

بررسی آزمایشگاهی تاثیر وجود ذرات غیر یکنواخت رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلتا در جریان ماندگار و غیر ماندگار

مهدی صدیق کیا^{۱*}، سید علی ایوب زاده^۲، جعفر مامی زاده^۳

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری تخصصی سازه های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه سازه های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه آبیاری، دانشگاه ایلام

تاریخ پذیرش: ۹۱/۳/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۲

چکیده

رسوبگذاری به صورت دلتا در ورودی مخزن اتفاق می افتد و ذرات درشت دانه تر تشکیل دلتا را می دهند. در این تحقیق تاثیر غیریکنواختی ذرات رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلتا در حالت ماندگار و غیرماندگار بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که در آزمایش هایی که از ذرات غیر یکنواخت در آنها استفاده شد حرکت دلتا نسبت به زمانی که از ذرات یکنواخت رسوبی استفاده شد دو بعدی تر بود. تقارن در شکل نهایی دلتا به غیریکنواختی ذرات بستگی نداشته و در کلیه آزمایش ها تقارن خوبی مشاهده گردید. در آزمایش هایی غیر یکنواختی در حالت ماندگار، توان رابطه اسونسن برای پایه برابر 0.788 به دست آمد که با توجه به اینکه در حالت یکنواخت این توان برابر 0.85 بود حرکت کندتری برای دلتا نشان داد که این مورد در جریان غیرماندگار نیز مشاهده شد. بعد از عبور سیلاب در شیب پیشانی دلتا نیز در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت کاهش بیشتری دیده شد.

کلید واژه ها: غیریکنواختی ذرات، پیشروی و شکل دلتا، جریان ماندگار و غیرماندگار.

مقدمه

دلتای رسوبی را در فلو می آزمایشگاهی بررسی کرد. نتایج تحقیق نشان داد که زاویه بین سطح جلویی دلتا و کف فلووم تقریباً ثابت می باشد که این مقدار ثابت تقریباً 40° درجه می باشد. به طور کلی مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی یوسل همخوانی خوبی نشان داد. چانگ در سال ۱۹۸۲ و مرتن در سال ۱۹۸۶ اقدام به بررسی آزمایشگاهی دلتای رسوبی در یک کانال با بازشدگی ناگهانی نمودند. نتایج این محققین نشان داد که در زمان های اولیه پیشروی دلتا بیشتر در جهت طولی رشد کرده و پس از آن به دلیل افزایش عرض و کاهش سرعت و مومنتم جریان، رسوب گذاری به صورت جانبی گسترش یافته و دلتا در عرض رشد می کند. فان و موریس^۳ در مورد تشکیل دلتا تحقیقی میدانی را انجام دادند و نتیجه گرفتند که تفاوت دانه بندی بین بخش فوقانی و پیشانی دلتای رسوبی محسوس است، همچنین تغییر ناگهانی شیب بین بخش فوقانی و پیشانی دلتای

رسوبگذاری در ابتدای مخزن به شکل دلتا اتفاق می افتد و ذرات درشت دانه تر تشکیل دلتای رسوبی را می دهند که با گذشت زمان در طول مخزن پیشروی می کند. بهامیدپاتی و شن^۱ در یک فلووم آزمایشگاهی به بررسی پدیده رسوب گذاری در نتیجه افزایش دبی تزریق بیش از قدرت حمل جریان پرداختند. به دلیل اضافه بودن بار رسوب تزریق شده نسبت به قدرت حمل جریان، رسوبگذاری در بازه بالادست صورت گرفته و افزایش شیب و کاهش عمق جریان را به دنبال داشته است. به گونه ای که قدرت حمل رسوب تزریق شده را داشته باشد. به مرور پشته های رسوبی تشکیل شده در امتداد طولی به حرکت در می آیند. یوسل^۲ شرایط ته نشینی رسوب در مخازن را در حالت جریان یک بعدی بررسی کرد. هدف اصلی او مقایسه مدل عددی خودش با نتیجه آزمایشگاهی بود. از این رو رشد و پیشرفت

1- Behamidipaty and Shen

2- Yucel

3- Fan and Morris

سطح آب باعث کندتر شدن پیشروی دلنا می‌شود لازم به ذکر است نتایج مطالعات حمزه قصابسرایبی با مامی‌زاده مطابقت خوبی داشت (۲). با توجه به مطالعات گذشته دیده می‌شود مسئله غیر یکنواختی دانه بندی ذرات رسوبی در مطالعات گذشته مورد توجه نبوده و بیشتر تحقیقات با ذرات یکنواخت رسوبی انجام شده است. همچنین بررسی‌های گذشته در حالت وجود جریان غیرمانگار صورت نپذیرفته است. در این تحقیق به بررسی تأثیر وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلنا در جریان ماندگار و غیر ماندگار به صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی در فرآیند پیشروی دلنا

انتخاب پارامترهای مؤثر با توجه به اصول اولیه حرکت رسوب و بررسی مطالعات گذشته صورت می‌گیرد. پارامترهای مؤثر بر طول پیشروی دلنا در خط مرکزی جریان، X ، به شرح زیر می‌باشند:

✓ پارامترهای جریان و سیال:

دانسیته آب، (ρ) - لزجت دینامیکی آب، (μ) - دبی آب، (Q_w) - عمق آب در مخزن، (W) - نسبت دبی اوج سیلاب به دبی پایه، (Q_p^*) شتاب ثقل، (g) .

✓ پارامترهای مشخصات جریان و ذرات رسوبی:

دانسیته ذرات، (ρ_s) - دبی رسوب، (Q_s) - قطر میانه ذرات رسوبی، (d_{50}) - انحراف معیار هندسی ذرات، (σ_g) .

✓ پارامترهای مشخصات هندسی:

زاویه بازشدگی مخزن، (Θ) - شیب مخزن، (S_B) - عرض مخزن، (B) - عرض رودخانه، (b) .

با توجه به اینکه تعداد پارامترهای مؤثر در پیشروی دلنا زیاد می‌باشد، امکان ارائه رابطه مشخص ریاضی برای تحلیل مسئله نمی‌باشد. بنابراین از روش آنالیز ابعادی برای بدون بعد نمودن پارامترها و تعیین روند آزمایش‌ها و همچنین تعمیم نتایج آزمایشگاهی به نمونه اصلی استفاده می‌گردد. متغیرهای ρ ، g و W را به عنوان متغیرهای تکراری انتخاب نموده پس از انجام تحلیل ابعادی و حذف عوامل ثابت در تحقیقات رابطه نهایی به صورت زیر استخراج شد:

$$X^* = F(Q_s^*, Q_w^*, W^*, \theta, T^*, Q_p^*, \sigma_g) \quad (2)$$

که در رابطه (۲)

