

Yoğun dalmış hazne akımlarının matematik modelle incelenmesi

Fatih ÜNEŞ*, Necati AĞIRALIOĞLU

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Baraj haznesine giren su ile haznedeki su arasındaki yoğunluk farkı, sıcaklık farklılığından yada askı maddesi veya çözülmüş madde konsantrasyonu farklılığından oluşabilir. Bu çalışmada, sadece sıcaklık farklılığından oluşan yoğunluk akımları, tabanı eğimli bir hazne boyunca, iki boyutlu matematik model kullanılarak incelenmiştir. Kararsız akım durumunda, süreklilik, hareket, enerji, ve türbülans model denklemleri kartezyen koordinat sisteminde çıkarılmıştır. Bu denklemler hazne akımının başlangıç ve sınır şartları için çözülmüştür. Akım alanında oluşan hızlar, sıcaklıklar, karışım oranları, dalma noktaları ve dalma derinlikleri, kontrol hacim kavramı ve sonlu farklar metodu kullanılarak Fluent 5.3 programı ile belirlenmiştir. Sonuçlar daha önce yapılan matematik model sonuçları ve deney ölçmeleri ile karşılaştırılmış ve grafikler halinde boyutsuz olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Baraj hazne akımı, dalmış akım, coriolis etkisi, matematik model.

Investigation of density plunging reservoir flow using mathematical modelling

Abstract

Density difference between inflowing and ambient waters may be due to a difference in temperature or concentration of dissolved or suspended substance. In this study, density flow, which will be occurring only due to a difference in temperature in a reservoir with a bottom slope is investigated by using two dimensional mathematical model. In the present model, nonlinear and unsteady continuity, momentum, energy and turbulence model equations are formulated in Cartesian coordinates. For the turbulence viscosity, $k-\epsilon$ turbulence model is used with an extension to include production or destruction of turbulent kinetic energy. The equations of the model are solved based on the initial and boundary conditions of the dam reservoir flow for a range of bottom slopes. Understanding of these flows is important from the point of view of water quality modeling, reservoir sedimentation studies, effluent mixing analyses and habitat in reservoirs. Velocities, temperatures, mixing rates as well as plunging points and plunging depths are determined using control volume concept and finite difference method using Fluent 5.3 software program. The results are compared with those of previous mathematical and experimental studies, and evaluated graphically in nondimensional form.

Keywords: Dam reservoir flow, plunging flow, coriolis effect, mathematical model.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Fatih ÜNEŞ. unes@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 45.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Coriolis ivmesinin ve hazne çıkış seviyesinin haznelerdeki dalmış akıma etkilerinin matematik modelle incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 06.01.2004 tarihinde dergiye ulaşılmış, 30.01.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Bir göl veya hazneye gelen su, çok seyrek olarak hazne içindeki su ile aynı yoğunluğa sahiptir. Bu yoğunluk farklılığı, sıcaklık farklarından, askı maddesi konsantrasyonundan veya çözülmüş madde konsantrasyonundan kaynaklanabilir. Gelen su, haznedeki sudan daha yoğun olduğu zaman, gelen akım, hazne suyunun altına dalar ve yoğunluk akımı olarak taban boyunca akar. Bu tip akımlar, haznenin değişik kısımlarında farklı isimler alırlar. Hazneye giren akım, dalma bölgesinde dalmış akım veya genel bir isimle yoğunluk akımı olarak adlandırılır. Akımın dalmasının bittiği kısımdan sonra oluşan akıma ise tabakalı akım veya taban akımı adı verilir.

Akımın su yüzeyinde daldığı yere, dalma noktası veya dalma çizgisi denilir. Dalmış akımdan dolayı haznedeki ters akımlar (sirkülasyon akımları) meydana gelir. Bu ters akımlardan dolayı, haznedeki yüzen cisimler belli bir bölgede toplanır. Dalma çizgisi, pratikte bu yüzen cisimlerin toplanmaya başladığı yer olarak tarif edilmektedir. Dalmış akımın olduğu, taban akımı ve giren nehir akımı arasında kalan geçiş bölgesine dalma bölgesi denilir. Bu bölgenin başlangıcı, dalma çizgisindeki H_p derinliği (dalma derinliği) veya dalma noktasının yeri (dalma noktasının hazne girişine mesafesi) şeklinde iki parametre ile ifade edilmektedir.

Baraj haznesindeki dalmış akımların, haznenin bir bütünü içerisinde belirlenmesi, haznenin su kalitesinin modellenmesi, haznedeki kumlanmanın belirlenmesi, oluşturulan hazne simülasyonları ile her noktadaki haznenin özelliklerini veren parametrelerinin yaklaşık olarak belirlenmesi, hazneye gelen akımın karışım etkilerinin incelenmesi, haznedeki kirlenmenin belirlenmesi açısından önemlidir.

Yoğunluk akımlarının arazide gözlemleri, Tennessee Vadisi haznelerinde Alavian ve Ostrowski (1992), DeGray Gölünde Ford ve Johnson (1980), ve Batı Avusturalya'da Wellington Baraj haznesinde Hebbert ve diğerleri (1979) tarafından araştırılmıştır. Tabanı eğimli

