



## مدل تحلیل پایداری سواحل رودخانه

امیر صمدی<sup>۱</sup>، ابراهیم امیری تکلدانی<sup>۲</sup>، حسن رحیمی<sup>۳</sup>

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

گرج - پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران - دانشکده مهندسی آب و خاک - گروه مهندسی آبیاری و آبادانی

آدرس پست الکترونیکی: amsamadi@ut.ac.ir

### خلاصه

فرسایش سواحل رودخانه، تخریب اراضی و رسوبات حاصل از آن در زمره مهمترین مسائل و مشکلات مهندسی رودخانه و مدیریت منابع آب می‌باشند که امروزه در اکثر مناطق جهان مورد توجه و مطالعه محققان مختلف قرار دارند. توانایی پیش‌بینی پایداری سواحل رودخانه‌های فرسایشی پیش‌نیاز توسعه مدل تعدیل عرض آبراهه آبرفتی و لازمه تخمین نرخ فرسایش ساحل و بار رسوبی حاصل از آن می‌باشد. در این تحقیق یک مدل جامع برای تحلیل پایداری سواحل رودخانه ارائه شده است. این مدل برخلاف اکثر مدل‌های پیشین که تنها بر مبنای گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای و یا هردو توسعه یافته‌اند، علاوه بر اینکه هر دو نوع گسیختگی را مدنظر قرار می‌دهد، امکان انجام تحلیل پایداری با استفاده از روش‌های مختلف موجود و مقایسه نتایج آنها را فراهم آورده است. علاوه بر این برای نخستین بار، در مدل حاضر توانایی تحلیل پایداری ساحل رودخانه با توجه به گسیختگی طاقی شکل به دو روش مختلف میسر گردیده است. در این مدل بسته به جنس مصالح تشکیل دهنده ساحل، نحوه لایه‌بندی مصالح ساحل و ارتفاع و زاویه شیب ساحل، روش تحلیل مناسب انتخاب شده و تحلیل پایداری ساحل رودخانه بر اساس تئوری‌های مبتنی بر روش گسیختگی محتمل صورت می‌پذیرد. نحوه کاربرد مدل جدید با ارائه مثال‌های جداگانه‌ای از انواع مختلف گسیختگی تشریح شده است.

کلمات کلیدی: فرسایش سواحل، تحلیل پایداری، گسیختگی صفحه‌ای، گسیختگی دایره‌ای، گسیختگی طاقی شکل.

### مقدمه

تخریب سواحل رودخانه، اتلاف اراضی ساحلی و رسوبات حاصل از آن در زمره مهمترین مسائل و مشکلات مهندسی رودخانه و مدیریت منابع آب می‌باشند که امروزه در اکثر مناطق جهان مورد توجه و مطالعه محققان مختلف قرار دارند. در حال حاضر در بسیاری از کشورها از جمله در ایالات متحده آمریکا، بررسی پایداری سواحل و نیز تثبیت آنها، در صورت لزوم، یکی از فعالیت‌های مهم مهندسی رودخانه محسوب می‌گردد. مطالعه پایداری سواحل رودخانه‌ها در طی دو دهه گذشته بطور وسیعی توسط محققان مختلف انجام و مدل‌های متعددی جهت تحلیل پایداری سواحل رودخانه توسعه یافته‌اند [۱، ۲، ۳ و ۴]. با این وجود اکثر مدل‌های موجود تحلیل پایداری سواحل رودخانه تنها قابلیت تحلیل پایداری ساحل در اثر گسیختگی صفحه‌ای و برخی نیز قابلیت محاسبه پایداری در برابر گسیختگی دایره‌ای را دارا می‌باشند. این قبیل تحلیل‌ها هنگامی که تحت شرایط طبیعی بکار روند، با محدودیت‌هایی همچون محدودیت عبور صفحه گسیختگی از درون پاشنه ساحل، در نظر گرفتن شکل هندسی ساده برای سواحل و عدم در نظر گرفتن نیروی ناشی از سطح آب زیرزمینی و آب رودخانه روبرو هستند. در نتیجه توسعه مدلی جامع با توانایی تحلیل پایداری ساحل در برابر انواع گسیختگی‌های عمده که در سواحل رودخانه بوقوع می‌پیوندد (صفحه‌ای، دایره‌ای و طاقی شکل) ضروری بوده و محدودیت‌های موجود نیز تا حد امکان می‌باید برطرف گردند. بدین منظور مدل جامع تحلیل پایداری سواحل رودخانه (Extensive Model of Stability Analysis of Riverbanks) در این تحقیق ارائه شده است. مدل جدید برخلاف اکثر مدل‌های پیشین که تنها بر مبنای گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای و یا هردو توسعه یافته‌اند، نه تنها هر دو نوع گسیختگی مذکور را مدنظر قرار می‌دهد، علاوه بر آن توانایی تحلیل پایداری ساحل با توجه به گسیختگی طاقی شکل که بخش قابل توجهی از تخریب سواحل رودخانه‌ها را شامل می‌شود نیز داراست. به عبارت دیگر، در مدل حاضر توانایی تحلیل پایداری ساحل رودخانه با توجه به گسیختگی طاقی شکل به دو روش میسر گردیده است. از یک طرف مدل حاضر قادر به تحلیل سه حالت مختلف پایداری طاق آویزان بر اساس روابط ارائه شده توسط محققین قبلی می‌باشد و از طرف دیگر در مدل جدید امکان تحلیل پایداری طاق آویزان در حالت بروز گسیختگی طاقی شکل نوع

