

## پیش‌بینی زاویه پایدار سواحل رودخانه‌های لایه به لایه پس از گسیختگی توده‌ای از نوع صفحه‌ای

مجید رضایی مایانی، ابراهیم امیری تکلدانی\* و محمدهادی داوودی\*\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، خیابان دانشکده، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فن‌آوری کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، تلفن: ۳۲۲۴۱۱۱۹ (۰۲۶)، پیام‌نگار: amiri@ut.ac.ir

\*\* به‌ترتیب: دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛ و دانشیار بازنشسته مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی وزارت جهاد کشاورزی

تاریخ دریافت: ۹۱/۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۱۴

### چکیده

گسیختگی توده‌ای از نوع صفحه‌ای از محتمل‌ترین انواع گسیختگی سواحل رودخانه در سطح جهان است و هر سال حجم قابل توجهی از خاک‌های حاصلخیز و تأسیسات مجاور سواحل رودخانه را تخریب می‌کند. از عوامل مهم در تحلیل پایداری این نوع گسیختگی، زاویه ساحل پس از وقوع گسیختگی است که در تعریف شکل هندسی بلوک تخریب شده نیز نقش دارد. برای برآورد مقدار زاویه ساحل پس از خرابی توده‌ای در سواحل دارای مصالح همگن روابط متعددی ارائه شده اما تا کنون رابطه‌ای برای تعیین این زاویه در رودخانه‌های دارای سواحل لایه‌لایه معرفی نشده است. در این تحقیق با احداث یک مدل فیزیکی از یک ساحل رودخانه متشکل از دو لایه خاک مختلف و ایجاد شرایط مناسب برای گسیختگی توده‌ای، زاویه لایه‌های بالایی و پایینی ساحل پس از گسیختگی اندازه‌گیری شد. با استفاده از دو سوم مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر لایه، دو رابطه برای تخمین زاویه گسیختگی لایه‌های بالا و پایین ساحل معرفی شد. برای ارزیابی و صحت‌سنجی روابط به دست آمده، از یک سوم مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده و مشخص شد که این دو رابطه دارای میانگین خطای نسبی ۱۴٪ و ۱۵٪ به ترتیب برای لایه بالا و لایه پایین است که دقت مناسب روابط ارائه شده را نشان می‌دهد. با میانگین‌گیری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی ساحل و با فرض یکنواختی آن، رابطه‌ای دیگر ارائه و نتایج آن با نتایج حاصل از برخی روابط ارائه شده توسط محققان قبلی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده دقت بهتری نسبت به روابط موجود دارد و در نتیجه می‌توان از این رابطه برای تخمین زاویه گسیختگی توده‌ای ساحل از نوع صفحه‌ای برای سواحل لایه‌لایه و یا همگن استفاده کرد.

### واژه‌های کلیدی

زاویه ساحل پس از گسیختگی، سواحل رودخانه، گسیختگی توده‌ای، گسیختگی صفحه‌ای توده‌ای، لایه‌های مرکب

### مقدمه

دره‌های سنگی، یک متر در سال در سواحل تشکیل شده از مصالح چسبنده و ۱۰۰ متر در سال در سواحل تشکیل شده از مصالح غیرچسبنده متغیر است (Simon et al., 1999). رسوبات حاصل از فرسایش سواحل در برخی مواقع درصد قابل توجهی (تا ۸۰ درصد) از مجموعه کل رسوبات انتقالی توسط جریان رودخانه را

از عمده‌ترین منابع تولید رسوبات، فرسایش سواحل رودخانه است که به دلیل اثرگذاری بر خصوصیات مجاری رودخانه‌ها، در توسعه پهنه سیلابی و مدیریت منابع آب بسیار اهمیت دارد. سرعت عریض‌شدگی آبراهه در رودخانه‌های با سواحل فرسایشی از ۰/۰۱ متر در سال در

$$\beta = \frac{\alpha + \varphi}{2} \quad (۱)$$

که در آن،

$\alpha$  = زاویه ساحل قبل از گسیختگی؛ و  $\varphi$  = زاویه اصطکاک داخلی مصالح تخریب شده در پنجه ساحل می‌باشند. عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) مدلی برای پیش‌بینی تغییرات پایداری ساحل در مقابل فرسایش جانبی و نیز کف‌کنی بستر ارائه داده‌اند. در این مدل، آنالیز پایداری شیب برای سواحل تند ( $\alpha > 60$ ) با در نظر گرفتن عمق ترک کششی معادل با عمق ترک کششی قبلی انجام شد و رابطه ۲ برای محاسبه زاویه صفحه گسیختگی در توده‌ای همگن پیشنهاد شده است:

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \tan^{-1} \left[ \left( \frac{H_1}{H'} \right)^2 (1 - K^2) \tan \alpha \right] + \varphi \right) \quad (۲)$$

که در آن،

$K$  = نسبت ارتفاع تیغه قائم (عمق ترک کششی) به ارتفاع ساحل؛  $H_1$  = ارتفاع ساحل؛ و  $H'$  = ارتفاع ساحل تا نقطه انتهای شیب ساحل است (شکل ۱). پارامترهای  $\alpha$  و  $\varphi$  در بالا تعریف شده‌اند. برای به دست آوردن این رابطه، فرض شده که صفحه گسیختگی منحصرأ از پاشنه ساحل عبور کرده، ارتفاع تیغه قائم (عمق ترک کششی) موجود با ارتفاع تیغه قائم (عمق ترک کششی) قبلی یکسان در نظر گرفته شده و اثر نیروهای هیدرواستاتیکی ناشی از سطح آب رودخانه و سطح آب زیرزمینی مورد نظر قرار نگرفته است.

داربی و تورن (Darby & Thorne, 1996) مدلی برای پیش‌بینی پایداری سواحل فرسایشی رودخانه ارائه کردند که برای سواحل تشکیل‌شده از مصالح چسبنده و برای سطوح گسیختگی صفحه‌ای قابل کاربرد است. این محققان از روشی مشابه با روش عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) برای محاسبه زاویه

شامل می‌شوند (Samadi et al., 2008). فرسایش سواحل همچنین موجب ایجاد خسارت‌های فراوان به اراضی و تاسیسات مجاور ساحل و همچنین سازه‌های پایین‌دست از قبیل سدهای مخزنی، سدهای انحرافی، شبکه‌های آبیاری، حمل و نقل آبی و ... می‌شود. این پدیده در بسیاری از کشورهای جهان معضل شمرده می‌شود اما کشورها متناسب با برنامه‌های توسعه داخلی خود و نقش آن در اقتصاد و محیط زیست، ساز و کارهای مختلفی برای مقابله یا کنترل این نوع فرسایش در نظر گرفته‌اند.

