بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویهٔ شیب کناره و دانهبندی ذرات بر فرسایش نشتی سواحل رودخانه

اعظم مسعودی^{*}، محمدرضا مجدزاده طباطبایی، علی نورزاد؛ دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور تاریخ: دریانت ۹۳/۱/۲۳ پذیرش ۹٤/۲/۲۳

چکیدہ

جریان زیرسطحی بهعنوان بخش چشم گیری از جریان آبراهه و عامل مهمی در بار رسوبی رودخانهها است. هدف این تحقیق بررسی فرسایش نشتی کنارهٔ رودخانهها در لایهٔ ماسهای با دانهبندی متفاوت در کنارهٔ رودخانه است. در این تحقیق به مطالعه و بررسی آزمایشگاهی تأثیر اندازهٔ ذرات خاک و همچنین شیب کنارهٔ رودخانه بر فرسایش نشتی پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی آزمایش در یک لایسی متر برای چهار شیبهای مختلف و دانهبندی های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که عدد رینولدز محیط متخلخل نقش اساسی در عمق حفره آبشستگی لایهٔ غیرچسبنده دارد. همچنین مشاهده شد که زمان شروع به حرکت ذرات با افزایش قطر مشخصه آنها کاهش پیدا میکند.

واژههای کلیدی: جریان زیرسطحی، فرسایش نشتی، شیب کناره رودخانه، عمق آبشستگی.

مقدمه

فرسایش سواحل رودخانه ها و تغییر مرفولوژی آن به دلیل از دست رفتن مقادیر زیادی خاک مطلوب کشاورزی، هر ساله سبب بروز خسارات زیادی به اراضی حاشیهٔ رودخانه می شود. از طرفی فرسایش، به دلیل افزایش رسوب در پایین دست، کاهش عمر مفید مخازن و هم چنین مشکلات عمده در بهره بر داری از تأسیسات آب گیری را در پی دارد. اگر چه آمار دقیق *نویسنده مسئول a_masoodi@sbu.ac.ir از میزان فرسایش خاک در کشور گزارش نشده، اما مقادیر بیش تر از استاندارد جهانی، نشان از وجود بحران در مناطق مختلف کشور دارد. نتایج تحقیقات در امریکا نشان می دهد که بسیاری از حوضههای سراسر ایالات متحده، منبع اولیه رسوبات در آبراههها برخلاف مناطق مرتفع از کناره آبراههها نشأت می گیرد [۹]. در شکل ۱ نمونهای از فرسایش نشتی در کناره رودخانه و نوع لایهبندی خاک آورده شده است.



فرسایش ناشی از تراوش شکل ۱. فرسایش نشتی در کناره رودخانه (فاکس و همکاران (۲۰۰۷))

فرسایش نشتی از مکانیسمهای مهم فرسایش درونی کنارهٔ رودخانه است اگرچه این فرسایش در بسیاری از نقاط جهان مکرراً اتفاق میافتد اما به علت ترکیب آن با سایر فرسایش های کناره و همچنین قطع جریان نشتی به هنگام بازدیدهای صحرایی، بررسیهای کمی روی آن انجام شده است. هنگامی است که لایهٔ خاکی با نفوذپذیری زیاد، زیر یک لایه غیرقابل نفوذ یا با قابلیت نفوذکم قرار گرفته باشد شرط لازم و نه لزوماً کافی برای وقوع فرسایش نشتی است. با وقوع جریان نشتی در خاک، به دلیل گرادیان هیدرولیکی و سرعت حرکت آب در خاک، بر ذرات نیرویی اعمال می شود در صورتی که فشار تراوش باعث کاهش تنش مؤثر شود موجب تسهیل در فرسایش و افزایش پدیدهٔ زیرشویی ^۱ می شود. از طرف دیگر در مصالح غیرچسبنده، فشار آب منفذی به دلیل وضعیت زهکشی خوب در این خاکها به ندرت عامل مؤثری در یایداری کناره است.

