GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

FARKLI AKIM DURUMLARINDA KÖPRÜLERDE MEYDANA GELEN YEREL OYULMALARIN SAYISAL MODELLE SİMÜLASYONU

Zülfikar Erkay KEMALOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2019

Zülfikar Erkay KEMALOĞLU tarafından hazırlanan "FARKLI AKIM DURUMLARINDA KÖPRÜLERDE MEYDANA GELEN YEREL OYULMALARIN SAYISAL MODELLE SİMÜLASYONU" 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 : Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 28/08/2019

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 çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dökümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında 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.

Zülfikar Erkay KEMALOĞLU

28/08/2019

FARKLI AKIM DURUMLARINDA KÖPRÜLERDE MEYDANA GELEN YEREL OYULMALARIN SAYISAL MODELLE SİMÜLASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Zülfikar Erkay KEMALOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2019

ÖZET

Bu çalışmada, farklı akım koşullarında çeşitli uzunlukta köprü yan ayaklarının etrafında yerel ve ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen daralma oyulmalarının Flow-3D modeli kullanılarak üç boyutlu sayısal benzeşimi yapılmıştır. Çalışmada ilk önce literatürden elde edilen deney verileriyle sayısal modelin çözüm ağı gözü büyüklüğü ile sediment modeli parametre değerleri kalibre edilmiş ve modelde kullanılacak türbülans modeline karar verilmiştir. Daha sonra farklı deney setleri kullanılarak kalibre edilmiş sayısal modelin sonuçlarının doğruluğu test edilmiştir. Oyulma çukuru derinliğinin belirlenmesinde karışım katsayısı, yatak yükü katsayısı, içsel sürtünme açısı, maksimum sıkıştırma oranı ve türbülans karışım uzunluğu değerlerinin etkisinin çok az olduğu, düşük kritik Shields değerleri ile yüksek yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranının oyulma çukuru derinliği arttırdığı görülmüştür. Dört farklı çözüm ağı gözü boyutu ile yapılan hassasiyet analizleri sonucunda oyulma derinliğinin çözüm ağı gözü aralığına bağlı olduğu ve sediment dane çapının 10 katından küçük olan çözüm ağı gözü aralığı kullanılmasının uygun olmadığı belirlenmiştir. Modelde kullanılacak türbülans modeline karar verilirken, Large-Eddy Simulation (LES) türbülans modelinin daha küçük, Renormalized Group (RNG) türbülans modelinin ise daha büyük oyulma çukuru derinlikleri verdiği ve LES modeli analiz süresinin RNG modeline göre daha uzun olduğu görülmüştür. Daha sonra iki farklı uzunluktaki kenar ayak etrafında ve ayağı olmayan köprü tabliyesi altında basınçlı ve savak tipi akım şartlarında meydana gelen oyulma çukurunun kalibre edilmiş model kullanılarak benzeşimi yapılmış ve deney verileriyle model sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda farklı akım koşullarında meydana gelen oyulma çukuruna ait deney verileriyle kalibre edilmiş model sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91122
Anahtar Kelimeler	:	Yerel oyulma, daralma oyulması, temiz su oyulması, basınçlı akım, savak tipi akım, Flow-3D
Sayfa Adedi	:	99
Danışman	:	Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

NUMERICAL MODELLING OF SCOURING AT BRIDGES UNDER DIFFERENT FLOW CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Zülfikar Erkay KEMALOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2019

ABSTRACT

In this study, three dimensional numerical modelling of local scour around abutments with various lengths and contraction scour beneath a bridge deck without a pier was performed by using Flow-3D under different flow conditions. At first, experimental data from literature was used to calibrate the computational grid size and the parameters of sediment model and determine the turbulence model to be employed in the simulations. Then, the predictions of the calibrated numerical model were verified by different sets of data. It was noted that entrainment coefficient, bed load coefficient, angle of repose, maximum packing fraction and turbulence mixing length had an insignificant effect in prediction of maximum scour hole depth, while smaller values of critical Shields and higher ratios of Nikuradse bed surface roughness / local median grain diameter increased the maximum scour hole depth. Results of mesh size sensivity analysis conducted by using four different mesh sizes showed that the maximum scour hole depth depends on the mesh size and it is not appropriate to use mesh sizes smaller than ten times of the sediment mean grain size for numerical modelling. To decide the turbulence model to be employed in the model simulations showed that LES turbulence model underpredicted the maximum scour hole depth while the RNG model overestimated and computational time of LES model was longer than RNG model. Then, calibrated 3-D model was employed to simulate local scour around abutment with two different lengths under free surface flow condition and scouring beneath a bridge deck without a pier under pressurized and weir flow conditions. Furthermore, the model predictions were compared with experimental data. The results of the study showed that there was a good agreement between the calibrated model predictions of the maximum scour depth and the experimental data under different flow conditions.

Science Code	:	91122
Key Words	:	Local scour, contraction scour, clear water scour, pressure flow, weir type of flow, Flow-3D
Page Number	:	99
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT'e, tezin hazırlanması sırasında çok önemli yardımlarını gördüğüm sevgili eşim İnş. Yük. Müh. Nazlı PALAMUT KEMALOĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

FLOW-3D programı ile ilgili sürekli yardımlarını aldığım Nükleer Enerji Müh. Ömer Faruk KORKMAZ'a ve değerli İOG Mühendislik çalışanlarına ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm çalışma sürem boyunca desteklerini esirgemeyen bütün aile fertlerime, dostlarıma ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

3. AKARSU KESİTİNDE MEYDANA GELEN OYULMA MEKANİZMASI 27

3.1. Oyulmanın Tanımı 27

3.2. Köprü Ayağı Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalar 28

4. 3-BOYUTLU SAYISAL MODEL İLE SEDİMENT TAŞINIM BENZEŞİMİ 33

4.1. 3-Boyutlu Sayısal Model Genel Bilgileri 33

4.2. Hidrodinamik Model Temel Eşitlikleri 33

4.3. Çözüm Ağı 34

4.4. Sediment Taşınım Modeli 38

4.4.1 Sediment çökelme modeli 39

4.4.2 Sediment yayılım modeli 42

4.4.3 Sediment girişim modeli 42

4.4.4 Sürüntü maddesi taşınım modeli 47

4.4.5 Sediment depolanma modeli 49

Sayfa

5. KÖPRÜLERDE MEYDANA GELEN OYULMANIN SAYISAL MODEL BENZEŞİMİ 51

5.1. Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Yerel Oyulmanın Benzeşimi 51

5.1.1. Deneysel çalışma 51

5.1.2. Hidrodinamik model kurulumu 53

5.1.3. Sediment taşınımı model kurulumu 57

5.1.4. Sayısal model kalibrasyonu 60

5.1.5. Oyulma derinliği üzerinde etkili olan değişkenlerin hassasiyet analizleri 68

5.1.6. Türbülans modelinin simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi 74

5.1.7. Kalibre edilmiş sayısal model simülasyonu 77

5.1.8. Sayısal model simülasyonları ve sonuçlarının yorumlanması 81

5.2. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Durumlarında Köprü Tabliyesi Altında Daralma Oyulması Benzeşimi 84

5.2.1. Deneysel çalışma 84

5.2.2. Sayısal model simülasyonları ve sonuçları 84

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 91

KAYNAKLAR 95

ÖZGEÇMİŞ 99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Model senaryoları (Brethour ve Burnham, 2010) 6

Çizelge 2.2. Sayısal analizlerde kullanılan büyüklükler (Kayser ve Gabr, 2013)..... 12

Çizelge 2.3. Karami ve diğerlerinin (2014) yapmış olduğu laboratuvar deneyleri 19

Çizelge 2.4. Flow 3D modellemesi kullanılan parametreler..... 20

Çizelge 2.5. Simülasyon karakteristikleri (Choufu ve diğerleri, 2019) 21

Çizelge 2.6. Simülasyonlarda elde edilen maksimum oyulma derinlikleri ve maksimum birikme yükseklikleri (Choufu ve diğerleri, 2019) 22

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan laboratuvar verileri (Kayatürk, 2005) 53

Çizelge 5.2. Sediment benzeşimi programda kabul edilen ve kalibrasyon çalışmalarında kullanılan parametreler 60

Çizelge 5.3. Farklı θ_{cr} parametreleri için elde edilen oyulma çukuru derinlikleri 61

Çizelge 5.4. Farklı C_e katsayıları için elde edilen oyulma çukuru derinlikleri 62

Çizelge 5.5. Farklı C_b katsayısıları için elde edilen oyulma derinlikleri 63

Çizelge 5.6. Farklı Φ açıları için elde edilen oyulma derinlikleri..... 64

Çizelge 5.7. k_s/D_{50} parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi 65

Çizelge 5.8. Maksimum sıkıştırma oranı parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi 66

Çizelge 5.9. T_{LEN} parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi 67

Çizelge 5.10. θ_{cr} ve k_s/D_{50} parametrelerinin birlikte maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi 68

Çizelge 5.11. θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 7,5 ve θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 10 seçeneklerinin tüm deney süresi boyunca maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi 70

Çizelge 5.12. Kalibrasyon çalışması sonucu seçilen sediment model parametreleri..... 71

Çizelge 5.13. Ağ aralığı hassasiyet analizleri maksimum oyulma çukuru derinlikleri .. 73

Çizelge 5.14. LES ve RNG türbülans modellerine ait maksimum oyulma değerleri 76

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.15. L_a=20 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafındaki maksimum oyulma derinliği 78

Çizelge 5.16. L_a=15 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı modeli maksimum oyulma değerleri..... 80

Çizelge 5.17. Sediment benzeşimi modellerinde kullanılan parametreler..... 86

Çizelge 5.18. Sediment benzeşimi deney ve model sonuçları kıyaslanması 86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kenar ayakların plan görünüşleri: a) Dikdörtgen kenar ayak, b) Trapez kenar ayak, c) Silindir kenar ayak (Demirci ve diğerleri, 2012) 3

Şekil 2.2. Analizlerden elde edilen hız dağılımlarının Schlichting (1987) ve Keulegan'ın (1938) formülü ile hesaplanan hız dağılımıyla karşılaştırılması (Yıldız, 2014) 4

Şekil 2.3. Laboratuvar fiziksel modeli (Yıldız, 2014) 5

Şekil 2.4. Fiziksel modelin gösterimi (Brethour ve Burnham, 2010)..... 6

Şekil 2.5. a) Deney verileri (Gladstone ve diğerleri, 2010) ; b) Flow-3D model sonuçları (Brethour ve Burnham, 2010) 7

Şekil 2.6. Ardışık üç köprü ayağı etrafındaki simülasyon sonuçları: a) Hız dağılımı, b) Temiz su oyulması ve birikme değerleri (Wei ve diğerleri, 2014)..... 8

Şekil 2.7. Chatterjee (1994) tarafından gerçekleştirilmiş kapak altı akımın neden olduğu oyulma deneyi ve sonuçları (Wei ve diğerleri, 2014)..... 9

Şekil 2.8. Chatterjee (1994) kapak altı akımın neden olduğu oyulmanın Flow-3D sonuçlarıyla karşılaştırılması (Wei ve diğerleri, 2014)..... 9

Şekil 2.9. Köprü ayağı grubunda yerel oyulmanın Flow-3D ile benzeşimi (Vasquez ve Walsh, 2009) 10

Şekil 2.10. Üç adet köprü ayağı etrafında meydana gelen Flow-3D yerel oyulma simülasyonu (Vasquez ve Walsh, 2009)..... 10

Şekil 2.11. Paglaria ve diğerleri (2008): (a) Jet akımı oyulması için kullandıkları düzeneği, (b) Flow-3D modeli oyulma sonuçları 11

Şekil 2.12. Flow-3D modeli (Kayser ve Gabr, 2013)..... 12

Şekil 2.13. Model oyulma derinliği sonuçları ile arazi ölçüm sonuçlarının kıyaslanması: a) C_e b) C_d c) C_b (Kayser ve Gabr, 2013) 13

Şekil 2.14. Modele ait oyulma derinliği/ayak çapı oranının nehir gücü arazi ölçüm sonuçları ve ampirik denklem sonuçları ile kıyaslanması (Kayser ve Gabr, 2013) 14

Şekil 2.15. Düz kanalda dairesel burunlu köprü yan ayağı etrafındaki akım (Göğüş ve Köken, 2011)..... 15

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.16. Deneylerde kullanılan dairesel burunlu köprü yan ayağı modeli ve büyüklükleri (Göğüş ve Köken, 2011)..... 16

Şekil 2.17. a) Sayısal model kurulumu; b) Ayak etrafındaki çözüm ağı (Göğüş ve Köken , 2011)..... 17

Şekil 2.18. Boyuna akım yönünde boyutsuz ortalama hız değerleri: a) Sayısal benzeşim; b) Sayısal ortama aktarılmış deney ölçümleri (Göğüş ve Köken, 2011) 18

Şekil 2.19. Köprü yan ayağı etrafında ortalama akım döngüsel yapıları (Göğüş ve Köken, 2011)..... 18

Şekil 2.20. Sayısal model kurulumu (Choufu ve diğerleri, 2019) 20

Şekil 2.21. Simülasyonlarda elde edilen sediment kotu değişimleri (Choufu ve diğerleri, 2019)..... 23

Şekil 2.22. Sayısal model ve çözüm gözü ağı blokları görünüşleri (Guodong ve diğerleri, 2013)..... 24

Şekil 2.23. Mahmuz yapısı etrafında meydana gelen oyulmanın zamanla gelişimi (Guodong ve diğerleri, 2013)..... 24

Şekil 2.24. Mahmuz yapısı y= 0,1 m kesiti oyulmanın zamanla gelişimi (Guodong ve diğerleri, 2013)..... 25

Şekil 3.1. Köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin değişimi (Yanmaz, 2002) ... 28

Şekil 3.2. Köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002)..... 29

Şekil 3.3. Kenar ayaklar etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002) 31

Şekil 4.1. Flow-3D hücreleri tanımlama (Flow Science, 2014) 35

Şekil 4.2. Flow-3D hücrelerde katı geometri tanımlama (Flow Science, 2014)..... 35

Şekil 4.3. Flow-3D hücrelere ayırma ve geometri tanımlama adımları (Flow Science, 2014) 36

Şekil 4.4. Flow-3D hücre blokları oranı (Flow Science, 2014)..... 36

Şekil 4.5. Flow-3D iç içe hücre blokları tanımlama (Flow Science, 2014)..... 37

Şekil 4.6. Flow-3D ardışık hücre blokları tanımlama (Flow Science, 2014) 37

Şekil 4.7. Flow-3D hücre doluluğu şematik gösterimi (Flow Science, 2014)..... 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. Flow-3D sediment taşınım modelleri (Flow Science, 2019) 39

Şekil 4.9. Sediment sürüklenme katsayısı (Flow Science, 2014) 40

Şekil 4.10. Shields parametrelerinin eğrisi (Flow Science, 2014) 43

Şekil 4.11. Shields-Rouse denklemi sonucunda elde edilen Shields abağı (Guo 1990; 2003) 44

Şekil 4.12. Shields parametresi eşitlikleri ve eğrileri (Guo, 2003; Soulsby ve Whitehouse, 1997) 45

Şekil 4.13. Egiazaroff bağıntısına göre Shields eğrisindeki uyarlama (Brethour ve Burnham, 2010) 46

Şekil 4.14. Eğimli sediment yatağı ve akış yönü (Wei ve diğerleri, 2014) 47

Şekil 4.15. Taban kayma gerilmesi 1000 g/cm/s² için Mastbergen - Van Den Berg (2003) ve Meyer-Peter-Mueller sediment taşınımı yaklaşımları grafiği ve Flow-3D toplam sürüntü maddesi taşınım hızı eğrisi (Brethour ve Burnham, 2010) 49

Şekil 5.1. Laboratuvar deney kanalı boy kesiti (Kayatürk, 2005) 52

Şekil 5.2. Kararlı akım koşullarının elde edildiği ön analiz modeli 54

Şekil 5.3. Kararlı akım koşullarının elde edildiği ön analiz modeli sınır koşulları 54

Şekil 5.4. Kararlı akım koşulları düşey (z) yönlü hız dağılımı (m/s) plan görünüşü: (a) L_a= 35 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (c) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm..... 56

Şekil 5.5. Kanal boyunca kararlı akım koşulları x yönü hız dağılımı (m/s) plan görünüşü: (a) L_a= 35 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (c) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm 56

Şekil 5.6. Kanal boyunca kararlı akım koşulları akım derinliği (m) plan görünüşü: (a) L_a= 35 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (c) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm..... 57

Şekil 5.7. Sediment benzeşimi örnek modeli sınır koşulları..... 59

Şekil 5.8. θ_{cr} parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi..... 61

Şekil 5.9. C_e parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi..... 62

Şekil 5.10. C_b parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi.... 63

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.11. Φ parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi..... 64

Şekil 5.12. k_s/D_{50} parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi 65

Şekil 5.13. Maksimum sıkıştırma oranı parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi 66

Şekil 5.14 T_{LEN} parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi. 67

Şekil 5.15. θ_{cr} ve k_s/D_{50} parametrelerinin birlikte maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi 69

Şekil 5.16. θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 7,5 ve θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 10 seçeneklerinin tüm deney süresi boyunca maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi..... 69

Şekil 5.17. Ağ gözü büyüklüğünün maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi..... 72

Şekil 5.18. L_a=35cm ve B_a=10cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafındaki oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları 74

Şekil 5.19. LES ve RNG türbülans modellerine ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri..... 75

Şekil 5.20. LES türbülans modeli ile oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları 77

Şekil 5.21. L_a=20 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafındaki maksimum oyulma çukuru derinliği 77

Şekil 5.22. L_a=15 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı modeli maksimum oyulma çukuru derinliği 79

Şekil 5.23. Köprü kenar ayaklı etrafındaki oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları: (a) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm..... 81

Şekil 5.24. Deneysel ve modelleme maksimum oyulma profilleri: (a) Basınçlı Akım 1, (b) Basınçlı Akım 2, (c) Savak Tipi Akım 1..... 88

Şekil 5.25. Deneysel ve modelleme boyutsuzlaştırılmış oyulma profilleri: (a) Basınçlı Akım 1, (b) Basınçlı Akım 2, (c) Savak Tipi Akım 1..... 89

Şekil 5.26. Flow-3D programı köprü tabliyesi altı oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları: (a) Basınçlı Akım 1, (b) Basınçlı Akım 1, (c) Savak Tipi Akım 1..... 90

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
(A_x, A_y, A_z)	Kontrol hacminde akışa elverişli alan, m^2
b	Boşluklu veya gözenekli ortamda kayıplar
B_a	Kenar ayak genişliği, m
B_0	Akarsu genişliği, m
C	Kohezyon, N/m^2
C_b	Yatak yükü katsayısı
C_c	Daralma katsayısı
C_d	Direnç katsayısı
C_e	Karışım katsayısı
C_s	Sedimentin yerel konsantrasyonu
cm	Santimetre
D_s	Sediment danesi medyan çapı, mm
D_{10}	Sedimentin %10'unun elekten geçtiği dane çapı, mm
D_{50}	Yatak malzemesi medyan dane çapı, mm
D_{60}	Sedimentin %60'ının elekten geçtiği dane çapı, mm
$D_{84,1}$	Sedimentin %84,1'inin elekten geçtiği dane çapı, mm
f	Viskoz etki ivmelenmesi, m/s^2
f_l	Akışkanın hacimsel doluluk oranı
f_s	Sediment danesinin hacimsel doluluk oranı
f_{packed}	Depolanmış haldeki sedimentin hacimsel oranı
F	Ağırlık kuvveti, N
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi, m/s^2
G	İvme, m/s^2
k	Türbülans kinetik enerjisi, N.m
K	Sediment danesine ait sürüklenme fonksiyonu
K_a	Akarsu güzergahı etkisini gösteren katsayı

Simgeler	Açıklamalar
K_b	Menba taban pürüzlülüğü katsayısı
K_c	Şevlerin pürüzlülük katsayısı
K_d	En kesit geometri etkisini gösteren katsayı
K_f	Dane şekil faktörü
K_s	Ayak şekil faktörü
K_g	Ayak grup etki faktörü
K_r	Ayak yüzeyi pürüzlülük faktörü
K_v	Ayak yüzeyiyle düşey arasındaki açı etkisi
k_s	Nikuradse pürüzlülük katsayısı, mm
K_α	Verevlik açısının etki faktörü
kg	Kilogram
lt	Litre
L	Uzunluk
m	Metre
mm	Milimetre
m^3	Metreküp
n_s	Birikmiş haldeki sediment yatağının normali
N	Newton
Q	Debi, m^3/sn
Q_b	Tabanda hareket eden toplam sediment akışı, m^3/sn
p	Basınç, Pa
Pa	Paskal
Re	Reynolds sayısı
R_{SOR}	Karışım nedeniyle kullanılan yoğunluk bazlı terim
$s_ç$	Kontrol hacminden çıkan sediment yükü, m^3/s
s_g	Kontrol hacmine giren sediment yükü, m^3/s
s	Saniye
S_o	Taban eğimi
t	Zaman, sn
T_{LEN}	Türbülans karışım uzunluğu, m
(u, v, w)	Kartezyen koordinatta hız bileşenleri, m/s
$\bar{u}$	Ortalama akım hızı, m/s

Simgeler	Açıklamalar
u_c	Tabanda sediment hareketini başlatan akım hızı, m/s
u_s	Sediment danesinin akım içindeki hızı, m/s
u_*	Kayma gerilmesi hızı, m/s
u_r	Sediment danesinin göreceli hızı, m/s
V	Kontrol hacmi, m^3
V_a	Yaklaşım kanalı ortalama akım hızı, m/s
V_{cr}	Kritik akım hızı, m/s
V_f	Akışkanın hesap hücresindeki doluluk oranı
(x, y, z)	Kartezyen koordinatları
x_m	Ölçüm noktasının akım doğrultusundaki uzaklığı, m
x_{max}	Maksimum oyulma çukuru derinliğinin konumu, m
y_a	Yaklaşım akım derinliği, cm
y_s	Oyulma çukuru derinliği, cm
y_{smax}	Maksimum oyulma çukuru derinliği, cm
ε	Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı
ν	Suyun kinematik viskozitesi, kg/m.s
ρ	Suyun yoğunluğu, g/cm^3
ρ_s	Sediment yoğunluğu, g/cm^3
$\overline{\rho}$	Ortalama karışım yoğunluğu, g/cm^3
α	Açı, derece
β	Sediment yatağının açısı, derece
ω	Ampirik kaldırma-karışım katsayısı
Y	Hareketsiz sınırdan uzaklık
Φ	Sediment içsel sürtünme açısı, derece
κ	von Karman sabiti
σ_g	Sediment dane dağılımı standart sapması
δ_ρ	Bölgedeki yoğunluktaki toplam değişiklik
τ_{cr}	Kritik taban kayma gerilmesi, N/m^2
τ_o	Taban kayma gerilmesi, N/m^2
ϕ_n	Doğal kayma açısı, derece
ψ	Akış yönü ile eğimli yüzey arasındaki açı, derece
θ_s	Shileds parametresi

Simgeler	Açıklamalar
θ_{cr}	Kritik Shileds parametresi
°	Derece
%	Yüzde

Kısaltmalar	Açıklamalar
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ISEEP	In-Situ Erosion Evaluation Probe
LES	Large-Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RNG	Renormalized Group
SSIIM	Sediment Simulation In Intakes with Multiblock
VOF	Volume of Fluid
1-B	Bir Boyutlu
2-B	İki Boyutlu
3-B	Üç Boyutlu
3-D	Three Dimensional

1. GİRİŞ

Ülkemizde özellikle köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulmalar nedeniyle birçok köprü yıkılmakta veya hasar görmektedir (Koçyiğit ve Karakurt, 2016). Bu durum hem can ve mal kayıplarına yol açmakta, hem de ulaşım sistemlerinin güvenli ve ekonomik kullanımını sekteye uğratmaktadır. Bu nedenle su-zemin-yapı etkileşimi konusunun incelenmesi köprü tasarımcıları tarafından artan bir öneme sahip olmaktadır. Türkiye'de yıkılmış veya ağır hasar görmüş akarsu köprüleri incelendiğinde, hidrolik ve yapısal projelendirmede eksiklikler olabileceği gibi havza hidrolojik davranışı ile meteorolojik koşullarda meydana gelen farklılıklarla taşkınların oluşumu ve etkisinin de büyük olduğu söylenebilir. Akarsu köprülerini etkileyecek hidrolik etkenler arasında köprü menbasında ve köprü ayakları etrafında aşırı kabarma, köprü ayakları arasında sediment ve atık malzeme birikmesi, tabanda ve köprü ayakları etrafında artan oyulma miktarı, köprü açıklığında hidrolik sıçrama oluşması, vb. olarak sıralanabilir (Yanmaz, 2002).

Türkiye'de günümüze kadar akarsu köprülerinde ciddi hasara veya yıkılmaya neden olan birçok taşkın olayı yaşanmıştır. Örneğin, taşkın nedeniyle ağır hasar görmüş veya çökmüş nehir köprüleri arasında Ocak 2010'da Muğla'da Gökçeler, 2011'de Ordu'da Curidere, Osmaniye'de Yarpuz I, Sinop'ta Güzelceçay 2 ve Abdest, Adana'da Gökdere ve 2012'de Mersin'de Kadıköy, Antalya'da Dolbazlar; 2014 yılı ocak ayında Malatya Doğanşehir'de biri eski diğeri yeni iki nehir köprüsü hasarı vakaları sayılabilir. Dolayısıyla, taşkın ve akarsu seviyelerinde ani ve önemli değişiklikler olduğu zaman gözlemlenen hidrolik olaylar, bunların akarsu köprüleri üzerindeki etkileri ve doğurabilecekleri sonuçların ayrıntılı olarak incelenmesi önem arz etmektedir (Koçyiğit, Akay ve Yanmaz, 2016).

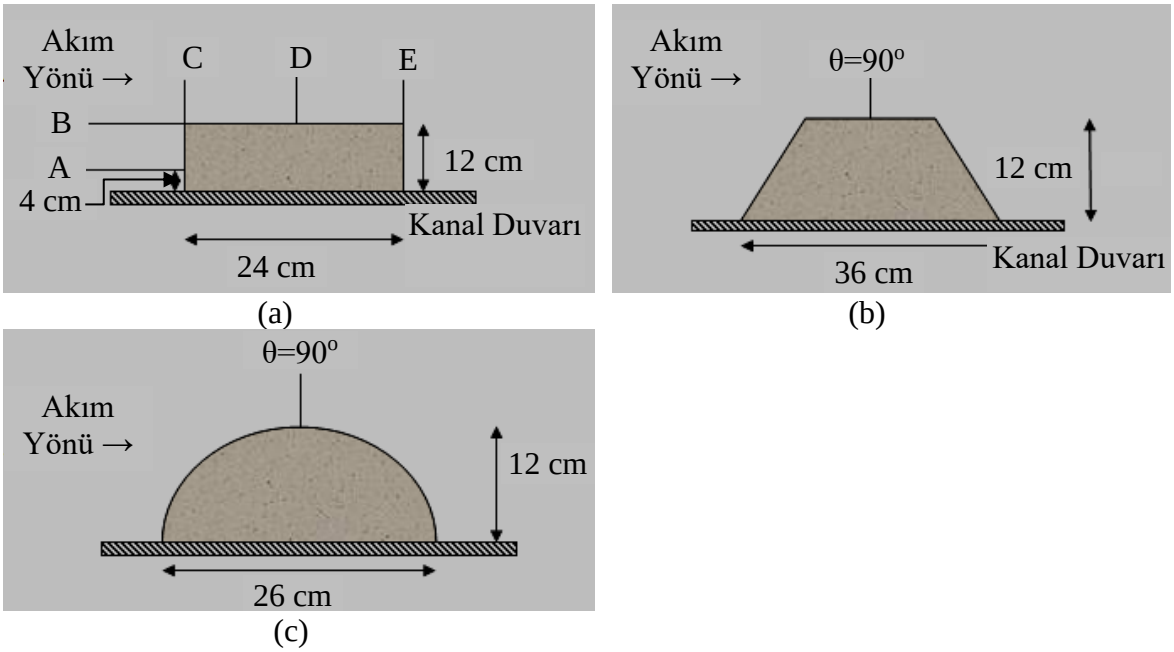
Yapılan istatistiksel çalışmalar ve gözlemler, köprülerde meydana gelen yıkılma veya hasarların çoğunun oyulma sebebiyle olduğunu göstermiştir (Demirci, Kocaman ve Varlı, 2012). Bir köprü tabanında meydana gelebilecek oyulma; genel taban oyulması, kesitin daralması nedeniyle oluşan daralma oyulması ve orta ve/veya kenar ayaklarda meydana gelen oyulmalar şeklinde sınıflandırılabilir. Oyulmanın şekli de; kısa ve/veya uzun dönemli taban oyulması ve şev erozyonu şeklinde oluşmaktadır. Oyulma mekanizması çok karmaşık olup bir çok parametreye bağlı olarak gelişmektedir. Bu nedenle evrensel nitelik

taşıyan bir hesap yöntemi oluşturulamamıştır. Günümüzde laboratuvar çalışmaları ve sayısal benzeşim yöntemleriyle yapılan çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez kapsamında, daha önce laboratuvar ortamında fiziksel modeli yapılmış olan köprü kenar ayakları etrafında ve farklı akım koşullarında köprü tabliyesi altında meydana gelmiş olan yerel oyulma deneylerinin, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan Flow-3D kullanılarak benzeşimi yapılmıştır (Kayatürk, 2005; Karakurt, 2016). Köprü kenar ayakları etrafında meydana gelen oyulmaların incelendiği çalışmada, serbest akım durumunda laboratuvar deneylerinden elde edilmiş ölçüm verileri kullanılarak sayısal model kalibre edilmiş ve farklı deney verileri kullanılarak model benzeşim sonuçları değerlendirilmiştir. Sonrasında köprü tabliyesi altında basınçlı ve savak tipi akım durumlarında gerçekleştirilmiş deney verileriyle daha önceki çalışmada kalibre edilmiş olan 3-B (üç boyutlu) sayısal modelin sonuçlarının doğruluğu irdelenmiştir. Tezin 2. Bölümünde literatürde yer alan köprü ayağı etrafında oluşan akım ve sediment taşınımı ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 3'te sediment taşınım mekanizması anlatılmış ve kenar ayak etrafında oluşan yerel oyulma hakkında bilgilere yer verilmiştir. 4. Bölümde, çalışma kapsamında kullanılan sayısal program Flow- 3D'ye ait genel hidrodinamik bağıntılar anlatılmış, sediment taşınım temel eşitlikleri ile model detaylarına yer verilmiştir. Bölüm 5'te sayısal modelin kurulum ve kalibrasyonunda kullanılan deneysel çalışma ile Flow-3D model kurulumu, kalibrasyonu anlatılmış ve deney verileri ile model tahminleri karşılaştırılarak modelin oyulma çukurunu tahmin edebilme kapasitesi değerlendirilmiştir. Ayrıca basınçlı ve savak tipi akım durumlarında ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulmanın benzeşimi yapılmış, model tahminleri ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Bölüm 6'da ise çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Büyük taşkınların köprüler üzerinde büyük hasarlara yol açması ve hatta köprüleri yıkması genellikle tabanda ayaklar etrafında meydana gelen oyulmalar sebebiyle oluşmaktadır. Konu ile ilgili literatürde çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve sayısal yaklaşımlar ile birlikte, konu ile ilgili yapılmış olan çok sayıda sayısal model çalışmaları da mevcuttur. Örneğin sorunların anlaşılabilmesi ve gerekli önlemlerin alınabilmesi amacıyla Demirci, Kocaman ve Varlı (2012) dikdörtgen, silindir ve trapez geometriye sahip köprü kenar ayağı (Şekil 2.1) civarındaki hız dağılımını incelemek için Flow-3D bilgisayar programını kullanarak 3 boyutlu sayısal modelleme yapmışlar ve analizlerden buldukları sayısal model sonuçlarını deney verileriyle karşılaştırmışlardır.

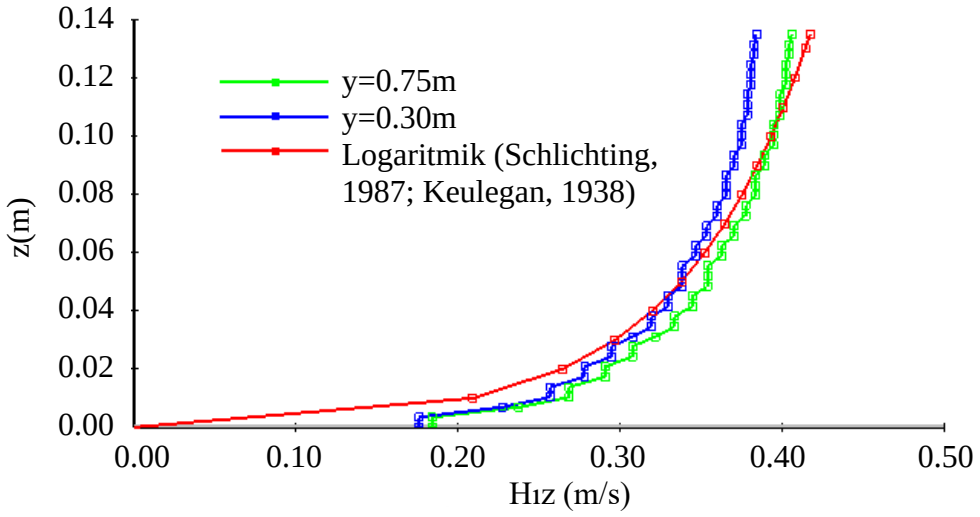


Şekil 2.1. Kenar ayakların plan görünüşleri: a) Dikdörtgen kenar ayak, b) Trapez kenar ayak, c) Silindir kenar ayak (Demirci ve diğerleri, 2012)

Demirci ve diğerleri (2012), Şekil 2.1'de görülen dikdörtgen, trapez ve yarım daire enkesit şekline sahip kenar ayaklar etrafında Barbhuiya ve Dey (2004) tarafından yapılmış olan deneysel çalışmada Akustik Doppler Hız Ölçer (Acustic Doppler Velocimeter, ADV) ölçüm aleti yardımıyla elde edilmiş olan hız dağılımlarını kullanarak sayısal modelin kalibrasyonunu yapmışlardır. Simülasyonlarda Flow-3D modelinin sahip olduğu k-ε, Tek Denklem-Türbülans Kinetik Enerji, Renormalized Group (RNG) ve Large-Eddy

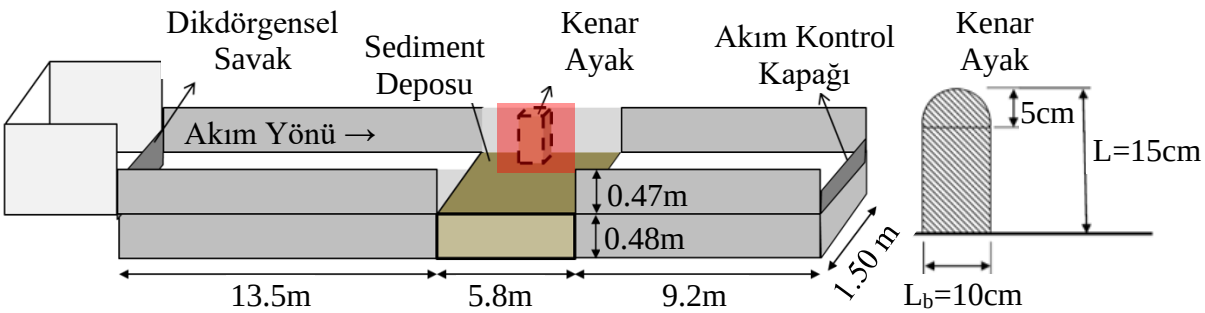
Simulation (LES) modellerini ayrı ayrı kullanarak benzeşimler yapılmış ve elde edilen model sonuçları ile deney verileri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar deney verilerine en yakın hız dağılımlarını genel olarak k-ε ve RNG türbülans moldellerinde, 1 cm'lik ağ aralığında elde etmişlerdir. Buna karşın hız alanında ani değişimlerin, çevrintilerin ve yoğun türbülans hareketlerinin olduğu cidara yakın kısımlarda deney sonuçlarıyla farklılıklar oluştuğunu ve bu bölgelerde LES modelinin daha küçük ağ aralıklarında, daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Analizler sonucunda akıma ait hızların Flow-3D programı yardımıyla yeterli doğrulukta benzeşiminin yapılabileceği kararına varmışlardır. Ancak söz konusu çalışmada , sadece akım yönündeki hız dağılımları incelenmiş, diğer doğrultudaki hız bileşenlerine ait değerlendirmeler yapılmamıştır.

Yıldız (2014), bir dizi deney yaparak oyulma esnasında köprü kenar ayakları etrafında zamana bağlı olarak akım karakteristiklerinde oluşan değişimleri incelemiştir. Deneyler 6,2 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve 0,2 m derinliğinde dikdörtgen bir kanalda yapılmış ve elde edilen deney verileri yardımıyla Flow-3D (versiyon 10.1) modeli kalibre edilerek yerel oyulma benzeşimi yapılmıştır. Flow-3D analizlerinin ilk aşamasında, RNG türbülans modelini kullanarak Schlichting (1987) ve Keulegan'ın (1938) geliştirdiği, düşey duvar hız dağılımı formülüyle elde ettiği hız dağılımını kabul edilebilir doğrulukla elde etmiştir. Kanalın tam ortasından (y= 0,75 m) ve kenara yakın bölümünden (y= 0,30 m) alınan iki kesitte teorik formülden elde edilen sonuçlar ile analiz verileri karşılaştırılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Analizlerden elde edilen hız dağılımlarının Schlichting (1987) ve Keulegan'ın (1938) formülü ile hesaplanan hız dağılımıyla karşılaştırılması (Yıldız, 2014)

Çalışmanın ikinci aşamasında, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi deney kanalına 0,15 m uzunluğunda dairesel uçlu dikdörtgen kesitli bir kenar ayak yerleştirilmesi suretiyle ayak etrafındaki hız alanı ölçülmüştür. Daha sonra Flow-3D'de RNG ve LES türbülans çözüm modelleri kullanılarak kanalda oluşan hız alanı hesaplanmış ve deney verileri ile model sonuçları karşılaştırılmıştır.



