

یادداشت فنی

شبیه‌سازی عددی تأثیر جریان غلیظ بر آشفستگی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی سدها

سید محمد کاظم امامی^{۱*} و محمدرضا کاویانپور^۲

چکیده

استفاده از فعالیت‌های حفاظت آب و خاک برای کنترل رسوب‌زایی حوضه‌های آبریز در همه شرایط موفق نبوده و به نظر می‌رسد تخلیه رسوبات ته‌نشین شده در مخزن از طریق تخلیه‌کننده‌های تحتانی تنها راه حل مؤثر و موفقیت‌آمیز خواهد بود. با توجه به اهمیت انرژی آشفستگی جریان از لحاظ ورود هوا به جریان و پتانسیل وقوع کاویتاسیون، در این مقاله سعی شده تا با شبیه‌سازی عددی این فرایند، گامی در جهت بهینه‌سازی عملکرد این سازه‌ها برداشته شود. در این پژوهش ابتدا جریان دو فاز آب و هوا شبیه‌سازی و نتایج با مشاهدات و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. سپس دو جریان با غلظت ۳۰۰ و ۵۰۰ گرم در لیتر به صورت سه فاز اولری آب و هوا و رسوب، جهت بررسی تأثیر غلظت بر پروفیل‌های آشفستگی و انرژی آشفستگی سطحی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در غلظت‌های بالای رسوب، انرژی آشفستگی جریان در مقایسه با حالت آب خالص بسیار ناچیز بوده و فقط در سطح جریان و در فواصل نزدیک دریچه تأثیرگذار است. ورود ذرات جامد رسوب به جریان سبب کاهش شدت و نرخ آشفستگی در مقاطع مختلف جریان در تونل شده به گونه‌ای که افزایش غلظت جریان به ۳۰۰ گرم بر لیتر سبب کاهش ۵۰ درصدی حداکثر انرژی آشفستگی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آشفستگی جریان، تخلیه‌کننده تحتانی، شبیه‌سازی عددی، غلظت رسوب.

ارجاع: امامی س. م. ک. و کاویانپور م. ر. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی عددی تأثیر جریان غلیظ بر آشفستگی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی سدها. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۱۸۳-۱۸۷.

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب- هیدرولیک، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

* نویسنده مسئول: emami@sina.kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۲۷

مقدمه

که در آن $\bar{\tau}_q$ تانسور تنش- کرنش فاز q است. در رابطه فوق \bar{F}_q نیروی خارجی حجمی^۱، $\bar{F}_{lit,q}$ نیروی بالابر^۲، $\bar{F}_{vm,q}$ نیروی جرم مجازی^۳، \bar{R}_{pq} نیروی عمل کننده بین فاز^۴ و p فشار اعمالی از طرف تمام فازها است. با در نظر گرفتن عدم انتقال جرم، $\dot{m}_{pq}=0$ خواهد بود. معادله مومنتوم برای مخلوط نیز از حاصل جمع معادله مومنتوم برای هر فاز به دست می‌آید. در معادله ۳ پارامتر \bar{R}_{pq} نیروی بین فاز^۴ بوده و به زبری، فشار، چسبندگی و دیگر پارامترها وابسته است و روابط $\bar{R}_{pq} = \bar{R}_{qp}$ و $\bar{R}_{qq} = 0$ در مورد آن برقرار است.

$$\sum \bar{R}_{pq} = \sum K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (4)$$

که در آن $\bar{K}_{pq} = \bar{K}_{qp}$ ضریب تبدیل مومنتوم بین فاز^۴ است و:

$$k_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p}, \quad \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (5)$$

که در آن τ_p زمان تخفیف ذرات^۵ (فاصله زمانی از بین رفتن آشفتگی تا برقراری حالت تعادل)، d_p قطر حبابها و یا ذرات ثانویه فاز p و f تابع درگ^۶ است.