^{1.} Undercutting

مروری بر پیشینه تحقیق

فاکس در تحقیقات آزمایشگاهیاش در سال ۲۰۰۵ بر میزان جریان زیرسطحی و پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر فرسایش درونی، به این نتیجه رسید که زمان شکست کناره رودخانه به هد آب بستگی دارد. همچنین شیب تأثیر کمتری بر زمان شکست دارد. بهطوریکه برای شیب ٥ و ١٠ درصد زمانهای تقریباً مشابهی ثبت شد [۹]. ویلسون^۲ و همکارانش رودخانه را بهصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. زمان شروع جریان و شدت جریان بهطور رودخانه را بهصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. زمان شروع جریان و شدت جریان بهطور خطی به شیب لایهٔ محصورکننده بستگی داشت. نتایج مؤید این امر است که در طول فروکش کردن هیدروگراف سیلاب ، فرسایش کنارهٔ رودخانه بهدلیل جریانات نشتی تأخیری، افزایش اثر فرسایش درونی در کنارههای قائم رودخانه با مصالح چسبنده را توسعه دادند. بدین منظور نشتی تبیین کردند که در واقع به بیان ارتباط بین جریان رسوب و دبی نشتی میپردازد [۸].

شی آگور^۳ و همکارانش (۲۰۰۸)، تأثیر نقش زیرشویی ناشی از نشت، نسبت به حذف فشار منفی منفذی آب در خاک در شکست بزرگ مقیاس را در اثر نقبزنی بررسی کردند. آنها با استفاده از مدل SEEP/W مقدار فشار منفذی و با استفاده از SLOPE/W میزان پسروی را شبیه سازی کردند و با ترکیب نتایج این دو مدل به بررسی تغییرات فاکتور ایمنی بر اثر وجود یا وجود نداشتن زیرشویی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که اگرچه افزایش هد آب موجب ریزش سریعتر کناره می شود اما برای شکست کناره نیازی به حذف کامل فشار آب منفذی منفی نیست و ترک کششی در فاصله ای از کناره که هنوز خاک اشباع نشده بود ایجاد می شود (۷]. بر اساس تحقیقات کنسین³ و همکاران (۲۰۰۸) که مدل BSTEM را استفاده کردند.

و کـاهش تسلیح ریشهٔ گیاهان، کاهش مییابد [٦]. Schnellmann و همکاران (۲۰۱۰) مـدلی

4. Cancienne

30.3

^{1.} Fox 2. Wilson

^{3.} Chu-Agor

فیزیکی برای بررسی اثرات تغییرات آب و هوایی در شیبهای خاکی غیراشباع ارائه داده و اثر بالا آمدن سطح آب در شیبهای غیراشباع را بهصورت آزمایشگاهی در مدل فیزیکی و عددی بررسی کردند. نتایج حاصل از اندازهگیریهای آزمایشگاهی و مدل عددی تطابق قابل قبولی در خصوص خاک غیراشباع که رفتار پیچیدهای از خود نشان میدهد، داشتند [۱۱].

در ایران شیرخانی (۲۰۱۰) به بررسیهای آزمایشگاهی بر فرسایش کنارهٔ رودخانهها و کانالهایی با مصالح غیرچسبنده در اثر تغییرات جریان در کانال پرداخت، و با استفاده از دادههای بهدست آمده دو معادله جداگانه برای رودخانههایی با بسترهای شنی و قلوهای برای برآورد عرض رودخانه بعد از فرسایش پیشنهاد داد [۲]. صمدی (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی خود نشان داد که وقوع مکانیسم گسیختگی چرخشی در مقابل مکانیسم ساده برشی محتمل تر است. همچنین نتایج بیانگر این نکته است که با افزایش دانسیته تراکم بلوک خاک استفاده شده، عمق زیرشویی بحرانی که منجر به وقوع گسیختگی طاقی شکل می شود، افزایش مییابد [۳].

بهدلیل ساز و کار خاص این پدیده و اندرکنشی که با سایر فرایندهای فرسایشی کناره دارد اهمیت تأثیر آن بر انتقال رسوب واضح است. از مشکلات اصلی در برآورد ناپایداری دامنه و کناره آبراههها بهخصوص در فرسایش نشتی که نسبت به انواع دیگر فرسایش کمتر روی آن تحقیق شده است، کمبود دادهها در این زمینه و بهبود روشهای اندازه گیری مشخصات مربوط است. در این تحقیق به بررسی تأثیر دانهبندی و زاویهٔ کناره رودخانه بر فرسایش نشتی پرداخته شده است.