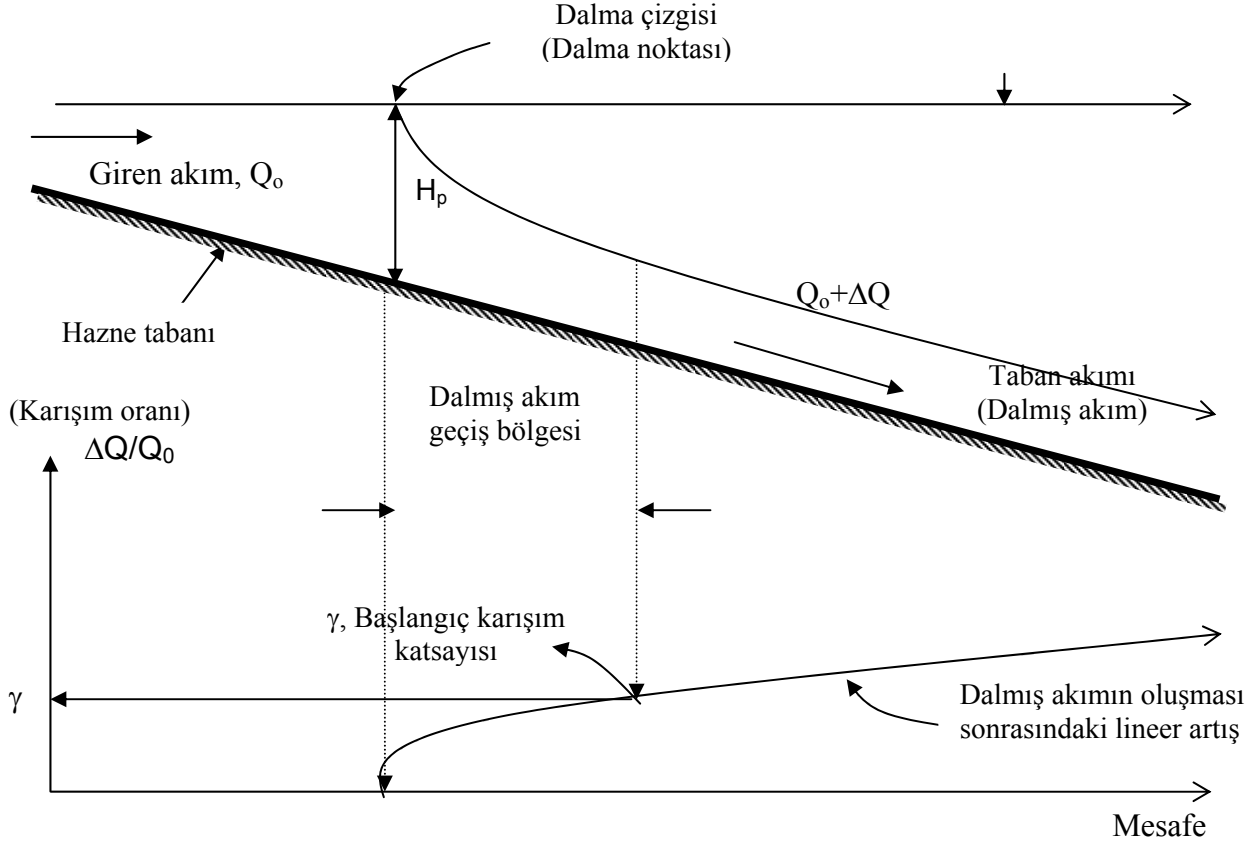
bir haznedeki yoğunluk akımlarının laboratuardaki deneysel ve nümerik çalışmaları, Singh ve Shah (1971), Savage ve Brimberg (1975), Akiyama ve Stefan (1984), Farrell ve Stefan (1986, 1988), Johnson ve diğerleri (1987), Bournet ve diğerleri (1999) tarafından deneysel ve matematik model ile çalışılmıştır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, çok az sayıda araştırmacı, dalma bölgesini haznenin bütünü içerisinde ele almıştır. Geçmişteki çalışmalarda haznedeki akım, bölümler halinde düşünülmüş, dalma bölgesi, iki tabakalı akım bölgesi, haznedeki karışımın miktarı ve türbülanslı akım durumu gibi başlıklar altında çalışılmıştır. Oysa dalmış akım ve dalma bölgesi haznedeki oluşan akımın önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Dalmış akımın yeri ve derinliği haznedeki oluşan akımın bir kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca baraj gövdesi yakınlarında oluşan akımın dalma bölgesindeki akımdan bağımsız olduğu düşünülemez.

Bu çalışmada dalmış hazne akımı, tabanı eğimli bir haznedeki türbülanslı akım şartlarında iki boyutlu matematik model kullanılarak araştırılmaktadır. Çalışmada yoğunluk akımının sebebi, hazneye giren ile haznedeki durgun su arasındaki sıcaklık farklılığı olduğu kabul edilmiştir ve meteorolojik etkiler göz ardı edilmiştir. Şekil 1'de iki boyutlu eğimli tabana sahip haznedeki bir dalmış akım durumu gösterilmiştir. Şekilde dalma noktası, taban akımı, başlangıç karışımı ve karışım oranı değişimi verilmektedir. Haznedeki dalma bölgesinde ki dalma çizgisindeki su derinliği H_p , çeşitli araştırmacılar tarafından özel olarak çalışılmıştır.

Singh ve Shah (1971), Savage ve Brimberg (1975), Akiyama ve Stefan (1984) ortalama akım karakteristiklerinden dalmış akım derinliğini tahmin etmek için teorik ilişkiler vermişlerdir.

Haznedeki dalmış akımın başladığı dalma çizgisindeki, dalma derinliği, (H_p) için verilen bağıntıların tümü, Farrell ve Stefan (1986, 1988) tarafından aşağıdaki genel formda verilmiştir.



Şekil 1. Dalmış akımın oluşumu, geçiş bölgesi ve karışım oranı değişimi

$$H_p = K \left(\frac{Q_0^2}{g'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Burada ;

H_p : Dalma noktasındaki su derinliği,

K : Katsayı,

Q_0 : Akarsudan hazneye gelen birim genişlik debisi,

g' : Etkili yerçekimi ivmesi olup,

$$g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (2)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Buradaki formülde;

g : Yerçekimi ivmesi,

$\Delta \rho$: Gelen su ile haznedeki su arasındaki yoğunluk farkı,

ρ_0 : Haznedeki suyun yoğunluğudur.

Singh ve Shah'ın deneysel verilerinde ve Farrell ve Stefan'ın çalışmalarında, dalma derinliğindeki K sabiti için $K=1.3$ değeri belirlenmiştir.

Dalma noktasının mansabındaki yoğunluk akımı ve taban akımının gelişimi Şekil 1'de gösterildiği gibi $\Delta Q/Q_0$ oranı ile değişmektedir (Farrell ve Stefan, 1988). ΔQ , haznedeki sirkülasyon akımından taban akımına her bir birim genişlikten sürüklenen akım oranıdır. $\Delta Q/Q_0$ oranı dalma çizgisinde sıfırdır, dalmış akım geçiş bölgesinde aniden büyür ve taban akımı olarak lineer bir şekilde artar. Geçiş bölgesi akımı, dalma çizgisindeki akım şartlarından taban akımı şartlarına getirir. Geçiş bölgesindeki karışım, γ başlangıç karışım katsayısı ile tanımlanmaktadır ve geçiş bölgesinin sonundaki $\Delta Q/Q_0$ oranının değeri ile belirlenmektedir. Farrell ve Stefan (1988) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda $1.16 F_N$ değeri için 0.1γ başlangıç karışım katsayısı belirlemişlerdir. Burada F_N yoğunluk Froude sayısıdır ve;

$$F_N = \frac{u}{\sqrt{g' \cdot h}} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada u taban akım hızı, h tabaka derinliği ve g' etkili yer çekimi ivmesidir ve yukarıda tanımlanmıştır.

Bu çalışmada dalmış akımlar kartezyen koordinat sistemindeki oluşturulan matematik model ile, geçmişte Singh ve Shah (1971)'in deneysel çalışmaları ve Farrell ve Stefan (1986)'ın silindirik koordinatlardaki matematik model sonuçları ile kontrol edilmiştir. Çalışmada oluşturulan akım simülasyonları, bu deneylerde uygulanan akım şartlarına göre oluşturulmuştur.

Dalmış akım ve taban akımı, türbülanslı ve kararlı akım durumunda modellenmiştir. Haznedeki akım, sirkülasyon, taban akımı ve dalmış akım gibi akımların bütününden oluşan karmaşık bir akım olması sebebi ile türbülans modeli olarak, $k-\epsilon$ modeli kullanılmıştır.

