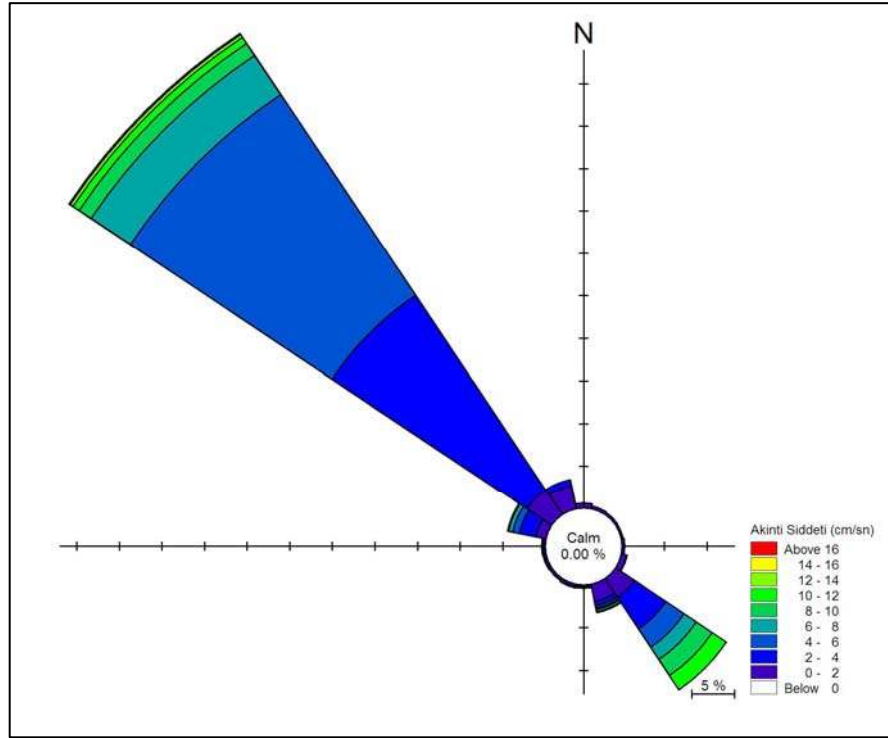
$$f_{RE}(\theta_4) = \%66.67 > f_{RE}(\theta_3) = \%62.11 \quad (\text{akıntı hızı})$$

$$f_{RE}(\theta_4) = \%67.27 > f_{RE}(\theta_3) = \%66.69 \quad (\text{akıntı yönü})$$

Mevcut hatırlatmalar ışığında Şekil 4.19 incelenecek olursa;

- a. Ölçülmüş ve modellenmiş veriler arasındaki en belirgin uyum, yine hiç kuşkusuz su yüzeyi değişiminde gözlenmektedir.
- b. Modellenmiş ortalama akıntı hızı 3.23 cm/sn olarak hesap edilmiş olup ortalama değerler bazında yakaladığı başarıya rağmen, genel benzeşim modeli açısından pik değerleri yakalamakta yetersiz kaldığı görülmektedir.
- c. Akıntı yönü benzeşimi Şekil (4.20)’de verilen akıntı gülüne bakıldığında, halen hidrodinamik sistemi yansıtmakta yetersiz kalmaktadır.

Test-4 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntıların, Kuzeybatı (%68.26) ve Güneydoğu (%15.66) yönlü akıntılar olduğu ortaya çıkmaktadır (Bkz. Ek 2).



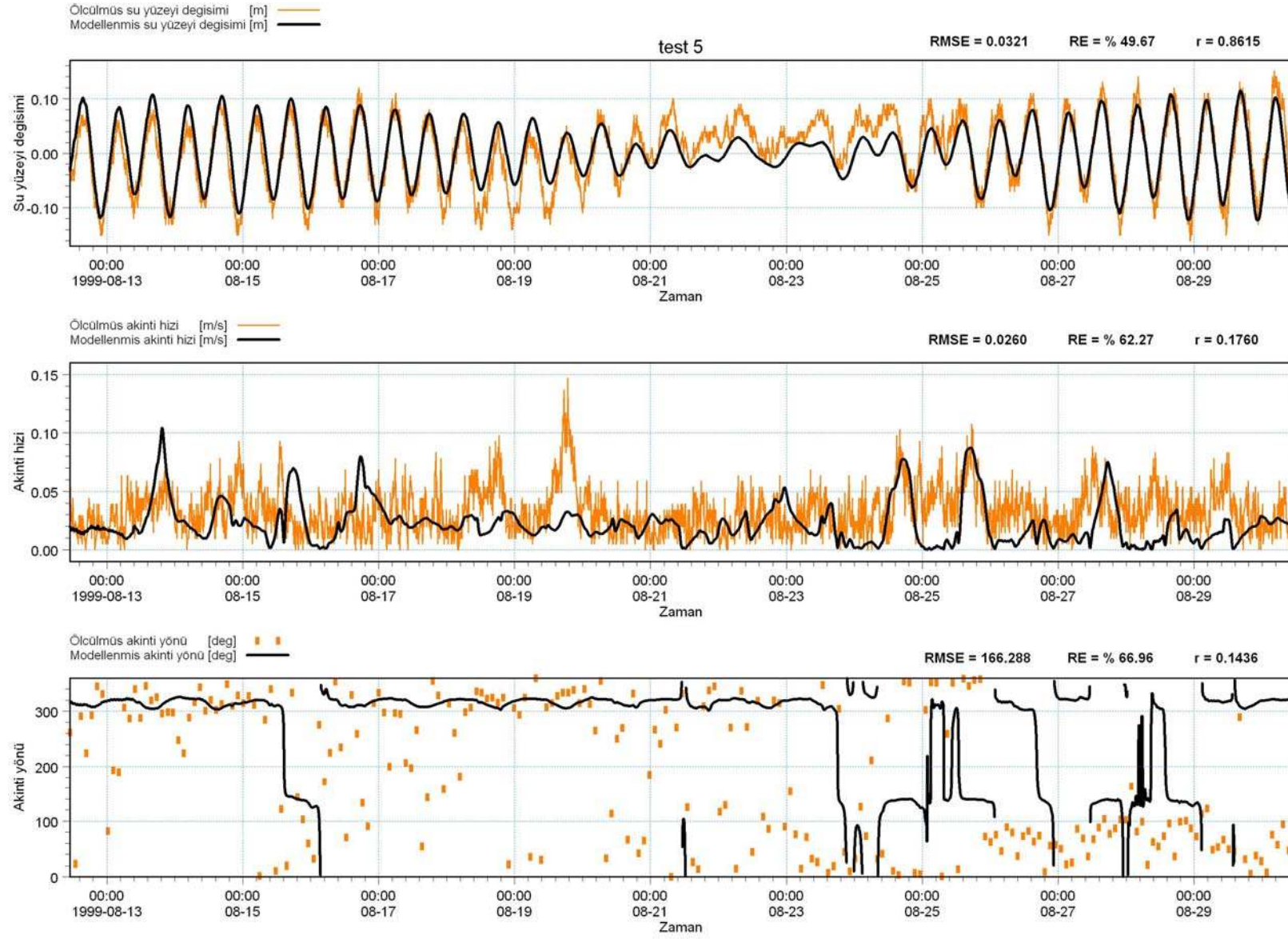
Şekil 4.20 Test-4 model sonucuna bağlı akıntı gülü

4.7.5 Test 5

Uygulanmış bu beşinci test ile eddy viskozitesi 2, taban direncini temsil eden manning sayısı ise $34 \text{ m}^{1/3}/\text{sn}$ alınarak, olası değişimler seçilen kriterler altında gözlenmiştir.

Çizelge 4.10 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		Δt = 5 sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilmiştir (Denklem 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ ₅	ψ ₁	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	2	1 - 40	m ² /s
	ψ ₂	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	34	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ ₃	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.21 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

Model sonucu ve ilgili hata fonksiyon değerleri Şekil 4.21’de verilmektedir.

