مجله علمی- پژوهشی دوره 13، شماره 1، بهار 1397



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

کاظم گمار<sup>1</sup>، مسعود قدسیان<sup>2\*</sup>و سیدعلی ایوبزاده<sup>3</sup>

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

#### <sup>\*</sup>ghods@modares.ac.ir

چکیده - در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تشکیل و توسعه ی دلتا و تأثیر متقابل الگوی جریان و رسوب در مخزن تحت جریان دائمی و غیردائمی آب و رسوب پرداخته می شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که علی رغم وجود تقارن کامل در هندسه و شرایط هیدرولیکی مدل، جریان در ورودی مخزن به صورت تصادفی به علی رغم وجود تقارن کامل در هندسه و شرایط هیدرولیکی مدل، جریان در ورودی مخزن به صورت تصادفی به آغاز رسوب گذاری در مخزن ایجاد می شود. مورت تصادفی به آغاز رسوب گذاری در فرودی مخزن ایجاد می شود. ورود رسوبات و محل ایک از طرفین منحرف شده و یک جریان نامتقارن، اما پایدار در ورودی مخزن ایجاد می شود. ورود رسوبات و آغاز رسوب گذاری در مخزن ایجاد می شود. منوبات و آغاز رسوب گذاری در مخزن ایجاد می شود. ورود رسوبات و محلت غیردائمی بیشتر از جریان دائمی است. نتایج نشان داد که با توسعه ی دلتا، انحراف دلتا کاهش می یابد و به آغاز رسوب گذاری پیش می رود. پیشروی دلتا به صورت تناوب توسعه ی طولی -عرضی بوده و حداکثر میزان کشیدگی دلتا در مراحل ابتدایی آن برابر 80 است. نتایج نشان داد که با توسعه ی دلتا، انحراف دلتا کاهش می یابد و به محت تقارن پیش می رود. پیشروی دلتا به صورت تناوب توسعه ی طولی -عرضی بوده و حداکثر میزان کشیدگی محت تقارن پیش می رود. پیشروی دلتا به صورت تناوب توسعه ی طولی -عرضی بوده و کمش میزان کشیدگی ی دلتا در مراحل ابتدایی آن برابر 80 است که با توسعه ی دلتا از میزان آن کاسته می شود. رابطهای برای محاسبه ی زمان تغییر جهت جریان بر حسب پارامتر مشخصه ی هیدروگراف استخراج شد. برای بررسی الگوی ته شینی ی رسوبات پارمترهای بدون بعدی به نام طول پیشروی (<sup>\*</sup>، X)، نسبت انحراف (ψ) و کشیدگی دلتا (π) معرفی شدند و رابطهای برای تحمین طول پیشروی دلتا با استفاده از پارامترهای بدون بعد مؤثر به دست آمد.

**کلید واژگان:** الگوی جریان، دلتا، مخزن، جریان دائمی، جریان غیردائمی، رسوب گذاری.

### 1– مقدمه

پیش بینی 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

پاییندست دلتا و نزدیک سد تهنشین شوند ( Sloff, ) را (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

تەنشىنى رسوبات درشتدانە و تشكيل دلتا يرداختماند و دستهی دوم، حرکت و تهنشینی ذرات ریزدانه و جریان غلیظ در مخزن را بررسی کردهاند (مانند زایری و همکاران (1395)، منصوری هفشجانی و همکاران (1395)، زینے-وند و همكاران (1396)، كردنائيج و همكاران (1396)، کشتکار و همکاران (1396)). برخی محققین نیز تأثیر جریان غلیظ بر مشخصات دلتا را مورد بررسی قرار دادهاند Lai and Capart Kostic and Parker (2003) (ماننـد) (2007, 2008, 2009) و يوسفوند و همكاران (1394)). آنچه در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار می گیرد، نحوهی تشکیل و توسعه ی دلتای رسوبی در مخرن است. بنابراین، تحقیق حاضر در دستهی اول مطالعات رسوب گذاری مخزن قرار می گیرد. در زمینه ی 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 شـدهانـد. از جملـهی ایـن تحقيقات مي توان به Shieh et al. (2001) و Jugovic et al. (2005) اشاره کرد که مراحل مختلف توسعه ی 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 (Kantoush (2008)، توسط Dewals Camnasio <sub>9</sub> Dufresne et al. (2010a,b) et al. (2008) et al. (2011, 2013) انجام شد. آنها وقوع جريان نامتقارن را علی رغم وجود هندسه ی متقارن مدل آزمایشگاهی گـزارش دادنـد. (2012) Mamizadeh et al. رابطـهى رگرسیون خطی را برای پیشبینی طول پیشروی پایه و تاج دلتای رسوبی در مخزن با بازشدگی تدریجی ارائه دادنـد. نتـایج مـدل آزمایشـگاهی و عـددی خسـروپور و همکاران (1387) نشان داد که تغییرات سرعت حرکت دلتای رسوبی در مخزن نسبت به عمق آب حساستر از سایر پارامترهای مورد مطالعه است. صفی یاری و بنے-هاشمی (1388) در شرایط آزمایشگاهی مشابه، معادلهی بدون بعدى براى پيشروى دلتاى رسوبى ارائه دادند. مامى-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 می شود. حمزه قصاب سرایی (1388) نشان داد که الگوی جریان در بازشدگی تـدریجی مخزن، نامتقارن بوده و تەنشىنى رسوبات باعث افزايش عدم تقارن جريان مي شود. صديق كيا و همكاران ( 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 م\_ىشود (اشرف واقفى، 1387). بـه طـور مثـال رژيـم رودخانهی میناب از نوع سیلابی بوده و بیش از 90 درصد رسوبات در طول جریان سیلاب به مدت چند روز در سال وارد مخزن می شود (عسگری، 1390). تحقیقات اندکی مشخصات دلتا را در شرایط سیلابی بررسی کردهاند، مانند صديق کيا و همکاران (1391) و حيدري و همکاران (1392) که در شرایط مشابه آزمایشـگاهی، اثر سـیلاب و غیریکشواختی 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 هيدروگراف جريان (بدون رسوب)، تغييرات مشخصات دلتا بررسی میشد. از سوی دیگر، تحقیقات متعدد انجام شده در زمینهی انتقال رسوب رودخانه در جريان غيردايمي (ماننـد (2003) Qu، (2004)، Lee et al. Karimaee Tabarestani and Bombar et al. (2011) Zarrati (2014) و كاشفی پور و همكاران (1388))، نشان داد که غیردائمی بودن جریان تأثیر مهمی بر الگوی جریان و حركت رسوبات دارد و استفاده از معادلات انتقال رسوب جريان دائمي براي جريان غيردائمي نتايج رضايت بخشي 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.

