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: دریافت ۹۳/۱/۲۳ **پذیرش** ۹٤/۲/۲۳

چکیده

جریان زیرسطحی به‌عنوان بخش چشم‌گیری 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. بدین‌منظور تعدادی آزمایش در یک لایسی‌متر برای چهار شیب‌های مختلف و دانه‌بندی‌های 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 رودخانه‌ها و تغییر مرفولوژی آن به‌دلیل از دست رفتن مقادیر زیادی خاک مطلوب کشاورزی، هر ساله سبب بروز خسارات زیادی به اراضی حاشیهٔ رودخانه می‌شود. از طرفی فرسایش، به‌دلیل افزایش رسوب در پایین‌دست، کاهش عمر مفید مخازن و هم‌چنین مشکلات عمده در بهره‌برداری از تأسیسات آب‌گیری را در پی دارد. اگرچه آمار دقیق

* **نویسنده مسئول** a_masoodi@sbu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

از میزان فرسایش خاک در کشور گزارش نشده، اما مقادیر بیش‌تر از استاندارد جهانی، نشان از وجود بحران در مناطق مختلف کشور دارد. نتایج تحقیقات در امریکا نشان می‌دهد که بسیاری از حوضه‌های سراسر ایالات متحده، منبع اولیه رسوبات در آبراهه‌ها برخلاف مناطق مرتفع از کناره آبراهه‌ها نشأت می‌گیرد [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 به‌علت ترکیب آن با سایر فرسایش‌های 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، به‌دلیل گرادیان هیدرولیکی و سرعت حرکت آب در خاک، بر ذرات نیرویی اعمال می‌شود در صورتی‌که فشار تراوش باعث کاهش تنش مؤثر شود موجب تسهیل در فرسایش و افزایش پدیدهٔ زیرشویی[1] می‌شود. از طرف دیگر در مصالح غیرچسبنده، فشار آب منفذی به‌دلیل وضعیت زهکشی خوب در این خاک‌ها به‌ندرت عامل مؤثری در پایداری کناره است.

1. Undercutting

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

مروری بر پیشینه تحقیق

فاکس[1] 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 ۵ و ۱۰ درصد زمان‌های تقریباً مشابهی ثبت شد [۹]. ویلسون[2] و همکارانش (۲۰۰۶)، بر پایهٔ مشاهدات صحرایی، تأثیر خصوصیات خاک بر نشت و تخریب دیوارهٔ 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 پیدا می‌کند [۱۳]. به‌علاوه در همان سال فاکس و همکارانش، مدلی تجربی انتقال رسوب در اثر فرسایش درونی در کناره‌های قائم رودخانه با مصالح چسبنده را توسعه دادند. بدین‌منظور معادلهٔ رسوب براساس مقاومت برشی در محیط‌های رودخانه‌ای و با لحاظ کردن نیروهای نشتی تبیین کردند که در واقع به بیان ارتباط بین جریان رسوب و دبی نشتی می‌پردازد [۸].

شی‌آگور[3] 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 شبیه‌سازی 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 می‌شود اما برای شکست کناره نیازی به حذف کامل فشار آب منفذی منفی نیست و ترک کششی در فاصله‌ای از کناره که هنوز خاک اشباع نشده بود ایجاد می‌شود [۷]. بر اساس تحقیقات کنسین[4] و همکاران (۲۰۰۸) که مدل BSTEM را استفاده کردند.

ضریب اطمینان پایداری ساحل با افزایش زاویهٔ ساحل، فشار آب منفذی و طول زیرشویی و کاهش تسلیح ریشهٔ گیاهان، کاهش می‌یابد [۶]. Schnellmann و همکاران (۲۰۱۰) مدلی

1. Fox
2. Wilson
3. Chu-Agor
4. Cancienne

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

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 محتمل‌تر 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 می‌شود، 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 اندازه‌گیری مشخصات مربوط است. در این تحقیق به بررسی تأثیر دانه‌بندی و زاویهٔ کناره رودخانه بر فرسایش نشتی پرداخته شده است.