Matematik modeli oluşturan denklemler

Şekil 2'de matematik model simülasyonlarında kullanılan baraj haznesinin şekli, iki boyutlu alınarak kartezyen koordinat sisteminde verilmiştir.

Yapılan çalışmalarda ve matematik model denklemleri oluşturulurken, hazne serbest yüzeyi sabit kapak gibi düşünülmüş ve diğer sınırlarda uygun şartlar seçilmiştir.

Tabakalı akımın kaynağı olarak sıcaklık değişimi kabul edilmiştir. Yoğunluk-sıcaklık ilişkisi aşağıdaki eşitlik kullanılarak lineerleştirilmiştir ve yoğunluk değişimi (4) denklemi ile verilmiştir.

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \beta\rho_0 [T_0 - T] \quad (4)$$

Burada, T hazne suyunun sıcaklığı, T_0 ve ρ_0 haznede hesap yapılan kontrol hacim noktasındaki sıcaklık ve yoğunluğu, β ısı yayılım katsayısını göstermektedir ve $\beta = -(\Delta\rho/\rho_0)(1/\Delta T)$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada ΔT , giren su sıcaklığı ile yerel su sıcaklığı farkıdır.

Sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişki hareket denkleminde yerine yazılarak, Boussinesq ve hidrostatik basınç yaklaşımı yapılarak haznede dalmış akım olayını idare eden matematik model denklemleri çıkarılmıştır ve aşağıda son halleri verilmiştir.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

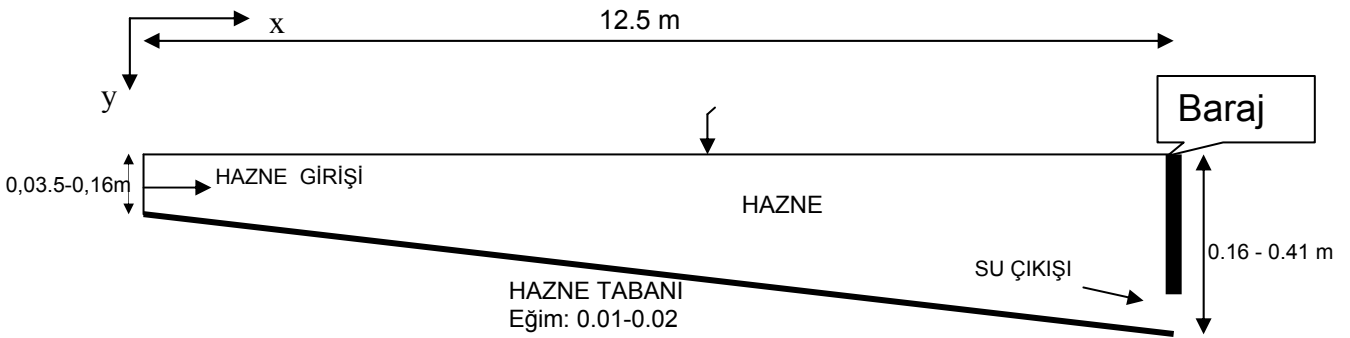
Hareket denklemleri;

x doğrultusu için;

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_{\text{eff}}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right) \quad (6)$$

y doğrultusu için;

$$\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial\bar{v}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial\bar{v}}{\partial y} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_{\text{eff}}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right) + g\beta(T_0 - \bar{T}) \quad (7)$$



Şekil 2. Deneysel ve çalışmadaki matematik model simülasyonlarında kullanılan hazne tipi

Enerji denklemi;

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \alpha_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

k - ε Türbülans modeli için denklemler;

k , türbülans kinetik enerjisini veren diferansiyel denklem:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P + G - \varepsilon \quad (9)$$

ε , türbülans kinetik enerjisi kaybını veren diferansiyel denklem:

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

P , türbülans kinetik enerji ile oluşan üretim;

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

G , yüzdürme veya tabakalı akım ile oluşan kaynak terim,

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

şekindedir. Burada, \bar{u} , x eksenine yönündeki hız bileşenlerinin zamansal ortalama hızını vermektedir. Aynı şekilde, \bar{v} , y eksenine yönündeki hız bileşenlerinin zamansal ortalamasıdır. Hareket denklemindeki ν_{eff} etkili türbülans viskozitesidir ve $\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_t$ olarak belirlenir. Burada, ν akışkanın viskozitesi, ν_t ise türbülans veya eddy viskozitesidir ve bir akışkan özelliği olmayıp, akım içerisinde noktadan noktaya değişir (Launder ve Spalding, 1972). ρ , akışkanın yersel yoğunluğu, g , yer çekimi ivmesi, p , indirgenmiş basınç terimidir.

Dalmış akım olayını sıcaklık oluşturduğundan sıcaklık için enerji denklemi yazılmıştır. Burada, \bar{T} , sıcaklığın zamansal ortalamasıdır. Burada α , ısı yayılımı veya difüzyon katsayısı olup, laminar akımda $\alpha = \nu / \text{Pr}$ ile belirlenir. Türbülanslı akımda ise $\alpha_{\text{eff}} = \frac{\nu}{\text{Pr}} + \frac{\nu_t}{\sigma_t}$ olarak belirlenir.

Burada, Pr boyutsuz Prandtl sayısı, ν kinematik viskozite, ν_t türbülans viskozitesi ve σ_t ise türbülans Prandtl sayısıdır (Farrell ve Stefan, 1986).

Haznede düşey yönde taşınımları belirlemek için k - ε modeli kullanılmıştır. k ve ε model denklemleri, yedi tane katsayı içermektedir. Bunlar, C_μ , σ_k , σ_ε , σ_t , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_3 katsayılarıdır. Bu sabitlerin değerleri Launder ve Spalding (1972) tarafından Tablo 1'deki gibi bulunmuştur (Farrell ve Stefan, 1986) ve makalede bu değerler kullanılmıştır.

Tablo 1. k ve ε modelinde alınan katsayılar

k ve ε modeli için tavsiye edilen sabit değerler						
C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_3	σ_k	σ_ε	σ_t
0.09	1.44	1.92	0.00	1.00	1.30	0.90

Modelde uygulanan sınır ve başlangıç şartları

Haznede dalmış akım alanının belirlenmesi için sınır şartları, haznenin giriş kesitinde, çıkış kesitinde, serbest yüzeyinde ve duvarlarda (baraj yüzeyinde) ayrı ayrı belirlenmelidir. Tabanı eğimli dalmış akım tipi, kararsız akım şartlarında olduğundan, her bir değişken için başlangıç alanlarının verilmesi gerekmektedir. Sınır ve başlangıç şartları her bir değişken için kendine özgü düşünülmelidir. Bundan dolayı akım, sıcaklık ve türbülans denklemleri için ayrı ayrı sınır ve başlangıç şartları verilmelidir. Burada hız ve sıcaklıklar için sınır ve başlangıç şartları verilmiştir.

