T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EĞİMLİ KRİTİK ALTI AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLEMESİ

Alaattin SEVEN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2020

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EĞİMLİ KRİTİKALTI AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLEMESİ

Alaattin SEVEN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER DİZİNİ vi
1.GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4
3. MATERYAL ve YÖNTEM 9
3.1. Deney Özellikleri 9
3.2. Yöntem 11
3.2.1. Temel denklemler ve türbülans modelleri 11
3.3.2. Ağ yakınsama indeksi (GCI) 12
3.2.3. Akışkan hacimler yöntemi (Volume of Fluids-VOF) 13
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 14
4.1. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları 14
4.2. Ağ Yapısının Belirlenmesi 14
4.3. Sayısal Modelleme 18
4.3.1. Deneysel ve sayısal hız profilleri 26
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 49
KAYNAKLAR 52
ÖZGEÇMİŞ 54

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Eğimli Kritikaltı Açık Kanal Akımının Sayısal Modellemesi

Alaattin SEVEN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ
Yıl: 2020, Sayfa: 54

Bu tez çalışması kapsamında, kritik altı akım koşullarına sahip farklı akım durumlarında açık kanal akımının sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal modellemelerde akımın hareketini idare eden temel denklemler sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS Fluent paket programı yardımıyla iki boyutlu çözülmüş ve su yüzü profilinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemede, türbülansın çözümünde RNG, SST, RSM ve DES modelleri kullanılmıştır. Sayısal modelleme sonuçları üzerinde ağ yapısının etkisinin olup olmadığının belirlenmesi için Ağ Yakınsama İndeksi yöntemi kullanılmıştır. Farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak, 7 farklı akım durumunda elde edilen sayısal hız profilleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda RNG sadece Durum 5'te, SST Durum 1, Durum 6 ve Durum 7'de, RSM Durum 3'te ve DES ise Durum 2 ve Durum 4'te deneysel verilere en yakın tahminde bulunmuştur. Çalışma sonucunda, hafif eğimli kritik altı açık kanal akımının sayısal çözümünde SST modelinin başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Kritik altı açık kanal akımı, sayısal model, akışkan hacimleri yöntemi, hız profili, ağ yakınsama indeksi, hesaplama ağı

ABSTRACT

MSc Thesis

Numerical Modeling of Subcritical Flow in Sloping Open Channel

Alaattin SEVEN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Veysel GÜMÜŞ
Year: 2020, Page: 54

In this thesis, numerical modeling of subcritical open channel flow with different conditions has been done. In numerical models, the governing equations are solved in two dimensions with the ANSYS Fluent software, which is based on the finite volume method, and Volumes of Fluid Method is used to determine the free surface profile. RNG, SST, RSM and DES models are used to modeling turbulence. Grid Convergence Index method is used to determine the sensitivity of grid structure on the numerical modeling results. The numerical velocity profiles obtained in 7 cases with different turbulence closure models are compared with the experimental results. According to comparison velocity profiles, the best turbulence closure models are determined RNG for Case 5, SST for Case 1, Case 6 and Case 7, RSM for Case 3, and DES for Case 2 and Case 4. As a result of the study, it is determined that the SST model can be used successfully in the numerical solution of subcritical flow in sloping open channel.

KEYWORDS: Subcritical open channel numerical model, volume of fluid, velocity profile, grid convergence index, calculation grid,

TEŞEKKÜR

Akademik hayatımın başlamasına vesile olan, çabaları ve gayretleri akademik hayatımda bana rehber olan, bilimsel çalışmalarımda bana yol gösteren ve bu tez kapsamında bana yardımcı olan engin tecrübe ve bilgisini benden esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ'e bu vesile ile teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca bu tez çalışmaları boyunca desteklerini esirgemeyen sayısal analiz uzmanı Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ŞİMŞEK'e ve bu tezin yazılma sürecinde desteklerini esirgemeyen hidrolik laboratuvar ekibine teşekkür ediyorum.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Deney düzeneğinin farklı açılardan görünümü 9
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü 10
Şekil 4.1. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları 14
Şekil 4.2. Hesaplama ağı 15
Şekil 4.3. Durum 1 için deneysel ve sayısal hız profilleri 27
Şekil 4.4. Durum 2 için deneysel ve sayısal hız profilleri 30
Şekil 4.5. Durum 3 için deneysel ve sayısal hız profilleri 34
Şekil 4.6 Durum 4 için deneysel ve sayısal hız profilleri 37
Şekil 4.7 Durum 5 için deneysel ve sayısal hız profilleri 40
Şekil 4.8 Durum 6 için deneysel ve sayısal hız profilleri 43
Şekil 4.9 Durum 7 için deneysel ve sayısal hız profilleri 46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Deneylerin akım özellikleri 11
Çizelge 4.1 Farklı alt bölgelerde bulunan ağ elemanı sayıları 15
Çizelge 4.2. Durum 1 için x=290 cm'deki GCI sonuçları 16
Çizelge 4.3. Durum 1 için x=390 cm'deki GCI sonuçları 16
Çizelge 4.4. Durum 6 için x=290 cm'deki GCI sonuçları 17
Çizelge 4.5. Durum 6 için x=390 cm'deki GCI sonuçları 17
Çizelge 4.6. Durum 1 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 19
Çizelge 4.7. Durum 2 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 20
Çizelge 4.8. Durum 3 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 21
Çizelge 4.9. Durum 4 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 22
Çizelge 4.10. Durum 5 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 23
Çizelge 4.11. Durum 6 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 24
Çizelge 4.12. Durum 7 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri 25

SİMGELER DİZİNİ

δ_{ij}	Kronecker delta
DES	Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation)
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
GCI	Grid Convergence Index
h	su yüksekliği
HAD	Hesaplamalı Akışkan Dinamiği
LDA	Lazer Doppler Anemometresi
μ	akışkanın dinamik viskozitesi
N	Hız profilindeki nokta sayısını
υ	Kinematik viskozite
OKH	Ortalama Karesel Hata
OMGH	Ortalama Mutlak Göreceli Hata
P	ortalama basıncı
Q	Debi
R	Hidrolik yarıçap
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
Re	Reynolds sayısı
ρ	akışkanın yoğunluğu
ρgi	Yerçekiminin sebep olduğu kütlesel kuvveti
RNG	Renormatization Group k- ε türbülans modeli
RSM	Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model) türbülans modeli
SST	Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport) türbülans modeli
T	Zaman
τ_{ij}	türbülans (Reynolds) gerilmeleri
u	x yönündeki akım hızı
$\overline{u_i}$	ortalama hız bileşenlerini
V	Ortalama hız
VOF	Akışkan hacimleri yöntemi

1.GİRİŞ

Akımın ıslak kesitinin tamamen katı sınır ile çevrelenmediği, serbest yüzeyli ve atmosfer basıncına maruz kalan akımlar, açık kanal akımları olarak adlandırılır. Serbest yüzeye sahip bu akımlar, doğal akarsu ve deniz akımları ile yapay açık kanallar, sulama kanaletleri ve kısmi dolu akan kanalizasyon sistemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Akım karakteristiklerine göre sınıflandırılan açık kanal akımları, zamana bağlı değişim sergilemesi durumunda değişken, zamana göre değişim sergilememesi durumunda ise düzenli akım olarak adlandırılır. Bunun yanında, akımın özelliklerinde (akım derinliği ve hızı) kesitten kesite değişim meydana gelmiyorsa yani yerden bağımsız olması durumunda üniform, kesitler arasında akım özellikleri değişiyorsa üniform olmayan akım olarak sınıflandırılır.

Ağırlık ve sürtünme kuvvetleri etkisi altında hareket eden açık kanal akımlarının karakteristiklerinin belirlenmesi için farklı parametreler kullanılır. Bunlardan en önemli olanlarında biri olan Reynolds sayısı ($\mathrm{Re} = 4\rho VR/\mu$,; ρ ,akışkan yoğunluğunu, V, akışkan hızını, R, hidrolik yarıçapı ve μ ise akışkanın dinamik viskozitesini), akımın türbülanslı, laminer ya da geçiş akımı olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır ve boyutsuzdur. Buna göre, viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine baskın olması durumunda Reynolds sayısı küçülmekte ve akım türü laminer akım özelliklerini taşımaktadır (Re<2000). Ancak, akımda atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlere bir baskınlığı olur ise, bu durumda akım türbülanslı akış özelliği taşımaktadır (Re>4000). Her iki akış türünün özelliklerinin meydana gelmesi durumunda ise akış geçiş akımı olarak değerlendirilir (2000<Re<4000). Reynolds sayısının yanı sıra, açık kanal akımlarını sınıflandırmak için kullanılan bir diğer önemli büyüklük ise Froude sayısıdır ($Fr = V/\sqrt{gh}$; V, akım ortalama hızı, g, yerçekimi ivmesi, h su yüksekliğini). Froude sayısı, atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranı olup, boyutsuz bir parametredir. Froude sayısına göre akım sel rejimi ya da nehir rejimi olarak sınıflandırılabilir. Fr sayısının 1'den küçük olması durumunda akım kritik altı yani nehir rejimi, 1'den büyük olması durumunda ise kritik üstü yani sel rejimi olarak

adlandırılır. Fr sayısının 1'e eşit olması durumunda ise akım kritik akım olarak ifade edilir. Akımın büyük derinlikli, küçük hızlı ve düşük eğimli olması durumunda sıklıkla karşılaşılan nehir rejiminde ağırlık kuvvetleri atalet kuvvetlerinden üstün olmaktadır. Tam aksi durum olarak yani atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerinden büyük olması durumunda meydana gelen sel rejiminde ise akım hızı yüksek, su derinliği ise düşük olmakta ve genellikle dolusavakların şüt kanallarında ve vahşi derelerde meydana gelmektedir. Kritik akım ise nehir rejiminde sel rejimine ya da sel rejiminden nehir rejimine geçişte meydana gelmekte ve akım enerjisinin en düşük olduğu kesittir.

Açık kanal akımlarının davranışları ve akım karakteristiklerinin belirlenmesi, su ile etkileşimde olan yapıların analiz ve tasarımında oldukça önemlidir. Bu karakteristiklerin incelenmesi için çoğunlukla diferansiyel ve integral yöntemler, boyut analizleri ve deneysel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak, özellikle diferansiyel ve integral yöntemler, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin çözümünü gerektirmekte olup, çözümün yapılabilmesi için bazı kabullerin yapılması zorunludur. Yapılan bu kabullerin, çözümü gerçekleştirmede yetersiz kalması durumunda ise sayısal çözüm için farklı analiz yöntemleri kullanılır. Özellikle türbülansın tanımlanabilmesi için son yıllarda sıklıkla başvurulan yöntemlerden biri Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) yöntemleridir. Bu yöntemlerle ise çözümü oldukça zor ve zahmetli olan temel denklemler, farklı türbülans modelleri kullanılarak çözülebilmektedir.

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli, yumuşak eğimli ve kritik altı açık kanal akımı için Ardıçlıoğlu (1994) tarafından Lazer Doppler Anemometresi (LDA) kullanılarak, 7 farklı deney durumu için ölçülen akım alanları deneylerle aynı şartlarda farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak sonlu hacimler yöntemine dayalı bir HAD yazılımı ile sayısal olarak modellenmiştir. Serbest su yüzünün belirlenebilmesi için Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF), türbülansın tanımlanabilmesi için Re-normalization Group k-ε (RNG), Kayma gerilmesi taşınımı k-ω (Shear Stress Transport-SST), Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM) ve Detached Eddy Simulation (DES) türbülans kapatma modelleri, ağ yapısının sayısal çözümler üzerindeki etkisini incelemek ve yapılan sayısal çözümlerin ağ yapısından bağımsız

hale geldiğini belirleyebilmek için ise Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, deneysel sonuçlara göre kritik altı açık kanal akımını sayısal olarak modellemede kullanılan modeller arasından en başarılı olan türbülans modeli belirlenmiştir. Farklı akım karakteristiklerinin farklı akım durumlarındaki değişimleri incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hromadka ve Rao (2019) çalışmalarında hidrolik sıçrama içeren bir açık kanal akımını HECRAS ve WSPG programlarıyla elde ettikleri sonuçları, üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile doğrulamışlardır. Ele alınan akım durumunda, Froude sayısı 6.125 ve Reynolds sayısı ise 3.54×10^5 olan bir sıçrama kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, hidrolik modeller (HECRAS ve WSPG) sabit durumdaki sıçramanın yerini tatmin edici bir şekilde tahmin edebilmesine rağmen, HAD yöntemleri ile hidrolik sıçramanın uzunluğu dahil diğer akım karakteristikleri bu modellere kıyasla daha iyi bir şekilde modellenebilmiştir.

Bal (2019), bu çalışmasında trapez kesitli yapı ile içerisinden geçen akım laboratuvar ortamında ve Paket program yardımıyla incelemiştir. Elde ettiği deneysel sonuçları, hız alanını akustik doppler hız ölçer (ADV) ve su yüzü profilini ise limnimetre ile almıştır. Sayısal sonuçları ise Ansys Fluent paket programıyla, Standart k- ε (SKE), Renormalization Group k- ε (RNG), Realizeble k- ε (RKE), Standart k-ω (SKW), Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport-SST), Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM) türbülans modelleri ve (Detached-Eddy Simulation-DES), (Large Eddy Simulation-LES) modelleri kullanılarak elde etmiştir. Bu modellerden başarı sıralamasını Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametrelerini kullanarak elde etmiştir. Hesaplama ağı seçiminde Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemini kullanmıştır. Su yüzü profilinin belirlenmesi için ise Volume of Fluids (VOF) metodunu kullanmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan türbülans modellerinde en başarılı sonucu DES türbülans modeli vermiştir.

Nalk ve ark. (2018), çalışmalarında birleşik en kesitli kanalların su yüzü profillerini ve kesit ortalama hızlarını belirlemek için sayısal modelleme yapmışlardır. Üç boyutlu olarak yapılan analizlerde ANSYS Fluent yazılımını ve türbülansın modellemesinde Standart k-ω modelini kullanmışlardır. Sayısal olarak elde edilen akım özellikleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, yapılan

sayısal modelleme ile açık kanal akımlarında meydana gelen karmaşık olayları doğru bir şekilde tahmin edebildiği sonucuna varmışlardır.

Tajnesale ve ark. (2018), çalışmalarında trapez kesitli kanalda sekonder akımların sayısal olarak belirlenebilmesi için Standart k-ε (SKE), SST ve RSM modellerini kullanmışlardır. RSM modelinde LRR-IP, LRR-QI ve SSG (Launder, Reece and Rodi – Isotropization of Production, Quasi-Isotropic, ve Speziale, Sarkar, Gatski) olarak tanımlanan üç farklı yapı kullanmışlardır. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel bulgular ile karşılaştırılmış ve su yüzü, akım ortalama hızı ve katı sınır kayma gerilmesini belirlemede, RSM modelinin SSG yapısıyla kullanılan diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Soydan ve ark. (2018), dairesel köprü ayağı çevresindeki türbülanslı akımı LDA ile ölçmüşler ve hız profillerini ve su yüzü profillerini deneysel olarak elde etmişlerdir. SKE, RNG ve RKE türbülans kapatma modelleri kullanılarak sayısal modelleme yapılmışlar ve VOF yöntemi kullanılarak da su yüzü profilini elde etmişlerdir. Seçilen ağ yapısının sonuçlara etkisinin olup olmadığını tespit edebilmek için Ağ yakınsama indeksi (GCI) yöntemi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve ele alınan akım yapı etkileşimi probleminin olduğu dairesel köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal modellemesi için RKE türbülans modelinin en başarılı sonucu verdiği bildirilmiştir.

İlkentapar ve Öner (2017), bu çalışmada deneysel olarak Dikdörtgen kesitli savakta 3 farklı debide memba ve mansaptaki su yüzü profilleri ile hızları incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen verilere istinaden sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal modellemede temel denklemler FLOW-3D paket programıyla, türbülans viskozitesi Standart k-ε ile su yüzü profilleri ise akışkanlar hacmi yöntemiyle hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal veriler karşılaştırıldığında Standart k-ε türbülans kapatma modelinin başarılı olduğu görülmüştür.

Aköz ve ark. (2015), bu çalışmada dolu savak mansabında bulunan enerji kırıcı yapılar ile etkileşimdeki akımın hızlarını ölçmüşlerdir. Bu akımın sayısal

modellemesi, RSM türbülans modeli kullanılmış ve su yüzü profili VOF yöntemi kullanılarak ANSYS-Fluent programıyla yapmışlardır. Buradan elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve RSM modelinin bu akım için hız alanı, su yüzü profili ve enerji kaybının belirlenmesinde başarılı olmuştur.

Gümüş ve Şimşek (2015) Bu çalışmada eğimli açık kanal akımının deneysel ve sayısal modellemesini gerçekleştirmişlerdir. LDA ile ölçülen deneyler ile sayısal sonuçlar karşılaştırmışlardır. Sayısal sonuçlar Ansys ile modellemişlerdir. Sayısal modelleme için SKE, RKE, RNG, MKE ve SST türbülans modellerini kullanmışlardır. Serbest su yüzü profilini akışkan hacimleri yöntemi ile hesaplamışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda, su yüzü ve hız alan profiline göre en iyi sayısal model RKE türbülans modeli olmuştur.

Gümüş ve Kırkgöz (2014) çalışmalarında laboratuvar ortamında su yüzü profili ve hız profillerini deneysel olarak ölçmüştür. Deneysel model ile aynı özelliklere sahip akım sayısal olarak modellenmiş, su yüzü profillerinin belirlenmesinde VOF yöntemi, hız profillerinin belirlenmesinde ise SKE, RNG ve Realizable k-ε (RKE) türbülans kapatma modelleri kullanılmıştır. Renormalization-group k-ε ve Realizable k-ε türbülans modellerinin, deneysel model sonuçlarına benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

İspir ve ark (2014), bu çalışmada açık kanal olarak tasarlanan yavaş değişen kritik altı akımın hız profilleri LDA ile ölmüşlerdir. Sayısal sonuçlar için SKE RNG ve RKE türbülans modelleri kullanılarak bilgisayar programları yardımıyla bulmuşlardır. Sayısal model ile deneysel model karşılaştırılmış RKE modeli başarılı olduğu görmüşlerdir.

Soydan ve ark. (2012), trapez kesitli geniş başlıklı savağın üzerinden geçen açık kanal akımının su yüzü profili deneysel elde etmişlerdir. Aynı akım durumu için ANSYS paket programıyla SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmasında

ortalama karesel hata değerleri kullanılmış ve bu kritere göre SKE türbülans modeli kullanılan modellere kıyasla daha başarılı olduğu belirtilmiştir.

Bal ve ark. (2011) çalışmalarında geniş başlıklı savak tasarlamışlardır. Bu yapı ile etkileşime giren kritik altı akım LDA ile ölmüşlerdir. Sonlu hacimler yöntemiyle ANSYS-Fluent programıyla SKE RNG, RKE, MKE, SST ve RSM türbülans modelleri kullanılarak akım hızlarının sayısal modeli çıkartılmıştır. Elde edilen su yüzü ve hız profilleri için sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve en iyi sonucu SST türbülans modeli verdiğini görmüşlerdir.

