مطالعه آزمایشگاهی اثر تراز آب مخزن و مشخصات هیدرولیگی و رسوبی دهانه ورودی مخزن بر سرعت پیشروی دلتا جعفر مامی زاده'، محمدعلی بنیهاشیمی'، *سیدعلی ایوبزاده'، سیدعلیاکبر صالحی نیشابوری^{*} و رشید جمشیدی^۵ ⁽دانشجوی دکتری گروه سازهای آبی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲استادیار گروه عمران دانشگاه تهران، ^۳استادیار گروه سازهای آبی دانشگاه تربیت مدرس تهران، ^۴استاد گروه عمران دانشگاه تربیت مدرس، ^۴دانشآموخته کارشناس ارشد گروه سازهای آبی دانشگاه مازندران تاریخ دریافت: ۲۰/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۲۰/۷/۲

حكيده

این تحقیق جهت بررسی پدیده رسوبگذاری بهصورت دلتا در مخازن سدها با استفاده از انجام آزمایش در یک فلوم آزمایشگاهی صورت گرفته است. رسوبگذاری بهصورت دلتا در مخزن، تابع متغیرهایی از جریان، رسوب، هندسه رودخانه و مخزن میباشد. در این پژوهش اثر برخی از این متغیرها شامل دبی جریان آب و رسوب در رودخانه، عمق آب در مخزن و زاویه بازشدگی بخش ابتدایی مخزن بر نحوه شکلگیری و پیشروی دلتا در مخزن و در طول فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییرات زمانی بالاآمدگی بستر و میزان پیشروی پایه و تاج دلتا در مقاطع مختلف مشاهده و اندازهگیری شد. نتایج آزمایشگاهی بهدست آمده از هر یک از آزمایش ها نشان داد که میزان پیشروی تاج دلتا با یک تابع نمایی با نمای ۱۲۲۰ قابل پیش بینی است. زاویه ایستایی مصالح رسویی که شامل ذرات پودر سیلیس با متوسط اندازه ۱ میلی متر بود، در حالت مستغرق بین ۳۰ تا ٤٠ درجه تعیین گردید. با استفاده از آنالیز ابعادی و تحلیل دادههای حاصل از آزمایشها و با بهکارگیری نرمافزار SPSS، مدل رگرسیون خطی چندمتغیره برای پیشروی پایه و تاج دلتا بهصورت تابعلی از چهار متغیر بدون بعد زمان، دبی جریان، دبی رسوب و عمق آب در مخزن بهدست آمد. با توجه به پیش بینی ضعیف مدل رگرسیون خطی در شرایط ابتدایی پیشروی، یک مدل نمایی برای این محدوده مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا مدل ترکیبی با تلفیق مدل رگرسیون خطی و مدل نمایی بهترتیب برای شرایط ابتدایی و پس از آن مورد توجه قرار گرفت. آنالیز آماری مدل ترکیبی نشان داد که میانگین و انحراف معیار شاخص نسبت اختلاف (۸) برای پایه بهترتیب برابر با ۹۹/۰ و ۱۳۹/۰ و برای تاج برابر با ۱/۰۰۵ و ۱/۱۲۱ میباشد که گویای دقت مدل میباشد. تحلیل حساسیت مدل ترکیبی نشان داد که شاخص ۸ برای پایه و تاج به تغییرات عمق آب در مخزن و دبی آب حساس نیست. لیکن این شاخص برای پایه نسبت به مقادیر زیاد دبی رسوب و برای تاج به مقاديركم دبي رسوب وابسته است.

واژههای کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، رسوبگذاری، مخزن، پیشروی دلتا

^{*-} مسئول مكاتبه: ayyoub@modares.ac.ir

مقدمه

پدیده رسوبگذاری در مخازن سدها مشکلی است که در طول زمان و به مرور، عمر مخازن را کاهش داده و باعث از دست رفتن سرمایه های کلان ملی می شود (تربن، ۲۰۰٤). تخمین زده شده است که تجمع رسوبات در مخازن سدها، سالانه یک درصد از حجم ذخیره آنها را کاهش میدهد (تونیلو و پارکر، ۲۰۰۳). برای مثال رسوب گذاری در مخزن سد سفیدرود سالانه ۳٦/۵ میلیون مترمكعب (معادل ۲/۱ درصد حجم اوليه مخزن) از حجم ذخیره آن را کاهش میدهد (موریس و فان، ۱۹۹۸). وقتىكە جريان آب رودخانە بە مخزن مىرسد، سرعت جریان و میزان حمل رسوب آن با فاصله از نقطه ورودی بهطور سريع كاهش مييابد، در نتيجه اكثر رسوباتي كه توسط رودخانه حمل شده است در داخل مخزن تهنشین میشود. رسوبات درشت دانهای که بهصورت بار بستر هستند، در انتهای بالادست مخزن تهنشین شده و دلتا را تشكيل ميدهند. رسوبات ريزدانه همراه جريان أب حمل شده و بهطور کم و بیش یکنواخت در تمام مخزن پخش می شوند (رادکیوی، ۱۹۹۳). مطالعات انجام شده نشان میدهد که پروفیل دلتایی مخزن را میتوان به سه ناحیه قابل تشخيص تقسيمبندي نمود. قسمت اوليه يا فوقاني دلتا، محل انباشت مصالح درشتدانه در محدوده اندازه قلوهسنگ تا شن و ماسه میباشد. این محدوده که تقریباً از دهانه مخزن شروع شده و تا بالاترین نقطه دلتا به نام تاج دلتا امتداد می یابد، دارای شیب ملایم تری نسبت به شیب اوليه بستر رودخانه است. بلافاصله بعد از قسمت فوقاني دلتا، محدوده دوم از تاج دلتا شروع می گردد و نقطه تاج را به پنجه دلتا متصل میکند. این منطقه که پیشانی دلتا نامیده میشود دارای شیبی تند و نزدیک به زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانهای در حالت مستغرق میباشد. آخرین قسمت شامل مصالح ریزدانهای است که پس از سرخوردن روی پیشانی دلتا در ناحیهای پایینتر از پنجه جمع شده و قسمت تحتانی را تشکیل میدهند (کوستیک و پارکر، ۲۰۰۳). با توجه به مسائل و مشکلاتی

که رسوبگذاری دلتایی در مخازن سدها بهوجود میآورد، لازم است که متغیرهای مؤثر بر شکلگیری دلتا و نحوه پیشروی آن مورد شناسایی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند.

