T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEĞİŞKEN ENKESİTLİ AÇIK KANAL AKIMININ DENEYSEL VE SAYISAL MODELLEMESİ

Şemsettin BAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEĞİŞKEN ENKESİTLİ AÇIK KANAL AKIMININ DENEYSEL VE SAYISAL MODELLEMESİ

Şemsettin BAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ danışmanlığında Şemsettin BAL' ın hazırladığı **"Değişken Enkesitli Açık Kanal Akımının Deneysel ve Sayısal Modellemesi"** konulu bu çalışma 11/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ ……

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ŞİMŞEK ……

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇELİK ……....

Bu Tezin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAP Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 17080

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirilişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1.GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL ve YÖNTEM 10
3.1. Deneyler 10
3.2. Yöntem 14
3.2.1. Temel denklemler 14
3.2.2. Türbülans kapatma modelleri 15
3.2.2.1. k-ε türbülans modelleri 15
3.2.2.2. k-ω türbülans modelleri 16
3.2.2.3. Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM) 17
3.2.2.3. Büyük girdap benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) 18
3.2.2.4. Bağımsız girdap benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES) 18
3.2.3. Ağ yakınsama indeksi (GCI) 19
3.2.4. Akışkan hacimler yöntemi (Volume of Fluid-VOF) 20
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 21
4.1. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları 21
4.2. Ağ Yapısının Belirlenmesi 21
4.3. Deneysel ve Sayısal Hız Profilleri 23
4.3.1. DES modeli ile hesaplanan hız profilleri 27
4.3.2. RNG modeli ile hesaplanan hız profilleri 30
4.3.3. SKE modeli ile hesaplanan hız profilleri 33
4.3.4. LES modeli ile hesaplanan hız profilleri 36
4.3.5. RKE modeli ile hesaplanan hız profilleri 39
4.3.6. RSM modeli ile hesaplanan hız profilleri 42
4.3.7. SKW modeli ile hesaplanan hız profilleri 45
4.3.8. SST modeli ile hesaplanan hız profilleri 48
4.4. Deneysel ve Sayısal Su Yüzü Profilleri 51
4.5. Sayısal Akım Çizgileri 53
4.6. Sayısal Hız Vektörleri 55
4.7. *u* Hızının Üç Boyutlu Dağılımı 56
4.8. Sayısal Hız Vektörlerinin Üç Boyutlu Dağılımları 69
4.9. Sayısal Türbülans Kinetik Enerjisinin Üç Boyutlu Dağılımı 81
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 92
KAYNAKLAR 94
ÖZGEÇMİŞ 97

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEĞİŞKEN ENKESİTLİ AÇIK KANAL AKIMININ DENEYSEL VE SAYISAL MODELLEMESİ

Şemsettin BAL

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ
Yıl: 2019, Sayfa: 97

Bu çalışmada, açık kanal içerisinde daralma ve genişleme kesiti oluşturan trapez başlıklı yapı ile etkileşimde bulunan akım, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, hız alanı akustik doppler hız ölçer (Acoustic Doppler Velocimeter-ADV) ve su yüzü profili ise limnimetre kullanılarak ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde 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 Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES), Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) modelleri kullanılarak, akım hız alanı ve su yüzü profili belirlenmiştir. Kullanılan modellerin performansları, Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olduğu bilinen hesaplama ağının analizinde Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi, serbest su yüzünün belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF) metodu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, akım hız alanı ve serbest su yüzü profilinin belirlenmesinde DES modelinin kullanılan diğer modellere göre daha başarılı sonuç verdiği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Açık kanal akımları, akustik doppler hız ölçer, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, hız alanı, türbülans kapatma modelleri

ABSTRACT

MSc Thesis

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF OPEN CHANNEL FLOW IN VARIOUS CROSS-SECTION

Şemsettin BAL

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Veysel GÜMÜŞ
Year: 2019, Page: 97

In this study, the flow that interacts with the trapezoidal head structure, which constitutes the narrowing and expansion section in the open channel, has been investigated experimentally and numerically. In experimental studies, the velocity field and flow profile are measured using acoustic doppler velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. In numerical modeling, Standard k-ε (SKE), Renormatization Group k-ε (RNG), Realizeble k- ε (RKE), Standard k-ω (SKW), Shear Stress Transport (SST), Reynolds Stress Model (RSM)) turbulence models and Detached-Eddy Simulation (DES), Large Eddy Simulation (LES) models are used. The successful model to estimate the velocity field and flow profiles are evaluated. In the evaluation of the model performance, Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used. Grid Convergence Index (GCI) method is used to determine the mesh density and the Volume of Fluids (VOF) method is used to determine the free surface profile. As a result of the study, it is determined that DES model is more successful than used other models in determining velocity field and flow profile.

KEY WORDS: Open channel flows, acoustic doppler velocimeter, computational fluid dynamics, velocity field, turbulence closure models

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında bana rehberlik eden, yardımlarını esirgemeyen ve akademik gelişimime katkı sağlayan danışman hocam sayın Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ'e, tezin yazımı sırasında öneride bulunan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ŞİMŞEK'e, çalışmalarım sürecinde fedakârlık göstererek bana yardımcı olan ağabeyim ve meslektaşım Yük. İnş. Müh. Harun BAL'a, Şanlıurfa'da bulunduğum sürece her konuda desteklerini benden esirgemeyen Halam Hatice OMUŞ, kuzenim İsmail OMUŞ ve enişte Kazım OMUŞ'a en içten duygularımla şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak öğrenim hayatım boyunca, her zaman arkamda olduğunu bildiğim ve yanımda hissettiğim Aileme bana gösterdikleri sabır ve sonsuz güven için çok teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Deney düzeneği 10
Şekil 3.2. Pompa hız kontrol cihazı 11
Şekil 3.3. Elektromanyetik debi ölçüm cihazı 11
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin şematik görünümü 12
Şekil 3.5. Akustik doppler hız ölçer cihazı (ADV) 13
Şekil 3.6. ADV elektronik düşey hareket sistemi ve kontrol paneli 13
Şekil 3.7. Ağ elemanlarının doluluk oranları 20
Şekil 4.1. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları 21
Şekil 4.2. Üç boyutlu sayısal hesaplama ağı 22
Şekil 4.3. *xy* ve *xz* eksenlerine göre sayısal hesaplama ağı 22
Şekil 4.4. Deneysel ve sayısal hız profilleri (DES) 27
Şekil 4.5. Deneysel ve sayısal hız profilleri (RNG) 30
Şekil 4.6. Deneysel ve sayısal hız profilleri (SKE) 33
Şekil 4.7. Deneysel ve sayısal hız profilleri (LES) 36
Şekil 4.8. Deneysel ve sayısal hız profilleri (RKE) 39
Şekil 4.9. Deneysel ve sayısal hız profilleri (RSM) 42
Şekil 4.10. Deneysel ve sayısal hız profilleri (SKW) 45
Şekil 4.11. Deneysel ve sayısal hız profilleri (SST) 48
Şekil 4.12. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri 52
Şekil 4.13. SKE, RKE ve RNG modelleri ile elde edilen akım çizgileri (z=0.175 m) 53
Şekil 4.14. SKW ve SST modelleri ile elde edilen akım çizgileri (z=0.175 m) 54
Şekil 4.15. RSM, DES ve LES modelleri ile elde edilen akım çizgileri (z=0.175 m) 54
Şekil 4.16. SKE, RKE ve RNG modelleri ile elde edilen hız vektörleri (z=0.175 m) 55
Şekil 4.17. SKW ve SST modelleri ile elde edilen hız vektörleri (z=0.175 m) 55
Şekil 4.18. RSM, DES ve LES modelleri ile elde edilen hız vektörleri (z=0.175 m) 56
Şekil 4.19. DES ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 57
Şekil 4.20. RNG ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 58
Şekil 4.21. SKE ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 60
Şekil 4.22. LES ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 61
Şekil 4.23. RKE ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 63
Şekil 4.24. RSM ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 64
Şekil 4.25. SKW ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 66
Şekil 4.26. SST ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi 67
Şekil 4.27. DES ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 69
Şekil 4.28. RNG ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 71
Şekil 4.29. SKE ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 72
Şekil 4.30. LES ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 74
Şekil 4.31. RKE ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 75
Şekil 4.32. RSM ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 77
Şekil 4.33. SKW ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 78
Şekil 4.34. SST ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi 80
Şekil 4.35. DES ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 81
Şekil 4.36. RNG ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 83
Şekil 4.37. SKE ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 84
Şekil 4.38. RKE ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 86
Şekil 4.39. RSM ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 87
Şekil 4.40. SKW ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 89
Şekil 4.41. SST ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi 90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. Farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarına ait bölgesel eleman sayıları..... 23
Çizelge 4.2. Farklı türbülans modellerine ait OKH değerleri (cm^2/s^2)..... 25
Çizelge 4.3. Farklı türbülans modellerine ait OMGH değerleri (%)..... 26
Çizelge 4.4. Farklı türbülans modelleri ile elde edilen su yüzlerinin OKH ve OMGH değerleri..... 51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ADV	Akustik Doppler Hız Ölçer (Acoustic Doppler Velocimeter)
DES	Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation)
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
GCI	Grid Convergence Index
LES	Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation)
OKH	Ortalama Karesel Hata
OMGH	Ortalama Mutlak Göreceli Hata
Q	Debi
Re	Reynolds sayısı
RKE	Realizeble k- ε türbülans modeli
RNG	Renormatization Group k- ε türbülans modeli
RSM	Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model) türbülans modeli
SKE	Standart k- ε türbülans modeli
SKW	Standart k-ω türbülans modeli
SST	Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport) türbülans modeli
TKE	Türbülans Kinetik Enerji
u	x yönündeki akım hızı
v	y yönündeki akım hızı
VOF	Akışkan hacimleri yöntemi
w	z yönündeki akım hızı
ν	Kinematik vizkozite

1.GİRİŞ

Akarsu veya açık kanal akımlarının yapı ile etkileşimleri karmaşık bir akım problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapı akım etkileşiminin söz konusu olduğu akımlarda yapının akım alanında meydana getirdiği daralma veya genişleme durumları akım alanı, akım karakteristikleri ve akım profili gibi parametrelerde değişikliğe neden olur. Ayrıca, doğal akarsu veya yapay kanallar içerisine çeşitli amaçlar için inşa edilmek zorunda kalınan yapıların etrafındaki akım alanında meydana gelen değişimler, doğal akarsu rejimini değiştirmenin yanı sıra yatak malzemesinin de topolojisini değiştirir. Örneğin, akarsu üzerine inşa edilen iki açıklıklı bir köprü yapısında, köprü yan ayaklarının akarsu yatağına inşa edilmesi durumunda, akarsu en kesiti daralacak ve bu daralmaya bağlı olarak akım hızı artacak ve artan akım hızı akımın sürükleme kuvvetini etkileyecek ve yan ayaklar etrafında yatak malzemesinin oyulmasına ve yığılmasına neden olacaktır. Bunun yanı sıra, akarsu kesit alanında meydana gelen daralmadan kaynaklı olarak daralma yapısının membasında su seviyesinde bir artış yaşanacaktır ve aşırı seviyede meydana gelen akım derinliği artışı daralma yapısının membasında bulunan yerleşim yerlerini ve canlıların hayatlarını riske atabilecektir. Bu olumsuzlukların yaşanmaması için akım alanına yapmak zorunda olduğumuz yapıların geometrik özelliklerinin yanı sıra hidrolik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Ulaşımda kullanılan köprülerin statik ve dinamik projelendirilmesinde hata bulunmamasına rağmen ülkemizde yaşanan köprü yıkılmalarının ya da göçmelerinin en büyük nedeni, yapıya etki eden akımın hidrolik özelliklerinin ve yapı üzerindeki etkilerinin göz ardı edilmesi veya doğru analiz edilmemesinden kaynaklandığı görülmektedir.

Hidrolik yapıların projelendirilme aşamasında, yapının ve akımının statik, dinamik ve hidrolik açıdan projelendirilmesi için laboratuvarlarda deneysel model çalışmalarının yanı sıra, bilgisayar ortamında sayısal model çalışmaları da yapılabilmektedir. Ayrıca, yapı ile etkileşimde bulunan akımların hidrolik özelliklerinin teorik olarak belirlenebilmesi için çeşitli ampirik formüller de geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapı akım etkileşimi gibi karmaşık akım

problemlerinin sayısal olarak çözümünde kullanılan bazı paket programlar geliştirilmiştir. Sayısal model çalışmaları fiziksel model çalışmalarına kıyasla, daha az zaman ve maliyet gerektirmesi, insan gücüne daha az ihtiyaç duyması ve akım ile ilgili daha fazla bilgiyi daha pratik olarak elde etme imkanı verdiği için büyük avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra, sayısal modeller farklı akım ve/veya yapı koşulları altında tekrar edilmesi gereken analizler içinde oldukça elverişli ve pratiktir. Bu avantajlarından dolayı fiziksel model çalışmalarına kıyasla sayısal model çalışmaları araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından oldukça sık tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, açık kanal içerisinde daralma ve genişleme kesiti oluşturan trapez başlıklı yapı ile etkileşimde bulunan açık kanal akımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, akım alanı akustik doppler hız ölçer (ADV) ve akım profili limnimetre kullanılarak ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde ise farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak, bu modellerin akım alanını ve su yüzü profilini tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olduğu bilinen hesaplama ağının analizinde ağ yakınsama indeksi yöntemi kullanılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Choi ve Kim (2000), ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akımı analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir sayısal model geliştirmişler ve Türkiye'de bulunan Boyabat Barajı'nın mevcut dolu savağını bu metot ile yeniden düzenlemişlerdir. Ogee profilli dolusavak kret geometrisinde yapılan bu değişikliğin, dolusavak debi kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Farklı kret geometrileri için yapılan sayısal çözümlerden, akım debilerini ve serbest su yüzü profillerini elde etmişler ve hesapladıkları su yüzeyi profillerinin U.S. Army Corps of Engineers (USACE,1988) test verilerinden elde edilenlerle benzerlik gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Ashgriz ve ark. (2004), yarı silindirik bir yapı ile etkileşim halinde bulunan akımı, sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS paket programını kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal su yüzü profillerini VOF metodunu kullanarak elde etmişler, sayısal çözümlerden elde ettikleri basınç ve hız dağılımlarını grafiksel olarak göstermişlerdir.

Zerihun ve Fenton (2004), çalışmalarında kısa ve geniş başlıklı trapez savağın üzerinden geçen akımın özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Geliştirdikleri tek boyutlu akım modeli ile kret üzerindeki serbest yüzeyin eğriselliğini ve hidrostatik olmayan basınç dağılımını teorik olarak analiz etmişlerdir. Pürüzlü ve pürüzsüz savak yüzeyleri için yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sayısal bulguları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar, sayısal sonuçların deneysel verilerle gayet uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Chatila ve Tabbara (2004), ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akım profilini, farklı akım koşullarında, ADINA paket programı yardımıyla sayısal olarak incelemişlerdir. SKE türbülans modelini kullanarak elde ettikleri bulguları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar, sayısal su yüzü profillerinin deneysel ölçümlerle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.

Tabbara ve ark. (2005), basamaklı dolu savaklar üzerindeki akım ile ilgili sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. ADINA paket programı yardımıyla temel denklemlerin çözümlerini sayısal olarak elde etmişlerdir. Sayısal hesaplama bulgularını laboratuvarda yaptıkları ölçümlerden elde ettikleri deneysel bulgularla karşılaştırmışlar, HAD çözüm tekniklerinin, basamaklı dolu savak üzerindeki akımların karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça başarılı oldukları sonucuna varmışlardır.

Şeker (2006), üçgen bir savak arkasındaki akımı sayısal ve deneysel olarak modellemiştir. Akımın hız alanını, parçacık görüntülemeli PIV tekniğini kullanarak ölçmüştür. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS paket programından elde ettiği sayısal sonuçları deneysel ölçümlerle karşılaştırmıştır. Su yüzünün sayısal olarak belirlenmesinde VOF yöntemini kullanmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, deneysel ve sayısal akım hızları ile su yüzü profillerinin birbirleri ile gayet uyumlu olduğu sonucuna varmıştır.

Johnson ve Savage (2006), iki farklı ogee profilli dolu savak üzerinden geçen akımı deneysel ve sayısal olarak analiz etmişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır. 2001 yılında yazarlar tarafından, ogee profilli dolu savak akımının kuyruk suyu etkisi ihmal edilerek yapılan çalışmaya ek olarak, bu çalışmada kuyruk suyu etkisini de göz önüne almışlardır. Ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akım debisinin belirlenmesi ve savak üzerindeki basıncın sayısal ve deneysel sonuçlarının karşılaştırmasından, ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akımların tahmininde HAD yazılımlarının güvenle kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Ramamurthy ve ark. (2006), trapez kanaldaki açık kanal akımının üç boyutlu sayısal analizini, SKE türbülans modelini kullanarak yapmışlar ve su yüzünün belirlenmesi için VOF metodunu kullanmışlardır. Sayısal olarak elde edilen su yüzü profillerini, hızları ve basınçları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar, sonuçların uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Bhajantri ve ark. (2007), çalışmalarında sonlu hacimler yöntemi ve Büyük Girdap Benzeşimi (Large Eddy Simulation-LES) tabanlı türbülans modelini kullanarak dolusavak üzerindeki akımı sayısal olarak modellemişlerdir. Gerçek bir kapak kontrollü dolusavak üzerinde uygulanan bu model ile sayısal ve deneysel olarak bulunan hız dağılımlarını, basınç dağılımlarını ve debi katsayılarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, sayısal bulguların ölçülmüş değerlerle oldukça uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.

Hargreaves ve ark. (2007), tarafından deneysel olarak incelenen, geniş başlıklı savak ile etkileşim halindeki açık kanal akımını, SKE, RNG ve SST türbülans modellerini kullanarak ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla analiz etmişlerdir. Sayısal modellemede serbest su yüzü profilini belirlemek için VOF metodunu kullanmışlardır. Farklı türbülans modelleri kullanılarak yapılan sayısal analiz bulguları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması neticesinde, ANSYS-Fluent paket programının su yüzünü belirlemede başarılı olduğu, su yapı etkileşiminin olduğu problemlerin analizinde rahatlıkla kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Ho ve ark. (2003), dolusavak üzerinden geçen akımın özelliklerini teorik olarak incelemek amacıyla iki ve üç boyutlu sayısal model çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Sayısal modelin doğrulanması bağlamında hesaplama bulgularını, Warragamba, Hume ve Buffalo Barajlarının dolusavaklarında akım profilleri ile ilgili yaptıkları ölçümlerle karşılaştırmışlar ve uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Taghizadeh (2012), çalışmasında dinamik basınç dalgalanmalarının basamaklı yan savaklar üzerine etkisini sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan RNG türbülans kapatma modeli ile araştırmıştır. Çalışma sonucunda, yeni bir ogee profili formu önermişler ve bu yeni ogee profilinin yan savak üzerindeki türbülans şiddetini önemli derecede azaltmasının yanı sıra daha kolay inşa edilmesine imkan verdiğini ve daha kolay işletildiğini bildirmiştir.

Öner ve ark. (2012), keskin kenarlı kapak ile etkileşim halinde bulunan, iki boyutlu serbest yüzeyli açık kanal akımını deneysel olarak incelemişlerdir. Kapak

membası bölgesindeki akımın hız alanını PIV tekniği ile ölçmüşlerdir. Akımı idare eden temel denklemlerin sayısal çözümlerinde SKE türbülans modelini ve su yüzünün belirlenmesinde VOF metodunu kullanmışlardır. Sayısal çözümlerde ağ yapısının çözümler üzerindeki etkisini belirlemek için üç farklı yoğunluğa sahip ağ yapısı oluşturmuşlar ve sayısal analizlerden elde ettikleri sonuçları deneysel bulgularla karşılaştırarak, hız alanını ve su yüzünü belirlemede en uygun ağ yapısını elde etmeye çalışmışlardır.

Daneshkhah ve Vosoughifar (2012), çalışmalarında Fluent yazılımı içerisinde bulunan farklı türbülans modellerini kullanarak ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akımı sayısal olarak analiz etmişlerdir. Gauss-Seidel yakınsama kriterini esas alarak sayısal çözümlerde zaman adımını 0.01 s olarak belirlemişlerdir. RNG türbülans modeli kullanılarak yapılan sayısal analiz bulguları ile deney bulguları arasındaki göreceli hata yüzdesini 9.687 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, diğer bir sayısal analiz yazılımı olan Flow 3D ile elde edilen bulguların, Fluent sonuçlarıyla ve deneysel bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür.

Cassan ve Belaud (2012), çalışmalarında içerisinde kayar kapak bulunan açık kanal akımının memba ve mansap bölgelerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. 27 deneye ait akım özellikleri ADV (Acoustic Doppler velocimeter) ile ölçülmüş ve elde ettikleri deneysel sonuçları, farklı türbülans modellerini kullanarak elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, sayısal modellemede farklı türbülans modellerinin bulgular üzerindeki etkisinin oldukça fazla olduğunu, SKE ve SKW modellerinin, daralma kesitindeki akım derinliklerini yüksek hesapladığını, RSM ve RNG modellerinin ise hız profillerini hesaplamada oldukça başarılı olduğunu bildirmişlerdir.

Aydin (2012), içerisinde üçgen yan savak bulunan açık kanal modeline ait deneysel su yüzü profillerini, farklı türbülans modelleri kullanarak elde ettiği sayısal sonuçlarla karşılaştırmıştır. Serbest su yüzünün modellenmesinde VOF yöntemini, ağ yapısının çözüm üzerine etkisinin araştırılması için ise GCI yöntemini kullanmıştır.

Ortalama ayrıklaştırma hatasını %2.13 olarak belirlemiş ve çalışma sonucunda sayısal bulguların deneylerle uyumlu olduğunu bildirmiştir.

Ramamurthy ve ark. (2013), 90^o kıvrıma sahip açık kanal akımını üç boyutlu olarak Fluent paket programını kullanarak modellemişlerdir. Türbülansın modellenmesinde RNG, RSM ve LES, serbest su yüzünün hesaplanmasında ise yapıya uyarlanmış koordinat (Body-fitted coordinate-BFC) ve VOF yöntemlerini kullanmışlardır. Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sayısal bulguların deneyler ile karşılaştırılması sonucunda, VOF yöntemi ve RSM türbülans modeli kullanılarak oluşturulan sayısal model sonuçlarının deneylerle en uyumlu sonucu verdiğini bildirmişlerdir.

Aydin ve Emiroglu (2013), yan savak kapasitesini belirlemek için deneysel ve sayısal model çalışması yapmışlardır. Sayısal olarak elde ettikleri akım özelliklerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Ağ yapısının çözüm üzerine etkisinin araştırılması için GCI yöntemini kullanmışlar ve elde ettikleri GCI^{ince} değerlerinin %0.77 ile %7.88 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda sayısal model sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Soydan (2013), trapez kesitli geniş başlıklı savak ile etkileşim halindeki açık kanal akımını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Akım hız alanını LDA ile deneysel olarak ölçmüştür. ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla yapılan sayısal çözümde, SKE, RNG, RKE, Modified k-ω (MKW), SST ve RSM türbülans modellerini kullanmıştır. Sayısal olarak elde ettiği hız ve su yüzü profillerini deneysel profiller ile karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, eğri yörüngeli bir akımın hâkim olduğu savak bölgesinde RSM türbülans modelinin kullanılan diğer türbülans modellerine göre daha başarılı, savak mansabında kritik üstü akım bölgesinde ise MKW modelinin kullanılan modeller arasında en başarısız olduğunu bildirmiştir.

Gümüş (2014), dolusavak modeli üzerinden geçen 6 farklı akım koşulunda elde edilmiş hız ve su yüzü profili ölçümlerini iki-boyutlu sayısal çözüm bulgularının doğrulanması için kullanmıştır. Sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan paket

program yardımıyla dolusavak akımını idare eden temel denklemleri SKE, RNG, RKE, MKW, SST ve RSM türbülans modelleri kullanarak çözmüştür. Sayısal su yüzü profillerinin hesabında VOF, ağ yapısından bağımsız çözümlerin elde edilip edilmediğini test etmek amacıyla GCI yöntemi kullanılmıştır. Yan duvar, ayrıklaştırma yöntemi, basınç düzeltme algoritması ve iterasyon sayısının sayısal sonuçlar üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Sayısal bulguların deneylerle karşılaştırılmasından, RKE ve RSM kullanılarak elde edilen bulguların birbirlerine çok yakın ve her iki modelin de dolusavak akımında hız alanı ve su yüzü profilinin hesaplanmasında altı deney durumu için diğer modellere göre daha başarılı olduğu sonucuna varmıştır.

Şimşek ve ark. (2015), ani bir düşü sonrasında oluşan B-tipi hidrolik sıçramanın özelliklerini, farklı akım koşulları için deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Sayısal modellemelerde sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS- Fluent paket programını kullanmışlar ve akımı idare eden denklemleri SKE, SST ve RSM türbülans modellerini kullanarak çözmüşlerdir. Deneysel su yüzü profilini limnimetreyle, hız alanını ise Lazer Doppler Anemometre (LDA) ile ölçmüşlerdir. Deneysel olarak elde edilen su yüzü ve hız profilleri, farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçları ile ortalama karesel hata ve ortalama mutlak göreceli hata ölçütlerine göre karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonucunda RSM türbülans modelinin B-tipi hidrolik sıçrama profilinin ve hız alanının belirlenmesinde çalışmada kullanılan diğer iki türbülans kapatma modeline göre deneylere daha yakın tahminde bulunduğu belirtilmiştir.

Şimşek ve ark. (2016), eğrisel geniş başlıklı savak ile etkileşimde olan açık kanal akımının hız alanını ve serbest su yüzü profilini iki farklı debi durumu için deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. ANSYS- Fluent paket programını yardımıyla gerçekleştirmiş oldukları sayısal modellemelerde, akımı idare eden denklemleri iki boyutlu olarak SKE, RKE, RNG, SST ve RSM türbülans modellerini kullanarak çözmüşlerdir. LDA kullanılarak elde ettikleri deneysel hız profillerini ve limnimetre kullanarak elde ettikleri su yüzü profillerini, sayısal model sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel ve sayısal model sonuçlarının karşılaştırılmasından,

RNG türbülans modeli ile yapılan sayısal modelin diğer modellerle yapılan sayısal modellere kıyasla deneylerle daha uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Soydan ve ark. (2017), tabandan belirli bir mesafe yukarıya yerleştirilmiş silindir savak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Akımı idare eden denklemleri iki boyutlu olarak RNG, SST ve RSM türbülans kapatma modellerini kullanarak çözmüşler ve sayısal modellemelerde su yüzü profilini belirlemek için VOF yöntemini kullanmışlardır. LDA kullanarak elde ettikleri deneysel hız profillerini sayısal model sonuçları ile karşılaştırmalarından, RNG türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçların kullanılan diğer iki modele kıyasla deneysel verilerle daha uyumlu olduğu rapor edilmiştir.

Soydan ve ark. (2018), köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu akımın hız alanını Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçmüşler ve aynı akım şartları için temel denklemleri ANSYS-Fluent ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Sayısal modellemede, SKE, RNG ve RKE türbülans modellerini ve serbest su yüzü profillerini belirlemede ise Akışkan Hacimleri Yöntemini kullanmışlardır. Sayısal modellemelerde kullanılacak ağ yapısının sayısal sonuçlara olan etkisini incelemek için Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) yönteminden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda, sayısal olarak elde edilen hız alanı ve su yüzü profillerini deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar ve RKE modelinin köprü ayağı etrafındaki akım alanını belirlemede diğer modellere göre daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir.

Aköz ve ark. (2019), tabana farklı kısmi oranlarda gömülmüş silindir üzerinden geçen akımı farklı Reynold sayıları için sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal çözümlemede SKE, RNG, RKE, SST, MKW, LES ve DES türbülans kapatma modellerini iki ve üç boyutlu modelleme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, SST türbülans kapatma modelinin akım alanının belirlemede daha iyi sonuçlar verdiğini ve silindir üzerine gelen kuvvetlerin belirlenmesinde DES modelinin RANS modellerine göre daha başarılı olduğunu ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneyler

Deneyler, Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında Şekil 3.1'de görülen açık kanal modelinin orta kısmında bir daralma yapısı oluşturarak yapılmıştır. Açık kanal modelinin, tabanı ve yan duvarları camdan imal edilmiştir. Dikdörtgen kesitli kanalın boyutları 400x35x35 cm'dir. Suyun sirkülasyonu bir santrifüj pompa ile boyutları 120x70x50 cm olan iki yer haznesinden, pompanın güç ayarı Şekil 3.2'de verilen Schneider marka hız kontrol cihazı ile yapılmaktadır. Debi miktarı ise Şekil 3.3'de verilen Altıgen marka cihaz ile ±%0.6 m^3/h hassasiyette elektronik debi ölçüm cihazı üzerinden okunmaktadır.



Şekil 3.1. Deney düzeneği



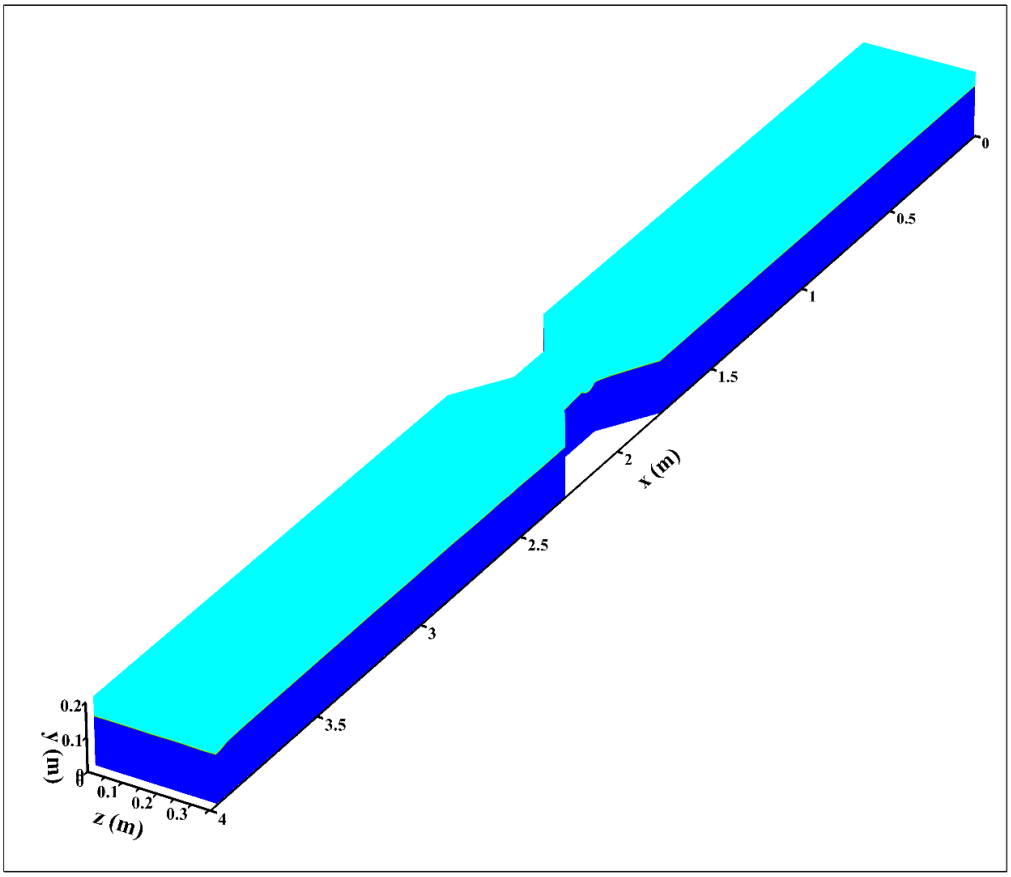
Şekil 3.2. Pompa hız kontrol cihazı



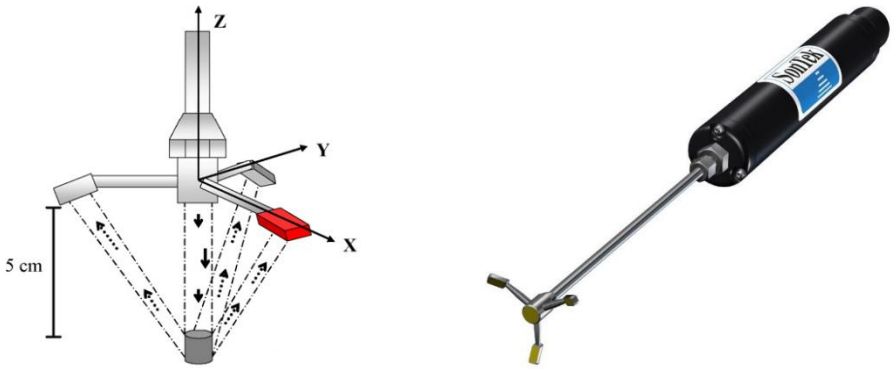
Şekil 3.3. Elektromanyetik debi ölçüm cihazı

Şekil 3.4'de deney düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir. Burada, sayısal hesaplama bölgesinde kullanılan x, y, z eksen takımı görülmektedir. Kanal üzerine yerleştirilmiş modelin akım karakteristikleri Şekil 3.5'te verilen Acoustic Doppler

Velocimeter (ADV) cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz kanal üzerinde oluşturulan ray sistemi ile yatay eksende manuel olarak hareket etmekte, düşey eksende ise hassas ölçüm alabilmesi için bir elektronik sistem ile kontrol edilmektedir (Şekil 3.6). Akımda pompa kapasitesinin en büyük olduğu debi için ölçüm alınmış olup, x=1.00, 1.50, 1.70, 1.80, 1.95, 2.10, 2.20, 2.50, 3.00 ve 3.50 m kesitlerinde hız ölçümleri alınmıştır.



Şekil 3.4. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.5. Akustik doppler hız ölçer cihazı (ADV)



Şekil 3.6. ADV elektronik düşey hareket sistemi ve kontrol paneli

Deneysel olarak ölçülmüş akım özelliklerine göre Fr ve Re, sırasıyla Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 ile hesaplanan Froude ve Reynolds sayılarını, Q ise debi değerini ifade etmektedir. Fr ve Re sayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

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

ve geniş kanal varsayımı ile

$$\mathrm{Re} = \frac{4Vh}{\nu} \tag{3.2}$$

Burada, V kesit ortalama hızı, g yerçekimi ivmesi, h su derinliği ve ν kinematik viskozitedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde giriş debisi Q=10.3 l/s, memba Fr sayısı 0.148 ve memba Re sayısı ise 116,000 olarak hesaplanmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Temel denklemler

Türbülanslı akımda kütlenin ve momentumun korunumunu idare eden temel denklemler, yani süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_i}} = 0 \tag{3.3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial \mathrm{t}} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial \mathrm{x_j}}\right) = \rho\, \mathrm{g_i} - \frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{x_i}} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial \mathrm{x_j^2}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}(\tau_{\mathrm{ij}}) \tag{3.4}$$

Bu denklemlerde ifade edilen 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. Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau_{\mathrm{ij}} = -\rho\overline{\mathrm{u_i'u_j'}} = \mu_{\mathrm{t}}\left(\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \mathrm{u_j}}{\partial \mathrm{x_i}}\right) - \frac{2}{3}\delta_{\mathrm{ij}}\rho\,\mathrm{k} \tag{3.5}$$

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).

3.2.2. Türbülans kapatma modelleri

RANS denklemlerinde üç boyutlu akışta bir basınç, üç hız, altı türbülans kayma gerilmesi bileşeni ile toplam 10 bilinmeyen bulunur. Buna karşılık üç RANS denklemi ve bir süreklilik denklemi olmak üzere sadece dört 4 denklem bulunduğundan denklem sistemi çözülememektedir. Bu sorunun çözülmesi ve denklem sisteminin kapatılabilmesi amacıyla farklı türbülans kapatma modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında k-ε, k-ω, RSM (Reynolds Stress Model-Reynold Gerilme Modeli), DES (Detached-Eddy Simulation-Bağımsız Girdap Benzetimi) ve LES (Large Eddy Simulation- Büyük Girdap Benzetimi) modelleri kullanılmıştır.

3.2.2.1. k-ε türbülans modelleri

k-ε modeli isminden de anlaşılabileceği gibi türbülans kinetik enerjisi olan "k" ile türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı olan "ε" büyüklüklerine dayalı olan iki ayrı geçiş (transport) denklemini kullanarak çözüm sağlamaktadır. Modellerin genel özellikleri birbirlerine benzer olmasına rağmen, katsayılarda ve çözümlerde farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmada Standart k- ε (SKE) (Launder ve Spalding, 1972) modeli, Realizeble k- ε (RKE) (Shih ve ark., 1995) modeli ve Renormatization Group k- ε (RNG) (Yakhot ve Orszag, 1986; Yakhot ve ark., 1992) modelleri kullanılmıştır.

Standart k-ε (SKE)

İlk defa Launder ve Spalding (1972) tarafından önerilen bu model, birçok mühendislik probleminde stabil çözüm vermesi, hesaplama süresinin diğer modellere kıyasla daha düşük olması ve yeterli doğrulukta sonuçlar vermesi nedeniyle sıklıkla kullanılan bir model olmuştur.

Bu model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve kayıp oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümünü ve buna bağlı olarak türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Bu model ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

Renormalization Group k-ε modeli (RNG)

RNG modeli Navier-Stokes denklemlerinden elde edilmekte olup standart k-ε modeliyle benzerdir. SKE modelinden farkı ise Yakhot ve Orszag (1986) tarafından geliştirilen istatiksel bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım modelde belirli iyileştirmeler yapan yeniden normalleştirme grup teorisi (Renormalization Group Theory) olarak adlandırılır (Aksoy, 2019).

RNG modeli ε taşınım denkleminde içerdiği fazladan bir terim ile hızlı gerilimli akışlarda daha doğru sonuçlar vermektedir. Böylelikle türbülans alanından bağımsız olarak gelişen ikinci bir akışın olduğu akım durumlarında ve girdap etkisini öz önünde bulundurduğundan girdap bulunan akım durumlarında standart k-ε modeline göre daha doğru sonuçlar verebilmektedir (Aksoy, 2019). Bu model ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

Realizable k-ε modeli (RKE)

Shih ve ark., (1995) tarafından geliştirilen bu model, SKE ve RNG modellerinden sonra geliştirilmiştir. Bu modelin SKE modelinden en belirgin farkı, türbülanslı girdap viskozitesi için yeni bir denklem kullanması ve yayılma taşınım denklemini vortisite çalkantılarının ortalama karelerinden çıkartmasıdır (Aksoy, 2019). Bu model ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

3.2.2.2. k-ω türbülans modelleri

k-ω modelleri de k-ε modelleri gibi mühendislik alanında oldukça sık kullanılmakta olup düşük Reynolds sayılarında modelin duvara yakın bölgelerdeki davranışı modelleyebilmesinin bu modellerin en önemli avantajı olduğu söylenebilir. Duvar yakını modellemelerindeki davranışları sayesinde stabil çalışan bu modeller hesaplamada da düşük maliyete sahiptirler.

