

# مقایسه مدل آزمایشگاهی و میدانی رودخانه پیربازار جهت برآورد میزان انتقال رسوب و تاثیر آن بر عمر مفید و محیط زیست تالاب انزلی

امیر هوشنگ نظامیوند چگینی<sup>(۱)</sup>، حامد حق نظر<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۲. دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۱۸

## چکیده

عامل اصلی جابجایی ذرات رسوبی در مجاری آب، انرژی جریان می‌باشد. نمایش فیزیکی انرژی جریان آب در عمق، سرعت، مقدار جریان و ارتباط آنها با هم قابل تصور است. بررسی تغییرات عمق جریان با فرض ناچیز بودن تغییرات بستر و یا شیب آن در مقابل عمق جریان در آزمایشگاه و میدان از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. بدین منظور، بررسی اثر تغییرات ارتفاع جریان بر میزان انتقال رسوب در تالاب انزلی مورد توجه قرار گرفت. جهت دستیابی به این هدف، رودخانه پیربازار و در امتداد آن پیربازار روگا که منتهی به تالاب انزلی است، انتخاب گردید. در این تحقیق، مطالعه میدانی مبتنی بر نمونه برداری از رسوبات بستر و همچنین اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی از قبیل عمق، سرعت و در نتیجه دبی جریان در مقاطع مختلف توسط دستگاه اندازه‌گیری کیو-لاینر انجام گرفت. نتایج برداشت میدانی و همچنین مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش اشل در ایستگاه پیربازار، ارتفاع جریان در نزدیکی تالاب به دلیل مماندری بودن رودخانه و در نتیجه استهلاک انرژی، مقدار کمی افزایش یافته است. این مقدار کم سبب انتقال رسوب به شاخه پیربازار روگا و بخش اولیه تالاب می‌گردد در حالیکه در شاخه پیربازار روگا منتهی به تالاب، رسوب قابل ملاحظه‌ای منتقل نمی‌شود. با توجه به تطبیق برداشت میدانی و مطالعه آزمایشگاهی و مقادیر دبی-اشل موجود در سال آبی ۹۰-۹۱ در ایستگاه پیربازار، حدوداً ۲۱۲ تن رسوب در این سال آبی از رودخانه پیربازار در نزدیکی تالاب عبور کرده و وارد تالاب شده است. این مقدار انتقال رسوب یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در عمر مفید و پایداری محیط زیست تالاب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تالاب انزلی، پیربازار، انتقال رسوب، سیلاب.

## مقدمه

اولیه در این زمینه توسط Kramer (1932) and Casey (1935) صورت گرفت. معیار آستانه حرکت رسوبات از کار آزمایشگاهی Shields (1936) که آستانه حرکت را در حالت جریان یکنواخت و بستر صاف مورد مطالعه قرار داد، به دست آمده است. Shields (1936) دیاگرامی بدون بعد بر حسب رینولدز ذرات متحرک تحت بنام پارامتر شیلدز ارائه داد که برای دانه‌بندی‌های مختلف می‌توان میزان پارامتر شیلدز بحرانی را برآورد نمود. با محاسبه رینولدز ذرات متحرک و پارامتر شیلدز در دیاگرام مربوطه می‌توان ناپایداری و عدم حرکت و آستانه حرکت ذرات را ارائه نمود.

در مطالعه حاضر، تحقیق میدانی مبتنی بر نمونه‌برداری از رسوبات بستر و همچنین اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی از قبیل عمق و سرعت در مقاطع مختلف رودخانه پیربازار توسط دستگاه اندازه‌گیری کیولاینر انجام گرفت و از معیار شیلدز به منظور تعیین آستانه حرکت رسوبات استفاده شد و در نتیجه میزان انتقال رسوب از رودخانه پیربازار به تالاب انزلی با استفاده از تطبیق مطالعه آزمایشگاهی و برداشت میدانی به دست آمد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان رشت توسط دو رودخانه گوهررود و سیاهرود احاطه شده و این دو رودخانه در حوالی منطقه پیربازار به هم متصل شده و با نام رودخانه پیربازار و سپس با نام پیربازار روگا وارد تالاب انزلی می‌شوند. رودخانه‌های منتهی به تالاب انزلی موجب انتقال رسوبات به این تالاب شده و این مسئله، تهدید جدی در عمر تالاب و همچنین مسائل زیست‌محیطی خواهد بود. در نتیجه مطالعه میزان انتقال رسوب در این رودخانه‌ها می‌تواند در تخمین میزان رسوب وارد شده به تالاب حائز اهمیت باشد.

به منظور دستیابی به این هدف، رودخانه پیربازار و شاخه خروجی آن از تالاب انتخاب شده و از بستر آنها نمونه‌برداری شد (شکل ۱). پس از تعیین منحنی دانه‌بندی و اندازه‌گیری سرعت متوسط و سطح مقطع جریان، اثر ارتفاع جریان بر میزان انتقال رسوبات به تالاب به کمک تطبیق با مطالعات آزمایشگاهی بررسی شد.