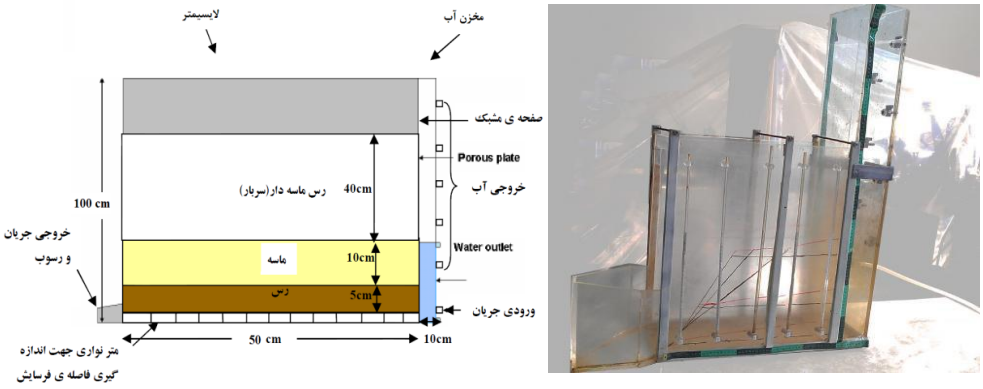
مواد و روش‌ها

مشخصات مدل آزمایشگاهی

تبادل جریان بین رودخانه و سفره‌های آب زیرزمینی باعث می‌شود تا مواد موجود در لایه‌های اطراف رودخانه سست شده و در جریان‌های زیرزمینی از سفرهٔ آب زیرزمینی به‌سمت رودخانه شسته شوند. هم‌چنین سیلاب‌ها باعث نوسان سطح آب رودخانه می‌شوند. هنگام بالا آمدن تراز آب در رودخانه روی شاخهٔ صعودی هیدروگراف سیلاب، جریان‌هایی وارد لایه‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

اطراف می‌شوند و زمانی‌که 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 چنان‌که 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 ٦۰ و عرض ۲۰ سانتی‌متر و مخزن آب به‌منظور تأمین هد دارای طول ۱۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر است. این دو با یک صفحهٔ مشبک پلکسی به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر و سوراخ‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر به‌هم مرتبط شده‌اند. به‌منظور تأمین و کنترل هد، مخزن آب 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

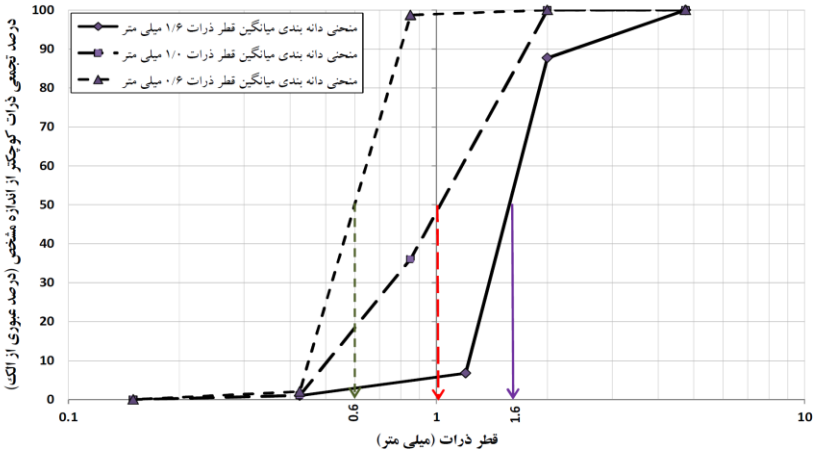
در همهٔ آزمایش‌ها از تأثیر جریان در راستای رودخانه صرف‌نظر شد و فرض بر این گرفته شد که فقط حرکت جریان در راستای عمود بر رودخانه در نظر گرفته شده است.

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

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 (G_s) برابر ۲/۶۳ به‌دست آمد. منحنی دانه‌بندی برای خاک‌های غیرچسبنده لایه هادی در شکل ۳ آورده شده است.



