

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SIĞ SU DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN KULLANILAN
SAYISAL ŞEMALARIN İYİLEŞTİRİLMESİ VE
PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AMİR MUHAMMAD JAFARİ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2022

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SIĞ SU DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN KULLANILAN
SAYISAL ŞEMALARIN İYİLEŞTİRİLMESİ VE
PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AMİR MUHAMMAD JAFARİ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2022

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Amir Muhammad Jafari

ÖZET

**SIĞ SU DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN KULLANILAN SAYISAL
ŞEMALARIN İYİLEŞTİRİLMESİ VE PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
AMİR MUHAMMAD JAFARİ
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HALİL KARAHAN)**

DENİZLİ, HAZİRAN - 2022

Bu tez çalışmasında sırasıyla 1 boyutlu ve 2 boyutlu sığ su akım denklemlerinin çözümü için normal MacCormack ve Lax-Wendroff şemalarının Toplam Değişim Azaltmalı (Total Variation Diminishin) metodu ile bilgisayar ortamında kodlanarak iyileştirilmesi yapılmıştır. Sığ su akım denklemlerinin ayrıklaştırılmasında sonlu farklar yöntemi kullanılarak öncelikle normal MacCormack ve normal Lax-Wendroff şemalarının iyileştirilmiş halleri ile sığ su akım denklemlerinin çözümünde çözüm hassasiyeti ve stabilite karşılaştırılması yapılmıştır. Ardından iyileştirilmiş MacCormack ve iyileştirilmiş Lax-Wendroff şemaları arasında ani değişen akımların çözümü için şok yakalama kabiliyeti, çözüm hassasiyeti ve stabilite karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları ile literatürdeki çalışmaların sonuçları oldukça iyi bir uyum içinde oldukları görülmüştür. En sonunda Flow-3D paket programı kullanılarak literatürde mevcut bir baraj yıkılması problemi ve varsayımsal bir dolusavak problemi 3 boyutlu olarak analiz edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Serbest yüzeyli akım, Sığ su denklemleri, Baraj yıkılması, Şok dalgaları, Tsunami, Lax-Wendroff şeması, MacCormack şeması, Godunov şeması, TVD

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF NUMERICAL SCHEMES USED TO SOLVE SHALLOW WATER EQUATIONS AND COMPARISON OF THEIR PERFORMANCES

MSC THESIS

AMİR MUHAMMAD JAFARI

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. HALİL KARAHAAN)

DENİZLİ, JUNE 2022

In this thesis study the normal MacCormack and Lax-Wendroff schemes coded and improved with Total Variation Diminishing method for solution of 1-dimensional and 2-dimensional shallow water equations respectively. Shallow water equations has discretized by finite difference method and the normal MacCormack and normal Lax-Wendroff has compared with their improved versions in solution sensitivity and stability for the solution of the shallow water equations. Then, shock capture capability, solution sensitivity and stability comparisons were made between the improved MacCormack and the improved Lax-Wendroff schemes for the solution of rapidly varied flow. The results of the analysis and the results of the studies in the literature are shown to be in very good harmony. Finally, a dam failure problem that it is exist in the literature and a hypothetical spillway problem has analyzed by using the Flow-3D package program in 3D.

KEYWORDS: Free surface flow, Shallow water equations, Dam break, Shock wave, Tsunami, Lax-Wendroff scheme, MacCormack scheme, Godunov scheme, TVD

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	2
1.2 Önceki Çalışmalar	3
2. PROBLEMİN TANIMI.....	14
2.1 Giriş	14
2.2 Hidrolik Modelleme	15
3. MODEL GELİŞTİRİLMESİ.....	16
3.1 Giriş	16
3.2 Temel denklemler.....	16
3.2.1 Bir boyutlu sığ akım denklemleri	16
3.2.2 İki boyutlu sığ akım denklemleri.....	17
3.2.3 Üç boyutlu sığ akım denklemleri.....	18
3.3 Çözüm Yöntemleri	19
3.4 Sonlu Farklar Yöntemi	19
3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi	21
3.6 Sonlu Hacimler Yöntemi.....	22
3.7 Lax-Wendroff Şeması	24
3.8 MacCormack Şeması.....	26
3.9 Godunov Şeması.....	27
3.1 Çözüm Yöntemlerinin Geliştirilmesi	30
3.1.1 Giriş	30
3.1.2 Lax-Wendroff-TVD Şeması	31
3.1.3 MacCormack-TVD Şeması.....	32
4. MODEL UYGULAMASI.....	33
4.1 Giriş	33
4.2 Örnek Problemler	33
4.2.1 Şok dalgası içeren bir kanaldaki akım	33
4.2.2 Baraj yıkılması problemi-kuru mansap durumu	39
4.2.3 Baraj yıkılması problemi-ıslak mansap durumu	41
4.2.4 Bir bariyer etrafındaki akımın davranışı.....	42
4.2.5 Tsunami problemi	45
4.2.6 3B baraj yıkılması problemi ve dolusavak akımı	49
4.2.7 Dolusavak üzerindeki akım:	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
6. KAYNAKLAR.....	53
7. ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3. 1: Değişen taban topoğrafyasına sahip bir akımın şematik gösterimi .	16
Şekil 3. 2: Sonlu farkların şematik gösterimi.....	20
Şekil 3. 3: Sonlu farklar yönteminin kartezyen koordinat sisteminde 1 ve 2 boyutlu şematik gösterimi	21
Şekil 3. 4: Sonlu elemanlar yönteminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3. 5: Bir boyutlu kontrol hacminin şematik gösterimi	23
Şekil 3. 6: Sonlu hacimler yönteminde kontrol hacminin 2- boyutlu ızgara üzerinde şematik gösterimi	23
Şekil 3. 7: Sonlu hacimler yönteminde kontrol hacminin 3- boyutlu şematik gösterimi.....	23
Şekil 3. 8: Lax-Wendroff şemasının bir boyutlu şematik gösterimi	24
Şekil 3. 9: Lax-Wendroff şemasının iki boyutlu şematik gösterimi	24
Şekil 3. 10: Godunov metodunun n'inci zaman adımındaki değerleri dikkate alma prensibi	28
Şekil 3. 11: Riemann probleminin çözümü ve ortalamaları.....	29
Şekil 3. 12: Lagrange aşaması artı doğrusal adveksiyon için yeniden eşleme..	29
Şekil 4. 1: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının klasik Lax- Wendroff şeması ile çözümü	34
Şekil 4. 2: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.1'deki klasik Lax-Wendroff şemasının içerdiği yapay salınımların yakından görünümü.....	34
Şekil 4. 3: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının klasik Maccormack şeması ile çözümü	35
Şekil 4. 4: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.3'teki klasik MacCormack şemasının içerdiği yapay salınımların yakından görünümü.....	35
Şekil 4. 5: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şeması ile çözümü	36
Şekil 4. 6: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.5'teki geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü	36
Şekil 4. 7: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının geliştirilen MacCormack-TVD şeması ile çözümü	37
Şekil 4. 8: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.7'deki geliştirilen MacCormack-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü	37
Şekil 4. 9: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şeması ile çözümü	38
Şekil 4. 10: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü	38
Şekil 4. 11: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen MacCormack-TVD şeması ile çözümü	39

Şekil 4. 12: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen MacCormack-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü	39
Şekil 4. 13: Fraccarollo ile Toro'nun oluştukları deney düzeneği	40
Şekil 4. 14: Sırasıyla a ve b Kalita (2016) tarafından geliştirilen MacCormack-TVD şeması Lax-Wendroff-TVD şemalarına ait O noktasının zamana göre su derinlik değişimi	40
Şekil 4. 15: Kısmi ve simetrik olmayan baraj yıkılması problemi	41
Şekil 4. 16: a ve c 7.2 saniyelik kısmi ve simetrik olmayan baraj yıkılması problemin geliştirilen Lax-Wendroff -TVD şeması ile çözüm sonucunu sırasıyla su yüzü profili ve hız vektörlerinin , b ve d benzer parametrelerin geliştirilen MacCormack-TVD şeması ile çözümünün gösterimi	42
Şekil 4. 17: Baraj yıkılması sonucu taşkın dalgasının bir bariyere çarpması problemin geometrisi	43
Şekil 4. 18: a ve b barajın yıkılma anından itibaren 14 saniye sonra geliştirilen Lax-Wendroff -TVD şemasının çözüm sonucu olarak taşkın dalgasının bariyer yüzüne yettiği anki su yüzü profili ve hız vektörlerini gösterimi	44
Şekil 4. 19: a ve b barajın yıkılma anından itibaren 17 saniye sonra geliştirilen Lax-Wendroff -TVD şemasının çözüm sonucu olarak taşkın dalgasının bariyer yüzüne çarptığı anki su yüzü profili ve hız vektörlerini gösterimi	44
Şekil 4. 20: a ve b barajın yıkılma anından itibaren 32 saniye sonra geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şemasının çözüm sonucu olarak taşkın dalgasının bariyeri geçmiş olmasını ve bariyer etrafındaki akımın davranışını su yüzü profili ve hız vektörleri cinsinden gösterimi	45
Şekil 4. 21: Göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminin $t = 0$ s anındaki görünümü	46
Şekil 4. 22: a ve b göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 4.17$ dakika anındaki görünümü	46
Şekil 4. 23: a ve b göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 16.67$ dakika anındaki görünümü	46
Şekil 4. 24: a ve b göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 33.33$ dakikalık çözüm sonucu tsunami dalgasının kıyıya çarptığı anın görüntüsü	47
Şekil 4. 25: Toprak kayması sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminin $t = 0$ s anındaki görünümü	47
Şekil 4. 26: a ve b toprak kayması sonucu varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 4.17$ dakika anındaki görünümü	48
Şekil 4. 27: a ve b toprak kayması sonucu varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 25$ dakika anındaki görünümü	48
Şekil 4. 28: a ve b toprak kayması sonucu varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 50$ dakika anındaki görünümü	48

Şekil 4. 29: $t = 7$ saniyedeki su profilinin üç boyutlu görünümü.....	49
Şekil 4. 30: Barajın kırılma uzunluğunun ortasında bulunan A notasından geçen kesite ait su derinlik değişimi.....	49
Şekil 4. 31: Rhino 7 çizim programında katı cisim olarak çizilen dolusavağın boyut uzunlukları.....	50
Şekil 4. 32: a, b, c, d, e ve f sırasıyla $t = 0$ s, $t = 0.998$ s, $t = 3$ s, $t = 5$ s, $t = 7$ s ve $t = 25$ s anlarına ait su kütlesinin dolusavak kanalındaki ilerleyişi..	50



SEMBOL LİSTESİ

Z_b	:	Taban topoğrafyası
h	:	Herhangi bir noktadaki su derinliği
u	:	X doğrultusundaki hız bileşeni
v	:	Y doğrultusundaki hız bileşeni
Δt	:	İki hesap adımı arasındaki zaman
Δx	:	X doğrultusunda ızgara aralığının büyüklüğü
Δy	:	Y doğrultusunda ızgara aralığının büyüklüğü
g	:	Yerçekimi ivmesi
n	:	Manning pürüzlülük katsayısı
S_{fx}	:	X doğrultusundaki taban sürtünme katsayısı
S_{fy}	:	Y doğrultusundaki taban sürtünme katsayısı
η	:	Su yüzü profili
C_r	:	Courant sayısı
SAD	:	Sığ akım denklemleri
SWE	:	Sığ su denklemleri (Shallow water equations)
$\emptyset(x)$:	Akı sınırlayıcısı
TVD	:	Toplam salınım azaltmalı (Total variation diminishing) metodu
VOF	:	Akışkan hacimler yöntemi (Volume of fluid)

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez danışmanlığımı üstlenerek konu seçiminde, çalışmalarımın yürütülmesi sırasında değerli bilgilerini, tecrübelerini, gerçek bir bilim insanı davranışlarını benden esirgemeyen ve her zorluğun uzun uğraşlar sonucunda aşılabileceğini hatırlatan danışman hocam sayın Prof. Dr. Halil KARAHAN'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tezin hazırlanması sırasında oturup konuştuğum, tecrübelerini benimle paylaşan ve güzel sohbetleriyle beni motive eden yakın arkadaşım Mansurali TURANBAEV'e ve bana yardımcı dokunan tüm arkadaşlarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Hasretleri burnumda tüten başta annem ve babam olmak üzere ailemin tüm fertlerine hakkımda ettikleri dualar ve manevi destekleri için teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun artışıyla birlikte kentleşme ve sanayileşme sonucunda su kaynakları bir yandan hızla tüketilmekte ve kalitesi bozulmakta, diğer yandan ise yüzeysel akışların doğal yapısı bozulmaktadır. Yüzeysel akışlarındaki bu değişimler sel ve taşkın gibi doğa felaketlerinin yanında su kalitesinin bozulmasından dolayı sağlık yönünde de çok ciddi sorunlara yol açmaktadır. Diğer yandan taşınım yoluyla gerek nehirlerin yataklarında ya da kıyılarında, su alma yapılarında gerek nehir ve deniz sularının birleştikleri kıyı bölgelerinde biriken sediment taneleri ciddi problemler oluşturmaktadır. Bu sorunlara başarılı çözümler bulabilmek, dünyada giderek artan su kıtlığının önüne geçebilmek ve olası bir felaketin getireceği can ve mal kayıplarını en aza indirebilmek insanları modern mühendislik teknikleriyle su yönetimine ve akımların davranışlarını doğru modellemeye, başka bir deyişle modern su yapıları inşa etmeye yöneltmiştir ki bu yapıların hidrolik hesaplamalarında ya da modellemelerinde klasik yöntemler ve teknikler çok zaman alıcı, bazı durumlar için yetersiz kalmaktadır. Örneğin bir barajın dolusavağındaki akım, ya da bir nehir ağzındaki gelgit dalgasının yayılımı ve yahut bir tsunami dalgasının hareket davranışını belirlemek için 1. Boyutlu ya da 2. boyutlu şekilde ele alınıp klasik yöntemlerle çözümlerse elde edilen model ve sonuçlarının problemin gerçekliğini yansıtmadığı bilinmektedir. Buna karşı yüksek kapasitelere sahip bilgisayarlar, gelişmiş görüntüleme cihazları ve geliştirilmiş güçlü nümerik yöntemlerinin giderek yaygınlaşması, araştırmacıların doğa ortamındaki akımları sınırlı hesaplama alanı içerisinde tüm yönleriyle 3 boyutlu olarak izlemelerine ve modellemelerine olanaklar sağlamaktadır.

Bazı durumlarda hidrolik problemlerini doğadaki akımların 3 boyutlu özelliğe sahip olmalarına rağmen mühendislik uygulamalarında pratik, hızlı ve problemin önemi de göz önünde bulundurularak 1 ya da 2 boyutlu olarak ele almak daha doğru bir seçim olabilmektedir. Bunun sebebi, bir baraj gölünden su alma yapısına giriş akım ve köprü ayaklarının etrafındaki akımlar gibi sınırlı alana sahip özel yapılar hariç sığ akım teorisine göre akımların üçüncü boyutta davranışlarını belirlemek bazen imkânsız olmakla beraber, ekonomik olmamaları gibi çok gerekli de değildir. Örneğin

bir sel felaketi veya bir baraj yıkılma sonucu taşkın dalgasının yerleşim ya da tarım alanlarına ilerlemesi ve yayılması zamana karşı bir problem olduğundan problemin 3 boyutlu çözümü yerine zamanla değişken 2 boyutlu hassas çözümler yapabilmek yeterli olmaktadır.

1.1 Amaç ve Kapsam

Hidrolik problemlerinin çözümü için geçmişte kullanılan klasik yöntemlerin yetersizliği ve zorluklarının olduğu farkına varıp teknolojinin sağladığı imkanlardan faydalanarak yukarıda sözü edilen hidrolik problemleri için gerçekçi ve hızlı bir çözüm olması yönünde zamana ve konuma göre sırasıyla bir, iki ve üç boyutlu değişim gösteren sığ su denklemler sırasıyla sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemine dayalı, kütle ve enerji korunumu açısından yeterince güçlü olan Lax-Wendroff, MacCormack ve Godunov şemaları kullanılarak modellenmiş ve bu amaçla bir yazılım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Modelin doğrulanması, literatürde bulunan ve doğal arazi koşullarını içeren nümerik çözüm sonuçları ve literatürde mevcut deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılma suretiyle yapılmıştır.

Bu tez çalışması, tez içindekileri ile buldukları sayfaları gösteren içindekiler listesi, şekillerin açıklanması ve buldukları sayfaları gösteren şekiller listesi, sembol ve kısaltmaların açıklama listesi ve çalışma özetine ilave olarak sekiz bölümden oluşmakta olup birinci bölümde giriş, tezin amacı ve kapsamı, hidrolik problemlerin modellenmesi ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalardan bazılarının özeti, ikinci bölümde bu tez çalışmasında ele anılacak problemin tanımlanması, hidrolik modellemenin önemi ve hidrolik modellemeler, üçüncü bölümde model geliştirilmesi, modellemede kullanılacak temel denklemler ve mühendislik modellemelerde yaygın kullanılan nümerik yöntemlerin açıklanması, bu çalışmada kullanılacak sayısal şemaların açıklanması ve mevcut durumlarının iyileştirilmesi, dördüncü bölümde geliştirilen modelin hidrolik problemlere uygulanması, beşinci bölümde sonuç ve öneriler, altıncı bölümde yararlanılan kaynakların listesi, yedinci bölümde ekler ve sekizinci bölümde yazarın özgeçmişine yer verilmiştir.

1.2 Önceki Çalışmalar

Sığ su denklemlerinin uygulama alanı gibi, ilgili problemlere uygulanan yöntem çeşitliliği de o denli geniştir. Tüm ulusal ve uluslararası yapılmış çalışmalardan bahsetmek mümkün olmadığından burada literatür çalışması sırasında incelenen çalışmalar özetlenerek verilmiştir.

Dressler (1952) çalışmasında Darcy-Weisbach denklemini kullanarak baraj yıkılması durumunda dikdörtgen bir kanaldaki sürtünme etkisini incelemiş ve Ritter'in çözümünü genişletmiştir. Pertürbasyon prosedürünü kullanarak dalga önünün yüksekliği ve dalga hızı için bir analitik çözüm geliştirmiştir. Sürtünmenin dalga yayılma hızından ziyade akım hızı üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir.

Stoker (1957) çalışmasında baraj mansabında kuyruk suyunun olduğu yani ıslak yatak durumu için Ritter'in çözümünü genişletmiştir. basınç dağılımının hidrostatik ve düşey hız dağılımının üniform olduğu kabulünü dikkate alarak sonsuz uzunluklu ve sürtünmesiz prizmatik dikdörtgen bir kanalda baraj yıkılması şok dalgaları için üç bilinmeyen ile üç denklemden oluşan ve su yüzü profillerini belirleyen bir analitik çözüm vermiştir.

Bell ve ark. (1992) çalışmalarında kanal tabanının pürüzsüz veya çok pürüzlü ve kanal mansabının kuru veya ıslak olması gibi çeşitli başlangıç koşullarına sahip baraj yıkılması dalgasının yayılmasını kapsamlı bir dizi deneysel çalışmalar gerçekleştirerek incelemişlerdir. Tabana tel ızgaralar ve bunların üzerine prizmatik ahşap malzemeler yerleştirerek kanal pürüzlülüğünü oluşturmuşlardır. Dalga ilerleyişini ve su seviyesinin noktasal değişimlerini, mansapta beş ve mimbada altı noktada, metal çubuklar kullanarak video kamera vasıtasıyla izlemişlerdir. Kavisli kanallar kullanıldığında dalga önünün kavisli kanalların dış kısmında, iç kısımdan daha hızlı ilerlediğini ve daha yüksek su seviyesi oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Bellos ve ark. (1992) çalışmalarında sabit taban eğimli, daralan-genişleyen, 0.012 pürüzlülük katsayısına sahip bir kanalda mansap tarafının kuru ve ıslak durumunun her ikisini dikkate alarak prizmatik olmayan bir kanalda baraj yıkılması dalgasının yayılmasını incelemişlerdir. Mansabın kuru yatağa sahip olduğu durumlar için 0-0.010 arasında 6 farklı eğim durumu, ıslak yatak oluşturmak için ise kanal

sonunda bir savak oluşturarak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney seti olarak rezervuar derinliği 0.25 m, kuyruk suyu derinliği 0.101 m olacak şekilde kanalın en dar kısmına bir kapak yerleştirmişlerdir. Daha sonra kapağı kaldırdıklarında su seviyesinin zamanla değişimini belirli aralıklarla kanalın merkez eksenine konulan ve elektrik iletkenliği ile çalışan metal çubuklar yardımıyla ölçmüşlerdir. Deneyden elde edilen sonuçlarının sayısal çözümlerle uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Casulli V. ve Cattani E. (1994) θ metodu esaslarına dayalı yarı kapalı sonlu farklar şemasını kullanarak üç boyutlu sığ su akım modellemenin kararlılığı ve yarı kapalı sonlu farklar şemasının doğruluğunu-etkinliğini incelemiştir. Modelin $0.5 \leq \theta \leq 1$ aralığı için stabil olduğunu, $\theta > 1$ değerleri için kararsız olduğunu ve $\theta = 0.5$ için en üst seviye doğruluğunu belirlemiştir.

Jovanovic ve Djordjevic (1995) çalışmalarında sığ su denklemlerinin MacCormack açık şemasına dayanan sayısal çözümlerini referans alarak bir ve iki boyutlu baraj yıkılması deneyleri gerçekleştirmiş ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Mansapta 4 farklı noktada yerleştirdikleri noktasal seviye ölçerler ve bir yüksek hızlı video kamera vasıtasıyla ölçülen değerler ile kullandıkları sayısal yöntemiyle hesaplanan sonuçlar bir boyutlu akım için dalga yayılma hızlarının ve su derinliklerinin uyum içinde olduğunu, iki boyutlu çözümlerde ise kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını ifade etmişlerdir.

Zhao ve ark. (1996) çalışmalarında Riemann çözücü olarak bilinen, karakteristik teoriye dayanan ve genellikle aerodinamik problemlerinde Euler denklemlerini çözmek için kullanılan “Flux Vector Splitting (FVS)”, “Flux Difference Splitting (FDS)” ve “Osher” şemalarını baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgaları üzerine uygulamışlardır. Sonlu hacimler yöntemini esas alarak bu üç çözücüye iki boyutlu sığ su denklemlerinin çözümünde kullanmışlardır. Ayrıca bu çözücülerin farklı şemalara, şok dalgalarına farklı zaman aralıkları, farklı taban eğimleri ve ızgara çözünürlüklerinde hesaplama stabilitesinin analizini yaparak uygulanabilirliklerini araştırmışlardır. Bu üç şemanın çözüm sonuçlarının arasında çok büyük farklar olmamakla beraber en iyi sonuç Osher’e ait iken en kötü sonuç da FVS’ye ait olduğu belirtilmiştir. Hesapla süresi açısından da sırasıyla en az ve en fazla hesaplama sürelerine sahip FVS ve FDS şemalarında görülmüştür. Araştırmacılar bir boyutlu

baraj yıkılması problemi ile eğimli bir yüzeyde hidrolik sıçrama probleminin yanında iki boyutlu baraj yıkılması problemi olarak 10m başlangıç su derinliği ve 5m kuyruk su derinliği bulunan 200×200m bir hesaplama alanı üzerinde test etmişlerdir. Bu hesaplama alanının ortasına düşünülmüş bir baraj üzerinde 75 m genişliğinde bir gediğin ani açılması sonucu oluşan dalganın yayılması problemini incelediklerinde elde ettikleri sayısal ve analitik çözümleri karşılaştırmışlar ve üç Riemann çözücünün de oldukça iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Casulli ve Stelling (1998) Yarı hidrostatik üç boyutlu sığ su denklemleri için nümerik bir metot geliştirmişlerdir. Normal doğa fiziksek koşulların altında yüzeysel akımlar hidrodinamik özelliklerine sahiptir. Geliştirdikleri nümerik metodun hidrodinamik bir problem için uygulanabilir ve nümerik metodun kararlılığının dalga hızından, rüzgâr geriliminden, taban sürtünme katsayısından ve düşey yöndeki viskozite parametresinden bağımsız olması için kademeli adım şeması kullanmışlardır. Birinci adımda hidrodinamik basıncı ihmal ederek x ve y yönlerine ait momentum denklemlerinde su derinliği değişimini, süreklilik denkleminde ise hız değişimlerini θ yöntemiyle tanımlamışlar. İkinci adımda ise birinci adımda hesaplanan ara hız, elde edilen hız alanı hesaplama alanı boyunca sapmasız olacak şekilde hesaplanan hidrodinamik basınç terimlerinin eklenmesiyle düzeltme yapmışlardır.