Sarmiento and Shvidchenko et al. (2001) و همچنین Falcon (2006) and روش‌های مختلفی جهت شناسایی تاثیر هیدرولیک جریان آب بر جابجایی و میزان انتقال ذرات رسوبی ارائه داده‌اند. مطالعات آزمایشگاهی و همچنین میدانی (طبیعی) این محققین نشان می‌دهد که مشخصات اساسی هیدرولیک جریان و ذرات رسوبی از عوامل اصلی شروع، چگونگی جابجایی و مقدار انتقال ذرات می‌باشند. بسیاری از نظریه‌های رایج در انتقال بار بستر و بار معلق از مطالعات آزمایشگاهی و با فرض وجود جریان یکنواخت به دست آمده است. (Chegini and Pender (2011) مطالعات آزمایشگاهی زیادی را جهت انتقال رسوبات ماسه‌ای در عمق‌ها، شیب‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف انجام دادند. این تحقیق آزمایشگاهی به منظور شناخت بهتر و بیشتر تاثیر متقابل هیدرولیک جریان بر ذرات رسوبی در یک فلوم جریان آب با بستر پوششی ذرات ریز دانه و درشت دانه انجام گردیده است. در این راستا از ابزارهای (سیستم‌های) نسبتاً ساده و کاربردی جهت اندازه‌گیری ذرات استفاده شده است. سیستم اندازه‌گیری ذرات، سیستمی کلاسیک و معروف به تله‌گذار می‌باشد. ایشان با بررسی شرایط مختلف جریان، میزان رسوبات ماسه‌ای منتقل شده را جمع‌آوری و شمارش کرده و ارتباط بین عمق و زمان با دبی واحد عرض انتقال رسوب را نمایش دادند.

Drake et al. (1988) اولین کسانی بودند که بر روی انتقال رسوب ذرات شنی رودخانه مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند. آنان با استفاده از عکسبرداری به این نتیجه رسیدند که ذرات ریزتر از بستر جدا شده و ذرات درشت‌تر بر روی بستر می‌غلتنند. (Nino et al. (1994) نیز با استفاده از عکسبرداری در پلان و سطح عمودی، مقدار انتقال رسوب ذرات را اندازه‌گیری کردند. (Abbott and Francis (1977) با استفاده از تکنیک عکسبرداری در سطح قائم، غلشش و جهش ناگهانی ذرات و ارتباط بدون بعد ارتفاع، طول و سرعت غلشش در راستای جریان را مورد بررسی قرار دادند. محققین مختلفی در مورد درک صحیح از آغاز حرکت رسوبات، مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند که مطالعات



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای از محدوده نمونه‌برداری (خط قرمز)

## داده‌های آزمایشگاهی

در مطالعه آزمایشگاهی (Chegini and Pender (2011) از فلومی به طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۳ متر و با شیب‌های متفاوت و همچنین از سه نوع مصالح تقریباً یکنواخت با میانگین قطر ۰/۲، ۱/۶ و ۲/۸ میلی‌متر استفاده شده است. از سیستم کلاسیک اندازه‌گیری جریان شامل اندازه‌گیری مکانیکی و دیجیتالی موضعی برای اندازه‌گیری سطح، عمق آب و مقدار جریان استفاده شده است. در این مطالعه، برای تعیین میزان رسوبات منتقل شده از سیستم جدیدی به نام تله‌گذار استفاده شده است. این سیستم کلاسیک اندازه‌گیری رسوب، امکان رسوب‌گذاری را بدون و یا حداقل تأثیر منفی در جریان آب فراهم می‌نماید. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از سیستم کلاسیک اندازه‌گیر رسوب و پارهای از مشخصات جریان میزان انتقال رسوبات در شرایط مختلفی از جریان یکنواخت تعیین شده است.

## اندازه‌گیری میدانی

در روز ۲۲ خرداد ماه سال ۱۳۹۱، یک مقطع از رودخانه پیربازار در نزدیکی محل اتصال به تالاب و ۹ مقطع از رودخانه پیربازار روگا از حوالی پل غازیان شهرستان انزلی به طول تقریبی ۸/۲ کیلومتر در شاخه خروجی رودخانه پیربازار از تالاب (پیربازار روگا) نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها از بستر رودخانه و ترجیحا در مرکز مقطع و توسط دستگاه جمع‌آوری رسوب برداشت شد.

علاوه بر نمونه‌برداری بستر، سرعت متوسط و عمق جریان در آن مقاطع توسط دستگاه کیو لاینر اندازه‌گیری و برداشت گردید. همچنین طول و عرض جغرافیایی مقاطع توسط GPS ثبت شد. شکل ۲، نمایی از دستگاه‌های برداشت رسوب و اندازه‌گیری عمق و سرعت را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۲. نمایی از دستگاه‌های استفاده شده در تحقیق. الف) دستگاه برداشت رسوب، ب) دستگاه برداشت سرعت و عمق

## نتایج و بحث

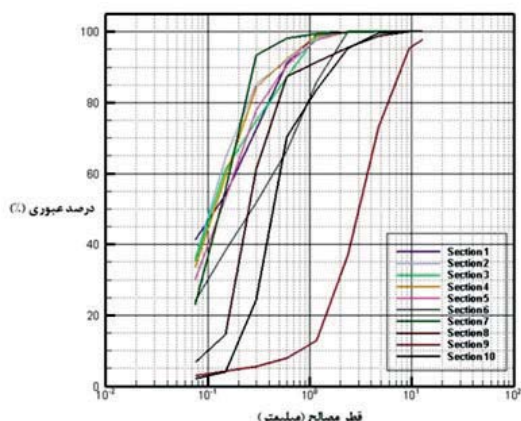
با توجه به سرعت کم جریان در مسیر رودخانه مورد مطالعه و همچنین عریض بودن مقاطع پیربازار روگا، تمرکز جریان در اطراف خط مرکزی مقطع قرار داشته و انتقال رسوب در این ناحیه صورت می‌گیرد. جدول ۱، مقادیر حاصل از برداشت میدانی ۱۰ مقطع از رودخانه پیربازار و پیربازار روگا را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. نتایج برداشت میدانی مقاطع

مقطع	موقعیت محل اندازه‌گیری	سرعت جریان (متر بر ثانیه)	عمق آب (متر)	متوسط قطر ذرات بستر (میلی‌متر)
۱ (پیربازار روگا)	فاصله از نقطه شروع = ۵۸۰ متر	۰/۲	۱/۳۲	۰/۱۲۶
۲ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه اول = ۲۰۵ متر	۰/۲۵	۲/۲۹	۰/۱۱۲
۳ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه دوم = ۲۴۵ متر	۰/۱۸	۱/۹۲	۰/۱۱۷
۴ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه سوم = ۲۴۰ متر	۰/۱۸	۱/۹	۰/۱۲۳
۵ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه چهارم = ۱۶۰ متر	۰/۲۲	۲/۶۲	۰/۱۴
۶ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه پنجم = ۳۱۰ متر	۰/۲۵	۲/۸۹	۰/۲۸
۷ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه ششم = ۵۷۰ متر	۰/۱۷	۲/۵۸	۰/۱۳۷
۸ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه هفتم = ۱۲۷۰ متر	۰/۲۱	۲/۹	۰/۲۶۴
۹ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه هشتم = ۲۶۰۰ متر	۰/۰۴	۴/۸	۳/۲۲
۱۰ (پیربازار روگا)	فاصله از ایستگاه نهم = ۱۹۳۰ متر	۰/۲۵	۱/۳۶	۰/۴۶۷

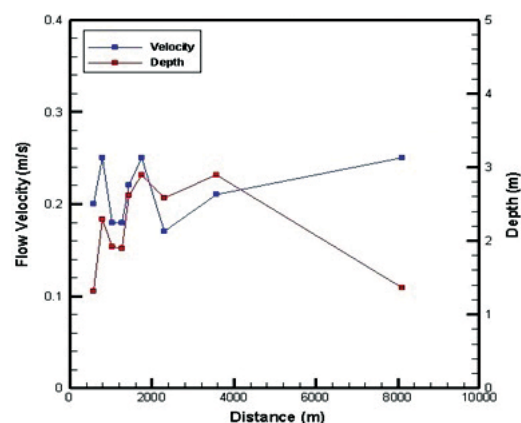
امیر هوشنگ نظامیوند چگینی و حامد حق نظر

مبدأ، تغییرات همسان عمق و سرعت به دلیل عدم لایروبی بستر می‌باشد و از مقطع ۸ به بعد به دلیل لایروبی، افزایش و کاهش سرعت توأم با کاهش و افزایش عمق خواهد بود.



(ب)

شکل‌های ۳-الف و ب، به ترتیب نمودار تغییرات عمق و سرعت جریان در مقاطع را برحسب فاصله از مبدأ نمونه برداری و منحنی دانه‌بندی مصالح بستر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-الف می‌توان دریافت که تا مقطع ۸ از



(الف)

شکل ۳. الف) تغییرات عمق و سرعت مقاطع برحسب فاصله از مبدأ نمونه برداری، ب) دانه‌بندی مصالح بستر در مقاطع نمونه‌گیری شده

که در آن  $R$  معرف شعاع هیدرولیکی برحسب متر،  $A$  معرف سطح مقطع جریان برحسب متر مربع،  $P$  معرف محیط خیس شده برحسب متر می‌باشد. ضریب زبری مانینگ توسط رابطه استریکلر ارائه شده در رابطه ۳ محاسبه گردید:

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (3)$$

که در آن  $n$  معرف ضریب زبری مانینگ (بی‌بعد) و  $d_{50}$  معرف قطر ذرات خاک (برحسب میلی‌متر) که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر باشد.