$$W^* = \frac{b}{W}; Q_p^* = \frac{Q_p}{Q_b} \quad T^* = \frac{t}{(W/g)^{0.5}}$$

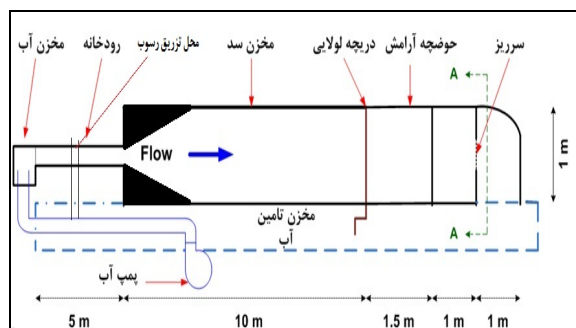
رسوبی دیده شد (۷۰۶). در بررسی و حل تحلیلی که توسط اسونسن^۴ در سال ۲۰۰۰ در خصوص حرکت دلتای رسوبی در یک کانال مستطیلی شکل با عرض ثابت انجام گرفته است، میزان پیشروی دلنا به صورت توانی از زمان و به شکل رابطه (۱) ارائه شده است (۹):

$$X = At^B \quad (1)$$

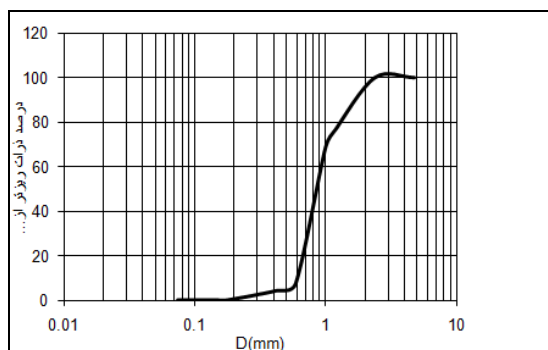
که در این رابطه پارامترهای A و B متغیرهای وابسته با بعدی از خصوصیات هندسی و فیزیکی مخزن می‌باشند. توان B برای کانال مستطیلی مورد مطالعه برابر با 0.5 به دست آمده است. کوستیک و پارکر^۵ مطالعات آزمایشگاهی و عددی را در ارتباط با تأثیر جریان گل آلود و اثر افزایش غلظت آن بر زاویه ایستایی قسمت پیشانی دلنا انجام دادند. این آزمایش‌ها مطابق با نتایج فرمول تتوری بود که کوستیک و همکاران به دست آوردند که طبق این فرمول زاویه قسمت پیشانی دلنا را افزایش غلظت جریان گل آلود می‌توان به کمتر از یک درجه نیز رسانید. چگنی‌زاده به بررسی آزمایشگاهی رسوب‌گذاری در مخازن سدها و تشکیل دلنا با دانه بندی یکنواخت ذرات رسوبی پرداخت. ده سری آزمایش به منظور مطالعه تشکیل و پیشروی تاج دلنا در یک بازشدگی خیلی ملایم (برابر دو درجه) انجام گرفت و پیشروی تاج دلنا را با استفاده از یک سری اعداد بدون بعد تجزیه و تحلیل نمودند. از ترکیب اعداد بدون بعد، یک گروه بدون بعد جدید به نام متغیر مشخصه به دست آوردند که به صورت هم-زمان تأثیر متغیرهای مختلف در پیشروی دلنا را نشان می‌داد و در نهایت روند تغییرات این نمودارها با این پارامتر بی بعد بررسی شد. با افزایش این عدد بی بعد سرعت پیشروی دلتای رسوبی نیز افزایش می‌یافت (۱). مامی‌زاده آزمایش‌های مختلفی در ارتباط با پیشروی دلنا تحت دبی‌های مختلف جریان و رسوب در تبدیل‌های ورودی به مخزن با زوایای گوناگون (با پنج زاویه واگرایی مختلف در پلان ۹۰، ۳۳/۵، ۱۵/۴، ۱۱/۵ و ۹/۲ درجه) انجام داد. او تحقیقات خود را در دبی ثابت جریان و همچنین در دبی ثابت رسوبی و با دانه‌های یکنواخت رسوبی به انجام رسانید. در تحقیق او زاویه واگرایی ۱۵/۴ درجه به عنوان زاویه مرزی بین الگوی پیشروی متقارن و نامتقارن انتخاب شد و همچنین مشخص شد که الگوی پیشروی رسوبات نه تنها به زاویه واگرایی بلکه به شرایط هیدرولیکی و رسوبی نیز وابسته است. او در مطالعات خود توان رابطه اسونسن را بین 0.6 تا 0.7 استخراج کرد (۴). حمزه قصابسرایبی به تکمیل مطالعات مامی‌زاده و در همان شرایط آزمایش‌های مامی‌زاده به بررسی الگوی جریان در حالت وجود و عدم وجود دلنا در زوایای مختلف ورودی و تأثیر سطح آب بر روی پیشروی و شکل دلنا پرداخت و مشاهده کرد که افزایش

4-swenson

5- Kostic and Parker



شکل ۱- سیستم گردش آب



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح رسوبی نمونه یک

میزان دبی به وسیله یک سیستم دور متغیر صورت می‌گرفت. با این سیستم میزان دور الکتروموتور قابل تنظیم بود که دارای فرکانسی بین ۰ تا ۵۰ بوده که میزان آبدهی در فرکانس صفر برابر صفر و در فرکانس حداکثر برابر میزان حداکثر آبدهی پمپ بود. سطح آب در مخزن نیز به وسیله یک سرریز لولایی مانند که در انتهای پایین دست فلوم قرار داشت کنترل می‌شد. همچنین در انتهای پایین دست فلوم یک سرریز مستطیلی با فشاردگی جانبی قرار داشت که کنترل دبی جریان با این سرریز صورت می‌گرفت. در شکل (۱) کل سیستم گردش آب به طور شماتیک نشان داده شده است.

تزریق رسوبات در این آزمایش‌ها به صورت تزریق خشک بود که توسط دستگاه ساخته شده صورت می‌گرفت. برای به دست آوردن هیدروگراف ورودی به مخزن نیاز به تبدیل داده‌های سطح آب به دبی بود که برای اندازه‌گیری داده‌های سطح آب از دستگاه موج‌نگار استفاده شد. برای اندازه‌گیری عمق آب بر روی سرریز پایین دست از اشل میله‌ای ثابت با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. جهت اندازه‌گیری عمق با عمق سنج ابتدا در محل اندازه‌گیری، صفر نموده و سپس در زمان تماس نوک میله با سطح آب عمق جریان قرائت می‌شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع رسوبات از متر لیزری با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. برای ثبت تغییرات زمانی رقوم سطح آب در ورودی مخزن، از

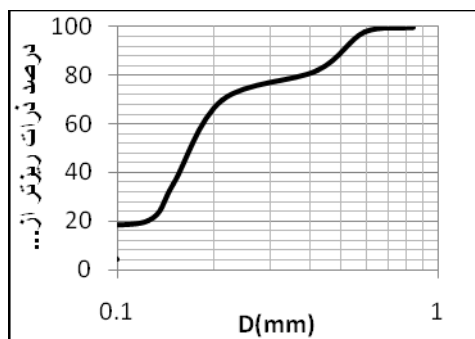
$$X^* = \frac{X}{W}$$

$$Q_s^* = \frac{Q_s}{(gW^5)^{0.5}}$$

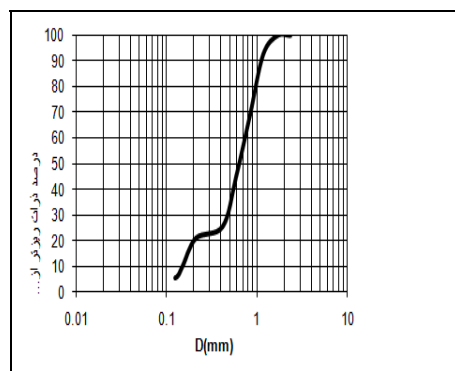
در تحقیقات گذشته تأثیر بعضی از عوامل بر روی پیشروی و شکل دلتا بررسی شده است و در این تحقیق به بررسی تأثیر غیر یکنواختی ذرات (تغییر انحراف معیار هندسی از محدوده یکنواخت به محدوده غیر یکنواخت) پرداخته شده است.

