

T.C.
NIĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKARSULARDA KİRLİLİĞİN YAYILIMININ SİMÜLASYONU İÇİN
HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ

Fatmanur DOĞAN

Mayıs 2016

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKARSULARDA KİRLİLİĞİN YAYILIMININ SİMÜLASYONU İÇİN
HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ

Fatmanur DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN

Mayıs 2016

Fatmanur DOĞAN tarafından **Prof. Dr. Kutsi S. ERDURAN** danışmanlığında hazırlanan “**Akarsularda Kirliliğin Yayılımının Simülasyonu İçin Hidrodinamik Su Kalite Modeli**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kutsi S. ERDURAN, Niğde Üniversitesi



Üye : Prof. Dr. Galip SEÇKİN, Çukurova Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Ahmet BİLGİL, Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Fatmanur DOĞAN

ÖZET

AKARSULARDA KİRLİLİĞİN YAYILIMININ SİMÜLASYONU İÇİN HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ

DOĞAN, Fatmanur

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN

Mayıs 2016, 80 sayfa

Bu çalışma kapsamında, prizmatik kanallarda bir boyutlu zamanla değişen su kirliliği yayılımını da içeren serbest su yüzü akımlarının davranışlarının nümerik benzeşim modeli oluşturulması amaçlanmıştır. Serbest su yüzü akımları de Saint Venant denklemleri ile tarif olunmuş ve çözümlerinde sonlu farklar yöntemi Preissmann kapalı çözüm şeması ile birlikte uygulanmıştır. Su kirliliği yayılımı ise adveksiyon-difüzyon denklemi ile tarif olunmuş yine çözümünde sonlu farklar yöntemi ve Crank-Nicholson kapalı çözüm şeması kullanılmıştır. Denklemlerin çözümleri, programın akış şeması ve algoritması elde edildikten sonra nesne tabanlı bir dil olan Delphi ortamında kodlaması yapılarak, görsel ve kullanıcı dostu bir yazılım gerçekleştirilmiştir.

Yazılan nümerik model yedi farklı güvenilirlik testine tabi tutulmuştur. Yapılan nümerik testler teorik beklentilerle karşılaştırılmış modelin beklentiler doğrultusunda sonuçlar verdiği görülmüştür. Rahat kullanıma sahip modelin tarif edilen akım durumlarını kapsayan hidrolik mühendisliği uygulamalarının yanı sıra eğitim amaçlı da kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: de Saint Venant denklemleri, adveksiyon-difüzyon, preissmann şeması, nümerik method, crank nicholson

SUMMARY

HYDRODYNAMIC WATER QUALITY MODEL FOR THE SIMULATION OF POLLUTION PROPAGATION IN RIVERS

DOĞAN, Fatmanur

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor :Professor Dr. Kutsi Savaş ERDURAN

May 2016, 80 pages

In this study, a numerical model is developed for the simulation of behaviour of a one-dimensional time varying free-surface flow with water pollution in prismatic channels. The free-surface flow is defined by de Saint Venant equations. The finite difference method together with Preissmann implicit scheme has been employed for the solution of the governing equations. Propagation of water pollution is defined by an advection-diffusion equation, which has been solved by using the finite difference method with Crank-Nicholson implicit scheme. Having the solution of the governing equations, flow chart and algorithms of the program are obtained, implementation and coding stages have been completed in Delphi environment, which is an object-oriented programming language. Hence, a user friendly model with graphical interfaces has been constructed.

Seven different hypothetical test cases are used for the verification of the developed numerical model. The results of the tests have been compared with the theoretical expectations and it has seen that they are agreed. The user friendly model can be used in hydraulic engineering applications on described flow cases as well as educational purposes.

Keywords: de Saint Venant equations, finite difference method, preissmann scheme, numerical model, advection-diffusion, crank nicholson

ÖNSÖZ

Su insan hayatı ile yakından ilgili olan doğal bir kaynaktır. Suyun kullanımı açısından iki kriterin yerine getirilmesi gerekir. Bunlar suyun miktarı ve su kalitesidir. Ancak dünyada uygun tatlı su miktarı sınırlıdır, ama aynı zamanda sağlıklı bir su koşulu için sadece su miktarı değil su kalitesi de bir toplumun varlığı ve gelişimi için son derece önemlidir.

Geçmişte, insanlar sel ve kuraklıktan korunmak için su miktarına dikkat etmekteydi. Sulama suyu, dağıtım ise başka bir miktar sorunudur. Ancak toplumların ekonomik ve sosyal gelişimi nedeniyle, özellikle gelişmekte olan ülkelerde su daha da fazla kirlenmektedir. Örneğin göllerdeki algler uzun bir süre yosuna neden olmaktadır. Bu da büyük ölçüde bölgenin su kaynağının etkilenmesine ve ekonomik bir kayba neden olur. Böyle durumlarda da görüldüğü gibi su kalite yönetimi etkin bir konu haline gelmektedir. Ayrıca, iklim değişiklikleri, kuraklık gibi ciddi durumlar olarak, sel ve tuzlu su saldırıları, ileride daha büyük tehlike oluşturacak gibi gözükmektedir. Su sıkıntısı, su kalitesi bozulan ve sel etkileri dikkat edilmesi gereken en acil sorunlar arasında yer almaktadır.

İdeal olarak su sistemlerinin çalışması için su miktar ve kalitesinin dikkate alınması gerekmektedir. İnsanlar su kalitesi sorunlarını tanımalı ve çözüm bulmayı denemelidir.

Bu çalışma, değerli danışmanım Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN katkılarıyla gerçekleştirilmiş olup, tez çalışmamızın sonucu oluşan programın, bu konuda yapılan uygulama ve çalışmalara katkıda bulunmasını dilerim.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılması için öncelikle destek veren ve katkıda bulunan danışmanım Mühendislik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN başta olmak üzere yüksek lisans eğitimime katkıda bulunan tüm İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına teşekkürlerimi sunar, akademik hayatlarında başarılar dilerim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖNSÖZ	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Hedefler	10
1.2 Tezin İçeriği	10
BÖLÜM II METOT	11
2.1 de Saint Venant Denklemleri ve Çözümü	11
2.1.1 Preissmann Şeması	16
2.1.2 Preissmann Şeması İle Terimlerin Ayrıklaştırılması ve Çözüm Denklemleri	17
2.1.3 Lineer Denklem Takımının Çözümü	23
2.2 Adveksiyon-Difüzyon Denklemi ve Çözüm	25
2.2.1 Crank-Nicholson Şeması	27
2.3 Denklemlerin İntegrasyonu	28
BÖLÜM III HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ ANALİZ PROGRAMI	31
3.1 Su Yüzü Modeli	31
3.2 Adveksiyon-Difüzyon Model	31
3.3 Modelin Akış Şeması	32
3.4 Modelin Kullanımı	39
BÖLÜM IV HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ SİMÜLASYONU VE NÜMERİK TESTLER	49
4.1 Statik Yüzey Akımı-Sabit Konsantrasyon Testi	49
4.2 Üniform Akım - Üniform Konsantrasyon Testi	52
4.3 Statik Akım-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi	55
4.4 Üniform Akım-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi	60

4.5 Üñiform Akım-Sınırdá Sabit Konsantrasyon Girişı Testi	64
4.6 Zamanla Değişen Akım (Seiche) – Üñiform Konsantrasyon Testi.....	68
4.7 Zamanla Değişen Akım (Seiche) –Üñiform Olmayan Konsantrasyon Testi.....	72
BÖLÜM V SONUÇLAR	76
KAYNAKLAR	77
ÖZ GEÇMİŞ	80



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yaygın kullanılan sayısal akım modelleri.....	8
Çizelge 4.1. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları ...	50
Çizelge 4.2. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Model parametreleri.....	50
Çizelge 4.3. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Sonuçlar.....	51
Çizelge 4.4. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları	53
Çizelge 4.5. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Model parametreleri.....	53
Çizelge 4.6. Üniform akım- üniform konsantrasyon testi: Sonuçlar	54
Çizelge 4.7. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları	56
Çizelge 4.8. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Model parametreleri...	56
Çizelge 4.9. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (75 s).....	57
Çizelge 4.10. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (57.600 s) ..	59
Çizelge 4.11. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları	61
Çizelge 4.12. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Model parametreleri	61
Çizelge 4.13. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (500 s)...	61
Çizelge 4.14. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (7760 s)...	63
Çizelge 4.15. Üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon girişi testi: Sınır ve başlangıç şartları	65
Çizelge 4.16. Üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon girişi testi: Model parametreleri	65
Çizelge 4.17. Üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon girişi testi: Sonuçlar (95 s) ...	66
Çizelge 4.18. Üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon girişi testi: Sonuçlar (3.085 s)	67
Çizelge 4.19. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları	68
Çizelge 4.20. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Model parametreleri	69
Çizelge 4.21. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Sonuçlar (6.000 s) ..	69

Çizelge 4.22. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Sonuçlar (76.300 s)	70
Çizelge 4.23. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları.....	72
Çizelge 4.24. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Model parametreleri	73
Çizelge 4.25. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (600 s).....	73
Çizelge 4.26. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (65.500 s).....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Nümerik model akış şeması	6
Şekil 1.2. ISIS akış ve ISIS kalite şeması.....	7
Şekil 2.1. Süreklilik denklemi için kullanılan notasyon.....	12
Şekil 2.2. Momentum denklemi için kullanılan notasyon.....	13
Şekil 2.3. Basınç kuvvetleri için kullanılan notasyon	14
Şekil 2.4. Preissmann şeması	17
Şekil 2.5. Crank-Nicholson şeması	28
Şekil 2.6. Hidrodinamik su kalite modelinin integrasyon şeması.....	30
Şekil 3.1. Akış şeması simgeleri	33
Şekil 3.2a Program akış şeması birinci bölüm.....	33
Şekil 3.2b Program akış şeması ikinci bölüm.....	34
Şekil 3.2c Program akış şeması üçüncü bölüm.....	35
Şekil 3.2d Program akış şeması dördüncü bölüm.....	36
Şekil 3.2e Program akış şeması beşinci bölüm.....	37
Şekil 3.3. Su kalite modeli programının modelleme aşamaları	39
Şekil 3.4. Program genel kullanım ekranı	40
Şekil 3.5. Kanal kesiti seçim ekranı	41
Şekil 3.6. Rapor ekranı	42
Şekil 3.7. Sonuç tablosu ekranı.....	42
Şekil 3.8. Araç çubuğu	43
Şekil 3.9. Dosya menü listesi.....	44
Şekil 3.10. Grafik menü listesi.....	45
Şekil 3.11. Veriler menü listesi.....	45
Şekil 3.12. Analiz menü listesi	45
Şekil 3.13. Sonuçlar menü listesi	46
Şekil 3.14. Dil menü listesi.....	46
Şekil 3.15. Yardım menü listesi	46
Şekil 3.16. Dur ve çalıştır tuşu.....	47
Şekil 4.1. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi.....	50
Şekil 4.2. Statik yüzey akımı ve sabit konsantrasyon testi: Su derinliği ve debi değişim grafikleri.....	51

Şekil 4.3. Statik yüzey akımı ve sabit konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri.....	52
Şekil 4.4. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi.....	53
Şekil 4.5. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Su derinliği ve debi değişim grafikleri.....	54
Şekil 4.6. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri.....	55
Şekil 4.7. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi.....	56
Şekil 4.8. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Su derinliği ve debi değişim grafikleri (75 s).....	58
Şekil 4.9. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (75 s).....	58
Şekil 4.10. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (57.600 s).....	59
Şekil 4.11. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği.....	60
Şekil 4.12. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi..	60
Şekil 4.13. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (500 s).....	62
Şekil 4.14. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (7760 s).....	63
Şekil 4.15. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği.....	64
Şekil 4.16. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Seçilen en kesit tipi.	64
Şekil 4.17. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (95 s).....	66
Şekil 4.18. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (3.085 s).....	67
Şekil 4.19. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi...	68
Şekil 4.20. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (6.000 s).....	70
Şekil 4.21. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (76.300s).....	71

Şekil 4.22. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği.....	71
Şekil 4.23. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi.....	72
Şekil 4.24. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (600 s)	74
Şekil 4.25. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (65.500s)	75
Şekil 4.26. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği.....	75

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Q	Debi
V	Hız
A	Su ile kaplı kesit alanı
h	Su derinliği
b_s	Su yüzü genişliği
t	Zaman
x	Mesafe
β	Momentum düzeltme katsayısı
g	Yer çekimi ivmesi
S_0	Taban eğimi
S_f	Enerji çizgisi eğimi
θ	Ağırlık katsayısı
L	Kanal uzunluğu
Δt	Zaman adımı
Δx	Mekan adımı
C	Chezy Katsayısı
b	Yüzeyden itibaren z derinliğindeki kanal genişliği
F_1	Hidrostatik basınç kuvveti
F_2	Yerçekimi kuvveti
F_s	Sürtünme kuvveti
γ	Özgül Ağırlık
τ_0	Cidar kayma gerilmesi
P	Islak çevre
R	Hidrolik yarıçap (A/P)

Kısaltmalar	Açıklama
SYM	Su Yüzü Modülü
ADM	Adveksiyon-Difüzyon Modülü
WASP	Water Quality Analysis Simulation Program

SKKY	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi)
SHODB	Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı
RWQM1	River Water Quality Model No 1
DYNHYD	The Dynamic Estuary Model
ECOLAB	Ecological Modeling



BÖLÜM I

GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma için en önemli yaşamsal kaynaklardan biri sudur. 20. yüzyılda dünya nüfusu 19. yüzyıla oranla üç kat artmasına rağmen, su kaynaklarının kullanımının altı kat arttığı belirlenmiştir. Dünya nüfusunun büyük bir kısmı akarsu kaynaklarının etrafındaki bölgelerde yaşamaktadır. Bu bölgeler tarıma elverişli olmaları, sulama ve ulaşım kolaylığı ile ekonomik nedenlerden dolayı tercih edilmişlerdir. Su insan hayatı ile yakından ilgili olan doğal bir kaynaktır. Gelecek on yıllarda, özellikle büyük kentlerde, su ihtiyacının giderek artması beklenmektedir. 20 yıl içerisinde gelişmekte olan ülkelerde gıda ürünlerinin yetiştirilmesi için % 17 oranında daha fazla suya ihtiyaç duyulacaktır. Bu noktadan hareketle toplam su tüketimindeki artışın % 40 olacağı tahmin edilmektedir. Diğer taraftan, göller, nehirler, sulak alanlar ve denizler balıkçılık ve benzeri su ürünleri istihsaline dayalı ekonominin ana kaynaklarıdır. İçme ve kullanma suyundan, ekonominin önemli bir kaynağı durumundaki su kaynaklarına kadar tüm bu ürün ve hizmetler sucul ekosistemlerin entegrasyonuna sıkı sıkıya bağlılık gösterir. Sel, kuraklık, kirlenme ve benzeri doğal ve/veya antropojenik etkiler bu kaynakların sürdürülebilirliğini hızla tehdit etmektedir. Bazı tahminler, 2025 yılından itibaren 3 milyardan fazla insanın su kıtlığı ile yüz yüze geleceğini göstermektedir. Bunun nedeni, sadece dünyadaki su kaynakları miktarının yetersiz olması değil, su kalite yönetiminin iyi yapılamamasından kaynaklanmaktadır (Korkut, 2012). Önemli su fonksiyonları içme suyu kaynağı, sulama vb.'dir. Suyun kullanımı açısından iki kriterin yerine getirilmesi gerekir. Bunlar suyun miktarı ve su kalitesidir.

TC Anayasası 2872 Sayılı Çevre Kanunu Madde 8'e bağlı olarak 1988 yılında yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 1988) su kalitesi yönetimine ilişkin kapsamlı düzenlemeler getirmiştir. Bu yönetmelikte, su kaynaklarının ekosistem prensibi çerçevesinde kalitesinin korunması ve ülke gereksinimleri doğrultusunda su kalitesinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çerçevede yönetmelikte içme ve kullanma suyu rezervuarlarının çevresinde oluşturulması gerekli koruma alanları; evsel ve endüstriyel atık su deşarjları ve tarım arazilerinin korunmasına ilişkin düzenlemeler getirilmiştir. Bununla birlikte yüzey suları ve yeraltı suları için kalite sınıflandırması yapılmıştır. Yüzeysel sular çerçevesinde yüksek kaliteli, az kirlenmiş, kirli ve çok

kirlenmiş sular olmak üzere 4 kalite sınıfı tanımlanmaktadır. Her sınıfa ait kullanım amaçları ayrıca belirtilmektedir. Aynı yönetmelik yeraltı suları için de 3 kalite sınıfı tanımlanmaktadır. I. Sınıf sular içme suyu amaçlı kullanılabilen sulardır. II. Sınıf sular ancak bir arıtma işlemi sonrası içme suyu amaçlı kullanılabilirken, endüstriyel ve tarım amaçlı kullanılabilir olarak tanımlanmaktadır. III. Sınıf yeraltı suları ise, kullanım amacının gerektirdiği biçimde arıtdıktan sonra kullanılabilen sulardır.

Türkiye’de su kaynakları akarsular bazında hidrolojik açıdan 26 havzaya bölünmüştür ve idaresi DSİ tarafından yapılmaktadır. DSİ kaynaklardaki su kalitesi ölçümelerini, sadece baraj göllerinin bulunduğu belli başlı kaynaklarda gerçekleştirilmektedir. Bu uygulama ülkenin bütün kaynaklarının yönetimini tam anlamıyla yansıtamamaktadır, sadece suyun kullanımı ile ilgili bazı düzenlemeler getirmeye yöneliktir. Su kaynağının korunması ve yararlı kullanımı doğrultusunda değerlendirilmesi ise ancak bütünsel bir yönetim mekanizması ile gerçekleştirilebilir.

Su enerjisini kullanılabilir hale getirmek, suyu verimli kullanabilmek, suyun sebep olacağı olası zararlı etki ve kayıpları kontrol altında tutabilmek için akım karakteristiklerinin detaylı ve doğru olarak belirlenmesine ihtiyaç vardır. Birçok mühendislik uygulamalarında olduğu gibi bu amaca en uygun yöntemlerin başında nümerik metotlar ve bunlara dayalı olarak geliştirilmiş paket programlar gelmektedir.

Günümüzde nümerik metotlar mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun başlıca sebepleri olarak; deneysel çalışmaların ölçek etkisine maruz kalmaları, masraflı ve zor oluşları, istatistiksel ve sinir ağları yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu geçmişe ait verilerin sınırlı ve kaliteden yoksun oluşları söylenilebilir. Nümerik metotlar hesap ve analiz kolaylığı sağlamak başta olmak üzere birçok avantaja sahiptir.

Sudaki doğal dengeyi bozacak her madde/parametre kirletici olarak adlandırılır. Su ortamına girmiş bir kirletici 3 dinamik olaya maruz kalmaktadır:

- Taşınım
- Karışım
- Reaksiyon (korunan bir kirletici değilse)

Su kalitesine etki eden parametreler; alıcı ortamın geometrisi (derinlik ve genişlik), eğim ve taban pürüzlülüğü, hız, debi, karışım özelliği, sıcaklık, askıda katı madde ve sediment taşınımı, pH, asidite-alkalinite, çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve toplam çözünmüş katı miktarı, zehirli kimyasal içeriği, bakteri, virüs, balık toplulukları, sucul bitkilerin ve yosunların varlığıdır. Kirleticiler, su ortamına giriş şekillerine, kaynaklarına, fiziksel, kimyasal ve biyolojik içeriklerine göre sınıflandırılmaktadır (Korkut, 2012).

Kirleticilerin akarsu veya nehirlerde taşınma mekanizmaları;

1. Difüzyon: Kirleticilerin konsantrasyon farkına göre taşınımı
2. Adveksiyon: Su hızı ile taşınma
3. Mekaniksel dispersiyon: Kirleticilerin gözenekli ortamda taşınımı
4. Hidrodinamik dispersiyon: Kirleticilerin hem difüzyon hem de mekaniksel dispersiyon ile taşınımı

1980'lerden beri su kalite modelleri, kirleticilerin yayılımını daha iyi anlamak ya da bu süreçleri çözmek ve gelecekteki gelişimi üzerine tahminler yapmak için kullanılmaktadır. Şu anda su kalite modelleri uygulamaların ve bilimsel soruların çözümleri için geniş bir yelpazede uygulanmaktadır.

Ayat (2010) tarafından daha önceden ticari olarak geliştirilmiş hidrodinamik benzeşim için MIKE3 ve su kalitesi için Ecolab modelleme yazılımını içeren üç boyutlu bileşik modelleme sistemi kullanılmıştır. Boğazda yapılacak planlama çalışmalarına bir altlık oluşturması amacıyla en güncel modelleme tekniklerinden olan su kalite modeli İstanbul Boğazı'na uygulanmıştır. Bu çalışmada, İstanbul Boğazı'ndaki hidrodinamik yapı ve su kalitesi durum değişkenlerinin zamansal ve uzamsal değişimleri üç boyutlu olarak benzeştirilmiştir. Bileşik modelin kurulumu, kalibrasyonu ve doğrulanması aşamalarında; ECMWF'ten alınan meteorolojik veriler, SHODB'den alınan batimetrik veriler, Marmaray Tüp Geçiş Projesi kapsamında İstanbul Boğazı'nda toplanan akıntı ve su seviyesi ölçümleri ile İSKİ tarafından İstanbul Boğazı'nda yürütülmekte olan Su Kalitesi İzleme çalışmaları kapsamında toplanan sıcaklık, tuzluluk ve su kalitesi durum değişkenlerine ait konsantrasyon ölçümleri kullanılmıştır. İstanbul Boğazı'nda akıntı hızları benzeştirilmiş, 24 farklı derinlikteki ölçüm verileri ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Hassasiyet analizi yapılarak konsantrasyonların en hassas olduğu model

parametreleri belirlenmiştir. Hassasiyet analizi sonucunda belirlenen kalibrasyon parametreleri kullanılarak sistematik bir kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli boğaz boyunca beş farklı istasyonda ve farklı derinliklerde toplanan veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Sonuçlara göre İstanbul Boğazı'nda ilk kez uygulanan üç boyutlu hidrodinamik ve su kalitesi bileşik modeli başarı ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır.

Ekdal (2008) Türkiye'nin en önemli ve hassas ekosistemlerinden olan Köyceğiz – Dalyan Lagünü'nü, pilot bölge olarak seçmiştir. Çalışmada Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Teşkilatı tarafından geliştirilen Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), model olarak seçilmiştir. Su kalitesi modelleme çalışmaları sırasında, sistemdeki süreçlerin ve mekanizmaların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla simülasyonlar basitten başlayıp, karmaşığa doğru gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, simülasyonlar 5 adımda yapılarak, her adımda bir veya birkaç durum değişkeni ilave edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, fosfor sistemdeki kısıtlayıcı element olarak gözükmektedir. Fosfor türleri simülasyonlara eklendiklerinde toplam klorofil-a konsantrasyonlarında önemli değişiklikler meydana gelmiş, bu da azot türlerinde konsantrasyon değişimlerine neden olmuştur.

Matzinger (2009) tarafından Almanya'nın Spree nehrinde su kalite modeli uygulanmıştır. Daha önceden ticari olarak geliştirilmiş WASP7, RWQM1, RIVE, Qsim programları su kalitesi problemlerine uygulanmış ve su kalitesinde ki sezonsal değişimlere gayet iyi uymakta olduğu görülmüştür. Özellikle hidrodinamik model için MIKE11, EcoLab ile birleştirilerek kullanılmaktadır. MIKE11 çözümlerinde kapalı sonlu farklar metodu kullanılmaktadır.

Hammond (2004) tarafından Virjinya'nın Alt Appomattox Nehri'nde su kalitesini artırmak için model geliştirilmiştir. Su kalite modelinin geliştirilmesi ve uygulanması bilgisayar destekli hidrodinamik program aracılığıyla yapılmıştır. DYNHYD5 ve WASP6.1 paket programları su kalitesi problemlerine uygulanmıştır. Hammond (2004) DYNHYD5'in hidrodinamik koşulları yeniden oluşturma için etkili bir araç olduğunu ve WASP6.1'in ise Appomattox Nehri içinde fekal koliform bakterilerinin davranışlarını simüle etmek için yetenekli bir araç olduğunu kanıtlamıştır.

Altansukh (2008) tarafından yapılan araştırma, Ulan Batur şehri etrafında Tuul Nehri akışı su kalitesini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Moğolistan ve Tuul Nehri su kalitesi üzerindeki atık su arıtma tesislerinin etkilerini modellemesi amaçlanmıştır. Modelin gelişiminde hidrodinamik modül için de Saint Venant denklemleri çözümlenmiştir.