شکل۳. منحنی دانه‌بندی مصالح درشت دانه لایه هادی

خصوصیات اندازه‌گیری شده برای سه نوع ماسه به‌کار رفته در آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مشخصه خاک غیرچسبنده

کلاس‌دانه‌بندی ذرات ماسه	قطر متوسط ذرات رسوب(mm)	γ_{dmin} (kN/m^3)	γ_{dmax} (kN/m^3)	D_r(%)	γ_d (kN/m^3)	n	ω(%)
۰/۴–۰/۸	۰/۶	۱۲/۱۶	۱۳/۸۳	۶۰	۱۳/۱۰	۰/۴۹	۵
۰/۸–۱/۲	۱/۰	۱۲/۶۵	۱۳/۹۳	۶۰	۱۳/۳۷	۰/۴۸	۵
۱/۲–۲	۱/۶	۱۳/۸۳	۱۵/۴۰	۶۰	۱۴/۷۱	۰/۴۳	۵

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

نحوهٔ انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها نمونه‌ای از کناره رودخانه با سه لایه افقی شبیه‌سازی شد که این سه لایه عبارت بودند از: لایهٔ زیرین، رس با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و غیرقابل نفوذ (به‌منظور جلوگیری از فرار آب در مرز بین خاک و کف مدل)، لایهٔ میانی، ماسه به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و لایهٔ فوقانی که تنها نقش سربار را داشته، از خاک دست‌خورده محل به ارتفاع ٤۰ سانتی‌متر در نظر گرفته و در مخزن قرار داده شد. لازم به ذکر است که در برخی از آزمایش‌ها به‌منظور ساده‌سازی آماده‌سازی مدل برای شبیه‌سازی دیوارهٔ کنارهٔ رودخانه روی لایهٔ رویی، وزنه متناسب به‌عنوان نیروی سربار قرار داده شد. در انتها نیز با برش زدن خاک اضافه، مقطع شیب‌دار رودخانه ایجاد می‌شد.

لایه میانی که بررسی‌ها روی آن انجام شد با سه دانه‌بندی متفاوت که محدودهٔ اندازه ذرات این سه نوع ماسه ۰/٤–۰/۸، ۰/۸–۱/۲ و ۱/۲–۲ میلی‌متر 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 ۲:۱ (۱ افقی به ۲عمودی) تکرار شد. جدول ۲ تعداد آزمایش‌ها و بازهٔ تغییرات پارامترها را نشان می‌دهد. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل زمان، تراز آب، دبی‌های نشتی از لایهٔ ماسه، طول پس‌روی لایهٔ ماسه با توجه به هدهای مختلف و وزن رسوبات زیرشویی شده از چالهٔ فرسایش در لایهٔ ماسه‌ای بود. دبی‌های خروجی از لایهٔ میانی در قسمت ناودانی شکل با استفاده از ظرف‌های مدرجی به حجم ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده و هم‌زمان با آن تراز آب ثبت می‌شود، به‌علاوه برای اندازه‌گیری عمق آب‌شستگی از خط‌کش استفاده شد.

در شروع آزمایش هد در یک ارتفاع ثابت نگه داشته شد تا فرسایش دیده شود، چنان‌چه پس از گذشت ۱۵ دقیقه فرسایشی مشاهده نمی‌شد مقدار هد افزایش داده شد. در هنگام شروع فرسایش ابتدا توده‌ای از ماسه ریزش کرده و به‌دنبال 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 می‌ماند، در این زمان تراز آب به تراز بعدی افزایش داده می‌شود، آزمایش تا کامل شدن لولهٔ ناشی از فرسایش و روان شدن ماسه ادامه پیدا کرد، و به‌دلیل چسبندگی زیاد لایهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

سربار در بیش‌تر آزمایش‌ها ترک‌هایی در لایهٔ سربار دیده شد ولی تا کامل شدن لوله فرو نمی‌ریزد. مدت زمان انجام هر آزمایش تقریباً بسته به دانه‌بندی و شرایط لایه ۱ تا ۳ ساعت طول می‌کشید. برای هریک از مدل‌های خاک آزمایش شده زمان از شروع آزمایش تا لحظه شروع آب‌شستگی نیز با زمان‌سنج ثبت شد.