Zoppou ve Roberts (1999) çalışmalarında bir baraj yıkılması sonucu taşkın yayılmasını belirleyebilmek amacıyla bir bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. İki boyutlu dalga denklemlerini çözmek için kesirli adım (Fractional Step) yöntemini, homojen denklemlerin çözümü için birinci derece yaklaşık Riemann çözücüsü sonlu hacimler yöntemini adi diferansiyel denklemin çözümü için Euler'in yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar mansabın ıslak ve kuru koşullarının her ikisinde modelin güçlü ve etkili sonuçlar verdiğini ifade ederek kompleks geometrilerin daha iyi tanımlanabilmesi amacıyla modelde üçgen ağ kullandıklarını belirtmişlerdir. Modelin hassaslığının literatürdeki sonuçlarla uyum halinde olduğu ifade edilerek modelin kompleks geometrilerin etrafındaki akımların modellenmesinde, dik yatak eğimleri ile sürtünme etkisi içeren durumlarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Zhou ve Stansby (1999) Çalışmalarında düz bir kanalda oluşacak hidrolik sıçrama problemin çözümü için Sonlu Hacimler esaslı üniform kaydırmalı ızgara

şemasını kullanmışlardır. Modelde standart sınır koşullarını uygulayarak modelin kabiliyetini deneysel ve literatürdeki verilerle göstermişlerdir.

Aureli ve ark. (2000) MacCormack şemasının esasını dikkate alarak geliştirdikleri sayısal modelin uygunluğunu literatürdeki deneysel sonuçlar ve kendi oluşturdukları bir boyutlu deney sonuçları ile test etmişlerdir. Kendilerinin oluşturduğu deney düzeneği; uzunluğu 7m, genişliği 1m ve yüksekliği 0.5m prizmatik bir kanaldan oluşmaktadır. Kanal tabanına naylon tırnaklar yerleştirilerek $n=0.01$ ve $n=0.025$ pürüzlülük değerleri yanına izotropik bir pürüzlülük sağlamışlardır. Araştırmacılar taban eğiminin farklı değerleri, ters taban eğimi ve farklı kuyruk suyu derinlikleri için testlerini tekrarlamışlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarını sayısal sonuçlar ile karşılaştırdıklarında üniform hız dağılımı, hidrostatik basınç dağılımı ve taban eğimi eğrilikleri deney sonuçlarında yerel olarak bozulsun bile genel olarak deneysel sonuçlarının sayısal sonuçlar ile uyum içerisinde oldukları belirtilmiştir.

Wang ve ark. (2000) çalışmalarında birinci derece Upwind şeması ile ikinci derece Lax-Wendroff şemalarını birleştirilerek sonlu farklar yöntemine dayanan toplam değişim azaltmalı (Total Variation Diminishin) şemasını geliştirmişlerdir. Bu şemanın baraj yıkılması problemlerine uygulanması için ıslak yatak durumu koşullarında bir boyutlu baraj yıkılması problemlerine uygulama amacıyla Saint-Venant denklemlerine çeşitli kısıtlayıcılar ekleyerek, iki boyutlu denklemler için ise farklı yatak koşullarında Operatör Splitting tekniğini kullanarak uygulamışlardır. Araştırmacılar çalışma sonucunda elde ettikleri optimum kısıtlayıcıların yanısıra elde edilen sonuçlarının önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyum içerisinde olduklarını ifade etmişlerdir.

Karahan (2001a) çalışmasında, sığ su denklemlerinin çözümü için Newton-Raphson algoritmasını kullanarak iyi karışımli bir gölün akıntı düzenini simüle etmek için sayısal bir model geliştirmiştir. Karahan elde ettiği sonuçları Leendertse'in şemasıyla karşılaştırmış ve geliştirdiği modelin uzun vadeli ve gerçek zamanlı uygulamalar için verimli bir şekilde kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Karahan (2001b) çalışmasında, Newton-Raphson algoritmasını ve hidrodinamik modelin sonuçlarını kullanarak dispersiyon denkleminin çözümü için ve iyi karışımli göl ve rezervuarlarda kirletici dağılımını simüle etmek için sayısal bir model geliştirmiştir. Araştırmacı geliştirdiği modelin göllerde ve rezervuarlarda

zamanla bozunan veya bozunmayan kirleticilerin uzun süreli konsanstrasyon dağılımlarını modellemek için kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Karahan (2002) çalışmasında, İzmir Körfezi'in uzun süreli akım modelini simüle etmek için üç boyutlu bir sonlu fark hidrodinamik modeli geliştirmiştir. Araştırmacı Körfez'in L tipi bir geometriye sahip olduğunu ve dış, orta ve iç körfez bölümleri olmak üzere üç bölümden oluştuğunu belirtmiştir. Araştırmacı İzmir Körfezini çeşitli meteorolojik koşullar için incelenmiş ve sonuç olarak Orta körfez girişinde Gediz Nehrinin eski yatağının yol açtığı sığlaşmanın dış körfezden orta ve iç körfeze olan su giriş ve çıkışlarını önemli oranda etkilediğini ve bu durumun su kalitesi üzerinde önemli rol oynadığını göstermiştir.

A-Medvidova (2005) çalışmasında sonlu hacim evrimi Galerkin şemasını (Finite Volume Evolation Galerkin Scheme) yardımıyla kaynak terimleri içeren ve sığ su akımlarını tanımlayan Saint-Venant denklemlerini kullanarak doğal bir nehir akışını modellemiştir. Araştırmacı modelin doğrulanmasını Teschke ve ark. (2003) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak geliştirdikleri doğal nehir simülasyonun sonuçları ile karşılaştırarak sağlamıştır.

Liang ve ark. (2006) sığ su akımları değişen taban topoğrafyası için üniform kartezyen ızgara üzerinde MacCormack şemasının TVD modifikasyonunu kullanarak sığ su akım denklemlerinin geleneksel ve deviatorik formlarının her ikisi için simüle etmişlerdir. Simülasyonun sonucunda sığ akım denklemlerinin geleneksel olmayan formunun geleneksel formundan daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Araştırmacılar bir de hızlı değişimler içeren sığ su akımların modellenmesinde geliştirdikleri TVD-MacCormack şemasını alternatif kapalı yön (ADI) metodu ile karşılaştırmışlar ve karşılaştırmanın sonucunda ADİ metodunun kritik üstü akışlar için doğru sonuçlar veremediğini ve yapay salınımların ortadan kaldırılması için ADİ metoduna yapay viskozitenin eklenmesinin gerektiğini belirterek TVD-MacCormack şemasının tüm akış rejimlerini doğru bir şekilde çözebildiğini ifade etmiştir.

Kocaman (2007) çalışmasında Baraj yıkılması problemini daha iyi anlayabilmek amacıyla dijital görüntüleme ve görüntü işleme tekniklerini kullanarak farklı teorilerin baraj yıkılması akımlarını çözebilirliğini yatay dikdörtgen bir kanalda iki farklı su seviyelerini birbirlerinden ayıran düşey bir kapağın ani olarak

kaldırılmasıyla oluşacak baraj yıkılmasını deneysel olarak incelemiştir. Denejde ölçümler bir bilgisayar, üç kamera ve görüntü yakalama kartından oluşan bir görüntüleme sistemi yardımıyla özellikle kuru ve farklı kuyruk suyu yüksekliklerine sahip ıslak durumlar için yıkılmanın başlangıç aşamalarında su yüzü profilleri belirlenip analitik sonuçların deneysel sonuçlarla olan uyumu incelenmiştir. Daha sonra mansap tarafını oluşturan kanalın enkesiti üzerine yerleştirilen farkı geometriye sahip pleksiglas engeller yardımıyla kanal enkesit şeklinin ve kanal genişliğindeki değişimlerin etkisi incelenmiştir. Araştırmacı deneysel çalışmasından elde edilen verileri öncelikle yaygın kullanılan analitik çözümlerle ve ardından sığ su denklemleri (SWE) ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri olmak üzere iki farklı teorik yaklaşıma ait 2 ve 3 boyutlu sayısal sonuçlarla karşılaştırarak bunların karmaşık topografyaya sahip bir arazi üzerinde baraj yıkılması sonucu akımların yayılma problemleri için uygulanabilirliğini ve çözebilme hassasiyetlerini incelemiştir.

Kim ve ark. (2011) Kore'nin kıyı şeridi boyunca maksimum dalga yüksekliği ve dalganın kıyıya yükselme yüksekliği tahminlerini doğrulamak amacıyla gerçekleşmiş ve beklenen tsunamiler için iki boyutlu sığ akım denklemlerine dayalı sayısal bir model oluşturmuşlardır. Araştırmacılar geliştirdikleri sayısal modelin doğrulanması için 1983 ve 1993 tsunamileri yeniden simüle etmişler ve simülayonun sonucunda sayısal modelin değerleri ile özellikle iyi belgelenmiş 1993 tsunamisi için gözlemlenen verilerle uyumlu olduğunu ifade ederek deprem kaynaklı üç varsayısal tsunami modeli ile Japonya'de meydana gelecek tsunami dalgalarının tanımlayıcı özelliklerini tahmin etmişlerdir.

Van Rijn (2011) Momentum ve enerji denklemleri kullanılarak prizmatik kanallar için analitik çözümü iyi bilinen ancak yakınsak kanallarda analitik çözümü çok bilinmeyen Gelgit dalga ayılımı için yeni bir sayısal yaklaşım geliştirmiştir. Araştırmacı nehir ağzı ve haliçler gibi güçlü yakınsak kanal plan şekline sahip bir çalışma alanında Gelgit dalgasının yayılım problemini süreklilik ve momentum denklemleri ile çözmek için taban sürtünmesini ifade eden doğrusal olmayan matematiksel denklemi lineerleştirerek süreklilik ve momentum denklemlerin analitik çözümünü sağlamıştır. Van Rijn, geliştirdiği sayısal yaklaşımı ABD'deki Delaware halici, Hollanda'daki Western Scheldt halici ve Hindistan'daki Hooghly halicine

uygulamıştır ve elde ettiği sonuçların adı geçen haliçlerin ölçülen verileriyle iyi uyum içinde olduğunu belirtmiştir.

Aybar (2012) Sualma yapısındaki serbest yüzeyli akımın sayısal modelini Flow-3D paket programıyla gerçekleştirmiştir. Araştırmacı önce bir hidroelektrik yükleme havuzunda vorteks oluşup oluşmadığını belirlemek için yükleme havuzunun hidrolik modelinde hız alanlarını ölçerek deneysel bir çalışma yapmış ve deneysel çalışmasından elde ettiği hız değerleri için potansiyel akım teorisine göre vorteks dayanımlarını hesaplamış daha sonra aynı yükleme havuzunu Flow-3D ile modelleyerek modelleme sonucunda elde ettiği hız dağılımları için vorteks dayanım hesaplarını terarlamıştır. Deneysel olarak ölçtüğü hızlar için hesaplanan vorteks dayanımları, sayısal modelin sonucunda elde ettiği hızlar için hesaplanan vorteks dayanımları ile karşılaştırmıştır.

Machaninska-Murawska ve Szydłowski (2013) Lax-Wendroff ve MacCormack şemalarının hızlı-kademeli ve kararsız açık kalan akışlarını modellenmek için uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar tek boyutlu Saint-Venant denklemlerini kullanarak biri baraj yıkılması tipi aşırı akış problemi diğeri ise basitleştirilmiş taşkın dalga yayılım problemi olmak üzere iki farklı hidrolik karakteristiklere sahip iki sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar hesaplama sonuçlarından standart Lax-Wendroff ve MacCormack şemalarının hızlı değişen akışların çözümünde şemaların ürettiği yapay salınımlardan dolayı akışın çözümünü problemin fiziksel davranışından çıkardığını ancak TVD metodu ile geliştirdikleri MacCormack şemasının ani değişimleri yakalayabildiğini ve geliştirilen MacCormack şemasının kentsel sel modellemelerde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Gümüş (2014) çalışmasında dolusavak üzerindeki akımlarını Sonlu Hacim Yöntemini esas alarak modellemiştir. Bu modelde Standart $k-\epsilon$, Renormalization group $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$, Modified $k-\epsilon$, Shear Stress Transport ve Reynold Stress Model altı farklı türbülans modeli kullanılmış ve su yüzü profilinin belirlenmesi Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF) ile hesaplanmıştır. Modellerden elde edilen değerler altı farklı debi için gerçekleştirilmiş deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Modeller ve deneylerin sonuçlarının karşılaştırılmasından Realizable $k-\epsilon$ ve Reynold Stress Model sonuçları ile deney değerleri birbirlerine çok yakın ve bir dolusavak

üzerindeki akımının hız ve su yüzü profili hesaplamalarında diğer modellere göre daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

İşçen (2015) Derinlik ortalamalı sığ su denklemlerinin çözümü amacıyla MUSCL değişken ekstrapolasyonuna dayalı yüksek mertebeden Godunov tipi Upwind şemasını kullanarak prizmatik bir kanalın yatağında dikdörtgen bir bloğun etrafındaki akımı modellemiştir. Modelin kararlılığı ve duyarlılığı farklı sınır koşulları ile farklı akım konfigürasyonları için test edilmiştir.

Kalite (2016) İki boyutlu sığ su akım denklemlerini kullanarak kararsız sığ su akımının simülasyonu için standart MacCormack şemasındaki tahmini değer hesaplama adımı (Predictor) ve tahmini değeri düzeltme adımı olan (Corrector) adımlarından sonra yeni bir toplam salınım azaltmalı (TVD) terimi ekleyerek sayısal bir yaklaşım geliştirmiştir. Araştırmacı yeni TVD-MacCormack şemasında sürtünme eğim teriminin yarı kapalı çözümüyle şemanın kuru mansap durumları için rahatlıkla uygulanabildiğini ve sayısal sonuçlarının mevcut analitik çözüm ve bilinen deneysel verilerle uyum içinde olduğunu ifade etmiştir.

Cannata ve ark. (2017) Derinlik boyunca integre edilmiş Navier-Stokes denklemlerini kullanarak düşey koordinatın zamanla değişen bir koordinat sistemi üzerinde dalga-yapı etkileşimini hidrostatik olmayan sonlu hacim şok yakalama tekniği ile üç boyutlu olarak modellemiştir. Modellemede akışkan hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemlerini ayrıklaştırmak için yeniden yapılanabilen Weno şemasını kullanmışlardır.

Choi ve Seo (2017) Çalışmasında atmosferik basınç bozulmasının nedeniyle düz bir kıyı şeridi boyunca sığ su yüzeyinde oluşturulan dalgalarının hareketini beşinci mertebeden doğru WENO şeması ve Riemann çözücüsü olan HLL ile modellemiştir. Araştırmacılar WENO5 şemasının sonuçlarını ikinci mertebeden doğru ATV-MUSCL ve analitik çözümlerin sonuçları ile karşılaştırarak modelin doğruluğunu göstermişlerdir.

İşçen ve ark. (2017) Sığ su akım denklemlerinin hidrolik problemlerinin hangi fiziki koşulları için yeterli ve geçerli olabileceklerini incelemiştir. Bunun için sığ akım denklemleri kullanılarak çözülmesi istenen sistemi basit bir sistemden karmaşık

ve 3 boyutlu akım özelliğe sahip sistemlere yenilemişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada Riemann çözücü esaslı Godunov tipi rüzgâr yönlü şemasını kullanmışlardır. Prizmatik bir kanal için Sırasıyla önce kanal tabanına kübik bir engel yerleştirerek bloğun etrafındaki akım davranışını ve bloğun üstünde oluşacak hidrolik sıçramayı kritik-üstü ve kritik-altı akımlar için çözmüşlerdir. Bu aşamada literatürdeki çalışmalara benzer bir şekilde sayısal yönteme viskoz terimleri ve türbülans gerilmeleri dahil edilmemiştir. Kritik-üstü ve kritik-altı durumundaki sayısal yöntemin sonuçları literatürdeki çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak sayısal yöntemin hidrolik sıçrama, hareketli ve hareketsiz şok dalgalarını ve boğulma gibi akım geçişlerini çok etkili bir şekilde çözebildiğini ifade edilmiştir. Daha sonra aynı kanalın yan duvarlarına şaşkırtmalı olarak mahmuzların yerleştirilmesiyle birlikte viskoz terimleri ve türbülans gerilmeleri sayısal yönteme dahil edilerek çoklu engellerin arasındaki akım incelenmiştir. Fakat burada problemin biraz daha kolay anlaşılabilir olması yönünde olsa gerek ki türbülans viskozitesi tüm alanı için sabit bir değer olarak ifade edilmiştir. Sayısal modelin doğrulanması için sayısal modelden elde edilen sonuçları aynı koşulları içeren fiziksel bir modelin sonuçları ile karşılaştırılmış ve karşılaştırmanın sonucunda sonuçların iyi uyum içinde olmakla birlikte, akım yönünde mahmuzlar geçildikçe sayısal modelin sonuçları ile deney sonuçlarının birbirlerinden farklı davranış gösterdiğini belirtmiştir. Sığ akım denklemlerinde düşey yönünde hız değişiminin ihmal edilmesi ve derinlik ortalamalı bir değer alındığında anı rejim geçişlerindeki iniş-çıkışları yakalayamadığı görülmüştür. En sonunda bir açık kanal akımındaki hız profillerini sığ akım denklemleri ile doğru hesaplayabilmek amacıyla türbülans için bir derinlik integral karışım uzunluğu belirlenmiş ve kanalda üniform akımın olması varsayılarak çözüm yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan türbülansın neden olduğu ikincil akımlar ve farklı eğimler için hesaplanan derinlik ortalamalı hız profilleri çok iyi temsil edildiği ifade edilmiştir.

Velioğlu (2017) Tsunami hareketi ve tsunami su baskınının benzetimini yapabilen, derinlik ortalamalı doğrusal olmayan sığ su denklemlerini kullanan NAMİ DANCE sayısal kodu ve üç boyutlu Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri ile çözüm yapan FLOW-3D paket programı kullanarak performans ve doğrulama karşılaştırması yapmıştır.

Lu ve ark. (2020) Üç boyutlu sığ akım denklemlerini çözmek için türbülans kapanmalı ve şok yakalama kabiliyetine sahip sayısal bir model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar σ koordinatlarında Godunov tipi sonlu hacim yöntemini kullanarak sayısal akıyı hesaplamak için yaklaşık bir Riemann çözücü kullanmışlardır. Araştırmacılar direkt üç boyutlu sığ su denklemlerini çözmek yerine yerel iki boyutluya geçiş yaklaşımını kullanarak ıslak-kuru kuyruk suyunu rahatça çözdüklerini belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar kullandıkları yerel iki boyutluya geçiş yaklaşımı ile daha önce yapılmış çalışmalara göre hesaplama süresini $1/2 - 2/3$ oranında azalttıklarını ifade etmişlerdir.

Şimşek ve ark. (2021) Akım hareketini tanımlayan Navier Stokes denklemlerini kullanarak deneysel olarak çalışılmış şaşirtmalı mahmuzlar arasındaki akımın farklı akım durumları için sonlu hacimler yöntemi ile üç boyutlu sayısal modellemesini yapmışlardır. Araştırmacılar sayısal modellemede türbülans viskozitesinin hesabı için ayrılmış girdap simülasyonunu ve su-hava arakesitini belirlemek için ise akışkan hacimleri yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar sayısal modelleme sonuçlarının deneysel sonuçları ile oldukça uyum içinde olduğunu ve geliştirdikleri sayısal modelin şaşirtmalı mahmuzların arasındaki akımların çözümünde iyi bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir.

Yang ve ark. (2021) Bilgisayar ağı teknolojisinin sağladığı imkanları kullanarak Poyang gölünü besleyen Le'an nehrinin yukarı kesimlerinde bulunan Wuyuan ilçesi için taşkın önleme ve risk analizinin üç boyutlu simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar WebGIS teknolojisini, uzamsal veri tabanı teknolojisini, yarı hidrolojik modelleme yapan TOPMODEL ve yerel taşkın analizi yapan IFMS paket programlarını kombine bir şekilde kullanarak gerçek zamanlı etkileşimli görüntüleme işlevine sahip üç boyutlu sanal gerçeklik platformu ve üç boyutlu veri sorgusu, su ve yağmur izleme, sel basma analizinin dinamik simülasyonu gerçekleştirmişler ve bu teknolojilerin nehir havzalarında su güvenliği, taşkın kontrolü ve afetlerin azaltılması konusunda yardımcı bir karar verme platformu olabileceğini belirtmişlerdir.

Aleksyuk ve ark. (2022) Godunov şemasını kullanarak süreksiz bir tabana sahip sığ su akımları için kesin bir Riemann çözücü algoritması geliştirmişlerdir. Araştırmacılar algoritmanın keyfi başlangıç değerleri için Riemann problemlerini

özebildiğini ve benzersizliğini ifade ederek algoritmanın yağış-akış problemlerine uygulandığında gözlem istasyonlarının gözlemlenen verilerin aynısını elde ettiklerini belirtmişlerdir.



2. PROBLEMİN TANIMI

2.1 Giriş

Son yıllarda ve günümüzde artmakta olan kentleşme ve sanayileşme sonucunda kalite bozulması ve tüketilme tehlikesi altında olan su kaynaklarımızı koruma ve yüzeysel akışların doğal yapısının bozulması sonucu sedimentlerin birikimi ile nehir yataklarının yükselmesi ve su yapıların faydalı ömrünün azalması, taşkınların meydana gelme sıklığı ve büyüklüğü gibi yaşanacak felaketleri önceden belirlemek ve tahmin etmek için ilgili problemlerinin hidrolik davranışını iyi tanımlayabilen matematik modellerin oluşturulmasına ve sayısal çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada hidrolik problemlerinin çoğu için uygun ve yaygın kullanılan sığ akım denklemleri (SAD) olarak bilinen derinlik ortalamalı Navier-Stokes denklemleri kullanılacaktır.

Derinlik ortalamalı veya 2-boyutlu derinlik integralli sığ akım denklemleri (SAD) taşkın dalgalarının modellemesinin yanı sıra nehirler, göller, atmosfer katmanlarında tabaka akımlarının hesabında, okyanus ve kıyı bölgelerinde akıntı çevrinti ve dalga ilerlemesinin hesabı gibi çok geniş kullanım alanına sahiptir. Hesaplama alanlarının yatay boyutunun düşey boyutundan 3-5 ve daha fazla olması durumlarda SAD denklemlerinin kullanılması beraberinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar veya matematik açısından sadeleştirilmeler su derinliğinin süreklilik denkleminde hesaplanabilmesi ve derinlik integrali sırasında düşey yöndeki ivmenin ihmal edilmesinin sağladığı hidrostatik basınç dağılımı kabulüyle basınç için bir denklem çözümününün gerekmemesidir (İşcen ve ark. 2017). Sığ akım denklemlerinin bir diğer avantajı akımdaki süreksizliklerin modelde tanınmasına izin vermesidir ki bu süreksizlikler Godunov veya diğer sonlu hacimler yöntemleri ile yakalanarak modelin stabil bir şekilde çalışması sağlanır.