Standart k-ω türbülans modeli (SKW)

Wilcox (2006) tarafından geliştirilen SKW türbülans modeli taşınım denklemi olarak türbülans kinetik enerjisini ve türbülans kinetik enerjisinin özgül kayıp oranını, ω=ε/k, kullanmaktadır. SKW modeli, düşük Reynolds sayısı etkileri, sıkıştırılabilirlik ve kayma akışı yayılması için bazı modifikasyonlar içermektedir. Model, uzak girdaplar, iç içe geçen katmanlar ile düzlemsel, yuvarlak ve radyal jetler için yapılan ölçümlerle düzgün bir şekilde uyum içinde olan serbest kayma akışı yayılma hızlarını öngörebilmekte ve bu nedenle duvarla çevrili, sınırlı akışlar ve serbest kayma akışları için de oldukça uygun olduğu ifade edilmektedir (Aksoy, 2019). Bu model ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport-SST) türbülans modeli

Menter (1994) tarafından geliştirilen bu modelde, sınır tabakanın iç bölgesinden dış bölgesine doğru SKW modelinden SKE modeline bir geçiş meydana gelmektedir. Ayrıca SST modeli türbülans kayma gerilmelerinin geçiş etkilerini yakalayabilmek amacıyla modifiye edilmiş bir türbülans viskozitesi denklemi kullanmaktadır (Aksoy, 2019).

SST modeli, akış ayrılmasının olduğu ters basınç gradyanlarının gözlemlendiği akışlarda, türbülanslı kayma gerilmesini taşınım denkleminde tanımlayarak çok yüksek derecede doğru tahminler yapabilmektedir (Ansys, 2018). Bu model ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

3.2.2.3. Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM)

RSM türbülans kapatma modeli (Launder ve ark., 1975), Reynolds gerilme tensörünün tüm bileşenleri ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı için oluşturulmuş taşınım denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır. RSM modeli, gerilmeden kaynaklı anizotropileri doğrudan modellediğinden bu modelin karmaşık akışlar için uygun olduğu söylenebilir. Ancak uygulamada genellikle iki denklemli modellere göre çok daha iyi sonuç verdiği söylenemez (Gümüş, 2014; Aksoy, 2019).

RSM modeli iki boyutlu akışlarda, fazladan dört adet taşınım denklemi çözerken üç boyutlu denklemlerde fazladan yedi adet taşınım denklemi çözmesi gerekmektedir. Bundan dolayı daha fazla depolama alanı ve özellikleri yüksek bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. RSM modeli akımda eğriliği, dönmeyi, girdapları, çevrintileri, birim uzama oranındaki ani değişmeleri kısaca Reynolds gerilmelerinden dolayı oluşan tüm anizotropik yapıları hesaba kattığından karmaşık akımlarda daha düzgün sonuç vermesi beklenmektedir. Ancak basınç-birim uzama ve türbülans kinetik enerjisi kayıp oranının modellenmesinin zor olması nedeniyle modelin hesaplama doğruluğu etkilenmektedir. Bu nedenle daha az denklemli basit modellere göre avantajı azalırken hesaplama maliyeti artmakta ve buna bağlı olarak kullanım avantajı azalmaktadır (Aksoy, 2019). Bu model ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

3.2.2.3. Büyük girdap benzetimi (Large Eddy Simulation-LES)

LES modeli, türbülans enerjisinin büyük bir bölümünü oluşturan büyük girdapların numerik olarak çözümünü içerirken, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) modellerine benzer olarak küçük girdapların modellenmesini de içermektedir (Ansys, 2018).

Büyük ölçekli girdapları doğrudan çözmesi nedeniyle LES modelinin, RANS modellerine göre daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmektedir (Tekgül, 2017). Bunun yanında, küçük girdapları modellediğinden dolayı bu noktada hata payı yükselmekte ve sonuçlar kötüleşebilmektedir. Modellemede oldukça güçlü bilgisayar özellikleri isteyen ve hesaplama maliyeti yüksek olan LES modeli, büyük girdapların oluşmadığı akım durumlarında RANS modellerine göre daha az kullanılmaktadır. Bu model ile ilgili detaylar Ansys (2018)'te verilmiştir.

3.2.2.4. Bağımsız girdap benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES)

Bağımsız girdap benzetimi modeli LES ve RANS modellerinin birleştirilmesi sonucunda elde edilmiş hibrit bir model olup, duvar yakının RANS, diğer kısımlarda ise LES modelini kullanarak çözüm yapmaktadır. Bu modelde duvar yakınının modellenmesinde RANS modellerinin herhangi biri ile çözüm yapmak mümkündür.

Bu çalışma kapsamında duvar yakınının modellenmesinde alt model olarak RKE türbülans kapatma modeli kullanılmıştır. Bu model ile ilgili detaylar Ansys (2018)'te verilmiştir.

3.2.3. Ağ yakınsama indeksi (GCI)

GCI yöntemi ile sayısal çözümlerin ayrıklaşma duyarlılığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır (Roache, 1994). GCI yöntemi, farklı ağ yapısına ait sayısal sonuçların 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;

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

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

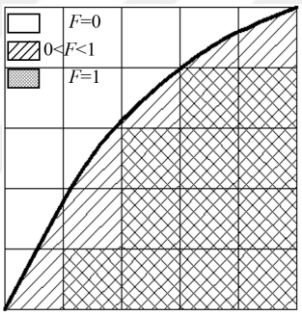
$$E_{23} = \frac{u_3 - u_2}{u_3} \tag{3.8}$$

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

İfadeleri ile verilen değerler belirlenir. Yukarıdaki denklemlerde 1, 2 ve 3 indisleri sırasıyla kaba, orta ve ince ağ hassasiyetli parametreleri, u, akım hızını p: doğruluk mertebesi, F_s güvenlik faktörünü temsil etmektedir. 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, 1997). İşlem sonucunda hesaplana 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.

3.2.4. Akışkan hacimler yöntemi (Volume of Fluid-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 tam 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 (Şekil 3.7). VOF yönteminde ara kesitin hesaplanmasında farklı yaklaşımlar bulunmakla beraber, bu çalışmada "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

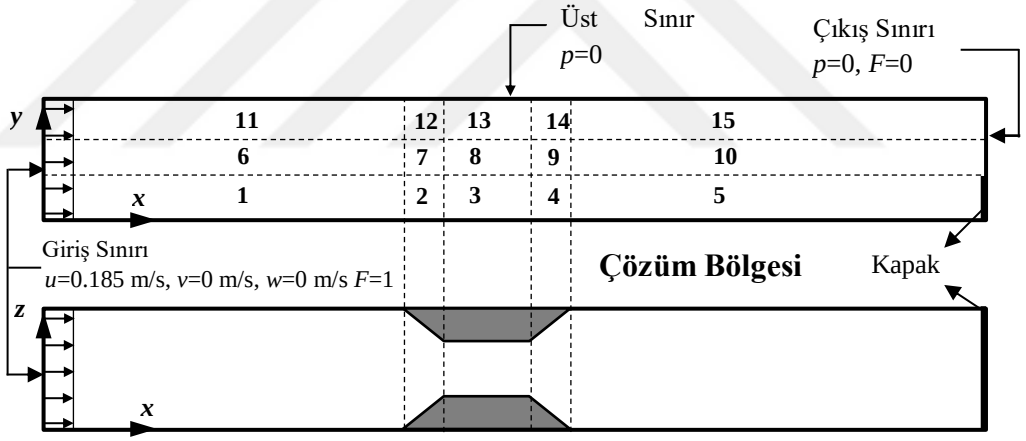


Şekil 3.7. Ağ elemanlarının doluluk oranları

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları

Şekil 4.1'de, değişken en kesitli açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi ve sınır şartlarını göstermektedir. *x, y, z* koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Şekilde verilen çözüm bölgesi toplam 15 alt bölgeye ayrılmış ve çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesi sınır şartı *p*=0, kanal tabanında ve savak tabanında sıfır-hız sınır şartı, yani *u*=0, *v*=0 olarak tanımlanmıştır. Giriş sınır şartı olarak *v* ve *w* hızları 0 olarak alınmış olup, yatay hız bileşeni u=0.185 m/s olarak alınmıştır. Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak, *t*=0 anında boş olan çözüm bölgesinin giriş sınırında VOF yöntemi için *F*=1, diğer bölgeler ve çözüm bölgesinin çıkış sınırında ise *F*=0 alınmıştır.

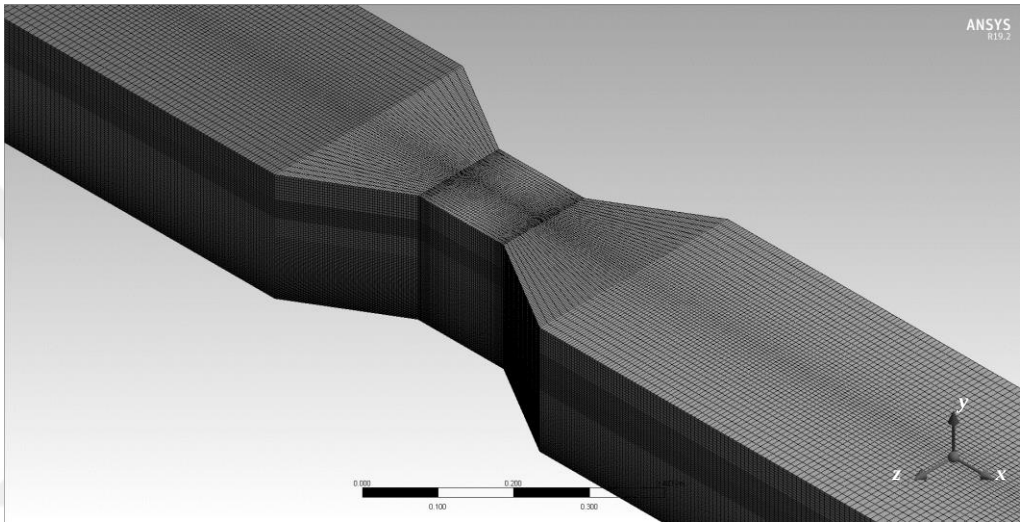


Şekil 4.1. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

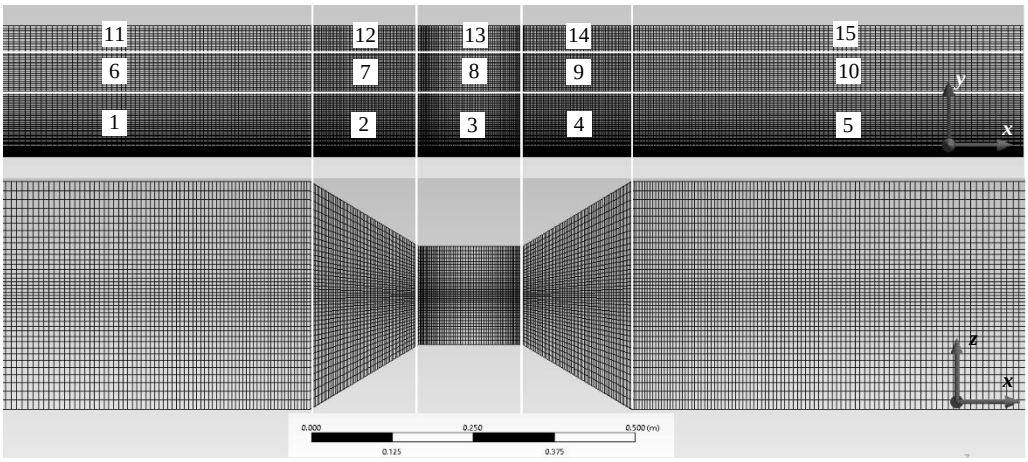
4.2. Ağ Yapısının Belirlenmesi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde oluşturulacak modelin ağ yapısının nümerik bulgular üzerinde oldukça fazla etkisi bulunmaktadır (Gümüş, 2014). Bu nedenle hesaplama ağı tasarlanırken belli bir metodoloji kullanılması oldukça önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında çözüm bölgesi, Şekil 4.2'de üç

boyutlu yapısı ve Şekil 4.3'de verilen *xy* ve *xz* eksenlerine göre sayısal hesaplama ağında da görüldüğü gibi 15 alt bölgeye ayrılmış ve ağ yapısının sayısal çözüm değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Meydana gelecek ayrıklaştırma hatasının tespiti için üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı oluşturulmuş ve ağ yapısının her bir alt bölgesindeki eleman sayısı yaklaşık olarak %25 ve %50 oranında arttırılarak üç farklı yoğunluktaki hesaplama ağları kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de, sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı yoğunluktaki ağ yapısı için eleman sayıları verilmiştir.



Şekil 4.2. Üç boyutlu sayısal hesaplama ağı



Şekil 4.3. *xy* ve *xz* eksenlerine göre sayısal hesaplama ağı

Çizelge 4.1. Farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarına ait bölgesel eleman sayıları

Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)	Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)	Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)
1	40x110	50x140	60x170	**6**	12x110	16x140	20x170	**11**	6x110	8x140	10x170
2	40x40	50x50	60x60	**7**	12x40	16x50	20x60	**12**	6x40	8x50	10x60
3	40x40	50x50	60x60	**8**	12x40	16x50	20x60	**13**	6x40	8x50	10x60
4	40x40	50x50	60x60	**9**	12x40	16x50	20x60	**14**	6x40	8x50	10x60
5	40x110	50x140	60x170	**10**	12x110	16x140	20x170	**15**	6x110	8x140	10x170

Ağ yapısının sıklığının yeterliliği yani sayısal çözümün ağ yapısından bağımsız olup olmadığının belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile oluşturulan Ağ 1 (Kaba), Ağ 2 (Orta) ve Ağ 3 (İnce) değerlendirilmiştir. GCI yöntemi ile yapılan analizler sonucunda Ağ 3 ile oluşturulan ağ yapısı ile hesaplanan hız değerlerinin Gümüş (2014)'te verilen yakınsama değeri olan %2'den küçük olduğu belirlenmiştir. Böylece çözüm hassasiyetinin ağ yapısından bağımsızlaştığı sonucuna varılmıştır.

4.3. Deneysel ve Sayısal Hız Profilleri

ADV ölçüm aleti kullanılarak elde edilen deneysel hız profillerinin, sayısal çözüm sonrası elde edilen hız profilleri ile karşılaştırılmasında performans kriteri olarak Denklem 4.1'de verilen Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Denklem 4.2'de verilen Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri kullanılmıştır.

$$\mathrm{OKH} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(u_d - u_h)^2 \tag{4.1.}$$

$$\mathrm{OMGH} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{|u_d - u_h|}{u_d}\right) \tag{4.2.}$$

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

Çizelge 4.2'de, kanal boyunca farklı kesitlerde, Denklem 4.1 kullanılarak elde edilen OKH değerleri verilmiştir. Elde edilen en küçük OKH değerleri çizelgelerde koyu renkle yazılmıştır. Bu OKH değerleri kesitteki en başarılı olan türbülans modelini

göstermektedir. OKH değerleri üzerindeki rakamlar ise o kesitteki başarı sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 4.2'ye göre, DES modeli x=100, 210, 300 ve 350 cm'de hesaplanan hız profillerinde en başarılı sonucu verirken, SKE modeli ise x=150, 170 ve 195 cm'de en başarılı sonucu vermiştir. SKW x=180 cm, LES x=220 cm ve RKE x=250 cm'de deneysel sonuçlara en yakın sonuçları vermişlerdir. Kanalın tamamı için ele alınan kesitlerin ortalamasına göre değerlendirme yapılacak olursa DES modeli 14.34 cm^2/s^2 OKH değeri ile en başarılı model olurken, hiçbir kesitte en başarılı model olmamasına rağmen RNG modeli 18.83 cm^2/s^2 OKH değeri ile en başarılı ikinci model olmuştur. Tüm kanal boyunca başarı sıralaması ise DES, RNG, SKE, RKE, LES, SKW, RSM ve SST şeklinde oluşmuştur. Kanalın akım profilinin hızlı değiştiği, daralma ve genişleme bölgesinde OKH değerlerine göre, tüm kanalda olduğu gibi yine DES modeli en başarı model olurken, tüm kanal boyunca başarılı olmayan RSM modeli en başarılı ikinci model olmuştur. Daralma ve genişleme bölgesinde başarı sıralaması DES, RSM, LES, RNG, RKE, SKW, SKE ve SST şeklinde oluşmuştur.

Çizelge 4.2'ye göre, daralma bölgesinden etkilenmeyen ve kararlı bir akım olarak değerlendirilebilecek kanal başlangıcında ölçülen hız profilleri, x=100 ve 150 cm'de neredeyse tüm modeller başarılı sonuçlar vermiştir. LES modeli dışındaki modellerde x=100 cm'de 4 cm^2/s^2'den, x=150 cm'de ise 2 cm^2/s^2 gibi bir OKH değeri hesaplanırken, daralma kesitinin başlangıcında hızlar arttığından dolayı OKH değerlerinde bir artış meydana gelmiş ve x=170 cm'de 3 cm^2/s^2, x=180 cm'de 9 cm^2/s^2'nin altında bir değer hesaplanmıştır. Hız değerlerinin en yüksek olduğu ve en fazla daralmanın olduğu bölge olan x=195 cm'de yine LES dışındaki tüm modeller ile elde edilen hız profillerinde 12 cm^2/s^2'nin altında bir OKH değeri hesaplanmıştır. Bu da LES dışındaki tüm modellerin kanal başlangıcından daralmadan sonra ve tekrar genişleme kesitine kadar benzer sonuçlar verdiği ve deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak genişleme kesitinden sonra (x=210 cm kesitinden itibaren) modellerin performansının azaldığı ve bu bölgeden sonra deneysel sonuçlarla olan uyumun ciddi bir şekilde azaldığı görülmüştür. Genişleme sonrası meydana gelen ayrılma bölgelerinin tahmininde türbülans modeli performanslarının yüksek olmadığı

diğer bir ifade ile ayrılma bölgelerini tahmininde türbülans modelleri başarılı olamamıştır.

Özellikle girdap etkilerini modellemede başarılı olan RNG modeli bu bölgede diğer modellere nazaran nispeten daha iyi sonuç vermiştir. Suyun yüksekliğini ayarlamak için kanal sonuna yerleştirilen kapağın akım üzerine etkisini modellemede DES ve RNG dışındaki modellerin performansının oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. Farklı türbülans modellerine ait OKH değerleri (cm^2/s^2)

***x* (cm)**	**OKH (cm^2/s^2)**							
	SKE	**RKE**	**RNG**	**SKW**	**SST**	**RSM**	**DES**	**LES**
100	38.5(3)	40.4(7)	38.6(4)	37.9(2)	39.0(6)	38.8(5)	**36.4(1)**	68.5(8)
150	**10.9(1)**	11.9(4)	11.1(2)	14.0(5)	15.8(6)	11.7(3)	18.2(7)	31.9(8)
170	**20.8(1)**	22.0(3)	21.8(2)	22.3(4)	23.8(6)	23.0(5)	24.4(7)	38.8(8)
180	76.4(2)	78.2(3)	83.6(6)	**71.9(1)**	83.2(5)	85.0(7)	82.4(4)	129.8(8)
195	**93.2(1)**	102.1(4)	98.7(3)	96.7(2)	117.1(7)	110.3(6)	104.4(5)	154.3(8)
210	349.2(8)	319.2(6)	297.3(4)	311.6(5)	290.5(3)	216.8(2)	**209.5(1)**	325.0(7)
220	537.9(7)	442.4(5)	352.4(4)	461.8(6)	972.4(8)	267.4(3)	209.5(2)	**124.2(1)**
250	138.7(2)	**131.4(1)**	289.1(3)	382.7(6)	4340.1(8)	945.6(7)	319.3(4)	364.4(5)
300	1195.4(3)	1580.4(4)	587.7(2)	2167.6(6)	2309.1(7)	2475.7(8)	**396.9(1)**	1831.1(5)
350	355.9(5)	438.6(6)	102.2(2)	1066.5(8)	283.5(4)	467.3(7)	**32.8(1)**	204.4(3)
Tüm Kanal	281.69	316.66	188.25	463.3	847.45	464.16	**143.38**(1)	327.24
Daralma/Genişleme	215.5(7)	192.8(5)	170.8(4)	192.9(6)	297.4(8)	140.5(2)	**126.1(1)**	154.4(3)

Çizelge 4.3'te ise yine kanal orta ekseni boyunca ölçülen ve sayısal olarak hesaplanan hız profillerine göre elde edilen OMGH değerleri verilmiştir. Bu değerlerin OKH değerinden farkı, hata oranını yüzde cinsinden ifade etmesidir. Böylece elde edilen sonuçlar, hız değerlerinin büyüklüğünden bağımsız olabilmektedir. Buna göre, kanal başlangıcında elde edilen hız profillerinde (x=100 ve 150 cm) tüm modellerin hata değerinin %8'den düşük olduğu ve en başarılı modelin x=100 cm'de RSM, x=150'de ise SKE olduğu görülmüştür. OKH değerlerine göre bu iki kesitte deneylerle en uyumlu model SKE çıkarken, OMGH değerine göre ise RSM çıkmasının nedeni, aralarındaki farkın oldukça düşük olmasıdır.

Daralma başlangıç kesitleri olan x=170 cm ve x=180 cm kesitlerinde elde edilen OMGH değerine göre, en başarılı model, sırasıyla, SKE ve SKW, akımın en fazla hızlandığı nokta olan x=195 cm kesitinde ise SKW olarak belirlenmiştir. Akımın en hızlı olarak geliştiği, daralmanın en fazla olduğu kesit olan x=195 cm'de OMGH %3.58 ile en başarılı tahmin yapılan kesit olarak ortaya çıkmıştır. Daralma sonrası genişleme kesitleri olan x=210 ve 220 cm'de sırasıyla DES ve LES modelleri, kanalın sonuna doğru olan bölgede ise DES modeli deneysel ölçümlere en yakın sonuçları vermiştir. OKH ve OMGH değerleri beraber incelendiğinde, OKH değerine göre en uyumlu model olarak karşımıza çıkan bazı türbülans modellerinin (x=100, 195 ve 250 cm) OMGH değerlerine göre en başarılı model olmamıştır. Bunun nedeni, modellerin deneysel sonuçları tahmin etmede başarılı ve aradaki farkın oldukça küçük olması olarak değerlendirilebilir.

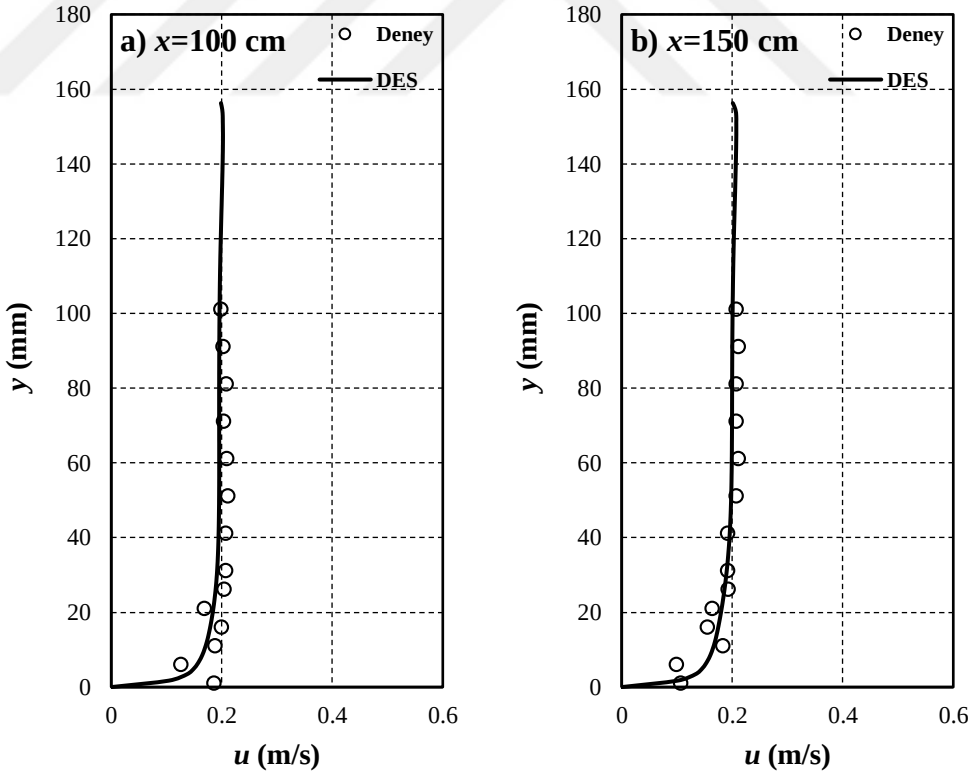
OMGH değerine göre tüm kanal boyunca ve daralma/genişleme kesitleri boyunca hesaplanan değerlerin ortalamalarına göre DES modeli OKH değerlerine paralel olarak en başarılı model olarak karşımıza çıkmıştır. Model başarı sıralaması ise tüm kanal boyunca DES, RNG, SKE, LES, RKE, RSM, SKW ve SST, daralma ve genişleme bölgesinde ise DES, LES, RSM, RNG, SKW, RKE, SKE ve SST olarak meydana gelmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı türbülans modellerine ait OMGH değerleri (%)

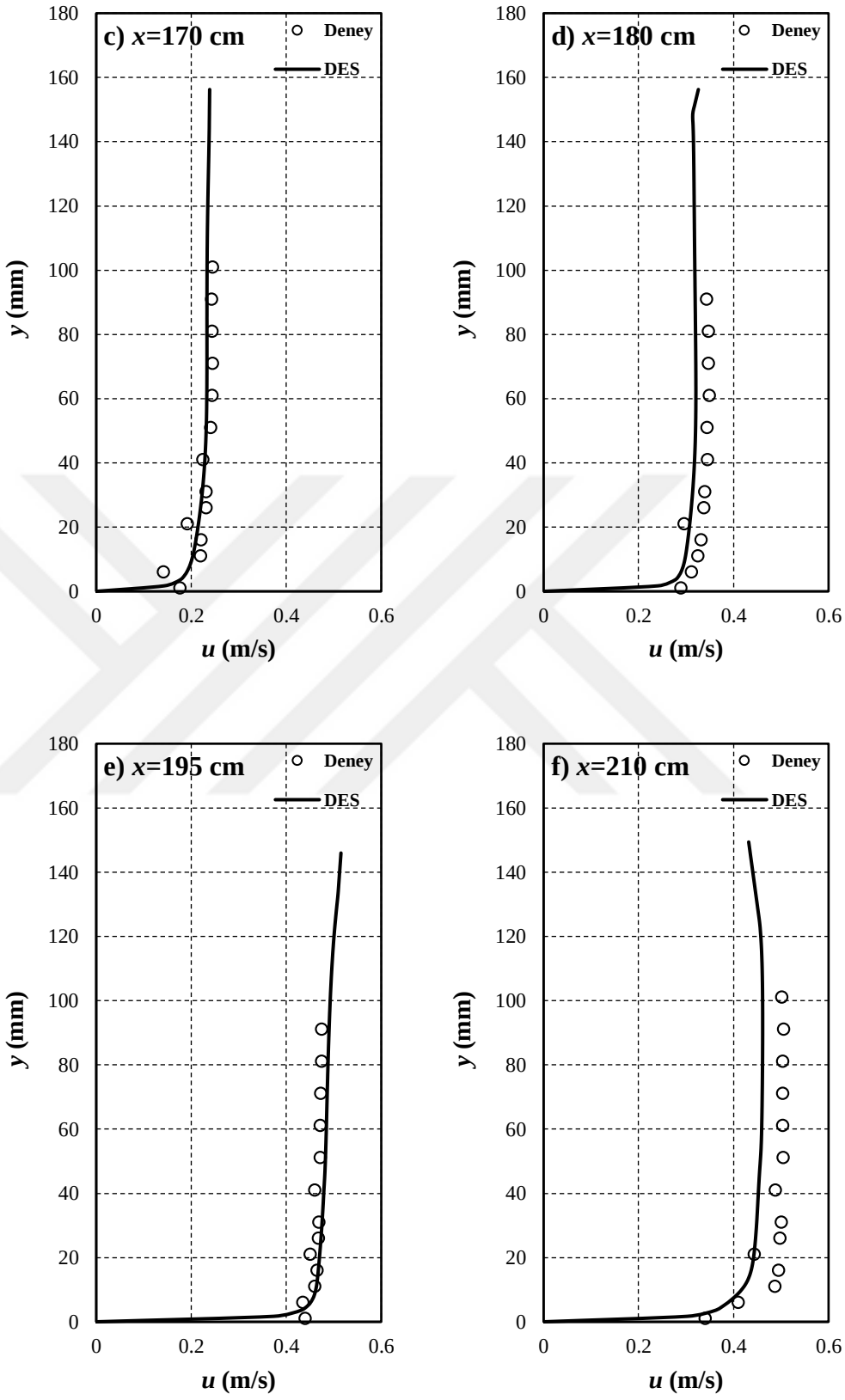
***x* (cm)**	**OMGH (%)**							
	SKE	**RKE**	**RNG**	**SKW**	**SST**	**RSM**	**DES**	**LES**
100	6.57(3)	6.77(4)	6.55(2)	6.55(2)	6.86(5)	**6.26(1)**	7.11(6)	8.00(7)
150	**4.81(1)**	5.11(4)	4.88(2)	5.66(5)	6.14(6)	4.94(3)	6.26(7)	7.91(8)
170	**4.69(1)**	4.87(3)	4.86(2)	4.94(4)	5.28(6)	5.07(5)	5.46(7)	6.15(8)
180	7.38(2)	7.43(3)	7.77(5)	**7.04(1)**	7.74(4)	7.85(7)	7.79(6)	9.16(8)
195	3.83(2)	4.13(3)	4.20(4)	**3.58(1)**	4.75(6)	4.65(5)	4.75(6)	6.26(7)
210	11.88(8)	11.25(7)	10.87(5)	10.95(6)	10.38(4)	9.04(2)	**8.95(1)**	10.03(3)
220	15.36(7))	13.82(5)	12.30(4)	13.89(6)	17.29(8)	10.57(3)	9.39(2)	**5.54(1)**
250	**7.39(1)**	8.12(2)	11.17(3)	12.86(5)	48.23(8)	23.20(7)	12.73(4)	14.60(6)
300	42.59(3)	49.21(5)	28.45(2)	56.44(6)	59.32(7)	61.84(8)	**22.85(1)**	48.14(4)
350	29.31(5)	33.09(7)	14.99(2)	52.97(8)	21.99(4)	32.43(6)	**8.23(1)**	19.28(3)
Tüm Kanal	15.24(3)	16.07(5)	12.95(2)	18.64(7)	19.74(8)	17.91(6)	**11.84(1)**	15.41(4)
Daralma/Genişleme	8.63(7)	8.30(6)	8.00(4)	8.08(5)	9.09(8)	7.44(3)	**7.27(1)**	7.43(2)

4.3.1. DES modeli ile hesaplanan hız profilleri

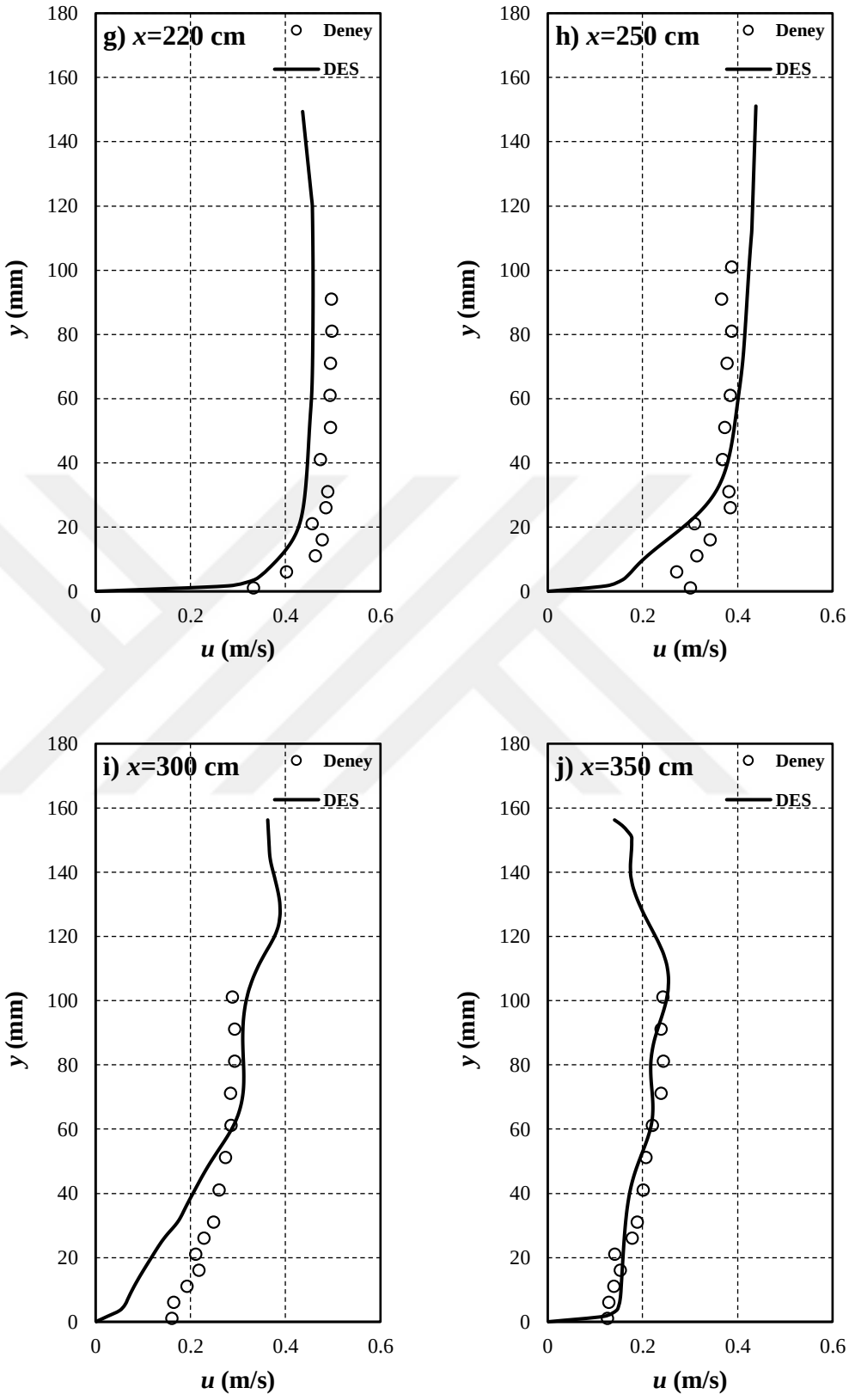
Şekil 4.4'te laboratuvar ortamında ADV cihazı ile kanal boyunca farklı kesitlerde elde edilen yatay hız bileşeninin (u) ile DES modeli kullanılarak sayısal olarak elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması verilmiştir. Buna göre, DES türbülans kapatma modeliyle yapılan analizler sonucunda elde edilen hız profillerinin, kanal başlangıcında (x=100 ve 150 cm) deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Kanalın daralmaya başladığı ilk nokta olan x=170 cm ve kanalın en fazla daraldığı bölge olan x=195 cm kesitlerinde sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, kanalın tekrar genişlediği x=210 ve 220 cm kesitlerinde elde edilen sayısal hız profillerinin dağılımının deneysel hız profilleriyle uyumlu olduğu, ancak değer olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Kanalın tekrar genişlediği x=250 ve 300 cm kesitlerinde DES modeli ile elde edilen hız profillerinin deneysel hız profillerinden oldukça farklı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Deneysel ve sayısal hız profilleri (DES)



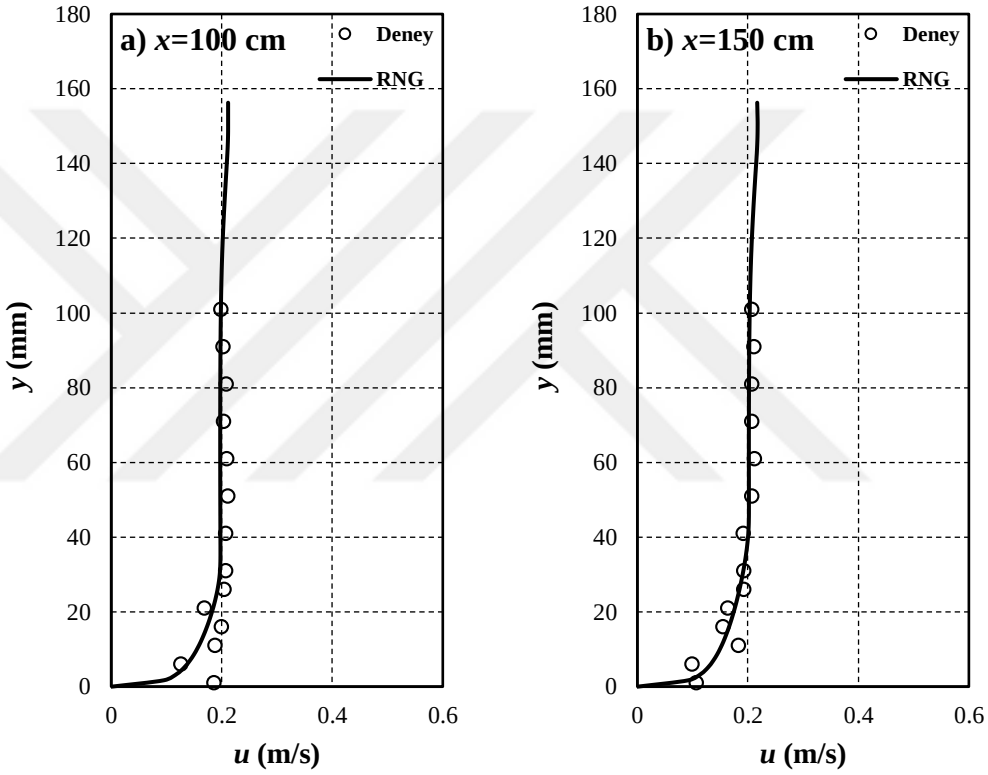
Şekil 4.4. (Devam)