تشریح فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های مربوطه در فلوم شماره دو آزمایشگاه هیدرولیک گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. این فلوم دارای ۱۷ متر طول و یک متر عرض می‌باشد. قسمت اولیه فلوم به عنوان رودخانه با طول ۵ متر، عرض ۱۶ سانتی‌متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر و بدون شیب طولی اجرا گردید. قسمت انتهایی فلوم به عنوان مخزن با طول ۱۰ متر، عرض ۱۰۰ سانتی‌متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر و شیب طولی ۲ درصد اجرا گردید. همچنین زاویه تبدیل ورودی رودخانه به مخزن دارای زاویه ۱۱/۵ درجه بود. به جز دیواره سمت راست که از پلکسی گلاس بود جنس بقیه قسمت‌های فلوم از بتن بود. در طول تبدیل ۱۵ ایستگاه به فواصل ۱۰ سانتی‌متری از ابتدای مخزن به منظور اندازه‌گیری‌ها مشخص شده بود، کنترل



شکل ۳- منحنی دانه بندی مصالح رسوبی نمونه دو



شکل ۴- دانه بندی غیر یکنواخت تهیه شده

ذرات با قطر متوسط حدود $0/8$ میلی‌متر در شرایط آزمایشگاهی تحقیق حاضر با توجه به معیار ون رایبن به صورت بار بستری حرکت می‌کنند.

آزمایش‌های با ذرات رسوبی غیر یکنواخت

با ترکیب ذرات یکنواخت با یک نوع پودر سیلیس ریز دانه با دانه‌بندی که در شکل (۳) آمده است دانه بندی غیر یکنواختی تهیه شد.

برای تهیه نمونه غیر یکنواخت دو معیار از خصوصیات دانه بندی ذرات مد نظر بود: اول قطر متوسط ذرات و دوم انحراف از معیار هندسی ذرات که اولی مشخص کننده متوسط اندازه ذرات و دومی مشخص کننده میزان غیر یکنواختی ذرات است. به دلیل اینکه در این تحقیق هدف بررسی تأثیر غیر یکنواختی ذرات بر روی پیشروی و شکل دلتا بود باید اندازه متوسط ذرات برابر یا تا میزان زیادی نزدیک به اندازه متوسط ذرات در حالت یکنواخت باشد و انحراف از معیار هندسی ذرات در حدی باشد تا بتوان ذرات را کاملاً غیر یکنواخت دانست. با توجه به این شرایط با مخلوط کردن دو نمونه یک و دو با نسبت مشخص دانه بندی جدیدی تهیه شد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

دستگاه موج‌نگار استفاده شد. دستگاه موج‌نگار به کمک سنسورهایش تا 50 سانتی‌متر تغییرات ارتفاع آب را ثبت می‌کند.

مصالح رسوبی مورد استفاده در تحقیق

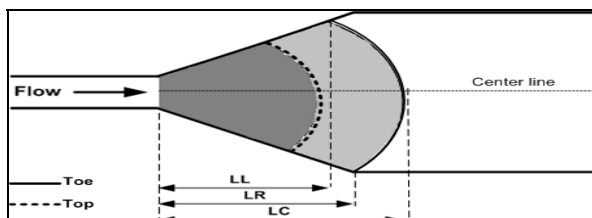
آزمایش‌های با ذرات رسوبی یکنواخت

در ابتدا با توجه به مصالح رسوبی یکنواخت موجود در آزمایشگاه منحنی دانه بندی ذرات یکنواخت رسوبی تعیین شد. این منحنی در شکل (۲) آمده است.

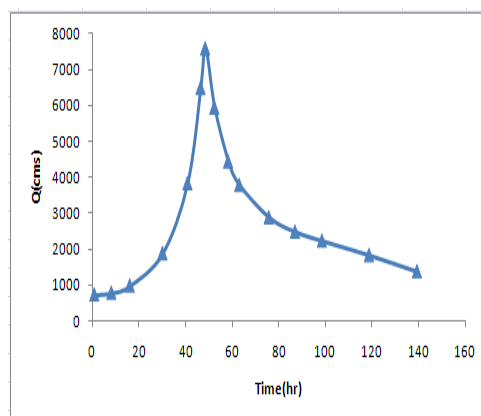
ضریب یکنواختی ذرات منحنی دانه بندی بالا در حدود $1/5$ می‌باشد که حکایت از یکنواختی ذرات دارد. اندازه متوسط ذرات در حدی بود که در دبی‌های مورد نظر به صورت بار بستر در کف کانال حرکت می‌کردند. دبی‌ها با توجه به این محدودیت‌ها در محدوده تا 20 لیتر بر ثانیه انتخاب شد. برای کنترل عدم حرکت رسوبات انتخابی به صورت بار معلق، آستانه تعلیق رسوبات به صورت بار معلق نیز کنترل و مشخص گردید. برای کنترل آستانه تعلیق رسوبات از رابطه ارائه شده توسط ون رایبن^۶ استفاده شد. که این رابطه در کتب مرجع مربوطه آمده است و در اینجا از ذکر آن خودداری می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات انواع دانه‌بندی‌ها

نوع دانه بندی	انحراف از معیار هندسی	ضریب یکنواختی
نمونه ۱	۱/۴۷	۱/۵۰
نمونه ۲	۱/۸۹	۲/۰۹
نمونه تهیه شده	۲/۵۸	۵/۰۰