2.2 Hidrolik Modelleme

Modelleme genel anlamda fiziksel bir problemin ölçekli olarak benzeşimini yapma işlemine denir. Modeller deneysel ve matematiksel olmak üzere ikiye ayrılır ki her birinin ayrı avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Deneysel modellerde fiziki problemi oluşturan çevre etkenleri ayrıntılı olarak modele kolayca dahil edilebilirken matematiksel modellerde ise fiziki koşulları ince ayrıntılarına kadar modele dahil etmek kolay bir iş değildir. Matematiksel modellerde bazı varsayımlar ve kabullere başvurmak zorunlu olmaktadır. Deneysel modellerin diğer bir dezavantajı; her modelin probleme özel olmasından her bir farklı problem için ayrı bir deney düzeneği gerektirmekte ki bunun maliyeti ve zaman kayıpları katlanamaz bir hal almaktadır. Buna karşılık bir problem için bilgisayar ortamında geliştirilen matematik veya nümerik modelleme ise farklı koşul ve boyutlara sahip problemler için sadece verilerin değiştirilmesiyle uygulanabilmektedir. Günümüzde güçlü nümerik şemaların yanında teknolojinin yardımıyla mühendislik problemlerini hem pratik-hızlı hem daha ekonomik olarak fiziki durumlarına uygun modellemek mümkündür.

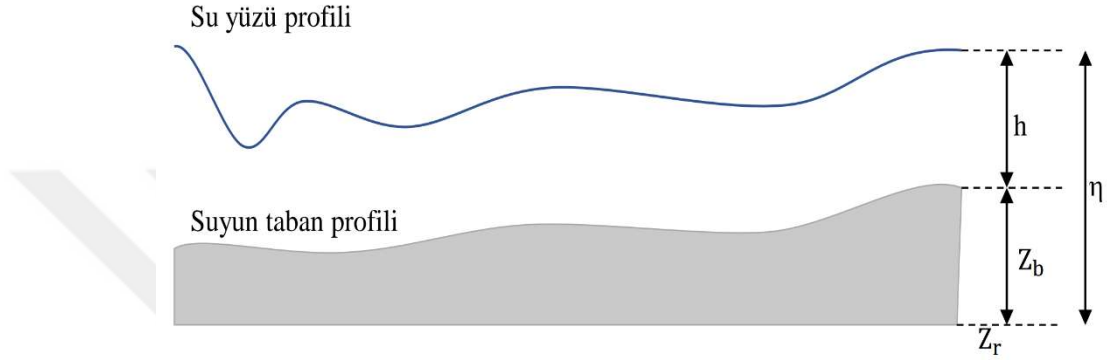
Hidrolik problemlerini doğru modellemenin mühendislik problemlerinin arasında büyük bir öneme sahip olmasının nedeni hidrolik yapıları inşa etmenin maliyetli olması gibi bir hidrolik probleminden tarım dahil insan ve diğer canlıların beraber zarar görmesidir. Örnek olarak su kalitesinin bozulması probleminden o bölgede bulunan canlılar arasından su kirliliğinden beslenen bazı mikro organizmalar hariç diğer tüm canlılar zarar görür.

Hidrolik modelleme sonucu ilerleyen zamanlar için tahmin edilen veya hesaplanan parametreler belli aralıklarla o parametrelerin mevcut fiziki ortamdaki değerleri ile modelleme sonucundan elde edilen değerler kontrol amaçlı karşılaştırılmalıdır. Çünkü hidrolik problemlerin fiziki koşulları giderek artan insan nüfusu ile paralel artan kentleşme-sanayileşmenin yanında iklim değişiklikleri ile değişmektedir.

3. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

3.1 Giriş

Bu bölümde sığ akım denklemleri olarak bilinen derinlik ortalamalı Navier-Stokes denklemleri 1B, 2B ve 3B olarak verilmiştir.



Şekil 3. 1: Değişen taban topografyasına sahip bir akımın şematik gösterimi

3.2 Temel denklemler

3.2.1 Bir boyutlu sığ akım denklemleri

Bir boyutlu derinlik ortalamalı veya Sığ Akım Denklemleri (Shallow Water Equations) aşağıda verildiği gibi bir süreklilik denklemi ile x doğrultusu için bir momentum denkleminde, toplamda iki denklemden oluşmaktadır.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial\left(u^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} = -gh\left(\frac{\partial b}{\partial x} + s_{fx}\right) \quad (3.2)$$

Burada h su derinliğini, u x doğrultusundaki hız bileşenini, b taban yüksekliğini, g yerçekimi katsayısını ve s_{fx} x doğrultusundaki sürtünme katsayısını temsil etmektedirler.

x doğrultusundaki taban sürtünme katsayısı;

$$S_{fx} = \frac{n^2 u |u|}{h^3} \quad (3.4)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada n Manning pürüzlülük katsayısını temsil etmektedir.

Yukarıda belirtilen (3.1) ve (3.2) denklemler vektör olarak;

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (3.5)$$

$$E = \begin{bmatrix} h \\ uh \end{bmatrix}, F(E) = \begin{bmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \end{bmatrix} \text{ ve } S(E) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \left(\frac{\partial b}{\partial x} + s_{fx} \right) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Şeklinde olup değişen taban topoğrafyası için denklem (3.5);

$$E = \begin{bmatrix} \eta \\ uh \end{bmatrix}, F(E) = \begin{bmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} g(\eta^2 - 2\eta z_b) \end{bmatrix} \text{ ve } S(E) = \begin{bmatrix} 0 \\ -g\eta \left(\frac{\partial b}{\partial x} - \frac{gn^2 u |u|}{h^{1/3}} \right) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Şeklinde yazılabilmektedir.

Burada η su yüzeyini ve z_b taban topoğrafyasını göstermektedir.

3.2.2 İki boyutlu sığ akım denklemleri

İki boyutlu derinlik ortalama veya Sığ Akım Denklemleri (Shallow Water Equations) aşağıda verildiği gibi bir süreklilik denklemi ile x-y yönlerindeki birer momentum denklemlerinden, toplamda üç denklemden oluşmaktadır.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial\left(u^2 h + \frac{1}{2} gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = -gh \left(\frac{\partial b}{\partial x} + s_{fx} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial\left(v^2 h + \frac{1}{2} gh^2\right)}{\partial y} = -gh \left(\frac{\partial b}{\partial y} + s_{fy} \right) \quad (3.10)$$

Burada h su derinliğini, u ve v sırasıyla x-y yönlerindeki hız bileşenlerini, b taban yüksekliğini, g yerçekimi katsayısını ve s_{fx} ve s_{fy} x-y yönlerindeki sürtünme katsayılarını temsil etmektedirler (Cun-hong ve ark. 2006).

X ve Y yönlerindeki taban sürtünme katsayıları;

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (3.11)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada n Manning pürüzlülük katsayısını temsil etmektedir.

Yukarıda belirtilen (3.8), (3.9) ve (3.10) denklemler bir boyutlu akım denklemlerine benzer bir şekilde vektör olarak;

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S \quad (3.12)$$

$$E = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \quad F(E) = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{bmatrix},$$

$$G(E) = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} \text{ ve } S(E) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \left(\frac{\partial b}{\partial x} + s_{fx} \right) \\ -gh \left(\frac{\partial b}{\partial y} + s_{fy} \right) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Şeklinde ve değişen taban topoğrafyası için denklem (3.12);

$$E = \begin{bmatrix} \eta \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \quad F(E) = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\eta z_b) \\ uvh \end{bmatrix},$$

$$G(E) = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2\eta z_b) \end{bmatrix} \text{ ve } S(E) = \begin{bmatrix} 0 \\ -g\eta \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \\ -g\eta \frac{\partial b}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Şeklinde yazılabilmektedir.

Burada η su yüzeyini ve z_b taban topoğrafyasını göstermektedir.

3.2.3 Üç boyutlu sığ akım denklemleri

Su yoğunluğunun uzayda ve zamanda sabit olduğu, ortalamalı türbülansın olduğu ve basıncın hidrostatik olduğu basitleştirici varsayımlar altında üç boyutlu sığ akım denklemleri Navier Stokes denklemlerinden türetilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + S_{v,u} + f_c v \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + S_{v,v} - f_c u \quad (3.17)$$

Burada u , v ve w sırasıyla x , y ve z doğrultusundaki hız bileşenleri, η su yüzü profili, $S_{v,u}$ ve $S_{v,v}$ sırasıyla x ve y doğrultusundaki viskoz gerilmenin bileşenleri, $f_c = 2\Omega \sin \beta$ Coriolis katsayısı, $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ dünyanın dönme açısal hızı ve β enlemleri ifade etmektedir (Lu ve ark. 2020).

3.3 Çözüm Yöntemleri

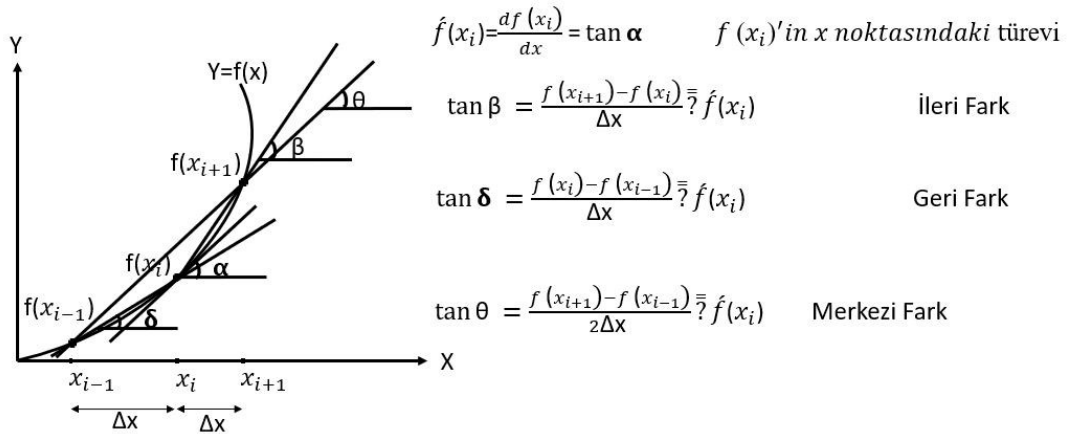
Geçmişte SAD'in çözümünde sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri yaygın olarak kullanılmıştır. Sonlu farklar yönteminin kütle korunumunu sağlamada yaşanan sorunlara ek olarak denklemlerdeki türevlerin sonlu fark yaklaşımında süreksizlik noktalarının sonsuz yakınlığında tanımsız ve yeterli olmaması durumu yaşanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise kütle korunumunu hesap alanın bütününde sağlarken noktasal olarak sağlayamamakta ve süreksizlik noktalarında salınımlar gerçekleşmektedir. Sonlu farklar ile sonlu elemanlar yöntemlerinin bu yetersizliklerinden yakın zamanlarda sonlu hacimler yöntemi ile çözümler yapmaya ilgi ve gereksinimler artmıştır. Sonlu hacimler yönteminin tercih edilmesinin başlıca sebebi; süreksizlik noktalarının kontrol hacimleri olarak ele alınmasına imkân sağlamasıdır. Böylece kontrol hacmin ara-yüzlerindeki akıların hesaplanmasının ardından hücre içinde değişkenlerin değerleri, ara-yüzlerde hesaplanan akıların ortalaması şeklinde ifade edilerek süreksiz noktalar da dikkate alınmış olur. Bu çalışmada Lax-Wendroff şeması, MacCormack şeması sonlu farklar ve sonlu hacimler esaslarına bağlı Godunov şeması kullanılacaktır.

3.4 Sonlu Farklar Yöntemi

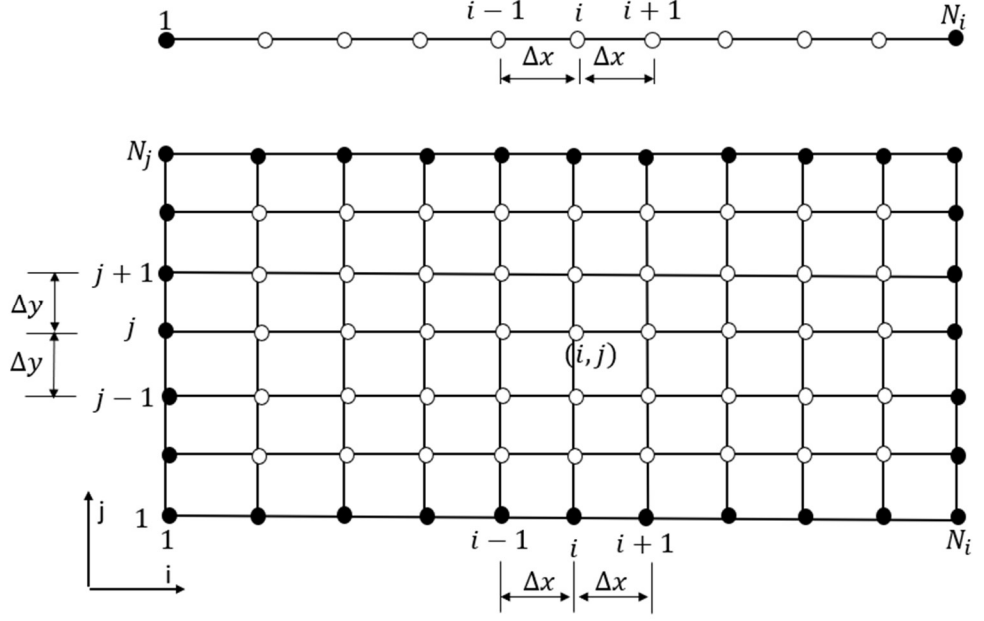
Sonlu farklar yöntemi, çözümleri nümerik olarak elde edilemeyen kapalı formdaki diferansiyel denklemlerinin çözümü için kullanılan yaklaşık bir yöntemdir (Ergün ve Kumbasar. 2003). Başka bir deyişle problemin diferansiyel denklemini,

fonksiyonun ayrık noktadaki değerleri ile yaklaşık olarak ifade etmektir. Bunun için kapalı fonksiyonun ayrık noktadaki değerlerini hesaplayabilmek için o noktalarda fonksiyonun türevleri bilinmeyen fonksiyonun değerleri cinsinden yazılır ki buna ayrıklaştırma ya da lineerleştirme işlemi denilir. Sonlu farklar yönteminde ayrıklaştırma işlemi temel olarak Taylor serisi açılımı ve kontrol hacim yaklaşımı olmak üzere iki Şekilde yapılır (Karakoca. 2017).

Bu işlemlerle kapalı veya lineer olmayan diferansiyel denklem bir lineer diferansiyel denklem sistemi ile ifade etmiş olur. Bu lineer denklem sisteminin czm kapalı diferansiyel denklemin ayrık noktadaki yaklaşık değerlerini verir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kapalı fonksiyonun sonlu farklar yöntemiyle czm, ileri sonlu farklar, merkezi sonlu farklar ve geri sonlu farklar olarak üç Şekilde gerçekleştirilebilir. Literatür verilerine göre ileri, geri ve merkezi sonlu farklar arasından merkezi sonlu farklar fonksiyonun gerçek değerine daha yakın bir değer vermektedir. Şekil 3.3’te dolu gösterilmiş düğümler sınır noktalarını, boş gösterilmiş düğümler ise hesap noktalarını belirtmek üzere sonlu farklar yönteminin 1 ve 2 boyutlu ayrıklaştırılmış noktaları Şematik olarak gösterilmiştir.



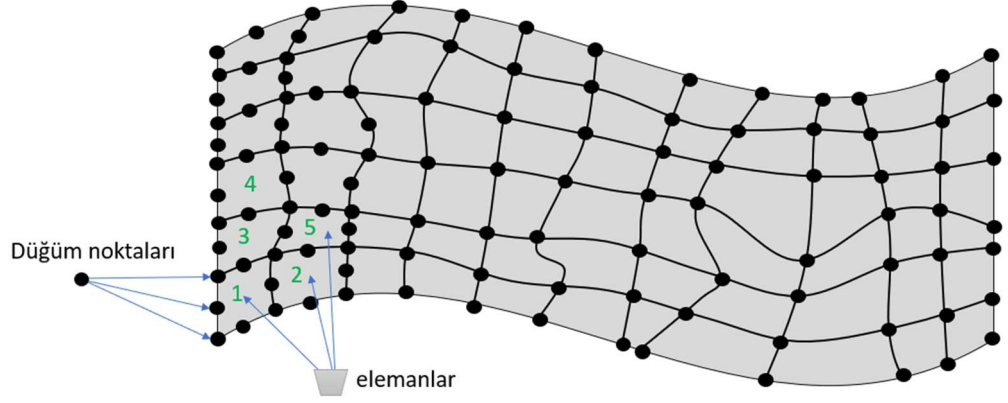
Şekil 3. 2: Sonlu farkların Şematik gösterimi



Şekil 3. 3: Sonlu farklar yönteminin kartezyen koordinat sisteminde 1 ve 2 boyutlu şematik gösterimi

3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemlerle temsil edilen problemler için uygulanmaktadır. Geniş bir hesaplama alanının bağlantılı olarak (düğüm noktaları ile) daha küçük sonlu alanlara “sonlu eleman (finite element)” ayrıştırılmasıyla ifade edilir. Böylece düzensiz geometrik şekiller, kompozit bölgeler ve farklı davranışları içeren bir hesaplama alanı homojen ve davranışı bilinen lineer özellikli alt hesaplama alanlarına dönüşür. Araştırılması istenen fiziksel problemin çözümü, alt bölgeleri temsil eden lineer denklem sisteminin çözümüyle elde edilir.

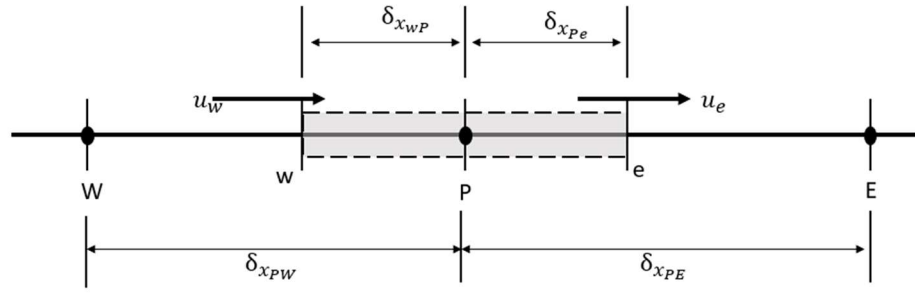


Şekil 3. 4: Sonlu elemanlar yönteminin şematik gösterimi

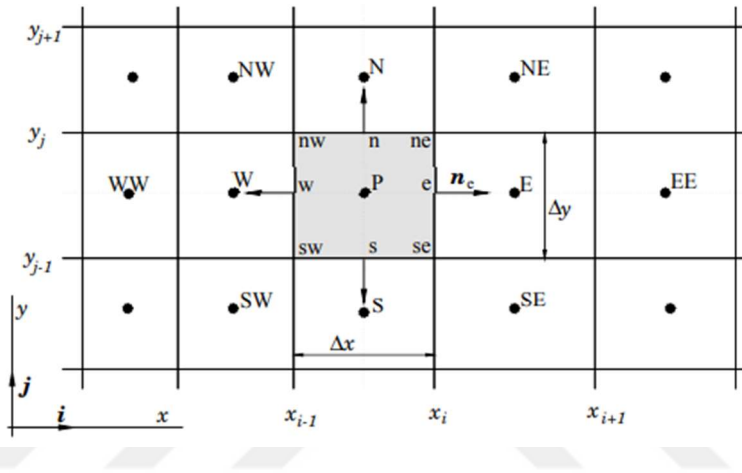
Yöntemin mantığı ve isminden de anlaşılacağı gibi bu yöntemle bir büyüklük alanının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Fiziksel problemlerden örneklersek bir akışkan probleminin analizinde bu değer akım fonksiyonu alanı, gerilme analizinde deplasman alanı veya gerilme alanı, ısı analizinde sıcaklık alanıdır. Sonlu elemanlar yönteminde bir elemanın içerisinde bir büyüklüğün değeri o elemanın düğüm noktalarındaki değerlere interpolasyon metotlarının uygulanması ile hesaplanır. Yani sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen değerler ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarındaki değerlerdir.

3.6 Sonlu Hacimler Yöntemi

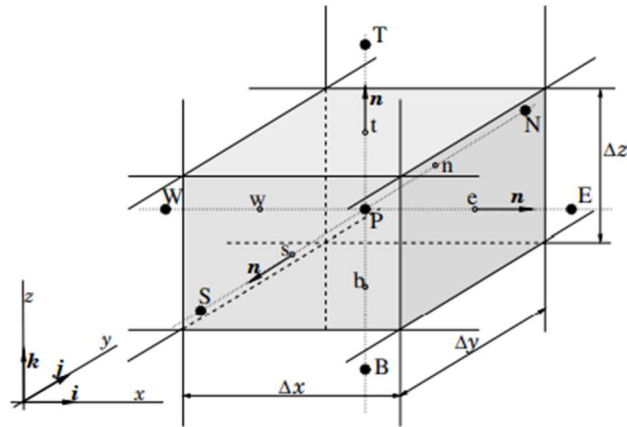
Sonlu hacimler yöntemi sonlu elemanlar yönteminin gelişmiş hali olup kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen düzenli ya da düzensiz geometrilere sahip problemler için oldukça hassas çözümler veren sayısal bir yaklaşımdır. Sonlu hacimler yönteminde ilgili problemin geometrisi kontrol hacmi denilen küçük sonlu hacimlere bölünerek kısmi diferansiyel denklemler bu küçük hacimleri karakterize edecek şekilde integre edilir. Bu hacim integrasyonundaki diverjans içeren terimler diverjans teoremi ile yüzey integrallerine dönüştürülerek her bir sonlu hacmin yüzeylerindeki akılar olarak değerlendirilir (Uçar, 2005). Bu yöntemde bir kontrol hacminden çıkan akı miktarı ona komşu olan kontrol hacminin girdisi olarak ele alınacağından yöntem korunumludur. Global problemin çözümü, her bir kontrol hacim için ayrı ayrı yapılan çözümlerin birleştirilmesi ile elde edilir.



Şekil 3. 5: Bir boyutlu kontrol hacminin şematik gösterimi



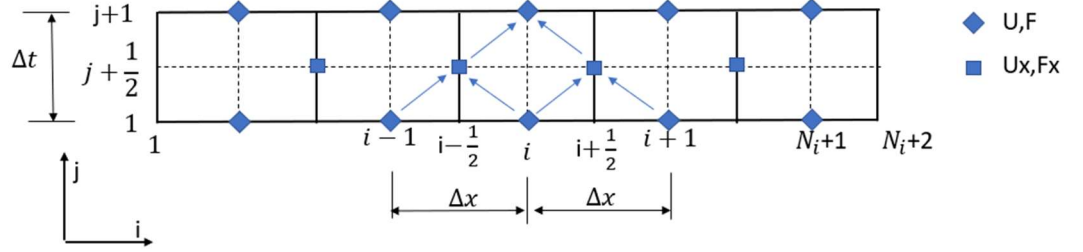
Şekil 3. 6: Sonlu hacimler yönteminde kontrol hacminin 2- boyutlu ızgara üzerinde şematik gösterimi



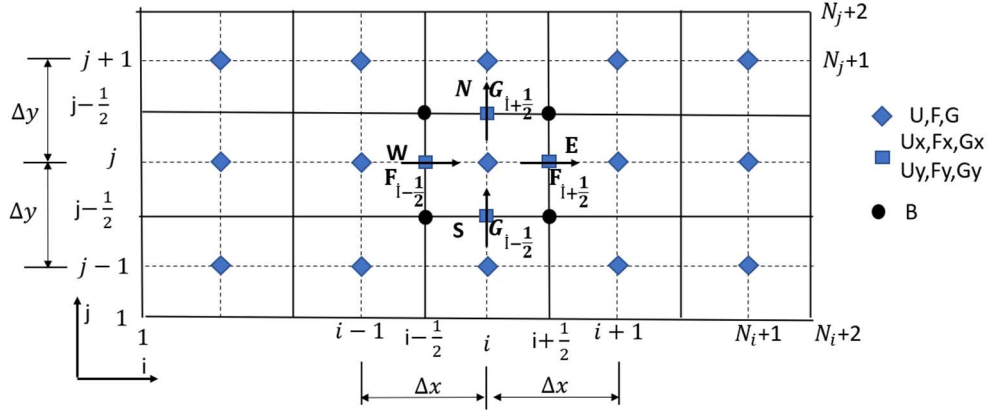
Şekil 3. 7: Sonlu hacimler yönteminde kontrol hacminin 3- boyutlu şematik gösterimi

3.7 Lax-Wendroff Şeması

Lax-Wendroff şeması, Taylor seri açılımı esasına dayalı özellikle hiperbolik kısmı diferansiyel denklemlerinin çözümü için kullanılan eksplicit sayısal bir yöntemdir. Euler yöntemler bir fonksiyonun şimdiki değerini bir önceki zaman dilimindeki değerinden itibaren tam bir zaman diliminde elde ederken Lax-Wendroff şeması ise ilgili fonksiyonun şimdiki değerini bir önceki zaman diliminden itibaren önce yarım zaman diliminde hesaplar daha sonra bu değerleri kullanarak fonksiyonun şimdiki değerini elde eder. Böylece yöntem zaman boyutunda ikinci mertebeden doğru olur. Aynı adımlar konum için de uygulandığında yöntem hem zamanda hem konumda ikinci mertebeden doğru olur.