پديده رسوب در مخازن سدها بهصورت پيشروي دلتا، جریان غلیظ، ضریب تلهاندازی و آورد رسوب توسط محققین مختلف بررسی شدهاست. مطالعات انجام شده در زمینه بررسی هیدرولیک جریان در یک کانال با بازشدگی متقارن در پلان'، نشان داد که جریان غیرمتقارن ممکن است در یک بازشدگی کاملاً متقارن رخ دهد که در آن جریان ورودی از کانال بهصورت اختیاری به یک دیواره کانال در محل بازشدگی منحرف شده و جریان بهصورت یکطرفه شکل گیرد. آنالیز آزمایشگاهی و عددی ایشان نشان داد که برای عدد فرود کمتر از ۰/۲ در کانال ورودی، اگر نسبت عرض مخزن به عرض رودخانه بیشتر از ۱/۵ باشد، جریان غیرمتقارن رخ خواهد داد (گرابر، ۱۹۸۲ و ۲۰۰۶). ژو (۱۹۹۵) با توسعه یک مدل ریاضی دوبعدی متوسط گیری شده در عمق و آزمایش آن در یک مجرای با بازشدگی ناگهانی و نسبت بازشدگی برابر ۲، مشاهده نمود که گردابهای شکل گرفته در طرفین بازشدگی نامتقارن میباشند.

اولین مطالعات آزمایشگاهی روی رسوبگذاری در مخازن سدها در سال ۱۹۳۷ بهوسیله شاکلیش در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی صورت گرفت. براساس نتایج حاصل از این تحقیق رسوبگذاری جایی رخ میدهد که با توجه به اثر برگشت آب شیب سطح آب کاهش یافته و ضمناً شکل کلی رسوبگذاری به دلتایی شبیه است که در محل تقاطع رودخانه و دریا صورت میگیرد و جهت حرکت آن در جهت جریان آب میباشد (چگنیزاده، حرکت آن در جهت جریان آب میباشد (چگنیزاده، به بررسی آزمایشگاهی دلتای رسوبی نمودند. نتایج این به بررسی آزمایشگاهی دلتای رسوبی نمودند. نتایج این محققین نشان داد که با کاهش سرعت جریان،

¹⁻ Symmetric Expansion Inplan

²⁻ Froude Number

بدون بعد، یک گروه بدون بعد جدید به نام متغیر مشخصه بهدست آوردند كه بهصورت هم زمان تأثير متغیرهای مختلف در پیشروی دلتا را نشان میداد. یوگوویچ و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعهای آزمایشگاهی بهبررسی رسوبگذاری مخازن و فرایند تشکیل و پیشروی دلتا در نواحی کوههای آلپ پرداختند. نتایج نشان داد که فرم دلتا بهطور عمده بهشدت جریان در کانال ورودی بستگی دارد. همچنین ارتفاع رسوبات در حین پیشروی دلتا در جهت طولی افزایش مییابد و این افزایش ممکن است در اثر افزایش مقاومت در برابر جریان باشد. از جمعبندی تحقیقات قبلی میتوان نتیجه گرفت که مطالعات کمی روی پیشروی دلتا بهصورت آزمایشگاهی در فلومهای مقطع مستطیلی با عرض ثابت یا با بازشدگیهای ناگهانی و یک مورد بازشدگی خیلی ملایم صورت گرفته است. در این تحقیق، اثر هندسه و مشخصات هیدرولیکی دهانه ورودی مخزن بر سرعت پیشروی دلتا بررسی میشود.

مواد و روشها

تجهیزات آزمایشگاهی: جهت بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه واگرایی قسمت ابتدایی مخازن سدها بر سرعت پیشروی رسوب در مخزن، از فلوم آزمایشگاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران با مشخصات ۱۷ متر طول و ۱ متر عرض استفاده شد. شکل ۱ پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان میدهد. برای مشاهده جریان در دیواره سمت راست کانال در طولی بهاندازه ۱۰ متر از پلگسی گلاس استفاده شده است. جهت به کارگیری فلوم به عنوان رودخانه و مخزن، قسمت اولیه فلوم به عنوان رودخانه با طول ۵ متر، طولی اجرا گردید. قسمت انتهایی فلوم به عنوان مخزن با طولی اجرا گردید. قسمت انتهایی فلوم به عنوان مخزن با شیب طولی ۲ درصد اجرا گردید. سیستمهای تأمین آب و شیب طولی ۲ درصد اجرا گردید. سیستمهای تأمین آب و