شیب کف مسیر جریان ( $S$ ) بی‌بعد، توسط رابطه کلاسیک مانینگ ارائه شده در رابطه ۴ به دست آمد:

$$S = \frac{V^2 n^2}{R^{4/3}} \quad (4)$$

تنش برشی شیلدز و عدد رینولدز ذرات با روابط ۵ و ۶ محاسبه شد:

$$\tau = \frac{R \cdot S}{\left(\frac{Y_s}{Y_w} - 1\right) \cdot d_{50}} \quad (5)$$

برای به دست آوردن عرض نواحی اندازه‌گیری شده از دبی متوسط سالانه سال آبی ۹۰-۹۱ استفاده کرده که به میزان ۱۳/۵ متر مکعب بر ثانیه بوده و با توجه به سرعت و عمق جریان که از برداشت میدانی حاصل گردیده است، عرض موثر انتقال رسوب بر طبق رابطه (۱) و با فرض مستطیل بودن ناحیه انتقال به دست آمده است:

$$B = \frac{Q}{y \cdot V} \quad (1)$$

که در آن  $Q$  معرف متوسط دبی سالانه برحسب متر مکعب بر ثانیه،  $y$  معرف عمق جریان برحسب متر،  $B$  معرف عرض موثر انتقال رسوب برحسب متر و  $V$  معرف سرعت متوسط جریان برحسب متر بر ثانیه می‌باشد. پس از محاسبه عرض موثر انتقال رسوب، دیگر مشخصات هیدرولیکی از قبیل شعاع هیدرولیکی، ضریب زبری مانینگ و شیب کف توسط رابطه مانینگ با استفاده از روابط کلاسیک و متداول ۲-۴ محاسبه شد:

$$R = \frac{A}{P} \quad (2)$$

بر متر مکعب،  $u^*$  معرف سرعت برشی برحسب متر بر ثانیه و  $v$  معرف لزجت سینماتیکی آب برحسب متر مربع بر ثانیه می‌باشد.

$$R^* = \frac{u^* \cdot d_{50}}{v} \quad (6)$$

جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی محاسبه شده مقاطع اول تا دهم را نمایش می‌دهد.

که در آن  $\tau$  معرف تنش برشی شیلدز برحسب نیوتن بر متر مربع،  $Y_s$  معرف وزن مخصوص ذرات بستر برحسب نیوتن بر متر مکعب،  $Y_w$  وزن مخصوص آب برحسب نیوتن

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی محاسبه شده مقاطع

مشخصات هیدرولیکی	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع	مقطع
B	۵۱/۱۳	۲۳/۵۸	۳۹/۰۶	۳۹/۴۷	۲۳/۴۲	۱۸/۶۸	۳۰/۷۷	۲۲/۱۶	۷۰/۳۱	۳۹/۷
R	۱/۲۵	۱/۹۱	۱/۷۴	۱/۷۳	۲/۱۴	۲/۲	۲/۲	۲/۲۹	۴/۲۲	۱/۲۷
N	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۱۳۲
S	۳/۳E-۶	۲/۸E-۶	۱/۶۹E-۶	۱/۷۴E-۶	۲/۰۵E-۶	۳/۲E-۶	۱/۱۶E-۶	۲/۰۹E-۶	۷/۷۷E-۸	۷/۹E-۶
T	۰/۰۲	۰/۰۲۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۰۶۱	۰/۰۱۳
R	۰/۸۰۱	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۹۱۷	۲/۳۲	۰/۶۸۷	۱/۸۱	۵/۷۷	۴/۶۳

در واقع این ناحیه مثل حوضچه رسوب‌گیر عمل کرده و سبب می‌شود تا انتقال رسوب قابل توجهی از این ناحیه تا پل غازیان (پیربازار روگا) وجود نداشته باشد. از میان ۱۰ مقطع برداشت شده، مقطع دهم در بالادست منطقه عریض و مابقی مقاطع در پایین دست آن قرار دارند. پس می‌توان با توجه به مشخصات هیدرولیکی مقطع دهم، اثر شرایط سیلابی در ایستگاه پیربازار را بر انتقال رسوب این مقطع بررسی کرد.



شکل ۴. تصویر ماهواره‌ای از ایستگاه پیربازار تا ناحیه عریض نزدیک تالاب

#### شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی و میدانی

برای سنجش رفتار رودخانه پیربازار می‌توان از مطالعه آزمایشگاهی الهام گرفت و با مشابه‌سازی مقاطع موجود

با توجه به مقدار تنش شیلدز و رینولدز ذرات و با دقت در دیگرام شیلدز نتیجه می‌شود که همه مقاطع در شرایط موجود به دلیل کوچک‌تر بودن تنش شیلدز از تنش شیلدز بحرانی، رسوبی را منتقل نمی‌کنند و در نتیجه فقط در شرایط سیلابی توان حمل رسوب را خواهند داشت. در واقع شیب بستر رودخانه پیربازار به علت ناچیر بودن آن، عامل انتقال رسوب نبوده و فقط در شرایط سیلابی، شیب هیدرولیکی ایجاد شده در رودخانه موجب انتقال رسوب خواهد بود. به‌منظور بررسی اثر شرایط سیلابی بر میزان حمل رسوب جریان در رودخانه پیربازار، با دقت بر تصاویر ماهواره‌ای که در شکل ۴ نمایش داده شده است، مشخص شد که رودخانه پیربازار از ایستگاه برداشت دبی- اشل پیربازار، به صورت مماندری حرکت کرده و پس از طی مسافت تقریبی هشت کیلومتر، در نزدیکی تالاب، به یکباره افزایش عرض ناگهانی خواهد داشت و خود را به تالاب متصل می‌کند و شاخه‌ای از آن همچنان به مسیر منتهی به تالاب ادامه داده و به دریای خزر می‌ریزد. با توجه به مطالب فوق‌الذکر می‌توان گفت که در اثر بروز سیلاب و افزایش ارتفاع آب در ایستگاه پیربازار، رودخانه تلاش می‌کند تا این افزایش ارتفاع و انرژی را با مماندری شدن خود مستهلک کند. با برخورد انرژی سیلاب با ناحیه عریض، اندک انرژی باقیمانده، مستهلک شده و

ناهمگن یا تحریف شده است پس با توجه به موارد فوق خواهیم داشت:

$$q_r = \frac{y_r}{x_r^{1/2}} \quad (10)$$

با داشتن  $y_r$  (نسبت عمق جریان در مدل به نمونه واقعی) و با استفاده از تشابه شیب‌ها،  $x_r$  (نسبت طولی در مدل به نمونه واقعی) به دست می‌آید:

$$S_r = \frac{y_r}{x_r} \quad (11)$$

تنها مجهول برای برقراری تشابه دبی رسوب،  $y_r$  می‌باشد. برای به دست آوردن  $y_r$  باید بدانیم کدام مقطع از رودخانه با کدام مقطع از آزمایشگاه تناسب دارد. بنابراین باید از رابطه بین پارامترهای هندسی مقاطع رودخانه و آزمایشگاه استفاده کنیم. بدین منظور از تساوی  $B_r = B_p$  استفاده می‌کنیم و با ساده‌سازی به این نتیجه می‌رسیم که نسبت  $\frac{y}{B}$  در رودخانه با آزمایشگاه برابر است. با توجه به جدول ۱، متوسط قطر ذرات بستر در مقطع دهم  $0.467$  میلی‌متر می‌باشد. برای شبیه‌سازی مقطع دهم از داده‌های با قطر  $0.21$  میلی‌متر و شیب در آزمایشگاه  $(S=0.004)$  استفاده شده و مشخصات آن در جدول ۳ آمده است. در روز ۲۲ خرداد سال ۱۳۹۱ (تاریخ اندازه‌گیری میدانی)، ارتفاع جریان در مقطع دهم  $1/36$  متر بوده و ارتفاع جریان در ایستگاه پیربازار براساس سال آبی ۹۱-۹۰،  $50$  سانتی‌متر می‌باشد. در این حالت بر طبق محاسبات جدول ۲، شیب هیدرولیکی کم بوده و انتقال رسوب نداریم.

جدول ۳. مشخصات داده‌های آزمایشگاهی برای ذرات با قطر  $0.21$  میلی‌متر و شیب  $0.004$  (اندیس  $m$  معرف نمونه آزمایشگاهی می‌باشد)

$q_p$ (g/s.m)	$(\frac{y}{B})_m$	$B_m$ (متر)	$S_m$	$y_m$ (متر)
0.1218	0.16	0.3	0.004	0.05
0.1444	0.2	0.3	0.004	0.06
0.3967	0.23	0.3	0.004	0.07
0.5668	0.26	0.3	0.004	0.08
0.1011	0.3	0.3	0.004	0.09
0.18833	0.33	0.3	0.004	0.1
0.14941	0.4	0.3	0.004	0.12
0.32189	0.43	0.3	0.004	0.13
0.45563	0.46	0.3	0.004	0.14
0.29526	0.5	0.3	0.004	0.15
0.30878	0.53	0.3	0.004	0.16

I. Distorted

با مقاطع آزمایشگاهی، میزان انتقال رسوب را در این رودخانه برای شرایط مختلف جریان بررسی کرد. از میان مقاطع برداشت شده، مقطع دهم در رودخانه پیربازار که قبل از اتصال به تالاب قرار دارد، استفاده می‌گردید. برای شبیه‌سازی رودخانه در آزمایشگاه از مفهوم مدل‌های فیزیکی بهره گرفته و با بررسی نسبت‌های بدون بعد بین رودخانه و آزمایشگاه میزان انتقال رسوب در رودخانه شبیه‌سازی شد. برای نیل به این منظور، نرخ بار بستر در واحد عرض را به صورت زیر می‌توان نشان داد:

$$q_b = C_s \cdot \delta_s \cdot u_s \quad (7)$$

که در آن  $q_b$  دبی واحد عرض رسوب بر حسب نیوتن در ثانیه بر مترمربع،  $u_s$  سرعت متوسط رسوبات در لایه بار بستر (بر حسب متر بر ثانیه) با ضخامت  $\delta_s$  (بر حسب متر) و  $C_s$  غلظت رسوب در لایه بار بستر (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب) است. با استفاده از نسبت‌های تشابه بین مدل و نمونه واقعی داریم:

$$\frac{q_{bm}}{q_{bp}} = \frac{u_{sm}}{u_{sp}} \quad (8)$$

اندیس  $m$  نشان‌دهنده مدل و اندیس  $p$  نشان‌دهنده نمونه واقعی می‌باشد.