Şekil 3. 8: Lax-Wendroff şemasının bir boyutlu şematik gösterimi



Şekil 3. 9: Lax-Wendroff şemasının iki boyutlu şematik gösterimi

Lax-Wendroff şemasının nasıl uygulandığını daha iyi anlayabilmek için;

$$\text{Eğer } \frac{\partial f(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial g(f(x,t))}{\partial x} \quad (3.18)$$

şeklinde bir fonksiyonumuz varsa bu fonksiyonun şimdiki değerine Lax-Wendroff şeması yardımıyla şöyle ulaşılır.

Birinci adım: fonksiyonun yarım zaman dilimi ve yarım mesafe adımı için değeri;

$$\frac{f_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{f_i^n + f_{i+1}^n}{2}}{\frac{\Delta t}{2}} = \frac{g_{i+1}^n - g_i^n}{\Delta x}, \quad \frac{f_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{f_{i-1}^n + f_i^n}{2}}{\frac{\Delta t}{2}} = \frac{g_i^n - g_{i-1}^n}{\Delta x} \quad (3.19)$$

İkinci adım:

$$\frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\Delta t} = \frac{g_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - g_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \quad (3.20)$$

Lax-Wendroff şemasını iki boyutlu sığ su akım denklemlerine uygulayabilmek için denklem (3.12)'de x doğrultusunda E yerine f ve F(E) yerine g(f)'i ve y doğrultusunda da ilgili yer değiştirmeleri uyguladığımızda denklem (3.19) tekrardan şu şekilde yazılabilir;

Birinci adım:

$$E_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(E_{i+1,j}^n + E_{i,j}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(F_{i+1,j}^n - F_{i,j}^n) + \frac{1}{4}\Delta t(S_{i+1,j}^n + S_{i,j}^n) \quad (3.21)$$

$$E_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(E_{i,j}^n + E_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(F_{i,j}^n - F_{i-1,j}^n) + \frac{1}{4}\Delta t(S_{i,j}^n + S_{i-1,j}^n) \quad (3.22)$$

$$E_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(E_{i,j+1}^n + E_{i,j}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta y}(G_{i,j+1}^n - G_{i,j}^n) + \frac{1}{4}\Delta t(S_{i,j+1}^n + S_{i,j}^n) \quad (3.23)$$

$$E_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(E_{i,j}^n + E_{i,j-1}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta y}(G_{i,j}^n - G_{i,j-1}^n) + \frac{1}{4}\Delta t(S_{i,j}^n + S_{i,j-1}^n) \quad (3.24)$$

$$F_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = F\left(E_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right), \quad F_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = F\left(E_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (3.25)$$

$$F_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = F\left(E_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right), \quad F_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = F\left(E_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (3.26)$$

$$G_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = G\left(Ex_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right), \quad G_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = G\left(Ex_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (3.27)$$

$$G_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = G\left(Ey_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right), \quad G_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = G\left(Ey_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (3.28)$$

$$S_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = S\left(Ex_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right), \quad S_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = S\left(Ex_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (3.29)$$

$$S_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = S\left(Ey_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right), \quad S_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = S\left(Ey_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (3.30)$$

İkinci adım:

$$E_{i,j}^{n+1} = E_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(G_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - G_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2} \Delta t \left(S_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2} \Delta t \left(S_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (3.31)$$

3.8 MacCormack Şeması

MacCormack şeması iki adımlı sonlu farklar yöntemi olup Lax-Wendroff şemasının bir versiyonu olarak düşünülebilir. MacCormack şemasının Lax-Wendroff şeması ile farkı ise Lax-Wendroff şeması ilgili fonksiyonun şimdiki değerini bir önceki zaman diliminden itibaren önce yarım zaman diliminde hesaplar daha sonra bu değerleri kullanarak fonksiyonun şimdiki değerini elde ederken MacCormack şeması ilgili fonksiyonun şimdiki değerini bir önceki zaman diliminden itibaren tek zaman diliminde önce tahmini değer olarak ardından bu tahmini değeri doğrularak elde eder. Başka bir deyişle bu iki adım ayrık hesaplama noktalarındaki değişkenlerin değerleri için tahmini değer hesaplama adımı (Predictor) ve aynı noktalarda tahmin edilen değerleri doğrulama veya düzeltme adımı (Corrector) olarak ifade edilir.

Denklem (3.12)'in Maccormack şemasında çözüm aşamaları şöyle verilmektedir;

Predictor adımı:

$$E_{i,j}^p = E_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i,j}^n - F_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j}^n - G_{i,j-1}^n) + \Delta t S_{i,j}^n \quad (3.32)$$

$$F_{i,j}^p = F(E_{i,j}^p), G_{i,j}^p = G(E_{i,j}^p) \text{ ve } S_{i,j}^p = S(E_{i,j}^p) \quad (3.33)$$

Corrector adımı:

$$E_{i,j}^c = E_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i,j}^p - F_{i-1,j}^p) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j}^p - G_{i,j-1}^p) + \Delta t S_{i,j}^p \quad (3.34)$$

Ve

$$E_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} (E_{i,j}^p + E_{i,j}^c) \quad (3.35)$$

Burada p ve c sırasıyla tahmini değer hesaplama aşaması (Predictor) ve hesaplanan tahmini değerleri doğrulama aşaması (Corrector) adımlarını göstermektedir.

3.9 Godunov Şeması

Godunov şeması, yerel olarak kesin veya yaklaşık çözümü mevcut başlangıç değer ya da genel Riemann problemin (süreksizliğin her iki tarafında sabit olan özel başlangıç koşullarına sahip bir kısmı diferansiyel denklemler sistemi) çözümünde salınımlar içermeyerek etkili sonuçlar veren ve sonlu hacimler esasına dayalı korunumlu bir sayısal yöntemdir (E. F. Toro, 2001).

Sonlu hacimler yönteminde belirtildiği gibi fiziksel problemin fonksiyonun sürekli çözümü zor ya da mümkün olmadığında hesaplama alanı küçük sonlu kontrol hacimlere bölünür. Fiziksel problemi temsil eden fonksiyonun yaklaşık çözümü bu kontrol hacimleri temsil eden alt fonksiyonlarının çözümünün birleşmesi ile elde edilir. Kontrol hacimlerin çözümlerinin birleştirilmesi esnasında farklı değerlere sahip iki komşu kontrol hacimlerin ara yüzlerinde süreksizlik oluşmakta ve bu süreksizlikten dolayı iki komşu kontrol hacimler arasında akı geçişinin doğru hesaplanması zorlaşmaktadır. Godunov şeması bu kontrol hacimlerin ara yüzelerindeki akıların

hesaplanmasında süreksizlikleri gidermek veya yumuşatmak için 1959 yılında Sergei Konstantinovich Godunov tarafından geliştirilmiştir.

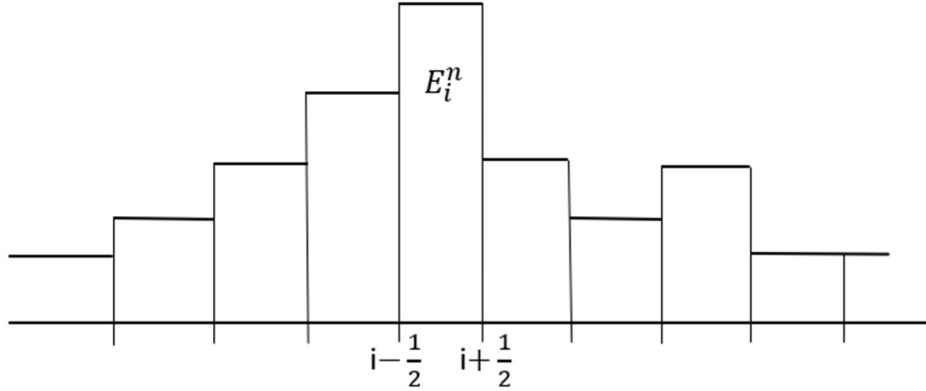
Godunov şemasının orijinali birinci mertebeden doğru bir şemadır. Daha sonra birçok araştırmacı örneğin; Roe (Roe, 1981), Lax (Lax, 1972), Van Leer (V. Leer, 1977), Warming ve Beam (Warming ve Beam, 1975), Harten, Osher, Engquist ve Chakravarthy (Harten ve ark. 1986) vs. tarafından yapılan çalışmalarla ikinci mertebeden doğru bir şemaya dönüştürülmüştür.

Tek boyutlu sığ akım denkleminde yani denklem (3.5)'ten kaynak teriminin olmadığı durumu ele alırsak

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (3.36)$$

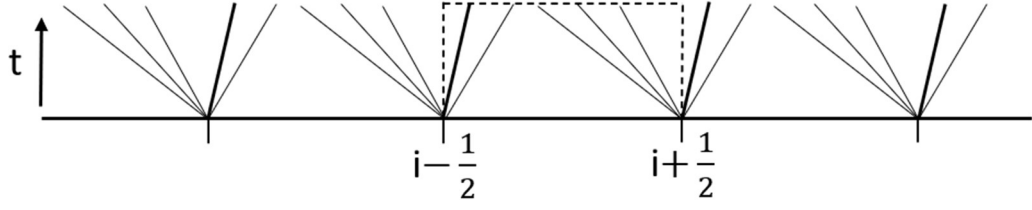
Godunov yöntemi, $E_{i,j}^n$ çözümünün sayısal değerlerini $E(x, y, t)$ analitik çözümün n zaman adımındaki hücre ortalamaları olarak kabul eder,

$$E_i^n = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} E(x, n\Delta t) dx \quad (3.37)$$



Şekil 3. 10: Godunov metodunun n 'inci zaman adımındaki değerleri dikkate alma prensibi

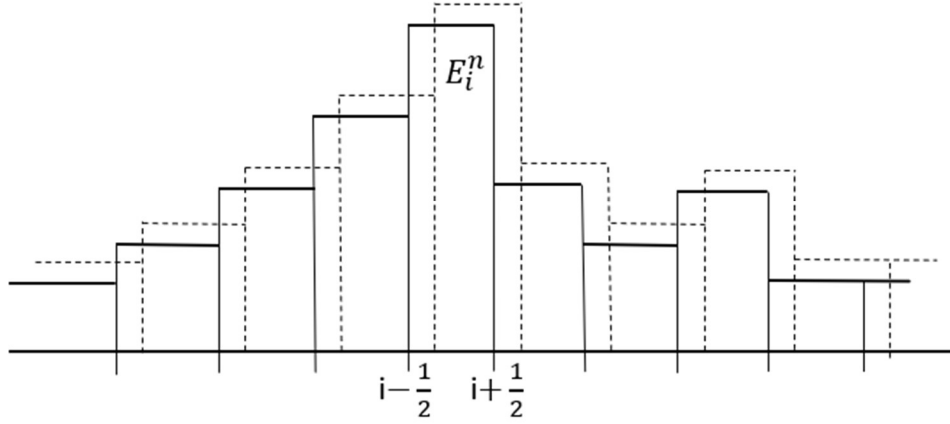
Ardından her hücrenin sınırlarında oluşan Riemann problemi çözülür (şekil 5.11) ve güncellenmiş sayısal değerleri elde etmek için tüm Riemann çözümlerinin birleşiminin her bir hücre üzerinde ortalaması alınır.



Şekil 3. 11: Riemann probleminin çözümü ve ortalamaları

Godunov şeması denklem (3.36)'ün $[x_{i-\frac{1}{2}}, x_{i+\frac{1}{2}}] \times [n\Delta t, (n+1)\Delta t]$ hücresi üzerinde integre edilerek tekrar Euler formuna dönüştürülebilir.

$$\int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} E_t(x, t) dx dt = - \int_{t^n}^{t^{n+1}} \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} F_t(E(x, t)) dx dt \quad (3.38)$$



Şekil 3. 12: Lagrange aşaması artı doğrusal adveksiyon için yeniden eşleme

O zaman;

$$\int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} E(x, t^{n+1}) - E(x, t^n) dx = - \int_{t^n}^{t^{n+1}} F(E(x_{i+\frac{1}{2}}, t)) - F(E(x_{i-\frac{1}{2}}, t)) dt \quad (3.39)$$

Veya

$$\Delta x (E_i^{n+1} - E_i^n) = -\Delta t \left(\frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^{n+1}} F(E(x_{i+\frac{1}{2}}, t)) dt - \frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^{n+1}} F(E(x_{i-\frac{1}{2}}, t)) dt \right) \quad (3.40)$$

Eğer bir akıyı tanımlayacak olursak;

$$F_{i-\frac{1}{2}}^n = F(E_{i-1}^n - E_i^n) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^{n+1}} F(E(x_{i-\frac{1}{2}}, t)) dt \quad (3.41)$$

Veya

$$F_{i-\frac{1}{2}}^n = F \left(E_{i-\frac{1}{2}}^n \right) \quad (3.42)$$

Şeklinde tanımlanmakta ve Godunov şeması şu şekilde ifade edilir;

$$E_i^{n+1} = E_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(F_{i+\frac{1}{2}}^n - F_{i-\frac{1}{2}}^n \right) \quad (3.43)$$

3.1 Çözüm Yöntemlerinin Geliştirilmesi

3.1.1 Giriş

Yüksek merteben doğru şemalar çözüm esnasında özellikle Peklet sayısı yüksek olduğunda ya da süreksizliklerin olduğu durumlarda nümerik difüzyonlardan dolayı yapay salınımlar, fiziksel olarak gerçekçi olmayan negatif değerler ve kararsızlıklar oluştururlar. Bu istenmeyen olumsuzluklar toplam salınım azaltmalı (Total Variation Diminshing, TVD) metodunun yardımı ile giderilmeye çalışılır.

Yukarıda sırasıyla açıklanan klasik Lax-Wendroff ve MacCormack şemaları TVD metodu ile iyileştirilmiştir. Kalsik Lax-Wendroff ve MacCormack şemalarına eklenecek TVD terimleri şu şekilde hesaplanmaktadır;

Denklem (3.56) ve (3.57)'de kullanılmak üzere;

$$\Delta E_{i+\frac{1}{2}j}^n = E_{i+1,j}^n - E_{i,j}^n \quad (3.44)$$

$$\Delta E_{i-\frac{1}{2}j}^n = E_{i,j}^n - E_{i-1,j}^n \quad (3.45)$$

$$\Delta E_{ij+\frac{1}{2}}^n = E_{i,j+1}^n - E_{i,j}^n \quad (3.46)$$

$$\Delta E_{ij-\frac{1}{2}}^n = E_{i,j}^n - E_{i,j-1}^n \quad (3.47)$$

$$rX_{i,j}^+ = \frac{\Delta\eta_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta\eta_{i+\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hu)_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hu)_{i+\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hv)_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hv)_{i+\frac{1}{2}j}^n}{\Delta\eta_{i+\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta\eta_{i-\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hu)_{i+\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hu)_{i-\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hv)_{i+\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hv)_{i-\frac{1}{2}j}^n} \quad (3.48)$$

$$rX_{i,j}^- = \frac{\Delta\eta_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta\eta_{i+\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hu)_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hu)_{i+\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hv)_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hv)_{i+\frac{1}{2}j}^n}{\Delta\eta_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta\eta_{i-\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hu)_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hu)_{i-\frac{1}{2}j}^n + \Delta(hv)_{i-\frac{1}{2}j}^n \cdot \Delta(hv)_{i-\frac{1}{2}j}^n} \quad (3.49)$$

$$ry_{i,j}^+ = \frac{\Delta\eta_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta\eta_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \Delta(hu)_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta(hu)_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \Delta(hv)_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta(hv)_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta\eta_{i,j+\frac{1}{2}}^n \Delta\eta_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \Delta(hu)_{i,j+\frac{1}{2}}^n \Delta(hu)_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \Delta(hv)_{i,j+\frac{1}{2}}^n \Delta(hv)_{i,j-\frac{1}{2}}^n} \quad (3.50)$$

$$ry_{i,j}^- = \frac{\Delta\eta_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta\eta_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \Delta(hu)_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta(hu)_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \Delta(hv)_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta(hv)_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta\eta_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta\eta_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \Delta(hu)_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta(hu)_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \Delta(hv)_{i,j-\frac{1}{2}}^n \Delta(hv)_{i,j-\frac{1}{2}}^n} \quad (3.51)$$

Denklem (3.56) ve (3.57)'de L();

$$L(x) = 0.5 \times C \times [1 - \emptyset(x)] \quad (3.52)$$

Akı sınırlayıcı şu şekilde;

$$\emptyset(x) = \max\{0, \min(2x, 1)\} \quad (3.53)$$

C parametresi şu şekilde;

$$C = \begin{cases} Cr \times (1 - Cr) & Cr \leq 0.5 \text{ ise} \\ 0.25 & Cr > 0.5 \text{ ise} \end{cases} \quad (3.54)$$

Ve yerel courant sayısı;

$$Cr = \Delta t \times \frac{\max[(u+\sqrt{gh}), (v+\sqrt{gh})]}{\min(\Delta x, \Delta y)} \quad (3.55)$$

Denklemlerle verilmektedir.

3.1.2 Lax-Wendroff-TVD Şeması

$$\begin{aligned} E_{i,j}^{n+1} = E_{i,j}^n &- \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(Fx_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - Fx_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(Gy_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - Gy_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\ &+ \frac{1}{2} \Delta t \left(Sx_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + Sx_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \frac{1}{2} \Delta t \left(Sy_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + Sy_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\ &+ [L(rx_{i,j}^+) + L(rx_{i+1,j}^-)] \Delta E_{i+\frac{1}{2},j}^n - [L(rx_{i-1,j}^+) + L(rx_{i,j}^-)] \Delta E_{i-\frac{1}{2},j}^n \\ &+ [L(ry_{i,j}^+) + L(ry_{i,j+1}^-)] \Delta E_{i,j+\frac{1}{2}}^n - [L(ry_{i-1,j}^+) + L(ry_{i,j}^-)] \Delta E_{i,j-\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (3.56)$$

3.1.3 MacCormack-TVD Şeması

$$\begin{aligned} E_{i,j}^{n+1} = & \frac{E_{i,j}^p + E_{i,j}^c}{2} + [L(rx_{i,j}^+) + L(rx_{i+1,j}^-)]\Delta E_{i+\frac{1}{2},j}^n - [L(rx_{i-1,j}^+) + L(rx_{i,j}^-)]\Delta E_{i-\frac{1}{2},j}^n \\ & + [L(ry_{i,j}^+) + L(ry_{i,j+1}^-)]\Delta E_{i,j+\frac{1}{2}}^n - [L(ry_{i-1,j}^+) + L(ry_{i,j}^-)]\Delta E_{i,j-\frac{1}{2}}^n \end{aligned} \quad (3.57)$$



4. MODEL UYGULAMASI

4.1 Giriş

Bu bölümde geliştirilen sayısal modelin performansı ve araştırmacılar tarafından çözülmesi güç ve kritik olarak bilinen bazı hidrolik problemlerine uygulanabilirliğini incelemek amacıyla literatürde mevcut deneysel çalışmalar ve hidrolik problemlerine uygulanarak elde edilecek sonuçların yapılan çalışmaların sonuçları ile uyumu bir sonraki bölüm sonuç ve öneriler kısmında tartışılacaktır.

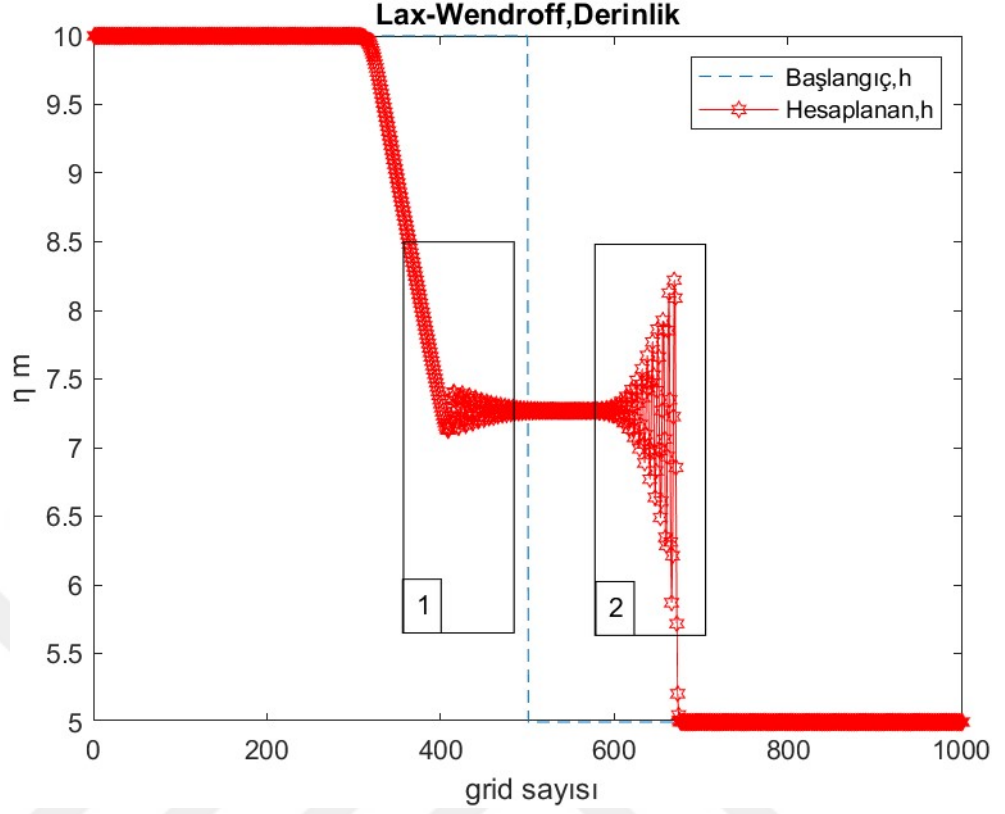
4.2 Örnek Problemler

Bu bölümde sırasıyla bir boyutlu düşünülebilen bir kanalda şok dalgası, iki boyutlu olarak bir baraj yıkılması problemin kuru-ıslak mansap durumlarının her ikisi, baraj yıkılması problemlerinde mansap tarafında bulunan bir bariyer etrafındaki akımın davranışı, deniz ortamında oluşan tsunami dalgasının yayılması, kıyı bölgelerinde denize toprak kayması sonucu oluşan dalgaların yayılması ve üç boyutlu olarak bir baraj yıkılması problemi modellenecektir.

