



**FARKLI AKIM KOŞULLARINDA KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDA
OLUŞAN OYULMALARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Melek ÖZPOLAT

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Melek ÖZPOLAT tarafından hazırlanan “FARKLI AKIM KOŞULLARINDA KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDA OLUŞAN OYULMALARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mete KÖKEN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç Dr. Nihat EROĞLU

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 15/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Melek ÖZPOLAT

15/01/2020

FARKLI AKIM KOŞULLARINDA KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDA OLUŞAN OYULMALARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Melek ÖZPOLAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Akarsularda değişen akım koşulları ve buna bağlı olarak gelişen yatak profilleri akarsu köprüleri ve köprüye ait ilgili yapıları hem statik hem de hidrodinamik açıdan etkilemektedir. Köprü yapılarının etrafında meydana gelen oyulmalar köprü güvenliğini tehdit eden başlıca sebeplerden biridir. Bu çalışmanın amacı köprü tabliyesi altında kesit daralması nedeniyle meydana gelebilecek oyulma çukurunu sayısal model yardımıyla incelemektir. Çalışmada temiz su ve basınçlı akım koşullarında farklı akım derinliklerinde köprü tabliyesi altında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği ve şekli sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma için ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılmıştır. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri ve farklı türbülans modelleri kullanılarak simülasyonu yapılan testler daha önceden laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda deney verileri ile sayısal model sonuçları karşılaştırılmış, hem maksimum oyulma çukuru derinliği hem de şekli bakımında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmada türbülansın oyulma çukuru üzerinde ciddi etkisi olduğu, sayısal modelde kullanılan k- ϵ ile RSM türbülans modellerinin yüksek türbülanslı akım durumunda yeterli olmadığı görülmüştür. Sayısal modelde kullanılan sınır şartları ve parametrelerin başlangıç değerleri ile model sonuçlarının deney verilerine yaklaştığı görülmüştür. Deney sürecinin uzun ve maliyetli olması göz önüne alındığında sayısal simülasyon çalışmalarıyla projelendirme sürecinde tasarımcıların farklı akım koşulları ve proje kriterlerine göre tasarımlarını güvenli ve ekonomik olarak gerçekleştirmeleri mümkün olabilecektir.

Bilim Kodu : 91122

Anahtar Kelimeler : Düşey daralma oyulması, Sediment taşınımı, Akarsu köprüsü, Sayısal modelleme, Türbülans, Basınçlı akım

Sayfa Adedi : 99

Danışman : Doç.Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

NUMERICAL ANALYSIS OF VERTICAL CONTRACTION SCOUR UNDER DIFFERENT FLOW CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Melek ÖZPOLAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

Changing flow conditions in rivers and bed profiles formed due to those changes affect river bridges and related structures both statically and hydrodynamically. Local and contraction scour formed around bridge structures is a major cause of threat to bridge safety. The aim of this study is to investigate the vertical contraction score hole underneath the bridge deck by using numerical model. In this study, the maximum scour hole depth and shape formed under the deck was simulated under clear water and pressure flow conditions. Engraving under the bridge deck is investigated numerically under pressure flow conditions and at different current depths. A commercial computational fluid dynamics software was used for numerical simulations. Results of numerical simulations obtained by solving Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations and various turbulence models were than compared with available laboratory data. In the study, model results with the Laboratory data were compared and it was observed that the model predictions were in good agreement with the experimental data with respect to both maximum scour hole depth and shape. In the study, it was observed that turbulence has a profound effect on scour hole and the k- ϵ and RSM turbulence models adopted in the numerical model was insufficient at high turbulent flow conditions. It was noted that the agreement between the model results and the experimental data was improved with the boundary conditions and initial values of parameters adopted in the simulations. Considering the durations and cost of experimental studies, numerical model simulations might enable bridge engineers to design river bridges safely and economically under various flow conditions and project criteria.

Science Code : 91122

Key Words : Vertical contraction scour, Sediment transport, River bridge, Numerical modelling, Turbulence, Pressure Flow

Page Number : 99

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada her zaman yanımda olan, ilgi ve desteğini her daim devam ettirmiş tez danışmanım değerli hocam Doç.Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu çalışmamda da manevi olarak beni destekleyen meslektaşım kıymetli babama ve aileme teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca göstermiş oldukları sabır ve ilgiden dolayı meslektaşım sevgili eşime ve güzel kızlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE OYULMA MEKANİZMASI.....	5
2.1. Literatür Araştırması	5
2.2. Oyulma Mekanizması	23
2.2.1. Katı madde hareketi	23
2.2.2. Kritik kayma gerilmesi.....	25
2.2.3. Yerel oyulma mekanizması.....	26
3. 3-B SAYISAL HİDRODİNAMİK VE SEDİMENT TAŞINIM MODELİ.....	29
3.1. Sayısal Model Genel Bilgileri.....	29
3.2. Hidrodinamik Model Temel Eşitlikleri.....	30
3.2.1. Navier-Stokes denklemleri.....	30
3.2.2. Türbülans modelleri	32
3.3. Sediment Taşınım Modeli	36
3.3.1. Çok fazlı akış modelleri	36
3.4. Çözüm Yöntemi	40
3.4.1. Çözüm ağı	41
3.4.2. Sınır koşulları	42

	Sayfa
3.4.3. Çözüm algoritmaları.....	43
3.4.4. Ayırıklaştırma.....	46
3.4.5. Yakınsama kriteri ve gevşeme parametreleri	48
4. KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDA DARALMA OYULMASININ SAYISAL MODELLE BENZEŞİMİ	49
4.1. Deneysel Çalışma.....	49
4.2. Sayısal Model Kurulumu	51
4.2.1. Geometri oluşturulması.....	51
4.2.2. Ağ oluşturulması	52
4.2.3. Çözüm metodu ve sınır koşulları	54
5. SAYISAL MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	57
5.1. k-ε Türbülans Modeline Ait Sayısal Çözüm Sonuçları.....	57
5.1.1. k-ε türbülans modeline ait sayısal sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırılması	60
5.2. RSM Türbülans Modeline Ait Sayısal Model Sonuçları	71
5.2.1. RSM türbülans modeline ait sayısal sonuçların deney verileriyle karşılaştırılması	74
5.3. k-ε ve RSM Türbülans Modellerine Ait Sayısal Sonuçların Karşılaştırması	82
6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	91
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	99
DİZİN.....	100

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Haung ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait küçük ve büyük boyutlu modellerin geometrik bilgileri.....	18
Çizelge 3.1. Fluent'te kullanılan türbülans modelleri.....	32
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmaya ait kullanılan parametreler ve maksimum oyulma çukuru derinlikleri	51
Çizelge 4.2. 80 lt/sn'lik debi, 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği ve $Fra = 0,155$ için çözüm ağı bağımsızlık testine ait bilgiler.....	53
Çizelge 4.3. Fluent'te sediment için tanımlanan fiziksel özellikler ve yaklaşımlar	54
Çizelge 5.1. k- ϵ türbülans modeli ve deneysel çalışmaya ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri	57
Çizelge 5.2. k- ϵ türbülans modeli ile yapılan sayısal çözümler sonucunda kanaldan taşınan sediment miktarları	61
Çizelge 5.3. RSM türbülans modeli ve deneysel çalışmaya ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri	71
Çizelge 5.4. RSM türbülans modeline ait sayısal çözüm sonuçları için kanaldan çıkan sediment miktarı	73
Çizelge 5.5. k- ϵ ve Reynolds Stress Model ile yapılan sayısal çözümlere ait değerler..	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Zhao ve diğerleri (2007)'nin çalışmasına ait sayısal modelin geometrisi ve sınır koşulları	8
Şekil 2.2. Zhao ve diğerleri (2007)'nin çalışmasına ait sayısal sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması	9
Şekil 2.3. Guo ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait deney düzeneği	10
Şekil 2.4. Shan ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait deney parametreleri	11
Şekil 2.5. Shan ve diğerleri (2012)'ne ait HAD simülasyonundan elde edilen akım ayrışma bölgesi.....	12
Şekil 2.6. Shan ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait PIV verilerinden elde edilen akım ayrışma bölgesi.....	13
Şekil 2.7. Tulimilli ve diğerleri (2011)'nin çalışmasına ait deneysel ve sayısal kanal kesiti	16
Şekil 2.8. Tullimili ve diğerleri (2011)'nin çalışmasına ait deneysel ve HAD çalışmalarından elde edilen üç boyutlu oyulma çukuru grafikleri	17
Şekil 2.9. Haung ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait modelin 3-B ağ yapısı.....	19
Şekil 2.10. Haung ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait bağıl oyulma derinliği eş yükselti eğrileri.....	19
Şekil 2.11. Azhari ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait sayısal modelin ağ yapısı	20
Şekil 2.12. Azhari ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait sayısal modelin sınır koşulları.....	20
Şekil 2.13. Zhu ve diğerleri(2012)'nin çalışmasına ait sayısal modelin planı ve sınır koşulları.....	21
Şekil 2.14. Zhu ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait sayısal model ağ yapısı.....	22
Şekil 2.15. Zhu ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait sayısal model ile deneysel oyulma çukurlarının karşılaştırılması.....	23
Şekil 2.16. Taneye etkiyen kuvvetler.....	24
Şekil 2.17. Boyutsuz Shields diyagramı	25
Şekil 2.18. Köprü ayağı etrafında meydana gelen akım ve çevrıntiler	27
Şekil 2.19. Köprü tabliyesi altında oluşan akım ve hız profilleri	28

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Akışa ait hız büyüklüğünün zaman göre bileşenleri.....	31
Şekil 3.2. Fluent çok fazlı akış modelleri	37
Şekil 3.3. Fluent fazlar arası değişim katsayısı yaklaşımları	40
Şekil 3.4. İki ve üç boyutlu çözüm ağı elemanları.....	41
Şekil 3.5. Yapısal ve yapısal olamayan çözüm ağı geometrileri	42
Şekil 3.6. Sınır koşulları için yüzey ve hücre bölgeleri	43
Şekil 3.7. Ayrık çözüm algoritması	44
Şekil 3.8. Bütünleşik çözüm algoritması	45
Şekil 3.9. Genel taşınım denkleminin ayrıklaştırılmasında kullanılan kontrol hacmi...	47
Şekil 4.1. Deneysel çalışmaya ait kanalın şeması.....	49
Şekil 4.2. Deneysel çalışmaya ait kanal tabanı	49
Şekil 4.3. Deneysel çalışmaya ait köprü tabliye modeli	50
Şekil 4.4. Kanal ve köprü tabliyesi için oluşturulan geometri ve sınır koşulları.....	51
Şekil 4.5. Kanal ve köprü tabliyesinin sayısal çözümü için oluşturulan ağ yapısı	52
Şekil 4.6. Kanal ve köprü tabliyesinin sayısal çözümü için oluşturulan ağ yapısı	53
Şekil 4.7. Çözüm ağı bağımsızlık grafiği.....	54
Şekil 4.8. Sayısal çözüme ait yatak profiline karşılık gelen sediment hacim fraksiyon kontürü.....	55
Şekil 5.1. 70 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen sayısal oyulma çukuru profilleri	58
Şekil 5.2. 80 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen sayısal oyulma çukuru profilleri	59
Şekil 5.3. 90 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen sayısal oyulma çukuru profilleri	60
Şekil 5.4. 70 lt/sn ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	62
Şekil 5.5. 70 lt/sn ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal modele ait $x=4.675$ m kanal enkesiti	62

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. 70 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	62
Şekil 5.7. 70 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal modele ait $x=4.65$ m kanal enkesiti	63
Şekil 5.8. 70 lt/sn ve 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	63
Şekil 5.9. 70 lt/sn ve 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	64
Şekil 5.10. 70 lt/sn ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	64
Şekil 5.11. 70 lt/sn ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait $x=4.625$ m kanal en kesiti	64
Şekil 5.12. 80 lt/sn ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	65
Şekil 5.13. 80 lt/sn ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	65
Şekil 5.14. 80 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri.....	66
Şekil 5.15. 80 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	66
Şekil 5.16. 80 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	67
Şekil 5.17. 80 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal modele ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	67
Şekil 5.18. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	68
Şekil 5.19. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti	68
Şekil 5.20. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	69
Şekil 5.21. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti	69
Şekil 5.22. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait oyulma çukuru profilleri.....	70

Şekil	Sayfa
Şekil 5.23. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m için kanal kesiti.....	70
Şekil 5.24. $k-\epsilon$ türbülans modeline ait 70 lt/sn debi ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliği için elde edilen akım iplikcikleri	70
Şekil 5.25. 70 lt/sn durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde RSM türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş olan sayısal oyulma çukuru profilleri	72
Şekil 5.26. 80 lt/sn durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde RSM türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş olan sayısal oyulma çukuru profilleri	72
Şekil 5.27. 90 lt/sn durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde RSM türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş olan sayısal oyulma çukuru profilleri	73
Şekil 5.28. 70 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	74
Şekil 5.29. 70 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4,65$ m kanal enkesiti	74
Şekil 5.30. 70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	75
Şekil 5.31. 70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	75
Şekil 5.32. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	76
Şekil 5.33. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti	76
Şekil 5.34. 70 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	77
Şekil 5.35. 70 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti	77
Şekil 5.36. 80 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	78
Şekil 5.37. 80 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	78
Şekil 5.38. 80 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	78
Şekil 5.39. 80 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.40. 80 lt/sn ve $y_a=30$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	79
Şekil 5.41. 80 lt/sn ve $y_a=30$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	79
Şekil 5.42. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	80
Şekil 5.43. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna $x=4.65$ m kanal en kesiti	80
Şekil 5.44. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	81
Şekil 5.45. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	81
Şekil 5.46. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri	81
Şekil 5.47. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti	82
Şekil 5.48. RSM türbülans modeline ait 70 lt/sn debi ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliği için elde edilen akım iplikcikleri	82
Şekil 5.47. 70 lt/sn ve $y_a=25$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	84
Şekil 5.48. 70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	84
Şekil 5.49. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	85
Şekil 5.50. 70 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	85
Şekil 5.51. 80 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	86
Şekil 5.52. 80 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	86
Şekil 5.53. 80 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	87
Şekil 5.54. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	87

Şekil	Sayfa
Şekil 5.55. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	88
Şekil 5.56. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri.....	88
Şekil 5.57. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ modeli çözümüne ait 3-B oyulma çukuru grafiği	89
Şekil 5.58. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için RSM modeli çözümüne ait 3-B oyulma çukuru grafiği	89
Şekil 5.59. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel çalışmaya ait 3-B oyulma çukuru grafiği	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Tanenin akıma dik alanı, m ²
B	Basıncılı akım durumu
c	Hücre
C	Courant sayısı
C_D	Direnç katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_μ	k-ε model sabiti
d	Sediment tane çapı, m
d₅₀	Taban malzemesinin medyan çapı, m
D_{t,ij}	Türbülans uzama terimi
D_{ij}	Moleküler difüzyon terimi
E_{ij}	Deformasyon oranı
f	Sürüklenme katsayısı
F	Taneyle teması bulunan tanelerin uyg. kuvvetler
F_D	Hidrodinamik sürüklenme kuvveti
F_L	Hidrodinamik kaldırma kuvveti
Fr	Froude sayısı
Fr_*	Tane sürüklenme Froude sayısı
g	Yer çekimi ivmesi, m/sn ²
G'	Tanenin su içindeki ağırlığı
H_b	Köprü kirişi ile bozulmamış taban sev. ara. mesafe, m
h_{ue}	Tabliye altına yönlendirilen etkili akım derinliği, m
h_c	Ayrışma bölgesinin bozulmamış tabana uzaklığı, m
h_q	q'nıncı fazın entalpisi,
h_s	Akım ayrışma bölgesi kalınlığı, m
H_T	Tabliye alt kotunun bozulmamış tabana mesafesi, m

Simgeler**Açıklamalar**

h_t	Kiriş alt kotunun akım yüzeyine mesafesi, m
h_w	Tabliye üstünden savaklanan akım derinliği, m
$\bar{I}$	Değişmez gerilme tensörü
k	Türbülans kinetik enerjisi, m^2/sn^2
K	Kiriş yüksekliği, m
K_{sl}	Fazlar arası momentum değişim katsayısı
lt	Litre
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
$\dot{m}$	Kütleli debi, kg/sn
$n_{yüzey}$	Yüzey sayısı
P_{ij}	Türbülans gerilmeleri üretimi
Q	Debi, m^3/sn
Q_{pq}	Fazlar arası ısı değişim yoğunluğu
R	Korelasyon katsayısı
r	Yarıçap, m
Re	Reynolds sayısı
Re_*	Tane sürüklenme Reynolds sayısı
Sm	Kaynak terim
sn	Saniye
T	Köprü tabliye kalınlığı, m
t	Zaman, sn
u	Tane yakınlarındaki akım hızı, m/sn
u_{cr}	Malzemeyi harekete geçiren kritik akım hızı, m/sn
u_i'	Hızın anlık sapma miktarı
$\bar{u}_i$	Hızın zaman ortalaması
u_{*cr}	Kritik kayma gerilmesi hızı, m/sn
u_*	Kayma gerilmesi hızı, m/sn
Uf	Hücreden hücreye geçen hacimsel debi, m^3/sn
V_a	Ortalama yaklaşım akım hızı, m/sn
V_c	Malzemeyi harekete geçiren kritik ort. akım hızı, m/sn

Simgeler**Açıklamalar**

V_u	Tabliye sonrası ortalama akım hızı
V_{vol}	Hacim, m^3
v_t	Türbülanslı viskozite, m^2/sn
y	Akım derinliği, m
y_a	Yaklaşım akım derinliği, m
y_d	Sediment yığılma kalınlığı, m
y_s	Maksimum oyulma çukuru derinliği, m
y_2	Ayrışma bölgesinin mak. oyulma çukuruna uzaklığı, m
x	Akım boyunca herhangi bir konum
x_0	Sıfır anındaki konum
x_1	Köprü tabliyesinin başlangıç koordinatı, m
x_2	Köprü tabliyesinin bitiş koordinatı, m
x_d	Oyulmanın bitiş koordinatı, m
x_s	Oyulmanın başlangıç koordinatı, m
α	Hacim yüzdesi
α_s	Sediment hacim yüzdesi
α_f	Akışkan hacim yüzdesi
ε	Türbülans sönümleme oranı
σ	Sediment derecelendirme katsayısı
ρ	Özgül kütle, kg/m^3
μ	Dinamik viskozite, $N.sn/m^2$
μ_t	Girdap viskozitesi, $N.sn/m^2$
γ	Suyun özgül ağırlığı, N/m^3
γ_s	Sedimentin özgül ağırlığı, N/m^3
ν	Kinematik viskozite, m^2/sn
τ_0	Taban sürüklenme gerilmesi, N/m^2
$\bar{\tau}$	Gerilme tensörü
δ	Sınır tabaka kalınlığı, m
Δt	Zaman adım aralığı, sn
Δx	Konum adım genişliği, m
Φ_{ij}	Basınç uzama terimi

Simgeler**Açıklamalar** φ

Skaler değişken

 φ_f

Hücre yüzeyi skaler değeri

 Γ_φ Skaler değişken difüzyon katsayısı, m^2/sn **Kısaltmalar****Açıklamalar****ABD**

Amerika Birleşik Devletleri

DES

Detached Eddy Simulation (Bağımsız Girdap Sim.)

FHWA

Federal Highway Administor (Fed. Karayolu İdare.)

HAD

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

LES

Large Eddy Simulation (Büyük Girdap Sim.)

PIV

Partical Image Velocimetry (Parçacık Görün. Hız.)

QUICK

Quad. Upstream Interpolation Convective Kinematic

RANS

Reynolds Av. Navier-Stokes (Reynolds Ort. NS)

RKERealizable $k-\epsilon$ **RNG**

Renormalized Group

RSM

Reynolds Stress Model

SKEStandard $k-\epsilon$ **SST**

Shear Stress Transport (Kayma Gerilmesi Taşıma)

TFHRC

Turner-Fairbank Highway Research Center

TDR

Turbulence Dissipation Rate (Türb. Sönümleme Oranı)

TKE

Turbulence Kinetic Energy (Türbülans Kinetik Enerji)

2-B

İki boyutlu

3-B

Üç boyutlu

1. GİRİŞ

Akarsu köprüleri özellikle ulaşım ağında büyük öneme sahiptir. Bu yapıların sorunsuz bir şekilde çalışması başta can güvenliği olmak üzere, mal kayıplarının önlenmesi ve trafik hizmetinin devamı için büyük önem taşımaktadır. Bu yapıların diğer yapılardan farklı olarak doğa olayları ile sürekli değişim içerisinde olan akarsular üzerine inşa edilmeleri, yapının tasarımında statik ve dinamik hesapların yanı sıra hidrolik hesapları daha önemli kılmaktadır. Zira köprünün stabilitesini sağlayan ayaklar akım içerisinde olduğundan meydana gelebilecek aşırı oyulma nedeniyle sürekli risk altındadır.

Değişen akım koşulları ve kesit özellikleriyle akarsu yatağında sürekli oyulma ve depolanma olayları söz konusudur. Akarsu üzerine inşa edilmiş akarsu köprüleri ve köprüye ait ayaklar bu değişen akım ve sediment taşınımı sebebiyle özellikle taşkın zamanlarında hasar görebilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Karayolları Birliğince Amerika'da her yıl ortalama 50 köprünün hidrolik etkenlerle yıkıldığı belirtilmektedir (Yanmaz, 2002). Shirole ve Holt (1991) tarafından yürütülmüş bir çalışmada 1950 yılından itibaren A.B.D'de yıkılan 823 köprüden %60'ının hidrolik etkenlerle yıkıldığı belirtilmiştir. Bu hidrolik etkenlerden bazıları taşkın esnasında yükselen akarsu seviyesinin köprü tabliyesi üzerinden aşması, biriken yatak malzemesinin ayaklar arasındaki açıklığı daraltması sonucu akım hızında meydana gelen değişiklikler, taban malzemesini uzun vadede aşınarak yatak profilinin değişmesi sonucu yapıda meydana gelecek hasarlar olarak sayılabilir (Yanmaz, 2002). Bu hidrolik etkilerin sebep olduğu en önemli hasar ise ayaklar etrafında oluşan oyulmalardır. New York Eyaleti Ulaştırma Bölümü Yapı İşleri tarafından yayımlanan ve Ulusal Köprü Veritabanı (New York State Department Bridge Failure Databse) kullanılarak hesaplanan istatistiklere göre 1966 ile 2005 dönemi arasında kaydedilen 1502 köprü yıkılma veya hasarından 878'si (%58) ayaklardaki oyulma sebebiyle oluşmuştur (Briaud, 2006). Bazen taşkın şiddetine bağlı olarak akarsu debisinin artmasıyla beraber su seviyesi köprü tabliyesine ulaşabilmektedir. Akarsu seviyesinin köprü tabliyesinin en alt kotuna dokunmasıyla basınçlı akım söz konusu olmaktadır. Su seviyesinin tabliye üst kotuna yükselmesi halinde basınçlı akım devam etmektedir. Su seviyesinin daha da yükselmesiyle akım köprü üzerinden aşarak savaklanmaktadır. Bu akıma ise savak tipi akım denmektedir. Köprü kesitindeki akım koşullarının değişmesiyle yatak tabanındaki sediment hareketi de önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle akarsu debisindeki değişikliklerin meydana getirdiği hidrolik olayların akarsu köprülerine olan etkilerinin araştırılması gerekmektedir.

Köprü temeli ve yaklaşım dolgusunda meydana gelen oyulma mekanizması yapı, zemin ve akım etkileşiminde olup çok sayıda değişkene bağlıdır ve oldukça karmaşıktır. Böylesine karmaşık bir akış ve sediment taşınımı analitik çözümlerle incelemek oldukça zordur. Bu sistemlerin çözüm aşamalarında ilgili değişkenlerin her zaman basitleştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda da bazı değişkenler ihmal edilerek karmaşık akım ve oyulma mekanizması basitleştirilmekte ve böylece ampirik bağıntılar elde edilmektedir. Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte karmaşık sistemleri modellemek ve farklı parametrelerin etkilerini incelemek için sayısal analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Sayısal yöntemler arazi ve deneysel çalışmalara kıyasla daha pratik olabilmekte ve inceleme için çok farklı senaryolar düşünülebilmektedir. Diğer uygulamalara nazaran doğru akım alanı ve oyulma şeklini tahmin edebildiği için tatmin edici olabilmektedir. Ayrıca yapılan deneylerin zaman ve maliyeti göz önüne alındığında, sayısal modellemenin kullanılmasını cazip hale gelmektedir. Bu yöntemle karmaşık akıma maruz kalan hidrolik yapılar henüz projelendirme aşamasında iken oluşabilecek farklı senaryolara göre güvenli bir şekilde tasarlanabilmektedir. Ancak sayısal model sonuçlarının doğruluğunun güvenliğinin de yine arazi ve deneysel verilerle sağlanması gerektiği unutulmamalıdır. Köprü temeli etrafında meydana gelen oyulma ile ilgili yapılmış olan çalışmaların birçoğunda oyulma çukurunun maksimum derinliği ile şekli incelenmiştir. Son dönemlerde birçok araştırmacı köprü ayakları etrafında oluşan akım koşulları ve sediment taşınımı ile ilgili sayısal çözümler içeren birçok araştırma yapmıştır. Maksimum oyulma derinliği ile ayaklar etrafında meydana gelecek oyulma çukuru şeklinin tahmin edilmesi ve ayakları korumaya yönelik uygulamalar ile bu önemli yapıların güvenli bir şekilde hizmet vermesini sağlamak için daha birçok çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Taşkın olaylarında köprü yapılarının stabilitesi ve yapısal işlevini koruması otoyol güvenliği açısından oldukça kritiktir. Basınçlı ve savaklı akım koşullarına bağlı olarak köprü tabliyesi altında ve köprü ayakları etrafında gelişen oyulma çukurunun önceden analiz edilmesi köprülerin tasarımı, inşası ve bakımı için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukurunun şekil ve derinliğini sayısal model kullanarak simüle etmek ve mevcut deneysel verilerle karşılaştırarak sayısal modelin ne kadar başarılı sonuçlar verebildiğini test etmektir.

Çalışma kapsamında sediment hareketi ve oyulma mekanizması ile ilgili teorik bilgiler, araştırmacılar tarafından konuyla ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar özetlenmiştir.

Bu çalışmada yapılan sayısal modelden elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan laboratuvar çalışmasına ait verilerle karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının neticesinde elde edilen bulgular ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE OYULMA MEKANİZMASI

2.1. Literatür Araştırması

Literatürde serbest ya da basınçlı akım durumlarında köprü ayakları veya köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukurunu inceleyen birçok çalışmadan söz etmek mümkündür. Bilhassa serbest akım durumunda yapılmış yüzlerce çalışma vardır. Çalışmalar genel itibariyle laboratuvar deneyleri, sayısal modelleme çalışmaları, veri madenciliği ve meydana gelebilecek oyulma çukuruna karşı alınan önlemler olarak gruplandırılabilir. Deneysel çalışmalarda genel olarak amaç farklı akım, taban malzemesi ve köprü özelliklerinde meydana gelen oyulma çukuru maksimum derinliğini tahmin edebilecek ampirik eşitlikler elde etmektir. Bunun için yaklaşım akım derinliği ve ortalama yaklaşım akım hızı, taban malzemesinin dane çapı ve dağılımı, köprüye ait tabliye ve ayakların boyut, şekil ve konumlarının oyulma çukuru üzerindeki etkisi incelenmektedir. Sayısal modelleme çalışmalarında ise çeşitli hesap yöntemleri kullanılarak geliştirilmiş sayısal modeller deneysel veriler yardımıyla kalibre edilmekte ve doğrulukları kanıtlandıktan sonra farklı durumlarda meydana gelebilecek oyulma çukuru için benzeşimler yapılmaktadır.

Köprü tabliyesi ve ayakları etrafında oluşan oyulma çukuru ile ilgili literatüre bakıldığında serbest ve basınçlı akım koşulu altında birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Örneğin; Fael, Lança ve Cardoso (2016) köprü ayaklarının şekil ve konumunun oyulma üzerindeki etkisini incelemiştir. Vaghefi, Ghodsian ve Salimi (2016) yanal eğime sahip dairesel kesitli köprü ayaklarının etrafındaki oyulma çukurunu araştırmıştır. Ismael, Gunal ve Hussein (2014) yuvarlak burunlu köprü ayağının akım yönüne göre konumunun oyulma üzerindeki etkisini incelemiştir. Chang ve diğerleri (2013) ile Das, Das ve Mazumdar (2013) ise çalışmalarında farklı geometriye sahip köprü ayakları etrafındaki akımı araştırmıştır. Hong, Sturm ve Stoesser (2015), Barbhuiya ve Mazumder (2014) kenar ayaklar etrafındaki oyulmaları incelemişlerdir. Xiong, Cai, Kong ve Kong (2014); Jahangirzadeh ve diğerleri (2014); Khosronejad, Kang ve Sotiropoulos (2012) yaptıkları sayısal model çalışmasıyla köprü ayaklarındaki oyulmaları analiz etmişlerdir. Zhu ve Liu (2012) yaptıkları bir çalışmada silindirik bir köprü iskele çevresinde yerel oyulma çukuru ve oluşumunu tahmin etmek amacıyla sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanmıştır. Lin, Bennett, Han ve Parsons (2014); Peng ve Ram (2014); Link, Klischies,

Montalva ve Dey (2013) çalışmalarında taban malzemesinin köprü ayaklarında oluşan oyulmalar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Wang, Tang, Xiao, Wang ve Jiang (2016); Akib, Jahangirzadeh ve Basser (2014); Özalp ve Bozkuş (2013) araştırmalarında gruplandırılmış ayakların yerel oyulmalara etkisini incelemişlerdir. Nasr-Allah, Mohamed, Abdel-Aal ve Awad (2016); Zokaei, Zarrati, Salamatian ve Tabarestani (2013); Beg ve Beg (2013) köprü ayakları etrafında oyulmaların azaltılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Azhari, Saghravani ve Mohammadnezhad (2010) yaptığı bir çalışmada bir nehirde daire kesitli bir grup köprü ayağı etrafında oluşan yerel oyulmaları simüle ederek akım koşullarını tahmin etmek için üç boyutlu sayısal model ile fiziksel bir model karşılaştırmıştır. Sümer ve Fredsøe (2002) oyulma sürecinin tüm ana özellikleri olan at nalı girdap, köprü ayağı yakınlarındaki oyulma ve kümelenmeler, yatak dalgalanmaları, oyulma çukurunun şekli ve oyulma derinliği ölçümlerini oldukça iyi tahmin etmişlerdir. Gamal, Hassan ve Shima (2006), tek bir ayak etrafında oluşan akışı ve yerel oyulma şekillerini doğrulamak için üç boyutlu akış modeli kullanmış ve birden fazla köprü ayakları arasındaki etkileşim etkisini araştırmıştır.

Basınçlı akım koşulunu içeren ilk çalışma Colorado Eyalet üniversitesi laboratuvarlarında Abed (1991) tarafından yapılmıştır. Abed, serbest akım şartında ayak etrafındaki oyulmayı incelemek için 10 adet ve basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma çukurunu incelemek için 15 adet deney yapmıştır. Deneylerde kullanılan taban malzemesi ortalama dane çapı 3mm olup, köprü tabliyesi ve ayaklarının boyutları sabit tutulmuştur. Deneyler temiz su oyulması durumunda 0,24m ile 0,61m arasında değişen farklı yaklaşım akım derinlikleri ve 0,305m/sn ile 0,9015m/sn arasında değişen farklı ortalama yaklaşım akım hızları ile gerçekleştirilmiştir. Aynı yaklaşım akım özelliklerine sahip basınçlı akım durumundaki deneylerde meydana gelen oyulma çukuru ile serbest yüzeyli akım durumuna ait ayak etrafındaki oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında, basınçlı akım durumundaki maksimum oyulma çukuru derinliğinin serbest akım koşundaki maksimum oyulma çukuru derinliğine göre 2,3-10 kat daha büyük olduğu tespit etmiştir.

Bir diğer çalışma ise Fairbank otoyolu araştırma merkezindeki Federal Karayolları İdaresinin laboratuvarlarında Umbrell, Young, Stein ve Jones (1998) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma Abed'in çalışmasının bir devamı niteliğinde olup olup, köprü tabliyesi altında oluşan daralma oyulmasını köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulmadan ayrı değerlendirebilmek amacıyla köprü ayakları olmayan bir köprü tabliyesi kullanılarak bir dizi

deney yapılmıştır. Çalışmada üç farklı boyutta taban malzemesi kullanılmıştır. Taban yaklaşım akım derinliği 0,305 m sabit tutularak, 0,42 m/sn ile yaklaşık 1,0 m/sn arasında değişen farklı ortalama yaklaşım akım hızları ile deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde farklı taban malzemesi, ortalama yaklaşım akım hız ve akım derinliği, köprü tabliyesi konumu ve taban malzemesine ait kritik sürüklenme hızı parametreleri kullanılarak söz konusu parametrelerin oyulma çukuru üzerindeki etkileri incelenmiş ve basınçlı akım koşulunda kanal tabanında oluşan oyulma çukuru maksimum derinliğinin belirlenebilmesi için Eş. 2.1’ de verilen bağıntı geliştirmişlerdir.

$$\frac{H_b+y_s}{y_a} = 1.1021 \left[\left(1 - \frac{h_w}{y_a} \right) \frac{V_a}{V_c} \right]^{0.6031} \quad (2.1)$$

Burada V_a = yaklaşım hızı (m/sn) V_c = kritik sürüklenme hızı (m/sn) , h_w = köprü tabliyesi üzerindeki su derinliği (m), y_a = yaklaşım akım derinliği(m), y_s = oyulma çukuru derinliği (m) , H_b = köprü kirişi ile bozulmamış taban arasındaki mesafe (m)’dir. Umbrell ve arkadaşlarının sunmuş oldukları bu bağıntı 81 adet deneyden elde edilmiş olup bağıntının korelasyon katsayısının karesi $R^2=0,81$ olarak hesaplamışlardır.

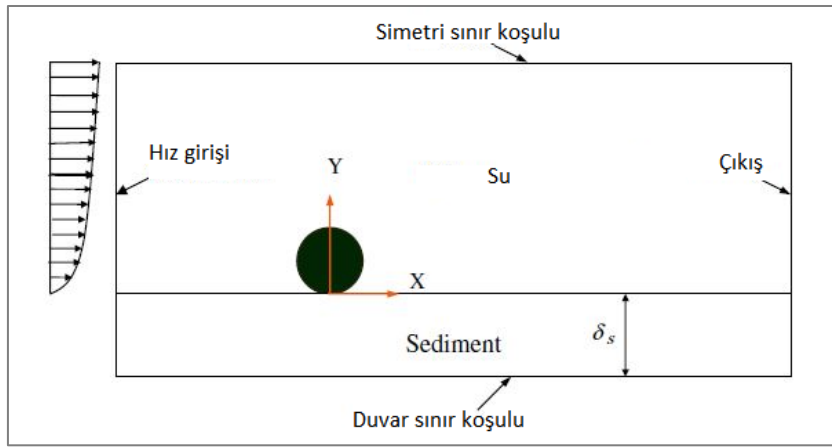
Anerson ve Abt (1998) yapmış oldukları deneysel çalışmalarda basınçlı akım koşullarında düşey akım daralması sonucu köprü tabliyesi altında oluşan oyulmayı incelemişlerdir. Verilerin kalitesini değerlendirmek için çoklu doğrusal regresyon teknikleri ve çeşitli diğer istatistiksel testler kullanılmış ve laboratuvarında elde edilen verilerden ampirik bir ilişki geliştirmişlerdir:

$$\frac{y_s}{y_a} = -5.08 + 1.27 \left(\frac{y_a}{H_b} \right) + 4.44 \left(\frac{H_b}{y_a} \right) + 0.19 \left(\frac{V_a}{V_c} \right) \quad (2.2)$$

Lyn (2008) yaptığı çalışmada Umbrell ve diğerleri (1998) ile Arneson ve Abt (1998)’ın yapmış olduğu kanal testlerinden toplanmış olan verileri HEC-18’de sunulan bağıntı ile karşılaştırmıştır. Basınçlı akım durumunda köprü tabliyesi altında oluşan oyulma çukuru için yapılan karşılaştırmalar neticesinde HEC-18 bağıntısının güvenilir sonuçlar vermediğini bildirmiştir. Belirlenen sınırlar içinde Arneson ve Abt (1998)’in deneysel verilerini baz alarak farklı bir model geliştirmiş ve köprü ayakları olmaksızın yalnızca köprü tabliyesi altındaki temiz su oyulması için bir bağıntı önermiştir.

Zhao ve Fernando (2007), yaptıkları bir çalışmada su altında sediment tabakası üzerine yerleştirilmiş bir boru etrafındaki oyulmayı incelemek üzere Mao (1986) tarafından yapılmış laboratuvar deneyini HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımıyla simüle etmişlerdir. Mao (1986)'nın laboratuvar deneyi 2 m genişliğinde, 23 m uzunluğunda ve 0,5 m yüksekliğinde, dikdörtgen kesitli bir kanalda gerçekleşmiştir. Kanalda 0,1 m derinliğindeki sediment tabakasının üzerine $D=0,1$ m çapında boru yerleştirilmiştir. Laboratuvar deneylerinde oyulma çukurunun derinliğinin zamana göre değişimi incelemişlerdir.

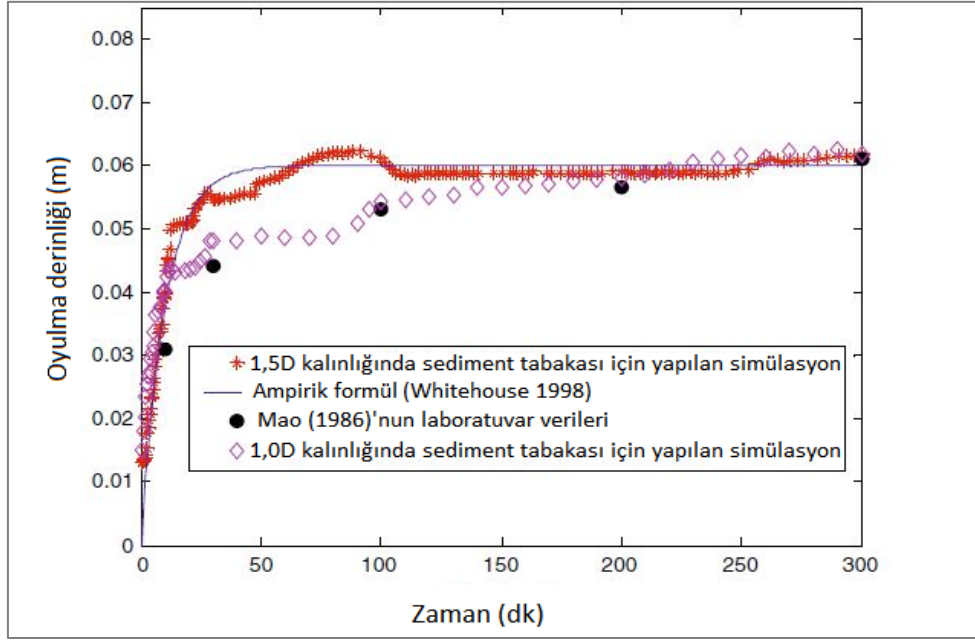
Laboratuvar deneyinin sayısal modelini Fluent'te iki boyutlu olarak oluşturmuşlardır. Sayısal modelin çözümü için $k-\varepsilon$ türbülans modeli ve katı-sıvı olmak üzere iki fazlı Eulerian akış modeli kullanmışlardır. Giriş koşulu için logaritmik hız profili vermişlerdir. Su yüzeyi için simetri sınır koşulu, boru ve kanal cidarları için duvar sınır koşulu uygulamışlardır. Sayısal çalışmaya ait model geometrisi ve sınır koşulları Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Zhao ve diğerleri (2007)'nin çalışmasına ait sayısal modelin geometrisi ve sınır koşulları

Burada δ_s = sediment tabakasının kalınlığıdır.

Sayısal modeli çözüm elemanlarına ayırmak için üniform olmayan bir ağ yapısı kullanmışlardır. Modeli toplamda 9575 adet elemana ayırmışlardır. Sayısal sonuçlardan elde edilen oyulma derinliklerinin ampirik formül ve laboratuvar verileriyle karşılaştırılması Şekil 2.2'de verilmiştir.

