



MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE KÖPRÜ KENAR
AYAKLARI ETRAFINDAKİ HIZ DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

BAŞAK VARLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANTAKYA /HATAY

AĞUSTOS - 2010



MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE KÖPRÜ KENAR
AYAKLARI ETRAFINDAKİ HIZ DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

BAŞAK VARLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya / HATAY

AĞUSTOS-2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler	3
1.1.1. Sürüklenen Vorteks Sistemler	4
1.1.2. Atnalı Vorteks Sistemler	4
1.1.3. Art-iz vorteks sistemler	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. Materyal	9
3.1.1. Navier Stokes Denklemleri	10
3.1.2. Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) Denklemleri	12
3.1.3. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri	13
3.2. Yöntem	17
3.2.1. Flow-3D Programı	17
3.2.2. k- ϵ Türbülans Yöntemi	21
3.2.3. Çalışma Hakkında Genel Bilgi	23
3.2.4. Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları	25

3.2.5. Köprü Ayakları Etrafındaki Hız Dağılımının Flow-3D ile Hesaplanması	29
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	36
4.1. Dikdörtgen Geometrilik Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Akımın Modellemesi	36
4.1.1. Mesh Karşılaştırması	37
4.1.2. Türbülans Yöntemi Karşılaştırması.....	44
4.1.3. Türbülans Karışım Boyu Karşılaştırması	51
4.2. Silindir Geometrilik Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Akımın Modellemesi	53
4.3. Trapez Geometrilik Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Akımın Modellemesi	55
5.SONUÇ ve ÖNERİLER	58
6. KAYNAKLAR	60
7. TEŞEKKÜR	62
8. ÖZGEÇMİŞ	63

ÖZET**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE KÖPRÜ KENAR AYAKLARI
ETRAFINDAKİ HIZ DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

Akarsu köprüleri büyük taşkınlar esnasında genellikle hasar görmekte veya yıkılmaktadır. Hasar nedenleri genellikle taban seviyesi alçalması ve köprü açıklığındaki yerel oyulmalara bağlanmıştır. Bu konu son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgisine sahip olmakla birlikte henüz istenilen aşamaya ulaşamamış ve evrensel bir yöntem geliştirilememiştir. Bu nedenle kontrol edilebilir laboratuvar koşullarında akarsu ve köprü ayakları konularında elde edilecek veriler, uygulamada karşılaşılan sorunların çözümü, hidrolik etkenlerin konu üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği esaslarına dayanan sayısal modeller benzer problemlerin çözümünde ve bu verilerin değerlendirilmesinde alternatif araçlar olmaktadır. Bu çalışmada, dikdörtgen, silindir ve trapez geometriye sahip köprü kenar ayakları civarındaki hız dağılımını incelemek için FLOW 3D bilgisayar programı vasıtasıyla 3 boyutlu sayısal modelleme yapılmıştır. Modelleme sonucu bulunan sayısal sonuçlar daha önce yapılmış deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2010, 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: Köprü Ayağı, FLOW-3D, Hız Dağılımı, Nümerik Model

ABSTRACT**INVESTIGATION OF DISTRIBUTION AROUND BRIDGE ABUTMENTS
WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

Bridge failures are described as the flow-induced erosion of soil material from around bridge abutments and piers set in rivers. It is caused by an acceleration of flow around the bridge foundation that accompanies a rise in water levels during floods. However this topic has a great interest of researchers in recent years but still failed to reach the desired stage, and a universal method has not been developed. Therefore laboratory experiments and field observations widely used to understand scour mechanism around bridge abutments and piers. In recent years, mainly based on computational fluid dynamics, numerical modeling and evaluation of these data for the solution of similar problems, has become as an alternative tool. In this study, in order to investigate velocity distribution around rectangle, cylinder and trapeze shaped bridge abutment, three-dimensional numerical model was generated by using the FLOW 3D computer program. Modeling results were compared with experimental results in literature.

2010, 63 pages

Key Words: Bridge Abutment, FLOW-3D, Velocity Distribution, Numerical Model

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Türbülans modeline bağlı olan bir sabit
A	: Kesit alanı
dV	: Diferansiyel kontrol hacmi
e_{ij}	: Ortalama gerilme-oranı tansörü
f_i	: Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri
F	: Akışkan hacmi oranı
F_G	: Yerçekimi kuvvetleri bileşeni, ağırlık bileşeni
F_x	: x doğrultusunda sisteme etki eden dış kuvvetler
ΣF	: Sisteme etkiyen toplam dış kuvvetler
g	: Yerçekimi ivmesi
k	: Türbülans kinetik enerji
k_s	: Engel pürüzlülüğü
L	: Karakteristik uzunluk
m	: Kütle
p	: Basınç
p'	: Basınç sapıncı
\bar{p}	: Ortalama basınç
P	: Islak çevre
q	: Birim genişlikteki debi

R_e	: Reynolds sayısı
t	: Zaman
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{ij}	: Gerilme tansörü
τ'_{ij}	: Türbülans (Reynolds, çalkantı gerilmeleri)
τ_T	: Toplam kayma gerilmesi
u	: x doğrultusundaki akım hızı
u'	: x doğrultusundaki çalkantı hızı
\bar{u}	: x doğrultusundaki ortalama akım hızı
u_0	: Herhangi bir noktadaki teğetsel hız
u^*	: Kayma hızı
v	: y doğrultusundaki akım hızı
v'	: y doğrultusundaki çalkantı hızı
\bar{v}	: y doğrultusundaki ortalama akım hızı
V	: Ortalama akım hızı
V_F	: Her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacim
w	: z doğrultusundaki akım hızı
w'	: z doğrultusundaki çalkantı hızı
\bar{w}	: z doğrultusundaki ortalama akım hızı
ws_i	: Duvar kayma gerilmesi
x	: Mesafe

ρ	: Akışkan yoğunluğu
ε	: Türbülans sönmülenme oranı (dissipation rate)
μ	: Kinematik viskozite
μ_t	: Türbülans (çalkantı) vizkozitesi
ν	: Dinamik viskozite
κ	: Von Karman sabiti
FAVOR	: Engelin temsil edilmesi için alan/hacim oranı (Fractional Area/Volume Obstacle Representation)
K.Y.	: Kontrol yüzeyi
K.H.	: Kontrol hacmi
LES	: Büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation)
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleri
VOF	: Akışkan hacmi yöntemi (Volume of Fluid)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sürüklenen Vorteks Sistem.....	4
Şekil 1.2. Atnalı Vorteks Sistem	4
Şekil 1.3. Bir Engel Etrafında Oluşan Vorteksler ve Art-iz Vorteks Sistem	5
Şekil 3.1. Bir hesaplama hücreğine etkiyen değişkenlerin gösterim.....	18
Şekil 3.2. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksenler	24
Şekil 3.3. Trapez kenar kesitli ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen.....	24
Şekil 3.4. Silindir kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen	24
Şekil 3.5. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 2 boyutlu görünüşü	27
Şekil 3.6. Trapez kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 2 boyutlu görünüşü	27
Şekil 3.7. Silindir kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 2 boyutlu görünüşü	27
Şekil 3.8. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 3 boyutlu görünüşü	28
Şekil 3.9. Trapez kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 3 boyutlu görünüşü	28
Şekil 3.10. Silindir kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 3 boyutlu görünüşü	28
Şekil 3.11. Flow-3D’de çözüm süresinin belirtilmesi	29
Şekil 3.12. Flow-3D’de çözümde kullanılacak sayısal sistemin belirlenmesi	30
Şekil 3.13. Flow-3D’de yerçekimi ivmesinin belirlenmesi	30

Şekil 3.14. Flow-3D’de türbülans yönteminin seçilmesi	31
Şekil 3.15. Flow-3D’de gömülü mesh geometrisi	32
Şekil 3.16. Flow-3D’de sınır koşullarının belirlenmesi	33
Şekil 3.17. Flow-3D’de başlangıçtaki akım hızının belirtilmesi	33
Şekil 3.18. Flow-3D’de simülasyonun başlaması	34
Şekil 3.19. Flow-3D’de Analiz Sonuçlarının Alınması	35
Şekil 4.1. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksenler	36
Şekil 4.2. Dikdörtgen kenar ayakta A eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması.....	39
Şekil 4.3. Dikdörtgen kenar ayakta B eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması.....	40
Şekil 4.4. Dikdörtgen kenar ayakta C eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması.....	41
Şekil 4.5. Dikdörtgen kenar ayakta D eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması	42
Şekil 4.6. Dikdörtgen kenar ayakta E eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması	43
Şekil 4.7. Dikdörtgen kenar ayak etrafında modelleme sonucu oluşan hız vektörleri ...	44
Şekil 4.8. Flow-3D programı türbülans yöntemleri	44
Şekil 4.9. Dikdörtgen kenar ayak A eksenini türbülans yöntemi karşılaştırması	46
Şekil 4.10. Dikdörtgen kenar ayak B eksenini türbülans yöntemi karşılaştırması	47
Şekil 4.11. Dikdörtgen kenar ayak C eksenini türbülans yöntemi karşılaştırması	48
Şekil 4.12. Dikdörtgen kenar ayak D eksenini türbülans yöntemi karşılaştırması.....	49
Şekil 4.13. Dikdörtgen kenar ayak E eksenini türbülans yöntemi karşılaştırması	50
Şekil 4.14. Dikdörtgen kenar ayak B eksenini TLEN karşılaştırması	52
Şekil 4.15. Silindirik kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen	53
Şekil 4.16. Silindirik kenar ayakta deney ve nümerik çalışma karşılaştırması	54
Şekil 4.17. Trapez kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen.....	55
Şekil 4.18. Trapez ayakta deney ve nümerik çalışma karşılaştırması	56
Şekil 4.19. Trapez köprü kenar ayağında oluşan türbülans bölgesi	57

1. GİRİŞ

Hareketli tabanlı bir akarsuya yerleştirilen herhangi bir engel, o noktada akım karakteristiklerinde değişmelere yol açar. Engel etrafında akıma ait hız ve basınç alanlarındaki değişmeler, bunlara bağlı olarak da engel etrafında bulunan sınır tabakasından ayrılmalar meydana gelir. Ayrılmalar sonucu çeşitli biçim ve büyüklükte vorteks sistemler ve sekonder hareketler oluşur. Akarsu yatağına yerleştirilen herhangi bir yapı, akımda bazı değişikliklere yol açar. Bu değişimlerin önceden tahmin edilmesi gerekir. Zaman içinde önceden tahmin edilemeyen problemlerin ortaya çıkması, yapının görevini yerine getirememesine yol açabilir. Akarsulardaki taban malzemesi hareketi ve akım karakteristikleri yukarıda sözü edilen değişikliklerin bir fonksiyonu olduğundan, akarsuda böyle bir değişikliğe yol açan engel etrafındaki katı madde hareketi ve varsa oyulma-yığılma gibi problemlerin inceleme ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Bir açık kanaldaki kıvrım veya eğriliklerin ek bir dirence sebep olacağı açıktır. Akım direncinde meydana gelen bu gibi değişimler, kıvrımın memba kısmında su derinliğinin artmasına ve akım hızında azalmaya yol açar. Kabarma etkisi, dış kıyımın mansap bölgesi yakınlarında, özellikle, sınır tabakasından ayrılma sonucu oluşan keskin eğriliklerde daha belirgin hale gelir.

Akarsulara yerleştirilen en büyük engeller köprülerdir. Geniş akarsuları geçen köprüler, tamamen kara üzerinde inşa edilmiş köprülere oranla daha fazla dış etkenlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle bu tip köprülerin belirli aralıklarla tetkik edilmesi, izlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekir. Bu alınan önlemler yapıların ekonomik ömrü süresince daha emniyetli ve güvenilir hizmet vermelerini sağlanmaktadır.

Bir köprünün, büyüklüğü ne olursa olsun, mühendislik ve ekonomik açıdan iyi bir şekilde projelendirilmesi için gerekli hidrolik çalışmalar, henüz gereken önemi kazanamamıştır. Son yıllarda ağır hasar gören veya yıkılan akarsu köprüleri için yürütülen istatistiksel çalışmalar, hasar nedenlerinin çoğunun hidrolik etkenlerden kaynaklandığını açığa çıkarmıştır. Yapılan çalışmalarda, hasar nedenlerinin %60 kadarı taban seviyesi alçalmaları ve köprü açıklığındaki yerel oyulmalar olmak üzere hidrolik etkenlere bağlanmıştır. Bu etkenlerin başında ayaklar etrafındaki aşırı taban oyulmaları, ayaklar arasındaki açıklığın akımla taşınan malzemeyle birikmesi sonucunda membada

ve köprü açıklığında su seviyesinin artması, akımla taşınan kaba malzemenin köprü alt yapı elemanlarına uyguladığı dinamik itki, köprü açıklığının yeterli genişlikte olmaması nedeniyle açıklıkta oluşabilecek hidrolik sıçrama, basınçlı ve savak tipi akımların oluşması, insan kaynaklı problemler vb. gelmektedir (Yanmaz, 2002).

Konunun önemi nedeniyle 1950'li yılların başından itibaren, köprü ayakları etrafındaki problemler, deneysel olarak incelenmeye başlanmıştır. 1970'lerden sonra ivme kazanan bu konu, güncelliğini daha da artırarak günümüze kadar uzanmıştır.

Bilim adamlarının daha iyi malzeme, yapılarda kullanılan metodlar ve analiz ve dizayn tekniklerini geliştirme konusundaki araştırmaları köprü yapılarında oluşabilecek sorunları erkenden tespit etmek konusunda çok faydalı olmuştur. Akarsu yatağındaki oyulmalar, bilim adamlarının şimdiye kadar tespit ettiği ve köprülere zarar veren en temel köprü hasarları sebeplerindedir. Bu oyulmalar genel olarak akarsuyu geçmek için kullanılan orta ve kenar ayaklarda tespit edilmektedir.

Köprülerde oluşan hasarlarda, en önemli sebep sel sularının etkisiyle akarsuyun debisinin artması, taşınan sürüntü maddesinin köprü ayakları civarında yığılmasıdır. Başlangıçta denge durumunda olan köprü ayakları, bu dengesiz dolmanın etkisi ile değişime uğramaktadır. Bazen de durum bunun tam tersi olabilir. Yani sel suları ayaklar civarındaki malzemeleri sürükleyerek oyulma meydana getirir. Bunların sonucu olarak ayaklar köprüyü taşıyamaz hale gelmekte veya tamamen yıkılabilmektedir. Bu sorunun çözümü için akarsu rejimine en uygun ayak tipinin belirlenmesi veya akarsu rejimini mevcut ayak tipine uygun hale getirilip getirilemeyeceği çalışmalarının yapılması gerekir (Süme, 1995).

Dere yatağının tüm özellikleri dikkate alındığında, sadece akarsu yatağı verilerine dayanarak orta ve kenar ayakları etrafında meydana gelecek oyulmaları tahmin etmek için genel bir kural bulunmamaktadır. Farklı akarsuların akışı, temel farklılıklar ve büyük değişiklikler göstermektedir. Akarsu yatağının eğimi, akım hızı ve en kesiti oyulma olgusu için tamamen ilişkili kavramlardır. Bu özellikler, yatak malzemesi özellikleri (sırasıyla silt, kil, çakıl taşı, büyük kaya parçaları) ve katı madde hareketiyle tamamen bir bütünlük içerisindedir.

Araştırmalar göstermiştir ki köprü ayağının akım alanına yerleştirilmesi ile yaklaşan akımın, engelin simetri eksenini üzerinde olan akım ipçığının, engele yaklaştıkça

hızının azaldığı ve engelin civarında sıfır olduğu araştırmalar sonucunda bulunmuştur. Bu nokta durgunluk noktasıdır. Durgunluk noktasının konumu akım yüksekliği, akım hızı ve engel önünde oluşan kabarma yüksekliğinin bir fonksiyonudur (Durgun, 1964). Hız alanında oluşan bu değişimlerin yanında, buna bağlı olarak diğer bir değişim de basınç alanında meydana gelmektedir. Engelin önünde yeterli uzaklıkta bir nokta ile engel civarındaki nokta arasında Bernoulli Denklemi uygulandığında, engel önünde meydana gelen basınç;

$$P=P_0+\rho.(U^2/2) \quad (1.1)$$

Olarak belirlenmektedir. Burada,

P : Engel durgunluk düzlemindeki bir noktanın basıncı,

P₀ : Engelden yeter uzaklıktaki bir noktanın basıncı,

$\rho.(U^2/2)$: Dinamik basınçtır.

Görüldüğü gibi engelin memba tarafında büyük bir basınç oluşmaktadır. Bundan dolayı da su yüzeyinde bir kabarma meydana gelmektedir.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\rho \cdot \frac{U^2}{2}} \quad (1.2)$$

Burada,

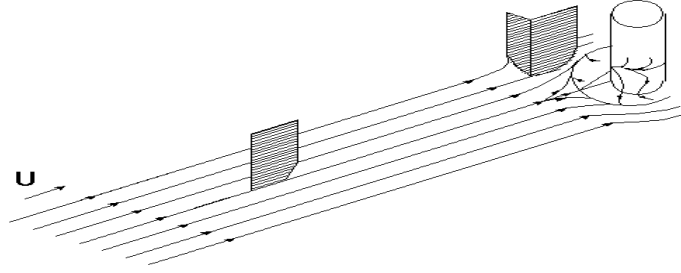
C_p: Basınç katsayısıdır (Aziz, 1996).

1.1. Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler

Bir engel etrafında yer alan akımın en belirgin özelliği, büyük ölçekli çevrinti yapısı veya diğer bir deyişle vorteks sistemleridir (Üç, 1979). Engelin hemen önünde meydana gelen basınç gradyanındaki artımdan dolayı, engelin membadaki sınır tabakası ayrılır. Bu ayrılma ve engelin memba durgunluk düzleminde oluşan hızın düşey bileşenlerinin, taban zemini üzerinde yansması sonucunda engel etrafında vorteks sistemler meydana gelir. Bu vorteks sistemleri üç ayrı biçimde oluşur:

1.1.1. Sürüklenen Vorteks Sistemler

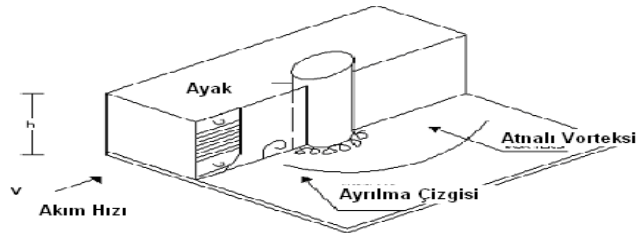
Bu vorteks sistemler aynı köşede birleşen yüzey arasında basınç farkları olan durumlarda meydana gelirler. Engelin durgunluk düzlemiyle kanal tabanının birleştiği yerde kabarmadan dolayı oluşan yüksek basınç gradyanları bu vortekslerin oluşmasına neden olur ve tamamen batık engellerle oluşur (Üç, 1979).



Şekil 1.1. Sürüklenen Vorteks Sistem (Aziz, 1996).

1.1.2. Atnalı Vorteks Sistemler

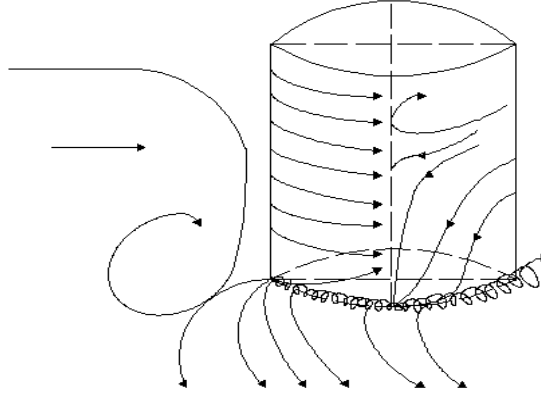
Engelin önünde meydana gelen aşağı yönlü düşey durumdaki hız bileşeni tabana ulaşır ve sapar. Yön değiştiren bu hız bileşenlerinin bir bölümü sürüklenen vorteksleri oluştururken, diğerlerinin bir bölümü de tekrar yükselir ve hareketine devam eder. Bu olayların sonucunda engelin tabanı yakında bir çevrinti hareketi olur. Bu çevrintiye atnalı vorteks sistem denir (Tison, 1940). Bu vorteksin oluşması basınç değişiminin büyük olmasına bağlıdır. Bu da ayak şekilleriyle ilgilidir. Atnalı vorteks sistem, dairesel engellerle ana akımla 70^0 açı yapan nokta yakınında, dikdörtgen engellerde ise engelin köşelerinde dönümlü akım hızına sahiptir (Aziz, 1996).



Şekil 1.2. Atnalı Vorteks Sistem (Aziz, 1996).

1.1.3. Art-iz vorteks sistemler

Engel yüzeyindeki kararsız sürtünme tabakasının yukarı doğru dönerek çıkmasından meydana gelir. Bu sistem içinde konsantre olan çevrilen engelin kendisi tarafından meydana getirilir. Sürtünme tabakaları, ayrılma hattının her iki tarafından ayrılır. Art-iz vorteks sisteminde çevrilerin şiddeti, engelin şekline ve akım hızına bağlı olarak değişir. Ayağın arka tarafında, tabandan yukarı doğru kalkan bir akım gözlenir (Üç, 1979). Şekildeki oklar su akımını göstermektedir.



Şekil 1.3. Bir Engel Etrafında Oluşan Vorteksler ve Art-iz Vorteks Sistem (Üç, 1979).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Köprülerin dizayn ve yapım aşamaları, son yıllardaki güvenlikle ilgili olumlu değişimlerden sonra tekrar gözden geçirilmelidir. Son zamanlardaki bazı köprü yıkılmaları ve meydana gelen ciddi hasarlar bu endişeleri artırarak bu tarz kazaları önlemek için araştırmacıları geniş çalışma alanlarına sevk etmiştir Köprü ayakları etrafında meydana gelen hız değişimlerinin ve bu değişimlerin sonuçlarının araştırılması 1960'lı yıllara dayanır

Carstens (1966), ortalama akım hızına bağlı olarak tane sayısını (Ns) hesap ederek, hareketli taban durumu için dairesel ayaklarda oyulmayı hesap eden bir yöntem geliştirmiştir.

Neill (1973), farklı ayak şekilleri için değişik katsayılar geliştirerek orta ayaklardaki oyulma miktarını hesap etmeye çalışmıştır.

Bresusers ve arkadaşları (1977), oyulmanın zamana bağlı oluşumu hakkında çok aydınlatıcı olmayan, ancak oyulmanın nihai derinliği hakkında fikir veren yöntem geliştirmiştir.

