

## Eğrekkaya Baraj Haznesindeki Yoğunluk Akımlarına Bağlı Oluşan Dalma Derinliğinin İncelenmesi

Fatih ÜNEŞ\*  
Hakan VARÇIN\*\*

### ÖZ

Çevresel problemler ve hızlı büyüyen nüfus artışı sebebiyle, tatlı su kaynakları günden güne azalmakta ve kirlenmektedir. Bundan dolayı, hazneler ve hazne içerisindeki akımların belirlenmesi, su kaynaklarının verimli kullanımı ve doğru şekilde modellenmesi büyük önem arz etmektedir. Gerçek baraj haznelerinde, hazneye giren su ile haznedeki su arasında yoğunluk farkı, haznede yoğunluk (tabakalı) akımlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu yoğunluk farkı, sıcaklık farklılığından ya da askı maddesi veya çözülmüş madde konsantrasyonu farklılığından veya her ikisinin birleşiminden oluşabilmektedir. Bu çalışmada, haznedeki akımların modellenmesi, dalma noktası ve derinliğinin belirlenmesi için matematik model kullanılmıştır. Model, lineer olmayan ve zamanla değişen akım şartları için süreklilik, momentum, enerji ve k-ε türbülans model denklemlerinden oluşmaktadır. Model denklemleri Eğrekkaya baraj haznesinin gerçek boyut, başlangıç ve sınır şartlarına dayanılarak kurulmuştur. Bu çalışma ile hazne içerisindeki dalmış akım ve yoğunluk akımları başarılı bir şekilde modellenmiştir. Elde edilen model sonuçları, gerçek ölçüm değerleri ile oldukça uyumlu çıkmaktadır. Çalışma ile bulunan sonuçlar, haznelerdeki sedimentasyon çalışmaları, su kalitesinin modellenmesi ve yönetimi ile haznedeki canlı hayata bakış ve değerlendirilmesi açısından önemlidir.

**Anahtar kelimeler:** Dalmış akım, baraj, hazne, yoğunluk akımları, matematik model.

### ABSTRACT

#### Investigation of Plunging Depth and Density Currents in Eğrekkaya Dam Reservoir

Fresh water sources are dwindling and becoming contaminated throughout the world due to environmental problems and fast growing population. Therefore, definition of reservoirs, reservoir flows, efficient use and proper modeling of fresh water sources gain great importance. In the real dam reservoirs, the density differences between inflow river water and ambient dam reservoir water create stratified flows. The density differences can be due

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21.01.2009 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Mustafa Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay - funes@mku.edu.tr

\*\* Mustafa Kemal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay - hvarcin@mku.edu.tr

to the discrepancies in temperatures, concentration of dissolved or suspended substances or a combination of both. In this study, a mathematical model is used for modeling reservoir flow and determining the plunging point and depth. The model consists of nonlinear and unsteady continuity, momentum, energy and k-ε turbulence model equations. The equations are constructed on actual dimensions, shape, boundary and initial conditions of the Eğrekkaya dam. The model successfully simulates the formation of density currents and plunging flow. The results are found to be in accordance with the actual measured values. The results of this study are important with regard to sedimentation studies, water quality modeling and management and habitat assessment in reservoirs.

**Keywords:** Plunging flow, dam, reservoir, density current, mathematical model.

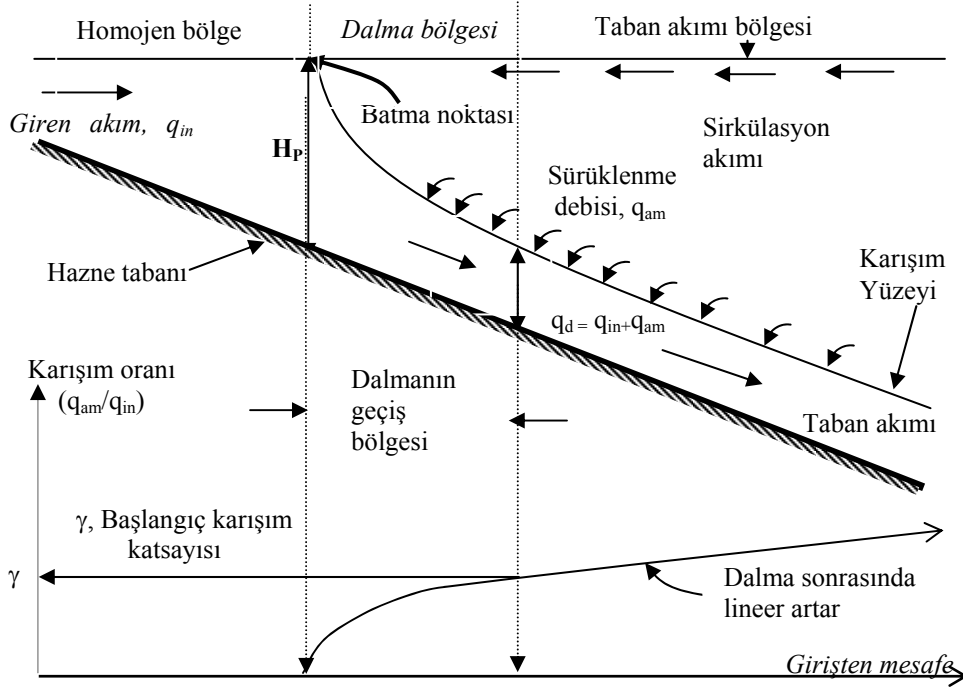
## 1. GİRİŞ

Enerji üretimi, içme suyu temini, tarımsal sulama, taşkından korunma, balıkçılık ve daha birçok amaca yönelik inşa edilen baraj ve göllerinin, hidrodinamik ve limnolojik özelliklerinin belirlenmesi ve araştırılması, tatlı su kaynaklarının sınırlı olduğu, farklı kirlilik unsurlarıyla karşı karşıya bulunduğu günümüzde oldukça önemli hale gelmiştir. Baraj havzalarında yapılan ölçümler göstermektedir ki, mevsimsel değişikliklere bağlı olarak, baraj gölüne gelen nehir suyunun yoğunluğu, göl haznesi içerisindeki sudan farklı değere sahip olmaktadır. Yoğunluktaki bu farklılığın sebebi, nehir suyundan gelen askı maddeleri ve su içinde çözülmüş olan madde konsantrasyonu olabildiği gibi özellikle bir nehir boyunca ardışık olarak inşa edilen barajlarda sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Bu yoğunluk farklılığı, göl haznesi boyunca tabakalı (yoğunluk) akımların oluşmasına neden olmaktadır. Hazneye giren suyun özelliği ile ilgili olarak haznede üç tip akım gelişmesi beklenmektedir. Eğer baraj haznesine giren nehir akımının yoğunluğu, baraj haznesindeki durgun su yoğunluğundan daha az ise hazne yüzeyine paralel olarak, akım yüzey akışı olarak ilerler (overflow), bu tip akımlarda hazne içerisinde dalma oluşmaz ve haznedeki durgun su ile giren akım arasındaki karışım ve girişim yüzeyindeki sürüklenme azdır. İkinci tip akımda, haznedeki durgun suda yoğunluk farklılığı sebebi ile tabakalaşma var ise, hazneye giren su haznedeki sudan daha yoğun olduğu için haznede dalmış akım oluşmasına sebep olmaktadır. Bu dalma sonrasında akım, hazne tabanı boyunca ilerleyecek ve yoğunluk farklılığı ile oluşan tabakalı haznede benzer yoğunluk seviyesinde haznedeki durgun su içerisine girişim yapacak (interflow) ve eşit yoğunluk tabakası boyunca haznede akım ilerleyecektir [1].

Haznede oluşan akımlar içinde en sık karşılaşılan, yoğunluk farklılığı sebebi ile oluşan dalma noktası ve daha sonra oluşup hazne boyunca ilerleyen taban akımıdır [2, 3]. Bu tip akımlara, haznenin değişik kısımlarında farklı isimler verilemiştir. Hazneye giren nehir akımı, dalma bölgesinde dalmış akım (plunging flow) veya genel bir isimle yoğunluk akımı (density current) olarak adlandırılmaktadır. Akımın dalmasının bittiği kısımdan sonra oluşan akıma ise tabakalı akım (stratified flow) veya taban akımı (underflow ) ismi verilmektedir. Dalmış akım oluşumunda giren akımın su yüzeyinde daldığı yere, dalma noktası (plunge point) veya dalma çizgisi, bu noktadaki haznedeki derinliğe de dalma derinliği denilmektedir. Taban akımının hazne tabanında ilerlemesiyle su yüzeyine yakın bölgede ters akımlar (sirkülasyon akımları) meydana geldiği görülmektedir (Şekil 1.). Bu ters akımlardan dolayı, su yüzeyindeki cisimler çizgi halinde belli bir bölgede

toplanmaktadır. Dalma çizgisi, pratikte bu yüzen cisimlerin toplanmaya başladığı yer olarak tarif edilmektedir. Şekil 1’de  $\gamma = q_{am}/q_{in}$ , başlangıç karışım katsayısı;  $q_{in}$  giren akımın birim genişlik için debisi,  $q_{am}$ , haznedeki sirkülasyon akım bölgesinin her bir birim genişliğinden taban akımına sürüklenen akım debisidir.  $\gamma$ ’nın batma noktasındaki başlangıç değeri sıfırdır, bu değer dalma bölgesinin sonundan itibaren lineer olarak artar. Farrell ve Stefan [2] yaptıkları çalışmada bu değerini özetlemiştir.

Dalmış akım olayı ve dalma bölgesinde önemli olan iki parametre vardır. Bunlardan ilki dalma noktasının hazne tabanına olan mesafesini gösteren ve  $H_p$  olarak ifade edilen dalma derinliği, ikincisi de dalma noktasının hazne girişine mesafesini gösteren dalma noktasının yeridir.



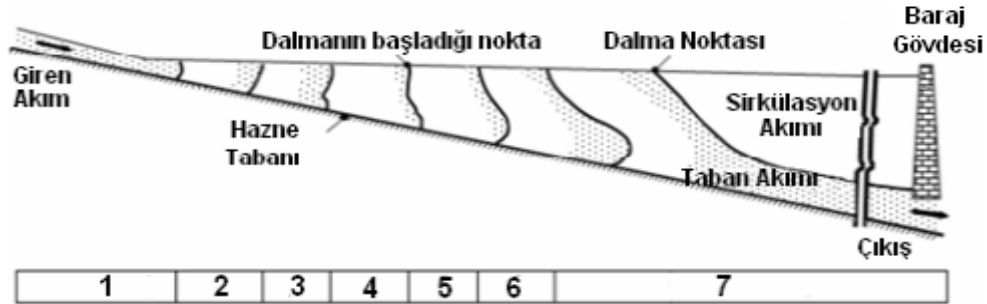
Şekil 1. Tabanı eğimli bir haznede dalmış akım ve dalma noktasının genel şekli

Geçmişteki çalışmalar laboratuvar ortamında yapılan deney düzenekleri, iki boyutlu matematik ve istatistiksel modeller ile arazideki gözlem çalışmalarını kapsamaktadır [3]. Son zamanlarda yapılmış olan çalışmalarda ise üç boyutlu matematik model ve simülasyonları kullanılarak, çok karmaşık, kararsız, nonlineer ve ters sirkülasyon akımlarından oluşan bu hazne akımları için nümerik olarak çözüm yapılabilmektedir [4, 5]. Fakat bu çalışmaların hiçbirinde gerçek boyutlarda bir baraj haznesi içerisindeki yoğunluk akımları incelenmemiştir. TÜBİTAK destekli olan 106Y294 nolu “Gerçek Bir Baraj Haznesi İçerisindeki Akımların Üç Boyutlu Matematik Model ile İncelenmesi” adlı projenin kapsamında hazırlanan bu çalışmayla ilk kez gerçek boyutlarda bir baraj haznesi

içindeki yoğunluk akımlarının üç boyutlu model ve simülasyonları yapılmıştır. Matematik model sonucunda oluşturulan hazne simülasyonları ile haznedeki her noktadaki akımın gelişimi ve haznenin bütününde akımı etkileyen parametreler belirlenebilmektedir. Gerçek baraj hazneleri için dalma bölgesinin belirlenmesi, baraj haznesi ile ilgili birçok konuda yarar sağlamaktadır. Nehir suyunun getirdiği katı maddelerin çökmesi ve hazne boyunca depolanması sonucunda haznedeki kumlanmanın belirlenerek barajın ömrünün tespit edilmesi, haznenin su kalitesinin modellenmesi ve haznedeki canlı hayatın sürdürülmesi bu konulardan sadece birkaçıdır.

