

## مطالعه آزمایشگاهی<sup>۱</sup> پیشروی زبانه رسوبی<sup>۲</sup> در مخزن<sup>۳</sup>

امید رضا صفی یاری<sup>۱</sup> و محمد علی بنی هاشمی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۶/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۴/۲۹، تاریخ تصویب ۸۷/۹/۱۰)

### چکیده

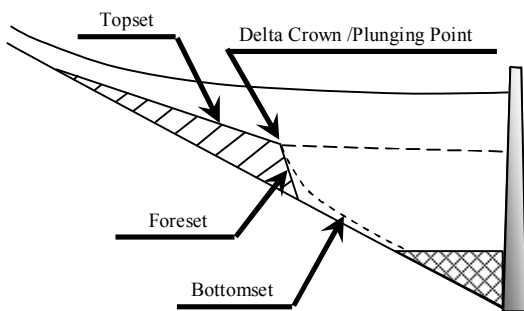
در مطالعه حاضر با استفاده از یک کانال با بازشدگی در پلان و پروفیل طولی، پدیده رسوب گذاری دلتایی<sup>۴</sup> در مخازن سدها<sup>۵</sup> مطالعه شده است. رسوب گذاری در شرایط بار کف<sup>۶</sup> و یا تشکیل دلتا در مخزن، تابع پارامترهای متعددی مانند: شکل هندسی مخزن<sup>۷</sup>، شیب کف<sup>۸</sup>، ویژگی های هیدرولوژیکی منطقه، شرایط هیدرولیکی جریان ورودی، نوع و میزان بار رسوبی ورودی به مخزن و . . . است. در این پژوهش تعدادی از پارامترهای موثر در مسئله، شامل دبی آب<sup>۹</sup>، عمق آب مخزن<sup>۱۰</sup>، دبی رسوب<sup>۱۱</sup> و خواص فیزیکی - هندسی<sup>۱۲</sup> ذرات رسوبی مطالعه شده اند. به ازای تغییر در هر یک از این پارامترها، تغییرات زمانی بالا آمدگی بستر مخزن و همچنین میزان جا به جایی زبانه رسوبی به صورت داده های عددی و تصویری ثبت شده است. مشاهده ها حاکی از آن است که میزان تغییرات سرعت حرکت دلتای رسوبی در امتداد طولی مخزن نسبت به عمق آب دریاچه حساس تر از سایر پارامترهای مورد مطالعه بوده است. برای نمایش قانون حاکم بر میزان جا به جایی دلتا در راستای طولی مخزن، با استفاده از آنالیز ابعادی<sup>۱۳</sup>، پارامترهای ترکیبی متناسب با فیزیک مسئله استخراج شده و با کمک اعداد بی بُعد<sup>۱۴</sup> حاصل و همچنین خروجی های آزمایشگاهی، با معرفی یک عدد بی بُعد جدید، نمودارهای مشخصه پیشروی دلتا ترسیم شده اند.

**واژه های کلیدی:** رسوب گذاری مخزن، مطالعات آزمایشگاهی، پیشروی زبانه رسوبی (دلتا)، اعداد بی بُعد

### مقدمه

به وجود آمدن ناحیه پس زدگی آب<sup>۱۵</sup> در کانال های روباز به واسطه قرارگیری مانعی در مسیر جریان، مانند یک سد یا یک سرریز، منجر به تولید پروفیل های طولی از رسوب گذاری<sup>۱۶</sup> می شود. هنگامی که جریان آب و رسوب به ناحیه پس زدگی وارد می شود، سطح مقطع عرضی کانال و عمق آب به تدریج افزایش یافته، سرعت جریان کم می شود و در نتیجه ذرات رسوبی همراه با آب ته نشین می شوند. ته نشینت اولیه ذرات درشت تر با رسوب گذاری ذرات ریزدانه تر در مناطق پایین دست جریان، ادامه می یابد و به مرور زمان ناحیه ای به شکل زبانه رسوبی یا دلتا در پروفیل طولی مشاهده می گردد (شکل ۱).

مطالعات انجام شده قبلی و مشاهده های میدانی بیانگر آن است که پروفیل دلتایی مخزن از نظر هندسی به سه ناحیه مختلف تقسیم می شود. قسمت اولیه به نام Topset، محل انباشت مصالح درشت دانه در محدوده اندازه قلوه سنگ تا شن و ماسه است. گزارش مشاهده های Borland در سال ۱۹۶۰ نشان داد، این محدوده که به طور تقریبی از دهانه مخزن شروع شده و تا بالاترین نقطه دلتا به نام "تاج دلتا"<sup>۱۷</sup> امتداد می یابد، شیب ملایمی حدود نیم تا دو سوم شیب اولیه بستر رودخانه دارد [۱].



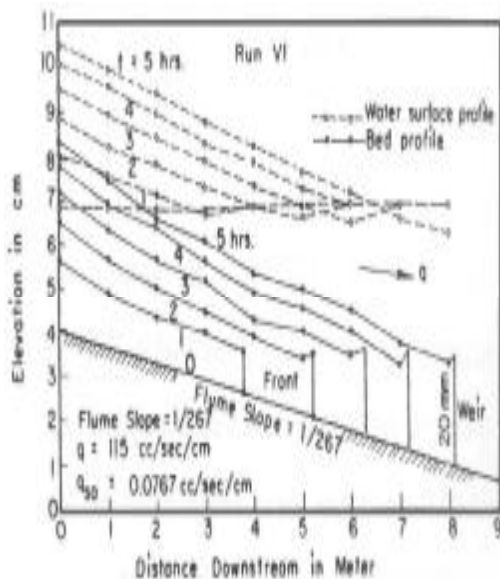
شکل ۱: نمایش پروفیل طولی از رسوب گذاری دلتایی در مخازن.

بلافاصله بعد از Topset، محدوده دوم از محل تاج دلتا شروع می شود و نقطه تاج را به پنجه دلتا<sup>۱۸</sup> متصل می کند. بر اساس مطالعات Borland در سال ۱۹۷۱ این منطقه که با نام Foreset یا پیشانی دلتا شناخته می شود، شیبی تند و نزدیک به زاویه انباشتگی مصالح<sup>۱۹</sup> دانه ای در حالت مغروق دارد [۲]. آخرین قسمت شامل مصالح ریزدانه ای است که پس از سر خوردن روی پیشانی دلتا در ناحیه ای پایین تر از پنجه جمع شده و منطقه Bottomset را تشکیل

Bhamidipaty & Shen در سال ۱۹۷۱ موضوع

رسوب‌گذاری را در کانالی مورد بررسی قرار دادند که کف آن با ماسه پوشیده شده بود و تزریق رسوب بیشتر از ظرفیت حمل جریان در کانال انجام می‌گرفت. با این روش، به دلیل اضافه بودن بار رسوبی نسبت به توان جریان، به مرور پشته‌های رسوبی تشکیل شده و در امتداد فلوم آزمایشگاه به حرکت در می‌آمده‌اند. این محققان مشاهده‌های خود را در قالب تصاویری از پروفیل طولی پیشرفت دلتا در کانال (و نه مخزن) همراه با تغییرات همزمان تراز سطح آب بالادست ثبت کرده‌اند [۹].

