

مقایسه‌ی شبیه‌های مختلف آشفتگی به منظور شبیه‌سازی مناسب جریانهای چگال در مجاورت

محل کاهش شیب بستر

نادر برهمند^{1*}، سید رضا موسوی²

تاریخ دریافت: 1391/8/15 تاریخ پذیرش: 1391/12/17

چکیده

جریان‌های چگال، به دلیل وجود تفاوت جرم حجمی مابین دو سیال، و یا مابین لایه‌های یک سیال، ایجاد می‌گردند. در این تحقیق با استفاده از یک شبیه عددی (نرم‌افزار پویای سیالات محاسباتی *FLUENT*) اقدام به شبیه‌سازی جریانهای چگال شور عبوری از روی یک بستر حاوی ناپیوستگی شیب گردید. گفتنی است که از نتایج آزمایشگاهی مطالعات گارسیا (1993) به منظور واسنجی و اعتبارسنجی نتایج محاسباتی کمک گرفته شد. معلوم گردید که استفاده از شبیه آشفتگی $k-e$ (از نوع *RNG*)، و شبکه‌ای با ابعاد بهینه، به خوبی می‌تواند ویژگیهای جریان چگال شور را با توجه به مسأله‌ی شکست شیب شبیه‌سازی نماید. این مطلب در مورد نیمرخهای قائم سرعت و غلظت موضعی (در مقاطع فوق و زیر بحرانی پیش و پس از پرش چگال)، ضخامت جریان چگال، رخدادن پرش چگال، مقدار بیشترین سرعت موضعی و ارتفاع متناظر با این سرعت صادق می‌باشد. ضمناً، نتایج عددی جهت شبیه‌سازی ضخامت جریان چگال شور (در ناحیه زیر بحرانی پس از پرش، و نیز در ناحیه پرش، بویژه در ناحیه‌ی فوق بحرانی پیش از پرش) نشان داد که علاوه بر شبیه آشفتگی $k-e$ از نوع *RNG*، شبیه آشفتگی $k-e$ از نوع معیار نیز سازگاری نسبتاً مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق، موقعیت بیشترین سرعت در ناحیه‌ی فوق بحرانی جریان چگال شور نسبت به ناحیه زیر بحرانی به بستر، نزدیکتر بود. همچنین، استفاده از شبیه آشفتگی $k-e$ از نوع *RNG* منجر به نیمرخهای دقیقتری از سرعتهای موضعی نسبت به نیمرخهای قائم غلظتهای موضعی گردید. علاوه بر این، به علت محدودیت در عمق آب تمیز محیطی، یک جریان برگشتی در نتایج شبیه عددی مشاهده گردید. نهایتاً، با افزایش شیب قسمت ابتدایی بستر، علاوه بر انتقال موقعیت پرش چگال به پایین دست جریان، مقدار اختلاط سیال محیطی با جریان فوق بحرانی پیش از پرش نیز در مقایسه‌ی با سایر قسمتهای جریان چگال افزایش بیشتری می‌یافت. **واژه‌های کلیدی:** جریان چگال، شکست شیب بستر، شبیه‌سازی عددی، نیمرخ قائم سرعت، نیمرخ قائم غلظت

¹ - استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران.

² - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یاسوج، یاسوج، ایران.

* - نویسنده مسئول: nader_barahmand@yahoo.com

مقدمه

جریانهای چگال زمانی ایجاد می‌گردند که اختلاف جرم حجمی بین دو سیال، و یا لایه‌های یک سیال، وجود داشته باشد. تفاوت جرم حجمی به سه علت (تفاوت در دما، تفاوت در غلظت مواد معلق ریزدانه، تفاوت در غلظت مواد محلول و یا ترکیبی از آنها) به‌وجود می‌آید. این جریانها یکی از ساز و کارهای مهم انتقال ته‌نشستها در دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوسها می‌باشند. ضمناً، جریانهای چگال عامل ایجاد جریانهایی از قبیل توفانهای گرد و غبار، توفانهای تندری، نسیمهای دریایی، حرکت خاکسترهای آتشفشانی، حرکت بهمن و حرکت ناشی از آزاد شدن ناگهانی یک توده‌ی گاز سنگین در جو را تشکیل می‌دهند (سیمپسون، 1987؛ هارتل و همکاران، 2000).

از مهمترین ویژگیهایی جریانهای چگال می‌توان به تلاطم در سطح مشترک جریان چگال با سیال سبکتر محیطی اشاره کرد؛ به بیانی دیگر، به علت تفاوت چگالی سیال غلیظ با چگالی سیال محیطی روی آن، در سطح مشترک جریان چگال با سیال محیطی، گردابه‌هایی به‌وجود می‌آیند که خود باعث ورود سیال محیطی به درون جریان چگال می‌گردند. از این منظر، می‌توان بیان نمود که ویژگیهای جریانهای چگال از ویژگیهای جریانهای معمولی نهر باز بسیار متفاوت است.

یک جریان چگال به علت وجود بالآمدگی بستر، و یا تنگ شدگی مقطع در پایاب، و همچنین تحت تاثیر کاهش شیب (مانند شکستگی شیب در دریاچه‌ها و همچنین، آبگیر سدها) می‌تواند طی یک پرش هیدرولیکی، به صورت سریع، از وضعیت فوق‌بحرانی به زیربحرانی تغییر وضعیت دهد.

هنگام روان گشتن سیلاب، وقوع پرش هیدرولیکی در جریانهای چگال ورودی به آبگیر سدها امری عادی و معمول به‌شمار رود که خود منجر به کاهش سرعت، کاهش قدرت حمل و انتقال ته‌نشستها، افزایش ته‌نشینی بار معلق و در نتیجه کاهش عمر مفید آبگیر سد می‌گردد. بنابراین، فهم دقیق این فرایند، بویژه در نزدیکی محل شکست شیب، می‌تواند نقش بسیار مهمی را در شناختن توسعه‌ی مکانی جریانهای چگال، و همچنین لحاظ پیش

بینیهای لازم به منظور کمک در بهبود کیفی آب استحصالی از آبگیر سدها و دریاچه‌ها، داشته باشد. از نمونه مطالعات انجام شده در مورد جریانهای غلیظ می‌توان به تحقیقات میدانی، آزمایشگاهی و عددی اشاره نمود.

نخستین بررسیهای عملی جریانهای چگال حاوی مواد ریزدانه (جریانهای چگال) به‌وسیله‌ی فارل (1892) در دریاچه جنوای سویس انجام گرفت. علاوه بر فارل، جریانهای چگال ورودی به دریاچه‌های جنوا و کنستانس به‌وسیله‌ی محققان دیگری از قبیل لامبرت و جیوانولی (1988) نیز مورد مشاهده و مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین، رفتار جریانهای چگال دارای مواد معلق به صورت آزمایشگاهی به‌وسیله‌ی محققان بسیاری از قبیل علویان (1986)، آلتیناکار و همکاران (1996)، لی و یو (1997)، گارسسیا (1993)، فیروزآبادی و همکاران (1384)، صفایی‌اردکانی و همکاران (1386) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

تنها در 80 ساله اخیر، شبیه‌های عددی متعددی جهت جریانهای چگال به‌وجود آمده‌اند. معمولاً این شبیه‌ها با توجه به معادلات پیوستگی جرم و اندازه‌ی حرکت برای هر دو حالت سیال و جامد و همچنین معادله پراکندگی (که بیان‌کننده‌ی تعادل بین نرخ خروج رسوب از حجم واپایش است) حجم واپایش و نرخ خروج رسوب از حجم واپایش است) به‌وجود آمده‌اند.

