نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره نهم / تابستان ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 9 / September 2016

مطالعه جریان عبوری از سد لاستیکی با به‌کارگیری هیدرودینامیک محاسباتی

سعید فرزین*[۱]
حجت کرمی[۲]
الهام ضمیری[۳]

چکیده

سدهای لاستیکی ازجمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که بر روی رودخانه‌ها احداث شده و نسبت به سازه‌های مشابه کم‌هزینه‌تر هستند. در این تحقیق، مدل‌سازی سد لاستیکی با سه فشار مختلف درون تیوپ (۱/۵ تا ۳ کیلو نیوتن بر مترمربع) و سه دبی (۱/۵ تا ۵/۵ لیتر بر ثانیه) با کمک نرم‌افزار Flow3D انجام شده است. یک سد لاستیکی واقع بر روی کانال روباز با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی صحت-سنجی گردید و ضریب همبستگی حاصل از تطابق نتایج مدل عددی با مقادیر مدل فیزیکی برابر با ۰/۹۳۵۷ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل عددی است. بیشترین ضریب دبی متعلق به دبی ۵/۲۵ لیتر بر ثانیه و فشار ۳ کیلو نیوتن بر مترمربع، حدود ۰/۴۶ محاسبه شد. همچنین مشخص شد که افزایش ۱۰۰ درصدی فشار هوای درون تیوپ، موجب رشد ۵ درصدی ضریب دبی می‌شود. درحالی‌که همین مقدار رشد در مقدار دبی، منجر به افزایش بیش از ۲۵ درصدی ضریب دبی می‌شود. پارامتر H/D_h نیز به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر ضریب دبی شناخته شد و نتایج مدل‌سازی نشان داد رشد ۳۱ درصدی این پارامتر، حدود ۷۰ درصد بر مقدار ضریب دبی می‌افزاید. همچنین عوامل مؤثر بر سرعت جریان عبوری از سد لاستیکی نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی

سد لاستیکی، ضریب دبی، مدل‌سازی، فشار هوای درون تیوپ، Flow-3D.

۱*. استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، saeed.farzin@semnan.ac.ir.
۲. استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

مقدمه

به‌طورکلی برای کنترل سیلاب عبوری از رودخانه‌ها و کانال-های روباز، از سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها استفاده می‌شود. یکی از انواع سرریزها برای کنترل سیلاب و تراز سطح آب، سدهای لاستیکی[1] هستند که از یک تیوپ لاستیکی ساخته‌شده‌اند (جنا[2]، ۲۰۱۲). سدهای لاستیکی عموماً از ماده پرکننده (آب یا هوا) پر می‌شوند و در عرض رودخانه کار گذاشته می‌شوند. از ویژگی‌های سد لاستیکی که آن را از سایر سازه‌های هیدرولیکی مجزا می‌سازد، کاسته شدن از ارتفاع تاج سرریز در مواقع سیلابی است که موجب خروج ماده پرکننده از طریق مجرایی به بیرون از سرریز می-شود (زارع و همکاران، ۱۳۹۲).

از سد لاستیکی برای کنترل سیلاب، افزایش تراز آب برای آبیاری زمین‌های کشاورزی، ایجاد سازگاری با محیط‌زیست به دلیل امکان تغییر ارتفاع سد و اقتصادی بودن استفاده می‌شود (ژانگ[3] و همکارن، ۲۰۰۲). اولین سد لاستیکی در سال ۱۹۵۷ در رودخانه لس‌آنجلس امریکا ساخته شد و پس‌ازآن فن‌آوری و پیشرفت علم در ساخت این سدها مؤثر واقع شد. نخستین سد لاستیکی در ایران در سال ۱۳۷۵ بر روی رودخانه بابل‌رود مورد بهره‌برداری قرار گرفت (احمدی و بینا، ۱۳۸۴).

چانسون[4] (۱۹۹۷) به مطالعه جریان آب عبوری از روی سدهای لاستیکی پرداخت و دریافت با عبور جریان از روی این سازه هیدرولیکی، جریان در موقعیت ناپایدار قرار می-گیرد که باید از آن جلوگیری شود. همچنین در مطالعه خود دریافت جریان با عبور از این سازه دچار پرش هیدرولیکی می‌شود. تام[5] (۱۹۹۷) در تحقیق خود مزایای سد لاستیکی را برشمرد و به این نکته اشاره نمود که سدهای لاستیکی نسبت به سازه‌های فولادی، به دلیل تحمل دماهای بسیار پایین، برای استفاده در مناطق سردسیر مناسب‌تر هستند.

چانسون (۱۹۹۸) تلاش نمود تا به روشی جدید برای پیش-بینی جریان عبوری از سدهای لاستیکی بپردازد و نتایج خود را با ۱۶۰ داده آزمایشگاهی مقایسه نمود. الحاتمی[6] و همکاران (۲۰۰۵) رفتار سدهای لاستیکی پرشده از آب‌وهوا را به‌صورت فیزیکی مورد ارزیابی قراردادند و ضمن مقایسه نتایج با روابط تئوری نشان دادند که تطابق مناسبی بین نتایج تئوری و مدل فیزیکی وجود دارد. جمالی و صالح[7] (۲۰۰۵) رفتار سد لاستیکی در موقعیت‌های مختلف همراه با هد بالادست و پایین‌دست را بر روی مدل آزمایشگاهی موردبررسی قراردادند و نشان دادند تطابق خوبی بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی وجود دارد. ایشان دریافتند تنش و ارتفاع سد پرشده از هوا، در مقایسه با سد پرشده از آب در شرایط یکسان (فشار درونی و هد بالادست و پایین‌دست)، بیشتر است. اندریاناریسون و اهاین[8] (۲۰۰۶) در مورد تأثیر وزن و تراکم‌پذیری سیالات در سازه‌هایی با ساختمان مشابه سد لاستیکی در دو حالت سیالات همگن و غیر همگن مطالعه نمودند و روابطی را به دست آوردند.