Şimşek ve ark (2011), Bu çalışmada eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın deneysel ve sayısal sonuçlarının hız profillerinin karşılaştırmışlardır. Deneysel olarak ölçülen ve bu sınır şartlarına bağlı olarak, RNG ve RKE türbülans modellerini kullanarak Ansys paket programıyla sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Serbest su yüzü profilini Akışkan hacimleri yöntemiyle yapmışlardır. Sayısal sonuçların doğruluğu kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Karşılaştırma sonucu hız alan grafiği ve su yüzü hesaplarına göre RNG türbülans modeli diğer modellere göre daha başarılı olmuştur.

Yağcı ve Kabdaşlı (2011), bu çalışmada akarsularda yatak boyunca mevcut olan bitkilerin akım hız profili ve türbülans üzerine etkileri araştırılmıştır. Optimum sonuç alabilmek amacıyla değişik çap, hacim ve yükseklikte bitkiler kullanılmıştır. Akım hızları akustik Doppler ile ölçülmüştür. Bitki tabakasının akım hız profilini önemli ölçüde düşürdüğü ve türbülans ile enerji kırdıkları görmüşlerdir.

Özdem, M. (2007), Bu çalışmasında dolu savaklar üzerinde oluşan akım özelliklerinin sayısal analizini yapmıştır. Baraj ve bağlamalardaki suyun membadan mansaba aktarılmasını sağlayan dolu savak yapılarının ilk çözülmesi gereken problemi, yapılacağı yerdeki konumudur. Günümüzde bilgisayarın gelişmesiyle bu problem CFD yazılımlarının kullanılmasıyla çözüm aranmaktadır. Bu çalışmalar yeni baraj modelleri ve var olan barajlarda iyileştirmeler yapmaya olanak verir. Bu bize zaman kazandırır ve hataları minimize eder. Bu çalışmada dolu savakların farklı geometrileri üzerinde olmuştur. Ogee profilli dolusavaklar, basamaklı dolusavaklar,

yandan alışlı savaklar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında bu savak modelleri içerisinde en uygun model elde edilmeye çalışılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

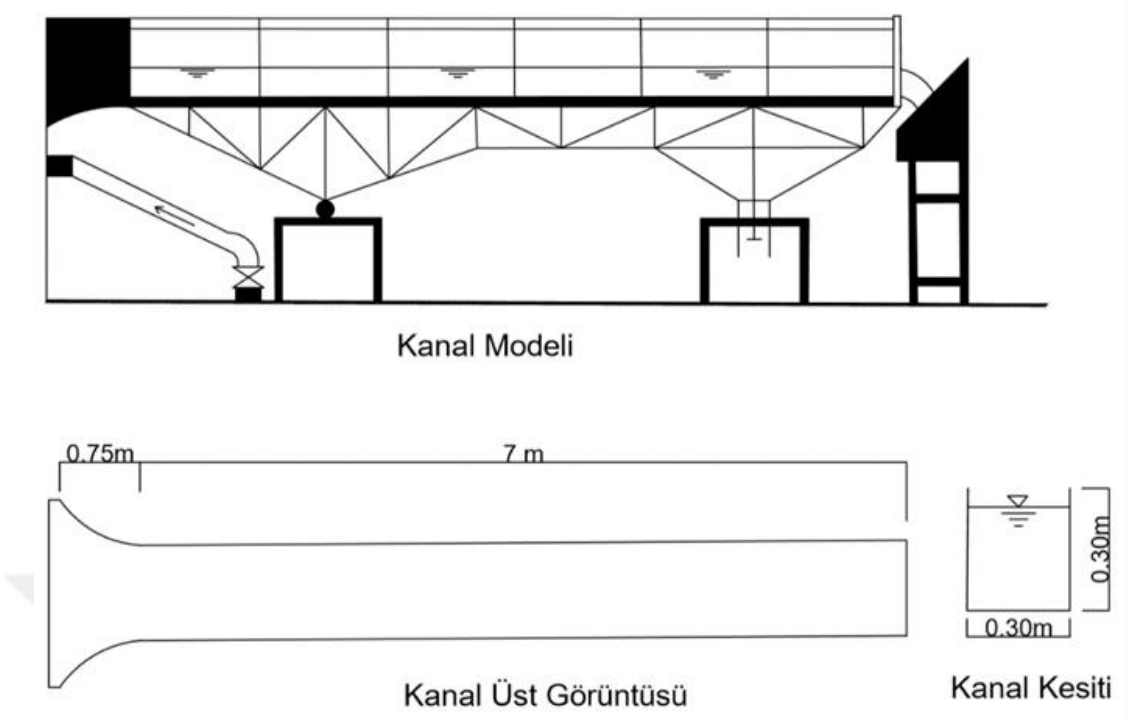
3.1. Deney Özellikleri

Deneyler, Ardıçlıoğlu (1994) tarafından İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında Şekil 3.1'de görülen açık kanal modeli üzerinde yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı kanalın yan duvarları ve tabanı camdan imal edilmiştir. Dikdörtgen kesitli açık kanal modelinin boyutları 30x30x700 cm'dir. Suyun sirkülasyonu santrifüj pompa ile yapılmaktadır.

Şekil 3.2'de deney düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir. Burada, sayısal hesaplama bölgesinde kullanılan x, y eksen takımına göre değerlendirilmiştir. Kanal üzerinde iki farklı eğimde ve toplam 7 farklı akım koşulunda, x=0.60, 1.40, 1.90, 2.40, 2.90, 3.40, 3.90, 4.40, 4.90 ve 5.40 m kesitlerinde Lazer Dopler Anemometresi (LDA) ile hız ölçümleri yapılmıştır. Akım derinliği boyunca yatay hız bileşeninin değişimi elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin farklı açılardan görünümü



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Deneysel olarak ölçülmüş akım özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelgedeki eğim değeri kanalın memba yüzünün eğim yüzdesini, Fr sayısı ise kanal girişinde ölçülen Froude sayısını temsil etmektedir. Froude sayısı Denklem 3.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{3.1}$$

Burada, V kesit ortalama hızı, g yerçekimi ivmesi, h su derinliğini temsil etmektedir.

Çizelge 3.1 de bulunan h_1 mm cinsinden su derinliğini, b/h kesit oranını ve Fr ise Froude sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 3.1. Deneylerin akım özellikleri

Durum	Eğim	Debi (l/s)	h_1 (mm)	b/h	Fr
1	0.0005	19.5	200	1.50	0.232
2	0.0020	19.5	100	3.00	0.656
3	0.0005	14.5	150	2.00	0.266
4	0.0005	10.0	120	2.50	0.256
5	0.0005	6.0	75	4.00	0.311
6	0.0005	3.2	50	6.00	0.300
7	0.0005	3.2	40	7.50	0.419

3.2. Yöntem

3.2.1. Temel denklemler ve türbülans modelleri

Kritik altı açık kanal akımı türbülanslı bir akım olup, akımın çözülebilmesi amacıyla kullanılacak temel denklemler süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleridir. Bu denklemler Denklem 3.2 ve Denklem 3.3'te verilmiştir.

$$\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_i}} = 0 \tag{3.2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial \mathrm{t}} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial \mathrm{x_j}}\right) = \rho \mathrm{g_i} - \frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x_i}} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial \mathrm{x_j^2}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}(\tau_{\mathrm{ij}}) \tag{3.3}$$

Süreklilik ve RANS denklemlerinde bulunan u_i ortalama hız bileşenlerini, p ortalama basıncı, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ρ akışkanın yoğunluğunu, ρg_i yerçekiminin sebep olduğu kütlesel kuvveti, t zamanı, τ_{ij} ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir. Türbülans yani Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre Denklem 3.4'teki gibi ifade edilir:

$$\tau_{\mathrm{ij}} = -\rho\overline{\mathrm{u_i'u_j'}} = \mu_{\mathrm{t}}\left(\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \mathrm{u_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right) - \frac{2}{3}\delta_{\mathrm{ij}}\rho \mathrm{k} \tag{3.4}$$

Burada, u_i' ve u_j' türbülans hız sapınçları ve μ_t türbülans viskozitesi olup δ_{ij} Kronecker deltadır (i=j için δ_{ij}=1). Türbülans viskozitesinin sayısal olarak

hesaplanabilmesi için literatürde sıklıkla kullanılan RNG (Yakhot ve Orszag, 1986; Yakhot ve ark., 1992), SST (Menter, 1994), RSM (Launder ve ark., 1975) DES (Aköz ve ark. 2019) türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu modeller ile ilgili detaylar Gümüş, (2014) ve Bal (2019)'de verilmiştir.

3.3.2. Ağ yakınsama indeksi (GCI)

Sayısal ayrıklaşma duyarlılığının belirlenmesi amacıyla kullanılan GCI yöntemi (Roache, 1994), aynı problemin farklı ağ yapısına ait sayısal sonuçlarının karşılaştırılmasını içermektedir. Böylece, hesaplama ağı ile elde edilen sayısal bulguların yakınsaması belirlenmekte ve ağ geometrisine bağlı belirsizliğin tahmini yapılabilmektedir. Bu yöntemin kullanılabilmesi için en az üç farklı yoğunluktaki hesaplama ağı kullanılmaktadır (Roache, 1998). Buna göre;

$$d_3 < d_2 < d_1,\ e_{12} = u_1 - u_2,\quad e_{23} = u_2 - u_3,\quad r_{12} = \frac{d_1}{d_2},\quad r_{23} = \frac{d_2}{d_3} \tag{3.6}$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{23})} \ln\left(\frac{(r_{23}^{p} - 1)e_{12}}{(r_{12}^{p} - 1)e_{23}} \right) \tag{3.7}$$

$$E_{23} = \frac{u_3 - u_2}{u_3} \tag{3.8}$$

$$GCI_{23}^{ince} = F_s \frac{|E_{23}|}{r_{23}^{p} - 1} \tag{3.9}$$

Burada bulunan d_1, d_2 ve d_3 sırasıyla ağ1, ağ2 ve ağ3'te bulunan ağ elemanının yüksekliğini ifade etmektedir. u_1, u_2 ve u_3 sırasıyla ağ1, ağ2 ve ağ3'te belirlenen noktadaki akışkanın hızını ifade etmektedir. p ifadesi de doğruluk mertebesini belirtmektedir. e_{12} ve e_{23} hız farklarını, r_{12} ve r_{23} ise ağ elemanının yükseklik oranını ifade etmektedir.

İfadeleri ile verilen değerler belirlenir. Yukarıdaki denklemlerde 1, 2 ve 3 indisleri sırasıyla kaba, orta ve ince ağlarda elde edilen parametreleri, u akım hızını, p

doğruluk mertebesini, F_s güvenlik faktörünü temsil etmektedir.

Buna göre r_{23}, $r_{12} \geq 1.10$ olmalı ve üç veya daha fazla ağ yapısı için güvenlik faktörü F_s, 1.25 olarak önerilmektedir (Roache, 1994; Roache, 1998). İşlem sonucunda hesaplanan GCI_{23}^{ince} değeri %2'den daha küçük ise ağa bağlı sayısal hesaplama sonuçlarının kabul edilebilir hata sınırlarında olduğu ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı sonucuna varılır. Sonuç olarak Ağ 3 kullanılarak sayısal modellemeler gerçekleştirilir.

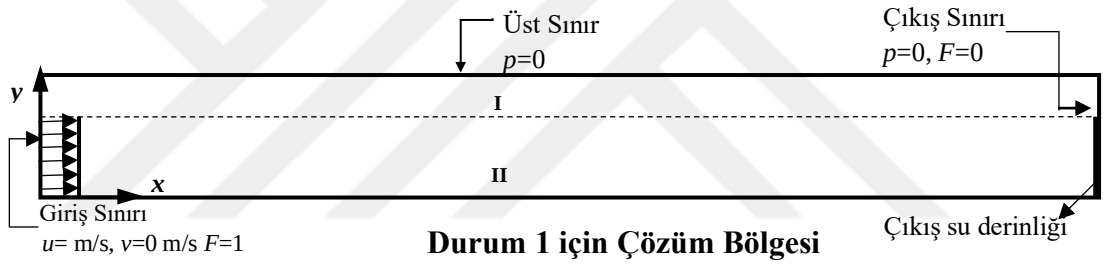
3.2.3. Akışkan hacimler yöntemi (Volume of Fluids-VOF)

VOF yöntemi, birbirine karışmayan iki veya daha fazla akışkan arasındaki ara yüzeyin şeklinin belirlenebilmesi için çözüm ağına uygulanabilir (Hirt ve Nichols, 1981). Bu tez çalışması kapsamında su-hava ara kesitinin belirlenebilmesi için kullanılan bu yöntem, hücrelerin boş, kısmen ya da tamamen su ile dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Buna göre, hacimsel doluluk oranını temsil etmesi için bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. F=1 için ağ elemanı tam dolu, F=0 için boş (hava ile dolu) ve 0<F<1 için ağ elemanı kısmen dolu olmaktadır. VOF yönteminde ara kesitin hesaplanmasında farklı yaklaşımlar bulunmakla beraber, bu çalışmada "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları

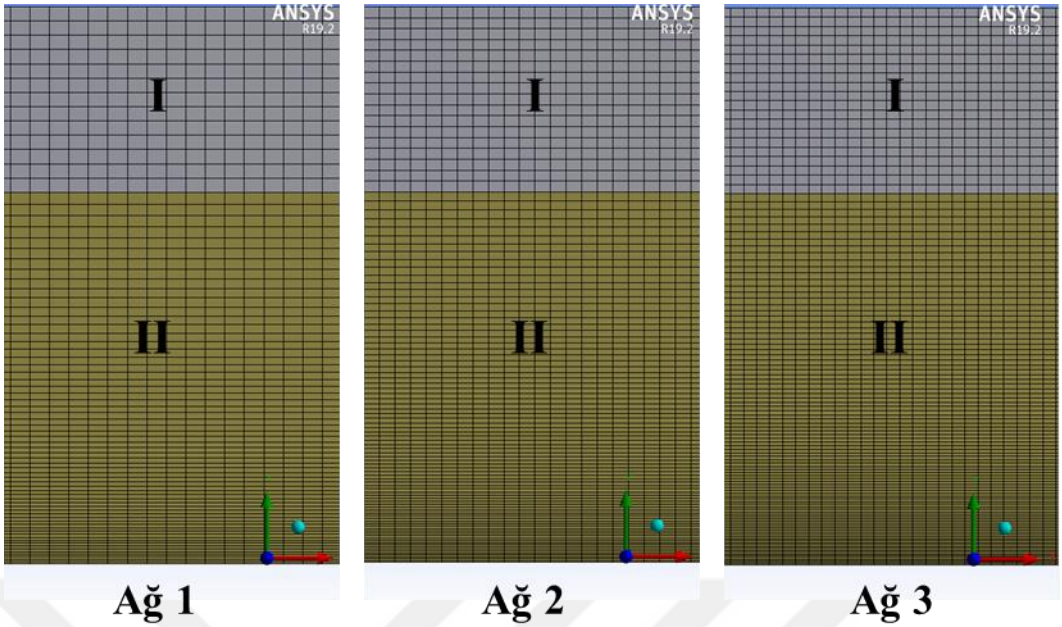
Tez çalışması kapsamında ele alınan deneylerin sayısal modellemesini yapabilmek için belli sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, sayısal modellemede kullanılan çözüm bölgesi ve sınır şartları Şekil 4.1'de verilmiştir. Buna göre, kanal tabanında sıfır hız sınır şartı (u=0, v=0), kanal üst sınırında ve çıkış sınırında p=0, giriş sınırında ise v=0 alınmış ve u hızı ise her bir durum için deneysel verilerden hesaplanarak tanımlanmıştır. Kanal sonunda çıkış su derinliğine bağlı olarak açık kanal çözümü yapılmış ve her bir deneyin çıkış su derinliği ayrı ayrı tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

4.2. Ağ Yapısının Belirlenmesi

Sayısal modellemede ağ yapısının çözüm üzerine önemli etkileri olduğu bilinmektedir (Gümüş, 2014). Bu etkilerin kabul edilebilir düzeylerde olup olmadığının belirlenebilmesi yani sayısal sonuçların ağ yapısından bağımsız bir yapıda olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada ağ yapısının uygunluğun tespiti için ağ yakınsama indeksi (GCI) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde gerekli olan üç farklı ağ yapısı, ağ sıklığının %25 ve %50 arttırılması suretiyle oluşturulmuş ve oluşturulan %50 sıklaştırılmış ağ en iyi ağ yani ince ağ olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.2). Bu çalışmada iki farklı akım durumu için üç farklı sıklıkta ağ yapısı kullanılmış ve sayısal çözüm bölgesi iki alt bölgeye ayrılmıştır. GCI yöntemi için oluşturulan farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarına ait eleman sayılarına ait detaylar Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Hesaplama ağı

Kullanılan ağın yeterli sıklıkta olup olmadığın ve buna bağlı olarak elde edilen sayısal bulguların ağ yapısından bağımsız olduğunun belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile oluşturulan Ağ 1 (Kaba), Ağ 2 (Orta) ve Ağ 3 (İnce) değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1 Farklı alt bölgelerde bulunan ağ elemanı sayıları

	Alt Bölge	**Ağ 1**	**Ağ 2**	**Ağ 3**
1. Durum	I. Bölge	13x667	17x833	20x1000
	II. Bölge	63x667	17x833	95x1000
6. Durum	I. Bölge	53x667	65x833	80x1000
	II. Bölge	23x667	30x833	35x1000

En düşük en yüksek giriş su yüksekliklerine sahip iki debide farklı kesitlerde GCI analizleri yapılmıştır.