پارکر و همکاران (1986)، یک شبیه متوسط-عمقی به‌وجود آوردند که در آن، علاوه بر معادلات معمول پیوستگی و اندازه‌ی حرکت سیال، از معادله ورود ته‌نشستها از بستر به درون جریان چگال هم استفاده شد. در معادله‌ی آخر، جمله‌ی ورود ته‌نشستها با مقدار کارمایه‌ی جنبشی آشفته‌گی ارتباط داشت. استیسی و باون (1988) از شبیه طول اختلاط جهت مبحث آشفته‌گی شبیه عددی جریان چگال استفاده نمودند. در این شبیه عددی از جمله‌های انتقال در معادلات بقا صرف‌نظر شد و تنها یک معادله‌ی ساده برای ساختار قائم به‌دست آمد. اسکن و همکاران (1997) از شبیه‌ی جهت شبیه‌سازی جریان دایمی استفاده کرده، و تغییرات توزیع ته‌نشست رسوبها را به علت وجود موانع پستی و بلندی را پیش بینی

متفاوت جهت شبیه‌سازی جریان چگال دو بعدی استفاده کردند.

همان‌طور که مشاهده گردید، اگرچه تحقیقات زیادی در مورد جریانهای چگال انجام شده اند اما تاثیر شکست شیب بر رفتار جریانهای چگال، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. گفتنی است که پدیده‌ی شکست شیب در بیشتر آبگیرهای سدها وجود دارد. بنابراین، در این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلونتت به بررسی امکان شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در جریانهای چگال پرداخته می‌شود.

معادلات حاکم بر جریانهای چگال

معادلات متوسط-رینولدزی بقای جرم و اندازه‌ی حرکت برای یک جریان چگال غیردایمی به صورت ذیل می‌باشد:

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial(rU_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(rU_i)}{\partial t} + \frac{\partial(rU_iU_j)}{\partial x_j} = \quad (2)$$

$$-\frac{\partial P_i}{\partial x_i} + rg'_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(m \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{rU_iU_j} \right)$$

که در آن U_i و U_j مولفه‌های بردار سرعت متوسط-رینولدزی جریان چگال در جهات دکارتی x_i و x_j ، t زمان، P_i فشار متوسط-رینولدزی در جهت دکارتی x_i ، r چگالی سیال غلیظ و m لزوجت پویای سیال می‌باشند. ضمناً، تنشهای رینولدز $\overline{rU_iU_j} - r$ و شتاب گرانش کاهش یافته g'_i به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌گردند. گفتنی است که تنشهای رینولدز با استفاده از انگاره‌ی بوسینسک به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$-\overline{rU_iU_j} = m_r \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + m \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$-\frac{2}{3} \left(rK + m_r \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) d_{ij}$$

$$g'_i = g_i \frac{r - r_a}{r_a} \quad (4)$$

که r_a چگالی سیال محیطی (در این جا آب تمیز)، d_{ij} دلتای کرونگر و K کارمایه‌ی جنبشی آشفتگی می‌باشند. ضمناً g_i شتاب گرانش بوده و به ازای $i=1,2,3$ برابر با $(g \sin q, -g \cos q, 0)$ است. q نیز شیب بستر نهر

کردند. ایدسویک و برارس (1989) نیز از یک شبیه $k-e$ بهره برده و امکان خود-شتاب‌دهنده‌ی جریانهای چگال را بررسی کردند. از دیگر محققانی که از این شبیه جهت مبحث آشفتگی استفاده کرده‌اند می‌توان به چویی و گارسسیا (2002) اشاره نمود. فیروزآبادی و همکاران (2001) از یک شبیه آشفتگی $K-e$ با اعداد رینولدز پایین (شبیه لاندر و شارما) جریانهای چگال را مورد شبیه‌سازی عددی قرار دادند. شبیه یک بعدی رسوبگذاری در آبگیر با توجه به رفتار ته‌نشینی شن و گل به‌وسیله‌ی تونیولو و پارکر (2003) مورد بررسی قرار گرفت و شبیه‌ی عددی برای آن تهیه گردید. ایمران و همکاران (2004)، جریان چگال سه بعدی را در یک نهر مستقیم شبیه‌سازی نمودند. همچنین، ایشان حالاتی را که جریان در یک نهر محصور (دارای دیواره‌های جانبی قائم)، و نیز در یک نهر غیر محصور (دشت سیلابی) نیز می‌باشد را شبیه‌سازی کردند. جهت جریان چگال آرام، غیردایمی و دو بعدی، فیروزآبادی و همکاران (2003)، شبیه‌ی عددی را با استفاده از معادلات بقای جرم، اندازه‌ی حرکت و پراکندگی تهیه کردند. در این شبیه از روش احجام محدود، و یک شبکه‌ی غیرشطرنجی استفاده شد که جفت فشار-سرعت از روش سیمپل سی محاسبه می‌گردیدند. نشان داده شد که شبیه‌سازی سازگاری مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. جهت جریان چگال با مرز تحتانی قابل تغییر شکل، معادلات ناویر-استوکس متوسط-رینولدزی به‌وسیله‌ی هانگ و همکاران (2005) حل گردیدند. شبیه قادر به بیان تکامل و توسعه‌ی جریان چگال، و نیز شبیه‌سازی تغییر تراز بستر به علت ته‌نشینی و فرسایش رسوبها بود. گفتنی است که در این مطالعه، معادلات متوسط-رینولدزی ناویر-استوکس با استفاده از روش احجام محدود گسسته‌سازی و حل گردیدند. کاستیک و پارکر (2006)، با مطالعه‌ی عددی، ویژگیهای جریان چگال دارای مواد معلق را در محل کاهش شیب بستر بررسی نمودند. آرام و فیروزآبادی (2007) با استفاده از شبیه آشفتگی با اعداد رینولدز پایین (لاندر و شارما، 1974) ساختار جریانهای دایمی چگال شور را مورد شبیه‌سازی عددی قرار دادند. همچنین مهدیزاده و فیروزآبادی (2009) از شبیه‌های آشفتگی

معادله تنش‌های رینولدز RSM ، شبیه تنش جبری ASM شبیه RNG و شبیه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مقیاس را LES اشاره نمود. در این مطالعه از شبیه‌های $k-e$ معیار، $k-e$ از نوع RNG ، $k-e$ تحقق‌پذیر و $k-w$ موجود در نرم افزار فلونت جهت شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. علاقمندان جهت توضیحات بیشتر می‌توانند به راهنمای کاربر نرم‌افزار فلونت (1998) و نیز کتابها و مقالات مرتبط مراجعه فرمایند.

شبیه‌سازی

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی عددی از نرم افزار فلونت استفاده شده است. نرم افزار فلونت که به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است، یکی از چند ده نرم افزار تجاری پویای سیالات محاسباتی در جهان می‌باشد. این نرم افزار به همراه دو نرم افزار CFX و $StarCD$ حدود نیمی از بازار فروش نرم افزارهای پویای سیالات محاسباتی در جهان را به خود اختصاص داده‌اند. بطور کلی نرم افزار فلونت، دارای شبیه‌های آشفتگی متنوعتری نسبت به سایر نرم افزارها بوده، و از این منظر می‌تواند نسبت به سایر نرم افزارها برتری داشته باشد. افزون بر این، نرم افزار فلونت می‌تواند جریان را در شبکه‌های بی سازمان و با سازمان برای هندسه‌های پیچیده شبیه‌سازی و تحلیل نماید. مزیت مهم دیگر این نرم افزار، راهنمای $Adapt$ آن می‌باشد که به کاربر اجازه‌ی تطبیق و بهبود شبکه شبکه‌بندی شده را می‌دهد. گفتنی است که این نرم افزار از روش احجام محدود جهت گسسته‌سازی و حل معادله‌های دیفرانسیلی حاکم بر جریان استفاده می‌نماید. ضمناً در این مقاله از آزمایشهای گارسیا (1993) جهت شبیه‌سازی عددی بهره‌وری گردید. شرایط اولیه آزمایشهای گارسیا در جدول (1) درج شده‌اند، که در آن h_0, U_0, C_0 به ترتیب ارتفاع بازشدگی دریچه، سرعت متوسط - لایه‌ای و غلظت متوسط - لایه‌ای در محل دریچه کشویی می‌باشند.

می‌باشد. ضمناً m_T لزوجت گردابه‌ای است که در یک شبیه $K-e$ از رابطه‌ی $m_T = rC_m \frac{K^2}{e}$ به دست می‌آید، که e نرخ اتلاف کارمایه‌ی جنبشی آشفتگی و C_m ثابت معادله است.

گفتنی است که علاوه بر معادلات بالا، معادله‌ی بقای جرم تهنشستها (یا مواد قابل انحلال) در یک جریان چگال غیردایمی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(rC)}{\partial t} + \frac{\partial[(rU_j - v_s d_{j2})C]}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(rI + \frac{m_T}{S_C} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} \quad (5)$$

که I ضریب پراکندگی سیال، v_s سرعت سقوط ذرات رسوبی (که برای مواد محلول مقدار آن صفر است) و d_{j2} مولفه‌ای از دلتای کروئکر در جهت خلاف شتاب گرانش می‌باشد. همچنین S_C عدد اسمیت آشفتگی است. این عدد همانند عدد پرانتل متأثر از شناوری می‌باشد، اما معمولاً مقدار آن را در جریانهای غلیظ برابر با واحد در نظر می‌گیرند. ضمناً $C = \frac{r - r_a}{r_s - r_a}$ غلظت متوسط - رینولدزی تهنشستها یا نمک در سیال غلیظ، و r_s چگالی تهنشستهای معلق (یا نمک) می‌باشد.

در معادله‌ی اندازه‌ی حرکت لازم به توجه است که فشار P در فاصله‌ی y از بستر از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{P}{r_a} = \frac{P_0}{r_a} - g'(H-h) + rg \frac{(H-y)}{r_a} \quad (6)$$

که P_0 فشار در سطح آزاد سیال محیطی، و H عمق کل سیال محیطی با در نظر گرفتن ضخامت جریان چگال h می‌باشد.

در انتها لازم به ذکر است که شبیه‌های آشفتگی از تنوع زیادی برخوردارند. از جمله‌ی این شبیه‌ها می‌توان به شبیه صفر معادله‌ای (مانند شبیه طول اختلاط پرانتل، شبیه طول اختلاط بالدوین و لوماکس و شبیه طول اختلاط که بی سی و اسمیت)، شبیه‌های دو معادله‌ای $k-e$ معیار، شبیه $k-e$ از نوع RNG ، شبیه $k-e$ تحقق‌پذیر، شبیه $k-e$ اصلاح شده، شبیه $k-e$ جهت اعداد رینولدز پایین، شبیه $k-w$ ، شبیه $v^2 - f$ ، شبیه

جدول 1- شرایط اولیه آزمایشهای گارسیا (1993) برای جریانهای چگال شور.

شماره آزمایش	U_0 (cm/s)	h_0 (cm)	$1.65C_0$
SAL26	11	3	0/0021
SAL27	11	3	0/0040
SAL28	11	3	0/0080
SAL29	11	3	0/0120
SAL11	11	3	0/0130

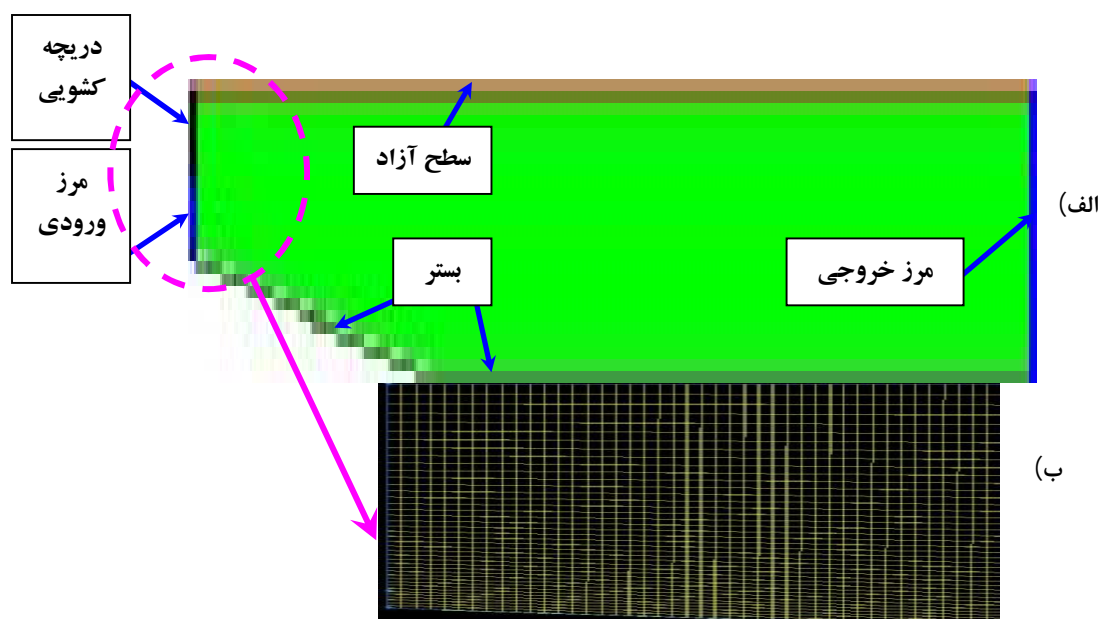
قرار گرفتند. بدین منظور از آزمایش چگال شور SAL29 استفاده گردید. به عبارت دیگر واسنجی نرم افزار فلونت با توجه به این آزمایش انجام شد. بدین ترتیب از شش نوع شبکه با ابعاد 1600×35 ، 1600×41 ، 1600×45 ، 1750×41 و 1450×41 استفاده گردید. همان طور که در شکل (1 الف) ملاحظه می‌گردد، به علت تراکم شدید احجام واپایش، میدان شبکه‌بندی شده جریان تنها با یک رنگ سبز نشان داده شده است. بنابراین، به منظور نشان دادن طرز شبکه‌بندی، تنها قسمت ابتدایی شیبدار نهر پایه‌دار به همراه دریچه کشویی آن با جزییات شبکه‌بندی در شکل (1 ب) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (1 ب) دیده می‌شود، بعد طولی همه احجام واپایش ثابت در نظر گرفته شده، اما بعد قائم احجام واپایش جهت مرز ورودی بسیار ریز انتخاب گردیده است. همچنین، باید بیان نمود که از مرز ورودی تا سطح آزاد، بعد قائم احجام واپایش به صورت تصاعدی افزایش یافته است. ضمناً، گفتنی است که انتخاب ابعاد سلولها در این چند نوع شبکه با توجه به بررسیها و آزمونهای محققان قبلی (مانند چویی و گارسیا 2002 و فیروزآبادی و همکاران 2003 و مهدیزاده و فیروزآبادی 2009) انجام شده است. در انتها، باید خاطر نشان نمود که جهت تولید پرش هیدرولیکی در نهر، در این شبیه‌سازی و نیز در تمام شبیه‌سازیهای این مقاله، طول افقی نهر در شبیه‌سازی عددی (11 متر) بیشتر از طول افقی واقعی (6/6 متر) می‌باشد. علت نیز در نظر گرفتن یک آبشار در انتهای نهر واقعی است در حالی که در شبیه‌سازی عددی، به جای این آبشار که پرش هیدرولیکی را میسر می‌نمود از طولی بیشتر از طول واقعی در شبیه‌سازی استفاده شده است.

در شبیه‌سازیهای صورت پذیرفته در این مقاله، در محل زیر دریچه‌ی کشویی، شرط مرزی ورودی در نظر گرفته شد. در این مرز، برای شماری از متغیرها (سرعت و غلظت)، توزیع یکنواخت فرض گردید. گفتنی است که سیال غلیظ خروجی از زیر دریچه‌ی کشویی در امتداد بستر حرکت کرده، و جریان غلیظ ایجاد می‌گردد. مقادیر سرعت، غلظت حجمی نمک و ضخامت جریان چگال در محل ورودی (در محل دریچه‌ی کشویی) جزء داده‌های مسئله بوده و از اطلاعات آزمایشهای گارسیا (1993) گرفته شدند. در انتهای نهر نیز شرط مرزی خروجی برقرار گردید. به عبارت دیگر، در شبیه‌سازی عددی، مقدار شیب تمام متغیرها (در جهت جریان) برابر با صفر فرض گردید. با این کار، انتظار می‌رود که مرز خروجی تنها دارای یک اثر موضعی و محدود بر میدان جریان باشد. در سطح آزاد (سطح مشترک بین سیال محیطی و هوا)، شرط مرزی تقارن به کار برده شد. از ویژگیهای این مرز، وجود مقدار صفر برای شیبها، و همچنین، شارهای جریان (در جهت عمود بر این مرز) می‌باشد. فارل و استفان (1986) نشان داده اند که اعمال فرض تقارن در سطح آزاد منجر به خطاهای ناچیزی در میدان سرعت جریان می‌شود که قابل صرف نظر کردن خواهند بود. نهایتاً، در بستر نهر، و همچنین در محل تماس با دریچه، شرط مرزی دیواره در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی و شرایط مرزی در شکل (1) نمایش داده شده‌اند.

نتایج و بحث

استقلال از شبکه

در ابتدا به منظور مبحث استقلال از شبکه، چندین شبکه با اندازه‌ی سلولهای متفاوت مورد آزمون و ارزیابی



شکل 1- الف) نمای شبکه‌بندی شده و بدون مقیاس نهر آزمایشگاهی گارسیا (1993) به منظور انجام شبیه‌سازی عددی در نرم افزار فلوئنت ب) چگونگی شبکه‌بندی در کنار مرز ورودی و دریچه کشویی با در نظر گرفتن مقیاس.

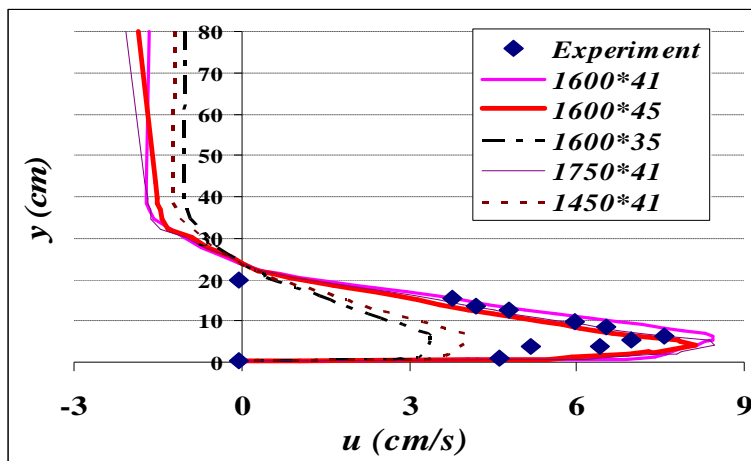
تجزیه و تحلیل شبیه‌های آشفتگی جهت شبیه‌سازی مناسب عددی توزیع قائم سرعت موضعی در قسمت بدنه‌ی جریان چگال

در این تحقیق از شبیه‌های آشفتگی پرشماری (شامل شبیه $k-e$ از نوع معیار، RNG و تحقق‌پذیر و شبیه $k-w$ معیار) جهت شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (3) مشاهده می‌شود در مورد نیمرخهای قائم سرعت پیش و پس از پرش چگالی در آزمایش $SAL29$ ، نتایج به‌دست آمده از شبیه $k-e$ از نوع RNG و نیز تحقق‌پذیر با مقادیر آزمایشگاهی بیشتر منطبق می‌باشند. گفتنی است که در نتایج عددی به‌دست آمده از این شبیه‌های آشفتگی، مقدار، و همچنین موقعیت سرعت بیشترین بویژه در ناحیه زیربحرانی جریان با مقدار آزمایشگاهی $SAL29$ کمی تفاوت می‌کند که می‌توان از این تفاوت صرف‌نظر نمود. ضمناً، مطابق با شکل (3)، بیشترین مقدار سرعت در ناحیه‌ی فوق بحرانی جریان نسبت به ناحیه زیربحرانی به بستر نزدیکتر می‌باشد، که این مطلب علاوه بر آزمایشهای گارسیا (1993)، به‌وسیله‌ی محققان دیگری نیز تایید شده

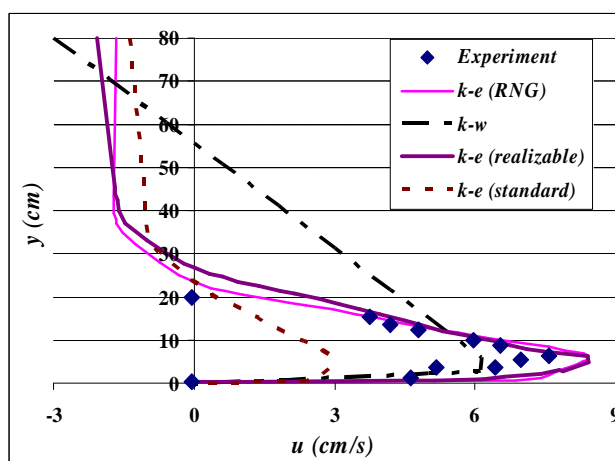
در ادامه این بخش، نیمرخ قائم سرعت جهت آزمایش چگال شور $SAL29$ (در موقعیت 8 متری از دریچه‌ی کشویی) نشان داده شده است (شکل 2). گفتنی است که در محاسبات عددی از شبیه $k-e$ از نوع RNG استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، جهت شبکه با ابعاد 1600×41 ، نتایج به‌دست آمده از نرم افزار فلوئنت با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نسبتاً مناسبی دارند. ضمناً، شبکه‌ی با ابعاد 1600×45 ، اگرچه دارای شمار سلولهای بیشتری است، اما نتایج آن با شبکه 1600×41 تقریباً منطبق است. اما در مورد شبکه 1600×35 نتایج عددی تفاوت‌های زیادی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. علاوه بر این نتایج عددی حاصل از شبکه‌ی 1450×41 تفاوت زیادی با مقادیر آزمایشگاهی دارد اما شبکه دارای 1600×41 و یا 1750×41 حجم واپاشی دارای مقادیر تقریباً نزدیکی به مقادیر آزمایشگاهی می‌باشند. در نتیجه می‌توان در مورد انتخاب تعداد شبکه‌های لازم جهت شبکه مورد نظر به مقدار 1600×41 اکتفا نمود. به عبارت دیگر، در این نوع از شبکه، جوابها مستقل از شبکه محاسباتی بوده و این نوع از شبکه‌بندی می‌تواند جهت شبیه‌سازی عددی، قابل اطمینان و کاربرد باشد.

مستقیم، که در موقعیت بیشترین سرعت به یکدیگر متصل می‌گردند، نزدیک دانست. این مطلب بویژه جهت قسمت بالای موقعیت بیشترین سرعت مشهودتر می‌باشد.

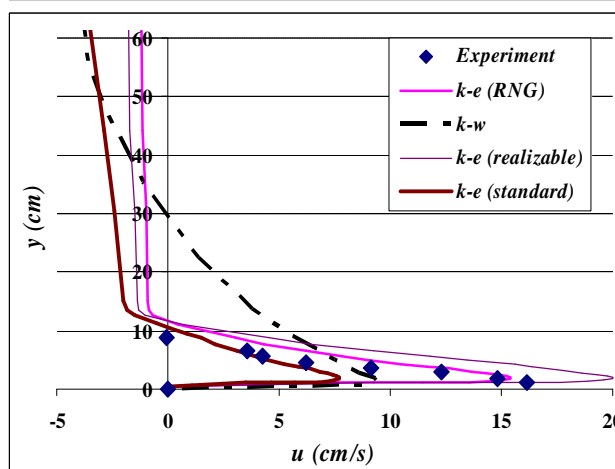
است. در ضمن، همان‌طور که از شکل (3) مشاهده می‌شود، شکل عمومی نیمرخ سرعت (به استثنای ناحیه‌ی دارای سرعت‌های منفی) را می‌توان به شکل دو خط تقریباً



شکل 2- مقایسه‌ی نیمرخ قائم سرعت موضعی آزمایش SAL29 (در موقعیت 8 متری از دریچه‌ی کشویی) برای شبکه‌بندی‌های مختلف.



(الف)



(ب)

شکل 3- مقایسه‌ی نیمرخ قائم سرعت موضعی آزمایش SAL29 (در موقعیت الف) 8 و ب) 3 متری از دریچه‌ی کشویی

آشفتگی $k-e$ از نوع RNG از سایر شبیه‌های آشفتگی دارای نتایج سازگارتری با مشاهده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. ضمناً، شبیه $k-w$ معیار دارای نتایج بسیار ضعیفی در شبیه‌سازی عددی این آزمایش است. بنابراین، بطور کلی می‌توان بیان نمود که شبیه $k-e$ از نوع RNG بهترین شبیه آشفتگی جهت شبیه‌سازی عددی الگوی جریان چگال شور در مجاورت شکست شیب می‌باشد.

در ادامه با توجه به شکل‌های (3 و 4) می‌توان نتیجه گرفت که شبیه آشفتگی $k-e$ از نوع RNG در تخمین نیمرخهای قائم سرعت موضعی بهتر از تخمین نیمرخهای قائم غلظت موضعی در نواحی پیش و پس از پرش چگالی در جریانهای چگال عمل می‌کند. علت نیز می‌تواند خطای داده‌های اندازه‌گیری شده، خطای گسسته‌سازی معادلات در نرم افزار، و خطای شبکه‌بندی باشد. گفتنی است که ریزتر کردن مش بهینه، منجر به افزایش شدید حجم محاسبات می‌گردید، اما تنها مقداری از خطاها در نیمرخ قائم غلظت کاهش می‌یافت.

در ادامه، جهت آزمون عملکرد شبیه آشفتگی، و نیز شبکه‌ی بهینه به‌دست آمده از تکرار دیگری از آزمایشهای چگال شور گارسیا (1993) استفاده شده است. در شکل (5)، نتایج به‌دست آمده از نیمرخ قائم سرعت برای آزمایش چگال شور $SAL26$ با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه‌ی شده است که سازگاری و انطباق خوبی دیده می‌شود؛ بنابراین، می‌توان به ابعاد شبکه و شبیه آشفتگی بهینه‌سازی شده در مرحله‌ی قبل اطمینان نمود.

ضخامت جریان چگال

می‌توان ضخامت جریان (h) را با استفاده از نیمرخهای قائم مؤلفه در جهت جریان سرعت، محاسبه نمود. لازم به یادآوری است که این نیمرخها باید در صفحه‌ی مرکزی نهر پایه‌دار اندازه‌گیری و یا محاسبه شوند. رابطه‌ی مورد استفاده در تخمین مقادیر h عبارت است از (پارکر و همکاران 1986):

توزیع قائم غلظت حجمی موضعی در قسمت بدنه‌ی جریان چگال

بر پایه‌ی مطالعات انجام شده، ماهیت و نیز اندازه‌گیری نیمرخ قائم غلظت حجمی از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد. اندازه‌گیریهای انجام شده در جریانهای محافظت شده (مانند جریانهای چگال شور) و نیز در جریانهای محافظت نشده (مانند جریانهای چگال حاوی ته‌نشستها معلق ریزدانه) نشان داده است که در یک نوع وضعیت جریان (فوق بحرانی یا زیربحرانی)، نیمرخ قائم غلظت حجمی در هر دو نوع جریان چگال از یک شکل کلی تبعیت می‌نماید.

بر پایه‌ی اندازه‌گیریهای انجام شده (مانند شکل 4)، برخلاف جریان زیر بحرانی، در جریان فوق بحرانی، شیب غلظت در نزدیکی بستر و ترازهای ارتفاعی پایینی جریان بیشترین بوده و سپس تا ارتفاع متوسط جریان این شیب کاهش یافته، و در نهایت در نزدیکی موقعیت سرعت صفر، مقدار غلظت حجمی به سمت صفر متمایل می‌گردد. به عبارت دیگر، در ناحیه‌ی برشی - پراکنشی جریان چگال، مقدار غلظت حجمی تقریباً برابر با صفر می‌شود.

تنها تفاوت نیمرخهای قائم غلظت حجمی دو نوع وضعیت فوق و زیربحرانی با یکدیگر، این مطلب می‌باشد که در جریان زیربحرانی که بر روی شیب کم (افقی) تشکیل شده است، جریان برگشتی که در سیال محیطی رخ می‌دهد (به علت کم شدن نیروی گرانش و امکان غلبه‌ی جریان چگال بر این نیرو)، باعث تغییر در توزیع توانی غلظت حجمی در ناحیه‌ی دیواره گشته و یک توزیع پلکانی جهت توزیع قائم غلظت حجمی می‌سازد. به عبارت دیگر جریان برگشتی در جریان زیربحرانی تاثیر بیشتری نسبت به جریان فوق بحرانی گذاشته، موجب توزیع تقریباً یکسانی از مواد محلول (نمک) در ناحیه‌ی دیواره، و در نتیجه موجب یک توزیع پلکانی در نیمرخ قائم غلظت حجمی گشته است.

در شکل (4)، نیمرخهای قائم غلظت مربوط به نواحی فوق و زیربحرانی آزمایش پرش چگال شور $SAL29$ رسم شده اند. همان‌طور که دیده می‌شود همانند آنچه در رابطه با نیمرخهای قائم سرعت بیان گردید، شبیه

شده به وسیله‌ی این شبیه‌آشتگی می‌باشد. در انتها باید متذکر گردید که مقادیر محاسبه شده به وسیله‌ی نرم افزار فلونت (صرف نظر از نوع معادله‌ی آشتگی) بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشند.

در ادامه، مقدار محاسبه شده ضخامت جریان چگال شور جهت SAL29 در موقعیتهای 3 و 8 متری از دریچه‌ی کشویی (به ترتیب دارای وضعیت فوق بحرانی و زیربحرانی) در جداول (2 و 3) درج شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، همانند شکل (6)، مقادیر خطای محاسباتی در جریان فوق بحرانی بین دو تا چهار برابر خطای محاسباتی در جریان زیربحرانی است. ضمناً، در جریان زیربحرانی، مقدار خطای ناشی از شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع معیار تقریباً با مقدار خطای ناشی از شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع RNG یکسان می‌باشد.

اما در وضعیت فوق بحرانی (جدول 2)، مقدار خطای ناشی از شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع معیار کمی کمتر از مقدار خطای ناشی از شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع RNG می‌باشد که با توجه به نتایج گرفته شده از نیمرخهای قائم سرعت و غلظت حجمی بطور کلی می‌توان به دقت محاسباتی شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع RNG ایمان آورد. ضمناً، مطابق با جداول (2 و 3) مقدار خطای ناشی از شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع تحقق‌پذیر نیز در هر دو نوع وضعیت جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی بیشتر از دو نوع دیگر شبیه‌آشتگی $k-e$ می‌باشد که این افزایش خطا جهت جریان زیربحرانی برابر با 1/33 و جهت جریان فوق بحرانی برابر با 14 درصد است که به وضوح دقت خوب شبیه‌آشتگی $k-e$ را از نوع تحقق‌پذیر در جریان فوق بحرانی پیش از پرش نشان می‌دهد. اما نتایج به‌دست آمده از شبیه‌آشتگی $k-w$ دارای مقادیر خطاهای قابل توجهی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی (بی‌ویژه در ناحیه‌ی فوق بحرانی جریان چگال شور) می‌باشد بطوری که مقدار خطای محاسباتی در جریان زیربحرانی برابر با 160، و در جریان فوق بحرانی برابر با 225 درصد است.

$$h \equiv \frac{\left(\int_0^{h_t} u(z) dz \right)^2}{\int_0^{h_t} u^2(z) dz} \quad (7)$$

$$\equiv \frac{\left(\sum_{i=1}^{r-1} \left(\frac{u(z_i) + u(z_{i+1})}{2} \right) (z_{i+1} - z_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^{r-1} \left(\frac{u^2(z_i) + u^2(z_{i+1})}{2} \right) (z_{i+1} - z_i)}$$

در این رابطه $u(z)$ مقدار متوسط-زمانی (مقدار موضعی) سرعت طولی در فاصله‌ی قائم z از سطح مبنا می‌باشد. همچنین، h_t فاصله قائم بین سطح مبنا و محلی است که در آن‌جا سرعت موضعی دوباره برابر با صفر می‌گردد. $i=1$ اولین نقطه‌ی اندازه‌گیری، و یا محاسبه شده است که آن را نزدیک به بستر (یعنی $z=0$) در نظر می‌گیرند. r نیز شمار داده‌های اندازه‌گیری گردیده یا محاسبه شده در روی هر نیمرخ قائم می‌باشد. البته r تا مکانی محاسبه می‌گردد که فاصله‌ی قائم آن مکان تا سطح مبنا برابر با h_t شود.

در شکل (6)، نیمرخ سطح مشترک بین جریان چگال شور و آب تمیز محیطی آزمایش SAL11 نشان داده شده است. گفتنی است که این نیمرخ با توجه به ارتفاع جریان چگال شور تهیه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع معیار و همچنین RNG سازگاری بهتری را با نتایج آزمایشگاهی دارند. ضمناً، نتایج به‌دست آمده از این دو شبیه در ناحیه زیر بحرانی تطابق بهتری نسبت به ناحیه‌ی پرش، و یا ناحیه‌ی فوق بحرانی پس از پرش از خود نشان می‌دهد. البته گفتنی می‌باشد که در این شکل، مقادیر ضخامت جریان چگال در فواصل یک متری از یکدیگر محاسبه شده‌اند. ضمناً، شکل مزبور نشان می‌دهد که شبیه‌آشتگی $k-w$ دارای کمترین انطباق با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه در این شکل، جوابدهی قابل قبول شبیه‌آشتگی $k-e$ از نوع معیار در تخمین ضخامت جریان چگال شور می‌باشد، که این مطلب بر خلاف نیمرخهای قائم سرعت و غلظت حجمی محاسبه

جدول 2- مقدار محاسبه شده‌ی ضخامت جریان چگال شور برای SAL29 در موقعیت 3 متری از دریچه‌ی کشویی.

	EXP.	$k - e$ RNG	$k - e$ realizable	$k - e$ standard	$k - w$
h (cm)	5.40	7.49	7.78	7.27	17.59
e%	---	38.62	44.04	34.56	225.48

جدول 3- مقدار محاسبه شده‌ی ضخامت جریان چگال شور برای SAL29 در موقعیت 8 متری از دریچه‌ی کشویی.

	EXP.	$k - e$ RNG	$k - e$ realizable	$k - e$ standard	$k - w$
h (cm)	15.96	17.61	19.80	17.70	41.71
e%	---	10.34	24.06	10.89	161.35

گرفته در این تحقیق 5، 8، 10، 15 و 20 درصد می‌باشند، که شیب 8 درصد، شیب در نظر گرفته شده در کلیه آزمایش‌های گارسیا (1993) است. ضمناً، در کلیه‌ی این شبیه‌سازیه‌ها، شیب قسمت بعدی بستر برابر با صفر در نظر گرفته شد. چنین تاثیری در پرش‌های هیدرولیکی در نهرهای باز نیز دیده می‌شود.

ضمناً، نتایج عددی نشان می‌دهند که جهت آزمایش SAL11، چنانچه شیب بستر قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار S_a ، افزایش یابد (ولی سایر شرایط اولیه ثابت باقی بماند)، نسبت دبی ویژه در مقطع ابتدایی پرش q_1 به دبی ویژه جریان چگال در محل ورودی (محل دریچه‌ی کشویی) q_0 نیز افزایش خواهد یافت (جدول 4). به عبارت دیگر، جهت شبیه‌های تندتر در قسمت ابتدایی نهر آزمایشگاهی، مقدار اختلاط سیال محیطی با جریان چگال فوق‌بحرانی نیز بیشتر خواهد بود که علت نیز می‌تواند تشدید ناپایداری در سطح مشترک سیال محیطی با جریان چگال در شبیه‌های تندتر باشد.

ضمناً مطابق با جدول (4)، با افزایش شیب قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار، مقدار سیال محیطی مختلط شده با جریان زیربحرانی دارای تغییرات منظمی نمی‌باشد، که علت را نیز می‌توان در کاهش ناپایداری وضعیت زیربحرانی نسبت به جریان فوق‌بحرانی پیش از پرش دانست. همچنین، با افزایش شیب، مقدار سیال محیطی وارد شده به ناحیه‌ی پرش به صورت مختصری افزایش می‌یابد.

