

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زمان عبور هیدروگراف سیل بر پیشروی و شکل دلتا در حالت وجود دانه‌بندی‌های مختلف مصالح رسوبی

مرتضی حیدری^{1*}، سید علی ایوب‌زاده²، سیده لیلا رضوی طوسی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

2- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

3- دکترای سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* کرج، صندوق پستی 336-14115
ayyoubzadeh@yahoo.com

چکیده- در این تحقیق، تأثیر عبور سیلاب در زمان‌های مختلف در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت رسوبی بر روی شکل و پیشروی دلتا مورد مطالعه قرار گرفته است. از پنج نوع منحنی دانه‌بندی استفاده شده که دارای توزیع نرمال و قطر متوسط یکسان بوده‌اند. در این تحقیق برای هر یک از نمونه‌های رسوبی 4 آزمایش در 4 زمان مختلف عبور سیلاب صورت گرفت. هر یک از زمان‌های عبور سیلاب مربوط به پیشروی تاج دلتا به اندازه 12، 26، 40 و 60 درصد از طول پیشروی نهایی تاج دلتا در تبدیل ورودی مخزن می‌باشد. از یک مدل آزمایشگاهی رودخانه به مخزن با زاویه و اگرایی تدریجی برای بررسی تأثیر زمان عبور سیلاب بر پیشروی دلتا استفاده شد و هیدروگراف سیل، هیدروگراف 50 ساله شبیه‌سازی شده سد دز بوده است. با توجه به نتایج مشاهده شد که تغییر در زمان عبور سیلاب بر روی شکل دلتا و نیز پیشروی دلتا تأثیر گذار است. در محدوده بررسی، با افزایش زمان تأثیر سیلاب، مقدار شسته شدن دلتا در بخش فوقانی آن در اثر عبور سیلاب کاهش می‌یابد و همچنین پیشروی دلتا پس از عبور سیلاب با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش انحراف معیار هندسی ذرات، توان رابطه توسعه داده شده بین 2 تا 3/5 تغییر می‌کند. میزان شستگی دلتا در اثر عبور سیلاب نیز با افزایش انحراف معیار ذرات رسوبی (از 1/2 تا 2/6) تا 20 درصد کاهش داشته است.

کلیدواژگان: پیشروی دلتا، یکنواختی ذرات رسوبی، غیر یکنواختی ذرات رسوب، زمان تأثیر سیلاب.

1- مقدمه
درصد از حجم ذخیره آنها را کاهش دهد (Mahmood, 1987). رسوبگذاری در ابتدای مخزن به شکل دلتا در ورودی رودخانه به مخزن اتفاق می‌افتد و ذرات درشت دانه‌تر تشکیل دلتای رسوبی را می‌دهند (Fan and

رسوبگذاری در مخزن سد از عواملی است که با گذشت زمان عمر مخازن را کاهش می‌دهد. تخمین زده شده است که تجمع رسوبات در مخازن سدها، می‌تواند سالانه یک

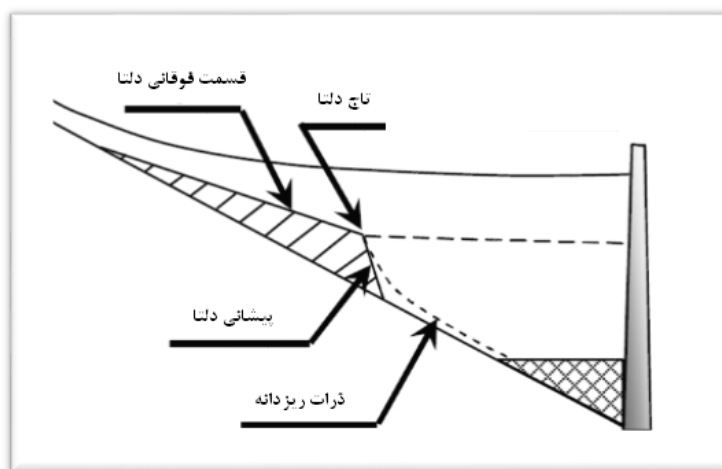
می‌کند. فان و موریس (1992) در مورد تشکیل دلتا تحقیقی را انجام دادند و در این تحقیق نتیجه شد که تفاوت دانه بندی بین بخش فوقانی و پیشانی دلتای رسوبی محسوس است. همچنین تغییر ناگهانی شیب بین بخش فوقانی و پیشانی دلتای رسوبی دیده شد. در بررسی و حل تحلیلی که توسط اسونسن و همکاران (2000) و همچنین ولر و همکاران (2004) در خصوص حرکت دلتای رسوبی در یک کانال مستطیل شکل با عرض ثابت انجام گرفته است، میزان پیشروی دلتا به صورت توانی از زمان و به شکل رابطه (1) ارائه شده است.

$$X = A.t^B \quad (1)$$

که در این رابطه پارامترهای A و B متغیرهای وابسته با بعدی از خصوصیات هندسی و فیزیکی مخزن هستند. توان B برای کانال مستطیلی مورد مطالعه ایشان برابر با 0/5 بدست آمده است. کوستیک و پارکر (2003) مطالعات آزمایشگاهی و عددی را در ارتباط با تأثیر جریان گل‌آلود و اثر افزایش غلظت آن بر زاویه ایستایی قسمت پیشانی دلتا انجام دادند. آنها سه مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند که از ماسه سیاه، رسوب گلی و نمک غیر قابل حل در هر آزمایش استفاده کردند.

(Morris, 2009). زمانی که دلتای رسوبی با ذرات رسوبی درشت دانه مانند شن و ماسه به سازه‌های سد، نظیر ورودی آبگیر برسد، خسارت زیادی به توربین‌ها و سازه‌های دیگر در سد خواهد رساند. بنابراین تخمین دقیق حرکت و پیشروی دلتا در مخزن امری مهم است. در شکل 1 قسمت‌های مختلف دلتا در مخزن نشان داده شده است.