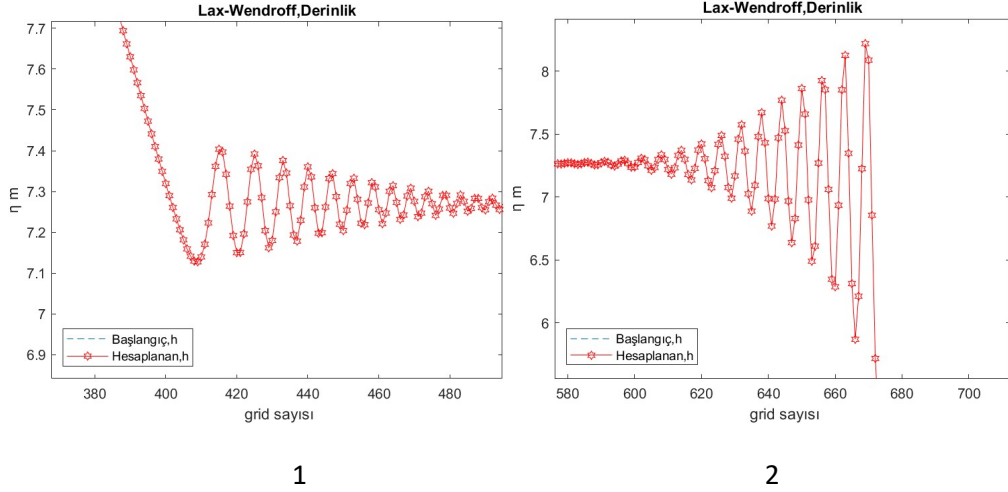
4.2.1 Şok dalgası içeren bir kanaldaki akım

Geliştirilen şemaların şok dalgasını yakalayabilme kabiliyetini kontrol etmek için 100 m uzunluğuna sahip bir kanal ele alınmıştır. Kanalin memba tarafından 50 m uzaklıkta bir kapağın olduğu varsayılarak memba su derinliği 10 m olarak sabit iken mansap su derinliği 5 m, 0.1 m ve 0.05 m üç farklı durumda kanalın ortasındaki kapağın aniden kaldırılması sonucu oluşan şok dalgasının ilerlemesi ve yapay salınımların olup olmaması incelenmiştir (Luo ve ark. 2017). Nümerik hesaplamada $\Delta x = 0.1\text{m}$ ve $\Delta t = 0.001\text{s}$ dikkate alınarak toplam 2 saniyelik hesaplama sonuçları aşağıda verilmiştir.

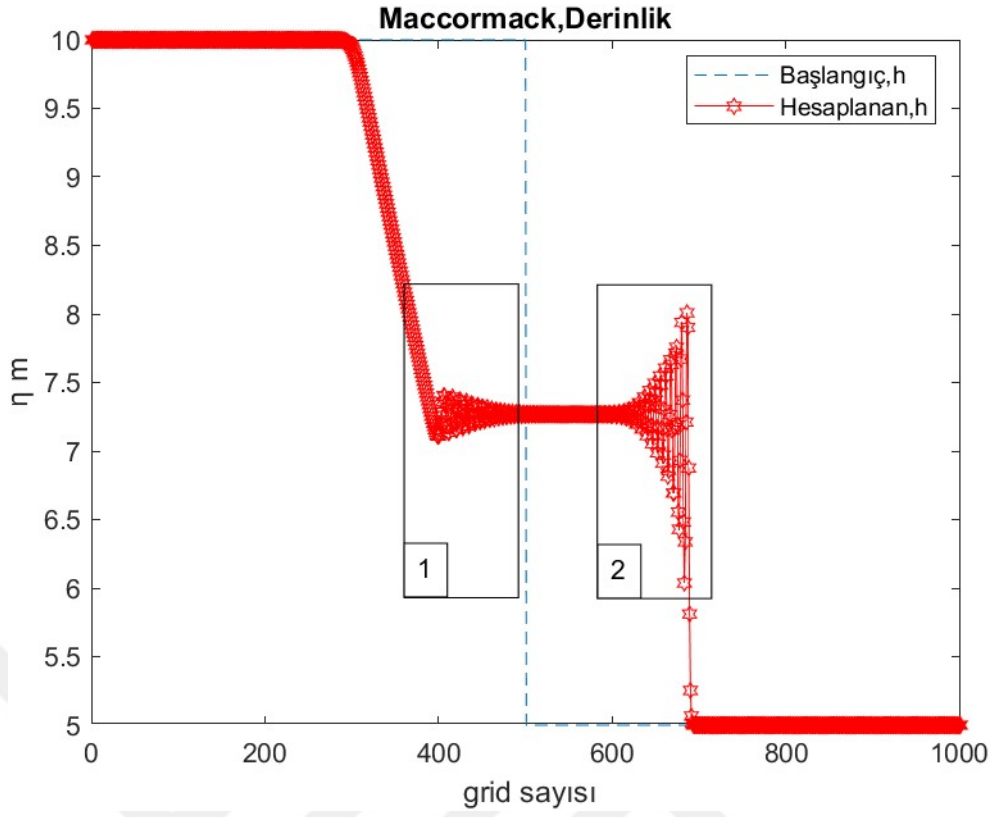
Birinci durum; $h_1 = 10$, $h_2 = 5$, $h_2/h_1 = 0.5$



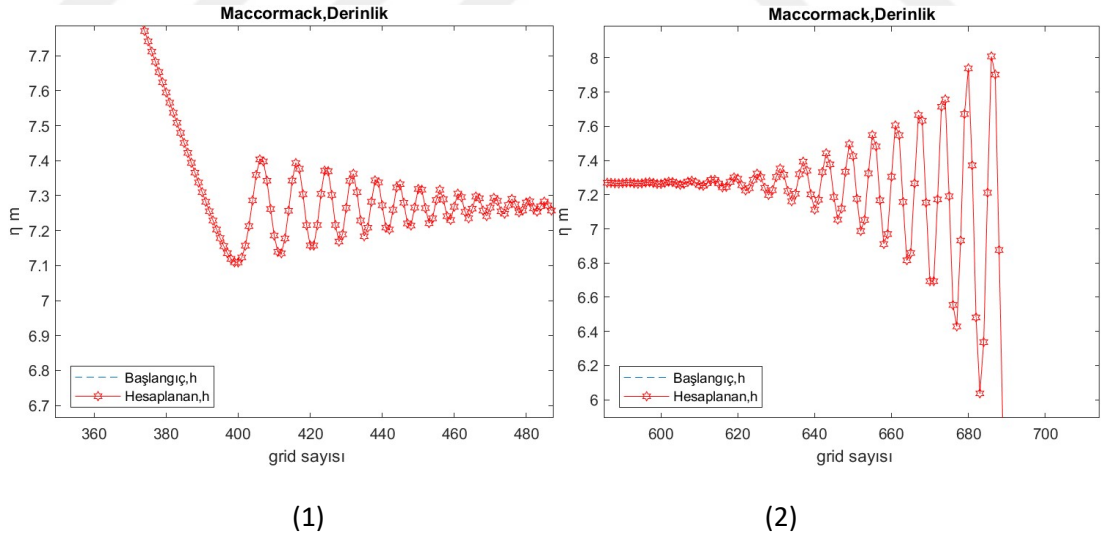
Şekil 4. 1: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının klasik Lax-Wendroff şeması ile çözümü



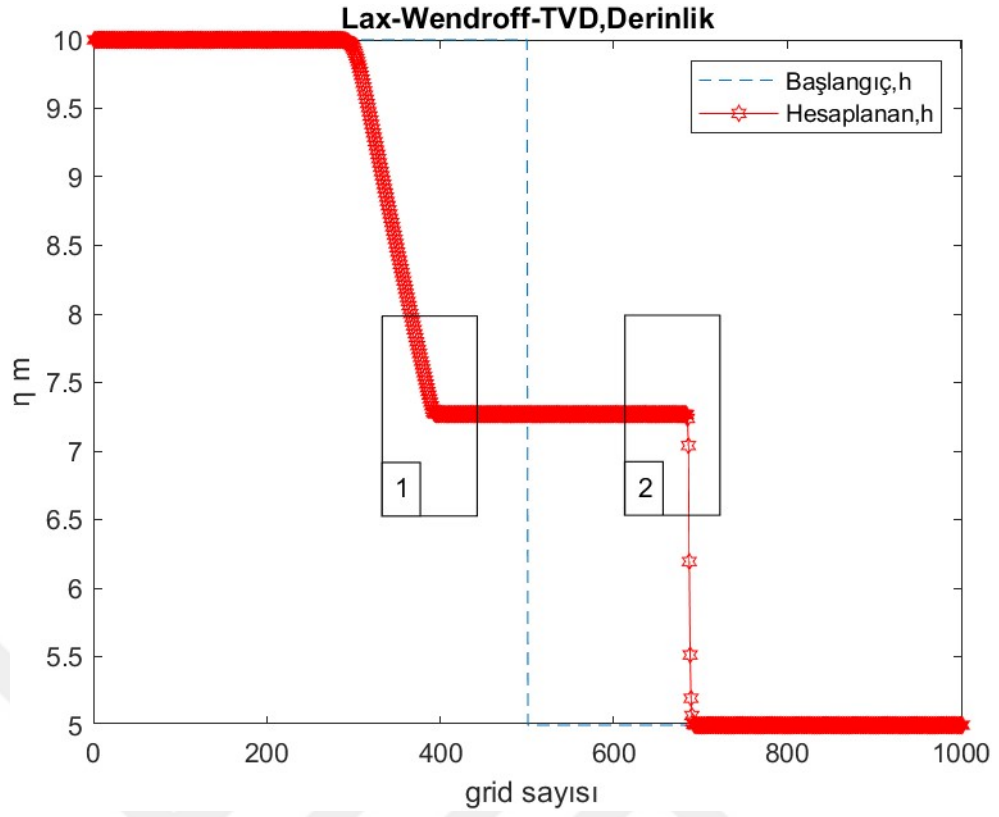
Şekil 4. 2: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.1'deki klasik Lax-Wendroff şemasının içerdiği yapay salınımların yakından görünümü



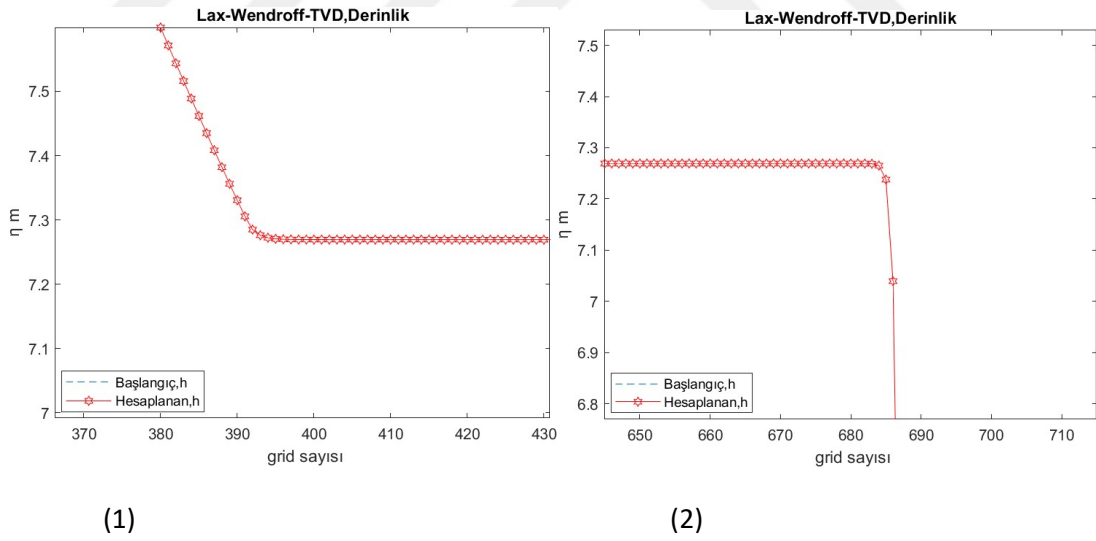
Şekil 4. 3: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının klasik Maccormack şeması ile çözümü



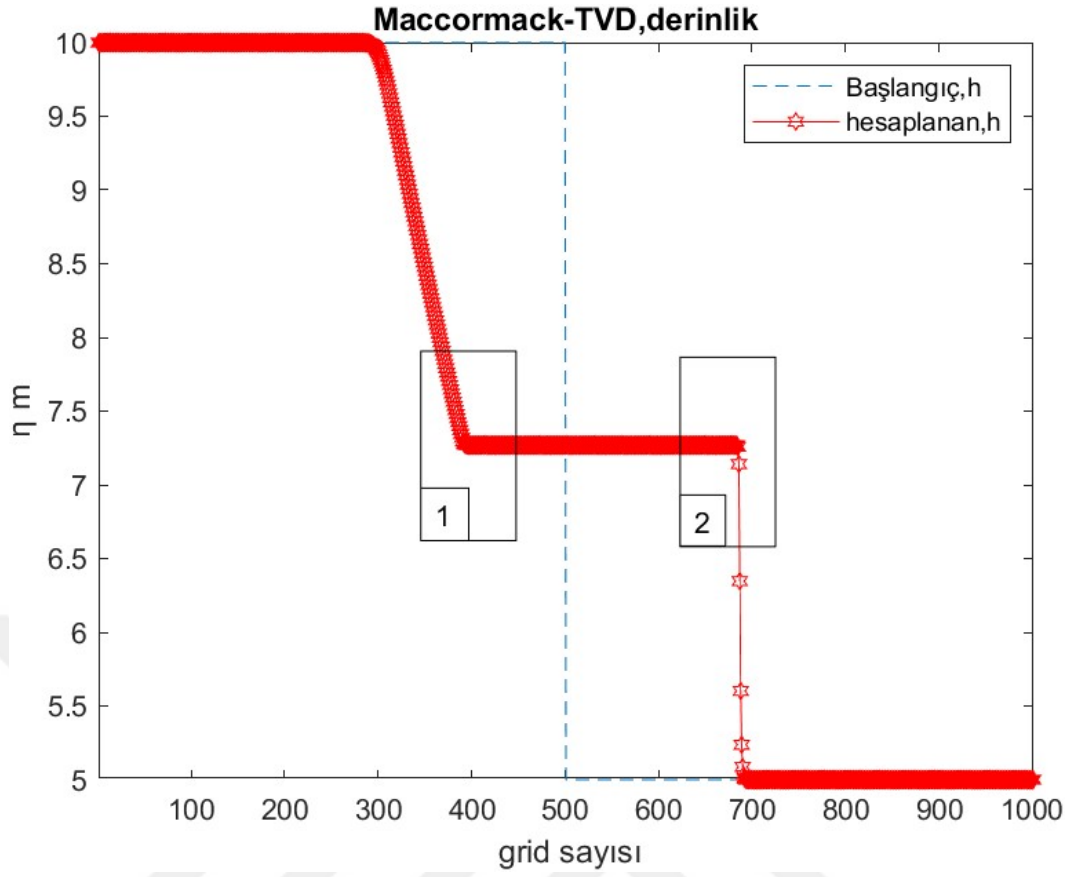
Şekil 4. 4: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.3'teki klasik MacCormack şemasının içerdiği yapay salınımların yakından görünümü



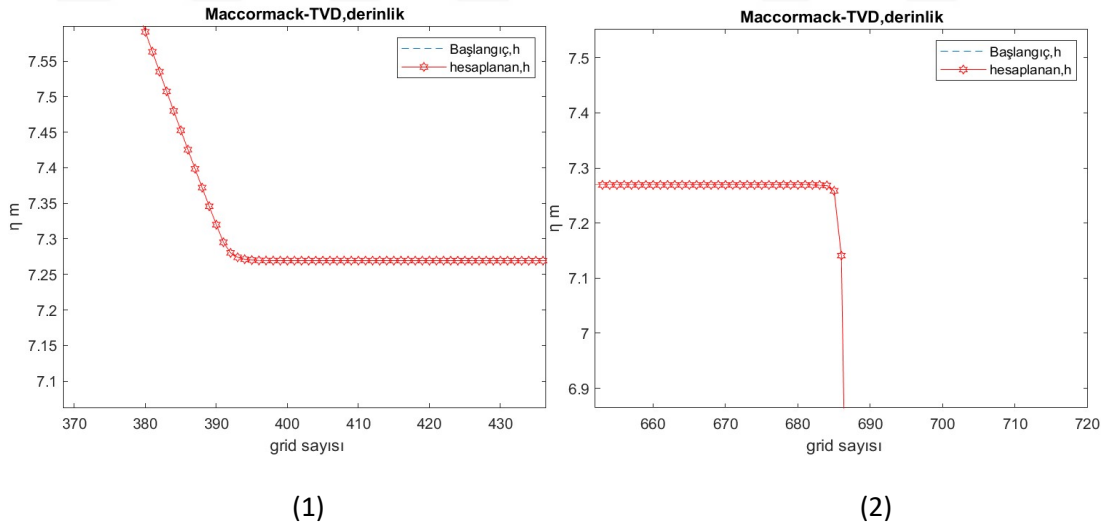
Şekil 4. 5: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şeması ile çözümü



Şekil 4. 6: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.5'teki geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü



Şekil 4. 7: Mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.5 olan şok dalgasının geliştirilen MacCormack-TVD şeması ile çözümü

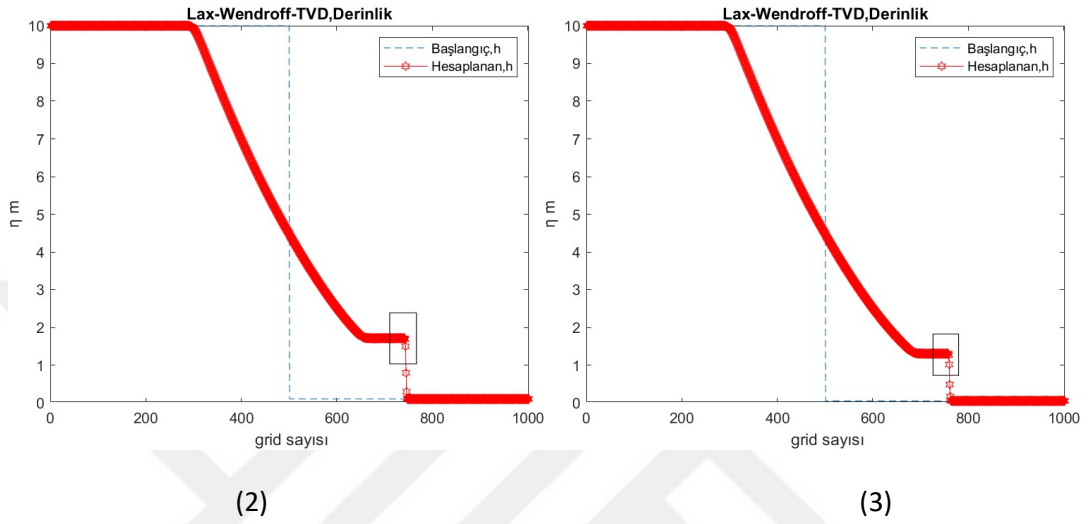


Şekil 4. 8: Sırasıyla (1) ve (2) Şekil 4.7'deki geliştirilen MacCormack-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü

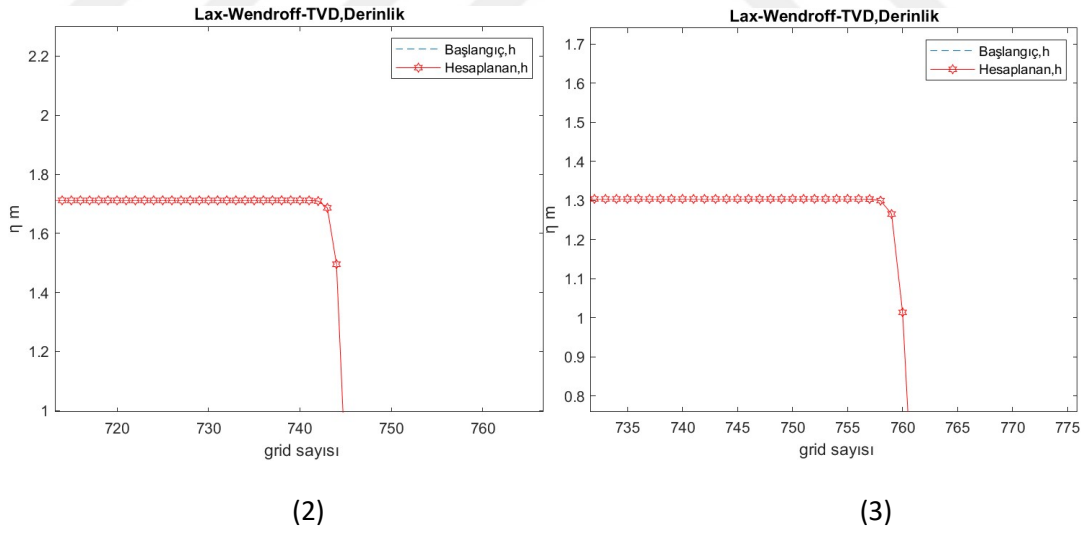
İkinci durum; $h_1 = 10$, $h_2 = 0.1$, $h_2/h_1 = 0.01$

Üçüncü durum; $h_1 = 10$, $h_2 = 0.05$, $h_2/h_1 = 0.005$

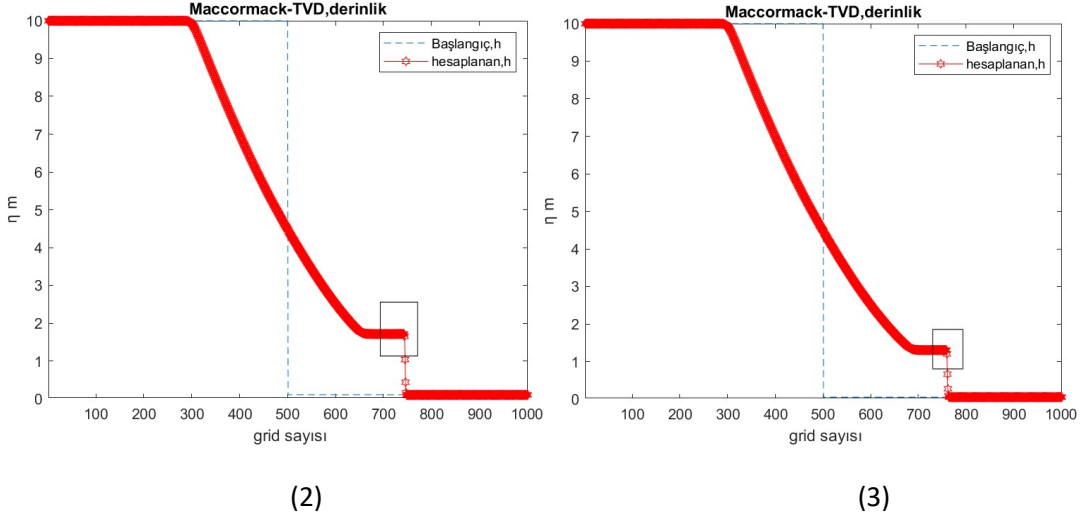
İkinci ve üçüncü durumlar için klasik Lax-Wendroff ve klasik MacCormack şemalarındaki salınımlar birinci duruma benzer bir şekilde görülmüştür. Burada sadece geliştirilen Lax-Wendroff-TVD ile MacCormack-TVD şemalarının hesaplama sonuçları sırasıyla verilecektir.