قوانلو و دانشمند[9] (۲۰۱۰) به بررسی رفتار استوانه‌های انعطاف‌پذیر پرشده از آب، هوا یا مخلوطی از آب‌وهوا در شرایط مختلف هد بالادست و پایین‌دست پرداختند و روابطی به‌منظور پیش‌بینی رفتار خیر خطی سیال درون استوانه و بدنه استوانه‌ای انعطاف‌پذیر پیشنهاد نمودند. چراغی شیرازی[10] و همکاران (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فشار هوای درون تیوپ و عمق آب بالادست و پایین‌دست، به مدل‌سازی سد لاستیکی پرداختند. ایشان دریافتند عواملی چون مدول الاستیسیته، فشار هوای درونی سد، عرض مقطع و ضخامت سد بر ارتفاع سد لاستیکی تأثیرگذار هستند. الاسلام و کومار[11] (۲۰۱۵) نیز به بررسی عملکرد سدهای لاستیکی در هند پرداختند و دریافتند سد

[1] Rubber Dam
[2] Jena
[3] Zhang
[4] Chanson
[5] Tam
[6] Alhamati
[7] Jumaily & Salih
[8] Andrianarison & Ohayon
[9] Ghavanloo & Daneshmand
[10] Cheraghi-Shirazi
[11] Ul Islam & Kumar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

لاستیکی به دلیل سرعت بالا در ساخت این سازه و انعطاف-پذیری بدنه سد یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای استفاده از نیروی برق‌آبی است. الاسلام و کومار (۲۰۱۶) در پژوهش خود نقش سدهای لاستیکی در استفاده از انرژی برق‌آبی را بررسی نموده و اشاره کردند استفاده از سدهای لاستیکی در تولید انرژی، بسیار اقتصادی است و موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود. ایشان همچنین انواع سدهای لاستیکی را ازنظر هزینه‌ها مقایسه نمودند.

مطالعه تجربی پدیده‌های موجود درزمینه سیالات، اطلاعات مهمی در اختیار محققین قرار می‌دهد اما به دلیل محدودیت در زمان و هزینه در مطالعه تجربی، استفاده از روش‌های عددی توسعه‌یافته‌اند. مدل Flow-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی درزمینه دینامیک سیالات است که قابلیت شبیه-سازی الگوهای فیزیکی متنوعی ازجمله آشفتگی و آب شستگی را دارا است.

با توجه به مطالعات انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت که سدهای لاستیکی دارای کاربردهای متعدد و مزایایی همچون هزینه احداث کم، سرعت بالا در ساخت و انعطاف‌پذیری بدنه سد هستند. بااین‌وجود، تاکنون درزمینه بررسی و تحلیل این‌گونه سدها با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی مطالعات چندانی صورت نگرفته است. لذا هدف از این تحقیق، تعیین قابلیت‌های نرم‌افزار Flow-3D در مدل‌سازی و تحلیل پارامترهای هیدرولیکی جریان عبوری از سد لاستیکی است. در این راستا، پس از مش‌بندی، تعیین مدل آشفتگی و صحت‌سنجی مدل عددی، پارامترهای ضریب دبی، عمق و سرعت متوسط جریان شبیه‌سازی‌شده و تجزیه‌وتحلیل می‌شود. همچنین، میزان تأثیر عوامل مؤثر بر این پارامترها، تحت مقادیر مختلف دبی جریان عبوری و فشار درون سد، ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان

تئوری جریان در سرریزهای استوانه‌ای و سدهای لاستیکی تحت تأثیر پارامترها و خصوصیات سینماتیکی، دینامیکی و هندسی است که بر اساس رابطه (۱) تعریف می‌شود (قره گزلو و مسعودیان، ۱۳۹۰):

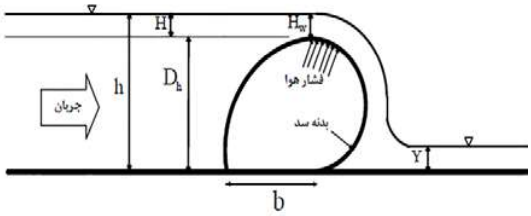
$$f(H,H_W,B,\mu,g,s,Q,R,\sigma,\rho,\delta)=0 \qquad (۱)$$

که در آن، B= عرض کانال، g= شتاب گرانش، μ= لزجت دینامیکی، s= شیب کف کانال، ρ= چگالی مخصوص سیال، σ= کشش سطحی و δ= ضریب تراکم، R= شعاع استوانه، h= عمق آب بالادست و H_w= عمق آب بر روی سرریز. در شکل (۱) شماتیکی از سد لاستیکی ارائه شده است.

برای محاسبه ضریب دبی در سدهای لاستیکی می‌توان از رابطه انور [1] (۱۹۶۷)، (رابطه ۲) استفاده کرد:

$$C_d=\frac{q}{\sqrt{2g}H^{1.5}} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، C_d= ضریب دبی و q(m3/s)= دبی جریان در واحد طول است. پارامتر H نیز در شکل (۱) تعریف‌شده است.



شکل (۱): مدل شماتیک سد لاستیکی

معادلات حاکم بر بدنه سد

انور (۱۹۶۷) با ساخت نمونه فیزیکی سد لاستیکی توانست به روابطی در رابطه با شکل سد لاستیکی دست یابد. در نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص شد شکل سد در پایین‌دست به‌صورت نیم‌دایره و در بالادست سهمی شکل است که روابط زیر بر آن حاکم است:

$$p_i=\alpha\rho gH \qquad (۳)$$

$$T=\frac{1}{2}p_iH=\frac{1}{2}\alpha\rho gH^2 \qquad (۴)$$

$$H_P=\frac{1}{2}\alpha\rho gH^2+\frac{1}{2}\rho gy^2-p_iy \qquad (۵)$$

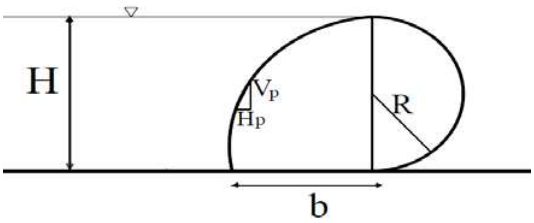
$$V_p=\rho g\int f(x)dx-p_ix \qquad (۶)$$

در روابط (۳) تا (۶)، p_i= فشار درونی سد، α= ضریب فشار درونی سد، ρ= جرم مخصوص سیال پرکننده، g= شتاب

[1] Anwar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

گرانش زمین، H= ارتفاع سد، T= نیرویی افقی در تاج سد، H_p= مؤلفه افقی نیروی ناشی از فشار ایستابی آب در نقطه دلخواه، y= ارتفاع نقطه دلخواه از کف و V_p= مؤلفه عمودی نیروی ناشی از فشار ایستابی آب در نقطه دلخواه. در شکل (۲) نمای کلی سد لاستیکی نشان داده شده است.



شکل (۲): نمای کلی سد لاستیکی

با در نظر گرفتن کلیه نیروها و بر اساس روابط (۳) تا (۶)، شکل مقطع سد لاستیکی در پایین‌دست به‌صورت نیم‌دایره و در بالادست به‌صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$\xi = \sqrt{\frac{\alpha}{2}} \int_{\arccos(\frac{\eta}{\alpha}-1)}^{\pi} \left[\frac{1-\alpha(\sin\varphi)^2}{\sqrt{1-\frac{\alpha}{2}(\sin\varphi)^2}} \right] d\varphi \qquad (۷)$$

که در آن، $\xi = \frac{x}{p}$ نسبت طول از مبدأ مختصات به ارتفاع سد، $\alpha = \frac{p_i}{p}$ نسبت فشار درونی سد به ارتفاع سد و $\eta = \frac{y}{p}$ نسبت عرض از مبدأ به ارتفاع سد و فراسنجی بی‌بعد برای تعریف شکل سد هستند که با استفاده از رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$\varphi = \cos^{-1}\left[\left(\frac{\gamma}{2}\left({H_u}^2 - {H_d}^2 \right) \right) / T_A - 1 \right] \qquad (۸)$$

از رابطه (۸) مشخص است که شکل سد لاستیکی در بالادست فقط تابع (α) است.