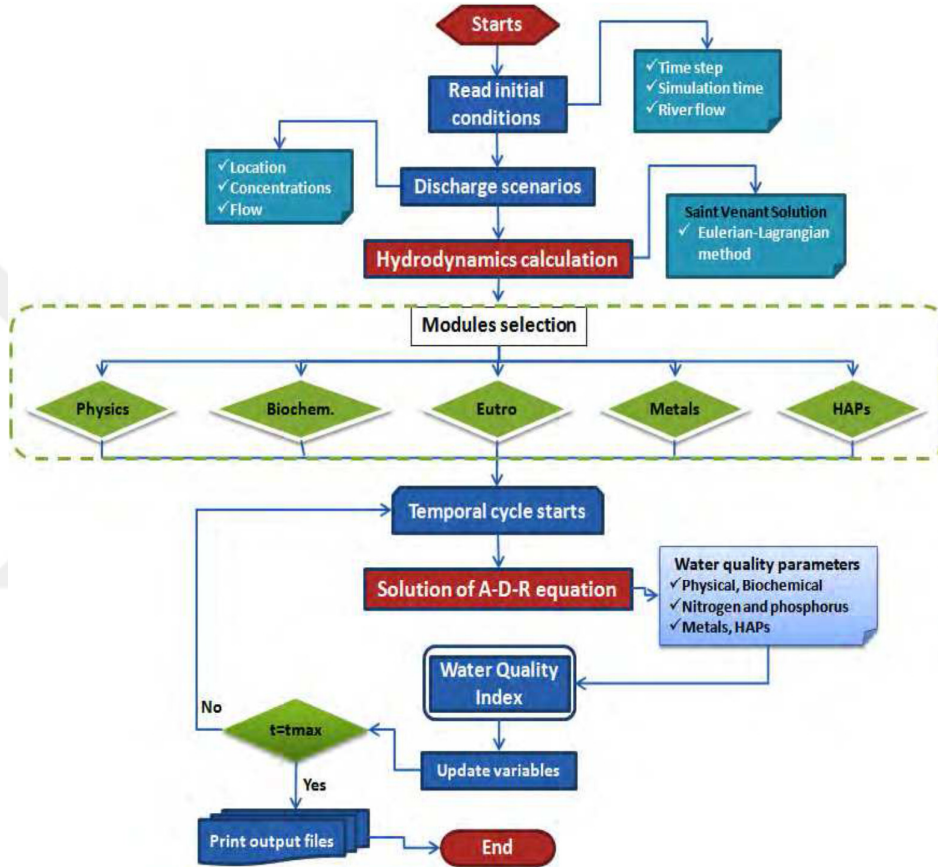
Mannina ve Viviani (2010), bir hidrodinamik su yüzü ve su kalite modülleri geliştirmişlerdir. Model su yüzü ve su kalitesi modüllerinden oluşmaktadır. Su yüzü alt modülü de Saint Venant denklemlerine dayanmaktadır. de Saint Venant denklemleri açık şema ile çözümlenmiştir. Diğer yandan kalite alt modülü ise adveksiyon-difüzyon denklemlerine dayanmaktadır. Model ana kalite süreçleri konusunda fiziksel/kimyasal işlemleri dikkate almaktadır. Güvenilir bir su kalite modeli simülasyonu için dört durum değişkeni kullanılmıştır. Bunlar: DO, BOD, NH₄ and NO. Model İtalya'nın Savana Nehrinde uygulanmıştır.

De Doncker vd. (2011) yaptıkları çalışmada 1D (bir boyutlu) modeli ekolojik süreçler ve yüzey su akışı arasındaki etkileşimin simülasyonu için uygulamıştır. Model de Saint-Venant denklemlerine dayanan hidrolik modülü ve adveksiyon-difüzyon denklemlerine dayanan su kalitesi modülünü içermektedir. Araştırmanın temel amacı su miktarının hesap parametreleri, su kalitesi doğal doğrulama ve duyarlılık analizleri ile birleştirilmesidir. Çalışma alanı Belçika yakınında ki Aa nehridir. Geliştirilen STRIVE (Stream–River–Ecosystem) model iyi ve doğru hesaplama sonuçlarını göstermiştir. Model akış süreci su kalitesi ve ekolojik açıdan birlikte ve ayrı ayrı çalışılmıştır. Adveksiyon - dispersiyon - reaksiyon denklemi kullanılmıştır.

Shao-Chen vd. (2014) tarafından ikinci Songhua Nehri için su kalitesi ile integre olmuş hidrodinamik model geliştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda Yinma nehir suyu kalitesi değişikliğine neden olan kirliliğin yoğunluğunun büyük ölçüde azalacağı düşünülmüştür.

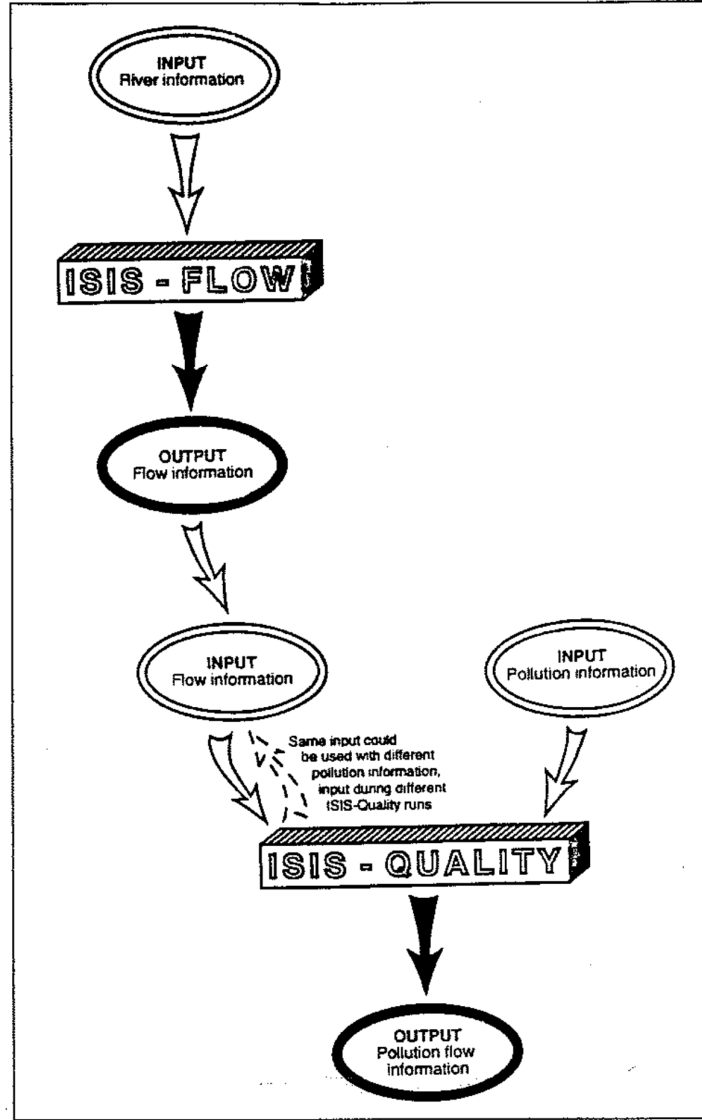
Torres-Bejarano vd. (2012) iki boyutlu de Saint-Venant ve Adveksiyon - Difüzyon - Reaksiyon denklemleri için sayısal çözüm modeli geliştirmişlerdir. Şekil 1.1'de nümerik modellerine ait akış şeması yer almaktadır. Model sırasıyla serbest yüzey akışı ve kirlitici taşıma hesaplamak için kullanılmıştır. Her iki denklemin çözümü, Euler-

Lagrange yöntemine dayanmaktadır. Adveksiyon terimleri Lagrange şeması kullanılarak çözülürken difüzyon terimleri Euler şeması kullanılarak çözülmüştür. Bu özel uygulama Meksika'daki Coatzacoalcos Nehri üzerinde, matematiksel modelleme ile desteklenerek su kalitesi değerlendirmesi için yapılmıştır.



Şekil 1.1. Nümerik model akış şeması (Torres-Bejarano, 2012)

Baban ve Foster (2002) tarafından yapılan çalışmada, Birleşik Krallık Avon nehri su akışı ve su kalitesi ISIS modeli ile değerlendirilmiştir. Şekil 1.2'de ISIS akış ve ISIS kalite şeması verilmiştir.



Şekil 1.2. ISIS akış ve ISIS kalite şeması (Baban ve Foster, 2002)

Bilimsel literatürde su kalite modeli olarak kullanılan bu terim, göller, rezervuarlar ve nehirlerdeki kimyasal ve/veya biyolojik dönüşüm süreçlerini taklit etmektedir. Su kalite modeli, hidrolik, fiziksel modeli, malzeme akış modeli ve biyolojik modeli içerisinde bulundurmaktadır.

Kirliliğin yayılımının belirlenmesinde modelleme çalışmalarına gereksinim duyulmaktadır. Kirliliğin yayılımı için hidrolik mühendisliğinde kullanılan modelleme çalışmaları fiziksel ve nümerik (sayısal) modellemelerden oluşmaktadır.

Fiziksel model: Bir sistemin ölçekli olarak küçültülmüş kopyasıdır.

Sayısal model: Bir sistemin sayısal kavramlar ile sayısal olarak tanımlanmasıdır. Sistemin tanımlanması, farklı bileşenlerin sistem üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve ileriye dönük tahmin yapılması için kullanılırlar (Özyurt, 2013).

Doğrudan sayısal benzeşim olarak anılan bu tür çalışmalar deneysel çalışmalar ile elde edilemeyecek detaydaki akım davranışları gözlemleyebilmemiz açısından çok önemlidir (Dündar, 2009).

Akarsu düzenleme çalışmaları sürecinde kullanılan akım modelleri günümüzde yalnızca hidrolik olarak çözümleme değil aynı zamanda akarsu çevresi ve ekosistemi göz önüne katarak da 3 boyutlu bir modelleme yapmaktadır. Çizelge 1.1’de yaygın olarak kullanılan sayısal akım modelleri verilmiştir (Ağırlioğlu ve Erkek, 2010).

Çizelge 1.1. Yaygın kullanılan sayısal akım modelleri (Ağırlioğlu ve Erkek, 2010)

Model sınıfı, uygulama	Yatak ıslahında temel uygulamalar	İstenilen parametreler	Belirsizlikler
Tek boyutlu -HEC-RAS -ISIS	Taşkın ötelemesi, taşkın kapasitesi, başlangıç su yüzeyi yüksekliği, hız ve en kesitler arasındaki derinlik	Mansap debisi, memba su seviyesi, pürüzlülük katsayısı, kanal genişleme/daralma katsayıları, temel kanal en kesit şekli	Pürüzlülük, genişleme/daralma katsayılarının doğru tahmini, yatak eğriliklerinin hesaplanamaması
İki boyutlu -Telemac -RMA	Akarsu akımının ve taşkın yatağının dinamik modellemesi, habitat uygunluğunun en kesit örnekleri	Sınır pürüzlülüğü, yatak topoğrafyası, türbülans modeli, sayısal çözüm tekniğinin ve boşalma katsayılarının seçilmesi	Yükseklik ilişkili akım özellik bilgilerinin kaybı, kararsız akım çözümlerinde zaman aralığının seçimi, yatak süreksizliklerinde ikincil akımların temsil edilememesi, ağ yapıları
Üç boyutlu -SSIIM -Fluent -CFX	Habitat uygunluğunun detaylı olarak modellenmesi	Yukarıda söz edilenler	Yukarıda söz edilenlerin büyük kısmı, en kesitlerde ve düşeyde ağ bağımsızlığı, su yüzeyinin belirlenmesi

Akarsular üzerinde su kalitesi dinamiklerini yalnızca biyolojik ve kimyasal süreçlerle benzeştirebilmek ya da öngörebilmek mümkün değildir. Böyle sistemlerde su kalitesi sıcaklık ve tuzluluk değişimleri, hidrodinamik değişimler (dalga, akıntı, gel-git,

türbülans karışımı, vb.), meteorolojik değişimler (rüzgâr, hava sıcaklığı, atmosferik basınç değişimleri, vb.) ve katı madde taşınım süreçlerinden de (birikim, tabandan su kolonuna ya da su kolonundan tabana geçiş, topaklaşma, vb.) etkilenmektedirler (Ayat, 2010).

Bu çalışmada, akarsulardaki hidrodinamik yapıya da önemli ölçüde bağlı olan su kalitesi süreçlerini anlamak için bileşik bir modelleme sistemi oluşturulmuştur. Bu çalışmanın öncelikli amacı gelişmiş teknikleri kullanarak akarsulardaki hidrodinamik yapıyı ve su kalitesi dinamiklerini ayrıntılı bir biçimde benzeştirebilmektir.

Literatürde en yaygın olarak kullanılan ve birçok ticari amaçlı geliştirilen paket programların nümerik motorlarının teşkilinde çözüm metodu olarak sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada sonlu farklar yöntemi kullanılmış, de Saint Venant denklemleri tanıtıldıktan sonra bu denklemlerin sonlu farklar ve kapalı çözüm şemalarından biri olan Preissmann şemasına göre ayrıklaştırılması yapılarak, çözüm denklemleri elde edilmiştir. Diğer yandan kirliliğin yayılımını tarif etmek amacıyla adveksiyon-difüzyon denklemi kullanılmıştır. Adveksiyon-difüzyon denklemi de Crank-Nicholson şeması kullanılarak çözümlenmiştir.

Bu tezde geliştirilen hidrodinamik su kalite modeli içerisinde iki modül yer almaktadır. Birinci modülde de Saint Venant denklemlerinin çözümü yapılırken ikinci modülde adveksiyon-difüzyon denklemlerinin çözümü yapılmaktadır. Birinci modül ile ikinci modülün integrasyonu birinci modülde hesaplanan akım hızlarının ikinci modüle geçişi ile sağlanmaktadır.

Dünyada yaygın olarak kullanılan benzeri yazılımlardan belli başlıları şunlardır: MIKE11, MIKE3, HEC-RAS, ECOLab ve ISIS.

1.1 Amaç ve Hedefler

Bu çalışmada akarsularda su kirliliğinin yayılımını belirlemek amacı ile bir boyutlu hidrodinamik su kalite modeli geliştirmek amaçlanmıştır.

Amaçlar doğrultusunda geliştirilen hedefler;

- Bir boyutlu zamanla değişen serbest su yüzü akımlarının davranışını tarif eden “de Saint Venant” denklemlerini sonlu farklar yöntemleriyle nümerik olarak çözmek.
- Kirliliğin yayılımını tarif eden adveksiyon-difüzyon denklemini sonlu farklar yöntemleriyle nümerik olarak çözmek.
- Her iki çözümün integrasyonunu sağlamak.
- Modeli nesne tabanlı Delphi programlama dili ortamında yazmak.
- Modelin güvenilirlik testlerini yapmak.

1.2 Tezin İçeriği

Bölüm 1’de; bu tez konusuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiş tezin içeriği, amaç ve hedefleri sunulmuştur. Bölüm 2’de; de Saint Venant denklemleri, de Saint Venant denklemlerinin sonlu fark çözümü, adveksiyon-difüzyon denklemi ve sonlu fark çözümü anlatıldıktan sonra bu iki çözümün integrasyonun nasıl gerçekleştirildiği gösterilmiştir. Üçüncü bölümde; delphi ortamında geliştirilen hidrodinamik su kalite modeli, modelin akış şeması ve kullanımı anlatılmıştır. Aynı zamanda delphi ortamında yazılan nümerik model programı ve kullanımı anlatılmıştır. Bölüm 4’de; programın doğruluk testleri, test sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

BÖLÜM II

METOT

Açık kanallarda oluşan değişken akımların karakteristiklerinin incelenmesinde “de Saint Venant” denklemlerinden yararlanılmaktadır.

2.1 de Saint Venant Denklemleri ve Çözümü

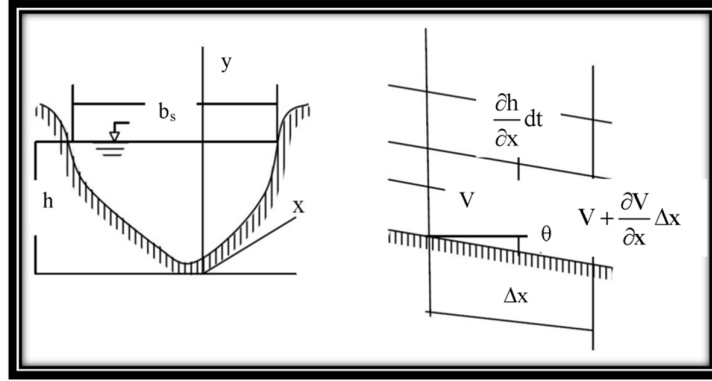
de Saint Venant denklemleri kütle ve momentumun korunumu prensiplerine göre aşağıda verilen kabuller çerçevesinde elde edilmiş bir süreklilik ve bir de momentum denklemlerinden oluşan dinamik denklemlerdir.

de Saint Venant denklemlerinin geliştirilmesi sırasında yapılan kabuller:

- Akım bir boyutludur, akım karakteristikleri sadece akım doğrultusunda değişiklik gösterir. Başka bir deyişle diğer yöndeki değişimler çok etkili değildir.
- Hidrostatik basınç dağılımı geçerlidir.
- Akarsu yatağının boyuna ekseni düz bir çizgidir.
- Akarsu tabanının eğimi küçüktür.
- Akarsu yatağı rijittir. Oyulmalar veya yığılmalar ile taban değişmez.
- Sürtünme kayıpları üniform akım bağıntıları yardımı ile hesaplanabilir.
- Akışkan sıkıştırılmaz, yoğunluk sabittir.

Süreklilik Denklemi:

Şekil 2.1’de kontrol hacmine giren ve çıkan kütledeki değişimler yer almaktadır.



Şekil 2.1. Süreklilik denklemi için kullanılan notasyon (Hacımusalar, 2003)

$$AVdt - \left[A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right] \left[V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right] dt + qdt\Delta x = b_s \Delta x \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de, ikinci mertebeden $\left(\frac{\partial A}{\partial x} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right)$ terimi ihmal edilerek sadeleştirmeler yapıldığında (Hacımusalar, 2003);

$$q - A \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial A}{\partial x} = b_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{veya} \quad q - \frac{\partial(AV)}{\partial x} = b_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{elde edilmektedir.}$$

Kanala giren veya çıkan su debisini $q = 0$ ve dikdörtgen kesit (b_s sabit) koşulu ile;

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Dikdörtgen en kesit dışındaki kesitler için denklem (2.3) şeklinde gösterilebilir.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b_s} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

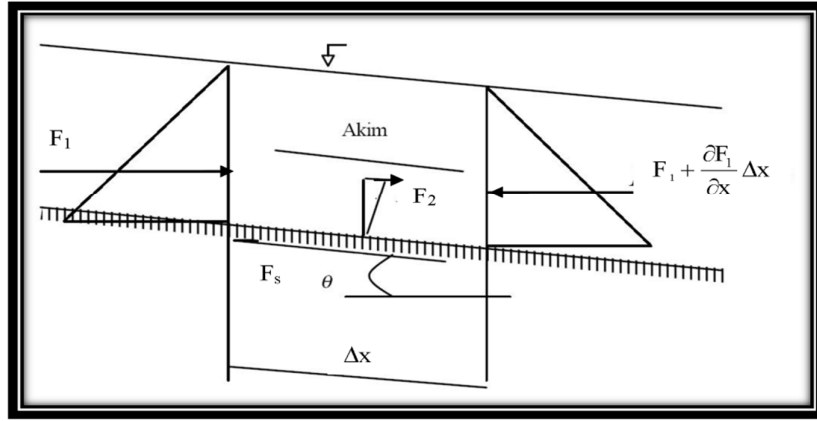
Momentum Denklemi:

Newtonun ikinci hareket kanunu yardımı ile momentum denklemi aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (m \vec{V}) = \sum \vec{F} \quad (2.4)$$

Şekil 2.2’de momentum denklemi için kullanılan notasyon, hareket denklemlerini ifade etmek için şematik olarak gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (m \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A \Delta x V) = \rho V \frac{\partial}{\partial t} (A \Delta x) + \rho A \Delta x \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.5)$$



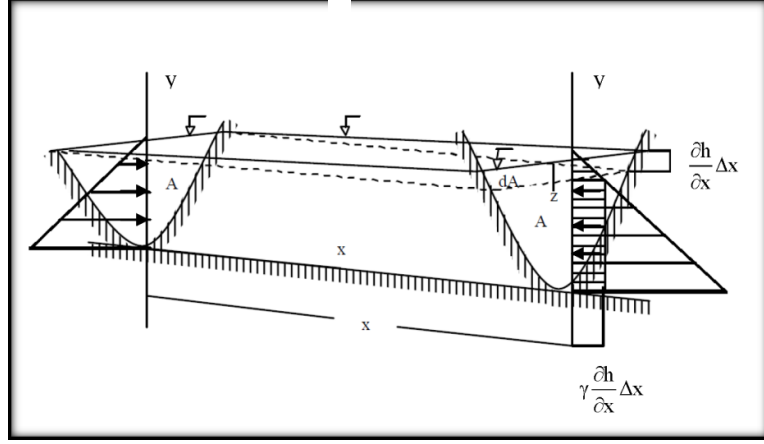
Şekil 2.2. Momentum denklemi için kullanılan notasyon (Hacımusalar, 2003)

Böylece (2.4) bağıntısı, denklem (2.6)’ya dönüşmektedir.

$$\rho V \Delta x \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \rho V A \Delta x \left(V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = \sum \vec{F} \quad (2.6)$$

Dikdörtgen en kesitler için denklem (2.7) elde edilmektedir.

$$\rho V q \Delta x + \rho V A \Delta x \left(V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = \sum \vec{F} \quad (2.7)$$



Şekil 2.3. Basınç kuvvetleri için kullanılan notasyon (Hacımusalar, 2003)

Basınç kuvvetlerinin hesabında, hidrostatik basınç dağılımı kabulü yapılmıştır. Prizmatik kanal olması durumunda; Şekil 2.3 yardımı ile basınç kuvveti F_1 , denklem (2.8) şeklinde ifade edilebilir (Hacımusalar, 2003).

$$\bar{F}_1 = -\gamma A \frac{\partial h}{\partial x} \int \Delta x - \int_0^{(\partial h / \partial x) \Delta x} b z dz \quad (2.8)$$

$\left[\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \Delta x \right]$ terimi ihmal edilecek boyutta olup, bundan doğan kuvvetler daha da küçük olacağından ihmal edilirse ve basınç kuvvetleri için denklem (2.9) elde edilir (Hacımusalar, 2003).

$$\bar{F}_1 = -\gamma A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (2.9)$$

Yerçekimi kuvvetinin akım doğrultusundaki bileşeni ise;

$$\bar{F}_2 = \gamma A \Delta x \sin \theta \quad (2.10)$$

Ve $\sin \theta \approx \tan \theta \approx S_0$ varsayımı yapıldığında denklem (2.10), denklem (2.11) şeklinde yazılır.

$$\bar{F}_2 = \gamma A \Delta x S_0 \quad (2.11)$$

Sürtünme kuvveti ise cidar kayma gerilmesi cinsinden denklem (2.12)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\vec{F}_s = -\tau_0 P \Delta x \quad (2.12)$$

Sırasıyla (2.9), (2.11) ve (2.12) denklemlerini kullanılarak dış kuvvetler için elde edilmiş olan değerler (2.6) denkleminde yerine yerleştirildiklerinde denklem (2.13) elde edilmektedir (Hacımusalar, 2003).

$$\begin{aligned} \rho V q \Delta x \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \rho V A \Delta x \left(V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = \\ - \gamma A \Delta x \frac{\partial h}{\partial x} + \gamma A \Delta x S_0 + -\tau_0 P \Delta x \end{aligned} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13)'ün her iki tarafı $(\gamma A \Delta x)$ ile bölünerek denklem düzenlenirse;

$$\frac{V}{gA} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau_0}{\gamma R} - S_0 = 0 \quad (2.14)$$

Bu bağıntı, prizmatik kanallar için momentum denklemi olarak adlandırılır. $S_f = \frac{\tau_0}{\gamma R}$ yazılıp denklem (2.14)'de yerine yazılırsa, debi cinsinden denklem (2.15) ve (2.16) elde olunur.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.15)$$

veya

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.16)$$

Literatürde süreklilik denklemi, denklem (2.3) ve momentum denklemi, denklem (2.16) genelleştirilmiş de Saint Venant denklemleri olarak bilinir.

Momentum denkleminde (2.16) yer alan terimler ve anlamları aşağıda verilmiştir.

gAS_0 : Yerçekimi kuvveti terimi

gAS_f : Sürtünme kuvveti terimi

$\frac{\partial Q}{\partial t}$: Yersel ivme terimi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) : \text{Konvektif ivme terimi}$$

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} : \text{Basınç kuvveti terimi}$$

de Saint Venant denklemlerinden momentum denklemi modellenmek istenen fiziksel olaya bağlı olarak aşağıdaki şekillerde sadeleştirilir.

$$gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.17)$$

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.18)$$

Denklem (2.17)'de verilen durum kinematik dalga denklemi, denklem (2.18)'de verilen durum ise difüzyon dalga denklemi olarak adlandırılır. Kinematik dalga yaklaşımı kanal eğimlerinin büyük olduğu ve kabarma etkilerinin önemsiz olduğu yerlerde tercih olunurken, difüzyon dalga formu basınç kuvvetlerinin önemli fakat atalet (yersel ve konvektif ivme terimleri) kuvvetlerinin önemsiz olduğu yerlerde kullanılır. Hem basınç ve hem de atalet kuvvetlerinin etkili olduğu küçük eğimli akarsularda ve kabarma etkisinin önemli olduğu durumlarda dinamik dalga bağıntısı kullanılır (Chow, 1973).

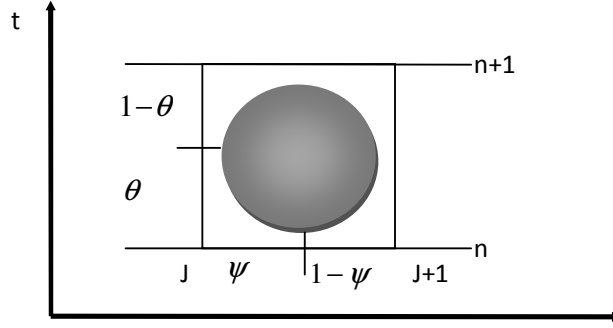
de Saint Venant denklemleri aşağıda gösterildiği şekilde üniform akım, tedrici değişken akım ve zamanla değişen akım durumlarını modellemede kullanılabilir.

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{Zamanla Değişen Akım}} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - \underbrace{gA(S_0 - S_f)}_{\text{Üniform Akım}} = 0$$

Tedrici Değişken Akım

2.1.1 Preissmann Şeması

Bu çalışmada kullanılacak olan kapalı çözüm şemalarından biri olan Preissman şeması (four point boxs cheme olarak da bilinmekte) Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Preissmann şeması

Preissmann şeması literatürde de Saint Venant denklemlerinin çözümünde en yaygın olarak kullanılan çözüm şemalarından biridir (Abedini, 2006). Diğer yaygın olarak kullanılan kapalı şema ise Abbott-Ionescu şemasıdır (Abbott, 1989).

Preissmann şeması üzerine yapılan nümerik ve model çalışmaları bu şemanın geçiş akım durumlarında (transcritical flow) problem oluşturduğu bunun dışında ise çok iyi sonuçlar verdiği yönündedir (Abedini, 2006).

Bu şemada ağırlık katsayısı θ sıfır alındığında şema açık çözüm şemasına dönüşürken, θ bire doğru yaklaştıkça kapalı şema özelliği ağırlık kazanır. Genellikle θ değeri için tercih edilen 0,5'e yakın değerler durumunda ise şemanın şekli bir kutuyu andırır. Bu yüzden dört noktalı kutu şeması olarak da bilinir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki;

- Şema $0,5 \leq \theta \leq 1$ değerleri için şartsız kararlı (denge problemi yok).
- Şema $\theta = 0,5$ olduğu zaman en hassas, $\theta = 1$ olduğu zaman ise denge anlamında en az hassastır.
- Genellikle $\theta = 0,53-0,57$ değerleri tercih edilir (Abbott, 1998).

