

تخمین استغراق بحرانی در آبگیر سد آیدوغموش با کاربرد مدل FLUENT

شبنم پرتوی آذر¹، داود فرسادی زاده^{3*}، علی حسین زاده دلیر³، فرزین سلماسی² و علی اشرف صدرالدینی³

تاریخ دریافت: 87/5/29 تاریخ پذیرش: 88/1/18

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

2-3- استادیار و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه E-mail: Farsadi@tabrizu.ac.ir

چکیده

آبگیرها جهت انحراف آب برای مقاصد مختلف از جمله کشاورزی، آبرسانی شهری، صنایع و تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. سازه آبگیر در شرایط استغراق کم می‌تواند مستعد وقوع گرداب باشد. استغراق کافی برای جلوگیری از ایجاد گرداب و مقابله با محبوس شدن هوا در آبگیرها ضروری است. در این تحقیق، جریان ورودی به سیستم آبگیر سد آیدوغموش با استفاده از مدل *FLUENT* به روش عددی حجم محدود در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده از این مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی آبگیر مورد مقایسه قرار گرفت. سیستم آبگیر سد آیدوغموش شامل برج آبگیر به ارتفاع 40 متر می‌باشد که دارای چهار تراز آبگیری است. خصوصیات جریان در چهار حالت از آبگیری (بازشدگی دریچه‌های 1، 2، 3 و 4) بررسی شد و مقادیر ارتفاع پیزومتریک و سرعت جریان در نقاط مختلف برج توسط مدل *FLUENT* محاسبه گردید. حداقل خطای برآورد تراز پیزومتریک با معیار *RMSE* برابر با 0/13 متر، حداکثر مقدار آن 2/42 متر و مقدار میانگین آن 0/67 متر بود. مقدار استغراق بحرانی برای چهار وضعیت از بازشدگی دریچه‌های 1، 2، 3 و 4 با استفاده از معیار ناس در شرایط نرمال برابر با 3/96 متر بدست آمد. براساس نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی و مدل *FLUENT*، مقدار استغراق بحرانی به شرایط هیدرولیکی در آبگیر بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: آبگیر، استغراق بحرانی، گرداب، مدل *FLUENT*

Estimation of Critical Submergence at Intake System of Aydoghmush Dam Using FLUENT Model

S Partovi Azar¹, D Farsadizadeh^{3*}, A Hosseinzadeh Dalir³, F Salmasi², AA Sadraddini³

Received: 19 August 2008 Accepted: 07 April 2009

¹Former MSc. Student, Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

^{2,3}Assist. and Assoc. Prof., Water Engin. Dept., Univ. of Tabriz, Iran.

*Corresponding author: E-mail: Farsadi@tabrizu.ac.ir

Abstract

Intakes are applied to divert water for agricultural, urban and industrial uses and to produce electricity. Vortices may occur at intakes in the case of insufficient submergence. In order to prevent the occurrence of vortices and air entrainment in intakes, an adequate submergence is required. In this study, flow characteristics at intake system of Aydoghmush Dam were investigated at different hydraulic conditions using finite volume numerical method through FLUENT model. Results were compared with the physical model measurements. Intake system of Aydoghmush Dam consists of an intake tower which is 40 meters high. There are four intake levels in the tower. Flow characteristics in four cases (i.e. gates No.1 to No.4 at opening states) were investigated. Piezometric heads and velocity values were computed using FLUENT model. Minimum, maximum and average RMSE of piezometric head were 0.13m, 2.42m and 0.67m, respectively. Critical submergence through Knauss criterion for gates No.1 to No.4 at opening states was 3.96 meters in the normal condition. The results from both physical and FLUENT model indicated that the critical submergence would depend on hydraulic conditions in intake structure.

Keywords: Critical submergence, FLUENT model, Intake, Vortex

مقدمه

گرداب باشد. ایجاد گرداب در سازه‌های هیدرولیکی دارای اثرات زیان‌باری از جمله حبس هوا، افزایش افت بار و کاهش راندمان انتقال آب، ایجاد خلاء و ارتعاش می‌باشد. بنابراین استغراق کافی برای جلوگیری از ایجاد گرداب، مقابله با محبوس شدن هوا و ایجاد جت متحرک در آبگیرها ضروری است. این استغراق را استغراق حد یا بحرانی می‌گویند. استغراق بحرانی به مشخصات

انحراف آب از مسیر اصلی آن برای مقاصد مختلف از جمله کشاورزی، آبرسانی شهری، صنایع، تولید برق و غیره با کمک آبگیرها صورت می‌گیرد (بیرامی 1382). تعیین ارتفاع تراز دهانه ورودی و خروجی آبگیر و مجرای انتقال آب، با تراز آب در مخزن در ارتباط است و به عوامل متعدد دیگری نیز بستگی دارد. به طور کلی سازه آبگیر در شرایط استغراق کم می‌تواند مستعد وقوع

پروفیل سطح آب برای گرداب‌های دارای هسته هوا در آبگیرها استنتاج شد. این معادلات از طریق اصلاح معادلات سرعت مماسی گزارش شده توسط هایت و میخ (1994) به دست آمدند. جهت تعیین استغراق بحرانی در آبگیرها، می توان تاثیرات چرخش و عدد فرود را بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات ناس (1987) با عدد چرخش ترکیب نمود (شمسایی 1383). ناس (1987) بر اساس آزمایشات گوردون (1970) و هکر (1981) حداقل استغراق آبگیرها را با شرایط تقرب نرمال ارائه داده است. اُدگارد (1986) مدل گرداب رانکین را به عنوان مبنای معادله‌ای برای تعیین استغراق بحرانی آبگیرها مورد استفاده قرار داد. او با فرض حرکت سیال در اطراف محور قائم به صورت ماندگار، متقارن محوری و ورقه‌ای، معادلات پیوستگی و مومنتم در جهت‌های مختلف را برای سیال غیر قابل تراکم برقرار کرد و با تعریف مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های مختلف معادلات حرکت را حل نمود.