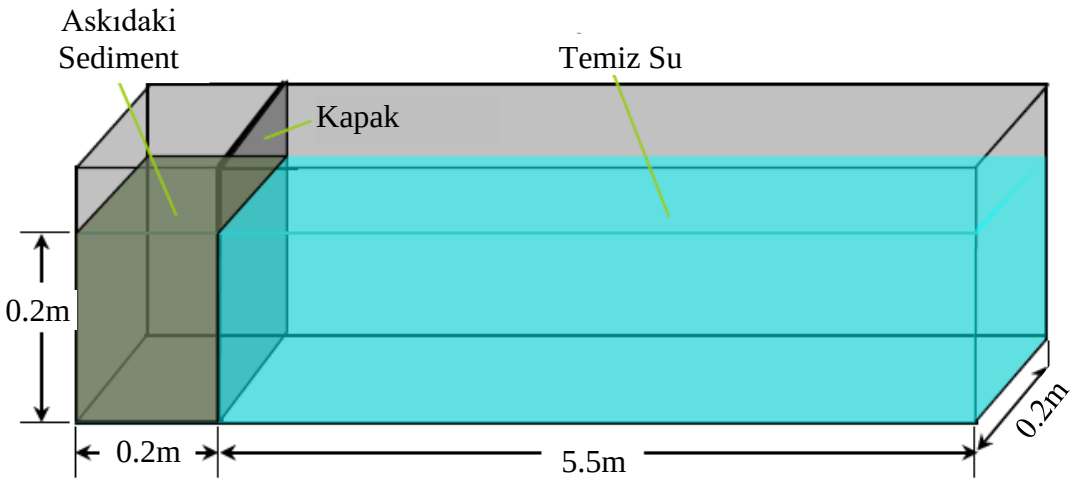
Şekil 2.3. Laboratuvar fiziksel modeli (Yıldız, 2014)

Her iki türbülans modelinin kullanılması durumunda laboratuvarda ölçülen hız değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiş, fakat LES türbülans modelinin daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Flow-3D analizlerinin üçüncü aşamasında, RNG ve LES türbülans modelleri kullanılarak aynı deney şartları altında kenar ayak etrafında meydana gelen yerel oyulma çukuru için benzeşim yapılmış ve modelden elde edilen oyulma çukuru şekli ve derinliği laboratuvar verileriyle karşılaştırılmıştır. RNG türbülans modeliyle elde edilen model sonuçlarında, oyulmanın yeri, doğru olarak tahmin edilemediği için sayısal çözümün yeterli olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte daha iyi sonuçlar veren LES türbülans çözüm modeli kullanılarak sediment parametrelerinde kalibrasyon çalışmaları yapılmış ve laboratuvar verileriyle model sonuçlarının yakınsamasına çalışılmıştır. Kalibrasyon çalışmaları sonucunda oyulma çukurunun yeri doğru olarak saptanırken, oyulma çukuru derinliğinde laboratuvar verilerine göre büyük farklılıklar olduğu, %40 ~ %70 arasında değişen hata oranları ile ölçülen değerlere yakınsadığı tespit edilmiştir.

Flow-3D modeli ile yapılmış olan bir diğer çalışmada Brethour ve Burnham (2010), programın hesaplarda kullandığı sediment taşınım formüllerini açıklamış, sediment taşınım model aşamalarını incelemiş ve iki adet oyulma analizi yapmıştır. Araştırmacılar,

Flow-3D'de bulunan tüm türbülans modellerinin kullanılabileceğini ama RNG türbülans modelinin kullanılmasının daha uygun olacağını belirtmişlerdir. Bu modelin daha iyi sonuç verebilmesi için türbülans karışım uzunluğunun, program tarafından dinamik olarak hesaplanmasına izin verilmeyip kullanıcı tarafından hidrolik derinliğin %7'si olarak girilmesini önermektedir. Çalışmada yapılmış olan sediment taşınım analizlerinin ilkinde, Gladstone, Phillips ve Sparks (1998) tarafından uzun, dikdörtgen kesitli sediment tankının kapakları açıldıktan sonra sedimentin kanal içinde askıdaki hareketini deneysel olarak inceledikleri laboratuvar deney verilerini kullanmışlar ve Şekil 2.4'te gösterildiği gibi Flow-3D programında benzeşimini yapmışlardır.



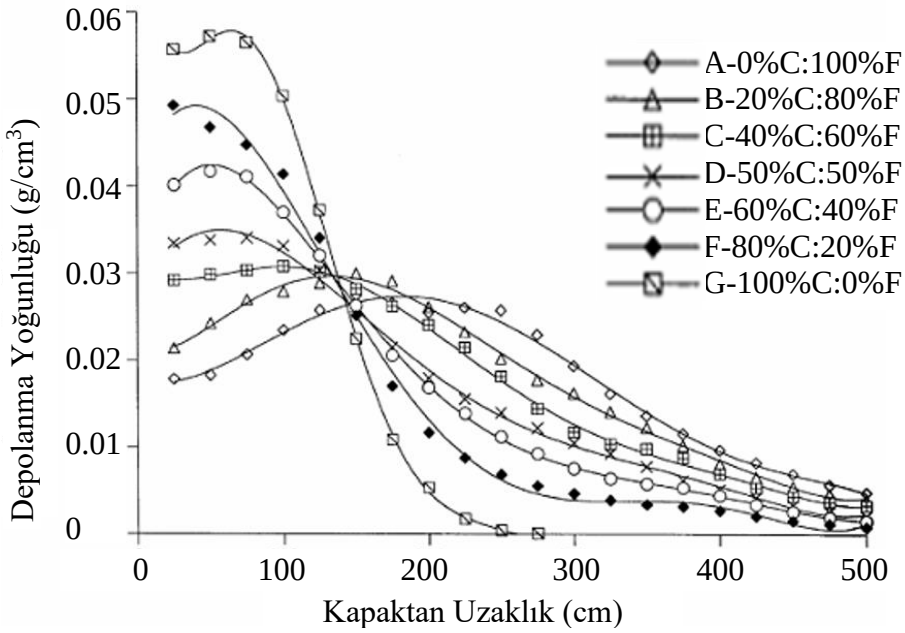
Şekil 2.4. Fiziksel modelin gösterimi (Brethour ve Burnham, 2010)

Çizelge 2.1'de verilmiş olan, her birinde çeşitli oranlarda 25 µm çaplı ince ve/veya 69 µm çaplı iri daneli sediment bulunan 7 farklı senaryo için model benzeşimi yapılmıştır.

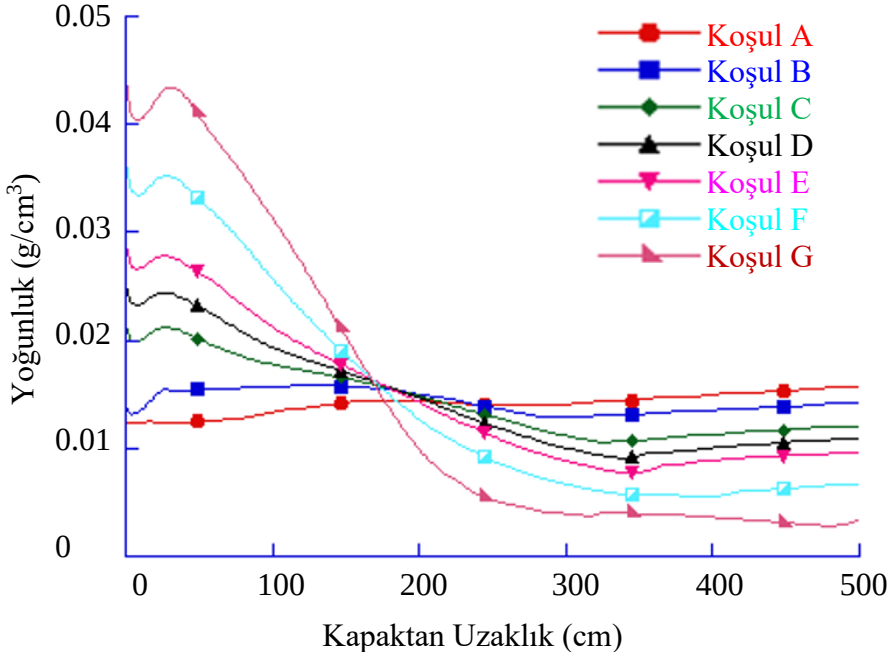
Çizelge 2.1. Model senaryoları (Brethour ve Burnham, 2010)

	Koşul A	Koşul B	Koşul C	Koşul D	Koşul E	Koşul F	Koşul G
İnce Daneli	%100	%80	%60	%50	%40	%20	%0
İri Daneli	%0	%20	%40	%50	%60	%80	%100

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere benzeşim sonuçları ile deney verileri birbirine çok yakın bulunmuştur.



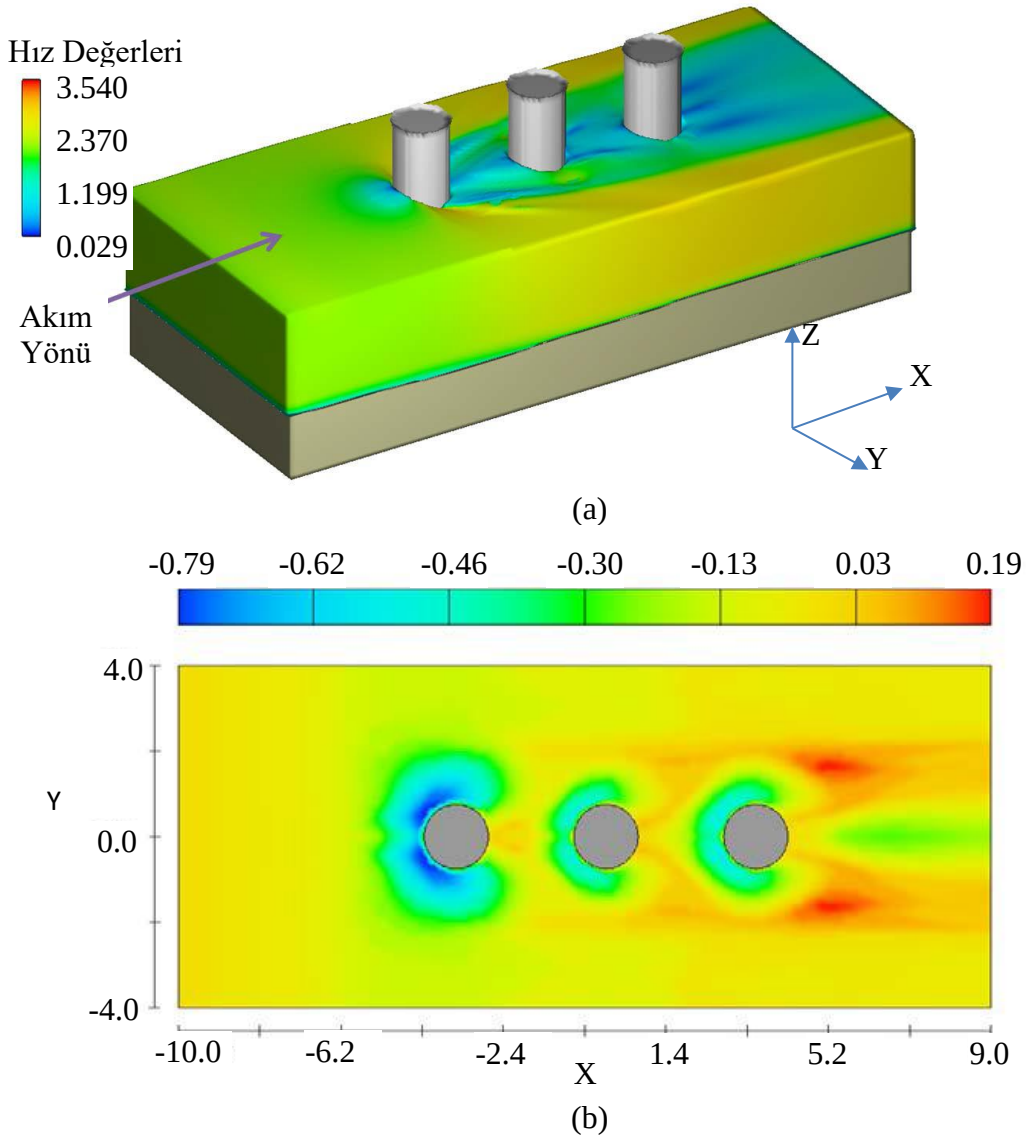
(a)



(b)

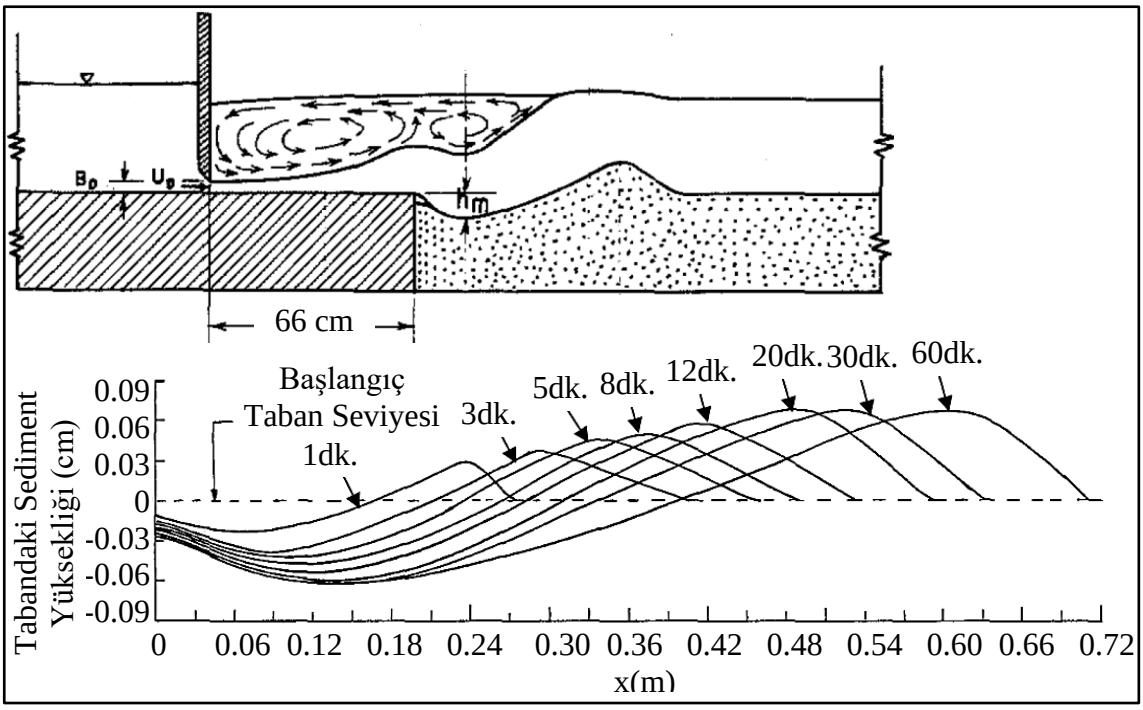
Şekil 2.5. a) Deney verileri (Gladstone ve diğerleri, 2010) ; b) Flow-3D model sonuçları (Brethour ve Burnham, 2010)

Wei, Brethour, Grünzner ve Burnham (2014) Flow 3D programıyla yaptıkları çalışmada silindir şeklindeki, ardışık üç köprü ayağı etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını incelemişlerdir Şekil 2.6'da, 8 dakikalık simülasyon sonucunda bu üç ayak etrafında meydana gelmiş olan yerel oyulmanın şekli verilmiştir.

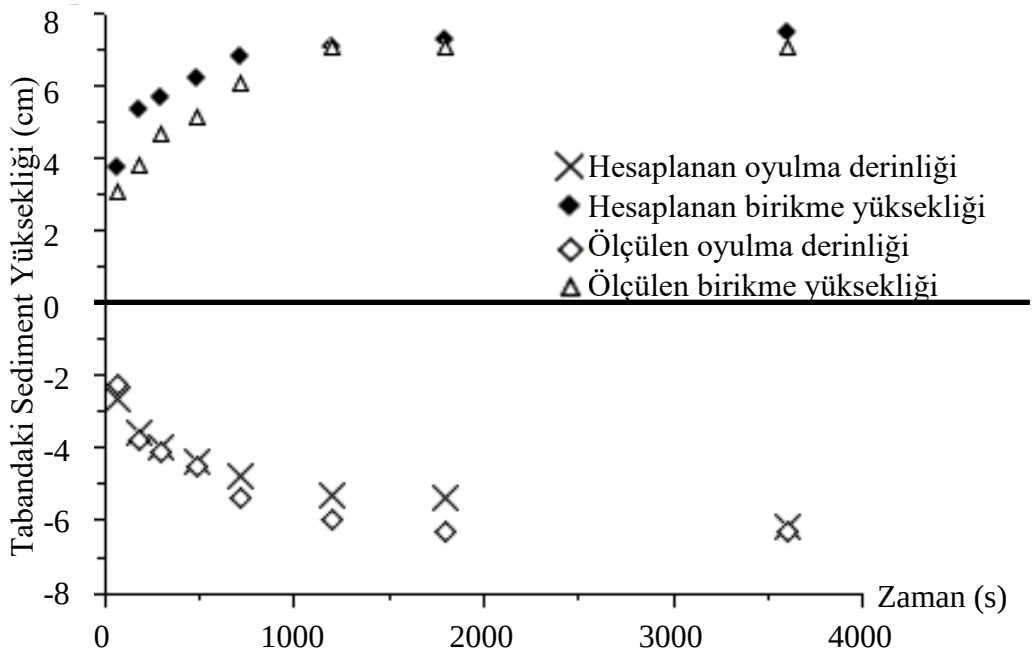


Şekil 2.6. Ardışık üç köprü ayağı etrafındaki simülasyon sonuçları: a) Hız dağılımı, b) Temiz su oyulması ve birikme değerleri (Wei ve diğerleri, 2014)

Aynı çalışmada kapak altı akımından dolayı mansapta meydana gelen hidrolik sıçrama etkisiyle oluşan oyulmanın simülasyonu Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Chatterjee (1994) tarafından yapılmış olan deneysel çalışmadaki büyüklükler kullanılarak Flow-3D modeli benzeşimi yapılmış ve belirli zaman aralıklarındaki oyulma miktarları kıyaslanmıştır. Araştırmacılar sayısal model sonuçlarının başarılı olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.8).



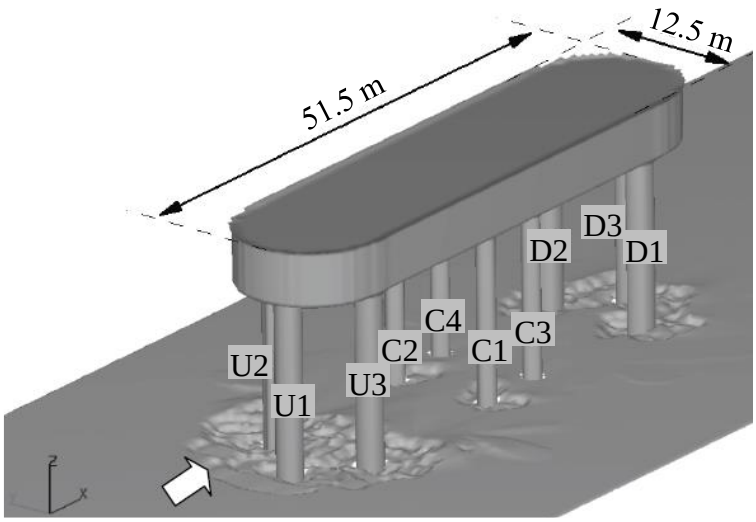
Şekil 2.7. Chatterjee (1994) tarafından gerçekleştirilmiş kapak altı akımın neden olduğu oyulma deneyi ve sonuçları (Wei ve diğerleri, 2014)



Şekil 2.8. Chatterjee (1994) kapak altı akımın neden olduğu oyulmanın Flow-3D sonuçlarıyla karşılaştırılması (Wei ve diğerleri, 2014)

Vasquez ve Walsh (2009) gelgit akımı etkisiyle köprü ayağı grubunun tabanında oluşan yerel oyulmaların FLOW-3D ile simülasyonunu yapmışlardır (Şekil 2.9). Çalışmalarında

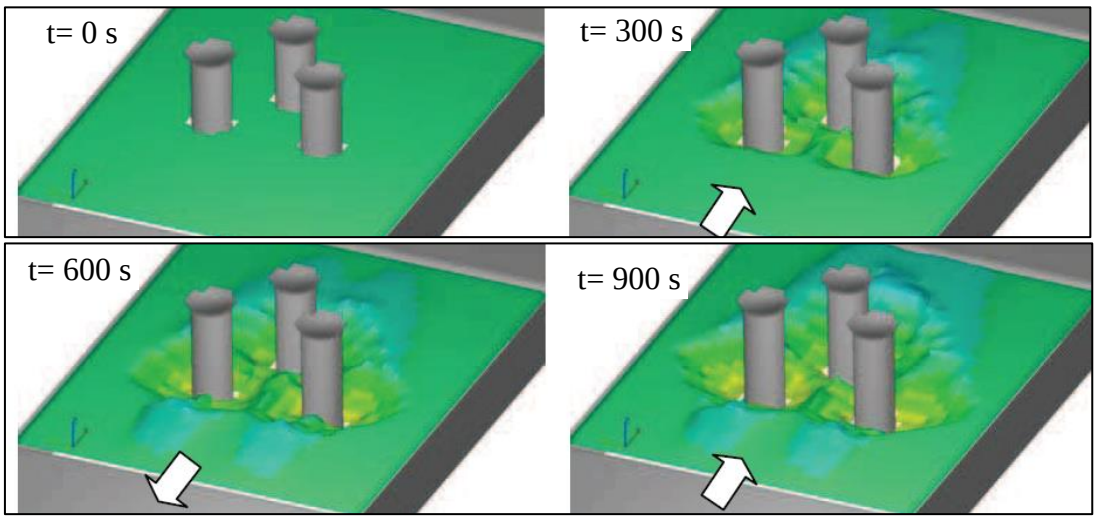
10 adet silindirik köprü ayağının bulunduğu modelde, köprü ayaklarının birbiriyle etkileşimini doğru bir şekilde modellediklerini ve buldukları model sonuçları ile deney verilerinin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.



Ayak Çapı:
U ve D Grupları = 2.4 m
C Grubu = 1.8 m

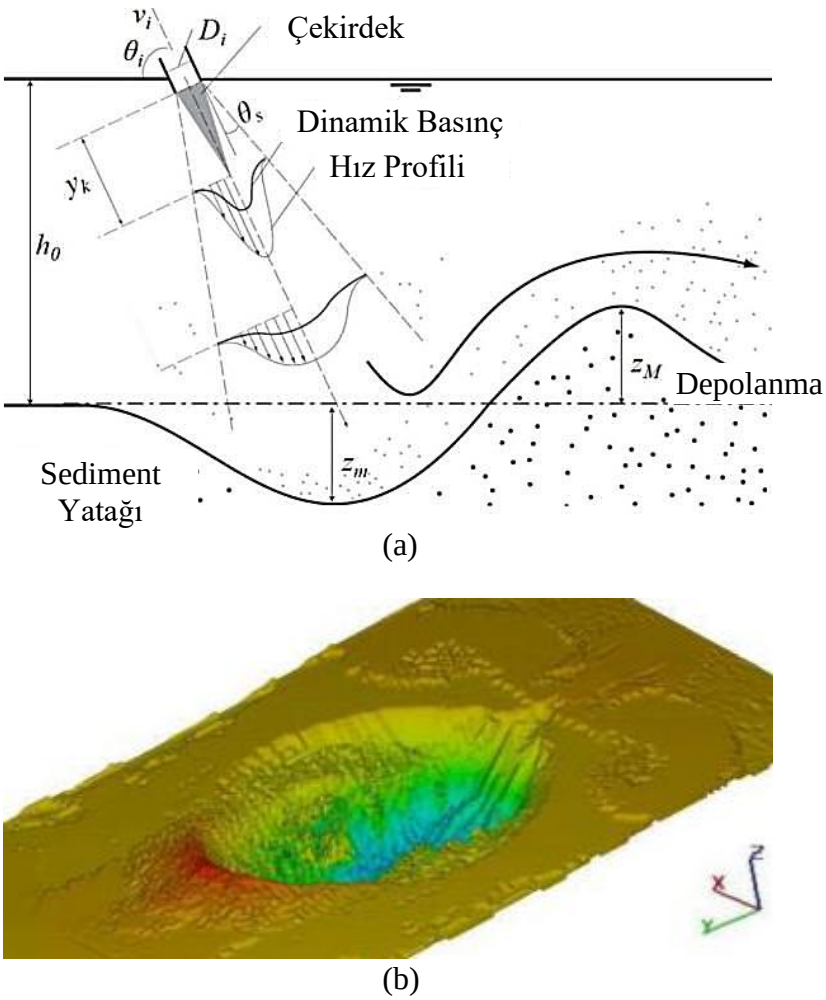
Şekil 2.9. Köprü ayağı grubunda yerel oyulmanın Flow-3D ile benzeşimi (Vasquez ve Walsh, 2009)

Ayrıca aynı çalışmada Şekil 2.10' da görüldüğü üzere, grup halinde bulunan 2 m çapındaki üç köprü ayağının sinüzoidal ve kare profilli, periyodu 300 saniye ve maksimum hızı 2 m/s olan gelgit akımları altında tabanında meydana gelen oyulmayı incelemişlerdir. Benzeşim sonunda araştırmacılar, deney verileriyle uyumlu sonuçlar elde ettiklerini açıklamışlardır.



Şekil 2.10. Üç adet köprü ayağı etrafında meydana gelen Flow-3D yerel oyulma simülasyonu (Vasquez ve Walsh, 2009)

Bir diğer Flow-3D uygulaması ise düşü havuzlarındaki oyulma benzeşimi için Chauvin, De Cesare ve Schwindt (2014) tarafından yapılmıştır. Bilindiği üzere düşü havuzları yüksek hızda jet akımına maruz kaldığından bu bölgede oluşan oyulmalar yapıların güvenliği açısından tehlike oluşturabilmektedir. Yapılan çalışma ile Flow-3D modelinin jet akım koşullarında meydana gelen sediment oyulma benzeşimini yapabilirliği test edilmiştir. Modelin kalibrasyonu için Pagliara, Amidei ve Hager'in (2008) yapmış oldukları deneysel çalışma dikkate alınmış ve deney verileri ile model sonuçları kıyaslandığında bu değerler arasında uyum olduğu görülmüştür (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Paglaria ve diğerleri (2008): (a) Jet akımı oyulması için kullandıkları düzeneği, (b) Flow-3D modeli oyulma sonuçları

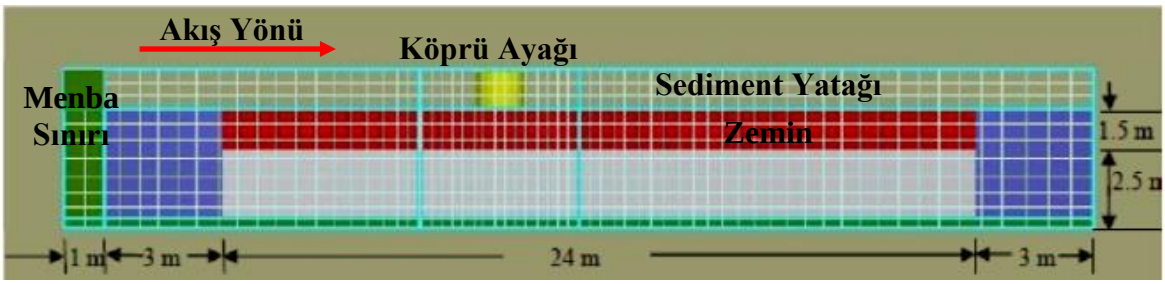
Kayser ve Gabr (2013), köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmanın sayısal benzeşim sonuçlarını, amprik denklemler ve sahada yapılan ölçümlerle kıyaslamışlar ve sonuçların arazi ölçüm değerleriyle uyum içerisinde olduğunu, ampirik denklemlerden elde edilen sonuçlardan ise daha küçük olduğunu tespit etmişleridir. Arazi ölçümlerinde mevcut

olan nehir tabanındaki tabakaların sayısal analizlerde de tanımlanabilmesinin, model sonuçları ile ölçüm değerlerinin birbirine yakınsamasında etkili olduğu belirtilmiştir. Çizelge 2.2'de, RNG türbülans modelinin tercih edildiği parametrik analizlerde kullanılan büyüklükler görülmektedir. Tabandaki hareketin başlangıç koşulu boyutsuz Shields parametresi θ'nin kritik shields değerine ulaşması olup bu parametre program tarafından otomatik olarak hesaplandığından çizelgede yer almamıştır. Yapılmış olan analizler sonucunda, Flow-3D oyulma derinliğinin hesaplanmasında karışım katsayısının (C_e) diğer parametrelerden daha büyük, direnç katsayısının (C_d) ise daha az etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir.

Çizelge 2.2. Sayısal analizlerde kullanılan büyüklükler (Kayser ve Gabr, 2013)

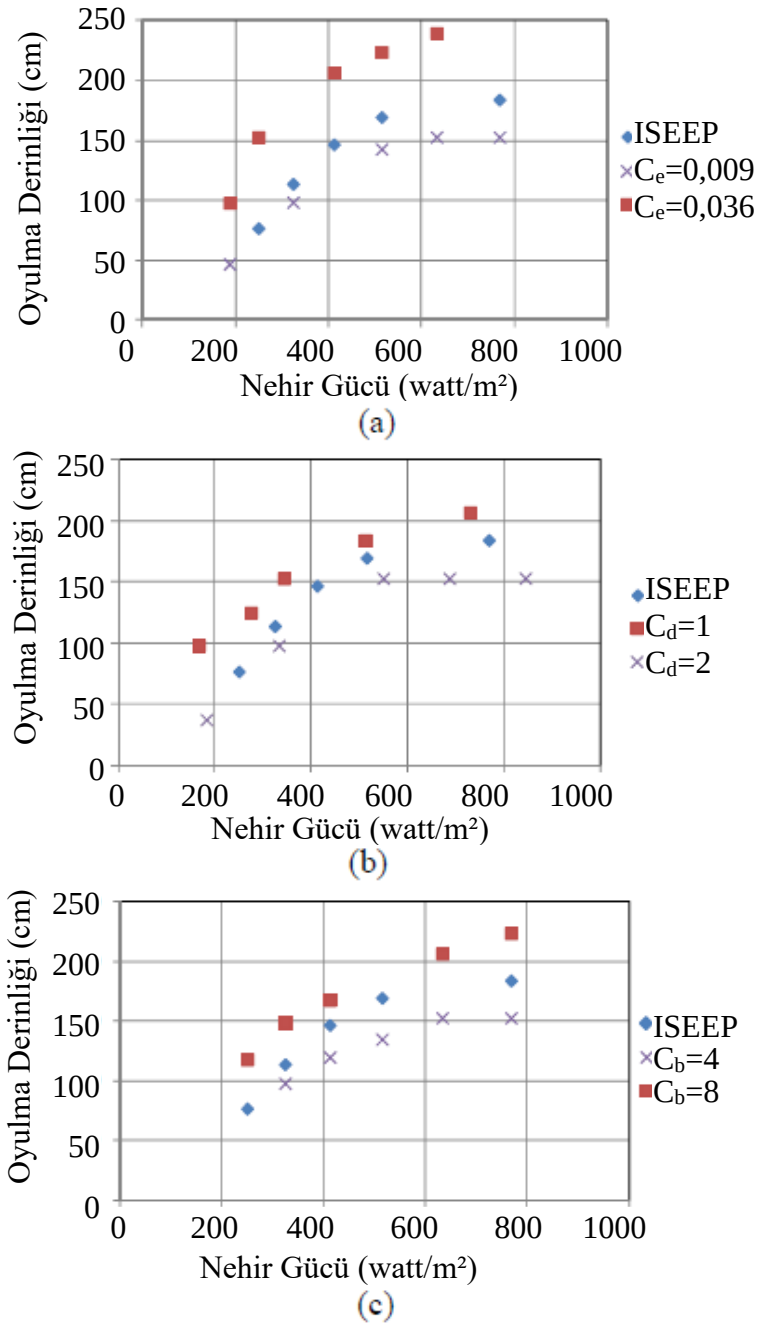
Parametre	Simge	Değer
Yoğunluk	ρ	1,5 g/cm³
Direnç Katsayısı	C_d	1 – 2 arası
Karışım katsayısı	C_e	0,009 – 0,036 arası
Yatak yükü katsayısı	C_b	4 – 8 arası
İçsel sürtünme açısı	Φ	31°

Kayser ve Gabr çalışmalarında Flow-3D modelinde 30 m uzunluğunda, 20 m genişliğinde ve 4 m yüksekliğinde, saha ölçümlerinden elde edildiği gibi iki tabakalı bir zemin oluşturmuşlardır. Modele 3 m yüksekliğinde 1,22 m çapında ve ayakları arasındaki mesafe merkezden merkeze 3 m olan iki adet köprü ayağı eklenmiştir. Çözüm ağı gözü kenar uzunluğu 0,5 m olarak seçilmiş, giriş sınır koşulu olarak sabit 1 m'lik akım derinliği ile 0,45 m/s ile 0,9 m/s arasında değişen akım hızı tanımlanmıştır (Şekil 2.12).

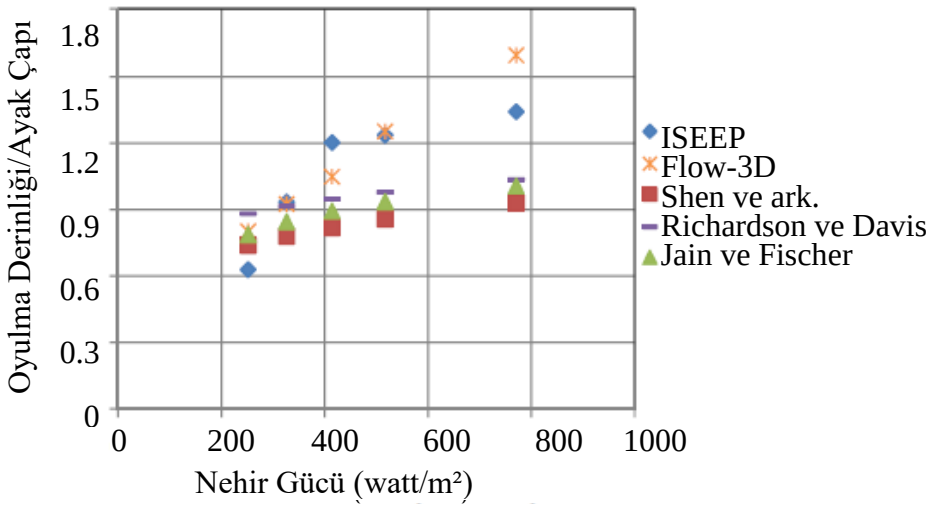


Şekil 2.12. Flow-3D modeli (Kayser ve Gabr, 2013)

Analizlerden elde edilen sonuçlar ile ilgili konumda meydana gelen erozyonu ölçen bir sonda ISEEP (In-Situ Erosion Evaluation Probe) aleti ile yapılan saha ölçümü sonuçları Şekil 2.13'te verilmiştir. Ayrıca çalışmada çeşitli ampirik denklemlerden elde edilmiş olan sonuçlarla, arazi ölçüm değerleri ve sayısal analiz sonuçları Şekil 2.14'te verildiği gibi karşılaştırılmıştır. Kanalın birim uzunluğuna karşı harcanan potansiyel enerji miktarı olarak tanımlanan nehir gücünün arttıkça oyulma derinliğinin arttığı görülmüştür.

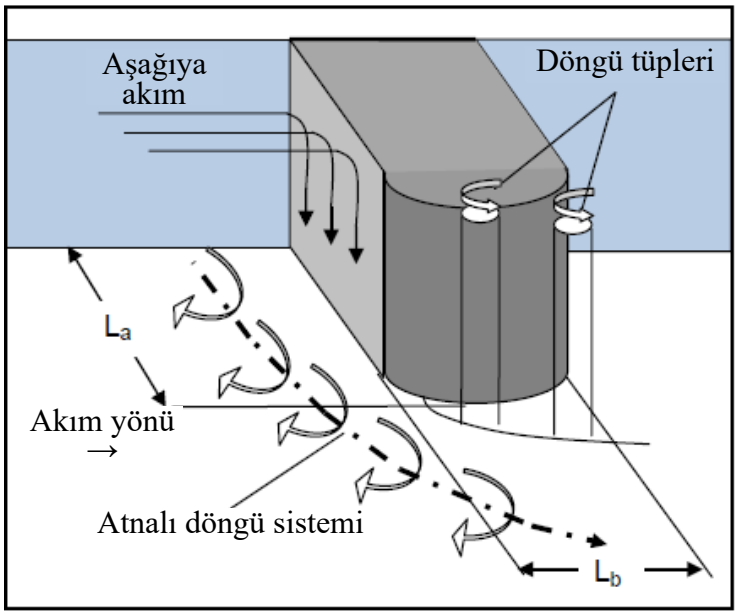


Şekil 2.13. Model oyulma derinliği sonuçları ile arazi ölçüm sonuçlarının kıyaslanması: a) C_e b) C_d c) C_b (Kayser ve Gabr, 2013)



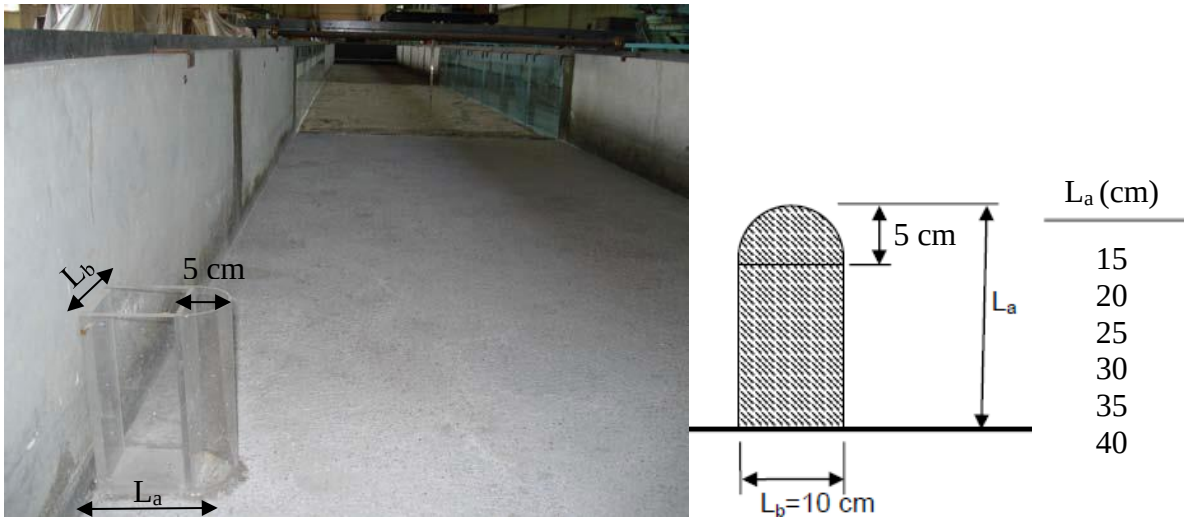
Şekil 2.14. Modele ait oyulma derinliği/ayak çapı oranının nehir gücü arazi ölçüm sonuçları ve ampirik denklem sonuçları ile kıyaslanması (Kayser ve Gabr, 2013)

Göğüş ve Köken (2011) yaptıkları çalışmada dikdörtgen kesitli, sabit eğimli, düz bir kanala yerleştirilen farklı uzunluklardaki dairesel uçlu köprü yan ayaklarının etrafında, oyulma esnasında oluşan akımdaki değişimleri inceleyerek, bu bölgedeki türbülans oluşumlarının birbirleri ile olan etkileşimini ve bunların oyulmaya olan etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Bu amaçla özellikle köprü yan ayağı etrafında oluşan atnalı döngülerinin ayak boyu ile değişimini incelemiş, farklı uzunluklardaki dairesel burunlu köprü yan ayaklarının sebep olacağı sürtünme gerilmelerini farklı oyulma safhalarında hesaplayarak oyulmaya en çok maruz kalan bölgeleri tespit etmiş ve bu bölgelerle ayak uzunlukları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Şekil 2.15'ten görüldüğü üzere köprü yan ayakları etrafında oluşan oyulmaya yine yapı etrafında meydana gelen atnalı döngü sisteminin etki ettiği görülmüştür. Ayrıca köprü yan ayağı önünden yayılan, döngü tüpleri olarak adlandırdıkları döngü sistemi de üzerinden geçtiği bölgedeki sürtünme gerilmesinde artışa neden olmuş ve oyulmaya katkı sağlamıştır. Zamanla atnalı döngü sistemi ile bu döngü tüpleri etkileşim göstermiş ve oyulma mekanizmasını daha karmaşık bir hale getirdiği gözlemlenmiştir (Göğüş ve Köken, 2011).