## 2. GEÇMİŞTE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Geçmişte haznedeki yoğunluk akımları, ilk olarak arazide yapılan gözlemlere ve ölçümlere dayanarak tespit edilmeye çalışılmıştır [6, 7, 8]. Daha sonraları tabakalı akımları, tabanı eğimli bir hazne için laboratuarda deneysel olarak ve modeller kurularak inceleyen araştırmacılar olmuştur [2, 9, 10, 11, 12, 13]. Singh ve Shah, [9] deneysel olarak ve boyut analizi, kontrol hacim yaklaşımı gibi metotları kullanarak dalma noktasını ve derinliğini tespit etmiş, deney sonuçlarını buldukları nümerik modeller ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, hazneyi yedi farklı bölgeye ayırmışlar (Şekil 2.) bu araştırma sonucunda dalma derinliği ( $H_p$ ) ile ilgili olarak bağıntılar çıkarmışlardır.



*Şekil 2. Singh ve Shah'ın deneysel olarak gözlemledikleri dalmış akım hareketi*

Bazı araştırmacılar, baraj haznesi içerisindeki yoğunluk akımlarını nümerik olarak incelemiş ve yaptıkları çalışmalar sonucunda  $H_p$  dalma derinliği ile ilgili olarak formüller elde etmişlerdir [3, 9, 8, 14, 15, 16] (Tablo 1.). Akiyama ve Stefan, [3] çalışmalarında hazneyi düşük ve dik eğimli olarak iki durum için inceleyerek  $H_p$  (dalma derinliği) için denklemler türetmişlerdir. Tablo 1' deki denklemlerde,  $f$  hazne yatağı sürtünme katsayısı,  $S$  yatak eğimi,  $q$  birim genişlik debisi,  $\gamma$ , başlangıç karışım katsayısı;  $\alpha$ , karışım katsayısı;  $f_t$ , toplam sürüklenme katsayısı ve  $S_1, S_2$  sabitlerdir.

Farrell ve Stefan [2, 10], Tablo 1' de verilen ilişkiler için aşağıdaki gibi genel bir denklem önermişlerdir.

$$H_p = K \left( \frac{q^2}{g'} \right)^{1/3} \quad (1)$$

Denklemden, K yatak taban eğimine bağlı bir katsayı olup, konsantrasyon, sıcaklık değişimi, ve başlangıç karışım katsayısı ile değişmektedir.  $g' = g \Delta\rho/\rho_0$  olarak belirlenmektedir, bu denklemden, g, yerçekimi ivmesi,  $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ , ise haznedeki suyun yoğunluğu ( $\rho_0$ ) ile giren nehir akımının yoğunluğu arasındaki farktır. Singh ve Shah [9] ve Farrell ve Stefan [2] yaptıkları çalışmalarda K katsayısını sırası ile 1.3 ve 1.6 belirlemişlerdir. Üneş[17] yaptığı çalışmalarda, Coriolis etkisini de yansıttığı iki boyutlu matematik model oluşturmuş ve sonuçlarını Singh ve Shah'ın [9] deney verilerini kullanarak karşılaştırmıştır. Johnson ve ark.[11, 12] yaptıkları çalışmalar ile hazneyi üç boyutlu modelleyerek dalmış akımı ve yayılmış akımı (divergence flow) deneysel olarak araştırmışlardır.

Tablo 1. Hp dalma derinliği ile ilgili olarak geçmişte bulunan denklemler [3]

Yazarlar	Dalma Derinliği (Hp)
Jain [14]	$H_p = 1,6 \left( \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1} \right)^{0,126} \left( \frac{8S}{f_1} \right)^{0,008} \left( \frac{q^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}$
Hebbert et al. [8]	$H_p = 1,16 \left( \frac{Q^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/5}$
Savage and Brimberg [15]	$H_p = \left\{ 2,05 \cdot \frac{(S/f)^{0,478}}{(i + \alpha)} \right\}^{-2/3} \left( \frac{q^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}$
Singh and Shah [9]	$H_p = 1,85 + 1,3 \left( \frac{q^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}$
Wunderlich and Elder [16]	$H_p = 1,85 + 1,3 \left( \frac{q^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}$
Akiyama and Stefan[3] <i>Düşük Eğimler</i>	$H_p = 0,5 \left\{ \left( \frac{(2+\gamma)/2}{S_1} \right) + \left( \frac{S_2 S}{f_1} \right) + \sqrt{\left[ \left( \frac{(2+\gamma)/2}{S_1} \right) + \left( \frac{S_2 S}{f_1} \right) \right]^2 - 4 \left( \frac{S_2 S}{f_1 (1+\gamma)} \right)} \right\} \left( \frac{f_1}{S_2} \right)^{1/3} \left( \frac{q_0^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}$
<i>Dik Eğimler</i>	$H_p = 0,5 \left\{ \left( \frac{(2+\gamma)/2}{S_1} \right) + S_1 + \sqrt{\left[ \left( \frac{(2+\gamma)/2}{S_1} \right) + S_1 \right]^2 - 4 \left( \frac{S_1}{(1+\gamma)} \right)} \right\} \left( \frac{1}{S_1} \right)^{1/3} \left( \frac{q_0^2}{\epsilon_0 g} \right)^{1/3}$

Üneş [4, 5], geçmiş yıllardaki Johnson ve ark.[11, 12] yaptığı deneysel çalışmalarını ilerleterek, gerçek baraj haznelerinde oluşan akımı belirlemek amacıyla Coriolis ivmesi

etkitilmiş üç boyutlu matematik model oluşturularak incelemiş ve hazne girişinden itibaren genişleyen hazneler içinde oluşan, yayılarak giren akımın (divergence flow) matematik model simülasyonlarını elde etmiştir. Johnson ve arkadaşlarının deney girdilerine göre elde edilen simülasyon sonuçları, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar, baraj haznesi girişinde ve içerisinde oluşan akımlarla ilgili değişik bir bakış açısı sağlamıştır. Yaptığı başka bir çalışmada Üneş [13], dalma noktasındaki derinliğin belirlenmesi için son zamanlarda su yapılarında sıkça uygulanan yöntemlerden olan yapay sinir ağları (YSA) yöntemini kullanmıştır. Bu çalışmada geçmişte dalma noktası ve derinliği üzerine yapılmış deneysel sonuçları veri olarak kullanarak YSA modeli oluşturmuş ve batma derinliğini deney sonuçlarına oldukça uyumlu olarak belirlemiştir.

### **3. SUNULAN ÇALIŞMA VE UYGULAMA ALANI**

Bu çalışmanın ana amacı orta boyutta gerçek bir baraj haznesinin nümerik olarak modellenmesidir. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerini temsilen Mayıs ve Ekim ayına ait akım verileri kullanılarak hazırlanan matematik model, FLUENT adlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı yardımıyla analiz edilerek, baraj haznesindeki dalma noktaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Böylece ilk kez gerçek bir baraj haznesi için  $H_p$  dalma derinlikleri mevsimlere göre simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir.

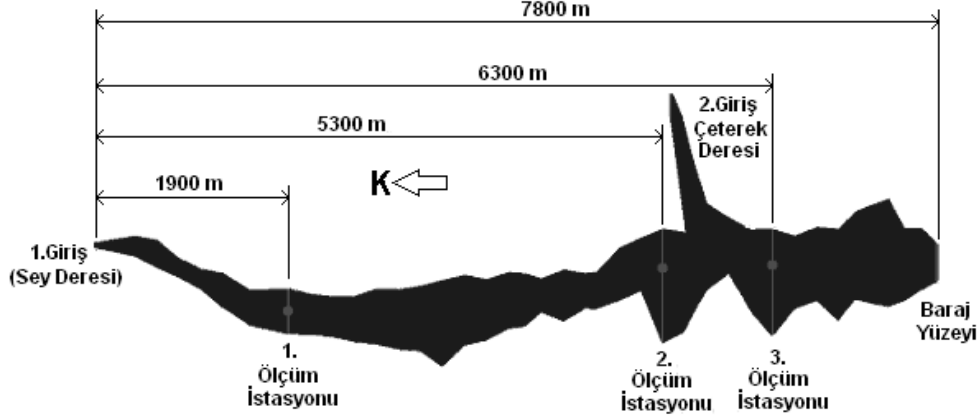
Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucunda uygulama barajı olarak, Türkiye’de baraj haznesi boyunca en çok ölçüm yapılmış olan barajlardan birisi olan ve Ankara’nın içme suyu ihtiyacını karşılayan Eğrekkaya barajı seçilmiştir. Baraj, Ankara’ya 70 km uzaklıkta olup, Kızılcahamam ilçesinin 3 km kuzeyinde inşa edilmiştir. Baraj, Sey ve Çeterek çayı sularını depolamak ve Akyar barajından aktarılan su ile birleştirerek Ankara’ya su temin etmek için inşa edilmiş bir barajdır. Eğrekkaya barajı kil çekirdekli dolgu bir baraj olup en yüksek ve en düşük işletme kotları sırası ile 1031 m ve 1000 m, kret uzunluğu 340 m, talvegden yüksekliği 67 m ve göl hacmi 113 hm<sup>3</sup> olarak inşa edilmiştir. Barajın Ankara’nın içme suyuna katkısı 90 hm<sup>3</sup> olarak planlanmaktadır [18].

Bu çalışmada kullanılan veriler, DSİ tarafından baraj gölündeki su kalitesini belirlemek amacıyla baraj gölü üzerine kurulmuş olan 3 ayrı su kalitesi gözlem istasyonundan alınmıştır. Bu istasyonlarda derinlik boyunca akım kalitesi ile ilgili parametreler ve hazne sıcaklık değişimi yıl boyunca ölçülmüştür. Şekil 3’ deki haritada görülen 1, 2, ve 3 nolu su ölçüm ve gözlem istasyonlarının membadan mansaba doğru olan uzaklıkları sırası ile yaklaşık olarak; 1900 m, 5300 m, ve 6300 m olarak belirlenmiştir. Bu ölçüm istasyonlarından Mayıs ayına ait derinlik boyunca elde edilen sıcaklık değerleri ile bu aya ait kurulacak matematik model sonuçları karşılaştırılarak modelin kalibrasyonu yapılmıştır.