مواد و روشها

مشخصات مدل آزمایشگاهی

تبادل جریان بین رودخانه و سفرههای آب زیرزمینی باعث می شود تا مواد موجود در لایههای اطراف رودخانه سست شده و در جریانهای زیرزمینی از سفرهٔ آب زیرزمینی به سمت رودخانه شسته شوند. همچنین سیلابها باعث نوسان سطح آب رودخانه می شوند. هنگام بالا آمدن تراز آب در رودخانه روی شاخهٔ صعودی هیدروگراف سیلاب، جریان هایی وارد لایههای اطراف میشوند و زمانی که سیلاب بر شاخهٔ نزولی هیدروگراف قرار میگیرد، جریانهای برگشتی از لایههای کناری رودخانه به داخل آن باعث وقوع فرسایش نشتی میشوند. در این تحقیق که حاصل انجام دو پایاننامهٔ کارشناسی ارشد است، برای بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش نشتی مدلی آزمایشگاهی از کناره رودخانه در آزمایشگاه هیدرولیک پردیس فنی شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شد [۱]، [۵]. فلوم آزمایشگاهی استفاده شده چنان که در شکل ۲ الف مشاهده میشود شامل دو مخزن خاک و آب است که مخزن خاک برای مدلسازی کنارهٔ رودخانه دارای ابعادی به طول ۵۰، ارتفاع ۲۰ و عرض ۲۰ سانتی متر و مخزن آب به منظور تأمین هد دارای طول ۱۰ سانتی متر، عرض ۲۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی متر و است. این دو با یک صفحهٔ مشبک پلکسی به ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر و عرض ۲۰ سانتی متر و دارای یک شیر ورودی آب و پنج شیر خروجی در ارتفاعهای معین است (شکل ۲ ب).



شکل۲. الف) نمایی از فلوم آزمایشگاهی استفاده شده، ب) طرح شماتیک لایسیمتر آزمایشگاهی در همهٔ آزمایشها از تأثیر جریان در راستای رودخانه صرفنظر شد و فرض بر این گرفته شد که فقط حرکت جریان در راستای عمود بر رودخانه در نظر گرفته شده است. رسوبات استفاده شده

برای مدلسازی کنارهٔ رودخانه از سه نوع مصالح ماسهای غیرچسبنده یکنواخت با قطر متوسط ۰/٦، ۱ و ۱/۵ میلیمتری استفاده شد. از طرفی خاک رس نفوذناپذیر برای لایهٔ زیرین که کف فلوم را پوشش میداد و برای لایهٔ رویی که نقش سربار را داشت از خاک محل، استفاده شده است. ابتدا بهمنظور تعیین خصوصیات خاکهای استفاده شده آزمایشها دانهبندی، تراکم در آزمایشگاه مکانیک خاک انجام شد که بر اساس آن میزان رطوبت بهینه خاک محل و خاک رس بهترتیب ۲۰ و ۱۵درصد و مقدار بیشینهٔ وزن مخصوص آنها بهترتیب ۱۷/۵ و ۱۸/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب محاسبه شد. همچنین مقدار تودهٔ ویژه ماسه (Gs) برابر ۲/٦۳ بهدست آمد. منحنی دانهبندی برای خاکهای غیرچسبنده لایه هادی در شکل ۳ آورده شده است.





خصوصیات اندازه گیری شده برای سه نوع ماسه به کار رفته در آزمایش ها در جدول ۱ آورده شده است.

کلاس دانهبندی ذرات ماسه	قطر متوسط ذرات رسوب(mm)	$\gamma_{dmin} \ (kN/m^3)$	γ_{dmax} (kN/m^3)	D _r (%)	γ_d (kN/m ³)	n	ω(%)
•/٤-•/A	• /٦	17/17	١٣/٨٣	٦٠	۱۳/۱۰	٠/٤٩	٥
•/A-1/Y	۱/۰	۱۲/٦٥	۱۳/۹۳	٦٠	137/57	•/٤٨	٥
۲-۲/۱	١/٦	۱۳/۸۳	١٥/٤٠	7.	١٤/٧١	• / ٤٣	٥

جدول ۱. پارامترهای مشخصه خاک غیرچسبنده

در این جدول، _{۲dmin} حداقل وزن مخصوص خشک خاک، _{۲dmax} حداکثر وزن مخصوص خشک خاک، D_r درصد تراکم، _۲d وزن مخصوص خشک خاک و n تخلخل است.