در این تحقیق شیب کف بر شکل‌گیری انواع الگوهای جریان تأثیرگذار است، لذا شتاب ثقل در محاسبات در نظر گرفته شده است. نیروی بالابر مؤثر بر فاز ثانویه q از طرف فاز اولیه p عبارت است از (کلر و همکاران، ۲۰۰۳):

$$\bar{F}_{lit} = -0.5\rho_q \alpha_p \left[\vec{v}_q - \vec{v}_p \right] \times (\nabla \times \vec{v}_q) \quad (6)$$

نیروی جرم مجازی زمانی که شتاب فاز ثانویه p نسبت به فاز اولیه q کاهش می‌یابد، وارد محاسبات می‌شود. مقدار این نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{vm} = 0.5\rho_q \alpha_p \left(\frac{d_q v_q}{dt} - \frac{d_p v_p}{dt} \right) \quad (7)$$

معرفی مدل، شبکه‌بندی محاسباتی و شرایط مرزی و اولیه

در تونل شماره ۵ سد سفیدرود (شکل ۱) در فاصله ۲۲/۴m از دهانه ورودی، دریچه سرویس به صورت قطاعی با شعاع ۵m واقع شده که ابعاد تونل در محل دریچه برابر

هر دوره عملیات رسوب‌شویی و تخلیه رسوب از طریق تخلیه‌کننده‌ها با معضلات و خسارات مهمی به سیستم هیدرومکانیک و بدنه مجرای این تأسیسات همراه است. از طرف دیگر کاربرد مدل‌سازی فیزیکی در شبیه‌سازی این پدیده به دلیل مشکلات و هزینه بالای آن میسر نشده و از نتایج مدل فیزیکی در شبیه‌سازی جریان خالص از مجرا برای بهینه‌سازی این بناها استفاده می‌شود. بنابراین عدم توجه به این موضوع ممکن است به تخریب سازه تونل و تأسیسات وابسته منجر شود. به عنوان مثال می‌توان به سد سفیدرود و تخریب تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی در سال‌های گذشته و حال اشاره کرد (طلوعی و همکاران، ۱۹۹۳ و خسرونژاد، ۲۰۰۹).

در این راستا در پژوهش حاضر جریان غلیظ رسوبی در تخلیه‌کننده تحتانی (شماره ۵) سد سفیدرود، جهت بررسی تأثیر غلظت جریان بر پروفیل‌های انرژی آشفتگی و آشفتگی سطحی، شبیه‌سازی و مطالعه شده است.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

جریان خروجی شامل فاز آب، رسوب و هوا است که معادله پیوستگی برای هر فاز به صورت جداگانه به شکل زیر بیان می‌شود (بوون، ۱۹۷۶):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

که در آن \vec{v}_q سرعت فاز q و \dot{m}_{pq} جرم منتقل شده از فاز p ام به فاز q ام، ρ_q دانسیته فاز q و α_q ضریب کسر حجمی آن است. کسر حجمی هر فاز نیز از معادله پیوستگی قابل محاسبه است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} (\alpha_q \frac{d_q \rho_q}{dt}) \quad (2)$$

تعادل مومنتوم برای فاز q در حالت کلی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \\ & \alpha_q \rho_q (\bar{F}_q + \bar{F}_{lit,q} + \bar{F}_{vm,q}) \\ & + \sum (\bar{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) \\ & - \alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q g \end{aligned} \quad (3)$$

1- External Body Force

2- Lift Force

3- Virtual Mass Force

4- Interaction Force Between Phases

5- particulate relaxation time

6- drag function

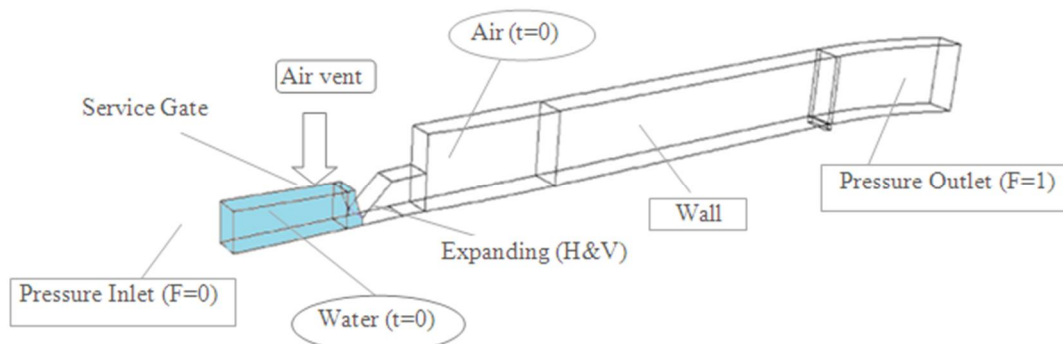
بیشتری می‌یابد و نیز با در نظر گرفتن شرایط جریان و گرادپان‌های سرعت موجود در جریان، شبکه‌بندی، در پلان و همچنین در عمق ریزتر شده است و سلول‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که کوچک‌تر کردن اندازه سلول تأثیر محسوسی بر نتایج مدل نداشته باشد.

