T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BARAJ YIKILMASININ FARKLI TÜRBÜLANS MODELLERİ KULLANILARAK SAYISAL MODELLEMESİ

Hüseyin İŞLEK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL ve YÖNTEM 12
3.1. Materyal 12
3.2. Yöntem 16
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 23
4.1. Kuru Yatak Durumu (α=0) 24
4.2. α=0.1 Durumu 44
4.3. α=0.4 Durumu 62
4.4. α=0.2 Durumu 81
4.5. Baraj Mansabında Üçgen Engel Bulunması Durumu 87
4.6. Baraj Mansabında Trapez Engel Bulunması Durumu 99
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 111
KAYNAKLAR 119
ÖZGEÇMİŞ 121

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BARAJ YIKILMASININ FARKLI TÜRBÜLANS MODELLERİ KULLANILARAK SAYISAL MODELLEMESİ

Hüseyin İŞLEK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ŞİMŞEK
Yıl: 2021, Sayfa:121

Bu tez çalışmasında kuru yatak üzerinde, farklı mansap/memba su derinliği oranlarında (α), mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumunda meydana gelen baraj yıkılması olayı sayısal olarak modellenmiştir. Baraj yıkılması sonucunda oluşan yayılım dalgasının hareketini idare eden temel denklemlerin sayısal çözümünde sonlu hacimler yöntemi, su hava arakesitinin belirlenmesinde ise akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemelerde türbülans viskozitesinin sayısal olarak çözülmesinde, k-ε tabanlı Re-normalization Grup, k-ω tabanlı Kayma Gerilmesi Modeli ve Ayrılmış Girdap Modeli kullanılmıştır. Kullanılan türbülans modellerinin farklı akım ve yapı koşulları durumunda meydana gelen baraj yıkılması dalgasının modellenmedeki başarısı, Ortalama Karesel Hata ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata değerlerine göre değerlendirilmiştir. Deneysel ve sayısal baraj yıkılma dalgasının su yüzü profilinin α=0, 0.1 ve 0.4 durumlarında karşılaştırılmasından Ayrılmış Girdap Modelinin, mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumunda ise Kayma Gerilmesi Modelinin kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Sayısal modellemelerden farklı akım zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerji, yatay hız bileşeni ve hız vektörlerinin desenleri mansap bölgesinde farklı yapı ve akım durumları için irdelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Baraj yıkılması, sayısal modelleme, mansap/memba su oranı, akışkan hacimleri yöntemi, üçgen ve trapez engel

ABSTRACT

MSc Thesis

NUMERICAL MODELLING OF DAM BREAK USING DIFFERENT TURBULENCE MODELS

Hüseyin İŞLEK

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Oğuz ŞİMŞEK
Year: 2021, Page:121

In this thesis, the dam break that occurs where on the dry bed, different downstream/upstream water depth ratios (α) and there are triangular and trapezoidal obstacle in the downstream region have been numerically modelled. The finite volume method is used in the numerical solution of the basic equations governing the motion of the propagation wave formed as a result of the dam break, and the volume of fluid method is used in the determination of the water-air interface. In numerical modelling, k-ε based Re-normalization Group, k-ω based Shear Stress Model and Detached Eddy Simulation are used to solve turbulent viscosity numerically. The success of the used turbulence models in modelling the dam break wave that occurs in case of different flow and structure conditions is evaluated according to the Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) values. Comparing the water surface profiles of the experimental and numerical dam break wave at α=0, 0.1 and 0.4 cases, it was determined that the Detached Eddy Simulation is more successful, other hand in the case of triangular and trapezoidal obstacles in the downstream region Shear Stress Model is more successful than the other models used. The turbulent kinetic energy, horizontal velocity component and velocity vector patterns obtained from the numerical models at different flow times are examined for different structures and flow conditions in the downstream region.

KEYWORDS: Dam break, numerical modelling, downstream/upstream water ratio (α), volume of fluid method, triangular and trapezoidal obstacle

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmama başladığım günden bugüne kadar tüm aşamada bilgisini ve tecrübesini benden esirgemeyen kıymetli hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ŞİMŞEK'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında görüşlerinden yararlandığım ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışmalarım sırasında da maddi manevi desteklerini esirgemeyen başta kıymetli eşim ve üç küçük kızım olmak üzere tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Deney düzeneği ve şematik görüntüsü (Kocaman, 2007) 13
Şekil 3.2. $\alpha=h_1/h_0=0.1$ derinlik oranı için deney kanalı kesiti (Islak yatak) 14
Şekil 3.3. Baraj mansabında üçgen engel bulunması durumu için kanal kesiti 15
Şekil 3.4. Baraj mansabında trapez engel bulunması durumu için kanal kesiti 16
Şekil 3.5. Farklı yoğunluklu hesaplama ağı tasarımları 19
Şekil 3.6. Farklı hesaplama ağlarıyla elde edilen sayısal su yüzü profilleri 20
Şekil 3.7. Kuru yatak durumunda çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları 21
Şekil 3.8. Islak yatak durumunda çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları ($\alpha=0.1$) 21
Şekil 3.9. Baraj mansabında engel bulunması durumunda çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları. 22
Şekil 4.1. Kuru yatak durumunda memba derinliği ve mansap kısmını gösteren mesh görüntüsü 24
Şekil 4.2. Kuru yatak durumunda deneysel ve RNG ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 27
Şekil 4.3. Kuru yatak durumunda RNG ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 30
Şekil 4.4 Kuru yatak durumunda RNG ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 31
Şekil 4.5. Kuru yatak durumunda RNG ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 32
Şekil 4.6. Kuru yatak durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 34
Şekil 4.7. Kuru yatak durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 35
Şekil 4.8. Kuru yatak durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 36
Şekil 4.9. Kuru yatak durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 37
Şekil 4.10. Kuru yatak durumunda deneysel ve DES ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 40
Şekil 4.11. Kuru yatak durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 41
Şekil 4.12. Kuru yatak durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 42
Şekil 4.13. Kuru yatak durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 43
Şekil 4.14. $\alpha=0.1$ derinlik oranı memba ve mansap derinliklerini gösteren mesh görüntüsü 44
Şekil 4.15. $\alpha=0.1$ durumunda deneysel ve RNG ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 46
Şekil 4.16. $\alpha=0.1$ durumunda RNG ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 48
Şekil 4.17. $\alpha=0.1$ durumunda RNG ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 49
Şekil 4.18. $\alpha=0.1$ durumunda RNG ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 50
Şekil 4.19. $\alpha=0.1$ durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması. 54
Şekil 4.20. $\alpha=0.1$ durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 55
Şekil 4.21. $\alpha=0.1$ durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 56
Şekil 4.22. $\alpha=0.1$ durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 57
Şekil 4.23. $\alpha=0.1$ durumunda deneysel ve DES ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 58
Şekil 4.24. $\alpha=0.1$ durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 59
Şekil 4.25. $\alpha=0.1$ durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 60
Şekil 4.26. $\alpha=0.1$ durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 61
Şekil 4.27. $\alpha=0.4$ derinlik oranı memba ve mansap derinliklerini gösteren mesh görüntüsü 62
Şekil 4.28. $\alpha=0.4$ durumunda deneysel ve RNG ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 64
Şekil 4.29. $\alpha=0.4$ durumunda RNG ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 67
Şekil 4.30. $\alpha=0.4$ durumunda RNG ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 68
Şekil 4.31. $\alpha=0.4$ durumunda RNG ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 69
Şekil 4.32. $\alpha=0.4$ durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması. 72
Şekil 4.33. $\alpha=0.4$ durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 73
Şekil 4.34. $\alpha=0.4$ durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 74
Şekil 4.35. $\alpha=0.4$ durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 75
Şekil 4.36. $\alpha=0.4$ durumunda deneysel ve DES ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 77
Şekil 4.37. $\alpha=0.4$ durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 78
Şekil 4.38. $\alpha=0.4$ durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 79
Şekil 4.39. $\alpha=0.4$ durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 80
Şekil 4.40. $\alpha=0.2$ derinlik oranı memba ve mansap derinliklerini gösteren mesh görüntüsü 81

Şekil 4.41. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen su yüzü profilleri 82
Şekil 4.42. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 84
Şekil 4.43. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 85
Şekil 4.44. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 86
Şekil 4.45. Üçgen engel durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 91
Şekil 4.46. Üçgen engel durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 93
Şekil 4.47. Üçgen engel durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 95
Şekil 4.48. Üçgen engel durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 97
Şekil 4.49. Trapez engel durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması 101
Şekil 4.50. Trapez engel durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni 105
Şekil 4.51. Trapez engel durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni 107
Şekil 4.52. Trapez engel durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni 109

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. Kuru yatak durumunda farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri 25
Çizelge 4.2. α=0.1 derinlik oranı için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri..... 45
Çizelge 4.3. α=0.4 derinlik oranı için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri..... 63
Çizelge 4.4. Üçgen engel durumu için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri..... 88
Çizelge 4.5. Trapez engel durumu için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri..... 100

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

k	Türbülans kinetik enerji
ε	Türbülans kinetik enerji kayıp miktarı
ω	Türbülans kinetik enerji özgül kayıp oranı
α	Mansap / Memba su derinliği oranı
h_o	Memba su yüksekliği
h_1	Mansap su yüksekliği
g	Yer çekimi ivmesi
t	Baraj yıkılma dalgasının yayılım zamanı
T	Boyutsuz hale getirilen zaman
H	Boyutsuz hale getirilen yükseklik
u_i	Ortalama hız bileşenleri
p	Ortalama basınç
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
τ_{ij}	Türbülans (Reynolds) gerilmelerini
RANS	Reynols Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemleri
SWE	Sığ Su Denklemleri (Shallow Water Equations)
LES	Büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation)
DES	Ayrılmış girdap simülasyonu (Detached Eddy Simulation)
SST	Kayma Gerilmesi Taşınım Modeli (Shear Stress Transport)
VOF	Akışkan hacmi yöntemi (Volume of Fluid)
RKE	Realizable k−ε
SKE	Standart k- ε
HLL	Harten-Lax-vau Leer
SPH	Düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics)
YSA	Yapay Sinir Ağları
ÇDR	Çoklu Doğrusal Regresyon
OKH	Ortalama Karesel Hata
OMGH	Ortalama Mutlak Göreceli Hata

1. GİRİŞ

Barajlar, sulama ve içme suyu temini, elektrik enerjisi üretimi, taşkın kontrolü ve daha birçok amaç için akarsu en kesitini tamamen kapatmak suretiyle inşa edilen hidrolik yapılardır. Baraj membasında farklı amaçlar için biriktirilmesi gereken su, barajların rezervuarında depolanmaktadır. Baraj rezervuarında depolanan su, baraj yapısı ve mansap bölgesinin güvenliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Barajlarda meydana gelen hasar veya yıkılma durumunda depolanan su, mansap bölgesi için büyük risk teşkil etmektedir. Farklı nedenlerle meydana gelen baraj yıkılması veya barajlardan kaynaklı kazalardan dolayı çok canlı hayatını kaybetmekte ve bunun yanında mansap bölgesinde bulunan sanayi tesisleri, konutlar ve tarım alanları gibi birçok kullanım alanı işlevini kaybetmekte ve/veya terk edilmek zorunda kalınmaktadır. Dünya'da son yaşanan baraj kazası 2021 yılı şubat ayında Hindistan'da bulunan Rishiganga barajında meydana gelmiş, çığ ve buzullar düşmesinden kaynaklı olarak baraj yapısı zarar görmüş ve bu durum Tapovan Hidroelektrik Santrali üzerinden aşan büyük bir su kütlesi oluşturmuştur. Bu kaza sonucunda 145 kişi yaşamını yitirmiştir. Bunun yanında, resmi kayıtlara göre barajlardan kaynaklı en fazla insan kaybı 1975 yılında Çin'in Zhumadian bölgesinde bulunan Banqiao ve Shimantan Barajlarının planlanan tasarım kapasitesinin üzerinde yağışın meydana gelmesinden dolayı yaşanmış ve bu olayda 171.000 kişi hayatını kaybetmiştir. Ayrıca, bu olaydan sonra 11 milyon insan evini terk etmek zorunda kalmıştır. Ülkemizde ise barajlardan kaynaklı kaza en son 2012 yılında Adana'da bulunan Köprü barajının rezervuarının su tutmaya başlamasıyla birlikte meydana gelen aşırı yağışlardan sonra, derivasyon tünelindeki kapağın zarar görmesi sonucunda baraj mansap bölgesinde derivasyon tüneli çıkışında çalışan 10 işçi yaşamını kaybetmiştir. Dünyada birçok ülkede bu tür kazalar meydana gelmekte ve sadece insanlar değil bitkiler ve hayvanlar da yaşamını yitirmekte ve yaşam alanları zarar görmektedir. Ayrıca, baraj yıkılmasından etkilenen bölgelerde ekolojik dengenin bozulması da kaçınılmazdır. Bu konuda, ülkemizde ilgili kurum ve kuruluşlar tarafından baraj yıkılması modelleme çalışmalarının yapılmasının gerekliliği belirlenmiş ve bu modelleme çalışmaları son yıllarda oldukça sık yapılmaya

başlanmıştır. Ayrıca, modelleme sonuçları bir rapor halinde ilgili birimlere sunulmakta ve planlamalar bu raporlar doğrultusunda gerçekleştirilmektedir.

Çok farklı nedenlerle baraj yıkılması olayının yaşandığı resmi kayıtlara yansımaktadır. Barajların en yaygın yıkılma nedeni aşırı yağışlar ve yağışların meydana getirdiği taşkınlardır. Bunun yanında, barajın güvenlik elemanı olan dolusavak kapasitesinin yetersiz olmasından kaynaklı olarak, suyun baraj gövdesinin üzerinden aşması, dolgu barajlarda gövde veya temelde meydana gelen sızma veya borulanmadan kaynaklı aşınmalar, uygun olmayan tasarım, baraj rezervuarına aşırı akım gelmesi, barajda kullanılan malzemelerin su basıncına karşı dayanıksız olması ve sabotaj gibi nedenlerle de barajlar yıkılmaktadır. Baraj yıkılması sonucunda oluşan yayılım dalgasının büyüklüğü, aşırı yağışlar ve büyük taşkınlardan kaynaklı olarak oluşan yayılım dalgasından oldukça yıkıcıdır. Oldukça tehlikeli olan bu baraj yıkılması sonucunda oluşan yayılım dalgasının harekete geçtikten sonra kontrol edilmesi neredeyse imkânsızdır. Ancak, baraj yıkılması durumunda, can ve mal kaybının azaltılması ve gerekli tedbirlerin alınması açısından, baraj yıkılması durumunda oluşan büyük yayılım dalgasının mansap bölgesinde etkileyeceği bölgeler, barajların planlama aşamasında belirlenmelidir. Zararın en aza indirmek için erken uyarı sistemlerinin kurulması ve mevcut bulunan yerleşim yerlerinin ve diğer tesislerin olası yıkılma durumunda risk bölgesinden taşınması gerekmektedir.

Ayrıca, baraj yıkılması problemleri barajın yapıldığı malzemenin türünden, inşasında kullanılan teknik ve barajın türüne göre farklılık göstermektedir. Baraj türüne göre beton barajlarda toptan veya kısmı ani yıkılma meydana gelirken, dolgu barajlarda ise zamana bağlı değişim gösteren aşamalı bir yıkılma söz konusu olmaktadır. Yapı akım etkileşimi probleminin yanında baraj yıkılma dalgasının hareketinin zamanla değişkenlik göstermesi baraj yıkılması olayını oldukça karmaşık hale getirmekte ve dolgu barajlarda özellikle dolgu malzemesinin akımla taşınması problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu karmaşık akım probleminin çözümünün yapılabilmesi için laboratuvar ortamında fiziksel model deneyleri gerçekleştirilebilmektedir.

Barajın ani yıkılması neticesinde memba bölgesinde negatif bir yayılım dalgası oluşurken, mansap bölgesinde ise pozitif bir yayılım dalgası oluşumu meydana gelmektedir. Mansap bölgesinde oluşan pozitif dalganın yayılımda, mansap bölgesi topoğrafyası, bu bölgede bulunan yerleşim yerleri ve kuyruk suyu derinliği etkili olmaktadır. Mansap bölgesinde kuyruk suyunun bulunmaması durumu kuru yatak, kuyruk suyu bulunması durumu ise ıslak yatak olarak adlandırılmaktadır. Baraj

yıkılması durumunda oluşan pozitif dalganın hızı ve yüksekliği alınacak tedbirlerin, taşkın yataklarının yüksekliğinin ve sınırlarının belirlenmesinde en önemli parametrelerdir.

Etkilenecek bölgenin belirlenmesi için, baraj yıkılması durumu deneysel çalışmalarla araştırılsa da bu deneysel verilerle gerçek yıkılma durumu tamamen gerçekleştirilememektedir. Ayrıca, bu fiziksel model çalışmalarında ölçek etkilerinden, insan ve ölçüm sisteminden kaynaklı hatalardan da kaçınılması imkânsızdır. Son yıllarda, bu deneysel çalışmaların yanında bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerine dayalı geliştirilen sayısal modelleme teknikleri oldukça sık tercih edilmeye başlanmıştır (Gümüş ve ark., 2018). Sayısal modellemeler, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen fiziksel model çalışmalarına kıyasla daha az insan gücüne ihtiyaç duymakta ve akımla ilgili farklı senaryoların denenmesinde yeniden modelleme maliyeti gerektirmemesinden dolayı daha ekonomik olmasının yanında akımla ilgili parametrelerin özel ölçüm cihazı kullanılmadan elde edilmesine imkân sunmaktadır. Sayısal modelleme teknikleri bu avantajlarından dolayı, hava araçlarının ve bina/bina elemanlarının tasarımında, kemiklerin mekanik ve dinamik davranışlarının incelenmesinde, sanayi tesislerinin bacalarının analizinde ve buna benzer birçok uygulamada farklı mühendislik disiplinleri tarafından olukça sık tercih edilmekte ve tasarımlarda kullanılmaktadır. Sayısal modellemenin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, sayısal model sonuçlarının deneysel verilerle doğrulanması neticesinde sayısal modellemelerin oldukça başarılı olduğu ve akımla ilgili detaylı bilginin kolayca elde edildiği, simülasyonun yenilenmesi gerektiğinde yeniden kurulum için sadece hesaplamanın tamamlanması zamanın dışında herhangi bir ek maliyet gerektirmediği görülmektedir.

Baraj yıkılmasının hareketini idare eden temel denklemler, süreklilik ve momentum denklemleridir. Bu denklemlerin sayısal olarak çözülmesinde kullanılmak üzere ticari Fluent, Flow 3D ve HEC RAS gibi bazı paket programlar geliştirilmiştir. Bu programlar vasıtasıyla elde edilen sonuçların laboratuvar ortamında fiziksel model sonuçlarıyla karşılaştırılması sonucunda, paket yazılımların farklı akım problemlerinin modellenmesinde oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir. Akımı idare eden temel denklemlerin içerisinde bulunan türbülans viskozitesinin modellenmesinde türbülans kapatma modellerinden yararlanılmaktadır. Bu türbülans kapatma modelleri türbülans viskozitesinin hesaplanmasında, akımın hız parametresine bağlı olarak hesap edilen büyüklükler olan türbülans kinetik enerji (k), türbülans kinetik enerji kayıp miktarı (ε), türbülans kinetik enerji özgül kayıp oranı olan (ω) denklemleri çözmekte veya türbülans gerilmelerini bu büyüklüklere ait denklemleri çözmeden doğrudan hesap edebilmektedir. Ayrıca, bu paket programlarda, su hava arakesitinin belirlenmesinde

Akışkan Hacimleri Yöntemi oldukça sık kullanılmaktadır. Baraj yıkılması sonucunda oluşan negatif ve pozitif yayılım dalgasının su yüzü profilinin belirlenmesinde bu yöntem, bilim insanları ve araştırmacılar tarafından oldukça sık tercih edilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, Kocaman (2007), tarafından laboratuvar ortamında kuru yatak, ıslak yatak, mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumlarında deneysel olarak incelenen baraj yıkılması probleminin sayısal modellemesi yapılmıştır. Farklı zamanlarda deneysel olarak elde edilen baraj yıkılması dalgasının su yüzü profili, akımın hareketini idare eden süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümünde farklı parametreleri kullanarak türbülans viskozitesini hesap eden türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması sonucunda, deneysel verilere en yakın sonuçları veren türbülans modeli Ortalama Mutlak Göreceli Hata ve Ortalama Karesel Hata değerlerine göre belirlenmiştir. Ayrıca, deneysel olarak değerlendirilmeyen veya elde edilmesi için özel ölçüm ekipmanları gerektiren hız vektörleri, hız ve türbülans kinetik enerji desenleri sayısal model sonuçlarından elde edilerek değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde baraj yıkılma dalgasının, deneysel ve sayısal modellenmesi ile ilgili çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Shigematsu ve ark. (2004), farklı başlangıç şartlarında baraj yıkılması dalgasını k-ε türbülans modelini kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal modelleme sonucunda elde edilen baraj yıkılma dalgasının su yüzü profillerini, deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırmışlardır. Sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin karşılaştırılmasından, su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğunu belirtmişler ve baraj yıkılması durumunda oluşan türbülansın dağılımı değerlendirilmiştir.

Kocaman (2007), farklı mansap koşullarında meydana gelen baraj yıkılması problemini deneysel, teorik ve sayısal olarak incelemiştir. Baraj yıkılması sonucunda oluşan pozitif dalganın (şok dalgasının) su yüzü profilini kuru yatak, farklı mansap/memba su yükseklikleri oranlarında ($\alpha=h_1/h_0$; $\alpha=0.1$, $\alpha=0.2$ ve $\alpha=0.4$) ve mansap bölgesinde üçgen ve trapez engellerin bulunması durumunda irdelenmiştir. Farklı yapı ve akım koşullarında elde edilen deneysel sonuçları, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Average Navier Stokes-RANS) ve sığ su denklemleri (Shallow Water Equations-SWE) denklemlerini çözen sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, sayısal model sonucunda elde edilen baraj yıkılması su yüzü profillerinin deneysel profillerle oldukça uyumlu olduğunu belirtmiştir.

Aliparast (2009), SWE denklemlerini çözmek için yapılandırılmamış ağ üzerinde ikinci derece sonlu farklar hücre merkezli metoduna dayanan bir sayısal model geliştirmiştir. Barajın mansap kısmında çok küçük bir derinlik olduğu varsayımının, yanlış sonuçlara yol açan baraj yıkılma akış probleminin doğasını değiştirebileceğinden, süreksiz akış fonksiyonlarının hesaplanması için Harten-Lax-vau Leer (HLL) yaklaşık Riemann çözücüsünü kullanmıştır. Böylelikle, bu çözücünün

işleme katılmasıyla süreksizliğin dikkate alınması sağlandığı ifade etmiştir. Çözümler, ikinci dereceden uzamsal doğruluğa ulaşmak ve sahte salınımları önlemek için çok boyutlu bir eğim sınırlama tekniği uygulanmıştır. Islak/kuru sınırın yakınındaki küçük su derinliklerinden kaynaklanan sayısal dengesizliklerle ilişkili sorunları aşmak için, sürtünme kaynağı terimleri tamamen örtük bir şekilde ele almışlardır. Geliştirilen sayısal model, birkaç test senaryosuna ve gerçek akımlara uygulamıştır. Sayısal testler, modelin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu kanıtlamış ve bu geliştirilen model İran'da Torogh'un baraj yıkılma analizinin sayısal simülasyonu için uygulanmıştır.

Tsang-Jung Chang ve ark. (2011), bir boyutlu açık kanallarda sığ su baraj yıkılmalarını araştırmak için ağsız sayısal model önermişlerdir. Sayısal model SWE denklemlerini düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği yöntemleriyle (Smoothed Particle Hydrodynamics-SPH) çözmüşlerdir. Daha sonra, düz bir kanal akışı, çeşitli mansap sınır koşullarına sahip engebeli kanal akışı, prizmatik olmayan kanal ve Toce nehrinin gerçekçi modeli olmak üzere dört farklı problem için laboratuvar ve saha verileriyle karşılaştırılarak modelin doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, önerilen sayısal modelin baraj yıkılmalarında oluşan yayılım dalgasının hesaplamalarında etkin ve güvenilir olduğunu belirtmişlerdir.

Ozmen-Cagatay ve Kocaman (2012), çalışmalarında, mansap bölgesinde bir engel bulunan ve kuru yatak üzerinde meydana gelen baraj yıkılması problemini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Baraj yıkılması akımını, RANS denklemlerini k-ε türbülans modeli ve SWE denklemleri ile çözmüşler ve akımın serbest su yüzü profilini Akışkan Hacimleri Yöntemini (Volume of Fluids-VOF) kullanarak Flow-3D paket programıyla sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal modelleri doğrulamak için gelişmiş ölçüm ve dijital görüntü işleme teknikleriyle elde edilen deneysel profilleri kullanmışlardır. Sayısal olarak elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması, RANS modelinin baraj yıkılması dalgasının profilini makul bir doğrulukla tahminde bulunduğunu gösterirken, basit SWE modelinin özellikle memba bölgesinde oluşan negatif dalga yayılımını tahmin etmede bazı tutarsızlıklar göstermiştir.

Marsoolia ve Wub (2014), düzensiz alanlarda düzensiz yataklar üzerinde baraj yıkılması sonucu oluşan yayılım dalgasını modellemek için üç boyutlu sayısal bir model geliştirilmişlerdir. Sayısal model RANS denklemlerini, yatak ve duvarlar gibi katı sınırlara uyan sıralı çözüm ağına dayalı sonlu hacimler yöntemini kullanarak çözdüğü ifade edilmiştir. Hız ve basınç eşleştirmesinde PISO algoritması ve Rhie ve Chow'un momentum interpolasyonunu kullanmışlardır. Su yüzeyinin belirlenmesinde, VOF yönteminde bulunan akışkanın hacimsel doluluk oranını temsil eden F denklemini çözmek için Rastgele Ağlar için Sıkıştırmalı Arayüz Yakalama Şeması (CICSAM) ile VOF yöntemini kullanmışlardır. Modelin doğruluğu ve güvenirliliğini, birkaç küçük ve büyük ölçekli laboratuvar deneylerle test etmişlerdir. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması neticesinde, geliştirilen modelin oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir.

Lobovský ve ark. (2014), basınç yüklerini dikkate almak için, mansap yönünde bir duvara çarpan baraj yıkılma dalgasının dinamiklerini ayrıntılı bir şekilde değerlendirmek için yatay bir kuru yatak üzerindeki bir baraj yıkılma akışında deneysel ölçümler yapmışlardır. Yayılım dalgasının serbest yüzeyi ve dalga önü davranışına odaklanılarak yayılım dalgasının hareketini analiz etmişlerdir. Su yüksekliği ve dalga ön hızı ile ilgili deneysel gözlemleri, mevcut literatürle karşılaştırmışlar ve değerlerin uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Fondelli ve ark. (2015), baraj yıkılması problemini üç boyutlu olarak modellenmiş ve baraj yıkılmasının sayısal modellemesinde uyarlamalı ağ tekniği ve su hava arakesitinin belirlenmesinde VOF yöntemi kullanılmıştır. Özellikle, uyarlamalı ağ yapısı tekniğinin sayısal modelleme de önemli ölçüde kazanım sağladığı belirtilmiştir. Bu şekilde bir tercihle su hava arakesitinin söz konusu olduğu akım bölgesinde daha yüksek çözünürlükte ağ tanımlanması sağlanmış ve sayısal modellemeden kaynaklı kayıplar en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Kullanılan yöntemin başarısını doğrulamak için deneysel verilerle karşılaştırma yapılmıştır.

Xu (2016), baraj yıkılma akışlarını üç boyutlu simüle etmek için SPH yaklaşımını kullanmıştır. Hesaplamanın doğruluğunu ve basınç dağılımlarını

iyileştirmek için, çekirdek gradyanının düzeltilmesi ve Rusanov akısının süreklilik denklemine eklenmesini sağlamıştır. Ayrıca, karmaşık katı sınırların esnek bir şekilde modellenmesi için hem duvar hem de yapay parçacıklar kullanmıştır. Bu şekilde geliştirilmiş SPH yaklaşımının, üç boyutlu serbest yüzeyli akış problemlerini çözme yeteneğini göstermek için dikey duvar, kübik ve silindirik engellerle etkileşim halinde olan üç boyutlu baraj yıkılma akışı dâhil olmak üzere sayısal olarak simüle edilmiş ve sayısal model sonuçları mevcut deneysel ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, geliştirilmiş SPH yaklaşımının, büyük deformasyonlara ve parçalanmalara sahip üç boyutlu serbest yüzeyli baraj yıkılması yayılım dalgasını doğru ve kararlı bir şekilde ele alabildiğini ve daha da önemlisi doğru ve dalgalanmalar içermeyen bir basınç alanını hesaplayabildiği sonucuna varılmıştır.

Seyedashraf ve ark. (2017), tek boyutlu baraj yıkılma problemlerinin kaynak terimsiz çözümü için yapay sinir ağına (YSA) dayalı yeni bir teknik ve bir denklem önererek detaylandırmışlardır. Mevcut tüm analitik çözümler karmaşık parçalı fonksiyonlar olduğundan, tek bir denklem ve düzgün sonuçlarla hızlı bir çözümün, sorunu analiz etmek için yardımcı olabileceğini varsaymışlardır. Modelde kanal uzunluğu, memba ve mansap su derinlikleri, zaman ve mesafe bilgileri girdi verisi olarak, su derinlikleri ve akış hızları çıktı olarak kullanılmıştır. Geliştirdikleri modeli, çeşitli sayısal ve analitik çözümlerle karşılaştırılmış ve modelin karşılaştırılan verileri iyi bir şekilde doğruladığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan, denklemin baraj yıkılma akış problemini tatmin edici bir şekilde modelleyebildiğini ve önerilen modelin klasik sayısal sonuçlardan daha iyi performans gösterdiğini, hesaplama zamanının ise klasik sayısal modellemenin üçte biri olduğu sonucuna varmışlardır.

Ye ve Zhao (2017), ıslak yatak durumunda baraj yıkılması dalgasının kuyruk suyuyla etkileşime girmesi sonucu oluşan karmaşık akım probleminin iki farklı akım ve hava arakesitini VOF yöntemini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. VOF yönteminde yapılan değişiklikle, su-su-hava ara yüzünde kesişme sorununun oluşmasını engellemişlerdir. Baraj yıkılma akışının ilk aşaması ve uzun kanal yayılımı, Jánosi ve ark. (2004) deneylerine göre sayısal olarak incelenmiştir. Serbest yüzey ve

su-su ara yüzü değişiminin karşılaştırılması sonucunda, deneysel ve sayısal sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu sonucuna varmışlardır. Baraj yıkılma akışının ilk aşamasında su-su ara yüzünün gelişimini ve kapak kalınlığının, kapak kaldırma hızının ve ortam su derinliğinin, baraj yıkılma dalgasının hareketine olan etkileri ayrıca incelenmiştir. Ayrıca, uzun bir kanalda baraj yıkılma akışının yayılması incelenmiş, su-su ara yüzeyinin yayılması ile baraj yıkılma dalgası cephesi arasında bir zaman farkının olduğunu tespit etmişlerdir.

Syedashraf ve ark. (2018), yapay zekâ tekniklerine dayalı yeni bir metodolojiyi, klasik baraj yıkılma akış probleminin modellenmesi için önermiş ve önerdikleri modeli test etmişlerdir. Yaptıkları araştırmada, 29 baraj yıkılma senaryosunun çözümü için Radyal Tabanlı Fonksiyon (RTF) ve Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) yöntemlerinin uygulanmasını detaylandırmışlardır. Modellerde kanalın uzunluğu, memba ve mansap su derinlikleri, zaman ve mesafe gibi yedi değişken kullanılarak, akış alanındaki her bir hesaplama düğümünde akım derinlikleri ve hızları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Modellerden elde edilen sonuçları, analitik ve Lax-Wendroff ve MacCormack şemalarıyla doğrulamışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, kullanılan yapay zekâ yöntemlerinin pozitif yayılım ve seyreklik dalgalarının genel şeklini tahmin edebildiğini göstermiştir. Ayrıca, ÇDR yöntemi, RTF ve test edilen sayısal şemalardan daha iyi performans göstererek, mevcut parçalı analitik denklemlere etkili bir alternatif olarak kullanılabileceği, farklı girdi kombinasyonlarında en uygun modele dayalı yeni bir monolitik denklemin geliştirilebileceği sonucuna varmışlardır.

Yang ve ark. (2018), mansap su derinliğinin baraj-yıkılma dalgası üzerindeki etkisini, fiziksel deneylerle ve FLOW-3D paket programını kullanarak sayısal olarak simüle etmişler ve farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Kuru yatak durumu ($\alpha=0$), sığ mansap su durumu ($\alpha=0.1$) ve derin mansap su durumu ($\alpha=0.4$) Özmen-Çağatay ve Kocaman (2010) tarafından gerçekleştirilen deneyleri sayısal olarak modellemişlerdir. Baraj-yıkılma dalgasının oluşumu ve yayılma süreci, kuru yatak ve ıslak yatak durumları için sırasıyla iki ve üç aşamaya ayırmışlardır. Serbest yüzey profili, dalga ön hızı, işaret noktası hareketi ve

yörünge, yukarı ve aşağı su arasındaki ara yüz, taban direnci ve türbülanslı kinetik enerji dahil olmak üzere baraj yıkılma dalgasının özellikleri karşılaştırmış ve her durum için farklı aşamalarda sonuçlar elde edilmiştir. Farklı mansap su derinliği durumları arasındaki akım özelliklerinin farklılıkları elde edilmiş ve farklılıkların nedenleri araştırılarak da baraj-yıkılma dalgasının oluşumunu ve yayılmasını detaylı olarak incelemişlerdir.

Khoshkonesh ve ark. (2019), başlangıç (kuru ve ıslak) ve geometrik koşulların baraj yıkılma akışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Serbest yüzeyin gelişimi ve değişimi, akışkan hacimleri yöntemini kullanarak belirlenmiştir. Sayısal çözümlerin, ağ çözünürlüğü ve türbülans kapatma modellerine duyarlılıklarını üç farklı hesaplama ağında ve dört türbülans modelinde değerlendirilmiştir. Sayısal modellemelerde, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulasyon-LES) kullanılmış ve elde edilen sonuçlar önceki deneysel verilerle karşılaştırmıştır. LES modelinin serbest yüzeyi belirleme konusunda kullanılan diğer modelden nispeten daha iyi tahminde olduğunu belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, başlangıç ve geometrik koşulların serbest yüzey yayılımının akış enerjisinin, dışarı ve içeri akış hidrograflarının ve ortaya çıkan kuvvetlerin üzerindeki önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Munoz ve Constantinescu (2020), baraj yıkılma dalgasını iki ve üç boyutlu olarak sayısal modellemek için akışkan hacimleri yöntemini ve akımın hareketini idare eden süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümünde, RANS tabanlı Realizable k−ε (RKE) türbülans modelini kullanmışlardır. İki ve üç boyutlu sayısal model sonuçlarının, laboratuvarda gerçekleştirilen deneysel model sonuçlarıyla karşılaştırılması sonucunda, üç boyutlu sayısal model sonuçlarıyla deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu belirlemişlerdir.

Liu ve ark (2020), eğimli bir yatak boyunca yayılan baraj yıkılma dalgalarının özelliklerini araştırmışlar ve sel uyarısının zamanında verilerek risk azaltılmasına yardımcı olabileceğini öngörmüşlerdir. Laboratuvar çalışmalarını memba su derinliği, yatak eğimleri ve kuyruk suyu derinliğinin oldukça geniş aralıkta değiştiği akım

koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Kuyruk suyu derinliği, ortalama hız ve dalga hızını hesaplamak için farklı akım durumlarında su seviyelerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, mansap kısmının kuru yatak olması durumunda yatak eğiminin artmasının, ters dalga şiddeti azaltırken (membaya doğru yayılım), şok dalgasının (mansaba doğru yayılım) şiddetinin önemli ölçüde arttıracağını belirlemişlerdir. Ayrıca, $\alpha \geq 0.3$ olduğu durumda, akım bir süre geliştikten sonra rezervuar alanına doğru yayılan ekstra negatif dalgalar oluştuğu, $\alpha \geq 0.6$ olduğu durumda ise mansaba doğru yayılan Favre dalgalarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Su seviyesinin ve ortalama hızın, ekstra negatif dalgaların ve Favre dalgalarının etkisine bağlı olarak dalgalandığını, bu tür dalgalanma frekansının su derinlik oranının artmasıyla arttığını, ilk ekstra negatif dalganın ve ilk mansap akım dalga hızı için deneysel formüller elde etmişlerdir. Bunun yanında, deneysel sonuçları bazı analitik çözümlerle de karşılaştırmışlar ve karşılaştırma sonucundan bu analitik çözümlerin geliştirilmesi sırasında yapılan varsayımların geçerliliği ve kısıtlılıkları deneysel ölçümlerle tartışmışlardır.

Ye ve ark. (2020), mansap kısmının kuru yatak, ıslak yatak ve önünde engeller olması gibi farklı yatak durumlarında baraj-yıkılma dalgasının yayılımını modellemek için mesh-free yöntemini kullanmışlardır. Mesh-free yöntemini kullanarak elde ettikleri sonuçları, mevcut deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak baraj yıkılma akışının sayısal model sonuçlarını doğrulamışlardır. Doğrulanmış bu sayısal yöntem daha sonra, farklı derinliklerdeki mansap koşulları altında yani farklı doluluk oranına sahip ıslak yataklar üzerinde yayılan baraj yıkılma dalgasını modellemek için kullanmışlardır. Modellemelerde serbest yüzey profili, akış deseni, ön dalga hareketi ve yatak kayma gerilmesi gibi akış özelliklerini irdelemişlerdir.

Kocaman ve ark. (2020), baraj yıkılması durumunda mansap bölgesinde daralmanın olduğu karmaşık akım problemini deneysel ve sayısal olarak modellemişlerdir. Mansap bölgesinde üç farklı yanal daralma geometrisi için dikdörtgen kesitli, yatay kanalda kuru yatak durumunda incelemişlerdir. Baraj kırılma dalgasının yayılmasını analiz etmek için akım alanına müdahalesi olmayan bir dijital görüntüleme tekniği kullanmışlardır. Seçilen bölümlerdeki su derinliklerinin, serbest yüzey profilleri ve zamanla değişimi, sanal bir dalga probu aracılığıyla doğrudan üç

senkronize CCD video kamera kaydından elde etmişlerdir. Deneysel sonuçları, SWE ve akışkan hacimleri yöntemiyle RANS denklemlerinin Standart k- ε (SKE) türbülans modelini kullanarak elde edilen iki farklı sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Hesaplanan ve ölçülen profiller arasında iyi benzerlikler elde edilmiş ve bununla birlikte, RANS modellinin SWE'ye kıyasla deneysel sonuçlarla daha iyi bir uyuma sahip olduğunu belirlemişlerdir. Sunulan yeni deneysel verilerin, düzensiz topografya üzerindeki baraj yıkılması sonucu oluşan akışların simülasyonunda sayısal modelleri doğrulamak için kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Peng ve ark. (2021), baraj yıkılması sonucu oluşan yayılım dalgasının gelişimini ve bir yapı üzerindeki çarpma basıncını sayısal modellerle ele almışlardır. Sayısal modeli doğrulamak için ilk olarak bir laboratuvar deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yapıya yakın akış rejimi, yapı üzerindeki çarpma basıncının zamansal değişimleri ve dağılımları ve bunun yanında ilk rezervuar su derinliğinin maksimum basınçlar üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Yapının memba ve mansap bölgesindeki su yüzeyi profillerinin tamamen farklı olduğunu ve yüzey hızı dağılımlarında önemli ölçüde farklılıların bulunduğu belirlenmiştir. Yayılım dalgasının yapıya ilk temas ettiğinde yapının büyük bir anlık çarpma basıncına maruz kaldığı ve bu basıncın değerinin ilk darbeden sonraki maksimum basıncın 1.5-3.0 katına ulaşabileceği ve anlık çarpma basıncının, ilk rezervuar su derinliği ile orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, yapının ön tarafında duvara etkiyen maksimum basıncın dağılımının hem yatay hem de düşey yönlerde doğrusal olmadığını belirlemişlerdir.

Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde, baraj yıkılma probleminin hidrodinamik yöntemlere dayalı analizinin oldukça kısıtlı olduğu belirlenmiştir. Baraj yıkılması sonucunda oluşan yayılım dalgasının hareketini idare eden temel denklemlerin çözümünün akıma ait farklı parametrelerin belirlenmesini esas alan türbülans modellerinin başarısının karşılaştırılması konusundaki çalışmaların yeteri sayıda bulunmadığı dikkat çekmektedir. Yapılan bu çalışmayla türbülans viskozitesinin sayısal olarak çözülmesinde farklı türbülans modellerinin farklı mansap koşulları ve mansapta farklı yapısal düzenlemeleri içeren açık kanalda yaşanan baraj

yıkılması sonucu oluşan yayılım dalgasının hareketinin detaylı olarak irdelenmesi ve deneysel olarak elde edilmesinde özel ekipmanların kullanılmasını gerektiren akım özelliklerin değerlendirilmesinin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

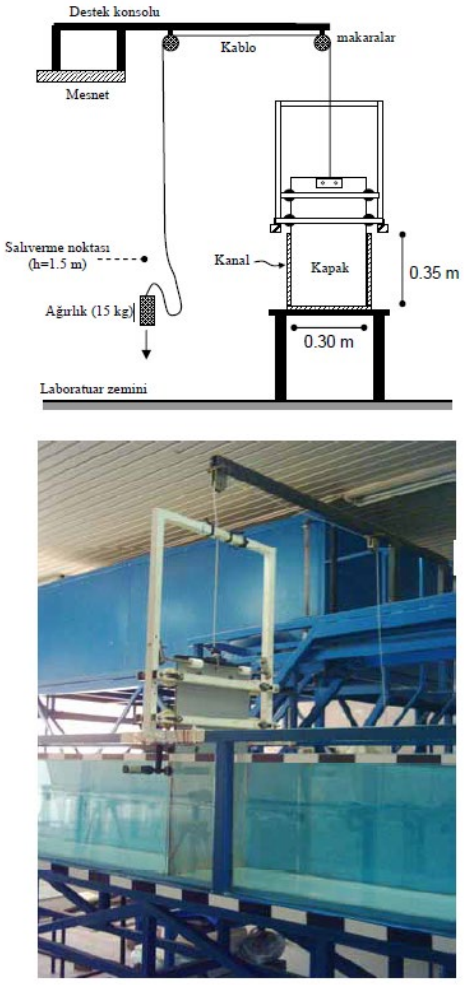
3.1. Materyal

Deneyler, Kocaman (2007) tarafından Çukurova Üniversitesi Hidrolik laboratuvarında bulunan dikdörtgen en kesitli açık kanalda yapılmıştır (Şekil 1). Deneylerin gerçekleştirildiği açık kanalın tüm yüzeyleri camdan imal edilmiş ve uzunluğu, yüksekliği ve genişliği sırasıyla 9 m, 0.35 m ve 0.3 m'dir. Baraj yıkılmasının deneysel olarak modellenmesinde açık kanala herhangi bir eğim verilmemiş olup deneylerin tamamı yatay taban üzerinde gerçekleştirilmiştir. Baraj yıkılma dalgası profilinin deneysel olarak elde edilmesinde yüksek çözünürlüğe sahip video kameralar kullanılmış olup, görüntü işleme teknikleriyle görüntü kalitesi arttırılmış ve elde edilen görüntülerin kalibrasyonu yapılmıştır (Kocaman, 2007).

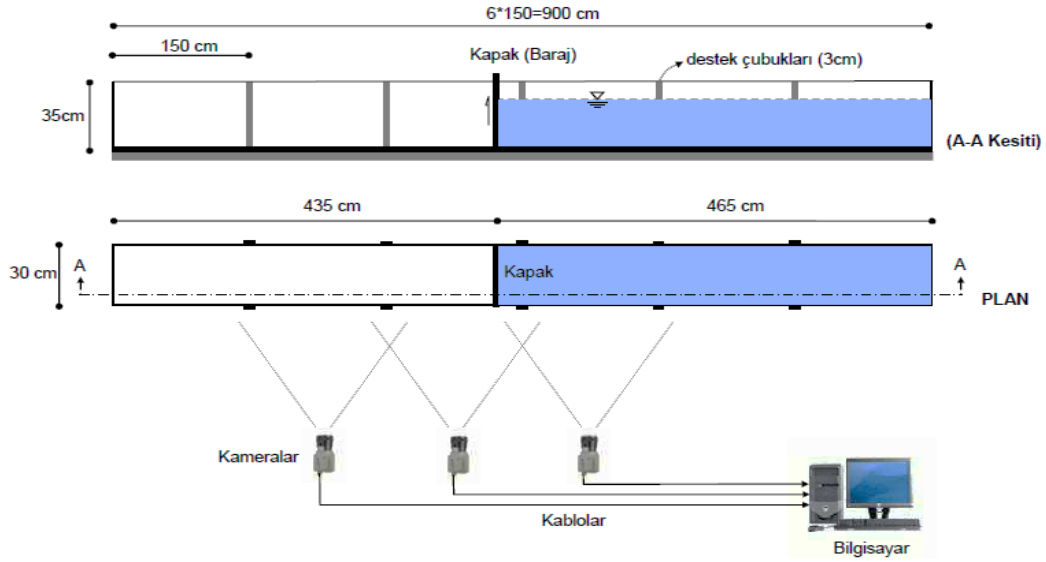
Laboratuvar ortamında baraj gövdesinin temsil edilmesinde kayar kapak kullanılmış ve bu kayar kapak kanal girişinden 4.65 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Kayar kapağın ani olarak hareketini sağlamak üzere makara sistemiyle 15 kg ağırlık 1.50 m yükseklikten serbest bırakılmıştır (Şekil 3.1). Baraj yıkılmasının ani olarak değerlendirilmesi için, kapağın kaldırılma zamanının, Lauber ve Hager (1998) tarafından önerilen 1.25 $(h_0/g)^{1/2}$ (h_o, memba su yüksekliği; g yer çekimi ivmesi) değerinden küçük olması gerekmektedir. Kapak açılma zamanının video kayıtlarından incelenmesinden, bu sürenin 0.06-0.08 s. olduğu ve formülle hesaplanan değerin ise 0.2 s. olduğu ve ölçülen değerin bu değerden küçük olduğu görülmüştür. Böylelikle, ele alınan baraj yıkılması olayı, ani yıkılma olarak değerlendirilmiştir. Baraj yıkılması dalgasının video kayıtlarında daha kolay fark edilebilmesi ve net görünmesi için su içerisine gıda boyası ilave edilmiştir. Kuru yatak durumunda, kapak kaldırılmadan önce baraj rezervuarını temsil eden bölgede (kapak membası) su ile doldurulmuş, ıslak yatak durumunda ise kapak memba bölgesinin yanında kapak mansap bölgesinde α değerine bağlı olarak su derinliği hesap edilmiş ve bölge suyla doldurulmuştur. Mansap bölgesinde üçgen veya trapez engel bulunması durumunda, mansap bölgesinde herhangi bir kuyruk suyu bulunmamaktadır. Deneysel ölçümlere, akım tam

durgun hale geldikten sonra başlanmıştır. Kayar kapak membasındaki su derinliği, tüm yapı ve akım durumları için sabit h_0=25 cm olarak ayarlanmıştır.

