ارزیابی عملکرد مدل تلاطمی $k-\varepsilon$ استاندارد در مقایسه با مدل $RNG\ k-\varepsilon$ در پیش‌بینی ارتفاع غوطه‌وری جریان غلیظ

حسن گلیج*، جواد احدیان، مهدی قمشی و حامد ارجمندی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱/۲۷)

چکیده

نقطه غوطه‌وری هنگامی روی می‌دهد که در برخورد جریان غلیظ با سیال ساکن، جریان غلیظ به‌درون سیال ساکن نفوذ کرده باشد. در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ و هم‌چنین شیب بستر سیال ساکن که بر نقطه غوطه‌وری تأثیر گذار هستند، تحت شرایط دو مدل تلاطمی $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG (که در سراسر متن به اختصار مدل استاندارد و RNG از آنها یاد خواهد شد) با استفاده از مدل Flow-3D مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق ابتدا یک مدل فیزیکی ساخته شد و آزمایش‌های مختلف- در مجموع ۳۶ آزمایش در آن انجام گردید. سپس **با استفاده از مدل Flow-3D ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شرایط آزمایشگاهی موجود تحت شرایط دو مدل آشفتگی مذکور شبیه‌سازی شد. بررسی مقایسه‌ای نشان داد که عمق غوطه‌وری برآورد شده تحت مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل استاندارد، به مقادیر اندازه گیری شدهٔ آزمایشگاهی** نزدیک‌تر می‌باشد. این در حالی است که در شیب ۱۲ درصد مدل **RNG** مقدار ۱۲/۲۸ درصد و مدل استاندارد حدود ۳۰ درصد نتایج را بیشتر از **داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. در مجموع برای کلیه شیب‌ها به‌طور متوسط نتایج حاصل از مدل تلاطمی RNG، ۱۰/۵ درصد و نتایج حاصل از مدل استاندارد ۲۷ درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. با توجه به بررسی آماری انجام شده مشخص گردید که مدل تلاطمی RNG به‌طور کلی نتایج ارتفاع غوطه‌وری را با دقت رضایت بخشی نسبت به مدل استاندارد تخمین می‌زند.**

واژه‌های کلیدی: جریان غلیظ، نقطه غوطه‌وری، مدل‌های آشفتگی، مدل فیزیکی، **Flow-3D**

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه چمران اهواز
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Hassan_goleij37@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]

مقدمه

یکی از مهمترین مسائل در مبحث عمر مفید یک سد، رسوبگذاری در مخزن و کاهش حجم مفید آن است. یکی از این روش‌ها خارج کردن جریان سیلاب در قالب دینامیک جریان‌های گل آلود می‌باشد. بنابراین بررسی و مطالعه حرکت جریان‌های گل آلود در مخازن در جهت وصول به هدف فوق، اطلاعات گرانبهایی را در اختیار قرار خواهد داد. به‌طور کلی اگر یک جریان غلیظ رسوبی با سرعت U و غلظت C_s وارد یک مخزن آب زلال راکد با $U_a = ۰$ شود، یک ناحیه غوطه‌وری رخ خواهد داد. در این راستا یک جریان گل‌آلود مرکب از ذرات ریز رسوبی معلق، پس از عبور از ناحیه غوطه‌وری، در کف مخزن به‌وجود خواهد آمد (شکل ۱). ذرات درشت‌تر به سرعت در ابتدای مخزن ته‌نشین شده و یک دلتا تشکیل می‌دهند (گراف و آلتیناکار (۸)).

عمق آب، hp، در نقطه غوطه‌وری با ملاحظه اندازه حرکت موجود جریان (در کانال و مخزن) می‌تواند محاسبه شود. یک رابطه تقریبی توسط آکیاما و استفان(۲)، با استفاده از عدد فرود جریان در نقطه غوطه‌وری به‌صورت زیر ارائه شده است:

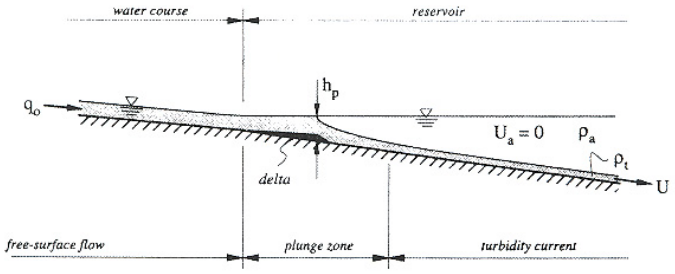
$$Fr_p = \frac{q_{\circ} / h_p}{\left(g' h_p\right)^{1/2}} \cong ۰/۶۸ \qquad [۱]$$