Şekil 4.19 ve 4.21 için hata fonksiyonları incelendiğinde, su seviyesi değişiminde halen ciddi bir değişim gözlenmediği, ancak akıntı hızı ve yönü için dikkate alınan hata fonksiyonları bazında, ufak oranlarda değişimlerin olduğu dikkati çekmektedir. Aşağıda verilen eşitlikler ile söz konusu değişimi görmek mümkündür.

$$f_{RE}(\theta_5) = \%49.67 > f_{RE}(\theta_4) = \%49.64 \quad (\text{su seviyesi değişimi})$$

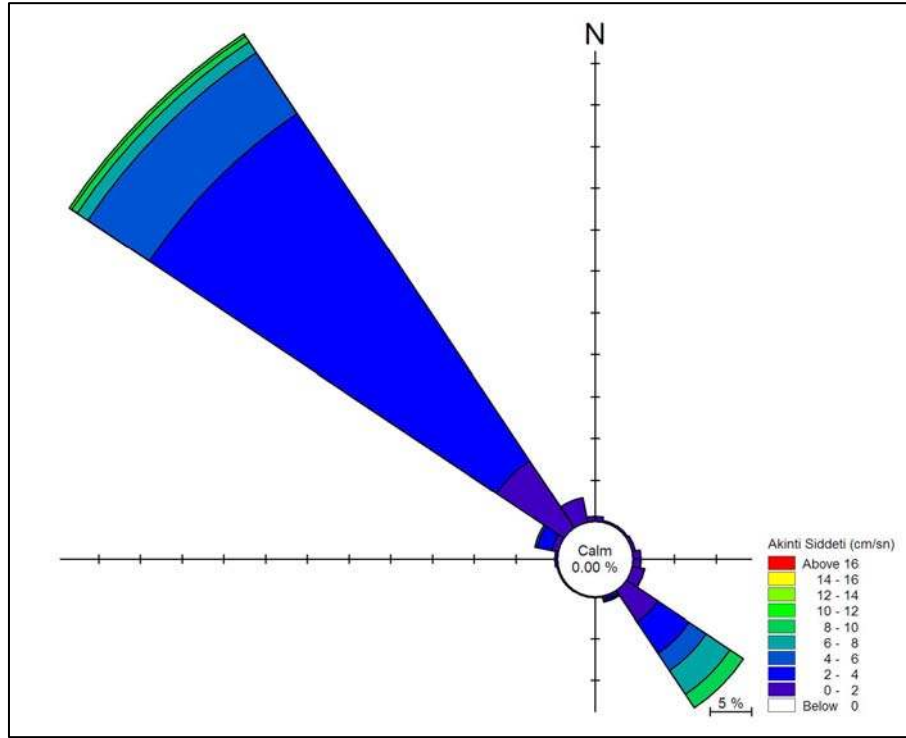
$$f_{RE}(\theta_5) = \%62.27 < f_{RE}(\theta_4) = \%66.67 \quad (\text{akıntı hızı})$$

$$f_{RE}(\theta_5) = \%66.96 < f_{RE}(\theta_4) = \%67.27 \quad (\text{akıntı yönü})$$

Mevcut bilgiler ışığında Şekil 4.21 incelenecek olursa;

- a. Su yüzeyi değişiminin kalibrasyon parametrelerinden çok modele sınır şartı olarak girilen gel-git dalgasının genliğine bağlı olduğu anlaşılmaktadır
- b. Modellenmiş ortalama akıntı hızı 2.23 cm/sn olarak hesap edilmiş olup, bir önceki teste göre ortalama hızda gözlenen bu farkın, eddy vizkozitesinden kaynaklanıyor olduğu açıkça kendini hissettirmektedir.
- c. Uygulanan bu test ile de modellenmiş akıntı yönü üzerinde belirgin bir iyileşme yakalanamamıştır.

Test-5 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntıların, Kuzeybatı (%71.42) ve Güneydoğu (%16.89) yönlü akıntılar olduğu belirlenmiştir (Bkz. Ek 2).



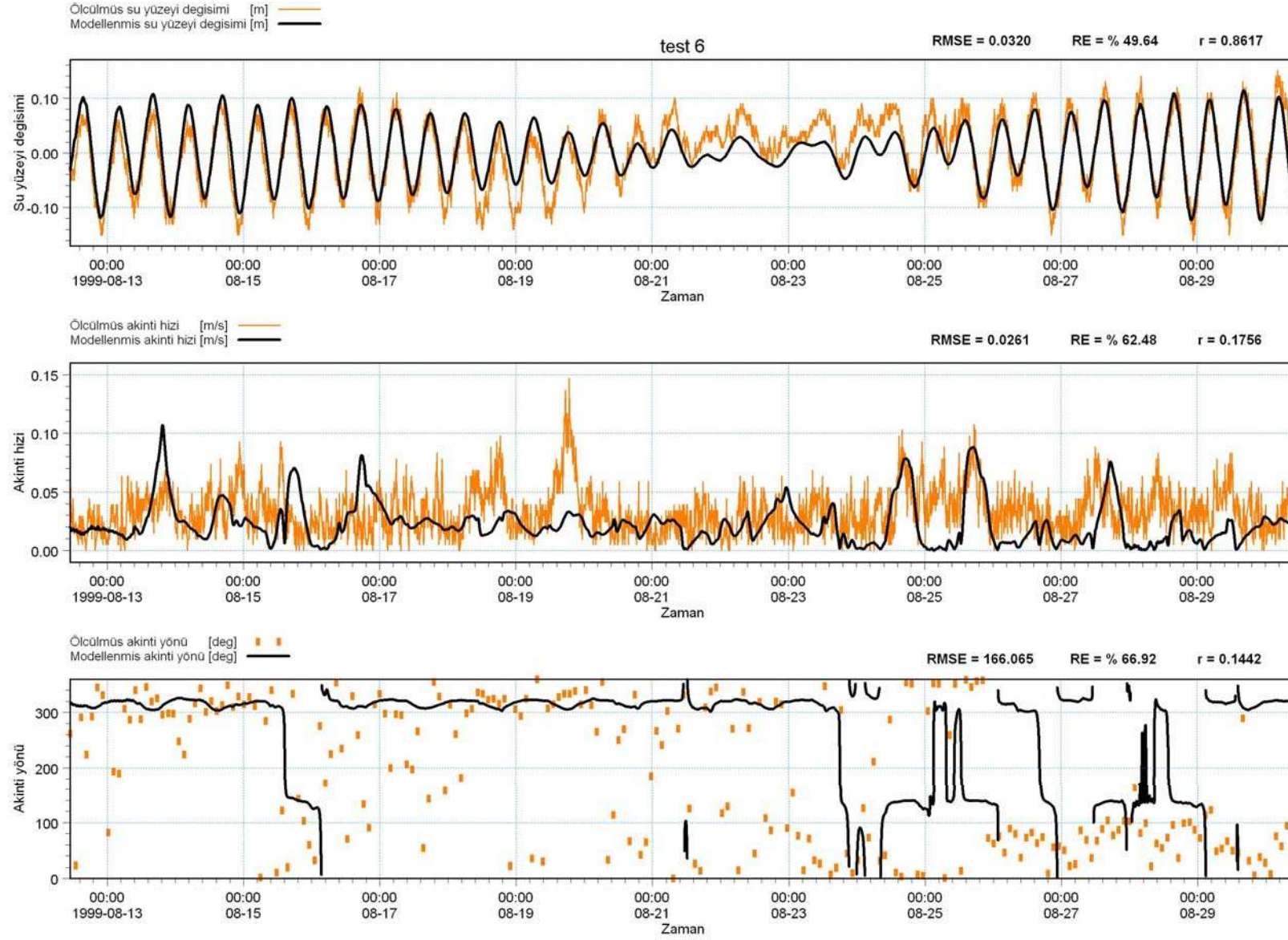
Şekil 4.22 Test-5 model sonucuna bağlı akıntı gülü

4.7.6 Test 6

Uygulanmış bu altıncı test ile eddy viskozitesi 2, taban direncini temsil eden manning sayısı ise $36 \text{ m}^{1/3}/\text{sn}$ alınarak, olası değişimler seçilen kriterler altında gözlenmiştir.

Çizelge 4.11 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		$\Delta t = 5$ sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilmiştir (Denklem 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ_6	ψ_1	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	2	1 - 40	m ² /s
	ψ_2	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	36	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ_3	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.23 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

Model sonucu Şekil 4.23’de sunulmaktadır.

Şekil 4.21 ve 4.23 için hata fonksiyonları incelenmiş ve aşağıda verilen eşitlikler ile mevcut değişimler karşılaştırılmıştır.

$$f_{RE}(\theta_6) = \%49.64 < f_{RE}(\theta_5) = \%49.67 \quad (\text{su seviyesi değişimi})$$

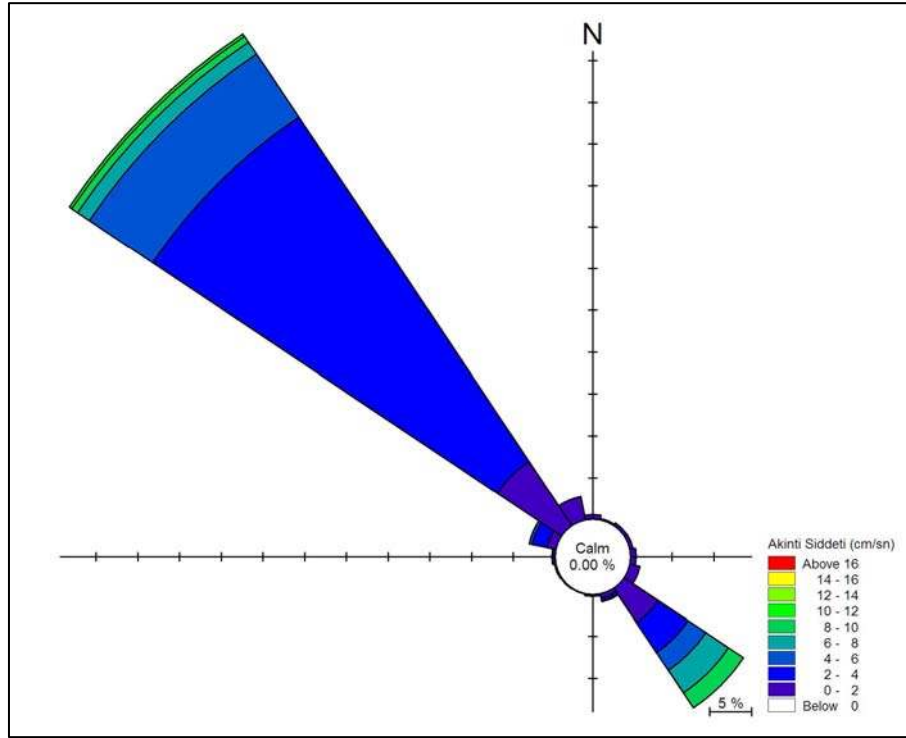
$$f_{RE}(\theta_6) = \%62.48 > f_{RE}(\theta_5) = \%62.27 \quad (\text{akıntı hızı})$$

$$f_{RE}(\theta_6) = \%66.92 < f_{RE}(\theta_5) = \%66.96 \quad (\text{akıntı yönü})$$