Deneysel olarak baraj yıkılma dalgasının, yayılım zamanı (t) $(g/h_0)^{1/2}$ ifadesi ile çarpılarak ve yükseklikler ise memba su derinliği h_0 ile bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir boyutsuz hale getirilmiştir. Bu şekilde boyutsuz hale getirilen zaman ifadesi "T", yükseklikler ise "H" ifadesi ile temsil edilmiştir. Kuru yatak durumunda T= 1.13, 2,76, 3,88, 5,01 ve 6,64 olduğu durumlarda deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri incelenmiştir.

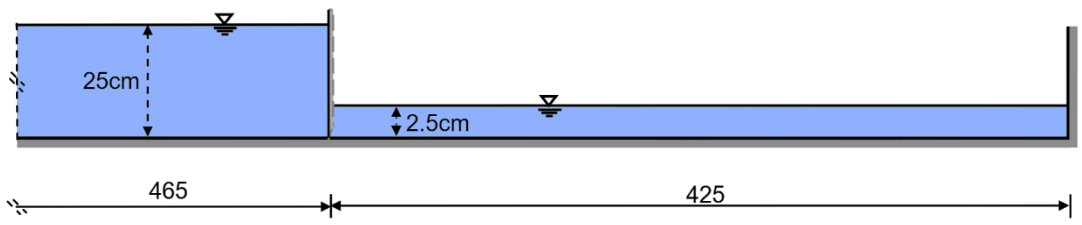


Şekil 3.1. Deney düzeneği ve şematik görüntüsü (Kocaman, 2007)



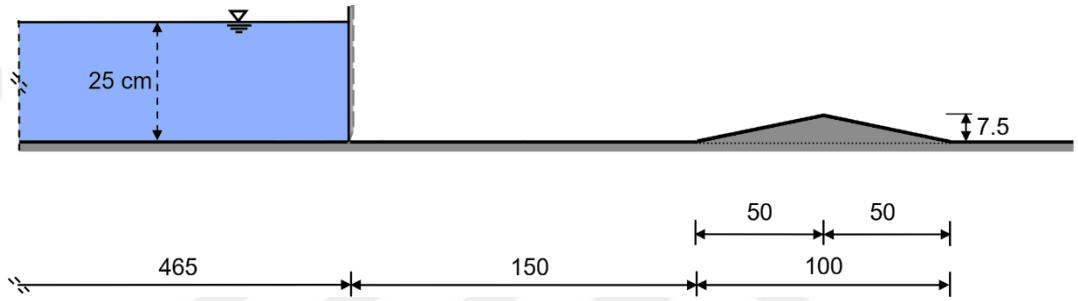
Şekil 3.1. **(devam)**

Kocaman (2007), tarafından yapılan deneylerde mansap bölgesinde farklı su yüksekliklerinde deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Üç farklı mansap suyu yüksekliği/memba yüksekliği oranına ($\alpha=h_1/h_0$) sahip ıslak yatak durumu Şekil 3.1.'de boyutları verilen kanalda deneyler yapılmıştır. Kapak memba ucundan 4.65m ve mansap ucundan 4.35 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Kuru yatak durumundan farklı olarak mansap derinliği oluşturabilmek ve taşkın koşullarını elde edebilmek amacıyla mansap ucu düşey bir kapak ile kapatılmıştır. Şekil 3.2.'de $\alpha=h_1/h_0=0.1$ derinlik oranı için kanal kesiti görülmektedir. Ayrıca, $\alpha=0.2$ ve 0.4 için de deneyler yapılmıştır. Deneylerde akım davranışının daha iyi izlenebilmesi için memba ve mansap kısmındaki akışkan farklı renkte boyanmıştır. Islak yatak durumunda T= 1.57, 2,38, 4,01, 6,51 ve 8,9 olduğu durumlarda deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri incelenmiştir.



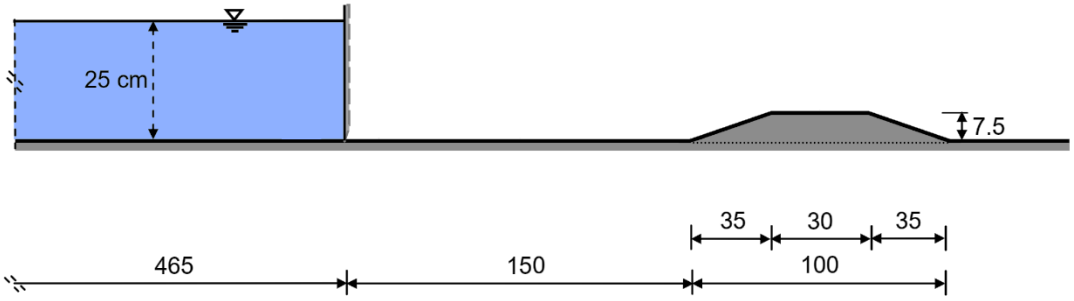
Şekil 3.2. $\alpha=h_1/h_0=0.1$ derinlik oranı için deney kanalı kesiti (Islak yatak)

Baraj mansabında üçgen engel bulunması durumunun incelenmesi için deneyler Şekil 3.3.'te görülen yatay dikdörtgen kesitli kanalda yapılmıştır. Kanal başlangıcından 6.15 m mesafeye, barajı temsil eden kapağın 150 cm mansabına taban genişliği 100 cm, kret yüksekliği 7.5 cm olan ikizkenar üçgen yerleştirilmiştir. Memba başlangıç derinliği 0.25 m olarak belirlenmiş ve mansap bölgesinde su bulunmaması (kuru yatak) durumu incelenmiştir. Kapak mansabında üçgen engel bulunması durumunda T= 11.9, 15.16, 17.54, 20.67, 23.05, 29.69, 35.83, 41.84, 49.99 ve 62.77 için deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri incelenmiştir.



Şekil 3.3. Baraj mansabında üçgen engel bulunması durumu için kanal kesiti

Yapılan çalışmada mansap bölgesinde farklı taban geometrilerinin yayılım dalgasına olan etkisini belirlemek amacıyla mansapta üçgen engel bulunması durumunun yanında trapez engel durumu da değerlendirilmiştir. Şekil 3.4.'te kapak mansabında trapez engel bulunması durumunun şematik görüntüsü verilmiştir. Baraj aksından (kapağın ön yüzünden) mansap bölgesinde 1.50 m mesafeye taban genişliği 100 cm, kret uzunluğu 30 cm ve kret yüksekliği 7.5 cm olan trapez bir engel yerleştirilmiştir. Mansapta üçgen engelin bulunması durumu ile karşılaştırma yapabilmek için trapez engelin taban genişliği, engel yüksekliği ve baraj aksından olan uzaklığı üçgen engel ile aynı seçilmiştir. Baraj mansabında trapez engel bulunması durumunda T= 11.9, 15.16, 17.54, 20.67, 23.05, 29.69, 35.83, 41.84, 49.99 ve 62.77 olduğu durumlarda elde edilen deneysel su yüzü profilleri incelenmiştir



Şekil 3.4. Baraj mansabında trapez engel bulunması durumu için kanal kesiti

Kuru yatak durumu atık barajlarında karşılaştığımız bir durumdur. Atık barajları özellikle madencilik faaliyetlerinde siyanürlü işlemlerden sonra atıkların doğrudan veya özel işlemlerle arıtılmakta ve bu işlemlerden sonra bu atıklar atık barajlarda depolanmaktadır. Bu atıkların, yeraltı suyuna ve su kaynaklarına karışması su kaynaklarının kirlenmesine neden olacaktır. Islak yatak durumları ise genelde akarsular üzerine inşa edilen barajlarda rastlanılan durumdur. α değerinin farklılık göstermesi ise pratikte mansap bölgesinde kuyruk suyu derinliklerinin değişiklik göstermesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Mansap bölgesinde farklı geometrik engellerin bulunması durumu ise farklı amaçlar inşa edilen ve mansabında yerleşim yerlerini temsil etmektedir.

3.2. Yöntem

Baraj yıkılması probleminde oluşan yayılım dalgası, iki boyutlu, sıkışmayan ve türbülanslı bir akım türüdür. Baraj yıkılması akımının hareketini idare eden temel eşitliklerden süreklilik eşitliği Denklem 3.1'de ve momentum eşitliği ise Denklem 3.2'de verilmiştir.

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) = \rho g_i - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{3.2}$$

Bu denklemlerde ifade edilen, $\overline{u_i}$ ortalama hız bileşenlerini, μ akışkanın dinamik viskozitesini, $\overline{p}$ ortalama basıncı, ρg_i yerçekiminin sebep olduğu kütlesel kuvveti, ρ akışkanın yoğunluğunu, t zamanı ve τ_{ij} ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir. Boussinesq yaklaşımına göre Reynolds gerilmeleri Denklem 3.3'teki gibi ifade edilir:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{3.3}$$

Burada, u_i' ve u_j' sırasıyla yatay ve düşey doğrultudaki türbülans hız sapınçları ve μ_t türbülans viskozitesi olup δ_{ij} Kronecker deltadır (i=j için δ_{ij} =1).

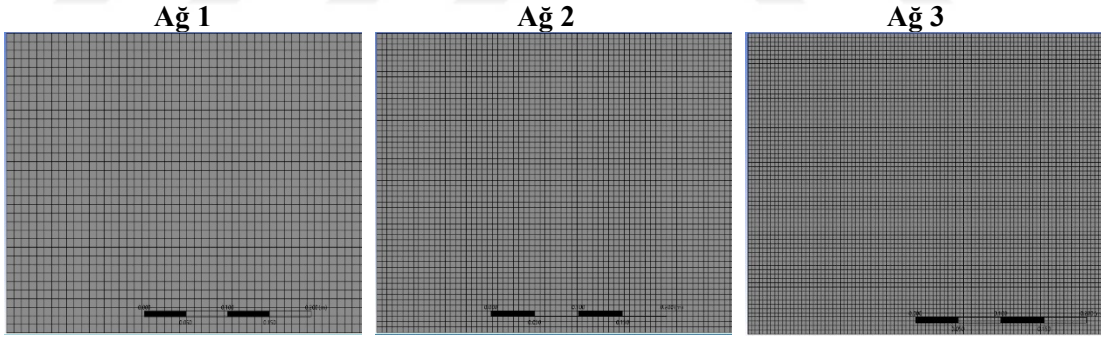
Yukarıdaki denklemler içerisinde, üç boyutlu akışta üç hız, bir basınç, altı türbülans kayma gerilmesi bileşeni bilinmeyen olarak bulunmaktadır. Akışın iki boyutlu olması durumunda ise bir adet hız bileşeni ve 3 adet türbülans gerilmesi bileşeni azalmakta ve bilinmeyen sayısı 6 olmaktadır. İki boyutlu akışta 6 adet bilinmeyene karşılık, bu bilinmeyenlerin çözümü için x ve y doğrultusundaki momentum denklemleri ve süreklilik denklemi olmak üzere 3 adet denklem bulunmasından dolayı bu bilinmeyenlerin çözümü mümkün olmamaktadır. Denklem içindeki bilinmeyenlerin çözümünün yapılabilmesi için Denklem 3.3'te bulunan türbülans viskozitesinin çözülmesi için farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen türbülans kapatma modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, μ_t türbülans viskozitesinin modellenmesi için Yakhot ve ark.(1992) tarafından geliştirilen, türbülans kinetik enerji (k) ve kinetik enerji kayıp oranı (ε) denklemlerini çözen RNG k-ε türbülans kapatma modeli, Menter (1992) tarafından, k ve türbülans kinetik enerji özgül kayıp oranı (ω) denklemlerini çözen Kayma Gerilmesi Taşınım (Shear Stress Transport-SST) modeli ve katı sınır üzerinde sınır tabakasında kararsız RANS tabanlı çözüm yaparken, ayrılmış bölgelerde LES'i kullanan Ayrılmış Girdap Modeli (Detached Eddy Simülasyonu-DES) kullanılmıştır Menter (1994), Kullanılan türbülans kapatma modellerinden, RNG akımda meydana gelen ayrılmaların ve eğriselliğin bulunması durumunda standart k-ε (SKE) modeline kıyasla başarılı olduğu

modeli geliştiren araştırmacılar tarafından iddia edilmiştir. SST modeli ise türbülans viskozitesinin hesabında, serbest kayma akışlarında ise standart k-ε modelini, sınır tabaka içerisinde orijinal k-ω modelini kullanmasından dolayı hibrit bir modeldir. Her iki modelin üstünlüklerinin bir arada kullanılmasını sağlamasından dolayı SST modeli, akımda ayrılmaların ve ikincil akımların söz konusu olduğu ve hız değerlerinin oldukça hızlı değiştiği akım durumlarında başarılı olduğu belirtilmiştir. DES modelinde ise hesaplama maliyetleri, LES hesaplama maliyetlerinden daha az, ancak RANS'tan daha yüksektir. Her iki modelin bir arada bulundurulmasından dolayı bu DES modeli de hibrit bir model olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, DES modelinin karmaşık akım problemlerinin çözümünde oldukça başarılı sonuçlar verdiği ve LES kadar küçük ağ elemanlarından oluşan hesaplama ağına ihtiyaç duymadığı belirtilmektedir.

Sayısal modellemelerde iterasyon adımı büyüklüğü, Courant sayısının ikiden küçük olması durumunun sağlandığı değer olarak sayısal modellemede kullanılan ANSYS -Fluent paket program tarafından belirlenmiştir. Hesaplama adımları arasında yapılan iterasyon sayısı olarak 10 kullanılmıştır. İterasyon adımlarında akımla ilgili parametrelerin yakınsama kriteri olarak 0.00001 kullanılmıştır. Eğer çözülen parametre bu değere kadar yakınsamış ise 10 iterasyon yapılmadan bir sonraki hesaplama adımına geçilmiştir.

Baraj yıkılma dalgasının hava ile ara kesitinin belirlenmesinde, farklı akım koşullarına sahip problemlerin çözümünde oldukça başarılı olan Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF) kullanılmıştır. Akışkan hacimleri yönteminde, “F” ile ifade edilen hesaplama ağı elemanın hacimsel doluluk oranı tanımlanmaktadır. Hesaplama ağı elemanının su ile tamamen dolu olması durumunda F=1 olurken, havayla tamamen dolu olması durumunda ise F=0 olmaktadır. Su ile havanın ara kesitinin bulunduğu bölgede ise F değeri hücrenin doluluk oranına göre sıfır ile bir arasında değişen bir değer almaktadır. “Geo-Reconstruct” yaklaşımı, akışkan hacimleri yöntemi ile serbest su yüzünün hesaplanmasında kullanılmıştır (ANSYS, 2018). Sayısal modellemelerde hesaplama ağı tasarımının sayısal modelleme sonuçları üzerinde etkisinin olduğu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemine dayalı çözüm

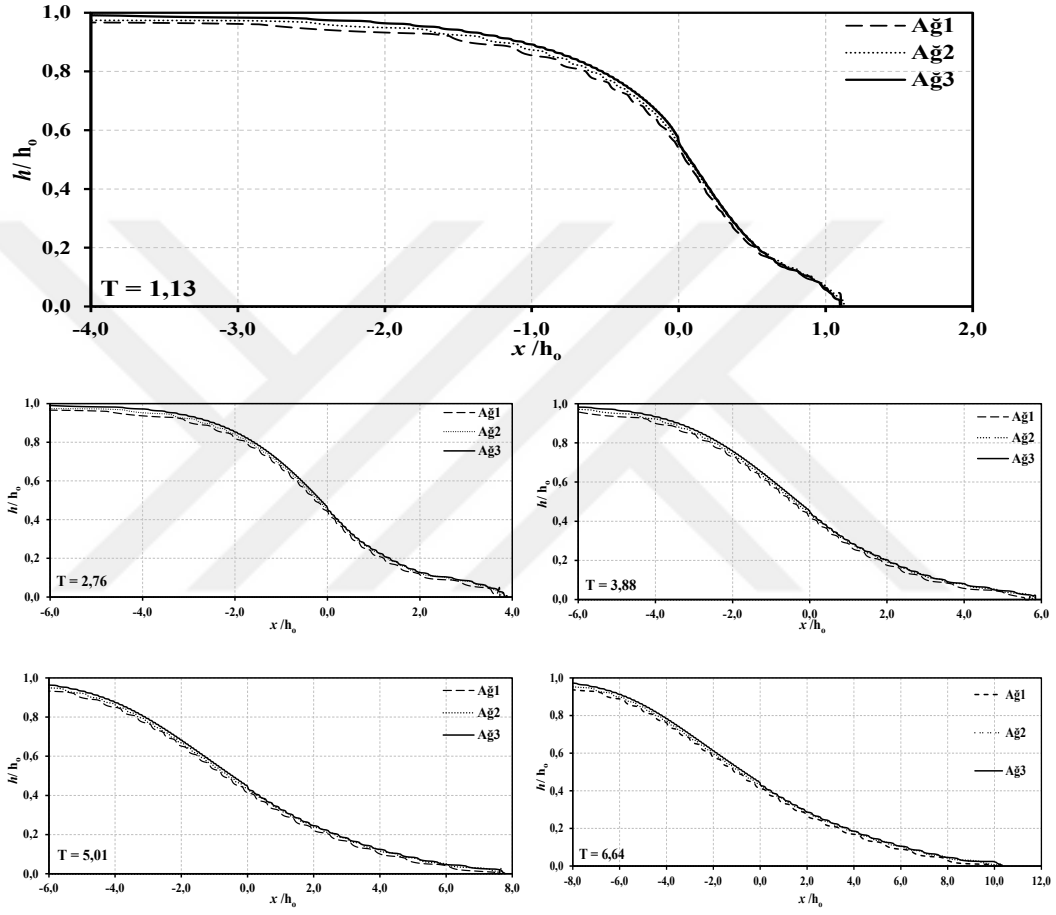
yapan araştırmacılar tarafından bilinmektedir. Hesaplama ağının sayısal çözümler üzerinde etkisinin olup olmadığının belirlenmesi için üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı tasarımı yapılmasını zorunluluğu olan Ağ Yakınsama Yöntemi (Grid Convergence Index- GCI) oldukça sık kullanılmaktadır (Aköz ve ark., 2016). GCI yönteminin uygulanması için üç farklı hesaplama ağı tasarımı gerekmekte olup, bu çalışmada tasarlanan hesaplama ağlarına ait görüntüler Şekil 3.5.'te verilmiştir. En büyük ağ elemanlarından oluşan hesaplama ağı Ağ1, en küçük ağ elemanlarından oluşan hesaplama ağı ise Ağ3 olarak adlandırılırken, bu iki ağ elemanına göre orta büyüklükte ağ elemanına sahip hesaplama ağı ise Ağ2 olarak adlandırılmıştır. Bu üç farklı hesaplama oluşturulurken çözüm bölgesinin sınırlarında bulunan eleman sayıları %50 oranında arttırılmıştır. Bu üç farklı hesaplama ağında Ağ1'de 1000x35=35000 adet, Ağ2'de 1500x55=82500 adet ve Ağ3'te ise 2000x70=140000 adet dikdörtgen elaman bulunmaktadır. Verilen ilk değer çözüm bölgesinin *x* boyutunda bulunan eleman sayısını, ikinci eleman ise *y* doğrultusunda bulunan eleman sayısını ifade etmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere Ağ3 en sıkı ağ yapısına sahip iken, Ağ1 en kaba ağ yapısına sahiptir.



Şekil 3.5. Farklı yoğunluklu hesaplama ağı tasarımları

Üç farklı eleman boyutuna sahip hesaplama ağı kullanılarak farklı zaman adımlarında elde edilen sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması Şekil 3.6.'da verilmiştir. Su yüzü profilinin değişim gösterdiği bölgede, farklı yoğunluktaki hesaplama ağları kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri arasındaki farklılıkların belirgin olmasından dolayı bu bölge şekillerde detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 3.6.'da verilen grafikler incelendiğinde, Ağ1 kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin diğer hesaplama ağları kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinden

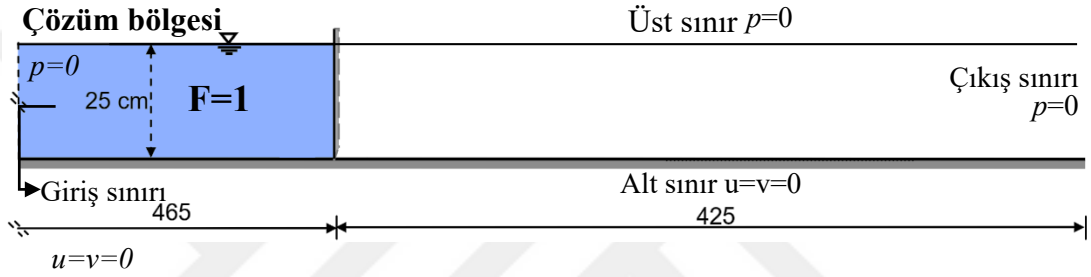
düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bunun yanında, Ağ2 ve Ağ3 kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri arasında fark oldukça küçüktür. GCI analizi sonucunda elde edilen değerlerden, ağ yapısının sayısal sonuçlar üzerindeki etkisinin oldukça kısıtlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle sayısal modellemelerde Ağ3 hesaplama ağı kullanılmıştır.



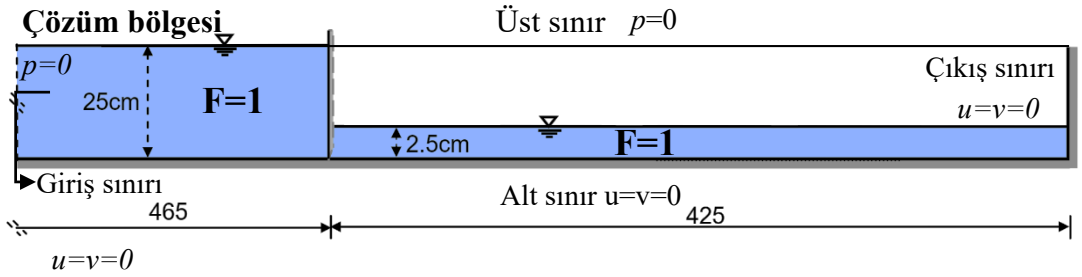
Şekil 3.6. Farklı hesaplama ağlarıyla elde edilen sayısal su yüzü profilleri

Sayısal modellemelerde kullanılan sınır ve başlangıç şartları, kuru yatak durumu için Şekil 3.7.'de, mansap/memba su derinlik oranının 0.1 olduğu ıslak yatak durumu için ise Şekil 3.8.'de verilmiştir. Farklı mansap/memba su derinlikleri oranlarına ait başlangıç ve sınır şartlarının α=0.1 durumuyla benzer olmasından dolayı diğer α oranları için başlangıç ve sınır şartları detayları verilmemiştir. Çözüm bölgesinin giriş sınırında F=1 verilerek, akımın kanal girişine doğru (negatif yönde) yayılımı engellenmiş ve baraj rezervuarında su depolanması temsil edilmiştir. Çözüm

bölgesinin diğer kısımlarında F=0 olarak tanımlanmıştır. Çözüm bölgesinin üst sınırında ise p=0 koşulu verilmiş olup, akımın bu bölgeden serbest dökülmesi sağlanmıştır. Kanal alt tabanında ve çıkış sınırında kapağın olduğu akım durumlarında ise u=v=0 m/s olarak, çıkış sınırında kapağın bulunmadığı durumlarda ise çıkış sınırında p=0 olarak sınır şartı tanımlanmıştır. Çözüm bölgesinde baraj haznesini temsil etmek üzere ilgili olan su ile doldurulmuş (F=1) olup, baraj yıkılmasının simülasyonu bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerin elde edildiği akış sürelerinde sayısal modellemeden kayıtlar alınarak, aynı zaman diliminde deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılması sağlanmıştır.

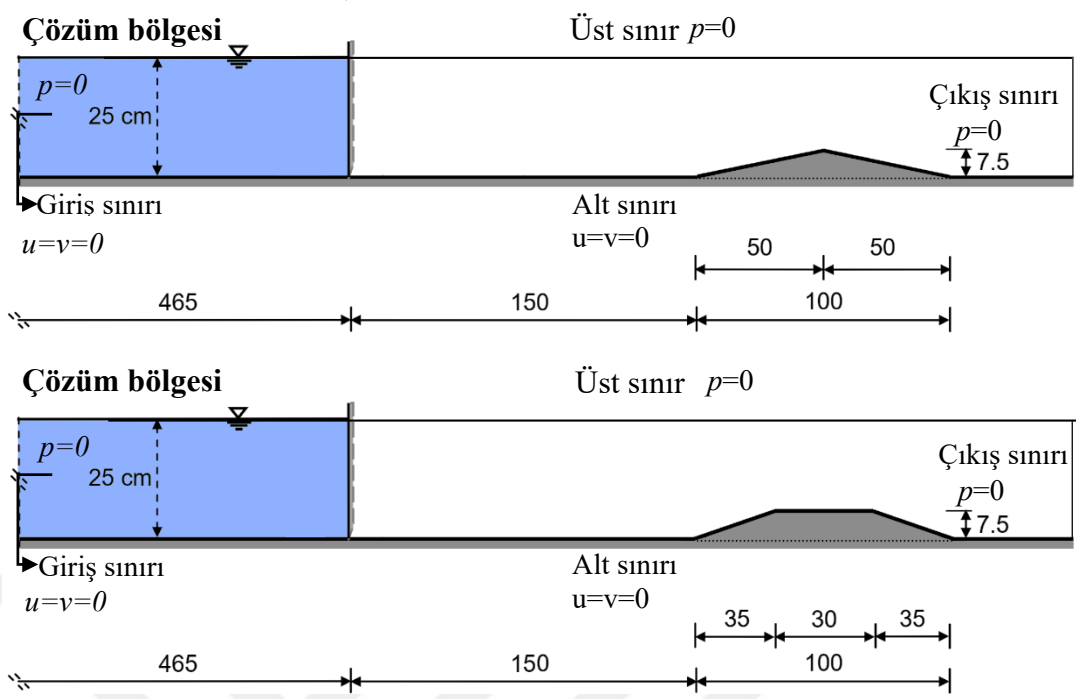


Şekil 3.7. Kuru yatak durumunda çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları



Şekil 3.8. Islak yatak durumunda çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları (α=0.1)

Barajı temsil eden kapağın mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumunda sayısal modellemelerde kullanılan çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları Şekil 3.9.'da verilmiştir. Kuru ve ıslak yatak durumuna benzer olarak tanımlanan başlangıç ve sınır şartlarının yanında engellere ait sınırlar duvar yani u=v=0 m/s olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.9. Baraj mansabında engel bulunması durumunda çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları

Bu çalışmada gerçekleştiren sayısal modellemeler, kanal genişliğinin 30 cm, yüksekliği 35 cm ve uzunluğu 9 m olan yatay açık kanalda ve memba su yüksekliğinin 25 cm olduğu durumlarda yapılmıştır. Mansap bölgesinde bulunan engellerin kret yüksekliği 7.5 cm ve taban genişliği 100 cm'dir. Belirtilen özellikler bu çalışmanın kısıtlarıdır.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Farklı α değerleri ve mansap bölgesinde farklı geometriye sahip engellerin bulunmasına bağlı olarak baraj yıkılma dalgasının yayılımı değişiklik gösterebilmektedir. Mansap kısmının kuru olması durumu ve genellikle mansapta belirli bir kuyruk suyu derinliği olduğu gerçeği göz önüne alındığında, bu çalışmada kuru, ıslak yatak ve mansabında farklı geometrik engeller bulunması durumlarında pürüzsüz, yatay ve dikdörtgen kesitli bir açık kanalda meydana gelen baraj yıkılma problemleri ele alınmıştır.

Baraj yıkılması sonucunda oluşan yayılım dalgasının profilinin ve herhangi bir noktada oluşan yıkılma dalgasının hızının bilinmesi, alınacak önlemlerin belirlenmesinde önem arz etmektedir. Ayrıca, akım derinlikleri yayılım dalgasından korunmak üzere inşa edilen yapıların boyutlarının belirlenmesinde en önemli parametrelerdir. Bunun yanında, baraj yıkılma dalgasının önünde oluşan akım hızının belirlenmesi, mansap bölgesinde bulunan yerleşim yerlerinin ve tesislerin tahliye süresinin hesaplanmasında, yayılım dalgasının hangi zamanda nerede olacağı ve yerleşim yerlerine ulaşım zamanının belirlenmesinde özellikle önem arz etmektedir. Kocaman (2007) tarafından laboratuvar ortamında deneysel olarak ve farklı türbülans modelleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen yayılım dalgasının su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Türbülans modellerinin yayılım dalgasının profilini tahmin etme başarısının belirlenmesinde başarı kriteri olarak Denklem 4.1 ve 4.2'de sırasıyla verilen Ortalama Mutlak Göreceli Hata ve Ortalama Karesel Hata değerleri kullanılmıştır.

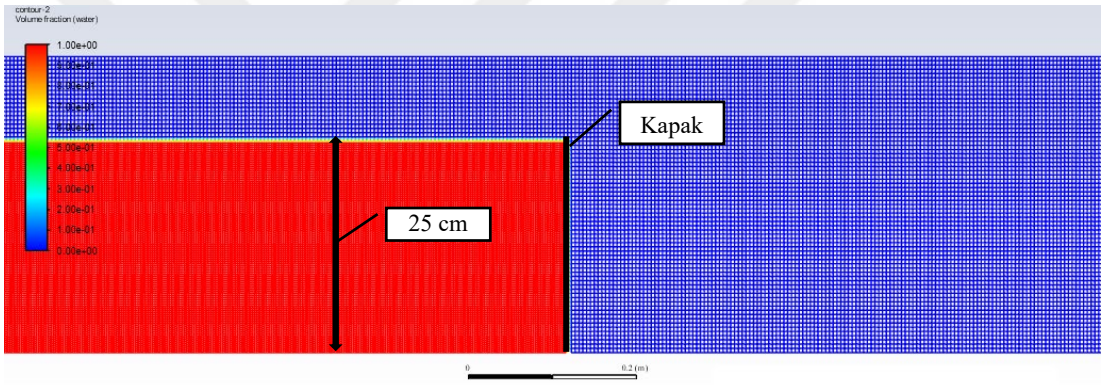
$$OMGH = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\frac{|H_d - H_h|}{H_d} \tag{4.1}$$

$$OKH = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(H_d - H_h)^2 \tag{4.2}$$

Denklemlerde bulunan H_d (h_d/h_0) deneysel sonucu, H_h (h_h/h_0) sayısal sonucu, N ise kullanılan parametre sayısını temsil etmektedir.

4.1. Kuru Yatak Durumu (α=0)

Kuru yatak durumunda sayısal modellemede kullanılan çözüm bölgesi, başlangıç şartları ve hesaplamalarda kullanılan hesaplama ağ yapısı Şekil 4.1.'de verilmiştir. Verilen şekilde kırmızı renkli görülen kısım suyu ifade eder iken, mavi renkli olan kısım ise havayı ifade etmektedir. Su hava arakesitinin belirlenmesinde kullanılan akışkan hacimleri yöntemine ait değişim de sarı renkli olarak görülmektedir (mavi- kırmızı geçişi).



Şekil 4.1. Kuru yatak durumunda memba derinliği ve mansap kısmını gösteren mesh görüntüsü

Farklı türbülans modelleri kullanılarak çeşitli akış zamanlarında elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda elde edilen OMGH ve OKH değerleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Çizelgede bulunan OKH ve OMGH değerlerinin parantez içinde verilen üst indisleri, kullanılan modellerin başarı sıralamasını göstermektedir. Tüm türbülans modellerinde farklı zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalaması tablonun son satırında verilmiştir. Tabloda verilen değerler incelendiğinde, T=1.13 için OKH kriterine göre RNG modeli deneysel verilere en yakın tahminde bulunurken, OMGH kriterine göre ise bu akım zamanında DES modeli deneysel profile en yakın tahminde bulunmuştur. T=3.88 için ise bu durumun tam tersi söz konusu olmakta OKH kriterine göre DES modeli, OMGH kriterine göre ise RNG türbülans modeli en başarılı model olmaktadır. Bu çözüm

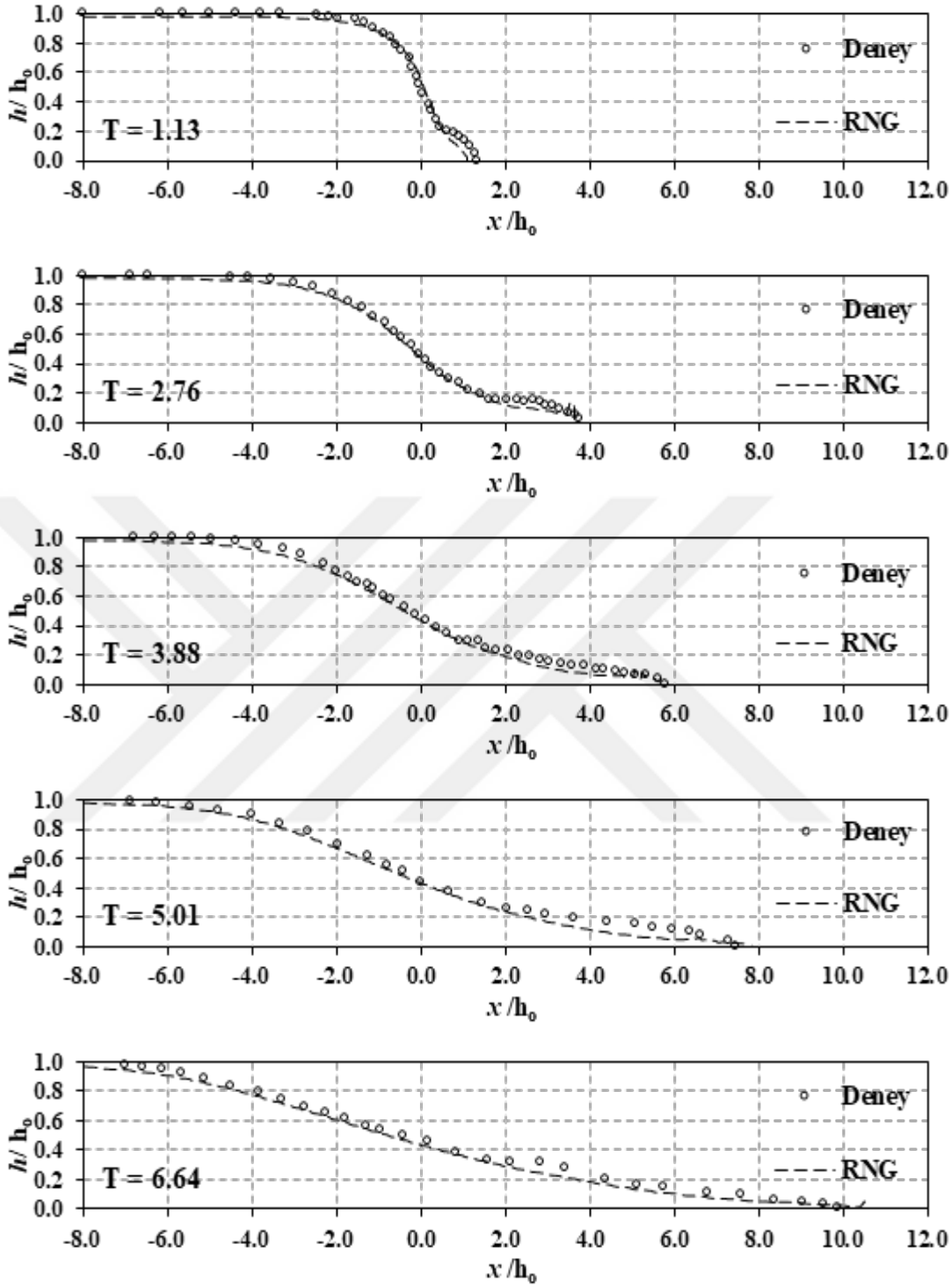
adımları dışında ele alınan tüm akış zamanlarında (T=3.88, 5.01 ve 6.64), DES modeli her iki başarı kriterine göre deneysel verilere en yakın sayısal su yüzü profilini belirlendiği elde edilen OKH ve OMGH değerlerinden anlaşılmaktadır. Ayrıca, tablonun son satırında verilen tüm ele alınan akış zamanlarının ortalaması alınarak elde edilen OKH ve OMGH değerleri incelendiğinde, her iki başarı kriterine göre DES modelinin en başarılı model olduğu ve türbülans modellerinin başarısı sıralamasının OKH kriterine göre DES, SST ve RNG şeklinde, OMGH kriterine göre ise bu sıralama DES, RNG ve SST şeklinde oluşmuştur. Elde edilen değerlerin karşılaştırılmasından deneysel su yüzü profillerinin sayısal olarak belirlenen su yüzü profilleri arasında ortalama OMGH değerlerine göre %10'dan daha küçük fark bulunduğu ve kullanılan tüm modellerin birbirine oldukça yakın tahminde bulunduğu söylenebilir. Kullanılan modeller arasında OMGH değerlerine göre yaklaşık %1 fark bulunmasından dolayı, kuru yatak durumunda sayısal modellemelerde bu çalışmada kullanılan herhangi bir türbülans modelinin kullanabileceği söylenebilir. Bu sonucun ortaya çıkmasında, sayısal modellemelerde tercih edilen RNG, SST ve DES türbülans modellerinin eğri yörüngeli akımlarda ve akım alanında eğriselliğin bulunduğu akım problemlerinin modellemesinde başarılı olmasından dolayı olduğu değerlendirilmektedir. Şekil değiştirme hızı tensörünün bu türbülans modellerinde dikkate alınması başarılı sonuçları elde edilmesinde etkin olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.1. Kuru yatak durumunda farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri

Model	**RNG**		**SST**		**DES**	
T	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**
1.13	5.69760(2)	0.00056(1)	6.42130(3)	0.00072(3)	5.58780 (1)	0.00059(2)
2.76	7.65670(3)	0.00052(3)	5.83050(2)	0.00047(2)	5.18320(1)	0.00028(1)
3.88	9.99890(1)	0.00087(3)	10.67420(3)	0.00086(2)	10.11750(2)	0.00058(1)
5.01	13.85630(2)	0.00140(3)	15.45020(3)	0.00130(2)	13.12760(1)	0.00129(1)
6.64	10.70490(3)	0.00127(3)	9.87500(2)	0.00117(2)	9.15610(1)	0.00093(1)
Ort.	9.58288(2)	0.00093(3)	9.65024(3)	0.00090(2)	**8.63444(1)**	**0.00073**(1)

RNG türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen su yüzü profillerinin, Kocaman (2007) tarafından deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.2.'de verilmiştir. Verilen şekiller incelendiğinde,

T=1.13 için elde edilen sayısal ve deneysel yüzü profilleri arasında çok az bir farklılığın bulunduğu görülmektedir. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasında farklılıklar genel olarak kanal tabanına yakın olan bölgede görülmektedir. Çizelge 4.1.'de de RNG modeline ait OKH ve OMGH değerlerinden görüleceği üzere en çok uyumsuzluk T=5.01 anında olmakla beraber, T=5.01 ve 6.64 akış zamanı dışında kalan akış zamanında elde edilen su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 4.2. Kuru yatak durumunda deneysel ve RNG ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması

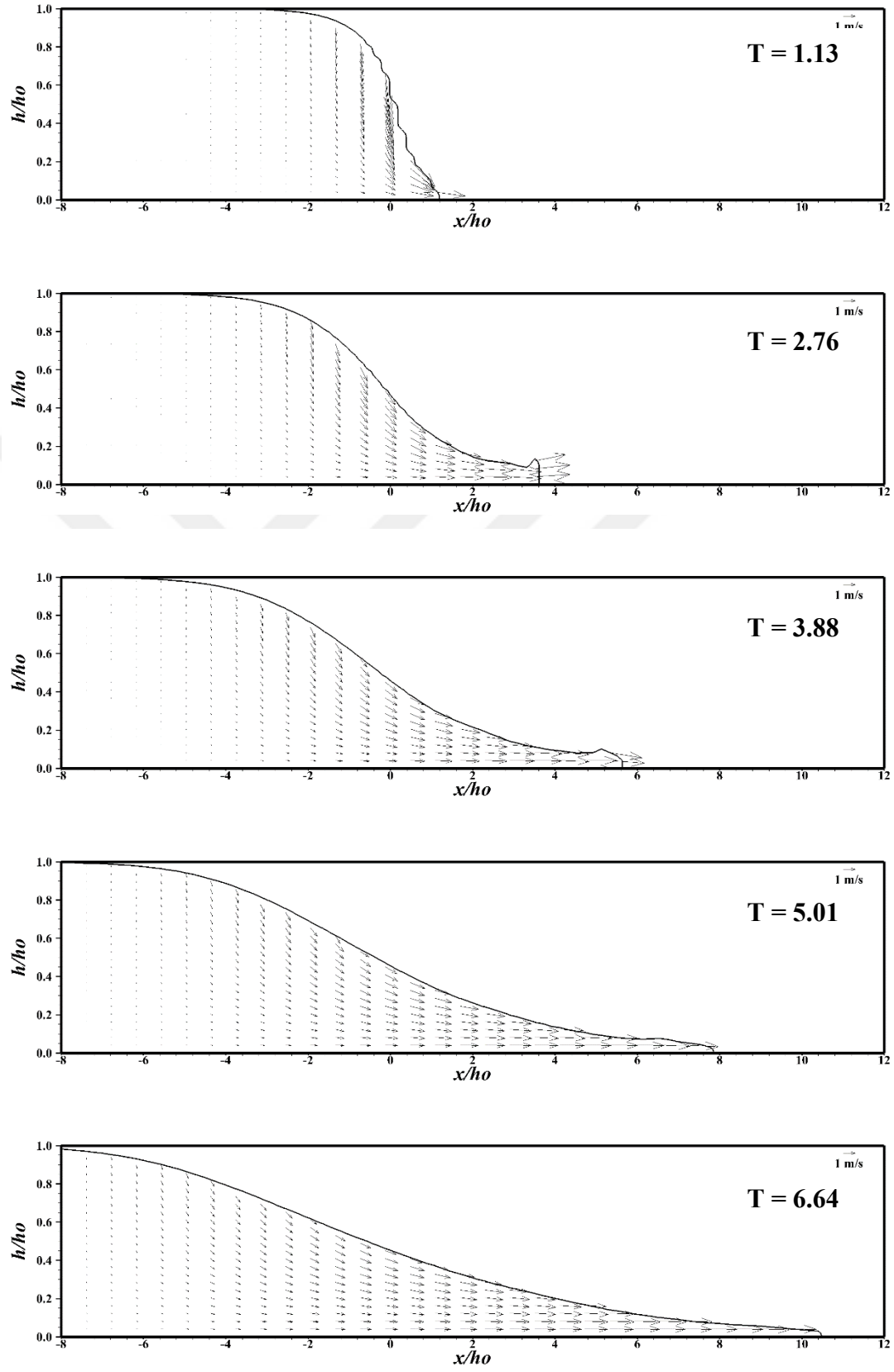
Kuru yatak durumunda RNG türbülans modeliyle sayısal olarak elde edilen hız vektörlerinin desenleri Şekil 4.3.'te verilmiştir. Şekiller incelendiğinde baraj yıkılmasının ilk anlarında elde edilen hız vektörlerinin kütlesel kuvvetlerin etkisiyle y

doğrultusunda aşağı yönlü oluştuğu görülmektedir. Baraj dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle y doğrultusunda düşey yönde oluşan hız vektörlerinin x doğrultusuna doğru değişim gösterdiği ve büyüklüklerinin arttığı söylenebilir. Hesaplama zamanının artmasıyla kuru yatak üzerinde meydana gelen hız vektörlerinin büyüklüğünün arttığı belirlenmiştir. T=6.64 durumunda kanal giriş kesitine doğru akımın henüz harekete geçmediği elde edilen hız vektörlerinin deseninden görülmektedir.

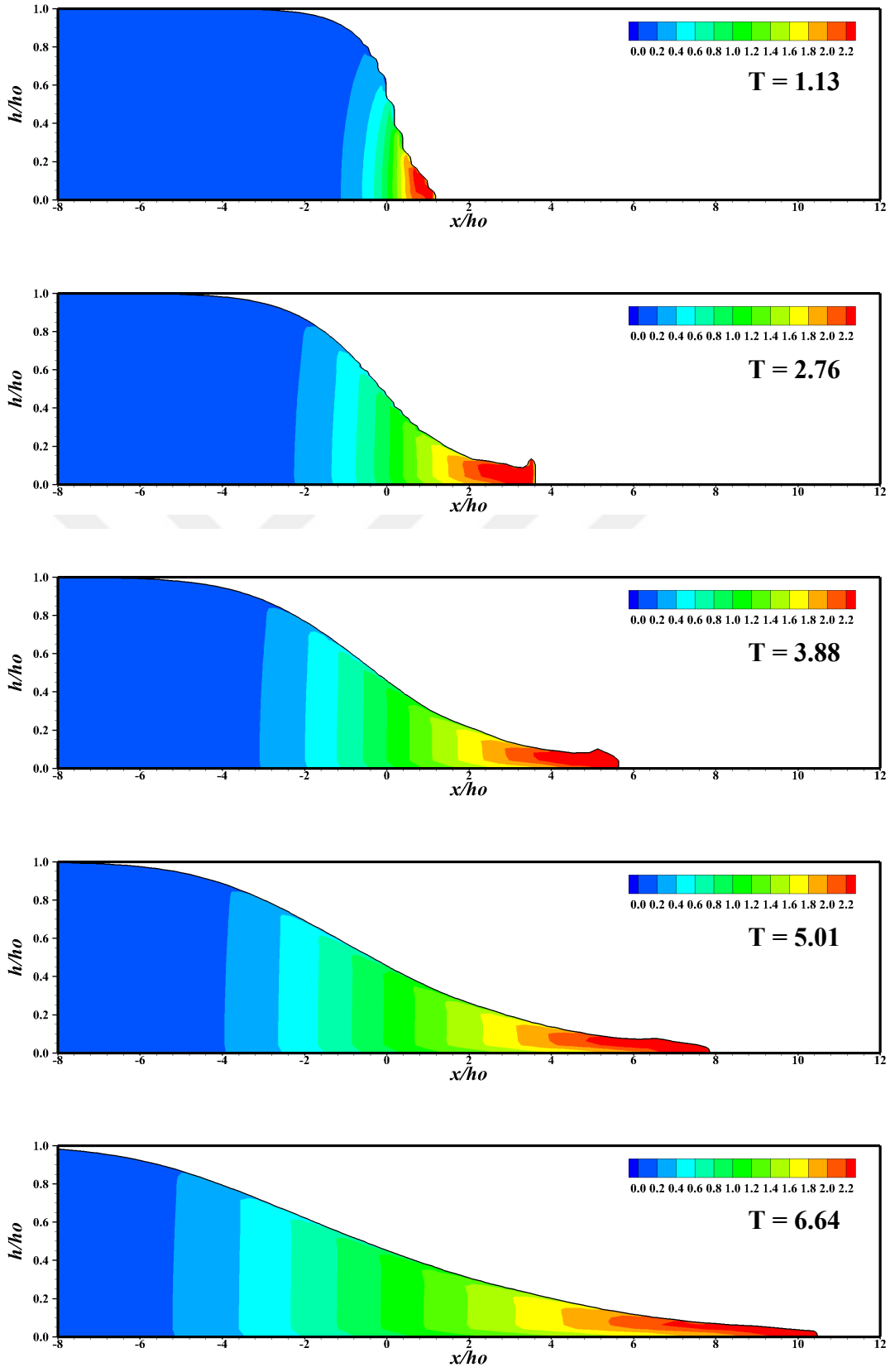
Şekil 4.4.'te, RNG türbülans modeli ile kuru yatak durumunda sayısal modelleme sonucunda farklı zamanlarda elde edilen x doğrultusundaki hız bileşenine ait desenler görülmektedir. Farklı çözüm zamanlarında elde edilen hız desenlerinden, baraj yıkılma dalgasının hız alanında 2.2 m/s'den daha büyük hızların, yayılım dalgasının önünde oluştuğu görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle, maksimum hızın oluştuğu bölgenin büyüdüğü açıkça görülmektedir. Bunun yanında, baraj yıkılma dalgasının hız alanında bulunan eğriselliğin yıkılma başlangıcında oldukça belirgin olduğu, yayılım dalgasının yatay yatak üzerinde ilerlemesiyle bu eğriselliğin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, yayılım dalgasının ele alınan akış zamanlarında tüm hız alanının harekete geçmediği görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının yatay kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle kanal tabanı üzerinde viskoz kuvvetlerin etkisinin arttığı da söylenebilir.