Hız

Hazne serbest yüzeyinde, su yüzeyi sabit kapakmış gibi kabul edildiğinden, serbest yüzeyde hızlar için simetri şartı kabul edilir. Hazne

girişinde sınır şartı olarak, x yönünde üniform hız dağılışının olduğu ve y yönündeki hızların ise sıfır olduğu kabul edilmektedir. Katı cidarda, baraj gövdesi yüzeyinde ve baraj tabanında hızlar sıfır alınmaktadır. Çıkış kesitinde hızlar x yönünde ve giren akım hızı ile dengededir. Giren ve çıkan akım hazne yüzeyinin sabit kabul edilmesi dolayısı ile eşit kabul edilmektedir. Diğer bir kabul de çıkışta y eksenini yönündeki hızların sıfır olarak alınmasıdır.

Başlangıç sınır şartı olarak, hazne başlangıcındaki hız alanı, x eksenini yönünde mansaba doğru hızlardan meydana gelir ve baraj yüzeyine yakın noktalar hariç bütün noktalarda y yönündeki hızlar sıfır alınmaktadır. Modellerde kullanılmış olan, başlangıç ve sınır şartları için giriş hızları Farrell ve Stefan'ın (1986) deneylerinde belirlediği hızlardır.

Türbülans modelindeki k ve ϵ için kullanılan başlangıç ve sınır şartları; hız alanını belirlerken kullanılan başlangıç ve sınır şartları ile aynıdır.

Sıcaklık

Haznede sıcaklık için sınır şartı olarak; hazne tabanında ve serbest yüzeyde adiabatik ısı prensibi geçerli kabul edilmektedir. Baraj yüzeyindeki sıcaklık başlangıçtaki hazne su sıcaklığına eşit alınmaktadır. Bu sıcaklık şartı, akım haznede ilerledikçe çok kısa bir sürede değişecek ve önemini kaybedecektir. İlk bölümde belirtildiği gibi, haznede dalmış akımı oluşturan yoğunluk değişimi, giren nehir akımı ile haznedeki durgun su sıcaklığı farkından dolayı olmaktadır. Bundan dolayı haznede sıcaklık değişimlerinin deneylerde doğru bir şekilde ölçülmesi ve modellerde doğru girilmesi büyük önem arz etmektedir.

Başlangıç sınır şartı olarak, hazneye giren nehir akımının sıcaklığı sabit bir sıcaklık olarak alınmakta ve nehrin derinliği boyunca değişmemektedir. Başlangıçta hazne boyunca sabit bir T_0 sıcaklığının var olduğu kabul edilmektedir. Bu başlangıç değeri de akımın ilerlemesi ile değişmektedir.

İterasyon adımlarında seçilen zaman aralığı

Dalmış akım oluşumu kararsız bir akım çeşididir. Deneyde ve modelde uygulanan akım kesitinin

uzunluğunun ve alanın küçük olması sebebi ile modelde uygulanan iterasyon zamanı adım aralığı ilk aşamada 15 saniye ve 10 saniye seçilerek çalışılmıştır. Hazne uzunluğunun küçük olması sebebi ile 15 saniye iterasyon zamanı adım aralığı çok kaba kaldığı ve 10 saniye zaman adım aralığı ile yapılan modelleme çalışmalarının yeterli sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sebeple çalışmanın bu kısmında iterasyon adımları için 10 saniye zaman aralığı seçilmiştir.

Sayısal yöntemler ve hesap detayları

Yukarıda belirlenen matematik modeli oluşturan denklemler uygun sınır ve başlangıç şartlarında, ticari bir program olan, Fluent 5.3 paket programı kullanılarak çözülmüştür. Gambit isimli çizim programı ile Şekil 2'deki hazne durumları için model simülasyonları ve hesap ağı oluşturulmuştur.

Çözüm yöntemi olarak kontrol hacim yaklaşımı kullanılmıştır. Bu metotta, çalışma alanı ardışık kontrol hacimlerine bölünür. Her bir kontrol hacminde matematik modeli oluşturan denklemlerin toplamı sıfır olacak şekilde, çözüm için anlık lineer denklemlerin bir serisi oluşturularak denklemler sayısallaştırılır. Kontrol hacim yüzeyleri boyunca akılar, Patankar (1980) tarafından tanımlanan *power law* şeması kullanılarak hesaplanmıştır.

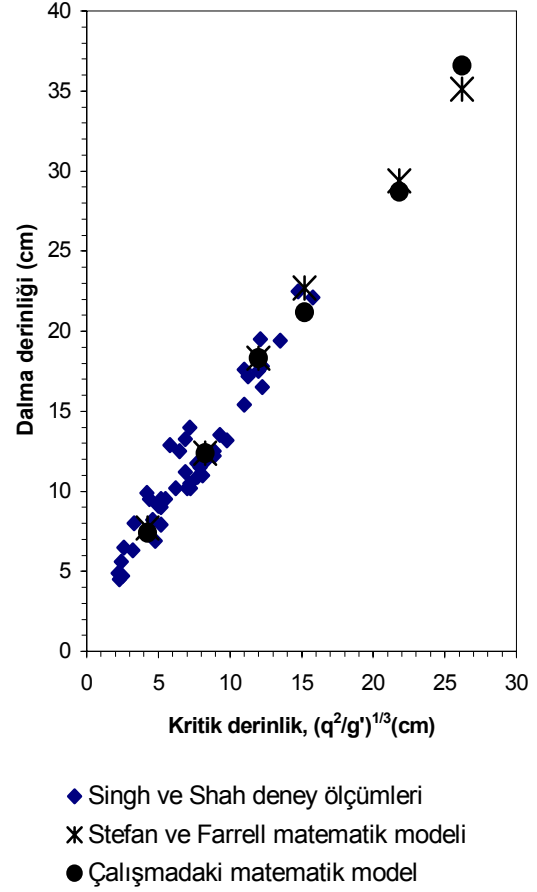
Hız alanlarının hesabında, hem hız alanlarının hem de basınç alanlarının bilinmemesinden dolayı hız – basınç iç bağımlılığı ile ortaya çıkan problem, Patankar ve Spalding'in (1972) SIMPLE yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu metotta; tahmini basınç alanları alınarak elde edilen düzeltilmiş basınç değerleri kullanılır. Hareket denklemlerinde tahmini basınç değerleri için ortaya çıkan hız alanları, her bir kontrol hacminde kütle dengesinden yola çıkılarak çözüm elde edilir. Dalmış akım, kararsız akım türünde olduğundan, kapalı şema kullanılarak çözüm elde edilmiştir.

Uygulama ve değerlendirmeler

Bu çalışmada oluşturulan matematik modelin doğruluğu, Singh ve Shah'ın (1971) yapmış oldukları deney ölçüm sonuçları, Farrell ve

Stefan'ın (1986) matematik model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Singh ve Shah (1971)'deki çalışmalarından çıkarılan deney sonuçları ve Farrell ve Stefan'ın (1986, 1988) matematik model çalışmaları, dalmış hazne akımının incelenmesinde en önemli çalışmalardandır.