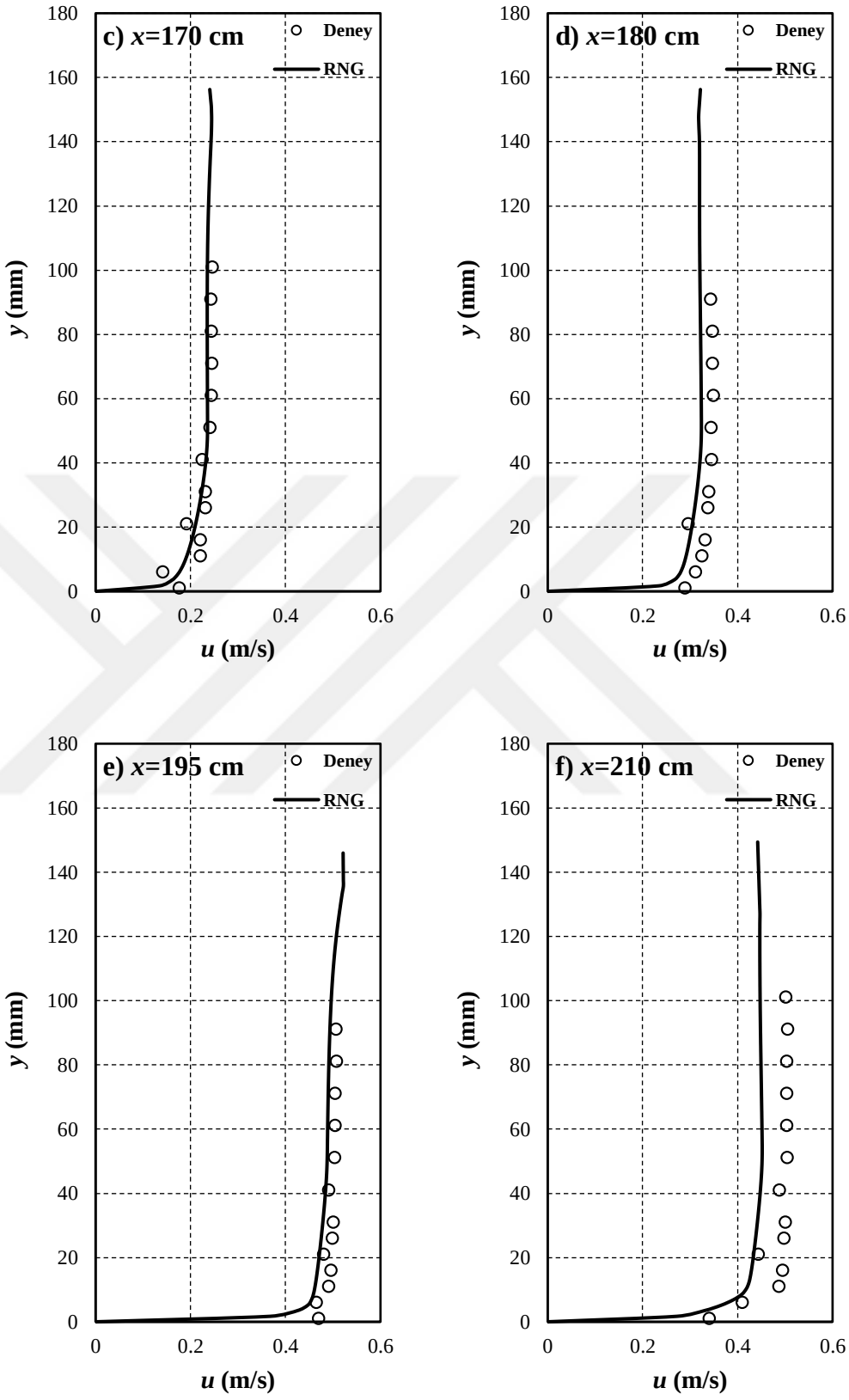
Şekil 4.4. (Devam)

4.3.2. RNG modeli ile hesaplanan hız profilleri

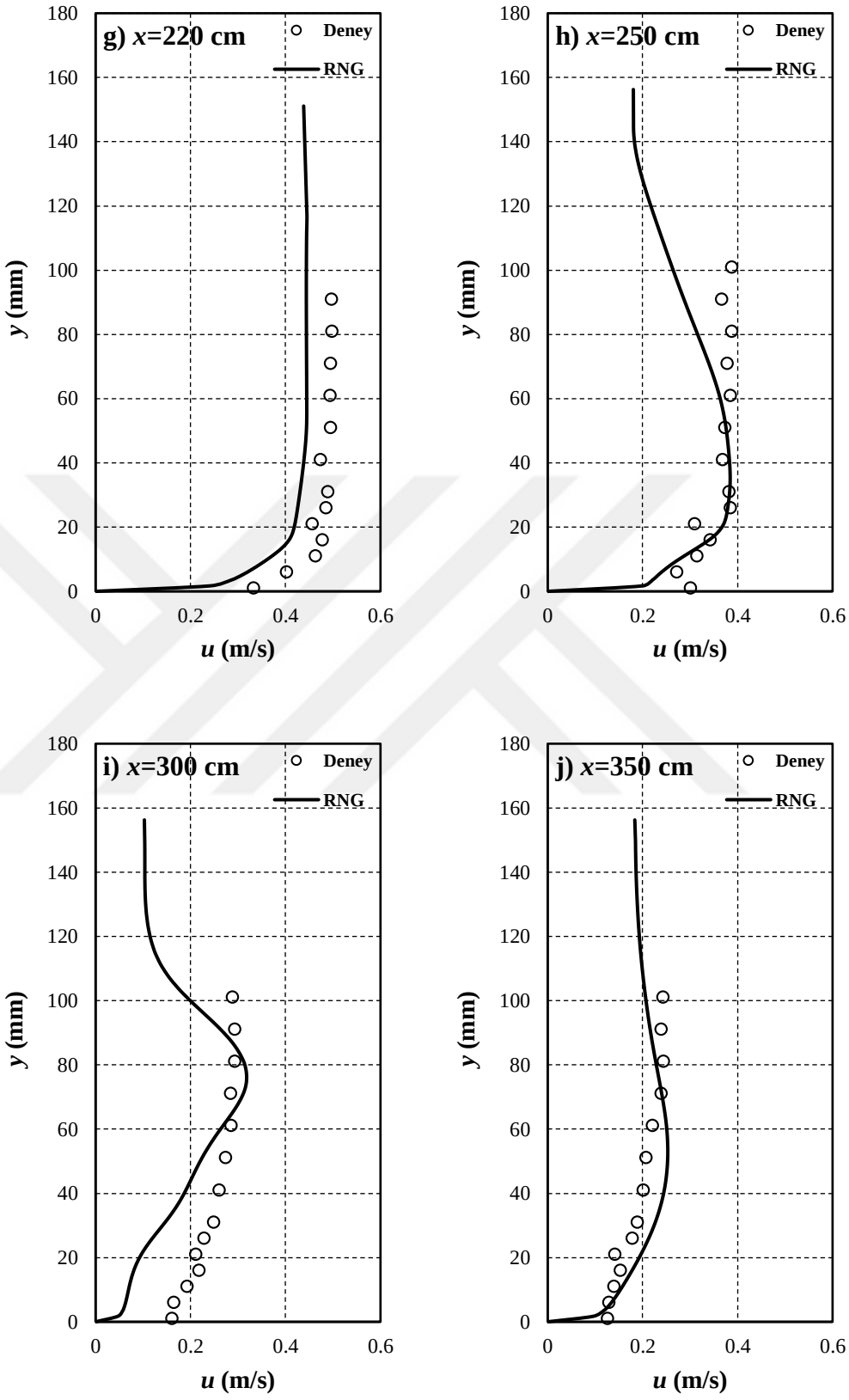
Deneysel akım profilleri ve RNG modeli ile hesaplanan akım profilleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Buna göre, kanal başlangıcında ve daralma bölgesinde modelin tahmin etme performansının oldukça yüksek olduğu, ancak genişleme bölgesinde elde edilen hız değerlerinin deneysel değerlerden yüksek olduğu belirlenmiştir. RNG modeli kanal sonunda da deneysel sonuçlara yaklaşmada başarılı olamamıştır.



Şekil 4.5. Deneysel ve sayısal hız profilleri (RNG)



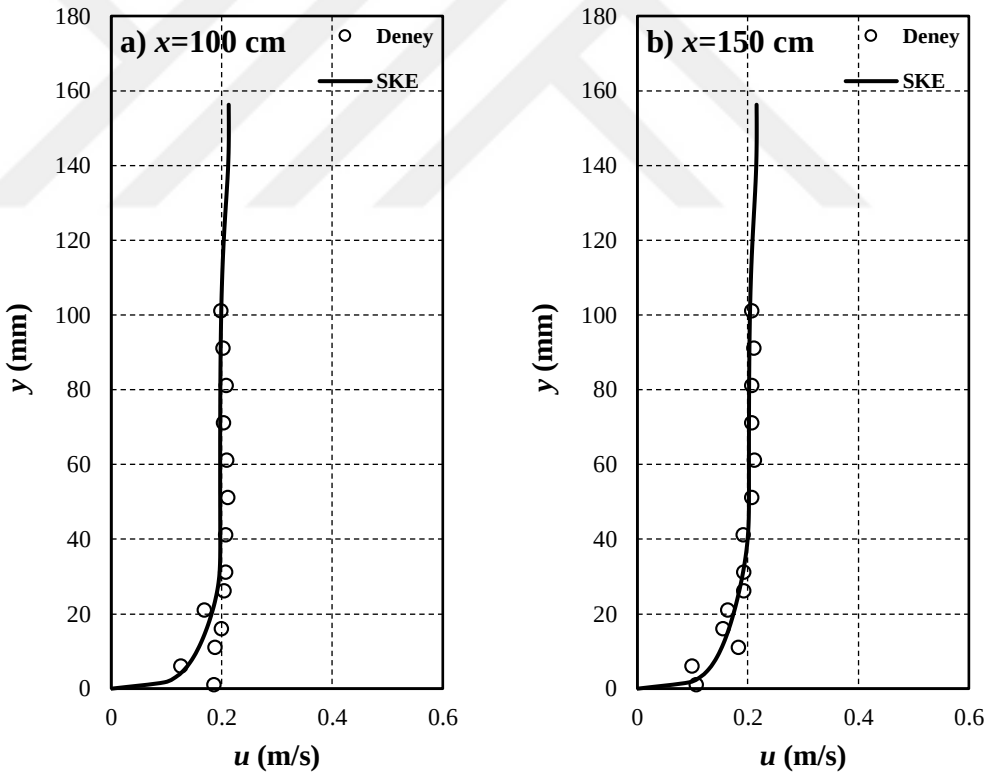
Şekil 4.5. (Devam)



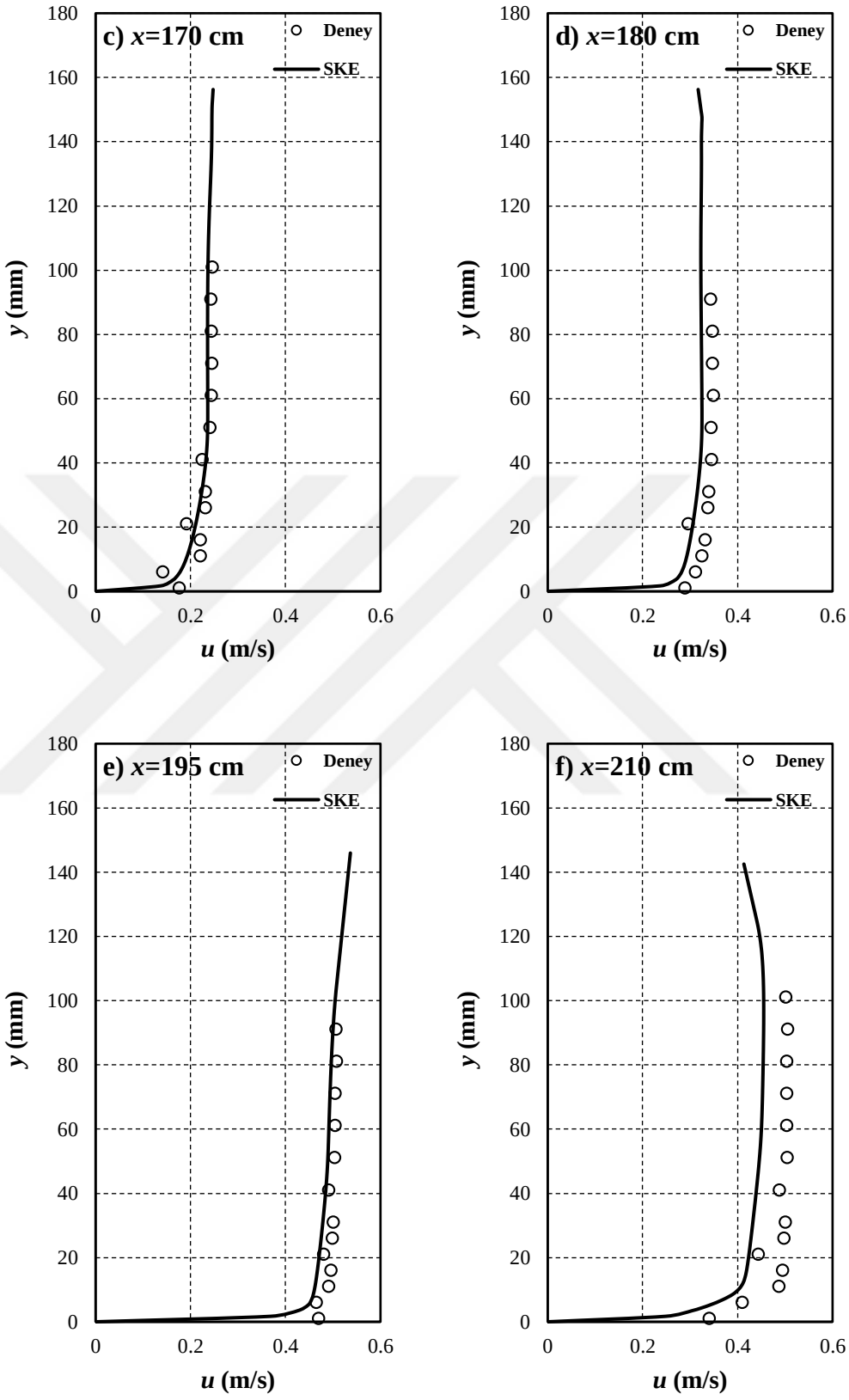
Şekil 4.5. (Devam)

4.3.3. SKE modeli ile hesaplanan hız profilleri

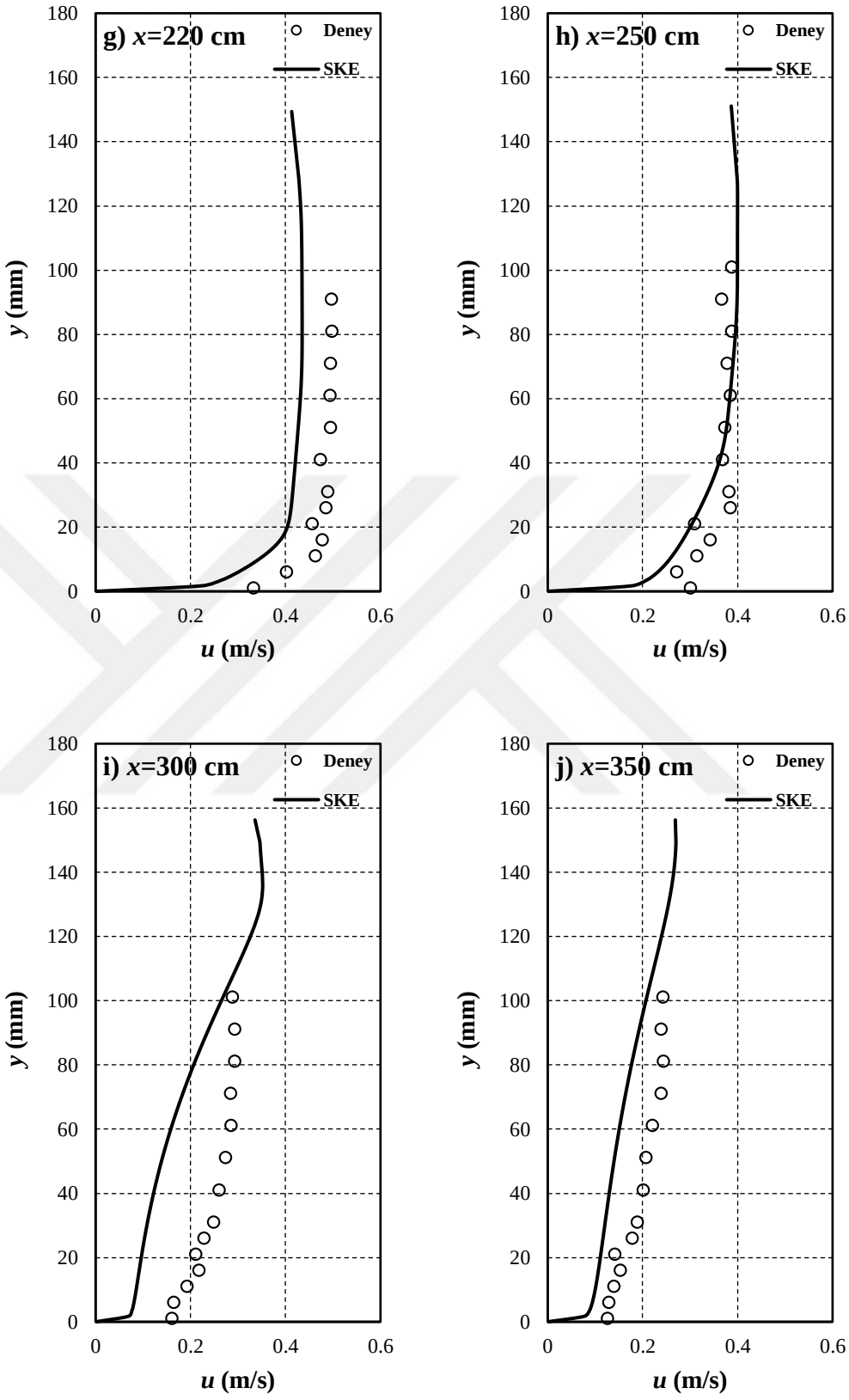
Deneysel akım profilleri ve SKE modeli ile hesaplanan akım profilleri Şekil 4.6'da verilmiştir. SKE modeline göre, kanal başlangıcında (x=100 cm, x=150 cm) deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Kanalın daralmaya başladığı ilk nokta olan x=170 cm de ve kanalın en fazla daraldığı bölge olan x=195 cm'de sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, kanalın tekrar genişlediği x=210 cm ve x=220 cm'de elde edilen sayısal hız profillerinin yapısının deneysel hız profillerine uyumlu olduğu fakat değer olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Kanalın tekrar genişlediği x=250cm ve x=300 cm'de DES modeli ile hesaplanan hız profillerinin deneysel profillerden farklı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.6. Deneysel ve sayısal hız profilleri (SKE)



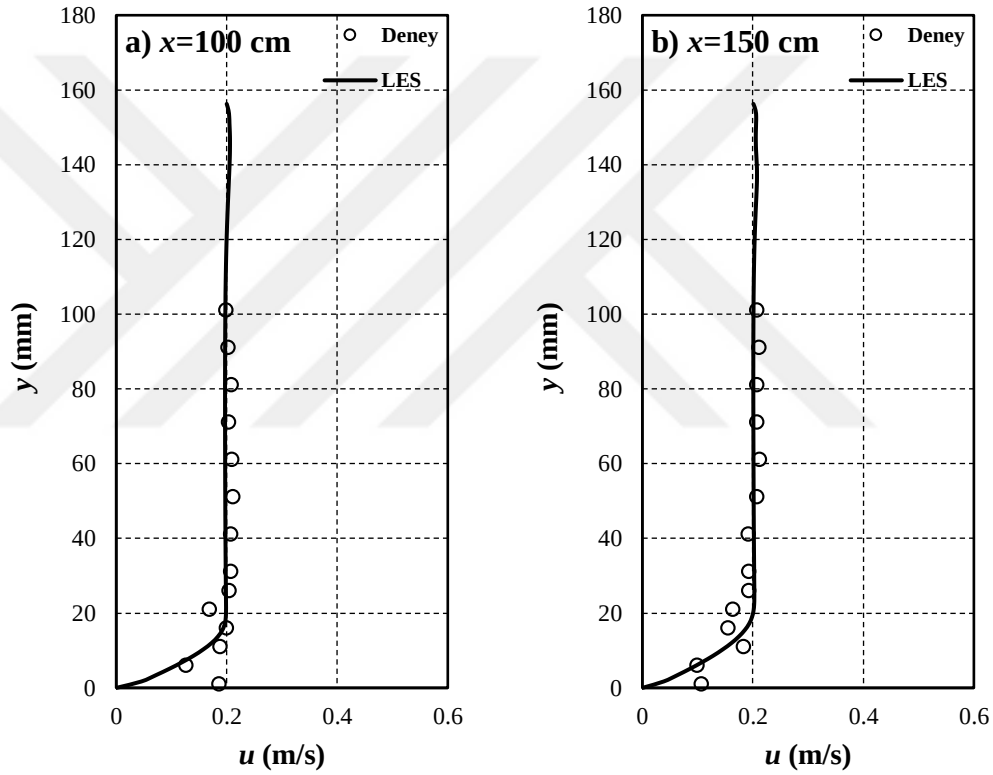
Şekil 4.6. (Devam)



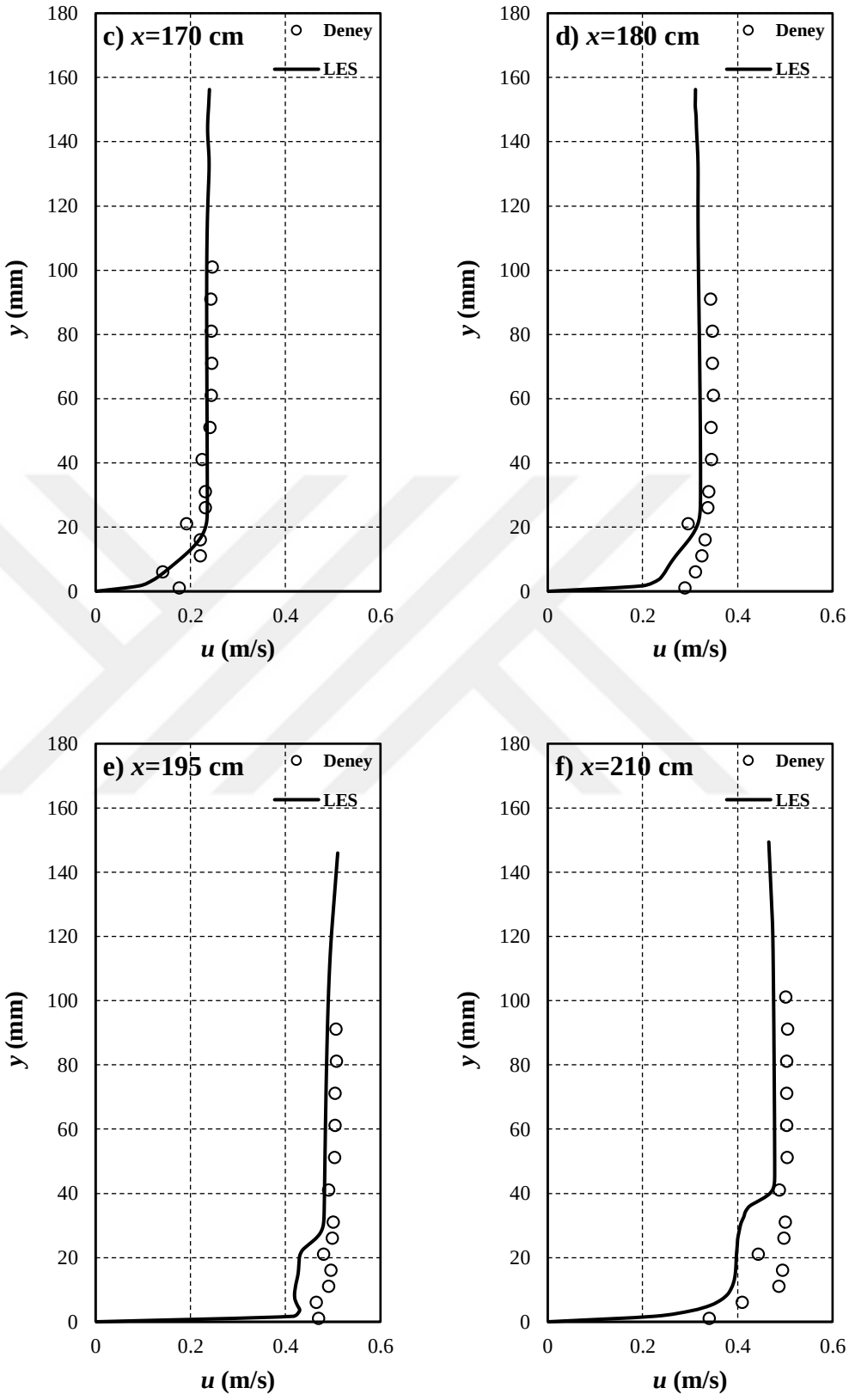
Şekil 4.6. (Devam)

4.3.4. LES modeli ile hesaplanan hız profilleri

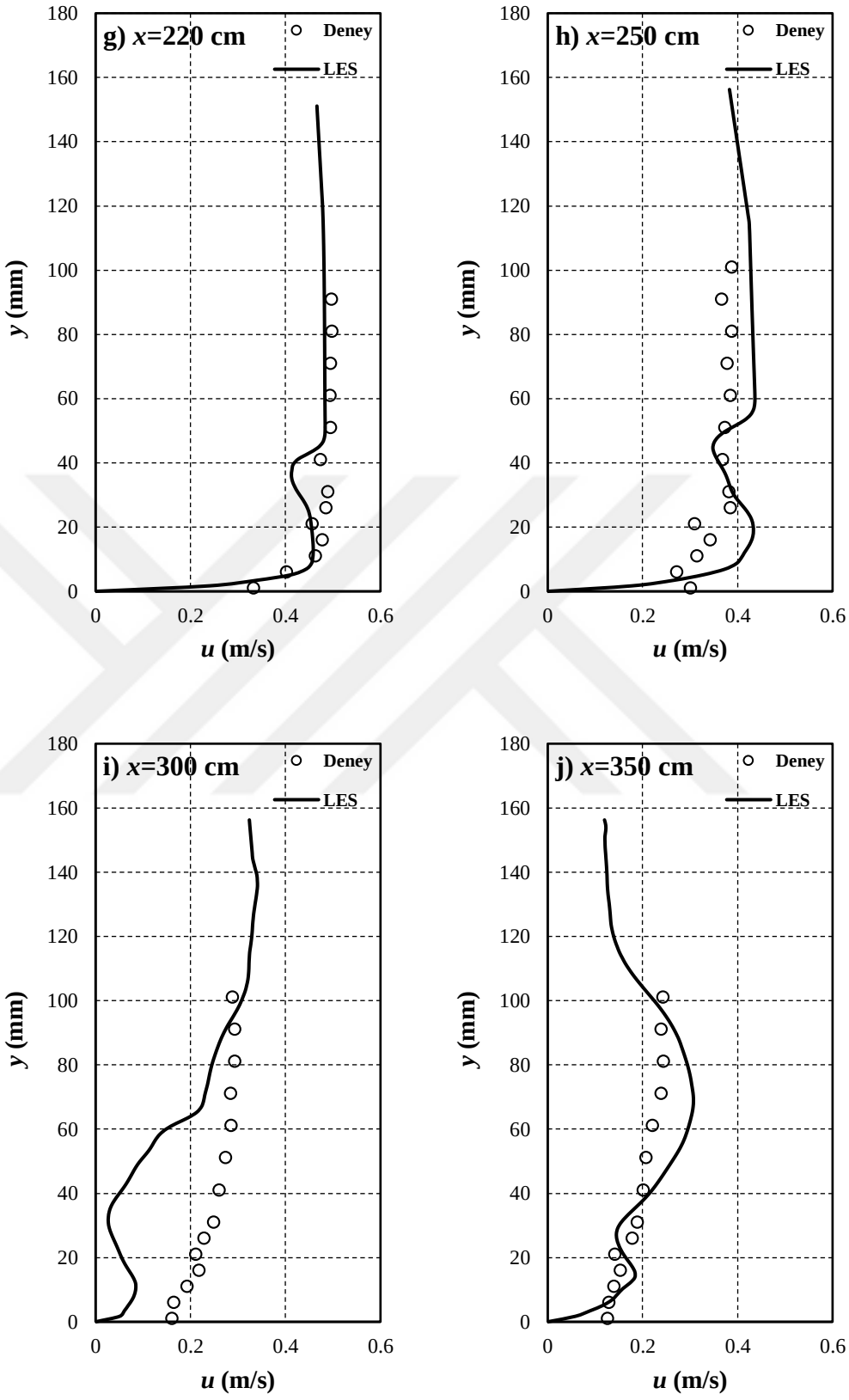
LES modeli ile sayısal olarak hesaplanan hız profilleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Buna göre, LES modeli hız profillerini hesaplamada x=100 cm, x=150 cm, x=170 cm'de başarılı sonuçlar vermesine rağmen, kanal tabanına yakın olan bölgeyi hesaplamada yetersiz kaldığı görülmüştür. Bunun nedeni, duvar yakınını modellemesi olarak gösterilebilir, katı sınıra uzak bölgeyi modellemede ise diğer modellere kıyasla iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.



Şekil 4.7. Deneysel ve sayısal hız profilleri (LES)



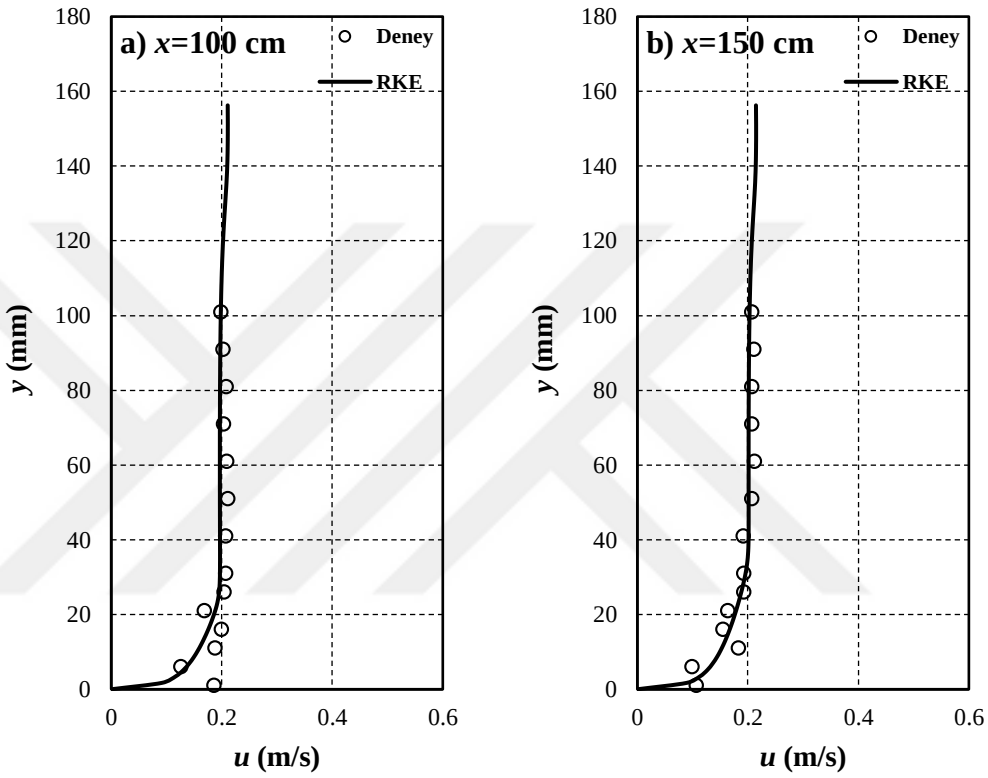
Şekil 4.7. (Devam)



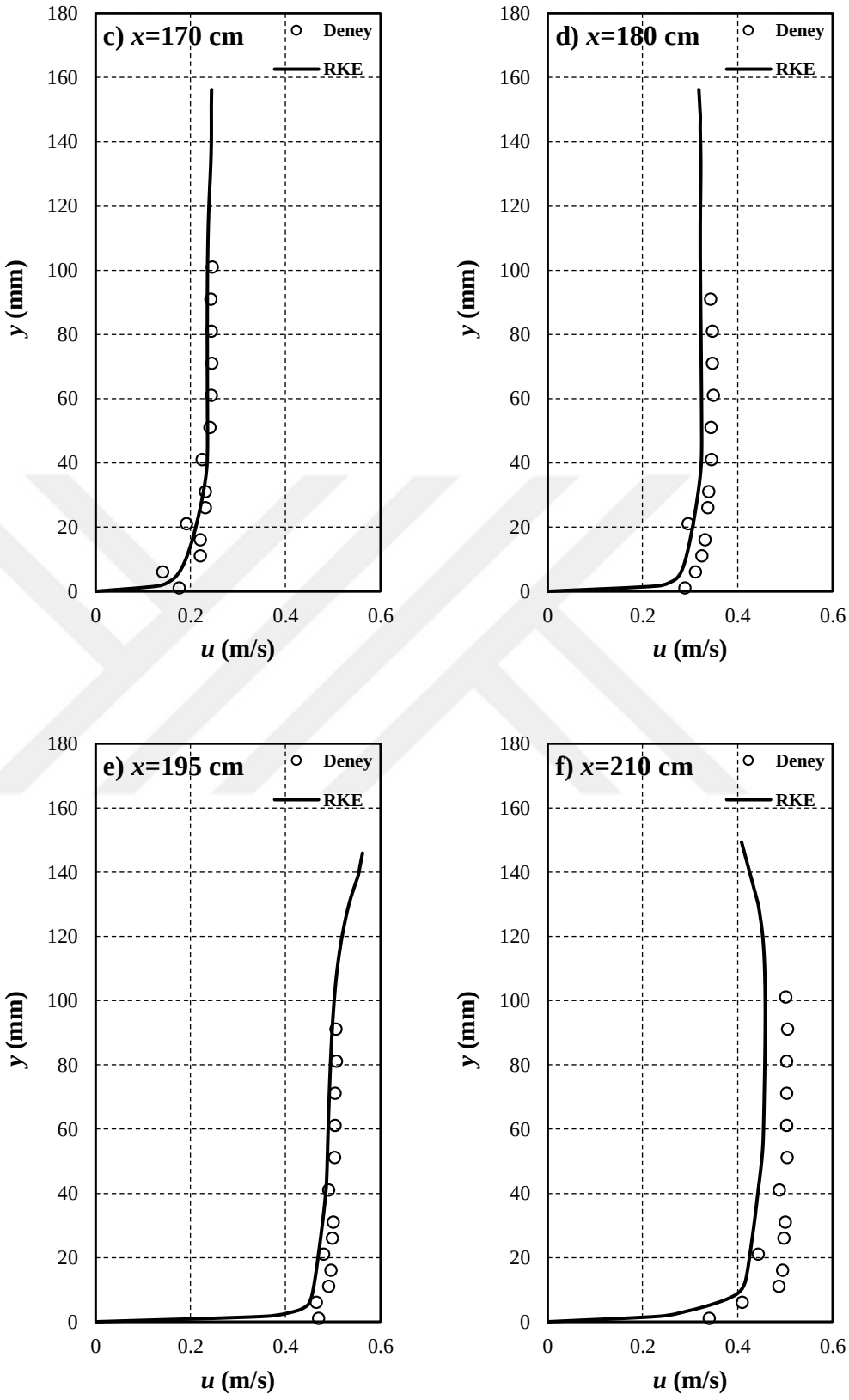
Şekil 4.7. (Devam)

4.3.5. RKE modeli ile hesaplanan hız profilleri

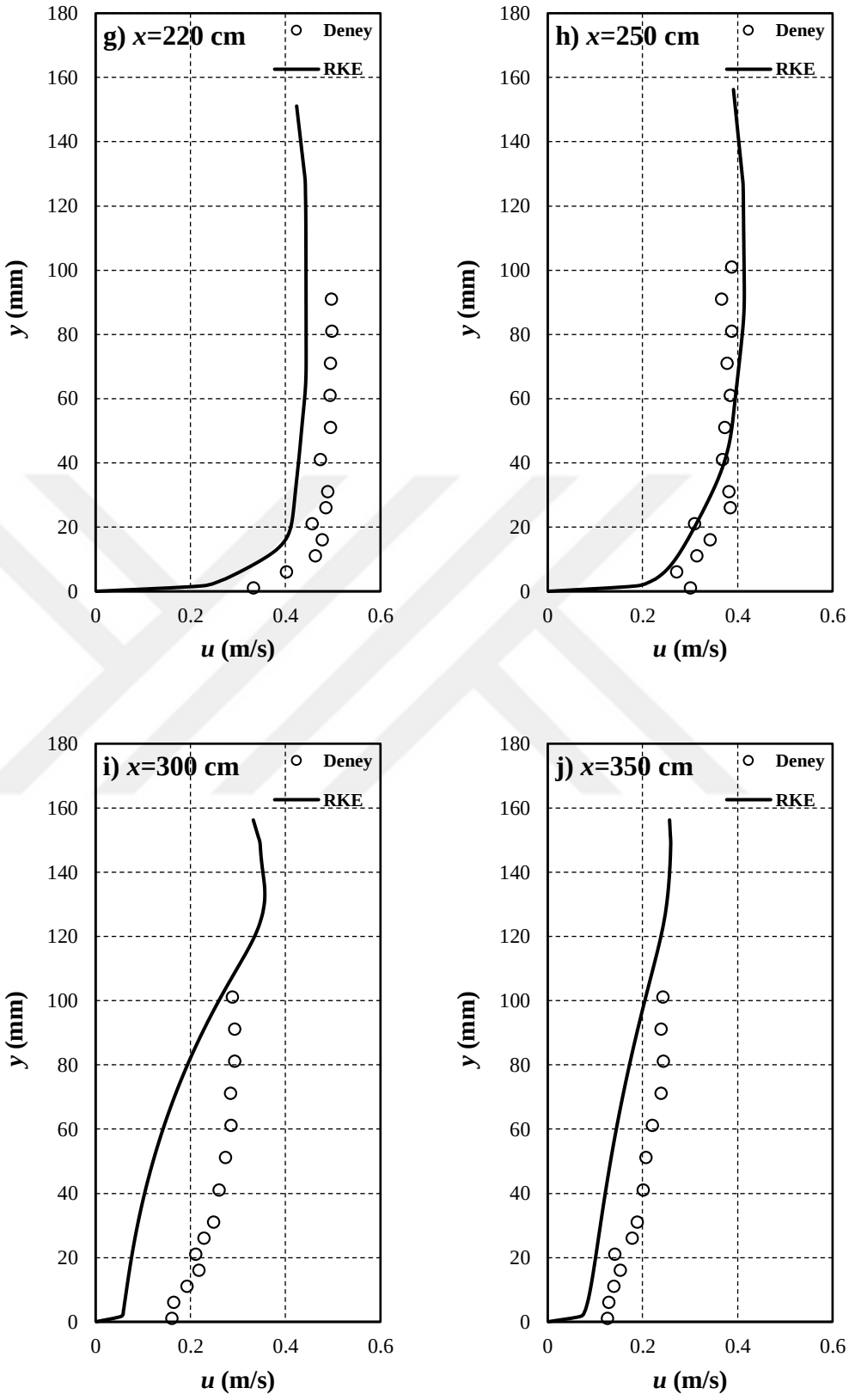
RKE modeli ile hesaplanan hız profilleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Buna göre, RKE modeli, RNG, SKE ve DES'e benzer olarak kanal başlangıcı ve daralma bölgesinde hız profili belirlemede başarılı olduğu, ayrıca bu bölgelerde katı sınıra yakın olan bölgeyi modellemede başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.8. Deneysel ve sayısal hız profilleri (RKE)



