

مقاله پژوهشی

ارزیابی حساسیت ضریب اطمینان در برابر گسیختگی صفحه‌ای سواحل رودخانه نسبت به تغییرات پارامترهای موثر در تحلیل پایداری سواحل

امیر صمدی^{۱*}، ابراهیم امیری تکلدانی^۲ و حسن رحیمی^۳
دریافت: ۱۳۸۶/۱۰/۲۳

چکیده

مطالعات مربوط به موضوع تخریب توده‌ای سواحل رودخانه‌ها به دلیل نقشی که در تولید مقدار قابل توجهی از رسوبات و در نتیجه اثرگذاری بر خصوصیات مجاری رودخانه‌ها و توسعه پهنه سیلابی دارد، از اهمیت زیادی برخوردار است. برای بررسی فرآیند تخریب سواحل لازم است مقدار پارامترهای موثر در تحلیل پایداری سواحل تعیین شود. به دلیل وجود مشکلات فنی و اجرایی، محاسبه برخی از مقدار پارامترها به راحتی میسر نیست، لذا در برخی موارد با پذیرفتن درصدی خطا در محاسبات مربوط، با استفاده از تجارب و اطلاعات موجود مقدار آن‌ها تخمین زده می‌شود. از آنجا که تاکنون برای تعیین میزان تأثیر پارامترهای فوق در تحلیل پایداری ساحل تحقیقات بسیار اندکی اجرا شده است، در این تحقیق با استفاده از یک مدل تحلیل پایداری سواحل رودخانه و با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از سه رودخانه در آمریکا و یک رودخانه در ایتالیا، پایداری سواحل رودخانه‌ها بررسی و اثرات پارامترهای مختلف بر اساس تحلیل حساسیت ضریب اطمینان پایداری ساحل در برابر گسیختگی صفحه‌ای، اجرا شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار ضریب اطمینان ساحل در برابر گسیختگی صفحه‌ای به ترتیب اهمیت نسبت به تغییرات سطح آب زیرزمینی، زاویه ساحل، سطح آب رودخانه و وزن مخصوص مصالح بیشترین حساسیت را داشته در حالی که حساسیت ضریب اطمینان نسبت به تغییرات عمق ترک کششی، چسبندگی، زاویه اصطکاک درونی و زاویه مربوط به افزایش مقاومت در اثر مکش منفی، ناچیز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه، تخریب توده‌ای، گسیختگی صفحه‌ای، پایداری ساحل و حساسیت.

ارجاع: صمدی ا. امیری تکلدانی ا. و رحیمی ح. ۱۳۸۶. ارزیابی حساسیت ضریب اطمینان در برابر گسیختگی صفحه‌ای سواحل رودخانه نسبت به تغییرات پارامترهای مؤثر در تحلیل پایداری سواحل. مجله پژوهش آب ایران. (۱۱): ۳۴-۲۵.

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران
^۲ عضو هیأت علمی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران
^۳ عضو هیأت علمی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران
* نویسنده مسئول amsamadi@ut.ac.ir

مقدمه

تشکیل دهنده ساحل و گسیختگی طاقی شکل، عمده‌ترین عوامل تخریب ساحل تشخیص داده شده‌اند و گسیختگی دایره‌ای در میان سایر عوامل از اهمیت کمتری برخوردار است (داری و تورن ۱۹۹۷). نگاهی به مشاهدات صحرایی صورت گرفته توسط محققان مختلف در اکثر رودخانه‌ها حاکی از میزان بالای فرسایش ساحل رودخانه در اثر فرسایش توده‌ای به صورت گسیختگی صفحه‌ای می‌باشد. مثلاً مثال در سال ۱۹۹۵ در طی مطالعات مرحله شناسایی در طول ۱۰۷ کیلومتر از سواحل ناپایدار رودخانه میسوری علیا در پایین دست سد فورت پک در مونتانا مشاهده شده است که ۴۸ کیلومتر از سواحل ناپایدار بر اثر گسیختگی صفحه‌ای، ۳۵ کیلومتر بر اثر فرسایش درونی ناگهانی، ۲۱ کیلومتر بر اثر گسیختگی طاقی شکل و تنها سه کیلومتر بر اثر گسیختگی دایره‌ای شکل تخریب شده‌اند (داری و تورن ۱۹۹۷). علاوه بر این گسیختگی صفحه‌ای در رودخانه‌های دیگری از جمله در میمشال بروک در هرتفوردشایر انگلستان، رودخانه سرخ در لوئیزیانا، رودخانه براهماپوترا در بنگلادش و در طول بسیاری از آبراهه‌های ناپایدار در می‌سی‌سی‌پی شمالی در آمریکا مشاهده گردیده‌اند (داری و تورن ۱۹۹۷).

تخریب توده‌ای موجب تعریض سریع آبراهه و ورود احجام بزرگ رسوبات به درون آبراهه شده و با توجه به حمل تمامی و یا بخشی از آنها توسط جریان عبوری و افزایش غلظت رسوبی و نیز اشغال بخشی از مقطع عرضی رودخانه توسط مصالح تخریب یافته، اثرات آن بر پارامترهای جریان در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آب دارای اهمیت می‌باشد. فرسایش توده‌ای ساحل رودخانه از نوع صفحه‌ای عموماً در هنگام پایین افتادن سطح آب پس از عبور سیلاب بر اثر عوامل زیر رخ می‌دهد (سیمون و داری ۱۹۹۹):

- ۱- حذف نیروی هیدرواستاتیک ناشی از عمق آب سیلاب در آبراهه؛
- ۲- تقدم زمانی بین پایین افتادن سطح آب در رودخانه نسبت به پایین افتادن سطح آب زیرزمینی و تولید نیروی فشار منفذی زیاد؛
- ۳- کاهش نیروی مکش یا فشار آب حفره‌ای منفی (و چسبندگی ظاهری) در اثر نفوذ آب باران یا نشت آب زیرزمینی.