Tablo 2'de (2), (3), (4), (5) ve (6) sütunlarda verilen akım şartlarında, altı değişik hazne tipi için matematik model simülasyonları oluşturularak, her bir akımın dalmaya başladığı durumdaki simülasyon modellerinden dalma derinlikleri çıkarılmış ve (10). sütunda verilmiştir. Tablo 2'nin (9). sütununda Farrell ve Stefan'ın Silindirik koordinat sistemindeki matematik modelle buldukları dalma derinlikleri verilmektedir. İki model arasındaki fark (11). sütunda verilmektedir. İki model arasındaki en yüksek fark SSHAH6 da %7 olarak bulunmuştur. Fakat genel itibarı ile deney sonuçları ve model sonuçları oldukça uyumlu çıkmıştır. Bu çalışmadaki matematik model sonuçları, Farrell ve Stefan'ın silindirik koordinatlardaki matematik model sonuçları ile Singh ve Shah'ın deney ölçüm sonuçları Şekil 3'te de grafik olarak verilmektedir. Şekilde dalma derinlikleri, kritik derinliklere karşı çizilmiştir. Benzer karşılaştırma Singh ve Shah (1971) tarafından ilk defa kullanılmıştır.



Şekil 3. Bulunan dalma derinliklerinin önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Tablo 2. Matematik modeller ile elde edilen dalma derinlikleri

Çalışma No:	Hazne Taban Eğimi	Giren akımın derinliği (cm)	Giren akımın hızları (cm/s)	Giren Akım Debisi (q) (cm ³ /cm/s)	To (°C)	Tgir (°C)	Kritik derinlik $(q^2/g)^{1/3}$ (cm)	Stefan ve Farrell'in matematik model dalma derinliği (cm)	Bu çalışmada matematik model sonuçları (cm)	Model sonuçları arasındaki fark (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
SSHAH2	0.01	3.5	3.22	11.3	25	15	4.24	7.7	7.4	4
SSHAH3	0.0104	8.3	3.71	30.8	25	15	8.27	12.4	12.4	0
SSHAH4	0.02	16	5.95	95.3	18	15	26.2	35.1	36.6	-4
SSHAH5	0.02	16	3.7	59.2	17	15	21.8	29.4	28.7	2
SSHAH6	0.02	8	5.3	42.1	18	15	15.2	22.7	21.2	7
SSHAH7	0.02	8	3.7	29.6	18	15	12	18.3	18.3	0

Şekil 3'ten de görüldüğü gibi deney sonuçları ile model sonuçları uyumlu çıkmıştır. Akımların, Fluent 5.3 programında ve türbülanslı akım şartlarında model sonuçları oluşturulduğunda; başlangıçta hazne içerisindeki bütün noktalarda akımı oluşturan hızlar mansaba doğru oluşur ve sıcaklığı daha yüksek olan haznedeki hareketsiz su mansaba doğru yer değiştirir. Süre ilerledikçe, hazneye giren ve sıcaklığı haznedeki durgun suyun sıcaklığından daha az olan soğuk su akımı, ılık hazne suyunun içerisine doğru yayılmaya başlar ve bu ilerleme ile birlikte, hazne yüzeyinde küçük bir sirkülasyon akımı bölgesi oluşumu görülmektedir. Oluşturulan akımın süresinin daha ilerlemesi ile bu sirkülasyon akımı büyür ve gelen soğuk su akımı bu sirkülasyon akımının altına doğru batarak hazne tabanına doğru ilerleyerek dalmış akımın başlangıcını oluşturur. Bu akımın zamanla ilerlemesi ile hazne tabanı boyunca dalmış taban veya yoğunluk akımı oluşur. Sonuçta akım hazne tabanı boyunca yoğunluk akımı olarak ilerleyerek barajın gövdesine varmaktadır. Tabandaki akımın ilerlemesi ile haznedeki dalmış akımın üstündeki ılık su tabakasının tümü de sirkülasyon akım bölgesi olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2'de verildiği gibi matematik model simülasyonları, altı değişik hazne model simülasyonu için oluşturulmuştur. Bu akımlar zamana bağımlı, yani kararsız akım olduğundan dolayı Fluent 5.3 de istenilen zaman adımı için sonuçlar elde edilmiştir. Bu simülasyonlardan SSHAH2 için elde edilenlerden bir kaçı aşağıda verilmektedir.

Türbülans viskozitesinin haznedeki değişimi SSHAH2 nolu deney için Şekil 4'te 600 saniyede akım alanlarında oluşan eş türbülans viskozitesi eğrileri ile verilmektedir.

600. saniyede, haznede dalmış akımın tam olarak oluştuğu ve taban akımının baraj gövdesine ulaştığı, yani haznenin tümünde bir sirkülasyon akımının oluştuğu durumda elde edilen eş türbülans viskozitesi eğri değerleri verilmektedir. Şekil 4'ten de görülebileceği gibi, haznede dalma hareketinin ve taban akımının oluştuğu alanda türbülans viskozitesinin değeri 10^{-3} kg/m-s seviyelerindedir. Fakat hazne girişinde ve baraj göv-