که برای کانال‌های شیب دار در شیب با محدوده، $۰/۰۱۷ \le S_f \le ۰/۱۲۳$ صادق می‌باشد؛ مقدار $q_{\circ}$ عبارت از دبی واحد عرض کانال برای جریان ورودی است. به‌دلیل این‌که نقطه غوطه‌وری مرز جداکننده بین سیال پیرامون (مخزن) و سیال غلیظ می‌باشد، بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ غوطه‌ورشده در مخزن، سرعت بدنه و پیشانی، میزان شدت اختلاط و غیره به این نقطه وابسته است. بنابراین پیش‌بینی مناسب ارتفاع نقطه غوطه‌وری به‌عنوان نقطه شروع غوطه‌ورشدن جریان غلیظ ورودی به‌درون مخزن ضروری می‌باشد. لذا محققین فرمول‌های مختلفی جهت محاسبه عمق جریان غلیظ (h_p) در محل غوطه‌وری ارائه نموده‌اند (صاحب شبان (۱)، آکیاما و استفان (۲)، هیبرت و همکاران (۷)، ساویج و بریمبرگ (۱۳)). از سال ۱۹۵۰ به بعد مسائل رسوبگذاری ناشی از جریان‌های گل آلود به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی در بسیاری از کشورها مطالعه شده است. تاکنون مشاهدات میدانی نه چندان زیادی در زمینه جریان‌های گل آلود انجام گرفته است (یاماموتو و همکاران (۱۴)). به‌دلیل دشواری و گرانی اندازه-گیری‌های میدانی، عمده بررسی‌های تجربی جریان گل آلود در آزمایشگاه صورت گرفته است. مدل‌های ریاضی این جریان‌ها در ۷۰ سال اخیر توسعه یافته‌اند و به‌دلیل فقدان شناخت کافی روی پارامترهای مختلف نظیر ضریب نفوذ(Entrainment coefficient) رسوب، معادلات به‌خوبی حل نشده‌اند. بارنت و همکاران (۳) به مطالعه عددی غوطه‌وری جریان غلیظ پرداختند. این محققین برای شبیه‌سازی جریان غلیظ از مدل آشفتگی $\kappa-\varepsilon$ اصلاح شده با اثرات شناوری استفاده نمودند. براساس یافته‌های ایشان رابطهٔ بین عمق نقطه غوطه‌وری در کانال با عرض ثابت و کانال واگرا برآورد شد. آنها نشان دادند که میزان پخشیدگی لایه جریان غلیظ در کانال واگرا تابعی از میزان نفوذ آب به‌درون جریان چگال و عرض کانال بوده و موقعیت خط غوطه‌وری قابل پیش‌بینی است. دالی‌مور و همکاران (۴) با استفاده از مدل سازی جریان غلیظ تحتانی، مطالعات خود را انجام دادند. این محققین از یک مدل ترکیبی جریان غلیظ تحتانی دو بعدی و هیدرودینامیک سه بعدی برای شبیه‌سازی جریان‌های ورودی غوطه‌ور در مخزن استفاده نمودند. در شبیه‌سازی‌های ایشان جریان غوطه‌ور در کانال‌هایی با شیب و عرض ثابت انجام شد و براساس نتایج این محققین عمق‌های غوطه‌وری با مدل‌های تجربی سازگاری مناسبی داشت.

در این تحقیق ابتدا نتایج مدل آزمایشگاهی جریان غلیظ در دبی، شیب و غلظت‌های مختلف ارائه می‌شود و پس از آن، ارزیابی عملکرد مدل تلاطمی $\kappa-\varepsilon$ استاندارد (به اختصار مدل استاندارد) در مقایسه با مدل RNG $\kappa-\varepsilon$ (به اختصار مدل RNG) در پیش‌بینی ارتفاع نقطهٔ غوطه‌وری در جریان‌های غلیظ زیررونده انجام می‌شود که برای این منظور از مدل ریاضی

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]



شکل ۱. نمودار ناحیه غوطه‌وری

Flow-3D تحت شرایط هر دو مدل آشفتگی مذکور جهت شبیه‌سازی استفاده گردیده است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارتفاع غوطه‌وری با نتایج مدل فیزیکی مقایسه می‌گردد.

مدل‌های تلاطم

تئوری CFD آنالیز و پیش‌بینی رفتار جریان متلاطم را که از مسائل اساسی در دینامیک سیالات می‌باشد مورد بررسی قرار می‌دهد. مشکل این روش ناشی از خصوصیات طبیعی پدیده‌های متلاطم مانند آشفتگی و اتفاقی بودن این نوع پدیده‌ها است. جریان متلاطم جریانی سه‌بعدی و وابسته به زمان می‌باشد که احتیاج به اطلاعات زیادی برای توضیح خصوصیات مکانیکی جریان دارد. ماهیت وابسته به زمان جریان متلاطم که به دامنه وسیعی از مقیاس‌های زمانی (فرکانس) وابسته است که به ناچار باید از تکنیک‌های متوسط‌گیری برای تقریب نوسانات استفاده شود. برای حل این معادلات پرانتل (۱۰) برای حل معادلات ناویر- استوکس مدل طول اختلاط را که یک حل ریاضی برای تنش‌های تلاطمی بود ارائه داد. در حال حاضر مدل طول اختلاط به‌عنوان یک مدل صفر معادله‌ای شناخته می‌شود. پرانتل(۱۶) در سال ۱۹۴۵ برای حل تنش‌های متلاطم مدل تک معادله‌ای را ارائه کرد. کولموگرف (۸) اولین مدل کامل تلاطم را ارائه کرد. این مدل، مدل دو معادله‌ای نام گرفت. این معادلات برای سال‌ها غیرقابل حل بود تا زمانی که کامپیوترهایی با قابلیت بالا اختراع گردیدند. روتا در سال (۱۲) با استفاده از مدل تقریبی متلاطم بوزینسک به حل معادلات تنش‌های رینولدز پرداخت و این روش به نام Second-order یا Second-moment جریان نامیده شد. برای یک جریان سه‌بعدی این مدل شامل هفت معادله می‌باشد که یک معادله مربوط به طول اختلاط و شش معادله دیگر به تنش‌های رینولدز مربوطه می‌شوند. به این ترتیب در اواخر دهه ۵۰ چهار دسته اصلی از مدل‌های تلاطم توسعه یافته بودند. این مدل‌ها به‌ترتیب شامل مدل صفر معادله‌ای، مدل یک معادله‌ای، مدل دو معادله‌ای و مدل Second-order می‌باشد. مدل استاندارد ساده‌ترین مدل دو معادله‌ای است و مدل RNG مدل توسعه‌یافته آن می‌باشد. مدل RNG از بسط و توسعه مدل استاندارد مبتی بر روش تجدید نرمال‌سازی گروهی (RNG) به‌دست آمده است، به‌صورتی که ثابت‌هایی که در معادلات که به‌طور تجربی در معادله استاندارد به‌دست آمده‌اند، به‌طور صریح در معادله RNG استخراج شده‌اند. در مدل استاندارد معادلاتی که تلاطم را مدل می‌کنند شامل دو معادله می‌باشند. معادله اول که معادله انرژی جنبشی تلاطمی است، به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial(\rho V_x k)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y k)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_z k)}{\partial z}=$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right)+\mu_t.\varphi-\rho.\varepsilon \quad [۲]$$

معادله دوم که نرخ افت انرژی تلاطمی نامیده می‌شود به‌صورت زیر می‌باشد:

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]

$$\frac{\partial \rho\varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial(\rho V_x\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V_y\varepsilon)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho V_z\varepsilon)}{\partial z}$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}) \qquad [۳]$$
$$+C_{1\varepsilon}.\mu_t.\frac{\varepsilon}{k}.\varphi+C_{2}.\rho.\frac{\varepsilon^2}{k}$$

که در معادلات (۲) و (۳)، k مربوط به معادله بقایی انرژی جنبشی تلاطمی و ε نرخ اتلاف تلاطم می‌باشد. هم‌چنین (V_x, V_y, V_z) مولفه‌های بردار سرعت ρ،جرم حجمی سیال و پارامتر ($\mu_t = C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon}$) لزجت تلاطمی است و بخشی از لزجت موثر μ_e است و با استفاده از ضرایب k و ε که از معادلات بالا استخراج می‌شوند قابل برآورد است. در روابط بالا ترم φ، مربوط به تنش برشی بوده و مقادیر پیش فرض در مدل استاندارد در جدول ۱ آورده شده است (لاندر و اسپالدینگ (۹)).

در واقع هدف از حل دو معادله فوق تعیین ویسکوزیته مؤثر μ_e می‌باشد که از حل معادلات فوق و با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\mu_e=\mu+C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad [۴]$$

که μ_e ویسکوزیته موثر می‌باشد. در مدل RNG مقدار $C_{1\varepsilon}$ که ضریب معادله نرخ افت انرژی جنبشی می‌باشد از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$C_{1\varepsilon}=1/42-\frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{\eta_\infty}\right)}{1+\beta\eta^3} \qquad [۵]$$

مقادیر پیش فرض در مدل RNG برای ثابت‌های به‌کار گرفته شده در معادلات، در جدول۲ آورده شده است.

برای شبیه‌سازی جریان و محاسبه نقطه غوطه‌وری پس از انجام آزمایش‌های این تحقیق از مدلFlow-3D تحت شرایط مدل تلاطمی استاندارد و RNG استفاده شد. سپس با استفاده از نتایج حاصل از این مدل‌های تلاطم و با توجه به‌نتایج آزمایشگاهی ارتفاع غوطه‌وری مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل‌ها چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشند. روش حل معادلات در این مدل‌ها براساس روش حجم محدود بوده که معادلات جریان شامل معادلهٔ پیوستگی و مومنتم و دیگر معادلات مانند معادله پخشیدگی را حل عددی می‌نماید. معادلهٔ پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل جرم برای یک المان سیال به‌دست می‌آید.

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در بخش‌های گذشته به آن اشاره شد در این تحقیق عملکرد دو مدل تلاطمی استاندارد و RNG در تخمین ارتفاع غوطه‌وری جریان غلیظ مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین جهت بررسی دقیق‌تر نتایج، مقایسه‌ای بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته که در بخش‌های بعدی به آن اشاره می‌شود. به‌طور کلی مطالعات و آزمایشات تجربی به‌عمل آمده برروی پدیده غوطه‌وری نشان می‌دهد که عمق محل غوطه‌وری (hp) تابع متغیرهایی نظیر شتاب ثقل، شیب کف مجرا، خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ و دانسیتهٔ جریان پیرامون می‌باشد (قمشی (۶)). در این تحقیق اثر شیب کف و دبی جریان غلیظ و هم‌چنین غلظت سیال ورودی بر ارتفاع نظیر غوطه‌وری بررسی می‌شود. بدین منظور جدول ۳ سناریوهای آزمایشی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدلFlow-3D را نمایش می‌دهد.

جدول ۳ سناریوهای آزمایشی به‌کار گرفته شده در شبیه‌سازی ریاضی را نمایش می‌دهد. در مجموع ۳۶ آزمایش انجام شده مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. مدل فیزیکی مورد استفاده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز برپا شد که دارای طول کل ۹/۲۵ متر و عرض ۰/۵ متر با ارتفاع ۰/۸ متر بود. جنس اسکلت فلوم از فلز بوده و بدنه و کف آن از پلکسی گلاس با ضخامت ۲ سانتی‌متر ساخته شد. بخش‌های مختلف این مدل فیزیکی شامل حوضچه‌های آرامش ابتدایی و انتهایی فلوم، مخازن مورد نیاز (مخزن آب زلال، جریان غلیظ و

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]

جدول۱. ضرایب مدل $k-\varepsilon$ استاندارد

$C_{1\varepsilon}$	C_2	C_μ	σ_k	σ_ε
۱/۴۴	۱/۹۲	۰/۰۹	۱/۰	**۱/۳**

جدول۲. ضرایب مدل RNG

β	C_2	C_μ	σ_k	σ_t	σ_ε	$\sigma\infty$
۰/۱۲	۱/۶۸	۰/۰۸۵	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۷۲	۴/۳۸

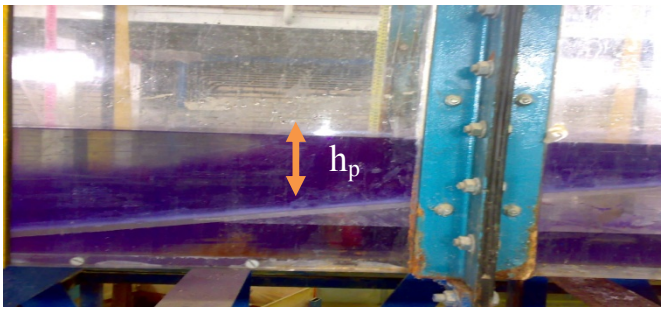
جدول۳. سناریوهای آزمایشی شبیه‌سازی شده با استفاده از Flow-3D

دبی جریان غلیظ (L/s)	دانسیته جریان غلیظ (Kg/m^3)	شیب کف مجرا (m/m)
محدودهٔ بین ۰/۵ تا ۲	۱۰۰۶، ۱۰۰۹، ۱۰۱۳ و ۱۰۱۶	۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶

مخازن هد ثابت) و پمپ‌های مورد نیاز (پمپ تامین آب زلال، اختلاط و تامین جریان غلیظ هر آزمایش) می‌باشد. هم‌چنین برای اندازه گیری دبی ورودی جریان غلیظ به‌درون فلوم از روش وزنی حجمی استفاده شد. بدین‌صورت که قبل از ورود جریان غلیظ به پشت دریچه لوله انتقال آن جدا و به‌روش زمان- حجم دبی ورودی به فلوم اندازه‌گیری می‌شد. حوضچه آرامش در ابتدای فلوم برای جلوگیری از تأثیر نوسان به‌وجودآمده در اثر ریزش جریان غلیظ به‌درون فلوم برروی دبی ورودی جریان غلیظ به‌درون فلوم و حوضچه آرامش آب زلال در انتهای فلوم، برای جلوگیری از تأثیر آب زلال ورودی برروی جریان غلیظ و انعکاس آن به بالادست تعبیه شده‌اند. هم‌چنین جهت ثابت نگه داشتن ارتفاع بار جریان غلیظ و آب زلال ورودی به فلوم به‌منظور جلوگیری از نوسات، مخزن با هد ثابت استفاده شد. این مخزن توسط یک تیغه فولادی به دو مخزن مجزا تبدیل شده (تفکیک آب زلال و سیال غلیظ). هم‌چنین هر یک از این دو مخزن مذکور نیز با استفاده از تیغه فولادی به ارتفاع مشخص به دو قسمت مجزا تقسیم شده (جهت سر ریز آب زلال و سیال غلیظ). در آزمایش‌های مدل فیزیکی از دو پمپ استفاده شده که یکی از پمپ‌ها وظیفهٔ انتقال آب به داخل فلوم آزمایشگاهی و مخزن آب با هد ثابت را برعهده دارد (پمپ A) و دیگری وظیفهٔ اختلاط جریان غلیظ و انتقال آن به‌داخل مخزن آب نمک با ارتفاع ثابت را انجام می‌دهد (پمپ B). پس از تهیه ماده غلیظ نمکی در یک سطل جداگانه با توجه به برنامه‌ریزی‌های آزمایشگاهی، آن را در مخزن تهیه و ذخیره جریان غلیظ حاوی آب ساکن ریخته، سپس توسط پمپ B آنها مخلوط می‌شوند، در ادامه آب زلال و سیال غلیظ به‌درون مخزن با هد ثابت و از آن جا به‌درون فلوم انتقال داده شد. هنگامی که سطح جریان غلیظ پشت دریچه با سطح آب زلال درون فلوم برابر شد، دریچه ورودی جریان غلیظ به فلوم به‌اندازه ۲ سانتی‌متر باز می‌شد تا جریان غلیظ وارد آب زلال ساکن درون فلوم شود. با توجه به غلظت بیشتر جریان غلیظ نسبت به آب درون فلوم، جریان غلیظ برروی شیب به‌درون آب ساکن غوطه‌ور می‌شد و پس از پایداری نقطه غوطه‌وری، این عمق اندازه‌گیری می‌شد. شکل ۲ یکی از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه را نمایش می‌دهد (h_p ارتفاع نقطه غوطه‌وری را نشان می‌دهد).

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]



شکل ۲. نمایی از اجرای مدل فیزیکی

در مجموع برای کلیه حالت‌های برنامه‌ریزی شده، آزمایش‌های مدل فیزیکی انجام شد. برای کلیه این حالات مدل ریاضی Flow-3D نیز برای هر دو حالت مدل تلاطمی یاد شده اجرا گردید. برای مش‌بندی هندسه جریان با توجه به پایداری شبکه مش‌بندی حالت‌های مختلفی مورد آزمون و خطا واقع شد تا بهترین حالت از نظر پایداری و زمان اجرای برنامه به‌دست آید. برای تعریف شرایط مرزی، ابتدا یک سیال اولیه در فلوم آزمایشگاهی به‌صورت Initial fluid تعریف شد و پس از آن جریان ورودی از نوع دبی تعریف گردید. مرز سیال با هوا از نوع symmetry و جداره‌ها از نوع wall تعریف شدند. برای تعیین گام زمانی حل، با استفاده از روش آزمون و خطا این عمل صورت پذیرد تا جریان پایا تشکیل گردد. در نهایت برای هر یک از آزمایش‌ها نتایج حاصل از مدل‌های تلاطمی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

نتایج و بحث

مطابق با آنچه که در بخش‌های گذشته به آن اشاره شد و براساس سناریوهای آزمایشی، برروی مدل فیزیکی آزمایش‌ها در سه شیب ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد با چهار غلظت مشخص و چندین دبی ورودی انجام شد. سپس با استفاده از مدل Flow-3D تحت شرایط دو مدل تلاطمی استاندارد و RNG مطابق با شرایط آزمایشگاهی موجود در مجموع ۳۶ آزمایش شبیه‌سازی گردید که در دو مدل یاد شده استاندارد و RNG مجموعاً ۷۲ مرتبه اجرا شد. برای بررسی نتایج شبیه‌سازی، داده‌های به‌دست آمده از دو مدل تلاطمی مذکور با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مقایسه و نتایج در سه شیب به‌طور جداگانه ترسیم شد. مقایسه نتایج با استفاده از آنالیز ابعادی به‌صورت بدون بعد به فرم معادله زیر درنظر گرفته شد.

$$\frac{hp_e}{y} = f\left(\frac{hp_m}{y}\right) \qquad [۵]$$

که در این رابطه hp_e مقدار ارتفاع غوطه‌وری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و hp_m ارتفاع غوطه‌وری پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ریاضی می‌باشد. هم‌چنین مقدار y در رابطهٔ فوق مربوط به‌عمق جریان غلیظ پس از دریچهٔ کنترل آن می‌باشد که مقدار آن در تحقیق حاضر برابر با ۲ سانتی‌متر درنظر گرفته شد و آزمایش‌های جریان غلیظ براین اساس انجام گردید. لازم به‌توضیح است که در تحقیق حاضر صرفاً تغییرات عمق غوطه‌وری در حالت اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده مدنظر بوده و به‌همین دلیل تنها برای ارائه نمایه‌ای از حالت بدون بعد، این مقادیر بر پارامتر ثابت y تقسیم شده است. در جدول ۴ نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده برای شیب ۱۲ درصد و تحت شرایط مدل‌های تلاطمی مذکور برای عمق غوطه‌وری ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، نتایج عمق غوطه‌وری برای شیب ۱۲ درصد برای کلیه غلظت‌های چهارگانه ۶، ۹، ۱۳ و ۱۶ گرم بر لیتر و در دبی‌های مختلف تحت شرایط هر دو مدل تلاطمی آورده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده مشخص است که مقادیر شبیه‌سازی شده بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده می‌باشد؛ به گونه‌ای که برای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]

جدول ۴. نتایج عمق غوطه وری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

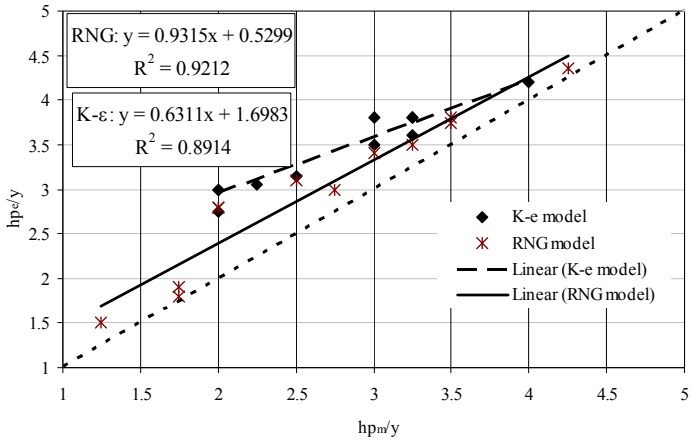
شیب ۱۲درصد				
Q (L/S)	ρ (Kg/m^3)	(cm) he	hm RNG(cm)	$k-\varepsilon$ hm (cm)
۱/۵۲	۱۰۰۶	۷/۵۰	۷/۹	۸/۴۰
۱/۱۰	۱۰۰۶	۵	۶/۱	۶/۵۰
۰/۷۰	۱۰۰۶	۴	۴/۲	۵/۶۰
۱/۴۰	۱۰۰۹	۶	۶/۰	۷/۴۰
۰/۶۵	۱۰۰۹	۳	۳/۵	۵
۱/۰۵	۱۰۰۹	۴	۵/۱	۵/۴۰
۰/۹۶	۱۰۱۳	۳/۵۰	۳/۹	۴/۶۰
۱/۴۵	۱۰۱۳	۵	۵/۴	۶/۴۰
۱/۹۰	۱۰۱۳	۸	۸/۶	۹/۵۰
۱/۴۵	۱۰۱۶	۴/۵۰	۵/۲	۵/۵۰
۱/۱۰	۱۰۱۶	۳/۵۰	۳/۸	۴/۵۰
۱/۹۰	۱۰۱۶	۶	۶/۳	۶/۶۰

مثال در شیب ۱۲ درصد، مقدار تفاوت نتایج شبیه‌سازی با نتایج مدل آزمایشگاهی در مدل استاندارد ۳۰ درصد و برای مدل RNG، ۱۲/۲۸ درصد می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع و مقایسه بهتر نتایج، مقادیر ارائه شده در جدول۴ به‌صورت گرافیکی برای هر سه شیب به تفکیک ترسیم گردیده است. شکل‌های ۳ الی ۵ نتایج مربوط به شیب‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد را نشان می‌دهد. در اینجا لازم به‌ذکر است که با توجه به‌اینکه hp_e/y و hp_m/y هر دو پارامترهای بی‌بعدی هستند، لذا این محورها در نمودارها بی‌بعد درنظر گرفته شده‌اند.

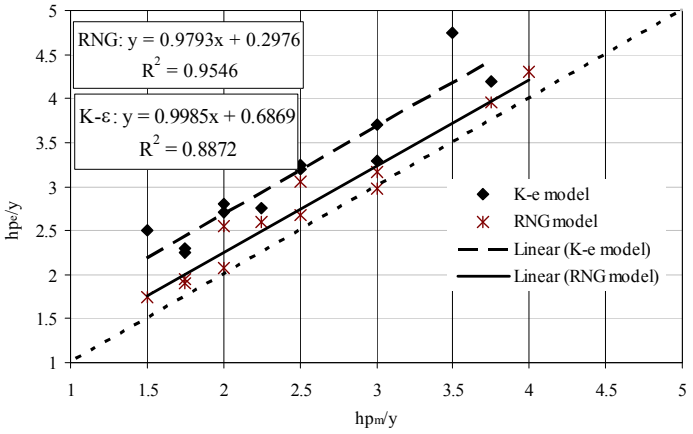
همان‌طور که در شکل‌های ۳ الی۵ مشاهده می‌شود، داده‌های شبیه‌سازی شده در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده در هر دو مدل تلاطمی ترسیم شده‌اند. در تمامی اشکال مشاهده می‌شود که دقت مدل تلاطمی RNG در مقایسه با $K-\varepsilon$ استاندارد بیشتر بوده و به خط ۴۵ درجه نزدیک‌تر است. این مقایسه برای شیب ۱۲ درصد به‌دلیل عرض از مبدا کمتر برای مدل تلاطمی RNG $K-\varepsilon$ نیز صادق است. با توجه به این اشکال در کلیهٔ شیب‌ها مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل ریاضی نسبت به‌نتایج اندازه‌گیری شده بیشتر بوده به‌گونه‌ای که در شیب ۸ درصد برای مدل $\kappa-\varepsilon$ استاندارد مقدار اختلاف با نتایج اندازه گیری شده به‌طور متوسط ۲۸ درصد، در شیب ۱۲درصد مقدار اختلاف ۳۰ درصد و برای شیب ۱۶ درصد مقدار اختلاف شبیه‌سازی با نتایج واقعی ۲۳ درصد می‌باشد و این مقادیر برای مدل RNG $K-\varepsilon$ به‌ترتیب ۱۴/۷۰ درصد، ۱۲/۲۸ درصد و ۴/۳۰ درصد می‌باشد. علت این امر که نتایج حاصل از مدل $\kappa-\varepsilon$ استاندارد اختلاف بیشتری با نتایج واقعی دارند، به این خاطر است که عموماً مدل RNG قابلیت اجرایی وسیع‌تری از مدل استاندارد دارد، خصوصاً برای توصیف جریان‌های با شدت آشفتگی کمتر و جریان‌های که نواحی برشی قوی‌تری دارند از دقت بالاتری برخوردار است (لاندر و اسپالدینگ (۱۳)). همان‌طور که ملاحظه شد مدل RNG در معادله $k-\varepsilon$اش دارای یک ترم ε اضافی است که به طور معنی‌داری دقت آنرا برای جریانهای پیچیده افزایش می‌دهد.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

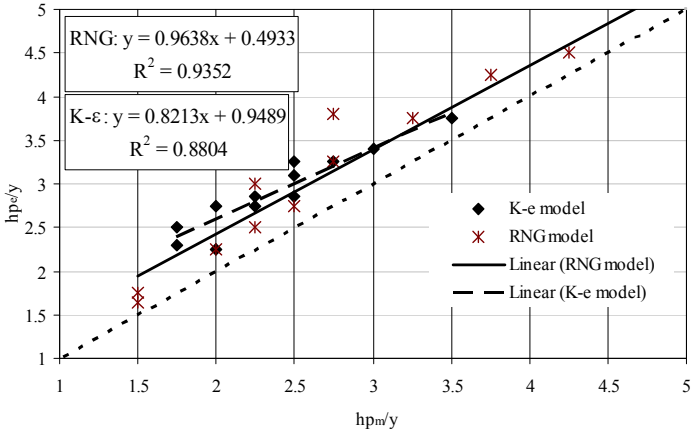
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]



شکل۳. مقایسه نتایج عمق غوطه‌وری شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب ۸



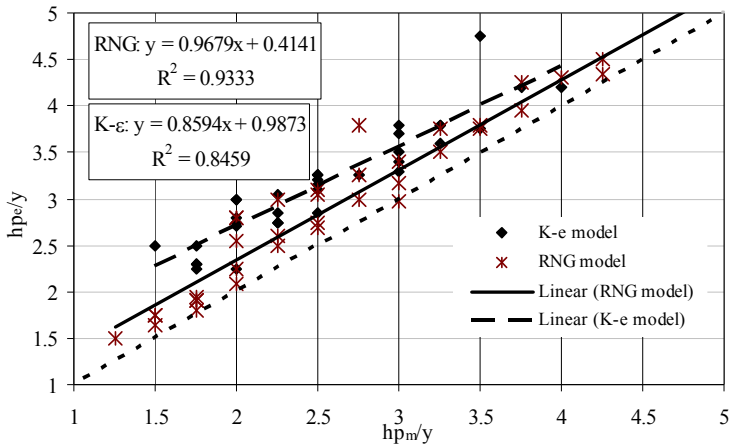
شکل۴. مقایسه نتایج عمق غوطه‌وری شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب ۱۲ درصد



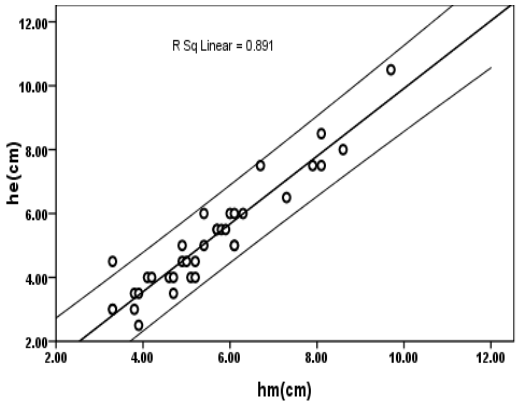
شکل۵. مقایسه نتایج عمق غوطه‌وری شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در شیب ۱۶ درصد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

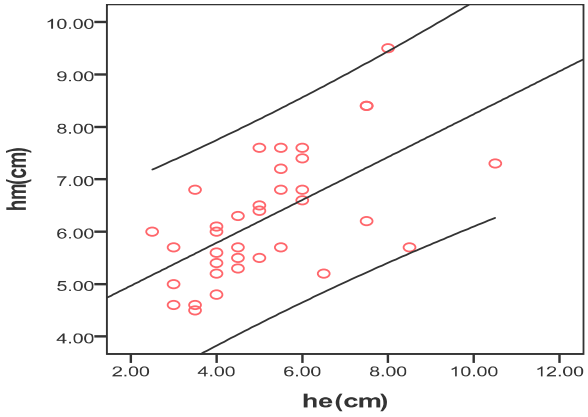
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]



شکل ۶. مقایسه داده‌های حاصل شده از مدل ریاضی با نتایج اندازه‌گیری شده در کلیه شیب‌ها



شکل ۷. بررسی آماری و پراکنش داده‌های حاصل از مدل تلاطمی RNG در سطح اطمینان ۹۵٪



شکل ۸ . بررسی آماری و پراکنش داده‌های حاصل از مدل تلاطمی $\kappa-\varepsilon$ در سطح اطمینان ۹۵٪

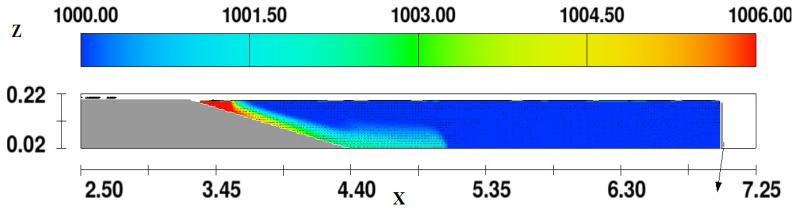
جدول۵. ضرایب تصحیح برای نتایج پیش بینی شده با استفاده از مدل‌های تلاطمی

شیب	شیب ۸ درصد	شیب ۱۲ درصد	شیب ۱۶ درصد
ضریب مدل RNG	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۳
ضریب مدل $\kappa-\varepsilon$	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۷۸

تئوری RNG یک فرمول دیفرانسیلی تحلیلی اشتقاقی را برای ویسکوزیته مؤثر و یک فرمول تحلیلی را برای اعداد پرانتل آشفتگی فراهم می‌کند. این خصوصیات مدل RNG را دقیق‌تر می‌کند و برای کلاس وسیع‌تری از جریان‌ها در مقابل مدل $k-\varepsilon$ استاندارد قابل اعتمادتر می‌کند. این مدل روش‌های آماری را برای استخراج از معادلات متوسط برای مقادیر آشفته از قبیل انرژی جنبشی آشفتگی و شدت پراکندگی‌اش به‌کار می‌برد. شکل ۶ برای کلیه شیب‌ها نتایج برآورد شده با استفاده

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]



شکل ۹. نتایج مدل ریاضی تحت شرایط مدل تلاطمی RNG برای آزمایش $(\rho = ۱۰۰۶ \frac{kg}{m^۳}, S = ۱۶\%, Q = ۱/۹ L/s)$

از مدل‌های مذکور را در مقایسه با داده‌های اندازه گیری شده نمایش می‌دهد.

همان‌طوری که در شکل ۶ مشاهده می‌شود شیب خط آماری مربوط به مدل تلاطمی RNG به عدد یک نزدیک‌تر و عرض از مبدا آن نیز کمتر است بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در مجموع این مدل تلاطمی دقت پیش‌بینی بالاتری را داراست. با توجه به اینکه در جریان غلیظ اختلاف تنش برشی زیادی بین ناحیه حرکتی جریان با سیال پیرامون به‌وجود می‌آید که ناشی از اختلاف فشار می‌گردد، لذا در مدل RNG با توجه به نرمال سازی گروهی مش‌ها و مدل‌های تلاطم دارای دقت بالاتری نسبت به مدل استاندارد معمولی می‌باشد که این امر در شکل (۶) مشخص است که ملاحظه می‌شود داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از مدل RNG مقادیر عمق غوطه‌وری را نزدیک‌تر به داده‌های آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج حاصل از مدل $\kappa-\varepsilon$ استاندارد پیش‌بینی می‌نماید. مقدار ضریب رگرسیون در شکل ۶ برای مدل RNG، در حدود ۹۳ درصد و برای مدل استاندارد در حدودا ۸۵ درصد بوده که ضرایب همبستگی نسبتاً بالایی می‌باشند. از طرفی داده‌های حاصل از هر دو مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS19 ترسیم شد. شکل ۷ و ۸ این موضوع را نمایش می‌دهند.