محاسبه جزئیات جریان سیال در یک سازه با مشخصات هندسی پیچیده به روش تحلیلی بسیار مشکل می‌باشد. زیرا حل هم‌زمان معادلات مومنتم، پیوستگی و گاهی اوقات معادله انرژی به روش تحلیلی با شرایط مرزی و اولیه تعریف شده در غالب موارد امکان‌پذیر نمی‌باشد. بسیاری از مسائل پیچیده مربوط به جریان سیال را می‌توان با استفاده از مفاهیم دینامیک سیالات و با کاربرد روش‌های عددی مانند تفاضلات محدود، المان‌های محدود، حجم محدود و یا تکنیک‌های تفاضلی دیگر حل نمود. مارکانو و همکاران (2004) تشکیل گرداب در آبگیرها را توسط مدل دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD مورد بررسی قرار دادند.

هدف از این تحقیق، تحلیل جریان در آبگیر سد آیدوغموش با کاربرد مدل FLUENT برای تعیین استغراق بحرانی در ترازهای مختلف آبگیری جهت بررسی امکان وقوع گرداب و ایجاد فشارهای منفی در داخل آبگیر می‌باشد. نتایج به دست آمده از مدل

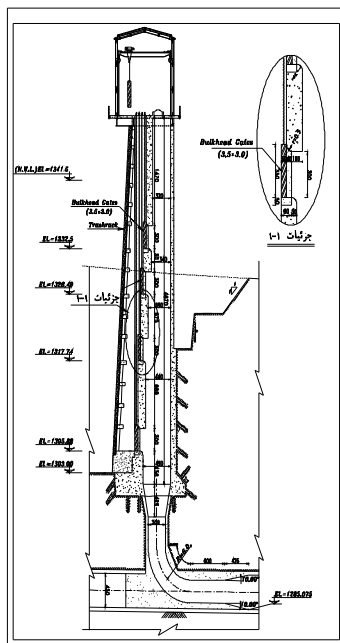
فیزیکی آبگیر و شرایط جریان وابسته بوده و تعیین مقدار آن برای هر آبگیر نیاز به بررسی دقیق جریان ورودی به آبگیر دارد.

بررسی‌های متعددی برای تعیین استغراق بحرانی و جلوگیری از ایجاد جریان گردابی انجام شده است. نتیجه برخی از این تحقیقات در قالب معادلات تجربی بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی، برخی براساس حل تحلیلی معادلات ساده شده جریان گردابی در شرایط ایده‌آل و برخی دیگر بر اساس حل عددی معادلات پیوستگی و مومنتم با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است. به منظور تعیین استغراق بحرانی برای جلوگیری از ایجاد گرداب همراه با مکش هوا در آبگیر کانال‌ها با جریان یکنواخت، یک روش تحلیلی به صورت ترکیب خروجی نقطه‌ای¹ و جریان یکنواخت کانال در شرایط ایده‌آل توسط ایلدیریم و کجاباش (1995) پیشنهاد شده است. تاثیر محدوده لوله آبگیر به صورت مرزهای غیر قابل نفوذ و محل آن‌ها بر استغراق بحرانی در یک آبگیر لوله‌ای توسط ایلدیریم و کجاباش (2002) مورد بررسی قرار گرفت. ایلدیریم و همکاران (2000) تاثیر محدوده لوله آبگیر به صورت مرزهای غیر قابل نفوذ و محل آن‌ها را در حالت‌های مختلف قرارگیری لوله آبگیر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای هر حالت سطح خالص رویه کروی- بحرانی خروجی² یا CSSS را محاسبه کرده و با کاربرد آن در معادله پیوستگی، استغراق بحرانی آبگیر را تعیین نمودند. ایلدیریم و کجاباش (1998) استغراق بحرانی در آبگیرهای واقع در آب ساکن مخازن را نیز مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که رویه کروی- بحرانی خروجی یا CSSS تعریف شده برای آبگیر کانال‌های با جریان یکنواخت و ایده‌آل را می‌توان در مورد این آبگیرها نیز به‌کار برد. همچنین، معادلاتی توسط هایت و میخ (1994) جهت تعیین سرعت‌های مماسی، شعاعی و محوری و

¹Point sink

²Critical spherical sink surface (CSSS)

4/5 متر به مسیر خود ادامه می دهد (بی نام 1380). مقطع طولی برج آبگیر در شکل 1 نشان داده شده است



شکل 1- مقطع طولی برج آبگیر سد آیدوغموش

مدل فیزیکی آبگیر سد

مدل فیزیکی سیستم آبگیر سد آیدوغموش با مقیاس 1:20 توسط مرکز تحقیقات منابع آب وزارت نیرو ساخته شده است. این مدل شامل کانال‌های ورودی به برج آبگیر، برج آبگیر به صورت کامل با دریچه‌ها و ریل‌ها و آشغالگیر و تبدیل انتهای برج و بخشی از تونل به طول 0/8 متر در مدل و 16 متر در نمونه اصلی می باشد. تعدادی پیزومتر روی بدنه برج آبگیر، محل دریچه‌ها، تبدیل انتهای برج، تونل با خم 90 درجه، تبدیل بعد از آن و تونل با قطر 4/5 متر در مکان‌های مختلف برای اندازه‌گیری فشار هیدرواستاتیک نصب گردیده است. اندازه‌گیری سرعت با استفاده از سرعت‌سنج میکرو انجام شده و تراز سطح آب در مخزن به وسیله اشل مدرج اندازه‌گیری گردیده است (بی نام 1380).