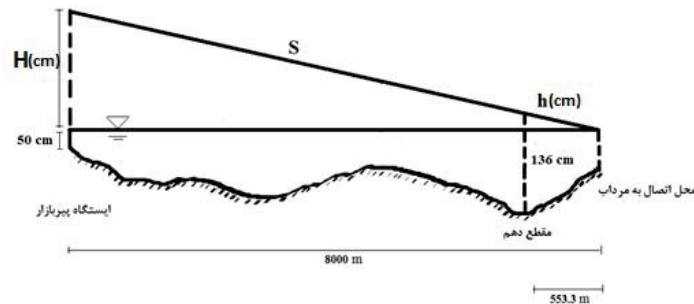
رابطه (۸) نتیجه می‌دهد که:

$$q_{br} = u_{sr} \quad (9)$$

$u_{sr}$  تابعی از سرعت برشی می‌باشد و دبی واحد عرض تابعی از شیب و عمق جریان خواهد بود و چون مدل

حال اگر ارتفاع جریان در اثر سیلاب در ایستگاه پیربازار افزایش یابد، می توان مقدار افزایش عمق در مقطع دهم را با استفاده از گرادیان هیدرولیکی و فاصله آنها از محل اتصال

به تالاب به دست آورد. با به دست آوردن این افزایش ارتفاع و حاصل جمع آن با مقدار کنونی، ارتفاع جریان در مقطع دهم در حالت سیلابی مطابق شکل ۵ به دست می آید.



شکل ۵. نمایی شماتیک از بستر، سطح آب موجود و گرادیان هیدرولیکی سیلاب از ایستگاه پیربازار تا تالاب

گردید که هنگامی که ارتفاع جریان در ایستگاه پیربازار به ۶۵ سانتی متر می رسد، در مقطع دهم آستانه حرکت اتفاق می افتد. بنابراین از ارتفاع جریان ۶۵ الی ۴۴۶ سانتی متر در ایستگاه پیربازار، انتقال رسوب در مقطع دهم وجود دارد و محاسبات برای روزهایی که اشل ایستگاه از ۶۵ سانتی متر بیشتر است انجام می گیرد. نسبت  $\frac{y}{B}$  در آزمایشگاه برای قطر مصالح ۰/۲۱ میلی متر در محدوده ۰/۱۶ تا ۰/۵۳ قرار دارد. در جدول ۴، با توجه به نسبت  $\frac{y}{B}$  بین آزمایشگاه و مقطع دهم، تاثیر افزایش عمق جریان از اشل ۵۰ سانتی متر به ۴۴۶ سانتی متر در ایستگاه پیربازار بر عمق جریان مقطع دهم ارائه شده است.

حداکثر میزان اشل در سال آبی ۹۱-۹۰ در ایستگاه پیربازار برابر ۴۴۶ سانتی متر است، بنابراین با افزایش ارتفاع جریان بصورت واحد از ۵۰ سانتی متر به ۴۴۶ سانتی متر، مقادیر شیب هیدرولیکی، ارتفاع سیلاب در ایستگاه پیربازار، ارتفاع سیلاب در مقطع دهم و نسبت عمق به عرض موثر به دست می آید. همچنین تنش شیلدز و رینولدز دانه ها به منظور مشخص نمودن آستانه حرکت در ارتفاع جریان بالاتر از ۵۰ سانتی متر در ایستگاه پیربازار محاسبه شد. در اشل ۵۰ سانتی متر، چون شیب هیدرولیکی صفر است پس با شیب کف برابر بوده و  $\tau > \tau_c$  می باشد؛ در نتیجه، در مرحله اول رسوبی منتقل نمی شود. با دقت در دیاگرام شیلدز مشخص

جدول ۴. تاثیر افزایش عمق جریان در ایستگاه پیربازار بر عمق جریان مقطع دهم (اشل ۵۰ الی ۴۴۶ سانتی متر)