تخریب توده‌ای سواحل رودخانه یکی از اصلی‌ترین منابع تولید رسوبات است و به دلیل تعریض شدن عرض رودخانه، این پدیده نقش زیادی در توسعه پهنه سیلابی دارد. آندروز (۱۹۸۲) ثابت کرد که عرض مجاری یکی از مهمترین پارامترها برای بیان خصوصیات مجاری طبیعی و رودخانه‌ها و نیز ریخت‌شناسی آنها می‌باشد. در رودخانه‌هایی که هنوز به رژیم تعادلی خود نرسیده‌اند، تعریض و تعمیق رودخانه و در رودخانه‌های پیچان، عقب‌نشینی ساحل خارجی از پدیده‌های عادی به شمار می‌روند. میزان عقب‌نشینی ساحل با افزایش عرض رودخانه افزایش می‌یابد. نرخ‌های تعریض‌شدگی آبراهه در رودخانه‌های با سواحل فرسایشی از ۰/۱ متر در سال در دره‌های سنگی، ۱/۰ متر در سال در سواحل تشکیل شده از مصالح چسبنده و ۱۰۰ متر در سال در سواحل تشکیل شده از مصالح غیرچسبنده متغیر است (سیمون و همکاران ۱۹۹۹). همچنین گزارش شده است که در اراضی لس^۱ میانه غربی آمریکا، مصالح تشکیل دهنده ساحل تا ۸۰ درصد حجم کل رسوبات فرسایش یافته از آبراهه‌های با ساحل فرسایشی را شامل می‌شوند (سیمون و داری ۱۹۹۹). مثلاً مثال میزان افزایش عرض، در اثر فرآیندهای تخریب توده‌ای در شبکه رودخانه‌های اوبیون - فورکد دیر در تنسی غربی برابر ۱/۵ متر در سال، در رودخانه سیمارون در کانزاس ۱۴ متر در سال، در رودخانه گیلا در آریزونا حدود ۵۰ متر در سال، و در برخی آبراهه‌های سیستم رودخانه توتل در واشینگتن بیش از ۱۰۰ متر در سال گزارش شده است (سیمون و همکاران ۱۹۹۹). در ایران نیز به طور مثال در رودخانه تجن، میزان افزایش عرض حدود ۸ متر در سال در طی سال‌های ۱۳۳۴ الی ۱۳۷۹ اندازه‌گیری شده است (احمدیان یزدی ۱۳۸۰). همچنین گزارش شده است که به دلیل شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و استفاده نامناسب از اراضی حوضه‌های آبخیز، رودخانه‌های داخلی در مقایسه با رودخانه‌های جهان میزان رسوب بالاتری را حمل می‌کنند (رفاهی ۱۳۷۵).

در بین فرآیندهای مختلف فرسایش سواحل رودخانه‌ها، پدیده‌های گسیختگی صفحه‌ای، فرسایش درونی مصالح

^۱ - Loess

زیر را برای تخمین عمق ترک کششی در خاک دارای مقاومت کششی محدود ارائه کردند (لونز و هندی ۱۹۶۸):

$$y = Z_0 (1 - t_{TC} / t) \quad (2)$$

که در آن S_{TC} = مقاومت کششی خاک، S_t = تنش کششی حداکثر در سطح خاک و y = عمق ترک کششی است. لوهنس و هندی با استفاده از دیاگرام موهر نشان دادند که (لونز و هندی ۱۹۶۸):

$$S_t = 2C \tan(45 - f/2) \quad (3)$$

تیلور (۱۹۴۸) نشان داد گسیختگی در صفحه‌ای اتفاق می‌افتد که چسبندگی فراهم شده در آن حداکثر باشد. لوهنس و هندی (۱۹۶۸) با استفاده از تئوری فوق و در نظر گرفتن شکل هندسی ساده‌ای از ساحل رودخانه، رابطه زیر را برای تعیین زاویه صفحه گسیختگی ارائه نمودند:

$$b = \frac{a+f}{2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، b = زاویه صفحه گسیختگی و a = زاویه ساحل رودخانه پیش از وقوع گسیختگی است. لوهنس و هندی خاطر نشان کردند که نتایج حاصل از معادلات فوق تقریبی است، زیرا شکل توزیع تنش به محض آغاز ترک و توسعه آن تغییر می‌کند.

داری و تورن (۱۹۹۴) گزارش کردند که بر اساس شکل هندسی سواحل تخریب‌یافته و نیز اطلاعات جمع‌آوری شده از ۵۱ محل در رودخانه می‌سی‌سی‌پی در ایالات متحده آمریکا، روابط فوق قادر به پیش‌بینی صحیح عمق ترک کششی در محل‌های مورد بررسی نبوده‌اند. تورن و ایت بیان نمودند که عمق ترک کششی معمولاً معادل نصف ارتفاع ساحل است و در صورت نبود اطلاعات محلی، می‌توان عمق ترک کششی را معادل نصف ارتفاع ساحل در نظر گرفت. تورن و ایت (۱۹۹۳) همچنین اعلام کردند که در صورت تغییر مقدار عمق ترک کششی از ۰/۳ تا ۰/۷ ارتفاع ساحل، ضریب ایمنی فقط حداکثر ۱۰ درصد تغییر می‌کند.

