



Farklı geometrilerdeki köprü kenar ayakları etrafındaki hız dağılımının sayısal incelenmesi

Mustafa DEMİRCİ, Selahattin KOCAMAN, Başak VARLI

Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İskenderun, Hatay

ÖZET

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. 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 bu gibi problemlerin çözümünde ve bu verilerin değerlendirilmesinde alternatif araçlar olmaktadır. Bu çalışmada, dikdörtgen, silindirik ve trapez geometriye sahip köprü kenar ayağı 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.

Anahtar

Kelimeler:

Köprü kenar ayağı,
FLOW-3D,
Hız dağılımı,
nümerik model,
Hesaplamalı
Akışkanlar Dinamiği

Numerical investigation of velocity distribution around bridge abutment with different geometries

ABSTRACT

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 are widely used to understand scour mechanism around bridge abutments and piers. In recent years, mainly based on computational fluid dynamic numerical modeling and evaluation of these data for the solution of similar problems, it has become as an alternative tool. In this study, in order to investigate velocity distribution around rectangle, cylinder and trapezoidal shaped bridge abutment, three-dimensional numerical model was generated by using the FLOW 3D computer program. Modelled results were compared with experimental results in literature.

Keywords:

Bridge abutment,
FLOW-3D,
velocity distribution,
numerical model,
Computational Fluid
Dynamics

1. Giriş

Geçmişte yapılan çalışmalar köprülerin yıkılması veya hasar görme nedenlerinin çoğunlukla hidrolik etkenlerden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Taşkınlar sırasında köprü ayakları civarında meydana gelen yerel oyulmalar yıkılmaların başlıca nedenlerinden biridir. Sel suları köprü kenar veya orta ayakları civarındaki yatak malzemelerini sürükleyerek bu bölgede oyulmalar meydana getirirler. Bunların sonucu olarak köprü ayaklarının stabilitesi azalır ve ayaklar köprüyü taşıyamaz hale gelerek yıkılırlar. Bu sorunun çözümü için akarsu rejimine en uygun ayak tipinin belirlenmesi veya akarsu rejimini mevcut ayak tipine uygun hale getirilip getirilemeyeceği çalışmalarının yapılması gerekir. Bu amaçla köprü ayağı civarında hız dağılımlarının belirlenmesi oldukça önemli olmaktadır [1, 2].

Köprü ayakları etrafında meydana gelen hız değişimlerinin ve bu değişimlerin sonuçlarının araştırılması 1960'lı yıllara dayanır. Köprü kenar ayaklarındaki oyulma miktarının hesaplanması ile ilgili birçok yöntem geliştirilmiştir [3-12]. Yanmaz [13], köprü fiziksel ömrü boyunca oluşacak riskin tahmini için köprü ayakları etrafındaki gerekli oyulma parametrelerinin belirsizliğinin hesaplanması için bir yöntem geliştirmiştir. Yücel ve Namlı [14], su ve diğer faktörlerin köprü ayakları etrafındaki bozulmalara etkisini araştırmışlardır. Köprü ayakları civarında meydana gelen bozulmalara karşı alınacak önlemler, hız ve basınç alanındaki değişimleri incelemiştir. Ayrıca köprü ayaklarındaki oyulmaya sebep olan akımın mekanizması ile birçok çalışma yapılmıştır. Rajaratnam ve Nwachukwu [15], silindirik şekilli yapılar civarındaki türbülanslı akımı deneysel olarak incelemiştir. Barbhuiya ve Dey [16], [17], [18] dikdörtgen bir kanal içerisindeki dikdörtgen, yarım silindirik ve trapez biçimli ayak çevresinde ölçümler yapmışlardır. Bu çalışmalarda, zamana bağlı olarak değişen hız, türbülans yoğunluğu, türbülans kinetik enerjisi ve gerilim değerlerini belirlemiştir. Graf ve Yulistiyanto [19], 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 kullanılmıştır Varli ve ark. [20] hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile dikdörtgen kenar ayak etrafındaki hız dağılımını incelemiştir. Azhari ve ark. [21] köprü ayakları etrafındaki yerel oyulma derinliğini incelemek için deneysel bir çalışma yapmış ve üç boyutlu bir sayısal model geliştirmişlerdir. Sayısal modelde k-ε türbülans modelini kullanmışlardır. Roulund ve ark [22] dairesel köprü ayağı etrafındaki oyulmayı ve akışı incelemek için sayısal ve deneysel çalışma yapmışlardır. Sayısal çalışmada yine k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip köprü kenar ayakları etrafındaki hız dağılımını incelemek için FLOW-3D bilgisayar programı vasıtasıyla 3 boyutlu sayısal modelleme yapılmıştır. Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçları literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel yöntem

Bu çalışmada, Barbhuiya ve Dey [16], [17] ve [18]' in laboratuvar ortamında gerçekleştirdikleri ve Şekil 1'de görülen dikdörtgen, trapez ve yarım daire en kesite sahip kenar ayaklar etrafında Akustik Doppler Hız ölçüm aleti (ADV) kullanılarak elde ettikleri hız dağılımları karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Deneyler 20 m uzunluğunda, 0.90 m genişliğinde ve 0.70 m derinliğinde dikdörtgen en kesite sahip yatay bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal içerisindeki ortalama akım hızı 0.294 m/sn ve su derinliği 0.2 m olarak alınmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılan hız büyüklükleri, yazarların çalışmalarında sundukları grafiklerin bilgisayar ortamında sayısallaştırılması suretiyle elde edilmiştir. Verilerin hassas olarak okunmasındaki güçlükler nedeniyle sadece x doğrultusundaki hız dağılımları karşılaştırma amacıyla kullanılabilmiştir.

