

مطالعه‌ی آزمایشگاهی پرش‌های چگالی نسبتاً ضعیف ایجاد‌ی بر روی بسترهای صاف و زبر

نادر برهمند^{۱*}، ابوالفضل شمسایی^۲ و مهدی قمشی^۳

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۸ تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۱۸

چکیده

مکان‌یابی و مدیریت پرش‌های چگالی در دریاچه‌ها و آبگیر سدها، می‌تواند در بهبود کیفی آب استحصال‌ی و هم‌چنین، در مدیریت ته‌نشینی و فرسایش رسوبات، نقشی سازنده داشته باشد. در این پژوهش، اثرات زبری بستر بر پدیده‌ی هیدرولیکی پرش چگالی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بررسی‌ها در یک نهر آزمایشگاهی که بستر آن با استفاده از ذرات ریگی چسبیده به هم زبر گردیده بود، انجام شد. با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی، رابطه‌ی ساده جهت تخمین نسبت عمق مزدوج در پرش‌های نسبتاً ضعیف بدست آمد. در این معادله، نسبت عمق مزدوج مستقل از نسبت اختلاط بوده و تنها تابعی از زبری نسبی بستر و عدد فرود چگالی مقطع بالادست پرش می‌باشد. هم‌چنین، جهت بسترهای صاف، تکامل مکانی جریان چگالی در دو وضعیت فرا و زیر بحرانی مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص گردید که با افزایش فاصله از مقطع انتهایی پرش، موقعیت مرتبط با سرعت بیشینه، به تدریج به بستر نزدیک شده و سرانجام در فاصله‌ی تقریباً معادل با ۹ برابر ضخامت جریان در مقطع انتهایی پرش، پروفیل بدون بعد سرعت دارای شکلی مشابه با مقطع فرا بحرانی پیش از پرش می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پرش چگالی، نیمرخ‌های قایم سرعت و غلظت حجمی، زبری نسبی، نسبت اختلاط و عدد فرود چگالی.

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه عمران-آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

۲- استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۳- استاد دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

*- نویسنده‌ی مسوول مقاله: nader_barahmand@yahoo.com

پیشگفتار

جریان چگالی یا ثقلی بر اثر اختلاف چگالی با سیال محیطی بوجود می‌آید. این تفاوت چگالی می‌تواند به علت وجود ذرات معلق، مواد محلول و یا تفاوت‌های دمایی باشد. جریان‌های چگالی عموماً با جریان‌های فشانندی آزاد و جریان‌های معمولی انتقال دهنده‌ی رسوبات در رودخانه‌ها تفاوت دارند. نسیم‌های دریایی، طوفان‌های شن، جریان‌های خروجی طوفان‌های آذرخشی، بادهای پایین‌رونده بی در رو، حرکت گدازه‌ها و جریان‌های ثقلی شور یا کدر وارد شده به دریاچه‌ها، آبگیر، دریاها و اقیانوس‌ها نمونه‌هایی از جریان‌های چگالی می‌باشند (فزدر و همکاران، ۱۹۸۵؛ علویان، ۱۹۸۶؛ سیمپسون، ۱۹۹۷؛ هارتل و همکاران، ۲۰۰۰) الف و ب) و دالیمور؛ همکاران، ۲۰۰۱).

در توده‌های عظیم آب (مثل آبگیرها، دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها)، جریان ثقلی تحتانی پس از غوطه‌وری، در زیر سطح آزاد و در امتداد شیب بستر شکل می‌گیرد (شکل ۱). در سطح مشترک این جریان، به علت تفاوت چگالی، جریان با آب تمیز روی آن، گردابه‌هایی تشکیل می‌گردند که منجر به ورود سیال محیطی به درون جریان ثقلی می‌شوند.

همان گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد، جریان چگالی تحتانی از سه بخش اصلی تشکیل می‌شود:

۱- ناحیه‌ی غوطه‌وری: این بخش، حد فاصل نقطه‌ی غوطه‌وری پایدار تا جایی است که در آن نرخ اختلاط آب محیطی با جریان ثابت می‌شود. طول این ناحیه تقریباً ۱۵ برابر عمق آب در نقطه‌ی غوطه‌وری پایدار می‌باشد (لی و یو ۱۹۹۷). لازم به ذکر است که در بیش‌تر مطالعات آزمایشگاهی، این بخش بوجود نمی‌آید.

۲- بدنه: بخش اصلی جریان است که بدهی آن در جهت حرکت افزایش می‌یابد. به علت دایمی و شبه یکنواخت بودن این بخش از جریان چگالی، بیش‌تر اندازه‌گیری‌های سرعت و غلظت در این بخش از جریان انجام شده است (آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۶؛ حسینی و همکاران ۲۰۰۶).

۳- بار آبی جریان: بخش پیشرو جریان با یک دماغه بالا آمده از بستر می‌باشد. ضخامت بار آبی تقریباً

دو برابر ضخامت بدنه است (ترنر ۱۹۷۹). عامل اختلاط در بار آبی، ناپایداری شدید آن می‌باشد که خود به علت ناپایداری هدایتی و ناپایداری کلین-هلمهولتز است (آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۰).

پرش‌های هیدرولیکی در جریان‌های چگالی معمولاً تحت تأثیر موانع موجود در پایین‌دست (همانند بالا آمدگی بستر و یا تنگ شدگی مقطع) و همچنین، تحت تأثیر کاهش شیب (مانند شکستگی شیب در محل تماس دره‌های زیردریایی با دشت‌های رسوبی) رخ می‌دهند (ویلکینسون و وود ۱۹۷۱، بادور و ابینک ۱۹۸۳؛ گارسیا ۱۹۹۳). در اصطلاح به این گونه از پرش‌ها، پرش‌های چگالی نیز می‌گویند. درک دقیق پرش‌های چگالی می‌تواند نقشی سازنده در بهبود مدیریت تنه‌نشینی و فرسایش رسوبات در آبگیر و دریاچه‌ها داشته باشد.

با فرض ساکن بودن سیال محیطی و عدم اختلاط دو سیال با یکدیگر، یه و گوها (۱۹۵۵) رابطه‌ی ساده‌ی زیر را جهت پیش‌بینی نسبت عمق جریان چگالی در مقطع انتهایی پرش، h_2 به عمق جریان در مقطع ابتدایی پرش، h_1 ارائه داده‌اند.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{D1}^2} - 1 \right) \quad (1)$$

که F_{D1} عدد فرود چگالی در مقطع پیش از پرش (مقطع ۱ شکل ۲) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{D1} = \frac{1}{\sqrt{Ri_1}} = \frac{U_1}{\sqrt{g \left(\frac{\rho_1 - \rho_a}{\rho_1} \right) h_1}} \quad (2)$$

Ri عدد ریچاردسون حجمی، ρ_1 میانگین چگالی لایه‌ای سیال غلیظ، ρ_a جرم حجمی سیال محیطی، U میانگین سرعت - لایه‌ای جریان چگالی در جهت شیب و g شتاب ثقل است. اندیس ۱ نیز نشان‌دهنده‌ی مقطع ۱ (مقطع عرضی قرار گرفته بلافاصله در بالادست پرش) می‌باشد (شکل ۲). گفتنی است که معادله‌ی ۱، مشابه رابطه‌ی کلاسیک نسبت عمق‌های مزدوج پرش در جریان‌های نهر-باز یک مرحله‌ای (رابطه‌ی بلانگر) می‌باشد.