### **4. MATEMATİK MODEL**

Oluşturulan matematik modelde, tabakalı akımın kaynağı olarak hazneye giren ve hazne suyunun sıcaklık değişimiyle oluşan yoğunluk değişimi kabul edilmiştir. Yoğunluk-sıcaklık ilişkisini lineerleştirmek için yoğunluk değişimi aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir [10, 17].

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \beta\rho_0 [T_0 - T] \quad (2)$$



Şekil 3. Eğrekkaya baraj gölü ve ölçüm istasyonlarının yerleri

Burada, T hazne suyunun sıcaklığı,  $T_o$  ve  $\rho_o$  haznede hesap yapılan kontrol hacmindeki sıcaklık ve yoğunluğu,  $\beta$  ısı yayılım katsayısını göstermektedir ve  $\beta = -(\Delta\rho/\rho_o)(1/\Delta T)$  şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $\Delta T$ , giren su sıcaklığı ile yersel su sıcaklığı farkıdır. Bu çalışmadaki gibi sıcaklık-yoğunluk değişimi ile oluşan cazibeli akımlar FLUENT paket programı ile modellenebilmektedir. Sıcaklık-yoğunluk ilişkisini veren (2) nolu ifade, programda enerji denklemi ve “Boussinesq” model yaklaşımı seçilerek modele katılmıştır.

Sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişki hareket denkleminde yerine yazılarak, Boussinesq yaklaşımı, hidrostatik basınç yaklaşımı uygulanmış ve haznede dalmış akım olayına ait matematik model denklemleri çıkarılmıştır. Modelde, Coriolis ivmesi, türbülanslı akım şartlarında hareket denkleminin x ve y bileşenlerinin ivme bölümüne eklenerek, Coriolis kuvveti ve etkisi matematik modele ilave edilmiştir. Aşağıda matematik modeli oluşturan denklemler kartezyen koordinat sisteminde üç boyutlu olarak verilmektedir [4, 5].

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w})}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Hareket denklemleri;

x doğrultusu için;

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - f \bar{v} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu_{eff} \left( \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial z} \right) \right) \quad (4)$$

y doğrultusu için;

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + f\bar{u} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + v_{\text{eff}} \left( \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y \partial z} \right) \right) \quad (5)$$

z doğrultusu için;

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + v_{\text{eff}} \left( \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \right) + g\beta(T_0 - \bar{T}) \quad (6)$$

Enerji denklemi;

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + f\bar{u} = \alpha_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

şeklinde. Burada  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ , ve  $\bar{w}$  sırası ile x, y ve z eksen yönündeki zamansal ortalama hız bileşenlerini vermektedir. Hareket denklemindeki  $v_{\text{eff}}$ , etkili türbülans viskozitesidir ve  $v_{\text{eff}} = \nu + \nu_t$  olarak belirlenir. Burada,  $\nu$  akışkanın kinematik viskozitesi,  $\nu_t$  ise türbülans veya eddy viskozitesidir ve bir akışkan özelliği olmayıp, akım içerisinde noktadan noktaya değişmektedir. Ayrıca  $\rho$ , akışkanın yersel yoğunluğu,  $g$ , yer çekimi ivmesini ve  $\bar{P}$ , indirgenmiş basınç terimidir.  $\bar{P} = \bar{P} + \rho k(2/3)$ ,  $\bar{P}$  yerçekimi ifadesinin hidrostatik kısmını da içeren düzeltilmiş ortalama basıncı ifade etmektedir. Dalmış akım olayını sıcaklık değişimi oluşturduğundan, sıcaklık değişiminin etkisini içeren enerji denklemi yazılmıştır. Bu denklemde,  $\bar{T}$ , sıcaklığın zamansal ortalamasıdır. Burada  $k$ = türbülans kinetik enerjisi,  $\alpha$ , ısı yayılımı veya difüzyon katsayısı olup, laminer akımda  $\alpha = \nu / \text{Pr}$  ile belirlenir. Türbülanslı akımda ise  $\alpha_{\text{eff}} = (\nu / \text{Pr}) + (\nu_t / \sigma_t)$  olarak belirlenir. Burada,  $\text{Pr}$  boyutsuz laminer Prandtl sayısı, ve  $\sigma_t$  ise türbülans Prandtl sayısıdır [4].

*k-ε Türbülans model denklemleri;*

Baraj haznedeki akım yukarıda belirtildiği gibi tabakalı ve ters döngü (sirkülasyon) akımlarından oluştuğu için bu tip türbülanslı akımları en iyi temsil eden k-ε türbülans modeli kullanılmıştır ve denklemleri aşağıda ifade edildiği gibidir;

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

bu ifadedeki,  $k$ , türbülans kinetik enerjisini veren diferansiyel denklem;



$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \text{Pr od} + G - \varepsilon \quad (9)$$

$\varepsilon$ , türbülans kinetik enerjisi kaybını veren diferansiyel denklem;

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \text{Pr od} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} C_3 \frac{\varepsilon}{k} G \quad (10)$$

Pr od, türbülans kinetik enerjisi ile oluşan üretim;

$$\text{Pr od} = v_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

G, yüzdürme veya tabakalı akım ile oluşan kaynak terim,

$$G = g_i \beta \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (12)$$

burada,  $\beta$  ısı termal yayılım katsayısıdır. Yukarıda bahsedildiği gibi haznede düşey yönde taşınımları belirlemek için kullanılan k- $\varepsilon$  model denklemleri, yedi tane katsayı içermektedir. Bunlar  $C_\mu$ ,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_3$ ,  $\sigma_k$ , ve  $\sigma_t$  katsayılarıdır. Bu sabitlerin değerleri Launder ve Spalding [19] tarafından standart k- $\varepsilon$  modeli için,  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ , ve  $\sigma_t = 0.9$  alınmaktadır. Fakat FLUENT paket programı,  $C_3$  için sabit bir değer almayıp,  $C_3 = \tanh|w/u|$  denklemi ile hesaplamaktadır. Bu konuda daha fazla detay "FLUENT user's guide" [20] dan alınabilir.

## 5. MODELDE UYGULANAN SINIR VE BAŞLANGIÇ ŞARTLARI

Yoğunluk akımları zamanla değişen, lineer olmayan denklemler ile temsil edilmektedir. Bu nedenle haznenin bütün giriş ve çıkışlarında ayrı ayrı başlangıç ve sınır şartları belirlenmektedir. Serbest yüzeyde rijit yüzey yaklaşımı kabul edilerek, mevsimsel olarak ölçülen değerler matematik modele etkilmiştir. Bu çalışmada hızlar için, serbest yüzeyde simetri şartı kabul edilmiştir. Baraj gövdesinde ve baraj hazne tabanında hızlar için Launder ve Spalding [19] tarafından önerilen standart duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonun katı cidar yakınlığında logaritmik hız kanunu (log-law velocity) profiline uyduğu kabul edilmektedir. FLUENT paket programında bu yaklaşım aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{u_p}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \left( E \frac{u_* y_p}{\nu} \right) - \Delta B \quad (13)$$

Bu denklemde  $u_p$ , p noktasındaki ortalama akım hızını;  $u_*$ , kayma (sürtünme) hızını; K, Von Karman sabitini; E, 9.81 değerinde ampirik olarak elde edilmiş bir sabit değeri;  $y_p$ , p noktasından duvara olan mesafeyi;  $\Delta B$ , katı cidar pürüzlülük yüksekliğine bağlı pürüzlülük fonksiyonudur (“FLUENT user’s guide”, [20]). Haznenin iki girişinden giren akımlara uygun olarak hızlar için sınır şartları olarak (Velocity inlet); x eksenini yönünde “u” hız bileşeni uniform hız dağılımı olduğu kabul edilmiştir. y ve z eksenini doğrultusundaki “v ve w” hız bileşenleri sıfır alınmıştır. Hazneye giren akım kadar akımın çıktığı (Outflow) sınır şartı olarak seçilmiştir. Buna göre hazne çıkışında x eksenini doğrultusunda oluşan hızların, hazne girişindeki hızlara uygun olarak olduğu, dikey yöndeki hız bileşenlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Hazne girişinde akım başlangıç hız şartı olarak, o dönem de ölçülen akımlara uygun olarak x eksenini yönünde sabit “u” hızı alınmıştır. Diğer “v ve w” hız bileşenleri baraj gövdesine yakın yüzeyler hariç sıfır alınmıştır.

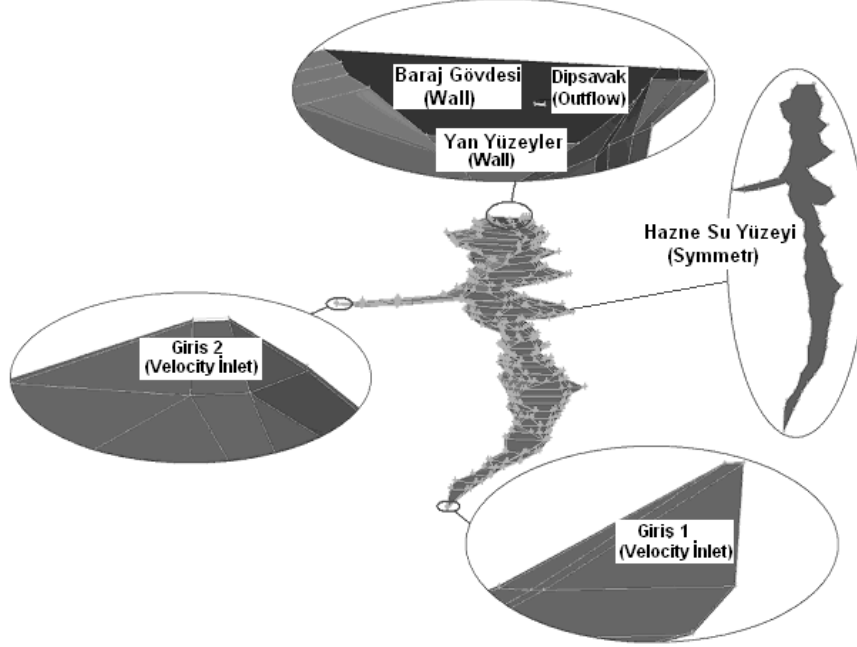
Matematik model simülasyonlarında, başlangıç şartı olarak (initial condition) hazne dolu ve mevsimlere göre arazide ölçülen aylık ortalama sıcaklıklara uygun sabit değerler alınmıştır. Hazne taban ve yüzeyinde sıcaklıkların adiabatik olduğu kabulü yapılmıştır. Hazneye giren suyun sıcaklığının derinlik boyunca değişmeden, arazi ölçümlerine uygun olarak sabit bir değerde olduğu kabul edilmiştir. Fakat baraj haznesindeki akım zamanla değişen akım olduğundan, bu başlangıç şartları akım simülasyonu boyunca değişmekte ve zamanla akıma uyum sağladığından fazla önem arz etmemektedir.

Yukarıda verilen sınır şartlarına benzer sınır şartları türbülans modeli içinde uygulanmıştır.  $k$  ve  $\epsilon$  türbülans model parametreleri için, serbest yüzeyde simetri şartı, katı cidar yakınlarında ve girişte Launder ve Spalding [19] tarafından önerilen hız dağılım fonksiyonuna uygun olarak, lineer profil olduğu kabul edilmiştir. “k” nin baraj hazne yüzeyi ve tabanında değişmediği ve sıfır olduğu kabulü yapılmıştır. Hazne çıkışında  $k$  ve  $\epsilon$  için kullanılan sınır ve başlangıç şartları hız için kullanılanlara benzer alınmıştır.