3. Sayısal yöntem

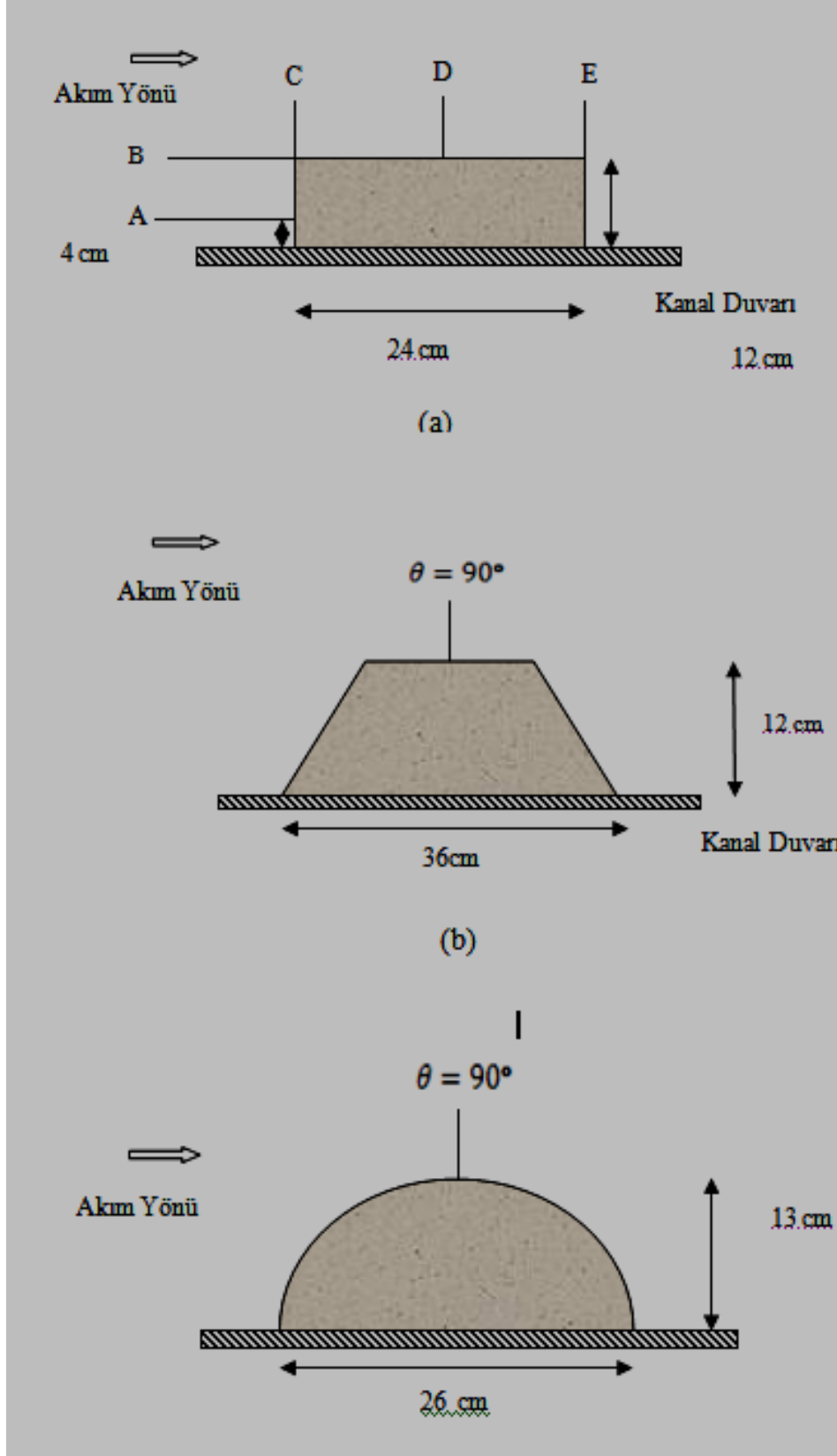
Sayısal çalışmada, FLOW-3D ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılmıştır. Özellikle, serbest yüzeyli akımların çözümünde oldukça başarılı olan bu yazılım ile süreklilik ve 3-boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözülmektedir. Sayısal hesaplamalar, dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı üzerinde yapılmakta ve problem geometrisi daha sonra bu ağ üzerinde ilgili hücrelerin engellerle kapatılmasıyla elde edilmektedir. Yazılım, serbest yüzeyli problemlerin çözümü için akışkan hacmi (VOF-Volume of Fluid) yöntemini kullanmaktadır [23]. Türbülans büyüklüklerinin hesaplanabilmesi için k-ε modeli, Prandtl karışma boyu modeli, türbülans enerji modeli, RNG (Renormalized Group) model ve LES (Large-Eddy Simulation) modeli gibi farklı türbülans yaklaşımlarını içerisinde barındırmaktadır. Yazılım içerisinde, sıkışmayan akım için eş zamanlı olarak çözülen kartezyen koordinatlarındaki 3 boyutlu süreklilik ve RANS denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

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 kütleli kuvvetleri, f_i herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir. [24].



Şekil 1. Kenar ayakların plan görünüşleri ve ölçüm alınan eksenler

a) Dikdörtgen kenar ayak b) Trapez kenar ayak c) Silindirik kenar ayak

3.2. Çözüm bölgesi, başlangıç ve sınır 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 0.294 m/s olan bir akışkan hacmi tanımlanmıştır. Membra 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.

Flow-3D programında, dikdörtgen hücrelerden oluşan bir çözüm ağı kullanılmaktadır. Ağ aralıklarının küçük olması çözüm hassasiyetini artırırken, bilgisayar ortamında çözüm süresini uzatmaktadır. Ayrıca seçilen ağ aralıkları elde edilecek sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada farklı ağ aralıkları ve ağ yapıları denenerek x, y ve z doğrultularında 1 cm hücre boyutuna sahip üniform bir çözüm ağı kullanılmasına karar verilmiştir.

Akımın kararlı hale gelmesi için çözüm süresi 30s olarak alınmış ve 900000 hücreden oluşan problemin çözümü Pentium Intel Core2Duo E7200 2.53GHz 2GB RAM özelliklere sahip bir bilgisayar yardımıyla yaklaşık 24 saat sürmüştür.

4. Bulgular ve tartışmalar

4.1. Dikdörtgen geometrili köprü kenar ayağı etrafındaki akımın modellenmesi

Barbhuiya ve Dey [16]'in dikdörtgen kesitli köprü kenar ayağı civarında deneysel olarak elde ettiği hız değerleri, öncelikle Flow-3D programı içerisinde bulunan 4 farklı türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Şekil 2, 3, 4, 5 ve 6'da dikdörtgen enkesitli kenar ayak civarında farklı noktalarda ve mesafelerde (Şekil 1a) farklı türbülans modelleri için elde edilen sayısal hız dağılımlarının deney sonuçları ile karşılaştırılmaları görülmektedir. Şekil 2 ve Şekil 3'te A ve B eksenleri kenar ayağın membasında akımın ayağa yaklaşımını gösteren hız dağılımlarını

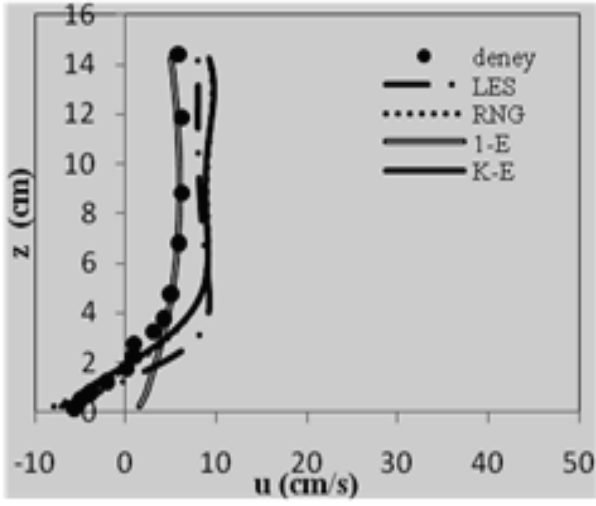
vermektedir. Bu eksenler boyunca elde edilen sayısal sonuçlarının, genel olarak deney sonuçlarından daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hız dağılımları arasında belirgin benzerlik olduğu söylenebilir. Cidara daha uzak olan B ekseninden elde edilen sonuçların A eksenine göre deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu göze çarpmaktadır.

Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da 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. Kenar ayağa yakın kısımlarda (Şekil 4.a-b, Şekil 5.a-b ve Şekil 6.a-b) çevrıntilerin etkisiyle hız dağılımında belirgin değişimlerin olduğu ve bu kısımlarda deney sonuçları ile model sonuçları arasında farklılıklar bulunduğu söylenebilir. Köprü ayağından uzaklaştıkça cidar etkisi ve çevrıntiler azalmakta ve kenar ayaktan uzak mesafelerde elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu gözlenmektedir.

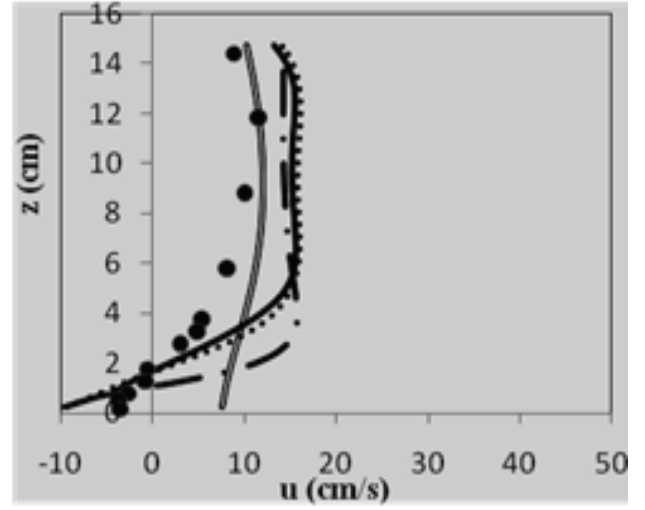
Köprü açıklığındaki sonuçlara genel olarak bakıldığında, k-e ve RNG türbülans yönteminden alınan sonuçların, diğer türbülans yöntemlerine göre deney sonuçları ile daha yakın sonuçlar verdiği ve logaritmik hız dağılımının elde edilebildiği gözlenmiştir. LES yöntemi daha iyi bir türbülans yaklaşımı olmasına karşın bu çözümlerde sonuçların özellikle cidara yakın kısımlarda diğerlerine kıyasla iyi yakınsamadığı görülmektedir. Bunun nedeni LES yönteminin küçük çalkantıları temsil edebilmesi için oldukça küçük ağ aralıklarına ihtiyaç duyması ile açıklanabilir.

4.3. Silindirik geometrili köprü kenar ayağı civarındaki akımın modellenmesi

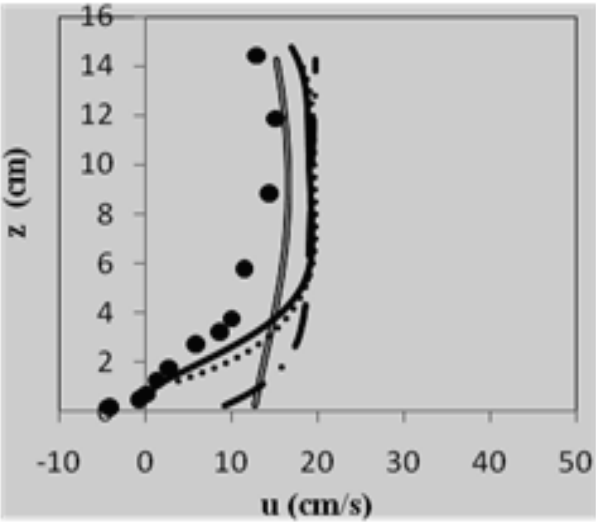
Bu kısımda daha uygun sonuçlar verdiği düşünüldüğünden türbülans yaklaşımı olarak $k-\epsilon$ yöntemi seçilmiştir. Şekil 7'de silindirik köprü kenar ayağının, 90 derecelik eksen boyunca y ekseninde belirli mesafelerde elde edilmiş düşey doğrultudaki hız dağılımlarına ait karşılaştırmalar görülmektedir. Grafiklere bakıldığında deney ve sayısal sonuçlar arasında belirgin bir benzerlik olduğu söylenebilir. Kenar ayağa yakın kısımlarda elde edilen sonuçlarda (Şekil 7a,b,c,d) kenar ayağın neden olduğu çevrıntilerden dolayı kanal tabanında farklılıklar olduğu ve akım derinliği arttıkça bu farkın azaldığı ve su yüzeyine yakın kısımlarda oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Köprü ayağından uzaklaştıkça cidar etkisi ve çevrıntiler azalmakta ve kenar ayaktan uzak mesafelerde elde edilen sayısal sonuçların deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu gözlenmektedir.



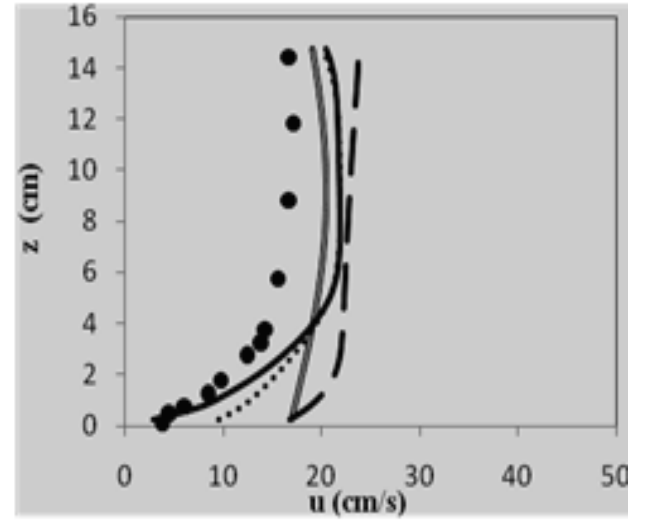
a)



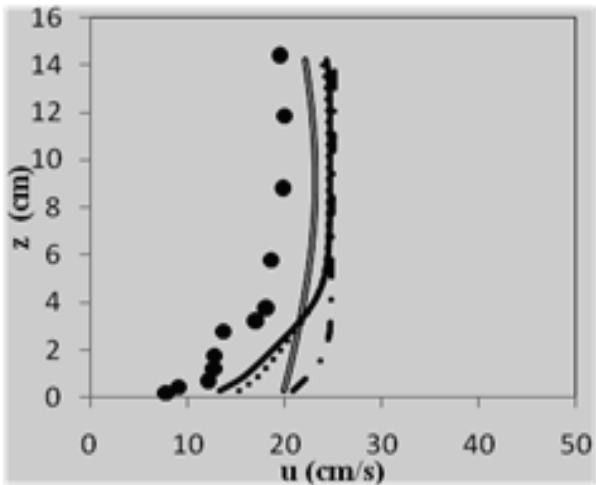
b)



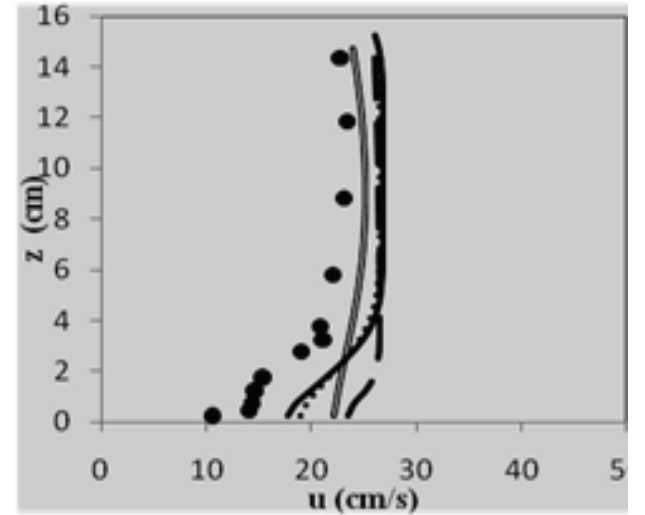
c)



d)

