

شبیه‌سازی عددی تأثیر جریان غلیظ بر تنش برشی دیواره تخلیه‌کننده تحتانی سدها

سید محمدکاظم امامی^{۱*}، محمدرضا کاویانپور^۲، رضا روشن^۳

۱- کارشناس ارشد هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- مربی پژوهشی گروه سازه‌های هیدرولیکی، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

* تهران، صندوق پستی ۱۴۸۱۷۱۳۷۴۳

Kazem.emami@gmail.com

چکیده - جریان غلیظ یکی از اصلی‌ترین فرایندهای رسوبگذاری در مخازن سدها است که کارکرد سد را پیش از پایان عمر مفید آن با مخاطره روبرو می‌سازد. چنانچه روش‌های موجود برای کنترل رسوبهای ورودی مخزن کارایی لازم را نداشته باشد، تخلیه رسوبهای ته‌نشین شده در مخزن از طریق تخلیه‌کننده‌های تحتانی، تنها راه حل مؤثر و موفقیت‌آمیز خواهد بود. از آنجا که انجام هر دوره عملیات رسوبشویی با توجه به عبور مقادیر زیادی مواد رسوبی جامد حمل شده با جریان، سایش و خوردگی سطوح کف و دیواره‌های تونل‌های تخلیه‌کننده را سبب خواهد شد، لذا در این مقاله سعی شده با شبیه‌سازی عددی فرایند تخلیه رسوب از تخلیه‌کننده تحتانی مخزن سد به روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل سه‌فازی اولری در نرم‌افزار فلوئنت، گامی در راستای شناخت این پدیده در برای بهینه‌سازی نحوه عملکرد تونل برداشته شود. در این تحقیق از دو غلظت ۳۰۰ و ۵۰۰ گرم بر لیتر برای بررسی تنش‌های برشی ناشی از فاز آب و رسوب به‌طور جداگانه استفاده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاکی از وجود تنش‌های برشی در لایه‌های مختلف جریان غلیظ و افزایش شدید این تنش‌ها در فاصله بسیار کوتاهی پس از دریچه است.

کلید واژگان: شبیه‌سازی عددی، تخلیه‌کننده تحتانی، فرسایش و رسوب‌گذاری، تنش برشی، غلظت رسوب.

۱- مقدمه

تجربه‌های به‌دست آمده در کنار مطالعات و پژوهشها نشان داده است که استفاده از روش تخلیه جریان‌های غلیظ از طریق تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد می‌تواند در حل این مسأله به نتایج موفقیت‌آمیزی منجر شود. با توجه به عبور مقادیر زیادی از مواد رسوبی جامد حمل شده با

فعالیت‌های حفاظت از آب و خاک به هدف کنترل رسوب‌زایی در حوضه‌های آبریز انجام شده و باید به روش‌های دیگری نسبت به حل معضل رسوبگذاری مخزن اقدام کرد (Khosronejad, 2009).

(Bowen, 1976; Anderson and Jackson, 1967)

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

که در آن \vec{v}_q سرعت فاز q و \dot{m}_{pq} جرم منتقل شده از فاز p به فاز q ، ρ_q چگالی فاز q و α_q ضریب کسر حجمی آن است. از آنجا که انتقال جرم در این مدل مجاز نیست، لذا سمت راست این رابطه برابر صفر است. کسر حجمی هر فاز از معادله پیوستگی محاسبه می‌شود:

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

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

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

که در آن $\vec{\tau}_q$ تانسور تنش-کرنش فاز q است. در این رابطه \vec{F}_q نیروی خارجی حجمی^۱، $\vec{F}_{lift,q}$ نیروی بالابر^۲، $\vec{F}_{vm,q}$ نیروی جرم مجازی^۳، \vec{R}_{pq} نیروی عمل‌کننده بین فاز^۴ و P فشار اعمال شده از سوی تمامی فازها است. توجه به انتقال نیافتن جرم، $\dot{m}_{pq} = 0$ خواهد بود. معادله مومنتم برای مخلوط از حاصل جمع معادله مومنتم برای هر فاز به دست می‌آید. در معادله ۳ پارامتر \vec{R}_{pq} نیروی بین فاز^۴ بوده و به زبری، فشار، چسبندگی و سایر پارامترها وابسته بوده و برای آن داریم: $\vec{R}_{pq} = \vec{R}_{qp}$ و $\vec{R}_{qq} = 0$:

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

که در آن $\vec{K}_{pq} = \vec{K}_{qp}$ ضریب تبدیل مومنتم بین فاز^۴ است. برای جریان‌هایی که دو سیال با مقدار نابرابر را شامل می‌شوند، سیالی که مقدار (نفوذ) بیشتری دارد و جریان غالب را تشکیل می‌دهد، به‌عنوان فاز اصلی در نظر

جریان، سایش و خوردگی سطوح کف و دیواره‌های تونل‌های تخلیه‌کننده از اهمیت خاصی برخوردار است به‌گونه‌ای که در طی هر دوره عملیات رسوب‌شویی، آسیب‌های بسیار زیادی به قسمت‌های مختلف پوشش کف و دیواره‌های پایاب گالری وارد شده است.