Raudkivi ve Ettema (1983), taban malzemesi dağılımının dengeli temiz su oyulması derinliğine etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmacıların çalışmalarına göre tane dağılımı, oyulma derinliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Tane dağılımı geometrik standart sapması, σ , artıkça tabandaki zırhlanma etkisiyle, yani kaba tanelerin ince tanelerin üzerini kaplamasıyla oyulma derinliği önemli ölçüde azalmaktadır.

Rajaratnam ve Nwachukwu (1983), silindirik yapılar civarındaki türbülanslı akımı deneysel olarak incelemiştir. Deneysel gözlemlere dayanarak köprü ayağı yakınlarında sapan akımı 3 boyutlu sınır tabakası ayrılması modeli kullanarak analiz etmiştir. Sınır tabakası ayrılmasını hız profillerini kullanarak doğrulamıştır.

Yanmaz (1989), köprü fiziksel ömrü boyunca oluşacak riskin tahmini için gerekli köprü ayakları etrafındaki oyulma parametrelerinin belirsizliğinin hesaplanması için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem literatürden elde edilen değişik şekillerdeki köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliği verisinin değerlendirilmesiyle ve olayı etkileyen parametreler arasındaki fonksiyonel bağımlılık araştırılmasıyla ortaya koyulmuştur. Bu parametrelerdeki belirsizlik mertebesi ve istatistiksel rastgelelik değişim katsayılar ve olasılık dağılım fonksiyonları cinsinden ifade edilmiştir.

Richardson ve Davis (1995), hareketli tabanın bütün tiplerdeki kenar ayaklar ve orta ayaklardaki genel oyulmalar için yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem ABD’de yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde Colarado State University (CSU) denklemi olarak bilinir.

Melville (1997), orta ve kenar ayaklar etrafındaki oyulma miktarının hesaplanması için tüm tip ayaklar için geçerli genel oyulma denklemi hazırlamıştır. Orta ayaklar için geliştirilen yöntem oyulma parametrelerinin (akım derinliği ve ayak genişliği oranına bağlı düzeltme katsayısı, akım şiddeti düzeltme katsayısı, tane çapı büyüklüğü için düzeltme katsayısı, şekil ve yaklaşım açısı düzeltme faktörü) detaylı analizine dayanmaktadır.

Lim (1997), mahmuz gibi davranan düşey plak şeklindeki kenar ayaklar üzerinde bir araştırma yapmıştır.

Graf ve Yulistiyanto (1998), bir açık kanalda silindirik köprü ayağı etrafındaki akışı iki farklı akım için deneysel olarak incelemiştir. Üç boyutlu akım hızını elde etmek için akustik hız profilleri kullanmıştır. Denejlerinin sonuçlarında negatif yönde bir at nalı vorteks sistemi olduğunu bulmuşlardır.

Sturm (1999), temiz su ve hareketli taban için kenar ayaklardaki oyulmayı hesap eden bir yöntem geliştirmiştir.

Yanmaz (2001), dairesel ve kare en-kesitli orta ayaklar etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimi için yarı teorik bir model geliştirmiştir. Bu model, katı madde süreklilik denklemine dayanmaktadır. Bu yöntemi kullanarak akım ve taban malzemesi özellikleri belli olan durumlarda kritik debiye karşı gelen süre sonunda oluşacak maksimum oyulma derinliği bulunabilir.

Richardson ve Davis (2001), hareketli tabanda bütün tip kenar ayaklar ve orta ayaklardaki genel oyulmalar için yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem köprülerde taban oyulmalarını hesap eden HEC-18 yazılımında standart denklem olarak kullanılmaktadır.

Barbhuiya ve Dey (2004a), dikdörtgen bir kanal içerisindeki yarım silindir biçimli ayak çevresinde ölçümler yapmışlardır. Bu çalışmalarda, zamana bağlı olarak değişen hız, türbülans yoğunluğu, türbülans kinetik enerjisi ve gerilim değerlerini belirlemişlerdir. Yatak içerisinde bulunan silindir ayak çevresindeki Reynolds gerilmelerini ve hız değerlerini ifade etmişlerdir.

Barbhuiya ve Dey (2004b), dikdörtgen ve rijit bir kanal içerisindeki trapez kenar ayak çevresinde ölçümler yapmışlardır. Zamana bağlı olarak değişen hız, türbülans yoğunluğu, türbülans kinetik enerjisi ve gerilim değerlerini belirtmişlerdir. Rijit yatakta bulunan trapez ayak çevresinde, Reynolds gerilmeleri ve hız değerlerinden yola çıkarak oluşan gerilmeleri çalışmışlardır.

Dey ve Barbhuiya (2004c), dikdörtgen açık bir kanalın içerisine dikdörtgen kenar ayak yerleştirilerek deneysel olarak çalışmışlardır. Ayak etrafında meydana gelen hız, türbülans yoğunluğu ve türbülans bileşenlerinin zamanla değişimi üzerine incelemeler yapmışlardır.

Yücel ve Namlı (2007) su ve diğer faktörlerin köprü ayakları etrafındaki bozulmalara etkisini araştırmışlardır. Köprü ayakları civarında meydana gelen bozulmalara karşı alınacak önlemler, hız ve basınç alanındaki değişimleri araştırmışlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Son yıllarda sonlu elemanlar, sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemleriyle çalışan sayısal analiz programları kullanılarak yapılan mühendislik tasarımlarının sayısı giderek artmaktadır. Paket programlarda bulunan teknolojik gelişmeler, daha karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerin çözüm ve analizlerini mümkün kılmıştır.

Günümüzde sayısal analiz birçok mühendislik alanının bir parçası haline gelmiştir. Tasarım yapan mühendislerin, sayısal hesaplama tekniklerini analizlerinde güvenli bir şekilde kullanmaları için sonuçların doğrulanması büyük önem taşımaktadır. Sayısal hesaplamalar ile elde edilen sonuçların kontrolü için uygulanan yöntemler teorik sonuçlar, deneysel sonuçlar, yayımlanmış diğer çalışmalar ve yapılmış diğer hesaplar ile karşılaştırılmıştır.

Genellikle kompleks geometrileri oluşturmak, bu geometrilerin uygun çözüm ağını oluşturmak, farklı olasılıklar için sınır koşulları tanımlamak, programın içindeki gerekli ayarlamaları yapıp analize uygun hale getirebilmek çok uzun zaman almaktadır. Problem geometrisinin oluşturulması sayısal modelleme işleminin sadece bir parçasıdır. Bunun yanında hesaplamalarda kullanılacak malzeme özelliğinin doğru belirlenmesi, sınır ve başlangıç koşullarının doğru tahlil edilmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Bilgisayar ile modelleme çalışmalarının temeli 19. yüzyılda elde edilen denklemlere ve bu denklemlerin sayısallaştırılmasına dayanmaktadır. Ancak simülasyon ve modelleme araştırmaları günümüzde mühendislik çalışmaları arasında yerini almaya başlamıştır. Bu modelleme çalışmaları hemen hemen her mühendislik alanında gelişiminin ilk safhasındadır.

Günümüzde serbest yüzeyli akımların modellenmesinde farklı yöntemler kullanılmakla birlikte bunlar içerisinde en bilineni ve ticari paket programlarda dahil olmak üzere en yaygın olarak kullanılanı akışkan hacmi (VOF) yöntemidir.

Türbülanslı akışların sayısal olarak çözülmesindeki en büyük sorun yüksek bilgisayar kapasitesi ve gücüne ihtiyaç duyulmasıdır. Türbülansın çok küçük ölçek ve zaman aralığında meydana gelmesi nedeniyle, zamana bağlı Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak tam çözümünün gerçekleştirildiği DNS (Direkt Nümerik Simülasyon) yönteminde çok küçük ağ aralıkları kullanılması gerektiğinden günümüzde dahi bu yöntem ancak çok basit geometri ve akış tipleri için, düşük Reynolds

sayılarında uygulanabilmektedir. LES (Büyük Girdap Simülasyonu-Large Eddy Simulation) bir model olarak bazı problemler için DNS'ye yakın sonuçlar verse de, uygulanması için yine yüksek bilgisayar donanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla nispeten daha ekonomik bir çözüm olan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) temelli türbülans modelleri günümüzde hala geçerliliklerini sürdürmektedirler. Bu nedenle daha hızlı çözüm elde edebilmek için Navier-Stokes denklemleri yerine akıma ait hız, basınç gibi özelliklerin zamansal ortalama değerleri ile ifade edildiği Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Denklemlerin çözümünde ortalama akım üzerindeki türbülans çalkantılarının etkileri farklı türbülans modelleri aracılığıyla hesaplanabilmektedir. Bu modellerden k- ϵ en çok bilinen ve kullanılan, doğruluğu kanıtlanmış türbülans modellerinden biridir (Wilcox, 2000).

3.1.1. Navier Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri 3 yönde (x, y, z) hareket denklemlerinden oluşan akışkanlar mekaniğinin temel denklemdir. Newton'un ikinci kanununun sonsuz küçük bir kontrol hacmine uygulanmasıyla Newtonien bir akışkan için aşağıdaki Navier-Stokes denklemleri türetilebilir.

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

yazılır. Burada u ve v yatay ve düşey yöndeki akım hızı, ρ ise akışkanın özgül kütesidir. Şekil 3.2 de gösterildiği gibi, x, y ve z sıra ile yatay ve düşey koordinatlardır.

Sıkışmayan akışkanlar için süreklilik denklemi yeniden yazıldığında, ρ =sabit olacağından, (3.1) denkleminde,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

elde edilir.

Bu denklemler kartezyen koordinatlarda daha açık bir şekilde yazılırsa, Navier Stokes denklemleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.5)$$

Bu çalışmada kütleli kuvvet olarak sadece yerçekimi kuvveti alınmıştır. Dolayısıyla ifadelerdeki g_x ve g_y terimleri sıfıra eşittir.

Bu denklem sistemine bakıldığında bilinmeyenler basınç p ve hız vektörünün üç bileşeni u, v, w olmak üzere dört adettir. Bununla birlikte sistemde bir süreklilik ve üç adet lineer momentum denklemi olmak üzere toplam dört adet denklem bulunmaktadır. Görüldüğü gibi sistemin bilinmeyen sayısı denklem sayısına eşittir. Buna karşın sıkışmayan, sabit viskoziteli akışkanlar için geçerli olan bu denklem sisteminin genel bir çözümü yoktur. Ancak uygun başlangıç ve sınır şartları altında sayısal yöntemler ile çözülebilirler. Bunun için yoğunluk, viskozite ve kütleli kuvvetlerin (yerçekimi) bilinmesi gereklidir.

Sonuç olarak denklem, (3.3), (3.4) ve (3.5)'ten oluşan hareket denklemleri aşağıdaki gibi kapalı formda da yazılabilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'nın fiziksel anlamı: Yoğunluk x ivme = birim hacim başına basınç kuvveti + birim hacim başına viskoz kuvvet + birim hacim başına kütleli (yerçekimi) kuvveti şeklindedir.

Navier-Stokes denklemlerinde viskozite içeren terimler ihmal edildiğinde, aşağıdaki Euler denklemleri elde edilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho g \quad (3.7)$$

Bu denklemlerde viskozite terimlerinin bulunmamasının yanında sınır koşulları da farklılıklar gösterir. Viskoz bir akışkanın katı bir sınırdaki hız vektörü sıfırdır. Bu da akışkanın katı madde sınırını ne geçebileceği ne de bu sınır üzerinde kayabileceği anlamına gelmektedir.

3.1.2. Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) Denklemleri

Gerçek akışkanların hareketinde, akımın durumu Reynolds sayısına bağlı olarak laminer veya türbülanslı olabilmektedir.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3.8)$$

Burada “V” ortalama hızı, “L” ise karakteristik boyutu göstermektedir. Reynolds sayısının büyümesi akımın çalkantıya karşı duyarlılığını gösterir ve açık kanal akımlarında laminer akımdan türbülanslı akıma geçiş için kritik Reynolds sayısı 500 olmaktadır. Birçok mühendislik problemi gibi köprü yıkılması akımı da oldukça türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte çok karmaşık olan türbülanslı akımın yapısı matematiksel olarak tam çözülememiştir.

Türbülanslı akım alanında herhangi bir noktada hız ve basınç gibi akım büyüklüklerinin şiddeti ve yönü zamana bağlı olarak gelişigüzel değişebilmektedir. Buna göre hız ve basıncın herhangi bir andaki değeri ortalama ve anlık sapmaların toplamı şeklinde yazılabilir:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad (3.9)$$

Burada \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} hıza ait ortalama değerleri, u' , v' , w' ise bunlara ait anlık sapmaları temsil etmektedir.

Denklem (3.9)'da verilen u , v , w değerleri denklem (3.2)'de verilen süreklilik denkleminde yerine yazılacak olursa;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w') = 0 \quad (3.10)$$

bir Δt intervali için süreklilik denkleminin ortalaması alınır;

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.11)$$

ifadesi bulunur. Denklem (3.11)'deki ifade (3.10)'dan çıkarılırsa;

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (3.12)$$

denklemini elde edilir ki ortalama hız bileşenleri ve türbülans hız sapınçlarının aynı süreklilik denklemini sağladığı görülmektedir.

3.1.3. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri

Navier-Stokes denklemlerinin x bileşeni ele alınıp denklem (3.9)'daki ifadeler denklem (3.3)'de yerine koyulursa;

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial z} \\ & = - \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (3.13)$$

formülü elde edilir. Böylece x doğrultusu için;

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{\frac{\partial u' u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial u' v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial u' w'}{\partial z}} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x
\end{aligned} \tag{3.14}$$

denklemini elde edilir. Çalkantı ifadeleri eşitliğin sağ tarafına alınırsa

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\overline{\frac{\partial u' u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial u' v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial u' w'}{\partial z}} \right) + \rho g_x
\end{aligned} \tag{3.15}$$

(3.15) denklemini y ve z doğrultuları içinde benzer şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\overline{\frac{\partial v' u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v' v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial v' w'}{\partial z}} \right) + \rho g_y
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\overline{\frac{\partial w' u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial w' v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial w' w'}{\partial z}} \right) + \rho g_z
\end{aligned}$$

(3.17)

Elde edilen bu RANS denklemleri tansör notasyonu ile aşağıdaki biçimde gösterilebilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.18}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\partial (\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.19)$$

(3.19) denklemi, denklem (3.9)'da verilen Navier-Stokes denklemleri ile karşılaştırıldığında ilave olarak $\partial(\overline{u_i' u_j'})/\partial x_j$ ifadesini içerdiği görülmektedir. Bu ifade türbülansın dolaylı olarak oluşan çalkantı (türbülans) gerilmelerini ya da literatürdeki ismiyle Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri olarak bilinen bu denklemlerde akım büyüklükleri (hız, basınç) ortalama değerler ile ifade edilmektedir.

Laminer akım durumunda Navier-Stokes denklemlerinde dört bilinmeyen ve dört denklem olmasına karşılık türbülanslı akım denklemlerinde (RANS) u', v', w' terimlerinin eklenmesiyle bilinmeyen sayısının artması yeni denklemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yeni denklemler türbülans modelleriyle elde edilir. Denklem sayısının bilinmeyen sayısına eşitlenmesine kapatma (closure) işlemi denilmektedir. Kapatma işleminin nasıl yapılacağı konusunda henüz bir fikir birliği oluşmadığından değişik türbülans modelleri kullanılmaktadır.

Bu denklemlerdeki türbülans gerilme terimleri, μ ile ölçülen moleküler viskoziteye benzer şekilde μ_t katsayısı ile ölçülen ve türbülans (eddy) viskozitesi olarak adlandırılan yeni bir viskoziteden kaynaklanmış gibi düşünülebilirler. Bu amaçla $\tau'_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$ türbülans gerilmelerini (Reynolds gerilmeleri), τ_{ij} laminer viskozite gerilmelerini göstermek üzere, denklem (3.19) gerilmeler cinsinden yeniden yazılacak olursa

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilir. Gerilme ifadeleri $\partial/\partial x_i$ parantezine alınırsa

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.21)$$

denklemleri ortaya çıkar. Görüldüğü gibi RANS denklemlerinde toplam gerilme laminer ve türbülans gerilmelerinin toplamı ($\tau_T = \tau + \tau'$) şeklinde yazılabilir. Genellikle ele alınan türbülans modellerinde Reynolds gerilmeleri, τ'_{ij} , için denklemlerdeki diğer terimlerin bir fonksiyonu olarak ele alınan ampirik ifadeler kullanılmaktadır. Bu modellerden Boussinesq hipotezi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hipoteze göre Reynolds gerilmeleri viskoz gerilmelere benzer biçimde ortalama hız gradyanlarıyla ilişkilendirilirse türbülans gerilmesi:

$$\tau'_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.22)$$

burada μ_t türbülans viskozitesini göstermektedir ve dinamik viskozite μ gibi akışkanın fiziksel bir özelliği olmayıp, akımdaki hız çalkantılarına bağlıdır. Başka bir ifade ile aynı akışkan için farklı akım koşullarında değişik değerler almaktadır. Dolayısıyla zamana bağlı RANS denklemlerinin çözülebilmesi için μ_t türbülans viskozitesi değerinin hesaplanması gereklidir. Bu da farklı türbülans modelleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

Türbülanslı akışlar, kontrol hacmindeki cidarların (duvarların) varlığından önemli ölçüde etkilenirler. Bir cidar bölgesinde (viskoz alt tabaka) toplam kayma gerilmesi neredeyse sabittir ve toplam kayma gerilmesi cidar kayma gerilmesine eşittir. Toplam kayma gerilmesi, τ_T , sadece cidar yakınında ince bir bölgede sabittir ve cidardan uzaklaştıkça azalır. Cidar üzerinde ortalama hız bileşenleri ve bunlara ait çalkantı hızları sıfır değerini alırlar. Ayrıca çalkantı hızları cidar yakınında da son derece küçüktürler. Bu nedenle cidara yaklaştıkça türbülans kayma gerilmesi ortadan kaybolur ve viskoz kayma gerilmesi cidar kayma gerilmesine eşit olur. Bu bölgede akım, laminer akım karakterini gösterdiğinden, laminer ya da viskoz alt tabaka olarak adlandırılır. Akım, bu tabakanın üzerinde türbülans karakterini gösterir ve çalkantılar görülür. Laminer viskozite ile birlikte türbülans viskozitesi de etkisini gösterir ve viskoz alt tabakadan uzaklaştıkça etkisini artırır. Dolayısıyla cidardan uzaklaştıkça viskoz kayma gerilmesi düşerken türbülans kayma gerilmesi yükselir. Belli bir yükseklikten

sonra viskoz gerilmesi türbülans gerilmesi ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değerde kalacağı için ihmal edilebilir. Bu nedenle cidara yakın bölgelerin sayısal olarak yeterli hassasiyette çözümlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için bu bölgede ağ aralıklarının oldukça sık seçilmesi gereklidir fakat özellikle üç boyutlu ve büyük ölçekli problemlerde bu durum bilgisayar gücüne duyulan gereksinimi arttırır. Diğer bir alternatif de cidar bölgesindeki akım için hız dağılımı bilinen bir duvar fonksiyonu (wall function) kullanmaktır.

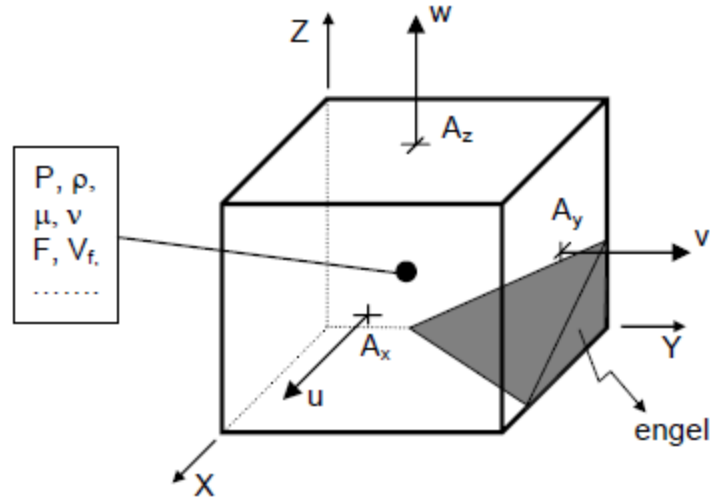
Sonuç olarak türbülanslı akımda hareket denklemleri, sınır tabakası içinde veya dışında, denklem sayısından daha fazla sayıda bilinmeyen (Reynolds gerilmeleri) içerdiği için denklemlerin çözümü ancak Reynolds gerilmelerinin bir başka yoldan bulunup bu denklemlere yerleştirilmeleri ile mümkündür. Reynolds gerilmelerinin elde edilmesi için Boussinesq, Prandtl ve Von Karman'ın geliştirmiş olduğu ve çok az hesaplama gerektiren basit ampirik kanunların yanında, sayısal yöntemler yardımıyla günümüzde daha karmaşık türbülans modelleri kullanılmaktadır (Örs, 1994).

3.2. Yöntem

3.2.1. Flow-3D Programı

Tez kapsamındaki sayısal uygulamalar, ticari Flow 3D yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım en genel haldeki süreklilik, momentum ve enerji temel denklemlerini çözebildiğinden, hemen her tür akışkan mekaniği problemlerine uygulanabilmektedir. Bununla birlikte yazılım özellikle serbest yüzeyli akım problemlerinin çözümünde oldukça başarılıdır ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

3 boyutlu süreklilik ve hareket (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemlerinden oluşan diferansiyel denklem sisteminin çözümü için sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Hesaplamalar dikdörtgen hücrelerden oluşan üniform olmayan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Akışkana ait basınç, yoğunluk, viskozite gibi skaler büyüklükler kontrol hacminin merkezinde yer alırken, sadece hızlar (u,v,w) kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır.