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استادیار دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> استاد دانشگاه تهران

برشی براساس روابط حاکم برای تحلیل پایداری گسیختگی نوع صفحه‌ای با در نظر گرفتن زاویه صفحه گسیختگی ۹۰ درجه فراهم شده است که در نوع خود در این زمینه منحصر به فرد می‌باشد.

### معرفی مدل

مدل جدید امکان انجام تحلیل پایداری ساحل را با توجه به سه نوع گسیختگی عمده که در سواحل رودخانه‌ها به وقوع می‌پیوندد فراهم می‌نماید. این گسیختگی‌ها شامل گسیختگی صفحه‌ای، دایره‌ای و طاقی شکل می‌باشند که به منظور محاسبه پایداری ساحل در مقابل هر یک از آنها، تحلیل‌های پایداری جداگانه‌ای در مدل جامع تحلیل پایداری سواحل رودخانه ارائه شده است. ذیلاً به تشریح ویژگی‌های هر کدام از تحلیل‌های فوق در مدل پرداخته می‌شود.

### گسیختگی صفحه‌ای

این نوع گسیختگی عموماً در سواحل با شیب تند و ارتفاع کم و در شرایطی که ساحل رودخانه از مصالح چسبنده تشکیل شده است به وقوع می‌پیوندد [۱]. در این حالت بررسی پایداری ساحل رودخانه با محاسبه نسبت نیروهای مقاوم به مخرب موثر بر روی بحرانی‌ترین سطح گسیختگی صورت می‌پذیرد. این بررسی معمولاً نیازمند شناسایی شکل سطح گسیختگی بحرانی است. در شکل ۱، خصوصیات هندسی ساحل جهت انجام تحلیل پایداری در برابر گسیختگی صفحه‌ای و نیروهای موثر در آستانه گسیختگی بلوک نشان داده شده‌اند. برای تعیین پایداری ساحل، ضریب اطمینان در برابر گسیختگی صفحه‌ای به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

