

بررسی آزمایشگاهی تغییرات عمق آبستگي ناشی از فرسایش درونی در کناره‌ی رودخانه‌ها

فرشته نوربخش^۱، محمدرضا مجدزاده طباطبایی^{۲*}، محمدحسین خرازی فرد^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور

۲- عضو هیأت علمی پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

۳- عضو هیأت علمی پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

m_majdzadeh@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۰۸

چکیده- فرسایش سواحل آبراهه‌های جریان باعث خسارت به اراضی مستعد کشاورزی، تأسیسات کناری و پهن شدن آبراهه‌ی جریان می‌شود. فرایند فرسایش توده‌ای ساحل رودخانه عاملی برای انتقال حجم بزرگ رسوب با پیامدهای رسوب‌گذاری در پایین دست یک سیستم رودخانه بوده و مسئله‌ی مهمی در مدیریت رودخانه است. این پژوهش با هدف بررسی فرسایش درونی تحت سه شیب کناره در رودخانه‌ها و دو شیب لایه‌های آبرفتی انجام شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی روی یک مدل آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری عمق آبستگي ناشی از فرسایش درونی و اندازه‌گیری دبی خروجی برای محاسبه عدد رینولدز به عمل آمده است. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول ۵۰ سانتی متر، عرض ۲۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر است. مصالح مورد استفاده در مخزن شامل رس به عنوان لایه چسبنده، ماسه با سه دانه‌بندی متفاوت ۰/۸-۰/۴، ۱/۲-۰/۸ و ۲/۰-۱/۲ میلی‌متر و لایه‌ی سوم به عنوان سربارمی‌باشد. این آزمایش‌ها در ارتفاع آبی متفاوت و تحت گرادیان‌های هیدرولیکی متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که میزان شیب کناره در عمق آبستگي و عدد رینولدز مؤثر است. با افزایش شیب کناره میزان عمق آبستگي و گرادیان هیدرولیکی کاهش پیدا می‌کند و با کاهش گرادیان، عدد رینولدز کاهش پیدا می‌کند.

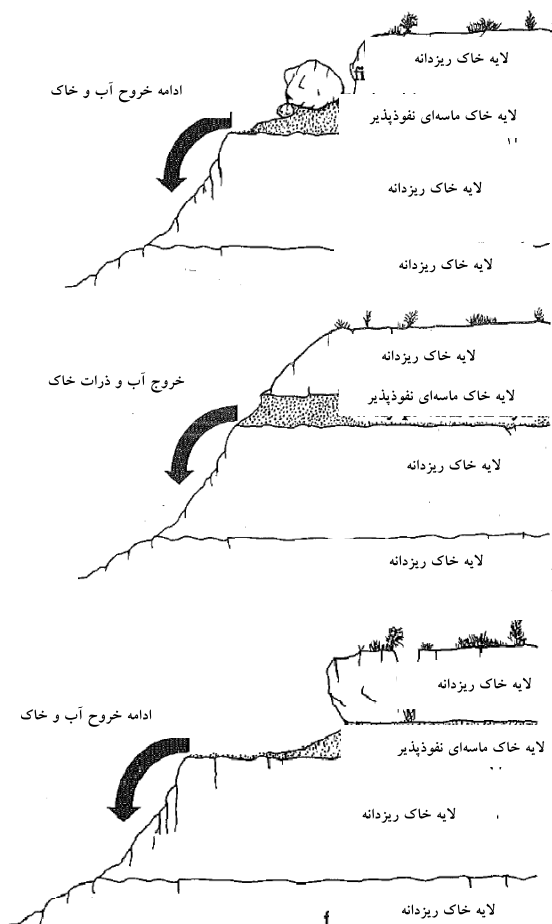
واژگان کلیدی: فرسایش درونی، شیب کناره رودخانه، میزان طول پسروری، عدد رینولدز

۱- مقدمه

انجام شده حاکی از آن است که رسوبات وارد شده از کناره‌ی رودخانه حدود ۳۰ تا ۸۰ درصد رسوبات حوضه‌ی آبخیز را شامل می‌شود [۲]. یکی از نتایج مکانیسم آبرفتی رودخانه‌ها، فرسایش کناره است که در اثر شکست ناشی از زیرشویی است [۳]. یکی از مهم‌ترین علت‌های فرسایش سواحل رودخانه‌ها می‌توان به ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح

رودخانه همیشه در حال تغییر و تحول است. مفهوم این جمله را کسانی که سالیان زیاد در حاشیه رودخانه‌ها منزل داشتند یا به فعالیت‌های کشاورزی مشغولند به خوبی می‌فهمند و خاطرات آنان، یادآور حرکت‌های موضعی و تغییر ابعاد رودخانه‌ها به طور تدریجی یا ناگهانی است [۱]. مطالعات

ذرات رسوب همراه با آب عامل تخریب کناره شود. شروع فرسایش درونی بستگی به گرادیان هیدرولیکی خروجی دارد. با نفوذ بارندگی در سراسر ناحیه‌های خاک، هدایت هیدرولیکی بین ذرات خاک کاهش پیدا می‌کند و کاهش نفوذپذیری خاک، منجر به آهسته شدن حرکت جریان عمودی شده و جریان جانبی را تسریع می‌کند. با جابه‌جایی ذرات، گرادیان هیدرولیکی در ناحیه برداشت افزایش پیدا می‌کند و افزایش موضعی در گرادیان می‌تواند تراوش بیشتری را ایجاد کند که باعث افزایش فرسایش می‌شود. به غیر از عامل نفوذ بارندگی یا جریان جانبی نشت، خطوط لوله مدفون و یا مخازن نیز می‌توانند باعث فرسایش درونی شوند. هگرتی (۱۹۹۱) نحوه تخریب را نشان می‌دهد (شکل ۱).