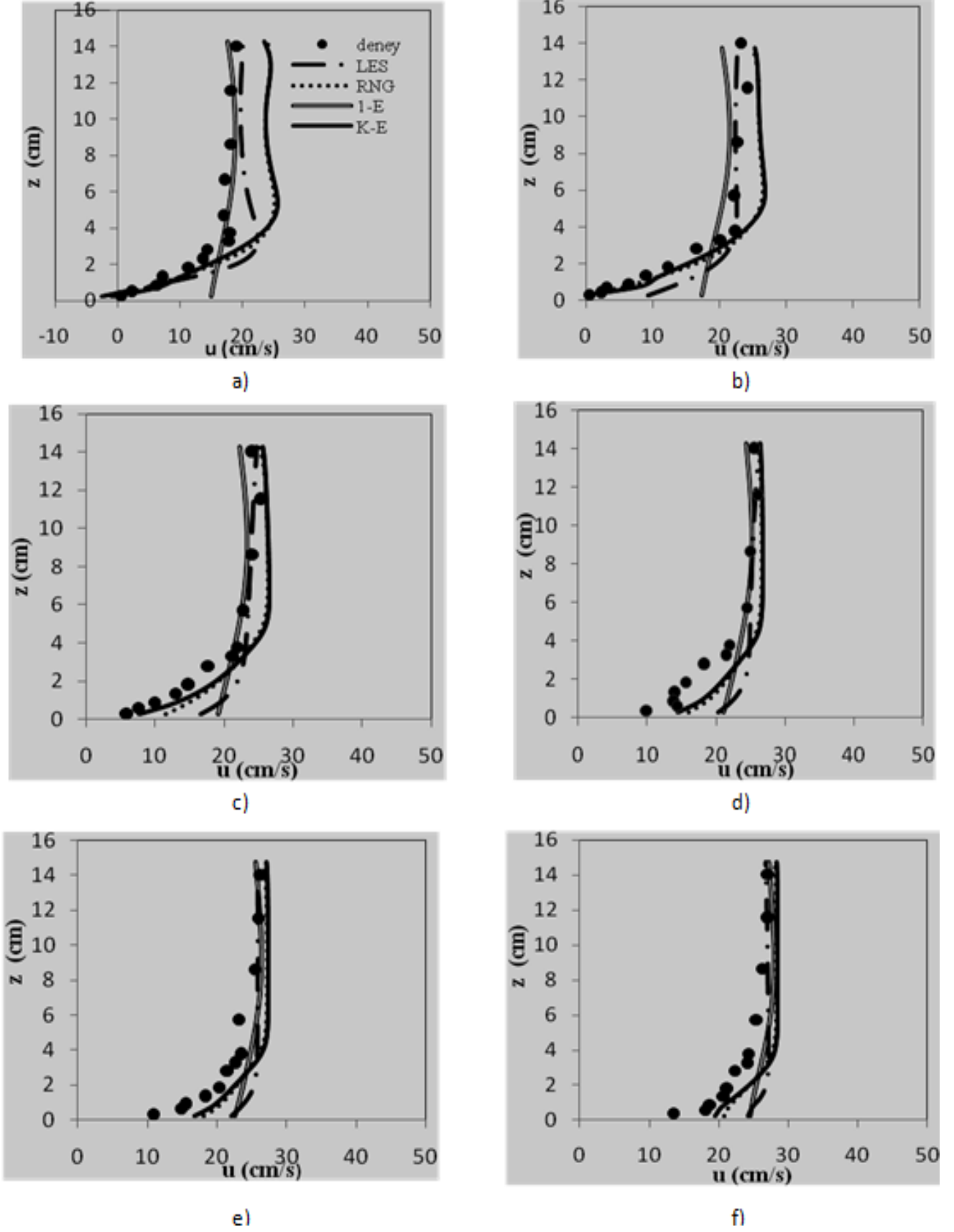


e)



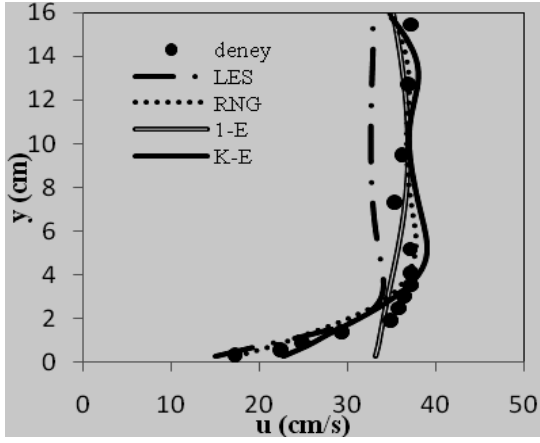
f)

Şekil 2. 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

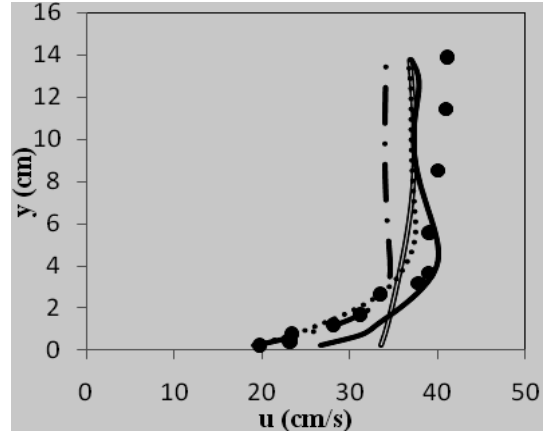


Şekil 3. Dikdörtgen kenar ayak B eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması

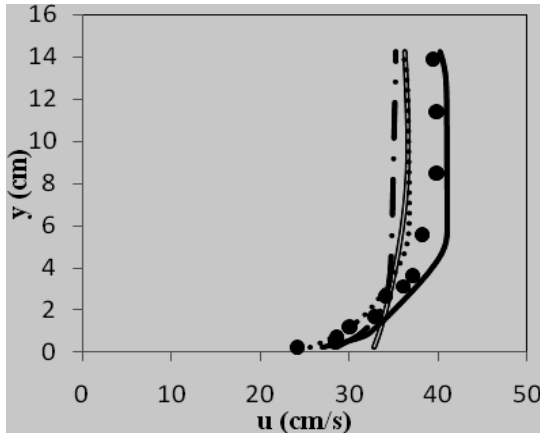
a) 14.53 cm, b) 19.04 cm, c) 24.00 cm, d) 30.04 cm, e) 36.00 cm, f) 47.02 cm