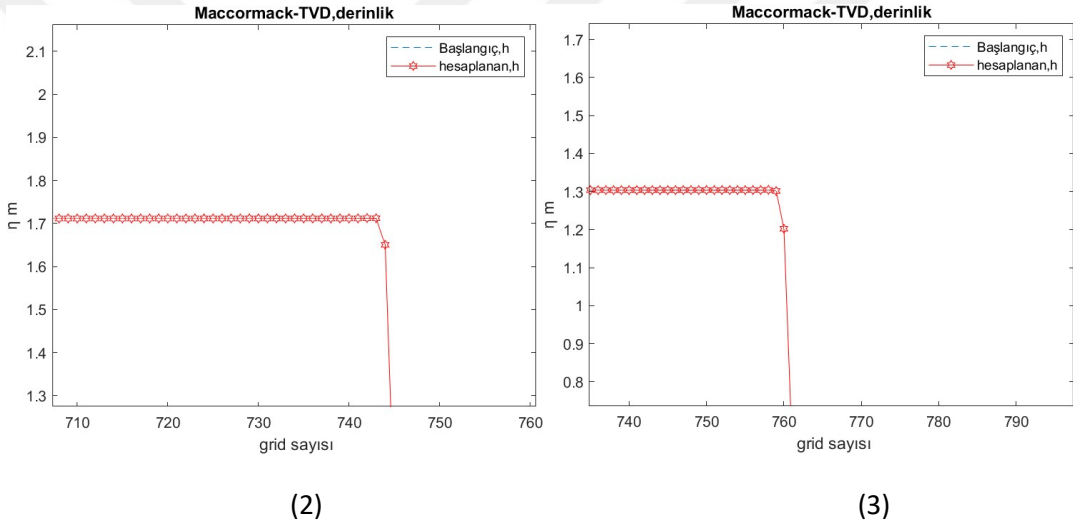
Şekil 4. 9: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şeması ile çözümü



Şekil 4. 10: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü



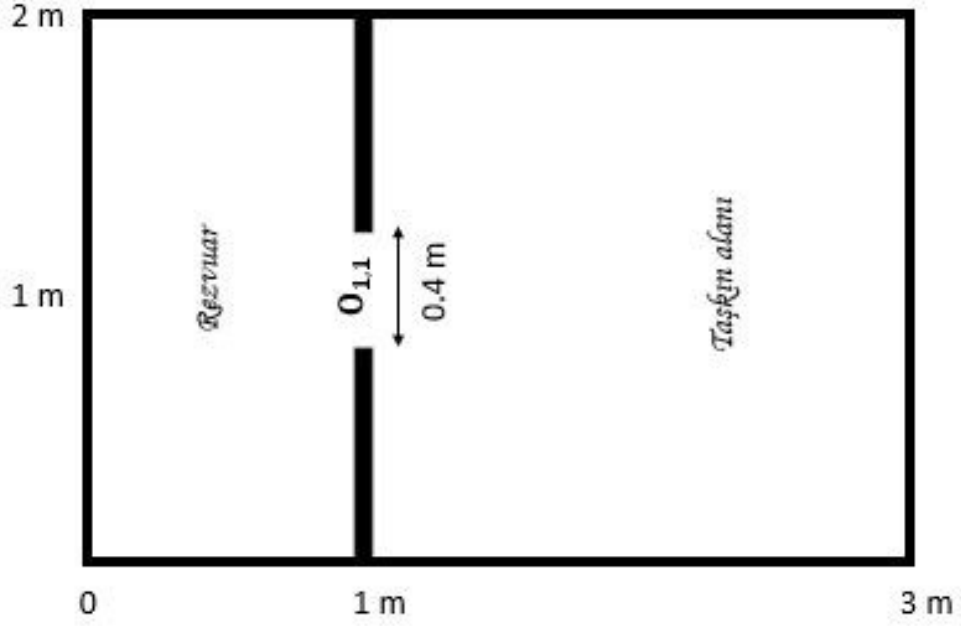
Şekil 4. 11: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen MacCormack-TVD şeması ile çözümü



Şekil 4. 12: Sırasıyla (2) ve (3) mansap su derinliğinin memba su derinliğine oranı 0.01 ve 0.005 olan şok dalgasının geliştirilen MacCormack-TVD şemasında yapay salınımların giderilmesinin yakından görünümü

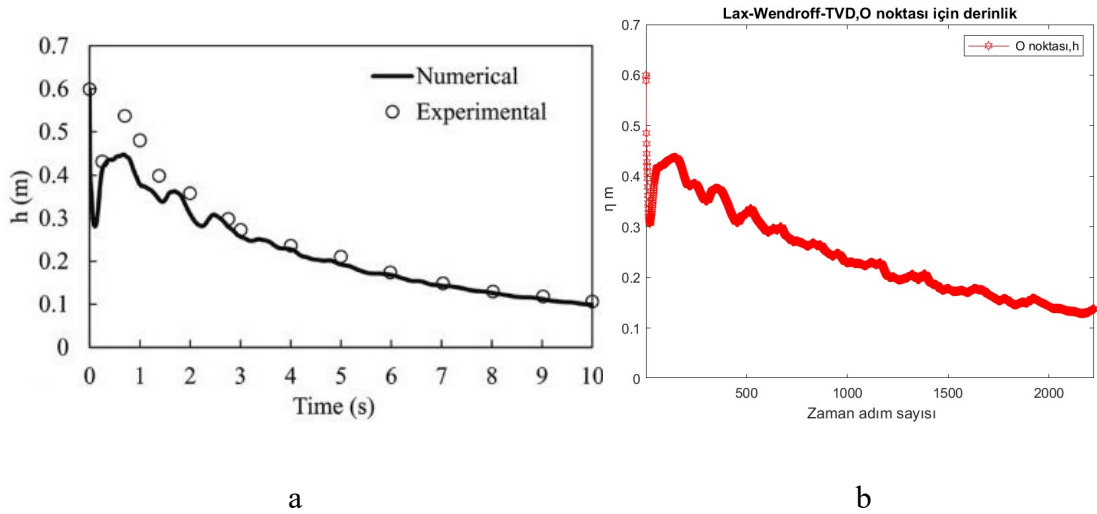
4.2.2 Baraj yıkılması problemi-kuru mansap durumu

Burada şekil 6.2’de görüldüğü gibi 3 m uzunluk ve 2 m genişliğine sahip, memba sınırından 1 m uzaklıkta konumlandırılan baraj gövdesinin tam ortasında 0.4 m genişliğinde bir kapağın aniden kaldırılması sonucu baraj yıkılmasının deneysel düzeneği ele alınmıştır (Fraccarollo ve Toro, 1995) .



Şekil 4. 13: Fraccarollo ile Toro'nun oluştukları deney düzeneği

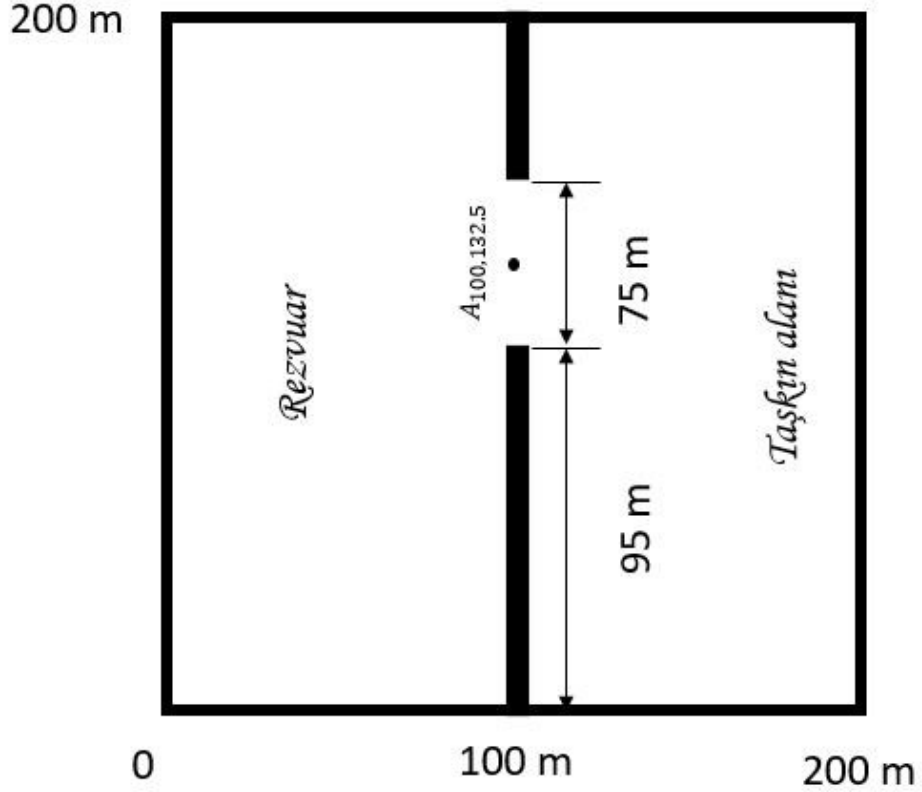
Hesaplama alanı 75×50 üniform izgaralar bölünerek $\Delta x = \Delta y = 0.04$ m, rezervuar su derinliği 0.6 m ve kuyruk suyunun olmaması ve zaman adımı $\Delta t = 0.004$ s dikkate alınmıştır. Fakat sayısal hesaplamaların kuyruk suyunun sıfır olması durumunda yapılamadığından dolayı mansapta su derinliği 0.06 m olarak alınmıştır.



Şekil 4. 14: Sırasıyla a ve b Kalita (2016) tarafından geliştirilen MacCormack-TVD şeması Lax-Wendroff-TVD şemalarına ait O noktasının zamana göre su derinlik değişimi

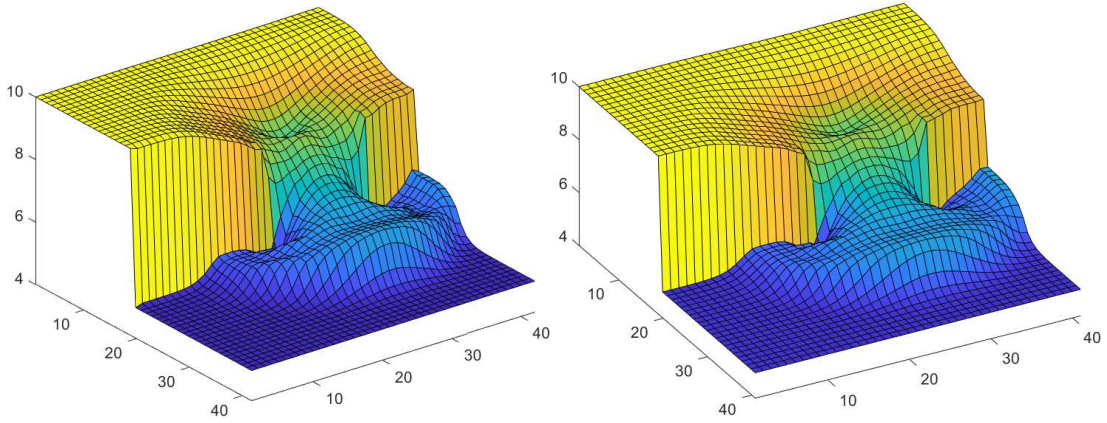
4.2.3 Baraj yıkılması problemi-ıslak mansap durumu

Burada şekil 6.15'te verilen 200×200 m bir hesaplama alanı 40×40 üniform ızgaralı ($\Delta x = \Delta y = 5$ m), membaa sınırından 100 m uzaklığında 10 m gövde kalınlığına sahip bir baraj ve baraj gövdesinin akım yönünün sağ tarafından 95 metreden itibaren 75 m uzunluğunda kırılması düşünülmüştür.



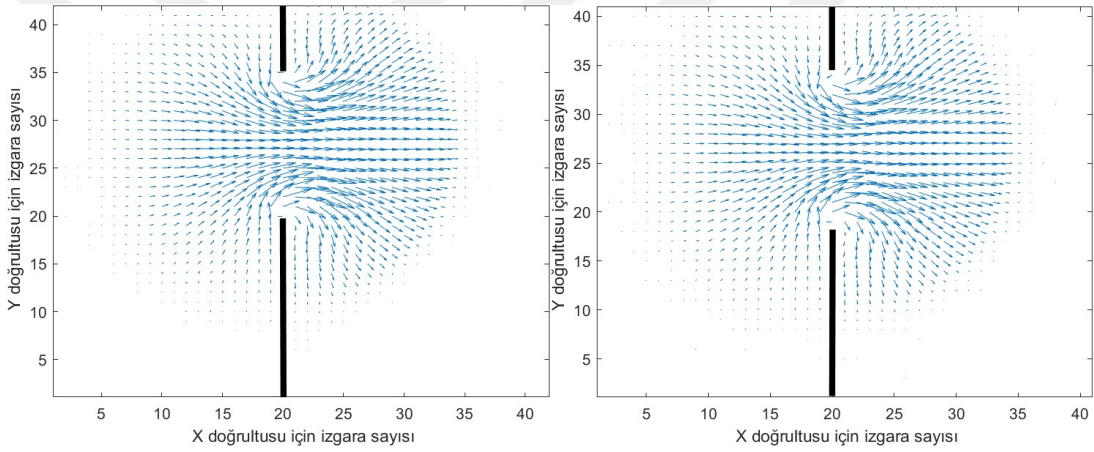
Şekil 4. 15: Kısmi ve simetrik olmayan baraj yıkılması problemi

Başlangıç değer olarak rezervuarın su derinliği 10 m, kuyruk su derinliği 5 m ve $\Delta t = 0.1$ s dikkate alınmıştır (Fennema ve ark. 1990).



a

b



c

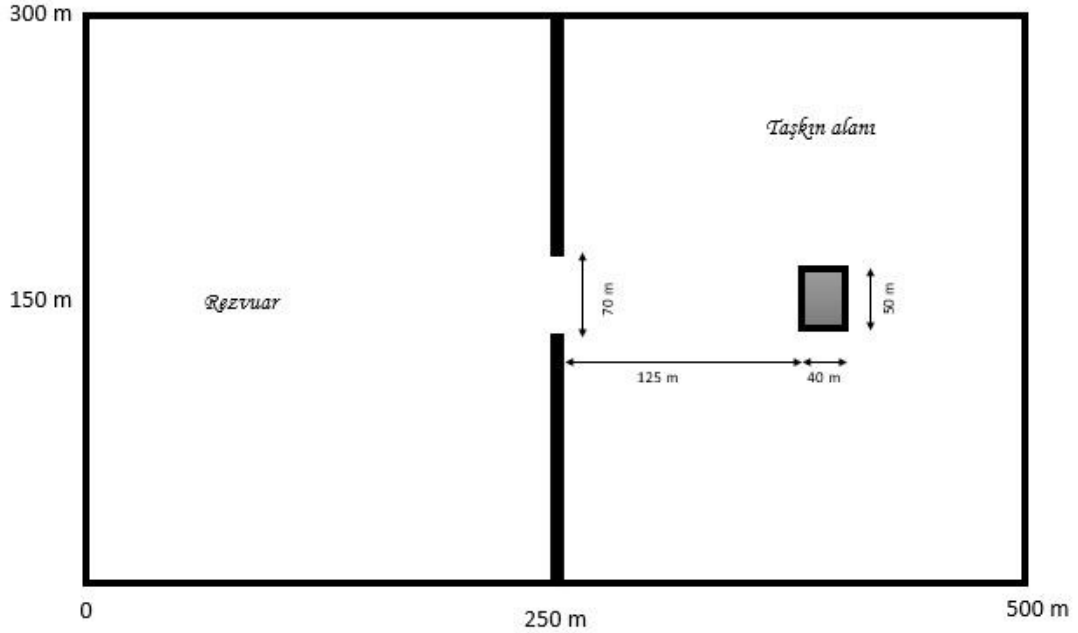
d

Şekil 4. 16: a ve c 7.2 saniyelik kısmı ve simetrik olmayan baraj yıkılması problemin geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şeması ile çözüm sonucunu sırasıyla su yüzü profili ve hız vektörlerinin , b ve d benzer parametrelerin geliştirilen MacCormack-TVD şeması ile çözümünün gösterimi

4.2.4 Bir bariyer etrafındaki akımın davranışı

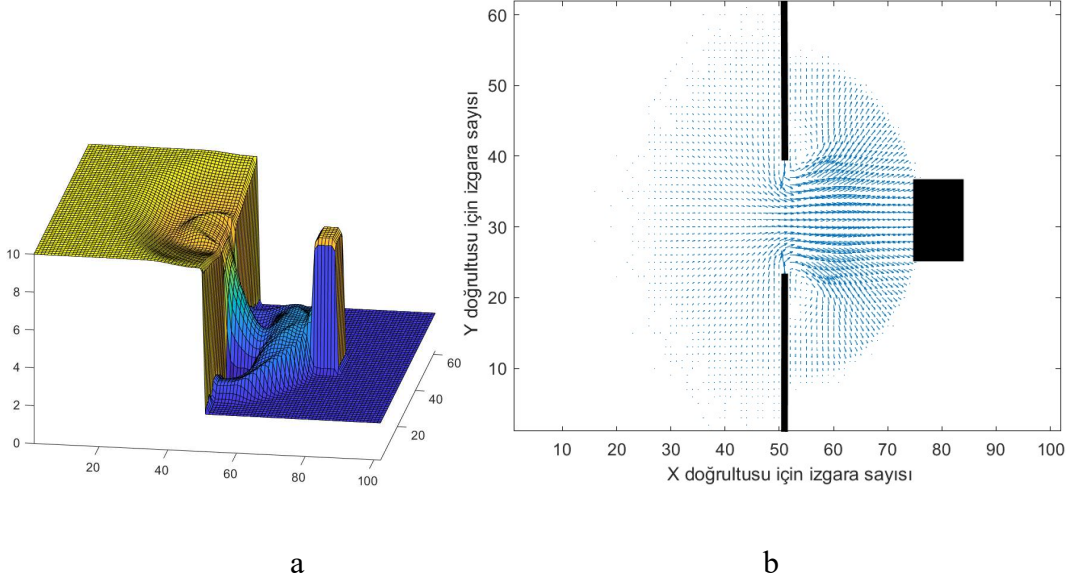
Bir baraj yıkılması probleminde oluşan yüksek dalgalar, karşısında bulunan engellere çok sert çarpmakta ve ani sıçramalarla engelin üzerinden aşmaktadır. Fakat engelin yüksekliği oldukça fazla olması durumunda ve taşkın dalgasının engelin üzerine çıkamadığı durumlarda engelin etrafında oluşan akımın davranışını yakalayabilmek bir sayısal modelin başarı ölçütüdür. Bu amaçla şekil 6.4'te verilen 500 m uzunluğunda ve 300 m genişliğinde varsayımsal sürtünmesiz bir kanal

düşünülmüştür. kanalın orta kısmında bulunan bir baraj 70 m uzunluğunda, baraj gövdesinin orta noktasına simetrik olarak aniden kırılması ve barajdan 125 m uzaklığından, barajın enine göre simetrik $40\text{ m} \times 50\text{ m} \times 7\text{ m}$ boyutlara sahip bir engelin olması düşünülmüştür.

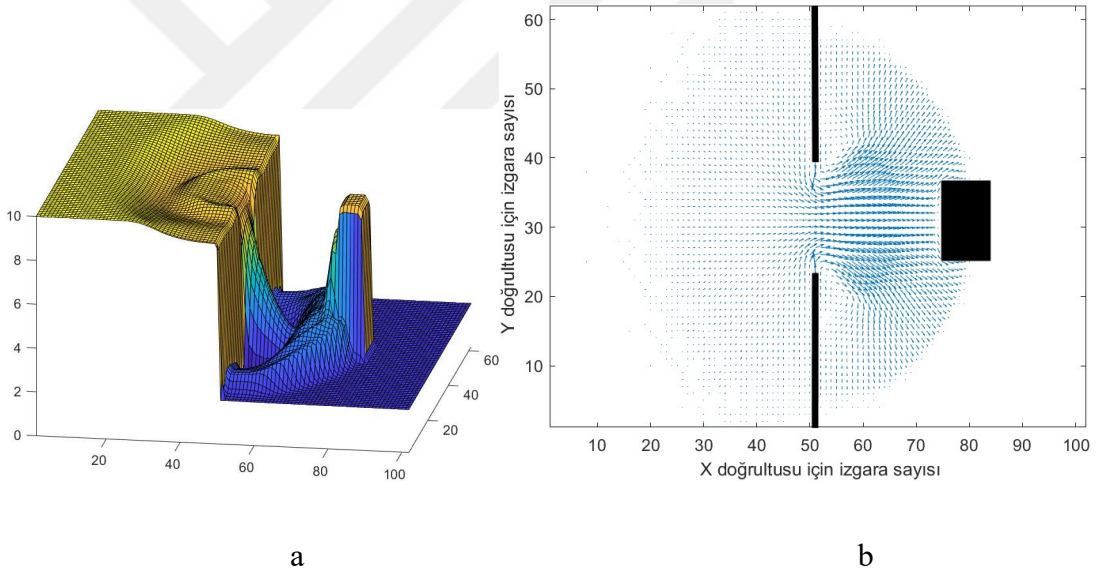


Şekil 4.17: Baraj yıkılması sonucu taşkın dalgasının bir bariyere çarpması problemin geometrisi

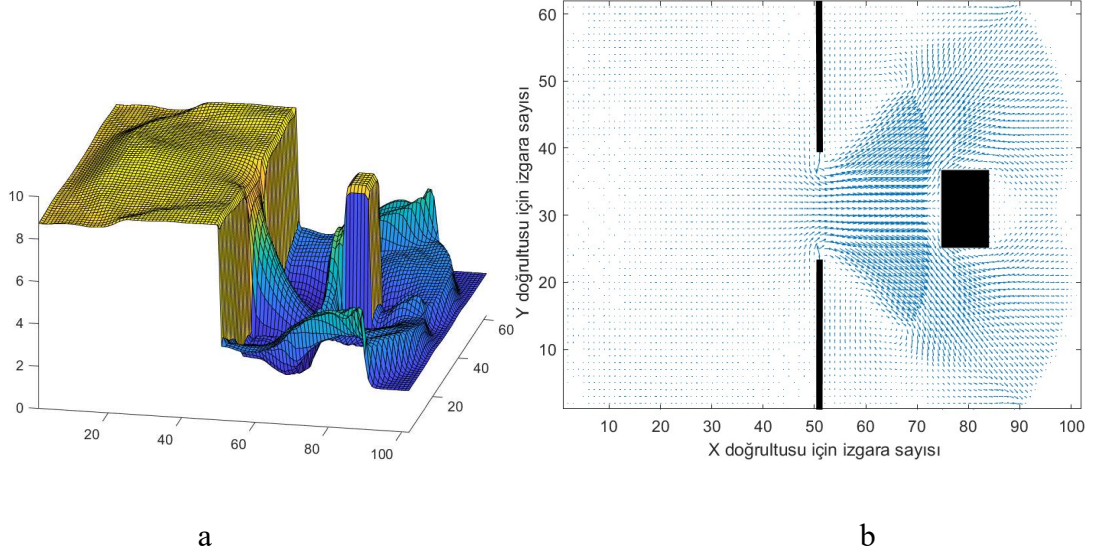
Hesaplama alanı 100×60 üniform ızgaralar ($\Delta x = \Delta y = 5\text{ m}$), $\Delta t = 0.2\text{ s}$, rezervuar su derinliği 10 m ve mansap su derinliği 2 m olarak uygulanmıştır.