Şekil 2.15. Düz kanalda dairesel burunlu köprü yan ayağı etrafındaki akım (Göğüş ve Köken, 2011)

Çalışmanın ilk aşamasında, laboratuvarda kurulan fiziksel modelde Akustik Doppler Hız Ölçer (ADV) yardımı ile kenar ayakların etrafında oluşan akımın hız ölçümleri alınmış, yüsek akışkanlıklı özel bir kimyasal boya uygulaması ile köprü yan ayağı ve köprü ayağı etrafında taban bölgesine yakın kısımlarda meydana gelen atnalı döngüleri ve ayrışmış kesme tabakaları görüntülenmiştir. Kenar ayağın farklı uzunluklardaki değerleri için, oyulma ve birikim değerleri, akustik batimetri belirleme cihazı ile görüntülenmiştir. Deneylerden elde edilen ölçümler sayısal model benzeşiminde kullanılmıştır. Deneysel çalışma, 29 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve 0,5 m yüksekliğindeki dikdörtgen kesitli sediment kanalında, düz ve aşınabilir zemin koşullarında yapılmıştır. Şekil 2.16'da görüldüğü üzere kanalda 6 m uzunluğunda ve 0,5 m yüksekliğinde bir sediment haznesi oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan akım derinliği 13,5 cm olup kanala giren debi Q= 67 lt/s'dir.

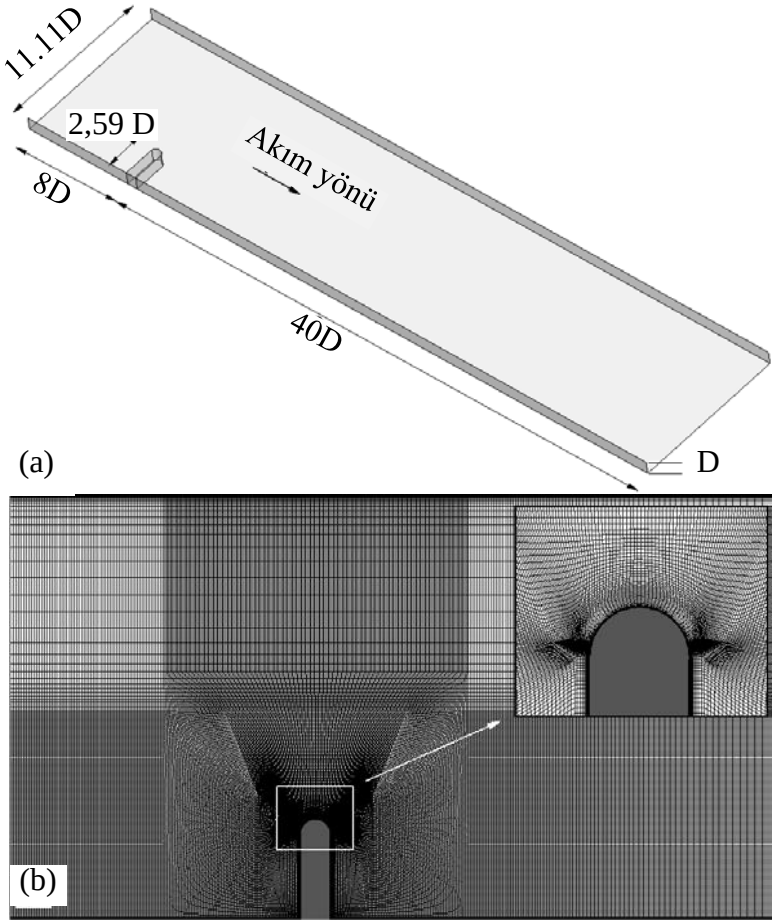


Şekil 2.16. Deneylerde kullanılan dairesel burunlu köprü yan ayağı modeli ve büyüklükleri (Göğüş ve Köken, 2011)

Çalışmada ayrıca, oyulma profilinin zamanla değişimini gözlemlemek için kenar ayaklar etrafında 8 saat süreli deneyler yapılmış ve beş farklı kesit boyunca belirli zaman aralıklarında okumalar kaydedilmiştir. Araştırmacılar çalışma sonucunda aşağıdaki değerlendirmeleri elde etmiştir:

- Kenar ayaklar etrafında oluşan oyulma kesitinin profili zaman arttıkça derinleşmekte ve zamanla oyulma derinliği azalarak artmaktadır.
- Kenar ayaklar etrafında oluşan oyulma çukurlarında yan yamaç eğimleri zamanla değişmemektedir.
- Uzun ayakların mansabında oluşan yığılmalar kısa ayaklara göre daha fazla oluşmaktadır ve tüm bu yığılmalar sonra oyularak mansaba doğru taşınmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, dairesel burunlu kenar ayağı uzunluğu değişiminin akım ve oyulma üzerindeki etkisini belirleyebilmek için deneysel çalışmalar sonrasında kararlaştırılan farklı köprü yan ayak uzunluklarına ait sayısal modelleme yapılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. a) Sayısal model kurulumu; b) Ayak etrafındaki çözüm ağı (Göğüş ve Köken, 2011)

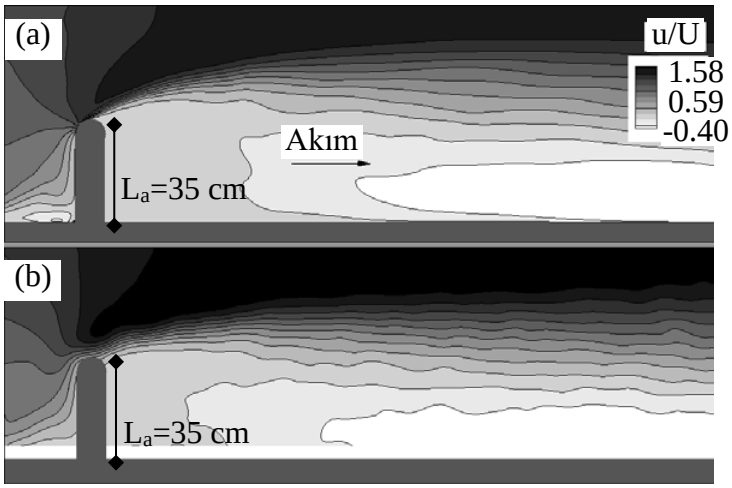
Uzunluğu (L_a) 15 cm, 25 cm ve 35 cm olan ayaklarla yaptıkları sayısal model analizlerinde ayrışan çevrinti benzeşimi (Detached Eddy Simulation, DES) ve büyük çevrinti benzeşimi (Large Eddy Simulation, LES) türbülans yöntemleri kullanılmıştır. L_a= 35 cm olan kenar ayak için Şekil 2.18'de verilen sayısal model analizinden elde edilen boyutsuzlaştırılmış hız konturları ile laboratuvarda ölçülen boyutsuzlaştırılmış hız verileri karşılaştırılmıştır.

Atnalı döngü sistemi, sürtünme gerilmesi ve basınç çalkantıları da en kısa ve en uzun ayak için incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara yer verilmiştir (Göğüş ve Köken, 2011):

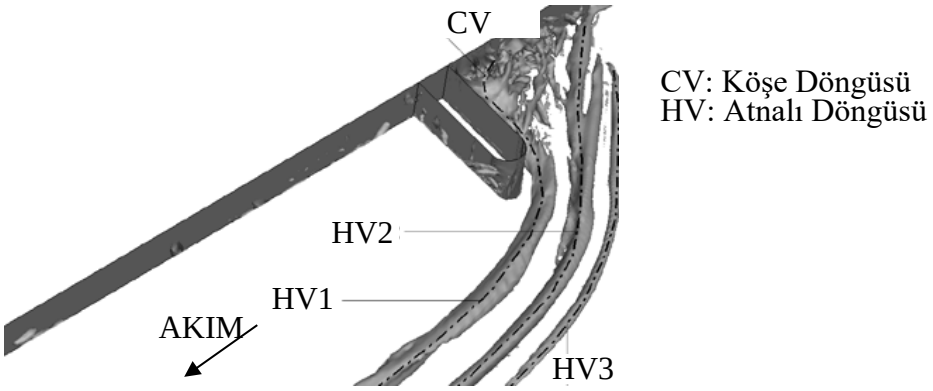
• Ayaklar etrafında üç adet döngü sistemi (Şekil 2.19) oluşmuş ve tüm köprü yan ayağı modellerinde birincil atnalı döngüsünün periyodik olmayan salınımlar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu salınımlar atnalı döngüsünün merkezinde artan türbülans kinetik enerjisi ve basınç dalgalanmaları ile zeminin oyulmasına katkı sağlamıştır.

• Oyulmaya neden olan köprü yan ayakları etrafındaki kritik sürtünme gerilmesi değerleri ayak boyu uzadıkça çok daha büyük bir alanda etkili olmuştur.

• Zaman ilerledikçe oyulma çukurunun oluşması ile birlikte köprü yan ayağı etrafında oluşan atnalı döngü sisteminde önemli yapısal değişiklikler meydana gelmiştir. Oyulma başlangıcında birbirleri ile çok fazla etkileşmeyen atnalı döngüleri zaman ilerledikçe oyulma çukurunun içerisine gömülmekte ve etkileşime geçmektedir. Mesela L_a 15 cm ile 35 cm olan ayaklarda 2 saatlik oyulma sonrasında birincil ve ikincil atnalı döngüleri köprü yan ayağının ucuna yakın bir bölgede birleşerek tek bir atnalı döngüsüne dönüşmektedir. L_a= 35 cm olan ayakta ise 4 saatlik oyulma sonrasında birincil (HV1), ikincil (HV2) ve üçüncül (HV3) atnalı döngüleri benzer bir şekilde birleşmektedir (Göğüş ve Köken, 2011).



Şekil 2.18. Boyuna akım yönünde boyutsuz ortalama hız değerleri: (a) Sayısal benzeşim, (b) Sayısal ortama aktarılmış deney ölçümleri (Göğüş ve Köken, 2011)



Şekil 2.19. Köprü yan ayağı etrafında ortalama akım döngüsel yapıları (Göğüş ve Köken, 2011)

Pourshahbaz, Abbasi ve Taghvaei (2017) daha önceden Karami, Basser, Ardeshir ve Hosseini (2014) tarafından laboratuvarda fiziksel modeli kurulmuş ve başka bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan "Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option (SSIIM)" ile simülasyonu yapılmış olan birbirine paralel 3 adet dalgakıran yapısı etrafında meydana gelen oyulmaları Flow 3D programında benzeşimini yapıp kıyaslama yapmışlardır. Deneyler 14 m uzunluğunda, 1,0 m genişliğinde ve 1,0 m derinliğinde dikdörtgen bir kanalda yapılmış olup, uzunluğu 25 cm olan mahmuz yapılarının ilki 6,16 m uzunluğa ve sonraki yapılar 0,5 m aralıkla paralel yerleştirilmiştir. 15 cm akım derinliği olan kanalda medyan çapı (D_{50}) 0,91 mm olan 0,35 m kalınlığında sediment tabakası tanımlanmıştır. Laboratuvarda yapılan deney sonuçları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Karami ve diğerlerinin (2014) yapmış olduğu laboratuvar deneyleri

Deney No	Q (m^3/s)	y_a (m)	V_a (m/s)	V_a/V_{cr}	Fr	1. Ayak Oyulma Derinliği y_{s1} (m)	2. Ayak Oyulma Derinliği y_{s2}	3. Ayak Oyulma Derinliği y_{s3}	Oyulan Sediment Hacmi (m^3)
E1	0,035	0,15	0,233	0,65	0,19	0,156	0	0,026	0,0165
E2	0,046	0,15	0,307	0,85	0,25	0,225	0,029	0,072	0,0668

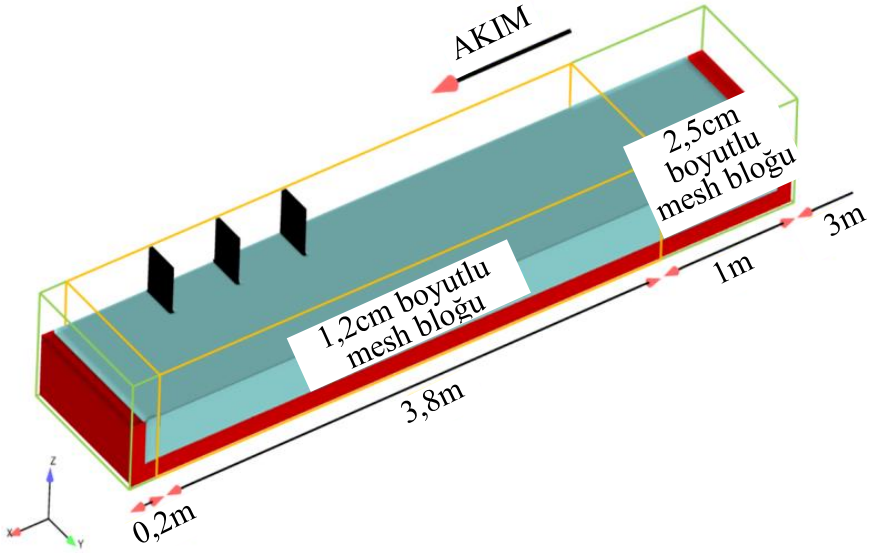
RNG türbülans metodunun kullanıldığı Flow-3D simülasyonlarında Çizelge 2.4'te verilen değerleri kullanmışlardır. Parametrelerden C_e için 4 farklı değer ve 2 farklı çözüm ağı gözü aralığı deneyerek hassasiyet analizleri yapmışlardır.

Flow-3D modellemesi sonucunda maksimum oyulma derinlikleri, Çizelge 2.3'te verilen E1 deneyi için 0,133 m ve E2 deneyi için de 0,182 m olarak hesaplanmıştır. Her iki deneyde de maksimum oyulmalar ilk ayak tabanında oluşmuştur. SSIIM modeli ve laboratuvar deneyi sonuçlarıyla yapılmış olan kıyaslamalarda; E1 deneyinde Flow-3D, E2 deneyinde is SSIIM modeli sonuçları laboratuvar sonuçlarına daha çok yakınsamıştır. E2 deneyinde artan debi değerlerinde Froude sayısı (Fr) ve V_a/V_{cr} oranının sonuç üzerinde etkili olması sebebiyle Flow-3D modelinde tekrardan kalibrasyon yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.4. Flow 3D modellemesi kullanılan parametreler

Parametreler	Sembol	Değer	
Yoğunluk	ρ	2,650 g/cm³	
Kritik Shields Parametresi	-	0,033	
Karışım katsayısı	C_e	0,018-0,027-0,036-0,045	
Yatak yükü katsayısı	C_b	1,0	
İçsel sürtünme açısı	Φ	30°	
Yatak pürüzlülüğü/Medyan dane çapı oranı	k_s/D_{50}	5,014	
Çözüm ağı aralığı (İç içe bloklar)	-	3 cm (dış)	2 cm (iç)
		2,5 cm (dış)	1,2 cm (iç)

Choufu, Pourshahbaz, Abbasi, Taghvaei ve Tfwala (2019) çalışmalarında Pourshahbaz, Abbasi ve Taghvaei'nin (2017) çalışmasının devamı olarak çeşitli açılarda, birbirine paralel yerleştirilen dalgakıranların kanal akımı, taban oyulması ve sediment birikimi üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir (Şekil 2.20). Dalgakıranlar 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120° ve 135° açılarda ve 40 cm – 20 cm arası değişen boylarda 15 farklı şekilde yerleşitirilmiştir (Çizelge 2.5).



Şekil 2.20. Sayısal model kurulumu (Choufu ve diğerleri, 2019)

Çizelge 2.5. Simülasyon karakteristikleri (Choufu ve diğerleri, 2019)

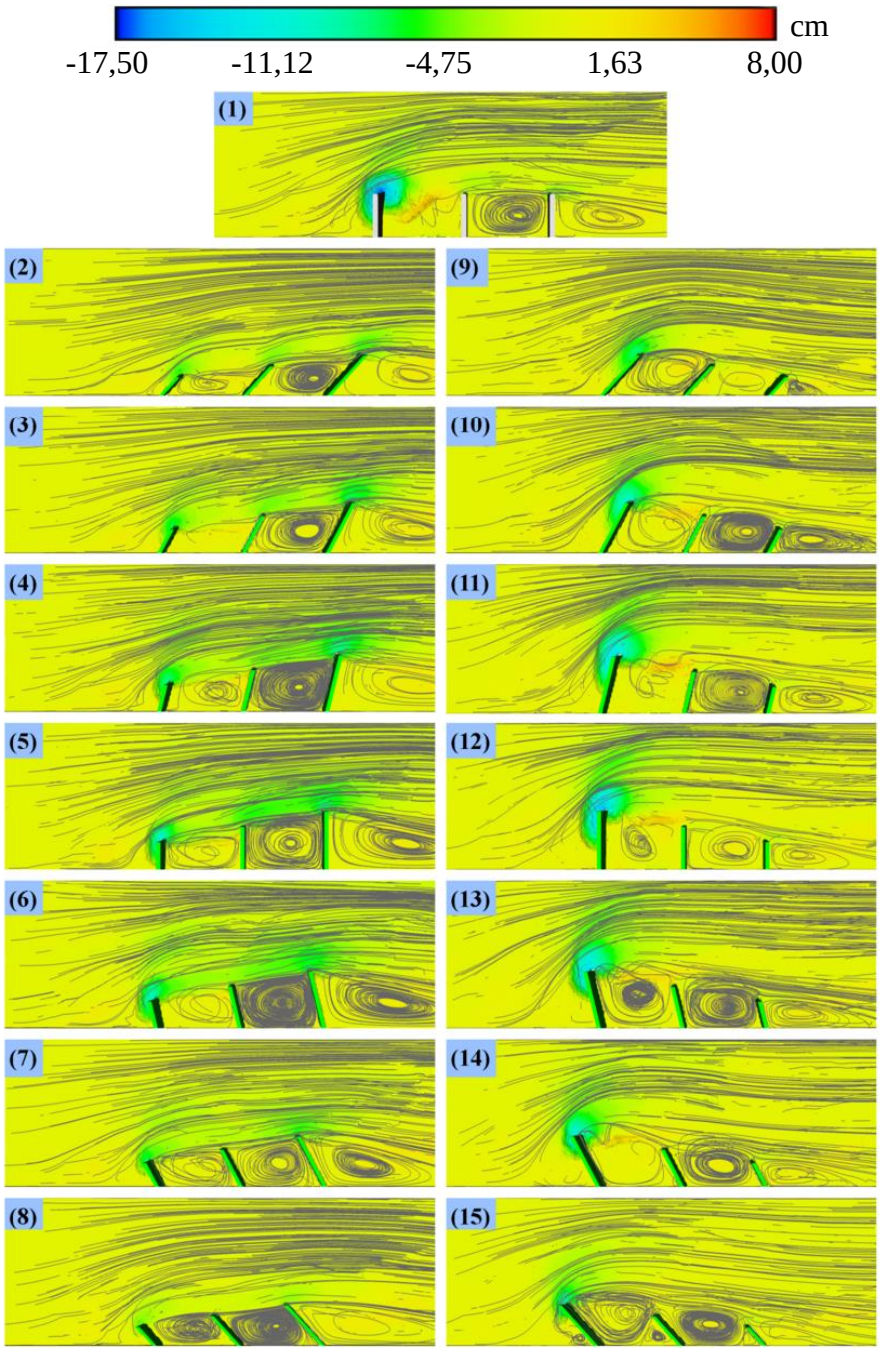
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Açı (^{o})	90	45	60	75	90	105	120	135	45	60	75	90	105	120	135
1. Dalgakıran uzunluğu (cm)	30	20	20	20	20	20	20	20	40	40	40	40	40	40	40
2. Dalgakıran uzunluğu (cm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
3. Dalgakıran uzunluğu (cm)	30	40	40	40	40	40	40	40	20	20	20	20	20	20	20

Simülasyonlar sonucunda Çizelge 2.6'da verilen maksimum oyulma derinlikleri ve birikme yükseklikleri ile Şekil 2.21'de verilen sediment yükseklikleri elde edilmiştir.

Dalgakıranlar uzunlukları artan bir düzende sıralandığında oyulmanın %50'den fazlası, uzunlukları azalan bir düzende ise oyulmanın % 70'inden fazlası simülasyon süresinin %10'luk diliminde gerçekleşmiştir. Oyulmanın limit dengeye ulaşma süresi 90°'ye yakın (akışa dik) yerleştirilen dalgakıranların çervresinde en uzun sürede olmuştur. En geniş vorteks akımları, dalgakıranların uzunlukları artan bir düzende sıralandığında ve 3. dalgakırandan sonra oluşmuştur. 135° açıyla, uzunlukları azalan bir düzende dalgakıranların çevresinde yok denecek kadar küçük vorteks akımları oluşmuştur. Maksimum birikme yükseklikleri dalgakıranların uzunlukları artan bir düzende sıralandığında oluşmuştur. Dalgakıran çevresinde meydana gelen oyulma derinliği, aynı boyda ve açıda yerleştirilen dalgakıranların çevresinde meydana gelen oyulmaya kıyasla; uzunlukları azalan bir düzende yerleşiminde %55 azaltılabilirken, uzunlukları artan bir düzende sıralandığında %72 seviyelerinde azaltma sağlanabilmiştir.

Çizelge 2.6. Simülasyonlarda elde edilen maksimum oyulma derinlikleri ve maksimum birikme yükseklikleri (Choufu ve diğerleri, 2019)

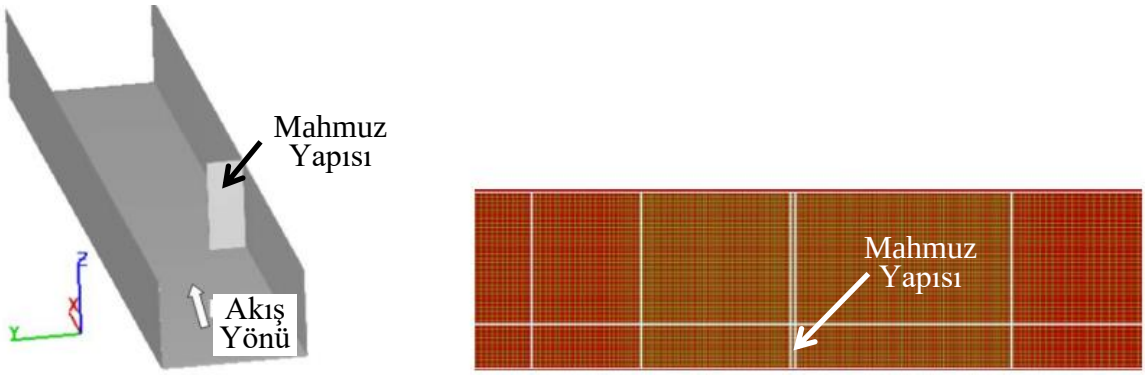
No	y_{smax} (cm)			Maksimum Birikme Yüksekliği (cm)
	1. Dalgakıran	2. Dalgakıran	3. Dalgakıran	
1	17,20	2,78	4,61	5,8
2	5,96	4,27	5,42	2,19
3	7,00	4,77	6,96	2,51
4	8,20	4,48	7,51	2,22
5	10,90	4,77	6,15	3,00
6	9,70	3,79	6,82	1,95
7	7,30	2,68	5,96	2,96
8	4,77	2,08	3,66	1,67
9	7,70	2,41	2,50	2,93
10	10,20	2,12	2,51	3,73
11	12,40	0,35	2,37	5,39
12	15,30	0,10	1,90	4,53
13	12,80	-0,10	2,56	4,23
14	11,20	0,00	1,72	4,59
15	9,20	0,65	1,80	2,26



Şekil 2.21. Simülasyonlarda elde edilen sediment kotu değişimleri (Choufu ve diğerleri, 2019)

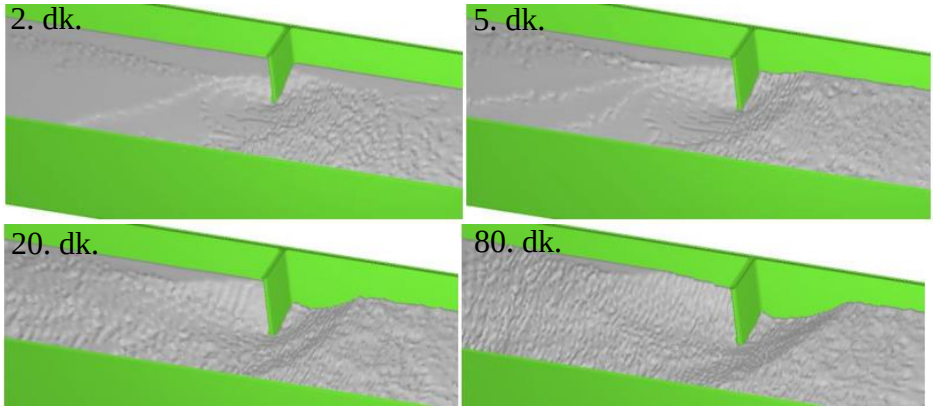
Guodong, Lang ve Ning (2013) akışı kontrol etmek için yerleştirilen ve batık olmayan mahmuz etrafındaki üç boyutlu yerel oyulmayı simüle etmek için Flow-3D yazılımı kullanılmışlardır. Sonuçlarını, oluşturdukları modelin (Şekil 2.22) temeli olan Zhang (2009) tarafından gerçekleştirimiş deneysel çalışma ile karşılaştırmışlardır. Uzunluğu 4 m, genişliği 0,4 m, derinliği 0,25 m ve eğimi 1/1000 olan dikdörtgen kesitli kanalda, sağ sahile 10 cm uzunluğunda ve 1 cm kalınlığında akıma dik bir şekilde yerleştirilmiş bir

mahmuz yapısının etrafındaki 1,9 g/cm² özgül ağırlığında, 15 cm kalınlığında ve 0,145 cm medyan dane çaplı olan bir sediment tabakasının, 5 cm akım derinliğinde ve 0,29 m/s akım hızında yerel oyulmaların sayısal benzeşimi yapılmıştır.

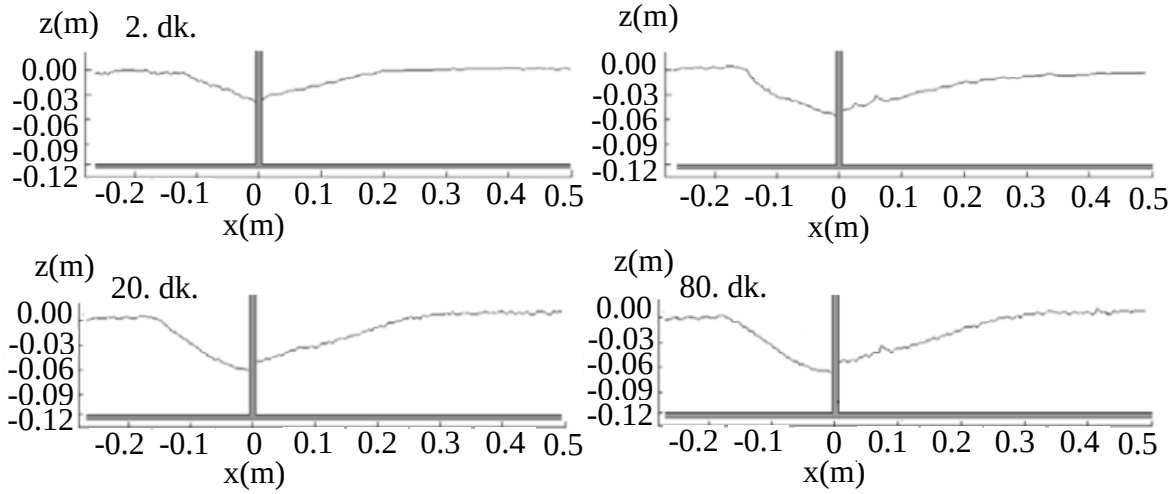


Şekil 2.22. Sayısal model ve çözüm gözü ağı blokları görünüşleri (Guodong ve diğerleri, 2013)

80 dakikalık simülasyon süresince mahmuz yapısı etrafında meydana gelen oyulmanın gelişimi Şekil 2.23 ve Şekil 2.24'te verilimştir.



Şekil 2.23. Mahmuz yapısı etrafında meydana gelen oyulmanın zamanla gelişimi (Guodong ve diğerleri, 2013)



Şekil 2.24. Mahmuz yapısı y= 0,1 m kesiti oyulmanın zamanla gelişimi (Guodong ve diğerleri, 2013)

Sonuç olarak simülasyon sonuçları, araştırmada kullanılan matematiksel modelin ve sayısal yöntemlerin, mahmuz yapısı etrafındaki yerel oyulmaların gelişimini simüle edebileceğini göstermiştir. Parametre kalibrasyonu yapılmadığı için deneysel çalışma sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar elde edilememiştir. Gelecekte yapılacak kalibrasyon çalışmalarıyla daha da iyileştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

3. AKARSU KESİTİNDE MEYDANA GELEN OYULMA MEKANİZMASI

3.1. Oyulmanın Tanımı

Akım rejimi, malzeme cinsi, akarsuyun fiziksel özellikleri ve akarsu kullanımı, akarsu tabanındaki oyulma ve birikme gibi alüvyon hareketlerini belirleyen başlıca unsurlardır. Oyulma, akarsu kesitinin daralması veya taban eğiminin artması sebebiyle hızın arttığı bölgelerde yani akımın katı madde taşıma yeterliliğine ulaştığı durumlarda meydana gelir. Akarsu tabandaki katı maddenin korunumuna dayanan süreklilik denklemi, Eş. 3.1 ile tanımlanabilir (Yanmaz, 2002):

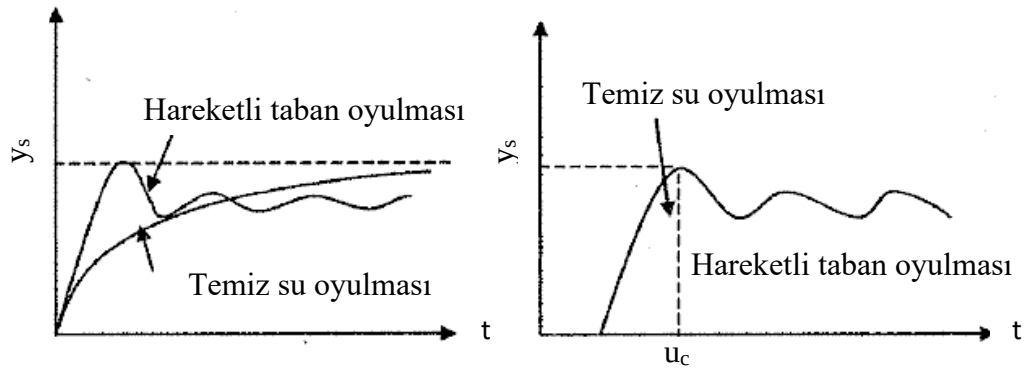
$$\frac{dV}{dt} = s_ç - s_g \tag{3.1}$$

Burada; V tabanda oluşturulan kontrol hacmi, t zaman, $s_ç$ kontrol hacminden çıkan sediment yükü ve s_g kontrol hacmine giren sediment yüküdür. Örneğin, akarsu üzerinde bulunan bir köprü nedeniyle akarsu kesitinde daralma meydana geldiğinde, daralan kesitte hız artmakta ve $s_ç>s_g$ olmaktadır. Bu nedenle $dV/dt>0$ olmakta ve taban seviyesinde alçalma meydana gelmektedir. Diğer bir deyişle, daralan kesitin mansabında $s_g>s_ç$ ve $dV/dt<0$ olduğundan sürüntü maddesi birikimi meydana gelmektedir (Yanmaz, 2002).

Kesit daralması nedeniyle oluşan oyulmaya daralma oyulması, akım doğrultusundaki bir köprünün ayakları etrafında oluşan çevrintilerin yarattığı oyulmaya ise yerel oyulma denilmektedir. Bir akarsuda hareketli taban oyulması ve temiz su oyulması olmak üzere iki tip yerel oyulma söz konusudur. Ayak etrafındaki çevrintili akım nedeniyle temiz su oyulması, akım şiddetinin artmasıyla tabanda kayma gerilmesinin taban malzemesinin karşı koyacağı kritik kayma gerilmesi değerini aştığı durumda ise hareketli taban oyulması meydana gelir. Temiz su oyulmasında askı halinde sediment taşınmadığından akım sadece tabanda oyulmaya sebep olmaktadır. Bir barajda dip savak veya dolusavak akımı nedeniyle oluşan oyulma bu oyulma türüne bir örnektir (Karakurt, 2016).

Hareketli taban oyulmasında oyulma derinliği y_s, başlangıçta hızla gelişir ve zamanla yavaşlamaya başlar. Hareketli taban oyulmasında oyulma derinliği kısa bir süre sonra en yüksek değerine ulaşır. Sonrasında taban kayma gerilmesi direncindeki değişimlerden

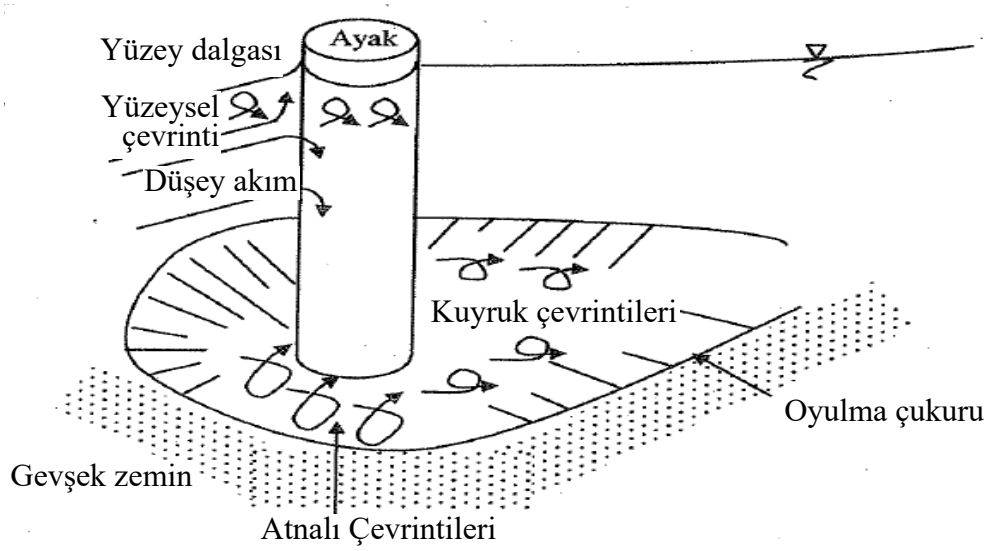
dolayı yığılma ve oyulma olayları gerçekleşir ve değişken salınımlar yaparak oyulma ve yığılma devam eder. Temiz su oyulmasında ise daha sakin akım şartlarından dolayı oyulma derinliğindeki artış daha yavaş gelişir ve belirli bir sürenin sonunda denge durumuna gelir. Şekil 3.1'de bu iki oyulma tipinin zamana ve ortalama yaklaşım akım hızına göre değişimi gösterilmektedir. Şekildeki u_c, tabanda hareketi başlatan ortalama kritik akım hızını göstermektedir. Köprü ayakları etrafındaki temiz su oyulması, ortalama akım hızının yaklaşık olarak kritik ortalama akım hızının yarısı değerine ulaştığında başlamaktadır (Yanmaz, 2002).



Şekil 3.1. Köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin değişimi (Yanmaz, 2002)

3.2. Köprü Ayağı Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalar

Akım yönünde bulunan bir köprü ayağı, akımın geçtiği kesitte daralma yaratacağı için kesitteki ortalama hızda artışa sebep olur. Daralan kesitte, akım hızındaki artış ile sediment taşınım kapasitesi de artar. Aynı zamanda, köprü ayağı ön yüzünde, hızdaki ani düşme sebebiyle durgunluk düzlemi oluşur ve su seviyesi yükselir. Bu düzlem boyunca ani basınç artışı meydana gelir. Yalnız akım hızı akım derinliği boyunca azalacağı için bu basınçtaki artış da akım derinliği boyunca azalan bir eğiri çizer. Artan basınç yüzeyinde yüksek basınçtan daha alçak basınca doğru yani su yüzeyinden tabana doğru bir akım hareketi başlar. Bu akım hareketiyle, yaklaşım akımının birleşmesi sonucu çevrintiler oluşur. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bu çevrintiler tabanda atnalı şeklinde oyulma yarattığı için bu akım türüne atnalı çevrintisi denir (Yanmaz, 2002).



Şekil 3.2. Köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002)

Oluşan bu düşey yönlü akım, taban oyulmasını başlatır. Ayak geometrisi ve su derinliğine bağlı olarak gelişen atnalı çevrintileriyle beraber oyulan daneler taşınır ve taşınımın derecesi de oluşan türbülansın şiddeti ve Reynolds değerine bağlıdır. Ayrıca meydana gelen oyulma, aşağıda sıralanan parametrelere bağlıdır:

- Akışkan parametreleri

ρ : suyun yoğunluğu, g/cm^3

v: suyun kinematik viskozitesi, kg/m.s

- Akım parametreleri

g : yerçekimi ivmesi, m/s^2

y_a : yaklaşım akım derinliği, m

V_a : ortalama yaklaşım akım hızı, m/sn

α : akım ve ayak aksları arasındaki açı, derece

u_* : kayma gerilmesi hızı, m/sn

- Akarsu parametreleri

S_o: taban eğimi

B_0: akarsu genişliği, m

C_c: daralma katsayısı

K_α: yaklaşım akımıyla köprü aksi arasındaki açının etki faktörü

K_a: akarsu güzergahı etkisini gösteren katsayı

K_b: menbada taban pürüzlülüğünü gösteren katsayı

K_c: akarsu şevlerinin pürüzlülüğünü gösteren katsayı

K_d: akarsu enkesit etkisini gösteren katsayı

● Taban malzemesi parametreleri

ρ_s: dane yoğunluğu, g/cm^3

D_{50}: dane medyan çapı, mm

σ_g: dane dağılımının geometrik standart sapması $(D_{84.1}/D_{15.9})^{0,5}$

C : kohezyon, N/m²

K_f: dane şekil faktörü

● Köprü ayağı parametreleri

B_a : ayak genişliği, m

K_s: ayak şekil faktörü

K_g: ayak grup etki faktörü

K_r: ayak yüzeyi pürüzlülük faktörü

K_v: ayak yüzeyiyle düşey arasındaki açı etkisi

● Zaman parametresi

t: akım süresi, sn

Bazı önemli faktörlerin etkileri aşağıda anlatıldığı şekilde özetlenebilir (Yanmaz, 2002):

● Yaklaşım akım derinliği: Oyulma miktarı; yaklaşım derinliği azaldıkça artmaktadır. Daha derin akımlarda derinlikten bağımsız hale gelmektedir.

● Yaklaşım hızı: Yaklaşım hızı ile tabanda hareket eden malzeme de davranış değiştirmektedir. Temiz su akımlarında, hız kritik taban hızına ulaşana kadar oyulma artmakta ancak daha sonra tabanın harekete geçmesiyle tabanda yeniden şekillenmeler meydana gelmektedir.