با *FLUENT* نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در مدل فیزیکی برای سیستم آبگیر سد آیدوغموش مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

سیستم آبگیر سد آیدوغموش

سد مخزنی آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی در 170 کیلومتری جنوب شرقی تبریز و 30 کیلومتری جنوب غربی شهرستان میانه بر روی رودخانه آیدوغموش از سرشاخه‌های اصلی قزل اوزن احداث می‌گردد. سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی به ارتفاع 87 متر از روی سنگ بستر می‌باشد. برای انحراف رودخانه در حین ساختمان سد از دو تونل به قطر 4/5 متر در جناح راست و چپ استفاده می‌شود که طول آن‌ها به ترتیب 333/7 و 313/8 متر است. همچنین شیب آن‌ها به ترتیب برابر با 0/00723 و 0/01035 می‌باشد. پس از تکمیل ساختمان سد، از تونل انحراف سمت راست به عنوان تخلیه کننده عمقی و از تونل سمت چپ به عنوان آبگیر برای آبیاری و شرب بهره گرفته خواهد شد. سیستم آبگیری از سد قادر به تأمین حداکثر 20 متر مکعب بر ثانیه آب مورد نیاز کشاورزی می‌باشد. سیستم آبگیر سد آیدوغموش شامل برج آبگیری به ارتفاع 40 متر می‌باشد که دارای چهار تراز آبگیری به ترتیب برابر با 1305/88، 1317/74، 1326/49، 1332/5 متر است. آبگیری از چهار تراز مذکور توسط دریچه‌هایی به ابعاد 3×3/5 متر انجام می‌گیرد. ورودی مجرای آبگیر در هر 4 تراز دارای مقطع مربعی شکل به ابعاد 3×3 متر می‌باشد. سطح مقطع برج از بالا به پایین به تدریج افزایش یافته و در انتها توسط تبدیلی به طول 4/25 متر با زاویه جمع شدگی 12/6° به لوله‌ای به قطر 3 متر تغییر مقطع می‌دهد. جریان عبوری از تبدیل و لوله مذکور توسط زانوئی 90° درجه‌ای به شعاع انحناء 6 متر وارد مسیر لوله به قطر 3 متر شده و پس از تبدیل به تونل به قطر

شامل جمله‌های منبع مربوط به مدل مثل محیط متخلخل و منابع تعریف شده دیگر می‌باشد.

تانسور تنش، $\bar{\tau}$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\tau} = m \left[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \quad [4]$$

μ ویسکوزیته مولکولی، I تانسور واحد و دومین جمله سمت راست مربوط به تأثیر اتساع حجم می‌باشد.

مدل **k-ε** استاندارد

در این تحقیق، جهت بررسی جریان آشفته ورودی به آبیگر از مدل آشفتگی **k-ε** استاندارد استفاده شده است. مدل **k-ε** استاندارد توسط محققین هیدرولیک در سال 1972 پیشنهاد شده است. این مدل یک مدل نیمه تجربی بر اساس معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفتگی **k** و نرخ پراکندگی آن ϵ می‌باشد. در استخراج مدل **k-ε** فرض شده است که جریان آشفته کامل بوده و اثرات ویسکوزیته مولکولی قابل صرف نظر می‌باشد. بنابراین مدل **k-ε** برای جریان‌های آشفته کامل قابل کاربرد است (بی نام 2001).

انرژی جنبشی آشفتگی **k** و نرخ پراکندگی آن ϵ از طریق معادلات انتقال زیر به دست می‌آید (بی نام 2001):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - re \\ - Y_M + S_k \end{aligned} \quad [5]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(re) + \frac{\partial}{\partial x_i}(reu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(m + \frac{m_t}{s_e} \right) \frac{\partial e}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1e} \frac{e}{k} (G_k + C_{3e} G_b) \\ - C_{2e} r \frac{e^2}{k} + S_e \end{aligned} \quad [6]$$

بررسی جریان در آبیگر سد با مدل FLUENT

در این تحقیق برای بررسی جریان ورودی به آبیگر و تعیین حد استغراق از مدل FLUENT استفاده شده است. مدل FLUENT، نرم افزاری برای تحلیل عددی جریان سیال با کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD می‌باشد. این مدل امکان تغییر شبکه به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های غیرمنظم را در محدوده‌های هندسی پیچیده فراهم می‌سازد.

در روش CFD، برای مدل‌سازی جریان دو فاز آب و هوا، معادلات پیوستگی و مومنتم هر فاز به عنوان معادلات اصلی حل می‌شوند. حالت کلی معادله پیوستگی برای جریان‌های تراکم پذیر و تراکم ناپذیر به صورت زیر نوشته می‌شود (انتظاری 1385):

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla \cdot (r\mathbf{v}) = S_m \quad [1]$$

S_m جرم اضافه شده به فاز پیوسته از فاز ثانویه گسسته به طور مثال، به علت تبخیر قطرات کوچک مایع و یا هر منبع تعریف شده دیگر، ρ جرم مخصوص سیال، \mathbf{v} بردار سرعت و t زمان می‌باشد.