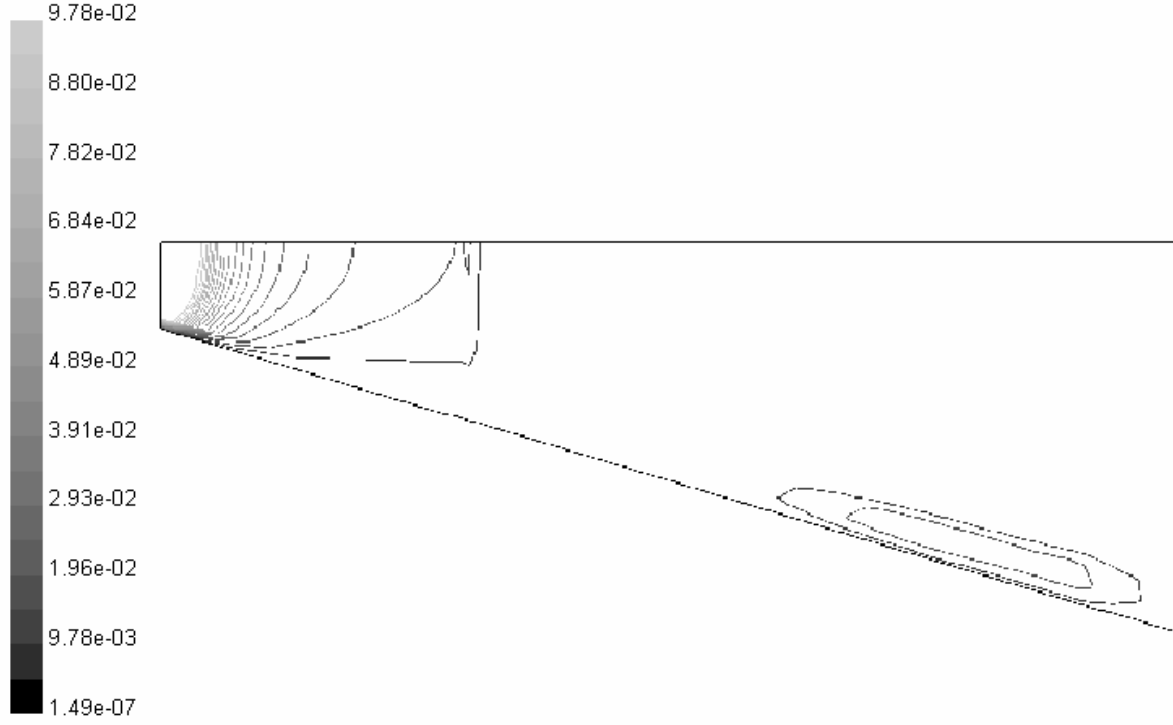
desi yakınlarında bu değer 10^{-1} seviyesindedir. Bu da göstermektedir ki, yoğunluk değişimleri v_t değerinin düşük değerlerdeki bölgelerinde oluşmaktadır. Haznedeki dalmış akım hareketi de, v_t değerinin bu düşük değerlerde olduğu alanlarda, yani yoğunluk değişiminin ve sıcaklık karışımının olduğu dalmış ve taban akımı bölgesinde gelişmektedir.

Şekil 5(a) ve (b) de haznede dalmış akımın başladığı ve dalmış akımın tam olarak geliştiği durumda oluşan hızlar vektörel olarak verilmektedir.

Şekil 5(a)'da SSHAH2 nolu deney için, akım başladıktan 240 saniye sonra haznede akımın gelişimi, akım alanında oluşan hız vektörleri ile verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi akımın 240. saniyesinde, dalmış akım hareketi başlamış ve dalma bölgesinin üzerinde küçük bir sirkülasyon bölgesi oluşmuştur. Haznede, sirkülasyon bölgesi haricinde, hızların tümü menbada doğru hareket etmektedir ve dalmış taban akımının olduğu kısımlarda 2.5-3.0 cm/s arasında değişmektedir. Oluşan küçük sirkülasyon bölgesinde ise hızlar çok küçük değerlerdedir. Şekil 5(b)'de SSHAH2 nolu deney için, 600 saniye sonra haznede taban ve sirkülasyon akımının tam oluşması durumunda, akım alanında oluşan hız vektörleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi oluşan dalmış yoğunluk akımı hazne tabanı boyunca baraj gövdesine kadar akarak, haznenin tümünde taban akımını ve üzerinde sirkülasyon akımını oluşturmaktadır. Haznede taban akımı baraj gövdesine varmış ve taban akımı hızları 4.60 cm/s seviyelerine ulaşmıştır. Sirkülasyon bölgesi, haznede dalmış akımın oluştuğu tüm alanı kaplamış ve 1.5 cm/s hıza ulaşmıştır.

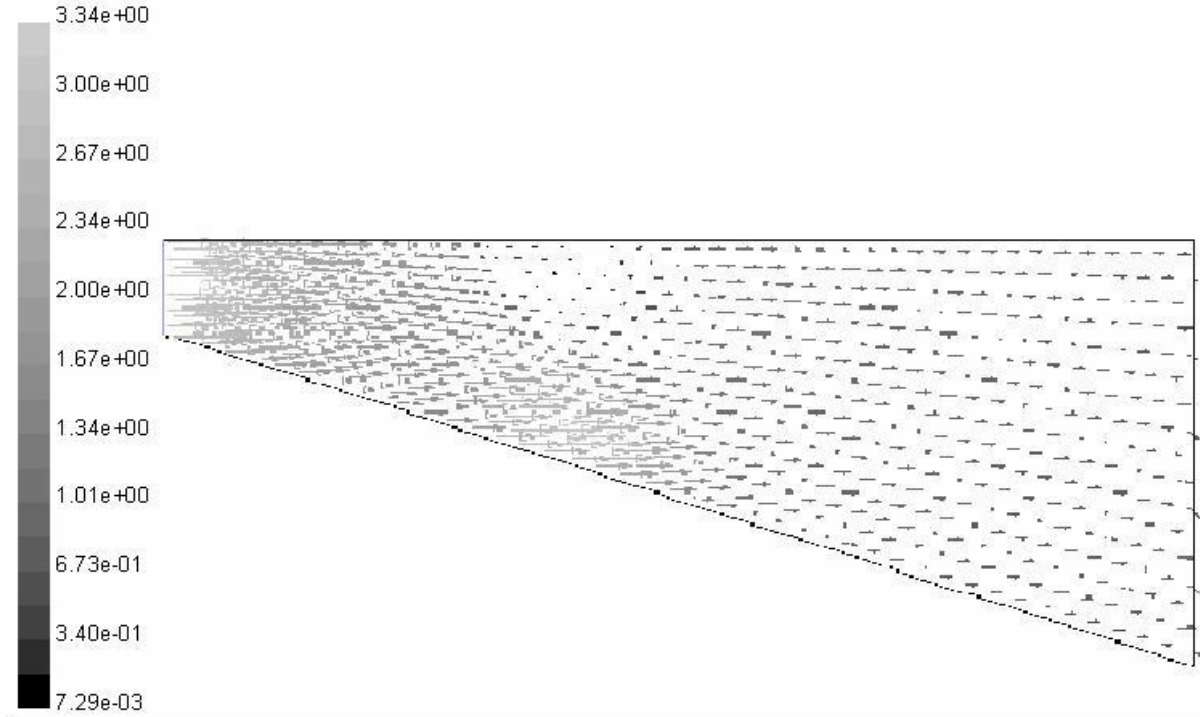
Şekil 6'da 600. saniyede akım alanında oluşan hızlar eş hız eğrileri ile verilmektedir. Aynı şekilde Şekil 7'de 600üncü saniyede haznede sirkülasyon akımının ve dalmış akımın tam oluştuğu durum için eş sıcaklık eğrileri verilmektedir. Şekil incelendiğinde, taban akımı hazne boyunca oluşmakta ve sıcaklığı da, giren akımın sıcaklığı civarında değişmektedir. Bununla birlikte, haznedeki sıcaklık değişiminin, sirkülasyon bölgesi ile taban akımı arasındaki sürüklenme bölgesinde oluştuğu görülmektedir.