یوسل (1975) به بررسی آزمایشگاهی و عددی نهشته شدن رسوب پرداخت. نتایج تحقیق نشان داد که زاویه بین سطح جلویی دلتا و کف فلوم تقریباً ثابت می‌باشد. همچنین تغییرات تراز آب در بالادست متناسب با رشد و پیشروی دلتا است؛ به گونه‌ای که به طور متناوب با تغییر هریک از آن‌ها، دیگری خود را با شرایط جدید وفق می‌دهد. بطور کلی مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی یوسل همخوانی خوبی نشان داد (چگنی‌زاده، 1384). رادکیوی (1993) اقدام به بررسی آزمایشگاهی دلتای رسوبی در یک کانال با بازشدگی ناگهانی نمود. نتایج این محقق نشان داد که در زمان‌های اولیه پیشروی، دلتا بیشتر در جهت طولی رشد کرده و پس از آن به دلیل افزایش عرض و کاهش سرعت و مومتم جریان، رسوب‌گذاری به صورت جانبی گسترش یافته و دلتا در عرض رشد



شکل 1 قسمت‌های مختلف دلتا

بررسی شده برابر 2/85 بود. وی از سیلاب‌های شبیه‌سازی شده سد دز برای آزمایش‌های خود استفاده نمود. این سیلاب‌ها با دوره‌های بازگشت 5، 50، 100، 500 و 1000 ساله می‌باشند. در تحقیقات وی توان رابطه اسونسن¹ بین 0/8 تا 2 بدست آمد. در تحقیقات گذشته تأثیر غیریکنواختی ذرات رسوبی روی پیشروی دلتا در مخزن کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و بیشتر تحقیقات گذشته با دانه‌های یکنواخت رسوبی صورت گرفته است، در حالی که در طبیعت در بیشتر مواقع ذرات رسوبی دارای دانه‌بندی غیریکنواخت هستند. در تحقیقات اندکی که در مورد تغییرات دبی جریان و عبور سیلاب انجام شده، تنها به بررسی عبور سیلاب در لحظه‌ای که دلتای رسوبی در قسمت ورودی مخزن قرار دارد، پرداخته شده است؛ در صورتی که عبور سیلاب در طبیعت در حالت‌های مختلف پیشروی دلتا در مخزن اتفاق می‌افتد. در این تحقیق تأثیر زمان عبور سیلاب در پیشروی‌های مختلف دلتا در مخزن در شرایط وجود دانه‌بندی‌های مختلف مصالح رسوبی بررسی شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. این فلوم دارای 17 متر طول و 1 متر عرض می‌باشد. قسمت اولیه فلوم با عمق 60 سانتی‌متر و بدون شیب طولی به عنوان رودخانه اجرا شد. طول تبدیل ابتدایی برابر 2 متر بوده و قسمت انتهایی فلوم با عمق 60 سانتی‌متر و شیب طولی 2% به عنوان مخزن اجرا شد. سایر مشخصات در شکل 2 آمده است. لازم به ذکر است که زاویه واگرایی مخزن برابر 11/5 درجه و طول تبدیل برابر 2 متر بود. تزریق رسوبات

در آزمایشی که جریان گل آلود تاثیرگذاری وجود نداشت، زاویه ایستایی قسمت پیشانی دلتا برابر با 35/5 درجه بدست آمد. با اضافه نمودن جریان گل آلود تاثیرگذار، زاویه ایستایی به 25/48 درجه کاهش یافت. در آخر با افزایش غلظت جریان گل آلود، زاویه ایستایی پیشانی دلتا به 16/1 درجه کاهش یافت. این آزمایش‌ها مطابق با نتایج فرمول تئوری بود که کوستیک و پارکر (2002) بدست آوردند که طبق این فرمول زاویه قسمت پیشانی دلتا، با افزایش غلظت جریان گل آلود، می‌تواند به کمتر از 1 درجه نیز برسد. جوگوویچ و همکاران (2005) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی رسوب‌گذاری مخازن و فرایند تشکیل و پیشروی دلتا در نواحی کوه‌های آلپ پرداختند. نتایج نشان داد که فرم دلتا عمدتاً به شدت جریان در کانال ورودی بستگی دارد. ارتفاع رسوبات در حین پیشروی دلتا در جهت طولی افزایش می‌یابد و این افزایش ممکن است در اثر افزایش مقاومت در برابر جریان باشد. مامی‌زاده (1388) به بررسی آزمایشگاهی زاویه واگرایی ابتدایی مخزن پرداخت و با بررسی 5 زاویه 90، 23/5، 15/4، 11/5 و 9/2 درجه با دانه‌های یکنواخت رسوبی زاویه 15/4 درجه را به عنوان زاویه مرزی بین الگوی پیشروی متقارن و نامتقارن بدست آورد. صفی‌یاری و بنی‌هاشمی (1387) تحقیقی به طور آزمایشگاهی به انجام رساندند و با مصالح یکنواخت رسوبی مسأله پیشروی دلتا را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در میان پارامترهای مورد مطالعه، پیشروی دلتا به تراز آب دریاچه حساس‌تر است. آنها در مطالعه خود نمای رابطه اسونسن را 0/4 بدست آوردند. صدیق‌کیا (1390) تأثیر هیدروگراف سیلاب و همچنین وجود ذرات غیریکنواخت بر روی پیشروی و شکل دلتای رسوبی را مورد بررسی قرار داد که نسبت دبی اوج به دبی پایه سیلاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته در محدوده 2/6 تا 4/5 قرار داشت. همچنین انحراف از معیار هندسی ذرات غیریکنواخت

1. Swenson Equation

در این آزمایش‌ها به صورت خشک بود که توسط دستگاه در قسمت رودخانه مدل با دبی قابل تنظیم انجام می‌شد. هیدروگراف سیل استفاده شده در این تحقیق، هیدروگراف 50 ساله شبیه‌سازی شده سد دز است (صدیق‌کیا، 1391). در شکل 3 هیدروگراف سیلاب‌های عبوری از سد دز نمایش داده شده است.

هیدروگراف سیل مورد مطالعه نیز هیدروگراف مثلثی بوده که به صورت شماتیک در شکل 4 ارائه شده است. پس از شبیه‌سازی سیلاب، هیدروگراف نهایی شبیه‌سازی شده سد دز با همان شکل عمومی مثلثی بدست آمد که مشخصات این هیدروگراف در جدول 1 ارائه شده است.