عثمان و تورن (۱۹۸۸) مدلی برای پیش‌بینی تغییرات پایداری ساحل در مقابل فرسایش جانبی و نیز کف‌کنی بستر ارائه کردند. در این مدل، تحلیل پایداری شیب برای سواحل تند ($a > 60^\circ$) ارائه و برای محاسبه زاویه صفحه گسیختگی ساحل از معادله زیر استفاده شده که بر اساس تئوری تیلور می‌باشد:

در شرایطی که ارتفاع و زاویه شیب ساحل به‌واسطه فرسایش مصالح از کف رودخانه و دیواره‌های ساحل به حد بحرانی برسد، گسیختگی در امتداد یک سطح تقریباً صفحه‌ای بوقوع می‌پیوندد. علاوه بر نقش جریان رودخانه در فرسایش ساحل، گسیختگی ساحل ممکن است بر اثر تغییر مشخصات ژئوتکنیکی مصالح تشکیل دهنده ساحل ایجاد گردد. مثلاً مثال کاهش چسبندگی ذرات خاک بر اثر تشکیل شبنم و یا وقوع فشارهای منفذی مثبت بر اثر پایین فتادگی ناگهانی سطح آب رودخانه می‌تواند باعث تسریع گسیختگی ساحل شوند. توسعه ترک کششی نیز در سرعت بخشیدن گسیختگی سواحل به‌صورت فوق با اهمیت می‌باشد (داری و تورن ۱۹۹۴). مشخص شده است که در مطالعات مربوط به پایداری سواحل رودخانه، موقعیت و عمق ترک کششی از جمله پارامترهای کلیدی در تعریف شکل هندسی سواحل تخریب‌یافته به شمار می‌روند. افزایش عمق ترک کششی باعث کاهش طول مؤثر سطح بالقوه گسیختگی و متعاقباً کاهش پایداری ساحل می‌گردد. رانکین وجود تنش کششی افقی در لایه‌های فوقانی خاک پشت یک دیوار قائم را اثبات نموده و ترزاقی با کاربرد تئوری‌های رانکین در مورد گسیختگی نوع کولمن در یک ساحل قائم، رابطه زیر را برای تعیین عمق ناحیه کششی ارائه نمود (نقل از تورن ۱۹۸۲):

$$Z_0 = \frac{2C}{s} \tan(45 + f/2) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Z_0 = عمق ناحیه تنش کششی خاک، g_s = وزن مخصوص مصالح و C و f به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک درونی مصالح ساحل می‌باشند. در سواحل بلند، مقدار Z_0 تنها درصد کمی از ارتفاع ساحل بوده و حضور ترک کششی به طور مؤثر شکل هندسی سطح گسیختگی را تغییر نمی‌دهد. بنابراین پتانسیل ترک خوردگی با کاهش طول سطح گسیختگی، توسط قسمتی در نظر گرفته می‌شود که درون ناحیه کششی واقع شده است.

بر اساس مشاهدات ترزاقی حداکثر عمق ترک کششی در حدود نصف ارتفاع دیوار قائم بدون تقویت‌کننده است (ر.ک. تورن ۱۹۸۲). لوهنس و هندی با بیان این که اگر مقاومت کششی در سطح خاک حداکثر باشد، مقدار آن به طور خطی با کاهش عمق در Z_0 به صفر می‌رسد، معادله

امیری تکلدانی و همکاران (۱۳۸۴) ضمن توسعه مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR¹), اثر ترک کششی در تخمین پایداری سواحل رودخانه را با استفاده از ۵۱ داده جمع‌آوری شده از سرشاخه‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی آمریکا بررسی نمودند. این مدل قابلیت محاسبه زاویه گسیختگی ساحل را با استفاده از روش‌های ساده‌ای همچون روش لوهنس و هندی (۱۹۶۸), عثمان و تورن (۱۹۸۸), و امیری تکلدانی (۲۰۰۲) داراست. مدل مذکور همچنین امکان محاسبه زاویه صفحه گسیختگی ساحل را با استفاده از روش داربی و تورن (اصلاح شده) در حالت حضور کلیه نیروهای مؤثر در سطح لغزش دارد. برخلاف مدل‌های پیشین که به منظور تحلیل پایداری نیازمند تعیین یکی از پارامترهای هندسی بلوک گسیختگی (زاویه صفحه گسیختگی یا عمق ترک کششی) هستند، مدل حاضر قابلیت تحلیل پایداری را با متغیر در نظر گرفتن مقدار عمق ترک کششی در کل ضخامت ساحل داراست و در نهایت بحرانی‌ترین شرایط را مشخص می‌کند (امیری تکلدانی و همکاران ۱۳۸۴).

با توجه به موارد ذکر شده، در این تحقیق با استفاده از مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR) و با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از سه رودخانه در آمریکا و یک رودخانه در ایتالیا، پایداری سواحل رودخانه‌ها بررسی و اثرات پارامترهای مختلف بر اساس تحلیل حساسیت ضریب اطمینان پایداری ساحل در برابر گسیختگی صفحه‌ای نسبت به تغییرات آن پارامترها تعیین شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند کمک شایانی به تعیین مقدار دقت لازم برای تخمین و یا محاسبه پارامترهای دخیل در فرآیند گسیختگی صفحه‌ای سواحل بنماید.