نحوة انجام أزمايشها

برای انجام آزمایش ها نمونه ای از کناره رودخانه با سه لایه افقی شبیه سازی شد که این سه لایه عبارت بودند از: لایهٔ زیرین، رس با ارتفاع ۵ سانتی متر و غیرقابل نفوذ (به منظور جلوگیری از فرار آب در مرز بین خاک و کف مدل)، لایهٔ میانی، ماسه به ارتفاع ۱۰ سانتی متر و لایهٔ فوقانی که تنها نقش سربار را داشته، از خاک دست خورده محل به ارتفاع ٤٠ سانتی متر در نظر گرفته و در مخزن قرار داده شد. لازم به ذکر است که در برخی از آزمایش ها به منظور ساده سازی آماده سازی مدل برای شبیه سازی دیوارهٔ کنارهٔ رودخانه روی لایهٔ رویی، وزنه متناسب به عنوان نیروی سربار قرار داده شد. در انتها نیز با برش زدن خاک اضافه، مقطع شیب دار رودخانه ایجاد می شد.

لایه میانی که بررسی ها روی آن انجام شد با سه دانه بندی متفاوت که محدودهٔ اندازه ذرات این سه نوع ماسه ۲۰۱۵–۰۸، ۸/۰–۱/۲ و ۲/۱–۲ میلی متر است ساخته شد. از طرفی تمامی مراحل ذکر شده برای چهار شیب کنارهٔ قائم، ۱:۱، ۱: ۱/۵ (۱ افقی به ۱/۵عمودی) و ۱:۲ (۱ افقی به ۲عمودی) تکرار شد. جدول ۲ تعداد آزمایش ها و بازهٔ تغییرات پارامترها را نشان می دهد. پارامترهای اندازه گیری شده شامل زمان، تراز آب، دبی های نشتی از لایهٔ ماسه، طول پسروی لایهٔ ماسه با توجه به هدهای مختلف و وزن رسوبات زیر شویی شده از چالهٔ فرسایش در لایهٔ ماسهای بود. دبی های خروجی از لایهٔ میانی در قسمت ناودانی شکل با استفاده از ظرف های مدرجی به حجم ۲۰۰ سانتی متر مکعب اندازه گیری شده و هم زمان با آن تراز آب

در شروع آزمایش هد در یک ارتفاع ثابت نگه داشته شد تا فرسایش دیده شود، چنانچه پس از گذشت ۱۵ دقیقه فرسایشی مشاهده نمی شد مقدار هد افزایش داده شد. در هنگام شروع فرسایش ابتدا تودهای از ماسه ریزش کرده و به دنبال ریزش ماسه فرسایش در تراز معینی ادامه پیدا کرد این پیشروی تا حد معینی پیش میرفت، در این تراز لایه به حالت پایدار رسیده و ثابت باقی می ماند، در این زمان تراز آب به تراز بعدی افزایش داده می شود، آزمایش تا کامل شدن لولهٔ ناشی از فرسایش و روان شدن ماسه ادامه پیدا کرد، و به دلیل چسبندگی زیاد لایه سربار در بیشتر آزمایشها ترکهایی در لایهٔ سربار دیده شد ولی تا کامل شدن لوله فرو نمی ریزد. مدت زمان انجام هر آزمایش تقریباً بسته به دانهبندی و شرایط لایه ۱ تا ۳ ساعت طول می کشید. برای هریک از مدلهای خاک آزمایش شده زمان از شروع آزمایش تا لحظه شروع آب شستگی نیز با زمان سنج ثبت شد.

دانەبندى لايە ميانى(mm)	شيب کناره	گرادیان هیدرولیکی	عمق آبشستگی(cm)
•/٤-•/A	۱:۱، ۱: ۵/۱، ۲:۱، قائم	•/YT-•/V0	1-7.
•/A-1/Y	۱:۱، ۱: ۱/۵، ۲:۱، قائم	•/١٢٨-١/١٦	۱-۳٤
۲-۲/۱	۱:۱، ۱: ۱/۵، ۲:۱، قائم	•/130-•/001	1-12

جدول۲. پارامترها و اطلاعات مربوط به آزمایشها

آنالیز ابعادی برای تعیین ابعاد آبشستگی

چنان که پیش تر ذکر شد، ایجاد حفره آب شستگی در حین جریانات نشتی در کنارههای لایه بندی شده رودخانه ناشی از عوامل مختلفی است. از جمله این پارامترها می توان به سرعت جریان خروجی (v)، ارتفاع آب در مخزن (h)، قطر مشخصه ذرات خاک (d₅0)، وزن مخصوص آب (m)، وزن مخصوص خاک (م⁰)، ارتفاع آب در مخزن (h)، قطر مشخصه ذرات خاک (d₅)، وزن مخصوص أب (n)، آب (m)، وزن مخصوص خاک (م⁰)، لزجت دینامیکی آب (m)، شتاب ثقل (g)، انحراف معیار طول لایه خاک (L)، ضریب چسبندگی خاک (c)، وزن رسوب خارج شده از چاله یا حفرهٔ ناشی از فرسایش درونی (m)، محقوص خاک (d₅)، وزن رسوب خارج شده از چاله یا حفرهٔ ناشی از فرسایش درونی (m)، عمق آب شستگی (b) اشاره کرد. به دلیل استفاده از مصالح غیر چسبنده در لایهٔ بررسی شده از تأثیر پارامتر C و به دلیل اختلاف جزیی در زاویهٔ اصطکاک داخلی داخلی داخلی داخلی در ای معیار از فرسایش درونی (m)، عمق آب شستگی (b) اشاره کرد. به دلیل استفاده از مصالح غیر چسبنده در ای مای در ای مایه در آن این داخلی در ای معیار از فرسایش درونی (m)، معق آب شستگی (b) اشاره کرد. به دلیل استفاده از مصالح غیر چسبنده در ات این لایه از پارامتر C و به دلیل اختلاف جزیی در زاویهٔ اصطکاک داخلی داخلی داخلی داخلی داخلی داخلی داخلی داخلی داخلی در تعین در تایه می خود در تعرف داخلی استفاده از مصالح فیر چسبنده در از این این این از پارامتر G و به دلیل اختلاف جزیی در زاویهٔ اصطکاک داخلی در از مرفی به علت یک نواختی دانه بندی خاک در ای در ای این لایه از پارامتر G و نیز صرفنظر شد. از طرفی به علت یک نواختی دانه بندی خاک در از مایش ای استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای زیر تعیین شدند.

و در نهایت اعداد بدون بعد زیر تعیین شدند.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویهٔ شیب کناره و دانهبندی ذرات بر فرسایش نشتی سواحل رودخانه

$$d^* = \frac{d}{L} \tag{1}$$

$$i = \frac{n}{L-d} \tag{(f)}$$

$$Re = \frac{1}{\vartheta}$$
(1)

$$d_{50}^{*} = d_{50} \times \sqrt[3]{\frac{g(G_{5}-1)}{\vartheta^{2}}}$$
 (6)

که در روابط مذکور *d عمق آبشستگی بدون بعد است که برابر نسبت میزان پسروی بهطول نمونه در زمانهای مختلف است.

همچنین i گرادیان هیدرولیکی، Re عدد رینولدز ذرات، V سرعت واقعی آب در لایه ماسه که از رابطهٔ (٦) بهدست میآید وt لزجت سینماتیک آب است. (٦)

در رابطهٔ (٦) B عرض فلوم آزمایش است. چنانکه در رابطهٔ (٦) مشاهده می شود برای محاسبه سرعت در لایه ماسه ابتدا مقادیر دبی نشتی این لایه اندازه گیری می شود، سپس بهمنظور محاسبه سرعت واقعی، مقادیر سرعت بهدست آمده از دبی نشتی بر تخلخل لایه تقسیم می شود.

