

## مطالعه آزمایشگاهی اثر تراز آب مخزن و مشخصات هیدرولیکی و رسوبی دهانه

### ورودی مخزن بر سرعت پیشروی دلتا

جعفر مامی زاده<sup>۱</sup>، محمدعلی بنی‌هاشمی<sup>۲</sup>، \*سیدعلی ایوب‌زاده<sup>۳</sup>

سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۴</sup> و رشید جمشیدی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، آستادیار گروه عمران دانشگاه تهران، آستادیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس تهران، آستاد گروه عمران دانشگاه تربیت مدرس، دانش‌آموخته کارشناس ارشد گروه سازه‌های آبی دانشگاه مازندران

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۷/۱۶

### چکیده

این تحقیق جهت بررسی پدیده رسوب‌گذاری به صورت دلتا در مخازن سدها با استفاده از انجام آزمایش در یک فلوم آزمایشگاهی صورت گرفته است. رسوب‌گذاری به صورت 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 بالآمدگی بستر و میزان پیشروی پایه و تاج دلتا در مقاطع مختلف مشاهده و اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از هر یک از آزمایش‌ها نشان داد که میزان پیشروی تاج دلتا با یک تابع نمایی با نمای  $0.624$  قابل پیش‌بینی است. زاویه ایستایی مصالح رسوبی که شامل ذرات پودر سیلیس با متوسط اندازه  $1$  میلی‌متر بود، در حالت مستغرق بین  $30$  تا  $40$  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 به صورت تابعی از چهار متغیر بدون بعد زمان، دبی جریان، دبی رسوب و عمق آب در مخزن به دست آمد. با توجه به پیش‌بینی 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 به ترتیب 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 ( $\lambda$ ) برای پایه به ترتیب برابر با  $0.99$  و  $0.139$  و برای تاج برابر با  $1.005$  و  $0.211$  می‌باشد که گویای دقت مدل می‌باشد. تحلیل حساسیت مدل ترکیبی نشان داد که شاخص  $\lambda$  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 مقادیر کم دبی رسوب وابسته است.

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

## 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 سرمایه‌های کلان ملی می‌شود (تربن، ۲۰۰۴). 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 رسوب‌گذاری در مخزن سد سفیدرود سالانه ۳۶/۵ میلیون مترمکعب (معادل ۲/۱ درصد حجم اولیه مخزن) از حجم ذخیره آن را کاهش می‌دهد (موریس و فان، ۱۹۹۸). وقتی که جریان آب رودخانه به مخزن می‌رسد، سرعت جریان و میزان حمل رسوب آن با فاصله از نقطه ورودی به‌طور سریع کاهش می‌یابد، در نتیجه اکثر رسوباتی که 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 تشکیل می‌دهند. رسوبات ریزدانه همراه جریان آب حمل شده و به‌طور کم و بیش یکنواخت در تمام مخزن پخش می‌شوند (رادکیوی، ۱۹۹۳). مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که پروفیل دلتایی مخزن را می‌توان به سه ناحیه قابل تشخیص تقسیم‌بندی نمود. قسمت اولیه یا فوقانی 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 می‌یابد، دارای شیب ملایم‌تری نسبت به شیب اولیه بستر رودخانه است. بلافاصله بعد از قسمت فوقانی دلتا، محدوده دوم از تاج دلتا شروع می‌گردد 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.

پدیده رسوب در مخازن سدها به‌صورت پیشروی 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<sup>۱</sup>، 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<sup>۲</sup> 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 متوسط‌گیری 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.

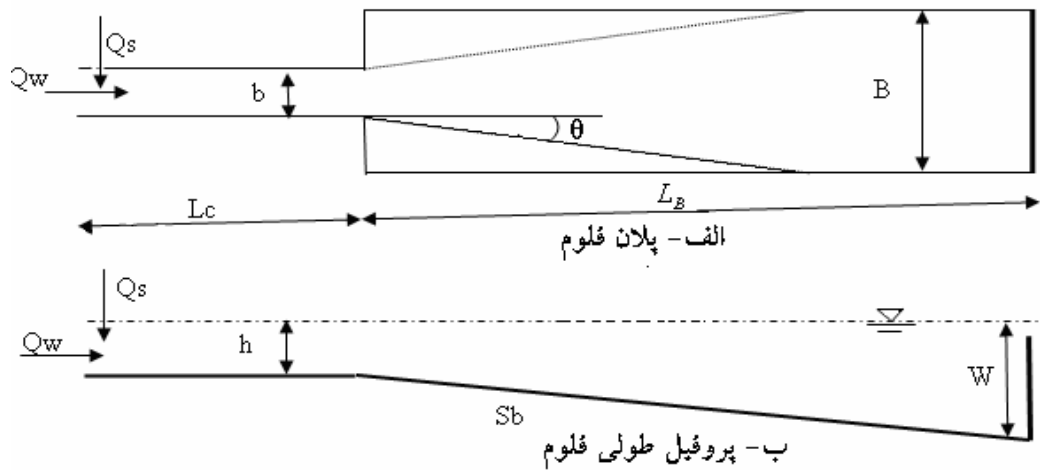
اولین مطالعات آزمایشگاهی روی رسوب‌گذاری در مخازن سدها در سال ۱۹۳۷ به‌وسیله شاکلیش در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی صورت گرفت. براساس نتایج حاصل از این تحقیق رسوب‌گذاری جایی رخ می‌دهد که با توجه به اثر برگشت آب شیب سطح آب کاهش یافته و ضمناً شکل کلی رسوب‌گذاری به دلتایی شبیه است که در محل تقاطع رودخانه و دریا صورت می‌گیرد و جهت حرکت آن در جهت جریان آب می‌باشد (چگنی‌زاده، ۲۰۰۵). چانگ (۱۹۸۲) در بررسی‌های جداگانه‌ای اقدام به بررسی آزمایشگاهی دلتای رسوبی نمودند. نتایج این محققین نشان داد که با کاهش سرعت جریان، رسوب‌گذاری به‌صورت جانبی گسترش یافته و دلتا در