شکل ۵- نمایش پارامترهای به کار برده شده در تعیین شاخص‌های ϕ و η



شکل ۶- هیدروگراف سیل ۵۰ ساله سد دز

قابل ذکر است که فاصله‌های نشان داده شده در شکل برای تعیین شاخص ϕ و η برای پایه دلتا می‌باشد

$$\phi = \frac{LR - LL}{LC} \quad (۳)$$

$$\eta = \frac{(LR + LL) / 2}{LC} \quad (۴)$$

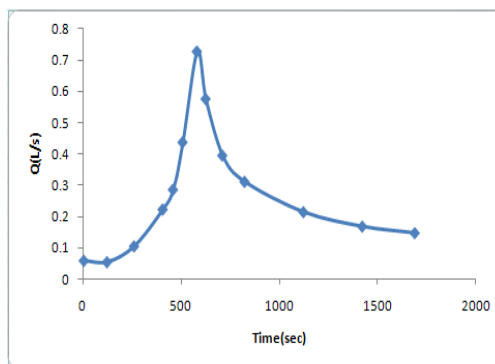
مطابق با تعریف اگر شاخص ϕ برابر با صفر باشد پیشروی دلتا در سمت راست و چپ در طول فلوم با هم برابر بوده و یا به عبارت دیگر پیشروی دلتا در طول متقارن است. اگر این شاخص کوچکتر از صفر باشد نشان دهنده پیشروی بیشتر در سمت چپ و اگر بزرگتر از صفر باشد نشان دهنده پیشروی بیشتر دلتا در سمت راست فلوم می‌باشد. شاخص η نیز نشان دهنده پیشروی یک یا دو بعدی دلتا است

در ادامه ضریب یکنواختی و انحراف از معیار هندسی مورد محاسبه قرار گرفتند. در جدول (۱) ضریب یکنواختی و انحراف از معیار هندسی برای انواع دانه‌بندی‌ها آمده است.

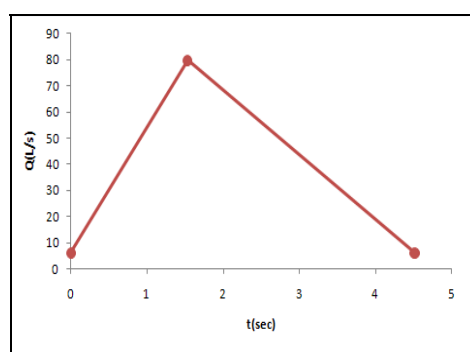
همان‌طور که دیده می‌شود نمونه تهیه شده با توجه به معیارهای آمده در کتب مرجع (۳) کاملاً غیر یکنواخت است و همان‌طور که از روی منحنی دانه بندی نیز مشخص است قطر متوسط ذرات نمونه تهیه شده بسیار نزدیک به اندازه متوسط ذرات در نمونه اول است و به همین دلیل می‌توان گفت دانه بندی تهیه شده از هر نظر مطابق با معیارهای در نظر گرفته شده می‌باشد.

معیارهای تقارن و چگونگی پیشروی دلتا

برای به دست آوردن معیاری برای تعیین مقدار تقارن و نوع پیشروی دلتا در تاج و پایه، براساس مطالعات مامی‌زاده (۴)، مطابق با شکل (۵) در روابط (۳) و (۴) دو شاخص ϕ و η تعریف شده است



شکل ۷- نتیجه شبیه سازی با روش اول



شکل ۸- نتیجه شبیه سازی با روش دوم

برای مدل نیز در نظر گرفته شد و با توجه به این نسبت، زمان هیدروگراف سیلاب در مدل به دست آورده شد. در این روش هیدروگراف سیل در مخزن مدل مثلی در شکل در نظر گرفته شد و دبی پایه با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی انتخاب شد و دبی اوج سیلاب نیز مطابق با نسبت دبی اوج به دبی پایه در طبیعت انتخاب شد (شبیه سازی براساس تشابه سینماتیکی) که نتیجه شبیه سازی با این روش در شکل (۸) آمده است.

دیده می‌شود زمان پایه هیدروگراف بسیار کوتاه بوده و کمتر از پنج ثانیه می‌باشد و این موضوع عبور چنین هیدروگراف‌هایی را در آزمایشگاه با توجه به زمان عکس‌العمل دستگاه دور متغیر غیر ممکن می‌سازد.

در روش سوم نسبت حجم سیلاب به حجم کل مخزن در مدل و نمونه اصلی یکسان در نظر گرفته شد، سپس دبی پایه هیدروگراف مدل با توجه به شرایط و محدودیت‌های آزمایشگاهی انتخاب شد. در این روش دبی پایه و اوج هیدروگراف مدل مانند روش دوم در نظر گرفته شد (شبیه سازی سیلاب براساس تشابه هندسی) که نتیجه شبیه سازی با این روش در شکل (۹) آمده است.

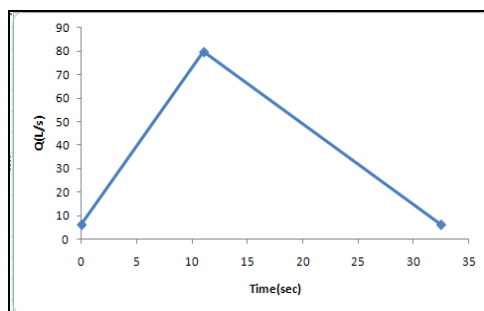
به طوری که اگر برابر با یک باشد نشان می‌دهد که تمامی عرض دلتا با سرعتی یکسان پیشروی می‌کند (حرکت یک بعدی)، اما اگر این مقدار تفاوت زیادی از یک داشته باشد نشان می‌دهد که سرعت پیشروی دلتا در کناره‌های تبدیل با مرکز تبدیل تفاوت زیادی دارد (حرکت دو بعدی).

نحوه شبیه سازی سیلاب در تحقیق

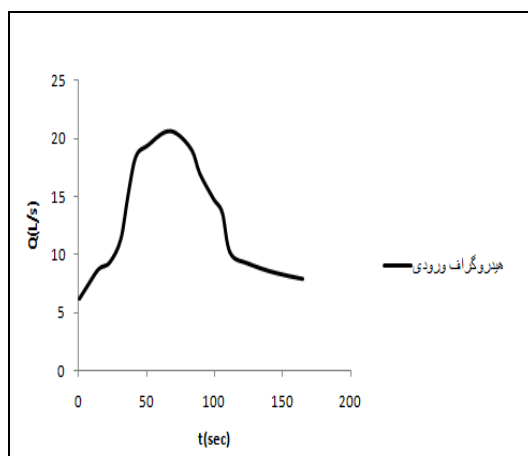
به دلیل اینکه شرایط آزمایش به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد در آزمایش‌های جریان ناماندگار (وجود هیدروگراف سیل) از هیدروگراف سیلاب ورودی با دوره بازگشت سال ۵۰ به سد دز استفاده شد که در شکل (۶) نشان داده شده است (حیدری ۲۰۰۱).

در ادامه با استفاده از سه روش شبیه سازی هیدروگراف سیل در مدل آزمایشگاهی انجام شد. در روش اول شبیه سازی دینامیکی صورت گرفت که در شکل (۷) نتیجه شبیه سازی با این روش آمده است.