اشل (سانتی متر)	S	H (سانتی متر)	h (سانتی متر)	y = (136+h) (سانتی متر)	$\frac{y}{B}$
۵۰	۰	۰	۰	۱۳۶	۰/۰۳۴
۱۰۰	۰/۰۰۰۰۶۷۱	۵۰	۳/۴۵	۱۳۹/۴۵	۰/۰۳۵۱
۱۵۰	۰/۰۰۰۱۳۴	۱۰۰	۶/۹۱	۱۴۲/۸	۰/۰۳۵۹
۲۰۰	۰/۰۰۰۲۰۱	۱۵۰	۱۰/۳۷	۱۴۶/۳۷	۰/۰۳۶۸
۲۵۰	۰/۰۰۰۲۶۸	۲۰۰	۱۳/۸۳	۱۴۹/۸۳	۰/۰۳۷۷
۳۰۰	۰/۰۰۰۳۳۵	۲۵۰	۱۷/۲۹	۱۵۳/۲۹	۰/۰۳۸۶
۳۵۰	۰/۰۰۰۴	۳۰۰	۲۰/۷۸	۱۵۶/۷۸	۰/۰۳۹۴
۴۰۰	۰/۰۰۰۴۷	۳۵۰	۲۴/۲	۱۶۰/۲	۰/۰۴۰۳
۴۴۶	۰/۰۰۰۵۳۱	۳۹۶	۲۷/۳۸	۱۶۳/۳۸	۰/۰۴۱۱



جدول ۵ محاسبات شبیه‌سازی انتقال رسوب مقطع صورت گرفته برای اشل تمامی روزهای سال آبی ۹۰-۹۱، دهم رودخانه با آزمایشگاه را برای اشل ۵۰ الی ۴۴۶ می‌توان تاثیر ارتفاع جریان بر میزان انتقال رسوب رودخانه سانتی‌متر نشان می‌دهد. بنابراین با استفاده از شبیه‌سازی پیربازار را تخمین زد.

جدول ۵. محاسبات شبیه‌سازی مقطع دهم رودخانه با آزمایشگاه برای اشل ۵۰ الی ۴۴۶ سانتی‌متر

$y_p$ (سانتی‌متر)	$S_p$	$B_p$ (متر)	$\frac{y}{B_p}$	$S_r$	$Y_r$	$X_r$	$q_b$	$q_{bm} \left( ta \frac{y}{B_p} \right)$ (گرم بر سانتی‌متر در ثانیه)	$q_{bp}$ (گرم بر سانتی‌متر در ثانیه)
۱۳۶	-	۳۹/۷	۰/۰۳۴	-	۰/۰۰۷۵۵	-	-	-	-
۱۳۹/۴۵	۰/۰۰۰۰۶۷۱	۳۹/۷	۰/۰۳۵۱	۵۹/۶۱	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۱۲۶	۰/۶۷	۰/۱۷۷۸	۰/۲۶۵
۱۴۲/۹۱	۰/۰۰۰۱۳۴	۳۹/۷	۰/۰۳۵۹	۲۹/۸۵	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۲۵۳	۰/۴۷۶	۰/۱۷۲۷	۰/۳۶۲
۱۴۶/۳۷	۰/۰۰۰۰۲۰۱	۳۹/۷	۰/۰۳۶۸	۱۹/۹	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۰۳۸	۰/۳۸۷	۰/۱۶۷۶	۰/۴۳۲
۱۴۹/۸۳	۰/۰۰۰۰۲۶۸	۳۹/۷	۰/۰۳۷۷	۱۴/۹۲	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۰۵۰۷	۰/۳۳۵	۰/۱۶۲۵	۰/۴۸۴
۱۵۳/۲۹	۰/۰۰۰۰۳۳۵	۳۹/۷	۰/۰۳۸۶	۱۱/۹۴	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۰۶۳۴	۰/۳	۰/۱۵۷۵	۰/۵۲۴
۱۵۶/۷۸	۰/۰۰۰۰۴	۳۹/۷	۰/۰۳۹۴	۱۰	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۰۷۶۱	۰/۲۷۴	۰/۱۵۲۴	۰/۵۵۵
۱۶۰/۲	۰/۰۰۰۰۴۷	۳۹/۷	۰/۰۴۰۳	۸/۵۱	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۰۰۸۸۷	۰/۲۵۳	۰/۱۶۷۷	۰/۶۵۶
۱۶۳/۳۸	۰/۰۰۰۰۵۳۱	۳۹/۷	۰/۰۴۱۱	۷/۵۲	۰/۰۰۷۵۵	۰/۰۰۱	۰/۲۳۸	۰/۲۰۹۲	۰/۸۷۷

بنابراین نتایج به‌دست آمده از آزمایشگاه و مقطع دهم در رودخانه پیربازار نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع جریان تاثیر به‌سزایی در میزان انتقال رسوب خواهد داشت. جدول ۶ بیانگر تعداد روزهای سال آبی ۹۰-۹۱ است که ارتفاع آب در ایستگاه پیربازار بزرگتر از ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد و جدول ۷ میزان انتقال رسوب در ماههای مختلف سال آبی ۹۰-۹۱ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۷، میزان دبی واحد

جدول ۶. تعداد روزهای سال آبی ۹۰-۹۱ با اشل بالاتر از ۵۰ سانتی‌متر در ایستگاه پیربازار