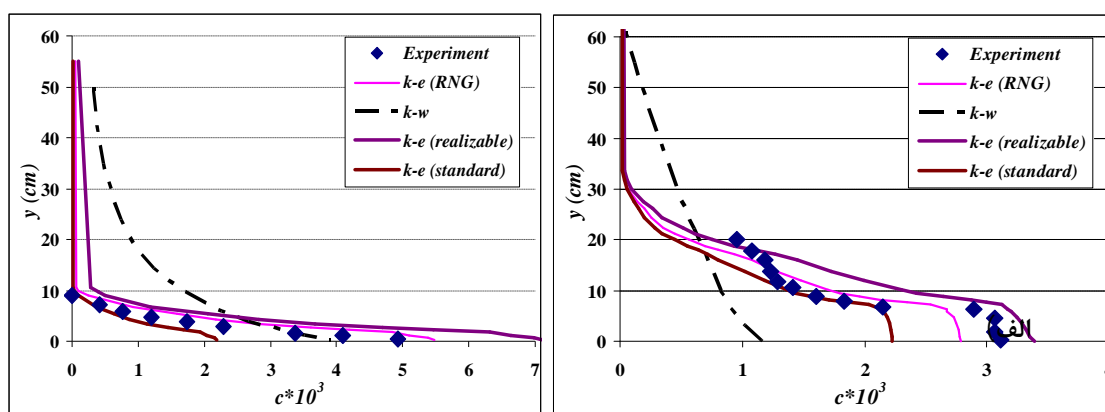
تأثیر شیب قسمت ابتدایی بستر بر مشخصات پرش چگال

در این بخش، به بررسی اثر شیب قسمت ابتدایی بستر بر فراسنجهای پرش چگال پرداخته می‌شود. گفتنی است که در کلیه شبیه‌سازیهای عددی از شبیه آشفتگی $k - e$ از نوع RNG استفاده شده است. ضمناً، ابعاد شبکه مورد استفاده نیز 1600×41 می‌باشد. به منظور مقایسه، علاوه بر شیب مورد استفاده در آزمایش‌های گارسیا (1993) از چهار شیب 5، 10، 15 و 20 درصد جهت قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار استفاده گردید. ضمناً، کلیه فراسنجهای ورودی و اولیه شبیه‌سازیهای عددی مشابه با فراسنجهای آزمایش SAL11 بودند.

در شکل (7)، با توجه به شبیه‌سازیهای انجام شده، نیمرخهای سطح مشترک بین جریان چگال شور و آب تمیز محیطی نشان داده شده است. گفتنی است که این نیمرخها با توجه به ارتفاع جریان چگال شور تهیه شده‌اند. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌گردد، با افزایش شیب قسمت اولیه‌ی بستر، و با فرض ثابت باقی ماندن شرایط اولیه، نتایج شبیه عددی به کار رفته، نشان‌دهنده‌ی انتقال موقعیت پرش به سمت پایین‌دست می‌باشند. به عبارت دیگر پرش چگال با افزایش شیب ابتدایی بستر، به سمت پایاب حرکت کرده و محل تشکیل پرش نسبتاً از محل تغییر شیب بستر نهر پایه‌دار فاصله می‌گیرد. البته باید متذکر گردید که شبیه‌های در نظر

جدول 4- تأثیر شیب قسمت ابتدایی نهر بر نسبت اختلاط سیال محیطی با جریان چگال.

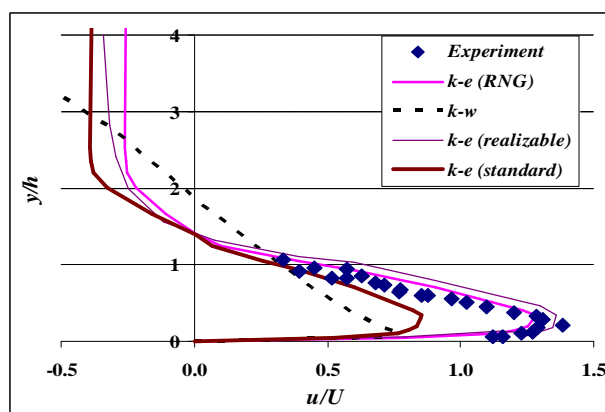
شیب (درصد)	5	8	10	15	20
q_1/q_0	2/32	2/49	2/64	2/88	2/95
q_2/q_1	1/10	1/12	1/13	1/16	1/18
q_3/q_2	1/53	1/57	1/48	1/55	1/39



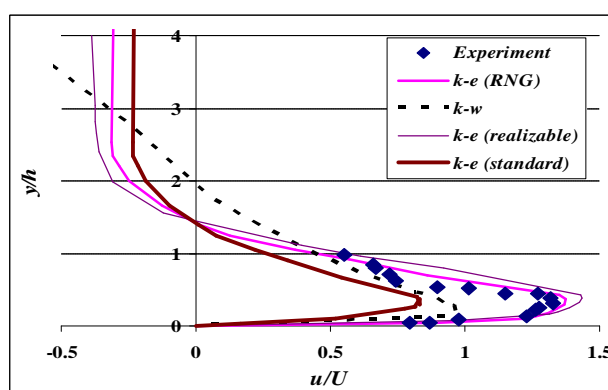
(ب)

(الف)

شکل 4- مقایسه‌ی نیمرخ قائم غلظت موضعی آزمایش *SAL29* در موقعیت الف) 2 و ب) 9 متری از دریچه‌ی کشویی.

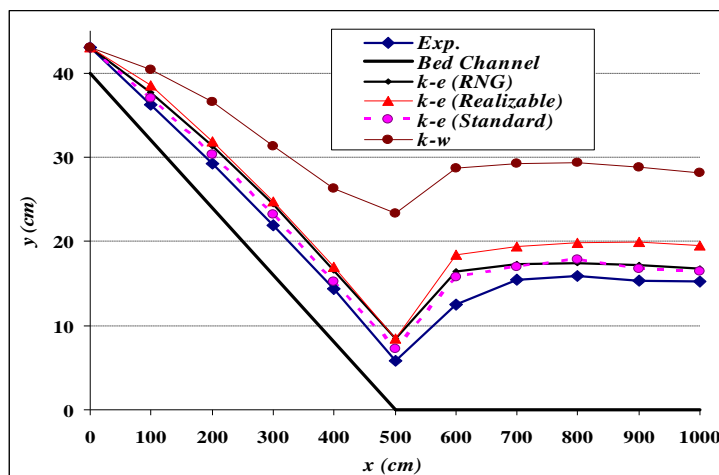


(الف)

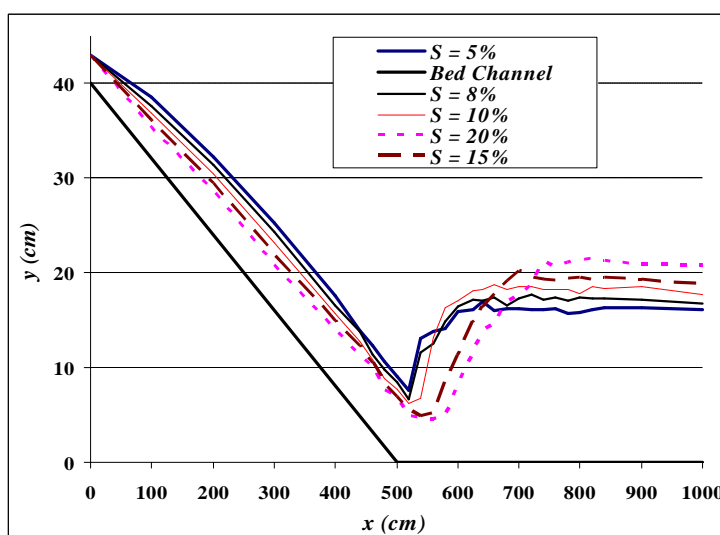


(ب)

شکل 5- مقایسه‌ی نیمرخ قائم سرعت موضعی آزمایش *SAL26* در الف) وضعیت فوق بحرانی پیش از پرش و در ب) وضعیت زیربحرانی بعد از پرش چگال.



شکل 6- نیمرخ سطح مشترک بین جریان چگال شور و آب تمیز محیطی آزمایش *SAL11*.



شکل 7- تاثیر شیب ابتدایی بستر بر پرش چگال شور.

نتیجه‌گیری

به نیمرخهای دقیقتری از سرعتهای موضعی نسبت به نیمرخهای قائم غلظتهای موضعی می‌گردد.