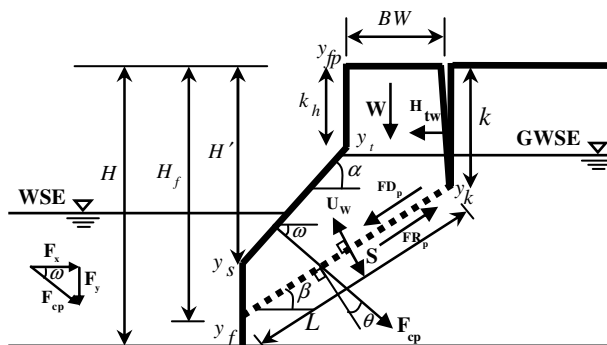
$$FS_p = \frac{FR_p}{FD_p} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $FS_p$  = ضریب اطمینان در مقابل لغزش بلوک، و  $FR_p$  و  $FD_p$  به ترتیب برآیند نیروهای مقاوم و محرک موثر بر عرض واحد بلوک دارای پتانسیل گسیختگی که از اینجا به بعد بطور اختصار بلوک نامیده می‌شود، می‌باشند. بر این اساس، گسیختگی بلوک هنگامی بوقوع خواهد پیوست که نسبت نیروهای مقاوم به محرک و به عبارت دیگر ضریب اطمینان محاسبه شده کمتر از یک گردد. برآیند نیروهای محرک و مقاوم در عرض واحد بلوک با روابط زیر بیان می‌گردند [۴]:

$$FD_p = W \sin \beta - F_{cp} \sin \theta + H_{tw} \cos \beta \quad (2)$$

$$FR_p = C'L + S \tan \phi^b + (W \cos \beta + F_{cp} \cos \theta - U_w - H_{tw} \sin \beta) \tan \phi' \quad (3)$$

که در آنها  $W$  = وزن بلوک گسیخته شده،  $F_{cp}$  = نیروی فشار محصورکننده هیدرواستاتیک،  $H_{tw}$  = نیروی فشار هیدرواستاتیک آب داخل ترک کششی،  $S$  = نیروی فشار آب منفذی منفی عمود بر سطح گسیختگی،  $U_w$  = نیروی فشار آب منفذی مثبت (نیروی زیرفشار) عمود بر سطح گسیختگی،  $\beta$  = زاویه صفحه گسیختگی،  $\theta$  = زاویه بین برآیند نیروی هیدرواستاتیک و صفحه عمود بر سطح لغزش،  $\phi^b$  = زاویه مبین نرخ افزایش مقاومت بر اثر مکش،  $L$  = طول سطح لغزش، و  $\phi'$  و  $C'$  به ترتیب متوسط وزنی زاویه اصطکاک درونی موثر و متوسط وزنی چسبندگی موثر مصالح خاکی تشکیل دهنده ساحل در هر بازه از رودخانه می‌باشند.

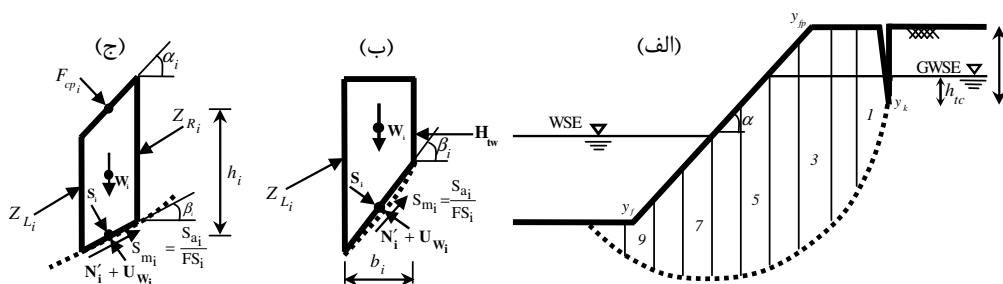


شکل ۱- مشخصات هندسی ساحل و نیروهای موثر بر آستانه لغزش بلوک در اثر گسیختگی صفحه‌ای

در مدل جدید نیز اثر تنش برشی اعمال شده توسط جریان آب موجود در آبراهه بر روی مصالح ساحل رودخانه بطور مستقیم در نظر گرفته نشده است. این بدین سبب است که در اکثر آبراهه‌ها میزان تنش برشی در مقابل نیروی هیدرواستاتیک قابل صرف نظر می‌باشد. در نتیجه این محدودیت بر تحلیل پایداری ساحل رودخانه تاثیر نخواهد گذاشت [۴]. از طرف دیگر در مدل جدید روش تحلیل پایداری ساحل داری- تورن (۱۹۹۶) و امیری تکلدانی (۲۰۰۲) مورد اصلاح قرار گرفته و مدل به تنهایی قادر به تخمین عمق ترک کششی و مشخصات هندسی بلوک گسیختگی متناظر آن می‌باشد.