شکل (۱) فرایند فرسایش درونی در کناره رودخانه

کناره، عوامل بیولوژیکی و دخالت انسان، عوامل شیمیایی و عوامل هیدرولیکی اشاره کرد. تغییرات فیزیکی مثل تغییر دما و انجماد و تغییرات بیولوژیکی مثل تغییر پوشش گیاهی منجر به فرسایش کناره می‌شوند که این خود منجر به تغییرات رژیم رودخانه می‌شود. گروه مهندسین ارتش ایالات متحده آمریکا (۱۹۸۱) عوامل سایش، بیولوژیکی (حیوانات)، بیولوژیکی (گیاهان)، شیمیایی، انتقال نخاله، جریان آب، یخ زدگی و آب شدن‌های متوالی مصالح کناره، نیروی ثقل، فعالیت‌های بشری (در کناره رودخانه و در داخل کانال اصلی)، وجود قطعات یخ، نزولات جوی، امواج آب و باد را مکانیسم‌های برداشته شدن ذرات خاک از کناره رودخانه تشخیص داده است.

از بین عوامل مؤثر بر فرسایش کناره، فرایند فرسایش درونی یا زیرسطحی است که موجب زیرشویی در لایه‌ی نفوذپذیر کناره که در بین دو لایه‌ی نفوذناپذیر قرار گرفته شده، می‌شود و در نتیجه این زیرشویی منجر به ریزش توده‌های لایه بالایی و شکست کناره می‌شود.

هووارد و مک‌لین در سال ۱۹۸۸ با انجام آزمایش‌هایی نقش نشت را بر فرسایش توده ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند. عواملی که باعث تمرکز جریان نشت و ایجاد نیرو برای خروج ذرات می‌شوند، لایه‌بندی کناره و اختلاف هدایت هیدرولیکی لایه‌ها است، در حالی که آزمایش‌های آن‌ها بر روی توده‌ی یکنواخت ماسه‌ای انجام شده و این حالت در طبیعت اجازه‌ی چنین تمرکز جریانی را پیدا نمی‌کند [۵].

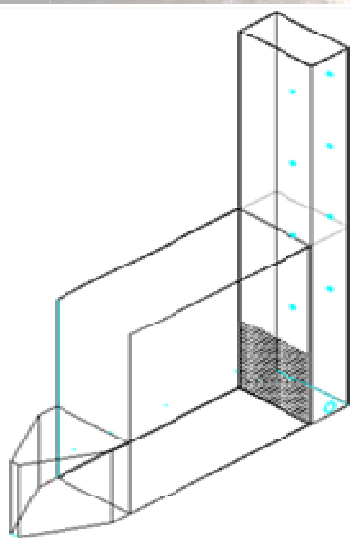
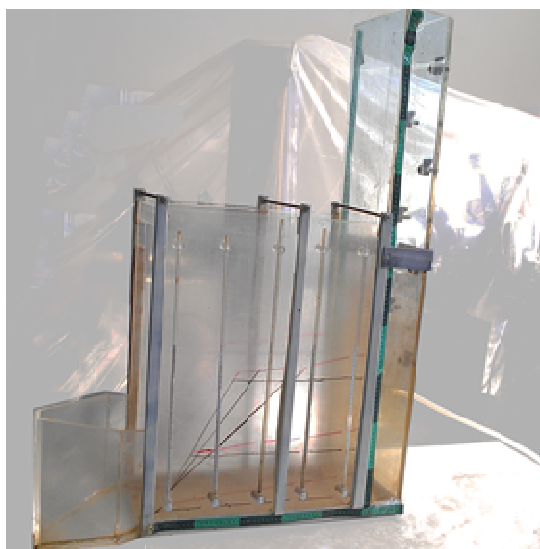
فرایند فرسایش درونی از عوامل پیچیده‌ی تغییر مورفولوژی در رودخانه‌ها است. هگرتی در سال ۱۹۹۱ با مطالعه و مشاهده صحرایی بسیار زیاد به این نتیجه رسید که علت اصلی به وجود آمدن فرسایش درونی قرارگیری یک لایه نفوذپذیر در بین لایه‌های ریزدانه و چسبنده است که باعث می‌شود این لایه با زهکشی کردن آب از یک منبع و خروج

1- Howard and McLane
2- Hagerti

۲- مطالعه‌ی آزمایشگاهی

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

از مخزن آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه دانشگاه شهید عباسپور برای بررسی تغییرات عمق آبشستگی و عدد رینولدز ذرات در شیب‌های متفاوت کناره استفاده شد.



شکل (۲) نمایی از فلوم آزمایشگاهی

مخزن آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول ۵۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است (شکل ۲). این مخزن از جنس پلکسی است که در آن دو مخزن برای

فاکس و ویلسون^(۲۰۰۶، ۲۰۰۷) پژوهش‌های صحرایی و آزمایشگاهی خود را با هدف تهیه‌ی یک مدل انتقال رسوب فرسایش درونی و تخریب کناره بر اساس پارامترهای قابل اندازه‌گیری انجام دادند. رستمی پور و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی آزمایشگاهی فرسایش درونی در کناره‌ی رودخانه در میکرومدل به عنوان عاملی مهم در فرسایش و ناپایداری کناره پرداختند. نتایج آزمایش حاکی از این بود که اندازه‌ی دانه‌های لایه‌ی ماسه‌ای و ارتفاع کناره نقش بسزایی بر گرادیان هیدرولیکی بحرانی برای آغاز فرسایش و نرخ فرسایش دارند. هم چنین نشان دادند که با افزایش سربار، گرادیان هیدرولیکی بحرانی افزایش و نرخ فرسایش لایه‌ی ماسه‌ای کاهش پیدا می‌کند. سلامت و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی فرسایش در مجاورت سازه‌های متقاطع در کناره‌های رودخانه پرداختند. نتایج بیان کننده‌ی مؤثر بودن اندازه‌ی ذرات و وجود سازه‌ی متقاطع و گرادیان (ثابت در طول زمان متغیر) در چگونگی شکل‌گیری فرسایش است.