معادله پیوستگی در مختصات دو بعدی متقارن محوری به صورت زیر می‌باشد (بی نام 2001):

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(rv_x) + \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{rv_r}{r} = S_m \quad [2]$$

x مختصه محوری، r مختصه شعاعی، v_x سرعت محوری و v_r سرعت شعاعی است.

معادله مومنتم در سیستم بدون شتاب به صورت زیر نوشته می‌شود (بی نام 2001):

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\mathbf{v}) + \nabla \cdot (r\mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + r\mathbf{g} + \mathbf{F} \quad [3]$$

p فشار استاتیکی، $\bar{\tau}$ تانسور تنش می‌باشد که در زیر توضیح داده شده است. $r\mathbf{g}$ و \mathbf{F} به ترتیب نیروی بدنی گرانشی و نیروهای بدنی خارجی هستند. \mathbf{F} همچنین

مدل VOF

با توجه به این که جریان از مخزن سد به آبگیر و در داخل آن همراه با دو فاز آب و هوا می باشد، از مدل چند فاز در تحلیل جریان استفاده شد. به لحاظ این که جریان با سطح آزاد و ریزشی نیز می باشد، مناسب ترین مدل جهت بررسی شرایط جریان، مدل حجم سیال¹ یا VOF در نظر گرفته شد.

شبکه بندی و تعریف شرایط مرزی

ابتدا محدوده هندسی، شبکه، شرایط مرزی و نوع آن ها در نرم افزار پیش پردازنده که در این تحقیق نرم افزار GAMBIT می باشد، تعریف شد. محدوده هندسی ایجاد شده در نرم افزار GAMBIT جهت امکان ریزتر نمودن شبکه و دستیابی به نتایج دقیق تر، مشابه مدل فیزیکی سیستم آبگیر با مقیاس 1:20 نمونه واقعی و به صورت دو بعدی در نظر گرفته شد. این محدوده شامل قسمتی از مخزن به طول 10 متر، برج آبگیر، تبدیل مقطع برج به لوله، زانویی، لوله به قطر 3 متر، تبدیل لوله به تونل و قسمتی از تونل به طول 3 متر است. شکل 2 محدوده هندسی سیستم آبگیر ایجاد شده توسط نرم افزار GAMBIT را نشان می دهد. پس از ایجاد شبکه های مختلف با ابعاد و فشردگی های متعدد و تحلیل محدوده مورد نظر در مدل FLUENT، شبکه ای بهینه که در آن نتایج حل، مستقل از شبکه شده و زمان همگرایی نیز مطلوب می باشد، انتخاب گردید.

G_k عبارت است از:

$$G_k = -r \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad [7]$$

برای برآورد G_k در حالت همسان با فرضیه بوزینسک می توان نوشت:

$$G_k = m_l S^2 \quad [8]$$

S قدر مطلق تانسور تغییر شکل میانگین با رابطه زیر می باشد:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad [9]$$

G_b نیز عبارت است از:

$$G_b = bg_i \frac{m_l}{Pr_l} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad [10]$$

P_{rt} عدد پранتل آشفتگی برای انرژی و g_i مؤلفه بردار گرانشی در جهت i ام می باشد. مقدار پیش فرض عدد پранتل برای مدل $k-\epsilon$ استاندارد برابر با 0/85 است. در این معادلات، G_k نشان دهنده گسترش انرژی جنبشی آشفتگی به علت گرادیان های سرعت متوسط، G_b نشان دهنده گسترش انرژی جنبشی آشفتگی به علت نیروی شناوری و Y_M نشان دهنده سهم انبساط نوسانی در آشفتگی تراکم پذیر به نرخ پراکندگی کل می باشند. $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ مقادیر ثابت هستند. σ_k و σ_ϵ اعداد پранتل آشفتگی به ترتیب برای k و ϵ بوده و S_k و S_ϵ جمله های منبع تعریف شده هستند.

ویسکوزیته گردابی، μ_t ، از ترکیب k و ϵ با رابطه زیر به دست می آید:

$$m_l = r C_m \frac{k^2}{\epsilon} \quad [11]$$

C_{μ} یک مقدار ثابت است. ثابت های مدل یعنی $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ و C_{μ} و σ_k و σ_ϵ برابر با مقادیر پیش فرض زیر می باشند - (بی نام 2001):

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \\ C_m = 0.09, \quad s_k = 1.0, \quad s_\epsilon = 1.3$$

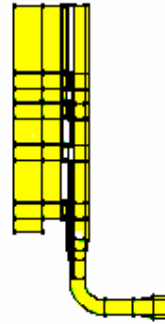
¹ Volume of fluid

هوای بالای سطح آب در مخزن و نیز هوای داخل برج، شدت آشفته‌گی و مقادیر انرژی تلف شده توسط آشفته‌گی در این مرزها صفر در نظر گرفته شد. شرط مرزی خروجی سرعت از طریق اختصاص مقدار سرعت خروجی از تونل که توسط رابطه پیوستگی و با دبی طراحی 20 متر مکعب بر ثانیه برای آبگیر به دست آمده است، تعریف شد. در این مرز برای تعریف مقادیر مربوط به پارامترهای آشفته‌گی، از روش شدت و قطر هیدرولیکی استفاده می‌شود که قطر هیدرولیکی تونل خروجی و شدت آشفته‌گی به این مقادیر اختصاص داده شدند. لازم به ذکر است که شدت آشفته‌گی در داخل تونل، از طریق رابطه زیر محاسبه شده و برابر با 4/02 درصد تعیین گردید.