جدول۲. پارامترها و اطلاعات مربوط به آزمایش‌ها

عمق آب‌شستگی(cm)	گرادیان هیدرولیکی	شیب کناره	دانه‌بندی لایه میانی(mm)
۱–۲۰	۰/۲۳–۰/۷۵	۱:۱، ۱: ۱/۵، ۲:۱، قائم	۰/٤–۰/۸
۱–۳٤	۰/۱۲۸–۱/۱٦	۱:۱، ۱: ۱/۵، ۲:۱، قائم	۰/۸–۱/۲
۱–۱٤	۰/۱۳۵–۰/۵۵۸	۱:۱، ۱: ۱/۵، ۲:۱، قائم	۱/۲–۲

آنالیز ابعادی برای تعیین ابعاد آبشستگی

چنان‌که پیش‌تر ذکر شد، ایجاد حفره آب‌شستگی در حین جریانات نشتی در کناره‌های لایه‌بندی شده رودخانه ناشی از عوامل مختلفی است. از جمله این پارامترها می‌توان به سرعت جریان خروجی (v)، ارتفاع آب در مخزن (h)، قطر مشخصه ذرات خاک (d_{50})، وزن مخصوص آب (ρ_w)، وزن مخصوص خاک (ρ_s)، لزجت دینامیکی آب (μ)، شتاب ثقل (g)، تخلخل (n)، طول لایه خاک (L)، ضریب چسبندگی خاک (c)، زاویهٔ اصطکاک داخلی (Φ)، انحراف معیار هندسی (σ_g)، ارتفاع خیس‌شدگی لایهٔ ماسه (h_s)، وزن رسوب خارج شده از چاله یا حفرهٔ ناشی از فرسایش درونی (m_s)، عمق آب‌شستگی (d) اشاره کرد. به‌دلیل استفاده از مصالح غیرچسبنده در لایهٔ بررسی شده از تأثیر پارامتر c و به‌دلیل اختلاف جزیی در زاویهٔ اصطکاک داخلی ذرات این لایه از پارامتر Φ نیز صرف‌نظر شد. از طرفی به‌علت یک‌نواختی دانه‌بندی خاک به‌کار رفته در آزمایش‌ها تأثیر σ_g نادیده گرفته می‌شود. در نتیجه به‌منظور مقایسه نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای زیر تعیین شدند.

$$f\,(Q, V, h, L, d_{50}, d, \rho_s, \rho_w, \mu, \theta, n, g, h_s) = 0 \qquad (۱)$$

و در نهایت اعداد بدون بعد زیر تعیین شدند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

$$d^* = \frac{d}{L} \quad (۲)$$

$$i = \frac{h}{L-d} \quad (۳)$$

$$Re = \frac{V' d_{50}}{\vartheta} \quad (٤)$$

$$d_{50}^* = d_{50} \times \sqrt[3]{\frac{g(G_s-1)}{\vartheta^2}} \quad (٥)$$

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 و ϑ لزجت سینماتیک آب است.