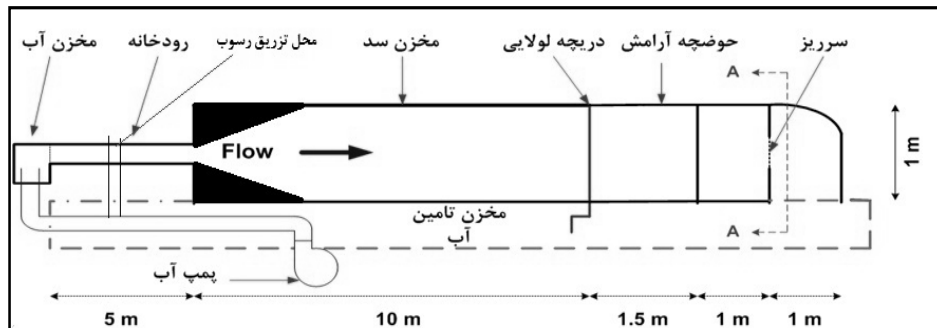
$$X = F(\rho, \mu, Q_w, W, Q, \rho_s, Q_s, d_{50}, \sigma_g, g, \theta, s_B, B, b, t, x, t_b, t_{sf}, h_i, h_f, x_i, x_f, x_n) \quad (2)$$

و با استفاده از روش باکینگهام پارامترهای بدون بعد به شرح زیر بدست آمد:

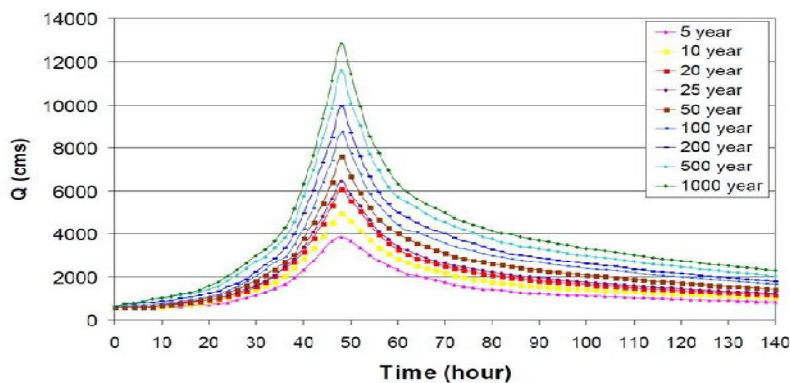
$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{Q_s^2}{gW^5}, \quad \pi_2 = \frac{Q_w^2}{gW^5}, \quad \pi_3 = \frac{d_{50}}{W}, \quad \pi_4 = \theta, \quad \pi_5 = s_B, \\ \pi_6 &= \frac{B}{W}, \quad \pi_7 = \frac{b}{W}, \quad \pi_8 = \frac{\rho_s}{\rho}, \quad \pi_9 = \frac{gt^2}{W}, \\ \pi_{10} &= \frac{\mu}{\rho g \cdot 0.5 W^{1.5}}, \quad \pi_{11} = \frac{x}{W}, \quad \pi_{12} = Q', \quad \pi_{13} = \rho_g, \\ \pi_{14} &= \frac{t_b g^{0.5}}{w^{0.5}}, \quad \pi_{15} = \frac{t_{sf} g^{0.5}}{w^{0.5}}, \quad \pi_{16} = \frac{h_i}{w}, \quad \pi_{17} = \frac{h_f}{w}, \\ \pi_{18} &= \frac{x_i}{w}, \quad \pi_{19} = \frac{x_f}{w}, \quad \pi_{20} = \frac{x_n}{w} \end{aligned} \quad (3)$$

2-2- آنالیز ابعادی

انتخاب پارامترهای مؤثر با توجه به اصول اولیه هیدرولیک رسوب و بررسی مطالعات گذشته صورت گرفت. در ابتدا

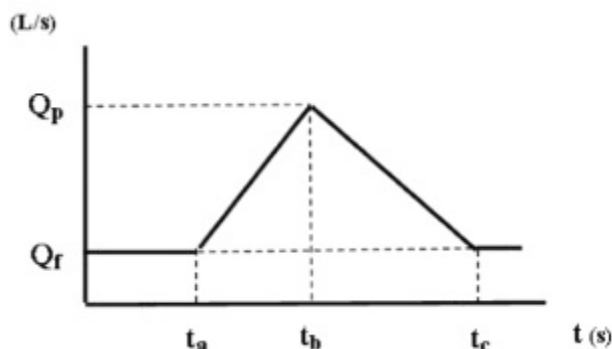


شکل 2 فلوم و سیستم گردش آب



شکل 3 هیدروگراف سیلاب‌های عبوری بر سد دز با دوره بازگشت‌های مختلف (صدیق‌کیا، 1391)

سیلاب، x_i طول پیشروی دلتا در لحظه عبور سیلاب، h_f ارتفاع دلتای رسوبی بعد از عبور سیلاب، h_i ارتفاع دلتای رسوبی در لحظه عبور سیلاب، t_b زمان پایه سیلاب، t_{sf} زمان عبور سیلاب، w عمق آب در مخزن، b عرض رودخانه و x_n طول پیشروی نهایی دلتا در پایان آزمایش‌ها است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مربوط به زمان تأثیر سیلاب و غیر یکنواختی ذرات رسوبی بر پیشروی و شکل دلتا مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان‌های تأثیر سیلاب برای هریک از آزمایش‌ها مربوط به رسیدن تاج دلتا به 12%، 26%، 40% و 65% پیشروی تاج دلتا در انتهای آزمایش‌ها است. ایستگاه‌های مورد نظر به صورت پارامتر x_f در فصل نتایج معرفی شده‌اند.



شکل 4 شکل عمومی یک هیدروگراف مثلثی

جدول 1 مشخصات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده در

مدل فیزیکی

Q_p (L/S)	Q_f (L/S)	t_c (s)	t_b (s)	t_a (s)
40/09	9/2	60/29	20/5	0

3-2- دانه‌بندی مصالح رسوبی

در این تحقیق برای بررسی تأثیر غیریکنواختی ذرات از 4 نوع منحنی دانه‌بندی استفاده شد که همگی دارای توزیع نرمال و قطر متوسط یکسان می‌باشند. در شکل 5 منحنی دانه‌بندی مصالح رسوبی مورد استفاده نشان داده شده است.