Sugio طی سال‌های ۱۹۷۱ و ۱۹۷۲ در مطالعاتی آزمایشگاهی که در آنها اثر حضور جسم سد به عنوان عامل ایجاد کننده پس‌زدگی آب شبیه‌سازی شده بود، اثر تغییر شیب کانال را بر میزان پیشروی زبانه رسوبی در دو حالت شیب تند و ملایم و با شرایط مختلف دبی آب و رسوب بررسی کرد. نمونه‌ای از کارهای او را می‌توان در پروفیل‌های طولی مشاهده شده برای شیب ملایم، ملاحظه کرد (شکل ۲). وی همچنین روابطی برای محاسبه خصوصیات هندسی دلتا و میزان حمل رسوب توسط آن به کمک آنالیز ابعادی به دست آورد [۹، ۱۰].



شکل ۲: نمایشی از پروفیل طولی در تراز بستر و سطح آب بالادست مخزن بر اساس نتایج آزمایشگاهی Sugio, 1972 (شیب ملایم).

Yücel در سال ۱۹۷۵ در بررسی‌های آزمایشگاهی خود شرایط ته‌نشینی رسوب در مخازن را در حالت جریان

می‌دهند.

مشاهده‌های آزمایشگاهی توسط Hotchkiss & Parker در سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ و هم چنین Bhamidipaty & Shen در سال ۱۹۷۱ [۳، ۴، ۵، ۶] نشان‌دهنده آن است که برای شرایط انتقال رسوب که بار بستر در آن غالب است، رسوب انتقال یافته در تمامی عرض دلتا روی سطح پیشانی ته‌نشین می‌شود و میزان انتقال رسوب در ناحیه پنجه دلتا ناچیز است. در این حالت ذرات درشت که عمده بار رسوبی را تشکیل می‌دهند، پس از ورود به مخزن و نشستن در ناحیه Topset به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول به قدری سنگین هستند که در همان محل باقی می‌مانند و دسته دیگر به دلیل کوچک تر بودن روی سطح Topset شروع به غلطش و لغزش نموده و به سمت تاج دلتا پیشروی می‌کنند. پس از رسیدن به محل تاج این ذرات در نقطه پرش ۲۰ قرار می‌گیرند و باز به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول که درشت‌تر هستند روی سطح پیشانی دلتا لغزیده و با فرو ریزش موجب توسعه این سطح به جلو می‌شوند. گروه دیگر که ریزدانه هستند، همراه با جریان به طور غوطه‌ور پرش می‌کنند و در منطقه‌ای آرام‌تر ته‌نشست می‌شوند. بدین ترتیب جسم دلتایی در مخزن رشد کرده و توسعه می‌یابد [۷، ۸].

بررسی روند رسوب‌گذاری مخازن به کمک مدل‌های تجربی و آزمایشگاهی قدمت زیادی دارد. اولین مطالعه تجربی در مورد رسوب‌گذاری مخزن توسط Schoklitsch در سال ۱۹۳۷ در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی انجام پذیرفت. نتایجی که او به آن دست یافت، اولین تعاریف در زمینه شکل دلتا گونه (گونه مثلثی) رسوب‌گذاری در مخزن و چگونگی پیشرفت آن در جهت جریان است. تعاریف و اصطلاحات وی هنوز هم در این زمینه رایج و کاربردی است [۹].

مطالعات Kobanbay طی سال ۱۹۶۹ در آزمایشگاه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه METU آنکارا، بیشتر روی سنجش و اندازه‌گیری طول پیشروی دلتا و حجم رسوب انتقال یافته توسط زبانه دلتایی متمرکز بوده است. وی برای پیش‌بینی سرعت پیشروی دلتا و دبی رسوبی که در محل پیشانی آن منتقل می‌شود، روابطی را پیشنهاد کرده است [۹].

رسوبی در یک کانال مستطیل شکل با عرض ثابت انجام گرفته است، میزان پیشروی دلتا به صورت تابعی توانی<sup>۲۲</sup> از زمان و به شکل رابطه زیر ارائه شده است [۱۷،۱۶]:

$$X = A \cdot t^B \quad (۱)$$

که در این معادله پارامترهای A و B متغیرهای وابسته با بُعدی از خصوصیات هندسی و فیزیکی مخزن هستند و توان B برای کانال مستطیلی مورد مطالعه معادل ۰/۵ به دست آورده شده بود.

تا کنون تلاش‌های آزمایشگاهی به عمل آمده در بررسی پدیده پیشروی دلتا، اغلب بر رسوب‌گذاری در فلوم‌های مقطع مستطیلی<sup>۲۳</sup> با عرض ثابت متمرکز بوده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهند که پارامترهای متنوعی مانند: شکل هندسی مخزن، ویژگی‌های مورفولوژیک بستر، خصوصیات مواد رسوبی و . . . بر پیشروی زبانه رسوبی در مخزن مؤثر هستند. هدف این مقاله، بررسی آزمایشگاهی رسوب‌گذاری مخزن در شرایطی که بار بستر حاکم است، در فلومی با هندسه بازشونده<sup>۲۴</sup> است. در این پژوهش فرض شده است که پیشروی زبانه رسوبی به سمت مخزن تحت اثر پارامترهای: دبی آب، دبی رسوب، تراز آب مخزن، خصوصیات فیزیکی-هندسی ذرات رسوبی و شتاب جاذبه و تابعی از زمان است که معادله حاکم بر آنها به این ترتیب معرفی می‌شود:

$$X = f(t, Q, Q_s, W, d_{50}, \rho_s, \rho, g) \quad (۲)$$

در معادله ۲، X [L] نمایانگر موقعیت تاج زبانه رسوبی نسبت به نقطه ابتدایی مخزن، t [T] زمان، Q [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>] دبی حجمی ورودی آب، Q<sub>s</sub> [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>] دبی حجمی ورودی رسوب، W [L] عمق آب مخزن، d<sub>50</sub> [L] اندازه میانه ذرات رسوبی، ρ<sub>s</sub> [ML<sup>-3</sup>] جرم حجمی رسوب، ρ [ML<sup>-3</sup>] جرم حجمی آب و g [LT<sup>-2</sup>] شتاب جاذبه زمین است. شکل مخزن آزمایشگاهی نیز بر خلاف آنچه در مرور ادبیات فنی در مورد کارهای گذشته ملاحظه شد، مقطع عرضی متغیر است تا ذرات رسوبی در یک محیط مشابه با مخزن سد در قالب زبانه رسوبی در امتداد طولی به پیشروی پردازند و اثر باز شدگی مقطع چه در پلان و چه در مقطع طولی تا حد امکان دیده شود.

### تحلیل ابعادی

با توجه به عوامل موثری که در معادله (۲) معرفی شده‌اند و به کمک آنالیز ابعادی، اعداد بی بُعد زیر حاصل

یک بعدی تجزیه و تحلیل کرد. مشاهده‌های وی نشان می‌داد که زاویه بین پیشانی دلتا و کف فلوم در حین آزمایش مقدار ثابتی دارد، همچنین تغییرات تراز آب در بالادست متناسب با رشد و پیشروی دلتا است؛ به گونه‌ای که به طور متناوب با تغییر هر یک از آنها، دیگری خود را با شرایط جدید وفق می‌دهد [۹].