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در بخش قبل عنوان شد در این تحقیق با کاربرد مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR) و با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از ۵۱ محل مطالعاتی در مسیر رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا (آبراه‌های هوتوفیا، لانگ و گودوین) و نیز اطلاعات کامل‌تر از یک مقطع مشخص از آبراهه گودوین از سرشاخه‌های

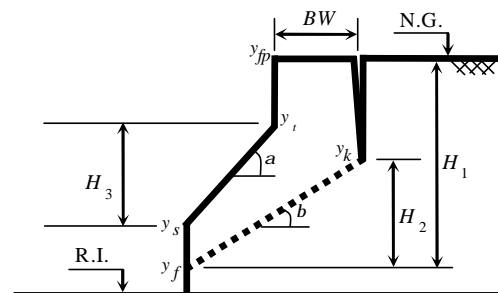
$$b = 0.5 \left(\tan^{-1} \left[\left(\frac{H}{H'} \right)^2 (1 - K_r^2) \tan a \right] + f \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق، k_r = نسبت عمق ترک کششی به ارتفاع ساحل و H و H' به ترتیب = ارتفاع ساحل از محل پاشنه ساحل و ارتفاع ساحل در بالای محل کف کنی پاشنه ساحل است. در روش عثمان و تورن، صفحه گسیختگی منحصرأ از درون پاشنه ساحل عبور کرده، عمق ترک کششی موجود با عمق ترک کششی قبلی یکسان در نظر گرفته شده است و نیروهای هیدرواستاتیک ناشی از سطح آب رودخانه و سطح آب زیرزمینی مدنظر قرار نگرفته‌اند.

داربی و تورن (۱۹۹۶) مدل دیگری برای پیش‌بینی پایداری سواحل فرسایشی رودخانه‌های دارای سواحل با شیب تند، مصالح چسبنده و همگن، در برابر گسیختگی صفحه‌ای ارائه کردند. در این مدل تأثیرات فشار آب منفذی و فشار محصور کننده هیدرواستاتیک و حضور ترک کششی مدنظر قرار گرفته و صفحه گسیختگی لزوماً از درون پاشنه ساحل عبور نمی‌کند. امیری تکلدانی (۲۰۰۲) علاوه بر نیروهای فشار منفذی و محصور کننده هیدرواستاتیک، نیروی ناشی از آب موجود در ترک کششی و نیروی مکش در بخش غیر اشباع ساحل را نیز در تحلیل پایداری در نظر گرفته است. امیری تکلدانی با توجه به شکل (۱) و با در نظر گرفتن عمق ترک کششی معادل با عمق ترک کششی قبلی، رابطه دیگری را برای محاسبه زاویه صفحه گسیختگی در ساحل پیشنهاد کرده است:

$$b = \tan^{-1} \left(\frac{H_2}{BW + H_3 / \tan a} \right) \quad (6)$$

در رابطه فوق، BW عرض بلوک و پارامترهای H_1 ، H_2 و H_3 در شکل ۱ تعریف شده‌اند.



شکل ۱- معرفی پارامترهای به کار رفته در محاسبه زاویه صفحه گسیختگی با استفاده از روش امیری تکلدانی (۲۰۰۲)

¹ - Extensive model of stability analysis of riverbank

گفتنی است که مطابقت کامل بین مقادیرهای پیش‌بینی شده و مشاهده شده به ازای $Sc = 0.0$ و $Pc = 0.0$ حاصل می‌شود. به عبارت ساده‌تر، مقدار تابع Pc بزرگتر از صفر، مبین بیش از حد پیش‌بینی شدن و کمتر از صفر مبین کمتر از حد پیش‌بینی شدن مقادیر نسبت به مقادیر مشاهداتی است. مقادیر تابع Sc نیز هرچه از صفر بیشتر باشد، مبین پراکندگی بیشتر داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و داده‌های مشاهده شده صحرائی است.

نتایج و بحث

قابلیت تحلیل پایداری سواحل جهت پیش‌بینی شکل هندسی بلوک گسیختگی با استفاده از مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه برای ۵۱ داده جمع‌آوری شده از رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا (آبراهه‌های هوتوفیا، لانگ و گودوین) توسط روش‌های مختلف در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این دو جدول مقادیر Sc و Pc برای شرایط عادی (عمق ترک کششی معلوم) در جدول ۱ مشخص شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از پیش‌بینی مشخصات هندسی بلوک گسیختگی (زاویه، عرض و حجم بلوک گسیختگی) با روش لوهنس- هندی نسبت به سایر روش‌ها مطابقت بیشتری با مقدارهای مشاهده شده نشان می‌دهد. با توجه به محدود بودن اطلاعات موجود رودخانه می‌سی‌سی‌پی و دسترسی نداشتن به اطلاعات سطح آب سطحی و زیرزمینی، امکان مقایسه دقیق‌تر روش‌ها وجود ندارد. اما مشخص است که روش‌های ساده و مقدماتی لوهنس- هندی و عثمان- تورن، قابلیت پیش‌بینی نیروهای ناشی از سطح آب سطحی و زیرزمینی را در تحلیل پایداری ساحل ندارند و در صورت وجود اطلاعات کامل‌تر نخواهند توانست مشخصات گسیختگی واقعی را تعیین کنند. از طرف دیگر، مقادیر توابع فوق برای دو روش داربی- تورن (اصلاح شده) و امیری تکلدانی (اصلاح شده) در حالت بحرانی (عمق ترک کششی نامعلوم) برای داده‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی در جدول ۲ مشخص شده‌اند. طبق جدول ۲، نتایج حاصل از پیش‌بینی زاویه صفحه گسیختگی و حجم بلوک گسیختگی با روش داربی- تورن (اصلاح شده) و نتایج حاصل از پیش‌بینی عمق ترک کششی و عرض بلوک گسیختگی با روش امیری