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(\text{Re}_{D_H}) \quad [12]$$

I شدت تلاطم، u' مجذور میانگین مربعات نوسانات سرعت، u_{avg} سرعت متوسط جریان، Re_{D_H} عدد رینولدز مربوط به قطر هیدرولیکی D_H می‌باشند.

برای شرط مرزی دیواره، مقادیر پیش فرض مربوط به زبری دیواره بتنی در نظر گرفته شده و مدل با این ضریب واسنجی و مقدار تنظیم شده آن در مدل به کار برده شد. برای هر حالت از بازشدگی دریچه‌های آبگیر در ترازهای مختلف سطح آب، ابتدا شرایط مرزی و مقادیر اولیه تعریف شد. سپس حل مسئله با استفاده از شرط مرزی ورودی فشار مخزن تا رسیدن به خطای



شکل 2 - محدوده هندسی سیستم آبگیر ایجاد شده توسط نرم افزار GAMBIT

در این تحقیق خصوصیات جریان در آبگیر و استغراق بحرانی در 4 حالت مختلف از باز بودن دریچه‌های آبگیر و در هر یک از این حالت‌ها در سه تراز آبگیری بررسی شد که در جدول 1 نشان داده شده است. سه شرط مرزی ورودی فشار¹ در بالای مخزن، بالای برج و داخل مخزن و یک شرط مرزی خروجی سرعت² در خروجی تونل در محدوده هندسی مورد نظر تعریف شد. جداره‌های برج آبگیر و مسیر دنباله آن نیز به صورت شرط مرزی دیواره³ تعریف شدند.

شرط مرزی ورودی فشار مخزن براساس تراز آب داخل مخزن، از طریق یک فایل UDF⁴ که برنامه‌ای به زبان C و تعریف کننده توزیع فشار ذوزنقه‌ای داخل مخزن می‌باشد، تعریف شد. پارامترهای مربوط به آشفته‌گی در این شرط مرزی از طریق تعریف k و ε تعیین می‌شوند. با توجه به این‌که در این مرز، آب داخل مخزن ساکن فرض می‌شود، مقادیر انرژی تلف شده در اثر آشفته‌گی k و نرخ پراکنش آن ε صفر در نظر گرفته شدند. مرزهای ورودی فشار بعدی، ورودی‌های فشار هوا از سمت بالای برج و بالای مخزن می‌باشند که دارای فشار نسبی صفر هستند. به علت ساکن فرض نمودن

¹ Pressure inlet
² Velocity outlet
³ Wall
⁴ User defined function

جدول 1 - حالت‌های مختلف بازشدگی دریاچه‌های آبگیر و تراز سطح آب در مخزن

دریاچه 4	دریاچه 3	دریاچه 2	دریاچه 1	دریاچه و
1332/50	1326/49	1317/74	1305/88	تراز ورودی دریاچه (متر)
1341/50	1341/50	1341/50	1341/50	تراز سطح آب در مخزن
1337/00	1331/00	1324/00	1326/00	(متر)
1335/00	1330/00	1321/50	1310/00	

y_{ci} مقدار شبیه سازی شده و y_{oi} مقدار اندازه‌گیری شده در گام زمانی i و n تعداد مشاهدات می باشد.

نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از مدل *FLUENT* برای هر حالت از بازشدگی دریاچه‌های آبگیر در ترازهای مختلف سطح آب، پس از تبدیل آن به مقیاس نمونه واقعی آبگیر به شرح زیر می‌باشند. کنتورهای کسر حجم، فشار و سرعت برای همه حالت‌های بازشدگی دریاچه‌ها بدست آمد و به عنوان نمونه برای حالت اول یعنی باز بودن دریاچه تحتانی 1 با تراز ورودی 1305/88 متر نشان داده شده است. شکل‌های 3 تا 5 نشان دهنده کنتورهای کسر حجم، فشار و سرعت بدست آمده از مدل *FLUENT* در حالت باز بودن دریاچه 1 و تراز سطح آب برابر با 1341/5 متر در مخزن می‌باشند.

محاسباتی مورد نظر که برابر با 1×10^{-5} در نظر گرفته شده است، انجام شد. نتایج از طریق منوهای مدل به صورت گرافیکی و مقادیر عددی بدست آمد. لازم به ذکر است که این نتایج با کاربرد قانون فرود و نسبت-های تشابه استفاده شده در مدل فیزیکی سیستم آبگیر به مقیاس نمونه واقعی آبگیر تبدیل شد.

مقدار استغراق بحرانی برای هر چهار دریاچه توسط معیار ناس (1987) به دست آمد. وی حداقل استغراق آبگیرها را با شرایط تقرب نرمال، به شرح زیر ارائه داده است.

$$Fr \leq 0.25 \quad \Rightarrow \quad \frac{S_c}{D} = 1.5 \quad [13]$$

$$Fr > 0.25 \quad \Rightarrow \quad \frac{S_c}{D} = \frac{1}{2} + 2Fr \quad [14]$$

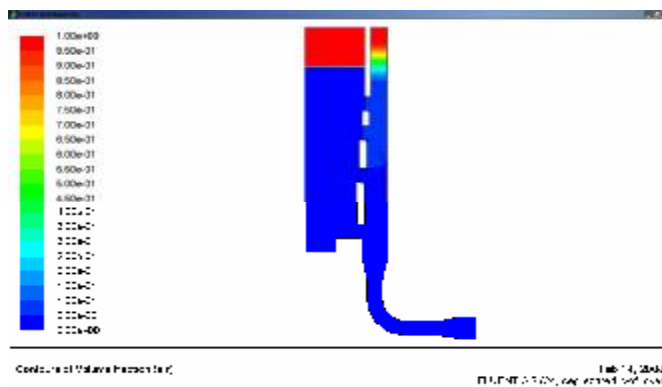
$$Fr = \frac{V}{(gD)^{\frac{1}{2}}} \quad [15]$$

Fr عدد فرود جریان در لوله آبگیر است.