نتايج و بحث

بهدلیل غالب بودن نیروهای مقاوم لزجی در جریان آبهای زیرزمینی، سرعت جریان کم است که این وضعیت برای عدد رینولدز برابر با یک یا کمتر از آن به وجود می آید. محمودیان شوشتری (۱۳۹۲) بیان می کند که طبق یک توافق کلی جریان آرام^۱ به ازای مقداری از عدد رینولدز واقع بین یک تا ده به جریان متلاطم تبدیل می شود و بنابراین در مسائل عملی، باید قانون دارسی را برای اعداد رینولدز کمتر از ده به کار برد [٤]، [١٢]. در این تحقیق نیز پس از انجام آزمایش ها و برداشت داده ها برای شیب های مختلف و دانه بندی های متفاوت، آزمایش هایی که عدد رینولدز ذرات آن بزرگتر از ۱۰ بودند حذف شدند. با مدنظر قرار دادن نتایج آزمایش ها برای یک شیب کناره خاص و مقایسهٔ آن ها ملاحظه می شود که به منظور آغاز حرکت ذرات خاک و زمان آستانه فرسایش، با افزایش قطر متوسط ذرات مقادیر عدد رینولدز نیز افزایش یافته است. چنان که در شکل ٤ و به عنوان نمونه برای شیب کناره ۱: ۰/۱ مشاهده می شود برای داخت دو دانهبندی ۸/۰–٤/۰ و ۲/۲–۸/۰ مقدار عدد رینولدز ذرات کمتر از ۳ است در حالی که این مقدار برای دانهبندی۲–۲/۲ با اختلاف زیادی در حدود ۷ دیده می شود. مشابه این روند در سه شیب دیگر کناره نیز مشاهده شد. در واقع چنان که در شکل نشان داده شده است با افزایش دانهبندی خاک و به تبع آن افزایش اندازهٔ خلل و فرج خاک مزبور سرعت آب در آن افزایش می یابد بنابراین عدد رینولدز ذرات برای به حرکت در آوردن ذرات ماسه، با افزایش دانهبندی افزایش پیدا می کند. از طرفی حداکثر عمق آب شستگی نیز با افزایش دانهبندی افزایش پیدا کرده است. لازم به ذکر است که در شیب قائم، به دلیل بیش تر بودن مقدار عدد رینولدز محیط متخلخل از ۱۰، داده های نظیر این اعداد رینولدز حذف شدند. به خصوص در دانهبندی ۲–۱/۲



شکل ٤. تغییرات عمق آب شستگی با عدد رینولدز برای شیب های مختلف کناره

چنانچه برای دانهبندی ثابت مقادیر عمق آبشستگی در برابر عدد رینولدز و برای شیبهای مختلف کناره رسم شود مشاهده می شود که خطوط برازش داده شده بر هریک از مجموعه دادهها دارای شیبهای مختلفی هستند. شکل ۵ نمونهای از این مقایسه را برای دانه-بندی ۰/۸–۱/۲ میلیمتر نشان میدهد. ضرایب تبیین خطوط برازش داده شده در این شکل برای شیبهای قائم، ۲:۱، ۱: ۱/۵ و ۱:۱ بهترتیب ۰/۹۹، ۰/۸۹، ۰۸۸۹ و ۰/۸۶ است که این خود مبين اعتبار خطوط برازش داده شده و روند تغييرات آنها است. با بررسي نمودار مشاهده مي-شود که شیب خطوط پسروی کناره در مقابل عدد رینولدز، در شیب ۱:۱ بیشتر از شیب ۱: ٥/١و همچنین بیشتر از مقدار آن در شیب ۲:۱ است به عبارت دیگر در شیب های مختلف آزمایش شده، با کاهش شیب کناره میزان فرسایش کناره افزایش می یابد به استثنای حالت قائم که شیب خط بیشتر از دیگر موارد است. آنچه از تجزیه و تحلیل نتایج دادهها بهدست میآید این است که در دانهبندی ثابت با افزایش شیب کناره، نیروی وزن خاک ناشی از سربار بر لایهٔ ماسهای با چسبندگی ناچیز، افزایش پیدا میکند که در نتیجه آن نیروی ناشی از نشت کاهش پیدا میکند و بنابراین در پی آن کاهش عمق آبشستگی را داریم. بهعبارت دیگر با افزایش شیب کناره بهازای عمق آبشستگی باید آب با سرعت بیش تری در خاک جریان داشته تا بتواند ذرات خاک را حرکت دهد. در واقع در حالتی که شیب کمتر است ارتفاع سربار روی آن نیز کمتر است. شکل ٦ بهطور شماتیک این قضیه را نشان میدهد. از طرفی در شیب قائم نتایج عکس این حالت را نشان میدهند که میتوان علت آن را در ناپایداری کناره بهعلت شیب زیاد دانست. با توجه به مغایرت روند نتایج و مقایسه حالت قائم با سایر شیبها نیاز به انجام آزمایش ها بیش تر بوده است تا با تعداد دادههای بیش تری بهبررسی اعتبار نتیجه پرداخته شود.