## 2- مواد و روشها

## 1-2- 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 یے -باکینگهام انجام شده است. طول مشخصهی دلتا (X) تابع یارامترهای هندسی، هیدرولیکی و محیطی مختلفی است. پارامترهای هندسی شامل عرض کانال بالادست (B<sub>c</sub>)، عـرض انتهـایی مخزن (*W<sub>r</sub>*)، طول مخزن (*L<sub>r</sub>*)، زاویه ی بازشدگی مخزن است. ( $\theta$ )، 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<sub>s</sub>)، عمق آب در مخزن (hr)، اندازه ذرات رسوب (d)، جرم مخصوص آب و رسوب (g) البه ترتيب  $\rho_w = \rho_w$ ، لزجت آب ( $\mu_w$ ) و شتاب ثقل ( $\rho_s$ است. بنابراین:  $X = f(B_{c}, W_{r}, L_{r}, \theta, S_{c}, S_{r}, u_{w}, h_{w}, h_{r}, t, Q_{s}, d, \rho_{w},$  $\rho_{s'}\mu_{w'}g$ ) (1)با در نظر گرفتن پارامترهای  $h_w \, \varphi_w$  و  $u_w$  به عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون بعد زیر حاصل می شوند.  $\pi_1 = \frac{X}{h_w}, \ \pi_2 = \frac{B_c}{h_w}, \ \pi_3 = \frac{W_r}{h_w}, \ \pi_4 = \frac{L_r}{h_w}$  $\pi_{5} = \frac{h_{r}}{h_{w}}, \quad \pi_{6} = \frac{d}{h_{w}}, \quad = \theta, \quad \pi_{8} = S_{c}$  $\pi_{9} = S_{r}, \ \pi_{10} = \frac{u_{w}}{\mu_{w}} h_{w} \rho_{w}, \ \pi_{11} = \frac{\rho_{s}}{\rho_{w}}$  $\pi_{12} = \frac{u_{w}}{\sqrt{gh_{w}}}, \ \pi_{13} = \frac{u_{w}t}{h_{w}}, \ \pi_{14} = \frac{Q_{s}}{\rho_{w}u_{w}h_{w}^{2}}$  $\pi_{13}$  و  $\pi_{11}$  و  $\pi_{16}$  و  $\pi_{16}$  و  $\pi_{16}$  و  $\pi_{17}$  و  $\pi_{17}$  و پارامتر  $\pi'_{14}$  به شکل زیر حاصل میشود.  $\pi'_{14} = \frac{\frac{\chi_s}{(\rho_s - \rho_w)}}{dh_w^2} = \frac{V_s}{dh_w^2}$ در این رابطه برابر با کل حجم رسوبات ورودی به  $V_s$ 

مخزن است. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای مؤثر در مسأله و به منظور سادهسازی و امکان بررسـی دقیـقتـر پارامترهـای اصـلی،

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.

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

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

 $X^* = f(Fr, T^*, V_S^*)$  (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  $(u_p, u_0, u_0)$ )، عمق جریان پایه و اوج در کانال بالادست (به ترتیب  $(h_p, h_0)$ )، زمان رسیدن به اوج و زمان تداوم هیدروگراف (به ترتیب  $(t_a, t_p, t_0)$ )، زمان رسیدن میباشند. ارتباط متغیرهای مستقل و وابسته در جریان غیردائمی در رابطهی (4) نشان داده شده است.  $X = f(B_c, W_r, L_r, \theta, S_c, S_r, u_0, u_p, h_0, h_p, h_r, t, t_p,$  $t_d, Q_s, d, \rho_w, \rho_s, \mu_w, g)$ 

با در نظر گرفتن پارامترهای hp ، pw و up به عنوان متغیرهای تکراری، اعداد بدون بعد در جریان غیردائمی به شرح زیر هستند.

