



**GEL-GİT ETKİLİ HALIÇLERDE HİDRODİNAMİK VE SU KALİTESİ
MODELLEMESİ: RİBBLE HALİCİ ÖRNEĞİ**

Memduh Burak ARDIÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Memduh Burak ARDIÇ

12/08/2021

GEL-GİT ETKİLİ HALİÇLERDE HİDRODİNAMİK VE SU KALİTESİ MODELLEMESİ: RIBBLE HALİCİ ÖRNEĞİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Memduh Burak ARDIÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Günümüzde küresel iklim değişikliği ve artan kirletici baskısı nedeniyle su kütlelerinin ekolojik açıdan sürdürülebilirliği önemli bir konu haline gelmiştir. İnsan kaynaklı organik ve inorganik birçok farklı kirletici su kütlelerinde doğal hayata ağır hasarlar verebilmektedir. Bu nedenle kirletici maddelerin hidrodinamik etkilerle taşınımının matematiksel ve fiziksel olarak ifade edilmesi üzerine uzun yıllardır araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle 1950’li yılların başında gelişmeye başlayan yazılım teknolojileriyle sayısal çözüm yöntemlerine dayanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çevresel problemler üzerine uygulamaları giderek artmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği sağladığı esneklik sayesinde analitik ve ampirik çözümlerin yerini almaktadır. Tez çalışması kapsamında gelgit hareketinin baskın olduğu Ribble Halinde bir patojen indikatörü olan fekal koliform bakterisinin yayılım hareketi bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğini temel olan Delft3D-FLOW ve D-Water Quality programları kullanılarak analiz edilmiştir. Gelgit etkisiyle su seviyelerinin, hız büyüklüklerinin ve fekal koliform konsantrasyonunun haliç içinde zamana ve konuma göre değişimi hesaplanmıştır. Ayrıca kalibrasyon işleminde farklı çözüm ağı tiplerinin, türbülans modellerinin ve sayısal çözüm yöntemlerinin performansı tartışılmıştır. Tez çalışmasının son kısmında ise sahada yapılan ölçümlerden ve uydu görüntülerinden elde edilmiş farklı batimetritlerin model sonuçları üzerinde etkileri ve işlevsellikleri değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışma kullanılan programların sağladığı özelliklerle farklı hidrodinamik mekanizmaların su kütlelerinde birçok kirleticinin yayılım hareketi üzerine modelleme yapılabileceğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 91120

Anahtar Kelimeler : Hidrodinamik modelleme, Su kalitesi modellemesi, Delft3D, HAD

Sayfa Adedi : 95

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Önder KOÇYİĞİT

İkinci Danışman : Dr. Erhan DEMİR

HYDRODYNAMIC AND WATER QUALITY MODELING IN THE TIDAL
ESTUARIES: THE RIBBLE ESTUARY CASE

(M. Sc. Thesis)

Memduh Burak ARDIÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

At the present time, ecological sustainability of water bodies has become a significant issue due to global climate change and increasing pollutant pressure. Anthropogenically different organic and inorganic pollutants can cause severe damages to natural life in water bodies. For this reason, over the course of many years, a lot of research have been carried out on the mathematical and physical expression of the transport of pollutants by hydrodynamic effects. The applications of Computational Fluid Dynamics, which is based on numerical solution methods with software technologies and started to be improved especially in the early 1950s, on environmental problems are increasing. Due to the flexibility it provides, Computational Fluid Dynamics supplants analytical and empirical solutions. Within the scope of the thesis, the propagation movement of fecal coliform bacteria, which is a pathogen indicator in the Ribble Estuary, where the tidal movement is dominant, was analyzed by using the Delft3D-FLOW and D-Water Quality programs, which are based on a Computational Fluid Dynamics. Spatial and temporal variations of water levels under tidal effect, velocity magnitudes and concentration of fecal coliform in the estuary were calculated. In addition, the performance of different mesh types, turbulence models and numerical solution methods in the calibration process are discussed. In the last part of the thesis, the effects and functionality of the different bathymetries obtained from the real measurements made in the field and satellite images on the results were evaluated. This study showed that thanks to the features provided by the programs used, different hydrodynamic mechanisms can be modeled for the propagation movement of many pollutants in water bodies.

Science Code : 91120

Key Words : Hydrodynamical modelling, Water quality modelling, Delft3D, CFD

Page Number : 95

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Önder KOÇYİĞİT

Co-Supervisor : Dr. Erhan DEMİR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının temelini oluşturan, hesaplamalı bilimlere ilgi duymamı sağlayan ve tecrübeleriyle bu alana olan ilgimi ve merakımı yönlendiren tez danışmanın hocam Dr. Öğr. Üyesi Önder KOÇYİĞİT'e, tez çalışması boyunca değerli yönlendirmelerini ve yorumlarını esirgemeyen ikinci tez danışmanım sayın Dr. Erhan DEMİR'e teşekkürü borç bilirim. Hayatıma girdiği andan itibaren bana olan sonsuz sevgisini hep yanımda hissettiğim, benim için yeri çok özel olan sevgili Senanur BACAKSIZ'a, hayatım boyunca her türlü fedakarlıktan kaçınmayan sevgilerini ve desteklerini hep yanımda hissettiğim annem Emel ARDIÇ'a ve babam Recep ARDIÇ'a, sevgisi ve yaptığım çalışmalara olan ilgisiyle beni hep yeni çalışmalar yapmaya teşvik eden ileride iyi bir satranç oyuncusu olacağına emin olduğum kardeşim Emir Çağrı ARDIÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Hidrodinamik Denklemler	5
2.3. Türbülans Modelleri	9
2.3.1. RANS denklemleri için türbülans modelleri.....	12
2.4. Adveksiyon-Difüzyon Denklemi	13
2.4.1. Difüzyon.....	13
2.4.2. Advektif difüzyon	15
2.5. Su Kalitesi Modellemesi Yaklaşımları.....	16
2.6. Sayısal Çözüm Yöntemleri	17
2.6.1. Sonlu farklar yaklaşımı	19
2.6.2. ADI yöntemi.....	20
2.7. Çözüm Ağı.....	22

	Sayfa
3. MODELLEMEDE KULLANILAN PROGRAM.....	23
3.1. Giriş.....	23
3.2. Delft3D-Flow.....	24
3.2.1. Kullandığı hidrodinamik denklemler.....	24
3.2.2. Sınır şartları	29
3.2.3. Türbülans modelleri.....	30
3.2.4. Taşınım denklemi.....	35
3.2.5. Sayısal çözüm yöntemleri.....	35
3.3. D-Water Quality	38
3.3.1. Adveksiyon-difüzyon-reaksiyon denklemi	39
3.3.2. Su Kalitesi modellemesi yaklaşımı.....	39
3.3.3. Çözüm yaklaşımı.....	40
4. UYGULAMA	41
4.1. Ribble Halici.....	41
4.2. Hidrodinamik Model Kurulumu.....	42
4.2.1. Model alanın sınırlarını belirlenmesi.....	44
4.2.2. Çözüm ağının oluşturulması.....	44
4.2.3. Batimetri verilerin oluşturulması	46
4.2.4. Başlangıç koşullarının ve fiziksel parametrelerin tanımlanması.....	48
4.2.5. Sınır şartlarının tanımlanması	51
4.3. Su Kalitesi Modeli Kurulumu.....	52
4.3.1. Başlangıç koşullarının ve su kalitesi parametrelerin tanımlanması.....	52
4.3.2. Sınır şartları	54
5. MODEL SONUÇLARI	57

	Sayfa
5.1. Hidrodinamik Model	57
5.1.1. Kalibrasyon ve validasyon	59
5.1.2. Hidrodinamik model sonuçları.....	62
5.2. Su Kalitesi Modeli.....	66
5.2.1. Su kalitesi modeli kalibrasyonu ve sonuçları.....	67
5.3. Uydu Verisi Kullanılarak Hazırlanan Batimetri ile Kurulan Modeller.....	75
5.3.1. Modellerin kurulumu	75
5.3.2. Farklı batimetrikler ile kurulan model çıktıları karşılaştırılması	76
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kısmi diferansiyel denklem sınıfları.....	17
Çizelge 2.2. Sonlu farklar açılımları	20
Çizelge 4.1. Fiziksel parametreler.....	48
Çizelge 4.2. Sayısal parametreler.....	49
Çizelge 4.3. Deşarj debileri.....	50
Çizelge 4.4. Su kalitesi parametreleri	53
Çizelge 4.5. Deşarj noktalarından fekal koliform salınımları.....	53
Çizelge 5.1. Çözüm ağı tipine göre CPU süreleri.....	57
Çizelge 5.2. Nikuradse pürüzlülük uzunluğuna göre model çıktılarının istatistiksel analizi.....	60
Çizelge 5.3. Türbülans modellerine ve sayısal çözüm yöntemlerine göre model çıktılarının istatistiksel analizi	61
Çizelge 5.4. Farklı model çıktılarının istatistiksel analizi	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Diferansiyel hacim.....	6
Şekil 2.2. Diferansiyel hacime etki eden kuvvetler	7
Şekil 2.3. Türbülanslı akımlarda hız bileşenlerinde dalgalanmalar.....	10
Şekil 2.4. Moleküler difüzyon	14
Şekil 2.5. ADI yöntemi	21
Şekil 2.6. Yapısal ve yapısal olmayan çözüm ağı.....	22
Şekil 3.1. Delft3D paketinin sistemsel yapısı	23
Şekil 3.2. Kartezyen koordinat sistemi ile σ koordinat sistemi arasındaki farklar	25
Şekil 3.3. σ koordinat sisteminde su seviyesi (ζ), derinlik (d) ve toplam derinlik (H)...	26
Şekil 3.4. Eğrisel koordinat sisteminin çözüm ağına dönüşümü	35
Şekil 3.5. Bir su kütesinin yapılandırılmış çözüm ağı ile kutulara ayrılması	39
Şekil 4.1. Modelleme aşamaları.....	43
Şekil 4.2. Yapılandırılmış çözüm ağları	45
Şekil 4.3. Çoklu çözüm ağı.....	46
Şekil 4.4. Dikey çözüm ağı.....	46
Şekil 4.5. Ribble halici model alanı derinlik verisi.....	48
Şekil 4.6. İrlanda Denizi (batı) sınır şartında ölçülmüş su seviyeleri	52
Şekil 4.7. Ribble Nehri (doğu) sınır şartında hız değerleri	52
Şekil 4.8. Ribble Nehri (doğu) sınır şartında fekal koliform konsantrasyon değerleri...	55
Şekil 5.1. Çözüm ağı tipine göre CPU sürelerinin karşılaştırılması	58
Şekil 5.2. Çözüm ağlarına göre haliç girişinde su seviye sonuçları	58
Şekil 5.3. Nikuradse pürüzlülük uzunluğuna göre modellerin su seviyesi sonuçları	61

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. Kalibre modelin 11 milepots noktasında su seviyesi sonuçları	62
Şekil 5.5. Kalibre modelin 7 milepots noktasında su seviyesi sonuçları	62
Şekil 5.6. Ribble Halici'nde 18.05.1999 tarihi 06.30 saatinde model su seviyesi ve hız çıktıları.....	63
Şekil 5.7. Ribble Halici'nde 18.05.1999 tarihi 11.00 saatinde model su seviyesi ve hız çıktıları.....	64
Şekil 5.8. Ribble Halici'nde 18.05.1999 tarihi 14.30 saatinde model su seviyesi ve hız çıktıları.....	65
Şekil 5.9. Haliç girişinde su seviyesi değişimi	66
Şekil 5.10. 11 Milepots gözlem noktasında fekal koliform konsantrasyon karşılaştırması.....	68
Şekil 5.11. 7 Milepots gözlem noktasında fekal koliform konsantrasyonu karşılaştırması.....	68
Şekil 5.12. Ribble Halici girişinde 19.05.1999 22.50 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	69
Şekil 5.13. Ribble Halici'nde 18.05.1999 18.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	70
Şekil 5.14. Ribble Halici'nde 18.05.1999 19.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	70
Şekil 5.15. Ribble Halici'nde 18.05.1999 20.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	71
Şekil 5.16. Ribble Halici'nde 18.05.1999 21.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	71
Şekil 5.17. Ribble Halici'nde 18.05.1999 22.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	72
Şekil 5.18. Ribble Halici'nde 18.05.1999 23.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	72
Şekil 5.19. Ribble Halici'nde 19.05.1999 00.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	73
Şekil 5.20. Ribble Halici'nde 19.05.1999 01.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.21. Ribble Halici girişinde 18.05.1999 18.00 ile 18.05.1999 21.00 arasında model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	74
Şekil 5.22. Ribble Halici girişinde 18.05.1999 22.00 ile 19.05.1999 01.00 arasında model fekal koliform konsantrasyon çıktıları	75
Şekil 5.23. 7 Milepots gözlem noktasında modellerin su seviyesi çıktılarının karşılaştırılması	77
Şekil 5.24. 11 Milepots gözlem noktasında modellerin su seviyesi çıktılarının karşılaştırılması	77
Şekil 5.25. Ribble Halici'nde 18.05.1999 06.30'da farklı modellerin su seviyesi ve hız çıktıları karşılaştırılması	79
Şekil 5.26. Ribble Halici'nde 18.05.1999 11.00'da farklı modellerin su seviyesi ve hız çıktıları karşılaştırılması	80
Şekil 5.27. Ribble Halici'nde 18.05.1999 14.30'da farklı modellerin su seviyesi ve hız çıktıları karşılaştırılması	81
Şekil 5.28. Haliç girişinde modellerin su seviyesi çıktılarının karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.29. 7 milepots gözlem noktasında modellerin fekal koliform konsantrasyonu çıktılarının karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.30. 11 milepots gözlem noktasında modellerin fekal koliform konsantrasyonu çıktılarının karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.31. Haliç girişinde 18.05.1999 18.00 ve 19.00 modellerin fekal koliform konsantrasyon çıktıları karşılaştırılması.....	84
Şekil 5.32. Haliç girişinde 18.05.1999 22.00 ve 23.00 modellerin fekal koliform konsantrasyon çıktıları karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.33. Haliç girişinde 19.05.1999 00.00 ve 01.00 modellerin fekal koliform konsantrasyon çıktıları karşılaştırılması.....	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Ribble Halici	42



HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 4.1. Ribble Halici haritası	41
Harita 4.2. Ribble Halici model alanı batimetrisi	47
Harita 4.3. Ribble Halici deşarj noktaları	49
Harita 5.1. Ribble Halici gözlem noktaları	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$\vec{u}_*$	Sürüklenme hızı
$\vec{u}_b$	İlk katmandaki yatay hız
$G_{\eta\eta}$	η yönünde koordinat dönüşüm katsayısı
$G_{\xi\xi}$	ξ yönünde koordinat dönüşüm katsayısı
k_s	Nikuradse pürüzlülük uzunluğu
σ_{ii}	Normal gerilmeleri
τ_{ij}	Kayma gerilmelerini
C	Chezy katsayısı
D	Difüzyon katsayısı
H	Toplam derinlik
Re	Reynolds sayısı
d	Referans katmanın derinliğini
fi	Coriolis etkisi
L	Karışım uzunluğu
k	Türbülans kinetik enerjisi
u	X yönünde hız bileşeni
v	Y yönünde hız bileşeni
w	Z yönünde hız bileşeni
ε	Türbülans kinetik enerjisi yayılımı
δ_{ij}	Kronecker deltası
ζ	Referans katmanına göre su seviyesi
ω	Dünyanın dönüş hızı
η	Eğrisel koordinat sisteminde y yönü
κ	Von Kármán katsayısı
μ	Dinamik viskozite
ν	Kinematik viskozite

Simgeler**Açıklamalar**

ξ	Eğrisel koordinat sisteminde x yönü
ρ	Yoğunluk
σ	Prandtl-Schmidt sayısı
φ	Coğrafik enlem açısı
ω	σ koordinat sisteminde katmanlardaki dikey hız

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ADI	The alternating-direction implicit
CFD	Computational fluid dynamics
CPU	Central process unit
DHI	Danish Hydraulic Institute
DNS	Direct numerical solutions
GEBCO	The General Bathymetry Chart of the Oceans
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HLES	Horizontal large eddy simulation
IHO	International Hydrographic Organization
LES	Large eddy simulations
RANS	Reynolds ortalamalı Navier-Stokes
SGS	Sub grid scale
UNESCO	UN Educational Scientific and Cultural Organization

1. GİRİŞ

İnsanlar ve yüzey suları arasındaki ilişki medeniyetin başlangıcına kadar dayanmaktadır. İnsanlar ilk tarım denemelerinden itibaren su kütlelerini kontrol etmeye çalışmış, yaşam tarzları yüzey sularına bağlı gelişmiştir. Günümüzde de bağ devam etmekte olup birçok sanayi sektörü yüzey sularından faydalanmaktadır. Ayrıca yüzey sularının her biri benzersiz bir ekolojiye sahip olup birçok farklı canlı türüne ev sahipliği yapmaktadır. Gelişen sanayi, artan nüfus ve küresel boyutta bir problem olan iklim değişikliği yüzey sularının üzerindeki baskıyı arttırmaktadır. Hem insanların yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmeleri hem de bu alanlardaki doğal yaşamın korunabilmesi için yüzey sularında sürdürülebilirliğinin sağlanması gerekmektedir. Sürdürülebilirlik için de yüzey sularının hidrodinamik açıdan daha iyi anlaşılması gerekmektedir.

Bir sığ su türü olan haliçler, tatlı ve tuzlu suyun birleştiği, nehir ağzının deniz veya okyanus ile bulunduğu farklı hidrodinamik kuvvetlerin etkilediği kıyı sularıdır. (Ji, 2008: 567; Hardisty, 2007: 3). Haliçlerde gelgit düzlükleri, tuzlu bataklık bitkileri ve gelgit kumulları gibi birçok farklı formasyon görülmektedir. Bu durum bu bölgelerdeki biyo-çeşitliliği arttırmaktadır. Baskın hareketin gelgit mekanizması olması sebebiyle hidrodinamik açıdan bir yapıya sahip karmaşık olan haliçler bu özelliği ile diğer yüzey sularından ayrılmaktadır. Bu durum kirlilik yayılımı ve taşınım süreçlerini de etkilemektedir.

Sığ sularda hız, basınç ve konsantrasyon gibi değişkenlerin hesaplanmasında analitik, istatistiksel ve sayısal birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bilgisayarların gelişen işlem kapasitesi ile birlikte çevresel hidrolik alanında, Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamaları da artmaktadır. Sağladığı esneklik ve kullanışlılık ile diğer yöntemlerden ayrılan HAD sadece çevresel hidrolik alanında değil birçok mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Dünya genelinde DHI tarafından sunulan MIKE21/3 gibi hazır paket programlar, hem ticari hem de akademik amaçlarla çevresel HAD uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (DHI, 2017: 11). Türkiye’de ise kıyı sularında ve iç sularda hidrodinamik, su kalitesi ve kirlilik modellemesi yapan HYDROTAM (Balas ve Özhan, 2000; Balas, Genç ve İnan, 2012) ise sağladığı esneklik ve kullanışlı yapısı ile öne çıkmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, kuzeybatı İngiltere’de yer alan Ribble Halici’nde Deltares tarafından geliştiren Delft3D paketinde yer alan Delft3D-FLOW ve D-Water Quality programları ile hidrodinamik modelleme ve su kalitesi modelleme çalışmaları yapılmıştır. Farklı çözüm ağlarının, sayısal çözüm yöntemlerinin ve türbülans modellerinin performansları test edilmiştir. Bu doğrultuda hem Türkiye’de hem dünyada yaşanabilecek kirliliğe bağlı çevresel problemlerde yol gösterecek bir çalışma yapılmak istenmiştir.

Tez giriş kısmı hariç beş ana başlıktan oluşmaktadır. Literatür çalışmaları kısmında, haliçlerde hidrodinamik ve çevresel mekanizmalar ve sayısal çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. Modellemede kullanılan programlar kısmında ise hidrodinamik modelleme için Delft3D-FLOW ve su kalitesi modellemesi için D-Water Quality programların özelliklerinden, prensiplerinden ve modelleme yaklaşımlarından bahsedilmiştir. Uygulama kısmında ise Ribble Halici’ndeki fiziksel şartların model üzerinde işleme süreçleri anlatılmıştır. Sonuçlar kısmında, Delft3D-FLOW ve D-Water Quality programlarının sonuçları ile ölçülmüş veriler ve önceki çalışmalardaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı veri setlerinin, farklı çözüm ağları, türbülans modellerinin ve sayısal çözüm yöntemlerinin performansları da test edilip ölçülmüş veriler ile kıyaslanmıştır. Sonuç ve öneri kısmında ise elde edilen sonuçlar değerlendirip ve tez çalışmalarında karşılaşılan sorunlar ve eksiklikler ortaya konulmuş ve çözüm önerileri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

2.1. Giriş

Günümüzde havacılık, araç aerodinamiği, nükleer tasarım gibi alanlarda sıklıkça kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, akışkan hareketi problemlerinin çözümünde alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Akışkanlar dinamiğinde kullanılan, akışkan hareketinin temel bileşenlerini ifade eden eşitlikler üzerinde 19. yüzyıldan beri çalışmaktadır ve belirli kabuller ve sınır şartları tanımlamalarıyla analitik çözümleri de geliştirilmiştir. 1950'lerde bir fiziksel akışın hesaplamalı olarak çözülebilmesi için karmaşık geometri ve sınır koşulları problemlerine yönelik sayısal çözüm yöntemlerinin ve bu yöntemlerdeki işlemleri yapabilecek düzeyde işlem kapasitesine sahip bilgisayarlarının geliştirilmesiyle, hesaplı akışkanlar dinamiği yeni ortaya çıkan bilimsel hesaplama alanından faydalanmaya başlamıştır. Bu süreçte hesaplamalı akışkanlar dinamiği düşük maliyet ve esneklik avantajları sayesinde fiziksel modellerin yerine kullanılmaya başlanmıştır (Bates, Lane ve Ferguson, 2005: 1).

Çevresel hidrolik alanında kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları, aerodinamik ve havacılık alanları gibi akışkanlar mekaniği ile bağlantılı alanlardaki diğer uygulamalardan daha farklı özelliklere sahiptir ve bu nedenle uygulamalarda modellenen alanın ve çevresel özelliklerin tanımlanması, sayısallaştırılması ve sadeleştirilmesi (*reduction*) gibi daha farklı problemlerle karşılaşmaktadır. Araştırmacılar, çevresel hidrolik alanında hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında, sayısal yöntemlerin ve çözüm ağı oluşturulması gibi temel sorunların yanı sıra; karmaşık doğal arazinin, sediment yüklü akımın ve su kalitesi parametrelerinin modellerde tanımlanması, boyut ve çözünürlüğün model üzerindeki etkileri ve çevresel özellikler üzerinde yapılan basitleştirilmeler gibi sorunlar üzerinde de yoğunlaşmıştır (Bates ve diğerleri., 2005: 3).

Son yıllarda yukarıda bahsedilen problemler için geliştirilen teknikler ve bilgisayarların artan işlem kapasitesi ile çevresel hidrolik alanında hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları alanı büyük bir gelişme kaydetmiştir. Bu gelişmede dijital veri setlerinin payı da büyüktür (Bates ve diğerleri., 2005: 3). Tez çalışması kapsamında da batimetri verisinin oluşturulmasında dijital veri setlerinde faydalanılmıştır.

Çevresel hidrolik alanında;

- Akarsular,
- Haliç ve kıyı sularında,
- Göl, baraj, rezervuarlar gibi iç kütlelerinde

doğal mekanizmalardan ve insanlar eliyle kaynaklan hareketler sonucu oluşan hız ve kayma gerilmeleri gibi akış özelliklerinin, kirletici konsantrasyonları gibi su kalitesi parametrelerin ve sediment gibi morfolojik özelliklerinin zamana ve konuma göre değişiminin hesaplanmasında hesaplamalı akışkanlar mekaniği yöntemleri sıkça kullanılmaktadır (Bates, ve diğerleri, 2005: 3).

Bu su kütlelerinde kirletici kaynaklar sebebiyle çevresel açıdan oldukça büyük problemlerle karşılaşmaktadır. Ayrıca günümüzde küresel çapta iklim değişikliğinden kaynaklanan kuraklığın bu su kütlelerinin çevresel açıdan sürdürülebilirliğine büyük bir tehdit oluşturmaktadır.

Akarsularda hidrolojik ve morfolojik etkilerin yanı sıra kirleticilerin taşınımında da HAD kullanılarak modellenmesi üzerine literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır (Booker, 2003; Nadaoka ve Yagi, 1998; Nezu, Nakagawa ve Jirka., 1994). Akarsularda HAD kullanımı, özellikle tarımsal sulamalar için önemli bir kaynak olan ve insan hayatına doğrudan etkisi olan akarsularında hidrodinamik ve taşınım mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Haliçler ve kıyı suları çevresel açıdan birçok farklı canlıya ev sahipliği yapan özel alanlar olmalarının yanı sıra bu alanlar balıkçılık faaliyetlerinde ve rekreasyon alanı olarak kullanılmalarıyla doğrudan insan ile bağlantısı olan alanlardır. Bu sebeple haliçler ve kıyı suları hem çevresel hem de ekonomik açıdan oldukça önemli bir noktadır. Bu alanlarda yapılan HAD uygulamalarında hidrodinamik açıdan dalga ve gelgit modellemeleri, çevresel açıdan yapılan deşarjlar yüzünden su kalitesi modellemeleri ve morfolojik yapıları yüzünden ise sediment modellemeleri üzerinde oldukça fazla bir şekilde durulmuştur (Falconer ve Lin, 1997; Kashefipour, Lin, Harris ve Falconer, 2002; Kurup, Hamilton ve Patterson, 1998; Lin ve Falconer, 1996; Yuan, Lin ve Falconer, 2007).

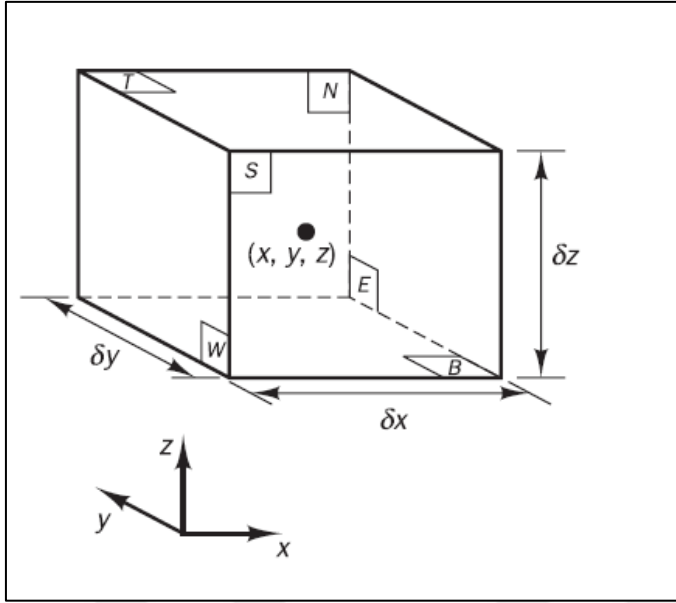
Göl, baraj ve rezervuarlar gibi iç su kütleleri ise akarsular gibi insanların doğrudan ekonomik ve yaşamsal faaliyetlerde kullandığı tatlı suyun temin edilmesinde kullanılmaktadır.

Özellikle içme ve kullanma suyu karşılanmasında kullanılan su kütlelerinde çevresel problemler insanları doğrudan etkilemektedir. Bunun yanında iç su kütleleri başta kuş türleri olmak üzere birçok canlıya hayat sağlamaktadır ve sürdürülebilirliği pek çok canlı için önem taşımaktadır. Diğer su kütlelerinde olduğu gibi iç su kütlelerinde de hem çevresel hem morfolojik hem de hidrodinamik çalışmalarda HAD uygulamaları çokça kullanılmaktadır (Jin, Hamrick ve Tisdale, 2000; Sheng, 1990; Soullignac ve diğerleri, 2017; Wahl ve Peeters, 2014).

Tez çalışmasının bu kapsamında haliçlerde, hız ve basınç ifadelerin zamana ve konuma göre değişiminde kullanılan hidrodinamik denklemlerin bileşenleriyle birlikte tanımlanması, türbülans kavramını açıklamakta kullanılan türbülans modelleri ve bu modellerinin temel yaklaşımları, advectif- difüzyon denklemi, su kalitesi bileşenlerinde azalma, çoğalma gibi değişimlerinin hesaplanması kullanılan yöntemler, ve bu denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerin temel prensipleri ve çözüm stratejilerinin açıklanması üzerinde durulmuştur.

2.2. Hidrodinamik Denklemler

Çevresel hidrolikte, haliçlerde akım, su kalitesi ve sediment taşınımı tahmini için kullanılan tüm modeller ilk olarak hidrodinamik denklemler üzerinde çözüm yapmaktadır (Falconer, Lin ve Kashefipour, 2005: 306). Bu nedenle, bu kısımda ilk olarak, hız ifadelerin hesaplanmasında kullanılan, kütlenin korunumu ve sisteme etki eden kuvvetlerle momentum değişimi arasında ilişkiyi tanımlayan Navier-Stokes denklemleri açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.1. Diferansiyel hacim (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 10)

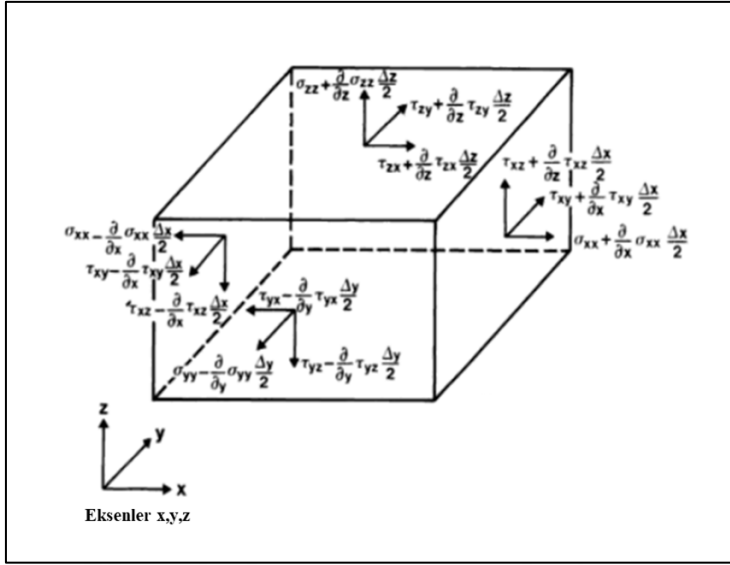
Kütlenin korunumu denklemi, δx , δy ve δz boyutlarında küçük bir diferansiyel hacim içerisinde kütlenin değişim oranının, diferansiyel hacme giren ve çıkan net kütle oranına eşit olması şekline tanımlanabilir (Şekil 2.1). Kartezyen koordinat sisteminde kütlenin korunumu denklemi şu şekilde verilmektedir (Falconer ve Lin, 1996);

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Eğer sıkışmaz akım ise denklem aşağıdaki şekli almaktadır.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Momentumun korunumu ise diferansiyel hacim içerisinde momentum değişiminin, diferansiyel hacme etki eden toplam kuvvete eşit olması durumu şeklinde tanımlanabilir. Moment korunumu, Navier Stokes denklemleri ifade edilmektedir. Şekil 2.2’de diferansiyel hacme etki eden kuvvetler gösterilmektedir. Her 3 doğrultularında kuvvet ve momentum aşağıdaki eşitliği verilmektedir (Munson, Young, Okiishi ve Huebsch 2007: 278);



Şekil 2.2. Diferansiyel hacime etki eden kuvvetler (Falconer, 1994: 28)

x- doğrultusunda;

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2.3)$$

y- doğrultusunda;

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (2.4)$$

z- doğrultusunda;

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (2.5)$$

Bir akışkan hareketinde normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler, laminar akımlar için Newton sıvıları kabulü altında Stokes Viskozite Kanunu ile ifade edilmektedir (Schlichting, 1979: 90). Gerilmeler aşağı şekilde yazılabilir;

Normal gerilmeler;

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

$$\sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

Kayma gerilmeleri;

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

Stokes Viskozite Kanunu ile gerilmeler için elde edilen eşitlikler, kuvvet ve momentum eşitliğinde yazılırsa laminar ve sıkışmaz akım için 3 boyutlu Navier-Stokes denklemleri elde edilmektedir. Navier-Stokes denklemi şu şekilde verilmektedir.

x- doğrultusunda;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_u \quad (2.12)$$

y- doğrultusunda;

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_v \quad (2.13)$$

z- doğrultusunda;

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g \quad (2.14)$$

Burada;

u, v ve w hızları

F_x, F_y ve F_z net kuvvetleri

ρ yoğunluğu

μ dinamik viskoziteyi

ν kinematik viskoziteyi

σ_{xx}, σ_{yy} ve σ_{zz} normal gerilmeleri

τ_{xy}, τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilmelerini

f_u ve f_v Coriolis etkisini

İfade etmektedir. Dünyanın dönmesinden kaynaklan Coriolis etki şu şekilde tanımlanmaktadır (Dronker, 1964);

$$f_u = 2u\omega \sin\varphi \quad (2.15)$$

$$f_v = -2v\omega \sin\varphi \quad (2.16)$$

Burada ω dünyanın dönüş hızını ($=7,3 \times 10^{-5}$ rad/s), φ ise coğrafik enlem açısını ifade etmektedir.