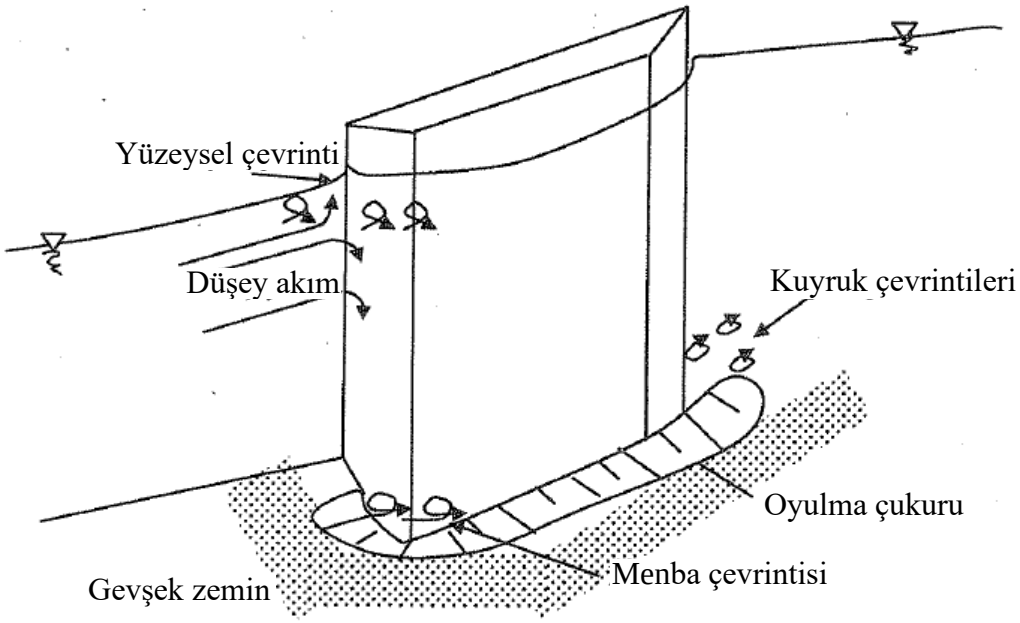
● Taban malzemesi dağılımı: Dane dağılımının geometrik standart sapması (σ_g) arttıkça kaba daneler ince daneleri kaplamakta ve oyulma azalmaktadır.

● Ayak ve dane büyüklüğü etkisi: B_a/D_{50} göreli ayak büyüklüğünün değeri 50'den küçük olduğunda oyulma azalmaktadır.

● Zaman etkisi: Temiz su oyulmalarında dengeye ulaşma süresi oldukça uzundur ve oyulma derinliği zamana bağlı olarak azalmaktadır.

● Ayak şekli ve yaklaşım açısı: Ayaklar akım alanına dik kesiti minimum olacak şekilde yerleştirilmelidir. Su yüzeyine doğru genişleyen ayaklar at nalı çevrintilerinin artmasına sebep verdiği için ayak etrafında oyulmanın daha fazla oluşmasına neden olmaktadır.

Köprünün uç mesnetleri olarak yanlara yapılan kenar ayaklar, yapısal sebepler gözetildiğinde, akım kesitinde daralma yaratabilecek şekilde akım alanına bir miktar uzanabilmektedir. Bu nedenle daha önce bölüm başında da anlatıldığı gibi kesitteki ortalama hızı arttırmakta ve Şekil 3.3'te görüldüğü gibi ayak çevresinde ve tabana doğru çevrintili akımlar meydana getirmektedir.



Şekil 3.3. Kenar ayaklar etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002)

4. 3-BOYUTLU SAYISAL MODEL İLE SEDİMENT TAŞINIM BENZEŞİMİ

4.1. 3-Boyutlu Sayısal Model Genel Bilgileri

Bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Flow-3D, daha çok 1-B, 2-B ve 3-B serbest yüzey problemlerinin zamana bağlı veya kararlı akım çözümleri için kullanılan ticari bir yazılımdır. Flow 3D programının hidrolikteki bazı uygulama alanları; dolusavak analizleri, dipsavak analizleri, baraj yıkılması analizleri, su alma yapıları analizleri, balık geçidi analizleri, çökeltim havuzu analizleri, toprak kayması analizleri, çığ düşmesi analizleri, kıyı ve nehir hidroliği, atık su tahliyesi ve kirlilik analizleri, taşkın analizleri, sediment taşınımı ve oyulması analizleri olarak sıralanabilir.

Günümüzde hala hidrolik yapıların güvenliği için laboratuvarlarda yapılan fiziksel modelleme çalışmaları büyük önem taşımasına rağmen Flow-3D gibi üç boyutlu çözüm yapabilen programların kullanılması ile hem zaman kazanılması ve hem de maliyetler azaltılması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, Flow-3D programının 11.0.4 numaralı versiyonu kullanılmıştır.

4.2. Hidrodinamik Model Temel Eşitlikleri

Serbest yüzeyli akımların ve sediment taşınımının benzeşiminde oldukça başarılı simülasyonları olan Flow-3D programında süreklilik ve üç boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri, sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmektedir.

Bu çalışmada sıkıştırılamaz akım kabulü ile dikkate alınan kütlenin korunum denklemi Eş. 4.1'de verilmiştir (Flow Science, 2014):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(uA_x\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(vA_y\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(wA_z\right)=\frac{R_{SOR}}{\rho} \tag{4.1}$$

3 boyutlu momentum korunumu denklemleri Eş. 4.2, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4'te verilmiştir (Flow Science, 2014):

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x-b_x-\frac{R_{SOR}}{\rho V_f}\left(u-u_w-\delta u_s\right) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+G_y+f_y-b_y-\frac{R_{SOR}}{\rho V_f}\left(v-v_w-\delta v_s\right) \quad (4.3)$$

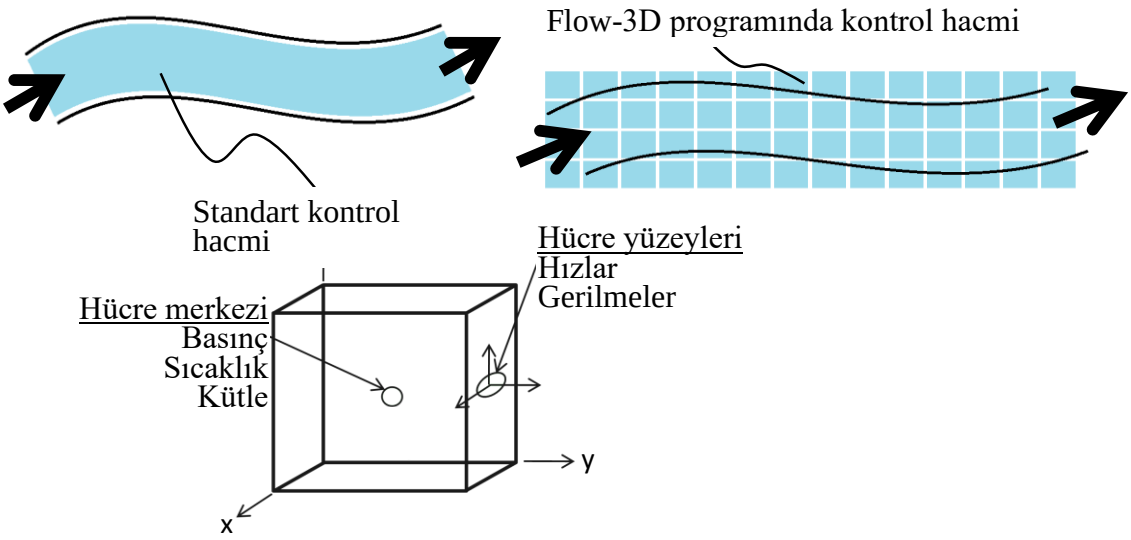
$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+G_z+f_z-b_z-\frac{R_{SOR}}{\rho V_f}\left(w-w_w-\delta w_s\right) \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerdeki; hız bileşenleri (u, v, w), kartezyen koordinat bileşenleri (x, y, z), zaman t, kontrol hacmindeki akışa elverişli kısmi hacim V_f, kontrol hacmindeki akışa elverişli x, y ve z doğrultusunda kısmi alan (A_x, A_y, A_z), kontrol hacminde "t" anında ortalama akışkan yoğunluğu ρ, kontrol hacminde "t" anında ortalama akışkan basıncı p, kütle yerçekimi ve rölatif etki ivmelenmeleri (G_x, G_y, G_z), viskoz etki ivmelenmeleri (f_x, f_y, f_z), boşluklu veya gözenekli ortamda kayıplar (b_x, b_y, b_z), gözenekli yüzeylerden ve aşınan sediment yataklarından kütlesel karışım nedeniyle kullanılan yoğunluk bazlı terim R_{SOR}, simülasyon süresi boyunca herhangi bir bölgedeki yoğunluktaki toplam değişiklik δ_ρ olarak tanımlanmaktadır.

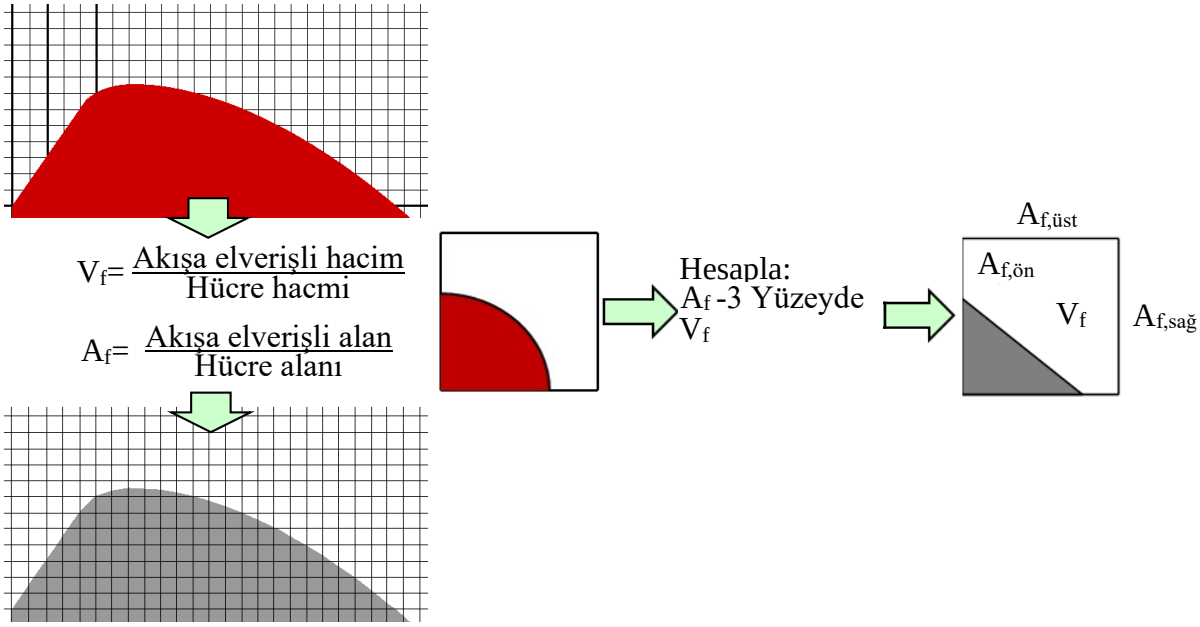
4.3. Çözüm Ağı

Sayısal hesaplamalar, kullanıcı tarafından belirlenen, dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Çözüm için kullanılan bu ağ sistemi çözümün yapılacağı kontrol hacmini oluşturmaktadır. Şekil 4.1'de verildiği gibi skaler büyüklükler her bir hücrenin merkezinde, vektörel büyüklükler ise her bir hücrenin yüzeyinde hesaplanmaktadır.

Flow-3D, problem geometrisini belirlerken FAVOR^{TM} isimli bir teknik kullanmaktadır. Bu teknikle ortogonal ağ içerisinde kalan geometrinin her bir hücresinde hem alansal hem de hacimsel boşluk oranları hesaplanmaktadır. Alansal boşluk oranını hesaplarken gereksiz tekrarlanma ve hafıza kullanımını önlemek için her hücre için yalnızca üç alan oranı dikkate alınmaktadır. Hücre tamamen katı ile dolu ise bu oranlar 0, tamamen boş ise bu oranlar 1 değerini almaktadır. Bu teknik aslında akışkanın geçebileceği boşluk oranını belirlemektedir. Geri kalan bölge ise Şekil 4.2'de görüldüğü üzere problem geometrisini oluşturmaktadır.

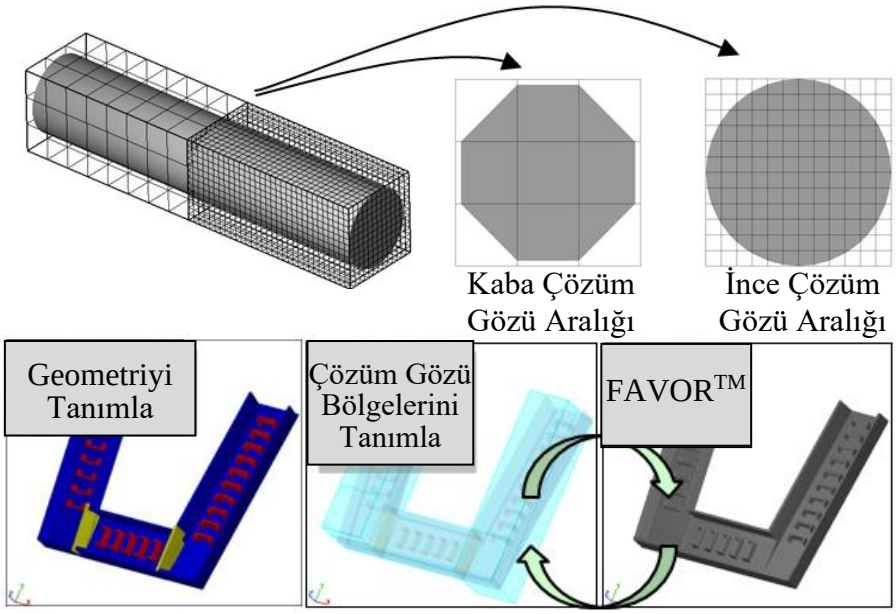


Şekil 4.1. Flow-3D hücreleri tanımlama (Flow Science, 2014)



Şekil 4.2. Flow-3D hücrelerde katı geometri tanımlama (Flow Science, 2014)

FAVOR™ yöntemi ile karmaşık şekle sahip geometriler, büyük çözüm ağı gözü aralıkları kullanılsa dahi kolayca modellenebilmekte ve gerek görülmesi durumunda daha küçük çözüm ağı gözü aralıkları kullanılmasıyla problem geometrisi daha düzgün ve gerçeğe yakın tanımlanmaktadır (Şekil 4.3). Ancak bu durumda da, simülasyon çözüm süresi çözüm ağ gözü adedinin artmasıyla artmaktadır. Bu nedenle hem çözümün ağ gözü boyutundan bağımsız hem de çözüm süresinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olabilmesi için modelde kullanılacak çözüm ağı gözü boyutu büyük önem taşımaktadır.



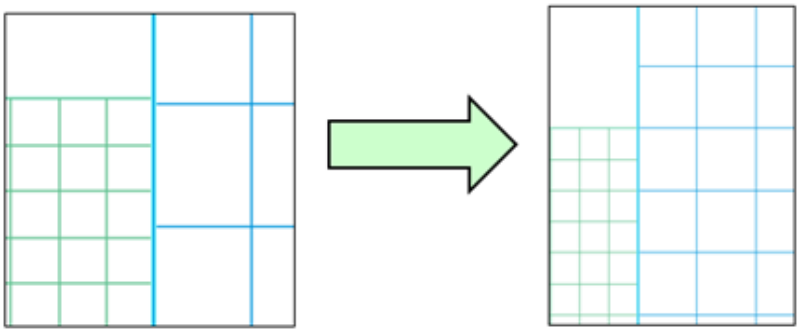
Şekil 4.3. Flow-3D hücre ve geometri tanımlama adımları (Flow Science, 2014)

Hücreler ve bloklar tanımlanırken aşağıda sıralanan konulara dikkat etmek gerekmektedir:

● Bir hücrenin uzun kenar boyutunun kısa kenar boyutuna oranı 3:1'i aşmamalıdır. En iyi oran 1:1:1 (x:y:z) dir.

● Komşu hücrelerin birbirine oranı 1,25'i aşmamalıdır. En iyi oran 1:1 (x_1:x_2, y_1:y_2, z_1:z_2) dir.

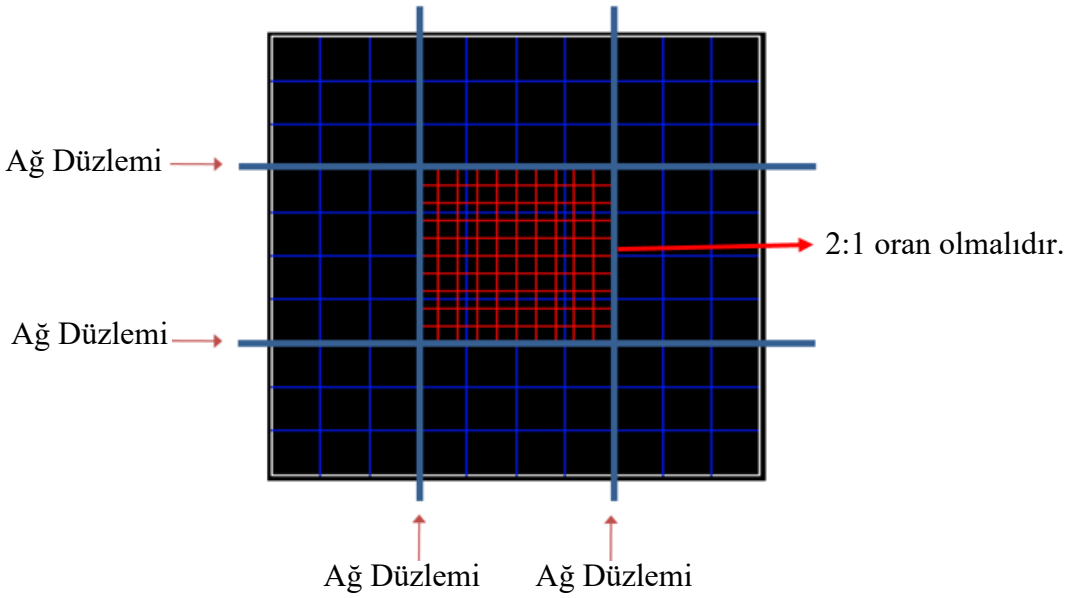
● Komşu hücre bloklarının oranı 1:1 veya 2:1 olmalıdır (Şekil 4.4).



Büyük enterpolasyon hataları olasıdır. İyileştirilmiştir.

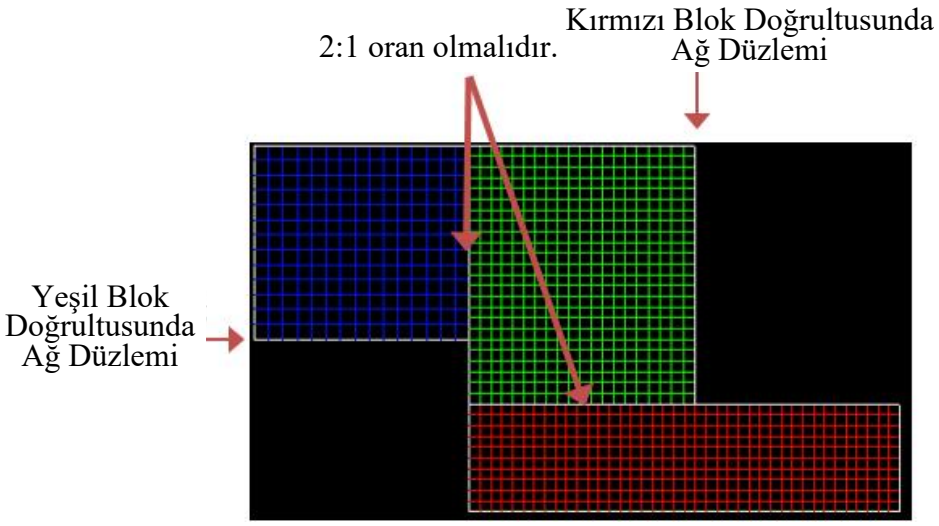
Şekil 4.4. Flow-3D hücre blokları oranı (Flow Science, 2014)

● İç içe yerleştirilmiş hücre bloklarında, içerdeki hücre bloğu tamamen dışardaki hücre bloğunun içinde kalmalıdır. İçerdeki hücre bloğunun 6 yüzeyine de ağ düzlemi oluşturulmalıdır. İç içe hücre bloklarının oranı 1:1 veya 2:1 olmalıdır (Şekil 4.5).



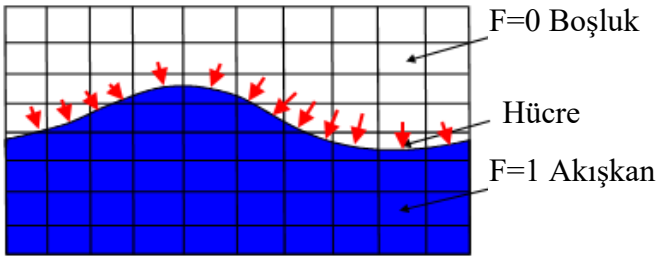
Şekil 4.5. Flow-3D iç içe hücre blokları tanımlama (Flow Science, 2014)

• Ardışık hücre bloklarında iç içe hücre bloklarındaki kurallar geçerlidir. Hücre blokları üst üste gelmemelidir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Flow-3D ardışık hücre blokları tanımlama (Flow Science, 2014)

Program, serbest yüzeyli problemlerin çözümü için akışkan hacmi Volume of Fluid (VOF) yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntem ile de, FAVOR^{TM} tekniğinde olduğu gibi hücrelerin boş, tam veya kısmen suyla dolu olduğu belirlenmektedir. Hesaplanan hücre tamamen akışkan ile dolu ise 1 değerini, tamamen boş ise 0 değerini ve kısmen dolu ise 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır (Şekil 4.7). Yani bu yöntemlerle bir hesap hücresi tamamen katı, kısmen katı veya sıvı, tamamen sıvı, kısmen sıvı ile dolu veya tamamen boş olabilir.



Şekil 4.7. Flow-3D hücre doluluğu şematik gösterimi (Flow Science, 2014)

4.4. Sediment Taşınım Modeli

Flow-3D programındaki sediment taşınım modeli, köprü ayakları ve diğer ilgili yapıların etrafında erozyona yol açabilecek, tabanda kümelenmiş veya askıdaki sediment hareketi hakkında modelleme yapabilmektedir. Kütle ve momentum korunum denklemleri ile hesaplanan üç boyutlu akışkanlar dinamiği çözümüyle birlikte, kum, silt ve diğer kohezif olmayan sediment taşınımının benzeşimini yapabilmektedir. Ayrıca model, birden fazla sediment türünün tanımlanmasına olanak verdiği gibi, tabanda sürüntü maddesi taşınımı, doğrusal olmayan sürüklenme-akış (drift-flux) ve sediment aşınımı ile sürüklenmesini tahmin etmek için çeşitli ampirik denklemleri de içermektedir. Bunun yanı sıra, askıya geçen parçacığın izlenme özelliği bulunmaktadır. Bilindiği üzere sediment, askıda ve tabanda kümelenmiş halde olmak üzere iki şekilde bulunabilmektedir

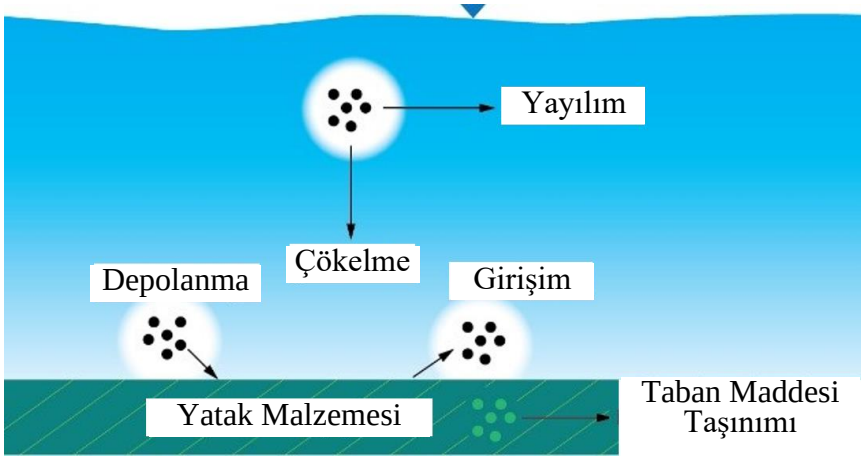
Askıdaki sediment;

- akışkan ile birlikte yayılır,
- Stokes ve doğrusal olmayan sürükleme etkisine ve difüzyona maruz kalır,
- var oluşu bölgesel viskoziteyi ve yoğunluğu etkiler,
- çökelerek tabanda kümlenmiş hale gelebilir.

Kümelenmiş haldeki sediment ise;

- akışkan ile birlikte (askıda olmaksızın) hareket etmez,
- son derece yüksek bir dirençle akışı durdurur,
- geçirimsiz katı madde gibi davranır,
- oyulup askı formuna geçebilir,
- taban yatak yükü olarak taşınabilir.

Flow-3D sediment taşınım modeli 5 farklı hareket modeli kullanmaktadır. Bunlar çökelme, yayılma, girişim, taban maddesi taşınımı ve depolanması modelleridir (Şekil 4.8).

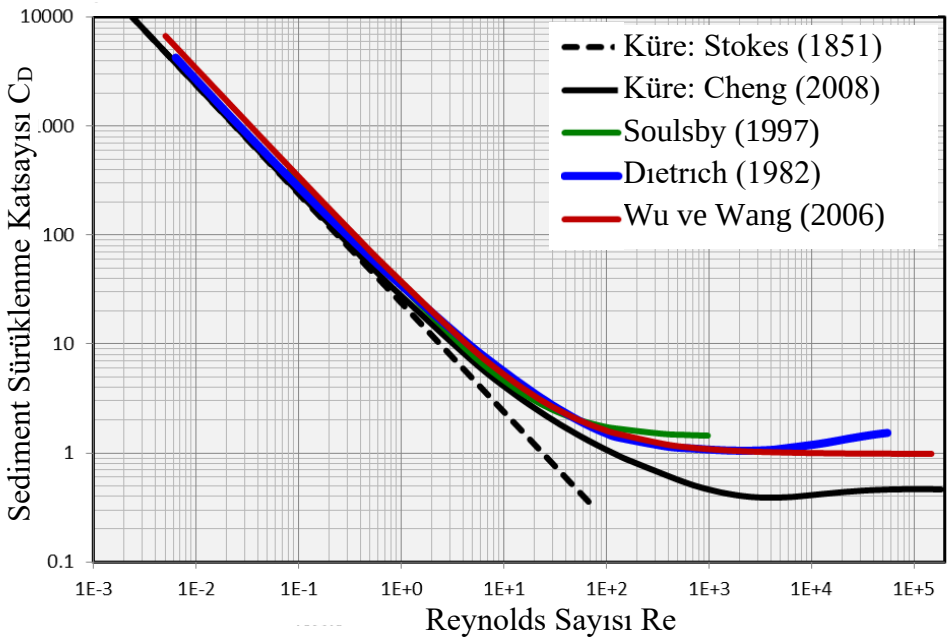


Şekil 4.8. Flow-3D sediment taşınım modelleri (Flow Science, 2019)

4.4.1. Sediment çökelme modeli

Sediment çökelme modeli, sediment danesinin yerçekimi kuvveti etkisinin yani ağırlığının, kaldırma kuvvetinden büyük olması durumunda çökelmesini simule etmektedir. Akışkan ve tüm sediment daneleri arasında göreceli hızlar, özellikle askıda olan her bir sediment danesine etki eden sürüklenmenin, diğer danelerden etkilenmeden oluşacağının kabulüne göre hesaplanmaktadır. Çözümlenebilmesi için parçacıklara ait sürüklenme katsayısı Şekil 4.9'da verilen grafik kullanılarak belirlenmektedir. Bu yaklaşıma göre çökelen sediment daneleri katı bir engele ulaştığında hareket edememekte ve durağan hale geçerek kümelenmiş/birikmiş olmaktadır.

Çökelme daneye etki eden yer çekimi kuvvetinin kaldırma kuvvetinden büyük olması durumunda gerçekleşmektedir. Modelde, her bir daneye etki eden sürüklenme hızı diğerlerinden bağımsız olarak dikkate alınmakta ve danelerin momentum korunumu ile ortalama hızı Eş. 4.5-4.8 kullanılarak hesaplanmaktadır (Brethour ve Burnham, 2010).



Şekil 4.9. Sediment sürüklenme katsayısı (Flow Science, 2014)

$$\frac{\partial u_{s,i}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla u_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}}\nabla P + F - \frac{K_i}{f_{s,i}\rho_{s,i}}u_{r,i} \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\nabla P + F \tag{4.6}$$

$$\bar{\rho} = \sum_{i=1}^{n} f_{s,i}\rho_{s,i} + \left(1 - \sum_{i=1}^{n} f_{s,i}\right)\rho_f \tag{4.7}$$

$$u_{r,i} = u_{s,i} - u_f \tag{4.8}$$

Burada $u_{s,i}$ ve $\bar{u}$ sırasıyla her bir sediment danesinin hızı ve ortalama akım hızı, $\rho_{s,i}$= her bir sediment danesinin yoğunluğu, $\bar{\rho}$= ortalama karışım yoğunluğu, ρ_f= akışkan yoğunluğu, $f_{s,i}$= her bir sediment danesinin hacimsel doluluk oranı, P= basınç, K_i= her daneye ait sürüklenme fonsiyonu, F= ağırlık kuvveti ve $u_{r,i}$= her bir sediment danesinin göreceli hızıdır.

Eş. 4.6'dan Eş. 4.5 çıkarıldığında Eş. 4.9 elde edilmektedir.

$$\frac{\partial u_{drift,i}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla u_{drift,i} = \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - \frac{1}{\rho_{s,i}}\right)\nabla P - \frac{K_i}{f_{s,i}\rho_{s,i}}u_{r,i} \tag{4.9}$$

$$u_{drift,i} = u_{s,i} - \bar{u} \tag{4.10}$$

Burada $u_{drift,i}$ her bir sediment danesinin çökelme hızıdır. Eş. 4.9, sediment hareketinin çözüm süresi ölçeğinde kararlı olacağı ve yayılma teriminin çökelme hızındaki küçük değişimlerden dolayı çok küçük olacağı kabul edilerek Eş. 4.11'deki hali almaktadır.

$$u_{r,i} = \frac{\nabla P}{\bar{\rho} K_i}\left(\rho_{s,i} - \rho_f\right) f_{s,i} \tag{4.11}$$

Eş. 4.9'daki sürükleme fonksiyonu terimi Eş. 4.12'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$K_i = \frac{3}{4}\frac{f_{s,i}}{d_{s,i}}\left(C_{D,i}\left\|u_{r,i}\right\| + 24\frac{\mu_f}{\rho_f D_{s,i}}\right) \tag{4.12}$$

Burada $D_{s,i}$ ve $C_{D,i}$ terimleri sırasıyla her bir sediment danesine ait çap ve sürüklenme katsayısıdır, μ_f ise akışkan viskozitesidir.

Ortalama akış hızı Eş. 4.13'teki bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$\bar{u} = \left(1 - \sum_{j=1}^{N} f_{s,j}\right) u_f + \sum_{j=1}^{N} f_{s,j}\, u_{s,i} \tag{4.13}$$

Bu eşitlikler ile çökelme hızı denklemi Eş. 4.14'teki hali almaktadır.

$$u_{drift,i} = \left(1 - f_{s,i}\right) u_{r,i} + \sum_{j=1}^{N(-i)} f_{s,j}\, u_{r,j} \tag{4.14}$$

Ayrıca çökelme hızı Eş. 4.15'deki gibi tanımlanmıştır (Brethour, 2003).

$$u_{drift} = \frac{f_l {D_s}^2}{18\mu}\frac{\nabla P}{\bar{\rho}}\left(\rho_s - \rho_l\right) \tag{4.15}$$

Burada, D_s= sediment danesi ortalama çapı, $\nabla P/\bar{\rho}$= mekanik potansiyel gradyanı veya kütlesel ivme, f_l= akışkanın doluluk oranıdır. Akışkanın serbest yüzeyli tanımlanması durumunda $\nabla P/\bar{\rho}$, g (yer çekimi ivmesi) değerini almaktadır. Hesap hücresinin komple katı cisim olarak tanımlandığı yerlerde f_l ve çökelme hızı sıfır olmaktadır.

4.4.2. Sediment yayılım modeli

Bu model, sedimentin akım ile beraber taşınmasını yani yayılmasını modellemektedir. Her bir hücrede, askıdaki sedimentin düzgün dağıldığı ve türbülanslı akım nedeniyle difüzyon oluştuğu varsayılmaktadır. Momentum ve süreklilik korunum hesaplamaları, RANS denklemleri ile yapılmaktadır. Sediment, akışkanın içerisinde askıda olduğu bölgelerde akış ile yayılmakta ve bu yayılma Eş. 4.16'daki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$V_F \frac{\partial C_s}{\partial t} + \nabla.(uAC_s) = \text{Difüzyon Terimi} \tag{4.16}$$

Bu eşitlikteki, V_F= akışkanın hesap hücresindeki doluluk oranı, A= her üç yöndeki akışa elverişli alan oranı, u= akışkan yerel hızı ve C_s= sedimentin yerel konsantrasyonudur. Bu bağıntı birinci dereceden sonlu farklar yöntemiyle ifade edilmektedir. Akışkan yoğunluğu, akışkan ve sedimentin hacim ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanmakta ve momentum korunum hesaplarında kullanılmaktadır (Brethour, 2001).

4.4.3. Sediment girişim modeli

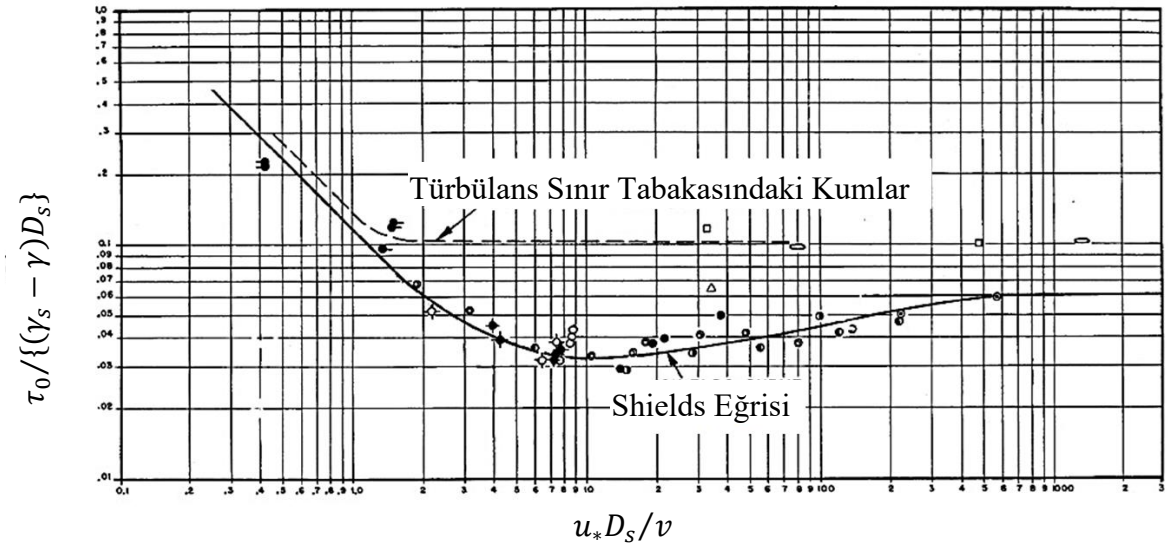
Girişim modeli, sedimentin akım içerisinde kaldırma kuvveti etkisi ile karışımını ve askıya geçmesini modellemektedir. Model, Shields (1936) tarafından tanımlanan kritik kayma gerilmesi yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yaklaşıma göre sediment danesinin harekete geçmesi yani akışkana karşımı, taban kayma gerilmesi değerinin (τ_0), sedimentin kritik kayma gerilmesi değerini (τ_c) aşmasıyla başlamaktadır. Kritik kayma gerilmesi de, Kritik Shields Parametresi (θ_c) boyutsuz değeri yardımıyla hesaplanmaktadır. Shields değeri, günümüze kadar yapılmış olan deneysel çalışmaların sonuçları ve bu deneylerden türetilen ampirik formüller yardımıyla elde edilmektedir (Şekil 4.10).

Shields parametresi, taban kayma gerilmesine bağlı boyutsuz bir büyüklük olup literatürde Eş. 4.17'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\theta_s = \frac{\tau_0}{gD_s(\rho_s - \rho_f)} \tag{4.17}$$

Burada, ρ_s= sediment yoğunluğu ve D_s= sediment dane çapıdır. Eş. 4.18'de tanımlandığı üzere, kritik Shields değeri yani sediment danesinin havalanacağı değer, kritik taban kayma gerilmesi ile hesaplanmaktadır (Wei ve diğerleri, 2014).

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{gD_s(\rho_s - \rho_f)} \tag{4.18}$$



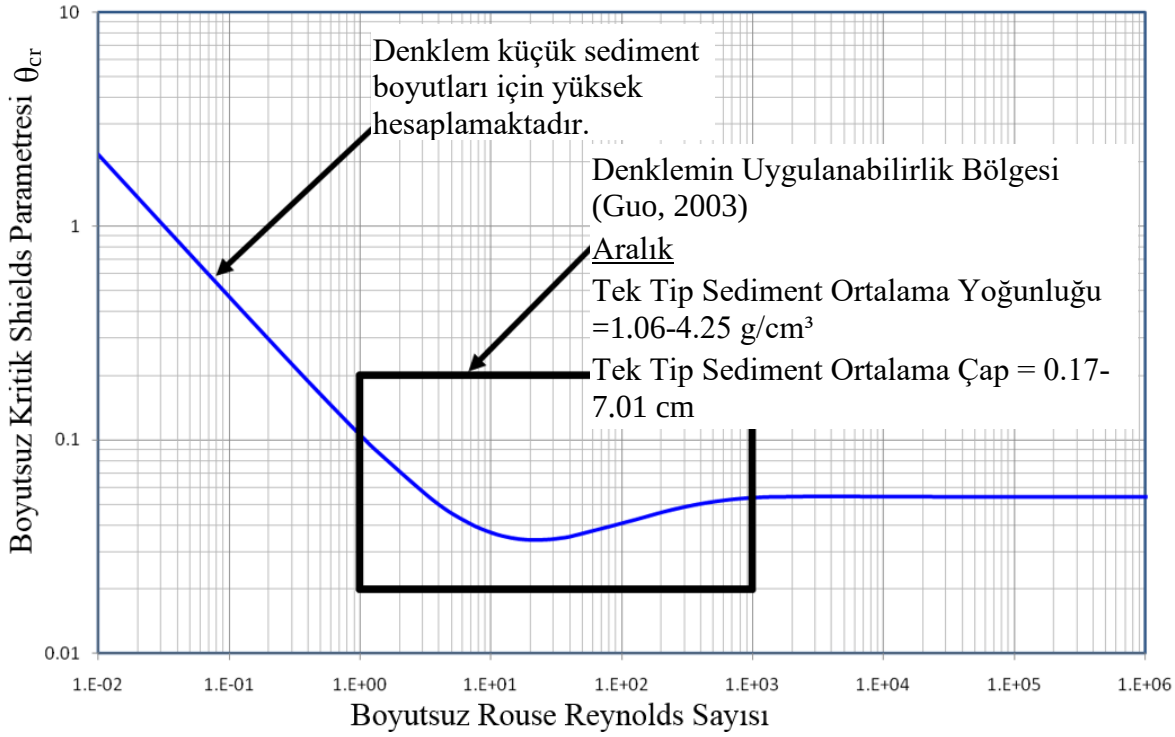
Şekil 4.10. Shields parametrelerinin eğrisi (Flow Science, 2014)

Shields parametresi, kullanıcı tarafından tanımlanabileceği gibi, tanımlanmadığı durumlarda Flow-3D programı tarafından otomatik olarak her bir hücrede, her bir zaman adımında hesaplanabilmektedir. Bu değer hesaplanırken Flow-3D, Guo'nun (1990) yaklaşımındaki Shields-Rouse denklemini kullanmaktadır (Şekil 4.11).