Şekil 3.1. Bir hesaplama hücresine etkiyen değişkenlerin gösterimi (Kocaman, 2007)

Problem geometrisi benzer yazılımları aksine çözüm ağı üzerinde bazı hücrelerin engellerle kapatılmasıyla elde edilmektedir. FAVOR (fractional area/ volume obstacle representation) adı verilen bu yöntemde kontrol hacmi içerisinde bulunan bir engelin kontrol hacminin ne kadarını kapladığı (volume fraction) ve bu engelin kontrol hacminin her bir yüzeyinde ne kadar alan kapattığı hesaplanarak bu iki değer oranlanır. Bu yöntem aslında engelleri tanımlamak için kullanılan bir boşluk tekniğidir. Kontrol hacmi tamamen engel ile dolu ise bu değer değer sıfır, tamamen boş ise bir değerini alır. Eğer bir hücre kısmen engel ile dolu ise bu değer hücrede kapladığı hacim yüzdesine bağlı olarak sıfır ile bir arasında değer alır. Bu durum aslında her bir hücredeki yüzeylerin akıma açık olduğu alanları, dolayısıyla bu hücrede ne kadar akışkan bulunduğunu ifade etmektedir. Bu yöntem ile karmaşık şekle sahip sınırlarda kaba ağ geometrisi kullanılsa bile engel geometrisi iyi kullanılabilir ve sınırlarda hassas çözüm kabiliyeti artmaktadır. Ayrıca problemlerde arazinin geometrisi CAD yazılımları ile oluşturulup çözüm ağı içerisine rahatlıkla yerleştirilebilmektedir. Bu da oldukça düzensiz topografyaya sahip akarsu, baraj gölü, dolusavak gibi açık kanal problemlerinin kolaylıkla 3 boyutlu modellerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Modelleme sırasında, daha küçük ağ aralıklarının kullanılması, çözüm alanı içerisindeki engel sınırlarının daha yumuşak (düzgün) tanımlanmasını sağlamaktadır.

Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılımda akışkan hacmi (VOF: Volume of Fluid) yöntemi kullanılmaktadır (Hirt ve Nichols, 1981). VOF yöntemi ile, FAVOR yöntemine benzer biçimde hücrelerin boş, tam veya kısmen suyla dolu olduğu belirlenir. Bu yöntemde hesaplama alanı üzerinde bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. Şayet bir hücre tamamen akışkan ile dolu ise 1 değeri, tamamen boş ise sıfır değeri ve kısmen dolu ise hücrede kapladığı yüzde değerini alır. Serbest yüzey, bir eğime sahip ise bir hücredeki yüzeyin yerini ve eğimini belirlemek için kendisini çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanılmaktadır.

VOF yöntemi ile serbest yüzeyin izlenmesi üç kısımdan oluşur. Öncelikle serbest yüzeyin yeri bulunur. Daha sonra bu yüzey, su ve hava arasında keskin bir arakesit olarak belirlenir. Son olarak bu arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu F'nin değişimi aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilmektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3.23)$$

bu denklem ile F değeri akışkan ile birlikte hareket etmektedir.

İçerisinde engel bulunan 3 boyutlu bir serbest yüzey probleminin FLOW-3D yazılımı ile çözümünde, çözüm ağı içerisindeki herhangi bir hücrede beş farklı durumdan biri söz konusu olabilir: Bunlar; hücre tamamen katı, kısmen katı veya sıvı, tamamen sıvı, kısmen sıvı ile dolu ve tamamen boş olabilir.

Bu yazılım; iki denklemlilik k-ε, Prandtl karışım boyu, türbülans enerji, RNG (Renormalized Group) ve LES (Large-Eddy Simulation) gibi farklı türbülans yaklaşımlarını içerisinde barındırmaktadır.

Çözüm ağı sınırlarında; simetri, duvar, bağlayıcı (continuitive), periyodik, basınç, hız, çıkan akım (outflow) gibi farklı sınır şartları uygulanabilmektedir.

Yazılımda üç boyutlu (3B) süreklilik ve hareket denklemleri eş zamanlı olarak çözülebilmektedir. Sıkışmayan akım için kullanılan kartezyen koordinatlardaki süreklilik ve hareket denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (3.25)$$

Burada u_i i doğrultusundaki akım hızını, P basıncı, A_i i doğrultusunda her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu alanı, V_F her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacmi, g_i kütlelesel kuvvetleri, f_i herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir.

Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri f_i aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$f_i = \frac{1}{\rho V_F} \left[ws_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (A_j \tau_{ij}) \right] \quad (3.26)$$

Burada ws_i duvar kayma gerilmesi, τ_{ij} ise gerilme hızı tansörünü göstermektedir.

Duvar kayma gerilmeleri ise

$$\tau_{ii} = -2\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad \text{ve} \quad \tau_{ij} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.27)$$

Burada μ_T türbülans etkilerini ifade eden ve çalkantı gerilmelerini de içeren toplam dinamik viskozitedir.

Duvar sınır koşulları, seçilen türbülans modeline (turbulence closure scheme) göre farklı değerlendirilmektedir. Taşınımlı türbülans kapatma şemalarının çözümünde (k- ϵ gibi) sınır tabakası içerisindeki hız dağılımını veren bir duvar fonksiyonundan yararlanılmaktadır. Yazılımda kayma hızı (u_*)'ı çözmek için pürüzlü ve pürüzsüz bir duvar yüzeyi için genelleştirilmiş olan aşağıdaki logaritmik duvar fonksiyonu kullanılmaktadır (Flow Science, INC., 2007):

$$u_0 = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\rho u_* y_0}{\mu + \rho a u_* k_s} \right) + 5 \right] \quad (3.28)$$

Burada κ Von Karman sabiti, a türbülans modeline bağlı olan bir sabit (k - ϵ modeli için 0.247), k_s engel pürüzlülüğü, y_0 herhangi bir noktadaki u_0 teğetsel hızının engelden olan uzaklığıdır. Denklem (3.132)'deki parantez içindeki ifadenin paydası, pürüzlü sınırın etkisinden dolayı oluşan etkili viskozitedir ($\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho a u_* k_s$). Eğer hücre laminer alt tabakaysa ($R_* = \rho u_* y_0 / \mu \leq 5$), kayma hızının çözümü için aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$u_* = \sqrt{\frac{\mu u_0}{\rho y_0}} \quad (3.29)$$

Kayma hızı (u_*) için elde edilen çözüm, türbülans taşınım denklemlerinde sınır şartı olarak kullanılır. Pürüzlülük etkileri daha sonra toplam dinamik viskozite (μ_T) ve doğrudan duvar kayma gerilmesi ws_i , aracılığıyla çözüme dahil edilir.

$$ws_i = \sum_j \frac{2\rho |u_{*i}| u_{*i}}{\Delta x_j} \quad (3.30)$$

Laminer akımlar ve taşınımsız türbülans kapatma şemaları (LES modeli) için duvar kayma gerilmesi (ws_i):

$$ws_i = \frac{(\mu + \rho a u_0 k_s) u_0}{y_0} \quad (3.31)$$

ifadesi ile verilmektedir. Hesaplanan duvar kayma gerilmesi (ws_i), daha sonra doğrudan denklem aracılığıyla momentum denkleminin çözümüne dahil edilmektedir.

3.2.2. k- ϵ Türbülans Yöntemi

FLOW-3D mevcut birkaç farklı türbülans kapatma (closure) şeması içermektedir. Bunlar: bir denklemlilik türbülans enerji (k), iki denklemlilik (k - ϵ), “Renormalization Group” (RNG), “Large Eddy Simulation” (LES) ve Prandtl karışma boyu modelidir. Bu çalışmada, farklı türbülans modellerinin duyarlılığı araştırılmadığından, literatürde bu konuda en yaygın şekilde tercih edilen ve en çok doğrulanmış olan k - ϵ türbülans modeli kullanılmıştır (Wilcox, 2000; Shigematsu ve

ark., 2004). Bu model özellikle yüksek Reynolds sayısına sahip akışlarda daha uygun sonuçlar vermektedir ve sınır tabakası dışında geçerlidir. Bu modelde kinetik enerji, “k” ve sönümlenme oranı (dissipation rate), “ ε ” için ayrı taşınım denklemleri yazılır. Genellikle iki denklemlilik olarak bilinen k- ε modelinde Reynolds gerilmesini verecek çevri (türbülans) viskozitesi:

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.32)$$

ifadesi ile elde edilir. k, türbülans kinetik enerji, ve ε sönümlenme oranı, için kapatma denklemleri aşağıdaki eşitlikler ile verilir:

k için:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3.33)$$

ε için:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (3.34)$$

k- ε modelindeki türbülans model katsayıları aşağıdaki gibi alınmaktadır:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad \text{ve} \quad \ell = \frac{C_\mu k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.35)$$

burada Reynolds gerilme tansörü, τ_{ij} ve ortalama gerilme-oranı tansörü, e_{ij} , sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\tau_{ij} = 2\nu_t e_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.36)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.37)$$

denklem (3.142)'de k ve ε için verilen sınır koşulları, denklem (3.132) ve (3.133)'de

verilen logaritmik duvar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmaktadır.

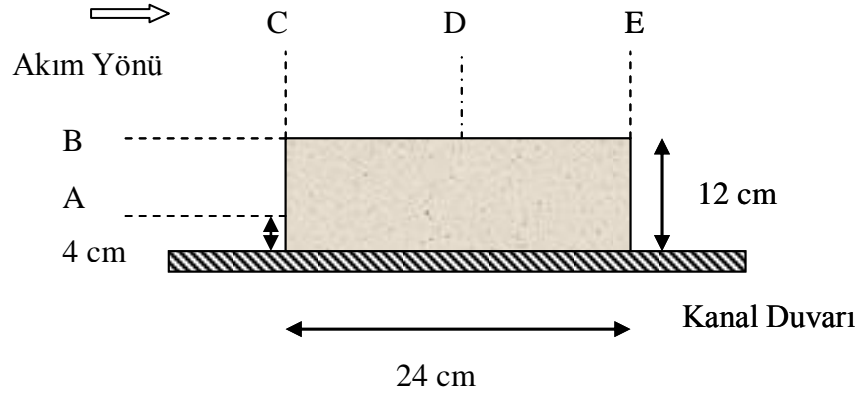
$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y_0} \quad (3.38)$$

3.2.3. Çalışma Hakkında Genel Bilgi

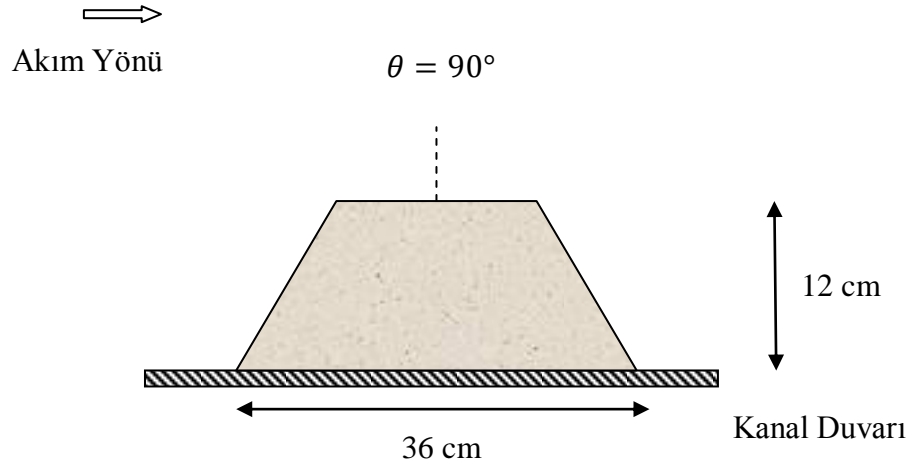
Bu çalışmada, sayısal model sonuçları ile karşılaştırabilmek amacıyla Barbhuiya ve Dey (2004a), (2004b) ve (2004c)'in laboratuvar ortamında deneysel olarak çalıştıkları farklı geometrili köprü kenar ayakları civarında elde ettikleri hız dağılımları kullanılmıştır. Akustik Doppler Hız ölçüm aleti (ADV) kullanılarak kenar ayak civarında farklı noktalarda hız ölçümleri gerçekleştirilmişlerdir. Kullandıkları ADV cihazının ışınları yerleştirilen ölçüm bölgesinin 5 cm altına kadar bölgeyi taramaktadır. Bu nedenle su yüzeyinden itibaren 5 cm' lik kısımda ölçüm alınmamıştır. Çalışmalarında 3 doğrultuda da hız bileşenleri belirlenmesine karşın yapılan çalışmada sadece x doğrultusundaki hız bileşenleri karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır.

Deneyler 20m uzunluğunda, 0.90m genişliğinde ve 0.70m derinliğinde dikdörtgen en kesite sahip yatay bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal tabanı üniform yatak malzemesi çapı 0.52mm olarak belirlenen kum ile kaplıdır. Kanal içerisindeki ortalama akım hızı 0.294 m/sn ve su derinliği 0.2m olarak alınmıştır. Zamana bağlı hız bileşenleri kartezyen koordinatlarda (x, y, z doğrultusunda) u, v, w olarak belirtilmiştir. Lineer uzunluklar ve hız bileşenlerinin boyutsuzlaştırılmasında silindirin enine uzunluğu L kullanılmıştır.

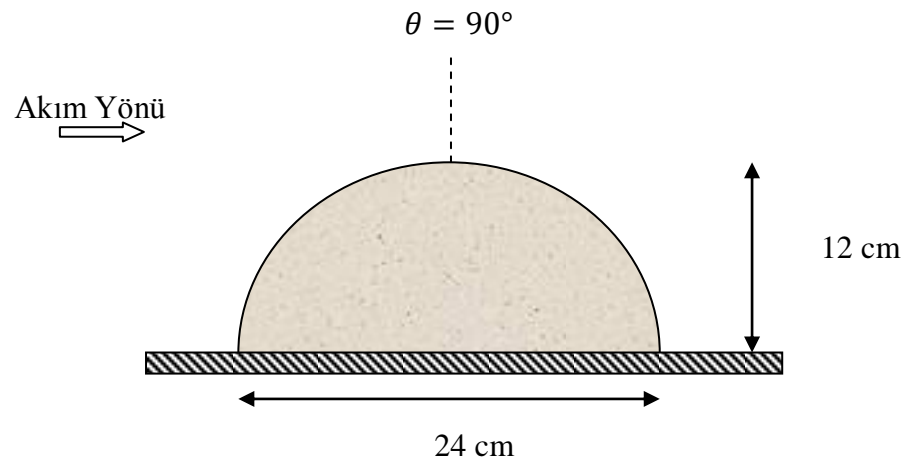
Kanal içerisine Şekil 3.2-3.4'de görülen dikdörtgen, silindir ve trapez geometrilere sahip kenar ayaklar yerleştirilmiştir. Öncelikle, 24 cm uzunluğunda, 12 cm genişliğinde bir dikdörtgen kenar ayak modellenerek Şekil 3.2'de görülen eksenler boyunca farklı mesafelerde, çeşitli ağ aralıkları, türbülans yöntemleri ve türbülans karışım boyları için ayrı sayısal modellemeler yapıp elde edilen çözümler deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve en uygun yöntemler belirlenmiştir. Sonrasında 36 cm uzunluğunda, 12 cm genişliğinde bir trapez kenar ayak ve 26 cm çapında, 12 cm genişliğinde bir yarım silindir kenar ayak belirlenen yöntemler ışığında sayısal olarak modellenerek elde edilen çözümler deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.2. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksenler



Şekil 3.3. Trapez kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen



Şekil 3.4. Silindir kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen

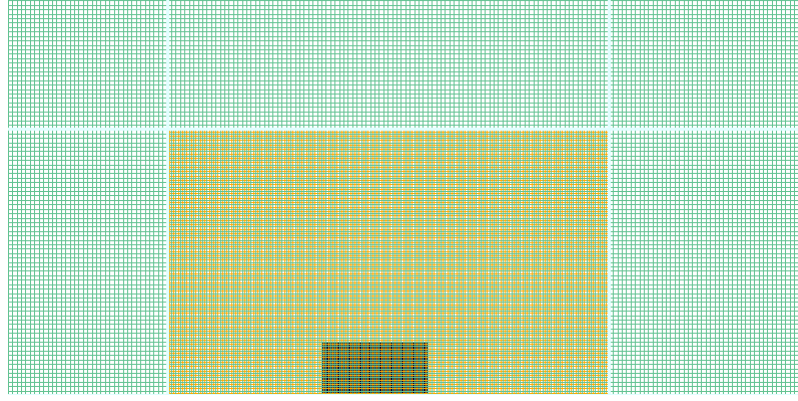
3.2.4. Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları

Sayısal çalışmada, deneysel veriler dikkate alınarak 400 cm uzunluğunda, 90 cm genişliğinde ve 25 cm yüksekliğinde dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm bölgesi düşünülerek 3 boyutlu model oluşturulmuştur.

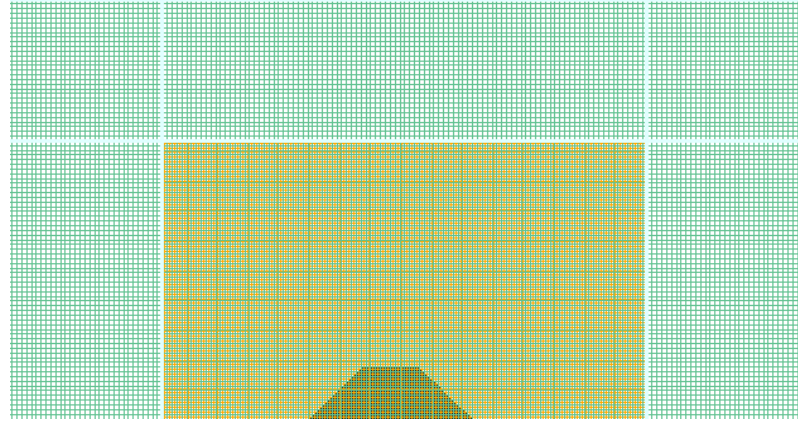
Başlangıç şartı olarak, kanal içerisinde 20 cm yükseklikli ve ortama akım hızı 0.294m/s olan bir akışkan hacmi tanımlanmıştır. Memba ucunda sınır şartı olarak ortalama akım hızı (specified velocity) alınmış, mansap ucunda ise çıkan akım (outflow) seçilmiştir. Kanal yan duvarları ve kanal tabanında sınır şartı; “duvar” (wall) olarak tanımlanmıştır. Katı sınır yüzeylerinde kaymama (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır. Dolayısıyla cidar yüzeylerinde yatay ve düşey doğrultudaki hız bileşenleri sıfır olmaktadır. Çözüm bölgesinin üst sınırında ise sınır şartı olarak “simetri” alınmıştır. Bu sınır şartı seçildiğinde, yerçekiminden dolayı herhangi bir etkisi olmadığı için serbest yüzeyde atmosfer basıncının etkili olduğu kabul edilmektedir. Su yüzeyi, “akışkan hacmi” (volume of fluid, VOF) yaklaşımı ile belirlendiğinden su-hava arakesitinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit atmosfer basıncı etkili olmaktadır. Yapılan çalışmada, k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Flow-3D programında, dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı kullanıldığından dolayı çözümüleme yapılırken model hücrelere bölünerek çözüm alınmaktadır. Ağ aralıklarının küçük olması çözüm hassasiyetini artırırken, bilgisayar ortamında çözüm süresini uzamaktadır. Bu nedenle farklı ağ aralıkları seçilerek sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmelidir. Yapılan çalışmada, iki farklı çözüm ağı (mesh) seçilerek çözümler gerçekleştirilmiştir. Ağ aralıkları x, y ve z doğrultularında 1 cm olan üniform mesh (MESH2) ve 1 cm ağ aralıklı çözüm bölgesi içerisine yerleştirilmiş 0.5 cm üniform ağ aralığına sahip yuva (nested) mesh(MESH1) olarak adlandırılan çözüm ağı kullanılmıştır. Yuva mesh ile köprü kenar ayağı etrafında ağ aralıkları sıklaştırılarak çözüm süresi kısaltılabilmektedir. Gömülü mesh kullanmanın avantajı, sonuç alınmak istenen noktada hassasiyeti artırarak istenilen bölgede daha hassas sonuçlar alınmasına yardımcı olmasıdır. Böylelikle mesh sayısı artışı çok olmazken, çözüm süresi uzamaz.

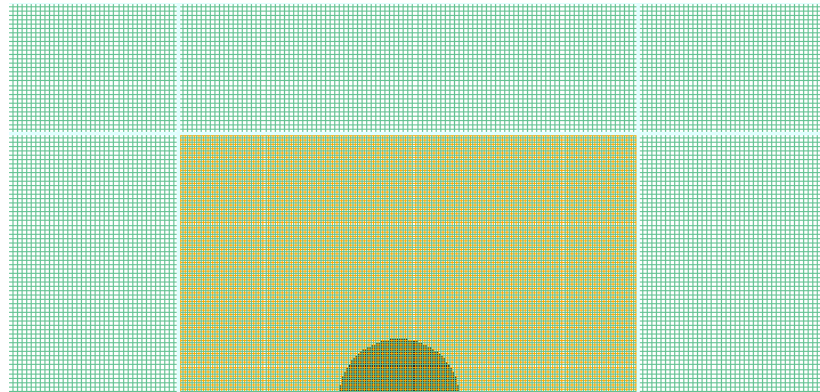
Pentium Intel Core2Duo E7200 2.53GHz 2GB RAM özelliklere sahip bir bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilen 20 s süreli çözümler 900000 hücreden oluşan Mesh1 için yaklaşık 24 saat, 2100000 hücreden oluşan mesh2 için yaklaşık 36 saat (bilgisayar zamanı) sürmüştür.