### گسیختگی دایره‌ای

گسیختگی‌های عمیق از محل پاشنه ساحل در سواحل بلند مرکب از مصالح چسبنده با زوایای شیب کوچک، به علت جهت تنش‌های اصلی در تغییرات خاک با عمق، معمولاً به صورت منحنی شکل می‌باشند و این مساله باعث تغییر جهت سطح گسیختگی می‌شود. در این حالت، صفحه گسیختگی بصورت یک قوس دایره‌ای یا یک منحنی لگاریتمی می‌باشد [۱]. در شکل ۲ پارامترها و نیروهای استفاده شده در مدل جدید تحلیل پایداری ساحل رودخانه طبیعی با توجه به گسیختگی دایره‌ای نمایش داده شده است. در این شکل،  $S_{a_i} = S_{m_i}$  مقاومت برشی موجود در قطعه  $i$ ،  $S_{m_i} = S_{m_i}$  مقاومت برشی بسیج شده در قطعه  $i$ ،  $N'_i = N'_i$  نیروی قائم موثر بر کف قطعه  $i$ ،  $Z_{L_i} = Z_{L_i}$  نیروی بین قطعه‌ای چپ در قطعه  $i$ ،  $Z_{R_i} = Z_{R_i}$  نیروی بین قطعه‌ای راست در قطعه  $i$ ،  $b = b$  عرض قطعه  $i$ ،  $h_i = h_i$  ارتفاع متوسط قطعه  $i$  و سایر پارامترها مشابه پارامترهای گسیختگی صفحه‌ای می‌باشند که تنها برای هر قطعه با اندیس  $i$  متمایز گشته‌اند.



شکل ۲- الف) مشخصات هندسی ساحل با توجه به گسیختگی دایره‌ای، ب) نیروهای موثر بر قطعه شماره (۱) در آستانه لغزش، ج) نیروهای موثر بر سایر قطعات در آستانه لغزش

در مدل جدید، روش ساده شده بیشاپ با در نظر گرفتن نیروی فشار آب منفذی منفی و نیروی فشار هیدرواستاتیک آب موجود در ترک کششی اصلاح گردیده و بر این اساس ضریب اطمینان محاسبه شده است. در این روش تعادل نیروها در جهت قائم برای هر قطعه و تعادل گشتاورها حول مرکز دایره گسیختگی مورد آزمون محاسبه گردیده و از نیروهای برشی میان قطعات صرف نظر شده است. با توجه به شکل ۲، اگر ضریب اطمینان برای تمامی قطعات مورد تحلیل مشابه باشد، می‌توان نوشت:

$$FS_r = \frac{FR_r}{FD_r} \quad (۴)$$

که در آن:

$$FR_r = \sum_{i=1}^n \left[ C'L_i + S_i \tan \phi_i^b + N'_i \tan \phi' \right] \quad (۵)$$

$$FD_r = \sum_{i=1}^n \left[ \left( W_i + F_{cp_i} \cos \alpha_i \right) \sin \beta_i + H_{tw} \left( \cos \beta_i - \frac{h_{tc}}{3R} \right) - F_{cp_i} \sin \alpha_i \left( \cos \beta_i - \frac{h_i}{R} \right) \right] \quad (۶)$$

با محاسبه مجموع نیروها در جهت قائم برای هر قطعه، مقدار نیروی عمودی موثر بر هر قطعه برابر است با:

$$N'_i = \frac{I}{M \beta_i} \left[ W_i - S_i \sin \phi_i^b + C'L_i \left( \frac{\sin \beta_i}{FS_r} \right) - U W_i \cos \beta_i + F_{cp_i} \cos \alpha_i \right] \quad (۷)$$

که در آن:



$$M_{\beta_i} = \cos \beta_i \left[ 1 + \frac{\tan \beta_i \tan \phi'}{FS_r} \right] \quad (8)$$