عرض رشد میکند. همچنین زمانی که جریان مومنتم خود را از دست میدهد، گرادیان انرژی اهمیت می یابد و باعث فرار ذرات رسوبی به کنارهها می گردد و این پدیده تا جایی ادامه مییابد که با شکستهایی تازه، تغییر در مسیر حرکت دلتا رخ دهد (رادکیوی، ۱۹۹۳). فان و موریس (۱۹۹۲) رسوب گذاری مخازن و بهطور خاص تشکیل دلتا را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق ارائه دهنده تحقیقات میدانی در مورد چند سد در چین بود. نتایج کار آنها نشان داد که تغییر ناگهانی شیب و تفاوت دانهبندی بین بخش فوقانی و پیشانی دلتای رسوبی وجود دارد و در ضمن ارتفاع نقطه تقاطع بخش فوقاني و پیشانی دلتای رسوبی تغییر میکند. شیه و همکاران (۲۰۰۱)، ۱٤سری آزمایش بهمنظور مطالعه آزمایشگاهی توسعه دلتاهای آبرفتی انجام دادند. تجهیزات آزمایشگاهی آنها شامل یک کانال مستطیلی عریض و یک کانال مستطیلی با عرض کم بود. جریان آب و رسوب با یک نرخ ثابت از بالادست کانال تزریق میشد. حمل رسوبات محدود به بار بستر بود. مقایسه نتایج آزمایشها با روابط تحلیلی نشاندهنده تشابه هندسی دلتا در پلان، مقطع طولی و مقطع عرضی بهترتیب با یک تابع گوسی' و یک تابع هذلولی و یک تابع خطی بود (شیه و همکاران، ۲۰۰۱). در بررسی و حل تحلیلی اسونسن و همکاران (۲۰۰۰) در خصوص حرکت دلتای رسوبی در یک کانال مستطیل شکل با عرض ثابت، میزان پیشروی تاج دلتا با زمان به فرم نمایی (X = At^B) ارائه شده است که متغیرهای A و B متغیرهای وابسته به خصوصیات هندسی و فیزیکی مخزن میباشند. نمای B در کانال مورد مطالعه برابر با ۰/۵ بهدست آمد (اسونسون و همکاران، ۲۰۰۰). چگنیزاده (۲۰۰۵) به بررسی آزمایشگاهی رسوب گذاری در مخازن سدها و تشکیل دلتا پرداختهاند. ده سری آزمایش بهمنظور مطالعه تشکیل و پیشروی تاج دلتا در یک بازشدگی خیلی ملایم (°r = θ) انجام گرفت و پیشروی تاج دلتا را با استفاده از یکسری اعداد بدون بعد تجزیه و تحلیل نمودند. از ترکیب اعداد

¹⁻ Gaussion Function



شکل ۱– پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی.

سانتی متر شامل: دبی آب (Q_W) برحسب لیتر در ثانیه، دبی رسوب (Q_S) برحسب گرم در ثانیه، تراز آب در (b) مخزن (W)، عرض مخزن (B)، عرض رودخانه (d) مخزن (W)، عرض مخزن (B)، عرض رودخانه (d (d₅₀) برحسب سانتی متر، قطر میانه ذرات رسوبی (d₅₀) برحسب میلی متر، زاویه بازشدگی مخزن (θ) و شیب مخزن (B) بدون بعد، وزن مخصوص ذرات (_a) و وزن مخصوص آب ((*p*)) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، لزجت دینامیکی آب (*μ*)) برحسب نیوتن ثانیه بر مترمربع، شتاب ثقل (*B*) برحسب متر بر مجذور ثانیه و زمان (t) برحسب ثانیه میباشد که به صورت معادله (۱) نشان داده شده است.

 $X = f(Q_W, Q_S, W, B, b, d_{\circ}, \theta, S_B, \rho_S, \rho, \mu, g, t)$ (۱) بنابراین با استفاده از روش آنالیز ابعادی خواهیم داشت:

$$\frac{X}{W} = F\left(\frac{Q_{S}}{(gW^{\circ})^{\cdot,\circ}}, \frac{Q_{W}}{(gW^{\circ})^{\cdot,\circ}}, \frac{b}{W}, \theta, \frac{t}{(W/g)^{\cdot,\circ}}, (\Upsilon)\right)$$
$$\frac{b}{d_{\circ,\circ}}, S_{B}, \frac{b}{B}, \frac{\rho_{s}}{\rho}, \frac{\mu}{\rho.g^{\cdot,\circ}.W^{\cdot,\circ}}\right)$$

دبی جریان ورودی به فلوم در بالادست (Q_W) از طریق شیر کنترل برقی قابل تنظیم بود. تزریق رسوب در فاصله ٥/٠ مترى از نقطه ابتدايي كانال، توسط يک دستگاه تزريق رسوبات بهصورت خشک با قابليت تنظيم دبي رسوب خروجی (Qs) بهصورت مكانيكی- الكتريكی انجام شد. برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و واسنجی آن، در ابتدای هر آزمایش میزان خروجی رسوب در زمان معین، چندین بار وزن شد و مقدار میانگین بهعنوان دبی رسوب ورودی لحاظ می گردید. ماده رسوبی استفاده شده ذرات سیلیس با متوسط قطر ذرات d₅₀=1 $G_S=2.65$ میلیمتر، ضریب یکنواختی ۱/۱۸ و چگالی بود. وسيله تنظيم ارتفاع آب مخزن بهعنوان نقطه كنترل شرایط پاییندست جریان در انتهای فلوم قرار گرفته و از یک سرریز مستطیلی با قابلیت تنظیم ارتفاع به کمک یک سرريز لولايي تشكيل شده است. **آنالیز ابعادی**: در این تحقیق فرض شدهاست که متغیرهای مؤثر بر طول پیشروی دلتا (X) برحسب