$$V' = \frac{V}{n} = \frac{Q}{(h_s B)n} \quad (٦)$$

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

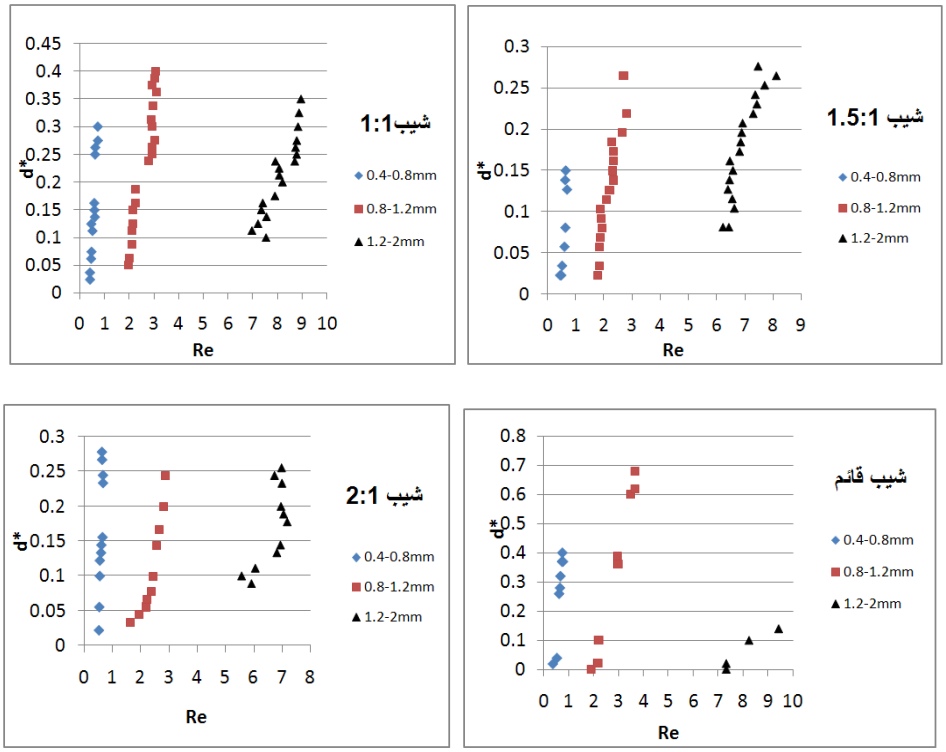
نتایج و بحث

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 به‌وجود می‌آید. محمودیان شوشتری (۱۳۹۲) بیان می‌کند که طبق یک توافق کلی جریان آرام[1] به‌ازای مقداری از عدد رینولدز واقع بین یک تا ده به جریان متلاطم تبدیل می‌شود و بنابراین در مسائل عملی، باید قانون دارسی را برای اعداد رینولدز کم‌تر از ده به‌کار برد [٤]، [۱۲]. در این تحقیق نیز پس از انجام آزمایش‌ها و برداشت داده‌ها برای شیب‌های مختلف و دانه‌بندی‌های متفاوت، آزمایش‌هایی که عدد رینولدز ذرات آن بزرگ‌تر از ۱۰ بودند حذف شدند. با مدنظر قرار دادن نتایج آزمایش‌ها برای یک شیب کناره خاص و مقایسهٔ آن‌ها ملاحظه می‌شود که به‌منظور آغاز حرکت ذرات خاک و زمان آستانه فرسایش، با افزایش قطر متوسط ذرات مقادیر عدد رینولدز نیز افزایش یافته است. چنان‌که در شکل ٤ و به‌عنوان نمونه برای شیب کناره ۱: ۱/۵ مشاهده می‌شود برای

1. Laminar

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

دو دانه‌بندی ۰/۸–۰/٤ و ۱/۲–۰/۸ مقدار عدد رینولدز ذرات کم‌تر از ۳ است در حالی‌که این مقدار برای دانه‌بندی۲–۱/۲ با اختلاف زیادی در حدود ۷ دیده می‌شود. مشابه این روند در سه شیب دیگر کناره نیز مشاهده شد. در واقع چنان‌که در شکل نشان داده شده است با افزایش دانه‌بندی خاک و به‌تبع آن افزایش اندازهٔ خلل و فرج خاک مزبور سرعت آب در آن افزایش می‌یابد بنابراین عدد رینولدز ذرات برای به‌حرکت در آوردن ذرات ماسه، با افزایش دانه‌بندی افزایش پیدا می‌کند. از طرفی حداکثر عمق آب‌شستگی نیز با افزایش دانه‌بندی افزایش پیدا کرده است. لازم به ذکر است که در شیب قائم، به‌دلیل بیش‌تر بودن مقدار عدد رینولدز محیط متخلخل از ۱۰، داده‌های نظیر این اعداد رینولدز حذف شدند. به‌خصوص در دانه‌بندی ۲–۱/۲ میلی‌متر این مساله مشهود است.