محققان مختلف با انجام بررسی‌های تئوری و تحلیل‌های عددی یا کاوش‌های تجربی، به مطالعه جریان‌های چندفازی پرداخته‌اند. از میان این محققان می‌توان Keller (2003) را نام برد که به مطالعه اثر انتقال از جریان آزاد به تحت فشار در خروجی‌های تحتانی و تونل‌ها، بر عمق آب پایین دست پرداختند.

Hager & Speerli (2000) به مطالعه جریان آب و هوا در تخلیه‌کننده تحتانی با استفاده از مدل هیدرولیکی با ابعاد نسبتاً بزرگی پرداخته‌اند. ایشان همچنین روش تحلیلی جدیدی را برای محاسبه پروفیل سطح آب در درون مجرا و غلظت هوا در آن ارائه کردند. Lareo & Fryer (1997) نیز کار ارزشمندی را در زمینه مکانیک سیال جریان دو فاز^۴ مایع-جامد انجام دادند. اگرچه مطالعات آنها در زمینه بیولوژی و پردازش تولیدات غذایی صورت گرفت، اما بررسی‌های انجام شده را با دقت خوبی برای مسائل مهندسی نیز می‌توان به‌کار برد.

در این تحقیق، تونل شماره پنج سد سفیدرود به سبب مشکلات و خسارتهای وارد شده بر آن در طی سالیان گذشته مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبه‌سازی آن انجام شده است.

۲- معادلات حاکم

جریان شامل فاز آب، رسوب و هوا (تراکم ناپذیر) است و معادله پیوستگی برای هر فاز به‌طور جداگانه به شکل زیر نوشته می‌شود

1. External Body Force
2. Lift Force
3. Virtual Mass Force
4. Interaction Force Between Phases

جمله d_q/dt مشتق زمانی فاز بوده که برابر است با:

$$\frac{d_q(\phi)}{dt} = \frac{\partial(\phi)}{\partial t} + (v_q \cdot \nabla)\phi \quad (۸)$$

نیروی جرم مجازی نیز برای هر فاز به سمت راست معادله مومتم اضافه می شود (Fluent user's guide, 2005).

۳- معرفی مدل و شرایط مرزی

در فاصله ۲۲/۴m از دهانه ورودی مجرای تخلیه کننده سد سفیدرود، دریچه کمکی به صورت قطاعی با شعاع ۵m واقع شده و ابعاد تونل در محل دریچه برابر ۲/۵m عرض و ۳m ارتفاع است. شیب کف تونل از این دریچه تا انتهای تونل برابر ۱/۳٪ است. عرض کف تونل در فاصله ۲۸/۷۵m از دهانه ورودی توسط دو خم متوالی با شعاع های ۷۴m و ۴۳۰m از ۲/۵m به ۳/۲۵m در فاصله ۴۸m از دهانه ورودی می رسد.

برای آن که مقایسه نتایج ممکن باشد، شبیه سازی هندسی نخست به صورت سه بعدی و در بازشدگی ۲۰٪ دریچه و بر اساس مدل هیدرولیکی نمونه آزمایشی انجام شده است. کل تونل تخلیه کننده از قبل از دریچه تا انتها مدل سازی شده تا شرایط ورود هوا از انتهای تونل حاکم باشد. همچنین شرایط مرزی به گونه ای اعمال شد که هوادهی جریان از بالای دریچه نیز امکان پذیر باشد. شرایط مرزی به کار رفته در تحلیل عددی در شکل ۱ نشان داده شده که در آن، F بیانگر کسر حجمی فاز هوا در مدل است. در شروع محاسبات کل مقطع پایین دست پر از هوا و سرعت جریان در مقطع بالادست ناچیز فرض شد.

۴- شبکه بندی دامنه محاسباتی

در این تحقیق با توجه به قابلیت های نرم افزار فلونت، از آن برای شبیه سازی عددی مسأله مورد نظر استفاده شد. شبکه تولید شده از نوع ساختارمند است. در بخشهایی از

گرفته می شود. در این مدل آب به عنوان فاز اصلی در نظر گرفته شده است:

$$k_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad \text{and} \quad \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (۵)$$

که در آن τ_p زمان آرامش ذرات^۱ (فاصله زمانی از بین رفتن آشفتگی تا برقراری حالت تعادل)، d_p قطر حبابها یا ذرات ثانویه فاز p و f تابع درگ^۲ است.

در تمامی حالتها در شرایطی که فاز اصلی داخل میدان موجود نیست k_{pq} باید به صفر میل کند، بنابراین تابع درگ f همان طور که در معادله ۵ نشان داده شده همواره در کسر حجمی فاز اصلی (α_q) ضرب می شود. در این تحقیق شیب کف بر شکل گیری الگوهای جریان اثر می گذارد، لذا باید شتاب ثقل در محاسبات وارد شود. این روند باعث به وجود آمدن تعادل نسبی بین گرادیان فشار و نیروی حجمی در معادله مومتم می شود. نیروی بالابر مؤثر بر فاز ثانویه q از سوی فاز اولیه p عبارت است از:

$$\bar{F}_{lift} = -0.5\rho_q\alpha_p|\vec{v}_q - \vec{v}_p| \times (\nabla \times \vec{v}_q) \quad (۶)$$

نیروی بالابر باید برای هر فاز به سمت راست معادله مومتم اضافه شود. این نیروها بر اثر گرادیانهای سرعت در جریان فاز اولیه، بر ذره اعمال شده و اثر آنها بر ذرات بزرگتر بیشتر است. نیروی جرم مجازی، زمانی به محاسبات وارد می شود که شتاب فاز ثانویه p نسبت به فاز اولیه q کاهش می یابد. اینرسی جرم فاز اولیه ای که با ذرات کاهش شتاب یافته روبرو شده، نیروی جرم مجازی را بر ذرات وارد می کند. این نیرو از رابطه زیر به دست می آید:

$$F_{vm} = 0.5\rho_q\alpha_p\left(\frac{d_q v_q}{dt} - \frac{d_p v_p}{dt}\right) \quad (۷)$$

1. Particulate Relaxation Time
2. Drag Function

از همخوانی مناسب داده‌ها است. همچنین همخوانی قابل ملاحظه‌ای (با میانگین اختلاف کمتر از ۲۰٪) میان نتایج به‌دست آمده از حل عددی در توزیع فشار استاتیک در کف تونل تخلیه کننده و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دیده می‌شود که به دلیل محدودیت در حجم، بررسی نمی‌شود. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر شبه‌سازی جریان به صورت سه فاز آب-هوای-رسوب مد نظر بوده - که این سبب افزایش حجم محاسبات می‌شود- لذا در مرحله بعدی، هندسه مدل، به صورت دوبعدی شبه‌سازی و نتایج استخراج شده است.

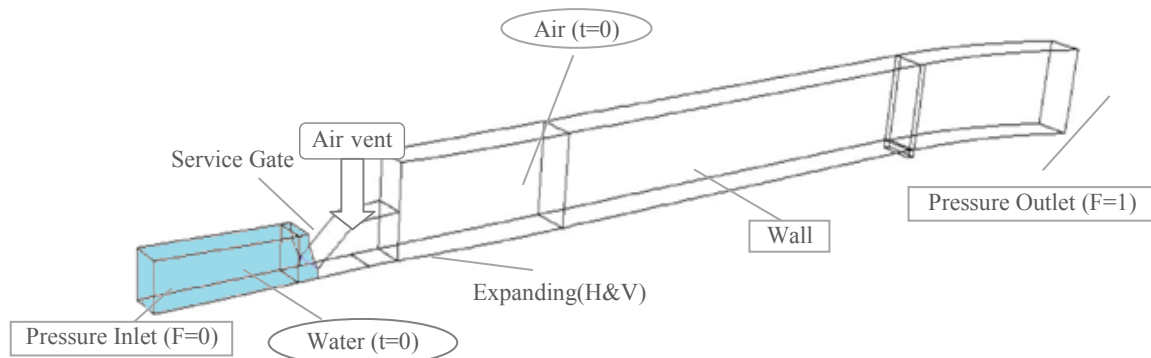
شرایط مرزی و اولیه‌ای که برای مدل دو بعدی در نظر گرفته شده، مانند شکل ۱ است. شبکه‌بندی دامنه محاسباتی مدل دوبعدی نیز بر اساس تعداد سلول‌های به‌کار رفته در صفحه مرکزی تونل در مدل سه‌بعدی با فواصل معین از جداره در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، تأثیر حذف بازشدگی افقی تونل بر افزایش جزئی مقادیر سرعت به‌دست آمده از حل عددی در کالیبره‌سازی مدل محسوس است.

تونل که مسیر مستقیم وجود دارد، شبکه‌بندی یکنواخت به‌کار رفته و با نزدیک شدن به دریچه و محدوده استخراج نتایج، از آنجا که تغییرات مکانی جریان اهمیت بیشتری دارد و نیز با در نظر گرفتن شرایط جریان و گرادیان‌های سرعت موجود شبکه‌بندی، در پلان و همچنین در عمق ریزتر شده است. شبکه ایجاد شده شامل ۴۷۸۵۵۰ گره محاسباتی است. شبه‌سازی برای مدت زمان ۱۲s انجام و زمان اجرای برابر ۴۲۰hr است. برای شبه‌سازی عددی، رایانه‌ای با پردازنده مرکزی دو هسته‌ای ۳/۲ گیگاهرتز به‌کار رفته است، به گونه‌ای که دو هسته به‌طور موازی، مدل را پردازش می‌کنند.

۵- نتایج شبه‌سازی عددی جریان دو فاز

(آب و هوا) و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۲ منحنی سرعت حاصل از شبه‌سازی برای مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی ترسیم شده است. پارامتر h عمق موضعی جریان، x فاصله از دریچه و V سرعت جریان است. همان‌گونه که دیده می‌شود، اختلاف نسبی بسیار کم (کمتر از ۵٪) بین مقادیر سرعت مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی (اندازه‌گیری شده با لوله پیتو)، حاکی

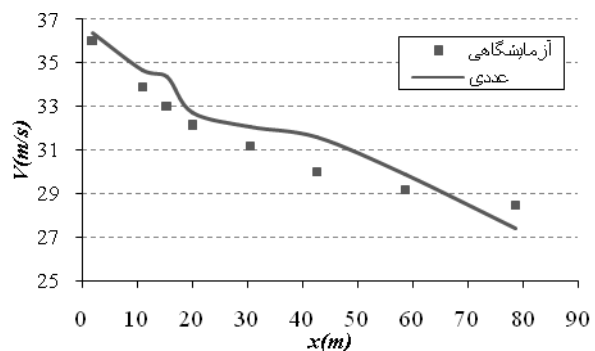


شکل ۱ طرح هندسی تونل تخلیه کننده شماره پنج سد سفیدرود و شرایط مرزی و اولیه به‌کار رفته در مطالعه حاضر

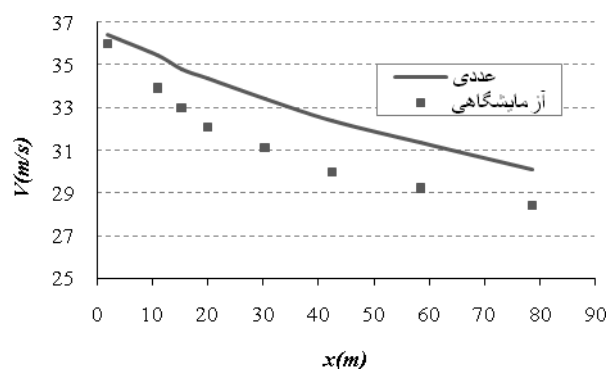
مدلسازی برای دو غلظت متفاوت ۳۰۰ gr/lit و ۵۰۰ gr/lit انجام شده است.

با توجه به توانایی نرم‌افزار فلونت در مدلسازی چندفازی جریان، تنش‌های برشی دیواره در جریان‌های رسوبی را می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی کرد: ۱- تنش‌های برشی ناشی از سیال آب ۲- تنش‌های برشی ناشی از برخورد رسوبهای جامد معلق در جریان غلیظ با دیواره. بر اساس این نوع تقسیم‌بندی، نتایج به دست آمده برای تنش برشی وارد شده بر کف تونل در طول مجرا از ابتدای بازشدگی دریاچه به‌طور جداگانه برای فازهای رسوب و آب و نیز تنش برشی کل به‌ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج شکل ۴ حاکی از کاهش تقریباً ۵۰٪ در تنش‌های برشی ناشی از رسوب در فاصله ۲۵ متری از ابتدای تونل است. کاهش تنش‌های برشی در این فاصله، روندی نسبتاً خطی دارد و در پایان، تنش تقریباً ثابت می‌شود.

افزایش غلظت رسوب، سبب افزایش چشمگیر تنش‌های برشی ناشی از رسوب در کف تخلیه‌کننده می‌شود. همچنین وقوع تنش‌های برشی بیشینه در فاصله حدود ۲/۵ متری از ابتدای بازشدگی دریاچه را می‌توان به محل وقوع جمع‌شدگی جریان در پایین‌دست دریاچه - که سرعت جریان به حداکثر رسیده و سپس با بازشدگی جریان کاهش می‌یابد - مرتبط دانست. همان‌گونه که دیده می‌شود، اگرچه افزایش غلظت رسوب، سبب کاهش کسر حجمی آب و در نتیجه کاهش تنش‌های برشی ناشی از فاز آب می‌شود، اما این در نهایت - به دلیل افزایش تصاعدی میزان برخورد رسوبهای جامد معلق در جریان غلیظ با کف تونل - افزایش تنش‌های برشی کل را منجر خواهد شد.



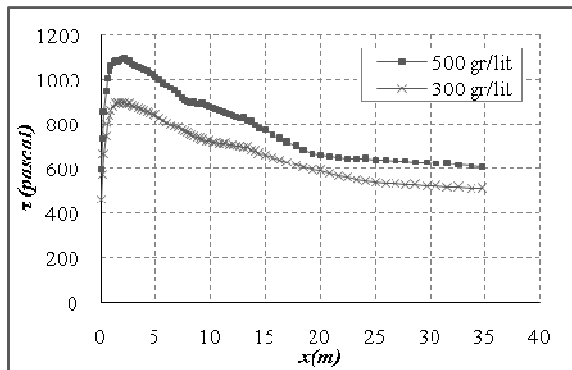
شکل ۲ نتایج پیش‌بینی سرعت در عمق ۰/۵ h در طول تخلیه‌کننده (مدل سه‌بعدی)



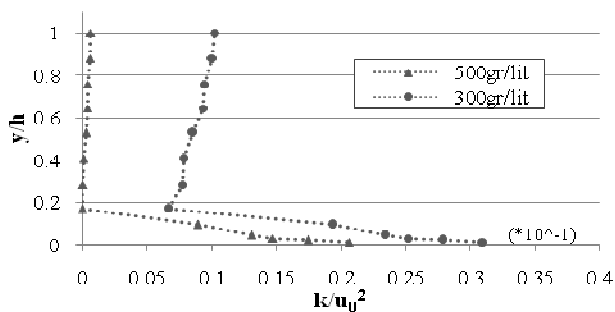
شکل ۳ نتایج پیش‌بینی سرعت در عمق ۰/۵ h در طول تخلیه‌کننده (مدل دو بعدی)

۶- نتایج شبیه‌سازی عددی جریان سه‌فاز (آب و رسوب و هوا) برای دو غلظت متفاوت

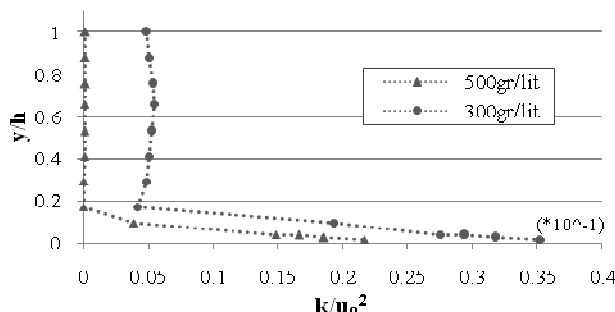
داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت رسوب در پایین‌دست سد در موقعیت‌های مکانی مختلف حاکی از ترکیب رسوبهای ته‌نشینی شامل ۴۱٪ ماسه و ۵۹٪ رس است (Khosronejad, 2009). در مدل حاضر ویژگیهای رسوب بر مبنای ماسه شبیه‌سازی شده و از چسبندگی و تأثیر نیروهای الکتریکی بر ذرات (که در ذرات کلوییدی از اهمیت خاصی برخوردار است) صرف‌نظر شده و



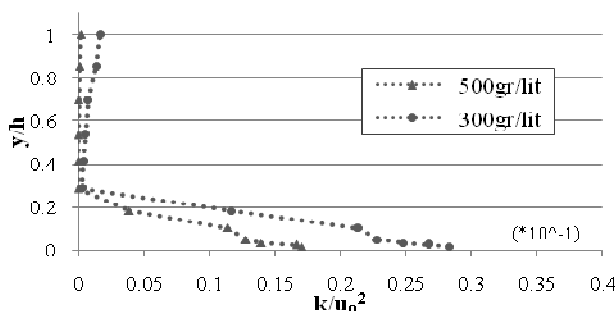
شکل ۶ تنشهای برشی کل وارد شده بر کف در طول تونل



شکل ۷ پروفیل انرژی آشفتگی در $x=1/0$ m

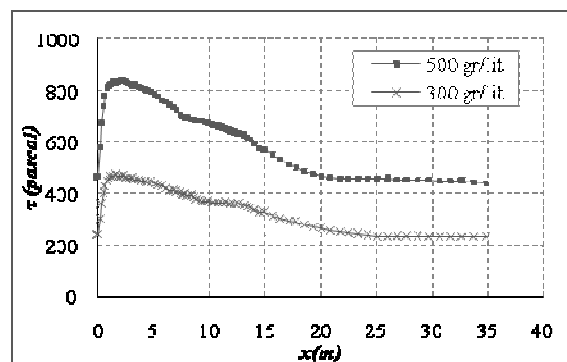


شکل ۸ پروفیل انرژی آشفتگی در $x=2/0.4$ m

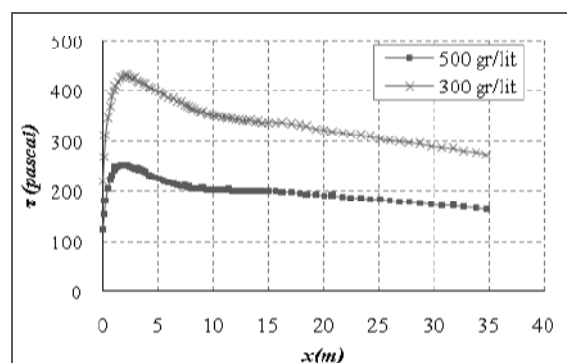


شکل ۹ پروفیل انرژی آشفتگی در $x=11/0.4$ m

مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که نرخ تنش برشی ناشی از رسوبها در مقایسه با گرادیان تنش‌های برشی ناشی از فاز آب، مقادیر بیشتری دارد. به بیانی دیگر بخش بزرگی از کاهش تنش برشی کل (پس از گذر از محل وقوع حداکثر) که در ۲۵ متری آغاز تونل رخ می‌دهد، به سبب کاهش تنش برشی ناشی از رسوب است. همچنین پروفیل انرژی آشفتگی در فاصله بسیار کوتاهی پس از دریچه (شکل ۷) نشان می‌دهد که حضور دریچه و اغتشاش‌های ایجاد شده توسط لایه برشی جدا شده از دریچه در سطح آب، باعث اغتشاش در میدان سرعت و افزایش آشفتگی می‌شود که البته جدای از کف تونل، انرژی آشفتگی در عمق کاهش می‌یابد.



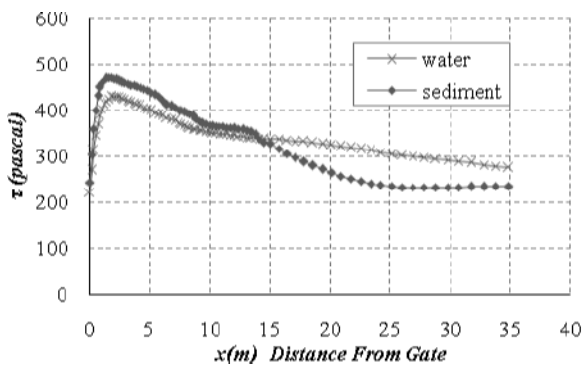
شکل ۴ تنشهای برشی کف ناشی از فاز رسوب در طول تونل



شکل ۵ تنشهای برشی کف ناشی از فاز آب در طول تونل

۱۲ تا ۱۴ ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود افزایش غلظت جریان نه تنها سبب کاهش میانگین سرعت در هر مقطع می‌شود، بلکه تأثیری مستقیم بر گرادیان‌های سرعت در عمق جریان دارد. اگرچه پروفیل‌های سرعت جریان رسوبی با غلظت بیشتر (۵۰۰ gr/lit)، گرادیان‌های بیشتری را در لایه‌های مختلف تجربه می‌کنند و تغییرات بالاتر سرعت را در عمق دارند که نشان‌دهنده وقوع تنش برشی در لایه‌های مختلف جریان غلیظ است، اما از آنجا که همین افزایش غلظت سبب کاهش سرعت در لایه‌های مختلف از جمله در نزدیکی کف می‌شود، لذا گرادیان سرعت در این ناحیه ملایم‌تر خواهد بود.

بنابراین افزایش تنش‌های برشی کف در جریان‌های غلیظ، بیش از آنکه متأثر از گرادیان سرعت جریان در مجاورت کف باشد، تحت تأثیر لزجت جریان است که در تعیین میزان این تنش‌ها نقشی اساسی دارد.



شکل ۱۰ مقایسه تنش‌های برشی ناشی از فاز آب و رسوب در غلظت ۳۰۰ gr/lit در طول تونل

تحقیقات در زمینه جریان‌های با غلظت بالا وجود پنج تنش برشی را شامل تنش برشی حدی τ_c (ناشی از چسبندگی)، تنش برشی موهر-کلمب τ_{mc} ، تنش لزجت τ_v (ناشی از پیوندهای ملکولی)، تنش آشفتگی τ_t (ناشی از

در این شکلها u_0 سرعت جریان در بالادست دریچه و x فاصله از دریچه است. افزایش غلظت جریان از ۳۰۰ gr/lit به ۵۰۰ gr/lit، سبب کاهش حدود ۹۵٪ در انرژی آشفتگی در مقاطع مختلف در عمق و کاهش ۴۵٪ در آن در نزدیکی بستر می‌شود، به‌گونه‌ای که در غلظت‌های بسیار بالا (غلظت ۵۰۰ گرم بر لیتر) میزان این آشفتگی‌ها در عمق بسیار ناچیز می‌شود.

آشفتگی ایجاد شده در پشت دریچه، به تدریج و با دور شدن از آن در عمق جریان گسترده شده و به دلیل تمایل جریان برای رسیدن به حالتی پایدار، مستهلک می‌شود. اما با وجود کاهش انرژی آشفتگی جریان در عمق، این انرژی در فاصله کوتاهی پس از دریچه ($x=2/0.4$ m) در نزدیکی بستر، افزایش یافته که البته افزایش این آشفتگی - از آنجا که سبب افزایش برخورد ذرات جامد رسوب با بستر می‌شود - می‌تواند بر افزایش تنش برشی تأثیرگذار بوده و در رخداد بیشینه تنش برشی در فاصله کوتاهی پس از دریچه به همراه افزایش سرعت سهمیم شود. البته لزجت جریان با دو منشأ ملکولی و آشفتگی می‌تواند به ایجاد دو تنش آشفتگی و ملکولی تفکیک شود که تابع وضعیت جریان، نقش ایفا می‌کند. بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱۰ نیز دیده می‌شود، در غلظت‌هایی مانند غلظت ۳۰۰ gr/lit در بازشدگی ۲۰٪ دریچه که فازهای آب و رسوب تقریباً سهم یکسانی در ایجاد تنش‌های برشی کل دارند، بسته به میزان غلظت در فواصل ابتدایی تونل پس از دریچه، فاز رسوب عامل بیشتر تأثیرگذار بر مقدار تنش برشی است، اما با فاصله گرفتن از دریچه، این تأثیرگذاری به سمت فاز آب تغییر خواهد کرد.

با توجه به نقش مهم تغییر سرعت در مجاورت کف در ایجاد تنش‌های برشی، پروفیل سرعت جریان برای غلظت‌های مذکور در سه ایستگاه مختلف در شکل‌های

مخلوط و رسوب، طول اختلاط، اندازه رسوب و غلظت آن است. با فرض ثابت بودن توربولانس، با افزایش غلظت، تأثیر تنش برشی برخوردی ذرات نیز افزایش می‌یابد برای مثال با افزایش غلظت از ۰/۳ به ۰/۴، این ضریب بر اساس محاسبات حاضر از حدود ۱۳/۷ به حدود ۴۲/۱ - یعنی حدود ۳/۱ - برابر افزایش خواهد یافت. بنابراین تأثیر اصلی در تنش برشی جریان غلیظ با غلظت رسوبهای داخل سیال ارتباط قابل توجهی دارد.