بدون بعد، یک گروه بدون بعد جدید به نام متغیر مشخصه به دست آوردند که به صورت هم زمان تأثیر متغیرهای مختلف در پیشروی دلتا را نشان می‌داد. یوگوییچ و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی 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<sup>۲</sup> 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 پلگسی‌گلاس استفاده شده است. جهت به‌کارگیری فلوم به‌عنوان رودخانه و مخزن، قسمت اولیه فلوم به‌عنوان رودخانه با طول ۵ متر، عرض ۱۶ سانتی‌متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر و بدون شیب طولی اجرا گردید. قسمت انتهایی فلوم به‌عنوان مخزن با طول ۱۰ متر، عرض ۹۸ سانتی‌متر، عمق ۶۰ سانتی‌متر و شیب طولی ۲ درصد اجرا گردید. سیستم‌های تأمین آب و تزریق رسوب در انتهای بالادست کانال نصب شده‌اند.

عرض رشد می‌کند. همچنین زمانی که جریان مومتم خود را از دست می‌دهد، گرادیان انرژی اهمیت می‌یابد و باعث فرار ذرات رسوبی به کناره‌ها می‌گردد و این پدیده تا جایی ادامه می‌یابد که با شکست‌هایی تازه، تغییر در مسیر حرکت دلتا رخ دهد (رادکیوی، ۱۹۹۳). فان و موریس (۱۹۹۲) رسوب‌گذاری 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 فوقانی و پیشانی دلتای رسوبی تغییر می‌کند. شیه و همکاران (۲۰۰۱)، ۱۴ سری 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<sup>۱</sup> 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 (اسونسن و همکاران، ۲۰۰۰). چگنی‌زاده (۲۰۰۵) به بررسی آزمایشگاهی رسوب‌گذاری در مخازن سدها و تشکیل دلتا پرداخته‌اند. ده سری آزمایش به‌منظور مطالعه تشکیل و پیشروی تاج دلتا در یک بازشدگی خیلی ملایم ( $\theta = 2^\circ$ ) انجام گرفت و پیشروی تاج دلتا را با استفاده از یک سری اعداد بدون بعد تجزیه و تحلیل نمودند. از ترکیب اعداد



$L_C$ : طول کانال	$Q_S$ : دبی رسوبات
$L_B$ : طول مخزن	$Q_W$ : دبی آب
$W$ : عمق آب مخزن	$B$ : عرض مخزن
$S_B$ : شیب مخزن	$b$ : عرض کانال
$\theta$ : زاویه بازشدگی	$h$ : عمق آب

شکل ۱- پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی.

دبی جریان ورودی به فلوم در بالادست ( $Q_W$ ) از طریق شیر کنترل برقی قابل تنظیم بود. تزریق رسوب در فاصله ۰/۵ متری از نقطه ابتدایی کانال، توسط یک دستگاه تزریق رسوبات به صورت خشک با قابلیت تنظیم دبی رسوب خروجی ( $Q_S$ ) به صورت مکانیکی-الکتریکی 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 به عنوان دبی رسوب ورودی لحاظ می‌گردید. ماده رسوبی استفاده شده ذرات سیلیس با متوسط قطر ذرات  $d_{50}=1$  میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۱/۱۸ و چگالی  $G_S=2.65$  بود. وسیله تنظیم ارتفاع آب مخزن به عنوان نقطه کنترل شرایط پایین دست جریان در انتهای فلوم قرار گرفته و از یک سرریز مستطیلی با قابلیت تنظیم ارتفاع به کمک یک سرریز لولایی تشکیل شده است.

$$X = f(Q_W, Q_S, W, B, b, d_o, \theta, S_B, \rho_S, \rho, \mu, g, t) \quad (1)$$

بنابراین با استفاده از روش آنالیز ابعادی خواهیم داشت:

$$\frac{X}{W} = F\left(\frac{Q_S}{(gW^3)^{0.5}}, \frac{Q_W}{(gW^3)^{0.5}}, \frac{b}{W}, \theta, \frac{t}{(W/g)^{0.5}}, \right) \quad (2)$$

$$\frac{b}{d_o}, S_B, \frac{b}{B}, \frac{\rho_S}{\rho}, \frac{\mu}{\rho \cdot g^{0.5} \cdot W^{1.5}}$$

متغیرهای مؤثر بر طول پیشروی دلتا ( $X$ ) برحسب

در این تحقیق فرض شده است که

مختلف برای شرایط هیدرولیکی مشخص، نهشته شدن رسوبات با توجه به سرعت کم جریان و عمق زیاد آن در قسمت رودخانه شروع و زیاد شدن ضخامت رسوب گذاری تا جایی ادامه می یافت 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 رسوب گذاری نداشته و فقط موجب پیشروی دلتا می شود و اصطلاحاً گفته می شود که رودخانه به حالت تعادل رسیده است. با ورود جریان از رودخانه به محل مخزن با توجه به تغییر مشخصات جریان، این تعادل به هم خورده و قدرت حمل رسوب در مقاطع مختلف مخزن تغییر می کند. برای انجام آزمایش های رسوب، رسوب با دبی دلخواه از بالادست کانال تزریق و ثبت وقایع از این مرحله آغاز می گردید. در گام های زمانی متناسب با رسیدن زبانه رسوبی به ایستگاه های خاص، با استفاده از تصویربرداری و ثبت داده ها در آن ایستگاه ها، تغییرات تراز کف در پلان و پروفیل به دست می آمد. همچنین تراز سطح آب و بستر به طور همزمان در حین پیشروی دلتا اندازه گیری و ثبت می گردید. 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 ایستگاه های خاص، آزمایش مورد نظر قطع شده و سایر اطلاعات لازم در خط مرکزی کانال، سمت چپ کانال و پلان نیز ثبت می گردید.