با توجه به معادلات فوق، به دلیل حضور جمله ضریب اطمینان پایداری  $(FS_r)$  در دو سمت معادله (۴)، از روش تکرار نیوتن-رافسون جهت حل آن استفاده می‌شود و خواهیم داشت:

$$f(FS_r) = FS_r \times FD_r - FR_r = 0.0 \quad (9)$$

در روش تکرار نیوتن-رافسون، پیش‌بینی متوالی مقدار  $FS_r$  با استفاده از رابطه زیر صورت می‌پذیرد:

$$FS_{r(j+1)} = FS_{r(j)} - \frac{f(FS_r)}{f'(FS_r)} \quad (10)$$

که در آن  $j$  = تعداد تکرار است و همچنین:

$$f'(FS_r) = FD_r - \frac{\partial(FR_r)}{\partial(FS_r)} \quad (11)$$

و

$$\frac{\partial(FR_r)}{\partial(FS_r)} = \sum_{i=1}^n \tan \phi' \left[ \frac{\sin \beta_i (S_i \tan \phi_i^b + C' L_i + N_i' \tan \phi')}{M_{\beta_i} \times FS_r^2} \right] \quad (12)$$

در این روش مقدار اولیه ضریب اطمینان با استفاده از روش معمولی یا روش فلنیوس تعیین می‌گردد [۱]. همگرایی در صورتی حاصل می‌شود که مقدار اختلاف بین مقادیر ضریب اطمینان حاصل از دو مرحله متوالی کمتر از ۰/۰۱ باشد. بدین ترتیب مقدار ضریب اطمینان پایداری ساحل با توجه به گسیختگی دایره‌ای با استفاده از روش ساده شده بیشاپ محاسبه می‌گردد.

### گسیختگی طاقی شکل

سواحل رودخانه‌های جاری در رسوبات آبرفتی اغلب دارای یک ساختمان مرکب از مصالح غیرچسبنده (شن و ماسه) هستند که توسط یک لایه مصالح چسبنده (سیلت یا رس ماسه‌ای) پوشیده شده‌اند. فرسایش ساحل در این شرایط، با اختلاط بسیار سریع‌تر مواد لایه غیرچسبنده زیرین نسبت به لایه چسبنده فوقانی ساحل به درون جریان رودخانه رخ می‌دهد. این مساله باعث گسیختگی ناحیه تحتانی ساحل شده و موجب ایجاد طاق‌های آویزانی از مواد چسبنده می‌شود. عقب‌نشینی ساحل فوقانی اغلب با گسیختگی این طاق‌ها اتفاق می‌افتد [۱ و ۵]. در شکل ۳ انواع گسیختگی‌های طاقی شکل و نیروها و پارامترهای دخیل در تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌های طبیعی با توجه به این نوع گسیختگی نشان داده شده است. تورن و تاوی (۱۹۸۱) با توجه به مشاهدات صحرایی از رودخانه‌های متشکل از سواحل مرکب که قسمت‌های تحتانی آنها از مصالح درشت دانه غیر چسبنده و قسمت‌های فوقانی آنها از مصالح چسبنده تشکیل شده بود، سه نوع مکانیزم اصلی گسیختگی طاقی شکل شامل گسیختگی از نوع برشی، شعاعی و کششی را معرفی نمودند و برای هر یک با توجه به نوع بروز گسیختگی رابطه متفاوتی جهت تحلیل پایداری ارائه نمودند [۵]. در این تحلیل اثرات ترک‌ها و شکاف‌های ایجاد شده در خاک نیز مدنظر قرار می‌گیرد. در مدل EMSAR نیز از روابط معرفی شده توسط تورن و تاوی (۱۹۸۱) براساس تعادل ایستائی و نظریه تیرها تحلیل پایداری طاق‌های آویزان انجام می‌گردد. علاوه بر این، در مدل جدید امکان تحلیل پایداری طاق آویزان در حالت بروز گسیختگی طاقی شکل نوع برشی براساس روابط حاکم برای تحلیل پایداری گسیختگی نوع صفحه‌ای با در نظر گرفتن زاویه صفحه گسیختگی ۹۰ درجه فراهم شده است که در نوع خود در این زمینه منحصر به فرد می‌باشد (شکل ۴). بدین منظور ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در مقابل گسیختگی صفحه‌ای یا برشی با محاسبه نسبت برآیند نیروهای مقاوم به محرک موثر بر عرض واحد بلوک آویزان در سطح دارای پتانسیل گسیختگی، حاصل می‌شود. بر این اساس، ضریب اطمینان در برابر گسیختگی برشی طاق آویزان به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$FS_{cs} = \frac{FR_{cs}}{FD_{cs}} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $FS_{cs}$  = ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی طاق آویزان، و  $FR_{cs}$  و  $FD_{cs}$  به ترتیب برآیند نیروهای مقاوم و محرک موثر بر عرض واحد طاق آویزان دارای پتانسیل گسیختگی می‌باشند. بر این اساس، گسیختگی برشی طاق آویزان هنگامی بوقوع خواهد پیوست که نسبت