در جدول ۳ مقادیر to یا زمان آستانه حرکت ذرات،که عبارتست از زمان آغاز آزمایش تا لحظهای که رسوبات کناره شروع به حرکت کرده و اولین عمق آبشستگی در مدل دیده میشود، برای شیبها و دانهبندیهای مختلف آورده شده است. در شکل ۷ این زمانها برای دانهبندیهای مختلف لایه غیرچسبنده و بهازای سه شیب کناره ۱، ۱/۵ و ۲ رسم شده است و



چنانکه در این شکل نشان داده شده است، برای قطر مؤثر ۱میلیمتر و بیشتر زمان t₀ ثابت

شکل٥. تغییرات عمق آبشستگی در برابر عدد رینولدز برای دانهبندی۱/۲-۸/۰



نتایج نشان میدهد که بهازای شیبهای مختلف، با افزایش قطر ذرات لایهٔ نفوذپذیر، زمان آستانه حرکت ذرات خاک از شروع آزمایش، کمتر میشود. بهعبارت دیگر هرچه ذرات درشت دانهتر میشوند فرسایش در آنها زودتر صورت میگیرد. چرا که با افزایش قطر مشخصه ذرات، تخلخل مؤثر افزایش مییابد و بهدلیل فضای بهم پیوسته زیاد در نتیجه دبی مؤثر بیشتر شده و بنابراین سبب می شود ذرات زودتر جابهجا شده و زمان رسیدن به آستانه حرکت کمتر است. در نتیجه در درشت دانهها زودتر حفره تشکیل می شود.

3013

از طرفی با کاهش شیب کناره، مقادیر to کمتر شده است، به استثنا دو مورد که در شیب کناره ۱:۱ و دانهبندی //۱–۸/ و //۱–۲ میلی متر مشاهده شد. در این دو مورد مقدارo بزرگتر از مقدار نظیر آنها در دیگر شیبها است. از آنجاکه این دو مورد، مقادیر عمق آب شستگی بزرگتری نسبت به سایر نمونه ها داشته اند (جدول۳)، ریزش ذرات خاک در آنها آنی بوده و بنابراین نمی توان زمان آستانه حرکت آنها را با بقیه مدل ها مقایسه کرد. دلیل دیگری که می توان ذکر کرد گرادیان کم این دو نمونه نسبت به سایر موارد است که می تواند علت طولانی تر شدن فرآیند آغاز فرسایش باشد. البته لازم به ذکر است چنان که در جدول ۳ مشاهده می شود مقادیر گرادیان هیدرولیکی در هریک از نمونه ها با بقیه متفاوت است. برای بیرسی دقیق تر پیرامون این مسئله و با ثابت نگه داشتن مقدار این پارامتر، ضرورت تحقیقات

Slope	d ₅₀	Ι	t _o	*d اوليه
١	١/٦	٥	22.	•/•V0
١	١	٥	۲٥٠	•/•٣٧٥
١	•/٦	٩	3797	•/•٢٥
1/0	١/٦	٥/٤	١٦٠	•/•٣٦٤
1/0	١	٥/٤	۲	•/•7٣
١/٥	٠/٦	٥/٤	٦٨٠٠	•/•7٣
۲	١/٦	٥/٦	۱۹۷	•/•٣٣
۲	١	٥/٦	737	•/•11
۲	٠/٦	١٥/٦	919+	•/• **

جدول۳. مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده برای مدلهای مختلف

در نهایت با استفاده از رگرسیون غیرخطی و بهکارگیری نرمافزار SPSS رابطهای کلی بین پارامترهای بیبعد بهدست آمده از آنالیز ابعادی و عمق آبشستگی حاصل از فرسایش نشتی برای تمامی دادهها بهدست آمد. $d^* = 6.235 \times 10^3 Re^{1.448} i^{0.781} (1 + \frac{1}{tan\theta})^{0.416} {d_{50}^*}^{-3.425}$



شکل ۷. مقادیر زمان آستانه فرسایش بهازای دانهبندی ها و شیب های مختلف مقدار²R یا ضریب تعیین این معادله ۸۰۸/۰ به دست آمد. چنان که از معادله پیداست رابطهٔ عمق آب شستگی بدون بعد با عدد رینولدز ذرات و گرادیان هیدرولیکی مستقیم و با قطر مشخصه ذرات رابطهٔ عکس دارد. با استفاده از رابطهٔ اخیر می توان عمق آب شستگی ناشی از فرسایش نشتی در کناره رودخانه ها را برای دانهبندی در محدوده های ذکر شده، با تقریب خوبی به دست آورد که با توجه به این که اندازه گیری صحرایی این پارامتر دشوار است کاربرد آن در بر آورد رسوب رودخانه ها روشن است. در شکل ۸ مقادیر عمق آب شستگی بدون بعد مشاهده شده در طی آزمایش ها در مقابل مقادیر محاسباتی متناظر با آن که از معادلهٔ (۷) به دست آمده رسم شده است. همچنین پراکندگی داده ها از خط با شیب ٤٥ درجه هم در این شکل نشان داده شده است.