جدول ۱- مشخصات شبکه تولید شده

نام مدل	تعداد گره‌ها	زمان جریان (s)	زمان اجرا (hr)
3D,20%opening	۴۷۸۵۵۰	۱۲	۴۲۰

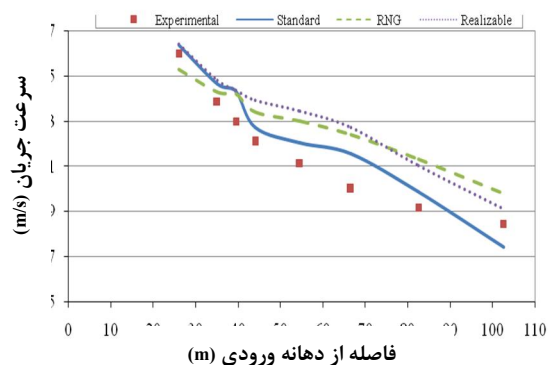
۲/۵m عرض و ۳m ارتفاع است. شیب کف تونل از دریچه سرویس تا انتهای تونل ۱/۳٪ است. عرض کف تونل نیز در فاصله ۲۸/۷۵m از دهانه ورودی توسط دو خم متوالی به شعاع‌های ۷۴ m و ۴۳۰m از ۲/۵m به ۳/۲۵m در فاصله ۴۸m از دهانه ورودی می‌رسد. برای امکان مقایسه نتایج، ابتدا شبیه‌سازی هندسی به صورت سه بعدی و در بازشدگی ۲۰٪ دریچه و براساس مدل هیدرولیکی ساخته شده در مؤسسه تحقیقات آب انجام شد.

همچنین محاسبات با شبکه‌ای ساختارمند منفصل که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد. در بخش‌هایی از تونل و با نزدیک شدن به دریچه و محدوده استخراج نتایج، از آنجایی که تغییرات مکانی جریان اهمیت



شکل ۱- هندسه تونل تخلیه‌کننده شماره ۵ سد سفیدرود به همراه شرایط مرزی و اولیه

بحث جریان آب- رسوب، از الگوی مذکور در گام‌های بعدی در زمینه شبیه‌سازی عددی پدیده جریان غلیظ در تخلیه‌کننده تحتانی استفاده شده است.



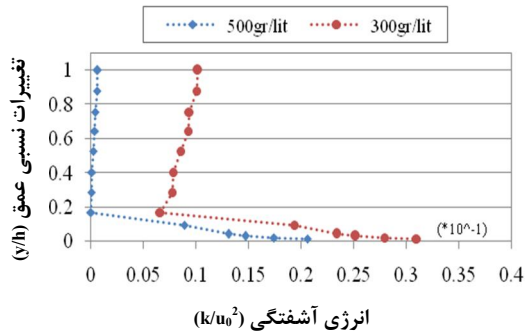
شکل ۲- مقایسه مدل‌های آشفتگی و داده‌های تجربی در پیش‌بینی سرعت در عمق ۰/۵ h

باتوجه به افزایش زمان محاسبات به دلیل افزایش تعداد فازها، هندسه در مرحله بعد به صورت دو بعدی شبیه‌سازی