که (۱۹۷۱)، اثر سازه کنترلی پایین‌دست را بر مشخصات اختلاطی یک جریان چگالی در یک سیال

پستی و بلندی بستر، پرش داخلی می‌تواند در افزایش ته نشست‌های جریان، تأثیری بسزا داشته باشد. لارکا و همکاران (۲۰۰۸) رفتار یک جریان چگالی شور را بدون این‌که پرشی انجام دهد، بر بستر زبر به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. بنابر نظر ایشان رفتار جریان عبوری از روی بستر زبر کاملاً نا معمول است. به گونه‌ای که سرعت بار آبی ابتدا زیاد شده و پس از طی مسافتی، دوباره کاهش می‌یابد.

متاسفانه با وجود مطالعاتی گسترده که در مورد بسترهای صاف انجام شده، تاکنون اثرات زبری بستر بر مشخصات پرش چگالی به‌خوبی شناخته نشده اند. در این مقاله، با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در نهر پایدار مستطیلی با بستر ریگی، معادله‌ای جهت محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج پرش بدست آمده و اعتبارسنجی می‌گردد. هم‌چنین، در بستر صاف، توسعه‌ی مکانی جریان‌های فرا و زیر بحرانی، مورد بررسی و پژوهش قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

۱- تجزیه‌ی ابعادی و تحلیلی پرش چگالی

از جمله فراسنج‌های مهم و موثر بر پرش چگالی، می‌توان به عمق سیال محیطی (H)، ضخامت جریان غلیظ در مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش (به ترتیب h_1 و h_2)، میانگین سرعت - لایه‌ای جریان غلیظ در مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش (U_1 و U_2)، چگالی سیال محیطی (ρ_a)، چگالی سیال غلیظ در مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش (ρ_1 و ρ_2)، ارتفاع معادل زبری بستر (K_S)، عرض نهر (B)، شتاب ثقل (g) و گرانشی سینماتیکی (ν) اشاره نمود. در نتیجه:

$$N(H, h_1, h_2, U_1, U_2, \rho_1, \rho_2, \rho_a, K_S, B, g, \nu) = 0 \quad (3)$$

که N نشانه‌ی تابع می‌باشد. با توجه به قضیه‌ی Π ساده و مرتب کردن گروه‌های بدون بعد، خواهیم داشت:

$$\frac{h_2}{h_1} = \Phi \left(F_{D1}, Re_1, (1+r_e), \frac{h_1}{B}, \frac{H}{h_1}, \frac{K_S}{h_1}, \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad (4)$$

در این رابطه، Φ نماد تابع است. هم‌چنین، r_e نسبت اختلاط و Re_1 عدد رینولدز در مقطع ابتدایی پرش می‌باشند.

محیطی عمیق و ساکن مورد بررسی قرار داد. هم‌چنین، اثر بالآمدگی بستر در پایاب بر ویژگی‌های اختلاطی پرش چگالی ایجاد می‌کند. در یک سیال محیطی عمیق، به وسیله‌ی ویلکینسون و وود (۱۹۷۱) به صورت نظری و آزمایشگاهی مورد پژوهش قرار گرفت. همان گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، طول پرش با توجه به اختلاط و یا عدم اختلاط سیال محیطی با جریان غلیظ به دو ناحیه‌ی اختلاط و غلطکی تقسیم گردید. ایشان جهت تجزیه و تحلیل پرش، افزون بر معادله‌های معمول در پرش‌های بدون اختلاط، از معادله‌ی بقای کارمایه‌ی بین جریان بحرانی روی بالآمدگی و انتهای پرش نیز استفاده کردند.

پدیده‌ی پرش چگالی در یک نهر پایدار کوتاه با بستر صاف و عمق محدود، به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی، به وسیله‌ی بادور و ابینک (۱۹۸۳) مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص گردید که مقدار اختلاط سیال محیطی با جریان غلیظ در پرش‌های کاملاً مستغرق و در جریان‌های کاملاً ناپایدار، ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. هم‌چنین، با فرض نامحدود بودن عمق سیال محیطی در پرش آزاد، بین عدد فرود چگالی مقطع پیش از پرش و بیشینه‌ی اختلاط، رابطه‌ای بدست آمد.

گارسیا (۱۹۹۳) رفتار جریان ثقلی شور و هم‌چنین، جریان غلیظ حاوی رسوبات را در یک نهر پایدار آزمایشگاهی با بستر صاف، بررسی کرد. جریان فرا بحرانی رها شده از زیر دریچه‌ی کشویی، در نزدیکی محل تغییر شیب بستر، از راه پرش هیدرولیکی به وضعیت زیر بحرانی تبدیل می‌گردید. در این آزمایش‌ها، مقدار اختلاط در ناحیه‌ی پرش و هم‌چنین، در جریان زیر بحرانی، در مقایسه با ناحیه‌ی فرا بحرانی، کوچک و ناچیز بود. هم‌چنین، گارسیا (۱۹۹۳) از روش آزمایشگاهی نشان داد که اگر شرایط اولیه‌ی آزمایش پرش جریان شور با آزمایش پرش جریان چگالی حاوی ذرات معلق بسیار ریز، یکسان باشد، نیمرخ‌های سرعت و غلظت مشابهی با یکدیگر خواهند داشت.

کویو (۲۰۰۴) اثرات پستی و بلندی بستر را بر ویژگی‌های جریان کدر به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد پژوهش قرار داد. نامبرده نشان داد که افزون بر

شارهای اندازه‌ی حرکت مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش، پیشنهاد شده است.

$$F_r = \beta(M_1 - M_2), \quad 0 \leq \beta < 1 \quad (10)$$

در این رابطه، β ضریبی مثبت است که با توجه به آزمایش‌های انجام شده در نه‌های-باز تک- لایه‌ای، تنها با توجه به مشخصات زبری نسبی بستر (مانند K_S/h_1)، تعیین می‌گردد (کارلو و فرو، ۲۰۰۴ و کارلو و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹).

اگر نسبت اختلاط r_e برابر با صفر شود، با استفاده از قوانین بقای حجم، جرم و اندازه حرکت، معادله‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8(1 - \beta)F_{D1}^2} - 1 \right) \quad (11)$$

در صورتی که $\rho_a/\rho_1 \approx 0$ باشد، حالتی مشابه با پرش‌های ایجاد‌ی در نه‌های-باز تک-لایه‌ای ایجاد می‌شود. در این وضعیت، معادله‌ی ۱۱ را می‌توان به شکل زیر بازنوشت:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8(1 - \beta)F_1^2} - 1 \right) \quad (12)$$

که در آن F_1 عدد فرود مقطع ابتدایی پرش در نه‌های-باز تک-لایه‌ای است. با قراردادن $\beta = 0$ جهت بستر صاف، معادله‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب به معادله‌ی پیشنهادی یه و گوها (رابطه‌ی ۱)، و معادله‌ی بلانگر تبدیل خواهند شد. همچنین، بیشینه‌ی مقدار ممکن ضریب زبری β که متناظر با کمینه‌ی مقدار h_2/h_1 (معادله‌ی ۸) است، از رابطه‌ی زیر، قابل محاسبه خواهد بود. گفتنی است که جهت این مقدار از ضریب زبری، ناحیه‌ی غلطکی وجود نخواهد داشت.

$$(\beta)_{\max} = 1 - \frac{a \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) - b}{F_{D1}^2} \quad (13)$$

$$a = 2\sqrt{b^2 - \frac{1}{4}}, \quad b = \frac{4 - 9(1 + r_e)^3}{8} \quad (14)$$

$$\theta = \text{Arc cos} \left[\frac{\left(-b^3 + \frac{3}{8}b - \frac{1}{16}\right)}{\left(b^2 - \frac{1}{4}\right)^{1.5}} \right]$$

$$r_e = q_e/q_1 = (q_2/q_1) - 1 = (C_1 - C_2)/C_2 \quad (5)$$

$$\text{Re}_1 = (U_1 h_1)/\nu \quad (6)$$

در پرش چگالی، اثرات گرانیوی جنبشی در مقایسه با اثرات نیروی ثقلی ناچیزند. لذا، معمولاً در روابط از عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. همچنین، با توجه به آزمایش‌هایی که در نه‌های باز تک-لایه و دو-لایه‌ای انجام شده است، می‌توان از تاثیر گروه بدون بعد h_1/B چشم‌پوشی نمود (بادور و ابینک ۱۹۸۳؛ کارلو و همکاران ۲۰۰۷). افزون بر این، اگر عمق سیال محیطی خیلی بزرگ‌تر از ضخامت جریان چگالی باشد، گروه بدون بعد H/h_1 اثری ناچیز بر نسبت عمق‌های مزدوج پرش خواهند داشت (بادور و ابینک ۱۹۸۳). نسبت جرم مخصوص جریان غلیظ در مقطع پس از پرش به مقطع پیش از پرش نیز معمولاً نزدیک به واحد است (گارسیا ۱۹۹۳). لذا:

$$\frac{h_2}{h_1} = \phi \left(F_{D1}, (1 + r_e), \frac{K_S}{h_1} \right) \quad (7)$$

که ϕ شاخص تابع می‌باشد. جهت محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج h_2/h_1 ، پرش داخلی شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود. چنان‌چه حجم تنظیم شده برابر حجم سیال غلیظ میان دو مقطع ۱ و ۲ (به ترتیب مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش) باشد، با توجه به یک گروه از فرضیه‌ها (نیوتنی، تراکم‌ناپذیر بودن هر دو سیال غلیظ و محیطی، مستطیلی و افقی بودن نه‌ر، ایستایی بودن توزیع فشار، یکنواختی توزیع قایم سرعت و چگالی، زیاد بودن عمق سیال محیطی در مقایسه با ضخامت جریان ثقلی، پایداری جریان غلیظ به علت وجود مواد محلول در آن و ...) و استفاده از قوانین بقای حجم، جرم و اندازه‌ی حرکت، خواهیم داشت:

$$\frac{h_2}{h_1} = 2\sqrt{\left(-\frac{k}{3}\right)} \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \quad (8)$$

$$\alpha = \text{Arc cos} \left[\left(-\frac{l}{2}\right) / \sqrt{\left(-\frac{k}{3}\right)^3} \right]$$

$$k = -[1 + 2F_{D1}^2(1 - \beta)](1 + r_e) \quad (9)$$

$$l = 2F_{D1}^2(1 - \beta)(1 + r_e)^3$$

گفتنی است که در معادله‌ی بقای اندازه‌ی حرکت، نیروی برشی بستر F_r به صورت کسری از تفاضل

آزمایش‌ها

به علت مشکل و پرهزینه بودن اندازه‌گیری‌های فیلدی، بیش‌تر از نتایج آزمایشگاهی، جهت بررسی و تجزیه و تحلیل پدیده‌ی پرش چگالی استفاده می‌شود. در این مطالعه، آزمایش‌ها در یک نهر پایدار به طول ۸/۳ متر، عرض ۰/۴ متر و ارتفاع ۰/۹ متر با دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس انجام شد (شکل ۳).

نهر پایدار به وسیله‌ی یک دریچه‌ی کشویی به دو بخش ۰/۵ و ۷/۸ متری تقسیم می‌گردید. بخش کوچک‌تر به عنوان مخزن آرام‌کننده‌ی سیال غلیظ، عمل می‌کرد و بخش بزرگ‌تر، یک مخزن دارای شکستگی شیب بستر را شبیه‌سازی می‌نمود.

پیش از هر آزمایش، مخزن اختلاط از آب شهری پر می‌شد. سپس با توجه به غلظت مورد نظر آزمایش، مقدار مناسبی نمک به آب، اضافه و به وسیله‌ی همزن مکانیکی، حل می‌گردید. هم‌زمان با تهیه‌ی سیال غلیظ، مخزن نهر پایدار با آب شهری پر می‌گردید. سپس سیال غلیظ تهیه‌شده در مخزن اختلاط به مخزن بار آبی ثابت، پمپ می‌شد. در انتهای نهر پایدار، یک سرریز لبه تیز نصب گردید تا سطح آزاد سیال محیطی در تراز تاج سرریز ثابت باقی بماند. هم‌چنین، جهت جلوگیری از ایجاد نوسان‌های شدید ناشی از ورود آب تمیز، با استفاده از یک صفحه‌ی مورب پلکسی گلاس، حوضچه‌ی آرامشی ساخته شد.

بستر نهر پایدار شامل دو بخش ثابت و قابل تنظیم با طول‌هایی به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۴/۸ متر بود. بستر بخش قابل تنظیم دارای شیب طولی متغیر بین ۸ تا ۱۲ درصد (4.57° تا 6.84°) بود، در حالی‌که بخش ثابت همواره در وضعیت افقی قرار داشت. پس از هم تراز شدن سطح سیال غلیظ با سطح آزاد مخزن نهر پایدار، اقدام به باز کردن آهسته‌ی دریچه کشویی به اندازه‌ی مشخص می‌شد. به علت شیب عمودی چگالی، جریان ثقلی شور در امتداد شیب بستر حرکت کرده، در انتهای نهر پایدار وارد مخزن استهلاک می‌گردید. علت استفاده از مخزن استهلاک جلوگیری از تاثیر زهکشی جریان بر بالادست آن بود.

در این پژوهش، در هر دو نوع بستر صاف و زیر،

آزمایش‌هایی انجام گرفت. با استفاده از چهار مقدار مختلف جهت میانگین قطر ذرات ریگی d_{50} ، چهار آرایش بستر زیر تهیه گردید. در هر آرایش، ذرات ریگی تقریباً کروی شکل و هم اندازه، به صورت به هم فشرده، به بخش افقی بستر نهر پایدار چسبانده می‌شدند. به علت این‌که در هر آرایش بستر، ذرات ریگی دارای منحنی دانه‌بندی باریکی بودند، ارتفاع زبری بستر K_s برابر با میانگین قطر ذرات d_{50} در نظر گرفته شد. گفتنی است که d_{50} ذرات با غربال‌گری و استفاده از نمونه‌گیری تصادفی ۲۰۰ ذره و میانگین‌گیری ۳ اندازه‌ی محوری آن‌ها محاسبه شد. هم‌چنین، در اندازه‌گیری‌ها و محاسبات، تراز مرجع، صفحه‌ای فرضی به موازات بستر به فاصله‌ی K_s از آن در نظر گرفته شد.

جهت برداشت نیم‌رخ قایم سرعت در امتداد صفحه‌ی مرکزی نهر پایدار از یک سرعت سنج صوتی استفاده شد. هم‌چنین، جهت نمونه‌برداری غلظت، از مجموعه‌ای از شترگلوهای قایم با ارتفاعات متفاوت از بستر استفاده شد. این مجموعه شامل ۱۰ شترگلو لوله‌ای با قطر خارجی ۳/۱۸ میلی‌متر بود. لازم به ذکر است که در هر آزمایش، تعداد شترگلوهای مورد استفاده بستگی به ضخامت ظاهری جریان داشت. نمونه‌های جمع‌آوری شده به وسیله‌ی لوله‌های پلاستیکی متصل به شترگلوها به ظرف‌هایی منتقل شده، سپس به وسیله‌ی یک هدایت سنج الکترونیکی واسنجی شده، غلظت آن‌ها تعیین می‌شد.

با تغییر مقادیر غلظت حجمی ورودی C_0 ، ارتفاع بازشدگی دریچه h_0 ، بدهی ورودی Q_0 ، شیب بستر قابل تنظیم S_a و ارتفاع معادل زبری بستر K_s ، ۳۹ آزمایش انجام شد. در هر آزمایش، اندازه‌گیری‌ها در صورتی انجام می‌شدند که افزون بر تشکیل پرش داخلی آزاد در بخش افقی بستر، تفاوت دمای آب تمیز داخل نهر پایدار T_R و دمای آب شور موجود در پشت دریچه‌ی کشویی T_T کم‌تر از 2°C باشد. مشخصات جریان‌های ثقلی ورودی به نهر پایدار، در جدول ۱ به اختصار آمده اند. در این جدول نمایه‌ی صفر نشان‌دهنده‌ی مقطع ورودی (دریچه‌ی کشویی) می‌باشد. با توجه به اعداد رینولدز و ریچاردسون حجمی، در

قابل پیش‌بینی است. هم‌چنین، نسبت مابین بده ویژه‌ی جریان در ۶ متری از محل دریچه‌ی کشویی q_3 و بده ویژه‌ی مقطع پس از پرش q_2 تقریباً برابر یک می‌باشد (جدول ۲). در نتیجه می‌توان گفت که اختلاط آب تمیز با جریان چگال در وضعیت زیر بحرانی در مقایسه با جریان فرا بحرانی، دارای مقادیری به مراتب کوچک‌تر است.

در مجموع ۳۰ آزمایش روی بسترهای زبر انجام شد. شکل ۴، تغییرات ضریب تنش برشی بستر β را نسبت به زبری نسبی K_s/h_1 نشان می‌دهد. با استفاده از روش کم‌ترین مربعات، معادله‌ی زیر جهت محاسبه‌ی β بدست می‌آید:

$$\beta = 1 - \exp\left[-0.5\left(\frac{K_s}{h_1}\right)^{0.85}\right] \quad (18)$$

مقدار میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب همبستگی (R^2) و خطای معیار ($RMSE$) معادله‌ی بالا به ترتیب برابر ۱۴/۸ درصد، ۰/۸۹ و ۰/۰۲ می‌باشد. جهت بستر صاف ($K_s = 0$)، مقدار محاسبه شده‌ی ضریب β برابر با صفر می‌شود. هم‌چنین، در بستر زبر، با افزایش زبری نسبی K_s/h_1 ، ضریب β افزایش می‌یابد. لذا، بر اساس رابطه‌ی ۸ و با فرض ثابت باقی‌ماندن سایر فراسنج‌ها (F_{D1}, r_e)، نسبت عمق مزدوج h_2/h_1 کاهش می‌یابد. افزون بر این، در بستر بی‌نهایت زبر $[(K_s/h_1) \rightarrow +\infty]$ ، ضریب β بدست آمده از معادله‌ی ۱۸ به سمت واحد میل می‌کند. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که در معادله‌ی بالا، شرط مهم $0 \leq \beta < 1$ همواره رعایت می‌شود.

با توجه به معادله‌های ۱۳ و ۱۸ برای مقادیر معلوم F_{D1} و r_e ، بیشینه‌ی زبری نسبی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\left(\frac{K_s}{h_1}\right)_{\max} = 2.26 \left[\text{Ln} \left(\frac{F_{D1}^2}{a \text{Cos}(\theta/3) - b} \right) \right]^{1.18} \quad (19)$$

در این حالت، ناحیه‌ی غلطکی پرش وجود نخواهد داشت و نسبت عمق مزدوج h_2/h_1 ، کمینه خواهد شد. در حالتی که اختلاط در ناحیه‌ی پرش وجود ندارد ($r_e = 0$)، معادله‌ی ۱۹ به شکل زیر ساده می‌گردد.

تمامی آزمایش‌ها، جریان تلاطمی فرا بحرانی در ورودی بوجود آمد.

نتایج و بحث

۱- نسبت عمق‌های مزدوج h_2/h_1

خلاصه‌ای از نتایج آزمایشگاهی در جدول ۲، درج شده است. در این جدول با توجه به نیمرخ‌های قایم سرعت و غلظت حجمی اندازه‌گیری شده در امتداد خط مرکزی نهر پایدار، میانگین سرعت - عمقی جریان U ، ضخامت جریان h و هم‌چنین، غلظت میانگین حجمی - عمقی جریان چگالی C به ترتیب با استفاده از روابط انتگرالی زیر محاسبه شده‌اند (ترنر، ۱۹۷۹؛ پارکر و همکاران، ۱۹۸۶).

$$U = \frac{\int_0^{\infty} u^2(z) dz}{\int_0^{\infty} u(z) dz} = \frac{\int_0^{h_i} u^2(z) dz}{\int_0^{h_i} u(z) dz} \quad (15)$$

$$h = \frac{\left(\int_0^{\infty} u(z) dz\right)^2}{\int_0^{\infty} u^2(z) dz} = \frac{\left(\int_0^{h_i} u(z) dz\right)^2}{\int_0^{h_i} u^2(z) dz} \quad (16)$$

$$C = \frac{\int_0^{\infty} (u(z).c(z)) dz}{\int_0^{\infty} u(z) dz} = \frac{\int_0^{h_i} (u(z).c(z)) dz}{\int_0^{h_i} u(z) dz} \quad (17)$$

$$= \frac{\int_0^{h_i} (u(z).c(z)) dz}{U.h}$$

در این روابط، $u(z)$ و $C(z)$ به ترتیب میانگین سرعت - زمانی در جهت پایاب و غلظت میانگین حجمی - زمانی در فاصله‌ی z از بستر می‌باشند. هم‌چنین، h_i فاصله‌ای قایم مابین تراز مرجع و موقعیتی است که در آن محل، سرعت موضعی u برابر صفر می‌گردد (شکل ۱).

همان گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نسبت بده‌ی ویژه‌ی مقطع ابتدایی پرش q_1 به بده‌ی ویژه‌ی جریان چگالی در محل دریچه‌ی q_0 همواره بزرگ‌تر از مقدار ۱/۵ می‌باشد. لذا، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در وضعیت فرا بحرانی، مقدار اختلاط سیال محیطی با جریان چگالی، قابل ملاحظه است. کوچک بودن مقادیر q_2/q_1 در جدول ۲، نشان‌دهنده‌ی تداخل کم آب تمیز با جریان ثقیل شور در طول پرش است که این امر با توجه به ضعیف بودن پرش‌ها ($0.15 \leq Ri_1 \leq 0.26$)

همان گونه که در شکل‌های ۶ و ۸ مشاهده می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت h_2/h_1 ، سازگاری مناسبی با مقادیر برآورد شده به وسیله‌ی رابطه‌ی ۲۲ دارند. مقادیر بدست آمده از این معادله دارای میانگین خطای مطلق ۲/۲۹ درصد می‌باشند. همچنین، تنها ۲ عدد از داده‌ها در خارج از پهنای خطای $\pm 6\%$ قرار می‌گیرند. معادله‌ی ذکر شده به علت سادگی، دقت مناسب و عدم وابستگی به نسبت اختلاط R_e در پرش‌های نسبتاً ضعیف، می‌تواند بکار برده شود.

تکامل مکانی پرش‌های چگالی ایجابی روی بسترهای صاف

جریان چگالی پس از طی مسافتی که وابسته به شیب و زبری بستر است، به حالت بهنجار یا تعادل می‌رسد. در این حالت، میانگین سرعت - عمقی جریان U و عدد ریچاردسون حجمی Ri دارای مقادیر ثابتی می‌گردند (الیسون و ترنر، ۱۹۵۹). در مورد بستر شیبدار، اندازه‌گیری نیمرخ‌های قائم سرعت در امتداد صفحه‌ی مرکزی نهر پایدار و در فاصله‌هایی متفاوت از دریچه‌ی کشویی نشان داد که در محدوده‌ی شرایط اولیه‌ی جریان (جدول ۱)، جریان‌های فرا بحرانی در فاصله‌ی ۱۲۰ تا ۱۶۰ سانتی‌متری از دریچه‌ی کشویی به حالت بهنجار می‌رسند. میانگین عدد ریچاردسون بهنجار جهت شیب‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد به ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۲۰ و ۰/۱۷ گردید که در شیب ۸ درصد، عدد بدست آمده با مقدار بدست آمده از آزمایش‌های گارسیا (۱۹۹۳) ($Ri = 0.25$) سازگاری مناسبی دارد.

جهت بررسی تکامل جریان زیربحرانی ایجابی روی بستر افقی و صاف، در هر آزمایش، نیمرخ‌های قائم سرعت در ابتدا و انتهای پرش (مقطع ۱ و ۲ شکل ۲) و همچنین، در چندین مکان در پایین‌دست پرش اندازه‌گیری شدند. گفتنی است که در تمامی آزمایش‌ها، به علت وجود فاصله‌ی کافی تا مخزن استهلاک، هیچ‌کدام از مقاطع اندازه‌گیری، تحت تاثیر محل خروجی جریان چگالی قرار نمی‌گرفتند. در طی آزمایش‌ها آشکار گردید که نسبت ارتفاع متناظر با سرعت بیشینه h_m به ضخامت جریان h_t از مقدار میانگین ۰/۳ در مقطع

$$\left(\frac{K_s}{h_1}\right)_{\max} = 5.11 [Ln(F_{D1})]^{1.18} \quad (20)$$

همان گونه که از معادله‌های ۱۹ و ۲۰ استنباط می‌شود، برای r_e معلوم و معین، با افزایش F_{D1} ، بیشینه‌ی زبری نسبی مجاز $(K_s/h_1)_{\max}$ ، افزایش می‌یابد.

نسبت عمق‌های مزدوج اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده با استفاده از روابط ۸ و ۱۸، در شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌گردد که تنها یکی از داده‌ها در خارج از بازه خطای $\pm 3.5\%$ واقع می‌شود. همچنین، مقادیر h_2/h_1 محاسبه شده دارای خطای معیار ۰/۰۵، میانگین خطای مطلق ۱/۸۸ درصد و ضریب همبستگی ۰/۸۳ می‌باشند.

مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت عمق‌های مزدوج h_2/h_1 در شکل ۶ به صورت تابعی از متغیر $F_{D1}(1-\beta)^{0.5}$ آورده شده‌اند. همان گونه که در شکل بالا و همچنین، شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، در تخمین نسبت عمق‌های مزدوج h_2/h_1 بدون در نظر گرفتن اثر اختلاطی سیال محیطی (معادله‌های ۱۱ و ۱۸)، خطاهای قابل توجهی بوجود می‌آید. در این حالت، مقادیر h_2/h_1 محاسبه شده به وسیله‌ی روابط ۱۱ و ۱۸، بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی می‌شود. همچنین، مقدار میانگین خطای روابط بالا برابر ۷/۱۷ درصد است. لذا، نمی‌توان از اثر اختلاط و ورود آب محیطی در ناحیه‌ی پرش ولو در مقیاس کوچک، صرف‌نظر نمود. با توجه به آزمایش‌های حاضر (جدول ۲) و با استفاده از روش کم‌ترین مربعات، معادله‌ی ساده‌ی ۲۱ جهت محاسبه‌ی نسبت h_2/h_1 بدست آمد.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 7.12(1-\beta)F_{D1}^2} - 1 \right) \quad (21)$$

رابطه‌ی ذکر شده جهت هر دو نوع بستر صاف و یا زبر، کارایی دارد. اثر ورود سیال محیطی به درون ناحیه‌ی پرش نیز در ضریب ۷/۱۲ مستتر است. در این رابطه، ضریب β از معادله‌ی ۱۸ تعیین می‌گردد. لذا، معادله‌ی ۲۱ را می‌توان به شکل زیر نیز نوشت:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 7.12 \exp \left[-0.5 \left(\frac{K_s}{h_1} \right)^{0.85} \right] F_{D1}^2} - 1 \right) \quad (22)$$

عمق‌های مزدوج پرش بدست آمد. در این معادله (رابطه‌ی ۲۲)، نسبت عمق‌های مزدوج دیگر وابسته به نسبت اختلاط نیست و تنها تابعی از عدد فرود چگالی بالادست پرش و زبری نسبی بستر می‌باشد. دقت این معادله مناسب بوده و می‌تواند به جای معادله‌ی ۸ بکار رود.

هم‌چنین، جهت بسترهای صاف، نحوه تکامل جریان فرا بحرانی پیش از پرش و هم‌چنین، جریان زیر بحرانی پس از پرش به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های ساختارهای قائم در موقعیت‌های گوناگون، مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، میانگین مقادیر اعداد ریچاردسون بهنجار متناظر با شیب‌های ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۱۲ به ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۲۰ و ۰/۱۷ گردیدند. افزون بر این، آزمایش‌ها نشان دادند که در مقطع انتهایی پرش، موقعیت بدون بعد سرعت بیشینه به مقدار ۰/۴۳ افزایش یافته و بار دیگر با افزایش فاصله از انتهای پرش، به بستر نزدیک شده و در نهایت در فاصله‌ای مساوی با ۹ برابر عمق ثانویه پرش، در موقعیتی مشابه با مقطع پیش از پرش قرار می‌گیرد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نتایج شبیه‌های عددی و هم‌چنین، آزمایش‌های جریان‌های ثقلی شور تا حد زیادی می‌توانند مشابه نتایج بدست آمده از جریان‌های کدر حاوی ذرات معلق ریز دانه (با میانگین قطر کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر) باشند (گارسیا، ۱۹۹۳؛ آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۶؛ فیروزآبادی و همکاران، ۲۰۰۳). لذا، نتایج این مقاله می‌تواند برای جریان‌های کدر ریزدانه نیز کارایی داشته باشند.

منابع

- 1- Alavian, V. 1986. Behavior of density currents on an incline. J. Hydraul. Eng. 112: 27-42.
- 2- Altinakar, M.S., W.H. Graf and E.J. Hopfinger. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. J. Hydraul. Res. 28: 55-80.
- 3- Altinakar, M.S., W.H. Graf and E.J. Hopfinger. 1996. Flow structure in turbidity currents. J. Hydraul. Res. 34: 713-718.
- 4- Baddour, R.E. and H. Abbink. 1983. Turbulent underflow in a short channel of

فرا بحرانی پیش از پرش به مقدار میانگین ۰/۴۳ در انتهای پرش افزایش می‌یابد. همان گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد، با افزایش فاصله از انتهای پرش، موقعیت نقطه‌ی متناظر با سرعت بیشینه، به بستر نزدیک شده و نسبت h_m/h_t دوباره به مقدار میانگین ۰/۳۱ کاهش یافته و تقریباً ثابت می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، این فاصله تقریباً معادل با ۹ برابر ضخامت جریان در مقطع انتهایی پرش گردید (در شکل بالا، x فاصله‌ی افقی مقطع اندازه‌گیری از دریچه‌ی کشویی و x_t فاصله‌ی طولی مقطع انتهایی پرش از محل دریچه‌ی کشویی است).

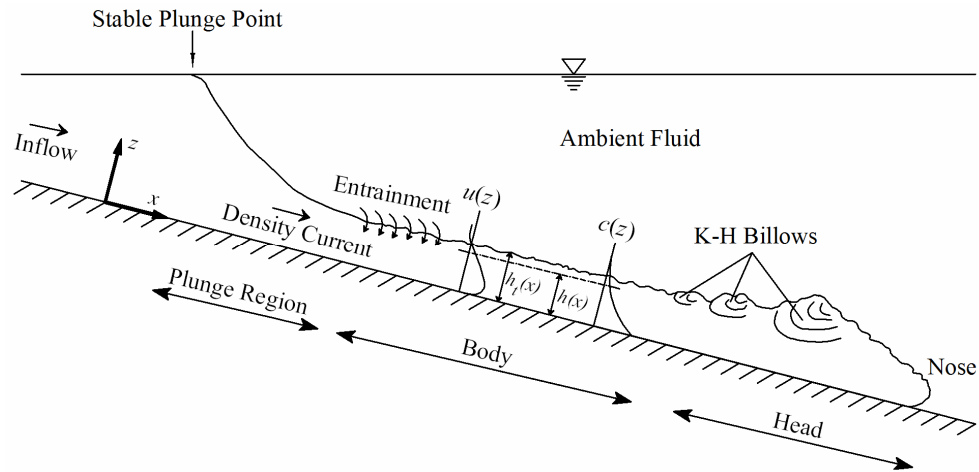
در این بخش از مقاله، تنها به بررسی تکامل جریان روی بستر صاف پرداخته شده است و باید خاطر نشان نمود که در مورد بستر زبر نیاز به مطالعات و آزمایش‌هایی گسترده‌تر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

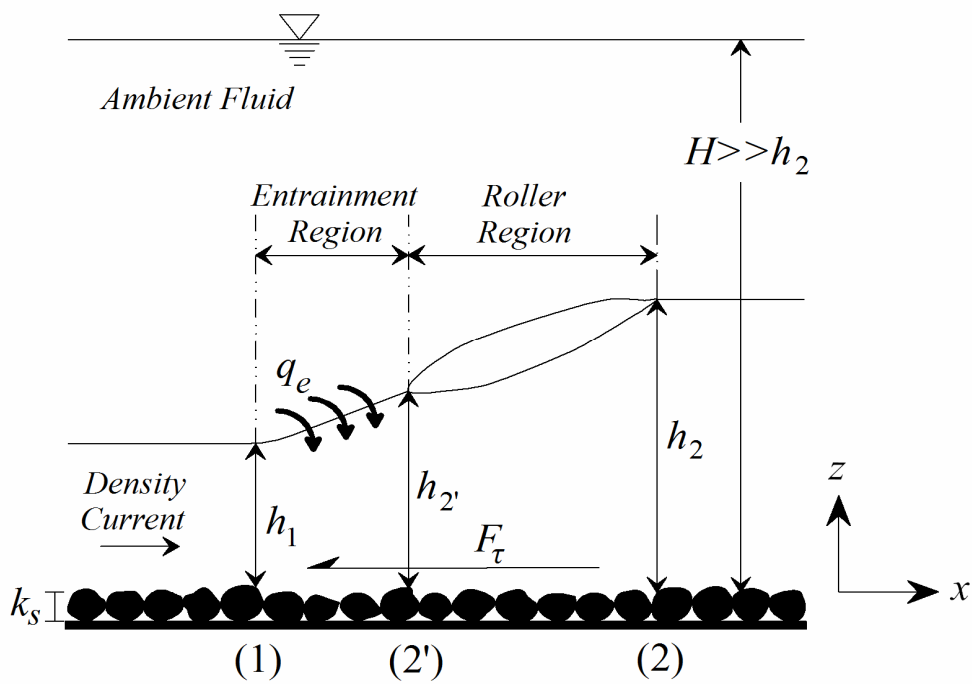
در ابتدا با استفاده از معادله‌های بقای جرم، حجم و اندازه حرکت، معادله‌ای جهت تخمین نسبت عمق‌های مزدوج بدست آمد. سپس جهت اعتبارسنجی معادله‌ی بدست آمده، در یک نهر پایدار مستطیلی آزمایش‌هایی انجام شد. بخش ابتدایی این نهر پایدار دارای بستری شیبدار و صاف بود، اما بستر بخش انتهایی آن همواره در حالت افقی قرار داشت. لازم به یادآوری است که این بخش از بستر، مصنوعاً به وسیله‌ی ذرات ریگی که نزدیک به هم قرار داشتند، زبر گردیده بود. در مورد بستر زبر، آزمایش‌ها با توجه به ۴ مقدار گوناگون از d_{50} ذرات ریگی انجام گرفت. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، معادله‌ای جهت محاسبه‌ی ضریب تنش برشی بستر به صورت تابعی منفرد از نسبت ارتفاع زبری بستر به عمق اولیه‌ی پرش بدست آمد. مقادیر بدست آمده از معادله‌ی ۸ که در آن ضریب تنش برشی بستر از رابطه‌ی ۱۸ محاسبه شده است، سازگاری مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت. هم‌چنین جهت تخمین بیشینه‌ی مقدار ممکن زبری نسبی، رابطه‌ای پیشنهاد شد. افزون بر این، با توجه به شرایط اولیه‌ی آزمایش‌ها (جدول ۱)، معادله‌ای ساده جهت محاسبه‌ی نسبت

- 418: 189-212.
- 15- Hosseini, S.A., A. Shamsai, and B. Ataie-Ashtiani 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an acoustic Doppler velocimeter. *J. Flow Measurement and Instrumentation* 17: 59–68.
- 16- Koh, R.C.Y. 1971. Two-dimensional surface warm jets. *J. Hydraul. Div., ASCE*. 97(HY6): 819-836.
- 17- Kubo, y. 2004. Experimental and numerical study of topographic effects on deposition from two-dimensional, particle-driven density currents. *Sedimentary Geology* 164: 311-326.
- 18- La Rocca, M., C. Adduce and G. Sciortino 2008. Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom. *Phys. Fluids* 20: 106603(1-15).
- 19- Lee, H.Y. and W.S. Yu. 1997. Experimental study of reservoir turbidity current. *J. Hydraul. Eng.* 123: 520–528.
- 20- Parker, G., Y.Fukushima and H.M. Pantin. 1986. Self-accelerating turbidity currents. *J. Fluid Mech.* 171: 145-181.
- 21- Simpson, J.E. 1997. Gravity currents in the environment and in the laboratory. 2nd ed Cambridge University Press.
- 22- Turner, J.S. 1979. Buoyancy effects in fluids. London, U.K., Cambridge University Press.
- 23- Wilkinson, D.L. and I.R Wood. 1971. A rapidly varied flow phenomenon in a two-layer flow. *J. Fluid Mech.* 47: 241-256.
- 24- Yih, C.S. and C.R. Guha. 1955. Hydraulic jump in a fluid system of two layers. *Tellus*. 7: 358-366.
- limited depth. *J. Hydraul. Eng.* 109: 722–740.
- 5- Carollo, F.G. and V. Ferro. 2004. Determinazione delle altezze coniugate del risalto libero su fondo liscio e scabro. *Rivista di Ingegneria Agraria*. 35: 1–11 (in Italian).
- 6- Carollo, F.G., V. Ferro and V. Pampalone. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *J. Hydraul. Eng.* 133: 989-999.
- 7- Carollo, F.G., V. Ferro and V. Pampalone. 2009. A new solution of classical hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 135: 527-531.
- 8- Dallimore, C.J., J. Imberger and T. Ishikawa. 2001. Entrainment and turbulence in a saline underflow in Lake Ogawara. *J. Hydraul. Eng.* 127: 937–948.
- 9- Ellison, T.H. and J.S. Turner. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *J. Fluid Mech.* 6: 423-448.
- 10- Firoozabadi, B., B. Farhanieh and M. Rad. 2003. Hydrodynamics of two-dimensional, laminar turbid density currents. *J. Hydraul. Res.* 41: 623-630.
- 11- Fozdar, F.M., G. Parker and J. Imberger. 1985. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics. *J. Phys. Oceanogr.* 15: 1557–1569.
- 12- Garcia, M.H. 1993. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. *J. Hydraul. Eng.* 119: 1094-1117.
- 13- Hartel, C., F. Carlsson and M. Thunblom. 2000(a). Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. Part 2: The Lobe-and-Cleft instability. *J. Fluid Mech.* 418: 213-229.
- 14- Hartel, C., E. Meiburg and F. Necker. 2000(b). 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.*