تغییرات فشار آب یا هوای درون سد، موجب اعمال نیروهای استاتیکی بر هر المان از بدنه سد شده که همین امر باعث تغییر حجم در بدنه سد می‌شود. با استفاده از روابط (۳) تا (۷) چگونگی تأثیر نیروی فشار هوا یا آب، بر بدنه سد محاسبه می‌شود.

سد لاستیکی رفتاری مشابه سرریز استوانه‌ای دارد؛ ولی در مواقع سیلابی، با خروج ماده پرکننده از طریق مجرایی به بیرون از بدنه سد، فشار هوای درونی سد کاهش یافته و به‌تبع آن از ارتفاع سد کاسته می‌شود. این امر، سبب بهبود عملکرد سد لاستیکی نسبت به سرریز استوانه‌ای می‌گردد.

معرفی مدل Flow-3D

نرم‌افزار Flow-3D قابلیت تحلیل دوبعدی یا سه‌بعدی حجم جریان را دارد. این مدل از المان‌های سه‌بعدی متعامد مستطیلی و روش حجم محدود استفاده می‌کند (احسانی و صالحی نیشابوری، ۱۳۹۴). این نرم‌افزار از دو روش عددی - VOF[1] و FAVOR[2] برای شبیه‌سازی هندسی بهره می‌برد.

روش VOF در شبیه‌سازی

از این روش زمانی استفاده می‌شود که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول‌ها از سیال پر نیستند و تعدادی از سلول‌ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه‌پر هستند. برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها از کمیتی به نام F (تابع حجم سیال) استفاده می‌شود که بیانگر بخشی از سلول است که توسط سیال پرشده است. در این روش برای تعریف پروفیل سطح آب از تابع $F(x,y,z)$ طبق رابطه (۹) استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \qquad (۹)$$

تابع F، شاخص درصد حجمی فاز آب است و مقدار آن بین صفر و یک متغیر است. مقدار این تابع در صورت پر بودن سلول از آب برابر با یک و در حالت پر بودن آن از هوا، صفر است؛ مقدار بین صفر و یک نشان‌دهنده وجود سطح آزاد در سلول است (هرت و نیکلس[3]، ۱۹۸۱؛ هرت و چن[4]، ۱۹۹۶).

روش FAVOR در شبیه‌سازی

روش FAVOR که روش کسر مساحت-حجم مانع نیز نامیده می‌شود، برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی مورداستفاده قرار می‌گیرد. جز حجمی سیال (F)، در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال به کار برده می‌شود. کمیت جز حجمی (V_f) نیز،

[1] Volume of Fluid
[2] Fractional Area-Volume Obstacle Representation
[3] Hirt & Nichols
[4] Hirt & Chen

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

برای تعیین سطح بدنه صلب استفاده می‌شود. از طرفی این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده است (V_f) نیز استفاده شود. زمانی که در هر سلول، حجم اشغال‌شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، به کار می‌رود (هرت و ریچاردسون[1]، ۱۹۹۹).

مدل‌سازی سد لاستیکی

در این تحقیق برای مدل‌سازی سد لاستیکی از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی الحاتمی[2] و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی از کانالی به طول ۲۰ متر، عرض ۹۰ و عمق ۶۰ سانتی‌متر تشکیل‌شده است و سد لاستیکی در فاصله ۸/۵ متری از بالادست قرارگرفته است. در مدل‌سازی، دبی با مقادیر ۱/۵ تا ۵/۵ لیتر بر ثانیه و فشار درون تیوپ لاستیکی معادل ۱/۵، ۲ و ۳ کیلو نیوتن بر مترمربع اعمال شده است (جمعاً ۹ آزمایش). مقادیر مربوط به دبی ورودی برای هر آزمایش با توجه به فشار هوای درون سد، در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

مدل‌سازی سد لاستیکی را می‌توان با کمک سه مدل آشفتگی K-ε[3]، RNG[4] و LES[5] انجام داد. ازآنجاکه تاکنون مطالعه چندانی پیرامون مدل‌سازی عددی سد لاستیکی انجام نشده است، بنابراین تحقیقات انجام‌شده درباره مدل‌سازی عددی سرریز استوانه‌ای، به دلیل شباهت عملکردی با سد لاستیکی، می‌تواند الگوی مناسبی برای مدل‌سازی باشد. بررسی و مدل‌سازی سرریز استوانه‌ای و نیم استوانه‌ای توسط پژوهشگرانی مانند ورجاوند و همکاران (۱۳۸۹)، فرزین و همکاران (۱۳۹۴)، صمدی و همکاران (۲۰۱۴) و فرزین و همکاران (۲۰۱۶) انجام شده است و بررسی نتایج حاصل از آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مدل آشفتگی K-ε بهترین نتیجه را با کمترین درصد خطا ارائه می‌دهد؛ بنابراین جهت صرفه‌جویی در وقت و هزینه از روش مدل‌سازی با مدل‌های آشفتگی مختلف صرف‌نظر شده و مدل‌سازی صرفاً با مدل آشفتگی K-ε، انجام‌شده است.

در مدل عددی موردنظر پس از بررسی مشخص گردید، چنانچه طول کانال از ۲۰ متر به ۱۵ متر کاهش یابد خطای نسبی کمتر از ۲٪ خواهد بود، لذا جهت کاهش حجم محاسبات و صرفه‌جویی در زمان، مدل‌سازی کانال با طول ۱۵ متر انجام شد. (کاهش طول از انتهای کانال انجام‌شده و روی پارامترهای موردنظر در این تحقیق تأثیرگذار نبوده است).

شرایط مرزی مدل موردنظر (مطابق شکل (۳)) در سطح AB به‌صورت دبی ورودی، در سطح CD، دبی خروجی و در سطح AC به فرم سطح آزاد سیال تعریف شده است. سایر سطوح مدل موردبررسی به‌صورت دیواره تعیین‌شده‌اند.