Kuru yatak durumunda, RNG modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenleri Şekil 4.5.'te verilmiştir. Farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerji dağılımlarının incelenmesinden, baraj yıkılması dalgasının uç noktasında hızda meydana gelen değişimden dolayı bu noktada büyük türbülans kinetik enerjisinin oluştuğu görülürken, zamanın akış zamanının artmasıyla kuru yatak üzerinde ilerleyen yayılım dalgasının kanal tabanı üzerinde hız değişiminin daha da arttığı görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle birlikte 0.2 m^2/s^2 değerinden daha büyük türbülans kinetik enerjisinin oluştuğu görülmektedir. Yayılım dalgasının yayılım süresinin artmasıyla, katı sınırla etkileşim bölgesinde elde edilen türbülans kinetik enerjisi değerlerinin arttığı, hava su arakesitinde bu duruma benzer bir oluşumdan söz edilebilir. Ayrıca, akış zamanının

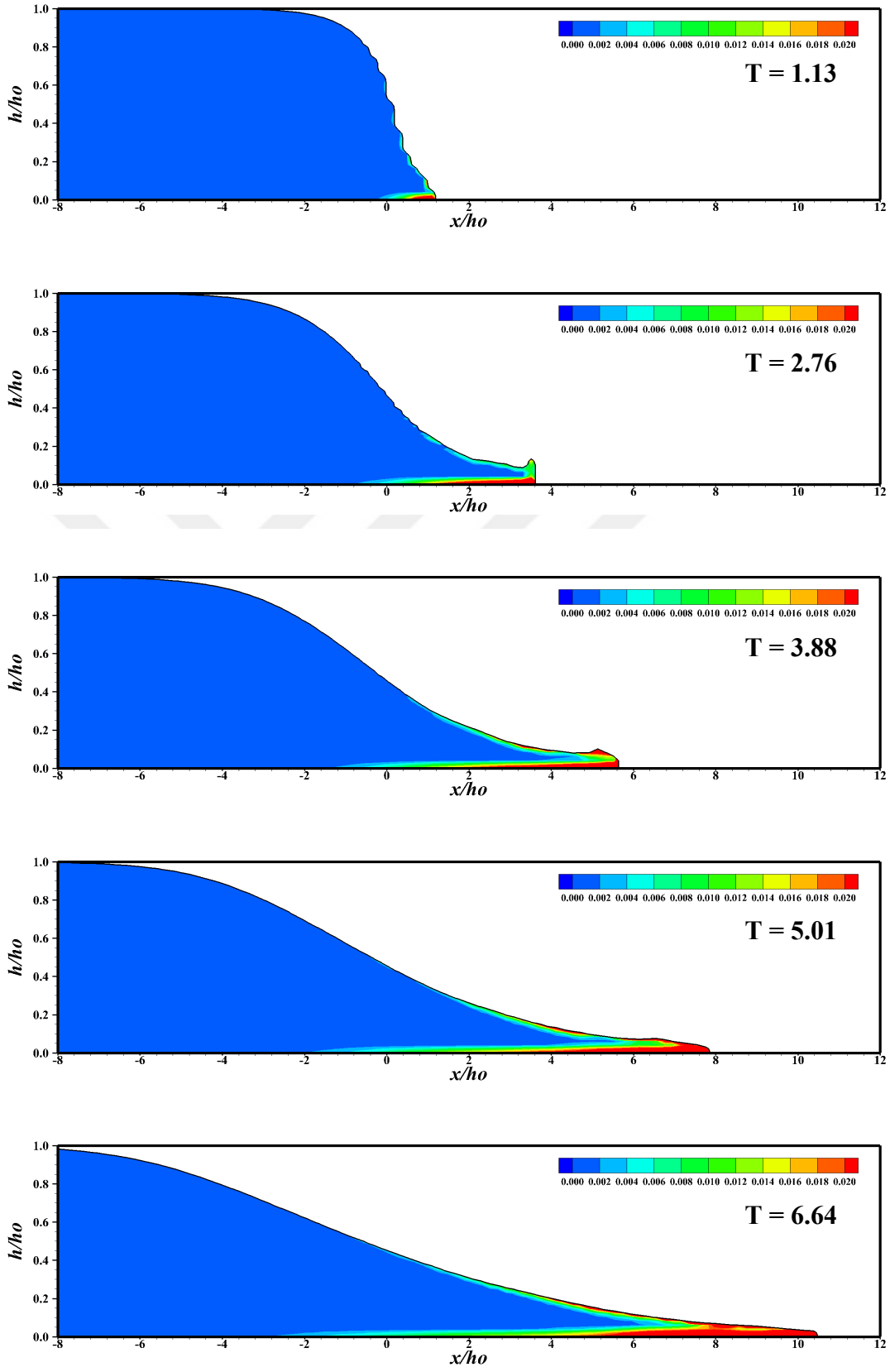
artmasıyla bu bölgenin büyüdüğü ve hız alanında meydana gelen değişim yayılım dalgasının ön noktasında oldukça büyük olduğu türbülans kinetik enerji desenlerinden görülmektedir.



Şekil 4.3. Kuru yatak durumunda RNG ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



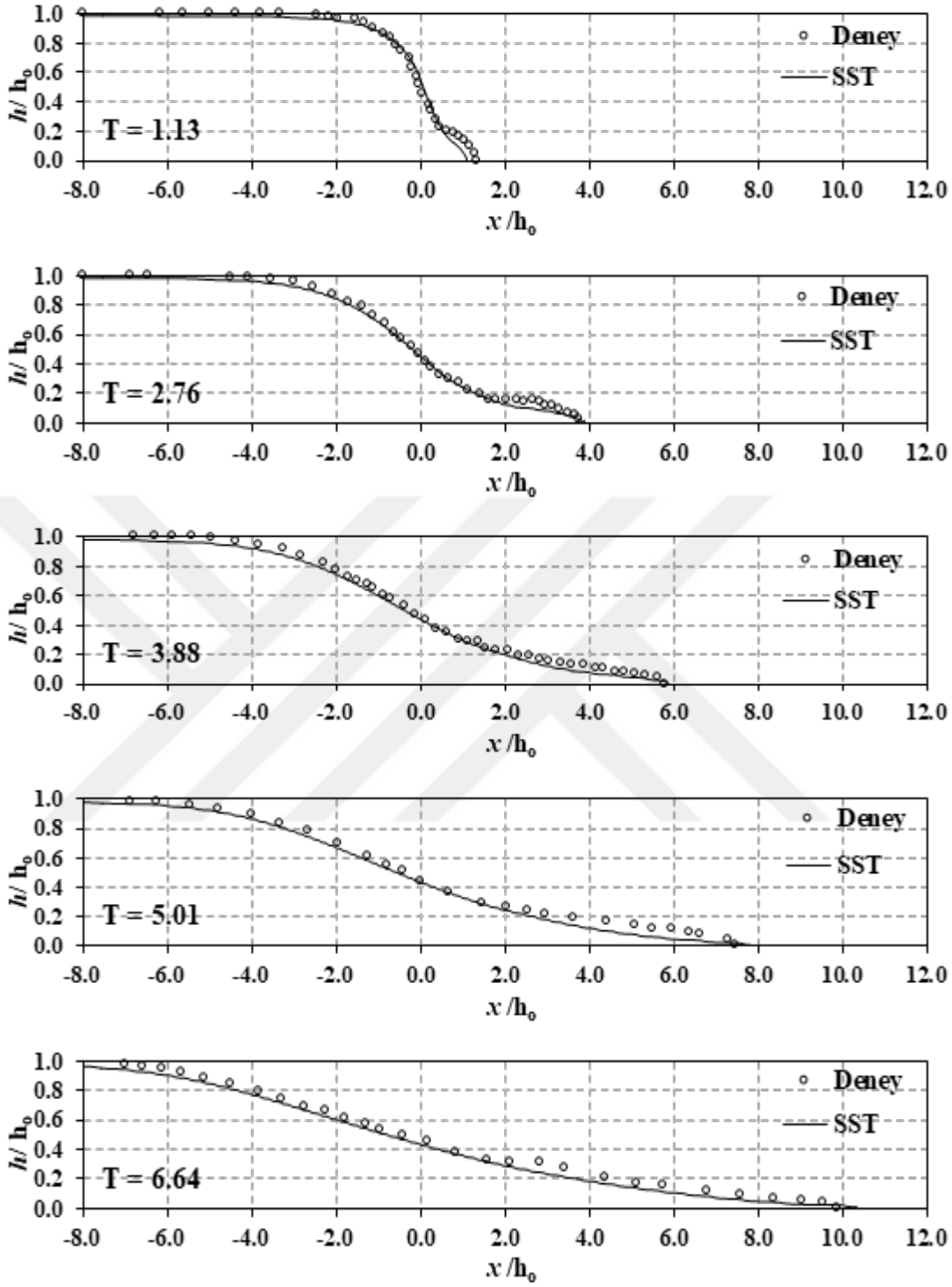
Şekil 4.4 Kuru yatak durumunda RNG ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



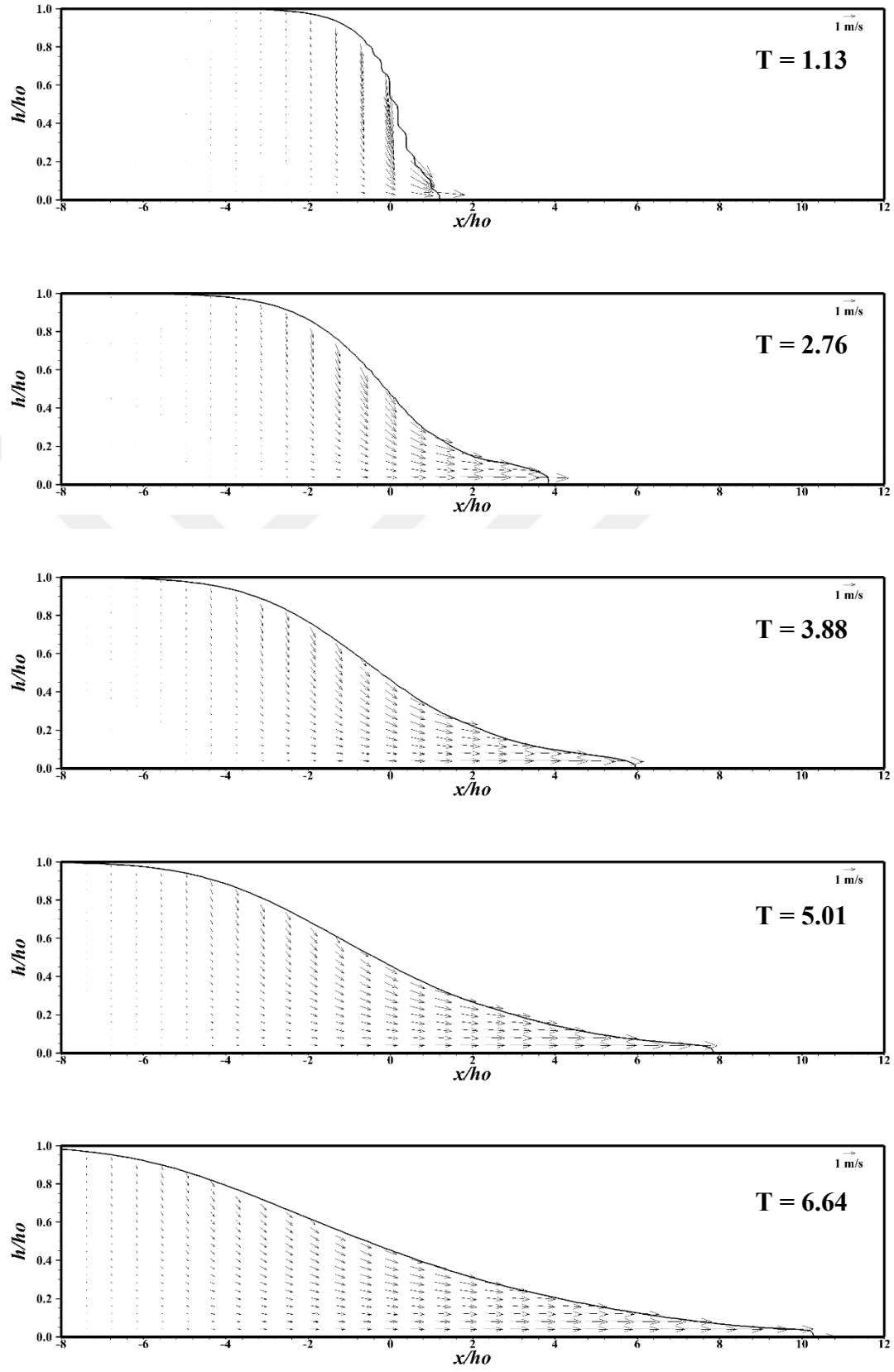
Şekil 4.5. Kuru yatak durumunda RNG ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

SST modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen su yüzü profillerinin, Kocaman (2007) tarafından elde edilen deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.6.'da verilmiştir. Verilen şekiller incelendiğinde, T=1.13 için elde edilen sayısal ve deneysel yüzü profilleri arasında sadece kanal tabanına yakın kısımda ($0\leq x/h_0 \leq 2$) çok az bir farklılığın bulunduğu görülmektedir. T=2.76 ve 3.88 zamanlarında ise deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumsuzluğun en çok T=5.01 anında x/h_o değerinin 2 ile 8 arasında değiştiği kısımda olduğu görülmektedir. Deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin arasındaki uyumsuzluğun genellikle yayılım dalgasının ön yüzünden başlayarak kanal başlangıcına doğru azaldığı söylenebilir.

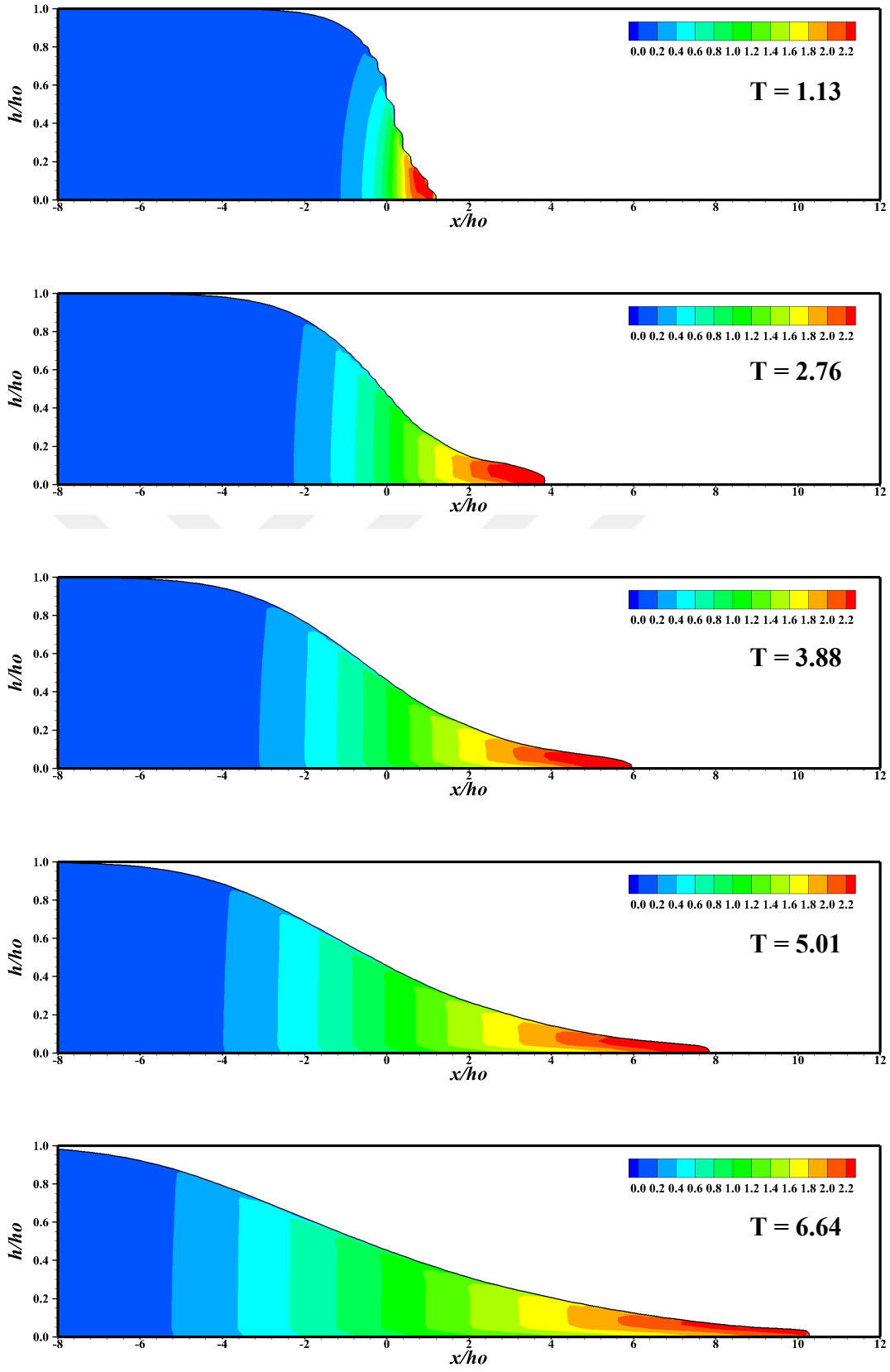
Kuru yatak durumunda, SST modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız vektörleri, yatay hız bileşeni ve türbülans kinetik enerjisi desenleri sırasıyla Şekil 4.7., 4.8. ve 4.9.'da verilmiştir. SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen desenlerin genel olarak RNG modeliyle elde edilen sonuçlara benzer olduğu değerlendirilmektedir. Tüm akış zamanlarında, yatay hız bileşenin en büyük değerinin yayılım dalgasının önünde oluştuğu, en büyük türbülans kinetik enerji değerinin de bu hız dağılımına benzer şekilde yayılım dalgasının önünden kanal başlangıcına doğru azalarak alanının küçüldüğü görülmektedir. Ayrıca, yayılım dalgasının henüz harekete geçmediği ($-8\leq x/h_o \leq -5$) bölgede herhangi bir viskoz kuvvetin oluşmadığı ve bu bölgede türbülans kinetik enerji belirlenmemiştir. Bunun yanında yayılım dalgasının kanal üzerinde ilerlemesiyle akım alanında viskoz gerilmelerin etkisinin arttığı söylenebilir.



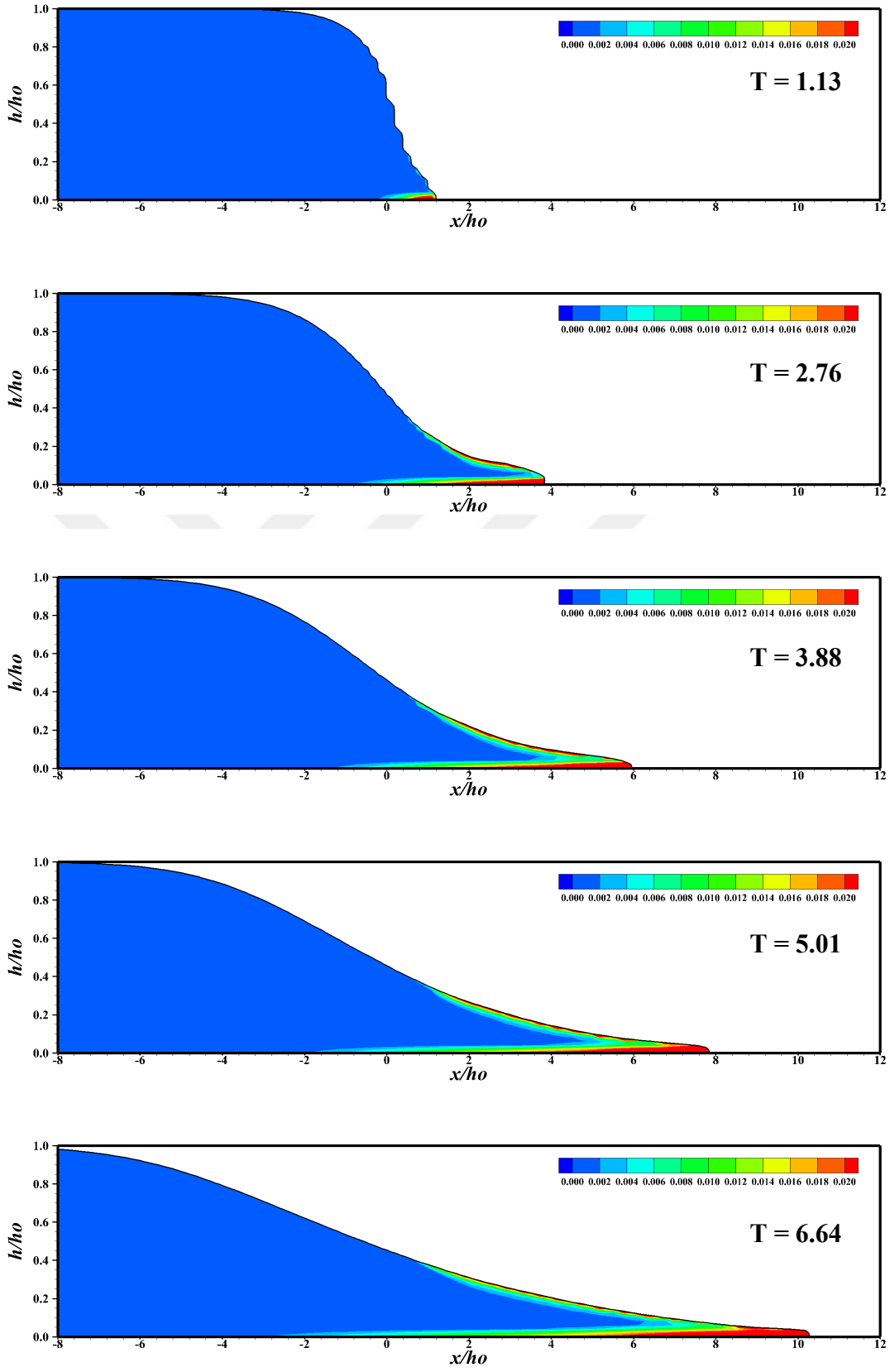
Şekil 4.6. Kuru yatak durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.7. Kuru yatak durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



Şekil 4.8. Kuru yatak durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.9. Kuru yatak durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

Kuru yatak durumunda, DES modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen sayısal su yüzü profillerinin, deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.10.'da verilmiştir. Verilen şekiller incelendiğinde, T=1.13 için elde edilen sayısal ve deneysel yüzü profilleri arasında, kanal tabanına yakın bölgede (yıkılma dalgasının kanal tabanına en dik açıyla çarptığı noktada) diğer bölgelere kıyasla daha fazla farklılık bulunmaktadır. Bu zaman adımı dışında elde edilen su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu şekillerden açıkça görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının ön yüzünün dikliğinin azaldığı durumlarda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumun oldukça iyi olduğu belirlenmiştir.

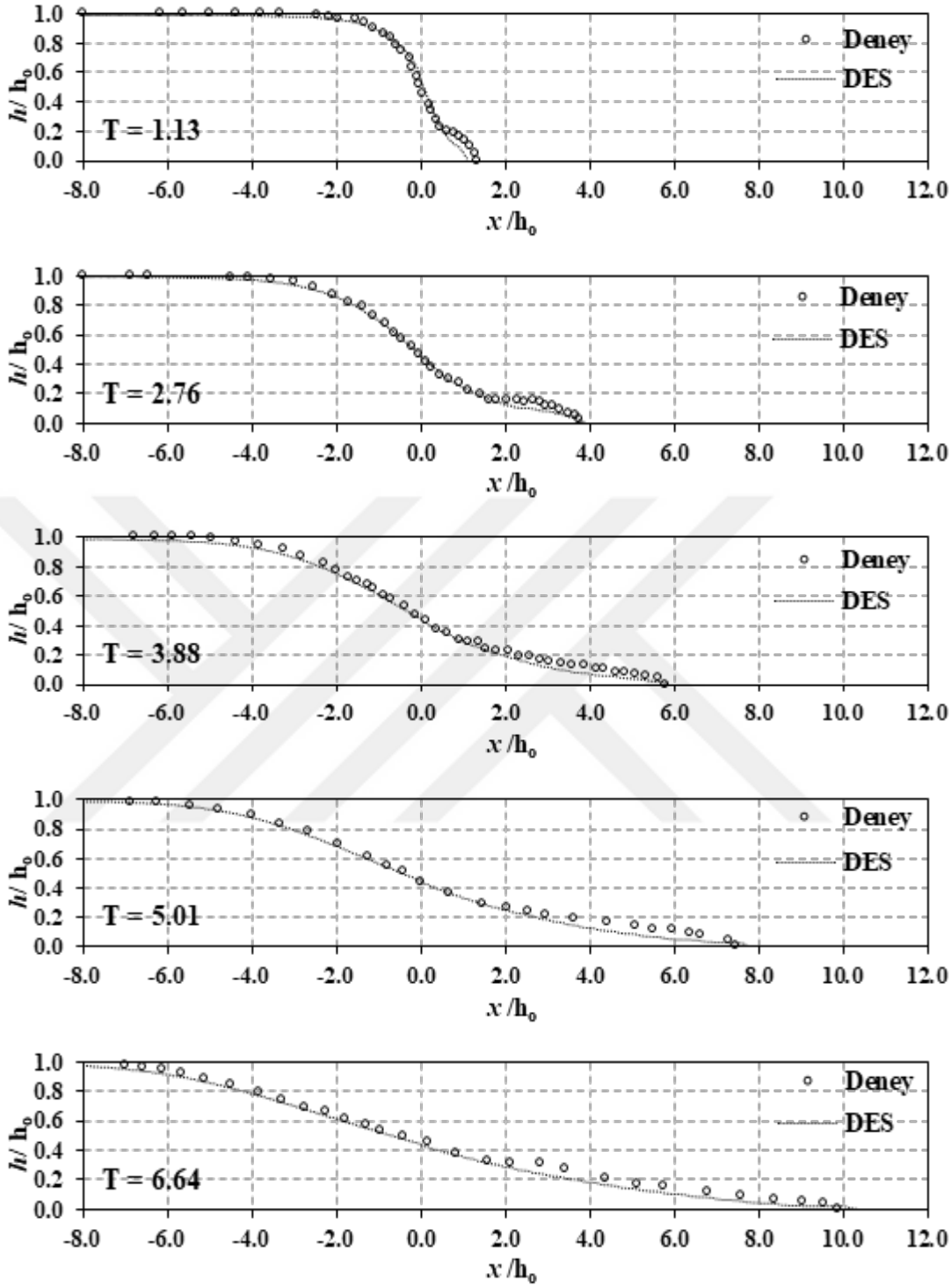
DES modeli kullanılarak sayısal modelleme sonucunda farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin desenleri Şekil 4.11.'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde baraj yıkılmasının ilk anlarında elde edilen hız vektörlerinin kütlesel kuvvetin etkisiyle y doğrultusunda aşağı yönlü oluştuğu görülmektedir. Baraj dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle y doğrultusunda düşey yönde oluşan hız vektörlerinin x doğrultusuna doğru değişim gösterdiği ve büyüklüklerinin arttığı söylenebilir. Hesaplama zamanının artmasıyla kuru yatak üzerinde meydana gelen hız vektörlerinin büyüklüğünün arttığı belirlenmiştir. Deneysel verilerin değerlendirildiği bu akış zamanlarında tüm akım alanının henüz tamamen harekete geçmediği elde edilen hız vektörlerinden söylenebilir.

DES modeli kullanılarak sayısal modelleme sonucunda farklı zamanlarda elde edilen yatay hız bileşenine ait desenler Şekil 4.12.'de verilmiştir. Farklı çözüm zamanlarında elde edilen hız desenlerinden, baraj yıkılma dalgasının hız alanında 2.2m/s'den daha büyük hızların yayılım dalgasının ön bölgesinde oluştuğu ve viskoz gerilmelerden kaynaklı olarak kanal tabanı üzerinde hız değerinde çok az da olsa azalmanın bulunduğu görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesine paralel olarak bu maksimum hızın oluştuğu bölgenin büyüdüğü açıkça görülmektedir. Bunun yanında, baraj yıkılma dalgasının hız alanında bulunan eğriselliğin yıkılma başlangıcında oldukça belirgin olduğu, yayılım dalgasının yatay yatak üzerinde ilerlemesiyle bu eğriselliğin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, yayılım dalgasının ele alınan zamanlarda tüm hız alanının harekete geçmediği hız

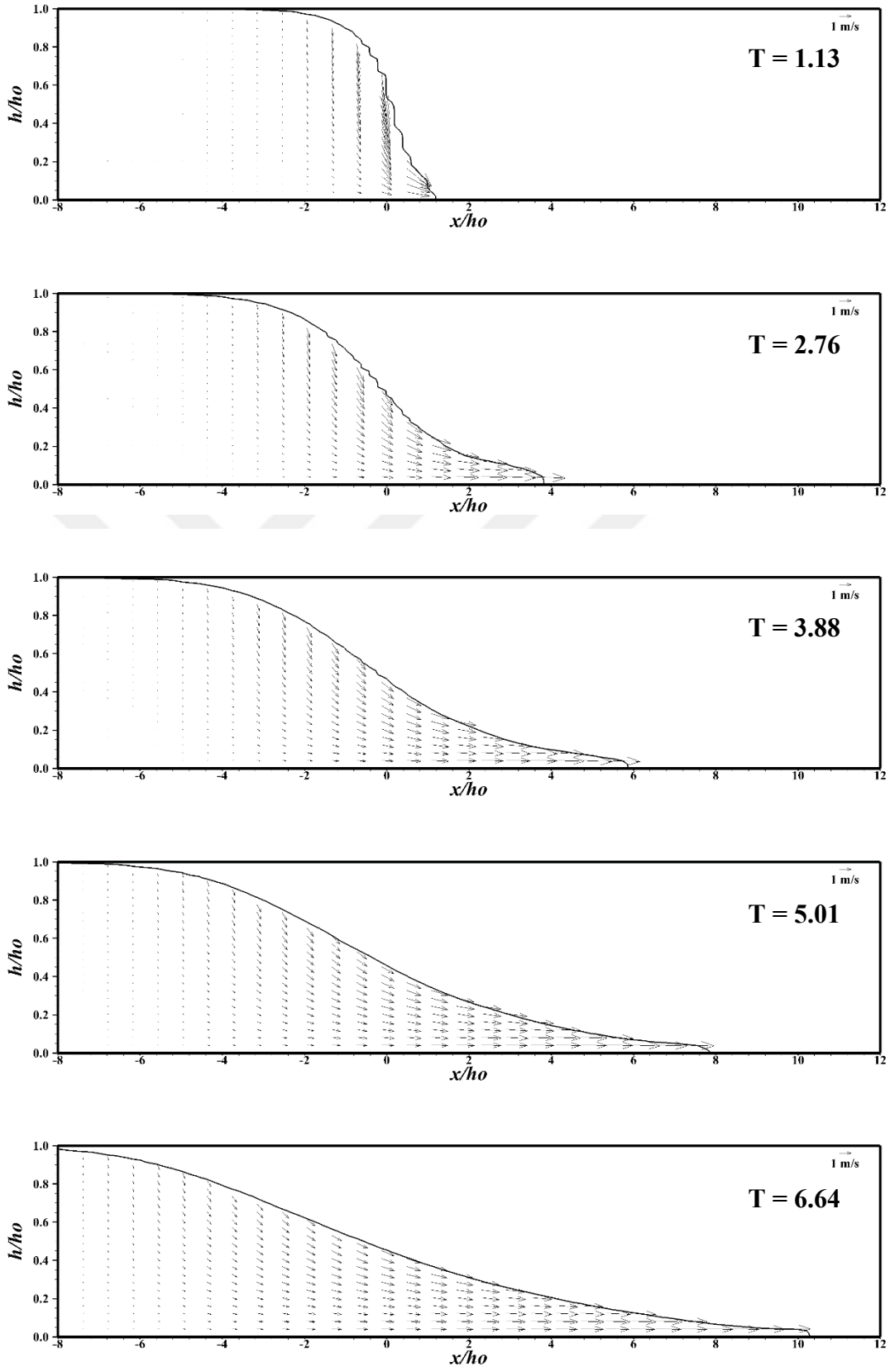
vektörlerinden de görüldüğü gibi yatay hız bileşeni deseninden de görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının yatay kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle kanal tabanı üzerinde viskoz kuvvetlerin etkisinin arttığı da söylenebilir.

DES modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenleri Şekil 4.13.'te verilmiştir. Farklı hesaplama zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerji dağılımlarının incelenmesinden, baraj yıkılması dalgasının uç noktasında hızda meydana gelen değişimin daha fazla olduğu görülürken, zamanın ilerlemesine paralel olarak kuru yatak üzerinde ilerleyen yayılım dalgasının kanal tabanı üzerinde hız değişiminin daha da arttığı görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle birlikte $0.2m^2/s^2$ değerinden daha büyük türbülans kinetik enerjisinin bulunduğu görülmektedir. Yayılım dalgasının hareket süresinin artmasıyla katı sınırla etkileşim bölgesinde elde edilen türbülans kinetik enerjisi değerlerinin arttığı ve alanının büyüdüğü söylenebilir. Hız alanında meydana gelen değişim yayılım dalgasının ön noktasında olduğu ve bu bölgede maksimum türbülans kinetik enerjinin oluştuğu görülmektedir.

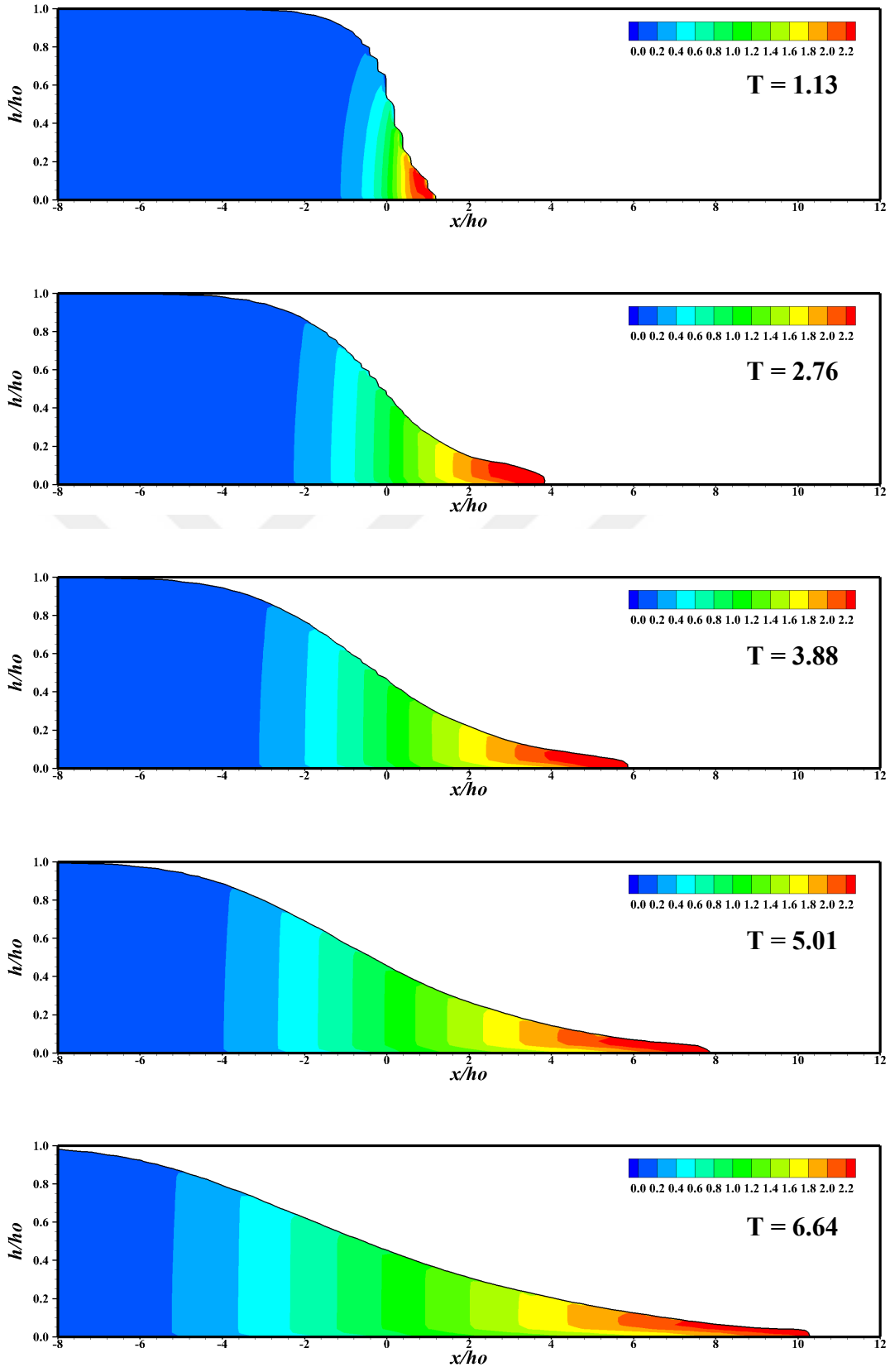
RNG, SST ve DES türbülans modelleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen hız vektörleri, yatay hız bileşeni ve türbülans kinetik enerji desenlerinin birbirine oldukça benzer olduğu aralarında önemli derece farklılıkların bulunmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan farklı üç türbülans modelinin kuru yatak üzerinde meydana gelen baraj yıkılması yayılım dalgasını modellemede deneysel bulgulara oldukça yakın tahminde bulunmuştur.



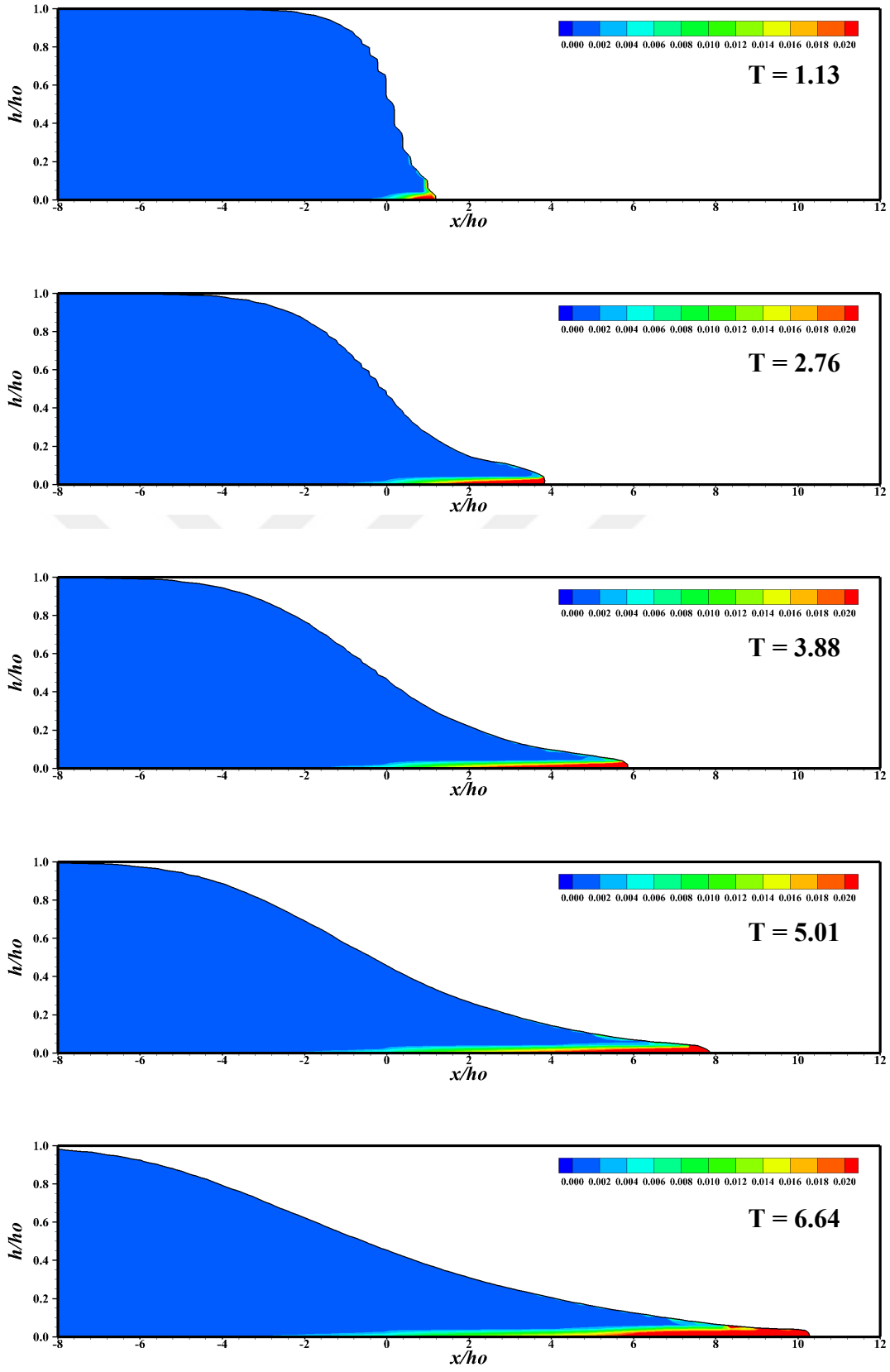
Şekil 4.10. Kuru yatak durumunda deneysel ve DES ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.11. Kuru yatak durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



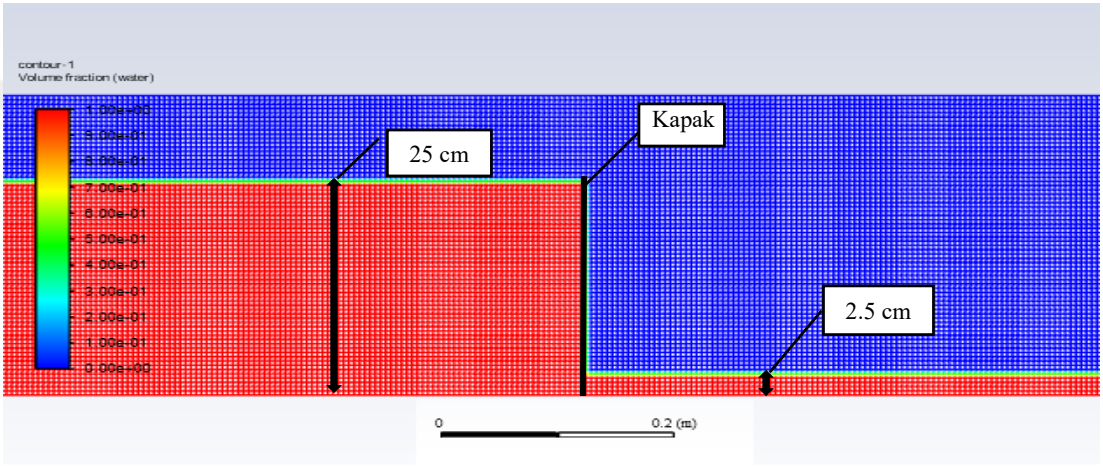
Şekil 4.12. Kuru yatak durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.13. Kuru yatak durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

4.2. α=0.1 Durumu

Islak yatak durumunda mansap bölgesindeki su yüksekliğinin rezervuar yüksekliği oranının ($\alpha=h_1/h_0$) 0.1 olduğu durum için farklı türbülans modelleri kullanılarak çeşitli akış zamanlarında elde edilen su yüzü profillerinin Kocaman (2007) tarafından deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.14.'te α=0.1 için sayısal modellemelerde kullanılan çözüm bölgesi, başlangıç şartları ve hesaplamalarda kullanılan ağ tasarımı verilmiştir.