Hotchkiss در سال ۱۹۸۸ و Hotchkiss & Parker در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۱ در فلومی به عرض ۱۵ سانتی‌متر، اثر مقدار بار رسوبی را روی میزان و نوع رسوب‌گذاری در مخازن به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند [۴،۵،۶].

Yu & Lee در سال ۱۹۹۹ با استفاده از یک فلوم به عرض ۱۵ سانتی‌متر، اثر تنش برشی بر روی پیشروی زبانه دلتایی و میزان انتقال رسوب توسط آن را مطالعه کردند [۱۱]. Yu و همکاران در سال ۲۰۰۰ در دنباله آزمون‌های سال ۱۹۸۸ Hotchkiss آزمون‌هایی در فلوم‌هایی به عرض ۲۰ و ۱۵ سانتی‌متر انجام دادند تا نحوه تشکیل زبانه رسوبی در مخزن را مطالعه کنند. در پژوهش‌های ایشان از پنج گروه مصالح رسوبی با دانه بندی متنوع استفاده شده بود. بر اساس نتایج این آزمون‌ها و همچنین نتایج کارهای قبلی توسط Hotchkiss، رابطه ظرفیت انتقال رسوب برای زبانه رسوبی استخراج شد [۱۲].

Bellal و همکاران در سال ۲۰۰۳ با استفاده از فلوم مستطیلی به عرض ۵۰ سانتی متر و طول ۷/۶ متر، تشکیل و پیشروی زبانه رسوبی پشت سد یا بند مستقر روی بسترهای با شیب زیاد و تشکیل پرش هیدرولیکی را مطالعه کردند [۱۳]. Cantelli و همکاران در سال ۲۰۰۴ برای مطالعه روی برداشتن سد (Dam Removal)، یک سری آزمون رسوب گذاری مخزن نیز انجام دادند. فلوم مورد استفاده با مقطع مستطیلی به عرض ۶۱ سانتی متر بوده است [۱۴]. Toniolo & Schultz در سال ۲۰۰۵ با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی رسوب‌گذاری مخزن به مطالعه میزان ضریب تله‌اندازی رسوب پرداختند. آزمایش‌های ایشان در فلومی مستطیلی به عرض ۳۰/۴ سانتی متر انجام پذیرفت و شرایط متنوعی در موقعیت خروجی پایین دست مخزن مطالعه شد [۱۵].

در بررسی و حل تحلیلی<sup>۲۱</sup> که توسط Swenson و همکاران در سال ۲۰۰۰ و همچنین توسط Voller و همکاران در سال ۲۰۰۴ درباره حرکت دلتای

می‌شوند:

$$\Pi_1 = \frac{X}{W} \quad (۳)$$

$$\Pi_2 = \frac{gt^2}{W} \quad (۴)$$

$$\Pi_3^1 = \frac{Q^2}{g \cdot W^5} \quad (۵-۱)$$

$$\Pi_3^2 = \frac{Q_s^2}{g \cdot W^5} \quad (۵-۲)$$

$$\Pi_3^3 = \frac{d_{50}}{W} \quad (۵-۳)$$

$$\Pi_3^4 = \frac{1}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)} \quad (۵-۴)$$

شده و عدد  $\Pi_3$  نماینده ترکیبی از خواص مختلف هیدرولیکی جریان و رسوب به همراه عمق مخزن است. طبق معادله (۷) توانسته‌ایم میزان پیشروی را به صورت تابعی زمانی و وابسته به خصوصیات مخزن و جریان نمایش دهیم. در بخش‌های بعدی ارتباط بین این پارامترها را با استفاده از برداشت‌های آزمایشگاهی می‌سنجیم و تابع F را که قانون حاکم بر پدیده پیشروی دلتا است بررسی می‌کنیم.

### شرح آزمایش و تحلیل نتایج

در ساخت مخزن از هندسه متقارن در پلان استفاده شده است تا فلوم آزمایشگاهی در امتداد محور مرکزی به گونه‌ای مناسب، شرایط هیدرودینامیکی و انتقال رسوب مدل دو بعدی در فایم را برآورده کند، علاوه بر آن تغییر در شیب طولی فلوم در ناحیه مخزن، مدل نسبت به قسمت مستقیم قبل از ورود به مخزن تداعی کننده وضعیت مخزنی است که شکل گرفته و استعداد رسوب‌گذاری و تشکیل زبانه دلتایی را دارد. کف فلوم و یکی از جداره‌ها از جنس سیمان با سطح بسیار صاف و رنگ شده است و جنس جداره دیگر برای امکان مشاهده و عکس‌برداری از جنس شیشه با ضخامت ۱۰ میلی متر انتخاب شده است. هندسه فلوم از سه قسمت متفاوت در طول کانال تشکیل شده است که معرف نواحی مختلف یک مخزن در حالت عمومی هستند (شکل های ۳ و ۴). این نواحی عبارتند از:

- ناحیه اول به طول ۳/۰۳ متر: کانال مستطیلی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و تراز کف ۴۰ سانتی‌متر و بستر بدون شیب؛
  - ناحیه دوم به طول ۱۳/۵۳ متر: کانال مستطیلی به عرض متغیر از ۳۰ سانتی‌متر در خروجی کانال تا ۱۸۰ سانتی‌متر در محل انتهایی مخزن و تراز کف متغیر از ۴۰ سانتی‌متر در ابتدا تا صفر در انتها با شیب بستر یکنواخت؛
  - ناحیه سوم به طول ۲/۵ متر: کانال مستطیلی به عرض ۱۸۰ سانتی‌متر و تراز کف صفر و بستر بدون شیب؛
- برای هر یک از این نواحی، نقشی در مطالعات لحاظ شده است. به این ترتیب که:

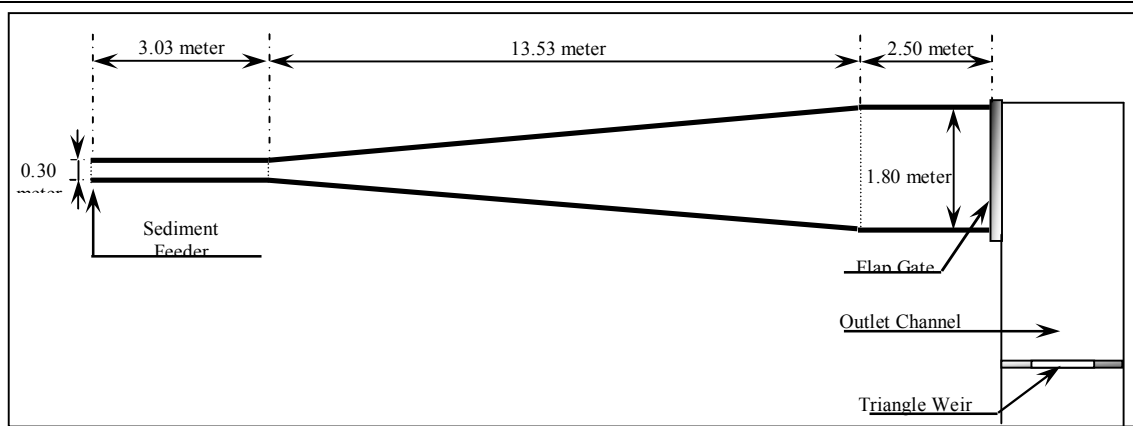
اعداد بی‌بعد به دست آمده در روابط (۵-۲) و (۵-۳) را می‌توان نوعی عدد فرود جریان و رسوب تلقی کرد. با توجه به تنوع تعداد عوامل موثر و اعداد بی‌بعد به دست آمده و برای فشرده‌سازی و تعمیم نتایج شایسته است تا جای امکان از اعداد بی‌بعد کمتری استفاده شود. از ضرب اعداد بی‌بعد روابط (۵-۱) تا (۵-۴)، عدد بی‌بعد جدیدی حاصل می‌شود که از این به بعد آن را پارامتر مشخصه رسوب‌گذاری مخزن یا به اختصار پارامتر مشخصه<sup>۲۵</sup> می‌نامیم. این پارامتر به این صورت است:

$$\Pi_3 = \frac{Q^2 \cdot Q_s^2 \cdot d_{50}}{g^2 \cdot W^{11} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)} \quad (۶)$$