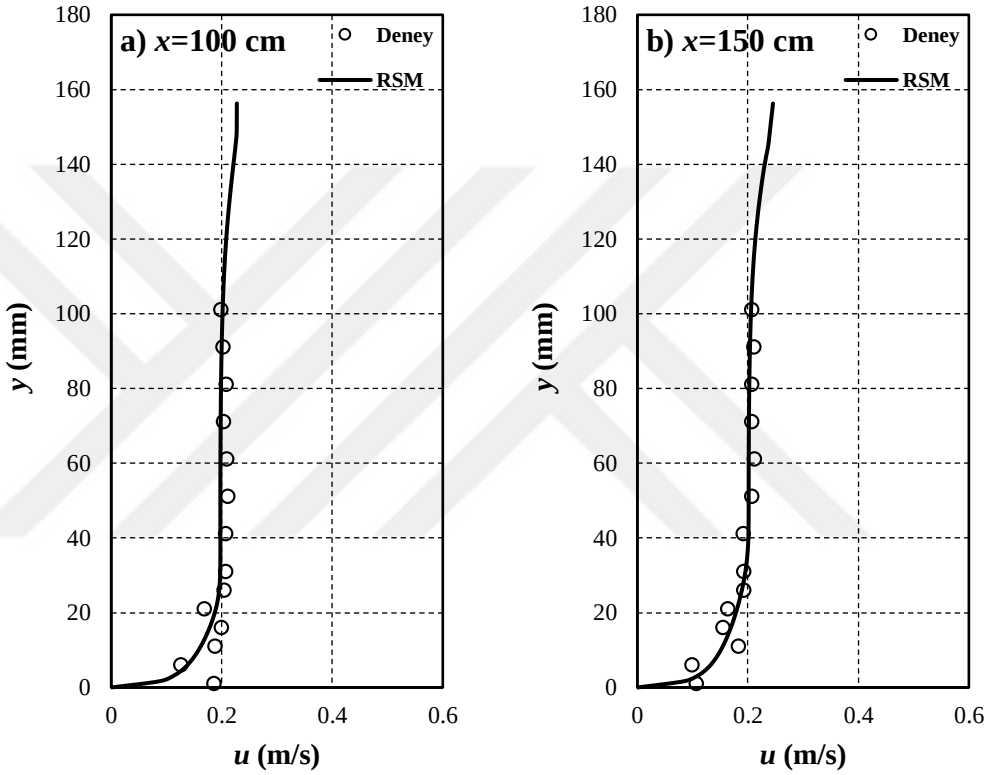
Şekil 4.8 (Devam)



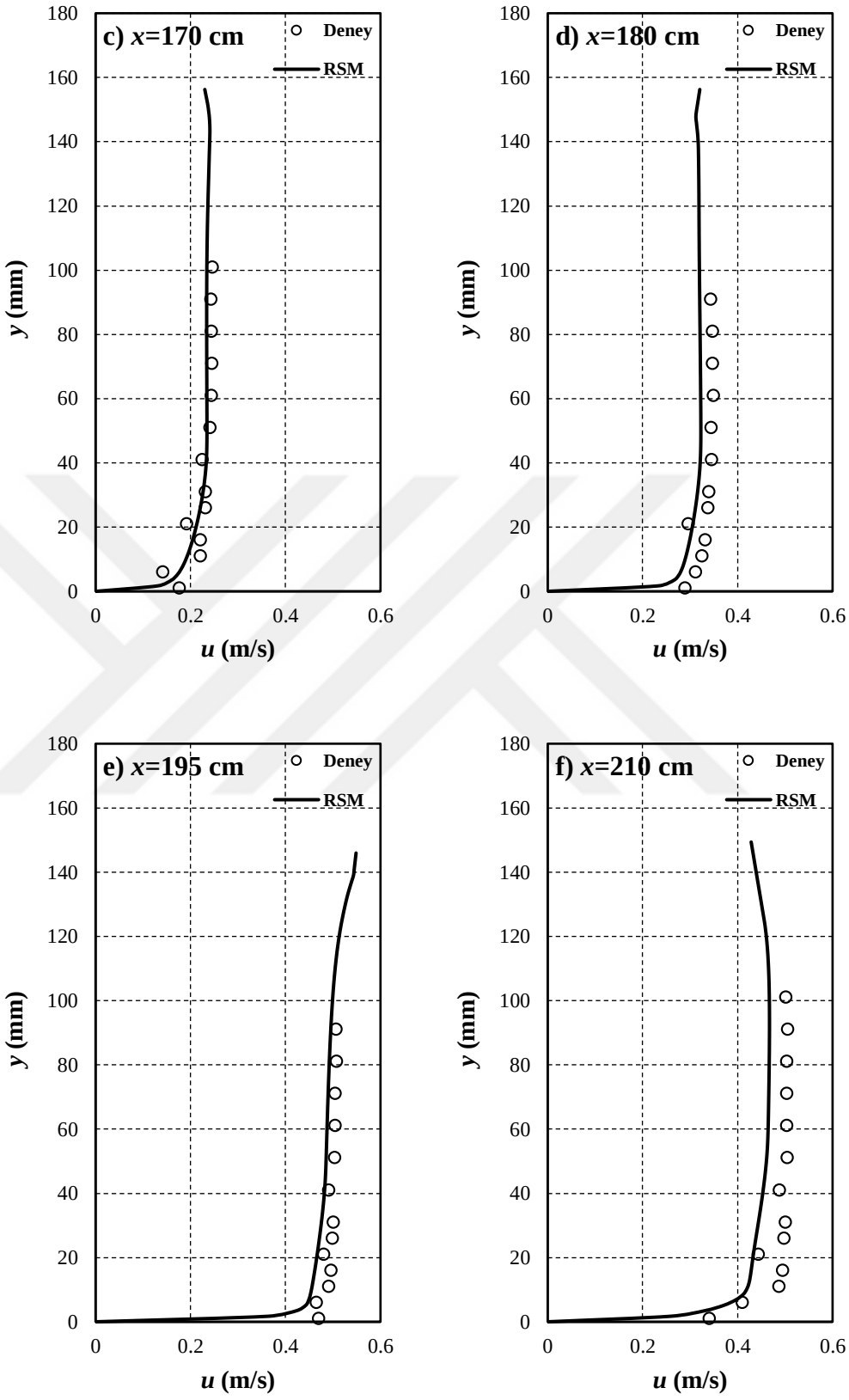
Şekil 4.8. (Devam)

4.3.6. RSM modeli ile hesaplanan hız profilleri

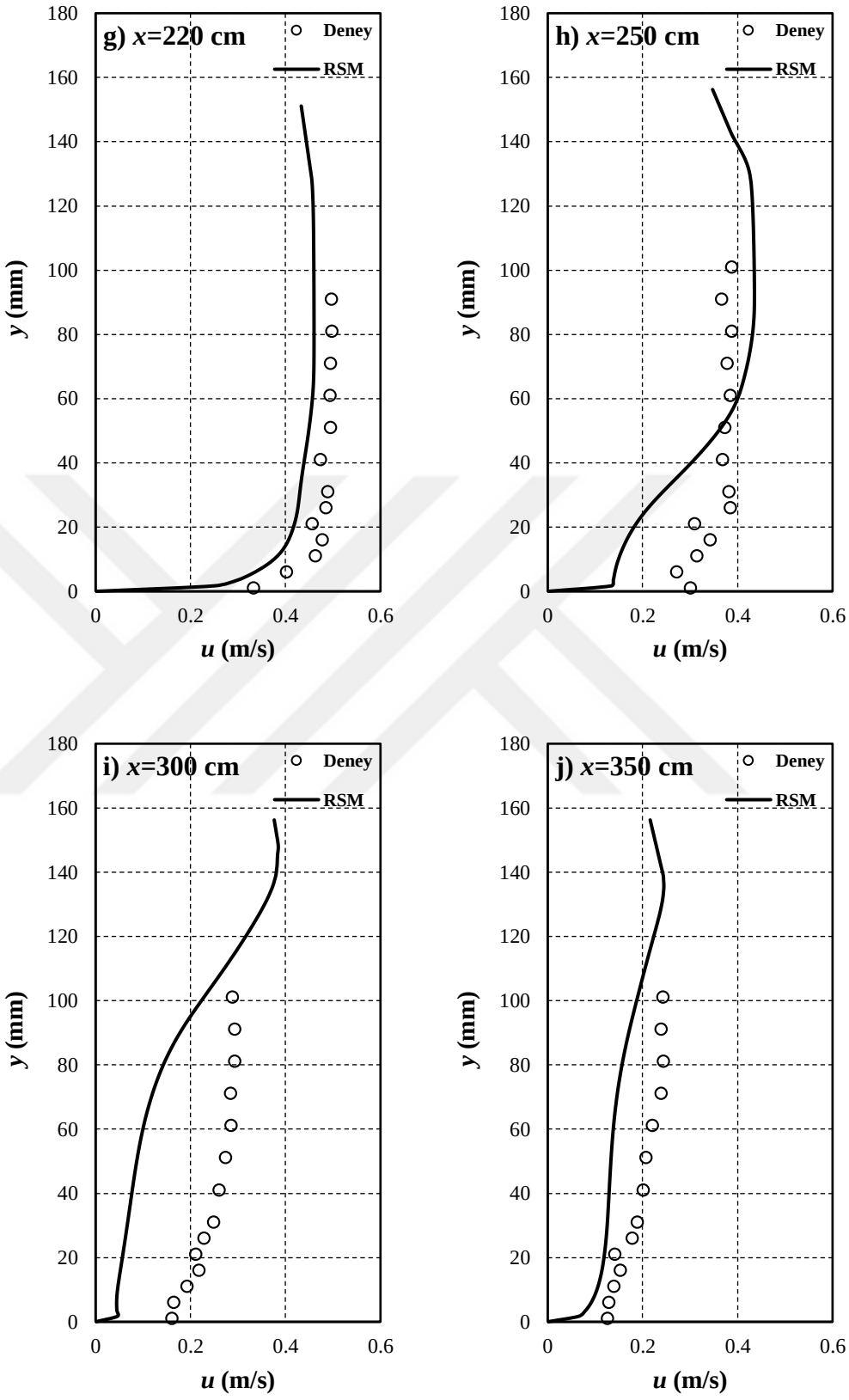
RSM modeli ile hesaplanan hız profilleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Buna göre, diğer modellere benzer olarak kanal başlangıcı ve daralmayı modellemede başarılı sonuçlar verse de kanal sonuna doğru elde edilen hız profilleri deneysel olarak ölçülen profillerden oldukça farklı olduğu ve model performansını düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 4.9. Deneysel ve sayısal hız profilleri (RSM)



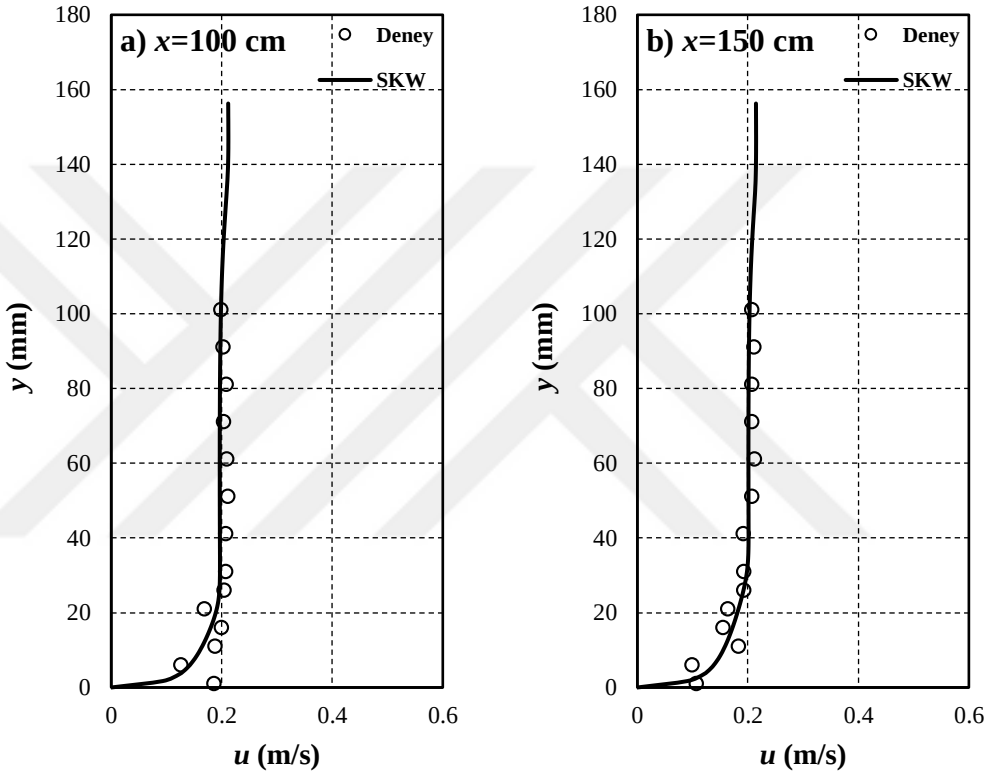
Şekil 4.9. (Devam)



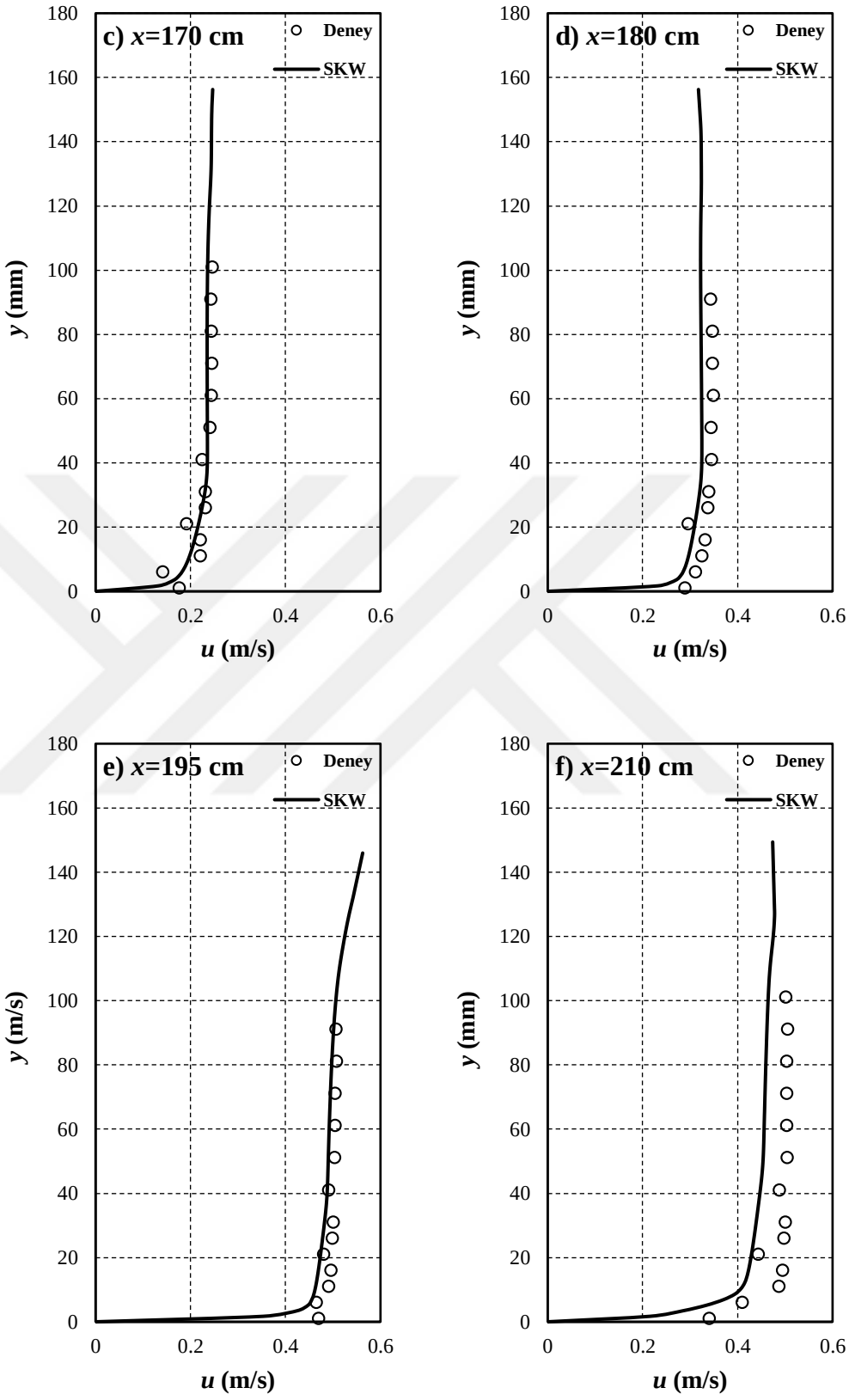
Şekil 4.9. (Devam)

4.3.7. SKW modeli ile hesaplanan hız profilleri

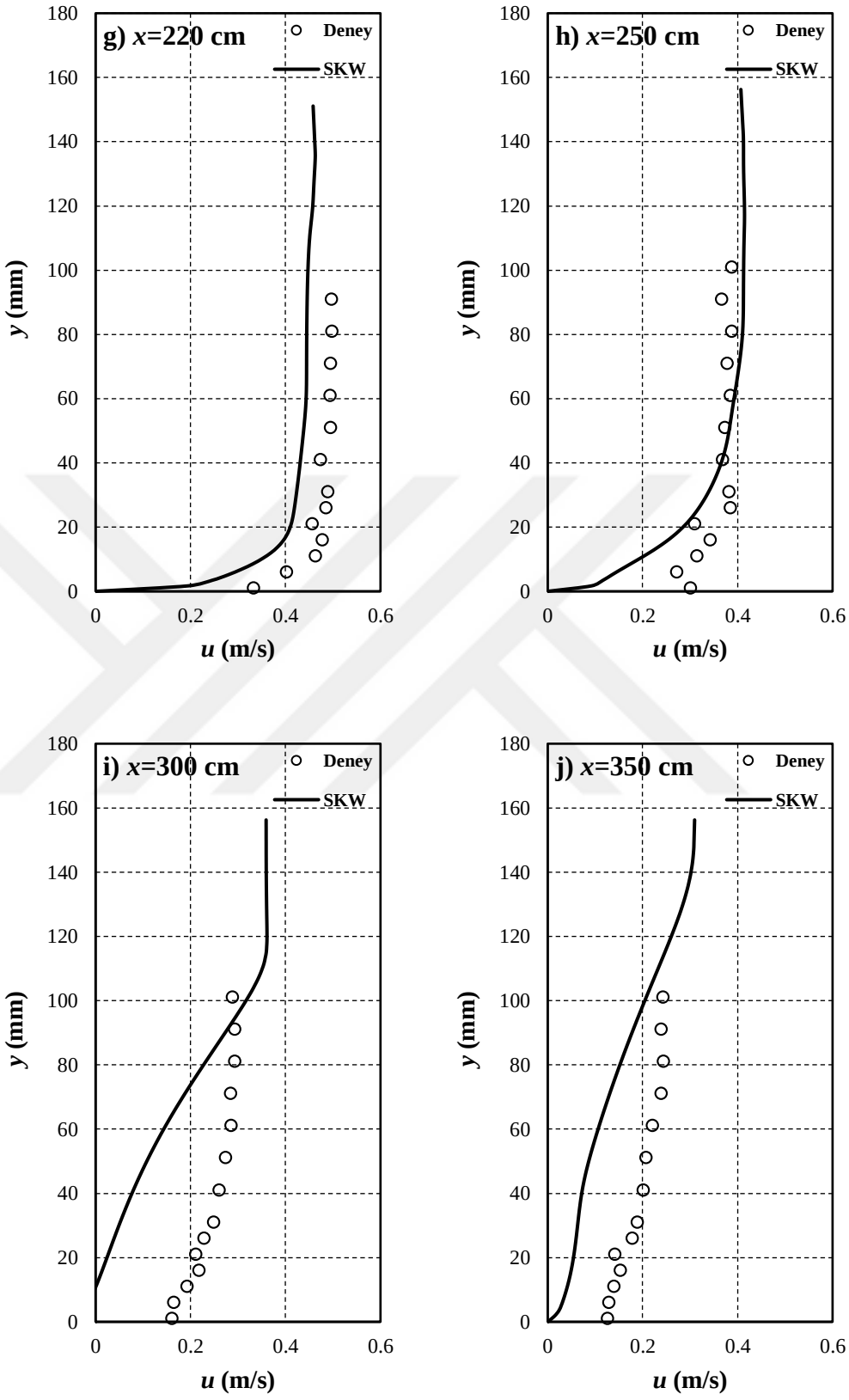
SKW modeli ile hesaplanan hız profilleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Buna göre, SKW modeli kanal başlangıcı ve daralmayı modellemede başarılı sonuçlar vermiş, ancak genişleme bölgesinde ve kanal sonunda hız profillerini hesaplamada başarısız olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Deneysel ve sayısal hız profilleri (SKW)



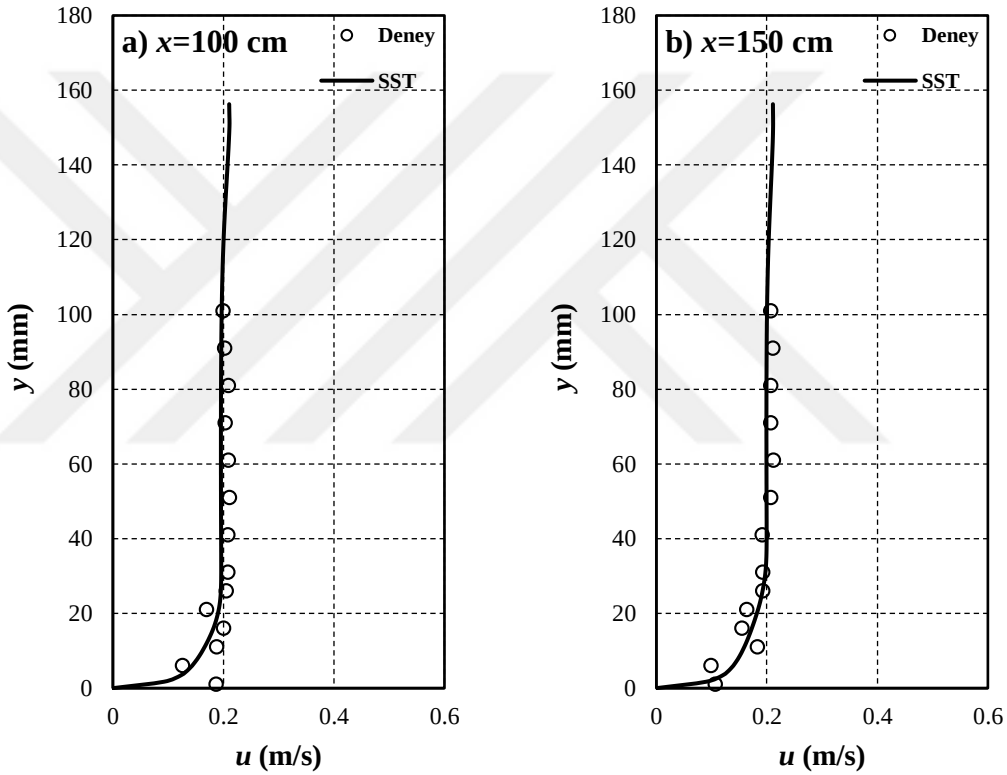
Şekil 4.10. (Devam)



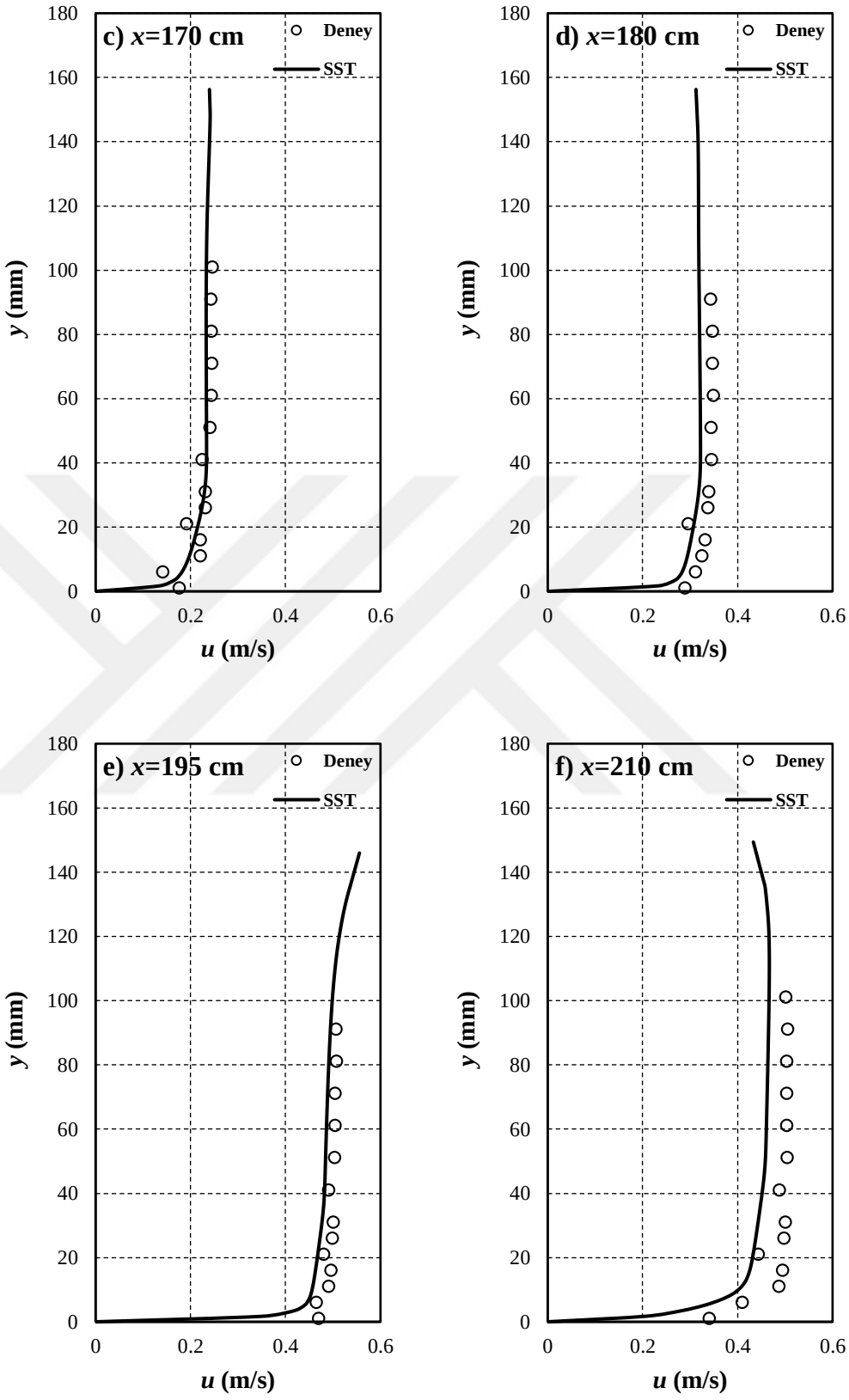
Şekil 4.10. (Devam)

4.3.8. SST modeli ile hesaplanan hız profilleri

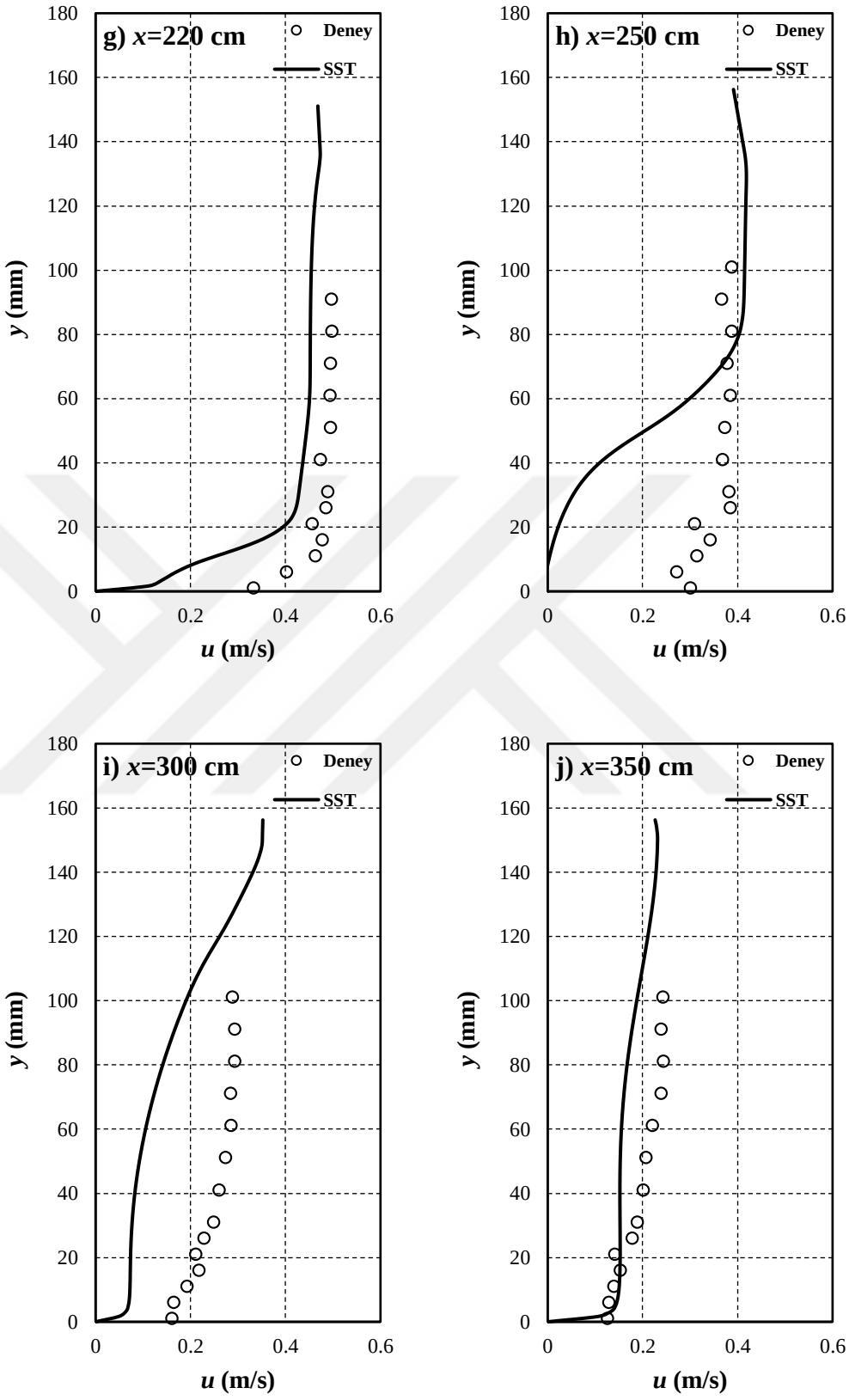
SST modeli ile hesaplanan hız profilleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Buna göre, SST modeli kanal başlangıcı ve daralmanın başladığı x=170 cm için hız profillerini başarılı bir şekilde modellemiş olsa da devamında elde edilen hız profillerinin deneysel sonuçlardan oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.11. Deneysel ve sayısal hız profilleri (SST)



Şekil 4.11. (Devam)



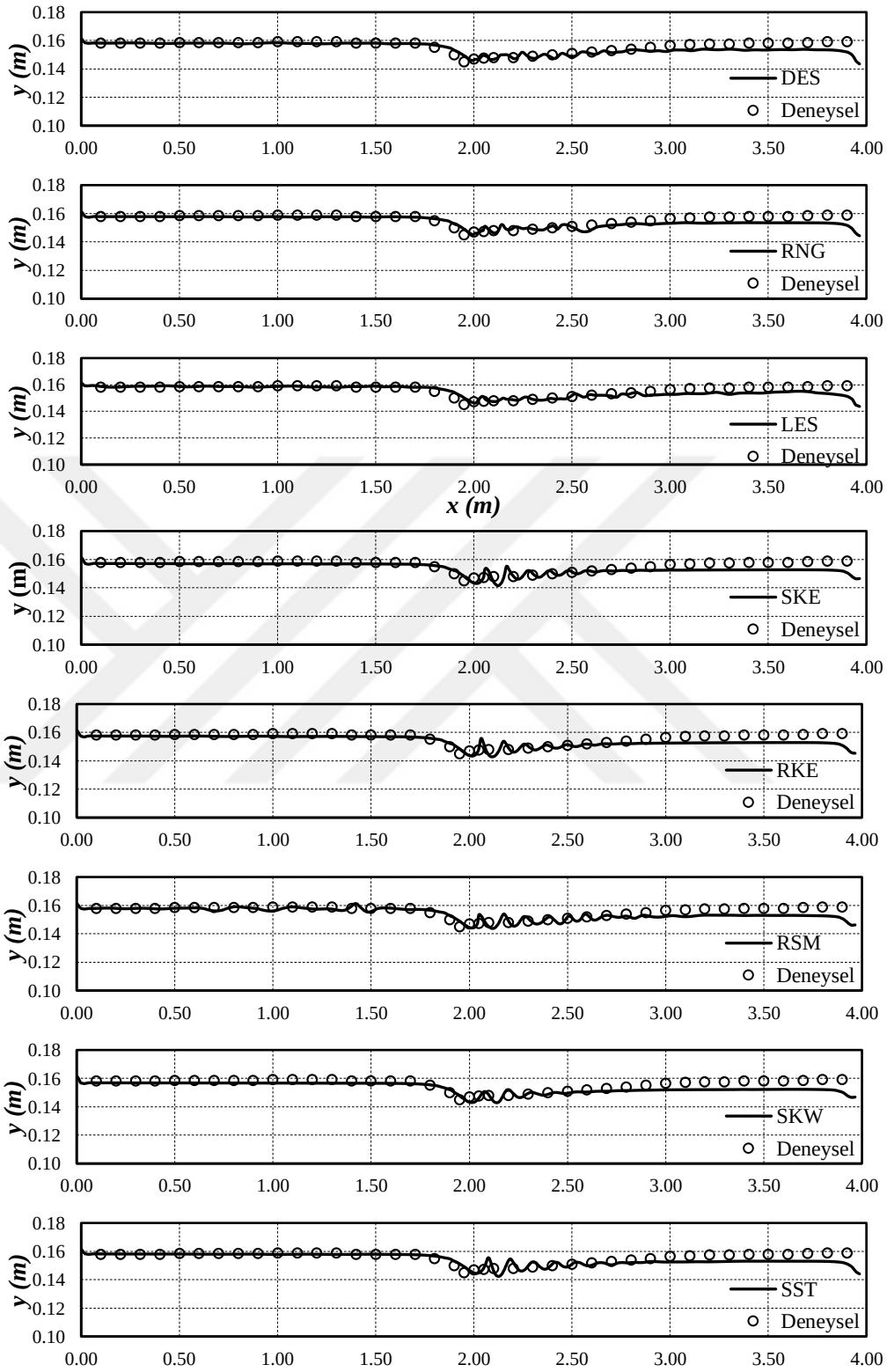
Şekil 4.11. (Devam)

4.4. Deneysel ve Sayısal Su Yüzü Profilleri

Kullanılan tüm türbülans kapatma modeller için VOF yöntemi kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri ve deneysel olarak ölçülen su yüzü profilleri Şekil 4.12'de, bu değerler ile hesaplanan OKH ve OMGH değerleri ise Çizelge 4.4'te verilmiştir. Buna göre, daralma bölgesine kadar olan kısımda, hız profillerinde olduğu gibi su yüzü profillerinde de benzer bir şekilde neredeyse tüm modeller su yüzünü belirlemede başarılı olmuşlardır. su yüzünü belirlemede, kanal boyunca, DES modeli, daralma/genişleme bölgesinde ise RNG modeli diğer modellere nazaran daha başarılı sonuçlar vermiştir. Su yüzünü belirlemede başarı sıralaması tüm kanal beraber değerlendirildiğinde OKH değerlerine göre, DES, RNG, LES, RKE, SST, SKE, RSM ve SKW şeklinde, daralma/genişleme bölgesindeki başarı sıralaması ise RNG, DES, SKW, LES, RSM, RKE, SKE ve SST şeklinde meydana gelmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı türbülans modelleri ile elde edilen su yüzlerinin OKH ve OMGH değerleri

Bölge	**OKH (cm^2/s^2)**							
	SKE	**RKE**	**RNG**	**SKW**	**SST**	**RSM**	**DES**	**LES**
Tüm Kanal	0.3894(6)	0.3856(4)	0.3677(2)	0.4010(8)	0.3893(5)	0.3906(7)	**0.3668(1)**	0.3764(3)
Daralma/Genişleme	0.0763(7)	0.0701(6)	**0.0357(1)**	0.0503(3)	0.0839(8)	0.0666(5)	0.0382(2)	0.0550(4)
	OMGH (%)							
Tüm Kanal	2.1372(7)	2.048(5)	1.7985(3)	2.2853(8)	1.9062(4)	2.0219(6)	**1.6715(2)**	1.6795(2)
Daralma/Genişleme	1.4937(7)	1.4331(6)	**0.9989(1)**	1.2633(4)	1.5169(8)	1.4328(5)	1.0017**(2)**	1.1821(3)

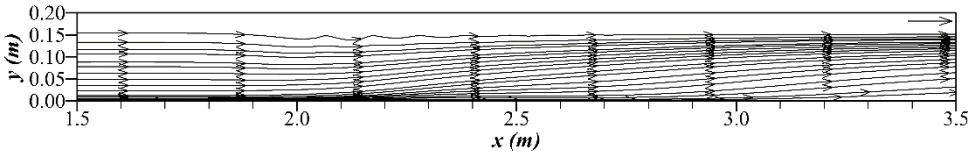


Şekil 4.12. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

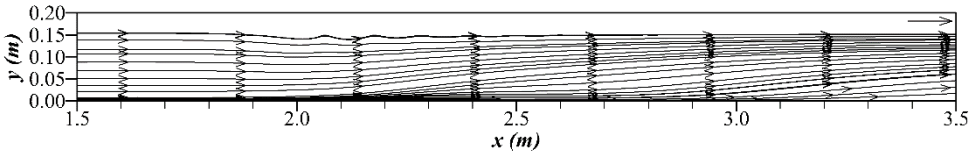
4.5. Sayısal Akım Çizgileri

Sayısal olarak z=0.1755 m'de hesaplanan akım çizgilerinin topolojisi k-ε grubu modeller için Şekil 4.13'te, k-ω grubu modeller için Şekil 4.14'te RSM, DES ve LES için ise Şekil 4.15'te verilmiştir. Buna göre, hız profillerini ve su yüzü profilini hesaplamada en başarılı model olarak ortaya çıkan DES modelinde x=270 cm civarında bir ayrılma bölgesi meydana geldiği görülmektedir. SST'de ayrılma bölgesi x=240 cm'de SKW'da ise x=300 cm'de meydana gelmektedir. Özellikle daralma sonrası bir ayrılma bölgesine deneysel olarak ölçüm alınan bölgelerde rastlanmamıştır.