Ağ yakınsama indeksi yöntemi ile Durum 1 için x=290 cm ve x=390 cm'de 10 farklı derinlikte elde edilen sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Buna göre, kullanılan diğer akım durumuna göre hız değerleri yüksek olan Durum 1 için x=290 cm'de elde edilen en yüksek GCI değerleri % 0.001 ile %0.935 olarak belirlenmiştir. Katı sınıra yakın olan bölgede akım hızlarının viskoz gerilmeler neticesinde hızlı değişimlere uğraması nedeniyle en yüksek GCI değerleri katı sınıra

yakın olan bölgede elde edilmiştir. Ayrıca akımın katı sınır etkisinden çıkmaya başladığı noktadan itibaren GCI değerleri azalma eğilimine girmiştir. Yine Durum 1 için x=390 cm için, x=290 cm'ye benzer bir şekilde katı sınıra yakın olan bölgede GCI değerleri daha yüksek olarak %0.018 değerinde olurken, katı sınırdan uzaklaştıkça büyük bir azalma göstermiştir. Bu nedenle, Durum 1 için elde edilmiş olan GCI değerlerine göre, kullanılan ağ yapısının çözüm üzerine etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Durum 1 için x=290 cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3(mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
10	1.866	1.494	1.195	0.268	0.267	0.266	1.249	1.250	-4.769	**-0.935**
20	2.511	1.965	1.612	0.301	0.301	0.300	1.278	1.219	-8.334	**-0.699**
30	2.501	2.001	1.666	0.326	0.326	0.324	1.250	1.201	-22.297	**-0.538**
40	2.499	1.690	1.666	0.349	0.349	0.348	1.479	1.014	-23.565	**-0.353**
50	3.033	1.666	2.499	0.365	0.366	0.365	1.821	0.667	-23.565	**-0.353**
70	3.758	2.997	2.499	0.376	0.377	0.376	1.254	1.199	1.648	**0.311**
90	4.002	2.852	2.499	0.379	0.380	0.379	1.403	1.141	-1.595	**-0.559**
110	4.000	2.861	2.499	0.379	0.382	0.382	1.398	1.145	4.855	**0.110**
140	3.749	3.006	2.499	0.383	0.384	0.383	1.247	1.203	3.356	**0.097**
180	3.848	3.124	2.499	0.369	0.367	0.367	1.232	1.250	14.350	**0.001**

Çizelge 4.3. Durum 1 için x=390 cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3(mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
10	1.879	1.491	1.200	0.265	0.264	0.263	1.260	1.243	-1.843	**-0.018**
20	2.507	1.972	1.607	0.297	0.296	0.295	1.272	1.227	-1.975	**-0.015**
30	2.503	2.003	1.666	0.318	0.318	0.317	1.249	1.202	-4.860	**-0.008**
40	2.498	1.666	1.665	0.337	0.337	0.336	1.499	1.001	-13.331	**-0.007**
50	3.034	3.031	2.500	0.356	0.355	0.354	1.001	1.212	18.719	**0.000**
70	3.752	2.997	2.500	0.379	0.379	0.379	1.252	1.199	-1.733	**-0.004**
90	4.001	2.857	2.497	0.383	0.384	0.383	1.400	1.144	-3.114	**-0.003**
110	4.001	2.857	2.500	0.385	0.386	0.385	1.400	1.143	-2.742	**-0.003**
140	3.748	3.003	2.497	0.387	0.387	0.387	1.248	1.203	2.437	**0.001**
180	3.846	3.127	2.500	0.372	0.371	0.370	1.230	1.250	0.641	**0.011**

Durum 6 için, x=290 cm ve x=390 cm için 10 farklı yükseklikte hesaplanan GCI değerleri Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Buna göre, çok daha düşük bir derinliğe sahip olan bu akım için GCI değerleri x=290 cm'de %1.972 değerine

ulaşırken, en düşük değer %0.1 olmuştur. Burada da Durum 1'e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında, x=390 cm'de akım tamamen gelişip düzenli üniform bir akım durumuna geçtiği tipik bir açık kanal akımına dönüştüğünden GCI değerlerinin oldukça düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Elde edilen tüm değerlerin %2'den küçük olduğu görülmektedir. Dolasıyla hesaplamalarda Ağ3 yapısının kullanılması durumunda, hesaplama ağının sayısal model sonuçlar üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir.

İki farklı debi ile farklı kesitlerde ve farklı yüksekliklerde elde edilen GCI değerleri incelendiğinde, hesaplanan büyük GCI değerlerinin akımın ani değişimler sergilediği katı sınıra yakın olan bölgelerde olduğu ve tabandan itibaren yapılacak sıklaştırmaların çözüm üzerine olumlu etkiler sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.4. Durum 6 için x=290 cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3(mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
2.5	1.414	1.171	0.928	0.106	0.103	0.108	1.208	1.262	-1.374	**-0.224**
5	1.581	1.308	1.049	0.132	0.127	0.132	1.209	1.246	-0.012	**-1.972**
7.5	1.779	1.429	1.125	0.144	0.138	0.145	1.245	1.270	0.320	**0.696**
10	1.870	1.490	1.201	0.153	0.146	0.153	1.255	1.241	-0.174	**-1.488**
15	1.992	1.627	1.292	0.159	0.152	0.159	1.224	1.259	0.793	**0.283**
17.5	2.372	1.885	1.490	0.169	0.161	0.169	1.258	1.265	0.491	**0.467**
22.5	2.646	2.053	1.673	0.177	0.168	0.176	1.289	1.227	-0.480	**-0.602**
27.5	2.494	1.773	1.673	0.183	0.174	0.182	1.407	1.060	-11.080	**-0.117**
35	2.494	2.007	1.673	0.189	0.181	0.189	1.242	1.200	-0.953	**-0.318**
45	2.494	1.667	1.657	0.194	0.188	0.196	1.496	1.006	-18.330	**-0.082**

Çizelge 4.5. Durum 6 için x=390 cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3(mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
2.5	1.417	1.179	0.931	0.108	0.108	0.112	1.202	1.267	-16.777	**-0.050**
5	1.580	1.298	1.039	0.133	0.133	0.137	1.217	1.250	-9.240	**-0.042**
7.5	1.774	1.428	1.114	0.146	0.145	0.150	1.242	1.282	-6.463	**-0.044**
10	1.883	1.493	1.201	0.155	0.153	0.158	1.261	1.243	-6.318	**-0.048**
15	1.991	1.634	1.298	0.161	0.159	0.164	1.219	1.258	-4.106	**-0.061**
17.5	2.370	1.883	1.493	0.171	0.168	0.174	1.259	1.261	-3.042	**-0.077**
22.5	2.651	2.056	1.666	0.178	0.175	0.180	1.289	1.234	-3.129	**-0.083**
27.5	2.499	1.668	1.666	0.183	0.180	0.186	1.498	1.001	-79.824	**-0.067**
35	2.499	2.002	1.666	0.189	0.185	0.192	1.249	1.201	-3.217	**-0.093**
45	2.499	1.669	1.666	0.194	0.191	0.197	1.497	1.002	-57.475	**-0.061**

4.3. Sayısal Modelleme

Ortalama Karesel Hata (OKH) ve verilen Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri Denklem 4.1 de verilmiştir.

$$OKH = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(u_d - u_h\right) \tag{4.1}$$

$$OMGH = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{u_d - u_h}{u_d}\right)\text{x}100 \tag{4.2}$$

Burada, u_d ve u_h sırasıyla deneysel ve sayısal hız değerini, N ise hız profilindeki nokta sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.6'da, Durum 1 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Buna göre, kanal başlangıcında (x=0.6-2.4 m) SST modeli en başarılı model olurken kanal ortasında (2.9 m ve 3.4 m) ise DES modeli deneysel verilere diğer model sonuçlarına kıyasla daha fazla yakınsamıştır. Kanal sonuna doğru (x=3.9-5.4 m) ise yine SST modeli deneysel verilere yakın tahminde bulunduğu görülmüştür. Tüm kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamaları değerlendirildiğinde kullanılan türbülans modellerinin başarı sıralaması SST, DES, RNG ve RSM şeklinde olmuştur. OKH değerlerine göre, ele alınan 10 kesitten 6'sında SST modeli, x=2.9 m ve 3.4 m kesitlerinde ise DES daha başarılı olmuştur. Ancak, SST ve DES modelleriyle elde edilen OKH değerleri arasındaki farkın da küçük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Durum 1 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

Durum 1 x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)
0.6	6.60(3)	6.78(3)	**5.91(1)**	6.41(2)	6.15(2)	**6.36(1)**	9.13(4)	8.04(4)
1.4	6.26(4)	5.69(3)	**5.33(1)**	5.51(2)	5.97(2)	**5.26(1)**	6.00(3)	6.16(4)
1.9	7.54(3)	6.35(3)	**6.40(1)**	**6.03(1)**	7.58(4)	6.14(2)	6.78(2)	6.47(4)
2.4	7.98(3)	6.81(4)	**5.64(1)**	**5.78(1)**	8.89(4)	6.72(3)	6.68(2)	6.57(2)
2.9	7.67(3)	5.88(3)	5.12(2)	4.95(2)	9.58(4)	6.18(4)	**4.37(1)**	**4.86(1)**
3.4	6.99(3)	5.78(3)	4.57(2)	**4.70(1)**	9.13(4)	6.40(4)	**4.23(1)**	4.96(2)
3.9	5.73(3)	5.56(2)	**3.48(1)**	**3.96(1)**	7.87(4)	6.28(4)	5.13(2)	5.63(3)
4.4	6.08(3)	6.02(3)	**3.87(1)**	**4.55(1)**	8.50(4)	6.79(4)	4.63(2)	5.52(2)
4.9	6.96(2)	5.96(2)	**5.24(1)**	**5.03(1)**	8.19(4)	6.33(3)	7.57(3)	6.78(4)
5.4	5.38(2)	5.69(3)	**5.37(1)**	5.62(2)	5.39(3)	**5.51(1)**	8.43(4)	7.26(4)
Ort.	6.72(3)	6.05(2)	**5.09(1)**	**5.25(1)**	7.73(4)	6.20(3)	6.30(2)	6.23(4)

Çizelge 4.7'de Durum 2'için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. OKH kriterine göre x=0.6, 1.9, 2.4, 2.9, 3.4 ve 3.9 m kesitlerinde DES modeli, 1.4 ve 4.4 m kesitlerinde RSM modeli, 4.9 ve 5.4 m kesitlerinde ise RNG türbülans modeli en başarılı olmuştur. OMGH kriterine göre ise x=0.6, 1.9, 2.4 ve 2.9 m kesitlerinde DES modeli OKH kriterine benzer olarak başarılı olmuştur. x=3.4, 3.9 ve 4.9 m kesitlerinde OMGH kriterine göre SST türbülans modeli en başarılı olmuştur. Ayrıca, 5.4m kesitinde OKH kriterinde olduğu gibi RNG türbülans modeli deneysel verilere daha yakın tahminde bulunmuştur. Kanal boyunca 10 farklı kesitte elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalama değerleri çizelgenin son satırında verilmiştir. Bu değerlere göre, en küçük OKH ve OMGH değeri, DES modelinde elde edilmiştir. Yani diğer bir ifadeyle DES modeli kullanılarak gerçekleştirilen sayısal model sonucunda deneysel verilere en yakın tahminde bulunulmuştur. Türbülans modellerinin başarı sıralaması DES, SST, RNG ve RSM şeklinde oluşmuştur. Bu sonuçtan ikincil akımlarda ve akımda ayrılmaların olduğu durumlarda başarılı sonuçlar verdiği bilinen RSM modelinin en başarısız model olduğu görülmektedir. Ele alınan akım durumunda ayrılmanın ve ikincil akımların oluşmamasının bu sonuca neden olduğu söylenebilir. Katı sınıra yakın bölgede k-ε denklemlerini çözen, katı sınırdan uzaklaştıkça k-ω denklemlerini çözmesinden dolayı

hibrit bir model olan SST modelinin, tüm akım derinliği boyunca k-ε denklemini çözen RNG modeline üstünlük sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.7. Durum 2 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

Durum 2	**RNG**		**SST**		**RSM**		**DES**	
x (m)	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**
0.6	38.87(3)	8.74(3)	31.19(2)	7.30(2)	67.43(4)	10.55(4)	**22.67(1)**	**6.77(1)**
1.4	57.26(3)	10.01(4)	58.01(4)	9.69(3)	**7.25(1)**	**3.58(1)**	30.49(2)	7.81(2)
1.9	315.00(3)	7.55(3)	304.74(2)	6.84(2)	345.19(4)	11.12(4)	**287.79**(1)	**4.95(1)**
2.4	14.64(2)	4.40(2)	26.73(4)	5.61(4)	16.17(3)	4.48(3)	**4.18(1)**	**2.71(1)**
2.9	34.39(2)	6.31(2)	40.95(3)	7.30(3)	127.28(4)	15.90(4)	**15.39(1)**	**5.15(1)**
3.4	26.27(3)	5.89(3)	18.65(2)	**4.86(1)**	57.59(4)	10.58(4)	**15.81(1)**	5.27(2)
3.9	17.14(3)	4.48(2)	15.37(2)	**4.12(1)**	37.73(4)	8.75(4)	**14.67(1)**	5.35(3)
4.4	10.70(4)	3.55(2)	9.72(3)	3.83(3)	**4.58(1)**	**2.56(1)**	8.89(2)	4.09(4)
4.9	**5.44(1)**	3.17(2)	6.77(2)	**2.81(1)**	32.06(4)	8.44(4)	9.23(3)	4.13(3)
5.4	**5.11(1)**	**2.57(1)**	5.66(2)	3.05(2)	7.48(3)	3.36(3)	11.24(4)	4.67(4)
Ort	52.48(3)	5.67(3)	51.78(2)	5.54(2)	70.28(4)	7.93(4)	**42.04(1)**	**5.09(1)**

Durum 3 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Buna göre, OKH değerleri kanal girişinde (x=0.6 ve x=2.4 m) DES modeli başarılı olurken, bu kesitler haricindeki ele alınan tüm diğer kesitlerde ise RSM modeli en başarılı model olmuştur. OMGH değerlerine bakıldığında ise kanal başlangıcında DES modeli RSM modelinden daha başarılı olmuştur. DES modeli ile RNG modelinin sonuçlarının birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. Tüm kanal boyunca elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamaları değerlendirildiğinde kullanılan türbülans modellerinin başarı sıralaması RSM, RNG, DES ve SST şeklinde olmuştur. OKH değerlerine göre, ele alınan 10 kesitin 8 kesitinde RSM modeli başarılı olmuş, RNG, RSM, DES modellerinin sonuçlarının arasındaki farkın küçük olmuş ve SST türbülans modeli sonucunda elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin büyük olması, bu modelin diğer modellere göre hata değerlerinin daha büyük olduğunu ifade etmektedir. Bu sonuçtan, SST modelinin Durum 3 için deneysel verileri tahmin etmekte başarısız olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 4.8. Durum 3 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

Durum 3 x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2/s^2)	OMGH (%)
0.6	2.98(3)	4.03(4)	3.23(4)	3.82(3)	2.68(2)	3.79(2)	**2.47(1)**	**3.59(1)**
1.4	2.49(3)	3.63(4)	2.77(4)	3.37(3)	**2.16(1)**	3.14(2)	2.35(2)	**2.68(1)**
1.9	3.72(3)	4.96(4)	4.10(4)	4.35(2)	**3.34(1)**	4.44(3)	3.66(2)	**3.84(1)**
2.4	3.44(3)	5.12(4)	3.66(4)	4.82(3)	3.20(2)	4.80(2)	**2.79(1)**	**3.94(1)**
2.9	6.11(2)	6.53(3)	9.27(4)	7.13(4)	**5.57(1)**	6.01(2)	6.43(3)	**5.59(1)**
3.4	4.52(2)	5.59(3)	9.65(4)	7.74(4)	**4.03(1)**	**4.86(1)**	5.20(3)	4.91(2)
3.9	5.41(2)	6.23(3)	10.25(4)	8.10(4)	**4.81(1)**	5.45(2)	5.59(3)	**5.35(1)**
4.4	5.88(3)	6.61(3)	11.59(4)	8.87(4)	**4.87(1)**	5.77(2)	5.64(2)	**5.65(1)**
4.9	5.48(2)	6.40(2)	10.84(4)	8.60(4)	**4.90(1)**	**5.65(1)**	6.46(3)	6.40(3)
5.4	6.45(2)	6.63(3)	11.49(4)	8.62(4)	**5.48(1)**	**5.9(1)**	7.70(3)	6.54(2)
Ort	4.65(2)	5.57(3)	7.69(4)	6.54(4)	**4.10(1)**	4.98(2)	4.83(3)	**4.85(1)**

Çizelge 4.9'da Durum 4 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Çizelgeye göre ele alınan tüm kanal kesitlerinde en küçük OKH ile OMGH değerlerinin DES modeliyle elde edilmesi, DES türbülans modelinin en başarılı model olduğunu belirtmektedir. Çizelgeden, SST ve RSM modellerine ait OKH ve OMGH değerleri incelendiğinde birbirine yakın olduğu görülmekte bu akım durumu için SST ve RSM modellerinin birbirine benzer tahminde bulunduğunu göstermektedir. RNG modelinin OKH ve OMGH değerlerinin kullanılan diğer üç modele kıyasla çok büyük olması başarısız olduğunu göstermektedir. SST modeli kanal girişinde x=2 m'ye kadar oldukça iyi tahminde bulunurken 2 m'den sonra SST türbülans modeliyle elde edilen hız profillerinin deneysel profillerden uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Kanal boyunca 10 farklı kesitte elde edilen OKH ve OMGH ortalama değerlerine göre, en küçük OKH ve OMGH değeri DES modelinde elde edilmiştir. Türbülans modellerinin başarı sıralaması DES, RSM, SST, ve RNG şeklinde oluşmuştur.

Çizelge 4.9. Durum 4 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

Durum 4	**RNG**		**SST**		**RSM**		**DES**	
x (m)	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**
0.6	43.58(4)	15.95(4)	6.80(2)	6.11(2)	12.17(3)	8.00(3)	**2.85(1)**	**3.86(1)**
1.4	21.45(4)	11.01(4)	3.59(2)	5.03(2)	15.60(3)	10.86(3)	**1.50(1)**	**2.62(1)**
1.9	13.57(4)	9.96(4)	6.93(2)	6.81(2)	9.95(3)	8.91(3)	**1.31(1)**	**2.97(1)**
2.4	28.88(4)	16.06(4)	12.62(3)	9.96(3)	9.78(2)	7.90(2)	**5.33(1)**	**5.94(1)**
2.9	24.44(4)	14.35(4)	13.18(2)	10.41(2)	18.34(3)	11.25(3)	**4.53(1)**	**5.56(1)**
3.4	32.32(4)	16.89(4)	16.97(2)	12.04(2)	22.89(3)	13.02(3)	**4.26(1)**	**5.27(1)**
3.9	31.85(4)	16.93(4)	21.97(2)	13.81(3)	22.07(3)	13.33(2)	**4.58(1)**	**5.51(1)**
4.4	35.07(4)	17.85(4)	32.50(3)	16.81(3)	14.75(2)	10.98(2)	**6.92(1)**	**6.97(1)**
4.9	25.40(3)	15.33(3)	32.73(4)	16.57(4)	10.64(2)	9.34(2)	**6.47(1)**	**6.94(1)**
5.4	11.97(3)	10.11(3)	30.07(4)	15.83(4)	7.93(2)	7.73(2)	**5.91(1)**	**5.86(1)**
Ort	26.85(4)	14.44(4)	17.74(3)	11.34(3)	14.41(2)	10.13(2)	**4.37(1)**	**5.15(1)**

Durum 5 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Tüm durumlar göz önünde bulundurulduğunda RNG türbülans modeli sadece Durum 5'te başarılı olurken diğer 6 durumda deneysel verileri tahminde başarısız olmuştur. Çizelgedeki değerler incelendiğinde, x=1.9, 2.4 m kesitlerinde ve kanal sonlarına doğru (x=4.4, 4.9, 5.4 m) toparlamış ve başarılı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Tüm kesitlerin ortalaması değerlendirildiğinde en başarılı model RNG türbülans modeli olmuş, RNG modelini SST modeli takip etmiştir. RSM ve DES model ise çok küçük fark ile de olsa RNG ve SST modellerine kıyasla başarısız olmuştur. Bu değerler değerlendirildiğinde, genel olarak değerlerin birbirine yakın olması ve oldukça küçük OKH ve OMGH değerlerinin elde edilmesinden kullanılan modellerin Durum 5 için kullanıla bileceğini ifade edilebiliriz.