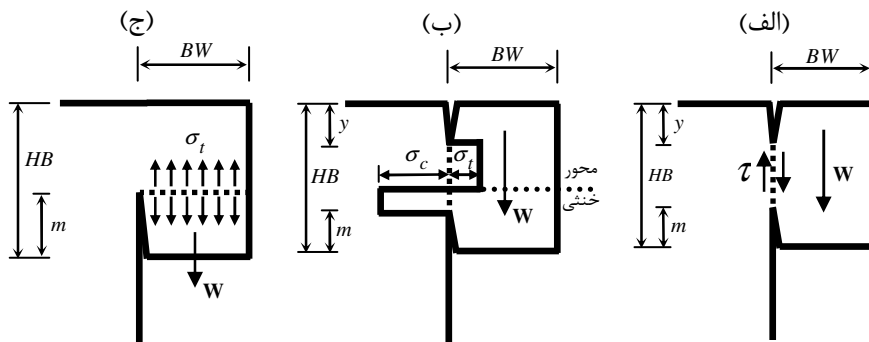
نیروهای مقاوم به محرک و به عبارت دیگر ضریب اطمینان محاسبه شده کمتر از یک گردد. برآیند نیروهای محرک و مقاوم در عرض واحد طاق آویزان با روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$FR_{cs} = C'L + S \tan \phi^b + (F_{cp} \cos \theta - U_W - H_{tw}) \tan \phi' \quad (14)$$

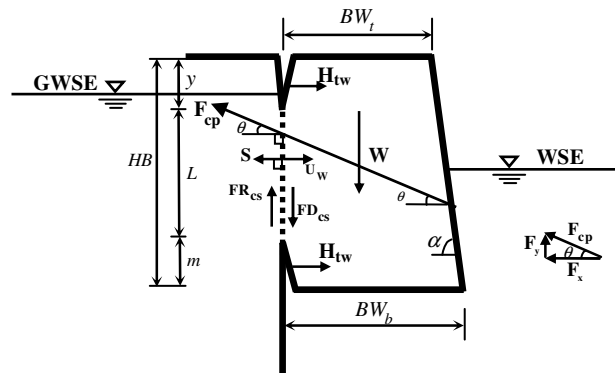
و

$$FD_{cs} = W - F_{cp} \sin \theta \quad (15)$$

که در آنها  $W$  = وزن طاق آویزان،  $F_{cp}$  = نیروی فشار محصورکننده هیدرواستاتیک،  $H_{tw}$  = نیروی فشار هیدرواستاتیک آب داخل ترک کششی،  $S$  = نیروی فشار آب منفذی منفی عمود بر سطح گسیختگی،  $U_W$  = نیروی فشار آب منفذی مثبت (نیروی زیرفشار) عمود بر سطح گسیختگی،  $\theta$  = زاویه بین برآیند نیروی هیدرواستاتیک و صفحه عمود بر سطح لغزش،  $\phi^b$  = زاویه مبین نرخ افزایش مقاومت بر اثر مکش،  $L$  = طول سطح لغزش، و  $\phi'$  و  $C'$  به ترتیب = متوسط وزنی زاویه اصطکاک درونی موثر و متوسط وزنی چسبندگی موثر مصالح خاکی تشکیل دهنده طاق آویزان در هر بازه از رودخانه می‌باشند.