مختلف برای شرایط هیدرولیکی مشخص، نهشته شدن رسوبات با توجه به سـرعت كـم جريان و عمق زياد أن در قسمت رودخانه شروع و زیادشدن ضخامت رسوبگذاری تا جایی ادامه مییافت که سرعت جریان و به تبع آن قدرت حمل رسوب جریان زیاد شده و از این مرحله به بعد تزریق رسوبات تأثیری در افزایش ضخامت رسوبگذاری نداشته و فقط موجب پیشروی دلتا می شود و اصطلاحاً گفته می شود که رودخانه به حالت تعادل رسیدهاست. با ورود جریان از رودخانه به محل مخزن با توجه به تغيير مشخصات جريان، اين تعادل بههم خورده و قدرت حمل رسوب در مقاطع مختلف مخزن تغيير میکند. برای انجام آزمایش های رسوب، رسوب با دبی دلخواه از بالادست كانال تزريق و ثبت وقايع از اين مرحله آغاز میگردید. در گامهای زمانی متناسب با رسیدن زبانه رسوبی به ایستگاههای خاص، با استفاده از تصویربرداری و ثبت دادهها در آن ایستگاهها، تغییرات تراز کف در پلان و پروفیل بهدست میآمد. همچنین تراز سطح آب و بستر بهطور همزمان در حین پیشروی دلتا اندازهگیری و ثبت میگردید. در حالت پیشروی متقارن، مشاهده و ثبت اطلاعات زمان پیشروی پایه و تاج و پروفیل طولی دلتا در دیواره سمت راست کانال انجام می شد. در حالت پیشروی رسوب غیرمتقارن، پس از رسیدن پایه دلتا در دیواره سمت راست به ایستگاههای خاص، آزمایش مورد نظر قطع شده و سایر اطلاعات لازم در خط مرکزی کانال، سمت چپ کانال و پلان نیز ثبت می گر دید.

با توجه به اینکه در این تحقیق متغیرهای ۲۰۱۰ = $\frac{b}{d_{o.}}$ ، با توجه به اینکه در این تحقیق متغیرهای ۲۰۱۰ = $\frac{b}{B}$ ثابت در نظر گرفته شدهاند، می توان آنها را حذف نمود. حداقل مقدار متغیر شدهاند، می توان آنها را حذف نمود. حداقل مقدار متغیر براب ر بییبعد نیشاندهنده اثر نیروهای لزجت براب برای معادل با عدد رینولدز جریان ۵۹۵۰۰ بوده و بیانکننده جریان آشفته و عدم تأثیر عامل لزجت در این تحقیق می باشد. لذا $X^* = F(Q_{s.}^*, Q_{w.}^*, \theta, T^*)$

; $Q_{s}^{*} = \frac{Q_{s}}{(gW^{\circ})^{*,\circ}}$; $W^{*} = \frac{b}{W}$; $T^{*} = \frac{t}{(W/g)^{*,\circ}}$ (ϵ) $X^{*} = \frac{X}{W}$

در این تحقیق بهمطالعه اثر متغیرهای دبی جریان آب و رسوب، عمق آب داخل مخزن و زاویه بازشدگی قسمت ابتدایی مخزن در زمانهای مختلف بر سرعت و الگوی پیشروی پایه و تاج دلتا پرداخته می شود.

انجام آزمایشها: با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته و شناخت متغیرهای مؤثر بر طول پیشروی دلتا، تعدادی آزمایش تنظیم و برنامهریزی شد. خلاصهای از شرایط انجام آزمایشها در جدول ۱ آورده شده است. ترتیب انجام آزمایشها بدین صورت است که ابتدا آزمایشهای هیدرولیک جریان برای یک زاویه بازشدگی معین انجام می گرفت. در صورتی که جریان شکل گرفته در محل بازشدگی با توجه به تزریق مادهرنگی و انداختن دیسکهای کاغذی در سطح آب متقارن بود، آزمایش رسوب و اندازه گیری پیشروی دلتای رسوب انجام می شد. در غیر این صورت زاویه بازشدگی تغییر می کرد و تبدیل ملایمتری در نظر گرفته می شد. با تزریق دبی رسوبات

جدول ۱- فهرست آزمایش های انجام شده.

θ (درجه)	L (سانتىمتر)	(گرم در ثانیه) \mathbf{Q}_{s}	(ليتر در ثانيه) Q _w	W (سانتىمتر)	رديف
٩٠	•	-	٩/٢	0.	١
٩٠	•	-	١٨/٥	0•	۲
٩٠	•	-	٤١٥	0•	٣
٩٠	•	٩.	٩/٢	٥.	٤
۲۳/٥	1	-	٩/٢	٥.	٥
۲۳/٥	1	-	١٨/٥	٥.	٦
۲۳/٥	1	-	٤١٥	٥.	V
۲۳/۵	1	٩.	٩/٢	0•	٨
٩/٢	۲0.	٩.	٩/٢	٤٥	٩
٩/٢	۲0.	٩.	٩/٢	٥.	۱.
٩/٢	۲0.	٩.	۱۸/٥	٥.	11
٩/٢	۲0.	٩.	٤١٥	0.	١٢
٩/٢	۲0.	٩.	٩/٢	00	١٣
٩/٢	۲0.	٩.	11/0	00	15
٩/٢	۲0.	٩.	٤/٥	٤٥	10
٩/٢	۲0.	٩.	v	٤٥	١٦
٩/٢	۲0.	٩٠	v	٥.	١v
٩/٢	۲0.	٩٠	V	00	١٨
٩/٢	۲0.	۱۳.	1/0	0•	١٩
٩/٢	۲0.	۱۳۰	٩/٢	0•	۲.
٩/٢	۲٥٠	15.	٤١٥	0•	71
٩/٢	۲0.	13.	٩/٢	٤٥	22
٩/٢	۲0,	13.	٩/٢	00	۲۳
٩/٢	70.	٤٥	٩/٢	٥.	72
٩/٢	۲٥.	٤٥	۱۸/۵	٥.	۲٥
٩/٢	۲٥٠	٤٥	٤/٥	٥.	۲٦
٩/٢	۲0.	٤٥	٩/٢	٤٥	۲V
٩/٢	40.	٤٥	٩/٢	00	77