Tablo 2’de, modelin kurulmasında kullanılan ve haznedeki ölçümlerden alınmış olan başlangıç şartları verilmektedir. Matematik model simülasyonları elde edilirken, hazne koşullarındaki gece ve gündüz değişimleri de dikkate alınarak, ölçümlerin gündüz yapılmasından dolayı, hazne yüzeyinde gündüz ölçülen hava sıcaklıkları günlük model simülasyonları elde edilirken başlangıç şartı olarak etki ettirilmiş, diğer sınır şartları Eğrekkaya barajında yapılan ölçüm değerlerine uygun olarak alınmıştır.

*Tablo 2. Eğrekkaya baraj haznesini besleyen Sey ve Çeterek deresi için seçilen aylardaki ölçülen sıcaklık ve akım değerleri.*

	Sey Deresi			Çeterek Deresi		
	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$Q (\text{m}^3/\text{s})$	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$Q (\text{m}^3/\text{s})$
<b>Mayıs</b>	7,5	17,1	6,4	4,6	17,1	2,5
<b>Ekim</b>	16	16,7	1,892	6,1	16,7	0,41



Şekil 4. Kurulan hazne modeli için girilen sınır şartları (GAMBIT yüzey görünümüleri)

## 6. SAYISAL YÖNTEMLER VE HESAP ESASLARI

Matematik modeli oluşturan denklemler uygun sınır ve başlangıç şartlarında, FLUENT paket programı kullanılarak çözülmüştür. Bu programın seçilmesinin temel sebeplerinden birisi, hazne içeririndeki akımlar ile oluşan yoğunluk değişimine bağlı olarak ortaya çıkan basınç-hız etkileşiminin çözümü için kullanılan SIMPLE iterasyon çözüm yönteminin uygulanabilmesidir [1, 17].

Çözüm yöntemi olarak kontrol hacim yaklaşımı tekniği kullanılmaktadır. Bu yöntemde, hesap ağı kullanılarak çalışma alanı ardışık kontrol hacimlerine bölünmekte, her bir kontrol hacmindeki bağımlı değişkenler (hızlar, basınçlar, sıcaklıklar v.b) ile oluşturulan matematik model denklemleri nümerik yöntemler (sonlu hacimler metodu) kullanılarak, çözüm için anlık lineer denklemlerin bir serisi oluşturulmuştur. Kontrol hacim yüzeyleri boyunca akımlar, Patankar [21] tarafından tanımlanan power-law şeması kullanılarak hesaplanmıştır.

Hesaplamlarda gevşetici faktör olarak akım denklemlerinin çözümü için 0.7, basınç ve yoğunluk için sırası ile 0.3 ve 1.0 değerleri alınmıştır. Akımdaki değişimler, her 10 saniyede 5 iterasyon yaptırılarak ve akımın gelişimi sürekli kayıt altına alınarak belirlenmiştir. Akımın gelişiminin belirlenmesinde temel akım parametresi olarak haznedeki sıcaklık değişimi alınmış, bulunan değerler arazide ölçüm yapılan istasyon noktalarındaki o aya ait ortalama sıcaklık ölçüm değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece yapılan çalışma ile arazi ölçümlerine uygun sınır şartlarının matematik modele uygulanması

sonucunda elde edilmiş olan simülasyonların gerçek hazne akımına uyumu ve haznede oluşan akımlar incelenmiştir.

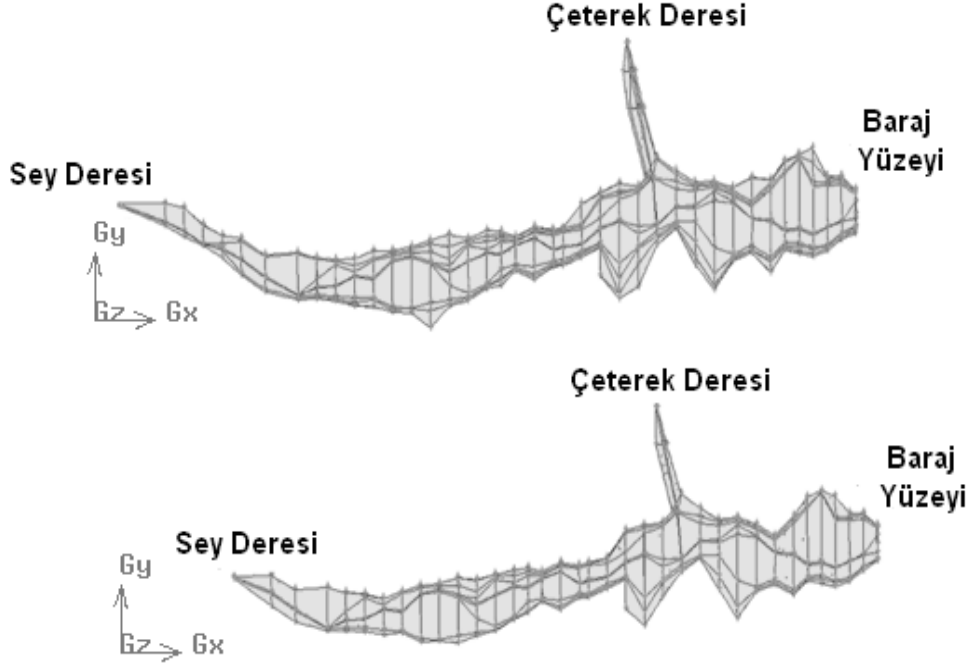
Eğrekkaya baraj haznesinin üç boyutlu modelleri DSI'den alınan topografik haritalar kullanılarak, elde edilen koordinat noktaları GAMBIT isimli çizim programında çizilmiştir. Hazne işletme su kotları Mayıs ve Ekim aylarında farklı olduğu için iki ayrı şekil (Şekil 5.) ve model tasarlanmıştır. Çizilen bu modellerin hesap ağı oluşturulurken, haritadaki kıvrımlı bölümlerdeki akım oluşmayan ölü bölgeleri de modelleyebilmek için tetrahedral hesap hücresi ile ağ oluşturulmuştur. Bu yöntem daha fazla hesap hücresi oluşturmak ile beraber hata miktarını ve hesap ağının çarpıklık oranını büyük oranda düşürmektedir. Fakat hesap ağındaki hücre sayısının artması yüksek kapasiteli bilgisayar sistemleri ve uzun bilgisayar hesap zamanı gerektirmektedir. Buna göre Mayıs ayı için Şekil 5-a' da ki modelde 1.5 milyona yakın hesap hücresi varken Şekil 5-b' deki ekim ayında su seviyesi daha az olduğundan bu sayı 1 milyon civarında olmaktadır.

Fakat bu boyutlarda matematik modelin çözülmesi ve nümerik simülasyonların oluşturulması problemlerinde en çok karşılaşılan sorun, mesh (hesap) ağının büyüklüğünden doğan çarpıklık katsayısının istenilen boyutlara çekilmesi ve problemin çözüm süresidir. Bu problemi aşmak için, simülasyon için oluşturulan, bir çok deneme sonucunda mesh ağları yeniden düzenlenerek çarpıklık katsayıları istenilen seviyeye getirilmiştir. Fakat bu düzenlemede, mesh sayısının büyümesi nedeni ile yeniden bilgisayar kapasitesi ve hız problemi ortaya çıkmıştır.

Sunulan çalışma, gerçek boyutlarında bir barajın akım simülasyonlarının oluşturulması temeline dayanan ve bu boyutlarda bir baraj haznesini bir bütün olarak modelleyen literatürde ki ilk çalışmadır. Bu durum da modelin büyümesine, hesap hücre sayısının artmasına ve dolayısıyla bilgisayar çözüm süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu problem 16 işlemcili (Amd-Athlon), her işlemci için 1 Gb ram ve 80 Gb sabit diske sahip yüksek kapasiteli paralel bilgisayar sistemi kullanılarak aşılmıştır. Bu çoklu işlemcili sisteme rağmen, hesap ağının çözümü için, kurulan sistem ile her bir değişik simülasyon modeli için, sürekli çalışmak koşulu ile 3 aya yakın bilgisayar hesap zamanı gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar yine bu araştırma için kurulmuş (4 Gb ram, 2.4 Ghz işlemci, 512 Mb ekran kartı, 500 Gb Sabit diske sahip)olan ayrı bir bilgisayarda değerlendirilmiştir.

## **7. UYGULAMA VE DEĞERLENDİRMELER**

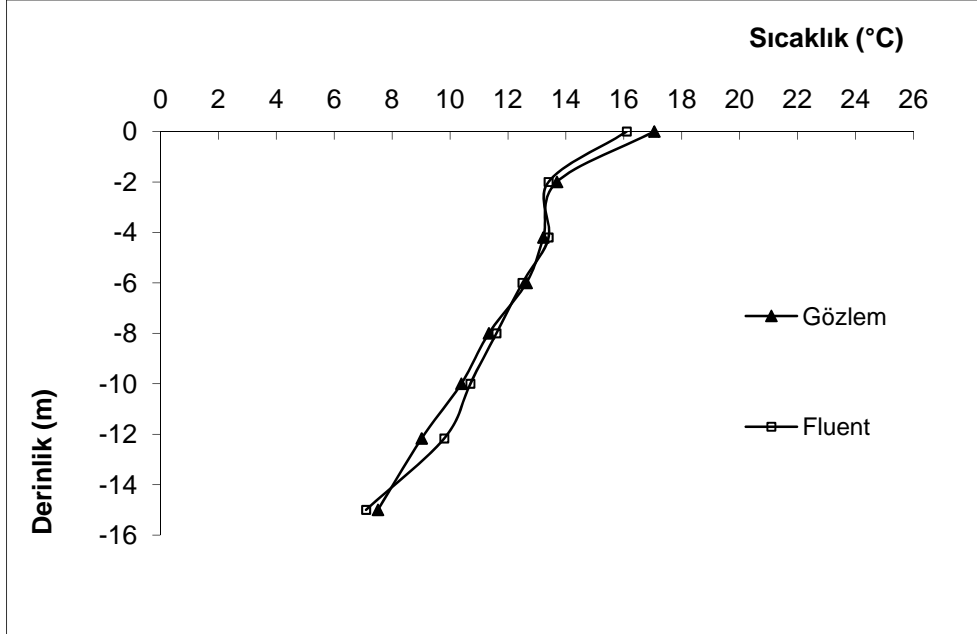
Bu çalışmada Mayıs ve Ekim ayları için oluşturulan matematik modeller FLUENT programında çözülerek analizleri yapılmıştır. Mayıs ayına ait sıcaklığa bağlı oluşan tabakalı akımlar ayrıca incelenmiş ve simülasyonları oluşturulmuştur. Bu simülasyonlardan elde edilen sıcaklık değerleri ile DSI'nin yapmış olduğu derinlik boyunca elde edilen sıcaklık ölçüm değerleri karşılaştırılmış ve hata yüzdeleri ile beraber Şekil 6, 7, 8 ve Tablo 3' de verilmiştir. Böylece oluşturulan matematik modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Buna göre Tablo 3' deki hata yüzdeleri sırası ile 1–2–3 nolu istasyonlarda % 3.7, 5.6 ve 5.5 olarak belirlenmiştir. Geçmişte yapılmış araştırmalar incelendiğinde sadece dalma noktası ve derinliğinin belirlenmesi için laboratuarda yapılan çalışmalar ile modeller karşılaştırıldığında, hata yüzdesinin, %15–25 arasında değerlerde olduğu görülmektedir [2, 4, 5, 10].