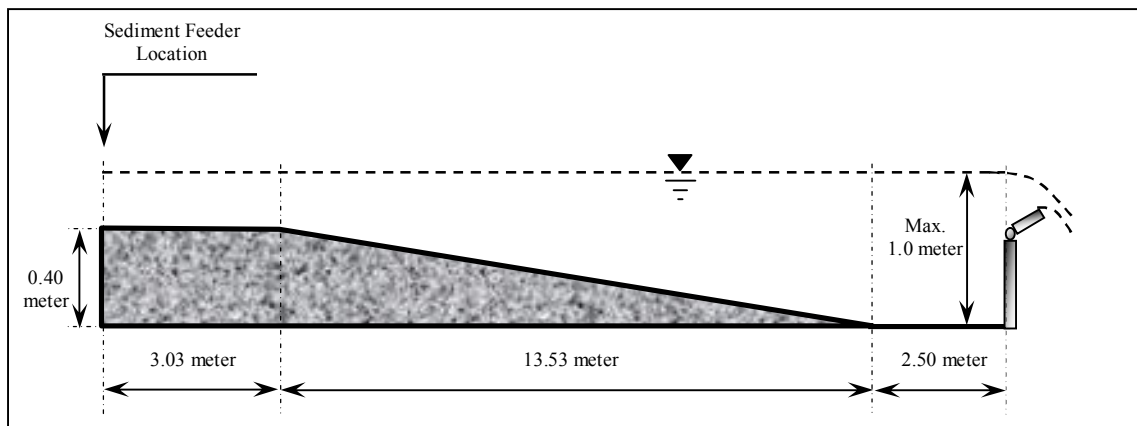
این پارامتر در واقع ترکیبی از عوامل محرک و مقاوم در پیشروی زبانه رسوبی است. چنان که در ادامه این تحقیق نشان داده می‌شود با افزایش این پارامتر سرعت پیشروی نیز بیشتر می‌شود و با کاهش آن نیز سرعت پیشروی کم می‌شود. همچنین در ادامه مقاله مفید بودن این عدد در فشرده سازی نتایج نمایش داده خواهد شد. باز نویسی معادله (۲) با استفاده از اعداد بی‌بعد توضیح داده شده، به معادله (۷) منجر می‌شود:

$$\frac{X}{W} = F \left[ \frac{gt^2}{W}, \frac{Q^2 \cdot Q_s^2 \cdot d_{50}}{g^2 \cdot W^{11} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)} \right] \quad (۷)$$

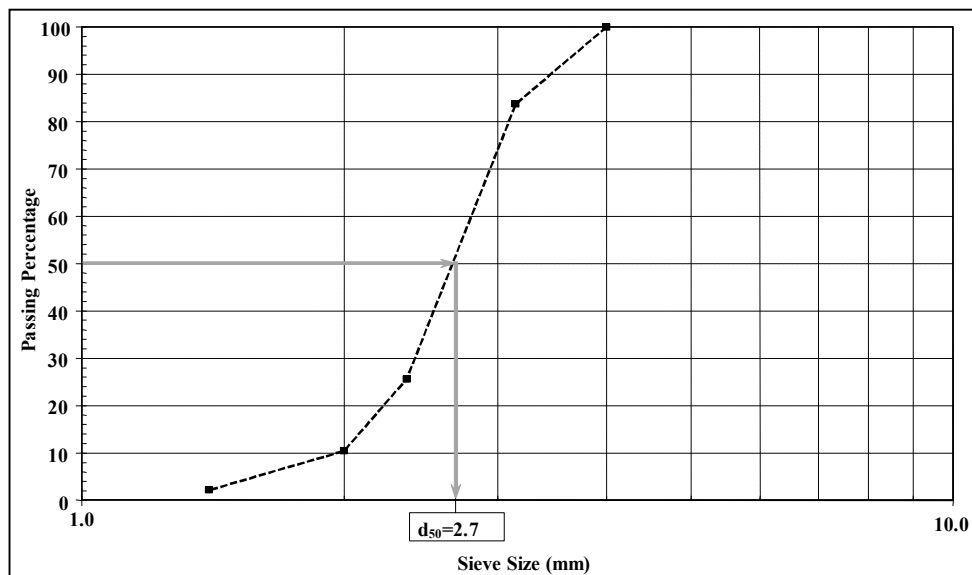
عدد بی‌بعد  $\Pi_1$  نشانگر میزان پیشروی دلتا یا میزان جا به جایی تاج دلتا، عدد  $\Pi_2$  نمایشگر زمان پیشروی بی‌بعد



شکل ۳: نمایش پلان فلوم آزمایشگاهی.



شکل ۴: نمایش مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی.



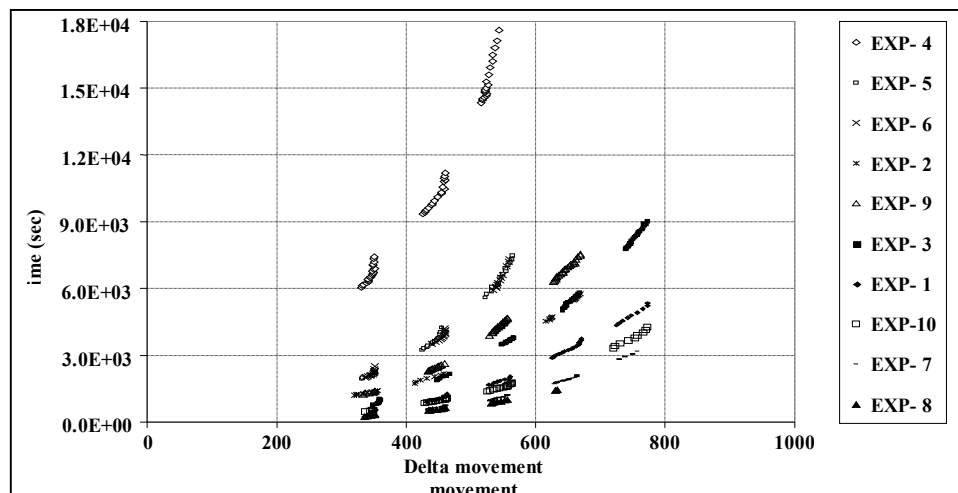
شکل ۵: نمایش دانه‌بندی مصالح رسوبی مورد استفاده.