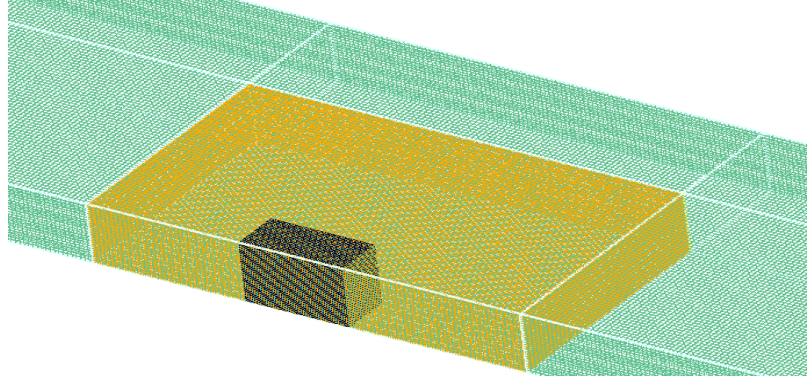
Şekil 3.5. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 2 boyutlu görünüşü



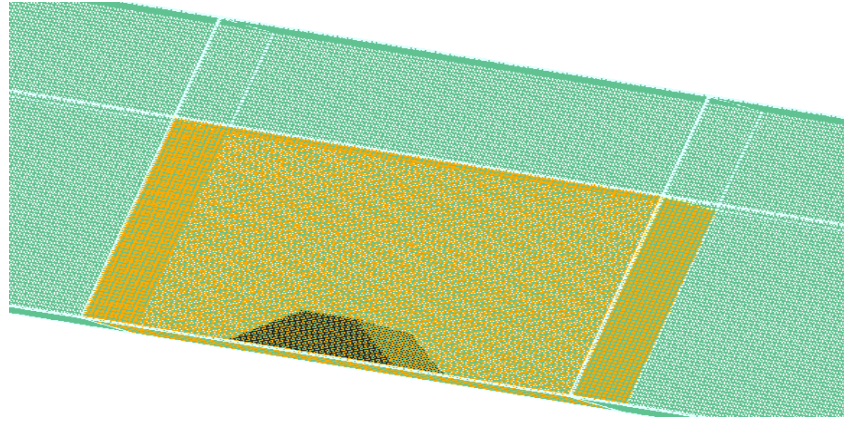
Şekil 3.6. Trapez kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 2 boyutlu görünüşü



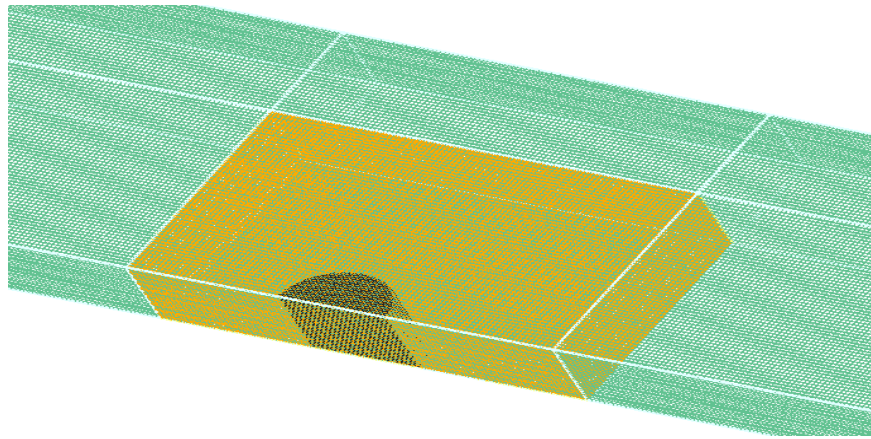
Şekil 3.7. Silindir kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 2 boyutlu görünüşü



Şekil 3.8. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 3 boyutlu görünüşü



Şekil 3.9. Trapez kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 3 boyutlu görünüşü



Şekil 3.10. Silindir kesitli kenar ayağın Flow-3D ile oluşturulmuş 3boyutlu görünüşü

3.2.5. Köprü Ayakları Etrafındaki Hız Dağılımının Flow-3D ile Hesaplanması

Sayısal çalışma, deneysel veriler dikkate alınarak 400 cm uzunluğunda, 90 cm yüksekliğinde ve 25 cm genişliğinde dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm bölgesi düşünülerek 3 boyutlu modellenmiştir. İki farklı çözüm ağı (mesh) seçilerek çözümler yapılmıştır. Farklı çözüm ağlarının seçilmesinin sebebi engele yakın noktalarda daha hassas çözüm alınabilmesidir. Çözüm bölgesinin her doğrultuda aynı genişlikte hücrelerden (mesh) oluşması, mesh sayısını artırarak çözümün çok daha uzun sürmesine sebep olmaktadır.

Köprü ayakları etrafındaki hız dağılımının Flow-3D programı ile hesaplanması için öncelikle programın model set up kısmında çözüm yapılacak problemle ilgili değişiklikler uygulanmalıdır.

Bu değişikliklere Şekil 3.11’de görüldüğü gibi çözülecek problemin bitiş süresinin belirtilmesiyle başlanmalıdır. Çözüm serbest yüzeyli akım ortamında gerçekleştirilmekte olduğundan, free surface or sharp interface ve akışkan sıkıştırılmaz olduğundan, incompressible seçilmelidir.

The image shows a software interface for setting up a simulation. It includes several sections:

- Finish time:** A text input field containing the value '20'.
- Restart:** A button labeled 'Restart'.
- Interface tracking:** A section with two radio button options: 'Free surface or sharp interface' (which is selected) and 'No sharp interface'.
- Finish condition:** A section with three radio button options: 'Finish time' (selected), 'Fill fraction', and 'Solidified fluid fraction'. Below this is a text input field for 'Finish fraction' containing the value '1.0'.
- Flow mode:** A section with three radio button options: 'Incompressible' (selected), 'Compressible', and 'Steady-state accelerator'. Below this is the text '(Non-physical transients)'. There is also a checkbox for 'Steady-state accelerator' which is unchecked.

A 'Not' label is visible in the bottom right corner of the interface.

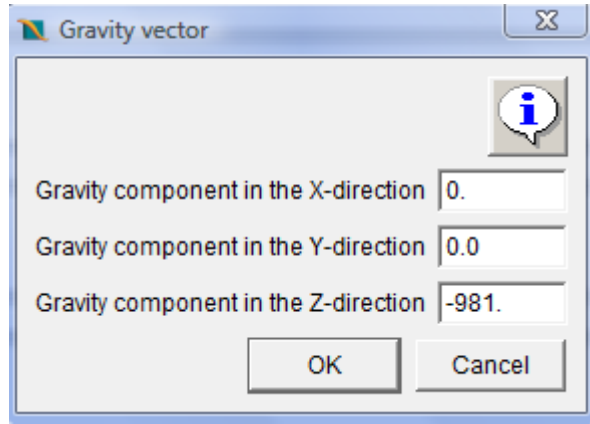
Şekil 3.11. Flow-3D’de çözüm süresinin belirtilmesi

İkinci aşama olarak, Şekil 3.12’de de görüldüğü gibi akışkan türü sayısı belirlenmelidir. Çözüm aşamasında, akışkan türü olarak sadece su kullanılmıştır. Virim sistemi olarak CGS birim sistemi kullanılmıştır.

Number of fluids <input checked="" type="radio"/> One fluid <input type="radio"/> Two fluids	Units Simulation units CGS
Mentor options <input type="radio"/> No mentor help <input checked="" type="radio"/> Offer suggestions <input type="radio"/> Offer suggestions and take action	Version options Version Double precision Number of processors All Available <input type="checkbox"/> Run serial code if parallel tokens in use

Şekil 3.12. Flow-3D’de çözümde kullanılacak sayısal sistemin belirlenmesi

Şekil 3.13’de yerçekimi ivmesinin belirlenmesi gösterilmiştir. Programda her üç koordinat sisteminde de yerçekimi ivmesi seçilebilir. Genellikle tek doğrultuda seçilmesi yeterli olmaktadır. Çözüm yapılırken yerçekimi ivmesi z doğrultusunda alınmıştır. CGS sisteminde yerçekimi ivmesi 981 cm/ s²’dir. Yerçekimi ivmesi eksi yönde olduğu için değer negatif alınmıştır.



The image shows a dialog box titled "Gravity vector" with a close button (X) in the top right corner. Inside the dialog, there is an information icon (i) in the top right. Below the icon, there are three input fields for gravity components:

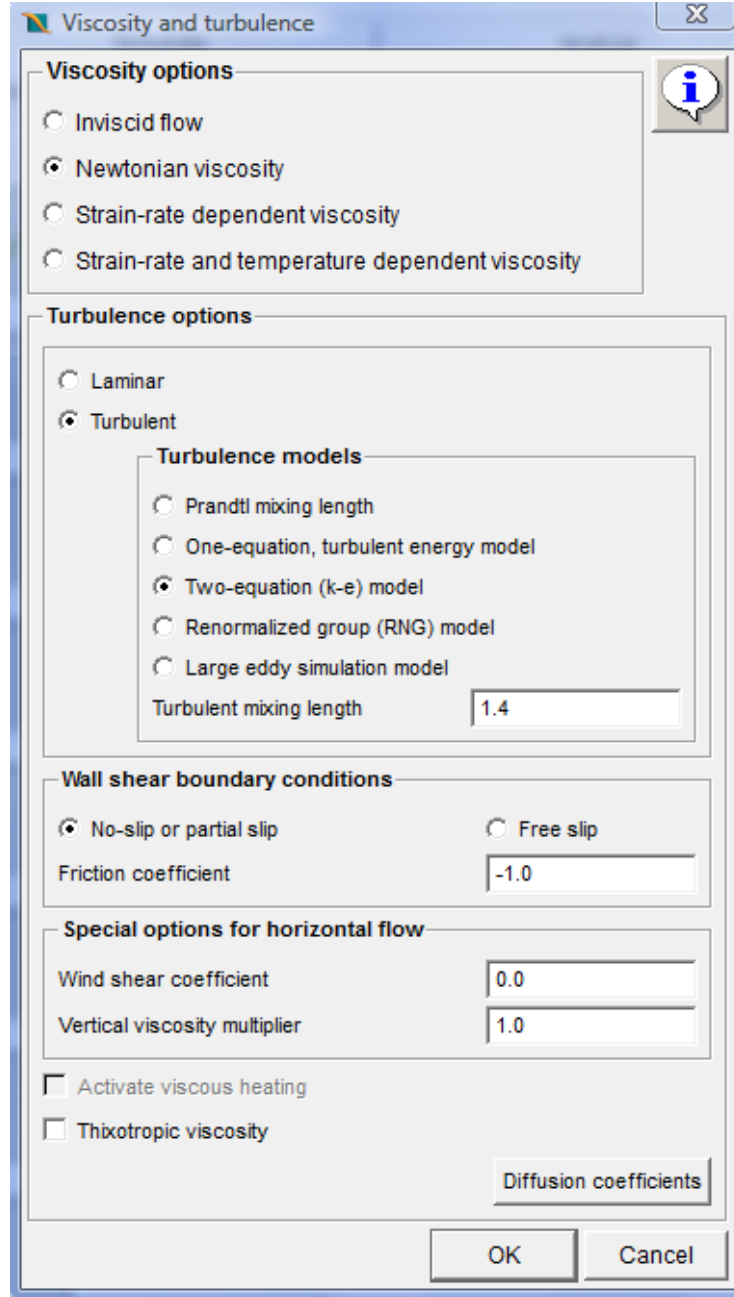
- Gravity component in the X-direction: 0.
- Gravity component in the Y-direction: 0.0
- Gravity component in the Z-direction: -981.

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Şekil 3.13. Flow-3D’de yerçekimi ivmesinin belirlenmesi

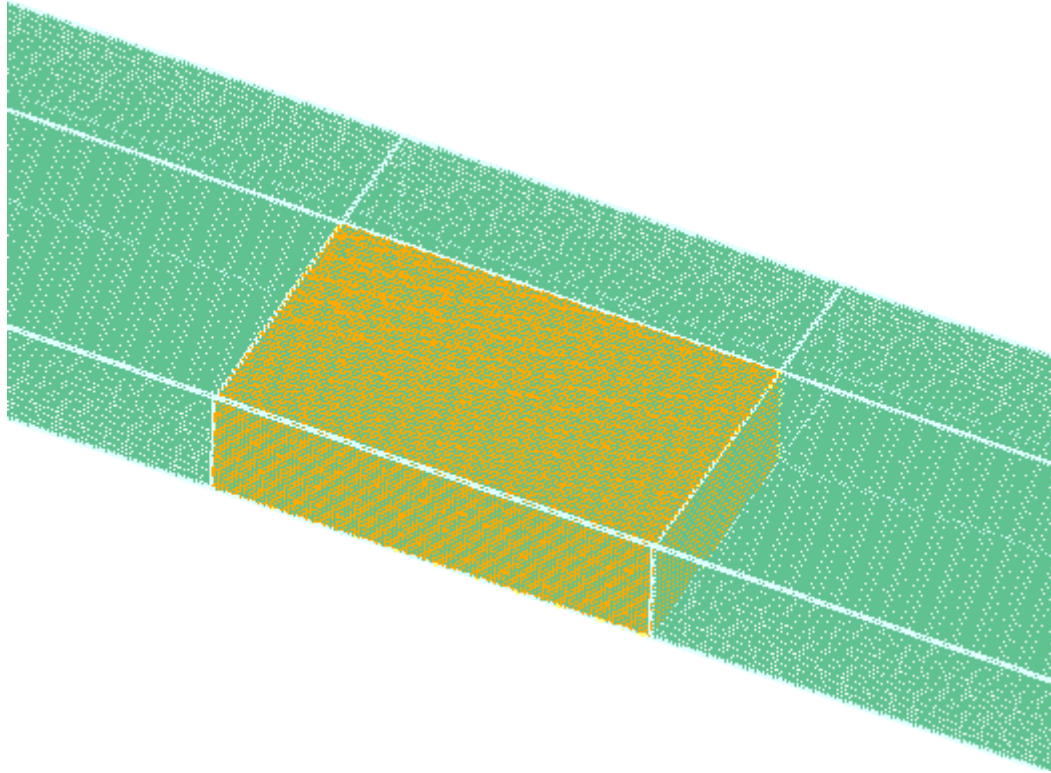
Şekil 3.14’de program kapsamında bulunan viskozite ve türbülans seçenekleri görülmektedir. Newtonien akışkan kısmının seçili olduğu kontrol edilmelidir. Program, türbülans büyüklüklerinin hesaplanabilmesi için k-ε modeli, Prandtl karışım boyu modeli, türbülans enerji modeli, RNG (Renormalized Group) model ve LES (Large-Eddy Simulation) modeli gibi farklı türbülans yaklaşımlarını içerisinde barındırmaktadır.

Seçilen türbülans yöntemlerine göre türbülans karışım boyu hesabı yapılarak farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu tezde 3 farklı türbülans karışım boyu denenerek deneyler doğrultusunda en yakın çıkan sonuçlar belirlenmiştir.



Şekil 3.14. Flow-3D’de türbülans yönteminin seçilmesi

Flow-3D programı ile çözümlene yaparken en önemli adım mesh geometrisini belirlemektir. Çözüm yapılan bölgede bulunan mesh geometrileri ne kadar küçük ve geometriler kareye yakın olursa sonuçlar o kadar hassas çıkmaktadır. Fakat mesh sayısının artması çözüm süresini çok uzattığından genellikle engele yakın bölgelerde daha küçük boyutlarda mesh seçilirken, engelden uzaklaştıkça mesh boyutları büyütülmektedir. Yuva mesh denilen bu kavramda dikkat edilmesi gereken en önemli nokta mesh geçişleri arasında süreksizlik oluşmasını engellemektir. Bu nedenle küçültülen mesh boyutları, ilk geometrinin yarısı kadar küçültülmeli ve mesh köşeleri birbiri ile aynı hizada olmalıdır.

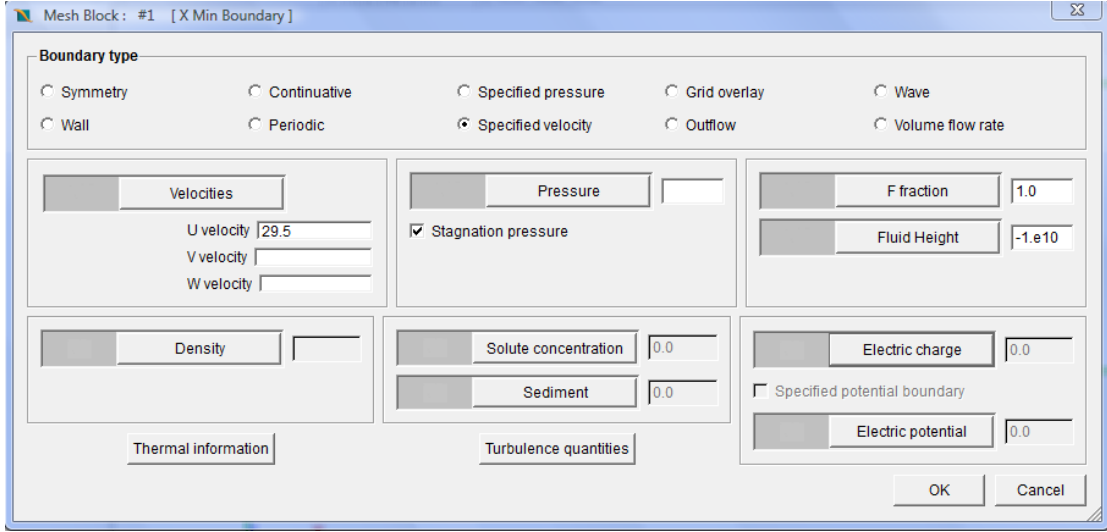


Şekil 3.15. Flow-3D’de gömülü mesh geometrisi

Şekil 3.15’de görüldüğü gibi tez çalışmasında engel civarındaki hız dağılımları ve basınç değişimlerini daha detaylı inceleyebilmek için engel çevresinde 0.5 cm’lik mesh kullanıldı. Diğer bölgelerde mesh boyutları 1 cm olarak alındı.

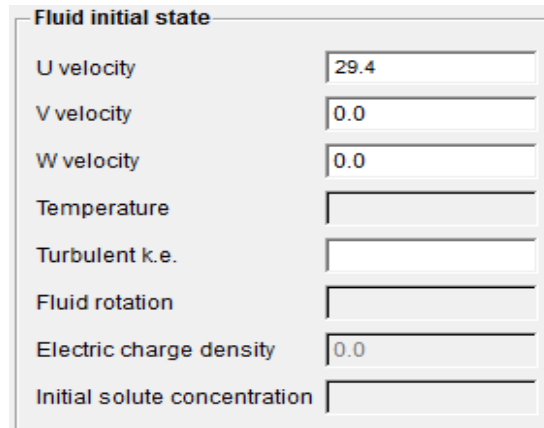
Şekil 3.16’da sınır koşullarının belirlenmesi görülmektedir. Memba, mansap uçlarında, kanal tabanında ve kenarlarında sınır şartı; “duvar” (wall) olarak tanımlanmıştır. Katı sınır yüzeylerinde kaymama (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır.

Dolayısıyla cidar yüzeylerinde yatay ve düşey doğrultudaki hız bileşenleri sıfır olmaktadır. Çözüm bölgesinin üst sınırında ise sınır şartı olarak “simetri” alınmıştır. Bu sınır şartı seçildiğinde, atmosfer basıncının etkili olduğu kabul edilmektedir. Su yüzeyi, “akışkan hacmi” (volum of fluid,VOF) yaklaşımı ile belirlendiğinden su-hava arakesitinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit atmosfer basıncı etkili olmaktadır (Hirt and Nichols 1981).



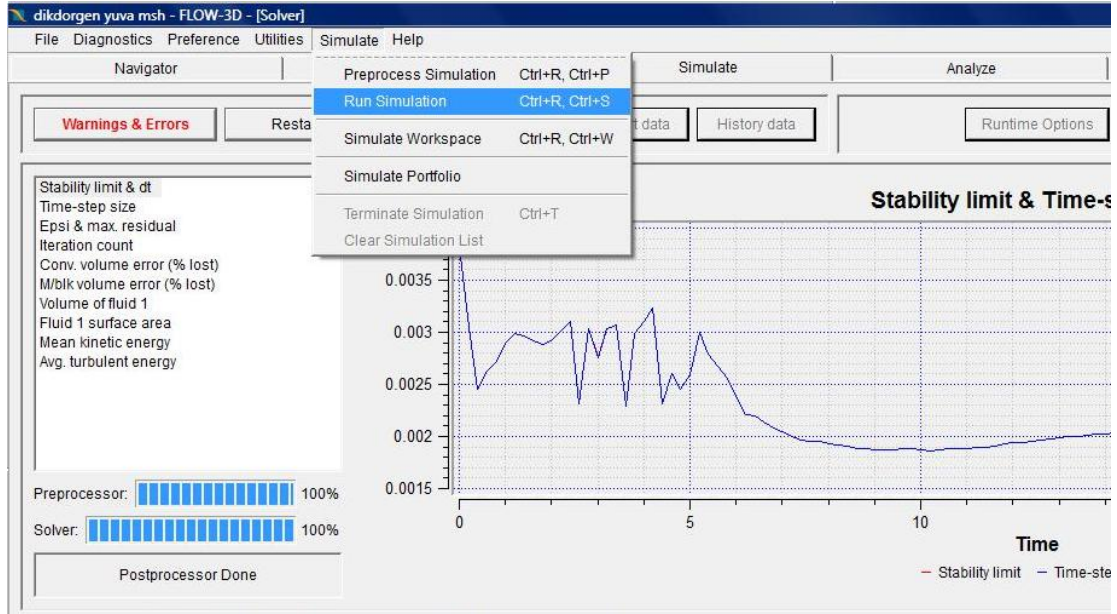
Şekil 3.16. Flow-3D’de sınır koşullarının belirlenmesi

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi x,y,z, doğrultularındaki hızlar, deney verileri doğrultusunda belirlenir ve su yüksekliğinin ne kadar olacağı modelde belirtilir. Bu tezde x doğrultusundaki akışkan hızı 29,4 cm/s ve yüksekliği 20 cm’dir



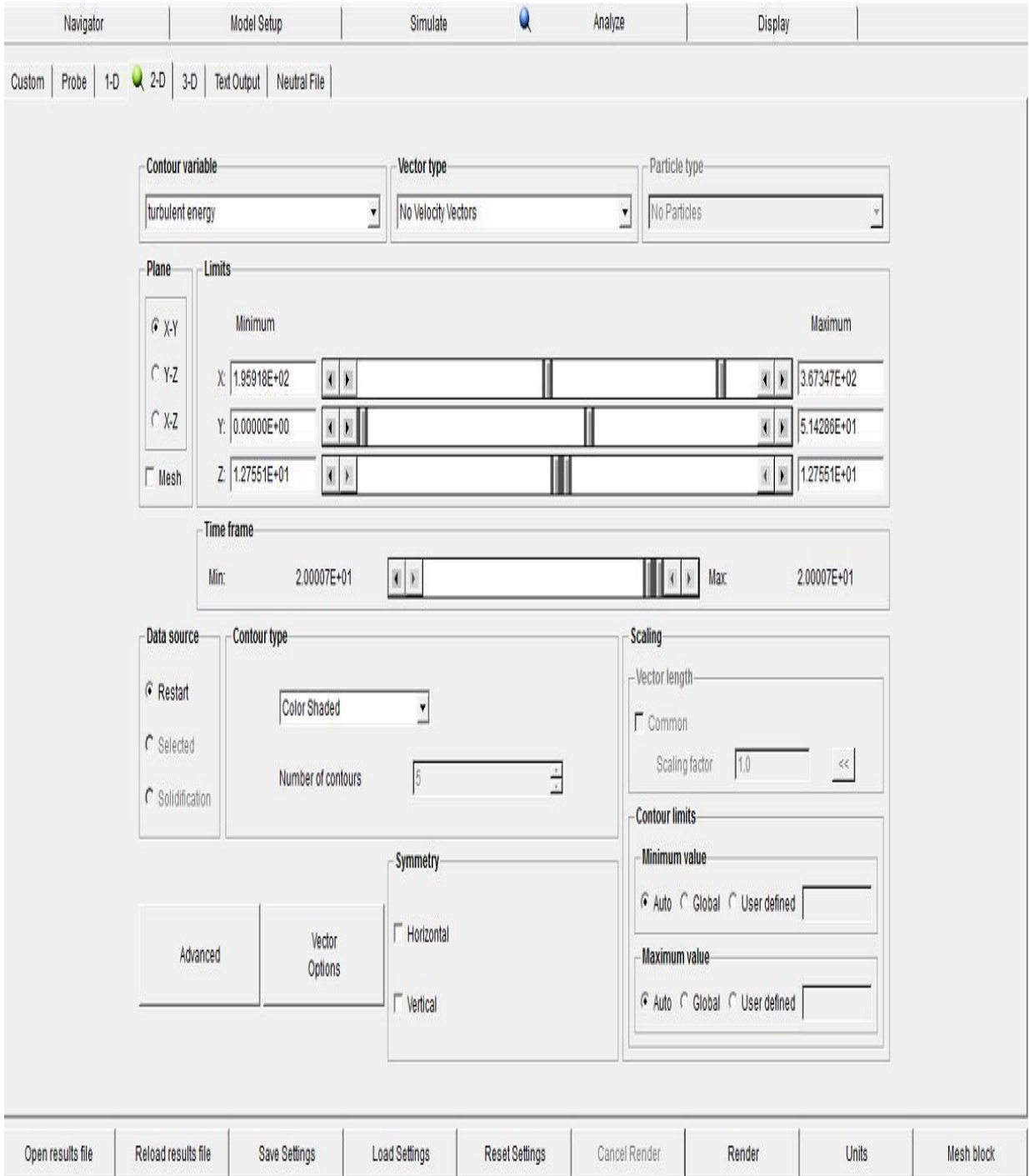
Şekil 3.17. Flow-3D’de başlangıçtaki akım hızının belirtilmesi

Bu veriler girildikten sonra program çözüm için hazır durumdadır. Şekil 3.18’de görülen run simulation komutu ile simülasyona başlanarak çözüm alınması beklenir. Programda belirtilen sonuç verme süresine göre sonuçlar gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3.18. Flow-3D’de simülasyonun başlaması

Şekil 3.19’da görülen analyse komutu çözüm sırasında ve sonrasında bir, iki ve üç boyutlu sonuçları almamıza olanak sağlar. Program kapsamında, oldukça çeşitli sonuç alma seçenekleri bulunmaktadır. Akarsu yatağındaki ve engel civarındaki hız, türbülans, basınç, dinamik viskozite, x,y,z doğrultularındaki hızlar gibi değişimler, vektörlerle ya da vektörsüz olarak renk seçenekleriyle elde edilebilir. Engel civarında akımda meydana gelen değişiklikler, oldukça detaylı olarak kullanıcıya sunulmaktadır.