دبی های مختلف نیز مشاهده شد که جریان ورودی از رودخانه به یک سمت منحرف شده و جریان بهصورت غیرمتقارن و یک طرفه می باشد. مشاهدات آزمایشگاهی و عددی نشان دادهاست که به منظور ایجاد جریان متقارن، نسبت بازشدگی مخزن به رودخانه باید کمتر از ۱/۵ باشد (گرابر، ۲۰۰٦–۱۹۸۲؛ ژو ۱۹۹۵). این نسبت در تحقیق حاضر تقریباً برابر با ۲ می باشد. بنابراین جریان غیرمتقارن دور از انتظار نبود. علاوه بر این مشاهدات و

نتايج و بحث

نتایج مربوط به بازشدگی ناگهانی (درجه ۹۰ = θ): در آزمایش های مربوط به هیدرولیک جریان (آزمایش های ۱ تا ۳)، در حالت جریان بدون کنترل پایین دست و تحت دبی های مختلف، با توجه به تزریق مادهرنگی و انداختن دیسک های کاغذی در سطح آب مشاهده گردید که جریان ورودی از رودخانه کاملاً به صورت متقارن وارد مخزن می شود. در حالت جریان با کنترل پایین دست، تحت اظهار نظر نمود که این بازشدگی نیز در عمل تند بوده و مشابه با بازشدگی ناگهانی عمل نموده و در نتیجه جریان نامتقارن شکل گرفته است. در آزمایش رسوب (آزمایش ۸)، پس از رسیدن پایه دلتا بهفواصل ۲۰، ۵۰، ۲۰، ۸۰ و سر ۱۰۰ سانتیمتری ابتدایی مخزن، آزمایش قطع گردید. شکل ۲ پروفیل طولی رسوبات در زمانهای مختلف در شکل ۲ پروفیل طولی رسوبات در زمانهای مختلف در دیواره سمت راست و چپ کانال را نشان میدهند. در هر مخزن و ارتفاع رسوبات را نشان میدهد. در زمانها و طولهای اولیه پیشروی، پروفیل دلتا در دیوارهها و پلان متقارن بوده و بهتدریج این حالت تقارن بههم خورده و مشابهت نتایج بهدست آمده در این حالت با آزمایشهای انجام شده در بازشدگی ناگهانی، آزمایش های بعدی در زوایای بازشدگی ملایمتر انجام شد. تحقیقات گذشته، به منظور ایجاد جریان متقارن در محل بازشدگی ناگهانی، مطابق با نظر محققین داخل و خارج کشور، تلاش زیادی انجام گرفت که این امر میسر نشد. در آزمایش رسوب انجام شده (آزمایش ٤)، الگوی غیرمتقارن پیشروی رسوب از کانال به مخزن مشاهده شد. الگوی غیرمتقارن پیشروی را میتوان توسط هیدرولیک جریان نامتقارن شکل گرفته در محل اتصال رودخانه به مخزن توجیه نمود. با توجه به پیشروی غیرمتقارن رسوبات در مخزن، آزمایشهای بعدی در زوایای

آزمایشهای مربوط به زاویه بازشدگی تدریجی (درجه ۲۳/۵ = θ): در این سری از آزمایش های هیدرولیک جریان (آزمایش های ٥ تا ۷) نیز جریان ورودی از رودخانه مشابه حالت بازشدگی ناگهانی، به صورت غیرمتقارن مشاهده شد. با مشاهده این شرایط، می توان



شکل ۲- پروفیل طولی رسوبات در دیواره سمت راست (الف) و چپ (پ) کانال.

ی (درجه پایه دلتا به فواصل ۸۰ ۱۲۰، ۱۹۰، ۲۰، و ۲۷ سانتی متری ای ۹ تا ابتدایی مخزن، آزمایش قطع می گردید. در نهایت پس از مدست و اطمینان از پیشروی متقارن رسوب، در آزمایش های بعدی ه جریان فقط آزمایش در ۲۵۰ سانتی متری مخزن قطع می شد. د مخزن شکل ۳ عمق رسوبات (_sh) با خطوط ممتد و عمق آب مه، عمده (h) با خطوط نقطه چین را در زمان ها و ایستگاه های مل چهار مختلف پیشروی در آزمایش ۸۸ (با کمترین سرعت زمان بیشروی) به صورت نمونه نشان می دهد. در این آزمایش با آزمایش ر رسیدن پس از مدت زمان طولانی معادل با ۲۵۱ دقیقه به انتهای