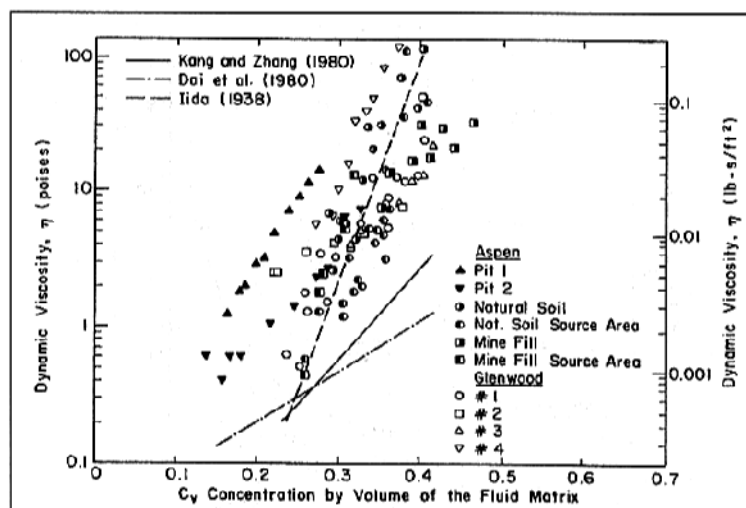
این تأثیر به‌سادگی در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نیز دیده می‌شود. شیب این منحنی‌ها در نزدیکی کف تقریباً یکسان است در حالی که تنش برشی حداکثر مطابق شکل ۶ با افزایش غلظت افزایش دارد که می‌تواند به تأثیر آن بر تنش برشی مطابق بحث بالا اشاره کند؛ ضمن آنکه اصولاً رفتار رئولوژی سیال تعیین کننده تغییر لزجت در سیالات مشابه است که خود به مطالعه‌ای جامع و کامل در باره این پدیده نیاز دارد.

توربولانس) و تنش برشی پخشی τ_d (ناشی از برخورد ذرات معلق در سیال) نشان داده است (Julien and Lan, 1991). تنشهای τ_c و τ_{mc} مستقل از گرادیان سرعت، τ_v تابع گرادیان سرعت و τ_t و τ_d تابع توان دوم گرادیان سرعت است.

بنابراین با صرف‌نظر کردن از اثر چسبندگی مطابق فرض مسأله حاضر و با غالب دانستن تنش‌های لزجت و توربولانس و دینامیکی ناشی از برخورد ذرات داریم:

$$\tau = \tau_v + \tau_t + \tau_d = \eta \frac{du}{dy} + \xi \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (9)$$

در این رابطه، اگرچه ممکن است با کاهش غلظت توربولانس افزایش یابد، اما اثر افزایش لزجت دینامیکی با افزایش غلظت به میزان قابل توجهی بالا است. برای نمونه منحنی زیر قابل تأمل است. مطابق شکل ۱۱ با افزایش غلظت از ۰/۳ به ۰/۴، ضریب دینامیک لزجت η از حدود ۲ به حدود ۲۰۰ افزایش یافته که ۱۰۰ برابر تغییر را نشان می‌دهد. ضریب اینرسی تنش برشی ξ تابع جرم‌های



شکل ۱۱ تغییر ضریب لزجت دینامیکی جریان غلیظ با تغییر غلظت سیال رسوبی (O'Brien and Julien, 1988)

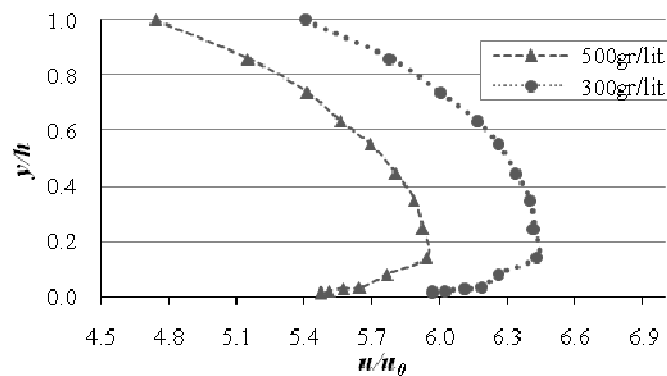
۷- نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل، برای دو غلظت متفاوت جریان در بازشدگی ۲۰٪ دریچه، در جریان‌های رسوبی، تنش‌های برشی بیشینه نه در زیر دریچه بلکه در خط واصل آغازین پایین دست دریچه رخ می‌دهد.

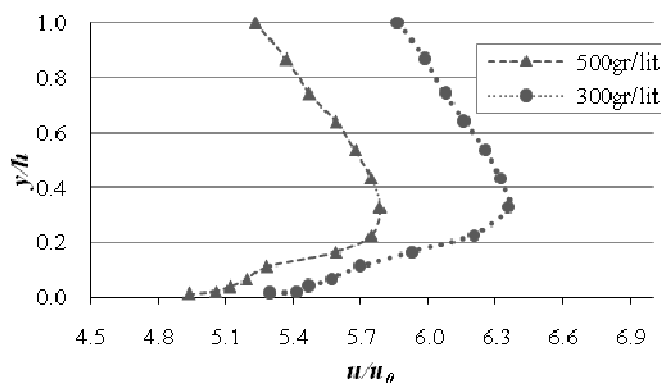
این تنش‌ها پس از عبور از بیشینه خود، با روندی نسبتاً خطی کاهش یافته و در مدل مذکور در فاصله ۲۵ متری از آغاز تونل تقریباً یکنواخت می‌شوند. علاوه بر این، افزایش غلظت رسوب، افزایش چشمگیری را در تنش‌های برشی کل در پی خواهد داشت که این موجب تشدید خوردگی و سایش پوشش داخلی تونل (به‌ویژه در

ناحیه ۲۵ متری آغازین تونل) در زمان تخلیه رسوب خواهد شد.