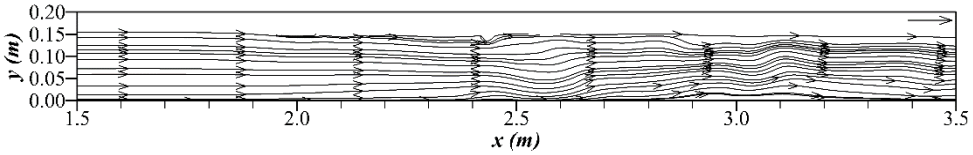
a) SKE



b) RKE

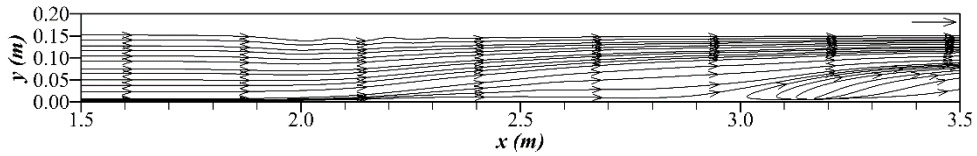


c) RNG

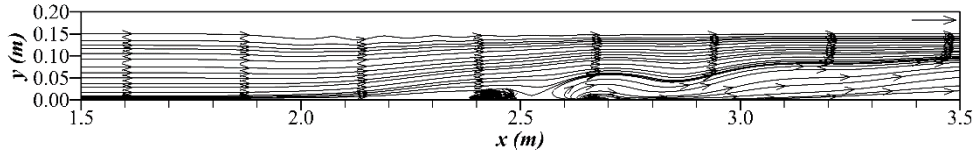


Şekil 4.13. SKE, RKE ve RNG modelleri ile elde edilen akım çizgileri (z=0.175 m)

a) SKW

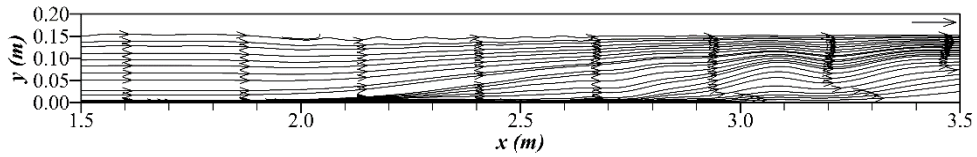


b) SST

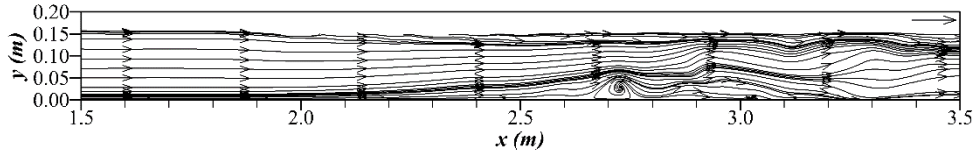


Şekil 4.14. SKW ve SST modelleri ile elde edilen akım çizgileri (z=0.175 m)

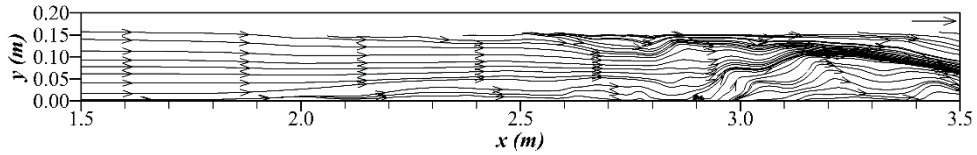
a) RSM



b) DES



c) LES

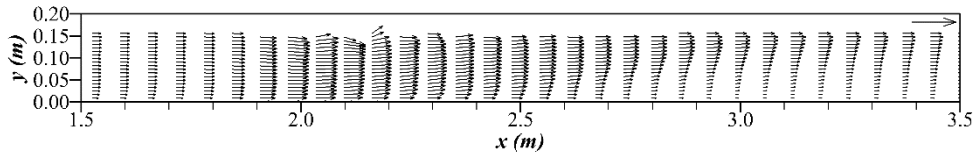


Şekil 4.15. RSM, DES ve LES modelleri ile elde edilen akım çizgileri (z=0.175 m)

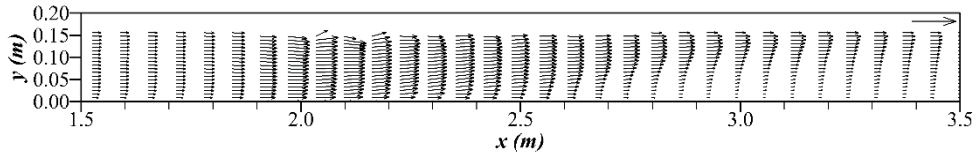
4.6. Sayısal Hız Vektörleri

Ele alınan tüm türbülans modelleri ile hesaplanan hız vektörlerinin x=150 cm ile x=350 cm aralığındaki bölümü ve z=0.175 m kesitinde, k-ε grubu modeller için Şekil 4.16'da, k-ω grubu modeller için Şekil 4.17'de RSM, DES ve LES için ise Şekil 4.18'de verilmiştir. Buna göre, daralma bölgesinde, beklendiği gibi, hız vektörlerinin boyutunda bir artış meydana gelmekte, genişleme başladığında ise hızlarda bir azalma meydana gelmektedir.

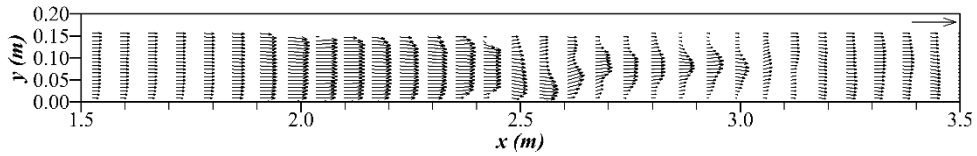
a) SKE



b) RKE

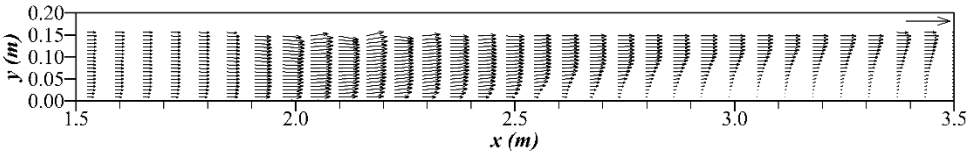


c) RNG

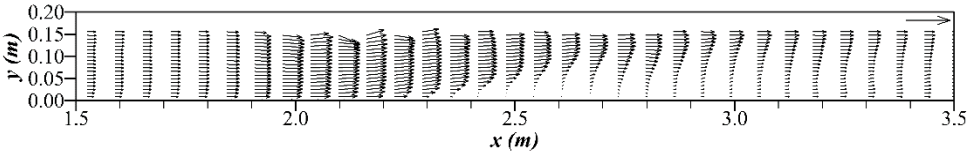


Şekil 4.16. SKE, RKE ve RNG modelleri ile elde edilen hız vektörleri (z=0.175 m)

a) SKW

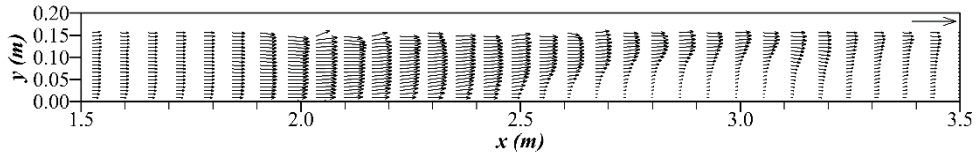


b) SST

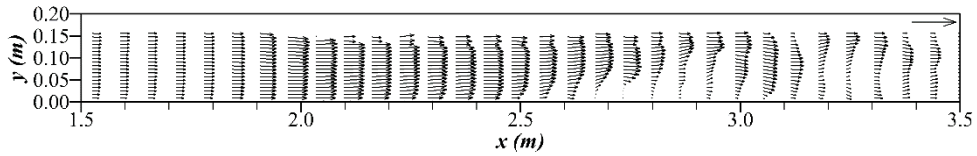


Şekil 4.17. SKW ve SST modelleri ile elde edilen hız vektörleri (z=0.175 m)

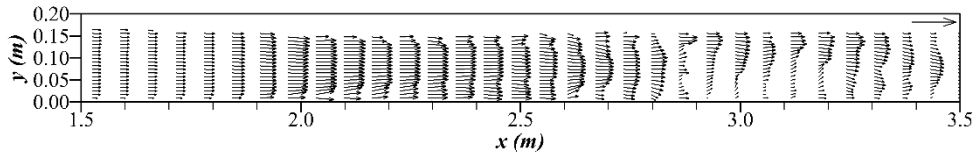
a) RSM



b) DES



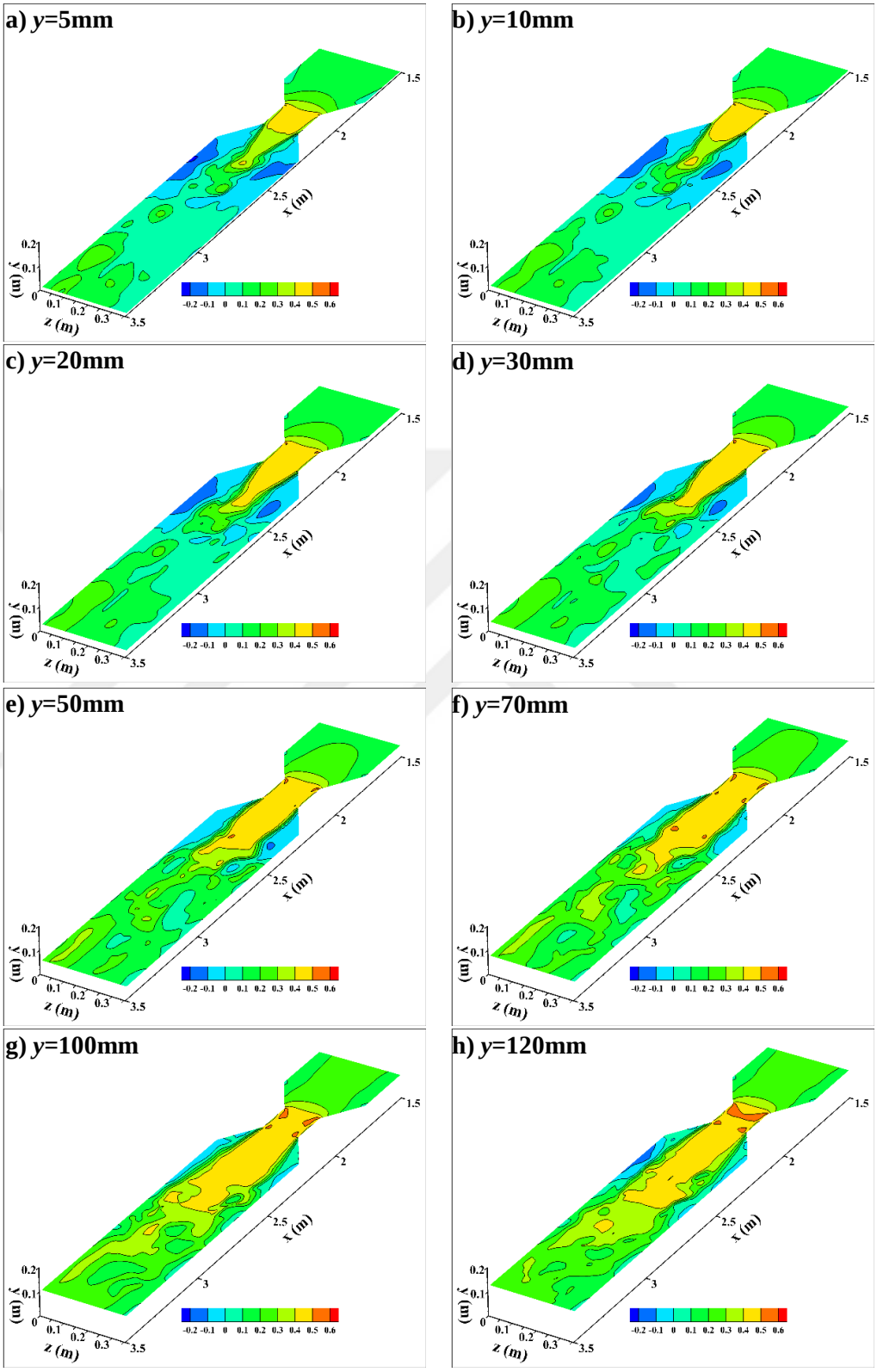
c) LES



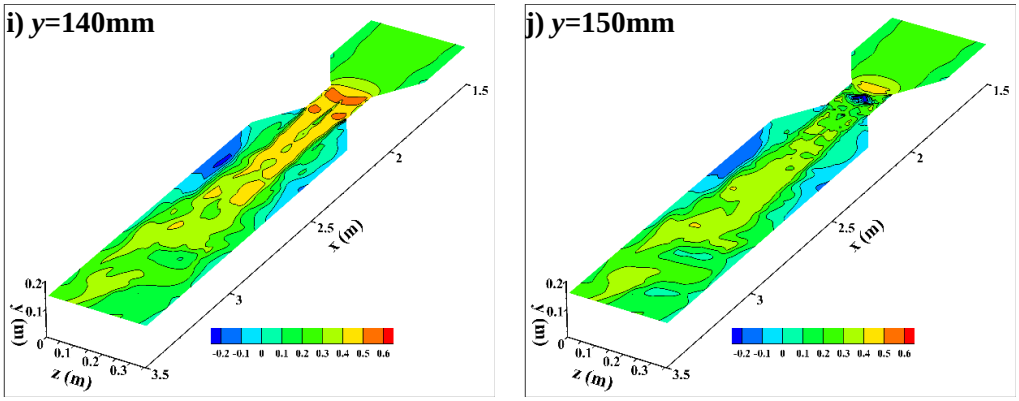
Şekil 4.18. RSM, DES ve LES modelleri ile elde edilen hız vektörleri (z=0.175 m)

4.7. *u* Hızının Üç Boyutlu Dağılımı

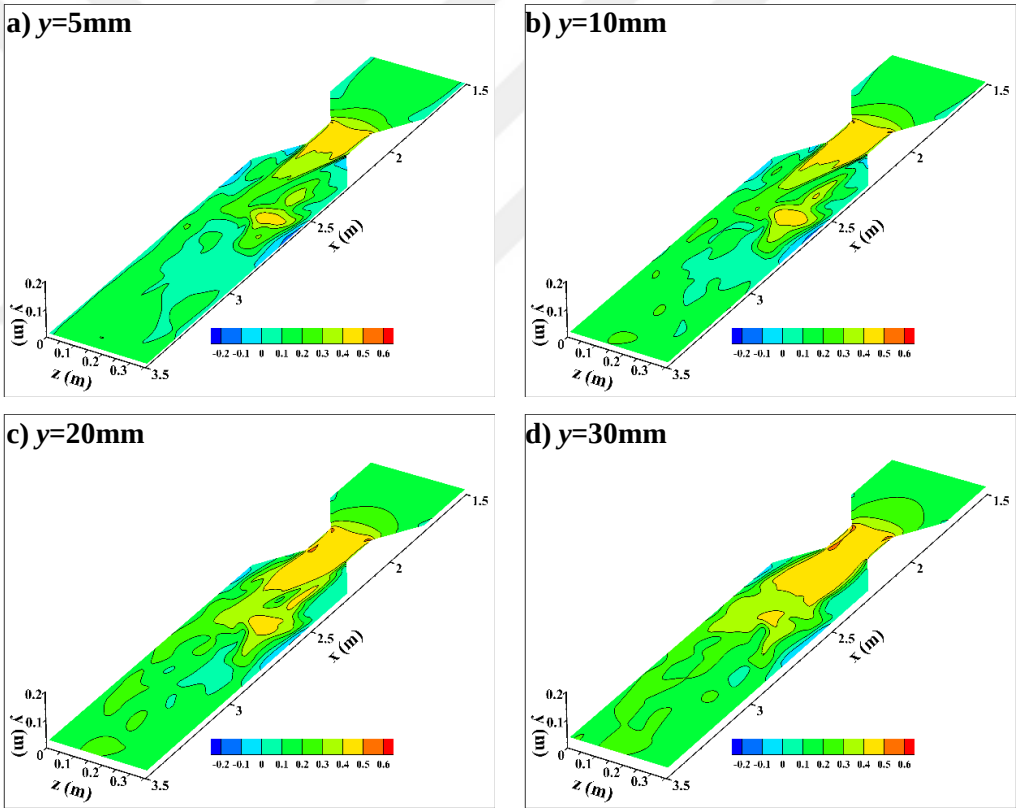
Kullanılan tüm türbülans modelleri ile üç boyutlu akımların *u* hızlarının derinlikle değişimleri DES, RNG, SKE, LES, RKE, RSM, SKW ve SST için sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 te verilmiştir. Buna göre tüm modellerde, katı sınıra yakın olan bölgede akım hızlarının düşük olduğu ve yukarı doğru çıkıldıkça hızlarda bir artış meydana geldiği görülmektedir. Özellikle tabana yakın bölge içerisinde olan ve daralmanın bittiği noktadan sonra yan duvara yakın olan bölgelerde durma noktası meydana geldiği, ancak katı sınırdan uzaklaştıkça akım profilinde pozitif bir hız bileşeni meydana geldiği görülmüştür.



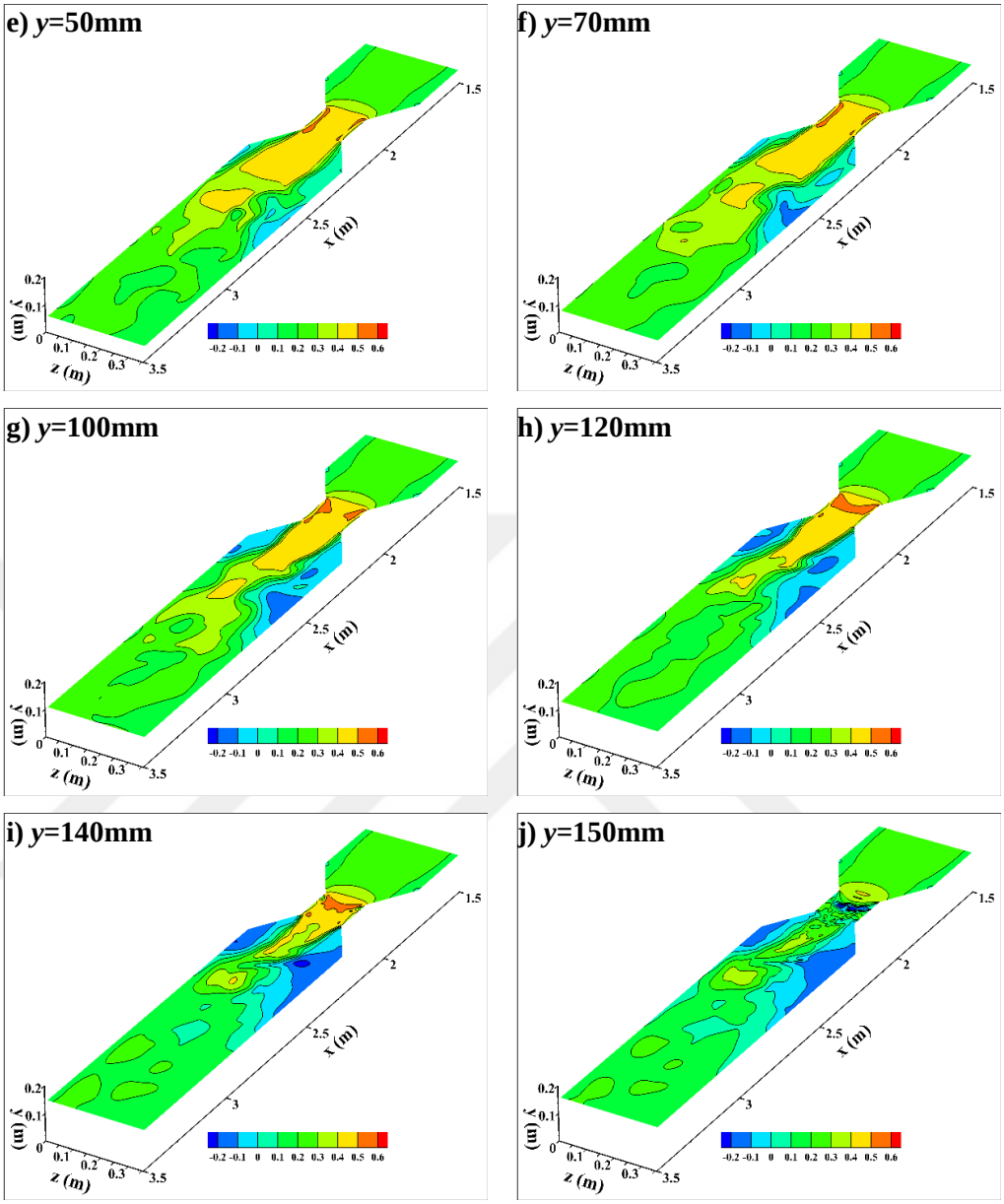
Şekil 4.19. DES ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



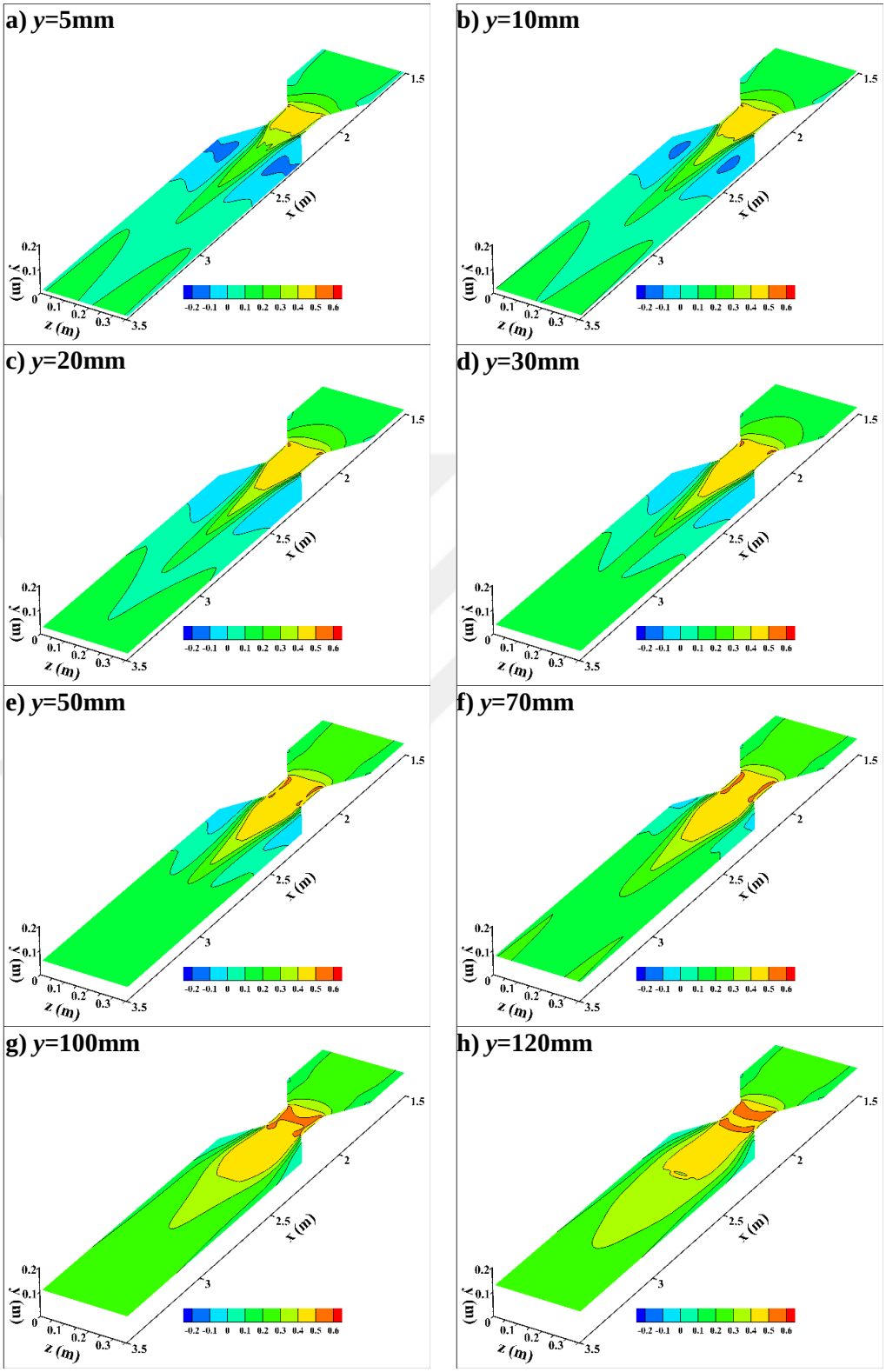
Şekil 4.19 (Devam)



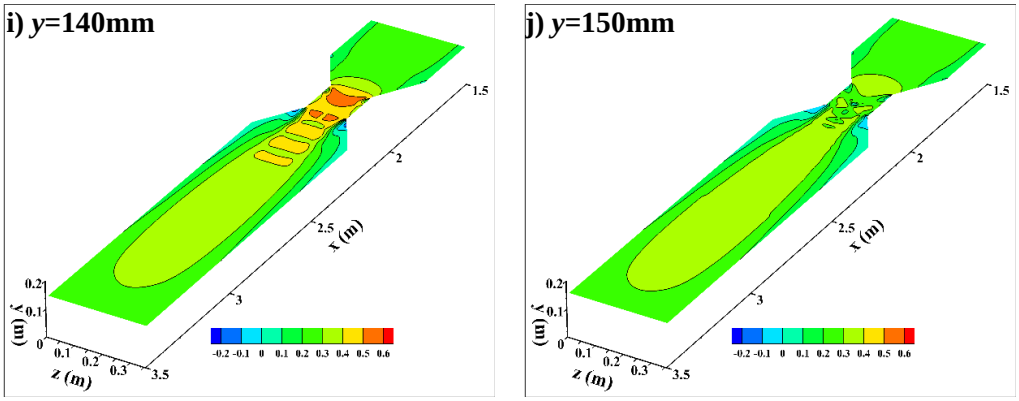
Şekil 4.20. RNG ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



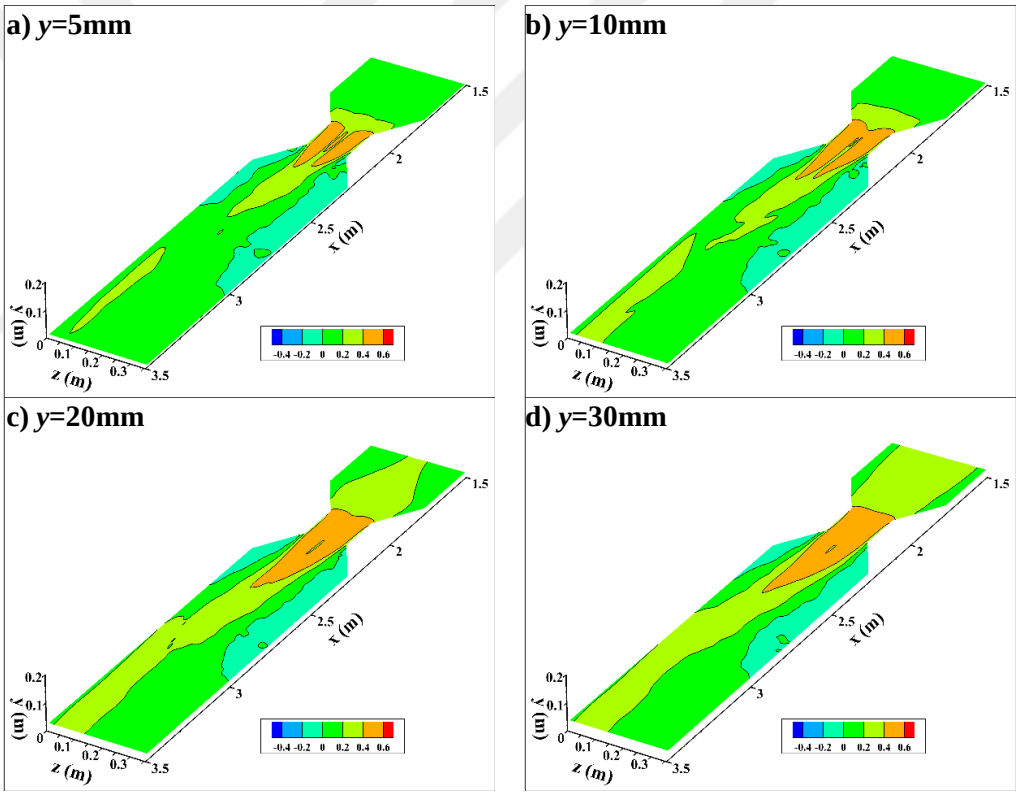
Şekil 4.20. (Devam)



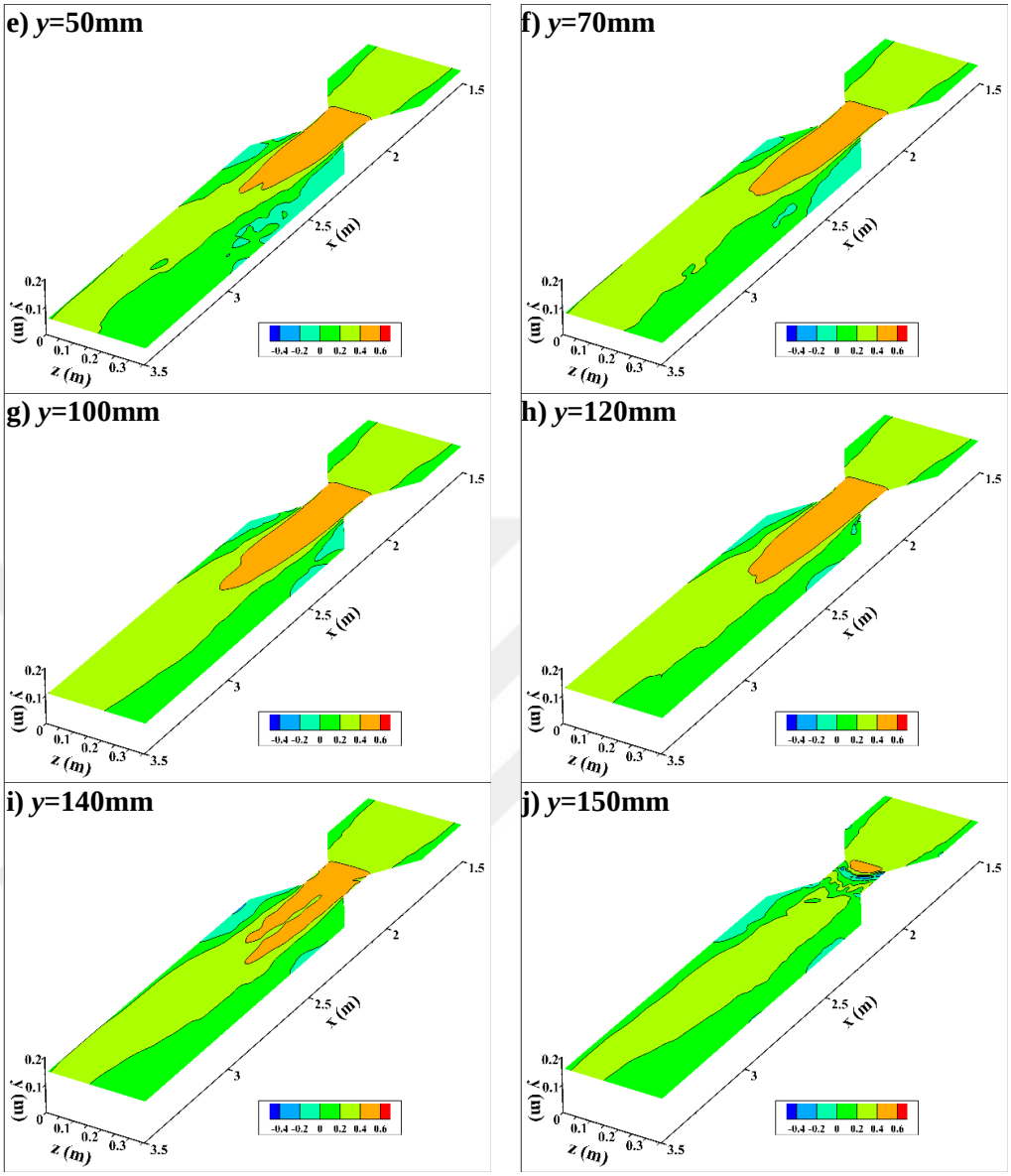
Şekil 4.21. SKE ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



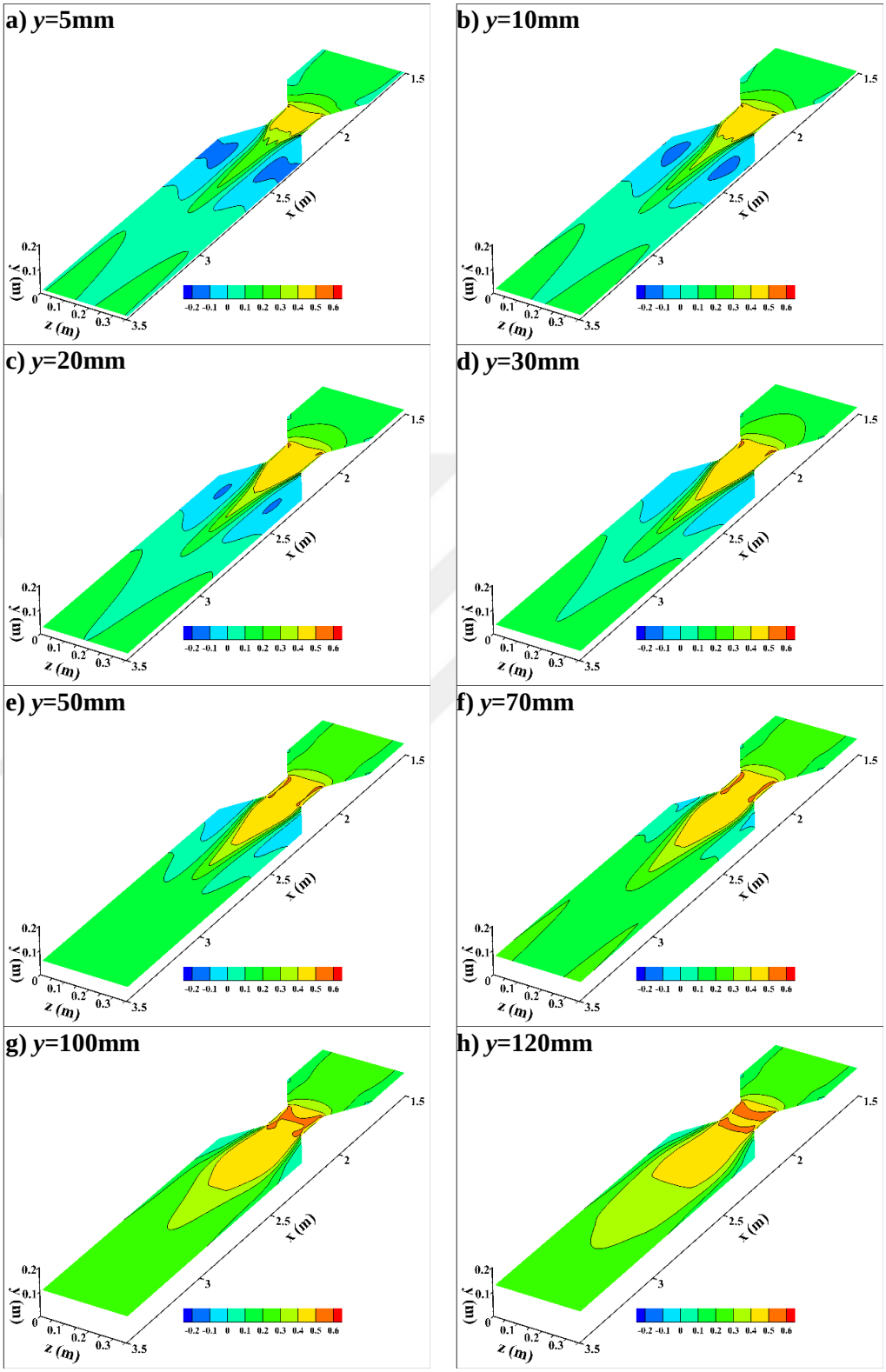
Şekil 4.21. (Devam)



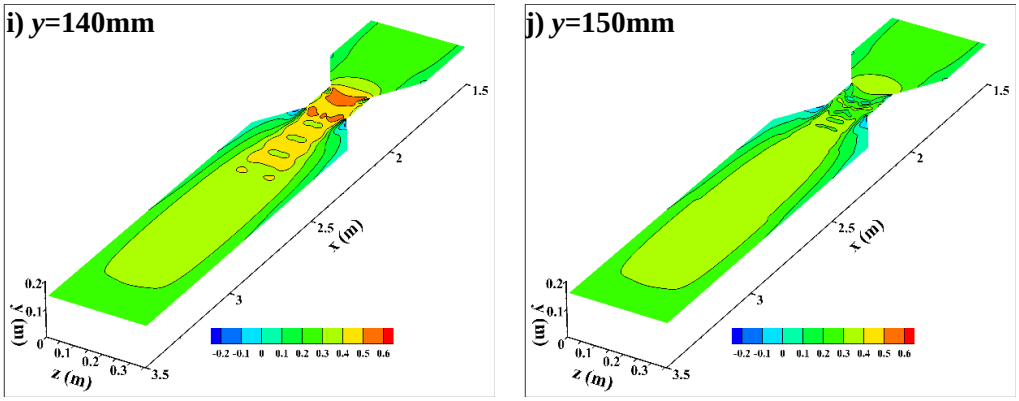
Şekil 4.22. LES ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



