

مدل سازی عددی غوطه‌وری جریان غلیظ در مخزن سد دز

چکیده

در طول سیلاب، یک رودخانه به طور طبیعی مقادیر قابل توجهی رسوب را از حوضه آبریز بالادست حمل می‌کند. به دلیل کاهش سرعت جریان در مناطق آرام و عمیق، مانند مخزن سد، رسوبات درشت‌تر که همراه جریان آب منتقل می‌شوند، در ناحیه به نام غوطه‌وری جریان غلیظ ته‌نشین می‌گردند. سد دز جهت تأمین آب شرب، آبیاری و کنترل سیلاب در شمال استان خوزستان اهمیت زیادی دارد. مطالعه بر روی ناحیه غوطه‌وری می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در جهت کمک به عملیات تخلیه جریان غلیظ حاوی رسوبات از دریچه‌های تختانی و تونل‌های انحراف رسوب فراهم کند. شبیه‌سازی و حرکت جریان‌های غلیظ گل‌آلود در مخزن سد دز با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی در ابعاد میدانی، از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) استفاده شده است. نتایج مدل عددی نشان می‌دهد برای سیلاب‌های بزرگ‌تر از $300 \text{ m}^3/\text{s}$ مترمکعب بر ثانیه با تراز سطح آب بالای 320 متر از سطح دریا محدوده تشکیل عمق غوطه‌وری حداقل 20 تا 27 کیلومتری از دیواره سد خواهد بود. مقایسه برآورد عمق غوطه‌وری جریان غلیظ ارائه شده با روابط تجربی پیشین به طور صریح ارتباط مستقیم با دبی سیلاب و ارتباط معکوس با غلظت رسوبات ورودی به مخزن سد دز را نشان می‌دهد. نتایج این اعتبارسنجی نشان داد که عمق‌های غوطه‌وری شبیه‌سازی شده به خوبی با مقادیر پیش‌بینی شده از روابط تجربی مطابقت دارند، به طوری که ضریب تبیین (R^2) جامع برابر با 0.938 به دست آمده است.

کلیدواژه‌ها

نیم‌رخ سرعت، جریان گل‌آلود، تصاویر ماهواره‌ای

Numerical modeling of plunging Turbidity current in the Dez Dam reservoir

ABSTRACT

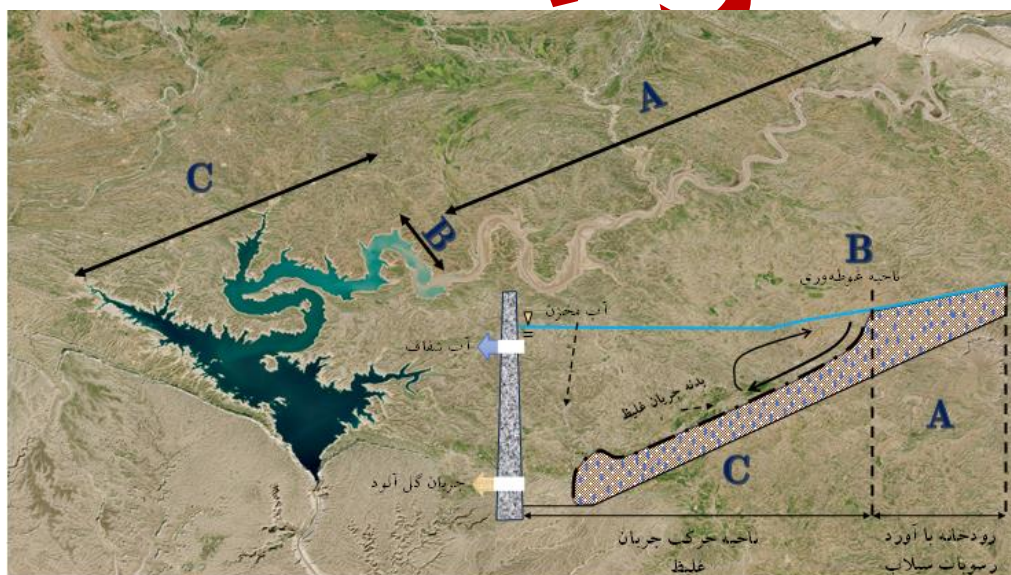
During flood events, a river naturally transports significant amounts of sediment from its upstream watershed. Due to the reduction in flow velocity in calm and deep areas such as dam reservoirs, coarser sediments carried by the flow tend to settle in a zone known as the plunge area of the turbidity current. The Dez Dam, located in the northern part of Khuzestan Province, plays a crucial role in providing drinking water, irrigation, and flood control. Investigating the turbidity plunge zone can yield valuable insights to support the management of sediment-laden flow discharge through bottom outlets and sediment bypass tunnels. In this study, the movement and behavior of muddy turbidity currents within the Dez Dam reservoir were simulated using the FLOW-3D computational fluid dynamics (CFD) code. The RNG $k-\epsilon$ turbulence model was employed to simulate field-scale conditions. Numerical modeling results indicate that for flood discharges exceeding $300 \text{ m}^3/\text{s}$ and reservoir water levels above 320 meters above sea level, the turbidity current plunging depth is formed at a distance ranging from 20 to 27 kilometers upstream of the dam structure. A comparison between the estimated plunging depths of the turbidity currents and previously developed empirical formulas reveals a direct relationship with flood discharge and an inverse relationship with the sediment concentration entering the reservoir. The model validation results demonstrated a strong agreement between the simulated plunging depths and those predicted by empirical relationships, with a determination coefficient (R^2) of 0.938 , confirming the model's high accuracy.

Keywords:

velocity profile, turbidity current, satellite imagery

مقدمه

سیلاب‌هایی که در زمان محدودی وارد مخازن سدها می‌گردند و حجم بالای رسوبات را شامل می‌شوند باعث ایجاد جریان‌های گل‌آلودی با جرم مخصوص بالا شده که در زمان ورود به مخزن سد با آب ساکن و جرم مخصوص متفاوت به‌صورت جریان‌های زیرسطحی حرکت خواهند کرد که در بعضی موارد با توجه به شرایط جریان، حرکت این رسوبات تا بدنه سد ادامه خواهد داشت که منجر به کاهش ظرفیت مخازن خواهند شد. در ایران نرخ رسوب‌گذاری سالانه ۰/۵ تا ۰/۷۵ حجم اولیه مخازن پیش‌بینی شده است که به طور تقریبی معادل ۱۷۵ میلیون تا ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال است (Meskar & Fazloul, 2013). علاوه بر کاهش حجم مخازن، رسوب‌گذاری ناشی از جریان‌های غلیظ باعث تأثیرات نامطلوب بر روی سازه‌های آبیگر نیروگاه‌ها و خروجی‌ها می‌گردد (Chamoun et al., 2016). هنگام ورود جریان غلیظ به مخزن سد در عمقی کافی، نیروهای شناوری بر نیروهای اینرسی غلبه می‌کنند، در آن زمان جریان گل‌آلود ناشی از سیلاب درون آب شفاف مخزن فرو می‌رود که به آن نقطه غوطه‌وری و ارتفاع نظیر آن عمق غوطه‌وری گفته می‌گویند (Schuch et al., 2021). در شکل ۱ سیلاب منتهی به مخزن سد دز مربوط به واقعه فروردین ماه سال ۱۳۹۸ به همراه شماتیک اجزای پدیده جریان غلیظ را نشان داده است.



شکل ۱. شماتیک مؤلفه‌های پدیده جریان غلیظ و نحوه شکل‌گیری آن در مخزن سد دز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (سنسیتل-۲)

برای بررسی دقیقتر، در شکل ۲ واژگان کلیدی پرکاربرد توسط محققان پیشین، در حوزه مطالعاتی جریان غلیظ در مخازن، در پایگاه استنادی اسکوپوس بررسی گردید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نقطه غوطه‌وری یکی از پیوندهای کلیدی در هیدرولیک رودخانه‌ها، مخازن، و محیط‌های دریایی است که با عواملی مانند سرعت جریان، جرم مخصوص رسوبات، عدد فرود، و مدل‌های عددی در ارتباط است. این پدیده تأثیر مستقیمی بر رسوب‌گذاری، کیفیت آب، و پایداری لایه‌های کیفی آب مخازن دارد و در مطالعات مرتبط با مهندسی منابع آب، نفت و گاز، و زمین‌شناسی رسوبی اهمیت زیادی دارد و نشاندهنده تلاش برای بهبود شناخت بیشتر آن در پنج سال اخیر است. با توجه به اهمیت این موضوع بسیاری از محققان پدیده شکل‌گیری غوطه‌وری و حرکت جریان غلیظ را برای درک تأثیر آن بر

1 Turbidity currents

2 Plunge point

9



تأثیر نیروی ثقل بر اختلاف جرم مخصوص دو سیال
 غلیظ به صورت زیر رابطه ۱ تعریف می گردد (1959, 1959)

$$= g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} = g C_s \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w}$$