این روش با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی قابل استفاده نبود. در روش دوم ابتدا یک آزمایش در دبی ثابت (مطابق با شرایط مطالعات مامی‌زاده (۴) انجام گرفت تا حدود زمان پیشروی دلتا در مخزن مدل به دست آید، سپس زمان سیلاب واقعی در پروتوتایپ بر مدت زمان پیشروی دلتا در آن تقسیم شد و این نسبت به دست آمده



شکل ۹- نتیجه شبیه سازی با روش سوم



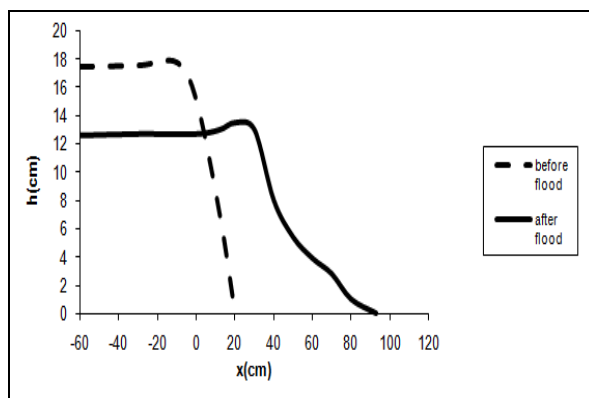
شکل ۱۰- هیدروگراف ورودی واقعی به مخزن مدل سد

به دلیل اینکه هیدروگراف سیلی که با سیستم پمپاژ عبور داده می‌شود با هیدروگرافی که به طور واقعی در داخل فلوم ایجاد می‌گردد متفاوت است به همین دلیل لازم است تا هیدروگراف‌هایی که می‌خواهند عبور داده شوند شبیه سازی شود تا هیدروگراف واقعی عبوری در داخل فلوم استخراج گردد که در تجزیه و تحلیل‌ها از این هیدروگراف که به طور واقع در داخل فلوم عبور می‌کند استفاده می‌شود آب در فلوم در حالی که در پیچه دورانی پایین دست کاملاً باز بود برقرار می‌گردید و بعد از اینکه جریان به حالت پایدار می‌رسید دبی به طور دقیق در دبی پایه هیدروگراف سیلاب تنظیم می‌گردید و سپس دستگاه موج نگار در ابتدای مخزن (انتهای رودخانه) قرار داده می‌شد و سپس هیدروگراف مورد نظر با استفاده از دستگاه دور متغیر عبور داده می‌شد. در نهایت بعد از انجام آزمایش شبیه سازی سیلاب هیدروگراف ورودی نهایی به صورت شکل (۱۰) استخراج شد.

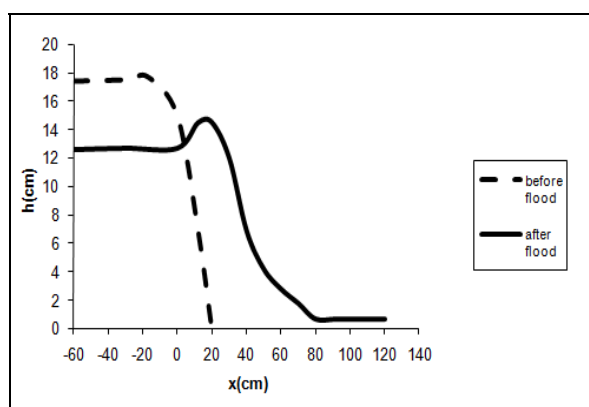
فهرست و نحوه انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق در مجموع پنج آزمایش انجام شد که چهار آزمایش مربوط به پیشروی دلتا و یک آزمایش نیز مربوط به شبیه سازی سیلاب (مربوط به آزمایش‌های جریان غیرماندگار) بود که شرح

هیدروگراف شبیه سازی شده با روش دوم هم از نظر زمان پایه و هم از نظر مقادیر دبی با توجه به شرایط آزمایشگاهی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. البته عبور آن نیز در شرایط عادی با توجه به محدودیت‌های سیستم پمپاژ امکان‌پذیر نبود، به همین دلیل این هیدروگراف نیز برای کار در آزمایشگاه نیاز به اصلاحاتی داشت. به دلیل تأمین نشدن دبی هیدروگراف شبیه سازی شده دبی اوج این هیدروگراف برابر با دبی اوج سیلاب پنج ساله (در حدود ۴۰ لیتر بر ثانیه) در نظر گرفته شد و حجم اضافه سیلاب به زمان پایه هیدروگراف افزوده شد و بدین ترتیب هم حجم سیلاب مورد نظر تأمین شد و هم امکان عبور هیدروگراف در آزمایشگاه فراهم شد. یک نکته در اینجا لازم به ذکر است و آن نکته اینکه در این تحقیق هدف بررسی مسئله به صورت یک مدل فرآیند است و مدل به صورت یک مدل طرح بررسی نمی‌گردد و هدف از این شبیه‌سازی این نبوده است که سد دز به طور کامل مدل گردد بلکه هدف نزدیک کردن شرایط آزمایش با شرایط طبیعت (شرایط سد دز) بوده است. به همین دلیل با اینکه شبیه سازی به طور کامل صورت نگرفته است ولی شرایط تحقیق را تأمین کرده است.



شکل ۱۱ – پروفیل طولی دلتا قبل و بعد از عبور سیلاب ۵۰ ساله (در حالت وجود ذرات یکنواخت رسوب)



شکل (۱۲) – پروفیل طولی دلتا قبل و بعد از عبور سیلاب ۵۰ ساله (در حالت وجود ذرات غیریکنواخت رسوب)

استفاده از متر لیزری پروفیل طولی دلتا برداشت می شد. لازم به ذکر است که در انتخاب گزینه‌های برداشت توپوگرافی بستر سعی شده خطوط برداشت نسبت به خط مرکزی کانال قرینه باشند. مدت زمان تقریبی برداشت هر یک از خطوط طولی شبکه‌بندی بستر کانال اصلی ۳۰ دقیقه بود.

نتایج و بحث

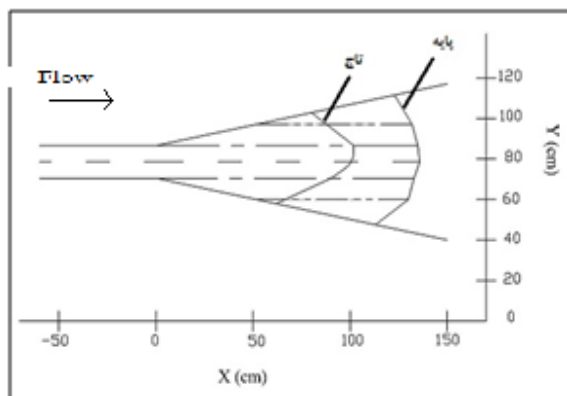
بررسی شکل دلتا در مخزن سد

در شکل (۱۱) پروفیل طولی دلتا در سمت راست در قبل و بعد از عبور سیلاب در حالتی که در آزمایش از ذرات یکنواخت استفاده شده آمده است.

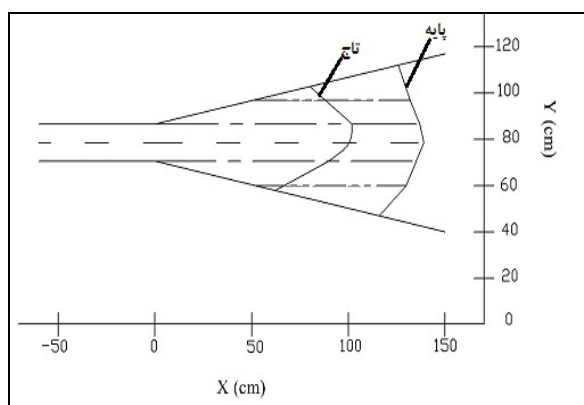
در شکل (۱۲) پروفیل طولی دلتا در سمت راست در قبل و بعد از عبور سیلاب در حالتی که در آزمایش از ذرات غیریکنواخت استفاده شده آمده است.