2.1.2 Preissmann Şeması İle Terimlerin Ayrıklaştırılması ve Çözüm Denklemleri

Preissmann şemasına göre denklem (2.3)'te gösterilen süreklilik denklemindeki terimlerin ayrıklaştırılması aşağıdaki şekilde yapılır.

$$\frac{dh}{dt} + \frac{1}{b_s} \frac{dQ}{dx} = 0$$

$$\frac{dh}{dt} \approx \psi \left(\frac{h_{j+1}^{n+1} - h_{j+1}^n}{\Delta t} \right) + (1 - \psi) \left(\frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} \right)$$

$$\frac{dQ}{dx} \approx \theta \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta x} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} \right) \quad \text{bu ayrıklaştırılmış terimleri denklem}$$

(2.3)'de yerine yazarsak;

$$\psi \left(\frac{h_{j+1}^{n+1} - h_{j+1}^n}{\Delta t} \right) + (1 - \psi) \left(\frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} \right) + \frac{1}{b_s} \left[\theta \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta x} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} \right) \right] = 0$$

Denklemleri düzenlersek;

$$\begin{aligned} & \psi \left(\frac{h_{j+1}^{n+1}}{\Delta t} \right) - \psi \left(\frac{h_{j+1}^n}{\Delta t} \right) + \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} - \psi \left(\frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t} \right) + \\ & \frac{1}{b_s} \left[\frac{\theta Q_{j+1}^{n+1}}{\Delta x} - \frac{\theta Q_j^{n+1}}{\Delta x} + \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} - \theta \left(\frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{\Delta x} \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

n+1 seviyesindeki bilinmeyenleri sol tarafa, n seviyesinde bilinenleri sağ tarafa alırsak;

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1 - \psi}{\Delta t} \right) h_j^{n+1} + \left(\frac{-\theta}{b_s \Delta x} \right) Q_j^{n+1} + \left(\frac{\psi}{\Delta t} \right) h_{j+1}^{n+1} + \left(\frac{\theta}{b_s \Delta x} \right) Q_{j+1}^{n+1} \\ & = \left(\frac{1 - \psi}{\Delta t} \right) h_j^n + \left(\frac{1 - \theta}{b_s \Delta x} \right) Q_j^n + \left(\frac{\psi}{\Delta t} \right) h_{j+1}^n + \left(\frac{\theta - 1}{b_s \Delta x} \right) Q_{j+1}^n \end{aligned} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'da gösterilen terimlerden bazılarını aşağıdaki biçimde ifade edersek;

$$A1 = \left(\frac{1 - \psi}{\Delta t} \right), \quad B1 = \left(\frac{-\theta}{b_s \Delta x} \right), \quad C1 = \left(\frac{\psi}{\Delta t} \right), \quad D1 = \left(\frac{\theta}{b_s \Delta x} \right)$$

$$E1 = \left(\frac{1 - \psi}{\Delta t} \right) h_j^n + \left(\frac{1 - \theta}{b_s \Delta x} \right) Q_j^n + \left(\frac{\psi}{\Delta t} \right) h_{j+1}^n + \left(\frac{\theta - 1}{b_s \Delta x} \right) Q_{j+1}^n$$

Süreklilik denklemi için çözümde kullanılacak olan denklem (2.20) elde olunur.

$$A1_j h_j^{n+1} + B1_j Q_j^{n+1} + C1_j h_{j+1}^{n+1} + D1_j Q_{j+1}^{n+1} = E1_j \quad (2.20)$$

Benzer şekilde momentum denklemi için;

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{d}{dx} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{dh}{dx} - gAi + \frac{gAQ|Q|}{K^2} = 0$$

Bu terimler Preissmann şemasına göre ayrıklaştırılırsa;

$$\frac{dQ}{dt} \approx \psi \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n}{\Delta t} \right) + (1 - \psi) \left(\frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} \right)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) \approx \left[\left(\beta \frac{Q^2}{A} \right)_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} - \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right)_j^{n+\frac{1}{2}} \right] \frac{1}{\Delta x}$$

$$Q_{j+1}^{2n+1} \approx Q_{j+1}^{n+1} Q_{j+1}^n \approx \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} Q_{j+1}^n}{A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} - \frac{Q_j^{n+1} Q_j^n}{A_j^{n+\frac{1}{2}}} \right)$$

$$gA \frac{dh}{dx} \approx gA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{dh}{dx} \approx gA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \theta \left(\frac{h_{j+1}^{n+1} - h_j^{n+1}}{\Delta x} \right) + gA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (1 - \theta) \left(\frac{h_{j+1}^n - h_j^n}{\Delta x} \right)$$

$$-gAi \approx -giA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$$

$$gA \frac{Q|Q|}{K^2} \approx \frac{g}{2} \left[\frac{A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{\left(K_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right)^2} |Q_{j+1}^n| Q_{j+1}^{n+1} + \frac{A_j^{n+\frac{1}{2}}}{\left(K_j^{n+\frac{1}{2}} \right)^2} |Q_j^n| Q_j^{n+1} \right]$$

Ayrıklaştırılmış bu terimler momentum denkleminde yerine yazılırsa;

$$\psi \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n}{\Delta t} \right) + (1 - \psi) \left(\frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} \right) + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} Q_{j+1}^n}{A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} - \frac{Q_j^{n+1} Q_j^n}{A_j^{n+\frac{1}{2}}} \right) +$$

$$gA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \theta \left(\frac{h_{j+1}^{n+1} - h_j^{n+1}}{\Delta x} \right) + gA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (1 - \theta) \left(\frac{h_{j+1}^n - h_j^n}{\Delta x} \right) - giA_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} +$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{\left(K_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right)^2} |Q_{j+1}^n| Q_{j+1}^{n+1} + \frac{A_j^{n+\frac{1}{2}}}{\left(K_j^{n+\frac{1}{2}}\right)^2} |Q_j^n| Q_j^{n+1} \right] = 0$$

Denklemleri yeniden n+1 seviyesindekileri solda ve n seviyesindekileri sağda olacak şekilde düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & \left(\frac{-g\theta A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) h_j^{n+1} + \left[\frac{1-\psi}{\Delta t} - \frac{Q_j^n}{\Delta x A_j^{n+\frac{1}{2}}} + \frac{g A_j^{n+\frac{1}{2}}}{2 \left(K_j^{n+\frac{1}{2}}\right)^2} |Q_j^n| \right] Q_j^{n+1} + \left(\frac{g\theta A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) h_{j+1}^{n+1} + \\ & \left[\frac{\psi}{\Delta t} + \frac{Q_{j+1}^n}{\Delta x A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} + \frac{g A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}}{2 \left(K_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}\right)^2} |Q_{j+1}^n| \right] Q_{j+1}^{n+1} = \frac{Q_{j+1}^n}{\Delta t} \psi + \frac{Q_j^n}{\Delta t} - \frac{\psi}{\Delta t} Q_j^n - g A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (1-\theta) \left(\frac{h_{j+1}^n - h_j^n}{\Delta x} \right) + g i A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Momentum denkleminde yer alan terimlerin bir bölümü aşağıdaki biçimde tanımlanırsa;

$$\begin{aligned} A2 &= \left(\frac{-g\theta A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) \\ B2 &= \left[\frac{1-\psi}{\Delta t} - \frac{\beta Q_j^n}{\Delta x A_j^{n+\frac{1}{2}}} + \frac{g A_j^{n+\frac{1}{2}}}{2 \left(K_j^{n+\frac{1}{2}}\right)^2} |Q_j^n| \right] \\ C2 &= \left(\frac{\theta g A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) \end{aligned}$$

$$D2 = \left[\frac{\psi}{\Delta t} + \frac{\beta Q_{j+1}^n}{\Delta x A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}}} + \frac{g A_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} |Q_{j+1}^n|}{2 \left(K_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right)^2} \right]$$

$$E2 = \frac{Q_{j+1}^n}{\Delta t} \psi + \left(\frac{1-\psi}{\Delta t} \right) Q_j^n - g A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (1-\theta) \left(\frac{h_{j+1}^n - h_j^n}{\Delta x} \right) + g i A_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$$

Momentum denklemi, bu durumda denklem (2.21)'deki şekle dönüşür.

$$A2_j h_j^{n+1} + B2_j Q_j^{n+1} + C2_j h_{j+1}^{n+1} + D2_j Q_{j+1}^{n+1} = E2_j \quad (2.21)$$

Sınır Durumları

Sayısal çözümleme yöntemlerinin hepsinde seçilen hesap alanını çevreleyen veya akım durumunu etkileyen sınırların belirtilmesi gerekir. Sınır şartları denklemlerin çözümü içinde olmazsa olmazlardandır. Bu bölümde debi (Q) ve su derinliği (h) sınır durumu olarak verilmesi durumunda, sınır şartlarının nümerik olarak nasıl tarif olunacağı gösterilmektedir.

Debi (Q₀) sınır şartı olarak verilmiş

$$\alpha_1 h_0^{n+1} + \beta_1 Q_0^{n+1} = \gamma_1$$

$$\alpha_1 = 0 \quad \beta_1 = 1 \quad \gamma_1 = Q_0$$

$$A1_0 h_0^{n+1} + B1_0 Q_0^{n+1} + C1_0 h_1^{n+1} + D1_0 Q_1^{n+1} = E1_0 \quad (2.22)$$

$$A2_0 h_0^{n+1} + B2_0 Q_0^{n+1} + C2_0 h_1^{n+1} + D2_0 Q_1^{n+1} = E2_0 \quad (2.23)$$

Denklem (2.22)'yi A2₀ ve (2.23)'ü A1₀ ile çarpıp birini diğerinden çıkartırsak;

$$A2_0 A1_0 h_0^{n+1} + A2_0 B1_0 Q_0^{n+1} + A2_0 C1_0 h_1^{n+1} + A2_0 D1_0 Q_1^{n+1} = A2_0 E1_0$$

$$A1_0 A2_0 h_0^{n+1} + A1_0 B2_0 Q_0^{n+1} + A1_0 C2_0 h_1^{n+1} + A1_0 D2_0 Q_1^{n+1} = A1_0 E2_0$$

$$0 + (A2_0 B1_0 - A1_0 B2_0) Q_0^{n+1} + (A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0) h_1^{n+1} + (A2_0 D1_0 - A1_0 D2_0) Q_1^{n+1} = A2_0 E1_0 - A1_0 E2_0$$

Elde olunan denklemi düzenlediğimizde;

$$h_1^{n+1} = -\left(\frac{A2_0 D1_0 - A1_0 D2_0}{A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0}\right)Q_1^{n+1} + \left(\frac{A2_0 E1_0 - A1_0 E2_0}{A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0}\right) - \left(\frac{A2_0 B1_0 - A1_0 B2_0}{A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0}\right)Q_0^{n+1}$$

$$F_0 = -\left(\frac{A2_0 D1_0 - A1_0 D2_0}{A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0}\right)$$

$$G_0 = \left(\frac{A2_0 E1_0 - A1_0 E2_0}{A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0}\right) - \left(\frac{A2_0 B1_0 - A1_0 B2_0}{A2_0 C1_0 - A1_0 C2_0}\right)Q_0^{n+1}$$

Sonuçta denklem (2.24) elde olunur. Bu denklem debinin sınır şartı olarak verilmesi durumunda ele alınması gereken denklemdir.

$$h_1^{n+1} = F_0 Q_1^{n+1} + G_0 \quad (2.24)$$

Su derinliği (h_0) sınır şartı olarak verilmiş

$$\alpha_1 h_0^{n+1} + \beta_1 Q_0^{n+1} = \gamma_1 \quad \alpha_1 = 0, \beta_1 = 0, \gamma_1 = h_0$$

$$A1_0 h_0^{n+1} + B1_0 Q_0^{n+1} + C1_0 h_1^{n+1} + D1_0 Q_1^{n+1} = E1_0 \quad (2.25)$$

$$A2_0 h_0^{n+1} + B2_0 Q_0^{n+1} + C2_0 h_1^{n+1} + D2_0 Q_1^{n+1} = E2_0 \quad (2.26)$$

Denklem (2.25) $B2_0$ ve denklem (2.26) $B1_0$ ile çarpılıp biri diğerinden çıkartılırsa;

$$B2_0 A1_0 h_0^{n+1} + B2_0 B1_0 Q_0^{n+1} + B2_0 C1_0 h_1^{n+1} + B2_0 D1_0 Q_1^{n+1} = B2_0 E1_0$$

$$B1_0 A2_0 h_0^{n+1} + B1_0 B2_0 Q_0^{n+1} + B1_0 C2_0 h_1^{n+1} + B1_0 D2_0 Q_1^{n+1} = B1_0 E2_0$$

$$(B2_0 A1_0 - B1_0 A2_0)h_0^{n+1} + 0 + (B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0)h_1^{n+1} + (B2_0 D1_0 - B1_0 D2_0)Q_1^{n+1} = B2_0 E1_0 - B1_0 E2_0$$

$$h_1^{n+1} = -\left[\frac{B2_0 D1_0 - B1_0 D2_0}{B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0}\right]Q_1^{n+1} + \frac{B2_0 E1_0 - B1_0 E2_0}{B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0} - \left[\frac{A1_0 B2_0 - A2_0 B1_0}{B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0}\right]h_0^{n+1}$$

$$F_0 = -\left[\frac{B2_0 D1_0 - B1_0 D2_0}{B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0}\right]$$

$$G_0 = \frac{B2_0 E1_0 - B1_0 E2_0}{B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0} - \left[\frac{A1_0 B2_0 - A2_0 B1_0}{B2_0 C1_0 - B1_0 C2_0}\right]h_0^{n+1}$$

$$h_1^{n+1} = F_0 Q_1^{n+1} + G_0 \quad (2.27)$$

Denklem (2.29), denklem (2.20)'de yerine yazılır.

$$A1_j h_j^{n+1} + B1_j Q_j^{n+1} + C1_j h_{j+1}^{n+1} + D1_j Q_{j+1}^{n+1} = E1_j$$

$$A1_j (F_{j-1} Q_j^{n+1} + G_{j-1}) + B1_j Q_j^{n+1} + C1_j h_{j+1}^{n+1} + D1_j Q_{j+1}^{n+1} = E1_j \text{ denklem düzenlenir.}$$

$$Q_j^{n+1} (A1_j F_{j-1} + B1_j) = -C1_j h_{j+1}^{n+1} - D1_j Q_{j+1}^{n+1} + E1_j - A1_j G_{j-1}$$

$$Q_j^{n+1} = \frac{-C1_j}{A1_j F_{j-1} + B1_j} h_{j+1}^{n+1} + \frac{-D1_j}{A1_j F_{j-1} + B1_j} Q_{j+1}^{n+1} + \frac{E1_j - A1_j G_{j-1}}{A1_j F_{j-1} + B1_j}$$

$$H_j = \frac{-C1_j}{A1_j F_{j-1} + B1_j}$$

$$I_j = \frac{-D1_j}{A1_j F_{j-1} + B1_j}$$

$$J_j = \frac{E1_j - A1_j G_{j-1}}{A1_j F_{j-1} + B1_j}$$

Bu işlemler sonucunda denklem (2.30) elde edilir.

$$Q_j^{n+1} = H_j h_{j+1}^{n+1} + I_j Q_{j+1}^{n+1} + J_j \quad (2.30)$$

Denklem (2.29) ve denklem (2.30) denklem (2.21)'de yerine yazılır.

$$A2_j (F_{j-1} Q_j^{n+1} + G_{j-1}) + B2_j (H_j h_{j+1}^{n+1} + I_j Q_{j+1}^{n+1} + J_j) + C2_j h_{j+1}^{n+1} + D2_j Q_{j+1}^{n+1} = E2_j$$

$$A2_j F_{j-1} (H_j h_{j+1}^{n+1} + I_j Q_{j+1}^{n+1} + J_j) + A2_j G_{j-1} + B2_j (H_j h_{j+1}^{n+1} + I_j Q_{j+1}^{n+1} + J_j) + C2_j h_{j+1}^{n+1} + D2_j Q_{j+1}^{n+1} = E2_j$$

$$h_{j+1}^{n+1} (A2_j F_{j-1} H_j + B2_j H_j + C2_j) + Q_{j+1}^{n+1} (A2_j F_{j-1} I_j + B2_j I_j + D2_j) + A2_j F_{j-1} J_j + A2_j G_{j-1} + B2_j J_j = E2_j$$

$$h_{j+1}^{n+1} (A2_j F_{j-1} H_j + B2_j H_j + C2_j) = -Q_{j+1}^{n+1} (A2_j F_{j-1} I_j + B2_j I_j + D2_j) + E2_j - A2_j F_{j-1} J_j - A2_j G_{j-1} - B2_j J_j$$

$$h_{j+1}^{n+1} = - \left(\frac{A2_j F_{j-1} I_j + B2_j I_j + D2_j}{A2_j F_{j-1} H_j + B2_j H_j + C2_j} \right) Q_{j+1}^{n+1} + \left(\frac{E2_j - A2_j F_{j-1} J_j - A2_j G_{j-1} - B2_j J_j}{A2_j F_{j-1} H_j + B2_j H_j + C2_j} \right)$$

$$F_j = - \left(\frac{A2_j F_{j-1} I_j + B2_j I_j + D2_j}{A2_j F_{j-1} H_j + B2_j H_j + C2_j} \right) \quad (2.31)$$

$$G_j = \left(\frac{E2_j - A2_j F_{j-1} J_j - A2_j G_{j-1} - B2_j J_j}{A2_j F_{j-1} H_j + B2_j H_j + C2_j} \right) \quad (2.32)$$

Bu işlemler sonucunda denklem (2.30) elde edilir.

$$h_{j+1}^{n+1} = F_j Q_{j+1}^{n+1} + G_j \quad (2.33)$$

2.2 Adveksiyon-Difüzyon Denklemi ve Çözüm

Adveksiyon, akışkanın hareketi (akım) sonucunda oluşan madde taşınımıdır. Örneğin bir akarsuya bırakılan bir maddenin bozulmadan ve dağılmadan akımla birlikte mansaba doğru taşınmasıdır.

Günlük hayatımızda akışkanların incelenmesi, akışkanlara bağlı uygulamaların gelişimi açısından önem kazanmıştır. Akışkan hareketinin önemli bir rol oynadığı problemlerde, adveksiyon etkisi dikkate alınmalıdır. Doğada adveksiyonun yanında daima difüzyon olayı gerçekleşir; bu nedenle adveksiyon ve difüzyonu beraber ele alan hesap yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Takıl, 2010).

Adveksiyon-difüzyon denklemi, kütle taşınması, momentum taşınması, enerji taşınması ve nötron taşınması gibi alanlarda uygulanır (Takıl, 2010).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{-U \frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{ADVEKSİYON TERİMİ}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}_{\text{DİFÜZYON TERİMİ}} + \underbrace{S}_{\text{KAYNAK TERİMİ}} + \underbrace{R}_{\text{REAKSİYON TERİMİ}} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} \} \text{ADVEKSİYON DENKLEMİ} \quad (2.35)$$

ADVEKSİYON TERİMİ

Adveksiyon ve difüzyon süreçleri bir arada görüldüğü zaman advectif-dispersiyon gerçekleşir ve madde taşınımı advectif-dispersiyon denkleminde göre hareket eder:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.36)$$

ADVEKSİYON TERİMİ DİFÜZYON TERİMİ

Bu denklemler reaksiyona girmeyen bir maddenin bir boyutlu taşınımı için kullanılmaktadır. Bu denklem çeşitli başlangıç ve sınır şartları altında çözülebilir. Elde edilen çözümler akarsu ortamlarındaki madde konsantrasyonlarının zaman ve konuma göre hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Sonlu farklar metodu, genellikle analitik çözümlerin elde olunamadığı kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan ve yaklaşık sonuç veren sayısal yöntemlerden biridir. Bu metod diğer nümerik metotlara yani sonlu eleman ve sonlu hacimler metotlarına göre daha basit ve anlaşılması daha kolay bir metottur. Sonlu farklar ile elde olunan yaklaşık çözümler denklem (2.37)'de gösterilen beşinci dereceden türev ifadesine kadar yazılmış, çapraz türevleri de içeren Taylor seri açılımı kullanılarak elde edilebilir (Chapra, 2003).

$$\begin{aligned} f(x + \alpha, t + \beta) = & f + \frac{1}{1!} \left[\alpha \frac{\partial f}{\partial x} + \beta \frac{\partial f}{\partial t} \right] + \frac{1}{2!} \left[\alpha^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + 2\alpha\beta \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial t} + \beta^2 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right] \\ & + \frac{1}{3!} \left[\alpha^3 \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + 3\alpha^2\beta \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial t} + 3\alpha\beta^2 \frac{\partial^3 f}{\partial x \partial t^2} + \beta^3 \frac{\partial^3 f}{\partial t^3} \right] \\ & + \frac{1}{4!} \left[\alpha^4 \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 4\alpha^3\beta \frac{\partial^4 f}{\partial x^3 \partial t} + 6\alpha^2\beta^2 \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial t^2} + 4\alpha\beta^3 \frac{\partial^4 f}{\partial x \partial t^3} + \beta^4 \frac{\partial^4 f}{\partial t^4} \right] \\ & + \frac{1}{5!} \left[\alpha^5 \frac{\partial^5 f}{\partial x^5} + 5\alpha^4\beta \frac{\partial^5 f}{\partial x^4 \partial t} + 10\alpha^3\beta^2 \frac{\partial^5 f}{\partial x^3 \partial t^2} + 10\alpha^2\beta^3 \frac{\partial^5 f}{\partial x^2 \partial t^3} + 5\alpha\beta^4 \frac{\partial^5 f}{\partial x \partial t^4} + \beta^5 \frac{\partial^5 f}{\partial t^5} \right] + \text{H.O.T} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Denklem (2.37) kullanılarak ileri doğru, geriye doğru ve merkezi sonlu fark açılım bağıntılarının genel formları sırasıyla denklem (2.38), (2.39) ve (2.40)'da verilmiştir.

$$\frac{d^n f}{dx^n} = \frac{\Delta^n f_i}{h^n} + O(h) \quad (2.38)$$

$$\frac{d^n f}{dx^n} = \frac{\nabla^n f_i}{h^n} + O(h) \quad (2.39)$$

$$n \text{ çift sayı ise; } \frac{d^n f}{dx^n} = \frac{\nabla^n f_{i+0,5n} + \Delta^n f_{i-0,5n}}{2h^n} + O(h^2) \quad (2.40)$$

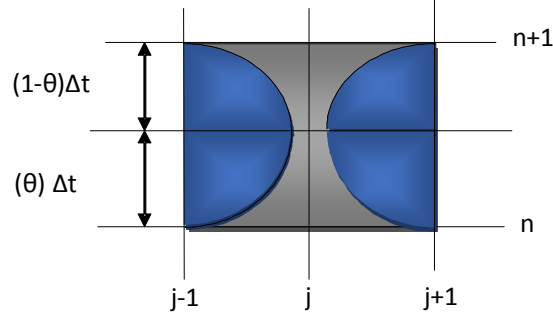
$$n \text{ tek sayı ise; } \frac{d^n f}{dx^n} = \frac{\nabla^n f_{i+0,5(n-1)} + \Delta^n f_{i-0,5(n-1)}}{2h^n} + O(h^2)$$

2.2.1 Crank-Nicholson Şeması

Diğer nümerik yöntemlerde olduğu gibi sonlu farklar metodu da çözüm şemaları ile birlikte tarif edilir. Çözüm şemaları, açık ve kapalı çözüm şemaları olmak üzere iki ana grupta incelenebilir (Abbott, 1989). Adveksiyon-difüzyon denklem çözümleri için kapalı çözüm şemalarından Crank-Nicholson şeması kullanılmıştır.

Kapalı çözüm şemaları, $n+1$ seviyesindeki tüm bağımlı değişkenlerin türev değerleri n seviyesinde bulunan bilinen bağımlı değişkenlerin yanı sıra $n+1$ seviyesinde bulunan diğer bilinmeyen değerler kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanır. Bu çözüm yöntemi, çözüm denklemlerinin daha karmaşık hal aldığı ve program kodlamalarının daha güç olduğu bir yöntemdir. Fakat çözüm denklemlerinin denge problemleri oluşturmaması avantajdır.