نتيجه گيري

نتایج مدلهای آزمایشگاهی در شبیهسازی کنارههای لایهای رودخانه ها حاکی از آن بود که در فرسایش نشتی برخلاف فرسایش پایهٔ رودخانه، هرچه شیب کناره بیش تر باشد به علت افزایش فشار ناشی از سربار پایداری بیش تر می شود. به جز در شیب قائم که ناپایداری ناشی از شیب بر فشار سربار غالب می شود. از طرفی با افزایش دانه بندی، زمان شروع آستانه حرکت ذرات کاهش می یابد و بنابراین حفره آب شستگی سریع تر تشکیل می شود. در نهایت هم یک

(V)

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویهٔ شیب کناره و دانهبندی ذرات بر فرسایش نشتی سواحل رودخانه

رابطه با استفاده از روش رگرسیونگیری برای برآورد عمق آبشستگی برای کنارههای رودخانه مشابه آزمایشهای شبیهسازی شده ارائه شد.



شکل ۸. مقادیر عمق بدون بعد مشاهداتی در مقابل محاسباتی

منابع

- سلامت روندی ۵۰، خرازی فرد م.ح.، مجدزاده طباطبایی م.ر.، بر آورد طول حفرهٔ آب شستگی ناشی از فرسایش نشتی کناره رودخانه بر اساس نتایج تجربیات آزمایشگاهی، نشویهٔ زمین شناسی مهندسی، ۷
 (۲) (۱۳۹۲) ۱۸۳۳–۱۸٤٦.
- ۲. شیرخانی ر.، مطالعهٔ آزمایشگاهی اثر تغییر جریان بر فرسایش کناره رودخانه، پایاننامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۸۹).
- ۳. صمدی ۱.، امیری تکلدانی ۱.، داودی م.۱.، رحیمی ح.، مطالعهٔ آزمایشگاهی و تحلیلی پایداری دیوارههای طاقی شکل در سواحل رودخانهها، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران (۱۳۸۹).
- محمودیان شوشتری م.، هیدرولیک آبهای زیرزمینی، دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم، (۱۳۹۲).
 ۲۸.
- . نوربخش ف.، *بررسی آزمایشگاهی تغییرات* شی*ب شیروانی و لایهبندی کناره بر فرسایش درونی در* ر*ودخانههای آبرفتی*، پایاننامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران (۱۳۹۱).

- Cancienne R.M., Fox G.A., Simon A., "Influence of seepage undercutting on the stability of root-reinforced stream-banks. Earth Surface Processes and Landforms", 33 (8) (2008) 1769-1786.
- Chu-Agor M.L., Wilson G.V., Fox G.A., "Numerical modeling of bank stability by seepage erosion", Journal of Hydrologic Engineering, 13(12) (2008) 1133-1145.
- Fox G.A., Wilson G.V., Periketi R.K., Cullum R.F., "Sediment Transport Model for Seepage Erosion of Streambank Sediment", Journal of Hydrologic Engineering, 11(6) (2006) 603-611.
- Fox G.A, Wilson G.V., Periketi R.K., Cullum R.F., Gordji L., "The Role of Subsurface Water in Contributing to Streambank Erosion", US-China Workshop on Advanced Computational Modeling in Hydroscience & Engineering, September 19-21, Oxford, Mississippi, USA (2005).
- Fox G.A., Chu-Agor M.L., Wilson G.V., "Seepage Erosion: A Significant Mechanism of Stream Bank Failure", Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE) World Environmental and Water Resources Congress, May (2007) 15-19.
- Schnellmann R.M., Busslinger H., Schneider R., Rahardjo H., "Effect of rising water table in an unsaturated slope", Engineering Geology, 114 (2010) 71-83.
- 12. Todd D.K., Mays L.W., "Groundwater Hydrology", John Wiley and Sons (2005).
- Wilson G.V., Periketi R.K., Fox G.A., Dabney S.M., Shields F.D., Cullum R.F., "Soil properties controlling seepage erosion contributions to streambank failure", Earth Surface Processes and Landforms, 32 (3) (2006) 447-459.