Modelde, boyutsuz Reynolds sayısı (Re) ile bu sayıya bağlı olarak kritik Shields parametresi (θ_{cr}) Eş. 4.19 ve Eş. 4.20'deki gibi hesaplanmaktadır (Brethour ve Burnham, 2010).

$$Re_i^* = D_{s,i}\frac{\sqrt{0.1(\rho_{s,i} - \rho_f)\|g\|D_{s,i}}}{\mu_f} \tag{4.19}$$

$$\theta_{cr,i} = \frac{0.1}{Re_i^{*\frac{2}{3}}} + 0.054\left[1 - \exp\left(\frac{-Re_i^{*0.52}}{10}\right)\right] \tag{4.20}$$



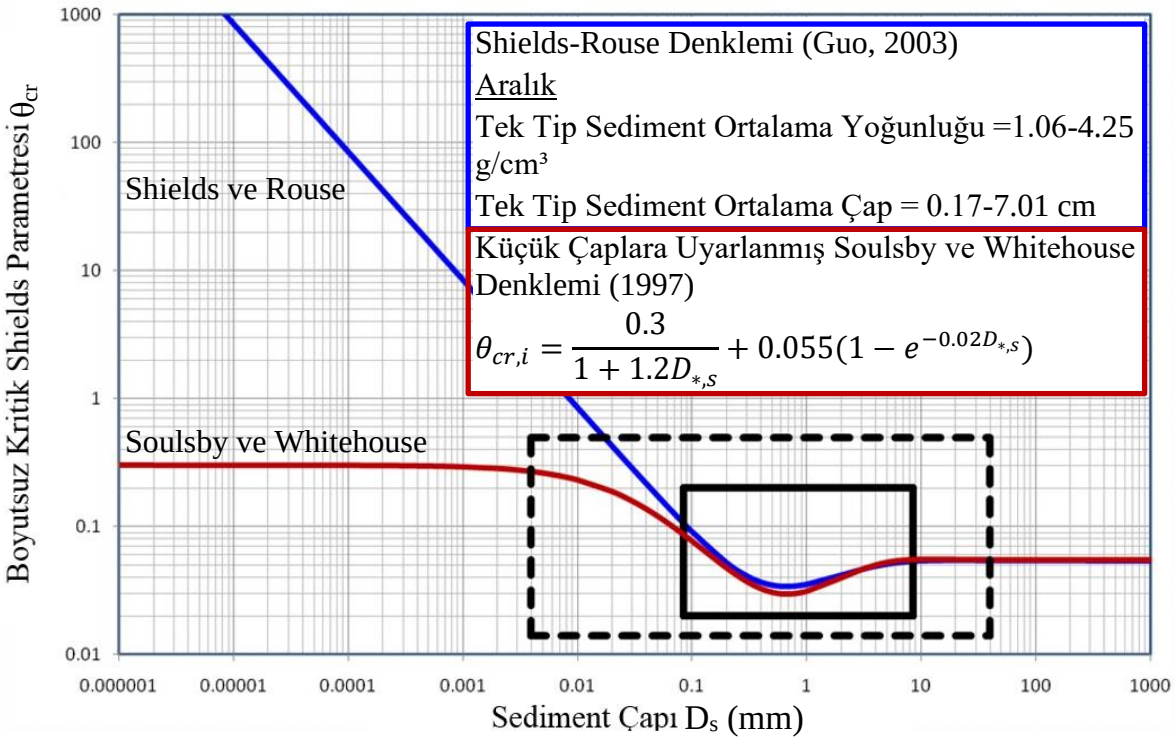
Şekil 4.11. Shields-Rouse denklemi sonucunda elde edilen Shields abağı (Guo 1990; 2003)

Ancak, modelde 0,17 mm ve daha küçük dane çapları için Shields parametresinin çok büyük hesaplandığına dikkat edilmelidir. Şekil 4.12'de görüldüğü üzere, 0,5 mm'den düşük çaplarda Shields değeri logaritmik olarak artmaktadır. Ancak, Bagnold (1963) yapmış olduğu çalışmalarında Shields parametresinin 0,3 değerinden daha büyük olamayacağını göstermiştir. Bu nedenle Shields parametresi programda küçük çaplı sediment daneleri için kullanıcı tarafından tanımlanmalı ve daha doğru sonuçlar veren Soulsby-Whitehouse (1997) tarafından geliştirilmiş bağıntının eğrisi kullanılmalıdır.

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_{*,s}} + 0.055(1 - e^{-0.02D_{*,s}}) \tag{4.21}$$

$$D_{*,s} = D_s \left[\frac{g(s_s - 1)}{{v_f}^2}\right]^{1/3} \tag{4.22}$$

Buradaki $s_s = \rho_s / \rho_f$ olarak hesaplanmaktadır (Wei ve diğerleri, 2014).



Şekil 4.12. Shields parametresi eşitlikleri ve eğrileri (Guo, 2003; Soulsby ve Whitehouse, 1997)

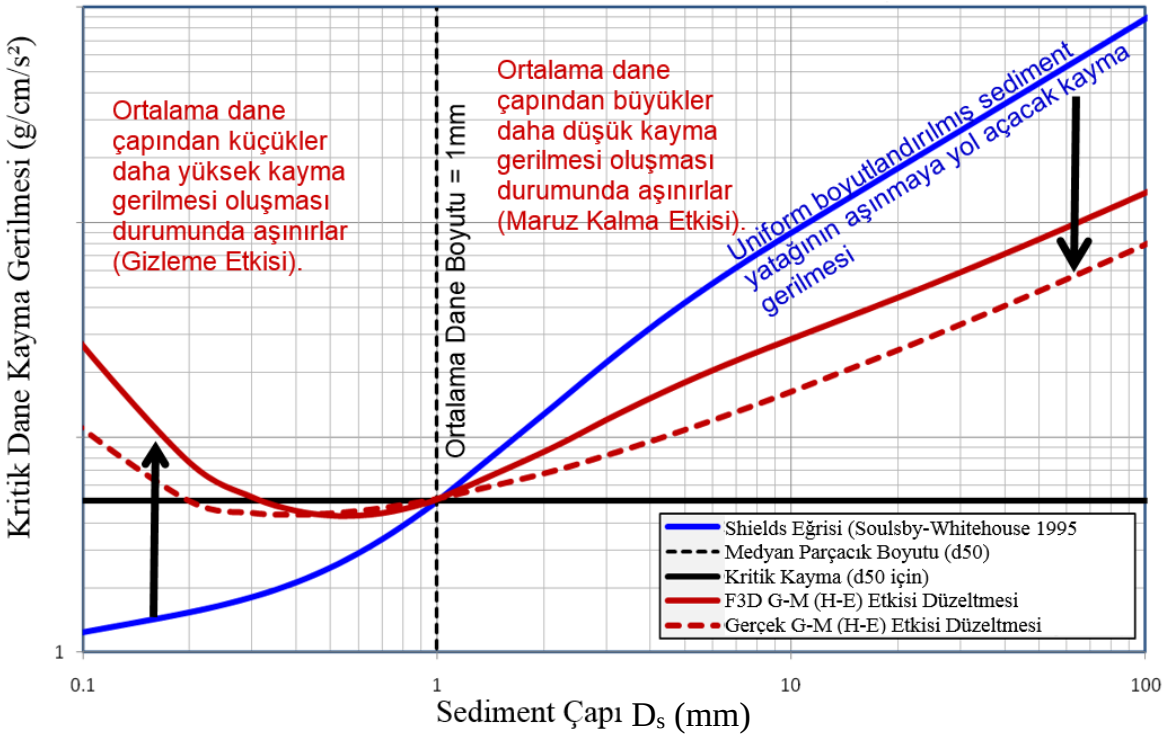
Tabanda hareketi başlatacak kritik Shields parametresinin hesabı, gizleme/ortaya çıkarma etkisi içermesi ve sediment yatağı açısı bulunması durumlarında program tarafından aşağıdaki gibi uyarlanmaktadır.

Gizleme/ortaya çıkarma etkisi: Modelde birden çok sediment türü tanımlandığında büyük sediment daneleri, kendisinden daha küçük olanları gizleyerek askıya geçmelerini engelemekte ve ilk olarak kendileri hareket etkisine maruz kalmaktadır. Bu durumda ilk aşamada her bir hesap hücresinde yerel dane boyutunun ortalama değeri Eş. 4.23 ile hesaplanmaktadır.

$$D_{50} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} c_i} \sum_{i=1}^{n} c_i D_{s,i} \tag{4.23}$$

Eş. 4.23'teki c_i her bir sediment türünün kütlesel konsantrasyonudur. Gizleme/ortaya çıkarma etkisinin var olması durumunda, program tarafından ortalama değer hesaplanarak analiz, biraz daha kolay çözülür hale getirilmekte ve buna göre Şekil 4.13'te görüldüğü gibi Shields parametresi Eş. 4.24'teki gibi uyarlanmaktadır (Egiazaroff, 1965).

$$\theta'_{cr,i} = \theta_{cr,i} \frac{1.666667}{\log_{10}(19\frac{D_{s,i}}{D_{50}})^2} \tag{4.24}$$

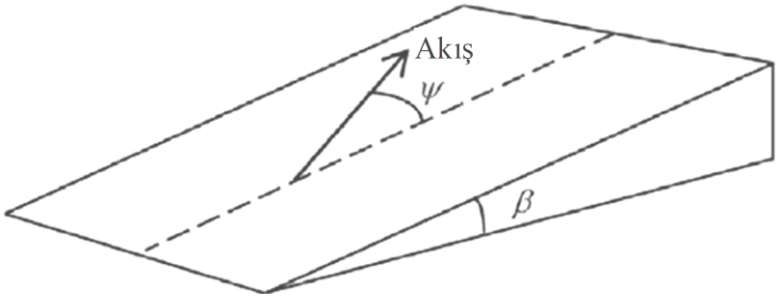


Şekil 4.13. Egiazaroff bağıntısına göre Shields eğrisindeki uyarlama (Brethour ve Burnham, 2010)

Sediment yatağı eğimi: Sediment yatağının eğimli olması durumunda, yer çekimi etkisi iki bileşen içermektedir. Bu durum akış yönüne de bağlı olarak, yatağın ya daha çok dengede olmasına ya da daha kolay oyulmasına neden olmaktadır. Bu durumun etkisi Soulsby (1997) tarafından tanımlanan Eş. 4.25 ile hesaplanabilmektedir.

$$\theta'_{cr} = \theta_{cr} \frac{\cos\varphi \sin\beta + \sqrt{\cos^2\beta\, tan^2\Phi - \sin^2\varphi \sin^2\beta}}{\tan\Phi} \tag{4.25}$$

Burada β= sediment yatağının açısı, ϕ= sediment içsel sürtünme açısı (varsayılan değer 32°) ve ψ= akış yönü ile eğimli yüzey arasındaki açıdır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Eğimli sediment yatağı ve akış yönü (Wei ve diğerleri, 2014)

Görüldüğü üzere sediment danelerine ait Shields parametresinin hesaplanmasında veya belirlenmesinde birçok yaklaşım mevcuttur. Ama gerçekte çok iyi bir şekilde biliniyor olsa dahi, Flow-3D sediment modellemesinde bu değerin bir kalibrasyon parametresi olduğuna dikkat edilmelidir. Özellikle daha büyük boyutlu hücrelerle çözümlemelerde, bu parametrenin kalibrasyonu çok önemlidir. Shields parametresinin belirlenmesinden sonra, sediment danesini harekete geçirme hızı Eş. 4.26'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$u_{lift,i} = \omega_i n_s {D_*}^{0.3} (\theta_{s,i} - \theta_{cr,i})^{1.5} \sqrt{\frac{\|g\| D_{s,i} (\rho_{s,i} - \rho_f)}{\rho_f}} \tag{4.26}$$

$$\theta_{s,i} = \frac{\tau_0}{\|g\| D_{s,i} (\rho_{s,i} - \rho_f)} \tag{4.27}$$

Buradaki $u_{lift,i}$ her sediment danesine etkiyen kaldırma hızı ve ω_i ampirik kaldırma-karışım katsayısı olup su altındaki sediment daneleri için varsayılan değeri 0,018'dir. n_s de birikmiş haldeki sediment yatağının normali olarak tanımlanmaktadır (Brethour ve Burnham, 2010).

4.4.4. Sürüntü maddesi taşınım modeli

Sürüntü maddesi taşınım modeli, sedimentin akışa karışmadan, sadece tabanda sekerek ya da dönerek taşınımını modellemektedir. Yeterli derecede iyileştirilmiş çözüm ağı aralıkları ile küçük zaman adımları kullanıldığında, teorik olarak herhangi bir sürüntü maddesi taşınım modeli gerekli olmamaktadır. Ancak bu modelin gereksinimi büyük ölçekli projelerde ortaya çıkmaktadır. Çünkü bu model büyük çözüm ağı aralıkları kullanıldığında, ve ince çakıl boyutundan daha büyük parçacıklarla çalışıldığında yararlı olmaktadır. Sürüntü maddesi taşınımı, ortalama kayma gerilmesinin kritik ortalama kayma gerilmesinden düşük olduğu durumlarda gerçekleşebilmektedir. Modelde bu modülün çözümünde, Meyer-Peter-Müller bağıntısı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sedimentin

depolandığı yatak yüzeyinin birim genişliğinden taşınan sediment miktarını tahmin etmektedir. Buna göre boyutsuz sürüntü maddesi taşınım miktarı (ϕ_i), Eş. 4.28 ile gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\emptyset_i = \beta_i(\theta_{s,i} - \theta_{cr,i})^{1.5} \tag{4.28}$$

Buradaki βi= boyutsuz sürüntü maddesi hareketi katsayısıdır. Modelde, sediment taban yükü hareketi katsayısı tanımlanarak modelin çözümü aktif hale getirilmektedir. Olağan değeri Meyer-Peter-Müller yaklaşımına göre 8 alınabileceği gibi, Ribberink'in (1998) yüksek, orta ve düşük taşınım yaklaşımlarına göre sırasıyla 13 ve 5,7 olarak alınması da önerilmektedir. Literatürde bu katsayı için öngörülen diğer değerler; Hunziker'e (1995) göre 5, Fernandez Luque ve Van Beek'e (1976) göre 5,7 ve Jaggi'ye (1992) göre de 5,7'dir.

Boyutsuz sürüntü maddesi taşınım miktarı hesaplandıktan sonra, tabanda taşınan sediment miktarı ($q_{b,i}$), sürüntü maddesi kalınlığı yani sıçrama yapan sediment tabakası kalınlığı (δ_i) ve taşınım hızı ($u_{bedload,i}$) Eş. 4.29, Eş. 4,30 ve Eş. 4.31 ile hesaplanmaktadır.

$$q_{b,i} = \emptyset_{0,i}\left[\|g\|\frac{(\rho_{s,i} - \rho_f)}{\rho_f}d_{s,i}^3\right]^{\frac{1}{2}} \tag{4.29}$$

$$\frac{\delta_i}{d_{50}} = 0.3d_*^{0.7}(\frac{\theta_i}{\theta''_{cr,i}} - 1)^{0.5} \tag{4.30}$$

$$u_{bedload,i} = \frac{q_{b,i}}{\delta_i f_{b,i}} \tag{4.31}$$

Ayrıca taşınabilen sürüntü maddesi tabakasına ait hacimsel oran (f_b), van Rjin'in yaklaşımına göre Eş. 4.32'deki gibi hesaplanmaktadır.

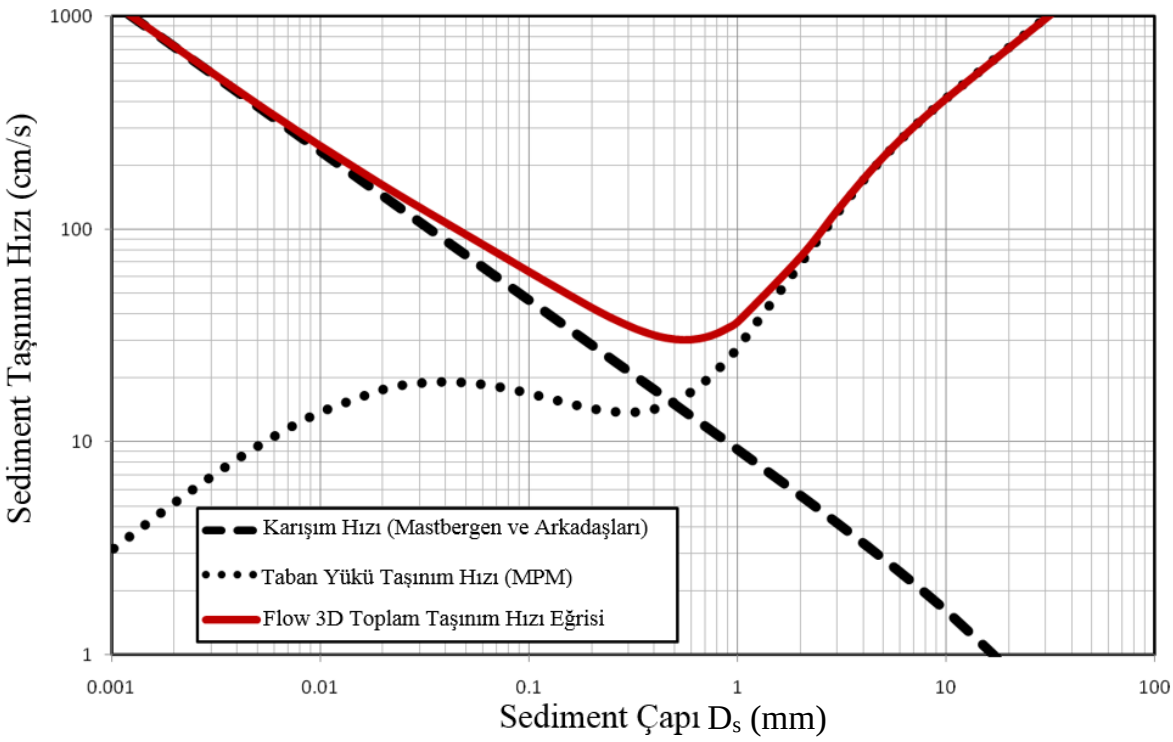
$$f_{b,i} = 0.18\frac{f_{packed}}{d_*}(\frac{\theta_{0,i}}{\theta''_{cr,i}} - 1) \tag{4.32}$$

Burada f_{packed}= tabanda birikmiş haldeki tüm sürüntü maddesinin hacimsel oranıdır.

Tüm bu hesaplamalara bağlı olarak Flow-3D tabanda hareket eden toplam sediment akışını ($Q_{b,i}$) Eş. 4.33'te gösterildiği gibi hesaplamaktadır (Brethour ve Burnham, 2010).

$$Q_{b,i} = u_{bedload,i}\delta_i f_{b,i}\rho_{s,i} \tag{4.33}$$

Şekil 4.15'te homojen dağılımlı sediment yatağında, taban kayma gerilmesi 1000 g/cm/s² için Mastbergen-Van Den Berg (2003) ve Meyer-Peter-Mueller sediment taşınım yaklaşımları grafiksel olarak gösterilmektedir. Mastbergen ve Van Den Berg (2003) yaklaşımıyla sedimentin askıya geçiş hızı değerleri ve Meyer-Peter-Mueller yaklaşımıyla da tabandaki sürüntü maddesi hızının değerleri hesaplanmaktadır.



Şekil 4.15. Taban kayma gerilmesi 1000 g/cm/s² için, Mastbergen - Van Den Berg (2003) ve Meyer-Peter-Mueller sediment taşınımı yaklaşımları grafiği ve Flow-3D toplam sürüntü maddesi taşınım hızı eğrisi (Brethour ve Burnham, 2010)

4.4.5. Sediment depolanma modeli

Sediment daneleri hareket edemediği zaman katı kütle gibi davranmaktadır. Tabanda depolanmış sediment tabakası üzerine etkiyen kayma gerilmesi üç boyutlu türbülanslı akımlar için Eş. 4.34'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$u = u_\tau \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Y}{\frac{v}{u_\tau} + k_s} \right) \right] \tag{4.34}$$

Burada u_τ= kayma hızı, $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$, τ= yatak kayma gerilmesi, *Y*= hareketsiz sınırdan uzaklık, κ= 0,4 von Karman sabiti ve k_s= Nikuradse pürüzlülüğü olarak tanımlanmaktadır. Nikuradse k_s pürüzlülüğü dane büyüklüğüne bağlı olarak Eş. 4.35'deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$k_s = c_s d_{50} \tag{4.35}$$

Burada c_s kullanıcı tanımlı bir katsayı olup 2,5 alınması önerilmektedir (Wei ve diğerleri, 2014).

Sığ sulardaki akımlarda yatak kayma gerilmesi Eş. 4.36 ile tanımlanmaktadır.

$$\tau_0 = \rho_f C_D \bar{u}\,|\bar{u}| \tag{4.36}$$

Burada $\bar{u}$= ortalama akım hızı ve C_D= sürükleme katsayısıdır. C_D sürükleme katsayısı 0,0026 olarak önerilmesine rağmen kullanıcı tarafından (Soulsby, 1997) Eş. 4.37 bağıntısıyla hesaplanabilir.

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{B + \ln\,(z_0/h)}\right]^2 \tag{4.37}$$

Buradaki h yerel akım derinliği, B= 0,71, z_0= k_s/30 olarak tanımlanır (Wei ve diğerleri, 2014).

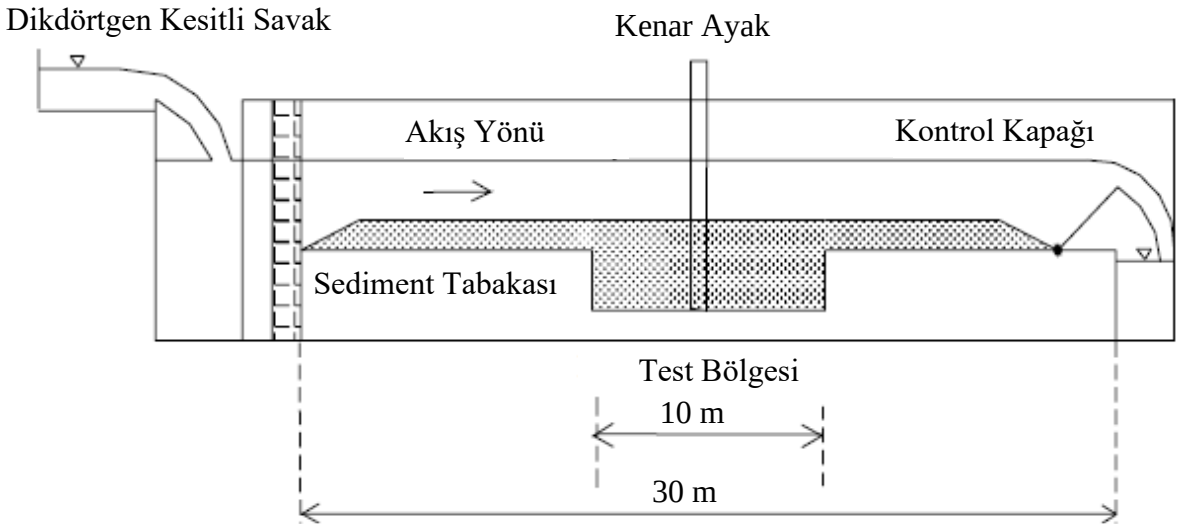
5. KÖPRÜLERDE MEYDANA GELEN OYULMANIN SAYISAL MODEL BENZEŞİMİ

Çalışma kapsamında akarsu köprülerinde farklı akım durumlarında meydana gelen iki farklı oyulma türünün simülasyonu yapılmıştır. Bunlardan ilki serbest akım durumunda kenar ayak etrafında meydana gelen yerel oyulmanın, ikincisi ise basınçlı ve savak tipi akım durumlarında ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen daralma oyulmasının benzeşimleridir. Sayısal modelde yapılan kalibrasyon çalışmaları sonrasında modelin farklı şartlar altında meydana gelen oyulma çukurunu tahmin edebilmesi test edilmiştir. Çalışmada, Intel Core İ7-4700 HQ işlemcili, 2,40 GHz işlemci hızına sahip, 8 çekirdekli ve 16 GB Ram kapasiteli bir dizüstü bilgisayarda Flow-3D programının 11.0.4 versiyonu kullanılmıştır.

5.1. Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Yerel Oyulmanın Benzeşimi

5.1.1. Deneysel çalışma

Kayatürk'ün (2005) çalışmasında çeşitli köprü yan ayakları etrafındaki oyulmaları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı boyutlardaki köprü kenar ayakları kullanılarak ayaklar etrafında meydana gelen sediment oyulmaları gözlenmiştir. Deneyler 30 m uzunluğunda, 1,5 m genişliğinde ve taban eğimi 0,001 olan bir kanalda 10 m uzunluğunda ve 0.5 m derinliğinde yatak malzemesi ile doldurulmuş bir test bölgesinde yapılmıştır. Taban malzemesinin medyan çapı D_{50} = 1,48mm, danelerin geometrik standart sapması σ_g = 1,28 olarak bulunmuştur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Laboratuvar deney kanalı boy kesiti (Kayatürk, 2005)

Kayatürk (2005) köprü kenar ayak boyutlarının oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yaptığı çalışmanın ilk bölümünde 10 cm, 15 cm, 20 cm ve 25 cm kenar ayak uzunlukları (L_a), 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm ve 50 cm kenar ayak genişlikleri (B_a), 10 cm, 12 cm ve 14 cm akım derinlikleri ile 0,050 m^3/s debi değeri kullanmış ve oluşan oyulma çukuru derinliklerini incelemiştir. Çalışmada ayrıca köprü kenar ayaklarının etrafında meydana gelen oyulma çukurunun zamanla değişimi, oyulmaya karşı koruma amaçlı yerleştirilen plakalı ve plakasız durumlar incelenmiştir. Bunun için 7,5 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm ve 35 cm kenar ayak uzunlukları, 10 cm sabit kenar ayak genişliği, 10 cm sabit su derinliği ve 0,050 m^3/s debi değeri kullanılmıştır. Plakalı deneylerde de plaka çeşitli yüksekliklerde ve boyutlarda konumlandırılmıştır. Aynı zamanda akım koşullarının oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkileri plakasız ve oyulmaya karşı koruma amaçlı yerleştirilen plakalı durumlar için ayrıca incelenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, Flow-3D modelinde oyulma çukuru benzeşimi için köprü ayağı uzunluğunun oyulma derinliği üzerindeki etkisinin incelendiği Çizelge 5.1'te verilen deney verileri kullanılmıştır.

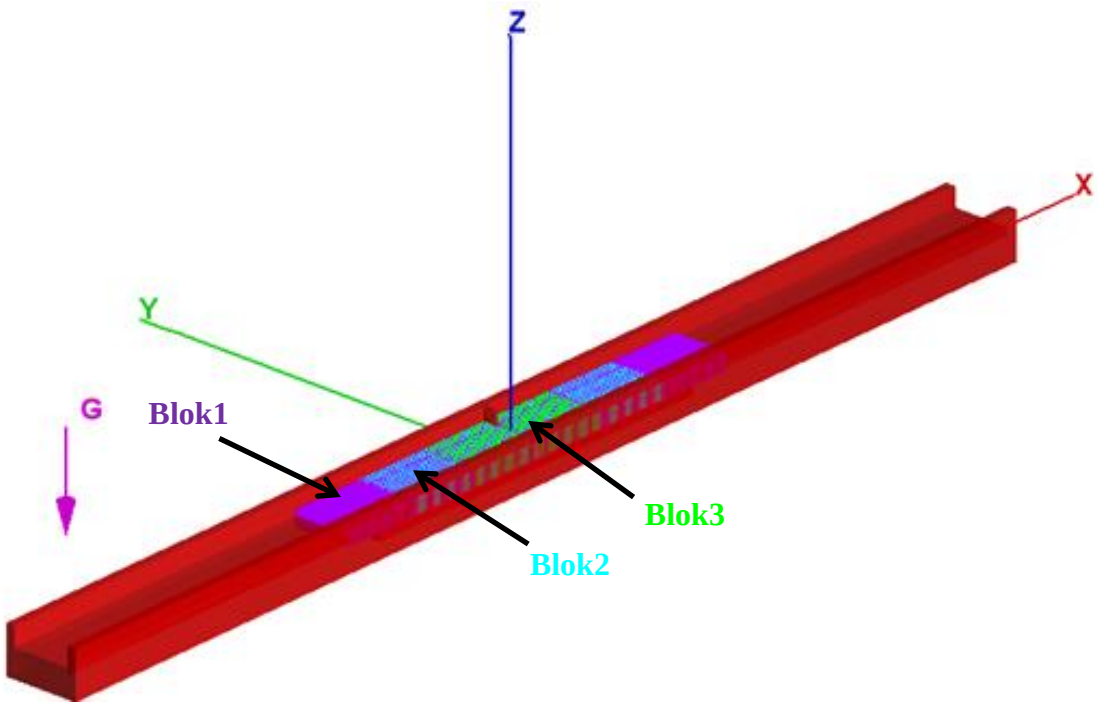
Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan laboratuvar verileri (Kayatürk, 2005)

L_a= 35cm ve B_a= 10cm		L_a= 20cm ve B_a= 10cm		L_a= 15cm ve B_a= 10cm	
Zaman (dk)	Plakasız y_{smax} (cm)	Zaman (dk)	Plakasız y_{smax} (cm)	Zaman (dk)	Plakasız y_{smax} (cm)
1	2,00	1	1,40	1	1,10
2	4,20	2	4,50	2	2,70
4	5,50	4	5,45	4	4,70
6	7,70	6	6,60	6	5,20
8	9,25	8	7,10	8	5,30
10	10,05	10	7,50	10	5,40
15	11,00	15	7,80	15	6,10
20	12,00	20	8,50	20	7,00
25	12,60	25	9,00	25	7,45
30	13,35	30	9,50	30	7,70
40	14,20	40	10,20	40	8,25
50	14,75	50	10,85	50	8,75
60	15,40	60	11,30	60	9,05
80	17,20	80	11,80	80	9,60
90	17,60	90	12,20	90	9,85
100	17,70	100	12,55	100	10,20
120	17,80	120	12,70	120	10,60

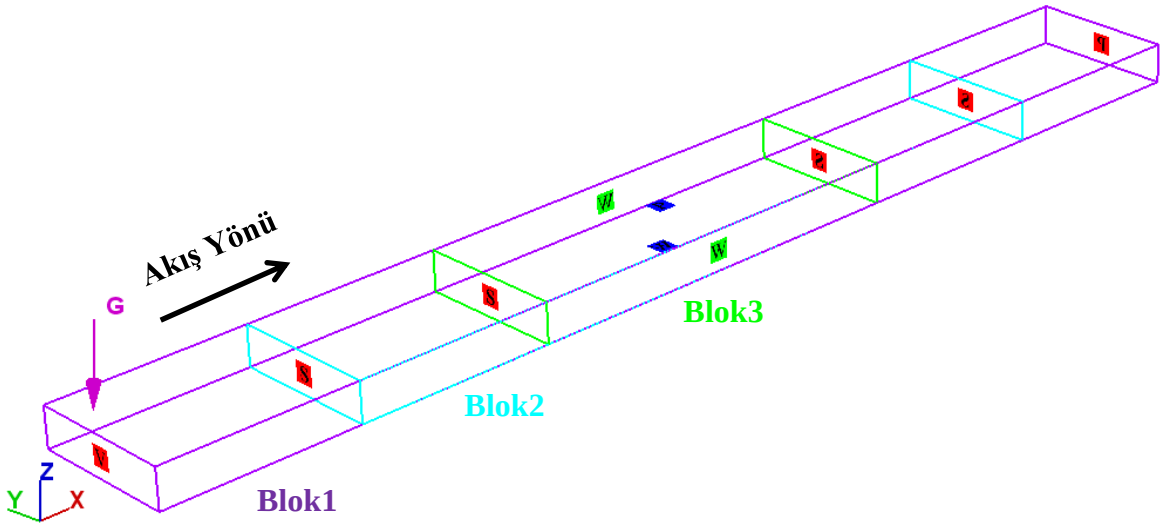
5.1.2. Hidrodinamik model kurulumu

Sediment test bölgesi yatağında oyulma analizlerine başlamadan önce, modelde dikdörtgen kanal içerisinde akım koşullarının kararlı akım haline getirilmesi amacıyla kanal, kenar ayak ve sediment yatağı katı cisim olarak, yani herhangi bir oyulma meydana gelmeyecek şekilde tanımlanmıştır. Modelde (0,0,0) orijin noktası köprü kenar ayağı ekseninde kanalın

orta noktası olarak tanımlanmış olup model boyutları, Şekil 5.1'de verilen 10 m uzunluğunda olan test bölgesini kapsayacak şekilde akım yönünde 12 m, akım yönüne dik 1,5 m ve düşey yönde derinlik boyunca 0,4 m olarak belirlenmiştir (Şekil 5.2). Akım derinliği ve oluşabilecek oyulma çukuru derinliği göz önüne alınarak düşey yöndeki kalınlık 0,4 m olarak seçilmiştir.



Şekil 5.2. Kararlı akım koşullarının elde edildiği ön analiz modeli



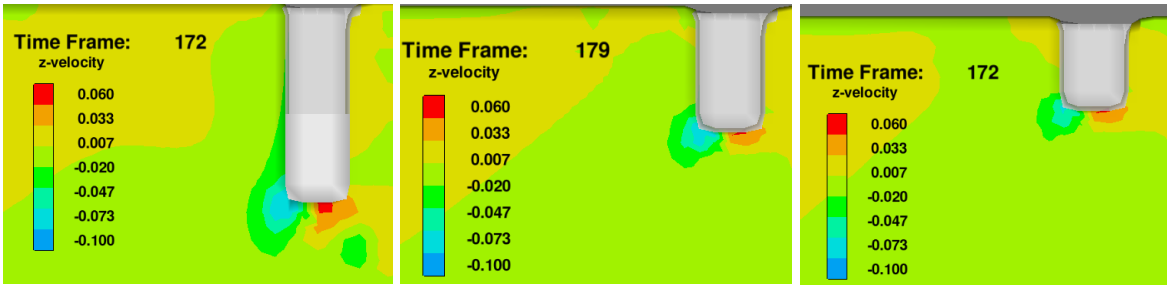
Şekil 5.3. Kararlı akım koşullarının elde edildiği ön analiz modeli sınır koşulları

RNG türbülans çözüm modelinin uygulanarak kararlı akımın elde edildiği benzeşimde modelin akış yönü doğrultusunda giriş kısmında su yüksekliği ve akım hızı, çıkışta su yüksekliği, kanal yan cidarlarında ve tabanda duvar, kanal su üst yüzü sınırında atmosfer basıncı ve hücre bloklarının birbirine değen yüzeylerinde sürekliliği sağlayan simetri sınır koşulları tanımlanmıştır (Şekil 5.3).

Öncelikle L_a= 35cm ve B_a= 10cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafında kararlı akım koşulları oluşturulmuş ve ilk 10 dakikalık deney süresi için sayısal model, çözüm ağı gözü aralıkları ve sediment parametreleri değiştirilmek suretiyle laboratuvar verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Sonraki model benzeşimlerinde her üç ayak etrafında 120 dakikalık deney süresince elde edilmiş model sonuçlarıyla laboratuvar verileri karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.

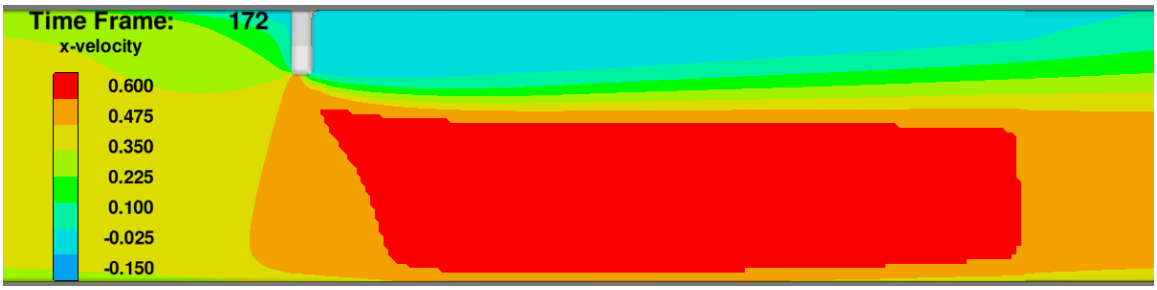
0,05 m^3/s'lik debi ve 10 cm'lik akım derinliği olan dikdörtgen kanal içerisinde L_a= 35cm / B_a= 10cm, L_a= 20cm / B_a= 10cm ve L_a= 15cm / B_a= 10cm boyutlarındaki köprü kenar ayakları etrafında akım koşullarının kararlı akım haline getirilmesi için hazırlanan modelde çözüm ağı kenar uzunlukları boyutları 5,0cm ve 2,50cm olan, iç içe geçmiş hücre blokları oluşturulmuş ve toplam 364 800 adet hücre tanımlanmıştır. Modellerde ortalama 175 saniyelik simülasyon süresi sonunda kararlı akım koşulları elde edilmesine rağmen simülasyonlar 3 ayakta sırasıyla 48, 35 ve 30 dakikalık koşum süreleri sonunda çözüme ulaşmıştır.

Şekil 5.4 - Şekil 5.6 arasında kararlı akım durumunda elde edilen düşey yöndeki ve akım doğrultusundaki hız dağılımları ile akım derinliklerinin üstten görünüşleri verilmiştir. Sediment sayısal benzeşiminin temelini oluşturan kararlı akım sonuçlarıyla laboratuvar deneylerinde kullanılmış olan başlangıç koşulları sağlanmış ve model sonuçları L_a= 35cm / B_a= 10cm, L_a= 20cm / B_a= 10cm ve L_a= 15cm / B_a= 10cm boyutlarındaki köprü kenar ayakları etrafındaki oyulmanın benzeşiminde kullanılmıştır.