مشاهدات صحرایی در اکثر رودخانه‌های جهان مؤید این نکته است که عمده‌ترین عامل فرسایش و عقب‌نشینی سواحل، فرسایش‌های توده‌ای ناشی از گسیختگی‌های صفحه‌ای و گسیختگی طاقی‌شکل است (Darby & Thorne, 1996). در مطالعات مربوط به پایداری سواحل رودخانه، زاویه ساحل پس از گسیختگی ( $\beta$ )، از جمله پارامترهای مهم و کلیدی در تعریف شکل هندسی ساحل تخریب‌یافته و محاسبه ضریب ایمنی دیواره در مقابل لغزش به شمار می‌رود. همچنین، حجم گوه گسیخته شده ناشی از شکست صفحه‌ای دیواره، مستقیماً با استفاده از زاویه ( $\beta$ ) محاسبه می‌شود.

اولین بار تیلور (Taylor, 1948) گزارش کرد که در توده‌ای یکنواخت، گسیختگی در صفحه‌ای اتفاق می‌افتد که چسبندگی بسیج شده در آن حداکثر باشد. لوهنس و هندی (Lohnes & Handy, 1968) با استفاده از تئوری فوق و در نظر گرفتن شکل هندسی ساده‌ای از ساحل رودخانه، رابطه ۱ را برای تعیین زاویه صفحه گسیختگی ارائه و خاطر نشان کردند که نتایج حاصل از آن تقریبی است زیرا شکل توزیع تنش به محض آغاز ترک کششی و توسعه آن تغییر می‌کند.

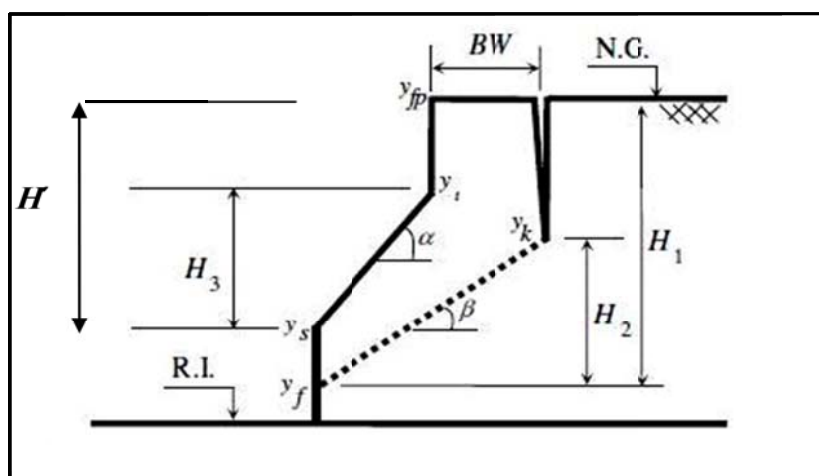
امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) علاوه بر توسعه مدل قبلی داریبی و تورن (Darby & Thorne, 1996)، با توجه به شکل ۱ و با در نظر گرفتن ارتفاع تیغه قائم (عمق ترک کششی) موجود معادل با ارتفاع تیغه قائم (عمق ترک کششی) قبلی ( $K=K_h$ )، رابطه ۳ را برای محاسبه زاویه صفحه گسیختگی در ساحل برای یک مقدار مشخص عقب‌نشینی ساحل ( $BW$ ) پیشنهاد کرده است:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{H_2}{BW + H_3 / \tan \alpha} \right) \quad (3)$$

مقدار پارامترهای  $H_1$ ،  $H_2$ ، و  $H_3$  با استفاده از شکل ۱ قابل تعیین است.

گسیختگی ساحل استفاده کردند اما در این روش نیروهای فشار بالا برنده و محصورکننده هیدرواستاتیک نیز در محاسبات وارد شده‌اند.

با توجه به وابستگی نیروی زیرفشار به مقدار زاویه گسیختگی ساحل و همچنین وجود روابط مختلف برای محاسبه نیروی زیرفشار در حالت‌های مختلف قرارگیری سطح آب زیرزمینی و جریان در رودخانه، و بالاخره شکل هندسی ساحل، محاسبه مشتق اول چسبندگی با پیچیدگی روبه‌رو می‌شود. در نتیجه نمی‌توان فرمول مشخصی برای محاسبه زاویه گسیختگی مطابق روش عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) به دست آورد و ناگزیر برای محاسبه زاویه صفحه گسیختگی از روش تکراری نیوتن-رافسون استفاده می‌شود.



شکل ۱- معرفی پارامترهای به کار رفته در محاسبه زاویه گسیختگی با استفاده از روش امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002)

ضروری به نظر می‌رسد به ویژه آن‌که پیش‌بینی می‌شود برای هر لایه، زاویه گسیختگی متفاوتی وجود داشته باشد. در این تحقیق زاویه گسیختگی در سواحل رودخانه‌های دارای لایه‌های مرکب، به صورت آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد تا با استفاده از پارامترهای مؤثر بر گسیختگی و پایداری سواحل رودخانه، مناسب‌ترین رابطه‌ای ارائه شود

از آن‌جا که در همه روابط ارائه شده توسط محققان، سواحل رودخانه همگن فرض شده و تنها یک زاویه گسیختگی برای آن در نظر گرفته شده است، لذا به دست آوردن رابطه‌ای جهت تخمین زاویه پایدار سواحل رودخانه با لایه‌های مرکب، که در آن‌ها تغییر ناگهانی و محسوس مشخصات فنی مواد تشکیل‌دهنده ساحل مشاهده می‌شود،

شد. سطح ایستابی داخل مخزن جلو در این آزمایش‌ها به عنوان معرف سطح آب رودخانه است. تا عمق ۱۰ سانتی‌متری از کف مخزن با مصالح درشت دانه، پر شد. ساحل مورد نظر در داخل جعبه و در مجاورت دیوار مخزن عقب ساخته شد.