Kapalı şemalardan biri olan Crank-Nicholson şeması Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Crank-Nicholson şeması

Crank-Nicholson şemasına göre daha önceden ele aldığımız terimleri ayırklaştırsak:

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{c_j^{n+1} - c_j^n}{\Delta t} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} \approx \theta \frac{c_{j+1}^{n+1} - c_{j-1}^{n+1}}{2\Delta x} + (1-\theta) \frac{c_{j+1}^n - c_{j-1}^n}{2\Delta x} \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \approx \theta \frac{c_{j+1}^{n+1} - 2c_j^{n+1} + c_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + (1-\theta) \frac{c_{j+1}^n - 2c_j^n + c_{j-1}^n}{\Delta x^2} \quad (2.43)$$

2.3 Denklemlerin İntegrasyonu

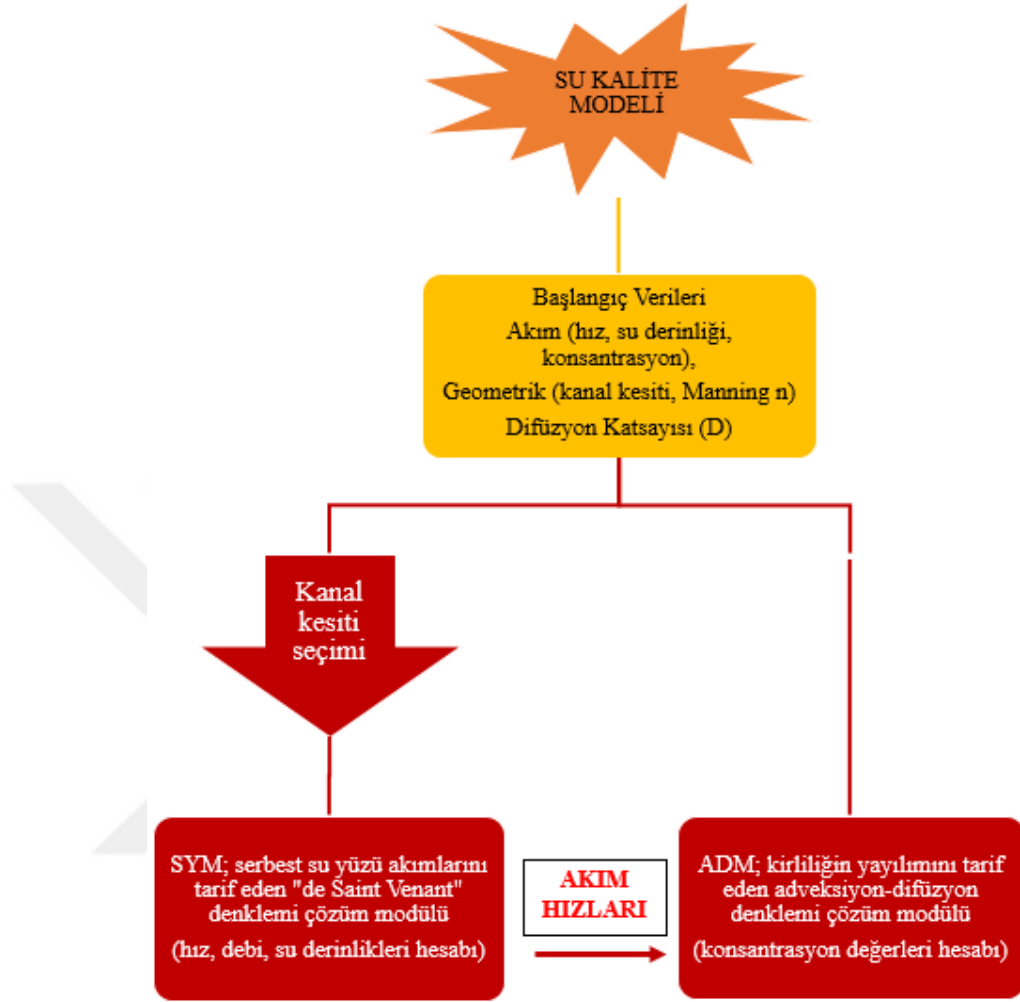
Hidrodinamik su kalite modeli programında kullanacağımız yaklaşımlardan ilki bir boyutlu zamanla değişen serbest su yüzü akım davranışlarını (nehir, akarsu ve kanallar gibi) tarif eden, de Saint Venant denklemlerinin çözümünün yapıldığı modüldür. Denklem çözümü için kapalı çözüm şemalarından Preissmann (dört noktalı kutu) şeması kullanılmaktadır. Sonlu farklar metodu ile Preissmann şeması kullanılarak denklemlerde yer alan terimlerin ayırklaştırılması tamamlandıktan sonra denklemler düzenlenerek çözüm alanı boyunca her sonlu fark noktasında bir tane olmak üzere lineer denklem takımı elde edilmektedir.

de Saint Venant denklemlerinin çözülmesi sonucunda elde edilen akımdaki hızlar kirliliğin yayılımını tarif eden adveksiyon-difüzyon denklemlerine gönderilerek Crank-Nicholson şeması ile denklem çözülerek kirliliğin yayılım davranışı belirlenmektedir.

Hidrodinamik su kalite modeli iki modülden oluşmaktadır. Bu modüller SYM ve ADM olarak adlandırılmıştır. SYM (su yüzü modülü) bu modülde, serbest su yüzü akım davranışlarını tarif etmede kullanılan de Saint Venant denklemleri sonlu farklar metodu ile nümerik olarak çözülmekte ve burada su derinliği, hızlar ve debiler elde edilmektedir. SYM modülü daha önce Tekbaş (2010) tarafından Prof. Dr. Kutsi S. ERDURAN danışmanlığında hazırlanan “Zamanla Değişen Bir Boyutlu Serbest Su Yüzü Akım Problemleri İçin Nümerik Bir Model” adlı çalışmada geliştirilen bir modüldür.

ADM (adveksiyon-difüzyon modülü) bu modülde su kirliliği (konsantrasyon) yayılımını tarif eden adveksiyon-difüzyon denklemi sonlu farklar metodu kullanılarak kapalı çözüm şeması ile birlikte nümerik olarak çözülmüştür. ADM değişik zamanlarda konsantrasyon değerlerini kanal boyunca hesaplamaktadır. ADM ve SYM’nin integrasyonu SYM’den elde edilen hızların ADM’ye iletilmesi ve orada kullanılması ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilecek olan yazılım için nesne tabanlı programlama dili olan Delphi kullanılmıştır. Şekil 2.6’da SYM ve ADM’nin integrasyonunun nasıl gerçekleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Hidrodinamik su kalite modelinin integrasyon şeması

BÖLÜM III

HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ ANALİZ PROGRAMI

3.1 Su Yüzü Modeli

SYM serbest su yüzü akım davranışlarını tarif eden modüldür. SYM için gerekli giriş verileri başlangıç su derinliği, başlangıç hızları, yatak eğimi, kanal kesiti, Manning n sürtünme katsayısıdır.

Bu modülde bir boyutlu zamanla değişen serbest su yüzü akım davranışlarını (nehir, akarsu ve kanallar gibi) tarif eden (de Saint Venant) denklemlerinin çözümü yapılmaktadır. Denklem çözümü için literatürde oldukça çok sayıda kapalı çözüm şeması vardır. Bunlardan belli başlıcaları, Preissmann, Abbott-Ionescu ve NewC olarak söylenebilmektedir. Bu çalışmada kapalı çözüm şemalarından Preissmann (dört noktalı kutu) şeması kullanılması düşünülmektedir. Sonlu farklar metodu ile Preissmann şeması kullanılarak denklemlerde yer alan terimlerin ayrıklaştırılması tamamlandıktan sonra denklemler düzenlenerek çözüm alanı boyunca her sonlu fark noktasında bir tane olmak üzere lineer denklem takımı elde edilmektedir.

SYM’de elde edilen akımda ki hızlar ADM’ye gönderilerek ADM’de adveksiyon ve difüzyon denklemi çözülerek kirliliğin yayılım davranışı belirlenmektedir.

Model oluşturulduktan sonra yine literatürde yer alan kaynaklardan seçilecek örnek problemlerle yazılımın kalibrasyon ve güvenilirlik testleri yapılmıştır.

3.2 Adveksiyon-Difüzyon Model

ADM su kirliliği (konsantrasyon) yayılımını tarif eden modüldür. ADM’de başlangıçtaki konsantrasyon miktarları ve difüzyon katsayısı veri olarak tanımlandıktan sonra, her bir noktada (hesap adımı) kirliliğin yayılımı hesaplanmaktadır.

Akışkan hareketinin önemli bir rol oynadığı problemlerde, adveksiyon etkisi dikkate alınmalıdır. Doğada adveksiyon yanında daima difüzyon olayı gerçekleşir; bu nedenle

adveksiyon ve difüzyonu beraber ele alan hesap yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Takıl, 2010). ADM modülünde çözülecek adveksiyon ve difüzyon denklemi (3.1)'de verilmiştir.

Adveksiyon-difüzyon denklemi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

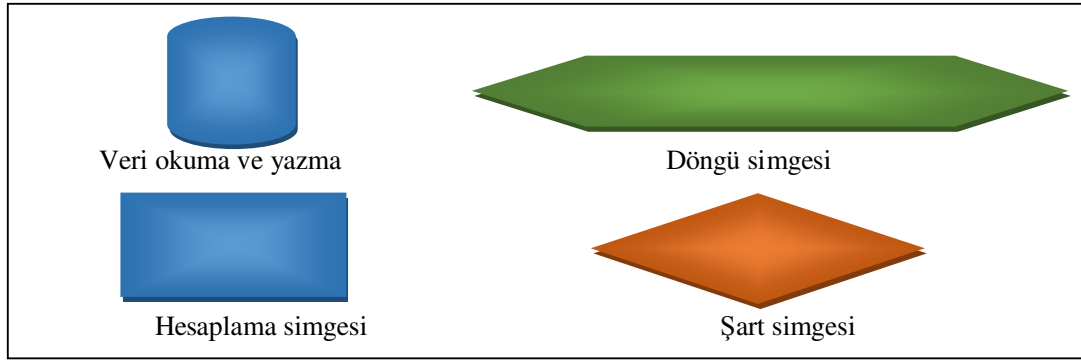
Bu denklemde; $-U \frac{\partial C}{\partial x}$ adveksiyon terimi ve $\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$ difüzyon terimi olarak bilinmektedir.

Denklem 3.1 reaksiyona girmeyen bir maddenin 1D (bir boyutlu) taşınımını temsil eden denklemdir. Bu denklem çeşitli başlangıç ve sınır şartları altında çözülebilir. Elde edilen çözümler su ortamlarındaki madde konsantrasyonlarının zaman ve konuma göre hesaplanmasında kullanılır.

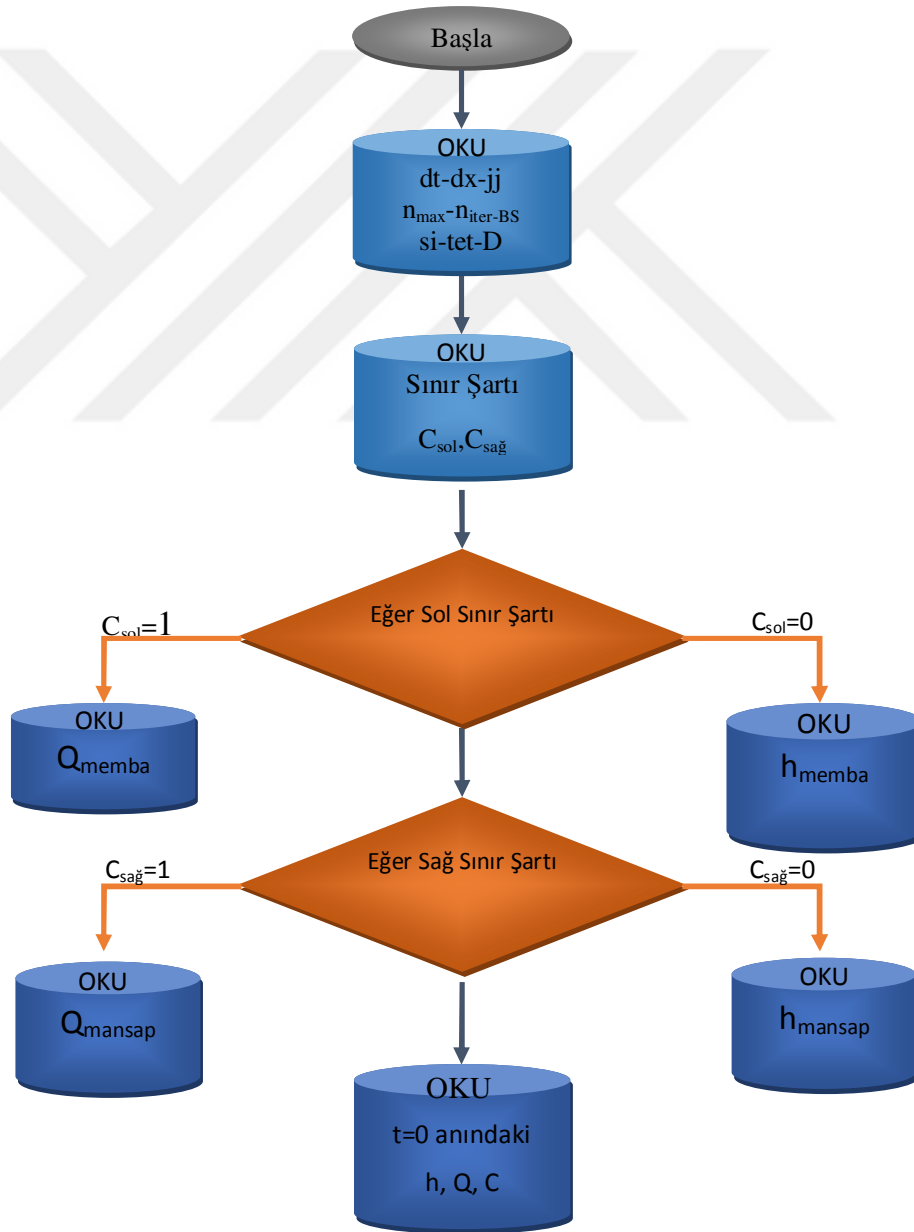
Adveksiyon-difüzyon denklem çözümü için sonlu farklar metodu ile Crank-Nicholson şeması kullanılarak denklemlerde yer alan terimlerin ayrıklaştırılması tamamlandıktan sonra denklemler düzenlenerek çözüm alanı boyunca her sonlu fark noktasında (hesap adımı) olmak üzere lineer denklem takımı elde edilmektedir. Elde edilen lineer denklemler Double-Sweep algoritması ile çözümlenmiştir.

3.3 Modelin Akış Şeması

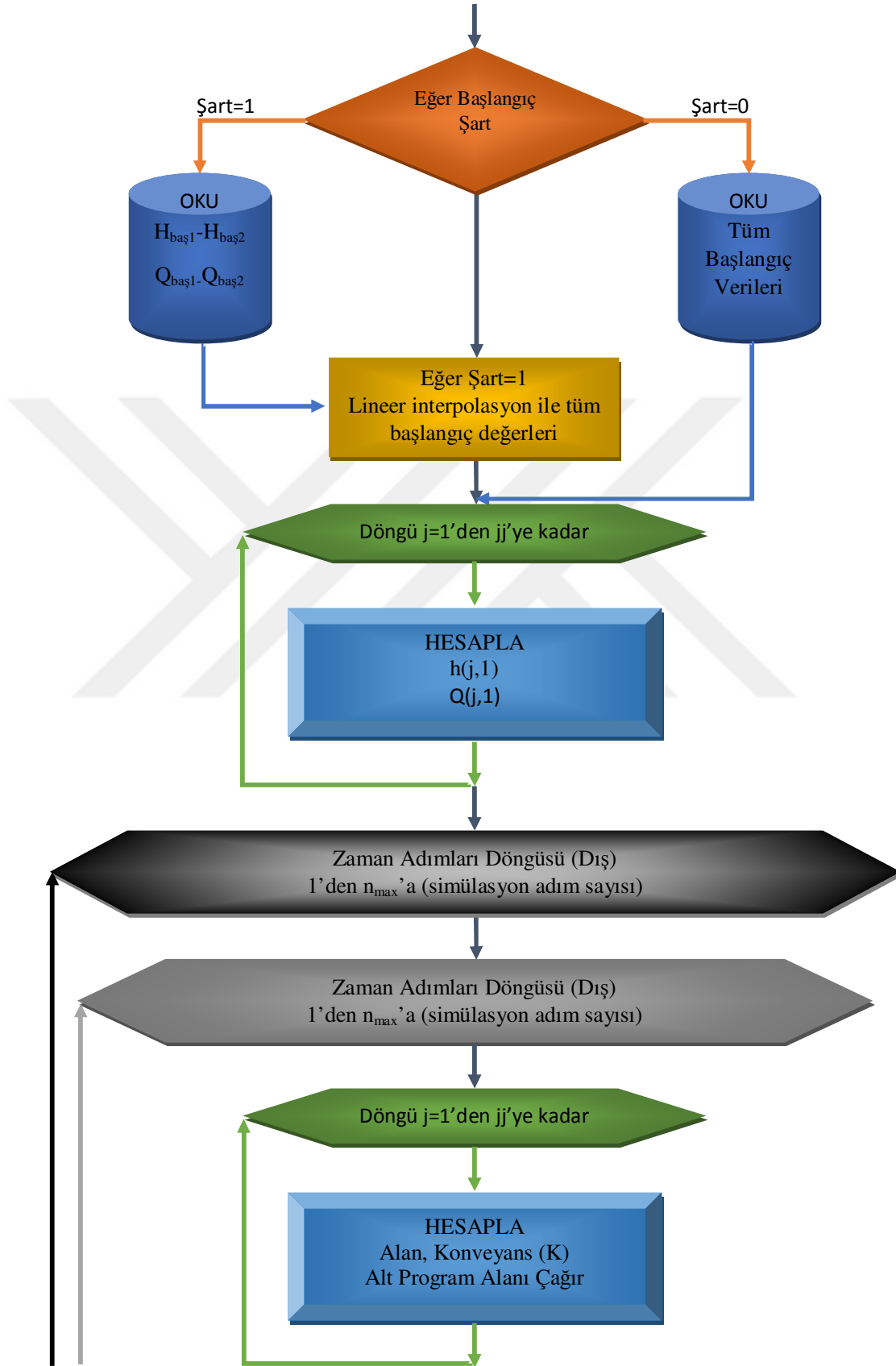
Şekil 3.1'de program akış şeması için kullanılan simgeler verilmektedir. Akış şemasında da gösterildiği gibi program, verilerin okunması (başlangıç, sınır şartı, zaman adımı, mekan adımı, mekan adımı sayısı, toplam zaman adımı sayısı, kanal taban genişliği, Chezy veya Manning sürtünme katsayısı, difüzyon katsayısı vb.), lineer denklemlerin katsayılarının hesaplanması ve çözümlerden sonra sonuçların yazılmasından oluşmaktadır. Şekil 3.2a, 3.2b, 3.2c, 3.2d ve 3.2e'de programa ait oluşturulan akış şeması bölümler halinde gösterilmektedir.



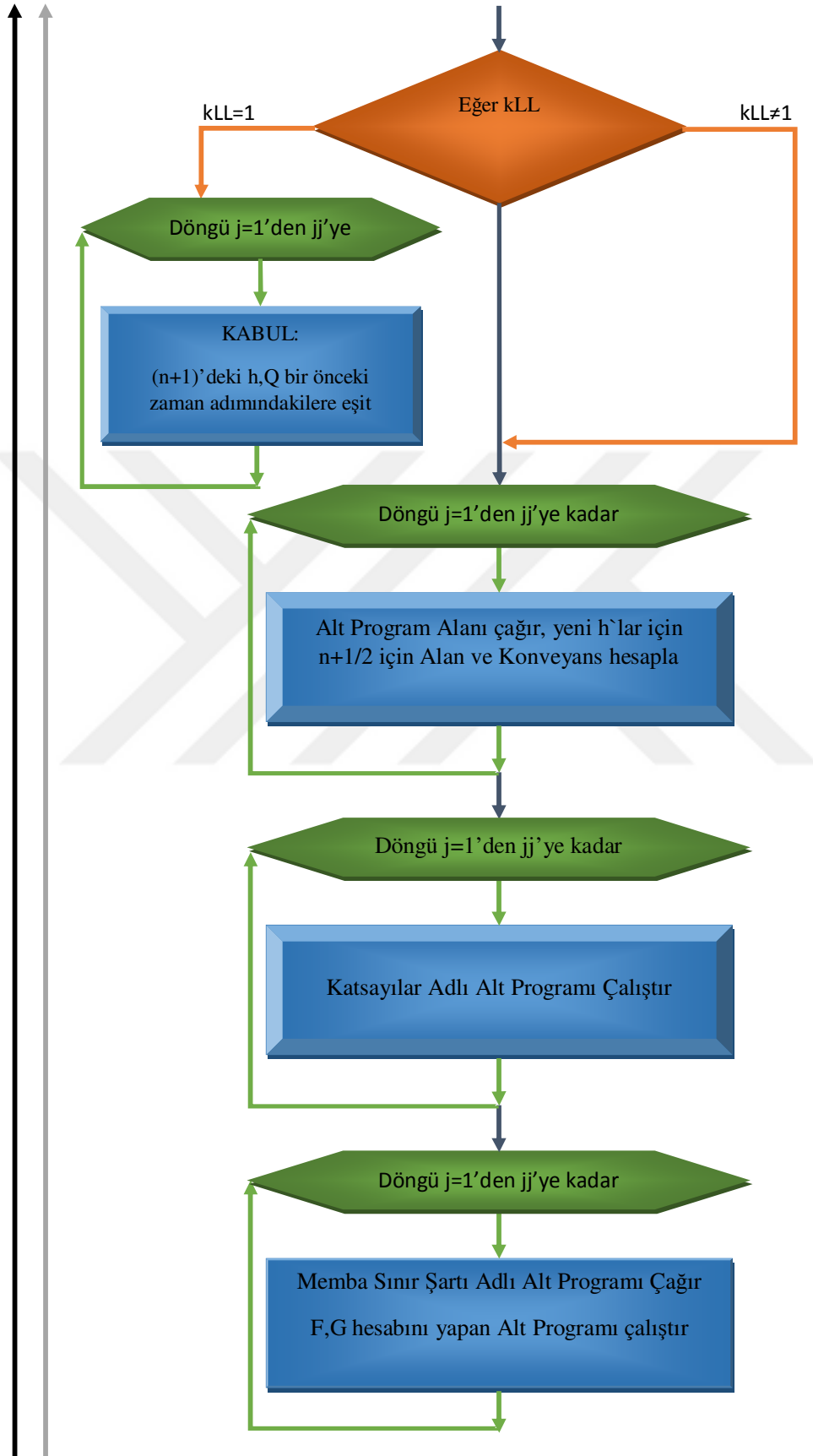
Şekil 3.1. Akış şeması simgeleri



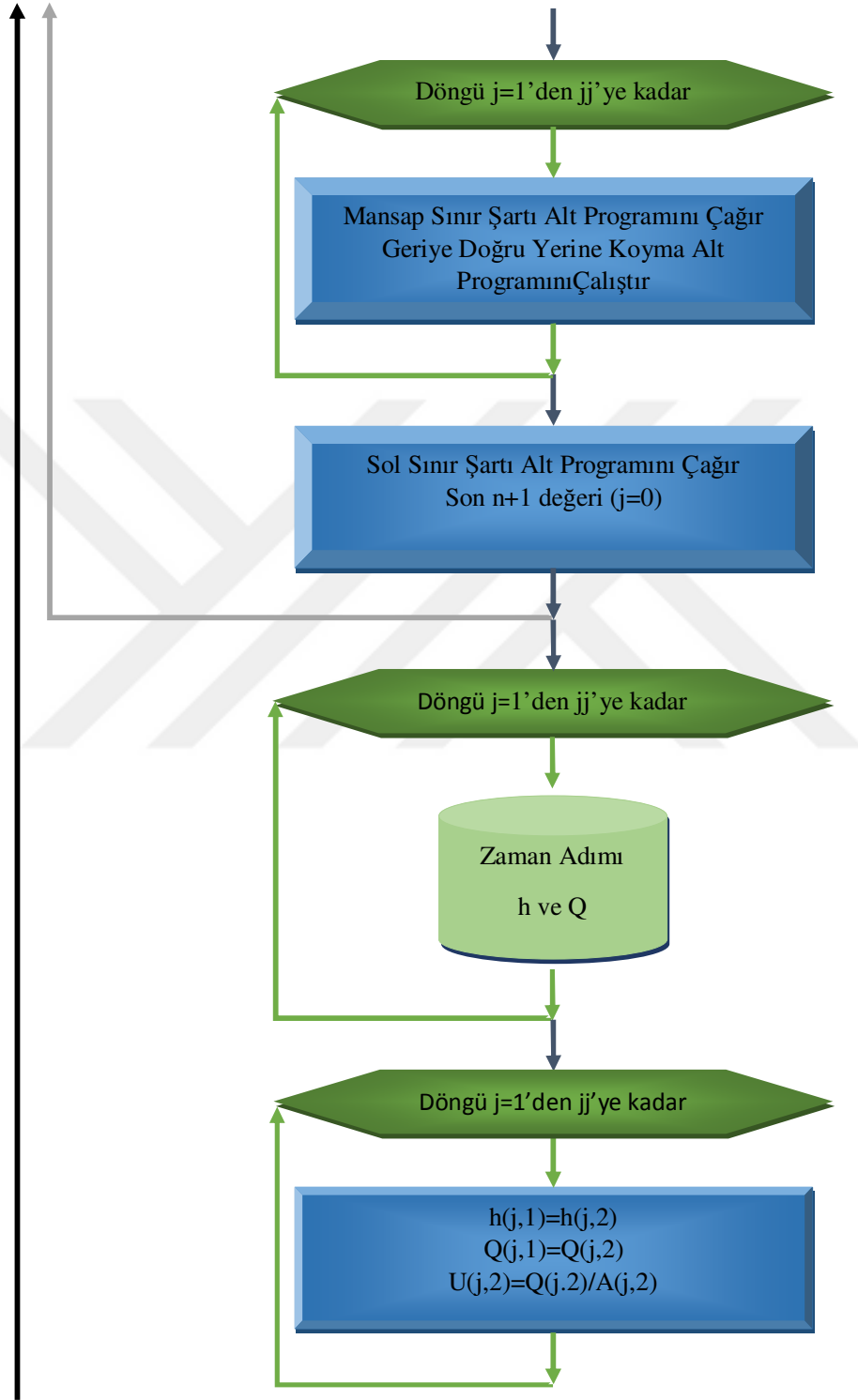
Şekil 3.2a Program akış şeması birinci bölüm



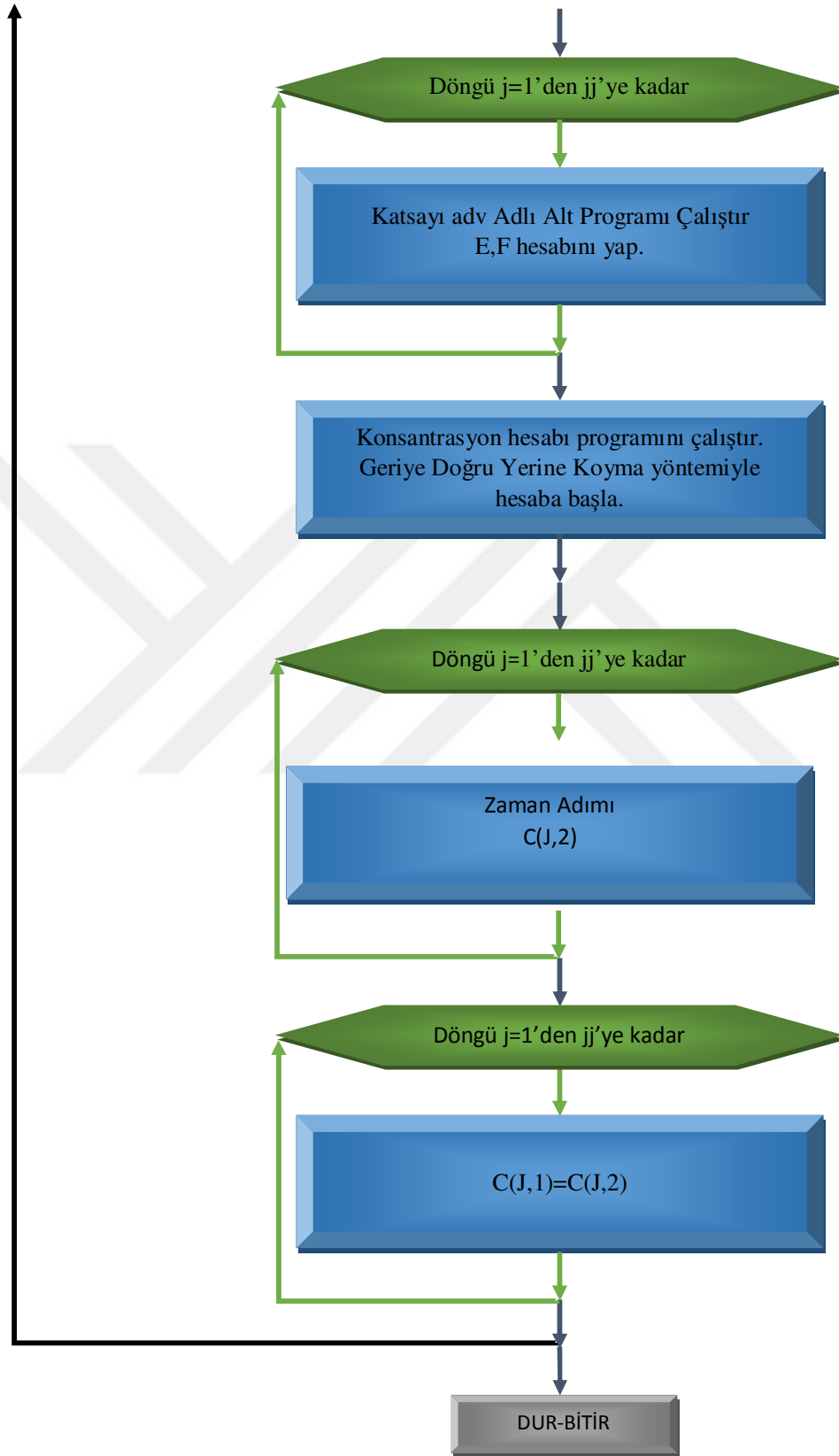
Şekil 3.2b Program akış şeması ikinci bölüm



Şekil 3.2c Program akış şeması üçüncü bölüm



Şekil 3.2d Program akış şeması dördüncü bölüm



Şekil 3.2e Program akış şeması beşinci bölüm

Programın algoritması özetle aşağıda verilmiştir.