2.3. Türbülans Modelleri

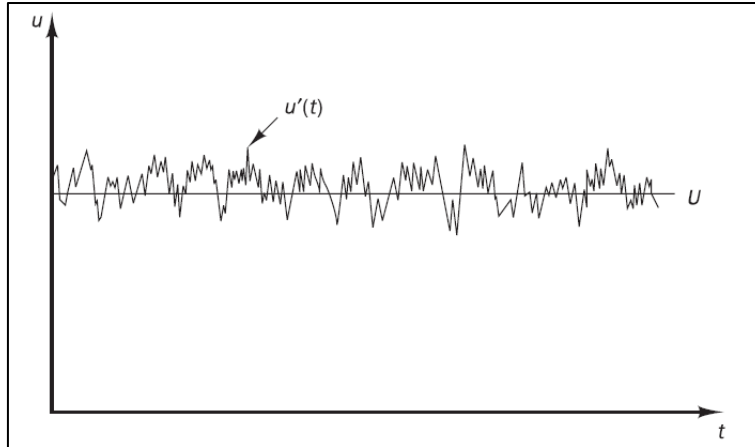
Haliç ve kıyı sularında genellikle türbülanslı akım halinde olmaktadır. Modern anlamda türbülans ilgili çalışmalar Reynolds'ın borular üzerinde yaptığı deneyler ile başlamaktadır (Socolofsky ve Jirka, 2005: 4). Bu deneylerin sonucunda Reynolds atalet kuvvetleri ile

viskoz kuvvetleri arasında ilişkiyi tanımlamayan Reynolds sayısını ($Re = UL/\nu$) ortaya sürmüştür. Her akım durumu için belirli bir kritik Re altında, akımın daha pürüzsüz olduğu laminar akım gözlemlenmektedir. Re bu kritik değeri aştığında akım daha karmaşık bir hal almaya başlamaktadır. Bu durum türbülanslı akım olarak adlandırılmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 40). Türbülanslı akımda rasgele gerçekleşen girdaplar (eddy) hareketin en etken parçalarından birisidir. Laminer akımda momentum transferi, sürtünme ve moleküler viskozite ile gerçekleşmektedir. Türbülanslı akımlarda ise tanecikler arasında çarpışmalar momentum transferinde baskın bir rol almaktadır.

Türbülanslı akımlarda, bazı akım bileşenlerinde gözlemlenen türbülans kaynaklı dalgalanmaların matematiksel ifadesinde Reynolds ayrışımı (decomposition) kullanılmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 41) (Şekil 2.3);

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.17)$$

Burada $\bar{u}$ ortalama hızı, $u'(t)$ ise dalgalanma bileşenini ifade etmektedir. Tüm hız ve basınç bileşenleri bu şekilde yazılabilir.



Şekil 2.3. Türbülanslı Akımlarda Hız Bileşenlerinde Dalgalanmalar (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 41)

Reynolds ayrıştırmasıyla elde edilen hız ve basınç bileşenleri Navier-Stokes denklemlerinde yerlerine yazılarak ve zaman ortalamaları alınarak türbülanslı akımlar için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri elde edilmektedir (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 65);

x-doğrultusunda

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right) + F_x \quad (2.18)$$

y-doğrultusunda

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right) + F_y \quad (2.19)$$

z-doğrultusunda

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right) + F_z \quad (2.20)$$

Türbülanslı akımlarda çok farklı uzunluklarda ve zaman aralıklarında karmaşık yapılarda girdaplar oluşmaktadır. Çevresel HAD uygulamalarında zorlukların geneli oluşturulacak modellerde türbülansı yansıtabilme problemlerinden kaynaklanmaktadır. HAD alanında çalışmalar başladığından itibaren araştırmacılar türbülanslı akımlar için etkili türbülans modelleri gelişme üzerinde yoğunlaşmışlardır. Kullanılmakta olan türbülans hesaplama yöntemleri temel yaklaşımlarına göre RANS denklemleri için türbülans modelleri, Geniş girdap simülasyonları (LES-*large eddy simulations*) ve direkt sayısal çözümler (DNS-*direct numerical solutions*) olmak üzere üç ana sınıfta toplanmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 66).

RANS denklemleri için türbülans modelleri, temel olarak türbülansın kaynaklanan hız ve basınç ifadelerindeki dalgalanmaların ortalama akım üzerindeki etkilerine yoğunlaşmaktadır. Bu modellerde dalgalanmaların etkilerini RANS denklemlerinde yansıtılabilmek için bu modellerde yeni kavramlar üretilmiştir. Bu kavramlar kullanılarak türbülans viskozitesi hesaplanmaktadır. Güncel HAD uygulamalarında, türbülans modelleri etkili ve az işlem yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklı olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 66).

LES yönteminde, geniş boyutlarda gerçekleşen girdapların akım üzerindeki etkilerinin matematiksel olarak hesaplanması temel alınmaktadır. Bu yöntemde kararlı olmayan akımlarda Navier-Stokes denklemleri çözülmektedir. Fakat bu metodolojide sadece geniş

boyutlardaki girdaplar göz önüne alınıp, daha küçük boyutlarda girdapların etkisi yok sayılmaktadır. Bu yüzden LES yönteminde, göz önünde bulundurulmamış küçük boyutlardaki girdapları çözmek için alt-çözüm ağı denilen modeller kullanılmaktadır. Bu yöntem karmaşık geometriye sahip problemlerde etkili bir performans göstermektedir. Ancak büyük bir kapasite ve işlem yoğunluğu gerektirmektedir (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 66).

Sonuncusu ise DNS hız ve basınç bileşenleri üzerindeki tüm dalgalanmaların Navier-Stokes denklemleri kullanılarak doğrudan çözülmesi üzerine kuruludur. Türbülans akımlarda oluşan girdaplar çok düşük boyutlara sahip olup çok kısa sürelerde gerçekleşebilmektedir. Bu girdapları herhangi bir sayısal modelde yansıtabilmek için çok küçük boyutlara sahip hücrelerden oluşan çözüm ağları üzerinde işlem yapılması ve çok kısa zaman adımlarının dalgalanmaları yansıtabilecek kadar kısa geçilmesi gerekmektedir. Bu yöntemde işlem yoğunluğu aşırı büyük boyutlardadır ve sayısal olarak maliyetli bir yöntemdir (Versteeg ve Malalasekera, 2007: 66).

Tez çalışması kapsamında, türbülans hesaplarında RANS denklemleri için türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu yüzden bu kısımda bu başlığa yoğunlaşılmıştır.

2.3.1. RANS denklemleri için türbülans modelleri

RANS denklemleri kullanılarak türbülans hesapları yapılması için, Reynolds gerilmelerinin, taşınım terimlerinin ve ortalama akım denklemlerini hesaplamasında kullanılabilecek türbülans modelleri geliştirilmesi gerekmektedir. Türbülans modelleri, modellerde çözülmesi gereken taşınım denklemleri sayısına göre sınıflandırılmaktadır. Sıfır denklemler model grubunda Prandtl Karışım Uzunluğu modeli, bir denklemler model grubunda Spalart-Allmaras modeli ve k -L modeli, iki denklemler model grubunda k - ϵ modeli ve k - ω modeli, yedi denklemler model grubunda ise Reynolds gerilmeleri modeli yer almaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007:67).

Türbülans modellerinde Reynolds gerilmeleri ve türbülans viskozitesi temel alınmaktadır. Reynolds gerilmeleri de Boussinesq türbülans viskozitesi yaklaşımıyla ifade edilmektedir (Ingham ve Ma, 2005: 26);

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.21)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesini, k türbülans enerjisini δ_{ij} ise Kronecker deltasını ($i = j, \delta_{ij} = 1, i \neq j, \delta_{ij} = 0$) ifade etmektedir.

Tez çalışması kapsamında çalışılan türbülans modelleri ile ilgili detaylı bilgilere hidrodinamik modelin anlatıldığı 3. kısımda yer verilmiştir.

2.4. Adveksiyon-Difüzyon Denklemi

Bu başlıkta çevresel akışkanlar dinamiğinde taşınım süreçlerini fiziksel ve matematiksel olarak ifade edilmesinde kullanılan difüzyon, adveksiyon, dispersiyon gibi temel kavramlar üzerinde durulup açıklanmaya çalışılmıştır.

Çevresel akışkanlar mekaniğinde, bir sıvı içerisinde çözülmüş maddelerin, kimyasalların veya sedimentin miktarını belirtmek için konsantrasyon terimi kullanılmaktadır. Konsantrasyon terimi karışımın içerisindeki maddenin ağırlığının, toplam karışımı hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır (Socolofsky ve Jirka, 2005: 9). Aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C = \frac{M}{V} \quad (2.22)$$

Birim $[M/L^3]$ olarak genellikle mg/l , kg/m^3 kullanılmaktadır.

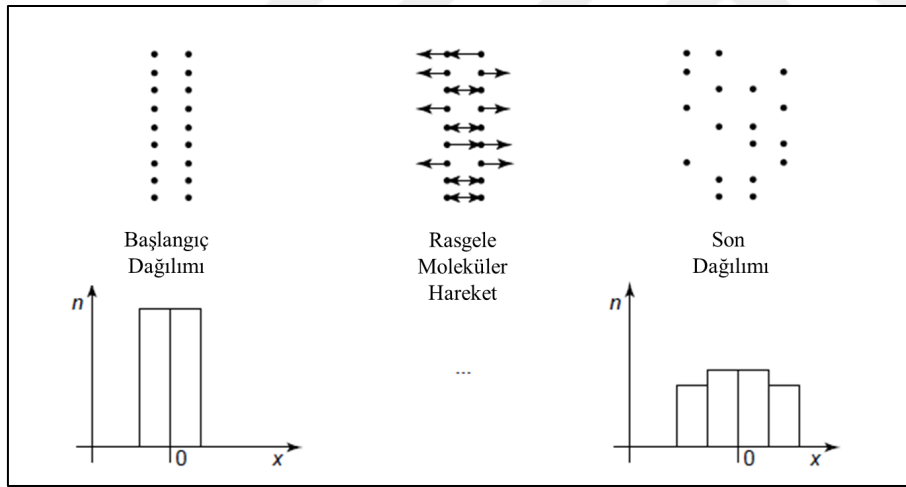
Doğada herhangi bir karışım ve taşınım sürecinde temel olarak difüzyon ve adveksiyon 2 adet baskın etken bulunmaktadır. Bu kısımda ilk olarak yayılım süreçlerini açıklamak için difüzyon kavramı, daha sonra ise akımdaki sıvı hareketinden kaynaklanan taşınımı ifade etmek için adveksiyon kavramı üzerinde durulmuştur.

2.4.1. Difüzyon

Çevresel akışkanlar mekaniğinde en temel yayılım mekanizması olan difüzyon iki temel özelliğiyle açıklanmaktadır. Bu özellikler, rastgele gerçekleşmesi ve hareketin yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru gerçekleşmesidir (Socolofsky ve Jirka,

2005: 15). Difüzyon kavramı moleküler difüzyon ve türbülans difüzyonu olmak üzere iki ana başlıkta incelenmektedir. Moleküler difüzyon, parçacıkların rasgele moleküler hareketten dolayı yayılması olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca Fick Kanunu ve klasik difüzyon denklemi kullanarak matematiksel olarak ifade edilmektedir. Türbülans difüzyonu ise parçacıkların türbülans hareketi ile yayılması olarak tanımlanmaktadır. Matematiksel olarak moleküler difüzyon ile analogi kurularak açıklanmaktadır. Türbülans hareketinin karışıma etkisi moleküler hareketten kat ve kat daha büyük olması nedeniyle türbülans difüzyon katsayısı moleküler difüzyon katsayısına göre oldukça büyük değerlerdedir (Fischer, List, Koh, Imberger, ve Brooks, 1979: 56).

Moleküler difüzyon doğadaki yayılım süreçlerinde pek karşılaşılmassa da dispersiyon gibi daha büyük boyutlarda ve daha karmaşık taşınım süreçlerinin matematiksel olarak ifade edilmesinde temel olarak kullanılmaktadır (Fischer ve diğerleri, 1979: 35). Molekül hareketinden kaynaklı moleküler difüzyon Şekil 2.4'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Moleküler difüzyon (Socolofsky ve Jirka, 2005: 9)

Fick Kanunu göre kütle akısı, birim zamanda birim alandan geçen kütle miktarı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, bu doğrultudaki madde konsantrasyonun gradyanı ile orantılıdır. Bir boyuttaki madde konsantrasyon için Fick Kanunu matematiksel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Fischer ve diğerleri, 1979: 31).

$$q = -D_m \partial C / \partial x \quad (2.23)$$

Burada q kütle akısı, C madde konsantrasyonu, D_m ise difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca “-“ işaret ise yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona hareketi göstermektedir (Fischer ve diğerleri, 1979: 31). Difüzyon katsayısı $[L^2/T]$ boyutunda olup, difüzyon olabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir. Burada bir kontrol hacmi tanımlanıp, bu hacimde paralel yüzeylerden geçen kütle akısı, kütlenin korunumu prensibiyle ifade edilerek, moleküler difüzyon denklemi elde edilmektedir. Üç boyutlu difüzyon denklemi aşağıda verilmektedir (Fischer ve diğerleri, 1979: 33);

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.24)$$

Doğada birçok akım mekanizması türbülanslı olarak gerçekleşmektedir. Türbülans difüzyonunda karışımın asıl etken, türbülans akımında ortaya çıkan girdaplardır. Rasgele gerçekleşen bu girdapların karışım üzerinde etkisini matematiksel olarak ifade edebilmek için ampirik ve istatistiksel olmak üzere birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan en geçerli ve en yaygını moleküler difüzyon ile analogi kurulmasına dayalı olan türbülans karışım katsayılarıdır. Bu analogide türbülans difüzyonu ifade edebilmek için, moleküler difüzyon denklemde difüzyon katsayısı olarak türbülans difüzyon katsayıları kullanılmaktadır. Girdap hareketini hem etkisi hem de enerji, moleküler hareket göre çok daha büyük olmasından kaynaklı olarak türbülans difüzyon katsayıları moleküler difüzyon katsayılarına göre oldukça büyüktür (Fischer ve diğerleri, 1979; Socolofsky ve Jirka, 2005: 3).

2.4.2. Advectif difüzyon

Difüzyon denklemine, sıvı hareketinden kaynaklanan taşınımın etkisi eklenerek advectif difüzyon denklemi elde edilmektedir. Sıvı hareketi ise akımdaki hız bileşenleri ile ifade edilmektedir (Fischer ve diğerleri, 1979: 51);

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

2.5. Su Kalitesi Modellemesi Yaklaşımları

Su kütleleri kendisine hidrodinamik, kimyasal ve biyolojik karakterleri olan karmaşık sistemler olmasına rağmen, ötrifikasyon, patojen artışı ve toksik maddeler gibi ekosistemi olumsuz şekilde etkileyen benzer çevresel problemlerle karşılaşabilmektedirler (Ji, 2008).

Bu yüzden su kütlelerinde hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliğin sağlanması ya da çevresel bir problemle karşılaşıldığı zaman etkili bir müdahale yapılabilmesi için belirli su kalitesi parametrelerinin düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir. Su kalitesi parametreleri Su sıcaklığı, tuzluluk, sediment, patojenler, toksik maddeler, çözünmüş oksijen, algler ve besin maddeleri sınıfları altında toplanmaktadır (Ji, 2008: 567).

Su kütlerinde yaşayan mikro organizmaların çoğunluğu ekosistemin sürekliliğinde kilit rol oynamaktadır. Özellikle besin maddelerinin ayrıştırması süreçlerinde rol alan bakteriler azot döngüsünü sağlayarak ekosistemleri ayakta tutmaktadırlar. Olumlu taraflarının yanında bazı su kütlelerinde yaşayan mikro organizmalar insanda kolera, tifo, hepatit gibi hastalıklara neden olmaktadır. Genellikle insan ve hayvan atıklarından kaynaklanan patojenler, su kütlesine karıştığı andan itibaren uygun ortamda kolayca çoğaltıp su kütlesi boyunca taşınabilmektedir (Ji, 2008: 567). Bu patojenler su kütlelerinden insanlara doğrudan ve dolaylı yollardan bulaşabilmektedir.

Patojenlerin su kütlelerinde tespit edilmesinde, teknik bilgi ve zaman gerektiren pahalı yöntemler kullanılması gerektiği için kolayca tespit edilip miktarları ölçülebilen belirli indikatörler kullanılmaktadır. Genellikle insanda bir rahatsızlığa yol açmayan indikatör ile patojen konsantrasyonu arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Bu indikatörler, patojenlere eşlik etmekte olup, konsantrasyonlarında artış su kütlesinde çevresel problemler olduğunu göstermektedir. Su kalitesinde yaygın olarak total koliform, fekal koliform, E.coli ve enterococci olmak üzere dört indikatör kullanılmaktadır (Ji, 2008: 568). Total koliform grubu hem fekal hem de fekal olmayan koliformları kapsamaktadır. Fekal koliform ise hayvan ve insan atıklarıyla direkt ilişkili olmasıyla total koliform grubundan ayrılmaktadır. E.coli de fekal koliform grubunda bir alt grup bakterileri temsil etmektedir.

Patojen konsantrasyonunda taşınım ve azalma süreçleri baskın rol oynamaktadır. Patojen taşınımı, herhangi bir çözünmüş madde konsantrasyonu gibi advektif-difüzyon denklemi

kullanılarak ifade edilmektedir. Azalma sürecinde ise güneş ışığı, tuzluluk, sıcaklık, toksik maddeler, besin miktarı gibi çevresel faktörler etkilidir (Ji, 2008: 568). Bu çevresel faktörlerin indikatör konsantrasyonunun azalma oranı üzerindeki etkilerinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi konusunda birçok çalışma bulunmaktadır (Kashefipour ve diğerleri, 2002; Chen ve Liu, 2017; Perkins ve diğerleri, 2016; Gao ve diğerleri, 2015). Tez kapsamında kullanılan azalma oranı 3. kısımda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.6. Sayısal Çözüm Yöntemleri

Akışkanlar dinamiğinde, birçok özelliğin hesaplanmasında kısmi diferansiyel denklemler kullanılmaktadır. Kısmi diferansiyel denklemler, birden fazla değişkeni olan bir fonksiyonun bir ya da daha fazla türevinden oluşan diferansiyel denklemler olarak tanımlanmaktadır. Fizikte kullanılan diferansiyel denklemlerde bu değişkenler genellikle konumsal değişkenler ve zaman değişkenidir (Kreyszig, 2011: 43). İkinci mertebeden kısmi diferansiyel denklemler eliptik, parabolik ve hiperbolik olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Genel formu aşağıdaki şekilde verilmektedir (Chapra ve Canale, 2010: 845);

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + D = 0 \quad (2.26)$$

Burada A , B ve C ifadeleri x ve y 'nin fonksiyonlarıdır. D genel bir fonksiyonu tanımlamaktadır. A , B ve C ifadelerinin değerlerine sınıflanan kısmi diferansiyel denklemlerle ilgi Çizelge 2.1'de detaylı bilgi verilmektedir.

Çizelge 2.1. Kısmi diferansiyel denklem sınıfları (Chapra ve Canale, 2010: 846; Hoffmann ve Chiang, 2000: 4)

$B^2 - 4AC$	Sınıf	Örnek
<0	Eliptik	Laplace Denklemi $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$
$=0$	Parabolik	Difüzyon Denklemi $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$
>0	Hiperbolik	Dalga Denklemi $\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$

Elipitik denklemler kararlı durumları, parabolik ve hiperbolik denklemler ise yayılım süreçlerinin matematiksel olarak ifade etmektedir.

Kısmi diferansiyel denklemlerin çözüm yöntemleri analitik ve sayısal olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir. Analitik çözüm yöntemleri başlığında adi diferansiyel denkleme indirgeme, Fourier dönüşümü, D'Alembert çözümü gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Analitik olarak yapılan çözümlerde belirtilen şartlar için net bir değer elde edilmektedir. Lakin analitik çözümlerde yapılan sınır şartları kabulü (genellikle sonsuz boyutlara sahip bir çözüm alanı gibi) yüzünden elde edilen analitik denklem gerçek bir fiziksel olayı tam anlamıyla karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Sayısal çözüm yöntemlerinde ise bu sınır şartları daha etkili ve doğru şekilde kurulan modellerde tanımlanabilmektedir. Değişen başlangıç koşullarına ve sınır şartlarına göre çözüm yönteminin tekrardan elde edilmesi gerekmemektedir. Ancak sayısal yöntemlerin Temelini oluşturan Taylor serisi açılımdan yapılan kesim kabulü ve sistemlerde fiziksel şartlarını tanımlamalarda yapılan basitleştirmeler sebebiyle analitik çözümde olduğu gibi gerçek bir sonuç elde edilememektedir. Buna ek olarak, seçilen çözüm yöntemine göre stabilite problemleriyle de karşılaşılabilir.

Tez çalışmasında kullanılan model, sayısal çözüm yöntemleri temelli olması sebebiyle bu kısımda sadece sayısal çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal çözüm yöntemleri ifadelerin ayrıştırılmasında kullanılan yaklaşımlara göre sınıflandırılmaktadır. Sonlu farklar (*finite differences*), sonlu elemanlar (*finite elements*) ve sonlu hacimler (*finite volumes*) olmak üç adet yaklaşım bulunmaktadır (Hoffmann ve Chiang, 2000: 4). HAD'nde genel olarak sonlu farklara ve sonlu hacimlere dayanan sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan Delft3D modelinde kısmi diferansiyel denklemlerin çözümde kullanılan sayısal çözüm yöntemleri ise sonlu farklar yöntemini temel almaktadır. Bu nedenle bu kısımda sonlu farklar yaklaşımı ve programda kullanılan sayısal çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur.

2.6.1. Sonlu farklar yaklaşımı

Sonlu farklar yaklaşımında türevlerin yaklaşımlarının edilmesi Taylor serisi açılımı kullanılarak yapılmaktadır. Taylor serisinde bir fonksiyonun bir birim sonraki değeri, fonksiyonun değeri ile türevleri kullanılarak ifade edilmektedir. Taylor serisi genel aşağıdaki formda verilmektedir (Hoffmann ve Chiang, 2000: 29);

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n f}{\partial x^n} + \quad (2.27)$$

$$f(x + \Delta x) = f(x) + (\Delta x) \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \dots \quad (2.28)$$

Solu farklar yaklaşımında türevler Taylor serisi ile farklı yönlerde açılmaktadır. Birinci mertebe bir türev için ileri sonlu farklar yaklaşımına göre açılımı aşağıdaki şekildedir (Hoffmann ve Chiang, 2000: 29);

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{(\Delta x)} - \frac{(\Delta x)}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{(\Delta x)^2}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \dots \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{(\Delta x)} + O(\Delta x) \quad (2.30)$$

Burada $O(\Delta x)$ yüksek mertebe ifadeleri içeren bir fonksiyondur. Sonlu farklar yaklaşımında $O(\Delta x)$ fonksiyonu “sıfır” olarak kabul edilip işleme alınmamaktadır. Bu duruma kesim hatası (*truncation error*) denilmektedir. Böylece birinci mertebeden türev aşağıdaki formu almaktadır (Hoffmann ve Chiang, 2000: 30);

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{(\Delta x)} \quad (2.31)$$

Çizelge 2.2’de ileri, merkezi ve geri sonlu farklar açılımı birinci ve ikinci mertebeden türevler için verilmektedir.

Çizelge 2.2. Sonlu farklar açılımları

Açılım	Birinci Mertebeden Türev	İkinci Mertebeden Türev
İleri sonlu farklar	$f'(x) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{\Delta x}$	$f''(x) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + f(x_i)}{\Delta x^2}$
Merkezi sonlu farklar	$f'(x) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x}$	$f''(x) = \frac{f(x_{i+1}) - 2f(x_i) + f(x_{i-1}))}{\Delta x^2}$
Geri sonlu farklar	$f'(x) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1}))}{\Delta x}$	$f''(x) = \frac{f(x_{i-2}) - 2f(x_{i-1}) + f(x_i)}{\Delta x^2}$

Sonlu farklar yaklaşımını temel alan birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden temel olarak çözüm algoritmasına açık ve kapalı sınıfında yer almaktadır. Açık olan yöntemlerde stabilite şartı aranmaktadır. Delft3D programında temel hareket denklemleri ve advektif difüzyon denklemlerinin çözümünde ADI yöntemi kullanılmaktadır.

2.6.2. ADI yöntemi

Tam adı *The Alternating-Direction Implicit* olan ADI yöntemi, bir zaman adımın iki yarı zaman adımına bölünmesi üzerine kurulu, parabolik denklemlerin çözümünde kullanılan bir yöntemdir. Örnek olarak 2 boyutlu bir difüzyon denkleminin yarı zaman dilimlerindeki açılımları aşağıda verilmektedir (Hoffmann ve Chiang, 2000: 164);

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\left(\frac{\Delta t}{2}\right)} = \alpha \left[\frac{C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{i,j+1}^n - 2C_{i,j}^n + C_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right] \quad (2.32)$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\Delta t}{2}\right)} = \alpha \left[\frac{C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2} + \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - 2C_{i,j}^{n+1} + C_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} \right] \quad (2.33)$$

Bu yöntemde her bir doğrultu için tridiagonal matrisi kullanılarak çözüm yapılmaktadır. Bundan dolayı, çözüm yöntemi koşulsuz stabildir. Açılımların tridiagonal hali sırasıyla şu şekildedir (Hoffmann ve Chiang, 2000: 164);

$$-d_1 C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + (1 + 2d_1) C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - d_1 C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = d_2 C_{i,j+1}^n + (1 - 2d_2) C_{i,j}^n + d_2 C_{i,j-1}^n \quad (2.34)$$

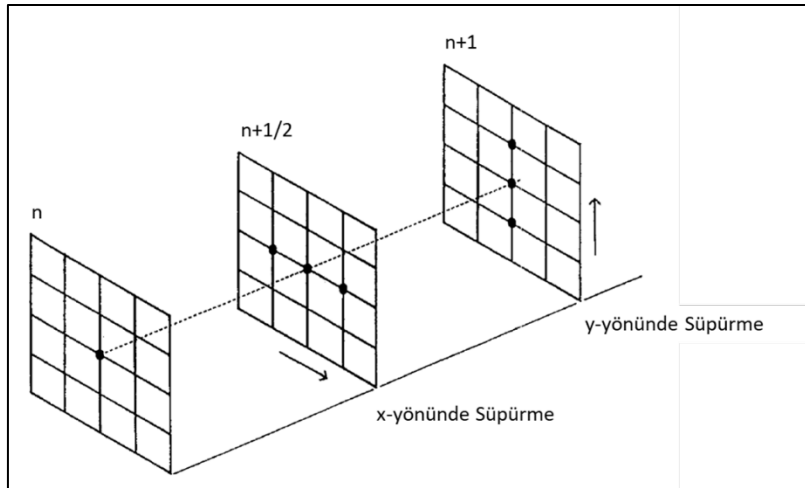
$$-d_2 C_{i,j+1}^{n+1} + (1 + 2d_2) C_{i,j}^{n+1} - d_2 C_{i,j-1}^{n+1} = d_1 C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + (1 - 2d_1) C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + d_1 C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

d_1 ve d_2 ifadeleri ise;

$$d_1 = \frac{1}{2} \frac{\alpha(\Delta t)}{(\Delta x)^2} \quad d_2 = \frac{1}{2} \frac{\alpha(\Delta t)}{(\Delta y)^2} \quad (2.36)$$

şeklindedir.

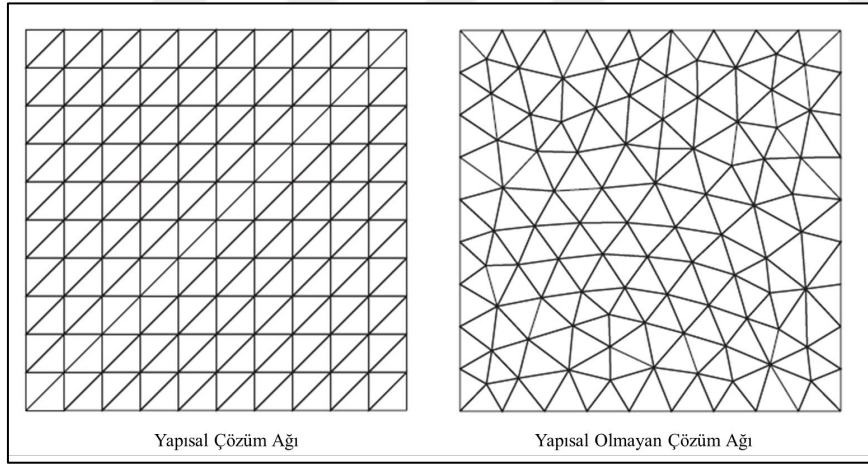
Çözüm algoritması ise, bir yarı zaman adımında bir doğrultu kapalı, diğer doğrultu ise açık olarak çözülmesine dayanmaktadır. Verilen örnekte anlatılması gerekirse, İlk yarı zaman adımında Eş 2.34'te x doğrultusunda ifadeler tridiagonal matris kullanılarak kapalı olarak çözülürken, y doğrultusunda ifadeler ise açık olarak çözülmemektedir. Aynı şekilde diğer yarı zaman adımında ise Eş 2.35'te y doğrultusundaki ifadeler kapalı olarak çözülürken, x doğrultusundaki ifadeler açık olarak çözülmemektedir. Bu algoritma süpürme olarak adlandırılmaktadır (Hoffmann ve Chiang, 2000: 165). Şekil 2.5'te yöntem görselleştirilmiştir.



Şekil 2.5. ADI yöntemi (Hoffmann ve Chiang, 2000: 165)

2.7. Çözüm Ağı

HAD'de çözüm ağı (grid) basitçe akımın etkilediği alan boyunca çözüm için ayrıştırılmış noktalarının dizilimidir (Anderson, 1995: 168). Günümüzde türbülans problemi ile birlikte çözüm ağı üretimi HAD'de üzerine en yoğunlaşılan alanlardan birisidir. Etkili sonuçlar alınabilmesi için, çözüm ağının fiziksel alanın geometrik şartlarını iyi yansıtması gerekmektedir. Ancak geometriyi yansıtabilmek için çözüm ağında hücrelerin boyut azaltıldıkça yani sayıları arttıkça, yapılacak işlemlerinde de sayısı artmaktadır. Sonuç olarak simülasyon süresi oldukça büyük boyutlara varabilmektedir. Bu nedenle HAD alanındaki ilk uygulamalardan beri çözüm ağı üretimi üzerinde çalışılıp, birçok farklı çözüm ağı ve çözüm ağı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Çözüm ağları temel olarak yapısal ve yapısal olmayan çözüm ağları olmak üzere iki ana başlıkta incelenmektedir. Yapısal çözüm ağları temel olarak çözüm ağında yer alan hücrelerin belirli bir düzen altın yerleştirilmiş olduğu çözüm ağlarıdır. Yapısal olmayan çözüm ağları ise modellenecek alanın sınırlarını daha iyi yansıtabilmek için aralarında herhangi bir düzenin bulunmadığı hücrelerden oluşan çözüm ağlarıdır (Şekil 2.6).



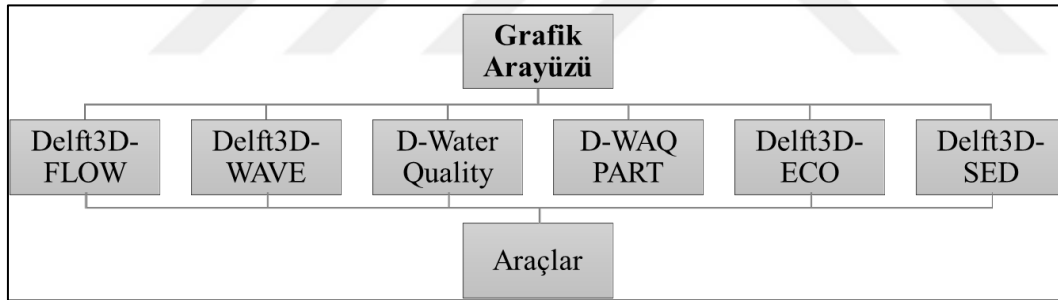
Şekil 2.6. Yapısal ve yapısal olmayan çözüm ağı (Hiester ve diğerleri, 2014)

Tez çalışması kapsamında yapısal çözüm ağı kullanılmıştır. Ayrıca işlem süresinde etkili bir azalma sağlamak için ve sınır şartlarını daha iyi yansıtmak için yerel çözüm ağı sıklaştırılması yöntemleri kullanılmıştır (Koçyiğit, 2005).

3. MODELLEMEDE KULLANILAN PROGRAM

3.1. Giriş

Bu tez çalışmasında hidrodinamik süreci ve taşınım mekanizmasını modellemek için Deltares tarafından geliştirilen 2011 yılında açık kaynak kodları yayınlanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) -literatürde Computational Fluid Dynamics (CFD)-tabanlı Delft3D programı kullanılmıştır. Tez çalışmasının bu kısmında, programların kullandığı denklemler, yaklaşım ve çözüm yöntemleri açıklanırken Deltares tarafından yayınlanan kullanıcı kılavuzları (2020) kullanılmıştır. Delft3D, kıyısal sular, nehirler, göller ve haliçler için 3 boyutlu hesaplamalar yapan, çoklu disiplinleri katan tam bütünleşmiş bilgisayar yazılım paketidir. Akım, sediment taşınımı, dalga hareketi, su kalitesi, morfolojik gelişim simülasyonları yapabilmektedir. Delft3D paketi, bir grafik ara yüzü ile gruplandırılmış birbiriyle etkileşimli çeşitli modüllerden oluşmaktadır. Bu modüller Şekil 3.1’ de gösterilmektedir (Deltares, 2020: 167).



Şekil 3.1. Delft3D paketinin sistemsel yapısı (Deltares, 2020: 8)

Bu modüller genel olarak;

- Delft3D-FLOW (2 ve 3 boyutlu hidrodinamik süreç ve taşınım modellemesi)
- Delft3D-WAVE (dalga yayılımı modellemesi)
- D-Water Quality (uzak alan su kalitesi modellemesi)
- D-WAQ PART (orta-alan su kalitesi ve parçacık hareketi modellemesi)
- Delft3D-ECO (ekolojik modelleme)
- Delft3D-SED (kohezif ve kohezif olmayan sediment taşınımı modellemesi)

alanlarında kullanılmaktadır. Tez çalışmasında hidrodinamik modellemede Delft3D-FLOW modülü, su kalitesi modellenmesinde ise D-Water Quality modülü kullanılmıştır.

3.2. Delft3D-Flow

Delft3D-FLOW, doğrusal ya da eğrisel sınırlar üzerine yerleştirilmiş çözüm ağı üzerinde, doğal mekanizmalardan kaynaklanan kararlı olmayan akımı hesaplayabilen çok boyutlu hidrodinamik modelleme programıdır. Gelgit ve rüzgâr kaynaklı akımların hâkim olduğu su kütleleri, nehirler, derin göller ve rezervuarlar, modelin başlıca uygulama alanlarıdır.

Program oluşturulurken, sığ sular, kıyısız bölgeler, haliçler, lagünler, nehirler ve göllerde akımı modelleyebilen bir yazılım üzerinde durulmuştur. Bu prensiple, sığ sularda derinliğin yatay doğrultudaki uzunluklardan çok daha küçük olduğu kabulü yapılmıştır. Bu kabul doğrultusunda, dikey yöndeki sığ sularda dikey yöndeki momentum eşitliği hidrostatik basınç ilişkisine indirgenmiştir. Bu yüzden kurulacak modelin daha doğruya yakın sonuçlar verebilmesi için yatay doğrultudaki uzunluklar ile derinlik arasındaki bu ilişkiyi sağlayabilmesi gerekmektedir (Deltares, 2020: 168).

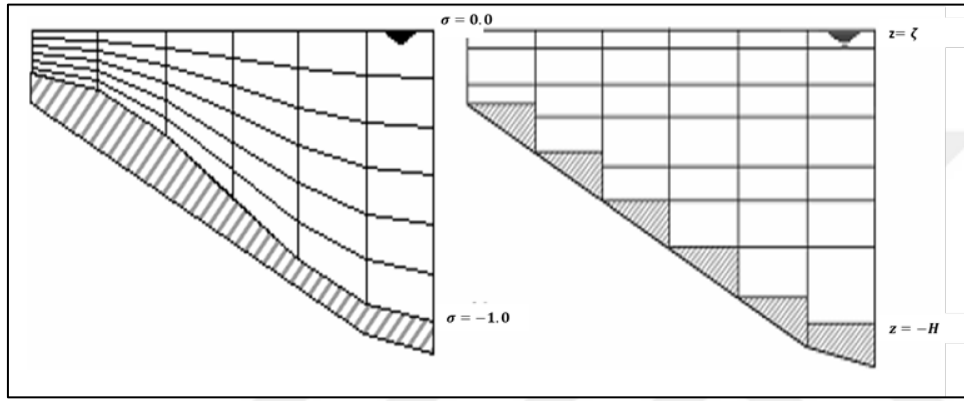
3.2.1. Kullandığı hidrodinamik denklemler

Delft3D-FLOW, hidrodinamik açıdan temel olarak sıkıştırılmaz akışkanlar için Navier-Stokes eşitliklerinin, Boussinesq kabulleri altında çözülmesine dayanmaktadır. Giriş kısmında bahsedilen dikey yöndeki momentum kabulü sebebiyle, 3 boyutlu modellerde dikey hızlar momentumun korunumu denklemi yerine süreklilik denklemi çözülerek hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 177).

Delft3D-FLOW programı, temel olarak kullanıcılara dikey yönde, Kartezyen koordinat sisteminde ve σ (sigma) koordinat sisteminde olmak üzere iki farklı dikey çözüm ağı sunmaktadır. Program, σ koordinat sisteminde Kartezyen koordinat sistemine kıyasla daha fazla eklenti sunduğu için tez çalışması kapsamında dikey çözüm ağının oluşturulmasında σ koordinat sistemi tercih edilmiştir (Deltares, 2020: 178).

σ koordinat sistemi, ilk olarak atmosfer modellerinde basınç farklarından oluşan katmanları daha doğru bir şekilde karşılayan avantajlı bir koordinat sistemi oluşturmak için Phillips tarafından 1957 yılında ortaya atılmıştır. σ koordinat sistemi basitçe tanımlanacak olursa, yatak tabanını ve su yüzeyini temsil edecek olan katmanların, Kartezyen koordinat sisteminde olduğu gibi yatay olarak bu sınırları kesmesi yerine bu sınırları geometrik olarak takip etmesine dayanan bir koordinat sistemidir. Diğer katmanlar ise dikey yönde bu

katmanlara paralel bir şekilde devam etmektedir. Ayrıca katmanlar arası mesafenin de üniform bir şekilde dağılmasına gerek yoktur. Bu yaklaşım dikey yönde, rüzgâr kuvvetlerinin etkili olduğu durumlarda su yüzeyi ve kompleks bir yatağa sahip su kütlerinin tabanı gibi katman sayısının daha yoğun olması istenilen alanları daha doğru bir şekilde yansıtmak için bu bölgelerde katman sıklaştırılması yapılmasına izin vermektedir. Şekil 3.2’de Kartezyen koordinat sistemi ile σ koordinat sistemi arasındaki farklar gösterilmektedir (Deltares, 2020: 178).

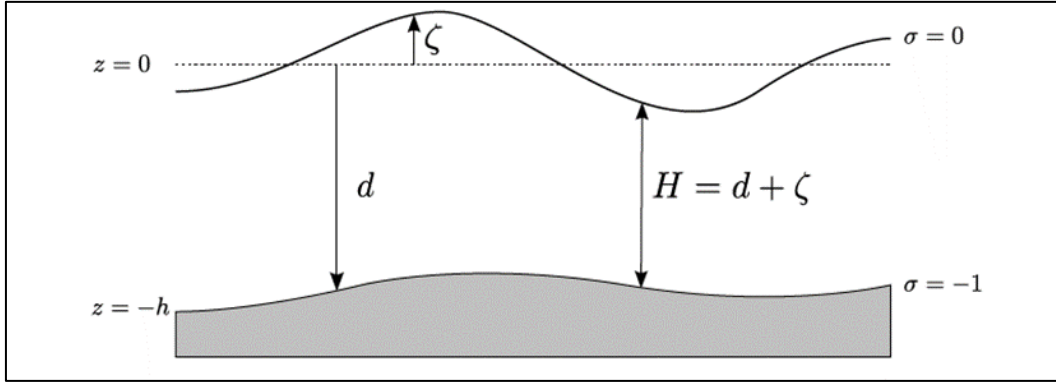


Şekil 3.2. Kartezyen koordinat sistemi ile σ koordinat sistemi arasındaki farklar (Deltares, 2020: 179)

σ koordinat sistemi şu şekilde tanımlanabilir (Deltares, 2020: 178);

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (3.1)$$

Burada, z dikey yönde uzunluğu, ζ referans katmanına göre su seviyesini, d referans katmanının derinliğini, H ise toplam su derinliğini temsil etmektedir. Bu büyüklükler Şekil 3.3’te görselleştirilmiştir.



Şekil 3.3. σ koordinat sisteminde su seviyesi (ζ), derinlik (d) ve toplam derinlik (H) (Deltares, 2020: 178)

Yatay yönde ise Delft3D-FLOW programı ortogonal eğrisel koordinat sistemini desteklemektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan tüm modellemelerde yatay yönde ortogonal eğrisel koordinat sisteminin Kartezyen koordinat açılımı kullanılmıştır. Delft3D-FLOW programında hidrodinamik denklemlerin yön notasyonları ξ ve η karakterleri ile ifade edilmiştir. Bu nedenle, tezin bu kısmında programın çözdüğü hidrodinamik denklemler açıklanırken bu notasyonlarla gösterilmiştir.

Süreklilik denklemi

Programda kullanılan derinlik ortalamalı süreklilik denklemi, sıkıştırılmaz akışkanlar için süreklilik denkleminin toplam derinlik boyunca integralinin alınmasıyla elde edilmiştir. Süreklilik denklemi ve derinlik ortalamalı yatay yöndeki hızlar (Deltares, 2020: 179);

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \quad (3.2)$$

$$U = \frac{1}{d+\zeta} \int_{-1}^{\zeta} u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma \quad (3.3)$$

$$V = \frac{1}{d+\zeta} \int_{-1}^{\zeta} v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad (3.4)$$

şeklinde verilmiştir. Burada $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ ve $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ ifadeleri ξ ve η doğrultularında koordinat dönüşüm katsayısıdır. Q sisteme giren ve çıkan net debiyi, U ve V ise ξ ve η doğrultularındaki derinlik ortalamalı hızları ifade etmektedir. (Deltares, 2020: 179).

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (3.5)$$

q_{in} ve q_{out} sistemdeki kaynak ve kuyuları temsil etmektedir. P ve E sistemdeki yağış ve buharlaşmayı ifade etmektedir.

Momentum denklemleri

ξ ve η yönlerinde momentum denklemleri (Deltares, 2020: 180);

ξ yönünde;

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + \\ F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3.6)$$

η yönünde;

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fu = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + \\ F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3.7)$$

şeklindedir. ν_V ifadesi dikey kinematik türbülans viskozitesini, fv ve fu ifadeleri Coriolis etkisini, P_ξ ve P_η ifadeleri basınç gradyanlarını, F_ξ ve F_η ifadeleri yatay doğrultudaki Reynold's gerilmelerini, M_ξ ve M_η ifadeleri ise sistemdeki momentum kaynaklarını ve çıkışlarını temsil etmektedir.

σ koordinat sistemi dikey yöndeki hızlar ise (Deltares, 2020: 180);

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = (d+\zeta)(q_{in} - q_{out}) \quad (3.8)$$

süreklilik denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklemdaki ω , σ koordinat sistemindeki katmanlardaki dikey hızı ifade etmektedir. Kartezyen koordinat sistemindeki

fiziksel dikey hız olan w model denklemlerine dahil edilmektedir. Hidrodinamik denklemler çözüldükten sonra elde edilen yatay doğrultudaki hızlar ile σ koordinat sistemindeki ω hızı kullanılarak fiziksel dikey hız aşağıdaki w denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 180).

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (3.9)$$

Hidrostatik basınç kabulü

Önceki bölümünde bahsedildiği üzere, dikey yönde momentum denklemi, ivme ifadelerinin etkisi alınmayarak hidrostatik basınca indirgenmiştir. Böyle dikey yönde momentum denklemi şu formu almaktadır (Deltares, 2020: 181);

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (3.10)$$

Bu ifade ξ ve η doğrultuları için açıldığında;

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (3.12)$$

şeklini almaktadır. Burada P_{atm} atmosfer basıncını ifade etmektedir.

Reynold gerilmeleri

Momentum denklemlerinde F_{ξ} ve F_{η} ile gösterilen yatay doğrultudaki Reynold gerilmeleri, türbülans viskozitesi konsepti kullanılarak modellenmektedir. Türbülans viskozite katsayısı akıma, modellenmenin kaç boyutlu olduğuna, çözüm ağında kullanılan hücrenin sık veya kaba olmasına ve türbülans uzunluğuna göre değişmektedir. ξ ve η doğrultuları için Reynold gerilmeleri aşağıdaki şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 182).

$$F_{\xi} = \nu_V \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2}} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}} \right) \quad (3.13)$$

$$F_{\eta} = \nu_V \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2}} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2}} \right) \quad (3.14)$$

Dikey kinematik türbülans viskozitesini olan ν_V türbülans modelleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

3.2.2. Sınır şartları

Taban sınır şartı

Delft3D-Flow programında, taban gerilmeleri aşağıdaki formül kullanılarak ifade edilmektedir (Deltares, 2020: 193);

$$\vec{\tau}_{b3D} = \frac{g\rho\vec{u}_b|\vec{u}_b|}{C^2_{3D}} \quad (3.15)$$

Burada $\vec{u}_b$ çözüm ağında dikey doğrultudaki tabanın üzerindeki ilk katmandaki yatay hızı, C_{3D} ise Chezy katsayısı ifade etmektedir. $\vec{u}_b$ ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 193);

$$\vec{u}_b = \frac{\vec{u}_*}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{\Delta z_b}{2z_0} \right) \quad (3.16)$$

Burada $\vec{u}_*$ sürüklenme hızını, κ von Karman katsayısını, Δz_b ise taban katmanının kalınlığı ifade etmektedir. z_0 ifadesi ise pürüzlülük yüksekliği olup Nikuradse pürüzlülük uzunluğu ile hesaplanmaktadır (Nikuradse, 1933);

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \quad (3.17)$$

Program Chezy katsayısının hesaplanmasında kullanıcıya, Chezy formülü, Manning formülü ve White-Colebrook formülü seçeneklerini sunmaktadır. Tez çalışması kapsamında White-Colebrook formülü kullanılmıştır. White-Colebrook formülü (Deltares, 2020: 194);

$$C_{3D} = 18 \log \left(\frac{12H}{k_s} \right) \quad (3.18)$$

şeklindedir.

Su yüzeyi sınır şartı

Su yüzeyinde rüzgâr ve diğer etkenler kaynaklı olarak gerilmeler oluşmaktadır. Çalışmada rüzgâr kaynaklı gerilmeler baskın olarak kabul edilmiştir. Programda, su yüzeyinde rüzgâr kaynaklı aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (Deltares,2020: 194);

$$\vec{\tau}_s = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (3.19)$$

Burada ρ_a havanın öz kütlesini, C_d sürüklenme katsayısını, U_{10} ise su yüzeyinden 10 m yükseklikte rüzgâr hızını temsil etmektedir.

3.2.3. Türbülans modelleri

Delft3D-FLOW’de türbülans modelleri yatay türbülans viskozitesin yatay türbülans hareketleriyle ve RANS denklemleri ile çözülemeyen kuvvetlerle ilişkili olduğu yaklaşımı üzerine kuruludur. Programda toplam yatay türbülans viskozitesi, büyük ölçekli türbülans viskozitesi, dikey türbülans viskozitesi ve kullanıcı tarafında girilen yatay türbülans viskozitesinin süperpozisyonu ile elde edilmektedir. Yatay türbülans viskozitesi bu yaklaşımla aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Deltares, 2020: 183);

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_v + \nu_H^{back} \quad (3.20)$$

Burada ν_H toplam yatay türbülans viskozitesini, ν_{SGS} büyük ölçekli türbülans viskozitesini, ν_v dikey türbülans viskozitesini ve ν_H^{back} ise kullanıcı tarafından girilen yatay türbülans viskozitesini göstermektedir.

Program, yatay doğrultudaki büyük ölçekli türbülans viskozitesini, HLES (Horizontal Large Eddy Simulation) adlı bir metodoloji kullanarak hesaplamaktadır. Bu türbülans türü SGS (Sub Grid Scale)adı verilen bir model ile çözülmektedir. Modelle ilgili teorik açıklamalar

Uittenbogaard (1998), Uittenbogaard ve Van Vossen (2003)'ın çalışmalarında detaylı bir şekilde yer almaktadır.

Dikey türbülans viskozitesinde ise, yine kullanıcı tarafında girilen dikey türbülans viskozitesi göz önünde bulundurulmaktadır. 3 boyutlu türbülans viskozitesi ile karşılaştırıp daha büyük değerde olanın işleme alındığı bir yaklaşımla dikey türbülans viskozitesi hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 183);

$$\nu_v = \nu_{mol} + maks(\nu_{3D} + \nu_v^{back}) \quad (3.21)$$

Burada ν_{mol} kinematik viskoziteyi, ν_{3D} 3 boyutlu türbülans viskozitesini ve ν_v^{back} kullanıcı tarafında girilen yatay türbülans viskozitesini ifade etmektedir.

Delft3D-FLOW programında, 3 boyutlu türbülans viskozitesini ν_{3D} hesabında RANS kapalı türbülans modelleri kullanılmaktadır. Büyük su kütlelerin sayısal modellemesinde çoğunlukla seçilen zaman aralıklarının süresi ve çözüm ağında seçilen hücre boyutları, hareket kaynaklanan türbülansı ifade edemeyecek kadar büyüktür. Bu yüzden bu çeşit modellemelerde türbülans olayı, türbülans modelleri kullanılarak yapılmaktadır. Delft3D-FLOW programında türbülans viskozitesinin hesaplanmasında; AEM Modeli, k -L kapalı türbülans modeli ve k - ϵ kapalı türbülans modeli olmak üzere 3 farklı yöntem sunulmaktadır. Her üç modelde hesaplanan değişkenler aynı olmakla birlikte, hesaplama yaklaşımları ve üzerinde çalıştıkları teoriler farklılaşmaktadır. 3 boyutlu türbülans viskozitesi şu şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 206);

$$\nu_{3D} = c'_\mu L \sqrt{k} \quad (3.22)$$

Burada c'_μ deneysel bir sabit olan c_μ 'den türetilmiş bir sabiti, L karışım uzunluğunu ve k türbülans kinetik enerjisini ifade etmektedir.

Tez çalışması kapsamında, k -L kapalı türbülans modeli ve k - ϵ kapalı türbülans modeli incelendiği için bu kısımda sadece bu modeller üzerinde durulmuştur.

k-L kapalı türbülans modeli

Birinci mertebeden kapalı türbülans modeli olan k -L modelinde, karışım uzunluğu L analitik olarak, türbülans kinetik enerjisi ise dağıtma (*dissipation*), yüzme (*buoyancy*) ve üretme (*production*) ifadelerini içeren taşınım denklemi ile sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Modelde, üretim, yüzdürme ve yayılım ifadelerin türbülans olayında baskın ifadeler olması ve yatay büyüklüklerin dikey büyüklüklerden çok daha büyük olması kabulleri yapılmaktadır. Karışım uzunluğu katmanlı olmayan akımlar için aşağıdaki şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 211);

$$L = \kappa(z + d) \sqrt{1 - \frac{z+d}{H}} \quad (3.23)$$

Burada κ Von Kármán sabiti olup yaklaşık 0,41 olarak kabul edilmektedir. Türbülans kinetik enerjisinin taşınım denklemi ise;

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_k \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_k + B_k - \varepsilon \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Deltares, 2020: 211). D_k türbülans dağıtma, P_k türbülans kinetik enerjisinin üretim terimini, B_k türbülans kinetik enerjisinin yüzdürme terimini, ε ise enerji yayılımı ifade etmektedir. D_k türbülans dağıtma terimi aşağıda eşitlikle gösterilmektedir (Deltares, 2020: 211);

$$D_k = \frac{\nu_{mol}}{\sigma_{mol}} + \frac{\nu_{3D}}{\sigma_k} \quad (3.25)$$

Burada, σ_{mol} moleküler karışım için Prandtl-Schmidt sayısını ve σ_k türbülans enerjisi için Prandtl-Schmidt sayısını ifade etmektedir.

P_k ifadesinde, sadece yatay hızların dikey doğrultudaki değiştiği, kabul edilmiştir ve P_k şu şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 212);

$$P_k = \nu_{3D} \frac{1}{(d+\zeta)^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] \quad (3.26)$$

B_k ifadesi, aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 212);

$$B_k = \frac{v_{3D}}{\rho \sigma_p} \frac{g}{H} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \quad (3.27)$$

Burada σ_p Prandtl-Schmidt sayısını ifade etmektedir.

Enerji yayılımı temsil eden ε ifadesi ise şu şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 212);

$$\varepsilon = c_D \frac{k\sqrt{k}}{L} \quad (3.28)$$

Burada c_D sabit bir sayı olup 0,1925 alınmaktadır.

Açık sınır şartlarında ise logaritmik hız profili yaklaşımıyla ve Dirichlet sınır şartı ile türbülans enerjisi denklemi analitik olarak yazılabilmektedir (Deltares; 2020: 213).

$$k(z) = \left[u_{*b}^2 \left(1 - \frac{z+d}{H} \right) + u_{*s}^2 \left(\frac{z+d}{H} \right) \right] \quad (3.29)$$

Burada u_{*b} ve u_{*s} sınırlar şartlarındaki sürüklenme hızları olup, u_{*b} taban sürüklenme hızını, u_{*s} ise su yüzeyi sürüklenme hızını ifade etmektedir.

k-ε kapalı türbülans modeli

k -ε türbülans modelinde, k -L modelinden farklı olarak hem türbülans kinetik enerjisi hem de enerji yayılımı için taşınım denklemi çözülmektedir. Karışım uzunluğu ise, türbülans kinetik enerjisi ve enerji yayılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Kullanılan eşitlik şu şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 213);

$$L = c_D \frac{k\sqrt{k}}{\varepsilon} \quad (3.30)$$

k -ε türbülans modeli, k -L modeliyle aynı şekilde; yine yatay büyükler dikey büyüklüklere göre çok daha büyük olduğu ver üretim, yüzdürme ve dağıtma ifadelerin türbülans olayında baskın ifadeler olduğu kabulleri altında çalışmaktadır. Türbülans enerjisi k için taşınım

denklemini, k -L modelinin açıklamasında verilen taşınım denklemiyle (3.24) aynıdır. Enerji yayılımı ise benzer şekilde aşağıdaki gibi verilmektedir (Deltares, 2020: 214);

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\varepsilon + B_\varepsilon - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.31)$$

Burada D_ε türbülans enerji yayılımının dağıtma terimini, P_ε üretim terimini ve B_ε ise yüzdürme terimini ifade etmektedir. Bu ifadeler sırasıyla aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 214);

$$D_\varepsilon = \frac{\nu_{3D}}{\sigma_\varepsilon} \quad (3.32)$$

$$P_\varepsilon = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k \quad (3.33)$$

$$B_\varepsilon = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (1 - c_{3\varepsilon}) B_k \quad (3.34)$$

Burada $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ ve $c_{3\varepsilon}$ kalibrasyon sabitleridir (Rodi, 1984);

$$c_{1\varepsilon} = 1,44 \quad (3.35)$$

$$c_{2\varepsilon} = 1,92 \quad (3.36)$$

$$c_{3\varepsilon} = 0, c_{3\varepsilon} = 1 \quad (3.37)$$

Sınır şartlarında türbülans enerjisi ve enerji yayılımı, k -L modelinde olduğu gibi hesaplanmaktadır. Türbülans enerjisi Eş 3.30, enerji yayılımı ise aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 214);

$$\varepsilon(z) = \left[\frac{u_{*b}^3}{\kappa(z-d)} + \frac{u_{*s}^3}{\kappa(H-z-d)} \right] \quad (3.38)$$

3.2.4. Taşınım denklemi

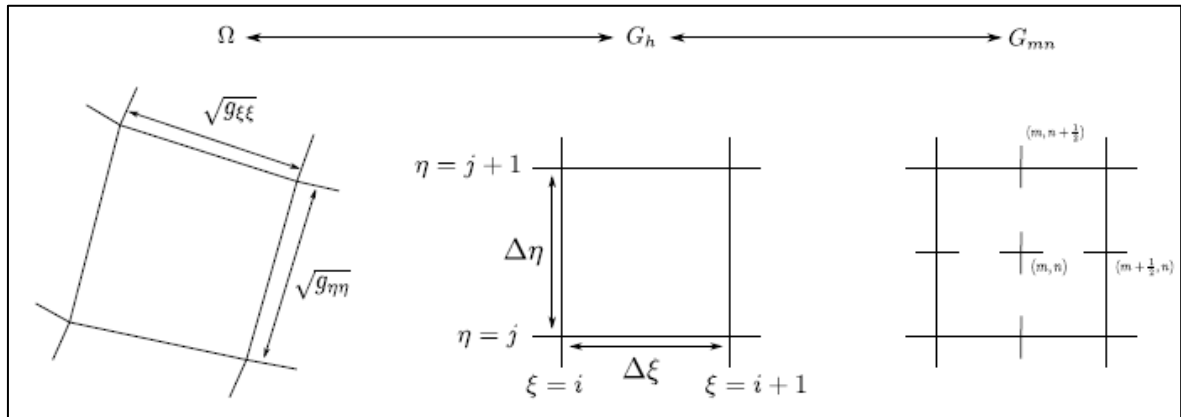
Delft3D-FLOW, hızların hesaplanmasında kullandığı yaklaşımdan farklı olarak, taşınım modellemesinde 3 boyutlu adveksiyon-difüzyon denklemi kullanmaktadır. Bu denklem σ koordinat sisteminde aşağıdaki şekilde verilmektedir (Deltares, 2020: 186);

$$\frac{\partial(d+\zeta)}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} \right\} + \frac{\partial\omega}{\partial \sigma} = \frac{(d+\zeta)}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{(d+\zeta)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + S \quad (3.39)$$

Burada D_H yatay doğrultudaki difüzyon katsayısını, D_V ise dikey doğrultudaki difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Kaynak ve kuyu ise S ile gösterilmektedir.

3.2.5. Sayısal çözüm yöntemleri

Delft3D-FLOW programında hidrodinamik denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal çözüm yöntemleri, sonlu farklar yöntemine dayanmaktadır. Sayısal çözüm sürecinin açıklanmasına, yatay doğrultudaki eğrisel koordinatların çözüm ağına kullanılabilecek hale getirilmesiyle başlamak gerekmektedir. Programın çözdüğü hidrodinamik denklemlerde, bu eğriselliği ifade edebilmek için $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ ve $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ koordinat dönüşüm katsayıları kullanılmıştır. Eğrisel koordinat sisteminin, çözüm ağına dönüşümünde bu katsayıların dönüşümü Şekil 3.4'te verilmektedir (Deltares, 2020: 266).



Şekil 3.4. Eğrisel koordinat sisteminin çözüm ağına dönüşümü (Deltares, 2020: 266)

Bu eğrisel koordinat sistemi dönüşümü, karmaşık geometriye sahip sınır şartların tanımlanmasında kolaylık sağlamaktadır.

Yatay adveksiyon ifadelerinde kullanılan çözüm yöntemleri

Yatay doğrultudaki adveksiyon ifadelerin, hesaplanmasında Delft3D-FLOW programı 3 farklı sayısal çözüm yöntemi sunmaktadır. Bu çözüm yöntemlerinden olan WAQUA Stelling (1984) ve Cyclic (devirli) Stelling and Leendertse (1992) yöntemleri ADI (Alternate Direction Implicit) yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntemler zaman adımları için herhangi bir kısıtlama getirmemektedir. Son yöntem olan Flooding (taşkın) yöntemi, akımda hidrolik sıçrama gibi ani değişimlerin olduğu problemlerin çözümünde daha stabil bir çözüm yöntemi olarak geliştirilmiştir (Stelling ve Duinmeijer, 2003). Diğer yöntemlerden farklı olarak, Flooding (taşkın) yönteminde adveksiyon ifadeleri açık (explicit) olarak çözülmektedir. Bu nedenle, zaman aralıkları Courant sayısı sınırlandırılmaktadır (Deltares, 2020: 270).

WAQUA yöntemi, ADI yönteminin değiştirilmiş bir versiyonudur. Bu yöntemde, yatay doğrultudaki adveksiyon ifadelerinin, ξ -yönünde olan $u \frac{\partial u}{\partial \xi}$ ifadesi merkezi farklar ile açılırken, η -yönünde olan $v \frac{\partial u}{\partial \eta}$ ifadesi ise hata durum yöntemi kullanılarak indirgenir. Hata durum yöntemi ise, üçüncü derece ileri farklar açılımının iki adet ikinci dereceden açılıma bölünmesine dayanan bir yöntemdir. Bu iki açılım ADI yönteminde farklı ara zaman adımlarında işleme alınmaktadır. ξ -yönünde olan $u \frac{\partial u}{\partial \xi}$ ifadesinin ileri merkezi farklara göre ve η -yönünde olan $v \frac{\partial u}{\partial \eta}$ ifadesini hata durum yönteminde ayrıştırılması aşağıda verilmektedir (Deltares, 2020: 275).

İleri Merkezi Farklar;

$$\left. \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} \right|_{m,n,k} = \frac{u_{m,n,k}^{-\xi\eta}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{u_{m+1,n,k} - u_{m-1,n,k}}{2\Delta\xi} \right) \quad (3.40)$$

Hata Durum Yöntemi;

$$\left. \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} \right|_{m,n,k} = \begin{cases} \frac{v_{m,n,k}^{-\xi\eta}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{3u_{m,n,k} - 4u_{m,n-1,k} + u_{m,n-2,k}}{2\Delta\eta} \right), & v_{m,n,k}^{-\xi\eta} \geq 0 \\ \frac{v_{m,n,k}^{-\xi\eta}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{-3u_{m,n,k} + 4u_{m,n+1,k} - u_{m,n+2,k}}{2\Delta\eta} \right), & v_{m,n,k}^{-\xi\eta} < 0 \end{cases} \quad (3.41)$$

Cyclic yönteminde ise hem ξ -yönünde olan $u \frac{\partial u}{\partial \xi}$ ifadesi hem η -yönünde olan $v \frac{\partial u}{\partial \eta}$ ifadesi hata durum yöntemine indirgenerek, sayısal çözüm elde edilmektedir. WAQUA ve Cyclic yöntemlerinde adveksiyon ifadelerinin kapalı olarak hesaplandığı zaman adımında serbest su yüzeyi gradyanı bir önceki zaman adımında hesaplanmış olarak gelmektedir. Serbest su yüzey gradyanının kapalı olarak hesapladığı adımda ise yine benzer şekilde adveksiyon ifadeleri bir önceki zaman adımında hesaplanmış olarak gelmektedir. Yani, ADI yöntemindeki bölünmüş zaman adımlarının birinde adveksiyon ifadeleri kapalı olarak çözülürken, diğer adımda ise serbest su yüzeyi gradyanı kapalı olarak çözülmemektedir (Deltares, 2020: 276).

Dikey adveksiyon ifadelerinde kullanılan çözüm yöntemleri

σ koordinat sistemi üzerinde yapılan sayısal çözümlerde, her komşu katmanda yatay adveksiyon ifadelerini hesaplanırken, dikey adveksiyon ifadeleri ve dikey doğrultudaki viskozite de hesaba katılmaktadır. Dikey adveksiyon ifadeleri, 2. mertebeden merkezi farklar açılımı yapılarak, çözüm yöntemlerine eklemektedir. Açılım şu şekilde ifade edilmektedir (Deltares, 2020: 279);

$$\left. \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right|_{m,n,k} = \omega_{m,n,k}^{-\xi\sigma} \left(\frac{u_{m,n,k+1} - u_{m,n,k-1}}{\frac{1}{2}h_{m,n,k-1} + h_{m,n,k} + \frac{1}{2}h_{m,n,k+1}} \right) \quad (3.42)$$

Burada $h_{m,n,k}$ σ koordinat sisteminde katman kalınlığını göstermektedir.

Taşıyım denkleminde kullanılan çözüm yöntemleri

Delft3D-FLOW programında, taşıyım denklemini sonlu hacimler yaklaşımını göre ayrıştırılmaktadır. Yatay adveksiyon ifadelerin ayrıştırılmasında Cyclic ve Van Leer-2

yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem sunulmaktadır. Cyclic yöntemi, yatay adveksiyon ifadelerde kullanılan çözüm yöntemleri başlığında detaylı incelemiştir. Tez çalışması kapsamında taşınım denkleminin sayısal çözümünde sadece Cyclic yöntemi kullanılmıştır. ξ -yönünde Konsantrasyon akılarının Cyclic yönteminde ayrıştırılması aşağıda verilmektedir (Deltares, 2020: 281);

$$\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial(huc\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial\xi} \Big|_{m,n,k} = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}|_{m,n}} \left(\frac{F_{m+\frac{1}{2},n,k} - F_{m-\frac{1}{2},n,k}}{\Delta\xi} \right) \quad (3.43)$$

$$F_{m+\frac{1}{2},n,k} = u_{m+\frac{1}{2},n,k} h_{m+\frac{1}{2},n,k} \sqrt{G_{\xi\xi}}|_{m+\frac{1}{2},n} \begin{cases} \frac{10c_{m,n,k} - 5c_{m-1,n,k} + c_{m-2,n,k}}{6\Delta\xi}, u_{m+\frac{1}{2},n,k} \geq 0 \\ \frac{10c_{m+1,n,k} - 5c_{m+2,n,k} + c_{m+3,n,k}}{6\Delta\xi}, u_{m+\frac{1}{2},n,k} < 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

η -yönünde de aynı şekilde açılmaktadır.

Türbülans modellerinde kullanılan çözüm yaklaşımları

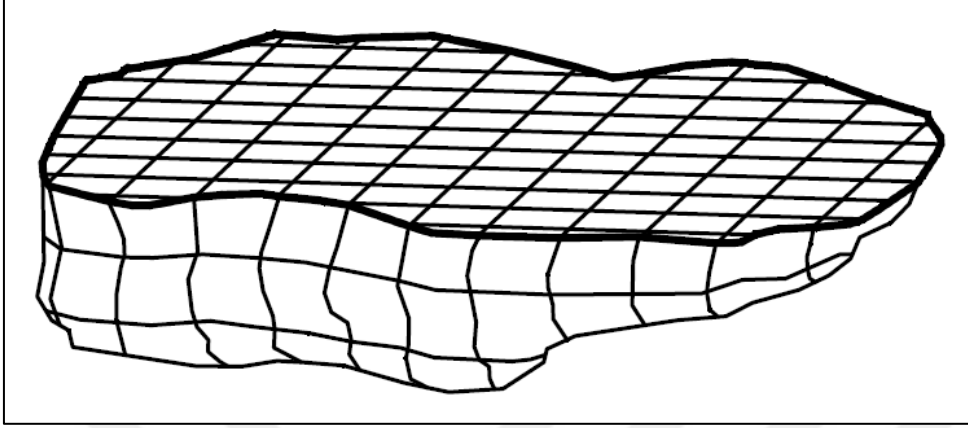
Türbülans viskozitesi hesaplanmasında kullanılan modeller açıklanırken kinetik enerji ve enerji yayılımı ifadeleri ve bu ifadelerinin hesabında kullanılan denklemler üzerinde detaylı bir şekil durulmuştur. Delft3D-FLOW programında bu modellerde bir kısmi diferansiyel denklem olan taşınım denklemini, ileri sonlu farklar açılımı kullanarak ayrıştırmaktadır. Türbülans viskozitesi hesabında ise, ADI yönteminde bir önceki ara zaman adımındaki değerlerle hesaplanmaktadır (Deltares, 2020: 285).

3.3. D-Water Quality

D-Water Quality, birçok farklı madde (substance) için advectif difüzyon denklemi çözen çok boyutlu su kalitesi modelleme programıdır. Hidrodinamik modelleme yapmayıp, Delft3D-FLOW programının sonuçlarından hız, gerime ve su seviyelerini girdi olarak kullanmaktadır. Yani modelleme sürecinde ilk olarak hidrodinamik model, sonrasında ise su kalitesi modeli kurulması gerekmektedir.

Programda, madde taşınımının modellenebilmesi için, su kütlesi Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, içinde hesaplama yapılacak küçük kutulara ayrılmaktadır. Her küçük hücre kendi

boyutlarıyla $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ tanımlanıp, ayrı ayrı numaralandırılmaktadır (Deltares, 2021: 196).



Şekil 3.5. Bir su kütesinin yapılandırılmış çözüm ağı ile kutulara ayrılması (Deltares, 2021: 196)

3.3.1. Adveksiyon-difüzyon-reaksiyon denklemi

D-Water Quality programı taşınım modellemesinde adveksiyon-difüzyon-reaksiyon denklemi kullanılmaktadır. Denklem aşağıdaki şekildedir (Deltares, 2020: 201).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = S + f_R(C, t) \quad (3.45)$$

Burada S kaynağı, f_R ise reaksiyon ifadeleri veya fiziksel süreçleri temsil etmektedir.

3.3.2. Su kalitesi modellemesi yaklaşımı

D-Water Quality programı, modellemede yer alan her madde için farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Tez kapsamında sadece koliform bakterileri dağılımı modellendiği için, sadece koliform için kullanılan yaklaşıma değinilmiştir.

Koliform azalma oranı

Koliform bakteri sayısı, çoğalmak için uygun olmayan bir ortama girdiği andan itibaren azalmaya başlayacaktır. koliform bakteri azalma oranı, doğrudan sıcaklık, tuzluluk, klor

konsantrasyonu ve güneş radyasyonu bağlıdır. Bu sebeple programda, azal oranı daha yansıtılabilmesi için bu değişkenlerin yer aldığı bir ölüm azalma formülü kullanılmaktadır (Mancini 1978);

$$Rmrt = kmrt \times C_x \quad (3.46)$$

$$kmrt = (kmb + kmcl) \times ktmrt^{(T-20)} + kmrd \quad (3.47)$$

$$kmcl = kcl \times C_{cl} \quad (3.48)$$

$$kmrd = krd \times f(I) \quad (3.49)$$

Burada, C_x koliform bakteri konsantrasyonu, C_{cl} klor konsantrasyonunu ifade etmektedir. koliform bakteri konsantrasyonun birimi MPN/m³ (olası en yüksek popülasyon sayısı), klor konsantrasyonun ise g/m³'tür. $kmrt$ birinci mertebe azalma oranını, kmb basit azalma oranını, $kmcl$ klor kaynaklı azalma oranını, $kmrd$ radyasyon kaynaklı azalma oranını, $ktmrt$ ise sıcaklık kaynaklı ölüm oranını temsil etmektedir. Birimleri gün⁻¹'dir. krd radyasyon kaynaklı azalma oranı katsayısını, kcl ise klor kaynaklı azalma katsayısını ifade etmektedir. krd katsayısının birimi m²/Wd, kcl katsayısının birimi ise m³/gd'dir. I su yüzeyindeki günlük UV radyasyonu ifade etmektedir. Birimi W/m²'dir. Son olarak $Rmrt$ ifadesi günlük koliform bakterisi azalma oranını temsil etmektedir ve MPN/m³d ile ifade edilmektedir (Mancini 1978).

3.3.3. Çözüm yaklaşımı

D-Water Quality programı, sayısal açıdan önceki kısımlardan bahsedilen denklemlerin çözümünde kullanılabilen birçok farklı çözüm yöntemi seçeneği sunmaktadır. Tez çalışması kapsamında bu sayısal çözüm yöntemlerinden ileri doğrultuda iteratif çözüm kullanılmıştır.

bölge 1976'dan beri Özel Bilimsel Araştırma Alanı (Site of Special Scientific Interest) statüsündedir (Natural England).

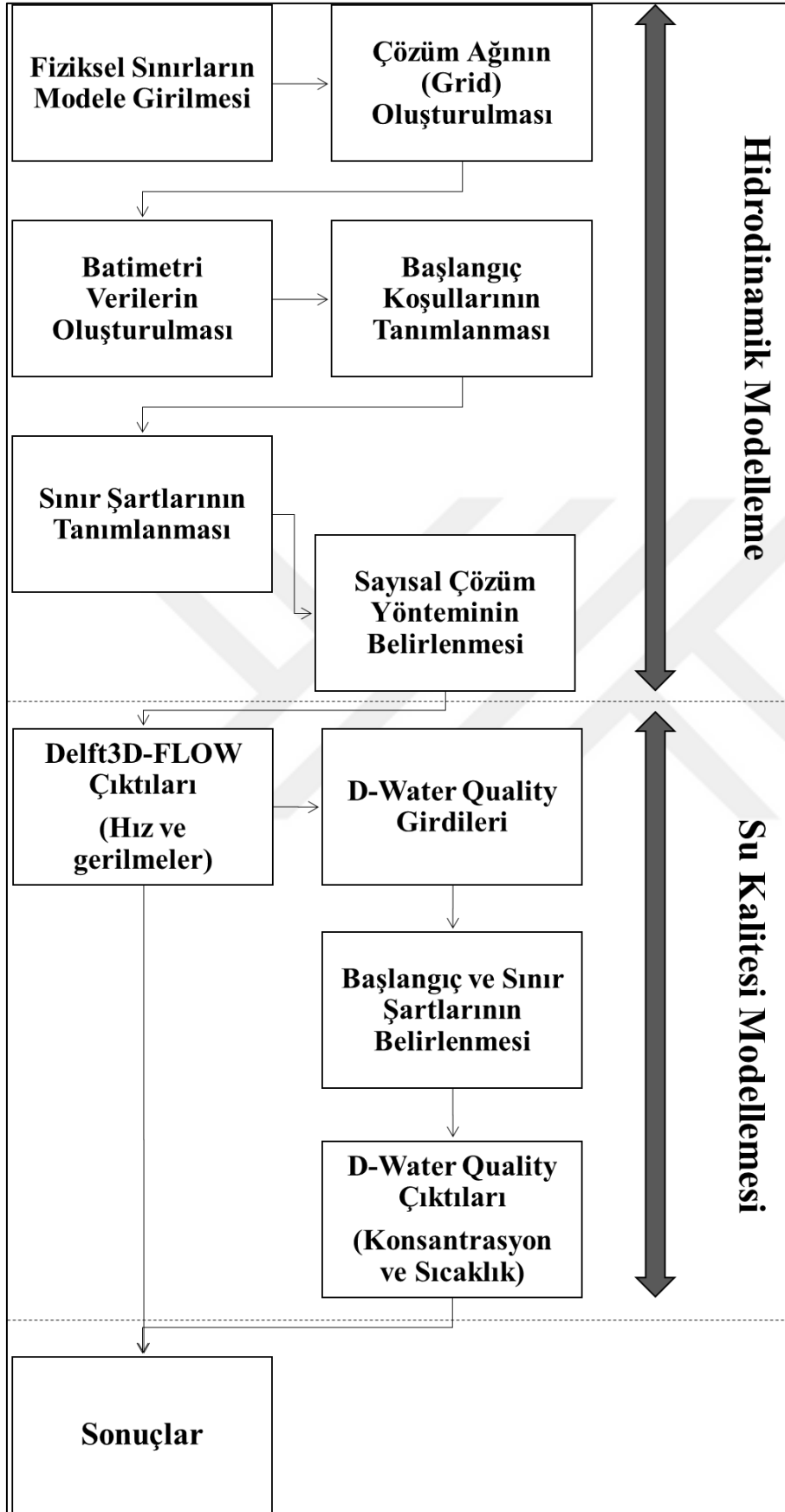


Resim 4.1. Ribble Halici (ESRİ, 2021)

4.2. Hidrodinamik Model Kurulumu

Fiziksel bir durumun matematiksel modellemesinde modelleme sürecini bir prosedür altında incelemek, fiziksel durumun çeşitli yönlerinin daha iyi anlaşılabilmesini sağlamaktadır (*CFD Analysis Process*, 2021). Bu nedenle, tez çalışması kapsamında modelleme çalışmaları, Şekil 4.1'de gösterilen aşamalarda gerçekleştirilmiştir.

Delft3D-FLOW programı kullanılarak hidrodinamik modelleme yapabilmek için, sınır şartları, batimetri ve pürüzlük gibi fiziksel özelliklerin ve sayısal çözüm için kullanılacak yöntemlerin ve bu yöntemlerdeki bazı parametrelerin programa tanıtılması gerekmektedir. D-Water Quality programı üzerinden ise, kirletici kaynağından su kütesine verilen kirletici miktarları ve azalma oranlarının programa tanıtılması gerekmektedir.



Şekil 4.1. Modelleme aşamaları

4.2.1. Model alanın sınırlarını belirlenmesi

Modelleme için gerekli olan veri ve girdileri hazırlanması sürecinde ilk aşama olarak modellenecek alanın sınırlarının belirlenmesi ve programın okuyacağı formata hazır hale getirilmesidir.

Ribble Haliç'inin modelleme alanı, boylamsal olarak 40 km, enlemsel olarak 30 km'lik bir alanı kaplamaktadır. Bu alan dar bir haliç ağzından İrlanda Denizi'ne doğru karmaşık bir batimetri ile ilerlemektedir. Modelleme alanının kuzey sınırı, batıda $53^{\circ} 54' 53.4''$ K, $3^{\circ} 19' 51.4''$ B noktasından, doğuda $53^{\circ} 54' 53.4''$ K, $2^{\circ} 52' 33''$ B noktasına uzanmaktadır. Güney sınırı ise, batıda $53^{\circ} 33' 6.8''$ K, $3^{\circ} 19' 51.4''$ B noktasından, doğuda $53^{\circ} 33' 6.8''$ K, $2^{\circ} 52' 33''$ B noktasına uzanmaktadır. Doğu ve batı sınırları da bu noktalar arasında boylamsal olarak uzanmaktadır.

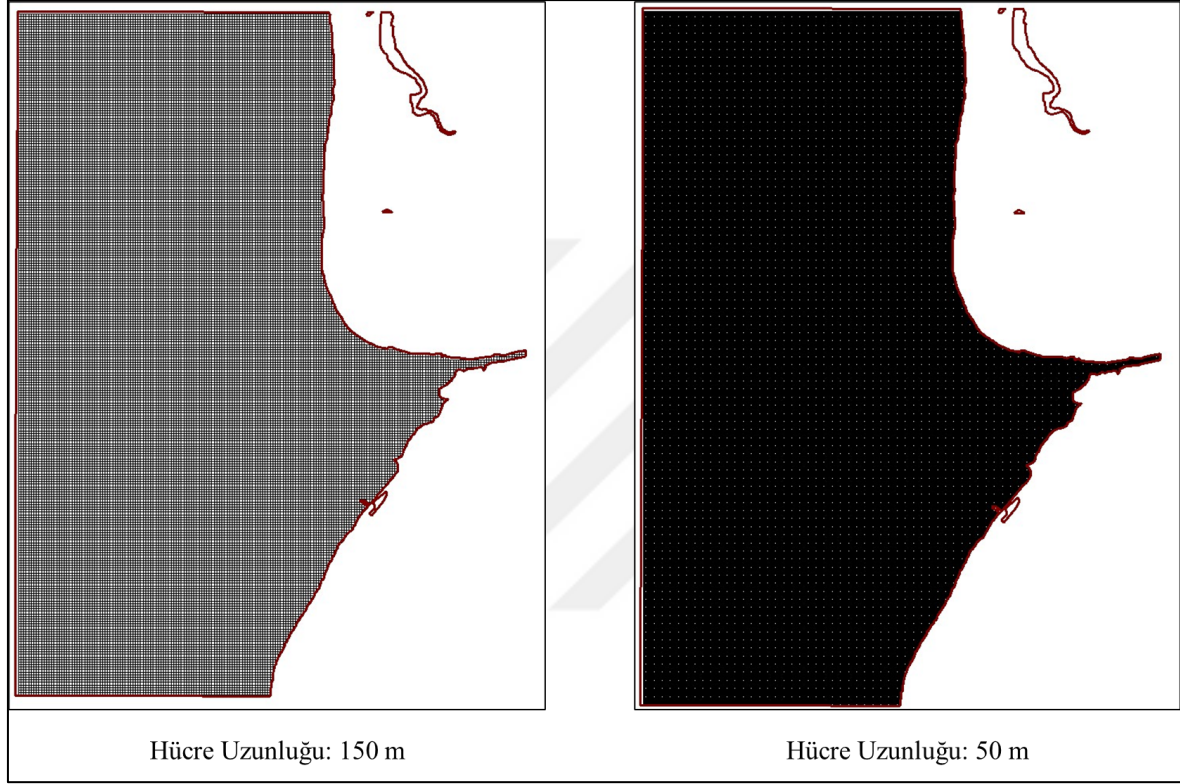
Model alanının, programa tanıtılabilmesi için alan sınırlarını belirtecek dijital verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Model alanının dijital verisi ArcGIS Hub üzerinden "World Water Bodies" adlı veri tabanından *.shp* formatında temin edilmiştir. Bu veri ArcGIS programı ile işlenerek, yukarıda belirtilen sınırlar içerisinde kalan alan elde edilmiştir.

Elde edilen veri Delft3D paketinde yer alan veri dosyalarının dönüşümü yapan QUICKPLOT eklentisi kullanılarak, Delft3D paketine uyumlu hale (*.pol*) getirilmiştir.

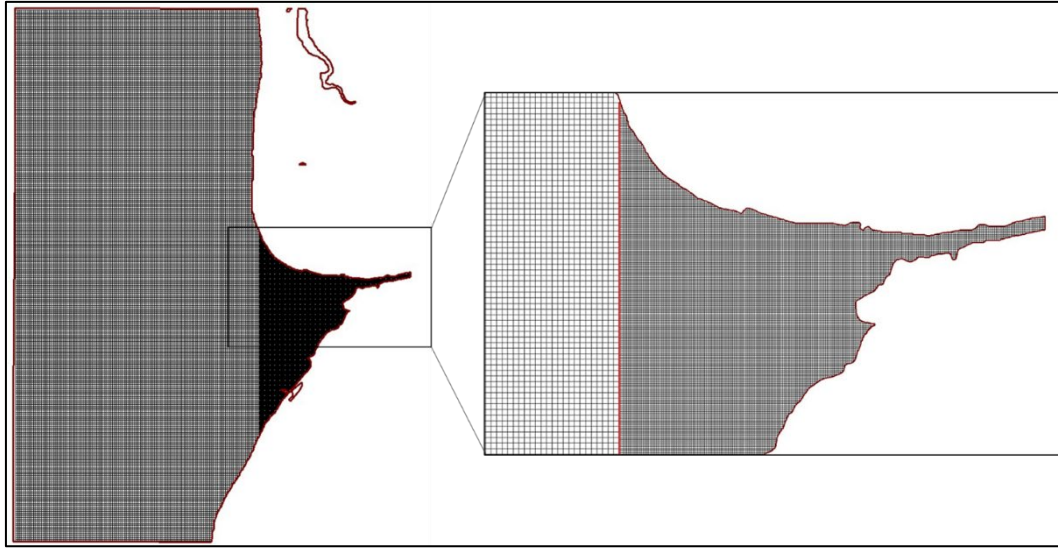
4.2.2. Çözüm ağının oluşturulması

Model alanının sınırları belirlendikten sonra bu alan içerisinde, üzerinde işlem yapılacak noktaları sınırlarıyla belirtmek için çözüm ağının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, yatay doğrultuda 3 farklı tipte çözüm ağı oluşturulmuştur ve çözüm ağları aynı model üzerinde performansları test edilmiştir. Bunlardan ikisi sırasıyla 150 m ve 50 m uzunluğuna sahip hücrelerden oluşan yapılandırılmış kaba ve sık çözüm ağlarıdır. Sonuncu ise yerel çözüm ağı sıklaştırması yöntemlerinden bir tanesi kullanılarak oluşturulmuş bu iki çözüm ağı ile elde edilmiş bir çoklu çözüm ağıdır. Çözüm ağları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görselleştirilmiştir. Tüm çözüm ağları, Delft3D paketinin, çözüm ağı oluşturulmasında kullanılan RGFGRID modülü ile hazırlanmıştır.

Çözüm ağı üzerinde yapılan yerel sıklaştırılmalar ile simülasyon süresinde etkili çözüm ağları elde edilmektedir. Bu yöntemlerin temel mantığı sonuçlarının daha önemli olduğu alanlarda daha yoğun çözüm ağları, diğer alanlarda ise daha düşük çözünürlükte çözüm ağı kullanılmasına dayanmaktadır. Çoklu çözüm ağında hücre uzunlukları sırasıyla 150 m ve 50 m'dir.

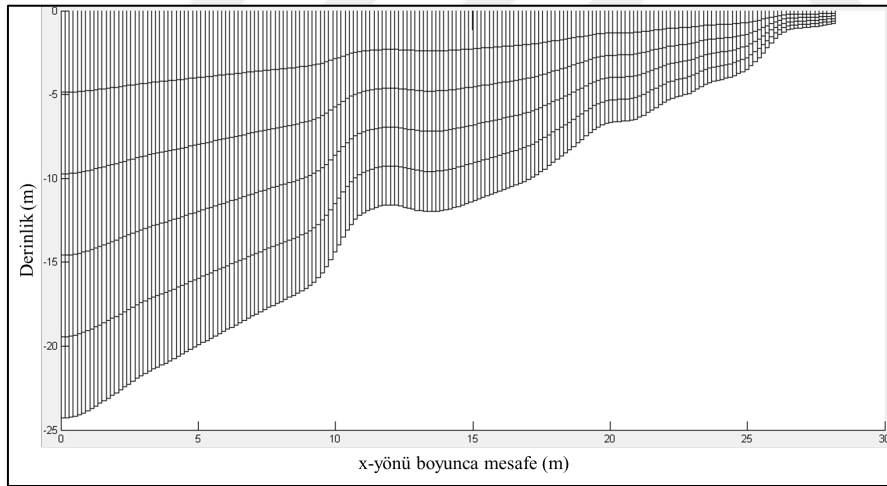


Şekil 4.2. Yapılandırılmış çözüm ağları



Şekil 4.3. Çoklu çözüm ağı

Düşey doğrultuda ise σ koordinat sisteminde 5 adet katmandan oluşan tek tip çözüm ağı kullanılmıştır. Haliç üzerinde x-yönünde bir kesitte dikey çözüm ağı Şekil 4.4’de verilmektedir.



Şekil 4.4. Dikey çözüm ağı

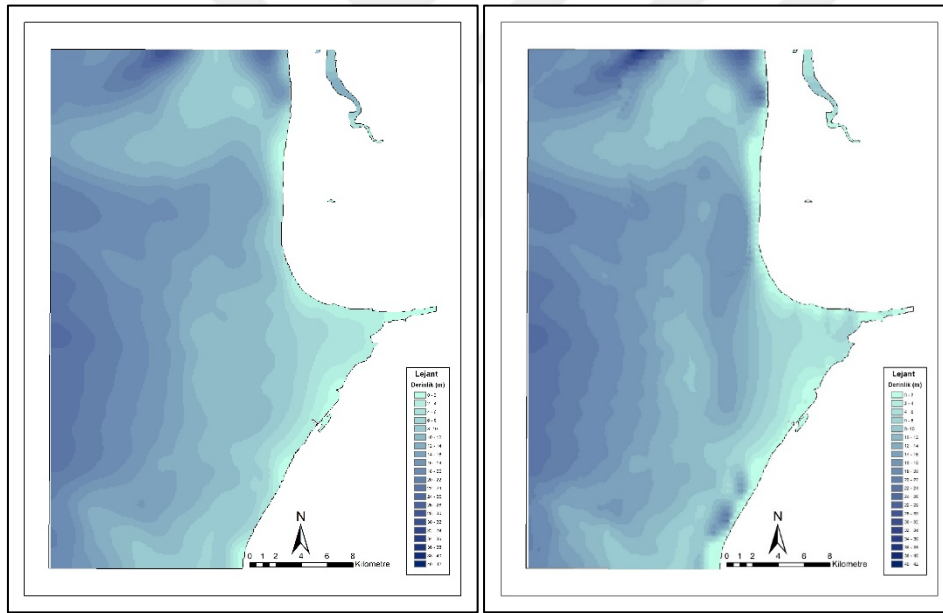
4.2.3. Batimetri verilerin oluşturulması

Batimetri, akım karakteristiklerini belirleyen ana unsurlardan biridir. Model sonuçlarının doğruluğunu artırabilmek için batimetri verileri deniz tabanının geometrisini iyi yansıtması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında, iki farklı batimetri verisi kullanılmıştır. Birinci batimetri verisi Birleşik Kralık hükümetine bağlı olan Çevre Ajansı kurumu (Environmental

Agency) tarafından saha ölçümleriyle elde edilmiştir (Koçyiğit, 2003). Diğeri ise IHO ve UNESCO tarafından desteklenen GEBCO (The General Bathymetry Chart of the Oceans) platformu tarafından uydu verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

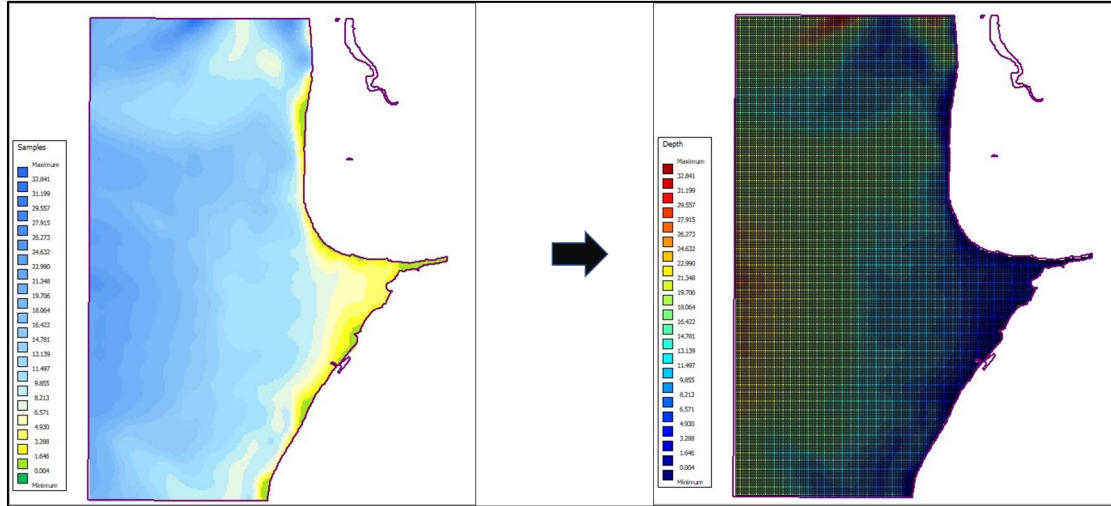
Uydu verileriyle hazırlanan batimetri 15 açısal saniye boyutuna sahip hücrelerden oluşmakta ve SRTM+15 adlı veri setini kullanmaktadır (Tozer ve diğerleri, 2019). Raster formatında olan veriler işlendikten, model alanın içerisine 42 m ile 0 m arasında 6.186 adet derinlik örneği noktası elde edilmiştir.

Her iki batimetri verisi Harita 4.2’de gösterilmektedir. Model çalışması kapsamında batimetri verileri ayrı ayrı kullanılarak modeller kurulmuştur ve uydu ile elde edilen verilerin etkililiği tartışılmıştır.



Harita 4.2. Ribble Halici model alanı batimetrisi (Sol-Saha Ölçümleri, Sağ-Uydu verileri)

Uydu verileri kullanılan batimetri verisinin, Delft3D-FLOW programında tanımlanabilmesi için çözüm ağında yer alan her bir hücre için derinlik değeri olan bir formata (.dep) getirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için ilk olarak raster verisini, her bir hücre merkezini temsil eden ve içerisinde derinlik bilgilerin yer aldığı formata dönüştürülmüştür. Sonra dönüştürülen veri, Delft3D paketinde yer alan QUICKIN aracı ile çözüm ağı içerisindeki her bir hücreye üçgensel interpolasyon yöntemi ile dağılmıştır. Elde edilen derinlik verisi Şekil 4.5’de görselleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Ribble Halici model alanı derinlik verisi

4.2.4. Başlangıç koşullarının ve fiziksel parametrelerin tanımlanması

Modelde başlangıç koşulları olarak, hız bileşenleri ve tuzluluk sıfır, sıcaklık ise 12°C olarak kabul edilmiştir. Modelde tanımlanan fiziksel ve sayısal parametreler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmektedir. Viskozite ifadeleri ve taban pürüzlüğü parametresi model kalibrasyonunda kullanılmıştır.

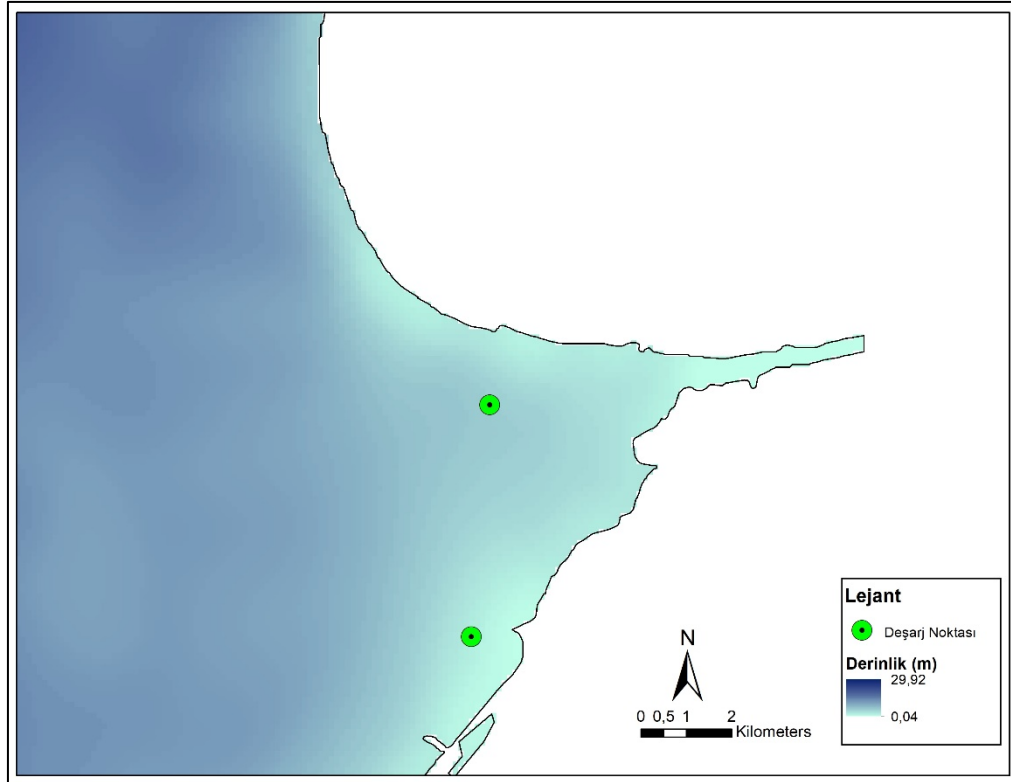
Çizelge 4.1. Fiziksel parametreler

Parametre	Değer	Birim
Yerçekimi	9,81	m/s ²
Suyun Öz kütlesi	1026	kg/m ³
Havanın Öz kütlesi	1,25	kg/m ³
Taban Pürüzlülüğü	Kalibrasyon	m (White-Colebrook)
Türbülans Viskozite İfadeleri	Kalibrasyon	m ² /s
Rüzgâr Hızı	10	m/s
Rüzgâr Yönü	315	Derece

Çizelge 4.2. Sayısal parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
Kuru- Islak Kontrolü	Çözüm ağındaki hücrenin yüzeyi ve merkezi	Eşik derinliğine göre hücreni ıslak veya kuruluşunun kontrolü
Eşik Derinliği	0,1 m	Seçilen değerin üstündeki değere sahip hücreler ıslak kabul edilmektedir
Marjinal Derinlik	-999 m	Derinlik alt sınırı
Düzleştirme Süresi	60 dakika	Simülasyon süresinin üzerinde süreye sahip sınır şartlarındaki ifadelerin (su seviyesi, debi,hız vb.) zaman serilerinin kullanılma sınırı

Ayrıca haliç girişinde 2 adet noktasal kirletici denize deşarj yapmaktadır. Modele bu kirleticiler nokta olarak girilmiş ve debi değerleri zamansal olarak tanımlanmıştır. Harita 4.3'te deşarj noktalarının haliç üzerinde konumları, Çizelge 4.3'te ise deşarj debilerinin zamana göre değerleri verilmektedir.



Harita 4.3. Ribble Halici deşarj noktaları

Çizelge 4.3. Deşarj debileri

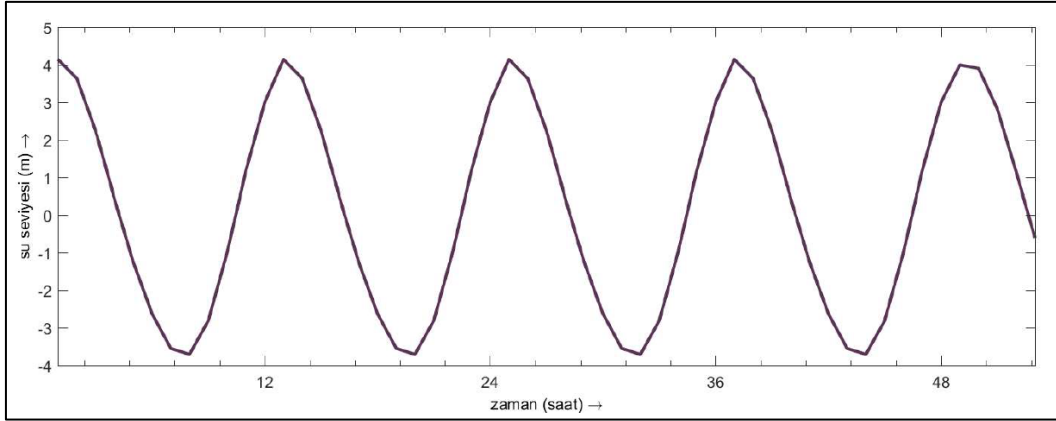
Deşarj 1		Deşarj 2	
Saat	Debi (m ³ /s)	Saat	Debi (m ³ /s)
18.5.1999 01:00	0,462	18.5.1999 01:00	0,305
18.5.1999 03:30	0,383	18.5.1999 02:00	0,301
18.5.1999 04:30	0,317	18.5.1999 03:00	0,293
18.5.1999 05:30	0,361	18.5.1999 04:00	0,287
18.5.1999 06:30	0,243	18.5.1999 05:00	0,281
18.5.1999 07:30	0,281	18.5.1999 06:00	0,277
18.5.1999 08:30	0,192	18.5.1999 07:00	0,278
18.5.1999 09:30	0,221	18.5.1999 08:00	0,274
18.5.1999 10:10	0,331	18.5.1999 09:00	0,27
18.5.1999 10:30	0,335	18.5.1999 10:00	0,28
18.5.1999 11:30	0,272	18.5.1999 11:00	0,298
18.5.1999 12:30	0	18.5.1999 12:00	0,297
18.5.1999 17:30	0	18.5.1999 13:00	0,286
18.5.1999 18:30	0,935	18.5.1999 14:00	0,286
18.5.1999 19:30	0,998	18.5.1999 15:00	0,28
18.5.1999 20:30	0,995	18.5.1999 16:00	0,275
18.5.1999 21:30	1.004	18.5.1999 17:00	0
18.5.1999 22:30	0,875	18.5.1999 18:00	0,273
18.5.1999 23:30	0,839	18.5.1999 19:00	0,274
19.5.1999 00:30	0,462	18.5.1999 20:00	0,274
19.5.1999 01:30	0,463	18.5.1999 21:00	0,276
19.5.1999 02:34	0,425	18.5.1999 22:00	0,276
19.5.1999 03:30	0	18.5.1999 23:00	0,275
19.5.1999 04:30	0	19.5.1999 00:00	0,268
19.5.1999 05:30	0,3	19.5.1999 01:00	0,266
19.5.1999 06:30	0,249	19.5.1999 02:00	0,261
19.5.1999 07:30	0,27	19.5.1999 03:00	0,258
19.5.1999 08:30	0,318	19.5.1999 04:00	0,249
19.5.1999 09:30	0,272	19.5.1999 05:00	0,245
19.5.1999 10:00	0,381	19.5.1999 06:00	0,241
19.5.1999 10:30	0,385	19.5.1999 07:00	0,243
19.5.1999 18:30	0,935	19.5.1999 08:00	0,24
19.5.1999 19:30	0,998	19.5.1999 09:00	0,242
19.5.1999 20:30	0,995	19.5.1999 10:00	0,242
19.5.1999 21:30	1.004	19.5.1999 11:00	0
19.5.1999 22:30	0,875	19.5.1999 12:00	0,272
19.5.1999 23:30	0,839	19.5.1999 13:00	0,263
20.5.1999 01:00	0,462	19.5.1999 14:00	0,257
20.5.1999 03:30	0,383	19.5.1999 15:00	0,254
20.5.1999 04:30	0,317	19.5.1999 16:00	0,254
20.5.1999 05:30	0,361	19.5.1999 17:00	0,252

Çizelge 4.3. (devam) Deşarj debileri

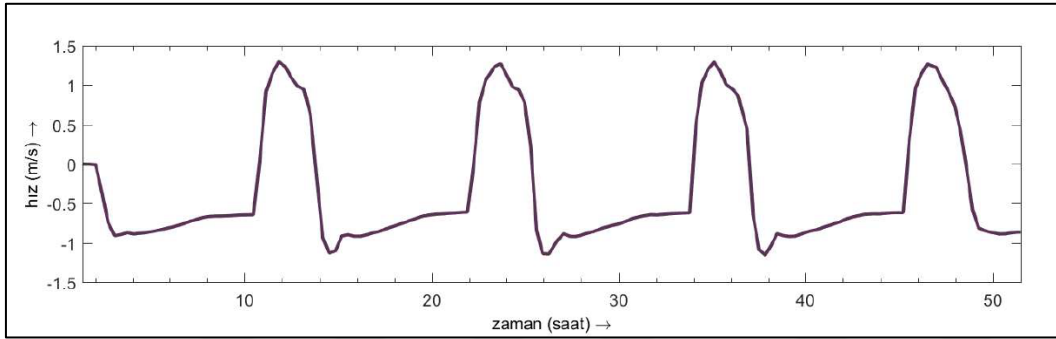
Deşarj 1		Deşarj 2	
Saat	Debi (m ³ /s)	Saat	Debi (m ³ /s)
		19.05.1999 18:00	0,253
		19.05.1999 19:00	0,25
		19.05.1999 20:00	0,251
		19.05.1999 21:00	0,251
		19.05.1999 22:00	0,254
		19.05.1999 23:00	0,251
		20.05.1999 00:00	0,245
		20.05.1999 01:00	0,305
		20.05.1999 02:00	0,301
		20.05.1999 03:00	0,293
		20.05.1999 04:00	0,287
		20.05.1999 05:00	0,281

4.2.5. Sınır şartlarının tanımlanması

Modelde İrlanda Denizi tarafı (batı), doğu, kuzey ve güney olmak üzere 4 farklı sınır şartı tanımlanmıştır. İrlanda Deniz sınır şartında, su seviyesi-zaman ilişkisi tanımlanmış olup veriler Proudman Okyanus Laboratuvarı İrlanda Denizi (Proudman Oceanographic Laboratory Irish Sea model) modelinden temin edilmiştir. Şekil 4.6’da İrlanda Denizi (batı) sınır şartından ölçülmüş su seviyeleri verilmektedir. Doğu sınır şartı, Ribble Nehri’nin İrlanda Denizi’ne ulaştığı haliç girişini temsil etmekte olup, sınır şartı olarak hız-zaman ilişkisi tanımlanmıştır. Doğu sınır şartındaki hız değerlerinde, Ribble Nehri’nde yapılan bir hidrodinamik modelleme çalışmadan elde edilen değerler kullanılmıştır (Kashefipour ve diğerleri, 2000). Şekil 4.7’de hız değerlerinin zaman göre değişim grafiği verilmektedir. Kuzey ve güney sınır şartları ise açık sınır şartı olup hız bileşenleri sıfır olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.6. İrlanda Denizi (batı) sınır şartında ölçülmüş su seviyeleri



Şekil 4.7. Ribble Nehri (doğu) sınır şartında hız değerleri (Kashefipour ve diğerleri, 2000)

4.3. Su Kalitesi Modeli Kurulumu

Su kalitesi modelinde kullanılan hidrodinamik bileşenler hidrodinamik modelden elde edilmiştir. Su kalitesi bileşenleri ise başlangıç koşulları ve sınır şartları tanımlanan hesaplanmıştır.

4.3.1. Başlangıç koşullarının ve su kalitesi parametrelerin tanımlanması

Su kalitesinde başlangıç koşulu olarak tüm haliç için fekal koliform konsantrasyonu sıfır olarak kabul edilmiştir. Fekal koliform için üçüncü kısımda açıklanan yaklaşımda kullanılan temel parametrelerin değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Birinci merteben ölüm oranı kalibrasyonda kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Su kalitesi parametreleri

Parametre	İfade	Değer	Birim
Klor Konsantrasyonu	C _{cl}	0	g/m ³
Birinci Mertebe Azalma Oranı	kmb	Kalibrasyon	l/gün
Sıcaklık Kaynaklı Azalma Oranı Katsayısı	ktmrt	1,07	-
Ortam Sıcaklığı	T	12	°C
Kritik Azalma Sıcaklığı	CTMrt	2	°C
Su Yüzeyine Düşen Radyasyon Miktarı	RadDay	0	W/m ²
Radyasyon Azalma Oranı Dönüşüm Katsayısı	CFRad	0,086	m ² /W/gün
Görülebilir Işığın Su İçerisinde Sönümlendiği Derinlik	Depth	-	m
Görülebilir Işık Sönümlenme Katsayısı	ExtVl	-	1/m

Radyasyon ve görülebilir ışıkla ilgili herhangi bir veri ve ölçüm bulunmaması sebebiyle bu parametreler sıfır kabul edilip herhangi bir işleme alınmamıştır.

Ayrıca Harita 4.3'te gösterilen deşarj noktalarından halice fekal koliform da salınmaktadır. Bu noktalardan salınan fekal koliform konsantrasyonları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deşarj noktalarından fekal koliform salınımları

Deşarj 1		Deşarj 2	
Saat	Konsantrasyon (MPN/m ³)	Saat	Konsantrasyon (MPN/m ³)
18.5.1999 01:00	0	18.5.1999 01:00	0
18.5.1999 14:00	$1,2 \times 10^9$	18.5.1999 13:00	0
18.5.1999 18:30	3×10^7	18.5.1999 14:00	$2,4 \times 10^7$
18.5.1999 19:30	4×10^8	18.5.1999 15:00	$2,4 \times 10^7$
18.5.1999 20:30	6×10^8	18.5.1999 16:00	$2,4 \times 10^7$
18.5.1999 21:30	9×10^8	18.5.1999 17:00	$2,4 \times 10^7$
18.5.1999 22:30	$1,3 \times 10^9$	18.5.1999 18:00	$2,4 \times 10^7$
18.5.1999 23:30	$1,8 \times 10^9$	18.5.1999 19:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 00:30	$1,3 \times 10^9$	18.5.1999 20:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 01:30	$1,4 \times 10^9$	18.5.1999 21:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 02:34	4×10^8	18.5.1999 22:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 05:30	5×10^8	18.5.1999 23:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 06:30	2×10^8	19.5.1999 00:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 07:30	$1,8 \times 10^8$	19.5.1999 01:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 08:30	1×10^8	19.5.1999 02:00	$2,4 \times 10^7$
19.5.1999 09:30	$1,6 \times 10^8$	19.5.1999 03:00	$2,4 \times 10^7$

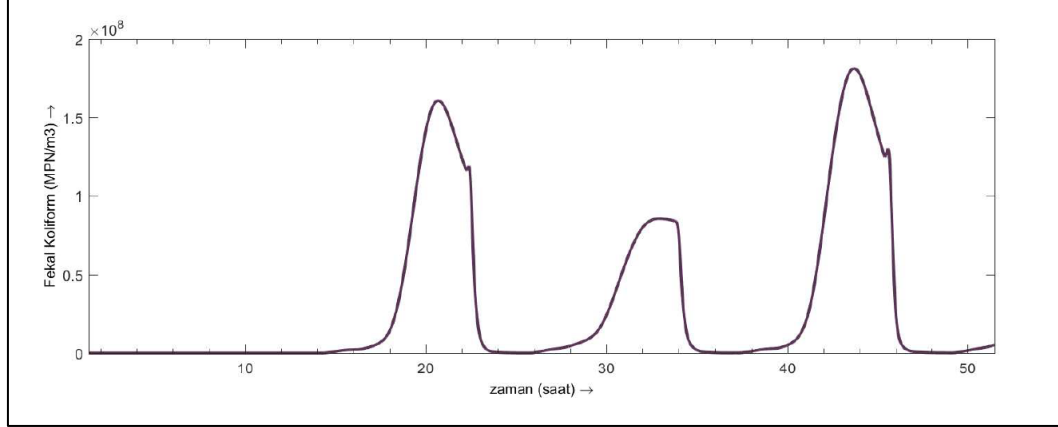
Çizelge 4.5. (devam) Deşarj noktalarından fekal koliform salınımları

Deşarj 1		Deşarj 2	
Saat	Konsantrasyon (MPN/m ³)	Saat	Konsantrasyon (MPN/m ³)
19.05.1999 10:00	$1,6 \times 10^8$	19.05.1999 04:00	$2,5 \times 10^7$
19.05.1999 10:30	$1,3 \times 10^8$	19.05.1999 05:00	$2,5 \times 10^7$
19.05.1999 18:30	3×10^7	19.05.1999 06:00	$2,5 \times 10^7$
19.05.1999 19:30	4×10^8	19.05.1999 07:00	$2,5 \times 10^7$
19.05.1999 20:30	6×10^8	19.05.1999 08:00	$2,5 \times 10^7$
19.05.1999 21:30	9×10^7	19.05.1999 09:00	$2,5 \times 10^7$
19.05.1999 22:30	$1,3 \times 10^9$	19.05.1999 10:00	$2,4 \times 10^7$
19.05.1999 23:30	$1,8 \times 10^9$	19.05.1999 11:00	$2,4 \times 10^7$
20.05.1999 01:00	$1,4 \times 10^9$	19.05.1999 12:00	$2,4 \times 10^7$
20.05.1999 03:30	1×10^7	19.05.1999 13:00	$2,4 \times 10^7$
20.05.1999 04:30	2×10^7	19.05.1999 14:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 15:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 16:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 17:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 18:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 19:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 20:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 21:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 22:00	$2,4 \times 10^7$
		19.05.1999 23:00	$2,4 \times 10^7$
		20.05.1999 00:00	$2,4 \times 10^7$
		20.05.1999 01:00	$2,5 \times 10^7$
		20.05.1999 02:00	$2,5 \times 10^7$
		20.05.1999 03:00	$2,5 \times 10^7$
		20.05.1999 04:00	$2,5 \times 10^7$
		20.05.1999 05:00	$2,5 \times 10^7$

4.3.2. Sınır şartları

Kuzey, güney ve batı sınır şartlarından model alanına herhangi bir fekal koliform konsantrasyonu salınımı olmadığı kabul edilmiştir. Ancak Ribble Nehri'nin tanımlandığı

doğu sınır şartından halice fekal koliform konsantrasyonu salınımı olmaktadır. Bu konsantrasyon değerleri, Ribble Nehri üzerinde yapılan bir modelleme çalışmasından elde edilmiştir (Kashefipour ve diğerleri, 2000). Şekil 4.8’de fekal koliform konsantrasyon değerlerinin zaman göre değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 4.8. Ribble Nehri (doğu) sınır şartında fekal koliform konsantrasyon değerleri (Kashefipour ve diğerleri, 2000)



5. MODEL SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında hem hidrodinamik model hem de su kalitesi modeli kurulmuş ve kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Ribble Halici üzerinde kurulan hidrodinamik modellerde farklı çözüm ağları, sayısal çözüm yöntemleri ve türbülans modelleri denenmiş olup bunlardan elde edilen sonuçlar ölçülmüş veriler ve eski çalışmalardan elde edilen model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Modelleme çalışmalarında simülasyon süresi elde bulunan veriler doğrultusunda 18 Mayıs 1999 01:00 ile 20 Mayıs 1999 05:00 saatleri arası seçilmiştir. Hidrodinamik modelde ilk olarak sahada yapılanlar ölçümlerden elde edilmiş batimetri kullanılarak kurulmuştur. Su kalitesi modelinde ise deşarj noktalarından ve sınır şartlarından suya verilen fekal koliform miktarının, hidrodinamik model çıktıları kullanılarak çevresel kuvvetler ile haliç içerisinde nasıl bir yayılım gösterdiği modellenmiştir.

Son bölümde ise uydu verilerinden elde edilen batimetri kullanılarak kurulan modelin çıktıları, saha ölçümleriyle elde edilmiş batimetri ile kurulan model çıktıları ve ölçülmüş veriler ile karşılaştırılarak uydu verilerinden elde edilen batimetrimin performansı ve etkililiği tartışılmıştır.

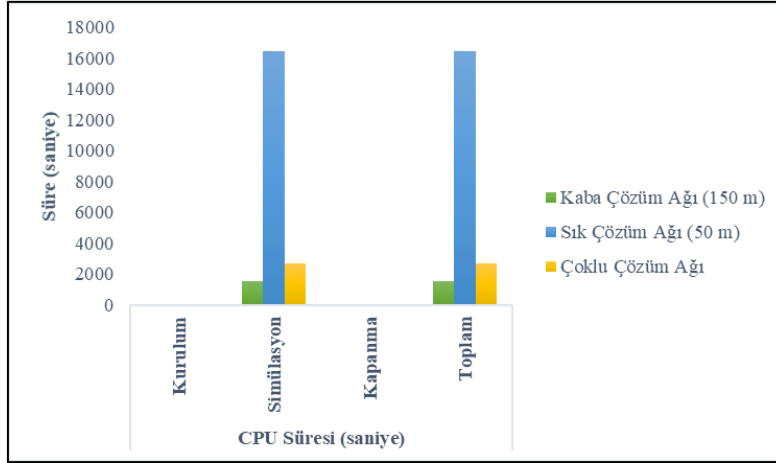
5.1. Hidrodinamik Model

Hidrodinamik model kurulumu süreci olarak çözüm ağının seçilmesi ile başlamıştır. 3 farklı çözüm ağının 52 saatlik simülasyon süresinde işlem hızları ve model çıktıları karşılaştırılarak seçim yapılmıştır.

Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1’te 3 farklı çözüm ağı kullanılarak yapılan modellerin CPU süreleri gösterilmektedir.

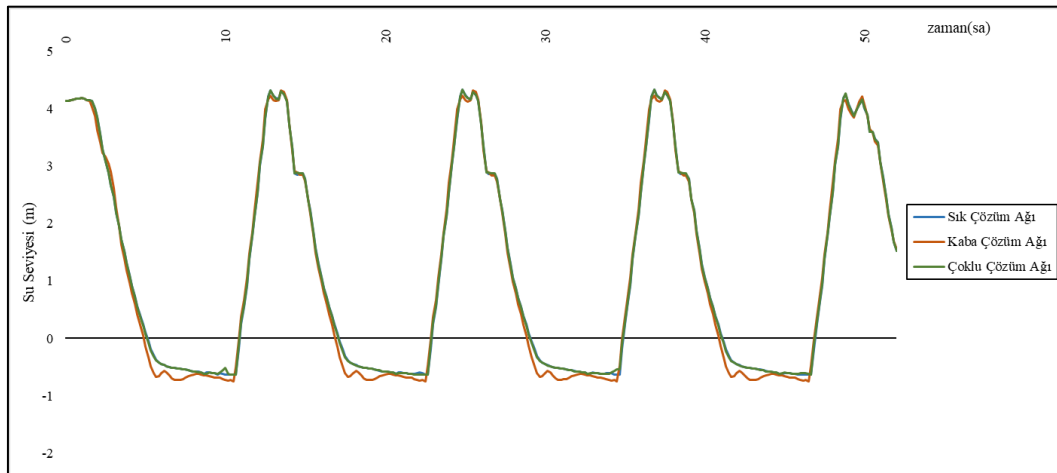
Çizelge 5.1. Çözüm ağı tipine göre CPU süreleri

Çözüm Ağı Tipi	CPU Süresi (saniye)			
	Kurulum	Simülasyon	Kapanma	Toplam
Kaba Çözüm Ağı (150 m)	0,42	1.562,53	0,07	1.563,02
Sık Çözüm Ağı (50 m)	3,00	16.420,56	0,47	16.424,03
Çoklu Çözüm Ağı	0,69	2.700,33	0,01	2.701,03



Şekil 5.1. Çözüm ağı tipine göre CPU sürelerinin karşılaştırılması

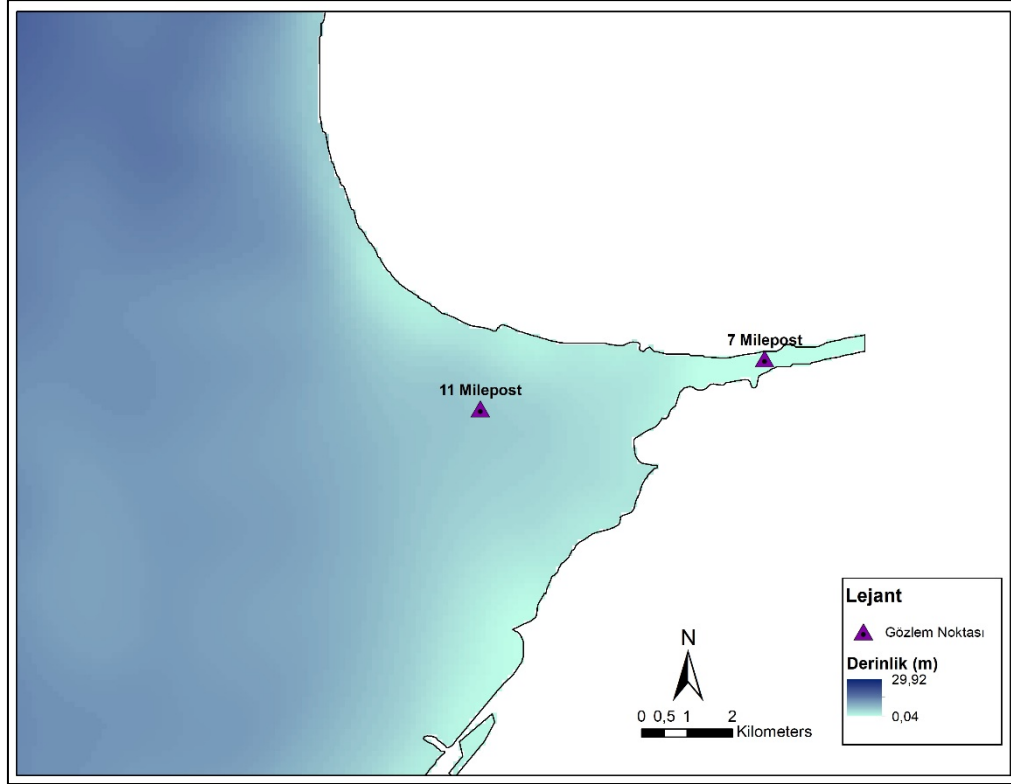
Yerel sıklaştırma ile oluşturulan çoklu çözüm ağı kullanılarak çözüm süresinde ciddi azalma sağlanmaktadır. Çoklu çözümü ağı kullanılarak yapılan modellemede CPU süresi sık çözüm ağıyla yapılan modellemeye göre 6,08 kat azalmıştır. Ayrıca haliç girişinde konumlanan bir kontrol 3 çözüm ağı kullanılarak hazırlanmış modellerden elde edilen su seviyeleri Şekil 5.2’de karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre çoklu çözüm ağı kullanılarak sık çözüm ağına yakın bir sonuç paterni elde edilebilmektedir. Tez çalışmasında da yerel sıklaştırma ile elde edilen çözüm ağının işlem süresi konusunda etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapılacak hidrodinamik modellemelerde çoklu çözüm ağı kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Çözüm ağlarına göre haliç girişinde su seviye sonuçları

5.1.1. Kalibrasyon ve validasyon

Kalibrasyon ve validasyon için sahada 7 milespot ve 11 milespot adında iki gözlem noktasında su seviyesi ölçümleri kullanılmıştır. Haliç girişinde yer alan gözlem noktaları haritası Harita 5.1’de verilmektedir.



Harita 5.1. Ribble Halici gözlem noktaları

Hidrodinamik modelde temel kalibrasyon parametresi olarak pürüzlülük Nikuradse pürüzlülük uzunluğu katsayısı k_s kullanılmıştır. Kalibrasyon için 0,05 m değerinden 0,30 m değerine kadar ayrı modeller çalıştırılmıştır. Model çıktıları ile 11 milepost noktasında ölçülmüş değerler arasında RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error) ve korelasyon katsayısı olmak üzere 3 temel istatistiksel analiz yöntemi kullanılarak su seviyesine göre model kalibre edilmiştir. Bu analiz yöntemleri matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

RMSE;

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\zeta_{gözlenmiş}^i - \zeta_{model}^i)^2}{n}} \quad (5.1)$$

MAE;

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \zeta_{gözlenmiş}^i - \zeta_{model}^i \right| \quad (5.2)$$

Korelasyon Katsayısı ise (Chapra ve Canale, 2010: 463);

$$r^2 = \frac{\sum(\zeta_{gözlenmiş}^i - \bar{\zeta}_{gözlenmiş})^2 - \sum(\zeta_{gözlenmiş}^i - \zeta_{model}^i)^2}{\sum(\zeta_{gözlenmiş}^i - \bar{\zeta}_{gözlenmiş})^2} \quad (5.3)$$

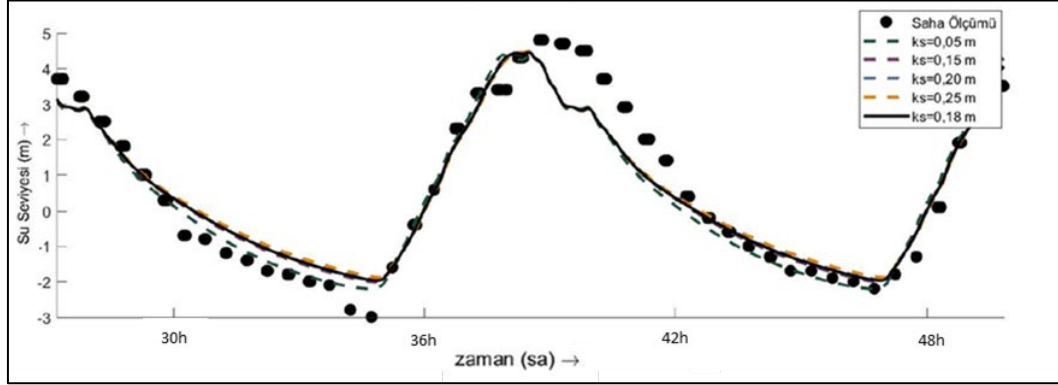
İki gözlem istasyonundan diğerinden daha fazla ölçüme sahip olan 11 milepots noktası kalibrasyon için seçilmiştir. 7 milepots noktası ise validasyon işlemlerinde kullanılmıştır. Farklı Nikuradse pürüzlülük uzunluğuna göre kurulan modellerin korelasyon katsayısı ve RMSE ve MAE değerleri Çizelge 5.2’de verilmektedir.

Çizelge 5.2. Nikuradse pürüzlülük uzunluğuna göre model çıktılarının istatistiksel analizi

k_s	r^2	RMSE	MAE
0,05	0,87391	0,76892	0,47025
0,1	0,88056	0,74837	0,42583
0,15	0,88286	0,74111	0,40969
0,16	0,88302	0,74061	0,40806
0,17	0,88311	0,74034	0,40707
0,18	0,88314	0,74022	0,40615
0,19	0,88314	0,74025	0,40611
0,2	0,88309	0,74040	0,40633
0,21	0,88299	0,74070	0,40735
0,25	0,88240	0,74258	0,41297
0,3	0,66475	1,25378	0,95916

Sonuçlara göre modelde kullanılacak Nikuradze pürüzlülük uzunluğu katsayısı 0,88314 r^2 ve 0,74022 RMSE değeri ile 0,18 m olarak belirlenmiştir. Modellerin su seviyesi

sonuçlarının değerlerinin 11 milepots gözlem noktasında ölçülmüş değerlere göre karşılaştırılması grafik halinde Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Nikuradse pürüzlülük uzunluğuna göre modellerin su seviyesi sonuçları

Sonraki aşamada ise Delft3D-Flow programında yer alan $k-\varepsilon$ ve $k-L$ kapalı türbülans modellerine ve Cyclic ve WAQUA sayısal çözüm yöntemlerine göre 4 ayrı model kurulup bu modeller kendi aralarında değerlendirilip en uygun model seçilmiştir. Bu doğrultuda kurulan modellerin korelasyon katsayısı ve RMSE ve MAE değerleri Çizelge 5.3'te verilmektedir.

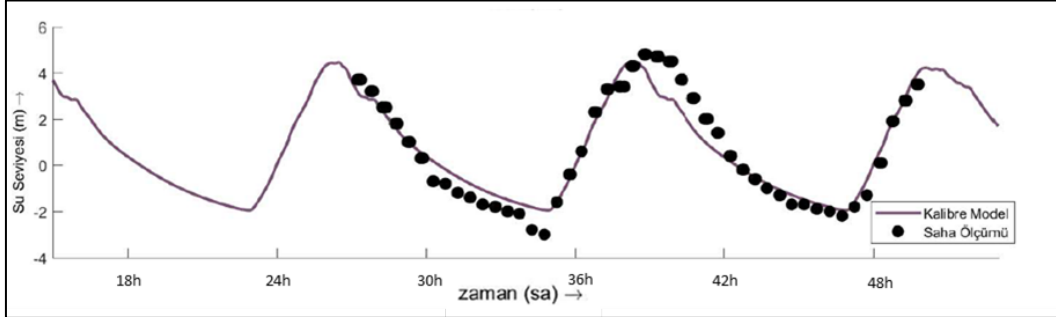
Çizelge 5.3. Türbülans modellerine ve sayısal çözüm yöntemlerine göre model çıktılarının istatistiksel analizi

Model Adı	Türbülans Modeli	Sayısal Çözüm Yöntemi	r^2	RMSE	MAE	CPU Süresi (saniye)
md-ke-cyc	$k-\varepsilon$	Cyclic	0,88314	0,74022	0,40615	5.539,42
md-ke-wq	$k-\varepsilon$	WAQUA	0,88262	0,74188	0,41079	4.821,73
md-kl-cy	$k-L$	Cyclic	0,88604	0,73100	0,40537	4.479,44
md-kl-wq	$k-L$	WAQUA	0,88580	0,73175	0,40838	4.379,09

Sonuçlara göre tek taşınım denklemleri olan $k-L$ türbülans modeli, iki taşınım denklemleri olan $k-\varepsilon$ türbülans modeline göre gerçek değerlere daha yakın sonuçlar vermiştir. Sayısal çözüm yöntemlerinde ise Cyclic yöntemi, pek büyük bir farkla olmasa da WAQUA yöntemine göre daha iyi bir performans sergilemiştir.

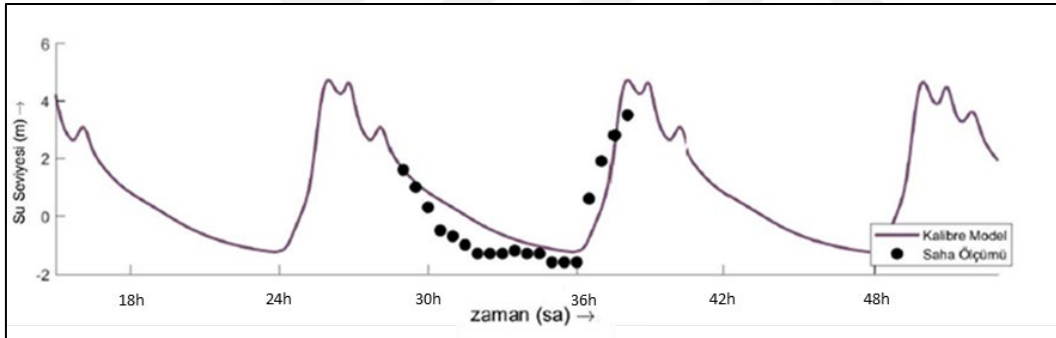
Kalibrasyon işlemlerinin sonucu olarak, modelde kullanılacak Nikuradze pürüzlülük uzunluğu 0,18 m, türbülans modeli $k-L$ ve sayısal çözüm yöntemi Cyclic yöntemi

seçilmiştir. Kalibre modelin 11 milepots gözlem noktasındaki su seviyesi sonuçları ile ölçüm değerlerini karşılaştırılması Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Kalibre modelin 11 milepots noktasında su seviyesi sonuçları

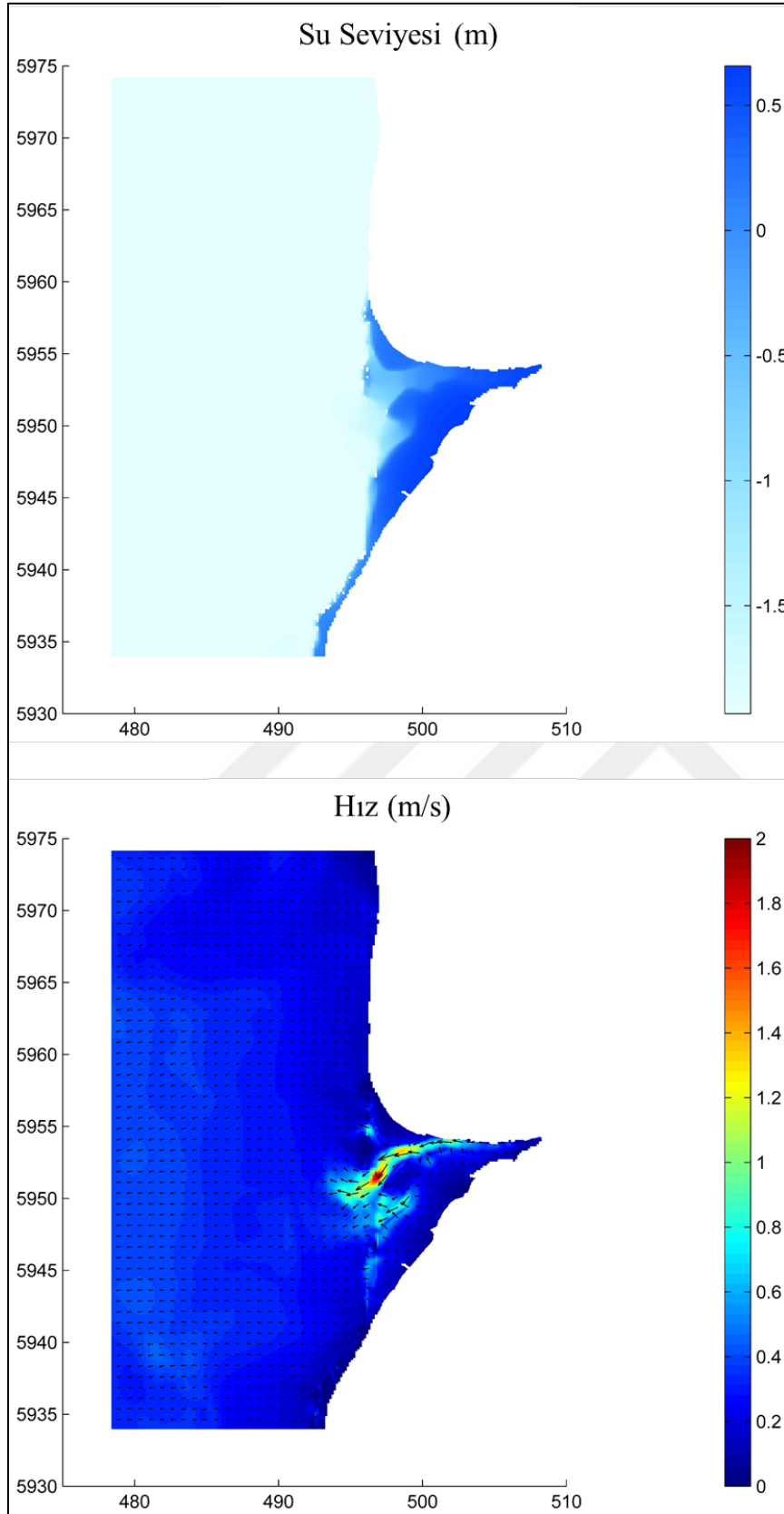
Validasyon işlemi için kullanılan 7 milepots noktasındaki ölçülmüş su seviyesi değerleri ile aynı noktada kalibre modelin su seviyesi sonuçları Şekil 5.5'te verilmiştir.



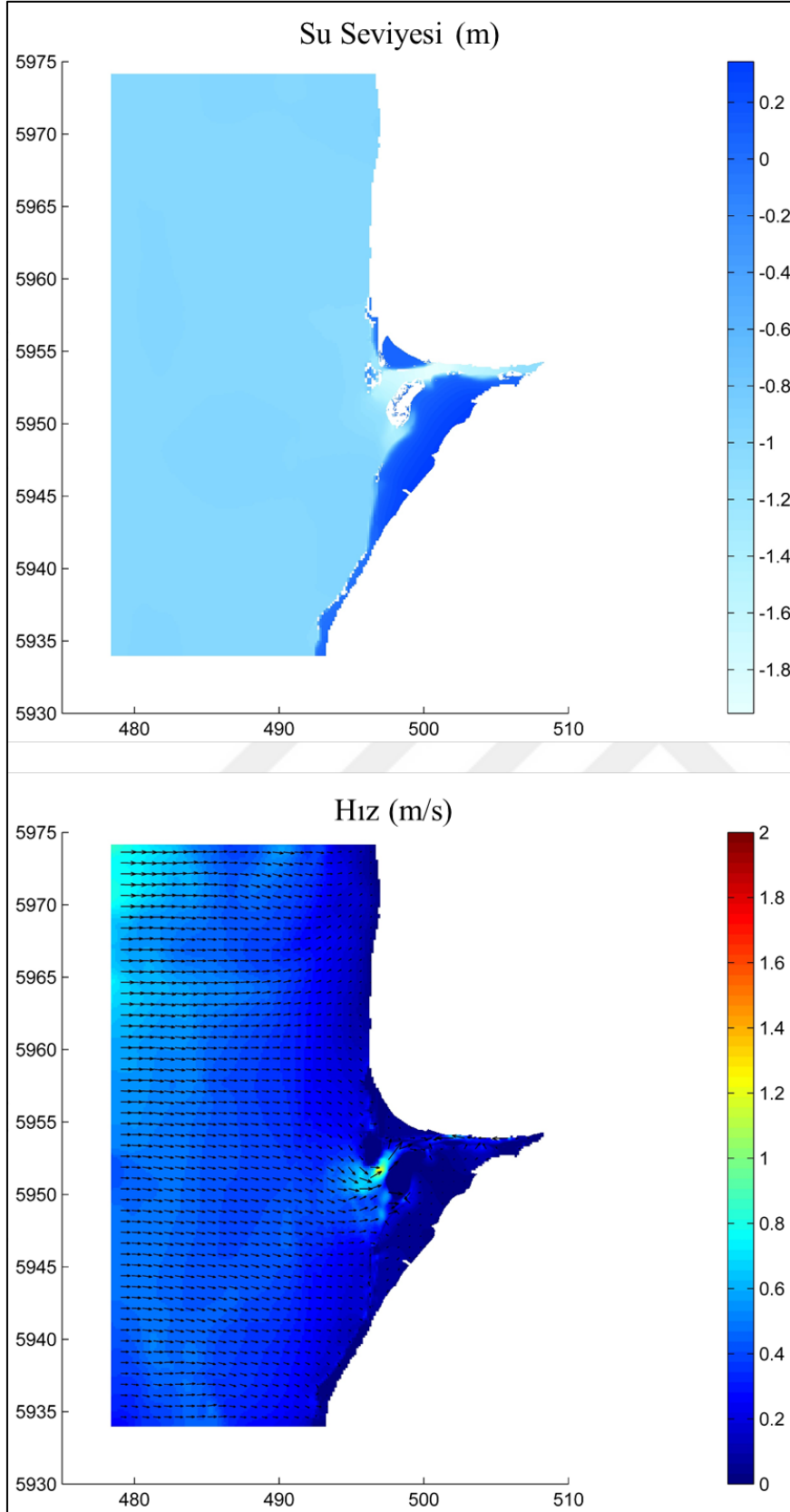
Şekil 5.5. Kalibre modelin 7 milepots noktasında su seviyesi sonuçları

5.1.2. Hidrodinamik model sonuçları

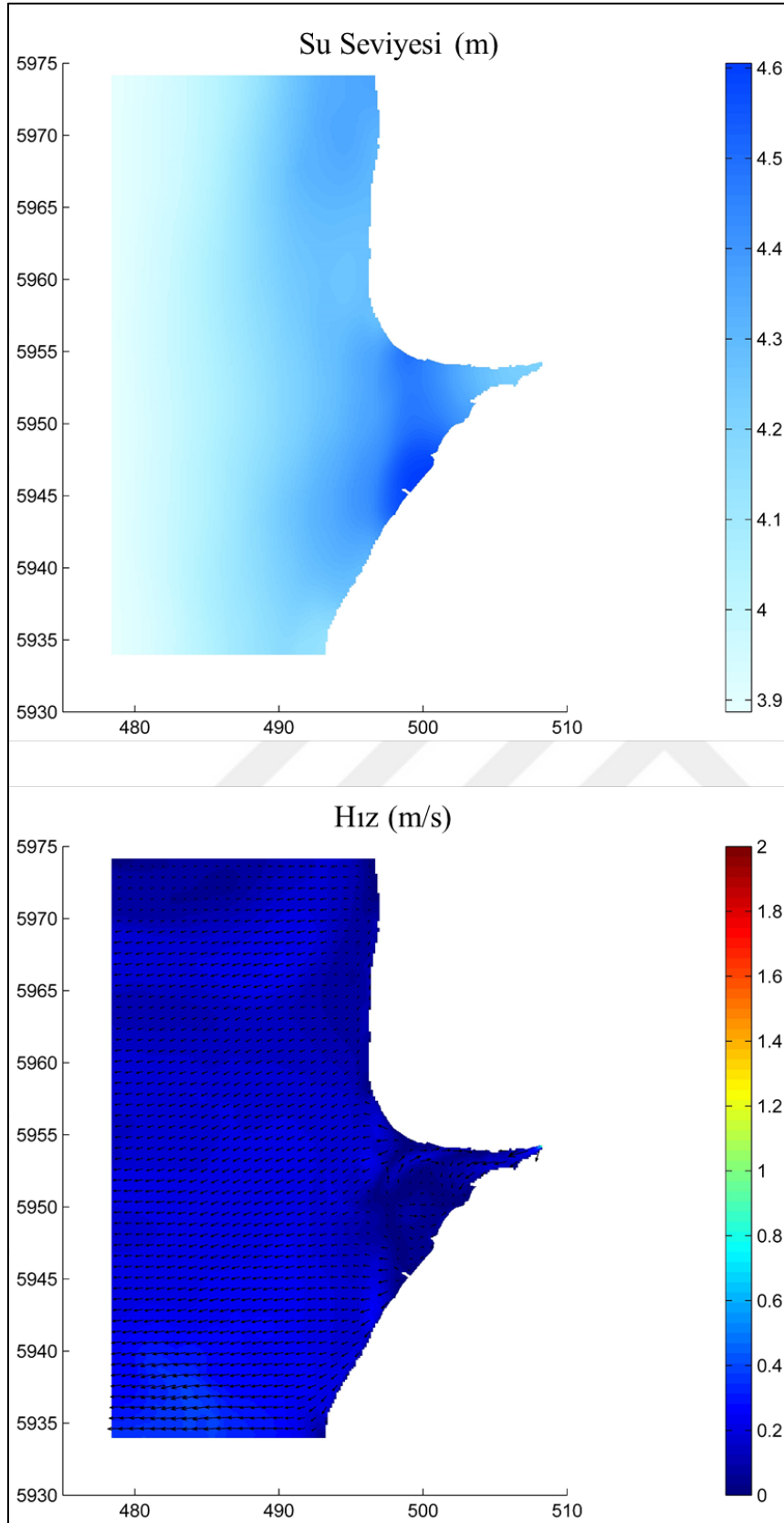
Model çıktılarına göre ilk gelgit dalgasının halice ulaştığı 18.05.1999 tarihinde haliç girişinde su seviyesi 06.30 saatinde sıfır değerini almakta, 11.00 saatinde dip noktasında düşmekte ve 14.30 saatinde ise tepe noktasında ulaşmaktadır. Modelden alınan hidrodinamik büyüklükler (su seviyesi, hız büyüklüğü ve hız doğrultusu) sırasıyla gelgit dalgasının sıfır değerini aldığı, dip ve tepe yaptığı zamanlarda Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Ribble Halici'nde 18.05.1999 tarihi 06.30 saatinde model su seviyesi ve hız çıktıları



Şekil 5.7. Ribble Halici'nde 18.05.1999 tarihi 11.00 saatinde model su seviyesi ve hız çıktıları



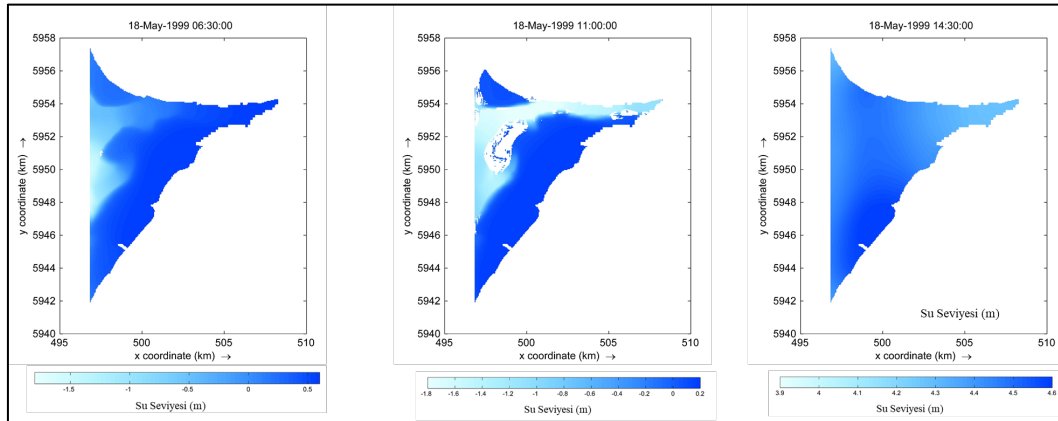
Şekil 5.8. Ribble Halici'nde 18.05.1999 tarihi 14.30 saatinde model su seviyesi ve hız çıktıları

Model sonuçlarına göre, su seviyesinin haliç girişinde sıfır değerini aldığı 06.30 saatinde, haliçte en büyük su seviyesi değeri 0,67 m en düşük su seviyesi değeri ise -1,93 m olduğu görülmektedir. Hız değerine bakıldığında, hız değeri en büyük değeri haliç girişindeki nehri ağzında 1,94 m/s ile almaktadır.

Model sonuçlarına göre, su seviyesinin haliç girişinde dip yaptığı 11.00 saatinde, haliçte en büyük su seviyesi değeri 0,34 m en düşük su seviyesi değeri ise -1,94 m olduğu görülmektedir. Hız değerine bakıldığında, hız değeri en büyük değeri haliç girişindeki nehri ağzında 1,24 m/s ile almaktadır.

Model sonuçlarına göre, su seviyesinin haliç girişinde tepe yaptığı 14.30 saatinde, haliçte en büyük su seviyesi değeri 4,47 m en düşük su seviyesi değeri ise 0 m olduğu görülmektedir. Hız değerine bakıldığında, hız değeri en büyük değeri haliç girişindeki nehri ağzında 0,97 m/s ile almaktadır.

Yukarıda belirtilen zaman adımlarında haliç girişindeki su seviyeleri Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9. Haliç girişinde su seviyesi değişimi

5.2. Su Kalitesi Modeli

Su kalitesi model çalışmalarına çoklu çözüm ağının ve hidrodinamik sonuçlarının modele tanıtılması aşamasıyla başlanmıştır. Ancak denemelerden sonra çoklu çözüm ağından hem hidrodinamik sonuçların su kalitesi modelinde kullanılabilecek formata getirdiğinde

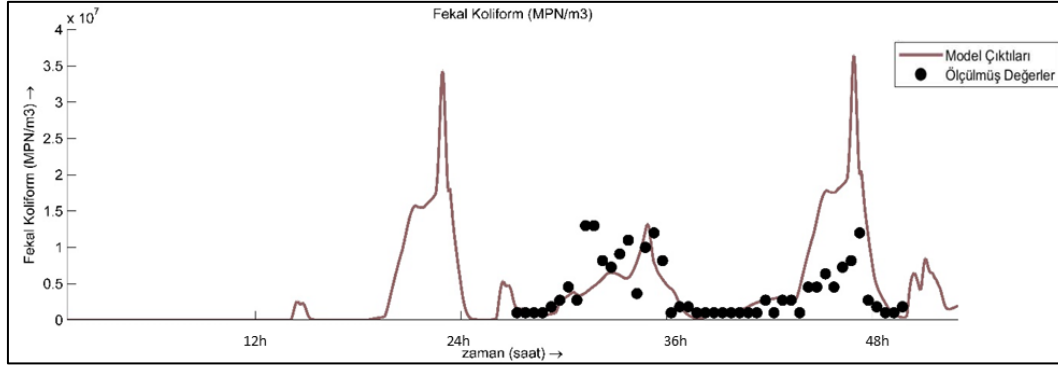
dosyaların aşırı büyük boyutlara ulaşması, hem de modelde hidrodinamik sonuçların tam alınamaması gibi problemler yaşanmıştır. Bu nedenle su kalitesi modeline kaba çözüm ağı kullanılarak devam edilmiştir. Kaba çözüm ağı ile su kalitesi modeli çalışır bir şekilde kurulabilmiş ve sonuç alınmıştır.

5.2.1. Su kalitesi modeli kalibrasyonu ve sonuçları

Hidrodinamik ölçümlerin yapıldığı iki gözlem noktasında koliform konsantrasyonlarının ölçümü de yapılmıştır. 11 milepots noktasında ölçüm sayısı daha fazla olması sebebiyle bu nokta hidrodinamik modelde olduğu gibi kalibrasyon işlemi için seçilmiştir. 7 milepots ise validasyon işleminde kullanılmıştır.

Su kalitesi modellerinde konsantrasyonun zamana ve konuma göre değişimini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Kalibrasyon parametresi olarak su kirlilik analizlerinde sıklıkla kullanılan birinci mertebe azalma oranı seçilmiştir. Diğer azalma oranını etkileyen diğer parametrelerle ilgili ölçümlerin ve verilerin az olması veya olmaması sebebiyle bu parametreler kalibrasyon işleminde kullanılmamıştır.

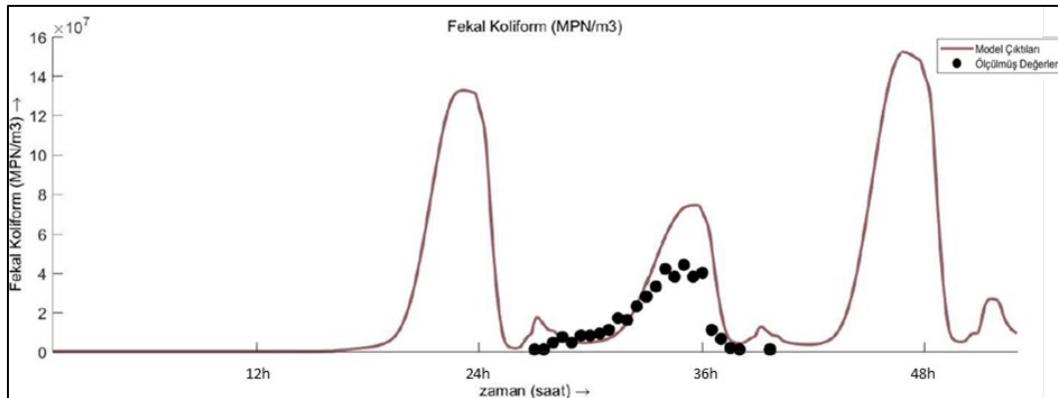
Tuz oranı fekal koliform azalama oranını etkileyen ana parametrelerden birisidir. Laboratuvar ve saha verilerine göre modelde kullanılan su kalitesi yaklaşımında birinci mertebe azalma oranı, deniz suyunda 1,40 1/gün, tatlı sularda ise 0,80 1/gün olarak alınması tavsiye edilmektedir. (Mancini, 1978). Bu nedenle modelde birinci mertebe azalma oranı 1,40 olarak seçilmiştir. Şekil 5.10'da 11 milepots gözlem noktasında ölçülmüş fekal koliform konsantrasyonu ile bu değere göre kurulmuş su kalitesi modelinin çıktıları karşılaştırması verilmiştir. Kalibrasyon işleminde, model çıktılarının ölçülmüş değerlere yakın bir paterne sahip olmasına rağmen çıktılarının RMSE, MAE değerleri beklenenden düşük çıkmıştır. Bunun sebebi deşarj noktalarında yapılan debi ve konsantrasyon ölçümlerde yaşanan hatalardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.10. 11 milepots gözlem noktasında fekal koliform konsantrasyonu karşılaştırması

Model çıktılarına göre fekal koliform konsantrasyonu 11 milepots gözlem noktasında 19 Mayıs 1999 22.54'te $3,64 \times 10^7$ MPN/m³ değeri ile maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Ayrıca yine aynı noktada fekal koliform konsantrasyonu simülasyon süresi içerisinde 18 Mayıs 1999 22.55'te ve 19 Mayıs 1999 10.52'de 2 defa daha tepe noktasına ulaşır sönümlenmektedir.

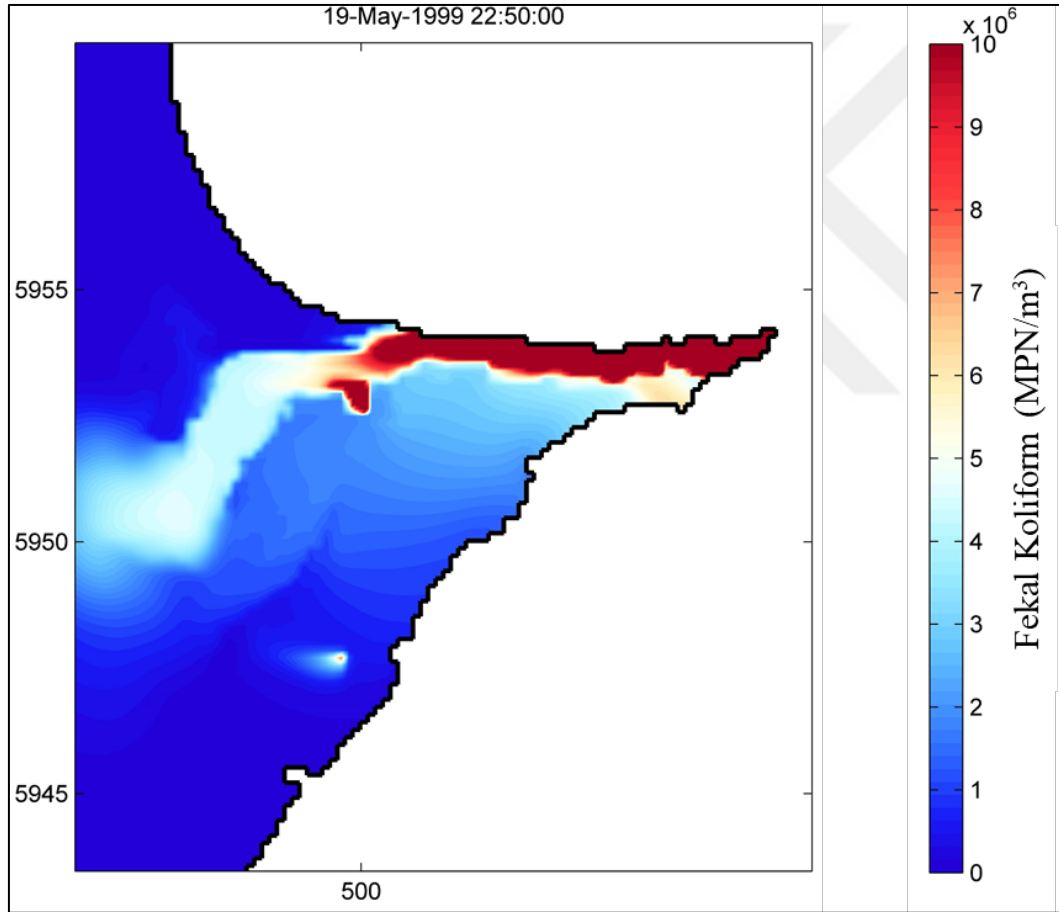
Validasyon işlemi için kullanılan 7 milepots gözlem noktasındaki ölçülmüş konsantrasyon değerleri ile aynı noktada birinci mertebe azalma oranı 1,40 1/gün değeri ile kalibre edilmiş modelin konsantrasyon çıktılarının karşılaştırılması Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. 7 milepots gözlem noktasında fekal koliform konsantrasyonu karşılaştırması

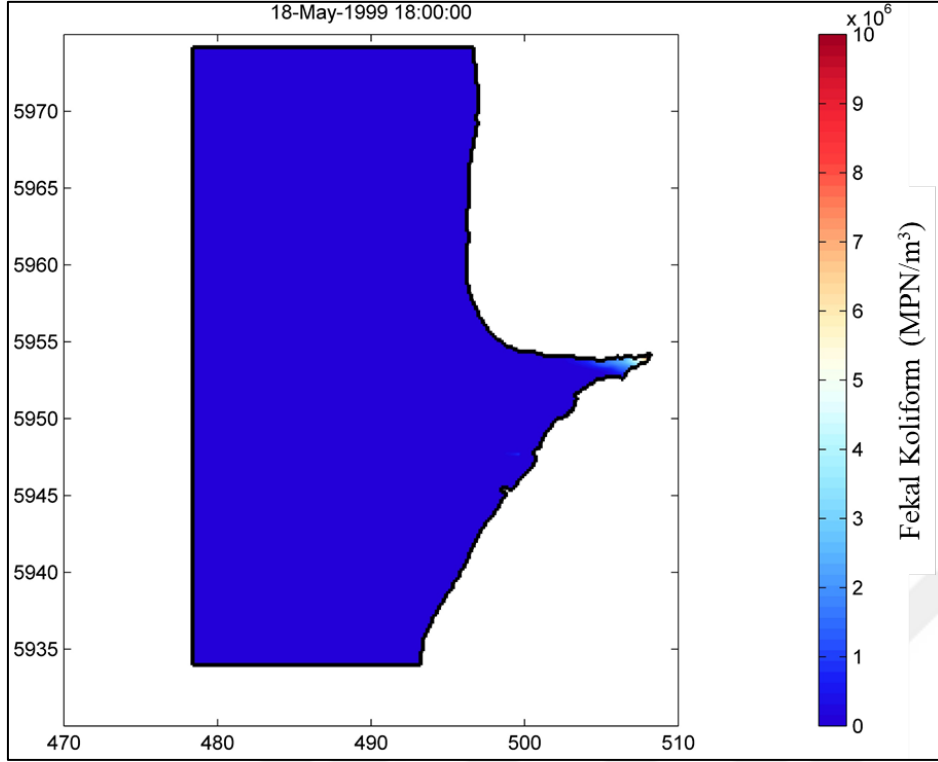
7 milepots gözlem noktasında ise model çıktılarına göre fekal koliform konsantrasyonu 19 Mayıs 1999 22.51’de $15,23 \times 10^7$ MPN/m³ değeri ile maksimum seviye çıkmaktadır. Ayrıca yine aynı noktada fekal koliform konsantrasyonu simülasyon süresi içerisinde 18 Mayıs 1999 23.07’de ve 19 Mayıs 1999 11.35’te 2 defa daha tepe noktasına ulaşır ve sönümlenmektedir.

Her iki gözlem noktasında da maksimum fekal koliform konsantrasyon değerine yakın bir zaman adımı 19 Mayıs 1999 22.50’de haliç girişinde konsantrasyon durumu Şekil 5.12’de görselleştirilmiştir.

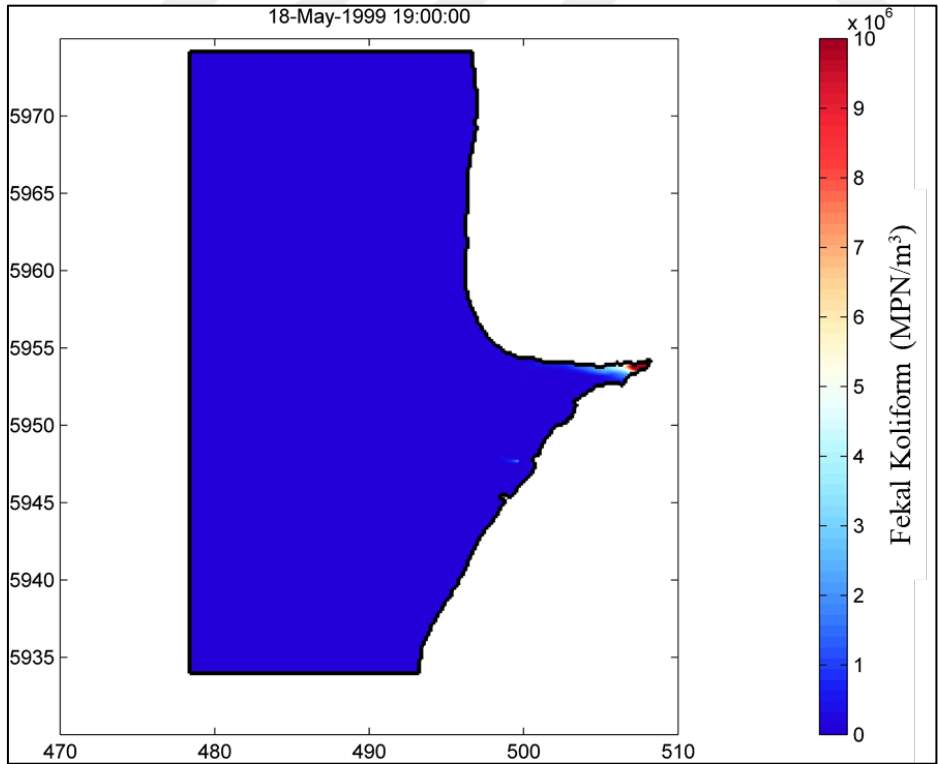


Şekil 5.12. Ribble Halici girişinde 19.05.1999 22.50 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları

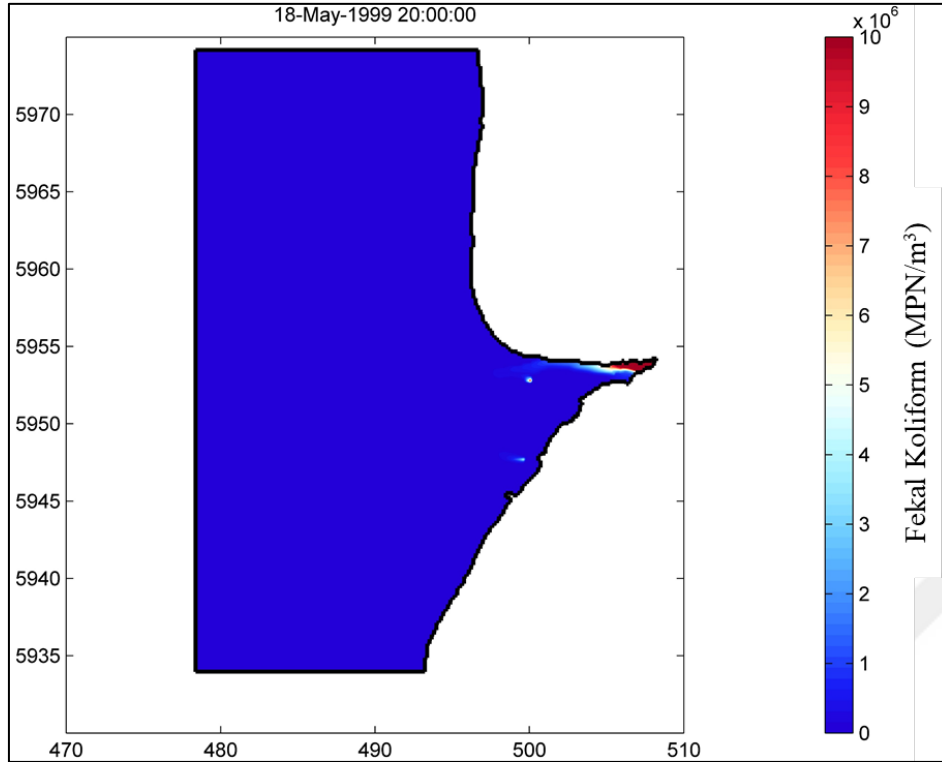
Şekil 5.10’da görüldüğü gibi 11 milepots gözlem noktasında fekal koliform konsantrasyonu ilk yükselişe geçip sönümlenmesi 18 Mayıs 1999 20.00 ile 19 Mayıs 1999 01.00 arasında gerçekleşmiştir. Bu saatler arasında haliçte saatlik fekal koliform konsantrasyonu değişimi sırasıyla Şekil 5.13-Şekil 5.20 ile verilmiştir.



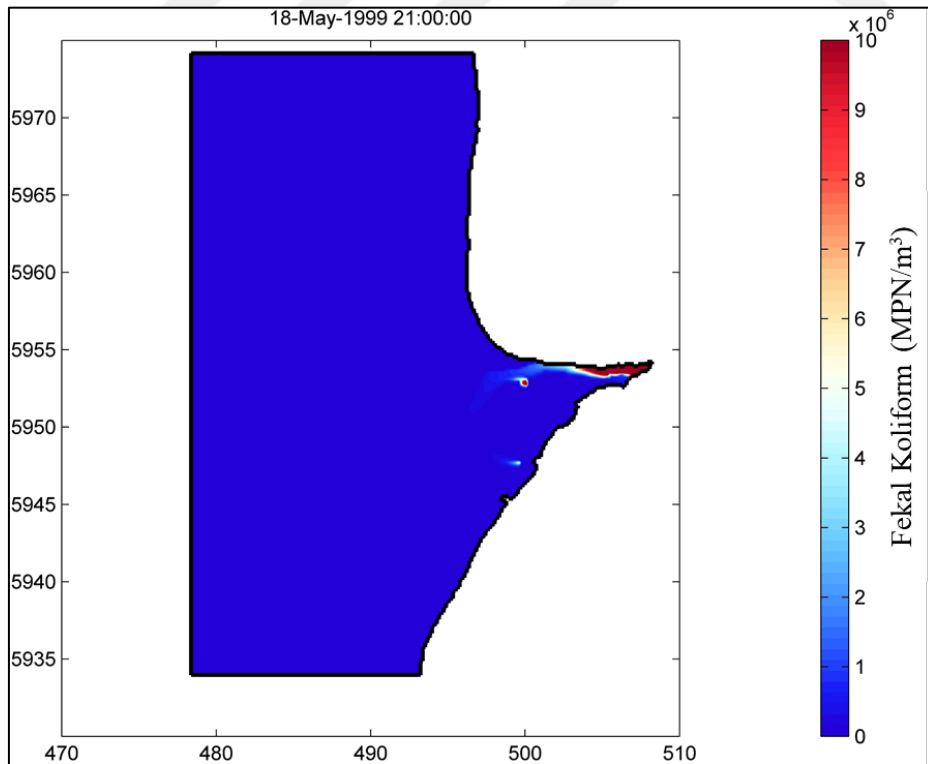
Şekil 5.13. Ribble Halici'nde 18.05.1999 18.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları



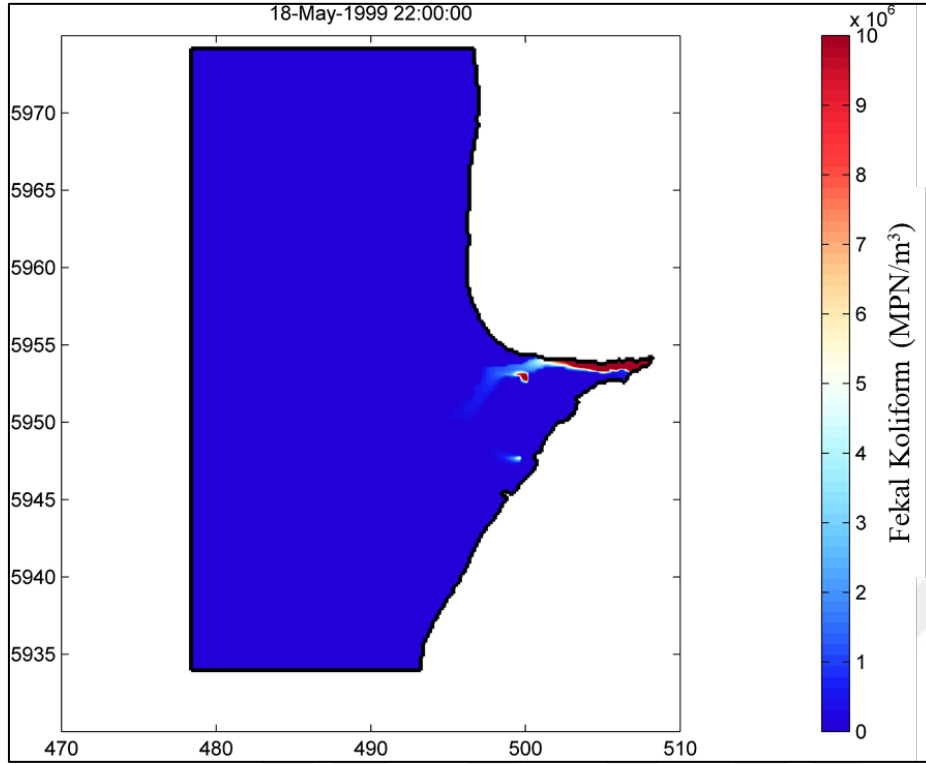
Şekil 5.14. Ribble Halici'nde 18.05.1999 19.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları



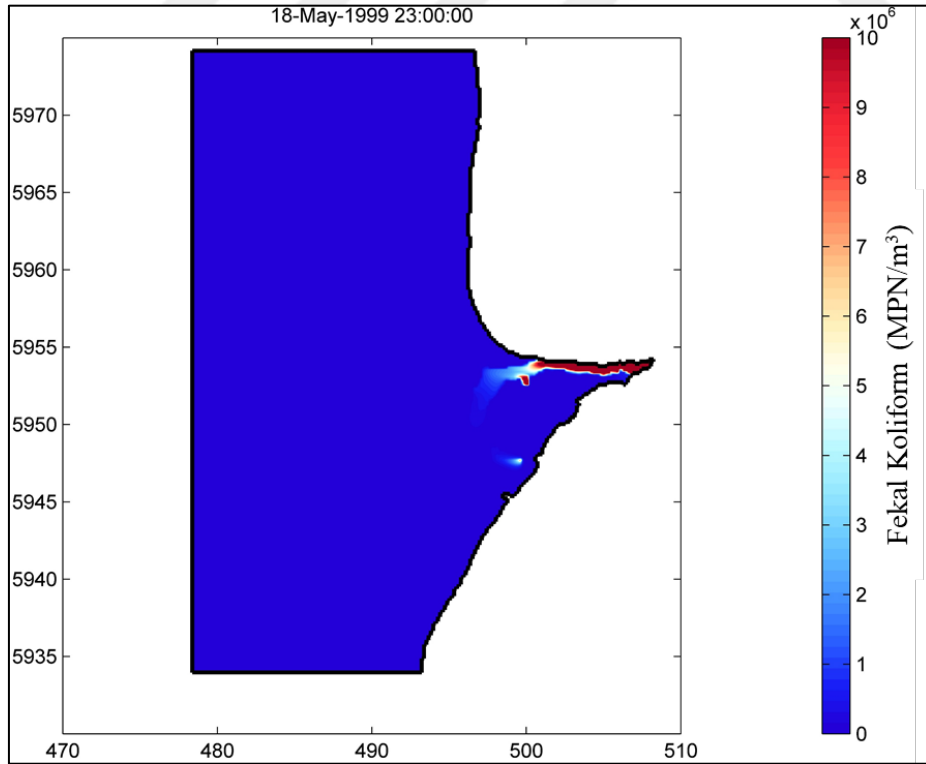
Şekil 5.15. Ribble Halici'nde 18.05.1999 20.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları



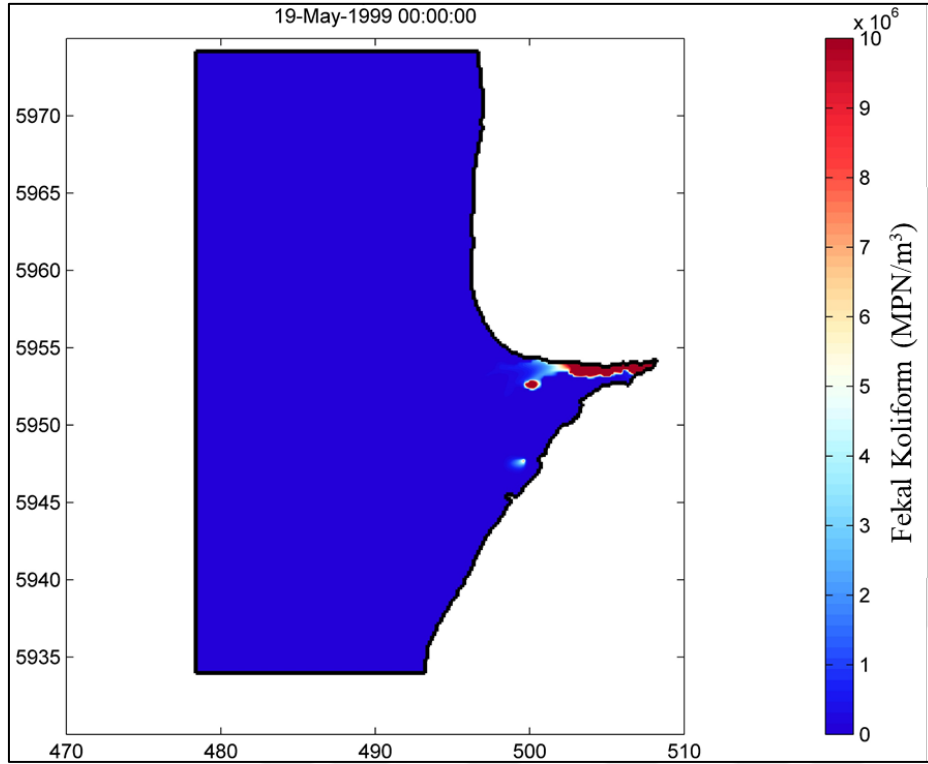
Şekil 5.16. Ribble Halici'nde 18.05.1999 21.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları



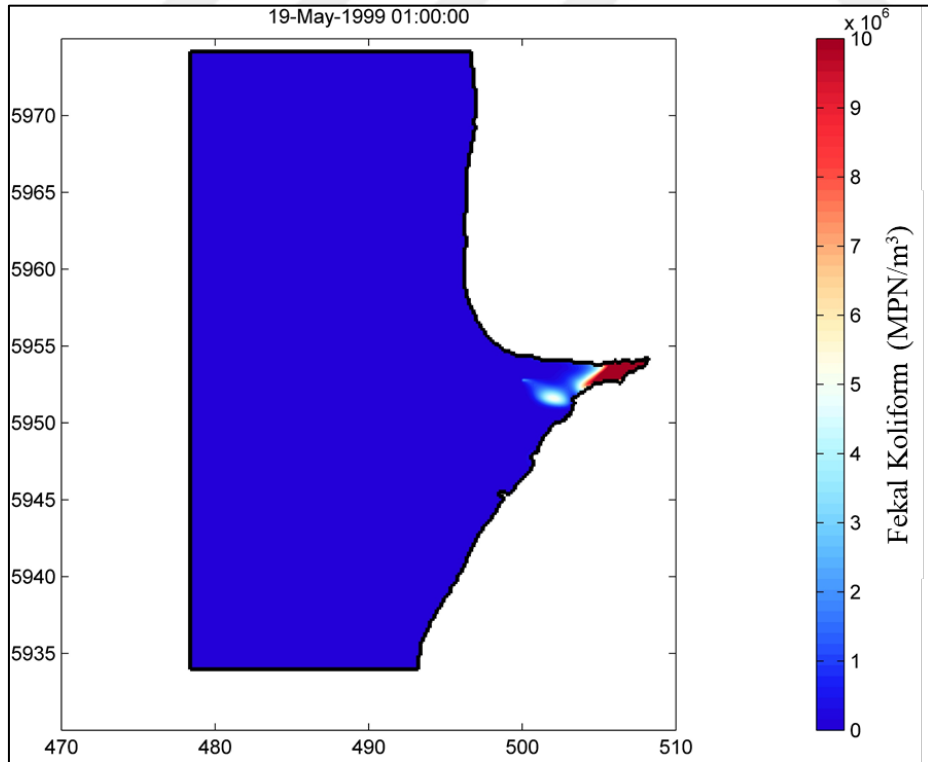
Şekil 5.17. Ribble Halici'nde 18.05.1999 22.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları



Şekil 5.18. Ribble Halici'nde 18.05.1999 23.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları

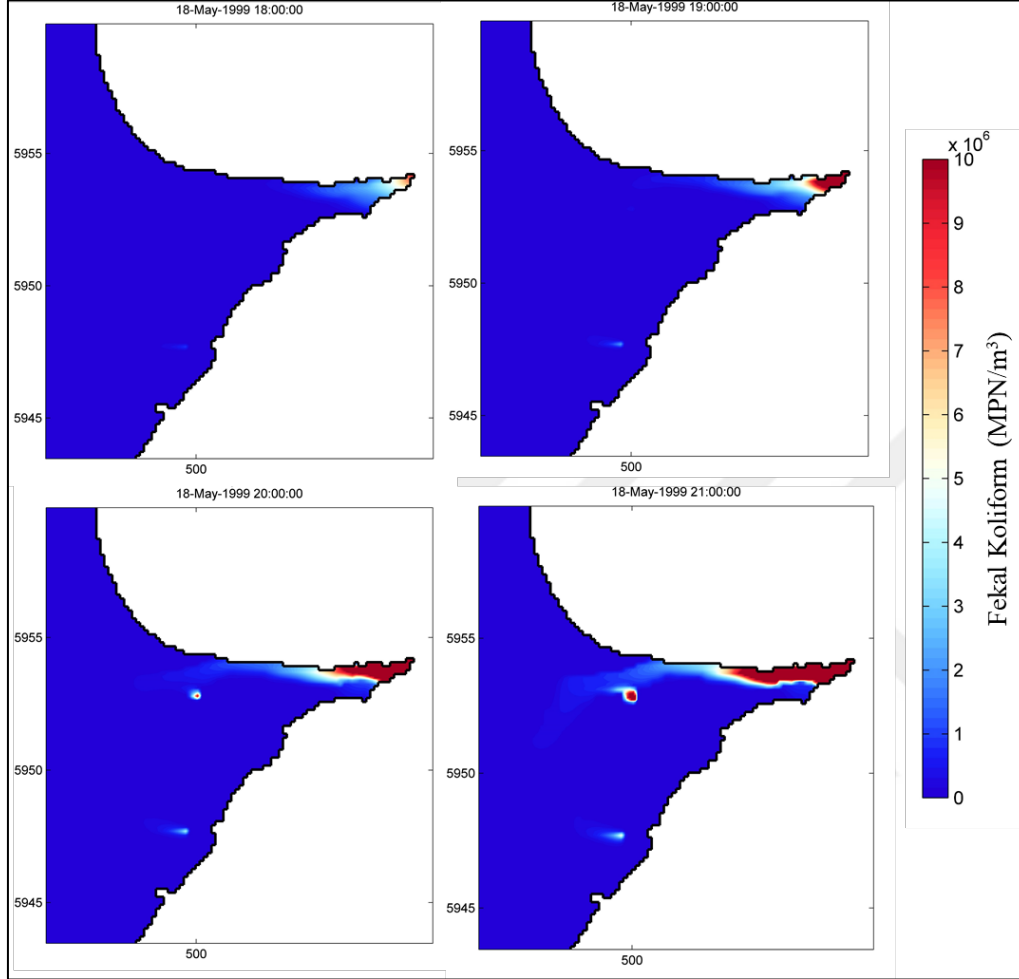


Şekil 5.19. Ribble Halici'nde 19.05.1999 00.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları

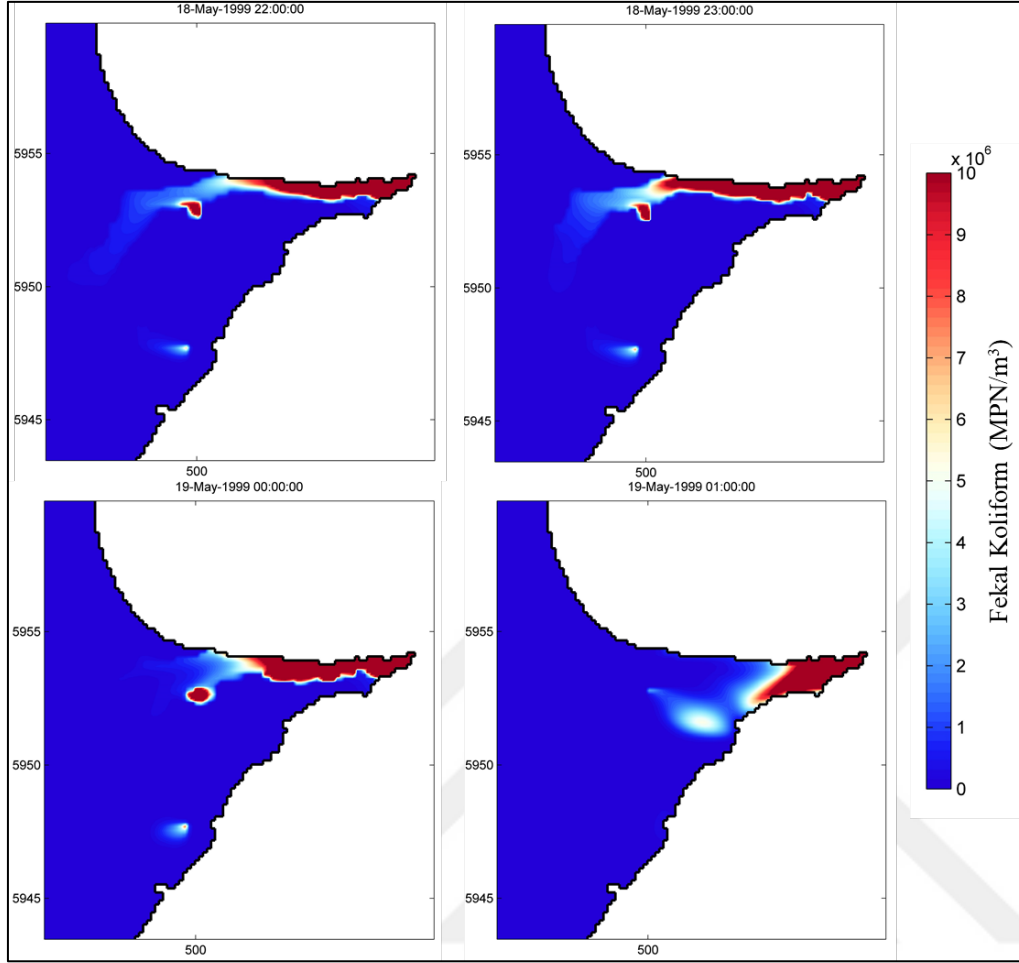


Şekil 5.20. Ribble Halici'nde 19.05.1999 01.00 model fekal koliform konsantrasyon çıktıları

Daha detaylı bir görselleştirme için haliç girişinde saatlik fekal koliform konsantrasyonu değişimi sırasıyla Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 ile verilmiştir.



Şekil 5.21. Ribble Halici girişinde 18.05.1999 18.00 ile 18.05.1999 21.00 arasında model fekal koliform konsantrasyon çıktıları



Şekil 5.22. Ribble Halici girişinde 18.05.1999 22.00 ile 19.05.1999 01.00 arasında model fekal koliform konsantrasyon çıktıları

5.3. Uydu Verisi Kullanılarak Hazırlanan Batimetri ile Kurulan Modeller

Tez çalışmasının bu kısmında, önceki hidrodinamik model ve su kalitesi modelinden ayrı olarak, başlık 4.2.3'te anlatılan uydu verisi kullanılarak hazırlanan batimetri ile modeller kurulmuştur. Farklı bir batimetriye sahip olan modellerin çıktıları ile, ölçülmüş değerler ile kalibre edilen modellerin çıktıları karşılaştırılmıştır. Bu kısımda araştırmanın genel amacı uydu verisi ile hazırlanan batimetrinin kullanılabilirliğinin ve etkililiğinin tespit edilmesi ve bundan sonraki benzer çalışmalar için bir altlık oluşturmaktır.

5.3.1. Modellerin kurulumu

Modeller çıktıları arasında daha sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek uydu batimetrisi ile kurulan hidrodinamik modelde, kalibrasyon parametreleri başlık 5.1'de verilen sahadan

yapılan ölçümlerden elde edilmiş olan batimetri ile kurulan model ile aynı değerlerde alınmıştır. Dolayısıyla bu hidrodinamik modelde de Nikuradse pürüzlülük uzunluğu 0,18 m türbülans modeli $k-L$ ve sayısal çözüm yöntemi Cyclic yöntemi olarak kullanılmıştır.

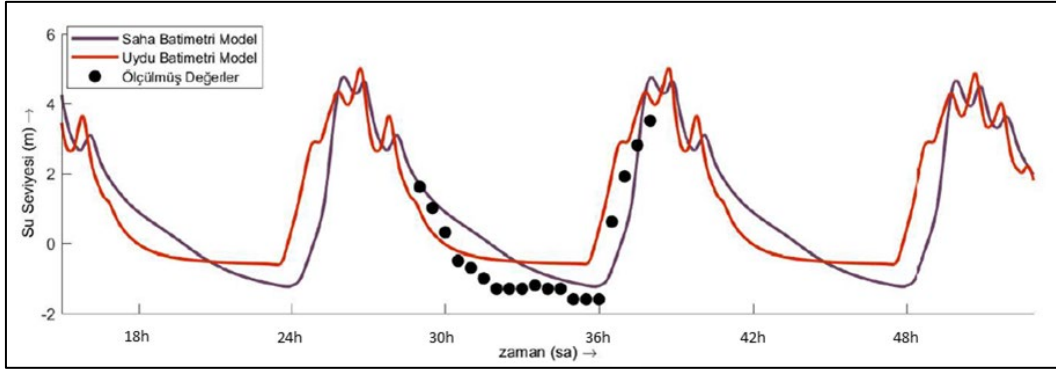
Su kalitesi modelinde kalibrasyon değeri halihazırda saha ve laboratuvar çalışmalarından elde edilmiş olduğu için bu kısımda kurulan modelde de birinci mertebenden azalama oranı 1,40 1/gün olarak alınmıştır.

5.3.2. Farklı batimetrlere ile kurulan model çıktıları karşılaştırılması

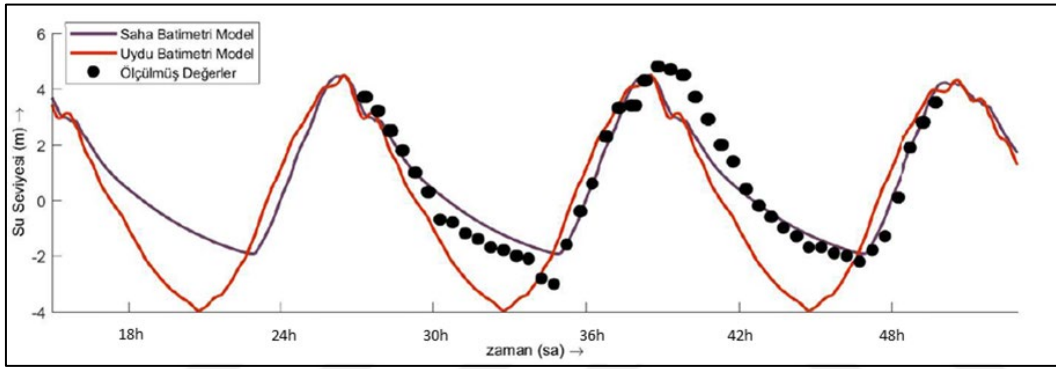
Uydu verisi kullanarak hazırlanan batimetri ile kurulan hidrodinamik modeli çıktıları ile saha ölçümleriyle elde edilmiş batimetri ile kurulan model çıktıları karşılaştırmak için 7 milepots ve 11 milepots gözlem noktalarında kullanılmıştır. İsim uzunluğu sebebiyle bu kısımdan sonra uydu verisi kullanarak hazırlanan batimetri ile kurulan hidrodinamik model uydu batimetri model, saha ölçümleriyle elde edilmiş batimetri ile kurulan hidrodinamik model ise saha batimetri model olarak ifade edilmiştir. Uydu batimetri modelin etkililiğinin ve doğruluğunun tespit edilebilmesi 7 milepots ve 11 milepots gözlem noktalarında saha batimetri modelinin su seviyesi çıktılarına göre korelasyon katsayısına, RMSE ve MAE değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te modellerin su seviye çıktılarının zamana göre değişimleri görselleştirilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı model çıktılarının istatistiksel analizi

Gözlem Noktası	r^2	RMSE	MAE
7 milepots	0,7354	0,9959	2,4370
11 milepots	0,5785	1,3627	4,3152



Şekil 5.23. 7 milepots gözlem noktasında modellerin su seviyesi çıktıların karşılaştırılması



Şekil 5.24. 11 milepots gözlem noktasında modellerin su seviyesi çıktıların karşılaştırılması

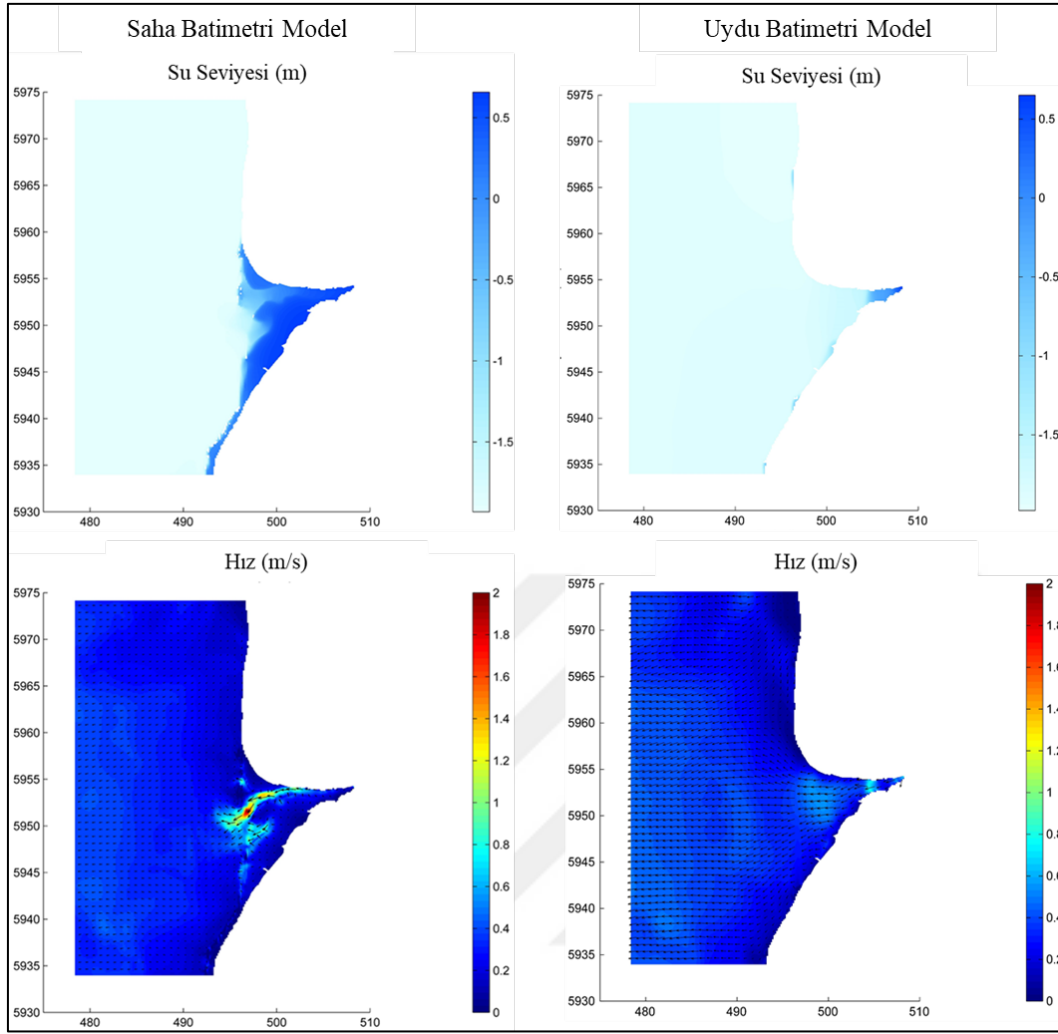
Sonuçlara göre 7 milepots noktasında su seviyeleri çıktıları 11 milepots noktasına göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Tüm istatistiksel parametrelerde daha yakın değerler alınmıştır. Yine de düşük korelasyon katsayısı değerlerinin de gösterdiği şekilde uydu batimetrisinin performansı ve etkililiği beklenen düşük kalmıştır. Bu farklılık ise uydu batimetrisi veri setinde değerlerin hassasiyetinin metre bazında olmasında kaynaklanmaktadır. Ayrıca gözlem noktaları Ribble Nehri'nden taşınan sedimentin biriktiği haliç girişinde yer almaktadır. Bu birikimden kaynaklı haliç girişinde nehir yatağı dışında su derinliği genellikle 1 m'den az değer almaktadır. Uydu verisinden bu hassasiyet sağlanamaması sebebiyle bu noktalarında beklenen etkililik yakalanamamıştır.

7 milepots noktasında saha batimetrisi modeli su seviyesi çıktıları minimum -1,24 m, maksimum 4,75 m değerini alırken uydu batimetrisi modeli su seviyesi çıktıları minimum -0,61 m, maksimum 5,01 m değerini almaktadır. Ortalama su seviyesi değerleri ise saha batimetri modelinde 1,07 m, uydu batimetri modelinde 1,21 m'dir.

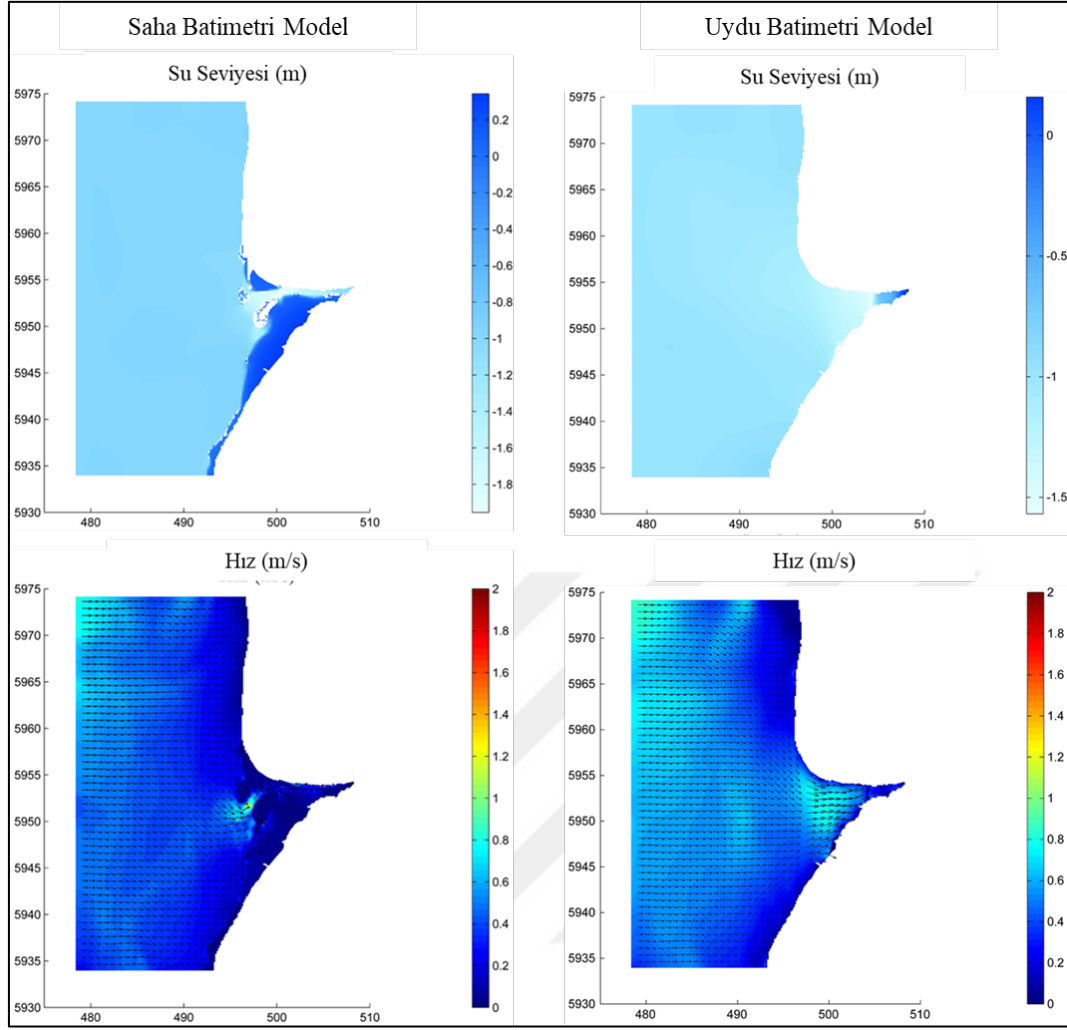
11 milepots noktasında saha batimetrisi modeli su seviyesi çıktıları minimum -1,94 m, maksimum 4,49 m değerini alırken uydu batimetrisi modeli su seviyesi çıktıları minimum -3,97 m, maksimum 4,49 m değerini almaktadır. Ortalama su seviyesi değerleri ise saha batimetri modelinde 0,93 m, uydu batimetri modelinde 0,25 m'dir.

Önceki başlıklarda incelenen su seviyesinin haliç girişinde sıfır değerini aldığı, dip ve tepe yaptığı zaman adımlarında uydu batimetrisi modelinin çıktıları, saha batimetrisi model çıktıları Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de verilmiştir.

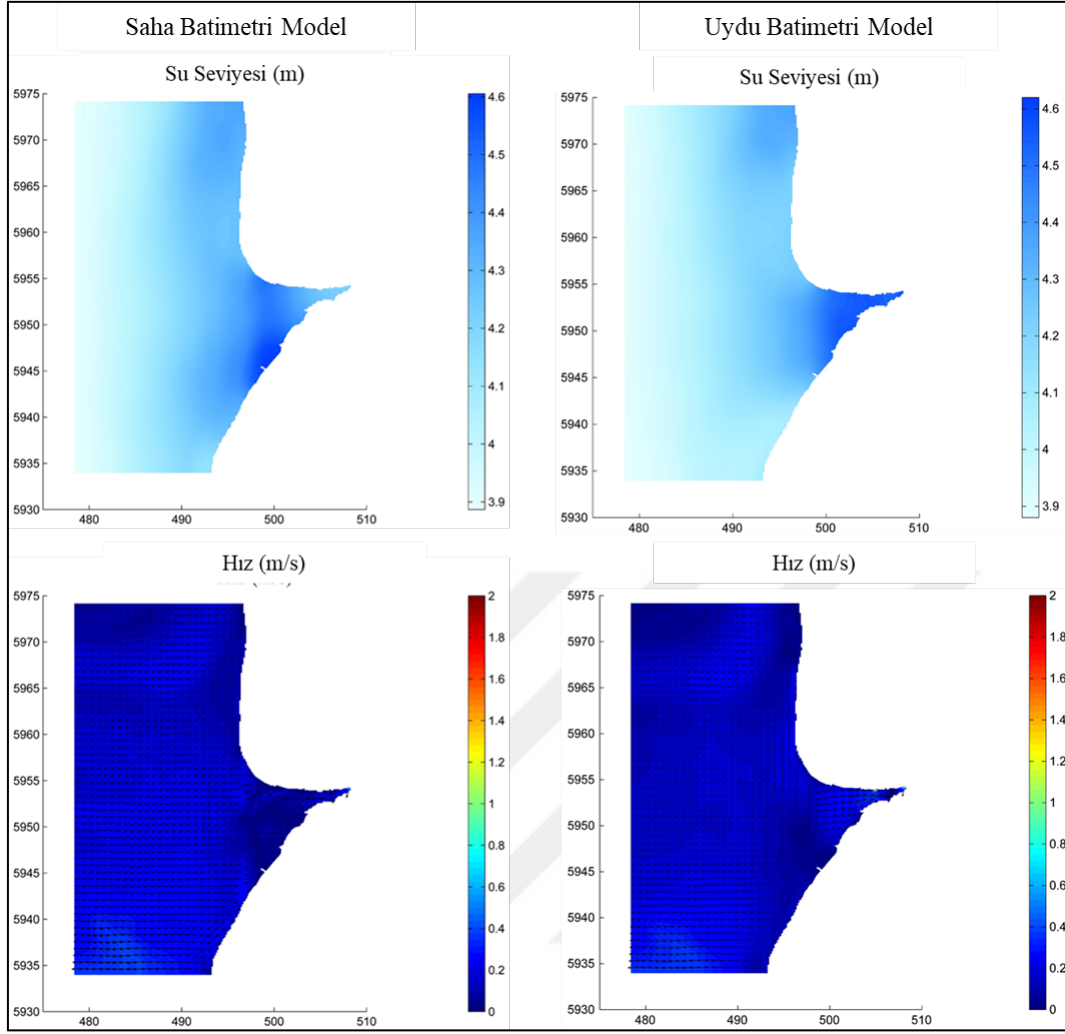




Şekil 5.25. Ribble Halici'nde 18.05.1999 06.30'da farklı modellerin su seviyesi ve hız çıktıları karşılaştırılması

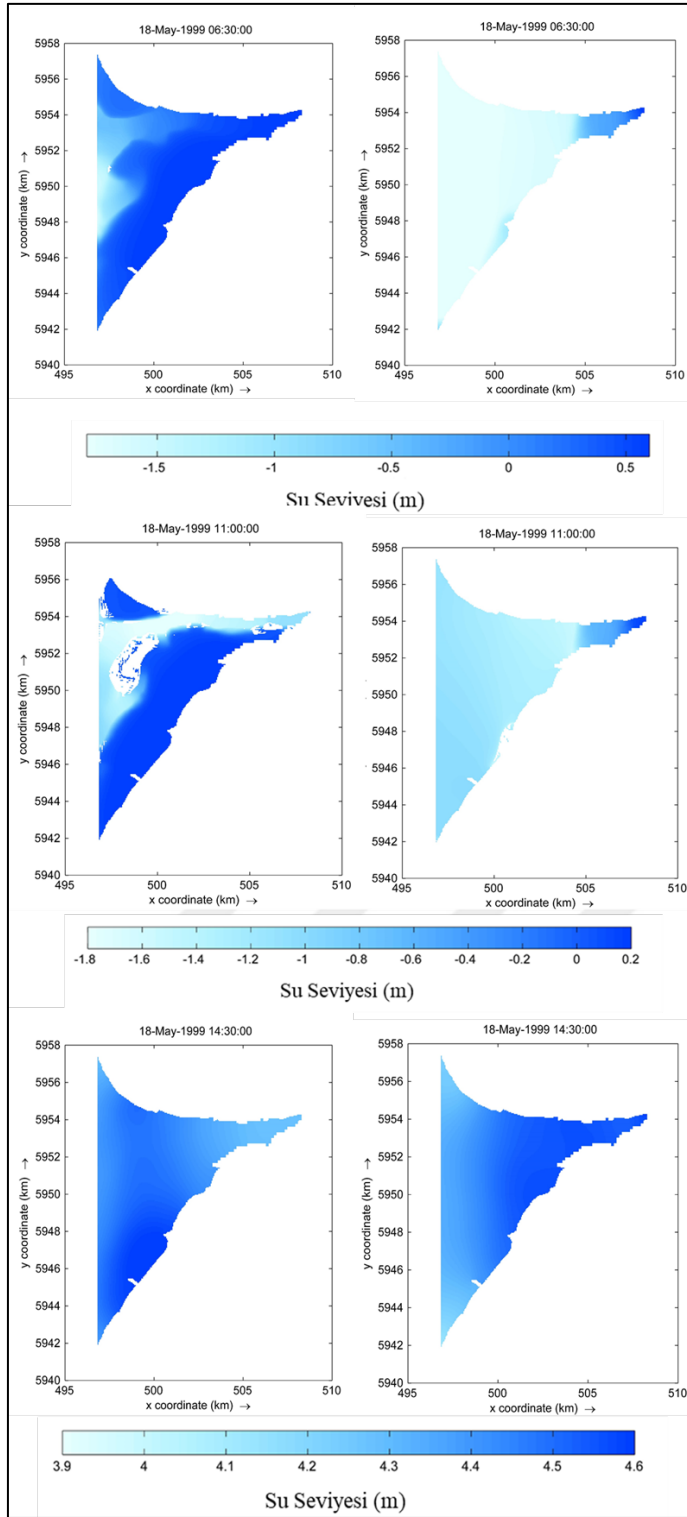


Şekil 5.26. Ribble Halici'nde 18.05.1999 11.00'da farklı modellerin su seviyesi ve hız çıktıları karşılaştırılması



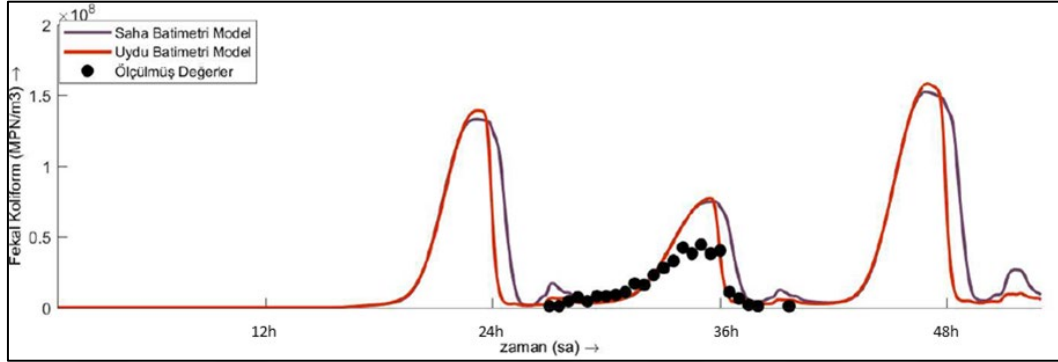
Şekil 5.27. Ribble Halici'nde 18.05.1999 14.30'da farklı modellerin su seviyesi ve hız çıktıları karşılaştırılması

Ayrıca halic girişinde uydu batimetrisi ile su seviyesini yansıtılamadığının gösterilmesi için yukarıda verilen zaman adımlarında modellerin su seviyesi çıktıları karşılaştırılması Şekil 5.28'de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere halic girişinde uydu batimetrisinde gerekli çözünürlük ve hassasiyet elde edilememiştir.