Mevcut bilgiler ışığında Şekil 4.23 incelenecek olursa;

- a. Su yüzeyi değişimi önceki model çalışmalarından çok farklı bir sonuç vermemiştir.
- b. Modellenmiş ortalama akıntı hızı 2.25 cm/sn olarak belirlenmiş olup, test 5 ile ulaşılan sonuçtan çok farklı bir netice sunmamıştır. Her iki benzeşim model sonucunun, ortalama hızlar bazında da sergilediği bu uyum, taban sürtünmesinin model sonuçları üzerindeki etkisinin oldukça küçük boyutlarda olduğunu göstermektedir.
- c. Modellenmiş akıntı yönü de önceki model çalışmalarından çok farklı bir sonuç vermemiştir.

Test-6 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntıların, Kuzeybatı (%71.04) ve Güneydoğu (%17.24) yönlü akıntılar olduğu, Ek 2’ de verilen frekans tablosundan ve aşağıda sunulan ilgili akıntı gülünden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.24 Test-6 model sonucuna bağlı akıntı gülü

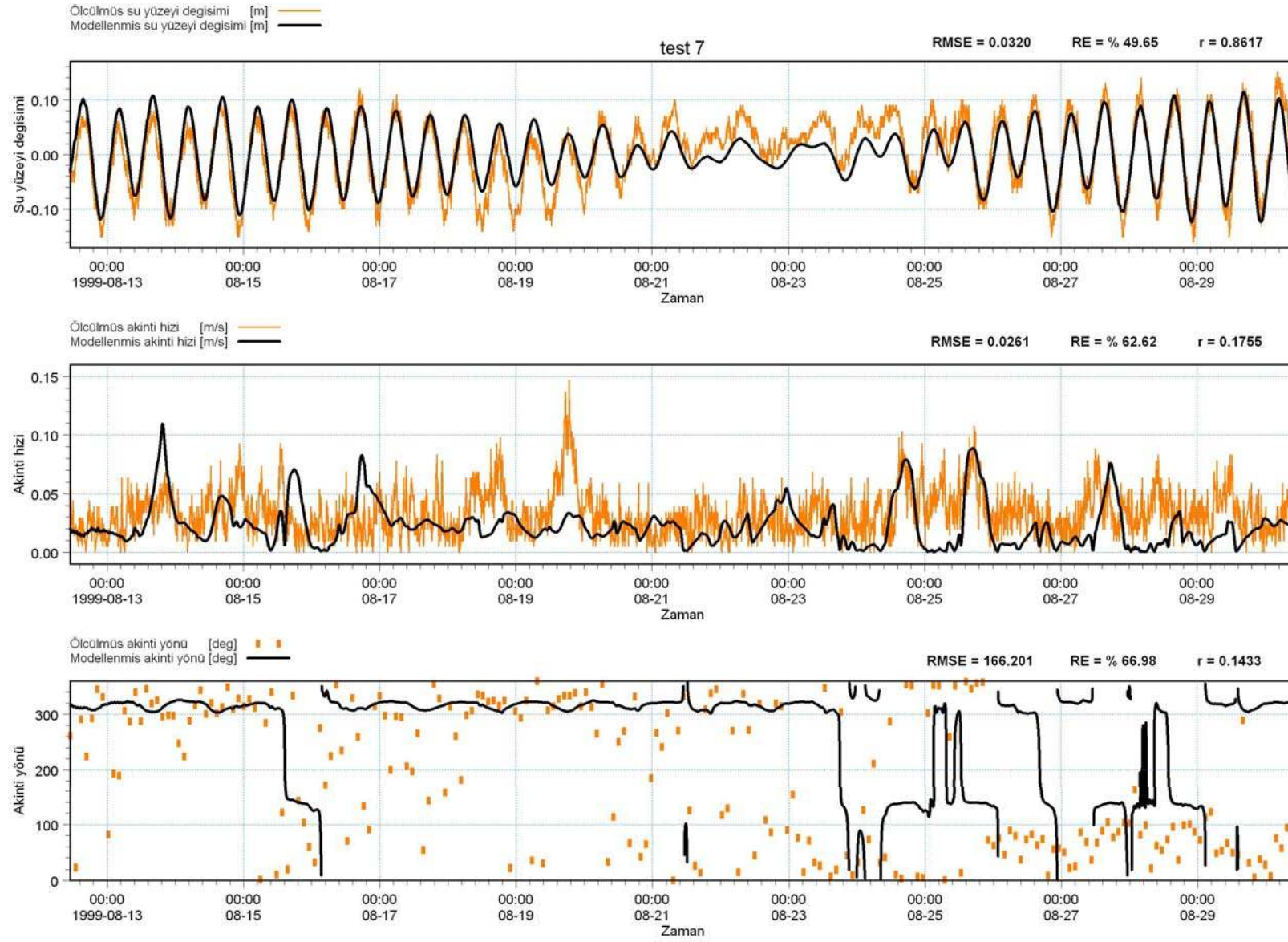
4.7.7 Test 7

Uygulanmış bu yedinci ve son test ile eddy viskozitesi 2, taban direncini temsil eden manning sayısı ise $38 \text{ m}^{1/3}/\text{sn}$ alınarak, olası değişimler seçilen kriterler altında gözlenmiştir.

Üçüncü, beşinci, altıncı ve yedinci testlere bakıldığında, taban direnci katsayısı olarak girilen manning sayılarındaki değişimin, hidrodinamik koşulları etkilemekte yetersiz kaldığı ve genele bakıldığında en belirgin değişimin eddy viskozitesi ile yaşandığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.12 Model ve kalibrasyon parametreleri

Temel Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Çözünürlük		
Modül	Hidrodinamik		-		
Batimetri	Sayısallaştırılmış bölgesel batimetri haritası, (Şekil 4.5)		ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
			20	20	-
Simülasyon Periyodu	Başlangıç	01.08.1999 01:00:00	Zaman adımı sayısı		534240
	Son	31.08.1999 23:00:00	Zaman adımı aralığı		Δt = 5 sn
	Max. Courant Sayısı		5.535		
Hidrodinamik Model Parametreleri					
Adı	Tanımı		Model Formatı		
Su Yüzeyi Seviyesi	Model alanı içerisinde başlangıçta yer alan su yüzeyi seviyesi		Sabit Değerli = 0		
Sınır Şartı	Sentetik gel-git dalgası (Şekil 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Rüzgar Koşulu	Ağustos 1999 dönemi saatlik ortalama rüzgar verileri deniz üzeri eşdeğer hızına çevrilmiştir (Denklem 4.6)		Zaman serisi formatında, (*.dfs0)		
Kalibrasyon					
Parametreler Takımı	Kalibrasyon Parametresi	Tanımı	Değeri	Değer Aralığı	Birimi
θ ₇	ψ ₁	Eddy Vizkozitesi, (hız tabanlı formül, sabit değerli)	2	1 - 40	m ² /s
	ψ ₂	Taban Direnci, (manning sayısı, sabit değerli)	38	20 - 40	m ^{1/3} /s
	ψ ₃	Rüzgar Sürtünme Katsayısı, (sabit değerli)	0.0026	1.2-2.6*(10 ⁻³)	-



Şekil 4.25 Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırılması

En son model çalışması olan bu yedinci test ile ulaşılan benzeşim sonuçları, Şekil 4.25’de sunulmaktadır.