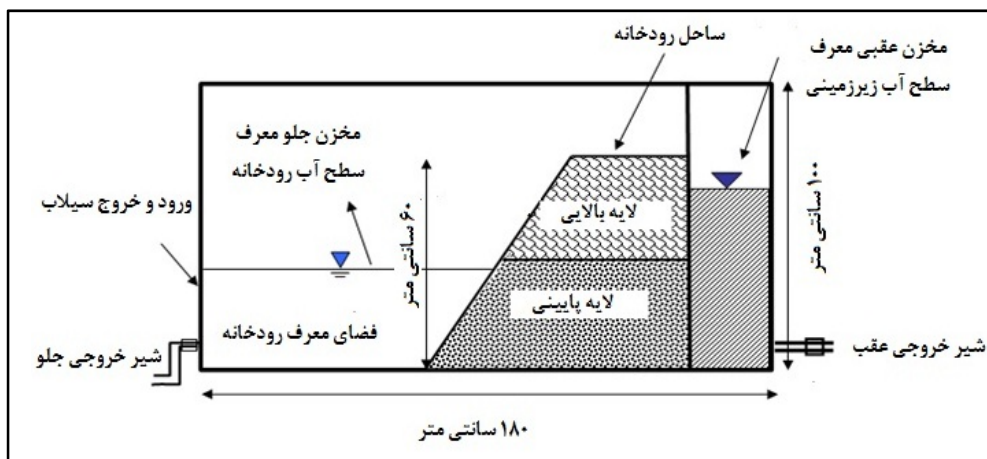
برای آزمون‌های شبیه‌سازی گسیختگی سواحل رودخانه با لایه‌های مرکب، در مدل‌های فیزیکی ساخته شده، از پنج نوع مصالح با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد. در مجموع ۱۲ ساحل دو لایه ساخته و آزمایش شد. ارتفاع تمام سواحل دو لایه احداثی ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع هر لایه نیز ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر لایه با چکش فلزی در سه مرحله کوبیده می‌شد تا به تراکم مورد نظر برسد. برای این منظور وزن مصالح هر لایه بر اساس دانسیته مورد نظر محاسبه و به سه قسمت مساوی تقسیم می‌شد. آنگاه هر قسمت در داخل جعبه ریخته شده و پخش می‌شد و سپس آن‌قدر کوبیده می‌شد تا ضخامت آن به ۱۰ سانتی‌متر برسد. این روش موجب می‌شد که لایه‌ها در سراسر ضخامت خود تراکم یکنواختی داشته باشند.

که در محاسبه زاویه گسیختگی خطای نسبی کمتری داشته باشد.

## مواد و روش‌ها

### الف- طراحی مدل فیزیکی

برای تهیه مدل فیزیکی، مطابق شکل ۲ از تجهیزات موجود در آزمایشگاه مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی استفاده شده است. از آن‌جا که جریان آب در رودخانه عمود بر صفحه پایداری است، نیروی ناشی از تنش‌های برشی وارده بر مصالح ساحل، نقش مؤثری در فرآیند گسیختگی توده‌ای ساحل ندارد و در نتیجه فاکتور جریان در مدل حذف شد. مدل در یک جعبه به ابعاد  $60 \times 180$  سانتی‌متر و به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر، با دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شد. به منظور ایجاد تغییرات سطح آب زیرزمینی در ساحل رودخانه، یک صفحه متخلخل در انتهای جعبه نصب شده و سطح آب داخل جعبه نیز از طریق ورود جریان به کمک یک شیر آب قابل تنظیم بود. یک شیر ورودی و خروجی آب در انتهای دیگر جعبه جهت کنترل سطح ایستابی داخل مخزن جلو تعبیه



شکل ۲- نیمرخ مدل فیزیکی احداث شده در آزمایشگاه

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده برای احداث ساحل در مدل فیزیکی

شماره مصالح	D <sub>50</sub> (میلی‌متر)	کلاس خاک	γ <sub>min</sub> (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	γ <sub>max</sub> (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	G <sub>s</sub>	γ <sub>d</sub> (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	D <sub>r</sub> (درصد)	φ' (درجه)	C' (نیوتن بر مترمربع)
۱	۰/۱۳	SP-SM	۱/۳۱	۱/۷۹	۲/۶۴	۱/۳۴	۸/۴	۲۱/۵۵	۳۲۵۰
۲	۰/۵۲	SP	۱/۱۴	۱/۳۸	۲/۶۲	۱/۲	۳۰/۵۱	۳۲/۷	۲۱۰۰
۳	۱	SP	۱/۲۹	۱/۵۲	۲/۶۳	۱/۴	۵۱/۹	۳۶/۲	۳۹۰۰
۴	۴/۷	SP	۱/۳۳	۱/۵۳	۲/۶۵	۱/۳۶	۱۶/۹	۴۰	۴۷۰
۵	۴/۷+C	SP-SC	۱/۳۳	۱/۵۳	۲/۶۵	۱/۳۶	۱۶/۹	۳۶/۳۵	۸۹۰۰

گسیختگی محاسبه شده ساحل مورد نظر هستند (Taghavi et al., 2010).

### ج- ارائه رابطه تجربی برای تخمین زاویه گسیختگی سواحل رودخانه

تشابه پدیده‌های فیزیکی مبتنی بر تساوی کمیت‌های بی‌بعد در شرایط آزمایشگاهی و محیط واقعی خواهد بود. به عبارت دیگر لازم است قبل از بررسی عملکرد هر پدیده در مدل فیزیکی و شرایط واقعی، کمیت‌های ابعادی حاکم بر پدیده را به صورت کمیت‌های بی‌بعد تعریف و با استفاده از برابری این کمیت‌های بی‌بعد، برقراری تشابه بین مدل فیزیکی و شرایط واقعی بررسی گردد. برای تبدیل رابطه‌ای متشکل از متغیرها به رابطه‌ای متشکل از پارامترهای بی‌بعد می‌توان از تئوری باکینگهام<sup>۱</sup> استفاده کرد. مطابق این تئوری، چنانچه در پدیده‌ای هیدرولیکی تعداد n متغیر دارای m بعد دخیل باشند در آن صورت می‌توان تعداد n-m پارامتر بی‌بعد را به وجود آورد. از این رو، با توجه به این که در پدیده گسیختگی سواحل مدل شده در آزمایشگاه، متغیرهای مختلفی نقش داشتند، رابطه کلی شامل کلیه متغیرها، به شکل رابطه ۵ است:

$$f(\tan \beta_i, \gamma_{si}, C'_i, \tan \phi'_i, H_i, H_{wi}, H_{ui}, \tan \alpha) = 0.0 \quad (5)$$