Yoğun dalmış hazne akımları



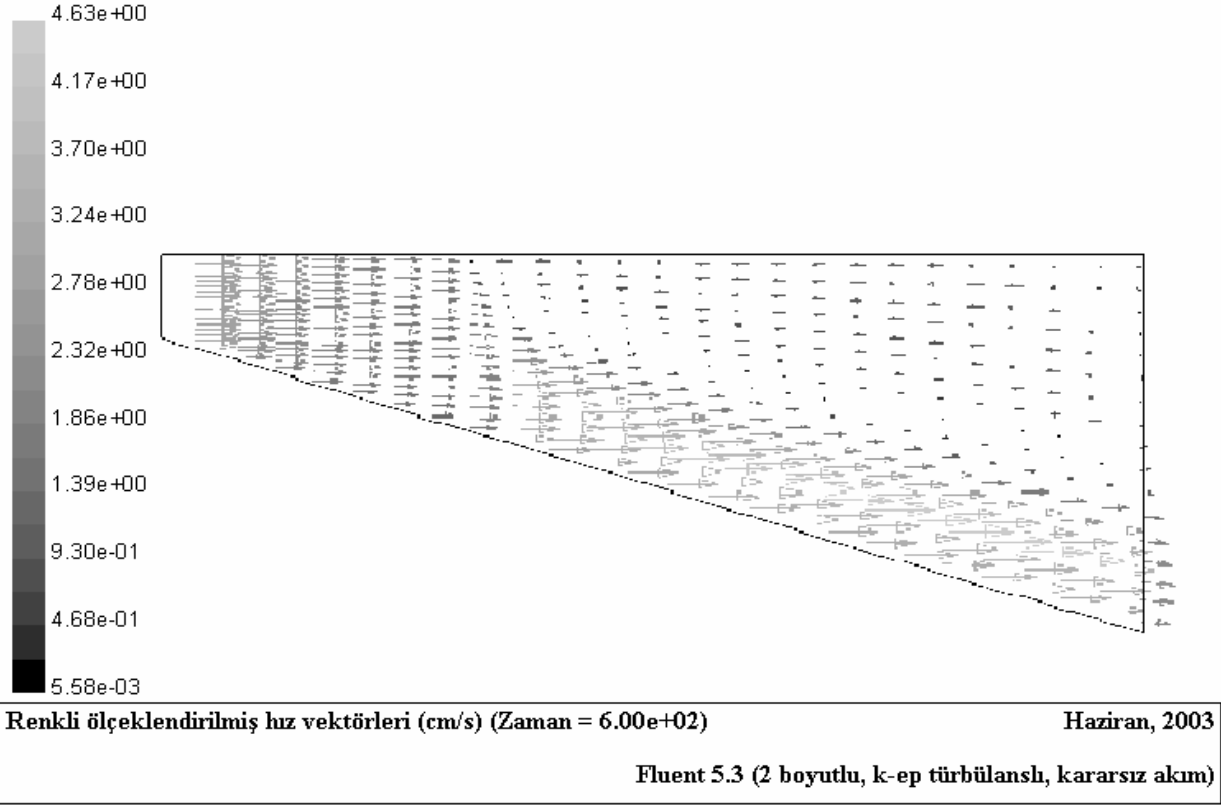
Renkli ölçeklendirilmiş eş türbülans viskozitesi eğrileri (kg/m-s) Zaman= 6.00e+02 Haziran, 2003
Fluent 5.3 (2 boyutlu, k-ep türbülanslı, kararsız akım)

Şekil 4. SSHAH2 nolu deneyin 600. saniyesinde haznede dalmış akım oluştuğu durum için akım alanında eş türbülans viskozite eğrileri

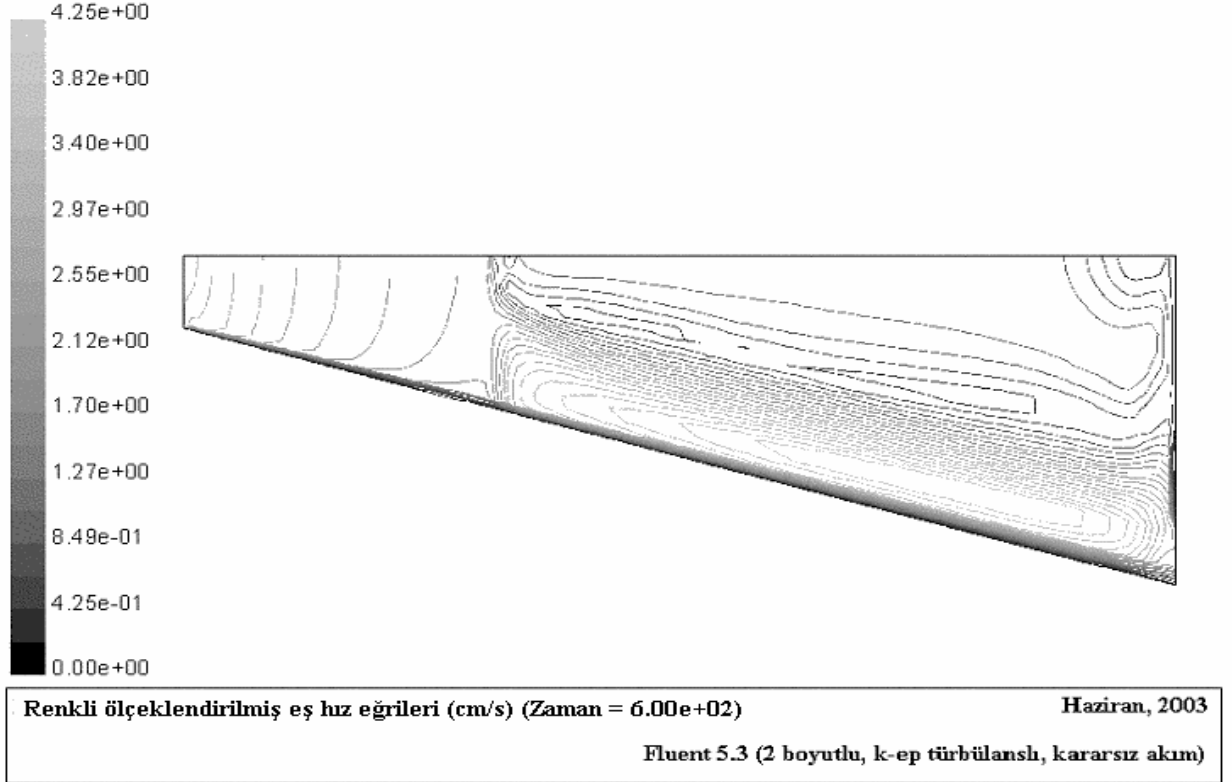


Renkli ölçeklendirilmiş hız vektörleri (cm/s) (Zaman = 2.40e+02) Haziran, 2003
Fluent 5.3 (2 boyutlu, k-ep türbülanslı, kararsız akım)