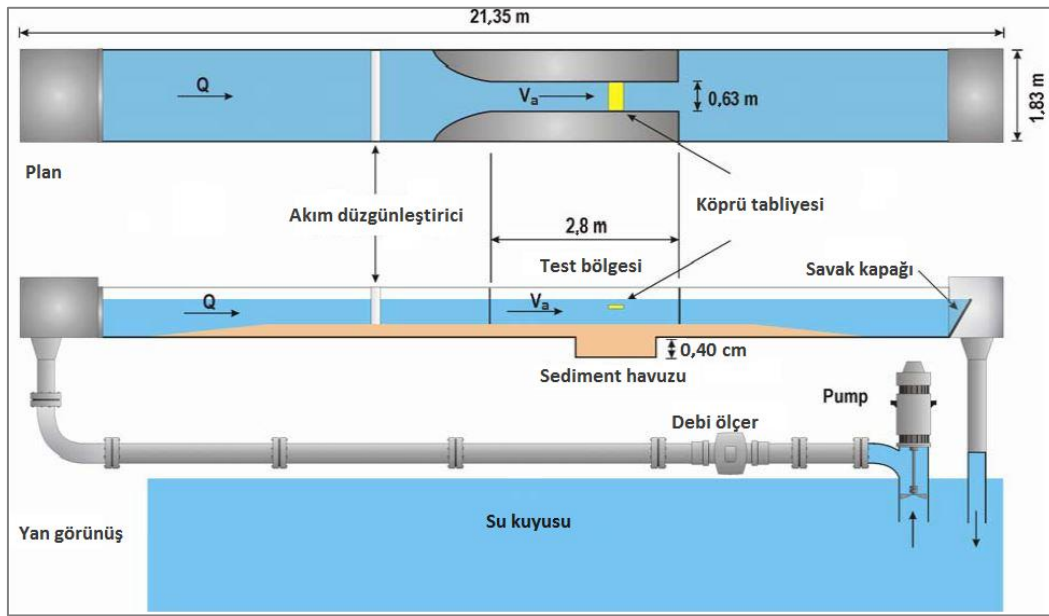


Şekil 2.2. Zhao ve diğerleri (2007)'nin çalışmasına ait sayısal sonuçların diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Çalışmada sediment tabakasının kalınlığının oyulma üzerindeki etkisini araştırmak için, Mao (1986)'nın laboratuvar deneylerinde kullandığı 1,0D kalınlığındaki sediment tabakasından farklı olarak 1,5D kalınlığında sediment tabakası için çözüm yapmışlardır. Ayrıca sayısal sonuçlar literatürde oyulma tahmini için yaygın olarak kullanılan, Whitehouse (1998) tarafından geliştirilen ampirik formül ile elde edilen sonuçlarla kıyaslamışlardır. Simülasyon sonucunda elde edilen oyulma derinliğinin deneysel verilerle uyum içerisinde olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca sediment tabakasının kalınlığının oyulma çukuru derinliği üzerinde etkili olduğunu, sediment tabakasının kalınlığının artırılarak oyulma derinliğinin bu etkiden kurtarılabileceğini bildirmişlerdir.

Guo, Kereny ve Pagan-Ortiz (2009) Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal Karayolu İdaresi Başkanlığı'nda (Federal Highway Administration–FHWA) bir dizi deney yapmışlardır. Deneylerinin amacı, bir kanaldaki kontrollü basınç akım durumunda bir köprüde meydana gelebilecek olası yıkılma olayı ile ilgili veri elde etmektir. Araştırmacılar deneylerden toplanan verileri daha sonra basınçlı akımın oyulma üzerindeki etkisini incelemek ve literatürde bulunan ampirik denklemler ile bu çalışmada önerilen bağıntıyı test etmek için kullanmışlardır. Deneylerde kullandıkları kanal 1,83 m genişliğinde, 21,35 m uzunluğunda dikdörtgen kesitli bir kanaldır. Yan duvarları cam ve tabanı paslanmaz çelikten yapılmıştır. 0,63 m genişliğinde ve 2,8 m uzunluğunda bir test bölgesi oluşturulmuştur. Yerel

oyulmayı gözlemlemek için köprü tabliyesi altında 1,3 m uzunluğunda bir sediment havuzu yapılmıştır. Kanalda temiz su koşulu sağlanmış ve ortalama yaklaşım akım hızı malzemeyi harekete geçirecek ortalama kritik hızına yakın almışlardır. Yaklaşım akım derinliği 25 cm olup, deneyler süresince sabit tutulmuştur. Sediment tane boyutunun oyulma üzerindeki etkisini test etmek için kanal tabanında $d_{50} = 1\text{mm}$ ve $d_{50} = 2\text{mm}$ ortalama tane çapıyla çalışmışlardır. Kanal boyunca 20 cm'lik bir kum yatağı, sediment havuzu kısmında ise oyulma çukurunun oluşumuna yetecek 60 cm derinlikte bir sediment tabakası oluşturulmuştur. Deney düzeneği Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Guo ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait deney düzeneği

Köprü tabliyesi 0,26 cm açıklığa sahiptir. 3 ve 6 adet kirişten oluşan iki farklı tabliye modeli test etmişlerdir. Veriler, oyulmanın köprü tabliyesinin akım yönündeki uzunluğuna bağlı olduğunu göstermiştir. Deney verilerinin interpolasyonu ile elde edilen bağıntılarla Eş. 2.3'de gösterildiği gibi oyulmanın köprünün menba kısmından yaklaşık bir tabliye genişliğinde başladığı ve Eş. 2.4'te gösterildiği gibi tabliyenin mansabından yaklaşık 2,5 tabliye genişliğinde oluştuğunu bildirmişlerdir. Oyulma çukurunun başlangıç pozisyonu ve bitiş pozisyonları sırasıyla Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'te verilmiştir.

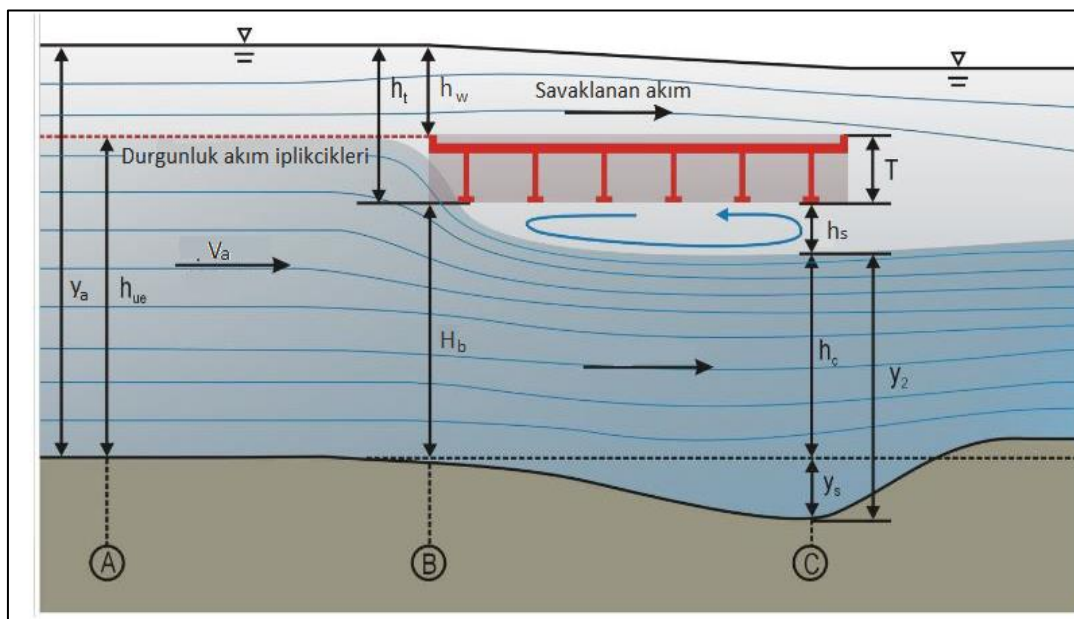
$$\frac{x_1}{w_b} - \frac{x_s}{w_b} = -0.84615 - (-1.842) = 0.99585 = 1 \quad (2.3)$$

$$\frac{x_d}{w_b} - \frac{x_2}{w_b} = 2.6827 - 0.15385 = 2.53 \quad (2.4)$$

Burada x_1 = köprü tabliyesinin başlangıç koordinatı (m), x_2 = köprü tabliyesinin bitiş koordinatı (m), x_d = oyulmanın bitiş koordinatı (m), x_s = oyulmanın başlangıç koordinatı (m), W_b = köprü tabliyesinin akım yönündeki uzunluğu (m)'dur.

Maksimum oyulma çukuru derinliğinin sediment ortalama tane çapı arttıkça azaldığı, ancak tabliye üzerindeki taşkının büyüklüğüne ve köprü tabliyesinin uzunluğuna bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Guo ve arkadaşları tarafından sunulan bu analitik çözümle, maksimum oyulma çukuru konumunu ve buna karşılık gelen oyulma çukuru profili tahmin edebilmektedir.

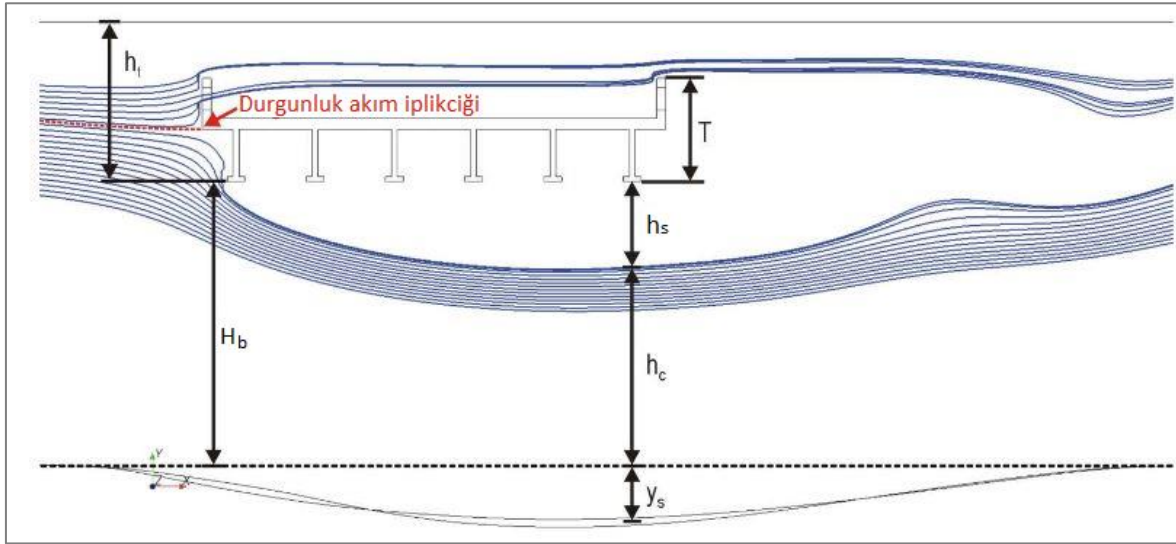
Shan ve diğerleri (2012) yaptıkları bir çalışmada, kısmen veya tamamen suya batmış bir köprü tabliyesi altındaki oyulmayı tahmin etmek için yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu modele dayanarak, basınçlı akım durumunda meydana gelen oyulma için köprü temel tasarımını amaçlayan bir denklem önermişlerdir. Çalışma kapsamında, PIV (Partical Image Velocimetry – Parçacık Görüntülemeli Akış Ölçüm Cihazı) ölçümleri ve HAD ile desteklenen bir dizi laboratuvar deneyi yapmışlardır. Ayrıca çalışmada Umbrell ve diğerlerinin (1998) çalışmasına ait veriler ile Arneson ve Abt'in (1998) yapmış olduğu çalışmalara ait verilerden de yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda HAD çözümü desteğiyle ayrışma bölgesi kalınlığını hesaplayan ve köprülerin projelendirilmesinde kullanılabilecek bir denklem geliştirmişlerdir.



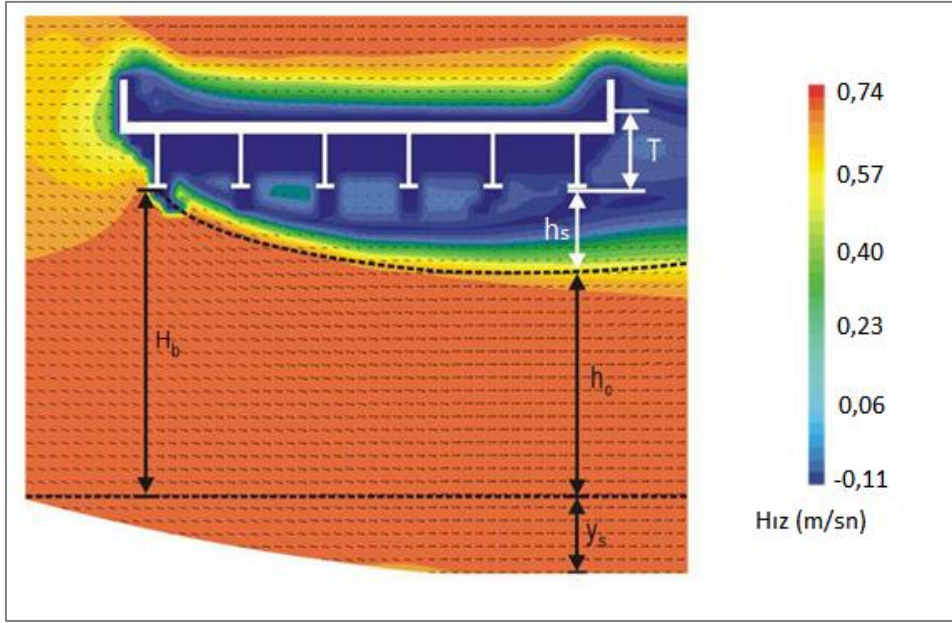
Şekil 2.4. Shan ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait deney parametreleri

Burada T = köprüye ait tabliye kalınlığı h_s = akım ayrışma bölgesi kalınlığı, H_b = kiriş alt kotunun bozulmamış tabana olan mesafesi, y_a = yaklaşım akım derinliği V_a = ortalama akım hızı, h_w = tabliye üst kotundan itibaren akım derinliği, h_{ue} = tabliye altına yönlendirilen etkili akım derinliği, h_t = tabliye kiriş alt kotunun akım yüzeyine olan uzaklığı, h_c = ayrışma bölgesinin tabana olan uzaklığı, y_s = maksimum oyulma çukuru derinliği, y_2 = ayrışma bölgesinin maksimum oyulma çukuru kotuna olan uzaklığıdır.

Çalışmalarının diğer bir bölümünde toplanan laboratuvar verileri kullanılarak HAD simülasyonları yapmışlardır. Kanalin sayısal modeli fiziksel modele göre kurulmuştur. Sınır tabaka kalınlığını tahmin etmek, kısmen ve tamamen batmış olan köprü tabliyesini etkileyen akım koşullarının analizi için, tabliyenin durgunluk noktasını analiz etmek için çeşitli simülasyonlar yapmışlardır. Oyulmanın gerçekleştiği ve oyulmanın olmadığı yatak durumlarına ait akımlar simüle etmişlerdir. Sayısal simülasyonlarda kullanılan altı kirişli köprü tabliyesi, deneylerde kullanılan köprü modeli ile aynı boyutlara sahiptir. Ayrışma bölgesinin karakterize edilmesinde kullanılan HAD ve PIV analizlerine ait simülasyon örnekleri sırasıyla Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’de görülmektedir.



Şekil 2.5. Shan ve diğerleri (2012)’ne ait HAD simülasyonundan elde edilen akım ayrışma bölgesi



Şekil 2.6. Shan ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait PIV verilerinden elde edilen akım ayrışma bölgesi

PIV ve sayısal analizlere göre oyulma çukuru köprü açıklığının başlangıcında en yüksek değerinde olup, çukur geliştikçe en büyük değerin köprü tabliyesinin mansabına yaklaştığını bildirmişlerdir. Eş. 2.5'te verilen ampirik bağıntıyı, deneylerden elde edilmiş veriler, PIV ve sayısal model kullanılarak elde edilmiş sonuçlar yardımıyla geliştirmiş ve test etmişlerdir.

$$\frac{h_s}{h_t} = K \left(\frac{V_a}{\sqrt{gh_t}} \right)^m \left(\frac{\rho V_a h_t}{\mu} \right)^n \left(\frac{H}{h_u} \right)^p \left(\frac{h_t}{h_u} \right)^q \left(1 - \frac{w}{h_t} \right)^m \quad (2.5)$$

Burada verilmiş olan K = köprü üstyapı geometrisi ile ilgili boyutsuz katsayı, ρ = özgül kütle, μ = dinamik viskozite, g = yer çekimi ivmesi, m , n , p ve q ise ilgili katsayılardır.

Laboratuvar deneylerinde temiz su koşullarında, maksimum oyulma çukurunun derinliğinin köprü tabliyesinin aşağı ucunda mansap kısmında meydana geldiğini bildirmişlerdir. Maksimum oyulma çukuru derinliğinin suyun köprünün üzerinden aştığı durumda arttığı, fakat artan sediment boyutuyla azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, maksimum oyulma çukuru derinliğinin, tabliye kirişlerinin sayısından bağımsız olduğu da gözlemlenmiştir. Araştırmacılar ölçekli kanal deneyleri, PIV testleri ve sayısal modelleme çalışmaları sonucunda, maksimum oyulma çukuru derinliğinin, köprü açıklığındaki etkili derinlik (daraltılmış derinlik) ile tanımlanabileceğini bildirmişlerdir.

Karakurt (2016), yaptığı bir çalışmada 10,00 m uzunluğunda, 1,0 m genişliğinde dikdörtgen kesitli bir kanalda köprü tabliyesi altında oluşan daralma oyulmasını incelemiştir. Kanal girişinden yaklaşık 4 m mansapta başlayan 2,5 m uzunluğunda 20 cm derinliğinde bir test bölgesi oluşturmuştur. Çalışmada basınçlı ve savak tipi akım durumları için farklı akım derinlikleri, kiriş yüksekliği, tabliye konumu ve farklı yatak malzemelerinin oyulma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde edilen deneysel verilerle hem basınçlı hem de savak tipi akım durumu için, düşey daralma sebebiyle köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru a ait derinliğin tahmininde kullanılabilecek iki farklı bağıntı elde etmiştir. Basınçlı ve savak tipi akıma ait oyulma çukuru tahmini için elde edilen ampirik bağıntılar sırasıyla Eş. 2.6 ve Eş 2.7’de verilmiştir.

$$\frac{y_s}{H_b} = -0,962 - 0,187 \frac{y_a}{H_b} + 0,433 Fr_b^* + 0,672 \frac{b}{H_b} \quad (2.6)$$

$$\frac{y_s}{H_b} = -1,002 - 0,190 \frac{y_a}{H_b} + 0,439 Fr_b^* + 0,925 \frac{b}{H_b} \quad (2.7)$$

Burada Fr_b^* = köprü tabliyesi altındaki Froude sayısıdır.

Çalışma sonucunda aynı debi değerlerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla meydana gelen oyulma çukuru derinliğinin de azaldığını bildirmiştir. Basınçlı akım durumundaki oyulma çukuru profilinin savak tipi akıma göre daha geniş olduğunu gözlemlemiştir. Sediment çapının küçülmesiyle hem basınçlı hem de savak tipi akım durumlarında oyulma çukuru derinliğinin ve genişliğinin daha büyük olduğunu tespit etmiştir. Aynı taban malzemesi ve aynı akım koşullarında kiriş yüksekliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin hem basınçlı hem de savak tipi akım durumları için artış gösterdiğini belirtmiştir. Tabliyenin tabana yaklaştırılmasıyla her iki yatak malzemesi durumunda da oyulma çukuru a ait derinliğin arttığını bildirmiştir.

Demir (2018), basınçlı ve savak tipi akım durumları için temiz su oyulmasını incelemek üzere yapmış olduğu bir çalışmada kanala verev yerleştirilmiş bir köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukurunu incelemiştir. Kanalda oyulmayı incelemek üzere ortalama tane çapı $d_{50}=1,1$ mm taban malzemesiyle 20,0 cm derinliğinde bir test bölgesi oluşturmuştur. Yapmış olduğu çalışma sonunda elde edilen verilerle oyulma çukuru derinliğinin tahmini için iki ampirik bağıntı elde etmiştir. Bu bağıntılar savak tipi ve basınçlı

akım durumları için sırasıyla Eş. 2.8 ve Eş. 2.9'da verilmiştir.

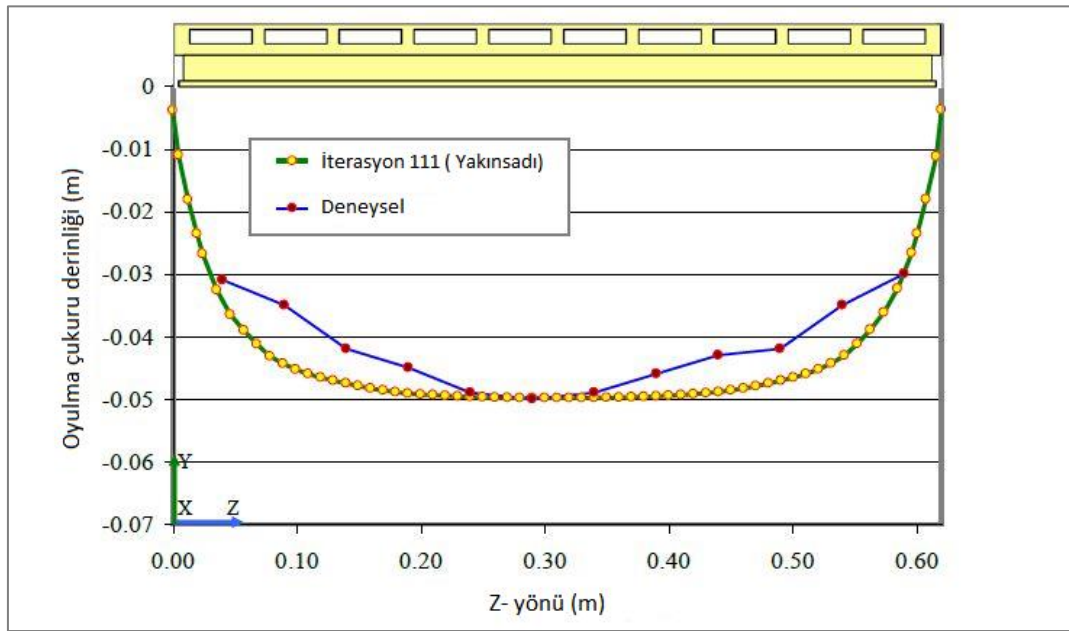
$$\frac{y_s}{H_b} = -1,0633 - 0,4792 \frac{y_a}{H_b} + 0,433 Fr_{b^*} + 2,3869 \frac{b}{H_b} \quad (2.8)$$

$$\frac{y_s}{H_b} = -1,1275 - 0,0411 \frac{y_a}{H_b} + 0,4057 Fr_{b^*} + 1,4292 \frac{b}{H_b} \quad (2.9)$$

Aynı debi değerlerinde yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinin azaldığını bildirmiştir. Kiriş yüksekliğinin artması ile maksimum oyulma çukuru derinliklerinin de artış gösterdiğini belirtmiştir. Yaklaşım akım derinliğinin artmasına bağlı olarak basınçlı akım koşulundaki maksimum oyulma çukuru derinliklerinde önemli artışlar gözlenirken, savak tipi akımlarda ise savak yükünün artışına bağlı olarak oyulma çukuru derinliğinin azaldığını bildirmiştir. Yapmış olduğu çalışmadan elde edilen sonuçları daha önceden Karakurt (2016) tarafından yapılan, aynı deney koşullarına sahip akıma dik yerleştirilmiş köprü tabliyesi ile yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Verev yerleştirilmiş tabliye durumunda elde edilen sonuçlar akıma dik yerleştirilmiş tabliye durumundan elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında maksimum oyulma çukuru derinliğinde genel olarak artış olduğunu bildirmiştir.

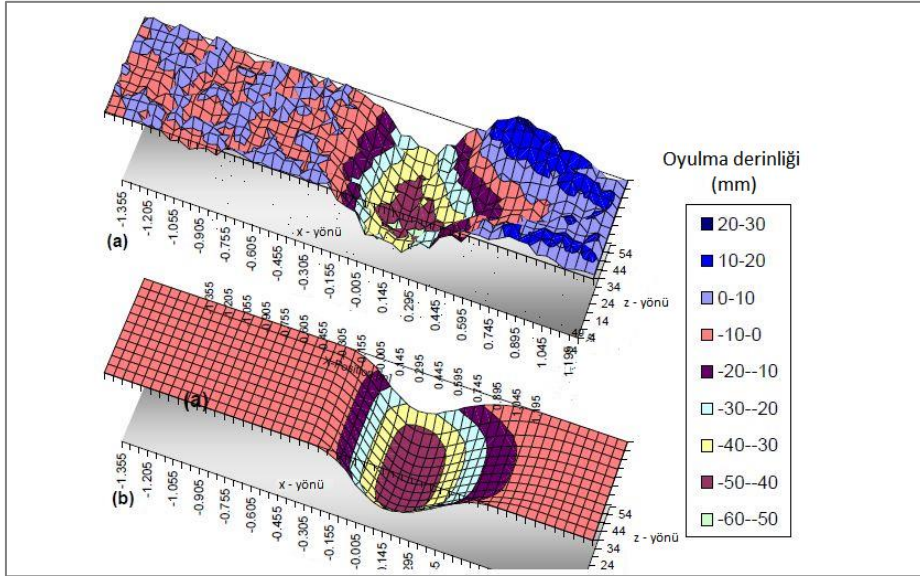
Tulimilli, Lottes, Majumdar ve Kostic (2011) ticari HAD yazılımı olan STAR-CD'yi kullanarak köprü tabliyeleri için basınçlı akım durumunda oyulma çukurunun şeklini ve boyutunu tahmin etmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada temiz su koşulu altında basınçlı akım için bir dizi oyulma deney verisi kullanmışlardır. Deneylerin sayısal benzeşimi için k-ε türbülans modelini seçmişlerdir. Sediment yatağı cidar olarak modellenmiştir. Çalışmada ortalama tane çapı sediment boyutu için 1 mm ve 2 mm olan iki farklı taban malzemesi kullanmışlardır. Yaklaşım akım derinliğine göre Reynolds sayısı $Re = 1,03 \times 10^5$ ve Froude sayısı $Fr = 0,26$ elde edilmiştir. Tullimili ve arkadaşları, hareket eden akım ile yatak yüzeyindeki taneciklerin sürüklenmesi yoluyla sediment yatağının profilini değiştiren oyulma mekanizmasını sayısal olarak doğru bir şekilde modelleyebilmek için öncelikle düzgün bir çözüm ağı ile yatak ve akım arasındaki ara yüzün iyi bir şekilde tanımlanarak çözümlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Deneysel veriler ile sayısal model sonuçları karşılaştırıldığında, meydana gelen oyulmanın şekil ve derinliğinin yakın olduğu bildirilmişlerdir. Türbülans yoğunluğunun düşük olduğu köprü tabliyesinin mansap kısmında, askıdaki malzemenin tekrar yatakta depolandığını belirtmişlerdir. Ancak çalışma

kapsamında kullanılan sayısal modelde askıda sediment taşınımı benzeşimi yapılamadığından deney sonuçlarında köprü tabliyesinin altındaki yatağa geri dönen taban malzemesinin benzeşimini de yapamamışlardır. Bu nedenle sayısal model sonuçlarında oyulma çukurunun mansaptaki derinliğinin, deneysel sonuçlardan daha büyük olarak elde edildiği bildirilmişlerdir. Fiziksel deney düzeneğinde önemli bir konu da kanal genişliği boyunca giriş akımı için üniform hız profili elde etmektir. Deneysel çalışmalarda elde edilen asimetric oyulma çukurunun oluşma sebebini deneyde düzgün giriş akımı koşulunun sağlanamaması olarak açıklamışlardır. Sayısal model çalışmasında ise son derece düzgün bir giriş akım hızı profili sağlanabildiğini belirtmişlerdir. Böylece sayısal olarak belirlenen oyulma çukurunun üniform giriş akım hızına bağlı olarak Şekil 2.7’de görüldüğü gibi kanal merkez çizgisi etrafında oldukça simetrik bir yapıya sahip olduğunu bildirilmiştir.



Şekil 2.7. Tulimilli ve diğerleri (2011)'nin çalışmasına ait deneysel ve sayısal kanal kesiti

Ayrıca araştırmacılar gerçekte türbülanstaki dalgalanmaların periyodik olarak parçacıkları hareket ettirmek için yeterli yükseklikte yatak kuvvetleri üreteceğini ve bunun sonucu olarak bozulmamış taban seviyesinin altında ve üstünde olmak üzere çeşitli pürüzlülükler meydana getireceğini bildirmişlerdir. Ancak sayısal modelde değişim olmaksızın ortalama bir Reynolds değeri ile çözüm yapıldığından, yatakta meydana gelen kayma gerilmelerinin kritik kayma gerilmesinin altında ya da üstünde kalması nedeniyle sayısal modelde Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, oyulma profili için bir pürüzlülük oluşmadığı ve daha homojen olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.8. Tullimili ve diğerleri (2011)' nin çalışmasına ait deneysel ve HAD çalışmalarından elde edilen üç boyutlu oyulma çukuru grafikleri

İşlem basitliği sağlayan HAD modelleme prosedürünün sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu, ancak en kötü değer %50 oranında deney sonucundan farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Adhikary, Majumdar ve Kostic (2009), yaptıkları bir çalışmada Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanan STAR-CD yazılımı kullanmışlardır. Köprü tabliyesi üzerinden geçen türbülanslı savak tipi akım durumunda çeşitli taşkın senaryoları için tabliye altında meydana gelen oyulma çukurlarının benzeşimini yapmışlardır. Sayısal çözümlerde akış alanı ve türbülans için $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanmışlardır. Bu çalışmada, oyulmanın esasen sediment tanecikleri üzerinde meydana gelen bölgesel kayma gerilmelerinden kaynaklandığı gerçeği göz önüne alınarak basitleştirilmiş bir model önermişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Tek fazlı zamandan bağımsız çözüm ile çift fazlı zamana bağlı çözümlerin sonuçlarının birbiriyle benzerlik gösterdiğini bildirmişlerdir. Sayısal modelde, oyulma çukurunun boyut ve şeklini saptamak için sabit, ampirik bir kritik kayma gerilme değeri kullanarak kararlı ve yakınsamış çözümler elde etmişlerdir. Ancak sayısal çözümlerde oyulma çukuru bölgesinde sabit kritik kayma gerilmesi kullanılmasının bu yöntemin başlıca eksiklerinden olduğu bildirmişlerdir.

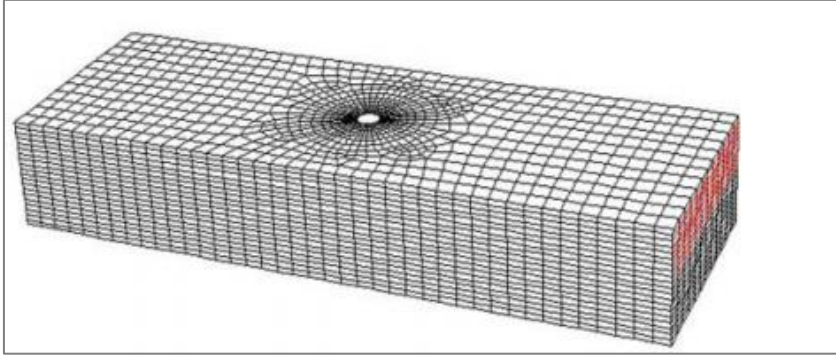
Demirci, Kocaman ve Varlı (2012) yaptıkları bir çalışmada FLOW-3D yazılımı kullanarak 400 cm uzunluğunda, 90 cm genişliğinde ve 25 cm yüksekliğinde bir kanal modeli

oluşturmuşlardır. Modelin ağ yapısı için dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı oluşturulmuş ve çözümlerde akışkan hacim (VOF-Volume of Fluid) yöntemi kullanılmıştır. Türbülans için k- ϵ , RNG (Renormalized Group) ve LES (Large Eddy Simulation) türbülans modelleri ile çözüm yapmışlardır. Elde edilen sayısal veriler daha önceden yapılmış deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal çözümlerde, genel olarak akıma ait hızların iyi bir biçimde elde edilebileceğini bildirmişlerdir. Buna karşın cidara yakın kısımlarda deney sonuçları ile farklılıklar gözlemlemişlerdir. Genel olarak k- ϵ ve RNG türbülans modelleriyle yapılan çözümlerden elde edilen sonuçların, LES türbülans modeline kıyasla daha iyi sonuç verdiğini bildirmişlerdir. Özellikle akım hızının ani olarak değiştiği ve çevrıntilerin olduğu cidarlara yakın bölgelerde çözüm için LES türbülans modelinin kullanılması durumunda daha küçük boyutlu ağ yapısına ihtiyaç duyulduğunu bildirmişlerdir.

Huang, Yang, ve Xiao (2009) Fluent ticari yazılımını kullanarak türbülanslı akış durumu ve sediment oyulmasını incelemek için farklı ölçeklerde oluşturulan modellerin ölçek etkilerini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada Yanmaz ve Altınbilek (1991)'in köprü ayakları etrafındaki oyulmayı incelemek için yaptığı deney verilerinden yararlanmışlardır. Ölçek etkilerini araştırmak için Yanmaz ve Altınbilek (1991)'nin çalışmasındaki 90 cm derinliğinde, 67 cm genişliğinde, 15 cm kalınlığında sediment yatağına sahip L şeklinde bir yatay dikdörtgen açık kanalın sayısal modelini oluşturmuşlardır. Sayısal simülasyonlar için oluşturulan küçük boyutlu model fiziksel modeli, büyük boyutlu model ise prototipi temsil etmiştir. Her iki modele ait geometrik bilgiler Çizelge 2.1'de ve model için oluşturulmuş ağ yapısı Şekil 2.9'da verilmiştir.

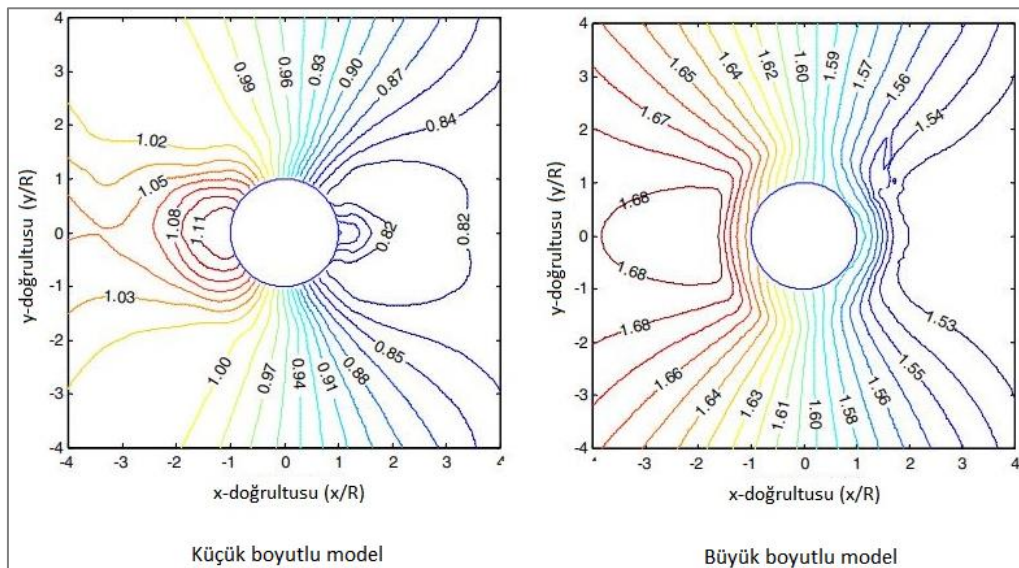
Çizelge 2.1. Huang ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait küçük ve büyük boyutlu modellerin geometrik bilgileri

	Küçük boyutlu	Büyük boyutlu
Uzunluk	2,00	50,00
Genişlik	0,67	16,50
Akım derinliği	0,15	3,75
Sediment yatağı kalınlığı	0,15	3,75
Köprü ayağı çapı	0,067	1,675



Şekil 2.9. Haung ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait modelin 3-B ağ yapısı

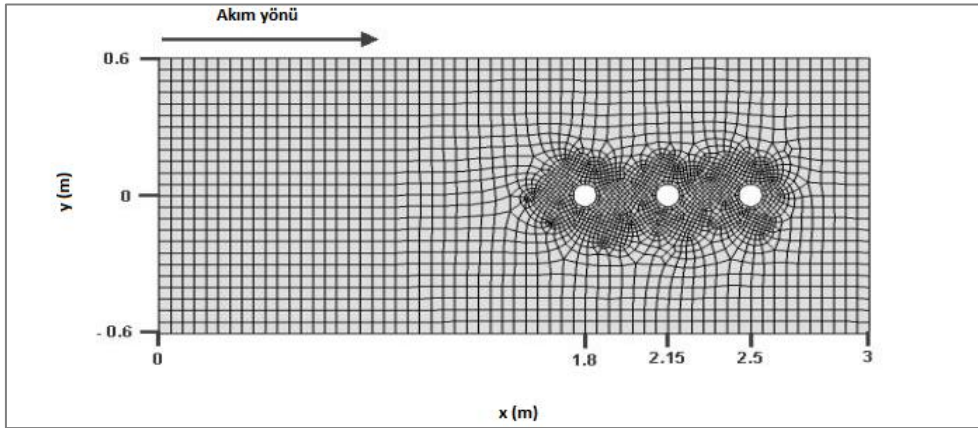
Araştırmacılar küçük boyutlu modelin sayısal sonuçlarını, büyük boyutlu modelin durumunu tahmin etmek için kullanmışlardır. Modellerin sayısal çözümü için iki fazlı Eulerian modeli ve $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Her iki model için geometrik benzeşim ve Froude sayısı benzeşimi yapmışlardır. Sınır koşullarını Froude sayısının benzeşimine göre seçmişlerdir. Ancak bu seçimler Reynolds sayısı benzeşimi ile örtüşmemiştir. Yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sayısal sonuçlar neticesinde özellikle akımın kuvvetli olduğu köprü ayağı yakınlarında hız verilerine ait büyük hatalar olduğunu gözlemlemişlerdir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre küçük boyutlu model ile büyük boyutlu model oyulma çukuru şekli ve derinliği bakımından birbirinden oldukça farklı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Her iki modele ait bağıl oyulma çukuru eş yükselti eğrileri Şekil 2.10'de verilmiştir.



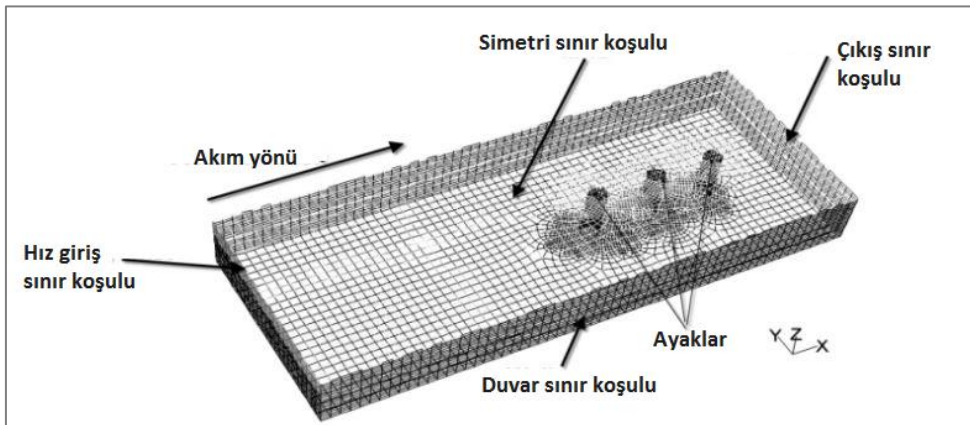
Şekil 2.10. Haung ve diğerleri (2009)'nin çalışmasına ait bağıl oyulma derinliği eş yükselti eğrileri

Çalışmanın sonucunda Reynolds sayısı benzeşiminin göz ardı edilmesinin, türbülanslı akış ve köprü ayakları etrafındaki oyulmanın modellenmesinde önemli hatalara neden olabileceğini bildirmişlerdir. Tüm bu olumsuzluklara rağmen, Fluent'in genel olarak köprü ayakları etrafındaki akış şekillerini iyi bir şekilde tahmin edebildiğini bildirmişlerdir.

Azhari ve diğerleri (2010) yaptığı çalışmada bir kanalda daire kesitli üç adet köprü ayağı etrafında oluşan yerel oyulmaları tahmin etmek için akım koşullarını üç boyutlu sayısal model ile simüle etmiş ve fiziksel deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. 3 m uzunluğunda, 1,2 m genişliğinde, 37 cm yüksekliğinde kanala yerleştirilmiş 10 cm çapında 3 adet daire kesitli köprü ayağının sayısal modeli için dikdörtgen yapıda çözüm ağı oluşturmuşlardır. Hesaplamalar standart k- ϵ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmaya ait modelin ağ yapısı ve sınır koşulları sırasıyla Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 gösterilmektedir.