$$\pi_{1} = \frac{X}{h_{p}}, \quad \pi_{2} = \frac{B_{c}}{h_{p}}, \quad \pi_{3} = \frac{W_{r}}{h_{p}}$$

$$\pi_{4} = \frac{L_{r}}{h_{p}}, \quad \pi_{5} = \frac{h_{r}}{h_{p}}, \quad \pi_{6} = \frac{d}{h_{p}}$$

$$\pi_{7} = \frac{h_{0}}{h_{p}}, \quad \pi_{8} = \frac{u_{0}}{u_{p}}, \quad \pi_{9} = \frac{t_{p}}{t_{d}}$$

$$\pi_{10} = \theta, \pi_{11} = S_{c}, \pi_{12} = S_{r}, \pi_{13} = \frac{u_{p}h_{p}\rho_{w}}{\mu_{w}}$$

$$\pi_{14} = \frac{\rho_{s}}{\rho_{w}}, \quad \pi_{15} = \frac{u_{p}}{\sqrt{gh_{p}}}, \quad \pi_{16} = \frac{u_{p}t}{h_{p}}$$





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)، مخرن رسوب و همچنین ابزار کنترل، اندازه گیری 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 شـد، آزمـایشهـا در دو حالـت جریـان دائمی (دبی ثابت) و غیردائمی انجام شـدند. جریـان آب از

 $\pi_{17} = \frac{u_p t_p}{h_p}, \ \pi_{18} = \frac{Q_s}{\rho_w u_p h_p^2}$ از ترکیب پارامتر  $\pi_7$  با پارامتر  $\pi_{17}$  پارامتر جدید  $\pi_7$  به شکل زیر حاصل میشود.  $\pi'_7 = \frac{(h_p - h_0)}{u_n t_n}$ از ترکیب پارامتر  $\pi_{17}$  با پارامترهای  $\pi_{7}$  ، $\pi_{8}$  ، $\pi_{7}$  به شکل زير حاصل مىشود.  $\pi'_{17} = \left(u_p h_p - u_0 h_0\right) \times \frac{t_p}{h_r^2} = \frac{V_f}{h_r^2}$ در این رابطه،  $V_f$  برابر با حجم هیـدروگراف بـدون جریـان یایه، در واحد عرض کانال است. همچنین از ترکیب پارامتر  $\pi_{18}$  با پارامترهای  $\pi_{6}$  و . پارامتر  $\pi'_{18}$  به شکل زیر حاصل می شود.  $\pi_{16}$  $\pi'_{18} = \frac{\overline{(\rho_s - \rho_w)}}{dh_n^2} = \frac{V_s}{dh_p^2}$ Vs در این رابطه برابـر بـا کـل حجـم رسـوبات ورودی بـه Vs 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 آشفته)، نتیجهی آنالیز ابعادی برای جریان غیردائمی به شکل رابطەي (5) است.  $\left(\frac{X}{h_p}\right) = f\left(\frac{u_p}{\sqrt{gh_p}}, \frac{u_p t}{h_p}, \frac{(h_p - h_0)}{u_p t_p}, \frac{V_f}{h_p^{-2}}, \frac{V_s}{dh_p^2}\right)$ (5)پارامتر سمت چپ تساوی، طول مشخصهی بدون بعد دلتا را نشان میدهد. پارامترهای سمت راست تساوی به  $(X^*)$  $(Fr_p)$  ترتیب نشاندهندهی عدد فرود جریان در دبلی اوج زمان بدون بعد (*T*\*)، پارامتر ناماندگاری هیـدروگراف (P)،

زمان بدون بعد ( 1)، پارامتر ناماندگاری هیدرو کراف (۲)، 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.  $X^* = f(Fr_p, T^*, P, V_f^*, V_s^*)$  (6)

2-2- معرفی مدل آزمایشگاهی
 طرح مدل آزمایشگاهی در شکل 1 نشان داده شده است.

دبیسنج، 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 دبیسنج به صورت لحظهای در کامپیوتر ذخیره می شوند. به این ترتیب با مقایسه یاین دو داده، می توان 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 شـمارهی 1 بـرای تنظـیم میـزان بازشـدگی 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 ایک دستگاہ 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 می شد که مقدار مورد نظر رسوب (سدیمنتگراف مطلوب) از دستگاه خارج شود.

#### 3-2- شرح آزمایشها

مشخصات آزمایش های جریان دائمی و جریان غیردائمی در جدول های 1 و 2 نشان داده شده است. نام گذاری آزمایش های جریان دائمی به این صورت است که با حرف کا 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 می-شد. محل تزریق رسوب در فاصله ی2 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 رسوب گذاری 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 به دست آمد. ذرات سیلیس به عنوان  $Q_s = 10 \, \text{l/s}$ رسوبات غیرچسبندہ با دانہبندی یکنواخت با ضریب یکنواختی  $\sigma_{s}$ =1/4 یکنواختی و انحراف معیار هندسی  $\sigma_{s}$ =1/6 مـورد 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 می-شد. برای برداشت تراز رسوبات از یک دستگاه برداشت مکانیکی نقطهای<sup>1</sup> با دقت 1/1± میلے متر استفادہ شد. همچنین از یک دستگاه دوربین عکاسی و فیلمبرداری با سرعت 30 فريم بر ثانيه براى ثبت مشخصات دلتا و جريان آب در کانال و مخزن استفاده شد. دبی جریان از طریق دبیسنج اولتراسونیک با دقت 1 درصد اندازه گیری 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، دبیسنج 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 دبیسنج را دریافت میکند. سپس با مقایسه ی لحظه به لحظهی دبی ورودی توسط کاربر و دبی قرائت شدهی