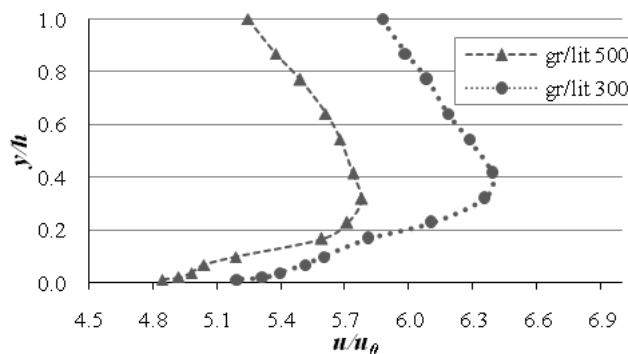
همچنین افزایش غلظت جریان از ۳۰۰ gr/lit به ۵۰۰ gr/lit، کاهش در حدود ۹۵٪ در انرژی آشفتگی در مقاطع مختلف در عمق را سبب شد، در صورتی‌که در نزدیکی بستر، کاهش ۴۵ درصدی در انرژی آشفتگی داشتیم. پروفیل‌های سرعت جریان رسوبی با غلظت بیشتر، گرادیان‌های بیشتری را در لایه‌های مختلف تجربه می‌کنند که البته در نزدیکی بستر عکس مطلب بالا درست است.



شکل ۱۲ پروفیل سرعت جریان در $x=1.0$ m



شکل ۱۳ پروفیل سرعت جریان در $x=2.05$ m



شکل ۱۴ پروفیل سرعت جریان در $x=24/35$ m

۸- فهرست علائم

τ	تنش آشفتنگی	d_p	قطر ذره
$d\tau$	تنش برشی پخشی	f	تابع درگ
ξ	ضریب اینرسی تنش برشی	F	کسر حجمی فاز
u_0	سرعت جریان در بالادست دریچه	$\vec{F}_{lift,q}$	نیروی بالابر
η	ضریب دینامیک لزجت	$\vec{F}_{vm,q}$	نیروی جرم مجازی
		\vec{F}_q	نیروی خارجی حجمی
		h	عمق موضعی جریان
		\vec{K}_{pq}	ضریب تبدیل مومنتم بین فازی
		\dot{m}_{pq}	جرم منتقل شده از فاز p به فاز q
		P	فشار مشترک دو فاز
		\vec{R}_{pq}	نیروی عمل کننده بین فازی
		V	سرعت جریان
		\vec{v}_q	سرعت فاز q
		x	فاصله از دریچه
		ρ_q	دانسیته فاز q
		α	ضریب کسر حجمی
		$\bar{\tau}_q$	تانسور تنش - کرنش فاز q
		τ_p	زمان تخفیف ذره
		$c\tau$	تنش برشی حدی
		$mc\tau$	تنش برشی موهر-کلمب
		$v\tau$	تنش لزجت

۹- منابع

پیروز، ب. و کاویانپور، م.ر. (۱۳۸۵). "پیش‌بینی شیب سواحل در دریاچه های حاصل از انباشت هیدرولیکی پسابها و دروغابهای معدنی"، رساله دکتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده عمران.

مطالعات علاج‌بخشی سد سفیدرود (۱۳۸۵). گزارشات مربوط به آسیب‌های تخلیه‌کننده‌های تحتانی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو.

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"، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک، شهرکرد، تابستان ۱۳۸۶.

Bezburuah R. and Ding J. (1992). "Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach", In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, pp. 75-82.

- Khosronejad, A. (2009). "Optimization of the Sefid-Roud dam desiltation process using a sophisticated one-dimensional numerical model", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 189-200.
- Lareo, C. and Fryer, P.J. (1997). "The mechanics of two-phase solid-liquid food flows: A review", *Food and Bioproducts Processing*, vol. 75, pp. 73-105.
- Najafi, M.R. and Kavianpour, M.R. (2008). "Optimization of the fuzzy system by the genetic algorithms and its application in air demand prediction in gated tunnels", 7th Hydraulics Conference held in PWUT.
- O'Brien J.S. and Julien P.Y. (1985). "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows", *Proc. ASCE Hyd. Div. Spec. Conf. on Delineation of landslids, Flash flood and debris flow hazards*, Logan Utah, pp. 260-279.
- Speerli and Hager, W.H. (2000). "Air water flow in bottom outlets", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27.
- 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*, pp. 125-138.
- Boroomand, M. and Salehi Neyshabouri, A. (2004). "Investigation of flow pattern zone of offset Jet & scour hole caused by it by Fluent", M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University.
- Emami, S.M.K. and Kavianpour, M.R. (2010). "Numerical Analysis of Density Flow of Sediment Through Bottom Outlet Conduits", M.Sc. Thesis, Kntu University.
- Fluent 6.2 Documentation, Users Guide, Fluent Inc. (2005).
- Jia, Y., Wang, S.Y.Y., and Xu, Y. (2002). "Validation and application of a 2D model to channels with complex geometry", *International Journal of Computational Engineering Science*, Vol. 3, No. 1, pp. 57-71.
- Julien P.Y. and Lan Y.Q. (1991). "On the rheology of hyperconcentrations", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117 (3), pp. 345-353.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, pp.269-289.
- Keller, U. and 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, pp. 511-518.