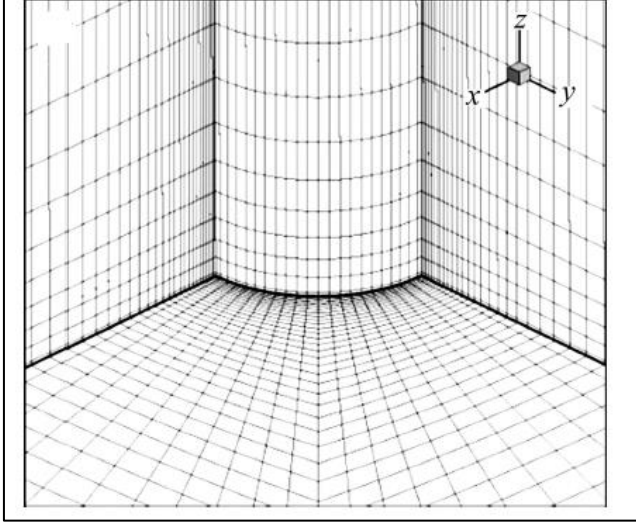


Şekil 2.11. Azhari ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait sayısal modelin ağ yapısı



Şekil 2.12. Azhari ve diğerleri (2012)'nin çalışmasına ait sayısal modelin sınır koşulları

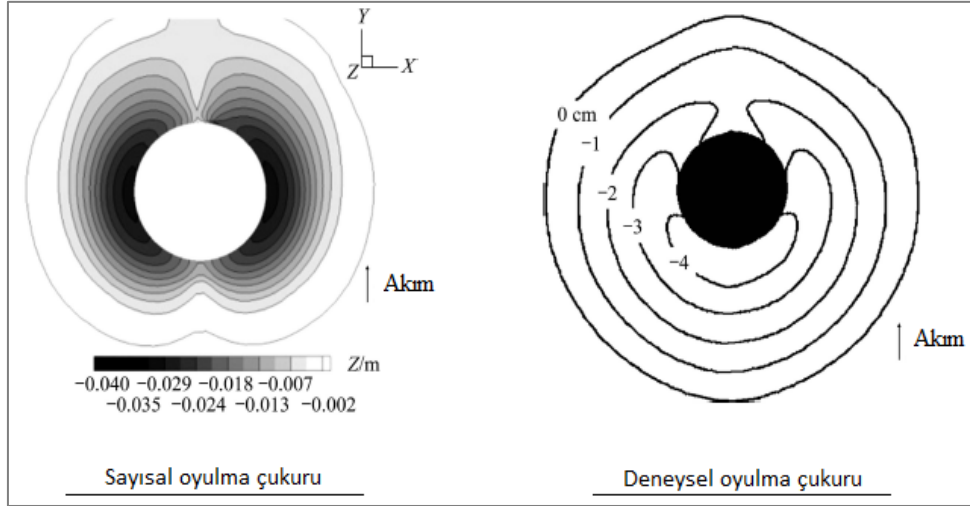
Model, çözüm için altı yüzlü elemanlara ayrılmıştır. Şekil 2.14'te kanal tabanı ve ayaklar yakınındaki akım bölgelerinde katı yüzeylerden uzaklaştıkça yavaş yavaş büyüyen yapıda hücreler kullanılarak elde edilmiş olan üniform olmayan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 2.14. Zhu ve Liu (2012)'nin çalışmasına ait sayısal model ağ yapısı

Sayısal yöntemde kanal üzerinde konumlanmış ayaklar etrafında üç boyutlu akış alanını simüle etmek için zaman ortalamalı Reynolds Navier Stokes denklemleri (RANS) ve standart k- ϵ türbülans modeli kullanmışlardır. Sayısal sonuçlar daha önceden Melville (1975) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında, meydana gelen akış düzeni ve maksimum oyulma derinliğinin deney verileriyle uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sayısal yöntem ile saptanan maksimum oyulma çukurunun konumu ve profilinin deney sonuçlarından farklılık gösterdiğini bildirmişlerdir. Buna sebep olarak deneyde oluşmuş sediment tepeliklerinin aşınma bölgesine doğru çöküşlerinin sayısal model tarafından simüle edilememiş olabileceğini belirtmişlerdir. Sayısal sonuçlarda köprü ayağının hemen bitişiğinde çift taraflı keskin bir oyulma söz konusuyken, deney sonuçlarında türbülanslı akış etkisiyle oyulan bölgeye tekrar sediment çöküşü olabileceğini bildirmişlerdir. Bu sebeple deney sonuçlarında o bölgede oyulma derinliğinin daha az olduğunu bildirmişlerdir. (Şekil 2.15)



Şekil 2.15. Zhu ve Liu (2012)'nin çalışmasına ait sayısal model ile deneysel oyulma çukurlarının karşılaştırılması

2.2. Oyulma Mekanizması

2.2.1. Katı madde hareketi

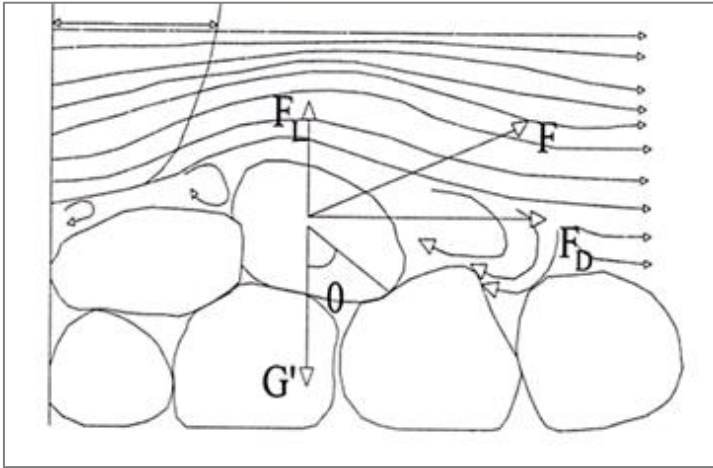
Doğadaki tüm akarsular havzalarından taşınan ve/veya kendi mevcut yataklarından sökülüşmüş çeşitli boyutlarda kaya, çakıl, kum, silt ve kil gibi farklı taneler ihtiva eder. Bu katı maddeler akım hızına bağlı olarak sürüklenme, yuvarlanma veya sıçrama gibi hareketlerle yer değiştirerek yatak yüzeyinde ve akım içerisinde askı halinde taşınır. Katı maddenin yatakta stabil yani hareketsiz kalmasını sağlayan ise tanenin kendi ağırlığı ve tane yapısıdır. Böylece katı maddenin hareketi söz konusu dinamik ve statik kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu kuvvetler aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Bayazıt, 2010);

- Ağırlık kuvveti yani tanenin su içindeki ağırlığı (G'),
- Hidrodinamik sürüklenme kuvveti (F_D),
- Hidrodinamik kaldırma kuvveti (F_L),
- Taneyle teması bulunan diğer tanelerin uyguladığı kuvvetleri (F).

Şekil 2.16'da taneye etkiyen kuvvetler gösterilmektedir. Burada G' = tanenin su altındaki ağırlığı, F_D = hidrodinamik sürüklenme kuvveti, F_L = hidrodinamik kaldırma kuvveti, F = taneyle teması bulunan diğer tanelerin uyguladığı kuvvettir. Bu kuvvetlerin bileşkelerinin sıfır olması durumunda tane üzerindeki kuvvetler dengededir demektir. Bu kritik durumu

sağlayan akım hızına ise kritik akım hızı denir. Akım hızının artmasına bağlı olarak, taneyi harekete geçirecek hidrodinamik kuvvetlerin bileşkesi artmakta, bu da taneleri harekete geçirmektedir (Bayazıt, 2010).

Taban yakınındaki akımın laminar olması yani taban yakınındaki laminar alt tabakanın taneleri tamamen örtmesi durumunda, bu kuvvet sadece viskoz tesirlerden oluşmakta ve bu durumda tanelerin arkasında sınır tabakasında ayrılma meydana gelmemektedir. Reynolds sayısının artışıyla birlikte laminar alt tabaka kalınlığı azalır ve sınır tabakasının ayrılmasından dolayı sürüklenme kuvveti (F_D) meydana gelir. Ayrılma neticesinde ise tanenin etrafında farklı basınç değerleri meydana gelir. Bu durum tane etrafında akım çizgilerinin eğilmesine ve basıncın hidrostatik değerin altına düşmesine sebep olur. Böylelikle taneye (F_L) kaldırma kuvveti de etki etmiş olur.



Şekil 2.16. Taneye etkiyen kuvvetler (Bayazıt, 2010)

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri için sırasıyla Eş. 2.10 ve Eş. 2.11 yazılabilir;

$$F_L = C_L \rho \frac{u^2}{2} A \quad (2.10)$$

$$F_D = C_D \rho \frac{u^2}{2} A \quad (2.11)$$

Burada, C_L =kaldırma katsayısı, C_D =sürüklenme katsayısı, u =tane yakınlarındaki akım hızı, A =tanenin akıma dik alanıdır. Eş. 2.10 ve Eş. 2.11’de u^2 parametresinin çarpanlar arasında olması türbülanslı akımın, hızın karesiyle doğru orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. C_L

ve C_D tanenin geometrisi, akımın Reynolds ve Froude sayılarıyla değişmektedir. Suyu tamamen batmış cisimlerde Froude sayısının herhangi bir etkisi yoktur (Tunç ve Emiroğlu, 2019).

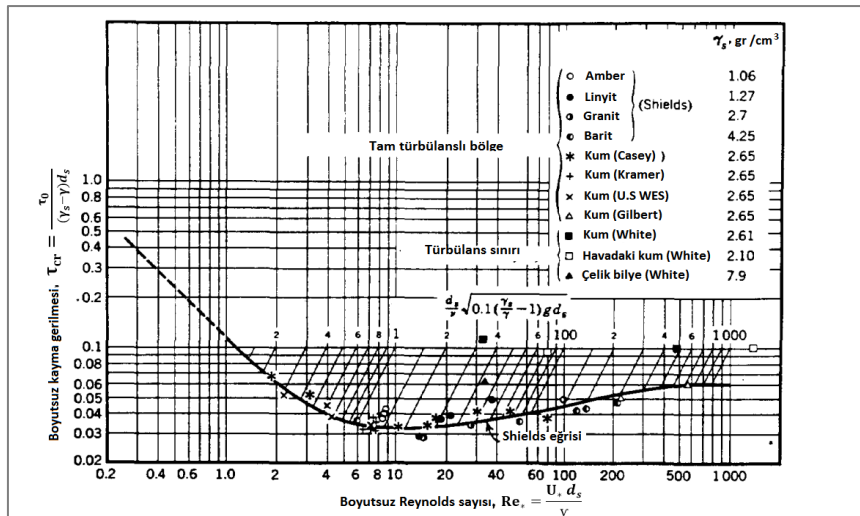
2.2.2. Kritik kayma gerilmesi

Kritik kayma gerilmesi, yatak malzemesinin harekete geçtiği akım şartlarını ifade eden τ_0 taban sürüklenme gerilmesinin kritik değeridir. Dolayısıyla yatak malzemesinin harekete geçmesi olayını ifade eden değişkenlere bağlıdır. Bunlar, akışkanın özellikleri (γ , ν), taban malzemesinin özellikleri (d , γ_s), akımın özellikleri (τ_0) ve yerçekimi ivmesi (g)'dir. Bu değişkenler kullanılarak boyut analizi yapıldığında kritik durum için Eş. 2.12 elde edilir;

$$\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} = f\left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\nu}d, \frac{\gamma_s}{\gamma}\right) = Fr_* \theta_{cr}^2 \quad (2.12)$$

Burada γ = suyun özgül ağırlığı, γ_s = sedimentin özgül ağırlığı, d = sedimentin tane çapı, τ_0 = taban sürüklenme gerilmesi, Fr_* = tane sürüklenme Froude sayısı, θ_{cr} = Shields parametresi kritik değeri, ν = viskozitedir.

Kritik durum için Shields (1936) Fr_*^2 ile Re_* arasında bir bağıntı önermiştir. Bu bağıntı deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş olup, Şekil 2.17'de verilmiştir. Burada Re_* = tane sürüklenme Reynolds sayısıdır.



Şekil 2.17. Boyutsuz Shields diyagramı (Shields, 1936)

Shields eğrisi hareketin başlangıcını yani kritik durumu ifade etmektedir. Eğrinin üstünde kalan bölge için tane hareket halinde olup, altında kalan bölge içinse hareketsizdir. Eğri laminar bölge, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge olmak üzere ayrılmıştır. Diyagramın sol tarafı ($Re_* < 2$) akımın laminar olduğu bölgedir. Bu bölgede Re sayısı arttıkça Shields parametresi azalmaktadır. Laminar bölgede kritik kayma gerilmesi hızı; u_{cr}^2 , γ_s , g ve v parametrelerine bağlı olup, tane çapından (d) bağımsızdır. Tane, laminar alt tabakada tamamen gömülü kaldığı sürece kayma gerilmesi, taban yüzeyini bir bütün olarak almaktadır. Laminar akımlarda cidar pürüzlülüğünün akım üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Ancak türbülanslı akımda $Re_* > 1000$ için viskozitenin etkisinin kalmadığı ve tam türbülanslı bölgede kritik durum için Fr_*^2 değerinin 0,06 olarak sabit kaldığı görülmektedir.

Shields eğrisinin her iki ekseninde u_* bulunması sebebiyle, taban malzemesini harekete geçirecek olan kritik gerilme değeri ancak deneme yanılma yoluyla bulunabilir. Shields eğrisini daha kullanılır hale getirmek için, deneme yanılma yapılmasına gerek kalmayan Eş. 2.13'deki bağıntı kullanılabilir.

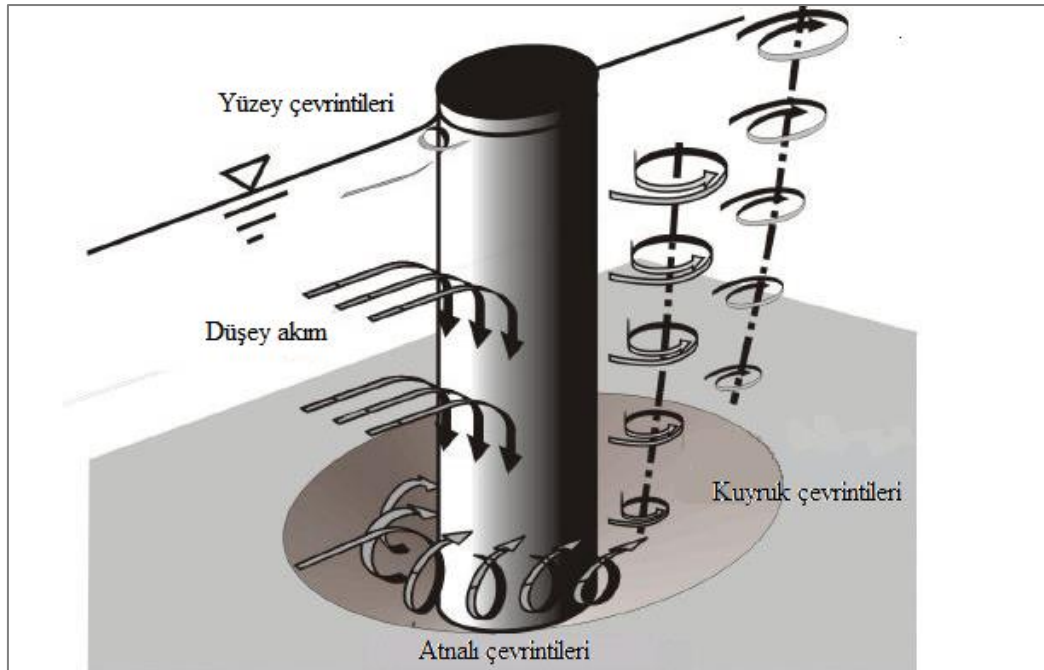
$$\frac{Fr_*^2}{Fr^2} = \frac{\gamma_{s*} g}{v^2} d^3 = d_*^3 \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte akıma dair bir büyüklük yoktur. Böylece d çaplı taban malzemesine sahip bir yatağı harekete geçirecek u_{*cr} değeri doğrudan okunabilir. Shields eğrisi birçok araştırmacı tarafından çalışılmış, farklı bağıntı ve grafikler sunulmuştur.

2.2.3. Yerel oyulma mekanizması

Akarsularda katı maddenin taşınması sırasında tabanda oyulmalar veya yığılmalar meydana gelmektedir. Akım hızlarının ve dolayısıyla tabandaki kayma gerilmesinin arttığı bölgelerde yerel oyulmalar meydana gelirken, taşıma kapasitesinin düştüğü bölgelerde yığılmalar oluşmaktadır. Köprü ayakların etrafında meydana gelen yerel oyulma mekanizması, ayağın menba tarafındaki düşük hızlı akım ve ayak etrafındaki çevrintiler sebebiyle meydana gelmektedir. Akım ayak yüzeyine yaklaşırken yavaşlamakta ve ayağın menba yüzünde sıfır olmaktadır. Bu da ayak yüzünde basıncın artmasına neden olmaktadır. Bu basınç değerleri yavaşlamanın en yüksek olduğu akım yüzeyinde en üst seviyeye ulaşırken tabana doğru azalmaktadır. Hızın akım yüzeyinden tabana doğru azalması sebebiyle, ayak yüzeyindeki

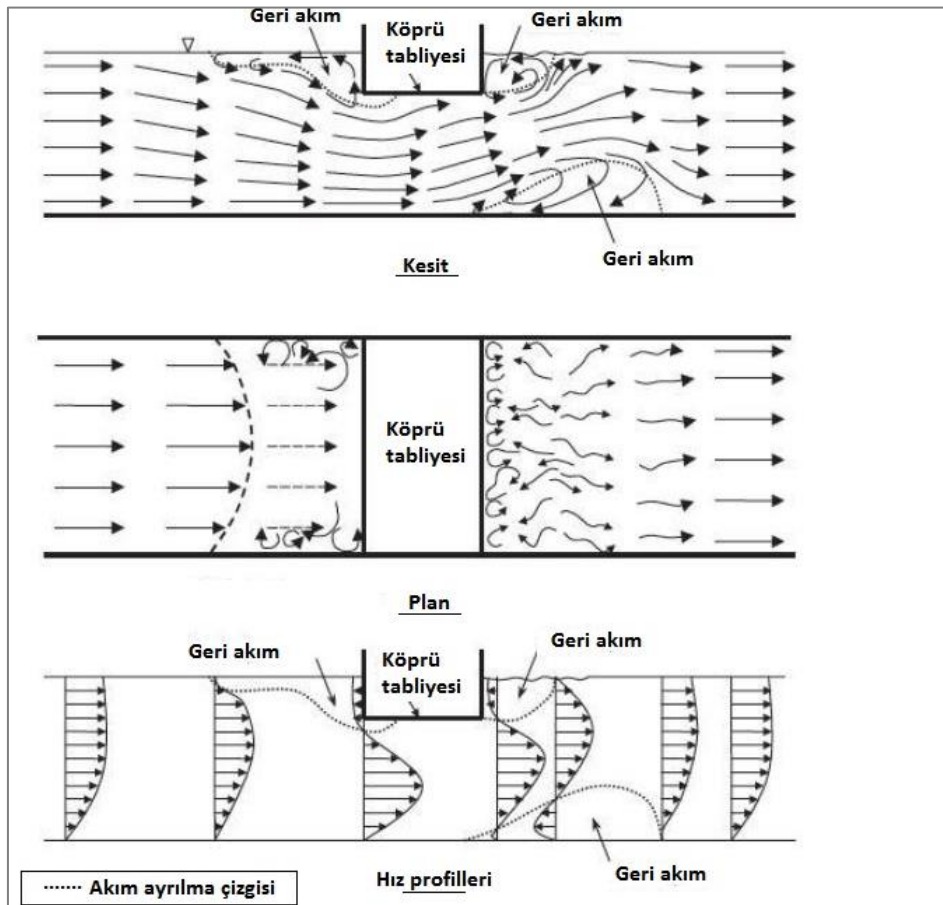
basınç tabana doğru azalan basınç eğrisi şeklinde olmaktadır. Tabana doğru oluşan bu basınç farkından dolayı ayaklarda aşağıya doğru düşey bir akım meydana gelir. Meydana gelen düşey akım tabana ulaşır ve ayak tabanı yakınında oyulmaya neden olur. Yatağa çarpan bu düşey akım oyulmanın en önemli nedenidir (Melville ve Raudkivi, 1977). Ayakların varlığından dolayı meydana gelen güçlü çevrıntiler, ayak tabanı etrafındaki yatak malzemesini sürükler (Melville ve Coleman, 2000). Düşey akım, yaklaşan yatay akımla etkileşime girerek karmaşık bir çevrinti akımı oluşturur ve devamlı dönerek bir çukur oluşturur (Şekil 2.18). Çevrinti ayak kenarlarından mansaba ulaşır. Bu çevrinti at nalına olan benzerliği sebebiyle at nalı çevrintisi olarak adlandırılır (Breusers, Nicollet ve Shen, 1977). Oyulma derinliği belirli bir büyüklüğe ulaşınca kayma gerilmelerinin etkisi azalmaya başlar. Kayma gerilmesinin gevşek malzemeyi harekete geçiren kritik kayma gerilmesinin altına düşmesiyle oyulma çukurunun hacmi sabit kalır ve denge durumuna ulaşmış olur (Yanmaz, 2002). Ayak tabanının yakınlarda at nalı çevrintisinin dışında kuyruk çevrintileri olarak adlandırılan ayağın mansabında oluşan düşey çevrıntiler de vardır. Ayak kenarlarında akımın ayrışması sonucu meydana gelirler (Dargahi, 1990). Bu kuyruk çevrintileri stabil değildir ve dönüşümlü olarak ayağın bir kenarından diğer kenarına döner. At nalı çevrintileri kadar etkili olmamakla birlikte ayakların taban bölgesinden taban malzemesini aşındırır. Kuyruk çevrintilerinin yoğunluğu mansap yönünde büyük ölçüde azalır. Öyle ki sediment birikimi ayağın hemen mansap kısmında yaygındır (Richardson ve Davies, 1995).



Şekil 2.18. Köprü ayağı etrafında meydana gelen akım ve çevrıntiler (Melville, 2008)

Yerel oyulmalar çoğu zaman köprünün akımla temas eden ayak kısımlarında olmasına rağmen farklı doğa olayları neticesinde sürekli değişim içerisinde olan akım rejimleri sebebiyle akımın köprü tabliyesine ulaştığı durumlarda meydana gelmektedir. Taşkının şiddetine göre değişmekle beraber suyun tabliye üzerinden savaklandığı yada tabliye altından basınçlı aktığı durumlar da mevcuttur. Basınçlı akışlar ciddi bir oyulma potansiyeli yaratır. Basınçlı akım durumunda kesitteki daralma sebebiyle akım hızı artmakta ve taban kayma gerilmelerinin de yükselmesiyle sediment hareketi artmaktadır (Karakurt, 2016).

Basınçlı oyulması olarak ifade edilen bu oyulmalar neticesinde tabliye altında kesitte bir genişleme söz konusu olmaktadır. Zira basınçlı bir akımda belirli bir deşarjı geçirmek için enerjiyi dağıtmanın tek yolu oyulma oluşturarak kesit genişletmektir (Guo, 2011). Kesit genişledikten sonra bölgesel olarak akım hızında yavaşlama ve kayma gerilmelerindeki düşüşle yavaşlayan sediment hareketi neticesinde oyulma çukuru denge profiline ulaşmaktadır. Basınçlı akımlar için köprü tabliyeleri altında oluşan akım iplikçığı ve hız profilleri Şekil 2.19’de gösterilmiştir (Verma, Setia ve Bhatia, 2004).



Şekil 2.19. Köprü tabliyesi altında oluşan akım ve hız profilleri (Verma ve diğerleri, 2004)

3. 3-B SAYISAL HİDRODİNAMİK VE SEDİMENT TAŞINIM MODELİ

3.1. Sayısal Model Genel Bilgileri

Analitik çözümlerin olmadığı ya da deneysel çalışmaların çok pahalı ve zaman alıcı olduğu veya ölçeklemede, ölçülebilirlikte yaşanacak problemlerin olduğu durumlarda sayısal analiz yöntemlerine başvurulabilmektedir. Sayısal çözüm yöntemlerin geçmişine bakıldığında ilk olarak el hesaplamalarına dayanan modeller geliştirilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ilgili ilk sayısal çözüm Thom (1933) tarafından bir silindir etrafındaki akış için yapılmıştır. Bilgisayar tabanlı hesaplamalara geçiş ise Kawaguti (1953) tarafından silindirin etrafındaki akışın, mekanik bir masa hesap makinesi yardımıyla çözümlenmesiyle başlamıştır. Evans, Harlow ve Bromberg (1957), ABD’de Los Alamos Ulusal Laboratuvarı’nda yapılan ve Navier-Stokes denklemlerine dayanan bir akışkan akış modeli geliştirilmiştir. Bu çalışma iki boyutlu, süreksiz, sıkıştırılamaz akışkanlarla ilgili dünyada yapılmış olan ilk çalışmadır. Hess ve Smith (1967) rastgele parçaların akış potansiyelinin hesaplanması ile ilgili çalışma yapmıştır. 3-B transonik akışların çözümleri Jameson ve Caughey (1977) tarafından geliştirilmiştir. Zaman içerisinde teknolojinin de gelişmesiyle genel amaçlı uygulamalardan problemlerin ihtiyaçlarına yönelik özel amaçlı uygulamalara kadar pek çok ticari yazılım üretilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği mühendislik uygulamalarında çok önemli bir yere sahiptir. Aerodinamik ve hidrodinamik tasarımları, ısıtma ve soğutma, havalandırma sistemleri, jet motorları ve turbo makinalar, kirleticilerin dağılımının analizi, atık işleme ve arıtma sistemleri, biyomedikal alanında akış analizleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Günümüzde birçok ticari yazılım akışkanlarla ilgili problemlere çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada Ansys 14.5v Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Fluent, sıkıştırılamaz, orta sıkıştırılabilir ve yüksek sıkıştırılabilir (süpersonik ve hipersonik) akışlar için hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsüdür. Analizler 2-B ve 3-B olarak yapılabilir. Laminer, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar (Ansys, 2015).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları, akış alanının çok sayıda küçük birime ayrılarak her bir kontrol hacmi için Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi prensibine

dayanır. Navier-Stokes denklemleri bilindiği üzere akış problemlerini temsil eden genel denklemlerdir. Fluent ve benzeri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları az sayıda akış hali hariç analitik çözümü mevcut olmayan bu denklemleri bir takım ayrıklaştırma ve kabullerle sayısal olarak çözmektedir (Versteeg ve Malalasekera, 1995).

3.2. Hidrodinamik Model Temel Eşitlikleri

3.2.1. Navier-Stokes denklemleri

Fluent yazılımında süreklilik ve momentum korunumuna dayanan 3-B Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri kullanılmaktadır. Sıkıştırılamaz akımlar için süreklilik denklemleri kütle korunumu esasına dayanır ve Eş. 3.1’de verilmiştir (Munson, Young ve Okiishi, 2006).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

3-B momentum korunum denklemleri Newton’un ikinci yasasında türetilmektedir. Buna göre momentum değişim oranı, kontrol hacmine etkiyen net kuvvetlerin değerine eşittir. x,y ve z yönündeki momentum korunum denklemleri sırasıyla Eş. 3.2, Eş. 3.3 ve Eş.3.4’te verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

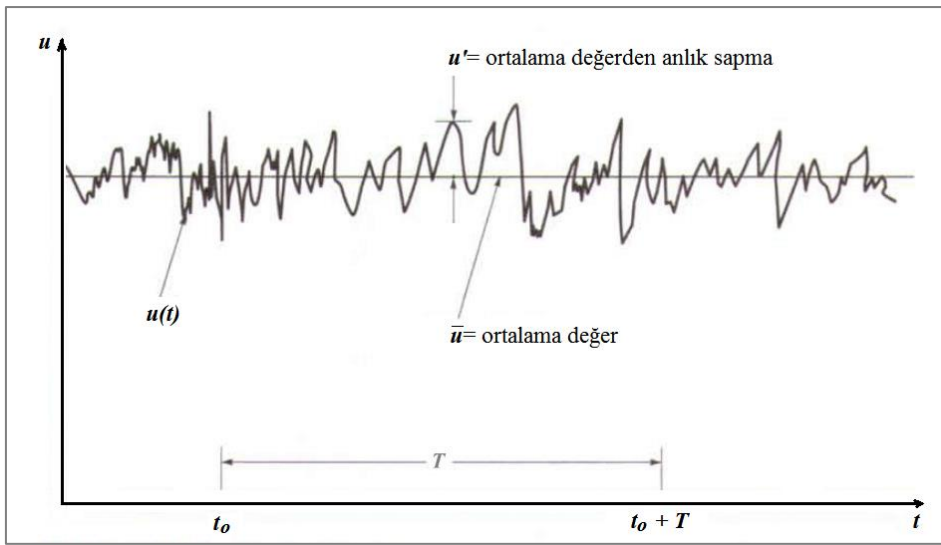
$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

Burada ρ = özgül ağırlık, P = basınç, u,v ve w sırasıyla x,y ve z yönündeki hızlardır.

Bu temel denklemlere ek olarak ayrıca türbülans denklemleri de çözülmektedir. Türbülans bir akış özelliği olmayıp sadece akışı karakterize etmektedir. Çevrintilere sahip hız alanı ile karakterize edilirler. Bu çevrintiler momentum, enerji ve konsantrasyon gibi niceliklerin

karışımıdır. Türbülans tanımlayan denklemlerin Navier-Stokes denklemleriyle birlikte kullanılabilmesi için, Navier-Stokes temel denklemlerinin uygun şekle getirilmesi gerekmektedir. Uygun hale getirilen bu denklemlere Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklem denir. Bu denklemlerde akışın özellikleri zaman ortalama ve zaman göre değişen iki kısım olarak ayrılır. Örneğin akışa ait hız büyüklüğünün bileşenlerine ayrılması Eş. 3.5'te verilmiştir (Şekil 3.1).

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (3.5)$$



Şekil 3.1. Akışa ait hız büyüklüğünün zaman göre bileşenleri (Munson ve diğerleri, 2006)

Burada $\bar{u}_i$ = x-yönündeki hız bileşeninin zamana göre ortalaması, u_i' = x-yönündeki hız bileşeninin zamana bağlı ortalama değerinden anlık sapma miktarıdır.

Hız gibi akışın basınç özellikleri de bu şekilde zamana göre bileşenlerine ayrılarak ifade edilir. Zamana bağlı çözülen RANS denklemleri Eş. 3.6'da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_t}{\partial x_t} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i' u_j') \quad (3.6)$$

Burada $(-\rho \bar{u}_i' u_j')$ terimi Reynolds tensörü olarak adlandırılır. u_j' = y yönündeki hızın y yönündeki ortalama hız değerlerinden anlık sapma miktarıdır (Munson ve diğerleri, 2006). Türbülans olayı oldukça karmaşık bir yapıda olması sebebi ile Reynolds gerilmesinin analitik bir çözümü yoktur. $(-\rho \bar{u}_i' u_j')$ teriminde söz konusu ortalama hızdan sapma

değerlerini hesaplamak için bazı yaklaşımlar kullanılmıştır. Böylece sayısal çözümler için türbülans modelleri geliştirilmiştir (Apaçoğlu, 2010).

3.2.2. Türbülans modelleri

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde sayısal modellerin çözümünde her türlü probleme uygulanabilir genel bir türbülans modeli yoktur. Analiz edilecek akış probleminin yapısı, incelenecek parametreler ve analiz süresi gibi etkenler türbülans modeli seçimini belirlemektedir (Başyazıcı, 2007). Fluent yazılımında kullanılan türbülans modelleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu çalışmada yapılan sayısal modeller için $k-\epsilon$ ve RSM türbülans modelleri kullanılmış olup, diğer türbülans modelleri hakkında detaylı bilgi verilmeyecektir.

Çizelge 3.1. Fluent’te kullanılan türbülans modelleri

Fluent Türbülans Modelleri	Denklem Sayısı
Spalart-Allmaras (Vorticity-Based)	1
Spalart-Allmaras (Strain/Vorticity-Based)	1
Standard $k-\epsilon$	2
Renormalization-group (RNG) $k-\epsilon$	2
Realizable $k-\epsilon$ model	2
Standard $k-\omega$	2
SST $k-\omega$	2
Transition $k-k\ell-\omega$	3
Transition SST	4
Reynolds Stress Linear Pressure-Strain	7
Reynolds Stress Quadratic Pressure-Strain	7
Reynolds Stress - ω	7
Scale-Adaptive Simulation (SAS)	-
Detached Eddy Simulation (DES)	-
Large Eddy Simulation (LES)	-

$k-\epsilon$ türbülans modeli

$k-\epsilon$ modeli iki denklemlilik en yaygın olarak kullanılan türbülans modellerindendir. Akışın çevrıntili özelliklerini karakterize etmek için fazladan iki taşıma denklemi içerir. İlk

değişken türbülansın kinetik enerjisi, ikincisi ise türbülansın sönümlene miktarıdır. Standart k-ε ve Realizable k-ε modelleri kısaca aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Standart k- ε türbülans modeli

Standart k-ε modeli, k ve ε için taşıma denklemlerine dayalı olup, akış türlerinin çoğunda kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar vermesi sebebiyle sıklıkla kullanılan, yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi k ve enerji sönümlene oranı ε için yazılan iki adet taşınım denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Bu taşınım denklemleri k ve ε için sırası ile Eş. 3.7 ve Eş. 3.8’de verilmiştir.

$$u \frac{\partial k}{\partial r} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (3.7)$$

$$u \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{C_1 \epsilon}{k} (G_k - C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.8)$$

Burada G_k ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak gelişen türbülans kinetik enerjisi (TKE) oluşumunu, G_b ise kaldırma kuvveti nedeniyle meydana gelen türbülans dağılım oranı (TDE) oluşumunu temsil eder. G_k ve G_b sırasıyla Eş. 3.9 ve Eş. 3.10’da verilmiştir.

$$G_k = v_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

$$G_b = -g \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (3.10)$$

Eş. 3.4’de v_t türbülans viskozitesi olup, TKE ve TDR'nin bir fonksiyonu olarak Eş. 3.11’deki gibi hesaplanır.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.11)$$

Buradaki C_μ terimi sabit olması sebebiyle türbülanslı viskozite daha az karmaşık bir şekilde hesaplanmakta ve böylece standart k-ε modeli daha kararlı çalışmaktadır.

Söz konusu model literatürde türbülanslı akışlar için hava ve su ile yapılan deneylerden elde edilen ampirik sabitler içermektedir. Söz konusu sabitler $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ olup, k ve ε için tanımlanan türbülans Prandtl sayıları ise $\sigma_k = 1.0$ ve $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 'dir. Bu katsayıların katı cıdarla sınırlandırılmış çok çeşitli akış durumları için oldukça iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Ansys, 2015).

Realizable k- ε türbülans modeli

Bu modelin standart k- ε modelinden iki önemli farkı bulunmaktadır. Öncelikle türbülanslı viskozite için yeni bir formülasyon içerir. C_μ , standart k- ε modelindeki gibi bir sabit değil, bir değişkendir. Diğer bir farkı ise ortalama kare vortisite dalgalanmasının taşınması için tam bir denklemden türetilmiş olan, kinetik enerji sönmleme oranı ε için yeni bir taşınım denklemi içermektedir. Realizable k- ε türbülans modeli için taşıma denklemleri k ve ε için sırasıyla Eş.3.12 ve Eş.3.13'de verilmiştir;

$$u \frac{\partial k}{\partial r} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3.12)$$

$$u \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] - \frac{C_1 \varepsilon}{k} (C_3 G_b) + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v_\varepsilon}} \quad (3.13)$$

Burada C_1 ve η sırasıyla Eş 3.14 ve Eş 3.15'te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.14)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

Türbülanslı viskozite, standart k- ε (SKE) modelinde olduğu gibidir ve Eş 3.16'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

Ancak, C_μ artık sabit değildir ve ortalama gerilme ile dönme hızlarının, sistemin dönme açısıl hızının ve türbülanslı alanların bir fonksiyonu olup daha fazla bilgi ilgili literatürde yer almaktadır (Ansys, 2015.)

Bu model, özellikle jetlerin yayılma hızının tahmininde, karmaşık yapıların ortalama akışını tahmin etme, dönme hareketi içeren akışlar ve güçlü ters basınç gradyanları altında sınır tabakalarının ayrılma ve yeniden dolaşıma girdiği olaylarda kullanılabilmektedir (Ansys, 2015). Modelin bu özellikleri standart k- ϵ modeline göre dönme ve sirkülasyon akışları için Reynolds gerilmelerini çok daha doğru bir şekilde tahmin etmektedir (Das ve diğerleri, 2016).

Reynolds Stress Türbülans modeli (RSM)

Reynolds gerilme modeli en ayrıntılı türbülans modelidir. İzotropik girdap viskozite hipotezini terk eden RSM, Reynolds gerilmeleri için taşıma denklemlerini çözerek, RANS denklemlerini sönümleme oranı ϵ ile kapatır (Ansys, 2015). Yani Reynolds gerilme tensörünün her bir bağımsız bileşeni için ayrı denklemin yanı sıra türbülansın skaler dağılım oranı için de bir taşıma denklemi çözülmemektedir. Kullanılan kapalı çözüm yöntemine genellikle İkinci Mertebeden Kapatma denir. Bu modelleme yaklaşımı Chou (1945) ve Rotta (1951) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Kaldırma kuvvetlerinin etkisi ihmal edildiğinde bu taşınım denklemleri Eş 3.17'deki şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u_k u_i' u_j'}) = D_{t,ij} + D_{ij} + P_{ij} + \phi_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (3.17)$$

Burada $D_{t,ij}$ = türbülans difüzyonu, D_{ij} = moleküler difüzyon, P_{ij} = türbülans gerilmeleri üretimi, ϕ_{ij} = basınç gerilmesi, ϵ_{ij} = sönümleme terimi olup sırasıyla Eş.3.18-3.22'de verilmiştir.

$$D_{t,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + \overline{p(\delta_{kj} u_i' + \delta_{ik} u_j')} \right] \quad (3.18)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (3.19)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (3.20)$$

$$\phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.22)$$

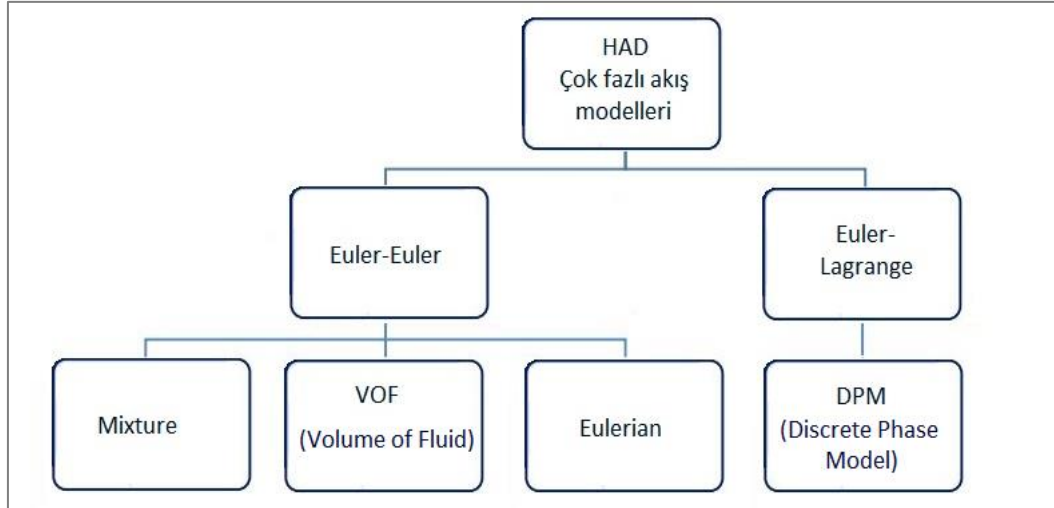
Bu terimlerden $D_{t,ij}$, ϕ_{ij} ve ε_{ij} yeni ve bilinmeyen korelasyon ifadeleri içermekte ve dolayısıyla hesaplanabilmeleri için modellenmeleri gerekmektedir (Kaya, 2007).

Genel olarak Reynolds Stress türbülans modeli yüksek dereceli anizotropi, önemli akış çizgisi eğriliği, akış ayrılması, sirkülasyon bölgeleri veya ortalama dönme etkilerinden etkilenen akışlar için iki denklemlilik türbülans modellerine göre daha tatmin edici sonuçlar vermektedir (Craft ve Launder, 1996).