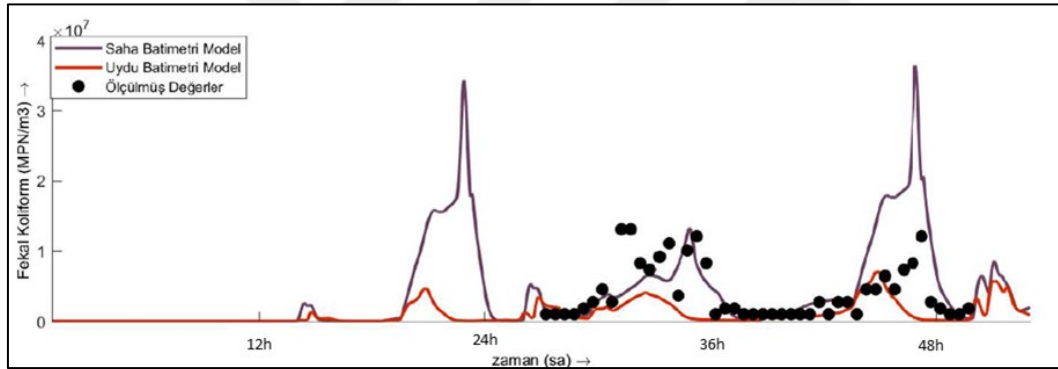


Şekil 5.28. Haliç girişinde modellerin su seviyesi çıktılarının karşılaştırılması

Su kalitesi model sonuçları da benzer bir şekilde karşılaştırılmıştır. 7 milepots ve 11 milepots gözlem noktalarında uydu batimetri modeli ve saha batimetri modelinin fekal koliform konsantrasyonu çıktıların karşılaştırılması sırasıyla Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da verilmiştir.



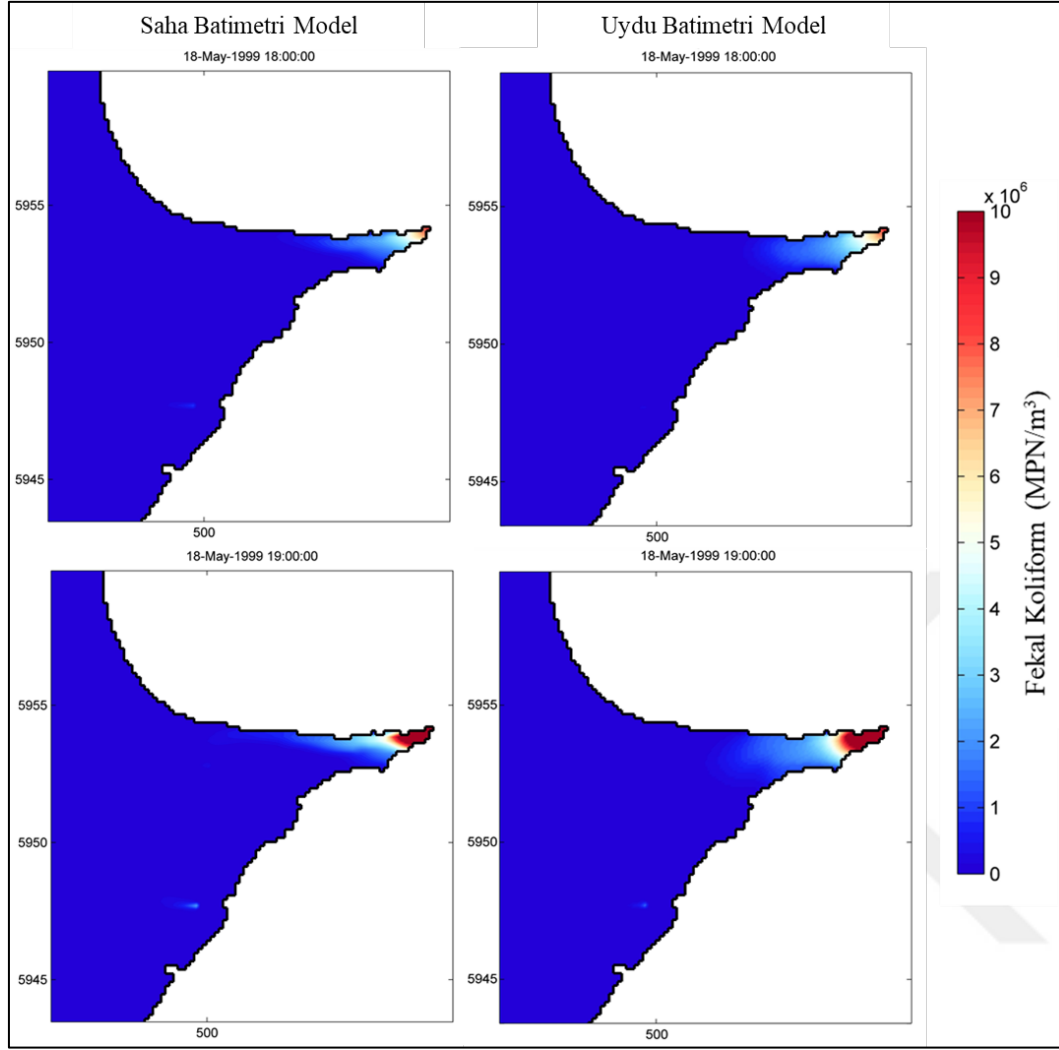
Şekil 5.29. 7 milepots gözlem noktasında modellerin fekal koliform konsantrasyonu çıktıların karşılaştırılması



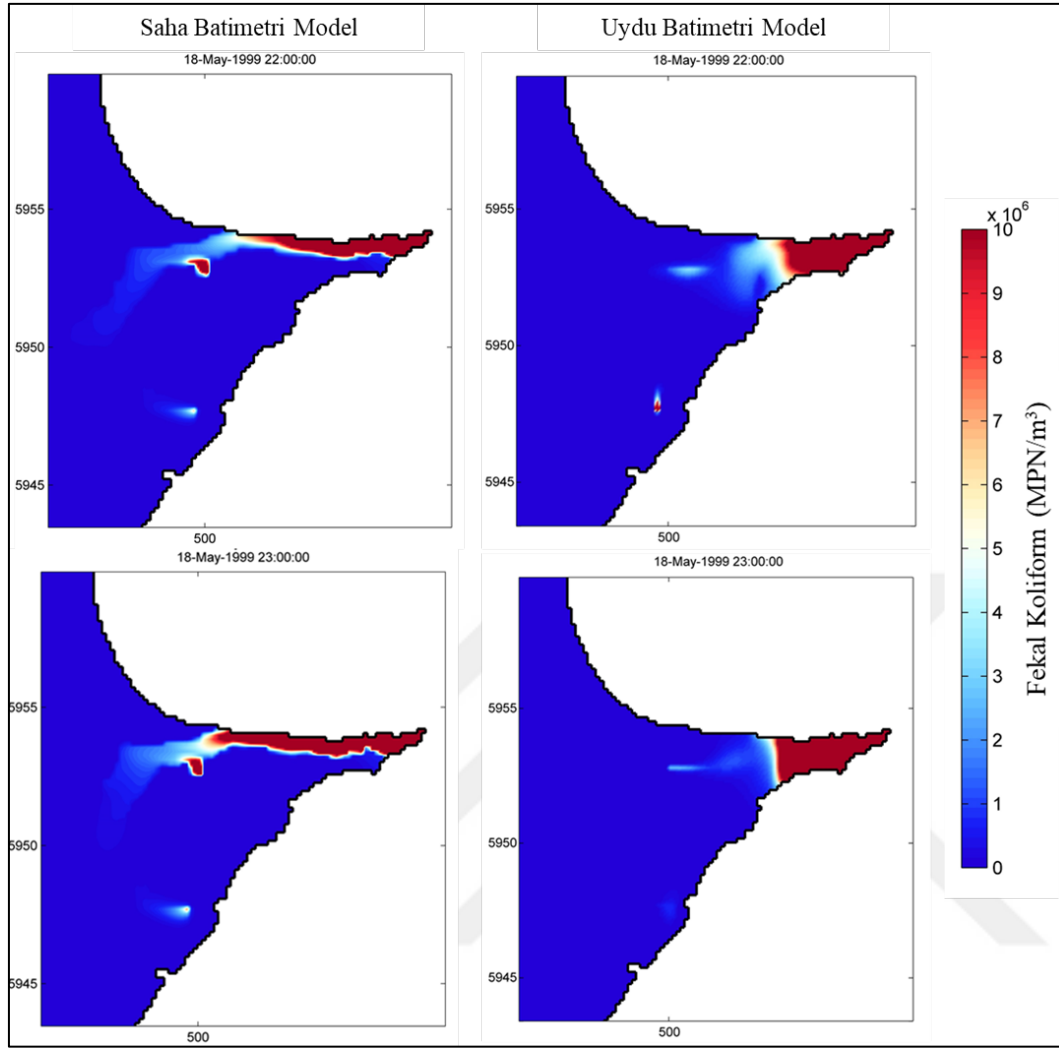
Şekil 5.30. 11 milepots gözlem noktasında modellerin fekal koliform konsantrasyonu çıktıların karşılaştırılması

Şekillerde görüldüğü konsantrasyon değerli üzere 7 milepots gözlem noktasında 11 milepots gözlem noktasına göre daha yakın değerler almıştır. Bunun nedeni 7 milepots noktasının Ribble Nehri sınır şartına hemen batı kısmında yer almasında kaynaklanmadır. Gözlem noktasının bulunduğu alanda Ribble Nehri'nden kaynaklanan hareketler daha baskın bir rol oynamaktadır.

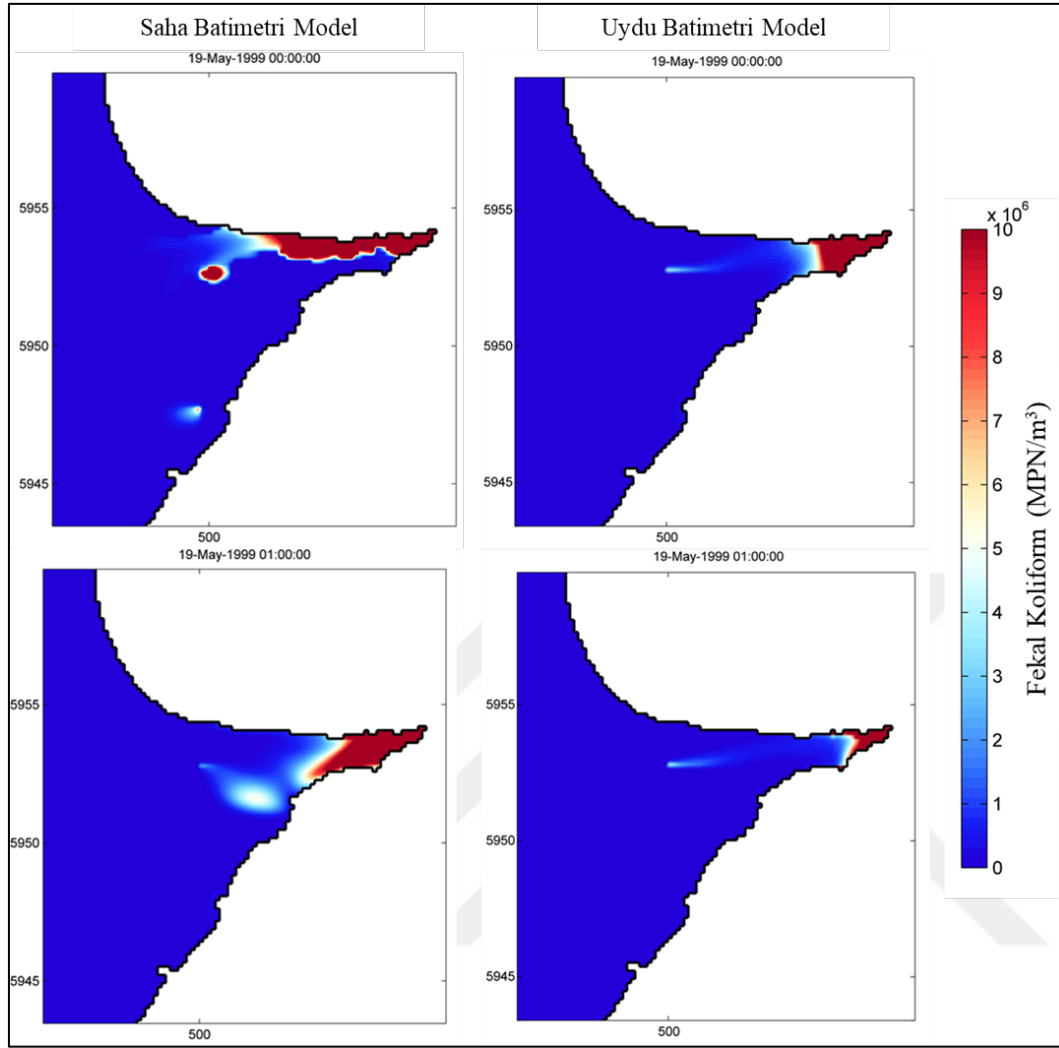
Başlık 5.2'de verilen 18 Mayıs 1999 18.00 ile 19 Mayıs 1999 01.00 zaman aralığında fekal konsantrasyon değişimi, bu kısımda da uydu batimetri modeli çıktıları ile Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te verilmiştir. Şekillerde konsantrasyon değişimdeki farklar net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.31. Haliç girişinde 18.05.1999 18.00 ve 19.00 modellerin fekal koliform konsantrasyon çıktıları karşılaştırılması



Şekil 5.32. Haliç girişinde 18.05.1999 22.00 ve 23.00 modellerin fekal koliform konsantrasyon çıktıları karşılaştırılması



Şekil 5.33. Haliç girişinde 19.05.1999 00.00 ve 01.00 modellerin fekal koliform konsantrasyon çıktıları karşılaştırılması

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında ilk kısmında gelgit etkisi altında olan bir haliçte, bir patojen indikatörü olan fekal koliform bakterisinin haliçteki hidrodinamik etkiler altında yayılımı sahada ölçüm yapılarak elde edilen verilerle (gelgit periyodu, batimetri, debi vb.) Delft3D Flow ve D-Water Quality programları kullanılarak analiz edilmiştir. Modellerde yapılan kalibrasyon işlemleri yine saha yapılan ölçümler ve literatürdeki laboratuvar çalışmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hidrodinamik model kurulumu sürecine, ilk olarak modellenecek alanın sınırlarının belirlenmesi ile başlanmıştır. Sınırların hidrodinamik etkinin net bir şekilde modelde yansıtılabilecek boyutlarda belirlenmesi gerekmektedir. Süreç üzerinde işlemlerin yapıldığı çözüm ağının oluşturulması ile devam etmiştir. Bu kısımda ise işlem boyutunu büyütmeden işlemleri yansıtılabilecek çözüm ağı sıklığının elde edilmesi önemli görülmektedir. Ardından batimetri verilerin modele işlenmesi ile süreç devam etmiştir. Son olarak fiziksel hareketi yansıtan sınır şartları ve model başlangıcındaki fiziksel ve kimyasal durumu belirten başlangıç şartları modele tanımlanmıştır. Bu adımda sahada yapılan ölçümlerden elde edilen veriler modelin doğruluğu için önem arz etmektedir.

Su kalitesi model kurulumunda ise benzer şekilde sınır şartları ve başlangıç şartları tanımlanmıştır. Ayrıca hidrodinamik modelden elde edilen hız ve gerilmeler su kalitesi modelinde kullanılmıştır.

Kurulan hidrodinamik modelde ilk olarak farklı tipte çözüm ağlarının performansları ve etkililikleri test edilmiştir. Bu çalışma sonucu yerel sıklaştırma ile oluşturulan çoklu çözüm ağlarının, yapılandırılmış basit çözüm ağlarına göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çoklu çözüm ağlarında, CPU süresini büyük bir artış yaşanmadan, modellenecek alanın geometrisini daha iyi bir çözünürlükle yansıtabildiği tespit edilmiştir. Çalışmada çoklu çözüm ağı ile kurulan hidrodinamik modelin CPU süresi sık çözüm ağı ile kurulan modelle hidrodinamik modele göre aynı sonuç paternini sağlayarak 6,08 kat az olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 5.1), (Bkz. Şekil 5.2).

Hidrodinamik modelin ikinci aşamasında yapılan bu çalışma özelinde kalibrasyon işleminin bir parçası olarak farklı türbülans modelleri ve sayısal çözüm etkililikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Türbülans modelleri olarak tek taşınım denklemleri olan k-L türbülans modeli ve iki taşınım denklemleri olan k- ϵ türbülans modeli, sayısal çözüm yöntemi olarak da WAQUA ve Cyclic adlı çözüm yöntemleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Türbülans modellerinde ön görülen sonucun aksine tek taşınım denklemleri k-L türbülans modeli, k- ϵ türbülans modeline göre daha etkili sonuçlar vermiştir. Sayısal çözüm yöntemlerinde ise yöntemlerin sonuçları üzerinde büyük bir farklılık yaratmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebebi her iki sayısal çözüm yöntemi de temel olarak ADI yöntemine dayanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Bkz. Çizelge 5.3).

Yapılan kalibrasyon işlemi sonucunda $r^2=0,88604$ değeri ile Nikarudse pürüzlülük uzunluğu 0,18 m olan, k-L türbülans modeli ve Cyclic sayısal çözüm yöntemi kullanan bir hidrodinamik modelden alınan çıktılar değerlendirilmiştir (Bkz. Çizelge 5.3), (Bkz. Şekil 5.4). Validasyon işleminde kalibre edilen hidrodinamik modelin su seviyesi sahada ölçümlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.5). Model hız ve su seviyesi çıktılarında gelgit dalgasının haliç üzerindeki etkisinin modelde yansıtılabildiği (Bkz. Şekil 5.6), (Bkz. Şekil 5.7), (Bkz. Şekil 5.8).

Kalibrasyon ve validasyon işlemlerinde 7 milepots ve 11 milepots adlı iki gözlem noktasında belirli zaman aralıklarında ölçülen veriler kullanılmıştır. Daha farklı zamanlarda da ölçüm verisi alınarak daha iyi bir kalibrasyon işlemi yapılabilir.

Su kalitesi modelinde, hidrodinamik modelinin çıktıları kullanılarak (hız, su seviyesi, su derinliği ve gerilmeler) Ribble Nehrinden ve haliç girişinde yer alan iki noktadan yapılan fekal koliform deşarjının haliçte yayılım süreci analiz edilmeye çalışılmıştır. Kalibrasyon işleminde Mancini'nin (1978) fekal koliform üzerinde yaptığı laboratuvar çalışmalarından faydalanılmıştır. Ribble Nehrinden gelen konsantrasyonun hâkim olduğu 7 milepots gözlem noktasında model çıktıları saha ölçümlerine yakın değerler alırken, deşarj noktalarına yakın olan 11 milepots gözlem noktasında model saha ölçümlerinden daha farklı değer almıştır (Bkz. Şekil 5.10), (Bkz. Şekil 5.11). Bu durumun deşarj noktalarında yapılan debi ve konsantrasyon ölçümlerinde yaşanan sıkıntılardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Tezin son kısmında ise hidrodinamik model ve su kalitesi modeli çalışmalarında belirlenen kalibrasyon parametreleri aynı değerlerde alınarak, uydu verisi kullanarak hazırlanan batimetri ile ayrı bir hidrodinamik model kurulmuştur. Bu hidrodinamik modelin çıktılarıyla, sahada yapılan ölçümlerle elde edilen batimetri ile kurulan ilk hidrodinamik modelin çıktıları karşılaştırılarak uydu batimetrisinin kullanılabilirliği tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlara göre ön görülenin aksine uydu verisi kullanan batimetri ile kurulan model çıktıları ile sahada yapılan ölçümlerle elde edilen batimetri ile kurulan modelin çıktılarından farklı değerler aldığı gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.28). Uydu verisi ile kurulan modelin su seviyesi çıktılarının sahada yapılan ölçümlerle elde edilen batimetri ile kurulan hidrodinamik model çıktılarına göre korelasyon katsayısı 7 milepots noktasında $r^2 = 0,7354$ değerine, 11 milepots gözlem noktasında ise $r^2 = 0,5785$ değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Değerlerdeki farklılığını sahada yapılan ölçümlerle elde edilen batimetrisinin aksine uydu batimetrisi veri setindeki değerlerin hassasiyetinin metre bazında olması yaratmaktadır. Kıyıdan uzak derinliğin fazla olduğu bölgelerde uydu verisi ile ölçüm verileri arasında uyumlu bir benzerlik varken, haliç girişine doğru değerler farklılaşmaktadır. Ayrıca Ribble Nehri'nde taşınan ve haliç girişinde biriken sedimentler gelgit etkisiyle mevsimsel ve dönemsel olarak değişmektedir. Ayrıca bu sediment birikimin olduğu alanlarda derinlikler yer yer 1 metreden az değerler almaktadır. Bu nedenle uydu batimetrisi veri setinde haliç girişindeki derinlikleri tam karşılayamamaktadır.

Günümüzde gelişen uydu teknolojisi ile daha yakın doğruya ölçümler alınabilmektedir. Bu ölçümlerle oluşturulan veri setlerinin (sayısal yükselti modeli, batimetri gibi) kolay elde edilebilir ve ucuz maliyetli olması gibi nedenlerle hidrolojik, hidrodinamik, morfolojik birçok farklı modellerde kullanımı, yaygınlaşmaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında haliç gibi belirli özel alanlarda bu veri setlerinin nasıl sonuçlar verdiğinin tespit edilmesi çalışılmıştır.

İklim değişikliği ve kirlenici yüklerinin artması ülkemizde ve dünyamızda birçok su kütlesinin ekolojik açıdan sürdürülebilirliğini büyük ölçüde tehdit etmektedir. Birçok farklı bitki ve hayvan türüne ev sahipliği yapan bu alanların korunması belirli eylem ve yönetim planlaması gerekmektedir. Çevresel problemlerde ileriye dönük daha sağlıklı tahminler yapabilmek için modeller kullanılmaktadır. Tez çalışmasında dünyada yaygın bir şekilde kullanılan Delft3D ve D-Water Quality programları ile planlandığı gibi hidrodinamik model

ve su kalitesi modeli kurulması gerçekleştirilmiştir. Programın sağladığı farklı özellikler test edilip değerlendirilmiştir. Bu tez çalışması ülkemizde sağlıklı veri temini ile su kütlelerinde ileriye dönük tahminler için hem hidrodinamik modelleme hem de su kalitesi modellemesi çalışmalarının sağlıklı bir şekilde yapılabilceğinin göstergesidir.



KAYNAKLAR

- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. New York: McGraw-Hill, 168-215.
- Balas, L., and Özhan, E. (2000). An implicit three-dimensional numerical model to simulate transport processes in coastal water bodies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 34(4), 307–339.
- Balas, L., Genç, A. N., and Inan, A. (2012, July). *HYDROTAM: 3D Model for Hydrodynamic and Transport Processes in Coastal Waters*. Paper presented at the International Congress on Environmental Modelling and Software, Leipzig.
- Bates, P. D., Lane, S. N., and Ferguson, R. I. (2005). *Computational Fluid Dynamics Modelling for Environmental Hydraulics*. West Sussex: John Wiley and Sons, 1-14.
- Booker, D. J. (2003). Hydraulic modelling of fish habitat in urban rivers during high flows. *Hydrological Processes*, 17(3), 577–599.
- Chapra, S., and Canale, R. (2010). *Numerical Methods for Engineers* (Sixth Edition). New York: McGraw-Hill Education, 463, 843-845.
- Chen, W. B., and Liu, W. C. (2017). Investigating the fate and transport of fecal coliform contamination in a tidal estuarine system using a three-dimensional model. *Marine Pollution Bulletin*, 116(1), 365–384.
- Deltares. (2020). *Delf3D-FLOW User Manuel*. Delft, 8, 167-214, 266-285.
- Deltares. (2021). *D-Water Quality User Manuel*. Delft, 196-201.
- Danish Hydraulic Institute. (2017). *MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Module User Guide*. Hørsholm, 11-15.
- Falconer, R. A. (1994). An Introduction to Nearly Horizontal Flows. Abbott, M. B. & Price W. A. (Eds.) *Coastal, Estuarial and Harbour Engineers Reference Book*. London: E and FN Spon, 27-28.
- Falconer, R. A., and Lin, B. (1996). Modelling hydrodynamic, sediment and contaminant transport processes in coastal and estuarine waters. *Transactions on Ecology and the Environment*, 26(1), 3-13.
- Falconer, R. A., and Lin, B. (1997). Three-dimensional modelling of water quality in the Humber Estuary. *Water Research*, 31(5), 1092–1102.
- Falconer, R. A., Lin, B., and Kashefipour, S. M. (2005). *Modelling Water Quality Process in Estuaries*. In P. D. Bates, S. N. Lane and R. I. Ferguson (Eds.), *Computational Fluid Dynamics Modelling for Environmental Hydraulics*. West Sussex: John Wiley and Sons, 306-326.

- Fischer, H. B., List, J. E., Koh, C. R., Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. San Diego: Academic Press, 30-56.
- Gao, G., Falconer, R. A., and Lin, B. (2015). Modelling the fate and transport of faecal bacteria in estuarine and coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 162–168.
- Ramsar. (2005). Information Sheet on Ramsar Wetlands (RIS). Gland, 1-35.
- Hardisty, J. (2007). *Estuaries: Monitoring and Modeling the Physical System*. Oxford: Blackwell Publishing, 3-4.
- Hiester, H. R., Piggott, M. D., Farrell, P. E., and Allison, P. A. (2014). Assessment of spurious mixing in adaptive mesh simulations of the two-dimensional lock-exchange. *Ocean Modelling*, 73(1), 30–44.
- Hoffmann, K. A., and Chiang, S. T. (2000). *Computational Fluid Dynamics (Fourth Edition)*. Kansas: Engineering Education System, 4-165.
- Ingham D. B. And Ma, L. (2005). Fundamental equations for CFD in river flow simulations, In P. D. Bates, S. N. Lane and R. I. Ferguson (Eds.), *Computational Fluid Dynamics Modelling for Environmental Hydraulics*. West Sussex: John Wiley and Sons, 26-27.
- Internet: ESRI. (April, 2021). *ArcGIS World Imagery*. Web: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?layers=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9> Erişim Tarihi: 12.05.2021.
- Internet: Natural England (December, 2020). Ribble Estuary National Nature Reserve: Changes to site area and management. Web: <https://www.gov.uk/government/publications/ribble-estuary-national-nature-reserve-changes-to-site-area-and-management> Erişim Tarihi: 20.04.2021
- Internet: Slater, J. B. (February, 2021). CFD Analysis Process. Web: <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/process.html> Erişim Tarihi: 05.06.2021
- Ji, Z. G. (2008). *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc, 567-568.
- Jin, K.R., Hamrick, J. H., and Tisdale, T. (2000). Application of Three-Dimensional Hydrodynamic Model for Lake Okeechobee. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(10), 758–771.
- Kashefipour, S. M., Lin, B., Harris, E., and Falconer, R. A. (2002). Hydro-environmental modelling for bathing water compliance of an estuarine basin. *Water Research*, 36(7), 1854–1868.
- Kocyigit, O., (2003). *Finite Volume Modelling of Water Quality And Sed,ment Transport In Aquatic Basins*. Phd Thesis, Department of Civil Engineering, Cardiff School of Engineering Cardiff University, 196-233.

- Kocyigit, O., Lin, B., and Falconer, R. A. (2005). Modelling sediment transport using a lightweight bed material. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Maritime Engineering*, 158(1), 3–14.
- Kreyszig, E. (2010). *Advanced Engineering Mathematics*. New York. John Wiley & Sons, 2-43.
- Kurup, G. R., Hamilton, D. P., and Patterson, J. C. (1998). Modelling the Effect of Seasonal Flow Variations on the Position of Salt Wedge in a Microtidal Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(2), 191–208.
- Lin, B., and Falconer, R. A. (1996). Numerical modelling of three-dimensional suspended sediment for estuarine and coastal waters. *Journal of Hydraulic Research*, 34(4), 435–456.
- Mancini, J. L. (1978). Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 50(11), 2477–2484.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi T. H. and Huebsch, W. W. (2007). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. (Sixth Edition). Jefferson City: John Wiley & Sons, 278.
- Nadaoka, K., and Yagi, H. (1998). Shallow-Water Turbulence Modeling and Horizontal Large-Eddy Computation of River Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(5), 493–500.
- Nezu, I., Nakagawa, H., and Jirka, G. H. (1994). Turbulence in Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(10), 1235–1237.
- Perkins, T. L., Perrow, K., Rajko-Nenow, P., Jago, C. F., Jones, D. L., Malham, S. K., and McDonald, J. E. (2016). Decay rates of faecal indicator bacteria from sewage and ovine faeces in brackish and freshwater microcosms with contrasting suspended particulate matter concentrations. *Science of The Total Environment*, 572, 1645–1652.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary Layer Theory*. (Seventh Edition). New York: McGraw-Hill, 89-96.
- Sheng, Y. P. (1990). Evolution of a Three-Dimensional Curvilinear-Grid Hydrodynamic Model for Estuaries, Lakes and Coastal Waters: CH3D. In M. L. Spaulding (Eds.), *Estuarine and Coastal Modeling*. Reston: American Society of Civil Engineers, 40-49.
- Socolofsky S. and Jirka G. (2005). *Special Topics in Mixing and Transport Processes in the Environment* (Fifth Edition). Texas: Texas A&M University, 1-28.
- Soulignac, F., Vinçon-Leite, B., Lemaire, B. J., Scarati Martins, J. R., Bonhomme, C., Dubois, P., Mezemate, Y., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., and Tassin, B. (2017). Performance Assessment of a 3D Hydrodynamic Model Using High Temporal Resolution Measurements in a Shallow Urban Lake. *Environmental Modeling and Assessment*, 22(4), 309–322.

- Stelling, G. S. and Leendertse, J. J. (1992). Approximation of Convective Processes by Cyclic AOI methods. In M. L. Spaulding, K. Bedford and A. Blumberg, (Eds.), *Estuarine and Coastal Modeling*. Florida: American Society of Civil Engineers, 771–782.
- Stelling, G. S. and S. P. A. Duinmeijer. (2003). A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International Journal Numerical Methods In Fluids*, 43,1329–1354.
- Stelling, G. S. (1984). *On the construction of computational methods for shallow water flow problems*, PhD Thesis, Delft University of Technology Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft, 35-36.
- Tozer, B., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Olson, C., Beale, J. R., and Wessel, P. (2019). Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6(10), 1847–1864.
- Uittenbogaard, R. E. (1998). Model for eddy diffusivity and viscosity related to sub-grid velocity and bed topography, *Delft Hydraulics Note*, Delft, 56-68.
- Van Vossen, B., and Uittenbogaard, R. E. (2003, September). *Subgrid-scale model for Quasi-2D turbulence in shallow water*. Paper presented at the Shallow flows: proceedings of the international symposium, Delft, 575–582.
- Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. (Second Edition). Essex England: Pearson Education, 10-66.
- Wahl, B., and Peeters, F. (2014). Effect of climatic changes on stratification and deep-water renewal in Lake Constance assessed by sensitivity studies with a 3D hydrodynamic model. *Limnology and Oceanography*, 59(3), 1035–1052.
- Yuan, D., Lin, B., and Falconer, R. A. (2007). A modelling study of residence time in a macro-tidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(3), 401–411.



GAZİ GELECEKTİR..