همان‌گونه که مشاهده می شود طول پیشروی پایه در حالت وجود ذرات غیریکنواخت بیشتر است و دلیل این امر را می‌توان به وجود ذرات ریزدانه در دانه بندی نسبت داد. در مورد شیب پیشانی

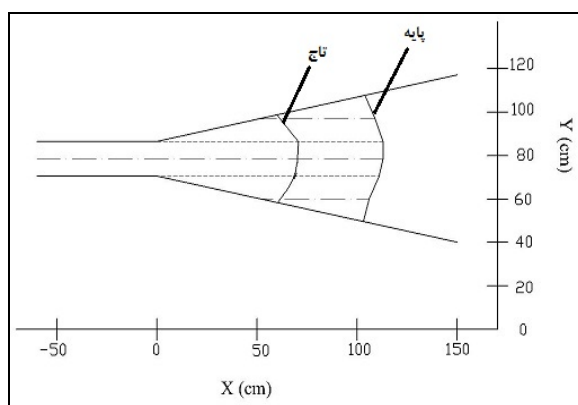
و نتیجه آن در قسمت قبل آمد. برای انجام آزمایش‌های اصلی در ابتدا آب در دبی مورد نظر در فلوم برقرار می‌گردید سپس بعد از پایدار شدن جریان با بالا بردن دریاچه دورانی سطح آب در مخزن در سطح مورد نظر تنظیم می‌گردید، سپس سیستم تزریق رسوب راه‌اندازی می‌شد و دبی رسوبی در مقدار مورد نظر تنظیم می‌گردید و آزمایش آغاز می‌گردید. بعد از اینکه دلتای رسوبی در داخل رودخانه پیشروی می‌کرد و زمانی که داخل مخزن می‌شد با استفاده از کرومومتر ثبت زمان آغاز می‌گردید. بعد از اینکه پایه دلتای رسوبی به ایستگاه سه می‌رسید پروفیل طولی دلتا در سمت راست برداشت شده و سپس سیلاب مربوطه عبور داده می‌شد. بعد از عبور سیلاب پروفیل طولی دلتا در سمت راست که در اثر عبور سیلاب تغییر پیدا کرده بود برداشت می‌شد و آزمایش ادامه پیدا می‌کرد و زمان رسیدن پایه و تاج دلتا که بعد از عبور سیلاب دوباره از ابتدا پیشروی خود را آغاز می‌کرد در ایستگاه‌های مختلف به ثبت می‌رسید. در آزمایشات دبی ثابت نیز مراحل کار بدین صورت بود که زمان رسیدن پایه و تاج دلتا در ایستگاه‌های مختلف ثبت می‌شد. در پایان آزمایش نیز برای برداشت شکل دلتا در امتداد خطوط مختلف در فواصل ۱۰ سانتی‌متری با



شکل ۱۳- پلان نهایی دلتا با وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ماندگار



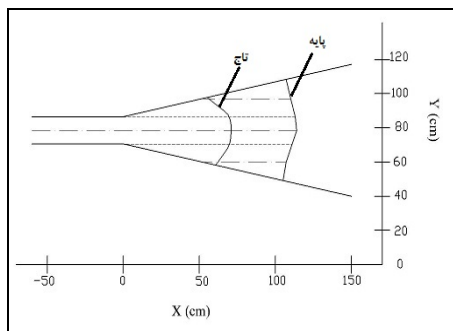
شکل ۱۴- پلان نهایی دلتا با وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ناماندگار



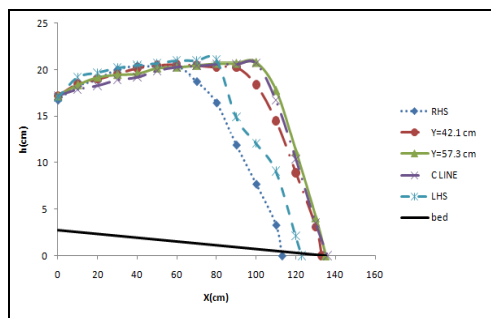
شکل ۱۵- پلان نهایی دلتا در حالت عدم وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ماندگار

در شکل (۱۴) پلان نهایی دلتا در پایان آزمایش در جریان ناماندگار در حالت وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی نشان داده شده است. در شکل (۱۵) پلان نهایی دلتا در پایان آزمایش در جریان ماندگار در حالت عدم وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی نشان داده شده است.

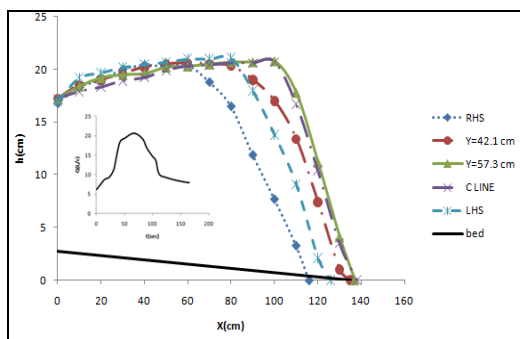
دلتا نیز کاهش شیب در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت دیده می‌شود. مورد دیگر که قابل مشاهده است وجود ارتفاع بیشتر برای قسمت پایینی دلتا در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت است. در شکل (۱۳) پلان نهایی دلتا در پایان آزمایش در جریان ماندگار در حالت وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی نشان داده شده است.



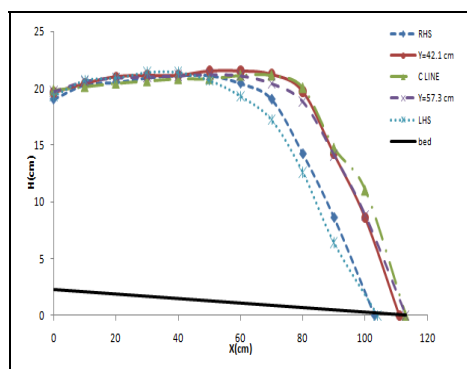
شکل ۱۶- پلان نهایی دلتا در حالت عدم وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ناماندگار



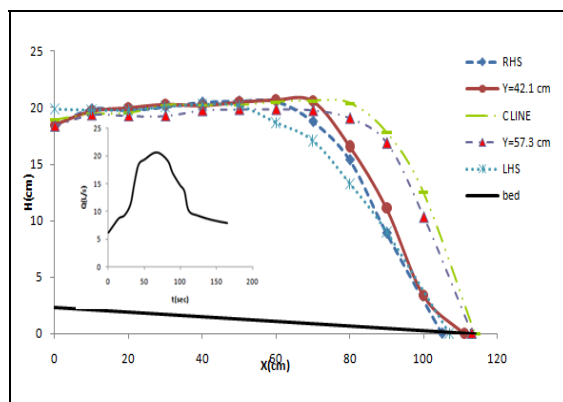
شکل ۱۷- پروفیل طولی نهایی دلتا در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ناماندگار