Çizelge 4.10. Durum 5 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

Durum 5	**RNG**		**SST**		**RSM**		**DES**	
x (m)	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**
0.6	4.44(3)	4.72(3)	**4.33(1)**	4.69(2)	6.70(4)	7.03(4)	4.35(2)	**4.18(1)**
1.4	5.81(4)	6.78(4)	4.82(3)	5.97(3)	**3.49(1)**	**5.13(1)**	4.28(2)	5.45(2)
1.9	**2.73(1)**	**4.37(1)**	2.81(2)	4.45(2)	4.35(4)	6.27(4)	3.43(3)	4.97(3)
2.4	**2.77(1)**	**4.23(1)**	3.22(2)	4.79(2)	5.07(4)	6.38(4)	3.34(3)	4.99(3)
2.9	6.24(2)	6.70(3)	6.85(4)	6.52(2)	**3.04(1)**	**4.7(1)**	6.79(3)	6.76(4)
3.4	6.58(2)	7.38(4)	7.25(3)	7.11(2)	**3.03(1)**	**4.7(1)**	7.42(4)	7.20(3)
3.9	5.03(2)	6.69(2)	6.01(3)	6.79(3)	**3.72(1)**	**5.47(1)**	7.11(4)	7.71(4)
4.4	**3.22(1)**	**5.31(1)**	4.09(2)	5.78(2)	6.49(4)	7.37(4)	6.12(3)	7.24(3)
4.9	**3.63(1)**	**5.47(1)**	4.72(2)	6.21(2)	7.44(3)	7.62(3)	8.67(4)	8.56(4)
5.4	**2.00(1)**	**3.20(1)**	2.80(2)	4.17(2)	9.31(4)	8.84(3)	9.15(3)	9.19(4)
Ort.	**4.25(1)**	**5.48(1)**	4.69(2)	5.65(2)	5.26(3)	6.35(3)	6.06(4)	6.62(4)

Durum 6 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. SST türbülans modeli kanal girişinde en başarılı model olurken, x=4.9 ve 5.4 m kesitlerinde DES en başarılı model olmuştur. SST türbülans modelinin OKH değerleri kanal girişinde (x=0,6 m kesitinde) 1.27 iken, kanal sonlarına doğru başarılı olduğu kesitlerde giderek bu değer küçülmüş yani deneysel değerleri tahmin başarısı artmıştır. x=4.9 ve 5.4 m kesitlerinde değerler artmış, dolayısıyla tahminde başarılı olmamıştır. SST modeli 10 kesitin sekizinde başarılı olurken 2 kesitte başarısız olmuştur. Son satırda verilen, ele alınan tüm kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamasına bakıldığında SST modeli en başarılı model olmuştur. Tüm kesitlerin ortalamalarında deneysel verileri tahminde başarı sıralaması SST, DES, RNG ve RSM şeklinde olmuştur.

Çizelge 4.11. Durum 6 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

Durum 6	**RNG**		**SST**		**RSM**		**DES**	
x (m)	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**
0.6	1.72(3)	6.76(3)	**1.27(1)**	**6.26(1)**	1.81(4)	7.09(4)	1.31(2)	6.44(2)
1.4	1.59(3)	6.04(3)	**0.90(1)**	**4.34(1)**	1.79(4)	6.19(4)	1.18(2)	5.08(2)
1.9	1.28(3)	5.64(3)	**0.63(1)**	**3.87(1)**	1.55(4)	6.15(4)	0.96(2)	4.98(2)
2.4	1.01(3)	5.28(3)	**0.61(1)**	**4.20(1)**	1.33(4)	6.07(4)	0.79(2)	4.80(2)
2.9	1.72(3)	7.14(4)	**0.70(1)**	**4.43(1)**	1.77(4)	6.95(3)	1.41(2)	6.54(2)
3.4	1.63(3)	6.91(4)	**0.54(1)**	**3.85(1)**	1.65(4)	6.73(3)	1.32(2)	6.38(2)
3.9	1.35(3)	6.16(4)	**0.40(1)**	**2.91(1)**	1.39(4)	6.01(3)	1.08(2)	5.79(2)
4.4	0.91(3)	4.96(4)	**0.36(1)**	**3.15(1)**	0.97(4)	4.82(3)	0.75(2)	4.74(2)
4.9	0.80(2)	4.47(2)	0.81(3)	5.07(4)	0.96(4)	4.73(3)	**0.53(1)**	**3.36(1)**
5.4	0.63(2)	3.84(2)	0.75(3)	5.00(4)	0.79(4)	3.90(3)	**0.51(1)**	**3.70(1)**
Ort	1.26(3)	5.72(3)	**0.70(1)**	**4.31(1)**	1.40(4)	5.86(4)	0.98(2)	5.18(2)

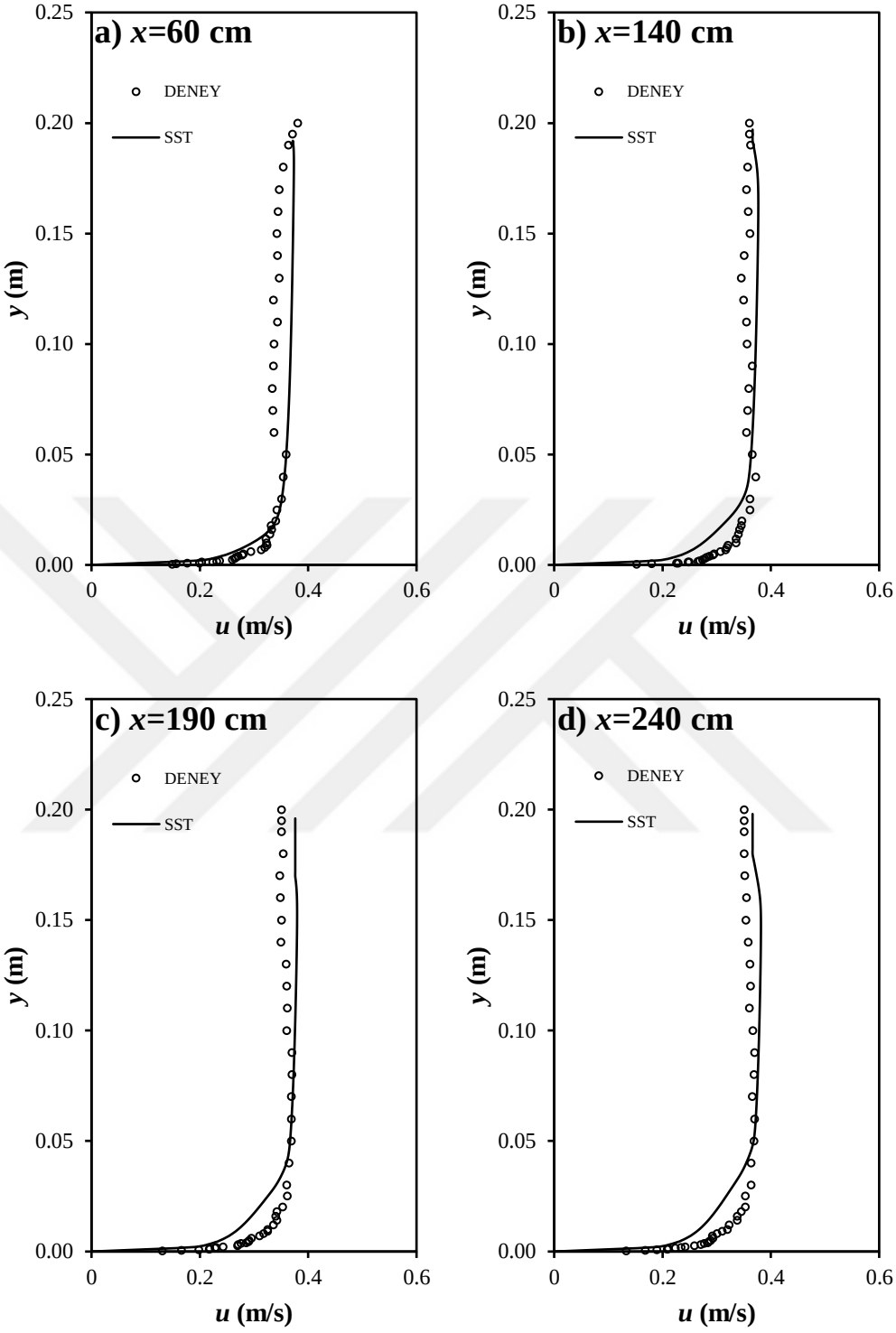
Çizelge 4.12'de Durum 7'için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. RNG türbülans modeli hiçbir kesitte başarılı olmazken, RSM türbülans modeli x=3.4 m'de, DES türbülans modeli x=1.9, 2.4, 3.9 ve 4.4 m'de ve SST türbülans modeli x=0.6, 1.4, 2.9, 4.9 ve 5.4 m'de en başarılı olmuştur. Kullanılan modellerin başarı sıralaması SST, DES, RSM ve RNG şeklinde olmuştur.

Çizelge 4.12. Durum 7 için farklı türbülans modellerine göre OKH ve OMGH değerleri

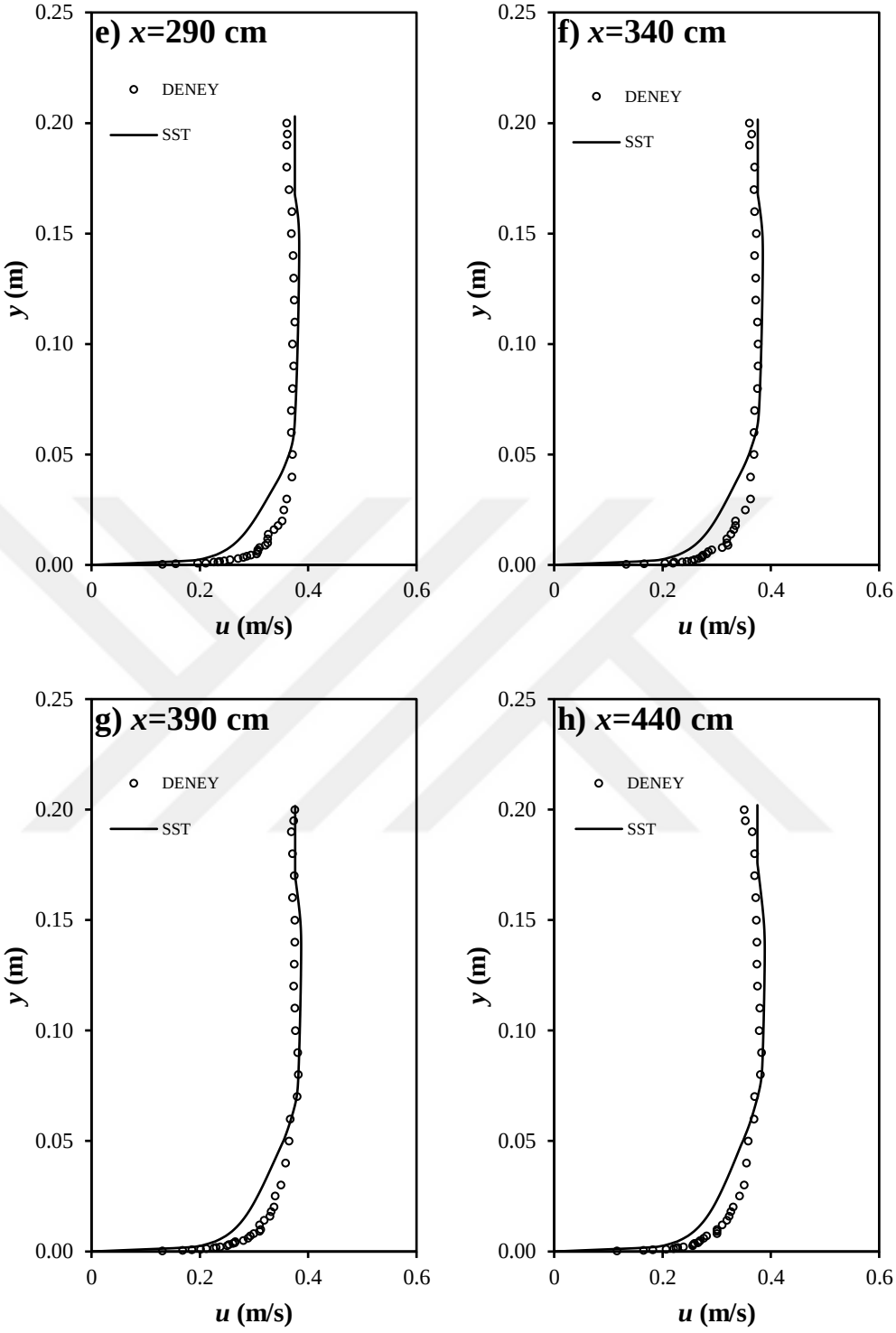
Durum 7	**RNG**		**SST**		**RSM**		**DES**	
x (m)	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**	**OKH (cm^2/s^2)**	**OMGH (%)**
0.6	3.29(4)	7.74(4)	**1.73(1)**	**5.55(1)**	2.00(3)	5.94(3)	1.76(2)	5.58(2)
1.4	4.07(4)	9.27(4)	**1.05(1)**	3.67(2)	1.48(3)	4.40(3)	1.06(2)	**3.55(1)**
1.9	3.28(4)	8.35(4)	0.62(2)	2.91(2)	1.20(3)	4.42(3)	**0.60(1)**	**2.70(1)**
2.4	1.97(4)	6.08(4)	0.71(2)	3.40(2)	1.69(3)	5.62(3)	**0.71(1)**	**3.36(1)**
2.9	3.59(4)	8.58(4)	**1.11(1)**	**4.15(1)**	1.47(3)	4.72(3)	1.19(2)	4.24(2)
3.4	7.34(4)	13.19(4)	6.34(2)	10.68(2)	**6.34(1)**	**10.33(1)**	6.36(3)	10.78(3)
3.9	2.08(4)	6.16(4)	1.03(2)	3.94(2)	1.32(3)	4.64(3)	**0.98(1)**	**3.55(1)**
4.4	1.34(3)	4.25(3)	0.69(2)	**2.51(1)**	1.58(4)	5.10(4)	**0.67(1)**	2.56(2)
4.9	1.11(3)	3.77(3)	**0.70(1)**	**2.57(1)**	1.88(4)	5.66(4)	0.76(2)	2.96(2)
5.4	1.01(3)	3.73(2)	**0.86(1)**	**3.65(1)**	3.02(4)	7.57(4)	0.95(2)	4.01(3)
Ort	2.91(4)	7.11(4)	**1.49(1)**	**4.30(1)**	2.20(3)	5.84(3)	1.51(2)	4.33(2)

4.3.1. Deneysel ve sayısal hız profilleri

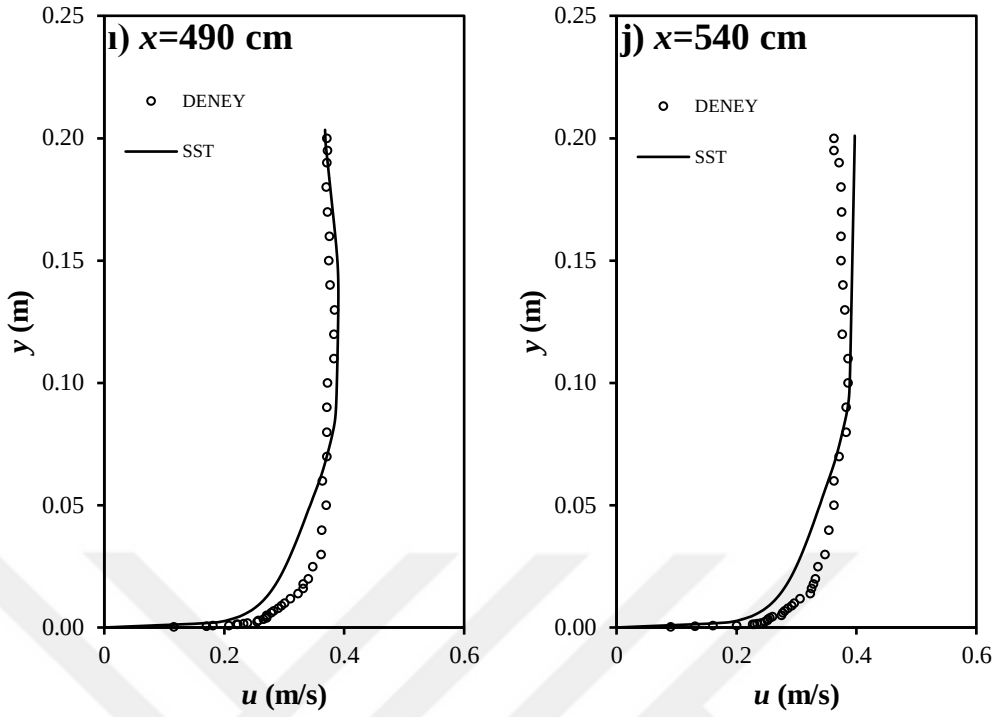
Durum 1 için kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerinin ortalamasına göre deneysel hız profillerine en yakın tahminde bulunan SST modeli ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3'te verilen grafikler incelendiğinde, SST modelinin kanal boyunca ele alınan kesitlerde deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği, ancak katı sınıra yakın olan bölgede deneysel verilerden uzaklaştığı ve genel olarak deneysel verilerden daha küçük bir hız değeri verdiği görülmüştür. Su yüzüne yakın bölgede kanal tabanına yakın bölgeye kıyasla sayısal modelleme sonuçlarının deneysel profile daha fazla yakınsadığı görülmektedir. Ayrıca, sayısal ve deneysel sınır tabakası kalınlıklarının birbirinden farklılık gösterdiği ifade edilebilir.