Şekil 4.14. α=0.1 derinlik oranı memba ve mansap derinliklerini gösteren mesh görüntüsü

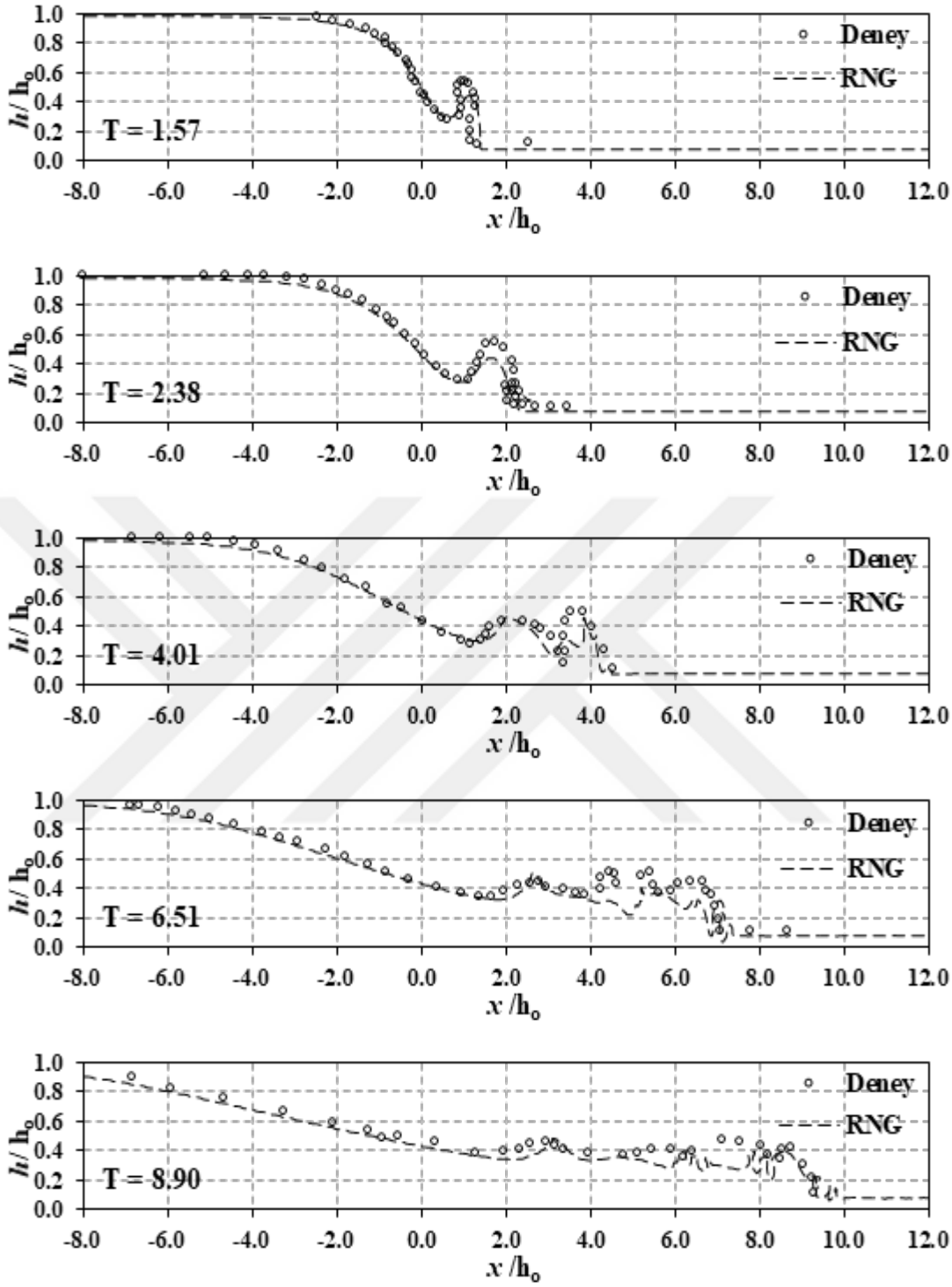
Farklı türbülans modelleri kullanılarak çeşitli akış zamanında elde edilen sayısal su yüzü profillerinin, deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda elde edilen OMGH ve OKH değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Çizelgede verilen değerler incelendiğinde, T=1.57 için OKH kriterine göre DES modeli ile SST modeli birbirine çok yakın sonuçlar vermiş olsa da çok küçük bir farkla DES modeli SST modeline kıyasla deneysel verilere en yakın tahminde bulunurken, OMGH kriterine göre ise aynı akış zamanında sayısal modeller arasında SST modeli deneysel profile en yakın tahminde bulunmuştur. T=2.38 için ise her iki başarı kriterine göre ise SST modeli en başarılı model olmuştur. T=4.01 akış zamanında ise OMGH ve OKH değerlerine göre daha önceki akış zamanlarında en başarılı model olmayan RNG modeli en başarılı model olmuştur. Bu akış zamanları dışında ele alınan diğer akış zamanlarında, DES modeli her iki başarı kriterine göre deneysel profillere en yakın sayısal su yüzü

profilini belirlendiği elde edilen değerlerden görülmektedir. T=6.51 durumunda deneysel ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri arasında en büyük OMGH değerleri oluşmuştur. Ayrıca, tablonun son satırında verilen ortalama hata değerleri incelendiğinde her iki karşılaştırma kriterine göre DES modelinin en başarılı olduğu ve türbülans modellerinin başarısı sıralamasının OKH ve OMGH kriterlerine göre DES, SST ve RNG şeklinde oluştuğu görülmektedir. α= 0.1 durumunda farklı türbülans modelleriyle ele alınan akış zamanlarında elde edilen değerlerin son satırda verilen ortalamasına göre kuru yatak durumunda elde edilen OKH ve OMGH değerlerden daha küçük olduğu ve türbülans modelleri arasındaki farkın daha küçük olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.2. α=0.1 derinlik oranı için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri

Model	**RNG**		**SST**		**DES**	
T	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**
1.57	6.45780 $^{(3)}$	0.00119$^{(3)}$	6.07210$^{(1)}$	0.00105$^{(2)}$	6.26100$^{(2)}$	0.00100$^{(1)}$
2.38	5.74040 $^{(2)}$	0.00112$^{(3)}$	5.70400$^{(1)}$	0.00136$^{(1)}$	5.76760$^{(3)}$	0.00138$^{(2)}$
4.01	6.21050 $^{(1)}$	0.00242$^{(1)}$	6.98960$^{(2)}$	0.00316$^{(2)}$	7.32390$^{(3)}$	0.00335$^{(3)}$
6.51	9.59120 $^{(3)}$	0.00416$^{(3)}$	8.80230$^{(2)}$	0.00398$^{(1)}$	8.54460$^{(1)}$	0.00384$^{(2)}$
8.90	8.82650 $^{(3)}$	0.04327$^{(3)}$	6.88220$^{(2)}$	0.00165$^{(2)}$	6.43840$^{(1)}$	0.00160$^{(1)}$
Ort.	7.36528 $^{(3)}$	0.01043$^{(3)}$	6.89004$^{(2)}$	0.00224$^{(2)}$	**6.86710$^{(1)}$**	**0.00223**$^{(1)}$

Şekil 4.15.'te, α=0.1 için RNG türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen sayısal su yüzü profillerinin ve deneysel su yüzü karşılaştırmaları verilmiştir. Akım hareketinin başladığı ilk zamanlarda deneysel ve RNG sayısal modeli ile elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmekle beraber akış zamanının ilerlemesiyle ve memba kısmından oluşan baraj yıkılma dalgası ile mansap kısmında oluşan negatif dalganın karşılaştığı kısımlarda uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. En çok uyumsuzluğun T=6.51 anında olduğu Çizelge 4.2 ve Şekil 4.15.'te görülmektedir. Kuru yatak durumuna göre su yüzü profillerinin α=0.1 durumunda daha fazla dalgalanmaya sahip olduğu ve değişimlerin daha belirgin olduğu söylenebilir. Baraj yıkılma dalgasının yayılımıyla birlikte dalga önü dikliğinin azaldığı görülmektedir.



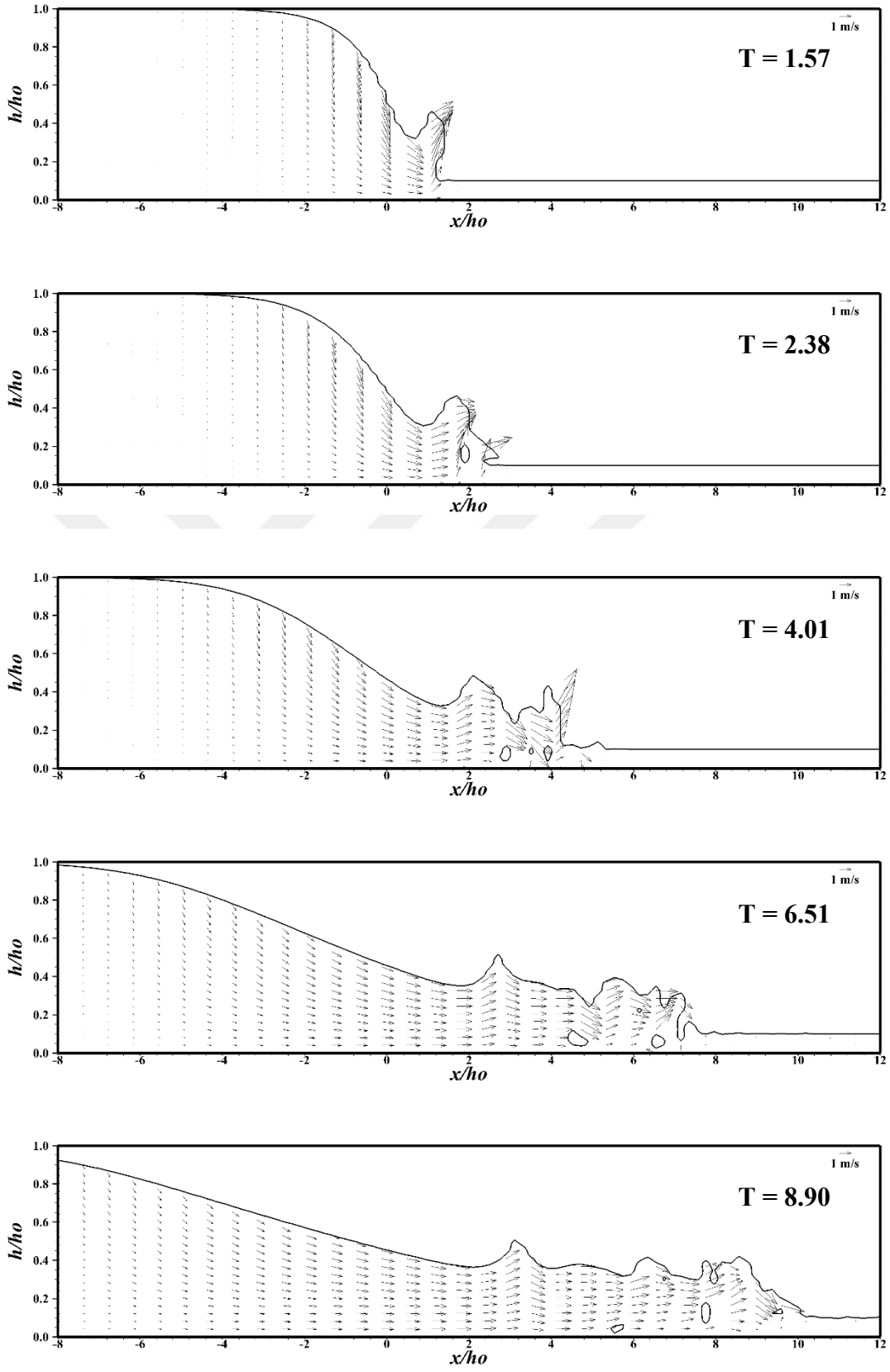
Şekil 4.15. α=0.1 durumunda deneysel ve RNG ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması

Şekil 4.16., 4.17. ve 4.18.'de sırasıyla RNG türbülans modeliyle farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörleri, yatay hız bileşeninin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri görülmektedir. T=1.57 durumunda baraj yıkılma başlangıcında

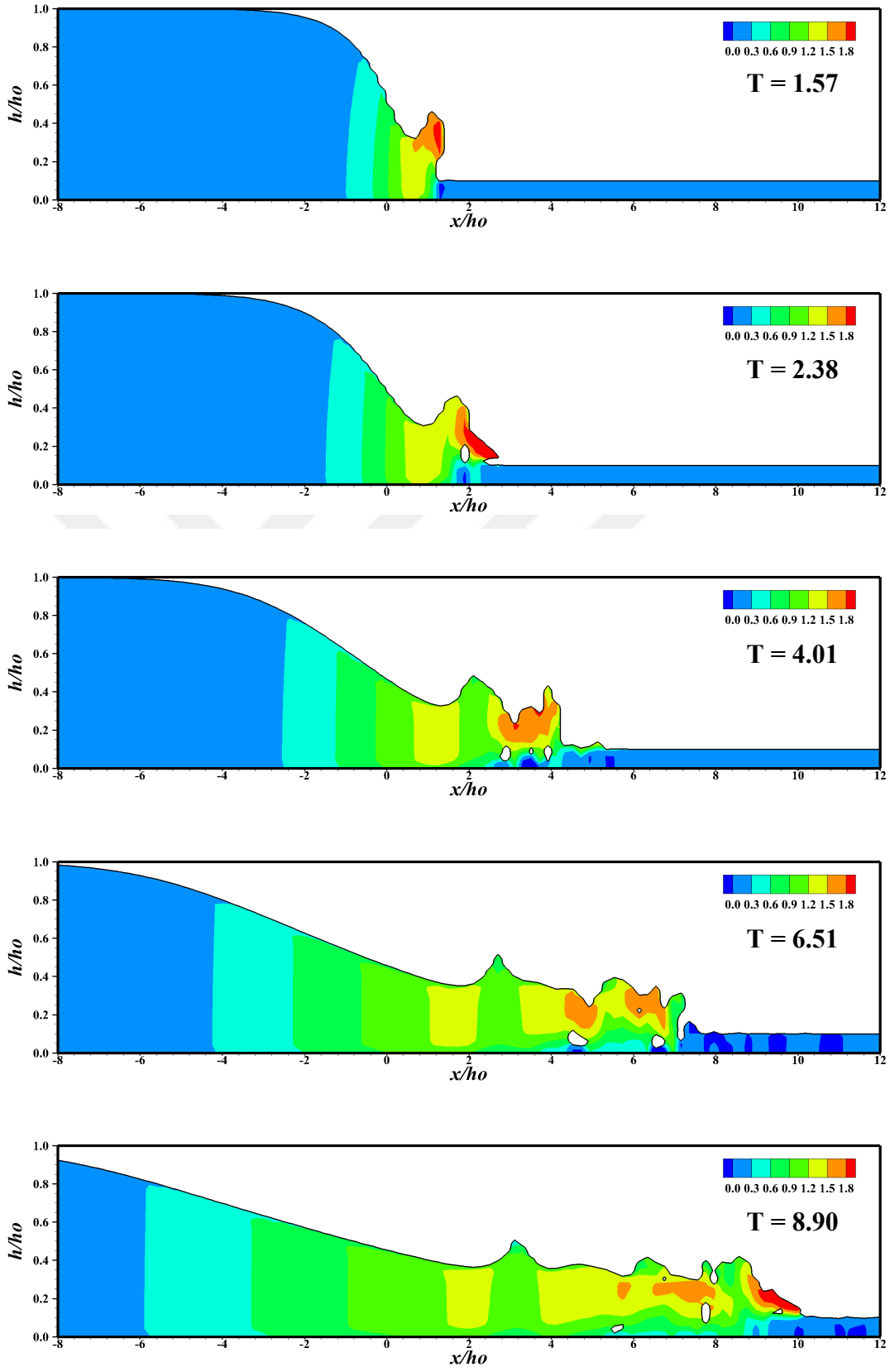
mansap bölgesinde suyun bulunmasından kaynaklı olarak yayılım dalgasının önünde hız vektörlerinin y doğrultusunda yukarı yönlü, hemen sonrasında elde edilen hız vektörlerinin ise hemen hemen x doğrultusunda olduğu y yönünde önemli bir büyüklüğe sahip olmadığı görülmektedir. Bu akış zamanı dışında ele alınan tüm akış zamanlarında akım alanı içerisine hava kabarcıklarının karıştığı belirlenmiştir. T=1.57 ile 4.01 durumlarında dalga önünde y yönünde yukarı yönlü bir hareket söz konusu iken, T=6.51 ile 8.9 durumlarında dalga önünde y doğrultusunda aşağı yönlü olduğu oluşmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere kuru yatak durumuna göre α=0.1 durumunda yayılım dalgasının y doğrultusunda pozitif ve negatif yönde değişim sergilemiştir. Ayrıca, yayılım dalgasının akış zamanının ilerlemesiyle birlikte x doğrultusunda elde edilen hız vektörlerinin küçüldüğü belirlenmiştir.

Yatay hız bileşeninin desenlerinin verildiği Şekil 4.17. incelendiğinde, yatay hız bileşeninin en büyük değerlerine dalga önünde oluşmuştur. T=1.57 durumunda dalga önünde oluşan x doğrultusundaki hız bileşenin 1.8m/s değerinden büyük değerlere sahip olduğu alanın T=2.38 olduğu duruma göre daha küçük olduğu görülürken, akış zamanının ilerlemesiyle bu maksimum değerin 1.5m/s kadar azaldığı şekillerden söylenebilir. T=8.9 olduğu durumda azalan hız bileşeninin maksimum değerinin arttığı ve bu değerin oluştuğu bölgenin büyüdüğü görülmektedir. Kuru yatak durumunda elde edilen yatay hız bileşeninin en büyük değerinin yaklaşık 2.2m/s olduğu, α=0.1 durumunda bu değer 1.8m/s kadar azalmaktadır. Buradan, mansap bölgesinde suyun bulunması durumunda (ıslak yatak durumu), kuru yatakla aynı memba bölgesi su yüksekliğine sahip akım durumu için mansap bölgesinde bulunan suyun yayılım dalgasının yatay doğrultudaki hareketinin engellediği görülmektedir.

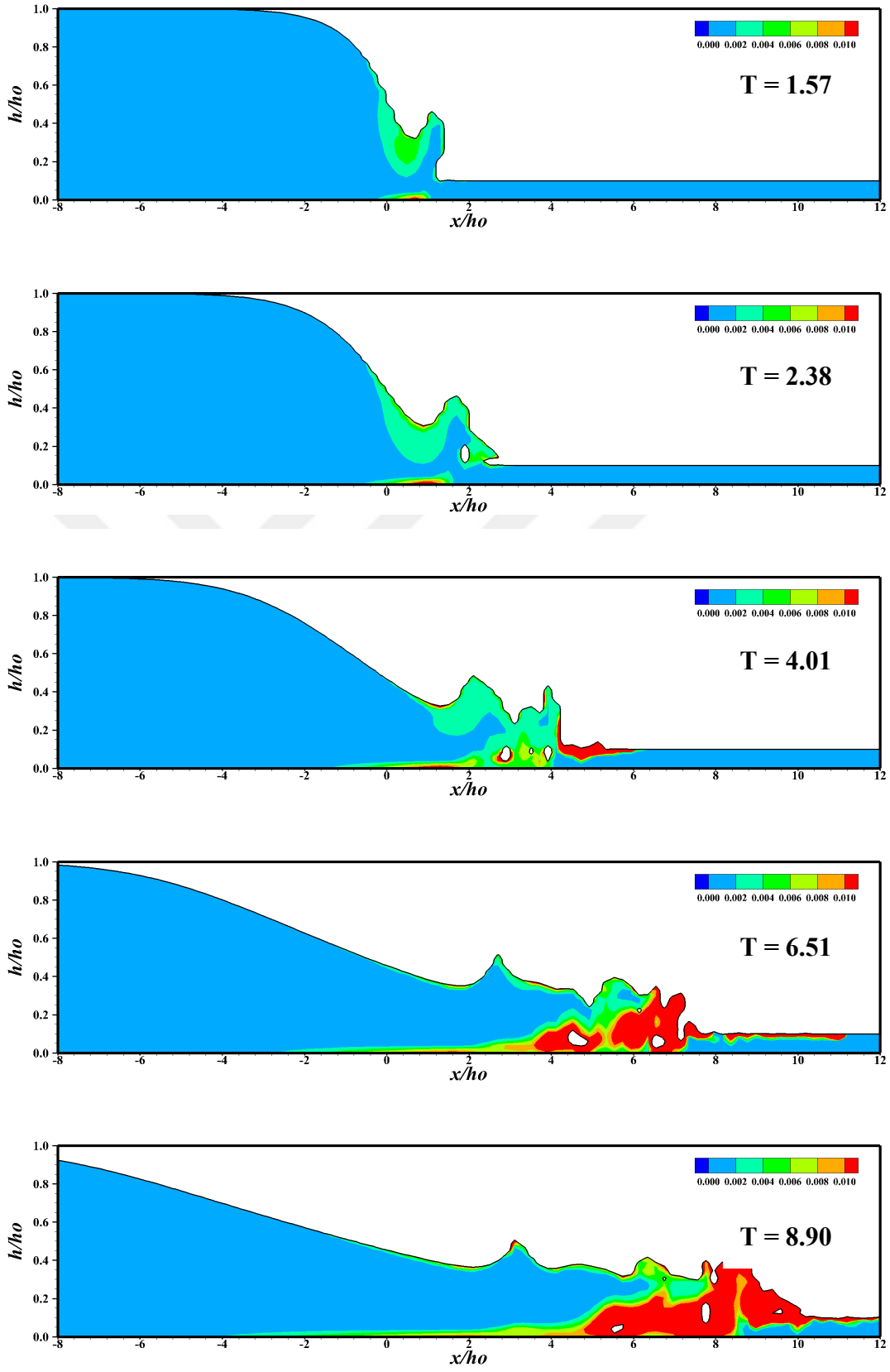
RNG türbülans modeliyle farklı akış zamanında elde edilen türbülans kinetik enerjisinin desenlerinin incelenmesinden, akış zamanının ilerlemesiyle türbülans kinetik enerjinin maksimum değerinin oluştuğu bölge artmaktadır. T=1.57 ve 2.38 durumunda maksimum türbülans kinetik enerjisinin kanal tabanına yakın bölgede oluştuğu, yayılım dalgasının x doğrultusunda ilerlemesiyle maksimum türbülans kinetik enerjisinin elde edildiği bölgenin dalga önüne kaydığı söylenebilir. Akış zamanının artmasıyla yayılım dalgası daha karmaşık hale gelmektedir.



Şekil 4.16. α=0.1 durumunda RNG ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



Şekil 4.17. α=0.1 durumunda RNG ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.18. α=0.1 durumunda RNG ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

α=0.1 durumunda, SST modeliyle elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.19.'da verilmiştir. Verilen şekiller incelendiğinde SST türbülans modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin genel olarak deneysel su yüzü profillerine benzer olduğu görülmektedir. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki farkın, akım hız alanında değişimin yaşandığı bölgede özellikle yayılım dalgasının önünde olduğu kanal giriş bölgesinde ise tüm akış zamanlarında bu farkın azaldığı söylenebilir. Çizelge 4.2.'den de anlaşılacağı üzere SST türbülans modeliyle elde edilen su yüzü profilleri, RNG türbülans modeliyle elde edilen su yüzü profillerine göre deneysel su yüzü profilleriyle daha uyumludur. Yayılım dalgasının x ekseninde ilerlemesiyle dalga dikliği azalmaktadır.

Şekil 4.20.'de, SST modeliyle farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin desenleri verilmiştir. Verilen şekillerden, T=1.57, 4.01 ve 8.9 durumunda yayılım dalgasının ön bölgesinde hız vektörlerinin y doğrultusunda yukarı yönlü oluştuğu, T=2.38 ve 6.51 durumlarında ise bu bölgede elde edilen hız vektörlerinin y doğrultusunda aşağı yönlü oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçla, yayılım dalgasının, y doğrultusunda değişik yönlerde hareket ettiği anlaşılmaktadır. Ele alınan akış zamanlarında, hız vektörlerinin desenlerinden mansap bölgesinde herhangi akım harekete geçmediği bölgenin büyüklüğünün küçüldüğü ve y yönündeki değişimin akış zamanının ilerlemesiyle daha kısıtlı olduğu belirlenmiştir.

SST modeliyle farklı akış zamanlarında yatay doğrultudaki hız bileşeni desenleri Şekil 4.21.'de verilmiştir. Şekillerden, yatay doğrultudaki hız bileşenin maksimum değerine dalga önünde sahip olduğu görülmektedir. Maksimum hızın oluştuğu bölgenin T=2.48'den sonra giderek küçüldüğü ve maksimum değerinin azaldığı şekillerden anlaşılmaktadır. Ayrıca, mansap ve memba bölgesinde hareketsiz olarak bulunan bölgelerin akış zamanının büyümesine paralel olarak küçüldüğü açıkça söylenebilir.

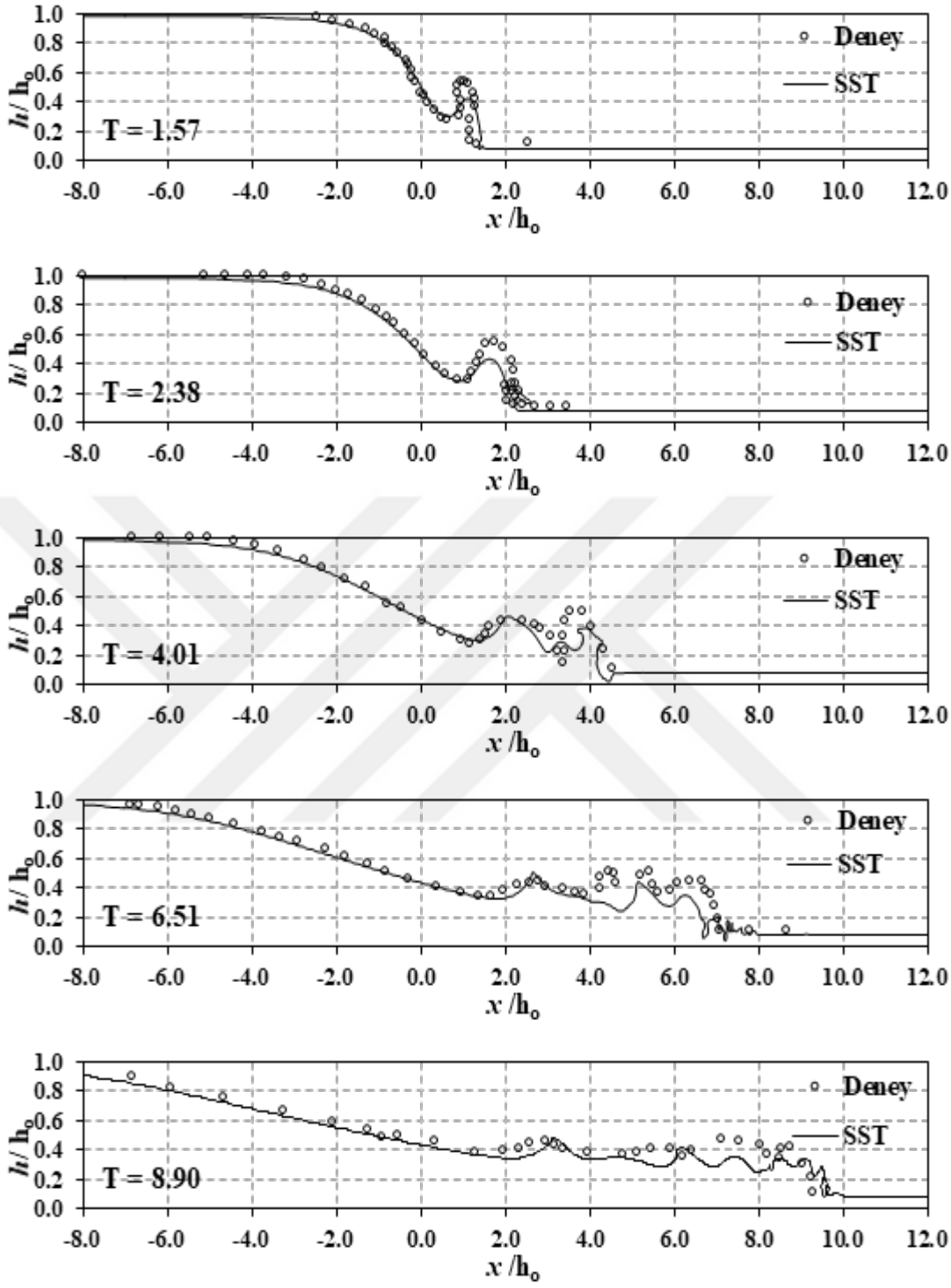
Şekil 4.22.'de, SST modeliyle farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenleri verilmiştir. Şekillerden, baraj yıkılma anından itibaren kanal

tabanına çarpan dalganın kanal tabanı üzerinde türbülans oluşturduğu ve bu türbülans oluşan bölgenin akış zamanının büyümesiyle dalga önüne taşındığı anlaşılmaktadır. Baraj yıkılması neticesinde oluşan yayılım dalgasının taşımış olduğu su kütlesinin akım alanında meydana getirdiği değişiklikle mansap ve memba bölgelerinde bulunan suların oldukça karmaşık akım yapıya büründüğü ve bu etkileşim bölgesinde aşırı türbülansın oluştuğu görülmektedir.

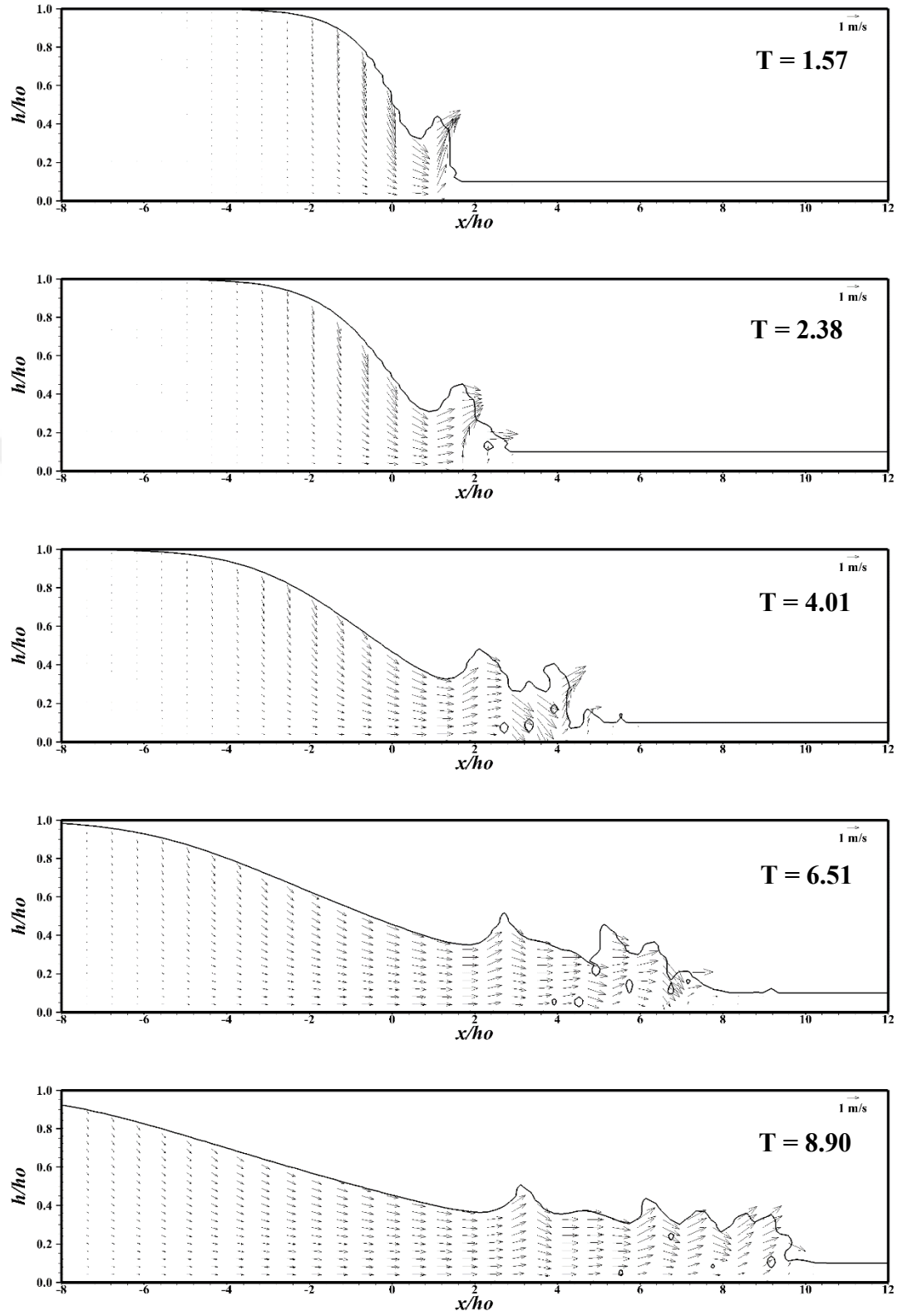
α=0.1 durumunda farklı akış zamanlarında DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.23.'te verilmiştir. Şekillerden, yayılım dalgasının yatay doğrultuda ilerlemesiyle deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumun azaldığı görülmektedir. x/h_o değerinin -8 ile 1 arasında değiştiği bölgede deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin tüm akış zamanlarında birbiriyle uyumlu olduğu açıkça söylenebilir. T=1.57 akış zamanında baraj yıkılmasından kaynaklı aşağı yönlü hareket eden su kütlesinin düşme yüksekliğinin büyük olmasından kaynaklı olarak y doğrultusunda oldukça fazla yükseldiği ve enerjisinin fazla olduğu değerlendirile bilinir. Ayrıca, bu akış zamanında oluşan oldukça büyük dikliğe sahip yayılım dalgasının, T=2.38 durumunda yeniden kırıldığı belirlenmiştir. Bunun yanında, diğer türbülans modellerin de de olduğu gibi dalga önü dikliğinin akış zamanının artmasıyla azaldığı ve kullanılan türbülans modelleriyle elde edilen su yüzü profillerine birbirine oldukça benzerdir.

α=0.1 durumunda farklı akış zamanlarında, DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız vektörlerinin, yatay hız bileşenlerinin ve türbülans kinetik enerjisi desenleri sırasıyla Şekil 4.24., Şekil 4.25. ve Şekil 4.26.'da verilmiştir. Fazla akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin desenlerinden, yayılım dalgasının y doğrultusunda aşağı ve yukarı yönde hareket sergilediği görülmektedir. DES modeli kullanılarak T=8.9 durumunda dalga ön bölgesinde elde edilen hız vektörlerinin RNG ve SST türbülans modellerine göre daha dik olduğu belirlenmiştir. Yayılım dalgasının x doğrultusunda hareket zamanının artmasıyla memba bölgesindeki daha büyük bir su kütlesinin harekete geçtiği görülmektedir. Ayrıca, T=8.9 durumunda baraj mansap bölgesinde bulunan su kütlesinin de bu zamandan itibaren tamamen etkilendiği söylenebilir.

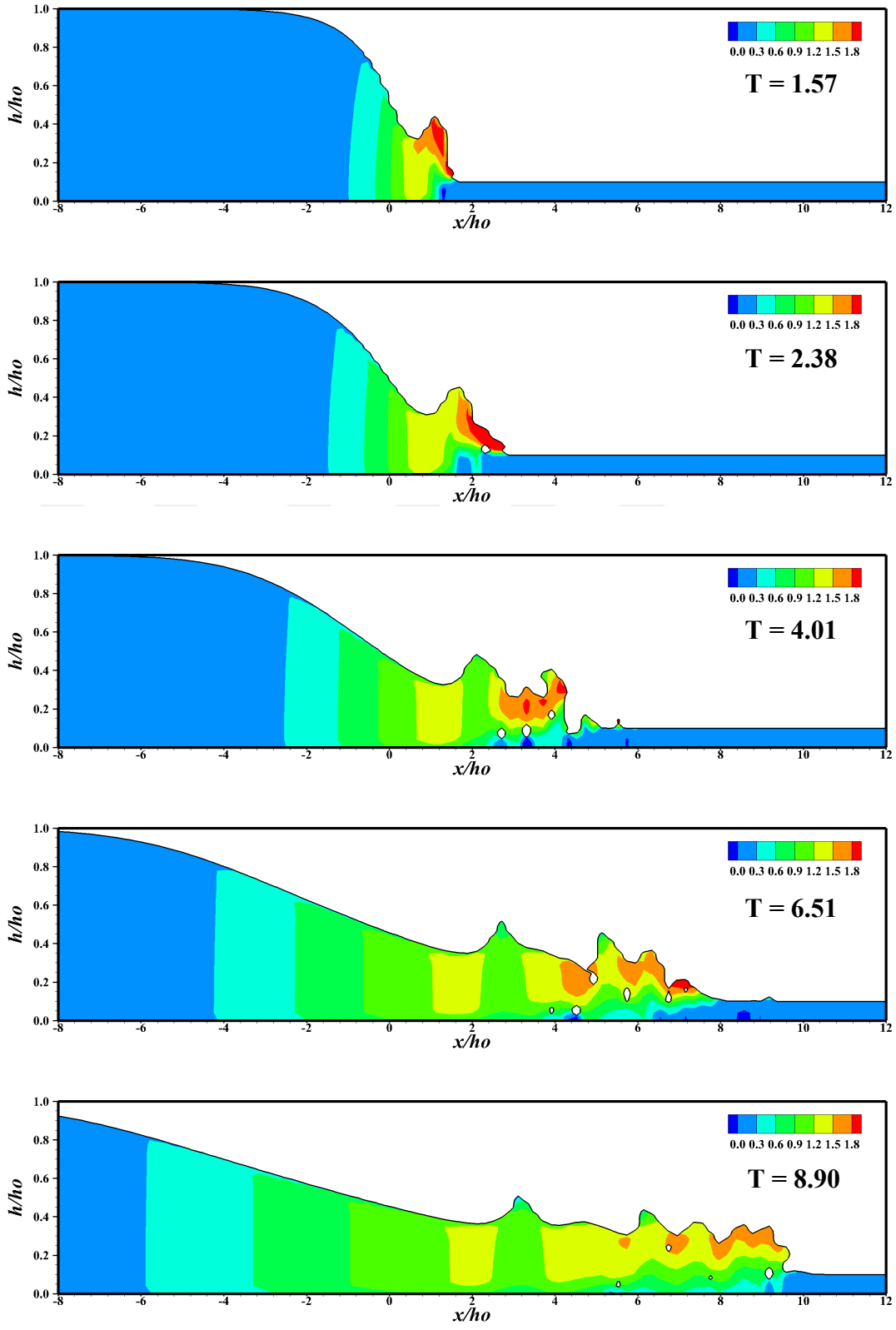
Şekil 4.25.'te verilen DES modeli kullanılarak elde edilen yatay hız bileşeninin desenlerinden, yatay hız bileşeninin maksimum değerine dalga önünde oluştuğu ve akış zamanının ilerlemesiyle akım alanında hız değişiminin yaşandığı ve memba bölgesinde daha fazla suyun harekete geçtiği görülmektedir. Akış süresinin artmasıyla birlikte yatay doğrultudaki hız bileşeninin maksimum değerinde azalmaların meydana geldiği özellikle T=8.9 durumunda bu değerin 1.5 ile 1.8 m/s değeri arasında oluştuğu söylenebilir. Baraj yıkılması sonucu oluşan yayılım dalgasının y doğrultusunda yatay ve düşey yönde harekete sahip olduğu elde edilen desenlerin değişiminde görülmektedir



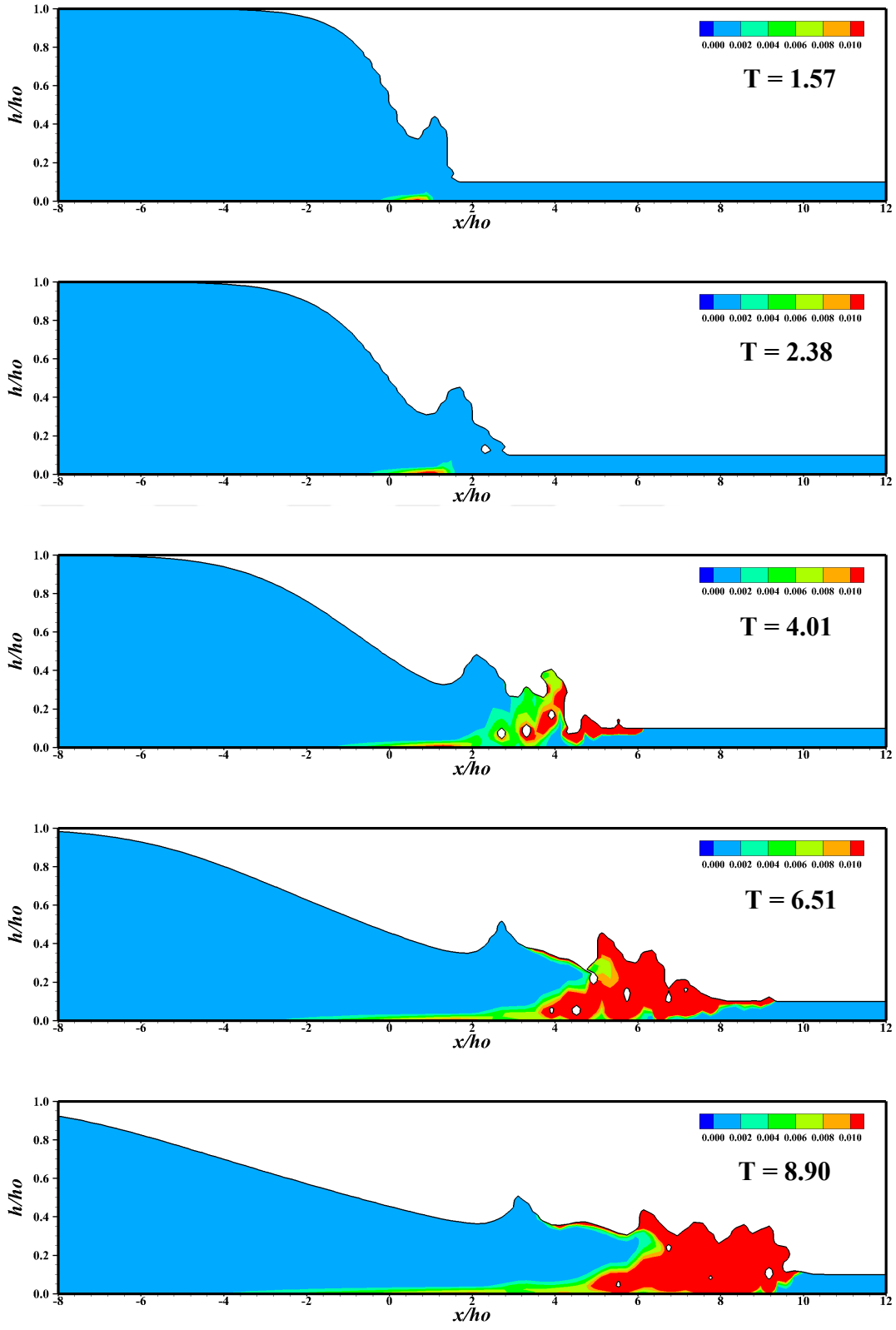
Şekil 4.19. α=0.1 durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



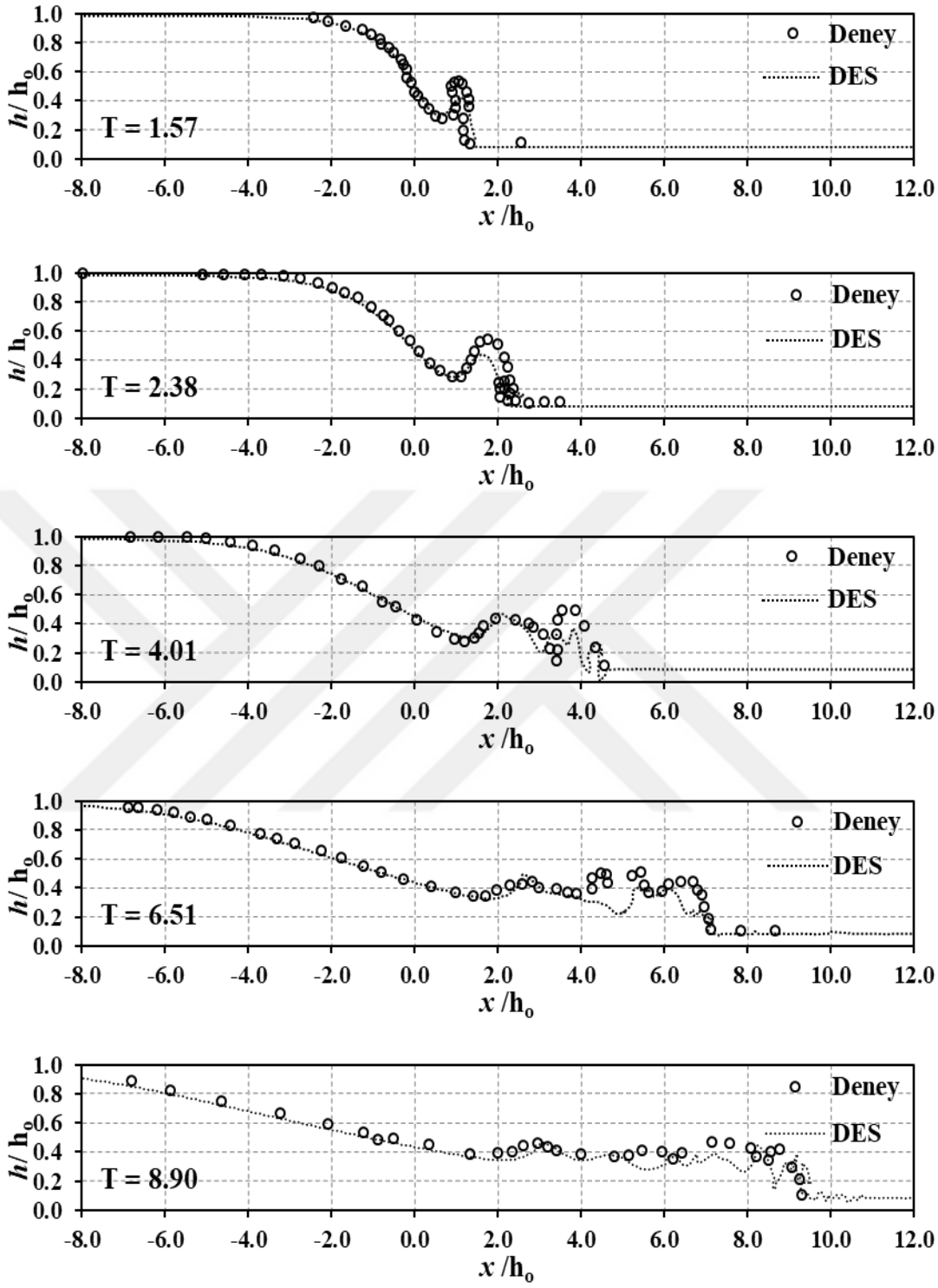
Şekil 4.20. α=0.1 durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



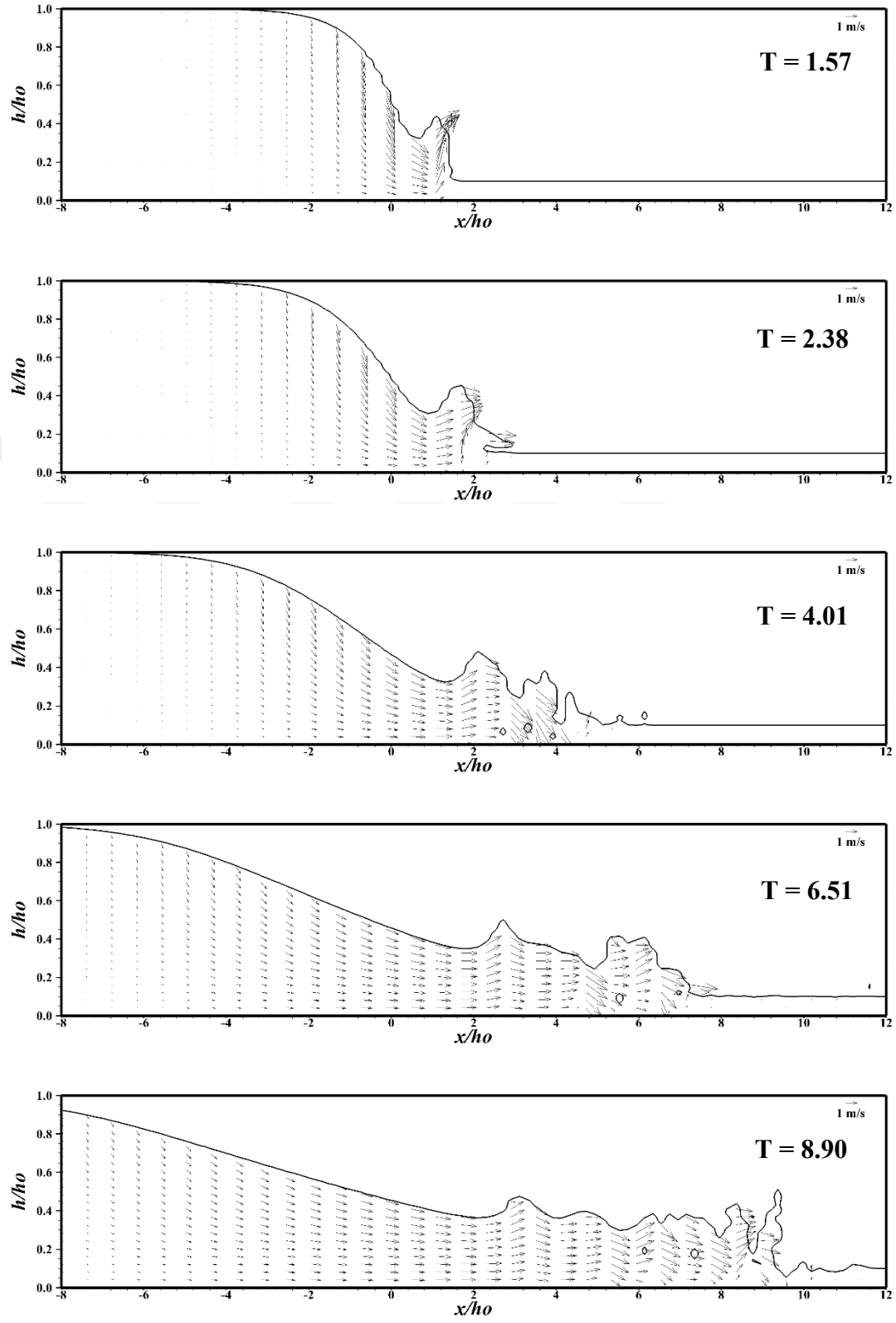
Şekil 4.21. α=0.1 durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