رودخانه می‌سی‌سی‌پی، به همراه داده‌های موجود از رودخانه سیو در ایتالیا، پایداری سواحل رودخانه‌ها بررسی و مقدار اثرات پارامترهای دخیل در تحلیل پایداری سواحل بر اساس تحلیل حساسیت ضریب ایمنی ساحل در برابر گسیختگی صفحه‌ای نسبت به تغییرات پارامترهای فوق تعیین شده است. در این تحقیق محدودیت موجود در مدل‌های تحلیل پایداری سواحل رودخانه با بازنگری در دو روش تحلیل پایداری ساحل رودخانه در شرایط عمق ترک کششی نامعلوم مرتفع گردیده و در نهایت بحرانی‌ترین حالت وقوع گسیختگی تخمین زده شده با شرایط وقوع پیوسته مقایسه شده است. به عبارت دیگر در این تحقیق محدودیت یکسان در نظر گرفتن عمق ترک کششی موجود با عمق ترک کششی قبلی در روش امیری تکلدانی (۲۰۰۲) مرتفع گردیده و در روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) امکان در نظر گرفتن عمق واقعی مشاهده شده یا تخمین عمق بحرانی ترک کششی لحاظ شده است (صمدی ۱۳۸۳). شایان ذکر است که شرح کاملی از مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EM SAR) و نیز نحوه اصلاح روش‌های داربی و تورن و امیری تکلدانی در منابع ۲ و ۴ ارائه شده و علاقه‌مندان برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد این مدل می‌توانند به مرجع یاد شده مراجعه نمایند.

برای بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از کاربرد مدل گسترده تحلیل پایداری با نتایج مشاهداتی، از معیارهای Sc^1 و Pc^2 که به ترتیب نشان‌گر معیار پراکندگی و معیار بیشتر/کمتر پیش‌بینی شدن مقدار پارامترها هستند به شرح زیر استفاده شده است:

$$Sc = \frac{\sum_{i=1}^n |x_p(i) - x_o(i)|}{n \times \max(x_o)} \quad (7)$$

$$Pc = \frac{\sum_{i=1}^n (x_p(i) - x_o(i))}{n \times \max(x_o)} \quad (8)$$

در این دو رابطه، x_p = مقدار پارامتر پیش‌بینی شده، x_o = مقدار پارامتر مشاهده شده، $\max(x_o)$ = حداکثر مقدار پارامتر مشاهده شده و n = تعداد نقاط اطلاعات است.

¹- Scatter criterion

²- Predictive criterion

پارامترهای عمق ترک کششی و عرض بلوک گسیختگی که در تعیین شکل هندسی سواحل تخریب یافته و میزان عقب‌نشینی سواحل بسیار مهم است، تفاوت دو روش در حدود ۵۰٪ می‌باشد که با مقایسه کارشناسی می‌توان به قابلیت پیش‌بینی بهتر روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) پی برد.

تکلدانی (اصلاح شده) مطابقت بیشتری با مقادیر مشاهده شده نشان می‌دهند. بر اساس جدول ۲، اگرچه در تخمین زاویه صفحه و حجم بلوک گسیختگی، نتایج روش داربی-تورن (اصلاح شده) نسبت به روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) تطابق بهتری با مقادیر مشاهده شده دارند، لکن اختلاف نتایج دو روش کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. اما در برآورد

جدول ۱- نتایج تحلیل پایداری سواحل رودخانه می‌سی‌سی‌پی با روش‌های مختلف در حالت عمق ترک کششی معلوم توسط

مدل EMSAR

حجم بلوک گسیختگی، V		عرض بلوک گسیختگی، BW		زاویه صفحه گسیختگی، b		مدل
Pc	Sc	Pc	Sc	Pc	Sc	
-0/008 ^θ	0/138 ^θ	0/083 ^θ	0/255 ^θ	-0/056 ^θ	0/168 ^θ	لوهنس - هندی
0/006	0/141	0/110	0/256	-0/065	0/170	عثمان - تورن
0/005	0/142	0/108	0/255	-0/062	0/172	دارابی - تورن (اصلاح شده)
0/095	0/187	0/628	0/695	-0/043	0/195	امیری تکلدانی
0/031	0/140	0/165	0/276	-0/046	0/198	امیری تکلدانی (اصلاح شده)

^θ مقادیر بهینه

جدول ۲- نتایج تحلیل پایداری سواحل رودخانه می‌سی‌سی‌پی با روش جدید همراه با تخمین عمق ترک کششی بحرانی

حجم بلوک گسیختگی، V		عرض بلوک گسیختگی، BW		زاویه صفحه گسیختگی، b		عمق ترک کششی بحرانی، k		مدل
Pc	Sc	Pc	Sc	Pc	Sc	Pc	Sc	
0/045 ^θ	0/139 ^θ	0/256	0/339	-0/042 ^θ	0/188 ^θ	0/274	0/352	داربی-تورن (اصلاح شده)
-0/023	0/151	-0/055 ^θ	0/241 ^θ	-0/054	0/201	-0/011 ^θ	0/224 ^θ	امیری تکلدانی (اصلاح شده)

^θ مقادیر بهینه

داده‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی آمریکا ارزیابی گردیده و نتایج زیر حاصل شده است:

- مؤثرترین پارامترها در تحلیل پایداری به ترتیب اهمیت، زاویه ساحل، چسبندگی و وزن مخصوص مصالح ساحل هستند.