3.3. Sediment Taşınım Modeli

3.3.1. Çok fazlı akış modelleri

Akışkan kinematiği akışkanların nasıl hareket ettiği ve hareketinin nasıl sonlanacağını inceler. Ansys Fluent'te akışkan hareketini gözlemleme yöntemi olarak çok fazlı akışlar için Euler-Euler ve Euler-Lagrange olmak üzere iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Fluent'te kullanılan çok fazlı akış modelleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.2'de verilen akış modellerinde DPM modeli parçacık, damlacık ve kabarcık yüklü (ayrık fazlı) akışlar için uygundur. Fazlar arasındaki ara yüzün önemli olduğu tabakalı akışlar, serbest yüzey akışları, sıçrama ve jet kopması gibi akışkan hareketi içeren akışlar için ise VOF modeli önerilmektedir. Mixture modeli iki yada daha fazla faz içeren homojen akışkanlar için pnömatik taşıma uygulamalarında kullanılabilir. Askı malzemesinin bulunduğu akışlar, akışkan yatak uygulamaları ve sedimantasyon için ise Eulerian model tercih edilmelidir.



Şekil 3.2. Fluent çok fazlı akış modelleri

Euler-Lagrange yaklaşımı

Lagrange yaklaşımı bir akış parçacığının pozisyon ve zaman fonksiyonu ile takibini temel alır (Çengel ve Cimbala, 2006). t_0 anından itibaren t anına kadar, x_0 konumundan x konumuna kadar parçacığın özelliklerini inceler. Fluent'te Lagrange yaklaşımında akışkan, Navier-Stokes denklemlerinin çözüldüğü sürekli faz olarak kabul edilirken ayrık faz ise parçacıkların takibi ile çözülür (DPM akış modeli). Bu yöntem, ayrık fazın düşük hacimli bir fraksiyona sahip olmasını gerektirir. Her parçacık ayrı olarak izlenir. Böylece çözüm sonunda herhangi bir parçacığın uzay ve zamandaki hareketi görülebilir (Ansys, 2015). Bu çalışmada Lagrange yaklaşımı tercih edilmediği için detaylı bilgi verilmemiştir.

Euler-Euler yaklaşımı

Euler-Euler yaklaşımı ise herhangi bir t anı için kontrol hacminde meydana gelen değişimler dikkate alır. Fluent'te Euler-Euler yaklaşımında akış fazlarının iç içe geçme durumu söz konusudur. Fazlar kontrol hacminde, hacim fraksiyonu şeklinde yer alır. Çözümlerde her bir faz için korunum kanunları uygulanır, momentum ve süreklilik denklemleri ayrı ayrı çözülür (Ansys, 2015). Euler-Euler yaklaşımında, sıvı-sıvı ve sıvı-katı akışları için bir ayrım yoktur. Ancak sıvı-katı akışları Granular olarak tanımlanır. Granular akışlarda fazlardan biri süreklilik teşkil ederken diğeri tanecikli faz olarak kabul edilir. Hacim fraksiyonlarının toplamı her zaman 1'e eşittir. Bir faza ait hacim fraksiyonu ve toplamı sırasıyla Eş.3.7 ve Eş. 3.8'deki gibi tanımlanabilir.

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (3.7)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.8)$$

Burada V_q = q'ninci fazın hacmi, α_q = q'ninci fazın hacim fraksiyonu, n= faz sayısıdır.

Süreklilik denklemi Eş. 3.9'daki gibi yazılır.

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3.9)$$

Burada ρ_q = q'ninci fazın yoğunluğu, ρ_{rq} = q'ninci faz için referans yoğunluk, v_q = q'ninci fazın hızı, $\dot{m}_{pq}$ ve $\dot{m}_{qp}$ = p'ninci fazdan q'ninci faza kütle transferi ve transferin tersini ifade etmektedir (Ansys, 2015).

Sıvı-sıvı akışa ait momentum denklemi Eş. 3.10'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{qp} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Burada $\bar{\bar{\tau}}_q$ = q'ninci fazın gerilim tensörü, $\vec{F}_q$ = etkiyen dış kuvvet, $\vec{F}_{lift,q}$ = kaldırma kuvveti, $\vec{F}_{wl,q}$ = cidar kayganlaşma kuvveti, $\vec{F}_{vm,q}$ = virtüel kütle kuvveti, $\vec{F}_{td,q}$ = türbülans yayılım kuvveti, $\vec{v}_p$ ev $\vec{v}_q$ = fazlara ait hızlar, $\vec{v}_{pq}$ ev $\vec{v}_{qp}$ = fazlar arası hızlar ve K_{qp} = sıvı-sıvı fazlar arası momentum değişim katsayısıdır.

q'ninci faz için gerilme tensörü Eş. 3.11'deki gibi yazılır.

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \vec{v}_q \bar{\bar{I}} \quad (3.11)$$

Burada μ_q = q'ninci fazın kayma viskozitesi, λ_q = q'ninci fazın kütle viskozitesi, $\bar{\bar{I}}$ = değişmez stres tensörüdür. Sıvı-katı akış için momentum denklemi ise Eş. 3.12'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla P_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ + \sum_{p=1}^n (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl}) + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{wl,s} + \vec{F}_{vm,s} + \vec{F}_{td,s}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Burada P_s = s'ninci katı fazın basıncı, K_{ls} = "l" sıvı veya katı fazı ile "s" katı fazı arasındaki momentum değişim kat sayısı, $\dot{m}_{ls}$ ve $\dot{m}_{sl}$ = fazlar arası kütle transferidir (Ansys, 2015).

Eulerian çok fazlı akış modellerinde ayrıca termodinamiğin birinci yasasına dayanan enerji korunumu tanımlanır ve her faz için ayrı bir entalpi denklemi çözülür. Euler yaklaşımı için entalpi denklemleri Eş. 3.13'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q h_q \vec{v}_q) = \alpha_q \frac{\partial P_q}{\partial t} + \vec{\tau}_q \cdot \nabla \vec{v}_q - \nabla \vec{q}_q + S_q + \\ + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Burada h_q = q'ninci fazın entalpisi, $\vec{q}_q$ = ısı akısı, S_q = kaynak terim, Q_{pq} = p'ninci ve q'ninci fazlar arasındaki ısı değişiminin yoğunluğu, h_{pq} ve h_{qp} = fazlar arası entalpidir (Ansys, 2015).

Yukarıdaki geçerli denklemlerden görülebileceği gibi, akış davranışını etkileyen ve uygun şekilde modellenmesi gereken birçok terim vardır. Sürüklenme ve kaldırma kuvveti gibi faz etkileşimi parametrelerinin de tanımlanması gerekmektedir (Ansys, 2015). Bu parametreler kısaca aşağıda verilmiştir.

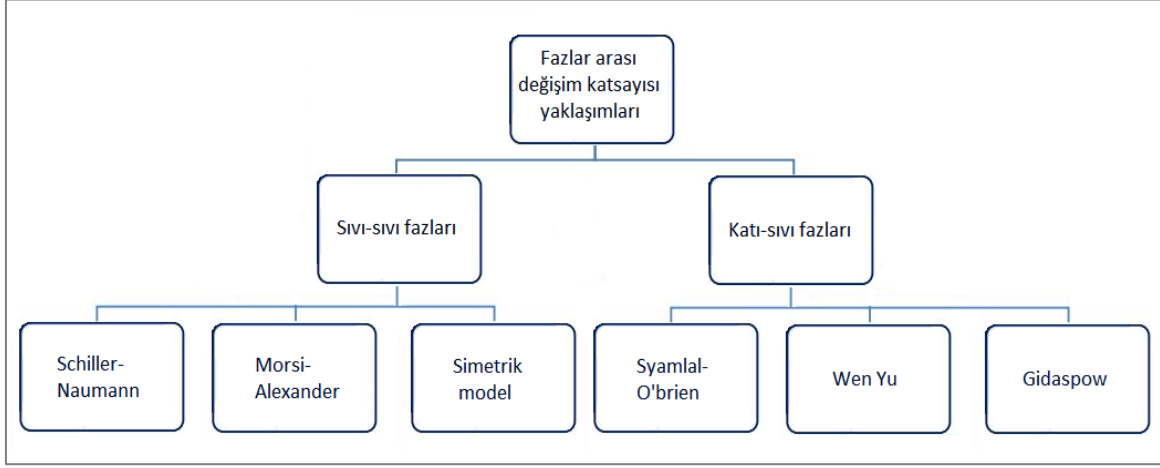
Sürüklenme kuvveti

Fluent sürüklenme kuvvetini, katı-sıvı değişim katsayısı olan K_{sl} 'yi kullanarak tanımlamıştır. Sürüklenme kuvveti Eş. 3.14'te verilmiştir.

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (3.14)$$

Burada K_{sl} = katı-sıvı değişim katsayısı, f = her modelde farklı hesaplanan sürüklenme katsayısıdır. f parametresi, bağıl Reynolds sayısına göre hesaplanan sürüklenme katsayısı olan

C_D ifadesini içerir. f parametresini hesaplamak için farklı yaklaşımlar olup, Fluent'te kullanılan fazlar arası değişim katsayıları için kullanılan yaklaşımlar Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Fluent fazlar arası değişim katsayısı yaklaşımları

Kaldırma kuvveti;

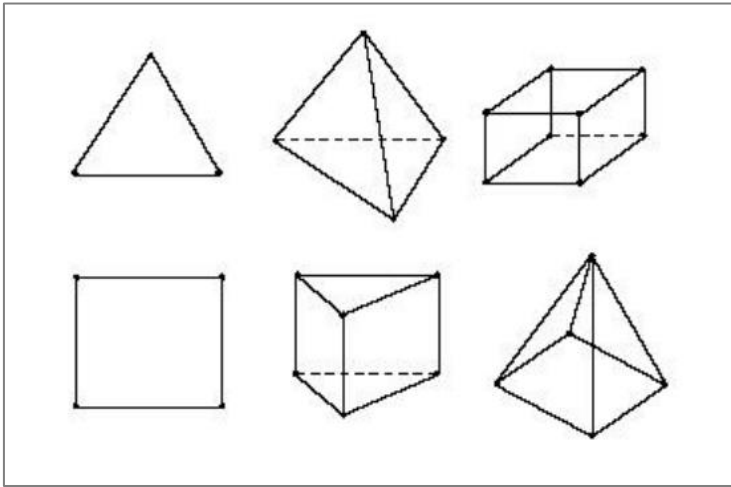
Fluent'te kaldırma kuvveti birincil sürekli faza ait hız gradyanları, ikincil faz olan parçacık yada damlacıklara etki eder. Ancak çoğu durumda kaldırma kuvveti, sürükleme kuvveti ile kıyaslandığında oldukça önemsizdir. Fluent'te akım yüksek parçacık konsantrasyonuna sahipse kaldırma kuvveti ihmal edilebilir. Ayrıca Euler yaklaşımında parçacıklar istiflenme sınırında (packing limit) simüle edildiği için hesaplarda kaldırma kuvveti dikkate alınmaz. Ancak kaldırma kuvvetinin önemli olduğu akışlarda istenirse kaldırma kuvvetinin etkisi hesaplara dahil edilebilir (Ansys, 2015).

3.4. Çözüm Yöntemi

Fluent yazılımı kullanılarak yapılan çözümler birkaç aşamadan oluşmaktadır. Katı model ve akış hacimleri için geometri oluşturulması, akış hacimlerini küçük birimlere ayıran sayısal ağ tabakasının oluşturulması, sınır koşulları başlangıç değerleri ve çözüm ayarlarının yapılması, çözümleme işlemi ve çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi şeklindedir.

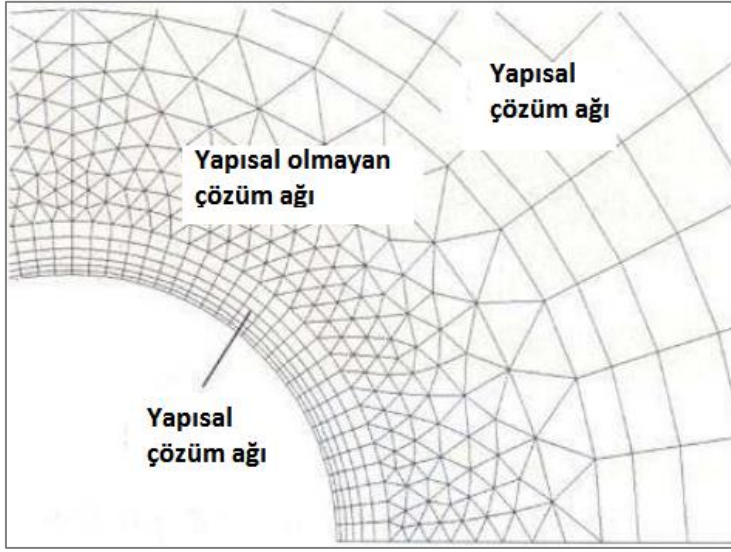
3.4.1. Çözüm ağı

Sayısal modellerin çözümü için elemanlara ayrılmasındaki temel amaç akışa ait diferansiyel denklemlerin çözümünü kolaylaştırmaktır. Model çözüm elemanlarına ayrılırken kullanılan hücre yapıları, problemin geometrisi, akış özellikleriyle ve sınır koşullarıyla yakından ilgilidir. Fluent'te 2-B veya 3-B boyutlu modeller için çözüm ağı üretiminde kullanılan elemanlar genel olarak Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. İki ve üç boyutlu çözüm ağı elemanları (Marshall ve Bakker, 2003)

Fluent yazılımı ile sayısal modeller hem yapısal hem de yapısal olmayan çözüm ağlarına ayrılabilir. Modelin geometrisine bağlı olarak hem yapısal hem de yapısal olmayan çözüm ağı (hibrit çözüm ağı) birlikte kullanılabilir. Yapısal ve yapısal olmayan çözüm ağı geometrileri Şekil 3.5'te verilmiştir.

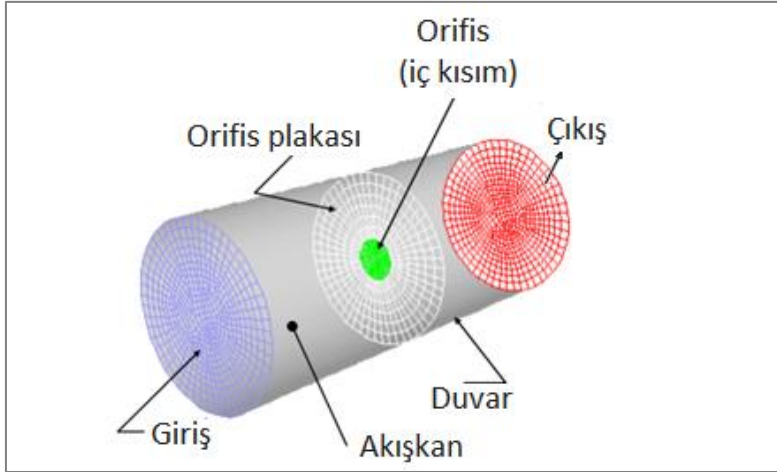


Şekil 3.5. Yapısal ve yapısal olmayan çözüm ağı geometrileri (Çengel ve Cimbala, 2006)

Sayısal çözüm ağı geometrisi ve eleman sayısı çözümün doğruluğu üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çözüm ağının sıklığı genel olarak çözümün hassasiyetini artırabilir ancak bununla beraber çözüm süresinin uzamasına neden olur.

3.4.2. Sınır koşulları

Sayısal çözümlerde Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri çözülürken uygun başlangıç koşulları ve sınır koşulları kullanılmalıdır. Sınır koşullarının tanımlanacağı sınırlar ve iç yüzeyler, yüzey bölgeleri (face zones) ile temsil edilir. Sınır koşullarına ait veriler bu yüzey bölgelerine atanır (Bakker, 2002). Örneğin Şekil 3.6'da boru akışı ve orifis plakasına ait akış ve sınır koşullarıyla ilgili yüzey ve hücre bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Sınır koşulları için yüzey ve hücre bölgeleri (Bakker, 2002)

Fluent'te akış giriş ve çıkış özelliklerinin tanımlanması için birçok sınır koşulu vardır. Bunlar hız girişi, basınç girişi, kütle akış girişi, basınç çıkışı, basınç uzak alanı, havalandırma girişi, havalandırma çıkışı, emme fanı, ve üfleme fanıdır. Akışkan ve katı bölgeleri bağlamak için ise duvar sınır koşulları kullanılır. Fluent'te duvar sınır koşulları için çözülecek problemin ihtiyaçlarına göre hareketli-sabit, pürüzlülük, kayma gerilmesi, ısı transferi, kimyasal yüzey reaksiyonları gibi birçok seçenek sunulmaktadır. Ayrıca çözümlerde hesaplama yükünü azaltmak için simetri sınır koşulu ve periyodik sınır koşulu uygulanabilmektedir. Simetri sınır koşulu ayna yüzeyini tanımlamaktadır. Bu koşulun uygulanabilmesi için ilgili yüzey akış alanı ve geometri bakımından mutlaka simetrik olmalıdır. Yüzeylerin, geometri ve akış şekli bakımından periyodik olarak tekrar eden bir yapıya sahip olması durumunda periyodik sınır koşulu kullanılmaktadır (Bakker, 2002).

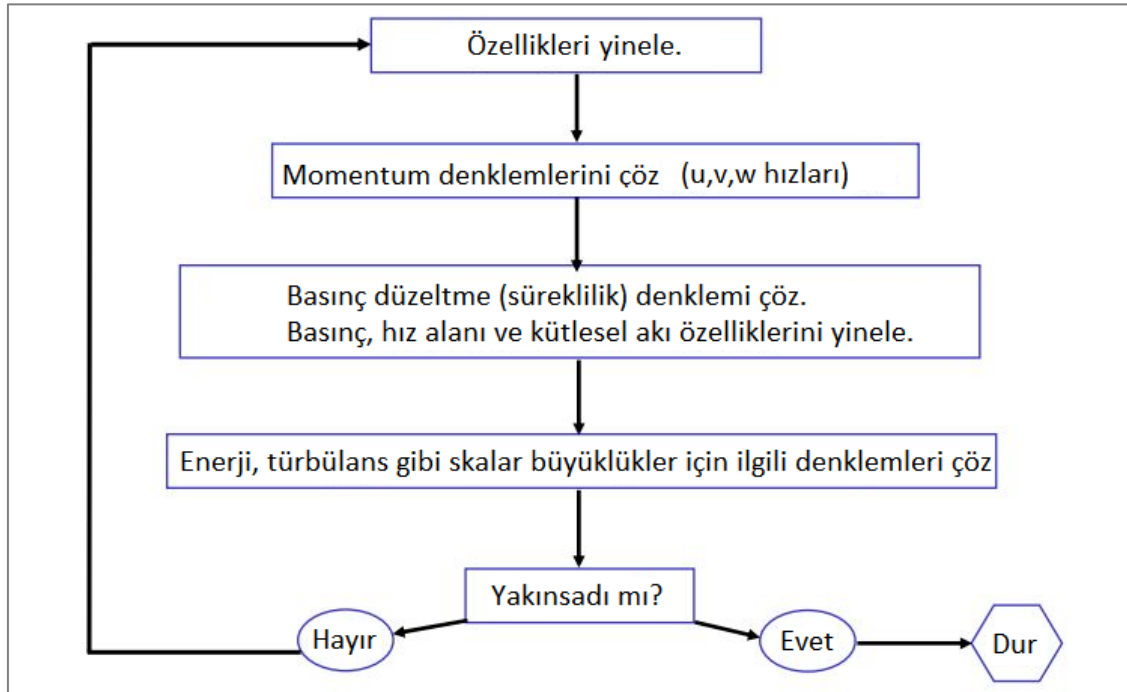
3.4.3. Çözüm algoritmaları

Fluent, temel denklemlerin çözümü için bütünleşik (coupled) ve ayırık (segregated) çözüm olmak üzere iki farklı algoritma ile çözüm yapar. Bütünleşik ve ayırık çözüm algoritması aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Ayrık Çözüm Algoritması

Ayrık çözüm algoritması yaklaşımında korunum denklemleri sıra ile çözülür. Korunum denklemleri doğrusal olmadığı için yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar iterasyonlar devam ettirilir. İterasyon adımları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

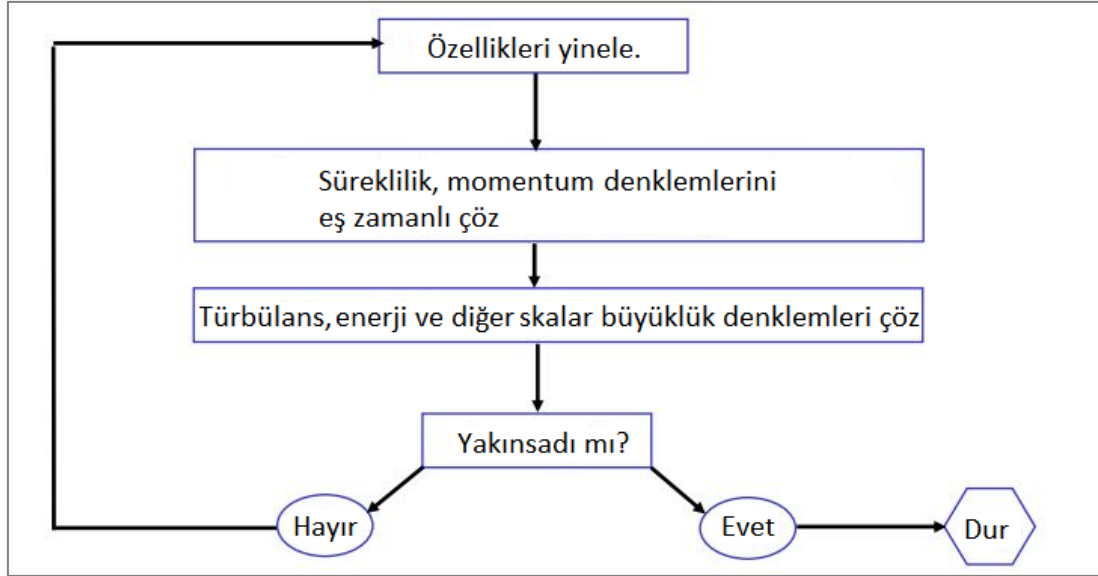
Ayrık çözüm algoritması sıkıştırılamaz ve karmaşık akış problemleri için daha çok tercih edilen bir çözüm yaklaşımıdır (Başyazıcı, 2007). Ayrık çözüm yönteminde denklemlerin doğrusallaştırılması için sadece Kapalı yöntem kullanılabilir.



Şekil 3.7. Ayrık çözüm algoritması (Bakker, 2002)

Bütünleşik Çözüm Algoritması

Bütünleşik çözüm algoritması yaklaşımı ile süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aynı anda, türbülans ve enerji gibi skalar büyüklükler ise korunum denklemlerinin çözümünden sonra çözülür. İterasyonlar yakınsama oluncaya kadar devam ettirilir. İterasyon adımları için çözüm algoritması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Bütünleşik çözüm algoritması (Bakker, 2002)

Ayrık çözüm ve bütünleşik çözüm yöntemleri, doğrusal olmayan denklemleri her hücre için bağımlı değişkene ait denklemler sistemi oluşturarak doğrusallaştırır. Elde edilen bu doğrusal denklemler, güncellenmiş akış alanı elde etmek için tekrar çözümlenir. Bu doğrusallaştırma işlemi bağımlı değişkene göre kapalı veya açık olarak yapılır. Kapalı ve açık yöntem kısaca aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Kapalı (Implicit) Yöntem

Kapalı yöntemde her hücredeki bilinmeyen değerler, komşu hücrelerdeki bilinen ve bilinmeyen değerler vasıtasıyla hesaplanır. Her bir bilinmeyen değer için sistemde birden fazla denklem ortaya çıkar ve bilinmeyenleri tespit etmek için bu denklemler eş zamanlı olarak çözülür (Keleşoğlu, 2010).

Kapalı yöntem Fluent'in standart sonlu fark enterpolasyon şemasıdır. Fazlar arası ara yüzeyde ve diğer hücrelerde hücreye giren ve çıkan akış miktarını hesaplamak için kullanılır. Bu yaklaşım matematiksel olarak Eş. 3.15'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{\alpha_p^{n+1} \rho_p^{n+1} - \alpha_p^n \rho_p^n}{\Delta t} V_{vol} + \sum_f \rho_p^{n+1} U_p^{n+1} \alpha_{p,f}^{n+1} = \left[S_{\alpha_p} \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{kp} - \dot{m}_{pk}) \right] V_{vol} \quad (3.15)$$

Burada $n+1$ = yeni zaman adımının indeksi, n = bir önceki zaman adımının indeksi, $\alpha_{p,f}$ = p 'nci fazın hacimsel oranının (fraksiyon) yüzey değeri, V_{vol} = hücrenin hacmi, U = normal hıza göre hücreden geçen hacimsel debidir.

Açık (Explicit) yöntem

Açık yöntem, verilen bir değişkenin hücredeki bilinmeyen değerinin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen sadece bir denklemde yer alır ve her hücredeki bilinmeyenler bir an için çözülür.

Fluent'te açık yöntem bir önceki zaman adımında hesaplanan hacimsel kesir değerleri için uygulanan standart sonlu fark enterpolasyon şemasıdır. Bu yaklaşım matematiksel olarak Eş. 3.16'daki şekilde ifade edilir.

$$\frac{\alpha_p^{n+1} \rho_p^{n+1} - \alpha_p^n \rho_p^n}{\Delta t} V_{vol} + \sum_f \rho_p U_p^n \alpha_{p,f}^n = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{kp} - \dot{m}_{pk}) + S_{\alpha_p} \right] V_{vol} \quad (3.16)$$

3.4.4. Ayırıklaştırma

Temel akış denklemlerini sayısal olarak çözülebilecek matematiksel denklemler haline getirmek için kontrol hacmi bazlı sonlu hacimler yöntemi kullanılır. Bu kontrol hacmi tekniği temel akışkan denklemlerinin her bir kontrol hacmi için entegre edilmesi ve her bir değişken için ayırıklaştırılmış korunum denklemlerinin kontrol hacmi temelinde sağlanmasını içerir (Başyazıcı, 2007).

Temel akış denklemlerinin ayırıklaştırılması bir skaler ϕ değişkeni için kararlı durumda korunum denklemi üzerinden açıklanabilir (Eş. 3.17).

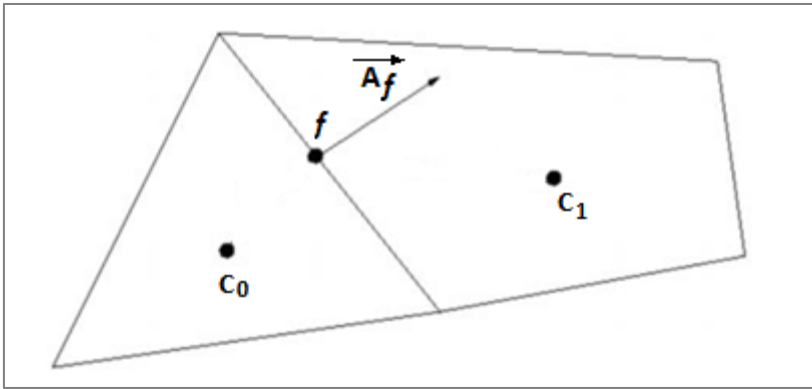
$$\int_{V_{vol}} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV_{vol} + \oint \rho \phi \vec{u} d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_{V_{vol}} S_\phi dV_{vol} \quad (3.17)$$

Burada, $\vec{u}$ hız vektörünü, $\vec{A}$ yüzey alanı vektörünü, Γ_ϕ ϕ 'nin difüzyon katsayısını, S_ϕ ise birim hacimde üretilen ϕ miktarını göstermektedir.

Şekil 3.9’da görülen 2-B üçgen hücreler için Eş 3.17’nin ayrıklaştırılmış hali Eş. 3.18’de verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^n \text{yüzey} \rho_f \phi_f \vec{V}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^n \text{yüzey} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (3.18)$$

Burada n = hücreyi sınırlayan yüzey sayısını, ϕ_f = yüzey boyunca taşınan ϕ miktarını, $\rho_f \vec{V}_f \cdot \vec{A}_f$ = A yüzeyden geçen kütle akısını, $\vec{A}_f$ = alan vektörünü göstermektedir.



Şekil 3.9. Genel taşınım denkleminin ayrıklaştırılmasında kullanılan kontrol hacmi (Apaçoğlu, 2010)

Fluent bütün akış denklemlerini Eş. 3.18’deki bağıntıyla çözer ve bu bağıntı kolaylıkla 3-B geometrilerde de uygulanabilir. Fluent başlangıçta ayrıklaştırılmış ϕ skaler değerini Şekil 3.19’da gösterildiği şekilde hücrenin merkezinde (C_0 ve C_1) saklar. Fakat yüzey değerleri ϕ_f (face value) Eş. 3.18’deki taşınım denklemi için gereklidir ve hücre merkezindeki değerden enterpolasyonla elde edilmelidir. Bu akış yönü metodu (upwind şeması) ile sağlanabilir. Akış yönü metodu ϕ_f ’in değerlerinin normal hız vektörünün yönüne göre hücrenin çıkış (upwind ya da upstream) değerlerinden türetilmesi ile yapılır. Fluent’te bu akış metodunun farklı şekilleri mevcuttur (Ansys, 2015). Bunlar birinci dereceden (first order), ikinci dereceden (second order), üssel (power law) ve hızlı enterpolasyon (quick) yöntemleridir

Fluent bu akış metodlarını her bir hücre merkezi için farklı ϕ skaler değerini bulabilmek için kullanır.

3.4.5. Yakınsama kriteri ve gevşeme parametreleri

Sayısal yöntemlerde denklemlerin çözümünde genel olarak iki tip hata meydana gelir. Bunlar yuvarlatma hatası ve uygulanan sayısal yöntemden kaynaklanan hatalardır. Çok fazla akış sistemlerinin çözümündeki zorluklar akışın hızı, yoğunluğu, basıncı vb. niceliklerin arasındaki ilişkilerden kaynaklanmaktadır. Bu ilişkilerin çözümü esnasında meydana gelen hatalar sayısal yöntemde kararsızlığa sebep olmaktadır. Eş.3.21’de verilen Courant sayısı olarak adlandırılan büyüklük genellikle hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde, çözümün yakınsaması için gerekli bir koşuldur.

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \leq C_{\max} \quad (3.21)$$

Burada u hız, Δt adım aralığı ve Δx hücre genişliğidir.

$C_{\max}$, sayısal yöntemde denklemlerin çözümünde kullanılan metoda göre özellikle açık (explicit) yada kapalı (implicit) olup olmamasına göre değişmektedir. Eğer açık yöntemli bir çözüm yöntemi kullanılıyorsa $C_{\max}=1$ kabul edilir. Kapalı yöntem çözümleri kararsızlığa daha az duyarlı olduğu için $C_{\max}$ için daha büyük değerler bu yöntemde tolere edilebilir. Fluent yazılımı denklemler için verilen başlangıç tahmininden başlayarak iteratif olarak çözüm yapmaktadır. İterasyonların ne kadar yakınsama elde edilmesi halinde durdurulacağı çalışmayı yapan kullanıcı tarafından belirlenmektedir (Özcan, 2004).

Fluent çözümlerde yakınsamayı kolaylaştırmak için gevşeme parametreleri kullanır. Her iterasyon sonunda elde edilen değer, eski ve yeni iterasyon sonuçlarının ağırlıklı ortalaması ile düzeltilir. Rahatlatma faktörleri çözümü yavaşlatabilir ancak çözüm daha stabil olur. Fluent problem tipine, akışın yapısına ve çözülen denklemlere göre farklı rahatlatma faktörleri sunmaktadır (Başyazıcı, 2007).

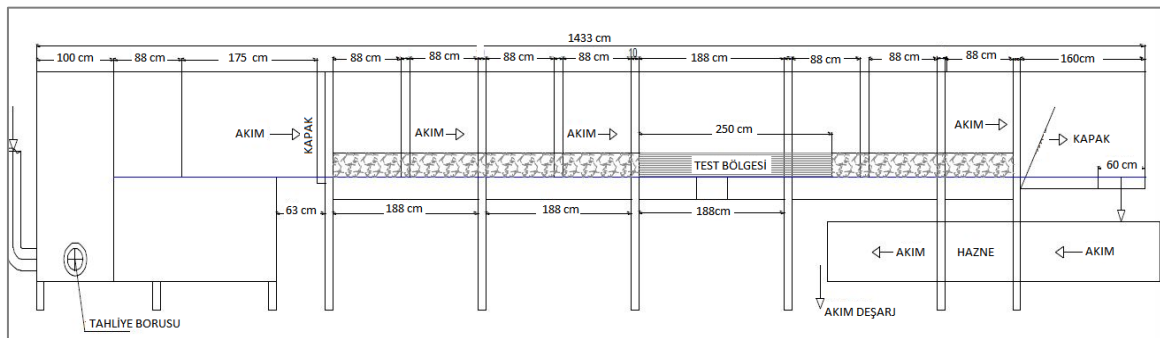
Akış hesaplamalarında çözümün yakınsaması, çok iyi tahmin edilmiş başlangıç koşulları, rahatlatma faktörlerinin artırılması ve Courant sayısının uygun olarak belirlenmesiyle kolaylaştırılabilir.

4. KÖPRÜ TABLİYESİ ALTINDA DARALMA OYULMASININ SAYISAL MODELLE BENZEŞİMİ

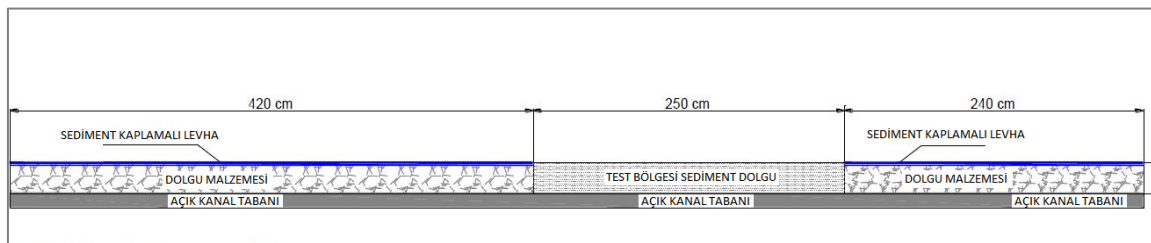
Bu çalışmada köprü tabliyesi altında tabanda meydana gelen daralma oyulmasının sayısal olarak incelemek üzere ANSYS Fluent R14.5 ticari yazılımı kullanılmıştır. Çözüme ait işlemler Core i5 ve 2.53Ghz işlemci özelliğine sahip bilgisayarla yapılmıştır.

4.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda hazırlanmış olup, yaklaşık olarak 10,00m uzunluğunda, 1,0m genişlik ve yüksekliğe sahip dikdörtgen kesitli bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalin girişinden yaklaşık 4,0 m mansapta 2,5 m uzunluğunda, 1,0 m genişliğinde ve 0,22 m yüksekliğinde köprü tabliyesinin yerleştirildiği bir sediment test bölgesi oluşturulmuştur. Deneye ait düzenek Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



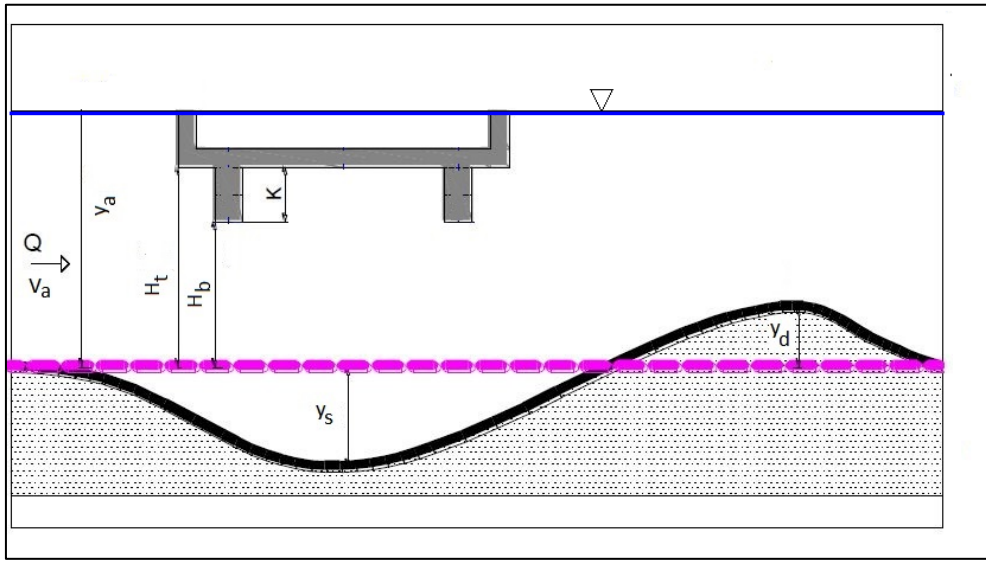
Şekil 4.1. Deneysel çalışmaya ait kanalın şeması (Karakurt, 2016)



Şekil 4.2. Deneysel çalışmaya ait kanal tabanı (Karakurt, 2016)

Deneylerde 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s olmak üzere üç farklı debi ile çalışılmıştır. Temiz su koşulunu sağlamak için bir dizi ön deney yapılmış ve ilgili debi değerlerinde tabanda katı

madde hareketini başlatacak olan akım derinlikleri saptanmıştır. Deneylerde kullanılan yaklaşım akım derinlikleri daha önce saptanan bu değerlerden daha büyük seçilerek temiz su koşulu sağlanmıştır. Deneylerde temiz su koşulu altında basınçlı ve serbest akım durumları için köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukurunun derinliği ve şekli lazer metre ile yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Deneyler, farklı yaklaşım akım derinlikleri, kiriş yükseklikleri, tabliye yüksekliği ve farklı yatak malzemesi için seriler halinde gerçekleştirilmiştir (Karakurt, 2016). Deneyde kullanılan köprü tabliye modeli Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Deneyel çalışmaya ait köprü tabliye modeli

Burada K = kiriş yüksekliği, y_d = sediment yığılma kalınlığıdır.

Deneylerde $Q_1 = 70$ lt/sn, $Q_2 = 80$ lt/sn ve $Q_3 = 90$ lt/sn olmak üzere üç farklı debi çalışılmıştır. Köprü tabliyesi bozulmamış tabandan itibaren $H = 20,0$ cm’e yerleştirilmiştir. Tüm deneylerde yükseklikleri 7,5 cm olan iki adet kiriş kullanılmıştır. Deneyler basınçlı akım şartlarında 25,0 cm ile 32,5 cm aralığında 2,5 cm’lik artışlarla dört farklı yaklaşım akım derinliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca taban malzemesi için medyan tane çapı 1,1 mm olan katı maddeyle çalışılmıştır. Çizelge 4.1’de bu çalışma kapsamında kullanılmış olan parametreler ve ölçülmüş maksimum oyulma çukuru derinlikleri verilmiştir.

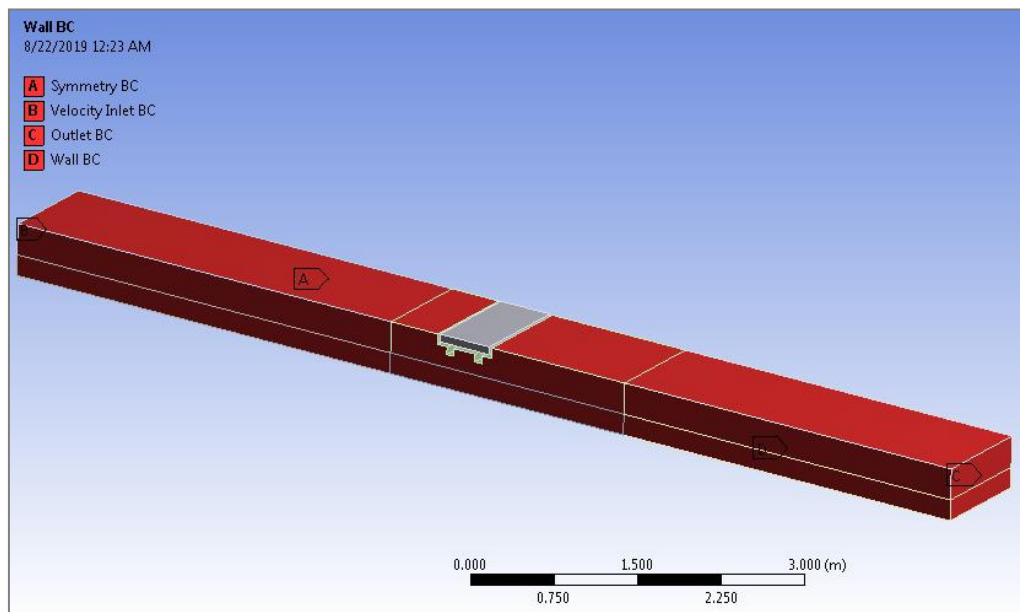
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmaya ait kullanılan parametreler ve maksimum oyulma çukuru derinlikleri (Karakurt, 2016)

Test No	Q (lt/sn)	y_a (cm)	V_a (m/sn)	y_s (cm)
1	70	25,0	0,280	13,1
2	70	27,5	0,255	11,7
3	70	30,0	0,233	13,0
4	70	32,5	0,215	11,8
5	80	25,0	0,320	14,1
6	80	27,5	0,291	13,0
7	80	30,0	0,267	13,4
8	80	32,5	0,246	13,3
9	90	30,0	0,300	16,5
10	90	32,5	0,277	17,3

4.2. Sayısal Model Kurulumu

4.2.1. Geometri oluşturulması

Fiziki modele ait veriler kullanılarak öncelikle sayısal model için 3-B geometrisi oluşturulmuştur. Geometri çizimleri için Fluent'in geometri modülü olan Model Designer kullanılmıştır. Sayısal model, deneysel çalışmada kullanılan fiziki modelle bire bir aynı ölçüde olup model benzeşimi uygulanmamıştır. Geometri farklı sınır koşulları için farklı yüzey sınırları ve hacimlerden oluşmaktadır. Kanalın sayısal çözümü için oluşturulan geometri ve tanımlanan sınır koşulları Şekil 4.4'te verilmiştir.