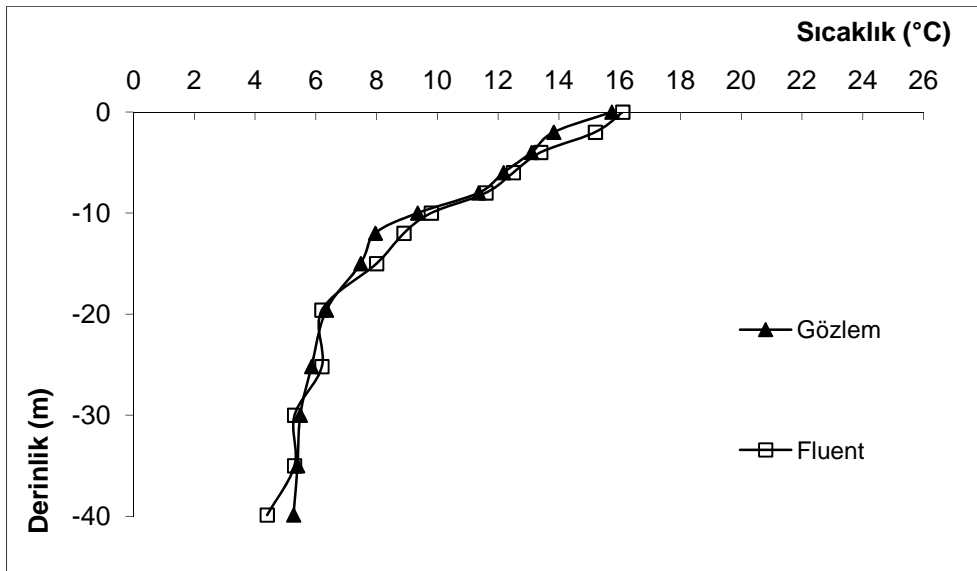
Şekil 5. Eğrekkaya baraj haznesinin seçilen aylar için GAMBIT programında çizilen üç boyutlu hesap ağı modelleri. a)Mayıs ayı için hesap ağı b)Ekim ayı için hesap ağı

Elde edilen hata yüzdeleri ve grafiklerden de anlaşılacağı gibi, Eğrekkaya baraj gölü için elde edilen sonuçlar istenen hassasiyet ve doğruluktadır. Buda matematik modelin doğru sonuç verdiğini ve simülasyonlardan elde edilecek dalma derinliklerinin kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

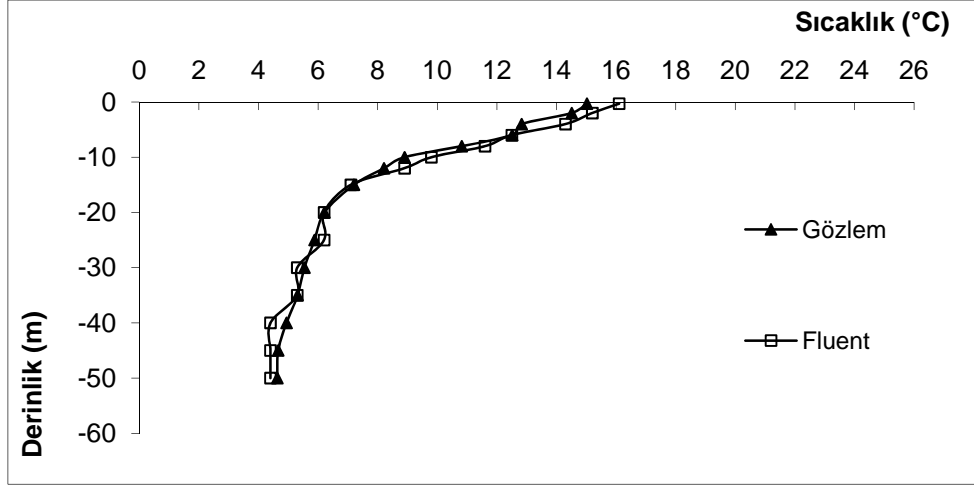
Mayıs ve Ekim aylarına ait simülasyonlar ve hazne boyunca oluşan akımlar üç yönde kesitler alınarak incelendiğinde, Mayıs ayında hazneye giren nehir akımlarının sıcaklık ölçüm değerlerinin düşük olması nedeni ile her iki akarsu girişinde de dalmış akım ve hazne boyunca taban akımının olduğu görülmüştür (Tablo 2 ve Şekil 6, 7 ve 8). Ekim ayında ise Sey deresinden gelen suyun sıcaklığının ( $16^{\circ}\text{C}$ ) hazne de ki su sıcaklığına çok yakın olması ( $16,7^{\circ}\text{C}$ ) nedeni ile Sey deresi girişinde batmış akım durumu gözlenmemiştir. Fakat Çeterek deresi girişinden gelen suyun sıcaklığı ( $6,1^{\circ}\text{C}$ ) olduğu için Ekim ayında sadece 2 ve 3 nolu istasyon da dalmış akımın olduğu görülmüştür. Şekil 9, 10 ve 11' de hazne boyunca ölçüm istasyonları ve çeşitli noktalarda alınan üç boyutlu kesitlerden de görüldüğü gibi, bu çalışma ile elde edilen akımlar ile gerçek akım ölçümleri elde edilen veriler oldukça uyumlu elde edilmektedir. Bu elde edilen simülasyonlardan dalma bölgesi, dalma noktası, dalma derinliği ( $H_p$ ) ve dalma noktasının girişten mesafesi tespit edilmiştir. Eğrekkaya barajının her iki girişinde belirlenen bu değerler Tablo 1' de verilmiştir.



Şekil 6. Mayıs ayı için 1. istasyondaki sıcaklık-derinlik değişiminin ölçüm ve simülasyon sonuçları



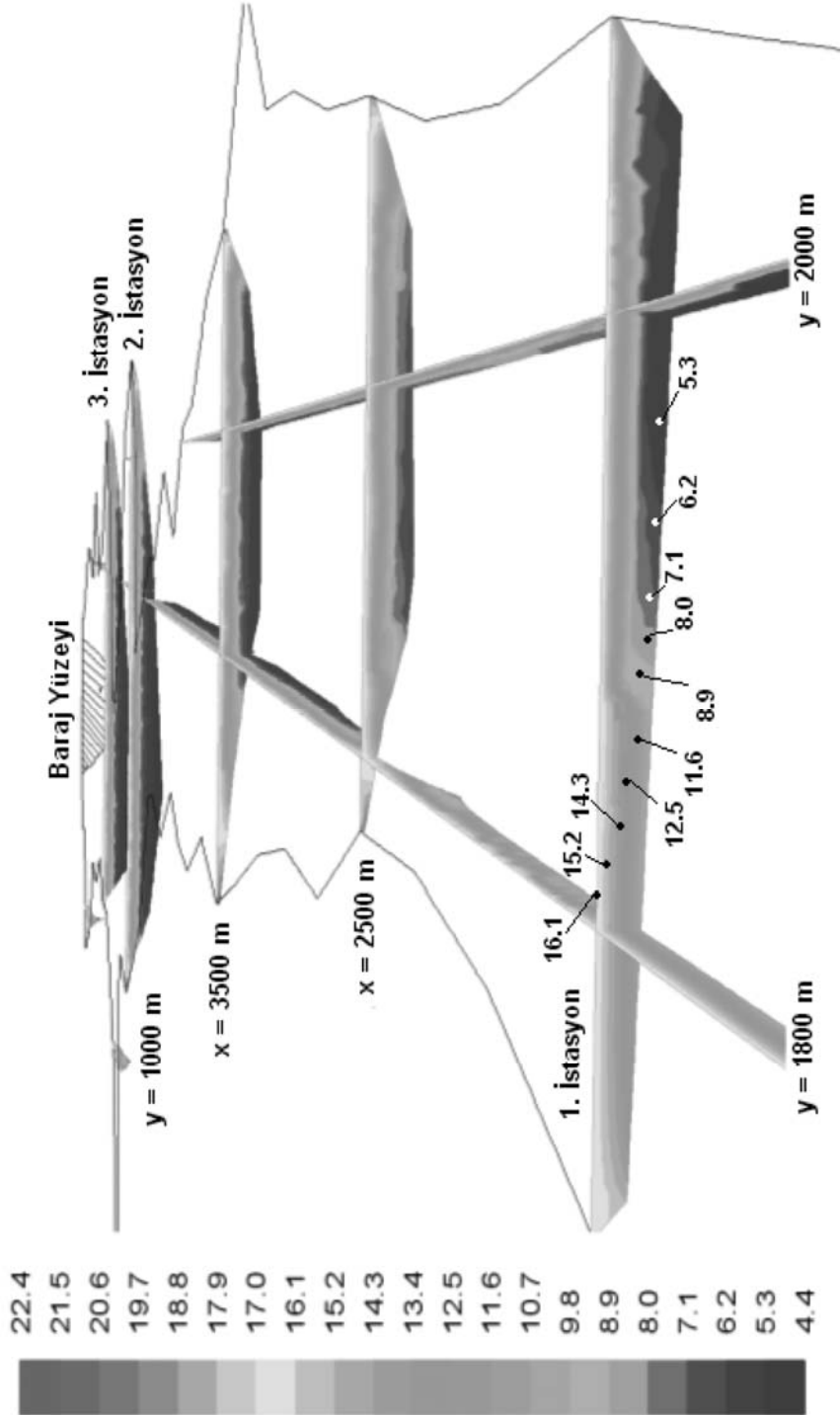
Şekil 7. Mayıs ayı için 2. istasyondaki sıcaklık-derinlik değişiminin ölçüm ve simülasyon sonuçları



Şekil 8. Mayıs ayı için 3. istasyondaki sıcaklık-derinlik değişiminin ölçüm ve simülasyon sonuçları