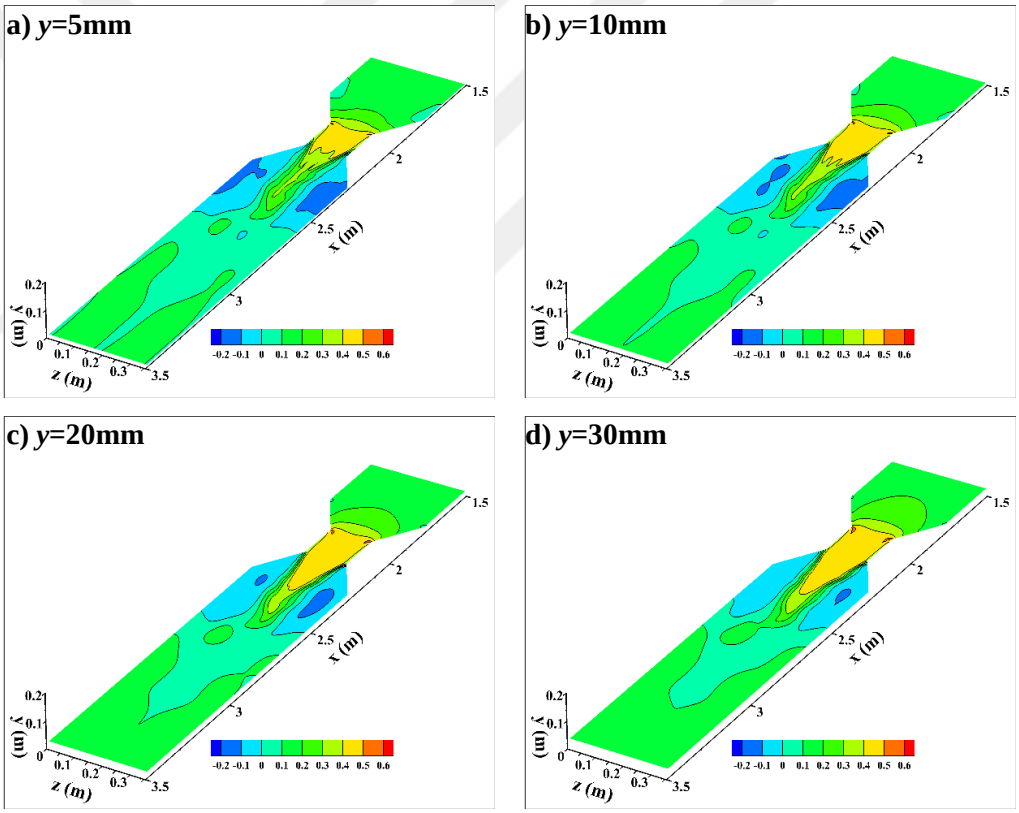
Şekil 4.22. (Devam)



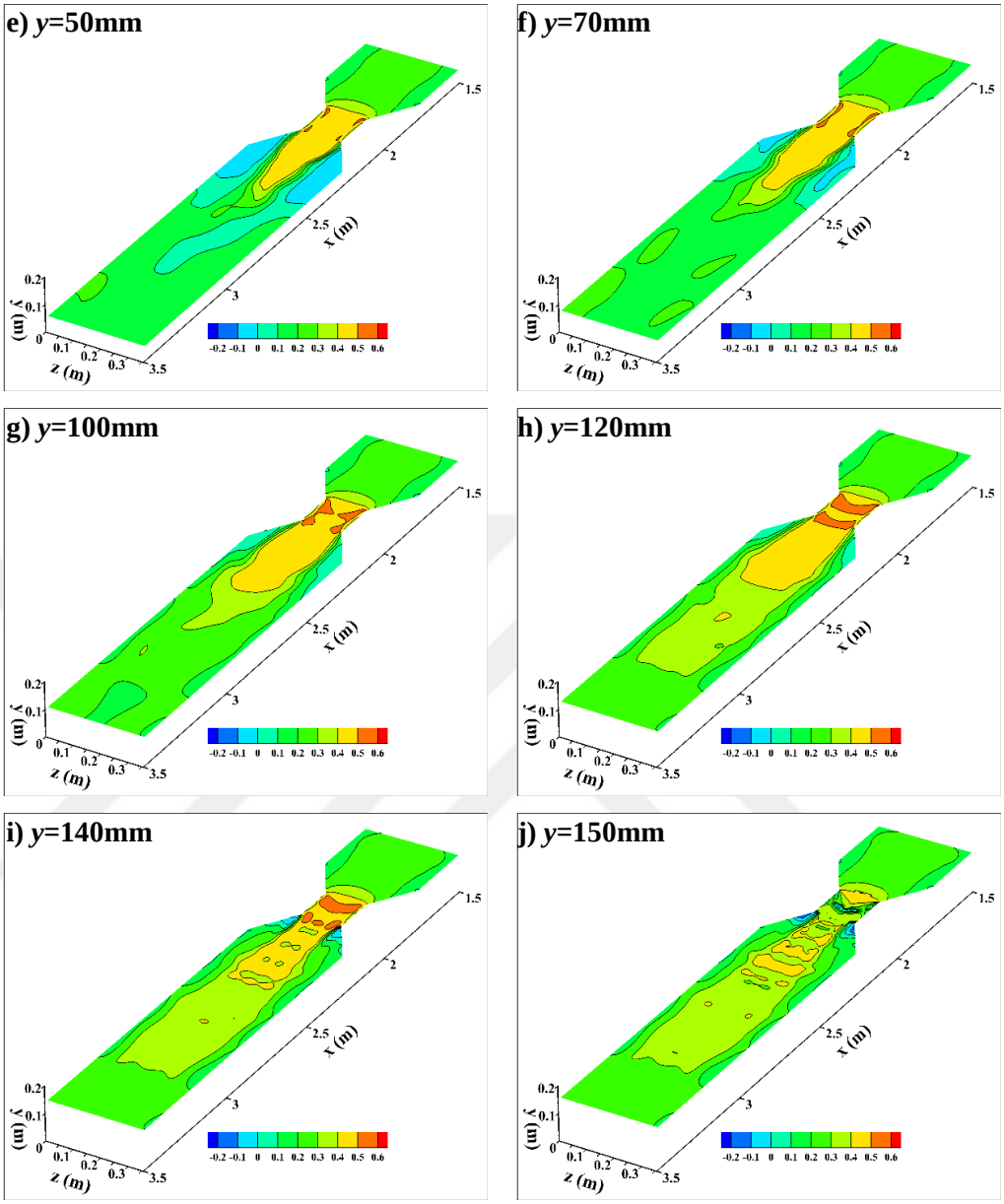
Şekil 4.23. RKE ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



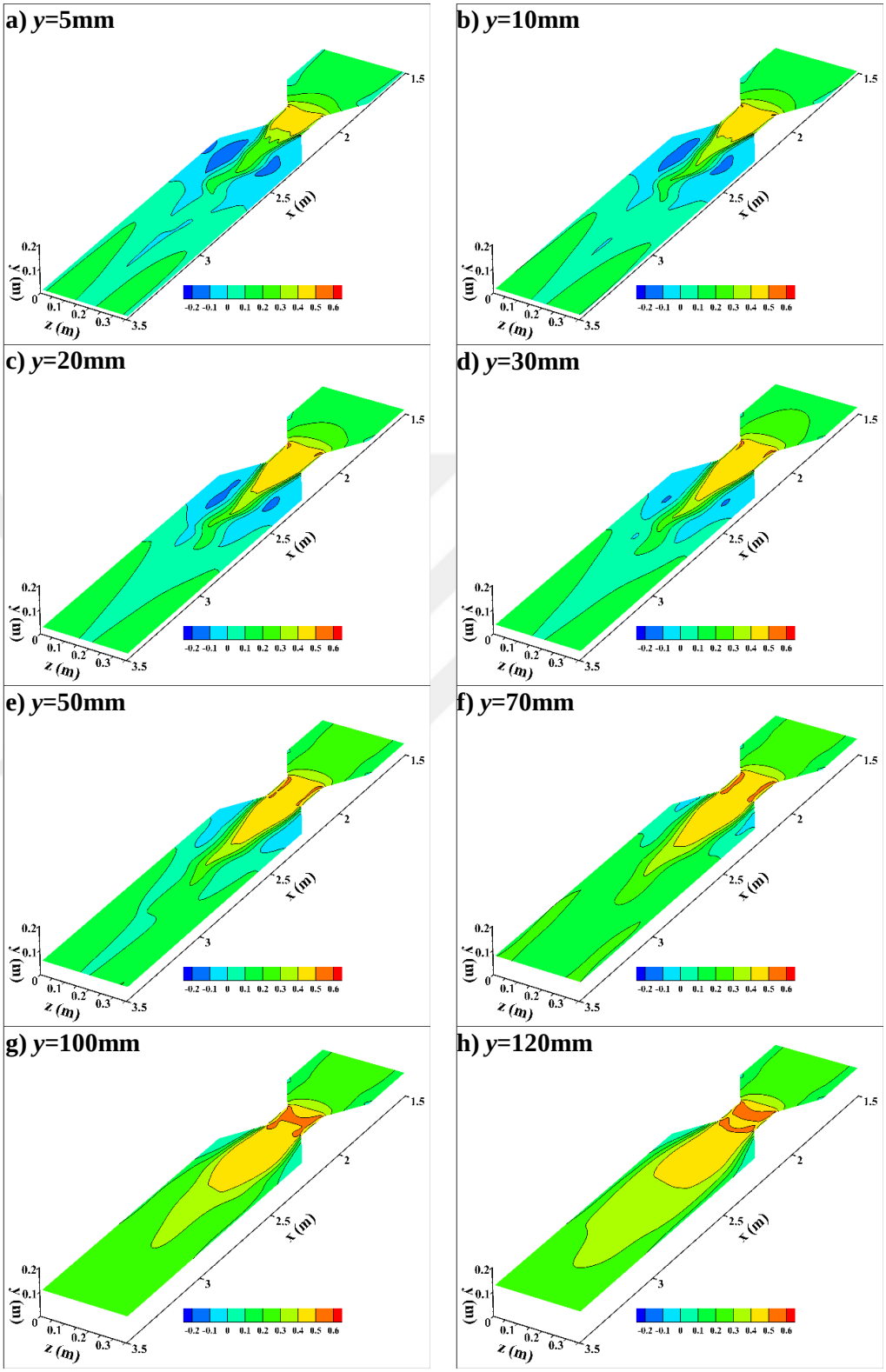
Şekil 4.23. (Devam)



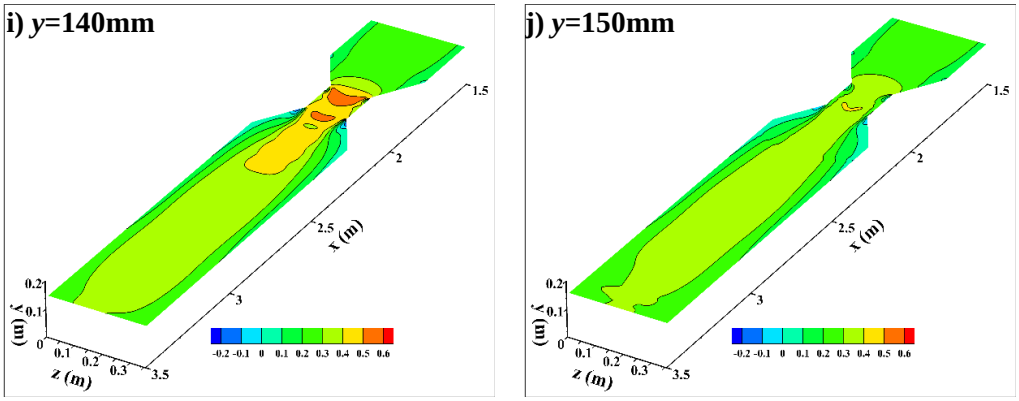
Şekil 4.24. RSM ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



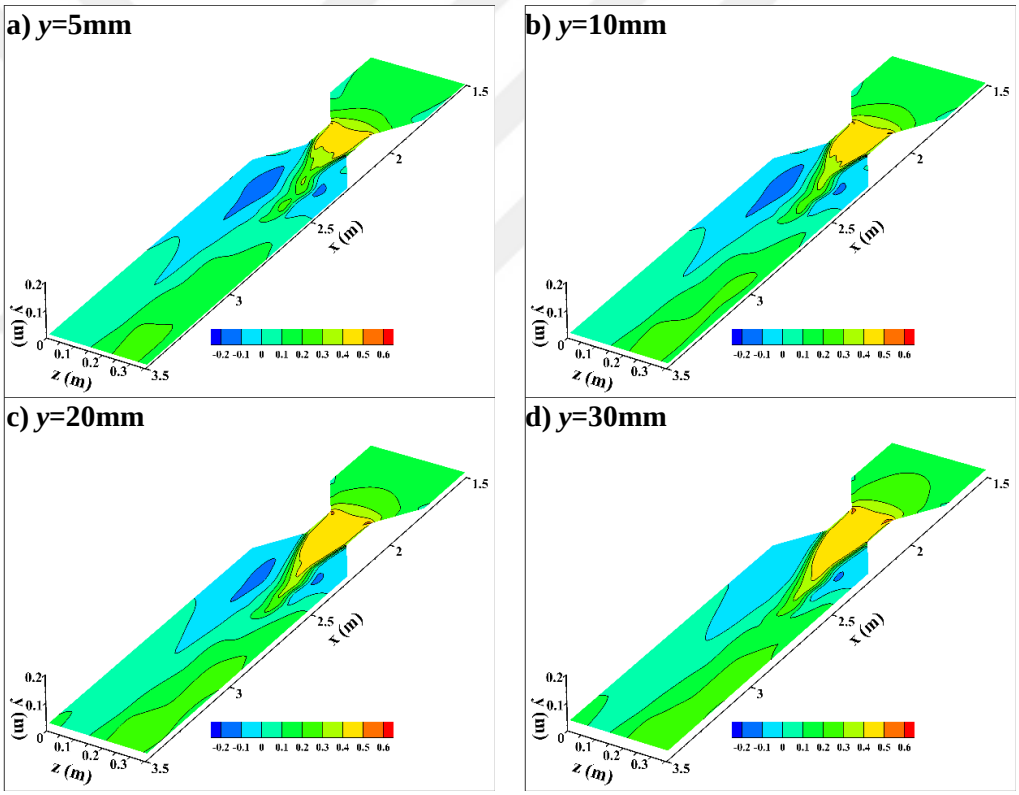
Şekil 4.24. (Devam)



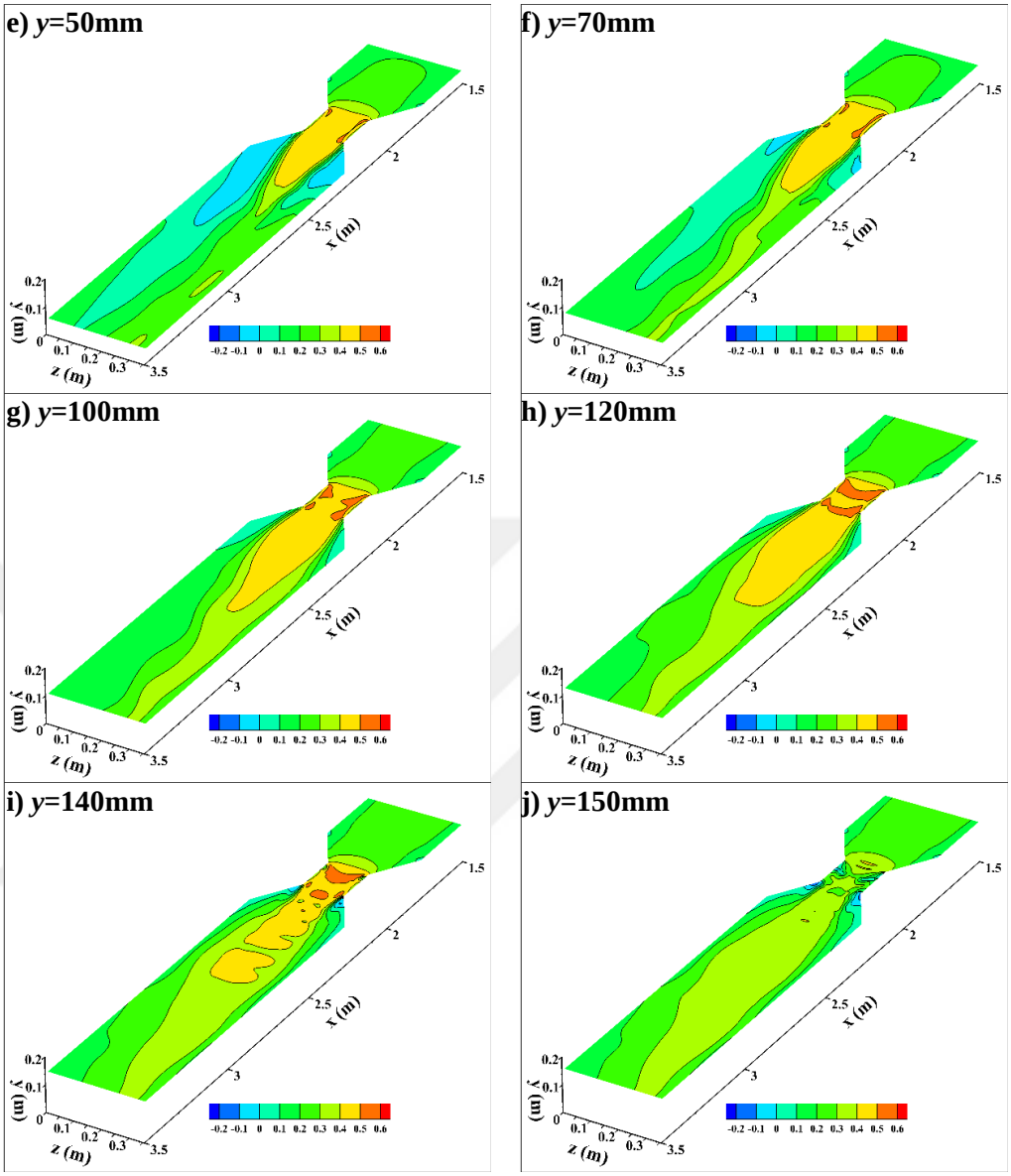
Şekil 4.25. SKW ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



Şekil 4.25. (Devam)



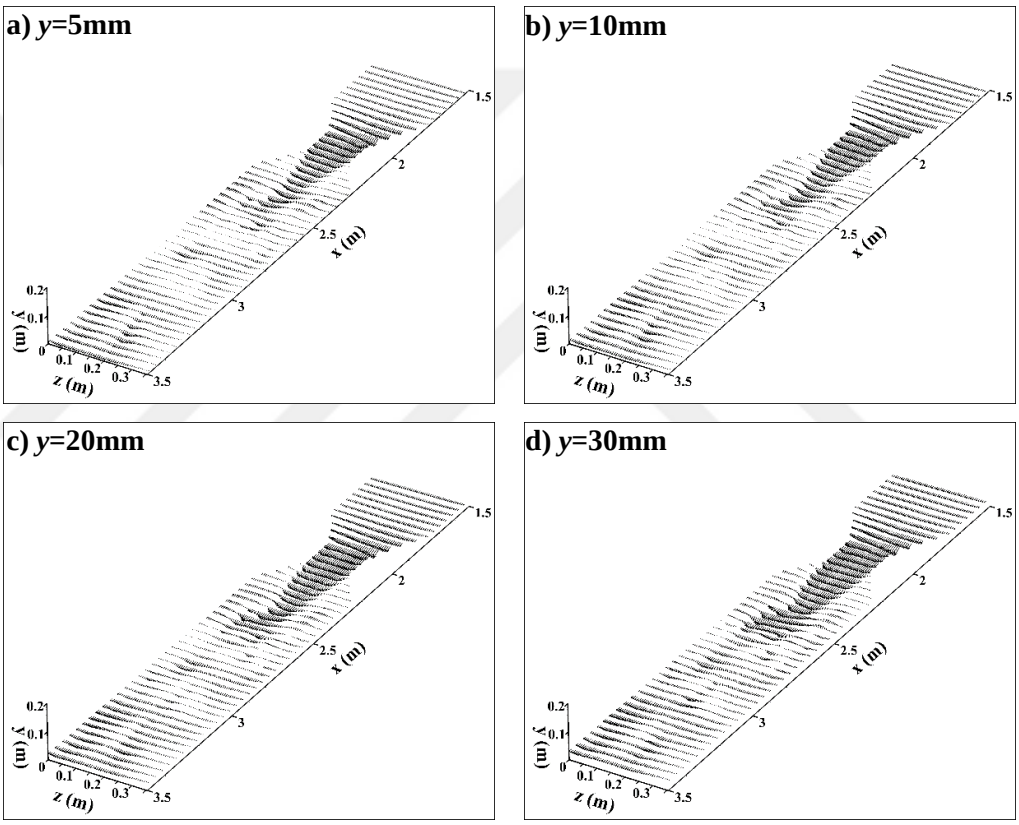
Şekil 4.26. SST ile hesaplanan *u* hızının topolojisinin derinlikle değişimi



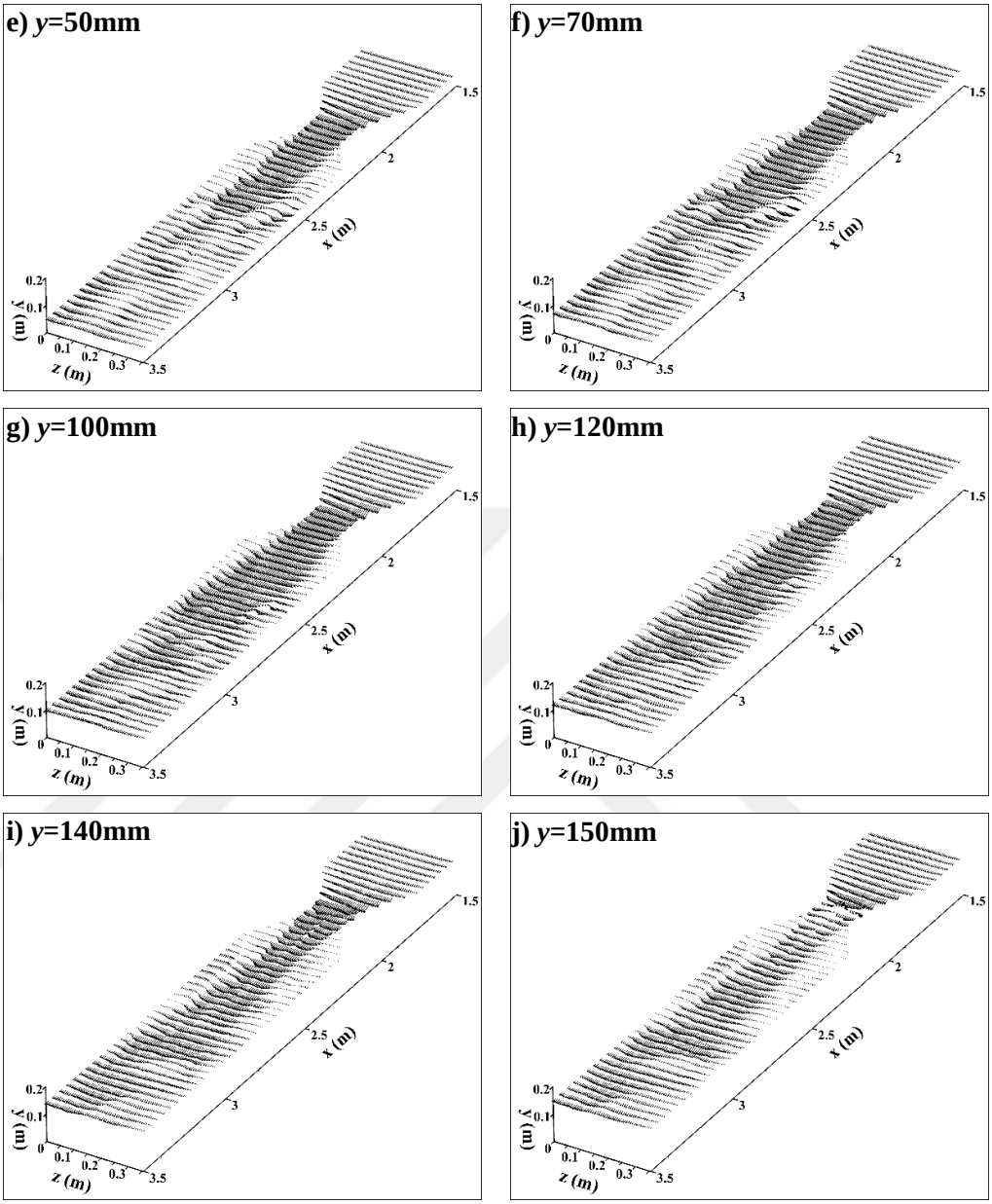
Şekil 4.26. (Devam)

4.8. Sayısal Hız Vektörlerinin Üç Boyutlu Dağılımları

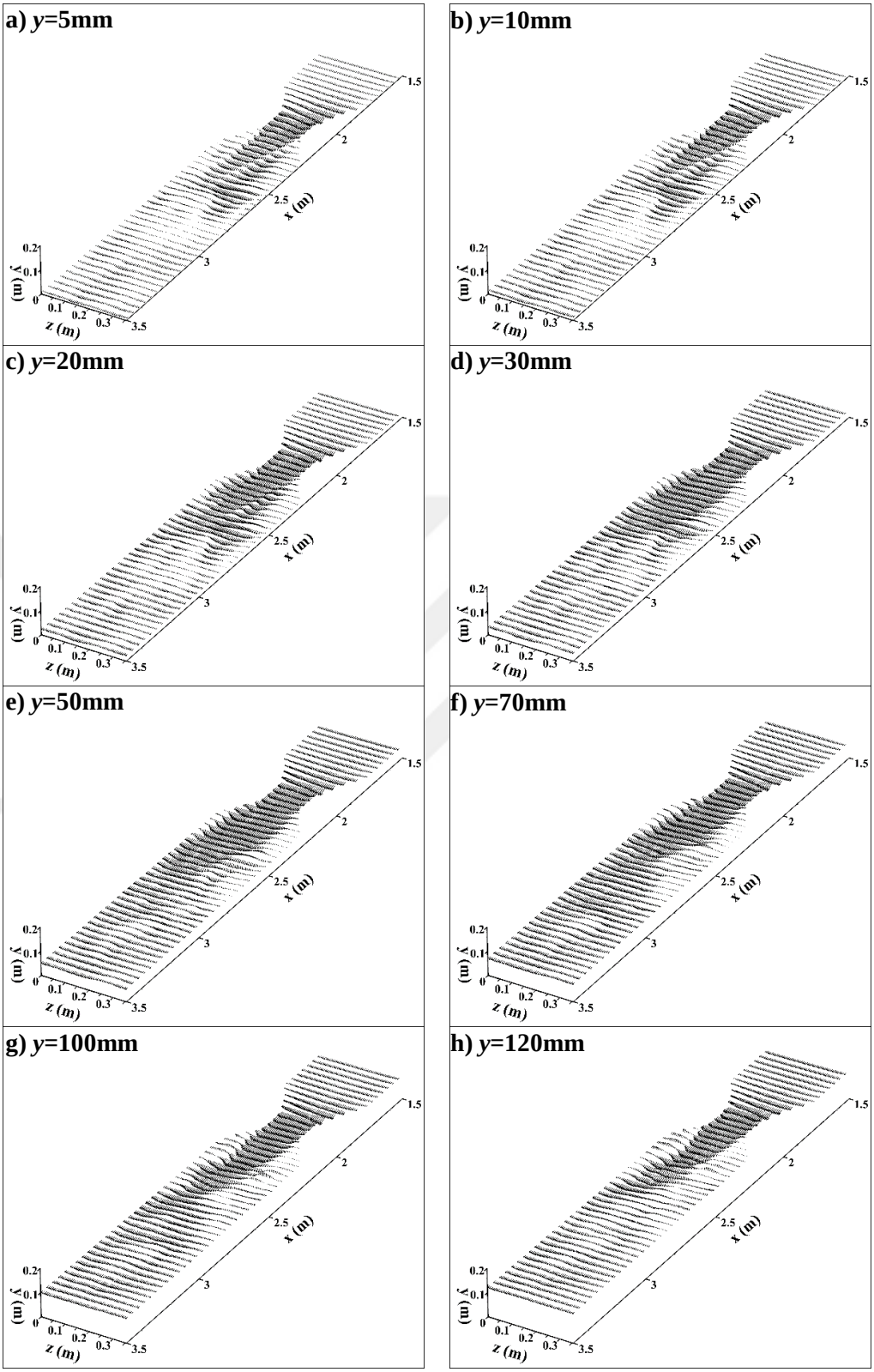
Kullanılan tüm türbülans modelleri ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimleri DES, RNG, SKE, LES, RKE, RSM, SKW ve SST için sırasıyla Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31 Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te verilmiştir. Buna göre hız vektörlerinin derinlikle beraber arttığı ve daralma bölgesinde de beklendiği gibi hız vektörlerinin en yüksek değere eriştiği görülmektedir.



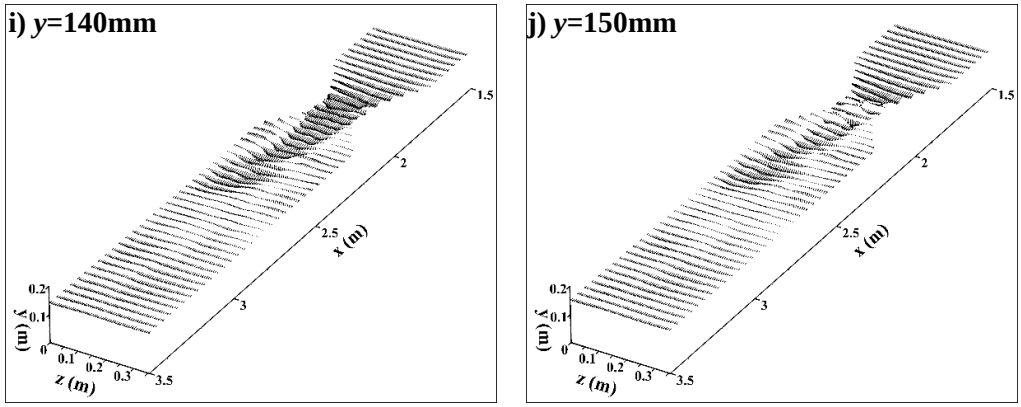
Şekil 4.27. DES ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



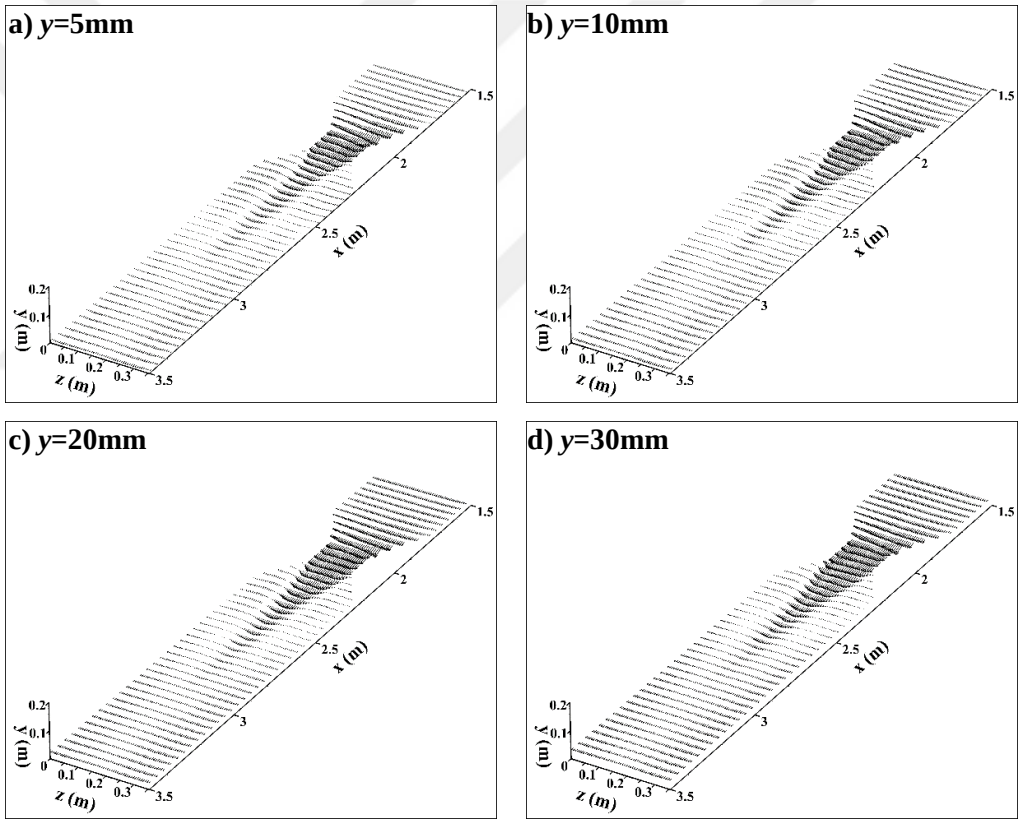
Şekil 4.27. (Devam)



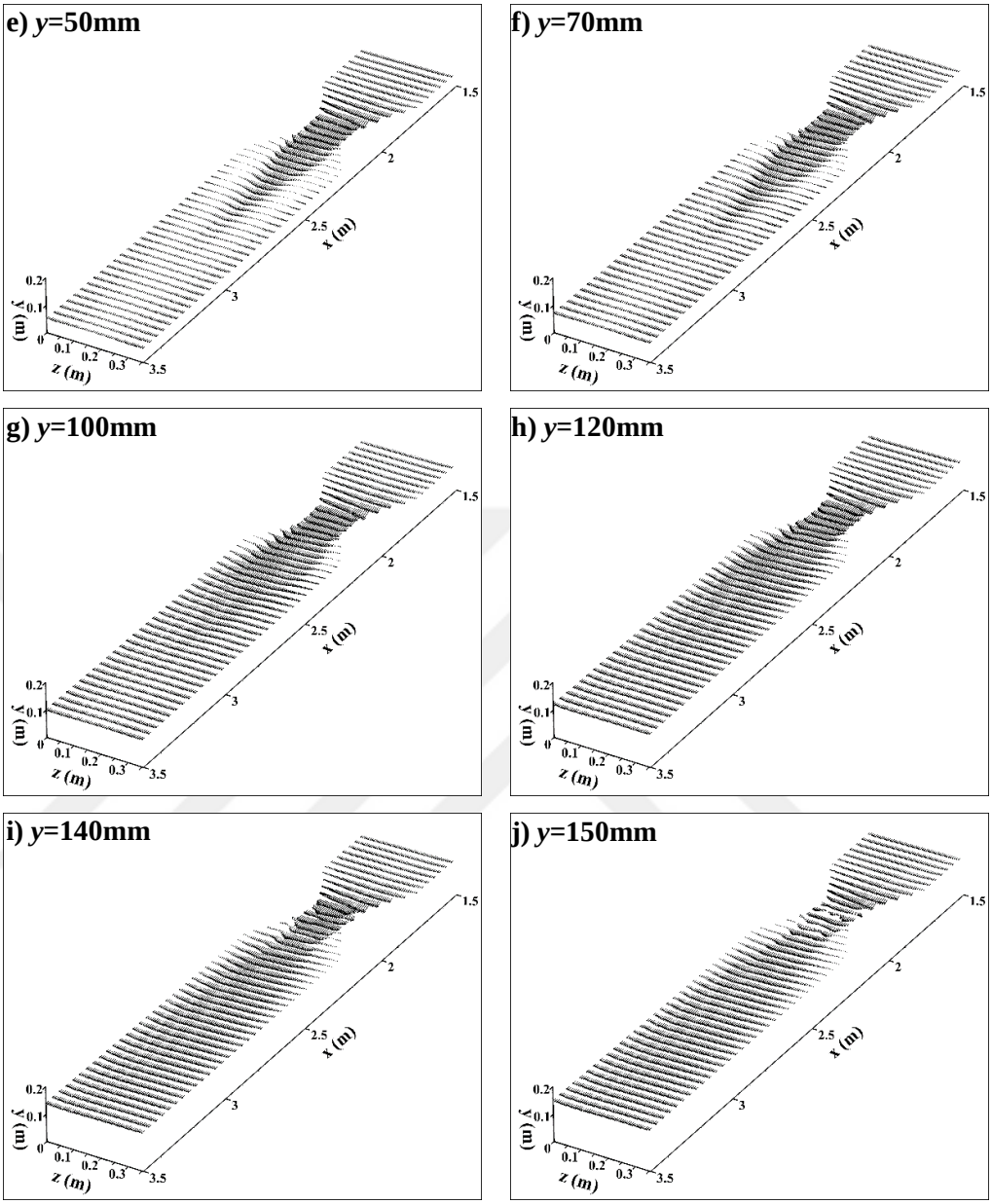
Şekil 4.28. RNG ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