شکل ۳- انواع گسیختگی طاقی شکل و نیروها و پارامترهای دخیل در تحلیل گسیختگی طاقی شکل: (الف) گسیختگی برشی، (ب) گسیختگی شعاعی، (ج) گسیختگی کششی [۵]



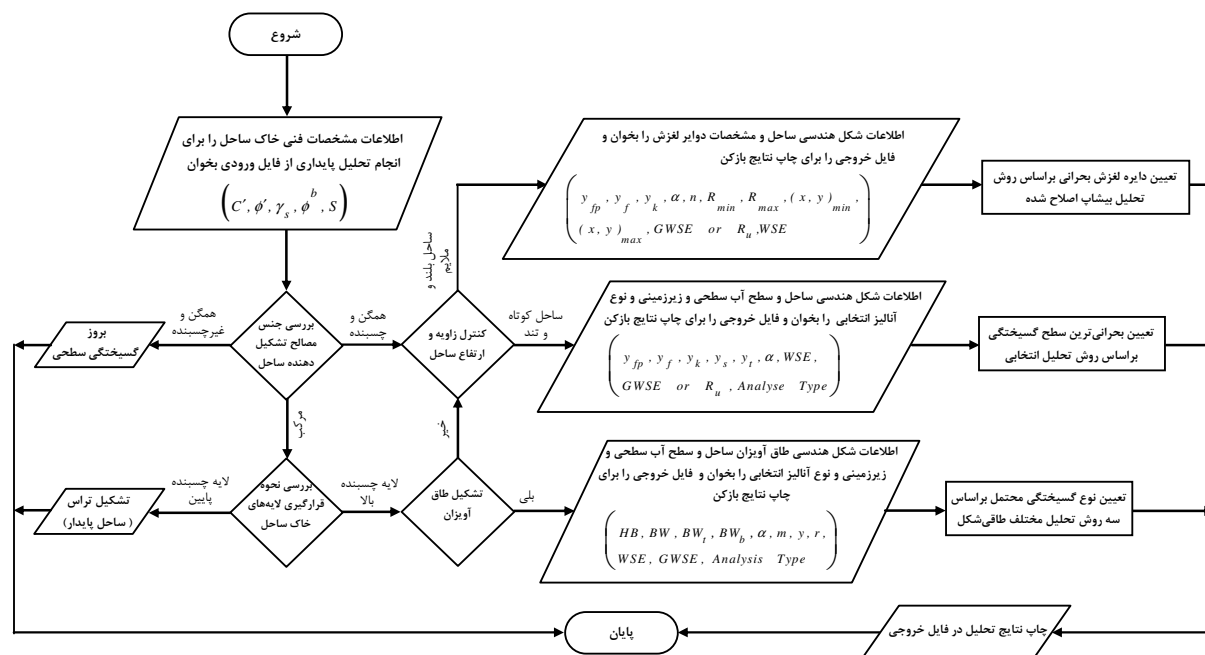
شکل ۴- مشخصات هندسی طاق آویزان و نیروهای موثر بر آستانه لغزش آن در اثر گسیختگی برشی

#### قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل

هیچ‌کدام از مدل‌های تحلیل پایداری ساحل رودخانه که تاکنون توسط محققین مختلف توسعه یافته‌اند، توانایی تحلیل پایداری ساحل در مقابل شکل‌های مختلف گسیختگی و به ویژه گسیختگی طاقی شکل را دارا نمی‌باشند. براین اساس در مدل حاضر روندنمای کاملی برای تحلیل پایداری سواحل رودخانه توسعه یافته که قابلیت تجزیه و تحلیل حالت‌های غالب گسیختگی سواحل را دارا می‌باشد. شکل ۵ به اختصار مراحل طی شده در مدل جدید جهت انجام تحلیل پایداری ساحل را نشان می‌دهد.