Şekil 3.19. Flow-3D'de Analiz Sonuçlarının Alınması

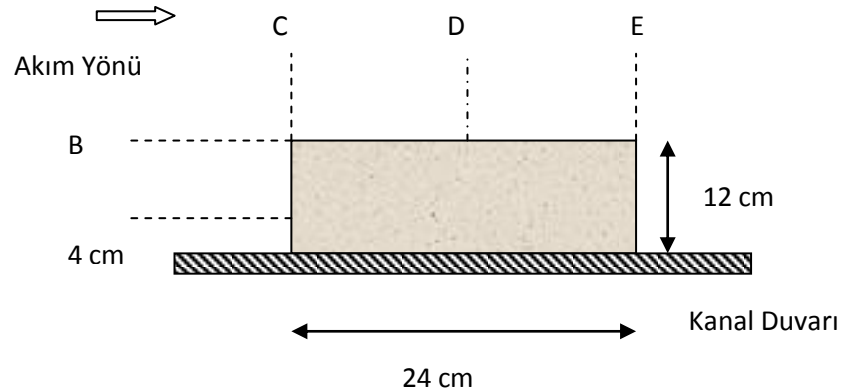
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Günümüzde akışkan problemlerini çözmek için kullanılan pek çok program mevcuttur (Fluent, Star CD, CFX...). Bu tezde kullanılan Flow-3D programının, 3 boyutlu köprü ayağı model çözümlerinde, zamana bağlı olarak akımda meydana gelen değişiklikleri birçok farklı mekanik, fiziksel ve mühendislik formülleri yardımıyla güvenli bir şekilde çözebileceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, Barbhuiya ve Dey'in (2004 a, b, c) 3 farklı çalışmasının modellenmesi yapılmıştır. Bu modeller 3 farklı kenar ayak geometrisine sahip köprüler (dikdörtgen, trapez, silindir) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kenar ayakta farklı mesh (hücre) boyutları, türbülans yöntemleri, ve türbülans karışım boylarına bağlı denemeler yapılmış ve en uygun modeller belirlenmiştir.

4.1. Dikdörtgen Geometrilik Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Akımın Modellemesi

Tez kapsamında Barbhuiya ve Dey (2004a)'in dikdörtgen kesitli köprü kenar ayağı civarında deneysel olarak elde ettiği hız değerleri Flow-3D programında sayısal olarak modellenmiştir. Dikdörtgen kesitli kenar ayaklar üzerinde, farklı hücre boyutları, türbülans yöntemleri ve türbülans karışım boyları denenerek, en başarılı bulunan yöntemler, silindir ve trapez kesitli ayaklar üzerinde uygulanmıştır. Şekil 4.1'de dikdörtgen kesitli kenar ayak ve ölçüm alınan eksenler görülmektedir.



Şekil 4.1. Dikdörtgen kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksenler

4.1.1. Mesh Karşılaştırması

Flow-3D programında, çözümlenme yapılırken model hücelere bölünerek çözüm alınmaktadır. Mesh boyutlarının küçük olması çözüm hassasiyetini artırırken, mesh sayısının artması bilgisayar ortamında çözüm süresini uzatmaktadır.

Bu tezde dikdörtgen kenar ayak üzerinde iki farklı mesh karşılaştırması yapılmıştır. Mesh-1 diye adlandırılan gömülü mesh, engel yakınlarında mesh boyutlarının küçültülmesi ve engelden uzaklaştıkça belirli oranda büyütülmesi ile elde edilmektedir. Gömülü mesh kullanmanın avantajı, sonuç alınmak istenen noktada hassasiyeti artırarak istenilen bölgede detaylı sonuçlar alınmasına yardımcı olmasıdır. Böylelikle mesh sayısı artışı çok olmazken, çözüm süresi uzamaz. Bu tezde detaylı çözüm ağının bulunduğu bölgedeki mesh boyutu 0.5 cm, diğer kısımlarda ise 1 cm olarak alınmıştır.

Mesh-2 diye adlandırılan mesh üniform mesh'tir ve modelin her tarafında aynı boyutta hüceler kullanılmıştır. Mesh boyutları her bölgede 1 cm' dir.

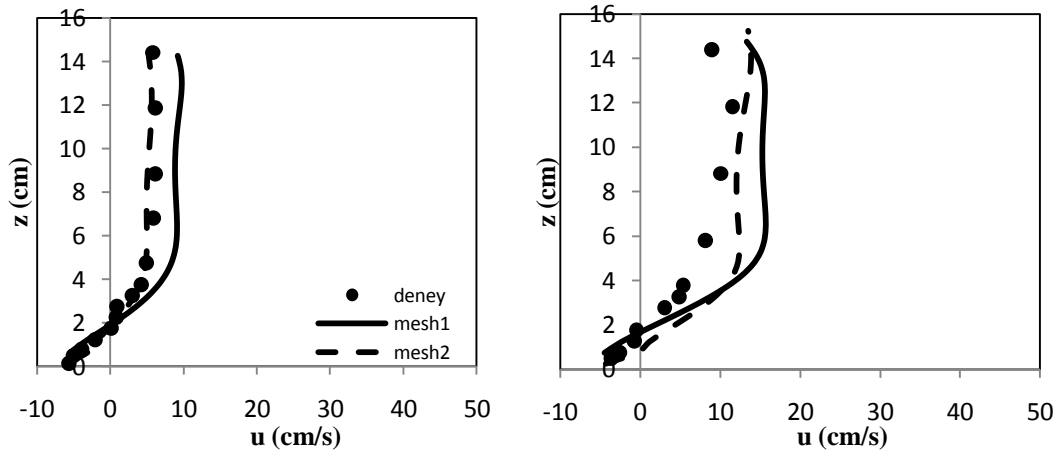
Aşağıdaki grafiklerde, dikdörtgen kenar ayak üzerinde gerçekleştirilen deneyler, farklı mesh boyutları ile Flow-3D programında modellenmiş ve en uygun ağ aralığı belirlenmiştir.

Şekil 4.2. dikdörtgen kenar köprü ayağının cidara en yakın olan A ekseninden alınmış sonuçları içermektedir. Eksen boyunca farklı mesafelerden elde edilen sayısal model sonuçlarının, deney sonuçları ile karşılaştırması görülmektedir. Sayısal modelleme sonucu elde edilen sonuçların deney sonuçlarından daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Hız dağılımları arasında genel bir benzerlik olduğu göze çarpmaktadır.

Şekil 4.3. dikdörtgen kenar ayağının B eksenine doğrultusunda farklı mesafelerden alınmış sonuçları içermektedir. Eksen boyunca elde edilen sonuçlar incelendiğinde, köprü ayağına en yakın olan ($x=14.53$ cm) nokta haricinde sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yuva mesh (Mesh 1), üniform mesh (Mesh 2)'e göre daha yakın sonuçlar vermektedir.

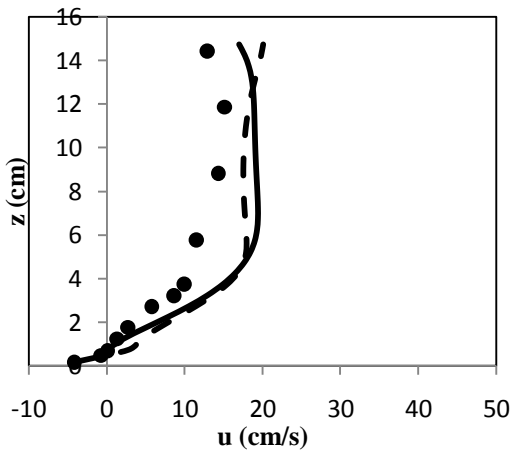
Şekil 4.4.-4.6. sırasıyla C, D, E eksenlerinden y doğrultusu boyunca farklı mesafelerden elde edilmiş sonuçları içermektedir. 4.5.a, 4.6.a. ve 4.6.b. grafikleri köprü ayağına çok yakın bölgeden alınan sonuçları göstermektedir. Bu grafiklerde, çevrıntilerin etkisiyle hız dağılımlarında belirgin değişiklikler olmakta ve deney sonuçları ile farklılıklar gözlenmektedir. Köprü ayağından uzaklaştıkça çevrıntilerin etkisi azalmakta ve hız dağılımları deney sonuçları ile uyumlu hale gelmektedir. Mesh1 çözümleri mesh 2 çözümlerine göre deney sonuçları ile daha yakınsamaktadır. Ayrıca deney sonuçları ile orantılı olarak sayısal çözümlerde, su yüzüne doğru çıkıldıkça logaritmik hız dağılımının gerçekleştiği görülmektedir.

Dikdörtgen kesitli kenar ayak etrafında gerçekleştirilen Flow-3D sonuçlarına göre tüm eksenlerin ortalama hata payları bulunmuştur. Buna göre, Mesh-1 (yuva mesh) % 31 hata payı verirken, Mesh-2 (üniform mesh) %38 hata payı vermektedir. Grafiklerden de anlaşıldığı gibi, Mesh-1, köprü kenar ayak etrafında daha yakın sonuç almamızı sağlamıştır.

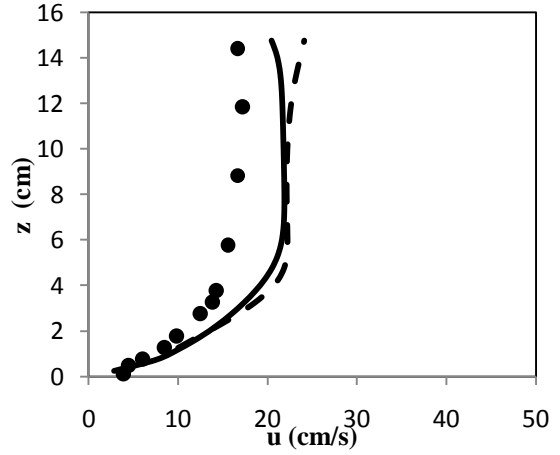


(a)

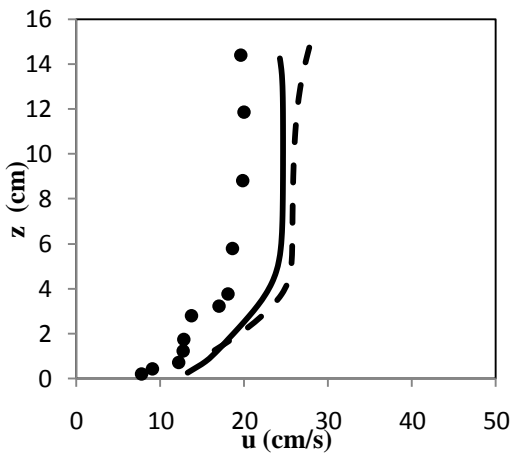
(b)



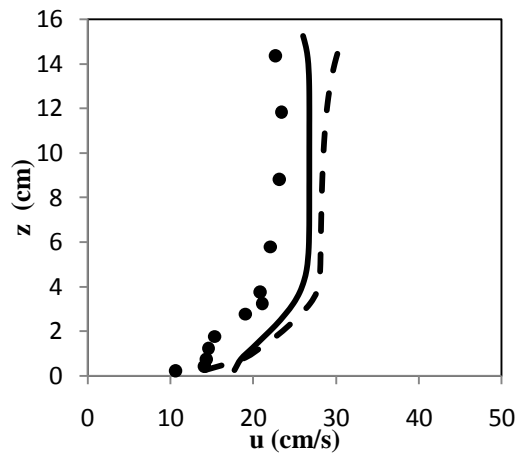
(c)



(d)

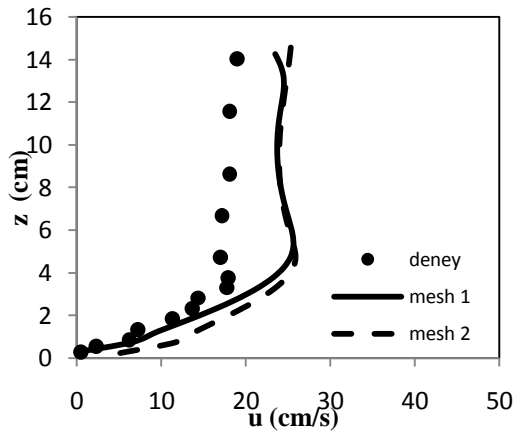


(e)

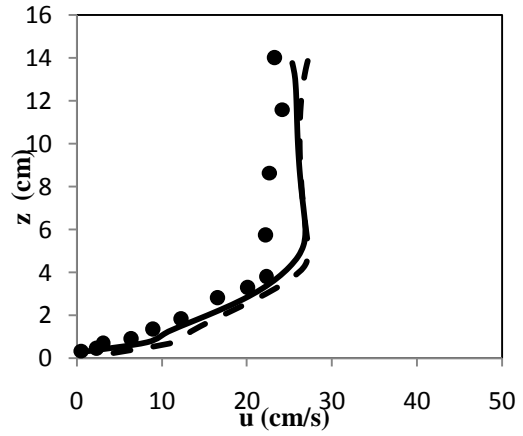


(f)

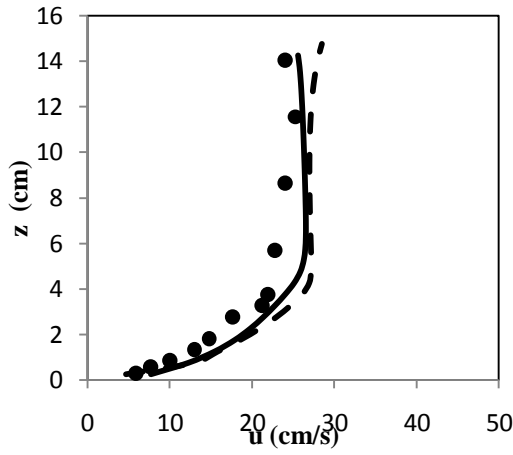
Şekil 4.2. Dikdörtgen kenar ayakta A eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması
a) -14.77 cm, b) -19.10 cm, c) -24.08 cm, d) -30.03 cm, e) -37.02 cm, f) -46.00 cm



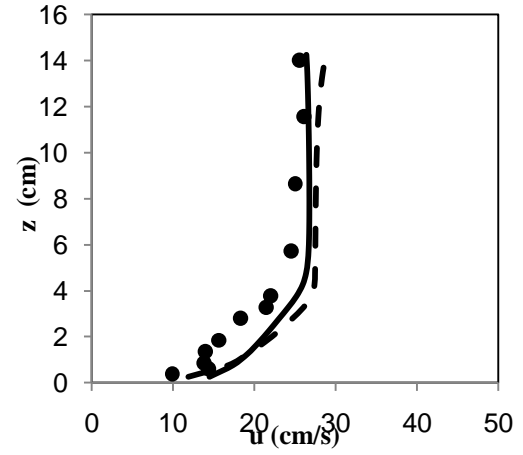
(a)



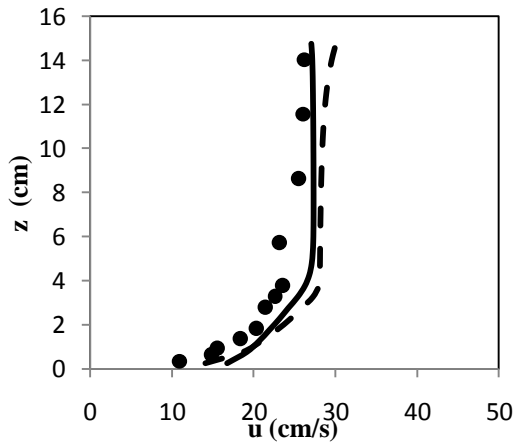
(b)



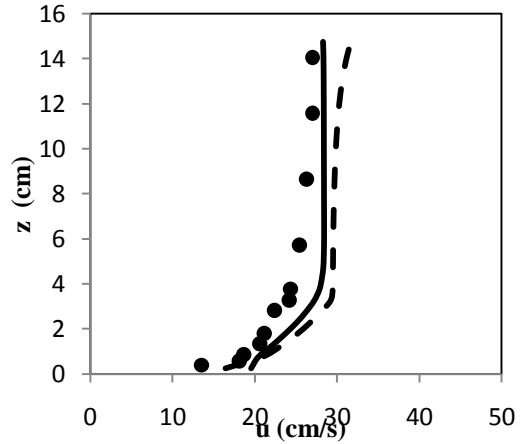
(c)



(d)

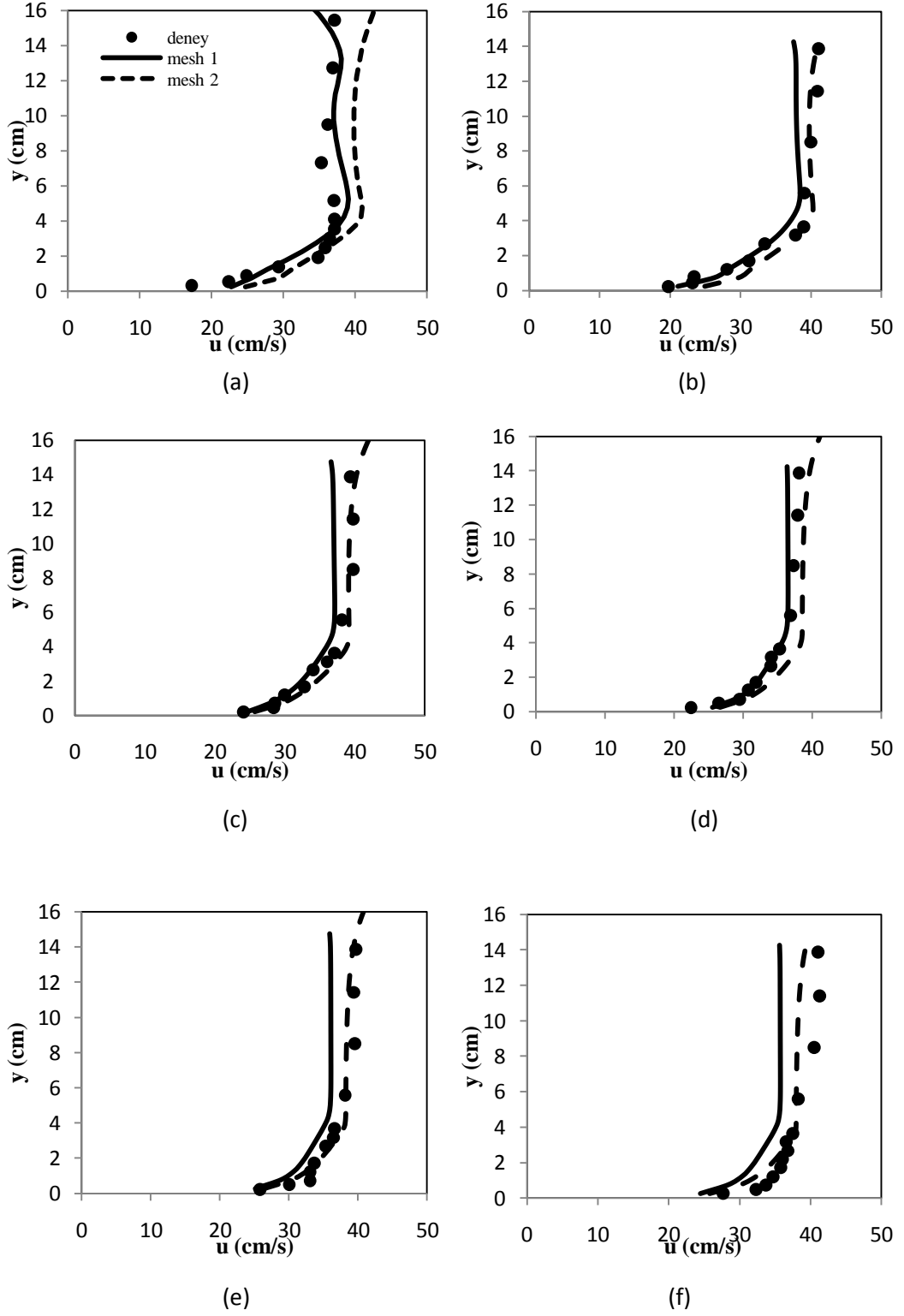


(e)