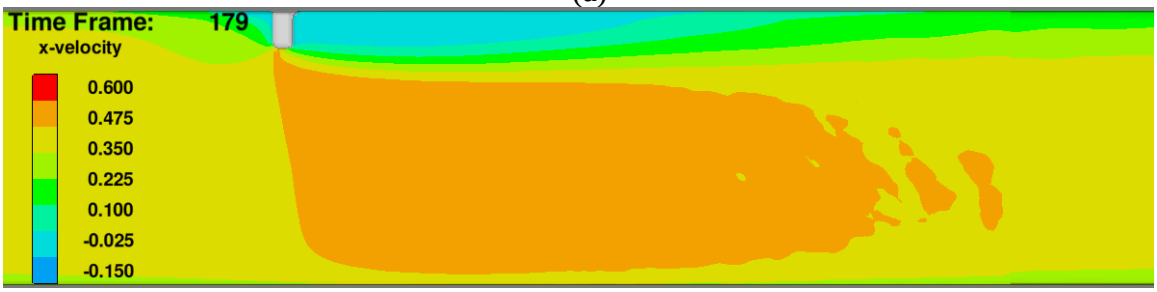


(a) (b) (c)

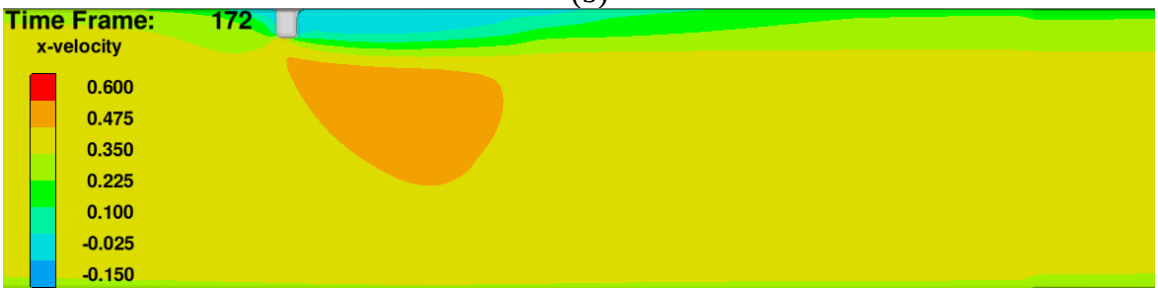
Şekil 5.4. Kararlı akım koşulları düşey (z) yönlü hız dağılımı (m/s) plan görünüşü: (a) L_a= 35 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (c) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm



(a)

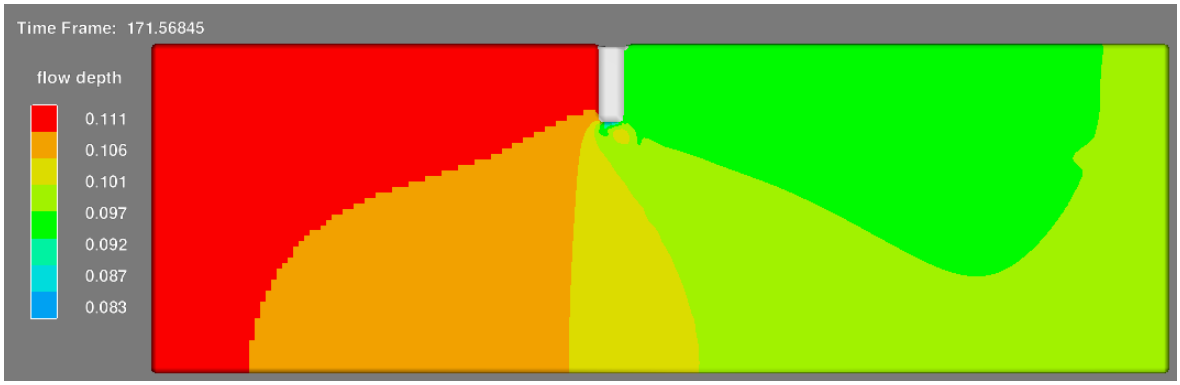


(b)

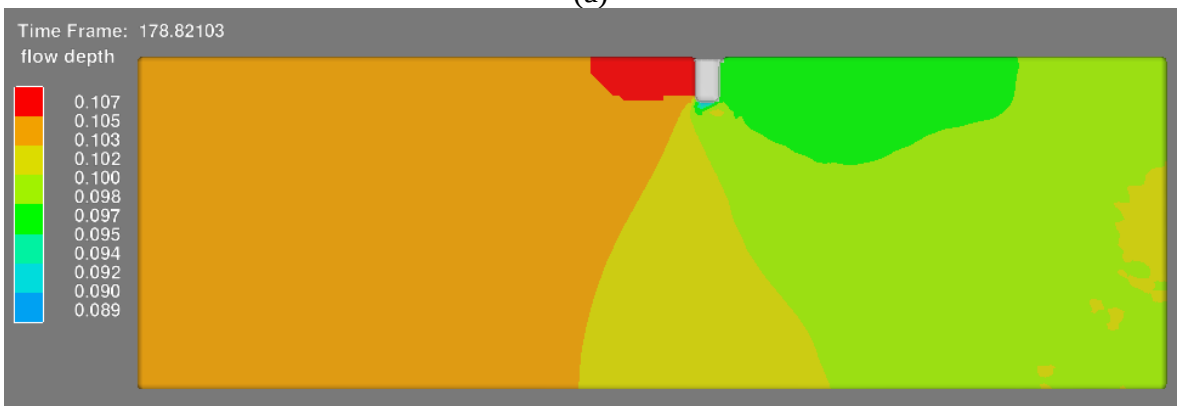


(c)

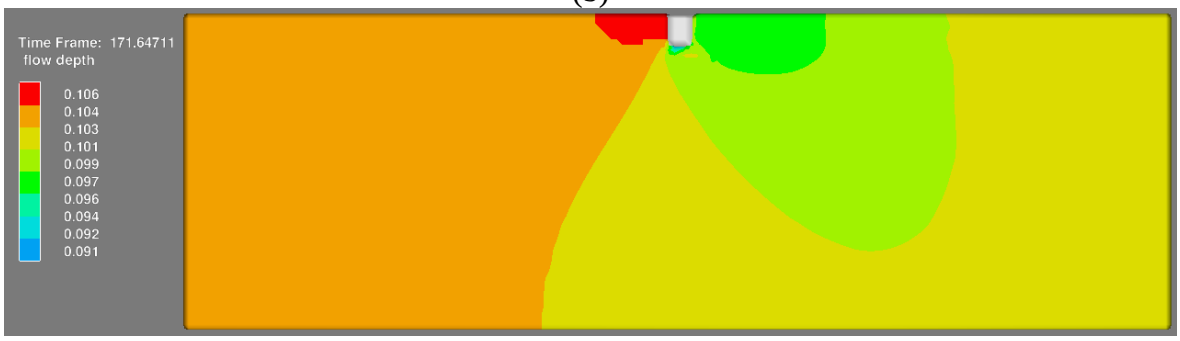
Şekil 5.5. Kanal boyunca kararlı akım koşulları x yönü hız dağılımı (m/s) plan görünüşü: (a) L_a= 35 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (c) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.6. Kanal boyunca kararlı akım koşulları akım derinliği (m) plan görünüşü: (a) L_a= 35 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (c) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm

5.1.3. Sediment taşınımı model kurulumu

Flow-3D modelinde sediment analizlerinin aktif hale gelebilmesi için fiziksel özelliklerin tanımlandığı bölüm ‘sediment oyulması’ (“sediment scour”) seçeneği aktif hale getirilmiştir. Bunun yanında, yer çekimi etkilerinin tanımlanması açısından ‘yerçekimi ve eylemsiz olmayan referans çerçevesi’ (“gravity and non-inertial reference frame”) ile türbülanslı akım çözüm tipleri ‘viskozite ve türbülans’ (“viscosity and turbulence”) seçenekleri de akışkanın hareketinin benzeşimi için aktif hale getirilmiştir. Çalışmada

sediment grubuna ait özgül ağırlık olarak, kuvars kumu için önerilen 2,65 g/cm³ kullanılmıştır.

Modelde tanımlanan maksimum sıkıştırma oranı ("maximum packing fraction"), test bölgesinde sedimentin çökmesi ve tabanda depolanması durumunda maksimum katı hacim oranını kontrol eden parametredir. Programda kabul edilmiş değer olarak küreler için maksimum sıkıştırma oranı olan 0,64 değeri kullanılmaktadır. Bu değer, çok dağılımlı sedimentler için daha fazla olabilirken, tekil dağlımlı, düzensiz sediment daneleri için daha düşük olabilmektedir. Bu nedenle kalibrasyon modellerinde 0,55 ve 0,75 değerleri de denenmiştir.

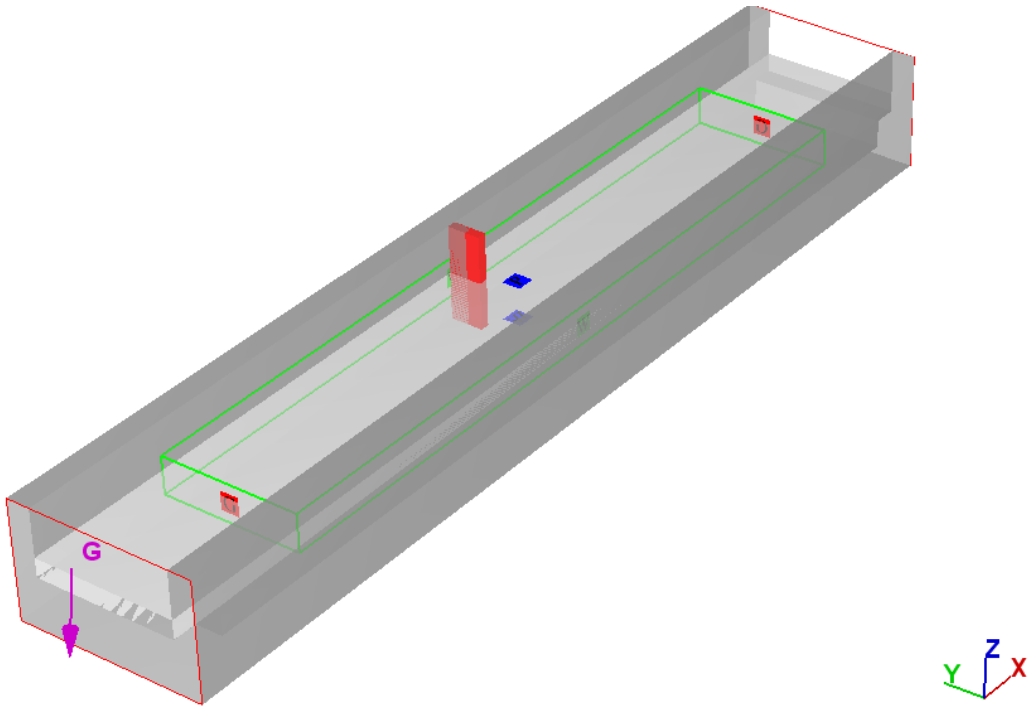
Yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranının, özellikle kalibrasyon aşamasında değiştirilerek kullanılması önerilmektedir. Başlangıç değeri olarak 2,5 alınması Wei ve diğerleri (2014) tarafından önerilmiştir. 5,0, 7,5 ve 10,0 değerleri de kalibrasyon modellerinde dikkate alınarak artan yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranının oyulma derinliği üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bölüm 4.4.3'te sediment girişim modelinde hesaplanması anlatılan kritik Shields değeri, tabanda depolanmış sediment danesini harekete geçiren kritik taban kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan boyutsuz bir büyüklüktür. Model bu değeri otomatik olarak hesaplayabildiği gibi kullanıcı tarafından da tanımlanabilmektedir. Ancak, 0,17 mm'den küçük sediment daneleri için modelin bu değeri yanlış hesapladığı ve kullanıcı tarafından manuel olarak tanımlanmasının önerilmektedir (Brethour ve Burnham, 2010). Çalışmada kullanılan sediment dane çapının 1,48 mm olmasından dolayı kalibrasyon modelinde programın Shields değerini otomatik hesaplaması dahil edilmiştir. Ayrıca 1,48 mm dane çapına karşılık gelen 0,033 Shields değeri ve bunun haricinde daha düşük değerler (0,01 ve 0,02) dikkate alınmıştır.

Karışım katsayısı, kritik kayma gerilmesinden daha büyük olan taban kayma gerilmelerinde erozyona uğrayan sediment oranını kontrol eden bir parametredir. Çalışmada kullanılan değeri, Mastbergen ve Von den Berg (2003) tarafından tanımlandığı üzere 0,018'dir. 0,009, 0,027 ve 0,036 değerleri de kalibrasyon modellerinde dikkate alınarak değişken karışım katsayısı değerlerinin oyulma çukuru boyutu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Doğal durma açısı, tabandaki veya şevdeki sediment danesinin kaymaya karşı koyduğu maksimum sürtünme açısı olarak tanımlanmakta ve sediment yatağının yerel kritik Shields parametresinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Kalibrasyon modellerinde kum için ideal değerler olan 28°, 30° ve 32° açıları kullanılmıştır.

Yatak yükü katsayısı, Meyer, Peter ve Muller'in Soulsby (1997) denkleminde tanımladığı üzere, kritik taban kayma gerilmesinden daha büyük kayma gerilmelerinde tabanda taşınan sürüntü maddesinin oranını kontrol eden bir parametredir. Ortalama olarak kullanılan değeri 8,0 olmakla birlikte Ribberink'in (1998) önerdiği üzere; daha yüksek ve daha düşük taşınım yaklaşımlarına göre sırasıyla 13,0 ve 5,7 olarak da tanımlanabilmektedir (Flow-3D, 2014).



Şekil 5.7. Sediment benzeşimi örnek modeli sınır koşulları

RNG türbülans çözüm metodunun kullanıldığı sediment taşınım model sınırları belirlenirken kararlı akım koşullarının elde edildiği model sınırlarının içerisinde kalacak şekilde tanımlanmıştır. Bunun sebebi; akış yönünde giriş ve çıkıştaki sınır koşullarının "grid overlay (çözüm ağı bindirme)" olarak tanımlanarak başlangıç akım koşullarının ön analiz sonuçlarından otomatik olarak alınmasını sağlamaktır (Şekil 5.7). Böylelikle sediment benzeşimi kararlı akım koşullarında olmaktadır.

5.1.4. Sayısal model kalibrasyonu

Daha önce Bölüm 5.1.2'de L_a= 35cm ve B_a= 10cm boyutlarındaki köprü kenar ayağının etrafında oluşan oyulma çukurunun benzeşimi için kararlı akım koşulları elde edilmişti. Bu aşamada sayısal model, ilk 10 dakikalık deney süresinde sediment parametreleri, çözüm ağı gözü aralıkları ve türbülans çözüm metodu değiştirilmek suretiyle laboratuvar verileri kullanılarak kalibre edilmiştir.

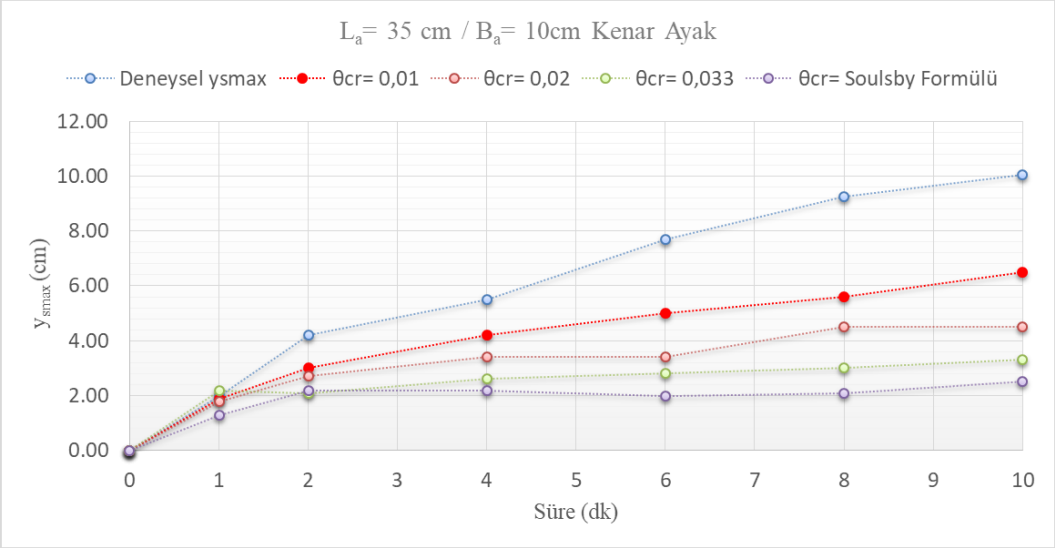
Bölüm 5.1.3'te tanımlanan parametrelerden kritik Shields parametresi, karışım katsayısı, yatak yükü katsayısı, içsel sürtünme açısı, yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranı, maksimum sıkıştırma oranı ve bunlara ek olarak akım derinliğinin %7'si ile %13'ü arasında tanımlanması önerilen türbülans karışım uzunluğu parametreleri değiştirilerek model kalibre edilmiştir (Brethour ve Burnham, 2010). Flow 3D'de oluşturulan modelde tanımlanmış kalibrasyon değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bunun haricindeki değerler literatürde önerildiği şekilde alınmıştır.

Çizelge 5.2. Sediment benzeşimi programda kabul edilen ve kalibrasyon çalışmalarında kullanılan parametreler

Parametre	Sembol	Programda Kabul Edilen Değerler	Model Kalibrasyon Değerleri
Yoğunluk, (g/cm^3)	ρ	2,65 g/cm^3	2,65 g/cm^3
Kritik Shields parametresi	θ_{cr}	0,033	0,01; 0,02; 0,03; Otomatik (Soulsby Formülü)
Karışım katsayısı	C_e	0,018	0,009; 0,018; 0,027; 0,036
Yatak yükü katsayısı	C_b	8,0	5,7; 8,0; 13,0
İçsel sürtünme açısı, °	Φ	32°	28°; 30°; 32°
Yatak pürüzlülüğü/Medyan dane çapı oranı	k_s/D_{50}	2,5	2,5; 5,0; 7,5; 10,0
Maksimum sıkıştırma oranı	-	0,64	0,55; 0,64; 0,75
Türbülans karışım uzunluğu, m	T_{LEN}	0,007	0,004; 0,007; 0,01; 0,013

Kritik Shields parametresi, θ_{cr}

Kritik Shields parametresinin oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisini inceleyebilmek ve kalibrasyonunu yapabilmek için Çizelge 5.2'de verilen değerler değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda Şekil 5.8'de ve Çizelge 5.3'te verilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri elde edilmiş, düşük θ_{cr} değerlerinde oyulma çukuru boyutunun daha büyük olduğu ve laboratuar deney sonucuna daha yakın değer verdiği görülmektedir. θ_{cr} değeri tek başına yeterli olmasa da özellikle 0,01 ve 0,02 değerleri ile ilerleyen aşamada kalibrasyon çalışmalarına devam edilmiştir.



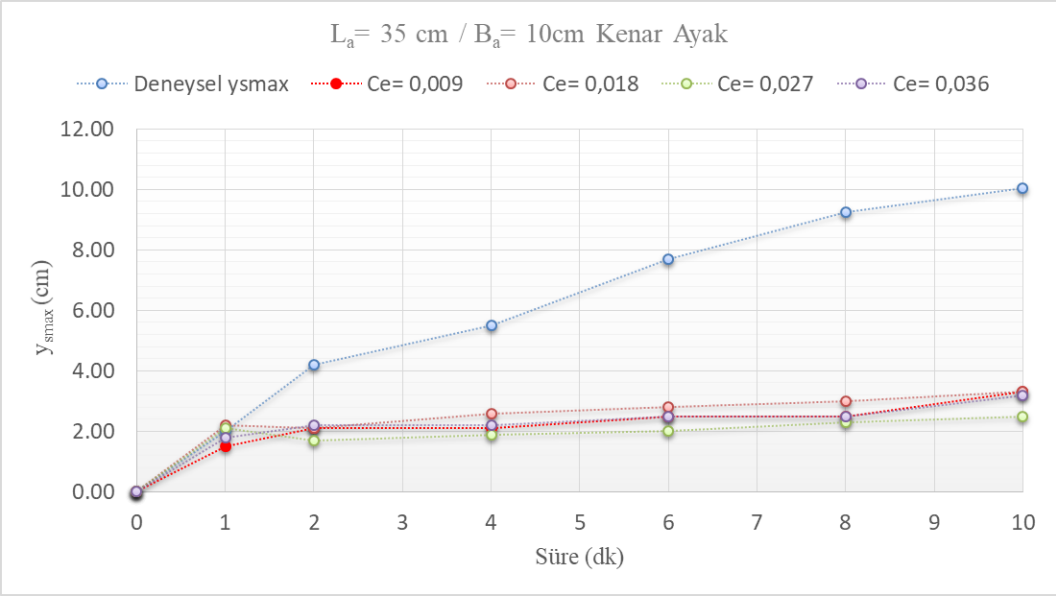
Şekil 5.8. θ_{cr} parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.3. Farklı θ_{cr} parametreleri için elde edilen oyulma çukuru derinlikleri

Süre (dk)	y_{smax} (cm)				
	Deneysel	θ_{cr}= 0,01	θ_{cr}= 0,02	θ_{cr}= 0,033	θ_{cr}= Soulsby Formülü
1	2,00	1,90	1,80	2,20	1,30
2	4,20	3,00	2,70	2,10	2,20
4	5,50	4,20	3,40	2,60	2,20
6	7,70	5,00	3,40	2,80	2,00
8	9,25	5,60	4,50	3,00	2,10
10	10,05	6,50	4,50	3,30	2,50

Karışım katsayısı, C_e

Karışım katsayısının oyulma derinliği üzerindeki etkisini inceleyebilmek için Çizelge 5.2'de verilen parametrelerden yalnızca karışım katsayısı değiştirilerek simülasyonlar yapılmış ve Şekil 5.9 ile Çizelge 5.4'te verilen maksimum oyulma derinliği büyüklükleri elde edilmiştir. C_e değerinin oyulma çukuru boyutunun belirlenmesinde etkisinin önemli olmadığı görülmüştür. Önerilen 0,018 değeri ile ilerleyen aşamada kalibrasyon çalışmalarına devam edilmiştir.



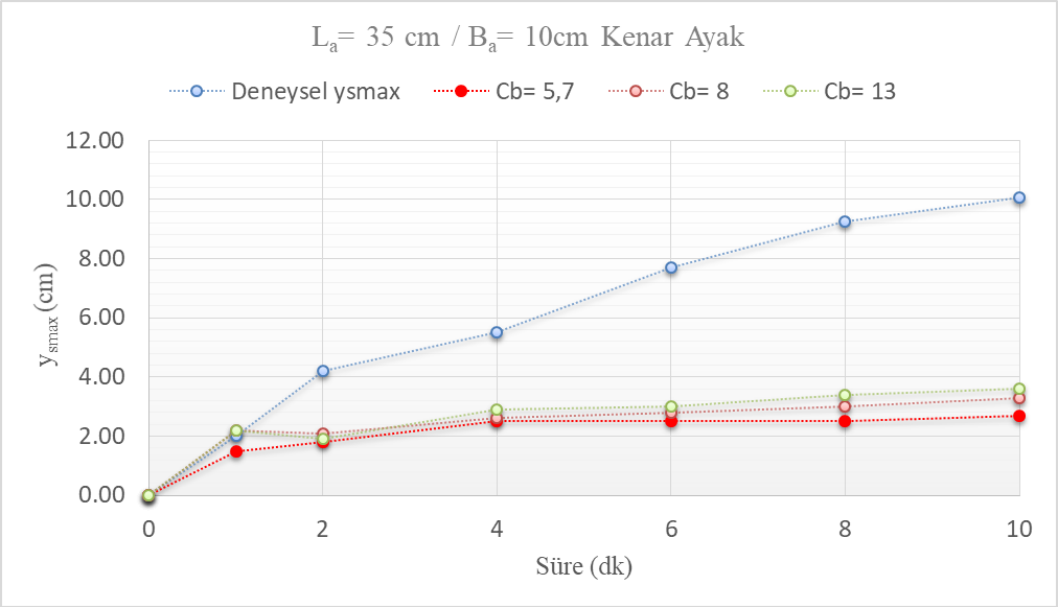
Şekil 5.9. C_e parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.4. Farklı C_e katsayıları için elde edilen oyulma çukuru derinlikleri

Süre (dk)	y_{smax} (cm)				
	Deneysel	C_e= 0,009	C_e= 0,018	C_e= 0,027	C_e= 0,036
1	2,00	1,50	2,20	2,10	1,80
2	4,20	2,10	2,10	1,70	2,20
4	5,50	2,10	2,60	1,90	2,20
6	7,70	2,50	2,80	2,00	2,50
8	9,25	2,50	3,00	2,30	2,50
10	10,05	3,30	3,30	2,50	3,20

Yatak yükü katsayısı, C_b

Oyulma derinliğine etkisini görebilmek ve kalibrasyon yapabilmek için, Çizelge 5.2'de verilen parametrelerden yalnızca yatak yükü katsayısı değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 5.10 ve Çizelge 5.5'te verilen maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiş, C_b değerinin oyulma çukuru boyutunun belirlenmesinde etkisinin çok az olduğu görülmüş ve ilerleyen aşamada kalibrasyon çalışmalarına önerilen 8 değeri ile devam edilmiştir.



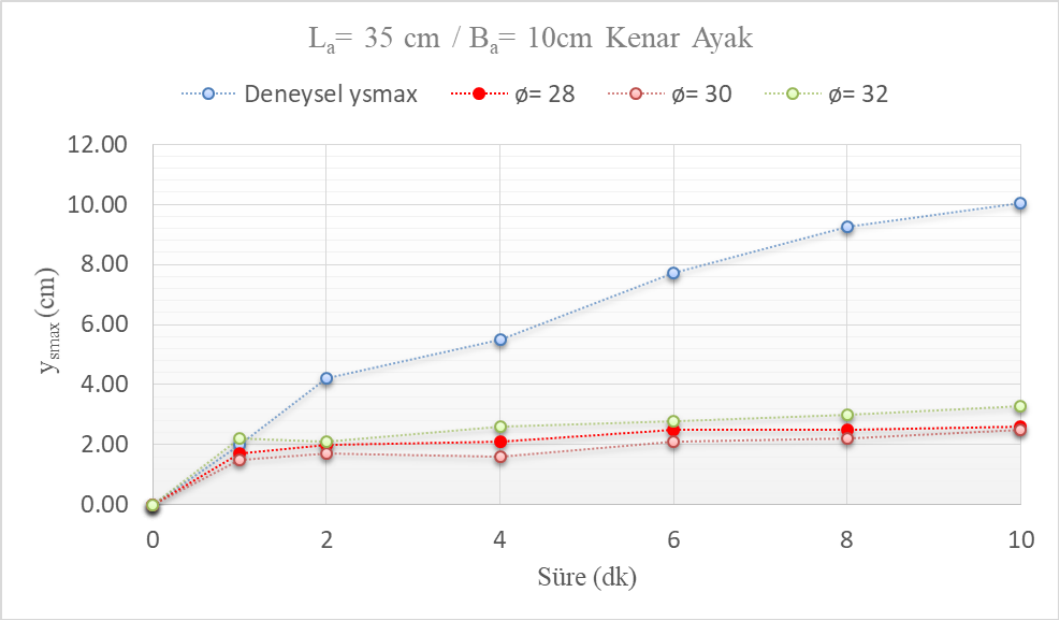
Şekil 5.10. C_b parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.5. Farklı C_b katsayısıları için elde edilen oyulma derinlikleri

Süre (dk)	y_{smax} (cm)			
	Deneysel	C_b= 5,7	C_b= 8	C_b= 13
1	2,00	1,50	2,20	2,20
2	4,20	1,80	2,10	1,90
4	5,50	2,50	2,60	2,90
6	7,70	2,50	2,80	3,00
8	9,25	2,50	3,00	3,40
10	10,05	2,70	3,30	3,60

<u>İçsel sürtünme açısı, Φ</u>

Φ, içsel sürtünme açısının, kenar ayak etrafında oluşan oyulma çukuru boyutu üzerindeki etkisini inceleyebilmek için Çizelge 5.2'de verilen parametrelerden yalnızca içsel sürtünme açısı değiştirilerek simülasyon sonuçları incelenmiştir. Şekil 5.11 ve Çizelge 5.6'da görüldüğü üzere oyulma çukuru boyutunun belirlenmesinde içsel sürtünme açısı değerinin etkili olmadığı görülmüş ve programda kullanılması önerilen 32° değeri kullanılarak kalibrasyon çalışmalarına devam edilmiştir.



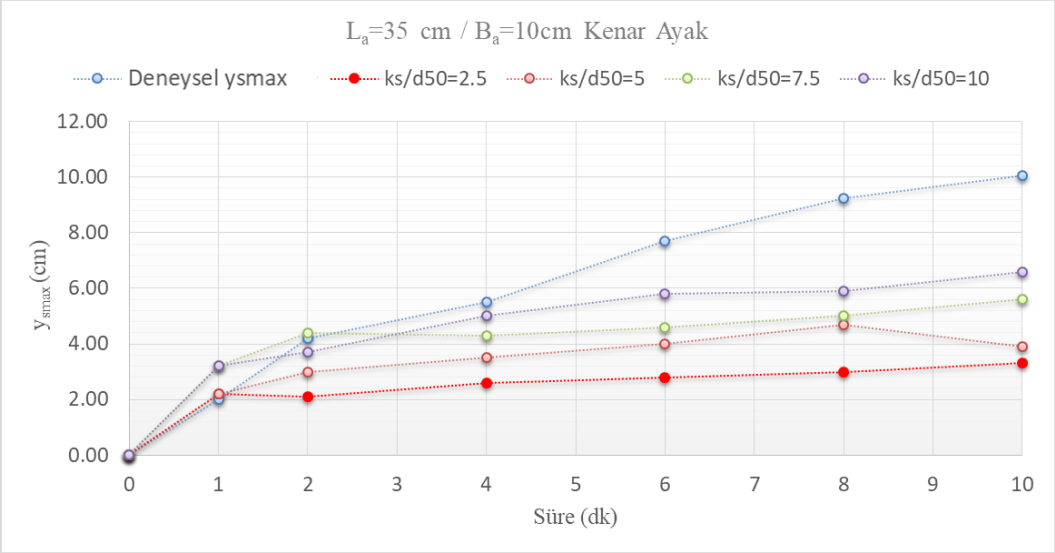
Şekil 5.11. Φ parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.6. Farklı Φ açıları için elde edilen oyulma derinlikleri

Süre (dk)	y_{smax} (cm)			
	Deneysel	Φ= 28	Φ= 30	Φ= 32
1	2,00	1,70	1,50	2,20
2	4,20	2,00	1,70	2,10
4	5,50	2,10	1,60	2,60
6	7,70	2,50	2,10	2,80
8	9,25	2,50	2,20	3,00
10	10,05	2,60	2,50	3,30

Yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranı, k_s/D_{50}

Yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranının oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisini görebilmek için benzeşim modelinde Çizelge 5.2'de verilen parametrelerden yalnızca k_s/D_{50} parametresi değiştirilmiştir. Şekil 5.12 ve Çizelge 5.7'de verilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri incelendiğinde, k_s/D_{50} oranı tek başına yeterli olmasa da büyük değerlerde oyulma çukuru boyutunun önemli oranda arttığı görülmüştür. Bu parametrenin kalibrasyon parametresi olarak kullanılması önerildiği için (Wei ve diğerleri, 2014) tüm değerleri kullanılarak kalibrasyon çalışmalarına devam edilmiştir.



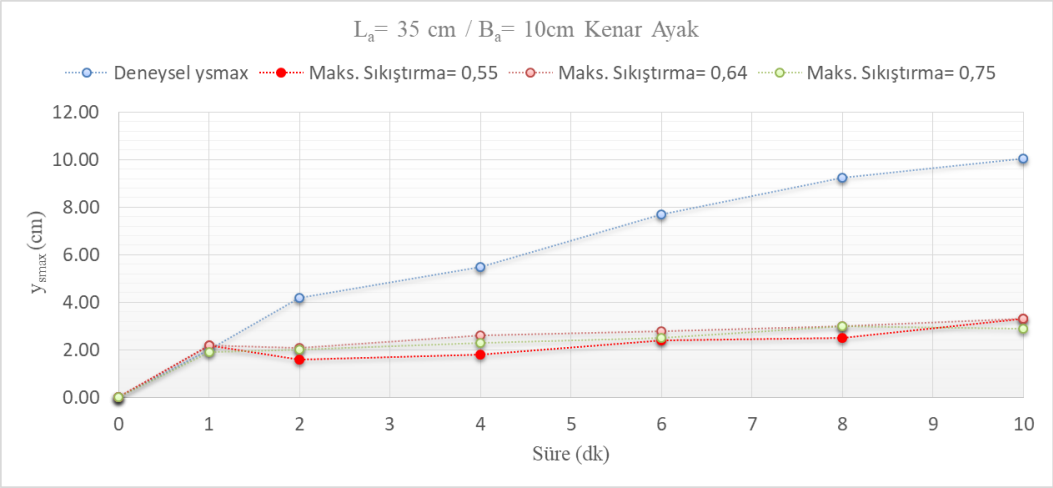
Şekil 5.12. k_s/D_{50} parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.7. k_s/D_{50} parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi

Süre (dk)	y_{smax} (cm)				
	Deneysel	k_s/D_{50}= 2,5	k_s/D_{50}= 5	k_s/D_{50}= 7,5	k_s/D_{50}= 10
1	2,00	2,20	2,20	3,20	3,20
2	4,20	2,10	3,00	4,40	3,70
4	5,50	2,60	3,50	4,30	5,00
6	7,70	2,80	4,00	4,60	5,80
8	9,25	3,00	4,70	5,00	5,90
10	10,05	3,30	3,90	5,60	6,60

Maksimum sıkıştırma oranı

Oyulma derinliği üzerindeki etkisini inceleyebilmek ve kalibrasyon yapabilmek için maksimum sıkıştırma oranı Çizelge 5.2'de verilen değerleri arasında değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 5.13 ve Çizelge 5.8'de verilen maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiş olup maksimum sıkıştırma oranı değerinin oyulma çukuru derinliğinde belirli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ön tanımlı 0,64 değeri ile ilerleyen aşamada kalibrasyon çalışmalarına devam edilmiştir.



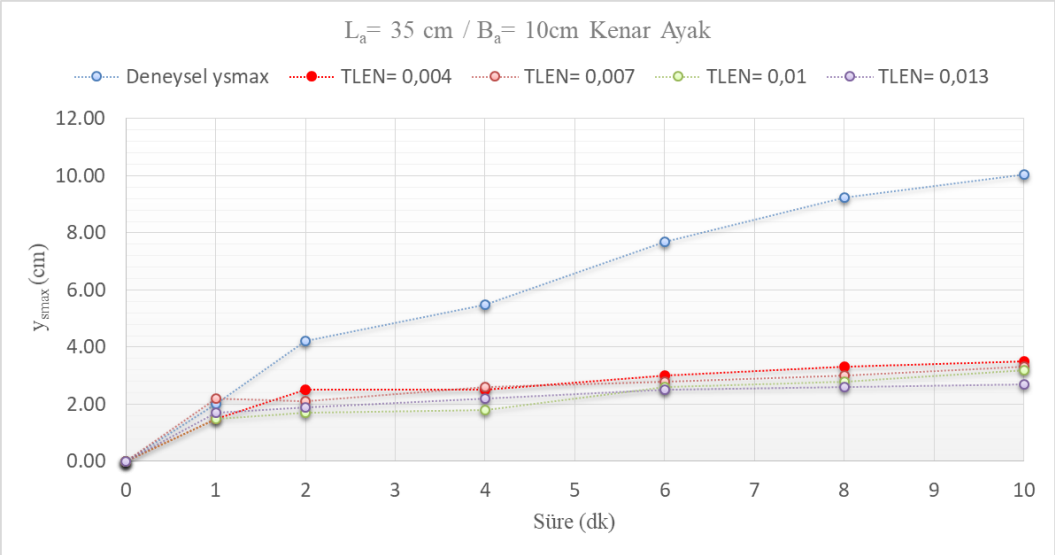
Şekil 5.13. Maksimum sıkıştırma oranı parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.8. Maksimum sıkıştırma oranı parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi

Süre (dk)	y_{smax} (cm)			
	Deneysel	Maks. Sık. =0,55	Maks. Sık. =0,64	Maks. Sık. =0,75
1	2,00	2,20	2,20	1,90
2	4,20	1,60	2,10	2,00
4	5,50	1,80	2,60	2,30
6	7,70	2,40	2,80	2,50
8	9,25	2,50	3,00	3,00
10	10,05	3,30	3,30	2,90

Türbülans karışım uzunluğu, T_{LEN}

Çizelge 5.2'de verilen türbülans karışım uzunluğu değerleri değiştirilerek oyulma çukuru simülasyonları yapılmıştır. Şekil 5.14 ve Çizelge 5.9 incelendiğinde T_{LEN} değerlerinin maksimum oyulma derinliğinin belirlenmesinde etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Seçilen aralıkta düşük T_{LEN} değerlerinde kısmen oyulma derinliği artmıştır. Yeterli bir yakınsama sağlamadığından ilerleyen aşamada kalibrasyon çalışmalarına programda kullanılması önerilen 0,007 değeri ile devam edilmiştir.



Şekil 5.14 T_{LEN} parametresinin maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.9. T_{LEN} parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi

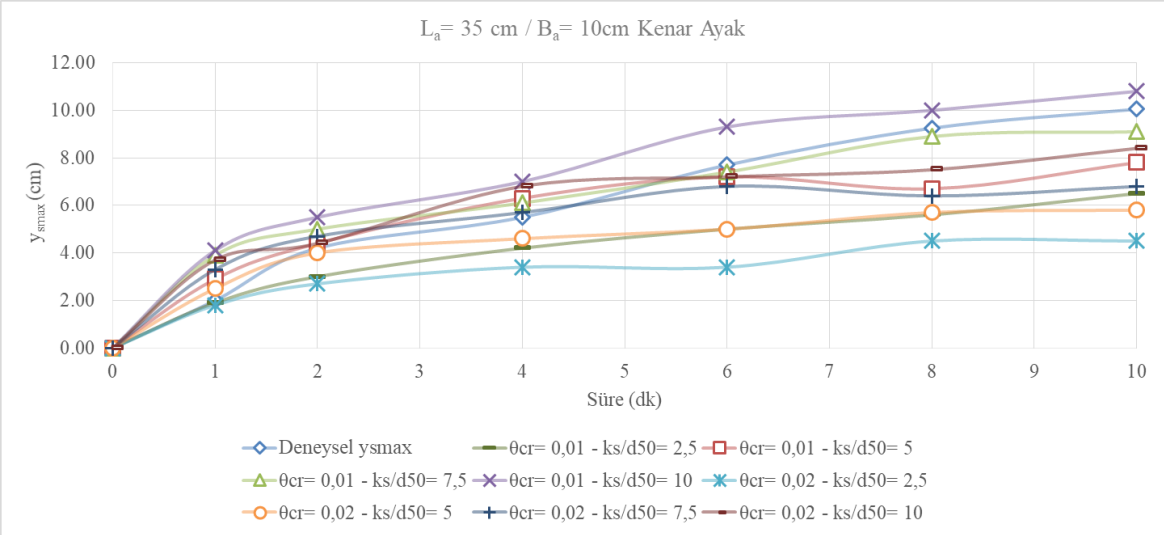
Süre (dk)	y_{smax} (cm)				
	Deneysel	T_{LEN}= 0,004	T_{LEN}= 0,007	T_{LEN}= 0,010	T_{LEN}= 0,013
1	2,00	1,50	2,20	1,50	1,70
2	4,20	2,50	2,10	1,70	1,90
4	5,50	2,50	2,60	1,80	2,20
6	7,70	3,00	2,80	2,60	2,50
8	9,25	3,30	3,00	2,80	2,60
10	10,05	3,50	3,30	3,20	2,70

5.1.5. Oyulma derinliği üzerinde etkili olan değişkenlerin hassasiyet analizleri

Kalibrasyonu yapılan parametrelerden elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere maksimum oyulma derinliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan θ_{cr} ve k_s/D_{50} parametreleridir. Bu nedenle Çizelge 5.2'de verilen bu iki parametre harici değerler değiştirilmeden kalibrasyona giren θ_{cr} değerlerinden oyulma üzerindeki etkisi daha fazla olan 0,01 ile 0,02 değerleri ve k_s/D_{50} parametresinin tüm değerleri birbirleriyle kombine edilerek sediment taşınım simülasyonları yapılmıştır. Bu analizler sonucunda Çizelge 5.10 ve Şekil 5.15'te verilen maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiştir.