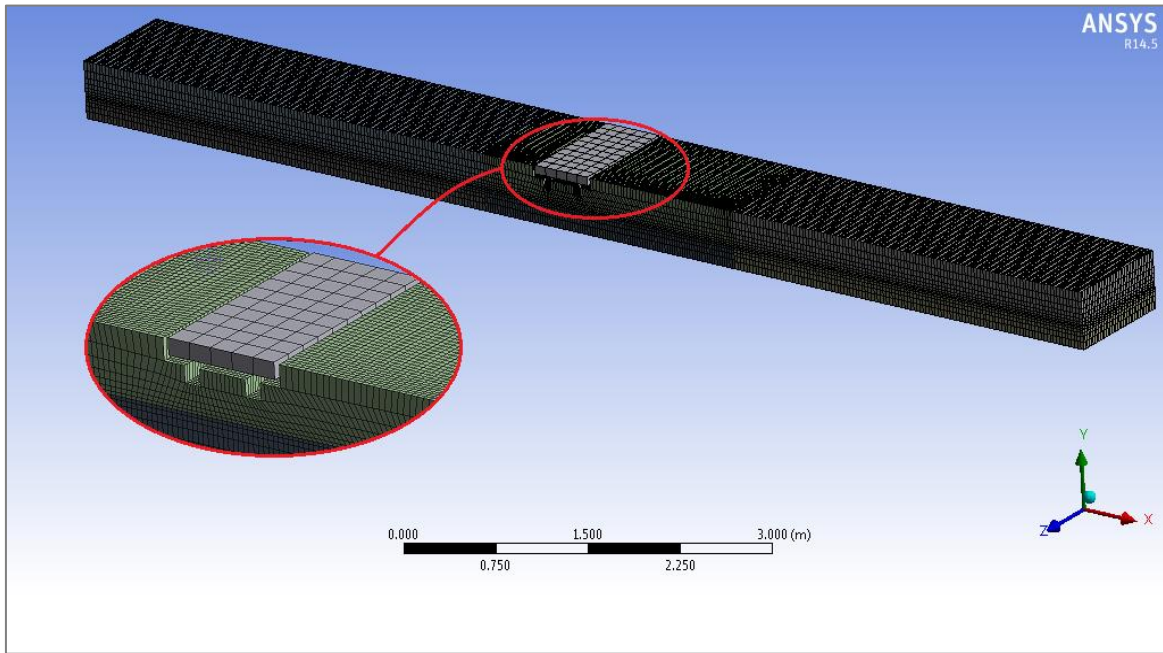


Şekil 4.4. Kanal ve köprü tabliyesi için oluşturulan geometri ve sınır koşulları

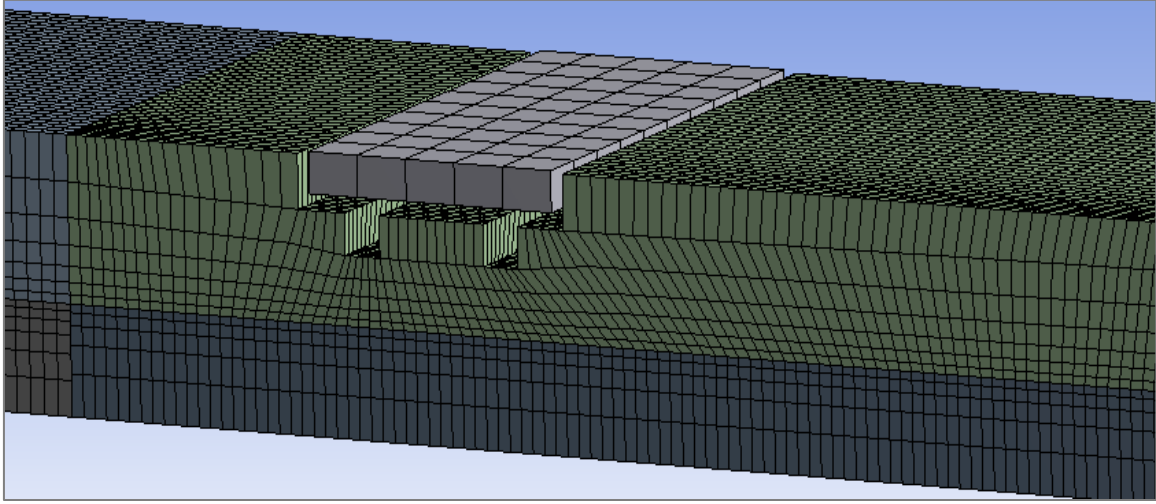
4.2.2. Ağ oluşturulması

Analizde doğru çözüm sonuçlarının elde edilmesi için öncelikle model yeterli bir şekilde çözüm ağ gözlerine ayrılmalıdır. Ağ yapısındaki bozukluk ve çarpıklıklar çözümün yakınsamasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada kanal ve köprü yapısının dikdörtgen olması sebebiyle oluşturulan geometrinin ağ yapısı için düzgün altı yüzlü elemanlar kullanılmıştır. Böylece ağ yapısında oluşabilecek karmaşıklık ve buna bağlı olarak çözüm süresinin uzaması ve yakınsama problemleri en aza indirgenmiştir.

Sediment yatağı ile akım ara yüzünde akım-tanecik etkileşimlerini daha iyi simüle edebilmek için akıma dik yönde ağ sıklaştırılması yapılmıştır. Sayısal çözüm için oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.5 ve Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kanal ve köprü tabliyesinin sayısal çözümü için oluşturulan ağ yapısı



Şekil 4.6. Kanal ve köprü tabliyesinin sayısal çözümü için oluşturulan ağ yapısı

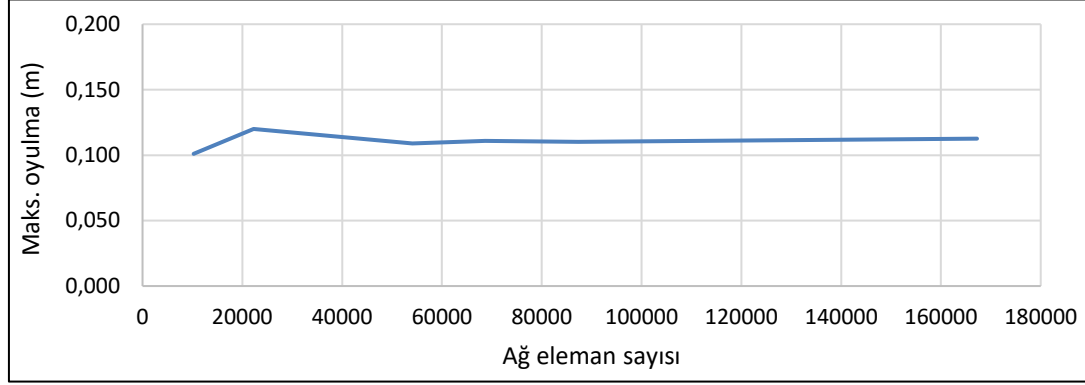
Sayısal model çözümlerinin yeterli doğrulukta sonuçlar verebilmesi için, model için oluşturulan çözüm ağının yeterli sayıda düğüm noktası ve hücre eleman sayısı içermesi gerekmektedir. Hassas çözümler için eleman sayısının artırılması çözüm süresinde uzamalara neden olmaktadır. Bu sebeple sayısal çözüm sonuçlarının, çözüm ağı sayısından bağımsız olacak şekilde modelde eleman sayısına sahip olması yeterlidir. Bunun için deneysel çalışmaya (Karakurt, 2016) ait seçilen bir deney için çözüm ağı bağımsızlık testi yapılmıştır. Teste ait bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 80 lt/sn’lik debi, 30,0 cm’lik yaklaşım akım derinliği ve $Fr_a = 0,155$ için çözüm ağı bağımsızlık testine ait bilgiler

Test	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	y_s (cm)
M1	18711	13890	10,1
M2	28705	22310	12,0
M3	67059	54090	10,9
M4	84699	68650	11,1
M5	107358	87350	11,1
M6	200800	167232	11,3

Seçilen deney için çözüm ağı sayısı düzenli olarak artırılarak 6 adet farklı ağ elemanı sayısı için çözüm yapılmıştır. Çözümlerden elde edilen oyulma çukuru maksimum derinlikleri incelendiğinde 54090 (M3) adet eleman sayısına sahip testten sonra eleman sayısındaki artışın maksimum oyulma çukuru derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Böylece 54090 (M3) adet eleman sayısına sahip testin sayısal modelleme

çalışması için en uygun çözüm ağı olduğuna karar verilmiştir. Seçilen deney için oyulma derinliğinin çözüm ağı sayısına bağlı değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.7. Çözüm ağı bağımsızlık grafiği

4.2.3. Çözüm metodu ve sınır koşulları

Sıvı-katı akış halinin modellenmesi için Eulerian çok fazlı akış modeli kullanılmıştır. Akışkan ve sediment için iki ayrı faz tanımlanmıştır. Eulerian çok fazlı akış modelinde katı faz Granular olarak tanımlanmaktadır. Çözümde Granular faz olan sediment için tanımlanan fiziksel özellikler ve yaklaşımlar Çizelge 4.3’de verilmiştir.

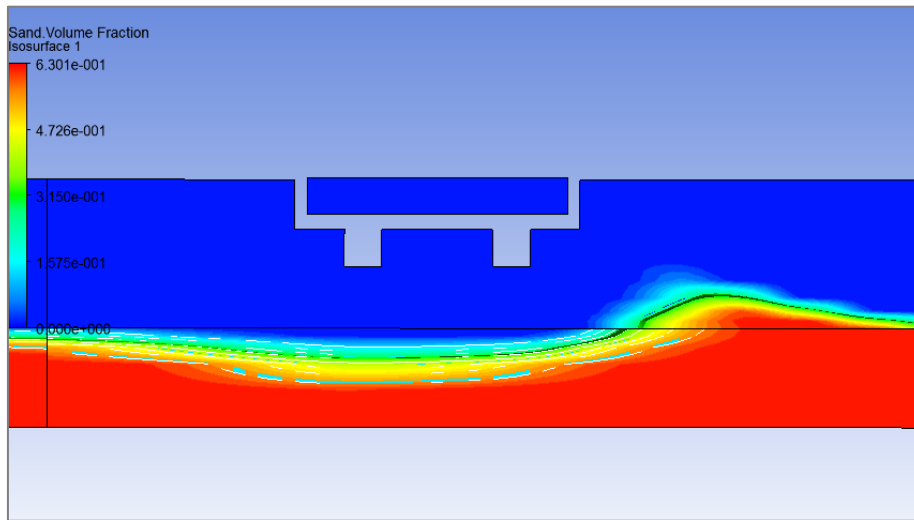
Çizelge 4.3. Fluent’te sediment için tanımlanan fiziksel özellikler ve yaklaşımlar

Diameter (m)	0,0011
Partical Density	2650 kg/m ³
Granular viscosity (kg/m-s)	Gidaspow
Granular Bulk viscosity (kg/m-s)	Lun-et-al
Frictional viscosity (kg/m-s)	Schaeffer
Angle of internal friction (deg)	30
Frictioan Pressure (pascal)	Based-ktgf
Granular temperature (m2/s2)	Algebraic
Solid pressure (pascal)	Lun-et-al
Radial distribution	Lun-et-al
Drag modification	Gidaspow
Packing limit	0,63

Kanal girişi için basınç tabanlı hız giriş sınır koşulu (velocity inlet) , kanal çıkışı için basınç tabanlı kötü çıkış sınır koşulu (outlet), kanal st yüzeyi için simetri (symmetry) sınır koşulu ve kanala ait tüm cidarlar için duvar (wall) sınır koşulu tanımlanmıştır.

Hesaplamalar için k- ϵ ve RSM türbülans modeli olmak üzere iki farklı türbülans modeli kullanılmış, mler zamana bağlı gerçekleştirilmiştir. mlerin yakınsaması için hücre aralığı ve zaman dilimi dikkate alınarak zaman aralığı 0,01sn seçilmiştir. Sayısal mlerde yakınsama kriterleri için akım ve tanecik hızları, srekliplik denklemleri ve türbülans modeline ait denklemlerin m için her iterasyonda 1/10000 hata oranı koşulu sağlanmıştır. mlerin işlemcide koşum süresi k- ϵ türbülans modeli için ortalama 8 saat, RSM türbülans modeli için ise ortalama 11 saat srmştir.

Sayısal mde yatak ve oyulma çukurunun yüzey profili m yapılan her bir hücrenin akışkan ve sediment fazlarının hacim fraksiyonuna göre belirlenmiştir. Hacim fraksiyonu α her bir fazın kapladığı alanı temsil eder ve 0 ila 1 arasında değişmektedir. Teorik olarak akışkan hacim fraksiyonu α_f , sediment hacim fraksiyonu α_s ile ifade edilirse her bir hücre için hacim fraksiyonları toplamı $\alpha_s + \alpha_f = 1$ 'dir (Ansys, 2015). Zhao ve Fernando (2007) yaptıkları bir çalışmada daha önceden yapılan fiziksel deneylerden elde edilen akışkan ve sediment ara yüzüne karşılık gelen sediment kontrnn sayısal çalışmada sediment hacim fraksiyonu $\alpha_s \approx 0,5$ 'e karşılık geldiğini bildirmiştir. Sayısal mden elde edilen oyulma çukuru profili için sediment hacim fraksiyonu kontürüne örnek şekil 4.7'de verilmiştir.



şekil 4.8. Sayısal me ait yatak profiline karşılık gelen sediment hacim fraksiyon kontr

Bu çalışmada basınçlı akım koşulu için 70 lt/sn, 80 lt/sn ve 90 lt/sn'lik her debi için farklı akım derinliklerinde, köprü tabliyesinin tabana göre 20,0 cm'lik konumu için sayısal çözümler yapılmıştır. Sayısal çözümler için modeli oluşturulan deney serileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

5. SAYISAL MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. k-ε Türbülans Modeline Ait Sayısal Çözüm Sonuçları

Bu çalışmada, temiz su oyulması ve basınçlı akım şartlarında ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukurunun 3-B sayısal model kullanılarak benzeşimi yapılmış ve model tahminleriyle deneysel veriler karşılaştırılarak modelin oyulma çukuru tahmin edebilme kapasitesi değerlendirilmiştir. Çalışmada, 70 lt/sn ve 80 lt/sn’lik debiler için 25,0 cm, 27,5 cm, 30,0 cm ve 32,5 cm’lik, 90 lt/sn’lik debi için 30,0 cm ve 32,5 cm’lik yaklaşım akım derinlikleri kullanılmıştır. Sayısal benzeşimi yapılmış olan deney serileri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

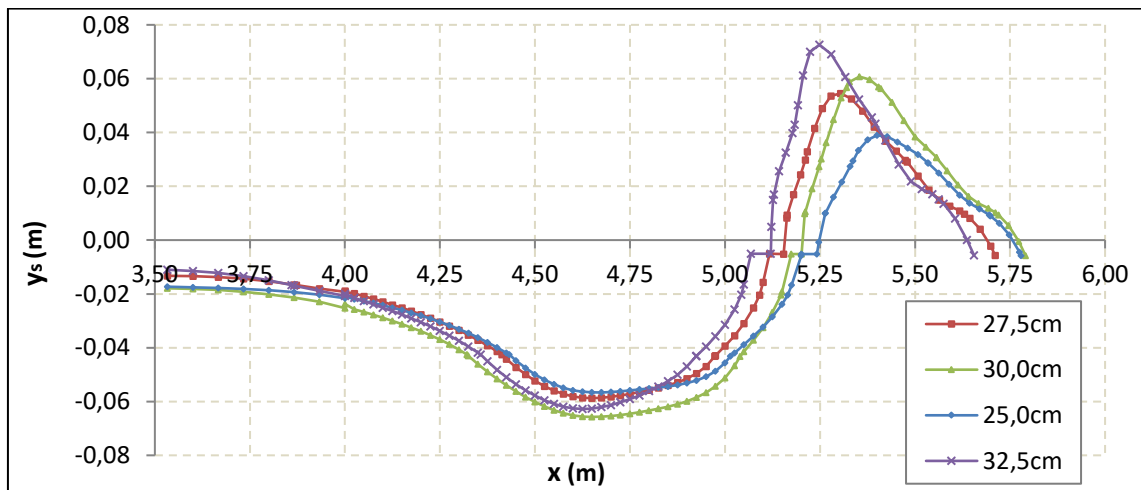
Çizelge 5.1. k-ε türbülans modeli ve deneysel çalışmaya ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Deney				Karakurt (2016)	Sayısal Realizable k-ε	Hata (%)
Test No	Q (lt/sn)	y _a (cm)	V _a (m/sn)	y _s (cm)	y _s (cm)	
1	70	25,0	0,280	13,1	5,66	56,79
2	70	27,5	0,255	11,7	5,87	49,83
3	70	30,0	0,233	13,0	6,57	49,46
4	70	32,5	0,215	11,8	6,27	46,86
5	80	25,0	0,320	14,1	5,42	61,56
6	80	27,5	0,291	13,0	5,92	54,46
7	80	30,0	0,267	13,4	6,12	54,33
8	80	32,5	0,246	13,8	6,10	55,80
9	90	30,0	0,300	16,5	6,14	62,79
10	90	32,5	0,277	17,3	6,24	63,93

Çizelge 5.1’de çalışmada kullanılan ilgili deneysel veriler, k-ε türbülans modelinin kullanıldığı 3-B sayısal model sonuçları ile maksimum oyulma çukuru derinliği için sayısal ve deneysel sonuçlara ait hata yüzdeleri verilmiştir. Söz konusu hata oranları incelendiğinde debinin artmasıyla hata oranlarının arttığı, aynı debi için yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla ise hata oranlarının azaldığı belirlenmiştir. Örneğin 70lt/sn’lik debi için en büyük hata yüzdesi en küçük yaklaşım akım derinliği y_a değerinde yani 25,0 cm’de meydana gelmişken, y_a’nın büyümesiyle hata yüzdesi azalmıştır. Bu sonuçlar, sayısal modelde

kullanılmış olan türbülans modelinin daha yüksek türbülans şiddetinin olduğu küçük y_a değerlerinde veya daha büyük debi değerlerinde daha kötü sonuçlar verdiğini göstermektedir. Özellikle debinin 90 lt/sn olması durumunda en yüksek hata yüzdeleri elde edilmiştir. Diğer önemli bir sonuç ise tüm model benzeşimlerinde maksimum oyulma çukuru derinliğinin deneysel verilerden daha küçük tahmin edilmiş olmasıdır. Bunun nedeni sayısal model simülasyonlarında türbülans modeline bağlı olarak oyulma çukurunun daha yayvan bir şekilde oluşması, buna bağlı olarak da maksimum oyulma çukuru derinliğinin daha küçük elde edilmesi olarak açıklanabilir.

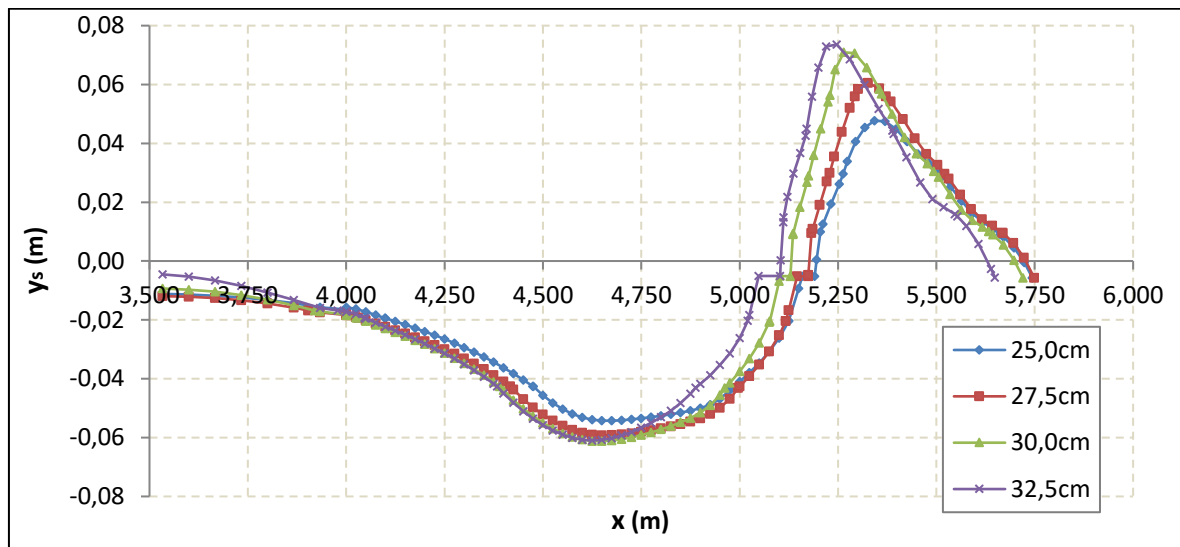
Şekil 5.1-5.3'te ise sırasıyla 70 lt/sn, 80 lt/sn, ve 90 lt/sn'lik debiler için farklı yaklaşım akım derinliklerinde sayısal model kullanılarak tahmin edilmiş oyulma çukuru profilleri verilmiştir.



Şekil 5.1. 70 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen sayısal oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.1 incelendiğinde 70 lt/sn'lik debi için en geniş ve en derin oyulma çukuru profilinin 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde olduğu, akım derinliğinin artmasıyla 32,5 cm'lik yaklaşım akım derinliğinde oluşan oyulma çukuru derinliğinin yaklaşık %4,5 oranında azaldığı görülmüştür. $y_a=32,5$ cm'de ise oyulma çukuru mansap şevinin dikleştiği görülmüştür. Bu durum daralmanın olduğu kesitten çıkan akımın hemen tabliye sonunda artık askıdaki sedimenti taşıyamayarak tabanda depolanmasına neden olması şeklinde açıklanabilir. Böylece maksimum oyulma çukuru derinliğinde $y_a=30,0$ cm sonuçlarıyla kıyaslandığında çok farklı sonuçlar elde edilmiş olmasa da mansap şevinde önemli bir farklılık söz konusudur.

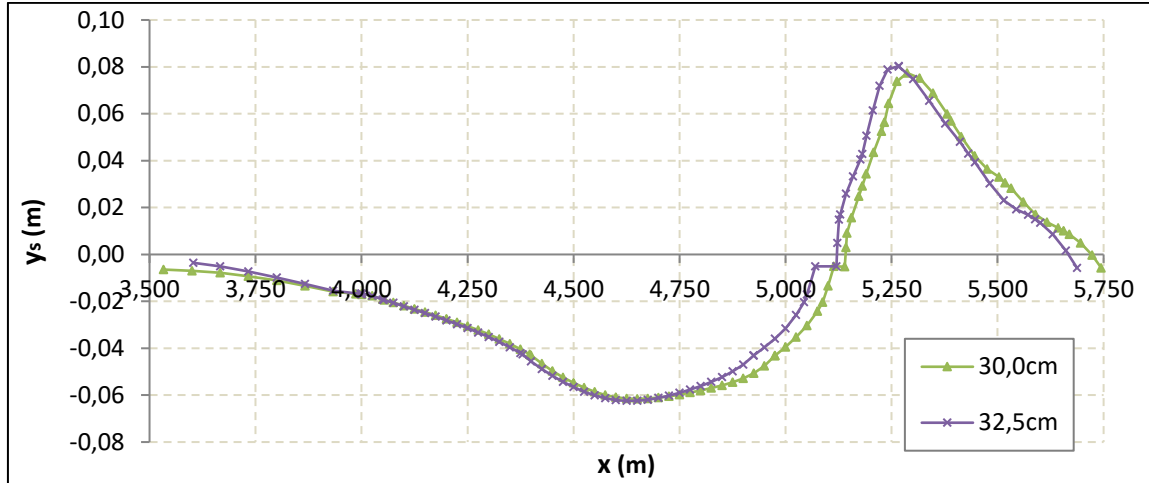
Şekil 5.2’de 80 lt/sn’lik debi için basınçlı akım koşulu durumunda yapılan sayısal çözümlerde artan akım derinliğiyle beraber oyulma çukuruna ait maksimum oyulma çukuru derinliğinin de arttığı görülmüştür. Ancak 70 lt/sn ve 80 lt/sn’lik debi durumları karşılaştırıldığında aynı yaklaşım akım derinliklerine karşılık gelen maksimum oyulma çukuru derinlikleri göz önüne alındığında 80 lt/sn’lik debi durumundaki oyulma çukuru derinliklerinin 70 lt/sn debi durumuna göre azaldığı görülmüştür. Bu durum debinin artmasıyla türbülans şiddetindeki büyümenin sayısal modelde kullanılan türbülans modeli tarafından iyi simüle edilemediğini göstermektedir.



Şekil 5.2. 80 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen sayısal oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.3’te 90lt/sn’lik debi durumunda 30,0 cm ve 32,5 cm’lik iki farklı akım derinliği için yapılmış olan sayısal benzeşimlere ait oyulma çukuru profilleri karşılaştırıldığında, değişen akım hızlarının maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisinin %2’den daha az olduğu, ancak mansap şevinde yine çok az da olsa bir dikleşme olduğu görülmüştür.

k-ε türbülans modeli için yapılan sayısal benzeşimlerde her üç debi göz önüne alındığında basınçlı akım durumunda, akım derinliğinin artmasıyla maksimum oyulma çukuru derinliğinde de artış olduğu görülmüştür. Ancak oyulma profilleri incelendiğinde 70 lt/sn’lik debi için en geniş ve en derin oyulma çukurunun 30,0 cm akım derinliğinde olduğu, 80 lt/sn ve 90 lt/sn’ lik debi durumları için oyulma çukuruna ait profil genişlikleri ile oyulma çukuru başlangıç-bitiş konumlarında önemli bir değişiklik gözlemlenmediği tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. 90 lt/sn için farklı yaklaşım akım derinliklerinde elde edilen sayısal oyulma çukuru profilleri

5.1.1. k-ε türbülans modeline ait sayısal sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde basınçlı akım durumunda tabliye altında meydana gelmiş oyulma çukuruna ait sayısal model tahminleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal model sonuçları ile deney verileri arasında genel olarak iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Sayısal sonuçlara ait oyulma çukuru profilleri incelendiğinde oyulma çukuru menba ve mansap şevlerinin daha yumuşak eğimde olduğu yani daha yayvan oyulma çukuru elde edildiği görülmektedir. Benzer sonuçlar Quezada, Tamburrino ve Niño (2018) tarafından yapılan bir çalışmada da gözlemlenmiştir. Söz konusu çalışmada, REEF3D sayısal modeli kullanılarak hareketli yatak koşulunu içeren sayısal benzeşimler ile Link ve diğerleri (2006) tarafından dairesel kesitli boru etrafındaki oyulmayı incelemek üzere temiz su koşulunda yapılan deney sonuçları karşılaştırılarak irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, REEF3D simülasyonlarından elde edilen oyulma çukuru geometrisi ve derinliğinin deneysel verilerle iyi bir uyum içerisinde olduğu, oyulma çukuru maksimum derinliğinin her iki çalışma için de aynı değere sahip olduğunu ancak konum olarak farklılık gösterdiği bildirilmiştir.

Sayısal model benzeşimlerinde kanal boyunca bir miktar sediment taşınımı olduğu gözlemlenmiştir. Kanalda taşınan malzemenin kanal girişindeki sınır koşulu nedeniyle meydana gelen ve simülasyon sonuçlarını etkilemeyen oyulmayla taşınan malzeme olduğu düşünülmektedir. Çözüm sonunda kanaldan taşınan sediment miktarları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. k-ε türbülans modeli ile yapılan sayısal çözümler sonucunda kanaldan taşınan sediment miktarları

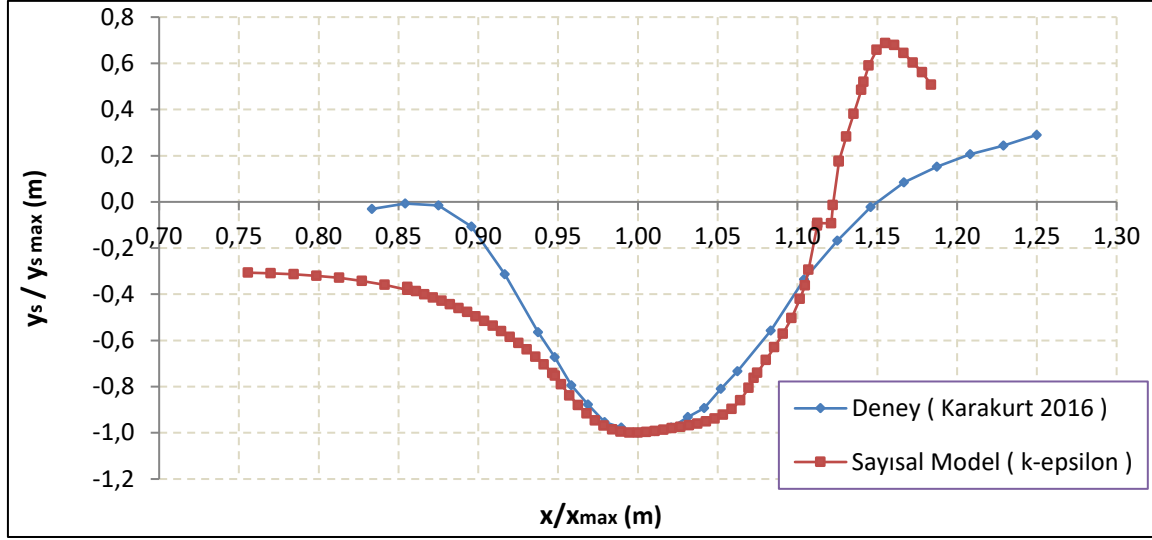
Sayısal Model Realizable k-ε				Kanaldan çıkan sediment miktarı
Test No	Q (lt/sn)	y _a	V _a	m ³
1	70	25,0	0,280	0,136
2	70	27,5	0,255	0,103
3	70	30,0	0,233	0,124
4	70	32,5	0,215	0,081
5	80	25,0	0,320	0,111
6	80	27,5	0,291	0,104
7	80	30,0	0,267	0,086
8	80	32,5	0,246	0,067
9	90	30,0	0,300	0,083
10	90	32,5	0,277	0,068

Sayısal modellere ait sonuçlar ile deneysel çalışmaya ait veriler karşılaştırılırken, oyulma çukurlarına ait veriler boyutsuzlaştırılmıştır. y_s = oyulma çukuru profiline ait derinlikleri, y_{smax} = oyulma çukuru maksimum derinliğini, x = oyulma çukuru profiline ait derinliklerin kanal başlangıcına olan mesafesini, x_{max} = oyulma çukuru maksimum derinliğinin kanal başlangıcına olan mesafesini ifade etmektedir.

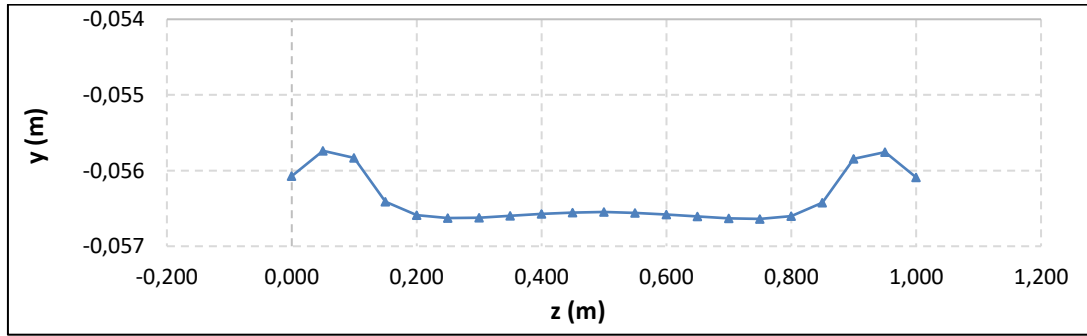
Şekil 5.4'te verilen boyutsuz oyulma çukuru profilleri incelendiğinde sayısal modele ait oyulma çukuru profilinin deneysel oyulma çukuruna göre daha geniş olduğu görülmektedir. Tabliye altında oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği 5,66 cm olup deneysel çalışmaya kıyasla daha az oyulma meydana gelmiştir.

Şekil 5.5'te verilen 70lt/sn ve 25,0 cm akım derinliği için sayısal modele ait $x = 4,675$ m mesafedeki kanal enkesiti incelendiğinde oyulma çukurunun simetrik olduğu görülmektedir.

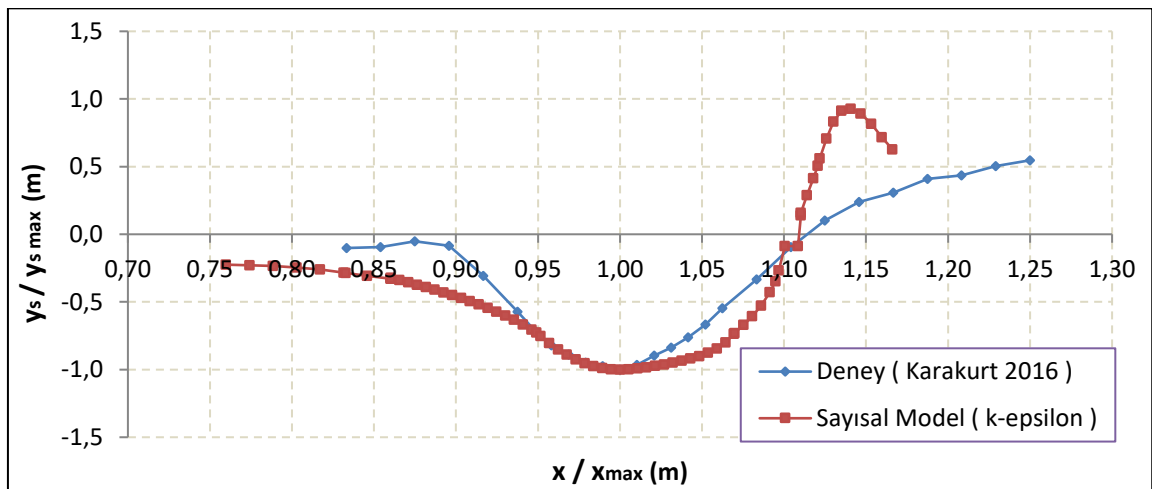
Şekil 5.6'da 70 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri verilmiştir.



Şekil 5.4. 70 lt/sn ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

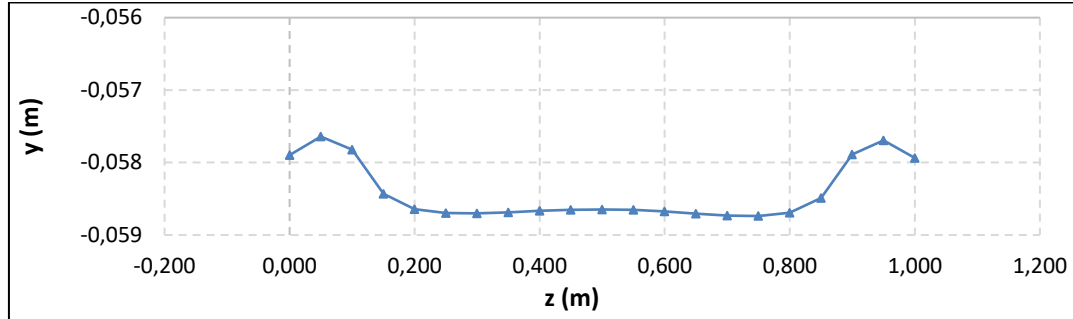


Şekil 5.5. 70 lt/sn ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal modele ait x=4.675 m kanal enkesiti



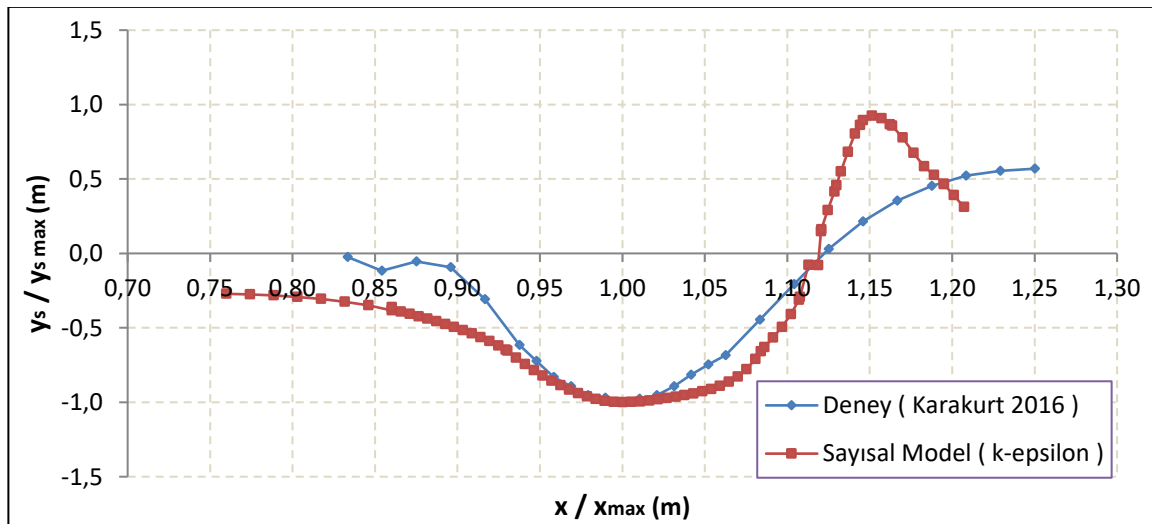
Şekil 5.6. 70 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm akım derinliği için $x=4,65$ m mesafedeki kanal enkesiti Şekil 5.7’de verilmiştir.



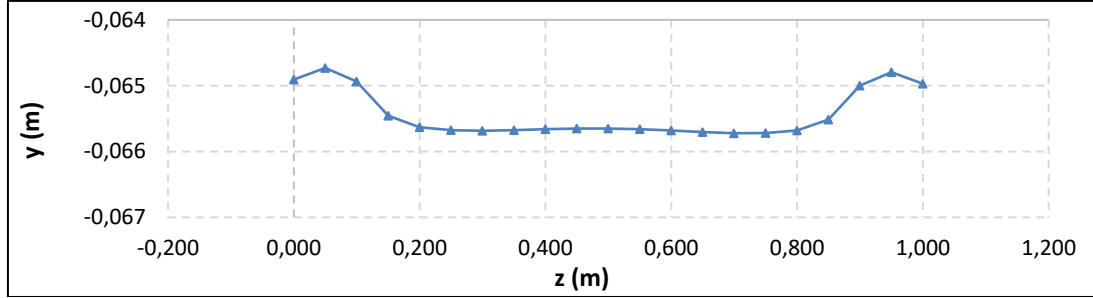
Şekil 5.7. 70 lt/sn ve 27,5 cm’lik yaklaşım akım derinliği için sayısal modele ait $x=4.65$ m kanal enkesiti

70 lt/sn’lik debi ve 27,5 cm’lik yaklaşım akım derinliğinde sayısal tahminler ile deneysel veriler incelendiğinde maksimum oyulma çukuru derinliklerinin sırasıyla 5,87 cm ve 11,7 cm olduğu Çizelge 5.1’de görülmektedir. Şekil 5.4, 5.6, 5.8 ve 5.10 incelendiğinde ise yaklaşım akım derinliğinin 25 cm’den 32,5 cm’ye artmasıyla sayısal benzeşimde elde edilen oyulma çukurunun deneyde oluşan oyulma çukuruna kıyasla oldukça yayvan, özellikle menba şevinin çok yumuşak ve oyulma çukurlarının başlangıç ve bitiş konumlarının benzer olduğu görülmüştür.