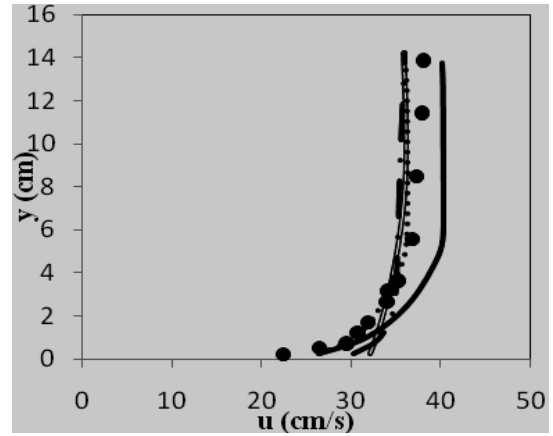
a)



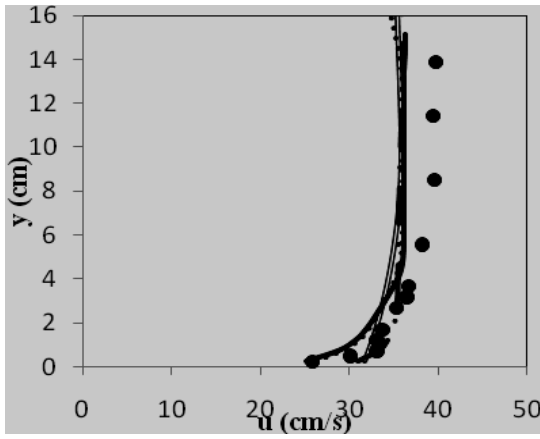
b)



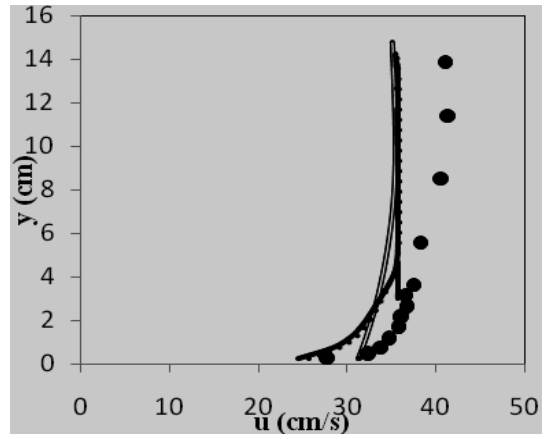
c)



d)



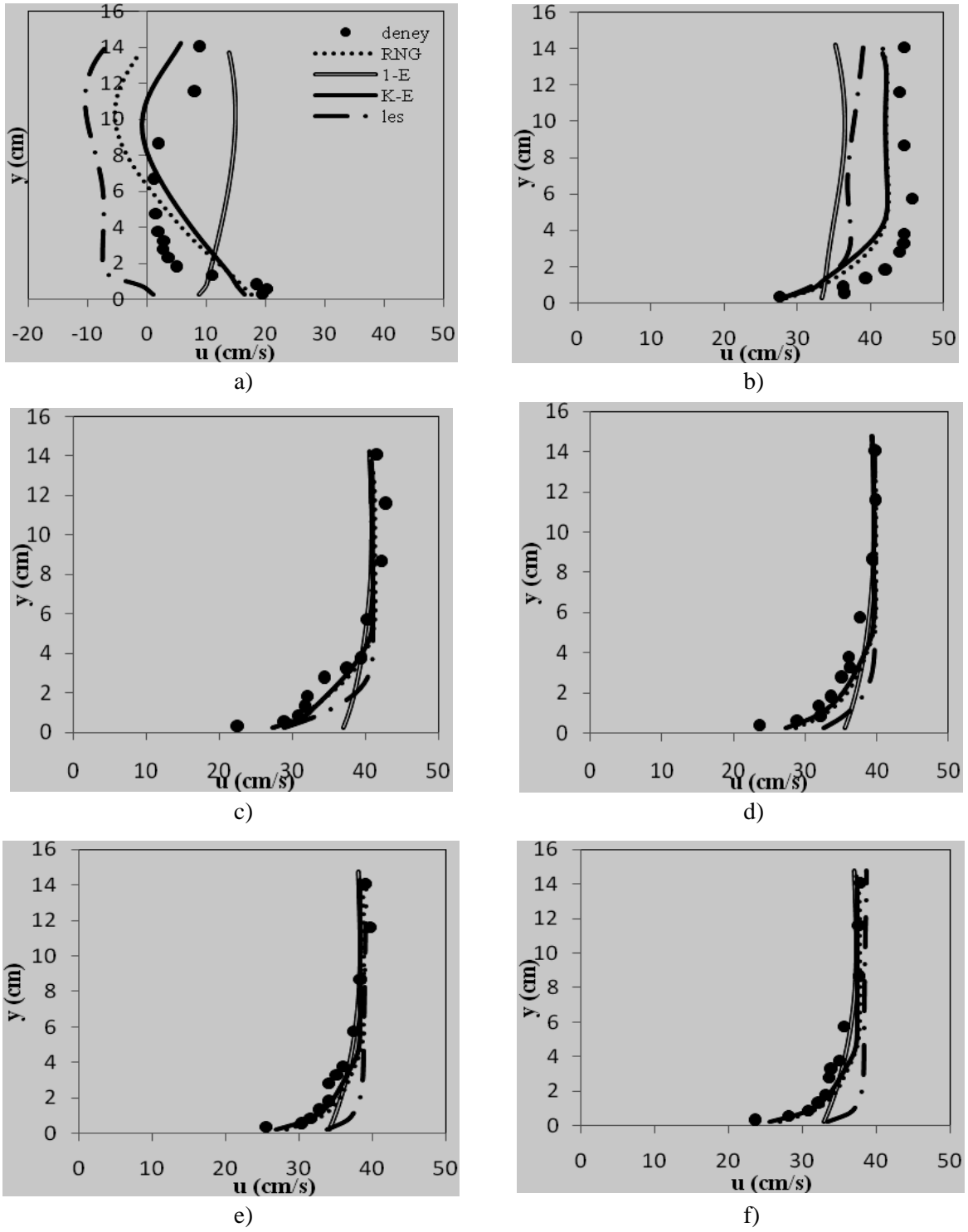
e)



f)