پس از رسم منحنی‌های مورد نظر میزان وزنی مورد نیاز برای تهیه هر یک از نمونه‌های رسوبی بدست آمد و سپس از هر خاک با استفاده از الک‌های مختلف (در اندازه‌های متنوع)، به میزان 600 کیلوگرم تهیه شد. در جدول 2 مشخصات کامل هر یک از نمونه‌های رسوبی ارائه شده است.

با توجه به این که در این تحقیق عرض مخزن یا کانال اصلی، عرض رودخانه، وزن مخصوص ذرات، وزن مخصوص آب و شیب مخزن، ثابت هستند و با توجه به پارامترهای مورد نظر برای بررسی در این تحقیق، در نهایت رابطه بدون بعد به صورت (4) بدست می‌آید:

$$X^* = F(t^*, T^*, h^*, x^*, \sigma, W^*, \theta, X_t) \quad (4)$$

که در این رابطه:

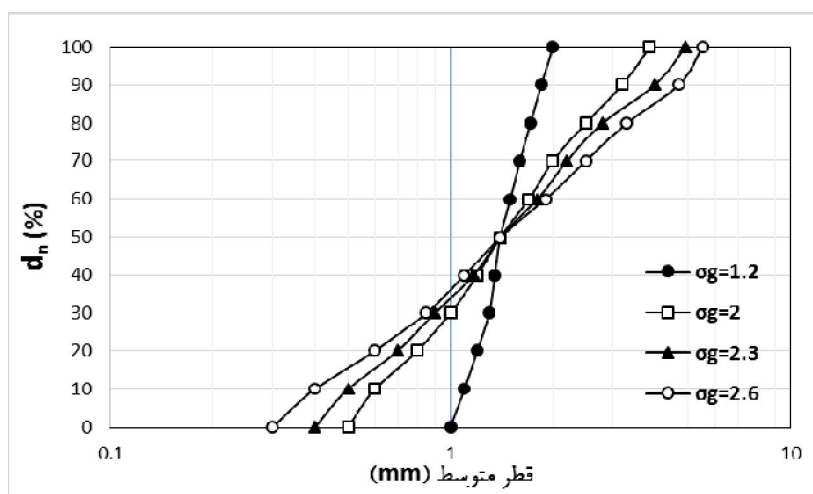
$$x^* = \frac{x_f}{x_i}, \quad h^* = \frac{h_f}{h_i}, \quad T^* = \frac{t_{sf}}{t_b}, \quad W^* = \frac{b}{W},$$

$$t^* = \frac{t}{\left(\frac{W}{g}\right)^{0.5}}, \quad X^* = \frac{x}{W}, \quad X_t = \frac{x_i}{x_n} \quad (5)$$

در رابطه (3) x_f طول پیشروی دلتا بعد از خاتمه عبور

جدول 2 مشخصات مصالح رسوبی مورد استفاده

شماره نمونه	قطر متوسط (میلی متر)	ضریب دانه‌بندی	انحراف معیار هندسی	ضریب یکنواختی
1	1/4	0/99	1/2	1/32
2	1/4	0/97	2	2/88
3	1/4	0/97	2/3	3/57
4	1/4	0/97	2/6	4/31



شکل 5 منحنی دانه‌بندی مصالح رسوبی

یکنواخت برداشت بازوی راست دلتا مجدداً انجام می‌گیرد تا دلتای شسته شده ثبت گردد. در ادامه آزمایش مشاهده می‌شد که دلتای شسته شده ثابت بوده و حرکت دلتای دیگری از رودخانه آغاز می‌شود. ثبت دلتای ثانویه در ایستگاه‌ها تا رسیدن این دلتا به دلتای شسته شده ادامه می‌یابد. در ادامه برداشت‌ها تا رسیدن دلتای کامل (حاصل از دلتای شسته شده و دلتای ثانویه) به ایستگاه آخر ادامه می‌یابد که در فاصله طولی 120 سانتی‌متر از ابتدای تبدیل می‌باشد. پس از اتمام آزمایش با زهکشی از طرفین دلتا به صورت کاملاً آرام، دلتای حاصل به وسیله‌ی متر لیزری برداشت می‌شود. در این تحقیق برای هر یک از نمونه‌های رسوبی 4 آزمایش در 4 زمان مختلف عبور سیلاب صورت گرفت که در مجموع 16 آزمایش انجام شد.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج مربوط به شکل دلتا

در شکل 6 پروفیل طولی دلتا در سمت راست تبدیل قبل و بعد از عبور سیلاب برای نمونه رسوبی شماره یک که دارای انحراف معیار هندسی 1/2 می‌باشد، در هریک از چهار زمان مختلف عبور سیلاب نشان داده شده است. نمودارها مربوط به زمان‌های مختلف تأثیر سیلاب است.

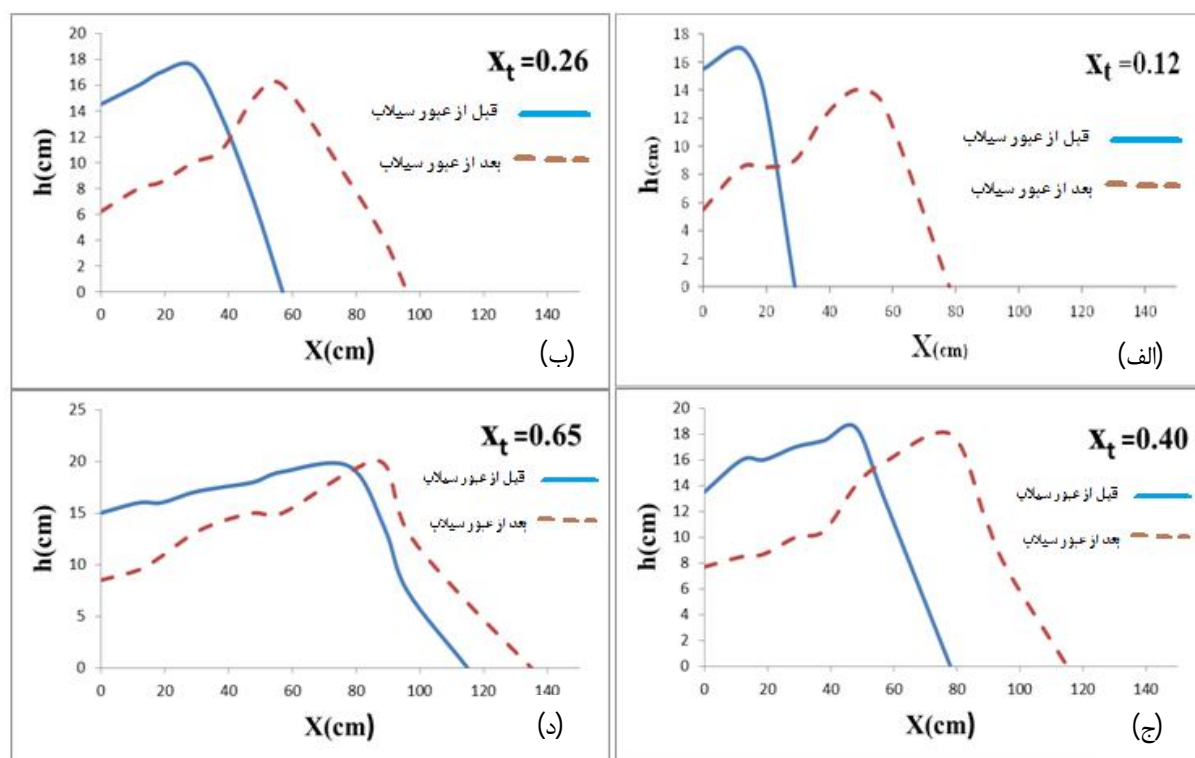
ضریب یکنواختی از طریق رابطه (6) بدست می‌آید.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6)$$