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است که در مدل تلاطمی RNG داده‌های کمتری نسبت به مدل تلاطمی $\kappa-\varepsilon$، خارج از محدوده خطوط ۹۵ درصد قرار دارند که این نشان‌دهندهٔ دقت بالای مدل RNG در مقایسه با $\kappa-\varepsilon$ در برآورد داده‌ها است. با این توضیح در شیب‌های مختلف مقدار ضریب اصلاحی در نتایج برآورد شده با استفاده از Flow-۳D برای هر دو مدل مذکور در جدول۵ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول۵ مشخص است که مدل RNG داده‌های آزمایشگاهی با دقت قابل قبول‌تری نسبت به مدل استاندارد برآورد نموده است. به‌طور کلی برای کلیه شیب‌ها مقدار ضریب اصلاحی نتایج مدل تلاطمی RNG، ۰/۹۱ و برای مدل تلاطمی استاندارد، ۰/۸ می‌باشد. هم‌چنین با توجه به نزدیک بودن ضرایب تصحیح برای مدل‌ها در شیب‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که شیب تأثیر چندانی برروی نقطه غوطه‌وری نگذاشته است. این نتیجه نیز از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده است. شکل۹ نمونه از اجرای مدل ریاضی Flow-۳D را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که به‌طور کلی مدل‌های به‌کار گرفته شده مقادیر شبیه‌سازی شده را بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه برآورد می‌کنند. در کلیهٔ شیب‌ها مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل ریاضی نسبت به نتایج اندازه‌گیری شده بیشتر بوده به‌گونه‌ای که در شیب ۸ درصد برای مدل $\kappa-\varepsilon$ استاندارد مقدار اختلاف ۲۸ درصد، در شیب ۱۲درصد مقدار اختلاف ۳۰ درصد و برای شیب ۱۶ درصد مقدار اختلاف شبیه‌سازی با نتایج واقعی ۲۳ درصد می‌باشد و این مقادیر برای مدل $\kappa-\varepsilon$ RNG به‌ترتیب ۱۴/۷۰ درصد، ۱۲/۲۸ درصد و ۴/۳۰ درصد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]

می‌باشد.

با توجه به اینکه در جریان غلیظ اختلاف تنش برشی زیادی بین ناحیه حرکتی جریان با سیال پیرامون به‌وجود می‌آید که ناشی از اختلاف فشار می‌گردد، لذا در مدل RNG κ−ε با توجه به نرمال سازی گروهی مش‌ها و مدل‌های تلاطم دارای دقت بالاتری نسبت به مدل κ−ε استاندارد معمولی می‌باشد.

مقدار ضریب رگرسیون برای مدل RNG κ−ε، ۸۹ درصد و برای مدل κ−ε استاندارد برابر با ۸۵ درصد بوده که ضرایب همبستگی نسبتاً بالایی می‌باشند. از طرفی با توجه به داده‌های حاصل از هر دو مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشخص شده است که در مدل تلاطمی RNG κ−ε داده‌های کمتری نسبت به مدل تلاطمی κ−ε استاندارد، خارج از محدوده خطوط ۹۵ درصد قرار دارند.

به‌طور کلی برای کلیه شیب‌ها مقدار ضریب اصلاحی نتایج مدل تلاطمی RNG κ−ε، ۰/۹۱ و برای مدل تلاطمی κ−ε استاندارد، ۰/۸ می‌باشد. با توجه به نزدیک بودن ضرایب تصحیح برای مدل‌ها در شیب‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که شیب تأثیر چندانی برروی نقطه غوطه‌وری نداشته است.

منابع مورد استفاده

۱. صاحب شبان ع، ۱۳۸۱ بررسی مدل رسوب گذاری جریانهای چگال در مخازن پشت سدها. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

2. Akiyama, J. and H. G. Stefan. 1984. Plunging flow into a reservoir: Theory. J. Hydraul. Eng. ASCE. 110(4): 484-499.
3. Bournet, P., D. Datus, B. Tassin and B. Vincon-Leite. 1999. Numerical investigation of plunging density current. J. Hydraul. Eng., ASCE 125(6), 584-594.
4. Dallimore, C. J., J. Imberger and B. R. Hodges. 2004. Modeling a plunging underflow. J. Hydraul. Eng., ASCE 130(11): 1068-1076.
5. Graf W. H. and M.S. Altinakar. 1998. Fluvial Hydraulics-Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry, Chapter 7, Wiley, New-York.
6. Ghomeshi M. 1995. Reservior sedimentation modeling. PhD. Thesis, University of Wollongong, Australia.
7. Hebbert B., J. Imberger, I. Loh and J. Patterson. 1979. Collie river underflow into the wellington reservoir J. Hydraulic. Div. ASCE 105(HYS): 553-545.
8. Kolmogorov , A. N. 1942. Equations of Turbulent Motion of an Incompressible Fluid. Izvestia Academy of Sciences, USSR; Physics, Vol. 6, Nos. 1 and 2, PP. 56-58.
9. Launder, B. E and D.B. Spalding. 1974. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods In Applied Mechanics and Eng. 3: 269-289.
10. Prandtl, Z. A. 1925. Bericht uber Untersuchugen zur Ausgebildeten Turbulenz , Zs Angew. Math. Mech., 5, PP. 136-169.
11. Prandtl, L. 1945. Ube rein neues Formelsystem fur die ausgebildate Turbulenz, Nacr. Akad. Wiss. Gottingen, Math-phys. KL. PP. 6-19.
12. Rotta, J. C. 1951. Statische Theorie nichthomogener Turbulenz. Zeitschrift fur Physik, 129: 547-572.
13. Savage S. B and J. Brimberg. 1975. Analysis of plunging phenomena in water resource. J. Hydraulic Res. IAHR 13(2): 187-204.
14. Yamamoto K., K. Yokoyama S. Takashima and S. Abe. 2008. Behavior of the turbidity plume relating to a density current in a tidal river, Proceedings in Marine Science: Okai University, Japan, 15 April. 9: 69-82.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.8.5]