Şekil 4.3. Durum 1 için deneysel ve sayısal hız profilleri

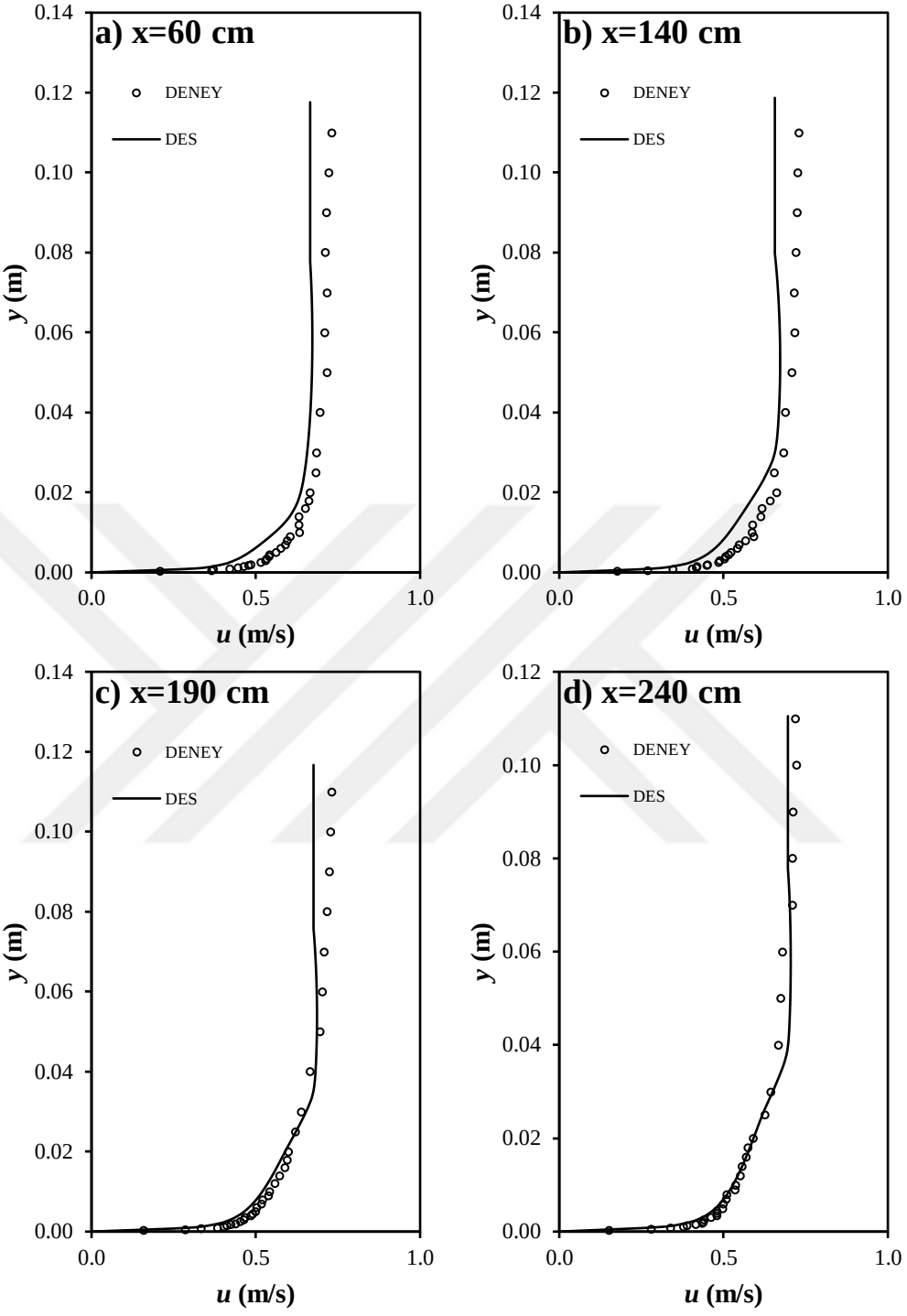


Şekil 4.3. Durum 1 (Devam)

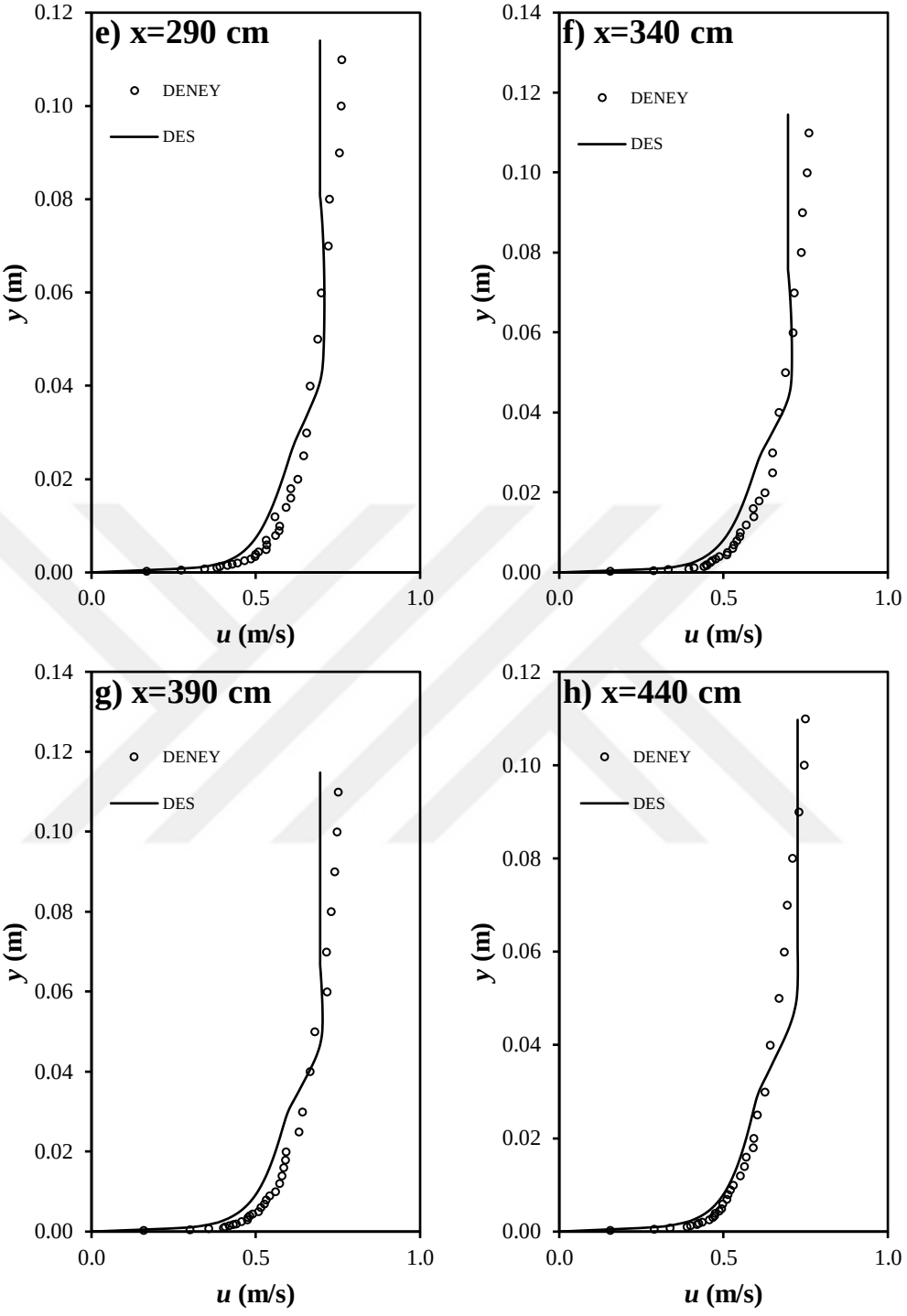


Şekil 4.3. Durum 1 (Devam)

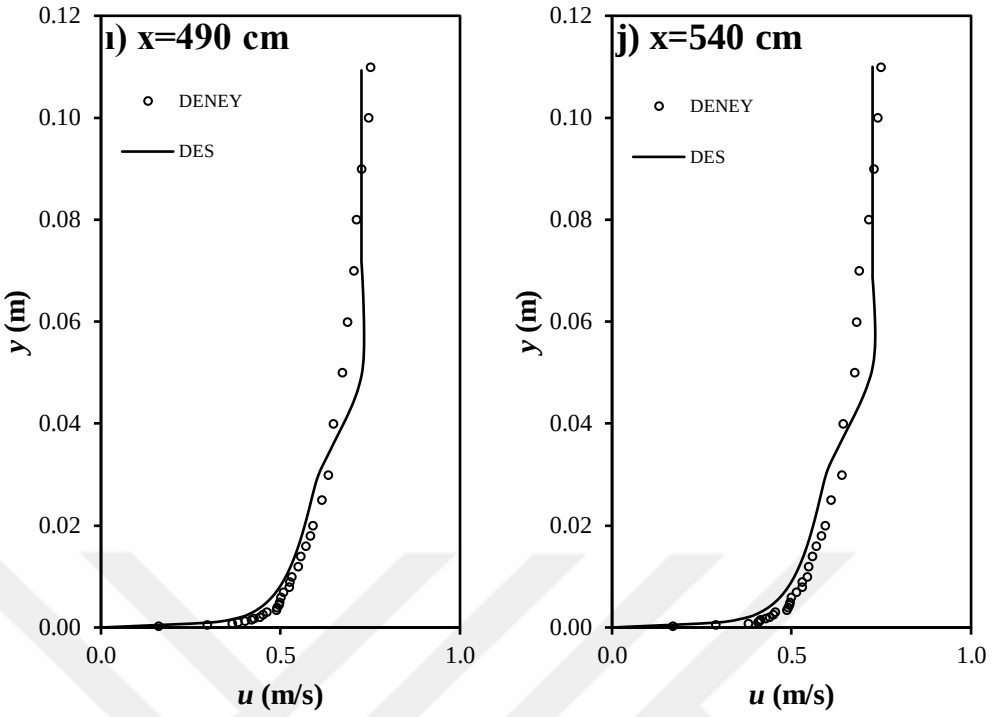
Çizelge 4.7'de verilen Durum 2 için kanal boyunca ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre hız alanını kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı modellediği görülen DES modeli ile elde edilen hız profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, DES modelinin x=60 ve 140 cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede ve akım derinliği boyunca deneysel verilerden uzak tahminde bulunmasının yanında hız profilinin genel olarak gidişatının benzer olduğu görülmektedir. Kanal boyunca ele alınan diğer kesitlerde, x=60 ve 140 cm kesitlerine kıyasla deneysel verilere daha fazla yakınsamıştır. Durum 2 için DES kullanılarak elde edilen hız profillerinin Durum 1'e kıyasla katı sınıra yakın bölgede deneysel verilerle daha uyumlu olduğu söylenebilir. Aksine tam türbülanslı bölgede ise deneysel ve sayısal hız profillerinin uyumu kanal eğiminin artmasıyla azalmaktadır. Bu bölgede Durum 1 de elde edilen sayısal hız profilleri deneysel sonuçlara Durum 2'ye kıyasla daha fazla yakınsamıştır.



Şekil 4.4. Durum 2 için deneysel ve sayısal hız profilleri



Şekil 4.4. Durum 2 (Devam)

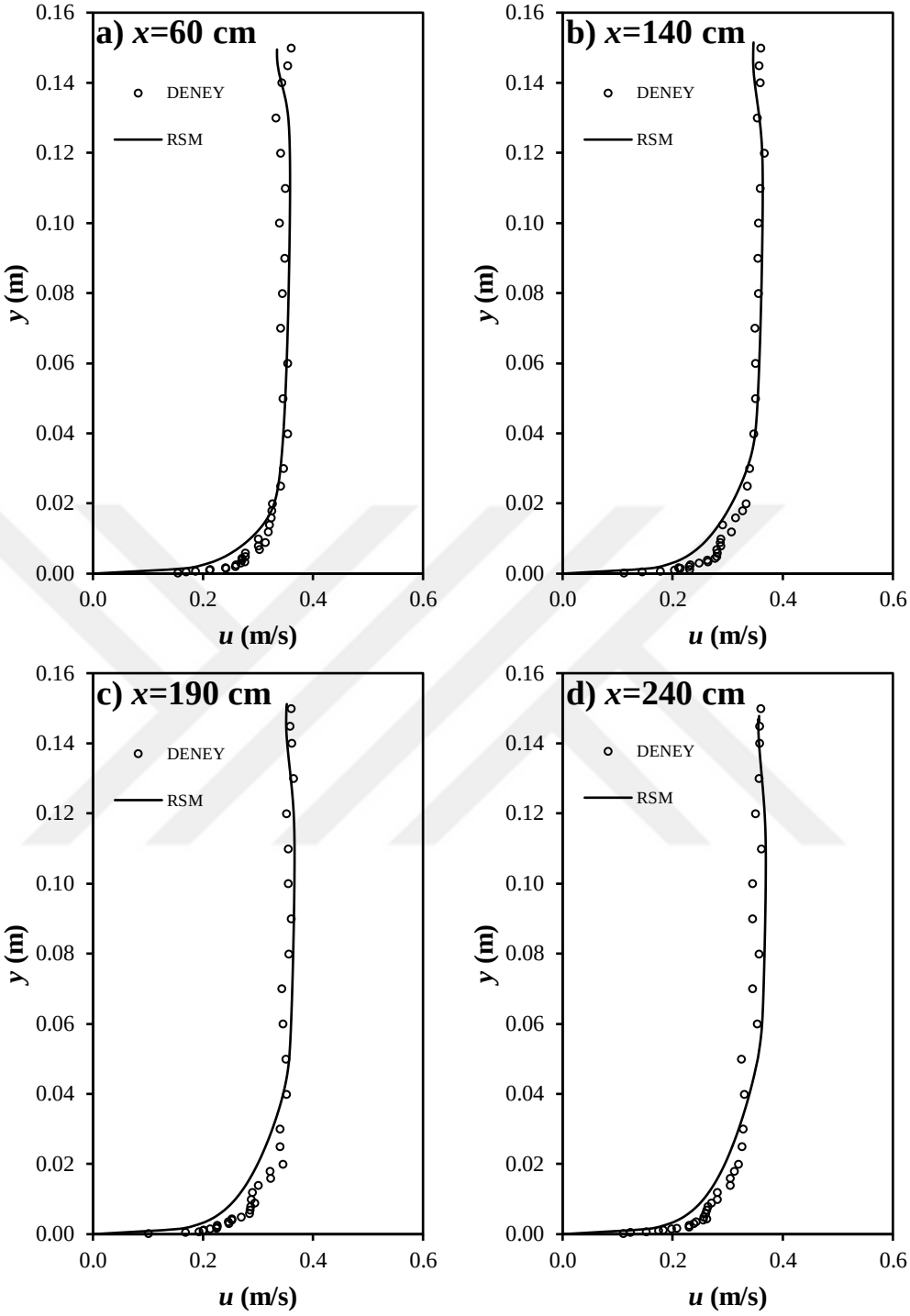


Şekil 4.4. Durum 2 (Devam)

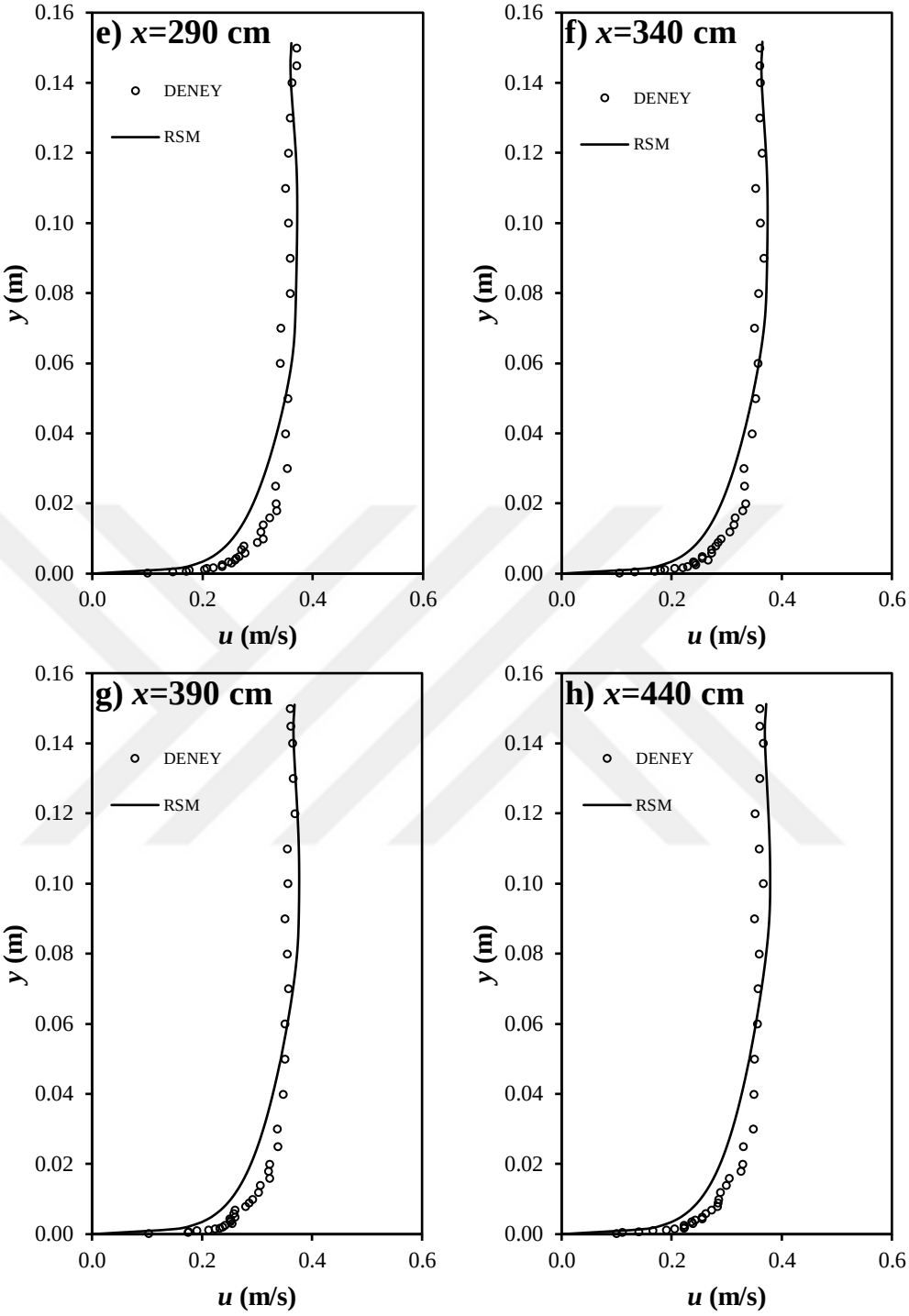
Çizelge 4.8'de verilen Durum 3 için OKH ve OMGH ortalama değerlerine göre kanal boyunca hız alanını kullanılan diğer modellere RSM modeli daha başarılı modellemiştir. Bu model ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 4.5'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, RSM modelinin x=60 ve 240 cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede deneysel sonuçlara yakın tahminde bulunurken, katı sınırının akım alanı üzerinde etkisinin olmadığı, akım derinliği boyunca deneysel verilerden uzak tahminde bulunduğu görülmektedir. x=60 ve 240 cm kesitleri dışında kalan tüm kesitlerde ise akım derinliği boyunca deneysel verilere yakın tahminde bulunduğu görülmektedir. Çizelge 4.8'de verilen (kontrol edilmesi gerekebilir) OKH ve OMGH değerlerine göre, RSM modeli Durum 3 ve 4 dışında kullanılan diğer modellere göre deneysel sonuçlardan daha kötü tahminde bulunduğu görülmüştür. Kanal girişinde deneysel hız profilleriyle sayısal model sonucunun uyumu gözlenirken, kanalın sonlarına doğru uyum gittikçe azalmıştır. RSM türbülans modeli kanal tabanında yani katı sınırına yakın bölgede akım hız

alanlarını daha düşük tahmin ederken, katı sınırın etkisi dışında kalan bölgede akım derinliği boyunca deneysel sonuçlara daha yakın tahminde bulunmuştur.