ن تعریف نمود و زمانی
(lee hor). به حرکت در

ناحیه غوطه‌وری را فاصله بین نقطه ناپایدار غوطه‌وری تا موقعیت پایدار آن می‌توان تعریف نمود و زمانی این ناحیه به پایداری میرسد که اختلاط بین جریان غلیظ و محیط پیرامون آن به حد ثابتی برسد (lee hong., 1997). به حرکت در آمدن جریان غلیظ در زیر لایه‌ای از آب در مخزن باعث به وجود آمدن تنش برشی بین این دو جریان می‌گردد. این تنش تا سطح آب توسعه یافته، و یک حرکت چرخشی آرام به سمت نقطه غوطه‌وری در مخزن ایجاد می‌کند. این حرکت باعث تجمع اجسام شناور روی سطح آب در محل غوطه‌وری خواهد شد (Zavala et al., 2012). عمق غوطه‌وری به عوامل مختلفی از جمله اختلاف جرم مخصوص بین دو سیال، سرعت جریان و شیب کف مجرا بستگی دارد، هرچه اختلاف جرم مخصوص بیشتر باشد، عمق غوطه‌وری بیشتر است هرچه سرعت جریان و عمق و شیب بیشتر باشد نیز عمق غوطه‌وری بیشتر خواهد بود (Schuch et al., 2023). بیشتر روابطی که از روش تحلیلی ساده‌شده در حالت پایدار استفاده می‌کنند، عمق غوطه‌وری را با رابطه ۲ پیش‌بینی می‌کنند (Sangdo An & Julien, 2014):

$$h_p = \frac{1}{F_p^{2/3}} \left(\frac{q_o^2}{g'} \right)^{1/3} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن h_p ارتفاع نقطه غوطه‌وری، F_p عدد فرود دنسیمتریک در نقطه غوطه‌وری $(U/\sqrt{g'h_p})$ و q دبی در واحد عرض جریان غلیظ بوده است. اولین و پراستندترین سند مستند درباره بررسی آزمایشگاهی عمق غوطه‌وری جریان غلیظ به Singh & Shah نسبت داده شده است. در این پژوهش، از یک کانال شیبدار ۱۶ متری برای مطالعه جریان دوبعدی غلیظ استفاده شد که در آن جریان به واسطه دو دیواره موازی در محدوده شکافی به پهنای ۰/۴ متر محصور شده بود. شیب کانال بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۲ تنظیم گردید. بر اساس مطالعات آنان که بر روی عوامل مؤثر بر عمق غوطه‌وری انجام شده است رابطه زیر استخراج گردیده شده است:

$$h_p = 1.85 + 1.3 \left(\frac{q^2}{g'} \right)^{1/3} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن q شتاب ثقل دنسیمتریک مطابق رابطه ۱ می باشد. براساس مطالعات Savage & Brimberg (1975) که در آن از شیب کف صرف نظر شده است عمق غوطه‌وری به صورت زیر تخمین زده شده است:

$$h_p = \left(\frac{4q^2}{g'} \right)^{1/3} \quad \text{رابطه ۴}$$

در مطالعاتی که Hebbert et al. (1979) بر روی آب شور ورودی از رودخانه کولی به مخزن سد ولینگتون انجام شد دریافتند که محل غوطه‌وری به پارامتر شدت اختلاط میان جریان غلیظ و آب مخزن (g') با توان یک به پنج مطابق رابطه زیر می تواند مورد استفاده واقع شود:

$$h_p = 1.16 \left(\frac{Q^2}{g'} \right)^{1/5} \quad \text{رابطه ۵}$$

Farrell & Stefan (1986) مجموعه‌ای از آزمایش‌های جریان غلیظ را در یک کانال به طول ۱۶ فوت (حدود ۴/۸۸ متر) و عرض ۱/۱۷ فوت (حدود ۰/۳۶ متر) با شیب کانال ۰/۰۴۷ انجام دادند. اختلاف جرم مخصوص با کنترل دمای آب ایجاد گردید. آنها دریافتند که عمق غوطه‌وری با معادله زیر می تواند تخمین زده شود.

$$h_p = 1.3 \left(\frac{q^2}{g'} \right)^{1/3} \quad \text{رابطه ۶}$$

Karamichemeh et al. (2014) مطالعات آزمایشگاهی در فلومی به طول ۹،۲۵ متر و عرض ۵۰ سانتی متر در غلظت‌های ۱۰۱۳، ۱۰۰۹، ۱۰۰۶ و ۱۰۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب در سه شیب متفاوت جهت بررسی عمق غوطه‌وری انجام دادند که در نتیجه آن معادله زیر استخراج گردید :

$$h_p = 2.876 \left(\frac{q^2}{g'} \right)^{0.414} \quad \text{رابطه ۷}$$

با توجه به توانایی مدل‌های عددی در تحلیل یک‌بعدی و دوبعدی جریان غلیظ و همچنین پیچیدگی این جریان‌ها، همواره مدل‌های عددی در کنار کارهای آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. Arjmandi et al. (2012) به بررسی عمق غوطه‌وری بر مبنای مدل آزمایشگاهی در سه شیب و غلظت‌های متفاوت و مقایسه آن با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow-3D پرداختند و نتایج نشان داد

که در کلیه شیب ها نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل عددی مقادیر کمتری را نشان میدهد که علت این امر را مدل تلاطمی RNG پیش بینی کرده اند. در حقیقت اگر اختلاف فشار در جریان دوفازی آشفته بیشتر گردد مدل RNG نتایج بهتری را نشان میدهد که در این مطالعه نیز در شیب های ۸،۱۲ و ۱۶ بهترین نتایج مربوط به شیب ۱۶ درصد بوده زیرا که در این شیب با افزایش نیروی ثقل میزان اختلاف فشار نیز افزایش و مدل سازی مطلوب تری انجام شده است.

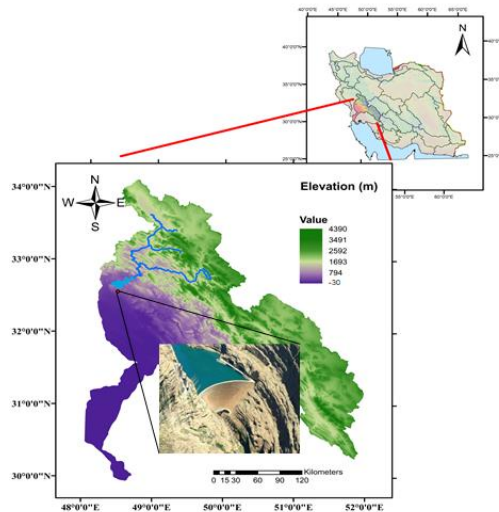
(Kostaschuk et al. 2018) در مخزن Xiaolangdi چین و Lillooet کانادا مدل عددی دو بعدی DNS جهت شبیه سازی پروفیل سرعت و ناپایداری های بدنه جریان غلیظ توسعه دادند. همچنین (Howlett et al. 2019) داده های میدانی جریان غلیظ در اعماق کف دریا را با مدل Flow-3D مقایسه کردند که نتایج آنان نشان داد این مدل به خوبی قابلیت شبیه سازی ناپایداری های کلون هلمهولتز را دارد (Zayeri & Ghomeshi 2019) مدل سازی یک بعدی و سه بعدی پیشروی جریان غلیظ ورودی به سد دز را با مدل های آشفتگی و آبستگي رسوبات و مدل عددی Flow-3D جهت تخمین ارتفاع و سرعت متوسط جریان مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که مدل عددی پروفیل غلظت در بدنه جریان گل آلود با اندازه گیری های میدانی انجام شده تطابق خوبی داشته است و مدل توانایی ارائه نتایج قابل اعتماد را داشته است. همچنین با توجه به اهمیت پیش بینی زمان رسیدن جریان گل آلود به بدنه سد جهت باز و بسته کردن دریچه ها و جلوگیری از ته نشینی حجم زیاد از رسوبات این مدل سازی می تواند بسیار کاربردی باشد. همچنین (Goodarzi et al. 2020) برای بررسی چگونگی تأثیر توپوگرافی بستر و ارتفاع ورودی بر جریان غلیظ مدل سازی سه بعدی را انجام دادند و مطالعات آنها نشان داد که موانع بر روی مشخصات سرعت و ارتفاع جریان های غلیظ درست قبل و بعد از آنها تأثیر می گذارد. در مطالعاتی دیگر تأثیر شاخه های ورودی رودخانه بر جریان غلیظ مخزن با مدل سازی عددی پرداختند و نتایج این مطالعه نشان داد که جریان مملو از رسوبات شاخه ای باعث می شود که نقطه غوطه وری پایدار به پایین دست منتقل شود و برای انتشار جریان غلیظ مساعد خواهد بود (Sun et al., 2023).

اندازه گیری جریان غلیظ هم در محیط میدانی و هم در آزمایشگاه بسیار دشوار است. هرچند بیشتر داده های موجود از آزمایش ها درون کانالی با عرض ثابت در آزمایشگاه به دست آمده اند، چنین پژوهش هایی برای درک توسعه های طولی و عرضی مؤلفه های هیدرولیکی جریان غلیظ با توجه به آنکه مخازن سدها هندسه های مشترکی ندارند، در مسافت های طولانی کافی نیستند. لذا نتایج شبیه سازی جریان غلیظ در ابعاد مخزن سد می تواند اطلاعات بیشتری درباره ویژگی های جریان غلیظ مخصوصاً در محل رسوب گذاری ذرات درشت دانه مخزن، یعنی نقطه غوطه وری ارائه دهد. هدف در این تحقیق بررسی قابلیت شبیه سازی مدل سه بعدی نرم افزار Flow-3D در شبیه سازی و تخمین عمق غوطه وری در مخزن سد دز و همچنین مقایسه نتایج آن با روابط تجربی دیگر محققان می باشد.