که در این رابطه D_{60} قطری از ذرات است که 60 درصد ذرات رسوبی از آن کوچکتر و D_{10} نیز قطری از ذرات است که 10 درصد ذرات رسوبی از آن کوچکتر است.

2-4- تعداد و نحوه انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا دبی با تجهیزات دور متغیر پمپ تنظیم، سپس میزان سطح آب در مخزن با دریچه لولایی انتهایی تنظیم می‌شد و بعد از ثابت شدن سطح آب در مخزن و ثابت شدن دبی ورودی، به وسیله تغذیه‌کننده رسوبات با دبی ثابت به صورت خشک و با دانه بندی مشخص به داخل رودخانه تزریق می‌شد. پس از رسیدن پایه دلتای رسوبی به ایستگاه اول ثبت زمان آغاز می‌شد و هم‌زمان با رسیدن پایه و تاج به هر یک از ایستگاه‌ها برداشت انجام می‌شد. با رسیدن تاج دلتا به ایستگاه‌های مورد نظر برای عبور هیدروگراف سیل، ابتدا برداشت در ساحل راست دلتا انجام و ارتفاع دلتا در ایستگاه‌های مختلف ثبت می‌شد. سیلاب بوسیله تغییر فرکانس مربوط تنظیم دبی پمپ عبور داده می‌شود. با اتمام عبور سیلاب پس از بازگشت به حالت اولیه و برقراری جریان



شکل 6 پروفیل طولی نمونه رسوب 1 قبل و پس از عبور دادن سیلاب در الف- 12، ب- 26، ج- 40 و د- 65 درصد از پیشروی دلتا

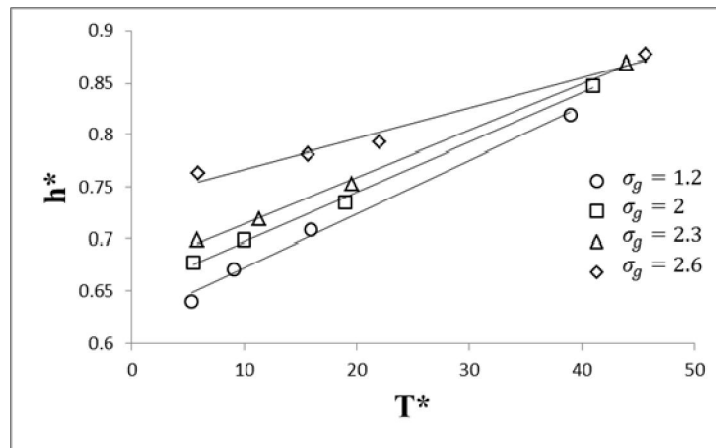
در هریک از نمودارها همان‌طور که در بخش آنالیز ابعادی نیز گفته شد، x_t نسبت طول پیشروی تاج دلتا در لحظه عبور سیلاب به طول نهایی پیشروی تاج در انتهای آزمایش‌ها است که برای تمامی آزمایش‌ها فاصله ثابتی از ابتدای مخزن است. نمودارهایی که با خط ممتد هستند نشان‌دهنده شکل دلتا در لحظه شروع سیلاب بوده و نمودارهایی که به صورت خط‌چین می‌باشند، شکل دلتا بعد از خاتمه عبور سیلاب را نشان می‌دهند. به منظور بررسی تأثیر عبور سیلاب بر روی شکل دلتا پارامتری بعد ارتفاع قسمت فوقانی (h_t) که معرف شکل پروفیل طولی دلتا قبل و بعد از عبور سیلاب است در برابر زمان نرمال شده وقوع هیدروگراف (T^*) برای انواع رسوبات به صورت نمودار 7 رسم شده است.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود با افزایش (T^*) مقدار (h_t^*) که نسبت ارتفاع دلتای رسوبی بعد از عبور سیلاب به ارتفاع دلتای رسوبی در لحظه عبور سیلاب