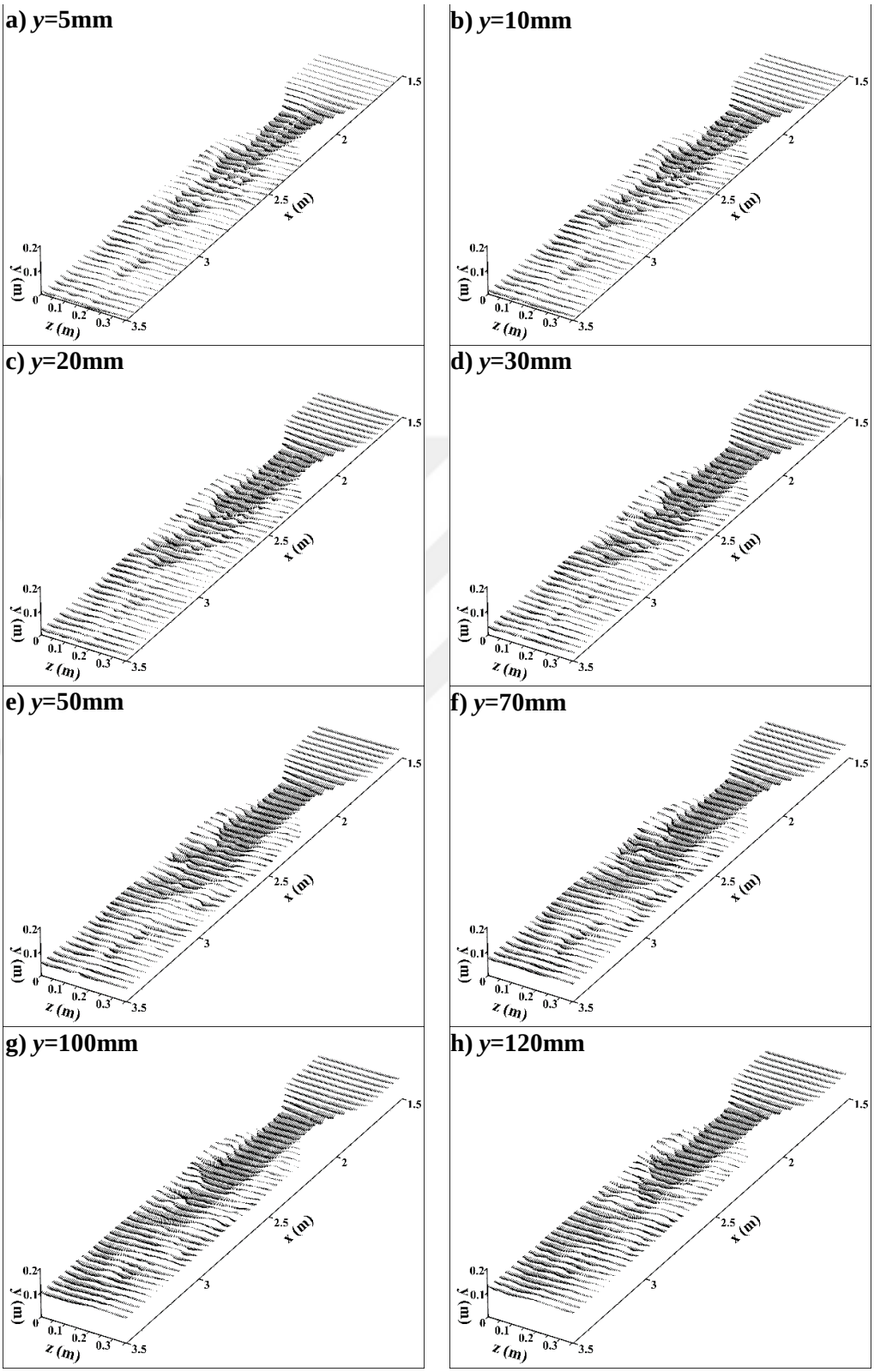
Şekil 4.28. (Devam)



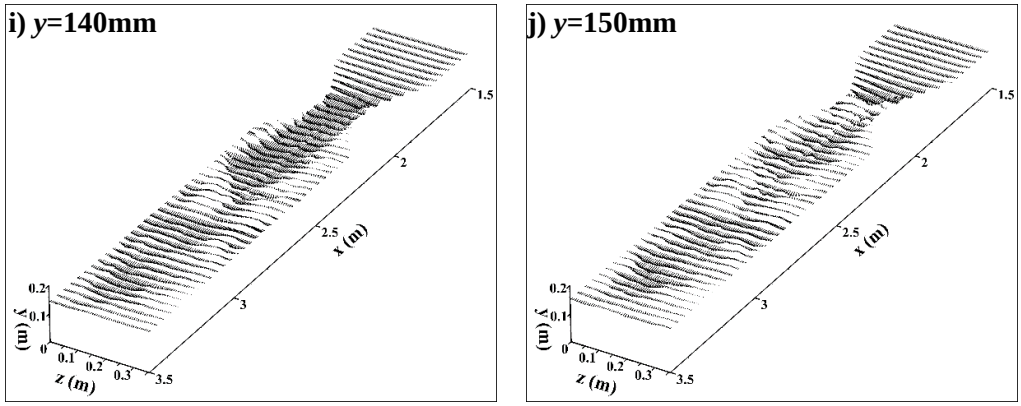
Şekil 4.29. SKE ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



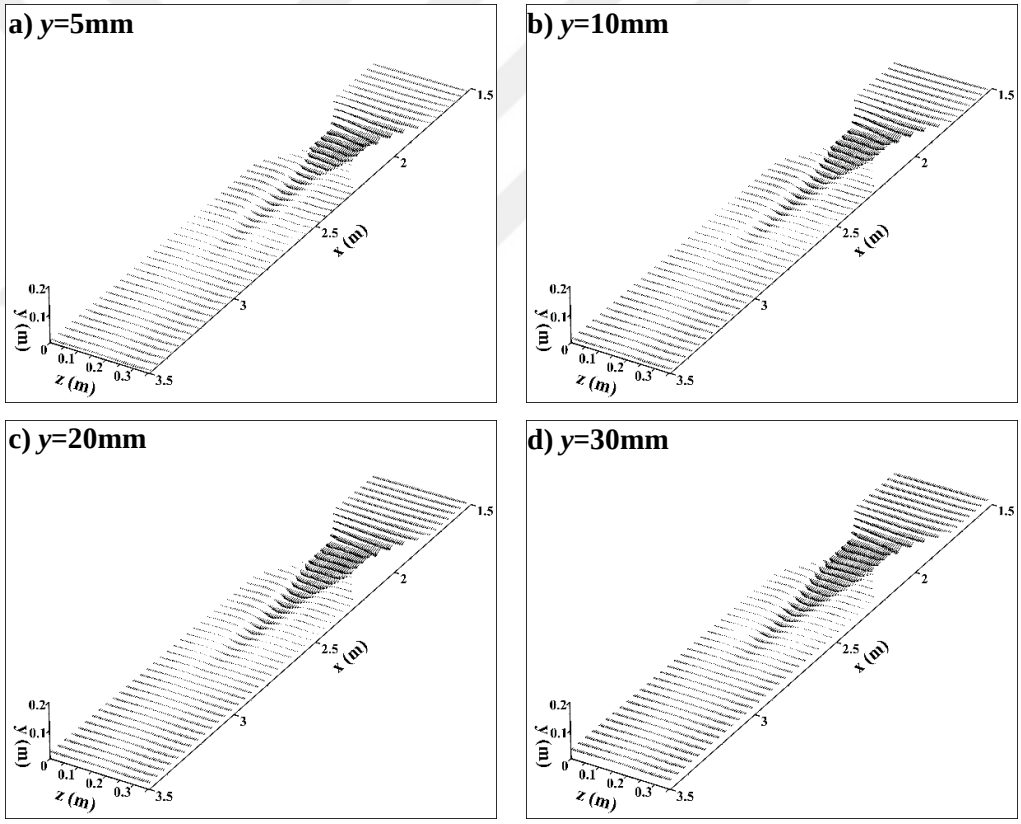
Şekil 4.29. (Devam)



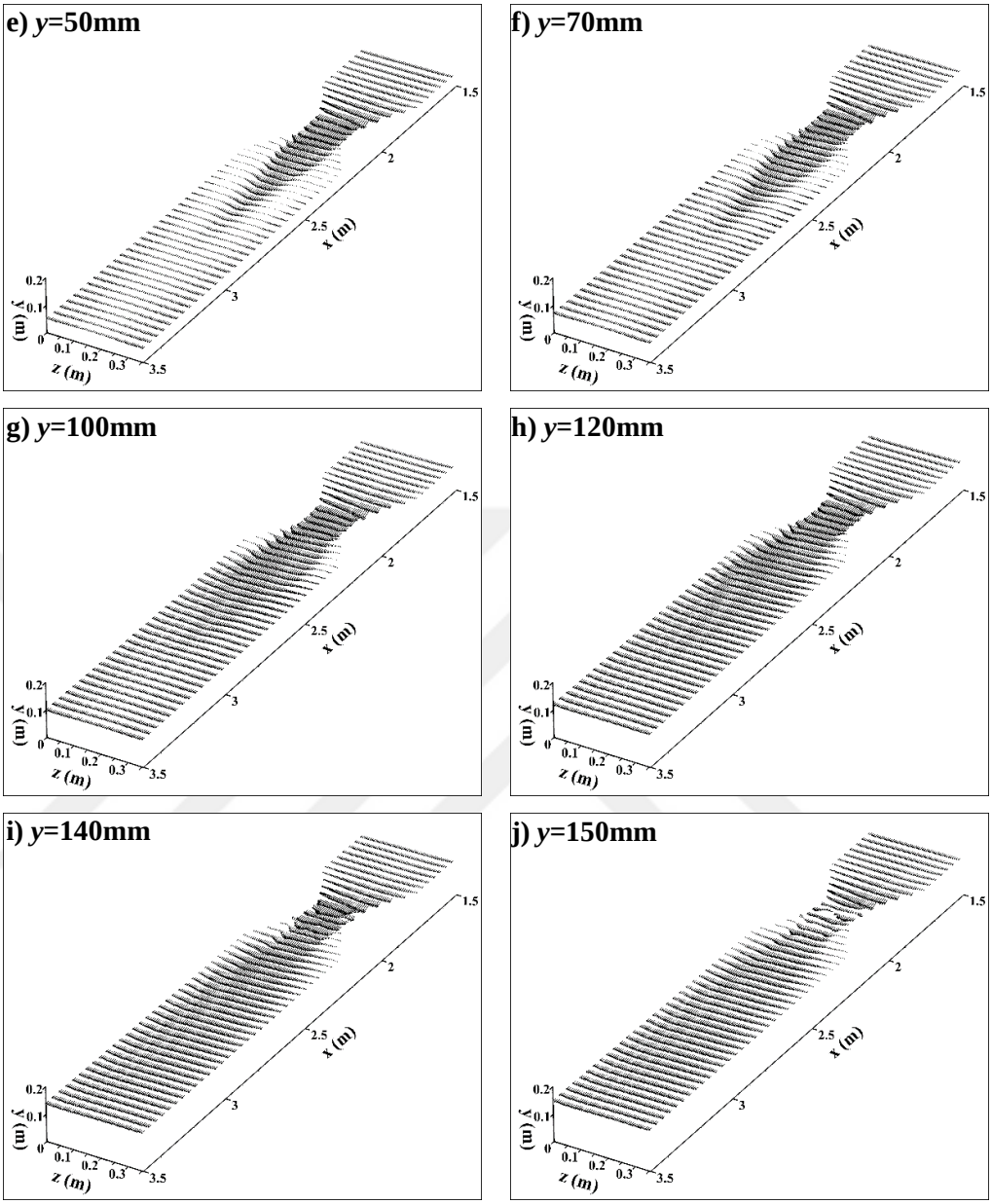
Şekil 4.30. LES ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



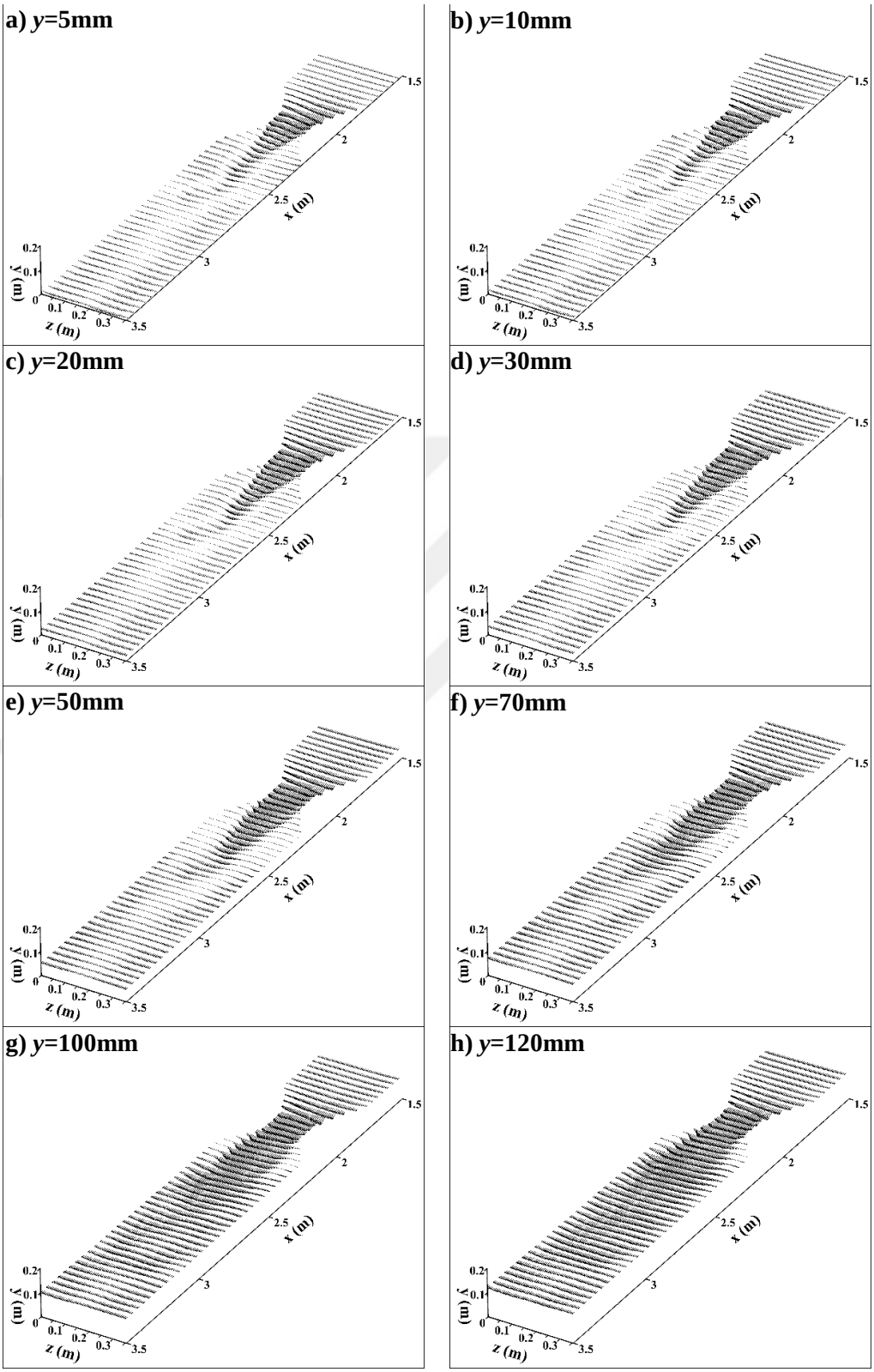
Şekil 4.30. (Devam)



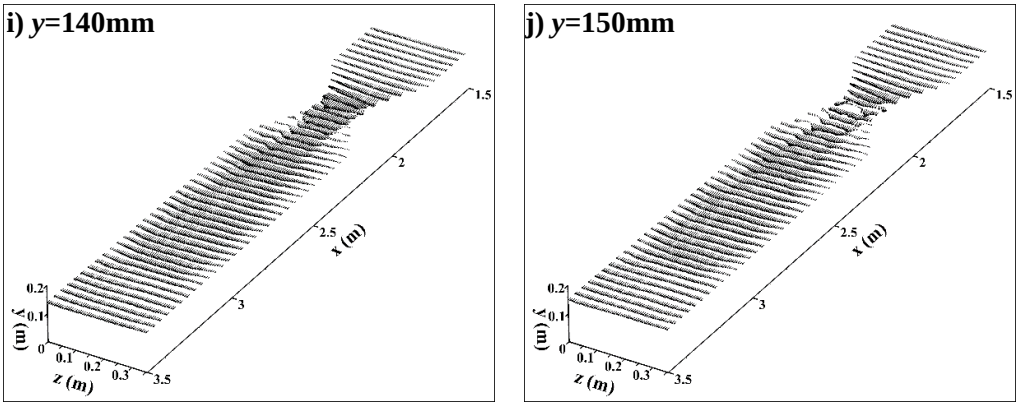
Şekil 4.31. RKE ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



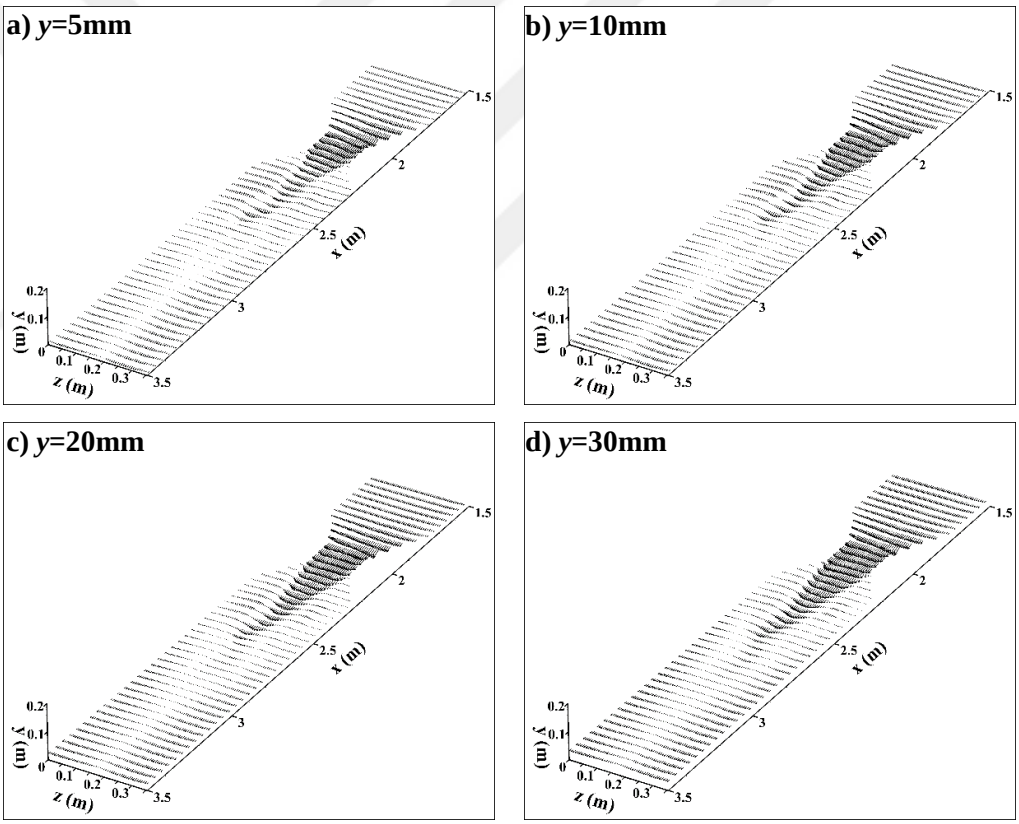
Şekil 4.31. (Devam)



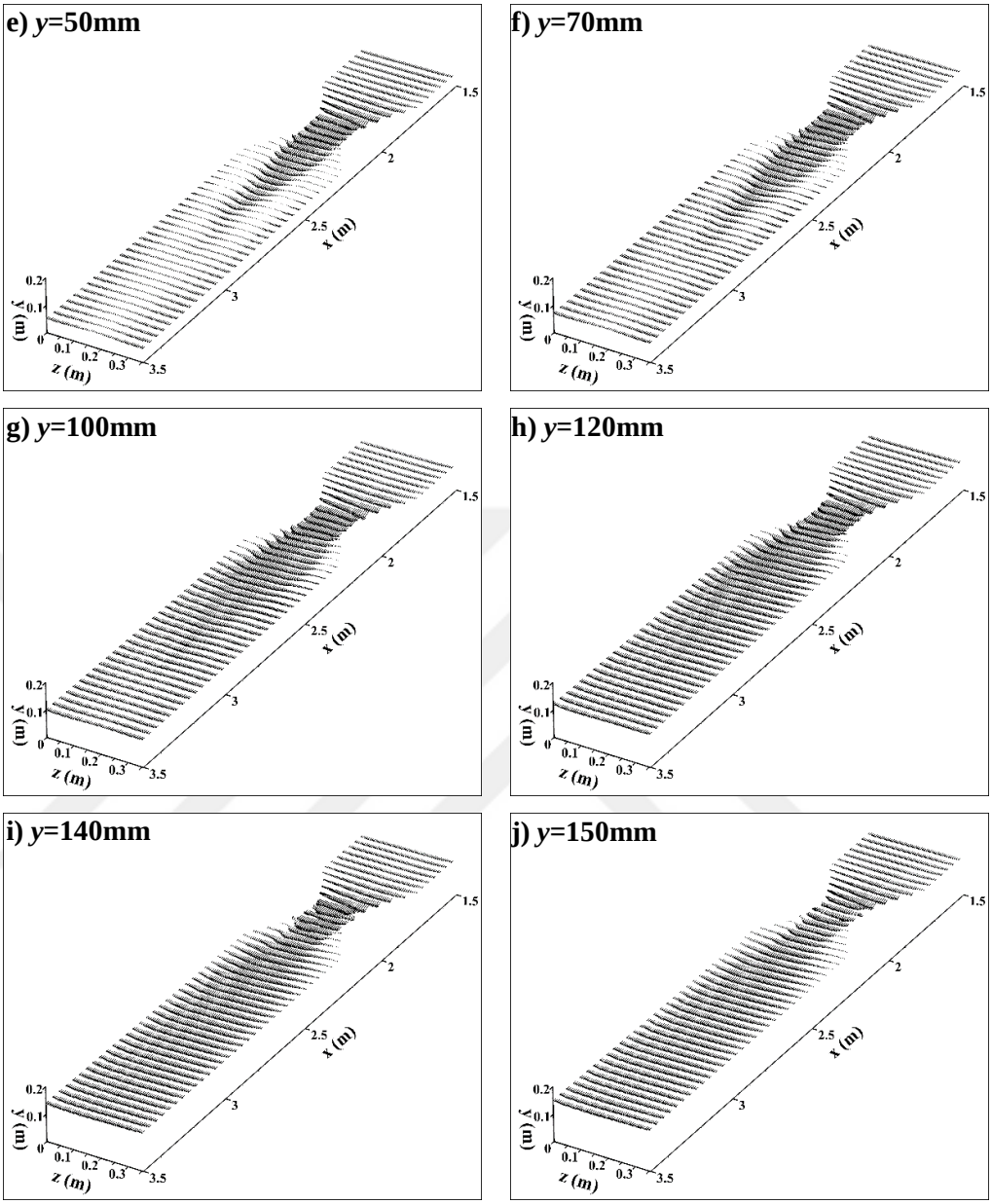
Şekil 4.32. RSM ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



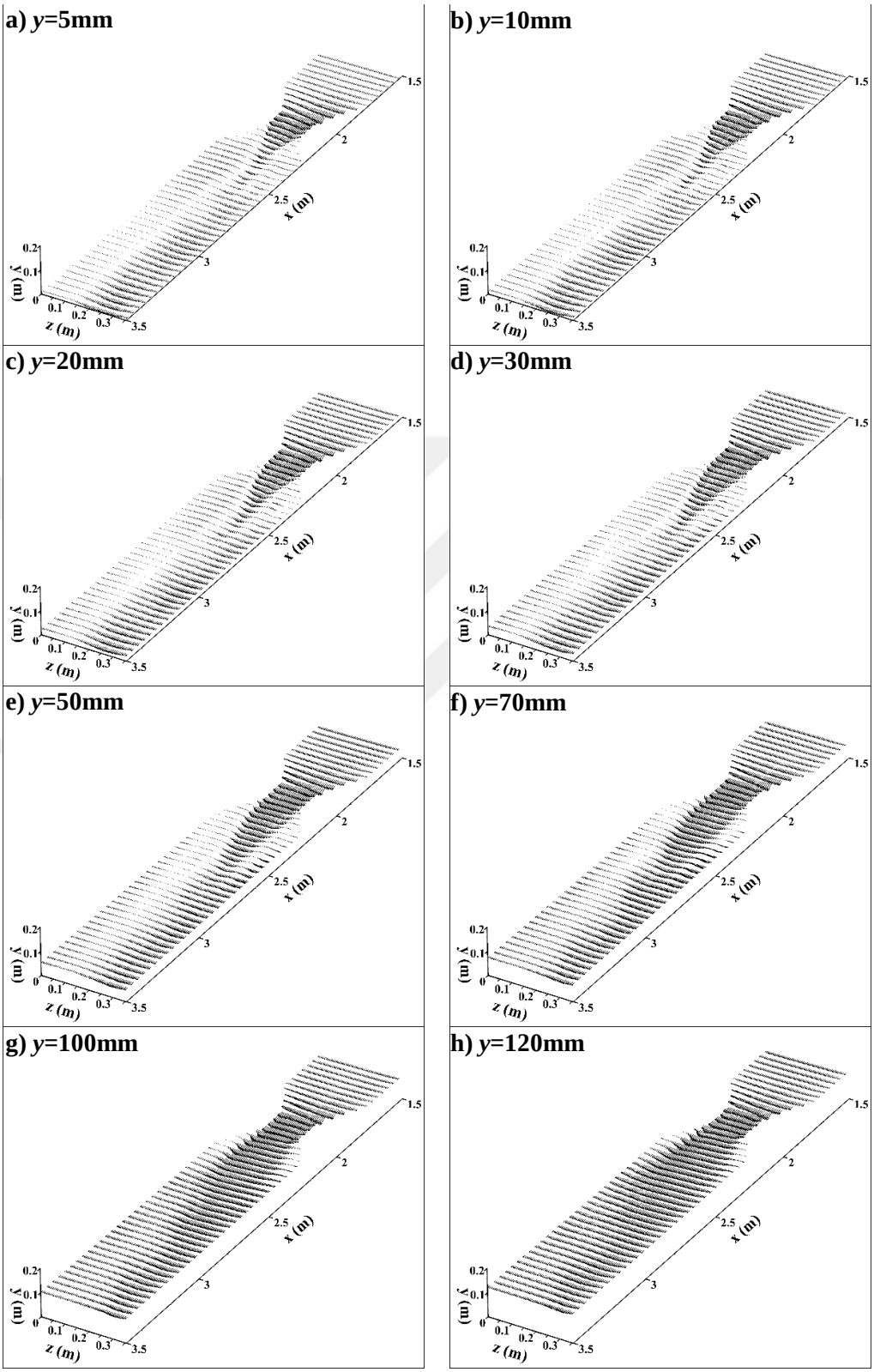
Şekil 4.32. (Devam)



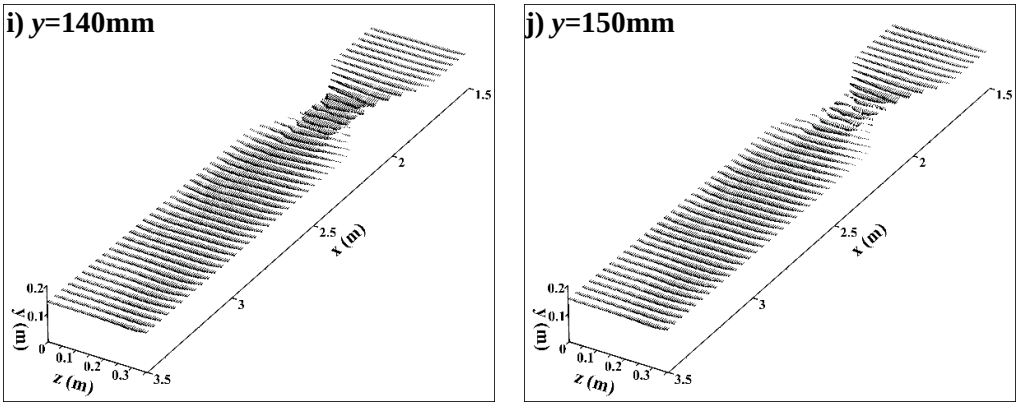
Şekil 4.33. SKW ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



Şekil 4.33. (Devam)



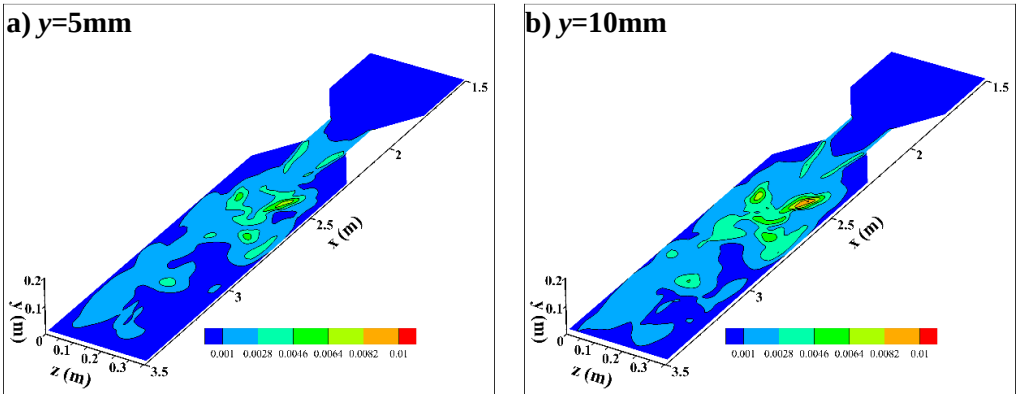
Şekil 4.34. SST ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



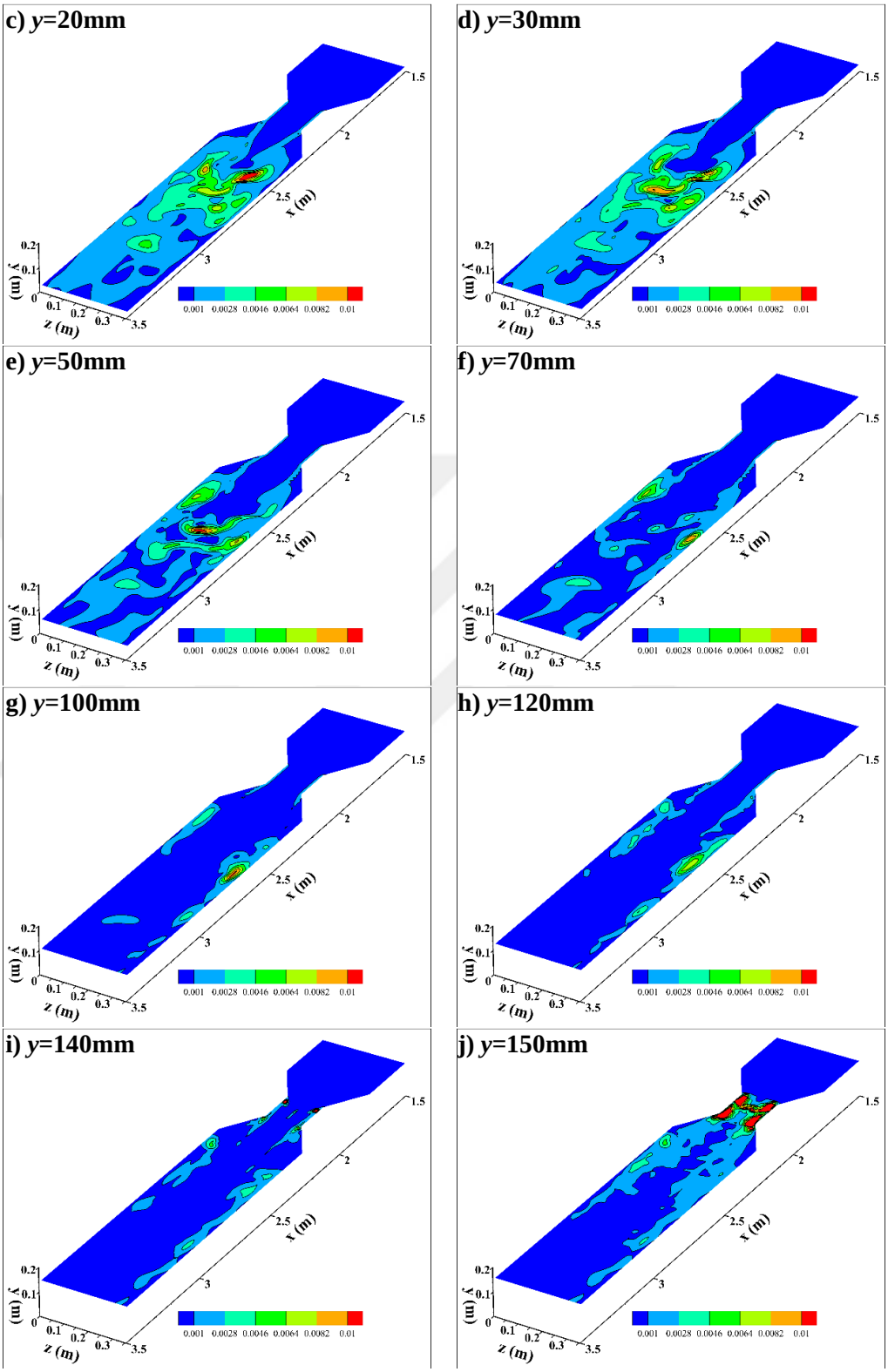
Şekil 4.34. (Devam)

4.9. Sayısal Türbülans Kinetik Enerjisinin Üç Boyutlu Dağılımı

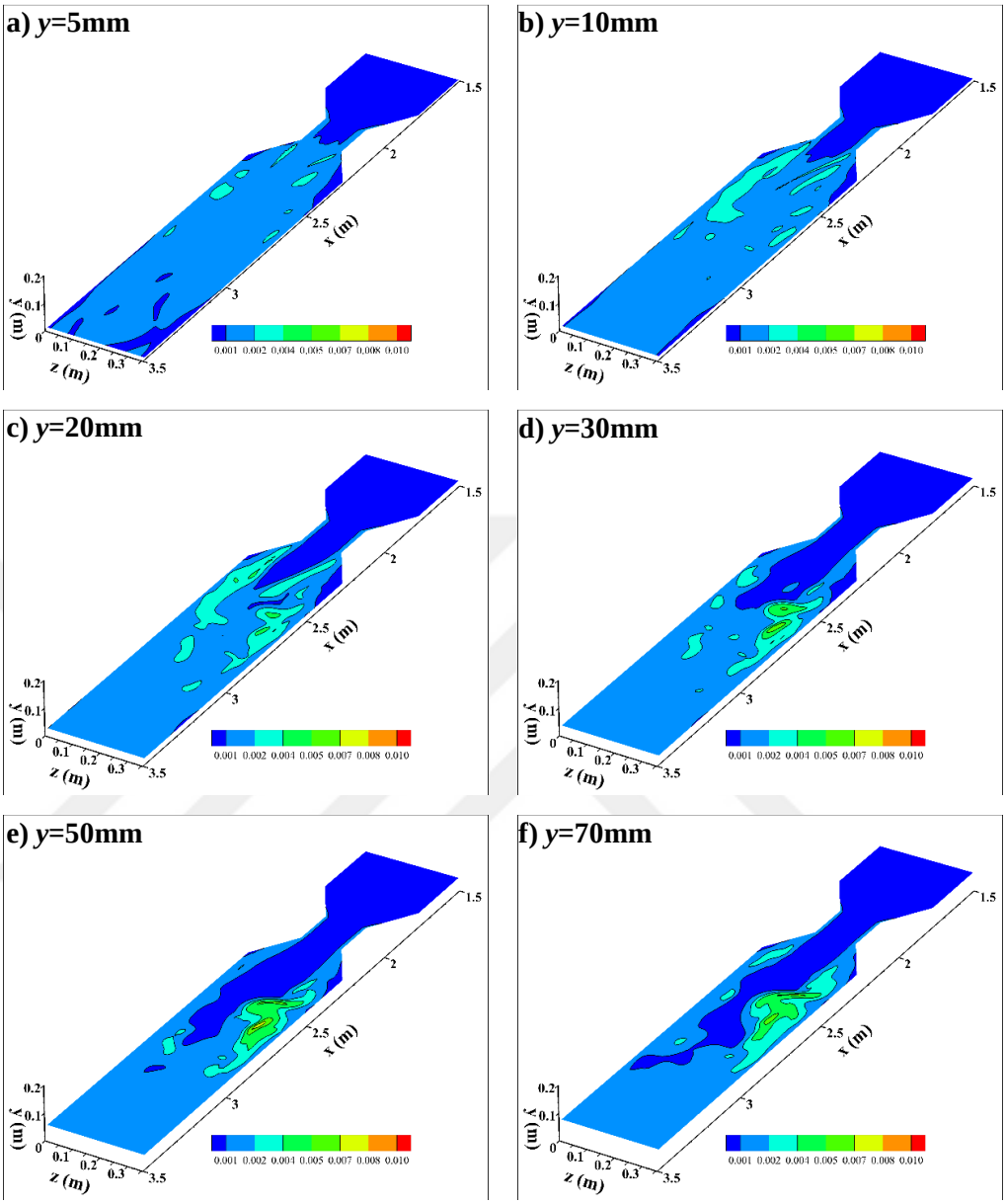
Kullanılan tüm türbülans modelleri ile hesaplanan türbülans kinetik enerjisi (TKE) topolojisinin derinlikle değişimi DES, RNG, SKE, RKE, RSM, SKW ve SST için sırasıyla Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de verilmiştir. Buna göre, TKE değeri kanal tabanında genellikle 0.002 m^2/s^2 ile 0.006 m^2/s^2 arasında değişim gösterirken, özellikle daralma elemanının sonrasında meydana gelen kuyruk akımında arttığı görülmüştür. Daralma bölgesinde su yüzeyine yakın olan bölgede maksimum değere ulaştığı görülmektedir.