با توجه به اینکه در این تحقیق متغیرهای  $\frac{b}{d_s} = 160$ ،  $S_B = 0.02$ ،  $\frac{\rho_s}{\rho} = 2.65$ ،  $\frac{b}{B} = 0.163$  ثابت در نظر گرفته شده اند، می توان آنها را حذف نمود. حداقل مقدار متغیر بی بعد نشان دهنده اثر نیروهای لزجت برابر  $R_{ew} = \frac{\rho \cdot g \cdot W^3}{\mu} = 787000$  بوده که این مقدار معادل با عدد رینولدز جریان 59500 بوده و بیان کننده جریان آشفته و عدم تأثیر عامل لزجت در این تحقیق می باشد. لذا خواهیم داشت:

$$X^* = F(Q_s^*, Q_w^*, W^*, \theta, T^*) \quad (3)$$

که در آن:

$$Q_s^* = \frac{Q_s}{(gW^3)^{0.5}}; W^* = \frac{b}{W}; T^* = \frac{t}{(W/g)^{0.5}} \quad (4)$$

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

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

**انجام آزمایش ها:** با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته و شناخت متغیرهای مؤثر بر طول پیشروی دلتا، تعدادی آزمایش تنظیم و برنامه ریزی شد. خلاصه ای از شرایط انجام آزمایش ها در جدول 1 آورده شده است. ترتیب انجام آزمایش ها بدین صورت است که ابتدا آزمایش های هیدرولیک جریان برای یک زاویه بازشدگی معین انجام می گرفت. در صورتی که جریان شکل گرفته در محل بازشدگی با توجه به تزریق ماده رنگی و انداختن دیسک های 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 ملایم تری در نظر گرفته می شد. با تزریق دبی رسوبات

جدول ۱- فهرست آزمایش‌های انجام شده.

ردیف	W (سانتی‌متر)	Q <sub>w</sub> (لیتر در ثانیه)	Q <sub>s</sub> (گرم در ثانیه)	L (سانتی‌متر)	θ (درجه)
۱	۵۰	۹/۲	-	۰	۹۰
۲	۵۰	۱۸/۵	-	۰	۹۰
۳	۵۰	۴/۵	-	۰	۹۰
۴	۵۰	۹/۲	۹۰	۰	۹۰
۵	۵۰	۹/۲	-	۱۰۰	۲۳/۵
۶	۵۰	۱۸/۵	-	۱۰۰	۲۳/۵
۷	۵۰	۴/۵	-	۱۰۰	۲۳/۵
۸	۵۰	۹/۲	۹۰	۱۰۰	۲۳/۵
۹	۴۵	۹/۲	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۰	۵۰	۹/۲	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۱	۵۰	۱۸/۵	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۲	۵۰	۴/۵	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۳	۵۵	۹/۲	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۴	۵۵	۱۸/۵	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۵	۴۵	۴/۵	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۶	۴۵	۷	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۷	۵۰	۷	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۸	۵۵	۷	۹۰	۲۵۰	۹/۲
۱۹	۵۰	۱۸/۵	۱۳۰	۲۵۰	۹/۲
۲۰	۵۰	۹/۲	۱۳۰	۲۵۰	۹/۲
۲۱	۵۰	۴/۵	۱۳۰	۲۵۰	۹/۲
۲۲	۴۵	۹/۲	۱۳۰	۲۵۰	۹/۲
۲۳	۵۵	۹/۲	۱۳۰	۲۵۰	۹/۲
۲۴	۵۰	۹/۲	۴۵	۲۵۰	۹/۲
۲۵	۵۰	۱۸/۵	۴۵	۲۵۰	۹/۲
۲۶	۵۰	۴/۵	۴۵	۲۵۰	۹/۲
۲۷	۴۵	۹/۲	۴۵	۲۵۰	۹/۲
۲۸	۵۵	۹/۲	۴۵	۲۵۰	۹/۲

## نتایج و بحث

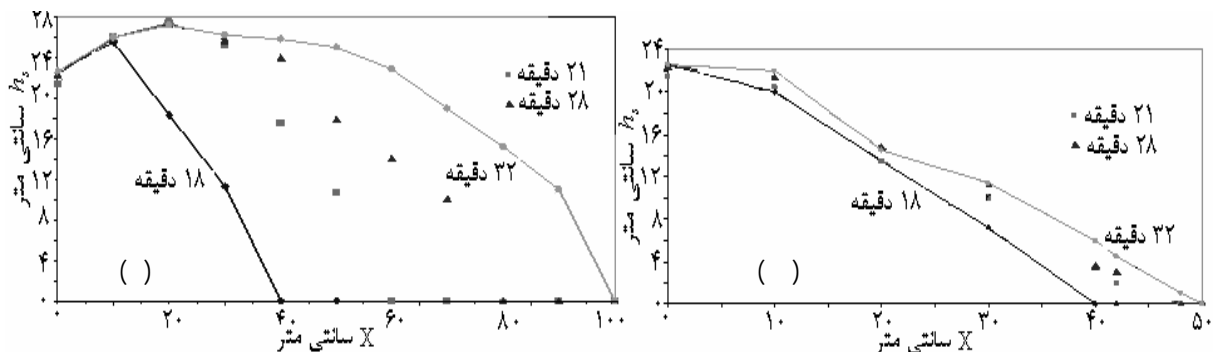
نتایج مربوط به بازشدگی ناگهانی (درجه  $\theta = 90$ ): در آزمایش‌های مربوط به هیدرولیک جریان (آزمایش‌های ۱ تا ۳)، در حالت جریان بدون کنترل پایین‌دست و تحت دبی‌های مختلف، با توجه به تزریق ماده‌رنگی و انداختن دیسک‌های کاغذی در سطح آب مشاهده گردید که جریان ورودی از رودخانه کاملاً به‌صورت متقارن وارد مخزن می‌شود. در حالت جریان با کنترل پایین‌دست، تحت