در جدول ۱، D<sub>50</sub> = اندازه‌ای است که قطر ۵۰ درصد ذرات مساوی و یا کوچک‌تر از آن باشد، γ<sub>max</sub> و γ<sub>min</sub>، به ترتیب وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر مصالح، G<sub>s</sub> = چگالی مصالح، γ<sub>d</sub> = وزن مخصوص خشک مورد استفاده در ساحل، D<sub>r</sub> = تراکم نسبی خاک و φ' و C'، به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی مؤثر و چسبندگی مؤثر مصالح به کار گرفته شده در ساخت ساحل هستند. برای ساخت مصالح شماره ۵، از مصالح شماره ۴ با مقداری رس (C) جهت ایجاد چسبندگی استفاده شد.

### ب- نحوه ارزیابی دقت روش‌ها

برای ارزیابی دقت روابط مختلف در محاسبه زاویه پایداری نسبت به زاویه‌های گسیختگی مشاهده شده در آزمایشگاه، از روش میانگین خطای نسبی<sup>۱</sup> MRE استفاده می‌شود که به صورت رابطه ۴ است.

$$MRE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{Observed_{(i)} - Predicted_{(i)}}{Observed_{(i)}} \right| \quad (4)$$

که در آن،

n = تعداد زاویه مشاهده شده؛ Observed(i) = زاویه گسیختگی مشاهده شده؛ و Predicted(i) = زاویه

از:  $\frac{C'_i}{\gamma_{si} H_i}$  و  $\frac{H_{ui}}{H_{wi}}$

بعضی از پارامترهای بی‌بعد را می‌توان در هم ادغام کرد تا پارامتر بی‌بعد جدیدی حاصل شود (Shafai-Bajestan, 2010). از این رو با ادغام برخی از پارامترهای بالا، رابطه ۶ حاصل شد:

$$\tan \beta_i = k \left( \left( \frac{C'_i}{\gamma_{si} H_i} \right)^{a_1} \times (\tan \alpha)^{a_2} \times (\tan \phi'_i)^{a_3} + \left( \frac{H_{ui}}{H_{wi}} \right)^{a_4} \right) \quad (6)$$

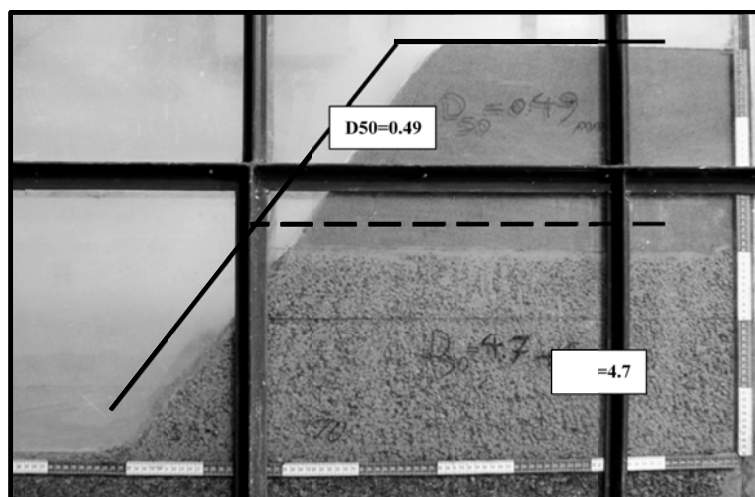
### نتایج و بحث

#### الف - نتایج مدل فیزیکی

پس از احداث ساحل (شکل ۳)، برای ایجاد شرایط گسیختگی ابتدا سطح آب داخل مخزن عقب به عنوان سطح آب زیرزمینی در ارتفاع مطلوب تنظیم گردید. پس از آن آب از طریق شیر کنترل به آرامی با دبی ثابت وارد مخزن جلو شد و سطح آب در آن با روندی یکنواخت افزایش یافت تا به حد معینی برسد.

مطابق رابطه ۵، زاویه گسیختگی لایه‌های بالایی ( $\beta_1$ ) و پایینی ( $\beta_2$ ) برای سواحل مدل شده در آزمایشگاه، متأثر از فاکتورهای زیر در نظر گرفته شد: سطح آب رودخانه ( $H_{wi}$ ) بر حسب متر از کف رودخانه، سطح آب زیرزمینی ( $H_{ui}$ ) بر حسب متر از کف رودخانه، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi'_i$ ) بر حسب درجه، چسبندگی ( $C'_i$ ) بر حسب نیوتن بر متر مربع، وزن مخصوص مصالح تشکیل‌دهنده لایه مورد نظر ( $\gamma_{si}$ ) بر حسب نیوتن بر متر مکعب، زاویه اولیه ساحل ( $\alpha$ ) بر حسب درجه و ارتفاع لایه مورد نظر ( $H_i$ ) بر حسب متر.

با توجه به این‌که در این پدیده ۸ متغیر و ۳ بعد (سه بعد اصلی L, M و T) وجود دارد، در نتیجه ۵ پارامتر بی‌بعد می‌توان استخراج کرد. از طرفی، متغیرهای  $\tan \beta_i$ ,  $\tan \phi'_i$ ,  $\tan \alpha$  خود متغیرهای بی‌بعد هستند و تنها دو متغیر بی‌بعد دیگر باید استخراج شود که عبارتند

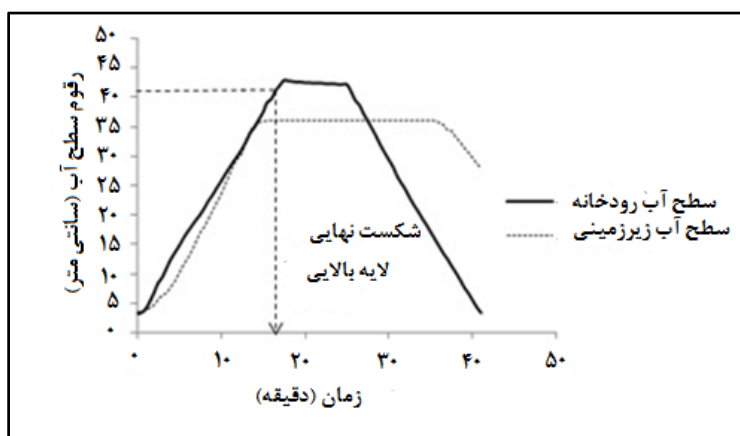


شکل ۳- نمونه‌ای از ساحل احداث شده

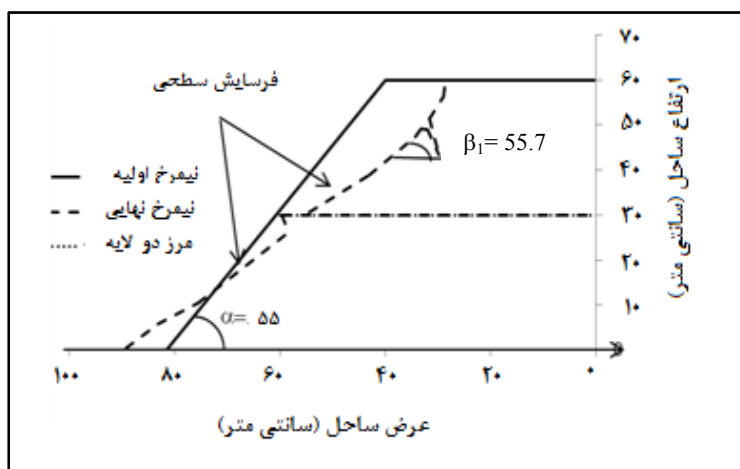
(این ساحل از مصالح شماره ۲ در لایه بالایی و مصالح شماره ۵ در لایه پایینی با زاویه اولیه ۵۵ درجه (کد آزمایش ۲-۵۵) تشکیل شده است)

۵ سانتی‌متری لبه فوقانی ساحل تکرار می‌شود. در هر مرحله، پس از وقوع شکست، آزمایش قطع و زاویه سطح لغزش لایه پایینی ( $\beta_1$ )، زاویه سطح لغزش لایه پایینی ( $\beta_2$ ) و پروفیل ساحل پس از شکست برداشت می‌شود. این فرآیند برای کلیه آزمایش‌های در نظر گرفته شده تکرار شده است. برای نمونه، در شکل ۴ هیدروگراف سیلاب و در شکل ۵ نیمرخ‌های اولیه (قبل از گسیختگی) و نهایی (پس از گسیختگی) مقطع رودخانه برای یکی از آزمایش‌ها (کد ۲-۵-۵۵) ارائه شده است.

صعود تدریجی آب و سپس نزول آن نشانگر الگوی هیدروگراف سیلاب عبوری از مقطع است. پس از بالارفتن سطح آب تا رقوم معین، شیر خروجی جلو باز می‌شود تا آب مخزن جلو با دبی تدریجی ثابتی خارج شود. طی زمان خروج آب، رفتار خاکریز ساحل بررسی می‌شود تا در صورت وقوع گسیختگی یا بروز ترک در آن، آزمایش پایان گیرد و داده‌های لازم برداشت شود. در صورت عدم وقوع شکست، سطح آب در داخل مخزن جلو را مجدداً از طریق شیر کنترل به ارتفاع بالاتری رسانده و مراحل فوق تا



شکل ۴- هیدروگراف سطح آب رودخانه و آب زیرزمینی و لحظه شکست در لایه‌های بالایی و پایینی آزمایش کد ۲-۵-۵۵



شکل ۵- نیمرخ‌های اولیه و نهایی ساحل در آزمایش کد ۲-۵-۵۵

در نتیجه رابطه ۸ نیز برای تخمین زاویه پایدار لایه پایینی سواحل چندلایه به دست آمد:

$$\tan \beta_2 = 0.517 \left( \left( \frac{C_2}{\gamma_{s2} H_2} \right)^{-0.012} \times (\tan \alpha)^{1.512} \times (\tan \phi_2')^{0.102} + \left( \frac{H_{w2}}{H_w} \right)^{-0.083} \right) \quad (8)$$

با متوسط‌گیری از مقادیر زاویه گسیختگی لایه‌های بالایی و پایینی (مشابه این که ساحل همگن و یک‌لایه فرض شده است) در دو سوم از آزمایش‌های انجام شده، مشابه روابط ۷ و ۸ مقادیر مجهول با ضریب همبستگی ۰/۹۹ ( $R^2 = 0.99$ ) برای محاسبه زاویه پایدار سواحل همگن به صورت زیر به دست آمدند:

$$k = 0.515, \quad a_1 = 0.01, \quad a_2 = 1.47, \\ a_3 = -0.017, \quad a_4 = -0.059$$

در این حالت نیز رابطه ۶ برای تخمین زاویه گسیختگی سواحل همگن به صورت رابطه ۹ به دست آمد:

$$\tan \beta = 0.515 \left( \left( \frac{C'}{\gamma_s H} \right)^{0.01} \times (\tan \alpha)^{1.47} \times (\tan \phi')^{-0.017} + \left( \frac{H_w}{H_w} \right)^{-0.059} \right) \quad (9)$$

به منظور اعتبارسنجی روابط ۷، ۸ و ۹ از مقادیر اندازه‌گیری شده در یک سوم باقیمانده از آزمایش‌ها استفاده شد و نتایج حاصل به شرح زیر است.

#### ب-۱- صحت‌سنجی روابط ۷ الی ۹

همان‌طور که گفته شد، روابط ۷، ۸ و ۹ با استفاده از دو سوم مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها و برای تخمین زاویه گسیختگی لایه‌های بالایی و پایینی ساحل و نیز متوسط‌گیری از زاویه گسیختگی لایه‌ها با ضریب همبستگی ۰/۹۹ به دست آمده‌اند. برای صحت‌سنجی این روابط، از مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به یک سوم باقیمانده آزمایش‌ها استفاده شد.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در این آزمایش ابتدا فرسایش سطحی از ارتفاع حدود ۱۷ سانتی‌متری نسبت به کف به وقوع پیوست و پس از گذشت حدود ۱۷ دقیقه از شروع آزمایش، گسیختگی توده‌ای با زاویه گسیختگی  $\beta_1 = 55/7^\circ$  در لایه بالایی اتفاق افتاد. یادآوری می‌شود که به دلیل محدودیت صفحات مقاله، امکان ارائه هیدروگراف و نیز نیمرخ‌های مشابه شکل‌های ۴ و ۵ برای کلیه آزمایش‌ها مقدور نیست. برای مشاهده این نتایج و یا اخذ اطلاعات بیشتر، علاقه‌مندان می‌توانند به تحقیق رضایی‌مایانی (Rezaie-Mayani, 2011) مراجعه کنند.

#### ب- نتایج رابطه تحلیلی

به منظور به دست آوردن رابطه‌ای تجربی برای تعیین زاویه ساحل لایه بالایی پس از گسیختگی توده‌ای، با توجه به رابطه ۶ و بر اساس مقادیر به دست آمده برای زاویه فوق در دو سوم آزمایش‌های انجام شده، با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی چند متغیره، ضریب  $k$  و توان‌های مجهول در رابطه ۶ به شرح زیر محاسبه شدند:

$$k = 0.618, \quad a_1 = 0.031, \quad a_2 = 1.159, \\ a_3 = -0.095, \quad a_4 = 0.109$$

در نتیجه رابطه ۷ برای تخمین زاویه پایدار لایه بالایی سواحل چند لایه به دست آمد:

$$\tan \beta_1 = 0.618 \left( \left( \frac{C'_1}{\gamma_{s1} H_1} \right)^{0.031} \times (\tan \alpha)^{1.159} \times (\tan \phi_1')^{-0.095} + \left( \frac{H_{w1}}{H_w} \right)^{0.109} \right) \quad (7)$$

مطابق بالا و برای لایه پایینی نیز ضریب  $k$  و توان‌های مجهول  $a_1, a_2, a_3, a_4$  با ضریب همبستگی ۰/۹۹ ( $R^2 = 0.99$ ) به شرح زیر تعیین شدند:

$$k = 0.517, \quad a_1 = -0.012, \quad a_2 = 1.512, \\ a_3 = 0.102, \quad a_4 = -0.083$$



پیش‌بینی زاویه پایدار سواحل رودخانه‌های...

در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ ضمن ارائه مشخصات هر کدام از لایه‌های ساحل، مقادیر زاویه محاسبه شده با استفاده از روابط فوق و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. در ستون آخر نیز مقدار خطای حاصل از کاربرد آن روابط نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده ارائه شده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج رابطه ۷ با مشاهدات آزمایشگاهی در لایه بالایی سواحل احداث شده در آزمایشگاه

کد آزمایش	$\gamma_{s1}$ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	$\phi'_1$ (درجه)	$C'_1$ (نیوتن بر متر مربع)	مشخصات آزمایشگاهی لایه بالایی		زاویه ساحل (درجه) $\alpha$	زاویه مشاهده شده (درجه) $\beta_1$	رابطه تجربی ۷ $\beta_1$	میانگین خطای نسبی لایه بالایی
				$Hu_1$ (متر)	$Hw_1$ (متر)				
۷۰-۳-۵	۱/۳۳	۳۶/۳۵	۸۹۰۰	۰/۱۸	۰/۰۷	۷۰	۵۰	۶۹/۴	۰/۳۹
۵۵-۵-۳	۱/۳۷	۳۶/۲	۳۹۰۰	۰/۴۴	۰/۴۳	۵۵	۶۶	۵۷/۶	۰/۱۳
۷۰-۵-۳	۱/۳۷	۳۶/۲	۳۹۰۰	۰/۲۴	۰/۱۸	۷۰	۷۰/۳	۶۹/۳	۰/۰۱۴
۵۵-۵-۲	۱/۱۸	۳۲/۷	۲۱۰۰	۰/۴۱	۰/۳۵	۵۵	۵۵/۵	۵۷/۴۴	۰/۰۳۵
									میانگین خطای نسبی
									۰/۱۴

جدول ۳- مقایسه نتایج رابطه ۸ با مشاهدات آزمایشگاهی در لایه پایینی سواحل آزمایشگاهی

کد آزمایش	$\gamma_{s2}$ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	$\phi'_1$ (درجه)	$C'_2$ (نیوتن بر متر مربع)	مشخصات آزمایشگاهی لایه پایینی		زاویه ساحل (درجه) $\alpha$	زاویه مشاهده شده (درجه) $\beta_2$	رابطه تجربی ۸ $\beta_2$	میانگین خطای نسبی لایه پایینی
				$Hu_2$ (متر)	$Hw_2$ (متر)				
۷۰-۳-۵	۱/۳۷	۳۶/۲	۳۹۰۰	۰/۱۲	۰/۰۵۵	۷۰	۷۰	۷۰/۷۴	۰/۰۱
۵۵-۵-۳	۱/۳۳	۳۶/۳۵	۸۹۰۰	۰/۳	۰/۲۹	۵۵	۵۵	۵۳/۹	۰/۰۲
۷۰-۵-۳	۱/۳۳	۳۶/۳۵	۸۹۰۰	۰/۱۴	۰/۰۴	۷۰	۷۰	۷۰/۷۴	۰/۰۱
۵۵-۵-۲	۱/۳۳	۳۶/۳۵	۸۹۰۰	۰/۳	۰/۲۹	۵۵	۵۵	۵۳/۹	۰/۰۲
									میانگین خطای نسبی
									۰/۰۱۵

جدول ۴- مقایسه نتایج رابطه ۹ با مشاهدات آزمایشگاهی با فرض همگن بودن سواحل مدل شده

شماره آزمایش	$\gamma_s$ (گرم بر سانتی متر مکعب)	$\phi'$ (درجه)	$C'$ (نیوتن بر متر مربع)	مشخصات آزمایشگاهی لایه پایینی		زاویه ساحل (درجه) $\alpha$	زاویه مشاهده شده (درجه) $\beta$	رابطه تجربی ۹ $\beta$	میانگین خطای نسبی
				$H_u$ (متر)	$H_w$ (متر)				
۷۰-۳-۵	۱/۳۵	۳۶/۲۷۵	۶۴۰۰	۰/۱۸	۰/۰۷	۷۰	۶۰	۷۰/۵	۰/۱۷۵
۵۵-۵-۳	۱/۳۵	۳۶/۲۷۵	۶۴۰۰	۰/۴۴	۰/۴۳	۵۵	۶۰/۵	۵۴/۲	۰/۱۰۴
۷۰-۵-۳	۱/۳۵	۳۶/۲۷۵	۶۴۰۰	۰/۲۴	۰/۱۸	۷۰	۷۰/۱۵	۷۰/۴	۰/۰۰۳
۵۵-۵-۲	۱/۲۶	۳۴/۵۲۵	۵۵۰۰	۰/۴۱	۰/۳۵	۵۵	۵۵/۲۵	۵۴/۳	۰/۰۱۷
									میانگین خطای نسبی
									۰/۰۷۵

(Darby & Thorne, 1996) و امیری تکلستانی (Amiri-Tokaldany, 2002) ارائه داده‌اند، فقط برای سواحل یک لایه هستند و تاکنون رابطه‌ای برای محاسبه زاویه ساحل پس از گسیختگی توده‌ای در سواحل لایه‌لایه ارائه نشده است. در نتیجه، به منظور بررسی دقت این روابط با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، ابتدا میانگین مشخصه‌های لایه‌های مختلف ساحل تعیین و برای برآورد زاویه گسیختگی از روابط محققان گفته شده استفاده شد. در جدول ۶ نتایج حاصل از کاربرد روابط موجود برای برآورد زاویه گسیختگی در مقایسه با میانگین مقادیر زاویه ساحل مشاهده شده در آزمایشگاه همراه با نتایج حاصل از کاربرد رابطه ۹ ارائه شده است. به منظور تعیین دقت این روابط، مقادیر میانگین خطای نسبی آن‌ها نسبت به مقادیر آزمایشگاهی مشاهده شده در جدول ۶ نشان داده شده است. مقایسه میانگین خطای نسبی محاسبه شده روابط موجود و رابطه ۹ بیانگر این است که رابطه ۹ نسبت به روابط موجود دقت بیشتری دارد.

لازم به ذکر است که رابطه ۹ مشابه روابط ۷ و ۸ با استفاده از دو سوم مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه گسیختگی، ولی با فرض همگن بودن سواحل مدل شده به دست آمده است (خواص مکانیکی مصالح موجود در لایه‌های بالایی و پایینی سواحل مدل شده به صورت میانگین و در نتیجه ساحل به صورت تک‌لایه در نظر گرفته شده است). در جدول‌های فوق مشاهده می‌شود که میانگین خطای نسبی به دست آمده برای کلیه روابط نسبتاً اندک است که این امر دقت قابل قبول روابط ارائه شده را نشان می‌دهد.

### ج- مقایسه نتایج رابطه تجربی ۹ برای سواحل همگن نسبت به روابط تئوریک موجود

قبلاً گفته شد که کلیه روابط ارائه شده برای تعیین زاویه ساحل پس از گسیختگی توده‌ای، از جمله روابطی که لوهنس و هندی (Lohnes & Handy, 1968)، عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988)، داربی و تورن

جدول ۶- مقایسه نتایج رابطه ۹ و نتایج روابط تئوریک موجود برای محاسبه زاویه پایدار (درجه) سواحل همگن مدل شده در آزمایشگاه

کد آزمایش	میانگین وزنی زاویه مشاهده شده	رابطه تجربی اخیر، رابطه ۹	روش لوهنس و هندی (۱۹۶۸)	روش عثمان و تورن (۱۹۸۸)	روش داربی و تورن (۱۹۹۶)	روش امیری تکلدانی (۲۰۰۲)
	$\bar{\beta}$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$	$\beta$
۷۰-۳-۵	۶۰	۷۰/۵	۵۳/۱	۵۳/۱	۵۳/۷	۵۵/۲۵
۵۵-۵-۳	۶۰/۵	۵۴/۲	۴۵/۶	۴۵/۶	۴۶/۲	۴۱/۱
۷۰-۵-۳	۷۰/۱۵	۷۰/۴	۵۳/۱	۵۳/۱	۵۴	۵۴
۵۵-۵-۲	۵۵/۲۵	۵۴/۳	۴۴/۸	۴۴/۸	۴۷/۷	۴۰/۸
	میانگین خطای نسبی	۰/۰۷۵	۰/۱۹۸	۰/۱۹۸	۰/۱۷۷	۰/۲۲

۲- در صورت فقدان مقدار سطح آب رودخانه و سطح آب زیرزمینی، روابط ۸ و ۹ جواب ندارند زیرا توان متغیر بی‌بعد  $\frac{H_{ui}}{H_{wi}}$ ، در این روابط منفی است و در این صورت مبهم می‌شوند ( $H_{ui}, H_{wi} \neq 0.0$ ). البته در رابطه ۷ در صورت فقدان رقوم سطح آب زیرزمینی چنین مشکلی پیش نمی‌آید.

۳- در نظر نگرفتن عمق ترک کششی در محاسبات.

۴- اگرچه کلیه مصالح ارائه شده مقداری چسبندگی دارند و در روابط به دست آمده نیز پارامتر چسبندگی به چشم می‌خورد اما در شرایط وجود مصالح با چسبندگی زیاد، استفاده از روابط فوق مناسب نیست و با توجه به احتمال وقوع گسیختگی دایروی در این نوع سواحل، لازم است برای تحلیل پایداری از روش‌های دیگر نظیر روش دوایر سوئدی استفاده شود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با احداث یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه، نتایج مشاهده شده ثبت و با استفاده از تحلیل ابعادی، روابطی برای تخمین زاویه پایدار ساحل پس از وقوع گسیختگی توده‌ای از نوع صفحه‌ای، برای لایه‌های

روابط تجربی ۷، ۸ و ۹ با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر گسیختگی سواحل در مدل فیزیکی به دست آمده است، پارامترهایی مانند: چسبندگی مصالح، زاویه اولیه ساحل، وزن مخصوص مصالح تشکیل‌دهنده لایه‌های ساحل، زاویه اصطکاک داخلی مصالح و سطح آب رودخانه و آب زیرزمینی. انتخاب پارامترهای فوق بر مبنای نتایج حاصل از تحقیقات امیری تکلدانی و همکاران (Amiri-Tokaldany et al., 2006) به منظور ارزیابی ضریب اطمینان پایداری سواحل رودخانه می‌سی‌سی‌پی آمریکا است که در آن پارامترهای فوق مؤثرترین پارامترها در تحلیل پایداری ساحل معرفی شده‌اند.