<sup>1.</sup> Point gage

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

خصات آزمایش های جریان دائمی	جدول 1 مشہ		
زمانهای آزمایش (min)	$Q_s$ (g/s)	$Q_w$ (l/s)	سری آزمایش
444/4 .333/3 .222/2 .1666/7 .111/1 .83/3 .55/6 .27/8	0/6	12	S-12
11/1، 2/22، 3/33. 44/4، 66/7، 6/88، 3/31، 2/2/	1/5	14	S-14
53/3 .40/0 .26/7 .20/0 .13/3 .10/0 .6/7 .3/3	5/0	16	S-16
25/4 .19/0 .12/7 .9/5 .6/3 .4/8 .3/2 .1/6	10/5	18	S-18
14/0 .10/5 .7/0 .5/3 .3/5 .2/6 .1/8 .0/9	19/0	20	S-20

جدول 2 مشخصات آزمایشهای جریان غیردائمی

-	<u> </u>		3			
	تعداد تكرار هيدروگراف	$t_d$ (min)	$Q_p$ (1/s)	$Q_0$ (l/s)	<i>m<sub>s</sub></i> (kg)	سری آزمایش
	32 .28 .24 .20 .16 .12 .8 .6 .4 .2	6	15/3	10	0/5	U-H0.5
	1، 2، 3، 4، 6، 8، 10، 12، 14، 16	6	17/5	10	1	U-H1
	8 .7 .6 .5 .4 .3 .2 .1	6	20	10	2	U-H2
	4 .3 .2 .1	12	20	10	4	U-H4
	2 .1	24	20	10	8	<i>U-H</i> 8
-						

آزمایش های جریان غیردائمی با حرف U شروع شده و عبارت بعدی نوع هیدرو گراف را مشخص میکند. این هیدرو گراف ها که به شکل مثلثی متقارن هستند در شکل 2 نمایش داده شدهاند. دبی پایه برای آزمایش های 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 هیدرو گراف است که بصورت متوالی وارد مخزن می شوند. حداقل تعداد لازم هیدرو گراف برابر 1 عدد و حداکثر آن برابر با تعداد لازم برای تزریق 16 کیلو گرم رسوب به داخل کانال است.



شکل 2 هیدروگرافهای مختلف در آزمایشهای غیردائمی

با انجام آزمایشهای مقدماتی مشخص شد که در آزمایشهای طولانی تر (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 متناظر 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 همهی هیدروگرافها انجام گیرد. برای این امر از رابطهی بقای جرم در مخزن (روابط 7 و 8) استفاده شد.

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

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \tag{8}$$

 $\Delta t = A \cdot \Delta t$  (\*) در این رابطه Q(t) دبی آب (قرائت شده توسط دبیسنج)، Q(t) دبی ورودی به ابتدای کانال (در محل تزریق رسوب) و I(t) تغییرات حجم آب در مخرن بالادست نسبت به زمان بعد از انجام آزمایش و قطع جریان آب و رسوب، ابتـدا آب موجـود در مخـزن از طریـق سـیفون، از بالادسـت و پاییندست به آرامی تخلیه میشد، به نحوی که باعـث بـه هم خوردگی شکل دلتا نشود. پس از تخلیهی آب، اقدام به برداشت مشخصات هندسی دلتا از جمله میزان پیشـروی و رقوم ارتفاعی سطح دلتا میشد.

# 3- نتايج و بحث 3-1- الگوى جريان

الگوی جریان داخل مخزن بدون تزریق و تهنشینی رسوبات، با انجام چندین آزمایش مقدماتی بررسی شد. برای مشاهده یجهت جریان، از نوارهای رنگی شناور در سطح آب استفاده شد. همان طور که شکل 4 نشان می دهد، با ورود جریان (بدون رسوب) به داخل مخزن، جریان به سمت دیواره ی مخزن منحرف شده و منجر به تشکیل جریان گردابی در مخزن می شود. جریان نامتقارن در مخزن در حالی ایجاد می شود که مشخصات هندسی مدل و مشخصات هیدرولیکی جریان ورودی کاملاً متقارن

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 می گیرد. مشاهدات نشان داد که این جریانِ نامتقارن، پایدار است. به این معنی که با ادامهی ورود جریان، جهت انحراف جریان تغییر نخواهد کرد.



نسبت به زمان، مقدار  $\frac{AS}{\Delta t}$  از رابطه ی (8) حاصل می شود. در این رابطه  $A \in h$  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 می شد تا هیدروگراف مورد نظر در ابتدای کانال تعیین می شد تا هیدروگراف مورد نظر در ابتدای کانال (I(t)) ایجاد شود. در شکل 3 نمونه ای 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.

 $Q_s = 811.0 \ Q_w^{6.07}$  (9) در این رابطـه  $Q_w$  دبـی آب و  $Q_s$  دبـی رسـوب بـر حسـب مترمکعب بر ثانیـه در واحـد عـرض کانـال هسـتند. دبـی

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 تـه-نشینی رسوبات وجود ندارد.