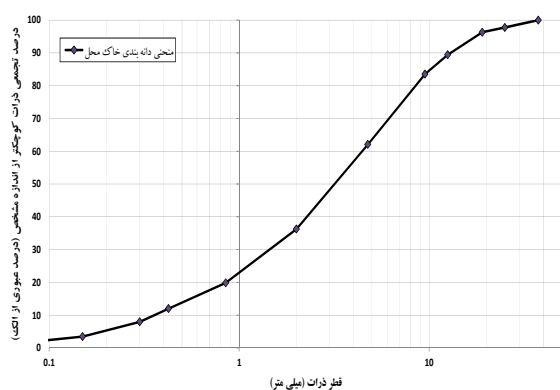
در اکثر پژوهش‌های انجام شده فرسایش درونی در دیواره‌ی ایستاده با لایه‌های آبرفتی افقی بررسی شده است و هیچ کدام تأثیر شیب کناره و لایه‌ها را در نظر نگرفتند. بدین منظور در این پژوهش به بررسی این موارد پرداخته و مطالعات آزمایشگاهی انجام شد.

هدف مطالعه‌ی حاضر شبیه‌سازی بخشی از کناره‌ی رودخانه در یک مخزن آزمایشگاهی برای بررسی تغییرات عمق آبشستگی و عدد رینولدز ذرات با در نظر گرفتن شیب کناره‌ی رودخانه است. همان‌گونه که می‌دانیم عمق آبشستگی در کناره رودخانه اگر افزایش یابد باعث ایجاد ترک کششی و در نتیجه فرسایش کناره می‌شود. همچنین عدد رینولدز نماینده سرعت جریان است. به همین دلیل این پارامترها بررسی شدند.

شده است. به منظور شبیه‌سازی کناره‌ی رودخانه از نظر سربار، الواری به ابعاد سطحی لایه‌ی رویی برای توزیع یکنواخت نیروی سربار روی لایه بالایی قرار داده شد. روی لایه‌ی رویی وزنه‌هایی هم‌وزن با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر خاک محل به عنوان نیروی سربار قرار داده شد. تمام این مراحل برای سه شیب کناره تکرار شد. برای حالت شیب دار لایه-های آبرفتی مطابق شکل (۴) به تمامی لایه‌ها شیب ۵ درجه داده شده است و لایه‌ی رس در مجاورت مخزن آب دارای ارتفاع ۹ سانتی‌متر و در پایان دارای ارتفاع ۵ سانتی‌متر است، لایه‌ی ماسه به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و لایه‌ی رویی در مجاورت مخزن آب دارای ارتفاع ۱۹ سانتی‌متر و در پایان دارای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر است.

جدول (۹) خلاصه آزمایش‌های انجام‌شده، (قطر ذرات به میلی‌متر)

شماره آزمایش	قطر ذرات	شیب کناره	شیب لایه‌ها	شماره آزمایش	قطر ذرات	شیب کناره	شیب لایه‌ها
۱	۰/۶	۱:۱	۰	۱۰	۰/۶	۱:۱	۰
۲	۱/۰	۱:۱	۰	۱۱	۱/۰	۱:۱	۰
۳	۱/۶	۱:۱	۰	۱۲	۱/۶	۱:۱	۰
۴	۰/۶	۱:۵:۱	۰	۱۳	۰/۶	۱:۵:۱	۰
۵	۱/۰	۱:۵:۱	۰	۱۴	۱/۰	۱:۵:۱	۰
۶	۱/۶	۱:۵:۱	۰	۱۵	۱/۶	۱:۵:۱	۰
۷	۰/۶	۲:۱	۰	۱۶	۰/۶	۲:۱	۰
۸	۱/۰	۲:۱	۰	۱۷	۱/۰	۲:۱	۰
۹	۱/۶	۲:۱	۰	۱۸	۱/۶	۲:۱	۰



شکل (۳) منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در لایه‌ی رویی

آب و مصالح رودخانه‌ای گذاشته شده است که این دو مخزن با یک صفحه‌ی مشبک پلکسی با سوراخ‌هایی به قطر ۱ میلی‌متر از یکدیگر جدا شده‌اند. طول، عرض و ارتفاع مخزن آب برابر ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر است. برای تأمین آب مورد نیاز، شیر ورودی جریان و شیرهای آب خروجی برای ثابت نگه‌داشتن ارتفاع آبی در روی مخزن آب قرار داده شده‌اند. انتهای مخزن مثل شکل در جهت تسهیل در هدایت آب، رسوب و اندازه‌گیری دبی خروجی از لایه‌ی ماسه به شکل ناودانی ساخته شده است.

۲-۲- روش انجام آزمایش

آزمایش‌های اصلی در دو مرحله انجام شد. مرحله‌ی اول نه آزمایش با سه محدوده‌ی دانه‌بندی یکنواخت ۰/۸-۰/۴، ۱/۲-۲/۰ میلی‌متر و اندازه متوسط ۰/۶، ۱/۰ و ۱/۲-۰/۸ میلی‌متر و سه شیب کناره‌ی ۱:۱، ۱:۵ و ۲:۱ با شیب افقی لایه-های آبرفتی صورت گرفت. مرحله‌ی دوم با سه دانه‌بندی و سه شیب کناره‌ی گفته شده و شیب ۵ درجه در لایه‌های آبرفتی انجام شد. در این پژوهش مجموعاً ۱۸ آزمایش مطابق جدول (۱) طراحی و انجام گرفته، که همه‌ی آزمایش‌ها در شرایط یکسان بودند. در این مقاله به ذکر اطلاعات به دست آمده در آزمایش‌های با دانه‌بندی ۱/۲-۲/۰ میلی‌متر اکتفا می‌شود. قطر ذرات در جدول (۱) به میلی‌متر است.

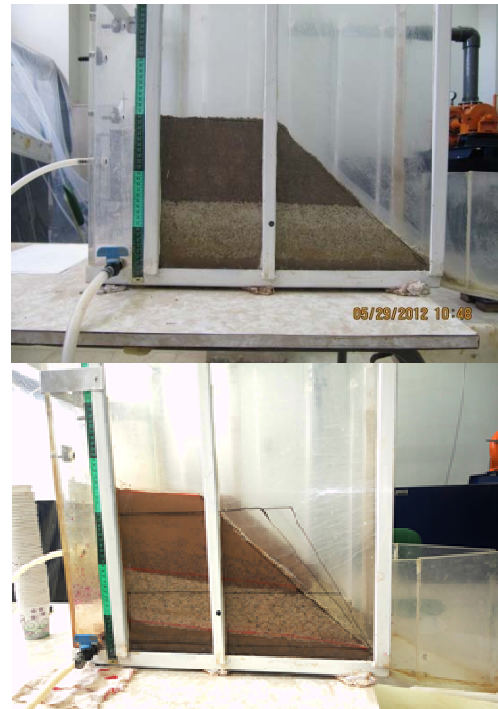
در رودخانه‌های ماسه‌ای، غالباً کناره‌ها به صورت آبرفتی به وسیله‌ی مواد غیرآبرفتی در بالا و پایین بسته است، پس مدل کناره‌ی رودخانه در مخزن مصالح مطابق شکل (۴) شامل سه لایه: لایه‌ی زیرین، رس به ضخامت ۵ سانتی‌متر، لایه‌ی میانی، ماسه به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در سه دانه‌بندی مختلف و لایه‌ی رویی، خاک محل با رطوبت ۲۰٪ به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته و در محفظه قرار داده شد. منحنی دانه‌بندی خاک محل در شکل (۳) نشان داده

پس از برقراری نشت آب، میزان دبی نشتی اندازه‌گیری شد و این کار در هر مرحله بار آبی انجام شد به دلیل این‌که لایه‌ی زیرین و لایه‌ی رویی با بیشترین تراکم در نظر گرفته شد نشت آب از این دو لایه جزئی بود. در آزمایش‌های انجام شده در ارقام ارتفاعی پایین‌تر از ارتفاع هم‌سطح با بستر ماسه هیچ گونه فرسایش و پس‌روی قابل ملاحظه‌ای در لایه‌ی ماسه‌ای مشاهده نشد و زمانی این پدیده قابل رویت بود که بار آبی باعث بوجود آمدن گرادیان بحرانی در لایه‌ی ماسه شد که این مقدار در سه دانه‌بندی مختلف بود. هنگامی که گرادیان بحرانی اتفاق می‌افتاد لایه‌ی ماسه دچار پس‌روی شد.

پارامترهای اندازه‌گیری شده در زمان انجام آزمایش‌ها عبارت از زمان، ارتفاع آب، دبی خروجی از لایه‌ی ماسه، وزن رسوبات خارج شده در زمان انجام آزمایش و میزان پس‌روی در لایه‌ی ماسه است. دبی‌های خروجی جریان به وسیله‌ی ظرف‌هایی با حجم مشخص در زمان معین به طور جداگانه اندازه‌گیری و میزان رسوبات خروجی از لایه ماسه با در نظر گرفتن زمان در ظرف‌هایی با حجم مشخص جمع‌آوری، و سپس وزن آن‌ها محاسبه و میزان پس‌روی در لایه‌ی ماسه با خط‌کش مدرج با دقت میلی‌متر مشاهده شد. در شکل (۵) میزان پس‌روی در لایه ماسه نشان داده شده است.



شکل (۵) نمایی از میزان پس‌روی در لایه ماسه



شکل (۴) نمایی از فلوم آزمایشگاهی، شیب افقی لایه‌های آبرفتی و حالت شیب‌دار لایه‌های آبرفتی

پس از آماده‌سازی نمونه، آب از طریق شیر ورودی وارد مخزن آب می‌شود و از طریق صفحه‌ی مشبک بین دو مخزن آب و مخزن خاک به داخل نمونه نفوذ می‌کند، با انجام آزمایش‌های اولیه، فرسایش در لایه‌ی آبرفتی ماسه از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر به بالا مشاهده شد. در هر آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه ارتفاع آب در سطح معینی ثابت نگه داشته می‌شد تا در مدت مذکور تغییرات و پدیده‌های احتمالی مشاهده و اندازه‌گیری شود و پس از گذشت زمان تعیین‌شده ارتفاع آب تغییر داده می‌شد و تا زمانی آزمایش ادامه داشت که در لایه‌ی رویی ترک مشاهده شود و فروریختن لایه اتفاق بیفتد. ارتفاع اولیه برای تمامی نمونه‌ها متناسب با سطح بستر ماسه بود که به مدت ۳۰ دقیقه نگه‌داری شده و سپس در هر مرحله ۲ سانتی‌متر به سطح آب اضافه می‌شد و در مدت زمان مذکور این ارتفاع آبی به وسیله‌ی شیرهای کنترل که در پشت مخزن آب تعبیه شده بود ثابت نگه داشته شد.

پذیرش جریان آرام برای مقادیر عدد رینولدز برابر یا کمتر از ۱ کفایت می‌کند (Jaceques Delleur, 1999).

S نسبت دانسیته‌ی جریان به دانسیته‌ی رسوبات است که برابر چگالی ویژه ذرات است. d^* طول پسروی بدون بعد، t^* زمان بی‌بعد شده، i گرادیان هیدرولیکی و θ نیز به ترتیب برابر زاویه‌ی کناره در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

همان‌گونه که گفته شد دبی، گرادیان و میزان پسروی در ارتفاع‌های آبی متفاوت در آزمایش‌های انجام شده برداشت شد، نتایج به دست آمده در قالب نمودارهایی به شرح فوق ارائه می‌شود. با توجه به این‌که توسعه‌ی چاله‌ی آبشستگی در طول محفظه تقریباً در وسط آن است، بنابراین این‌گونه به نظر می‌رسد که تأثیر زبری دیواره بر سرعت نشت قابل ملاحظه نیست زیرا هیچ‌گونه فرسایشی در مجاورت دیواره-های کناره مخزن دیده نشده است. گرادیان محاسبه شده در این نمودارها برابر است با ارتفاع آب تقسیم بر طول نمونه منهای میزان پسروی در لایه ماسه، همچنین سرعت محاسبه شده برابر سرعت واقعی؛ که از تقسیم سرعت متوسط بر ضریب تخلخل محاسبه می‌شود؛ است. در تمامی منحنی‌ها طول پسروی بی‌بعد در نظر گرفته شده که برابر میزان پسروی در لایه ماسه تقسیم بر طول کل نمونه است که این طول در سه‌شیب به دلیل مختلف بودن طول نمونه در سه‌شیب متفاوت است. عدد رینولدز نیز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است که رابطه‌ی مستقیم با سرعت دارد.

$$V = \frac{Q}{nA} \quad (1)$$

$$Re = \frac{Vd_{50}\rho}{\mu} \quad (2)$$

که در آن Q دبی اندازه‌گیری شده جریان، A متوسط

۲-۳- آنالیز ابعادی و تعیین پارامترهای بدون بعد

هدف از آنالیز ابعادی، شناخت پارامترهای مؤثر در پدیده‌ی مطالعه شده و تعیین نسبت‌های بدون بعد است. از آن‌جا که تعداد پارامترهای مؤثر بر این پدیده‌ها زیاد است، امکان ارائه‌ی رابطه‌ی مشخص ریاضی برای تحلیل مسئله وجود ندارد، پس از روش آنالیز ابعادی برای بدون بعد کردن پارامترها استفاده شده است. پارامترهای مؤثر شامل موارد زیر است:

$$f(h, d_{50}, \rho, \rho_s, g, \mu, L, d, \theta, t, t_{\max}) = 0$$

در آنالیز ابعادی به روش باکینگهام یک سری گروه بدون-بعد به نام π انتخاب و با انجام یک‌سری محاسبات، روابط بدون بعد بر اساس گروه‌های بدون بعد تشکیل می‌شود. تعدادی از پارامترها نیز وجود دارند که نسبت آن‌ها بدون-بعد می‌شود.

$$f\left(\frac{\mu}{\rho d \sqrt{gd}}, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{d}{L}, \frac{t}{t_{\max}}, \frac{h}{L}, \theta\right) = 0$$

$$\pi_1 \rightarrow Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

$$\pi_2 \rightarrow S = \frac{\rho}{\rho_s}$$

$$\pi_3 \rightarrow d^* = \frac{d}{L}$$

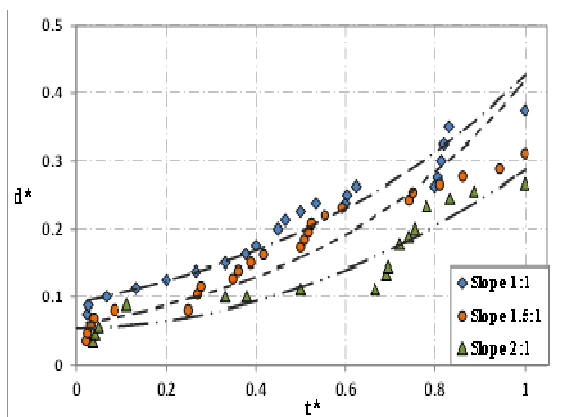
$$\pi_4 \rightarrow t^* = \frac{t}{t_{\max}}$$

$$\pi_5 \rightarrow i = \frac{h}{L}$$

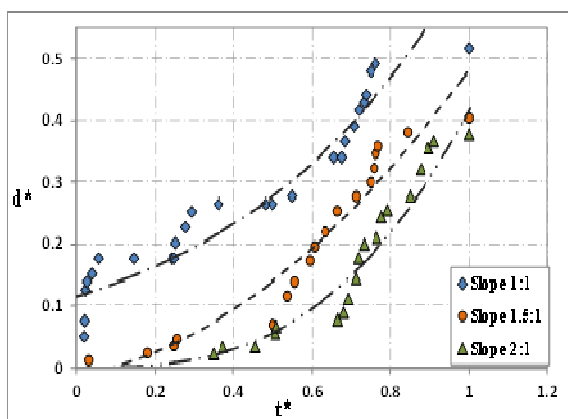
$$\pi_6 = \tan \theta$$

Re ، عدد رینولدز در محیط متخلخل است که نماینده‌ی سرعت واقعی جریان در نظر گرفته شده است. مقدار بحرانی عدد رینولدز که جریان در بین دانه‌ها از جریان آرام به جریان متلاطم تغییر پیدا می‌کند، در مطالعات گوناگون بین ۱ تا ۱۲ به دست آمده است، با این وجود، در کل

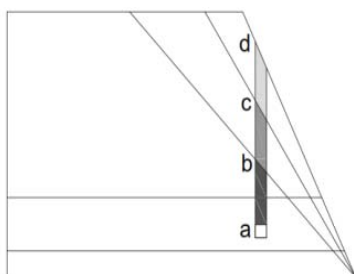
اجازه داده می‌شود که سریعتر جا به جا شده و حفره‌ی آبستگي را به وجود بیاورند. هم‌چنین با توجه به اشکال نشان داده شده با گذر زمان در هر سه شیب یک روند افزایشی در میزان آبستگي دیده می‌شود.