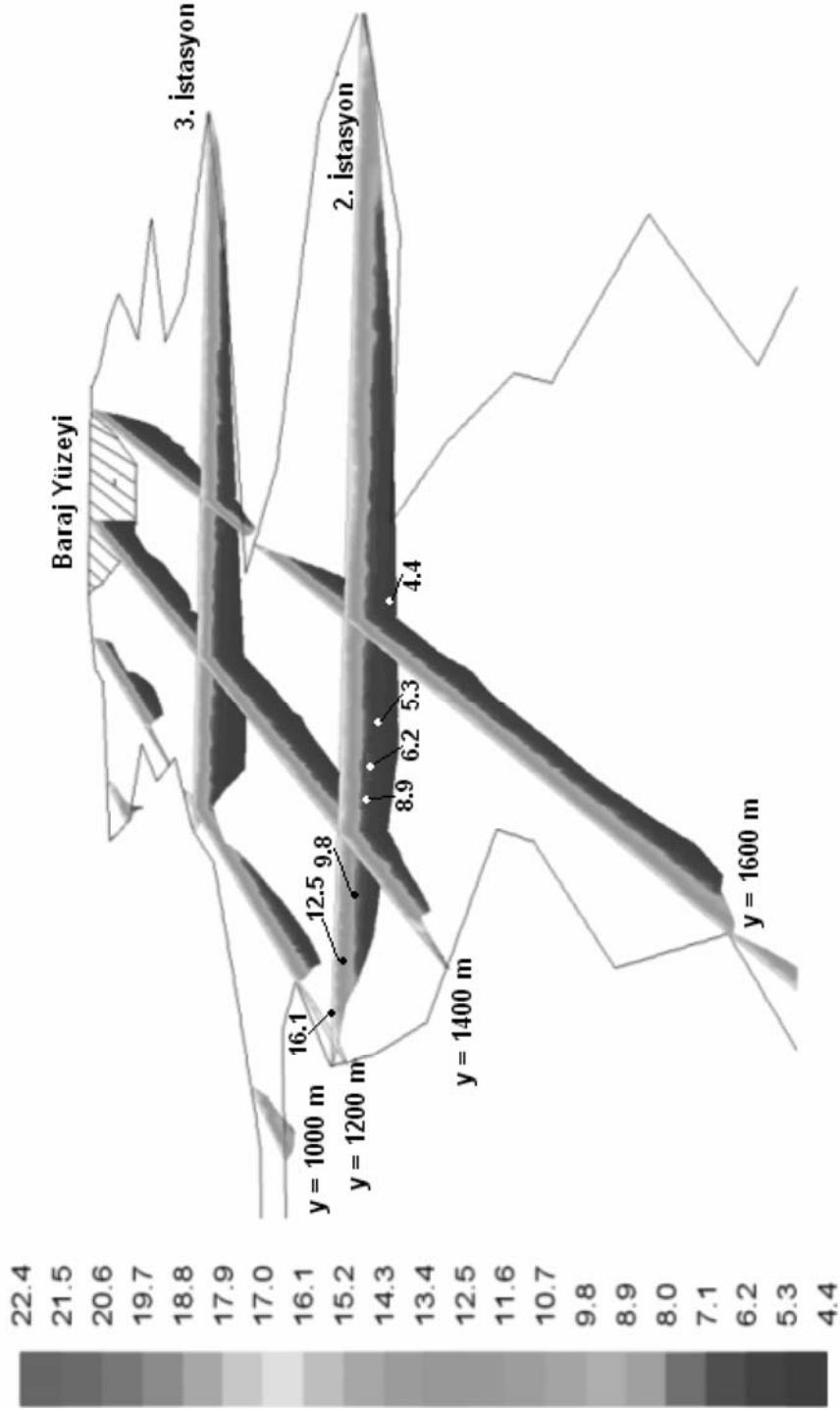
Tablo 3. Mayıs ayı için 1, 2 ve 3 nolu istasyonlarda ölçüm ve matematik model sonuçlarıyla bulunan sıcaklık-derinlik ilişkisinin karşılaştırılması

Derinlik (m)	1.İstasyon			2.İstasyon			3.İstasyon			
	Gözlem (°C)	Fluent (°C)	Hata (%)	Gözlem (°C)	Fluent (°C)	Hata (%)	Gözlem (°C)	Fluent (°C)	Hata (%)	
-0,3	17,05	16,1	5,6	15,74	16,1	2,3	15,02	16,1	7,2	
-2	13,69	13,4	2,1	13,83	15,2	9,9	14,51	15,2	4,8	
-4	13,22	13,4	1,4	13,1	13,4	2,3	12,83	14,3	11,5	
-6	12,64	12,5	1,1	12,18	12,5	2,6	12,51	12,5	0,1	
-8	11,34	11,6	2,3	11,36	11,6	2,1	10,82	11,6	7,2	
-10	10,39	10,7	3,0	9,35	9,8	4,8	8,9	9,8	10,1	
-12	9,02	9,8	8,6	7,96	8,9	11,8	8,21	8,9	8,4	
-15	7,51	7,1	5,5	7,48	8	7,0	7,2	7,1	1,4	
-20				6,35	6,2	2,4	6,21	6,2	0,2	
-25				5,86	6,2	5,8	5,88	6,2	5,4	
-30				5,49	5,3	3,5	5,54	5,3	4,3	
-35				5,4	5,3	1,9	5,31	5,3	0,2	
-40				5,27	4,4	16,5	4,94	4,4	10,9	
-45							4,66	4,4	5,6	
-50							4,63	4,4	5,0	
<b>Ortalama Hata Yüzdesi:</b>			<b>3,7</b>				<b>5,6</b>			

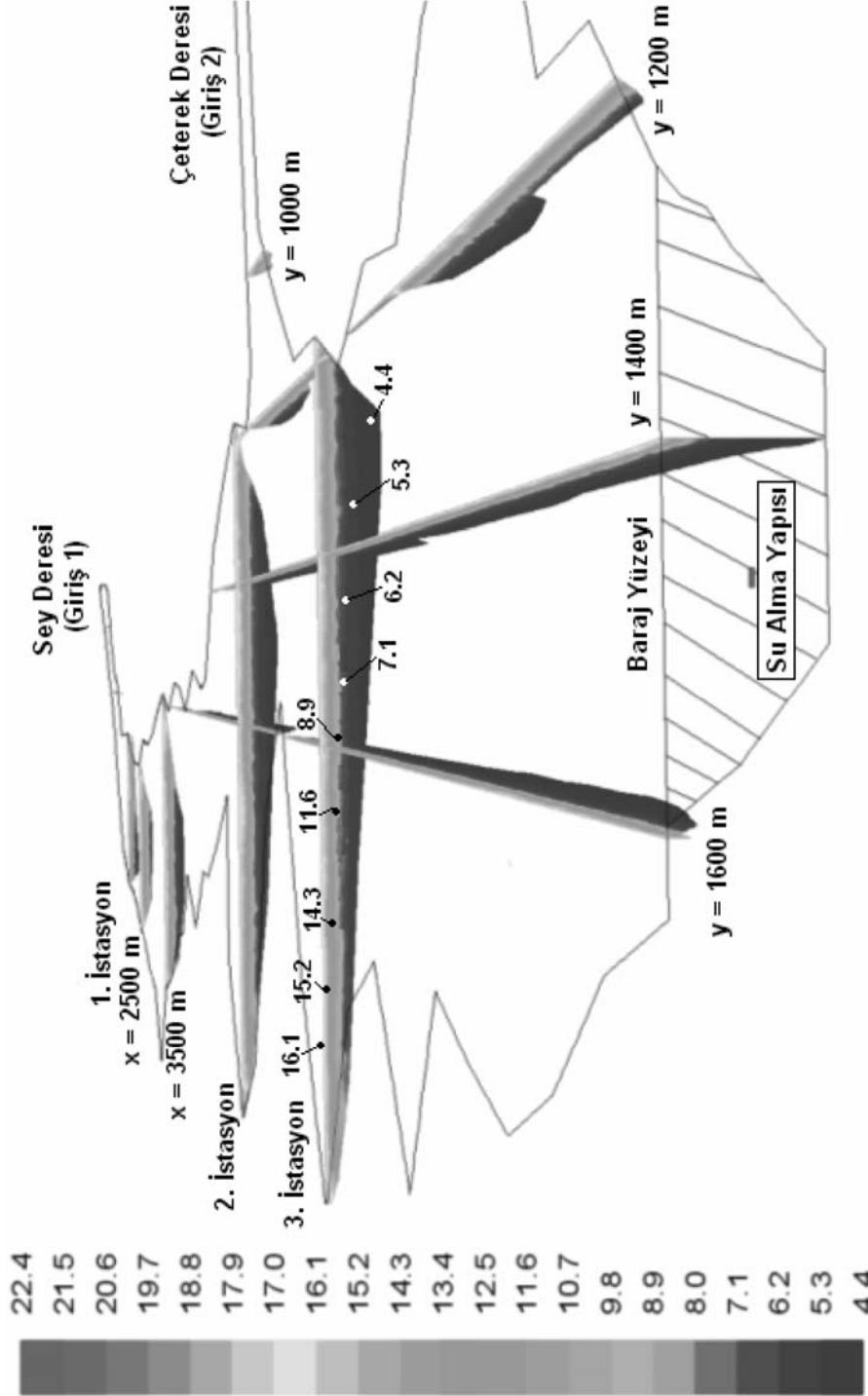


Şekil 9. Mayıs ayında Eğrekkaya barajı 1.ölçüm istasyonunda oluşan sıcaklık değişimleri ve dalmış akım