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	ماه
۲۳	۱	۱۴	۵	۹	۱۸	۲۷	۳۰	۲۱	۳۰	۲۷	۱۵	روز

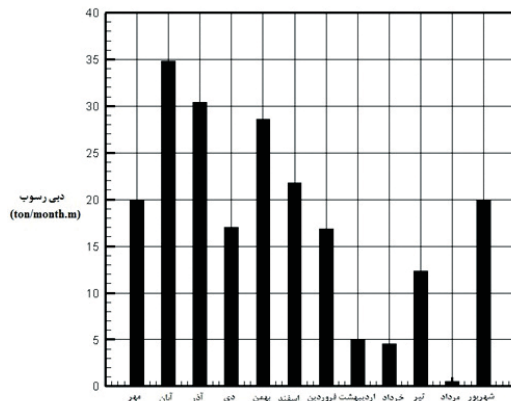
جدول ۷. میزان انتقال رسوب در واحد عرض مقطع دهم در سال آبی ۹۰-۹۱

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	ماه
۵/۸۳۱	۰/۱۵۲	۳/۶۰۱	۱/۳۳۴	۱/۴۷۵	۴/۹۱۷	۶/۳۳۸	۸/۳۲۵	۴/۹۶۶	۸/۸۵۹	۱۰/۱۶۴	۵/۸۳۳	$q_b$ (g/s.m)

سال آبی از این مقطع عبور کرده و وارد تالاب شده است. این مقدار انتقال رسوب یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در عمر مفید و پایداری محیطزیست تالاب می باشد.

### منابع

- Abbott, J.E. and Francis, J.R.D., 1977. Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, 284, 225-254.
- Casey, H.J., 1935. Ueber Geschiebebewegung (On Bed Load, in German), Mitt. Preuss. Versuchsanstalt f. Wasserbau u. Schiffbau, Berlin.
- Chegini, A.H.N. and Pender, G., 2011. The effect of various flow conditions on the initial motion of sand particle beds. *International Journal of Sediment Research*, 3, 304-317.
- Drake, T.G., Shreve, R.L., Dietrich, W.E., Whiting, P.J. and Leopold, L.B., 1988. Bedload transport of fine gravel observed by motion picture photography. *Journal of Fluid Mechanics*, 192, 2193-2217.
- Kramer, H., 1932. Modellgeschiebe und Schleppekraft (Model Sediment and Shear Force, in German), Berlin.
- Nino, Y., Garcia, M. and Ayala L., 1994. Gravel saltation, 1. Experiments. *Water Resources Research*, 30, 6, 1907-1914.
- Sarmiento, O.A. and Falcon, M.A., 2006. Critical bed shear Stress for unsize sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 2, 172-179.
- Shields, A., 1936. Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. 26, Berlin, Germany.
- Shvidchenko, A.B., Pender, G. and Hoey, T. B., 2001. Critical shear stress for incipient motion of sand/gravel streambeds. *Journal of Water Resources Research*, 37, 7, 2273-2283.



شکل ۶. دبی رسوب عبوری از مقطع دهم بر حسب تن در هر ماه از سال آبی ۹۰-۹۱

### نتیجه گیری

در این مطالعه میدانی با نمونه گیری از ۱۰ مقطع رودخانه های پیربازار روگا و پیربازار و جمع آوری اطلاعات هیدرولیکی مقاطع، محاسبات هیدرولیکی آنها صورت گرفت. نتایج اطلاعات برداشت شده، نشان می دهد که رسوبی در این دو رودخانه منتقل نشده و انتقال رسوب در شرایط سیلابی اتفاق می افتد. با افزایش ارتفاع سیلاب، شیب هیدرولیکی ایجاد می شود و این شیب عامل انتقال رسوب خواهد بود. با ایجاد شیب هیدرولیکی و حرکت جریان سیلابی به سمت پایین دست، به علت مانداری بودن رودخانه، انرژی جریان مستهلک شده و این انرژی در محل اتصال به مرداب به دلیل عرض زیاد جریان بسیار ناچیز شده و عملاً انرژی به سمت رودخانه پیربازار روگا منتقل نمی شود و سیلاب در محل اتصال به مرداب تقریباً فروکش می کند و این امر سبب می شود که انتقال رسوب در پیربازار روگا وجود نداشته و یا بسیار ناچیز باشد. نتایج شبیه سازی انتقال رسوب بین مقطع دهم در رودخانه پیربازار و مطالعه آزمایشگاهی نشان می دهد که با افزایش ارتفاع جریان در ایستگاه پیربازار، ارتفاع جریان در مقطع دهم نسبت به ایستگاه پیربازار به دلیل استهلاک انرژی اندکی افزایش یافته اما همین افزایش ارتفاع باعث انتقال رسوب قابل ملاحظه ای در این مقطع خواهد شد. با توجه به مقادیر دبی- اشل موجود در سال آبی ۹۰-۹۱ و مقادیر دبی واحد عرض رسوب در مقطع دهم رودخانه پیربازار، تقریباً ۲۱۲ تن رسوب در این