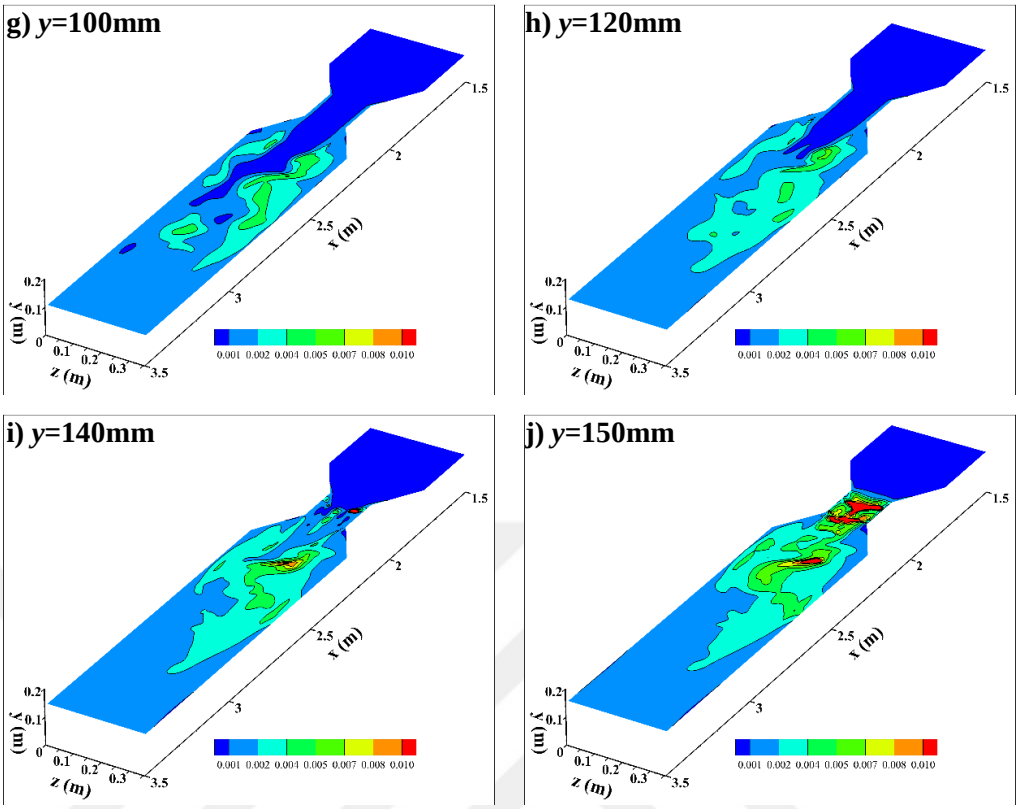
Şekil 4.35. DES ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



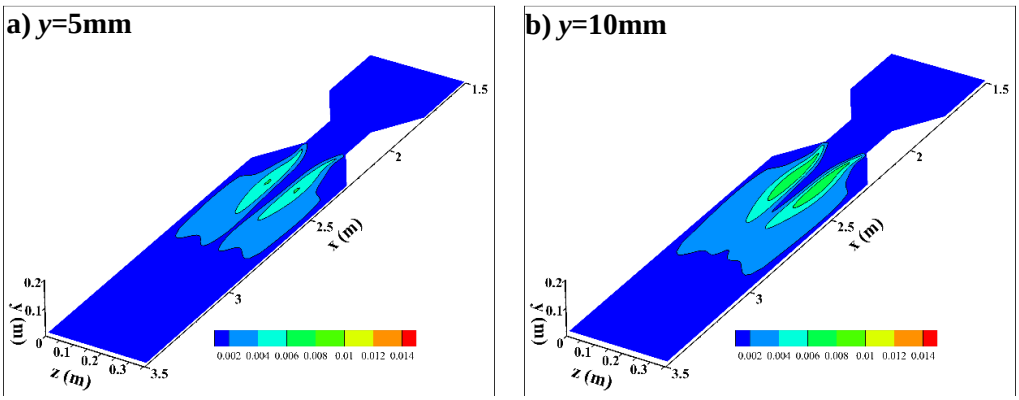
Şekil 4.35. (Devam)



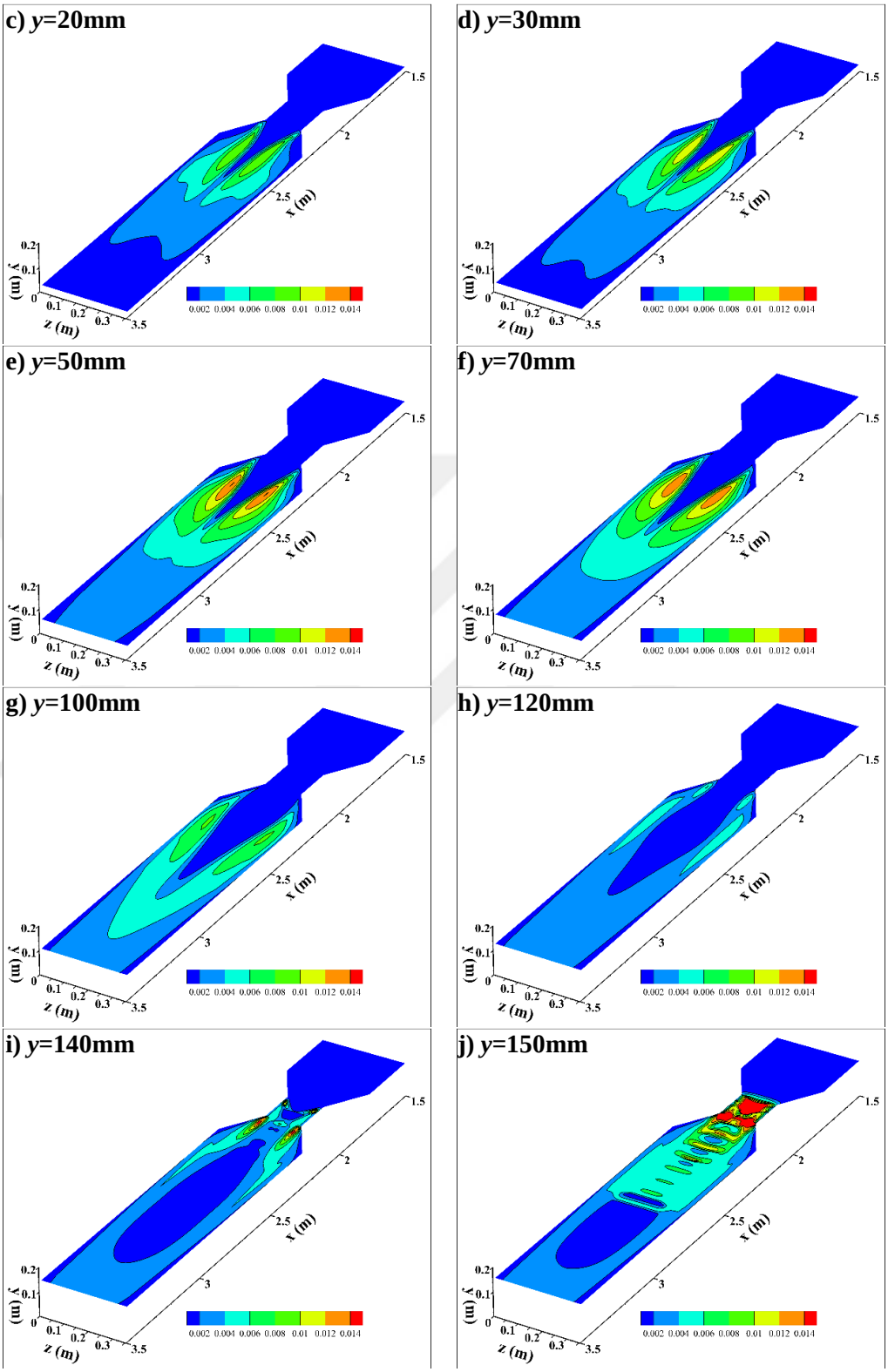
Şekil 4.36. RNG ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



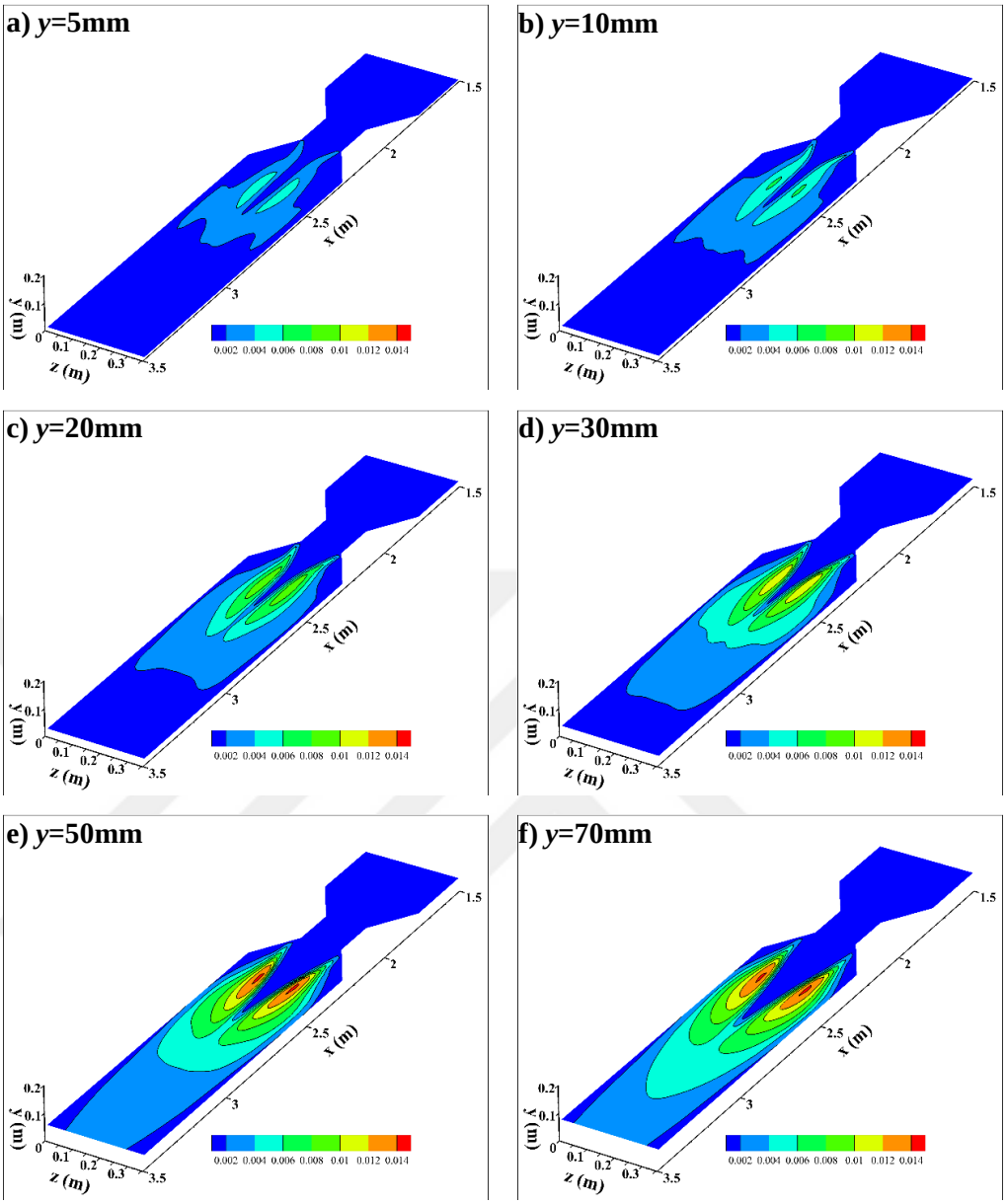
Şekil 4.36. (Devam)



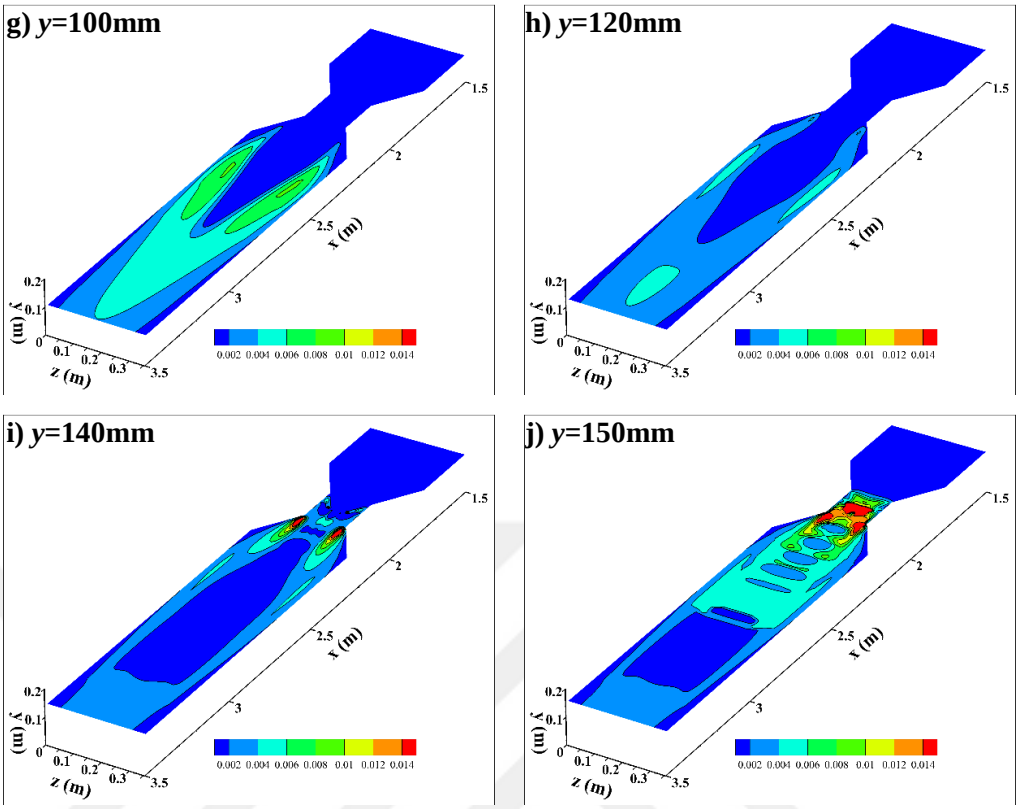
Şekil 4.37. SKE ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



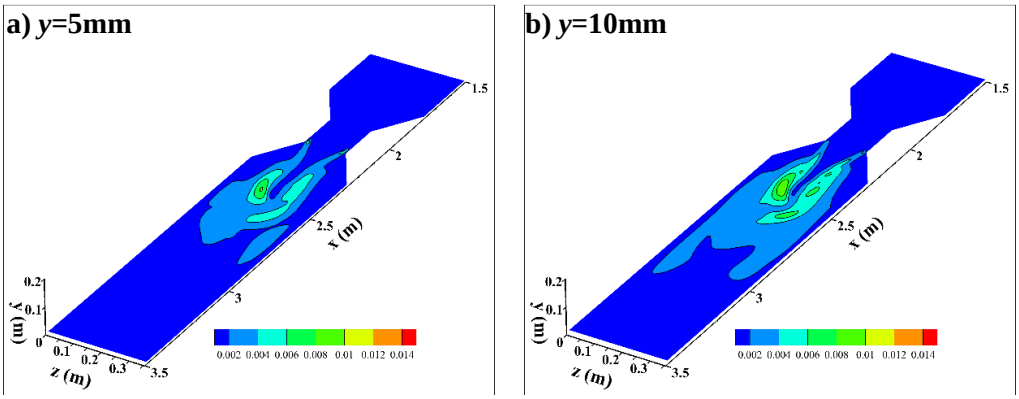
Şekil 4.37. (Devam)



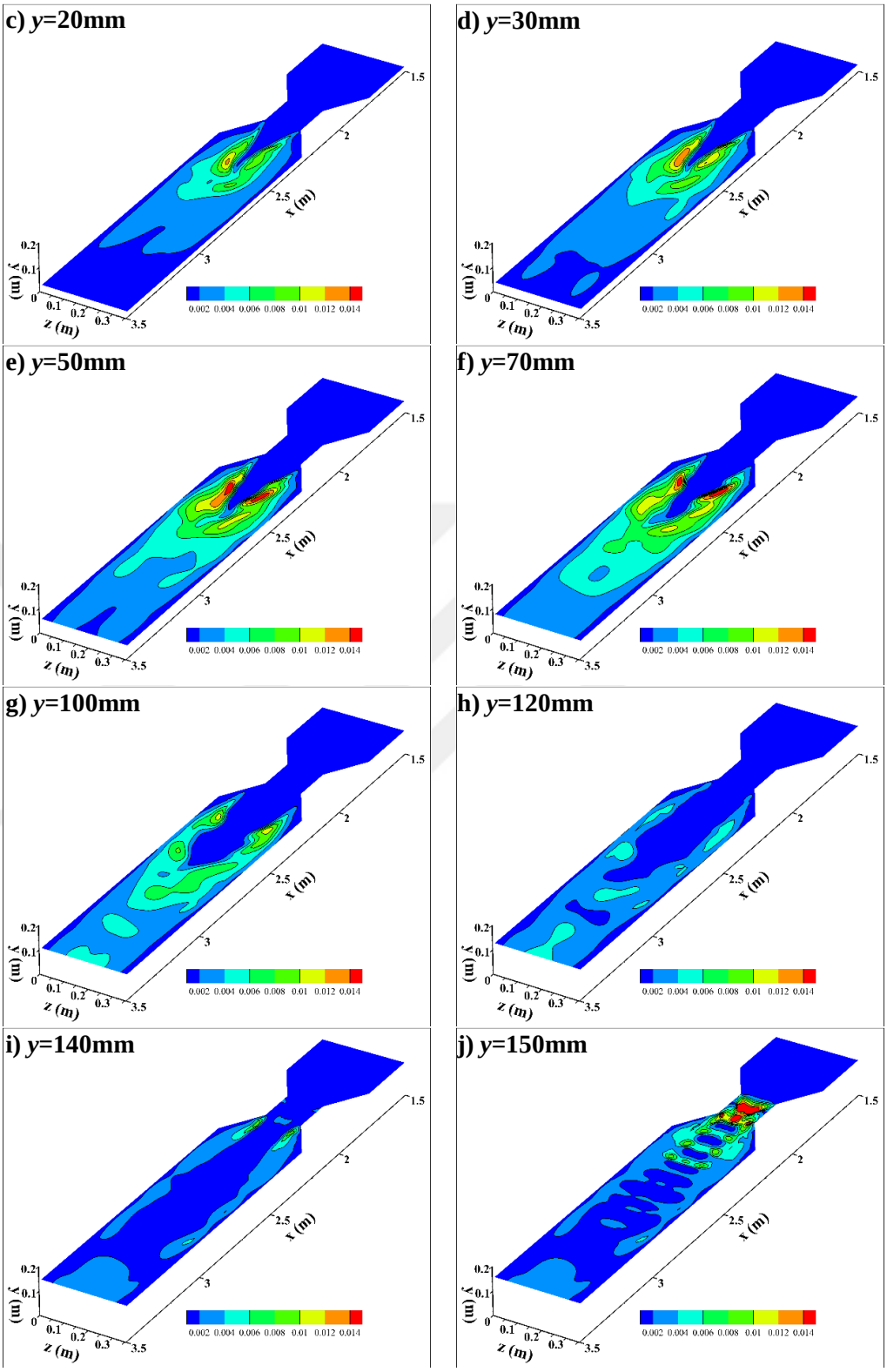
Şekil 4.38. RKE ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



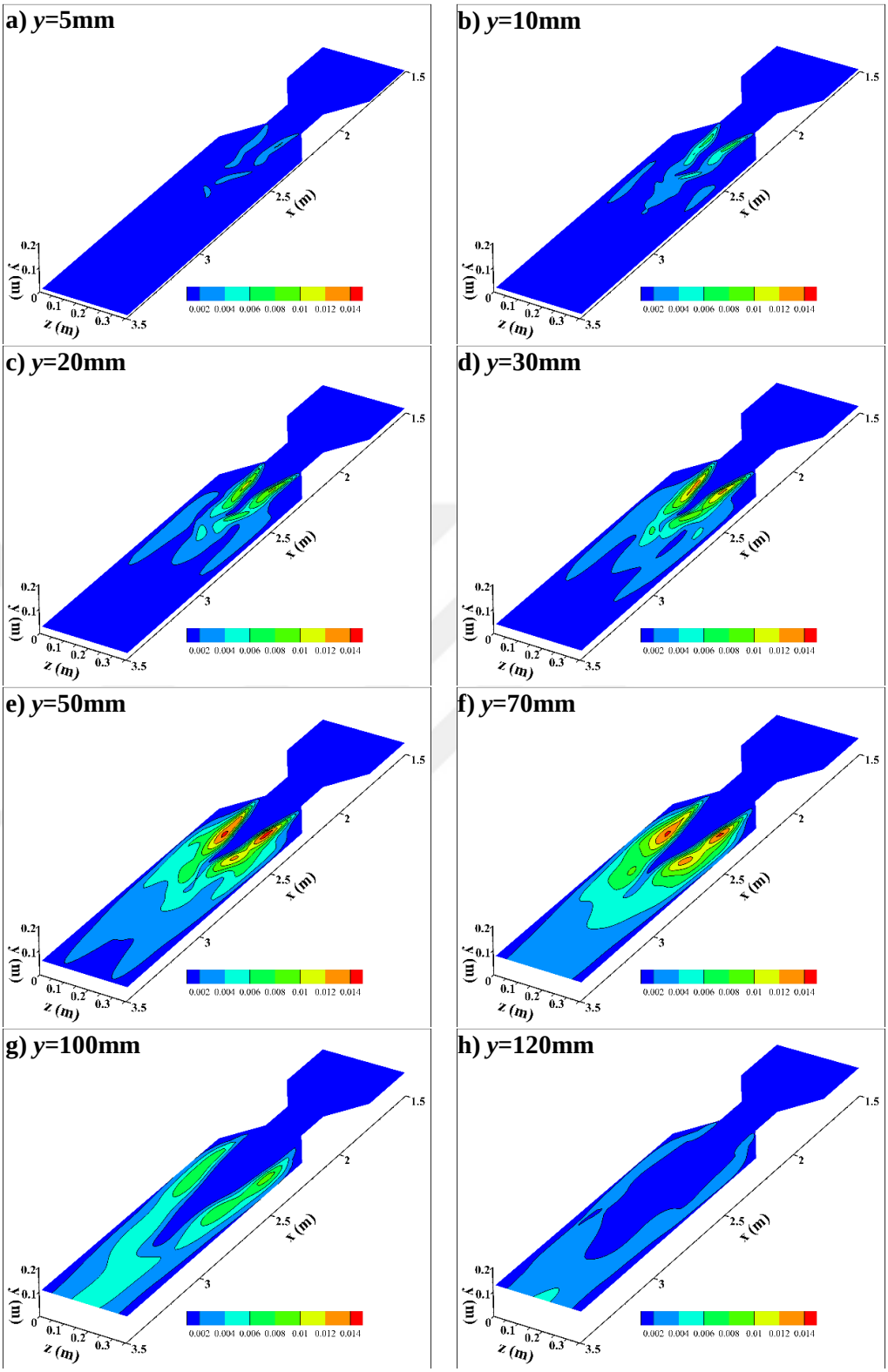
Şekil 4.38. (Devam)



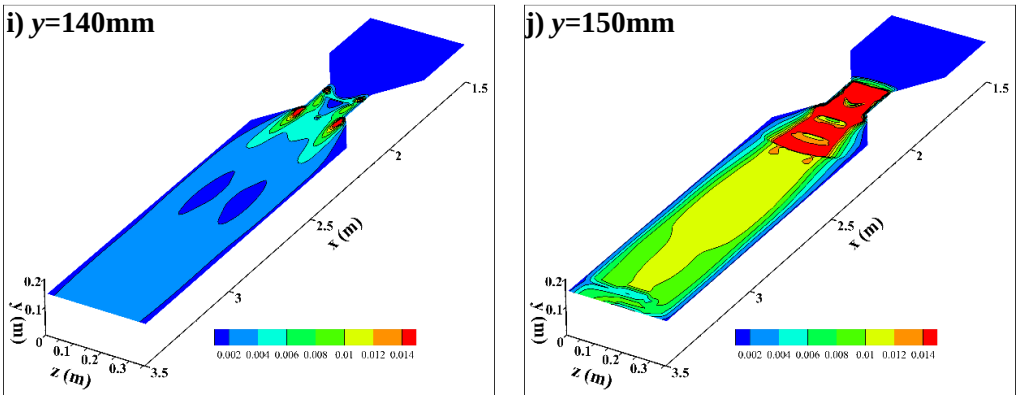
Şekil 4.39. RSM ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



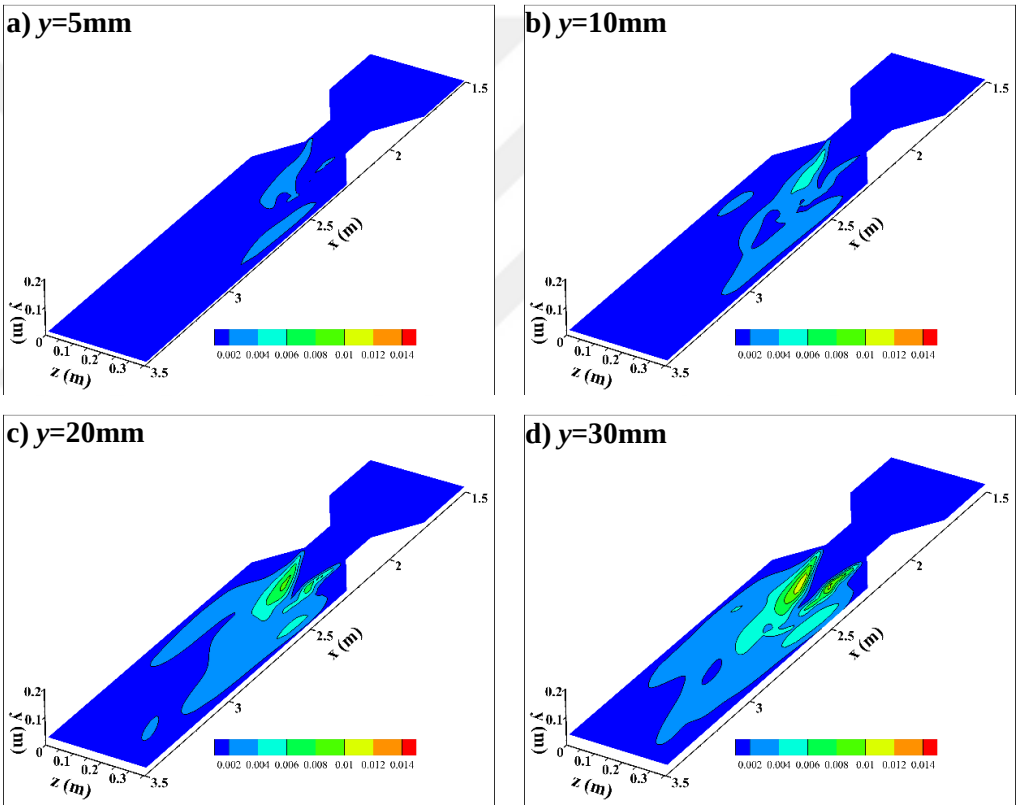
Şekil 4.39. (Devam)



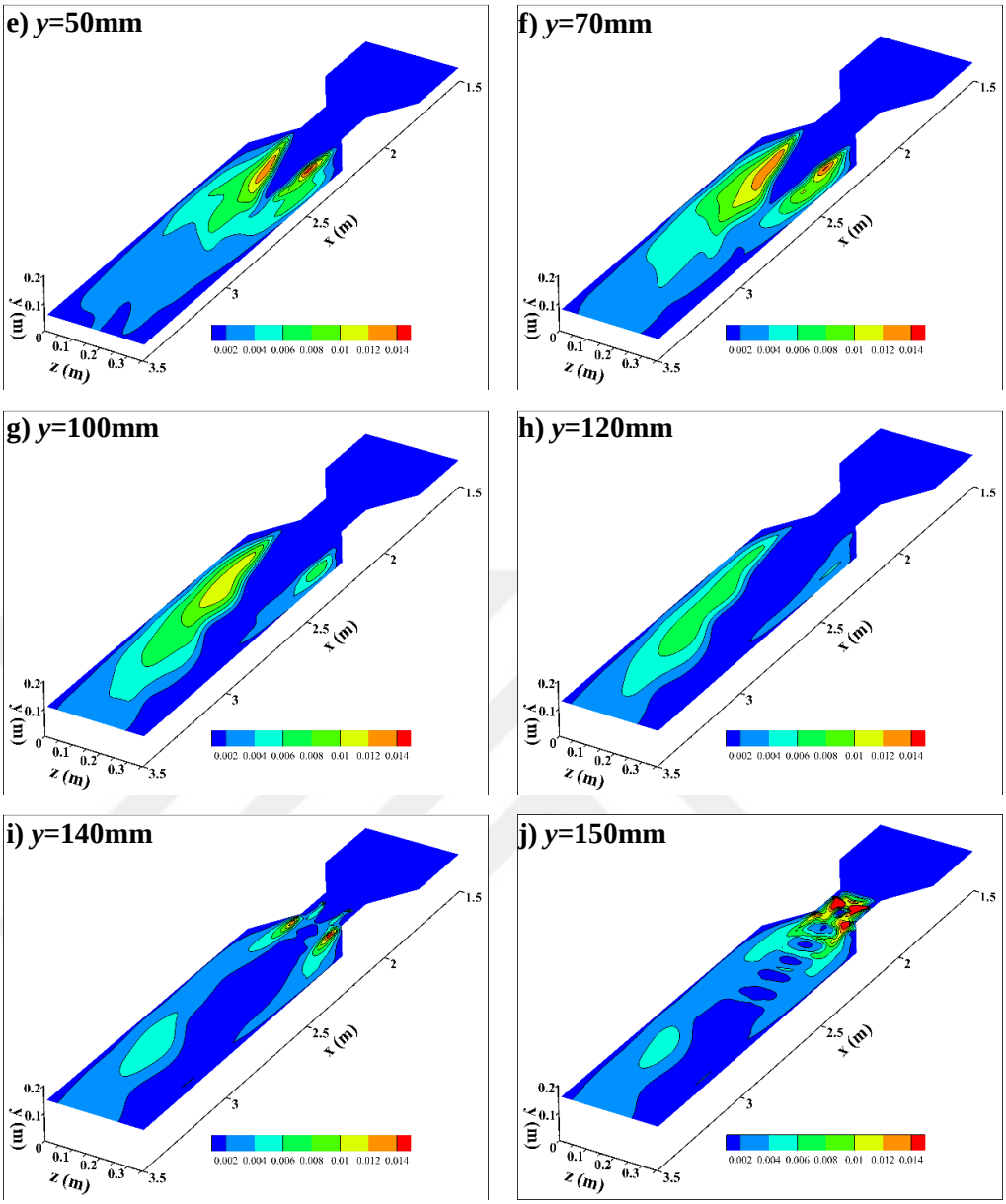
Şekil 4.40. SKW ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



Şekil 4.40. (Devam)



Şekil 4.41. SST ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi



Şekil 4.41. (Devam)

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Açık kanal içerisinde trapez başlıklı bir yapı ile oluşturulan daralma ve genişleme durumlarındaki akım deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, akım alanı akustik doppler hız ölçer (Acoustic Doppler Velocimeter-ADV) ve akım profili limnimetre kullanılarak ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde SKE, RKE, RNG, SKW, SST, RSM, DES ve LES olmak üzere sekiz model kullanılmış ve bu modellerin akım alanını ve su yüzü profilini tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olduğu bilinen hesaplama ağının analizinde ağ yakınsama indeksi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda özetlenmiştir:

- Ağ yapısının sıklığının yeterliliği yani sayısal çözümün ağ yapısından bağımsız olup olmadığının belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile analizler yapılmış ve Ağ 3 ile oluşturulan ağ yapısı ile hesaplanan hız değerlerinin %2'den küçük olduğu, böylece çözüm hassasiyetinin ağ yapısından bağımsızlaştığı sonucu elde edilmiştir.

- Sayısal hız profillerinin deneysel profillere uyumunda, DES modeli x=100, 210, 300 ve 350 cm'de, SKE modeli ise x=150, 170 ve 195 cm'de en başarılı sonucu vermiştir. SKW modelinde x=180 cm, LES x=220 cm ve RKE x=250 cm'de deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Kanalın tamamı için ortalama OKH değeri 14.34 cm^2/s^2 ile DES modeli en başarılı model olurken, hiçbir kesitte en başarılı model olmamasına rağmen RNG modelinin 18.83 cm^2/s^2 ortalama OKH değeri ile en başarılı ikinci model olduğu belirlenmiştir. Tüm kanal boyunca OKH değerine göre başarı sıralaması ise DES, RNG, SKE, RKE, LES, SKW, RSM ve SST şeklinde olmuştur.

- Kanalın akım profilinin hızlı değiştiği, daralma ve genişleme bölgesinde OKH değerlerine göre, tüm kanalda olduğu gibi yine DES modeli en başarı model olurken, tüm kanal boyunca başarılı olmayan RSM modeli en başarılı ikinci

model olmuştur. Daralma ve genişleme bölgesinde başarı sıralaması DES, RSM, LES, RNG, RKE, SKW, SKE ve SST şeklinde olmuştur.

- Türbülans modellerinin su yüzünü belirlemede başarı sıralaması, tüm kanal boyunca, DES, RNG, LES, RKE, SST, SKE, RSM ve SKW şeklinde, daralma/genişleme bölgesinde ise RNG, DES, SKW, LES, RSM, RKE, SKE ve SST şeklinde meydana gelmiştir.

- TKE değerleri kanal tabanında genellikle 0.002 m^2/s^2 ile 0.006 m^2/s^2 arasında değişim gösterirken, özellikle daralma elemanının sonrasında meydana gelen kuyruk akımında arttığı ve daralma bölgesinde su yüzeyine yakın olan bölgede maksimum değere ulaştığı görülmüştür.

Bu çalışmada araştırılan konunun devamı olarak, farklı türde kesit daralmalarının değerlendirilmesi ve ayrıca kritik üstü akımlarda kesit daralma etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

AKÖZ, M , ŞİMŞEK, 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.

AKSOY, C. H. C. (2019). Türbülanslı Açık Kanal Akışlarında Türbülans Dağıtıcı Sistemler ve Kesit Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 209s.

ASHGRIZ, N., BARBAT, T. ve WANG, G. (2004). A Computational Lagrangian-Eulerian Advection Remap for Free Surface Flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 44(1): 1-32.

AYDIN, M. C. (2012). Cfd Simulation of Free-Surface Flow over Triangular Labyrinth Side Weir. Advances in Engineering Software, 45(1): 159-166.

AYDIN, M. C. ve EMİROGLU, M. E. (2013). Determination of Capacity of Labyrinth Side Weir by Cfd. Flow Measurement and Instrumentation, 29(1): 1-8.

BHAJANTRI, M. R., ELDHO, T. I. ve DEOLALIKAR, P. B. (2007). Numerical Modelling of Turbulent Flow through Spillway with Gated Operation. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 72(2): 221-243.

CASSAN, L. ve BELAUD, G. (2012). Experimental and Numerical Investigation of Flow under Sluice Gates. Journal of Hydraulic Engineering, 138(4): 367-373.

CHATILA, J. ve TABBARA, M. (2004). Computational Modeling of Flow over an Ogee Spillway. Computers & Structures, 82(22): 1805-1812.

CHOI, W. ve KIM, M. H. (2000). Free-Surface Fluid Flow over Spillway. 4th International Conference Hydro-Science and Engineering, Seoul, s1-5.

DANESHKHAH, A. ve VOSOUGHIFAR, H. Solution of Flow Field Equations to Investigate the Best Turbulent Model of Flow over a Standard Ogee Spillway in Finite Volume Method. The First İnternational Conference On Dams-Hydropower, Iran, s1-9.

GÜMÜŞ, V. (2014). Dolusavak Akımının Sayısal Modellemesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstiütsü, Doktora Tezi, Adana, 129s.

HARGREAVES, D. M., MORVAN, H. P. ve WRIGHT, N. G. (2007). Validation of the Volume of Fluid Method for Free Surface Calculation: The Broad-Crested Weir. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 1(2): 136-146.

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

HO, D., KAREN, B., SHANE, D. ve BRAIN, C. Numerical Flow Analysis for Spillways. 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania, s127-138.

JOHNSON, M. C. ve SAVAGE, B. M. (2006). Physical and Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 132(12): 1353-1357.

LAUNDER, B. E. ve SPALDING, D. B. (1972). Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, New York, 169s.

LAUNDER, B. E., REECE, G. J. ve RODI, W. (1975). Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. Journal of Fluid Mechanics, 68(03): 537.

MENTER, F. R. (1994). 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. Aiaa Journal, 32(8): 1598-1605.

ÖNER, A. A., AKÖZ, M. S., KIRKGOZ, M. S. ve GÜMÜŞ, V. (2012). Experimental Validation of Volume of Fluid Method for a Sluice Gate Flow. Advances in Mechanical Engineering, 2012(4): 1-10.

RAMAMURTHY, A. S., HAN, S. S. ve BIRON, P. M. (2013). Three-Dimensional Simulation Parameters for 90° Open Channel Bend Flows. Journal of Computing in Civil Engineering, 27(3): 282-291.

RAMAMURTHY, A. S., QU, J. Y. ve VO, D. (2006). Vof Model for Simulation of a Free Overfall in Trapezoidal Channels. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce, 132(4): 425-428.

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. (1997). Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics. Annual Review of Fluid Mechanics, 29: 123-160.

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

SHIH, T.-H., LIOU, W. W., SHABBIR, A., YANG, Z. ve ZHU, J. (1995). A New K-ϵ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. Computers & Fluids, 24(3): 227-238.

SOYDAN, N. G. (2013). Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel Ve Sayısal Analizi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstiütsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 146s.

SOYDAN, N. G., ŞİMŞEK O., AKÖZ M.S. (2017). Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir, European Water 57: 85-92

SOYDAN, N. G., ŞİMŞEK O., AKÖZ M.S. (2018). Köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal ve deneysel analizi, Politeknik Dergisi, 21(1): 137-147

ŞEKER, T. (2006). Kontrol Yapıları Arkasındaki Açık Kanal Akımlarının Sayısal Ve Deneysel Analizi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstiütsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 58s.

ŞİMŞEK O., SOYDAN N. G., GÜMÜŞ V., AKÖZ M. S., KIRKGÖZ M. S., (2015). Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi, İMO Teknik Dergi, 441: 7215-7240

ŞİMŞEK O., AKÖZ M.S., SOYDAN N. G., (2016). Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir, Progress in Computational Fluid Dynamics, 16(6): 364-378

TABBARA, M., CHATILA, J. ve AWWAD, R. (2005). Computational Simulation of Flow over Stepped Spillways. Computers & Structures, 83(27): 2215-2224.

TAGHIZADEH, H. (2012). Dynamic Pressure Fluctuations in Stepped Three-Side Spillway. Iranica Journal of Energy & Environment, 3(1): 78-87.

TEKGÜL, B. (2017). On The Applicability Of Progress Variable Approach For Large Eddy Simulation Of Premixed Flames, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 99s.

WILCOX, D. C. (2006). Turbulence Modeling for Cfd (Third Edition), DCW Industries, Inc., California, 522s.

YAKHOT, V. ve ORSZAG, S. A. (1986). Renormalization-Group Analysis of Turbulence. Physical Review Letters, 57(14): 1722-1724.

YAKHOT, V., ORSZAG, S. A., THANGAM, S., GATSKI, T. B. ve SPEZIALE, C. G. (1992). Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique. Physics of Fluids a-Fluid Dynamics, 4(7): 1510-1520.

ZERIHUN, Y. T. ve FENTON, J. D. (2004). Application of a Boussinesq-Type Equation to Flow over Trapezoidal Profile Weirs. Hydraulics of Dams and River Structures: 369-376.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şemsettin BAL
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Dörtyol / 17.12.1991
Telefon : 0 (541) 643 61 62
e-mail : sems.bal@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe / İl	Bitirme Yılı
Lise	Dörtyol Atatürk Lisesi	Dörtyol/ Hatay	2010
Lisans	Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü	Adana	2013
Y. Lisans	Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Şanlıurfa	2019

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2015	Pozitif Bal Mühendislik Ltd. Şti.	Ar-ge Mühendisi
2015-2018	Akademi Yelken Yapı Denetim Ltd. Şti.	İnşaat Mühendisliği

UZMANLIK ALANI:

Sayısal modelleme, açık kanal akımları

YABANCI DİLLER:

İngilizce

YAYINLAR: