

بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و مشخصات دلتا تحت جریان دائمی و غیردائمی

کاظم گمار¹، مسعود قدسیان^{2*} و سیدعلی ایوبزاده³

1- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*ghods@modares.ac.ir

چکیده - در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تشکیل و توسعه‌ی دلتا و تأثیر متقابل الگوی جریان و رسوب در مخزن تحت جریان دائمی و غیردائمی آب و رسوب پرداخته می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که علی‌رغم وجود تقارن کامل در هندسه و شرایط هیدرولیکی مدل، جریان در ورودی مخزن به صورت تصادفی به یکی از طرفین منحرف شده و یک جریان نامتقارن، اما پایدار در ورودی مخزن ایجاد می‌شود. ورود رسوبات و آغاز رسوب‌گذاری در مخزن، منجر به ناپایدار شدن جریان و تغییر جهت جریان خواهد شد. ناپایداری جریان در حالت غیردائمی بیشتر از جریان دائمی است. نتایج نشان داد که با توسعه‌ی دلتا، انحراف دلتا کاهش می‌یابد و به سمت تقارن پیش می‌رود. پیشروی دلتا به صورت تناوب توسعه‌ی طولی-عرضی بوده و حداکثر میزان کشیدگی دلتا در مراحل ابتدایی آن برابر 0/8 است که با توسعه‌ی دلتا از میزان آن کاسته می‌شود. رابطه‌ای برای محاسبه-ی زمان تغییر جهت جریان بر حسب پارامتر مشخصه‌ی هیدروگراف استخراج شد. برای بررسی الگوی ته‌نشینی رسوبات پارامترهای بدون بعدی به نام طول پیشروی (X_r^*)، نسبت انحراف (ψ) و کشیدگی دلتا (η) معرفی شدند و رابطه‌ای برای تخمین طول پیشروی دلتا با استفاده از پارامترهای بدون بعد مؤثر به دست آمد.

کلید واژگان: الگوی جریان، دلتا، مخزن، جریان دائمی، جریان غیردائمی، رسوب‌گذاری.

1- مقدمه

پایین‌دست دلتا و نزدیک سد ته‌نشین شوند (Sloff, 1991). حرکت رسوبات ریزدانه به شکل جریان غلیظ تا بدنه‌ی سد می‌تواند ادامه داشته باشد. Fan and Morris (1992) فرایند رسوب‌گذاری در مخزن را به سه بخش اصلی تقسیم کردند. این بخش‌ها شامل ته‌نشینی دلتایی ذرات درشت دانه، ته‌نشینی ذرات ریزدانه در اثر جریان همگن و حمل و ته‌نشینی ذرات ریزدانه توسط جریان لایه‌ای است. بر این اساس با توجه به مکانیسم متفاوت ته‌نشینی رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه در مخزن، تحقیقات انجام شده در مورد رسوب‌گذاری در مخازن عموماً در دو دسته‌ی اصلی انجام گرفته‌اند. دسته‌ی اول به بررسی

پیش‌بینی الگوی ته‌نشینی رسوبات به عنوان تابعی از مشخصات هندسی مخزن، شرایط هیدرولیکی جریان و مشخصات رسوب از مسائل مهم در طراحی و مدیریت مخازن سدها می‌باشد. رسوباتی که عمدتاً توسط سیلاب‌ها وارد مخزن سد می‌شوند، سالیانه یک درصد از حجم مخازن را کاهش می‌دهند. افزایش سطح مقطع جریان در ورود به مخزن باعث کاهش نیروی درگ وارد بر رسوبات بستر شده و ذرات درشت دانه در قسمت بالایی مخزن ته‌نشین شده و دلتا را تشکیل می‌دهند. کاهش تلاطم و سرعت جریان باعث می‌شود که ذرات ریزدانه در

ته‌نشینی رسوبات درشت‌دانه و تشکیل دلتا پرداخته‌اند و دسته‌ی دوم، حرکت و ته‌نشینی ذرات ریزدانه و جریان غلیظ در مخزن را بررسی کرده‌اند (مانند زاپری و همکاران (1395)، منصوره هفشجانی و همکاران (1395)، زینی - وند و همکاران (1396)، کردنائیج و همکاران (1396)، کشتکار و همکاران (1396)). برخی محققین نیز تأثیر جریان غلیظ بر مشخصات دلتا را مورد بررسی قرار داده‌اند (مانند Lai and Capart, Kostic and Parker (2003), 2007, 2008, 2009) و یوسفوند و همکاران (1394)). آنچه در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد، نحوه‌ی تشکیل و توسعه‌ی دلتای رسوبی در مخزن است. بنابراین، تحقیق حاضر در دسته‌ی اول مطالعات رسوب‌گذاری مخزن قرار می‌گیرد. در زمینه‌ی بررسی ته‌نشینی رسوبات درشت‌دانه و تشکیل دلتا در مخزن، تحقیقات مختلفی به روش‌های آزمایشگاهی، بررسی‌های میدانی و یا با استفاده از مدل‌های ریاضی انجام شده‌است که اکثر این تحقیقات در دبی ثابت آب و رسوب انجام شده‌اند. از جمله‌ی این تحقیقات می‌توان به (Jugovic et al. و Shieh et al. (2001) و al. (2005) اشاره کرد که مراحل مختلف توسعه‌ی دلتا در مخزن را با معرفی فاکتور شکل دلتا بررسی کردند. بررسی الگوی جریان و رسوب در مخزن مستطیلی در شرایط مختلف هندسی توسط مدل آزمایشگاهی در کنار ارائه‌ی مدل عددی و تحلیلی توسط (Dewals, Kantoush (2008) و Camnasio et al. (2008) et al. (2010a,b) و (2011, 2013) انجام شد. آنها وقوع جریان نامتقارن را علی‌رغم وجود هندسه‌ی متقارن مدل آزمایشگاهی گزارش دادند. Mamizadeh et al. (2012) رابطه‌ی رگرسیون خطی را برای پیش‌بینی طول پیشروی پایه و تاج دلتای رسوبی در مخزن با بازشدگی تدریجی ارائه دادند. نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی خسروپور و همکاران (1387) نشان داد که تغییرات سرعت حرکت دلتای رسوبی در مخزن نسبت به عمق آب حساس‌تر از سایر پارامترهای مورد مطالعه است. صفی‌یاری و بنی - هاشمی (1388) در شرایط آزمایشگاهی مشابه، معادله‌ی بدون بعدی برای پیشروی دلتای رسوبی ارائه دادند. مامی - زاده و همکاران (1387) نشان دادند که در بازشدگی

ناگهانی، توزیع جریان و رسوب در مخزن نامتقارن است و با کاهش زاویه‌ی بازشدگی (کمتر از 9/2 درجه)، جریان - متقارن در مخزن تشکیل می‌شود. حمزه قصاب‌سرای (1388) نشان داد که الگوی جریان در بازشدگی تدریجی مخزن، نامتقارن بوده و ته‌نشینی رسوبات باعث افزایش عدم تقارن جریان می‌شود. صدیق‌کیا و همکاران (1395) نشان دادند که با افزایش میزان غیریکنواختی ذرات، سرعت پیشروی و زاویه‌ی پیشانی دلتا کاهش می‌یابند. در همه‌ی تحقیقات ذکر شده، از دبی ثابت آب و رسوب (جریان دائمی) در انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. این در حالی است که آمار نشان می‌دهد عمده حجم رسوبات، توسط سیلاب‌ها (جریان غیردائمی) به مخزن سد وارد می‌شود (اشرف واقفی، 1387). به طور مثال رژیم رودخانه‌ی میناب از نوع سیلابی بوده و بیش از 90 درصد رسوبات در طول جریان سیلاب به مدت چند روز در سال وارد مخزن می‌شود (عسگری، 1390). تحقیقات اندکی مشخصات دلتا را در شرایط سیلابی بررسی کرده‌اند، مانند صدیق‌کیا و همکاران (1391) و حیدری و همکاران (1392) که در شرایط مشابه آزمایشگاهی، اثر سیلاب و غیریکنواختی ذرات رسوب را بر سرعت پیشروی و مشخصات دلتا بررسی کردند. اثر سیلاب در این تحقیقات به صورت محدود بررسی شده است، به این صورت که ابتدا دلتای رسوبی توسط جریان دائمی تشکیل شده و سپس با عبور هیدروگراف جریان (بدون رسوب)، تغییرات مشخصات دلتا بررسی می‌شد. از سوی دیگر، تحقیقات متعدد انجام شده در زمینه‌ی انتقال رسوب رودخانه در جریان غیردائمی (مانند Qu (2003), Lee et al. (2004), Karimae Tabarestani and Bombar et al. (2011) و Zarrati (2014) و کاشفی‌پور و همکاران (1388))، نشان داد که غیردائمی بودن جریان تأثیر مهمی بر الگوی جریان و حرکت رسوبات دارد و استفاده از معادلات انتقال رسوب جریان دائمی برای جریان غیردائمی نتایج رضایت‌بخشی نمی‌دهد. بنابراین بررسی رفتار جریان و رسوب در شرایط غیردائمی از جمله در مخازن سدها دارای اهمیت است. از این رو در تحقیق حاضر الگوی جریان و رسوب در شرایط غیردائمی جریان در مخزن سد به روش آزمایشگاهی مورد

بررسی قرار گرفته است.

مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی و همچنین مشخصات فیزیکی آب و رسوب در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. همچنین مقدار عمق آب در مخزن همواره مقداری ثابت بود. بنابراین با صرف نظر از پارامترهای ثابت و همچنین پارامترهای غیرمؤثر (مانند لزجت در جریان آشفته)، نتیجه‌ی آنالیز ابعادی برای جریان دائمی به شکل رابطه‌ی (2) است.

$$\left(\frac{X}{h_w}\right) = f\left(\frac{u_w}{\sqrt{gh_w}}, \frac{u_w t}{h_w}, \frac{V_s}{dh_w^2}\right) \quad (2)$$

پارامتر سمت چپ تساوی، طول مشخصه‌ی بدون بعد دلتا (X^*) را نشان می‌دهد. پارامترهای سمت راست تساوی به ترتیب نشان‌دهنده‌ی عدد فرود جریان (Fr)، زمان بدون بعد (T^*) و حجم بدون بعد رسوبات (V_s^*) هستند. به این ترتیب رابطه‌ی (2) را می‌توان به شکل رابطه (3) بازنویسی کرد.

$$X^* = f(Fr, T^*, V_s^*) \quad (3)$$

در جریان غیردائمی، علاوه بر متغیرهای موجود در جریان دائمی، مشخصات هیدروگراف ورودی نیز از متغیرهای مؤثر در مسأله هستند، که شامل: سرعت جریان پایه و اوج در کانال بالادست (به ترتیب u_p, u_0)، عمق جریان پایه و اوج در کانال بالادست (به ترتیب h_p, h_0)، زمان رسیدن به اوج و زمان تداوم هیدروگراف (به ترتیب t_d, t_p) می‌باشند. ارتباط متغیرهای مستقل و وابسته در جریان غیردائمی در رابطه‌ی (4) نشان داده شده است.

$$X = f(B_c, W_r, L_r, \theta, S_c, S_r, u_0, u_p, h_0, h_p, h_r, t, t_p, t_d, Q_s, d, \rho_w, \rho_s, \mu_w, g) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن پارامترهای u_p, h_p, ρ_w به عنوان متغیرهای تکراری، اعداد بدون بعد در جریان غیردائمی به شرح زیر هستند.

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{X}{h_p}, \quad \pi_2 = \frac{B_c}{h_p}, \quad \pi_3 = \frac{W_r}{h_p} \\ \pi_4 &= \frac{L_r}{h_p}, \quad \pi_5 = \frac{h_r}{h_p}, \quad \pi_6 = \frac{d}{h_p} \\ \pi_7 &= \frac{h_0}{h_p}, \quad \pi_8 = \frac{u_0}{u_p}, \quad \pi_9 = \frac{t_p}{t_d} \\ \pi_{10} &= \theta, \quad \pi_{11} = S_c, \quad \pi_{12} = S_r, \quad \pi_{13} = \frac{u_p h_p \rho_w}{\mu_w} \\ \pi_{14} &= \frac{\rho_s}{\rho_w}, \quad \pi_{15} = \frac{u_p}{\sqrt{gh_p}}, \quad \pi_{16} = \frac{u_p t}{h_p} \end{aligned}$$

2- مواد و روش‌ها

2-1- آنالیز ابعادی

پیش از طراحی آزمایش‌ها نیاز است که متغیرهای مؤثر در مسأله شناسایی شده و پارامترهای بدون بعد استخراج شوند که این امر به روش تحلیل ابعادی پی-باکینگهام انجام شده است. طول مشخصه‌ی دلتا (X) تابع پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و محیطی مختلفی است. پارامترهای هندسی شامل عرض کانال بالادست (B_c)، عرض انتهایی مخزن (W_r)، طول مخزن (L_r)، زاویه‌ی بازشدگی مخزن (θ)، شیب کف کانال (S_c) و شیب کف مخزن (S_r) است. پارامترهای هیدرولیکی و محیطی در جریان دائمی شامل سرعت جریان (u_w)، عمق جریان در کانال بالادست (h_w)، زمان آزمایش (t)، دبی رسوب (Q_s)، عمق آب در مخزن (h_r)، اندازه ذرات رسوب (d)، جرم مخصوص آب و رسوب (به ترتیب ρ_w و ρ_s)، لزجت آب (μ_w) و شتاب ثقل (g) است. بنابراین:

$$X = f(B_c, W_r, L_r, \theta, S_c, S_r, u_w, h_w, h_r, t, Q_s, d, \rho_w, \rho_s, \mu_w, g) \quad (1)$$

با در نظر گرفتن پارامترهای u_w, h_w, ρ_w به عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون بعد زیر حاصل می‌شوند.

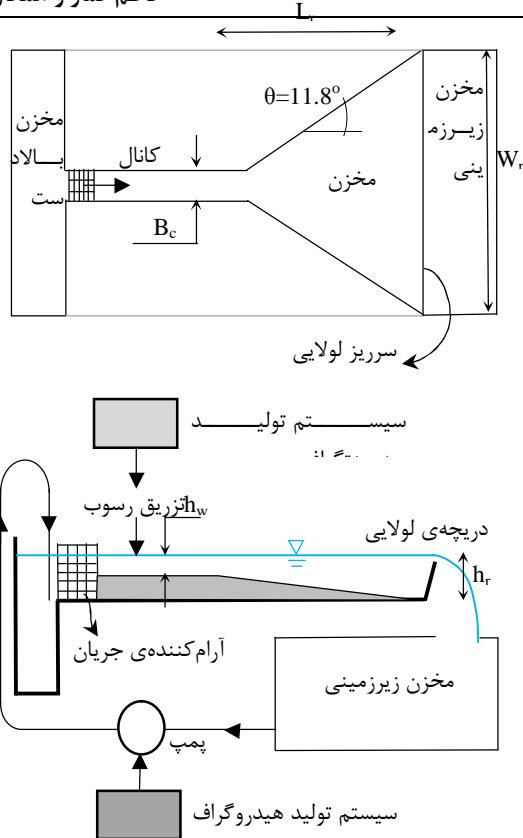
$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{X}{h_w}, \quad \pi_2 = \frac{B_c}{h_w}, \quad \pi_3 = \frac{W_r}{h_w}, \quad \pi_4 = \frac{L_r}{h_w} \\ \pi_5 &= \frac{h_r}{h_w}, \quad \pi_6 = \frac{d}{h_w}, \quad \pi_7 = \theta, \quad \pi_8 = S_c \\ \pi_9 &= S_r, \quad \pi_{10} = \frac{u_w h_w \rho_w}{\mu_w}, \quad \pi_{11} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \\ \pi_{12} &= \frac{u_w}{\sqrt{gh_w}}, \quad \pi_{13} = \frac{u_w t}{h_w}, \quad \pi_{14} = \frac{Q_s}{\rho_w u_w h_w^2} \end{aligned}$$

از ترکیب پارامترهای π_6 و π_{14} و پارامترهای π_{13} و π_{11} پارامتر π'_{14} به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\pi'_{14} = \frac{Q_s t}{(\rho_s - \rho_w) dh_w^2} = \frac{V_s}{dh_w^2}$$

در این رابطه برابر با کل حجم رسوبات ورودی به مخزن است.

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای مؤثر در مسأله و به منظور ساده‌سازی و امکان بررسی دقیق‌تر پارامترهای اصلی،



شکل 1 پلان و نمای مدل آزمایشگاهی (بدون مقیاس)

این مدل در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده و شامل اجزای زیر است: مخزن بالادست با سطح مقطع مستطیلی به همراه آرام کننده جریان، کانال مستقیم، مدل مخزن سد به شکل بازشدگی در کف و دیواره‌های کانال، سرریز لولایی به عرض 2 متر (به عنوان مدل سد)، مخزن آب زیرزمینی، سیستم تولید جریان (دائمی و غیردائمی)، سیستم تزریق رسوب (دائمی و غیردائمی)، مخزن رسوب و همچنین ابزار کنترل، اندازه‌گیری و ثبت. کانال بالادست با طول 3 متر، عرض 0/3 متر و شیب کف 0/007 به عنوان مدل رودخانه ساخته شد. مدل مخزن سد که به صورت یک بازشدگی در ادامه‌ی کانال بالادست ساخته شد، دارای عرض ابتدایی 0/3 متر، عرض انتهایی 2 متر و طول 5 متر است. شیب کف مخزن برابر 0/075 و زاویه‌ی بازشدگی دیواره‌ها 11/8 درجه است. جنس کف کانال و مخزن از ورق استیل و دیواره‌ها از شیشه هستند.

همان‌طور که بیان شد، آزمایش‌ها در دو حالت جریان دائمی (دبی ثابت) و غیردائمی انجام شدند. جریان آب از

$$\pi_{17} = \frac{u_p t_p}{h_p}, \quad \pi_{18} = \frac{Q_s}{\rho_w u_p h_p^2}$$

از ترکیب پارامتر π_7 با پارامتر π_{17} پارامتر جدید π'_7 به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\pi'_7 = \frac{(h_p - h_0)}{u_p t_p}$$

از ترکیب پارامتر π_{17} با پارامترهای π_{17} ، π_8 ، π_7 به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\pi'_{17} = (u_p h_p - u_0 h_0) \times \frac{t_p}{h_p^2} = \frac{V_f}{h_p^2}$$

در این رابطه، V_f برابر با حجم هیدروگراف بدون جریان پایه، در واحد عرض کانال است.

همچنین از ترکیب پارامتر π_{18} با پارامترهای π_{14} ، π_6 و π_{16} ، پارامتر π'_{18} به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\pi'_{18} = \frac{Q_s t}{(\rho_s - \rho_w) dh_p^2} = \frac{V_s}{dh_p^2}$$

در این رابطه برابر با کل حجم رسوبات ورودی به مخزن است.

در جریان غیردائمی، هیدروگراف‌ها به شکل مثلثی متقارن طراحی شده و مقدار دبی جریان پایه همواره مقداری ثابت بود. بنابراین با صرف نظر از پارامترهای ثابت و همچنین پارامترهای غیرمؤثر (مانند لزجت در جریان آشفتگی)، نتیجه‌ی آنالیز ابعادی برای جریان غیردائمی به شکل رابطه‌ی (5) است.

$$\left(\frac{X}{h_p}\right) = f\left(\frac{u_p}{\sqrt{gh_p}}, \frac{u_p t}{h_p}, \frac{(h_p - h_0)}{u_p t_p}, \frac{V_f}{h_p^2}, \frac{V_s}{dh_p^2}\right) \quad (5)$$

پارامتر سمت چپ تساوی، طول مشخصه‌ی بدون بعد دلتا (X^*) را نشان می‌دهد. پارامترهای سمت راست تساوی به ترتیب نشان‌دهنده‌ی عدد فرود جریان در دبی اوج (Fr_p)، زمان بدون بعد (T^*)، پارامتر ناماندگاری هیدروگراف (P)، حجم بدون بعد هیدروگراف (V_f^*) و حجم بدون بعد رسوبات (V_s^*) هستند. به این ترتیب رابطه‌ی (5) را می‌توان به شکل رابطه (6) بازنویسی کرد.

$$X^* = f(Fr_p, T^*, P, V_f^*, V_s^*) \quad (6)$$

2-2- معرفی مدل آزمایشگاهی

طرح مدل آزمایشگاهی در شکل 1 نشان داده شده است.

دبی سنج، دور پمپ را به نحوی تنظیم می‌کند که دبی مورد نظر کاربر از پمپ خارج شود و به این ترتیب قادر است هیدروگراف جریان را تولید نماید. اطلاعات دبی ورودی توسط کاربر و همچنین دبی قرائت شده توسط دبی سنج به صورت لحظه‌ای در کامپیوتر ذخیره می‌شوند. به این ترتیب با مقایسه‌ی این دو داده، می‌توان خطای سیستم را تعیین کرده و سپس با تغییر ضرایب مربوطه در قسمت نرم‌افزاری، سیستم را کالیبره کرده و دقت مطلوب را به دست آورد.

برای تزریق رسوب، دستگاهی طراحی و ساخته شد که روی کانال بالادست نصب شده و قادر است بر اساس اطلاعات ورودی کاربر، رسوبات خشک را از مخزن رسوب با نرخ دلخواه به صورت دائمی یا غیردائمی به جریان تزریق کند. این دستگاه شامل مخزن رسوب، دریچه‌ی تخلیه، موتور شماره‌ی 1 برای تنظیم میزان بازشدگی دریچه و موتور شماره‌ی 2 برای ایجاد لرزش در دریچه‌ی تخلیه و خروج بهتر رسوبات است. به منظور کالیبره کردن این دستگاه، از یک ترازوی دیجیتال با دقت ± 1 گرم و یک دستگاه دوربین فیلمبرداری با سرعت 30 فریم بر ثانیه استفاده شد. نحوه‌ی کالیبره کردن به این صورت بود که رسوبات خارج شده از دستگاه روی ترازوی دیجیتال تخلیه شده و همزمان، از عدد قرائت شده‌ی ترازو فیلمبرداری می‌شد. سپس با بررسی دقیق فیلم ضبط شده، وزن تجمعی رسوب خارج شده نسبت به زمان محاسبه می‌شد و سپس سدیمنتگراف خروجی ترسیم می‌شد. با مقایسه‌ی سدیمنتگراف ورودی و خروجی، سرعت موتورهای دستگاه به نحوی تنظیم و کنترل می‌شد که مقدار مورد نظر رسوب (سدیمنتگراف مطلوب) از دستگاه خارج شود.

2-3- شرح آزمایش‌ها

مشخصات آزمایش‌های جریان دائمی و جریان غیردائمی در جدول‌های 1 و 2 نشان داده شده است. نام‌گذاری آزمایش‌های جریان دائمی به این صورت است که با حرف K شروع شده و عدد بعدی نشان‌دهنده‌ی دبی جریان بر حسب لیتر بر ثانیه است.

مخزن بالادست وارد کانال شده و رسوبات خشک نیز (به حالت دبی ثابت یا متغیر) از بالا به داخل کانال تزریق می‌شد. محل تزریق رسوب در فاصله‌ی 2 متری در بالادست بازشدگی مخزن قرار داشت. مشخصات جریان و رسوب در همه‌ی آزمایش‌ها به نحوی در نظر گرفته شد که رسوبات به صورت بار بستر حرکت کرده و در عین حال رسوب‌گذاری در کانال بالادست انجام نگیرد. به این ترتیب همه‌ی حجم رسوبات در دهانه‌ی ورودی مخزن ته‌نشین شده و در آنجا دلتای رسوبی را تشکیل می‌دادند. دبی بحرانی یا حداقل دبی لازم برای حرکت رسوبات بستر برابر $Q_s = 10 \text{ l/s}$ به دست آمد. ذرات سیلیس به عنوان رسوبات غیرچسبنده با دانه‌بندی یکنواخت با ضریب یکنواختی $C_u = 1/6$ و انحراف معیار هندسی $\sigma_g = 1/4$ مورد استفاده قرار گرفت. قطر متوسط رسوبات با توجه به معیار Van Rijn (1993) برابر 480 میکرومتر انتخاب شد، به نحوی که حرکت رسوبات به صورت بار بستر باشد.

در حین و پس از انجام آزمایش، مشخصات الگوی جریان و همچنین مشخصات هندسی دلتای تشکیل شده ثبت می‌شد. برای برداشت تراز رسوبات از یک دستگاه برداشت مکانیکی نقطه‌ای¹ با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر استفاده شد. همچنین از یک دستگاه دوربین عکاسی و فیلمبرداری با سرعت 30 فریم بر ثانیه برای ثبت مشخصات دلتا و جریان آب در کانال و مخزن استفاده شد. دبی جریان از طریق دبی سنج اولتراسونیک با دقت 1 درصد اندازه‌گیری شده و سپس اطلاعات آن به سیستم تولید جریان منتقل می‌شد.

برای تولید جریان و همچنین تشکیل هیدروگراف، از سیستمی که پیشتر در آزمایشگاه هیدرولیک طراحی و ساخته شده بود، استفاده شد. این سیستم شامل برنامه‌ی نرم‌افزاری، کامپیوتر، پمپ، دبی سنج و تابلو برق است. با اعمال تغییرات و اصلاحاتی در بخش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری این سیستم، امکان تولید انواع مختلف هیدروگراف جریان با دقت مطلوب فراهم شد. این سیستم از سویی اطلاعات جریان را به عنوان ورودی از کاربر دریافت کرده و از سوی دیگر اطلاعات برداشت شده توسط دبی سنج را دریافت می‌کند. سپس با مقایسه‌ی لحظه به لحظه‌ی دبی ورودی توسط کاربر و دبی قرائت شده‌ی

1. Point gage

جدول 1 مشخصات آزمایش‌های جریان دائمی

سری آزمایش	Q_w (l/s)	Q_s (g/s)	زمان‌های آزمایش (min)
S-12	12	0/6	444/4, 333/3, 222/2, 1666/7, 111/1, 83/3, 55/6, 27/8
S-14	14	1/5	177/8, 133/3, 88/9, 66/7, 44/4, 33/3, 22/2, 11/1
S-16	16	5/0	53/3, 40/0, 26/7, 20/0, 13/3, 10/0, 6/7, 3/3
S-18	18	10/5	25/4, 19/0, 12/7, 9/5, 6/3, 4/8, 3/2, 1/6
S-20	20	19/0	14/0, 10/5, 7/0, 5/3, 3/5, 2/6, 1/8, 0/9

جدول 2 مشخصات آزمایش‌های جریان غیردائمی

سری آزمایش	m_s (kg)	Q_0 (l/s)	Q_p (l/s)	t_d (min)	تعداد تکرار هیدروگراف
U-H0.5	0/5	10	15/3	6	32, 28, 24, 20, 16, 12, 8, 6, 4, 2
U-H1	1	10	17/5	6	16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 3, 2, 1
U-H2	2	10	20	6	8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1
U-H4	4	10	20	12	4, 3, 2, 1
U-H8	8	10	20	24	2, 1

با انجام آزمایش‌های مقدماتی مشخص شد که در آزمایش‌های طولانی‌تر (تا تزریق 32 کیلوگرم رسوب)، مشخصات دلتای رسوبی تغییرات زیادی نخواهد داشت. بنابراین زمان لازم برای تزریق 16 کیلوگرم رسوب به عنوان حداکثر زمان مناسب برای آزمایش‌ها انتخاب شد. همچنین هر سری آزمایش جریان دائمی نیز شامل چندین آزمایش با مدت زمان‌های مختلف است. مدت زمان آزمایش‌های جریان دائمی به نحوی انتخاب شد که کل رسوب تزریق شده متناسب با آزمایش‌های جریان غیردائمی باشد.

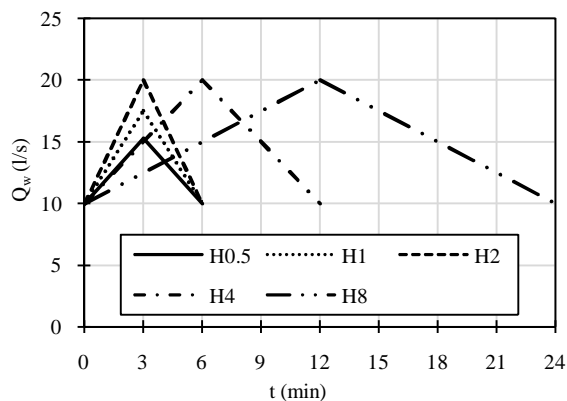
با توجه به اینکه مشخصات هیدروگراف در محل نصب دبی سنج تا رسیدن به ابتدای کانال تغییر می‌نماید، بنابراین می‌بایست قبل از انجام آزمایش‌ها روندیابی سیلاب در کانال آزمایشگاهی برای تمامی هیدروگراف‌ها انجام گیرد. برای این امر از رابطه‌ی بقای جرم در مخزن (روابط 7 و 8) استفاده شد.

$$Q(t) - I(t) = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (8)$$

در این رابطه $Q(t)$ دبی آب (قرائت شده توسط دبی‌سنج)، $I(t)$ دبی ورودی به ابتدای کانال (در محل تزریق رسوب) و $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ تغییرات حجم آب در مخزن بالادست نسبت به زمان

آزمایش‌های جریان غیردائمی با حرف U شروع شده و عبارت بعدی نوع هیدروگراف را مشخص می‌کند. این هیدروگراف‌ها که به شکل مثلثی متقارن هستند در شکل 2 نمایش داده شده‌اند. دبی پایه برای آزمایش‌های جریان غیردائمی برابر 10 لیتر بر ثانیه (برابر با دبی بحرانی) است. هر سری آزمایش جریان غیردائمی، شامل چندین آزمایش با تعداد تکرارهای مختلف از هر هیدروگراف است که بصورت متوالی وارد مخزن می‌شوند. حداقل تعداد هیدروگراف برابر 1 عدد و حداکثر آن برابر با تعداد لازم برای تزریق 16 کیلوگرم رسوب به داخل کانال است.



شکل 2 هیدروگراف‌های مختلف در آزمایش‌های غیردائمی

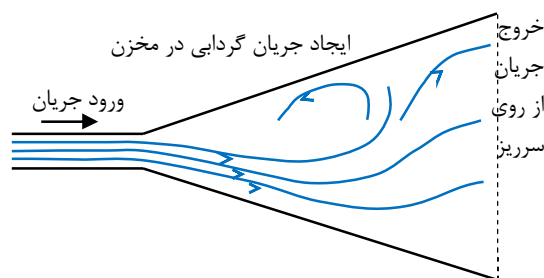
بعد از انجام آزمایش و قطع جریان آب و رسوب، ابتدا آب موجود در مخزن از طریق سیفون، از بالادست و پایین دست به آرامی تخلیه می‌شد، به نحوی که باعث به هم خوردگی شکل دلتا نشود. پس از تخلیه‌ی آب، اقدام به برداشت مشخصات هندسی دلتا از جمله میزان پیشروی و رقوم ارتفاعی سطح دلتا می‌شد.

3- نتایج و بحث

3-1- الگوی جریان

الگوی جریان داخل مخزن بدون تزریق و ته‌نشینی رسوبات، با انجام چندین آزمایش مقدماتی بررسی شد. برای مشاهده‌ی جهت جریان، از نوارهای رنگی شناور در سطح آب استفاده شد. همان‌طور که شکل 4 نشان می‌دهد، با ورود جریان (بدون رسوب) به داخل مخزن، جریان به سمت دیواره‌ی مخزن منحرف شده و منجر به تشکیل جریان گردابی در مخزن می‌شود. جریان نامتقارن در مخزن در حالی ایجاد می‌شود که مشخصات هندسی مدل و مشخصات هیدرولیکی جریان ورودی کاملاً متقارن هستند.

دیگر مشخصه‌ی الگوی جریان در مخزن، تصادفی بودن جهت انحراف جریان است. بدین صورت که با ورود جریان به داخل مخزن، جریان به صورت تصادفی ممکن است به سمت چپ یا راست مخزن منحرف شود و با توجه به جهت انحراف جریان، گردابه‌ی ساعتگرد یا پادساعتگردی در مخزن شکل می‌گیرد. مشاهدات نشان داد که این جریان نامتقارن، پایدار است. به این معنی که با ادامه‌ی ورود جریان، جهت انحراف جریان تغییر نخواهد کرد.



شکل 4 طرح شماتیک انحراف جریان و ایجاد جریان گردابی در مخزن

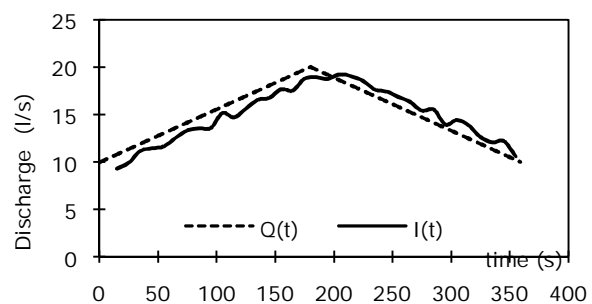
است. با اندازه‌گیری تغییرات سطح آب در مخزن بالادست نسبت به زمان، مقدار $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ از رابطه‌ی (8) حاصل می‌شود. در این رابطه A و h به ترتیب سطح مقطع و عمق آب در مخزن بالادست هستند. با تکرار عملیات فوق و استفاده از روش سعی و خطا، مشخصات هیدروگراف ورودی به نرم‌افزار $(Q(t))$ به نحوی تعیین می‌شد تا هیدروگراف مورد نظر در ابتدای کانال $(I(t))$ ایجاد شود. در شکل 3 نمونه‌ای از روندیابی سیلاب نشان داده شده است.

در مرحله‌ی بعد نیاز بود که مقدار دبی رسوب در هر آزمایش و برای هر مقدار دبی جریان تعیین شود. برای این امر با انجام چندین آزمایش، رابطه‌ی دبی آب- دبی رسوب (رابطه‌ی 9) به دست آمد.

$$Q_s = 811.0 Q_w^{6.07} \quad (9)$$

در این رابطه Q_w دبی آب و Q_s دبی رسوب بر حسب مترمکعب بر ثانیه در واحد عرض کانال هستند. دبی رسوب برابر با حداکثر ظرفیت حمل جریان است و در واقع با تزریق این مقدار از رسوب، همه‌ی رسوبات توسط جریان حمل شده و وارد مخزن می‌شوند و در کانال بالادست ته‌نشینی رسوبات وجود ندارد.

مراحل انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که ابتدا مخزن سد تا تراز سطح دریچه‌ی لولایی پر از آب می‌گردید و پس از برقراری تعادل در جریان و ثابت شدن شرایط، جریان آب و رسوب به صورت همزمان وارد کانال شده و آزمایش آغاز می‌شد. مشخصات مختلف جریان و رسوب از جمله جهت انحراف جریان و تغییرات دلتای تشکیل شده بصورت کیفی و کمی در حین هر آزمایش ثبت می‌شد.



شکل 3 نمونه‌ای از روندیابی سیلاب در آزمایشگاه

داده شده است. اطلاعات این جدول نشان می‌دهد که در مقادیر اندک عدد رینولدز، تغییر جهت جریان وجود ندارد. اما با افزایش عدد رینولدز، پس از توسعه‌ی دلتا تا طول مشخصی (X_t')، تغییر جهت جریان ایجاد می‌شود که در نهایت به تقارن جریان می‌انجامد. علت این امر، پیشروی بیشتر جریان به درون مخزن و کاهش طول مخزن در نتیجه‌ی توسعه‌ی دلتا است.

محققانی همچون (Kantoush (2008, Dewals et al. (2008) و (Dufresne et al. (2010a,b) اثر طول مخزن را بر الگوی جریان به این صورت نشان دادند که با کاهش طول مخزن، الگوی جریان متقارن خواهد شد.

پارامترهای X_t' و T' در جدول 3 به ترتیب به معنی طول پیشروی دلتا و زمان در لحظه‌ی آغاز تغییر جهت جریان هستند که با روش آنالیز ابعادی شرح داده شده در بخش 1-2 بی بعد شده و با پارامترهای T^* و X_t^{*} نشان داده شده‌اند. پارامترهای T^* و X_t^{*} نشان می‌دهند که در شرایط مختلف جریان ورودی، تغییر الگوی جریان (و به تبع آن تغییر جهت دلتا) در چه زمان و مکانی از مخزن رخ خواهد داد. به بیان دیگر، این دو پارامتر نشان‌دهنده‌ی عکس العمل مخزن نسبت به جریان ورودی هستند و جهت برنامه‌ریزی مدیریتی و بهره‌برداری مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرند. تغییرات T^* و X_t^{*} برای آزمایش‌های جریان دائمی، نسبت به عدد فرود در شکل 5 نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان، حساسیت جریان نسبت به تغییر جهت افزایش یافته، به نحوی که انحراف جریان در زمان کمتر و در طول کمتری از پیشروی دلتا ایجاد می‌شود.

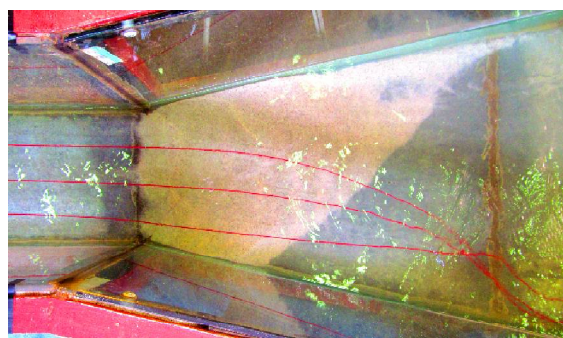
حتی تلاطم ایجاد شده ناشی از ورود هیدروگراف‌های متوالی، منجر به تغییر جهت انحراف در مخزن نمی‌شود و جریان از لحاظ جهت انحراف همواره پایدار باقی می‌ماند. وقوع جریان نامتقارن در تحقیقات دیگر محققان نیز گزارش شده است. بررسی‌های قبلی روی جریان در بازشدگی مجاری نشان داده‌اند که تنها در مقادیر اندک عدد رینولدز، جریان بعد از بازشدگی متقارن می‌ماند. با افزایش عدد رینولدز، نواحی جدادشدگی با طول نابرابر در دو طرف بازشدگی ایجاد می‌شود که این پدیده منجر به تشکیل جریان نامتقارن می‌شود (Cherdron et al., 1978, Fearn et al., 1990, Sobey, 1985, Durst et al., 1974, Shapira et al., 1990 و Chiang et al., 2000). نتایج حاصل از آزمایش‌های حاضر نیز مؤید این مطلب است. عدد رینولدز جریان ورودی (Re_r) در آزمایش‌های حاضر در محدوده‌ی 33000 تا 66000 است که در همه‌ی آزمایش‌ها، جریان نامتقارن ایجاد می‌شد. عدد رینولدز جریان در کانال بالادست از رابطه‌ی (10) به دست می‌آید.

$$Re_r = \frac{u_w h_w \rho_w}{\mu_w} \quad (10)$$

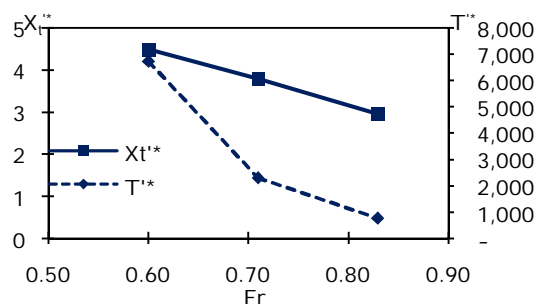
در مرحله‌ی بعد، الگوی جریان پس از ته‌نشینی رسوبات و تشکیل دلتا بررسی شد. با توجه به تصادفی بودن جهت جریان، به منظور یکسان سازی شرایط اولیه در همه‌ی آزمایش‌ها، جهت اولیه‌ی جریان قبل از شروع آزمایش به سمت چپ منحرف می‌شد و پس از تثبیت جهت جریان و سایر مشخصات هیدرولیکی، آزمایش شروع می‌شد. مشاهدات نشان داد که تزریق رسوب به جریان و ته‌نشینی رسوبات در مخزن می‌تواند منجر به ناپایدار شدن جریان و تغییر جهت جریان شود. اطلاعات مربوط به تغییر جهت جریان در آزمایش‌های جریان دائمی در جدول 3 نشان

جدول 3 مشخصات تغییر جهت جریان دائمی

نام آزمایش	Fr	T' (s)	X_t' (cm)	T^*	X_t^{*}	نحوه‌ی تغییر جهت جریان
S-12	0/43	-	-	-	-	عدم تغییر
S-14	0/51	-	-	-	-	عدم تغییر
S-16	0/60	600	34	6721	4/49	نوسانات زیاد و سپس تقارن
S-18	0/71	210	28	2301	3/78	نوسانات اندک و سپس تقارن
S-20	0/83	70	23	767	2/95	نوسانات اندک و سپس تقارن



شکل 6 انحراف جریان در ابتدای شاخه‌ی نزولی هیدروگراف



شکل 5 زمان و طول دلتا در لحظه‌ی تغییر جهت جریان در جریان دائمی

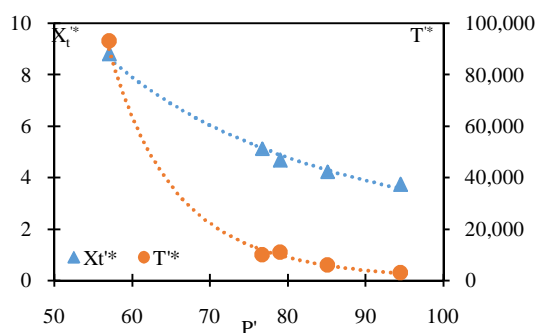
جدول 4 مشخصات تغییر جهت جریان در جریان غیردائمی

نام آزمایش	P'	T' (s)	X_t' (cm)	T'^*	$X_t'^*$
U-H0.5	57/1	8200	59	93047	8/81
U-H1	79/0	990	34	10837	4/66
U-H2	94/5	270	29	2959	3/72
U-H4	85/2	540	33	5917	4/23
U-H8	76/7	990	40	9862	5/13

از ترکیب اعداد بدون بعد، پارامتر جدیدی به نام پارامتر مشخصه‌ی هیدروگراف حاصل شد که مطابق رابطه‌ی (11) با P' نشان داده می‌شود. این پارامتر شامل کلیه‌ی مشخصات هیدروگراف از جمله عمق و سرعت جریان در دبی اوج و دبی پایه‌ی هیدروگراف و همچنین زمان تداوم هیدروگراف است.

$$P' = P \times \left(\frac{u_p t_p}{h_p} \right)^{0.85} \quad (11)$$

تغییرات $X_t'^*$ و T'^* با پارامتر P' در شکل 7 نشان داده شده است.

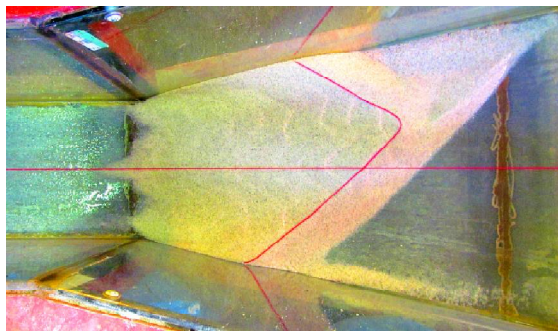


شکل 7 تغییرات زمان و طول دلتا در اولین تغییر جهت جریان نسبت به پارامتر مشخصه هیدروگراف P'

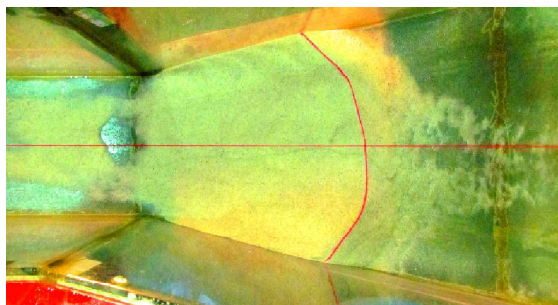
الگوی جریان مشاهده شده در آزمایش‌های حاضر، متفاوت با نتایج مامی‌زاده (1388) است. وی نتیجه گرفت که در زوایای بازشدگی کمتر از 15/4 درجه، الگوی جریان در مخزن متقارن خواهد بود. عدم تقارن مشاهده شده در آزمایش‌های حاضر که در زاویه‌ی بازشدگی 11/8 درجه انجام شده است، نشان می‌دهد که الگوی جریان در مخزن، علاوه بر زاویه‌ی بازشدگی مخزن، تابع دیگر مشخصات هندسی و هیدرولیکی مخزن و رودخانه نیز می‌باشد.

در مورد جریان غیردائمی نیز، ته‌نشینی رسوبات در مخزن منجر به تغییر الگوی جریان می‌شود. شکل 6 لحظه‌ی انحراف جریان را در ابتدای شاخه‌ی نزولی هیدروگراف نشان می‌دهد. جهت جریان، که با نوارهای قرمز رنگ شناور روی آب مشخص شده است، به سمت راست منحرف شده است، در حالی که انحراف رسوبات در جهت اولیه و به سمت چپ هستند.

علاوه بر این مشاهده شد که میزان ناپایداری و انحراف جریان در جریان غیردائمی بسیار بیشتر از جریان دائمی است. با ورود هیدروگراف‌های متوالی به مخزن، تغییر جهت جریان همواره بطور نوسانی به طرفین انجام می‌گیرد. در ابتدای شاخه‌ی نزولی هر هیدروگراف، با تاخیری کوتاه پس از دبی اوج، تغییر جهت جریان انجام می‌گیرد. بنابراین، تقارن جریان در شرایط غیردائمی، مانند آنچه در جریان دائمی ایجاد می‌شود، رخ نخواهد داد. در جدول 4، اطلاعات مربوط به تغییر جهت جریان در آزمایش‌های مربوط به جریان غیردائمی نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که زمان و طول دلتا در لحظه‌ی آغاز تغییر جهت جریان ($X_t'^*$ و T'^*) در جریان غیردائمی، تابعی از مشخصات هیدروگراف هستند.



الف) S-12



ب) S-20

شکل 8 پلان نهایی دلتا در آزمایش‌های مختلف جریان دائمی (جریان از چپ به راست)

مشاهده می‌شود که با افزایش P' ، زمان و طول دلتا در آغاز تغییر جهت جریان به صورت نمایی کاهش می‌یابد که با متوسط خطای (MAPE) کمتر از 1 درصد به شکل روابط (12) و (13) هستند.

$$X_t'^* = 10342 (P')^{-1.753} \quad (12)$$

$$T_t'^* = 9 \times 10^{16} (P')^{-6.83} \quad (13)$$

متوسط خطای برآورد از رابطه‌ی (14) محاسبه می‌شود.

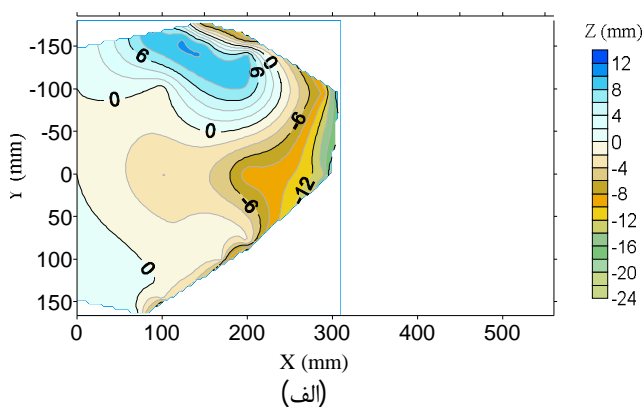
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - M_i}{M_i} \right| \times 100 \quad (14)$$

در این رابطه، P_i و M_i به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار پیش‌بینی شده پارامترهای $X_t'^*$ و $T_t'^*$ هستند و n تعداد داده‌ها را نشان می‌دهد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پارامتر P' ، میزان حساسیت جریان نسبت به شرایط مرزی افزایش می‌یابد. بنابراین با ته‌نشینی رسوبات و تغییر در شرایط مرزی، جریان به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و سریعاً تغییر جهت می‌دهد.

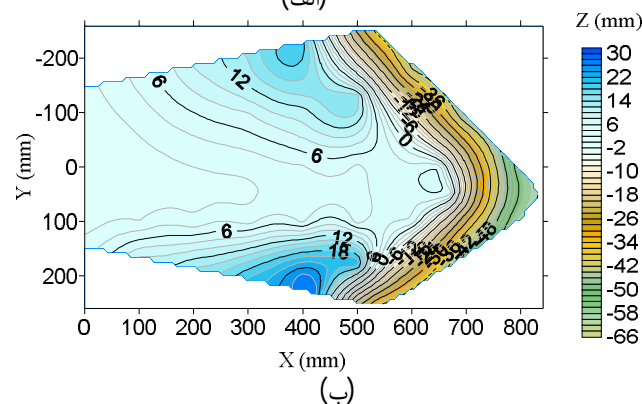
3-2- الگوی ته‌نشینی رسوبات

در جریان دائمی، الگوی ته‌نشینی رسوبات کاملاً از الگوی جریان پیروی می‌کند. به این صورت که در مقادیر پایین عدد فرود (آزمایش‌های S-12 و S-14)، جهت پیشروی دلتای رسوبی به تبعیت از جریان، همواره به سمت چپ است (شکل 8-الف). در مقادیر بیشتر عدد فرود (آزمایش‌های S-16 و S-18 و S-20)، جهت دلتای رسوبی همانند جریان به تدریج متقارن می‌شود (شکل 8-ب).

در جریان غیردائمی با ادامه‌ی ته‌نشینی رسوبات و پیشروی دلتا، علی‌رغم تداوم نوسانات در جهت جریان، نوسان در تغییر جهت رسوبات به مرور کاهش یافته و جهت دلتا به سمت تقارن پیش می‌رود. به منظور بررسی الگوی ته‌نشینی رسوبات، از پارامترهای مختلفی مانند نسبت انحراف دلتا، طول پیشروی دلتا و کشیدگی دلتا استفاده شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. نمونه‌ای از توپوگرافی سطح دلتا در یکی از آزمایش‌های جریان غیردائمی (آزمایش U-H0.5) در مرحله‌ی اولیه توسعه‌ی دلتا (عبور دو هیدروگراف) و مرحله نهایی آن (عبور 32 هیدروگراف) در شکل 9 نشان داده شده است.

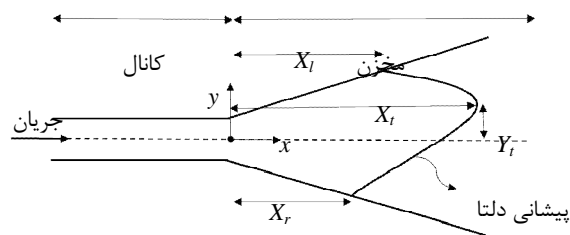


الف)

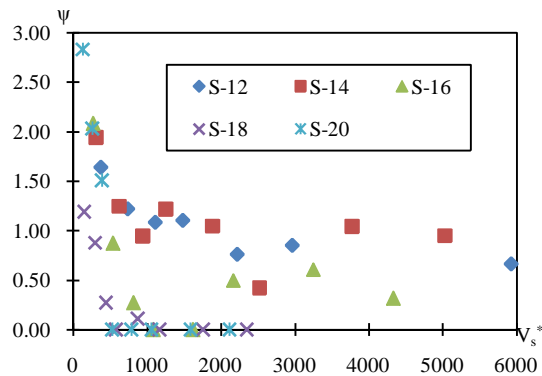


ب)

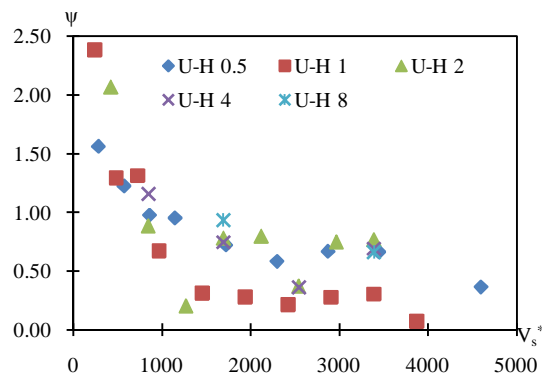
شکل 9 توپوگرافی دلتا در مراحل ابتدایی (الف) و انتهایی (ب) (فاصله خطوط تراز برابر 2 میلی‌متر است).



شکل 10 پارامترهای هندسی دلتا



شکل 11 تغییرات نسبت انحراف دلتا با حجم رسوبات در جریان دائمی



شکل 12 تغییرات نسبت انحراف دلتا با حجم رسوبات در جریان غیردائمی

شکل‌های 11 و 12 نشان می‌دهند که نسبت انحراف دلتا، در مراحل ابتدایی توسعه دلتا می‌تواند مقداری بیشتر از 1 داشته باشد. به عبارت دیگر زاویه انحراف دلتا می‌تواند بیشتر از شیب دیواره‌ی مخزن باشد. اما با توسعه بیشتر دلتا، این نسبت برابر یا کمتر از 1 خواهد بود.

3-2-2-2- طول پیشروی دلتا (X_t)

ارتباط طول پیشروی دلتا (X_t^*) با حجم رسوبات ته‌نشین

پارامتر Z نشان‌دهنده‌ی تراز سطح دلتا است. تراز صفر برابر با تراز کف کانال بالادست در محل ورودی مخزن است. شکل 9 نشان می‌دهد که بیشترین تراز رسوبات در راستای دیواره‌های مخزن قرار دارد و با نزدیک شدن به راستای مرکزی مخزن، از تراز رسوبات کاسته می‌شود. همچنین با توسعه‌ی دلتا، تراز رسوبات در جهت طولی مخزن افزایش می‌یابد که به معنی شیب طولی منفی در وجه بالایی دلتا است. کمترین شیب طولی دلتا در راستای خط مرکزی مخزن قرار دارد. با مقایسه شکل‌های 9-الف و ب مشخص می‌شود که در مراحل ابتدایی تشکیل دلتا، پروفیل سمت چپ بالاتر از سمت راست دلتا است و در مراحل انتهایی، عکس این موضوع وجود دارد. علت این امر این است که جهت جریان در مراحل ابتدایی به سمت چپ بوده که منجر به افزایش تراز رسوبات ته‌نشین شده در این جهت شده است. در مراحل انتهایی که جهت جریان به سمت راست تغییر یافته است، پروفیل سمت راست دلتا در تراز بالاتری قرار دارد.

3-2-1- نسبت انحراف دلتا (ψ)

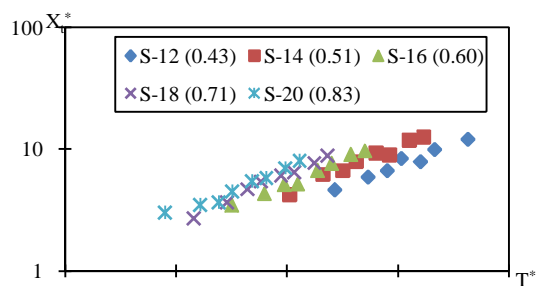
برای تعیین جهت دلتا از پارامتر ψ استفاده شده است که از رابطه‌ی (15) بدست می‌آید. در این رابطه θ زاویه‌ی بازشدگی مخزن است. دیگر پارامترهای مورد استفاده در این رابطه در شکل 10 نشان داده شده‌اند.

$$\psi = \frac{\left| \frac{Y_t}{X_t} \right|}{\tan(\theta)} \quad (15)$$

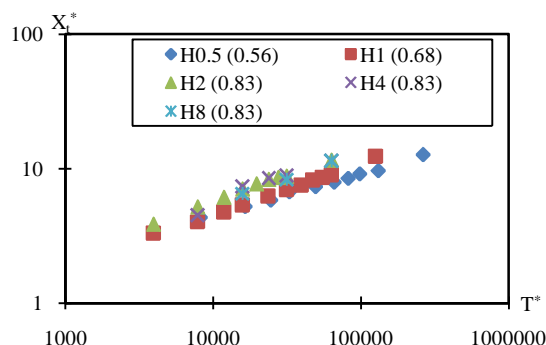
تغییرات پارامتر ψ نسبت به حجم رسوب ورودی به مخزن (V_s^*) برای جریان دائمی و غیردائمی به ترتیب در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، با افزایش حجم رسوبات، نسبت انحراف دلتا کاهش می‌یابد، به این معنی که جهت دلتا به مرور به سمت خط مرکزی دلتا نزدیک می‌شود. مقدار ψ در آزمایش‌های S-14 و S-12 بیشتر از دیگر آزمایش‌هاست که علت آن، عدم تغییر جهت جریان و در نتیجه‌ی عدم تقارن دلتا است. در دیگر آزمایش‌ها، نوسانات جریان موجب می‌شود که دلتا به سمت تقارن پیش برود.

تزیق رسوبات بیش از قدرت حمل جریان در آزمایش‌های مامی‌زاده (1388) منجر به ته‌نشینی رسوبات در کانال بالادست و در نتیجه پیشروی کمتر دلتا می‌شود. همچنین زاویه‌ی واگرایی اندک در آزمایش‌های صفی‌یاری و بنی‌هاشمی (1388) منجر به طول پیشروی بیشتر دلتا شده است.

تغییرات طول دلتا نسبت به زمان (T^*) در جریان دائمی و غیردائمی در شکل‌های 15 و 16 نشان داده شده است. خطی بودن نمودارها نشان دهنده‌ی رابطه‌ی نمایی طول دلتا با زمان است. با استخراج روابط نمایی در آزمایش‌ها حاضر مشخص شد که توان روابط نمایی، در جریان دائمی در محدوده‌ی 0/34 تا 0/41 و در آزمایش‌های جریان غیردائمی در محدوده‌ی 0/31 تا 0/43 قرار می‌گیرد. در بررسی و حل تحلیلی که توسط Swenson et al. (2000) در خصوص حرکت دلتای رسوبی در یک کانال مستطیل شکل با عرض ثابت انجام گرفته است، میزان پیشروی دلتا به صورت تابع نمایی از زمان با توان 0/5 ارائه شده است. آنها اظهار کردند که توان این رابطه‌ی نمایی تابع مشخصات فیزیکی و هندسی مخزن است.



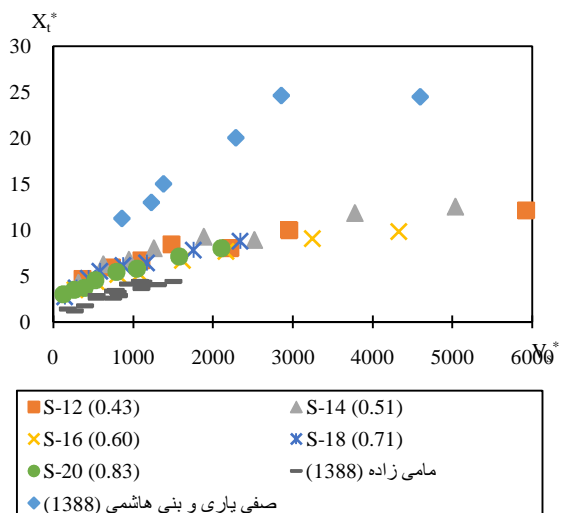
شکل 15 رابطه‌ی طول دلتا و زمان در جریان دائمی



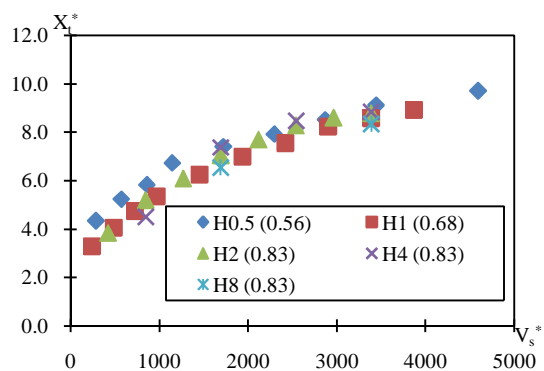
شکل 16 رابطه‌ی طول دلتا و زمان در جریان غیردائمی

شده (V_s^*) در جریان دائمی و غیردائمی در شکل‌های 13 و 14 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش حجم رسوبات، طول پیشروی دلتا در همه‌ی آزمایش‌ها بصورت نمایی افزایش می‌یابد. داده‌های مامی‌زاده (1388) و صفی‌یاری و بنی‌هاشمی (1388) نیز در شکل 13 نشان داده شده‌اند. زاویه‌ی بازشدگی در آزمایش‌های مامی‌زاده (1388) برابر 11/5 درجه است که نزدیک به زاویه‌ی بازشدگی مدل حاضر است. این زاویه در آزمایش‌های صفی‌یاری و بنی‌هاشمی (1388) کمتر از آزمایش‌های حاضر و برابر 3/2 درجه بوده است.

برای داده‌های مامی‌زاده (1388) و صفی‌یاری و بنی‌هاشمی (1388) نیز رابطه‌ی نمایی با توان به ترتیب 0/69 و 0/52 بین طول پیشروی و حجم رسوبات برقرار است.



شکل 13 تغییر طول دلتا با حجم رسوبات در جریان دائمی



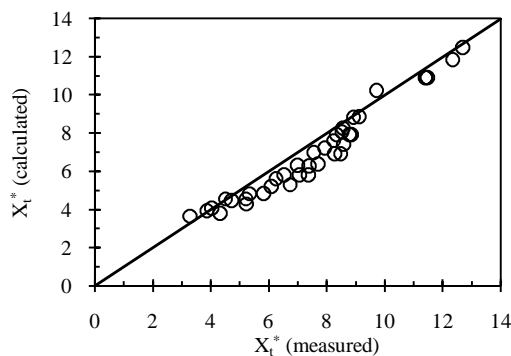
شکل 14 تغییر طول دلتا با حجم رسوبات در جریان غیردائمی

$$(\prod_{i=1}^5 U_i) - 8.200 \quad (16)$$

در حالی که:

$$U_i = \alpha_i^+ (X_i - X_{\min_i})^{\beta_i^+} + \alpha_i^- [X_i + X_{\max_i} - 2X_{\min_i}]^{\beta_i^-}$$

تغییرات مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده X_i^* در شکل 17 رسم شده است. متوسط خطای بین این دو مقدار برابر 17/3 درصد است.



شکل 17 تغییرات مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای طول پیشروی دلتا در جریان غیردائمی

3-2-3- کشیدگی دلتا (η)

پارامتر کشیدگی دلتا مطابق رابطه‌ی (17) معرفی می‌شود. X_r و X_l در این رابطه برابر طول چپ و راست دلتا هستند (شکل 10).

$$\eta = 1 - \frac{X_l + X_r}{2X_t} \quad (17)$$

هرچه مقدار پارامتر η به عدد 1 نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده‌ی کشیدگی بیشتر در پلان دلتا است. تغییرات پارامتر η نسبت به حجم رسوب ته‌نشین شده در مخزن در شکل‌های 18 و 19 نشان داده شده است.

"در بررسی و حل تحلیلی که توسط Swenson و همکاران (2000) در خصوص حرکت دلتای رسوبی در یک کانال مستطیل شکل با عرض ثابت انجام گرفته است، میزان پیشروی دلتا به شکل تابع نمایی از زمان به صورت $X_t = At^B$ ارائه شده است. پارامترهای A و B در این رابطه، تابع مشخصات فیزیکی و هندسی مخزن هستند. سوونسون و همکاران مقدار 0/5 را برای B پیشنهاد کردند. مقدار توان رابطه‌ی سوونسون در مطالعات چگنی‌زاده (1384)، خسروپور و همکاران (1387) و صفی‌یاری و بنی‌هاشمی برابر 0/4 بدست آمد، در حالی که در مطالعات مامی‌زاده و همکاران (1387) و حمزه قصاب‌سرایی (1388) بین 0/65 تا 0/75 قرار داشت. در تحقیقات صدیق‌کیا (1391) با ذرات یکنواخت، این ضریب برابر 0/85 و با ذرات غیریکنواخت برابر 0/79 بود. در تحقیق حیدری و همکاران (1392) که از ذرات غیریکنواخت استفاده کرده و اثر هیدروگراف را بر دلتا بررسی نموده‌اند، مقدار توان این رابطه در محدوده‌ی 1 تا 4 بود. طیف وسیع تغییرات این توان در نتایج محققان مختلف، نشان می‌دهد که عواملی همچون هندسه‌ی مدل، مشخصات ذرات رسوبی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها در مقدار توان سوونسون مؤثر هستند.

در نهایت رابطه‌ی طول پیشروی دلتا در جریان غیردائمی به صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد به شکل معادله‌ی (16) به دست آمد. در این رابطه پارامترهای X_4, X_3, X_2, X_1 و X_5 به ترتیب برابر با V_s^*, T^*, Fr, P و V_f^* هستند. مقادیر X_{\max} و X_{\min} به ترتیب، کمترین و بیشترین مقدار بدون بعد از هر یک از متغیرها در آزمایش‌های حاضر هستند. ضرایب تجربی این رابطه در جدول 5 نشان داده شده‌اند.

$$X_t^* = -22.332 * (\prod_{i=1}^5 U_i^2) + 42.967 *$$

جدول 5 ضرایب تجربی مربوط به رابطه‌ی (16)

X_{\min_i}	X_{\max_i}	β_i^-	β_i^+	α_i^-	α_i^+	پارامتر
241/98	9192/18	0/705	0/976	$9/78 \times 10^{-4}$	$1/74 \times 10^{-4}$	V_s^*
3940/70	261759/90	0/952	1/015	$3/51 \times 10^{-6}$	$2/18 \times 10^{-6}$	T^*
0/565	0/829	0/946	0/964	1/80	1/90	Fr
0/037	0/149	0/921	1/011	10/65	13/48	P
708/40	3944/77	0/903	1/084	$10/47 \times 10^{-4}$	$2/35 \times 10^{-4}$	V_f^*

مقدار نهایی کشیدگی دلتا در جریان دائمی در محدوده‌ی 0/25 تا 0/55 و برای جریان غیردائمی در محدوده‌ی 0/35 تا 0/40 قرار می‌گیرد. در آزمایش‌های مامی‌زاده (1388)، در مخزن با بازشدگی 11/5 درجه مقدار این پارامتر در محدوده‌ی 0/10-0/20 قرار گرفت. علت کمتر بودن کشیدگی دلتا در نتایج مامی‌زاده (1388) وقوع جریان متقارن در مخزن بود. اما در تحقیقات وی با بازشدگی 15/4 درجه که جریان نامتقارن ایجاد می‌شد، مقدار این پارامتر در محدوده‌ی 0/20-0/50 قرار گرفت که نزدیک به مقادیر مشاهده شده در آزمایش‌های حاضر است. بنابراین، عدم تقارن جریان در مخزن، موجب افزایش کشیدگی دلتا خواهد شد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی الگوی جریان و مشخصات دلتا در جریان دائمی و غیردائمی در مخزن پرداخته شده است. در آزمایش‌های جریان غیردائمی از هیدروگراف‌های مثلی متقارن استفاده شد. انتقال رسوب به صورت بار بستر و برابر با قدرت حمل جریان بود. مهمترین نتایج تحقیق حاضر به شرح زیر است.

- جریان متقارن پس از ورود به بازشدگی مخزن، به صورت تصادفی به سمت چپ یا راست مخزن منحرف شده و گردابه پایدار ساعتگرد یا پادساعتگردی را در مخزن ایجاد می‌کند.

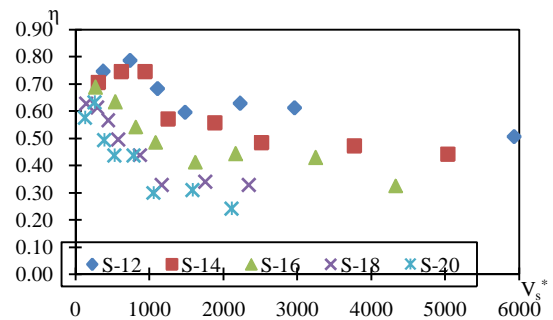
- جهت جریان در شرایط غیردائمی، به دلیل ورود هیدروگراف‌های متوالی، نوسان بیشتری نسبت به جریان دائمی دارد.

- ورود رسوبات و تشکیل دلتا در مخزن منجر به تغییر جهت جریان و ناپایداری جریان در مخزن می‌شود.

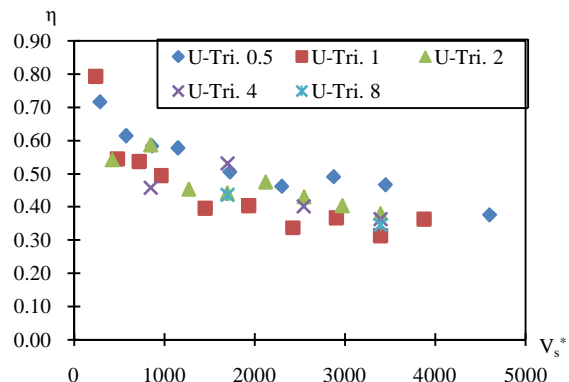
- کمترین تراز رسوبات و همچنین کمترین شیب وجه بالایی در راستای خط مرکزی دلتا قرار دارد. با پیشروی دلتا، شیب وجه بالایی دلتا کاهش یافته و در نهایت به شیب منفی یا شیب معکوس تبدیل خواهد شد.

- زمان و طول دلتا در لحظه‌ی وقوع اولین تغییر جهت جریان (T' و X'_l) در جریان دائمی تابعی از عدد فرود جریان و در جریان غیردائمی تابعی از پارامتر ناماندگاری هیدروگراف بوده و با افزایش عدد فرود یا پارامتر

مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار کشیدگی دلتا در مراحل ابتدایی تشکیل دلتا ایجاد می‌شود. با افزایش حجم رسوب و پیشروی دلتا، با صرف نظر از نوسانات موجود در نمودارها، مقدار کشیدگی دلتا کاهش می‌یابد. حداکثر مقدار کشیدگی دلتا حدود 0/8 اندازه‌گیری شده است.



شکل 18 تغییرات کشیدگی دلتا با حجم رسوبات در جریان دائمی



شکل 19 تغییرات کشیدگی دلتا نسبت به حجم رسوبات در جریان غیردائمی

کاهش کشیدگی دلتا به معنی رشد سریع‌تر بال چپ و راست دلتا نسبت به خط مرکزی دلتا است که نشان از توسعه‌ی دوبعدی دلتا دارد. نوسانات موجود در نمودارها حاکی از توسعه‌ی دلتا به صورت تناوبی در جهت‌های طولی و عرضی است. به این معنی که در یک مرحله، توسعه‌ی طولی دلتا در جهت خط مرکزی انجام می‌گیرد (افزایش کشیدگی دلتا) و در مرحله‌ی بعد، توسعه‌ی دلتا در بال‌های کناری است (کاهش کشیدگی دلتا) و این روند دائماً تکرار می‌شود. شکل‌های 18 و 19 نشان می‌دهند که

Q_w	دبی آب
Re_r	عدد رینولدز در کانال بالادست
S	حجم مخزن
S_c	شیب کف کانال
S_r	شیب کف مخزن
t	زمان
T^*	زمان بدون بعد
t_d	زمان تداوم هیدروگراف
t_p	زمان رسیدن به اوج هیدروگراف
u_0	سرعت جریان پایه
u_p	سرعت در اوج هیدروگراف
u_w	سرعت جریان
V_f^*	حجم بدون بعد هیدروگراف
V_f	حجم هیدروگراف
V_s^*	حجم بدون بعد رسوبات
V_s	حجم رسوبات
W_r	عرض مخزن
X	طول مشخصه دلتا
X_l	طول بال چپ دلتا
X_r	طول بال راست دلتا
X_l	حداکثر طول پیشروی دلتا
X_l^*	حداکثر طول بدون بعد پیشروی دلتا
X_l'	طول دلتا در لحظه‌ی آغاز تغییر جهت جریان
$X_l'^*$	طول بدون بعد دلتا در آغاز تغییر جهت جریان
Y_l	فاصله‌ی عرضی تاج دلتا از خط مرکزی مخزن
Z	تراز سطح دلتا
Ψ	نسبت انحراف دلتا
η	کشیدگی دلتا
μ_w	لزجت دینامیکی آب
θ	زاویه‌ی باز شدگی مخزن
ρ_s	جرم مخصوص ذرات رسوب
ρ_w	جرم مخصوص آب
σ_g	انحراف معیار هندسی رسوبات

6- منابع

اشرف واقفی، س. (1387). "بررسی پارامترهای مؤثر بر عملیات فلاشینگ از مخازن سدها و تأثیر آنها در موفقیت عملیات"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

چگنی‌زاده، ا. (1384). "بررسی آزمایشگاهی رسوب‌گذاری

ناماندگاری، مقدار X_l' و T' کاهش می‌یابند. این دو پارامتر، عکس‌العمل مخزن را در برابر شرایط جریان ورودی نشان می‌دهند.

- با توسعه‌ی دلتا از میزان انحراف دلتا کاسته می‌شود. نسبت انحراف دلتا در مراحل ابتدایی توسعه‌ی دلتا می‌تواند بزرگتر از یک باشد. به این معنی که زاویه‌ی انحراف دلتا در مراحل ابتدایی می‌تواند از زاویه‌ی بازشدگی مخزن نیز بیشتر باشد.

- توان رابطه‌ی سوونسون در جریان دائمی در محدوده‌ی 0/34 تا 0/41 و در جریان غیردائمی در محدوده‌ی 0/31 تا 0/43 بدست آمد.

- رابطه‌ای برای تعیین طول دلتا به صورت تابعی از اعداد بی بعد مؤثر شامل حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن، زمان، عدد فرود، پارامتر ناماندگاری جریان و حجم هیدروگراف ارائه شد.

- حداکثر مقدار کشیدگی دلتا در مراحل ابتدایی آن و برابر با 0/8 بوده و مقدار این پارامتر با توسعه‌ی دلتا کاهش می‌یابد.

5- فهرست علائم

B_c	عرض کانال بالادست
C_u	ضریب یکنواختی رسوبات
d	اندازه‌ی ذرات رسوب
Fr	عدد فرود جریان در کانال بالادست
Fr_p	عدد فرود در اوج هیدروگراف در کانال بالادست
g	شتاب ثقل
h_0	عمق جریان پایه‌ی کانال بالادست
h_p	عمق جریان اوج در کانال بالادست
h_r	عمق آب در مخزن
h_w	عمق جریان در کانال بالادست
Q_0	دبی ورودی به ابتدای کانال
L_r	طول مخزن
P	پارامتر ناماندگاری هیدروگراف
P'	پارامتر مشخصه‌ی هیدروگراف
Q_0	دبی جریان پایه
Q_c	دبی بحرانی برای شروع حرکت رسوبات
Q_s	دبی رسوبات
Q_0	دبی آب قرائت شده توسط دبی‌سنج

مطالعه موردی: مخازن سدهای سفید رود، لتیان، میناب و دز"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

کاشفی پور، س. م.، شفافی بجستان، م. و اسماعیلی، ک. (1388). بررسی روند انتقال بار کف در رودخانه فصلی ناشی از سیلاب ناگهانی، وزارت نیرو، شورای تحقیقات سد و نیروگاه.

کردنائیج، م.، اصغری پری، س. ا.، سجادی، س. م. و شفافی بجستان، م. (1396). "مقایسه آزمایشگاهی اثر صفحات متخلخل و موانع متخلخل در کنترل جریان غلیظ"، مجله دانش آب و خاک، دوره 27، شماره 1، صص. 43-54.

کشتکار، ش.، ایوبزاده، س. ع. و قدسیان، م. (1396). "مطالعه آزمایشگاهی اثر ارتفاع مانع در مهار سرعت جریان گل آلود در شرایط تغییر ناگهانی شیب بستر مخزن"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب، دوره 10، شماره 32، صص. 55-70.

مامی زاده، ج.، بنی هاشمی، م. ع.، ایوبزاده، س. ع.، صالحی نیشابوری، س. ع. ا. و جمشیدی، ر. (1387). "مطالعه آزمایشگاهی اثر تراز آب مخزن و مشخصات هیدرولیکی و رسوبی دهانه ورودی مخزن بر سرعت پیشروی دلتا"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دوره 15، شماره 5، صص. 191 تا 202.

مامی زاده، ج. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان ورودی به مخزن سد در تبدیل تدریجی و تأثیر آن در پیشروی و شکل دلتا"، رساله دکتری، رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس.

منصوری هفشجانی، م.، قمشی، م.، شفافی بجستان، م. و احدیان، ج. (1395). "تخمین سرعت نسبی پیشانی جریان غلیظ برای سیال پیرامون متحرک هم جهت با حرکت جریان غلیظ"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، دوره 39، شماره 4، صص. 193-200.

یوسفوند، ف.، میرکاظمی، س. ع.، صادقی، س.، ایوبزاده، س. ع. و صدیق کیا، م. (1394). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر بار معلق رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلتا در مخزن سد"، دومین کنفرانس سراسری توسعه‌ی محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان.

Bombar G., Elci S., Tayfur G., Guney M.S. and Bor A. (2011). "Experimental and numerical investigation of bed load transport under unsteady

درمخازن سدها و تشکیل دلتا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

حمزه قصاب سرایی، م. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان ورودی به مخزن سد در تبدیل تدریجی و تأثیر آن در پیشروی و شکل دلتا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

حیدری، م.، ایوبزاده، س. ع. و رضوی طوسی، س. ل. (1391). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر زمان عبور هیدروگراف سیل بر روی پیشروی و شکل دلتا در حالت وجود دانه‌بندی‌های مختلف مصالح رسوبی"، مجله هیدرولیک، دوره 8، شماره 4، صص. 12-1.

خسروپور، ح.، بنی هاشمی، م. ع.، صفی‌یاری، ا. (1387). "مقایسه‌ی نتایج پیشروی دلتای رسوب در مخزن سد در مدل آزمایشگاهی با مدل عددی مشابه با استفاده از نرم افزار HEC-RAS"، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، تهران.

زایری، م.، قمشی، م.، شفافی بجستان، م. و فتحی، ا. (1395). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع دریچه‌ی تخلیه کننده بر غلظت جریان غلیظ خروجی"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، دوره 12، شماره 3، صص. 188-180.

زینی‌وند، م.، کاشفی پور، س. م. و قمشی، م. (1396). "بررسی آزمایشگاهی اثر تخلخل صفحات نفوذ پذیر بر کنترل جریان غلیظ"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، دوره 40، شماره 1، صص. 13-24.

صدیق کیا، م.، ایوبزاده، س. ع. و مامی زاده، ج. (1391). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلتا در جریان ماندگار و غیرماندگار"، علوم و مهندسی آبیاری، جلد 35، شماره 3.

صدیق کیا، م.، ایوبزاده، س. ع.، حیدری، م.، مامی زاده، ج. و جعفرزاده، ا. (1395). "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر غیریکنواختی ذرات رسوبی بر پیشروی دلتای رسوبی در مخزن"، نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر، دوره 48، شماره 2، صص. 161 تا 167.

صفی‌یاری، ا. و بنی هاشمی، م. ع. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی پیشروی زبانه رسوبی در مخزن"، نشریه دانشکده فنی، دوره 43، شماره 4، صص. 383-394.

عسگری، م. (1390). "بررسی تأثیر زاویه واگرایی ورودی مخازن سدها بر میزان و الگوی پیشروی رسوب در مخزن؛

- Otteinstein, Austria.
- Kantoush, S.A. (2008). "Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments", PhD Thesis, 4048, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Karimae Tabarestani, M. and Zarrati A. R. (2014). "Sediment transport during flood event: a review", Int. J. Environ. Sci. Technol., Vol. 12, Issue 2, Pages 775-788.
- Kostic S. and Parker G. (2003). "Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs, Part 2, experimental and numerical simulation", Journal of Hydraulic Research, Vol. 4, No. 2, pp. 127-140.
- Lai S. Y. J. and Capart H. (2007). "Two-diffusion description of hyperpycnal deltas", J. Geophys. Res., 112, F03005.
- Lai S. Y. J. and Capart H. (2008). "Response of hyperpycnal deltas to a steady rise in base level", 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, The Netherlands.
- Lai S. Y. J. and Capart H. (2009). "Reservoir infill by hyperpycnal deltas over bedrock", Geophys. Res. Lett., 36, L08402.
- Lee K.T., Liu Y. and Cheng K., (2004), "Experimental investigation of bed load transport processes under unsteady flow conditions", Hydrol. Process. 18, pp. 2439-2454.
- Mamizadeh J., Ayyoubzadeh S. A. and Banihashemi M. A. (2012). "Experimental study of hydraulic-sediment properties on deltaic sedimentation in reservoirs", International Research Journal of Applied and Basic Sciences. Vol. 3 (4), pp. 810-816.
- Morris G. and Fan J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook, design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*, McGraw- Hill Companies, Washington. 1800p.
- Qu, Z. (2003). Unsteady open-channel flow over a mobile bed, Doctoral dissertation, no. 2688, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Shapira M., Degani D. and Weihs D. (1990). "Stability and existence of multiple solutions for viscous flow in suddenly enlarged channels", Computers and Fluids, 18, 3, 239-258.
- Shieh C., Tseng C. and Hsu M. (2001). "Development and geometric similarity of alluvial deltas", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. flows", J. Hydraulic Eng. Vol. 137, No. 10, pp. 1276-1282.
- Camnasio E., Orsi E. and Schleiss J. (2011). "Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs", Journal of Hydraulic Research Vol. 49, No. 3, pp. 352-358.
- Camnasio E., Erpicum S., Orsi E., Piroton M., Schleiss J. and Dewals B. (2013). "Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs", Journal of Hydraulic Research, Vol. 51, No. 5, pp. 535-547.
- Cherdron W., Durst F. and Whitelaw JH. (1978). "Asymmetric flows and instabilities in symmetric ducts with sudden expansions", Journal of Fluid Mech., 84(1), 13-31.
- Chiang T.P., Sheu W.H. and Wang S.K. (2000). "Side wall effects on the structure of laminar flow over a plane-symmetric sudden expansion", Computers and Fluids, 29, 467-492.
- Dewals B.J., Kantoush S.A., Erpicum S., Piroton M. and Schleiss A.J. (2008). "Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins", Environ. Fluid Mech. 8:31-54.
- Dufresne M., Dewals B.J., Erpicum S., Archambeau P. and Piroton M. (2010a). "Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs", International Journal of Sediment Research, Vol. 25, No. 3, pp. 258-270.
- Dufresne M., Dewals B.J., Erpicum S., Archambeau P. and Piroton M. (2010b). "Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs", Journal of Hydraulic Research Vol. 48, No. 2, pp. 197-204.
- Durst F., Melling A. and Whitelaw J. H. (1974). "Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion", J. Fluid Mech., Vol. 64, part 1, pp. 111-128.
- Fan J. and Morris G. (1992). "Reservoir sedimentation, I: delta and density current deposits, Journal of Hydraulic Engineering", Vol. 118, No.3, pp. 354-369.
- Fearn R. M., Mullin T. and Cliffe K. A. (1990). "Nonlinear flow phenomena in a symmetric sudden expansion", J. Fluid Mech., 211, 595-608.
- Jugovic C. J., Schuster G. and Nachtnebel H. P. (2005), "Aggradation of reservoirs in alpine regions", International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering,

Swenson, J. B., Voller, V. R., Paola, C., Parker, G. and Marr, J. G. (2000). "Fluvio-deltaic sedimentation: A generalized Stefan problem", *European Journal of Applied Mathematics*, 11(5), 433-452.

Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Amsterdam, Aqua Publication.

127, No. 1, P.P. 17-29.

Sloff, C. J. (1991). "Reservoir sedimentation: a literature survey", *Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Delft University of Technology.

Sobey I. J. (1985). "Observation of waves during oscillatory channel flow", *J. Fluid Mech.* 151, 395-426.