مواد و روش ها

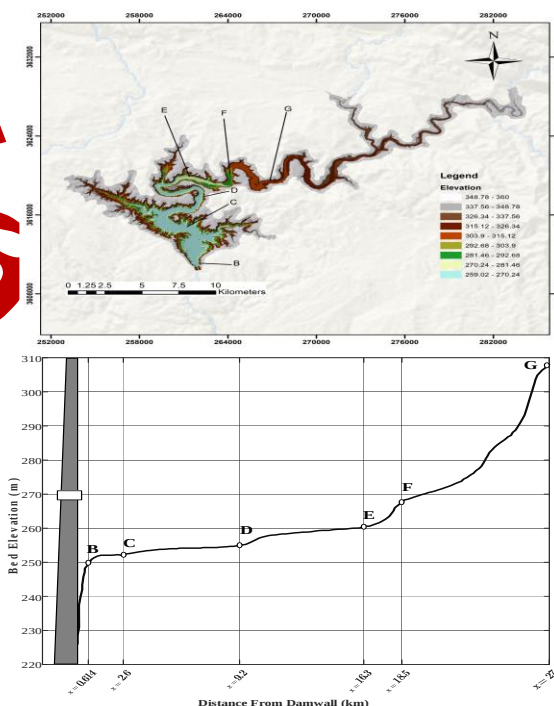
معرفی منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر بر روی مخزن سد دز که از تلاقی دو رودخانه بختیاری و سزار در محلی به نام تله زنگ که منجر به تشکیل رودخانه دز می شود، مطابق شکل ۳، صورت پذیرفت. به طور کلی ۵۵ درصد کل رسوبات ورودی به مخزن سد دز از انشعاب بختیاری ۴۵ درصد باقی از انشعاب سزار ناشی می گردند. برآورد انباشتگی رسوب در مخزن سد دز، ۶۰۰ میلیون مترمکعب در مدت زمان ۴۸ سال بوده است. اکثر رسوبات در طول قسمت های بالایی ته نشین شده و تشکیل دلتا می دهند و به آرامی به طرف بدنه سد پیشروی می کند. حدود ۱۱ درصد از رسوباتی که به شکل ذرات نسبتاً ریز به بدنه سد دز می رسند توسط جریان های غلیظ انتقال پیدا می کنند. اگر چه مدت زمانی طول می کشد تا مخزن به نیمه عمر خود برسد و به طور معمول ترازوی به عنوان پایان عمر مفید مخزن پذیرفته شده است، اما اثر جریان های غلیظ ورودی فعلی این نگرانی را به وجود آورده که این رسوبات در طول یک دهه شروع به حرکت به داخل تونل های نیروگاه در ارتفاع ۲۷۰ متری از سطح دریا کنند که بدین ترتیب صدمات زیادی به توربین وارد می نمایند.



شکل ۳. موقعیت مخزن سد مورد مطالعه بر روی حوزه آبریز دز

به منظور مقایسه پارامترهای شبیه‌سازی شده جریان غلیظ در مدل عددی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی از ایستگاه‌هایی در مسیر خط‌القعر آبراهه اصلی که جایگاه آنها در شکل ۴ نشان داده شده است، استفاده گردید. این اندازه‌گیری‌ها توسط مؤسسه تحقیقات آب از تاریخ ۹ دی ۱۳۸۵ لغایت ۱۹ اسفند ۱۳۸۵ انجام شده است. شش ایستگاه برای اهداف مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی داده‌های میدانی نشان می‌دهد که رسوب معلق وارد شده به مخزن سد دز از نوع کائولین با جرم مخصوص ۲۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، میانگین قطر ذرات هفت میکرومتر است (Mehranfar et al., 2023).



شکل ۴. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای جریان غلیظ در مخزن سد دز

معرفی مدل سه‌بعدی FLOW-3D و معادلات حاکم بر آن

معادلات حاکم بر جریان گل‌آلود با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به صورت عددی شبیه‌سازی شده‌اند. این نرم‌افزار یک برنامه محاسباتی قدرتمند است که به طور خاص برای تحلیل جریان‌های کانال باز طراحی شده است. این نرم‌افزار با استفاده از روش تقریب حجم محدود، معادلات حاکم بر حرکت سیال را حل می‌کند. نرم‌افزار FLOW-3D محیط جریان را به شبکه‌ای از سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم می‌کند و برای هر سلول، مقادیر میانگین متغیرهای وابسته را محاسبه می‌کند. معادلات حاکم بر جریان سیال در سیستم مختصات کارتزین شامل معادلات پیوستگی، مومنوم و انتقال جرم هستند که به فرم زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \bar{u}_i \bar{u}_i \right) \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} (Cu_i) = \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial C}{\partial x_i} - \bar{u}_i \bar{C} \right) \right] \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

در این معادلات $\bar{u}_i$ و G_i به ترتیب مقدار متوسط و ترم‌های شتاب جرم در سه جهت مختصاتی x, y, z ، فشار، P ، Γ ضریب پخشیدگی، C غلظت متوسط و $\bar{u}_i \bar{C}$ متوسط حاصل ضرب نوسانات غلظت در نوسانات سرعت و $\bar{u}_i \bar{u}_i$ تنش رینولدزی می‌باشد که با یکی از مدل‌های آشفتگی حل می‌گردد. همچنین برای حل معادلات حاکم، لازم است که مدل آشفتگی مناسبی انتخاب شود. برای بستن سیستم معادلات جریان میانگین، نیاز به یک مدل آشفتگی وجود دارد. متداول‌ترین مدل آشفتگی در تحلیل جریان‌های هیدرولیکی، مدل‌های ویسکوزیته گردابه‌ای دو معادله‌ای هستند که رایج‌ترین آنها مدل $k - \varepsilon$ است که در این تحقیق از این مدل آشفته استفاده گردید. استفاده از مدل‌های میانگین‌گیری معادلات ناویر استوکس^۱ در شبیه‌سازی جریان غلیظ مخازن به عنوان یک مدل کارآمد گزارش شده است (Mehranfar et al., 2023; Peng-An, 2022). در این مدل، ویسکوزیته گردابه‌ای به صورت زیر داده می‌شود.

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ اتلاف انرژی آشفتگی c_μ ضریب تجربی است. معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی k به صورت زیر است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P + G - \varepsilon \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

و معادله انتقال برای نرخ اتلاف انرژی آشفتگی ε به صورت زیر تعریف می‌شود:

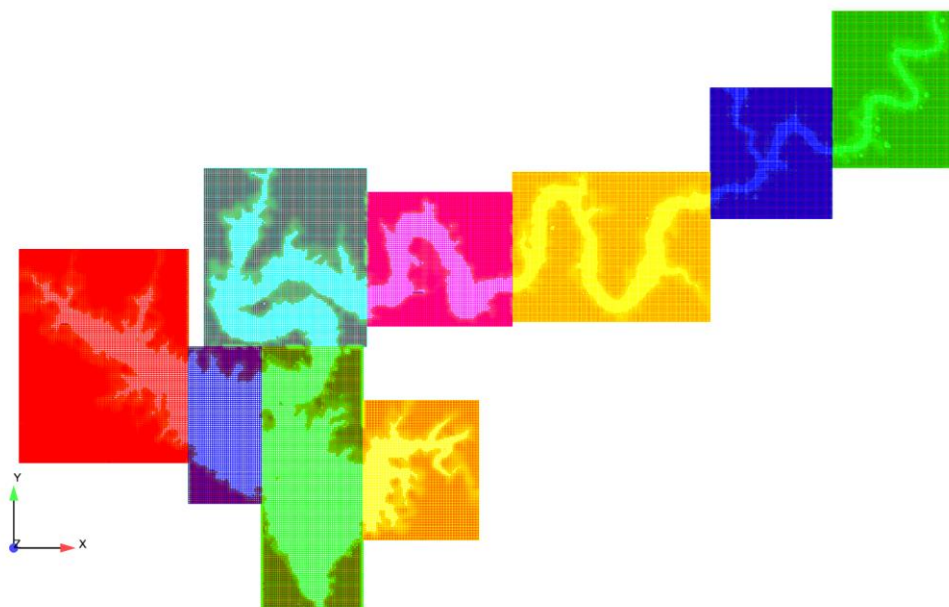
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

که در آن P نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل برش سرعت، G نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل نیروهای شناوری است. مقادیر ضرایب تجربی برابرند با $c_1 = 1.42$ ، $c_2 = 1.83$ و $c_\mu = 0.09$ این مدل یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته و جریان غلیظ است که در نرم‌افزارهای مختلف CFD مانند FLOW-3D مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sangdo An & Julien, 2014).

اطلاعات ورودی به مدل FLOW-3D

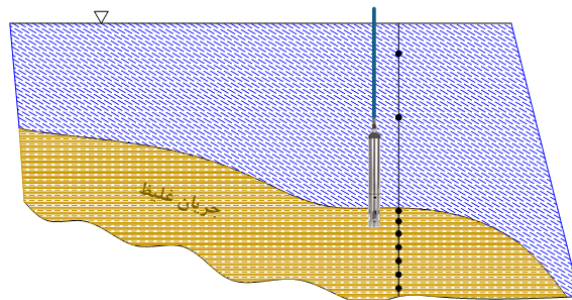
¹ Reynold-Average Navier-Stokes

برای حل معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود، لازم است که دامنه شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های مدل گسسته‌سازی شود. از آنجاکه دینامیک جریان‌های جرم مخصوص تحت تأثیر شرایط هندسی پیچیده منطقه مطالعه و ویژگی‌های چند فیزیکی (مانند لایه‌بندی جرم مخصوص، ته‌نشینی ذرات و غیره) قرار دارد، از شبکه‌های گسسته‌سازی با وضوح نسبتاً بالا استفاده شده است. برای تعریف هندسه بستر و تغییرات آن در مدل، از نقشه‌های هیدروگرافی مخزن سد دز که توسط سازمان آب و برق خوزستان در سال ۱۳۸۶ تهیه شده بود، استفاده شد. این نقشه‌ها شامل مختصات X ، Y و Z مخزن بودند که در فایل‌های CAD ترسیم شده بودند. جهت آماده‌سازی هندسه جریان و تهیه مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، از نرم‌افزار Arc-GIS استفاده گردید. به منظور حل معادلات حاکم با استفاده از تقریب حجم محدود، فضای محاسباتی باید تعیین می‌شد. به همین منظور، از نه بلوک استفاده شد که فاصله لایه‌های عمودی از هم دو متر $\Delta Z = 2$ و برای شبکه افقی ۱۵ متر $\Delta x = \Delta y = 15$ در نظر گرفته شد (شکل ۵). این مقدار با توجه به زمان محاسبات و ظرفیت حافظه کامپیوتر انتخاب شد و نحوه توزیع آن به گونه‌ای بود که از ایستگاه اندازه‌گیری تله زنگ تا دیواره سد را پوشش داده و در مجموع ۴/۶ میلیون سلول برای محاسبات تولید گردید.