بدین ترتیب علاوه بر ایجاد مانع به عنوان جداره سد و تأمین محیط آرام در مخزن، امکان تنظیم تراز آب مخزن در محدوده عملکرد دریاچه دورانی نیز به وجود می‌آید. آب پس از سرریز شدن از روی نقطه کنترل، به کانال تخلیه سالن آزمایشگاه وارد می‌شود که در مسیر این کانال از یک سرریز مثلی برای قرائت و کنترل دبی جریان استفاده شده است. در طی انجام هر آزمایش به طور منظم و در فواصل زمانی مناسب، عدم تغییرات دبی ناشی از کارکرد پمپ و همچنین عدم تغییرات تراز آب کنترل می‌شد تا از یکنواختی کارکرد مدل اطمینان حاصل شود. ریختن رسوب خشک در نقطه ابتدایی کانال، توسط یک دستگاه رسوب‌ریز (شکل ۹)، با قابلیت تنظیم رسوب خروجی به صورت مکانیکی-الکتریکی، انجام می‌شد. طراحی و عملکرد این دستگاه به نحوی است که تزریق رسوب باید از نوع خشک باشد، بنابراین پس از هر بار آزمایش، رسوب داخل کانال تخلیه و خشک می‌شود. برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و کالیبراسیون آن، در ابتدای هر آزمایش میزان خروجی دستگاه پس از تنظیمات مورد نظر، چندین بار اندازه‌گیری می‌شد و مقدار میانگین به عنوان دبی رسوب ورودی در نظر گرفته می‌شد. مشخصات ذرات رسوب مورد استفاده عبارتند از: اندازه میانه  $2/7$  میلی‌متر ( $d_{50}=2.7 \text{ mm}$ )، از جنس مصالح سنگی (یا ماسه درشت) با وزن مخصوص  $2/47$  گرم بر سانتی‌متر مکعب. سایر اندازه‌های هندسی عبارتند از:  $d_{84}=3.16 \text{ mm}$ ،  $d_{16}=2.13 \text{ mm}$ ،  $\sigma_g=1.2$ .

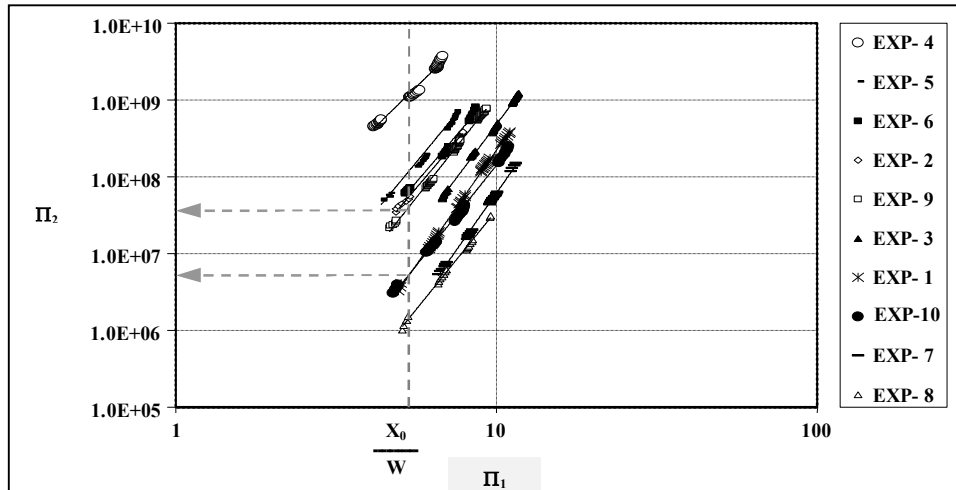
قسمت اول نمایانگر کانال یا رودخانه ورودی به مخزن و هم چنین مسیری برای یکنواخت شدن جریان قبل از رسیدن به مخزن سد است. به علاوه با توجه به اینکه فلوم آزمایشگاهی با بستر صلب ساخته شده و بار بستر از راه تزریق رسوب تأمین می‌شود، در این ناحیه ذرات رسوب فرصت دارند، شکل و تراز بستر متناسب با شرایط هیدرولیکی را تشکیل داده و به سوی مخزن مدل پیشروی کنند. به عبارت دیگر در این ناحیه دبی آب و رسوب به تعادل می‌رسند.

ناحیه دوم نمایانگر محوطه مخزن است و با شبیهی که در کف آن لحاظ شده است در حقیقت امکان تعقیب پدیده رسوب‌گذاری مخزن و تولید و توسعه دلتا پس از شکل‌گیری مخزن را ممکن می‌کند. ناحیه سوم نیز نماینده محوطه عمیق و آرام پشت سد و محلی است که در انتهای آن با سازه کنترلی می‌توانیم تراز آب مخزن انتخابی را در آزمایش‌های مختلف تنظیم کنیم.

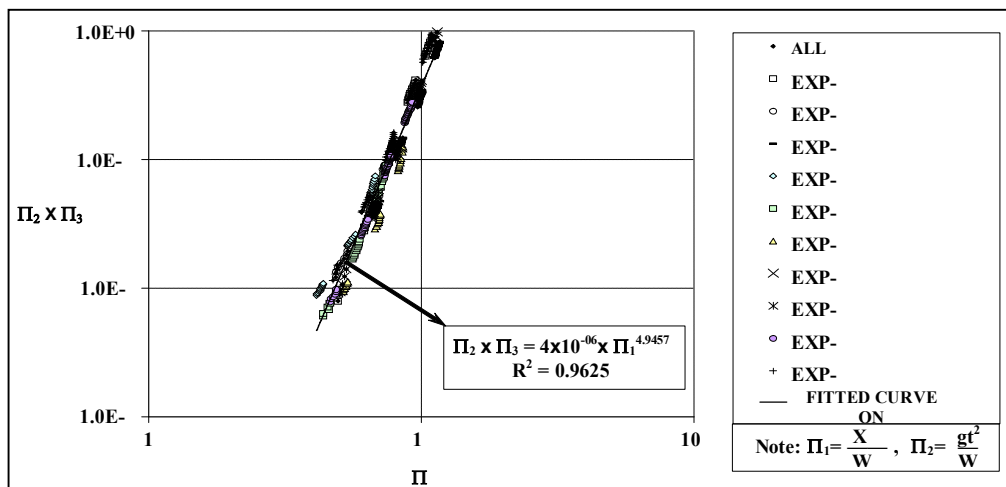
شرایط هیدرولیکی در نقاط بالادستی و پایین‌دستی مخزن به ترتیب شامل دبی ورودی و تراز آب مخزن است. تنظیم دبی ورودی به فلوم در بالادست از راه یک پمپ آب و شیر کنترلی انجام می‌شود. پس از پُر شدن حوضچه ابتدای فلوم و عبور جریان از صافی‌ها و آرام کننده‌ها، آب به دهانه ورودی کانال هدایت می‌شود. نقطه کنترل شرایط پایین‌دستی جریان (تنظیم ارتفاع مخزن) در انتهای فلوم قرار گرفته و از یک سرریز مستطیلی با قابلیت تنظیم ارتفاع به کمک یک دریاچه لولایی<sup>۲۶</sup> تشکیل شده است.



شکل ۶: منحنی‌های پیشروی زمانی دلتا - صفحه (X,t).