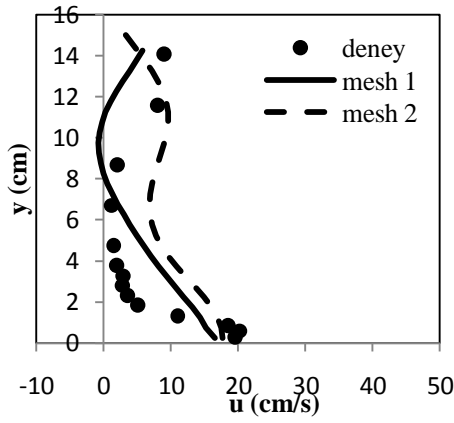


(f)

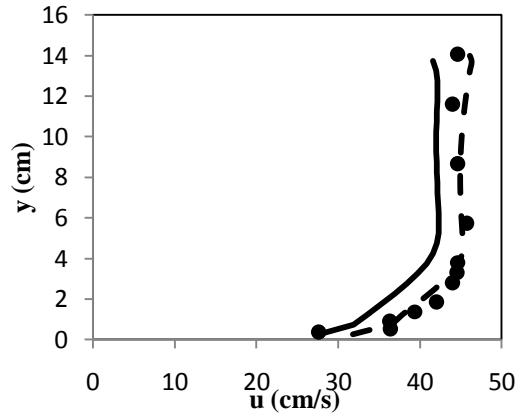
Şekil 4.3. Dikdörtgen kenar ayakta B eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması
a) -14.53 cm, b) -19.04 cm, c) -24.00 cm, d) -30.04 cm, e) -36.00 cm, f) -47.02 cm



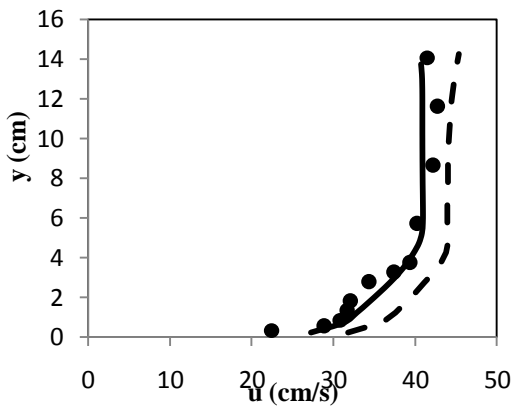
Şekil 4.4. Dikdörtgen kenar ayakta C eksenini doğrultusunda mesh karşılaştırması
a) 16.39 cm, b) 20.12 cm, c) 25.06 cm, d) 30.00 cm, e) 36.18 cm, f) 46.21 cm



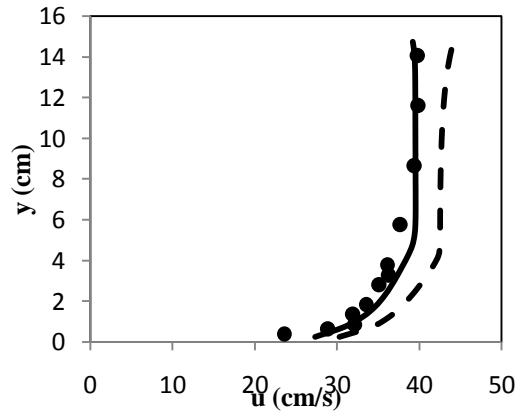
(a)



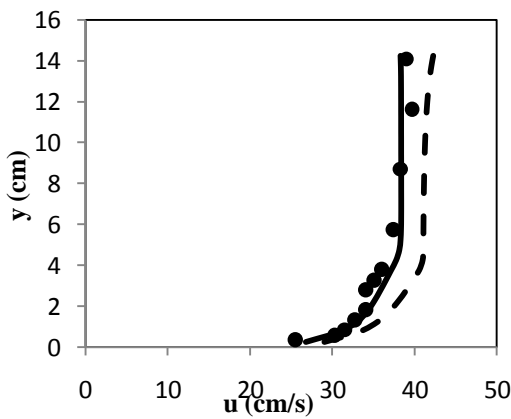
(b)



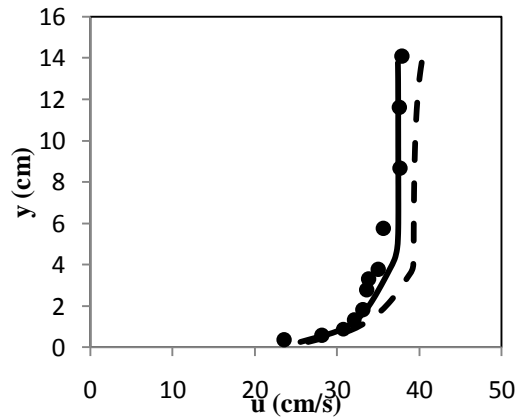
(c)



(d)



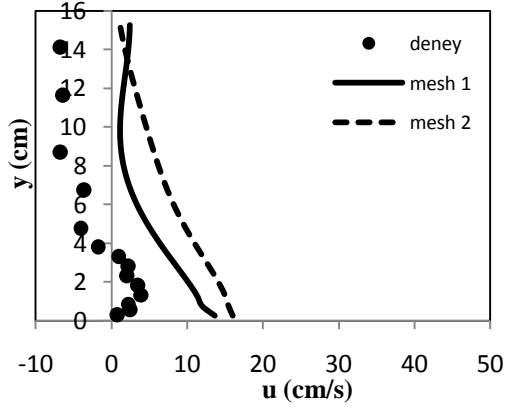
(e)



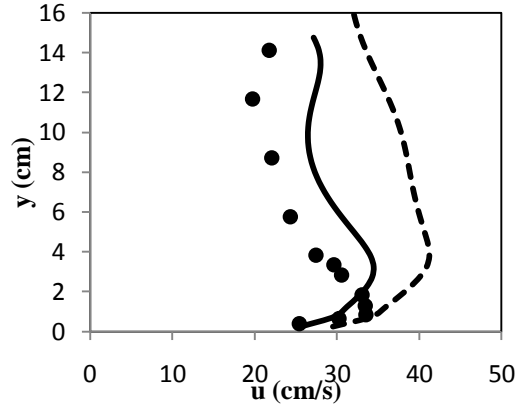
(f)

Şekil 4.5. Dikdörtgen kenar ayakta D eksenı doğrultusundaki mesh karşılaştırması

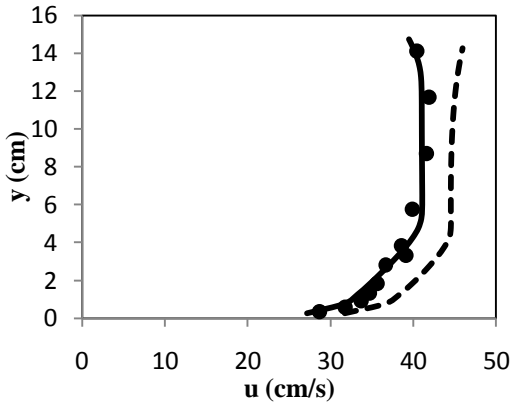
a) 15.97 cm, b) 20.03 cm, c) 24.99 cm, d) 29.88 cm, e) 36.00 cm, f) 45.90 cm



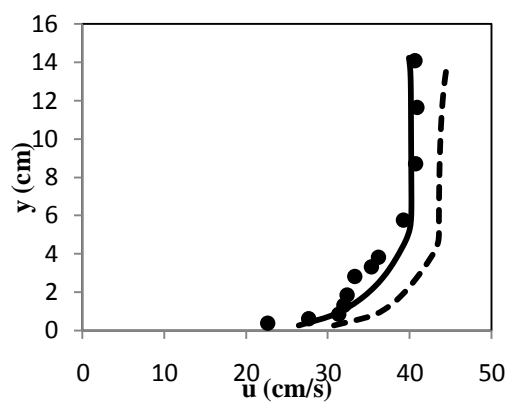
(a)



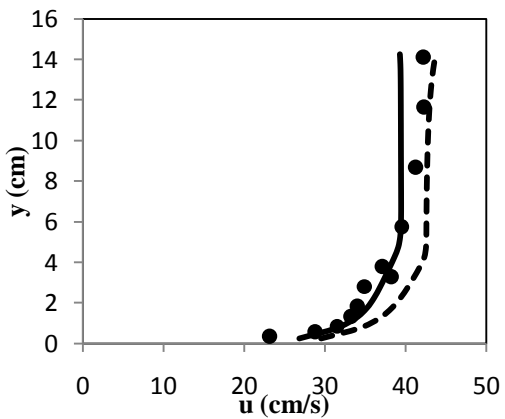
(b)



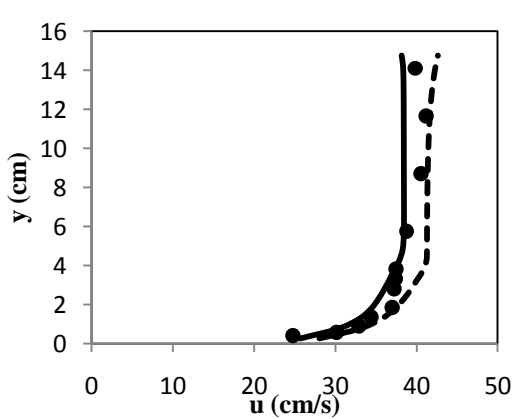
(c)



(d)

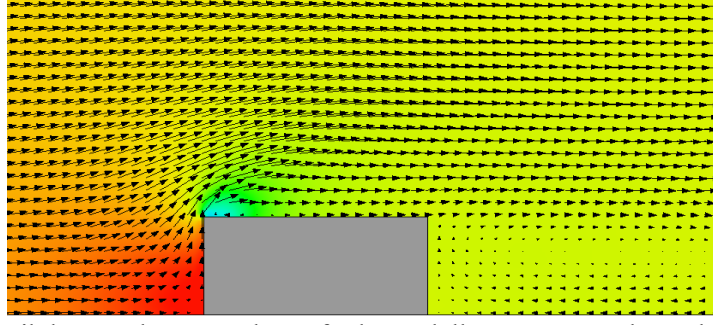


(e)



(f)

Şekil 4.6. Dikdörtgen kenar ayakta E eksenini doğrultusundaki mesh karşılaştırması
 a) 14.14 cm, b) 19.14 cm, c) 24.12 cm, d) 30.10 cm, e) 36.10 cm, f) 47.06 cm

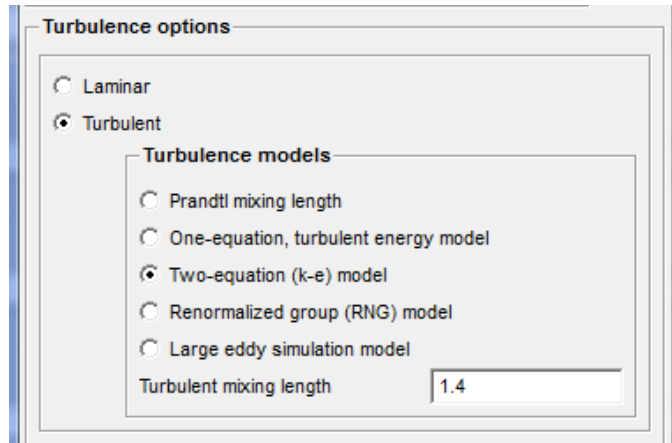


Şekil 4.7. Dikdörtgen kenar ayak etrafında modelleme sonucu oluşan hız vektörleri

Şekil 4.7’de köprü kenar ayağı civarında sayısal çözüm sonucunda elde edilen hız vektörleri görülmektedir. Akım, kenar ayağın memba kısmında engele çarparak yavaşlamakta ve hızlı bir şekilde doğrultu değiştirerek köprü açıklığından çıkmaya çalışmaktadır. Memba ucunda daralmanın da etkisiyle akım hızının arttığı ve köşe noktasında çok küçük bir bölgede tersine akım gözlenmektedir. Köprü açıklığında çıktıkça akım daha düzenli hale gelmektedir. Ayağın mansap kısmında ise düşük hızlarda tersine akım ve çevrıntiler oluştuğu görülmektedir.

4.1.2. Türbülans Yöntemi Karşılaştırması

Tez kapsamında, sayısal modellemeler esnasında kullanılacak uygun yöntemi belirlemek için, dikdörtgen kenar ayak üzerinde yapılan bir diğer karşılaştırma türbülans yöntemi karşılaştırmasıdır. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi sayısal modellemenin yapıldığı Flow-3D programı, içerisinde beş farklı türbülans yöntemi barındırmaktadır.



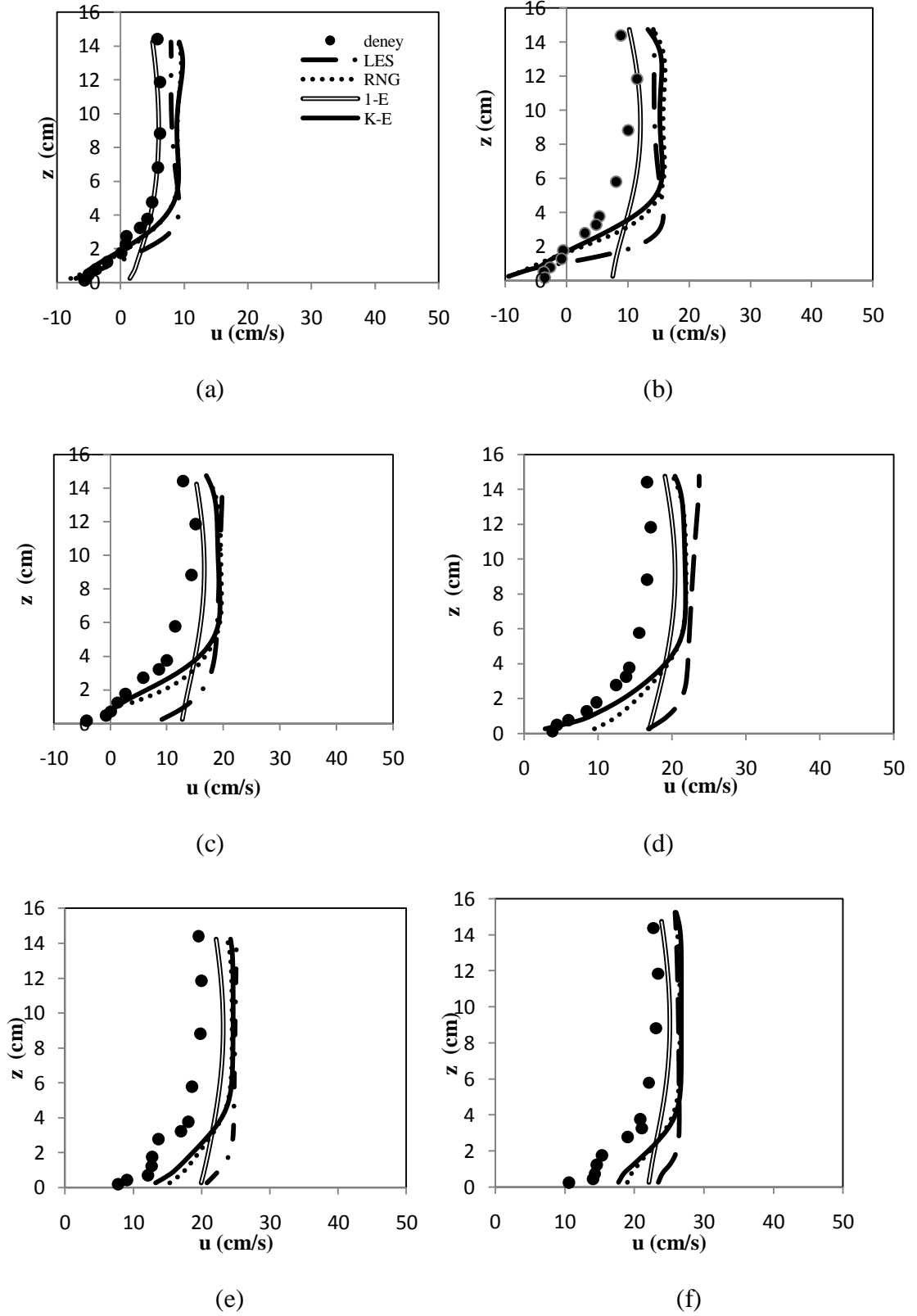
Şekil 4.8. Flow-3D programı türbülans yöntemleri

Bir türbülans yönteminin temel prensibi, akım miktarı üzerindeki türbülans dalgalanmalarının etkisini tahmin edebilmek için uygun mekanizmayı sağlamaktır. Bu etki genellikle kütle, momentum ve enerji taşınımı formülleri ile ifade edilmektedir.

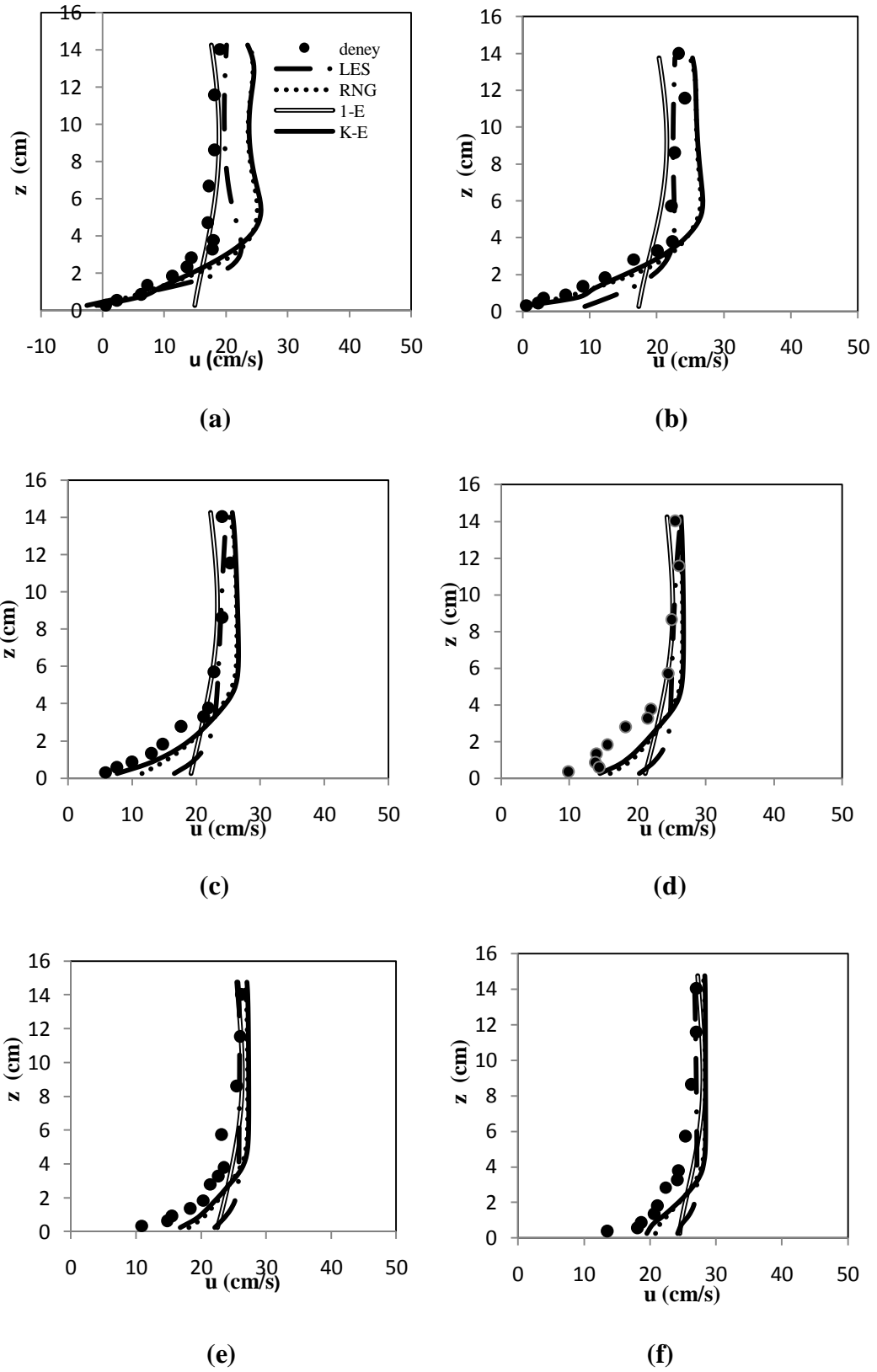
Şekil 4.9-4.13. arasında dikdörtgen köprü kenar ayağının Mesh-1 ağ aralığında deney sonuçları ile farklı türbülans yöntemleri ile karşılaştırmaları görülmektedir.

Şekil 4.9. ve 4.10'da sırasıyla A ve B eksenleri boyunca belirli mesafelerden alınmış sonuçlar görülmektedir. Bu eksenler boyunca elde edilen sayısal modelleme sonuçlarının, genel olarak deney sonuçlarından daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hız dağılımları arasında belirgin benzerlik olduğu söylenebilir. Şekil 4.9. cidara en yakın olan A ekseninden x doğrultusunda alınmış sonuçları göstermektedir. Köprü kenar ayağından x doğrultusunda uzaklaştıkça, sonuçların daha uyum içinde olduğu ve k- ϵ türbülans yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçları ile daha büyük bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Cidara daha uzak olan B ekseninden elde edilen sonuçların A eksenine göre deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu, köprü ayağına en yakın noktadan alınmış sonuçları içeren 4.10.a. haricindeki grafiklerde, yine k- ϵ türbülans yönteminin deney sonuçları ile yakınsadığı görülmektedir.

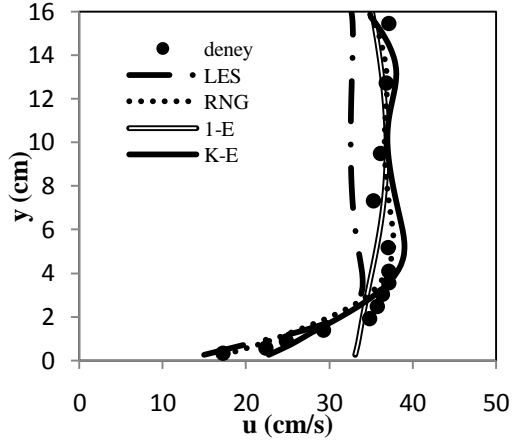
Şekil 4.11.-4.13'de sırasıyla C, D ve E eksenleri doğrultusunda köprü açıklığı içerisinde y doğrultusunda farklı mesafelerde ölçülmüş olan ve farklı türbülans yöntemleri için sayısal olarak hesaplanan hız dağılımlarının değişimi verilmiştir. Şekil 4.11.a-b, 4.12.a-b. ve 4.13.a.b. grafiklerinde çevrintilerin etkisiyle kısa mesafede bile hız dağılımında belirgin değişimlerin olduğu kenar ayağa yakın kısımlarda deney sonuçları ile farklılıklar göze çarpmaktadır. Köprü ayağından uzaklaştıkça cidar etkisi ve çevrintiler azalmakta ve kenar ayaktan uzak mesafelerde elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu gözlenmektedir. Köprü açıklığındaki sonuçlara genel olarak bakıldığında, k- ϵ türbülans yönteminden alınan sonuçların, diğer türbülans yöntemlerine göre deney sonuçları ile daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.