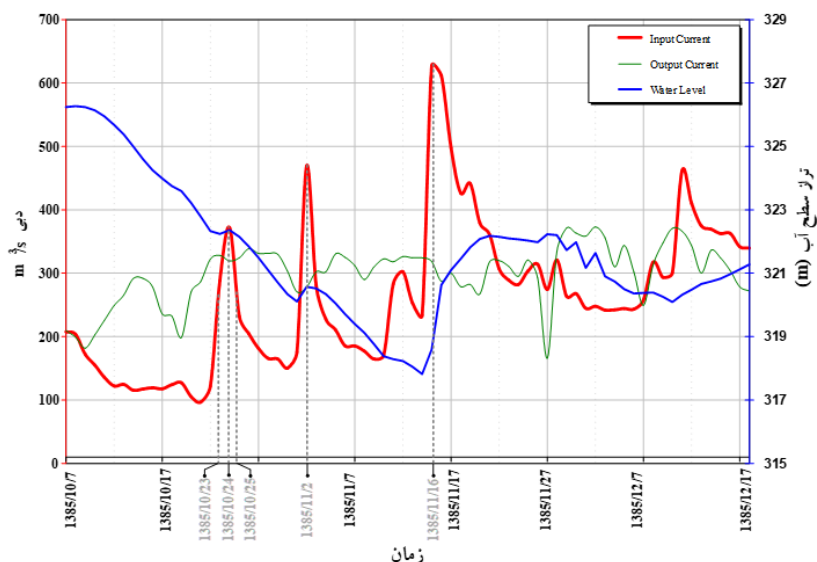
شکل ۵. شبکه مش محاسباتی جهت شبیه‌سازی جریان غلیظ در مخزن سد دز

جهت پایش و مدل‌سازی تغییرات غلظت رسوبات در طول مخزن و در جریان غلیظ، نیاز به داده‌های غلظت رسوبات در ایستگاه بالادست (تله زنگ) پیش از شکل‌گیری غوطه‌وری جریان غلیظ است. این نمونه‌برداری‌ها با استفاده از نمونه‌بردار نقطه‌ای آب نارسن مطابق با شکل ۶ در شش ایستگاه به فواصل عمقی دو متر از کف و سپس با فواصل چهار متری تا جایی که آب زلال مشاهده شود، انجام گرفت.



شکل ۶. نحوه نمونه برداری بار معلق توسط نمونه بردار نانسن

ایستگاه F تنها ایستگاه بود که به حسگر سرعت سنج داپلر ADCP که توانایی ثبت سرعت و جهت جریان در لایه‌های مختلف را دارد، مجهز بود. جهت مدل‌سازی عددی در مرحله نخست، با توجه به داده‌های برداشت شده غلظت رسوبات ورودی مطابق با جدول ۱ و همچنین تغییرات دراز سطح آب و میزان دبی ورودی و خروجی از سد در طی دوره برداشت جریان غلیظ مطابق با شکل ۷ به عنوان شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده واقع شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تاریخ ۲۴ دی ۱۳۸۵ مخزن سد دز شاهد سیلاب شدیدی بود که حجم قابل توجهی از آب و رسوب را به مخزن سد منتقل کرد. پس از رسیدن جریان غلیظ به بدنه سد دز، این رسوبات از طریق باز کردن خروجی‌های تحتانی از مخزن تخلیه شدند. به همین دلیل، داده‌های مربوط به یک روز قبل یعنی از تاریخ ۲۳ دی ماه به عنوان شرایط مرزی و مرحله اعتبارسنجی در مدل‌سازی جریان غلیظ انتخاب شد (Mehranfar et al., 2023).



شکل ۷. هیدروگراف دبی ورودی، تغییرات سطح آب و دبی خروجی از مخزن سد دز طی دوره زمانی مورد بررسی

در طول برداشت میدانی مطابق با جدول ۱، مجموعاً پنج جریان غلیظ ثبت شد. برخی از این جریان‌ها در ابتدای مخزن متوقف شدند، در حالی که برخی دیگر به دیواره سد رسیدند و رسوبات قابل توجهی را به آنجا منتقل کردند. برای اعتبارسنجی مدل عددی، پروفایل غلظت رسوبات معلق اندازه‌گیری شده در طول ایستگاه‌های G، F، E و D با نتایج میدانی مقایسه شد. این ایستگاه‌ها به دلیل داشتن داده‌های کامل غلظت رسوبات برای اعتبارسنجی انتخاب شدند. از سایر نتایج میدانی برداشت شده جهت واسنجی و برآورد ارتفاع غوطه‌وری جریان غلیظ استفاده گردید. بدین منظور مرز ورودی مدل با مقدار دبی و غلظت رسوب ورودی از داده‌های ایستگاه تله زنگ

مشخص شده است. برای تعیین شرایط اولیه، از ارتفاع سطح آب نزدیک دیواره سد استفاده شد.

جدول ۱. نتایج اندازه گیری شده پارامترهای عمق و غلظت جریان غلیظ در ایستگاه‌های مورد بررسی (Zayrie & Ghomeshi, 2014)

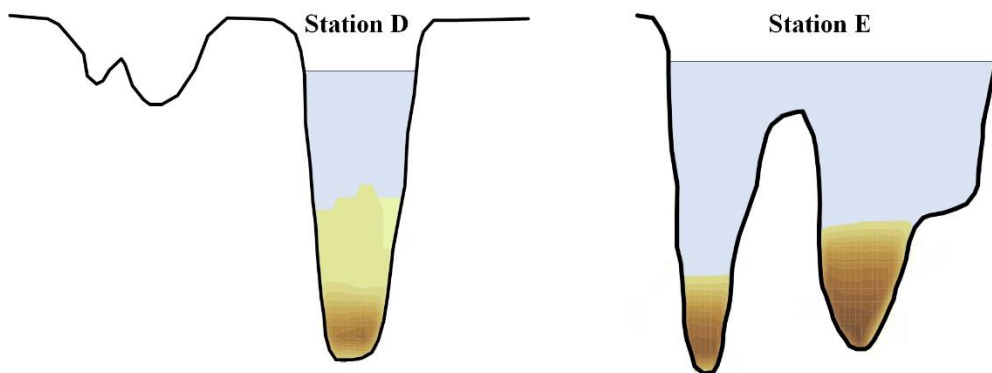
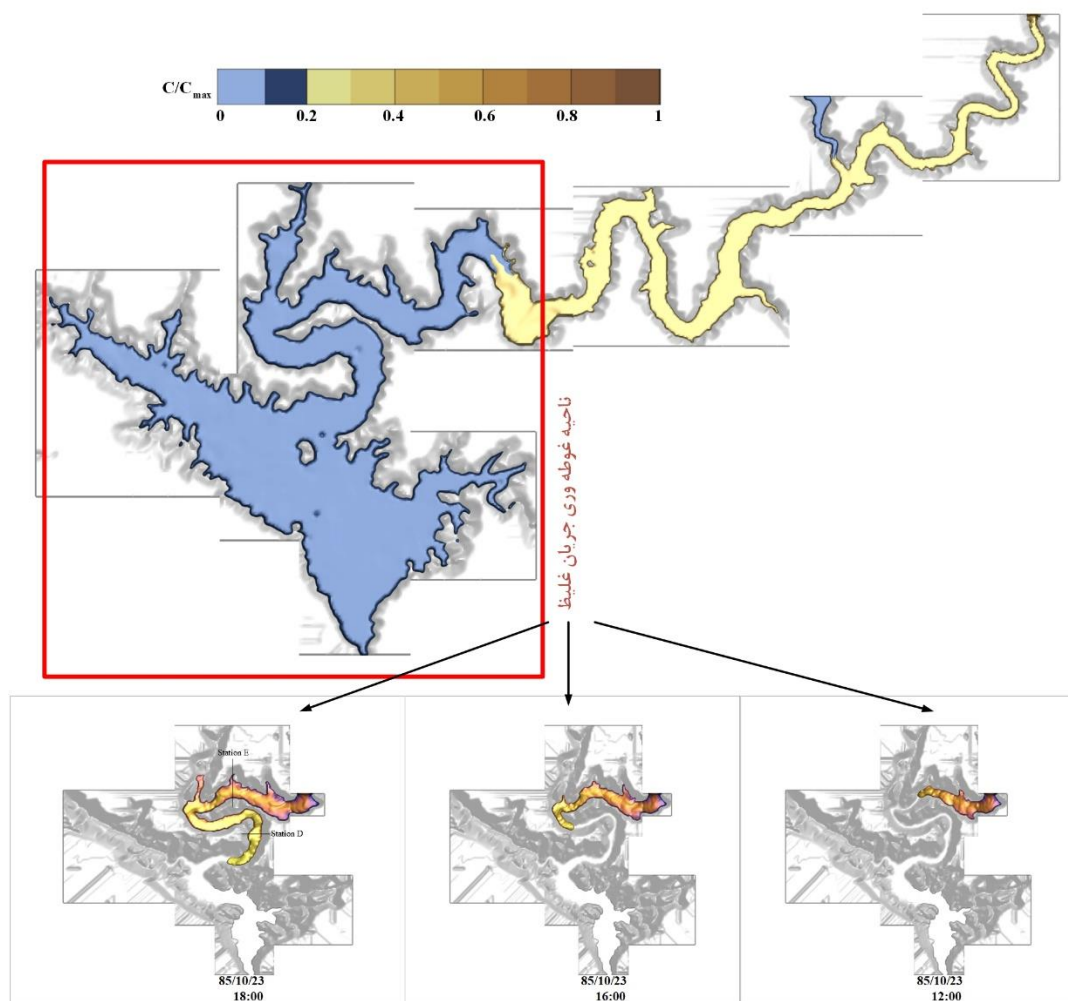
غلظت رسوبات (mgr/L)	دبی (m ³ /s)		عمق جریان غلیظ (m)	عمق آب (m)	فاصله از دیواره سد (km)	مرحله	تاریخ
	خروجی (از سد)	ورودی (تله زنگ)					
۶۹۰	۳۲۸	۲۸۸	-	-	تله زنگ	واسنجی	۱۳۸۵/۱۰/۲۳
۲۰۰	۳۲۸	۲۸۸	۶	۱۱	F		
۲۰۰۰	۳۱۹	۳۷۱	-	-	تله زنگ	اعتبارسنجی	۱۳۸۵/۱۰/۲۴
۱۷۲			۷	۱۱	G		
۱۳۶			۱۵	۴۴	F		
۱۵۰			۸	۵۴	E		
۳			۱۰	۶۱	D		
۰	۳۱۹	۳۷۱	۱۲	۶۳	C		
۴۰۰	۳۲۴	۲۳۲	-	-	تله زنگ	واسنجی	۱۳۸۵/۱۰/۲۵
۳۲۰	۳۲۴	۲۳۲	۳	۶	۱۶		
۱۰۰۰	۲۷۸	۴۶۹	-	-	تله زنگ	واسنجی	۱۳۸۵/۱۱/۲
۳۰۰			۷	۱۰	G		
۱۰۰۰			۱۱	۴۳	F		
۱۱۰۰			۱۲	۵۷	E		
۱۵۰			۱۲	۶۰	D		
۱۰			۱۵	۶۱	C		
۰			۱۲	۶۱	B		
۵۰۰۰	۲۷۸	۶۱۱	-	-	تله زنگ	واسنجی	۱۳۸۵/۱۱/۱۶
۴۰۰۰			۴٫۸	۸	G		
۹۰۰			۱۷	۴۱	F		
۱۰۰۰			۲۱	۵۳	E		
۱۴۰۰			۱۵	۶۰	D		
۱۰۰۰			۱۲	۶۱	C		
۲۸۰			۱۲	۶۳	B		

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل

کالیبراسیون مدل با اجرای سناریوهای مطابق با غلظت‌های رسوب پنج واقعه سیلاب رخ داده در مخزن سد دز و اندازه‌گیری سرعت در پایین‌دست نقطه غوطه‌وری انجام شد و اعتبارسنجی آن با استفاده از نیم رخ‌های غلظت و سرعت صورت گرفت. انتشار جریان‌های چگال را می‌توان از طریق نقشه‌های غلظت رسوب در زمان‌های مختلف توصیف کرد. شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی شده غلظت رسوب را قبل و بعد از غوطه‌وری جریان غلیظ نشان می‌دهند. این شکل‌ها تکامل زمانی و مکانی جریان غلیظ، مخلوط شدن جانبی و طولی با

سیال پیرامون در مخزن پيچان رودی سد دز را در سیلاب ۱۳۸۵/۱۰/۲۳ به تصویر می‌کشند. برداشت نیم رخ های عمودی غلظت و سرعت در مدل عددی مطابق با موقعیت ایستگاه های مورد نظر مطابق شکل ۹ صورت پذیرفت. سرعت انتشار جریان غلیظ را می‌توان با تقسیم طول مخزن بر زمان اوج انتقال از دو ایستگاه متوالی محاسبه کرد. در مورد، سرعت انتشار بین دو ایستگاه E و D تقریباً ۰/۳۴ متر بر ثانیه محاسبه شد.



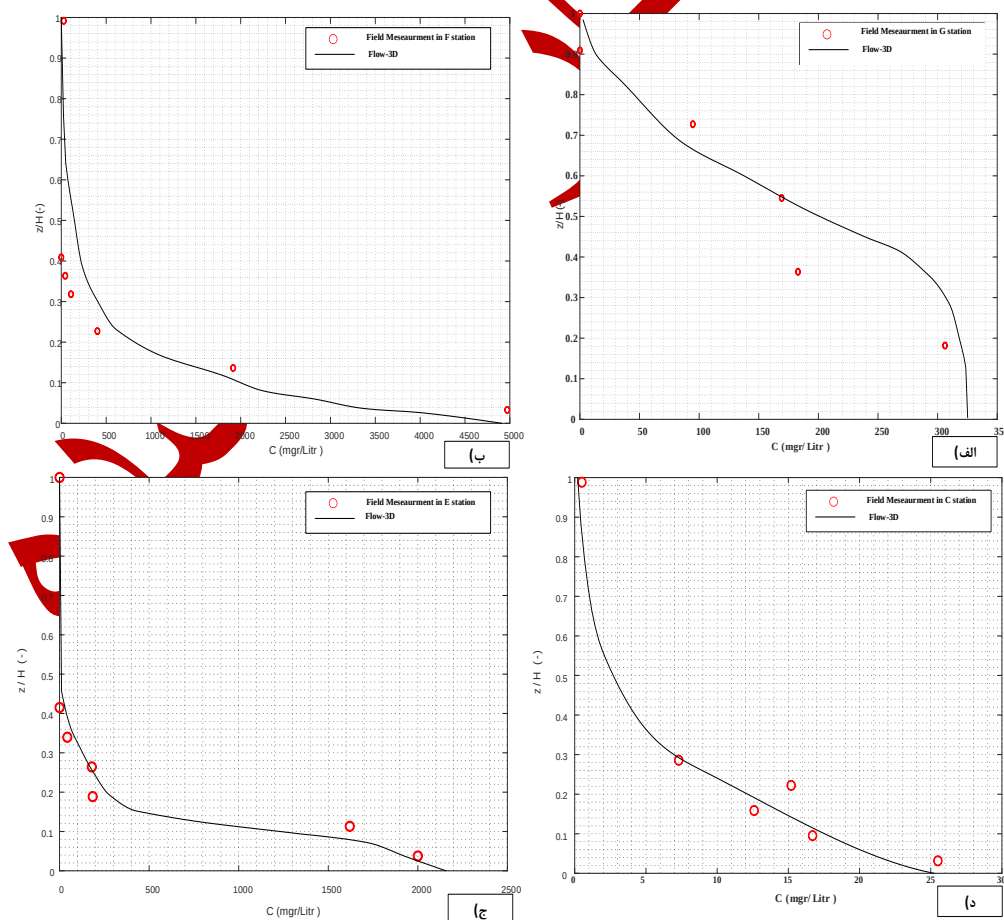
شکل ۸. شبیه‌سازی توزیع زمانی و مکانی غلظت رسوب معلق در پلان افقی مخزن و دو ایستگاه D و E بعد از نقطه غوطه‌وری

شکل ۹ نمودارهای مستخرج از مدل عددی رسوبات معلق را نشان می‌دهند که با اندازه‌گیری‌های میدانی در چهار ایستگاه F، G، E و D مقایسه شده‌اند. سرعت‌های انتشار عمودی جریان غلیظ واقع در ایستگاه F در شکل ۱۰ در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری شده میدانی نشان داده شده است. برای ارزیابی کمی عملکرد مدل، از ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

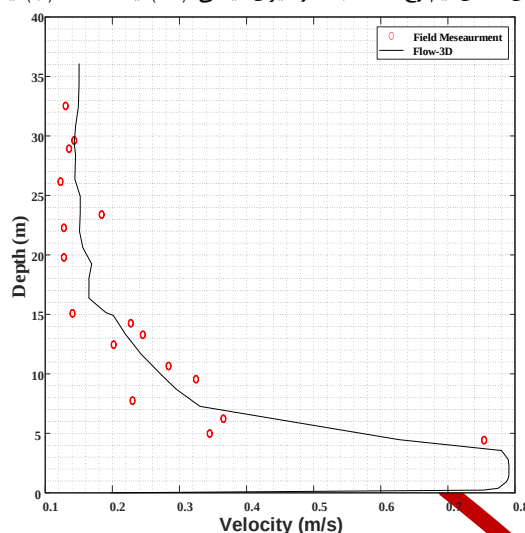
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{N=1}^{N_{\max}} (M_N - S_N)^2}{\sum_{N=1}^{N_{\max}} (M_N - \bar{M})^2} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_{\max}} \sum_{N=1}^{N_{\max}} (M_N - S_N)^2} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

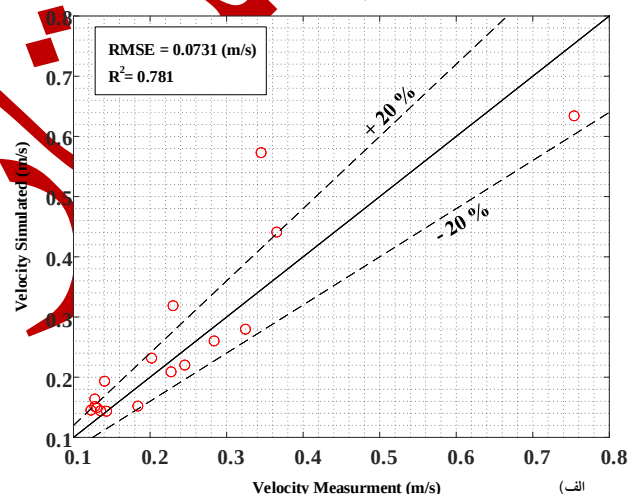
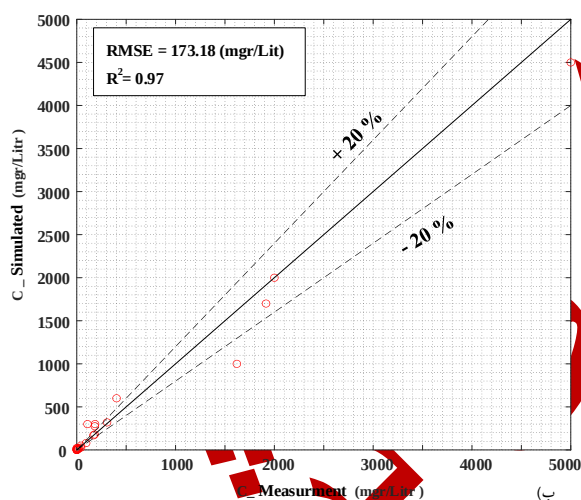
که در آن $N_{\max}$ تعداد داده‌ها، M_N اندازه‌گیری‌های میدانی و S_N نتایج شبیه‌سازی هستند. در شکل ۱۱، دقت مدل در پیش‌بینی توزیع عمودی غلظت و سرعت نشان داده شده است. همان‌گونه که نشان داده شده است مدل به طور دقیق با اندازه‌گیری‌های میدانی غلظت در چهار ایستگاه اندازه‌گیری مختلف اعتبارسنجی شد و از تطابق خوبی با شاخص‌های آماری $RMSE = 0.0731$ (m/s) و $R^2 = 0.781$ برای برآورد سرعت جریان غلیظ و $RMSE = 173.18$ (mgr/Lit) و $R^2 = 0.97$ جهت برآورد غلظت جریان غلیظ برخوردار بوده است.



شکل ۹. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی نیم رخ غلظت با اندازه گیری میدانی: (الف) ایستگاه G، (ب) ایستگاه F، (ج) ایستگاه E، (د) ایستگاه C



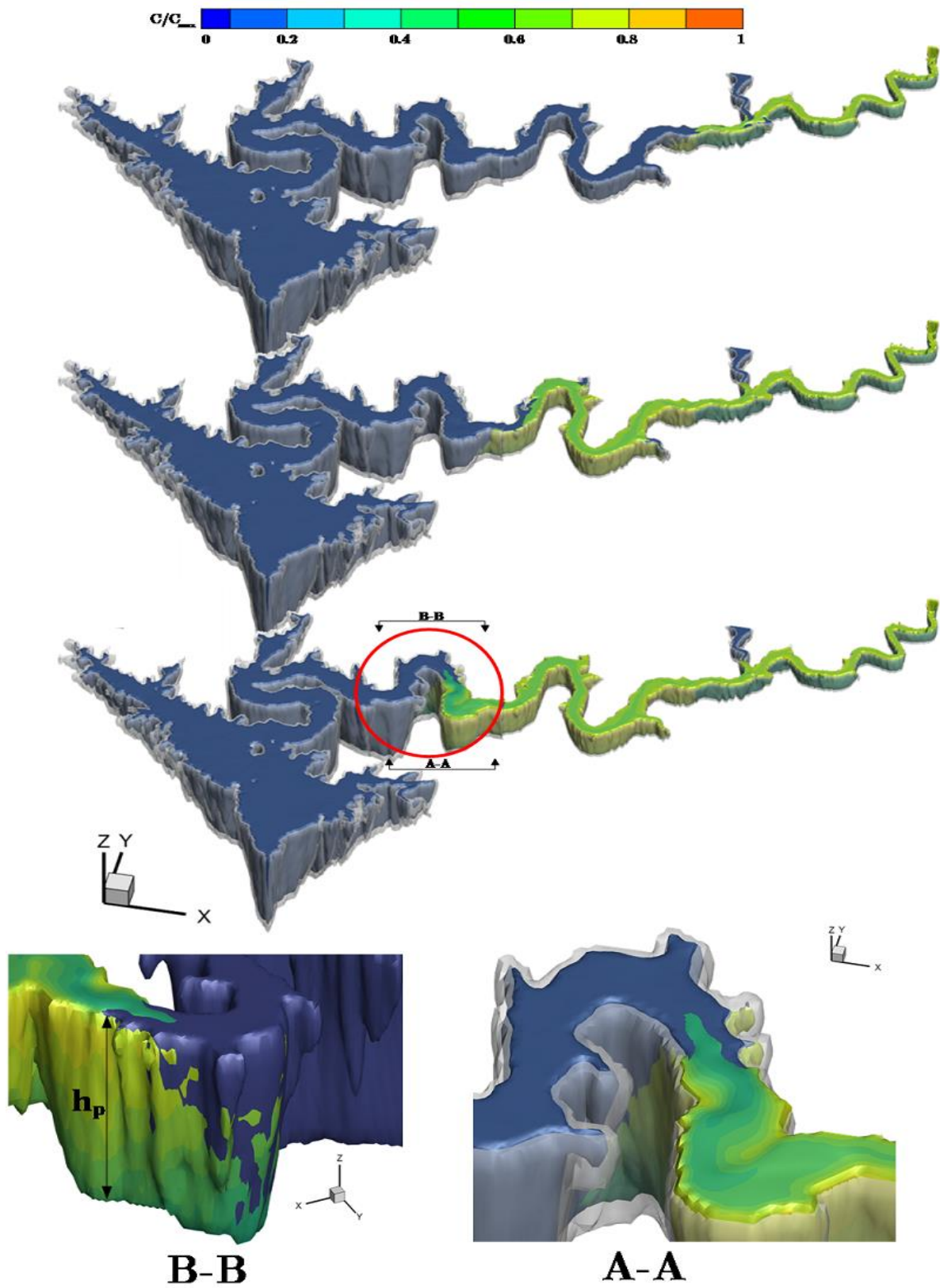
شکل ۱۰. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی برای سرعت در ایستگاه F در مقایسه با نتایج میدانی



شکل ۱۱. ارزیابی کمی خطاها با استفاده از مقایسه (الف) نیمرخ سرعت و (ب) غلظت بین مدل عددی و اندازه گیری های میدانی

عمق غوطه‌وری جریان غلیظ

همان گونه که بیان گردید رسوب گذاری یکی از مشکلات بزرگ است که بر عمر مخازن رودخانه‌هایی با بار رسوبی سنگین تأثیر می‌گذارد. تخلیه رسوبات از طریق جریان‌های گل‌آلود یک اقدام مهم برای کاهش نرخ رسوب گذاری در مخزن، به ویژه در مرحله اولیه بهره‌برداری از مخزن محسوب می‌شود. در این مطالعه پس از صحت سنجی داده‌های میدانی در پایین دست ناحیه غوطه‌وری، به محاسبه عمق غوطه‌وری در حالت پایدار آن مطابق با شکل ۱۲، و سپس محاسبه پارامترهای این جریان نظیر عمق، سرعت و عدد فرود دسیمتریک پرداخته شد. مقایسه تمام نتایج حاصل از تشکیل غوطه‌وری جریان غلیظ از مدل عددی با تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۱) نشان می‌دهد برای سیلاب‌های بزرگتر از ۳۰۰ مترمکعب با تراز سطح آب بالای ۳۲۰ متر از سطح دریا محدوده تشکیل عمق غوطه‌وری حد فاصل ایستگاه G تا F خواهد بود.



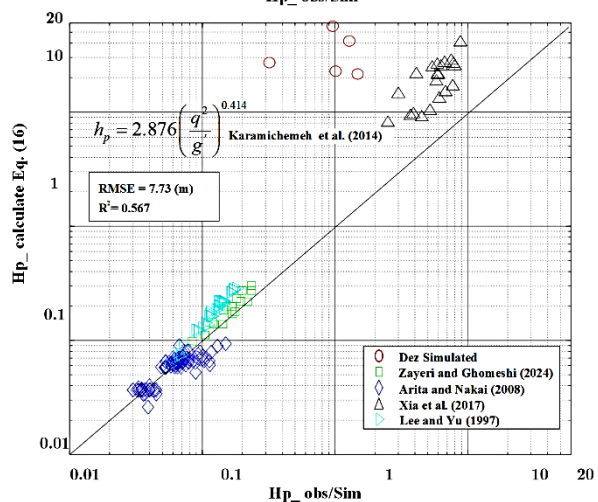
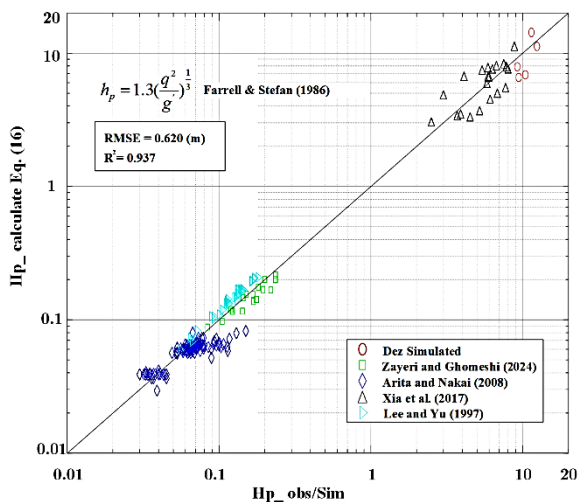
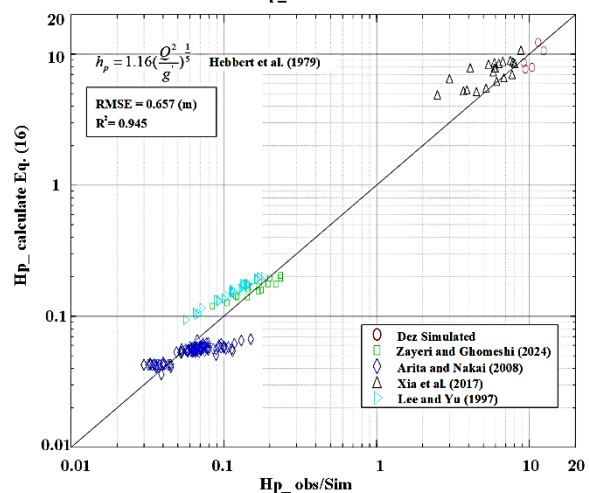
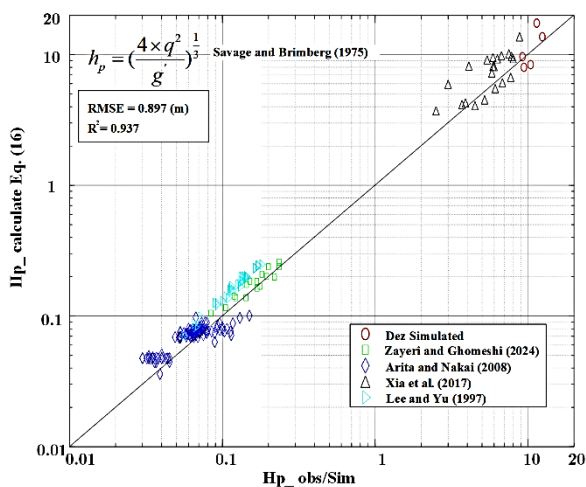
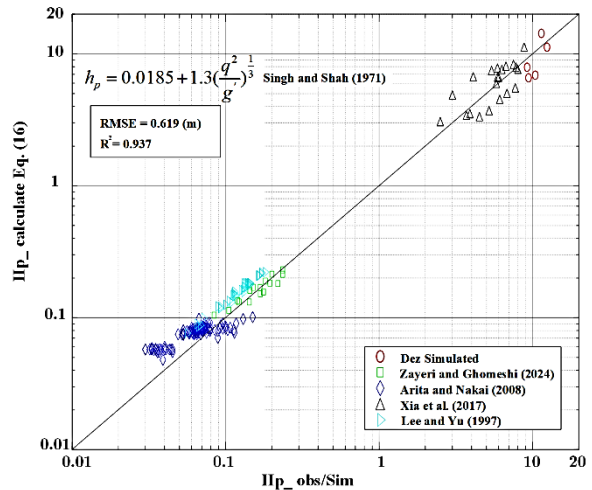
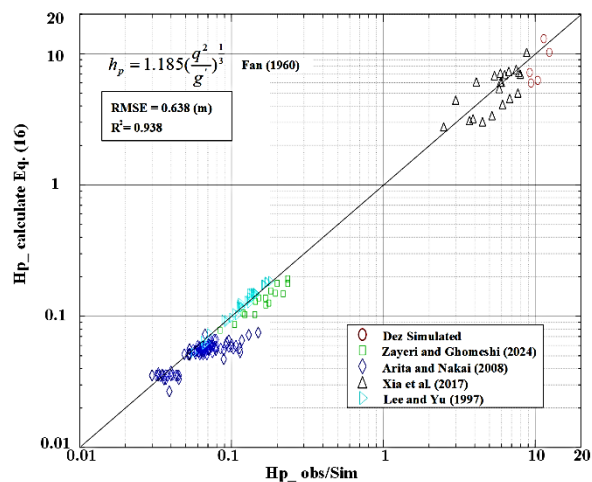
شکل ۱۲. نحوه محاسبه مؤلفه های جریان غلیظ در موقعیت غوطه‌وری آن در مخزن سد در