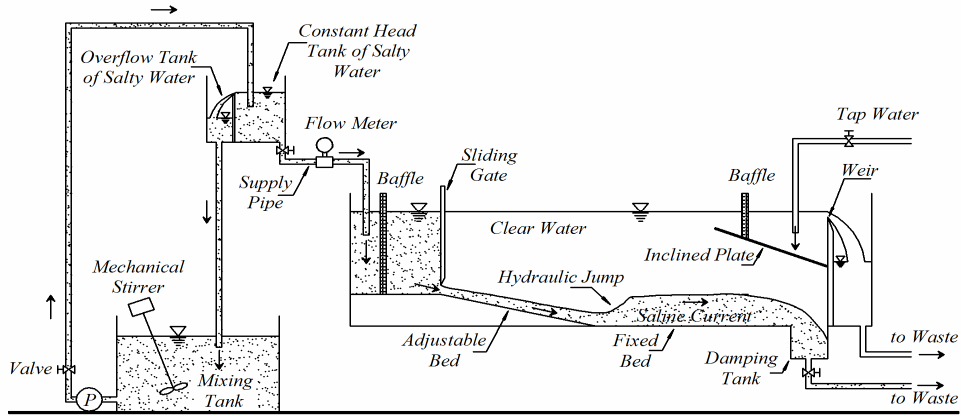
پیوست‌ها



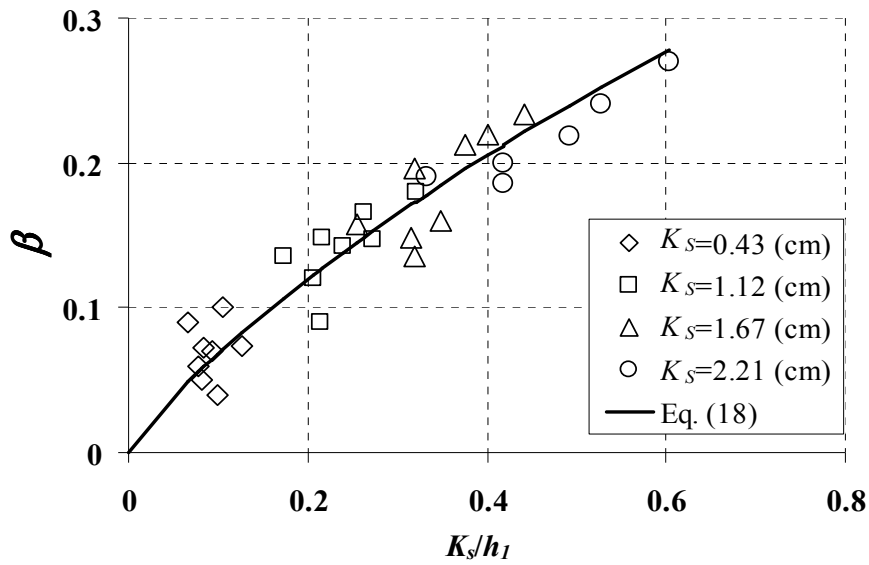
شکل ۱- طرح‌واره‌ی یک جریان چگالی توسعه‌یافته روی یک بستر شیب‌دار.



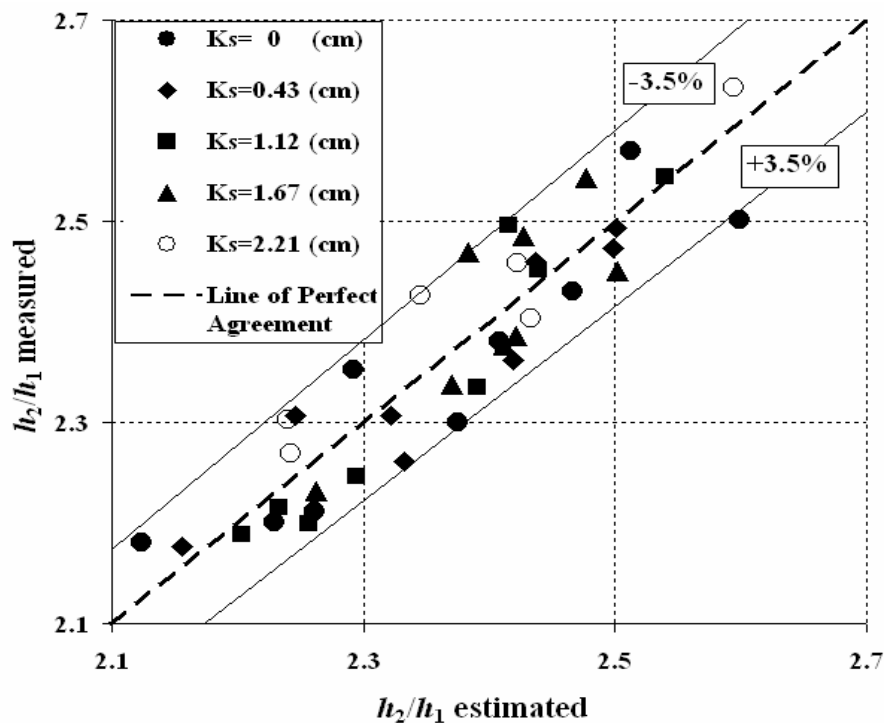
شکل ۲- پرش چگالی داخلی با در نظر گرفتن بستر زبر.



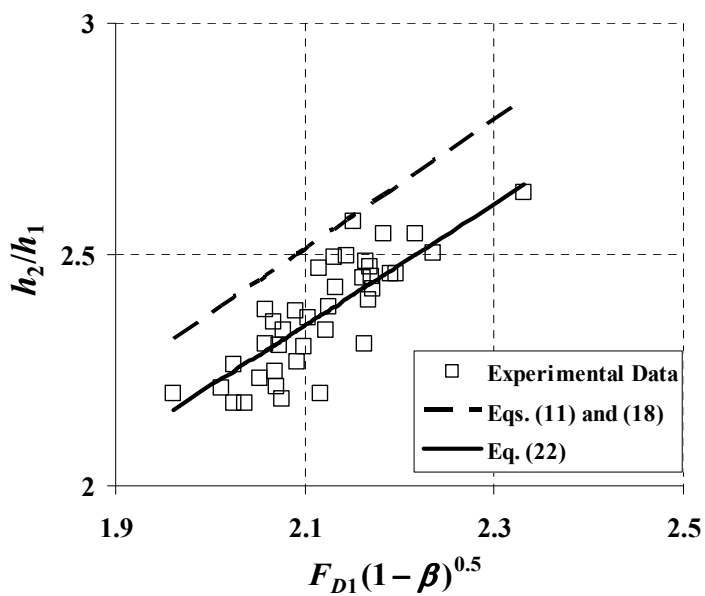
شکل ۳- طرح‌واره‌ی نهر پایدار آزمایشگاهی به همراه ملحقات آن (بدون مقیاس).