شکل٤. تغییرات عمق آب‌شستگی با عدد رینولدز برای شیب‌های مختلف کناره

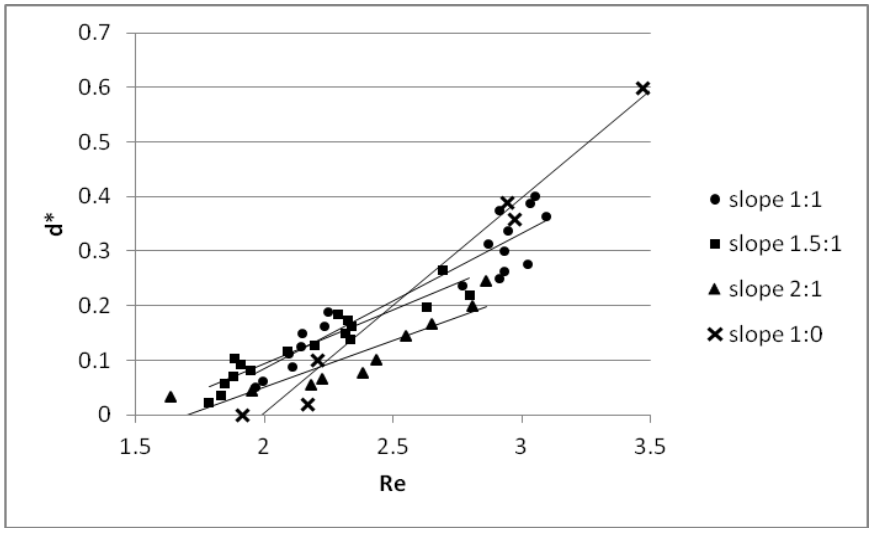
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

چنان‌چه برای دانه‌بندی ثابت مقادیر عمق آب‌شستگی در برابر عدد رینولدز و برای شیب‌های مختلف کناره رسم شود مشاهده می‌شود 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، ۰/۸۹ و ۰/۸٤ است که این خود مبین اعتبار خطوط برازش داده شده و روند تغییرات آن‌ها است. با بررسی نمودار مشاهده می-شود که شیب خطوط پس‌روی کناره در مقابل عدد رینولدز، در شیب ۱:۱ بیش‌تر از شیب ۱: ۱/۵و هم‌چنین بیش‌تر از مقدار آن در شیب ۲:۱ است به‌عبارت دیگر در شیب‌های مختلف آزمایش شده، با کاهش شیب کناره میزان فرسایش کناره افزایش می‌یابد 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 بیش‌تری 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 آزمایش‌ها بیش‌تر بوده است تا با تعداد داده‌های بیش‌تری به‌بررسی اعتبار نتیجه پرداخته شود.

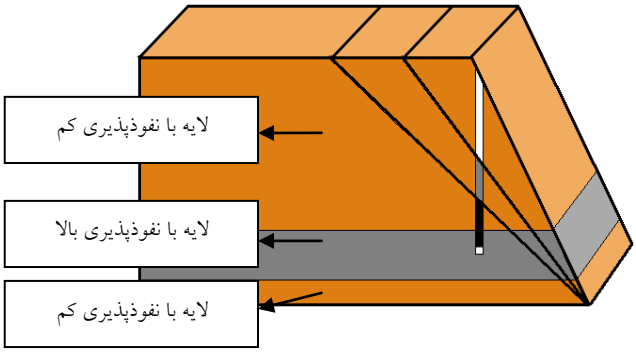
در جدول ۳ مقادیر t_0 یا زمان آستانه حرکت ذرات،که عبارتست از زمان آغاز آزمایش تا لحظه‌ای که رسوبات کناره شروع به حرکت کرده و اولین عمق آب‌شستگی در مدل دیده می‌شود، برای شیب‌ها و دانه‌بندی‌های مختلف آورده شده است. در شکل ۷ این زمان‌ها برای دانه‌بندی‌های مختلف لایه غیرچسبنده و به‌ازای سه شیب کناره ۱، ۱/۵ و ۲ رسم شده است و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

چنان‌که در این شکل نشان داده شده است، برای قطر مؤثر ۱میلی‌متر و بیش‌تر زمان t_0 ثابت است.