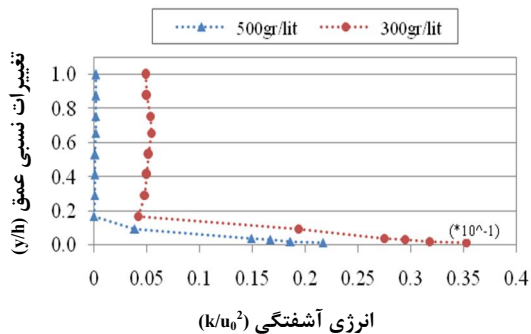
نتایج و بحث

برای انتخاب مناسب‌ترین الگوی آشفتگی با توجه به پژوهش‌های انجام شده در این زمینه (لاندر و اسپالدینگ، ۱۹۷۴؛ معظمی و کاویانپور، ۱۳۸۶)، مطالعه‌ای روی مدل می‌شود اختلاف نسبی بسیار کم (کمتر از ۰/۵٪) مقادیر سرعت مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل آشفتگی استاندارد، حاکی از همخوانی مناسبی برای داده‌هاست. بر این اساس و با توجه به نتایج استخراج شده از پروفیل‌های سرعت و توزیع فشار استاتیک (که به دلیل محدودیت در حجم مطالب از ارائه آن خودداری می‌شود) الگوی آشفتگی استاندارد در معادلات $k-\varepsilon$ به عنوان مناسب‌ترین الگوی موجود در زمینه شبیه‌سازی جریان آب- هوا در مدل حاضر تشخیص داده شده (امامی و کاویانپور، ۱۳۸۹ و هگر، ۲۰۰۰) که با توجه به عدم دسترسی به نتایج آزمایشگاهی مشابه جریان آب- هوا در

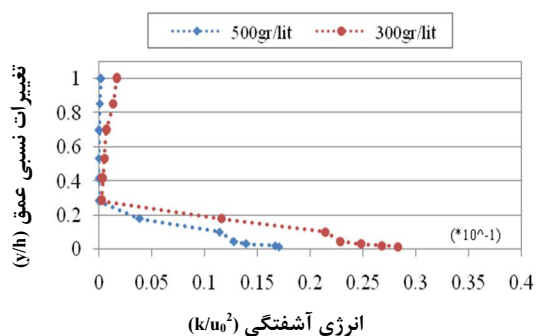
کوچک و سطحی بوده و تغییرات آن در عمق بسیار ناچیز است. با افزایش غلظت سیال، لختی توده سیال افزایش یافته که در تضعیف انرژی آشفته‌گی و کاهش آن مؤثر خواهد بود، البته اثر لایه برشی جدا شده از لبه دریاچه همچنان به‌عنوان یک عامل ایجاد آشفته‌گی در سطح جریان در فواصل نزدیک دریاچه قابل دیدن است.



شکل ۵- پروفیل انرژی آشفته‌گی در $x=1.0$ m از دریاچه



شکل ۶- پروفیل انرژی آشفته‌گی در $x=2.04$ m از دریاچه

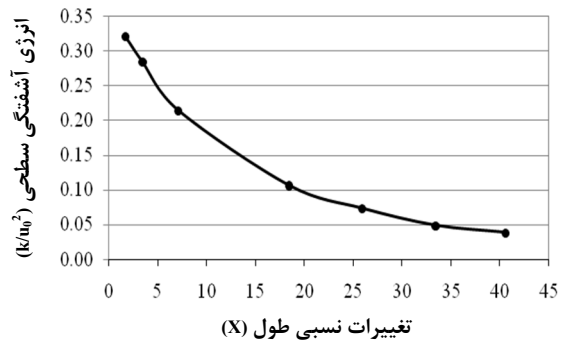


شکل ۷- پروفیل انرژی آشفته‌گی در $x=11.04$ m از دریاچه

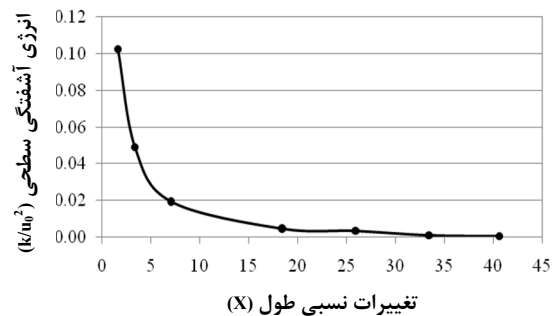
با توجه به نتایج حاصل، افزایش غلظت جریان ۳۰۰ گرم بر لیتر، سبب کاهش حدود ۹۵٪ انرژی آشفته‌گی در مقاطع مختلف در عمق و کاهش ۴۵٪ آن در نزدیکی بستر می‌شود، به گونه‌ای که در غلظت ۵۰۰ gr/lit میزان آشفته‌گی در عمق، بسیار ناچیز است.

شده است.

خصوصیات رسوب براساس شبیه‌سازی شد و از چسبندگی و تأثیر نیروهای الکتریکی بر ذرات صرف‌نظر گردید. تغییرات سطحی بی‌بعد شده انرژی آشفته‌گی در طول تخلیه‌کننده در دو حالت دو فاز و سه فاز نیز بررسی شد که نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در این نمودارها، X^* معرف x/w بوده که W میزان بازشدگی دریاچه است.