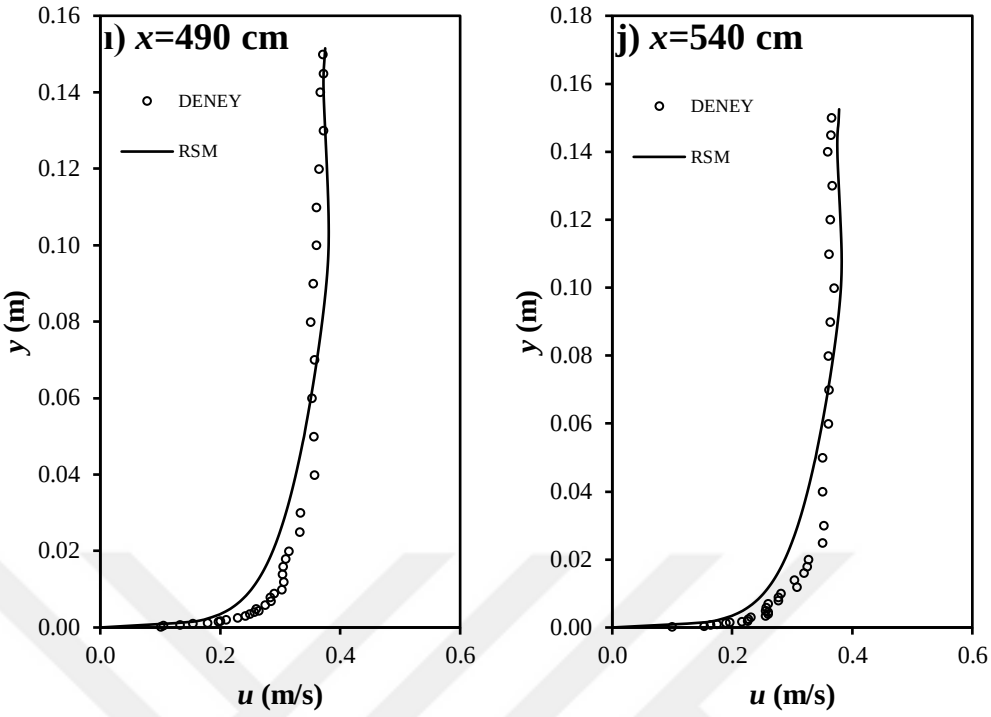
OKH ve OMGH değeri incelendiğinde en yakın tahmini x=190 cm kesitinde elde ederken, en uzak tahmini de x=290 cm kesitinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.5. Durum 3 için deneysel ve sayısal hız profilleri

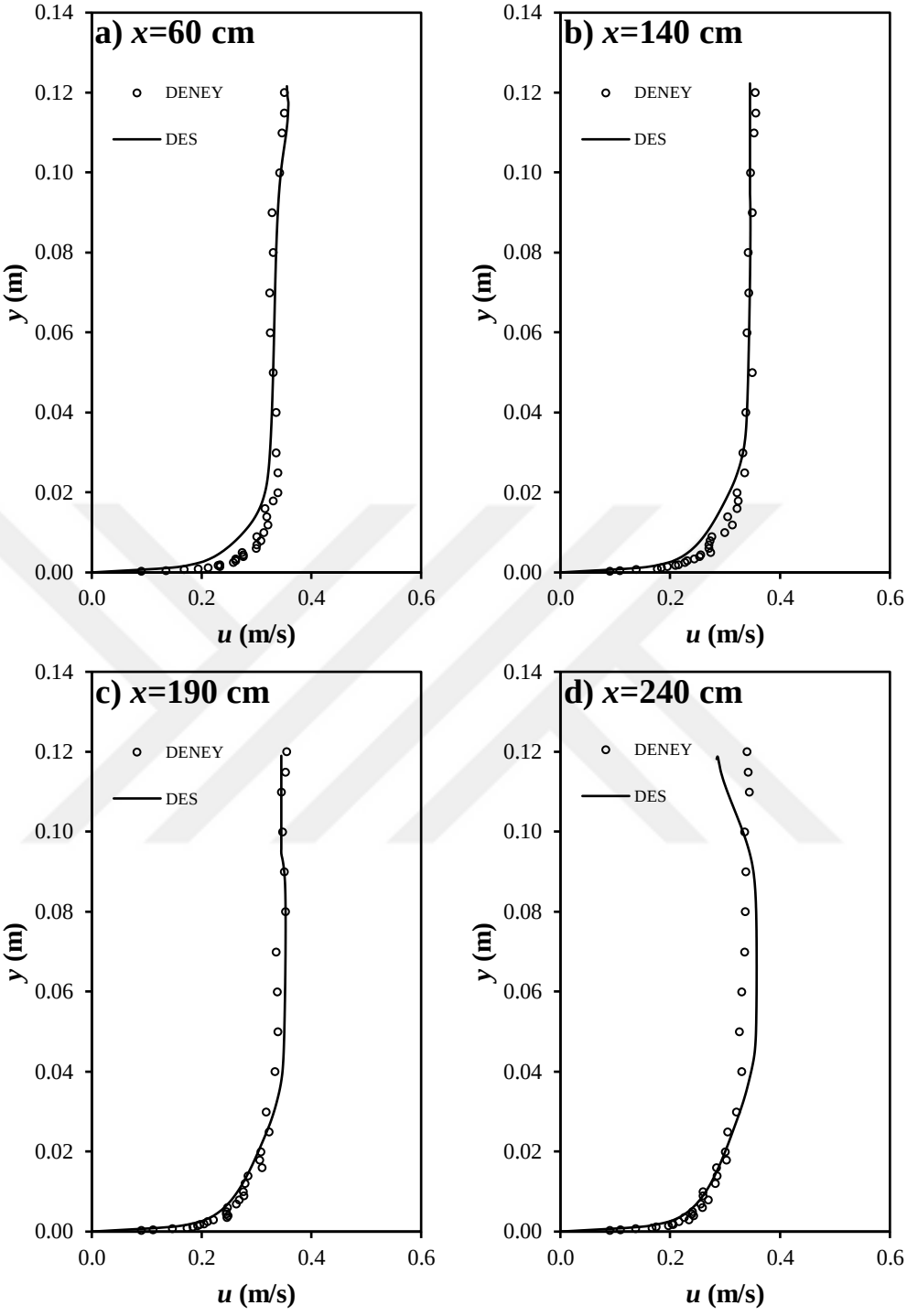


Şekil 4.5. Durum 3 (Devam)

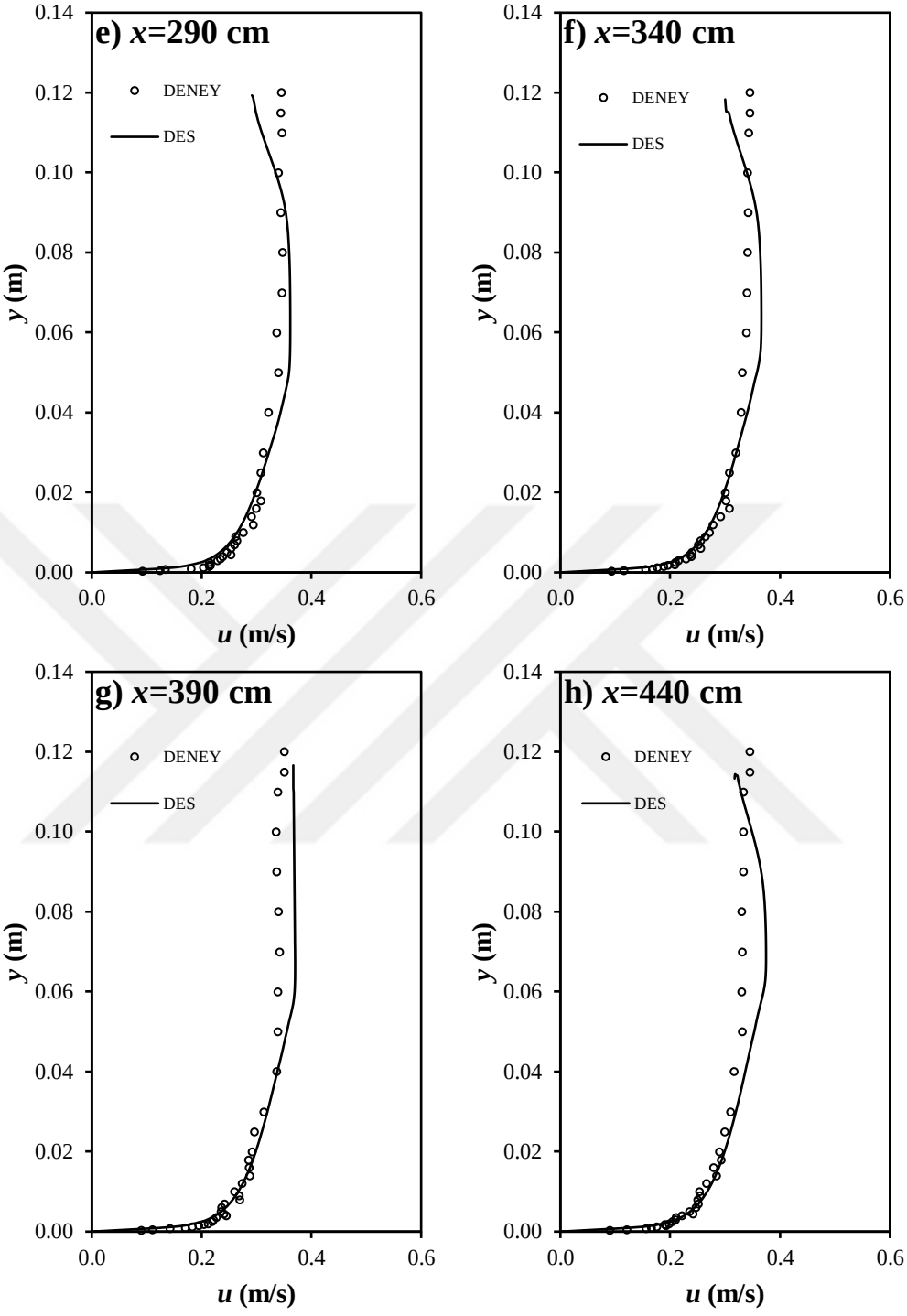


Şekil 4.5. Durum 3 (Devam)

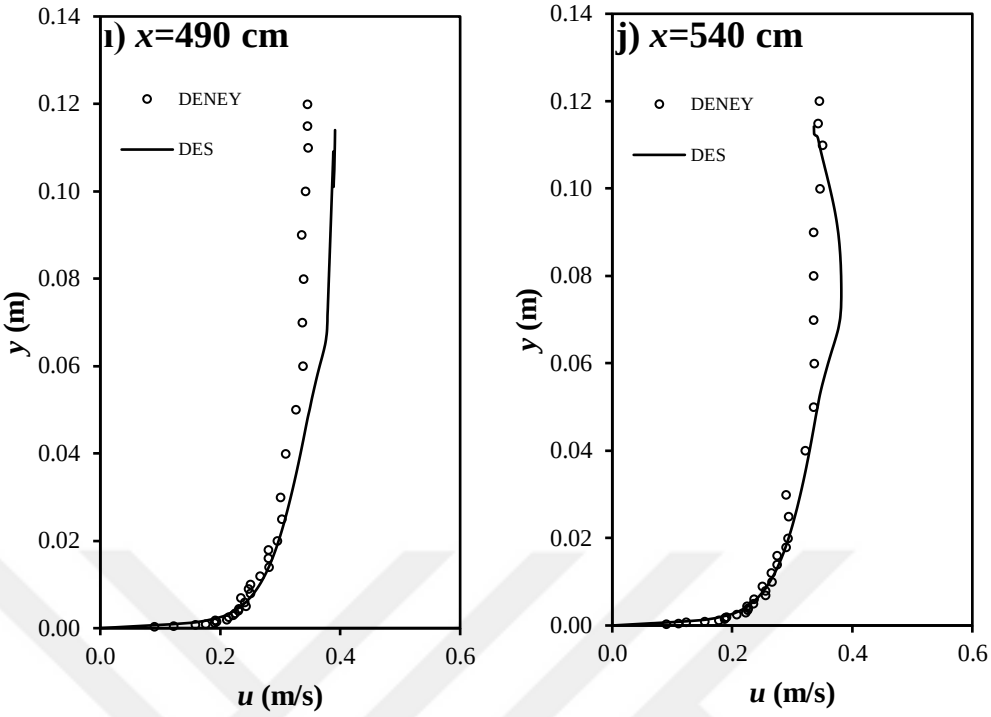
Çizelge 4.9'da Durum 4 için kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalama değerlerine göre kanal boyunca hız alanını, DES modeli kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı modellemiştir. Deneysel sonuçlar ile DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılması Şekil 4.6'da verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, DES modeli x=60, 140 ve 190 cm kesitlerinde deneysel verileri tahminde çok başarılı olmuştur. Kanal girişinde x=60 ve 140 cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede deneysel veriden uzaklaşırken akım derinliği boyunca bu sınırın üstünde kalan kısımda daha yakın tahminde bulunmuştur. Kanal boyunca x=60 ve 140 cm dışında kalan kesitlerde kanal tabanına yakın bölgeyi deneysel verilere yakın tahminde bulunarak bu bölgede çok başarılı olmuştur. Çizelge 4.9'da verilen OKH değeri incelendiğinde deneysel verilere en yakın tahmini x=190 cm kesitinde (1.31 cm^2/s^2) yaparken, en uzak tahmini de x=290 cm kesitinde (6.92 cm^2/s^2) yapmıştır.



Şekil 4.6 Durum 4 için deneysel ve sayısal hız profilleri

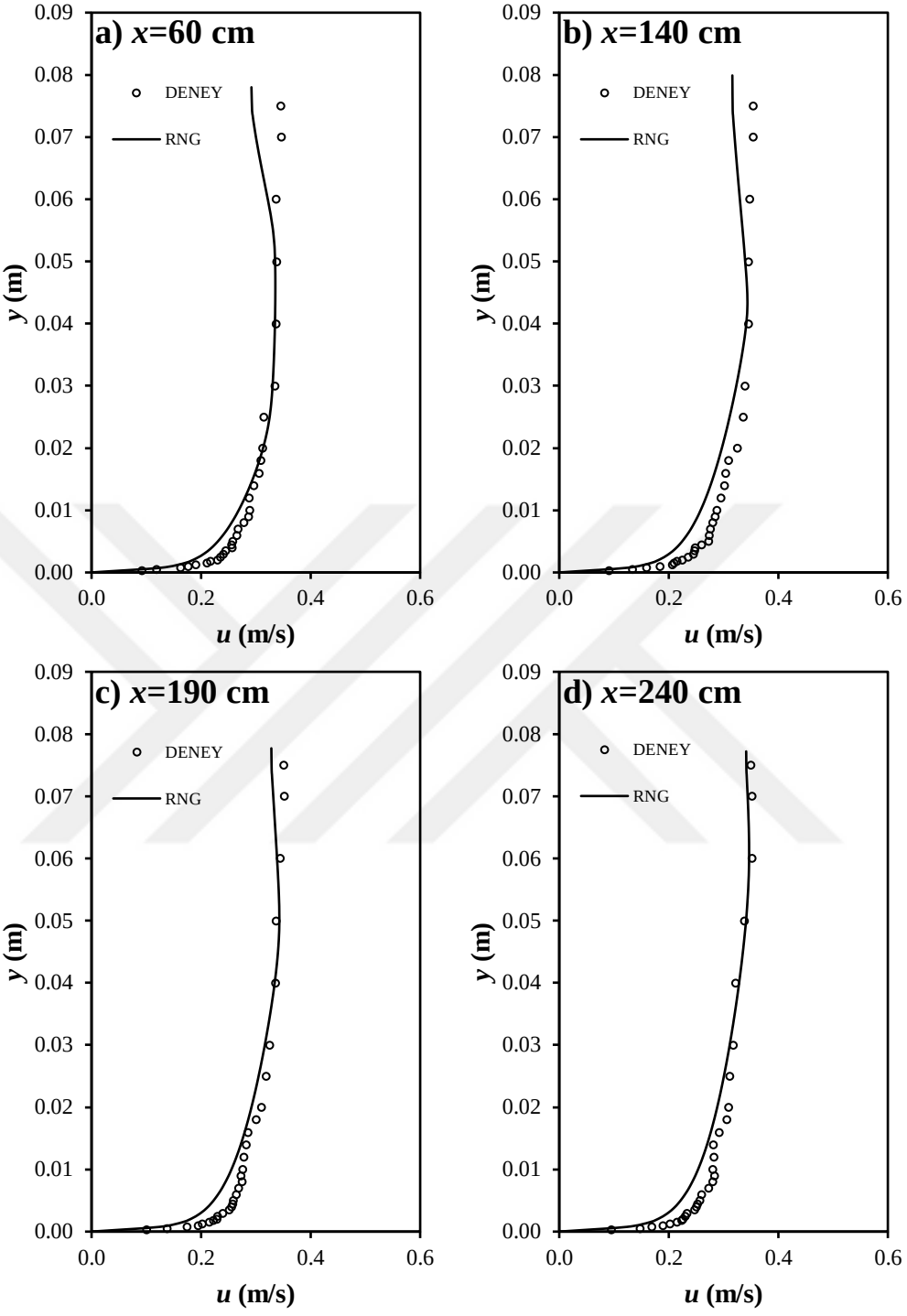


Şekil 4.6 Durum 4 (Devam)

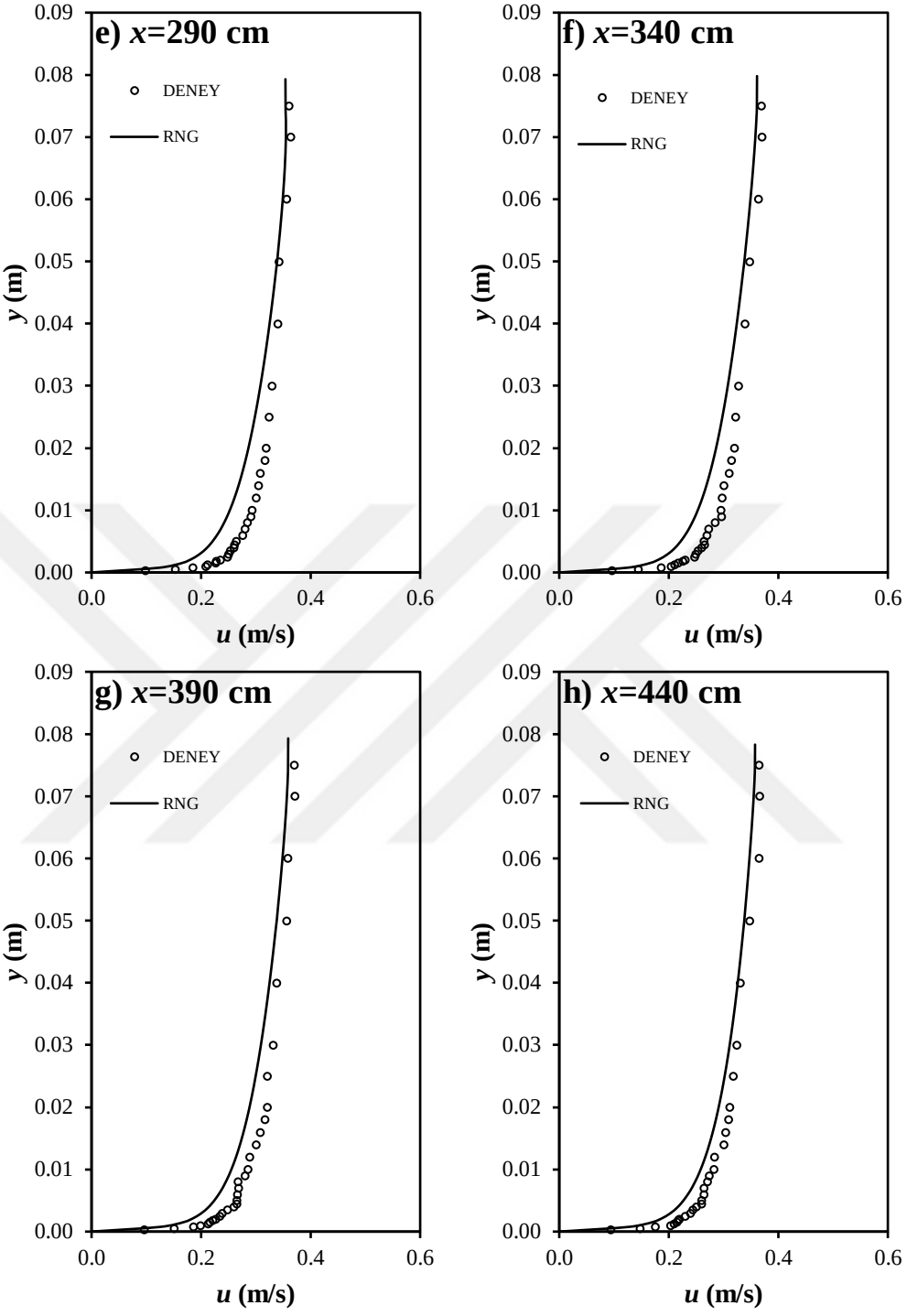


Şekil 4.6 Durum 4 (Devam)