شکل ۷: نمودارهای مشخصه پیشروی دلتا - صفحه لگاریتمی.



شکل ۸: نمودارهای مشخصه به صورت فشرده شده برای کلیه سری‌های آزمایشی.

جدول ۱: ویژگی‌های پارامتری سری‌های آزمایشی.

Experiment No.	W (cm)	Q <sub>1</sub> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /sec)	Q <sub>3</sub> (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /sec)
EXP -1	70	48.14	224.81
EXP -2	85	59.41	242.72
EXP -3	64	48.14	78.46
EXP -4	80	54.34	35.39
EXP -5	76	53.85	80.32
EXP -6	65	36.68	51.41
EXP -7	66	49.53	260.69
EXP -8	66	48.14	346.69
EXP -9	72	51.90	90.32
EXP-10	71	50.00	298.19

منحنی دانه بندی مصالح با استفاده از آزمون سری الک‌های استاندارد تهیه شد (شکل ۵). در هر آزمون، پس از اعمال تنظیمات هیدرولیکی و رسیدن به حالت تعادل هیدرولیکی در وضعیت جریان، رسوب با دبی دلخواه در محدوده‌ای که بتوان شرایط تعادل را فراهم کرد، وارد می‌شد و ثبت وقایع از این مرحله آغاز می‌شد. در گام‌های زمانی متناسب با سرعت پیشروی زبانه رسوبی، با استفاده از تصویر برداری و رهاکردن میله‌های سنجش عمق<sup>۲۷</sup> تغییرات تراز کف ثبت می‌شد (تصاویر ۱۰، ۱۱، ۱۲). بازه زمانی آزمون‌ها بسته به سرعت پیشروی زبانه رسوبی و رسیدن به حد مطلوب از پیشروی برای برداشت تعداد داده‌های کافی، بین ۱ تا ۱۰ ساعت بوده است. شرایط آزمایشگاهی در جدول (۱) نمایش داده شده است.

در معادله (۸) ضرایب  $a_i$  و  $b_i$ ، پارامترهای معادله، متناسب با آزمون  $i$  ام هستند که از برازش منحنی توانی به داده‌های تجربی همان آزمون به دست می‌آیند. در صفحه لگاریتمی مقادیر  $a_i$  نشانگر مقدار عرض از مبدأ خط و مقدار  $b_i$  نمایشگر شیب خط هستند. با توجه به شکل (۷)، ترازوی نسبی خطوط ترسیمی در دسته‌های مختلف نشان می‌دهد که مقدار شیب یا توان  $b_i$  در معادله  $\gamma$  در این خطوط تا حدودی یکسان است ( $b = b_i = b_j$ ;  $i \neq j$ ) و مقادیر عرض از مبدأ خطوط با یکدیگر تمایز دارد. با توجه به منحنی‌های شکل (۶) ملاحظه می‌شود که شیب موضعی منحنی در نقاط مختلف به ازای افزایش زمان یا افزایش طول دلتا، نسبت به محور قائم کاهش می‌یابد و این کاهش شیب یعنی سرعت حرکت دلتا کمتر می‌شود. این نتیجه به طور مشهود در موارد طبیعی نیز قابل مشاهده و استنباط است، چون هرچه زبانه رسوبی بیشتر در مخزن نفوذ و پیشروی می‌کند، با مقطع بزرگ‌تری روبرو می‌شود و همچنین عمق بیشتری از آب را در مخزن تجربه می‌کند و در نتیجه سرعت پیشرفت دلتا کاهش می‌یابد.

شکل تغییرات خطی نتایج آزمایش‌ها در صفحه لگاریتمی و افزایش سرعت پیشروی به ازای افزایش پارامتر مشخصه  $\Pi_3$ ، القاء کننده این مفهوم است که با ضرب کردن پارامتر مشخصه در مقادیر محور قائم که اعداد  $\Pi_2$  را شامل می‌شود، موجب یک دست شدن منحنی‌ها و داده‌ها می‌شود. به بیانی دیگر چنانچه داده‌ها را در صفحه ای با مختصات ( $\Pi_1, \Pi_2 * \Pi_3$ ) ترسیم کنیم، ملاحظه می‌شود که تمامی داده‌های مربوط به آزمایش‌های مختلف، حول یک خط مشترک جمع و فشرده‌سازی می‌شوند (شکل ۸). این خط واحد نمایانگر معادله یا قانون رفتاری پیشروی زبانه رسوبی داخل مخزن است. به این ترتیب مجموعه معادلات (۸) که برای تک تک آزمون‌ها با پارامترهای مختلف برازش داده شده بود، اینک در قالب یک معادله واحد قابل عرضه است که به صورت معادله (۹) مشاهده می‌شود.

با استفاده از معادله پارامتریک ۹ و همچنین معادله خطی که بر داده‌های فشرده شده (شکل ۸) به صورت  $\log(\Pi_2 * \Pi_3) = 4 \times 10^{-6} + 4.9457 \times \log(\Pi_1)$  برازش داده شده است، می‌توان پارامترهای  $a$  و  $b$  را برآورد کرد.

با استفاده از داده‌های ترازایی کف و تصاویر برداشت شده، پروفیل‌های پیشروی دلتا در مخزن به دست آمدند. با انتخاب نقطه تاج دلتا به عنوان محل ردیابی<sup>۲۷</sup> زبانه رسوبی، داده‌های سری زمانی جا به جایی نقطه تاج در طی هر آزمایش استخراج شد.

نمودارهای  $(X, t)$  در شکل (۶) نمایش این سری‌های زمانی است. برای تعمیم نتایج، با استفاده از اعداد بی بُعد  $\Pi_2, \Pi_1$  که در بخش تحلیل ابعادی به دست آورده‌ایم، نمودارهای بی‌بُعد  $(\Pi_1, \Pi_2)$  در مختصات لگاریتمی در شکل (۷) ترسیم شدند که متناظر با نمودارهای شکل (۶) هستند. نکته جالب توجه در شکل‌های (۶) و (۷) این است که ترتیب قرارگیری منحنی‌ها از چپ به راست در صفحات مختصاتی، با روند افزایشی مقدار پارامتر  $\Pi_3$  متناظر هستند و به بیانی دیگر هرچه مقدار پارامتر مشخصه یک آزمایش بیشتر باشد، خط یا منحنی مشخصه آن آزمایش بیشتر به سمت راست صفحه متمایل می‌شود. چنانچه در شکل (۷) مشهود است به ازای یک مقدار ثابت از  $X = X_0$  می‌توانیم خطی عمودی ترسیم کنیم که خطوط یا منحنی‌های مشخصه را قطع کند و هرچه نقطه تقاطع بالاتر قرار گیرد، نشانگر زمان طولانی‌تری است. این مطلب مبین این حقیقت فیزیکی است که یک مسافت مساوی در آزمون‌های مختلف در زمان‌های مختلفی طی شده است و هرچه منحنی مشخصه آزمون به سمت چپ صفحه مختصاتی متمایل باشد زمان طی مسافت طولانی‌تر است. بنابراین سرعت متوسط پیشروی زبانه رسوبی کمتر است. بدین لحاظ با افزایش پارامتر مشخصه، سرعت متوسط پیشروی زبانه رسوبی در داخل مخزن نیز افزایش می‌یابد. شکل (۷) به خوبی رفتار خطی اعداد بی بُعد را در فضای لگاریتمی نشان می‌دهد که نشانگر رفتار توانی بین پارامترها است. به عبارت دیگر برای هر سری آزمایش می‌توان رابطه حاکم بر پیشروی زمانی دلتا را بدین شکل نوشت:

$$\Pi_{2,i} = a_i \cdot (\Pi_{1,i})^{b_i} \Rightarrow \frac{g \cdot t^2}{W_i} = a_i \left( \frac{X}{W_i} \right)^{b_i}$$

$$\Rightarrow \log(\Pi_{2,i}) = a_i + b_i \cdot \log(\Pi_{1,i}) \quad (۸)$$

$$\Rightarrow \log\left(\frac{g \cdot t^2}{W_i}\right) = a_i + b_i \cdot \log\left(\frac{X}{W_i}\right)$$