شکل ۱۸- پروفیل طولی نهایی دلتا در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ناماندگار



شکل ۱۹- پروفیل طولی نهایی دلتا در حالت وجود ذرات یکنواخت در جریان ناماندگار



شکل ۲۰- پروفیل طولی نهایی دلتا در حالت وجود ذرات یکنواخت در جریان ناماندگار

جدول ۲- تغییرات φ و η

	φ		η	
	جریان ماندگار	جریان غیرماندگار	جریان ماندگار	جریان غیرماندگار
پایه	۰/۰۷۴	۰/۰۷۲	۰/۸۶۷	۰/۸۷۶
تاج	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۶۱۲	۰/۶۱۲

تأثیر زیادی نداشته است، جز اینکه دیده می‌شود که در قسمت ابتدایی مخزن در حالت وجود ذرات یکنواخت ارتفاع قسمت فوقانی دلتا کمی بیشتر است که با پیشروی در طول مخزن مقادیر به یکدیگر بسیار نزدیک می‌شوند که این کاهش ارتفاع قسمت فوقانی در حالت وجود ذرات غیریکنواخت منطقی به نظر می‌رسد. در دو حالت دیده می‌شود که با پیشروی دلتا در مخزن ارتفاع قسمت فوقانی دلتا افزایش می‌یابد که البته مقدار این افزایش ارتفاع در حالت ذرات غیر یکنواخت بیشتر است. در مورد طول پیشروی دلتا مشاهده می‌شود که در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت طول پیشروی پایه نسبت به تاج دلتا افزایش بیشتری داشته است که این مورد را می‌توان به ارتفاع قسمت پایینی دلتا ارتباط داد چون در اثر وجود ذرات غیر یکنواخت با توجه به اینکه درصدی از ذرات ریزدانه بودند این ذرات ریزدانه همزمان با پیشروی جبهه رسوبات درشت دانه‌تر (به صورت بار بستری) در رودخانه در آب به حالت معلق در می‌آیند و بعد از طی کردن مسافتی در کف مخزن ته‌نشین می‌شوند و وجود لایه‌ای از همین ذرات ریزدانه که در واقع قسمت پایینی دلتا را تشکیل می‌دهند باعث پیشروی بیشتر پایه نسبت به تاج دلتا می‌شود و بدین ترتیب در حالتی که ذرات غیریکنواخت وجود داشته است شیب پیشانی دلتا مقدار کمی کاهش نشان می‌دهد. این نتیجه در مورد آزمایش سیلاب‌ها نیز مشاهده شد که با افزایش ضخامت قسمت پایینی دلتا در اثر عبور سیلاب اختلاف بین طول پیشروی پایه و تاج بیشتر می‌شود.

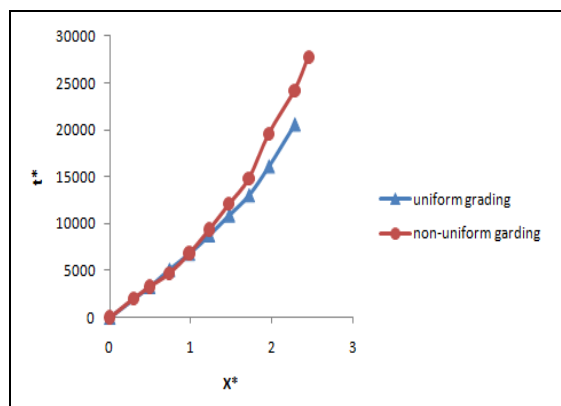
در شکل (۱۶) پلان نهایی دلتا در پایان آزمایش در جریان ناماندگار در حالت عدم وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی نشان داده شده است. برای بررسی بهتر پلان دلتا پارامترهای φ و η مورد محاسبه قرار گرفتند که در جدول (۲) این مقادیر نشان داده شده‌اند.

در دو حالت دیده می‌شود که تقارن مناسبی برای پایه و تاج دلتا وجود دارد و می‌توان گفت که دلتای متقارنی تشکیل شده است و در مورد حرکت دلتا نیز حرکت یک بعدی‌تری در پایه دلتا نسبت به تاج مشاهده می‌شود. در مقایسه با آزمایش‌های ذرات یکنواخت دیده می‌شود که در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار، تقارن چه در تاج و چه در پایه مقدار بسیار کمی کمتر شده است که البته همان‌طور که گفته شد همچنان تقارن خوبی وجود دارد و در واقع می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که وجود ذرات غیر یکنواخت تأثیری بر روی تقارن شکل دلتا ندارد. در مورد حرکت دلتا نیز حرکت یک بعدی‌تری در حالت وجود ذرات یکنواخت هم در پایه و هم در تاج دیده می‌شود.

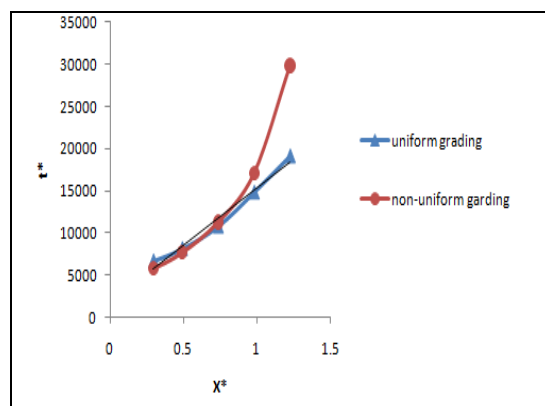
در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) پروفیل طولی نهایی دلتا در پایان آزمایش در امتداد خطوط مختلف در حالت وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی در جریان ماندگار و غیرماندگار نشان داده شده است.

در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) پروفیل طولی نهایی دلتا در پایان آزمایش در امتداد خطوط مختلف در حالت وجود ذرات یکنواخت رسوبی در جریان ماندگار و غیرماندگار نشان داده شده است.

دیده می‌شود در حالت دبی ثابت (جریان ماندگار) وجود و یا عدم وجود ذرات غیریکنواخت رسوبی بر روی ارتفاع قسمت فوقانی دلتا



شکل ۲۱- منحنی پیشروی پایه دلتا در دو حالت وجود و عدم وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ماندگار



شکل ۲۲- منحنی پیشروی تاج دلتا در دو حالت وجود و عدم وجود ذرات غیر یکنواخت در جریان ماندگار

در شکل (۲۲) منحنی پیشروی تاج دلتا در جریان ماندگار در دو حالت وجود و عدم وجود ذرات غیر یکنواخت، به صورت بدون بعد نشان داده شده است.

در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) اختلاف بین زمان پیشروی در دو حالت کاملاً قابل مشاهده است که البته در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت به دلیل اینکه تعداد داده بیشتری ثبت شد طول منحنی کمی بیشتر از حالت وجود ذرات یکنواخت رسوبی است.