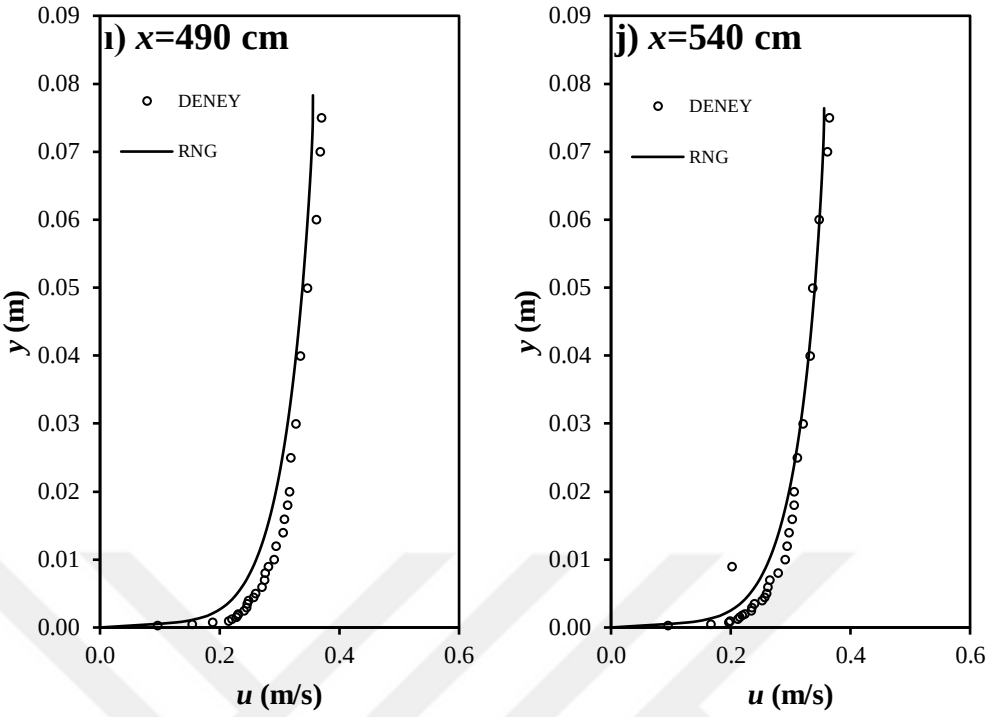
Şekil 4.7'de, Durum 5 için kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerinin ortalamasına göre deneysel hız profillerine en yakın tahminde bulunan RNG modeli ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel sonuçlar ile grafiksel karşılaştırılması verilmiştir. Tüm diğer durumlar incelendiğinde, RNG modeli sadece durum 5'te başarılı olmuştur. Şekil 4.7 incelendiğinde, RNG modeli, kanal giriş bölgesinde x=60, 140 ve 190 cm kesitlerinde katı sınıra ve su yüzüne yakın bölgenin dışında (akım derinliğinin orta kısmında) deneysel veriye yakın tahminde bulunmuştur. Bu kesitlerden sonra RNG modelinin, serbest su yüzüne doğru deneysel verilere yakın tahminde bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 Durum 5 için deneysel ve sayısal hız profilleri

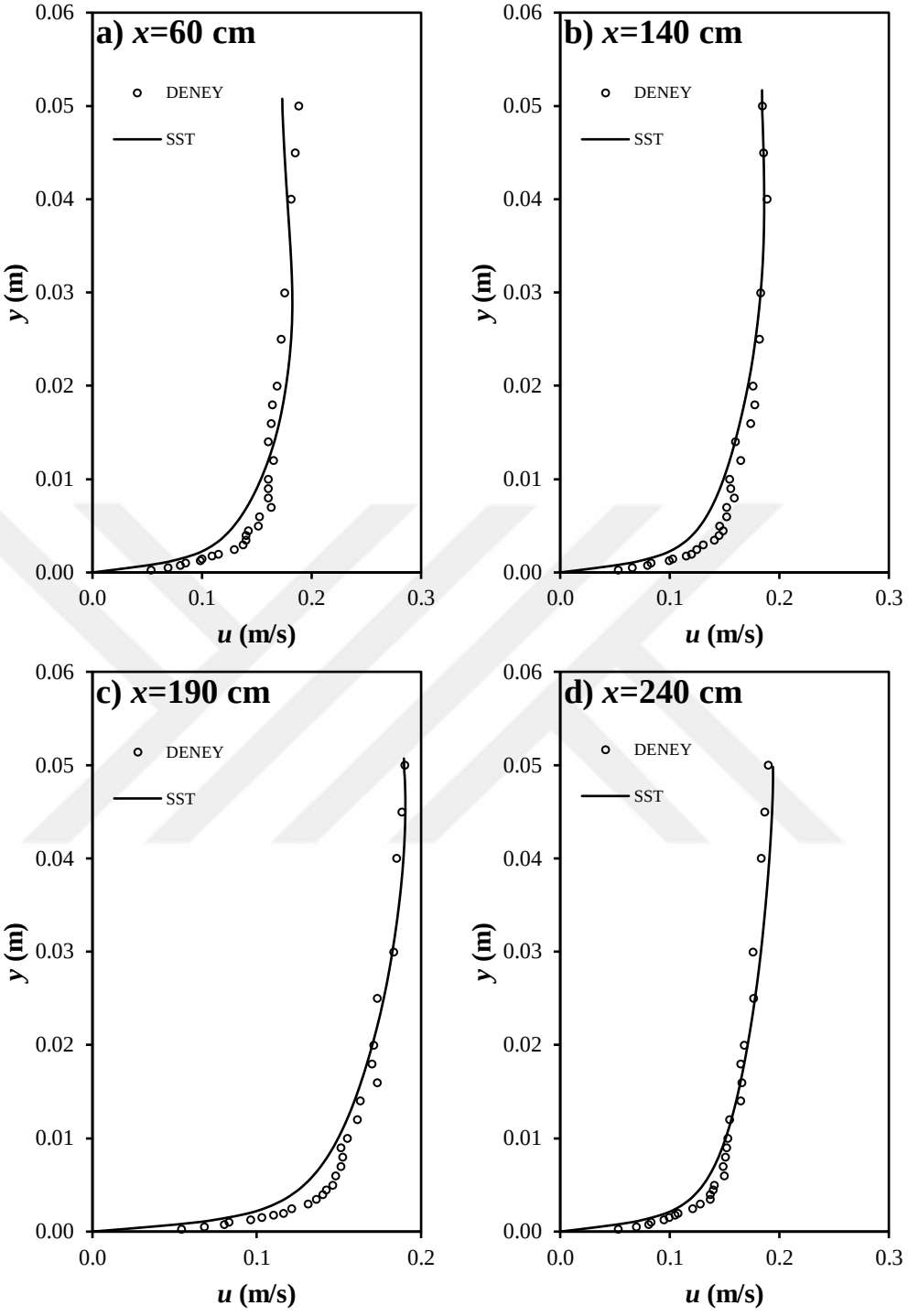


Şekil 4.7 Durum 5 (Devam)

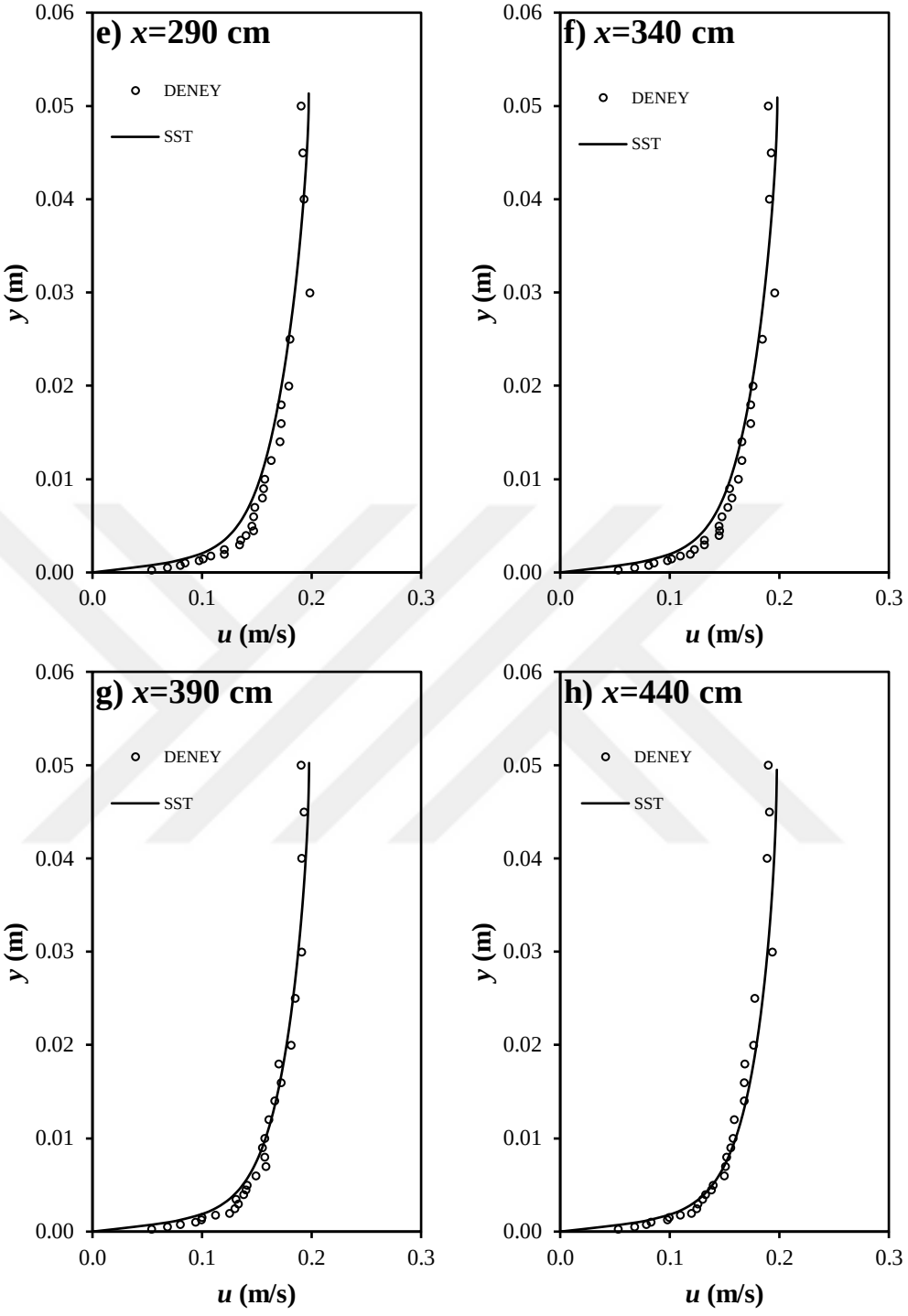


Şekil 4.7 Durum 5 (Devam)

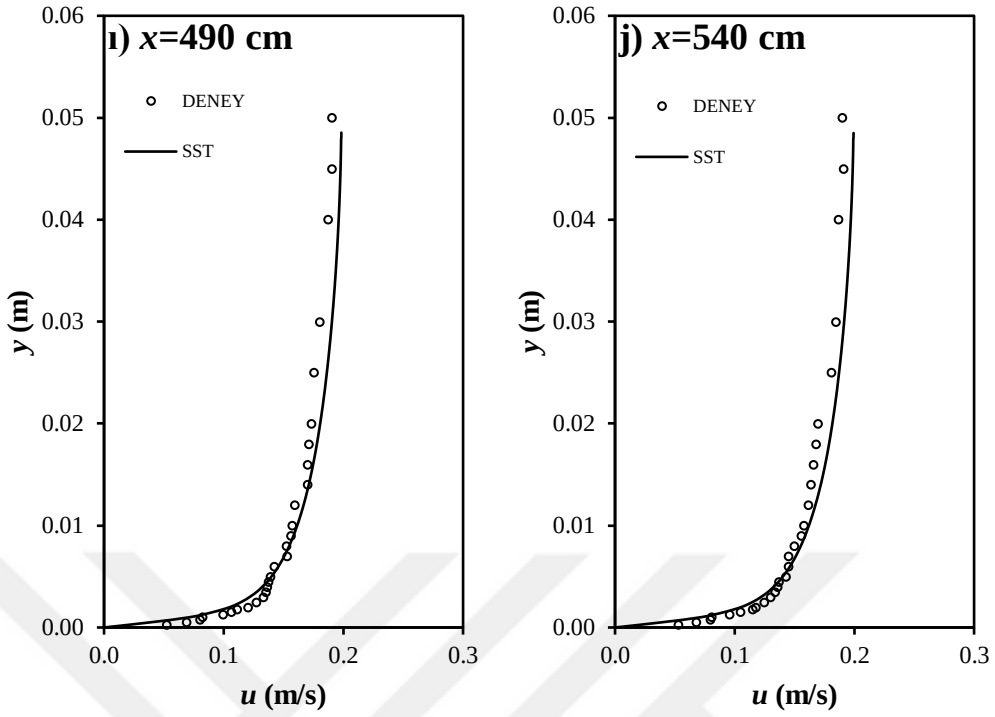
Çizelge 4.11'de Durum 6 için son satırda verilen OKH ve OMGH ortalama değerlerine göre kanal boyunca hız alanını, DES modeli diğer modellere kıyasla daha başarılı modellemiştir. Deneysel sonuçlar ile DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılması Şekil 4.8'de verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, kanal tabanına yakın bölgede deneysel verilerle uyum azken kanal tabanından uzaklaştıkça akım derinliğinin artmasıyla hız profilleri arasındaki uyum çok iyi olmuştur. Durum 6 için tüm kesitler kıyaslandığında en iyi uyum x=440 cm kesitinde olmuş ve tüm akım derinliği boyunca uyum çok iyi olmuştur.



Şekil 4.8 Durum 6 için deneysel ve sayısal hız profilleri

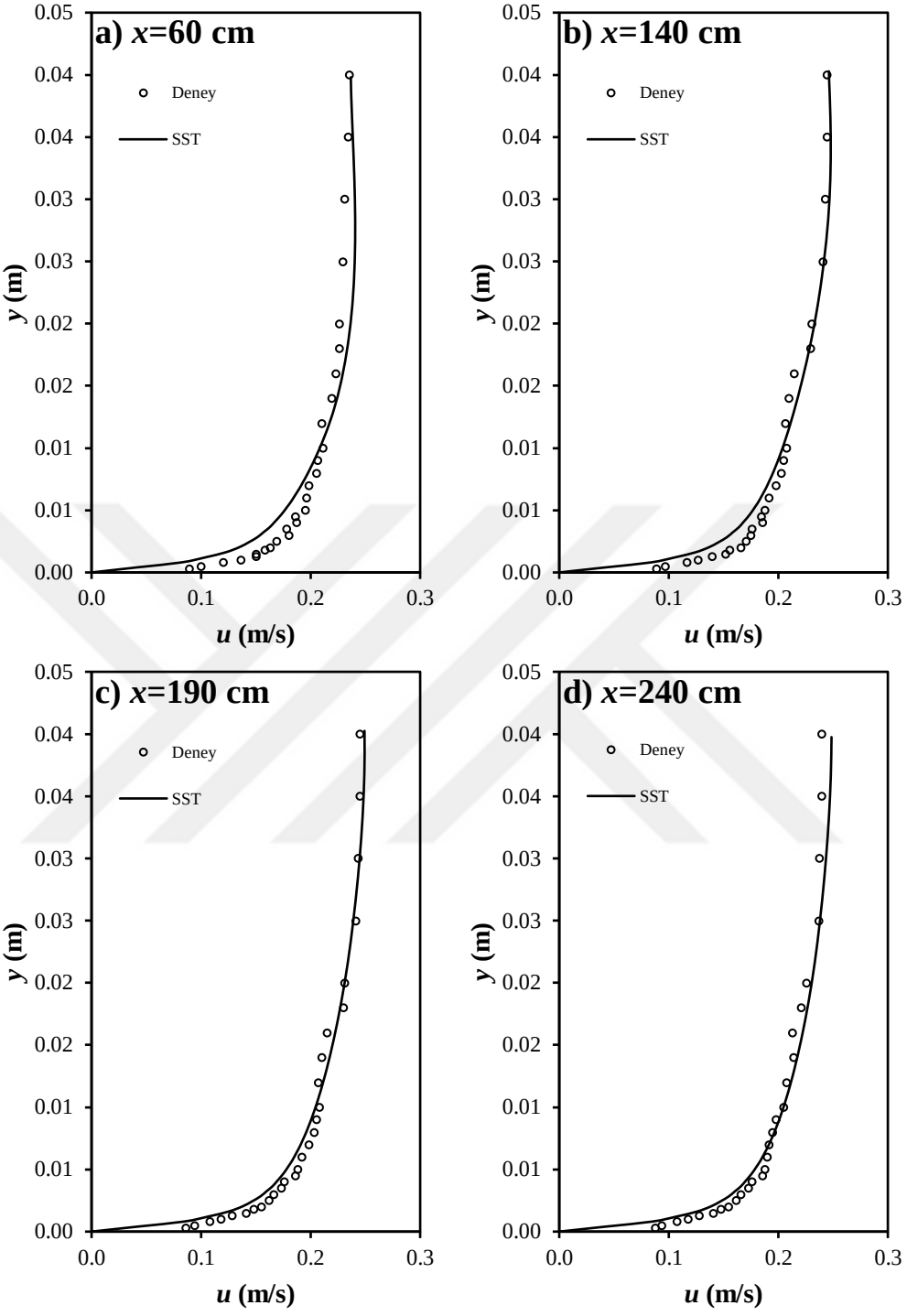


Şekil 4.8 Durum 6 (Devam)