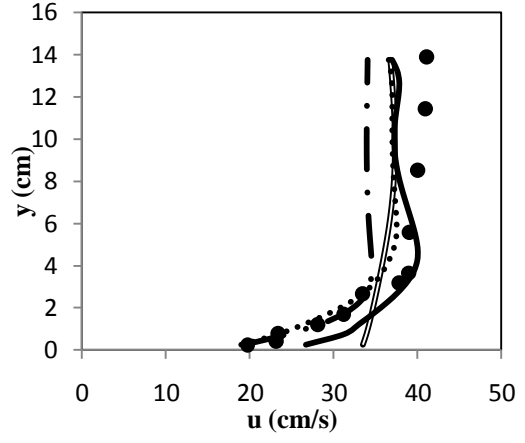
Şekil 4.9. Dikdörtgen kenar ayak A eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması
a) -14.77 cm, b) -19.10 cm, c) -24.08 cm, d) -30.03 cm, e) -37.02 cm, f) -46.00 cm



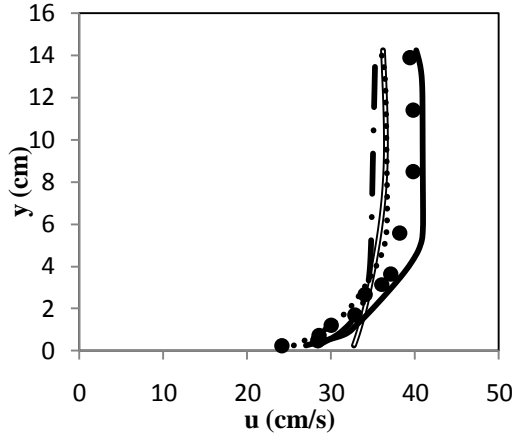
Şekil 4.10. Dikdörtgen kenar ayak B eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması
a) -14.53 cm, b) -19.04 cm, c) -24.00 cm, d) -30.04 cm, e) -36.00 cm, f) -47.02 cm



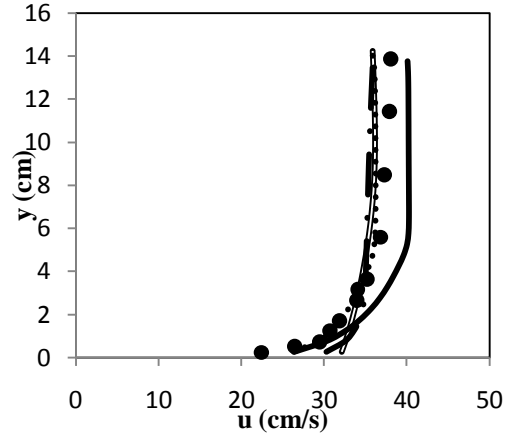
(a)



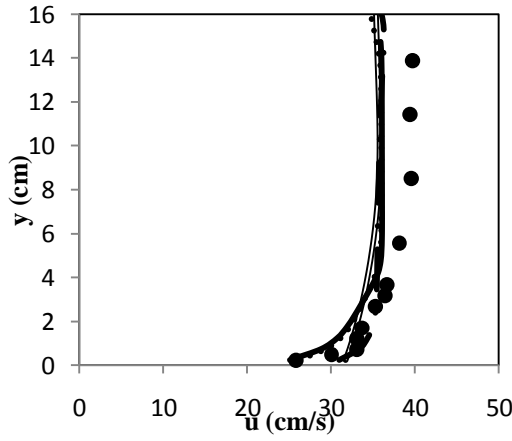
(b)



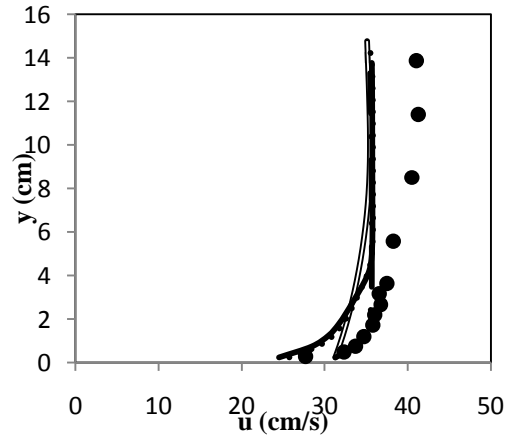
(c)



(d)

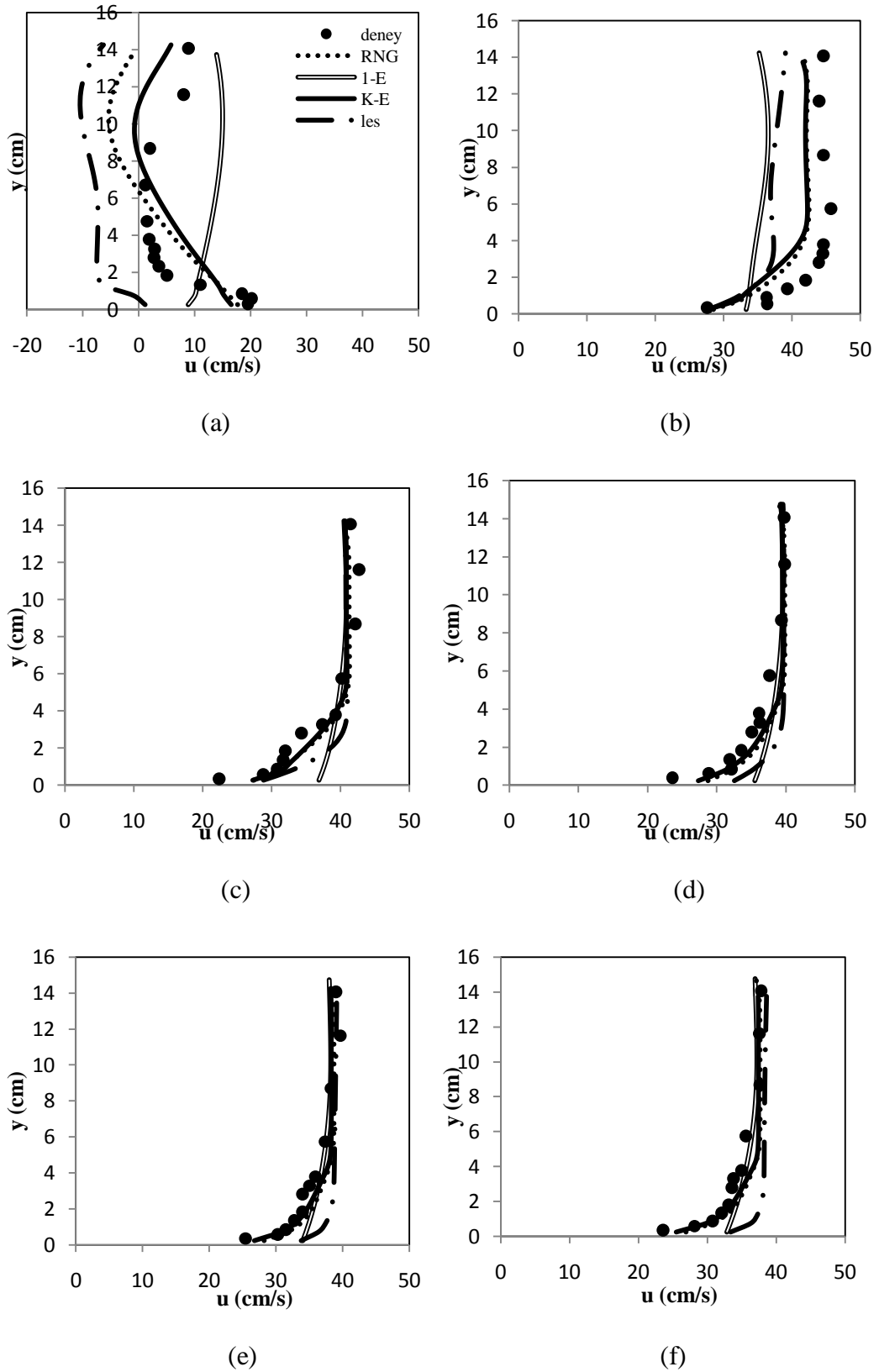


(e)

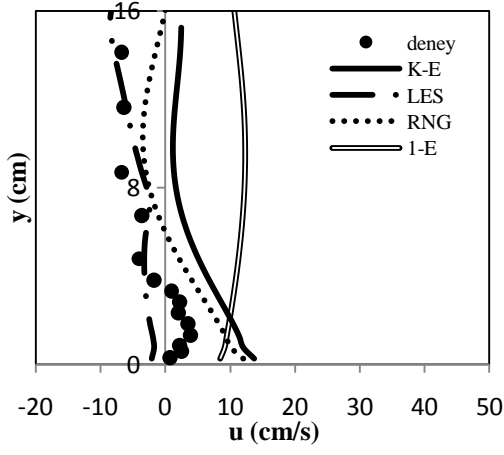


(f)

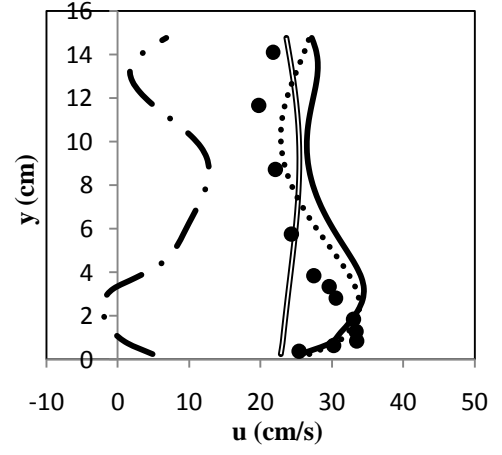
Şekil 4.11. Dikdörtgen kenar ayak C eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması
 a) 16.39 cm, b) 20.12 cm, c) 25.06 cm, d) 30.00 cm, e) 36.18 cm, f) 46.21 cm



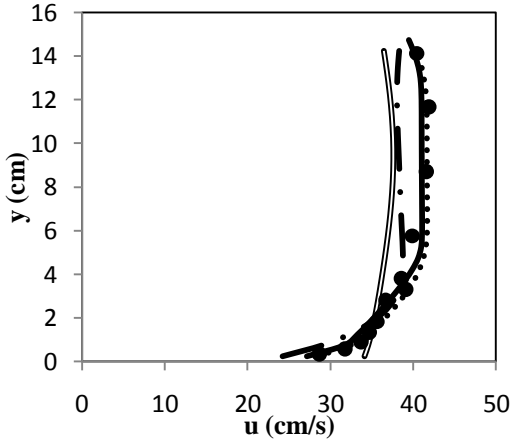
Şekil 4.12. Dikdörtgen kenar ayak D eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması
a) 15.97 cm, b) 20.03 cm, c) 24.99 cm, d) 29.88 cm, e) 36.00 cm, f) 45.90



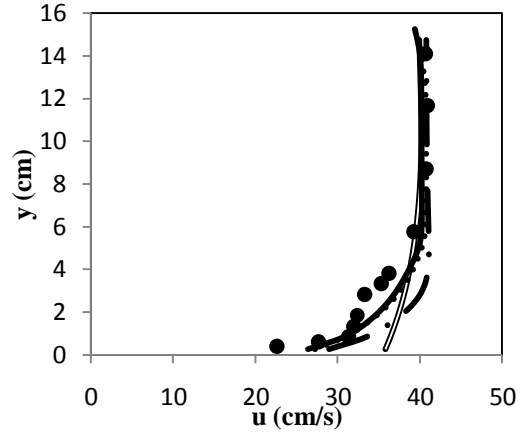
(a)



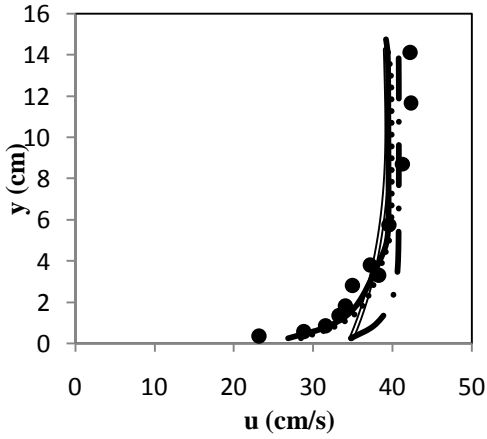
(b)



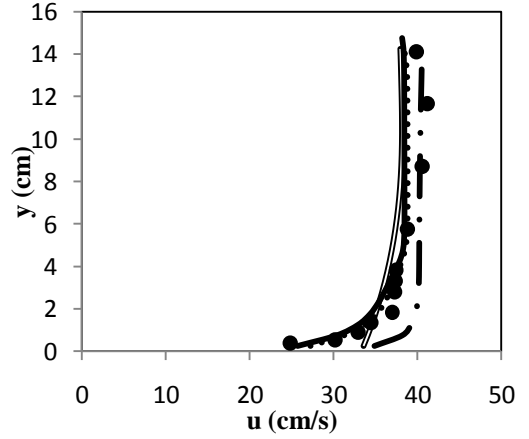
(c)



(d)



(e)



(f)

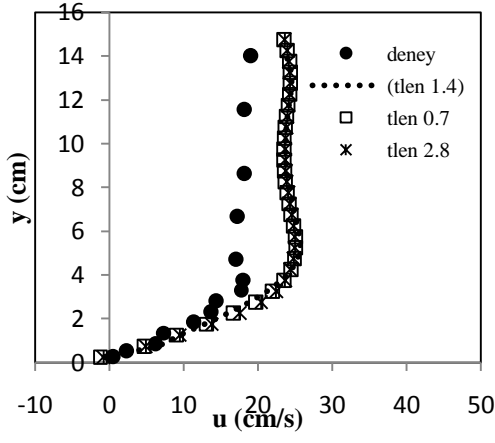
Şekil 4.13. Dikdörtgen kenar ayak E eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması
 a) 14.14 cm, b) 19.14 cm, c) 24.12 cm, d) 30.10 cm, e) 36.10 cm, f) 47.06 cm

4.1.3. Türbülans Karışım Boyu (TLEN) Karşılaştırması

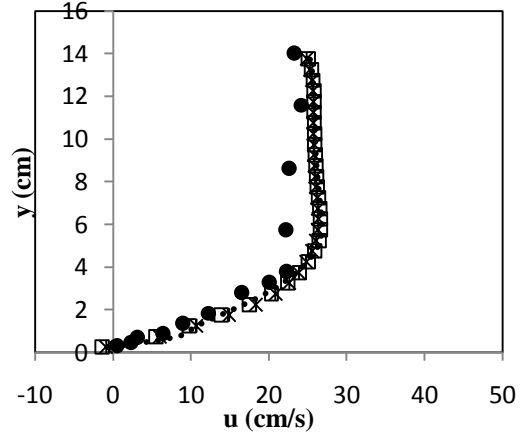
Tez kapsamında dikdörtgen kenar ayak üzerinde deney sonuçları ile sayısal modelleme arasında yapılan diğer karşılaştırma TLEN (Türbülans karışım boyu) karşılaştırmasıdır. Bu değer yalnızca k-e ve RNG türbülans yöntemlerinde kullanılarak, sınır türbülans değerini dağıtır ve viskozite değerinin çok büyük olmasını engeller. Değer programa kullanıcı tarafından girilerek, en küçük hücre boyutunun %7'si hesaplanarak elde edilir.

Bu çalışmada yuva mesh ve k- ϵ türbülans yöntemi kullanılmış ve çeşitli TLEN değerleri denenmiştir. Eksenlerde yapılan denemeler neticesinde elde edilen sayısal sonuçlar, deney sonuçları ile yakın olduğu için tek eksende karşılaştırma yapılmıştır.

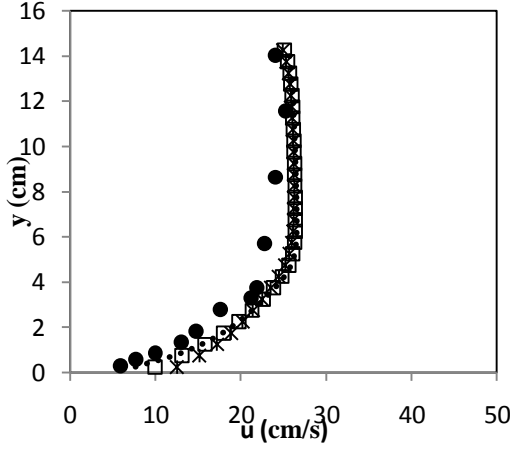
Şekil 4.14'de mesh1 ağında ve k- ϵ türbülans yönteminde sayısal olarak modellenmiş dikdörtgen kenar köprü ayağında türbülans karışım boyları ile deney sonuçları karşılaştırmaları görülmektedir. B ekseninde yapılan karşılaştırmalara göre farklı TLEN değerlerinin, çok önemli bir fark yaratmadığı görülmektedir. Sonuçlar birbirine çok yakın olmakla beraber, türbülans karışım boyu değerinin 1.4 olduğu durum için hata payı, % 21 olarak hesaplanmıştır.



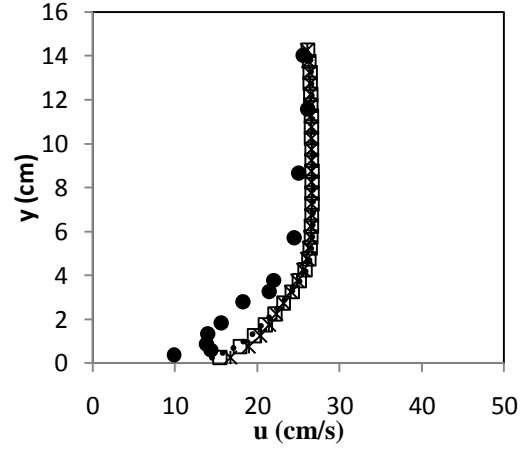
(a)



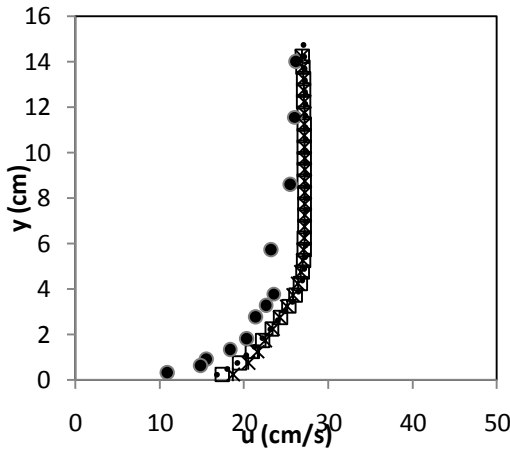
(b)



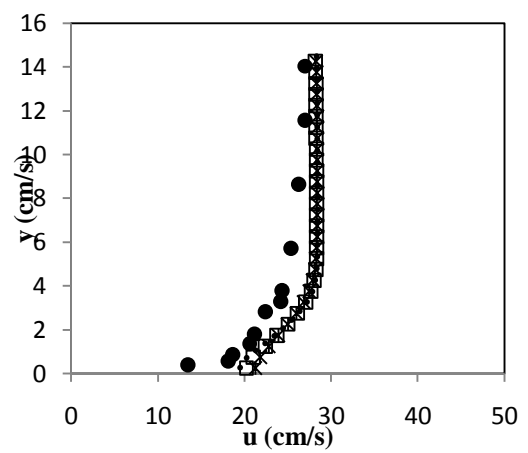
(c)



(d)



(e)



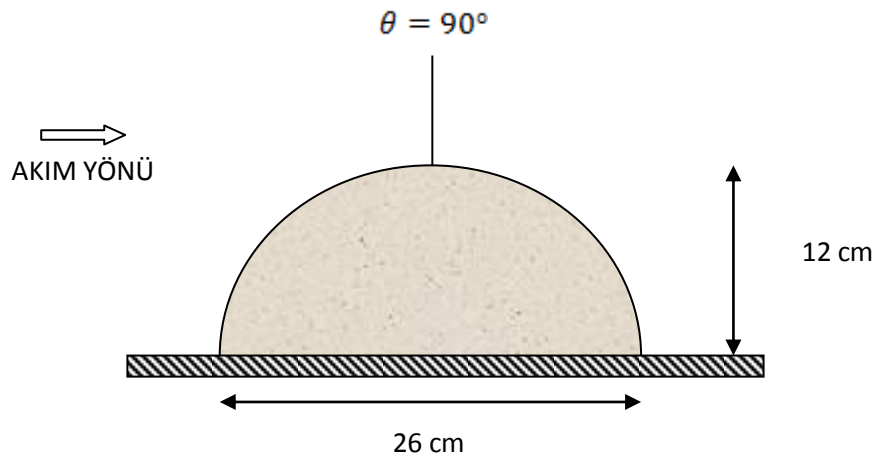
(f)

Şekil 4.14. Dikdörtgen kenar ayak B ekseni TLEN karşılaştırması
a) 14.53 cm, b) 19.04 cm, c) 24.00 cm, d) 30.04 cm, e) 36.00 cm, f) 47.02 cm

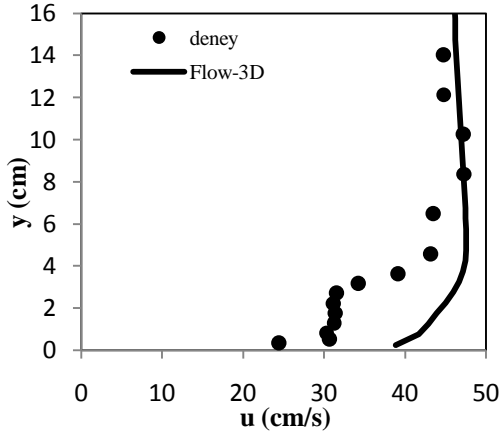
4.2. Silindir Geometrili Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Akımın Modellemesi

Tez kapsamında Barbhuiya ve Dey (2004c)'in silindir köprü kenar ayağı civarında deneysel olarak elde ettiği hız değerleri Flow-3D programında sayısal olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken hücre aralığı olarak mesh1 kullanılmış, yapılan denemeler sonucunda en uygun yöntem olduğuna karar verilen k-e türbülans yöntemi ile TLEN 1.4 değerleri seçilmiştir. Şekil 4.16'da, modelleme yapılan trapez kenar köprü ayağının plan görünüşü bulunmaktadır.