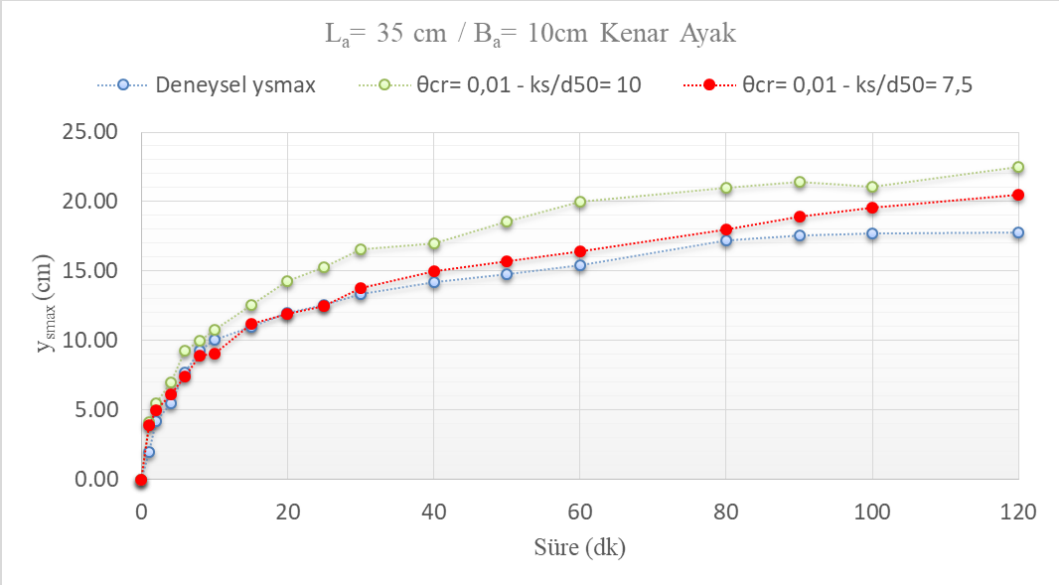
Çizelge 5.10. θ_{cr} ve k_s/D_{50} parametrelerinin birlikte maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi

Süre (dk)	y_{smax} (cm)				
	Deneysel	θ_{cr}= 0,01 k_s/D_{50}= 2,5	θ_{cr}= 0,01 k_s/D_{50}= 5,0	θ_{cr}= 0,01 k_s/D_{50}= 7,5	θ_{cr}= 0,01 k_s/D_{50}= 10,0
1	2,00	1,90	2,90	3,90	4,10
2	4,20	3,00	4,40	5,00	5,50
4	5,50	4,20	6,30	6,10	7,00
6	7,70	5,00	7,20	7,40	9,30
8	9,25	5,60	6,70	8,90	10,00
10	10,05	6,50	7,80	9,10	10,80
Süre (dk)	Deneysel	θ_{cr}= 0,02 k_s/D_{50}= 2,5	θ_{cr}= 0,02 k_s/D_{50}= 5,0	θ_{cr}= 0,02 k_s/D_{50}= 7,5	θ_{cr}= 0,02 k_s/D_{50}= 10,0
1	2,00	1,80	2,50	3,30	3,70
2	4,20	2,70	4,00	4,70	4,40
4	5,50	3,40	4,60	5,70	6,80
6	7,70	3,40	5,00	6,80	7,20
8	9,25	4,50	5,70	6,40	7,50
10	10,05	4,50	5,80	6,80	8,40



Şekil 5.15. θ_{cr} ve k_s/D_{50} parametrelerinin birlikte maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Şekil 5.15 ve Çizelge 5.10'dan görüleceği üzere θ_{cr} parametresi 0,01 ve k_s/D_{50} değeri 7,5 ile θ_{cr} parametresi 0,01 ve k_s/D_{50} değeri 10 olması halinde model sonuçlarıyla laboratuvar verileri arasında uyum olduğu görülmektedir. Kalibrasyon analizlerinin bu aşamasında belirlenen θ_{cr} parametresi 0,01 - k_s/D_{50} değeri 7,5 ve θ_{cr} parametresi 0,01 - k_s/D_{50} değeri 10 seçenekleri için Bölüm 5.1.1'de paylaşılmış olan 120 dakikalık laboratuvar deneyinin tamamı simüle edilmiş ve sonuçları Şekil 5.16 ve Çizelge 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 7,5 ve θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 10 seçeneklerinin tüm deney süresi boyunca maksimum oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 5.11. θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 7,5 ve θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 10 seçeneklerinin tüm deney süresi boyunca maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi

Süre (dk)	Deneysel y_{smax} (cm)	θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 10,0		θ_{cr}= 0,01 - k_s/D_{50}= 7,5	
		Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %
1	2,00	4,10	%105	3,90	%95
2	4,20	5,50	%31	5,00	%19
4	5,50	7,00	%27	6,10	%11
6	7,70	9,30	%21	7,40	%4
8	9,25	10,00	%8	8,90	%4
10	10,05	10,80	%7	9,10	%9
15	11,00	12,60	%15	11,20	%2
20	12,00	14,30	%19	11,90	%1
25	12,60	15,30	%21	12,50	%1
30	13,35	16,60	%24	13,80	%3
40	14,20	17,00	%20	15,00	%6
50	14,75	18,60	%26	15,70	%6
60	15,40	20,00	%30	16,40	%6
80	17,20	21,00	%22	18,00	%5
90	17,60	21,40	%22	18,90	%7
100	17,70	21,10	%19	19,60	%11
120	17,80	22,50	%26	20,50	%15

Çizelge 5.11'den görüleceği üzere θ_{cr} parametresi 0,01 ve k_s/D_{50} değeri 7,5 olan seçenekte L_a=35 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulma çukuru derinliği değerine büyük oranda yakınsama sağladığı görülmüştür. Deneyin ilk 1 dakikasında, modelden elde edilen ölçüm değerinden %95 değerinde saptığı ama genel olarak %10'dan küçük hata yüzdeleri elde edildiği ve 120 dakikalık deney sonucunda

oluşan maksimum oyulma çukuru değerine %15 hata oranıyla yakın sonuç elde ediliği görülmüştür. Bu hata oranı kalibrasyonun büyük oranda başarılı olduğunu göstermektedir.

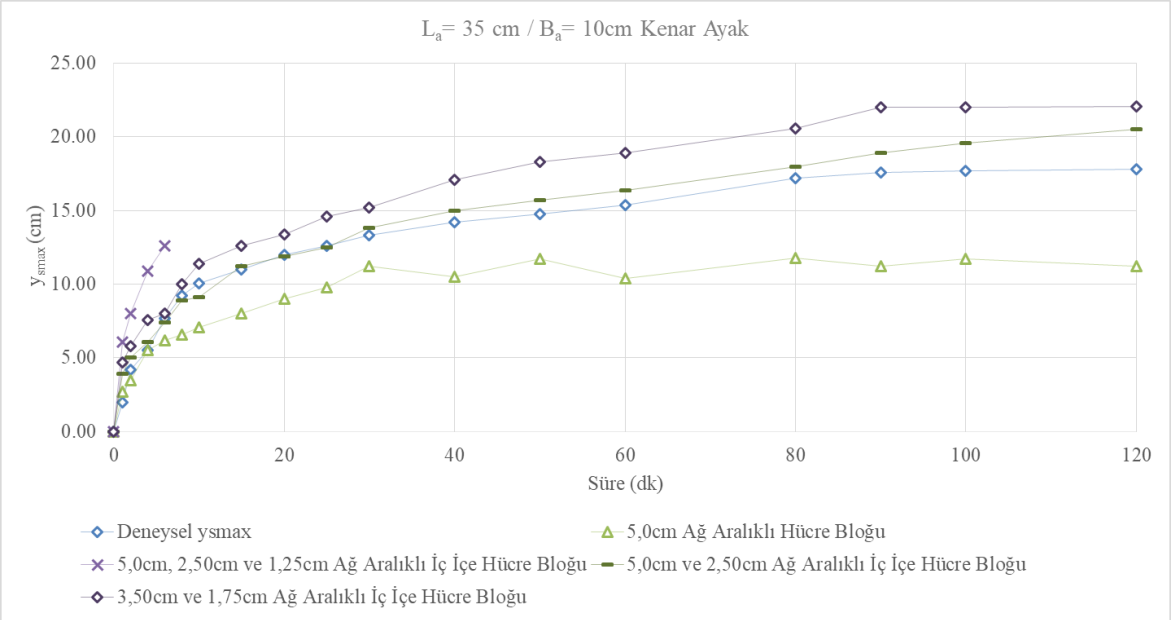
En yakın simülasyon sonuçlarını veren model parametreleri ile bunların değerleri Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Kalibrasyon çalışması sonucu seçilen sediment model parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer
Yoğunluk, g/cm³	ρ	2,65
Kritik Shields parametresi	θ_{cr}	0,01
Karışım katsayısı	C_e	0,018
Yatak yükü katsayısı	C_b	8,0
İçsel sürtünme açısı	Φ	32°
Yatak pürüzlülüğü/Medyan dane çapı oranı	k_s/D_{50}	7,5
Maksimum sıkıştırma oranı	-	0,64
Türbülans karışım uzunluğu, m	T_{LEN}	0,007

Yapılan kalibrasyon çalışmalarından sonra, L_a= 35 cm ve B_a= 10 cm boyutlarındaki model köprü kenar ayağında meydana gelen oyulma analizinde Çizelge 5.12'de verilen parametreler kullanılarak çözüm ağı gözü aralığının analiz sonuçları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için çözüm ağı boyutları 5,0 cm olan hücre bloğu, 5,0 cm ve 2,50 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları, 3,5 cm ve 1,75 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları ve 5,0 cm, 2,5 cm ve 1,25 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları oluşturularak hassasiyet analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait sonuçlar Şekil 5.17'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere çözüm ağı gözü boyutları boyutları 5,0 cm, 2,5 cm ve 1,25 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları oluşturularak yapılan simülasyonda, seçilen en küçük çözüm ağı gözü boyutunun (1,25 cm), modelde kullanılan sediment dane çapının (0,148 cm) 10 katından küçük olması sebebiyle çözüme ulaşılamadığı görülmüştür. Ayrıca bu çözüm ağı gözü tipinde çözüm alınabilen 6. dakikaya kadar laboratuvar sonuçlarının yakınsanamadığı görülmüştür.

Hesaplanan maksimum oyulma çukuru derinliği, çözüm ağı gözü boyutunun 5,0 cm seçilerek yapılan simülasyonda 30. dakikadan sonra laboratuvar ölçüm değerinden uzaklaşmıştır. 3,5 cm ve 1,75 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları seçilerek yapılan simülasyonda ise laboratuvar ölçüm değerinden yaklaşık %25 oranında daha yüksek sonuç elde edilmiştir. Sonuç olarak Çizelge 5.13'te verilen 5,0 cm ve 2,50 cm olan iç içe geçmiş hücre bloklarının kullanıldığı simülasyon sonuçlarının, laboratuvar deneyi verilerine simülasyon sonunda %15 hata oranıyla yakınsadığı ve en uygun çözüm ağı seçeneği olduğu görülmüştür.

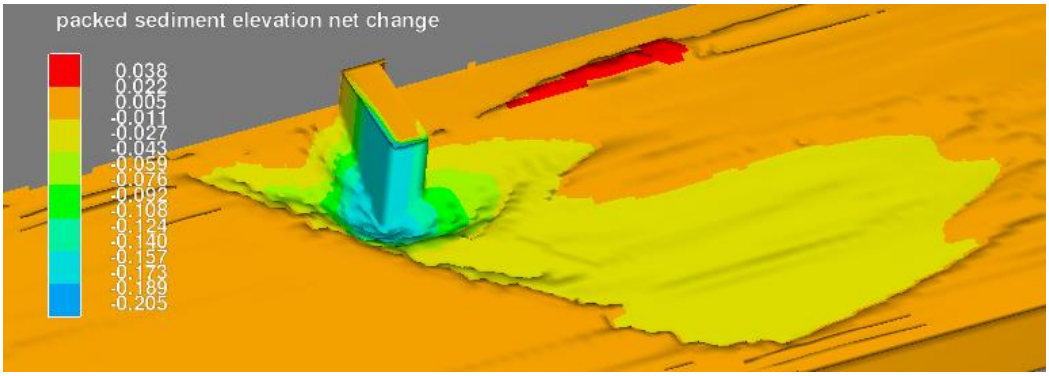


Şekil 5.17. Ağ gözü büyüklüğünün maksimum oyulma çukuru derinliğine etkisi

Sayısal modelin kalibrasyon ve çözüm ağı gözü boyutunun sonuçlar üzerindeki hassasiyet analizleri sonucunda L_a=35 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulma çukurunun 120 dakikalık deney süresi sonundaki şekli Şekil 5.18'deki gibi elde edilmiştir. 2,50 cm çözüm ağı gözü boyutlarında tanımlanmış toplam 307 200 adet hücre ile gerçekleştirilmiş olan 120 dakikalık simülasyon süresi, yapılan kalibrasyon çalışmalarının süreleri dahil olmamakla birlikte, L_a= 35 cm ve B_a= 10 cm olan kenar ayakta yaklaşık 4 gün sürmüştür.

Çizelge 5.13. Ağ aralığı hassasiyet analizleri maksimum oyulma çukuru derinlikleri

Süre (dk)	Deneysel y_{smax} (cm)	5,0 cm Ağ Aralıklı Hücre Bloğu		5,0 cm ve 2,50 cm Ağ Aralıklı İç İçe Hücre Bloğu		3,5 cm ve 1,75 cm Ağ Aralıklı İç İçe Hücre Bloğu		5,0 cm, 2,5 cm ve 1,25 cm Ağ Aralıklı İç İçe Hücre Bloğu	
		Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %
1	2.00	2.70	%35	3.90	%95	4.70	%135	6,10	%205
2	4.20	3.50	%17	5.00	%19	5.80	%38	8,00	%90
4	5.50	5.50	%0	6.10	%11	7.60	%38	10,90	%98
6	7.70	6.20	%19	7.40	%4	8.00	%4	12,60	%64
8	9.25	6.60	%29	8.90	%4	10.00	%8	Çözüm alınamadı.	
10	10.05	7.10	%29	9.10	%9	11.40	%13		
15	11.00	8.00	%27	11.20	%2	12.60	%15		
20	12.00	9.00	%25	11.90	%1	13.40	%12		
25	12.60	9.80	%22	12.50	%1	14.60	%16		
30	13.35	11.20	%16	13.80	%3	15.20	%14		
40	14.20	10.50	%26	15.00	%6	17.10	%20		
50	14.75	11.70	%21	15.70	%6	18.30	%24		
60	15.40	10.40	%32	16.40	%6	18.90	%23		
80	17.20	11.80	%31	18.00	%5	20.60	%20		
90	17.60	11.20	%36	18.90	%7	22.00	%25		
100	17.70	11.70	%34	19.60	%11	22.00	%24		
120	17.80	11.20	%37	20.50	%15	22.10	%24		



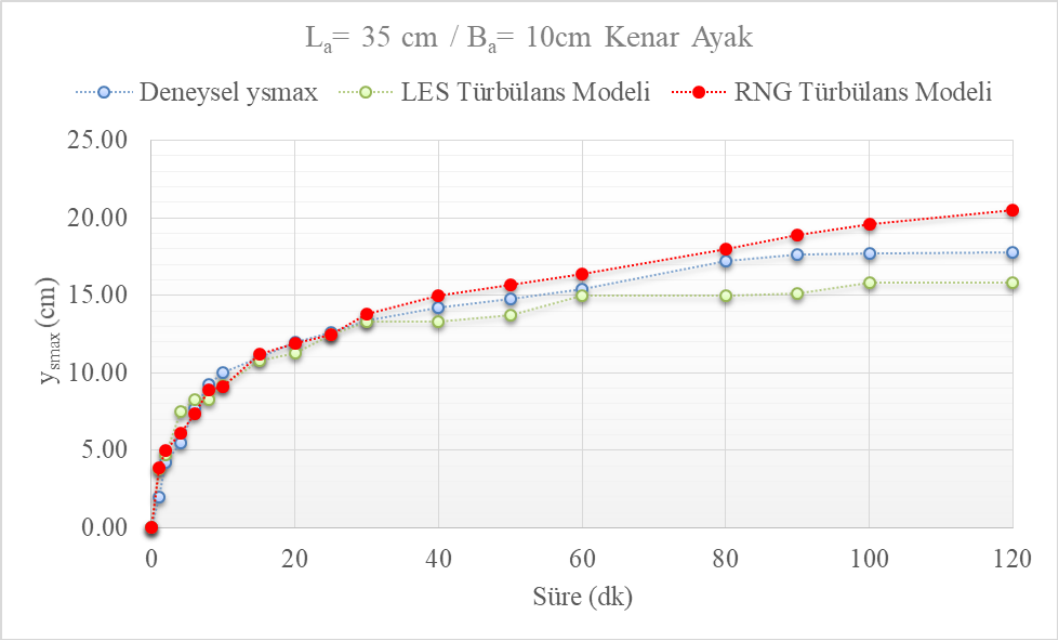
Şekil 5.18. L_a=35cm ve B_a=10cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafındaki oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları

5.1.6. Türbülans modelinin simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi

Flow-3D türbülans akımı değerlerinin çözümünde k-ε, Prandtl karışma boyu, Tek Denklem-Türbülans enerji, RNG ve LES yaklaşımları olmak üzere 5 farklı türbülans modeli kullanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında en yaygın yöntem olan RNG türbülans modeli kullanılmış ve köprü kenar ayağı etrafındaki oyulma çukuru benzeşiminde bir diğer yaygın çözüm yöntemi olan LES modelinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

RNG modeli, k-ε modelinin geliştirilmiş hali (Yakhot ve Orzsag, 1986) olmakla birlikte temelinde RANS yöntemini baz almaktadır. k-ε çözüm modelinde ampirik olarak elde edilen denklem sabitleri, RNG çözüm modelinde explicit çözüm ile elde edilmektedir. LES modeli ise, hesap ağındaki tüm büyük ölçekli türbülanslı yapıların yanı sıra çözüm ağı gözünden daha küçük yapıların modellenmesine de olanak sağlamaktadır. Modelde, türbülansın daha küçük yapılar üzerindeki etkisi, çevrinti (eddy) viskozitesi adı verilen bir terimle ifade edilmiştir (Yıldız, 2014). Yapılan çalışmalarda özellikle yapı cidarına yakın kısımlarda, akım hızında ani değişimlerin ve çevrintilerin olduğu, yoğun türbülans hareketlerinin beklendiği bölgelerde özellikle LES türbülans yöntemi kullanılırken hassas bir çözüm için ağ gözü aralıklarının sıklaştırılması gerektiği belirtilmektedir (Demirci ve diğerleri, 2012). LES metodu ile yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.19'da ve Çizelge 5.14'te verilen maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiş, simülasyon sonuçları deney verileriyle ve RNG yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

LES türbülans modelinin kullanıldığı simülasyonda deney başlangıcından hemen sonraki oyulma oyulma derinliği ile ölçüm değeri arasında % 90'lık bir hata meydana gelmiş ve genel olarak RNG modelinin kullanıldığı simülasyondaki model sonuçlarına benzer şekilde % 10'dan küçük hata değerleri elde edildiği görülmüştür. 120 dakikalık deney sonucunda oluşan maksimum oyulma çukuru derinliği ile simülasyon sonucu arasında ise % 11'lik bir hata oluşmuştur. İki türbülans modeli sonuçları arasındaki en önemli fark ise deney verileriyle karşılaştırıldığında LES metodunun deney verilerinden daha küçük, RNG metodunun ise daha büyük oyulma derinlikleri vermesidir.

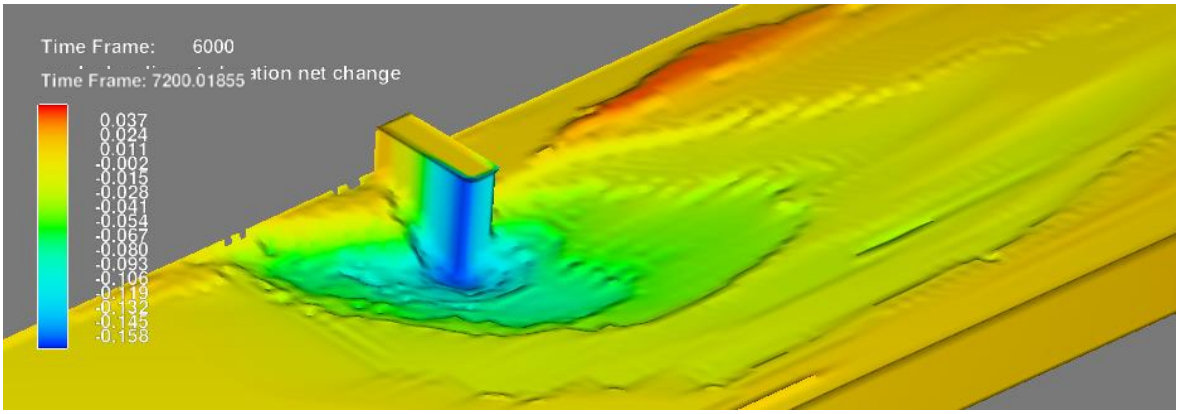


Şekil 5.19. LES ve RNG türbülans modellerine ait maksimum oyulma çukuru derinlikleri

LES türbülans modelinin kullanıldığı simülasyon sonucunda, köprü kenar ayağı etrafında 120 dakikalık deney süresi sonunda meydana gelen oyulma çukurunun şekli Şekil 5.20'deki gibi elde edilmiştir. LES modeli kullanılarak çözülen 120 dakikalık laboratuvar deneyinin simülasyon süresi yaklaşık 4,5 gün sürmüştür. Çözüm süresi olarak kıyaslandığında da LES modelinin RNG modelinden daha uzun sürdüğü görülmüştür.

Çizelge 5.14. LES ve RNG türbülans modellerine ait maksimum oyulma değerleri

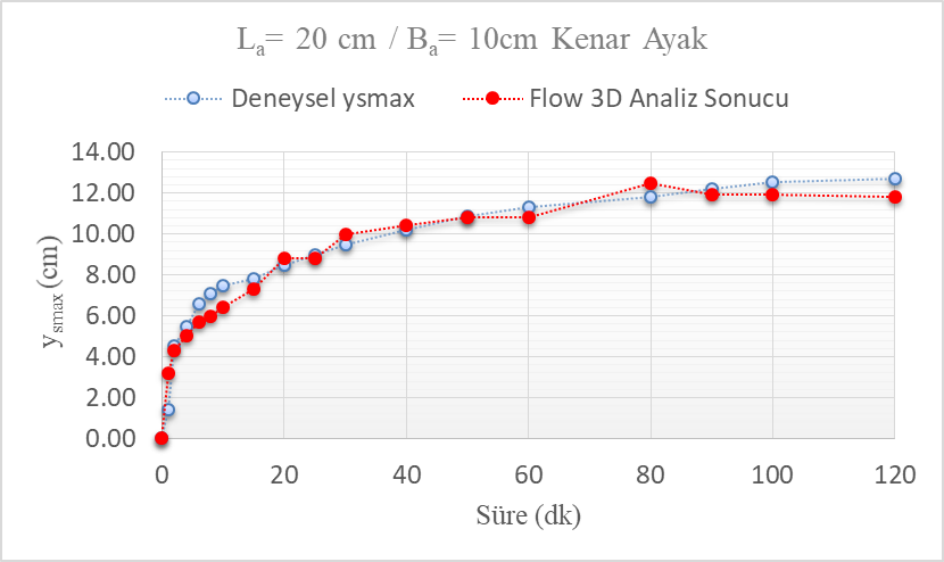
Süre (dk)	Deneysel y_{smax} (cm)	LES Türbülans Modeli		RNG Türbülans Modeli	
		Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %
1	2.00	3.80	%90	3.90	%95
2	4.20	4.70	%12	5.00	%19
4	5.50	7.50	%36	6.10	%11
6	7.70	8.30	%8	7.40	%4
8	9.25	8.30	%10	8.90	%4
10	10.05	9.20	%8	9.10	%9
15	11.00	10.80	%2	11.20	%2
20	12.00	11.30	%6	11.90	%1
25	12.60	12.50	%1	12.50	%1
30	13.35	13.30	%0	13.80	%3
40	14.20	13.30	%6	15.00	%6
50	14.75	13.70	%7	15.70	%6
60	15.40	15.00	%3	16.40	%6
80	17.20	15.00	%13	18.00	%5
90	17.60	15.10	%14	18.90	%7
100	17.70	15.80	%11	19.60	%11
120	17.80	15.80	%11	20.50	%15



Şekil 5.20. LES türbülans modeli ile oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları

5.1.7. Kalibre edilmiş sayısal model simülasyonu

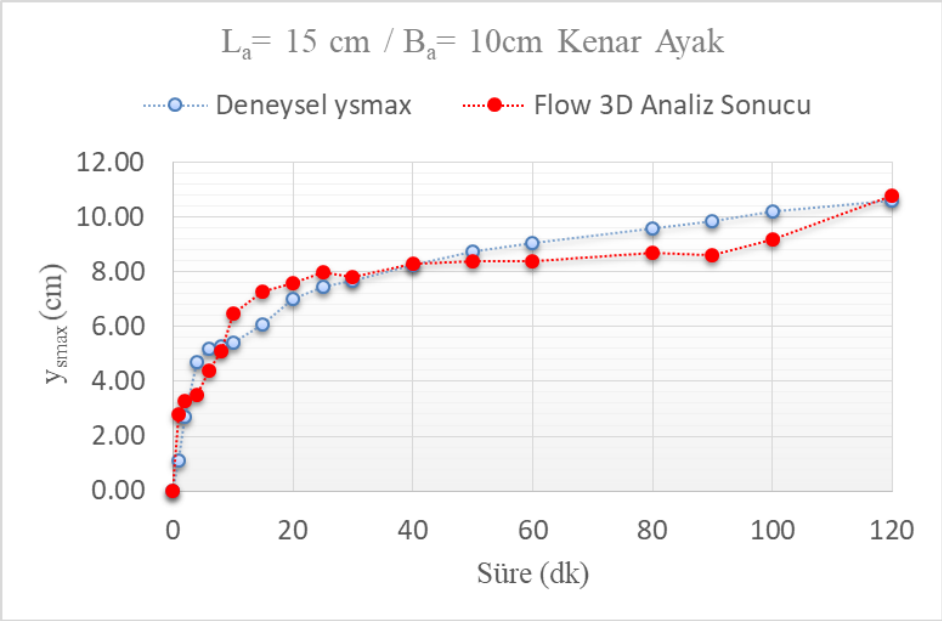
L_a=20 cm / B_a=10 cm ve L_a=15 cm / B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayakları etrafında, kalibrasyon analizleri neticesinde Çizelge 5.12'te sunulan parametreler ile çözüm ağı gözü boyutları 5,0 cm ve 2,50 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları kullanılarak sediment oyulma analizleri yapılmış ve sonuçları sırasıyla Şekil 5.21 ve Çizelge 5.15 ile Şekil 5.22 ve Çizelge 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.21. L_a=20 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafındaki maksimum oyulma çukuru derinliği

Çizelge 5.15. L_a=20 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı etrafındaki maksimum oyulma derinliği

Süre (dk)	Deneysel y_{smax} (cm)	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %
1	1.40	3.20	%129
2	4.50	4.30	%4
4	5.45	5.00	%8
6	6.60	5.70	%14
8	7.10	6.00	%15
10	7.50	6.40	%15
15	7.80	7.30	%6
20	8.50	8.80	%4
25	9.00	8.80	%2
30	9.50	10.00	%5
40	10.20	10.40	%2
50	10.85	10.80	%0
60	11.30	10.80	%4
80	11.80	12.50	%6
90	12.20	11.90	%2
100	12.55	11.90	%5
120	12.70	11.80	%7



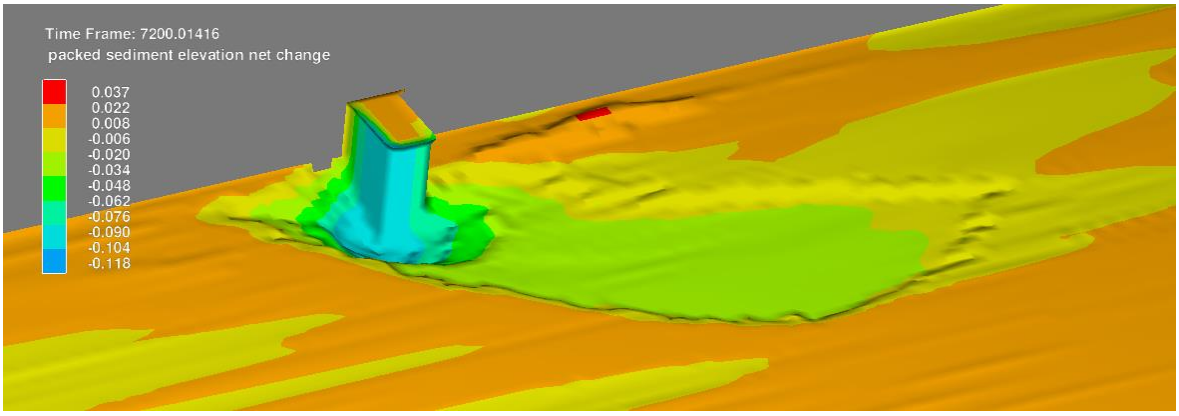
Şekil 5.22. L_a=15 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı modeli maksimum oyulma çukuru derinliği

Çizelge 5.15 ve Çizelge 5.16'dan görüleceği üzere L_a=20 cm / B_a=10 cm ve L_a=15 cm / B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayakları etrafında oluşan oyulma çukuru derinliğine ait deney verileri ile simülasyon sonuçları arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Deney başladıktan hemen sonra model oyulma değeri ile ölçümü arasında L_a=20 cm / B_a=10 cm boyutundaki ayakta %129'luk ve L_a=15 cm / B_a=10 cm boyutundaki ayakta %155'lik hatalar oluşmasına rağmen genel olarak her iki ayaktada % 15'ten küçük hata değerleri elde edilmiştir. 120 dakikalık deney sonucunda oluşan maksimum oyulma çukuru derinliğinde L_a=20 cm / B_a=10 cm boyutundaki ayakta %7'lik ve L_a=15 cm / B_a=10 cm boyutundaki ayakta %2'lik hata meydana gelmiştir. Model sonuçlarıyla deney verileri arasında elde edilen hata yüzdeleri modelin başarılı bir şekilde kalibre edildiğini ve iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

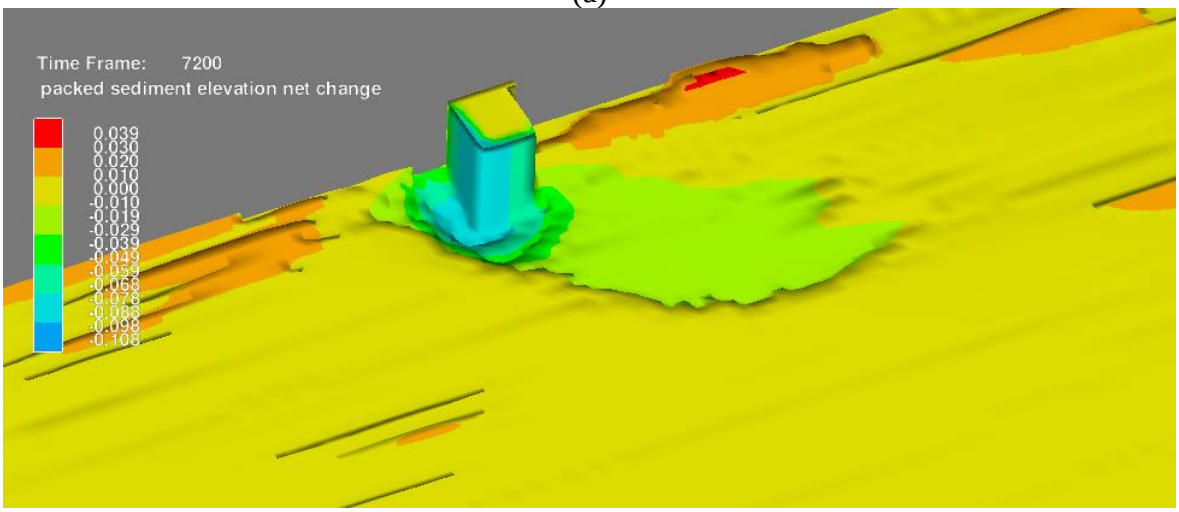
Çizelge 5.16. L_a=15 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağı modeli maksimum oyulma değerleri

Süre (dk)	Deneysel y_{smax} (cm)	Sayısal y_{smax} (cm)	Hata %
1	1.10	2.80	%155
2	2.70	3.30	%22
4	4.70	3.50	%26
6	5.20	4.40	%15
8	5.30	5.10	%4
10	5.40	6.50	%20
15	6.10	7.30	%20
20	7.00	7.60	%9
25	7.45	8.00	%7
30	7.70	7.80	%1
40	8.25	8.30	%1
50	8.75	8.40	%4
60	9.05	8.40	%7
80	9.60	8.70	%9
90	9.85	8.60	%13
100	10.20	9.20	%10
120	10.60	10.80	%2

Köprü kenar ayaklarında yapılan 120 dakikalık deney süresi sonunda oyulma çukurunun şekilleri Şekil 5.23'teki gibi elde edilmiştir. 2,50 cm'lik çözüm ağı boyutlu toplam 307 200 adet hücre ile gerçekleştirilen 120 dakikalık simülasyon süresi, L_a =20 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki kenar ayak için yaklaşık 3 gün 15 saat, L_a=15 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki kenar ayak için ise yaklaşık 3 gün 9 saat sürmüştür.



(a)



(b)

Şekil 5.23. Köprü kenar ayaklı etrafındaki oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları: (a) L_a= 20 cm / B_a= 10 cm, (b) L_a= 15 cm / B_a= 10 cm

5.1.8. Sayısal model simülasyonları ve sonuçlarının yorumlanması

Köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulmanın incelendiği sayısal model simülasyonlarında Kayatürk'ün (2005) laboratuvar deneyi çalışmalarından yalnızca köprü ayağı uzunluğunun oyulma derinliği üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Akım derinliğinin oyulma çukuru üzerindeki etkileri ile oyulmaya karşı koruma amaçlı yerleştirilen plakalı ve plakasız durumlarda meydana gelen oyulmalar bu çalışmada incelenmemiştir.

Bölüm 5.1.2 ve 5.1.3'te deneysel çalışmaların benzeşimi yapılırken programda sediment taşınımı modelinin nasıl oluşturulacağı ve dikkat edilmesi gereken konular anlatılmış ve Bölüm 5.1.4'te 10 cm akım derinliği ve 0,050 m^3/s debi olması durumunda L_a=35 cm, B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağında laboratuvar deneyinin (Kayatürk, 2005) ilk 10 dakikası için sayısal modelin kalibrasyonuna geçilmiştir. Kalibrasyon çalışmalarında 4

adet kritik Shields değeri, 4 adet karışım katsayısı, 3 adet yatak yükü katsayısı, 3 adet içsel sürtünme açısı, 4 adet yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranı, 3 adet maksimum sıkıştırma oranı ve 4 adet türbülans karışım uzunluğu denenerek 19 farklı modelde analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir parametrenin oyulma çukuru derinliği üzerindeki etkisi incelenmiş ve laboratuvardaki deney sonucu ile kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda kalibrasyonu yapılan çeşitli karışım katsayısı, yatak yükü katsayısı, içsel sürtünme açısı, maksimum sıkıştırma oranı ve türbülans karışım uzunluğu değerlerinin oyulma çukuru derinliğinin belirlenmesinde etkisinin çok az olduğu ve düşük kritik Shields değerleri ile yüksek k_s/D_{50} oranı değerlerinde oyulma çukuru derinliğinin büyük oranda arttığı görülmüştür. Etkili olan bu iki parametre harici değerler değiştirilmeden Shields değerlerinden oyulma çukuru üzerindeki etkisi daha fazla olan 0,01 ile 0,02 değerleri ve yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranı (k_s/D_{50}) parametresinin tüm değerleri birbirleriyle kombine edilerek kalibrasyon çalışmalarına devam edilmiştir. Shields parametresi 0,01 ve k_s/D_{50} değeri 7,5 ile Shields parametresi 0,01 ve k_s/D_{50} değeri 10 olması koşullarında model sonuçlarıyla laboratuvar verileri arasında uyum olduğu görülmüş ve bu iki koşul için 120 dakikalık laboratuvar deneyinin (Kayatürk, 2005) tamamı simüle edilmiştir. Kalibrasyon çalışmalarında toplam 25 adet analiz yapılmış ve sonucunda Shields parametresi 0,01 ve k_s/D_{50} değeri 7,5 olan seçenekte, L_a=35 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağında ölçülen laboratuvar deney verilerine büyük oranda yakınsama sağlanmıştır.

Kalibrasyon çalışmalarından sonra, L_a=35 cm ve B_a=10 cm boyutlarındaki köprü kenar ayağında belirlenen en uygun sediment taşınım modeli parametreleri kullanılarak çözüm ağı gözü aralığının analiz sonuçları üzerindeki etkisini inceleyebilmek için çözüm ağı boyutları 5,0 cm olan hücre bloğu, 5,0 cm ve 2,50 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları, 3,5 cm ve 1,75 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları ile 5,0 cm, 2,5 cm ve 1,25 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları oluşturularak hassasiyet analizleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyi verilerine en yakın sonuç 5,0 cm ve 2,50 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları kullanılarak yapılan simülasyonda elde edilmiştir. 5,0 cm, 2,5 cm ve 1,25 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları oluşturularak yapılan simülasyonda, seçilen en küçük çözüm ağı gözü boyutunun (1,25 cm) modelde kullanılan sediment dane çapının (0,148cm) 10 katından küçük olması sebebiyle çözüm alınamamıştır. Çözüm ağı gözü boyutları 5,0 cm seçilerek yapılan simülasyonda ise oyulma derinliği 30. dakikadan sonra laboratuvar sonucundan uzaklaşmış, 3,5 cm ve 1,75 cm olan iç içe geçmiş hücre blokları seçilerek yapılan

simülasyonda ise laboratuvar ölçüm değerinden yaklaşık %25 oranında daha yüksek sonuç elde edilmiştir.

Daha önce Yıldız (2014) tarafından gerçekleştirilen köprü kenar ayak etrafında oluşan oyulmaların incelendiği bir başka Flow-3D (versiyon 10.1) sayısal model simülasyonlarında türbülans akımı çözüm metodu olarak LES (Large-Eddy Simulation) kullanılarak oyulma çukurunun şeklinin, derinliğinin ve yerinin daha doğru belirleneceği belirtilmiştir. Bu nedenle önceki kalibrasyon ve hassasiyet analizlerine ilaveten LES yaklaşımı kullanılarak türbülans akımı çözüm yaklaşımının simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak daha önce RNG modeli kullanılarak elde edilen sonuçlarla benzer şekilde laboratuvar sonuçlarına yakınsama sağlanmıştır. Fakat laboratuvar deneyi sonuçlarına kıyasla LES metodu daha küçük değerler hesaplarken RNG metodu daha büyük oyulma derinlikleri hesaplamıştır. Ayrıca çözüm süresi olarak da LES metodu kullanılarak yapılan analiz RNG yönteminden yaklaşık 12 saat daha uzun sürmüştür.