در این مطالعه برای تأیید دقت پیش‌بینی عددی عمق غوطه‌وری جریان غلیظ در مخزن سد دز، از اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی مخزن شیائولانگدی در چین استفاده شده است (Xia et al., 2017). همچنین از داده‌های آزمایشگاهی حاصل از کانال آزمایشگاهی Lee & Yu (1997) نیز در فرآیند اعتبارسنجی گنجانده شده‌اند. Lee & Yu (1997) با استفاده از کائولین به عنوان بار معلق با میانگین اندازه ذره ۶/۸ میکرومتر، آزمایشاتی را بر روی تشکیل جریان‌های غلیظ انجام دادند. ۲۸ آزمایش از جریان‌های غلیظ در نقاط غوطه‌وری پایدار ثبت نمودند که غلظت جریان ورودی بین ۵/۳ تا ۲۸/۶ کیلوگرم بر مترمکعب و عمق غوطه‌وری بین ۵/۶ تا ۱۸/۱ سانتی متر متغیر بود. علاوه بر این، از نتایج آزمایشات برداشت شده عمق غوطه‌وری در مسیر خم با نسبت شعاع به عرض ۲، ۴ و ۶ توسط Zayeri & Ghomeshi (2024) جهت آزمودن روبری عمق جریان غلیظ استفاده گردید. همچنین از نتایج آزمایشگاهی Arita & Nakai (2008) که عمق غوطه‌وری جریان غلیظ را در کانالی با شیب‌های یک به سه تا یک به پنجاه استفاده گردید.

شکل ۱۳ به مقایسه بین عمق غوطه‌وری جریان غلیظ شبیه‌سازی شده عددی با استفاده از روابط تجربی و داده‌های مشاهده‌شده از چهار منبع مختلف دیگر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان ضریب تعیین (R^2) بین عمق مدل‌سازی شده با معیار Fan (1960) برابر با ۰/۹۳۸ است، در حالی که این مقدار برای معیار Farrell & Stefan (Farrell & Stefan, 1986) و (1975) و Savage & Brimberg به ترتیب ۰/۸۸۷ و ۰/۸۳۷ می‌باشد. جدول ۲ نشان می‌دهد که میانگین مربعات خطا (RMSE) بین عمق غوطه‌وری محاسبه‌شده Flow-3D بر مبنای این سه مجموعه داده به ترتیب ۰/۶۱۸، ۰/۷۲۰ و ۰/۸۹۷ متر است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای غلظت‌های بالای ۴۰۰ (mg/Lit) معیارهای که بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی عمق غوطه‌وری را پیش‌بینی نموده‌اند از دقت بالای برای تخمین عمق جریان غلیظ در مخزن سد دز برخوردار نبوده‌اند. بنابراین، معیار Fan (1960) ارائه‌شده در این مطالعه می‌تواند برای پیش‌بینی عمق غوطه‌وری جریان‌های غلیظ در مخزن سد دز با بار رسوبی سنگین مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲. شاخص آماری عمق‌های غوطه‌وری مشاهده‌شده از مجموعه داده‌های مختلف و مدل‌سازی شده

شاخص آماری	معیار مورد استفاده	
RMSE (m)	R^2	
۰/۶۱۸	۰/۹۳۸	Fan (1960)
۰/۷۱۹	۰/۸۱۷	Singh & Shah (1971)
۰/۸۹۷	۰/۸۳۷	Savage & Brimberg (1975)
۰/۹۵۷	۰/۷۹۵	Hebbert et al. (1979)
۰/۷۲۰	۰/۸۸۷	Farrell & Stefan (1986)
۷/۷۳	۰/۵۶۷	Karamichemeh et al. (2014)



شکل ۱۳. مقایسه بین عمق‌های غوطه‌وری مشاهده‌شده از مجموعه داده‌های مختلف و مدل‌سازی انجام‌شده

نتیجه‌گیری

بررسی شرایط تشکیل جریان‌های غلیظ گل‌آلود در مخازن رودخانه‌هایی با بار رسوبی سنگین از منظر عملی و علمی در بهره‌برداری و

مدیریت مخازن حائز اهمیت است. مدل عددی غیرهیدرواستاتیک FLOW-3D برای واقعۀ سیلاب زمستان ۱۳۸۵ با شاخص های آماری $R^2=0.97$ و $RMSE=173.18$ (mgr/Lit) و $R^2=0.781$ و $RMSE = 0.0731$ (m/s) برای برآورد سرعت جریان غلیظ و جهت برآورد غلظت جریان غلیظ صحت سنجی گردید. نتیجه گیری اصلی این مطالعه نشان می دهد که مدل عددی سه بعدی، به طور مناسبی دینامیک انتشار جریان های غلیظ را در مخزن سد دز می تواند شبیه سازی کند. مدل شبیه سازی شده از عمق غوطه وری جریان غلیظ از مخزن سد دز با استفاده از داده های آزمایشگاهی جریان های غلیظ پیشین، که طیف وسیعی از غلظت های رسوبی از کم تا زیاد را پوشش می دهد، اعتبارسنجی شده اند. در این اعتبارسنجی، میزان همبستگی بالایی به دست آمده است.

نتایج نشان می دهد عمق غوطه وری جریان غلیظ به صورت مستقیم متناسب با توان $2/3$ از دبی واحد عرض و به صورت معکوس متناسب است با توان $1/3$ از غلظت حجمی رسوب (C_s) خواهد بود. نتایج تأیید شده نشان می دهند که معیار Fan (1960) می تواند برای پیش بینی عمق غوطه وری جریان های گل آلود در مخزن سد دز مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

در پایان، از حمایت های مالی شورای پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را داریم (GN: SCU.WH1403.43525).

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

- Arita, M., & Nakai, M. (2008). Plunging conditions of two-dimensional negative buoyant surface jets released on a sloping bottom. *Journal of Hydraulic Research*, 46(3), 301–306. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.2714>
- Arjmandi, Ghomeshi, M., Ahadiayn, javad, & Goleij, hasan. (2012). PREDICTION OF PLUNGE POINT IN THE DENSITY CURRENT USING RNG TURBULENCE MODELING. 22(1), 171–185.
- Brasington, J., & Richards, K. (2000). Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes*, 14(14), 2559–2574. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2559::AID-HYP114>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2559::AID-HYP114>3.0.CO;2-E)
- Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. (2016). Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.001>
- Elahi, R., Ghomeshi, M., & Zayeri, M. (2024). Experimental Study of Water Entrainment in Plunging Phenomena in Channel's Bend. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), 119–130. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.21656.1581>
- Ellison, T. H., & Turner, J. S. (1959). Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 6(3), 423–448. <https://doi.org/10.1017/S0022112059000738>
- Fan, J.-H. (1960). Experimental studies on density currents. *Water and Energy International*, 17(4), 706–729.
- Farrell, G. J., & Stefan, H. G. (1986). Buoyancy induced plunging flow into reservoirs and costal regions. <https://conservancy.umn.edu/items/6c58e0c0-3288-45ce-8c50-914df41b8990>
- Goodarzi, D., Sookhak Lari, K., Khavasi, E., & Abolfathi, S. (2020). Large eddy simulation of turbidity currents in a narrow channel with different obstacle configurations. *Scientific Reports*, 10(1), 12814. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68830-5>
- Hebbert, B., Patterson, J., Loh, I., & Imberger, J. (1979). Collie River Underflow into the Wellington Reservoir. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(5), 533–545. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005206>
- Howlett, D. M., Ge, Z., Nemec, W., Gawthorpe, R. L., Rotevatn, A., & Jackson, C. A. -L. (2019). Response of unconfined turbidity current to deep-water fold and thrust belt topography: Orthogonal incidence on solitary and segmented folds. *Sedimentology*, 66(6), 2425–2454. <https://doi.org/10.1111/sed.12602>
- Imtiyaz, N., Lee, F.-Z., Lin, G.-F., & Lai, J.-S. (2024). Modeling and Analysis of Turbidity Currents in a Reservoir with the Dredged Guiding Channel. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(8), 3257–3269. Scopus.