شکل (۶) نمودار تغییرات میزان پس‌روی و زمان بی‌بعد در حالت دانه بندی ۱/۲-۲/۰ شیب افقی لایه‌ها



شکل (۷) نمودار تغییرات میزان پس‌روی و زمان بی‌بعد در حالت دانه بندی ۱/۲-۲/۰ میلی‌متر در حالت شیب‌دار لایه‌ها



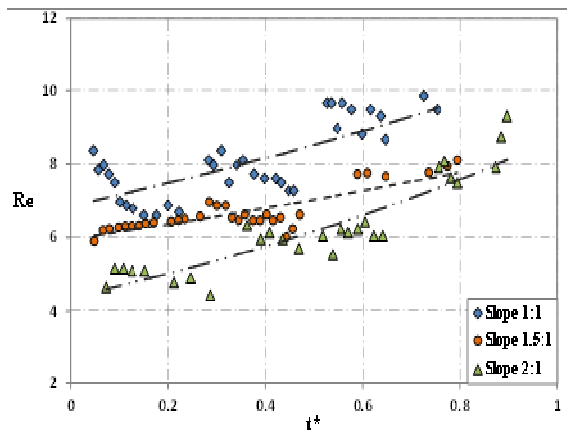
شکل (۸) نمای شماتیک از نیروی سربار بر ذره‌ای در لایه ماسه

مساحت ابتدا و پایان لایه‌ی ماسه، n تخلخل (بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی و پارامترهای مرتبط اندازه‌گیری شده محاسبه شد)، Re عدد رینولدز، v سرعت واقعی جریان، d_{50} متوسط قطر ذرات، ρ چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی است.

۳-۱- بررسی نتایج آزمایش‌ها در شیب‌های متفاوت کناره و شیب‌های لایه‌ی آبرفتی

شکل‌های ۶ و ۷ طول پس‌روی بی‌بعد را در برابر زمان بی‌بعد شده در سه شیب متفاوت کناره و دو شیب لایه‌های آبرفتی در دانه‌بندی ۱/۲-۲/۰ میلی‌متر نشان می‌دهند که t_{max} زمان پایان آزمایش است. زمان بی‌بعد شده برابر با زمان اندازه‌گیری تقسیم بر زمان پایان آزمایش است.

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که با کاهش شیب کناره میزان پس‌روی افزایش می‌یابد و یا به عبارت دیگر در یک زمان معین میزان پس‌روی در شیب ۱:۱ بیشتر از شیب ۱: ۱/۵ و در شیب ۱: ۱/۵ بیشتر از شیب ۱: ۲ می‌باشد. علت این است که با افزایش شیب کناره، بر میزان نیرویی که از جانب سربار بر لایه‌ی آبرفتی وارد می‌شود، افزوده می‌شود و همان‌طور که می‌دانیم، تنش ناشی از وزن سربار و نیروی اصطکاک، عوامل مؤثر در حرکت ذره هستند و چسبندگی در لایه‌ی ماسه برابر صفر است، در نتیجه عامل مؤثر تنش قائم است که ناشی از وزن سربار است. با افزایش وزن سربار، توانایی حمل ذرات در اثر نیروی نشست کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه از میزان پس‌روی نیز کاسته می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است در شیب ۱:۱ نیرویی به اندازه‌ی وزن ab در شیب ۱: ۱/۵ نیرویی به اندازه‌ی وزن ac و در شیب ۲:۱ نیرویی به اندازه‌ی وزن ad را تحمل می‌کند. با توجه به این‌که در شیب ۱:۱ میزان وزن سربار نسبت به دو شیب دیگر کمتر است و در نتیجه به لایه‌ی ماسه نیروی کمتری وارد می‌شود و به ذرات ماسه

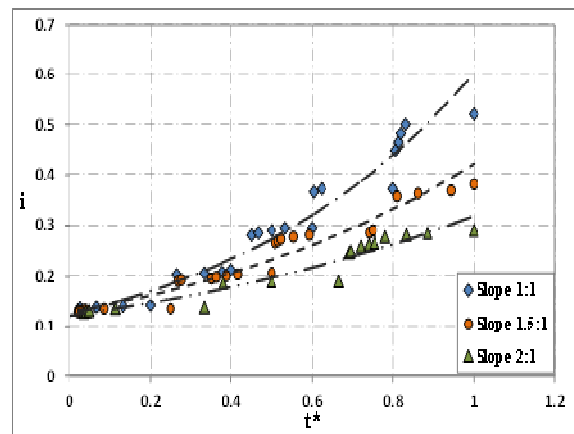


شکل (۱۲) نمودار تغییرات عدد رینولدز و زمان بی بعد در حالت دانه بندی ۲/۰-۱/۲ میلی متر در حالت شیب دار لایه ها

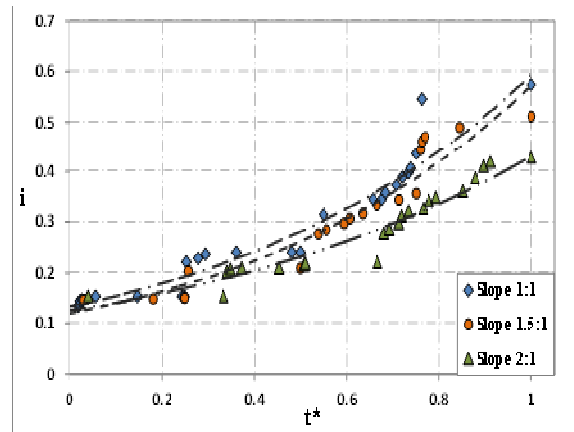
شکل های ۹ و ۱۰ گرادیان را در برابر زمان بی بعد شده در سه شیب متفاوت کناره و دو شیب لایه های آبرفتی در دانه بندی ۲/۰-۱/۲ میلی متر نشان.

همان گونه که در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است با افزایش شیب کناره میزان گرادیان کاهش می کند. همان گونه که اشاره شد با افزایش شیب میزان پس روی کاهش پیدا می کند، در نتیجه با توجه به فرمول گرادیان که برابر $i = h/(l-d)$ است با کاهش میزان پس روی، گرادیان نیز کاهش پیدا می کند. با توجه به نمودارها مشاهده می شود که با گذشت زمان میزان گرادیان در هر سه شیب متفاوت افزایش پیدا کرده است و این به دلیل افزایش ارتفاع آب است، سرعت افزایش سر آب بیشتر از سرعت افزایش میزان پس روی است.