Taban direncindeki değişimin incelendiği Şekil 4.23 ve 4.25’deki benzeşim sonuçları, aşağıda verilen eşitlikler ile karşılaştırılmıştır.

$$f_{RE}(\theta_7) = \%49.65 > f_{RE}(\theta_6) = \%49.64 \quad (\text{su seviyesi değişimi})$$

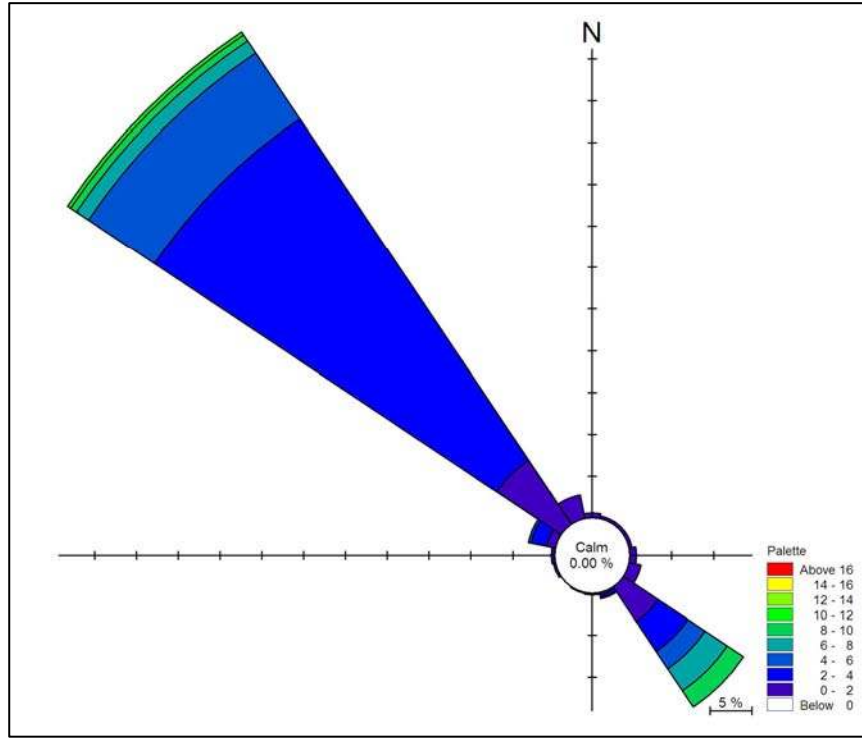
$$f_{RE}(\theta_7) = \%62.62 > f_{RE}(\theta_6) = \%62.48 \quad (\text{akıntı hızı})$$

$$f_{RE}(\theta_7) = \%66.98 > f_{RE}(\theta_6) = \%66.92 \quad (\text{akıntı yönü})$$

Mevcut bilgiler ışığında Şekil 4.25 incelenecek olursa;

- a. Uygulanan bütün model sonuçlarına bakıldığında su yüzeyinin, gerek taban direnci gerekse eddy vizkozitesinden, ufak değişimler dışında fiziksel olarak pek etkilenmediği anlaşılmaktadır.
- b. Modellenmiş ortalama akıntı hızının 2.28 cm/sn olduğu hesap edilmiş olup, taban direncinin model sonuçları üzerindeki etkisinin yetersizliği bir kez daha anlaşılmıştır.
- c. Akıntı yönünün, kalibrasyon parametrelerine uygulanan değişimden bağımsız olduğu ve uygulanan sınır şartları ile yakından ilintili olduğu anlaşılmıştır.

Test-7 neticesinde, model bölgesi içerisindeki hakim akıntıların, Kuzeybatı (%71.00) ve Güneydoğu (%17.24) yönlü akıntılar olduğu belirlenmiştir (Bkz. Ek 2). Hakim akıntı yönlerini veren akıntı gülü aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 4.26 Test-7 model sonucuna bağlı akıntı gülü

4.8 Pareto Eğrisi

Seçilmiş model bölgesi için yürütülen hidrodinamik modelleme çalışmaları, eddy vizkozitesi (ψ_1), taban direnci (ψ_2) ve rüzgar sürtünme katsayısı (ψ_3) gibi parametreler göz önünde tutularak kalibre edilmeye çalışılmıştır.

Yukarıda açıklanan bütün model çalışmaları için hesap edilmiş hata fonksiyon değerleri bir tablo halinde Çizelge 4.13’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.13 Her bir parametreler takımı için hesaplanmış hata fonksiyon değerleri

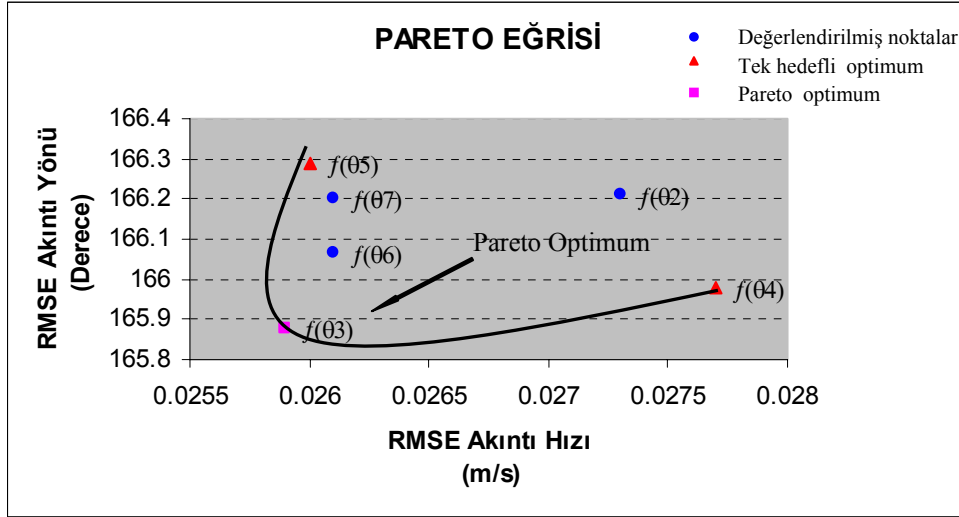
Parametreler			Su Yüzeyi Değişimi			Akıntı Hızı			Akıntı Yönü		
Takımı			RMSE*	RE**	r***	RMSE*	RE**	r***	RMSE*	RE**	r***
θ_1	ψ_1	1	0.0321	%49.65	0.8615	0.0304	%74.53	0.1690	157.151	%62.91	0.2075
	ψ_2	32									
	ψ_3	0.0026									
θ_2	ψ_1	1	0.0320	%49.64	0.8617	0.0273	%65.80	0.1490	166.211	%67.38	0.1415
	ψ_2	32									
	ψ_3	0.0026									
θ_3	ψ_1	2	0.0321	%49.68	0.8615	0.0259	%62.11	0.1765	165.877	%66.69	0.1513
	ψ_2	32									
	ψ_3	0.0026									
θ_4	ψ_1	1	0.0320	%49.64	0.8617	0.0277	%66.67	0.1478	165.980	%67.27	0.1444
	ψ_2	34									
	ψ_3	0.0026									
θ_5	ψ_1	2	0.0321	%49.67	0.8615	0.0260	%62.27	0.1760	166.288	%66.96	0.1436
	ψ_2	34									
	ψ_3	0.0026									
θ_6	ψ_1	2	0.0320	%49.64	0.8617	0.0261	%62.48	0.1756	166.065	%66.92	0.1442
	ψ_2	36									
	ψ_3	0.0026									
θ_7	ψ_1	2	0.0320	%49.65	0.8617	0.0261	%62.62	0.1755	166.201	%66.98	0.1433
	ψ_2	38									
	ψ_3	0.0026									

*RMSE: Hataların kareli ortalamalarının karekökü

**RE: Bağlı hata fonksiyonu

***r: Korelasyon katsayısı

Su seviyesi değişimi, akıntı hızı ve yönü gibi model bölgesi hidrodinamik koşullarını yansıtan kalibrasyon hedeflerinin tümü, seçilen kalibrasyon dönemi için, ölçülmüş ve modellenmiş değerler arasındaki optimum uyum sağlanana kadar incelenmiştir. Böylece probleme, Bölüm 2’de de değinildiği gibi çok hedefli kalibrasyon açısından yaklaşmıştır.



Şekil 4.27 Optimum Pareto Eğrisi

Uygulanan kalibrasyon testleri ile Şekil 4.27’de verilen Optimum Pareto Eğrisi çıkarılmıştır. Pratik uygulamalarda, Pareto değerler takımının tamamını hesap etmek oldukça zor ve zahmetli olabilir. Bu durumda sadece optimal çözüm aralıkları ile ilgilenmek en doğrusudur.

Pareto eğrisinin tahmin edilmesinde, model bölgesi hidrodinamik parametrelerinden akıntı hızı ve akıntı yönü değişimleri tercih edilmiştir. Bu iki hidrodinamik koşulun tercih edilmesindeki neden ise, mevcut kalibrasyon parametrelerine bağlı model sonuçlarındaki değişimin, su seviyesinden çok bu iki hidrodinamik parametre üzerinde etkin olmasından kaynaklanmaktadır (Bkz.. Çizelge 4.13). Eğrinin çıkartılışında, ölçülmüş ve modellenmiş değerler arasındaki farkı yansıtan, hataların kareli ortalamalarının karekökü (RMSE) kullanılmıştır.

Pareto eğrisini Şekil 4.27’ye göre yorumlamak gerekirse, ani bir değişim ile köşegen bir yapı arzettiği kolayca farkedilebilir. Bunun anlamı, fiziksel sistemi temsil eden kalibrasyon hedeflerinden yalnızca bir tanesinin uygulanması durumunda, diğer kalibrasyon hedefinin oldukça uyumsuz bir simulasyon sonucu yansıtabileceği olasılığıdır.