دبی‌های مختلف نیز مشاهده شد که جریان ورودی از رودخانه به یک سمت منحرف شده و جریان به‌صورت غیرمتقارن و یک‌طرفه می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌است که به‌منظور ایجاد جریان متقارن، نسبت بازشدگی مخزن به رودخانه باید کمتر از ۱/۵ باشد (گرابر، ۲۰۰۶-۱۹۸۲؛ ژو ۱۹۹۵). این نسبت در تحقیق حاضر تقریباً برابر با ۶ می‌باشد. بنابراین جریان غیرمتقارن دور از انتظار نبود. علاوه‌بر این مشاهدات و

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 ۴)، الگوی غیرمتقارن پیشروی رسوب از کانال به مخزن مشاهده شد. الگوی غیرمتقارن پیشروی را می توان توسط هیدرولیک جریان نامتقارن شکل گرفته در محل اتصال رودخانه به مخزن توجیه نمود. با توجه به پیشروی غیرمتقارن رسوبات در مخزن، آزمایش های بعدی در زوایای بازشدگی تدریجی انجام شد.

**آزمایش های مربوط به زاویه بازشدگی تدریجی (درجه  $\theta = 23/5$ ):** در این سری از آزمایش های هیدرولیک جریان (آزمایش های ۵ تا ۷) نیز جریان ورودی از رودخانه مشابه حالت بازشدگی ناگهانی، به صورت غیرمتقارن مشاهده شد. با مشاهده این شرایط، می توان

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 به فواصل ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی متری ابتدایی مخزن، آزمایش قطع گردید. شکل ۲ پروفیل طولی رسوبات در زمان های مختلف در دیواره سمت راست و چپ کانال را نشان می دهند. در هر یک از شکل ها X و hs به ترتیب فاصله طولی از ابتدای مخزن و ارتفاع رسوبات را نشان می دهد. در زمان ها و طول های اولیه پیشروی، پروفیل دلتا در دیواره ها و پلان متقارن بوده و به تدریج این حالت تقارن به هم خورده و توزیع رسوبات به صورت نامتقارن در می آید. با توجه به مشابهت نتایج به دست آمده در این حالت با آزمایش های انجام شده در بازشدگی ناگهانی، آزمایش های بعدی در زوایای بازشدگی ملایم تر انجام شد.



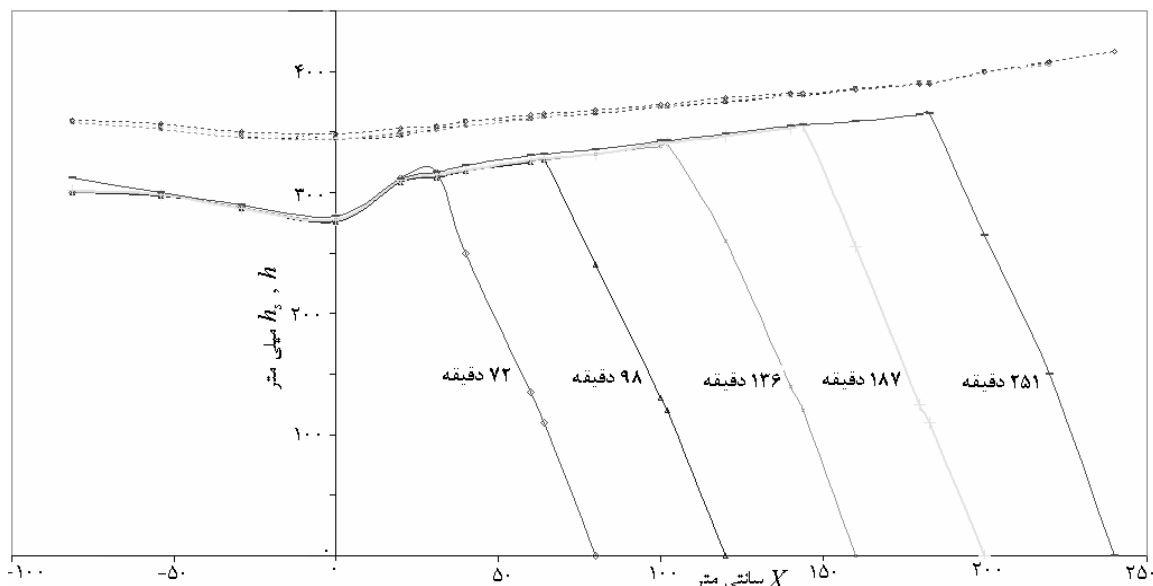
شکل ۲- پروفیل طولی رسوبات در دیواره سمت راست (الف) و چپ (ب) کانال.

پایه دلتا به فواصل ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ سانتی متری ابتدایی مخزن، آزمایش قطع می گردید. در نهایت پس از اطمینان از پیشروی متقارن رسوب، در آزمایش های بعدی فقط آزمایش در ۲۴۰ سانتی متری مخزن قطع می شد. شکل ۳ عمق رسوبات ( $h_s$ ) با خطوط ممتد و عمق آب ( $h$ ) با خطوط نقطه چین را در زمان ها و ایستگاه های مختلف پیشروی در آزمایش ۲۸ (با کمترین سرعت پیشروی) به صورت نمونه نشان می دهد. در این آزمایش با بیشترین عمق آب در مخزن و کمترین دبی رسوبات دلتا پس از مدت زمان طولانی معادل با ۲۵۱ دقیقه به انتهای

**آزمایش های مربوط به زاویه بازشدگی تدریجی (درجه  $\theta = 9/2$ ):** در این سری از آزمایش ها (ردیف های ۹ تا ۲۹ جدول ۱)، در هر دو حالت با کنترل پایین دست و بدون آن، به صورت کیفی مشاهده گردید که جریان ورودی از رودخانه به صورت تقریباً متقارن وارد مخزن می شود. با توجه به جریان متقارن شکل گرفته، عمده آزمایش های 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 به دست آمد. زاویه ایستایی محاسبه شده در کلیه آزمایش ها بین ۳۰ تا ۴۰ درجه به دست آمد.