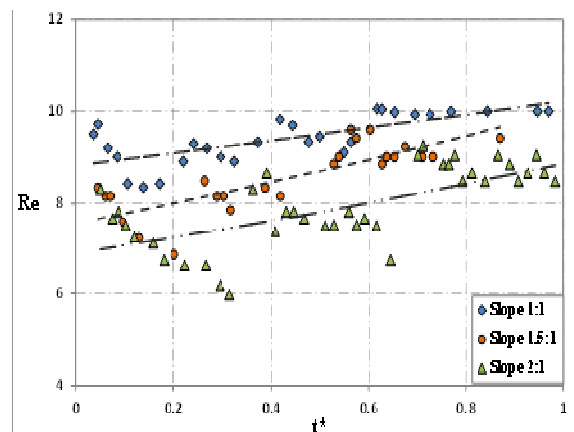
شکل های ۱۱ و ۱۲ تغییرات عدد رینولدز را در برابر زمان بی بعد شده در سه شیب متفاوت کناره و دو شیب لایه های آبرفتی در دانه بندی ۲/۰-۱/۲ میلی متر نشان می دهند. از آنجایی که میزان آبشستگی چاله فرسایش به سرعت جریان نشتی و در نتیجه عدد رینولدز در محیط متخلخل بستگی دارد و از سویی دیگر بنا به نتایج به دست آمده گرادیان بحرانی می تواند نقش به سزایی در این فرایند



شکل (۹) نمودار تغییرات گرادیان و زمان بی بعد در حالت دانه بندی ۲/۰-۱/۲ میلی متر در شیب افقی لایه ها



شکل (۱۰) نمودار تغییرات گرادیان و زمان بی بعد در حالت دانه بندی ۲/۰-۱/۲ میلی متر در حالت شیب دار لایه ها

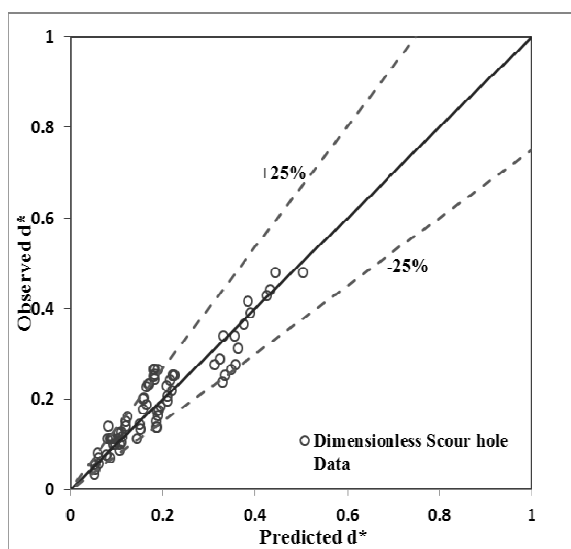


شکل (۱۱) نمودار تغییرات میزان عدد رینولدز و زمان بی بعد در حالت دانه بندی ۲/۰-۱/۲ میلی متر در شیب افقی لایه ها

ضریب تعیین رابطه‌ی بالا برابر $R^2 = 0.85$ بوده و محدوده کاربرد آن به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$Re < 10$

شکل ۱۳، مقادیر مشاهده شده d^* در برابر مقادیر محاسباتی آن، در شرایطی که قانون داریسی حاکم باشد؛ حاصل از رابطه‌ی بالا را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشتر داده‌ها در محدوده‌ی $\pm 25\%$ خطا، که نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب رابطه است. میانگین درصد خطای بین مقادیر مشاهده و محاسبه شده برابر با 18% است.



شکل (۱۳) مقایسه بین مقادیر مشاهده و محاسبه شده

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به اهمیت زیاد فرسایش درونی در رودخانه‌های آبرفتی، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به منظور شناخت بهتر تأثیر شیب کناره در رودخانه‌ها بر روی میزان پس‌روی در لایه‌ی غیرچسبنده که بین دو لایه‌ی چسبنده قرار گرفته است و دبی ناشی از لایه‌ی ماسه انجام گرفت و سپس نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه‌ی انجام شده بین نتایج حاکی از این امر بود

ایفا نماید. پس نتایج فوق نشان می‌دهد که عمق چاله‌ی فرسایشی ناشی از جریان نشی می‌تواند همراه با عدد رینولدز محیط متخلخل، گرادیان هیدرولیکی بحرانی و شیب کناره رابطه‌ی محسوسی داشته باشد.

نتایج مشاهده شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بیانگر این امر هستند که با کاهش شیب کناره، عدد رینولدز ذرات افزایش می‌یابد. همان گونه که می‌دانیم با توجه به قانون داریسی با افزایش گرادیان دبی جریان نیز افزایش پیدا می‌کند و با توجه به توضیحات ذکر شده در بالا با افزایش دبی سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد و با توجه به فرمول عدد رینولدز و ثابت بودن چگالی سیال و ضریب ویسکوزیته و اندازه‌ی قطر ذرات در هر دانه بندی، عدد رینولدز نیز افزایش خواهد کرد. همچنین با گذشت زمان و افزایش دبی جریان به دلیل افزایش ارتفاع آبی عدد رینولدز نیز افزایش پیدا می‌کند.