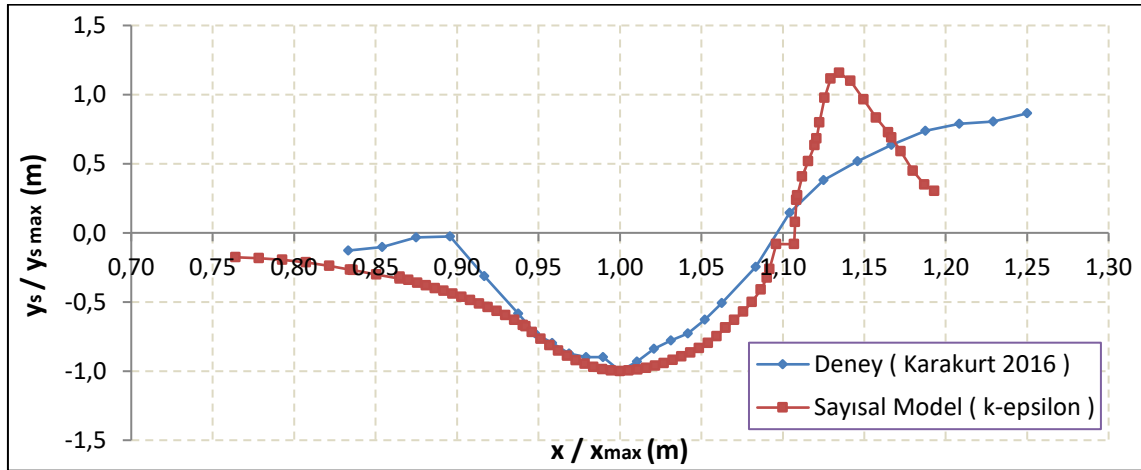


Şekil 5.8. 70 lt/sn ve 30,0 cm’lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

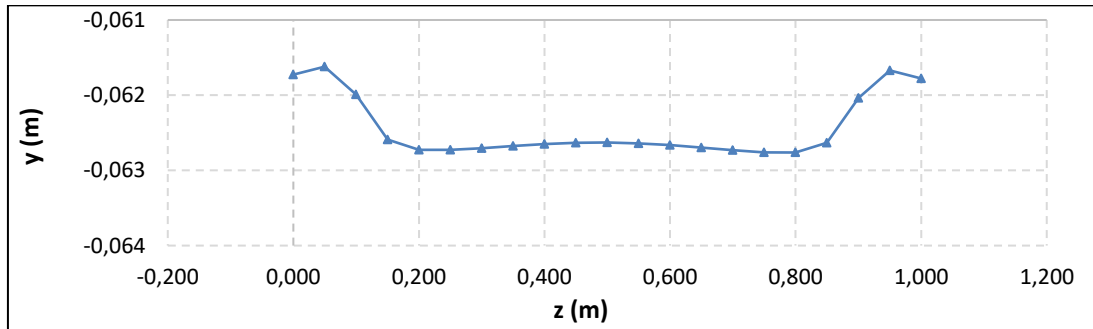
Şekil 5.9 ve Şekil 5.11’de verilen sırasıyla $y_a=30,0$ cm ve $y_a=32,5$ cm akım derinliklerine ait kanal enkesitleri incelendiğinde sayısal model çözümünde kullanılan simetrik ağ yapısı ve girişteki üniform hız sebebiyle oyulma çukurunun da oldukça simetrik bir şekilde oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.9. 70 lt/sn ve 30,0 cm’lik yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait $x=4.65$ m kanal en kesiti



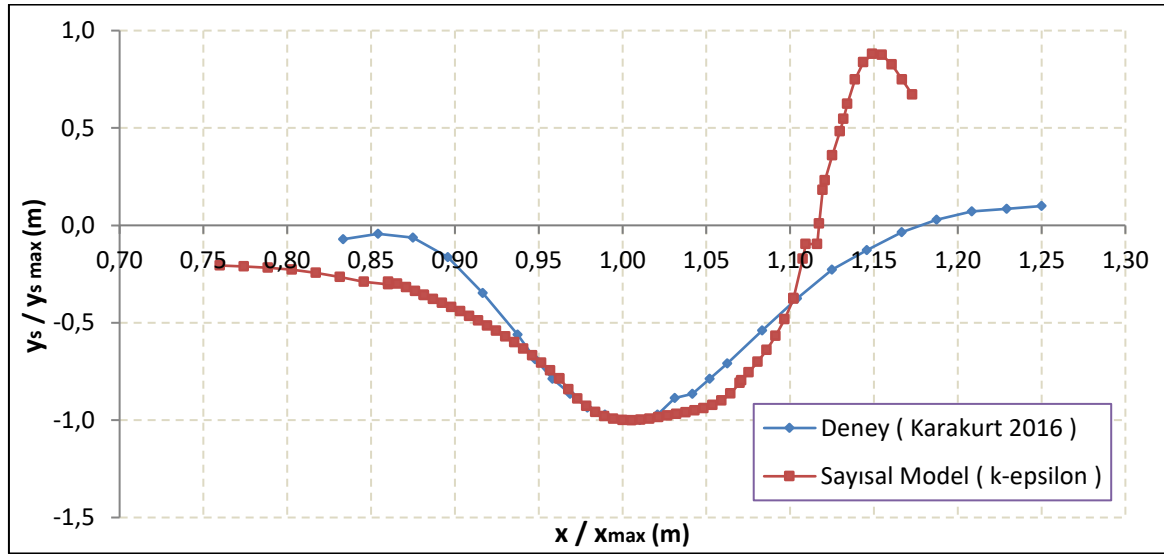
Şekil 5.10. 70 lt/sn ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 5.11. 70 lt/sn ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait $x=4.625$ m kanal en kesiti

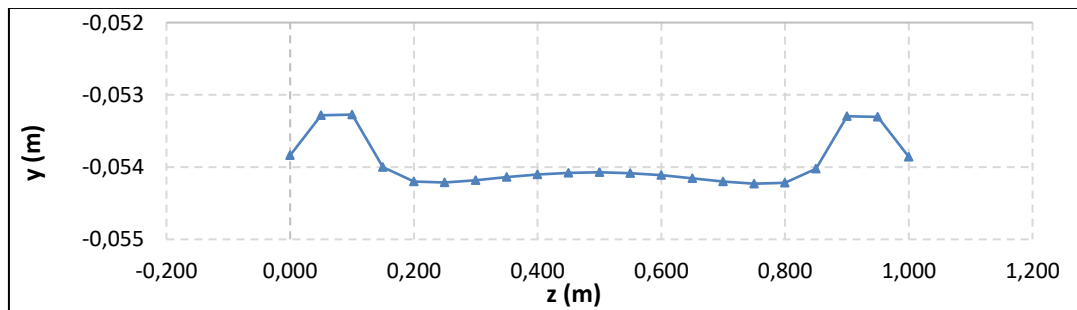
Çizelge 5.1’de verilen sayısal ve deneysel maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde 80 lt/sn’lik debi durumunda 25 cm akım derinliği için sayısal çözümde deneysel sonuca göre daha az oyulma meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.12).

Şekil 5.14 ve Şekil 5.16’da gösterilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri incelendiğinde $y_a=27,5$ cm ve $y_a=30,0$ cm için deneysel ve sayısal model sonuçlarına ait oyulma çukurları profillerinin birbiriyle benzerlik gösterdiği görülmektedir.

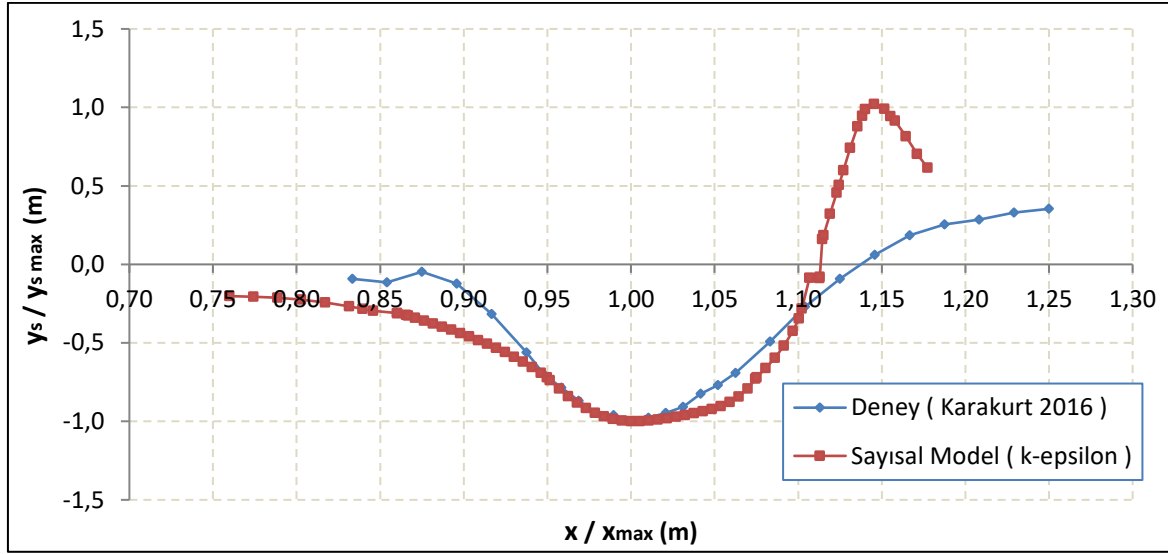


Şekil 5.12. 80 lt/sn ve 25,0 cm’lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

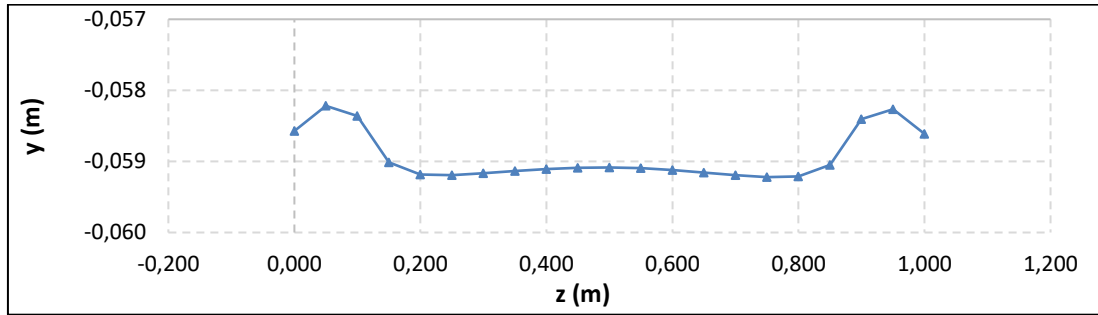
80 lt/sn debi durumu için farklı yaklaşım akım derinliklerinde oluşan oyulma çukuruna ait kanal enkesitleri Şekil 5.13, Şekil 5.15, Şekil 5.17 ve Şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil 5.13. 80 lt/sn ve 25,0 cm’lik yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait x=4.65 m kanal en kesiti

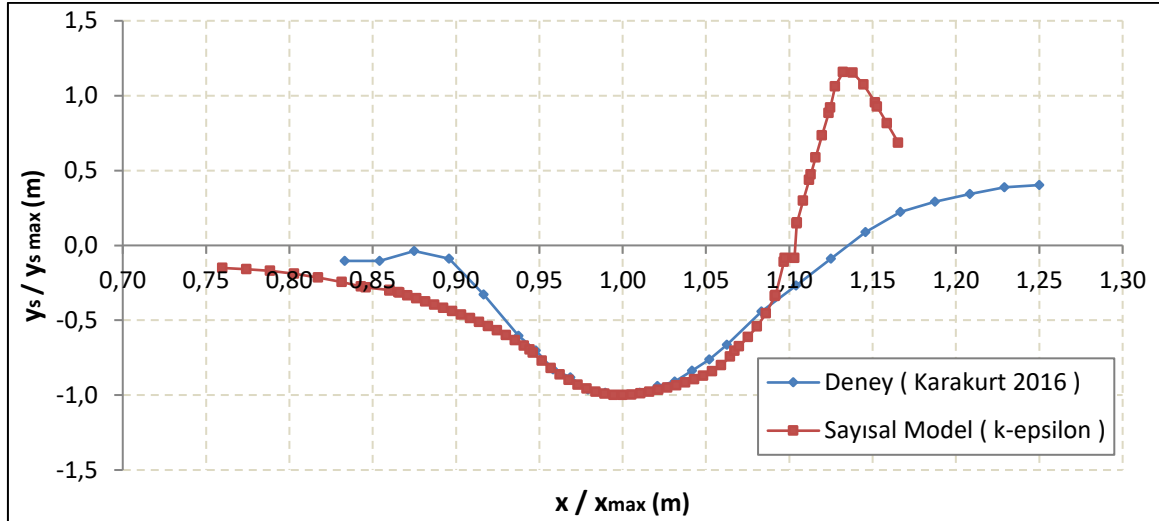


Şekil 5.14. 80 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için deneysel veriler ve sayısal çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

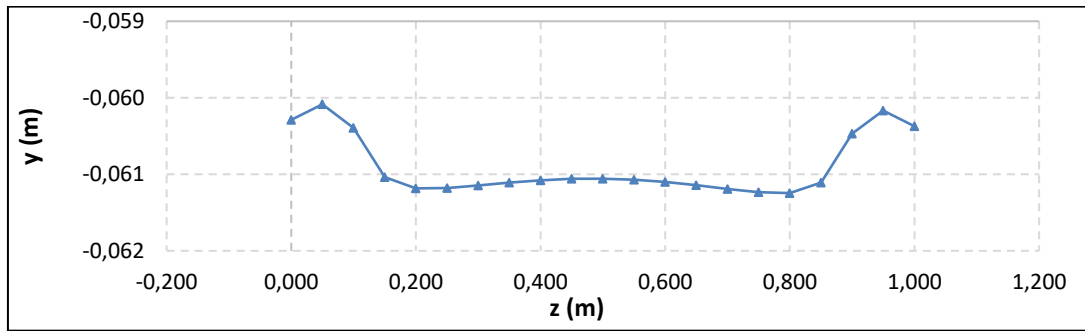


Şekil 5.15. 80 lt/sn ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal çözüme ait x=4.65 m kanal en kesiti

80 lt/sn'lik debi için sayısal ve deneysel maksimum oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında akım derinliğinin artmasıyla hata oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Çizelge 5.1 incelendiğinde hata oranının en fazla %61,6 ile 25,0 cm olan en küçük yaklaşım akım derinliğinde, en az hata oranının ise %54,3 ile 30,0 cm yaklaşım akım derinliğinde meydana geldiği belirlenmiştir.



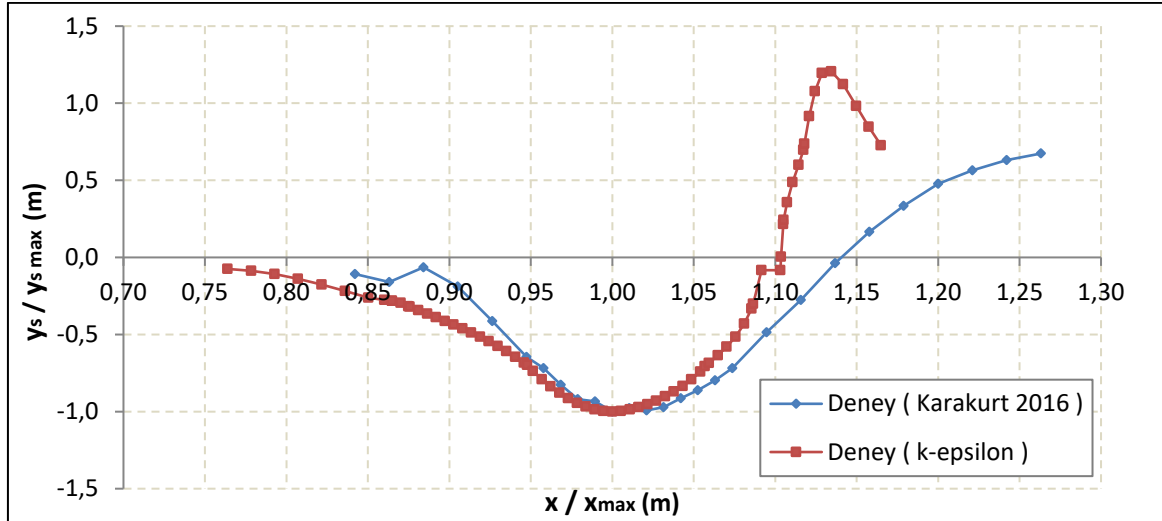
Şekil 5.16. 80 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal modele ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



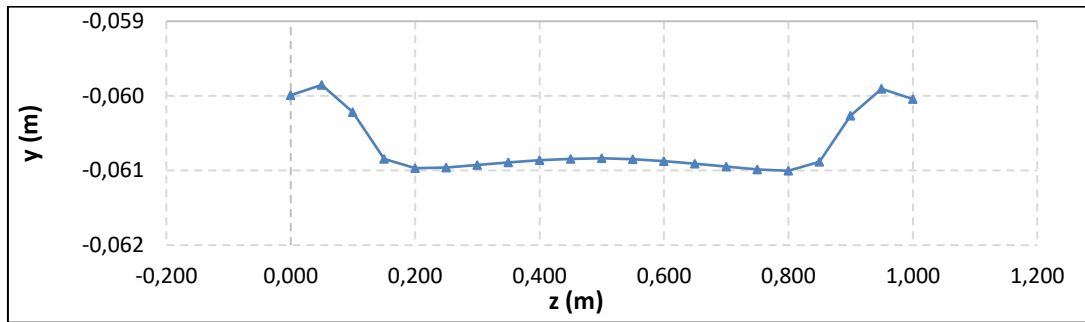
Şekil 5.17. 80 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal modele ait $x=4.65$ m kanal en kesiti

Çizelge 5.1’de verilen maksimum oyulma çukuru derinliklerine ait veriler göz önüne alındığında 25,0 cm, 27,5 cm, 30,0 cm, 32,5 cm’lik yaklaşım akım derinlikleri için 70 lt/sn’lik debi durumunda hata oranları sırasıyla %56,8, %49,8, %49,5, %46,9 iken, 80 lt/sn’lik debi durumunda sırasıyla %61,6, %54,5, %54,3, %55,8’e yükselmiştir. Yani debinin artmasıyla tüm yaklaşım akım derinlikleri için hata oranlarında artış meydana gelmiştir. Bu da artan türbülans şiddetinin model benzeşiminde başarıyla ifade edilemediğini göstermektedir.

Şekil 5.18’de 80 lt/sn’lik debi ve $y_a= 32,5$ cm durumunda oyulma çukuruna ait grafikler incelendiğinde sayısal çözüme ait oyulma çukuru mansap şevinin deneysel sonuçlara göre bir miktar menbaya ötelendiği görülmektedir.

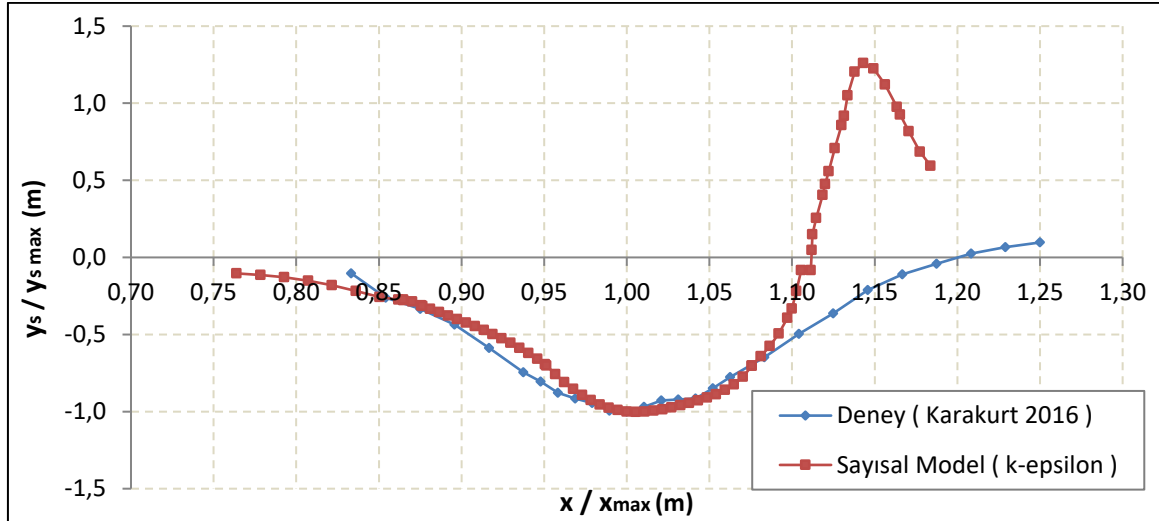


Şekil 5.18. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



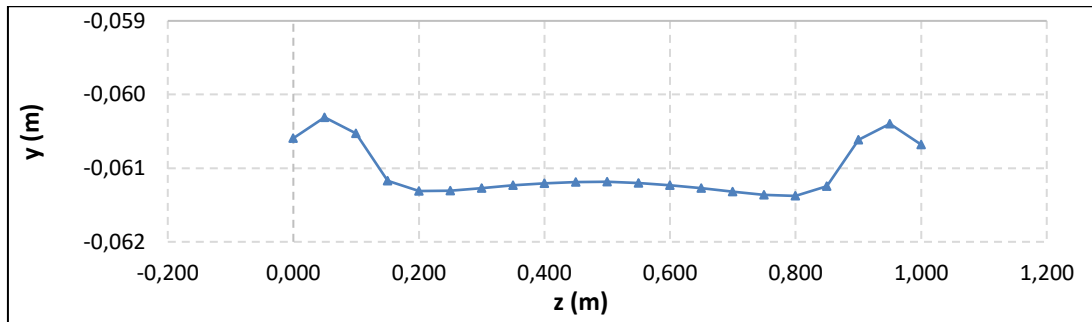
Şekil 5.19. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti

Şekil 5.20 ve Şekil 5.22’de gösterilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri incelendiğinde 30,0 cm ve 32,5 cm’lik yaklaşım akım derinlikleri için deneysel ve sayısal model sonuçlarına ait oyulma çukuru profilleri benzerlik gösterse de, maksimum oyulma çukuru derinliklerinin oldukça farklı olduğu görülmektedir. Deneysel maksimum oyulma çukuru derinlikleri $y_a=30,0$ cm ve $y_a=32,5$ cm için sırasıyla 16,5 cm ve 17,3 cm olup, sayısal modelde maksimum oyulma çukuru derinlikleri $y_a=30,0$ cm ve $y_a=32,5$ için sırasıyla 6,14 cm ve 6,24 cm olarak elde edilmiştir.



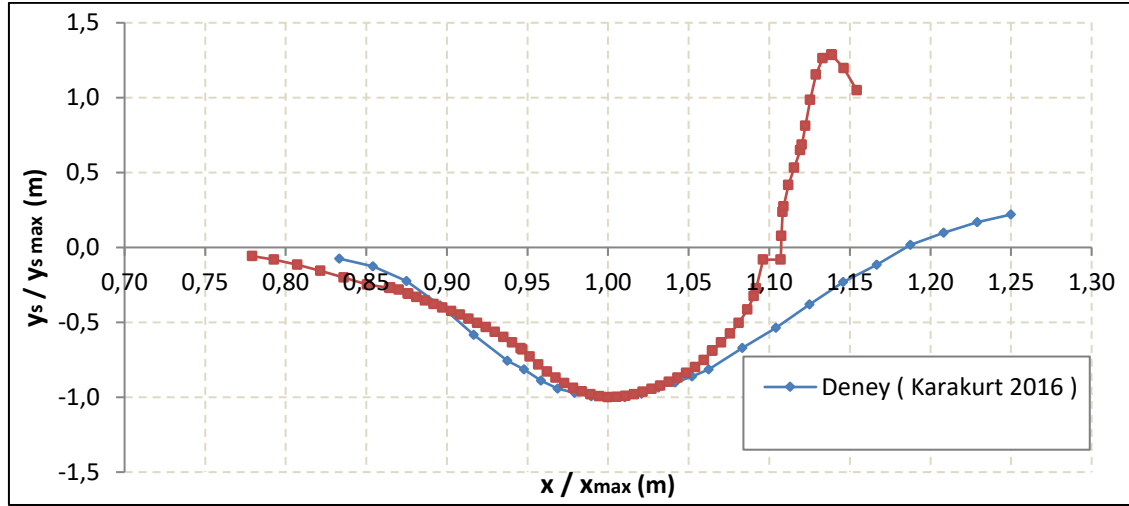
Şekil 5.20. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm ve $y_a=32,5$ cm akım derinlikleri için oyulma çukuruna ait kanal enkesitleri Şekil 5.21 ve Şekil 5.23'te verilmiştir.

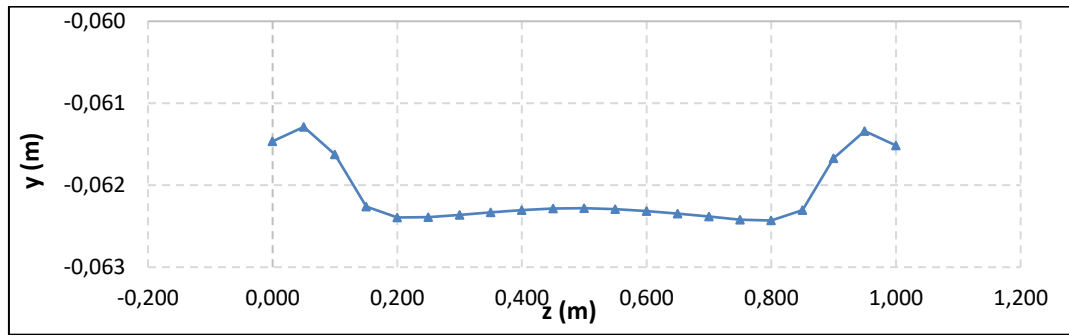


Şekil 5.21. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti

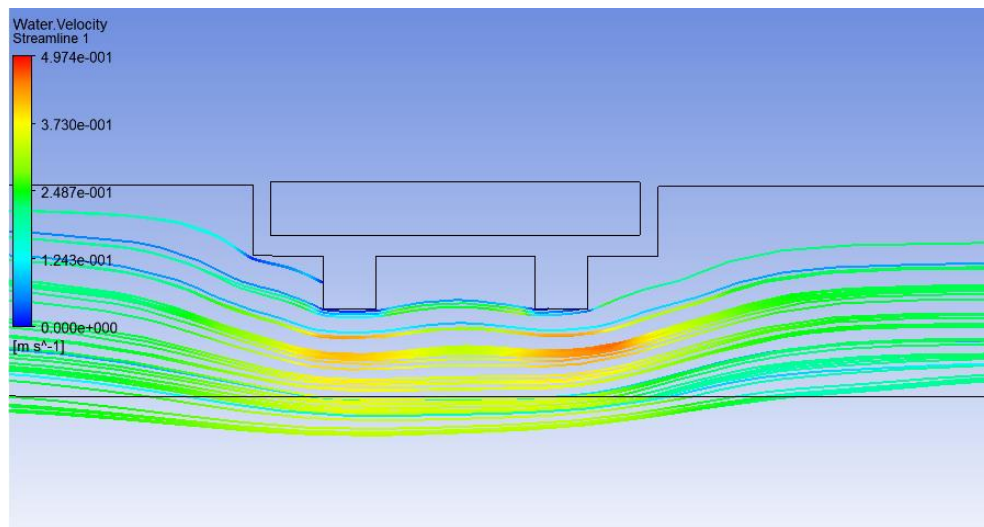
Sayısal ve deneysel sonuçlar kıyaslandığında hata oranının en yüksek olduğu durum 90 lt/sn'lik debi ve $y_a=32,5$ cm'e ait oyulma çukurunda meydana geldiği ve hatanın %63,9 olduğu görülmüştür. Tulimilli ve diğerleri (2011), basınçlı akıma maruz köprü tabliyesi altında oluşan oyulmayı incelemek için yaptıkları çalışmada, oyulma çukuruna ait sayısal sonuçlarla deneysel verileri karşılaştırmış ve en kötü sonuçta %50 civarında hata olduğunu bildirmişlerdir. Sonuçlardaki hataların esas sebebinin genel olarak sayısal modelde ortalama Reynolds değeri kullanılması ve askıda sediment taşınımı için benzeşim yapılamaması olarak değerlendirmişlerdir.



Şekil 5.22. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait oyulma çukuru profilleri



Şekil 5.23. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m için kanal kesiti



Şekil 5.24. $k-\epsilon$ türbülans modeline ait 70 lt/sn debi ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliği için elde edilen akım iplikcikleri

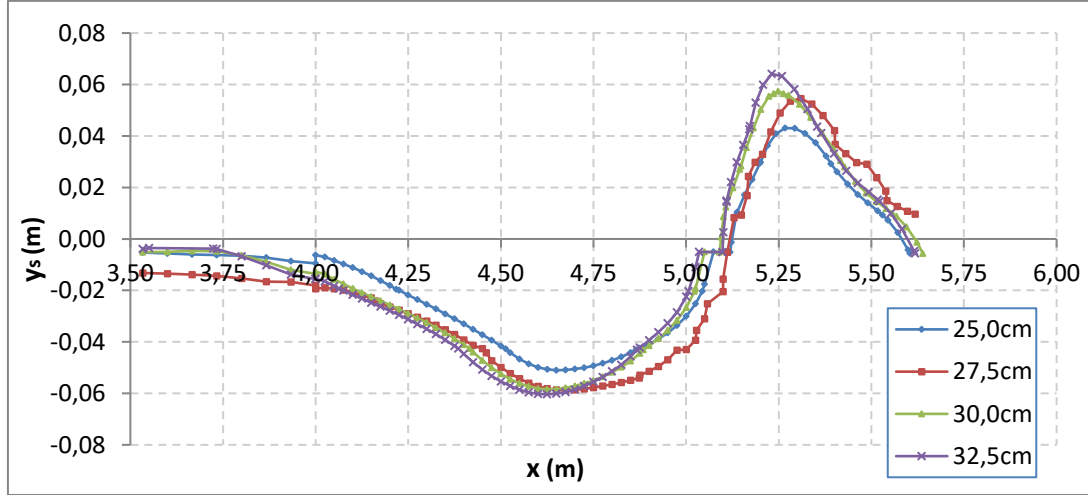
5.2. RSM Türbülans Modeline Ait Sayısal Model Sonuçları

Reynolds Stress Model türbülans modeli ile yapılan sayısal benzeşime ait sonuçlarla laboratuvar deneylerine ait verilerin karşılaştırılması Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. RSM türbülans modeli ve deneysel çalışmaya ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri

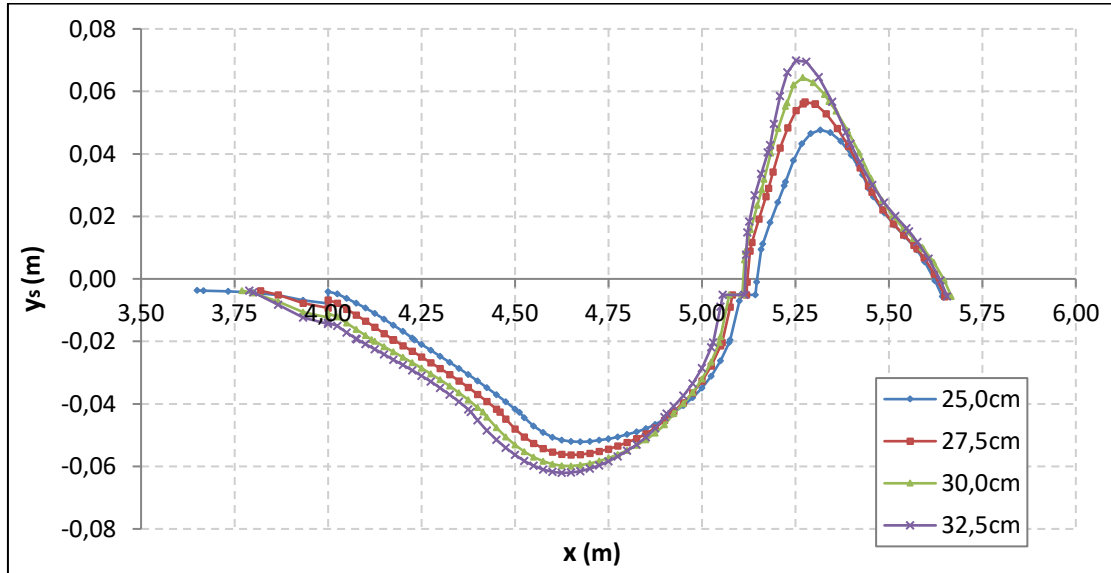
Deney				Karakurt (2016)	Sayısal RSM	Hata (%)
Test No	Q (lt/sn)	y_a (cm)	V_a (m/sn)	y_s (cm)	y_s (cm)	
1	70	25,0	0,280	13,1	5,10	61,07
2	70	27,5	0,255	11,7	5,50	52,99
3	70	30,0	0,233	13,0	5,84	55,08
4	70	32,5	0,215	11,8	6,04	48,81
5	80	25,0	0,320	14,1	5,21	63,05
6	80	27,5	0,291	13,0	5,63	56,69
7	80	30,0	0,267	13,4	5,99	55,30
8	80	32,5	0,246	13,8	6,20	55,07
9	90	30,0	0,300	16,5	6,12	62,91
10	90	32,5	0,277	17,3	6,30	63,58

70 lt/sn debi durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerine ait oyulma çukuru profilleri Şekil 5.25’te verilmiştir. Şekil incelendiğinde oyulma çukurlarının başlangıç-bitiş konumları ile profillerinin oldukça benzerlik gösterdiği görülmektedir. Akım derinliğinin artmasıyla beraber maksimum oyulma çukuru derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. 70lt/sn debi durumu için maksimum oyulma çukuru derinliğinin en fazla $y_a=32,5$ cm’de meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda basınçlı akım için tabliye altında en büyük akım hız oluşmakta, dolayısıyla tabanda oluşan kayma gerilmesi ve oyulma artmaktadır



Şekil 5.25. 70 lt/sn durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde RSM türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş olan sayısal oyulma çukuru profilleri

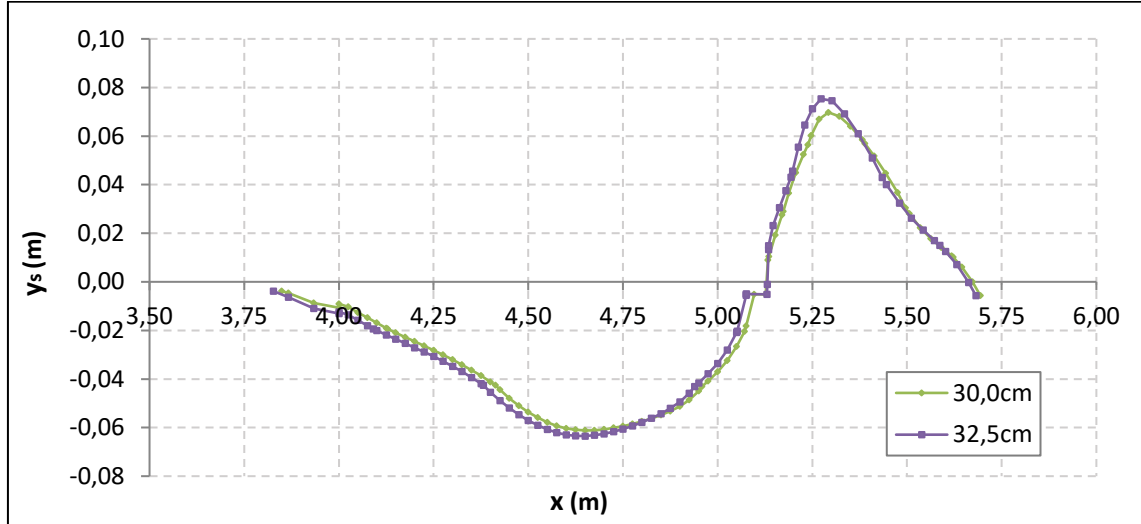
80lt/sn debi durumunda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla beraber Şekil 5.26’da görüldüğü gibi oyulma çukurunun menba şev eğimi küçülmüştür. 80lt/sn debi durumu için oyulma çukuru derinliği en fazla $y_a=32,5$ cm’de meydana gelmiş olup değeri 6,20 cm’dir. Çizelge 5.3’de görüldüğü üzere debinin 70 lt/sn’den 80 lt/sn’ye artmasıyla beraber aynı yaklaşım akım derinliklerine karşılık gelen oyulma çukuru derinlikleri de artış göstermiştir.



Şekil 5.26. 80 lt/sn durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde RSM türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş olan sayısal oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.27’de verilen 90 lt/sn debi durumunda $y_a=30,0$ cm ve $y_a=32,5$ cm için sayısal oyulma çukurlarına ait profiller incelendiğinde çukur profillerinin birbirine oldukça yakın olduğu

görülmektedir. Çizelge 5.3’de görüldüğü gibi yaklaşım akım derinliğinin $y_a=30,0$ cm’den $y_a=32,5$ cm’ye yükselmesiyle beraber maksimum oyulma çukuru derinliği %3 gibi küçük bir oranda artmıştır.



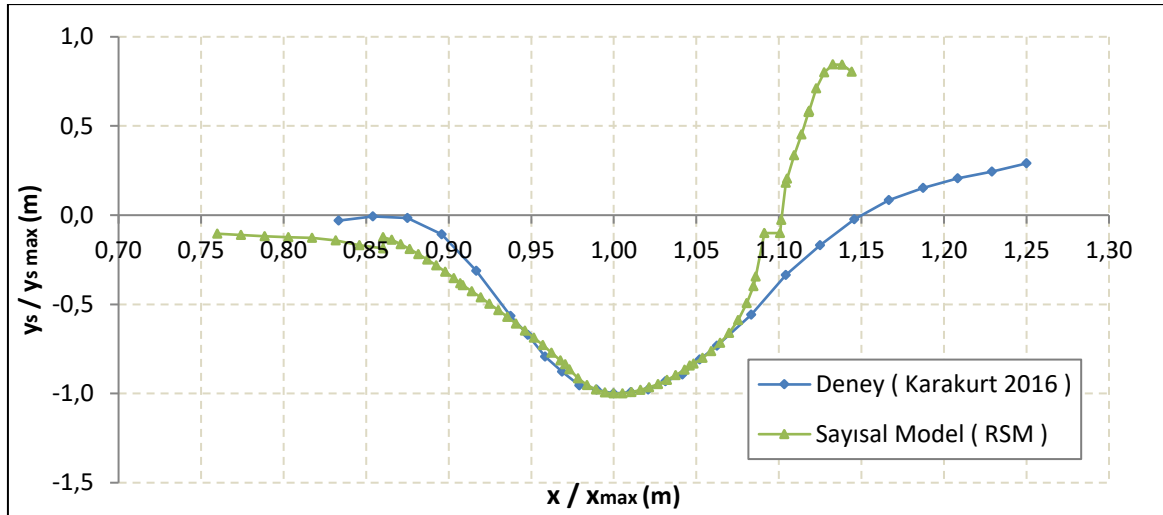
Şekil 5.27. 90 lt/sn durumunda farklı yaklaşım akım derinliklerinde RSM türbülans modeli kullanılarak elde edilmiş olan sayısal oyulma çukuru profilleri

Çizelge 5.4. RSM türbülans modeline ait sayısal çözüm sonuçları için kanaldan çıkan sediment miktarı

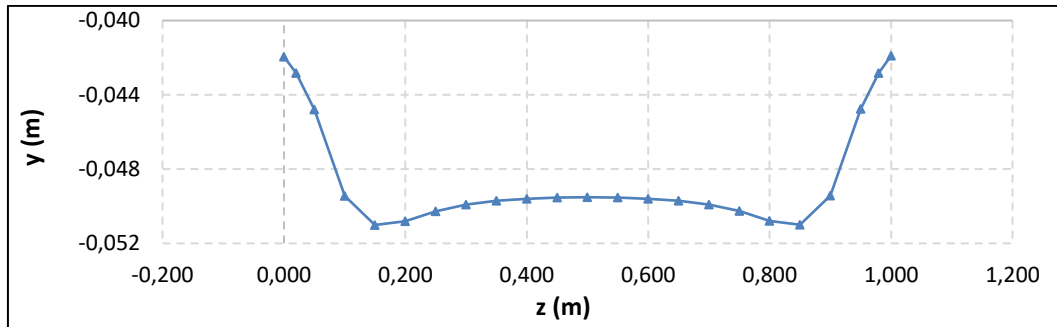
Sayısal Model RSM				Kanaldan çıkan sediment miktarı
Test No	Q (lt/sn)	y_a	V_a	m3
1	70	25,0	0,280	0,082
2	70	27,5	0,255	0,075
3	70	30,0	0,233	0,072
4	70	32,5	0,215	0,067
5	80	25,0	0,320	0,085
6	80	27,5	0,291	0,076
7	80	30,0	0,267	0,072
8	80	32,5	0,246	0,067
9	90	30,0	0,300	0,073
10	90	32,5	0,277	0,067

5.2.1. RSM türbülans modeline ait sayısal sonuçların deney verileriyle karşılaştırılması

70 lt/sn debi ve 25,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlara ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri Şekil 5.28'de, oyulma çukuruna ait kanal enkesiti ise Şekil 5.29'da verilmiştir.