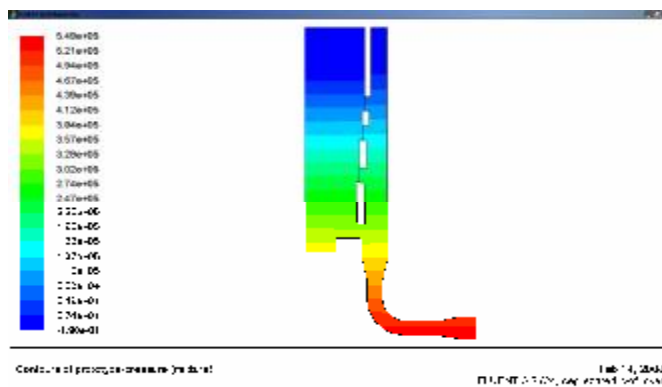
برای تعیین خطای برآورد مدل و مقایسه نتایج بدست آمده از مدل *FLUENT* با مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی، از معیار آماری جذر میانگین مربعات خطا، $RMSE^1$ بر اساس رابطه [16] استفاده گردید (مندنهال و سینکیچ 1994).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{oi} - y_{ci})^2 \right]^{0.5} \quad [16]$$

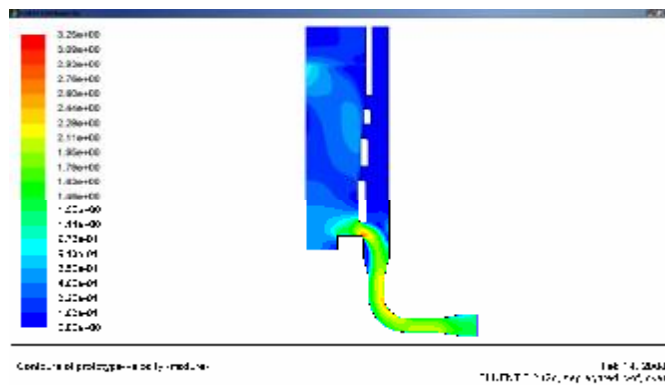
¹ Root mean square error



شکل 3 - کنتورهای کسر حجم (فازها) نسبت به هوا در داخل مخزن و سیستم آبنگير برای تراز سطح آب برابر با 1341/5 متر در حالت باز بودن دریچه 1



شکل 4 - کنتورهای فشار (بر حسب پاسکال) در داخل مخزن و سیستم آبنگير برای تراز سطح آب برابر با 1341/5 متر در حالت باز بودن دریچه 1



شکل 5 - کنتورهای سرعت (بر حسب متر در ثانیه) در داخل مخزن و سیستم آبنگير برای تراز سطح آب برابر با 1341/5 متر در حالت باز بودن دریچه 1

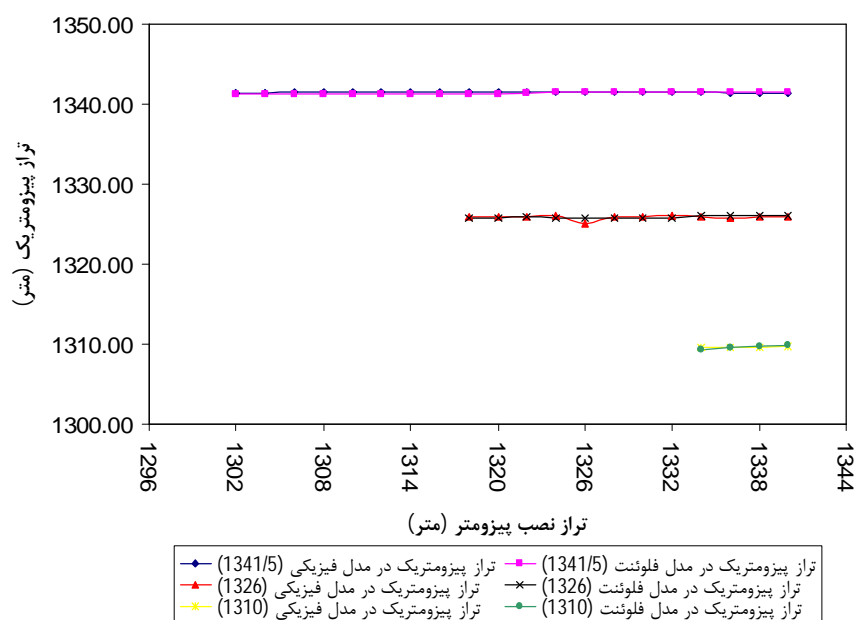
همزمان با بازشدگی هر دریچه، صرفاً سرعت سنج‌های مقابل همان دریچه قرائت شده‌اند. نمودار تغییرات ارتفاع پیزومتریک در مدل فیزیکی و مدل *FLUENT*، به عنوان نمونه در حالت باز بودن دریچه 1 و تراز سطح آب برابر با 1341/5، 1326 و 1310 در شکل 6 نشان داده شده است.