مدل سد لاستیکی در تحقیق حاضر با سه مش‌بندی با تعداد تقریبی سلول‌های ۹۰۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰ با مدل آشفتگی K-ε مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد با افزایش تعداد مش‌ها به ۹۰۰۰۰۰ عدد، خطای RMSE[6] حاصل از مدل‌سازی به ۰/۰۱۸۳ کاهش می‌یابد و سبب بهبود نتایج می‌گردد. نتایج مربوط به مش بهینه با توجه به شاخص‌های MAE[7]، RMSE و R^2 (ضریب همبستگی) در جدول (۲)، نشان‌دهنده تطابق بالای نتایج مدل فیزیکی با نتایج مدل عددی با تعداد ۹۰۰۰۰۰ سلول است.

نتایج

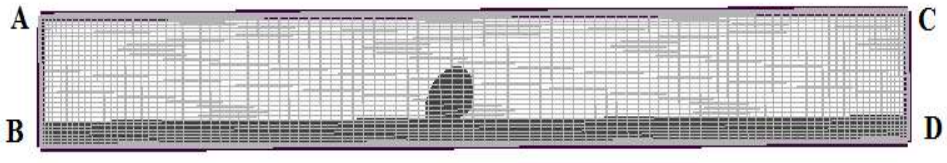
در این تحقیق تغییرات ضریب دبی و عوامل مؤثر بر آن و عوامل تأثیرگذار بر سرعت جریان در فشارهای مختلف هوای درون تیوپ سد لاستیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۴) نتایج مربوط به مقایسه مقادیر H/D_h در دو حالت عددی و فیزیکی نشان داده شده است. مقدار ضریب همبستگی حاصل از این مقایسه ۰/۹۳۵۷ به‌دست‌آمده است که نشان‌دهنده انطباق مناسب نتایج مدل عددی با مقادیر حاصل از کار آزمایشگاهی است.

[1] Hirt & Richardson
[2] Alhamati
[3] Two equation k-ε model
[4] Renormalized group model
[5] Large Eddy Simulation Models
[6] Root Mean Square Error
[7] Mean Absolute Error

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

جدول (۱): مقادیر آزمایشگاهی دبی ورودی سد

فشار هوا (KN/m^2)	۱/۵			۲			۳		
دبی ورودی به کانال (Q)(لیتر بر ثانیه)	۱/۹۳	۳/۳۷	۵/۲۵	۱/۹۳	۳/۳۴	۵/۲۵	۱/۹۳	۳/۴۵	۵/۱۲



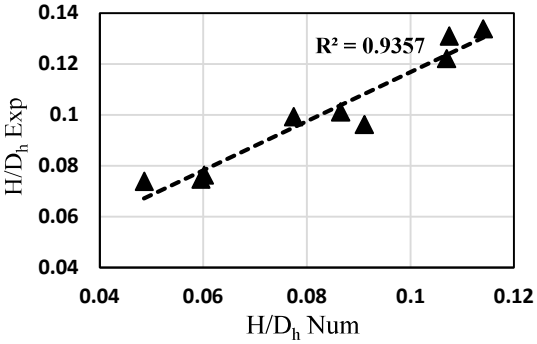
شکل (۳): محدوده محاسباتی جریان

جدول (۲): خطای مربوط به H/Dh با توجه به مش بندی

تعداد مش‌ها	RMSE	MAE	R^2
۳۰۰۰۰۰	۰/۰۷۱۴۹	۰/۰۷۰۲۶	۰/۷۶۱۴
۶۰۰۰۰۰	۰/۰۳۳۴۷	۰/۰۲۶۷۱	۰/۸۲۵۴
۹۰۰۰۰۰	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۷۳۸	۰/۹۳۵۷

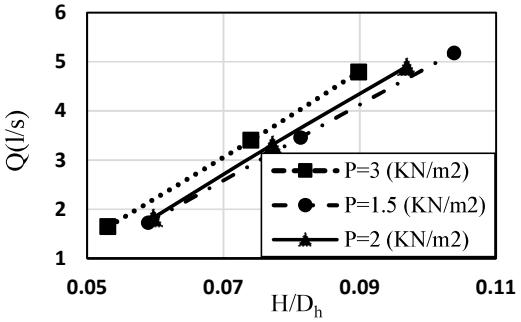
تأثیر مقدار دبی بر عمق آب بالادست در شکل (۵)، نشان‌دهنده آن است که به ازای دبی‌های تقریباً یکسان، چنانچه فشار درون تیوپی افزایش یابد، از مقدار نسبت H/D_h کاسته می‌شود.

مقادیر H/D_h در حالت با فشار درونی تیوپ برابر KN/m^2 ۳، نسبت به حالت با فشار KN/m^2 ۱/۵ و به‌طور متوسط حدود ۳/۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ۲/۸۶ برابری دبی، میزان H/D_h حدوداً ۱/۷ برابر بیشتر خواهد شد.



شکل (۴): نمایش تطابق مقادیر حاصل از مدل عددی و فیزیکی

شکل (۶) نشان‌دهنده رابطه ضریب دبی با دبی در سه فشار مختلف درون تیوپ است. عدد رگرسیون حاصل از نمودار زیر برای هر سه حالت مقادیر بالایی را نشان می‌دهد، مقدار



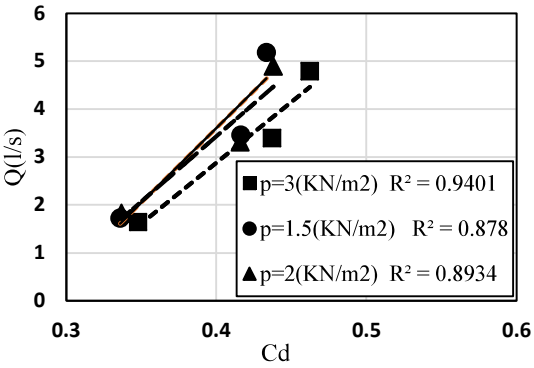
شکل (۵): رابطه دبی با H/D_h

ضریب رگرسیون در فشار درون مخزنی KN/m^2 ۳، برابر با ۰/۹۴۰۱، در فشار مخزنی KN/m^2 ۲ برابر با ۰/۸۹۳۴ و در فشار مخزنی KN/m^2 ۱/۵ برابر با ۰/۸۷۸ است که حاکی از تطابق و همبستگی بالا میان پارامترهای دبی و ضریب دبی در سدهای لاستیکی است.