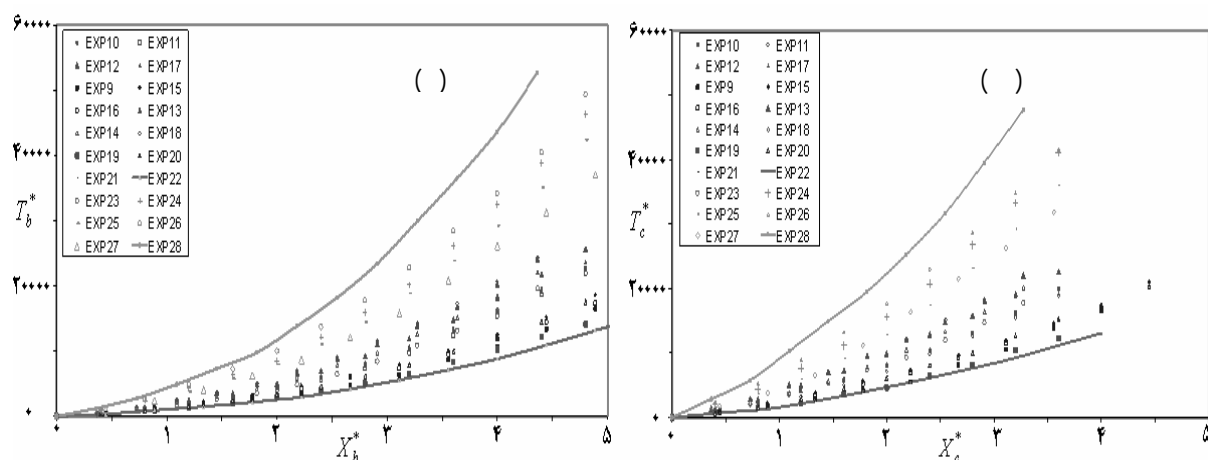
تبدیل می‌رسید، در حالی که در آزمایش ۲۲ (با بیشترین سرعت پیشروی) یا کمترین عمق آب در مخزن و بیشترین دبی رسوبات دلنا پس از مدت زمان کوتاهی معادل با ۶۷ دقیقه به انتهای تبدیل رسید. با توجه به شکل ۳ زاویه بین خط افق و خط واصل بین نقطه تاج و پایه که



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

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

شکل ۴ نمودار طول پیشروی پایه ( $X_b^*$ ) و تاج ( $X_c^*$ ) رسوبات به صورت بدون بعد را برای همه آزمایش‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، کمترین و بیشترین سرعت پیشروی به ترتیب مربوط به آزمایش‌های شماره ۲۲ و ۲۸ به دست آمد و داده‌های سایر آزمایش‌ها



شکل ۴- منحنی پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) دلنا (کلیه آزمایش‌ها).



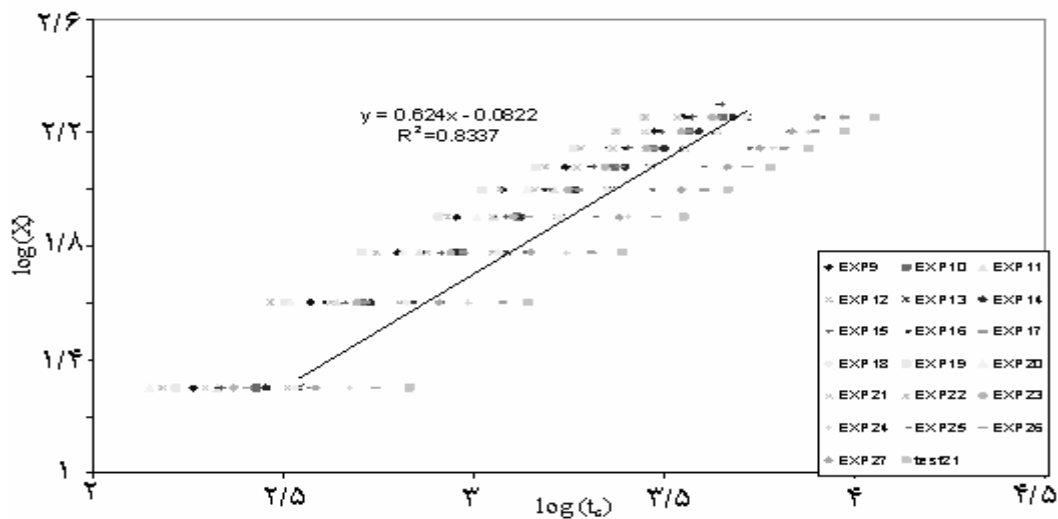
نمای B در معادله ارائه شده توسط اسونسون و همکاران (۲۰۰۰) برای پیشروی تاج دلتا با زمان در هر یک از آزمایش‌ها محاسبه شد که مقدار آن به طور متوسط ۰/۶۲۴ به دست آمد (شکل ۵). تفاوت مقادیر B به دست آمده مربوط به تفاوت در هندسه مدل‌ها است. در کانال مستطیلی توان B برابر ۰/۵ و در کانال با بازشدگی ملایم برابر ۰/۴ و در این تحقیق به طور متوسط ۰/۶۲۴ به دست آمد. انتظار این بود که برای زاویه بازشدگی بیشتر توان B کمتر از ۰/۴ به دست می‌آید. این نشان می‌دهد که توان B 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 داده‌های مربوط به ۲۱ آزمایش (۲۵۰ 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 به صورت معادله ۵ با ضرایب جدول ۲ استخراج شد:

$$X^* = \alpha + \beta W^* + \gamma Q_W^* + \mu Q_S^* + \delta T_b^* + \phi T_b^* \quad (5)$$