مقادیر ارتفاع پیزومتریک و سرعت جریان اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها و سرعت سنج در مدل فیزیکی با مقادیر محاسبه شده برای همه حالت‌ها در مدل *FLUENT* مقایسه شده‌اند. جدول 2 نشان دهنده مقادیر سرعت جریان اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی و مقادیر سرعت جریان متناظر نتیجه شده از مدل *FLUENT* در حالت باز بودن دریچه 1 و تراز سطح آب برابر با 1341/5، 1326 و 1310 متر، می‌باشد.

جدول 2 - مقادیر سرعت جریان در مدل فیزیکی و مدل *FLUENT*

برای تراز سطح آب برابر با 1341/5، 1326 و 1310 متر در حالت باز بودن دریچه 1

تراز سطح آب در مخزن (متر)	شماره سرعت سنج میکرو	سرعت جریان در مدل فیزیکی (متر بر ثانیه)	سرعت جریان در مدل <i>FLUENT</i> (متر بر ثانیه)
1341/5	4	اندازه گیری نشده است	0/66
	8	اندازه گیری نشده است	2/04
1326	4	2/20	0/73
	8	2/40	2/03
1310	4	2/45	0/22
	8	2/67	2/21



شکل 6 - نمودار تغییرات ارتفاع پیزومتریک در مدل فیزیکی و مدل *FLUENT* برای تراز سطح آب برابر با 1341/5، 1326 و 1310 متر در حالت باز بودن دریچه 1

اساس بررسی‌های انجام گرفته در حالت باز بودن دریاچه‌های 1، 2، 3 و 4 به ترتیب در جدول 4 نشان داده شده است.

خطای برآورد مقادیر ارتفاع پیزومتریک توسط مدل FLUENT با معیار RMSE در حالت باز بودن دریاچه 1، 2، 3 و 4 در جدول 3 نشان داده شده است. نتایج مشاهده گرداب در مدل فیزیکی و مدل FLUENT بر

جدول 3- خطای برآورد مقادیر ارتفاع پیزومتریک توسط مدل FLUENT با معیار RMSE در حالت باز بودن دریاچه 1، 2، 3، 4

خطای برآورد مدل با RMSE	تراز سطح آب در مخزن متر	شماره دریاچه
0/13	1341/5	1
0/25	1326	
0/15	1310	
0/39	1341/5	2
0/15	1324	
2/42	1321/5	
0/24	1341/5	3
1/63	1331	
0/57	1341/5	4
0/77	1337	

جدول 4 - نتایج مشاهده گرداب در مدل فیزیکی و مدل FLUENT در حالت باز بودن دریاچه 1، 2، 3، 4

نوع گرداب مشاهده شده در مدل FLUENT	نوع گرداب مشاهده شده در مدل فیزیکی	تراز سطح آب در مخزن متر	شماره دریاچه
گردابی مشاهده نشده	گردابی مشاهده نشده	1341/5	1
گردابی مشاهده نشده	نوع 1 - ناپایدار	1326	
نوع 2 - فروافتادگی سطح آب با چرخش‌های سطحی	گردابی مشاهده نشده	1310	
گردابی مشاهده نشده	گردابی مشاهده نشده	1341/5	2
نوع 1 - چرخش سطحی	نوع 1 - ناپایدار	1324	
جریان آزاد	جریان آزاد	1321/5	
گردابی مشاهده نشده	گردابی مشاهده نشده	1341/5	3
نوع 3 - چرخش ستونی از آب	نوع 3 - پایدار	1331	
جریان آزاد	جریان آزاد	1330	
نوع 3 - چرخش ستونی از آب	گردابی مشاهده نشده	1341/5	4
نوع 2 - فروافتادگی سطح آب با چرخش‌های سطحی	نوع 2 - پایدار	1337	
جریان آزاد	جریان آزاد	1335	

20 متر مکعب بر ثانیه در آبگیر مطابق جدول 5 تعیین شد.

استغراق بحرانی برای هر دریچه با استفاده از روابطی که ناس (1987) براساس آزمایشات گوردون (1970) و هکر (1981) ارائه داده است، با دبی جریان

جدول 5- تعیین استغراق بحرانی در آبگیر براساس معیار ناس (1987)

شماره دریچه	استغراق بحرانی (متر)	سرعت متوسط در ورودی (متر بر ثانیه)	عدد فرود برای آبگیر
1	3/96	2/22	0/41
2	3/96	2/22	0/41
3	3/96	2/22	0/41
4	3/96	2/22	0/41

نتیجه گیری

ریزش جریان از دهانه آبگیر در وضعیت آزاد، به دیواره مقابل برج برخورد کرده و شرایط نامطلوبی را از لحاظ هیدرولیکی در برج به وجود می‌آورد. در برخی از قسمت‌های بدنه برج، همان طوری که مشاهده می‌گردد، جریان به صورت پاششی می‌باشد. در جریان آزاد نیز مقادیر فشار منفی زیادی مشاهده نگردید.

تراز پیزومتریک در داخل برج به دلیل وجود افت‌های موضعی و اصطکاکی و نیز تبدیل پتانسیل فشاری به سرعت در طول مسیر، از بالا به پایین روند کلی نزولی را نشان می‌دهد. در برخی نقاط به دلیل افزایش ناگهانی سطح مقطع برج در محل دریچه‌ها و کاهش سرعت در مقطع، تراز پیزومتریک ثابت مانده و یا به صورت موضعی روند صعودی را نشان می‌دهد.