آزمایشهای مربوط به زاویه بازشدگی تدریجی (درجه آزمایشهای مربوط به زاویه بازشدگی تدریجی (درجه ۲۹ جدول ۱)، در هر دو حالت با کنترل پاییندست و بدون آن، بهصورت کیفی مشاهده گردید که جریان ورودی از رودخانه بهصورت تقریباً متقارن وارد مخزن میشود. با توجه به جریان متقارن شکل گرفته، عمده آزمایشهای رسوبی و تجزیه و تحلیل آنها شامل چهار دبی آب و سه دبی رسوب و سه عمق آب در مخزن (۲۱ آزمایش) برای این حالت انجام گرفت. در دو آزمایش رسوب اولیه انجام شده، مانند حالت قبل، پس از رسیدن همان زاویه ایستایی رسوبات در حالت مستغرق و در مراحل مختلف پیشروی است به طور متوسط ۳۳ درجه بهدست آمد. زاویه ایستایی محاسبه شده در کلیه آزمایش ها بین ۳۰ تا ٤٠ درجه به دست آمد. تبدیل می رسید، در حالی که در آزمایش ۲۲ (با بی شترین سرعت پی شروی) یا کمترین عمق آب در مخزن و بیشترین دبی رسوبات دلتا پس از مدت زمان کوتاهی معادل با ۲۷ دقیقه به انتهای تبدیل رسید. با توجه به شکل ۳ زاویه بین خط افق و خط واصل بین نقطه تاج و پایه که



شکل ۳– نمونهای از پروفیل رسوبات و عمق آب در مراحل مختلف پیشروی رسوب (آزمایش ۲۸ با حداقل سرعت پیشروی).

شکل ٤ نمودار طول پیشروی پایه $(X_b^*)_{\rm p}$ تاج شکل ٤ نمودار طول پیشروی پایه $(X_c^*)_{\rm p}$ همه $(z_c^*)_{\rm rot})_{\rm rot}$ می دهد. با توجه به این شکل، کمترین و بیشترین سرعت پیشروی بهترتیب مربوط به آزمایشهای شماره ۲۸ و ۲۲ بهدست آمد و دادههای سایر آزمایشها

بین این مقادیر قرار گرفتند. نتیجه بهدست آمده برای این شرایط، از نظر فیزیکی نیز توجیه پذیر است. زیرا برای کمترین عمق آب در مخزن و بیشترین دبی جریان و رسوب انتظار پیشروی سریعتر رسوبات به طرف مخزن را داریم.



شکل ٤- منحنی پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) دلتا (کلیه آزمایشها).

نمای B در معادله ارائهشده توسط اسونسون و همکاران (۲۰۰۰) برای پیشروی تاج دلتا با زمان در هر یک از آزمایشها محاسبه شد که مقدار آن بهطور متوسط ۱۸۲۰ بهدست آمد (شکل ۵). تفاوت مقادیر B بهدست آمده مربوط به تفاوت در هندسه مدلها است. در کانال مستطیلی توان B برابر ۵/۰ و در کانال با بازشدگی ملایم برابر ٤/۰ و در این تحقیق بهطور متوسط ۲۲۲۶۰ بهدست آمد. انتظار این بود که برای زاویه بازشدگی بیشتر توان محتر از ٤/۰ بهدست میآمد. این نشان میدهد که توان به متغیرهای دیگری نیز وابسته است که در این تحقیق لحاظ نشده است.

به منظور به دست آوردن روابط حاکم بر پدیده به صورت کمی و فرم کلی معادله ۳، همه داده های مربوط به ۲۱ آزمایش (۲۰۰ داده مربوط به زمان رسیدن پایه دلتا و ۲۰۰ داده مربوط به زمان رسیدن تاج دلتا شامل عمق آب مخزن، دبی جریان آب، دبی رسوبات، زمان و طول پیشروی به صورت بدون بعد وارد نرم افزار SPSS شد و

در نهایت بهترین معادله رگرسیون خطی چندمتغیره برای پیشروی پایه و تاج دلتا بهصورت معادله ۵ با ضرایب جدول ۲ استخراج شد:

 $X^{*} = \alpha + \beta W^{*} + \gamma Q_{W}^{*} + \mu Q_{S}^{*} + \delta T_{b}^{*} + \phi T_{b}^{*} (o)$

شکل ۲ طول پیشروی پایه و تاج محاسباتی را در مقابل طول پیشروی پایه مشاهداتی برای کلیه آزمایشها نشان میدهد. $X_{b0}^*(X, X_{b0}^*(X, Y_{c0}))$ و $\frac{X_{b0}^*}{X_{b0}^*} = \lambda$ بهترتیب طول پیشروی پایه و تاج مشاهداتی و محاسباتی و تغییرات نسبت اختلاف طول پیشروی پایه با مقادیر مشاهداتی را نشان میدهد. شکل ۷ تغییرات نسبت اختلاف طول پیشروی پایه دلتا با مقادیر مشاهداتی را نشان میدهد. همانطور که از این شکلها مشخص است، دادههای مشاهداتی و محاسباتی در محدوده میانی و نتهایی طول پیشروی مطابقت خوبی با هم دارند. در محدوده ابتدایی طول پیشروی، دادههای مدل، مقادیر را بالاتر از داده های آزمایشگاهی نشان میدهد.



شکل ۵– منحنی پیشروی تاج دلتا با زمان (کلیه آزمایش ها).

جدول ۲- مفادير صرايب معادله خطي.	دله خطي.	ضرايب معا	۲- مقادير	جدول
----------------------------------	----------	-----------	-----------	------

R^2	ϕ	δ	μ	γ	β	α	ضرايب
•/97V	$-\epsilon/1\times1$.	•/••• ٢٨	11/922	٧/٦٣١	-V/779	-•/9YV	پايە
•/٩٨١	-٣/٧×١• ^{-٩}	•/••• 72	1./222	Λ/Λ Λ	۲۸/۳	-1/7/9	تاج

Sciences Statistical package the social



شکل ٦- مقایسه طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) محاسباتی و مشاهداتی برای کلیه آزمایش.ها.



شکل ۷- مقایسه تغییرات نسبت اختلاف طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) دلتا محاسباتی و مشاهداتی برای کلیه آزمایش.ها

(A)

است.