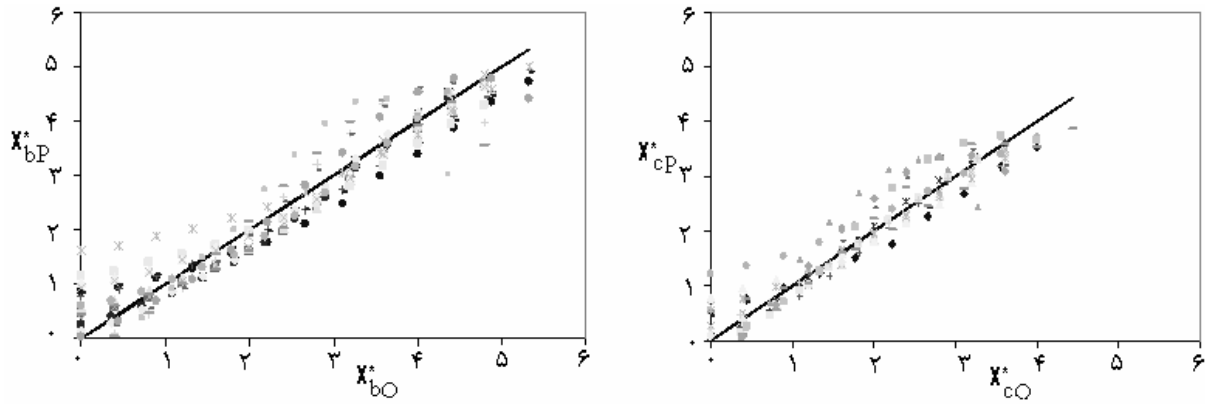
شکل ۶ طول پیشروی پایه و تاج محاسباتی را در مقابل طول پیشروی پایه مشاهداتی برای کلیه آزمایش‌ها نشان می‌دهد.  $X_{CP}^*$ ,  $X_{bP}^*$ ,  $X_{CO}^*$ ,  $X_{bO}^*$  و  $\lambda = \frac{X_{bP}^*}{X_{bO}^*}$  به ترتیب طول پیشروی پایه و تاج مشاهداتی و محاسباتی و تغییرات نسبت اختلاف طول پیشروی پایه با مقادیر 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 انتهایی طول پیشروی مطابقت خوبی با هم دارند. در محدوده ابتدایی طول پیشروی، داده‌های مدل، مقادیر را بالاتر از داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



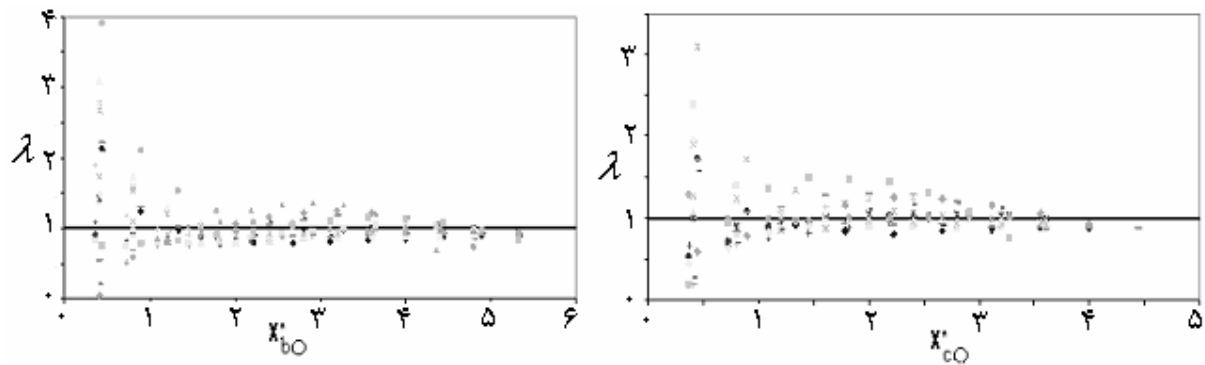
شکل ۵- منحنی پیشروی تاج دلتا با زمان (کلیه آزمایش‌ها).

جدول ۲- مقادیر ضرایب معادله خطی.

ضرایب	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\mu$	$\delta$	$\phi$	$R^2$
پایه	-۰/۹۲۷	-۷/۲۲۹	۷/۶۳۱	۱۱/۹۴۷	۰/۰۰۰۲۸	-۴/۱×۱۰ <sup>-۹</sup>	۰/۹۶۷
تاج	-۱/۲۸۹	۲۸/۳	۸/۸۳۸	۱۰/۲۲۶	۰/۰۰۰۲۴	-۳/۷×۱۰ <sup>-۹</sup>	۰/۹۸۱



شکل ۶- مقایسه طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) محاسباتی و مشاهداتی برای کلیه آزمایش‌ها.