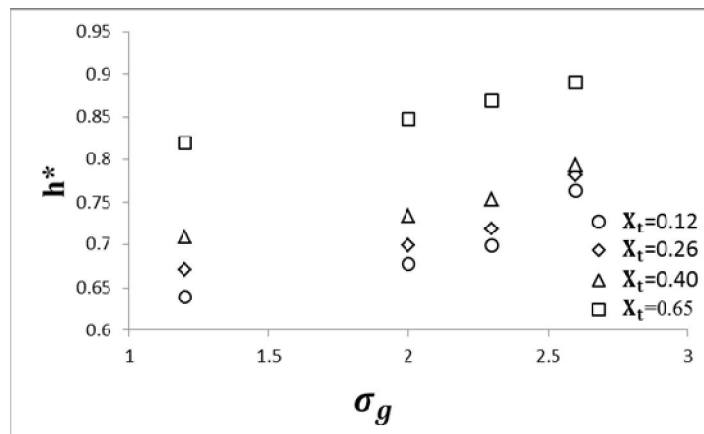
است و در واقع نشان دهنده میزان شسته شدن دلتا در عمق است، افزایش می‌یابد. لذا می‌توان گفت مقدار شسته شدن دلتا در بخش فوقانی آن در اثر عبور سیلاب با افزایش پیشروی دلتا در مخزن کاهش می‌یابد و همچنین می‌توان گفت با افزایش غیر یکنواختی میزان تأثیر سیلاب بر روی دلتا کمتر و شسته شدن دلتا در بخش فوقانی در اثر سیلاب کاهش می‌یابد. حداکثر این کاهش تأثیر در انحراف معیار هندسی $1/2$ تا $2/6$ ، 20 درصد بوده که مربوط به زمانی است که سیلاب در قسمت‌های ابتدایی پیشروی دلتا عبور می‌کند و در کمترین مقدار خود 7 درصد بوده است. با افزایش انحراف معیار هندسی ذرات شیب نمودارها نیز کاهش می‌یابد و این بدان معنی است که هر چه دانه‌بندی ذرات به سمت غیریکنواختی پیش می‌رود واکنش به زمان تأثیر هیدروگراف کاهش می‌یابد و تأثیر تغییرات زمان عبور سیلاب بر روی ارتفاع دلتا کمتر می‌شود. در شکل 8 تغییرات بدون بعد شده ارتفاع تاج

به منظور بررسی تغییرات طولی دلتا در اثر عبور سیلاب پارامتر بی بعد X_t^* (نسبت فاصله طولی تاج دلتا بعد از عبور سیلاب به قبل از عبور سیلاب) در مقابل زمان نرمال شده وقوع هیدروگراف سیل در شکل 9 نمایش داده شده است.

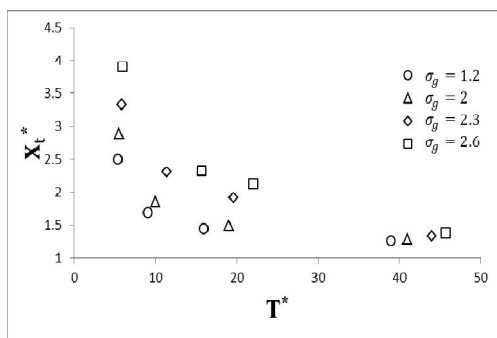
دلتا با انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی در هر یک از زمان‌های وقوع هیدروگراف نشان داده شده است. در این نمودار X_t نسبت طول پیشروی تاج قبل از عبور سیلاب به طول نهایی پیشروی تاج در انتهای آزمایش‌ها می‌باشد.



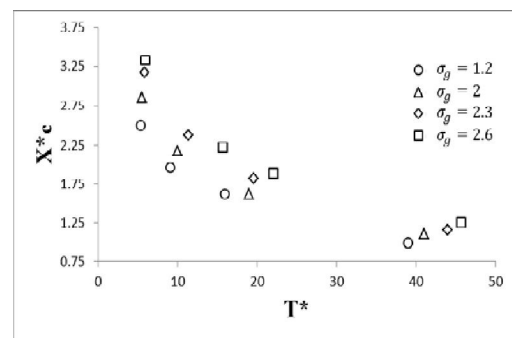
شکل 7 رابطه تغییرات ارتفاع تاج دلتا بعد از عبور هیدروگراف با زمان وقوع هیدروگراف



شکل 8 تغییرات ارتفاع تاج دلتا در برابر انحراف معیار ذرات رسوبی در هر یک از زمان‌های وقوع هیدروگراف



(ب)



(الف)

شکل 9 تغییرات الف - پیشروی تاج و ب - پایه دلتا، پس از عبور سیلاب با زمان وقوع هیدروگراف

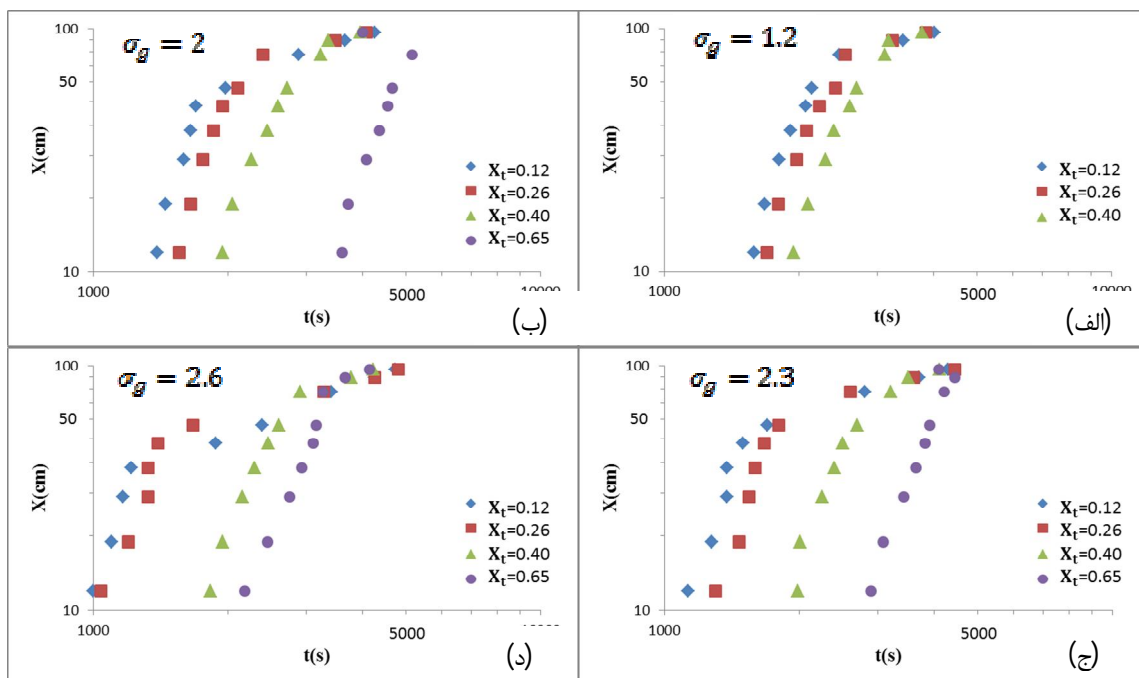
انحراف معیارهای مختلف هستند که در آن‌ها پیشروی تاج دلتای رسوبی پس از عبور سیلاب تا انتهای آزمایش یعنی زمانی که تاج دلتا به ایستگاه انتهایی در 1/2 متری ابتدای تبدیل می‌رسد، برای هر یک از زمان‌های عبور سیلاب نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود با افزایش زمان عبور سیلاب x_f سرعت پیشروی دلتا پس از عبور سیلاب افزایش می‌یابد. با توجه به شیب هریک از نمودارها می‌توان گفت که افزایش زمان تأثیر سیلاب هم بر نمای رابطه اسونسن و هم بر ضریب این رابطه تأثیرگذار است. همچنین می‌توان گفت که با افزایش انحراف معیار هندسی ذرات سرعت پیشروی دلتا پس از عبور سیلاب تا انتهای آزمایش افزایش می‌یابد. برای بدست آوردن مقادیر A و B ، مقادیر پیشروی دلتا در برابر زمان به صورت لگاریتمی رسم و بدینوسیله مقادیر نمای رابطه اسونسن و لگاریتم ضریب رابطه اسونسن به شرح جدول 3 بدست آمد.