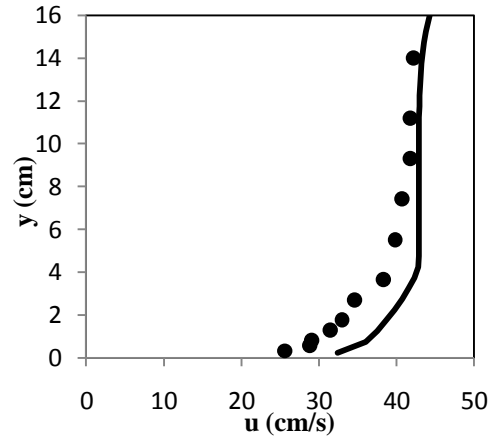
Şekil 4.16'da silindir kenar köprü ayağının, 90 derecelik eksen boyunca y ekseninde belirli mesafelerde alınmış sayısal sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırmaları görülmektedir. Grafiklere bakıldığında sayısal olarak elde edilen hız değerlerinin deney sonuçlarına göre daha büyük değere sahip olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte genel olarak hız dağılımları arasında belirgin bir benzerlik olduğu söylenebilir. Şekil 4.16.a' da köprü ayağına en yakın olan kısımdan alınan sonuçları görmekteyiz. Bu bölgede çevrintilerin etkisiyle kısa mesafede bile hız dağılımında belirgin değişimlerin olduğu kenar ayağına yakın kısımlarda deney sonuçları ile farklılıklar göze çarpmaktadır. Köprü ayağından uzaklaştıkça cidar etkisi ve çevrintiler azalmakta ve kenar ayaktan uzak mesafelerde elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu gözlenmektedir. Silindir kesitli köprü kenar ayağı çözümlerinde, % 17.25 oranında hata payı hesaplanmıştır.



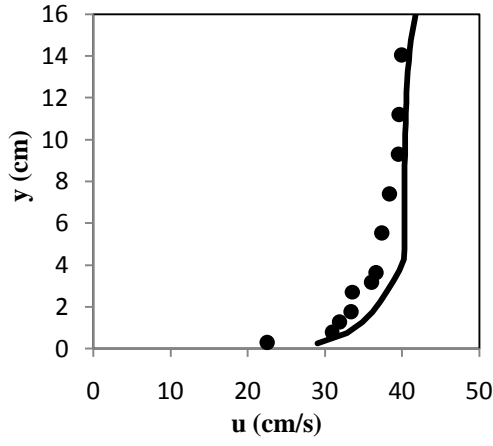
Şekil 4.15. Silindir kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen



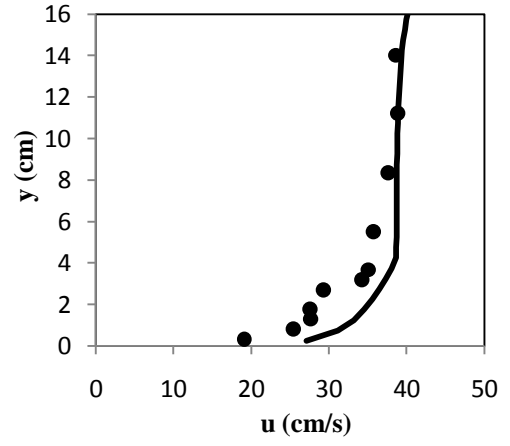
(a)



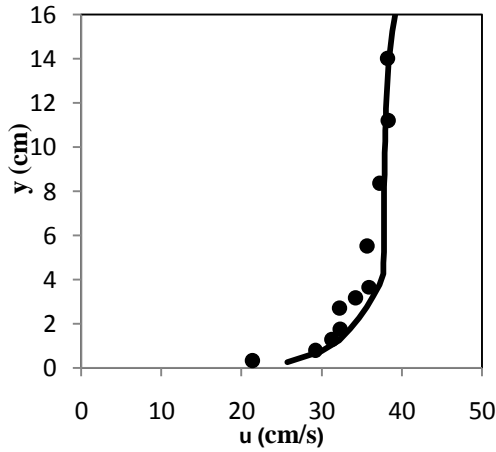
(b)



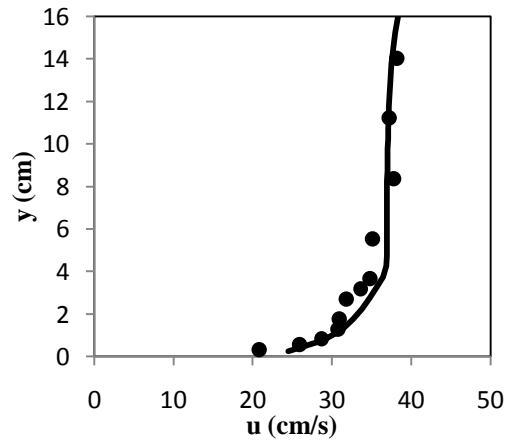
(c)



(d)



(e)



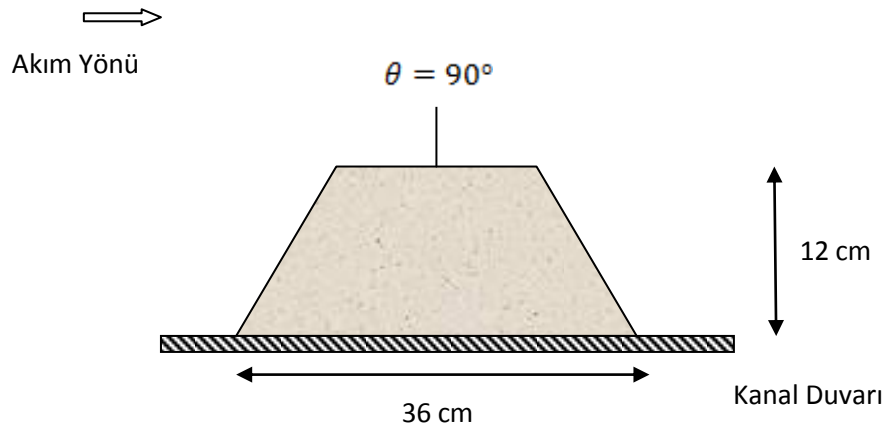
(f)

Şekil 4.16. Silindir kenar ayakta deney ve nümerik çalışma karşılaştırması
 a) 15.07 cm, b) 20.02 cm, c) 24.97 cm, d) 29.95 cm, e) 35.88 cm, f) 42.86 cm

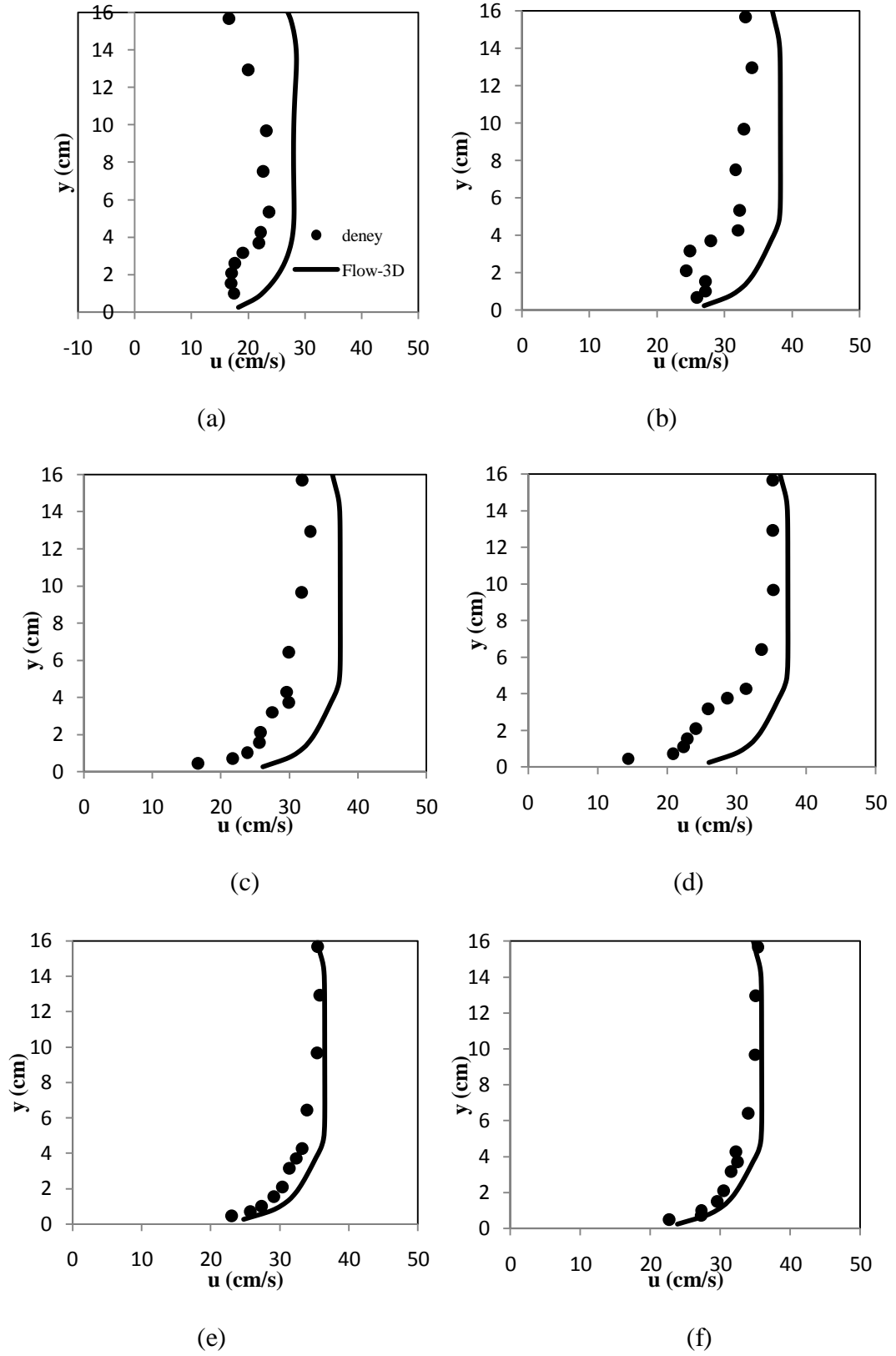
4.3. Trapez Geometrilik Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Akımın Modellemesi

Farklı ayak geometrilerinin test edilebilmesi için çalışma kapsamında, Barbhuiya ve Dey (2004b)'in trapez köprü kenar ayağındaki deneysel çalışması da Flow-3D ile sayısal olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken hücre aralığı olarak mesh1 kullanılmış, yapılan karşılaştırmalar sonucunda en uygun yöntem olduğuna karar verilen k- ϵ türbülans yöntemi kullanılmıştır. Türbülans karışım boyu (TLEN) 1.7 olarak alınmıştır. Şekil 4.17'de, modelleme yapılan trapez kenar köprü ayağının plan görünüşü bulunmaktadır.

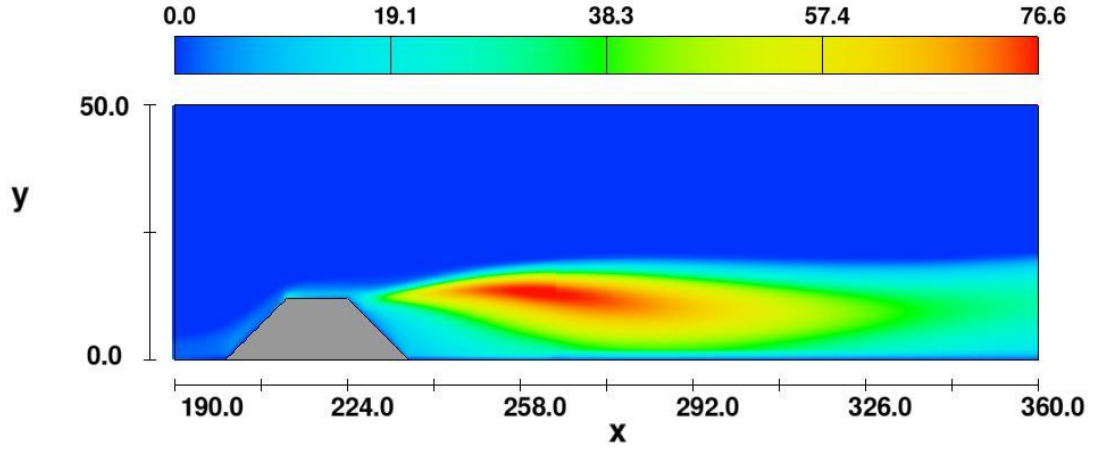
Şekil 4.18'de 90 derecelik eksen boyunca y ekseninde belirli mesafelerde alınmış sayısal sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırmaları görülmektedir. Grafiklere bakıldığında sayısal olarak elde edilen hız değerlerinin deney sonuçlarına göre daha büyük değere sahip olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.18.a'da trapez köprü kenar ayağına en yakın olan mesafeden alınan sonuçlar görülmektedir. Bu bölgede oluşan cidar etkisi ve çevrıntiler nedeniyle sonuçlar birbirine uzak çıkmıştır. Köprü kenar ayağından uzaklaştıkça, cidar etkisinin de azalmasıyla elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Trapez kesitli köprü kenar ayağı etrafında, % 18.17 oranında hata payı hesaplanmıştır.



Şekil 4.17. Trapez kesitli kenar ayağın plan görünüşü ve ölçüm alınan eksen



Şekil 4.18. Trapez ayakta deney ve nümerik çalışma karşılaştırması
a) 14.53cm, b) 19.00 cm, c) 23.98 cm, d) 29.02 cm, e) 34.97 cm, e) 41.87 cm



Şekil 4.19. Trapez Köprü Kenar Ayağında Oluşan Türbülans Bölgesi

Şekil 4.19'da trapez köprü kenar ayağı civarında meydana gelen türbülans kinetik enerji değişimi görülmektedir. Gelen akımın engeli geçmesiyle mansap tarafında türbülanslı bölge oluşmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında Barbhuiya ve Dey'in (2004 a,b,c,) farklı geometrili köprü kenar ayakları civarında ADV hız ölçer ile almış oldukları sonuçların RANS çözümüne dayanan nümerik sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla Flow-3D paket programı kullanılmıştır. Farklı geometrili dikdörtgen kenar ayaklar, Flow-3D programında modellenerek, 3 boyutlu nümerik model oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında, çözümlerin hassasiyetini belirlemek için sonuçlar üzerinde etkisi olduğu düşünülen farklı ağ aralıkları denenmiş ve bu sonuçlar deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu programa özgü istenilen bölgede mesh sıkılaştırmasına olanak sağlayan yuva mesh, çözüm süresi ve hassasiyeti konusunda çok elverişlidir. Beklendiği şekilde mesh sıkılaştırmasının, daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Çözüm hassasiyetini belirlemek için yapılan diğer karşılaştırma türbülans yöntemi karşılaştırmasıdır. k- ϵ türbülans yöntemi laboratuvar ortamında kalibre edildiği için diğer yöntemlere göre daha yakın sonuç vermektedir.

Flow-3D modellemelerinde çok büyük bir öneme sahip olan türbülans karışım boyu karşılaştırmasında, TLEN değerinin yuva mesh ile birlikte çok etkili olmadığı görülmüştür.

Farklı köprü ayak geometrilerinde, elde edilen model sonuçları deney sonuçları ile uyumlu sonuç vermiştir.

Silindir ve trapez kesitli köprü kenar ayaklarında sırasıyla % 17,25 ve 18,17; hata oranları bulunurken; dikdörtgen kesitli kenar ayakta, tüm eksenler boyunca ortalama hata oranları Mesh-1 için % 31 ve Mesh-2 için %38 olarak bulunmuştur. Yine dikdörtgen kesitte, türbülans karışım boyu karşılaştırmasında B eksenini boyunca %21 hata oranı mevcuttur. Seçilen türbülans yöntemi (k- ϵ) ise % 31 hata oranıyla sonuç vermektedir.

Tez kapsamında sadece x doğrultusundaki hız değerleri karşılaştırılmıştır. Diğer doğrultulardaki hız değerlerinin de karşılaştırılması faydalı olacaktır. Çözümleme yapılırken yatağın rijit olduğu, oyulmanın bulunmadığı kabulü yapılmıştır. Oysa ki gerçekte oyulma meydana gelmektedir. Modellemelerde katı maddeyi de içine alan

nümerik bir yöntem gerçekleştirilebilir. Programın köprü kenar ayak açıklıklarında oldukça yakın sonuçlar vermesine karşın ayak civarında sonuçların deneysel verilere uzak çıkması mesh sıkılaştırması ile çözümlenebilir. Köprü kenar ayak civarında daha sıkı mesh denenmelidir.

KAYNAKLAR

- Aksöz, Y., 1967, Köprü Hidroliği. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü., Yayın No:152, Ankara.
- Aziz, S., 1996, Ard Arda Dizili Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Oyulmanın Araştırılması. Yük-sek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üni. Fen Bil.Enst, İstanbul.
- Barbhuiya, A. K., Dey, S., 2004a. Turbulent Flow Measurement by the ADV in the Vicinity of a Rectangular Cross-section Cylinder Placed at a Channel Sidewall. **Flow Measurement and Instrumentation**, 15: 221-237
- Barbhuiya, A. K., Dey, S., 2004b. Velocity and Turbulence at a Wing-Wall Abutment. **Sadhana**, 29: 35–56.
- Barbhuiya, A. K., Dey, S., 2004c. Measurement of Turbulent Flow Field at a Vertical Semicircular Cylinder Attached to the Sidewall of a Rectangular Channel. **Flow Measurement and Instrumentation**, 15: 87–96
- Breusers, H.N.C., Nicollet, G., ve Shen, H.W., 1977. Local Scour Araund Cylindrical Piers, Journal of the Hydraulics Research. **IAHR**, 15(3), 211-252
- Carstens, M.R., 1966. SimilarityLaws for Localized Scour, Journal of the Hydraulics Division. **ASCE**, 92(HY3):13-36
- Durgun, K., 1964, Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakası Denklemlerinin İnvaryant Özellikleri ve Bir Bağlama Ayağı Etrafındaki Laminer Üç Bo-yutlu Sınır Tabakasının Etüdü, Doktora Tezi, İ.T.Ü., İstanbul.
- Erdem, M., 1975, Köprü Bakım ve Onarımı. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Santa Fe, N.M. Flow Science Inc. (2007). “Flow-3D User’s Manuals”,
- Graf, W. H., Yulistiyanto, B., 1998. Experiments on flow around a cylinder: The velocity and velocity fields. **J. Hydraul. Res**, 36: 637–655
- Hirt, C. W., ve Nichols, B. D., 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. **J. Comput. Phys**, 39: 201–225
- Kocaman, S., 2007. Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik İncelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Adana.
- Lim, S.Y., 1997. EQUilibrium Clear Water Scour Araund an Abutment, Journal of Hydraulic Engineering. **ASCE**, 123(3): 237-243
- Lcox, D. C., 2000. Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, CA.
- Melville, B.W., 1997. Pier and Abutment Scour: İntegrated Approach, Journal of Hydraulic Engineering. **ASCE**, 123(2), 125-136

- Neill, C.R., 1973. Guide to Bridge Hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Kanada
- Örs, H., 1994. Akışkanlar Mekaniği. Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.
- Rajaratnam, N., Nwachukwu, B. A., 1983. Flow near groyne-like structures. **J. Hydraul. Eng. Am. Soc. mCivil Eng**, 109: 463–480
- Raudkivi, A. J., ve Ettema ,R., 1983. Clear Water Scour at Cylindrical Piers, Journal of Hydraulc Engineering. **ASCE**, 109: 338-350
- Richardson, E.V., ve Davis ,S.R., 1995. Evaluating Scour at Bridges, Rapor No: FHWA-IP90- 017, **Hydraulic Engineering Circular** No:18 (HEC-18), Üçüncü Baskı, Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, WashingtonD.C., ABD,
- Richardson, E.V., ve Davis ,S.R., 2001. Evaluating Scour at Bridge, Hydraulic Engineering Circular No: 18, Yayın No: FHWA NHI 01-001, FHWA, US. Dept. Of Transportation
- Sturm, T. W., 1999. Abutment Scour Studies for Compound channels, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, ABD,
- Süme, V., 1995, Köprü Ayakları Etrafındaki Değişimlerin Etüdü. Doktora Tezi, Karadeniz Tek. Üni. Fen.Bil.Enst., Trabzon.
- Tilson, L. J., 1940 Erosion Autour Des Pilles De Pont En Rivier. **Annales Des Travaux De Belgique**, Vol:41, No:3
- Üç, S., 1979, Akarsu Kıvrımlarındaki Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Yerel Oyulmalar, İstanbul.
- Wilcox, D. C., 2000. Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, CA.
- Yanmaz, A. M., 2002, Dynamic Reliability in Bridge Pier Scouring. **Turkish J. Eng. Env. Sci**, 26 367-375
- Yanmaz, A.M., 1989. Time- Dependent Analysis of Clear Water Scour Araund Bridge Piers, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
- Yücel, A., Namlı, R., 2007, Su ve Diğer Faktörlerin Köprü Ayakları Etrafındaki Bozulmalara Etkisinin Araştırılması Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında bana araştırma olanağı sağlayan ve her tŒrlŒ yardımlarını, gerek maddi, gerekse manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli danıőman hocam, sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa DEMİRĐİ' ye sonsuz teőekkŒr ederim.

Bu tezin hazırlanmasında değerli yardımlarını ve desteğini esirgemeyen hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN'a en içten teőekkŒrlerimi sunarım.

Tezin hazırlanması sırasında önemli yardımlarını grdŒđŒm çok kıymetli hocalarım sayın Yrd. Doç. Dr. Fatih ŒNEŐ ve sayın Hasan GŒZEL' e sonsuz teőekkŒr ederim.

Yaőamım boyunca hemen her tŒrlŒ sıkıntıda yanımda olan, maddi-manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve tezimin hazırlanması aőamasındaki desteklerinden ve sabırlarından tŒrŒ çok sevdiğim aileme sonsuz teőekkŒr ederim.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2004 yılında girdiği Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden 2008 yılında mezun oldu. Aynı yıl MKÜ inşaat mühendisliği bölümü Hidrolik Ana Bilim Dalında yüksek lisansa başladı. 2009 yılında Hakkari Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Şu an MKÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde geçici görevlendirmeyele araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.