Şekil 4. 18: a ve b barajın yıkılma anından itibaren 14 saniye sonra geliştirilen Lax-Wendroff -TVD şemasının çözüm sonucu olarak taşkın dalgasının bariyer yüzüne yetiştiği anki su yüzü profili ve hız vektörlerini gösterimi



Şekil 4. 19: a ve b barajın yıkılma anından itibaren 17 saniye sonra geliştirilen Lax-Wendroff -TVD şemasının çözüm sonucu olarak taşkın dalgasının bariyer yüzüne çarptığı anki su yüzü profili ve hız vektörlerini gösterimi



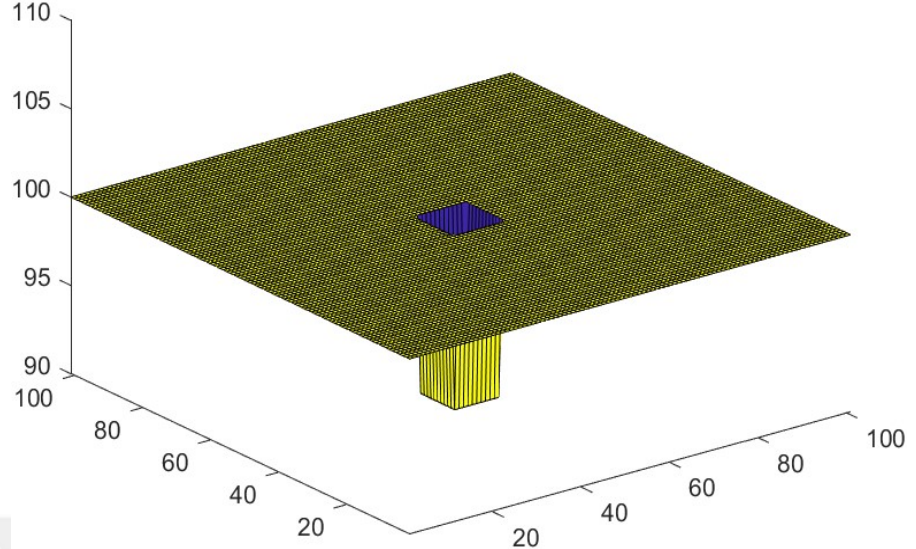
Şekil 4. 20: a ve b barajın yıkılma anından itibaren 32 saniye sonra geliştirilen Lax-Wendroff-TVD şemasının çözüm sonucu olarak taşkın dalgasının bariyeri geçmiş olmasını ve bariyer etrafındaki akımın davranışını su yüzü profili ve hız vektörleri cinsinden gösterimi

4.2.5 Tsunami problemi

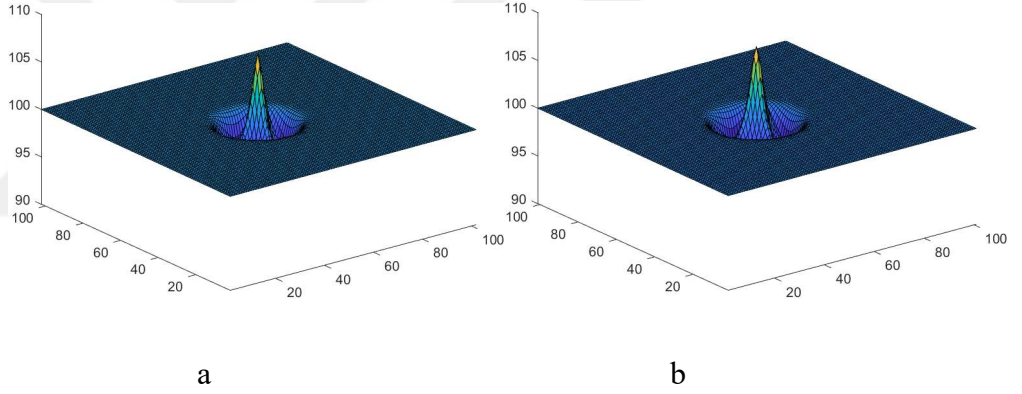
Tsunami yaygın olarak depremleri meydana getiren yer kabuk levhalarının hareketi, lavların denize girmesi, toprak kayması, deniz dağlarının çökmesi ve göktaşı çarpması sonucu şiddetli deniz tabanının hareketinden meydana gelmektedir.

Deniz ya da okyanus ortamında meydana gelen saatte yüzlerce kilometre hızlara ulaşan ve yüzbinler kilometre kare alanlara yayılan büyük su kütesinin hareketine tsunami denir. Tsunami dalgasının diğer su dalgalarından farkı, deniz ve okyanus suyun derinliğinin kilometrelere ulaşmasından dolayı kıyı bölgelerin yakınları dışında taban topografyasından etkilenmemesi ve buna karşı olarak da yer küresinin şekli ve hareketinden etkilenmesidir. Burada $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ bir alanın ortasında $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ bir alanın 10 m çökmesi sonucu ve aynı hesaplama alanın kıyı bölgesinin başlangıç noktasında $10 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ toprak kayması sonucu oluşan dalganın yayılımı modellenmiştir.

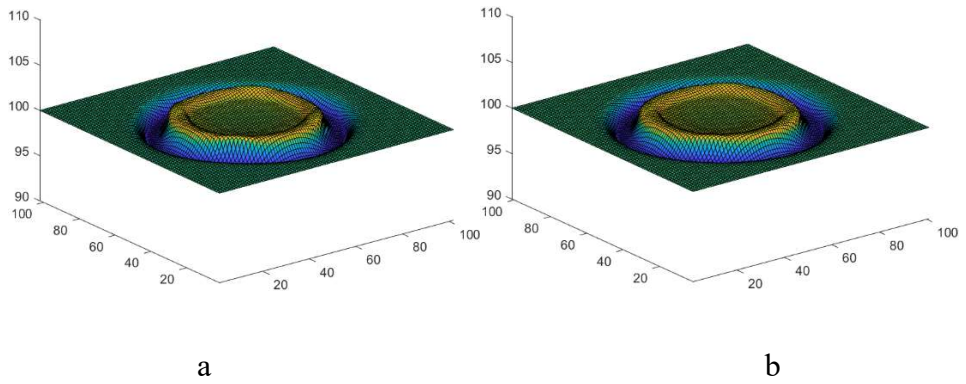
Çökme sonucu oluşan tsunami dalga yayılımı:



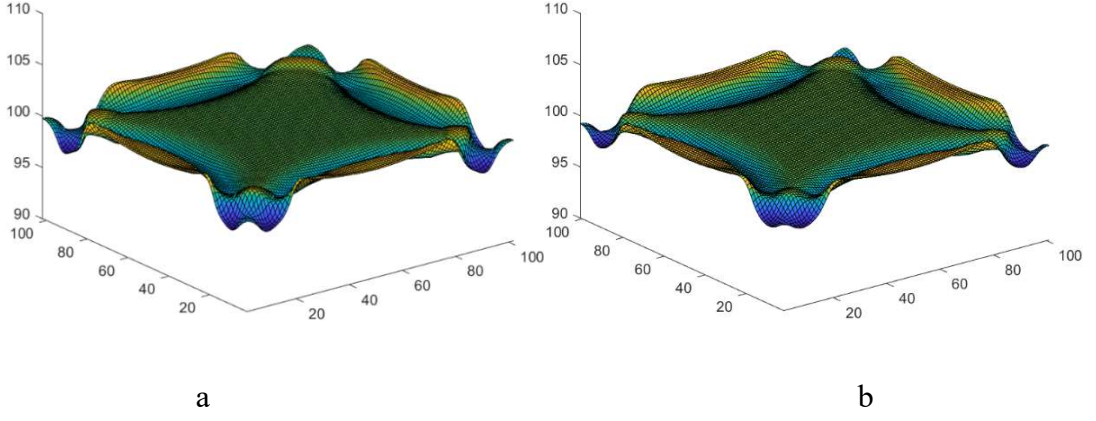
Şekil 4. 21: Göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminin $t = 0$ s anındaki görünümü



Şekil 4. 22: a ve b göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 4.17$ dakika anındaki görünümü

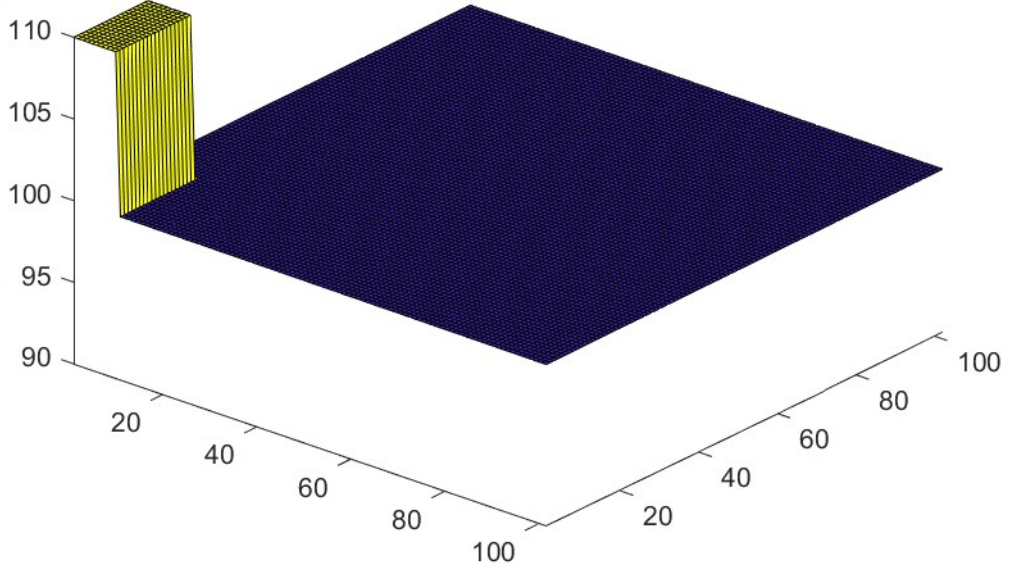


Şekil 4. 23: a ve b göçme sonucu oluşacak varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 16.67$ dakika anındaki görünümü

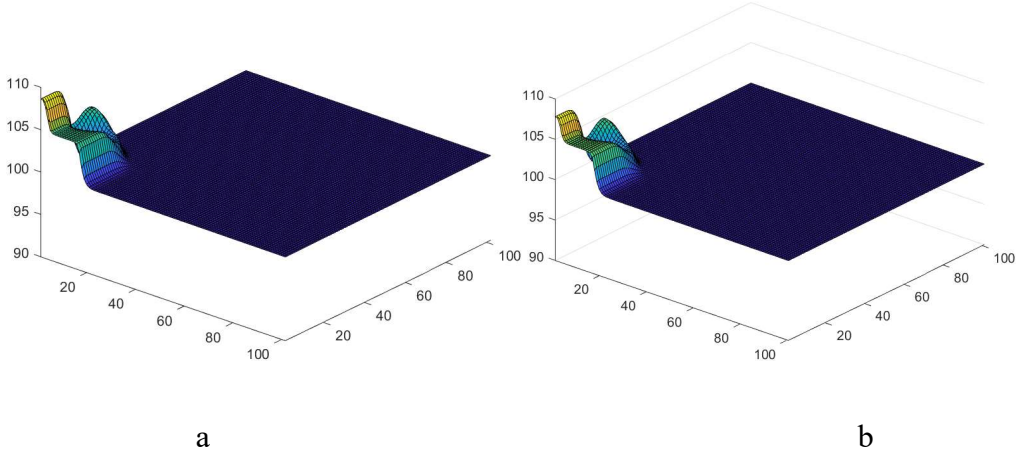


Şekil 4. 24: a ve b göçme sonucu oluşacak varsımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 33.33$ dakikalık çözüm sonucu tsunaminin kıyıya çarptığı anın görüntüsü

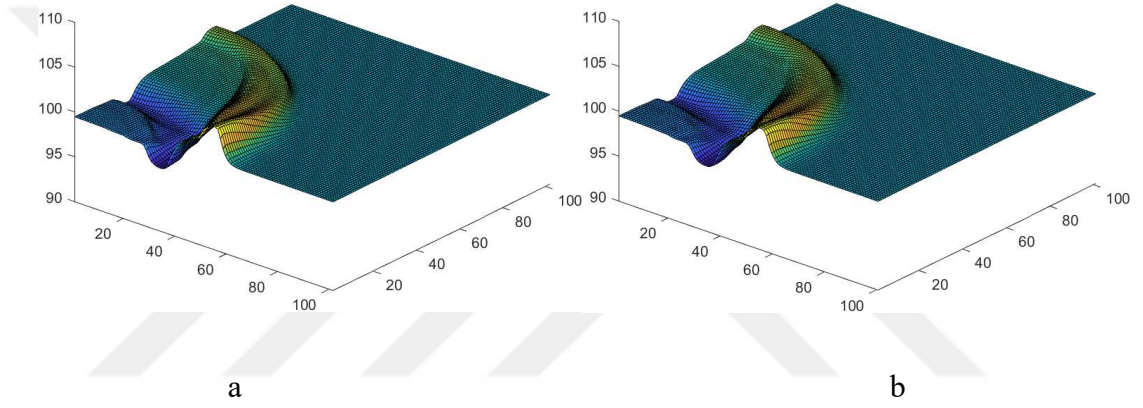
Toprak kayması sonucu oluşan tsunami dalga yayılımı:



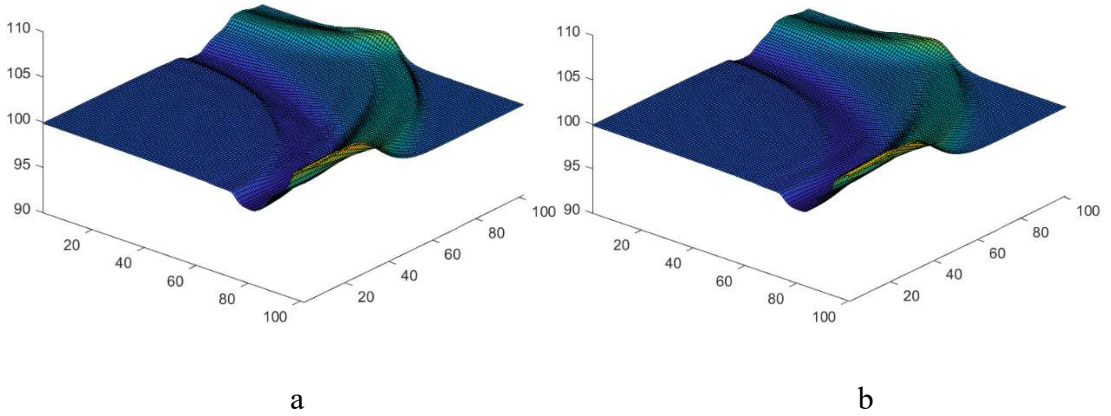
Şekil 4. 25: Toprak kayması sonucu oluşacak varsımsal tsunaminin $t = 0$ sındaki görünümü



Şekil 4. 26: a ve b toprak kayması sonucu varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 4.17$ dakika anındaki görünümü



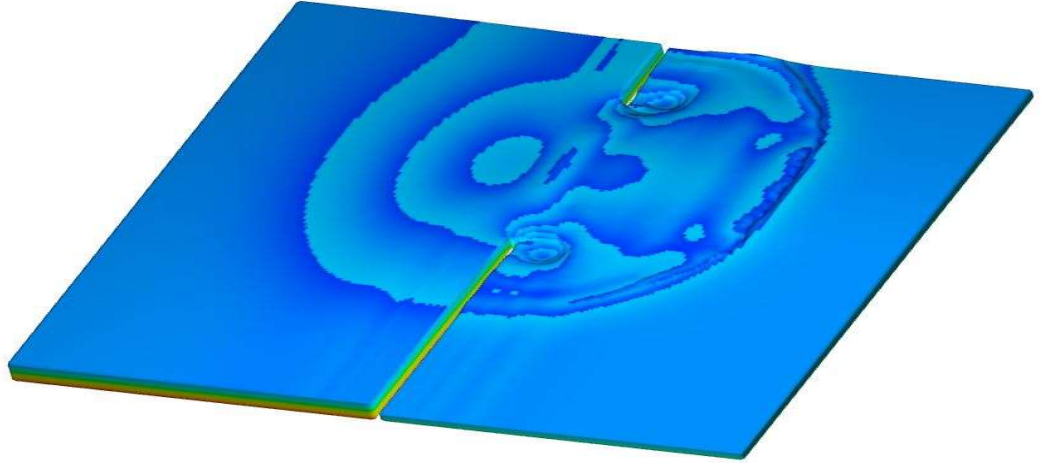
Şekil 4. 27: a ve b toprak kayması sonucu varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 25$ dakika anındaki görünümü



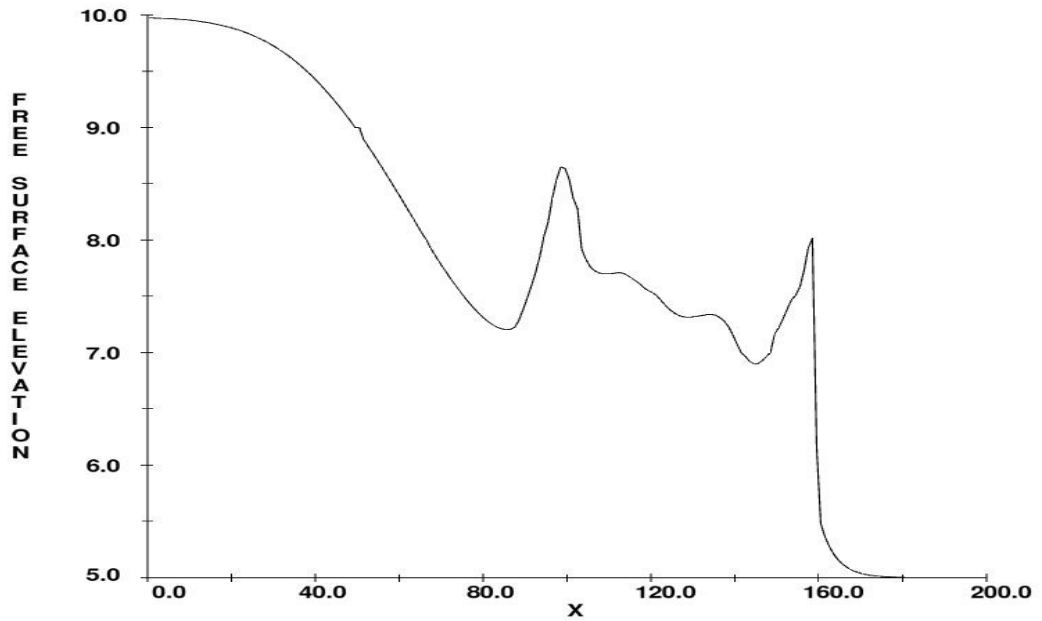
Şekil 4. 28: a ve b toprak kayması sonucu varsayımsal tsunami probleminde sırasıyla Lax-Wendroff-TVD ve MacCormack-TVD şemalarının $t = 50$ dakika anındaki görünümü

4.2.6 3B baraj yıkılması problemi ve dolusavak akımı

Burada şekil 4.15’te verilen problem Flow-3D paket programı ile üç boyutlu çözülmüştür.



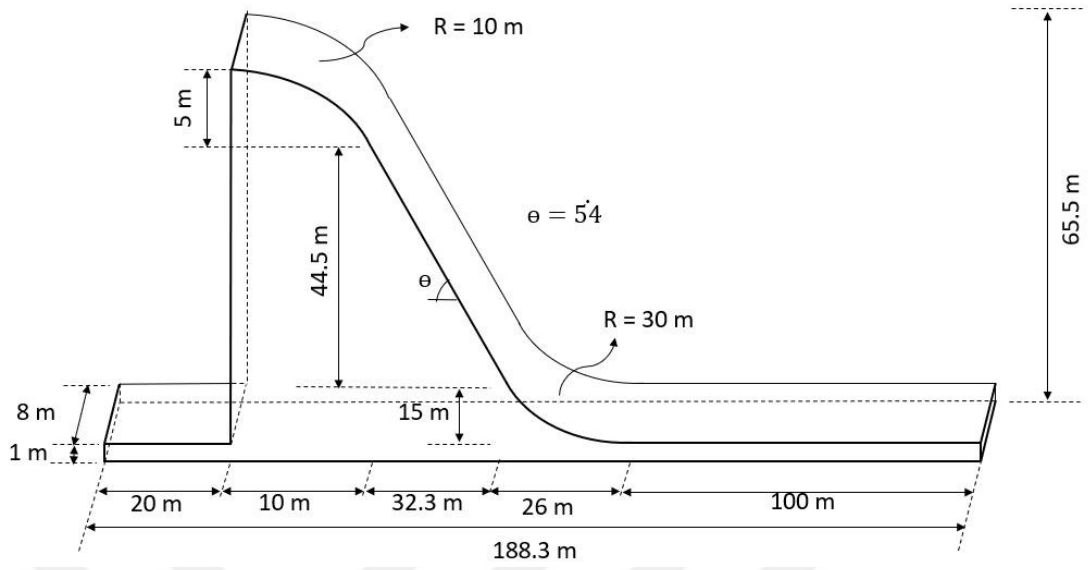
Şekil 4. 29: t = 7 saniyedeki su profilinin üç boyutlu görünümü



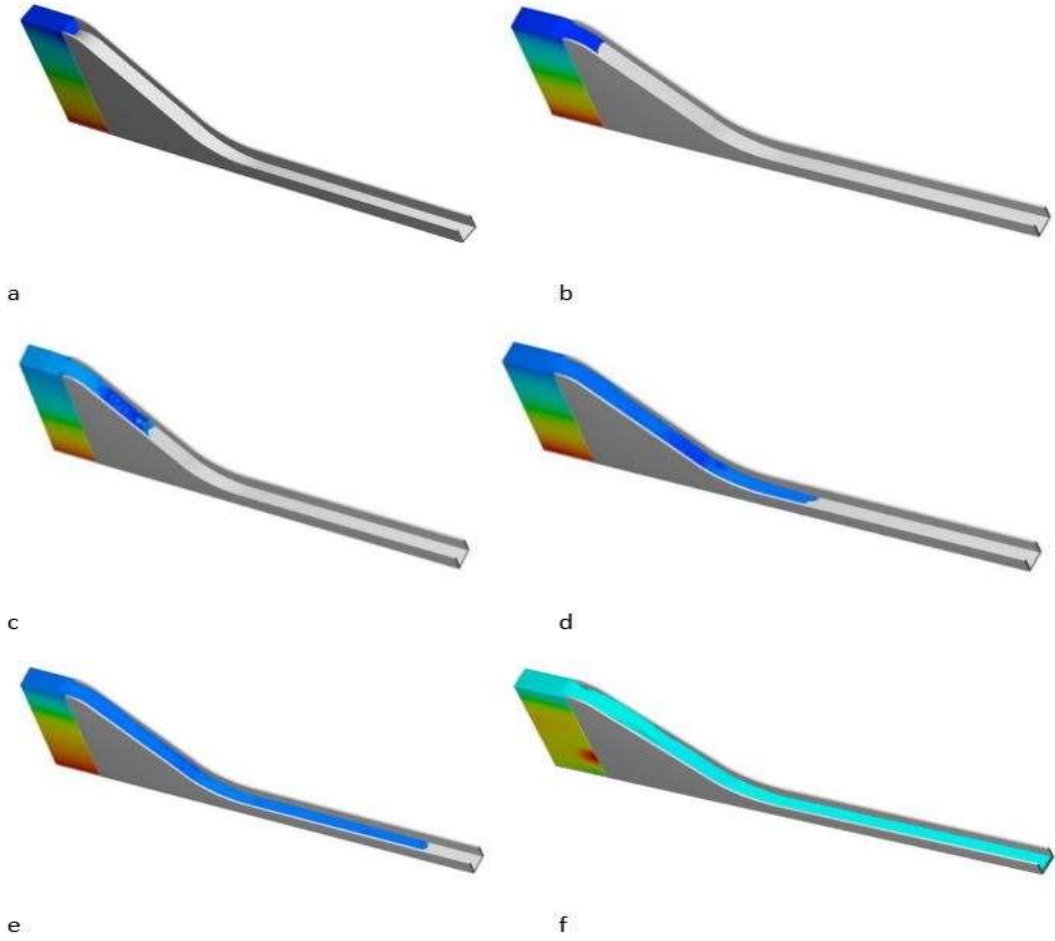
FLOW-3D t=6.9985981 z=9.500E+00 ix=2 to 201 y=1.325E+02
10:42:48 05/23/2022 vrsq hydr3d version 11.2.2.01 win64
Title

Şekil 4. 30: Barajın kırılma uzunluğunun ortasında bulunan A notasından geçen kesite ait su derinlik değişimi

4.2.7 Dolusavak üzerindeki akım:



Şekil 4. 31: Rhino 7 çizim programında katı cisim olarak çizilen dolusavagın boyut uzunlukları



Şekil 4. 32: a, b, c, d, e ve f sırasıyla $t = 0$ s, $t = 0.998$ s, $t = 3$ s, $t = 5$ s, $t = 7$ s ve $t = 25$ s anlarına ait su kütlesinin dolusavak kanalındaki ilerleyişi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde hızlı bir şekilde gelişmekte olan bilgisayar teknolojisi, uzun süreli çalışmalar gerektiren hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerini kısa süre içerisinde gerçekleştirebilme olanağı sunmuştur. Gelişen bilgisayar teknolojisinin sunduğu bu imkanlar, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin uygulama alanlarında da hızlı bir gelişime fırsat tanımıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin yöntemlerinden biri olan sonlu farklar yöntemi de bu gelişimden faydalanan bir yöntem olmuştur.