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

$$X^* = \eta T^{*2} + \varphi T^* \quad (6)$$

$$\eta = f_i(W^*, Q_w^*, Q_s^*) = \alpha'_i + \beta'_i W^* + \gamma'_i Q_w^* + \mu'_i Q_s^*, \quad i=1,2 \quad (7)$$

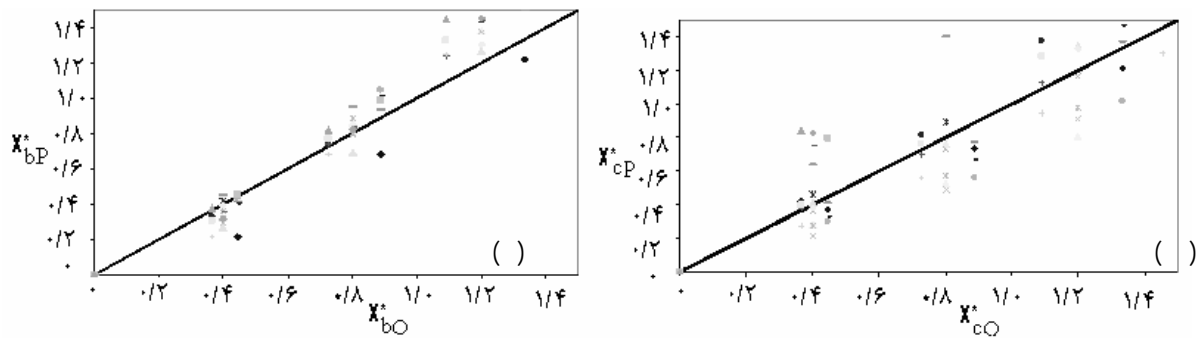
$$\varphi = f_i(W^*, Q_w^*, Q_s^*) = \alpha'_i + \beta'_i W^* + \gamma'_i Q_w^* + \mu'_i Q_s^*, \quad i=1,2 \quad (8)$$

مقادیر ضرایب  $\eta$  و  $\varphi$  برای پایه و تاج در جدول ۳ آورده شده است. همچنین ارزیابی این مدل برای طول‌های پیشروی پایه و تاج در شکل ۸ نشان داده شده است.

با توجه به پیش‌بینی ضعیف مدل خطی در شرایط ابتدایی طول پیشروی  $(X_b^*, X_c^*) \leq 1$ ، یک مدل دیگر برای این شرایط اجرا شد. به منظور به دست آوردن مدل جدید، ابتدا با توجه به زمان پیشروی پایه و تاج دلنا برای هر یک از آزمایش‌ها، یک معادله نمائی به فرم کلی  $X^* = \eta \cdot T^{*2} + \varphi \cdot T^*$  برای پایه و تاج برآزش داده شد. ضرایب  $\eta$  و  $\varphi$  در حالت کلی تابعی از عمق آب مخزن، دبی جریان آب و دبی رسوبات می‌باشند که مقادیر بهینه با استفاده از نرم‌افزار SPSS تعیین شده و در نهایت روابط زیر برای پیشروی پایه و تاج دلنا استخراج گردید:

جدول ۳- مقادیر ضرایب روابط ۷ و ۸

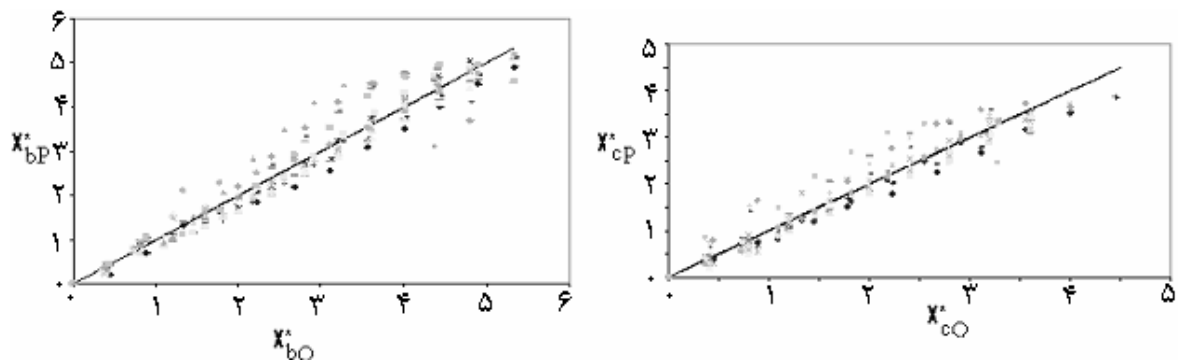
$R^2$	$\mu'$	$\gamma'$	$\beta'$	$\alpha'$	ضرایب
۰/۹۲۷	$-1/6 \times 10^{-7}$	$-1/9 \times 10^{-7}$	$-1/46 \times 10^{-6}$	$-5/25 \times 10^{-10}$	$\eta$ برای پایه (i=1)
۰/۹۴۵	$-9/87 \times 10^{-8}$	$-1/91 \times 10^{-7}$	$-1/148 \times 10^{-6}$	.	$\eta$ برای تاج (i=2)
۰/۹۳۲	۰/۰۰۳۶۱	۰/۰۰۳۲۱	-۰/۰۲۱۵۹	۰/۰۰۰۱۰۸	$\varphi$ برای پایه (i=1)
۰/۹۴۱	-۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۲۶	۰/۰۵۰۸	.	$\varphi$ برای تاج (i=2)