در اینجا نیز مشاهده می‌شود که با افزایش زمان تأثیر سیلاب (نسبت به پیشروی دلتا) میزان شستگی دلتا در جهت طولی نیز کاهش یافته و در نتیجه می‌توان گفت تأثیر سیلاب بر روی دلتا با پیشروی طولی بیشتر دلتا در مخزن، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش غیریکنواختی میزان شستگی دلتا در پروفیل طولی کاهش می‌یابد. این مقادیر در زمانی که دلتای رسوبی قبل از عبور سیلاب در قسمت‌های ابتدایی مخزن قرار داشته، بیشترین اختلاف را نشان داده‌اند.

3-2- نتایج مربوط به پیشروی دلتا

در شکل 10 منحنی پیشروی دلتا در مخزن برای پایه دلتا در کلیه آزمایش‌ها نشان داده شده است. با توجه به منحنی پیشروی می‌توان رابطه‌ای توانی (رابطه اسونسن $X = A.t^B$) برای پیشروی تاج دلتا را توسعه داد که در جدول 3 مقادیر ضریب و توان در حالات مختلف آمده است. هر یک از نمودارها مربوط به نمونه‌های رسوبی با



شکل 10 تغییرات زمانی طول پیشروی بر حسب انحراف معیاردانه‌بندی مصالح رسوبی: الف- 1/2، ب- 2/3، ج- 2/3 و د- 2/6

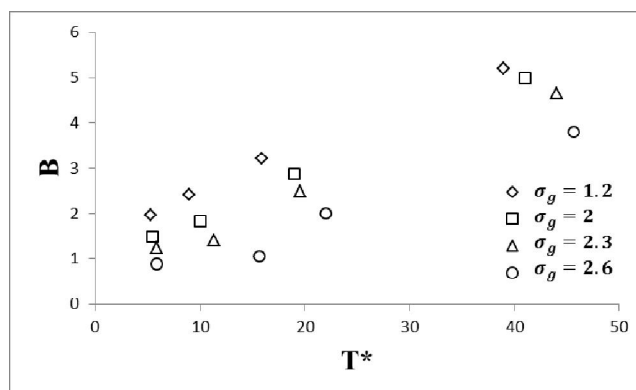
تفاوت هندسه مدل آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش در این تحقیق و تحقیقات گذشته دانست. وجود دلتای شسته شده توسط سیلاب در این آزمایش‌ها باعث افزایش سرعت پیشروی دلتا در اثر تغییر عمق و سرعت جریان می‌شود.

در شکل 11 رابطه بین نمای معادله اسونسن و زمان نرمال شده عبور سیلاب در دانه‌بندی‌های مختلف مصالح رسوبی و در شکل 12 ارتباط بین تغییرات نمای رابطه برآزش داده شده با انحراف معیار هندسی ذرات در زمان‌های مختلف وقوع هیدروگراف نشان داده شده است. با توجه به شکل 12 مشاهده می‌شود با افزایش انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی توان رابطه اسونسن کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در وجود ذرات ریزدانه بیشتر در نمونه‌های رسوبی غیریکنواخت دانست.

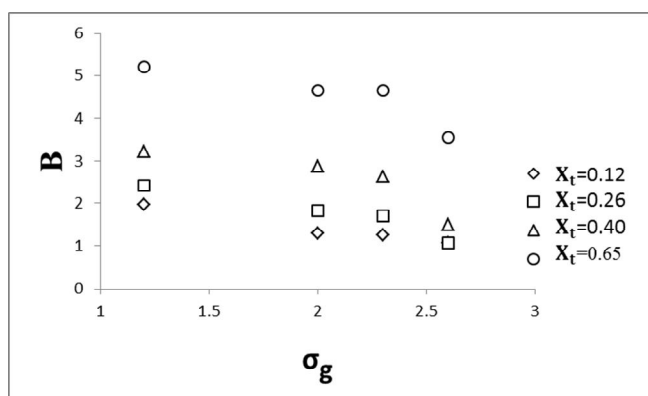
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان تأثیر هیدروگراف توان رابطه اسونسن افزایش می‌یابد. در مطالعات اسونسن (2004) که در یک کانال مستطیلی انجام شد توان رابطه اسونسن برابر 0/5 استخراج شده است. در مطالعات چگنی‌زاده (1384) این توان برابر 0/4 و در بررسی‌های خسروپور و بنی‌هاشمی (1387) نیز برابر 0/4 بدست آمده است. اما در مطالعات انجام شده توسط مامی‌زاده (1387) و قصاب سرابی (1388) بین 0/6 تا 0/7 و در تحقیقات صدیق‌کیا (1390) 0/8 تا 2 بوده است. مقدار توان این رابطه در این تحقیق نیز دارای طیف وسیع 1 تا 4 است. این اختلافات در این تحقیق و تحقیقات گذشته به دلیل اختلاف در زمان قطع آزمایش، اختلاف بین نسبت بازشدگی‌ها، وجود سیلاب و دانه‌بندی‌های مختلف رسوبی می‌باشد. همچنین می‌توان دلیل اصلی این اختلاف در توان رابطه اسونسن را در