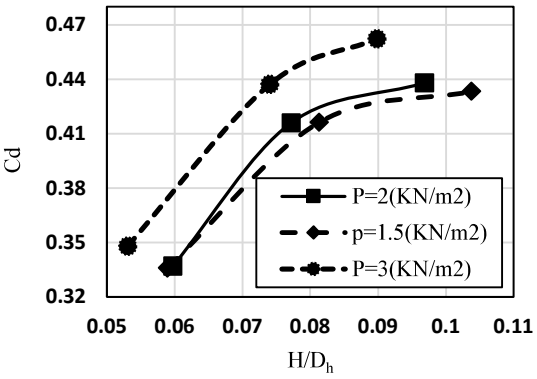
رابطه ضریب دبی با نسبت H/D_h در شکل (۷)، نشان‌دهنده رابطه مستقیم این دو پارامتر با یکدیگر است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از نمودار نتیجه می‌شود که با افزایش ۳۱ درصدی H/D_h، مقدار ضریب دبی، رشدی معادل ۶۹ درصد خواهد داشت، لذا می‌توان گفت افزایش اندک H/D_h تأثیر زیادی در افزایش ضریب دبی دارد. ولی افزایش ۱۰۰ درصدی فشار درون تیوپ تنها موجب رشد ۵ درصدی مقدار ضریب دبی می‌شود؛ بنابراین افزایش H/D_h بر رشد ضریب دبی بسیار مؤثرتر از افزایش فشار درون محفظه لاستیکی است و اقتصادی‌تر خواهد بود. همچنین روند رشد ضریب دبی با افزایش H/D_h در بازه‌های با ضریب دبی بالاتر از ۰/۴۲ با آهنگ کمتری انجام خواهد شد.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

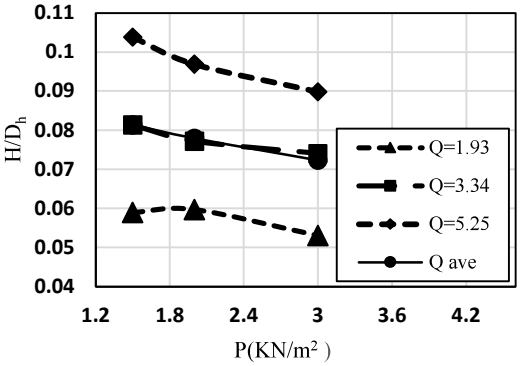


شکل (۶): رابطه دبی با ضریب دبی



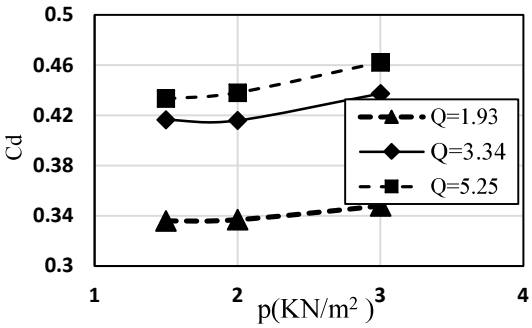
شکل (۷): رابطه ضریب دبی با H/D_h

در شکل (۸)، رابطه فشار درون تیوپ لاستیکی با H/D_h برای سه مقدار دبی مختلف بررسی شده است. از اطلاعات نمودار مشخص می‌شود که با افزایش دبی از ۱/۹۳ به ۳/۳۴ لیتر بر ثانیه مقدار رشد پارامتر بی‌بعد H/D_h، ۳۵ درصد خواهد بود و با رسیدن مقدار دبی جریان از ۳/۳۴ به ۵/۲۵ لیتر بر ثانیه، میزان افزایش این نسبت حدود ۲۵ درصد است. همچنین نتایج مربوط به دبی متوسط با نتایج مربوط به دبی ۳/۳۴ لیتر بر ثانیه، تطابق دارد که این امر به دلیل نزدیکی مقدار دبی متوسط با دبی ۳/۳۴ لیتر بر ثانیه است.



شکل (۸): رابطه فشار درون تیوپ با H/D_h

در ادامه تأثیر مقدار دبی جریان بر روی پارامتر ضریب دبی، متأثر از سه فشار مختلف درون تیوپ سد در شکل (۹) مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج نمودار نشان‌دهنده تأثیر بالای مقدار دبی بر ضریب دبی است. با افزایش مقدار دبی جریان از ۱/۹۳ به ۵/۲۵ لیتر بر ثانیه، ضریب دبی از مقدار متوسط ۰/۳۴ به مقدار میانگین ۰/۴۵ می‌رسد و رشدی برابر با ۳۱ درصد خواهد داشت. این در حالی است که با دو برابر شدن فشار درون تیوپ از ۱/۵ KN/m^2 به ۳ KN/m^2 مقدار ضریب دبی سد تنها ۵ درصد افزایش می‌یابد. به‌علاوه نتایج نشان-دهنده آن است که ضریب دبی در محدوده فشار ۱/۵ تا ۲ کیلو نیوتون بر مترمربع درون تیوپ، مقدار تقریباً ثابتی دارد و در فشار بالاتر از ۲ KN/m^2 روند صعودی پیدا می‌کند.



شکل (۹): رابطه ضریب دبی با فشار درون تیوپ سد

سدهای لاستیکی با تغییر فشار هوای درون تیوپ دچار تغییر شکل می‌شوند و ازآنجاکه طول و شکل سرریزها بر مشخصات جریان عبوری مؤثرند، تأثیر میزان فشار هوای درون تیوپ سد لاستیکی، بر عمق جریان عبوری از روی سد برای دبی ثابت ۳/۳۴ لیتر بر ثانیه در شکل (۱۰) بررسی شده است. به‌طورکلی عملکرد سدهای لاستیکی به این صورت است که با افزایش فشار درون تیوپ سد، قطر سد لاستیکی (D_h) افزایش یافته و همین امر موجب افزایش عمق آب عبوری در کانال می‌شود. نتایج حاصل از پروفیل عمق جریان در طول کانال حاکی از آن است که با افزایش فشار درون تیوپ از ۱/۵ KN/m^2 به ۳ KN/m^2، عمق جریان تا قبل از رسیدن به سد، ۵/۶ درصد افزایش می‌یابد. ولی پس از عبور جریان از روی سد، تیوپی که بیشترین فشار درونی را دارد، کمترین عمق جریان را خواهد داشت.

همچنین در شکل (۱۱)، اثر مقدار دبی‌های مختلف، بر عمق جریان عبوری از روی سد در فشار ثابت درون تیوپ سد

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

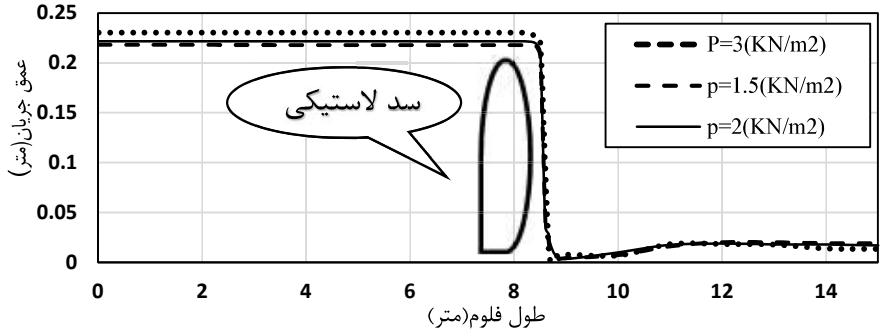
لاستیکی، نشان داده شده و مشخص شده است که به ازای فشار ثابت هوای درون تیوپ، با افزایش دبی، عمق جریان عبوری از روی سرریز افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار عمق آب در شکل (۱۱)، ۰/۲۳ متر است.