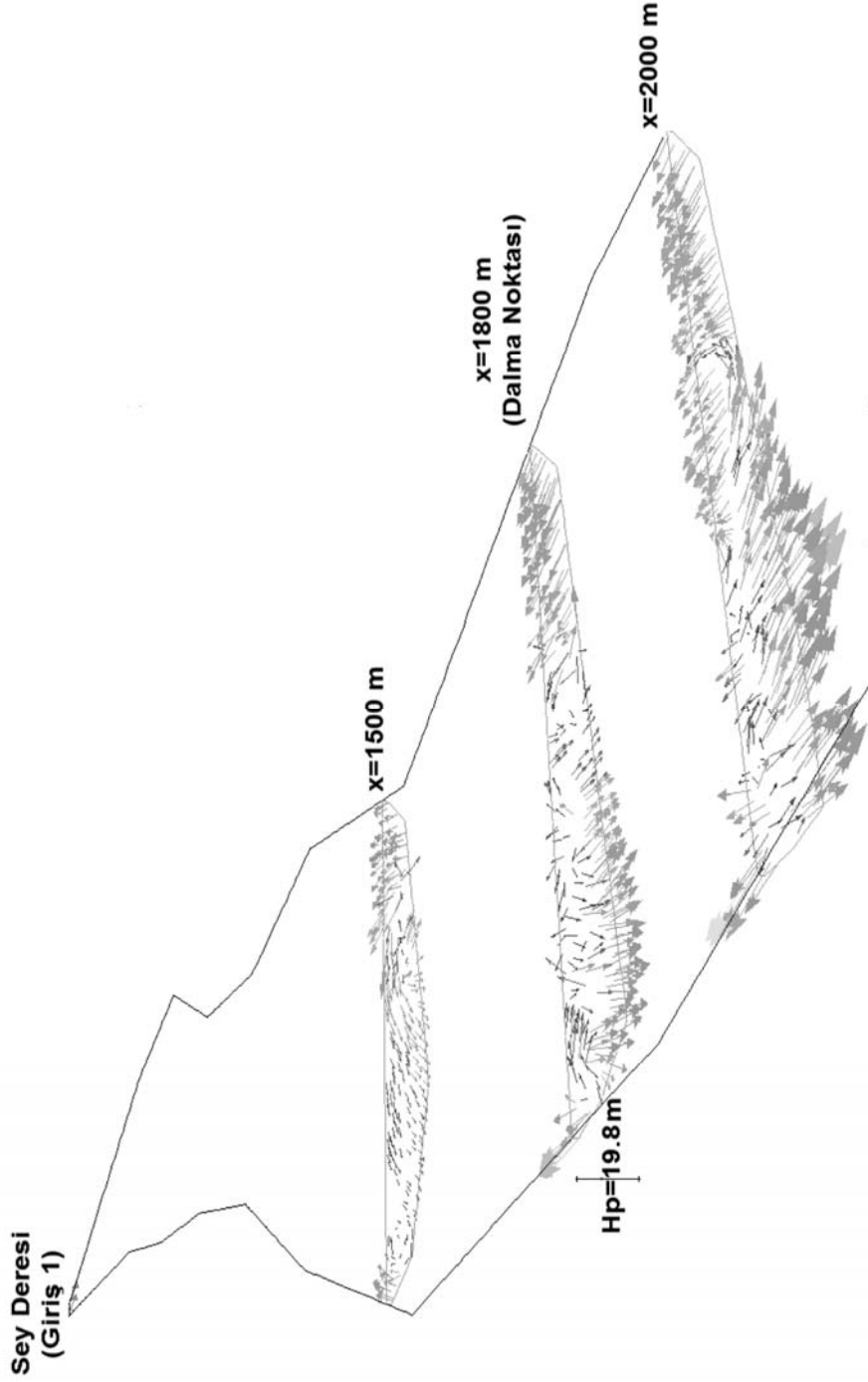




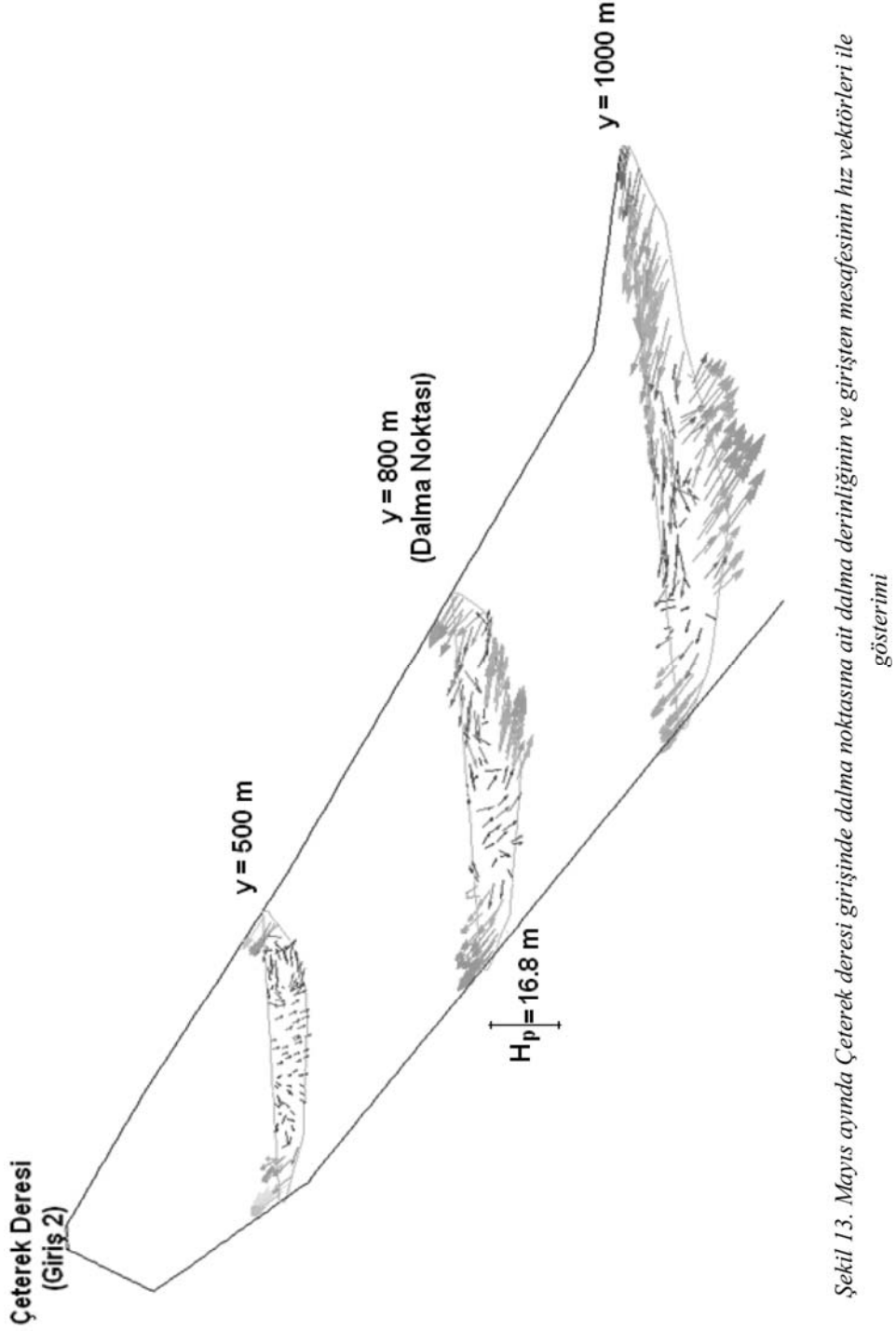
Şekil 10. Mayıs ayında Eğrekkaya barajı 2. ölçüm istasyonunda oluşan sıcaklık değişimleri ve dalmış akım



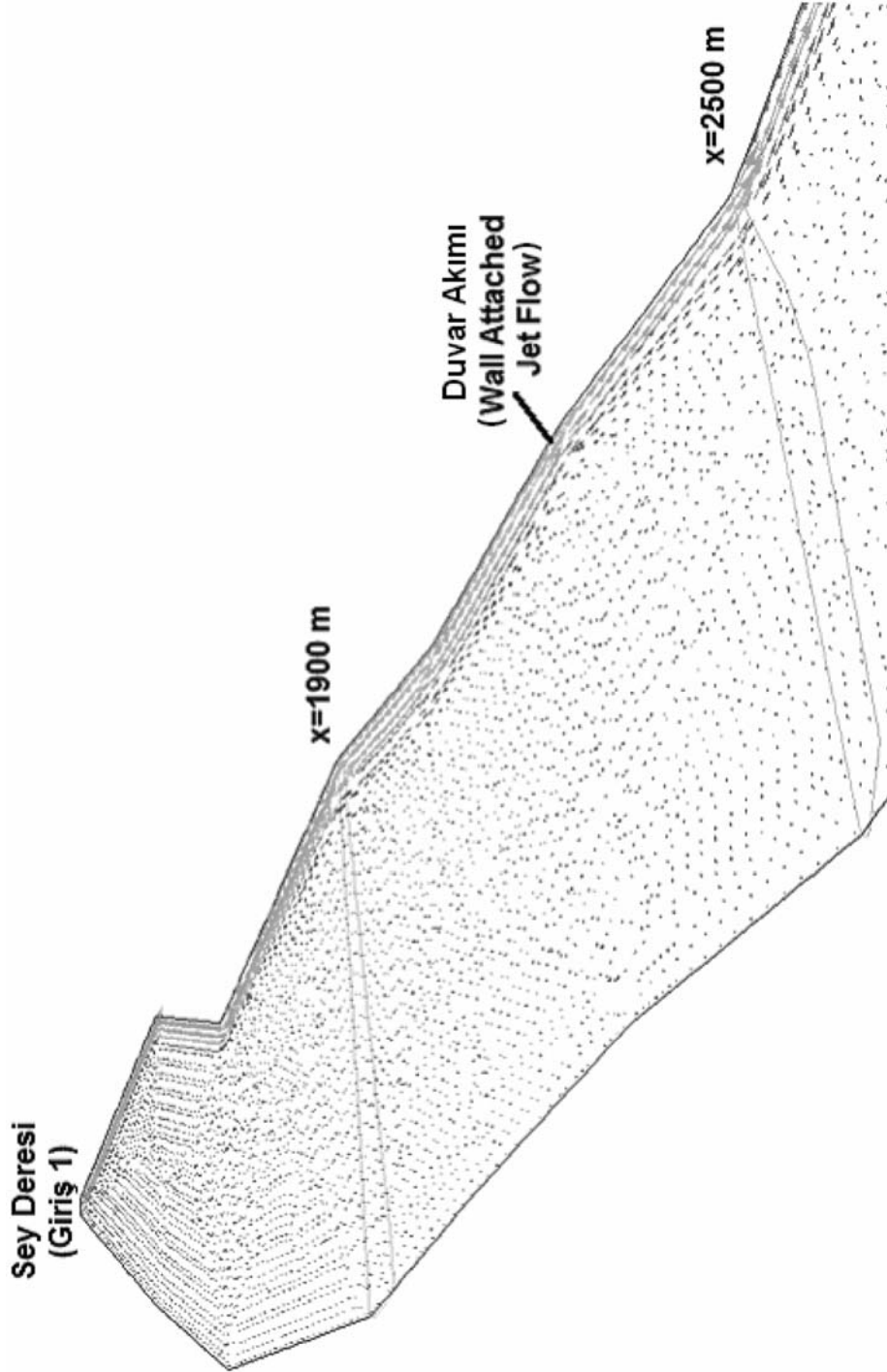
Şekil 11. Mayıs ayında Eğrekkaya barajı 3. ölçüm istasyonunda oluşan sıcaklık değişimleri ve dalmış akım (Mansap 'dan görünüşi)



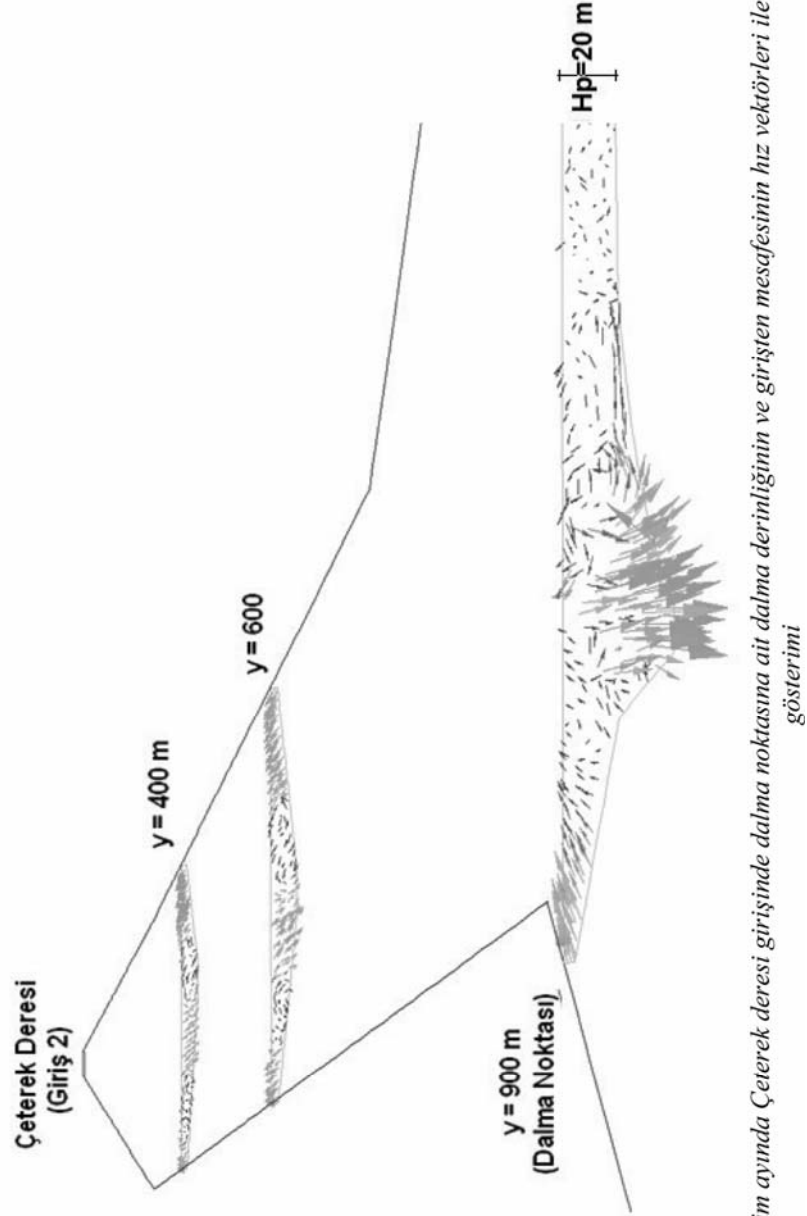
Şekil 12. Mayıs ayında Sey deresi girişinde dalma noktasına ait dalma derinliğinin ve girişten mesafesinin hız vektörleri ile gösterimi