۲-۳- ارائه روابط تجربی برآورد طول پسروی در

لایه آبرفتی

با توجه به تحلیل ابعادی که در قسمت ۲-۳ گفته شد، با در نظر گرفتن پارامتر وابسته‌ی d^* به عنوان تابعی از پارامترهای مستقل Re ، i و $\tan \theta$ می‌توان رابطه‌ی بدون بعد d^* را در شرایط مختلف آزمایشگاهی به صورت زیر نوشت.

$$d^* = 0.062 \left(1 + \frac{1}{\tan \theta} \right)^{1.48} (Re)^{0.98} (i)^{1.41}$$

که در این رابطه علائم به کار رفته عبارتند از:

d^* : میزان طول پسروی بی‌بعد در لایه‌ی غیرچسبنده در طول آزمایش

θ : اندازه‌ی زاویه‌ی کناره‌ی رودخانه

Re : عدد رینولدز ذرات

i : گرادیان هیدرولیکی

[۴] طاهرشمسی، ا، مجدزاده طباطبائی، م. و شیرخانی، ر، ۱۳۸۸، مدل‌های فرسایش کناره رودخانه، مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[5] Fox, G. A., Chu-Agor, M. L. and Wilson, G. V., 2007b, Seepage of noncohesive Sediment by groundwater seepage: Lysimeter experiments and modeling, *American Society of Agricultural and Biological Engineers.*, No. 072235.

[6] Fox; G.A; Wilson; G.V; Periketi; R.K; and Cullum; R.F; (2006). "Sediment transport model for seepage erosion of stream bank sediment"; *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 11(6), 603-611, 2006.

[7] Howard, A. D., and McLane, C. F., III, 1988, Erosion of cohesiveless Sediment by groundwater seepage, *Water Rasources Research*, 24(10): 1659-1674

[8] Fox, G. A., Wilson, G. V., Simon, A., Langendoen, E. J., Akay, O. and Fuchs, J. W., 2007a, Measuring Streambank erosion due to groundwater seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and Stream Stage, *Wiley Interscience, Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 32, No. 1558-1573.

[9] Hagerty, D. J., 1991a, Piping/Sapping erosion I: Identification and Diagnosis, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, pp. 991-1008.

[10] U.s. Army; corps of engineers "Final Report to Congress The Streambank Erosion control Evaluation and demonstration ", 1981a.

[11] Wilson, G. V., 2006, Soil Properties controlling Seepage erosion contributions to Streambank failure, *Earth Surface Processes and Landform*, Vol. 10, pp. 1405-1418.

[12] Fox, G. A., Chu-Agor, M. L. and Wilson, G. V., 2007b, Seepage of noncohesive Sediment by groundwater seepage: Lysimeter experiments and modeling, *American Society of Agricultural and Biological Engineers.*, No. 072235.

[13] Cancienne, R. M., Fox, G. A., and Simon, A., 2008, Influence of seepage undercutting on the stability of root-reinforced streambanks, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, Vol. 10, No. 33, pp. 1769-1786.

که با کاهش شیب کناره میزان عمق آبستتگی افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان‌دهنده این موضوع بودند که هرچقدر شیب کناره کاهش پیدا می‌کند از میزان نیرویی که از جانب سربار به لایه ماسه وارد می‌شود کاسته می‌شود و در نتیجه میزان پسروی در این لایه افزایش پیدا می‌کند که افزایش میزان پس روی باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی می‌شود، هم‌چنین در نمودارهای مربوط به عمق پسروی و گرادیان، روند افزایشی قابل مشاهده است. با توجه به اینکه با افزایش گرادیان هیدرولیکی میزان دبی خروجی نیز افزایش پیدا می‌کند در نتیجه سرعت جریان و عدد رینولدز ذرات نیز افزایش پیدا می‌کند. تمام نتایج بدست آمده در هر دو شیب لایه-های آبرفتی صادق است.

۵- منابع

[۱] ایمان‌شعار، ف.، حسن‌زاده، ی. و مجدزاده طباطبائی، م.، ۱۳۸۹، مبانی اساسی و شواهد فرسایش لوله‌ای شکل در کناره‌های رودخانه‌ها، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[۲] رستمی‌پور، م.، ۱۳۸۶، مدل آزمایشگاهی فرسایش کناره رودخانه با در نظرگرفتن فرسایش ناشی از نشست، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

[۳] صمدی، الف.، ۱۳۸۹، بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی پایداری سواحل رودخانه‌ها در مقابل گسیختگی طاقی-شکل، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

- [15] Chu-Agor, M. L., Garey, G. A., and Wilson, G. V., 2009, Slope failure mechanisms due to seepage 3dimension, *ASABE Annual International Meeting*, Providence, Rhode Island.
- [14] Chu-Agor, M. L., Fox, G. A., and Wilson, G. V., 2007, Empirical sediment transport function predicting seepage erosion undercutting for cohesive bank failure prediction, *Jurnal of Hydrology*, Vol. 377, Issues 1-2, Pages 155-164

Experimental Investigation of Scour Hole Length and Reynolds number variations under Different Bank Slopes in Rivers

F. Noorbahsh¹, M.R. Majdzadeh Tabatabai^{2*}, M.H. Kharazifard³

1- M.Sc. River Engineering, Power and Water University of Technology, Tehran

2- Faculty Member of Abbaspour Technical and Engineering College, Shahid Beheshti University, Tehran

3- Faculty Member of Abbaspour Technical and Engineering College, Shahid Beheshti University, Tehran

m_majdzadeh@sbu.ac.ir

Abstract:

River bank erosion causes damages to agricultural land, adjacent establishments and widening of river dimensions. Mass failure process of bank erosion is a factor to transport bulk of sediments followed by deposition in downstreams of a river system, which could be an important problem in river management. This research is to investigate internal erosion under different bank and floodplain slopes, By this means, a number of experiments were carried out in a model designed to simulate internal river bank erosion in the laboratory. In these experiments, the scour hole length, resulted from internal erosion and seepage discharge were measured under different hydraulic gradients. Results showed that bank slope plays an effective role in scour hole length and calculated Reynolds number in porous medium. As it was observed that the scour hole length and hydraulic gradient decrease with an increase in the bank slope and porous medium Reynolds number decreases with reduction in the hydraulic gradient.

Keywords: Internal erosion, Rivers Bank slope, Scour hole length, Reynolds number