حداقل خطای برآورد تراز پیزومتریک توسط مدل *FLUENT* مربوط به حالت باز بودن دریچه 1 و تراز سطح آب 1341/5 متر با *RMSE* برابر با 0/13 متر و حداکثر مقدار آن مربوط به حالت باز بودن دریچه 2 و تراز سطح آب 1321/5 متر با *RMSE* برابر با 2/42 متر بوده است. خطای برآورد تراز پیزومتریک توسط مدل *FLUENT* با معیار *RMSE* به طور میانگین برابر با 0/67 متر است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تراز پیزومتریک به دست آمده از مدل *FLUENT* همخوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی دارد.

حادثترین گرداب ایجاد شده در حالت استغراق آبگیر در ترازهای مختلف و برای دریچه‌های یک تا چهار، گرداب نوع 3 می‌باشد. با توجه به این‌که فشار منفی قابل توجهی در سازه ایجاد نگردیده است، این گرداب برای سیستم آبگیر مشکل ساز نخواهد بود.

استغراق بحرانی محاسبه شده توسط معیار ناس (1987) براساس روابط تحلیلی در شرایط ایده‌آل و بدون تاثیر بسیاری از پارامترهای مؤثر در جریان سیال بوده و به همین دلیل مقدار آن بسیار دست بالا می‌باشد. با توجه به شرایط هیدرولیکی حاکم بر آبگیر مقدار استغراق بحرانی متفاوت بوده و می‌تواند کمتر از مقدار محاسبه شده توسط معیار ناس (1987) نیز باشد.

نتایج به دست آمده از مدل *FLUENT* به جز در موارد معدودی که ناشی از خطای اندازه‌گیری در مدل فیزیکی می‌باشد، مشابه با مقادیر مدل فیزیکی است. چون در مدل *FLUENT* همه پارامترهای مؤثر در جریان سیال مورد تحلیل قرار می‌گیرند، نتایج به دست آمده از این مدل تطابق زیادی با ماهیت واقعی جریان دارد. بنابراین جهت بررسی جریان گردابی و تعیین استغراق بحرانی در آبگیر می‌توان از مدل *FLUENT* به عنوان ابزاری مناسب استفاده نمود.

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که مدل *FLUENT* ابزاری مناسب جهت بررسی مشخصات جریان در محدوده های هندسه ای پیچیده می باشد. پارامترهای مختلف جریان از قبیل سرعت، فشار و ... با دقت زیاد در هر نقطه از محدوده هندسی مورد نظر با استفاده از این مدل محاسبه می شود. همچنین به طوری که در تحقیق حاضر مشاهده می شود، این مدل قابلیت انعطاف بسیار بالایی داشته و به راحتی می توان شرایط مختلف جریان را با آن بررسی نمود.

قدر مطلق بردار سرعت در داخل برج به دلیل افزایش ناگهانی سطح مقطع برج نسبت به مقطع دریاچه، بیشتر از مقدار آن در محل دریاچه می باشد. حداکثر سرعت به دست آمده از مدل فیزیکی و مدل *FLUENT* به ترتیب برابر با $2/96$ و $2/52$ متر بر ثانیه بوده است. مقدار سرعت نقطه ای جریان در وسط برج آبگیر به لحاظ ایجاد جریان ریزشی در ترازهای پایین سطح آب و پر نشدن کامل مقطع برج در این شرایط، بسیار ناچیز اندازه گیری شده است.

منابع مورد استفاده

- انتظاری ع، 1385. مکانیک سیالات (ترجمه). نشر نوپردازان.
- بیرامی م ک، 1382. سازه های انتقال آب. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
- بی نام، 1380. گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سیستم آبگیر سد آیدوغموش (میان)، مرکز تحقیقات آب - وزارت نیرو.
- شمسایی ا، 1383. طراحی و ساخت سد های مخزنی (جلد چهارم) تاسیسات هیدرولیکی. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

Anonymous, 2001. FLUENT 6.0 user's guide. Fluent Inc.

Gordon JL, 1970. Vortices at intakes. *Water Power* 4: 137-138.

Hecker GE, 1981. Model prototype comparison of free surface vortices. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 107 (HY10): 1243-1259.

Hite JE and Mih WC, 1994. Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 120: 284-297.

Knauss J, 1987. Swirling flow problems at intakes. pp. 13-38. *IAHR Hydraulic Structures Manual*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Marcano A, Rojas-Solorzano L, Reyes M, and Marin J, 2004. 3-D CFD modeling-investigation of potential vortex formation at the intakes of Caruachi powerhouse. pp. 61-68. *Hydraulics of Dams and River Structures*, London.

- Mendenhall W and Sincich T, 1994. Statistics for Engineering and Sciences. Prentice-Hall Pub. Co. Inc., London.
- Odgaard AJ, 1986. Free-surface air core vortex. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 112: 610-620.
- Yildirim N and Kocabas F, 1995. Critical submergence for intakes in open channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 121: 900-905.
- Yildirim N and Kocabas F, 1998. Critical submergence for intakes in still-water reservoir. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 124: 103-104.
- Yildirim N, Kocabas F, and Gulcan SC, 2000. Flow-boundary effects on critical submergence of intake pipe. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 126: 288-297.
- Yildirim N and Kocabas F, 2002. Prediction of critical submergence for an intake pipe. Journal of Hydraulic Research 40: 507-516.