مراحل انجام آزمایشها به این صورت بود که ابتـدا مخـزن سد تا تراز سطح دریچهی لـولایی پـر از آب مـیگردیـد و پس از برقراری تعـادل در جریـان و ثابـت شـدن شـرایط، جریان آب و رسوب به صورت همزمان وارد کانـال شـده و آزمایش آغاز میشد. مشخصات مختلف جریان و رسـوب از جمله جهت انحراف جریان و تغییرات دلتای تشکیل شـده بصورت کیفی و کمّی در حین هر آزمایش ثبت میشد.



هيدروليک

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)، تغییر جهت جریان ایجاد می شود که

در نهایت به تقارن جریان میانجامد. علت این امر،

پیشروی بیشتر جریان به درون مخزن و کاهش طول

محققانی همچون (Kantoush (2008، محققانی همچون

(2008) وDufresne et al. (2010a,b)، اثر طول مخزن را

بر الگوی جریان به این صورت نشان دادند که با کاهش

یارامترهای  $X'_t$  و T' در جدول 3 به ترتیب به معنای طول  $X'_t$ 

پیشروی دلتا و زمان در لحظهی آغاز تغییر جهت جریان هستند که با روش آنالیز ابعادی شرح داده شده در بخش

داده  $X_t^{*}$  و  $T^{'*}$  و  $T^{'}$  نشان داده  $X_t^{*}$  بی بعد شده و با پارامترهای  $T^{'}$  نشان میدهند که در شرایط شدهاند. پارامترهای  $T^{'*}$  و  $T^{'*}$  نشان میدهند که در

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، ایـن دو پـارامتر نشـاندهنـدهی عکـس

العمل مخزن نسبت به جريان ورودي هستند و جهت

برنامهریزی مدیریتی و بهرهبرداری مخزن مورد استفاده

قرار می گیرند. تغییرات \*'T و X'\* برای آزمایش های جریان

دائمی، نسبت به عدد فرود در شکل 5 نشان داده شده

است. این شکل نشان میدهد که با افزایش عدد فرود

جريان، حساسيت جريان نسبت به تغيير جهت افزايش

یافته، به نحوی که انحراف جریان در زمان کمتر و در

ط\_ول کمت\_ری از پیش\_روی دلتا ایج\_اد م\_یشود.

طول مخزن، الگوی جریان متقارن خواهد شد.

مخزن در نتیجهی توسعهی دلتا است.

حتی تلاطم ایجاد شده ناشی از ورود هیدروگرافهای متوالي، منجر به تغيير جهت انحراف در مخزن نمي شود و جريان از لحاظ جهت انحراف همواره پايدار باقي ميماند. وقوع جريان نامتقارن در تحقيقات ديگر محققان نيز 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 جداشدگی با طول نابرابر در دو طرف بازشدگی ایجاد می شود که این پدیده منجر به تشکیل جریان نامتقارن می شود (Cherdron et al., 1978). Fearn et al., 1990 Sobey, 1985 Durst et al., 1974 Shapira et al., 1990 و Chiang et al., 2000). نتايج حاصل از آزمایشهای حاضر نیز مؤید این مطلب است. عدد رینولدز جریان ورودی (Re<sub>r</sub>) در آزمایش های حاضر در محدودهی 33000 تـا 66000 است کـه در همـهی آزمایشها، جریان نامتقارن ایجاد میشد. عدد رینولدز جریان در کانال بالادست از رابطهی (10) به دست میآید.  $\operatorname{Re}_{\mathrm{r}} = \frac{u_w h_w \rho_w}{1 + \frac{1}{2}}$ (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

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

جدول 3 مشخصات تغيير جهت جريان دائمي

#### هيدروليک





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 زاویه ی بازشدگی 11/8 درجه انجام شده است، نشان میدهد که الگوی جریان در مخزن، علاوه بر زاویه ی 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 لحظه ی انحراف جریان را در ابتدای شاخه ی 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 براین 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 می-گیرد. در ابتدای شاخهی نزولی هر هیدروگراف، با تاخیری کوتاه پس از دبی اوج، تغییر جهت جریان انجام می گیرد. 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.



شکل 6 انحراف جریان در ابتدای شاخهی نزولی هیدروگراف

غيردائمي	جريان	جریان در	جهت	مشخصات تغيير	جدول 4
----------	-------	----------	-----	--------------	--------

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

از ترکیب اعداد بدون بعد، پارامتر جدیدی به نام پارامتر مشخصهی هیدروگراف حاصل شد که مطابق رابطهی (11) با / 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.





کاظم گمار و همکاران

مشاهده می شود که با افزایش <sup>P</sup>، زمان و طول دلتا در آغاز تغییر جهت جریان به صورت نمایی کاهش می یابد که با متوسط خطای (MAPE) کمتر از 1 درصد به شکل روابط (12) و (13) هستند.

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

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

متوسط خطای برآورد از رابطهی (14) محاسبه میشود.

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

در این رابطه، *M*<sub>i</sub> و *P<sub>i</sub>* به ترتیب نشان دهندهی مقدار اندازه گیری شده و مقدار پیش پینی شده پارامترهای \**X*<sup>t</sup> و *T*<sup>t\*</sup> هستند و *n* تعداد داده ها را نشان می دهد. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که با افزایش پارامتر '*P*، میزان حساسیت جریان نسبت به شرایط مرزی افزایش می یابد. بنابراین با ته نشینی رسوبات و تغییر در شرایط مرزی، جریان به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و سریعاً تغییر جهت می دهد.

## 3-2- الگوى تەنشىنى رسوبات

در جریان دائمی، الگوی تهنشینی رسوبات کاملاً از الگوی جریان پیروی می کند. به این صورت که در مقادیر پایین عدد فرود (آزمایشهای 21-S و 14-S)، جهت پیشروی دلتای رسوبی به تبعیت از جریان، همواره به سمت چپ است (شکل 8- الف). در مقادیر بیشتر عدد فرود (آزمایشهای 16-S و 18-S و 20-S)، جهت دلتای رسوبی همانند جریان به تدریج متقارن می شود (شکل 8- ب). در جریان غیردائمی با ادامه تی تهنشینی رسوبات و پیشروی دلتا، علی غم تداوم نوسانات در جهت جریان، نوسان در تغییر جهت رسوبات به مرور کاهش یافته و بهت دلتا به سمت تقارن پیش می رود. 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 می گیرند.

جریان غیردائمی (آزمایش U-H0.5) در مرحله اولیه

توسعهی دلتا (عبور دو هیدروگراف) و مرحله نهایی آن

(عبور 32 هیدروگراف) در شکل 9 نشان داده شده است.







ب) S-20 **شکل 8** پلان نهایی دلتا در آزمایشهای مختلف جریان دائمی (جریان از چپ به راست)





حل ۲۲ تعییرات نسبت انجراف دلتا با حجم رسوبات در جریان غیردائمی

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

**3-2-2- طول پیشروی دلتا (X,)** ارتباط طول پیشروی دلتا (X,<sup>\*</sup>) با حجم رسوبات تـهنشـین یارامتر 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 می یابد که به معنی شیب طولی منفے در وجه بالایی دلتا است. کمترین شیب طولی دلتا در راستای خط مرکزی مخزن قرار دارد. با مقایسه شکلهای 9- الف و ب مشخص می شود 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 تغيير يافته است، پروفيل سمت راست دلتا در تراز بالاتری قرار دارد.

### (ψ) نسبت انحراف دلتا

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

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

تغییرات پارامتر  $\psi$  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. همان طور که این شکلها نشان میدهند، با افزایش حجم رسوبات، نسبت انحراف دلتا کاهش می یابد، به این معنی که جهت دلتا به مرور به سمت خط مرکزی دلتا نزدیک می شود. مقدار  $\psi$  در آزمایشهای 21-8 و 14-8 بیشتر از دیگر آزمایشهاست که علت آن، عدم تغییر جهت جریان و در نتیجهی عدم تقارن دلتا است. در دیگر آزمایشها، نوسانات جریان موجب می شود که دلتا به سمت تقارن پیش برود.

شده (\*<sub>5</sub>%) در جریان دائمی و غیردائمی در شکلهای 13 و 14 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش حجم رسوبات، طول پیشروی دلتا در همهی آزمایش ها بصورت نمایی افزایش می باید. داده های مامیزاده (1388) و صفییاری و بنی هاشمی (1388) نیز آزمایش های مامیزاده (1388) برابر 11/5 درجه است که آزمایش های صفییاری و بنی هاشمی (1388) در آزمایش های صفییاری و بنی هاشمی (1388) کمتر از آزمایش های حاضر و برابر 2/3 درجه بوده است. برای داده های مامیزاده (1388) و صفی یاری و آزمایش های حاضر و برابر 2/3 درجه بوده است. بیرای داده های مامیزاده (1388) و صفی یا توان به تریب بیرای داده مای زاهه ی نمایی با توان به ترتیب بنی هاشمی (1388) نیز رابطهی نمایی با توان به ترتیب





تزریق 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 زاویه واگرایی اندک در آزمایشهای صفی یاری و بنیهاشمی (1388) منجر به طول پیشروی بیشتر دلتا شده است.

تغییرات طول دلتا نسبت به زمان (<sup>\*</sup>*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 جریان دائمی حاضر مشخص شد که توان روابط نمایی، در جریان دائمی در محدودهی 20/1 تا 20/1 و در آزمایشهای جریان غیردائمی در محدودهی 20/1 تا 20/1 قرار می گیرد. در بررسی و حل تحلیلی که توسط (2000) دال مستطیل بررسی و حل تحلیلی که توسط (2000) دال مستطیل بررسی و مرکت دلتای رسوبی در یک کانال مستطیل شکل با عرض ثابت انجام گرفته است، میزان پیشروی دلتا به صورت تابع نمایی از زمان با توان 5/0 ارائه شده است. آنها اظهار کردند که توان این رابطهی نمایی تابع مشخصات فیزیکی و هندسی مخزن است.





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

در حالیکه:

 $U_i = \alpha_i^+ \left( X_i - X_{min_i} \right)^{\beta_i^+}$  $+ \alpha_i^{-} [X_i + X_{max_i} - 2X_{min_i}]^{\beta_i}$ تغییرات مقادیر محاسبه شده و انـدازه گیـری شـده  $X_t^*$  در شکل 17 رسم شده است. متوسط خطای بین این دو مقدار برابر 17/3 درصد است.