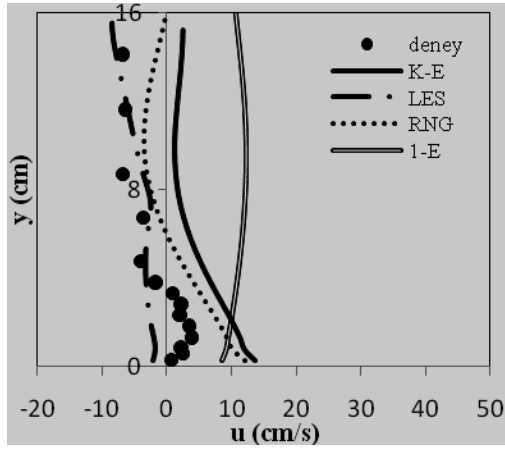
Şekil 4. Dikdörtgen kenar ayak C eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması

a) 16.39 cm, b) 20.12 cm, c) 25.06 cm, d) 30.00 cm, e) 36.18 cm, f) 46.21 cm

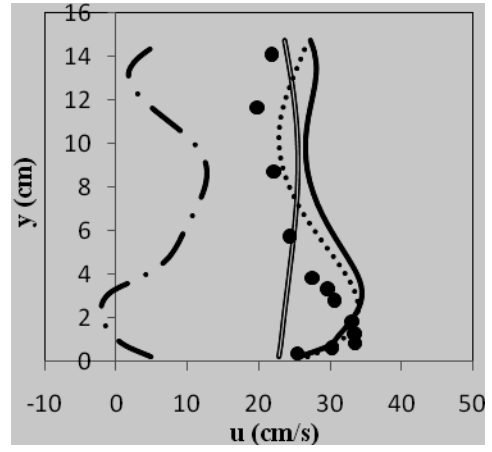


Şekil 5. Dikdörtgen kenar ayak D eksenli türbülans yöntemi karşılaştırması

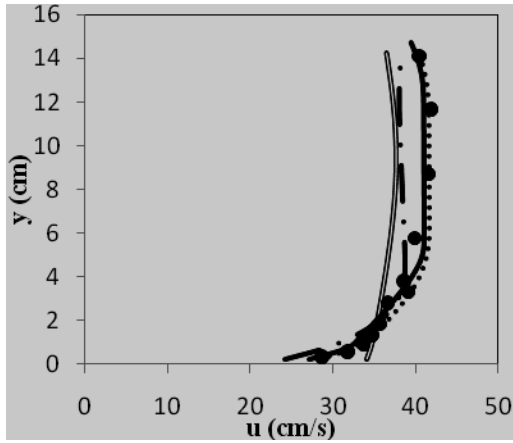
a)15.97 cm, b)20.03 cm, c) 24.99 cm, d) 29.88 cm, e) 36.00 cm, f) 45.90 cm



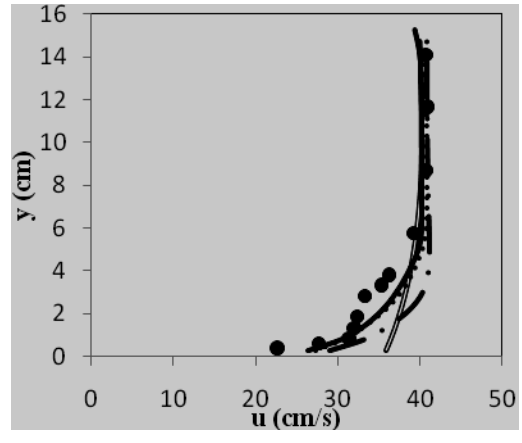
a)



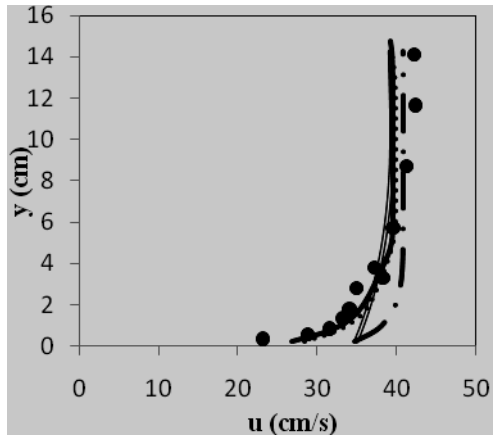
b)



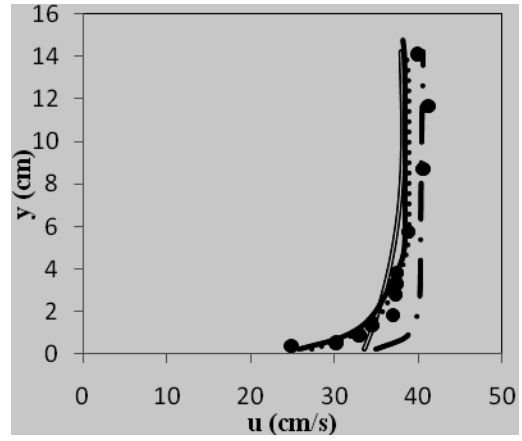
c)



d)



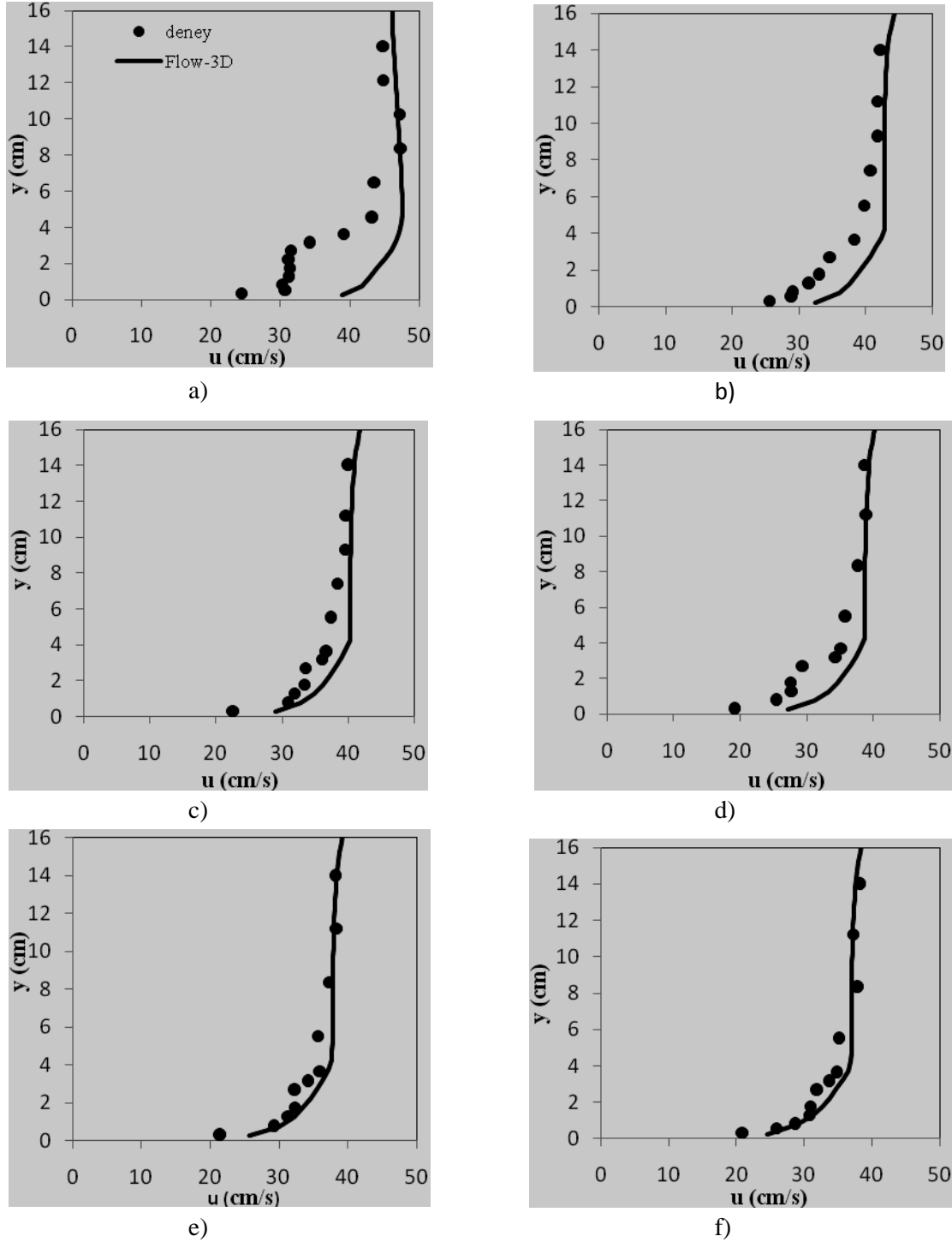
e)



f)