شکل۵. تغییرات عمق آب‌شستگی در برابر عدد رینولدز برای دانه‌بندی۱/۲–۰/۸



شکل٦. اثر وزن سربار روی لایه ماسه

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

مؤثر بیش‌تر شده و بنابراین سبب می‌شود ذرات زودتر جابه‌جا شده و زمان رسیدن به آستانه حرکت کم‌تر است. در نتیجه در درشت دانه‌ها زودتر حفره تشکیل می‌شود.

از طرفی با کاهش شیب کناره، مقادیر t_0 کم‌تر شده است، به استثنا دو مورد که در شیب کناره ۱:۱ و دانه‌بندی۱/۲–۰/۸ و ۱/۲–۲ میلی‌متر مشاهده شد. در این دو مورد مقدارt_0 بزرگ‌تر از مقدار نظیر آن‌ها در دیگر شیب‌ها است. از آن‌جاکه این دو مورد، مقادیر عمق آب‌شستگی بزرگ‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند (جدول۳)، ریزش ذرات خاک در آن‌ها آنی بوده و بنابراین نمی‌توان زمان آستانه حرکت آن‌ها را با بقیه مدل‌ها مقایسه کرد. دلیل دیگری که می‌توان ذکر کرد گرادیان کم این دو نمونه نسبت به سایر موارد است که می‌تواند علت طولانی‌تر شدن فرآیند آغاز فرسایش باشد. البته لازم به ذکر است چنان‌که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مقادیر گرادیان هیدرولیکی در هریک از نمونه‌ها با بقیه متفاوت است. برای بررسی دقیق‌تر پیرامون این مسئله و با ثابت نگه داشتن مقدار این پارامتر، ضرورت تحقیقات بیش‌تر در این زمینه وجود دارد.

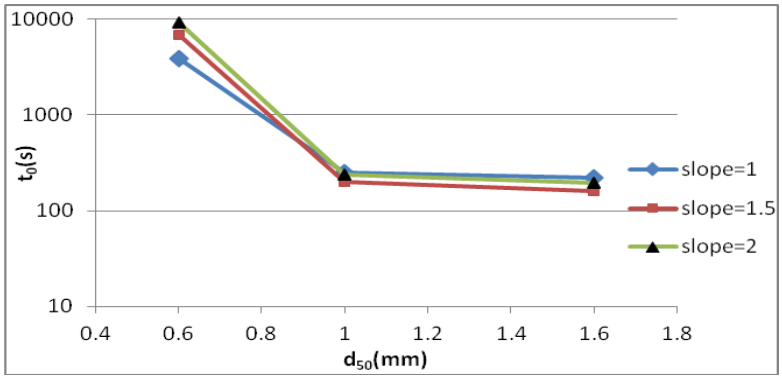
جدول۳. مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده برای مدل‌های مختلف

Slope	d_{50}	I	t_0	*d اولیه
۱	۱/٦	۵	۲۲۰	۰/۰۷۵
۱	۱	۵	۲۵۰	۰/۰۳۷۵
۱	۰/٦	۹	۳۹۲٤	۰/۰۲۵
۱/۵	۱/٦	۵/٤	۱٦۰	۰/۰۳٦٤
۱/۵	۱	۵/٤	۲۰۰	۰/۰۲۳
۱/۵	۰/٦	۵/٤	٦۸۰۰	۰/۰۲۳
۲	۱/٦	۵/٦	۱۹۷	۰/۰۳۳
۲	۱	۵/٦	۲۳۸	۰/۰۱۱
۲	۰/٦	۱۵/٦	۹۱۹۰	۰/۰۲۲

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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

$$d^* = 6.235 \times 10^3 Re^{1.448} i^{0.781} (1 + \frac{1}{tan\theta})^{0.416} {d_{50}^*}^{-3.425} \quad (۷)$$



شکل۷. مقادیر زمان آستانه فرسایش به‌ازای دانه‌بندی‌ها و شیب‌های مختلف

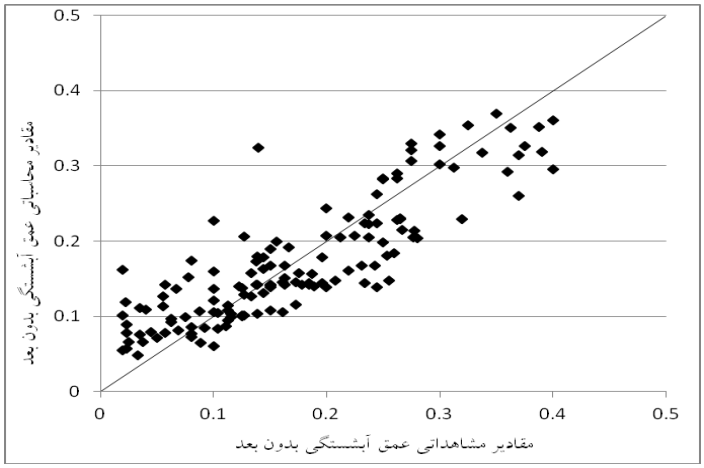
مقدار R^2 یا ضریب تعیین این معادله ۰/۸۰۸ به‌دست آمد. چنان‌که از معادله پیداست رابطهٔ عمق آب‌شستگی بدون بعد با عدد رینولدز ذرات و گرادیان هیدرولیکی مستقیم و با قطر مشخصه ذرات رابطهٔ عکس دارد. با استفاده از رابطهٔ اخیر می‌توان عمق آب‌شستگی ناشی از فرسایش نشتی در کناره رودخانه‌ها را برای دانه‌بندی در محدوده‌های ذکر شده، با تقریب خوبی به‌دست آورد که با توجه به این‌که اندازه‌گیری صحرایی این پارامتر دشوار است کاربرد آن در برآورد رسوب رودخانه‌ها روشن است. در شکل ۸ مقادیر عمق آب‌شستگی بدون بعد مشاهده شده در طی آزمایش‌ها در مقابل مقادیر محاسباتی متناظر با آن که از معادلهٔ (۷) به‌دست آمده رسم شده است. هم‌چنین پراکندگی داده‌ها از خط با شیب ٤٥ درجه هم در این شکل نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌های آزمایشگاهی در شبیه‌سازی کناره‌های لایه‌ای رودخانه ها حاکی از آن بود که در فرسایش نشتی برخلاف فرسایش پایهٔ رودخانه، هرچه شیب کناره بیش‌تر باشد به‌علت افزایش فشار ناشی از سربار پایداری بیش‌تر می‌شود. به‌جز در شیب قائم که ناپایداری ناشی از شیب بر فشار سربار غالب می‌شود. از طرفی با افزایش دانه‌بندی، زمان شروع آستانه حرکت ذرات کاهش می‌یابد و بنابراین حفره آب‌شستگی سریع‌تر تشکیل می‌شود. در نهایت هم یک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

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



شکل۸. مقادیر عمق بدون بعد مشاهداتی در مقابل محاسباتی

منابع

۱. سلامت‌روندی ه.، خرازی‌فرد م.ح.، مجدزاده طباطبایی م.ر.، *برآورد طول حفرهٔ آب‌شستگی ناشی از فرسایش نشتی کناره رودخانه بر اساس نتایج تجربیات آزمایشگاهی*، نشریهٔ زمین‌شناسی 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 ا.، امیری تکلدانی ا.، داودی م.ا.، رحیمی ح.، *مطالعهٔ آزمایشگاهی و تحلیلی پایداری دیواره‌های طاقی شکل در سواحل رودخانه‌ها*، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران (۱۳۸۹).

٤. محمودیان شوشتری م.، *هیدرولیک آب‌های زیرزمینی*، دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم، (۱۳۹۲) ٦۸.

۵. نوربخش ف.، *بررسی آزمایشگاهی تغییرات شیب شیروانی و لایه‌بندی کناره بر فرسایش درونی در رودخانه‌های آبرفتی*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران (۱۳۹۱).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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).
10. 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.
11. 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).
13. 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.2.6.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.2.3501]