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

(η) کشیدگی دلتا پارامتر کشیدگی دلتا مطابق رابطهی (17) معرفی میشود. <sub>ا</sub> X<sub>r</sub> راین رابطه برابر طول چپ و راست دلتا هسـتند (شكل 10).  $\eta = 1 - \frac{X_l + X_r}{2X_t}$ (17)

هرچه مقدار پارامتر  $\eta$  به عدد 1 نزدیکتر باشد، نشان دهندهی کشیدگی بیشتر در پلان دلتا است. تغییرات پارامتر  $\eta$  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 ارائـه شـده اسـت. پارامترهـای A و  $X_t = At^B$ رابطه، تابع مشخصات فیزیکی و هندسی مخزن هستند. سونسون و همکاران مقدار 0/5 را برای B پیشنهاد کردند. مقدار توان رابطهی سوونسون در مطالعات چگنیزاده (1384)، خسروپور و همکاران (1387) و صفی یاری و بنیهاشمی برابر 0/4 بدست آمد، در حالی که در مطالعات مامیزاده و همکاران (1387) و حمازه قصابسرایی (1388) بين 0/65 تا 0/75 قرار داشت. در تحقيقات صدیق کیا (1391) با ذرات یکنواخت، این ضریب برابر 0/85 و با ذرات غیریکنواخت برابر 0/79 بود. در تحقیق حیدری و همکاران (1392) کے از ذرات غیریکنواخت استفاده کرده و اثر هیدروگراف را بر دلتا بررسی نمودهاند، مقدار توان ایـن رابطـه در محـدودهی 1 تـا 4 بـود. طيـف وسيع تغييرات اين توان در نتايج محققان مختلف، نشان میدهد که عواملی همچون هندسه یمدل، مشخصات ذرات رسوبی و نحوهی انجام آزمایشها در مقدار توان

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*<sub>1</sub> X<sub>2</sub> X<sub>1</sub> (16) و  $V_{f}^{*}$  هستند. مقادیر P ،Fr ،T\* ، $V_{s}^{*}$  برابر با  $X_{5}$ و  $X_{\max}$ به ترتیب، کمترین و بیشترین مقدار بدون بعد  $X_{\max}$ از هر یک از متغیرها در آزمایشهای حاضر هستد. ضرایب تجربی این رابطه در جدول 5 نشان داده شدهاند.

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

$X_{\min_i}$	$X_{\max_i}$	$\beta_i^-$	$\beta_i^+$	$\alpha_i^-$	$\alpha_i^+$	پارامتر
241/98	9192/18	0/705	0/976	9/78×10⁻⁴	1/74×10 <sup>-4</sup>	$V_s^*$
3940/70	261759/90	0/952	1/015	3/51×10⁻ <sup>6</sup>	2/18×10⁻ <sup>6</sup>	Т*
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	Р
708/40	3944/77	0/903	1/084	10/47×10 <sup>-4</sup>	2/35×10 <sup>-4</sup>	$V_f^*$

جدول 5 ضرایب تجربی مربوط به رابطهی (16)

سوونسون مؤثر هستند.

مشاهده می شود که حداکثر مقدار کشیدگی دلتا در مراحل ابتدایی تشکیل دلتا ایجاد می شود. با افزایش حجم رسوب و پیشروی دلتا، با صرف نظر از نوسانات موجود در نمودارها، مقدار کشیدگی دلتا کهش می یابد. حداکثر مقدار کشیدگی دلتا حدود 8/0 اندازه گیری شده است.



کاهش کشیدگی دلتا به معنی رشد سریع تر 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 می گیرد (افزایش کشیدگی دلتا) و در مرحلهی بعد، توسعهی دلتا در بالهای کناری است (کاهش کشیدگی دلتا) و این روند دائماً تکرار می شود. شکل های 18 و 19 نشان می دهند که

مقدار نهایی کشیدگی دلتا در جریان دائمی در محدودهی 0/25 تا 0/50 و برای جریان غیردائمی در محدودهی 0/35 تا 0/40 قرار می گیرد. در آزمایشهای مامیزاده (1388)، در مخزن با بازشدگی 1/15 درجه مقدار این پارامتر در محدودهی 20/0-10/0 قرار گرفت. علت کمتر بودن کشیدگی دلتا در نتایج مامیزاده (1388) وقوع بازشدگی 1/34 درجه که جریان نامتقارن ایجاد میشد، مقدار این پارامتر در محدودهی 0/00-20/0 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- نتيجەگىرى

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 مثلثی 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 می کند.

- جهـت جریـان در شـرایط غیردائمـی، بـه دلیـل ورود هیدروگرافهای متوالی، نوسان بیشتری نسبت بـه جریـان دائمی دارد.

- ورود رسوبات و تشکیل دلتا در مخرن منجر به تغییر جهت جریان و ناپایداری جریان در مخزن می شود.