Kalibrasyon analizleri neticesinde belirlenen parametreler ve hassasiyet analizleri neticesinde seçilen çözüm ağı aralığı ile RNG türbülans modeli kullanılarak yine Kayatürk'ün (2005) laboratuvar deneyi çalışmalarından 2 farklı uzunluktaki (L_a=20 cm-B_a=10 cm ve L_a=15 cm-B_a=10 cm) köprü kenar ayağı etrafındaki oyulmalar incelenmiştir. Belirlenen en uygun sediment taşınım modeli parametreleri ve seçilen çözüm ağı aralığının kontrolü amaçlı yapılan bu çalışmalarda, seçilen tüm değerlerin farklı uzunluktaki köprü kenar ayakları etrafında oluşan oyulmanın belirlenmesinde büyük oranda başarılı olduğu görülmüştür. 120 dakikalık deney süresi sonunda laboratuvarda oluşan maksimum oyulma çukuru değerine L_a=20 cm-B_a=10 cm boyutlarındaki kenar ayakta % 7, L_a=15 cm-B_a=10 cm boyutlarındaki kenar ayakta % 2 hatayla yaklaşılmıştır.

5.2. Basınçlı ve Savak Tipi Akım Durumlarında Köprü Tabliyesi Altında Daralma Oyulması Benzeşimi

Bu bölümde köprü kenar ayağı etrafında meydana gelen oyulma çukuru deney verileri kullanılarak kalibre edilmiş olan 3-B sayısal modelin, akarsu köprülerinde taşkın dönemlerinde karşılaşılabilecek basınçlı ve savak tipi akım koşullarında meydana gelen oyulma çukurunun benzeşiminde ne kadar başarılı sonuçlar verebileceğini görebilmek amacıyla benzeşim yapılmıştır.

5.2.1. Deneysel çalışma

Deneysel çalışma Karakurt (2016)'a ait doktora tez çalışması kapsamında 10 metre uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 1 m yüksekliğinde olan dikdörtgen kesitli bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal başlangıcından itibaren yaklaşık 4,00 m mansapta köprü tabliyesinin yerleştirildiği 2,50 m boyunda, 1,00 m genişliğinde ve 0,22 m derinliğinde bir test havuzu oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan köprü tabliyesi iki şeritli köprü boyutları göz önüne alınarak 1/100 ölçeğinde belirlenmiştir. Pleksiglas malzemeden yapılmış olan tabliyede kiriş yükseklikleri 5,0 cm ile 7,5 cm olarak belirlenmiştir. Köprü tabliyesi deney bölgesi içerisine kanal tabanından 20,0 cm yüksekliklerde olacak şekilde kanal yan duvarlarına sabitlenerek kızaklı bir sistem üzerine oturtulmuştur. Deneylerde kullanılmış olan taban malzemesi medyan çapı (D_{50}) 1,1 mm olup, geometrik standart sapma σ_g =1,273 < 1,4 olduğundan sediment üniform kabul edilmiştir. Deneylerde 70 lt/s, 80 lt/s ve 90 lt/s büyüklüğünde debi ve basınçlı akım elde etmek için 0,20 cm, 0,225 cm ve 0,25 cm lik yaklaşım akım derinlikleri kullanılmıştır. Savak tipi akım ise 0,275 cm, 0,30 cm ve 0,325 cm lik yaklaşım akım derinliklerinde elde edilmiştir. Deney süresi 8 saat olarak gerçekleşmiştir.

5.2.2. Sayısal model simülasyonları ve sonuçları

Deneysel çalışmaların 3 boyutlu olarak sayısal modellemesinde özellikleri Bölüm 5'te verilen bir dizüstü bilgisayarı kullanılmıştır. Karakurt'un (2016) laboratuvar deneyi çalışmalarından 2 tane basınçlı akım ve 1 tane savak tipi akım olmak üzere 3 adet deneyin sayısal model benzeşimi Flow-3D 11.0.4 versiyonu ile yapılmıştır.

Dikdörtgen kanalın model boyutları, Bölüm 5.2.1'de verilen 2,5 m uzunluğunda olan test bölgesini kapsayacak şekilde akım yönünde 9 m, akım yönüne dik 1,0 m ve düşey yönde derinlik boyunca 0,55 m olarak belirlenmiştir. Akım yönünde 4 m ile 6,5 m arasındaki sediment test bölgesinde oyulma simülasyonlarına başlamadan önce, akım koşullarının kararlı akım haline getirilmesi sağlanmıştır. RNG türbülans çözüm modelinin uygulanarak kararlı akımın elde edildiği benzeşimde modelin akış yönü doğrultusunda giriş kısmında su yüksekliği ve akım hızı, çıkışta su yüksekliği, kanal yan cidarlarında ve tabanda duvar, kanal su üst yüzü sınırında atmosfer basıncı ve hücre bloklarının birbirine değen yüzeylerinde sürekliliği sağlayan simetri sınır koşulları tanımlanmıştır.

Basınçlı Akım 1 deneyinin benzeşiminde simetri ekseni tanımlanmayıp 1,0 m kanal genişliği tamamen oluşturulmuşken, diğer Basınçlı Akım 2 ve Savak Tipi Akım 1 deneylerinin benzeşiminde kanalın ortası olan 0,5 m'de simetri ekseni tanımlanıp analiz süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Modellerde çözüm ağı kenar uzunlukları boyutları 2,50 cm olan hücre bloğu oluşturulmuş ve Basınçlı Akım 1 deneyinin modellenmesi için 316800 adet, Basınçlı Akım 2 ve Savak Tipi Akım 1 deneylerinin modellenmesi için ise 174240 adet hücre tanımlanmıştır. Basınçlı Akım 1, Basınçlı Akım 2 ve Savak Tipi Akım 1 deneylerinin modellerinde kararlı akım koşulları sırasıyla 472, 486 ve 286 saniyelik simülasyon süreleri sonunda elde edilmiş ve bu simülasyonların elde edilmesi sırasıyla 7 saat 23 dakika, 3 saat 38 dakika ve 2 saat 16 dakika sürmüştür. Sonuç olarak bu kararlı akım sonuçlarıyla köprü tabliyesi altında taban oyulması deneylerinde kullanılmış olan başlangıç koşulları sağlanmış olup dikdörtgen kanalda Çizelge 5.18'te verilen ortalama akım hızları ve yaklaşım akımı derinlikleri elde edilmiştir.

Köprü tabliyesi modele dahil edilerek ve Bölüm 5.1.4'te yapılan kalibrasyon çalışmaları neticesinde belirlenen Çizelge 5.17'deki parametreler kullanılarak sediment oyulma analizlerine geçilmiştir. Bu parametrelerden yalnızca "Türbülans karışım uzunluğu, T_{LEN}" değeri akım derinliğinin %7'si olarak tanımlanması önerildiği için değiştirilmiştir (Brethour, 2010).

Çizelge 5.17. Sediment benzeşimi modellerinde kullanılan parametreler

Parametreler	Sembol	Değer		
Deneyler		Basınçlı Akım 1	Basınçlı Akım 2	Savak Tipi Akım 1
Yoğunluk, g/cm³	ρ	2,65		
Kritik Shields parametresi	θ_{cr}	0,01		
Karışım katsayısı	C_e	0,018		
Yatak yükü katsayısı	C_b	8,0		
İçsel sürtünme açısı	Φ	32°		
Yatak pürüzlülüğü/Medyan dane çapı oranı	ks/D_{50}	7,5		
Maksimum sıkıştırma oranı	-	0,64		
Türbülans karışım uzunluğu, m	T_{LEN}	0,0175	0,0175	0,021

Çizelge 5.18. Sediment benzeşimi deney ve model sonuçları kıyaslanması

Deney No	V_a (m/s)		y_a (m)		y_{smax} (m)		
	Deneysel Veriler	Model Tahminleri	Deneysel Veriler	Model Tahminleri	Deneysel Veriler	Model Tahminleri	Hata %
Basınçlı Akım 1	0,280	0,286	0,250	0,252	0,131	0,163	%24,4
Basınçlı Akım 2	0,320	0,321	0,250	0,252	0,141	0,185	%31,1
Savak Tipi Akım 1	0,300	0,301	0,300	0,302	0,138	0,164	%19,0

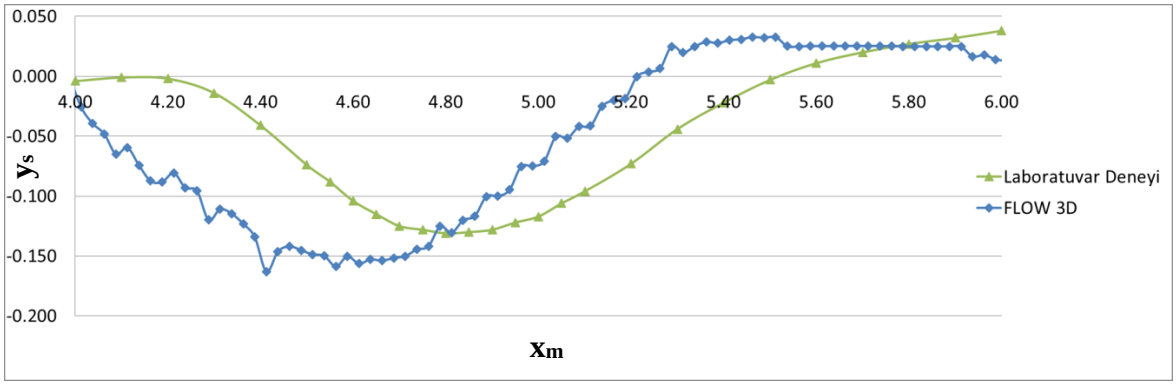
Çizelge 5.18’de verilen sonuçlara göre kanal içindeki ortalama hız ve akım derinlikleri çok yakın değerler elde edilmişken, maksimum oyulma çukuru derinlikleri deneysel verilerden ortalama % 25 daha büyük hesaplanmıştır. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’te verilen oyulma çukuru profillerine bakıldığında maksimum oyulma derinliklerinin deneysel verilere göre

oluştuğu bölgede farklılık gözlemlenmiştir. Tüm deneyler için deneysel sonuçlarda maksimum oyulma çukuru yaklaşık olarak 4,80 m'de oluşurken Flow-3D modellemesi sonuçlarında yaklaşık 4,60 m'de oluştuğu gözlemlenmiştir.

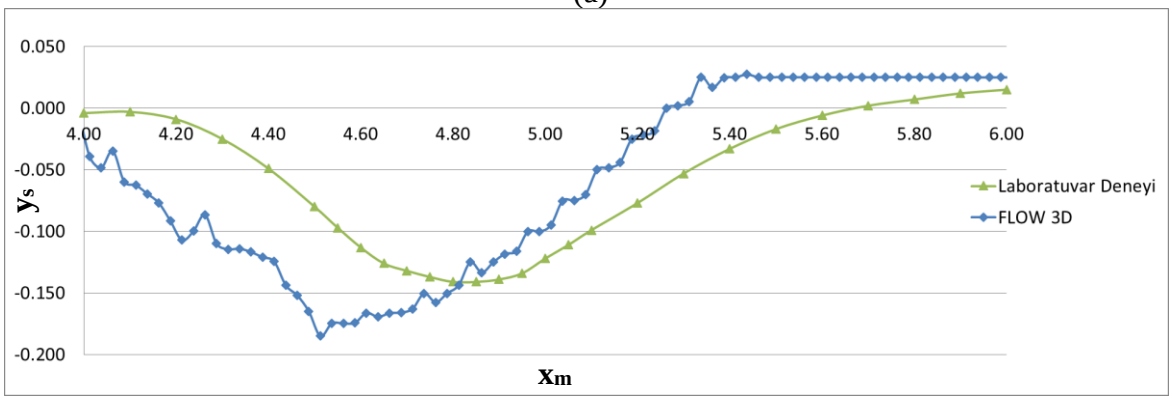
Şekil 5.24 ile verilen maksimum oyulma çukuru derinliği değerleri incelendiğinde, deneysel çalışmalar sonuçlarında olduğu gibi, kanalda hızın artması durumunda oyulma çukurunun boyutunun büyüdüğü ve yaklaşım akım derinliğinin artarak savak tipi akımın oluşması durumunda köprü tabliyesi altından geçen hızın azalmasından dolayı oyulma çukuru derinliğinin küçüldüğü model sonuçlarında da elde edilmiştir.

Oyulma çukuru profilinin incelendiği şekillerde akış doğrultusundaki ölçüm alınan konum "x_m", maksimum oyulma çukurunun meydana geldiği konum "x_{max}" ve oyulma miktarı "y_s", maksimum oyulma derinliği "y_{smax}" olarak ifade edilmiş ve bu parametreler "x_m/x_{max}" ve "y_s/y_{smax}" şeklinde birbirine oranlanarak oyulma çukuru profilleri boyutsuzlaştırılmıştır. Modellerden elde edilen boyutsuzlaştırılmış oyulma çukuru profilleri ile deneysel veriler karşılaştırıldığında Şekil 5.24'ten görüldüğü üzere sayısal model benzeşimlerinde oyulma çukuru her üç deney durumunda da menbaya doğru ötelenmiş olarak tahmin edilmiştir. Ancak Şekil 5.25'den de görüldüğü üzere boyutsuzlaştırılmış profiller karşılaştırıldığında oyulma çukuru şeklinin deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

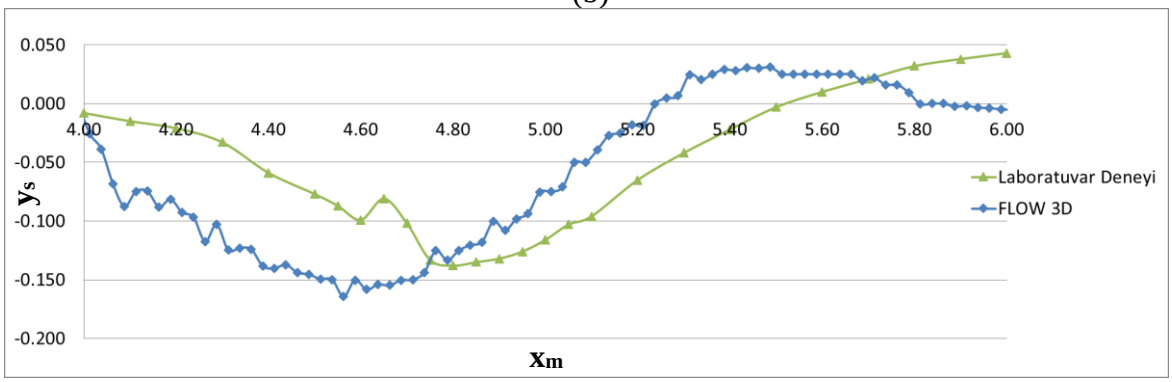
Laboratuvarda gerçekleştirilen Basınçlı Akım 1 deneyinin süresi 7 saat 30 dakika, Basınçlı Akım 2 ve Savak Tipi Akım deneylerinin süreleri ise 8 saat 15'er dakikadır. Flow-3D simülasyonlarında bu çözüm süreleri Basınçlı Akım 1, Basınçlı Akım 2 ve Savak Tipi Akım 1 deneylerinde sırasıyla yaklaşık 100 saat, 48 saat ve 55 saat sürmüştür. Basınçlı Akım 2 ve Savak Tipi Akım 1 deneylerinde kanalın ortası olan 0,5 m'de simetri ekseni tanımlandığından analiz sürelerinin simetri ekseni tanımlanmayan Basınçlı Akım 1 deneyine göre nerdeyse yarı yarıya azaldığı görülmüştür.



(a)

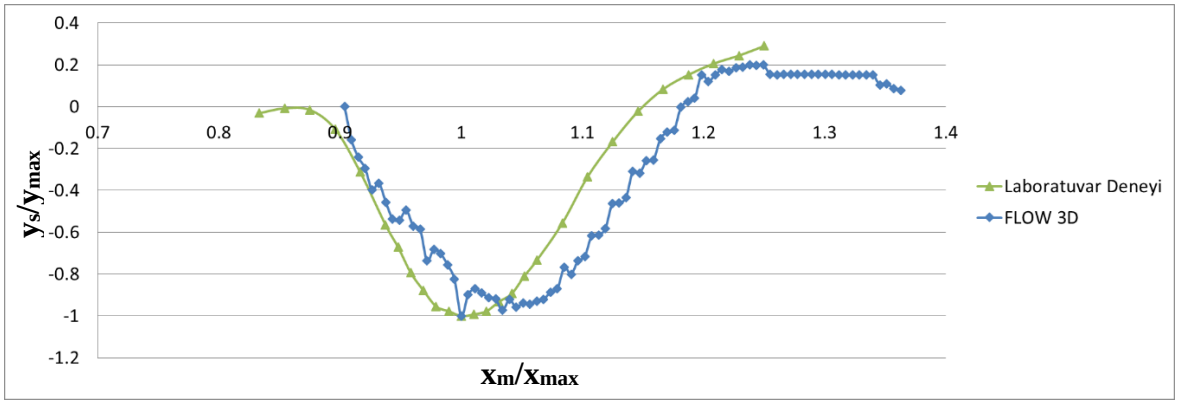


(b)

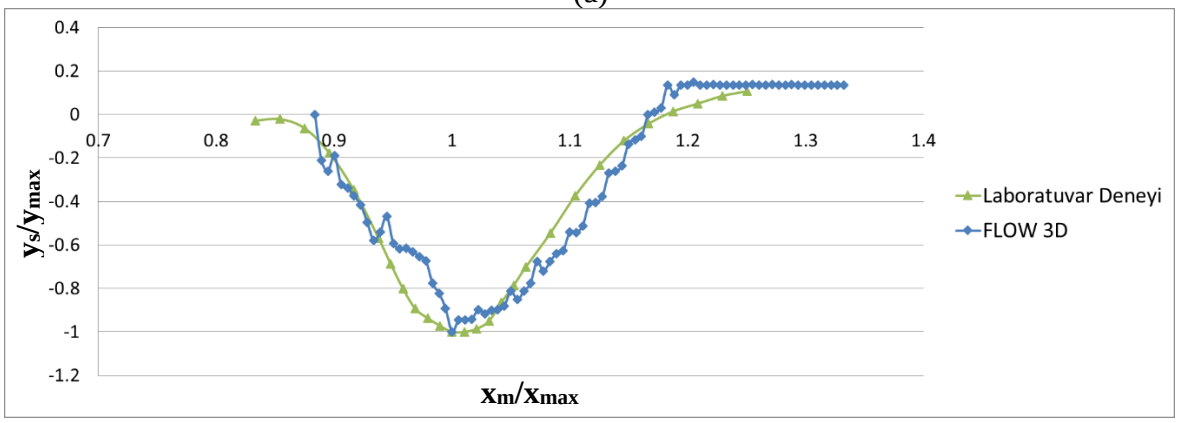


(c)

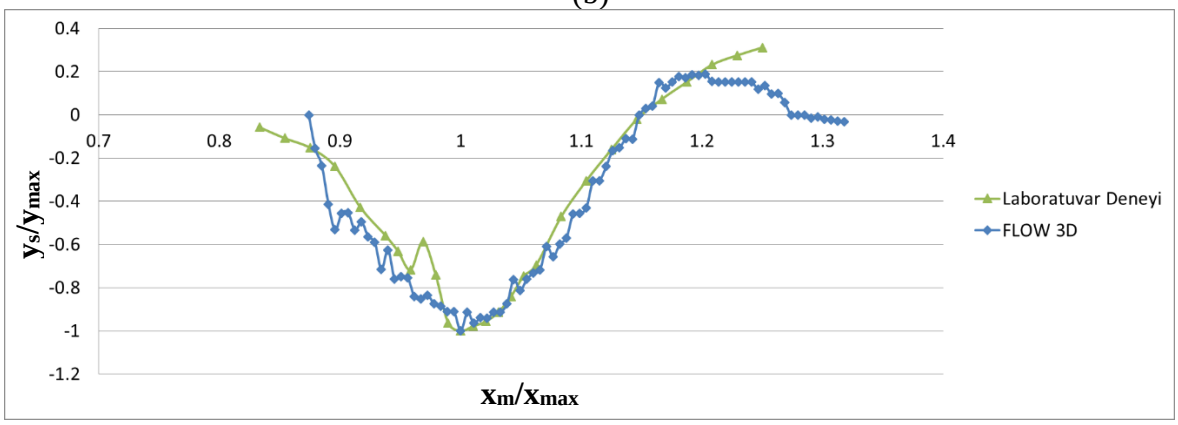
Şekil 5.24. Deneysel ve modelleme maksimum oyulma profilleri: (a) Basınçlı Akım 1, (b) Basınçlı Akım 2, (c) Savak Tipi Akım 1



(a)



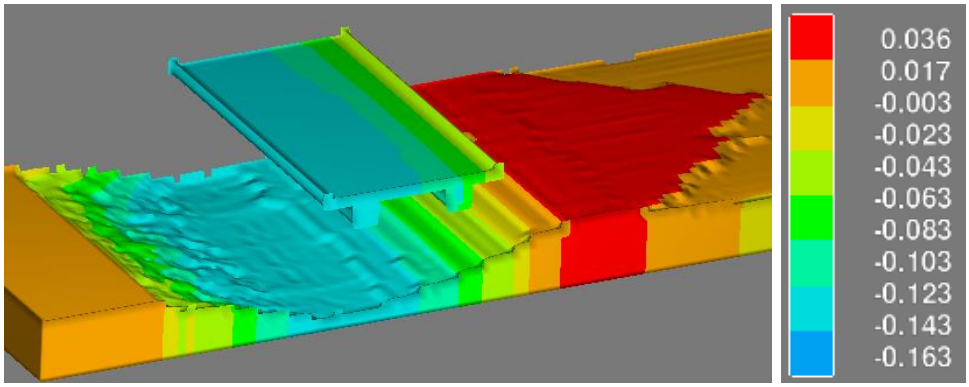
(b)



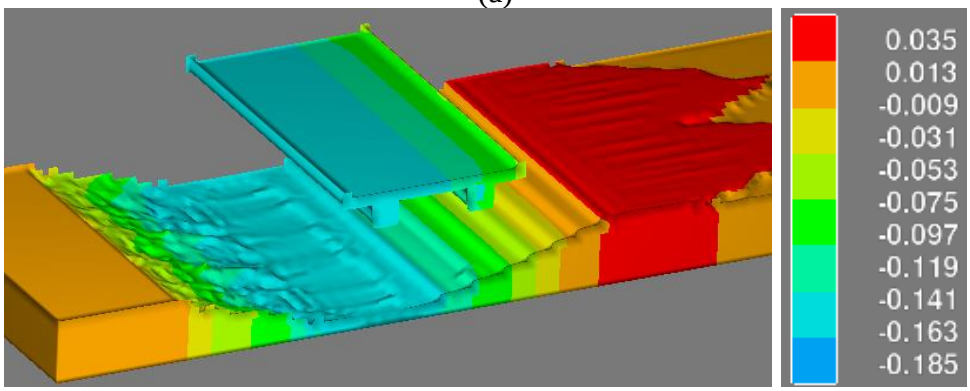
(c)

Şekil 5.25. Deneysel ve modelleme boyutsuzlaştırılmış oyulma profilleri: (a) Basınçlı Akım 1, (b) Basınçlı Akım 2, (c) Savak Tipi Akım 1

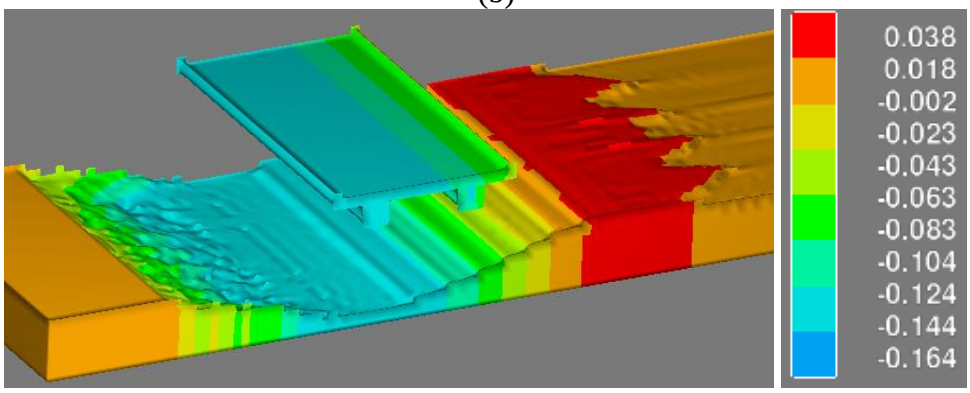
Tüm deneylere ait oyulma çukuru şekli ve derinliğini gösteren FLOW-3D programı sonuçları Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Ayaksız köprü tabliyesi gibi farklı tipteki yapılarda, başka sınır koşullarında ne kadar başarılı sonuçlar verebileceğini görebilmek için yapılan modellemeler neticesinde Bölüm 5.1'de belirlenen yöntem ve parametrelerin oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.26. Flow-3D programı köprü tabliyesi altı oyulma çukurunun şekli ve metre cinsinden boyutları: (a) Basınçlı Akım 1, (b) Basınçlı Akım 2, (c) Savak Tipi Akım 1

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, temiz su oyulması ve serbest akım koşulunda köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulma çukuru ile yine temiz su oyulması halinde batmış ve savak tipi akım koşullarında ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru şekli ve derinliğinin benzeşimi 3 boyutlu Flow-3D yazılımı ile yapıldı. Köprü kenar ayağı etrafındaki oyulma çukuru benzeşimi için Kayatürk (2005) tarafından gerçekleştirilmiş olan laboratuvar deneyleri, ayağı olmayan köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru benzeşimi ise Karakurt (2016) tarafından yapılmış deneysel çalışmalar dikkate alınmıştır.

Sayısal model benzeşimlerinin yapıldığı Flow-3D modelinde oyulma çukuru benzeşimi için yalnızca köprü ayağı uzunluğunun oyulma derinliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Flow-3D modeli her iki model düzeneği için kurulmuş ve kararlı akım elde edildikten sonra sediment modeli çalıştırılmıştır. Deneysel verilerin bir bölümüyle sayısal modelde sediment modulünde yer alan çeşitli katsayılar kalibre edilmiştir. Kalibrasyon çalışmaları neticesinde çözüme etki eden sediment parametreleri belirlenerek birbirleriyle kombine edilmiş ve en uygun sediment taşınım modeli belirlenmiştir. Model simülasyonlarında genel olarak RNG türbülans modeli kullanılmıştır. Bu simülasyonlara ilave olarak LES türbülans modelinin de maksimum oyulma çukuru üzerindeki etkisi incelenmiş, simülasyon sonuçları ile deneysel veriler ve RNG yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçları kıyaslanmıştır. RNG türbülans modelinin deneysel verilerle daha uyumlu sonuçlar verdiği ve simülasyon süresini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Kalibrasyon analizleri neticesinde belirlenen parametreler dikkate alınarak 2 farklı uzunlukta köprü kenar ayağı etrafında oluşmuş maksimum oyulma çukuru derinliklerinin zamanla gelişimi incelenmiş ve belirlenen yöntem ve parametrelerin oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Genel olarak tüm kenar ayaklar etrafında oyulma derinliklerinin incelendiği deney verileri ile simülasyon sonuçları arasında % 15'ten küçük hata değerleri elde edilmiştir.

Çeşitli sediment parametreleri (kritik Shields parametresi, karışım katsayısı, yatak yükü katsayısı, içsel sürtünme açısı, yatak pürüzlülüğü/medyan dane çapı oranı, maksimum sıkıştırma oranı ve türbülans karışım uzunluğu), çözüm ağı gözü boyutları ve türbülans çözüm metodları denenerek yapılan kalibrasyon ve hassasiyet analizleri sonucunda elde

edilen sayısal modelin daha sonra basınçlı ve savak tipi akım koşullarında köprü tabliyesi altında meydana gelen oyulma çukuru benzeşimi için kurulmuştur. Tüm model simülasyonlarıda maksimum oyulma çukuru deney verilerine göre daha menbada oluşmuş ancak oyulma çukuru şeklinin deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak kanal akımının modellenmesine ek olarak sediment oyulma çukuru şekilinin ve derinliğinin benzeşiminde 11.0.4 numaralı versiyonu kullanılan Flow-3D programının gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verebildiği yapılan sayısal çözümler sonucunda görülmüştür. RNG türbülans yöntemi ile 2,50 cm çözüm ağı gözü aralığında yapılan simülasyonlarda, logaritmik hız dağılımını ve oyulma miktarlarını veren ve deney verileri ile uyumlu, yeterli hassasiyette sonuçlar alınabilmiştir.

Günümüzde sayısal model simülasyonlarında karşılaşılan en önemli sorun, diğer benzer HAD programlarında da var olan simülasyon sürelerinin çok uzun oluşudur. Bilindiği üzere Flow-3D sayısal hesaplamaları, kullanıcı tarafından belirlenen, dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Karmaşık şekle sahip geometrilerin daha düzgün ve gerçeğe yakın tanımlanabilmesi ve sonuçların gerçeğe daha uygun olması amacıyla küçük çözüm ağı gözü aralıklarının kullanılması gerekebilmektedir. Fakat bu ağ aralıklarının küçültülmesi durumunda simülasyon sürelerinin artması kaçınılmaz olmakta ve çözüm ağ gözü boyutlarının küçültülmesi her zaman daha hassas çözümler sağlayamamaktadır. Bu çalışmada da görüldüğü üzere Flow-3D sediment oyulması çözüm ağı gözü boyut hassasiyeti analizlerinde, denenen en küçük çözüm ağı aralığında, ağ aralığının sediment danesi çapının 10 katından küçük olması sebebiyle gerçek sonuçlardan uzaklaşılmış ve hattta analizlerde hata oluşması sebebiyle çözüm alınamamıştır.

Flow-3D programında gerçekleştirilen sediment oyulması analizlerinde i7 işlemcili, 8 çekirdekli 16 GB Ram kapasiteli ASUS N550JV modeli bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Kayatürk'ün (2005) laboratuvar deneyi çalışmaları temelinde yapılan modellemelerde 2,50 cm çözüm gözü ağı gözü boyutlarında tanımlanmış toplam 307 200 adet hücre ile gerçekleştirilen 120 dakikalık simülasyon süresi, yapılan kalibrasyon çalışmalarının süreleri dahil olmamakla birlikte, L_a=35 cm, L_a=20 cm ve L_a=15 cm olan kenar ayaklarda sırasıyla yaklaşık 4 gün, 3 gün 15 saat ve 3 gün 9 saat saat sürmüştür. Karakurt (2016)'a ait doktora tez çalışmasından seçilen 3 adet laboratuvar deney verileri

kullanılarak yapılan doğrulama analizlerinde ise yine 2,50 cm çözüm gözü ağı boyutu seçilmiş ve incelenen ilk deneyde kanalın ortası olan 0,5 m'de simetri ekseni oluşturulmayıp kanal genişliği tamamen modellenerek 316 800 adet hücre, diğer 2 adet deneyin benzeşiminde ise analiz süresinin azaltılması amacıyla simetri ekseni oluşturulup 174 240 adet hücre tanımlanmıştır. Seçilen ilk deneyin süresi 7 saat 30 dakika, diğer deneylerin süreleri ise 8 saat 15'er dakikayken, Flow-3D benzeşimlerinde bu deneyler sırasıyla yaklaşık 100 saat, 48 saat ve 55 saat sürmüştür. Sonuç olarak Flow-3D modeli laboratuvarda fiziksel modelin kurulumundaki zorluğu ve zaman kaybını ortadan kaldırırken benzeşim modeli analiz sürelerinde tasarruf sağlayamamaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda taşkın durumunda karşılaşılan basınçlı ve savak tipi akım koşullarında orta ayağa sahip köprü tabliyesi altında ayak etrafında meydana gelecek oyulma çukuru simülasyonlarının mühendislere özellikle köprünün dizayn aşamasında önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Böylece gereksiz olabilecek köprü ayağı kazık boylarından tasarruf yapılabilirken, köprü ayakları oyulmaya karşı yeterli boyutlarda projelendirilebilecektir.

KAYNAKLAR

Abdelaziz, S., Bui, M.D., and Rutschmann, P. (2011). Numerical investigation of flow and sediment transport around a circular bridge pier. In E. M. Valentine and C. J. Apelt (Eds.), *34th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research World Congress: Balance and Uncertainty: Water in a Changing World*. Brisbane, Australia: İAHR, pp. 3296-3304.

Barbhuiya, A. K., Dey, S. (2004). Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(2), 87–96.

Brethour, J., Burnham, J. (2010). Modeling sediment erosion and deposition with the Flow-3D sedimentation and scour model. *Flow Science Technical Note FSI-10-TN85*, 1-22.

Chang, Y. L., Hsieh, T. Y., Chen, C. H., and Yang, J. C. (2013). Two-dimensional numerical investigation for short-and long-term effects of spur dikes on weighted usable area of rhinogobius candidianus (goby). *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(12), 1297-1303.

Chatterjee, S. S., Ghosh, S. N., and Chatterjee M., (1994). Local scour due to submerged horizontal jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 973-992.

Chauvin, G.E., De Cesare, G., and Schwindt, S. (2015). Numerical modelling of plunge pool scour evolution in non-cohesive sediments. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), 477-487.

Choufu, L., Abbasi, S., Pourshahbaz, H., Taghvaei, P., and Tfwala, S. (2019). Investigation of flow, erosion, and sedimentation pattern around varied groynes under different hydraulic and geometric conditions: a numerical study. *Water 2019*, 11(2), 235-252.

Demirci, M., Kocaman, S., ve Varlı, B. (2012). Farklı geometrilerdeki köprü kenar ayakları etrafındaki hız dağılımının sayısal incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 161-174.

Egiazaroff, I. V. (1965). Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 225–247.

Faruque, M.A.A., Sarathi, P., and Balachandar, R. (2006). Clear water local scour by submerged three-dimensional wall jets : effect of tailwater depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 575-580.

Fernandez, L.R., Van Beek, R. (1976). Erosion and transport of bed-load sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 14(2), 127-144.

Flow Science. (2014). *Intro to Flow-3D version 11 for Water and Environment Modellin*g. Santa Fe, NM: Flow Science,1-377.

Garde, R., Subramanya, K., and Nambudripad, K. D. (1961). Study of scour around spurdikes. *Journal of the Hydraulics Division*, 86(6), 23-37.

Gladstone, C., Phillips, J.C., and Sparks, R.S.J. (1998). Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition. *Sedimentology*, 45(5), 833-843.

Göğüş, M., Köken, M. (2011). Köprü yan ayağı uzunluğunun akım karakteristiklerine ve taban oyulmasına etkisi; TUBİTAK 108M590, Ankara, 1-68.

Guo, J. (2002). Hunter Rouse and Shields diagram. *Proceedings of 13th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research – Asia Pacific Division Congress: Advances in Hydraulics and Water Engineering*, 2, 1096-1098.

Hunziker, R. P. (1995). *Fraktionsweiser geschiebetransport*. Hydrologie und Glaziologie, Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, 138.

İnternet: Brethour J. (December, 2001). Transient 3-D model for lifting, transporting and depositing solid material. *3rd International Symposium on Environmental Hydraulics with a Special Theme on Urban Fluid Dynamics*. Web: https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/08/Transient-3D-Model-for-Lifting-Transporting-and-Depositing-Solid-Material.pdf adresinden 25 Nisan 2015'de alınmıştır.

İnternet: Brethour J. (2003). Modeling sediment scour. *Flow Science Technical Note FSI-03-TN-62*. Web: https://www.flow3d.co.kr/wp-content/uploads/FloSci-TN62_Sediment-Scour.pdf adresinden 28 Şubat 2015'de alınmıştır.

İnternet: Flow Science. (2019). URL: https://www.flow3d.com/modeling-capabilities/sediment-transport-model/, Son Erişim Tarihi: 28 Ağustos 2019.

İnternet: Guodong, L., Lang, L., and Ning, J. (2013). 3D Numerical simulation of flow and Local Scour around a Spur Dike. *Proceedings of 2013 International Association for Hydro-Environment Engineering and Research World Congress*. Web: https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/04/3D-Numerical-Simulation-of-Flow-and-Local-Scour-around-a-Spur-Dike.pdf adresinden 10 Nisan 2016'da alınmıştır.

İnternet: Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M., and Burnham, J. (2014). Sedimentation scour model. *Flow Science Report 03-14*. Web: https://www.fsci.dev/wp-content/uploads/2014/06/Sedimentation-Scour-Model.pdf adresinden 9 Şubat 2015'de alınmıştır.

Jaggi, M. (1992). *Sedimenthaushalt und stabilität von flussbauten*. Hydrologie und Glaziologie, Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, 119.

Karakurt, O. (2016). *Basınçlı ve savak tipi akım durumlarında köprü tabliyesi altındaki oyulmanın incelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-96.

Karami, H., Basser, H., Ardeshir, A., and Hosseini, S. H. (2014). Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data. *Water and Environment Journal*, 28(1), 124-134.

Kayatürk, Ş. Y. (2005). *Köprü yan ayaklarında oyulma ve oyulmaya karşı koruma*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-226.

Kayser, M., Gabr, M.A. (2013). Assessment of scour on bridge foundations using an in situ erosion evaluation probe. *Journal of the 92nd Transportation Research Board Annual Meeting*, 2335(1), 72-78.

Keulegan, G. H. (1938). Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 21(6), 707-741.

Koçyiğit, M.B., Akay, H., ve Yanmaz, A.M. (2016). Flooding and its effects on river bridges in western black sea region. *Disaster Science and Engineering*, 2(1), 29-35.

Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Shields Jr, F. D. (2002). Local scour associated with angled spur dikes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(12), 1087-1093.

Kumcu, S. Y. (2016). Steady and unsteady pressure scour under bridges at clear-water conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(4), 334-342.

Mastbergen, D. R., Van Den Berg, J. H. (2003). Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology*, 50(4), 625-637.

Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, 6(18), 39–64.

Pagliara, S., Amidei, M., and Hager, W.H. (2008). Hydraulics of 3D plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1275-1284.

Pourshahbaz, H., Abbasi, S., and Taghvaei, P. (2017, June). *Numerical scour modeling around parallel spur dikes in Flow-3D*. Paper presented at the Drinking Water Engineering and Science Interactive Discussion, Zanjan, Iran.

Ribberink, J.S. (1998). Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows. *Coastal Engineering*, 34(1), 59-82.

Schlichting, H. (1987). *Boundary-Layer Theory* (7th edition). New York: McGraw Hill Book Company, 635-665.

Soulsby, R. L., Whitehouse, R. J. S. W. (1997). Threshold of sediment motion in coastal environments. *Proceedings of the Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference*, 1(1), 145-150.

Van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1456.

Vasquez, J. A., Walsh, B. W. (2009). CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. *33rd International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, 1(3), 896-903.

Winterwerp, J. C., Bakker, W. T., Mastbergen, D. R., and Van Rossum, H. (1992). Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11), 1508–1525.

Yanmaz, A.M. (2002). *Köprü Hidroliği* (Birinci Baskı). Ankara: Odtü Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayınları, 158-189.

Yıldız, B. (2014). *Oyulma esnasında köprü yan ayakları etrafında zamana bağlı olarak akım karakteristiklerinde oluşan değişimlerin incelenmesi*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 173-206.

Zhang, H., Nakagawa, H. (2009). Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke. *International Journal of Sediment Research*, 24(1), 33-45.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: KEMALOĞLU, Zülfikar Erkay
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 13.06.1987, Muş
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (505) 902 55 34
e-mail	: zekemaloglu@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2011
Lise	Maltepe Askeri Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Dolsar Mühendislik A.Ş.	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Pausz, S., Arslan, M., Kemaloğlu, Z.E. (2016). *Considerations of Concrete Face Rockfill Dam with a High Cut-off Wall and Located on a Thick Alluvial Soil Layer* Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu Türk Milli Komitesi (TRCOLD) "Sürdürülebilir Kalkınma için Barajlar ve HES'ler" Antalya Sempozyumunda sunuldu.

Hobiler

Yüzme, Futbol, Basketbol, Tenis

GAZİ GELECEKTİR...