- نتایج نشان‌دهنده تأثیر ناچیز عمق توسعه ترک کششی در تعیین ضریب ایمنی پایداری ساحل رودخانه

در تحقیقات اجرا شده توسط امیری تکلدانی و همکاران (۱۳۸۴) میزان حساسیت ضریب اطمینان در مقابل تغییرات پارامترهای مختلفی، چون مشخصات فنی مصالح تشکیل دهنده ساحل شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص مصالح و مشخصات هندسی شامل عمق ترک کششی و زاویه ساحل با استفاده از روش داربی-تورن برای

زاویه مبین افزایش مقاومت در اثر مکش و مشخصات هندسی شامل عمق ترک کششی و زاویه ساحل و همچنین سطوح آب رودخانه و زیرزمینی با استفاده از روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) برای داده‌های مقطع فرسایش‌پذیری از آبراهه گودوین در رودخانه می‌سی‌سی‌پی آمریکا و همچنین مقطعی از رودخانه سیو ایتالیا ارزیابی و نتایج حاصله در جدول ۳ خلاصه شده است. بدین ترتیب نقش عوامل مختلفی همچون خطای اندازه‌گیری یا خطای ناشی از در نظر گرفتن مقادیر متوسط مشخصات فنی مصالح ساحل در مقدار ضریب اطمینان به دست آمده از تحلیل پایداری ساحل مشخص گردید. علاوه بر این در شکل (۲) روند تغییرات ضریب اطمینان متوسط پایداری ساحل در برابر تغییرات سطح آب رودخانه و زیرزمینی رودخانه سیو ایتالیا به عنوان دو پارامتر کلیدی و مؤثر در بروز گسیختگی در سواحل رودخانه نمایش داده شده است.

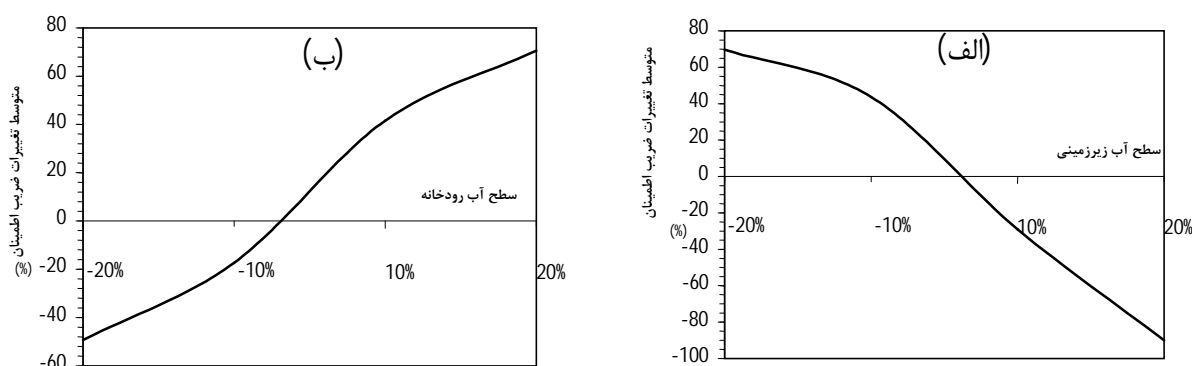
است. اگرچه عمق ترک کششی در تعیین عرض بلوک تخریب‌یافته بسیار مؤثر است.

- با توجه به اطلاعات محدود موجود از رودخانه می‌سی‌سی‌پی، روش‌های عثمان- تورن (۱۹۸۸) و لوهنس- هندی (۱۹۶۸) در محاسبه هندسه بلوک گسیختگی جواب مناسب‌تری می‌دهند.

با توجه به نقص داده‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی، امکان بررسی تأثیر سایر پارامترهای مؤثر در پایداری سواحل رودخانه شامل سطوح آب رودخانه و زیرزمینی و نیروی مکش منفی در تحلیل پایداری میسر نمی‌باشد. براین اساس به منظور تعیین میزان حساسیت ضریب اطمینان در مقابل تغییرات پارامترهای مختلف، عکس‌العمل مقدار ضریب اطمینان پایداری ساحل نسبت به پارامترهای متغیری چون مشخصات فنی مصالح تشکیل دهنده ساحل شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص مصالح و

جدول ۳- میزان حساسیت ضریب اطمینان پایداری سواحل رودخانه سیو و آبراهه گودوین در رودخانه می‌سی‌سی‌پی در مقابل تغییرات مشخصات فنی و هندسی ساحل

مقدار ضریب اطمینان [FS(%)]				پارامتر مورد نظر	
محدوده تغییرات پارامترهای مختلف (درصد)					
-20%	-10%	+10%	+20%		
+9/42	+4/55	-5/61	-7/77	عمیق‌تر ترک کششی (k)	مشخصات هندسی
+36/3	+16/7	-14/5	-27/4	زاویه ساحل (α)	
-25/2	-9/0	+21/1	+36/0	سطح آب رودخانه (WSE)	
+35/5	+22/3	-14/9	-45/8	سطح آب زیرزمینی (GWSE)	
-9/9	-5/0	+5/0	+9/5	چسبندگی (c)	مشخصات فنی
-12/2	-6/3	+6/0	+12/1	زاویه اصطکاک درونی (ϕ)	
+12/4	+5/6	-4/8	-9/4	وزن مخصوص مصالح (γ)	
-6/1	-2/9	+2/7	+5/2	زاویه نشانگر افزایش مقاومت در اثر مکش (ϕ^b)	



شکل ۲- روند تغییرات ضریب اطمینان پایداری ساحل در مقابل تغییرات: الف) سطح آب زیرزمینی؛ ب) سطح آب رودخانه