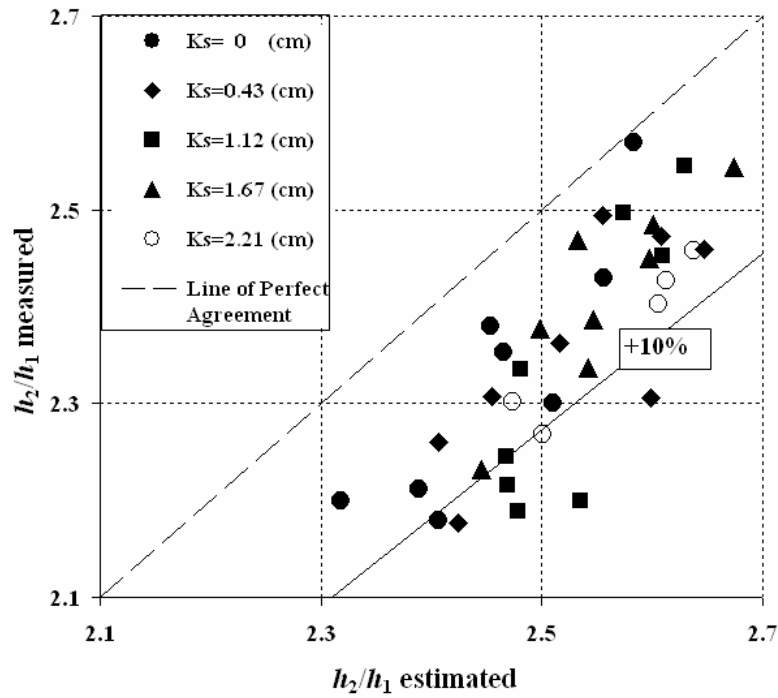
شکل ۴- تغییرات ضریب تنش برشی بستر، β ، نسبت به زبری نسبی، K_s/h_1 .



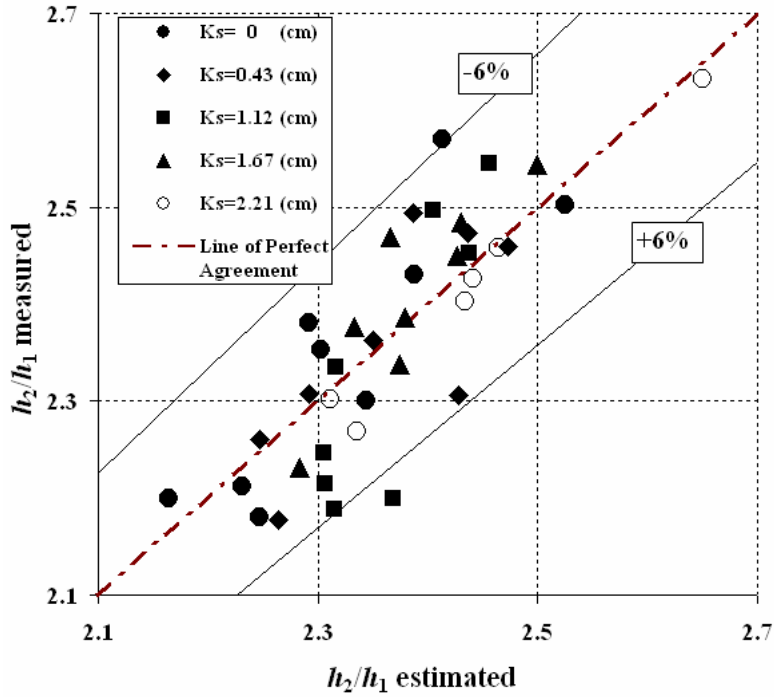
شکل ۵- مقایسه‌ی مقادیر h_2/h_1 محاسبه شده با کاربرد روابط ۸ و ۱۸ با مقادیر آزمایشگاهی.



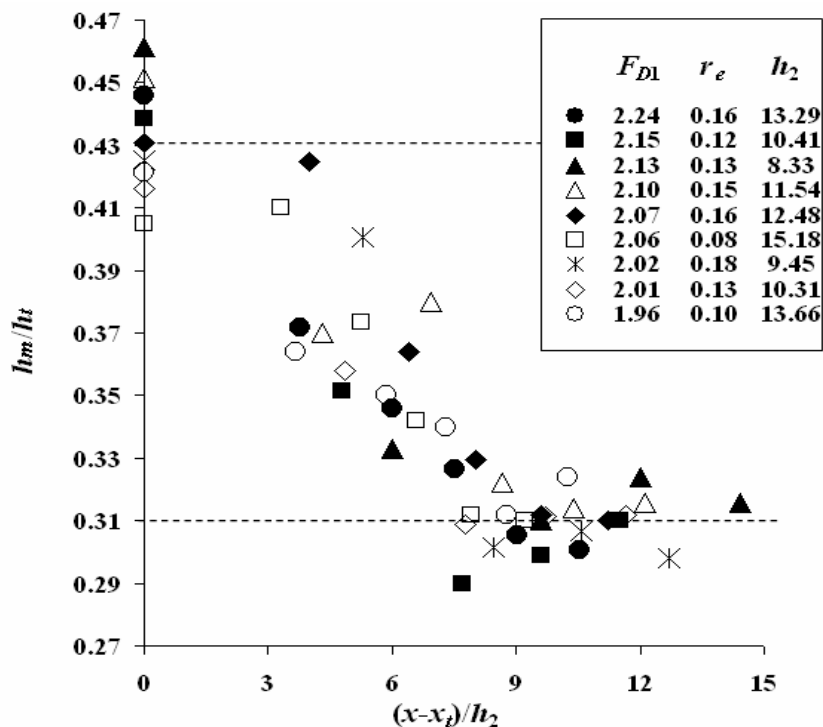
شکل ۶- تغییرات نسبت عمق مزدوج h_2/h_1 با توجه به فراسنج $F_{D1}(1-\beta)^{0.5}$.



شکل ۷- مقایسه‌ی مقادیر h_2/h_1 محاسبه شده با کاربرد روابط ۱۱ و ۱۸ با مقادیر h_2/h_1 آزمایشگاهی.



شکل ۸- مقایسه‌ی مقادیر h_2/h_1 محاسبه شده با کاربرد معادله‌ی ۲۲ با مقادیر h_2/h_1 آزمایشگاهی.



شکل ۹- تغییرات نسبت h_m/h_t با توجه به تغییرات فراسنج بدون بعد طولی $(x-x_i)/h_2$ در شرایط نبود زبری بستر.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات جریان چگالی ورودی به نهر پایدار.

h_0 (cm)	Q_0 (lit/s)	C_0 $\times 10^3$	S_a (%)	K_s (cm)	Ri_0	Re_0	$(T_T - T_R)$ ($^{\circ}C$)
۴.۳.۲	۱/۷، ۱/۵، ۱/۳، ۱	۹/۰۹۱، ۴/۸۴۸	۱۲، ۱۰، ۸	۲/۲۱، ۱/۶۷، ۱/۱۲، ۰/۴۳، ۰	۰/۳۷-۰/۱۰	۲۲۷۳-۳۸۶۴	± 0.1

جدول ۲- خلاصه‌ای از نتایج آزمایشگاهی پرش‌های ثقلی شور.

$\frac{K_s}{h_1}$	Ri_1	Ri_2	$\frac{q_1}{q_0}$	$\frac{q_2}{q_1}$	$\frac{q_3}{q_2}$	$\frac{h_2}{h_1}$
۰-۰/۶۰	۰/۱۵-۰/۲۶	۱/۱۳-۲/۶۱	۱/۵۸-۱/۹۴	۱/۰۸-۱/۲۴	۱/۰۴-۱/۱۵	۲/۱۸-۲/۶۳