در شکل (۱۲) عمق جریان در طول زمان مدل‌سازی ارائه شده است که نشان‌دهنده ثابت شدن تقریبی عمق جریان در زمان پایداری است. در این مرحله بیشینه ارتفاع سطح آب از کف کانال برابر ۲۲ سانتی‌متر است که این مقدار تقریباً ثابت خواهد ماند.

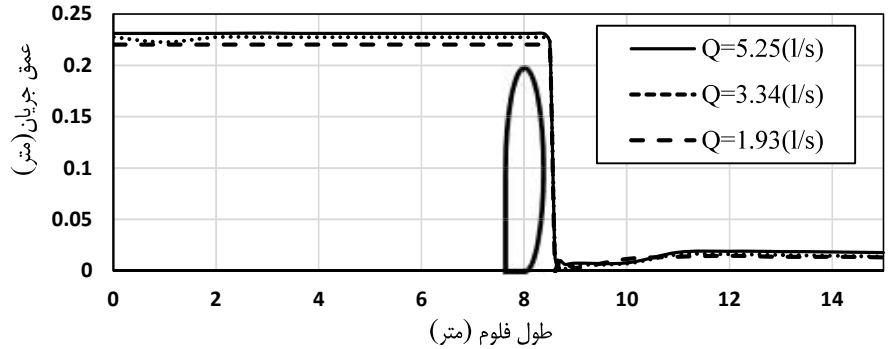
مقدار سرعت متوسط جریان عبوری از روی سد، به ازای دبی ثابت، تحت فشارهای مختلف درون تیوپ در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشخص شده است. طبق اطلاعات به‌دست‌آمده از نتایج تا قبل از رسیدن جریان به سرریز، مقدار متوسط سرعت در هر سه حالت تقریباً باهم برابر است لیکن با عبور جریان از روی سرریز، مدلی که تحت کمترین فشار درون تیوپ است، بیشترین سرعت برابر با ۰/۶۷۵ و ۰/۸۷۲ متر بر ثانیه را به ترتیب در دبی‌های ۱/۹۳ و ۳/۳۷ لیتر بر ثانیه دارد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، حداکثر سرعت جریان با دو برابر شدن فشار درون تیوپ در دبی ۱/۹۳ لیتر بر ثانیه معادل ۳۰ درصد و برای دبی ۳/۳۷ لیتر بر ثانیه، معادل ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، مقدار سرعت متوسط جریان عبوری از روی سد، به ازای فشار ثابت ۲ و ۳ کیلو نیوتون بر مترمربع، تحت دبی‌های ورودی مختلف نشان داده است. همان‌طور که انتظار می‌رود بیشترین سرعت متعلق به جریان با بیشترین دبی ورودی است که مقادیر آن به ترتیب برابر با ۰/۹۷۱ و ۰/۷۸۶ متر بر ثانیه تحت فشار ۲ و ۳ کیلو نیوتون بر مترمربع است.

نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است که با رشد ۵۶ درصدی دبی در شکل (۱۵)، سرعت جریان حدود ۶۳ درصد افزایش یافته است که این مقدار رشد در شکل (۱۶) معادل ۵۱ درصد است.



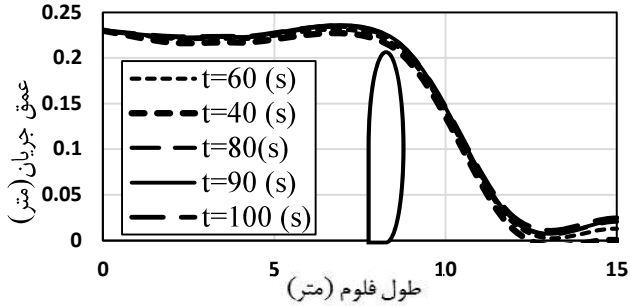
شکل (۱۰): رابطه میزان فشار درون تیوپ سد لاستیکی بر عمق جریان ((Q=3.34 (l/s)



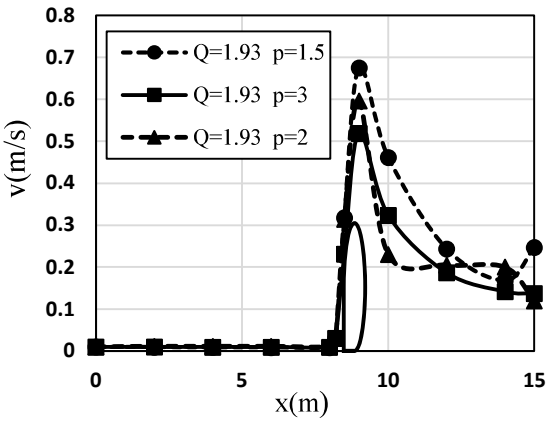
شکل (۱۱): رابطه میزان فشار درون تیوپ سد لاستیکی بر عمق جریان (p=3 KN/m2)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

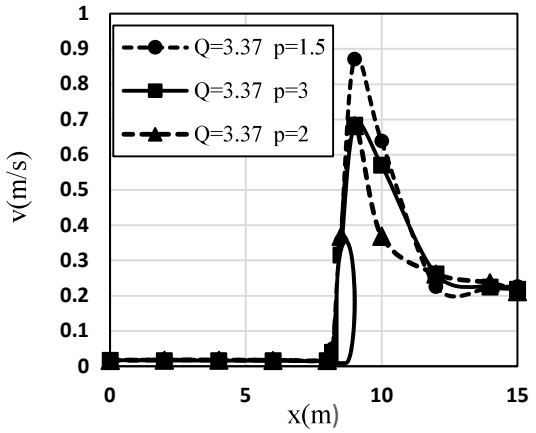
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]



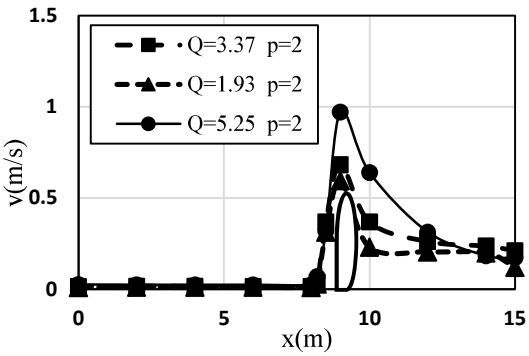
شکل (۱۲): نمایش عمق جریان در طی زمان



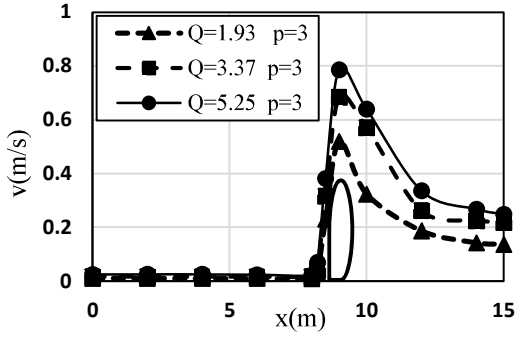
شکل (۱۳): نمایش سرعت متوسط جریان در (Q=1.93 l/s)