Şekil 13. Mayıs ayında Çeterek deresi girişinde dalma noktasına ait dalma derinliğinin ve girişten mesafesinin hız vektörleri ile gösterimi



Şekil 14. Ekim ayında Sey deresi girişinde oluşan akımların hız vektör-leri ile gösterimi



Şekil 15. Ekim ayında Çeterek deresi girişinde dalma noktasına ait dalma derinliğinin ve girişten mesafesinin hız vektörleri ile gösterimi

Tablo 4. Eğrekkaya baraj haznesini besleyen Sey ve Çeterek deresi girişlerindeki dalma derinlikleri ve dalma noktalarının girişten mesafeleri

	Sey Deresi		Çeterek Deresi	
	Dalma derinliği Hp (m)	Dalma noktasının girişten mesafesi (m)	Dalma derinliği Hp (m)	Dalma noktasının girişten mesafesi (m)
<b>Mayıs</b>	19.8	1800	16.8	800
<b>Ekim</b>	-	-	20	900

Örnek olarak, Mayıs ayı için elde edilen simülasyon sonuçlarına göre Sey deresi girişindeki dalma noktasının girişe olan mesafesi 1800 m civarında ve dalma derinliği 19.8 m olarak bulunmuş ve Şekil 12’ de bu noktada alınan kesit ve akımın oluşturduğu hız vektörleri verilmiştir. Baraj haznesinin topografik yapısı dikkate alındığında hazne tabanının sağ tarafa doğru eğimli ve bundan dolayı dalmış ve taban akımının bu kısımlarda oluştuğu şekillerden açık bir şekilde görülmektedir. Bu dalma ve akımın yayılma (divergence) etkisi dolayısı ile hem hazne yüzeyinde hem de tabakalı akım boyunca taban akımının üzerinde teoride bahsedilen sirkülasyon akımlarının oluştuğu açıkça görülmektedir.

Haznenin ikinci girişi olan Çeterek deresinin, Sey deresi girişine göre eğiminin daha fazla olması sebebiyle dalma derinliğinin girişe olan mesafesinin daha az çıktığı arazi ölçüm ve model sonuçlarından elde edilmiştir. Şekil 13’de görüldüğü gibi, hazne ikinci girişinde, dalma girişten yaklaşık olarak 800 m mesafede 16.8 m derinlikten itibaren başladığı belirlenmiştir. Bu bulunan değerlerin hazne sıcaklık ve bölgenin iklim şartları ile sürekli olarak değiştiği model ve ölçüm sonuçlarından görülmektedir.

Ekim ayı için elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde ise Sey deresi girişinde dalmış akımın oluşmadığı, daha önce bahsedilen yüzey akışının (Overflow) hazne girişindeki yayılma açısı (divergence angle) etkisi altında hazne duvarına yapışık halde duvar akımı (wall jet flow) oluşturduğu görülmektedir. Şekil 14’ de Sey deresi girişi için model simülasyon sonucu elde edilen yüzeysel akımlar verilmektedir. Çeterek deresi girişinde ise Mayıs ayına benzer olarak dalmış akımın oluştuğu model sonuçlarından görülmektedir. Çeterek deresi girişi için, dalma derinliği 20 m ve dalma noktasının girişe olan mesafesi 900 m olarak tespit edilmiş ve Şekil 15’ de verilmiştir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmadan aşağıda belirtilen sonuçlar çıkartılmıştır.

- 1- Eğrekkaya baraj haznesindeki yoğunluk akımları üç boyutlu matematik model ile bulunmuştur. Matematik modelden elde edilen sonuçlar ile gerçek baraj haznesi boyunca yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve uyumun iyi olduğu görülmüştür.
- 2- Eğrekkaya baraj haznesi için farklı mevsimleri temsilen dalma noktası derinliği ve değerleri belirlenmiştir.

- 3- Bu çalışmadaki yöntem uygulandığında çok büyük hacme sahip bir baraj haznesi içerisinde, hazne boyunca her noktada oluşabilecek akım ve parametrelerin kabul edilebilir bir hata ile belirlenebilir.
- 4- Bu çalışma göstermiştir ki, matematik model simülasyonları haznenin inşası öncesinde, hazneyi beslemesi düşünülen nehirlerin akım ve mevsim şartları dikkate alınarak yapıldığında, haznenin modeli yardımı ile akım ve şartları belirlenebilir. Böylece haznenin her noktasında oluşabilecek; hazne boyunca belirlenmesi çok zor ve pahalı olan, sıcaklık, basınç, hız, türbülans gibi değişen akım parametreleri belirlenerek barajın inşası öncesinde yapılan baraj etüt çalışmalarında da kullanılabilir.
- 5- Sunulan çalışmada kullanılan “rijit hazne yüzeyi” ve “ simetri” gibi sınır şartları, model sonuçlarının gerçek hazne akım değerlerinden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Gelecekte yapılacak hazne model çalışmalarında, bu gibi gerçeğe uygun olmayan sınır şartları, gerçek sınır şartları ile uyumlu hale getirilerek, daha az hatalı hazne akım model çalışmaları yapılabilir.

#### **Semboller**

$g$	= yer çekim ivmesi
$H_d$	= taban akımı derinliği
$H_p$	= dalma noktasındaki derinlik
$H_{p0}$	= ilk dalma noktası derinliği
$K$	= dalma derinliği katsayısı
$k$	= türbülans kinetik enerjisi
$Pr$	= Prandtl sayısı
$\bar{P}$	= indirgenmiş basınç
$q_o$	= birim genişlikten geçen nehir debisi
$q_{am}$	= birim genişlikten hazne suyundan sürüklenme ile taban akımına geçen debi
$q_d$	= birim genişlikten taban akımı debisi
$\bar{T}$	= ortalama sıcaklık
$T_o$	= haznedeki durgun suyun sıcaklığı
$T$	= hazne içerisinde akımla oluşan su sıcaklığı
$\bar{u}$	= yatay ortalama hız
$\bar{v}$	= düşey ortalama hız
$B$	= ısı yayılım katsayısı
$\Delta T$	= haznedeki durgun su ile hazneye giren su arasındaki sıcaklık farkı



$\Delta\rho$	=	haznedeki durgun su ile hazneye giren su arasındaki yoğunluk farkı
$\varepsilon$	=	her bir birim kütledeki türbülans enerji kaybı
$\rho$	=	hazneye giren nehir suyunun yoğunluğu
$\rho_0$	=	haznedeki durgun suyun yoğunluğu
$\nu$	=	kinematik viskozite
$\nu_t$	=	kinematik türbülans (eddy) viskozitesi
$\sigma_t$	=	türbülans Prandtl sayısı

### **Teşekkür**

Yazarlar, “106Y294: Gerçek Bir Baraj Haznesi İçerisindeki Akımların Üç Boyutlu Matematik Model ile İncelenmesi” adlı Araştırma Projesini destekleyen TÜBİTAK’a teşekkürlerini sunarlar.

### **Kaynaklar**

- [1] Üneş, F., Baraj Haznelerinde Yoğunluk Akımları İle Oluşan Dalma Noktasının Zamanla Değişiminin Matematik Modelle İncelenmesi, Teknik Dergi, 16, 4, 3657-3672, 2005.
- [2] Farrell, G.J. ve Stefan, H. G., Mathematical Modeling of Plunging Reservoir Flows, Journal of Hydraulics Research, 26, 525-537, 1988.
- [3] Akiyama, J. ve Stefan, G.H., Plunging Flow into a Reservoir: Theory, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110, 484-489, 1984.
- [4] Üneş, F., Investigation of density flow in dam reservoirs using a three-dimensional mathematical model including Coriolis effect, Computers & Fluids, 37, 1170-1192, 2008.
- [5] Üneş, F., Analysis of Plunging Phenomenon in Dam Reservoirs Using Three Dimensional Density Flow Simulations, Canadian Journal of Civil Engineering, 35, 1138-1151, 2008.
- [6] Alavian, V. ve Ostrowski, P., Use of Density Current to Modify Thermal Structure of TVA Reservoirs, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(5), 688-706, 1992.
- [7] Ford, D.E., Johnson, M.C. ve Monismith, S.G., Density Inflows to DeGray Lake, Arkansas, Second Int. Symp. On Stratified Flows, IAHR, Trondheim, Norway, 1980.
- [8] Hebbert, B., Imberger, J., Loh, I. ve Paterson, J., Collie River Underflow into the Wellington Reservoir, Journal of Hydraulics Div., ASCE, 105, HY5, 533-545, 1979.
- [9] Singh, B. and Shah, C.R., Plunging Phenomenon of Density Currents in Reservoirs, La Houille Blanche, 26, 5, 1971.

- [10] Farrell, G.J. ve Stefan, H.G., Buoyancy Induced Plunging Flow into Reservoirs and Coastal Regions, Project Report, No. 241, Minnesota, 1986.
- [11] Johnson, T.R., Farrell, G.J., Ellis, C.R. ve Stefan, H.G., Negatively Buoyant Flow in Diverging Channel: Part I: Flow Regimes, Journal Hydraulic Engineering, ASCE, 113, 716-730, 1987.
- [12] Johnson, T.R., Farrell, G.J., Ellis, C.R., ve Stefan, H.G., Negatively Buoyant Flow in Diverging Channel: Part II: 3-D Flow Field Regimes. Journal Hydraulic Engineering ASCE, 113, 731-742, 1987.
- [13] Ünes, F., Prediction of Density Flow Plunging Depth in Dam Reservoir: An Artificial Neural Network Approach, CLEAN - Soil, Air, Water, 38(3), 296 – 308, 2010.
- [14] Jain, S. C., Plunging phenomena in reservoirs, Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments, Minneapolis, June 2-5, p. 1429, 1980.
- [15] Savage, S.B. ve Brimberg, J., Analysis of Plunging Phenomenon in Reservoirs , Journal of Hydraulics Research, 13, s. 187, 1975.
- [16] Wunderlich, W.O., and Elder, R.A., “Mechanics of Flow Through Man-Made Lakes” Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects, W.C. Ackermann, G. F. White, and E. B. Worthington, eds., American Geophysical Union, Washington DC, 1973.
- [17] Üneş, F., Coriolis İvmesinin ve Hazne Çıkış Seviyesinin Haznelerdeki Dalmış Akıma Etkilerinin Matematik Modelle İncelenmesi, Doktora tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [18] DSİ Eğrekkaya Baraj Gölü ve Havzasında Kirlilik Araştırması Raporu, DSİ Genel Müdürlüğü Araştırma Raporu, 2001.
- [19] Launder, B.E. ve Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering , 3:269—289, 1974.
- [20] FLUENT 6.3 users Guide, FLUENT incorporated, 2008.
- [21] Patankar, S.V. ve Spalding, D.B., A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three Dimensional Parabolic Flows, International Journal Heat and Mass Transfer, 15, s.1787, 1972.