Bu tez çalışmasında gelişen bilgisayar teknolojinin sunduğu bu imkanlardan faydalanarak çözümü oldukça zaman alıcı ve hatta imkânsız olduğu gibi uygulanması zor olan sığ su akım denklemlerinin çözümü için pratik ve hızlı olan MacCormack ve Lax-Wendroff sayısal şemaları TVD metodu ile iyileştirilmiştir.

Uygulama çalışmaları olarak literatürde sıkça çalışılan ve kritik hidrolik problemleri olarak bilinen baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının arazi koşullarında ilerlemesi ve bazı diğer varsayımsal problemler simüle edilmiştir. Şekil 4.1 ve şekil 4.3'te görüldüğü gibi normal Lax-Wendroff ve MacCormack şemaları çok büyük ve fiziki şok dalgası ilerleyişinin gerçekliğini yansıtmayan salınımlar içermektedir. Bu salınımlar ve nümerik difüzyonlardan dolayı model kısa bir süre içinde anormal davranışlar sergileyip çökmektedir. Şekil 4.5 ve 4.7'de görüldüğü gibi TVD metodu ile iyileştirilmiş Lax-Wendroff ve MacCormack şemalarındaki yapay salınımlar önlenmiş ve şok dalgasının ilerleyişi doğru bir şekilde simüle edilmiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere kalite (2016) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu ile iyileştirilmiş Lax-Wendroff şemasının verdiği sonuçlar tamamen aynıdır. Sonuçları şekil 4.16'da gösterilen baraj yıkılması problemin analiz sonuçları literatürde mevcut analiz sonuçları ile tamamen uyumludur. Bir baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının bir bariyer etrafındaki sayısal modellenmesinde iyileştirilmiş MacCormack şeması literatürdeki sonuçları verememiştir. Ancak iyileştirilmiş Lax-Wendroff şeması bu problemi çok rahat çözmekte ve literatürdeki çalışmalar ile tamamen uyumlu sonuçlar vermiştir.

Bu tez çalışmasının başlangıcında Lax-Wendroff şeması, MacCormack şeması ve Godunov şeması olarak üç farklı sayısal şema ile sığ su akım denklemlerinin

özüleği planlanmıştı ancak vaktimizin sınırlı olduğundan sığ su akımların Godunov şeması ile modellenmesi gelecekteki çalışmalarda yapılacaktır.



6. KAYNAKLAR

Ak, T., “Bazı Sığ Su Dalga Denklemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Sayısal Çözümleri”, Doktora Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik Anabilim Dalı, Nevşehir, (2017).

Aksoy, H. G., “Akış Problemlerinin Sonlu Hacimler Metodu İle Yapısal Olmayan Hesap Ağlarında Çözümü”, (2001).

Alcrudo, F. and Garcia-Navarro, P., “A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations”, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 16, 489–505, (1993).

Aleksyuk, A. I., Malakhov, M. A. and Belikov, V. V., “The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom”, *J. Comput. Phys*, 450, 110801, (2022).

Alias, N. A., Liang, Q. and Kesserwani, G., “A Godunov-type scheme for modelling 1D channel flow with varying width and topography” , *Comput. and Fluids*, 46, 88–93, (2011).

A-Medvidova, M. L., “Numerical Modeling of Shallow Flows Including Bottom Topography And Friction Effects”, *Proc. Algoritm*, 73–82, (2005).

Aoyama, Y., Adityawan, M. B., Widiyanto, W., Mitobe, Y., Komori, D. and Tanaka, H., “Coastal storm hazards Coastal Education & Research Foundation”, *J. Coast. Res*, 33, 216–219, (2016).

Arkış, T., “Baraj Yıkılması Sonucu Oluşan Taşkın Dalgalarının Deneysel Ve Nümerik Metodlar ile Araştırılması”, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik, Hidroloji ve Su Kaynakları Programı, İzmir, (2020).

Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P. and Ziveri, C., “A weighted surface-depth gradient method for the numerical integration of the 2D shallow water equations with topography”, *Adv. Water Resour*, 31, 962–974, (2008).

Aureli, F., Mignosa, P. and Tomirotti, M., “Dam-break flows in presence of abrupt bottom variations”, *Proc. XXVIII IAHR Int. Congr*, (1999).

Aureli, F., Mignosa, P. and Tomirotti, M., “Numerical simulation and experimental verification of Dam-Break flows with shocks”, *J. Hydraul. Res*, 38, 197–206, (2000).

Aybar, A., “Computational modelling of free surface flow in intake structures using Flow 3D software”, Master Thesis, Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, (2012).

- Aydın, I., “Nonlinear Mixing Length Model for Prediction of Secondary Currents in Uniform Channel Flows”, *J. Hydraul. Eng.*, 135, 146–153, (2009).
- Behrens, J. and Dias, F., “New computational methods in tsunami science”, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 373, 1–15, (2015).
- Bell, S. W., Elliot, R. C. And Chaudry, M. H., “Experimental results of two dimensional dam-break flows”, *J. Hydraul. Res.*, 30, 225–252, (1992).
- Bellos, C. V., Soulis, J. V. and Sakkas, J. G., “Computation of two-dimensional dam-break-induced flows”, *Adv. Water Resour.*, 14, 31–41, (1991).
- Bellos, C. V., Soulis, V. and Sakkas, J. G., “Etude experimental de l’écoulement bi-dimensionnel produit par la rupture d’un barrage”, *J. Hydraul. Res.*, 30, 47–63, (1992).
- Bellos, V. and Hrisanthou, V., “Numerical simulation of 2D dam-break flood wave”, *Eur. Water*, 33, 43 ,(2011).
- Beneito, R. D. and Gavara, A. M., “A flux-limited second order scheme for hyperbolic conservation laws with source terms”, *Monogr. la Real Acad. Ciencias Zaragoza*, 31, 77–87, (2009).
- Benkhaldoun, F. and Saïd, M., “A simple finite volume method for the shallow water equations” , *J. Comput. Appl. Math.*, 234, 58–72, (2010).
- Brufau, P. and Garcia-Navarro, P., “Two-dimensional dam break flow simulation”, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 33, 35–57, (2000).
- Cannata, G., Petrelli, C., Barsi, L., Camilli, F. and Gallerano, F., “3D free surface flow simulations based on the integral form of the equations of motion”, *WSEAS Trans. Fluid Mech*, 12, 166–175 ,(2017).
- Castro-Orgaz, O. and Hager, W. H., "Shallow water hydraulics", *Shallow Water Hydraulics*, doi:10.1007/978-3-030-13073-2, (2019).
- Casulli, V. and Cattani, E., “Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow”, *Comput. Math. with Appl.*, 27, 99–112, (1994).
- Casulli, V. and Stelling, G. S., “Numerical Simulation of 3D Liquid–Gas Distribution”, *J. hydraul. eng.*, 686, (1998).
- Choi, Y. K., Seo, S. N., “shock Capturing Shallow Water Model for Long Waves Generated by a Moving Atmospheric Pressure”, *J. Coast. Res.*, 111, (2017).
- Chun, H. and Suh, K. D., “Analysis of Longshore Currents with an Eulerian Nearshore Currents Model” , *J. Coast. Res.*, 33, 1352–1366, (2017).

- Chun, J., Ahn, K. and Suh, K. D., “Computations of three-dimensional nearshore currents using dynamically coupled wave-current model”, in *J. Coast. Res*, 995–1002, (2011).
- Colella, P., "Volume-Of-Fluid Methods For Partial Differential Equations", (2001).
- D. H. Zhao, H. W. Shen, J. S. Lai, and G. Q. T., “Approximate Riemann Solvers In Fvm For 2d Hydraulic Shock Wave Modeling”, *J. Hydraul. Eng*, 122, 692–702, (1996).
- Darwish M., F. M. and Mangani, L., "The Finite Volume Method in Computational Fluid Dybamics", *Finite Volume Method - Pow. Means.Eng. Des*, doi:10.5772/38644, (2012).
- Dashtekhaki, M. Z., Ghaeini-Hessaroezeh, M. “Numerical Simulation of Tidal Wave over Wavy Bed”, *J. Coast. Mar. Eng*, Vol. 1, 39–45, (2018).
- Davis, S. F., “A Simplified TVD Finite Difference Scheme via Artificial Viscosity”, *SIAM J. Sci. Stat. Comput*, 8, 1–18, (1987).
- Deilami-Tarifi, M., Behdarvandi-Askar, M., Chegini, V. and Haghghi-Pour, S., “Modeling of the Changes in Flow Velocity on Seawalls under Different Conditions Using FLOW-3D Software”, *Open J. Mar. Sci*, 06, 317–322, (2016).
- Di Cristo, C., Greco, M., Iervolino, M., Martino, R. and Vacca, A., “A remark on finite volume methods for 2D shallow water equations over irregular bottom topography”, *J. Hydraul. Res*, 1–8 ,(2020).
- Dressler, R. F., “Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions”, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* (1934), 49, 217, (1952).
- Ergün, A., Kumbasar, N., “İnce plaklar için geliştirilmiş sonlu farklar yöntemi”, *itüdergisi/d*, cilt: 2, sayı: 1, 35-44, (2003).
- Fennema, R. J. and Chaudhry, M. H., “Explicit Methods for 2-D Transient Free Surface Flows”, *J. Hydraul. Eng*, 116, 1013–1034, (1990).
- Ferziger J, Perić M, S. R., "Chapter 4 Finite Volume Methods", *Computational Methods for Fluid Dynamics*, doi:10.1007/978-3-319-99693-6, (2020).
- Filinte, E. G., “Konveksiyon-Difüzyon Problemlerinin Sonlu Hacim Yöntemi İle Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana ,(2006).
- Fraccarollo, L., Capart, H. and Zech, Y., “A Godunov method for the computation of erosional shallow transients”, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 976, 951–976, (2003).

George, D. L., “Numerical Approximation of the Nonlinear Shallow Water Equations with Topography and Dry Beds: A Godunov-Type Scheme”, Master Thesis, University of Washington, (2004).

GÜL, E., “Dolusavak Ve Enerji Kırıcı Yapı Tip Seçiminin Uzman Sistemler İle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik Bilim Dalı, (2015).

Gümüş, V., “Dolusavak akımının sayısal modellenmesi”, Dotor Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 2014.

Harten, A., Hyman, J. M. and Lax, P. D., “On Finite-Difference Approximations and Entropy Conditions”, Commun. PURE Appl. Math, XXIX, 297–322, (1976).

Heuzé, T., “Lax–Wendroff and TVD finite volume methods for unidimensional thermomechanical numerical simulations of impacts on elastic–plastic solids”, J. Comput. Phys, 346, 369–388 ,(2017).

İşcen, B. N., Öktem, N., Yılmaz, B. ve Aydın, İ., “Sığ Akım Denklemlerinin Hidrolikte Kullanılması Üzerine Değerlendirmeler”, TİMO Tek. Dergi, 28, 7747–7747, (2017).

İşcen, B. N., “Computer Code Development For Numerical Solution Of Depth Integrated Shallow Water Equations To Study Flood Waves”, Master Thesis, Middle east Technical University, The Graduavate Shool of Natural and Applied Sciences, Ankara, (2015).

İşlek, H., “Baraj Yıkılmasının Farklı Türbülans Modelleri Kullanılarak Sayısal Modellemesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul, (2021).

Jovanović, M. and Djordjević, D., “Experimental verification of the MacCormack numerical scheme”, Adv. Eng. Softw, 23, 61–67, (1995).

Jung, T-h., Son, S. and Lynett, P.J., “A Comprehensiv Sensitivity Analysis of Tsunami Model System to the Parametric and Input Unncertainties”, 2, 6–11, (2016).

Kaan Dal., “Eğimli Kanalda Ardışık Baraj Yıkılmasının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İnkenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay (2018).

Kalita, H. M., “A New Total Variation Diminishing Predictor Corrector Approach for Two-Dimensional Shallow Water Flow”, Water Resour. Manag, 30, 1481–1497, (2016).

Karahan. H., “The impacts of sedimentation caused in Izmir Bay by Gediz River on circulation and water quality”, Fifth International Conference on Coastal Engineering, Wessex Institute of Technology, UK, (2001a).

Karahan. H., “An iterative method for the solution of dispersion equation in shallow water”, Sixth International Conference on The Modeling, Monitoring and Management of Water Pollution, Wessex Institute of Technology, UK, (2001b).

Karahan. H., “Numerical modelling of shallow water using an iterative solution algorithm”, Fourth International Conference on Environmental Problems in Coastal Regions, Wessex Institute of Technology, UK, (2002).

Karakoca, A., “İplik Bobini Kurutma İşleminde Sıcaklık Alanının Sonlu Farklar Yöntemi İle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Takırdağ, (2017).

Katopodes, N. D., "Chapter 5 Finite-Difference Methods", (2019).

Kaveh, N. A., Ghaheri, A., Chegini, V. and Nazarali, M., “Application of a Hybrid Approach for Tide-Surge Modeling in the Persian Gulf”, J. Coast. Res, 32, 1126–1134, (2016).

Kesserwani, G., “Topography discretization techniques for Godunov-type shallow water numerical models: A comparative study”, J. Hydraul. Res, 51, 351–367, (2013).

Khoperskov, A. and Khrapov, S., “A Numerical Simulation of the Shallow Water Flow on a Complex Topography”, Numer. Simulations Eng. Sci, doi:10.5772/intechopen.71026, (2018).

Kim, J., “Finite Volume Methods for Tsunamis Generated by Submarine Landslides”, University of Washington, 2014.

Kim, K. O., Choi, B. H., Pelinovsky, E., Yuk, J. H. and Min, B. I., “An East Sea/Japan Sea tsunami simulator”, J. Coast. Res, 1058–1062, (2011).

Kocaman, S., “Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, (2007).

Korichi, K. and Hazzab, A., “Application of shock capturing method for free surface flow simulation”, Jordan J. Civ. Eng, 4, 310–320, (2010).

Lax, P. D. and Wendroff, B., “Difference schemes for hyperbolic equations with high order of accuracy”, Commun. Pure Appl. Math, 17, 381–398, (1964).

Liang, D., Falconer, R. A. and Lin, B., “Comparison between TVD-MacCormack and ADI-type solvers of the shallow water equations”, Adv. Water Resour, 29, 1833–1845, (2006).

Lörcher, F. and Munz, C.-D., “High order Lax-Wendroff-Type schemes for linear wave propagation”, in European Conference on Computational Fluid Dynamics, 1–16, (2017).

- Lu, X., Mao, B., Zhang, X. and Ren, S., “Well-balanced and shock-capturing solving of 3D shallow-water equations involving rapid wetting and drying with a local 2D transition approach”, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 364, 112897, (2020).
- Luo, C., Xu, K. and Zhao, Y., “A TVD discretization method for shallow water equations: Numerical simulations of tailing dam break”, *Int. J. Model. Simulation, Sci. Comput.*, 8, 22, (2017).
- Lynett, P. and F. Liu, P. L., “A Numerical Study of Submarine-Landslide-Generated Waves and Run-Up”, *R. Soc.* 458, 2885–2910, (2002).
- Machalińska-Murawska, J. and Szydłowski, M., “Lax-Wendroff and McCormack schemes for numerical simulation of unsteady gradually and rapidly varied open channel flow”, *Arch. Hydroengineering Environ. Mech.*, 60, 51–62, (2013).
- Ming, H. T. and Chu, C. R., “Two-dimensional shallow water flows simulation using TVD-MacCormack scheme”, *J. Hydraul. Res.*, 38, 123–131, (2000).
- Mingham, C. G., Causon, D. M. and Ingram, D. M., “A TVD MacCormack scheme for transcritical flow”, *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Marit. Eng.*, 148, 167–175, (2001).
- Naik, S., “Numerical Simulation Of A Dam Break Flow Using Finite Difference Approach”, Master Thesis, Department of Civil Engineering National Institute of Technology, Water Resource Engineering, Rourkela India, (2015).
- Neelz, S., Wallis, S. G. and Manson, J. R., “On Options for the Numerical Modelling of the Diffusion Term in River Pollution Simulations”, in *Godunov Methods*, doi:10.1007/978-1-4615-0663-8_66, (2001).
- Nikolaos D., K., “Chapter 12 Volume of Fluid Method”, in *Free-Surface Flow*, 766–802, doi:10.1016/b978-0-12-815485-4.00018-8, (2019).
- Nikolaos D., K., “Chapter 7 Methods for Open-Channel Flow”, in *Free-Surface Flow vol.*, M 404–498, (2019).
- Ouyang, C., He, S. and Xu, Q., “MacCormack-TVD Finite Difference Solution for Dam Break Hydraulics over Erodible Sediment Beds”, *J. Hydraul. Eng.*, 141, 06014026, (2015).
- Ouyang, C., He, S., Xu, Q., Luo, Y. and Zhang, W., “A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain”, *Comput. Geosci.*, 52, 1–10, (2013).
- Öktem, N., “İki boyutlu sığ akım denklemlerinin sırasız ağda sayısal çözümü için bilgisayar yazılımı geliştirilmesi”, *Sak. Univ. J. Sci.*, 22, 364–382, (2017).
- Palemon-Arcos, L. et al., “Numerical Assessment of Tsunami-Structure Interaction (Guerrero, Mexico)”, *J. Coast. Res.*, 36, 1302–1312, (2020).

- Qiu, J. And Shu, Chi-W., “Finite Difference Weno Schemes With Lax–Wendroff-Type Time Discretizations”, *SIAM J. SCI. Comput*, 24, 323–330, (2003) .
- Robinson, C. R., “Shallow Water Equations (SWE)”, *SYRACUSE Univ*, 307–356, doi:10.1201/b11856-11, (2011).
- Roe, P. L., "Generalized formulation of TVD Lax-Wendroff schemes", Granfield Institute of Technology U. K, (1984).
- Stoker, J. J, “Water Wave, the mathematical Theory with Applications”, (1957).
- Sulistyono, B. A., Wiryanto, L. H. and Mungkasi, S., “A staggered method for simulating shallow water flows along channels with irregular geometry and friction”, *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol*, 10, 952–958, (2020).
- SWEBY, P. K., “Godunov Methods”, *Elem. Numer. Methods Compressible Flows*, 105–146, doi:10.1017/cbo9780511617447.006, (2001)
- Şimşek, O., Gümüş, V. ve Özlük, A., “Şaşırtmalı Mahmuzların Üç Boyutlu Sayısal Analizi”, *Müh. Bilim. ve Tasarım Derg*, 9, 187–198, (2021).
- Thuburn, J., “TVD schemes, positive schemes, and the universal limiter”, *Mon. Weather Rev*, 125, 1990–1993, (1997).
- Toro, E. F. and Garcia-navarro, P., “Godunov-type methods for free-surface shallow flows : A review Godunov-type methods for free-surface shallow flows : A review Méthodes de type Godunov pour les écoulements peu profonds à surface libre : Une revue”, *J. Hydraul. Res*, 45, 37–41, (2010).
- Toro, E. F., "Chapter 16 Methods for muti-dimensional PDEs", vol. 49, (2009).
- Toro, E. F., "Godunov Methods", (2001).
- Toro, E. F., "Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics A Practical Introduction Third Edition", *Toward a Media History of Documents*, (2014).
- Toro, E. F., "Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamic", vol. 49, (2009).
- Toro, E. F., “Chapter 6 Godunovs method for non-linear systems”, 49, 1–40, (2009).
- Toro, E. F., “Fluid Dynamics Equations”, in *Fundamentals of Fluid Mechanics and Transport Phenomena*, 151–197, doi:10.1002/9780470611500.ch4, (2010).
- Toro, Luigi Fraccarollo, E. F., “Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems Evaluation expérimentale et numérique d ’ un modèle de Saint-Venant bi-dimensionnel appliqué aux ruptures de barrages”, *J. Hydraul. Res*, 33, 37–41, (2010).

Tseng, M. H., “The improved surface gradient method for flows simulation in variable bed topography channel using TVD-MacCormack scheme”, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 43, 71–91, DOI: 10.1002/flid.605, (2003).

Uçar, G., “Helikopter Etrafındaki Akışın Sonlu Hacimler Yöntemiyle Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul, (2005).

Van Rijn, L. C., “Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; Part I: Tidal wave propagation in convergent estuaries”, *Ocean Dyn*, 61, 1719–1741, (2011).

Velioglu, D., “Advanced Two- And Three-Dimensional Tsunami Models: Benchmarking And Validation”, Doctoral Thesis, Middle east Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, (2017).

Waade, E., Huss, S. and Sj, W., "Predicting the Steady State Solutions of the 1D Shallow Water Equations", (2020).

Wang, J. S., Ni, H. G., and He, Y. S., “Finite-Difference TVD Scheme For Computation Of Dam-Break Problems”, *J. Hydraul. Eng*, 253–262, (2000).

Wendroff, B., “Approximate Riemann Solvers, Godunov Schemes and Contact Discontinuities”, in *Godunov Methods vol.*, 35 1023–1056, (2001).

Wilders, P., Van Stun, T. L., Stelling, G. S. and Fokkema, G. A., “A Fully Implicit Splitting Method For Accurate Tidal Computations”, *I. J. Num. Meth, In Engineering vol. 26*, (1988).

Xin, X., Bai, F. and Li, K., “Numerical Simulating Open-Channel Flows with Regular and Irregular Cross-Section Shapes Based on Finite Volume Godunov-Type Scheme”, *Int. J. Comput. Methods*, 18, (2020).

Xing, Y. and Shu, C. W., “A Survey of High Order Schemes for the Shallow Water Equations”, *J. Math. Study*, 47, 221–249, (2014).

Xu, R., Borthwick, A. G. L., Zhuang, W., Xu, B. and Yang, F., “Large Time Step TVD High Order Scheme for Shallow Water Equations”. *SSRN Electron. J*, doi:10.2139/ssrn.3990661, (2022).

Yang, B., Ma, J., Huang, G. and Cao, D., “Development and Application of 3D Visualization Platform for Flood Evolution in Le’an River Basin of Wuyuan”, in *IOP Conference Series: Ear. Environ. Sci*, vol. 638, (2021).

Ye, J. and McCorquodale, J. A., “Simulation of Curved Open Channel Flows by 3D Hydrodynamic Model”, *J. Hydraul. Eng*, 124, 687–698, (1998).

Zhou, D. H., Shen, H. V., Laj, J. S. and Tabios, G. Q., "Approximate Riemann solvers in FVM for 2D Hydraulic Shock Wave Modelling", J. Hydraul. Eng, 122, 692–702, (1996).

Zhou, J. G. and Stansby, P. K., "2D shallow water flow model for the hydraulic jump", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 29, 375–387, (1999).

Zhou, J. G., Causon, D. M., Mingham, C. G. and Ingram, D. M., "Numerical Prediction of Dam-Break Flows in General Geometries with Complex Bed Topography", J. Hydraul. Eng, 130, 332–340, (2004).

Zhou, J. G., Causon, D. M., Mingham, C. G. and Ingram, D. M., "The Surface Gradient Method for the Treatment of Source Terms in the Shallow-Water Equations", J. Comput. Phys, 168, 1–25, (2001).

Zoppou, C. and Roberts, S., "Catastrophic collapse of water supply reservoirs in urban areas", J. hydraul. eng, 125, 686-695, (1999).

ریحانه ا. حسام ق.، کاظم ش.، "شبیه سازی جریان غیرماندگار ناگهانی در کانال های آبیاری با استفاده از روش عددی MacCormack-TVD"، 13-21، آب ایران، (2019).