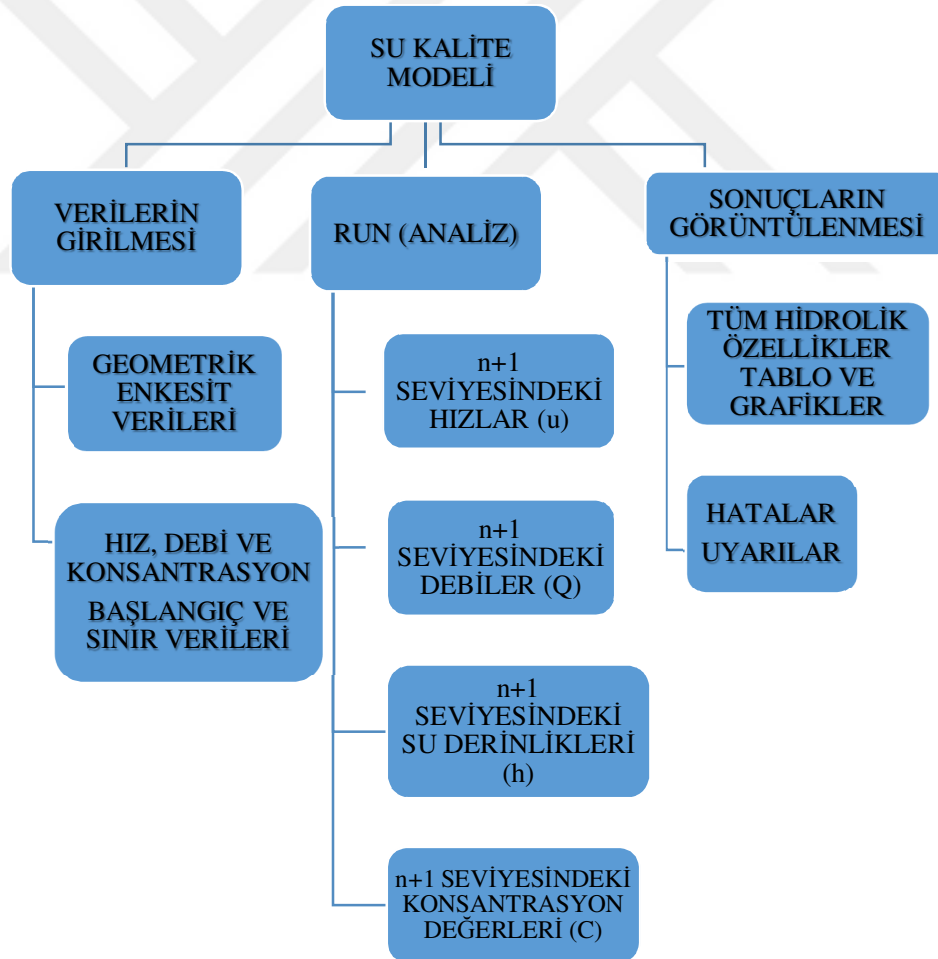
Adımlar:

- Başla.
- Zaman adımı, mekan adımı, mekan adımı sayısı, toplam zaman adımı sayısı, kanal taban genişliği, taban eğimi, chezy katsayısı, difüzyon katsayısı verilerini oku.
- Serbest su yüzü için sınır şartlarının yerini belirle (memba ve mansap uç noktaları için).
- Serbest su yüzü için sınır şartlarının tipini belirle (h veya Q şeklinde).
- Başlangıç koşullarını oku, enkesit tipini belirle.
- Tüm noktalardaki başlangıç değerlerini (su derinliği, debi, hız, konsantrasyon) oku.
- $n+1$ seviyesi için h , Q ve u değerlerini n seviyesindekiler olarak al.
- Sonuçların daha iyi çıkması için öngörü-düzeltilmiş şekilde iki aşamalı olarak $n+1/2$ seviyesi değerlerini hesapla.
- Dış zaman adımı döngüsünü oluştur.
- Tüm noktalarda alan, konveyans hesabını yap, bunun için bir alt program oluştur.
- $n+1$ seviyesindeki h , Q ve u 'ları lineer denklem takımlarını Double-Sweep algoritması ile çözerek bul.
- $n+1$ seviyesi için $h(j,1)$, $Q(j,1)$ ve $u(j,1)$ değerlerini n seviyesindekiler olarak al.
- Adveksiyon-difüzyon denklem takımları için bir alt program oluştur.
- Adveksiyon-difüzyon problemi çözümü için konsantrasyon sınır şartlarını belirle ve oku.
- Sınır şartlarını da kullanarak iki aşamalı eleme-yerine koyma şeklinde Double-Sweep algoritması ile denklemleri çöz.
- $n+1$ seviyesindeki C 'leri hesapla.
- Sonuçları yazdır.
- $n+1$ seviyesindeki h , Q ve C 'leri n seviyesindeki h , Q ve C olarak işlemlere devam et, böylece hafızada tüm değerler tutulmak zorunda kalmaz.
- Durdur.
- Bitir.

3.4 Modelin Kullanımı

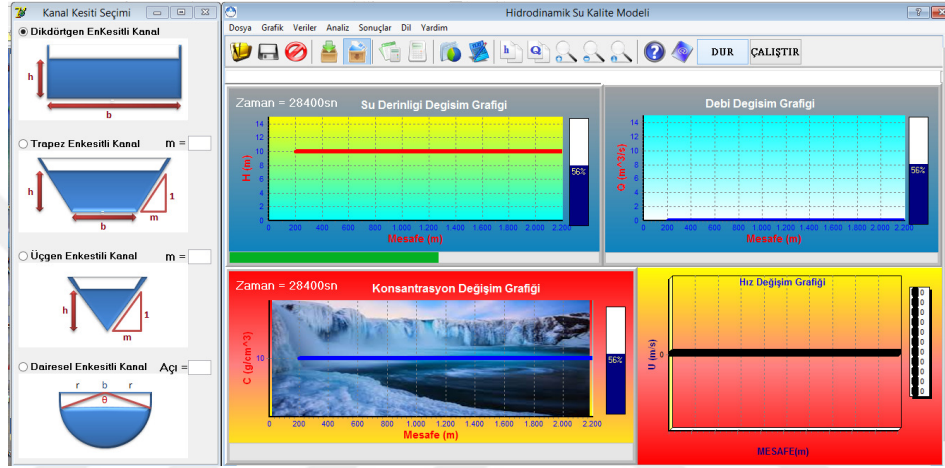
Hidrodinamik su kalite modeli, bir akarsuda kirliliğin yayılımını tek boyutlu hidrodinamik olarak analiz edebilen bir matematiksel modeldir. Şekil 3.3’de Hidrodinamik Su Kalite Modelinin aşamaları gösterilmiştir.

Program nesne tabanlı Delphi 7 programlama dili ortamında yazılmıştır. Delphi 7 programı, nesne tabanlı olmasının yanı sıra Teechart gibi gerçek zamanlı grafik çizim uygulamaları gibi görsel özellikler içermesi ve kodlama dilinin yaygın olarak kullanılmasından ötürü tercih edilmiştir (Demirli ve İnan, 2003).



Şekil 3.3. Su kalite modeli programının modelleme aşamaları

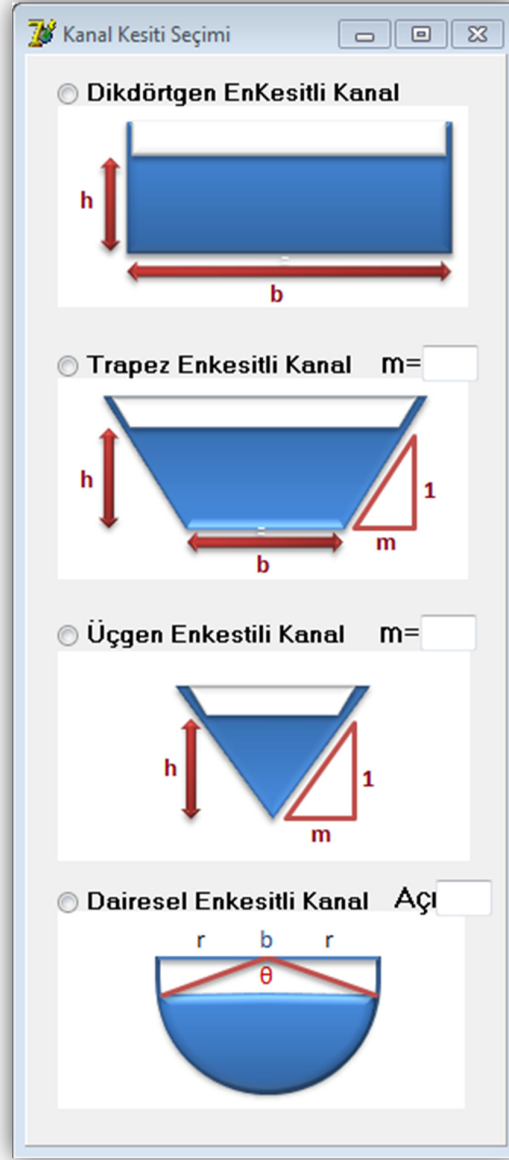
“Hidrodinamik Su Kalite Modeli” olarak adlandırılan program, kullanıcı dostu arayüzlere ve kolay kullanım özelliğine sahiptir. Programda yer alan menü çubuğu, araç çubuğu, yardımcı kullanım ekranları, grafikler, program ilerleme çubukları ve kısayol tuşları ile programın kullanıcı dostu olması hedeflenmiştir. Şekil 3.4’de program genel kullanım ekranı gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Program genel kullanım ekranı

Hidrodinamik su kalite modeli, bir ana ekran ve üç yardımcı ekrandan oluşmaktadır. Ana ekranda, menü ve araç çubukları ile zaman adımlarına göre değişen su derinliği, debi, hız ve konsantrasyon grafikleri yer almaktadır. Ana ekranın araç çubuğunda 15 adet kısayol tuşu, menü çubuğunda 7 adet menü listesi, 4 adet grafik bulunmaktadır. Diğer yardımcı ekranlar ise; kanal kesit ekranı, rapor ekranı ve sonuçlar ekranıdır.

Kanal kesit ekranı, seçeneği ile hesaplamalarda kullanacağımız kanal kesitinin tipini belirlenmektedir. Program 4 farklı prizmatik kanal kesit tipine göre hesaplama yapabilir. Dikdörtgen, trapez, üçgen ve dairesel kanal kesit tipleri bulunmaktadır. Kanal kesit tipine göre eğim (m) değeri veya açı da girmek gereklidir. Şekil 3.5’de kanal kesit seçim ekranı gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Kanal kesiti seçim ekranı

Rapor ekranı, program hidrolik çözüme başladığı zaman yapılan hesaplamalara göre ilerlemeye başlar. Ekranda zaman adımına göre hesaplanan su derinliklerini, debi ve konsantrasyon değişimleri gösterilmektedir. Hesaplama devam ederken veya bittikten analiz sona erdiğinde sonuçlar buradan görülebilmektedir. Şekil 3.6'da rapor ekranı gösterilmektedir.

Zaman (s)	Konsantrasyon (g/cm ³)
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
100	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
200	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000
300	10.000

Şekil 3.6. Rapor ekranı

Şekil 3.7’de sonuç tablosu ekranı gösterilmektedir.

Nokta No	MESAFE	SU DERİNLİĞİ	DEBİ	ZAMAN
1	1000	8,987486841737	0	250000
2	2000	8,995808871286	13,60607069398	250000
3	3000	9,0128970356161	10,83893512491	250000
4	4000	9,0204120081764	-13,0852824359	250000
5	5000	9,0016981125445	-56,2656304695	250000
6	6000	8,9627066470403	-106,146808562	250000
7	7000	8,9433062837396	-128,043628218	250000
8	8000	8,9710100413417	-102,080971892	250000
9	9000	9,0168574413534	-57,1309220567	250000
10	10000	9,0482766628355	-22,7317143868	250000
11	11000	9,0582837627092	0	250000

Şekil 3.7. Sonuç tablosu ekranı (Tekbaş, 2010)

Program Araç ve Menü Çubukları:

Tekbaş (2010) tarafından geliştirilen nümerik modelde bir adet araç ve bir adet menü çubuğu yer almaktadır. Araç çubuğundaki tuşlar işlevlerine göre ayıraçlar ile altı gruba ayrılmıştır. Menü çubuğu ise yine gruplara göre yedi adet açılır listeden oluşmaktadır. Araç çubuğundaki tuşlar ve işlevleri, Şekil 3.8’de verilen numaralara göre sırasıyla aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.8. Araç çubuğu

- 1- Üzerinde çalışılmış bir proje dosyasını açma tuşudur. Kullanıcı daha önceden çalıştığı bir proje dosyasını buradan açabilir.
- 2- Çalışılan projeyi dosya olarak kayıt etme tuşudur.
- 3- Çalışılan projeyi kapatma tuşudur.
- 4- Hesaplama için gerekli kanal kesit tipi seçim ekranını açma tuşudur.
- 5- Proje için gerekli verilerin okunması için veri dosyasını açma tuşudur. Kullanıcı bilgisayar veya veri depolama aygıtlarından veri dosyasını programa aktarabilir.
- 6- Model parametrelerinin kullanıcı tarafından girilmesini sağlayan ekranı açmaya yarayan tuştur.
- 7- Nümerik hesaplamayı veri dosyasını kullanarak başlatan tuştur.
- 8- Sonuç Tablosu ekranını açan tuştur. Mekan adımlarındaki su yüksekliği ve debi bilgilerini gösterir.
- 9- Rapor Ekranını açan tuştur. Tüm zaman ve mekan adımlarındaki su derinliği, debi ve konsantrasyon bilgilerini gösterir.
- 10- Hesaplanan su derinliği grafiğini farklı bir ortama kopyalama tuşudur.
- 11- Hesaplanan debi grafiğini farklı bir ortama kopyalama tuşudur.
- 12- Grafikleri büyütürken detayın görünmesini sağlayan tuştur.
- 13- Grafikleri küçültürken geniş boyutlu izlenmeyi sağlayan tuştur.
- 14- Hesaplanan mekan adımı aralığı boyutunda grafikleri görüntüleyen tuştur.
- 15- Yazılım ve kullanımı hakkında bilgileri açan tuştur.
- 16- Yazılım ile ilgili iletişim bilgilerini veren tuştur.
- 17- Nümerik hesaplamayı istenen zaman adımında durduran tuştur.
- 18- Nümerik hesaplamayı yeniden devam ettiren tuştur.

Menü çubuğundaki açılır listeler ve işlevleri;

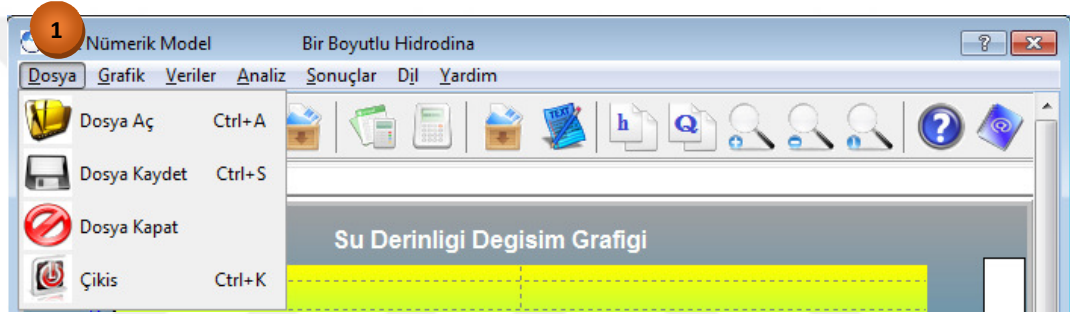
- 1- Dosya menü listesi Şekil 3.9'da verilmiş ve dört başlıktan oluşmaktadır. Bunlar;

Dosya Aç:Üzerinde çalışılmış bir proje dosyasını açma tuşudur. Kullanıcı daha önceden çalıştığı bir proje dosyasını buradan açabilir. Kısayol olarak Ctrl+A'yı tuşlamak yeterlidir. Geliştirilme aşamasındadır.

Dosya Kaydet:Çalışılan projeyi dosya olarak kayıt etme tuşudur. Kısayol olarak Ctrl+S'yi tuşlamak yeterlidir. Geliştirilme aşamasındadır.

Dosya Kapat:Çalışılan projeyi kapatma tuşudur. Geliştirilme aşamasındadır.

Çıkış:Programdan tamamen çıkışı sağlayan tuştur. Kısayol olarak Ctrl+K'yı tuşlamak yeterlidir.



Şekil 3.9. Dosya menü listesi

2- Grafik menü listesi Şekil 3.10'da verilmiştir. Grafik menü listesi beş başlıktan oluşmaktadır. Bunlar;

Su Derinliği Grafiği Kopyala: Oluşan grafiği farklı bir ortama kopyalamayı sağlar. Kısayol olarak Ctrl+C'yi tuşlamak yeterlidir.

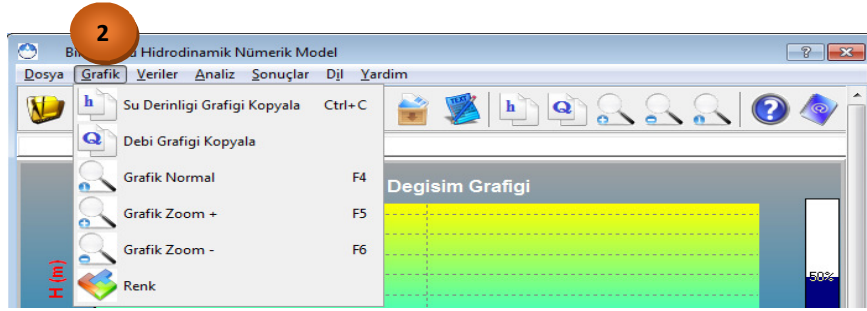
Debi Grafiği Kopyala: Oluşan grafiği farklı bir ortama kopyalamayı sağlar. Kısayol olarak Ctrl+C'yi tuşlamak yeterlidir.

Grafik Normal: Grafikleri küçülterek geniş boyutlu izlenmeyi sağlar. Kısayol olarak F4'ü tuşlamak yeterlidir.

Grafik Zoom +: Grafikleri büyüterek detayın görünmesini sağlar. Kısayol olarak F5'i tuşlamak yeterlidir.

Grafik Zoom -: Grafikleri küçülterek geniş boyutlu izlenmeyi sağlayan tuştur. Kısayol olarak F6'yı tuşlamak yeterlidir.

Renk: Grafik çizim rengini belirlemeyi sağlar.

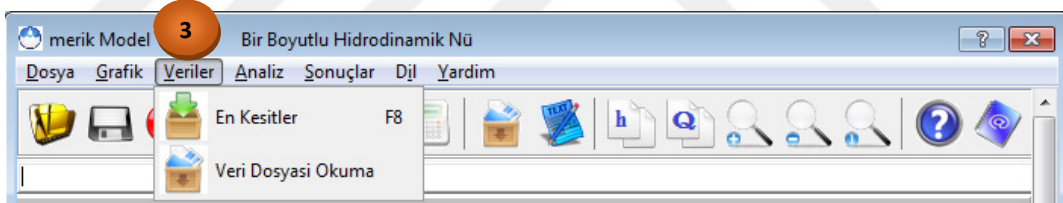


Şekil 3.10. Grafik menü listesi

3- Veriler menü listesi Şekil 3.11’de verilmiştir. Veriler menü listesi iki başlıktan oluşmaktadır. Bunlar;

En Kesitler : Hesaplama için gerekli en kesit tipi seçim ekranını açma tuşudur. Kısayol olarak F8’i tuşlamak yeterlidir.

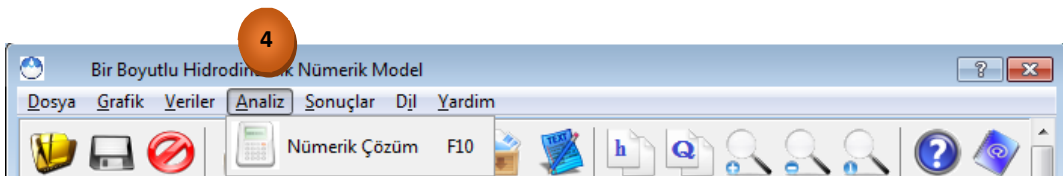
Veriler Dosyası Okuma : Hesaplama için gerekli verilerin bulunduğu dosyayı programa yüklemeyi sağlar.



Şekil 3.11. Veriler menü listesi

4- Analiz menü listesi Şekil 3.12’de verilmiştir. Analiz menü listesi bir başlıktan oluşmaktadır.

Nümerik Çözüm: Yüklenen veri dosyasına göre nümerik çözümü başlatmayı sağlar. Kısayol olarak F10’u tuşlamak yeterlidir.



Şekil 3.12. Analiz menü listesi

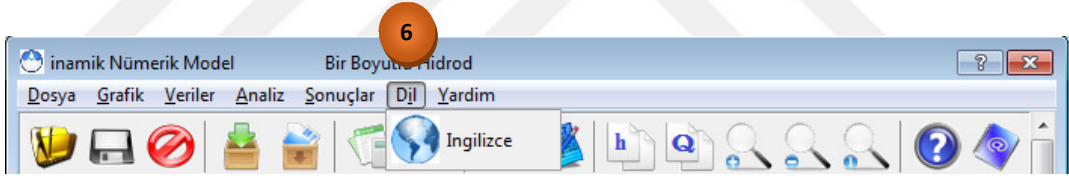
5- Sonuçlar menü listesi Şekil 3.13’de verilmiş ve iki başlıktan oluşmaktadır. Bunlar;
Çıktı : Sonuç Tablosu Ekranını açmayı sağlar. Kısayol olarak F11’i tuşlamak yeterlidir.

Rapor : Rapor Ekranını açmayı sağlar. Kısayol olarak F12’yi tuşlamak yeterlidir.



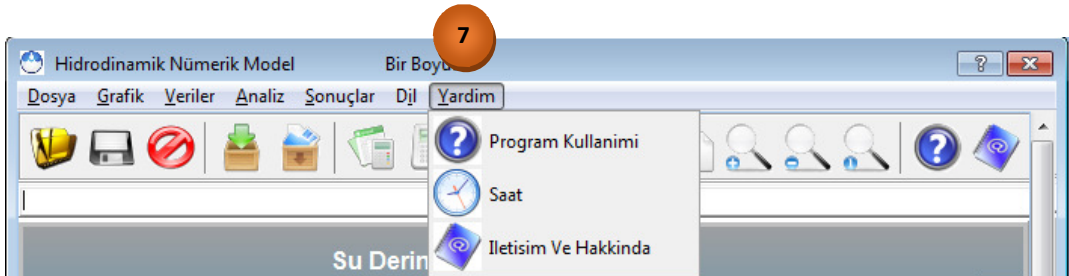
Şekil 3.13. Sonuçlar menü listesi

6- Dil menü listesi Şekil 3.14’de verilmiş ve liste bir başlıktan oluşmaktadır.
İngilizce : Program dilini İngilizceye dönüştürmeyi sağlar. Yapım aşamasındadır.