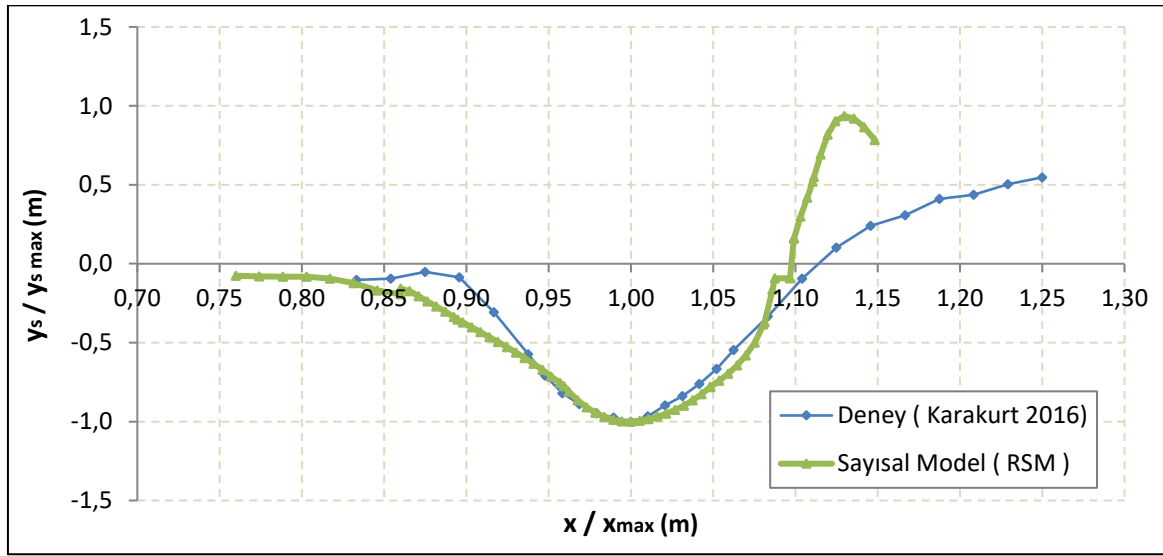
Şekil 5.28. 70 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 5.29. 70 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4,65$ m kanal enkesiti

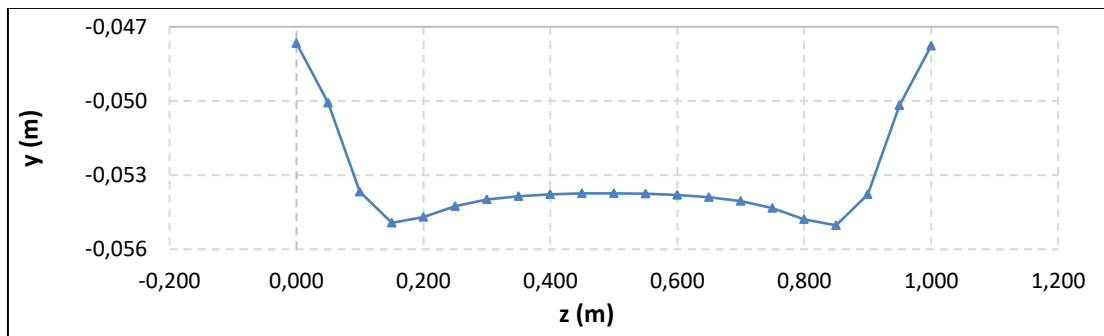
70 lt/sn debi ve 27,5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal ve deneysel çalışmaya ait maksimum oyulma çukuru derinliği sırasıyla 11,7 cm ve 5,50 cm olup Çizelge 5.3'de gösterilmektedir. 70lt/sn debi ve 27, 5 cm'lik yaklaşım akım derinliği için sayısal ve deneysel çözüme ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri ise Şekil 5.30'da verilmiştir.

Reynolds Stress Model türbülans modeline ait 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm akım derinliği için boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru ile deneysel çalışmaya ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri Şekil 5.32’de karşılaştırılmış olup profil bakımından birbiriyle uyum içerisinde. Ancak deneysel çalışmada maksimum oyulma çukuru derinliği 13 cm iken sayısal çözümde elde edilen maksimum oyulma çukuru derinliği 5,84 cm olarak belirlenmiştir.

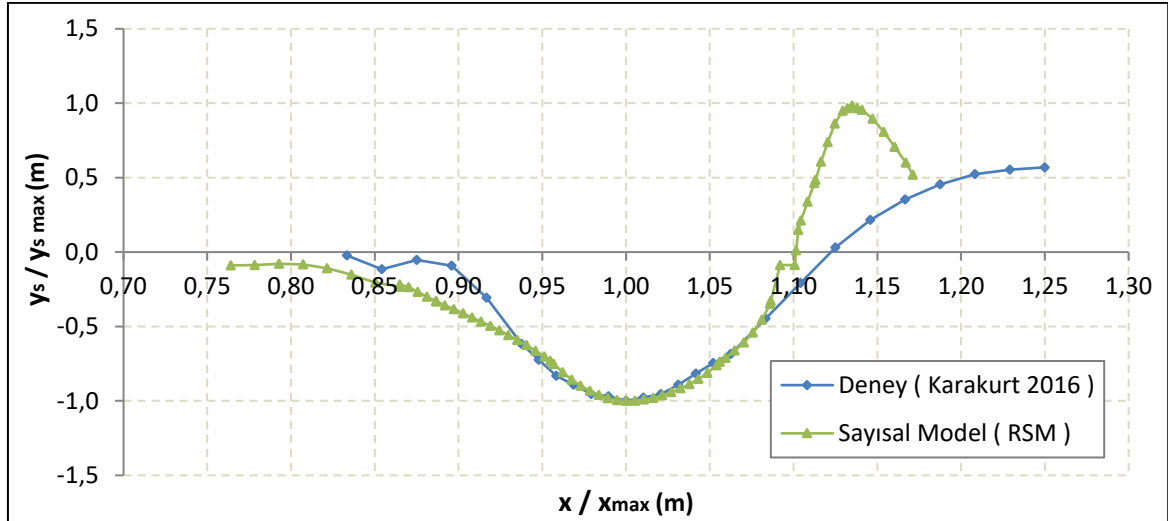


Şekil 5.30. 70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

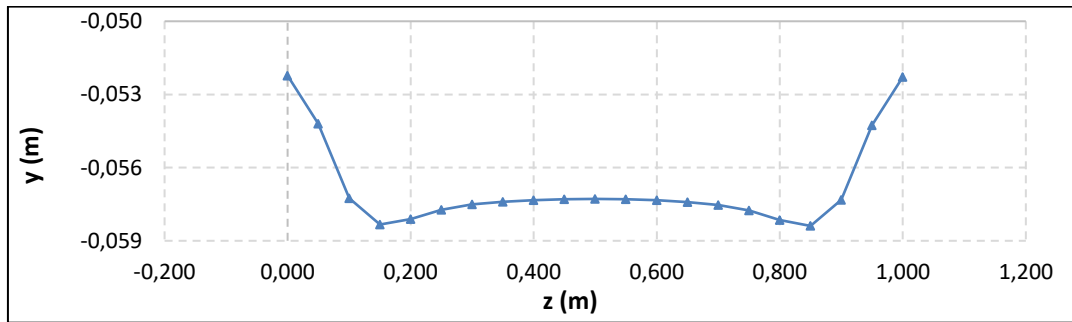
$y_a=27,5$ cm, $y_a=30,0$ cm ve $y_a=27,5$ cm akım derinliği için sayısal çözümde elde edilen oyulma çukuruna ait kanal enkesitleri sırasıyla Şekil 5.31, Şekil 5.33 ve Şekil 5.35’te verilmiştir.



Şekil 5.31. 70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti

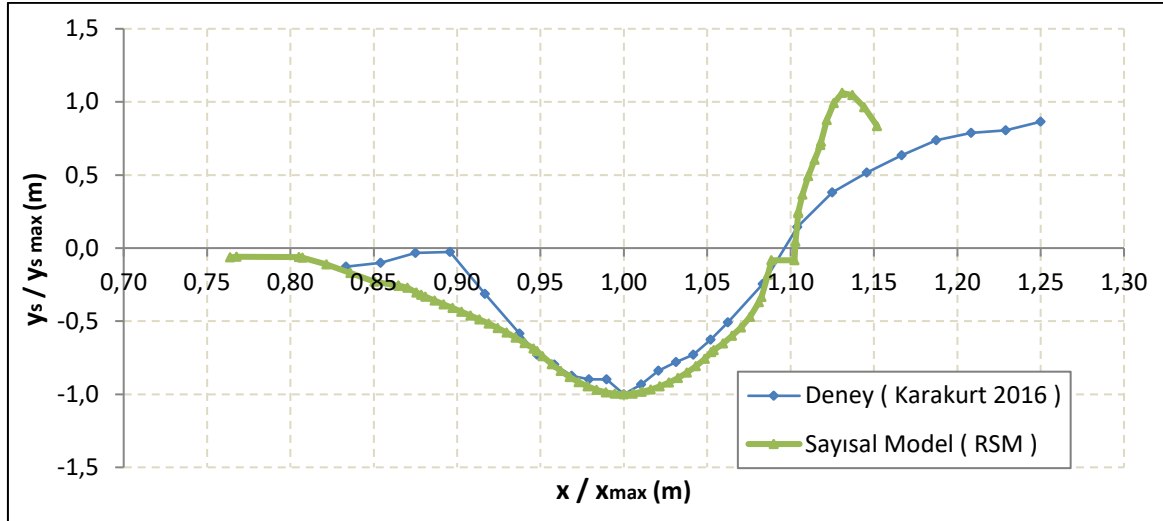


Şekil 5.32. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

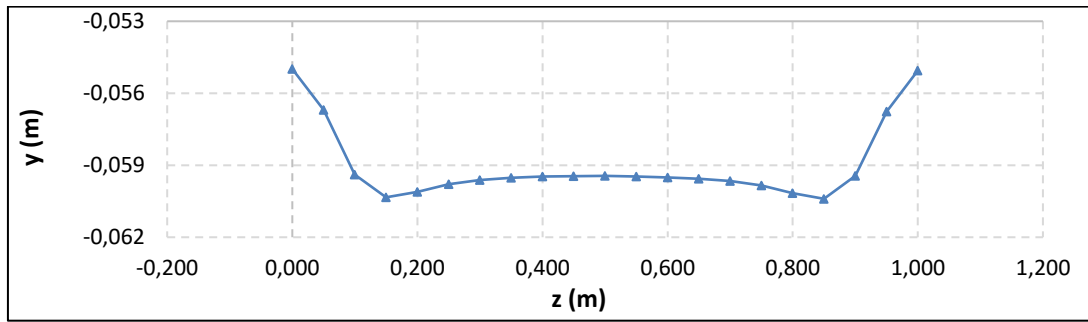


Şekil 5.33. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti

70 lt/sn'lik debi durumunda yaklaşım akım derinliğinin artmasıyla beraber Şekil 5.34'de görüldüğü üzere sayısal oyulma çukuruna ait menba şevi yayvanlaşmıştır. Maksimum oyulma çukuru derinlikleri deneysel ve sayısal çalışma için sırasıyla 11,8 cm ve 6,04 cm olup Çizelge 5.3'de verilmiştir.



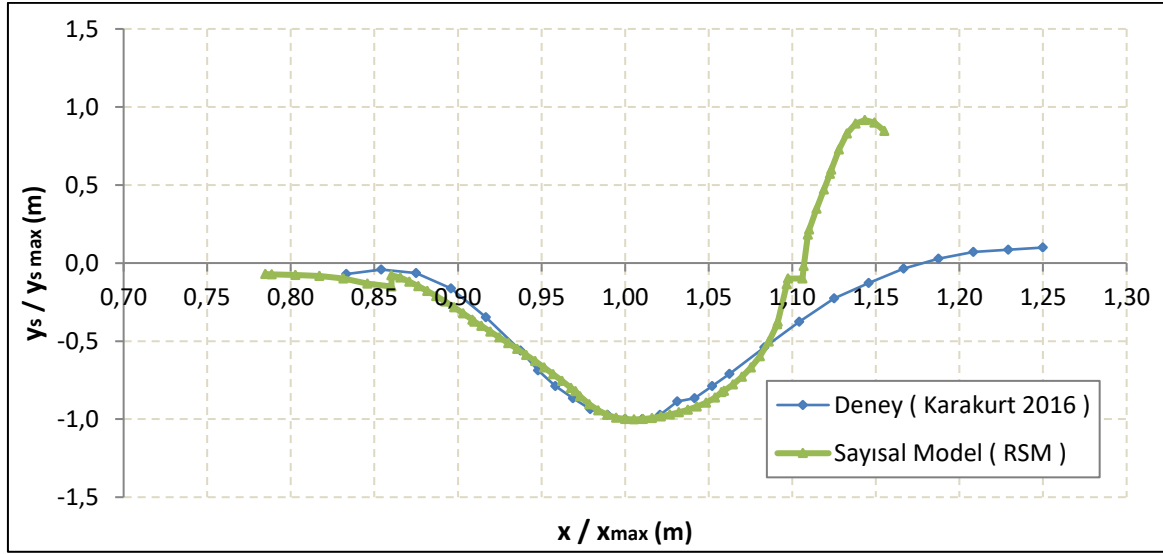
Şekil 5.34. 70 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



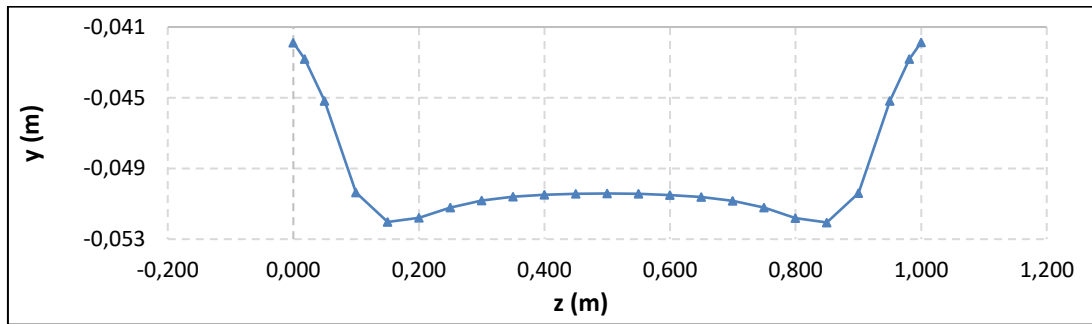
Şekil 5.35. 70 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.625$ m kanal en kesiti

Şekil 5.36, Şekil 5.38 ve Şekil 5.40'ta verilmiş olan 80 lt/sn debi durumu için elde edilmiş olan sayısal model sonuçları ile deneysel verilere ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru incelendiğinde birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. 70 lt/sn ve 80 lt/sn debi durumları için aynı akım derinliklerine karşılık gelen oyulma çukuru derinlikleri karşılaştırıldığında hata oranları 25,0 cm, 27,5 cm, 30,0 cm ve 32,5 cm yaklaşım akım derinlikleri için 70lt/sn debi durumunda sırasıyla %61,1, %53,0, %55,1 ve %48,8'den, 80lt/sn debi durumunda sırasıyla %63,1, %56,7, %55,3 ve %55,1'e yükselmiştir.

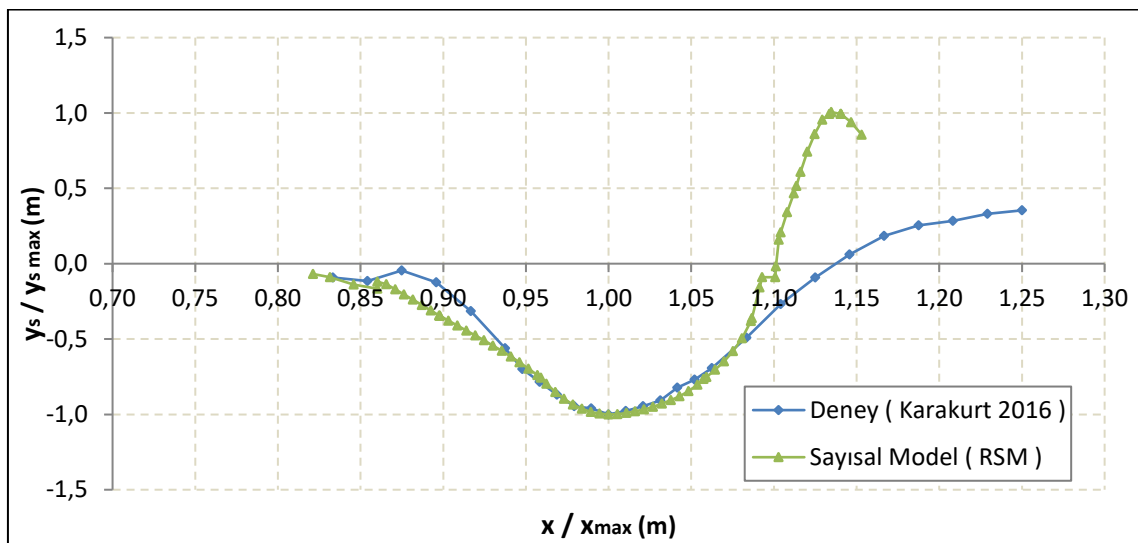
80 lt/sn debi durumunda, yaklaşım akım derinliğinin 25,0 cm, 27,5 cm, 30,0 cm ve 32,5 cm olduğu sayısal modellerden elde edilen oyulma çukuru profillerine ait kanal enkesitleri sırasıyla Şekil 5.37, Şekil 5.39, Şekil 5.41 ve Şekil 5.43'te verilmiştir.



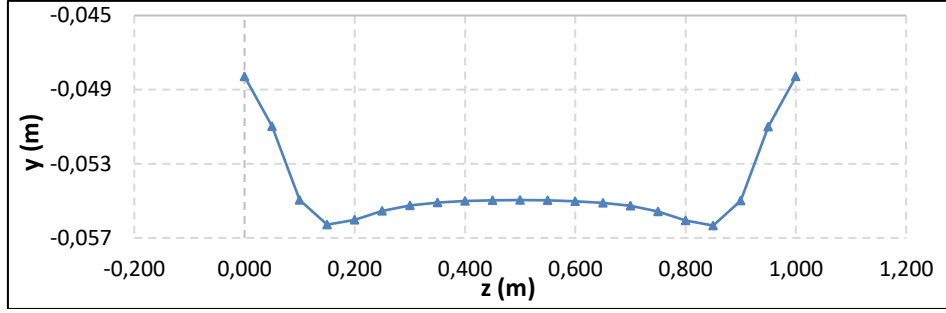
Şekil 5.36. 80 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



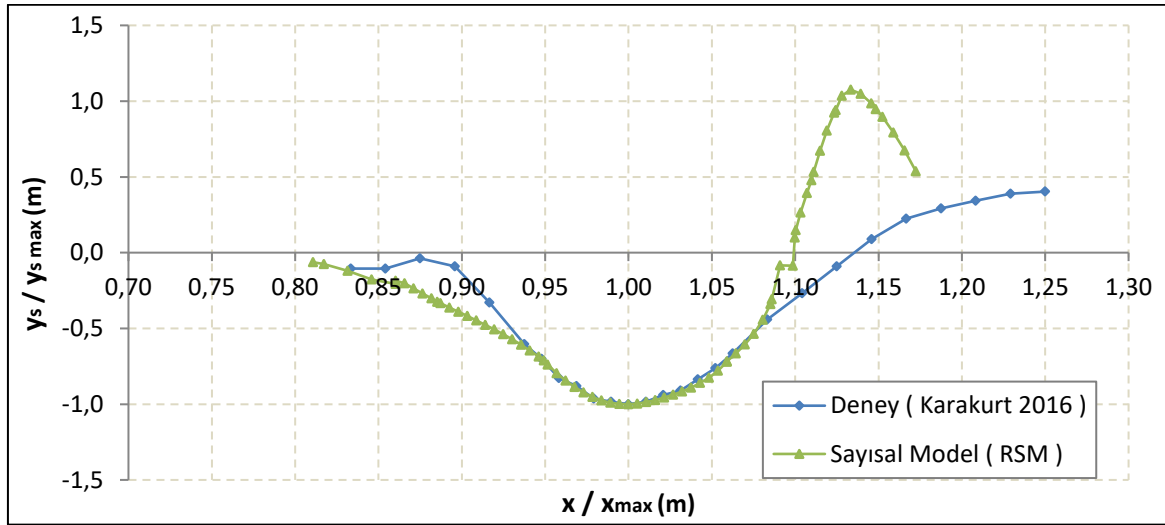
Şekil 5.37. 80 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti



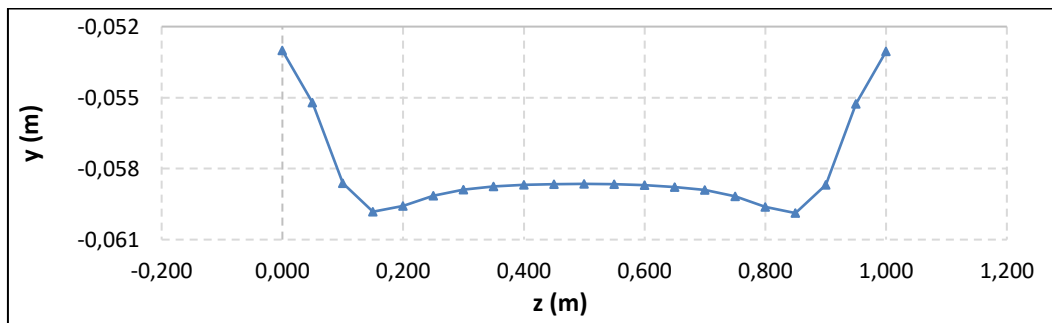
Şekil 5.38. 80 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 5.39. 80 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti

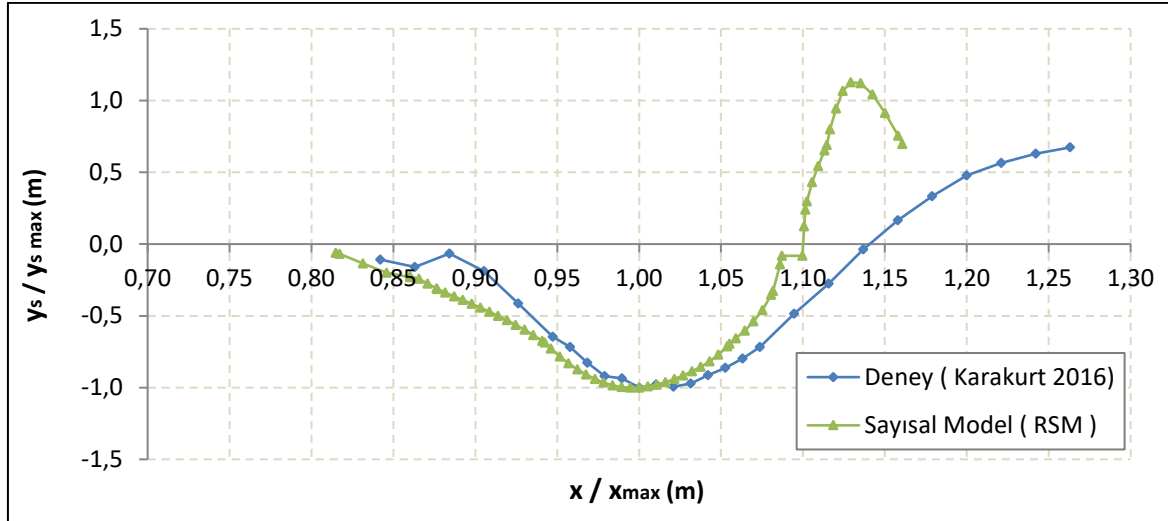


Şekil 5.40. 80 lt/sn ve $y_a=30$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

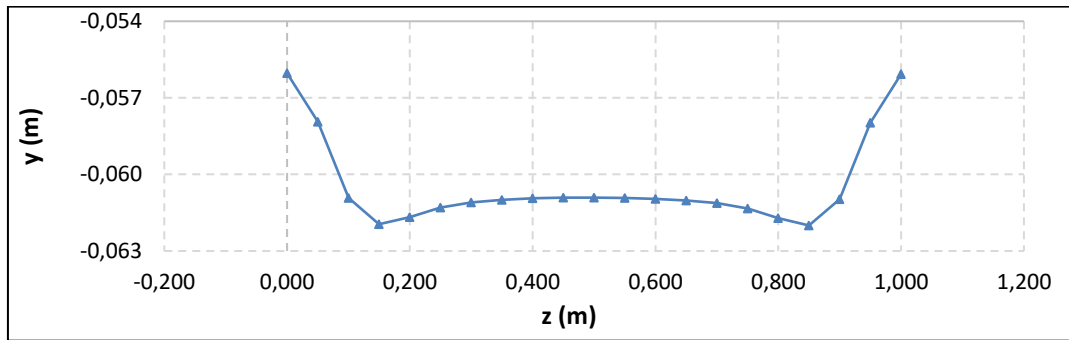


Şekil 5.41. 80 lt/sn ve $y_a=30$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti

Şekil 5.42'de görüldüğü üzere akım derinliğinin 32,5 cm olması durumunda sayısal oyulma çukuru bir miktar menbaya doğru ötelenmiştir.

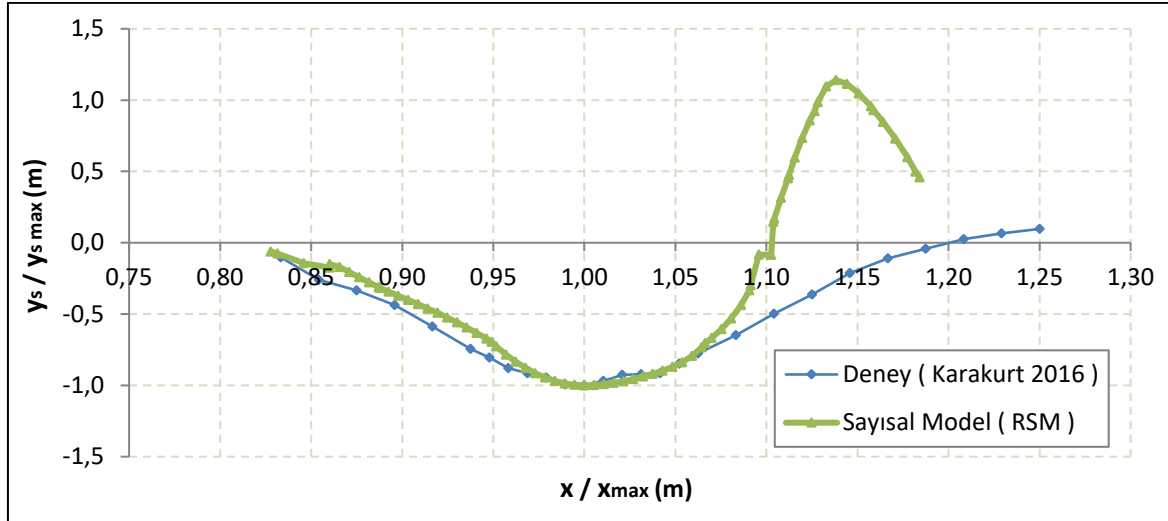


Şekil 5.42. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri

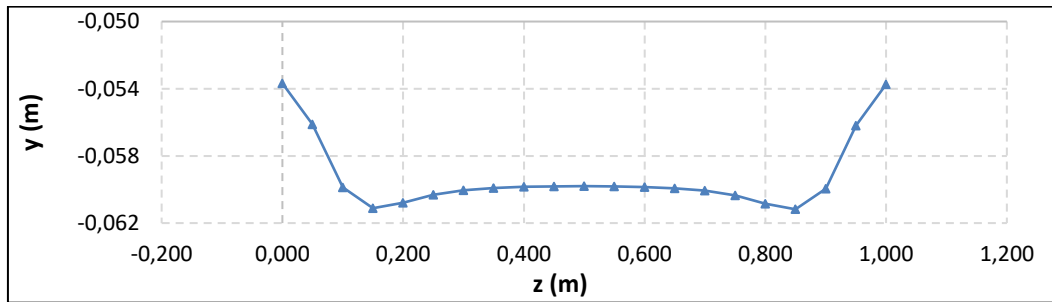


Şekil 5.43. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna $x=4.65$ m kanal en kesiti

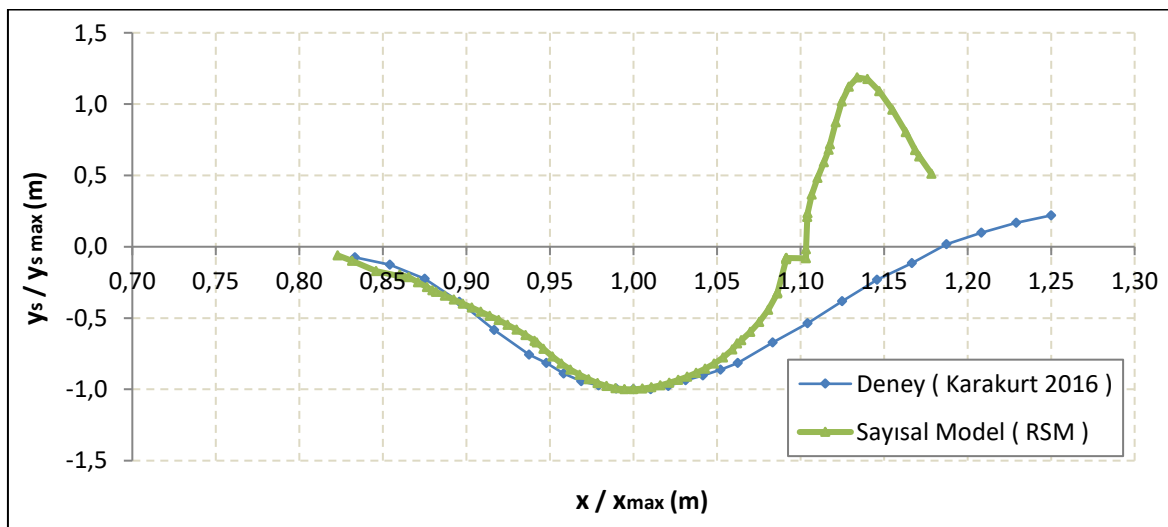
Sayısal çalışmada debinin 90lt/sn'ye artmasıyla beraber aynı yaklaşım akım derinliklerine karşılık gelen sayısal oyulma çukuru derinlikleri için hata oranları da artış göstermiştir. Çizelge 5.3'de incelendiğinde %63,6 hata oranıyla en kötü sonuç 90lt/sn debi ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliğine ait deney serisinde elde edilmiştir. Diğer debi değerlerinde açıklandığı üzere debi ve yaklaşım akım derinliği arttıkça köprü altındaki basınçlı akımın hızı ve kayma gerilmesi artmakta ve daha büyük oyulma derinlikleri oluşmaktadır. 90lt/sn debi için 30,0 cm ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliklerine ait oyulma çukuru profilleri sırasıyla Şekil 5.44 ve Şekil 5.46'da, oyulma çukuru profiline ait kanal enkesitleri ise Şekil 5.45 ve Şekil 5.47'de verilmiştir.



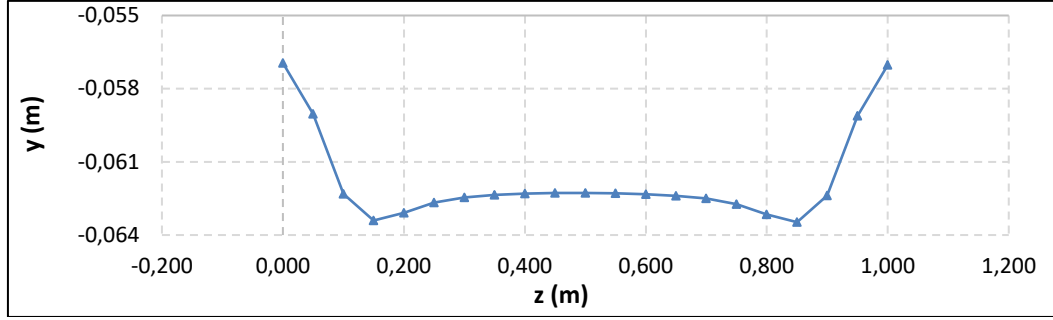
Şekil 5.44. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 5.45. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti



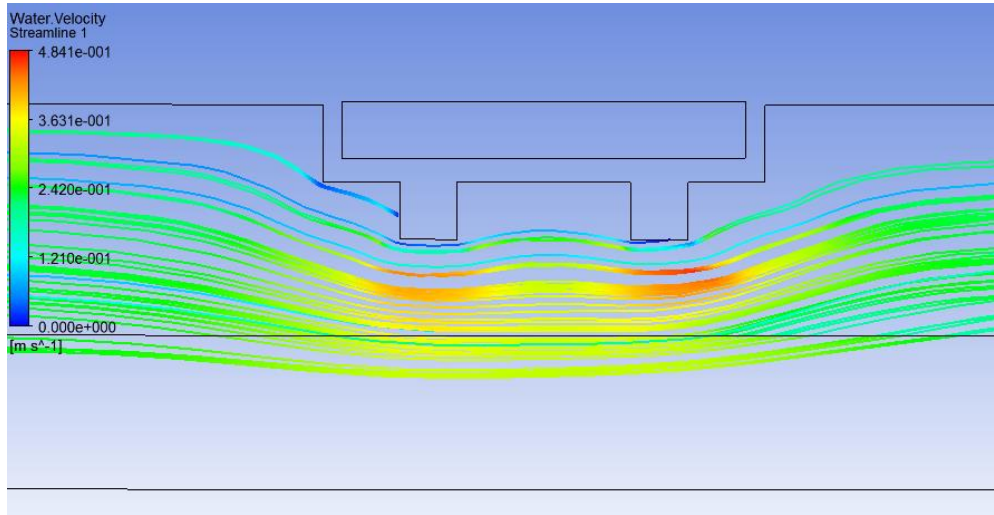
Şekil 5.46. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için deneysel veriler ve sayısal model sonuçlarına ait boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri



Şekil 5.47. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için sayısal model sonucuna ait $x=4.65$ m kanal en kesiti

90 lt/sn debi durumunda 30,0 cm ve 32,5 cm yaklaşım akım derinliklerine ait Şekil 5.44 ve Şekil 5.46'deki profiller incelendiğinde her iki akım derinliği için oyulma çukurlarının menba şevleri birbirine benzer olup mansap şevleri deneysel sonuçlara göre bir miktar mansap tarafına ötelenmiştir ve daha diktir.

Sayısal model benzeşiminde tabliye etrafında gözlemlenen akım iplikciklerine örnek olarak 70 lt/sn debi ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliği için elde edilen sonuç Şekil 5.48'de verilmiştir.



Şekil 5.48. RSM türbülans modeline ait 70 lt/sn debi ve 30,0 cm yaklaşım akım derinliği için elde edilen akım iplikcikleri

5.3. k-ε ve RSM Türbülans Modellerine Ait Sayısal Sonuçların Karşılaştırması

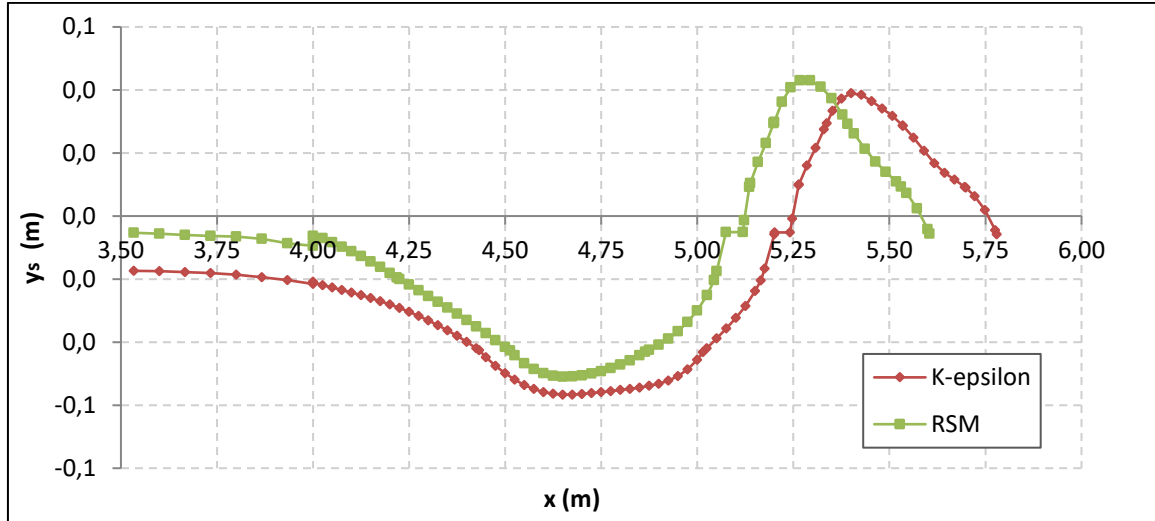
Bu çalışmada yapılan sayısal benzeşimlerde iki farklı türbülans modeli kullanılmıştır. k-ε ve Reynolds Stress Model ile yapılmış olan sayısal benzeşim sonuçları Çizelge 5.5'te

verilmiştir. Çözüm sonuçları incelendiğinde genel olarak k- ϵ türbülans modeliyle çözülen sayısal simülasyonlarda oyulma çukuru derinlikleri için hata oranlarının RSM'ye göre daha düşük olduğu görülmektedir.

70 lt/sn ve 25 cm yaklaşım akım derinliği durumu için k- ϵ ve RSM türbülans modeli ile yapılan sayısal benzeşimlerden elde edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri sırasıyla 5,66 cm ve 5,10 cm'dir. Şekil 5.47 incelendiğinde her iki çözümün oyulma çukuru profilleri açısından birbirine benzediği görülmektedir. Ancak k- ϵ ile yapılan çözüme ait oyulma çukuru profili RSM'ye göre daha geniştir.

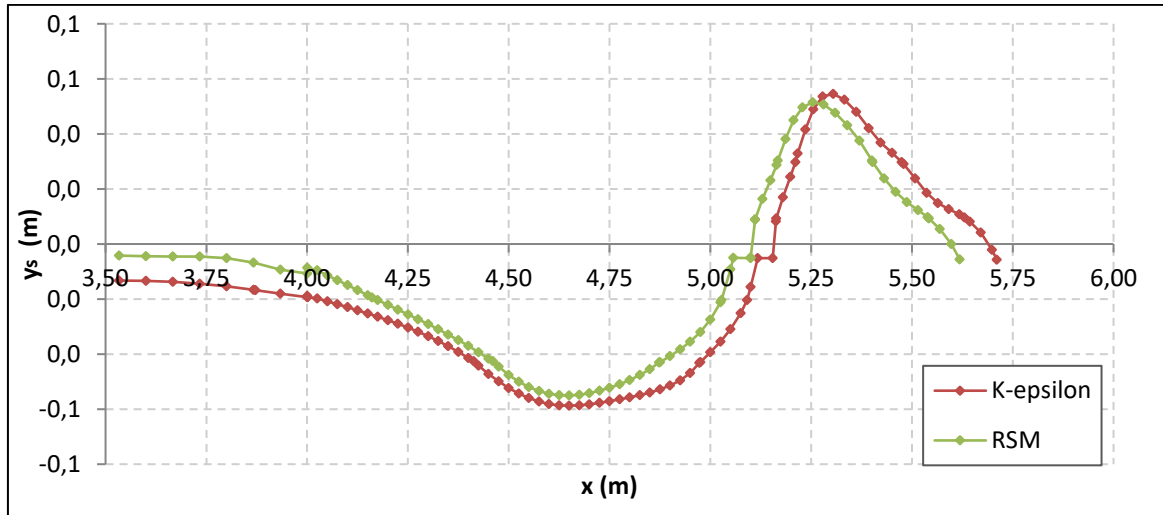
Çizelge 5.5. k- ϵ ve Reynolds Stress Model ile yapılan sayısal çözümlere ait değerler

DENEY				Realiazble k - ϵ	RSM	Hata (%)
Test No	Q (lt/sn)	y _a (cm)	V _a (m/sn)	y _s (m)	y _s (m)	
1	70	25,0	0,280	5,66	5,10	9,89
2	70	27,5	0,255	5,87	5,50	6,30
3	70	30,0	0,233	6,57	5,84	11,11
4	70	32,5	0,215	6,27	6,04	3,67
5	80	25,0	0,320	5,42	5,21	3,87
6	80	27,5	0,291	5,92	5,63	4,90
7	80	30,0	0,267	6,12	5,99	2,12
8	80	32,5	0,246	6,10	6,20	1,64
9	90	30,0	0,300	6,14	6,12	0,33
10	90	32,5	0,277	6,24	6,30	0,96



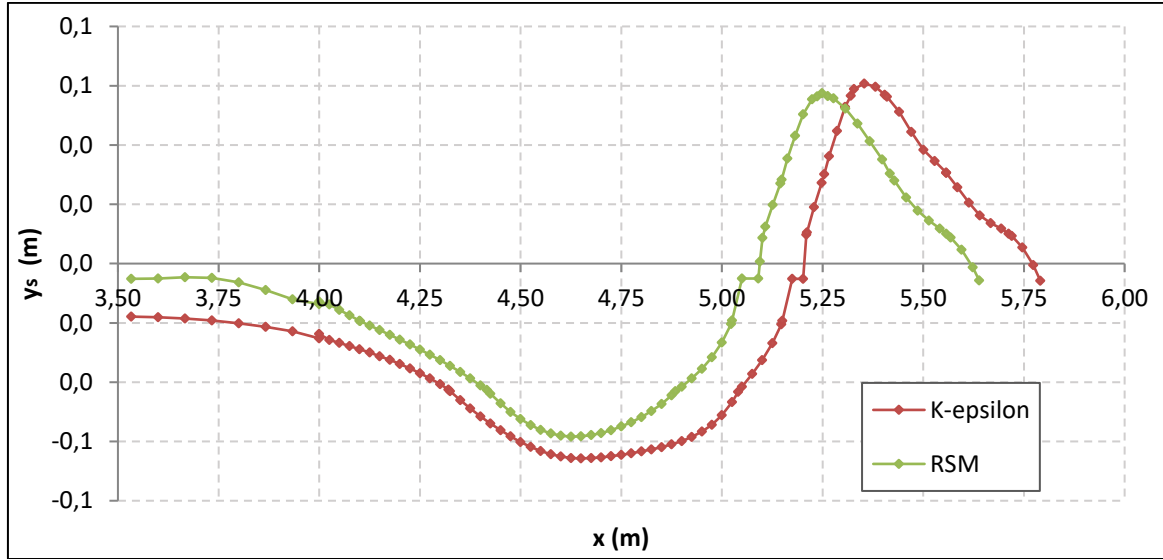
Şekil 5.47. 70 lt/sn ve $y_a=25$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

70 lt/sn debi ve $y_a=27,5$ cm için k- ϵ ve RSM sayısal çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri Şekil 5.48’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki türbülans modelinin oyulma profili bakımında birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği, k- ϵ türbülans modeline ait maksimum oyulma çukuru derinliğinin ise daha büyük olduğu görülmüştür.