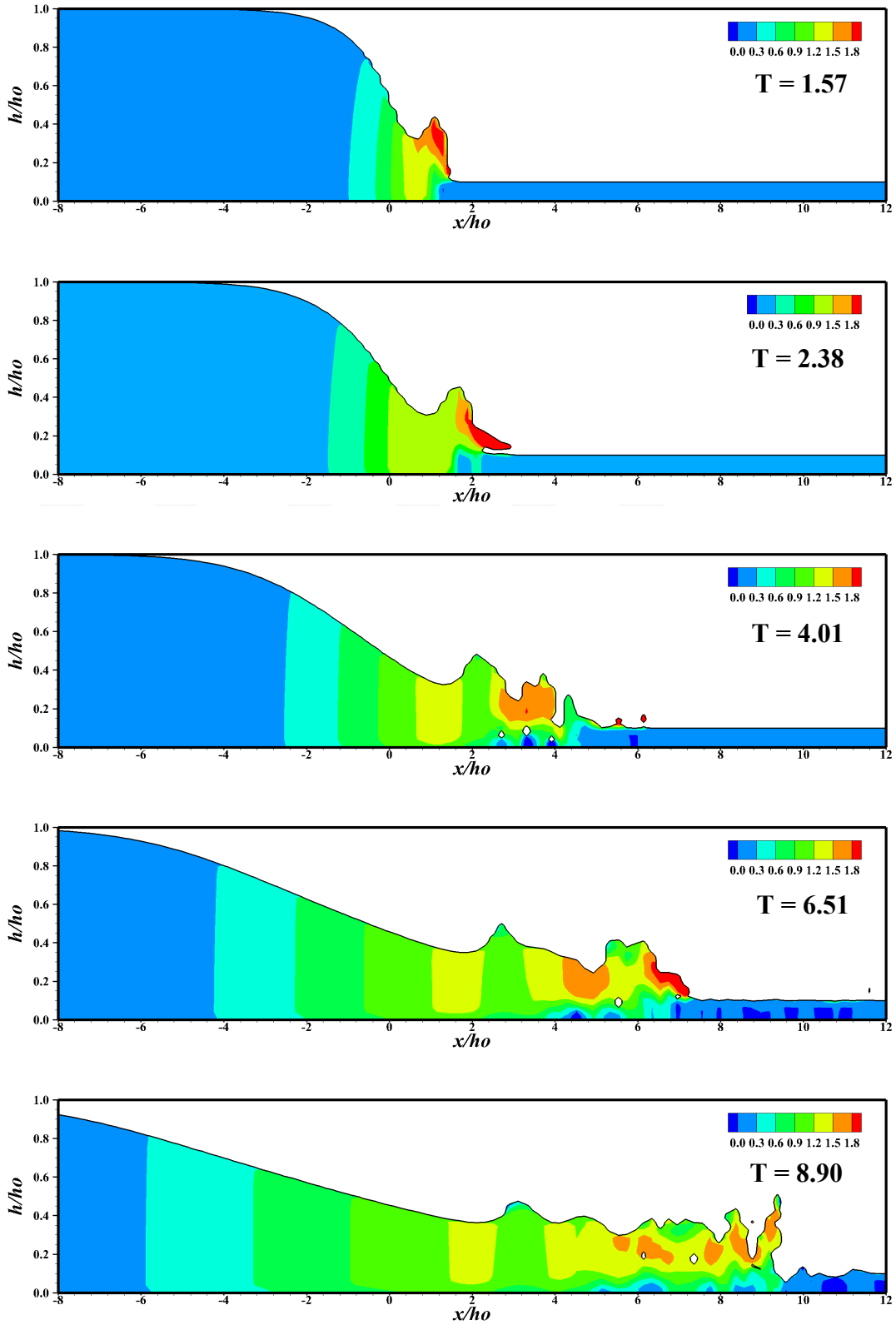
Şekil 4.22. α=0.1 durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni



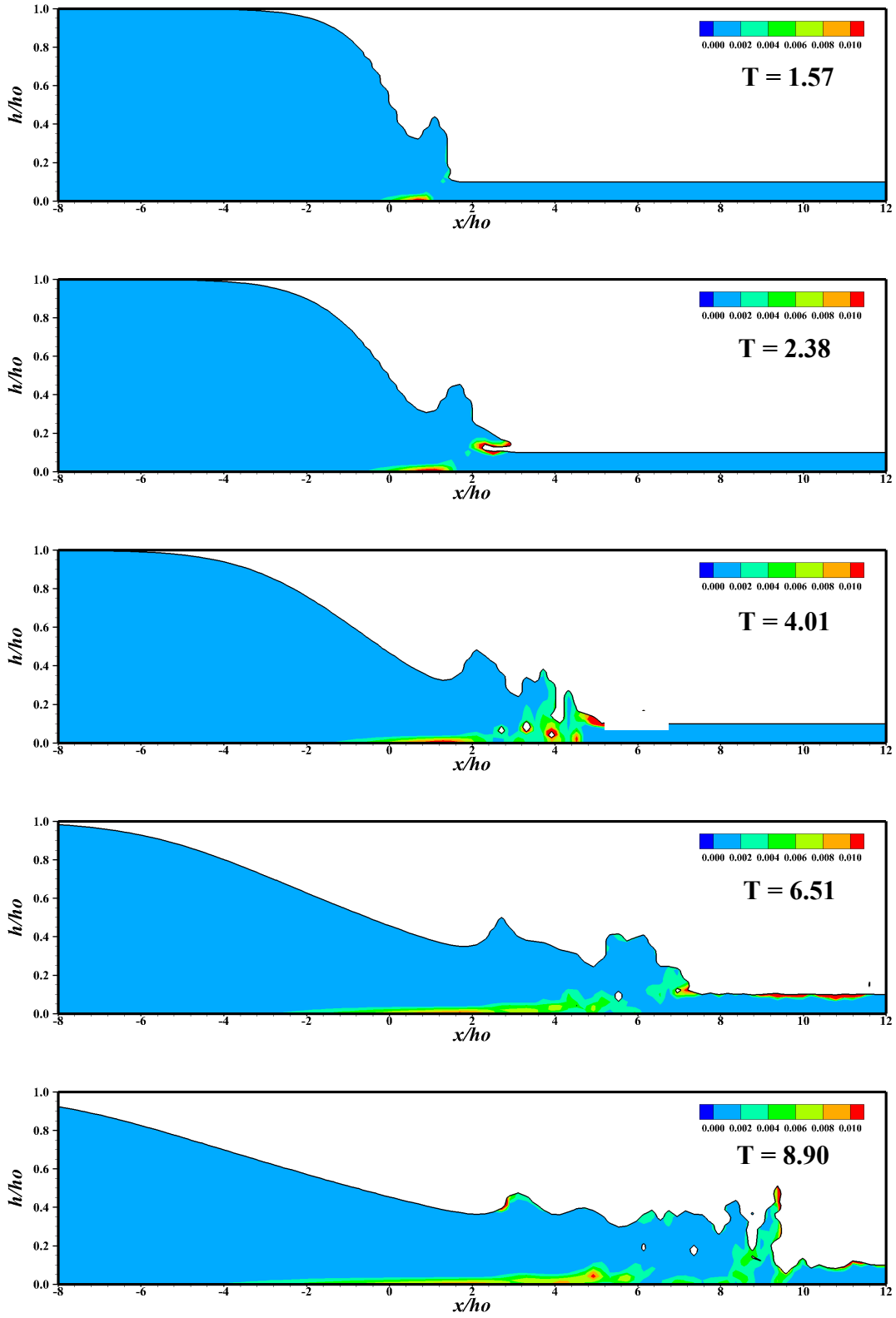
Şekil 4.23. α=0.1 durumunda deneysel ve DES ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.24. α=0.1 durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



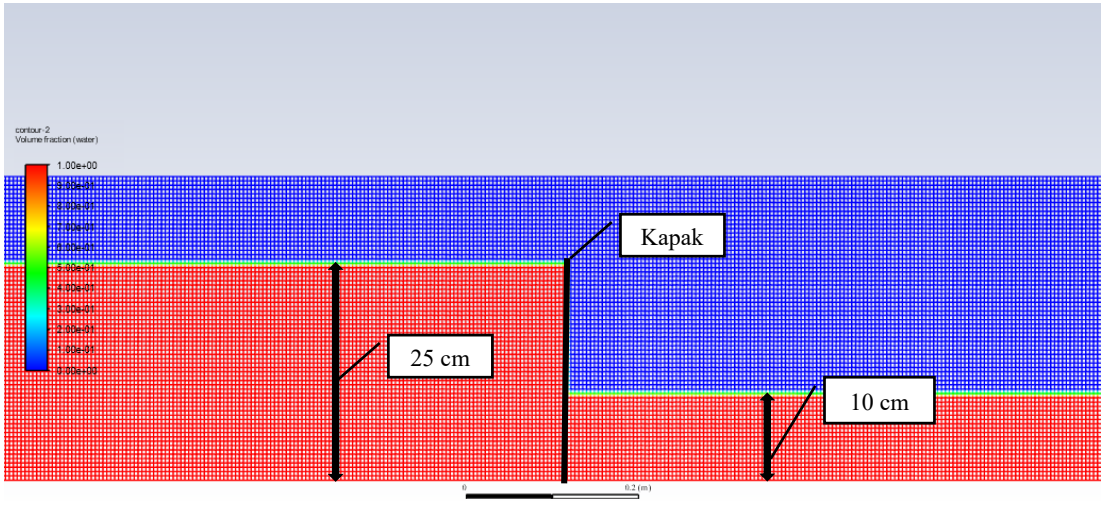
Şekil 4.25. α=0.1 durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.26. α=0.1 durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

4.3. α=0.4 Durumu

Şekil 4.27.'de, α=0.4 için sayısal modellemelerde kullanılan çözüm bölgesi ve başlangıç şartları verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere memba derinliği 25 cm ve mansap derinliğinin 10 cm olduğu durum için RNG, SST ve DES türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma sonucunda elde edilen OKH ve OMGH Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Farklı akış zamanlarında elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalaması son satırda verilmiştir. Tabloda verilen değerler incelendiğinde, ele alınan tüm akış zamanlarında OMGH ve OKH kriterine göre DES modelinin deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu görülmektedir. RNG, SST ve DES modelleri kullanılarak elde edilen OMGH değerlerinin sırasıyla %3.51, %3.57 ve %3.03 olduğu ve bu değerlerin kuru yatak ve α=0.1 durumlarından daha küçük olduğu söylenebilir. Bu sonuçlardan α=0.4 durumunda kullanılan türbülans modellerinin deneysel verilere oldukça yakın tahminde bulunduğu ve aralarında %0.54'lük farkın bulunmasından dolayı tüm modellerin aslında başarılı olduğu söylenebilir

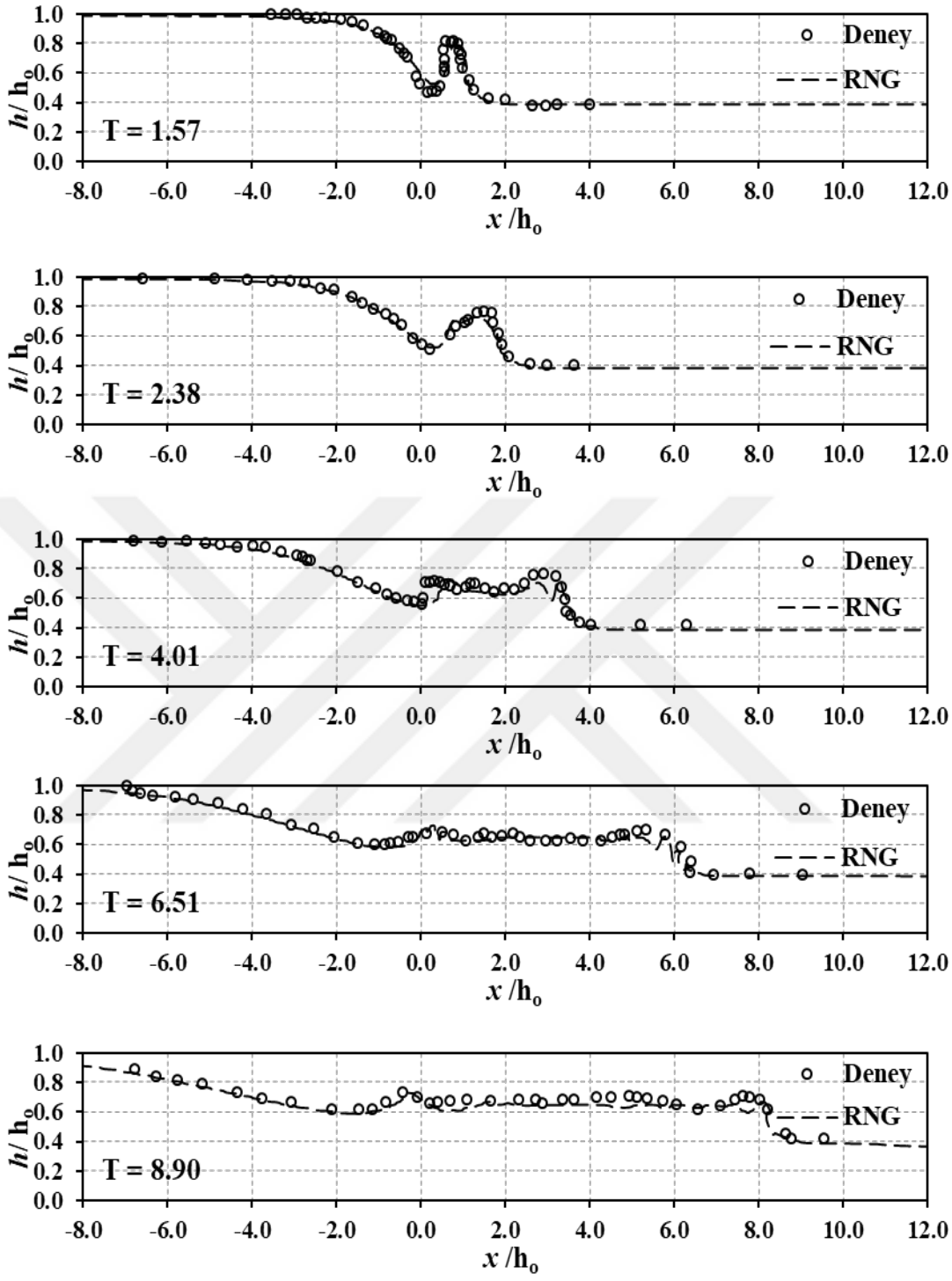


Şekil 4.27. α=0.4 derinlik oranı memba ve mansap derinliklerini gösteren mesh görüntüsü

Çizelge 4.3. α=0.4 derinlik oranı için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri

Model	RNG		SST		DES	
T	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**
1.57	2.88510 $^{(2)}$	0.00082$^{(2)}$	2.90010$^{(3)}$	0.00080$^{(3)}$	2.78250$^{(1)}$	0.00079$^{(1)}$
2.38	2.05180 $^{(2)}$	0.00036$^{(2)}$	2.15380$^{(3)}$	0.00049$^{(3)}$	1.76740$^{(1)}$	0.00036$^{(1)}$
4.01	4.16750 $^{(2)}$	0.00143$^{(2)}$	4.40880$^{(3)}$	0.00164$^{(3)}$	3.18780$^{(1)}$	0.00129$^{(1)}$
6.51	3.89540 $^{(3)}$	0.00105$^{(2)}$	3.86450$^{(2)}$	0.00106$^{(3)}$	3.40750$^{(1)}$	0.00101$^{(1)}$
8.90	4.54890 $^{(3)}$	0.00140$^{(3)}$	4.51450$^{(2)}$	0.00130$^{(2)}$	3.99980$^{(1)}$	0.00118$^{(1)}$
Ort.	3.50974 $^{(2)}$	0.00101$^{(2)}$	3.56834$^{(3)}$	0.00106$^{(3)}$	**3.02900$^{(1)}$**	**0.00093**$^{(1)}$

Şekil 4.28.'de, α=0.4 için farklı akış zamanlarında RNG türbülans modelli kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Ele alınan akış zamanlarında deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bunun yanında kutu yatak ve α=0.1 durumunda baraj yıkılması neticesinde oluşan yayılım dalgasının ön bölgesinde deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumsuzluğun α=0.4 durumunda meydana gelmediği anlaşılmakta ve bu uyum Çizelge 4.3.'te verilen değerlerin oldukça küçük olmasından da anlaşılmaktadır. Ayrıca, mansap bölgesinde bulunan su yüksekliğinin artmasıyla baraj yıkılma dalgasının düşü yüksekliğinin azalmasıyla su yüzü profillerinde meydana gelen değişim oldukça sınır kaldığı değerlendirilmektedir



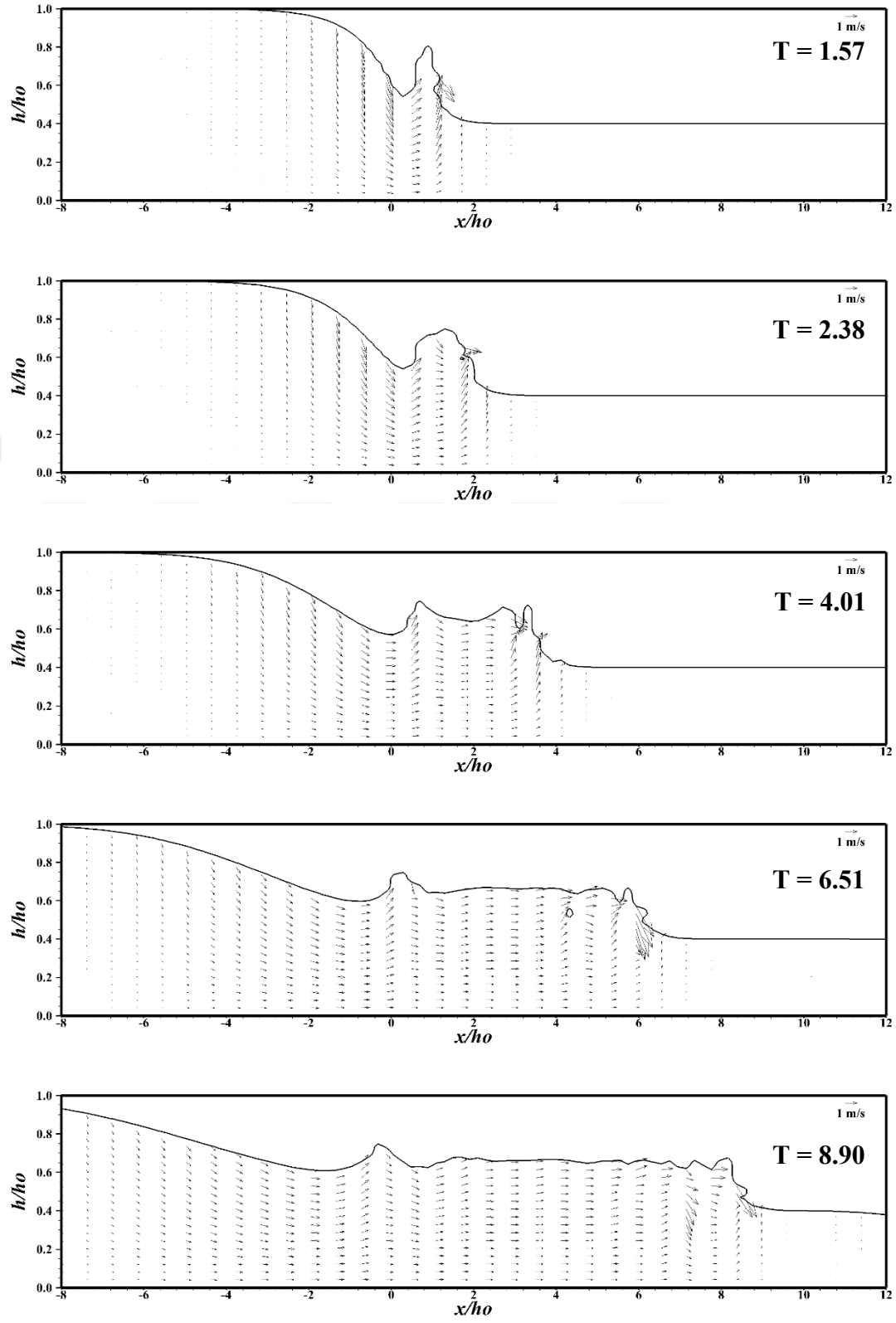
Şekil 4.28. α=0.4 durumunda deneysel ve RNG ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması

Şekil 4.29., Şekil 4.30. ve Şekil 4.31.'de sırasıyla RNG türbülans modelli kullanılarak elde edilen hız vektörlerinin, yatay hız bileşeninin ve türbülans kinetik enerjisinin farklı akış zamanlarındaki desenleri verilmiştir. Şekil 4.29.'da verilen hız vektörlerinin deseninden, tüm akış zamanlarında yayılım dalgasının önünde hız vektörlerinin y doğrultusunda aşağı yönlü olduğu ve yayılım dalgası ön dikliğinin akış zamanının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Baraj yıkılmasından sonra oluşan yayılım dalgasının ön bölgesinde akış zamanının ilerlemesiyle birlikte dalganın kırıldığı vektörlerin yönlerinden anlaşılmaktadır. T=1.57 durumunda mansap bölgesinde suyun bulunmasından dolayı akım bölgesinde harekete geçen su kütlesinin oldukça az olduğu, T=8.9 durumunda ise akım bölgesinin neredeyse tamamının harekete geçtiği elde edilen hız vektörlerinin deseninden söylenebilir. T=4.01 durumunda ikinci bir dalga oluşumu başlamakta ve akış zamanının ilerlemesiyle bu ikinci dalganın dikliği artmaktadır.

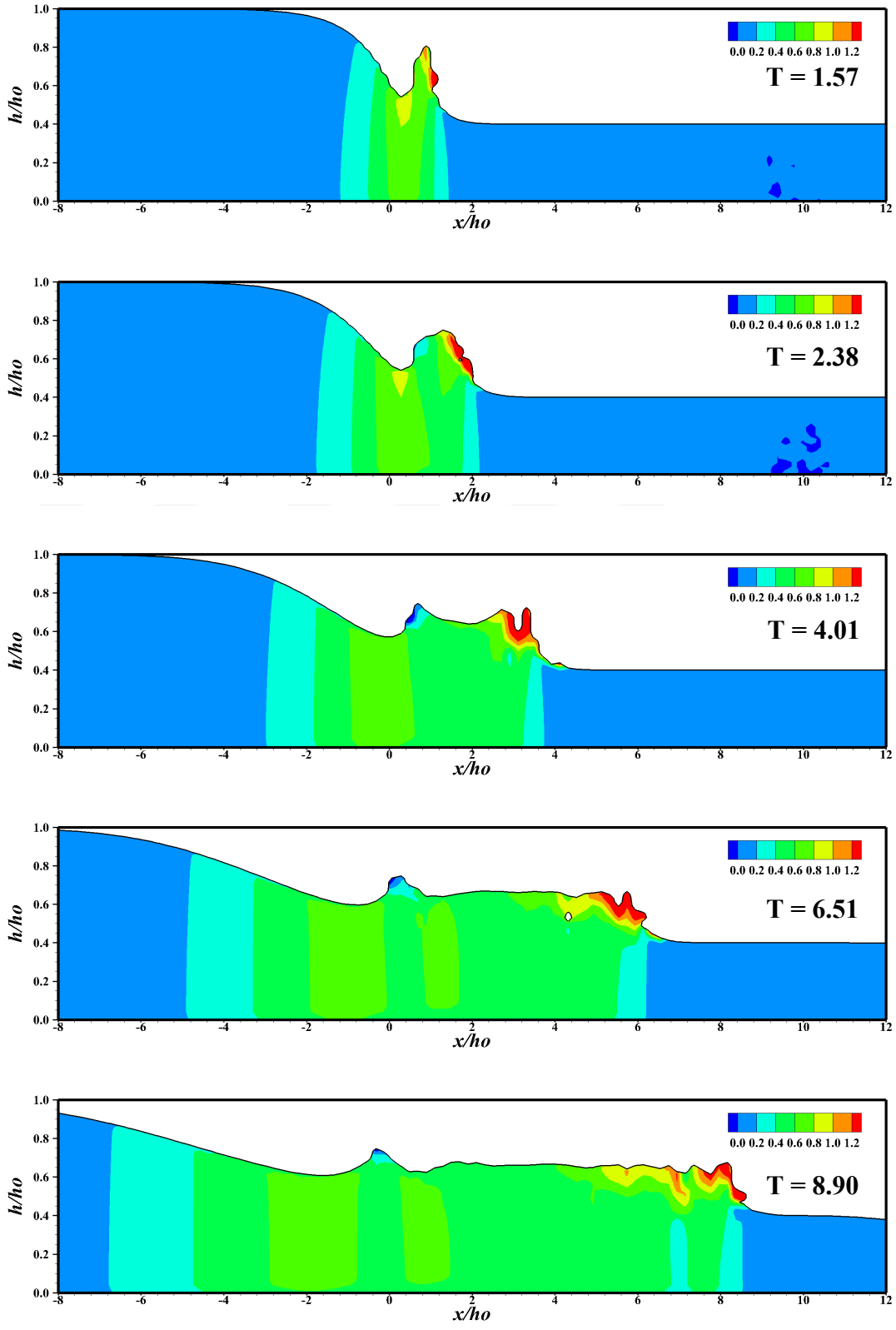
α=0.4 durumunda RNG türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanında elde edilen yatay hız bileşenine ait desenler Şekil 4.30.'da verilmiştir. Tüm akış zamanlarında yatay hız bileşeninin maksimum değerinin yayılım dalgasının önünde oluştuğu ve değerinin 1.2m/s'den büyük olduğu görülmektedir. Yatay hız bileşeninde oluşan bu maksimum değerin kuru yatak ve α=0.1 durumunda elde edilen değerlerden oldukça küçük olduğu dikkat çekmektedir. Mansap bölgesindeki su yüksekliğinin artmasıyla, baraj yıkılması sonucu oluşan yayılım dalgasının yatay hızı oldukça azalmaktadır.

RNG modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenleri farklı akış zamanları için Şekil 4.31.'de verilmiştir. Farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenlerinden, maksimum türbülans kinetik enerjisi değerinin dalga ön bölgesinde ve dalga çukurunda oluştuğu görülmektedir. Bunun yanında T=1.57 durumunda kanal tabanı üzerinde oldukça küçük bir alanda türbülans kinetik enerjisi oluştuğu ve bu bölgede oluşan türbülans kinetik enerjinin alanının akış zamanının ilerlemesiyle büyüdüğü şekillerden açıkça söylenebilir. Ayrıca, akış zamanının artmasıyla oluşan ikinci dalganın meydana geldiği akım bölgesinin oldukça büyük türbülans kinetik enerjisi değerlerine sahip olmasından, akımın bu bölgede

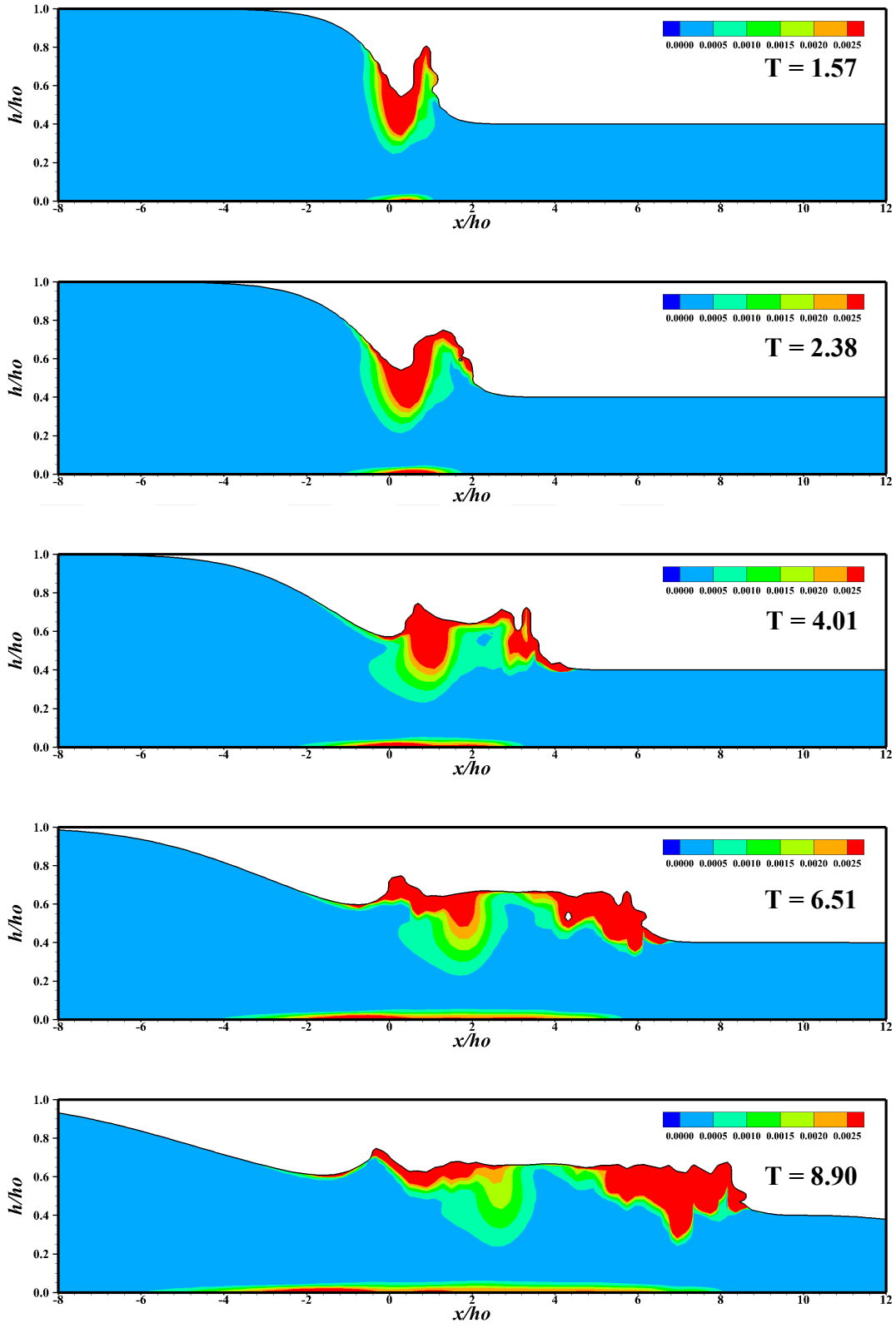
karmaşık bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Kanal tabanı üzerinde meydana gelen türbülans kinetik enerji değerlerinin viskoz kuvvetlerden kaynaklı olarak akım alanında meydana gelen değişiklikten dolayı olduğu değerlendirilmektedir. Kuru yatak ve $\alpha=0.1$ durumunda elde edilen türbülans kinetik enerji değerlerinin $\alpha=0.4$ durumunda elde edilen türbülans kinetik enerji değerlerinden daha büyük olduğu, $\alpha=0.4$ durumunda memba bölgesinden düşü yüksekliğinin daha düşük olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.29. α=0.4 durumunda RNG ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



Şekil 4.30. α=0.4 durumunda RNG ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.31. α=0.4 durumunda RNG ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

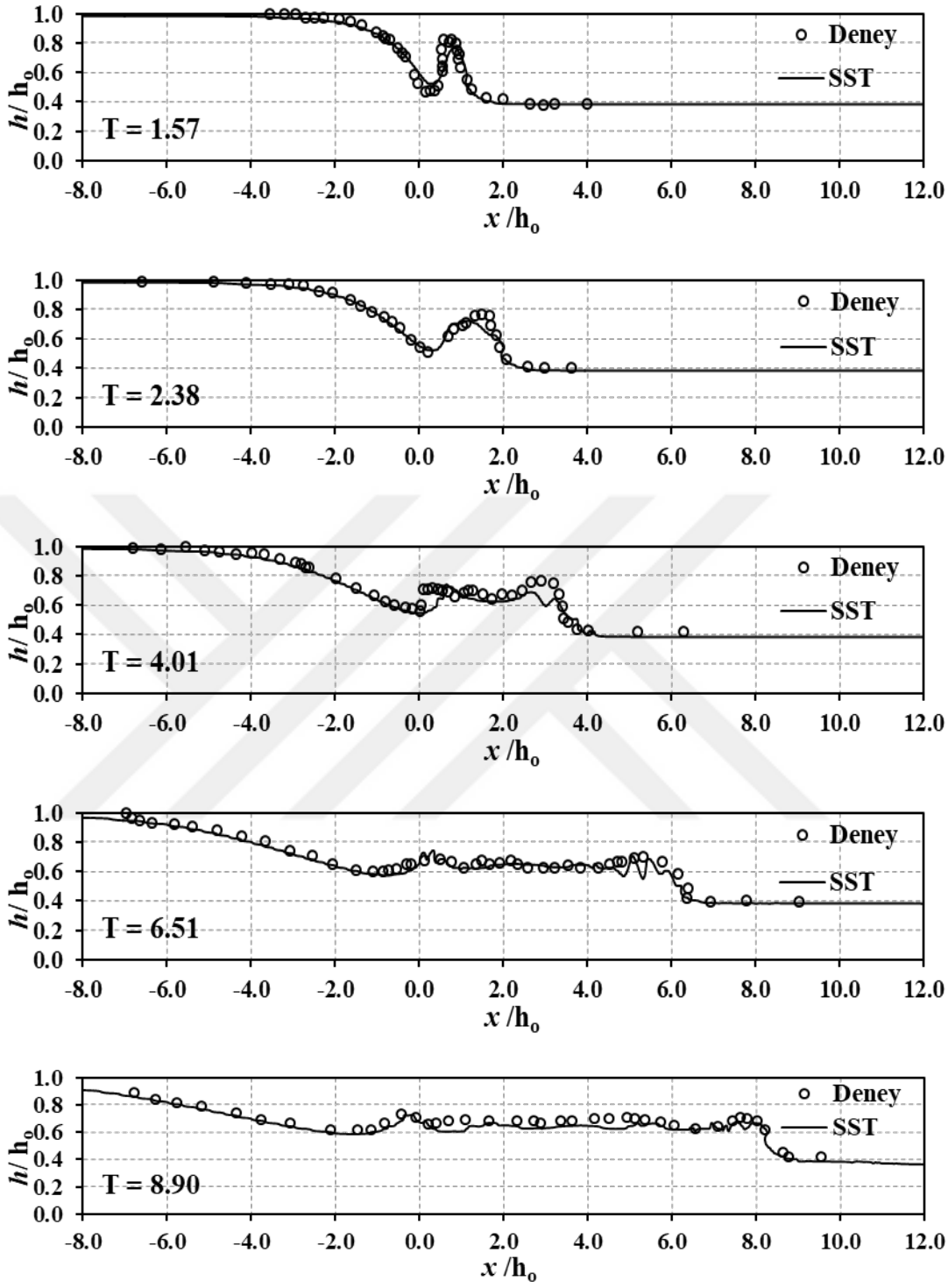
α=0.4 durumunda SST türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.32.'de verilmiştir. Farklı akış zamanlarında sayısal ve deneysel olarak elde edilen su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle baraj yıkılması anına en yakın akış zamanlarında T=1.57 ve 2.38 durumlarında deneysel ve sayısal su yüzü profillerinde dalga önü dikliğinin benzer olduğu söylenebilir. T=4.01 durumunda $0 \leq x/h_o \leq 4$ aralığında, T=6.51 durumunda ise $4 \leq x/h_o \leq 6$ aralığında deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin uyumsuzluğunun diğer bölgelere kıyasla oldukça fazla olduğu görülmektedir. T=8.9 durumunda ise T=4.01 ve 6.51 durumlarında deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumsuzluğun oluşmadığı belirlenmiştir.

Şekil 4.33.'te, α=0.4 durumunda SST türbülans modeliyle farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin desenleri verilmiştir. Elde edilen vektör desenlerinin RNG türbülans modeli kullanılarak elde edilen vektör desenleriyle benzer olduğu görülmektedir. Su yüzüne yakın bölgede hız vektörlerinin y doğrultusunda aşağı yönlü, kanal tabanına yakın bölgede ise x doğrultusunda yatay bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Yayılım dalgasının hareket zamanının artmasıyla, akım alanında daha fazla su kütlesinin harekete geçtiği elde edilen vektör desenlerinden anlaşılmaktadır.

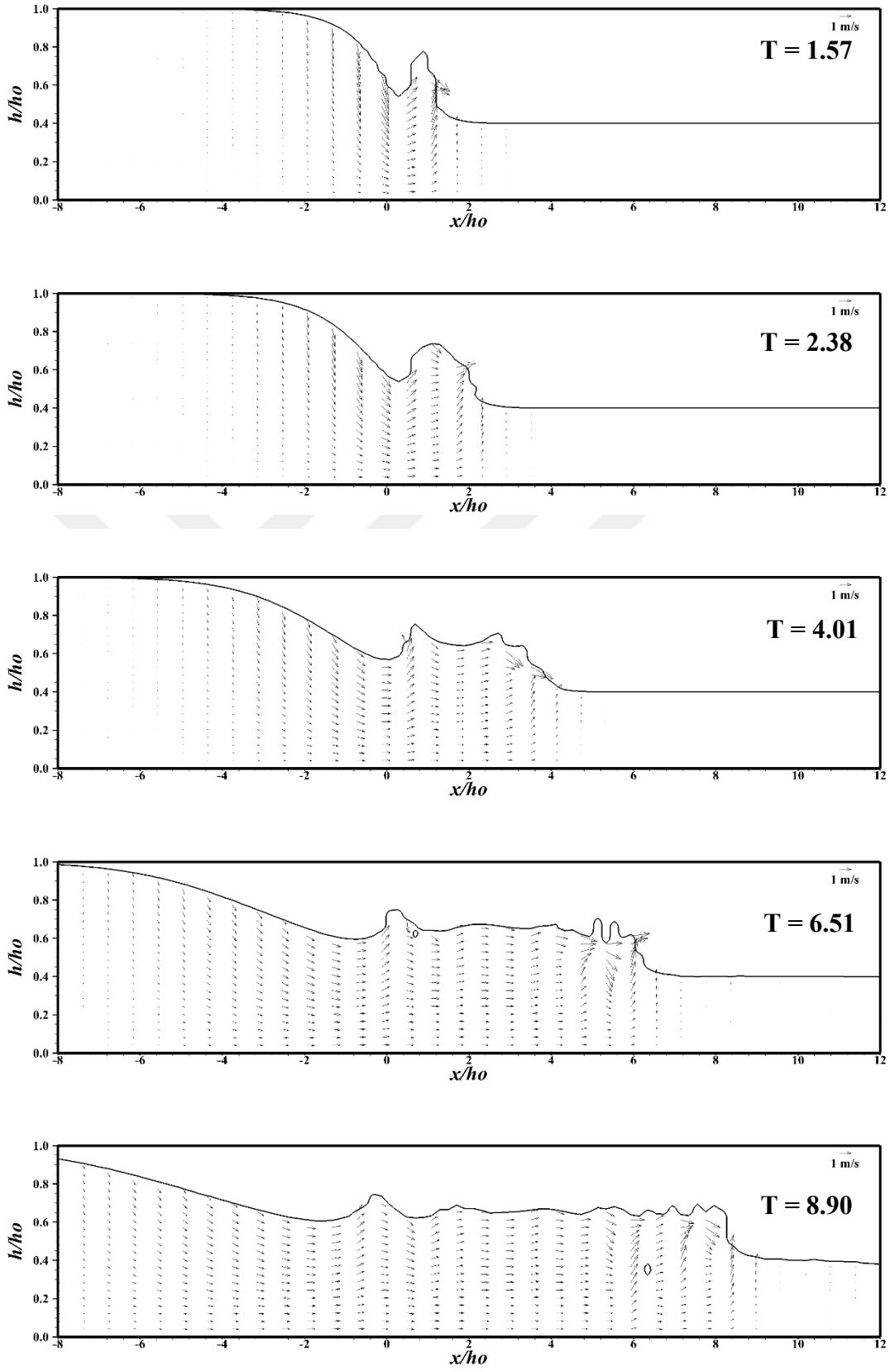
Şekil 4.34.'te, α=0.4 durumunda SST türbülans modeli ile farklı akış zamanlarında elde edilen yatay hız bileşeni desenleri verilmiştir. Ele alınan akış zamanlarının tamamında yatay hız bileşeninin maksimum değerinin dalga önünde oluştuğu belirlenmiştir. İkinci dalga oluşumunun görüldüğü T=4.01, 6.51 ve 8.9 durumlarında ikinci dalganın meydana geldiği bölgede hız değerinin su yüzüne yakın bölgede daha küçük oluştuğu burada düşey doğrultuda hız bileşeninin etkin olduğu görülmektedir.

Şekil 4.35.'te, α=0.4 durumunda SST türbülans modeli ile farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenleri verilmiştir. SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenleri, RNG türbülans modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerjisinden farklı desenlere sahiptir.

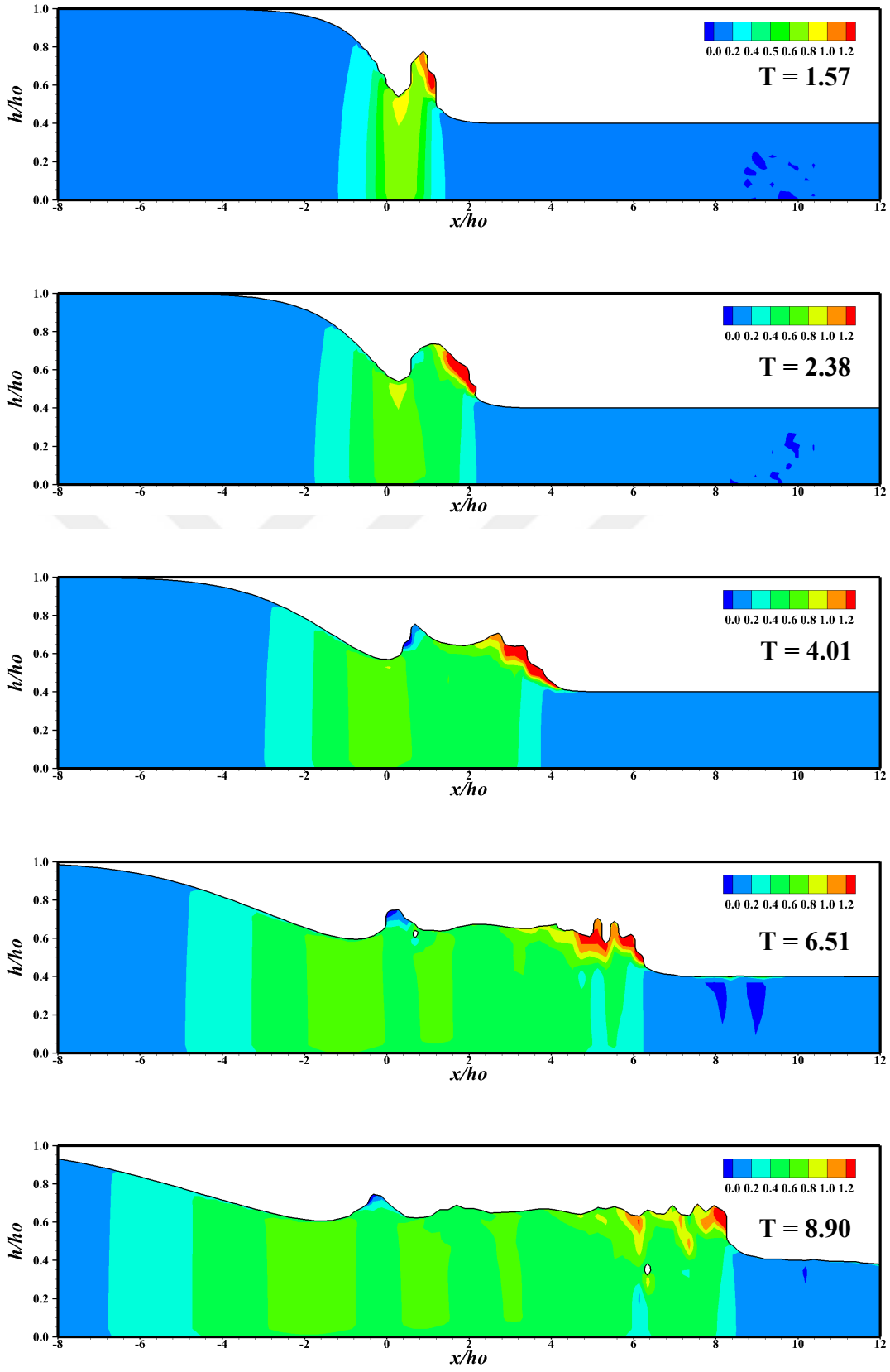
RNG modelinde yayılım dalgasının önünde ve kanal tabanı üzerinde türbülans kinetik enerjinin maksimum değerlere sahip olduğu görülürken, SST modelinde sadece kanal tabanı üzerinde türbülans kinetik enerji maksimum değere sahip olmuştur. Tüm akış zamanlarında, kanal tabanına yakın bölge dışında türbülans kinetik enerji değerinin 0 ile $0.0005 m^2/s^2$ değerine sahip olduğu görülmektedir. Yayılım dalgasının akış zamanının artmasıyla birlikte kanal tabanı üzerinde türbülans kinetik enerjinin meydana geldiği alanının büyüklüğü artmaktadır.



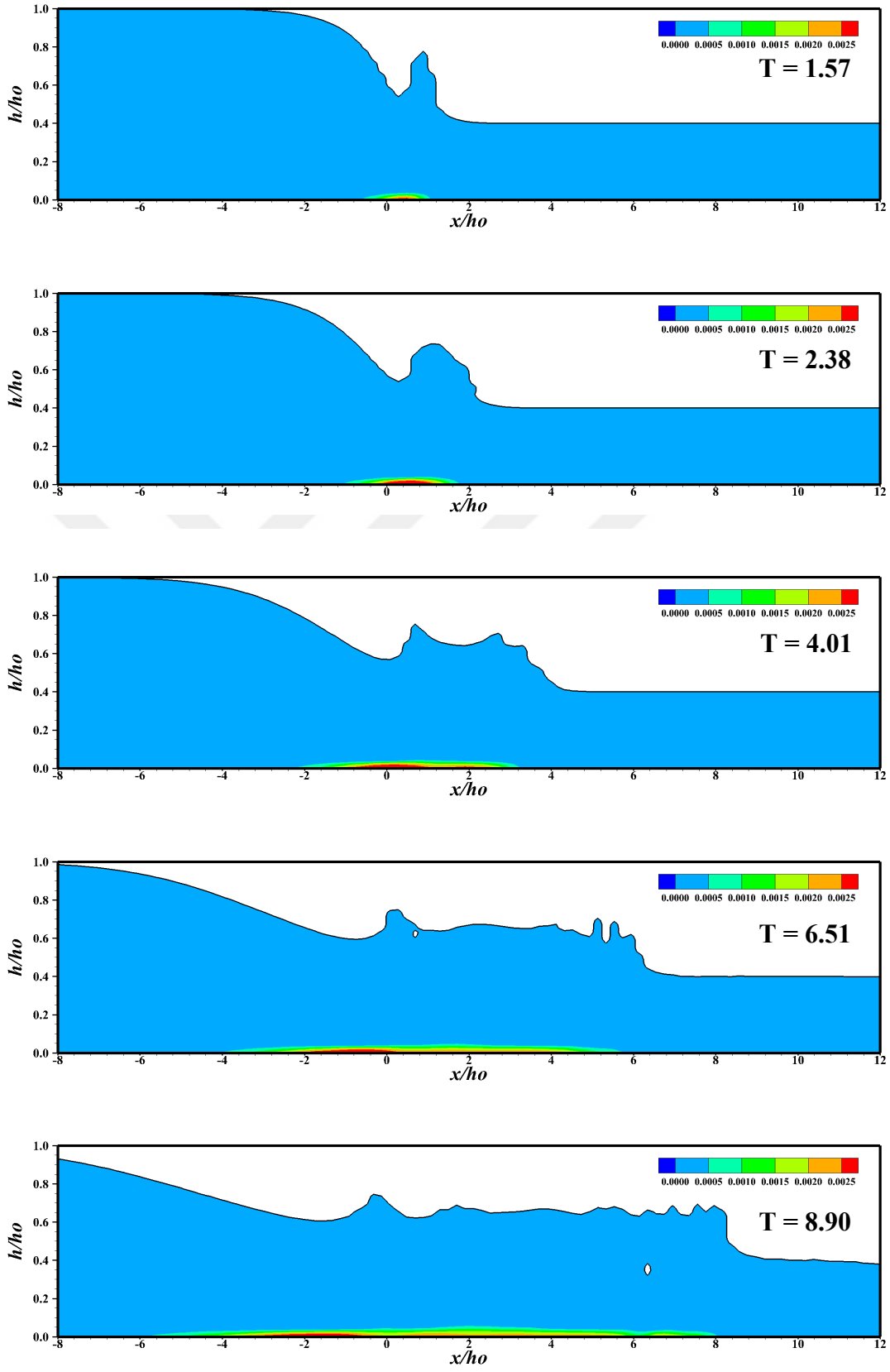
Şekil 4.32. α=0.4 durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.33. α=0.4 durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



Şekil 4.34. α=0.4 durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni

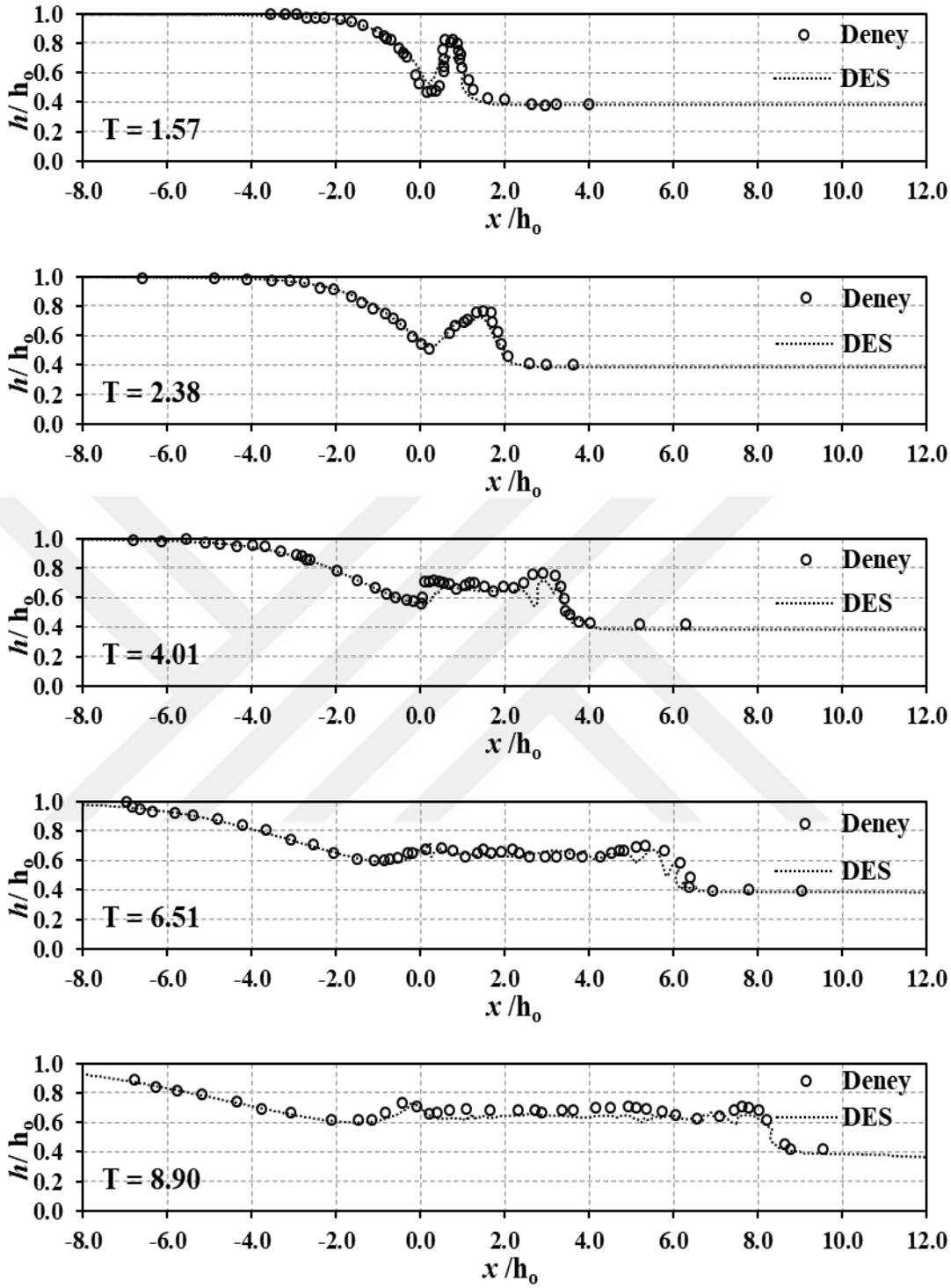


Şekil 4.35. α=0.4 durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

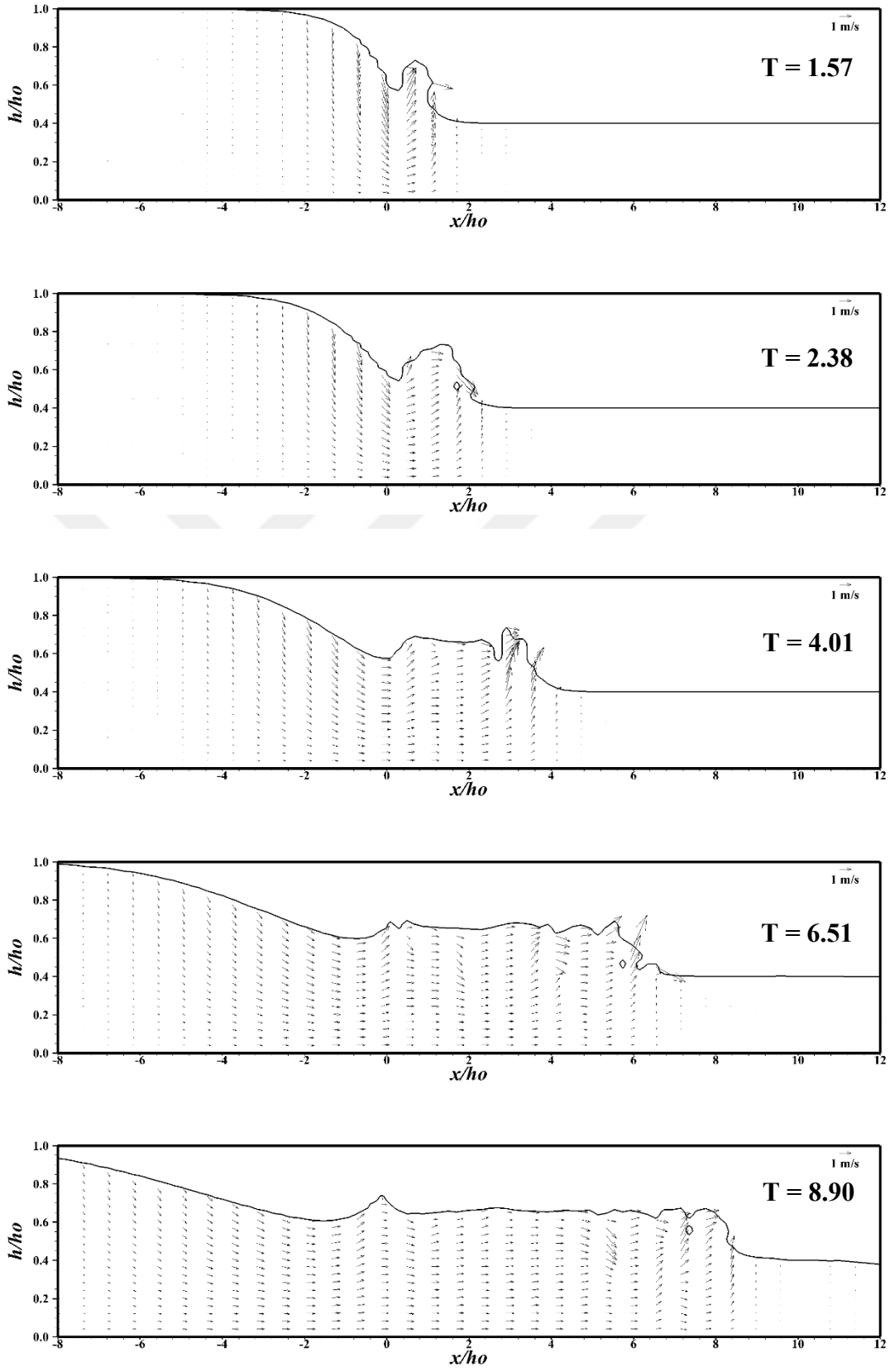
α=0.4 durumunda farklı akış zamanlarında DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.36.'da verilmiştir. Deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin birbirine oldukça benzer olduğu, RNG ve SST türbülans modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerine kıyasla deneysel su yüzü profillerine DES modeliyle daha yakın tahmin edildiği görülmektedir. Bu sonuç Çizelge 4.3.'te verilen OKH ve OMGH değerleriyle de uyum göstermektedir. Özellikle baraj yıkılma anında yayılım dalgası önünde oluşan dikliğin belirlenmesinde DES modelinin oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir.

α=0.4 durumunda DES modeli kullanılarak farklı akış zamanında elde edilen hız vektörlerinin deseni Şekil 4.37.'de verilmiştir. T=1.57 ve 2.38 akış zamanlarında dalga önünde hız vektörlerinin y doğrultusunda aşağı yönlü oluştuğu, ele alınan diğer akış zamanlarında ise bu bölgedeki hız vektörlerinin y doğrultusunda yukarı yönlü oluştuğu söylenebilir. Ele alınan akış zamanlarında genel olarak su yüzüne yakın bölgede hız vektörlerinin y doğrultusunda aşağı yönlü olduğu, kanal tabanına yakın bölgede ise x doğrultusunda hızlara sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında, T=8.9 durumunda memba bölgesinden yayılan yıkılma dalgasının mansap bölgesindeki suyla etkileşime girmesiyle hız vektörlerinin büyüklüğünün arttığı anlaşılmaktadır.

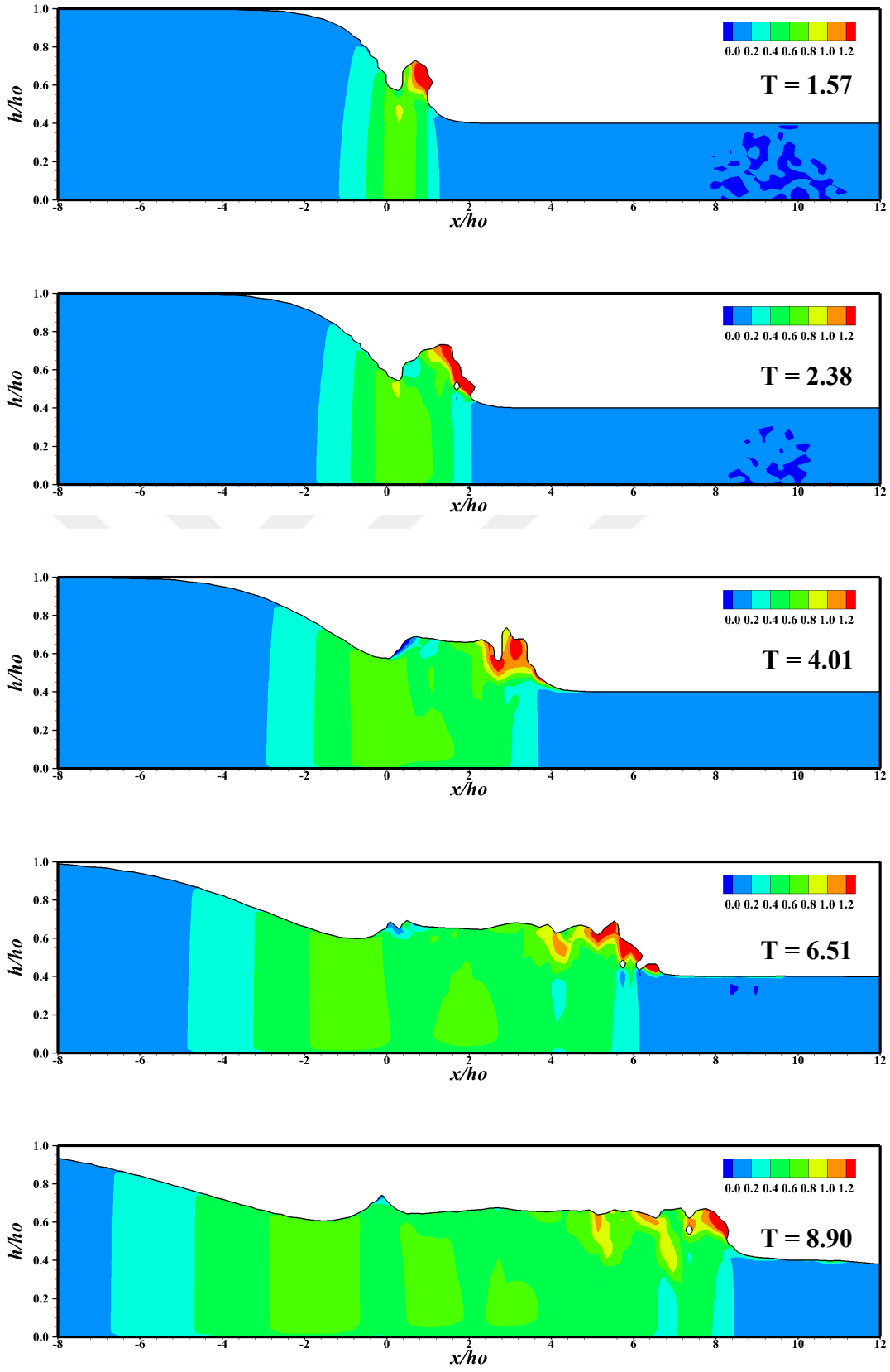
α=0.4 durumunda DES modeli kullanılarak farklı akış zamanında elde edilen yatay hız bileşenin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri sırasıyla Şekil 4.38. ve Şekil 4.39.'da verilmiştir. Farklı akış zamanlarında yatay bileşenlerine ait desenlerin incelenmesinden, yayılım dalgasının önünde maksimum yatay hızların oluştuğu görülmektedir. DES modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerji deseninin RNG türbülans modelleriyle elde edilen türbülans kinetik enerji desenlerine benzer olduğu, SST türbülans modeliyle elde edilen türbülans kinetik enerji desenlerinin ise sadece kanal tabanı üzerinde benzer olduğu, fakat dalga önü bölgesinde ise farklılıklar bulunmaktadır.



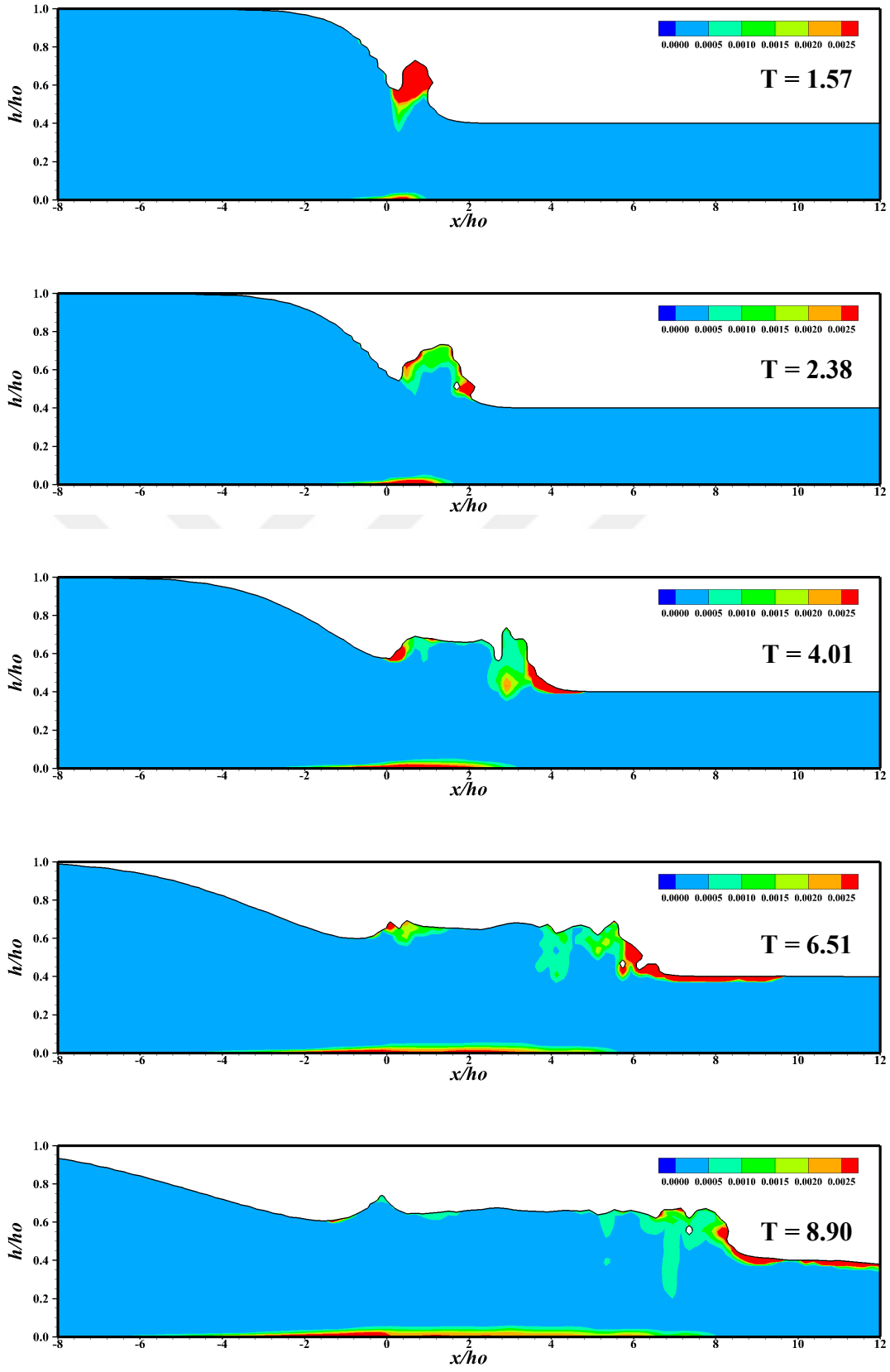
Şekil 4.36. α=0.4 durumunda deneysel ve DES ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.37. α=0.4 durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



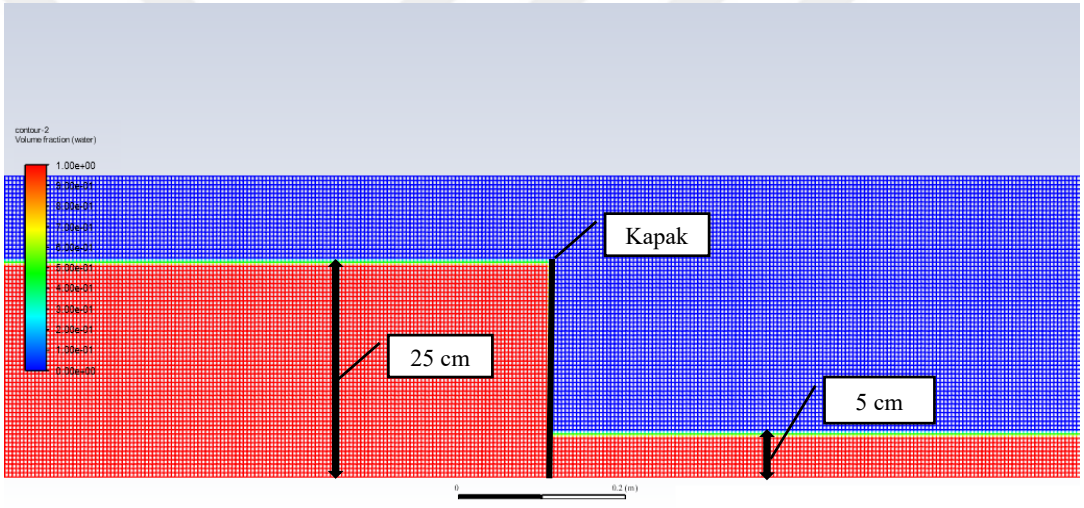
Şekil 4.38. α=0.4 durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.39. α=0.4 durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

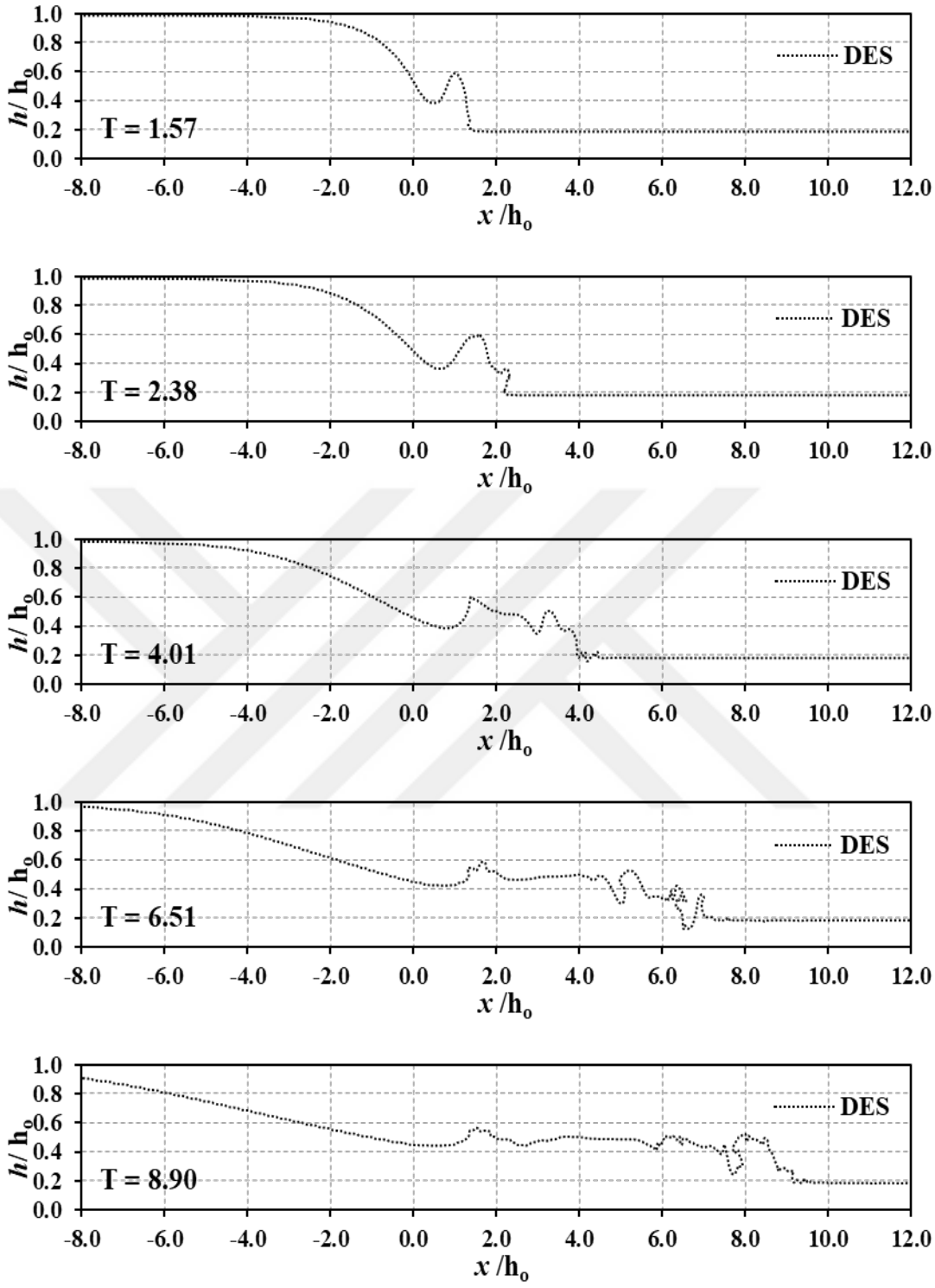
4.4. α=0.2 Durumu

α=0.2 durumunda deneysel olarak elde edilen su yüzü profillerinin grafiksel olarak değil sadece kamera görüntülerinin verilmesinden dolayı bu durumda deneysel ve sayısal su yüzü profilleri karşılaştırılamamıştır. Deneysel olarak değerlendirilmeyen hız vektörlerinin, yatay hız bileşeninin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri kuru yatak, α=0.1 ve 0.4 durumlarında en başarılı türbülans modeli olan DES modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilmiştir. α=0.2 durumunda sayısal modellemeye ait çözüm bölgesi, başlangıç şartları ve hesaplama ağı görüntüsü Şekil 4.40.'ta verilmiştir.



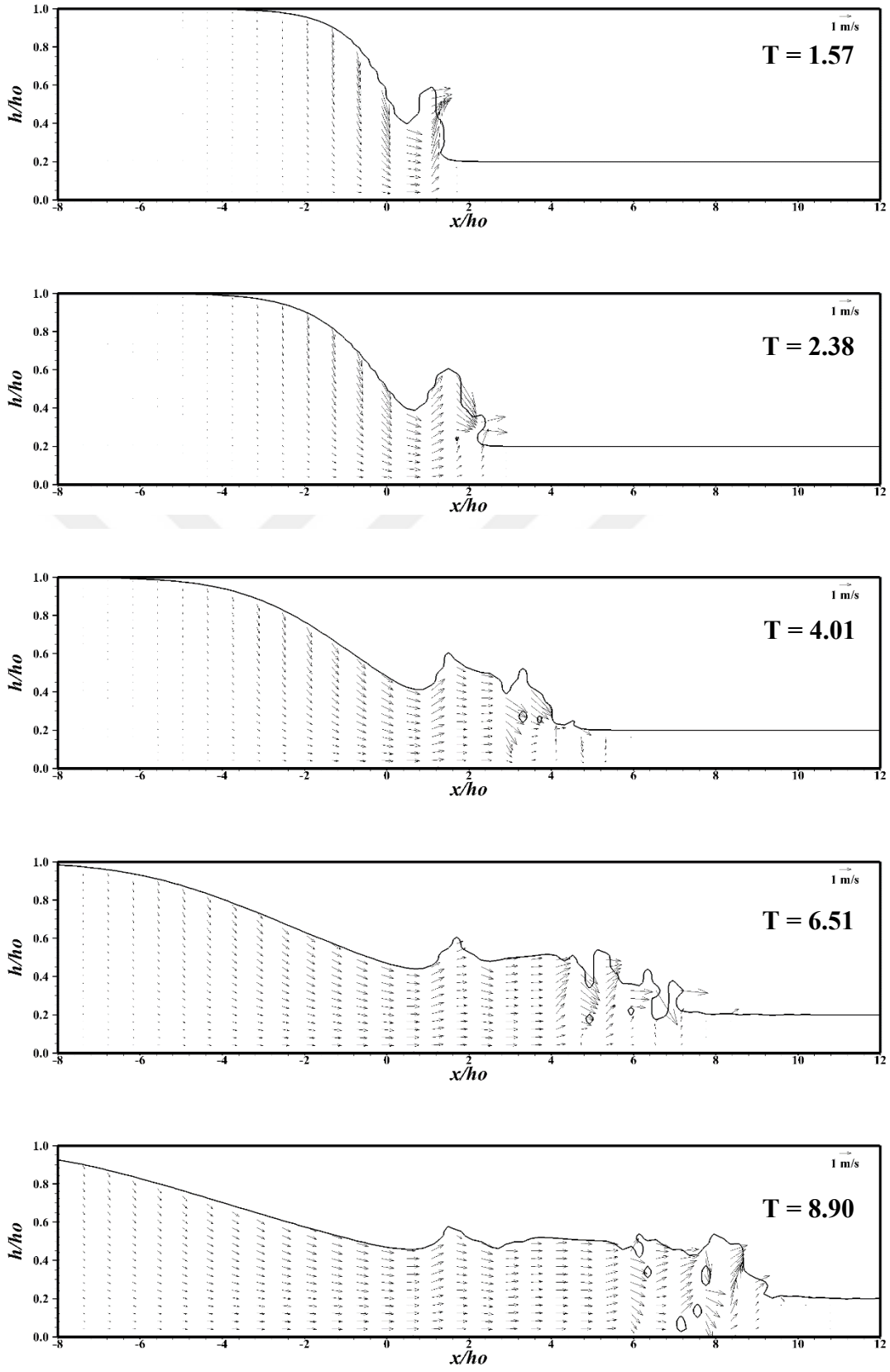
Şekil 4.40. α=0.2 derinlik oranı memba ve mansap derinliklerini gösteren mesh görüntüsü

DES türbülans modeli kullanılarak α=0.2 durumunda farklı akış zamanları için elde edilen su yüzü profilleri Şekil 4.41.'de verilmiştir. Kapak kaldırıldıktan sonra memba kısmındaki depolanan su yerçekimi etkisiyle mansap bölgesine doğru hareket etmekte ve bu bölgede bulunan kuyruk suyunu sürüklemektedir. T=1.57 olduğu durumda dalga önü dikliğinin x/h_o oranının 0 ile 2 arasında değiştiği bölgede oluştuğu, akış zamanının artmasıyla dalganın x doğrultusunda ilerlemesiyle daha büyük x/h_o değerlerinde dalga önü dikliğinin oluştuğu görülmektedir.

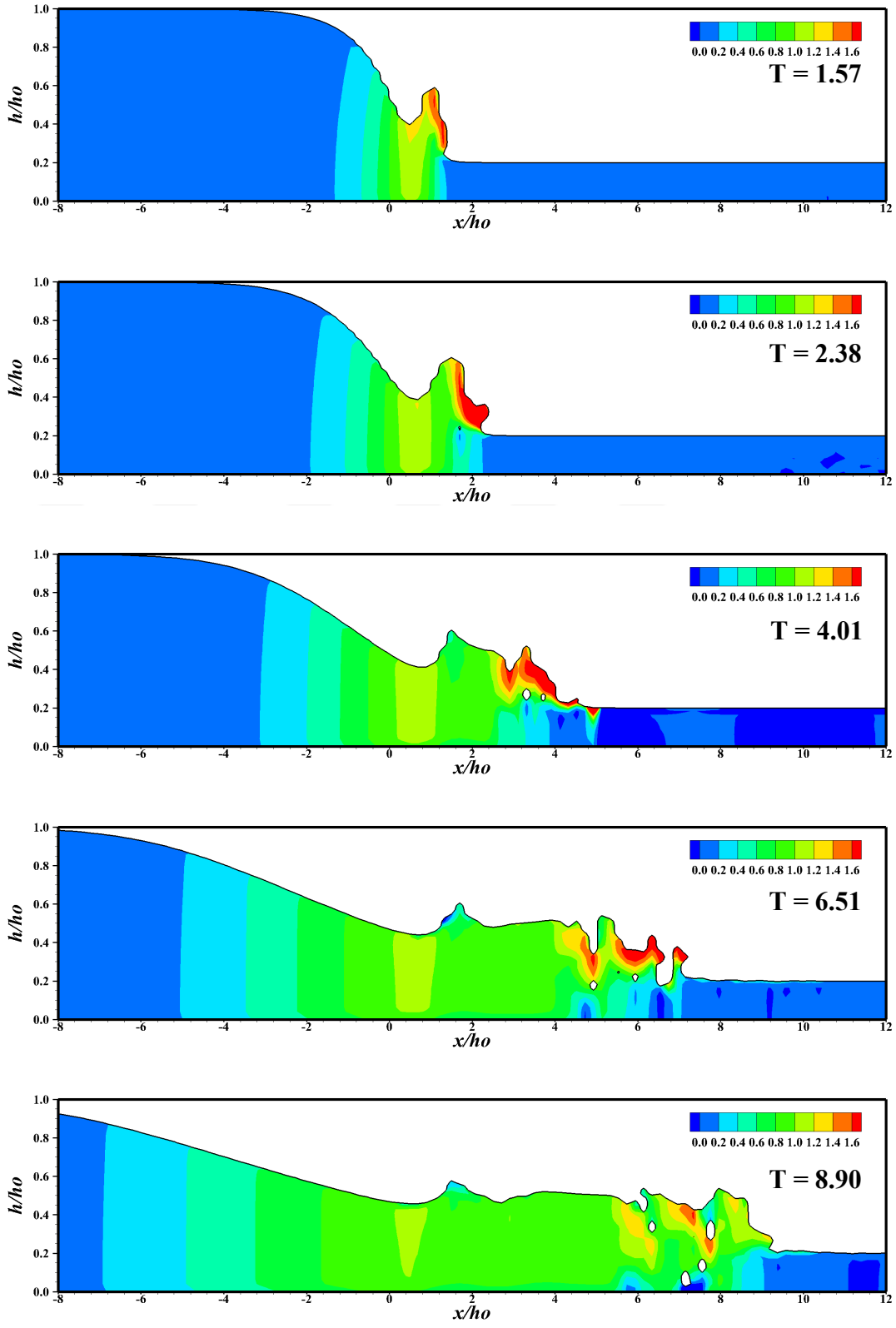


Şekil 4.41. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen su yüzü profilleri

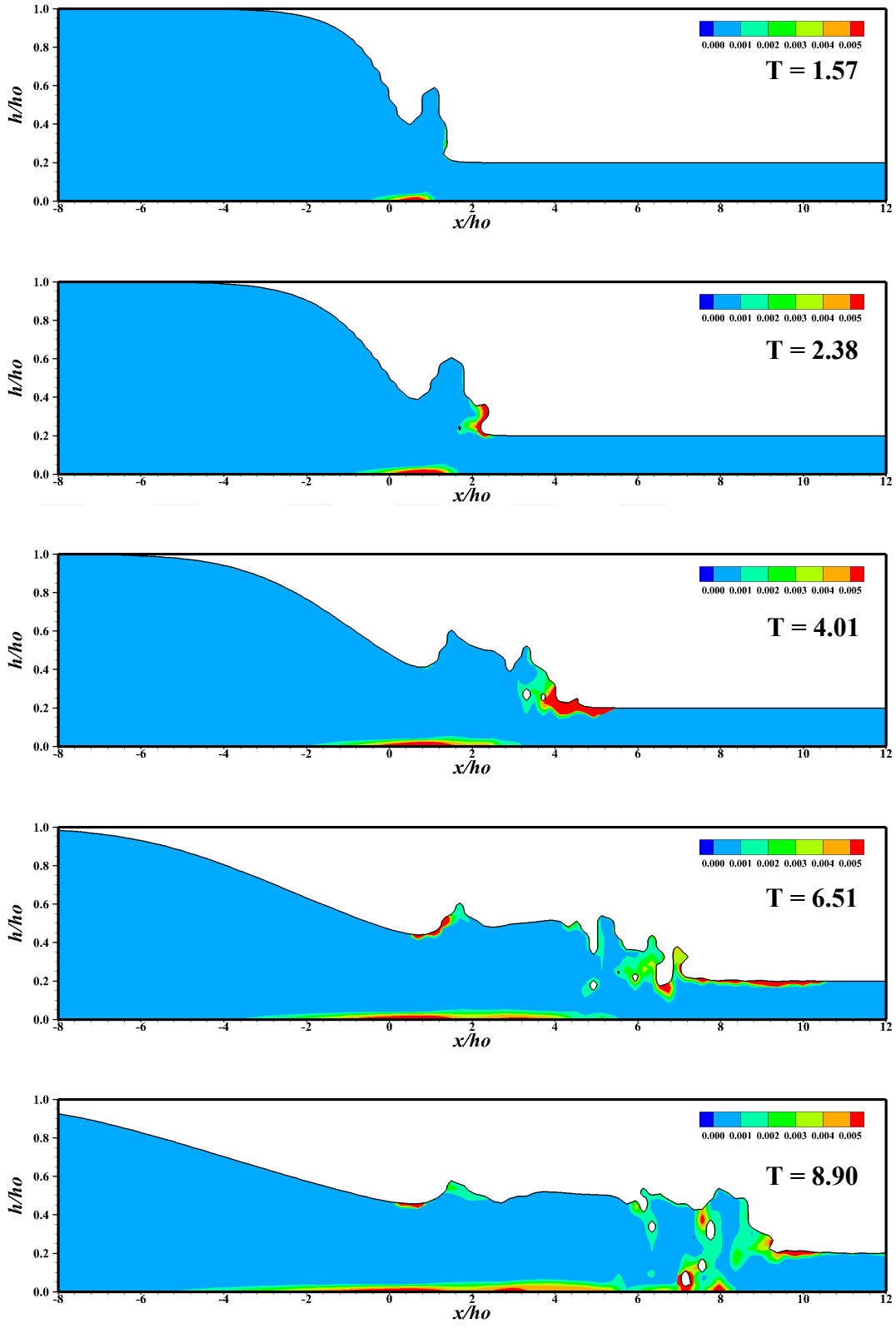
α=0.2 durumunda DES modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin, yatay hız bileşeninin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri sırasıyla Şekil 4.42., Şekil 4.43. ve Şekil 4.44.'te verilmiştir. Şekil 4.42.'de verilen hız vektörlerinin desenlerinden T=1.57 durumunda yayılım dalgasının ön bölgesinin y doğrultusunda yukarı yönde hareket sergilediği, ele alınan diğer akış zamanlarında ise bu yukarı yönlü hareketin yerine aşağı yönlü bir hareketin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, T=4.01 durumundan itibaren suyun içerisinde dalga kırılmasından kaynaklı olarak hava kabarcıkları karışmış bulunmaktadır. Ele alınan akış zamanlarında mansap bölgesinde bulunan kuyruk suyunun yayılan dalgadan kaynaklı tamamen hareket ettiğinden söz edilemez. Daha önceki bölümlerde incelenen akım durumlarına benzer olarak su yüzüne yakın bölgede elde edilen hız vektörleri y doğrultusunda aşağı yönlü olarak elde edilmiştir. Şekil 4.43.'te DES türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen yatay hız bileşeni desenlerinden yatay hız bileşenin maksimum değerine yayılım dalgası önünde sahip olduğu ve akış zamanının ilerlemesiyle hareket eden su miktarının hız alanın büyüdüğü görülmektedir. Hız alanında negatif hız değerlerinin bulunmamasından dolayı negatif dalganın oluşmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.44.'de α=0.2 durumunda DES modeliyle farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenlerinden, hızın maksimum değerine sahip olduğu yayılım dalgasının önünde türbülans kinetik enerjinin de maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, türbülans kinetik enerjisinin baraj yıkılmasından dolayı kanal tabanı üzerinde x/h_o değerinin yaklaşık olarak 0 ile 1 arasında olduğu bölgede maksimum değere sahiptir. Akış zamanının artmasına paralel olarak, kanala tabanı üzerinde maksimum türbülans kinetik enerjisinin görüldüğü alanın büyüdüğü ve kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Bu bölgede özellikle viskoz gerilmelerin akım alanı üzerinde etkili olduğu ve bu bölgede hız değişimlerinin yaşandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.42. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



Şekil 4.43. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.44. α=0.2 durumunda DES ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni

4.5. Baraj Mansabında Üçgen Engel Bulunması Durumu

Baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılımı, gerçek arazi koşullarında mansap bölgesindeki farklı akım koşullarının yanında topoğrafik koşullardan da etkilenmektedir. Baraj mansabında yerleşim yerinin konumuna göre eğim, daralmalar, genişlemeler ve engeller buluna bilmektedir. Ancak bu koşulların değişimi çok sık olduğundan ve gerçek topoğrafya verileri bulunmadığından modellemesi oldukça zordur. Kocaman (2007) tarafından yapılan laboratuvar deneylerinde kanal tabanındaki farklı engellerin etkisinin araştırılması için kanal tabanına basit geometriye sahip üçgen ve trapez engeller yerleştirilmiştir.

Sayısal model oluşturulurken Şekil 3.3.'de verilen Kocaman (2007) tarafından yapılan deneydeki kanal boyutları dikkate alınmış ve engel baraj aksından 1.50 m uzağa yerleştirilmiştir. Baraj kapağının memba kısmında 4.65 m uzunluğunda 0.25 m yüksekliğinde su bulunduğu ve mansap kısmının kuru olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Mansap kısmında üçgen engel bulunması durumunda üç farklı türbülans modeli kullanılarak incelenen zamanlarda elde edilen su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda elde edilen OMGH ve OKH değerleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Tabloda bulunan OKH ve OMGH değerlerinin parantez içinde verilen üst indisleri kullanılan modellerin başarı sıralamasını göstermektedir. Çizelgenin son satırında, tüm türbülans modellerinde farklı zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalaması alınmıştır. Çizelgede verilen değerler incelendiğinde, son satırda verilen ortalama OMGH ve OKH kriterine göre SST modelinin deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu görülmektedir. Ayrıca, ele alınan ilk akış zamanlarında (T=11.90, 15.16, 17.54, 20.67 ve 23.05) RNG türbülans modeli çok az bir farkla SST türbülans modelinden en başarılı tahminde bulunmuştur. Ele alınan diğer akış zamanlarında ise SST türbülans modeli deneysel su yüzü profillerine en yakın su yüzü profilini tahmin etmiştir. Ancak, diğer tüm zaman dilimlerinde ve incelenen zaman dilimlerinin ortalamasına bakıldığında SST türbülans modeli daha başarılı model olmuştur. Çizelgenin son satırında verilen ortalama OMGH değerlerinin RNG, SST ve DES modelleri için sırasıyla 12.12938, 11.99424, ve 12.52217 olduğu, OKH değerlerinin ise sırasıyla 0.00234, 0.00222 ve 0.00255

olduğu görülmektedir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere mansap bölgesinde üçgen engel bulunması durumunda elde edilen hata değerlerinin daha önce ele alınan durumlardan büyük olduğu, diğer bir değişle sayısal modellemelerin mansap bölgesinde engel bulunması durumunda, daha önce ele alınan akım durumlarına kıyasla daha başarısız olduğu söylenebilir

Çizelge 4.4. Üçgen engel durumu için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri

Model	**RNG**		**SST**		**DES**	
T	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**
11.90	16.28983**(1)**	0.00168**(1)**	16.51860**(2)**	0.00172**(2)**	16.76332**(3)**	0.00176**(3)**
15.16	10.49985**(1)**	0.00104**(1)**	10.80526**(2)**	0.00106**(2)**	10.95255**(3)**	0.00111**(3)**
17.54	15.47150**(1)**	0.00659**(1)**	15.62564**(2)**	0.00662**(2)**	15.76473**(3)**	0.00666**(3)**
20.67	9.71723**(1)**	0.00145**(1)**	9.75714**(2)**	0.00145**(2)**	9.91225**(3)**	0.00157**(3)**
23.05	10.93216**(1)**	0.00372**(1)**	10.98723**(2)**	0.00374**(2)**	11.19939**(3)**	0.00411**(3)**
29.69	9.44019**(2)**	0.00276**(2)**	9.02979**(1)**	0.00205**(1)**	9.98815**(3)**	0.00313**(3)**
35.83	9.76573**(2)**	0.00224**(2)**	9.58434**(1)**	0.00195**(1)**	9.97979**(3)**	0.00259**(3)**
41.84	8.92216**(2)**	0.00122**(2)**	8.66334**(1)**	0.00112**(1)**	9.74311**(3)**	0.00165**(3)**
49.99	10.79091**(2)**	0.00105**(2)**	10.20655**(1)**	0.00093**(1)**	11.27549**(3)**	0.00121**(3)**
62.77	19.46429**(2)**	0.00165**(2)**	18.76452**(1)**	0.00154**(1)**	19.64292**(3)**	0.00172**(3)**
Ort.	12.12938**(2)**	0.00234**(2)**	**11.99424(1)**	**0.00222(1)**	12.52217(3)	0.00255(3)

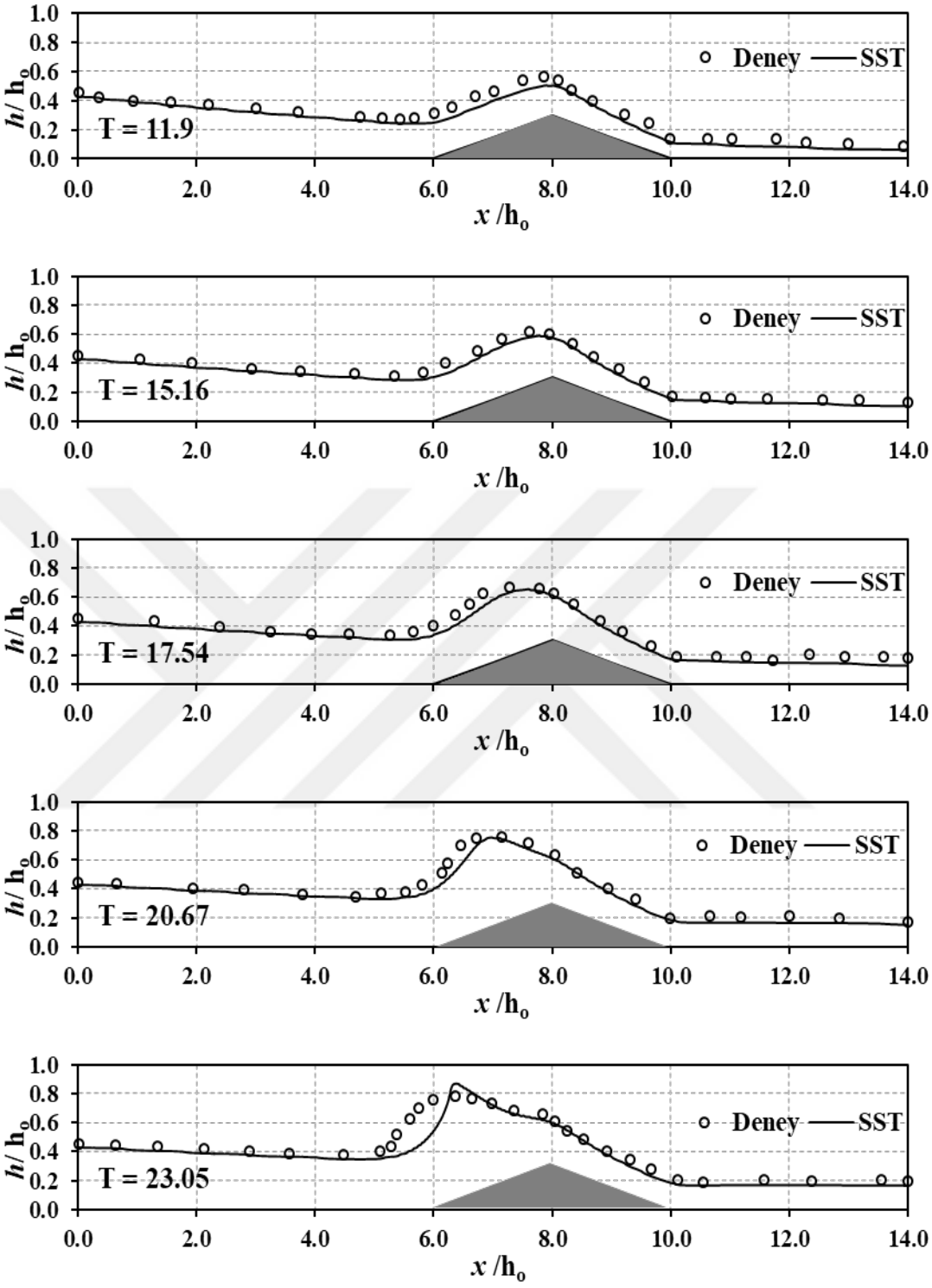
Mansap kısmında üçgen engel bulunması durumunda elde edilen deneysel su yüzü profilleriyle ve ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı model olarak belirlenen SST türbülans modeliyle elde edilen su yüzü karşılaştırılması Şekil 4.45.'de verilmiştir. Taşkın dalgasının üçgen engel üzerinden geçerken bir kısmı eşiği aşmakta bir kısmı ise membaya doğru negatif dalga meydana getirmektedir. T=11.90, 15.16 ve 17.54 zamanlarında deneysel su yüzü profilleri ile SST türbülans modeli ile oluşturulan su yüzü profillerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. T=20.67, T=23.05 de is engel üzerinde yükselerek negatif dalga kabarmasıyla 4.05 ile 6.5 x/h0 değerleri arasında deneysel ve sayısal model arasında uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. T=29.69 ve 35.83 akış zamanında membaya doğru ilerleyen negatif taşkın dalgası ile eşiğe doğru ilerleyen dalganın yükseklik farkı oluştuğu kısımlarda (2 ile 4 ve 0 ile 2 5 x/h0 değerleri) deneysel ve sayısal model arasında uyumsuzluklar görülebilmektedir. T=41.84 ve sonraki kesitlerde negatif taşkın dalgası membaa ya

ulaştığından ve memba kısmı kapalı olduğundan dolayı engele doğru yüksekliği artmış olarak hareket etmektedir. Bu akış zamanlarında deneysel ve SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

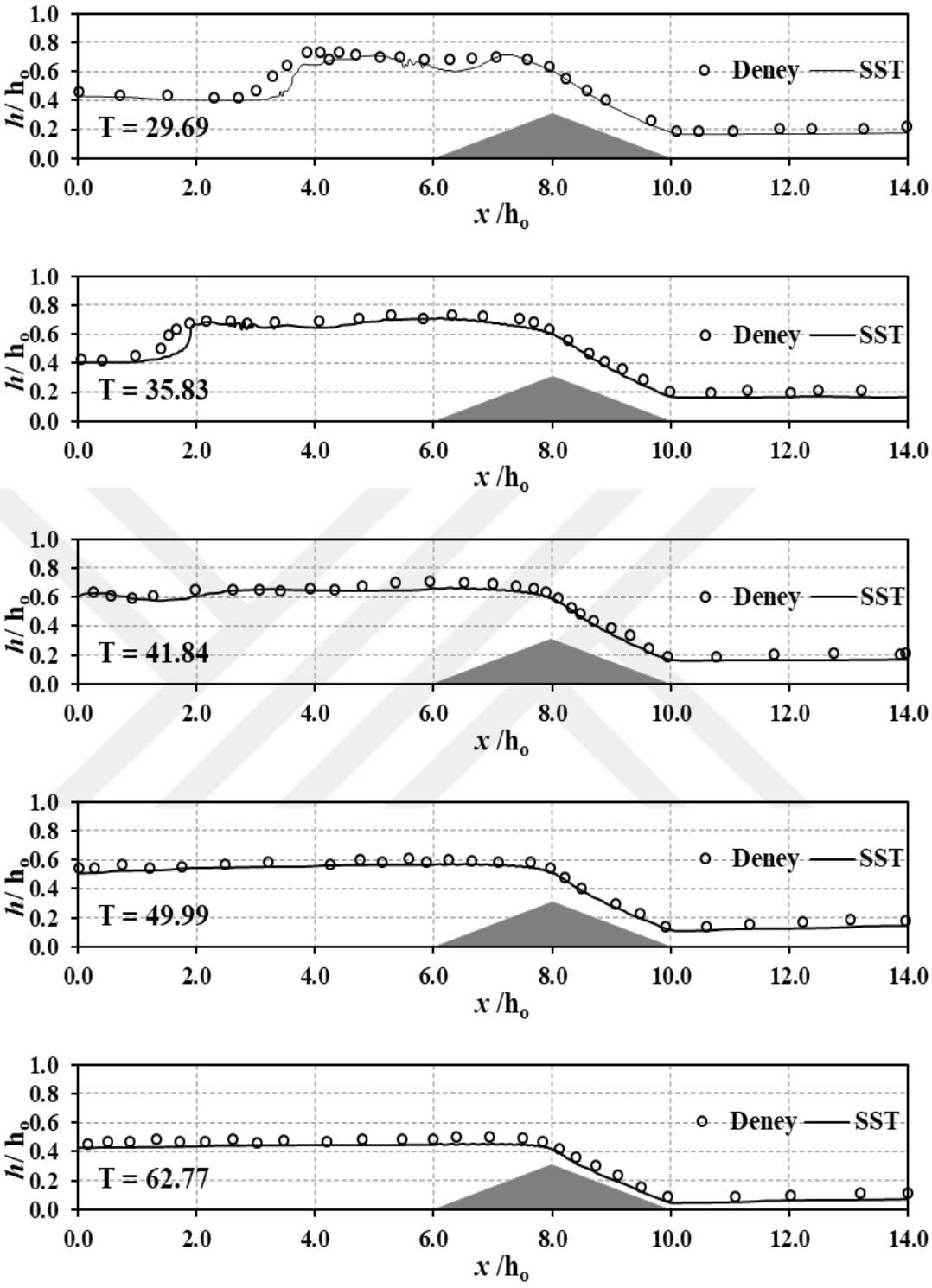
Mansap bölgesinde üçgen engel bulunması durumunda SST türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin, yatay hız bileşenin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri sırasıyla Şekil 4.46., Şekil 4.47. ve Şekil 4.48.'de verilmiştir. Şekil 4.46.'da verilen şekiller incelendiğinde yayılım dalgasının üçgen engelle etkileşime girdiği bölgede engel memba yüzünde y doğrultusunda yukarı yönlü, engel mansap yüzünde ise y doğrultusunda aşağı yönlü hareket meydana gelmektedir. T=29.69 akış zamanına kadar olan hareket süresi içerisinde x doğrultusunda negatif hızların oluşmadığı, T=29.69 akış zamanından itibaren ise üçgen engel memba yüzünden kanal başlangıcına doğru yayılan negatif dalganın oluştuğu bölgede hız vektörlerinin x doğrultusunda negatif yönde olduğu görülmektedir. Akış zamanının artmasına paralel olarak negatif dalganın dikliğinin azaldığı belirlenmiştir. T=62.77 durumunda elde edilen hız vektörlerinin desenlerinden, pozitif ve negatif yayılım dalgasının akım alanında bulunmadığı ve baraj yıkılma dalgasının normal açık kanal akımına dönüştüğü söylenebilir.

Şekil 4.47.'de, baraj mansap bölgesinde üçgen engel bulunması durumunda SST türbülans modelleri kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen yatay hız bileşeni desenleri verilmiştir. T=11.9 ve 15.16 akış zamanlarında yatay hız bileşeninin maksimum değerine üçgen engelin mansap ve memba yüzeylerinin üzerinde ulaştığı ve değerinin 1.4 m/s'den büyük olduğu desenlerden görülmektedir. Memba bölgesinde T=15.16 akış zamanından itibaren memba bölgesinde 1.4m/s değerinde daha düşük hızların oluştuğu ve T=20.67 akış zamanından itibaren üçgen engelin memba yüzünde negatif hızlar oluşmaktadır. Ayrıca, akış zamanının artmasıyla memba bölgesinde meydana gelen negatif hızların oluştuğu bölgenin üçgen engel memba yüzünden kanal tabanına doğru arttığı ve negatif dalganın ön yüzünde negatif hız bölgelerinin oluştuğu belirlenmiştir.

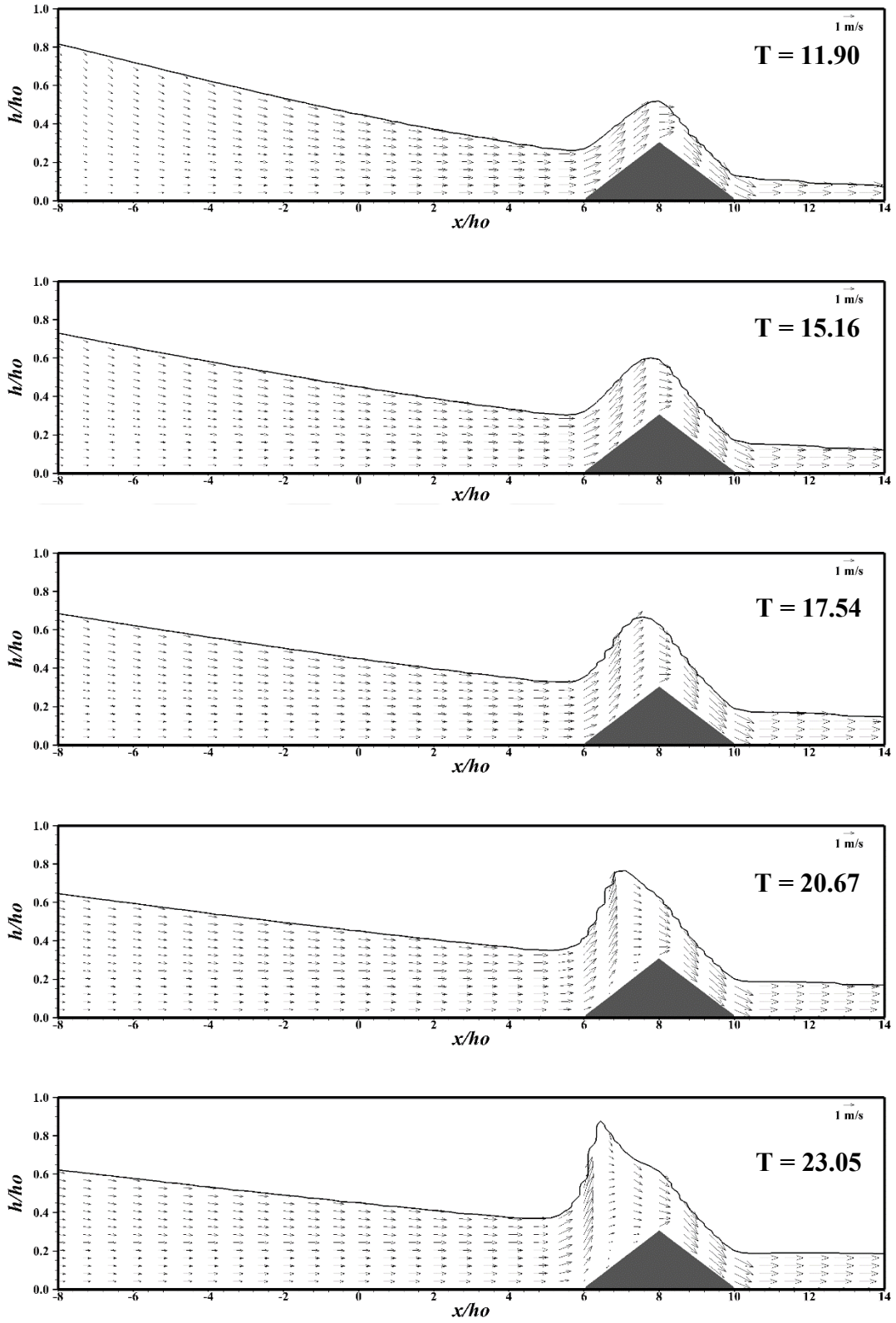
Şekil 4.48.'de mansap bölgesinde üçgen engel bulunması durumunda SST türbülans modelleri kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerji desenleri verilmiştir. Türbülans kinetik enerjisinin maksimum değerinin yatay hızların en büyük değerine sahip olduğu üçgen engel mansap bölgesinde oluştuğu ve yayılım dalgasının üçgen engelle etkileşime girdiği bölgede sınır tabakasının gelişim göstermesinden kaynaklı türbülans kinetik enerjisinin oluştuğu görülmektedir. Üçgen engel memba bölgesinde oluşan negatif yayılım dalgasının oluştuğu bölgede akımın oldukça karmaşık yapıda olduğu ve bu bölgede türbülans kinetik enerjisinin maksimum değerine sahip olduğu belirlenmiştir. T=62.77 durumunda memba bölgesinde türbülans kinetik enerjisi değerinin oldukça küçük olduğu ve mansap bölgesinde üçgen engel ile kanal tabanı etkileşim noktasında oluşmuştur.



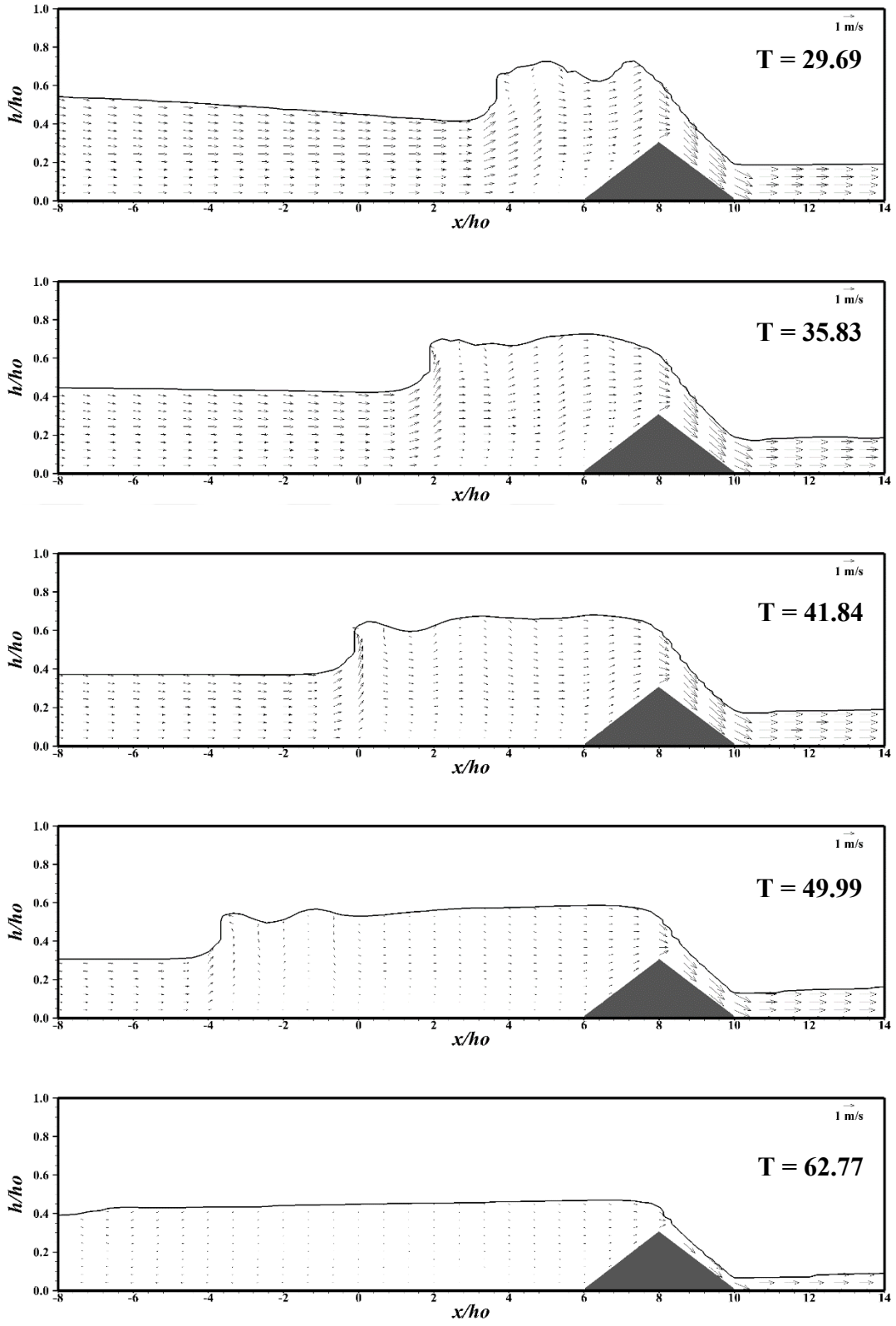
Şekil 4.45. Üçgen engel durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



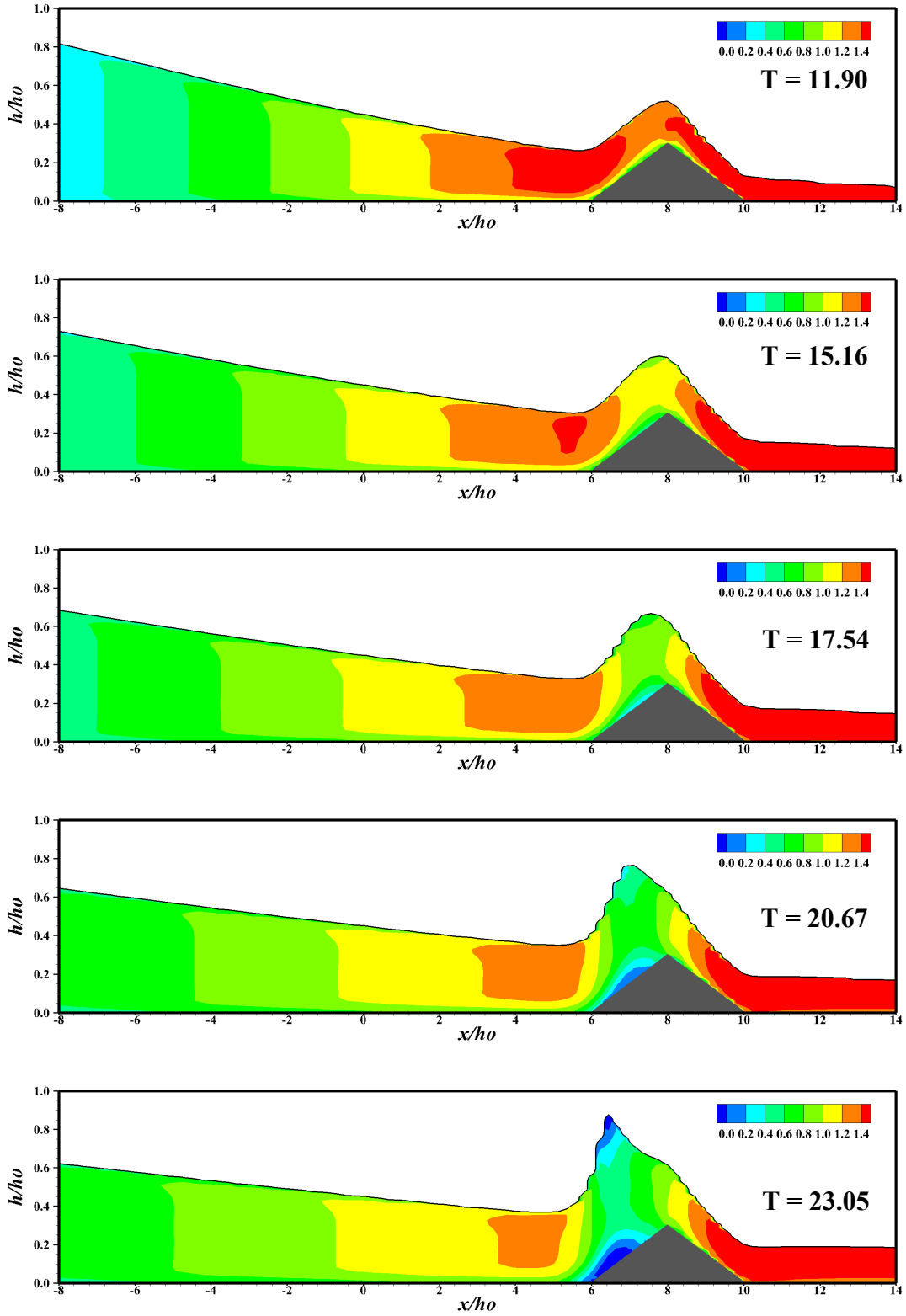
Şekil 4.45. **(devam)**



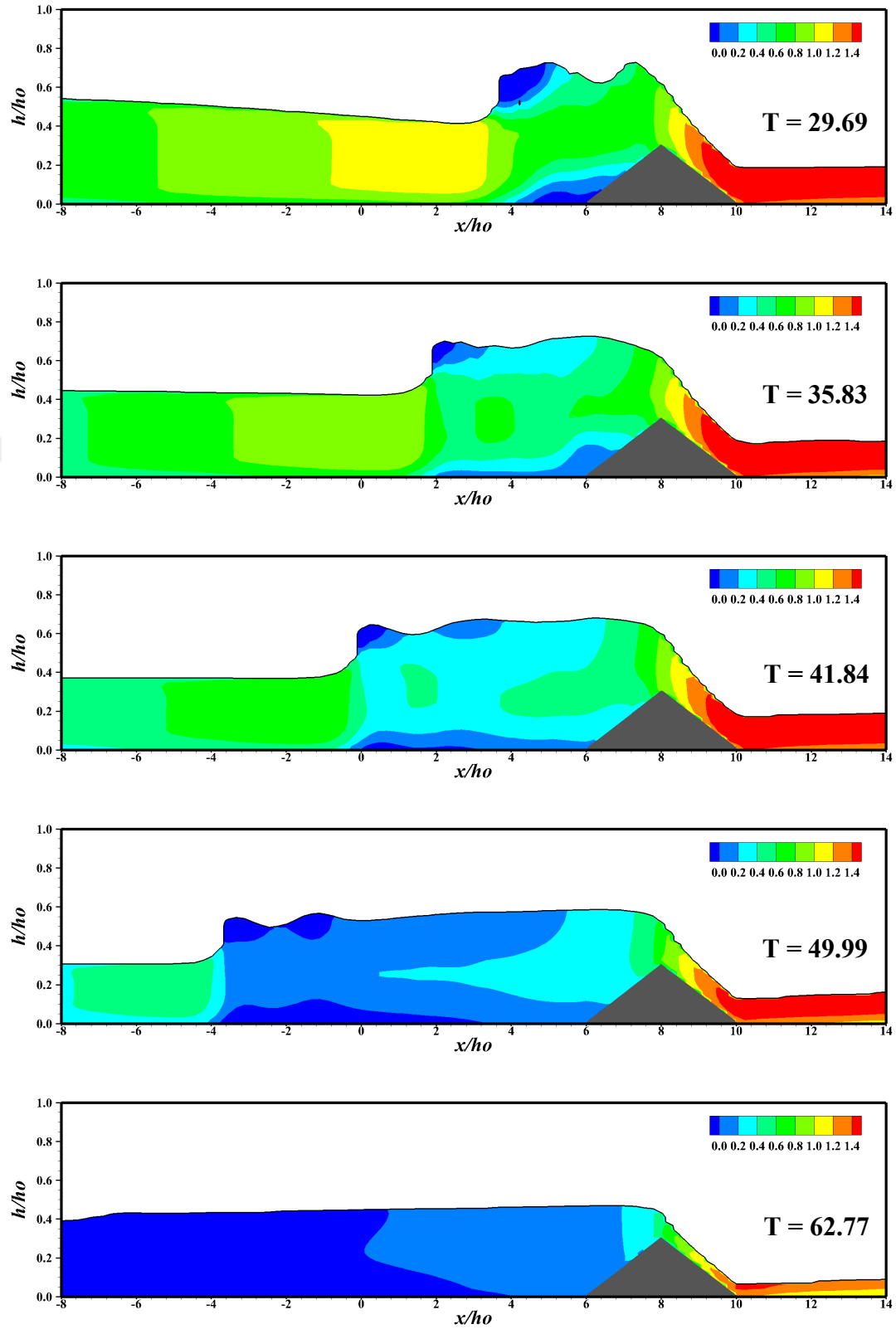
Şekil 4.46. Üçgen engel durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



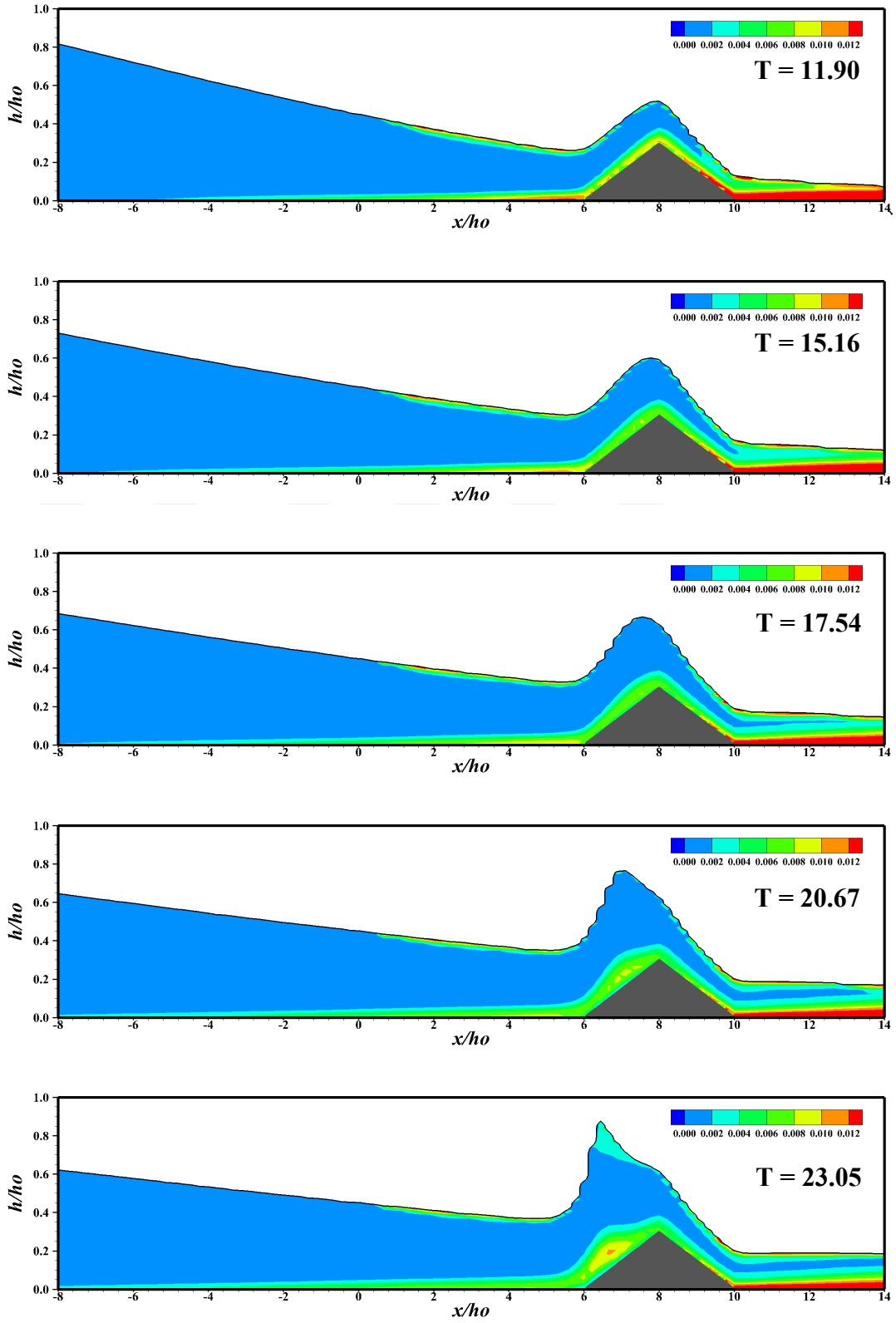
Şekil 4.46. **(devam)**



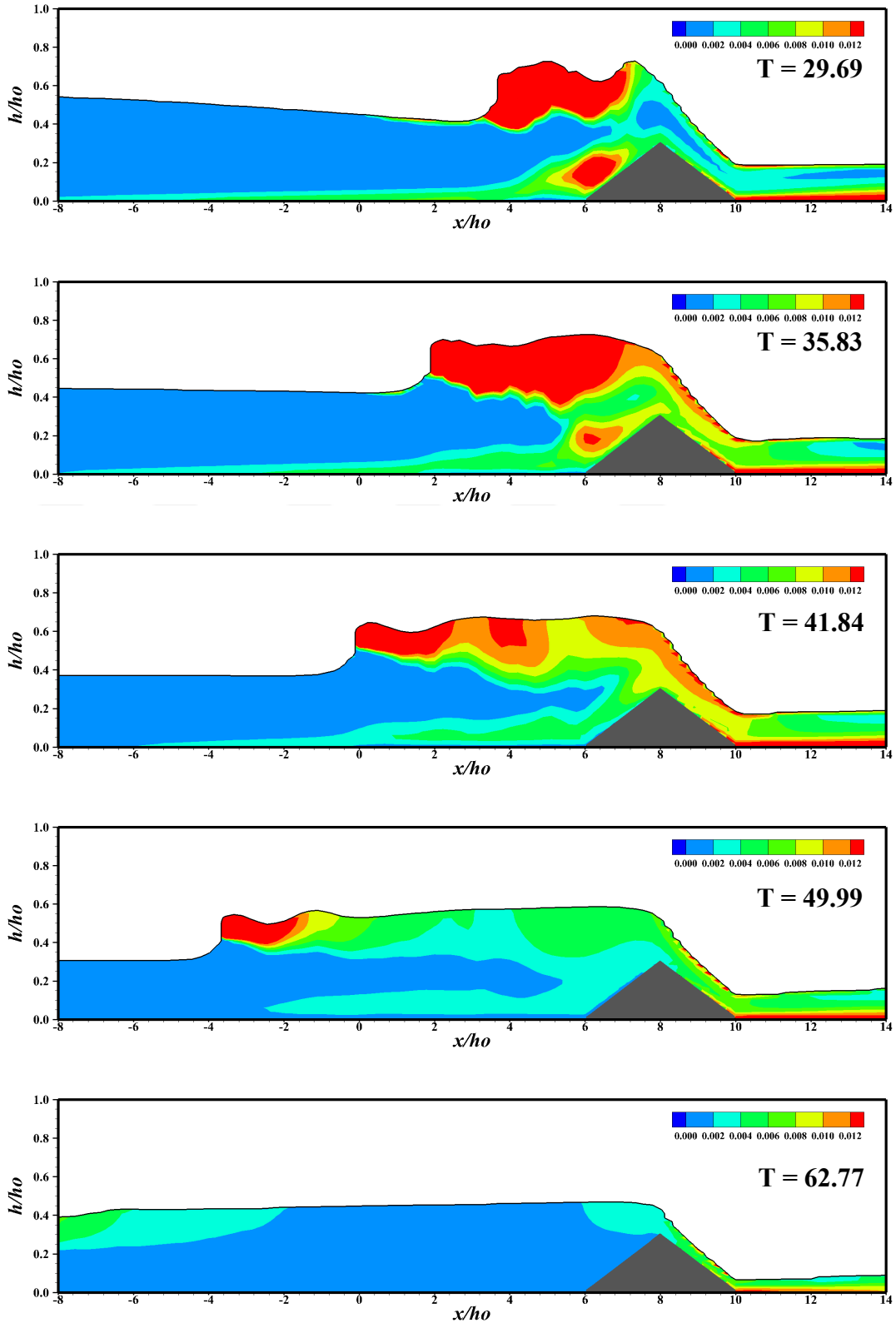
Şekil 4.47. Üçgen engel durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.47. **(devam)**



Şekil 4.48. Üçgen engel durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni



Şekil 4.48. **(devam)**

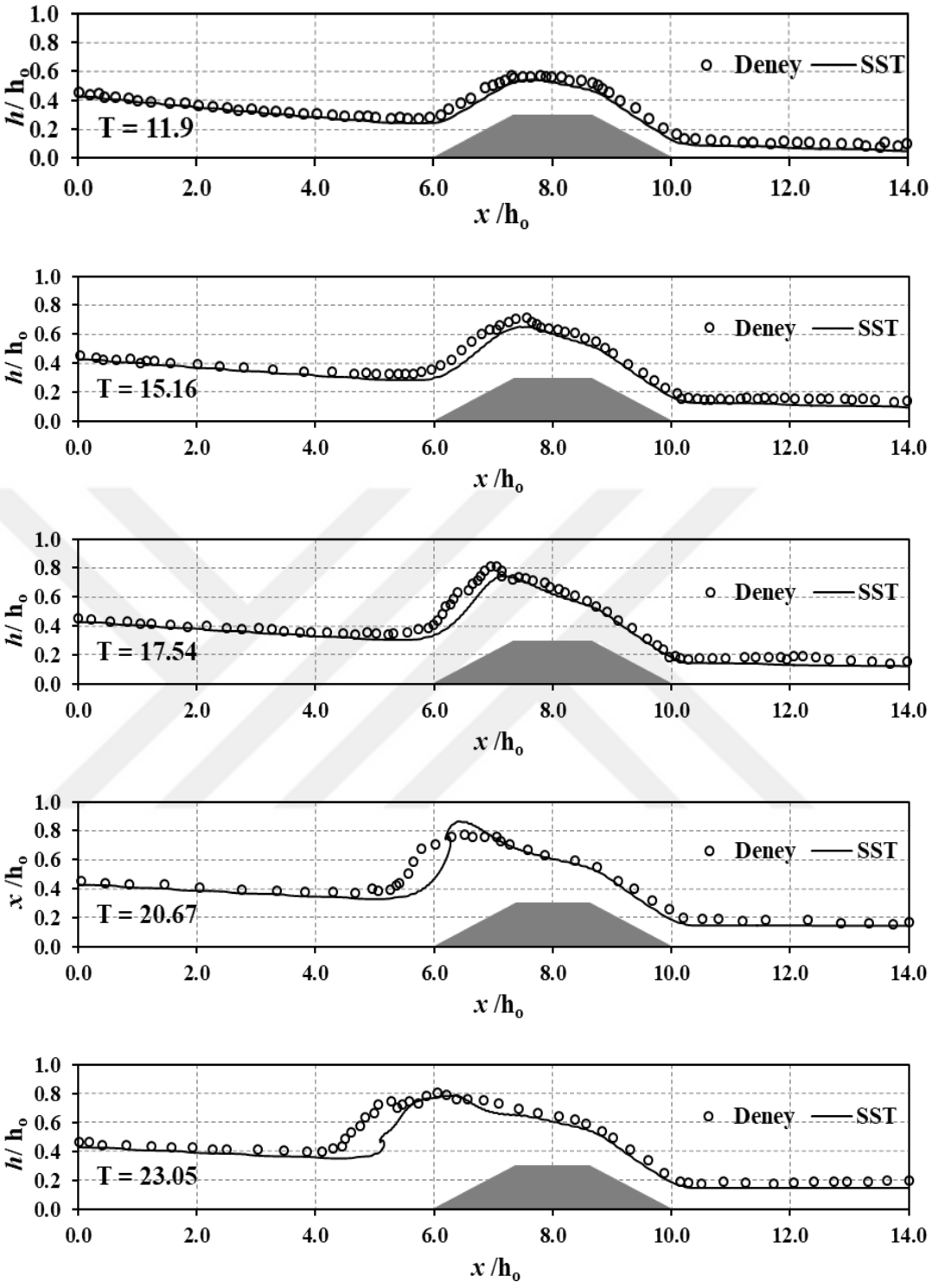
4.6. Baraj Mansabında Trapez Engel Bulunması Durumu

Sayısal model oluşturulurken Şekil 3.4.'de kanal boyutları verilen ve Kocaman (2007), tarafından yapılan deneydeki kanal boyutları dikkate alınmış ve engel baraj aksından 150 cm uzağa, taban genişliği 100 cm, üst genişliği 30 cm ve yüksekliği 7.5cm olarak yerleştirilmiştir. Baraj kapağının memba kısmında 465cm uzunluğunda, 25 cm yüksekliğinde su bulunduğu ve mansap bölgesi kuru olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Mansap kısmında trapez engel bulunması durumunda üç farklı türbülans modeli kullanılarak incelenen zamanlarda elde edilen su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda elde edilen OMGH ve OKH değerleri Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Son satırda tüm türbülans modellerinde farklı akış zamanlarında elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalaması alınmıştır. Son satırda verilen ortalama OMGH ve OKH başarı kriterlerine göre SST modelinin deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu görülmektedir. T=11.90 ile 23.05 arasında ele alınan akış zamanlarında elde edilen OKH ve OMGH değerlerinden RNG modelinin en başarılı model olduğu, SST türbülans modelinin ise RNG modelinin ardından ikinci en başarılı model olduğu görülmektedir. Elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre DES modelinin tüm akış zamanlarında en başarısız model olduğu belirlenmiştir. Farklı türbülans modellerine ait farklı akış zamanlarında elde edilen OKH değerlerinin ortalamasının 0.00222 ile 0.00255 arasında, OMGH değerlerinin ortalamasının ise %11.99 ile %12.52 arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Bu değerlerden, farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri arasında bariz farklılıkların bulunmadığı söylenebilir. Ayrıca, elde edilen ortalama değerlerin baraj yıkılma sonucunda oluşan yayılım dalgası gibi negatif ve pozitif dalgaların oluştuğu karmaşık akım problemlerinin çözümünde kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu değerlendirilmektedir. OKH ve OMGH değerlerine göre çalışmada kullanılan RNG ve DES modellerine az da olsa üstünlük sağlayan SST türbülans modeliyle elde edilen su yüzü profilleri deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılmış ve sayısal olarak elde edilen hız vektörlerinin, yatay hız bileşenin ve türbülans kinetik enerjisi desenlerinin değişimi sadece SST türbülans modeliyle sunulmuştur.

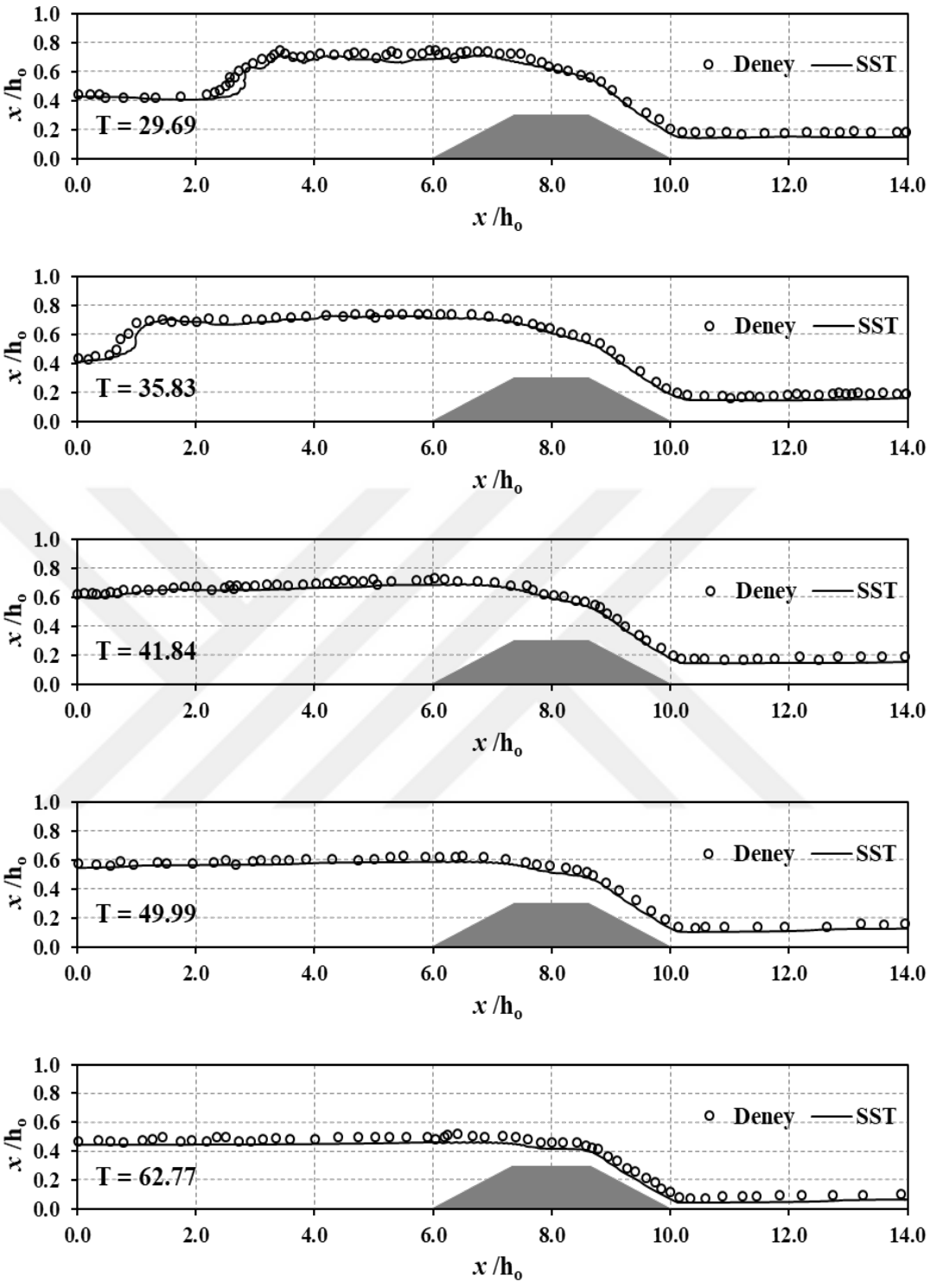
Çizelge 4.5. Trapez engel durumu için farklı türbülans modellerine ait çeşitli zamanlarda elde edilen OKH ve OMGH (%) değerleri

Model	RNG		SST		DES	
T	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**	**OMGH**	**OKH**
11.90	15.47500(2)	0.00129(2)	14.48000(1)	0.00110(1)	15.67300(3)	0.00130(3)
15.16	13.36200(3)	0.00171(2)	12.60710(1)	0.00149(1)	13.19430(2)	0.00172(3)
17.54	11.93540(3)	0.00231(3)	11.34180(1)	0.00196(1)	11.46980(2)	0.00206(2)
20.67	11.71600(3)	0.00393(2)	11.47650(1)	0.00356(1)	11.63040(2)	0.00394(3)
23.05	13.48470(2)	0.00521(2)	13.09160(1)	0.00516(1)	14.01880(3)	0.00635(3)
29.69	9.41760(2)	0.00165(2)	8.51960(1)	0.00159(1)	10.04180(3)	0.00326(3)
35.83	8.13930(1)	0.00103(1)	8.27420(2)	0.00104(2)	8.94210(3)	0.00172(3)
41.84	8.51590(2)	0.00089(2)	8.45500(1)	0.00084(1)	8.90720(3)	0.00131(3)
49.99	10.26780(1)	0.00097(1)	10.57340(2)	0.00102(2)	10.75232(3)	0.00111(3)
62.77	18.86848(2)	0.00159(1)	18.87032(3)	0.00163(3)	18.55933(1)	0.00161(2)
Ort.	12.11822(2)	0.00206(2)	**11.76895**(1)	**0.00194**(1)	12.31891(3)	0.00244(3)

Mansap bölgesinde trapez engel bulunması durumunda, OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı türbülans modeli olarak belirlenen SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin ile deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması Şekil 4.49.'da verilmiştir. Verilen şekillerden, SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleriyle deneysel su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. T=17.54, 20.67 ve 23.05 akış zamanlarında trapez engel memba bölgesinde negatif dalganın önünde deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasında uyumsuzluğun bulunduğu söylenebilir. Bu bölge dışında kalan bölgelerde deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin birebir benzer olduğundan söz edilebilir. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasında uyumsuzluğun bulunduğu negatif dalga önü bölgesinde, dalganın kırılmasından kaynaklı olarak oluşan köpüklenmenin ve hava kabarcıklarının akım alanına dahil olmasından dolayı su yüzü profilinin deneysel görüntülerde ayırt edilmesinin zor olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.49. Trapez engel durumunda deneysel ve SST ile elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4.49. **(devam)**

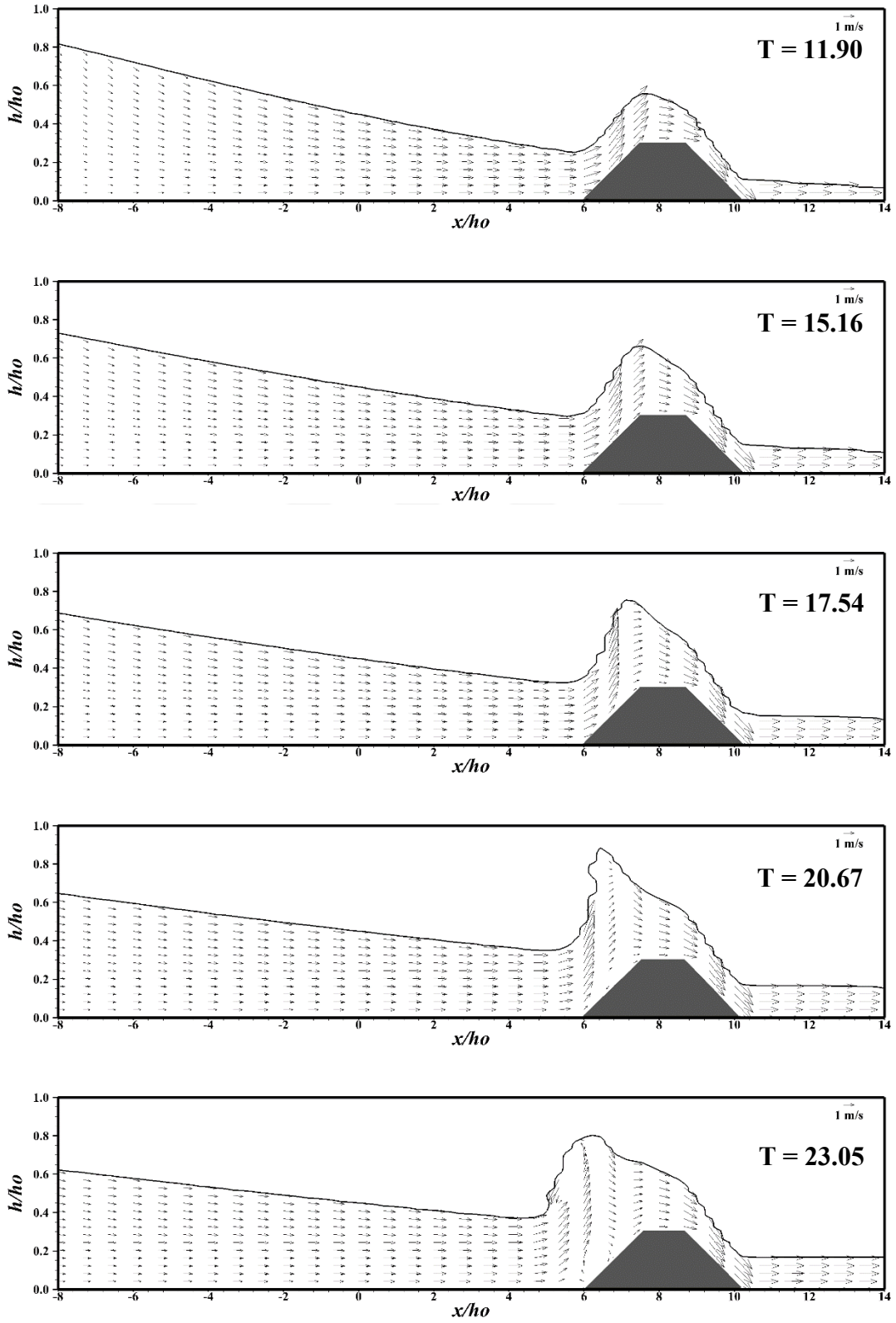
Şekil 4.50.'de mansap bölgesinde trapez engel bulunması durumunda SST türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin

desenleri verilmiştir. Tüm akış zamanlarında elde edilen desenlerden trapez engel mansap bölgesinde elde edilen hız vektörlerinin, memba bölgesinde elde edilen hız vektörlerinin büyüklüğünden daha olduğu görülmektedir. T=11.9, 15.16 ve 17.54 akış zamanlarında akım alanında negatif hızların bulunmadığı hız vektörlerinin deseninden anlaşılmaktadır. T=20.67, 23.05 ve 29.69 akış zamanlarında memba bölgesinde oluşan negatif dalganın önünde hız vektörlerinin negatif yönünde olduğu ve akış zamanının artmasıyla birlikte bu bölgede elde edilen hız vektörlerinin büyüklüğü küçülmektedir. T=62.77 akış zamanında elde edilen hız vektörlerinin desenlerinden memba bölgesinde hızların çok küçük olduğu anlaşılmaktadır.

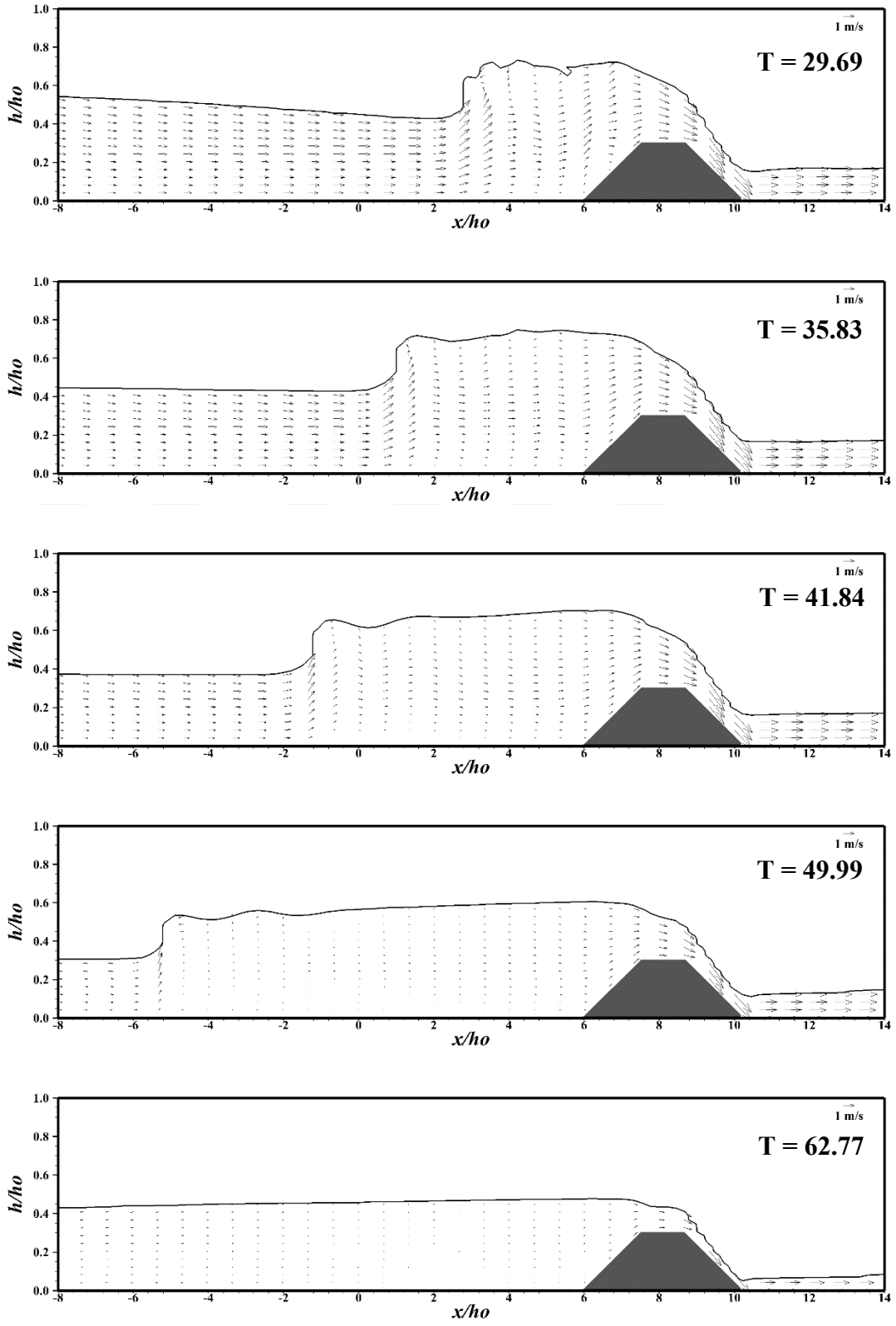
Şekil 4.51.'de mansap bölgesinde trapez engel bulunması durumunda SST türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen yatay hız bileşenine ait desenler verilmiştir. Yatay doğrultudaki hız bileşeninin en büyük değerlerinin trapez engelin mansap bölgesinde oluştuğu ve değerinin 1.6m/s'den büyük olduğu şekillerden görülmektedir. Üçgen engelin memba bölgesinde maksimum yatay hız bileşeninin elde edildiği bölgenin trapez engel durumunda oluşmadığı belirlenmiştir. T=11.9 ve 15.16 akış zamanlarında trapez engelin memba ve mansap yüzeyleri üzerinde negatif hızların oluşmadığı, T=17.54 akış durumunda trapez engelin memba üst köşesinden başlayarak akış zamanının artmasıyla bu negatif hızların oluştuğu bölgenin trapez engelin alt topuk noktasına kaydığı ve ilerleyen akış zamanlarında kanal tabanı üzerinde de negatif hızların oluştuğu bölgenin büyüdüğü görülmektedir.

Şekil 4.52.'de mansap bölgesinde trapez engel bulunması durumunda SST türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerjisinin desenleri verilmiştir. Şekillerin incelenmesinden, T=15.16 ve 17.54 akış zamanlarında türbülans kinetik enerjinin maksimum değerinin trapez engelin mansap bölgesinde oluştuğu, bu akış zamanlarından daha büyük akış zamanlarında trapez engelin memba yüzünde oluşan negatif dalganın ön yüzünde de türbülans kinetik enerjinin maksimum değerlere sahip olduğu görülmektedir. Akış zamanın artmasıyla, trapez engelin memba yüzü üzerinde oluşan kinetik enerjinin negatif yayılım dalgasıyla birleşerek daha büyük bir bölgede maksimum değerlerin oluştuğu belirlenmiştir. Negatif yayılım dalgasının membaya doğru hareketiyle birlikte

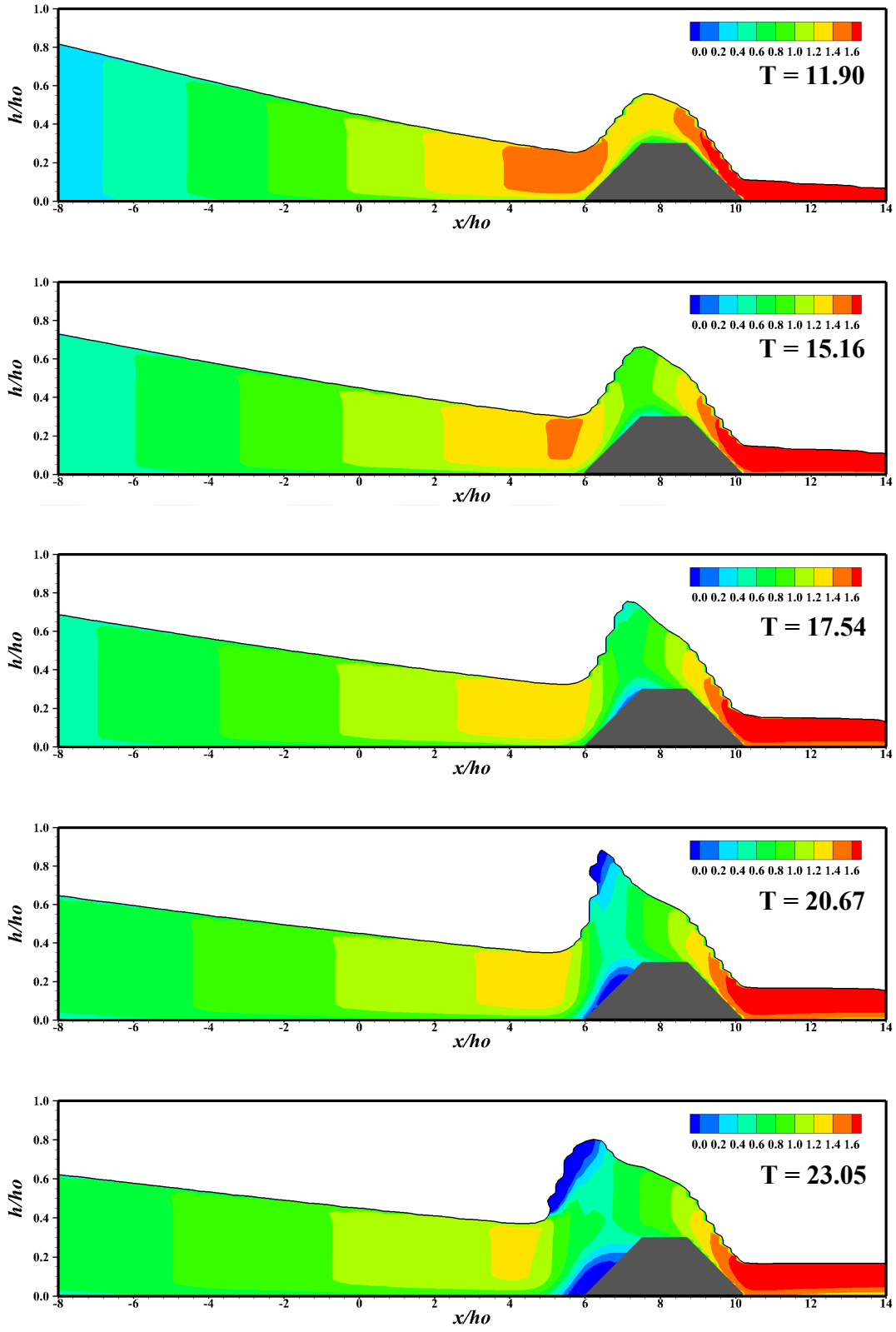
T=35.83 akış zamanında türbülans kinetik enerjisinin maksimum değerinin oluştuğu bölgenin en büyük olduğu söylenebilir. Akış zamanının T=35.83'ten büyük olduğu akış zamanlarında (T=41.84 ve 49.99) bu bölgenin zamanla daha da küçüldüğü ve T=62.77 akış zamanında negatif yayılım dalgasının bittiği görülmektedir. Trapez engel durumunda elde edilen hız vektörlerinin, yatay hız bileşeni ve türbülans kinetik enerjisi desenlerinin birbirine benzer olduğu belirlenmiştir.



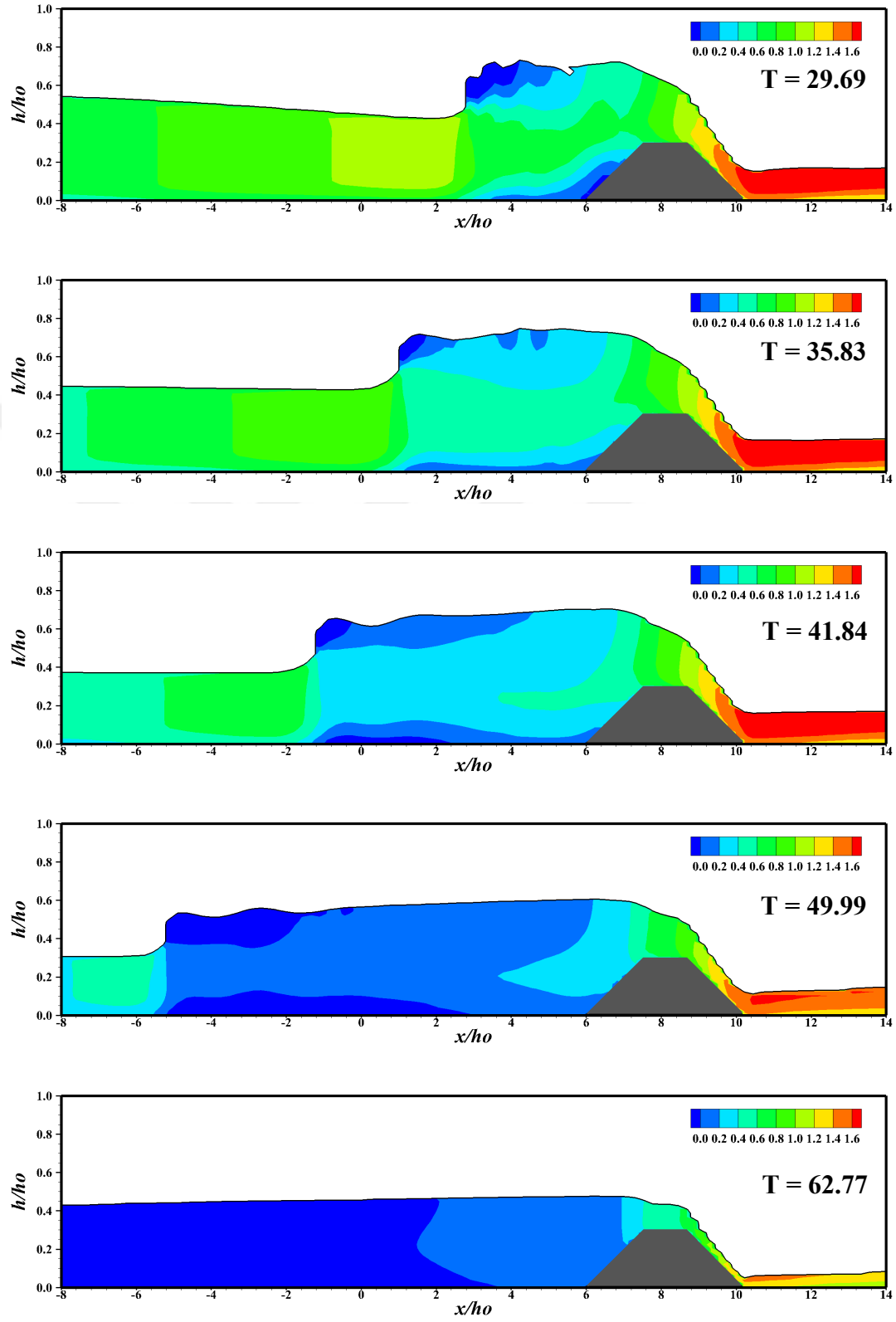
Şekil 4.50. Trapez engel durumunda SST ile elde edilen hız vektörlerinin deseni



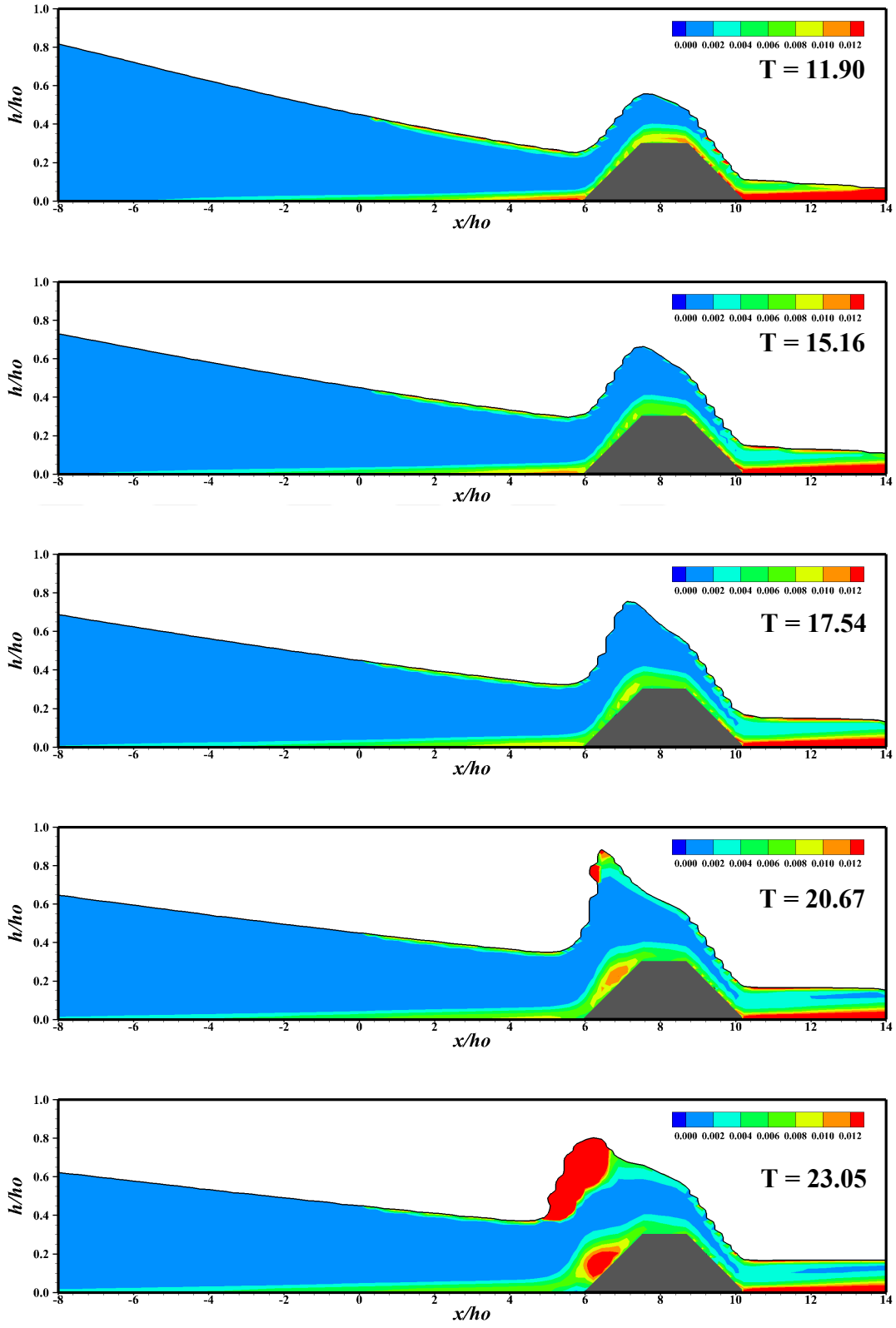
Şekil 4.50. **(devam)**



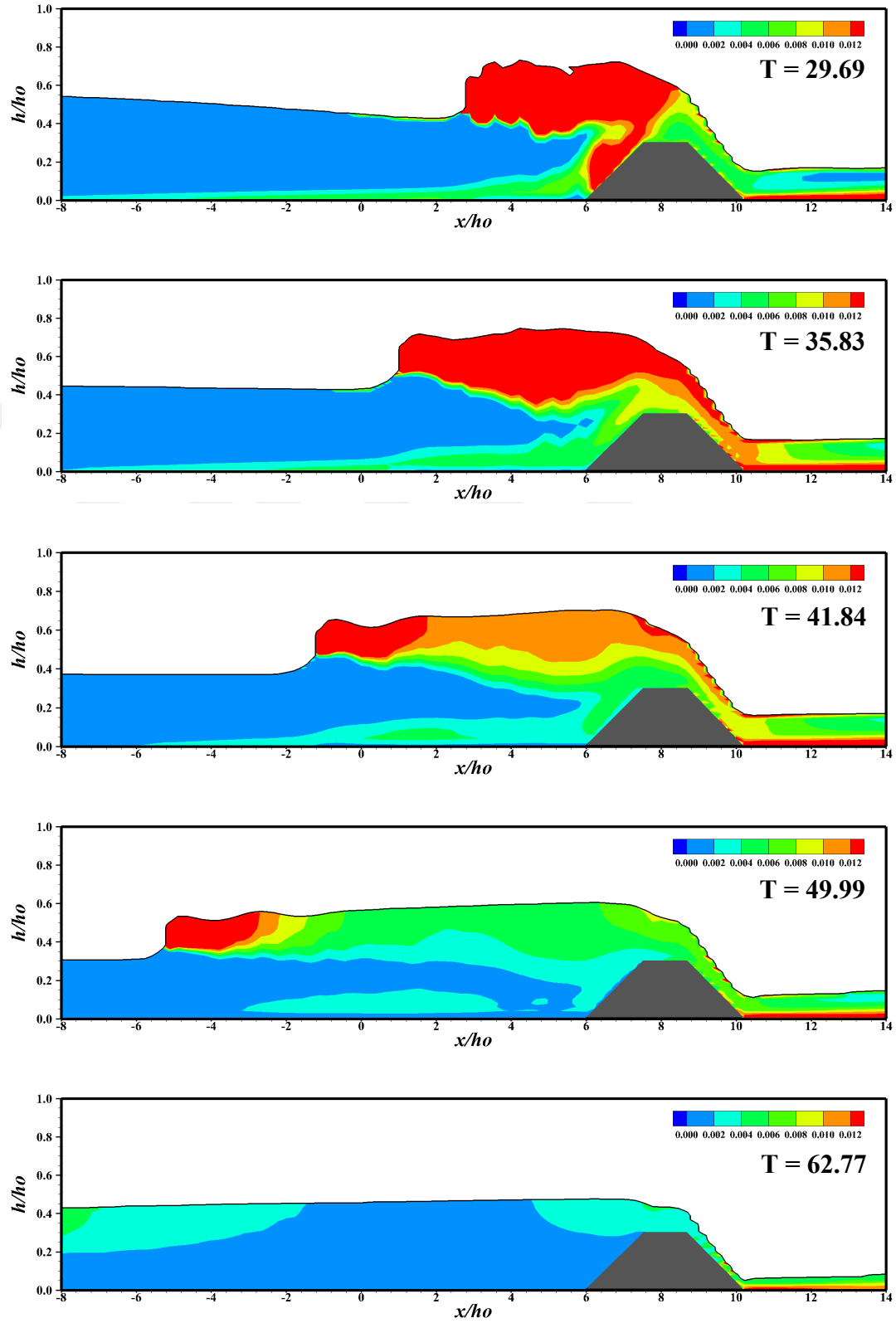
Şekil 4.51. Trapez engel durumunda SST ile elde edilen yatay hız bileşeni deseni



Şekil 4.51. **(devam)**



Şekil 4.52. Trapez engel durumunda SST ile elde edilen türbülans kinetik enerji deseni



Şekil 4.52. **(devam)**

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, laboratuvar ortamında kuru yatak, mansap/memba su derinliği oranın (α) 0.1 ve 0.4 olduğu ve mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumunda meydana gelen baraj yıkılması probleminin deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri, RNG, SST ve DES türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Farklı türbülans modelleri kullanılarak belirlenen su yüzü profillerinin deneysel profillerle olan uyumunun değerlendirilmesinde OKH ve OMGH değerleri başarı ölçütü olarak kullanılmıştır. Ayrıca, α=0.2 durumunda deneysel olarak su yüzü profillerinin grafiksel olarak verilmemesinden kaynaklı sayısal model sonuçları deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılamamıştır. α=0.2 durumu için kuru yatak ve α=0.4 için en başarılı model olan DES modeliyle elde edilen akım özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda farklı yapı ve akım koşulları için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Kuru yatak durumunda (α=0) deneysel ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılmasından, DES modelinin deneysel su yüzü profillerine en yakın tahminde bulunduğu OKH ve OMGH değerlerinden belirlenmiştir. Ele alınan akış zamanlarında elde edilen OMGH değerlerinin ortalamasının tüm türbülans modelleri için%10'dan küçük olduğu ve farklı türbülans modellerine ait ortalama OMGH değerleri arasında oldukça küçük farklılıklar bulunmasından dolayı tüm türbülans modellerinin kuru yatak üzerinde meydana gelen baraj yıkılması probleminin sayısal olarak modellenmesinde kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Farklı türbülans modelleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen hız vektörlerinin desenlerinden, baraj yıkılmasının ilk anlarında elde edilen hız vektörlerinin kütlesel kuvvetlerin etkisiyle y doğrultusunda aşağı yönlü oluştuğu, baraj yıkılması sonucunda oluşan yayılım dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle, y doğrultusunda düşey yönde oluşan hız vektörlerinin x doğrultusuna doğru değişim gösterdiği ve büyüklüklerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, akış zamanının artmasıyla, daha fazla su kütlesinin harekete geçmesinden dolayı kuru yatak üzerinde meydana gelen hız vektörlerinin büyüklüğünün arttığı belirlenmiştir. Ele alınan son akış zamanı

olan T=6.64 durumunda kanal giriş sınırında hareket etmeyen bölgelerin bulunduğu, diğer bir ifadeyle incelenen akış zamanlarında ele alınan çözüm bölgesinin tamamen harekete geçmediği görülmüştür. Farklı akış zamanlarında elde edilen hız desenlerinden, baraj yıkılma dalgasının hız alanında 2.2 m/s'den daha büyük hızların yayılım dalgasının önünde oluştuğu ve baraj yıkılma dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle maksimum hızın oluştuğu bölgenin büyüdüğü belirlenmiştir. Bunun yanında, baraj yıkılma dalgasının hız alanında bulunan eğriselliğin yıkılma başlangıcında oldukça belirgin olduğu, yayılım dalgasının yatay yatak üzerinde ilerlemesiyle bu eğriselliğin azaldığı görülmüştür. Baraj yıkılma dalgasının yatay kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle kanal tabanı üzerinde viskoz kuvvetlerin etkisinin arttığı da ifade edilebilir. Baraj yıkılması dalgasının uç noktasında hızda meydana gelen değişimin daha fazla olduğu görülürken, zamanın ilerlemesine paralel olarak kuru yatak üzerinde ilerleyen yayılım dalgasının kanal tabanı üzerinde hız değişiminin daha da arttığı görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının kuru yatak üzerinde ilerlemesiyle birlikte 0.2 m^2/s^2 değerinden daha büyük türbülans kinetik enerjisinin oluştuğu görülmüştür. Yayılım dalgasının akış süresinin artmasıyla, katı sınırla etkileşim bölgesinde elde edilen türbülans kinetik enerjisi değerlerinin arttığı ve alanının büyüdüğü ve hız alanında meydana gelen değişimin yayılım dalgasının ön noktasında olduğu görülmektedir.

α=0.1 durumunda deneysel ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılmasından, ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı modelin DES olduğu ve başarısı sıralamasının DES, SST ve RNG şeklinde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, α= 0.1 durumunda farklı türbülans modelleriyle elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin kuru yatak durumu için elde edilen OKH ve OMGH değerlerinden daha küçük olduğu belirlenmiştir. α=0.1 durumunda farklı akış zamanlarında DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılmasından yayılım dalgasının yatay doğrultuda ilerlemesiyle deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumun azaldığı ve kapak memba bölgesinde su yüzü profilleri arasında tüm akış zamanlarında uyumun iyi olduğu belirlenmiştir. Kullanılan türbülans modellerinin tümünde dalga önü dikliğinin akış zamanının artmasıyla azaldığı ve kullanılan türbülans modelleriyle

elde edilen su yüzü profillerine birbirine oldukça benzer olduğu söylenebilir. Farklı akış zamanlarında elde edilen hız vektörlerinin desenlerinden, yayılım dalgasının y doğrultusunda aşağı ve yukarı yönde hareket sergilediği görülmektedir. Yayılım dalgasının x doğrultusunda hareket zamanının artmasıyla memba bölgesindeki daha büyük bir su kütlesinin harekete geçtiği ve T=8.9 durumunda baraj mansap bölgesinde bulunan su kütlesinin de bu zamandan itibaren tamamen etkilendiği söylenebilir. Yatay hız bileşeninin maksimum değerinin dalga önünde oluştuğu ve akış zamanının ilerlemesiyle akım alanında hız değişiminin yaşandığı ve akış süresinin artmasıyla birlikte yatay doğrultudaki hız bileşeninin maksimum değerinde azalmaların meydana geldiği özellikle T=8.9 durumunda bu değerin 1.5 ile 1.8m/s değeri arasında oluştuğu söylenebilir. Baraj yıkılma anından itibaren kanal tabanına çarpan su kütlesinin, kanal tabanı üzerinde türbülans oluşturduğu ve bu türbülans oluşan bölgenin akış zamanının büyümesiyle dalga önüne taşındığı belirlenmiştir. Baraj yıkılması neticesinde oluşan yayılım dalgasının taşımış olduğu su kütlesinin akım alanında meydana getirdiği değişiklikle mansap ve memba bölgelerinde bulunan suların oldukça karmaşık akım yapısına büründüğü ve bu etkileşim bölgesinde aşırı türbülans oluşmuştur.

α=0.4 durumunda RNG, SST ve DES türbülans modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması sonucunda elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamasına göre DES modelinin deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu ve RNG, SST ve DES modelleri kullanılarak elde edilen OMGH değerlerinin sırasıyla % 3.51, %3.57 ve %3.03 olduğu ve bu değerlerin kuru yatak ve α=0.1 durumlarından daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlardan α=0.4 durumunda kullanılan türbülans modellerinin deneysel verilere oldukça yakın tahminde bulunduğu ve aralarında %0.54'lük farkın bulunmasından dolayı tüm modellerin aslında başarılı olduğu değerlendirilmektedir. Ele alınan akış zamanlarında deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin oldukça uyumlu olduğu ve kuru yatak ve α=0.1 durumunda baraj yıkılması neticesinde oluşan yayılım dalgasının ön bölgesinde deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumsuzluğun α=0.4 durumunda meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Ayrıca, mansap bölgesinde bulunan su yüksekliğinin artmasıyla baraj yıkılma dalgasının düşü yüksekliğinin azalmasıyla su yüzü profillerinde meydana

gelen değişim oldukça sınır kaldığı değerlendirilmektedir. Tüm akış zamanlarında yayılım dalgasının önünde hız vektörlerinin y doğrultusunda aşağı yönlü olduğu ve yayılım dalgası ön dikliğinin akış zamanının artmasıyla azaldığı ve baraj yıkılmasından sonra oluşan yayılım dalgasının ön bölgesinde zamanın ilerlemesiyle birlikte dalganın kırıldığı vektörlerin yönlerinden anlaşılmaktadır. Belirli bir akış zamanından itibaren ikinci bir dalga oluşumu başlamakta ve akış zamanının ilerlemesiyle bu ikinci dalganın dikliği artmaktadır. Tüm akış zamanlarında yatay hız bileşeninin maksimum değerinin yayılım dalgasının önünde oluştuğu ve değerinin 1.2m/s'den büyük olduğu görülmektedir. Yatay hız bileşeninde oluşan bu maksimum değerin kuru yatak ve α=0.1 durumunda elde edilen değerlerden oldukça küçük olduğu dikkat çekmektedir. Mansap bölgesindeki su yüksekliğinin artmasıyla baraj yıkılması sonucu oluşan yayılım dalgasının hızı oldukça azalmaktadır. Farklı akış zamanlarında elde edilen türbülans kinetik enerjisi desenlerinden maksimum türbülans kinetik enerjisi değerinin dalga ön bölgesinde ve dalga çukurunda oluştuğu görülmektedir. Kanal tabanı üzerinde meydana gelen türbülans kinetik enerji değerlerinin viskoz kuvvetlerden kaynaklı olarak akım alanında meydana gelen değişiklikten dolayı olduğu değerlendirilmektedir. Kuru yatak ve α=0.1 durumunda elde edilen türbülans kinetik enerji değerlerinin α=0.4 durumunda elde edilen türbülans kinetik enerji değerlerinden daha büyük olduğu, α=0.4 durumunda memba bölgesinden mansap bölgesine yıkılan barajda su yüksekliğinin daha düşük olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

α=0.2 durumunda deneysel olarak elde edilen su yüzü profillerinin grafiksel olarak değil sadece kamera görüntülerinin verilmesinden dolayı bu durumda deneysel ve sayısal su yüzü profilleri karşılaştırılamamıştır. Deneysel olarak değerlendirilmeyen hız vektörlerinin, yatay hız bileşeninin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri kuru yatak, α=0.1 ve 0.4 durumlarında en başarılı türbülans modeli olan DES modeli kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilmiştir. Kapak kaldırıldıktan sonra memba kısmında depolanan su yerçekimi etkisiyle mansap bölgesine doğru hareket etmekte ve bu bölgede bulunan kuyruk suyunu sürüklemektedir. T=1.57 olduğu durumda dalga önü dikliğinin x/h_o oranının 0 ile 2 arasında değiştiği bölgede oluştuğu, akış zamanının artmasıyla dalganın x

doğrultusunda ilerlemesiyle daha büyük x/h_o değerlerinde dalga önü dikliğinin oluştuğu belirlenmiştir. T=1.57 durumunda yayılım dalgasının ön bölgesinin y doğrultusunda yukarı yönde hareket sergilediği, ele alınan diğer akış zamanlarında ise bu yukarı yönlü hareketin yerine aşağı yönlü bir hareketin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, T=4.01 durumundan itibaren suyun içerisinde dalga kırılmasından kaynaklı olarak hava kabarcıkları karışmış bulunmaktadır. Daha önceki bölümlerde incelenen akım durumlarına benzer olarak su yüzüne yakın bölgede elde edilen hız vektörleri y doğrultusunda aşağı yönlü olarak elde edilmiştir. Farklı akış zamanlarında elde edilen yatay hız bileşeni desenlerinden yatay hız bileşenin maksimum değerine yayılım dalgası önünde sahip olduğu ve akış zamanının ilerlemesiyle hareket eden su miktarının hız alanın büyüdüğü görülmektedir. Hız alanında negatif hız değerlerinin bulunmamasından dolayı negatif dalganın oluşmadığı anlaşılmaktadır. Hızın maksimum değerine sahip olduğu yayılım dalgasının önünde türbülans kinetik enerjinin de maksimum değere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, türbülans kinetik enerjisinin baraj yıkılmasından dolayı kanal tabanı üzerinde x/h_o değerinin yaklaşık olarak 0 ile 1 arasında olduğu bölgede maksimum değere sahiptir. Akış zamanının artmasına paralel olarak, kanala tabanı üzerinde maksimum türbülans kinetik enerjisinin görüldüğü alanın büyüdüğü ve kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Bu bölgede özellikle viskoz gerilmelerin akım alanı üzerinde etkili olduğu ve bu bölgede hız değişimlerinin yaşandığı değerlendirilmektedir.

Mansap kısmında üçgen engel bulunması durumunda, üç farklı türbülans modeli kullanılarak incelenen zamanlarda elde edilen su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda elde edilen OMGH ve OKH kriterlerine göre SST modelinin deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu, ayrıca, ele alınan ilk akış zamanlarında RNG türbülans modelinin SST ve DES türbülans modellerinden daha başarılı model olduğu belirlenmiştir. Ortalama OMGH değerlerinin RNG, SST ve DES modelleri için sırasıyla 12.12938, 11.99424, ve 12.52217 olduğu, OKH değerlerinin ise sırasıyla 0.00234, 0.00222 ve 0.00255 olduğu ve bu değerlerden de anlaşılacağı üzere mansap bölgesinde üçgen engel bulunması durumunda elde edilen hata değerlerinin daha önce ele alınan durumlardan büyük olduğu, diğer bir değişle sayısal modellemelerin mansap bölgesinde engel bulunması durumunda, daha önce ele

alınan akım durumlarına kıyasla daha başarısız olduğu söylenebilir. Bu sonuç, yayılım dalgasının zaten karmaşık olan akım yapısının ayrıca bir engel ile karşılaşınca daha karmaşık akım yapısına dönüşmesinden ve memba bölgesinde oluşan negatif dalgadan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Mansap kısmında trapez engel bulunması durumunda, üç farklı türbülans modeli kullanılarak incelenen zamanlarda elde edilen su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda elde edilen ortalama OMGH ve OKH başarı kriterlerine göre SST modelinin deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu ve türbülans modeli başarı sıralamasının SST, RNG ve DES şeklinde oluştuğu belirlenmiştir. SST, RNG ve DES türbülans modelleri kullanılarak farklı akış zamanlarında elde edilen OKH değerlerinin ortalamasının sırasıyla 0.00222, 0.00234 ve 0.00255 olduğu, OMGH değerlerinin ortalamasının ise %11.99, %12.13 ve %12.52 olduğu görülmektedir. T=17.54, 20.67 ve 23.05 akış zamanlarında trapez engel memba bölgesinde negatif dalganın önünde deneysel ve SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri arasında uyumsuzluğun bulunduğu söylenebilir. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasında uyumsuzluğun bulunduğu negatif dalga önü bölgesinde, dalganın kırılmasından kaynaklı olarak oluşan köpüklenmenin ve hava kabarcıklarının akım alanına dahil olmasından dolayı su yüzü profilinin deneysel görüntülerde ayırt edilmesinin zor olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. T=11.9, 15.16 ve 17.54 akış zamanlarında akım alanında negatif hızların bulunmadığı hız vektörlerinin deseninden anlaşılmaktadır. T=20.67, 23.05 ve 29.69 akış zamanlarında memba bölgesinde oluşan negatif dalganın önünde hız vektörlerinin negatif yönünde olduğu ve akış zamanının artmasıyla birlikte bu bölgede elde edilen hız vektörlerinin büyüklüğü küçülmektedir. Yatay doğrultudaki hız bileşeninin en büyük değerlerinin trapez engelin mansap bölgesinde oluştuğu ve değerinin 1.6m/s'den büyük olduğu ve üçgen engelin memba bölgesinde maksimum yatay hız bileşeninin elde edildiği bölgenin trapez engel durumunda oluşmadığı belirlenmiştir. T=17.54 akış durumunda trapez engelin memba üst köşesinden başlayarak akış zamanının artmasıyla bu negatif hızların oluştuğu bölgenin trapez engelin alt topuk noktasına kaydığı ve ilerleyen akış zamanlarında kanal tabanı üzerinde de negatif hızların oluştuğu bölgenin büyüdüğü görülmektedir. Baraj yıkılma dalgasının ilk akış

zamanlarında (T=15.16 ve 17.54) trapez engelin mansap bölgesinde türbülans kinetik enerjinin maksimum değerinin oluştuğu, bu akış zamanlarından daha büyük akış zamanlarında trapez engelin memba yüzünde oluşan negatif dalganın ön yüzünde de türbülans kinetik enerjinin maksimum değerlere sahip olduğu görülmektedir. Akış zamanın artmasıyla, trapez engelin memba yüzü üzerinde oluşan kinetik enerjinin negatif yayılım dalgasıyla birleşerek daha büyük bir bölgede maksimum değerlerin oluştuğu belirlenmiştir. Negatif yayılım dalgasının membaya doğru hareketiyle birlikte T=35.83 akış zamanında türbülans kinetik enerjisinin maksimum değerinin oluştuğu bölgenin en büyük olduğu söylenebilir. Akış zamanının T=35.83'ten büyük olduğu akış zamanlarında (T=41.84 ve 49.99) bu bölgenin zamanla daha da küçüldüğü ve T=62.77 akış zamanında negatif yayılım dalgasının bittiği görülmektedir.

Bu çalışmanın sonuçlarının genel olarak değerlendirilmesinden, farklı mansap su yüksekliklerinde ve mansap bölgesinde farklı geometrilere sahip engellerin bulunması durumunda meydana gelen baraj yıkılması probleminin sayısal modellemesinden elde edilen su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması sonucunda, sayısal modellemelerde kullanılan RNG, SST ve DES modellerinin tüm akış zamanlarında birbirine benzer sonuçlar verdiği ve birbirilerine bariz üstünlükler sağlamadığı belirlenmiştir. α=0, 0.1 ve 0.4 durumunda DES modelinin, mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumunda ise SST türbülans modelinin kullanılan diğer türbülans modellerine kıyasla çok az farkla deneysel verilere en yakın tahminde bulunduğu ifade edilebilir. Bunun yanında, α=0 durumunda oluşan yayılım dalgasının α=0.1 ve 0.4 durumlarına kıyasla düşü yüksekliğinin büyük olması nedeniyle, bu α değerlerine kıyasla akım alanında daha yüksek hızların ve türbülans kinetik enerjisinin oluştuğu belirlenmiştir. α=0.4 durumunda elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerlerinin diğer α değerlerinde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinden daha küçük olduğu ve bu akım durumunda yayılım dalgasının hareketinin daha kısıtlı olduğu ve sayısal modellemelerin daha karmaşık olmayan akım problemlerinin çözümünde daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Baraj yapısının mansap bölgesinde üçgen ve trapez engel bulunması durumunda elde edilen su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılması sonucunda SST modelinin kullanılan diğer modellere kıyasla daha

başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiş, sonuçların bu şekilde oluşmasında yayılım dalgasının engel ile etkileşimde bulunması durumunda yeni bir sınır tabakasının gelişim göstermesinin etkisinin olduğu ve bu sınır tabakası gelişiminin SST türbülans modeli tarafından çalışmada kullanılan diğer modellere kıyasla daha iyi modellendiği düşünülmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, baraj mansap bölgesinde gerçek durumun temsil edilebilmesi için, farklı geometrik özelliklere sahip engellerin bulunması durumunun hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

AKÖZ, M. S., SOYDAN, N. G. ve ŞİMŞEK, O., 2016. Kritik Üstü Açık Kanal Akiminin Detached Eddy ve Large Eddy Simülasyon ile Sayısal Modellenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 4(4): 213-224.

ANSYS, 2018. Fluent Theory Guide, ANSYS Inc. USA.

AVUDAIAPPAN, T., VIJAYAN, V., PANDIYAN, S. S., SARAVANAN, M. and DİNESH, S., 2018. Potential flow simulation through lagrangian interpolation meshless method coding. Journal of Applied Fluid Mechanics, 11: 129-134.

DUTTA, R. and XING, T., 2017 (April). Quantitative solution verification of large eddy simulation of channel flow. In Proceedings of the 2nd Thermal and Fluid Engineering Conference and 4th International Workshop on Heat Transfer. Las Vegas.

EÇA, L. and HOEKSTRA, M., 2014. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. Journal of Computational Physics, 262: 104-130.

GUMUS, V., SİMSEK, O., SOYDAN, N. G., AKOZ, M. S. and KIRKGOZ, M. S., 2016. Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(1): 1-11.

GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., AKÖZ, M. S. ve KIRKGÖZ, M. S., 2018. Akışkan Hacimleri Yöntemiyle Yapılan Sayısal Modellemelerde Yan Duvar Etkisinin İncelenmesi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3(3):15-21.

KHOSHKONESH, A., NSOM, B., GOHARI, S. and BANEJAD, H., 2019. A comprehensive study on dam-break flow over dry and wet beds. Ocean Engineering, 188: 1-18.

KİRKGOZ, M. S., AKOZ, M. S. and ONER, A. A., 2008. Experimental and theoretical analyses of two-dimensional flows upstream of broad-crested weirs. Canadian Journal of Civil Engineering, 35(9): 975-986.

KIRKGOZ, M. S., AKOZ, M.S. and ONER, A. A., 2009. Numerical modeling of flow over a chute spillway. Journal of Hydraulic Research, 47(6): 790-797.

KOCAMAN, S., 2007. Experimental and theoretical investigation of dam-break problem, Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 286.

KOCAMAN, S., 2014. Prediction of backwater profiles due to bridges in a compound channel using CFD. Advances in Mechanical Engineering, 6: 1-19.

KOCAMAN, S., GÜZEL, H., EVANGELISTA, S., OZMEN-CAGATAY, H. and VICCIONE, G., 2020. Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel. Water, 12(4): 1-22.

LIU, W., WANG, B., GUO, Y., ZHANG, J. and CHEN, Y., 2020. Experimental investigation on the effects of bed slope and tailwater on dam-break flows. Journal of Hydrology, 590: 1-16.

MANSOUR, A. and LAURIEN, E., 2018. Numerical error analysis for three-dimensional CFD simulations in the two-room model containment THAI+:

Grid convergence index, wall treatment error and scalability tests. Nuclear Engineering and Design, 326: 220-233.
MENTER, F. R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32(8): 1598-1605.
MUNOZ, D. H. and CONSTANTİNESCU, G., 2020. 3-D dam break flow simulations in simplified and complex domains. Advances in Water Resources, 137: 1-16.
ONER, A. A., AKOZ, M. S., KİRKGOZ, M. S. and GUMUS, V., 2012. Experimental validation of volume of fluid method for a sluice gate flow. Advances in Mechanical Engineering, 4: 1-10.
OZMEN-CAGATAY, H. and KOCAMAN, S., 2011. Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 5(4): 541-552.
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.
SHIGEMATSU, T., LİU, P. L. F. and ODA, K., 2004. Numerical modeling of the initial stages of dam-break waves. Journal of Hydraulic Research, 42(2): 183-195.
SIMSEK, O., AKOZ, M. S. and SOYDAN, N. G., 2016. Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir. Progress in Computational Fluid Dynamics, an İnternational Journal, 16(6): 364-378.
SOYDAN, N. G., ŞİMŞEK, O. and AKÖZ, M. S., 2017. Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir. European Water, 57: 85-92.
ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., GÜMÜŞ, V., AKÖZ, M. S. and KIRKGÖZ, M. S., 2015. Numerical modeling of B-type hydraulic jump at an abrupt drop. Teknik Dergi, 26(4): 7215-7240.
YAKHOT, V. S. A. S. T. B. C. G., ORSZAG, S. A., THANGAM, S., GATSKI, T. B. and 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.
YAKHOT, V., and ORSZAG, S. A., 1986. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. Journal of Scientific Computing, 1(1): 3-51.
YE, Y., XU, T. and ZHU, D. Z., 2020. Numerical analysis of dam-break waves propagating over dry and wet beds by the mesh-free method. Ocean Engineering, 217: 1-11.