Şekil 3.14. Dil menü listesi

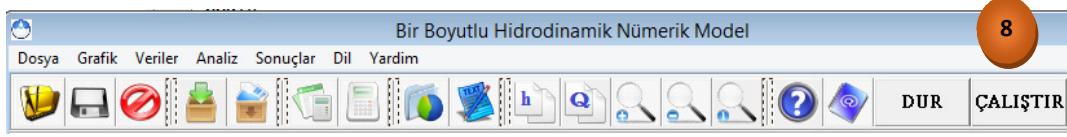
7- Yardım menü listesi Şekil 3.15’de verilmiş ve üç başlıktan oluşmaktadır. Bunlar;
Program Kullanımı : Program kullanımı ile ilgili yardım dosyasını açmayı sağlar.
Saat : Sistem saat bilgisini görmeyi sağlar.
İletişim ve Hakkında : Yazılım bilgileri ve iletişim bilgilerini görmeyi sağlar.



Şekil 3.15. Yardım menü listesi

Dur ve çalıştır tuşu Şekil 3.16’da verilmiştir.

Dur ve Çalıştır tuşu: Kirliliğin yayılımının hesaplanması sırasında analizi durdurmayı ve yeniden çalışmasını sağlar.



Şekil 3.16. Dur ve çalıştır tuşu

Programın Kullanılması:

Nümerik programının hesaplama, raporlama ve izleme komutları menü çubuğunda bulunmasının yanı sıra araç çubuğunda da yer almaktadır. Ayrıca kısayol tuşlarıyla da komutların daha hızlı kullanması sağlanmaktadır. Program kullanım adımları aşağıdaki gibidir.

- 1- Programın kurulduğu klasörden “Hidrodinamik Su Kalite Modeli” dosyasından çalıştırılır.
- 2- Program ana ekranından menü çubuğundaki “Veriler” sekmesinden “Veriler” listesi tuşlanır veya kısayol olarak F8 tuşuna basılır. Bu komut ile Ana pencerenin sol yanında “Kanal Kesit Seçimi” ekranı açılır.
- 3- Kanal kesit tipi ekranından hesap yapılmasını istediğimiz kanal tipi seçilir ve gerekiyor ise eğim “m” veya “açı” bilgileri girilir.
- 4- Ana ekranın araç çubukları bölümünde “Veriler Penceresi” tuşuna basılarak hesaplama için kullanılacak verilerin yer aldığı dosya bilgisayardan bulunur ve programa yüklenir.
- 5- Program veri dosyasını okuduktan sonra, hem araç çubuğunda hem de menü çubuğunda yer alan “Nümerik Çözüm” tuşu veya F10 kısayolu tuşlanarak programın hesaplamaya başlaması sağlanır.
- 6- Program hesaplamaları yaparken ana ekrandaki grafiklerden su derinliği, debi, hız ve konsantrasyon değişimleri izlenebilir. Grafiklerin yanındaki program ilerleme çubuğundan hesaplamanın yapılma yüzdesi görülebilir.

- 7- Program nümerik çözüme başladığı anda su derinliği ile debi hesaplarını yaparken aynı zamanda konsantrasyon değişimi “kirliliğin yayılımını” da hesaplamaktadır.
- 8- Program hesaplamalara devam ederken veya hesaplamayı bitirdiği zaman Menü çubuğunda “Sonuçlar” listesinden “Çıktı” tuşlanarak hesaplama sonuçları izlenebilir. Aynı listeden “Rapor” tuşlanması durumunda her mekan adımı için her zaman adımında hesaplanan su derinliği, debi değerleri görülebilmektedir.
- 9- Program hesaplamalara devam ederken veya hesaplamayı bitirdiği zaman grafik izleme tuşları ile su derinliği, debi, hız ve konsantrasyon grafiklerinin detayları incelenebilir. Grafik kopyalama tuşu ile grafik farklı ortamlara kayıt edilebilir.
- 10- Program hesaplamayı bitirdikten sonra yüklü olduğu klasöre “Hout” su derinliği, “Qout” debi değerlerini ve “Cout” konsantrasyon değerlerini Text dosyası olarak yazar.

BÖLÜM IV

HİDRODİNAMİK SU KALİTE MODELİ SİMÜLASYONU VE NÜMERİK TESTLER

Program yazımı tamamlandıktan sonra literatürde yaygın olarak kullanılan testler yapılmıştır. Bu bölümde programın doğru çözümler oluşturduğunu görmemiz için yapılan testler, testlerin yapılma amaçları ve test sonuçları anlatılmıştır. Nümerik testler yardımı ile programın doğruluğu test edilmiş, kullanımına yönelik karşılaşılan aksaklıklar belirlenerek giderilmiştir. Bu bölümde, verilen model parametreleri, başlangıç ve sınır şartları doğrultusunda yapılan çözüm sonuçları ve grafikler testin amacına göre değerlendirilmiştir. Literatürde bu amaç doğrultusunda yapılan testler şunlardır;

1. Statik Yüzey Akımı-Sabit Konsantrasyon Testi
2. Üniform Akım-Üniform Konsantrasyon Testi
3. Statik Akım-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi
4. Üniform Akım-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi
5. Üniform Akım-Sınırdaki Sabit Konsantrasyon Girişi Testi
6. Zamanla Değişen Akım (Seiche)-Üniform Konsantrasyon Testi
7. Zamanla Değişen Akım (Seiche)-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi

4.1 Statik Yüzey Akımı-Sabit Konsantrasyon Testi

Bu test ile statik akım durumunda kanal içerisine her noktadan aynı miktarda bırakıldığı düşünülen konsantrasyon miktarının simülasyon sonuna kadar değişmeden kütlenin korunumu prensibine göre davranış gösterip/göstermediğinin görülmesi amaçlanmıştır. Serbest su yüzeyinin ise simülasyon süresince değişmeden kalması beklenmektedir. Model hiçbir şekilde akım oluşmasına ve fazla veya eksik konsantrasyon oluşumuna izin vermemelidir. Eğer akım gözlenmiş veya kütlenin korunumuna aykırı konsantrasyonlar da farklılık var ise sınır şartlarının ardından, nümerik denklemlerin çözümleri ve kodlamaları tekrar kontrol edilmelidir. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi için seçilen kanal en kesit tipi Şekil 4.1’de verilmiştir. Çizelge

4.1’de sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.2’de verilen model parametrelerine göre test yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.1. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları				Sınır Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)	Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	0,00	10,00	Memba	10,00	-	10,00
2	10,00	0,00	10,00	Mansap	10,00	-	10,00
3	10,00	0,00	10,00				
4	10,00	0,00	10,00				
5	10,00	0,00	10,00				
6	10,00	0,00	10,00				
7	10,00	0,00	10,00				
8	10,00	0,00	10,00				
9	10,00	0,00	10,00				
10	10,00	0,00	10,00				
11	10,00	0,00	10,00				
				U (hız)	0		

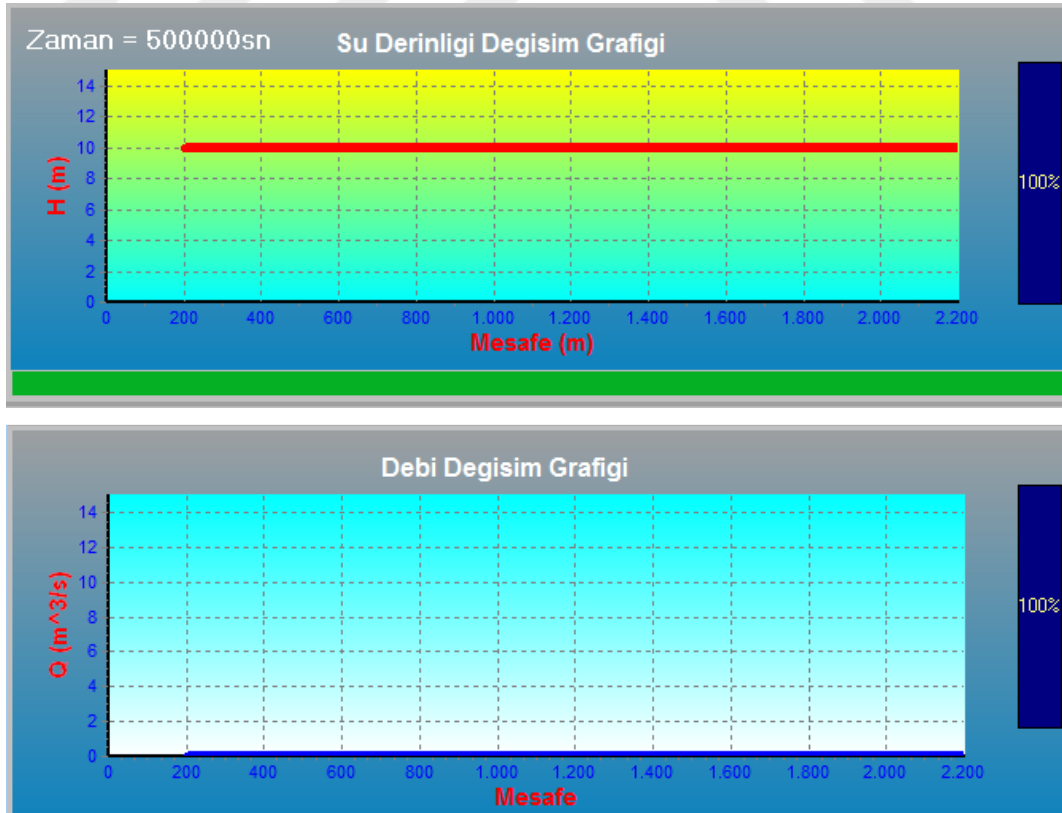
Çizelge 4.2. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Model parametreleri

Parametreler	Değerler
Dikdörtgen Kesit Tipi	m=0
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	500
Zaman Adımı (Δt)	100 s
Simülasyon Süresi (t)	-
Difüzyon Katsayısı	200
Kanal Genişliği (b)	100 m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

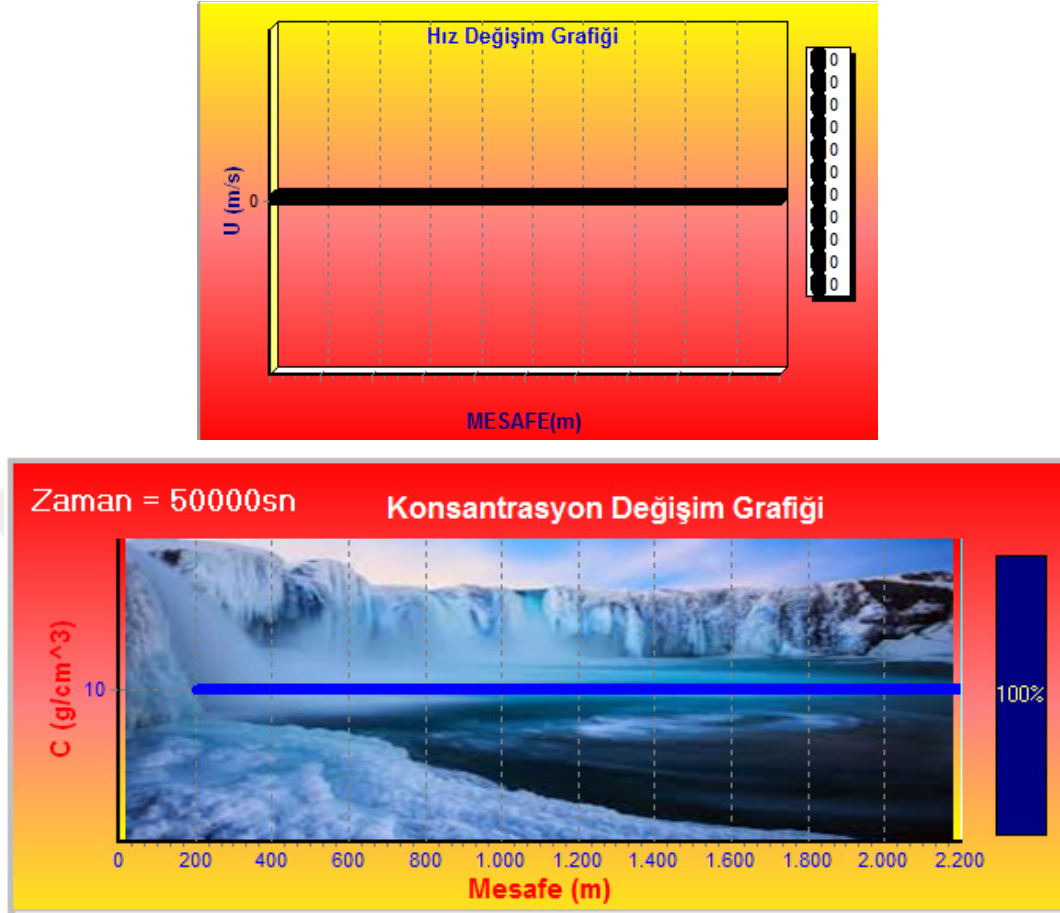
Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi sayısal sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir. Simülasyonun farklı zaman ve mekan adımlarından alınan bu sonuçlara göre başlangıçta verilen debi su derinliği ve konsantrasyon değerleri simülasyon süresince değişmemiş ve beklenildiği şekilde sabit kaldığı görülmüştür. Şekil 4.2’de programdan elde edilen statik teste ait su derinliği ve debi değişim grafikleri, Şekil 4.3’de statik teste ait hız değişim ve konsantrasyon grafikleri de testin beklenildiği şekilde sonuçlandığını göstermektedir. Modelin sonuçlara göre statik testi doğru bir biçimde gerçekleştirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.3. Statik yüzey akımı-sabit konsantrasyon testi: Sonuçlar

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
100 s	0 m	0,0000	10,0000	10,0000
12.500 s	500 m	0,0000	10,0000	10,0000
25.000 s	1000 m	0,0000	10,0000	10,0000
37.500 s	1500 m	0,0000	10,0000	10,0000
50.000 s	2000 m	0,0000	10,0000	10,0000



Şekil 4.2. Statik yüzey akımı ve sabit konsantrasyon testi: Su derinliği ve debi değişim grafikleri



Şekil 4.3. Statik yüzey akımı ve sabit konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri

4.2 Üniform Akım-Üniform Konsantrasyon Testi

Bu test ile amaçlanan başlangıç ve sınır şartları ile $t = 0$ anında serbest su yüzü üniform akım koşullarında iken konsantrasyon her noktadan üniform olarak bırakıldığı düşünüldüğünde, konsantrasyonun (su içerisindeki kirliliğin) kütlenin korunumu prensibine göre her yerde aynı miktarda görülmesidir. U (akım hızı) 1 m/s olduğu varsayılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Model hiçbir şekilde konsantrasyon miktarı değişimine izin vermemelidir. Eğer üniform akım koşulları bozulmuş veya kütlenin korunumuna aykırı konsantrasyonlar var ise sınır şartlarının ardından, nümerik denklemlerin çözümleri ve kodlamaları tekrar kontrol edilmelidir. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi için seçilen kanal en kesit tipi Şekil 4.4’de verilmiştir. Çizelge 4.4’de sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.5’de verilen model parametrelerine göre test yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.4. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları				Sınır Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)	Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	1.000	10,00	Memba	10,00	1.000	10,00
2	10,00	1.000	10,00	Mansap	10,00	1.000	10,00
3	10,00	1.000	10,00				
4	10,00	1.000	10,00				
5	10,00	1.000	10,00				
6	10,00	1.000	10,00				
7	10,00	1.000	10,00				
8	10,00	1.000	10,00				
9	10,00	1.000	10,00				
10	10,00	1.000	10,00				
11	10,00	1.000	10,00				

U (hız) 1

Çizelge 4.5. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Model parametreleri

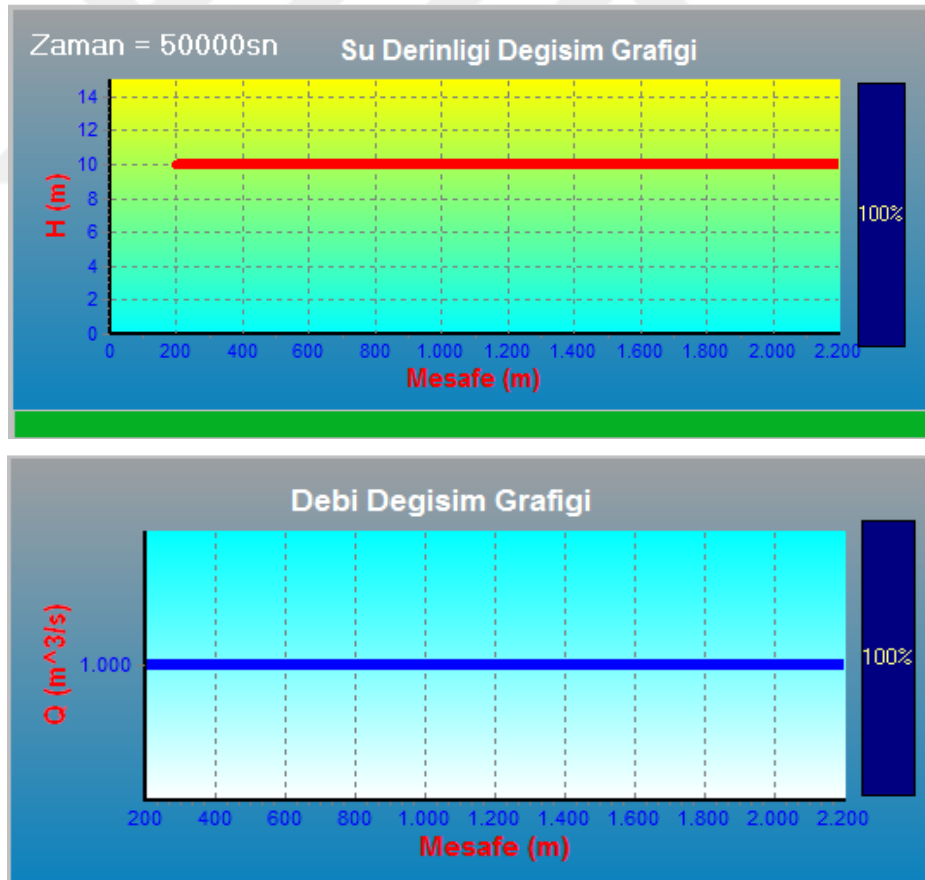
Parametreler	Değerler
Dikdörtgen Kesit Tipi	m=0
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	500
Zaman Adımı (Δt)	100 s
Simülasyon Süresi (t)	-
Difüzyon Katsayısı	200
Kanal Genişliği (b)	100 m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

Üniform akım-üniform konsantrasyon testi sayısal sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Simülasyonun farklı zaman ve mekan adımlarından alınan bu sonuçlara göre başlangıçta verilen debi ve su derinliği değerleri simülasyon süresince değişmemiş ve

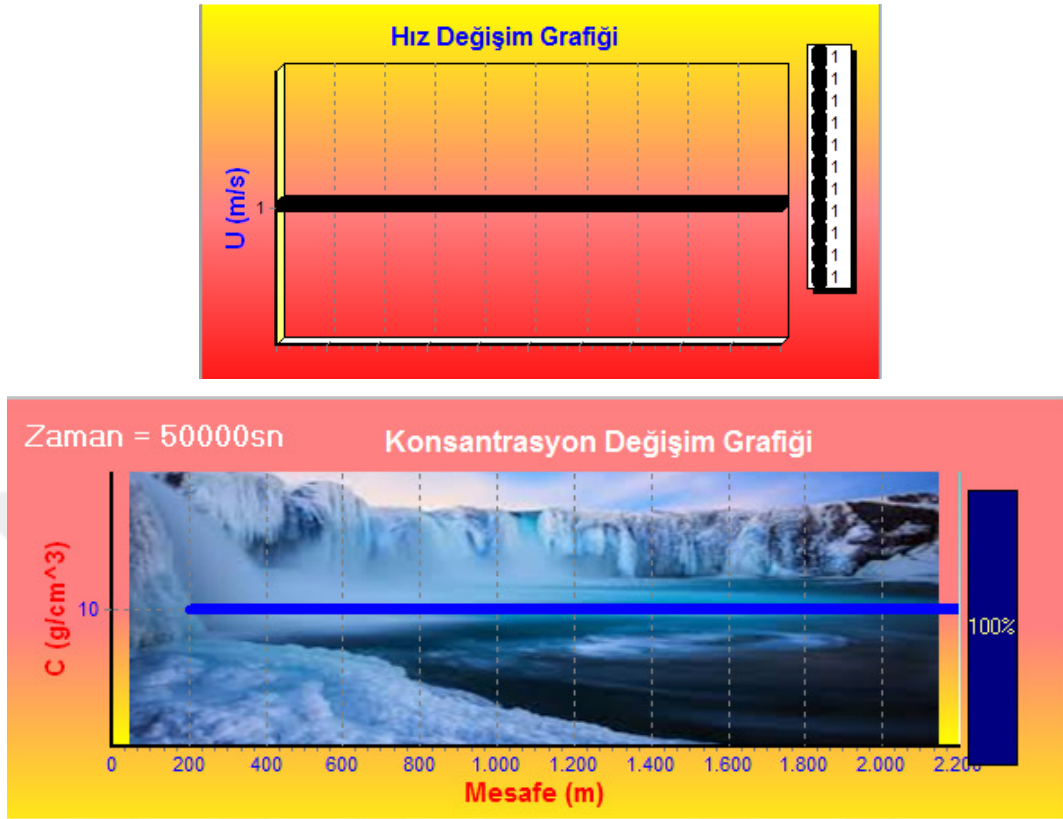
beklenildiği şekilde sabit kaldığı görülmüştür. Şekil 4.5’de programdan elde edilen üniform akım-üniform konsantrasyon testine ait su derinliği ve debi değişim grafikleri de Şekil 4.6’da üniform akım-üniform konsantrasyon testine ait hız değişim ve konsantrasyon grafikleri de testin beklenildiği şekilde sonuçlandığını göstermektedir. Modelin sonuçlara göre statik testi doğru bir biçimde gerçekleştirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.6. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Sonuçlar

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
100 s	0 m	1.000	10,0000	10,0000
12.500 s	500 m	1.000	10,0000	10,0000
25.000 s	1000 m	1.000	10,0000	10,0000
37.500 s	1500 m	1.000	10,0000	10,0000
50.000 s	2000 m	1.000	10,0000	10,0000



Şekil 4.5. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Su derinliği ve debi değişim grafikleri

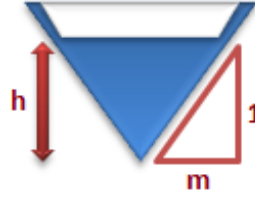


Şekil 4.6. Üniform akım-üniform konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri

4.3 Statik Akım-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi

Kanalda zamanla değişmeyen akım oluşacak şekilde sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Başlangıçta $t = 0$ anında hızlar ve su derinlikleri ne ise simülasyon süresince herhangi bir değişim olmaması amaçlanır. Ancak kanalın tam ortasından bırakıldığı varsayılan bir konsantrasyonun simülasyon süresince simetrik olarak dağılım göstermesi beklenmektedir. Eğer hızlarda ve/veya su derinliklerinde bir farklılık gözlenmiş ise ve konsantrasyon simetrik olarak bir yayılım göstermez ise yine diğer testlerde olduğu gibi sınır şartları ve çözümler yeniden kontrol edilmelidir.

Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi için seçilen en kesit tipi Şekil 4.7’de verilmiştir. Çizelge 4.7’de sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.8’de verilen model parametreleri kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.7. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları				Sınır Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)	Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	0,00	12,00	Memba	10,00	-	12,00
2	10,00	0,00	8,5	Mansap	10,00	-	12,00
3	10,00	0,00	8,5				
4	10,00	0,00	8,5				
5	10,00	0,00	8,5				
6	10,00	0,00	40,00				
7	10,00	0,00	8,5				
8	10,00	0,00	8,5				
9	10,00	0,00	8,5				
10	10,00	0,00	8,5				
11	10,00	0,00	12,00				

U (hız) 0

Çizelge 4.8. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Model parametreleri

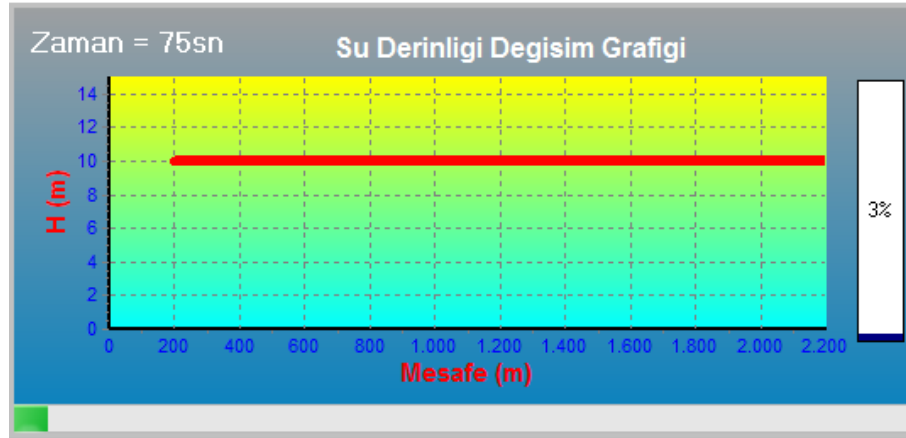
Parametreler	Değerler
Üçgen Kesit Tipi	m=1
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	25
Zaman Adımı (Δt)	2304 s
Simülasyon Süresi (t)	-
Kanal Genişliği (b)	100 m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Difüzyon Katsayısı	200
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

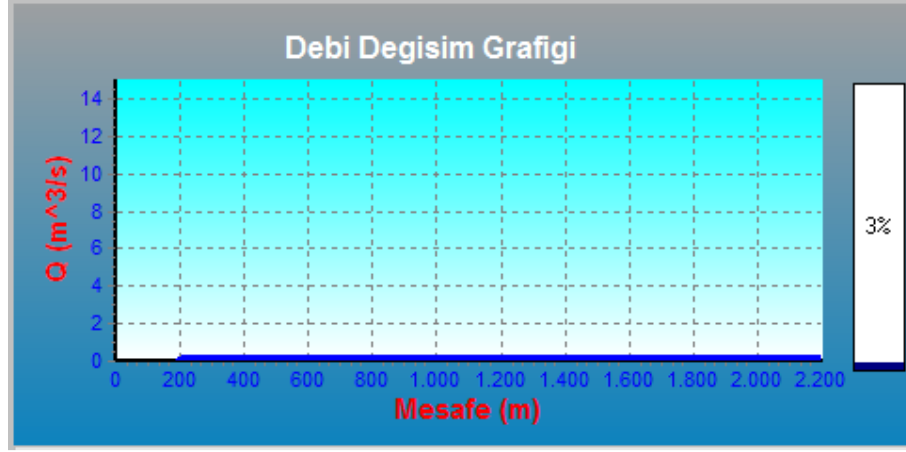
Çizelge 4.9’da Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi sayısal sonuçları verilmiştir. Simülasyonun farklı zaman ve mekan adımlarından alınan bu sonuçlara göre başlangıçta verilen sabit debi ve su derinlikleri simülasyon süresince değişmeyerek, akım hızı olmadan difüzyonunda etkisiyle konsantrasyonun simetrik olarak istenildiği şekilde yayıldığı gözlenmiştir.

Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterildiği gibi simülasyon sonu ($t = 75$ s) su derinliği ve debi değişimi, hız değişim ve konsantrasyon grafikleri de modelin istenilen sonuçları ürettiğini göstermektedir.

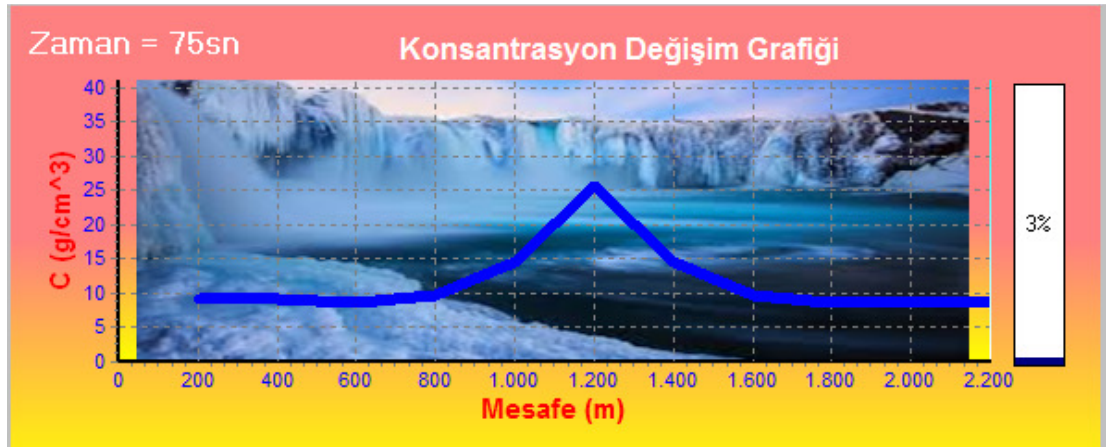
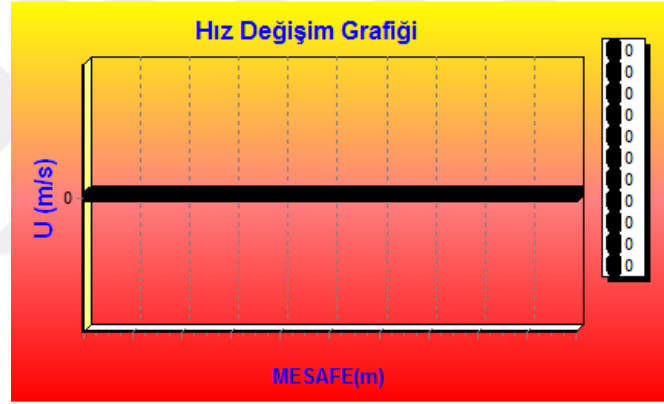
Çizelge 4.9. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (75 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
75 s	200 m	0,0000	10,0000	9.161
75 s	800 m	0,0000	10,0000	14.52
75 s	1200 m	0,0000	10,0000	25.48
75 s	1600 m	0,0000	10,0000	8.67
75 s	2000 m	0,0000	10,0000	8.66





Şekil 4.8. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Su derinliği ve debi değişim grafikleri (75 s)



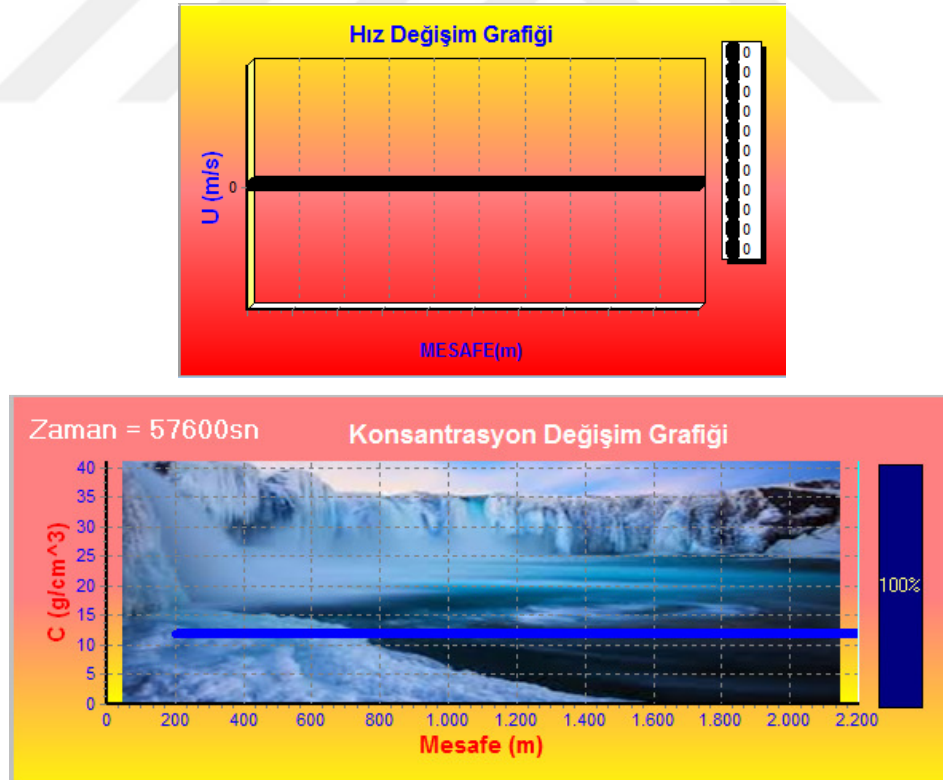
Şekil 4.9. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (75 s)

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi simülasyon sonu ($t = 57.600 \text{ s}$) su derinliği ve debi değişim grafikleri de modelin istenilen sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Başlangıçta

kanalın orta noktasından 40 g/cm^3 ve diğer noktalarda $8,5 \text{ g/cm}^3$ olarak bırakılan konsantrasyonun zamanla simetrik olarak yayıldığı ve ilk 57.600 s sonucunda kanalın tüm noktasında 12 g/cm^3 olacak şekilde eşit olarak yayıldığı da görülmektedir. Başlangıçta bırakılan $40 \text{ g/cm}^3 + (8,5 \times 8) \text{ g/cm}^3 = 108 \text{ g/cm}^3$ 'lük konsantrasyonun simülasyon sonunda da $12 \times 9 = 108 \text{ g/cm}^3$ olarak kanalda yayıldığı ve kütlenin korunduğu görülmüştür. Çizelge 4.10'da statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi sonuçları verilmiştir.

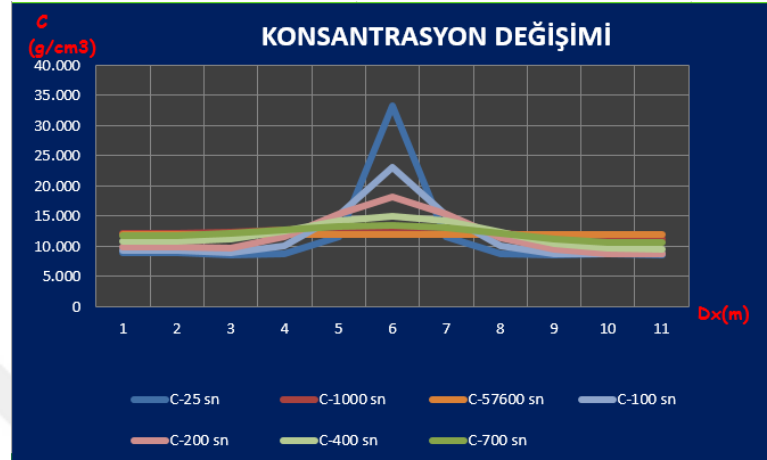
Çizelge 4.10. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (57.600 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
57.600 s	0 m	0,0000	10,0000	12,0000
57.600 s	500 m	0,0000	10,0000	12,0000
57.600 s	1000 m	0,0000	10,0000	12,0000
57.600 s	1500 m	0,0000	10,0000	12,0000
57.600 s	2000 m	0,0000	10,0000	12,0000



Şekil 4.10. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (57.600 s)

Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi sonucunda belirli zaman adımlarında grafik üzerinde Şekil 4.11’de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Statik akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği

4.4 Üniform Akım-Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi

Kanalda üniform akım oluşacak şekilde sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Başlangıçta $t = 0$ anında hızlar ve su derinlikleri ne ise simülasyon süresince herhangi bir değişim olmaması amaçlanır. Başlangıçta kanalın orta noktasından 90 g/cm^3 ’lük, sınırlarda 10 g/cm^3 ’lük, kanalın diğer noktalarında 0 g/cm^3 ’lük bir konsantrasyon bırakılırsa simülasyon süresince konsantrasyonun fazla olduğu yerlerden daha az olduğu noktalara yayılması aynı zamanda akım hızının da etkisiyle membadan mansaba doğru konsantrasyonun dağılımı ve belli bir süre sonrada kanalın her yerinde eşit olacak şekilde üniform bir dağılım göstermesi beklenmektedir.

Üniform test için seçilen en kesit tipi Şekil 4.12’de verilmiştir. Çizelge 4.11’de sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.12’de verilen model parametreleri kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.11. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları				Sınır Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)	Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	1.000	10,00	Memba	10,00	1.000	10,00
2	10,00	1.000	0,00	Mansap	10,00	1.000	10,00
3	10,00	1.000	0,00				
4	10,00	1.000	0,00				
5	10,00	1.000	0,00				
6	10,00	1.000	90,00				
7	10,00	1.000	0,00				
8	10,00	1.000	0,00				
9	10,00	1.000	0,00				
10	10,00	1.000	0,00				
11	10,00	1.000	10,00				

U 1

Çizelge 4.12. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Model parametreleri

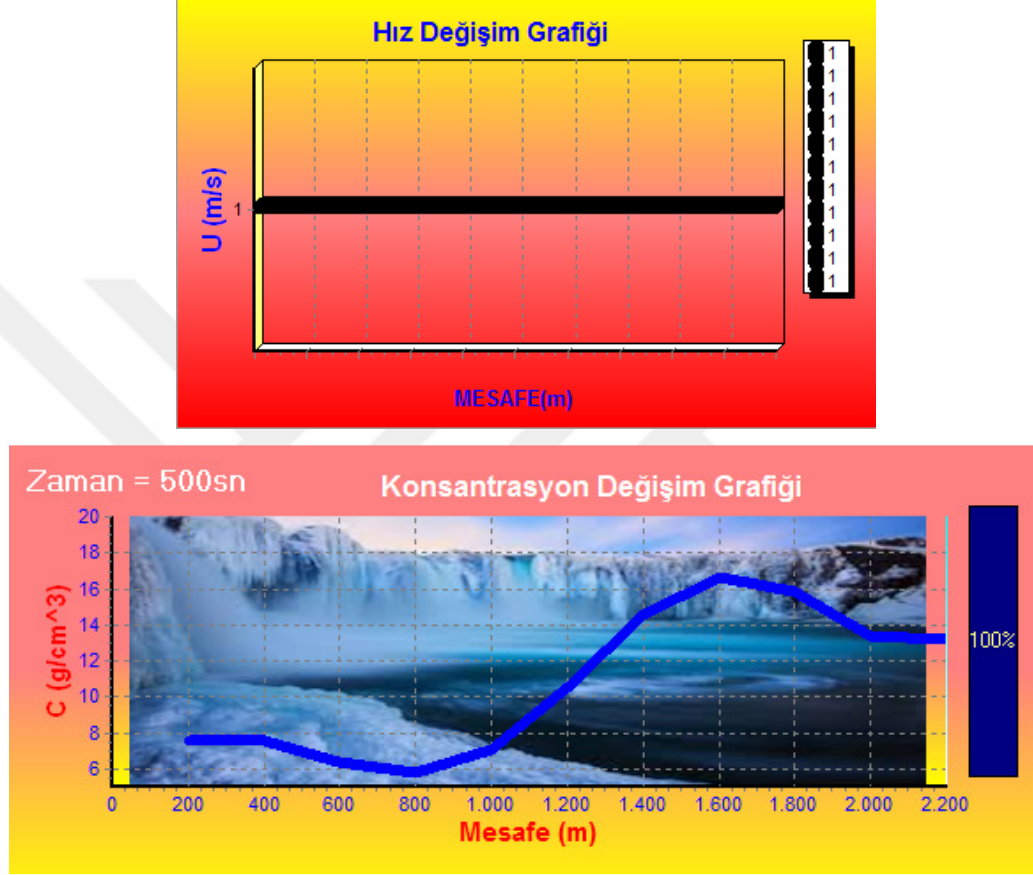
Parametreler	Değerler
Dikdörtgen Kesit Tipi	m=0
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	776
Zaman Adımı (Δt)	10 s
Simülasyon Süresi (t)	7760 s
Kanal Genişliği (b)	100m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Difüzyon Katsayısı	200
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

Çizelge 4.13’de üniform yayılım testi sayısal sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.13. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (500 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
500 s	200 m	1.000	10,0000	7.61
500 s	600 m	1.000	10,0000	5.82
500 s	1200 m	1.000	10,0000	14.54
500 s	1800 m	1.000	10,0000	13.36
500 s	2000 m	1.000	10,0000	13.18

Şekil 4.13’de gösterildiği gibi simülasyon sonu ($t = 500$ s) hız değişim ve konsantrasyon grafikleri de modelin istenilen sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Program bu sonuçlara göre her yerde eşit dağılıma ulaşıncaya kadar konsantrasyonun yayılımı görülmektedir.

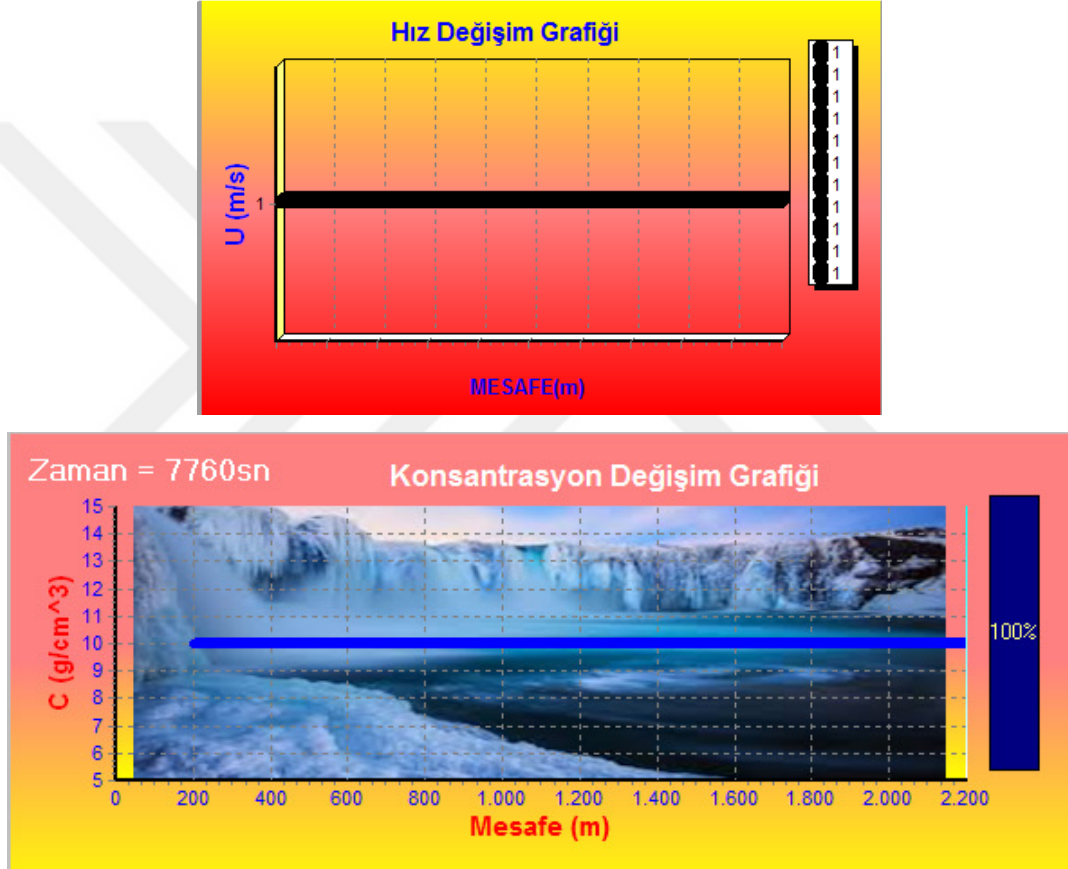


Şekil 4.13. Üiform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (500 s)

Şekil 4.14’de gösterildiği gibi simülasyon sonu ($t = 7760$ s) hız değişim ve konsantrasyon grafikleri de modelin istenilen sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Başlangıçta kanalın orta noktasından 90 g/cm^3 sınırlarda 10 g/cm^3 olarak bırakılan konsantrasyonun zamanla yayılarak 7760 s sonucunda kanalın tüm noktasında 10 g/cm^3 olacak şekilde üniform olduğu görülmektedir. Başlangıçta bırakılan $90+10+10 \text{ g/cm}^3 = 110 \text{ g/cm}^3$ ’lük konsantrasyonun simülasyon sonunda da $11 \cdot 10 = 110 \text{ g/cm}^3$ olarak kanalda yayıldığı ve kütlenin korunduğu görülmüştür. Çizelge 4.14’de üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi sonuçları verilmiştir.

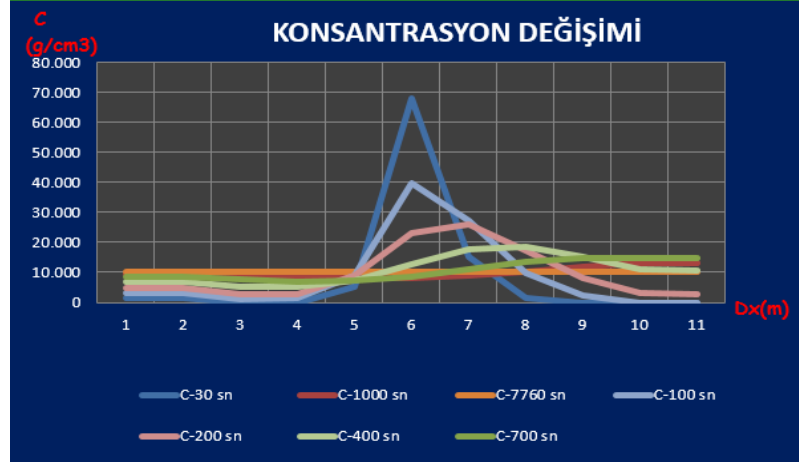
Çizelge 4.14. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (7760 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
7760 s	0 m	1.000	10,0000	10,0000
7760 s	500 m	1.000	10,0000	10,0000
7760 s	1000 m	1.000	10,0000	10,0000
7760 s	1500 m	1.000	10,0000	10,0000
7760 s	2000 m	1.000	10,0000	10,0000



Şekil 4.14. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (7760 s)

Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi sonucunda belirli zaman adımlarında grafik üzerinde Şekil 4.15’de sunulmuştur.



Şekil 4.15. Üniform akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği

4.5 Üniform Akım-Sınırdaki Sabit Konsantrasyon Girişi Testi

Kanalda üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon oluşacak şekilde sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Başlangıçta ($t = 0$ anında) hızlar ve su derinlikleri ne ise simülasyon süresince herhangi bir değişim olmaması amaçlanır. Başlangıçta kanalın memba sınırından 20 g/cm^3 lük bir konsantrasyon kanala verilirken, mansap sınırında konsantrasyon olmadığı varsayılmıştır. Kirliliğin ne kadar sürede mansaba ulaştığı gözlemlenmiştir.

Üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon girişi testi için seçilen en kesit tipi Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Üniform akım-sınırdaki sabit konsantrasyon girişi testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.15'de sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.16'da verilen model parametreleri kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları				Sınır Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)	Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	2.000	10,00	Memba	10,00	2.000	20,00
2	10,00	2.000	10,00	Mansap	10,00	2.000	0,00
3	10,00	2.000	10,00				
4	10,00	2.000	50,00				
5	10,00	2.000	10,00				
6	10,00	2.000	10,00				
7	10,00	2.000	10,00				
8	10,00	2.000	10,00				
9	10,00	2.000	10,00				
10	10,00	2.000	10,00				
11	10,00	2.000	10,00				

U 2

Çizelge 4.16. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Model parametreleri

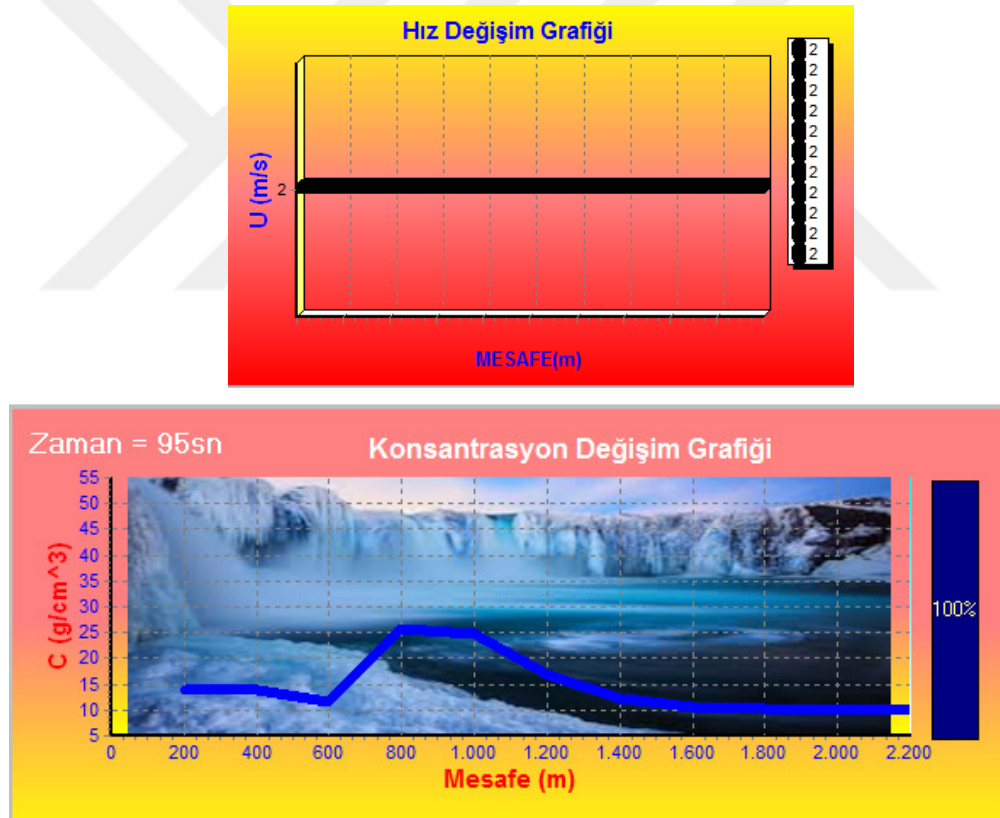
Parametreler	Değerler
Dikdörtgen Kesit Tipi	m=0
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	1000
Zaman Adımı (Δt)	5 s
Simülasyon Süresi (t)	5000 s
Kanal Genişliği (b)	100m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Difüzyon Katsayısı	200
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

Çizelge 4.17’de üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi sayısal sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.17. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Sonuçlar (95 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
1500 s	200 m	2.000	10,0000	13,80
1500 s	600 m	2.000	10,0000	25,87
1500 s	1200 m	2.000	10,0000	12,21
1500 s	1800 m	2.000	10,0000	10,01
1500 s	2000 m	2.000	10,0000	10,01

Şekil 4.17’de gösterildiği gibi hız, $u=2$ m/s iken simülasyon sonunda ($t = 95$ s) kirliliğin tüm kanalda yayıldığı görülmüştür. Membadan yayılan bir kirliliğin 95 s’de kanalın sonuna ulaştığı hız değişim ve konsantrasyon grafiklerinde görülmektedir (Şekil 4.17).

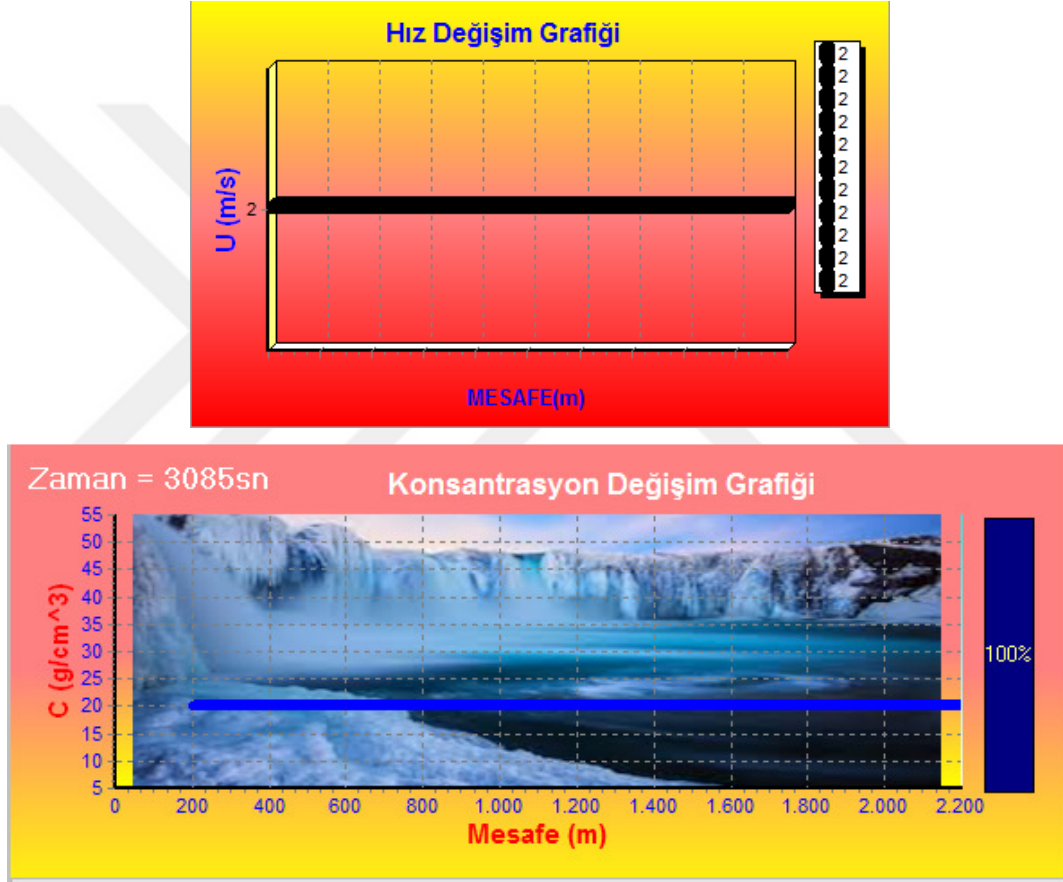


Şekil 4.17. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (95 s)

Şekil 4.18’de gösterildiği gibi hız, $u=2$ m/s iken simülasyon sonucu memba tarafından yayılmaya başlayan bir kirliliğin 3.085 s de 2000 m’lik mesafeli kanalın tüm her yerine yayıldığı ve 20 g/cm^3 değerine ulaştığı görülmektedir. Çizelge 4.18’de üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.18. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Sonuçlar (3.085 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
3.085 s	0 m	2.000	10,0000	20,0
3.085 s	500 m	2.000	10,0000	20,0
3.085 s	1000 m	2.000	10,0000	20,0
3.085 s	1500 m	2.000	10,0000	20,0
3.085 s	2000 m	2.000	10,0000	20,0

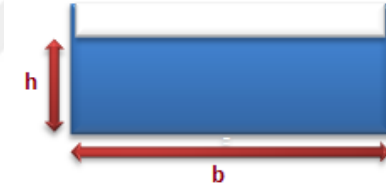


Şekil 4.18. Üniform akım-sınırda sabit konsantrasyon girişi testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (3.085 s)

4.6 Zamanla Değişen Akım (Seiche) – Üniform Konsantrasyon Testi

Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi için başlangıç durumları belirlenirken kanalda $t = 0$ anından itibaren değişken dalgalı su yüzü oluşması sağlanır. Başlangıçta üniform konsantrasyon bulunmaktadır. Sınır şartları seçilirken dışarıya su/konsantrasyon çıkışı veya dışarıdan içeriye su/konsantrasyon girişi olmayacak şekilde seçilir. Simülasyon, oluşturulan dalgalanma devam ettiği sürece konsantrasyonun sabit miktarlarda olduğu görülmektedir.

Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi için dikdörtgen kesit tipi seçilmiş ve Şekil 4.19’de verilmiştir. Çizelge 4.19’da sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.20’de verilen model parametrelerine göre test yapılarak sonuçlar ve grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.19. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	0,00	10,00
2	9,80	0,00	10,00
3	9,60	0,00	10,00
4	9,40	0,00	10,00
5	9,20	0,00	10,00
6	9,00	0,00	10,00
7	8,80	0,00	10,00
8	8,60	0,00	10,00
9	8,40	0,00	10,00
10	8,20	0,00	10,00
11	8,00	0,00	10,00

Sınır Şartları			
Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
Memba	-	0,00	10,00
Mansap	-	0,00	10,00

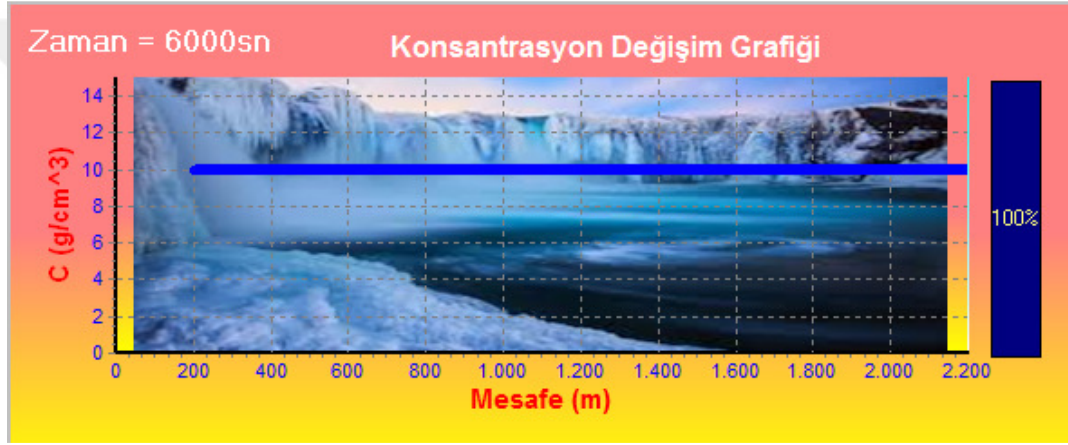
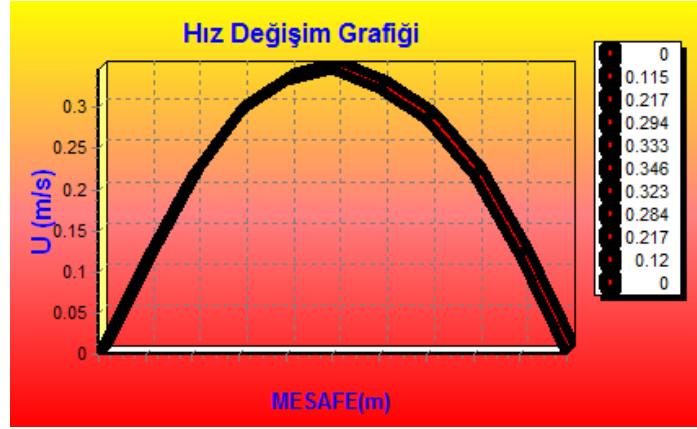
Çizelge 4.20. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Model parametreleri

Parametreler	Değerler
Dikdörtgen Kesit	m =0
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	100
Zaman Adımı (Δt)	763 s
Simülasyon Süresi (t)	-
Kanal Genişliği (b)	100 m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

Akım statik hale geldiğinde her yerde eşit miktarda konsantrasyon olduğu görülmüştür. Başlangıçta kanalın her noktasından aynı miktarda olan konsantrasyon statik duruma ulaşıldığında da her yerde aynı miktarda kalmıştır. Şekil 4.21 simülasyon sonu programdan elde edilen konsantrasyon sonuç grafikleri modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Şekil 4.20’de 6.000 s’deki, Şekil 4.21’de 76.300 s’deki hız ve konsantrasyon değişim grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.21’de akım testi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.21. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Sonuçlar (6.000 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
6.000 s	0 m	0,000	9,063	10,0
6.000 s	400 m	199,28	9,059	10,0
6.000 s	1.000 m	311,61	9,005	10,0
6.000 s	1.600 m	191,48	8,942	10,0
6.000 s	2.000 m	0,000	8,915	10,0

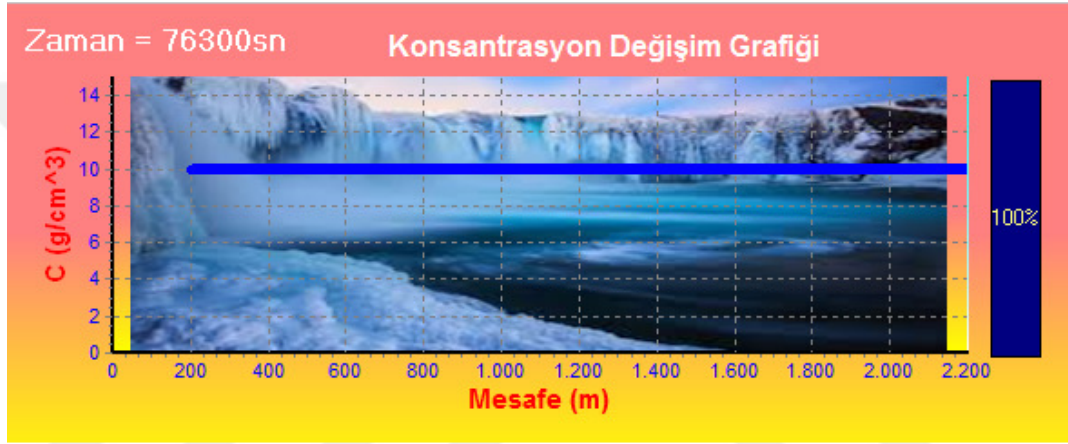
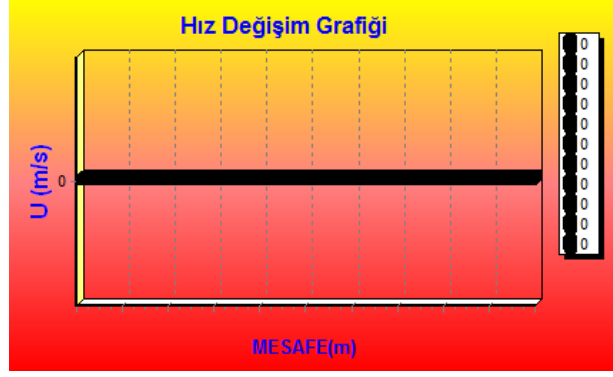


Şekil 4.20. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (6.000 s)

Çizelge 4.22’de akım testi sonuçları verilmiştir.

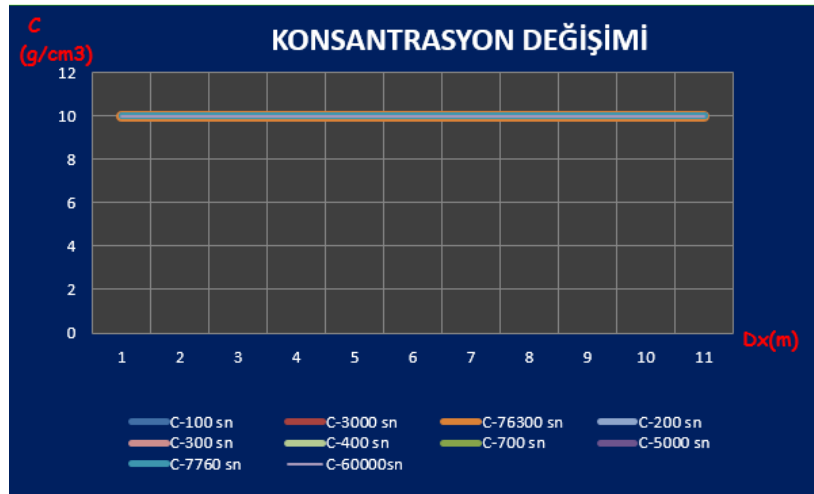
Çizelge 4.22. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Sonuçlar (76.300 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
76.300 s	0 m	0,000	9,00	10
76.300 s	400 m	0,007	9,00	10
76.300 s	1.000 m	0,012	9,00	10
76.300 s	1.600 m	0,007	9,00	10
76.300 s	2.000 m	0,000	9,00	10



Şekil 4.21. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (76.300s)

Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi sonuçları belirli zaman adımları için grafik üzerinde Şekil 4.22’de sunulmuştur.



Şekil 4.22. Zamanla değişen akım-üniform konsantrasyon testi: Konsantrasyon değişim grafiği

4.7 Zamanla Değişen Akım (Seiche)–Üniform Olmayan Konsantrasyon Testi

Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi için başlangıç durumları belirlenirken kanalda $t = 0$ anından itibaren dalgalanma oluşması sağlanır. Bir önceki testte başlangıçta kanal içerisinde değişken bir konsantrasyon yayılımı öngörülmüştür. Sınır şartları seçilirken dışarıya su/konsantrasyon çıkışı veya dışarıdan içeriye su/konsantrasyon girişi olmayacak şekilde seçilir. Simülasyon, oluşturulan dalgalanma devam ettiği sürece konsantrasyonun her bölgeye farklı miktarlarda yayılacağı beklenmektedir.

Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi için dikdörtgen kesit tipi seçilmiş ve Şekil 4.23’de verilmiştir. Çizelge 4.23’de sınır ve başlangıç şartları verilmiştir. Çizelge 4.24’de verilen model parametrelerine göre test yapılarak sonuçlar ve grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.23. Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi: Seçilen en kesit tipi

Çizelge 4.23. Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi: Sınır ve başlangıç şartları

Başlangıç Şartları				Sınır Şartları			
Mekan	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)	Sınır	h (m)	Q (m ³ /s)	C (g/cm ³)
1	10,00	0,00	10,00	Memba	-	0,00	20,00
2	9,80	0,00	10,00	Mansap	-	0,00	20,00
3	9,60	0,00	10,00				
4	9,40	0,00	10,00				
5	9,20	0,00	10,00				
6	9,00	0,00	100,00				
7	8,80	0,00	10,00				
8	8,60	0,00	10,00				
9	8,40	0,00	10,00				
10	8,20	0,00	10,00				
11	8,00	0,00	10,00				

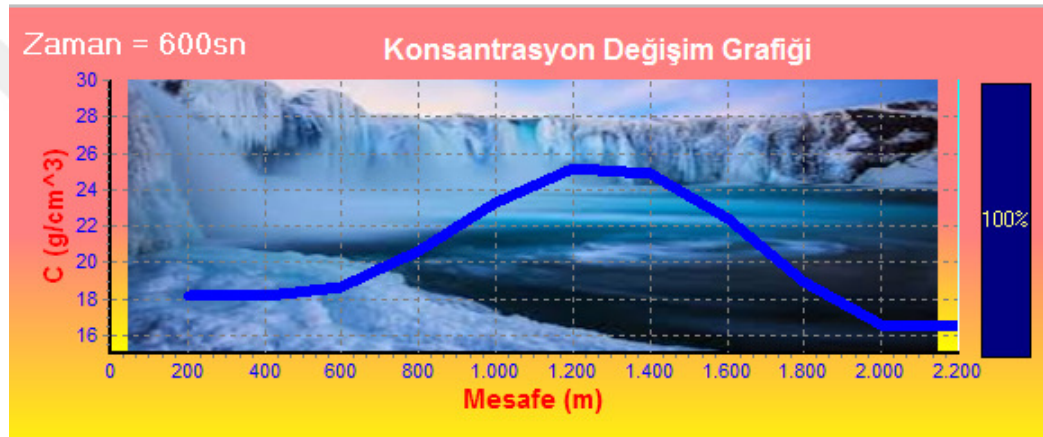
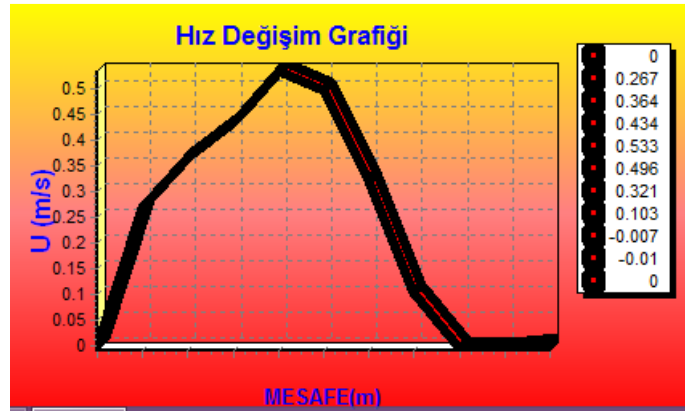
Çizelge 4.24. Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi: Model parametreleri

Parametreler	Değerler
Dikdörtgen Kesit	m =0
Mekan Adım Sayısı	11
Mekan Adımı (Δx)	200 m
Kanal Boyu (L)	2000 m
Zaman Adım Sayısı	655
Zaman Adımı (Δt)	100 s
Simülasyon Süresi (t)	-
Kanal Genişliği (b)	100 m
Kanal Eğimi (S_0)	0
Chezy Katsayısı (C)	10.000.000.000
Ağırlık Katsayısı (θ)	0,51
Momentum Düz.Kat. (β)	0,50

Şekil 4.25’deki 65.500 s’de akım statik hale geldiğinde her yerde eşit miktarda konsantrasyon olduğu görülmüştür. Başlangıçta kanalın farklı noktasından farklı miktarlarda tanımlanan konsantrasyon zamanla yayılarak her yerde aynı miktarda olmuştur. Şekil 4.25 simülasyon sonu programdan elde edilen konsantrasyon sonuç grafikleri modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Şekil 4.24’de 600 s’deki, Şekil 4.25’de 65.500 s’deki hız ve konsantrasyon değişim grafikleri verilmiştir. Çizelge 4.25’de akım testi sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.25. Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (600 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
600 s	0 m	0,000	8,461	18,17
600 s	400 m	228,27	8,576	18,67
600 s	1.000 m	434,20	8,765	25,12
600 s	1.600 m	-6,286	9,597	18,97
600 s	2.000 m	0,000	9,825	16,44

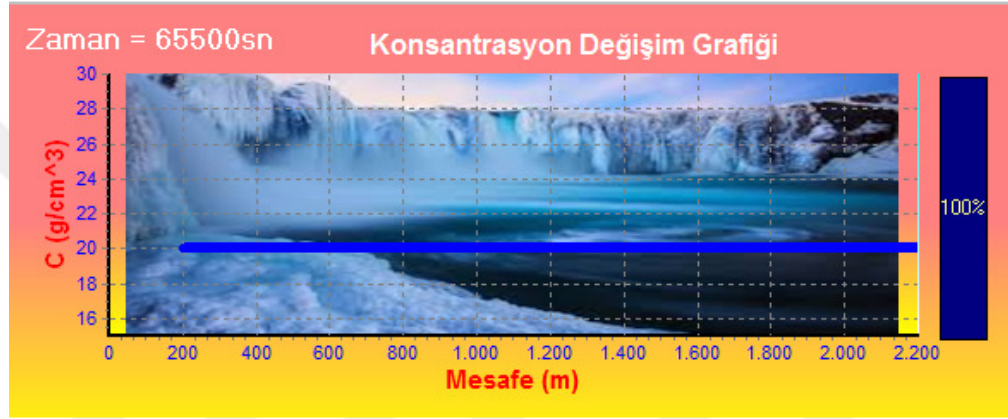
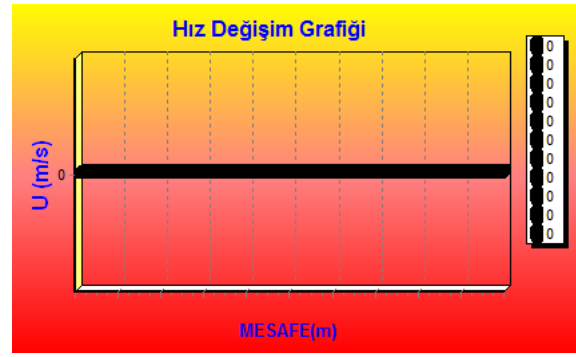


Şekil 4.24. Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (600 s)

Çizelge 4.26’da akım testi sonuçları verilmiştir.

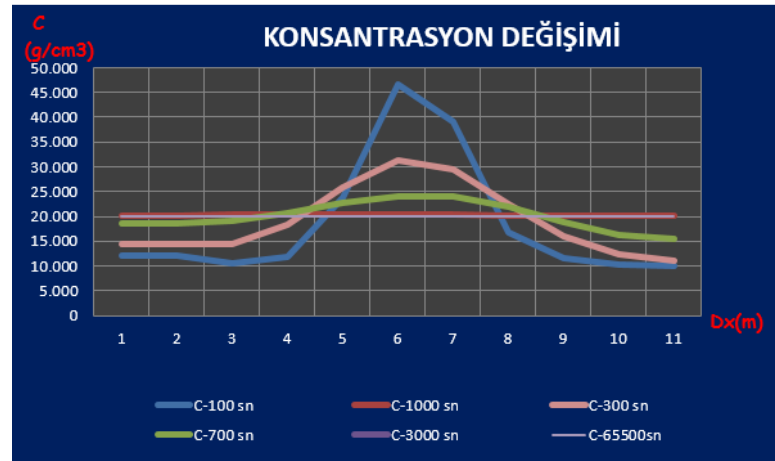
Çizelge 4.26. Zamanla değişen akım–üniform olmayan konsantrasyon testi: Sonuçlar (65.500 s)

Zaman	Mekan	Q (m ³ /s)	h (m)	C (g/cm ³)
65.500 s	0 m	0,000	9,00	20,00
65.500 s	400 m	0,030	9,00	20,00
65.500 s	1.000 m	0,052	9,00	20,00
65.500 s	1.600 m	0,030	9,00	20,00
65.500 s	2.000 m	0,000	9,00	20,00



Şekil 4.25. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi: Hız değişim ve konsantrasyon grafikleri (65.500s)

Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi sonucu belirli zaman adımlarında grafik üzerinde Şekil 4.26’da sunulmuştur.



Şekil 4.26. Zamanla değişen akım-üniform olmayan konsantrasyon testi:
Konsantrasyon değişim grafiği

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında akarsularda kirliliğin yayılımının simülasyonu için hidrodinamik su kalite modeli geliştirilmiştir. Tez çalışması sonucunda elde edilenler sonuçlar şunlardır;

- Prizmatik kanallarda bir boyutlu zamanla değişen su kirliliği yayılımını da tarif eden ve serbest su yüzü akımlarını modellemede kullanılmak üzere nümerik bir yazılım gerçekleştirilmiştir.
- Yazılım iki alt modülden oluşturulmuştur. Bunlar SYM ve ADM'dir. Modüllerin integrasyonu SYM'den akım hızlarının ADM'ye geçişi şeklinde olmuştur.
- Model Delphi nesne tabanlı programlama dili ortamında geliştirilerek görsel ve kullanıcı dostu bir yazılım oluşturulmuştur.
- Model bir dizi teste tabi tutularak, testler sonucunda teorik olarak beklentilerin karşılandığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Abbott, M.B. and Minns, A.W., Computational Hydraulics, 2nd Edition. *Ashgate, Aldershot*, England, 1998.

Abedini, M.J. and Hashemi, M.R., “Effect of Convective Term Suppression In Numerical Simulation of Trans-Critical Open Channel Flow”, *Iranian Journal of Science&Technology*, Transaction B, Engineering, 30, B1, 85-96, 2006.

Aktürk, T., Adveksiyon Yayılım Denkleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sayısal Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2011.

Altansukh, O., Surface Water Quality Assessment and Modelling-A Case Study In The Tuul River, Ulaanbaatar City, Mongolia. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, The Netherlands, Enschede, *MSthesis*, 87, 2008.

Ayat, B., İstanbul Boğazı Su Kalitesinin Modellenmesi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2010.

Baban, S. M., and Foster, I. D., “Modelling Water Flow and Quality: An Evaluation of The ISIS Model In The River Avon, United Kingdom”, *West Indian Journal of Engineering*, 24(2), 1-15, 2002.

Chapra, S.C. ve Canale, R.P., Mühendisler için Sayısal Yöntemler, Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla, 4. Basımdan Çevirenler: H. Heperkan, U. Kesgin, *Literatür Yayıncılık*, 2003.

De Doncker, L., Troch, P., Verhoeven, R., Buis, K. and Meire, P., “Validation of The STRIVE Model for Coupling Ecological Processes and Surface Water Flow”, *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 741-759, 2011.

Demirli N. ve İnan Y., Delphi 7, *Prestij Yayınları*, Ankara, 2003.

Dündar, O., “Dolu Savak Akımlarının Modellemesinde Sayısal Hesaplama Yönteminin Güvenli Kullanımı”, *Türkiye Mühendis Haberleri*, 2009/5, Ankara, 2009.

Erkek, C. ve Ağırlioğlu, N., Su Kaynakları Mühendisliği, *Beta Yayınevi*, İstanbul, 2010.

Ekdal, A., Water Quality Modeling of Köyceğiz-Dalyan Lagoon (Doctoral dissertation), Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2008.

Hacımusalar, K.A., Açık Kanallarda Oluşan Dalgaların Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2003.

Hammond, A. J., Hydrodynamic and Water Quality Simulation of Fecal Coliforms in the Lower Appomattox River, Master Thesis, *Virginia*, 2004.

Korkut, Ş., Su Kalitesi Yönetimi Ders Notları, *Bülent Ecevit Üniversitesi*, Zonguldak, 2012.

Mannina, G. and Viviani, G., “River Water Quality Assessment: A Hydrodynamic Water Quality Model for The Propagation of Pollutants”, *7th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies for Urban Water Management*, NOVATECH, 2010.

Matzinger, A., River Water Quality Modelling: Statusquo Project Acronym: SAM-CSO, *Kompetenzzentrum Wasser Berlin GmbH*, Berlin, Almanya, 2009.

Özyurt, N., Su Yapıları Ders Notları, *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara, 2013.

Shao-Chen, S., Zu-Hao, Z., Wei-Hua, X., and Hao, W., “Impact Analysis on Water Quality of the Second Songhua River Based on Mathematical Model”, *Journal of Clean Energy Technologies*, 2(3),2014.

Takıl, H., Sınırlayıcı Taylor Yaklaşım Metodları Yardımıyla Kısmi Türevli Denklemlerin Sayısal Çözümleri, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 2010.

Tekbaş, Y., Zamanla Değişen Bir Boyutlu Serbest Su Yüzü Akım Problemleri İçin Nümerik Bir Model, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2010.

Torres-Bejarano, F., Rodríguez, C., and Ramirez, H., A Study Case of Hydrodynamics and Water Quality Modelling: Coatzacoalcos River, Mexico, *INTECH Open Access Publisher*, 2012.

Türk, Ö., Hava Kirliliğinde Reaksiyon-Difüzyon-Adveksiyon Denklemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doęu Teknik Üniversitesi, Uygulamalı Matematik Enstitüsü*, Ankara, 2008.

ÖZ GEÇMİŞ

Fatmanur DOĞAN 09.08.1991 tarihinde Beyşehir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Beyşehir’de tamamladı. 2010 yılında girdiği Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2014’de derece ile mezun oldu. 2014-16 yılları arasında Niğde Enerjik Yapı Denetim Ltd. Şti.’de mühendis olarak çalıştı. 2014 Öğretim yılında Niğde İnşaat Mühendisliği Bölümü yüksek lisans öğrenimine başladı. O tarihten beri yine aynı bölümde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.