Yani, ilgili konuyu daha da derinlemesine incelemek gerekirse, aşağıda belirtilen şu hususlara Şekil 4.27 ışığında ulaşmak mümkündür:

- a. Uygulanan kalibrasyon süreci içerisinde, 6 farklı parametreler takımı için çalıştırılan modeller sonucunda, hata fonksiyonları hesap edilmiştir.
- b. 5 numaralı parametreler takımı için hesaplanan hata fonksiyon değerleri, yalnızca “akıntı hızı” için kabul edilebilir bir uygunluk sağlamaktadır.
- c. 4 numaralı parametreler takımı için hesaplanan hata fonksiyon değerleri, yalnızca “akıntı yönü” için kabul edilebilir bir uygunluk sağlamaktadır.
- d. Tüm bunlara karşın 3 numaralı parametreler takımı için hesaplanan hata fonksiyon değerleri ise, hem “akıntı hızı” hem de “akıntı yönü” için kabul edilebilir bir uygunluk sağlamaktadır.
- e. Pareto eğrisi içerisinde kalan diğer noktalar ise, parametreler uzayı içerisinde değerlendirilmiş, ancak model kalibrasyonu açısından uygunluk derecesi düşük noktaları temsil etmektedir.

Bahsi geçen her iki hidrodinamik parametre için kalibrasyon probleminin birbirinden bağımsız olduğu düşünülemez. Çünkü dikkate alınan kalibrasyon parametreleri (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3) ile kurulabilecek parametreler takımı (θ), mesela akıntı hızı için minimum bir çözüm sunarken, akıntı yönü değişimini aynı netlikte yansıtamayabilir. Bu durum, yalnızca akıntı hızı değişimi gibi tek bir performans kriteri üzerine kurulan kalibrasyon problemlerinde, sistemin davranışını gerçekçi bir şekilde değerlendirmeye yetmez. O halde ilgili probleme, yukarıda değinildiği üzere “çok hedefli kalibrasyon” açısından yaklaşmak kaçınılmaz olmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Kalibrasyon Sonuçları

Şekil 4.1’de gösterilen model bölgesi ve eldeki mevcut veriler değerlendirildiğinde, bölgesel hidrodinamik koşulların analizi ve eldeki verilere göre kurulan modelin kalibrasyonu için, iki boyutlu hidrodinamik modelleme yapabilen MIKE 21 yazılımı kullanılmıştır. MIKE 21 HD hemen hemen düzlemsel akışı veren kısmi diferansiyel denklemleri çözümler ve diğer tüm diferansiyel denklemler gibi sınır koşulları gerektirir. Öyle ki, belirlenen tüm bu başlangıç ve sınır koşullarının model stabilitesi üzerindeki etkinliği, uygulanan test çalışmaları aşamasında açıkça kendisini hissettirmiştir.

Model kalibrasyonu aşamasında uygulanan tüm testler yukarıda ayrıntılı şekilde incelenip, analiz edilmiştir. Şimdi, genel itibari ile ulaşılan sonuçları yorumlamak gerekirse, aşağıda belirtilen şu birkaç hususa değinmek mümkündür:

- a. Ölçülmüş ve modellenmiş verilerin karşılaştırıldığı yukarıda verilen tüm grafikler dikkatle incelendiğinde, ölçülmüş zaman serilerinde gözlenen anlık salınımlara karşılık, modellenmiş zaman serilerinin oldukça düzgün bir seyir izlediği görülmektedir. Öyle ki, modele sınır şartı olarak girilen rüzgar verilerinin saatlik ortalama değerler ile hesaba katılması bu durumun başlıca nedeni olarak gösterilebilir. Halbuki, ölçülmüş zaman serileri ile alınan hidrodinamik kayıtlar, 10’ar dakika aralıklar ile okunmuş değerleri içermektedir. Dolayısı ile, ölçülmüş zaman serilerinin saatlik ortalama değerlerini dikkate alarak hesaplanabilecek hata fonksiyonları ile daha yüksek uygunluk derecelerine ulaşmak mümkün olabilir.
- b. Ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasındaki ilişkiler, korelasyon katsayıları adına değerlendirildiğinde, su seviyesi değişimini veren tüm grafikler için oldukça yüksek bir fonksiyonel ilişkinin varlığına dikkatleri çekmektedir. Halbuki, akıntı hızı ve yönü için hesaplanmış korelasyon katsayıları, bu iki hidrodinamik parametre için oldukça zayıf bir fonksiyonel ilişkinin varlığına işaret etmektedir. Öyle ki, bu durum bizi, akıntı hızı ve yönü üzerinde etkin iki sınır şartı olan gel-git ve rüzgar koşullarını incelemeye yöneltmektedir.
- c. Genellikle açık sınırlar boyunca, gel-git’ e bağlı su seviyesi değişimleri oldukça yüksek bir doğruluk ile elde edilebilmektedir. Oysaki, meteorolojik etkilerden kaynaklanan değişimler (mesela, model alanı dışında oluşmuş bir fırtına gibi) model sonuçları adına

büyük hatalar içerebilirler. Meteorolojik etkenlere bağlı zorlayıcı unsurlardan kaynaklanan hatalar, kısmen de olsa meteorolojik gözlemlerin belirsizliği ile izah edilebilirler. O halde hesap alanımız ile hesap alanı üzerinde estirilen rüzgara ait kayıt istasyonlarının konum ve dağılımı büyük önem arz etmektedir. Şekil 4.1 üzerinde meteorolojik verilerin temin edildiği meteoroloji istasyonu ve bu istasyona göre hesap alanının konumu görülebilmektedir. Kayıt istasyonunun model alanına olan mesafesi ve topoğrafik koşullar, kullanılan rüzgar verilerinin doğruluğunun sorgulanmasını gerektirmektedir.

- d. Şekil 4.1’de gösterilen bölgesel meteoroloji istasyonundan temin edilen ve kalibrasyon çalışmaları için sınır koşul olarak modele girilen Ağustos 1999 dönemi rüzgar kayıtları, 1991-1996 yılları için kaydedilmiş uzun dönem rüzgar kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde, Ağustos 1999 dönemi için alınan kayıtların (Çizelge 4.4), 1991-1996 dönemi Ağustos ayları ortalamalarını (Çizelge 4.5) yansıtmadığı anlaşılmıştır. O halde, rüzgar verilerinin sahadaki gerçek durumu yansıtma oranı şüphe ile karşılanabilir.
- e. Bütün simülasyon sonuçları incelendiğinde, su seviyesi değişimi için ölçülmüş ve modellenmiş seriler arasında oldukça mükemmel bir uyum ve korelasyon ilişkisi yakalandığı anlaşılmaktadır.
- f. Model sonuçlarını yansıtan grafikler dikkatle incelendiğinde, hedef kalibrasyon döneminin ilk yarısı için akıntı hızlarında ortalama değerlerin yakalandığı ancak pik değerleri yakalamakta zorlanıldığı fark edilmektedir. Buna karşın, hedef kalibrasyon döneminin ikinci yarısı incelendiğinde ise, ortalama değerlerden uzaklaşılmasına rağmen pik değerleri yakalamakta zorlanılmadığı anlaşılmaktadır. Genele bakıldığında ise Batı-Güneybatıdan esen rüzgarlar ile akıntı hızında ölçülen pik değerlere ulaşamadığı dikkatleri çekmektedir.
- g. Benzeşim sonuçlarına bağlı kalarak üretilen ve modellenmiş akıntı yönünü ve şiddetlerini temsil eden akıntı gülleri incelendiğinde, model içerisinde Kuzeybatı-Güneydoğu yönlü akıntıların hakimiyeti dikkati çekmektedir. Halbuki model bölgesi içerisinde varolan akıntıların yönü, Kuzeybatı-Kuzeydoğu yönleri ile sınırlı bir yelpazeyi göstermektedir (Bkz.. Şekil 4.7). Bunda, Ağustos 1999 dönemi için modele verilen rüzgar verilerinin, uzun dönem rüzgar kayıtlarından türetilen Ağustos ayları ortalamalarından uzak bir görüntü sergilemesinin rolü olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, Batı-Güneybatı’dan esen rüzgarlar için modelin istenilen performansı yansıtamaması da bir diğer neden olarak

gösterilebilir.

- h. Hesap edilen hata fonksiyon değerlerine bağlı olarak çıkarılan Pareto eğrisi ile, parametreler uzayı içerisinde değerlendirilmiş noktalara göre model sonuçlarını incelemek mümkündür. Pareto eğrisinin temelinde otomatik kalibrasyon modeli yatmaktadır. Böylece eğrinin her iki ucunun tespit edildiği durumlarda, hidrodinamik parametrelerden herhangi birine verilen rölatif önceliğe göre atanan ağırlık katsayıları, eğrinin geri kalan kısmının tahmini için kullanılır (Bkz. Bölüm 2). Uygulama modelimizin dışında, hidrodinamik parametre sayısı ikiden fazla olan çalışmalarda, otomatik kalibrasyon için Pareto eğrisinin belirlenmesi kaçınılmazdır.