جدول 3 مقادیر ضریب و نمای رابطه توسعه داده شده

X_t	$\sigma_g = 1.2$		$\sigma_g = 2$		$\sigma_g = 2.3$		$\sigma_g = 2.6$	
	B	Log(A)	B	Log(A)	B	Log(A)	B	Log(A)
0/12	1/96	-4/96	1/3	-3/33	1/25	-2/49	1/06	-1/87
0/26	2/41	-6/52	1/83	-4/49	1/7	-3/051	1/061	-1/85
0/40	3/21	-9/37	2/87	-8/21	2/63	-7/41	1/5	-6/25
0/65	-	-	4/22	-13/73	4/88	-15/8	3/56	-10/76



شکل 11 تغییرات نمای رابطه اسونسن (2004) با زمان نرمال شده وقوع سیلاب



شکل 12 تغییرات نمای رابطه اسونسن با انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی

سمت غیر یکنواختی پیش می‌رود، واکنش به زمان تأثیر سیلاب کاهش می‌یابد. ذرات غیر یکنواخت رسوبی هم بر نمای رابطه و هم بر ضریب رابطه تأثیر گذار بوده و به طور کلی با افزایش انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی، مقدار بدست آمده برای توان رابطه اسونسن کاهش می‌یابد و سرعت پیشروی دلتا کم می‌شود. این تأثیر در محدوده انحراف معیار هندسی 1 تا 2 کم بوده، ولی با افزایش بیش از 2 انحراف معیار هندسی تأثیر بیشتری خواهد داشت.

قسمتی از این ذرات در آزمایشات همراه با جریان شسته شده و به حالت معلق به پایین دست مخزن منتقل و در آنجا ته‌نشین می‌شد که این امر موجب کاهش بار بستر و کند شدن حرکت دلتا می‌شود. البته پنهان شدن این ذرات ریزدانه در بین ذرات درشت‌دانه و افزایش آستانه حرکت ذرات را می‌توان از عوامل این کاهش نیز دانست. همچنین با افزایش زمان عبور سیلاب این توان افزایش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر زمان عبور سیلاب بر روی پیشروی و شکل دلتا در حالت وجود دانه‌بندی‌های مختلف مصالح رسوبی به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح رسوبی مورد استفاده در این تحقیق دارای محدوده غیریکنواختی (انحراف معیار هندسی) $1/2$ تا $2/6$ بودند. با توجه به نتایج تحقیق مشاهده که در محدوده بررسی این تحقیق با افزایش زمان عبور سیلاب نسبت به پیشروی دلتا در مخزن، میزان شستگی دلتا هم در قسمت فوقانی و هم قسمت پیشانی دلتا کاهش می‌یابد. با افزایش انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی میزان تأثیر سیلاب (عبور کرده در زمان‌های مختلف پیشروی) بر روی دلتا کمتر و شستگی دلتا در اثر سیلاب در پروفیل طولی و عرضی کاهش می‌یابد. همچنین هر چه دانه‌بندی ذرات به

5- فهرست علائم

B	عرض مخزن
b	عرض رودخانه
d_{50}	قطر میانه ذرات رسوبی
g	شتاب ثقل
H	ارتفاع آب یا رسوب
h^*	ارتفاع بدون بعد شده آب یا رسوب
Q_w	دبی جریان
T^*	زمان تأثیر سیلاب (بدون بعد)
t^*	زمان پیشروی دلتا (بدون بعد)
X^*	طول پیشروی دلتا (بدون بعد)

6- منابع

چگنی زاده، ا. (1384). "بررسی آزمایشگاهی رسوبگذاری در

- Fan, J. and Morris, G. (1992). "Reservoir sedimentation. I: delta and density current deposits", *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), pp. 354-369.
- Jugovic, J., Schuster, G., and Nachtnebel, S. (2005). "Aggradation of reservoirs in alpine regions", *International symposium on water management and hydraulic engineering, Austria*, pp. 275-280.
- Kostic, S., and Parker, G. (2003). "Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling", *Journal of Hydraulic Research*, 41(2), pp. 127-140.
- Mahmood, K. (1987). "Reservoir sedimentation: impact, extent, mitigation", *World Bank Technical Report No. 71, Washington, D.C.*
- Raudkivi, A.J. (1993). *Hydraulic Structure Design Manual, Sedimentation, Exclusion and Removal of Sediment from Diversion Water*, IAHR. p. 164.
- Swenson, J.B., Voller, V.R., Paola, C., Parker G. and Marr J.G. (2000). "Fluvio-deltaic sedimentation: a generalized stefan problem", *Euro. J. of App. Math.* 11, pp. 433-452.
- Toniolo, H. and Parker, G. (2003). "1D numerical modeling of reservoir sedimentation", *Proceeding, IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain*, pp. 457-468.
- Voller, V.R., Swenson, J.B., Kim, W. and Paola, C. (2004). "A fixed-grid method for moving boundary problems on the earth surface", *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2004)*, Jyvaskyla.
- مخازن سدها و تشکیل دلتا"، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- خسروپور، ح، بنی‌هاشمی، م.ع، و صفی‌یاری، ا. (1387)، مقایسه نتایج پیشروی دلتای رسوب در مخزن سد در مدل آزمایشگاهی با مدل عددی مشابه با استفاده از نرم‌افزار "HEC-RAS، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، تهران، ایران.
- صدیق‌کیا، م. (1390). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر هیدروگراف سیل و دانه‌بندی غیریکنواخت ذرات رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلتا"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- صفی‌یاری، ا، و بنی‌هاشمی، م. (1388). "بررسی پیشروی زبان رسوبی در مخزن"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، 43(4)، ص.ص. 383-394.
- قصاب‌سرایبی، ح. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان ورودی به مخزن سد در تبدیل تدریجی و تأثیر آن در پیشروی و شکل دلتا"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- مامی‌زاده، ج. (1388). "بررسی زاویه واگرایی و مشخصات هیدرولیکی - رسوبی بر نحوه پیشروی دلتا در مخازن سدها"، رساله دکترای سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.