- 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) 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  $Q_w$ 

Re<sub>r</sub>

S

 $S_c$ 

 $S_r$ 

t

 $T^*$ 

 $t_d$ 

 $t_p$ 

 $u_0$ 

 $u_p$ 

 $u_w$ 

 $V_f^*$ 

 $V_f$  $V_s^*$ 

 $V_s$ 

 $W_r$ 

X

 $X_l$ 

 $X_r$  $X_t$ 

 $X_t^*$  $X_t'$  $X_t'^*$  $Y_t$ Ζ

اماندگاری، مقدار ' <sub>X</sub> و 'T کاهش مییابند. این دو پارامتر،	دب <i>ی</i> آب
عکسالعمل مخزن را در برابر شرایط جریان ورودی نشان	عدد رینولدز در کانال بالادست
مىدھند.	حجم مخزن
- با توسعهی دلتا از میزان انحراف دلتـا کاسـته مـیشـود.	شیب کف کانال
سبت انحراف دلتا در مراحل ابتدایی توسعه ی دلتا	شیب کف مخزن
می تواند بزرگتر از یک باشد. به این معنی کیه زاویته ی	زمان
ی د ایر در در د	زمان بدون بعد
سر میں میں جن جس جندا ہی جند کی جند اور روید کی جرمند کی ۔ محمد ذرید بر منا سائد د	زمان تداوم هيدروگراف
	زمان رسیدن به اوج هیدروگراف
- نوان رابطهای شوونسون در جریان دانمی در محدودهای ۱۵/۷۸ تا ۱۸/۱۸ می ا	سرعت جريان پايه
0/34 تا ۵/14 و در جریان عیردانمی در محدودهی ۵۲/۱۶	سرعت در اوج هیدروگراف
نا 0/43 بدست امد.	سرعت جريان
- رابطهای برای تعیین طول دلتا به صورت تـابعی از اعـداد	حجم بدون بعد هيدروگراف
ی بعد مؤثر شامل حجم رسوبات تەنشین شده در مخـزن،	حجم هيدروگراف
مان، عـدد فـرود، پـارامتر نامانـدگاری جریـان و حجـم	حجم بدون بعد رسوبات
هيدروگراف ارائه شد.	حجم رسوبات
- حداکثر مقدار کشیدگی دلتا در مراحل ابتدایی آن و	عرض مخزن
برابر با 0/8 بـوده و مقـدار ایـن پـارامتر بـا توسـعهی دلتـا	طول مشخصه دلتا بریانی
کاهش می یابد.	طول بال چپ دلتا
5- فو ست علایہ	حداکثر طول پیشروی دلتا
	خداکثر طول بدون بعد پیشروی دلتا
	طول دلتا در لحطهی اعاز تعییر جهت جریان
للريب يعنو، على رسوب ذران مريد التي رسوب	طول بدون بعد ذلتا در اعاز تعییر جهت جریان
عدد فرود جران در کانال رالادست عدد فرود جران در کانال رالادست	فاصلهی غرصی تاج دلتا از خط مردزی محزن
عدد فرود جریان در عدن بر مست عدد فرود در اوح هیدروگرافی در کانال بالادست	
شتاد، ثقا و	نسبت الحراف دلنا
	دشید دی دلیا

Ψ	نسبت انحراف دلتا
η	کشیدگی دلتا
$\mu_w$	لزجت دینامیکی آب
$\theta$	زاویهی باز شدگی مخزن
$ ho_s$	جرم مخصوص ذرات رسوب
$ ho_w$	جرم مخصوص آب
$\sigma_{g}$	انحراف معيار هندسي رسوبات

6- منابع

اشرف واقفی، س. (1387). "بررسی پارامترهای مؤثر بر عملیات
فلاشینگ از مخازن سـدها و تأثیرآنهـا در موفقیـت عملیـات"،
پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
چگنــیزاده، ا. (1384). "بررســی آزمایشـگاهی رسـوبگــذاری

## 5- فهرست علايم

$B_c$	عرض كانال بالادست
$C_u$	ضريب يكنواختى 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
Р	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

#### بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و مشخصات دلتا تحت جریان دائمی ...

درمخازن سدها و تشکیل دلتا"، پایاننامه 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"، پایاننامه 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 دانهبندی های مختلف مصالح رسوبی"، مجله هیدرولیک، دوره 8، شماره ی 4، صص. 12-1.

خسروپور، ح. بنیهاشیمی، 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، شفاعی 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، شمارهی 3، صص. 180-188.

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

صدیق کیا، م، ایوبزاده، س. ع. و مامیزاده، 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، شمارهی 3.

صدیق کیا، م، ایوبزاده، س.ع، حیدری، م، مامیزاده، ج. و جعفرزاده، ۱. (1395). "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر غیریکنواختی ذرات رسوبی بر پیشروی دلتای رسوبی در مخزن"، نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر، دوره 48، شمارهی 2، صص. 161 تا 167.

صفییاری، ا. و بنی هاشمی، م. ع. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی پیشروی زبانه رسوبی در مخزن"، نشریه دانشکده فنی، دوره43، شمارهی4، صص. 383-394.

عسـگری، م. (1390). "بررسـی تـاثیر زاویـه واگرایـی ورودی مخازن سدها بـر میـزان و الگـوی پیشـروی رسـوب در مخـزن؛

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

کاشفی پور، س، م، شفاعی 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 شفاعی بجستان، م. (1396). "مقایسهی آزمایشگاهی اثر صفحات متخلخل و موانع متخلخل در کنترل جریان غلیظ"، مجله دانش آب و خاک، دوره 27، شمارهی 1، صص. 43-54.

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

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

مامیزاده، 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، شفاعی 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، شمارهی 4، ص. 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 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.

Karimaee 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., Pirotton 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., Pirotton 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 Pirotton 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 Pirotton 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,* Amesterdam, Aqua Publication.

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

Sloff, C. J. (1991). "Reservoir sedimentaion,: 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.