درصد تغییر می‌نماید (امیری تکلدانی و همکاران ۱۳۸۴). در این تحقیق نیز نتایج بررسی‌ها نشان دهنده تأثیر بیشتر زاویه ساحل بر میزان افزایش یا کاهش ضریب اطمینان پایداری ساحل در برابر لغزش نسبت به وزن مخصوص مصالح ساحل و عمق ترک کششی است. همان‌گونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، میزان حساسیت ضریب اطمینان پایداری سواحل رودخانه سیو و آبراهه گودوین در رودخانه می‌سی‌سی‌پی در مقابل افزایش و کاهش وزن مخصوص مصالح به میزان ۲۰ درصد به ترتیب معادل ۹- و ۱۲+ درصد و در مقابل افزایش و کاهش زاویه ساحل به میزان ۲۰ درصد به ترتیب معادل ۲۷- و ۳۶+ درصد می‌باشد. بنابراین در صورتی که به دلیل شیب تند سواحل، اندازه‌گیری دقیق زاویه ساحل میسر نباشد و مقدار زاویه ساحل کمتر از حد واقعی تخمین زده شود، اثر این اختلاف در تعیین مقدار ضریب اطمینان قابل توجه است و نتیجه تحلیل پایداری ساحل اختلاف قابل توجهی با مقدار واقعی نشان می‌دهد اما اثر وزن مخصوص مصالح چندان قابل توجه نبوده و در صورتی که به دلیل ناممکن بودن اندازه‌گیری دقیق صحرایی مقدار وزن مخصوص مصالح تشکیل دهنده سواحل در معرض تخریب یا به دلیل استفاده از مقدار متوسط وزن مخصوص مصالح در یک بازه از رودخانه، مقدار وزن مخصوص کمتر از حد واقعی تخمین زده شود، اثر این اختلاف در تعیین مقدار ضریب اطمینان چندان قابل توجه نبوده و نتیجه تحلیل پایداری ساحل اختلاف قابل توجهی با مقدار واقعی نشان نمی‌دهد.

نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده تأثیر شدیدتر تغییر سطح آب زیرزمینی، سطح آب رودخانه، زاویه ساحل و وزن مخصوص

طبق بررسی‌های صورت گرفته، نتایج حساسیت مقادیر ضریب اطمینان متوسط پایداری ساحل در برابر لغزش نسبت به تغییرات مقدار عمق ترک کششی در سه آبراهه هوتوفیا، لانگ، و گودوین در رودخانه می‌سی‌سی‌پی نشان می‌دهد که با افزایش و کاهش عمق ترک کششی به میزان ۳۰ درصد، حداکثر حساسیت ضریب اطمینان پایداری ساحل در برابر لغزش به ترتیب معادل ۵- و ۱۵+ درصد می‌باشد (امیری تکلدانی و همکاران ۱۳۸۴)، که این میزان در رودخانه سیو در حدود ۱۵- و ۲۱+ درصد می‌باشد. بر طبق اطلاعات جدول ۲، میزان حساسیت ضریب اطمینان متوسط پایداری سواحل رودخانه سیو و آبراهه گودوین در رودخانه می‌سی‌سی‌پی در مقابل افزایش و کاهش عمق ترک کششی به میزان ۲۰ درصد به ترتیب معادل ۸- و ۹+ درصد می‌باشد. بنابراین هرگاه که به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری دقیق عمق ترک کششی، مقدار عمق ترک کششی کمتر از حد واقعی تخمین زده شود، اشکال چندان در تحلیل پایداری ساحل ایجاد نمی‌شود. زیرا اثر این اختلاف در تعیین مقدار ضریب اطمینان قابل توجه نیست. از سوی دیگر، نتایج حساسیت مقادیر ضریب اطمینان متوسط پایداری ساحل در برابر لغزش نسبت به تغییرات مقدار زاویه ساحل و وزن مخصوص مصالح در سه آبراهه مورد نظر نشان دهنده تأثیر شدیدتر تغییر زاویه ساحل و وزن مخصوص مصالح بر میزان کاهش یا افزایش ضریب اطمینان متوسط در مقابل تأثیر تغییرات عمق ترک کششی است. حداکثر حساسیت در آبراهه هوتوفیاست به طوری که با افزایش و کاهش زاویه ساحل به میزان ۲۰ درصد، مقدار ضریب اطمینان پایداری ساحل در برابر لغزش به ترتیب معادل ۲۵- و ۳۵+

می‌سی‌سی‌پی در آمریکا و نیز اطلاعات کامل‌تر از یک مقطع مشخص از آبراهه گودوین از سرشاخه‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی، به همراه داده‌های موجود از رودخانه سیو در ایتالیا، پایداری سواحل رودخانه‌ها بررسی و مقادیر اثرات پارامترهای دخیل در تحلیل پایداری سواحل بر اساس تحلیل حساسیت ضریب اطمینان پایداری ساحل در برابر گسیختگی صفحه‌ای نسبت به تغییرات پارامترهای فوق تعیین شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- مؤثرترین پارامترها در تحلیل پایداری به ترتیب اهمیت، سطح آب زیرزمینی، زاویه ساحل، سطح آب رودخانه و وزن مخصوص مصالح ساحل هستند.

- نتایج نشان‌دهنده تأثیر ناچیز عمق توسعه ترک کششی در تعیین ضریب ایمنی پایداری ساحل رودخانه است.

- با توجه به اطلاعات محدود موجود از رودخانه می‌سی‌سی‌پی، روش لوهنس- هندی (۱۹۶۸) در محاسبه هندسه بلوک گسیختگی جواب مناسب‌تری می‌دهد.

- کاربرد روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) در مقایسه با روش داربی- تورن (اصلاح شده) برای تخمین عمق ترک کششی بحرانی و گسیختگی محتمل تطابق نسبتاً بهتری با مقادیر مشاهده شده نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (ریاست جمهوری) که تامین هزینه‌های مالی این تحقیق را در قالب طرح شماره ۸۴۱۱۵/۳۰ تحت عنوان "مطالعات جامع پایداری سواحل رودخانه‌ها" برعهده داشته‌اند، قدردانی می‌گردد.

منابع

- ۱- احمدیان یزدی م.ج. ۱۳۸۰. بررسی نقش پوشش گیاهی در کنترل فرسایش کناری پیچان رود تجن- هریرود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مرتع و آبخیزداری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان.
- ۲- امیری تکلدانی ا. صمدی ا. و رحیمی ح. ۱۳۸۴. اثرات موقعیت و عمق ترک کششی در پایداری ساحل رودخانه. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۷۷(۲۵): ۷۷-۹۴.

مصالح بر میزان کاهش یا افزایش ضریب اطمینان متوسط در مقابل تأثیر تغییرات عمق ترک کششی و سایر پارامترها می‌باشد. به عبارتی میزان حساسیت ضریب اطمینان متوسط پایداری سواحل رودخانه سیو و آبراهه گودوین در رودخانه می‌سی‌سی‌پی در مقابل افزایش و کاهش سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۰ درصد به ترتیب معادل ۴۶- و ۳۶+ درصد و در مقابل افزایش و کاهش سطح آب رودخانه به میزان ۲۰ درصد به ترتیب معادل ۳۶+ و ۲۵- درصد می‌باشد. شایان ذکر است که در صورت تخمین مقادیر عمق ترک کششی، زاویه ساحل، وزن مخصوص مصالح ساحل و سطح آب زیرزمینی به میزان بیشتر از مقدار واقعی و تخمین مقادیر سطح آب رودخانه، چسبندگی و زاویه اصطکاک درونی مصالح ساحل به میزان کمتر از مقدار واقعی آنها، ضریب اطمینان پایداری در شرایط واقعی به طور یقین بیش از ضریب اطمینان محاسبه شده بر اساس مقادیر تخمینی خواهد بود و از این بابت تحلیل پایداری دچار خطای اثرگذار نخواهد بود. بر این اساس مطابق نتایج جدول ۳، در صورتی که زاویه ساحل به میزان ۲۰٪ کمتر از مقدار واقعی، سطح آب رودخانه به میزان ۲۰٪ بیشتر از مقدار واقعی و سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۰٪ کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شود، موجب افزایش ضریب اطمینان تخمین زده شده توسط مدل به میزان تقریبی ۳۶٪ می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت اثر اندازه‌گیری اشتباه این سه پارامتر در بروز عدم قطعیت در برآورد وضعیت پایداری ساحل رودخانه تقریباً یکسان می‌باشد، منتهی اثر سطح آب زیرزمینی طبق روند تغییرات آن در جدول ۳ و مشکلات موجود در اندازه‌گیری آن، نسبت به سایر پارامترها از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین با توجه به این که اندازه‌گیری زاویه ساحل تقریباً قائم از اندازه‌گیری رقوم سطح آب رودخانه دشوارتر می‌باشد، احتمال بروز خطا در مقدار زاویه ساحل بیشتر خواهد بود و لذا می‌توان اولویت پارامتر زاویه ساحل را در درجه دوم اهمیت پس از سطح آب زیرزمینی در برآورد ضریب اطمینان پایداری ساحل شمرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با کاربرد مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR) و با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از ۵۱ محل مطالعاتی در مسیر رودخانه

- 8- Rinaldi M. and Casagli N. 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressure: the Sieve River (Italy). *Geomorphology*. 26(4):253-277.
- 9- Simon A. Curini A. Darby S.E. and Langendoen E.J. 1999. Streambank mechanics and the role of bank and near-bank processes in incised channels. *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*. Darby S.E. and Simon A. Eds. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester. UK. 123-152.
- 10- Simon A. and Darby S.E. 1999. The nature and significance of incised river channels. *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*. Darby S.E. and Simon A. Eds. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester. UK. 3-18.
- 11-Taylor D.W. 1948. *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York NY.
- 12- Thorne C.R. 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. *Gravel Bed Rivers*. R.D. Hey. J. C. Bathurst. and C.R. Thorne Eds. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester. UK. 227-271.
- 13-Thorne C.R. and Abt S.R. 1993. Analysis of riverbank instability due to toe scour and lateral erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*. 18(9):835-843.
- ۳- رفاهی ح. ۱۳۷۵. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران. تهران.
- ۴- صمدی ا. ۱۳۸۳. تعیین موقعیت و عمق ترک کششی و اثرات آنها در پایداری ساحل رودخانه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی. دانشکده مهندسی آب و خاک. دانشگاه تهران. تهران.
- 1- Amiri-Tokaldany E. 2002. A model of bank erosion and equilibrium bed topography in river bends. Ph.D thesis. Dept. of Civil and Environmental Engineering. Univ. of Southampton. Southampton. UK.
- 2- Andrews E.D. 1982. Bank stability and channel width adjustment. *East Fork River Wyoming*. *Water Resour. Res.* 18(4): 1184-1192.
- 3- Darby S.E. and Thorne C.R. 1994. Prediction of tension crack location and riverbank erosion hazards along destabilized channels. *Earth Surface Processes and Landforms*. 19(3):233-245.
- 4- Darby S.E. and Thorne C.R. 1996. Development and testing of riverbank-stability analysis. *J. Hydraulic Eng.* 122(8):443-454.
- 5- Darby S.E. and Thorne C.R. 1997. Discussion of Development and testing of riverbank-stability analysis. *J. Hydraulic Eng.* 123(11):1052-1053.
- 6- Lohnes R.A. and Handy R.L. 1968. Slope angle in friable loess. *The J. of Geology*. 76(3):247-258.
- 7- Osman A.M. and Thorne C.R. 1988. Riverbank stability analysis. I: Theory. *J. Hydraulic Eng.* 114(2):134-150.