شکل ۳- انرژی آشفته‌گی سطحی جریان دو فازی آب و هوا



شکل ۴- انرژی آشفته‌گی سطحی جریان با غلظت ۳۰۰ gr/lit

همان‌گونه که دیده می‌شود، ورود ذرات جامد رسوب به جریان باعث کاهش شدید آشفته‌گی سطحی در مقاطع مختلف و به‌خصوص در ابتدای تونل نسبت به جریان دو فاز شده است. کمتر بودن میزان آشفته‌گی سطحی در واقع به معنای اختلاط کمتر هوا با جریان است که لزوم توجه بیشتر به ساز و کار وقوع پدیده کاپیتاسیون و کنترل و تأثیر هوا بر آن در جریان‌های غلیظ را گوشزد می‌کند.

شکل‌های ۵ الی ۷ پروفیل‌های بی‌بعد شده انرژی آشفته‌گی در سه ایستگاه‌های متفاوت را در دو غلظت ۳۰۰ gr/lit و ۵۰۰ gr/lit نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های مذکور، میزان آشفته‌گی در جریان با غلظت بیشتر، کمتر بوده، به گونه‌ای که در غلظت ۵۰۰ گرم بر لیتر، شدت آشفته‌گی بسیار

7. Speerli Hager W. H. 2000. Air water flow in bottom outlets. Canadian Journal of Civil Engineering. 27(3): 454-462.
8. Tolouei E. West J. R. and Billiam J. 1993. Sedimentation and desiltation in the Sefid-Roud reservoir. Iran. Geomorphology and Sedimentology of lakes and reservoir. 125-138.

نتیجه گیری

مطالعه انجام شده نشان داد که ورود ذرات جامد رسوب به جریان علاوه بر کاهش شدت آشفتگی سطحی در مقاطع مختلف، آهنگ کاهش میزان این آشفتگی در ابتدای تونل را نیز افزایش می‌دهد.

از آنجا که در جریان‌های حاوی رسوب، حداکثر انرژی آشفتگی در کف رخ می‌دهد و کاهش انرژی آشفتگی متأثر از افزایش غلظت جریان در نزدیکی بستر کمتر است و نیز با توجه به کاهش شدید انرژی آشفتگی در سطح جریان‌های غلیظ، استفاده از رمپ هواده برای هوادهی جریان از زیر، به‌عنوان راهکاری مناسب برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون توصیه می‌شود. این نتایج در بحث مکانیزم هواگیری جریان که ارتباط مؤثری با آشفتگی سطحی دارد مهم بوده و نشان می‌دهد که با ورود جریان غلیظ به این تونل‌ها، میدان جریان با تغییرهای اساسی همراه شده و بنابراین باید در مطالعات مورد توجه قرار گیرد.

منابع

۱. امامی م. ک. و کاویانپور م. ر. ۱۳۸۹. بررسی عددی جریان رسوب در تخلیه‌کننده تحتانی سدها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. دانشکده عمران. ۱۸۶ ص.
۲. معظمی گودرزی ص. و کاویانپور م. ر. ۱۳۸۶. بررسی عددی جریان دوفازه و مقایسه نیروهای هیدرودینامیک وارد بر دریچه‌های تحتانی سدها در دو حالت با هوادهی و بدون هوادهی. ششمین کنفرانس هیدرولیک. شهرکرد. ایران. ۳-۵.
3. Bowen R. M. 1976. Theory of mixtures. A.C.Eringen (Ed.). Continuum Physics. 21(3): 119-126.
4. Keller U. Volkart P. U. and Minor H. E. 2003. Tail water influenced transition from free surface to pressurized flow in bottom outlet tailrace tunnels. XXX IAHR Cong. Theme D. AUTH. Thessaloniki. Greece. 511-518.
5. Khosronejad A. 2009. Optimization of the Sefid-Roud Dam desiltation Process using a sophisticated one-dimensional numerical model. International Journal of Sediment Research. 24(2): 189-200.
6. Launder B. E. and Spalding D. B. 1974. The numerical computation of turbulent flow. computer methods in applied mechanics and engineering. 3(2): 269-289.