شکل (۱۴): نمایش سرعت متوسط جریان در (Q=3/37 l/s)



شکل (۱۵): نمایش سرعت متوسط جریان در $P=2\ KN/m^2$



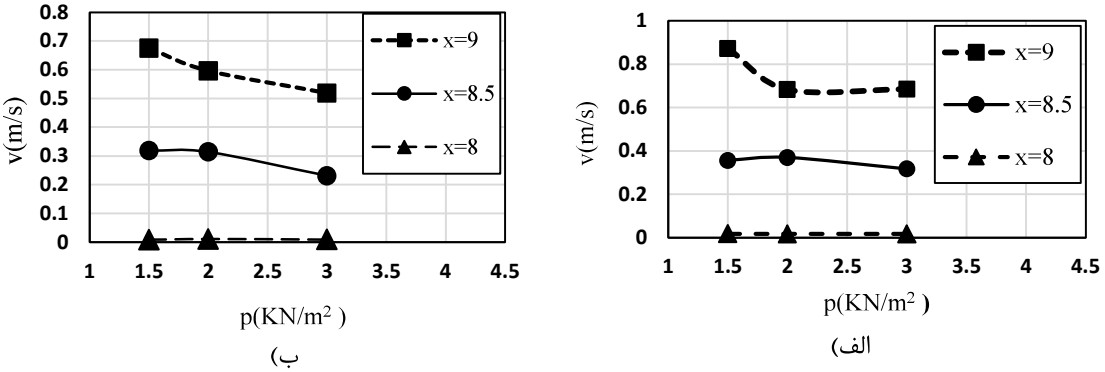
شکل (۱۶): نمایش سرعت متوسط جریان در $P=3\ KN/m^2$

رابطه سرعت جریان عبوری از روی سرریز با فشار درون تیوپ در مقاطع ۰/۵ متری قبل و بعد از سرریز و همچنین روی سرریز در شکل (۱۷) مشخص شده است. همان‌طور که در شکل (۱۷) مشخص است، سرعت جریان تا قبل از رسیدن به سرریز در هر سه فشار موردبررسی، بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. مقدار سرعت متوسط جریان بر روی سرریز x=۸/۵m، با افزایش فشار درون تیوپ کاهش می‌یابد و این کاهش فشار در مقطع x=۹m با افت بیشتری همراه است. ولی مشاهده می‌شود که در مقطع بعد از سرریز، مقدار سرعت متوسط بیش از ۲ برابر سرعت متوسط جریان بر روی سرریز خواهد بود. این در حالی رخ می‌دهد که جریان حین عبور از سرریز، با سرعتی بیش از ۲۵ برابر سرعت جریان در مقطع x=۸m عبور خواهد کرد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

دبی جریان، سرعت نیز افزایش می‌یابد. حداکثر سرعت جریان ۰/۸۷ m/s در دبی معادل ۳/۳۷ لیتر بر ثانیه اتفاق می‌افتد.



شکل (۱۷): نمایش رابطه سرعت جریان با فشار درون تیوپ: الف) Q=3.37 l/s، ب) Q=1.93 l/s

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامترهای هیدرولیکی جریان عبوری از سد لاستیکی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی شده است. در این راستا، پس از مش بندی، تعیین مدل آشفتگی و صحت سنجی مدل، پارامترهای ضریب دبی، عمق و سرعت متوسط جریان در شرایط مختلف شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل گردید. نتایج حاصل را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱) ضریب همبستگی میان مقادیر عددی و آزمایشگاهی برای پارامتر H/D_h، ۰/۹۳۵۷ به‌دست‌آمده است که نشان‌دهنده تطابق بالای نتایج حاصل از مدل‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی است؛ لذا نرم‌افزار Flow-3D به‌عنوان یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی معرفی شده است.

۲) دبی از مؤثرترین پارامترها بر ضریب دبی است که حداقل ضریب همبستگی میان این دو مشخصه ۰/۸۷۸ است. افزایش H/D_hبر رشد ضریب دبی بسیار مؤثرتر از افزایش فشار درون محفظه لاستیکی است، با افزایش ۳۱ درصدی H/D_h، مقدار ضریب دبی رشدی معادل ۶۹ درصد پیدا خواهد کرد، لیکن افزایش ۱۰۰ درصدی فشار درون تیوپ تنها ۵ درصد بر افزایش مقدار ضریب دبی اثر می‌گذارد.

۳) در بازه‌های با ضریب دبی بالاتر از ۰/۴۲ روند رشد ضریب دبی با افزایش H/D_h با آهنگ کمتری نسبت به ضرایب دبی کمتر، انجام می‌شود. مقدار رشد نسبت H/D_h، با افزایش دبی از ۱/۹۳ l/s به ۳/۳۴ l/s، ۳۵ درصد خواهد بود و با رسیدن مقدار دبی جریان از ۳/۳۴ l/s به ۵/۲۵ l/s میزان افزایش این نسبت حدود ۲۵ درصد است.

۴) نتایج حاکی از آن است که ضریب دبی در محدوده فشار درون تیوپ ۱/۵ تا ۲ کیلو نیوتون بر مترمربع، مقدار تقریباً ثابتی دارد و در فشار بالاتر از ۲، روند افزایشی خواهد داشت. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است که با رشدی معادل ۵۶ درصد در مقدار دبی، سرعت جریان بیش از ۵۰ درصد رشد کرده است. همچنین حداکثر سرعت جریان با دو برابر شدن فشار درون تیوپ بیش از ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

۵) سرعت جریان تا قبل از رسیدن به سرریز در هر سه فشار موردبررسی بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. مقدار سرعت متوسط جریان بر روی سرریز، با افزایش فشار درون تیوپ کاهش می‌یابد و این کاهش فشار در مقطع بعد از سرریز با افت بیشتری همراه است. ولی مشاهده شده است در مقطع بعد از سرریز، مقدار سرعت متوسط بیش از ۲ برابر سرعت متوسط جریان بر روی سرریز خواهد بود.