دلته را با استفاده از معادله ۱۰ به صورت زیر بیان کنیم:

$$X = A \cdot t^B \quad (10)$$

با کمی عملیات ریاضی روی معادله (۹) و استفاده از معادله برازش داده شده به کلیه داده‌ها در شکل (۸) مقدار توان B و پارامتر A قابل محاسبه است. معادله برازش یافته عبارت است از:

$$\log(\Pi_2 \cdot \Pi_3) = 4 \times 10^{-6} + 4.9457 \log(\Pi_1) \quad (11)$$

پس از جا به جایی پارامترها داریم:

$$X = 12.3436 \times g^{0.2022} \times (\Pi_3)^{0.2022} \times w^{0.7978} \times t^{0.4} \quad (12)$$

از مقایسه رابطه (۱۰) با معادله (۱۲) مشخص می‌شود که B برابر با ۰/۴ است و برای پارامتر A رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$A = 12.3436 \times g^{0.2022} \times (\Pi_3)^{0.2022} \times w^{0.7978} \quad (13)$$

همان طور که گفته شد در بررسی و حل تحلیلی که توسط محققان انجام گرفته است، توان B معادل ۰/۵ به دست آمده که مربوط به هندسه مستطیلی با مقطع ثابت است. تفاوت مقادیر B مربوط به تفاوت در هندسه فلوم‌ها است، در تحقیق حاضر از فلوم با بازشدگی استفاده شده است در حالی که در موارد دیگر فلوم‌های با عرض مقطع ثابت به کار گرفته شده‌اند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با بازشدگی بیشتر در محل اتصال به مخزن، مقدار B نیز کاهش بیشتری یابد. این نتیجه دور از ذهن و واقعیت نیست، چون هرچه میزان باز شدگی بیشتر شود، سرعت پیشروی هم کمتر می‌شود در نتیجه تابع توانی نیز دارای عدد توان کمتری خواهد داشت.

### جمع بندی

در بررسی آزمایشگاهی حاضر پیشروی دلتای رسوبی در یک کانال، با بازشدگی در پلان و پروفیل طولی مورد مطالعه شده است. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که میزان پیشروی دلتا، با توان ۰/۴ زمان متناسب است. با ترکیب عوامل بی‌بعد به دست آمده از آنالیز ابعادی، یک عدد بی‌بعد جدید معرفی شد که به طور همزمان تأثیر میزان دبی آب و رسوب و همچنین تراز سطح آب مخزن در سرعت پیشروی را نشان می‌دهد. با استفاده از این عامل بی‌بعد ملاحظه می‌شود که کلیه نتایج به طرز قابل توجهی در قالب یک معادله قابل بیان است. هر چه این عامل بی‌بعد جدید که پارامتر مشخصه نام گرفته است،

$$\Pi_{2,i} \cdot \Pi_{3,i} = a \cdot (\Pi_{1,i})^b \Rightarrow \left( \frac{g \cdot t^2}{W} \right) \cdot \Pi_3 = a \cdot \left( \frac{X}{W} \right)^b$$

$$\Rightarrow \log(\Pi_{2,i}) = a - \log(\Pi_{3,i}) + b \cdot \log(\Pi_{1,i}) \quad (9)$$

### نتیجه گیری و تفسیر

بر اساس برداشت‌های آزمایشگاهی انجام شده و تحلیل‌هایی که در بخش قبلی انجام گرفت، به نتایج زیر می‌رسیم:

۱- نرخ حرکت دلتا تابعی است صعودی از پارامتر مشخصه  $\Pi_3$ ، که در این تحقیق معرفی شده است، است. رابطه این پارامتر با سرعت پیشروی زبانه رسوبی داخل مخزن به گونه‌ای است که با افزایش عدد  $\Pi_3$  میزان سرعت پیشروی نیز افزایش می‌یابد و برعکس.

۲- عدد  $\Pi_3$  در بطن خود دارای فاکتورهایی است که نماینده عوامل محرک و مقاوم در برابر پیشروی دلتا است. مانند اثرات دبی آب ورودی (Q) و دبی رسوب ( $Q_s$ ) که اثر افزاینده بر میزان و سرعت پیشروی زبانه رسوبی دارند و عمق آب مخزن (W) که اثر مقاوم در برابر پیشروی زبانه دارد.

۳- ترتیب قرارگیری منحنی‌ها در مقیاس معمولی (کارتزین) و یا ترتیب خطوط در مقیاس لگاریتمی، به مقدار  $\Pi_3$  بستگی مستقیم دارد و هر چه مقدار پارامتر مشخصه بیشتر باشد، منحنی یا خط مشخصه به سمت راست صفحه مختصاتی متمایل می‌شود و با توضیحی که در بخش تحلیل نتایج آزمایشگاهی ارائه شد، هرچه خطوط مشخصه به سمت راست صفحه بروند، برای طی یک مسافت مشخص زمان کمتری صرف می‌شود و در نتیجه سرعت متوسط بیشتری برای پیشروی زبانه رسوبی داخل مخزن حاصل می‌شود.

۴- عمق آب مخزن، W، نسبت به سایر پارامترها نقش بیشتری در سرعت پیشروی ایفا می‌کند. این اثر را در عدد  $\Pi_3$  نیز می‌توان ملاحظه کرد، به گونه‌ای که پارامتر عمق آب با بیشترین توان نسبت به بقیه متغیرها در روابط حاکم ظاهر شده است.

۵- چنانچه مشابه کار تحلیلی انجام شده توسط Swenson و همکاران در سال ۲۰۰۰ و همچنین توسط Voller و همکاران در سال ۲۰۰۴ بخواهیم میزان پیشروی



شکل ۱۰: تصویر پیشروی زبانه رسوبی در فلوم (دید از سمت جداره شیشه‌ای).



شکل ۹: تصویر دستگاه رسوب‌ریز. 1.0E+00



شکل ۱۱: تصویر جسم کامل دلتای رسوبی در فلوم (نمای جانبی).



شکل ۱۲: تصویر جسم کامل دلتای رسوبی در فلوم (نمای روبرو).