4. همانند فشانه‌های دیواره‌ای، موقعیت بیشترین سرعت در ناحیه فوق بحرانی جریان چگال شور نسبت به ناحیه زیربحرانی به بستر، نزدیکتر می‌باشد.

5. نتایج عددی به‌دست آمده، نشان دادند که موقعیت، و بویژه مقدار بیشترین سرعت بالاخص در ناحیه‌ی زیربحرانی جریان با مقدار آزمایشگاهی کمی تفاوت می‌کند.

6. به علت محدودیت در عمق آب تمیز محیطی، یک جریان برگشتی در نهر ایجاد گردید که این مطلب به وضوح در نتایج عددی قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به تحقیق انجام شده، نتایج زیر حاصل شده‌اند:

1. در مورد مبحث استقلال از شبکه، نشان داده شد که استفاده از شبکه 1600×41 منجر به جوابهایی تقریباً مستقل از شبکه محاسباتی می‌گردد.
2. به منظور محاسبه و تخمین توزیعهای قائم سرعت و غلظت موضعی، مقایسه بین شبیه‌های آشفتگی نشان داد که شبیه آشفتگی $k-e$ از نوع *RNG* دارای نتایج سازگارتری نسبت به مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد، در حالی که شبیه آشفتگی $k-w$ دارای نتایج چندان مناسبی نیست.
3. استفاده از شبیه آشفتگی $k-e$ از نوع *RNG* منجر

5. Aram, E., and B. Firoozabadi. 2007. Numerical simulation and experimental investigation of 3-dimensional confined density currents. *Int. J. Dynamics of Fluids*. 3: 45-62.
6. Choi, S.U., and M.H. Garcia. 2002. $k-e$ turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope. *J. Hydraul. Eng.* 128: 55-63.
7. Eidsvik, K.J. and B. Brørs. 1989. Self-accelerated turbidity current prediction based upon $(k-e)$ turbulence. *Cont. Shelf Res.* 9: 617-627.
8. Farrel, G.J., and H. Stefan. 1988. Mathematical modeling of plunging reservoir flows. *J. Hydraul. Res.* 26: 525-537.
9. Firoozabadi, B., B. Farhanieh, and M. Rad. 2001. The Propagation of turbulent density currents on sloping bed. *J. Scientia of Iranica*. 8: 223-235.
10. Firoozabadi, B., B. Farhanieh, and M. Rad. 2003. Hydrodynamics of two-dimensional, laminar turbid density currents. *J. Hydraul. Res.* 41: 623-630.
11. Forel, F.A. 1892. *The'orie du ravin sous-lacustre. Le le'man*, Vol. 1, F. Rouge, Lausanne, Switzerland, 381-386.
12. Garcia, M.H. 1993. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. *J. Hydraul. Eng.* 119: 1094-1117.
13. Hartel, C., E. Meiburg, and F. Necker. 2000. Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. Part 1. Flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries, *J. Fluid Mech.* 418: 189-212
14. Huang, H., J. Imran, and C. Primez. 2005. Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary. *J. Hydraul. Eng.* 131: 283-293.
15. Imran, J., A. Kassem, and S.M. Khan. 2004. Three-dimensional modeling of density current. I. Flow in straight confined and unconfined channels. *J. Hydraul. Res.* 42: 578-590.
16. Kostic, S. and G. Parker. 2006. The response of turbidity currents to a canyon-fan transition: internal hydraulic jumps and depositional signatures. *J. Hydraul. Res.* 44: 631-653.
17. Lambert, A., and F. Giovanoli. 1988. Records of riverborne turbidity currents
7. ضخامت جریان چگال شور محاسبه شده با استفاده از شبیه آشفستگی $k-e$ از نوع معیار، و همچنین از نوع RNG (در ناحیه زیربحرانی پس از پرش و نیز در ناحیه‌ی پرش، و بویژه در ناحیه‌ی فوق بحرانی پیش از پرش)، سازگاری نسبتاً مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد.
8. در نهایت، نشان داده شد که نرم افزار پویای سیالات محاسباتی فلونت با در نظر گرفتن شبیه آشفستگی $k-e$ از نوع RNG و شبکه‌ای با ابعاد بهینه می‌تواند به خوبی ویژگیهای جریان چگال شور را با توجه به مسأله‌ی شکست شیب شبیه‌سازی نماید.
9. با افزایش شیب قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار، موقعیت پرش چگال به سمت پایین دست جریان انتقال می‌یابد.
10. مقدار آب تمیز اختلاط یافته با جریان چگال در ناحیه‌ی شیب‌دار بستر با افزایش شیب قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار، افزایش می‌یابد. که علت آن نیز تشدید ناپایداری در سطح مشترک سیال محیطی با جریان چگال در شیبهای تندتر می‌باشد. همچنین، با افزایش شیب قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار، مقدار سیال محیطی اختلاط یافته با ناحیه‌ی پرش به صورت مختصر زیاد می‌گردد. ضمناً، در قسمت پس از پرش، با افزایش شیب قسمت ابتدایی نهر پایه‌دار، تغییرات نسبت بدهی ویژه در انتهای نهر پایه‌دار به بدهی ویژه مقطع انتهایی نهر پایه‌دار دارای تغییرات منظمی نمی‌باشد.

منابع

1. صفایی اردکانی، ا. ح. افشین، و ب. فیروزآبادی. 1386. بررسی تجربی ساختار جریان چگال سه بعدی. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهرکرد. 13-15 شهریور.
2. فیروزآبادی، ب. س. م. ر. موسوی حکمتی و س. ع. حسینی. 1384. بررسی تجربی رسوبگذاری دو بعدی و سه بعدی مغشوش. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهید باهنر کرمان. 7-19 آبان ماه.
3. Alavian, V. 1986. Behavior of density currents on an incline. *J. Hydraul. Eng.* 112: 27-42.
4. Altinakar, M.S., W.H. Graf, and E.J. Hopfinger. 1996. Flow structure in turbidity currents. *J. Hydraul. Res.* 34: 713-718.

- and indications of slope failures in the Rhone Delta of Lake Geneva. *Limnology and Oceanography*. 33(3).
18. Launder, B., and B. Sharma. 1974. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat Mass Transfer*. 1: 131–138.
 19. Lee, H.Y., and W.S. Yu. 1997. Experimental study of reservoir turbidity current. *J. Hydraul. Eng.* 123: 520–528.
 20. Mehdizadeh, A., and B. Firoozabadi. 2009. Simulation of a density current turbulent flow employing different RANS models: A comparison study. *Scientia Iranica, Transaction B: Mechanical Engineering* 16: 53-63.
 21. Parker, G., Y. Fukushima, and H.M. Pantin. 1986. Self-accelerating turbidity currents. *J. Fluid Mech.* 171: 145–181.
 22. Simpson, J.E. 1987. Gravity currents in the environment and the laboratory. Ellis Harwood, Chi Chester, U.K.
 23. Skene, K.I., T. Mulder, and J.P.M. Syvitski. 1997. INFLO1: A model predicting the behaviour of turbidity currents generated at river mouths. *Comput. Geosci.* 23: 975–991.
 24. Stacey, M.W., and A.J. Bowen. 1988a. The vertical structure of density and turbidity currents: theory and observations. *J. Geophys. Res.* 93(C3): 3528–3542.
 25. Stacey, M.W., and A.J. Bowen. 1988b. The vertical structure of turbidity currents and a necessary condition for self-maintenance. *J. Geophys. Res.* 93(C3): 3543–3553.
 26. Toniolo, H., and G. Parker. 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation. *Proc., IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Barcelona, Spain. 457-468.
 27. User's guide manual of FLUENT software, version 5.0. 1998. Incorporated, Lebanon, N.H.