مراجع

۱- احسانی، م. و صالحی نیشابوری، س. ع. ا. (۱۳۹۴). "بررسی عددی تأثیر تغییرات ارتفاع شفت قائم بر شکل‌گیری کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری." نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی، سال دوم، شماره ۵، صفحه‌های ۱۳ تا ۲۳.

۲- احمدی، ت. و بینا، م. (۱۳۸۴). "بررسی هیدرولیک و رژیم جریان بر روی تاج در سدهای لاستیکی با استفاده از مدل فیزیکی."

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ تا ۱۹ آبان ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳- زارع، ح.، سروی شوریجه، غ. و بینا، م. (۱۳۹۲). "تأثیر تغییر ارتفاع شالوده‌ی کف در افت کارمایه‌ی جریان روی سدهای لاستیکی در حالت پرش مستغرق." مجله مهندسی منابع آب، سال ششم، صفحه‌های ۷۵ تا ۸۶.

۴- فرزین، س.، کرمی، ح.، نیّر، ش. و ضمیری، ا. (۱۳۹۴). "بررسی تغییرات سرعت جریان در سرریز استوانه‌ای با استفاده از CFD." دهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ۲۹ دی الی ۱ بهمن ۱۳۹۴، اهواز، دانشگاه شهید چمران.

۵- قره گزلو، م. و مسعودیان، م. (۱۳۹۰). "اثر قطر و هد آب روی سرریز استوانه‌ای روی ضریب دبی." چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۰، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۶- ورجاوند، پ.، فرسادی زاده، د.، خسروی نیا، پ. و رفیعی، ز. (۱۳۸۹). "شبیه‌سازی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از مدل Fluent و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی." مجله دانش آب و خاک، جلد۲۰/۱، شماره۲.

7- Alhamati, A. A. N., Mohammed, T. A., Norzaie, J., Ghazali, A. H., and Al-Jumaily, K. K. (2005). "Behavior of inflatable dams under hydrostatic conditions." *Suranaree Journal of Science and Technology*. 12(1), 1-18.

8- Alhamati, A. A. N., Mohammed, T. A., Ghazali, A. H., Norzaie, J., Al-Jumaily, K. K. (2005). "Determination of coefficient of discharge for air-inflated dam using physical model." *Suranaree Journal of Science and Technology*. 12(1), 19-27.

9- Andrianarison, O. and Ohayon, R. (2006). "Compressibility and gravity effects in internal fluid–structure vibrations: Basic equations and appropriate variational formulations." *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 195(17), 1958-1972.

10- Anwar, H. O. (1967). "Inflatable dams." *Journal of the Hydraulics Division*. 93(3), 99-119.

11- Chanson, H. (1997). "A review of the overflow of inflatable flexible membrane dams." *Australian Civil/Structural Engineering Transactions*. (2-3), 107-116.

12- Chanson, H. (1998). "Hydraulics of rubber dam overflow: a simple design approach." 13th Australasian Fluid Mechanics Conference, 13-18 December, 1998, Monash University, Melbourne, Australia.

13- Cheraghi-Shirazi, N., Kabiri-Samani, A. R. and Boroomand, B. (2014). "Numerical analysis of rubber dams using fluid–structure interactions." *Flow Measurement and Instrumentation*. 40, 91-98.

14- Farzin, S., Karami, H., Zamiri, E., Nayyer, Sh. (2016). "Three-dimensional modelling of flow over the cylindrical weir using Flow-3D software." 10th International River Engineering Conference, 19-21 January 2016. Shahid Chamran University, Ahwaz.

15- Ghavanloo, E. and Daneshmand, F. (2010). "Analytical analysis of the static interaction of fluid and cylindrical membrane structures." *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 29(4), 600-610.

16- Hirt, C. W., Chen, K. S. (1996)."Simulation of slide-coating flows using a fixed grid and a volume-of-fluid front-tracking technique." 8th international coating process science and technology symposium, 25-29 February, 1996, New Orleans, LA, USA.

17- Hirt, C. W., Nichols, B. D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries." *Journal of computational physics*. 39(1), 201-225

18- Hirt, C. W. and Richardson, J. E. (1999). "The Modeling of Shallow Flows." *Flow Science Technical Notes*. 48, 1-14.

19- Jena, J. (2012). "Rubber Dam and Its Prospect." Proceedings of International Conference on Structural and Civil Engineering.

20- Jumaily, K. K. and Salih, A. A. (2005). "Analysis of inflatable dams under hydrostatic conditions." *Journal of Engineering and Development*. 9(3), 69-93.

21- Samadi, A., Nejati, S., Azizi, S. H. and Bakhshayesh, B. O. (2014). "Three dimensional simulation of flow for semi cylindrical weirs using fluent software." *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 4(4), 397-401.

22- Tam, P. W. M. (1997). "Use of rubber dams for flood mitigation in Hong Kong." *Journal of irrigation and drainage engineering*. 123(2), 73-78.

23- Ul Islam, S. and Kumar, A. (2015). "Evaluation of Rubber Dams for SHP in India." *Indian Journal of Science and Technology*. 8(28), 1-8.

24- Ul Islam, S., and Kumar, A. (2016). "Inflatable dams for shp projects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57, 945-952.

25- Zhang, X. Q., Tam, P. W. and Zheng, W. (2002). "Construction, operation, and maintenance of rubber dams." *Canadian Journal of Civil Engineering*. 29(3), 409-420.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]

Study of the Flow over Rubber Dam Using Computational Hydrodynamics

Saeed Farzin [*1]
Hojat Karami [2]
Elham Zamiri [3]

Abstract

Rubber dams are hydraulic structures that are constructed on rivers which are cheaper than similar structures. In this research, rubber-dam modeling was performed by three different pressures inside the tube (1.5 to 3 KN/m^2) and three discharges (1.5 to 5.5 lit/s) by Flow-3D software. A rubber dam, located on an open channel, was verified using an experimental model. The correlation coefficient resulted from fitting numerical model results and physical quantities, was 0.9357, which represents high accuracy of the numerical-model results. Maximum discharge coefficient was about 0.46 in discharge of 5.25 lit/s and pressure of 3 KN/m^2. It was revealed that 100% increase in internal pressure of the tube leads to 5% increase in discharge coefficient. While, the same amount of discharge increase will lead to an increase of more than 25% in discharge coefficient. The H/D_h parameter was recognized as one of the effective factors on discharge coefficient. The modeling results showed that 31% increase of this parameter will increase discharge coefficient by 70%. Moreover, effective factors on flow velocity through the rubber dam were evaluated.

Keywords

Rubber dam, Discharge coefficient, Modeling, Internal pressure of tube, Flow-3D.

1* Assistant Professor, group of water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, saeed.farzin@semnan.ac.ir.
2 Assistant Professor, group of water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
3 M.Sc. Student of water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
Received: 2016/05/07 Accepted: 2016/07/31

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.3.3]