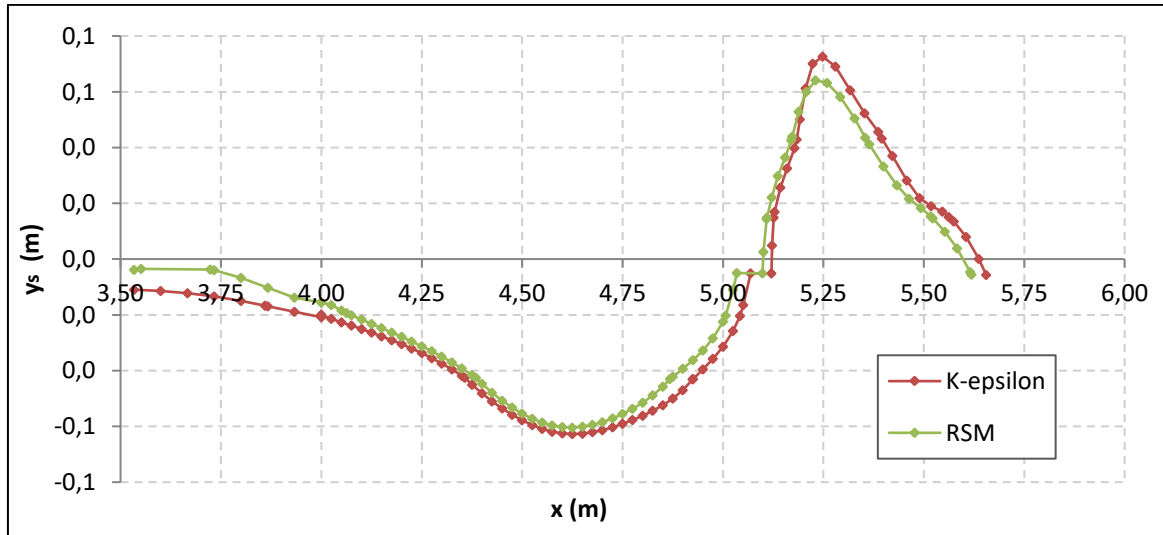
Şekil 5.48. 70 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

70 lt/sn debi ve $y_a=30,0$ için her iki türbülans modeline ait maksimum oyulma çukuru profillerinin verildiği Şekil 5.49 incelendiğinde k- ϵ türbülans modeliyle yapılan çözüme ait oyulma çukuru profili RSM türbülans modeline göre daha geniş ve daha derindir. Diğer bir deyişle k- ϵ türbülans modeli ile yapılan çözümlerde RSM türbülans modeline göre daha fazla oyulma meydana gelmiştir.



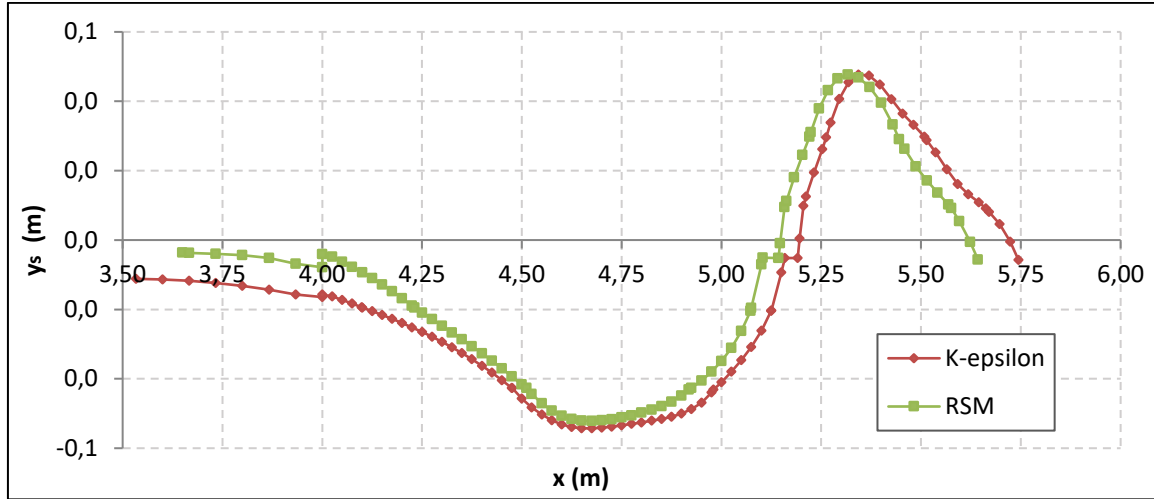
Şekil 5.49. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.50 incelendiğinde 70lt/sn debi durumunda $y_a=32,5$ cm'ye yükselerek türbülansın azalmasıyla birlikte iki modele ait oyulma çukuru profilleri birbirine yakınlaşmıştır. k- ϵ ve RSM türbülans modeline ait maksimum oyulma çukuru derinliği arasında %4'den daha azdır.



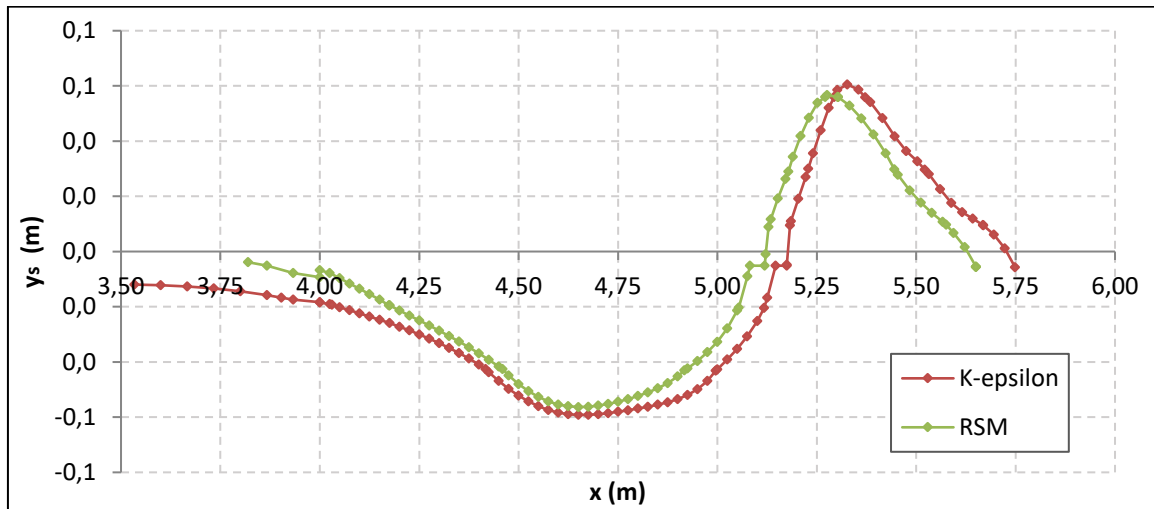
Şekil 5.50. 70 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

80 lt/sn debi ve $y_a=25,0$ cm koşullarında yapılan sayısal model çözümlerinde her iki türbülans modeli için Şekil 5.51 ve Çizelge 5.5 incelendiğinde elde edilen oyulma çukuru profilleri ve derinlikleri benzerlik göstermektedir.

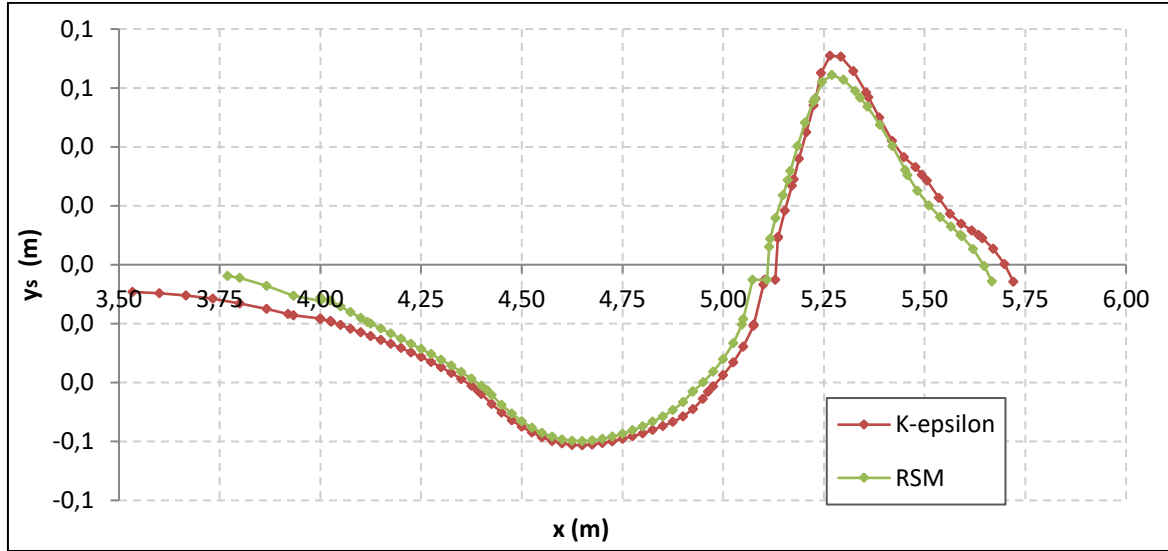


Şekil 5.51. 80 lt/sn ve $y_a=25,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.52 ve Şekil 5.53 incelendiğinde 80 lt/sn debi için sırasıyla yaklaşım akım derinliğinin 27,5 cm ve 30,0 cm'ye artmasıyla benzer oyulma çukuru profilleri elde edilmiştir. Türbülans şiddeti arttıkça modeller yakın sonuçlar vermektedir.

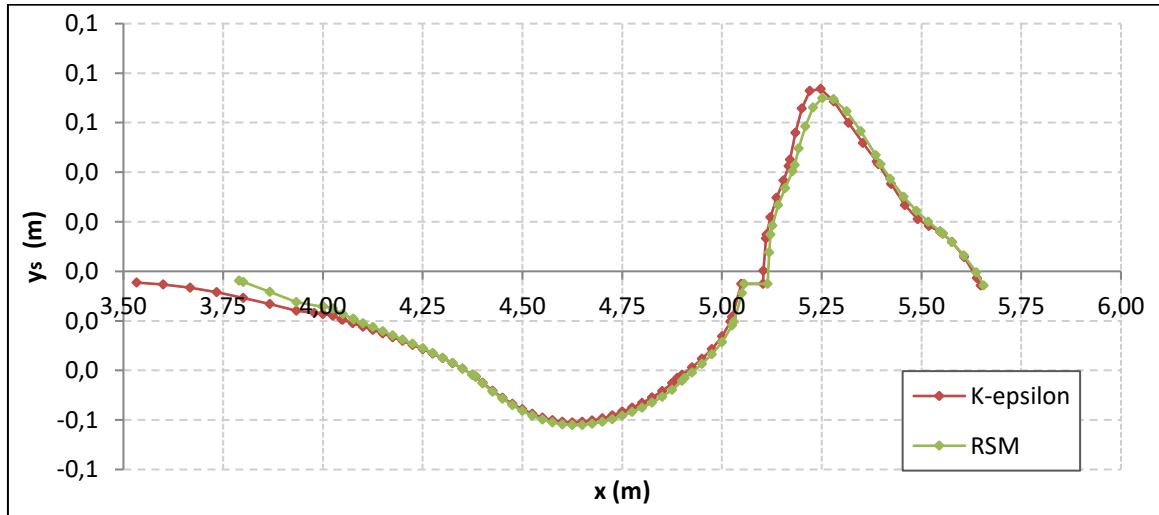


Şekil 5.52. 80 lt/sn ve $y_a=27,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri



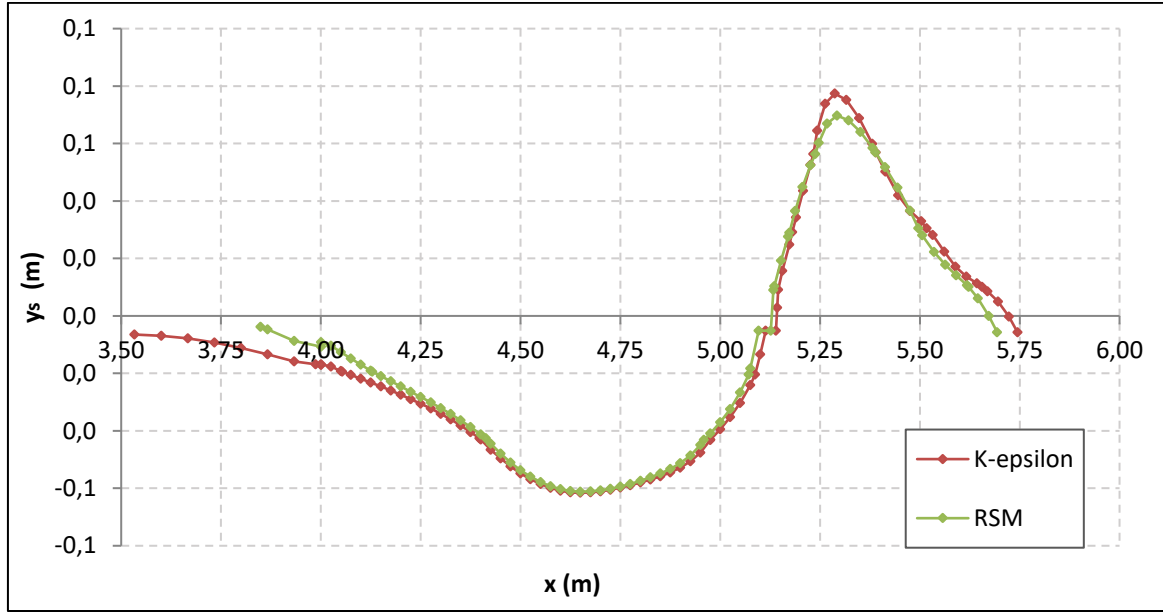
Şekil 5.53. 80 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.54 incelendiğinde $y_a=32,5$ cm ve 80 lt/sn debi durumunda yapılan sayısal model benzeşiminde k- ϵ ve RSM türbülans modeli için maksimum oyulma çukuru derinlikleri sırasıyla 6,10 cm ve 6,20 cm'dir, oyulma çukuru profiller ise birbirine çok benzerdir.

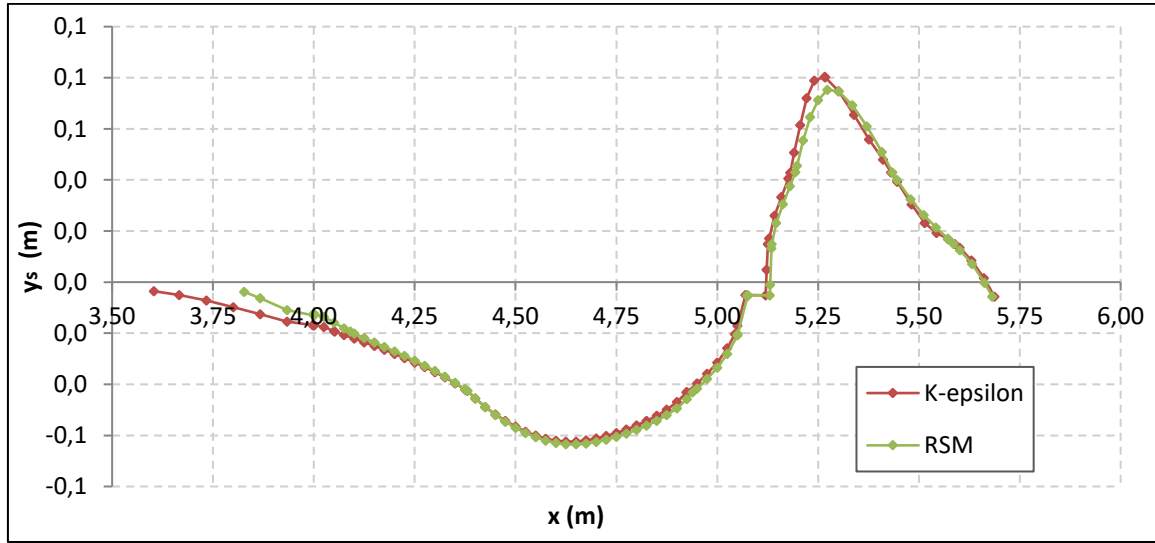


Şekil 5.54. 80 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

Şekil 5.55 ve Şekil 5.56 incelendiğinde 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği ve 90 lt/sn debi durumunda oyulma çukuru profilleri yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 5.55. 90 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

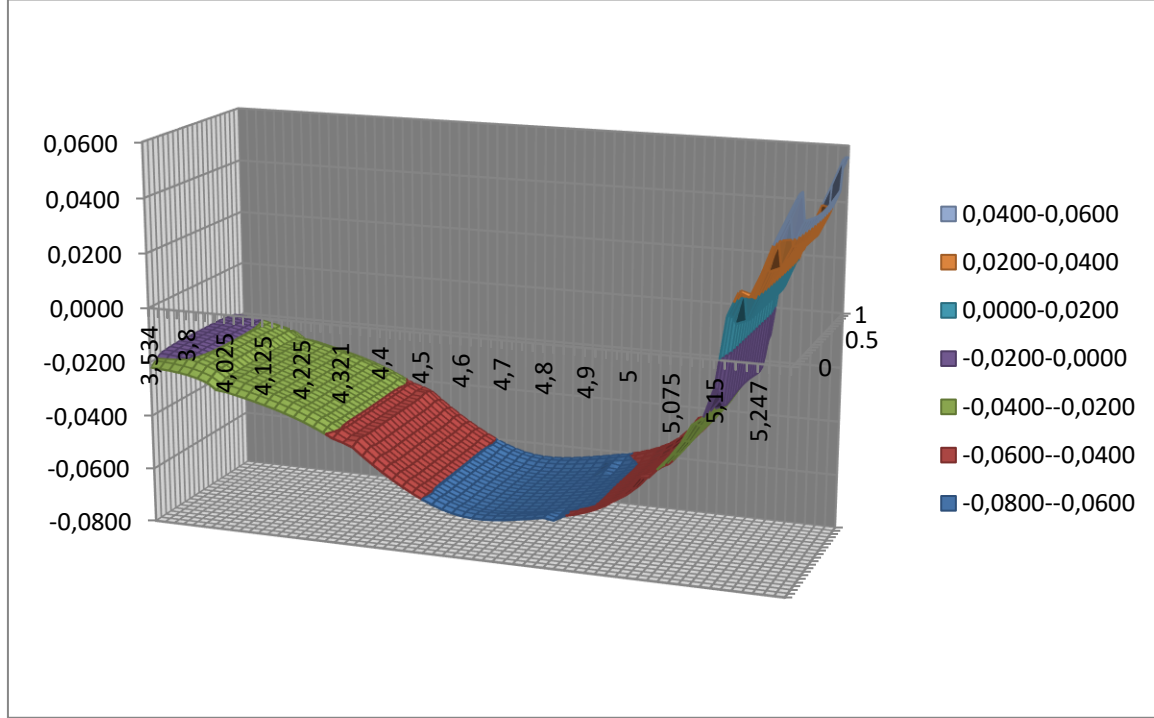


Şekil 5.56. 90 lt/sn ve $y_a=32,5$ cm için k- ϵ ve RSM çözümlerine ait oyulma çukuru profilleri

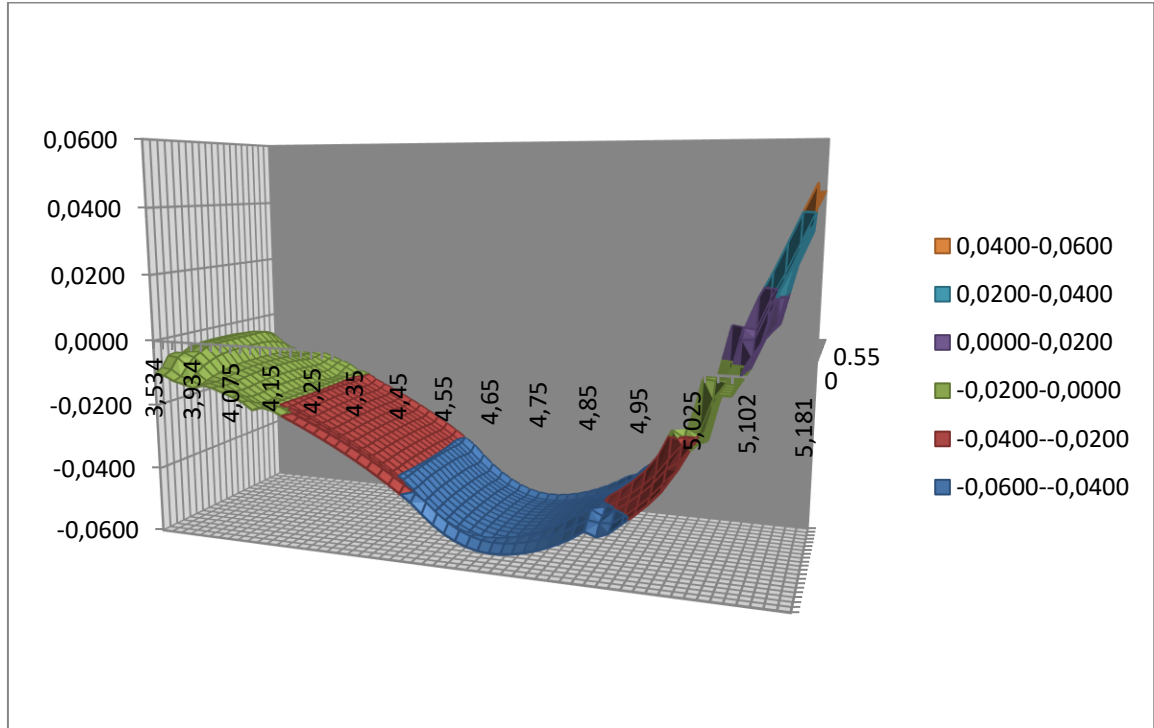
Sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem k- ϵ hem de RSM modeli için akım hızının büyük olduğu dolayısıyla türbülansın yüksek olduğu deney serilerinde hata oranlarının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum çözümlerde kullanılan her iki modelin de yüksek türbülanslı akımı iyi karakterize edemediğini göstermektedir.

k- ϵ ve RSM türbülans modelinin sayısal çözümlerinden elde edilen oyulma çukurlarının 3-B grafikleri incelendiğinde yatak yüzeyinin oldukça homojen olduğu görülmüştür. Buna örnek olarak 70lt/sn debi ve 30,0 cm'lik yaklaşım akım derinliği için elde edilen 3-B oyulma

profillerine ait k- ϵ ve RSM türbülans modelleri için sırasıyla Şekil 5.57 ve Şekil 5.58’de verilmiştir.

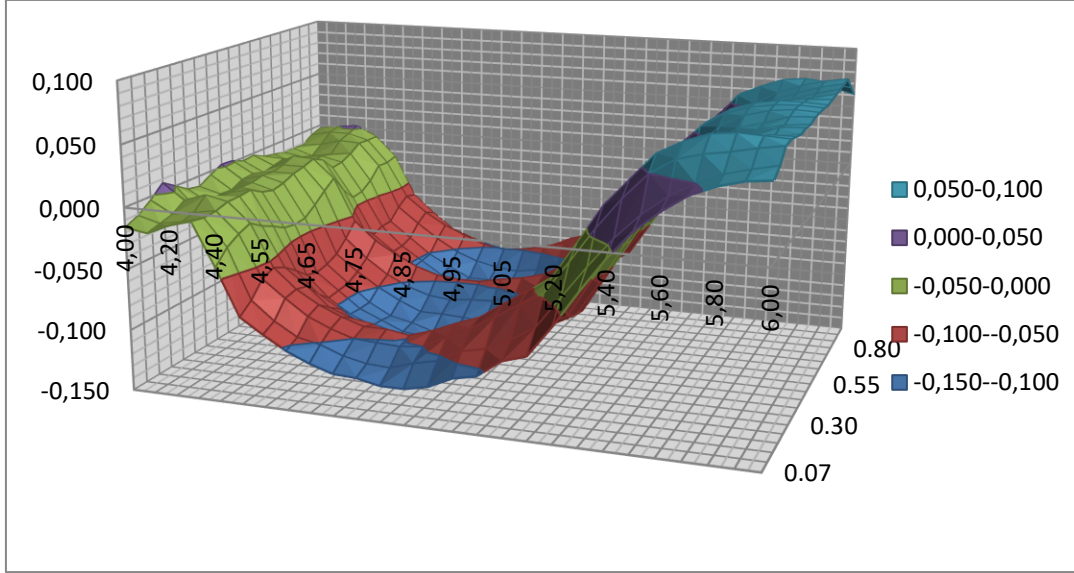


Şekil 5.57. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için k- ϵ modeli çözümüne ait 3-B oyulma çukuru grafiği



Şekil 5.58. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için RSM modeli çözümüne ait 3-B oyulma çukuru grafiği

k- ϵ ve RSM türbülans modellerine ait 3-B grafikler Şekil 5.59’da verilen deneysel çalışmaya ait 3-B grafiklerle karşılaştırıldığında k- ϵ ve RSM türbülans modellerine ait oyulma çukurunun yatak yüzeyinin daha düz ve homojen olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.59’da verilen deneysel çalışmaya ait 3-B grafik incelendiğinde oyulma çukuru yatak yüzeyinde simetrik olmayan yatak şekillerinin oluştuğu görülmektedir. Halbuki yapılan sayısal çözümlerde kullanılan her iki türbülans modeline ait 3-B oyulma çukuru grafikleri oldukça simetrik ve düzenlidir. Böylece başlangıç koşulu olarak tanımlanan giriş hızının son derece düzgün hız profiline sahip olması ve simetrik ağ yapısı sayısal çözümlerde simetrik oyulma çukurlarının oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 5.59. 70 lt/sn ve $y_a=30,0$ cm için deneysel çalışmaya ait 3-B oyulma çukuru grafiği

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada köprü tabliyesi altında meydana gelen daralma oyulmasını incelemek üzere daha önce laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş deneylerin sayısal benzeşimi yapılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak simüle edilen çözümlerle laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler karşılaştırılarak sonuçlar irdelenmiştir. Çözümlerde basınçlı akım durumu için farklı yaklaşım akım derinliklerinin oyulma çukuru maksimum derinliği ve şekli üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara kıyasla hata oranlarına bakıldığında en büyük hata oranlarının türbülansın yüksek olduğu deney serilerinde olduğu görülmüştür. Hem $k-\epsilon$ hem de RSM türbülans modeline ait çözüm sonuçları incelendiğinde, sabit debi değerleri için akım derinliği arttıkça maksimum oyulma çukuru derinlikleri de artış göstermiştir. Aynı akım derinliklerine karşılık gelen debi değerleri arttıkça hata oranlarında genel olarak artış görülmüştür. Bu da ilgili sınır koşullarının ve çözümlerde kullanılan $k-\epsilon$ ve RSM türbülans modelleri kullanılarak oluşturulan modellerin yüksek türbülanslı ortamı iyi simüle edemediğini düşündürmektedir. Sayısal çözümlerde kullanılan $k-\epsilon$ ve RSM türbülans model sonuçları karşılaştırıldığında ise oyulma çukuru maksimum derinliği için $k-\epsilon$ türbülans modelinin deneysel sonuçlarla daha iyi uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Her iki çözüme ait üç boyutlu grafikler incelendiğinde oyulma çukurunun yatak yüzeyinin deneysel sonuçlara göre daha üniform ve düz olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum sayısal çözümlerde kullanılan türbülans modellerinin ortalama bir Reynolds değeri ile çözüm yapmasının sonucu olarak açıklanabilir.

Özetle karmaşık ve kaotik akış olaylarının çözümünde HAD yöntemlerinin kullanılmasıyla analizi yapılan problemler için bazı durumlarda yakın ve anlamlı sonuçlar elde edilse de halen karmaşık akımların benzeşimi için yapılması gereken çalışmalar vardır. Analizlerde uygun modelin seçilmesi ve doğru sınır koşullarının tanımlanması sonuçların güvenilirliği belirlemektedir.

KAYNAKLAR

- Abed, L.M. (1991). *Local scour around bridge piers in pressure flow*, PhD thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA. 28-38.
- Adhikary, B. D., Majumdar, P., and Kostic, M. (2009). *CFD simulation of open channel flooding flows and scouring around bridge structures*. In Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics.
- Akib, S., Jahangirzadeh, A., and Basser, H. (2014). Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(2), 108–116.
- Ansyes (2015). Fluent User's Guide Release 16.1
- Apaçoğlu, B., (2010). *Silindir üzerindeki laminar ve türbülanslı akışın kontrolsüz ve kontrollü had analizleri*. Yüksek Lisans Tezi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 18-27.
- Arneson, L. A., and Abt, S. R. (1998). Vertical contraction scour at bridges with water flowing under pressure conditions. *Transportation research record*, 1647(1), 10-17.
- Azhari, A., Saghravani, S. F., and Mohammadnezhad, B. A. (2010). *3D Numerical modeling of local scour around the cylindrical bridge piers*. In XVIII International Conference on Computational Methods in Water Resources.
- Bakker, A. (2002). Boundary Conditions, Applied Computational Fluid Dynamics. *Lectures of Fluent Instructor*, 41-43.
- Barbhuiya, A.K., and Mazumder, M.H. (2014). Live-bed local scour around vertical-wall abutments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20(3), 339-351.
- Başyazıcı, İ.U. (2007). *İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 42,43,54,56.
- Bayazıt, M. (2010). *Akarsularda Akım ve Sediment Taşınımı*, İstanbul: Birsan Yayınevi, 36-37.
- Beg, M. and Beg, S. (2013). Scour Reduction around Bridge Piers: A Review. *International Journal of Engineering Inventions*, 2(7), 7-15.
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 211-252.
- Briaud J. L. (2006). Bridge Scour, *Geotechnical News*, 24(3).
- Cengal, Y. A., & Cimbala, J. M. (2004). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications* 1st edn Publication Company.

- Chang, W., Constantinescu, G., Lien, H., Tsai, W., Lai, J., and Loh, C. (2013). Flow Structure around Bridge Piers of Varying Geometrical Complexity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8), 812-826.
- Chou, P. Y. (1945). On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation. *Quarterly of Applied Mathematics*, 3(1), 38-54.4
- Craft, T. J., and Launder, B. E. (1996). A reynolds stress closure designed for complex geometries. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 17(3), 245–254.
- Dargahi, B. (1990). Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(10), 1197-1214.
- Das, S., Das, R., and Mazumdar, A. (2013). Comparison of Characteristics of Horseshoe Vortex at Circular and Square Piers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(17), 4373-4387.
- Demir, G. (2018). *Akarsuyu verev kesen köprülerde farklı akım şartlarında meydana gelen taban oyulmalarının deneysel olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 69.
- Demirci, M., Kocaman, S., ve Varlı, B. (2012). Farklı geometrilerdeki köprü kenar ayakları etrafındaki hız dağılımının sayısal incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(3), 161-173.
- Evans, M. W. Harlow, F. H., and Bromberg, E. (1957). *The particle-in-cell method for hydrodynamic calculations* (No. LA-2139). Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 15-20.
- Fael, C., Lança, R., and Cardoso, A. (2016). Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium scour depth at single piers. *International Journal of Sediment Research*, 31(3), 244-250.
- Fletcher, C. A. (1991). Fluid Dynamics: The Governing Equations. In *Computational Techniques for Fluid Dynamics 2*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1-46.
- Gamal, A.A.A., Hassan, I.M. and Shima, M.A. (2006). *3D numerical simulation of flow and clear water scour by interaction between bridge piers*. Tenth International Water Technology Conference, Alexandria, 899-915.
- Gentry, R. A., Martin, R. E., and Daly, B. J. (1966). An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems. *Journal of computational Physics*, 1(1), 87-118.
- Guo, J. (2011). Time-dependent clear-water scour for submerged bridge flows. *Journal of Hydraulic Research*, 49 (6), 744–749.
- Guo, J., Kerenyi, K., Pagan-Ortiz, J. E., & Flora, K. (2009). Bridge pressure flow scour at clear water threshold condition. *Transactions of Tianjin University*, 15(2), 79-94.

- Hess, J. L., and Smith, A. O. (1967). Calculation of potential flow about arbitrary bodies. *Progress in Aerospace Sciences*, 8, 1-138.
- Hong, S., Sturm, T., and Stoesser, T. (2015). Clear Water Abutment Scour in a Compound Channel for Extreme Hydrologic Events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(6), 1-12.
- Huang, W., Yang, Q., and Xiao, H. (2009). CFD modeling of scale effects on turbulence flow and scour around bridge piers. *Computers and Fluids*, 38(5), 1050-1058.
- Ismael, A., Gunal, M. and Hussein, H. (2014). Influence of bridge pier position according to flow direction on scour reduction. *International Journal of Structural Analysis and Design – IJSAD*, 1(2), 1-5.
- Jahangirzadeh, A., Basser, H., Akib, S., Karami, H., Naji, S., and Shamshirband, S. (2014). Experimental and numerical investigation of the effect of different shapes of collars on the reduction of scour around a single bridge pier. *PloS one*, 9(6), 1-7.
- Jameson, A. and Caughey, D. (1977). *A finite volume method for transonic potential flow calculations*. In 3rd Computational Fluid Dynamics Conference, 635.
- Karakurt, O. (2016). *Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altındaki oyulmanın incelenmesi*, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 82-85.
- Kaya, F. (2007). Girdaplı akışlarda türbülans modellerinin uygunluğunun incelenmesi *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12(1), 85-96.
- Kawaguti, M. (1953). Numerical Solution of the NS Equations for the Flow Around a Circular Cylinder at Reynolds Number 40', *Journal of the Physical Society of Japan*, 8, 747-757
- Keleşoğlu, B. (2010). *Yön Değiştiren Kanal Akışlarında Isı Transferinin İncelenmesi*, Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 26.
- Khosronejad, A., Kang, S., and Sotiropoulos, F. (2012). Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources*, 37, 73–85.
- Lin, C., Bennett, C., Han, J. and Parsons, R. (2014). Effect of Soil Stress History on Scour Evaluation of Pile-Supported Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6), 913-921.
- Link, O., Klischies, K., Montalva, G. and Dey, S. (2013). Effects of Bed Compaction on Scour at Piers in Sand-Clay Mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9), 1013-1019.
- Link, O. (2006, November). *Time scale of scour around a cylindrical pier in sand and gravel*. In Proceedings of Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, Tainan, Taiwan, 421-422.

- Lyn, D. A. (2008). Pressure-flow scour: A reexamination of the HEC-18 equation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 1015-1020.
- Mao, Y. (1986). *The interaction between a pipeline and an erodible bed*, PhD thesis, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 14,23.
- Marshall, E. M., and Bakker, A. (2004). Computational fluid mixing. *Handbook of industrial mixing: science and practice*, 257-343.
- Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000). *Bridge scour*. Colorado, U.S.A.: Water Resources Publication, 68.
- Melville, B. W., (1975). *Local scour at bridge sites*. PhD Thesis. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Melville, B. W., and Raudkivi, A. J. (1977). Flow characteristics in local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15(4), 373-380.
- Melville, B. (2008). *The physics of local scour at bridge piers*. In Fourth international conference on scour and erosion, 28-38.
- Munson, B. R., Young, D. F., and Okiishi, T. H. (2006). *Fundamentals of Fluid Mechanics*, USA.: John Wiley and Sons. Inc., 270-400.
- Nasr-Allah, T.H., Mohamed, Y.A., Abdel-Aal, and G.M., Awad, A.S. (2016). Experimental and numerical simulation of scour at bridge abutment provided with different arrangements of collars, *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1455–1463.
- Özalp, M. C. ve Bozkuş, Z. (2013). *Experimental investigation of local scour around bridge pier groups*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara. 4,11.
- Özcan, O. A. (2004). *Uçak Kanatlarının Cfd Analizi*, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 27-28.
- Peng, W. and Ram, B. (2016). Local scour around bridge abutments including effects of relative bed coarseness and blockage ratio. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(1), 51-59.
- Quezada, M., Tamburrino, A., and Niño, Y. (2018). Numerical simulation of scour around circular piles due to unsteady currents and oscillatory flows. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12(1), 354-374.
- Richardson, E. V., & Davis, S. R. (1995). *Evaluating scour at bridges* (No. HEC 18). United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications.
- Rotta, J. C. (1951). Statistische theorie nichthomogener turbulenz. *Zeitschrift für Physik*, 129(6), 547-572.

- Shan, H., Xie, Z., Bojanowski, C., Suaznabar, O., Lottes, S., Shen, J., and Kerenyi, K. (2012). *Submerged flow bridge scour under clear water conditions* (No. FHWA-HRT-12-034). Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Shirole, A. M., and Holt, R. C. (1991). Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. *Transportation Research Record*, 1290, 39-50.
- Sumer, B. M. ve Fredsoe, F. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. (17) Singapore, London. World Scientific Publishing Company, 20-75.
- Thom, A. (1933). The flow past circular cylinders at low speeds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 141(845), 651-669.
- Tulimilli, B. R., Lottes, S. A., Majumdar, P., and Kostic, M. (2011, January). *Three-dimensional scouring analysis for open channel pressure flow scour under flooded bridge decks*. In ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 975-981.
- Tunç, M. ve Emiroğlu, M. E. (2019). Yan Savak Akımında Sediment Taşınımının Deneysel İncelenmesi. *Su Vakfı Su Kaynakları Dergisi*, 4(1), 1-11.
- Umbrell, E.R., Young, G.K., Stein, S.M. and Jones, J.S. (1998). Clear-water contraction scour under bridges in pressure flow, *Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.*, 124(2), 236-240.
- Vaghefi, M., Ghodsian, M., and Salimi, S. (2016). The effect of circular bridge piers with different inclination angles toward downstream on scour. *Sadhana*, 41(1), 75-86.
- Verma, D. V. S., Setia, B. and Bhatia, U. (2004). Constriction Scour In Pressurized Flow Condition. *Scientific Information Database (SID)*, 17(3), 237-246.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method*. England: Longman Scientific and Technical.
- Wang, H., Tang, H., Xiao, J., Wang, Y. and Jiang, S. (2016). Clear-water local scouring around three piers in a tandem arrangement. *Science China Technological Sciences*, 59(6), 888–896.
- Xiong, W., Cai, C., Kong, B. and Kong, X. (2014). CFD Simulations and Analyses for Bridge-Scour Development Using a Dynamic-Mesh Updating Technique. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 887-993.
- Yanmaz, A. M. ve Altinbilek, H. D. G. A. (1991). Study of time-depenbent local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(10), 1247-1268.
- Yanmaz, A. M. (2002). *Köprü Hidroliği*, Ankara: METU Press.
- Zhao, Z., and Fernando, H. J. S. (2007). Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler–Euler coupled two-phase model. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(2), 121-142.

Zhu, Z. W., and Liu, Z. Q. (2012). CFD prediction of local scour hole around bridge piers. *Journal of Central South University*, 19(1), 273-281.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZPOLAT, Melek
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.09.1985, Elazığ
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (424) 241 11 45
 e-mail : odabasm@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Fırat Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2007
Lise	Ankara Ayrancı Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Elazığ Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
2013-2014	Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Yürüyüş |



GAZİ GELECEKTİR..