است. لازم به توضیح است که در برنامه‌ریزی پژوهش مورد نظر که این مقاله بخش کوچکی از آن است، برنامه آزمایش‌ها برای چند گروه از مصالح دانه‌ای تعریف و اجرا شد. بنابراین پارامترهای  $d_{50}$  (اندازه میانه ذرات رسوبی) و

بزرگ‌تر باشد، سرعت پیشروی نیز بیشتر است. در پارامتر مشخصه، عوامل دیگر نظیر قطر متوسط رسوبات و چگالی نسبی ذرات نیز نقش دارند، ولی نقش آنها به طور مستقل در آزمایش‌های ارائه شده در مقاله حاضر بررسی نشده

ثابت درآورد که تغییری در نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی پدیده مورد بررسی ایجاد نمی‌کند. در نتیجه با عددگذاری و ساده‌سازی، رابطه (۱۲) که نشانگر معادله حرکت زبانه رسوبی است به معادله (۱۴) تبدیل می‌شود:

$$X=2.7406 \times g^{0.2022} \times Q^{0.4044} \times Q_s^{0.4044} \times W^{-1.4264} \times t^{0.4} \quad (14)$$

حال در این معادله به سهولت می‌توان نقش پارامترهای مورد بررسی در این نوشتار را به سهولت ملاحظه و بررسی کرد.

### تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی شرکت مدیریت منابع آب ایران در وزارت نیرو که حامی مالی این پژوهش در حوزه طرح‌های تحقیقاتی - کاربردی است، کمال تشکر را داریم. همچنین پژوهشگران از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و موسسه آب دانشگاه تهران که در اجرای این طرح، پشتیبانی لازم را به عمل آورده‌اند، قدردانی می‌کنند.

$\rho_s$  (جرم حجمی رسوبات) نیز به تناسب اندازه‌گیری شده و از آنها در محاسبات استفاده شده است. اما در این مقاله فقط با تأکید بر گروه خاصی از مصالح رسوبی که مشخصات آنها در متن مقاله ارائه شده است، نتایج حاصل از پردازش داده‌ها و تعیین اعداد بی‌بعد بررسی و تحلیل شده است. به عبارت دیگر هدف اصلی نشان دادن نقش پارامترهای  $Q$  (دبی حجمی ورودی آب)،  $Q_s$  (دبی حجمی ورودی رسوب) و  $W$  (عمق آب مخزن) روی روند حرکتی زبانه رسوبی و تحلیل تغییرات نمودار  $X-t$  (منحنی پیشروی زبانه رسوبی در طی زمان) در اثر تغییر این پارامترهای پایه بوده و فقط برای نتیجه‌گیری کلی و همچنین عمومیت بخشیدن به نتایج تحقیق، از این پارامترها در ترکیب با  $\rho$  (جرم حجمی آب) و  $g$  (شتاب جاذبه زمین) برای انجام تحلیل ابعادی و استخراج اعداد بی‌بعد استفاده شده است. بنابراین برای ساده سازی در معادلات متن مقاله می‌توان پارامترهای  $d_{50}$ ،  $\rho_s$ ،  $\rho$  و  $g$  را با عددگذاری از معادلات حذف کرده و به صورت ضریب

### مراجع

- 1 - Borland, W. M. (1960). "Distribution of sediment in large reservoirs." *Trans. ASCE*, Vol. 125.
- 2 - Borland, W. M. (1971). *Reservoir Sedimentation*, in *River Mechanics*, (H.V. Shen Editor), Colorado State Univ., Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado.
- 3 - Behamidipaty, S. and Shen, H. V. (1971). "Laboratory study of degradation and aggradation." *Proc. ASCE*, Vol. 97, No. WW4.
- 4 - Hotchkiss, R. H. and Parker, G. (1988). "Reservoir sediment sluicing - laboratory study." *Proc. Of the 1988 National Conf.*, Colorado, PP. 1073-1078.
- 5 - Hotchkiss, R. H. and Parker, G. (1990). "Laboratory modeling of reservoir sedimentation and sluicing: scale considerations." *International Conf. on Physical Modeling of Transport and Suspension*, PP. 14B.25-14B.30.
- 6 - Hotchkiss, R. H. and Parker, G. (1991). "Shock Fitting of aggradational profiles Due to backwater." *J. of Hyd. Engr., ASCE*, Vol. 117, No. 9, PP. 1129-1144.
- 7 - Fan, J. and Morris, G. (1992). "Reservoir sedimentation. I: delta and density current deposits." *J. of Hyd. Engr., ASCE*, Vol. 118, No. 3, PP. 354-369.
- 8 - Fan, J. and Morris, G. (1992). "Reservoir sedimentation. II: reservoir desiltation and long term storage capacity." *J. of Hyd. Engr., ASCE*, Vol. 118, No. PP. 370-384.
- 9 - Göğüş, M. (1995). "Reservoir sedimentation." *Proc., Post Graduate Course in Sediment Transport*, Vol. 2, UNESCO IHP SC/ROSTE 876.012.5, Ankara, Turkey.
- 10 - Sugio, S. (1972). "Laboratory study of degradation and aggradation A discussion." *Proc. ASCE*, Vol. 98, No. WW4.
- 11 - Yu, W. S. and Lee, H. Y. (1999). "Laboratory study of delta propagation in a reservoir." *J. of Sediment Research, IWHR*, Vol. 3, PP. 8-16 (in Chinese)

- 12 - Yu, W. S., Lee, H. Y. and Hsu, S. M. (2000). "Experimental study on delta formation in a reservoir." *J. of the Chinese Inst. Of Civ. And Hyd. Engr.*, Vol. 12, No. 1, PP. 171-177 (in Chinese).
- 13 - Bellal, M., Spinewine, B., Savary, C. and Zech, Y. (2003). "Morphological evolution of steep sloped river beds in the presence of a hydraulic jump: experimental study." *XXX IAHR Congress*, AUTH, Thessaloniki, Greece, PP. 133-140.
- 14 - Cantelli, A., Paola, C. and Parker, G. (2004). "Experiments on upstream migrating erosional narrowing and widening of an incisional channel caused by dam removal." *J. of Water Resources Research*, Vol. 40, W03304, PP. 1-12.
- 15 - Toniolo, H. and Schultz, J. (2005). "Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs." *J. of Lakes and Reservoirs: Research and Management*, Vol. 10, PP. 13-24.
- 16 - 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.*, Vol. 11, PP. 433-452.
- 17 - 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, 28 July 2004.

#### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 - Experimental Investigation     | 2 - Delta Progression                   |
| 3 - Reservoir                      | 4 - Deltaic Sedimentation               |
| 5 - Reservoir of Dam               | 6 - Bed Load Condition                  |
| 7 - Geometrical Shape of Reservoir | 8 - Bed Slope                           |
| 9 - Water Discharge                | 10 - Water Depth in Reservoir           |
| 11 - Sediment Inflow Rate          | 12 - Physical - Geometrical Properties  |
| 13 - Dimensional Analysis          | 14 - Non-Dimensional Number             |
| 15 - Back Water Zone               | 16 - Longitudinal Profile of Deposition |
| 17 - Crown of Delta                | 18 - Toe of Delta                       |
| 19 - Stability Angle of Materials  | 20 - Plunging Point                     |
| 21 - Analytical Solution           | 22 - Power Law Function                 |
| 23 - Rectangular Flume Section     | 24 - Expanded Flume Section             |
| 25 - Characteristic Parameter      | 26 - Flap Gate                          |
| 27 - Point Gauge                   | 28 - Monitoring Point                   |