روند تغییرات در حالت ناماندگار نیز مانند جریان ماندگار است. برای بررسی پیشروی دلتا توان رابطه اسونسن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت ماندگار در آزمایش‌های غیر یکنواختی، توان این رابطه برای پایه برابر 0.788 بدست آمد که با توجه به اینکه در حالت یکنواخت این توان برابر 0.85 بود حرکت کندتری برای پایه دلتا نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان به مواد ریزدانه موجود در دانه بندی نسبت داد. اولاً اینکه به دلیل وجود ذرات ریزدانه در دانه بندی، قسمتی از ذرات همراه با جریان شسته شده و به حالت معلق در می‌آیند و به پایین دست مخزن منتقل می‌شوند و چون ذرات دارای حرکت بستری کمتر می‌شد قطعاً زمان بیشتری برای پیشروی

بررسی پیشروی دلتا در مخزن سد

در شکل (۲۱) منحنی پیشروی پاشنه دلتا در جریان ماندگار در دو حالت وجود و عدم وجود ذرات غیر یکنواخت، به صورت بدون بعد نشان داده شده است. روابط زیر نشان دهنده چگونگی بدون بعد کردن نمودار می‌باشد:

$$t^* = \frac{t}{\left(\frac{w}{g}\right)^{0.5}} \quad (۵)$$

$$X^* = \frac{x}{w} \quad (۶)$$

در روابط بالا x میزان پیشروی دلتا، t مدت زمان پیشروی دلتا، w سطح آب در مخزن، g شتاب ثقل، t^* زمان بدون بعد شده و X^* مقدار پیشروی بدون بعد شده می‌باشد.

آزمایش است که تمامی این موارد می‌تواند بر روی نتایج تأثیرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر دانه بندی غیر یکنواخت ذرات رسوبی بر روی پیشروی و شکل دلتا در حالت ماندگار و غیرماندگار (وجود هیدروگراف سیل) بررسی شد. در کلیه آزمایش‌ها تغییرات پارامتر مربوط به تقارن دلتا در حدود $0.1-0.07$ بود. در واقع همان‌طور که دیده شد تقارن در شکل نهایی دلتا به غیریکنواختی ذرات بستگی نداشت و در کلیه آزمایش‌ها هم برای پایه و هم برای تاج دلتا تقارن خوبی مشاهده می‌گردد. به طور کلی در همه آزمایش‌ها حرکت یک بعدی‌تری در مورد پایه دلتا نسبت به تاج دلتا مشاهده شد. در آزمایش‌هایی که از ذرات غیر یکنواخت در آنها استفاده شد حرکت دلتا نسبت به زمانی که از ذرات یکنواخت رسوبی استفاده شد دو بعدی تر بود. در آزمایش‌های غیر یکنواختی در حالت ماندگار، توان رابطه اسونسن برای پایه برابر 0.788 به دست آمد که با توجه به اینکه در حالت یکنواخت این توان برابر 0.85 بود حرکت کندتری برای پایه دلتا نشان می‌داد. دلیل این امر را می‌توان به مواد ریزدانه موجود در دانه بندی نسبت داد. بعد از عبور سیلاب طول پیشروی پایه در حالت وجود ذرات غیریکنواخت بیشتر بود و دلیل این امر را می‌توان به وجود ذرات ریزدانه در دانه بندی نسبت داد. در مورد شیب پیشانی دلتا نیز کاهش شیب در حالت وجود ذرات غیر یکنواخت دیده شد.

دلتا نیاز است البته تمامی ذرات ریزدانه این‌گونه رفتار نمی‌کردند و بخشی از این ذرات در داخل ذرات درشت تر مخفی می‌شدند و با توجه به خاصیت مخفی شدگی آستانه حرکت آنها افزایش می‌یافت. نکته دیگر قابل مشاهده این بود که ذرات ریزدانه‌تر از روی قسمت فوقانی دلتا حرکت کرده ولی در طول آزمایش در آنجا ته نشین نمی‌شدند و بعد از عبور از نقطه محوری دلتا یا در پیشانی دلتا نهشته می‌شدند و یا اینکه همراه با جریان به پایین دست مخزن منتقل می‌شدند که با نتایج تحقیقات قبلی نیز تطابق دارد. در حالت وجود سیلاب در آزمایش‌های غیر یکنواختی توان رابطه اسونسن برابر $1/3$ استخراج شد که نسبت به حالت وجود ذرات یکنواخت (برابر $1/45$ استخراج شد) کاهش نشان می‌دهد و کاهش سرعت پیشروی دیده می‌شود. در مورد تاج دلتا نیز وضعیت به همین ترتیب است و کاهش توان رابطه اسونسن دیده می‌شود، که در حالت وجود ذرات غیریکنواخت این توان برابر 0.9 و در حالت عدم وجود ذرات غیریکنواخت این توان برابر $1/31$ می‌باشد. بنابراین به طور کلی کاهش سرعت پیشروی دلتا در حالت وجود ذرات غیریکنواخت دیده می‌شود. البته باید توجه داشت که دانه بندی غیریکنواخت مورد استفاده در این تحقیق شامل ذرات ریزدانه‌تر بود ولی ممکن است در دانه بندی‌های دیگر (منظور استفاده از ذرات درشت دانه‌تر) نتیجه متفاوت باشد. در مطالعات اسونسن توان رابطه (۱) برابر 0.5 استخراج شد. در مطالعات چگنی زاده (۱) این توان برابر 0.4 و در مطالعات مامی‌زاده (۴) این توان بین 0.6 تا 0.7 به دست آمد. تمامی تفاوت‌های موجود در مطالعات مختلف به دلیل اختلاف در هندسه مدل‌ها، نسبت باز شدگی‌ها و شرایط آزمایش مانند زمان قطع

منابع

- ۱- چگنی زاده، ا. ۱۳۸۴. بررسی آزمایشگاهی رسوبگذاری در مخازن سدها و تشکیل دلتا. پایان نامه کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- ۲- حمزه قصابسرای، م. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان ورودی به مخزن سد در تبدیل تدریجی و تأثیر آن در پیشروی و شکل دلتا. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۳- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۷. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ اول، ۵۴۹ صفحه.
- ۴- مامی زاده، ج. ۱۳۸۸. بررسی زاویه واگرایی و مشخصات هیدرولیکی- رسوبی بر نحوه پیشروی دلتا در مخازن سدها. رساله دکتری رشته سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- 5- Behamidipaty, S. and H. V. Shen. 1971. Laboratory study of degradation and aggradation. ASCE, 97(ww4):278-279
- 6- Fan, J. and G. Morris. 1992a. Reservoir sedimentation. I: delta and density current deposits. Journal of Hydraulic Engineering, 118: 354-369.

- 7- Fan, J. and G. Morris. 1992b. Reservoir sedimentation. II: Reservoir desiltation and long term storage capacity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3): 370-384.
- 8- Kostic, S. and G. Parker. 2003. Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2): 127-140.
- 9- Swenson, J. B., Voller, V. R., Paola, C., Parker G., and J. G. Marr. 2000. Fluvio-deltaic sedimentation: A generalized stefan problem. *Euro. Jnl of Applied Mathematics*. 11: 433-452.