- <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1054-z>
- Karamichemeh D, M, G., H, G., & A, S. (2014). *EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF PLUNGE REGION OF SALINE DENSITY CURRENT*. 36(4), 0–0.
- Kostaschuk, R., Nasr-Azadani, M., Meiburg, E., Wei, T., Chen, Z., Negretti, M.-E., Best, J., Peakall, J., & Parsons, D. (2018). On the Causes of Pulsing in Continuous Turbidity Currents. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(11), 2827–2843. <https://doi.org/10.1029/2018JF004719>
- Lee, F.-Z., Lai, J.-S., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2024). Analysis of turbidity current plunging and floating woody debris in a reservoir during flood events. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 102027. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102027>
- lee hong. (1997). *Experimental Study of Reservoir Turbidity Current | Journal of Hydraulic Engineering | Vol 123, No 6*. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281997%29123%3A6%28520%29>
- Lee, H.-Y., & Yu, W.-S. (1997). Experimental Study of Reservoir Turbidity Current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(6), 520–528. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:6\(520\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:6(520))
- Mehranfar, N., Kolahdoozan, M., & Faghihirad, S. (2023). Development of multiphase solver for the modeling of turbidity currents (the case study of Dez Dam). *International Journal of Multiphase Flow*, 168, 104586.
- Meskar Hoda & Fazloul Ramin. (2013). *INVESTIGATION OF SEDIMENTATION PATTERN IN THE SHAHID RAJAEE RESERVOIR USING GSTAR3.0 NUMERICAL MODEL*. 4(7), 16–29.
- Minella, J. P. G., Merten, G. H., Reichert, J. M., & Clarke, R. T. (2008). Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological Processes*, 22(12), 1819–1830. <https://doi.org/10.1002/hyp.6763>
- N. Schuch, F., Meiburg, E., & H. Silvestrini, J. (2021). Plunging criterion for particle-laden flows over sloping bottoms: Three-dimensional turbulence-resolving simulations. *Computers & Geosciences*, 156(C). <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104880>
- Peng-An, C. (2022). *Integration of multiple outlets' operation and sediment management options in the reservoir for increasing efficiency of turbidity current venting and clear water storage* [PhD Thesis, 京都大学]. <https://ci.nii.ac.jp/naid/500001899348/>
- Rakesh, M., Rakesh, P. K., Kumar, B., Chowdhury, S., & Patidar, A. K. (2022). Numerical simulation of gravity driven turbidity currents using Computational fluid dynamics. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1883–1891. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.238>
- Sangdo An, & Julien, P. Y. (2014). Three-Dimensional Modeling of Turbid Density Currents in Imha Reservoir, South Korea. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(5), 05014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000851](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000851)
- Savage, S. B., & Brimberg, J. (1975). Analysis Of Plunging Phenomena In Water Reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 13(2), 187–205. <https://doi.org/10.1080/00221687509499713>
- Schuch, F. N., Silvestrini, J. H., Meiburg, E., & Laizet, S. (2023). The Plunging of Hyperpycnal Plumes on Tilted Bed by Three-Dimensional Large-Eddy Simulations. In H. F. Meier, A. A. M. De Oliveira Junior, & J. Utzig (Eds.), *Advances in Turbulence* (pp. 41–55). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25990-6_4
- Singh, B., & Shah, C. R. (1971). Plunging phenomenon of density currents in reservoirs. *La Houille Blanche*, 1, 59–64.
- Sun, Y., Li, J., Cao, Z., Borthwick, A. G. L., & Józsa, J. (2023). Effect of tributary inflow on reservoir turbidity current. *Environmental Fluid Mechanics*, 23(2), 259–290. <https://doi.org/10.1007/s10652-022-09856-3>
- Tang, X.-Q., Koh, C. G., & Luo, M. (2023). Numerical simulation of turbidity currents using consistent particle method. *Advances in Water Resources*, 180, 104536. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104536>
- Wang, S., Qian, X., Han, B., Luo, L., Ye, R., & Xiong, W. (2013). Effects of different operational modes on the flood-induced turbidity current of a canyon-shaped reservoir: Case study on Liuxihe Reservoir, South China. *Hydrological Processes*, 27(26), 4004–4016. <https://doi.org/10.1002/hyp.9534>
- Wang, Z., Xia, J., Zhou, M., Cheng, Y., & Li, T. (2023). A semi-analytical model for predicting outflow concentration of vented turbidity currents with application in the Xiaolangdi reservoir. *Journal of Hydrology*, 625, 130009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130009>
- Xia, J., Zhang, J., Deng, S., Wang, Z., & Li, T. (2017). Improved criterion for plunge of reservoir turbidity currents. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 170. <https://doi.org/10.1680/jwama.15.00046>
- Zavala, C., Arcuri, M., & Valiente, L. (2012). The importance of plant remains as diagnostic criteria for the recognition of ancient hyperpycnites. *Revue de Paleobiologie*, 11, 457–469.
- Zayeri, M., & Ghomeshi, M. (2024). Analysis of two-phase flow hydraulics using acoustic doppler velocimetry.

- Iranian Water Researches Journal*, 18(2). <https://doi.org/10.22034/iwrj.2024.14686.2584>
- Zayeri, M. R., & Ghomeshi, M. (2019). Numerical Modeling of Turbid Density Current in Dez Reservoir. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49.1(94), 77–88. <https://doi.org/10.22034/ceej.2019.8958>
- Zayrie, M., & Ghomeshi, M. (2014). Hydrodynamic Analysis of Turbidity Currents Measured in Dez Dam Reservoir. *Water and Soil Science*, 24(2), 135–145. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1672_en.html

Numerical modeling of plunging Turbidity current in the Dez Dam reservoir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Flood events that deliver large volumes of sediment into dam reservoirs often generate high-density turbidity currents. These flows, upon entering the reservoir, interact with the less dense ambient water and move as underflows. Depending on flow conditions, they can travel considerable distances and reach the dam body, leading to significant sediment accumulation and a reduction in storage capacity. In Iran, the annual sedimentation rate is estimated between 0.5% and 0.75% of the initial reservoir volume, equivalent to approximately 175–250 million cubic meters (Meskar & Fazloulou, 2013). These currents also negatively affect hydropower intake structures and outlet systems (Chamoun et al., 2016). Turbidity currents submerge beneath clear water when buoyancy forces surpass inertial forces, creating a plunging point and corresponding plunging depth (Schuch et al., 2021). Several studies have focused on modeling these flows. Kostaschuk et al. (2018) and Howlett et al. (2019) used DNS and Flow-3D to simulate velocity profiles and instabilities. Zayeri & Ghomeshi (2019) successfully modeled turbidity currents in Dez Dam, showing strong agreement with field data. Goodarzi et al. (2020) explored the effects of topography and inlet elevation, while Sun et al. (2023) examined how tributary inflows influence flow dispersion and plunging location.

Due to challenges in measuring turbidity currents, especially in real reservoir conditions, numerical modeling is essential. This study aims to assess the capability of Flow-3D in three-dimensional simulation of turbidity currents and estimation of plunging depth in Dez Dam. The results are compared with empirical formulations to validate model accuracy.

Materials and Methods

This study focuses on the Dez Dam reservoir, located at the confluence of the Bakhtiari and Sezar Rivers in the Tele Zang region, where the Dez River originates. The research utilizes FLOW-3D, a powerful computational fluid dynamics (CFD) software, to numerically simulate turbidity currents using the governing flow equations. The software is well-suited for modeling open channel flows. Reservoir bed geometry and its variations were defined using hydrographic maps prepared by the Khuzestan Water and Power Authority in 2007. These maps, containing X, Y, and Z coordinates, were provided in CAD format. ArcGIS software was employed to develop a digital elevation model (DEM) and prepare the flow domain. The computational domain was structured using nine blocks, with a vertical grid spacing of 2 meters ($\Delta Z = 2$ m) and a horizontal mesh resolution of 15 meters ($\Delta x = \Delta y = 15$ m). This setup enabled the application of the finite volume method for solving the flow equations.

A major flood occurred on January 14, 2007, introducing significant volumes of water and sediment into the Dez reservoir. After reaching the dam body, sediments were discharged through the bottom outlets.

Consequently, data from January 13, 2007, were used as boundary conditions and for model validation of the turbidity current simulation.

Results and discussion

In this study, following the validation of field data downstream of the plunging zone, the steady-state plunging depth was calculated, as illustrated in Figure 12. Subsequently, key flow parameters such as flow depth, velocity, and the densimetric Froude number were determined. A comparison of all results from the numerical model regarding the formation of turbidity current plunging with satellite imagery (Figure 1) indicates that for flood events exceeding 300 m³/s and a reservoir water level above 320 meters above sea level, the plunging zone typically forms between stations G and F.

It was also observed that for high sediment concentrations exceeding 400 mg/L, empirical criteria derived from laboratory data were not sufficiently accurate in predicting plunging depth in the Dez Dam reservoir. Therefore, the Fan (1960) criterion presented in this study is recommended as a more suitable and reliable approach for estimating the plunging depth of high-concentration turbidity currents in this specific context.

Conclusion

The main conclusion of this study demonstrates that the three-dimensional numerical model effectively simulates the dynamics of turbidity current propagation within the Dez Dam reservoir. The simulated plunging depth of the turbidity currents was validated using experimental data from previous turbidity flow studies, which encompass a wide range of sediment concentrations from low to high. This validation yielded a high degree of correlation, confirming the model's reliability.

The results indicate that the plunging depth of turbidity currents is directly proportional to the 2/3 power of the unit discharge and inversely proportional to the 1/3 power of the sediment volumetric concentration (Cs). These validated outcomes further support the use of the Fan (1960) criterion as an effective predictive tool for estimating the plunging depth of sediment-laden flows in the Dez Dam reservoir.

Author Contributions

For this research article, the individual contributions are as follows: Conceptualization, [Author A] and [Author B] and [Author C]; methodology, [Author B]; software, [Author C]; validation, [Author A], [Author B], and [Author C]; formal analysis, [Author A]; investigation, [Author B]; resources, [Author A]; data curation, [Author B]; writing—original draft preparation, [Author C]; writing—review and editing, [Author B]; visualization, [Author A]; supervision, [Author B]; project administration, [Author C]; funding acquisition, [Author A]. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available. For further inquiries regarding the data, please contact author's email.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz (GN: SCU.WH1403.43525).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.