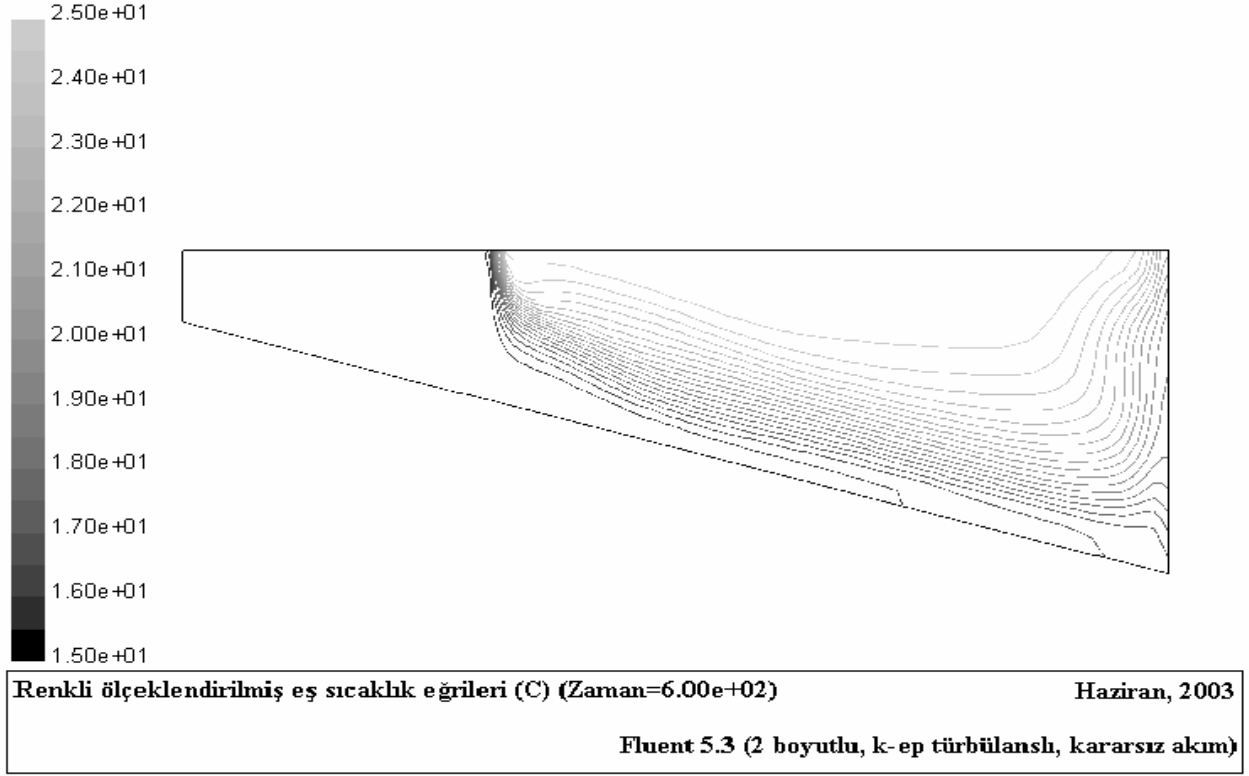
Şekil 5(a). SSHAH2 nolu deney şartları için 240. saniyede haznede oluşan akım alanında hızlar



Şekil 5(b). SSHAH2 nolu deney şartları için 600. saniyede haznede oluşan akım alanında hızlar



Şekil 6. SSHAH2 nolu deney şartları için 600. saniyede haznede taban ve sirkülasyon akımının tam oluşması durumunda akım alanında eş hız eğrileri



Şekil 7. SSHAH2 nolu deney şartları için 600. saniyede haznede sirkülasyon akımının ve dalmış akımın tam oluştuğu durum için eş sıcaklık eğrileri

Akımın eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, bu eğrilerin akımın hız eğrileri ile çok uyumlu olduğu izlenmektedir. Ayrıca, eş sıcaklık eğrilerinden dalmış hazne akımının oluşumu da çok açık bir şekilde görülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada tanımlanan matematik model deneylerde kullanılan dalmış hazne akımlarının simülasyonlarına uygulanmıştır. Bu simülasyonlar ile dalmış hazne akımının ve haznede oluşan sirkülasyon akımlarının gelişimi ve bu akımların gelişimi ile hız, sıcaklık, viskozite ve benzeri parametrelerindeki değişim hakkında faydalı bilgi vermektedir.

Bu çalışmalar sonucunda elde edilen dalma derinlikleri deney sonuçları ve dalmış akım dinamiği ile uyumlu çıkmıştır. Bu tip model çalışmaları, hazne modellemesinde, hazne tabanında oluşan akımın belirlenmesinde, haznedeki su kalitesi modellemesinde kullanılabilir. Bu sebep ile bu tip model çalışmaları geliştirilerek,

gerçek hazne boyutları için uygulama yapılması, çalışmanın ileri aşamalarında düşünülmektedir. Bu konudaki çalışmalar devam etmektedir.

Kaynaklar

- Akiyama, J. ve Stefan, G.H., (1984). Plunging Flow into a Reservoir: Theory, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110, 484-489.
- Alavian, V. ve Ostrowski, P., (1992). Use of Density Current to Modify Thermal Structure of TVA Reservoirs, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **118**, 5, 688-706.
- Bournet, P.E., Dartus, D., Tassin, B. ve Vincon-Leite, B., (1999). Numerical Investigation of Plunging Density Current, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125, 584-594.
- Farrell, G.J. ve Stefan, H.G., (1986). Buoyancy Induced Plunging Flow into Reservoirs and Coastal Regions, *Project Report*, No. 241, Minnesota.
- Farrell, G.J. ve Stefan, H. G., (1988). Mathematical Modeling of Plunging Reservoir Flows, *Journal of Hydraulics Research*, 26, 525-537.
- Ford, D.E., Johnson, M.C. ve Monismith, S.G., (1980). Density Inflows to DeGray Lake, Arkansas,

- 2nd *International Symposium on Stratified Flows*, IAHR, Trondheim, Norway.
- Hebbert, B., Imberger, J., Loh, I. ve Paterson, J., (1979). Collie River Underflow into the Wellington Reservoir, *ASCE Journal of Hydraulics Division*, ASCE, 105, HY5, 533-545.
- Johnson, T.R., Farrell, G.J., Ellis, C.R. ve Stefan, H.G., (1987). Negatively Buoyant Flow in Diverging Channel: Part I: Flow Regimes, *Journal Hydraulic Engineering*, ASCE, 113, 716-730.
- Launder, B.E. ve Spalding, D.B., (1972). *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, Newyork.
- Patankar, S.V., (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flows*, McGraw-Hill, Newyork.
- Patankar, S.V. ve Spalding, D.B., (1972). A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three Dimensional Parabolic Flows, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 15, 1787.
- Savage, S.B. ve Brimberg, J., (1975). Analysis of Plunging Phenomenon in Reservoirs, *Journal of Hydraulics Research*, 13, 187.
- Singh, B. ve Shah, C.R., (1971). Plunging Phenomenon of Density Currents in Reservoirs, *La Houille Blanche*, 26, 59-64.