 $X^* = \eta T^{*\tau} + \phi T^*$

 $+\mu'_{i}Q_{s}^{*}$, i=1,7

 $+\mu'_{i}Q_{s}^{*}$, i = 1,7

 $\eta = f_i(W^*, Q_W^*, Q_S^*) = \alpha'_i + \beta'_i W^* + \gamma'_i Q_W$

 $\phi = f_i(W^*, Q_W^*, Q_S^*) = \alpha'_i + \beta'_i W^* + \gamma'_i Q_W$

مقادیر ضرایب η و ϕ برای پایه و تاج در جدول π

آورده شده است. همچنین ارزیابی این مدل برای

طول های پیشروی پایه و تاج در شکل ۸ نشان داده شده

با توجه به پیشبینی ضعیف مدل خطی در شرایط ابتدایی طول پیشروی 1 ≥ (X^{*}_b, X^{*}_c)، یک مدل دیگر برای این شرایط اجرا شد. بهمنظور بهدست آوردن مدل جدید، ابتدا با توجه به زمان پیشروی پایه و تاج دلتا برای هر یک از آزمایشها، یک معادله نمائی به فرم کلی *T, Φ, T^{*} = η. T^{*} برای پایه و تاج برازش داده شد. ضرایب *η* و *Φ* در حالت کلی تابعی از عمق آب مخزن، دبی جریان آب و دبی رسوبات می باشند که مقادیر بهینه با استفاده از نرمافزار SPSS تعیین شده و در نهایت روابط زیر برای پیشروی پایه و تاج دلتا استخراج گردید:

R^2	μ'	γ'	β'	α'	ضرايب	
•/97V	$-1/1 \times 1 \cdot -v$	-1/9×1·-~	-1/27×1.	-0/Y0×1.	$({ m i=1})$ برای پایه η	
•/920	$-4/\Lambda V \times 1 \cdot^{-\Lambda}$	-1/91×1.	-1/12A×1.	•	(i=2) برای تاج η	
•/9٣٢	•/••٣٦١	•/••٣٢١	-•/•٢١٥٩	•/•••١•٨	$({ m i=1})$ برای پایه $arphi$	
•/9٤1	-•/•••))	•/••٢٦	•/•0•٨	•	$(ext{i=2})$ برای تاج $arphi$	

۷ و ∧	روابط	ضرايب	۳– مقادير	جدول
-------	-------	-------	-----------	------



شکل ۸- طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) محاسباتی و مشاهداتی برای کلیه آزمایشها– مدل نمایی.

روابط بدون بعد بهدست آمده بهصورت کمّی برای پیشروی پایه و تاج دلتا میتوان از آنها برای سایر شرایط در محدوده ذکر شده استفاده کرد. آنالیز حساسیت مدل ترکیبی نشان داد که شاخص نسبت اختلاف (Λ) برای پایه و تاج به تغییرات عمق آب در مخزن و دبی جریان آب حساس نیست. شاخص Λ ، برای پایه نسبت به مقادیر زیاد دبی رسوب و برای تاج به مقادیر کم دبی رسوب وابسته است. شکلهای ۹ و ۱۰ نمودارهای طول پیشروی محاسباتی توسط مدل ترکیبی را نشان می دهند. آنالیز آماری دادهها نشان می دهد که میانگین و انحراف معیار ۸ برای پایه بهترتیب برابر با ۹۹/۰ و ۱۳۹/۰ و برای تاج برابر با ۱/۰۰۵ و ۲۱/۱ می باشد. به عبارت دیگر می توان گفت که در سطح احتمال ۹۵ درصد مقدار ۸ برای پایه بین مقدار سطح احتمال ۹۵ درصد مقدار ۸ برای پایه بین مقدار که نشاندهنده عملکرد مناسب مدل می باشد. با توجه به







شکل ۱۰– تغییرات نسبت اختلاف طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) دلتا با مقادیر مشاهداتی برای کلیه آزمایشها– مدل ترکیبی.

نمایی به فرم $X^* = \eta. T^{**} + \varphi. T$ برای یایه و تاج هر یک از آزمایش ها برازش داده شد که ضرایب η و arphi در حالت کلی تابعی از عمق آب مخزن، دبی جریان آب و دبی رسوبات می باشد (روابط ۲، ۷ و ۸). ٥- مدل تركيبي با تركيب مدل رگرسيون خطي و مدل نمایی بهترتیب برای شرایط ابتدایی و پس از آن در محدوده آزمایش های انجام شده توسعه داده شد. ٦- آنالیز آماری مدل ترکیبی نشان داد که میانگین و انحراف معيار شاخص نسبت اختلاف, λ , برای يايه بهترتیب برابر با ۱/۰۰۹ و ۱/۱۳۹ و برای تاج برابر با ۱/۰۰۵ و ۲۱۱/۰ می باشد. به عبارتی می توان گفت که در سطح احتمال ۹۵ درصد مقدار λ برای پایه بین مقدار ۷۲ تا ۱/۲۸ و برای تاج بین ۰/۵۸ تا ۱/٤۲ تغییر میکند که این شاخص ها نشان دهنده عملكر د مناسب مدل مى باشد. ٧- آناليز حساسيت مدل تركيبي نشان داد كه شاخص نسبت اختلاف, λ , برای پایه و تاج به تغییرات عمق آب در مخزن و دبی آب حساس نیست. شاخص λ , برای

پایه نسبت به مقادیر زیاد دبی رسوب و برای تاج به

مقادير كم دبي رسوب وابسته است.