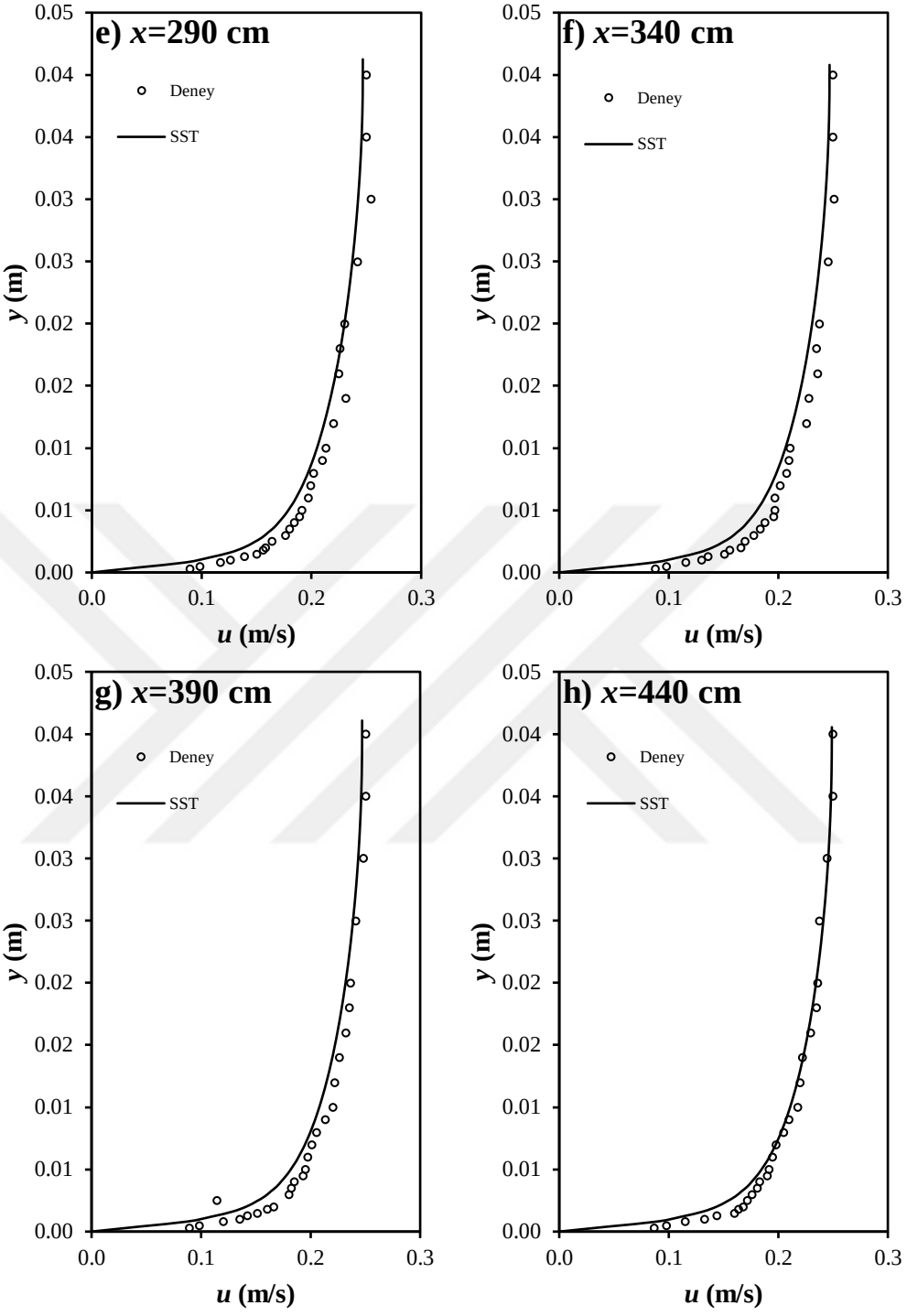


Şekil 4.8 Durum 6 (Devam)

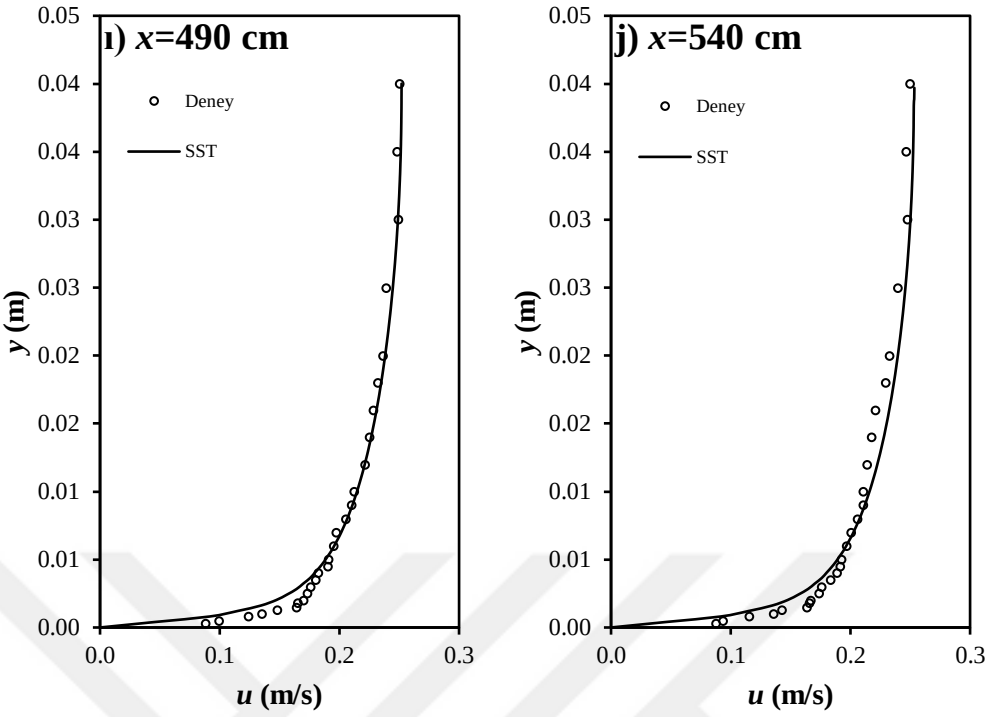
Çizelge 4.12'de Durum 7 için OKH ve OMGH ortalama değerlerine göre kanal boyunca hız alanını, SST modeli diğer modellere kıyasla daha başarılı modellemiştir. Deneysel sonuçlar ile SST modelinden elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması Şekil 4.9'da verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde SST modelinin kanal boyunca ele alınan kesitlerde deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği, ancak katı sınıra yakın olan bölgede deneysel verilerden uzaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, sayısal ve deneysel sınır tabakası kalınlıklarının birbirinden farklılık gösterdiği ifade edilebilir. Katı sınıra yakın bölgede sayısal hız değerlerinin deneysel hız verilerinden küçük olduğu görülmektedir. Kanal girişinde x=60 cm kesitinde sınır tabakasının üst tarafını deneysel hız verilerinden büyük tahmin ederken diğer kesitlerde nispeten küçük tahminde bulunmuştur. Çizelge 4.12'de verilen OKH değerleri incelendiğinde, deneysel verilere en yakın tahmini x=190 cm kesitinde (0.62 cm^2/s^2) yaparken en uzak tahmini de x=340 cm kesitinde (6.34 cm^2/s^2) yapmıştır. Bu sonuç, grafiksel karşılaştırmadan da görülmektedir.



Şekil 4.9 Durum 7 için deneysel ve sayısal hız profilleri



Şekil 4.9 Durum 7 (Devam)



Şekil 4.9 Durum 7 (Devam)

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, kritik altı akım koşullarında farklı akım durumlarına sahip açık kanal akımının sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal modellemelerde akımın hareketini idare eden temel denklemler sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS Fluent paket programı yardımıyla çözülmüş ve su yüzü profilinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Temel denklemlerin çözümde Reynolds ortalamalı Navier Stokes (RANS) tabanlı RNG, SST, RSM türbülans modelleri ve LES ve RANS eşitliklerinin çözümü bir arada barındırmasından dolayı hibrit bir model olan DES kullanılmıştır. Sayısal modelleme sonuçları üzerinde ağ yapısının etkisinin olup olmadığının belirlenmesi için Ağ Yakınsama İndeksi yöntemi kullanılmıştır. Ardıçlıoğlu (1994) tarafından laboratuvar ortamında farklı kanal eğimi ve akım şartları altında elde edilen hız profilleri, farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Farklı akım koşullarında türbülans modellerinin başarısı farklılık göstermiştir. Farklı türbülans modellerinin başarısının belirlenmesi için niceliksel kriter olarak OMGH ve OKH değerleri kullanılmıştır.

Ağ yapısının sayısal modelleme sonuçları üzerinde etkisinin olup olmadığının belirlenmesi için üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı tasarımı yapılmıştır. Ağ yakınsama indeksi yöntemiyle elde edilen sonuçlardan GCI değerinin %2'den küçük olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak sayısal modellemelerde kullanılan hesaplama ağının sonuçlar üzerinde etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu, diğer bir ifadeyle sayısal model sonuçlarının ağ yapısından bağımsızlaştığı görülmüştür.

Kanal eğiminin 0.0005, akım debisinin 19.5 l/s ve su derinliğinin 20 cm olduğu Durum 1'de kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamasına göre en küçük OKH (5.09 cm^2/s^2) ve OMGH (%5.25) değerleri SST türbülans modeliyle elde edilmiştir. Bu değerlerden, SST türbülans modelinin kullanılan diğer modellere kıyasla Durum 1 akım koşullarında daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Kanal boyunca ele alınan noktalarda elde edilen OKH değerlerine göre türbülans modellerinin başarı sıralaması SST, DES, RNG ve RSM şeklinde olurken, OMGH değerlerinin ortalamasına göre ise SST, RNG, RSM ve DES

şeklinde olmuştur. Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin birbirine çok yakın olması farklı kriterlere göre farklılıkların oluşmasına neden olmuştur. En büyük OMGH değerinin %6.23 olmasından dolayı, genel olarak sayısal modellemede kullanılan türbülans modellerinin başarılı olduğu ifade edilebilir.

Durum 1'e kıyasla kanal eğiminin arttığı ve akım derinliğinin azaldığı (10 cm) olduğu Durum 2'de ise kanalın farklı kesitlerinde elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre türbülans modellerinin başarısı DES, SST, RNG ve RSM şeklinde oluşmuştur. Durum 1'e kıyasla ortalama OKH artış görülürken, ortalama OMGH değerinde benzerlik bulunmaktadır.

Akım debisinin 14.5 l/s, kanal eğiminin 0.0005 ve su derinliğinin 15 cm olduğu Durum 3'te ele alınan kesitlerde OKH değerine göre genel olarak RSM modeli başarılı görülürken, OMGH kriterine göre ise genel olarak DES modeli başarılı olmuştur. Bu sonuç kanal boyunca ele alınan noktaların OKH ve OMGH değerlerinin ortalamasında da ortaya çıkmıştır. OKH kriterine göre başarı sıralaması RSM, RNG, SST ve DES şeklinde oluşurken, OMGH kriterine göre ise DES, RSM, RNG ve SST şeklinde oluşmuştur. Ortalama OKH ve OMGH kriterlerine göre, kullanılan türbülans modellerinin Durum 3'teki akım koşullarını sayısal olarak modellemede genel olarak Durum 1 ve Durum 2'ye kıyasla daha başarılı olduğu söylenebilir.

Durum 4'te ele alınan tüm kesitlerde ve ele alınan kesitlerin ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre kullanılan türbülans modelleri arasında deneysel hız profillerine en yakın tahminde DES modeli bulunmuştur. Ortalama OKH ve OMGH değerlerinden DES modeline en yakın sonuç veren RSM modeliyle DES modeli sonuçları arasında iki kat fark bulunmaktadır. Ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre türbülans modelleri DES, RSM, SST ve RNG olarak sıralanmıştır.

Durum 5'te ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre türbülans modelleri RNG, SST, RSM ve DES şeklinde sıralanmıştır. Kullanılan kriterlere göre kanal giriş ve çıkış bölgelerinde ele alınan kesitlerde RNG modeli, kanal orta bölgesinde ele alınan kesitlerde ise RSM modeliyle en başarılı modeller olarak belirlenmiştir.

Durum 6'da x=0.6-4.4 m arasında elde edilen en küçük OKH ve OMGH değerlerine göre SST modeli başarılı olurken x=4.9 m ve x=5.4 m kesitlerinde DES

modeli en iyi tahminde bulunmuştur. Ortalama olarak elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre ise türbülans modellerinin başarılı sıralaması SST, DES, RNG ve RSM olarak oluşmuştur. Durum 1, 2, 3, 4 ve 5'e göre Durum 6'da elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerleri daha küçük olmuştur. Bu sonuçtan türbülans modellerinin Durum 6'da ele alınan durumlara göre daha başarılı olduğu söylenebilir.

Durum 7'de elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre türbülans modelleri SST, DES, RSM ve RNG şeklinde başarı sıralaması oluşmuştur.

Akım debisinin ve buna bağlı olarak akım derinliğinin azalmasıyla birlikte eğimli kritik altı akımın sayısal modellemesinde kullanılan türbülans modellerinin başarısının arttığı görülmüştür. 7 farklı akım durumu için elde edilen sonuçların genel değerlendirmesinden, RNG ve RSM türbülans modellerinin sadece bir akım durumunda, DES modelinin iki farklı akım durumunda ve SST türbülans modelinin ise üç farklı akım durumunda başarılı olmuştur. 7 farklı akım durumunda farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerlerinin birbirine çok yakın olmasından dolayı kritik altı açık kanal akımının sayısal modellemesinde herhangi bir modelin kullanılmasının sakıncasının bulunmadığı belirlenmiştir.

Deneysel ve sayısal hız profillerinin farklı akım durumlarında karşılaştırılmasından, elde edilen hız profillerinin genel olarak birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bazı akım durumlarında hız profilleri arasındaki farklılık katı sınıra yakın bölgede daha fazla iken, bazı durumlarda ise su yüzüne yakın bölgede daha fazladır. Genel olarak sayısal ve deneysel hız profillerinin dağılımının benzer olduğu, deneysel verilerde kritik altı akım koşullarının oluşturulması için kanal sonuna yerleştirilen kayar kapağın yüksekliğinin verilmemiş olmasından kaynaklı olarak, sayısal modellemede açık kanal akımı modellemesinin kullanılmasından kaynaklı bazı farklılıkların oluştuğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, eğimli kritik altı açık kanal akımının sayısal modellemesinde, RANS ve DES modellerinin başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Aköz, M , Şimşek, O ve Soydan, N . (2019). Numerical Modeling of Interaction of Turbulent Flow with a Buried Circular Cylinder on a Plane Surface. Teknik Dergi, 30 (6), 1-25.

Aköz, M. S., Şimşek, O., Soydan, N. G., Gümüş, V., & Kırkgöz, M. S. (2015), RSM Türbülans Modeli İle Enerji Kırıcı Yapı Üzerindeki Akımın Sayısal Modellenmesi.

Ardıçlıoğlu, M. (1994). Pürüzsüz açık kanal akımlarında türbülanslı hız dağılımının lazer doppler anemometresi ile incelenmesi (Doctoral dissertation, doktora tezi, Çukurova Üniversitesi).

Bal, H., Kırkgöz, M. S., & Gümüş, V. (2011). Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(2), 33-45.

Bal, Ş. (2019). Değişken enkesitli açık kanal akımının deneysel ve sayısal modellemesi/Experimental and numerical modeling of open channel flow in various cross-section (Doctoral dissertation).

Gümüş, V., & Kırkgöz, M. S. (2014). Dolusavak Akımının Farklı Türbülans Kapatma Modelleri ile Sayısal Hesabı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 71-81.

Gümüş, V., & Şimşek, O. (2015). Eğimli Açık Kanal Akımının Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellemesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 41-54.

Hirt, C. W. & Nichols, B. D. (1981). Volume of Fluid (Vof) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1): 201-225.

Hromadka II, T. V., & Rao, P. (2019). Examination of Computational Precision versus Modeling Complexity for Open Channel Flow with Hydraulic Jump. Journal of Water Resource and Protection, 11(10), 1233-1244.

İlkentapar, M., & Öner, A. A. (2017). Geniş Başlıklı Savak Etrafındaki Akımın İncelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 615-626.

İspir, M. A., Kırkgöz, M. S., & Gümüş, V. (2014),Yavaş Değişen Kritik-Altı Açık Kanal Akımının k-ε Türbülans Kapatma Modelleri ile Sayısal Hesabı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 145-156.

Launder, B. E., and Spalding, D. B., (1972). Lectures in mathematical models of turbulence, New York. Academic Press.s

Naik, B., Khatua, K. K., Wright, N., Sleigh, A., & Singh, P. (2018). Numerical modeling of converging compound channel flow. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 24(3), 285-297.

Özdem, M. (2007). Dolu savaklar üzerinde oluşan akım özelliklerinin sayısal analizi/Numerical analysis of flow characteristics formed on spillway.

Roache, P. J. (1994). Perspective - a Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 116(3): 405-413.

Roache, P. J. (1998). Verification of Codes and Calculations. Aiaa Journal, 36(5): 696-702.

Soydan, N. G., Aköz, M. S., Şimşek, O., & Gümüş, V. (2012). Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının ke Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), 47-58.

Soydan, N. G., Şimşek, O., & Aköz, M. S. (2018). Köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal ve deneysel analizi. Politeknik dergisi, 21(1), 137-147.

Şimşek, O., Aköz, M. S., & Gümüş, V. (2011). Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel ve Teorik Analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(2), 47-55.

Tajnesaie, M., Jafari Nodoushan, E., Barati, R., & Azhdary Moghadam, M. (2018). Performance comparison of four turbulence models for modeling of secondary flow cells in simple trapezoidal channels. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 1-11.

Yağcı, O., & Kabdaşlı, M. S. (2011). Tekil doğal bitkilerin açık kanallardaki akım karakteristikleri üzerinde etkisi. İTÜDergisi/d, 6(3).

Yakhot, V., Orszag, S., Thangam, S., Gatski, T., and Speziale, C., (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993), 4(7):15101520.

Yakhot, V., ve Orszag, S. A., (1986), Renormalization-group analysis of turbulence. Physical Review Letters, 57(14):1722-1724.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Alaattin SEVEN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Midyat/Mardin / 25.05.1990
Telefon : 0 (507) 900 43 59
e-mail : alaattinseven@yahoo.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe / İl	Bitirme Yılı
Lise	Midyat Aziz Önen Lisesi	Midyat/ Mardin	2007
Ön Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi, İskenderun MYO, İnşaat Teknolojisi Programı	İskenderun/ Hatay	2011
Lisans	Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü	Şanlıurfa	2017
Y. Lisans	Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Şanlıurfa	2020

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009-2014	Topalali İnşaat TİC. LTD. ŞTİ.	Tekniker
2015	DSİ 151. Şanlıurfa şubesi	Stajyer
2017-2020	Topalali İnşaat TİC. LTD. ŞTİ.	Şantiye Şefi

UZMANLIK ALANI:

Sayısal modelleme, türbülans modelleri, açık kanal akımları

YABANCI DİLLER:

İngilizce

YAYINLAR:

SEVEN, A., GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., 2019 Az Eğimli Açık Kanal Akımının Rans ile İki Boyutlu Sayısal Analizi. 6th lnternational Scientlfic Research Congress. 1-3 Kasım 2019, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa

CAN, M., C., GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., İFŞAAT, H., İ., **SEVEN, A.,** 2019. Farklı Kapak Açıklıklarına Sahip Açık Kanal Akımının Su Yüzünün Rng Türbülans Modeli İle Sayısal Analizi. 3. Uluslararası Gap Matematik - Mühendislik - Fen Ve Sağlık Bilimleri Kongresı. 29 Kasım - 1 Aralık 2019, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa

SEVEN, A., GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., PARMAKSIZ, M., AVŞAROĞLU, Y., 2019. Kritik Altı Açık Kanal Akımının Nümerik Modellemesinde Ağ Yapısının Etkisinin İncelenmesi. 3. Uluslararası Gap Matematik - Mühendislik - Fen Ve Sağlık Bilimleri Kongresı. 29 Kasım - 1 Aralık 2019, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa