

PAPER DETAILS

TITLE: Barajların desanj yapılarındaki akis karakteristikleri ve enerji kirici yapıların etkinliğinin sayısal analizi

AUTHORS: Selman OGRAS,Fevzi ÖNEN

PAGES: 749-770

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2689753>



Barajların deşarj yapılarındaki akış karakteristikleri ve enerji kırıcı yapıların etkinliğinin sayısal analizi

Numerical analysis of the efficiency of flow characteristics in the discharge and energy dissipators structures of dams

Selman OĞRAŞ^{1,*}, Fevzi ÖNEN²

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü ugras_selman@hotmail.com ORCID: 0000-0002-0347-3482,

² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü fonen@dicle.edu.tr ORCID:0000-0002-2368-1035,

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 05 Ekim 2022
Revizyon 26.Ekim 2022
Kabul 10 Aralık 2022
Online 31 Aralık 2022

Anahtar Kelimeler: Barajlar,
Deşarj Yapıları, Enerji, Flow3D

ÖZ

Baraj mühendisliğinin araştırma konularından olan barajların deşarj yapılarının hidrolik karakteristikleri ve ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu dikkate alındığında etkin bir proje tasarımı için yapılacak fiziksel modelleme, prototip deneyler ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Deşarj yapılarının performansını değerlendirmek için kullanılan fiziksel model yöntemi geçmişte ve günümüzde başarılı olmasına rağmen HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) yönteminin de fiziksel modellemeye göre çeşitli avantajlar sunduğu bilindiğinden günümüzde yapılacak hidrolik alanındaki mühendislik tasarımları artık deneysel çalışmalar ile birlikte HAD yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir. Bu tür programların birçok hidrolik yapıların projelendirilmesinde kullanılması, planlanmada daha az hata oluşmasını, daha kısa zamanda ve daha ekonomik olarak yapılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada fiziksel model çalışmalarıyla belirlenen Ilısu Barajı dolusavak yapısındaki hidrolik karakteristikler ve enerji kırıcı yapıların etkinliği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın sayısal modellemesinde özellikle açık kanal akımı, sediment taşınımı, oyulma gibi problemlerin çözümünde başarılı bir yazılım olan Flow3D kullanılmış olup sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü, basınç değerleri ve hız profilleri, 1/100 ve 1/30 model ölçekleriyle yapılan fiziksel model deney ölçümleriyle karşılaştırılarak ilgili sayısal analiz yönteminin performansı değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 October 2022
Received in revised form 26 October 2022
Accepted 10 December 2022
Available online 31 December 2022

Keywords: Dams, dissipation
structures, energy, Flow3D

Doi: 10.24012/dumf.1184570

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Physical modeling, prototype experiments and numerical modeling results should be evaluated together for effective design, considering the hydraulic properties of the discharge structures of dams, which are research subjects of dam engineering, and the safe and economical distribution of the resulting energy. Although the physical model method used to evaluate the performance of discharge structures has been successful in the past and today, it is known that the CFD method offers various advantages over physical modeling. Engineering designs in the field of hydraulics to be made today require the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) software together with experimental studies. Because the use of such programs in the design of many hydraulic structures will ensure that there are fewer mistakes in planning, and that it will be done in a shorter time and more economically. In this study, the hydraulic characteristics in the discharge structures determined by the physical model studies and the efficiency of the energy dissipating structures were numerically investigated by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. In the numerical modeling of the study, Flow3D, a successful software, was used to solve problems such as open channel flow, sediment transport, and scour, and the water surface pressure values and velocity profiles obtained from numerical calculations were compared. In this comparison, the performance of the numerical analysis method was evaluated by using the physical model test measurements made with the 1/100 and 1/30 scale models.

1. Giriş

Su, hayatın sırlarının en önemlisidir. Tarihteki ilk medeniyetlerin yerleşim bölgeleri hep su kaynaklarının yakınında olmuştur. Bilim tarihinde bilgi bakımından toplulukların dayanışmasına ilk misallerin yine su ile ilgili olduğu dikkate alındığında, ilgili bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak medeniyetlerin de geliştiği söylenebilir. Özellikle modern çağımızda insanın çevre ile olan karşılıklı etkileşiminin çok yönlü olarak artması sonucunda su talebi de orantılı olarak gittikçe artmıştır. Artan talebin karşılanması için kurak zamanlarda kullanılmak üzere sulak zamanların akarsu, nehir, ırmak, çay veya dere sularının bent, sedde, bağlama ve barajlar vasıtasıyla yolunun kesilerek biriktirilmesiyle ihtiyaç olunan talep karşılanmaya çalışılmıştır. Bu yapılar günümüzde bile sadece içme suyu amacıyla değil, aynı zamanda tarım, ulaşım, endüstri, korunma, barınma elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır. İhtiyaçlar dikkate alındığında neredeyse tümünü karşılayabilecek biriktirme yapıları olarak barajlar ön plana çıkmaktadır [1]. Bu yapılar sınıflandırılırken çeşitli kriterler dikkate alınmaktadır;

*Büyükliklerine göre; büyük baraj ve küçük baraj,

*Yüksekliklerine göre sınıflandırma; baraj yüksekliği 100 m'den fazla ise yüksek baraj, 50 ile 100 m arasında orta yükseklikte baraj, 50 m'den az ise alçak baraj,

*Yapılış amaçlarına göre sınıflandırma; Sulama barajı ve taşkın koruma barajı,

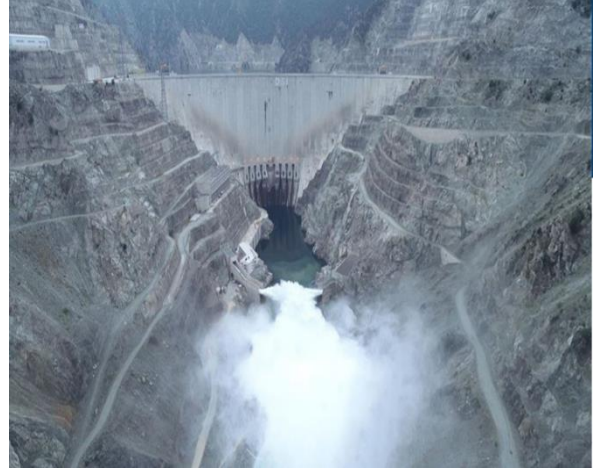
*Fonksiyonlarına göre sınıflandırma; biriktirme barajı, taşkın geciktirme barajı, kabartma barajı,

*Gövdenin statik projelendirmesine göre sınıflandırma; Ağırlık barajı, Kemer baraj (Şekil 1), Kemer ağırlık baraj, Payandalı baraj, Dolgu baraj, Ön germeli baraj,

*Hidrolik özelliğe göre sınıflandırma; Üzerinden su akan ve akmayan baraj,

*Gövde malzemesine göre sınıflandırma; Kargir, Beton, Dolgu baraj, Ahşap baraj, Çelik baraj, Lastik baraj olmak üzere çeşitli sınıflandırmaya tabi tutulmuştur [2].

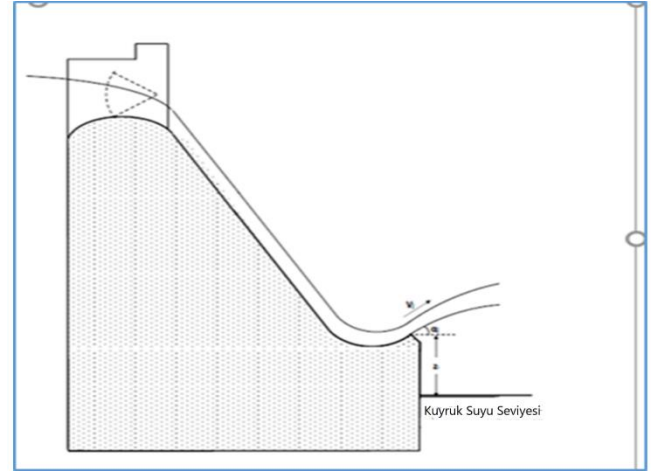
Baraj yapılarının taşkın sırasındaki güvenliğini sağlamak amacıyla deşarj yapıları olarak dolusavaklar inşa edilmektedir. Bu yapılar, barajı taşmaya karşı korumak için akışı kontrol ederek fazla suyu rezervuardan kuyruk suyuna aktarır. Amerika Birleşik Devletleri İçişleri Bürosu Islah Departmanı'nın (United States Bureau of Reclamation, USBR) tanımına göre, rezervuar alanında tutulamayan fazla suyu (sel suyu) serbest bırakmak için, ayrıca derivasyon barajlarındaki taşkın sularını derivasyon sistemine baypas etmesi için inşa edilmektedir[3].



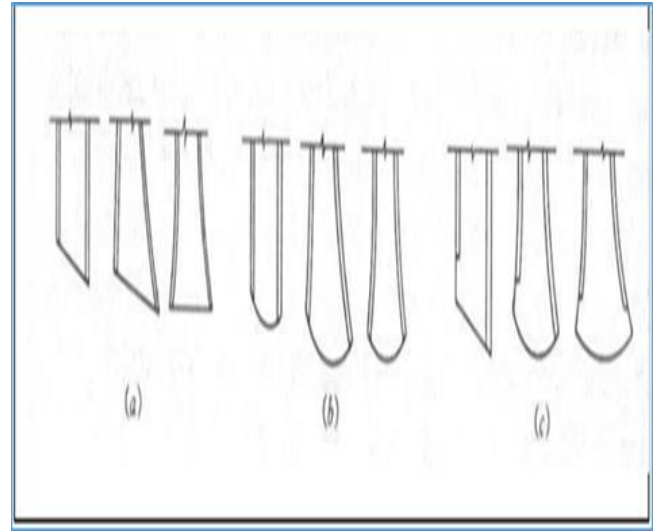
Şekil 1. Beton Dolgulu Kemer Baraj (Deriner Barajı)

Söz konusu deşarj yapıları birkaç farklı türde inşa edilebilmektedir. Başlıca; Basamaklı, Labirent, Sifon, Yanal, Şaft, Serbest Taşmalı, Tünel, Şut Kanallı ve Ogee dolusavaklardır [4]. Dolusavakların boyutları gelişen dünya nüfusu ile birlikte doğan enerji ihtiyacını karşılamak için son 30 yılda oldukça artış gösterdiğinden ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu baraj mühendisliğinin zor olan konuları arasında bulunmaktadır[5]. Bu tür yapıların tasarım ve inşaat ihtiyaçlarını karşılamak için hidrolik araştırmalar önem kazanmıştır. Bu çalışmalar ihtiyaçlar doğrultusunda belirlendiğinden ihtiyaçlar arttıkça proje karakteristikleri de buna göre değişim göstermiş, ayrıca teknoloji de bu doğrultuda gelişmiştir. Şimdiye kadar büyük taşkın debileri için gerçekleştirilen prototip deneyler sonucunda yeni tip enerji kırıcılar kullanılmak suretiyle birçok büyük proje tasarlanmıştır. Bununla birlikte taşkın deşarjı ve enerji kırınımı için tercih edilen yöntemler çeşitlidir. USBR tarafından uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucunda tasarlanan ve tip 1, 2, 3, 4 şeklinde sınıflandırılan ve dolusavakların alt kısmında inşa edilen hidrolik sıçramalı bu yapılar, dolusavaklar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca dolusavak yapısının ucunda yuvarlak eşik (roller bucket) (Şekil 2) tasarlanarak kavisli kısımda meydana gelen hidrolik sıçrama ile enerji kırınımı gerçekleştirilebileceği gibi, yine dolusavak yapısının sonunda inşa edilen sıçratma eşiği (ski jump) yardımıyla akımın havalandırılarak yapıdan uzak bir noktaya fırlatılması ve hava direnci etkisiyle jetin enerjisinin dağılması sağlanabilmektedir. Sıçratma eşikleri, serbest jet fırlatmalı enerji kırıcı (ski-jump bucket), ve çevirmeli sıçratma eşikli enerji kırıcı (flip bucket) olarak sınıflandırılır [6]. Serbest fırlatma yapısının ana amacı, ana barajda oyulma açısından sıkıntı oluşturmayacak şekilde akıntı yönünde mümkün olduğunca büyük bir mesafede jet çarpmasını sağlamak iken çevirmeli sıçratma eşğinde, enerji dağılımı genellikle dalma havuzu (plunge pool) ve hava sürüklenmesi ile oluşturmaktadır [7]. Steiner ve ark. [8] gibi birçok araştırmacı çevirmeli sıçratma eşiğini

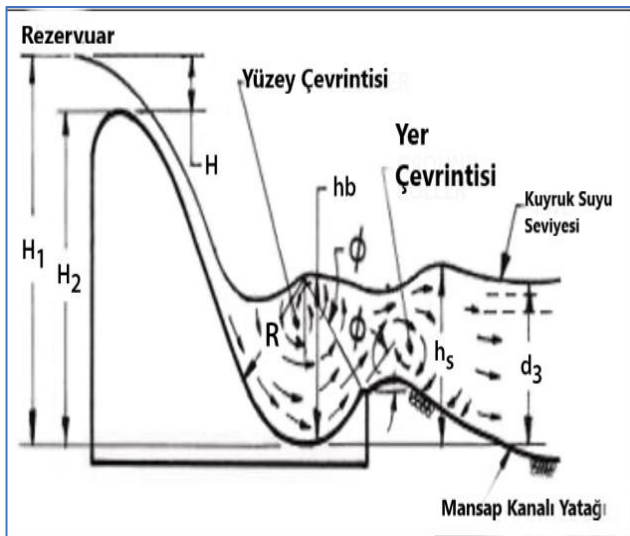
(flip bucket), fırlatmalı eşik (ski jump) (Şekil 3) yapısı ile aynı kategoriye koymaktadır. Sıçratma eşiklerinin halihazırda, çok çeşitli sapma açıları, fırlatma açıları, göreceli eğrilik yarıçaplı, dişli yapı elemanları gibi özel elemanlar içeren çeşitli geometrilere sahip (Şekil 4-5) binlerce tasarımı aktif olarak çalışmakta, ancak bunlar için sınırlı standart ve sadece birkaç tasarım yönergesi mevcuttur [9]. Serbest Jet yörüngeleri de yine tercih edilebilen enerji kırıcı yöntemlerden biridir. Baraj kretinin üstünden deşarj olan serbest akış, aşağıya doğru hava direncine ve hava sürüklenmesine maruz kalır. Hava sürüklenmesi nedeniyle su jetinin kuyruk suyuna dalmadan önce önemli miktarda enerjisi sönümlenir. Nehir yatağına dalma ile birlikte daha fazla enerji kaybı elde edilir. Serbest jet akışı kemer barajlarda kret üstünde, ayrıca dip savakların çıkışlarında oluşmaktadır. Bu yapılar dizayn edilirken baraj tipi, barajla bağlantılı yapıların yerleşimi, ilgili yapılardaki hidrolik durum, çevre, jeoloji, giriş ve çıkış debi miktarları, baraj yüksekliği, ekonomik değerlendirme gibi faktörler göz önüne alınmaktadır. Bunların dışında büyük barajlar için sıçratma eşikleriyle birlikte kombine olarak inşa edilen jet etkileşimli havuzlar, dalma havuzları (plunge pool), taban kaplamalı düşü havuz (stilling basin) gibi yöntemler yerel durumlar da göz önüne alınarak kullanılmaktadır. Enerji kırıcı yapı türlerinden bir diğeri de iç enerji kırıcı yapılar olan tünellerde inşa edilen yapılardır. Alandaki topografik ve jeolojik şartlar uygun ise hem projenin daha düzenli olması hem de maliyetin azalması için derivasyon tünellerinin içinde örneğin orifis kapaklar, yüzük şeklindeki engeller (tumbling) tasarlanmak suretiyle büyük miktarda enerji kırınımı gerçekleştirilebilir. Tabii olarak bu yöntemdeki en büyük sıkıntı kavitasyon, sediment ve dolayısıyla erozyon hususudur. Çözümü ise gerekli basıncı ayarlamak, orifis plakalarda gerekli optimizasyonu yapmak, anti erozyon malzeme kullanmaktır [5].



Şekil 3. Fırlatmalı Sıçratma Eşiği (Ski Jump)



Şekil 4. Flip bucket türleri a. eğimli, b. dil şeklinde. c. eğimli(kısa yan duvarlar dahil)



Şekil 2. Yuvarlak Sıçratma Eşiği (Roller Bucket)



Şekil 5. Dişli Sıçratma Eşiği (Slotted Bucket)

Söz konusu deşarj yapılarında ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu dikkate alındığında etkin bir proje tasarımı için yapılacak fiziksel modelleme, prototip deneyleri ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Nitekim bu doğrultuda çok sayıda çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır.

Chanel ve Doering [10], daha önce fiziksel model çalışmaları yapılmış olan 3 farklı hidroelektrik santralin dolusavaklarının farklı su yükü ve dolusavak yüksekliklerini göz önüne alarak, P/H_d (P :dolusavak yüksekliği, H_d :dolusavak tasarım su yüksekliği) oranının değişimini bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi olan Flow3D ile sayısal analizini yapmışlardır.

Ho ve ark. [11], Avustralya genelinde çeşitli dolusavak uygulamalarını modellemek için Flow3D programını kullanarak elde ettikleri sonuçlara göre tasarım seviyelerine eşit ve üzerindeki su yükseklikleri için debi miktarının genellikle fiziksel model verilerinden %5 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca sayısal modellerin fiziksel model debi deşarjlarını %3 oranında fazla tahmin ettiğine dair genel bir sonuca ulaşmışlardır.

Gessler [12], yaptığı çalışmada su yüzeyi profillerinin fiziksel model karşılaştırmalarına göre HAD'ın deşarjları %3'e kadar eksik tahmin ettiğini belirtmiştir. Ayrıca %5'lik farkların elde edildiği analizlerinde oluşan jet profillerinde de gayet iyi sonuçlar alındığını belirtmiştir.

Savage ve Johnson [13], Flow3D programını kullanarak standart ogee dolusavakların simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları fiziksel model, USBR ve USACE (United States Army Corps of Engineers) verileriyle karşılaştırdıklarında Flow3D'nin $0,7*H_d$ den büyük su yükseklikleri için debi değerlerinin fiziksel model sonuçlarına göre biraz fazla tahmin ettiğini, USACE ve USBR standartlarının ise fiziksel model debi deşarjlarını sırasıyla yaklaşık %1.5 ve %5 oranında düşük tahmin ettiğini tespit etmişlerdir.

Dursun ve Öztürk [14], Özellikle son otuz yıldır gelişen baraj inşa tekniklerinin (silindire sıkıştırılmış beton baraj metodu gibi), basamaklı dolusavakların popülaritesini artırdığını, bu tip dolusavaklarda klasik dolusavaklara göre %70-80 oranlarında daha fazla enerji sönmülmesinin mümkün olduğunu, kendilerinin de farklı boşaltım kanalı taban eğimleri için enerji sönmülme oranlarını sayısal yöntemle belirleyerek benzer konuda daha önce fiziksel modelleri yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmasını amaçlamışlardır.

Baba Ali ve ark. [15], Nazloo Barajı'nın dolusavak tasarımında inşa edilen enerji kırıcı havuzun etkinliğini

fiziksel ve sayısal olarak modelleme yoluna gitmişlerdir. USBR Tip- II enerji kırıcı havuzun yan duvarlarında $5^\circ/7,5^\circ/10^\circ$ ve $12,5^\circ$ açılarla havuzun mansabına doğru daraltmak suretiyle oluşacak hidrolik sıçramanın da katkısıyla meydana gelen enerji sönmülmesi oranını farklı debiler için araştırmışlardır. Flow3D programı ile analizi yapılan modelde türbülans modeli olarak RNG (Renormalize Grup Denklemleri) $k-\epsilon$ ve Standart $k-\epsilon$ modellerini ayrı ayrı çalışmışlardır.

Valero ve Rafael [16], dolusavak üzerindeki serbest akışı, Flow3D programı yardımıyla hava sürüklemesi (air entrainment) ve sürüklemesi akış (drift flux) modellerini kullanarak elde ettikleri hava konsantrasyon katsayısını, daha önceki prototip çalışmalarından elde edilen sonuçlarla kıyaslamışlardır.

Usta [17], Laleli barajı dolusavak fiziksel model sonuçlarını sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG model tercih edilmiştir. 1/25 ölçekli olarak yapılan fiziksel model, aynı zamanda 1/1 olarak da çözümlenmiş olup ölçek etkisi de tespit edilmiş, ayrıca fiziksel modelde ortaya çıkan kavitasyon hususu için de sürüklemesi (air entrainment) modeli çalıştırılmıştır.

Daneshfaraz ve ark. [18], USBR standartlarına sahip ogee dolusavağında ve hemen mansabında meydana gelen enerji kırıcının etkinliğini farklı varyantlar için araştırmışlardır. Çalışmalarında hem fiziksel hem de sayısal model ele alınarak sonuçların karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG türbülans modeli seçilmiş ve analiz için beş farklı hücre boyutu kullanılmıştır. Varyant olarak; Ogee profilinin üstünde blokların eklenmesi şeklinde, ayrıca dolusavak ucunda 32° ve 52° 'lik sıçratma eşiği kullanılarak oluşan jet uzunluğu ve enerji kırılımı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Zhenwei ve ark. [19], laboratuvarında tasarladıkları dolusavağın hidrolik karakteristiklerinin tespiti için deney yapmışlardır. Ayrıca aynı yapının sayısal analizi için de Fluent yazılımını kullanarak elde ettikleri sonuçları kıyaslamışlardır.

Khani ve ark. [20], dolusavak eşik mansabındaki sıçratma eşiği (flip bucket) üzerinde oluşan basınç ve hız dağılımı gibi hidrolik karakteristikleri belirlemişlerdir. Bunun için S. Eklund (2017)'in çalışmasındaki teorik ve deneysel yöntemler sonucu ortaya çıkan basınç diyagramını dikkate alarak aynı grafiğe yapılacak sayısal analiz sonuçlarını ekleyerek ilgili teorik ve deneysel değerlere nümerik sonuçları da eklemek istemişlerdir.

Yavuz [21], yaptıkları fiziksel model deneylerinde elde ettikleri jet mesafesi ile Kawakami (1973)'nin ve

Khatsuria (2005)'nın ampirik denklemlerinde elde edilen jet mesafesi ve ayrıca sayısal simülasyon sonucu edinilen jet mesafesinin kıyaslanarak oluşan debi-enerji sönümlenme yüksekliği denklemini elde etmiştir.

Aydın ve ark. [22], çalışmalarında boşaltım kanallarındaki enerji kırıcı yapıların etkinliğini sayısal olarak incelemişlerdir. Peterka (1984)'nın deneysel çalışmalarından uyarlanan model, klasik şüt kanalı ve bu kanal üzerine yerleştirilen enerji kırıcı bloklardan oluşmaktadır. Flow3D'nin kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG modeli, sınır koşulları olarak giriş hızı ve çıkış koşulu da serbest çıkış tercih edilmiştir.

Bu çalışmada da HAD yazılımı Flow3D kullanılarak Ilısu barajı dolusavağı için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini Renormalize Grup Denklemleri (RNG) türbülans kapama modeli ile analizler gerçekleştirilmiştir. Flow 3D kullanılarak 1/100, 1/30 ve 1/1 (prototip) ölçeklerinde çeşitli akış senaryoları simüle edilerek elde edilen sonuçlar, DSİ TAKK laboratuvarında 1/100 ve 1/30 ölçeklerinde inşa edilen Ilısu Baraj dolusavağının fiziksel model testlerinden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve böylece HAD yönteminin etkinliği ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

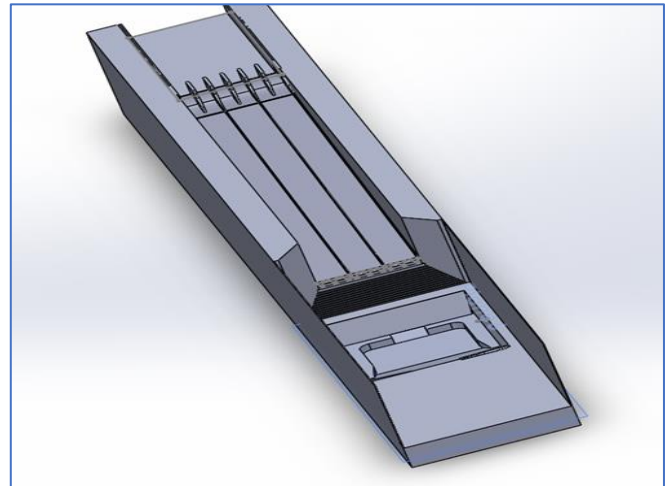
2.1 Çalışma Alanı

Ilısu barajı, Türkiye'nin güney doğusunda Dicle Nehri üzerinde yer almaktadır. Bu baraj, Önyüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu barajlar içerisinde gövde uzunluğu ve yüzey alanı bakımından dünyada en büyük, gövde dolgu hacmi bakımından Atatürk Barajından sonra Türkiye'nin 2. büyük, Kurulu güç bakımından Atatürk, Karakaya ve Keban Barajlarından sonra 4. büyük, Dicle Nehri üzerinde yapılmış ve yapılacak olan en büyük Baraj ve HES'tir. Tamamlandığında, sadece elektrik enerjisi üretiminden ekonomiye yılda 412 Milyon \$ fayda sağlaması planlanmaktadır. Uygulanarak yapımı tamamlanan barajın toplam dolusavak genişliği 124 m olup altı adet radyal kapak ile kontrol edilmektedir. Dolusavak boşaltım kanalının eğimi 1/8,25 'tir. Ilısu barajı dolusavağı dişli çevirmeli tip sıçratma eşiği (slotted bucket) ve dalma havuzu ile sona ermektedir. Dolusavak tepesi ile çevirmeli sıçratma eşiği mansap ucu arasındaki kot farkı 70 m (510-440)'dir.

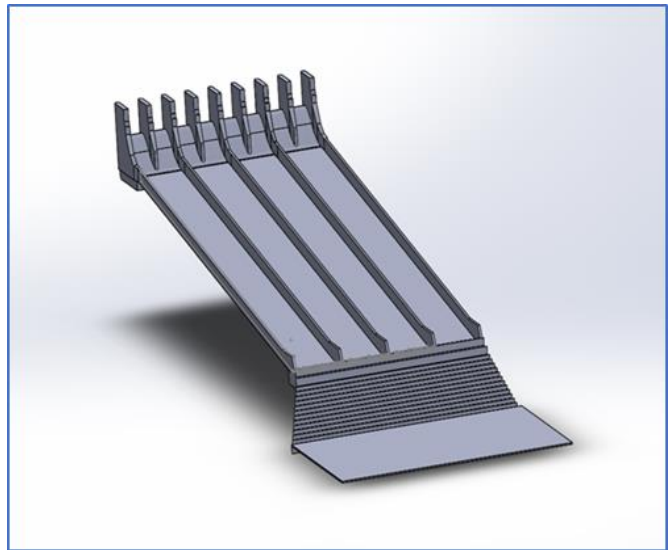
Ilısu Barajı dolusavağı 2010 yılı revize uygulama projeleri MMF (muhtemel maksimum feyezan) taşkın debisine göre boyutlandırılmış olup 6 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; Eşik Yapısı - Şüt Kanalı - Sıçratma Eşiği – Apron - Enerji Kırıcı Havuz - Boşaltım kanalıdır (Şekil 6). Söz konusu barajın dolusavağı 6 adet radyal kapak tarafından kontrol edilmektedir. Barajın kapak sayısı fiziksel modelde 8 adet 16x16 m'dir (Şekil 7). DSİ Barajlar Hidroelektrik Santralleri

Daire Başkanlığı tarafından hazırlanan Revize Dolusavak Hidrolik Raporunda ise 6 adet 15x16 m olarak değiştirilmiştir. 2010 yılı revize dolusavak hidrolik raporuna göre baraj yerinin en büyük taşkın piki 20357 m³/s dir. Dolusavak kapasitesinin tayini için MMF kullanılarak taşkın öteleme yapılmış ve bu öteleme esnasında suyun rezervuarda ne kadar yükseldiği tespit edilerek hava payı bulunmuştur. Maksimum kapak açıklığında dolusavak 14799 m³/s debi atabilmektedir. Dolusavağın bu debiyi attığı andaki rezervuar su seviyesi ise 527.86 m'dir [23].

Ilısu Barajı dolusavağı 1982 yılı fiziksel model raporuna göre tasarlanan yapıda ise enerji kırıcı havuz bulunmamaktadır. 1980 yılında tasarlanan projede 8 adet radyal kapak mevcut iken maksimum taşkın debisi ise 17988 m³/s olarak ölçülmüştür. Dolusavağın bu debiyi attığı andaki rezervuar su seviyesi ise 527.05 m'dir. İlgili modelde ihtiyaç olunan enerji sönümlenmesini temin için sıçratma eşiği 3 farklı şekilde tasarlanmış elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 6. Ilısu Barajı 2010 Yılı Dolusavak 3D Yapısı



Şekil 7. Ilısu Barajı 1982 Yılı Dolusavak 3D Yapısı

2.1.1 Ilısu Barajı Dolusavak Enerji Kırıcı Yapıların Tasarımı

Ilısu Barajı ve HES Projesinde dolusavak yapısında meydana gelen enerjinin sönmülmesi için ilk olarak şut kanalının sonunda çevirmeli sıçratma eşiği (flip bucket) tasarlanmıştır. Daha sonra proje firmasının tavsiye ettiği dişli sıçratma eşiği Varyant-I modele uygulanmıştır. Bu tasarımda eşikteki diş üst genişliği 12 m, dişin yan şev açısı $1/2.15$ olarak alınmıştır. Ayrıca dişler arası yarıkların yatay ile yaptıkları açı olan Beta sıçratma açısı 3.55° olarak seçilmiştir. Dişli sıçratma eşiği (slotted bucket) Varyant-I için yapılan modelleme sonuçları dikkate alındığında; dişin üst genişliğinin eşik yapısına nazaran büyük olduğu ve buna karşın yarık genişliklerinin napın havalanması için yeterli olmadığı görüldüğünden bu durumu düzeltmek için yapılan çalışmalar sonunda dişli sıçratma eşiği Varyant-II alternatif olarak tasarlanmış ve elde edilen sonuçlara göre de en uygun varyant olarak belirlenmiştir. Bu eşikte diş üst genişliği 10.97 m, diş yan şevleri $\frac{1}{2}$, dişler arası mesafe 1.46 m ve ayırma duvarına bitişik şevler Varyant-I'de olduğu gibi $1/1$ yapılmıştır. Beta sıçratma açısı 2.78° olarak seçilmiştir [24].

2.2 Metod

Flow3D, önerilen dolusavak tasarımlarının hidrolik performansını doğrulamak ve baraj güvenlik gereksinimlerini karşılama hususları için yaygın olarak kullanılmaktadır [25]. Bu çalışma kapsamında Ilısu baraj dolusavağının $1/100$, $1/30$ ve $1/1$ ölçekli sayısal model simülasyonları tamamlanmıştır. Hidrolik parametreler simülasyonlardan elde edilmiş ve sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Birkaç farklı senaryo uygulanarak en optimum ve doğru çözümler bulunmaya çalışılmıştır.

2.2.1 Uygun Hesap Ağı

Uygun hesap ağının tespiti için eldeki laboratuvar ölçümleri en önemli verilerdir. 1982 yılı modelinin sayısal analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçları kıyaslanarak uygun hesap ağına ulaşılmıştır. Bunun için öncelikle kaba bir hesap ağıyla çözümler yapılmıştır. Daha sonra hesap hücreleri küçültülerek alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların hesap hücrelerinin boyutlarına bağlı olmaktan çıktığı ve çözüm süresi olarak da en optimum sonucu veren hesap ağı(mesh) tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunlara ek olarak model içindeki "Favorized" seçeneği kullanılarak katı geometri, her bir hesap ağı için kontrol edilmiştir. Sayısal analizlerde ağ tasarımı yapılırken modelin büyük olması durumunda tek bloklu tasarım hücre sayısının çok fazla olmasına neden olmaktadır. Buna karşın simülasyon çözünürlüğünü yalnızca

ilgilenilen alanda artırmak ve ilgilenilmeyen bölgeleri hariç tutmak adına çoklu ağ bloğu yöntemi kullanmak etkili çözümlerdendir. Flow3D, modelin tümünde kullanılan ağ bloğu türünü "Non-Conforming Mesh" şeklinde adlandırırken özel olarak ilgilenilen kısım için ise "Conformed Mesh" olarak adlandırmaktadır. Söz konusu ağ tiplerinin özellikleri de dikkate alınarak modelimizin tamamında geçerli olan non-conformed blok'a ek olarak enerji kırıcı yapının memba ve mansabını da kapsayacak şekilde ikinci bir ağ bloku (conform to blocked volume) tanımlanmıştır. "Conform to blocked volume" olarak tanımlanan bu blok sayesinde özellikle geometrinin değiştiği boşaltım kanalı sonunda (slotted bucket) enerji kırıcı yapının daha net algılanması beklenmiştir. Fiziksel model ve sayısal model sonuçlarının birbirlerine olan yakınsama oranları ve uygun ağ elde edilebileceği hususu da göz önüne alınarak elde edilen debi ve jet profillerinin yanı sıra ağ boyutlarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde (Şekil 8) görüleceği üzere ogee üzerinde performans kriteri olarak 5 adet farklı ağ boyutu için 9 farklı noktada hesaplanan su yüzü profillerinin OKH (Ortalama Karesel Hata) ve OMGH (Ortalama Mutlak Göreceli Yüzde Hata) değerleri verilmiştir. Şekilde küçülen hücre boyutlarına bağlı olarak hata oranı T5 testi hariç gittikçe azalmış, buna paralel hücre sayısı ve çözüm süresi de oldukça uzamıştır. İlgili sonuçlara göre zaman/kaynak gözetilerek ve ayrıca oluşan jet profillerinin durumu da göz önüne alınarak T3 testi uygun ağ ölçüleri olarak seçilmiştir (Şekil 9).

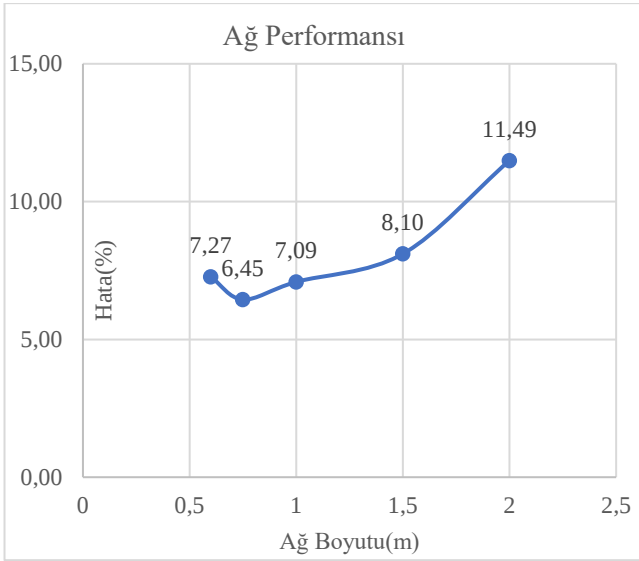
2.2.2 Sınır Koşulları

Sınır koşulları olarak, maksimum hesap yüküne denk gelen 527,05 m rezervuar seviyesi giriş koşulu seçilmiştir (Xmin). Bu sınır koşulunda rezervuar bulunduğundan dolayı sonsuz rezervuar varsayımı dikkate alınmış ve başlangıç olarak sıfır hız ve sıfır hidrostatik basınç, yani "stagnation pressure" söz konusudur. Çıkış koşulu ise santral tam kapasite çalışırken oluşacak kuyruk suyu kotu olan 422 m'dir (Xmax). Çözüm bölgesinin üst sınırında ise sınır şartı olarak yine basınç koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulu, yerçekiminden dolayı herhangi bir etkisi olmadığı için serbest yüzeyde atmosfer basıncının da etkisiyle enerji kırıcı bölgesinde suyun serbest hareket etmesi sağlanmıştır (Zmax). Serbest yüzey, akışkan hacmi (Volume Of Fluid, VOF) yaklaşımı ile belirlendiğinden su-hava arakesitinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit atmosfer basıncı etkili olmaktadır. Katı sınır yüzeylerinde kaymama (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır (Ymax, Ymin, Zmin). Dolayısıyla simetri koşulu uygulanmak suretiyle cidar

yüzeylerinde yatay ve düşey doğrultudaki hız bileşenleri sıfır olmaktadır. Ayrıca yaptığımız çalışmada tüm simülasyonlar için renormalizasyon grubu RNG k - ϵ türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Flow3D kullanıcı kılavuzundaki RNG türbülans modelinin yazılımda mevcut olan en doğru ve sağlam model olduğu ve yapılan literatür çalışmalarında ilgili modelin daha etkin ve gerçeğe yakın sonuçlar vermesinden dolayı kullanılmıştır.

Test No	Hücre Boyutu (non-conformmed mesh)	Hücre Boyutu (Conformmed to block volume mesh)	Toplam Hücre Sayısı	OKH	OMGH
T1	2	1	2000000	0,79	11,49
T2	1,5	0,75	5000000	0,54	8,10
T3	1	0,5	18000000	0,52	7,09
T4	0,75	0,375	38000000	0,48	6,45
T5	0,6	-	48000000	0,47	7,27

Şekil 8. Farklı Ağ Boyutlarının Performans Analizi



Şekil 9. Uygun Hesap Ağı Performansı

3. Bulgular

Üç boyutlu simülasyonlar zamana bağlı çözülerek tamamlanmıştır. Öncelikle uygun hesap ağı seçimi yapılarak çözüm için en optimum hesap hücre boyutu ve konfigürasyonu belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen hesap ağı kullanılarak model üzerinde detaylı incelemeler yapılmıştır. Ilısu Barajı dolusavağının yarısı hesap ağına dahil edilmiştir. Y eksenini simetri alındığından yapının tamamı analize dahil olmuştur. Debi sonuçları yapının tamamına göre verilmiş olup sayısal model sonuçlarına göre taşkın deşarj debisi fiziksel modelden %3.2 daha fazla çıkmıştır.

3.1 Dolusavak Ogee Eşik Yapısı ve Boşaltım Kanallının İncelenmesi

3.1.1 Basınç, Su Yüzü ve Hız Değerleri

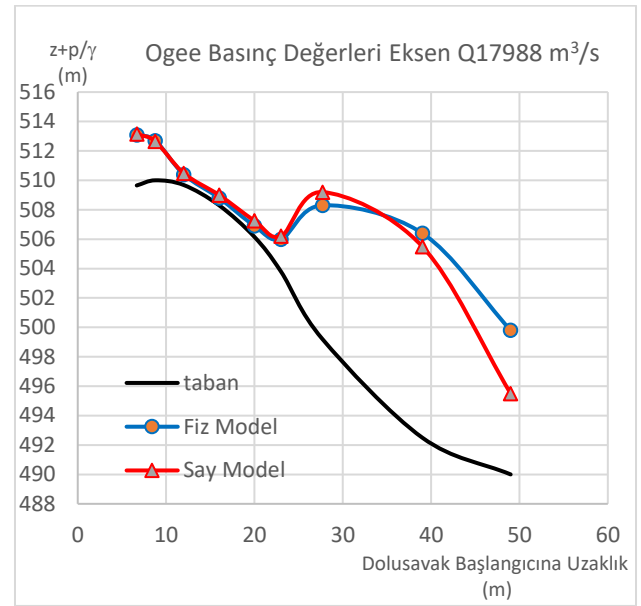
Yapılan analiz sonuçlarına göre eşik yapısındaki basınç değerleri ile ilgili olarak, fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verileri eşik yapısı için kıyaslandığında; Yapının eğimli-kavisli kısmında az da olsa farklı sonuçlar elde edilmişse de genel itibarıyla sayısal analiz değerlerinin fiziksel model basınç değerleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 10-11). Yine fiziksel model çalışmalarında dolusavak şut(boşaltım) kanalında basınç değerleriyle ilgili olarak fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verileri kıyaslandığında, sonuçların özellikle kanalın başlangıç ve orta kısımlarında hemen hemen aynı olduğu, kanalın sonuna doğru fiziksel model sonuçlarıyla nizamî bir miktar farkın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 12).

Fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verilerinin su yüzü profilleri, ogee eşik yapısı üzerinde sağ ve sol olmak üzere her iki sahilde, boşaltım kanalında ise sahiller ve eksende belirlenmiştir. Buna göre yapılan değerlendirmelerde; 17988 m³/s debi için su yüzü profilleri ile ilgili olarak dolusavağın hemen başlangıcında (ogee) meydana gelen su yüzü profilleri incelendiğinde kavisin olduğu kısım dışında nizamî bir su yüzü profili elde edilmiştir (Şekil 13 a). Aynı durum boşaltım kanalı için de geçerlidir. Ancak boşaltım kanalı sonunda basınç değerlerinde olduğu gibi nizamî bir farklılık ortaya çıkmıştır. Basınç değerlerinin tersine fiziksel modeldeki su yüzü profilleri sayısal modelden daha fazla çıkması da beklenen bir durumdur. Kanalın sonunda ortaya çıkan farklılığa neden olarak, artan hızla beraber türbülans kinetik enerjisinin su içerisinden serbest yüzeye çıkmasıyla gerçek durumda yani model deneylerde oluşan hava sürüklenmesi hususudur. Akış içerisine sürüklenen hava girişi ile beraber su seviyesi yükselecektir. Ancak sayısal modelde air entrainment modeli çalıştırılmadığından bu durum tespit edilememiş su yüzü profilleri fiziksel model deneylerindeki değerlerin altında kalmıştır. Hava sürüklenmesi hususu ile ilgili olarak, bilindiği üzere ogee üzerinden dökülen akış, boşaltım kanalından geçerken viskoz ve türbülanslı süreçlerin akış üzerindeki etkisi genellikle çok azdır. Akış kanal sonuna doğru hareket ederken artan hızın da etkisiyle enerji dengesinde az da olsa değişimler başlayacaktır. Sıçratma eşiğini terk ettikten sonra ve özellikle de mansap kanalındaki kuyruk suyu veya dalma havuzu ile temas ettiğinde güçlü momentum değişimleri meydana gelecektir. Devamında mansap kanalına giren akış parçacıkları, önceki kısımlara

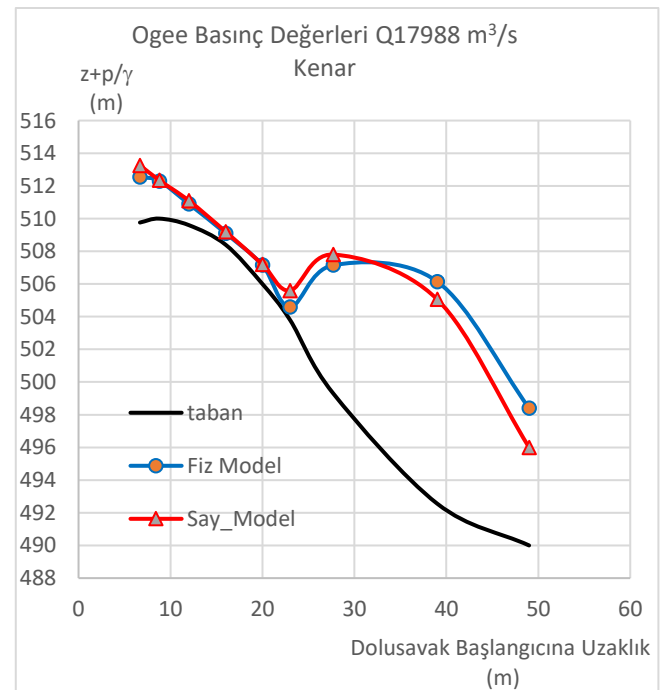
kıyasla daha düşük bir hidrolik enerjiyle yapıyı eder. Açıklanan hususun daha iyi anlaşılması adına Ilısu Barajı dolusavağının sayısal çözümleri Q12500 m³/s için air entrainment modeli değişken yoğunluklu formülasyon(variable density flow) ile birlikte kullanılarak ve kullanılmaksızın yapılmış olup sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre; air entrainment modelinde ogee üzerinde hava sürüklenmesi tespit edilememiş ve su yüzü değerleri air entrainment modeli kullanılmadan yapılan analizlerle aynı çıkmıştır (Şekil 13 b). Boşaltım kanalında ise ogeeden hemen sonra kanal başlangıcında orta ayaklardan kaynaklı nispeten güçlü bir hava sürüklenmesi başlangıcı tespit edilmiş olup bu sürüklenme kanalın orta kısımlarında %7, sonlarına doğru ise %12 seviyelerinde olmuştur (Şekil 14). Sürüklenme sonucunda kanalın tümünde geçerli olacak şekilde su yüzü değerlerinde fiziksel model değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Su yüzü değerlerindeki bu değişiklik basınç değerlerine yansımamış ve kanalın hemen her noktasında elde edilen basınç değerleri, ilgili model kullanılmadan oluşan çizgiyi takip etmiştir. Bu durum akışın hidrolik karakteristiklerine ters düşmektedir. Kanal sonuna doğru artan hava sürüklenmesi ile birlikte akışın basıncında azalma beklenmektedir. Ancak değişen akış koşullarının etkisi air entrainment modelinde görülmemiştir (Şekil 15 a, b). Nitekim bu durum önceki araştırmacıların dolusavak boşaltım kanallarındaki karakteristikler üzerinde sayısal analiz programlarının hava sürüklenmesi modelinin etkisini nicel olarak değil nitel olarak tespit ettiğini belirtmelerindeki sebep tam olarak bu şekilde ortaya çıkmaktadır. Sıçratma eşiği sonrasında oluşan jet profillerinde ve kuyruk suyu kanalında sürüklenme modelinin kullanılmasıyla jet profil mesafeleri ortalama %12 oranda kısalmış, kuyruk suyu kanalı tabanındaki basınçlarda da %60'a varan oranda düşüşler meydana gelmiştir. Oluşan bu vaziyet, ilgili air entrainment modelinin akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin ortaya çıkması için sürüklenen hava hacim miktarının etkili olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Fiziksel Model çalışmalarında Q12500 m³/s debi için şut kanalının 0+81.5 / 0+256.5 / 0+456.5 / 0+496(eşik sonu) km'lerinde ölçülen hızlar ile sayısal analiz sonucu elde edilen hızlar ile ilgili olarak; boşaltım kanalının orta kısımlarına kadar hız değerlerinin uyumlu olduğu kanal sonuna doğru fiziksel modele kıyasla sayısal analiz modelinde hız değerlerinde daha fazla artış elde edildiği, air entrainment modeli kullanılmasıyla kanal sonundaki hız farkının azaldığı

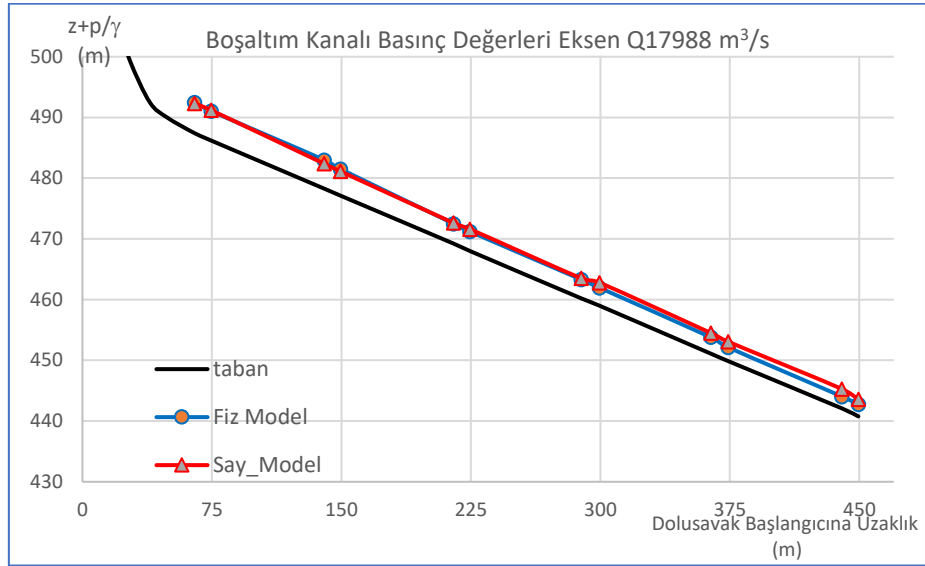
tespit edilmiştir. Oluşan bu durumun da hava sürüklenmesi etkisiyle kayma gerilmesinin azalması ve hızın artması teorisine zıt olduğu görülmüştür. Diğer hidrolik karakteristiklerinde olduğu gibi fiziksel modelin ölçekli olması hız değerleri profilini etkilemiştir. Sıçratma eşiği sonunda gerek flip bucket gerekse de varyantlarda eşik içerisindeki çevrinti etkisiyle hız değerlerinde düşüş görülmüş bu durum sayısal analiz sonuçları için de geçerli olmuştur. Varyantlarda dış üstündeki hız değerleri dış yarıklarındaki değerlere göre daha fazla düşüş göstermiştir (Tablo 1, Şekil 16 a, b).



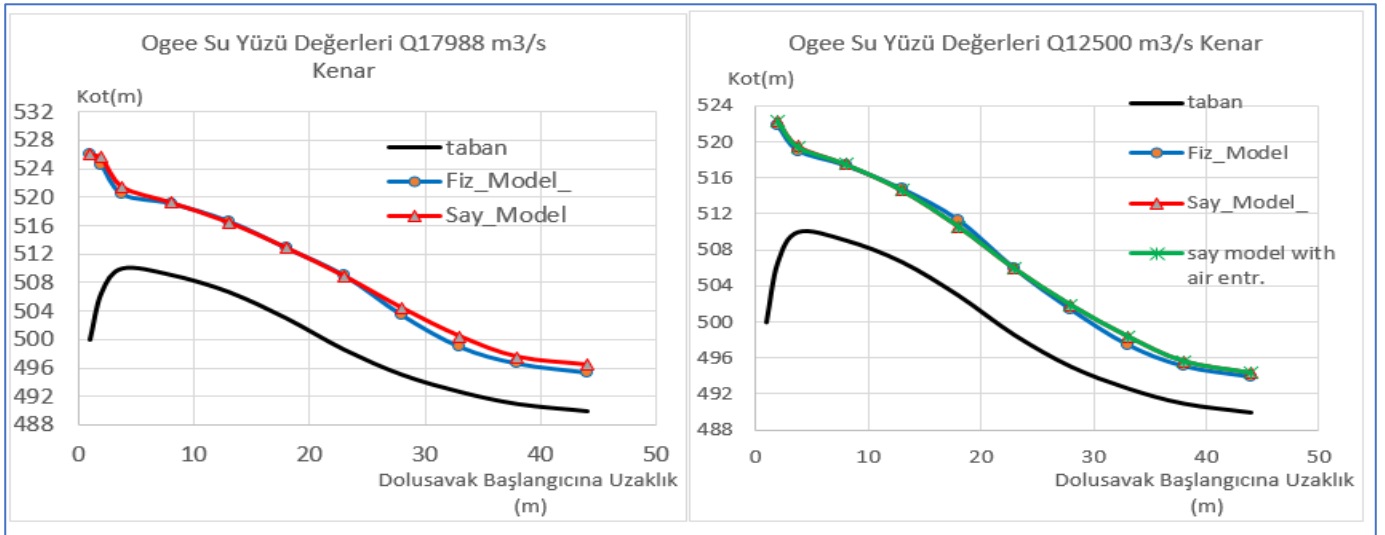
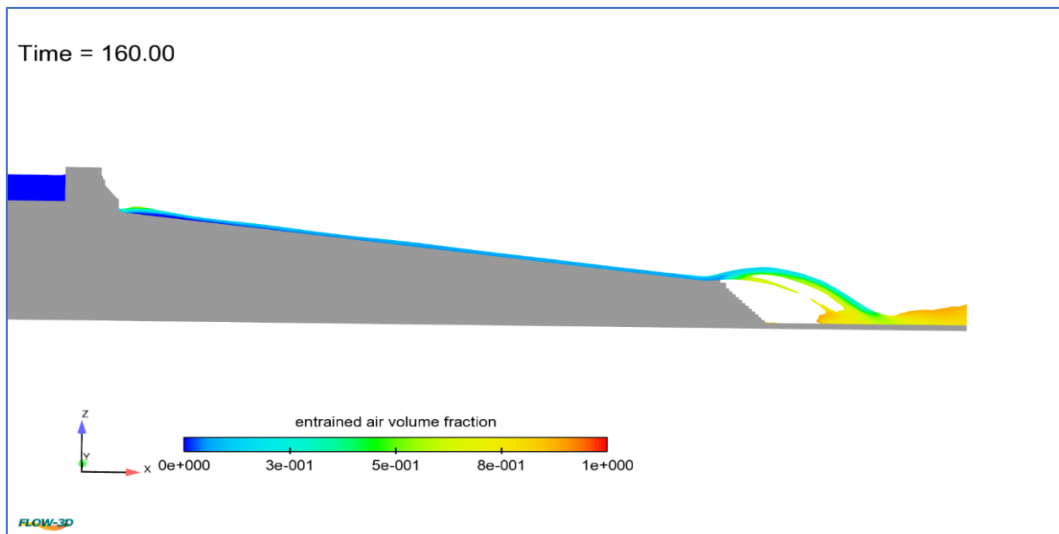
Şekil 10. Ogee Basınç Değerleri-Eksen

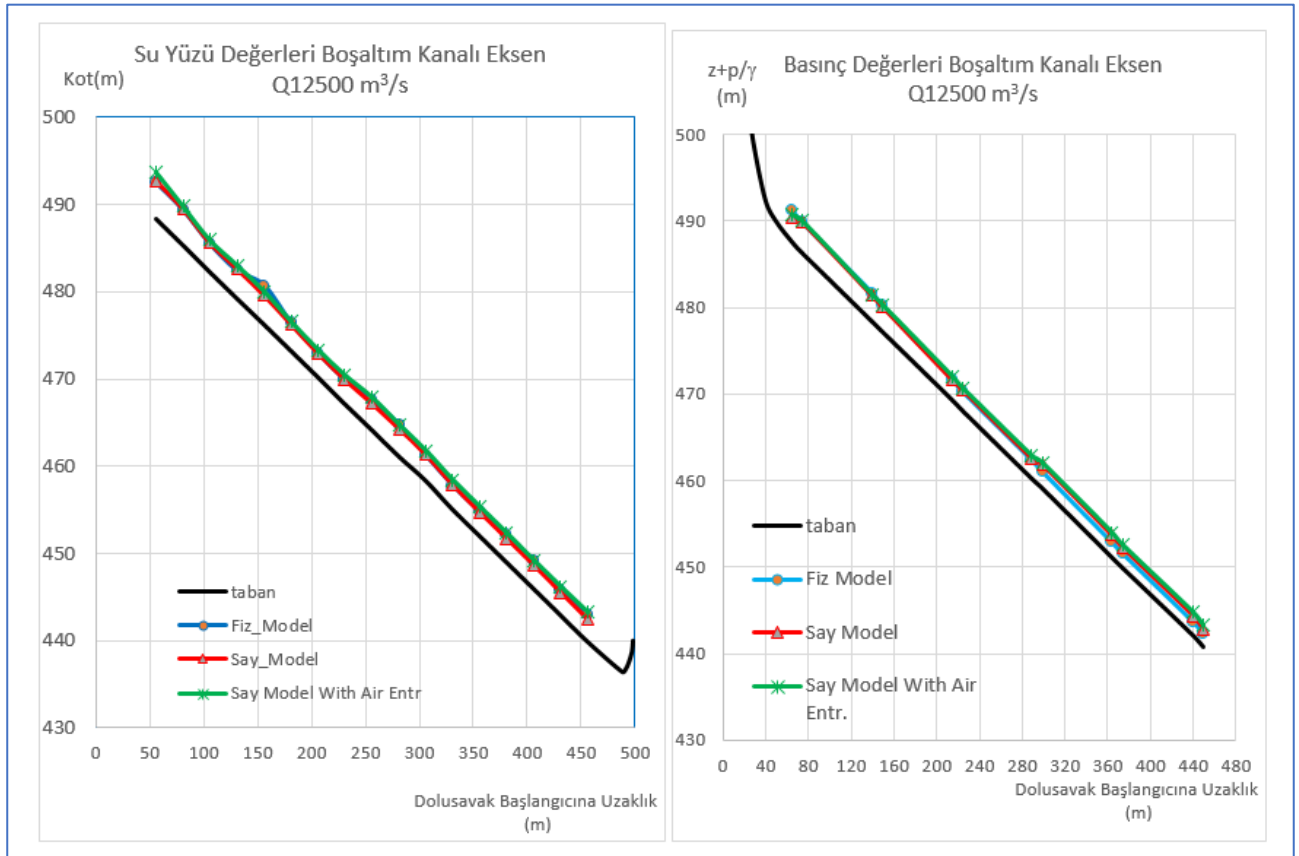


Şekil 11. Ogee Basınç Değerleri-Kenar



Şekil 12. Boşaltım Kanalı Basınç Değerleri-Eksen

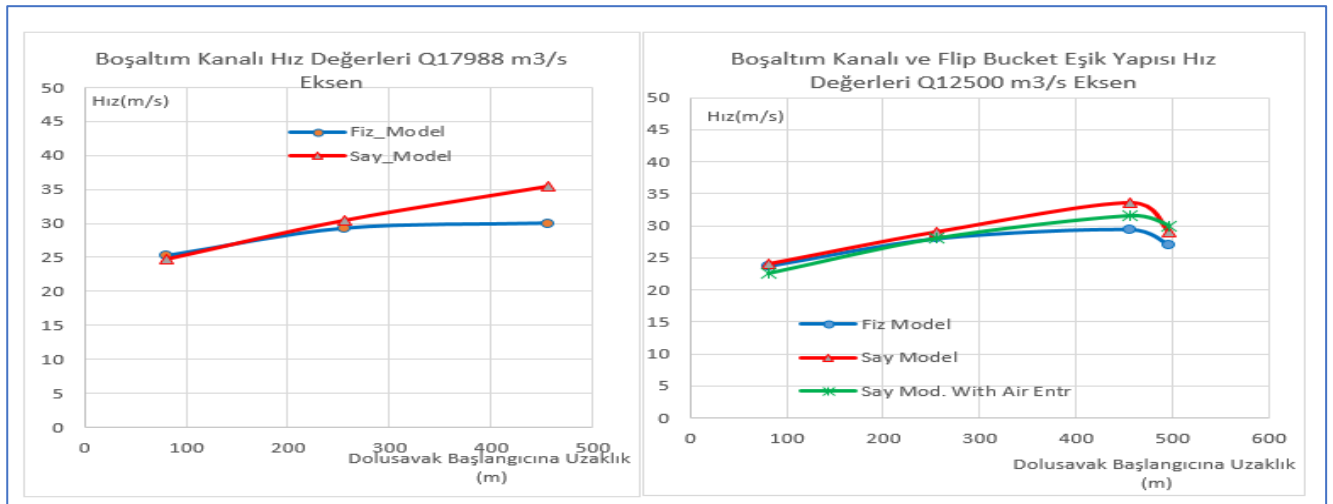
Şekil 13. a. Su Yüzü Değerleri Ogee Eksen (Q17988 m³/s) b. Su Yüzü Değerleri Ogee Kenar (Q12500 m³/s)Şekil 14. Dolusavak Akıma Giren Hava Değerlerine Göre Sınıflandırma ve 2D Eksen Kesiti (Q12500 m³/s)



Şekil 15. a. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri-Eksen b. Basınç Değerleri-Eksen (Q12500 m³/s)

Tablo 1. Boşaltım Kanalı Hız Değerleri Fiziksel Model & Sayısal Model Karşılaştırma (Q12500 m³/s)

Nokta Eksen	X(Eksen) Fiziksel Model (m)	Fiziksel Model Hız Değerleri (m/s)	Sayısal Model Hız Değerleri (m/s)
1	81	23,7	22,5
2	256	28	29,2
3	456	29,4	33,7
4(eşik sonu)	496	27	29
Varyant-I (dış üstü)	496	26,3	29
Varyant-I (dış arası)	496	27,3	32
Varyant-II(dış üstü)	496	26,9	30
Varyant-II (dış arası)	496	27	31,5



Şekil 16. a. Boşaltım Kanalı Hız Değerleri 17988 m³/s b. Boşaltım Kanalı ve Flip Bucket Hız Değerleri (Q12500m³/s)

3.2 Varyant I, Varyant II (Slotted Bucket) ve Çevirmeli(Flip Bucket) Sıçratma Eşiğinin İncelenmesi

3.2.1 Basınç ve Su Yüzü Değerleri

Bu bölümde sıçratma eşiğindeki varyantlarda elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Fiziksel modelde eşik içerisinde olmak üzere üç farklı noktada ölçümler yapılmıştır. Varyant-I tasarımının dış aralıkları Varyant-II'ye nazaran daha küçük, dış üst genişlikleri ise daha büyüktür. Dış aralığının büyümesiyle sıçrama sonrası sisteme sürüklenen hava girişinin artması amaçlanmıştır. Yapılan değişiklik sonrası fiziksel modellerde eşik içerisinde ikinci varyantın basınç miktarında artış gözlenirken su yüzü profillerinde dikkate değer değişiklik gözlenmemiştir. Basınç gibi su yüzü değerlerinde görülmeyen farkın nedeni fiziksel modelde kullanılan ölçek etkisi olabilir. Fiziksel modellerde eşik içerisinde artan basınçla birlikte sıçrama sonrasında sisteme daha fazla hava girişi gözlenmiş ve jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. İlgili durumların sayısal analizde de tespit edilmesi analizlerin kalitesini göstermesi açısından dikkat çekicidir. Air entrainment modeli kullanılmadan tanzim edilen sayısal analizlerde elde edilen sonuçlarda sıçratma eşiği yapısında su yüzü değerlerinin eşik içi çevrintide oluşan hava-su ilişkilerinden dolayı fiziksel model değerlerinden daha küçük, bu duruma paralel olarak sıçratma eşiğindeki basınç değerlerinde de tersi durumun olduğu tespit edilmiştir. Air entrainment modeli kullanıldığında su yüzü profillerinde fiziksel model değerlerinin üzerinde artış gerçekleşmiştir. Boşaltım kanalına kıyasla daha fazla artışın görülmesi de eşikteki çevrintiden kaynaklanmaktadır. Basınç değerleri ile ilgili olarak, Varyant-II tasarımında dış üstündeki değerlerinde bir miktar artış görülürken Varyant-I'de ise azalış kaydedilmiştir. Azalan ve artan değerlerin %5 seviyelerinde olması durumu da göz önüne alındığında yukarıda da değinildiği üzere air entrainment modelinin dolusavak boşaltım kanalı ve sıçratma eşiği dahil olmak üzere bu kısımlardaki hidrolik karakteristiklere etkisi nicel anlamda yoktur. Sıçratma eşiğindeki sayısal analizlerde eşiğin kavisli olduğu da göz önüne alındığında analizlerde kullanılan "blocked volume" ağ cinsinin elde edilen sonuçlara olumlu katkısı göz ardı edilemeyecektir (Şekil 17-21). Çevirmeli sıçratma eşiği (flipbucket) tasarımının fiziksel model sonuçları ile sayısal model sonuçları

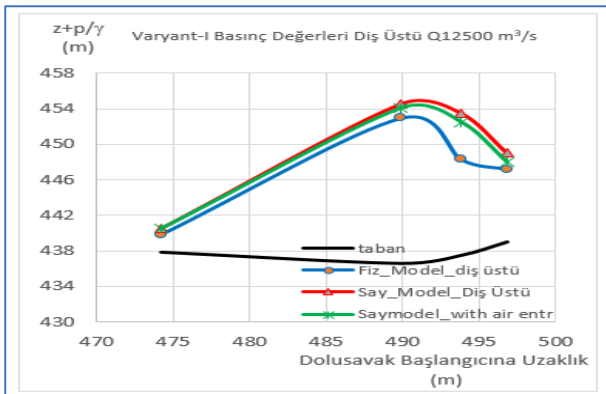
karşılaştırıldığında; fiziksel modelde elde edilen akış yüksekliğinin sayısal modele kıyasla akış hızı nedeniyle kurpta meydana gelen çevrinti etkisiyle oluşan hava sürüklemesinden dolayı fazla olması beklenmektedir. Ancak su seviyelerinde sayısal model verileri daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca jet uzaklığı mesafesi hususunda fiziksel model jet profili daha uzağa sıçramıştır. Sıçrama mesafesinin uzak ve su seviyesinin düşük olması fiziksel modelde ölçek etkisine işaret etmektedir. Air entrainment modelinin kullanılmadığı 1/1 ölçekli sayısal modellerde diğer varyantlarda olduğu gibi elde edilen jet mesafelerinin fiziksel modellerden daha fazla olması beklenmektedir. Nitekim diğer varyantlarda da böyle bir durum gerçekleşmiştir. Katı geometrinin değiştiği eşikte, sıçratma eşiğinin kavisli olmasından dolayı sayısal model analiz programı tarafından yeterince algılanamadığından böyle bir durumun olduğu ihtimali de göz önüne alınarak ilgili durumun çözümü için devamındaki analiz çalışmalarında ağ boyutları yarıya indirilmişse de istenen sonuçlar elde edilememiştir. İlgili durumun çözümü için alternatif olarak eğrilikteki ağ blok sayısının artırılmasıyla eşiğin net olarak algılanacağı düşünülmüşse de yine beklenen durum gerçekleşmemiştir. Bu nedenle çevirmeli sıçratma eşiğindeki farklılığın nedeninin ölçek kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Dişli tasarımlarda, dişlerin genişliği kanal genişliğinin yarısına sahip olduğundan çevirmeli sıçratma eşiğindeki ölçek etkisine rastlanmamıştır.

Fiziksel model çalışmalarında eşikte elde edilen su yüzü profilleriyle ilgili olarak, çevirmeli sıçratma eşiğinin su yüzü profillerinin varyantların su yüzü profilleriyle neredeyse aynı olması yine ölçek etkisine işaret ettiği, basınç değerlerinin farklı profile sahip olması da çalışma tarzı olarak çevirmeli sıçratma eşiğinin farklı olduğunu göstermektedir. Air entrainment modelinin çalıştırıldığı analiz sonuçlarına göre varyantlarda olduğu gibi su yüzü değerlerinde artış gözlenmiş, ancak basınç değerlerinde değişiklik neredeyse gözlenmemiştir (Şekil 22-23).

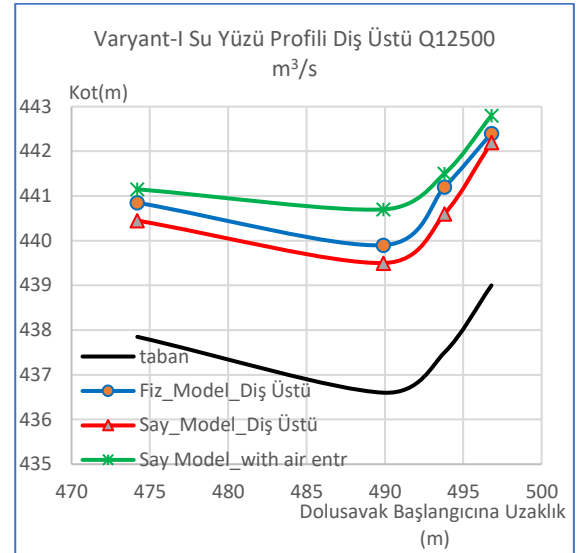
3.3 Jet Profillerinin İncelenmesi

Orijinal projedeki çevirmeli(flip bucket) sıçratma eşiği ile yapılan fiziksel model deneylerinde Q12500 m³/s'lik debide sıçrayan su jetinin üst nap profilleri ölçümlerle bulunmuş ve şekillerde de verilmiştir. Fiziksel model deney sonuçlarına göre orijinal proje durumunda Q12500 m³/s'lik debinin

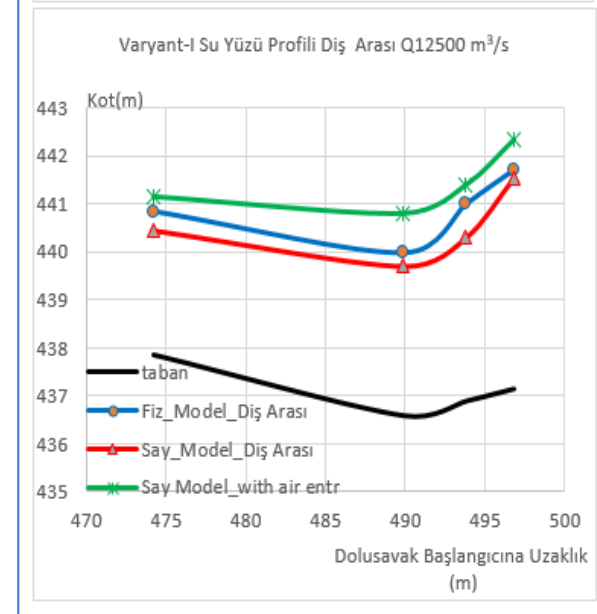
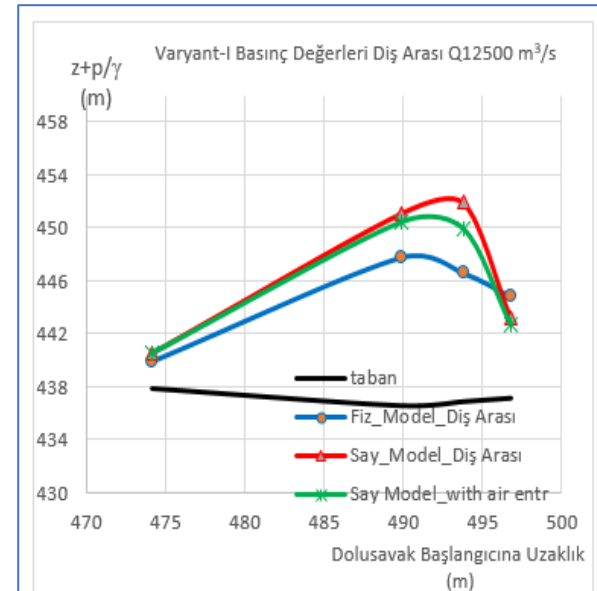
deşarjında sıçrayan su jeti sıçratma eşiğinden 151 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak ise 158 m, birinci dişli varyant durumunda Q12500 m³/s'lik debinindeşarjında sıçrayan su jeti sıçratma eşiğinden 148 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak ise 156 m, ikinci dişli varyantta ise aynı debide sıçrayan su jeti sıçratma eşiğinden 137 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak da 141 m mansaba düşmüştür. Su jeti profilleri açısından sıçratma eşiklerinin sayısal modelleri de gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar fiziksel model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre orijinal proje olan flip bucket eşiğinde su jeti sayısal model sonuçlarına göre 147 m mansaba düşerek fiziksel model değeri olan 151 m'ye kıyasla geride kalmıştır. Varyant-I tasarımında su jeti 154 m, Varyant-II tasarımında ise 145 m mansaba düşerek hava-su-ölçek etkisi ilişkilerinden dolayı fiziksel modele kıyasla beklendiği gibi daha uzak mesafeye mansaplanmıştır. Eşikten sonra basınç değerlerindeki sönümlenme en fazla Varyant-II de gözlemlenirken en az kırınım ise flip bucket' da gözlenmiştir. Bu sonuçlar fiziksel model çalışmalarının sonuçlarına da uygun olmakla birlikte fiziksel model çalışmalarında yer verilmeyen mansap kanalı tabanındaki basınç değerleri sayısal analiz yöntemi yardımıyla elde edilmiştir. Air entrainment modeli kullanıldığında ise jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. İlgili model varyantların sıçrama mesafesine %12 seviyelerinde etki ederken çevirmeli sıçratma eşiğine %5 seviyelerinde etki etmiştir. Dolayısıyla dişler sayesinde oluşan jet ayrılımlarına etkileyen hava sürüklenmesi miktarı çevirmeli yapıya göre iki kat daha fazla olmuştur (Şekil 24-25). Sisteme sürüklenen hava neticesinde kuyruk suyu tabanındaki basınç değerlerinde de önemli azalmalar görülmüştür Şekil(26-28).



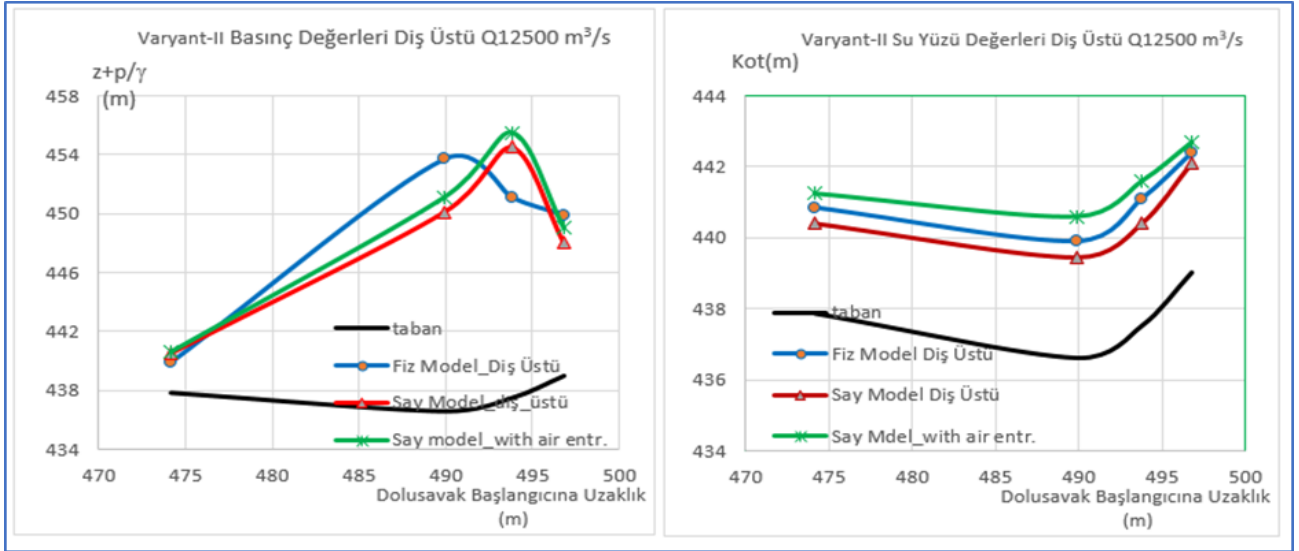
Şekil 17. Varyant-I Diş Üstü Basınç Değerleri



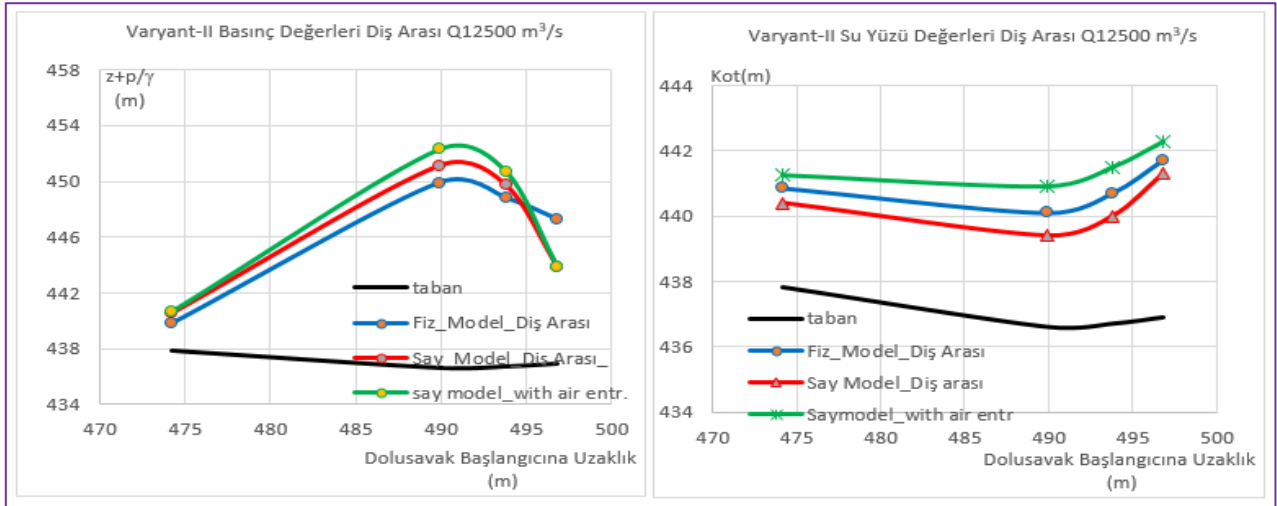
Şekil 18. Varyant-I Diş Üstü Su yüzü Değerleri



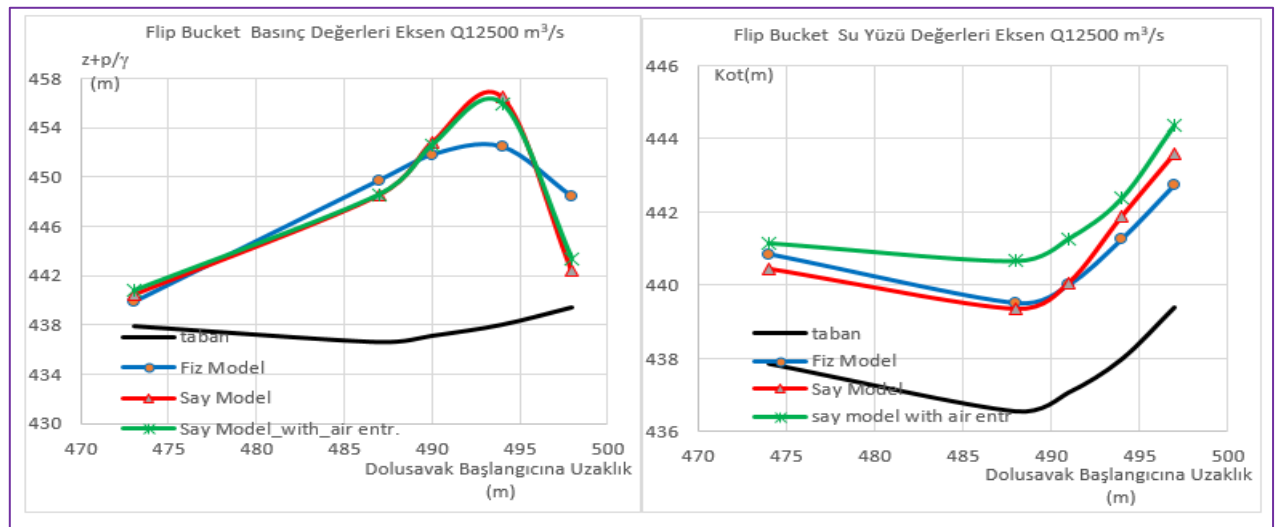
Şekil 19. Varyant-I Diş Arası Basınç ve Su Yüzü Değerleri



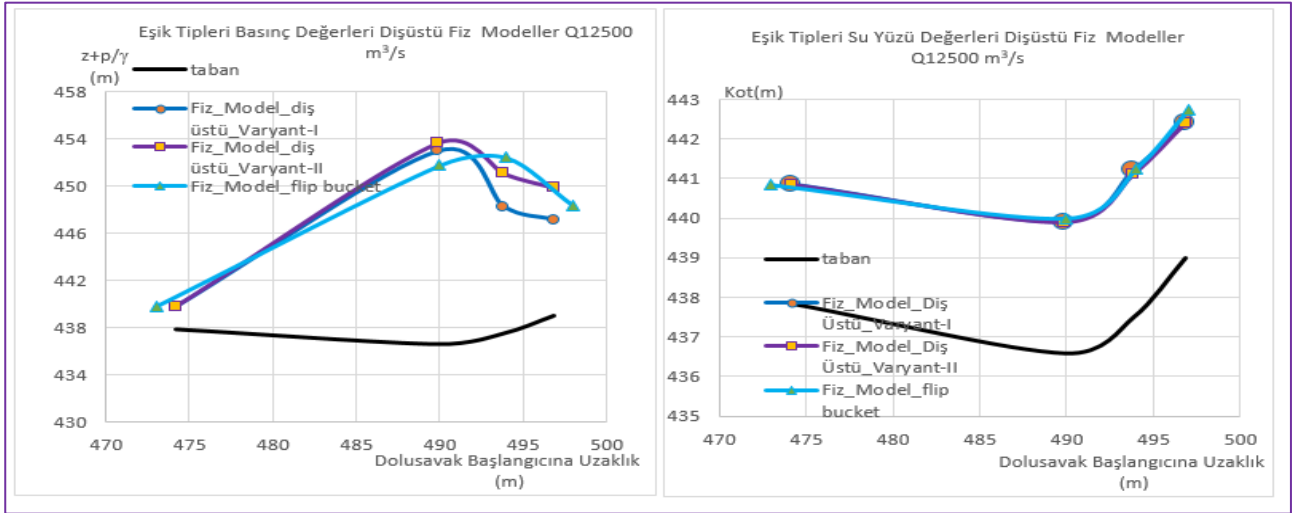
Şekil 20. Varyant-II Diş Üstü Basınç ve Su Yüzü Değerleri



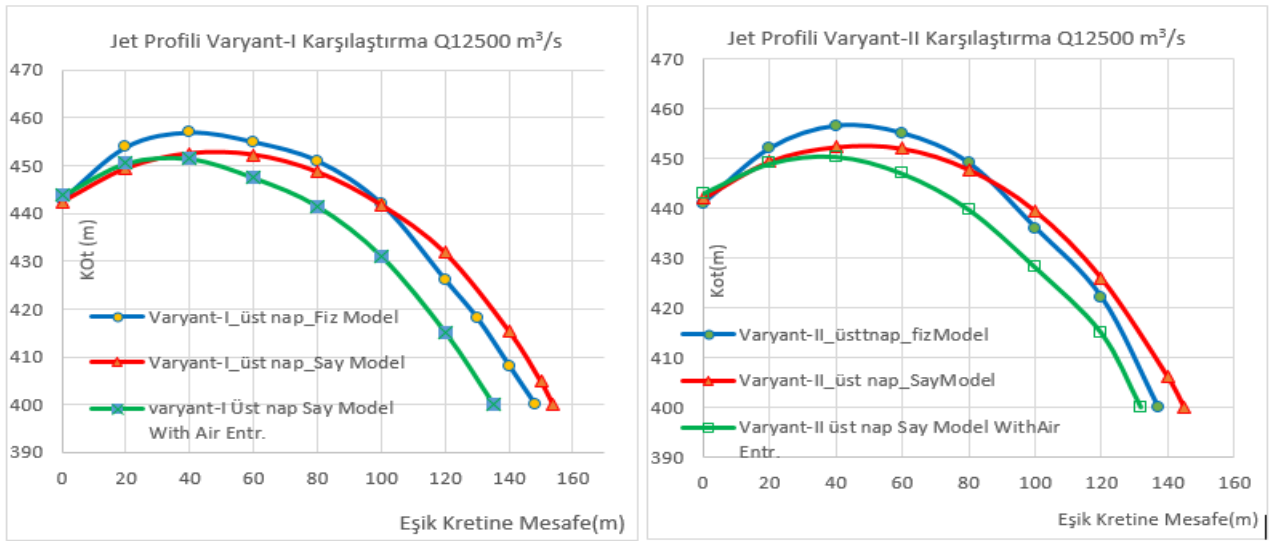
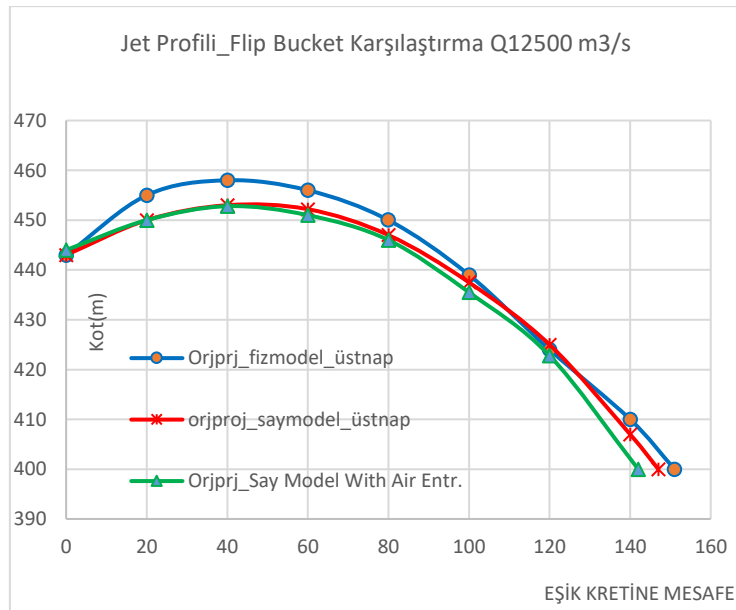
Şekil 21. Varyant-II Diş Arası Basınç ve Su Yüzü Değerleri

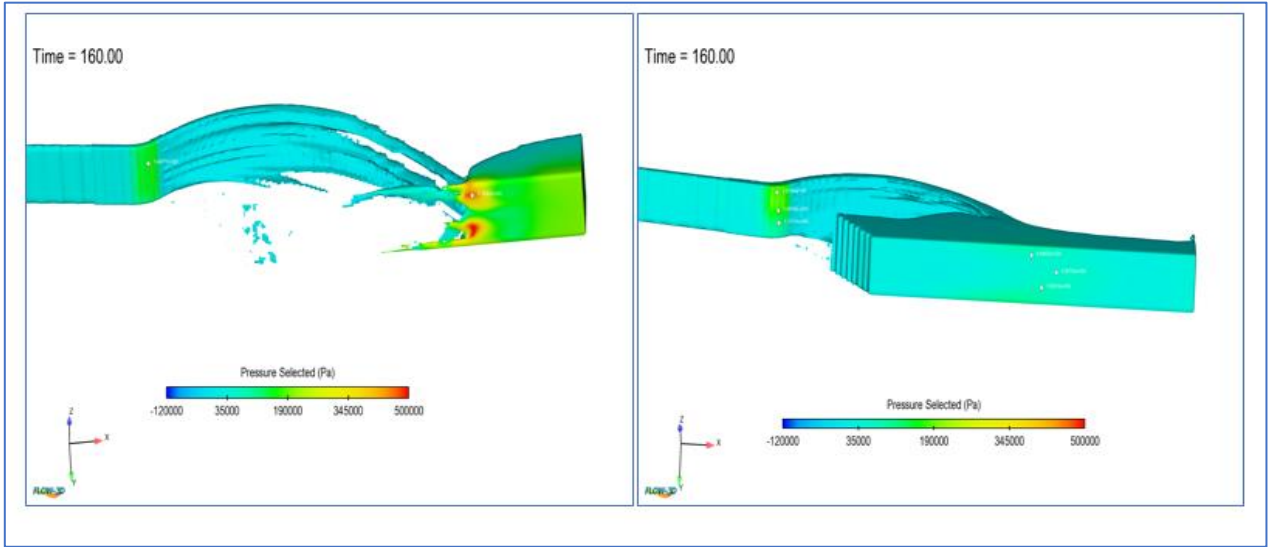


Şekil 22. Flip Bucket Eksen Basınç ve Su Yüzü Değerleri

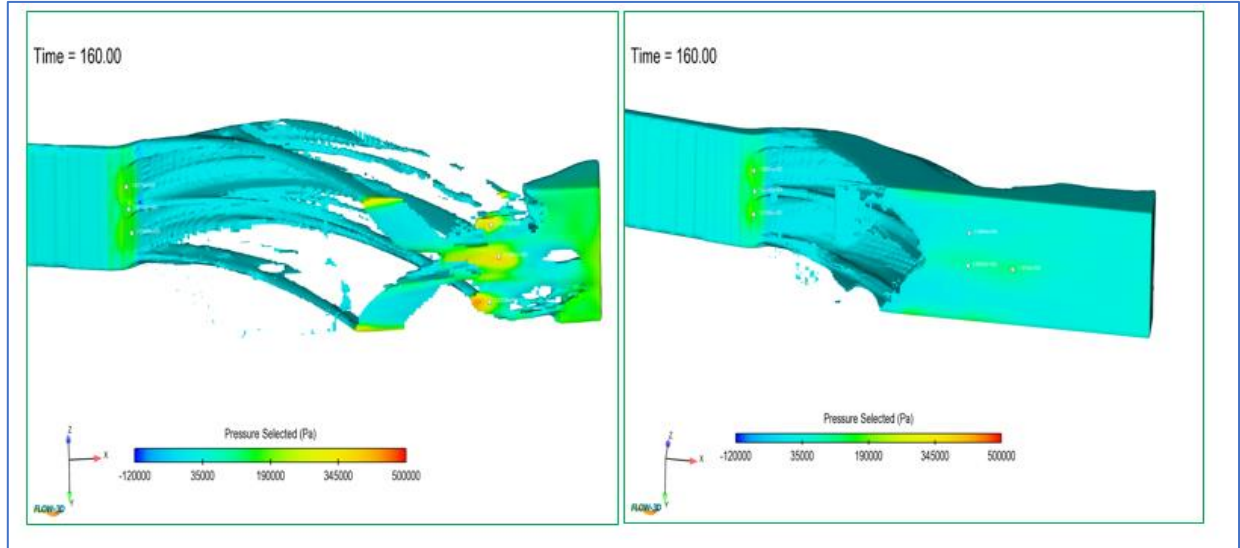


Şekil 23. Sıçratma Eşik Tipleri Basınç ve Su Yüzü Değerleri Fiziksel Modeller

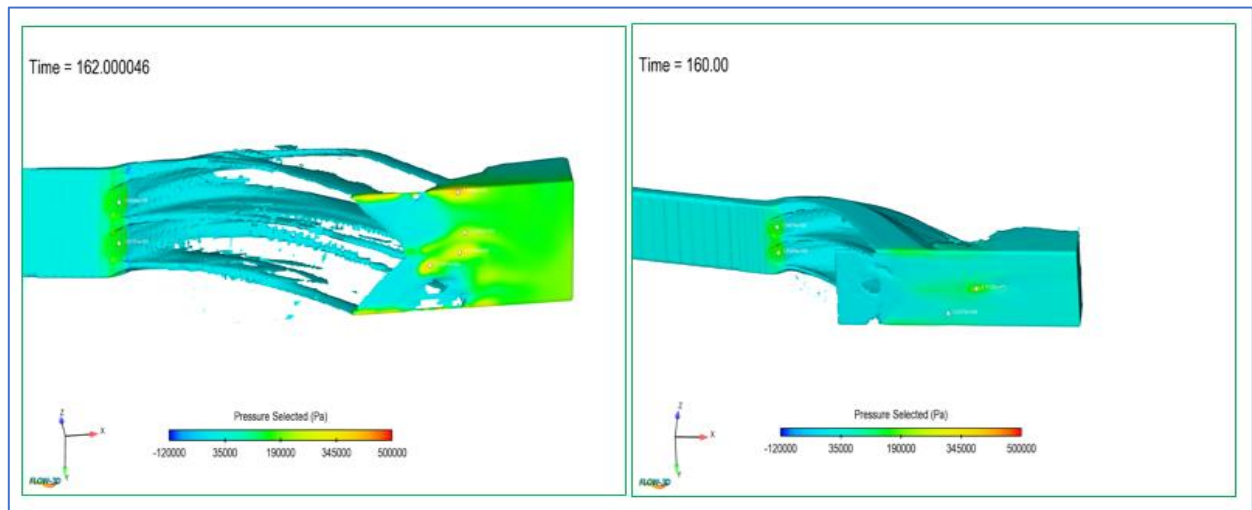
Şekil 24. Varyant-I ve Varyant-II Jet profilleri (Q12500 m³/s)Şekil 25. Flip Bucket Jet profilleri (Q12500 m³/s)



Şekil 26. Hava Sürüklenme Modeli Öncesi ve Sonrası Mansap Kanalı Tabanındaki Basınç Sınıflandırması ($Q12500\text{m}^3/\text{s}$ Flip Bucket)



Şekil 27. Hava Sürüklenme Modeli Öncesi ve Sonrası Mansap Kanalı Tabanındaki Basınç Sınıflandırması ($Q12500\text{m}^3/\text{s}$ Varyant-I)



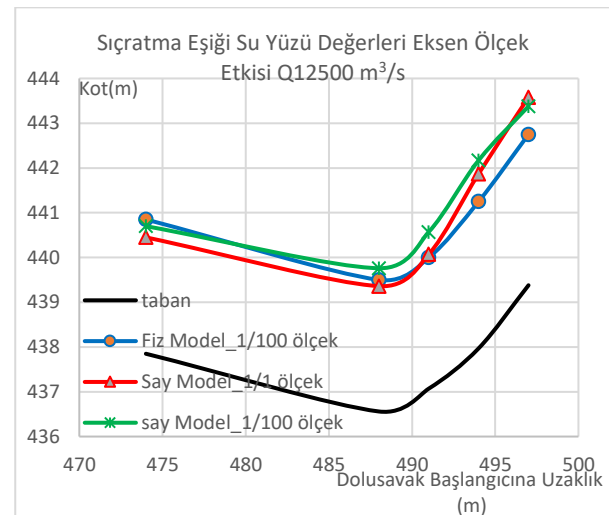
Şekil 28. Hava Sürüklenme Modeli Öncesi ve Sonrası Mansap Kanalı Tabanındaki Basınç Sınıflandırması ($Q12500\text{m}^3/\text{s}$ Varyant-II)

3.4 Sayısal ve Fiziksel Modellerde Ölçek Hususu

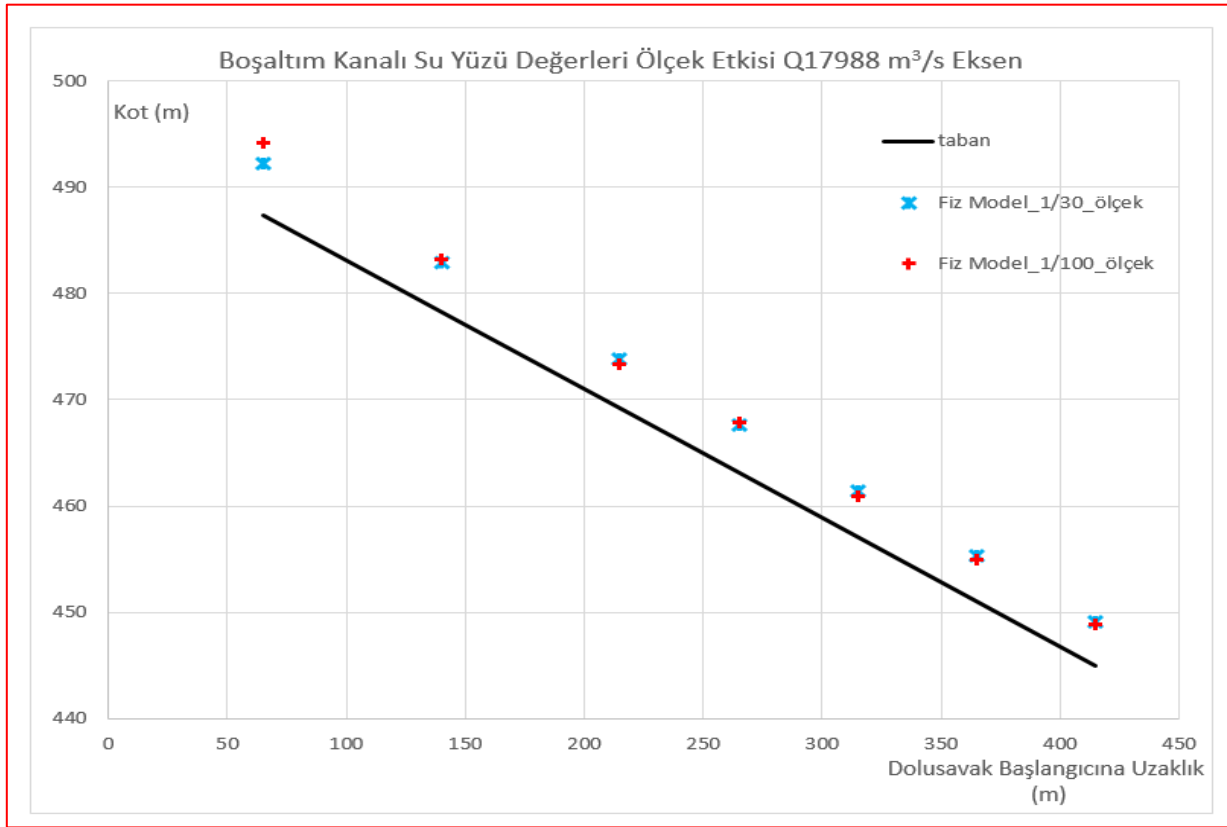
Çalışmamızın buraya kadarki kısmında sayısal analizlerimiz 1/1 (prototip) ölçek ile gerçekleştirilmiştir. Çünkü fiziksel model çalışmalarındaki Varyant-I ve Varyant-II dişli sıçratma eşiklerinin sayısal analizleri ile ilgili olarak; tanzim edilen 1/100 ölçekli varyant modellerinin Flow3D ile yapılan sayısal analizi için ihtiyaç olunan çözüm süresinin yaklaşık 55 gün olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma neden olarak, hem modelin 1/100 gibi oldukça küçük ölçeğe sahip olması hem de boşaltım kanalı sonundaki dişli yapı ve bu yapıda kullanılan “blocked to volume” ağ türü olmak üzere ilgili durumlar sayısal analiz süresini zaman/kaynak açısından oldukça olumsuz etkilemiştir. Daha önceki çalışmalarda araştırmacılarca da tespit olunan basınç ve su yüzü gibi hidrolik karakteristiklere ölçek etkisinin (özellikle 200’den küçük ölçek) neredeyse olmadığı hususu bilinmektedir (Kim, 2005; Usta, 2017). İlgili hususun tarafımızca da tespit edilmesi için 1982 yılında gerçekleştirilen 1/100 ve 1/30 ölçekli fiziksel model sonuçları göz önünde bulundurularak 1/30, 1/100 ve prototip ölçek(1/1 ölçek) modellerinin sayısal analizleri gerçekleştirilip gerek fiziksel ve sayısal model arasında gerekse de 30 ve 100 ölçekli fiziksel model arasındaki ölçek farkının etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre; 1/30 ölçekli fiziksel model sadece boşaltım kanalı için gerçekleştirilmiştir. Boşaltım kanalında 1/30 ölçekli fiziksel modellerde oluşan su yüzü değerleri ile 1/100 ölçekli model değerlerinin birbirleriyle uyumlu olmakla birlikte 30 ölçekli fiziksel modelin su seviyesi daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu fark %10-15 seviyelerindedir. Söz konusu her iki ölçekli modeller sayısal olarak da çözümlenmiş ve ilgili sonuçlar arasında fark gözlenmemiştir. Yine tanzim edilen sayısal modellerde ölçek küçüldükçe boşaltım kanalı ve sıçratma eşğinde su yüzü değerlerinde artış gözlenirken, eşik sonrasında jet profil mesafesi kısalmıştır. Dolayısıyla kritik kısımlarda yani sıçratma eşiği ve sonrasında ölçek etkisinin ciddi boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Ölçek küçüldükçe yani 1/100 ölçekli sayısal model sonuçları aynı ölçekteki fiziksel model sonuçlarıyla boşaltım kanalı sonunda dahi neredeyse aynı olması hava-su ilişkileri de göz önüne alındığında olması gereken vaziyete aykırıdır. Çünkü küçülen geometri ile birlikte

sıçratma eşiği gibi kritik noktalarda akış daha az çevrintiye maruz kalıp daha uzağa fırlayacaktır. Ancak sıçratma eşğinde su seviyesi artmış ve sonrasında oluşan jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. Gelineen noktada sayısal modelde ölçek büyüdükçe sonuçların daha gerçekçi ve anlaşılabilir olduğundan su yüzü profilleri için sayısal modelde prototip ölçekte çözümlemenin daha doğru olacağı değerlendirilmektedir (Şekil29-33a).

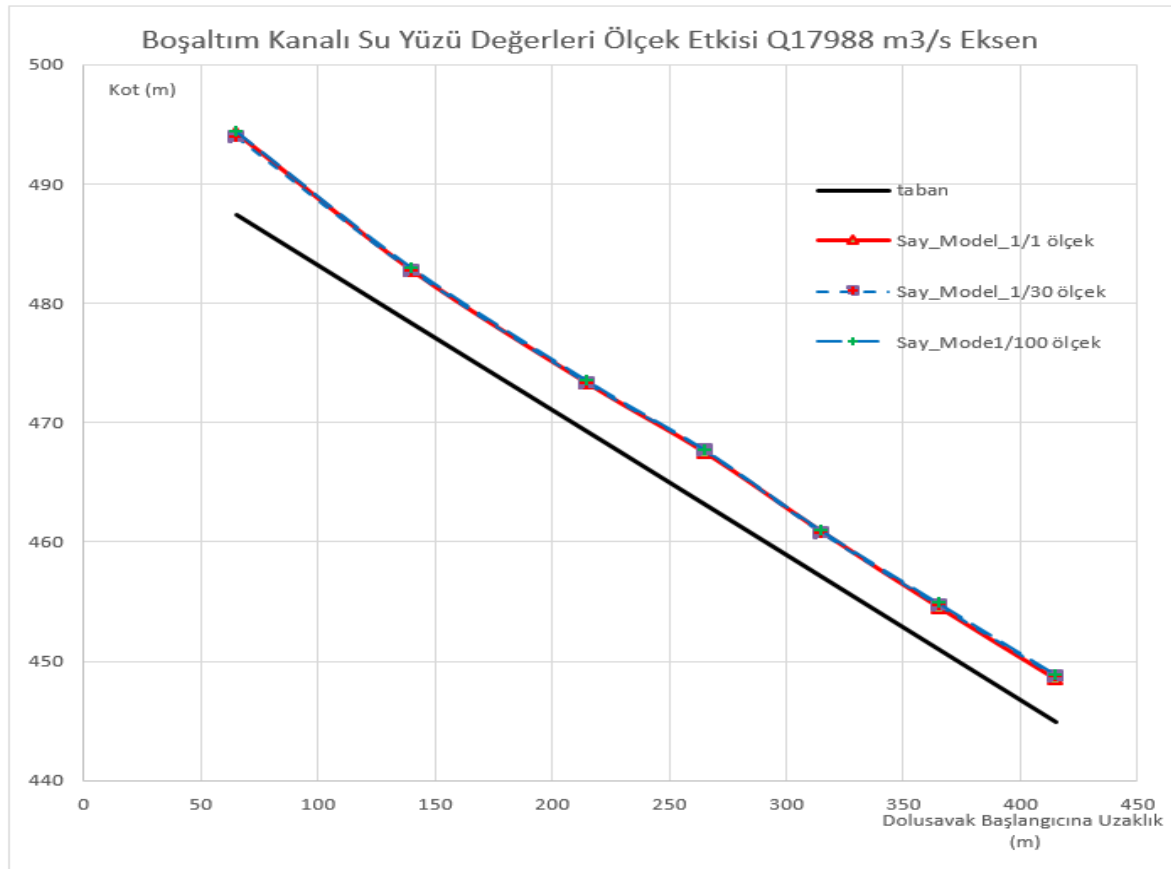
Basınç değerleri için ise yapılan analiz sonuçlarına göre ölçek etkisi ihmal edilecek düzeydedir. 30 ve 100 ölçekli fiziksel model sonuçları boşaltım kanalının ilk iki noktasında farklı olsa da kalan kısımlarda aynı değerler elde edilmiştir. 1/1, 1/30 ve 1/100 ölçekli sayısal modellerde elde edilen basınç değerleri birbirine yakın olup bu durum boşaltım kanalının hemen her noktası için geçerlidir. Aynı durum sıçratma eşiği için de geçerli olmuştur. Dolayısıyla fiziksel ve sayısal ölçekli modellerdeki ölçek etkisi yapılan incelemelerde basınç üzerinde olmadığı tespit edilmiştir. Ölçek etkisinin akış hızı üzerindeki durumu ile ilgili olarak; 1/30 ve 1/100 ölçekli fiziksel modellerde ölçek büyüdükçe boşaltım kanalında hız değerlerinde artışlar gerçekleşmiştir. Bu durumun nedeni geometrinin büyümesiyle akış-taban arasında sürüklenen havadan kaynaklı sürtünme gerilmelerinin azalmasıdır. Ancak bu fark ihmal edilecek düzeydedir. Yanı sıra sayısal modellerdeki hızların durumu ise ölçek büyüdükçe yani 1/100'den 1/1'e gelindikçe az önce değinilen sebepten kaynaklı hızlarda artışın olduğu görülmüş, özellikle prototip ölçekteki hızlar net bir şekilde 1/30 ve 1/100'den sıyrılmıştır (Şekil 33b-35).



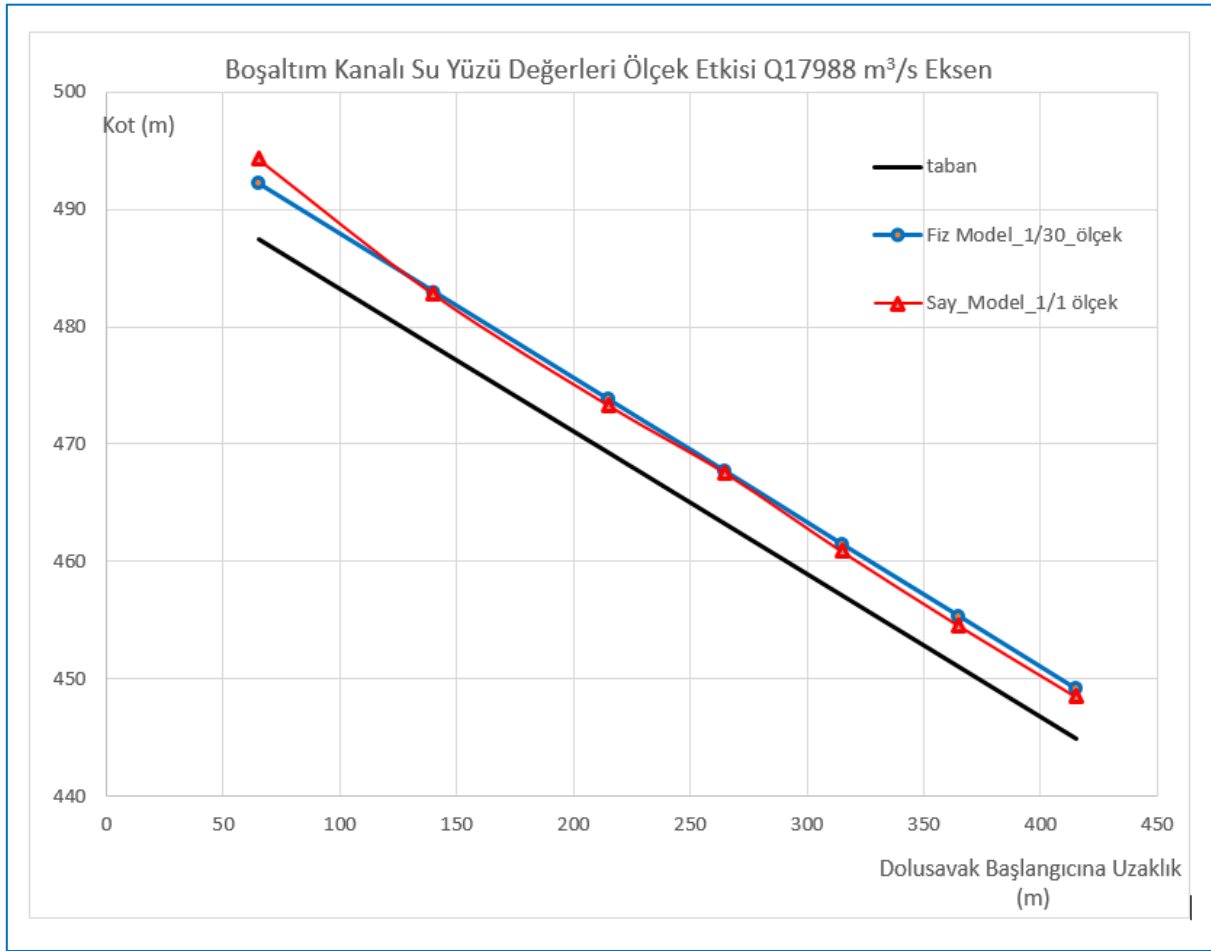
Şekil29. Sıçratma Eşiği(flip bucket) Su Yüzü Değerleri



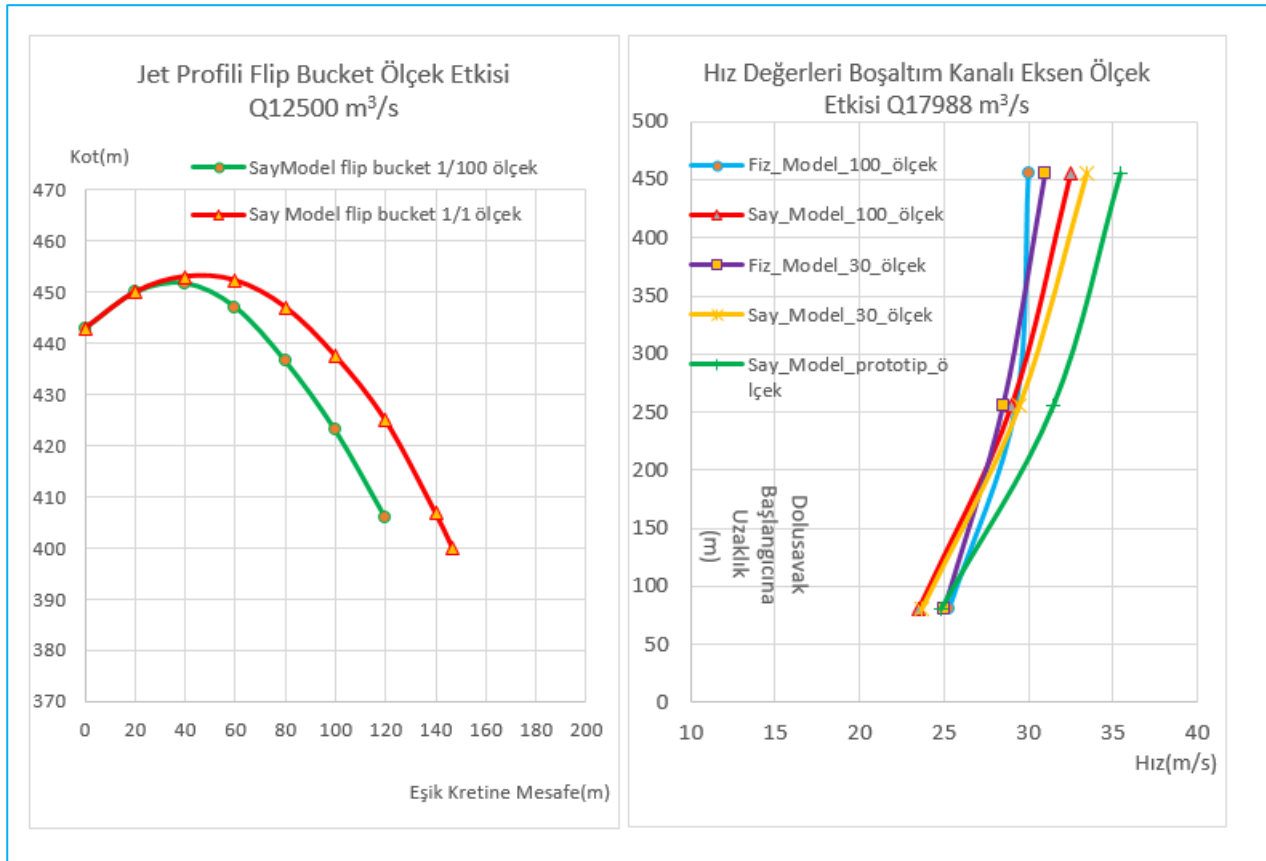
Şekil 30. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri Fiziksel Modeller Ölçek Etkisi Eksen



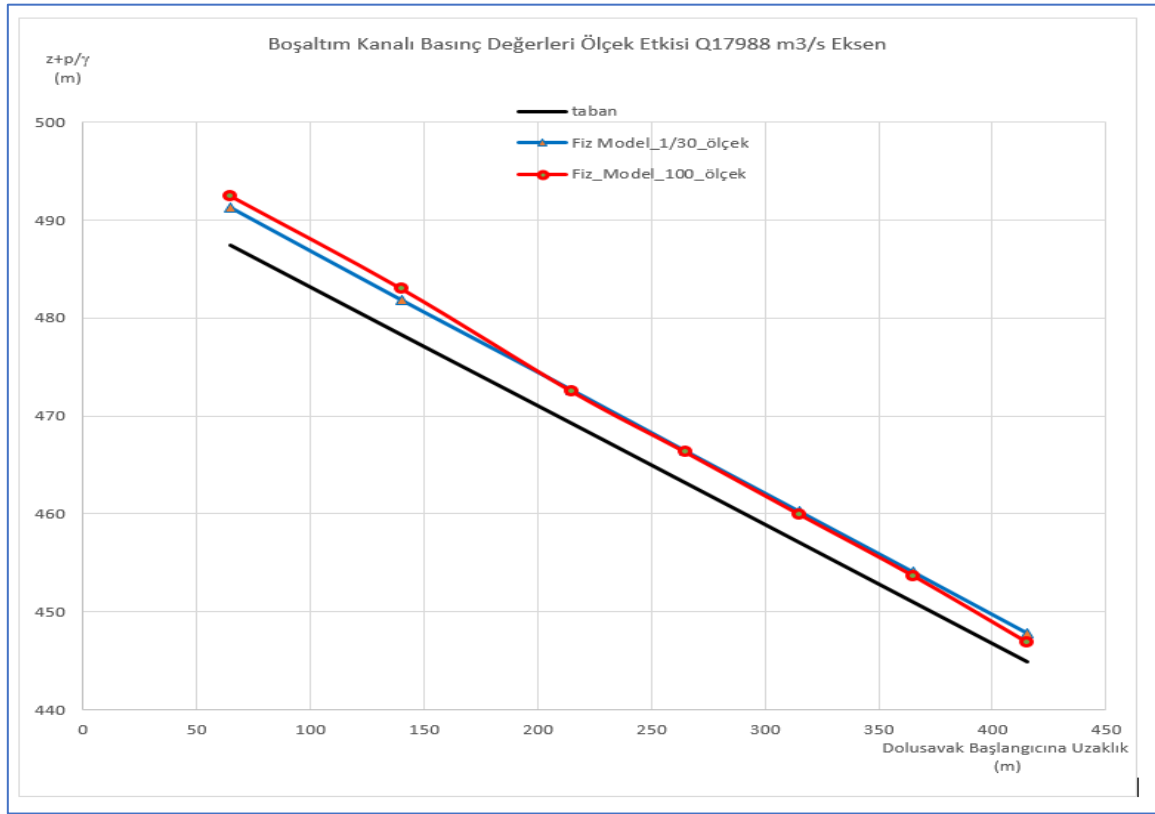
Şekil 31. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri Sayısal Modeller Ölçek Etkisi Eksen



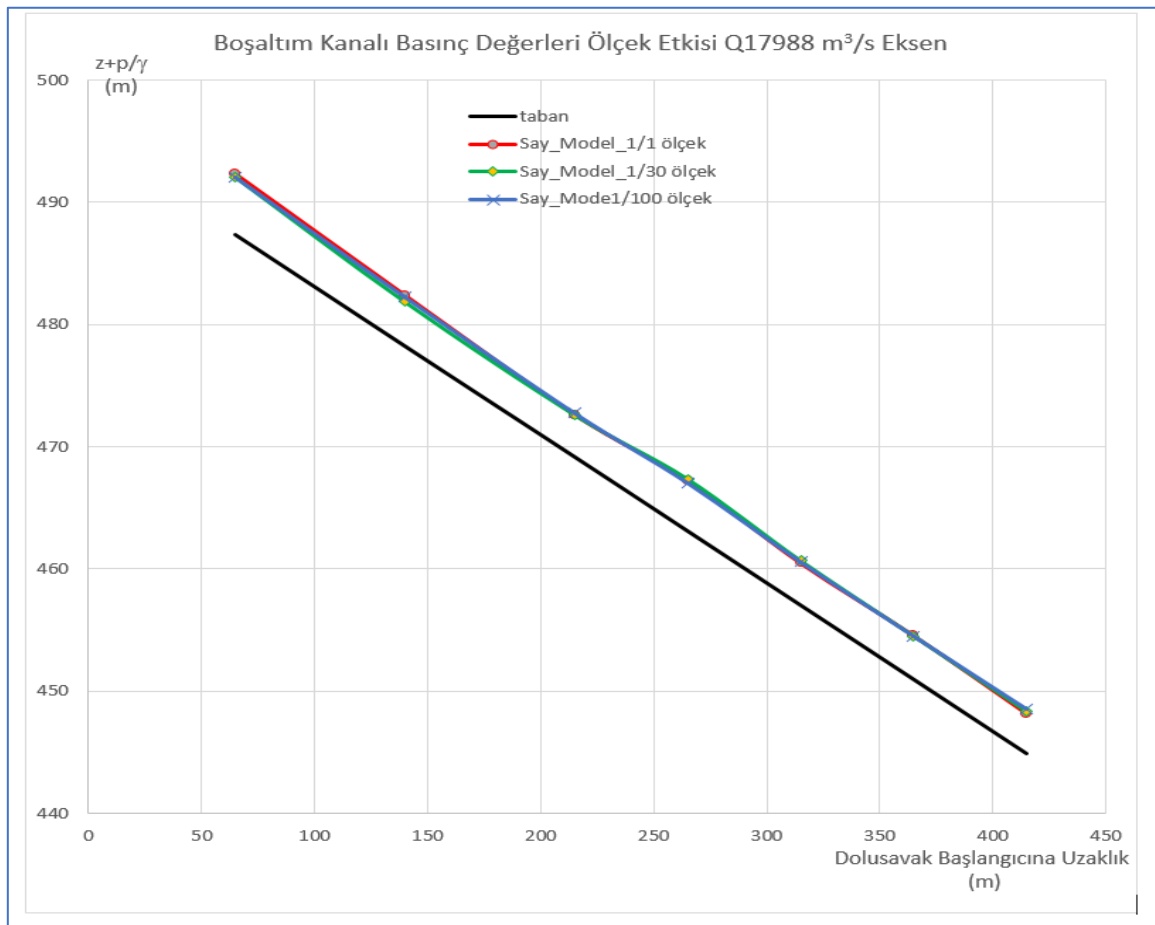
Şekil 32. Boşaltım Kanalı Su Yüzü Değerleri Sayısal ve Fiziksel Modeller Ölçek Etkisi Eksen



Şekil 33. a. Boşaltım Kanalı Hız Değerleri b. Flip Bucket Jet profilleri Ölçek Etkisi



Şekil 34. Boşaltım Kanalı Basınç Değerleri Fiziksel Modeller Ölçek Etkisi Eksen



Şekil 35. Boşaltım Kanalı Basınç Değerleri Sayısal Modeller Ölçek Etkisi Eksen

4. Sonuçlar

Bu çalışmada baraj yapılarının taşkın sırasındaki güvenliğini sağlayan dolusavakların hidrolik karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda sayısal çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar, DSİ 1982 yılı Ilısu Barajı Dolusavak fiziksel model raporlarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Flow3D'nin kullanıldığı çalışmamızda ağ boyutlarının sonuçlara olan etkisi de göz önüne alınarak detaylı çalışma yapılmıştır. Analiz sonuçları dikkate alındığında fiziksel ve sayısal analizler arasındaki karşılaştırmada hidrolik karakteristiklere etki eden en güçlü hususun hava-su ilişkisi olduğu görülmüştür. Sayısal analizde kullanılan air entrainment modelinin dolusavak akışı üzerindeki hidrolik karakteristiklere etkimesi için enerji dengesinde güçlü değişimlere ihtiyaç duyması sayısal analiz yönteminin zayıf tarafını ortaya çıkarmıştır. Yine söz konusu her iki analiz yönteminde hidrolik karakteristiklere etkileyen diğer husus da ölçek konusudur. Açıklanan iki husus doğrultusunda sonuçlar aşağıya kısaca çıkarılmıştır. Buna göre;

Sayısal analizde debi miktarı fiziksel model verilerinden %3.2 daha fazla tahmin edilmiş, bu tahminin de literatür taramalarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Debiye kıyasla yüksek ağ çözünürlüğüne ihtiyaç duyan basınç değerleri konusunda, sayısal analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının kritik noktalarda dahi birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Dolusavak boşaltım kanalında fiziksel modelde ölçeğin büyümesinin basınç değerleri üzerinde etkisinin olmadığı, aynı durumun sayısal analiz modellerinin farklı ölçekleri için de geçerli olduğu, air entrainment modelinin sayısal analizde çalıştırılmasıyla dolusavak ogee eşiği, boşaltım kanalı ve sıçratma eşiğindeki basınç değerleri üzerinde pek bir etkisinin gerçekleşmediği, ancak sıçratma eşiği sonrasında kuyruk suyu kanalı tabanında %60'a varan oranda basınçlarda düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Sıçratma eşiğinde denenilen tasarımlarda kuyruk suyu kanalındaki taban basıncının en fazla olduğu tasarımın çevirmeli sıçratma eşiği, en az ise ikinci varyant olması hususlarının fiziksel model sonuçlarıncı da tasdik edilmesi ilgili sayısal analiz yönteminin güçlü yanını ortaya çıkarmıştır.

Su yüzü profilleri ile ilgili olarak, akış üzerindeki hava-su ilişkisi de göz önüne alındığında fiziksel ve sayısal analiz sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu, fiziksel modelde ölçeğin büyümesiyle boşaltım kanalı üzerindeki su seviyelerinde ortalama %12 oranında artışların gözlemlendiği, sayısal analizlerde ölçeğin küçülmesiyle boşaltım kanalı ve eşik yapısında su seviyesinde beklenenin aksine artış, sıçratma eşiği sonrasında yine beklenenin aksine jet profil mesafelerinde düşüş gözlemlendiğinden su yüzü profilleri için sayısal analizlerde prototip ölçekte (1/1 ölçek) analiz yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Yine sayısal analizdeki 1/1 prototip ölçek sonuçlarına göre çevirmeli sıçratma eşiğinde elde edilen su seviyesinin fiziksel model 1/100 ölçek seviyesinden daha fazla çıkması ve jet profilinin de daha kısa mesafeye ulaşması, ölçek konusunun geometrinin eğri-kavisli kısımlardaki etkisini ön plana çıkarmıştır. Dolayısıyla fiziksel model çalışmalarında kavisli kısımlardaki hidrolik karakteristiklerin daha sağlıklı elde edilebilmesi için model ölçek verisinin büyük tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Air entrainment modelinin kullanılmasıyla varyantlarda %10 oranında, çevirmeli eşikte ise %5 oranında sıçrama mesafesinin kısalmasına neden olduğu dikkate alındığında sisteme sürüklenen havanın artması için jet profillerinin parçalanması gerektiği görülmektedir. Enerji kırınımindaki etkili parametre olan jet profillerine etki eden hava sürüklenmesinin yanı sıra varyantlara kıyasla çevirmeli sıçratma eşiğine etki eden ölçek etkisi de dikkate alındığında Ilısu Barajı Dolusavak yapısında enerji kırıcı olarak tercih edilen dişli sıçratma eşiği tasarımının oldukça yerinde bir karar olduğu görülmüştür.

Hız karakteristikleri konusunda fiziksel modellerde ölçeğin büyümesiyle hız artmışsa da bu artış oldukça sınırlı olmuştur. Sayısal analizlerde ölçeğin büyümesiyle hızlardaki artış fiziksel modele kıyasla daha fazla olmuştur. Sayısal ve fiziksel modellerde kanal sonu ve sonrası gibi kritik kısımlarda dahi aradaki farkın %10 seviyesinde olması sayısal analizin hız karakteristiklerinin tespiti konusunda başarılı olduğunu göstermektedir. 1/30 ve 1/100 fiziksel modellerde hızlar arasında dikkate değer farkın olmaması su ve taban arasında oluşan gerilmelerin dolusavak gibi yapılarda ihmal edilebileceğinin

önceki çalışmalarca ifade edilmesi sayısal analiz sonuçları ile desteklenmiştir. Ayrıca sayısal modellerde beklendiği gibi air entrainment modelinin hızları azaltıcı yönündeki etkisi oldukça sınırlı olmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma DÜBAP tarafından desteklenmiştir (DÜBAP, Proje No: MÜHENDİSLİK.20.007).

5.Kaynaklar

- [1] Z. Şen, Kur'an-ı Kerim ve Su Bilimi. İstanbul; Su Vakfı Yayınları, sayfa:264, 2006.
- [2] N. Ağralıoğlu, Baraj Planlama ve Tasarımı Cilt 1. İstanbul; Su Vakfı Yayınları, sayfa: 262, 2007.
- [3] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design of Small Dams. Third Edition, pp: 339, 1987.
- [4] R. M. Khatsuria, Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators. New York; CRC Press, 2005.
- [5] J. Gao, Z. P. Liu, ve J. Guo, "Energy Dissipation and High Velocity Flow Dam Construction in China - A Sixty-Year Review", China Water Power Press, 2014.
- [6] P. J. Mason, The choice of hydraulic energy dissipator for dam outlet works based on a survey of prototype usage. Proc. Instn. Civil Engineers, Part I. Vol 72, May 1982.
- [7] B. H. Rajan, K. N. Rao, "Design of trajectory buckets", Water and Energy International, Vol 37, pp 63-76, 1980.
- [8] R. Steiner, V. Heller, W.H. Hager, ve H-E. Minor, "Deflector ski jump hydraulics", J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 134, No. 5, pp. 562-571, 2008.
- [9] D. L. Vischer ve W. H. Hager, Dam Hydraulics. Wiley, Chichester, England and New York, 1998.
- [10] P. G. Chanele ve J. C. Doering, "An evaluation of computational fluid dynamics for spillway modelling", Proc. 16th AMFC, 1201-1206, 2007.
- [11] D. Ho, B. Cooper, K. Riddette ve S. Donohoo, "Application of Numerical Modelling to Spillways in Australia, in Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century", Berga et al (eds). Taylor and Francis Group, London, 951-959, 2006.
- [12] D. Gessler, "CFD Modeling of Spillway Performance", ASCE World Water and Environmental Resources Congress, 2005.
- [13] B. M. Savage & M. C. Johnson, "Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study", Journal of Hydraulic Engineering, 127, No. 8, pp: 640-649, 2001.
- [14] Ö. F. Dursun, M. Öztürk, "Basamaklı Dolusavakların Akımın Enerjisini Sönümleme Özelliğinin Sayısal Analizi", Engineering Sciences, 4(2):165- 174, 2009.
- [15] H. Babaali, A. Shamsai & H. Vosoughifar, "Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes", Arab J Sci Eng 40, 381-395, 2015.
- [16] D. Valero, G. B. Rafael, "Calibration of an Air Entrainment Model for CFD Spillway Applications", Adv. Hydroinform, 38, 571-582, 2016.
- [17] E. Usta, "Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study", PhD thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.
- [18] R. Daneshfaraz, A. Ghaderi, A. Akhtari and S. D. Francesco, "On the Effect of Block Roughness in Ogee Spillways with Flip Buckets", Fluids, 5(4):182, 2020.
- [19] M. Zhenwei, Z. Zhiyan and Z. Tao, "Numerical Simulation Of 3-D Flow Field Of Spillway Based On VOF Method", 2012 International Conference On Modern Hydraulic Engineering, SciVerse ScienceDirect, Procedia Engineering, 28 808-812, 2012.
- [20] S. Khani, M. A. Moghadam, and M. Nikookar, "Pressure Fluctuations Investigation on the Curve of Flip Buckets Using Analytical and Numerical Methods", Computational Research Progress in Applied Science & Engineering: An international Journal (CRPASE) - ISSN: 2423-4591. 03. 165-171, 2017.
- [21] C. Yavuz, "Energy Dissipation Scale For Dam Prototypes", Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 105-116, 2022.
- [22] M. C. Aydın, E. İkinciogulları ve M. E. Emiroğlu, "Şütlerdeki Enerji Kırıcı Blokların Akımın Hidrolik Karakteristikleri Üzerine Etkisinin Sayısal Analizi", Uluslararası Su ve Çevre Kongresi, SUCEV2018 Bildiriler Kitabı, Bursa, 22-24 Mart 2018.
- [23] DSİ, Ilısu Barajı ve HES İnşaatı Rehber Projeleri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2010.
- [24] S. Okyay, Ilısu Barajı Dolusavak Model Raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın no: Hİ-715, Model no: M-192, Ankara, s: 110, 1982.
- [25] Flow3D, Flow3D User Manual, v11.2. Flow Science Inc, 2014.