Şekil 6. 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



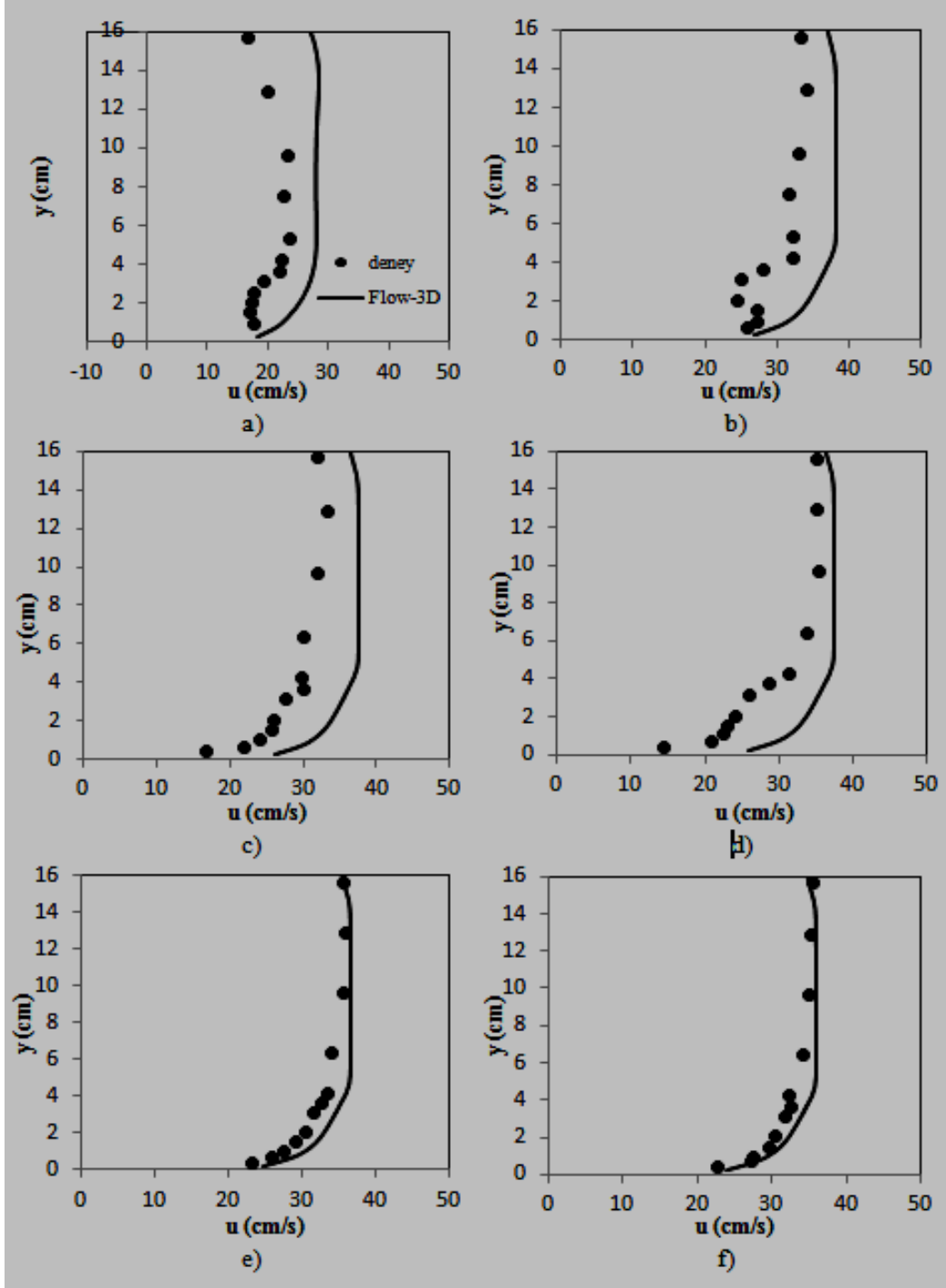
Şekil 7. Silindirik ayakta deneysel ve sayısal çalışma karşılaştırması

a) 15.07 cm, b) 20.02 cm, c) 24.97 cm, d) 29.95 cm, e) 35.88 cm, f) 42.86 cm

4.4. Trapez geometrilili köprü kenar ayağı civarındaki akımın modellenmesi

Şekil 8'de trapez köprü kenar 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. Köprü

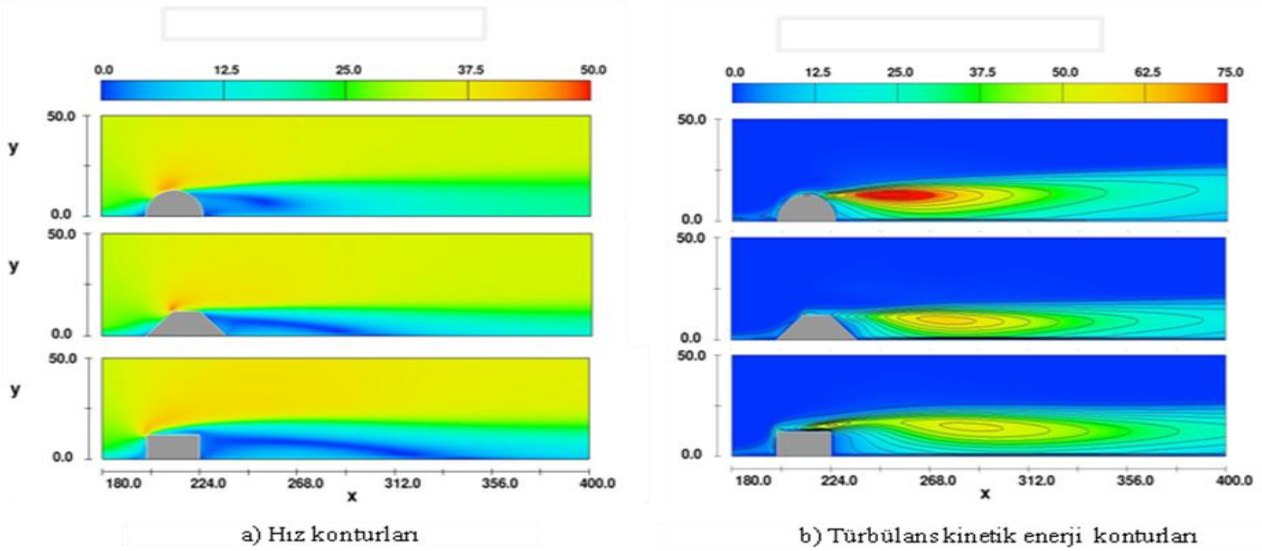
kenar ayağına yakın kısımlarda cidar etkisinden dolayı meydana gelen çevrıntiler nedeniyle sonuçlar beklenenden uzak çıkmıştır. Köprü kenar ayağından uzaklaştıkça, cidar etkisinin de azalmasıyla elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu gözlenmektedir. Cidara yakın bölgelerde ağ aralıklarını daha da sıklaştırmak suretiyle sonuçların daha da yakınsayacağı düşünülmektedir.