5.2 Öneriler

Uygulanan kalibrasyon çalışması ile model alanı içerisinde tek bir noktada ölçümleri alınan “hidrodinamik parametreler”, mevcut kısıtlar ve hedef kalibrasyon dönemi dahilinde kalibre edilmeye çalışılmıştır. Ağustos 1999 dönemi içerisinde kaydedilmiş su seviyesi, akıntı ve rüzgar ölçümleri, kalibrasyon süreci içerisinde kullanılmıştır. Ancak söz konusu model alanı için sadece tek bir döneme ait hidrodinamik veri temin edilmiş olması, kalibre edilen modelin geçerliliğini (validation) kontrol etmeye izin vermemektedir.

Bu şartlar altında ileriki bir dönemde, model alanı içerisinde farklı birkaç noktadan temin edilebilecek hidrodinamik veriler ile, kurulan modelin geçerliliğinin araştırılması ve Pareto çözümler sisteminin kontrolü tavsiye edilebilir.

İdeal bir kalibrasyon çalışması için:

- a. Sahadaki durumu daha iyi temsil ettiğinden emin olunan rüzgar verilerinin kullanılmış olması,
- b. Birbirinden bağımsız en az iki ayrı dönem için kalibrasyon çalışmalarının yapılmış olması,
- c. Bağımsız bir ölçüm dönemi için kalibre edilmiş modelin sınanmış olması, gerekirse yeniden kalibre edilmesi,

gerekli olmaktadır.

Geleneksel şekli ile hidrodinamik model kalibrasyonu, uyguladığımız çalışmada da görüldüğü gibi, deneme-yanılma metodu ile model parametreleri üzerinde el ile yapılabilecek oynamalar şeklinde yorumlanabilir. Ancak, el ile uygulanacak bir kalibrasyon süreci, bağımsız model parametrelerinin sayısına ve bu parametreler arası etkileşim derecesine bağlı olarak oldukça usandırıcı ve zaman tüketici bir görev olabilir.

Dolayısı ile daha etkili ve daha nesnel otomatik kalibrasyon yöntemlerinin geliştirilebilmesi için bir çok araştırmalar bu alana kaydırılmıştır. Dünya çapında yapılan uygulamalardan en genel hatları ile alıntıda bulunduğum bu çalışma içerisindeki otomatik kalibrasyon yöntemleri ile, zamandan tasarruf sağlayan ideal modeller kurup kalibre etmek, kaçınılmaz bir görev olarak kendini hissettirmektedir.

KAYNAKLAR

Binh, D.T., “ Application of GIS and Numerical Simulation Modeling to Assess and Predict Environment of Ha Long Bay, Vietnam” , Department of Physical Oceanography , Haiphong Institute of Oceanology

Birpınar, M.E., (2003), “ İstatistik Ders Notları” Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Dean, R.G., “ Tides and Harmonic Analysis” , University of Florida, Gainesville, Florida

DHI Water & Environment, (2004),” Auto calibration tool – User guide”, Horsholm, Denmark

DHI Water & Environment, (2004),” Mike 21 Hd– User guide”, Horsholm, Denmark

Duan, et al., (1992), “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models”, Water Resour. Res., 28(4), 1015-1031

Efstratiadis, A., “ Investigation of global optimum seeking methods in water resources problems”

Gözütok, S., Özdemir, O.N., (2004) “ Genetik algoritma ile su şebekelerinde hidrolik kalibrasyonun geliştirilmesi” Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, No 2, 125-130

Gupta, et al., “ Toward improved calibration of hydrological models: multiple and noncommensurable measures of information”, Water Resour. Res., 34(4), 751-763

Hansen, H.K., (2002), ” Mike 21 Nsw – on model validation” DHI Water & Environment, Horsholm, Denmark

Hill, M.C., (1998), ” Methods and guidelines for effective model calibration”, U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report , 98-4005

Kriauciuniene, J., “Application of Mike 21 Models in Lithuania”, Hydrolgy laboratory, Lithuanian Energy Institute

Kuczera, G., (1997), “ Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models” , Water Resour. Res., 33(1), 177-185

Madsen, H., Jacobsen, T., (2001), “Automatic calibration of the Mike She integrated hydrological modeling system”, Proceedings Of 4th DHI Software Conference, 6-8 June. 2001, Denmark

Madsen, H., (2000a), “Automatic calibration and Uncertainty Assesment in Rainfall-Runoff Modeling”, Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management , July 30-August 2. 2000, USA

Madsen, H., (2000b), “Automatic calibration of a conceptual Rainfall-Runoff Model using multiple objectives”, Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management , July 30-August 2. 2000, USA

Nocedal, J., J. Wright, S., (1999) “Numerical Optimization” İ.T.Ü Merkez Kütüphanesi, İstanbul.

Nogochi, M., Solomatine D.P., Nishida, W., (2002) “ Calibtarion of water quality model by global optimization techniques”, Proceedings Of 5th International Conference on Hydroinformatics, 1-5 July. 2002, Cardiff, UK

Siegle, E., Huntley, A.D., (2002) “ Modeling water surface topography at a complex inlet system-Teignmouth, UK” , ICS 2002 Proceedings, Northern Ireland

Solomatine, D.P., (1995,1998), “ Experience with nine automatic calibration algorithms: Global optimization with globe system”, International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, The Netherlands

Sorensen J.V.T., Madsen, H., “ Data assimilation of tidal gauge data in a three dimensional coastal model”, DHI Water & Environment, Horsholm, Denmark

Stoschek, O., & Matheja, A., (2000), ” Sensitivity analysis of numerical solving Techniques for modeling sediment transport under tidal conitions” Proceedings Of 4th International Conference on Hydroinformatics, 23-27 July. 2000, Iowa City, USA

Yüksel, Y., (1999), “ Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Hidrolik” Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Yüksel, Y., (2005), “ Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik” Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Wangwongwiroj, N., Mark, O., Schlutter, F., (2001), “ Application of an automatic calibration scheme for Urban Rainfall-Runoff Models in Mouse”, Proceedings Of 4th DHI Software Conference, 6-8 June. 2001, Denmark

EKLER

- Ek 1 Saatlik ortalama rüzgar verilerini içeren Ağustos 1999 kayıtlarının bir kopyası
- Ek 2 Modellenen akıntı hızı ve yönleri için hız gruplarının yönsel dağılım frekans tabloları
- Ek 3 Mike 21 Hidrodinamik modül temel denklemleri ve çözüm algoritması

EK 1: Saatlik ortalama rüzgar verilerini içeren Ağustos 1999 kayıtlarının bir kopyası

EK 2: Modellenen akıntı hızı ve yönleri için hız gruplarının yönsel dağılım frekans tabloları

Çizelge 5.1 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-1)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u <= 1	2	1	2	1	2	3	380	44	15	11	8	10	10	53	1212	14		1,768
1 < u <= 2							121	5							436			562
2 < u <= 3							78	1						7	74			160
3 < u <= 4							57							5	15			77
4 < u <= 5							16								10			26
5 < u <= 6																		0
6 < u <= 7																		0
7 < u <= 8																		0
8 < u <= 9																		0
Toplam	2	1	2	1	2	3	652	50	15	11	8	10	10	65	1,747	14	0	2,593
Yüzde	%0.08	%0.04	%0.08	%0.04	%0.08	%0.12	%25.14	%1.93	%0.58	%0.42	%0.31	%0.39	%0.39	%2.51	%67.37	%0.54	%0.00	%100.00

Çizelge 5.2 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-2)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u ≤ 1	21	10	5	5	9	20	63	53	9	5	12	8	9	30	77	73		409
1 < u ≤ 2						2	66	6	4	3	1	2	4	37	223	17		365
2 < u ≤ 3							46	9	1					17	524			597
3 < u ≤ 4							35	4						15	554			608
4 < u ≤ 5							32	2						7	198			239
5 < u ≤ 6							24	3						4	67			98
6 < u ≤ 7							26	2						9	56			93
7 < u ≤ 8							28	2						1	26			57
8 < u ≤ 9							34	6							9			49
9 < u ≤ 10							25	1							9			35
10 < u ≤ 11							18								12			30
11 < u ≤ 12															5			5
12 < u ≤ 13															5			5
13 < u ≤ 14															3			3
14 < u ≤ 15																		0

Toplam	21	10	5	5	9	22	397	88	14	8	13	10	13	120	1,768	90	0	2,593
Yüzde	%0.81	%0.39	%0.19	%0.19	%0.35	%0.85	%15.31	%3.39	%0.54	%0.31	%0.50	%0.39	%0.50	%4.63	%68.18	%3.47	%0.00	%100.00

Çizelge 5.3 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-3)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u ≤ 1	16	8	6	13	24	40	116	7	7	4	3	5	9	18	261	76		613
1 < u ≤ 2						1	66	6						29	706			808
2 < u ≤ 3							48	3						17	600			668
3 < u ≤ 4							37	2						2	151			192
4 < u ≤ 5							30							4	75			109
5 < u ≤ 6							39								26			65
6 < u ≤ 7							48								12			60
7 < u ≤ 8							32								16			48
8 < u ≤ 9							18								5			23
9 < u ≤ 10															5			5
10 < u ≤ 11															2			2
11 < u ≤ 12																		0

Toplam	16	8	6	13	24	41	434	18	7	4	3	5	9	70	1,859	76	0	2,593
Yüzde	%0.62	%0.31	%0.23	%0.50	%0.93	%1.58	%16.74	%0.69	%0.27	%0.15	%0.12	%0.19	%0.35	%2.70	%71.69	%2.93	%0.00	%100.00

Çizelge 5.4 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-4)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u <= 1	14	8	7	6	8	17	69	53	6	9	8	8	7	32	91	73		416
1 < u <= 2						2	67	5	5	3	1	2	4	35	204	20		348
2 < u <= 3							49	9					1	16	510			585
3 < u <= 4							32	5						13	541			591
4 < u <= 5							34	2						8	199			243
5 < u <= 6							21	3						5	95			124
6 < u <= 7							24	2						7	49			82
7 < u <= 8							28	2						4	34			68
8 < u <= 9							30	5							10			45
9 < u <= 10							33	2							8			43
10 < u <= 11							19								15			34
11 < u <= 12															5			5
12 < u <= 13															4			4
13 < u <= 14															5			5
14 < u <= 15																		0

Toplam	14	8	7	6	8	19	406	88	11	12	9	10	12	120	1,770	93	0	2,593
Yüzde	%0.54	%0.31	%0.27	%0.23	%0.31	%0.73	%15.66	%3.39	%0.42	%0.46	%0.35	%0.39	%0.46	%4.63	%68.26	%3.59	%0.00	%100.00

Çizelge 5.5 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-5)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u ≤ 1	15	6	7	11	26	39	118	9	4	3	5	4	9	21	252	78		607
1 < u ≤ 2						1	67	6						28	692			794
2 < u ≤ 3							50	2						18	607			677
3 < u ≤ 4							36	3						3	153			195
4 < u ≤ 5							27							5	77			109
5 < u ≤ 6							36								30			66
6 < u ≤ 7							53								11			64
7 < u ≤ 8							33								16			49
8 < u ≤ 9							18								5			23
9 < u ≤ 10															5			5
10 < u ≤ 11															4			4
11 < u ≤ 12																		0

Toplam	15	6	7	11	26	40	438	20	4	3	5	4	9	75	1,852	78	0	2,593
Yüzde	%0.58	%0.23	%0.27	%0.42	%1.00	%1.54	%16.89	%0.77	%0.15	%0.12	%0.19	%0.15	%0.35	%2.89	%71.42	%3.01	%0.00	%100.00

Çizelge 5.6 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-6)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u ≤ 1	14	5	10	11	19	33	128	14	7	2	3	5	9	28	240	74		602
1 < u ≤ 2						1	65	7					1	30	674			778
2 < u ≤ 3							47	2						18	613			680
3 < u ≤ 4							39	3						2	159			203
4 < u ≤ 5							27							6	80			113
5 < u ≤ 6							35								33			68
6 < u ≤ 7							49								12			61
7 < u ≤ 8							38								12			50
8 < u ≤ 9							19								10			29
9 < u ≤ 10															4			4
10 < u ≤ 11															5			5
11 < u ≤ 12																		0

Toplam	14	5	10	11	19	34	447	26	7	2	3	5	10	84	1,842	74	0	2,593
Yüzde	%0.54	%0.19	%0.39	%0.42	%0.73	%1.31	%17.24	%1.00	%0.27	%0.08	%0.12	%0.19	%0.39	%3.24	%71.04	%2.85	%0.00	%100.00

Çizelge 5.7 Modellenen akıntı hızı ve yönü için yönsel dağılım frekans tablosu (test-7)

Hız (cm/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Sakin	Toplam
0 < u ≤ 1	14	8	9	9	20	37	129	7	6	3	1	6	10	27	239	75		600
1 < u ≤ 2						1	64	7					1	32	658			763
2 < u ≤ 3							47	2						18	618			685
3 < u ≤ 4							37	3						2	168			210
4 < u ≤ 5							27	1						6	80			114
5 < u ≤ 6							37								34			71
6 < u ≤ 7							46								11			57
7 < u ≤ 8							40								11			51
8 < u ≤ 9							20								11			31
9 < u ≤ 10															5			5
10 < u ≤ 11															6			6
11 < u ≤ 12																		0

Toplam	14	8	9	9	20	38	447	20	6	3	1	6	11	85	1,841	75	0	2,593
Yüzde	%0.54	%0.31	%0.35	%0.35	%0.77	%1.47	%17.24	%0.77	%0.23	%0.12	%0.04	%0.23	%0.42	%3.28	%71.00	%2.89	%0.00	%100.00

EK 3: Mike 21 Hidrodinamik modül temel denklemleri ve çözüm algoritması

1. MIKE 21 HD (Hidrodinamik) MODÜL TEMEL DENKLEMLERİ

Mike 21 HD modül, koylarda, körfezlerde ve sahil bölgelerinde su seviyesi ve akış koşullarını benzeştirmek için kullanılan sayısal bir modelleme sistemidir. Hidrodinamik modül ile tek tabakalı, kararsız ve iki boyutlu akımları benzeştirmek mümkündür.

Aşağıda belirtilen ve düşeyde integre edilen kütle ve momentumun korunumu denklemleri, su seviyesi ve akış değişimlerini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{l}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q \\ & - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{l}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega p \\ & - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

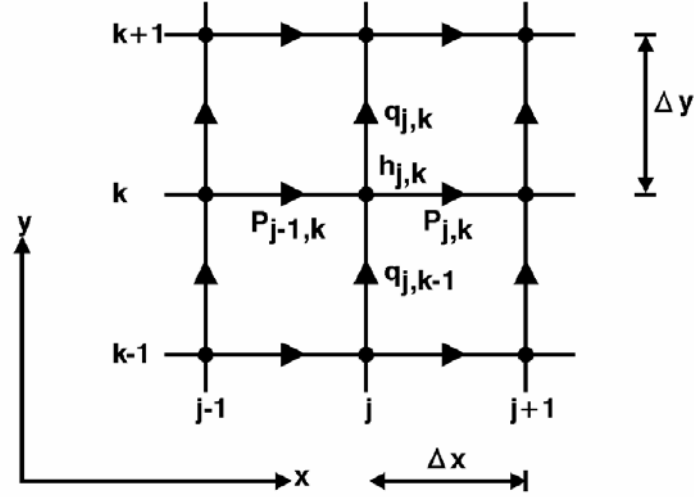
Burada denklemlerde kullanılan semboller:

$h(x,y,t)$	- su derinliği ($h=\zeta-d$, m)
$d(x,y,t)$	- zamanla değişen su derinliği (m)
$\zeta(x,y,t)$	- su yüzü kotu (m)
$p,q(x,y,t)$	- x ve y yönlerindeki akılar ($m^3/s/m$)= (u_h,v_h) ; $(u,v)=x$ ve y yönlerindeki kesitsel ortalama hızlar
$C(x,y)$	- Chezy katsayısı ($m^{1/2}/s$)
g	- yerçekimi ivmesi (m/s^2)
$f(V)$	- rüzgar sürtünme faktörü
$V,V_x,V_y(x,y,t)$	- x ve y yönlerindeki rüzgar hızı ve bileşenleri (m/s)
$\Omega(x,y)$	- Coriolis parametresi, enlem bağımlı (s^{-1})
$p_a(x,y,t)$	- atmosfer basıncı ($kg/m/s^2$)
ρ_w	- su yoğunluğu (kg/m^3)
x,y	- uzamsal koordinatlar (m)
t	- zaman (s)
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	- efektif sürtünme kuvveti gerilme bileşenleri

2. ÇÖZÜM ALGORİTMASI

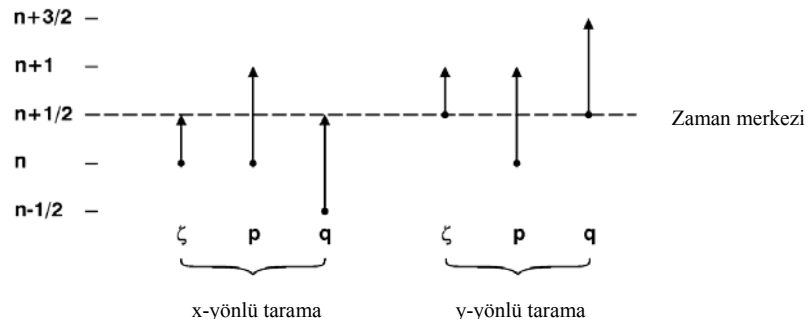
Hidrodinamik modül, konum ve zamana bağlı kütle ve momentumun korunumu denklemlerini integre etmek için Alternatif Doğrultu Metodu (Alternating Direction Implicit, ADI) olarak bilinen tekniği kullanır.

Her bir yön ve her bir hesap ağı boyunca meydana gelen denklem matrisleri çift tarama (Double Sweep) yöntemi ile çözülür.



Şekil 2.1 Hesap ağı

Yukarıda gösterildiği üzere farklı terimler x,y-düzleminde şaşırtmalı bir ağı sistemi üzerinde ifade edilmektedir. Hidrodinamik modül ile, su seviyesi ve x ve y doğrultularındaki akı miktarlarının zaman eksenli hesap akışı aşağıdaki şema ile kısaca özetlenebilir.



Şekil 2.2 Zamansal ortalama

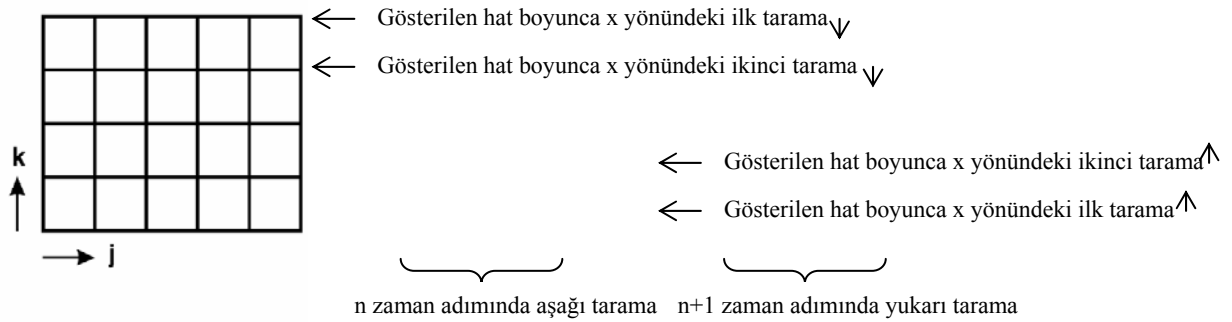
Denklemler x ve y doğrultularında değişen bir boyutlu taramalar şeklinde çözülür. “x” doğrultulu tarama ile süreklilik ve x yönündeki momentum denklemleri çözülür, su seviyesi n zaman seviyesinden n+1/2 zaman seviyesine, p akı miktarı n zaman seviyesinden n+1/2 zaman seviyesine taşınır. q akı miktarını içeren terimler için, önceden bilinen n-1/2 ve

$n+1/2$ zaman seviyelerindeki değerler kullanılır.

“y” doğrultulu tarama ile süreklilik ve y yönlü momentum denklemleri çözülür, su seviyesi $n+1/2$ zaman seviyesinden $n+1$ zaman seviyesine, q akısı $n+1/2$ zaman seviyesinden $n+3/2$ zaman seviyesine taşınır. p akısını içeren terimler için, henüz x doğrultusunda yapılan taramada hesaplanmış n ve $n+1$ zaman seviyelerindeki değerler kullanılır.

İki doğrultuda yapılan tarama sonuçlarının birbirine eklenmesi $n+1/2$ zaman seviyesinde “ideal” zamansal ortalama değerini vermektedir. Momentum denklemindeki kısmi türevlerin kusursuz zamansal ortalamalarının alınması mümkün olmayacağı için ideal kelimesi tırnak işaretleri içerisine konulmuştur. İterasyona baş vurmaksızın yapılacak en iyi yaklaşım ise “yan besleme” tekniği olarak bilinmektedir..

Bir zaman adımında x yönlü tarama ile elde edilen çözümler azalan y doğrultulu sırada elde edilir. Bu işlem “Aşağı” tarama olarak anılmaktadır. Bir sonraki zaman adımında elde edilen çözümler ise artan y doğrultulu sırada elde edilir. Bu da “Yukarı” tarama olarak anılmaktadır.



Şekil 2.3 Yan-besleme

“Aşağı” tarama esnasında kısmi türev $\partial p / \partial y$, üst kısımda $p^{n+1}_{j,k+1}$ şeklinde, alt kısımda ise $p^n_{j,k-1}$ şeklinde ifade edilebilir; “Yukarı” tarama esnasında ise tam tersi bir durum söz konusudur. Bu şekilde $n+1/2$ zaman seviyesinde kısmi türev $\partial p / \partial y$ için yaklaşık bir zamansal ortalama kabaca sağlanabilir ancak oluşabilecek bazı salınımların varlığı göz ardı edilemez.

Nihayetinde, diferansiyeller üzerinde hakim katsayıların kusursuz zamansal ortalamalarına ulaşmanın mümkün olmayacağını söylemekte yarar vardır.

Ardışık ağ noktaları için bir boyutlu tarama ile ifade edilen kütle ve momentum denklemleri, bizleri üç diyagonal bir matrise götürmektedir.

$$MV^{n+1} = W^n \quad (2.1)$$

$$A_j \cdot p_{j-1}^{n+1} + B_j \cdot \zeta_j^{n+1/2} + C_j \cdot p_j^{n+1} = D_j \big|_k \quad (2.2)$$

$$A_j^* \cdot \zeta_j^{n+1/2} + B_j^* \cdot p_j^{n+1} + C_j^* \cdot \zeta_{j+1}^{n+1/2} = D_j^* \big|_k$$

Burada A, B, C, D ve A*, B*, C*, D* katsayılarının tümü bilinmeyen nicelikler şeklinde ifade edilir. Ayrıca burada, p' nin q ve j' nin de k gibi sayılabileceğini söylemekte yarar vardır.

O zaman (2.1) denklemi çok iyi bilinen Çift Tarama algoritması ile çözümlenebilmektedir. Algoritma geliştirildiğinde şöyle bir ilişkinin varlığından söz edilebilir.

$$p_j^{n+1} = E_j^* \cdot \zeta_j^{n+1/2} + F_j^* \quad (2.3)$$

$$\zeta_j^{n+1/2} = E_j \cdot p_j^{n+1} + F_{j+1}$$

Bu eşitlikler (2.2) denklem çiftinde yerine koyulduğunda E, F, E* ve F* katsayıları için tekerrür ilişkisine ulaşıldığı görülmektedir..

E_j, F_j veya E*_{j+1}, F*_{j+1} değer çiftleri bir kez bilindiğinde, tüm E, F ve E*, F* katsayıları, azalan j için hesaplanabilmektedir. (2.2) denklem çiftlerinden herhangi biri içerisine sağ-taraf sınır koşulunu sağlayarak, E, F taraması için tekerrür hesabı başlatılmaktadır. (2.3) denklem çiftinde sol-taraf sınır koşulunu sağlayarak ise, içerisinde N ve q' nun hesaplandığı algoritmik tarama başlatılmaktadır.

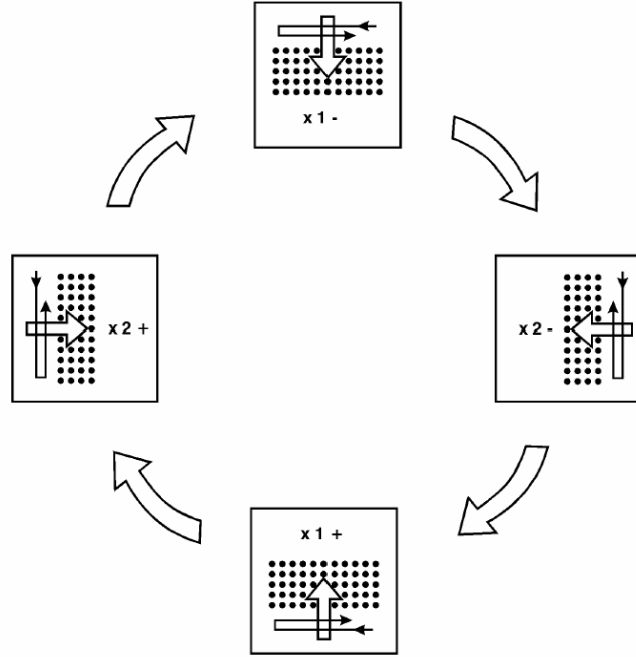
$$E_j^* = \frac{-A_j^*}{B_j^* + C_j^* \cdot E_j}$$

$$F_j^* = \frac{D_j^* - C_j^* \cdot F_j}{B_j^* + C_j^* \cdot E_j}$$

$$E_{j-1} = \frac{-A_j}{B_j + C_j \cdot E_j^*}$$

$$F_{j-1} = \frac{D_j - C_j \cdot F_j^*}{B_j + C_j \cdot E_j^*} \quad (2.4)$$

Daha önceden ele alındığı gibi, taramalar, artan veya azalan bir koordinat sisteminde yürütülebilir. Bu durum Şekil (2.4) ile gösterilen döngüde düzenlenmiştir.



Şekil 2.4 Tarama sırasına göre hesap döngüsü

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 20.04.1979

Doğum yeri İstanbul

Lise 1993-1997 Yunus Emre Süper Lisesi

Lisans 1997-2001 Karadeniz Teknik Üniversitesi Müh. Mim. Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2003-Devam ediyor Artı Proje Ltd Şti.