نتيجه گيري

در تحقیق حاضر با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی با سه بازشدگی مختلف در پلان (۹۰، ۲۳/۵ و ۹/۲ درجه)، پدیده رسوبگذاری در شرایط بار بستری و یا تشکیل دلتا در مخازن سدها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر استخراج شد: ۱- نتایج آزمایشگاهی بهدست آمده نشان داد که میزان پیشروی تاج دلتا با توان ۲٫۵۰–۷/۰ زمان متناسب است

پیسروی تاج دلت با توان ۲۸۰۰–۲۰۷۵ رمان میناسب است (شکل ۵). ۲- زاویه ایستایی رسوبات در حالت مستغرق در مراحل مختلف پیشروی رسوبات برای هر یک از آزمایش ها برابر

با ۳۰ تا ٤٠ درجه بهدست آمد. ۳– با استفاده از آنالیز ابعادی و تجزیه و تحلیل دادهها با استفاده از SPSS، معادلهای بهصورت رگرسیون خطی چندگانه برای پیشروی پایه و تاج دلتا بهعنوان تابعی از چهار متغیر بدون بعد زمان رسیدن پایه و تاج، دبی جریان، دبی رسوب و عمق آب در مخزن بهدست آمل (معادله ٤).

٤- با توجه به پیشبینی ضعیف مدل رگرسیون خطی در شرایط ابتدایی طول پیشروی 1 ≥ (X_b^*, X_c^*)، یک مدل

منابع

- 1. Chang, H. 1982. Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans. Proc. ASCE, Vol. 108.
- Cheganizadeh, A. 2005. The sedimentation in reservoirs and delta formation in laboratory. MS.c thesis. Technical faculty, Tehran university.(In Persian)
 Fan, J., and Morris, G. 1992. Reservoir sedimentation. I: delta and density current deposits. Journal
- 3.Fan, J., and Morris, G. 1992. Reservoir sedimentation. I: delta and density current deposits. Journal of Hydraulic Engineering. 118. 354-369.
- 4.Graber, D. 1982. Asymmetric flow in symmetric expansions. Journal of Hydraulic Divisions. 108:133-140.
- 5.Graber, D. 2006. Asymmetric flow in symmetric supercritical expansions. Journal of Hydraulic Engineering. 132: 207-213.
- 6.Jugovic, J., Schuster, G., and Nachtnebel, S. 2005. Aggradation of reservoirs in alpine regions. International symposium on water management and hydraulic engineering. P275-280, Austria.
- 7.Kostic, S., and Parker, G. 2003. Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 2. Experimental and numerical simulation. Journal of Hydraulic Research.41: 127-140.
- 8. 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.
- 9.Raudkivi, A.J. 1993. Hydraulic Structure Design Manual, Sedimentation, Exclusion and Removal of Sediment from Diversion Water. IAHR. 164p.
- 10.Shieh, C., Tseng, C., and Hsu, M. 2001. Development and geometric similarity of alluvial deltas. Journal of Hydraulic Engineering. 127: 408-415.
- 11.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: 433-452.
- 12. Tarban, S. 2004. Simulation of sedimentation in reservoirs. MS.c thesis. Technical and engineering faculty, tarbiat modares university. (In Persian). 95p.
- 13. Toniolo, H., and Parker, G. 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation.P457-468. Proceeding, IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain.
- 14.Zhou, G. 1995. Velocity depth coupling in shallow water flows. Journal of Hydraulic Engineering. 121:717-724.

J. Agric. Sci. Natur. Resour., Vol. 15(5), 2008 www.jasnr.info www.sid.ir www.magiran.com/jasnr

Experimental study of the reservoir water level, hydraulic and sediment properties of reservoir entrance on the rate of delta progression

J. Mamizadeh¹, M.A. Banihashemi², *S.A. Ayyoubzadeh³ S.A.A. Salehi Neyshabori⁴ and R. Jamshidi⁵

¹Ph.D. student, Dept. of water structure Tarbiat Modares University, Iran, ²Assistant Prof., Dept. of civil engineering Tehran University, ³Assistant Prof., Dept. of water structure Tarbiat Modares University, ⁴Prof. Dept. of civil engineering Tarbiat Modares University, ⁵Former M.Sc. Student Dept. of water structure

Mazandaran University

Abstract

In this research, an experimental investigation of the process involved in delta formation and its progression in reservoirs has been undertaken. The process depends on hydraulic, sediment, and physical parameters of the reservoirs and their associated river. In this research, a number of the influencing parameters, such as water and sediment discharges in the river, the reservoir flow depth, and the entrance diverging angle of reservoir, have been studied. For each run, the rate of bed changes and progression of bottom set and crest of a delta in specific stations have been observed and recorded. The results showed that the rate of crest progression can be predicted using an exponential function (with exponent of 0.624). Submerged angle of sediment with d_{50} = 1mm has been obtained between the range of 30 -40 degrees. Using dimensional analysis and SPSS software for the independent variables (progression of bottom set and crest of delta) and the dependent variables (dimensionless time, water and sediment discharges, reservoir flow depth), a multiple linear regression model to experimental data is fitted. Due to weak prediction of the linear model in the first stage of progression, an exponential model has been carried out for this stage. Using a combination of these two models, a combined model is developed. Analysis of this model showed that the average and standard deviation of discrepancy ratio (λ) for the bottom set of delta are 0.99 and 0.139, and those for the crest are 1.005 and 0.211 which show a good prediction when the new model is applied. Sensitivity analysis of the new model showed that the discrepancy ratio, (λ) , for the bottom set and the crest of delta are not sensitive to water discharge and flow depth in the reservoir. However, the parameter is sensitive to the bottom set and the crest of delta in high and low sediment rates, respectively.

Keywords: Experimental study; Sedimentation; Reservoir; Delta progression