Şekil 8. Trapez ayakta deneysel ve nümerik çalışmaların 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 9'da farklı kenar ayak geometrileri için sırasıyla ayak mansabında oluşan hız ve türbülans kinetik enerji değişimleri görülmektedir. Gelen akımın engeli geçmesi sırasında sınır tabakası ayrılmasından dolayı mansap tarafında tersine akımlar ve çevrıntilerin bulunduğu türbülanslı bir bölge oluşmaktadır. Silindirik kenar ayakta türbülans kinetik enerjisinin daha fazla olduğu ve buna

karşın ayağın mansap kısmında tersine akımların olduğu çevrinti bölgesinin daha küçük bir alana sahip olduğu görülebilir. Dikdörtgen kenar ayakta ise bu bölge daha büyük bir alana yayılırken türbülans enerjisinin diğerlerine kıyasla daha düşük olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum yüksek türbülans enerjisine sahip durumlarda enerjinin sönmülleme oranında enerji kayıplarından dolayı yüksek olması ile açıklanabilir.



Şekil 9. Farklı geometride kenar ayak mansabında a) hız b) türbülans kinetik enerji değişimi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı geometriye sahip köprü kenar ayakları civarındaki hız dağılımları sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, hesaplamalı akışkanlar dinamiği esaslarına dayanan FLOW-3D bilgisayar programı ile problemin 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Farklı türbülans yöntemleri karşılaştırılarak Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin problemi çözebilirliği irdelenmiştir.

Yapılan sayısal çözümlerde, genel olarak akıma ait hızların oldukça iyi bir biçimde temsil edilebileceği görülmüştür. Buna karşın cidara yakın kısımlarda deney sonuçları ile farklılıklar gözlenmiştir. RNG ve k-ε yöntemleri ile yapılan çözümlerde, 1 cm kaba ağ aralığında logaritmik hız dağılımını veren ve deney verileri ile uyumlu, yeterli hassasiyette sonuçlar alınabilmektedir. Cidara yakın kısımlarda, hızda ani değişimlerin ve çevrıntilerin olduğu, yoğun türbülans hareketlerinin beklendiği bölgelerde özellikle LES türbülans yönteminde hassas bir çözüm için ağ aralıklarının sıklaştırılması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında sadece x doğrultusundaki hız dağılımları incelenmiştir. Diğer doğrultulardaki hız bileşenlerinin de uygun deneysel çalışmalarla karşılaştırılması gerekir. Çözümleme yapılırken yatağın rijit olduğu, oyulmanın bulunmadığı kabulü yapılmıştır. Oysaki gerçekte oyulma meydana gelmektedir. Modellemelerde katı maddeyi de içine alan nümerik bir yöntem gerçekleştirilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Yanmaz, A.M., Köprü Hidroliği, Odtü Yayınları, Ankara, 2002.

2. Süme, V., Köprü Ayakları Etrafındaki Değişimlerin Etüdü, Doktora Tezi, Karadeniz Tek. Üni. Fen.Bil.Enst., Trabzon, 1995
3. Carstens, M.R., Similarity Laws for Localized Scour, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 92(HY3):13-36, 1966.
4. Neill, C.R., Guide to Bridge Hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Kanada, 1973.
5. Breusers, H.N.C., Nicollet, G., ve Shen, H.W., Local Scour Araund Cylindrical Piers, Journal of the Hydraulics Research, IAHR, 15(3), 211-252, 1977.
6. Raudkivi, A. J., ve Ettema ,R., Clear Water Scour at Cylindrical Piers, Journal of Hydroulic Engineering, ASCE, 109: 338-350, 1983.
7. Yanmaz, A. M., Time- Dependent Analysis of Clear Water Scour Araund Bridge Piers, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1989.
8. Richardson, E.V., ve Davis ,S.R., Evaluating Scour at Bridge, Hydraulic Engineering Circular, No: 18, Yayın No: FHWA NHI 01-001, FHWA, US. Dept. Of Transportation, 2001.
9. Melville, B.W., Pier and Abutment Scour: İntegrated Approach, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2), 125-136, 997.
10. Lim, S.Y., Equilibrium Clear Water Scour Around an Abutment, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 123(3): 237-243, 1997.
11. Sturm, T. W., Abutment Scour Studies for Compound channels, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, ABD, 1999.
12. Richardson, E.V., ve Davis ,S.R., Evaluating Scour at Bridges, Rapor No: FHWA-IP90- 017, Hydraulic

- Engineering Circular No:18 (HEC-18), Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., ABD. 1995.
13. Yanmaz, A. M., Dynamic Reliability in Bridge Pier Scouring, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 26, 367-375, 2002.
 14. Yücel, A., Namlı, R., Su ve Diğer Faktörlerin Köprü Ayakları Etrafındaki Bozulmalara Etkisinin Araştırılması, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 2007.
 15. Rajaratnam, N., Nwachukwu, B. A., Flow Near Groyne-Like Structures, *J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civil Eng.*, 109: 463-480, 1983.
 16. Barbhuiya, A. K., Dey, S., 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, 2004.
 17. Barbhuiya, A. K., Dey, S., Velocity and Turbulence at a Wing-Wall Abutment, *Sadhana*, 29: 35-56, 2004.
 18. Barbhuiya, A. K., Dey, S., 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, 2004.
 19. Graf, W. H., Yulistiyanto, B., Experiments on Flow Around a Cylinder: The Velocity and Velocity Fields, *J. Hydraul. Res.*, 36: 637-655, 1998.
 20. Varli, B., Demirci, M., Kocaman, S., Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Köprü Kenar Ayağı Etrafındaki Hız Dağılımlarının İncelenmesi, *E-Journal of New World Sciences Academy*, Volume: 6, Number: 2, Article Number: 1A0176, 542-555, 2011.
 21. Azhari, A., Saghravani S. F., Mohammadnezhad, B. A., "3D Numerical Modelling of Local Scour Around the Cylindrical Bridge Piers", XVIII International Conference on Water Resources, J. Carrera (Ed) CIMNE, Barcelona 2010.
 22. Roulund, A., Sumer, M., Fredsoe, J., Michelsen, J., Numerical and Experimental Investigation of Flow and Scour Around a Circular Pile, *J. Fluid Mech.*, 534: 351-401, 2005.
 23. Hirt, C. W., ve Nichols, B. D., Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39: 201-225, 1981.
 24. Flow Science Inc, Flow-3D User's Manuals, Santa Fe, N.M. 2007.