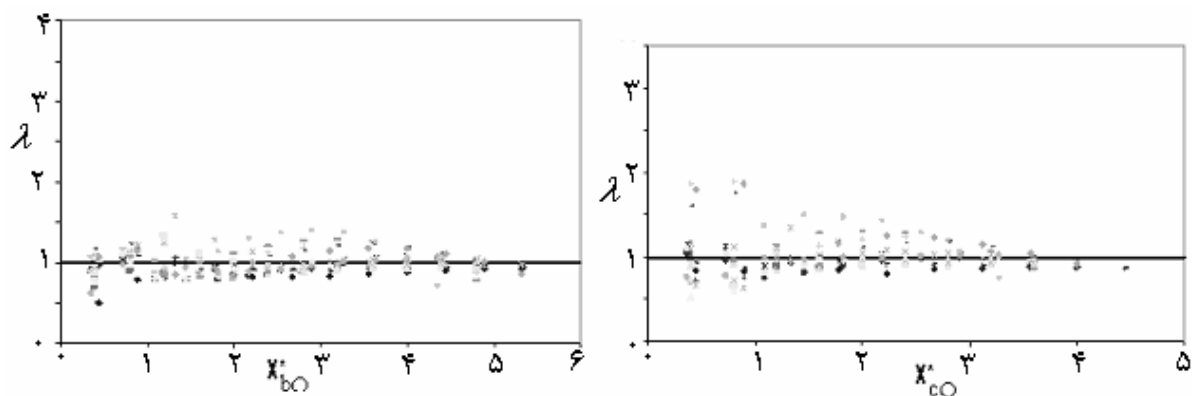
شکل ۸- طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) محاسباتی و مشاهداتی برای کلیه آزمایش‌ها- مدل نمایی.

روابط بدون بعد به دست آمده به صورت کمی 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 ( $\lambda$ ) برای پایه و تاج به تغییرات عمق آب در مخزن و دبی جریان آب حساس نیست. شاخص  $\lambda$ ، 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 می‌دهند. آنالیز آماری داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین و انحراف معیار  $\lambda$  برای پایه به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۱۳۹ و برای تاج برابر با ۱/۰۰۵ و ۰/۲۱۱ می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در سطح احتمال ۹۵ درصد مقدار  $\lambda$  برای پایه بین مقدار ۰/۷۲ تا ۱/۲۸ و برای تاج بین ۰/۵۸ تا ۱/۴۲ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل می‌باشد. با توجه به



شکل ۹- طول پیشروی تاج (الف) و پایه (ب) محاسباتی و مشاهداتی برای کلیه آزمایش‌ها- مدل ترکیبی.



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

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی با سه بازشدگی مختلف در پلان (۹۰، ۲۳/۵ و ۹/۲ درجه)، پدیده رسوب گذاری در شرایط بار بستری و یا تشکیل دلتا در مخازن سدها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر استخراج شد:

۱- نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نشان داد که میزان پیشروی تاج دلتا با توان ۰/۶۵-۰/۷۵ زمان متناسب است (شکل ۵).

۲- زاویه ایستایی رسوبات در حالت مستغرق در مراحل مختلف پیشروی رسوبات برای هر یک از آزمایشها برابر با ۳۰ تا ۴۰ درجه به دست آمد.

۳- با استفاده از آنالیز ابعادی و تجزیه و تحلیل دادهها با استفاده از SPSS، معادله‌ای به صورت رگرسیون خطی چندگانه برای پیشروی پایه و تاج دلتا به عنوان تابعی از چهار متغیر بدون بعد زمان رسیدن پایه و تاج، دبی جریان، دبی رسوب و عمق آب در مخزن به دست آمد (معادله ۴).

۴- با توجه به پیش بینی ضعیف مدل رگرسیون خطی در شرایط ابتدایی طول پیشروی  $(X_b^*, X_c^*) \leq 1$ ، یک مدل

نمایی به فرم  $X^* = \eta \cdot T^{*2} + \phi \cdot T^*$  برای پایه و تاج هر یک از آزمایشها برآزش داده شد که ضرایب  $\eta$  و  $\phi$  در حالت کلی تابعی از عمق آب مخزن، دبی جریان آب و دبی رسوبات می باشد (روابط ۶، ۷ و ۸).

۵- مدل ترکیبی با ترکیب مدل رگرسیون خطی و مدل نمایی به ترتیب برای شرایط ابتدایی و پس از آن در محدوده آزمایشهای انجام شده توسعه داده شد.

۶- آنالیز آماری مدل ترکیبی نشان داد که میانگین و انحراف معیار شاخص نسبت اختلاف،  $\lambda$ ، برای پایه به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۱۳۹ و برای تاج برابر با ۱/۰۰۵ و ۰/۲۱۱ می باشد. به عبارتی می توان گفت که در سطح احتمال ۹۵ درصد مقدار  $\lambda$  برای پایه بین مقدار ۰/۷۲ تا ۱/۲۸ و برای تاج بین ۰/۵۸ تا ۱/۴۲ تغییر می کند که این شاخصها نشان دهنده عملکرد مناسب مدل می باشد.

۷- آنالیز حساسیت مدل ترکیبی نشان داد که شاخص نسبت اختلاف،  $\lambda$ ، برای پایه و تاج به تغییرات عمق آب در مخزن و دبی آب حساس نیست. شاخص  $\lambda$ ، برای پایه نسبت به مقادیر زیاد دبی رسوب و برای تاج به مقادیر کم دبی رسوب وابسته است.

## منابع

- 1.Chang, H. 1982. Fluvial hydraulics of deltas and alluvial fans. Proc. ASCE, Vol. 108.
- 2.Cheganizadeh, A. 2005. The sedimentation in reservoirs and delta formation in laboratory. MS.c thesis. Technical faculty, Tehran university.(In Persian)
- 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.

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

**J. Mamizadeh<sup>1</sup>, M.A. Banihashemi<sup>2</sup>, \*S.A. Ayyoubzadeh<sup>3</sup>  
S.A.A. Salehi Neyshabori<sup>4</sup> and R. Jamshidi<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. student, Dept. of water structure Tarbiat Modares University, Iran, <sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of civil engineering Tehran University, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of water structure Tarbiat Modares University, <sup>4</sup>Prof. Dept. of civil engineering Tarbiat Modares University, <sup>5</sup>Former 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  $d_{50} = 1\text{mm}$  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 ( $\lambda$ ) 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, ( $\lambda$ ), 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