### محدودیت‌های روابط ارائه شده

روابط تجربی ارائه شده در این تحقیق نیز مانند روابط دیگر محدودیت‌هایی دارد. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:  
 ۱- اگر مصالح ساحل غیرچسبنده باشد ( $C_i' = 0.0$ )، رابطه ۸ مبهم می‌شود. در نتیجه، کاربرد این رابطه برای مصالح غیرچسبنده مناسب نخواهد بود. با این همه، به نظر می‌رسد این حالت عادی باشد زیرا در شرایط وجود مصالح غیرچسبنده در لایه پایینی، فرسایش مورد انتظار از نوع طاقی شکل خواهد بود.

تورن (Darby & Thorne, 1996) و امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) مقایسه شدند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده برای تخمین زاویه پایدار پس از خرابی در ساحل تک‌لایه در این تحقیق، در مقایسه با روابط ارائه شده قبلی، نتایجی دقیق‌تر به دست می‌دهد و در نتیجه می‌توان از این رابطه هم برای سواحل رودخانه‌های لایه‌لایه و هم همگن استفاده کرد.

### قردانی

از مسئولان مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی وزارت جهاد کشاورزی که امکانات آزمایشگاهی لازم را برای اجرای این تحقیق فراهم آوردند سپاسگزاری می‌شود.

بالایی و زیرین ارائه شدند. میانگین خطای نسبی روابط ارائه شده برای تخمین زاویه گسیختگی لایه‌های بالایی و پایینی به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۵ به دست آمد. با متوسط‌گیری از مقادیر زاویه گسیختگی لایه‌های بالایی و پایینی، با فرض این‌که فقط یک لایه همگن وجود داشته باشد، رابطه دیگری ارائه شد.

به منظور مقایسه دقت رابطه ارائه شده برای لایه همگن، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده، نتایج حاصل از این رابطه با نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط محققان قبلی از جمله لوهنس و هندی (Lohnes & Handy, 1968)، عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988)، داری و

### مراجع

- Amiri-Tokaldany, E. 2002. A model of bank erosion and equilibrium bed topography in river bends. Ph. D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Southampton. Southampton. UK.
- Amiri-Tokaldany, E., Samadi, A. and Rahimi, H. 2006. The effects of the location and depth of tension cracks in stability analysis of riverbanks. J. Agric. Eng. Res. 25, 77-94. (in Farsi)
- Darby, S. E. and Thorne, C. R. 1996. Development and testing of riverbank stability analysis. J. Hydraul. Eng. 122(8): 443-454.
- Lohnes, R. A. and Handy, R. L. 1968. Slope angle in friable loess. J. Geology. 76(3): 247-258.
- Osman, A. M. and Thorne, C. R. 1988. Riverbank stability analysis. I: Theory. J. Hydraul. Eng. 114(2): 134-150.
- Rezaie-Mayani, M. 2011. Laboratory investigations to determine the stable angle of multi-layer riverbanks after mass failure and comparing provided relationships with laboratory observations. M. Sc. Thesis. Department of Irrigation and Reclamation Engineering. University of Tehran. Tehran. Iran. (in Farsi)
- Samadi, A., Amiri-Tokaldany, E. and Rahimi, H. 2008. Sensitivity evaluation of factor of safety against failure plain of riverbanks in respond to changes in the magnitude of the effective parameters in stability analysis of riverbanks. Iranian Water. Res. J. 1(1): 25-34 (in Farsi)
- Shafai-Bajestan, M. 2010. Basic Concepts and Applications of Physical-Hydraulic Modeling. Shahid Chamran University Press. Ahvaz. Iran. (in Farsi)
- Simon, A., Curini, A., Darby, S. E. and Langendoen, E. J. 1999. Stream Bank Mechanics and The Role of Bank and Near-Bank Processes in Incised Channels. In: Darby, S. E. and Simon, A. (Eds.) Incised

پیش‌بینی زاویه پایدار سواحل رودخانه‌های...

River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management. John Wiley and Sons Ltd. Chichester. U.K.

Taghavi, M., Davoudi, M. H., Amiri-Tokaldany, E. and Darby, S. E. 2010. An analytical method to estimate failure plane angle and tension crack depth for use in riverbank stability analysis. *Geomorphology*. 123, 74-83.

Taylor, D. W. 1948. *Fundamental of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York.

## **Predicting Stable Bank Angle of Multi-Layered River Banks after Planar Mass Failure**

**M. Rezaie-Mayani, E. Amiri-Tokaldany\* and M. H. Davoudi**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: amiri@ut.ac.ir

Received: 13 April 2012, Accepted: 4 May 2013

Planar failure is one of the most common types of riverbank destruction worldwide. Annually, it destroys much fertile soil and leads to the collapse of nearby infrastructure. The angle of riverbanks after failure plays an important role in defining the geometry of a failed block when analyzing the stability of this type of failure. Studies published thus far estimate the angle of the riverbanks after planar mass failure, but they fall short because they only can be used for homogeneous bank material. No relation has been introduced to estimate the angle of different layers in a multi-layered river bank. This research used a physical model in a laboratory consisting of two layers of soil and measured the angle of failure of the bank for different soil layers. Two relationships to estimate the amount of upper and lower bank failure angles are introduced using two-thirds of the measured values for each layer. Evaluating these relationships using one-third of the measured values results in a mean relative error of 0.14 and 0.015 for the upper and lower bank layers, respectively. Another relationship is introduced and its results compared with those obtained from available relationships using the mean of physical and mechanical specifications of the banks and by imaging a homogenous river bank. The results show that the river bank angle of failure after planar mass failure is better estimated using the new relationship and it can be used to estimate the angle of the river bank for both multilayered and homogenous river banks.

**Keywords:** Angle of failure, Mass failure, Multi-layered, Planar failure, Riverbanks