اگر چه در مدل جامع تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR)، برخی از محدودیت‌های موجود در مدل‌های قبلی مرتفع شده است، لکن برخی از محدودیت‌ها نیز همچنان باقی است. توسعه تحلیل پایداری براساس روش‌های تعادل حدی و در نظر گرفتن سواحل چند لایه همراه با سطح گسیختگی مستقیم در تمامی لایه‌ها، به دلیل اینکه در طبیعت انتظار وقوع یک صفحه گسیختگی کاملاً مستقیم در سواحل چندلایه بعید می‌باشد تاثیر بسزایی در

رفع عدم اطمینان موجود در نتایج کار نخواهد داشت. بر این اساس در مدل جدید به منظور سهولت در تحلیل پایداری، از مصالح چندلایه در ساحل رودخانه صرفنظر گردیده و ساحل همگن در نظر گرفته شده است. همچنین سطح آب زیرزمینی و جریان نشت از داخل ساحل به جریان رودخانه، موازی سطح دشت سیلابی در نظر گرفته شده و از اثرات نوسانات موجود در سطح آب رودخانه که به جهت وزش باد مربوط است صرفنظر شده است. توزیع نیروی فشار آب ناشی از عمق آب در رودخانه در مجاور ساحل و نیز توزیع نیروی فشار آب منفذی مثبت و منفی، هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است. به منظور ارائه قابلیت‌های مختلف مدل جدید، چند مثال عددی ذیلاً ارائه شده و نتایج حاصل از اجرای مدل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵- روندنمای انجام محاسبات در مدل جامع تحلیل پایداری سواحل رودخانه

## نتایج و بحث

### گسیختگی صفحه‌ای

در این مثال، پایداری مقطعی از ساحل آبراهه هوتوفیا از سرشاخه‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا در مقابل گسیختگی صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. براساس مشاهدات صحرایی وقوع گسیختگی صفحه‌ای در این آبراهه محتمل‌ترین نوع گسیختگی به وقوع پیوسته است [۴]. همانطور که اشاره گردید، یکی از قابلیت‌های مدل جدید نسبت به مدل‌های پیشین، عدم نیاز به ورود عمق ترک کششی جهت انجام تحلیل پایداری ساحل می‌باشد. لذا امکان ارزیابی توانایی مدل در پیش‌بینی عمق ترک کششی بحرانی با عمق ترک کششی مشاهده شده در طبیعت وجود دارد. در جدول ۱، مشخصات هندسی بلوک گسیخته شده از ساحل رودخانه شامل  $BW$  = عرض بلوک،  $\beta$  = زاویه صفحه گسیختگی بلوک،  $k$  = عمق ترک کششی و  $VB$  = حجم بلوک ارائه شده‌اند. مطابق نتایج جدول ۱، مدل حاضر مقدار زاویه صفحه گسیختگی و عمق ترک کششی را با روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) کمتر برآورد می‌نماید اما تطابق خوبی بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عرض بلوک و حجم مصالح تخریب یافته وجود دارد که اختلاف‌های موجود بی‌تردید ناشی از نقص داده‌های موجود زاویه ساحل، سطح آب رودخانه و آب زیرزمینی می‌باشد.

جدول ۱- مقایسه مشخصات هندسی بلوک و عمق ترک کششی پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهده شده در طبیعت

نام روش	پیش‌بینی شده				مشاهده شده			
	$VB$	$BW$	$\beta$	$k$	$VB$	$BW$	$\beta$	$k$
	$(m^3 / m)$	(m)	(درجه)	(m)	$(m^3 / m)$	(m)	(درجه)	(m)
امیری تکلدانی (اصلاح شده)	۱۰/۲۷	۱/۵۰	۴۴/۶	۲/۹۵	۱۰/۲۹	۱/۴	۵۷	۳/۳۶



### گسیختگی دایره‌ای

در این مثال، پایداری مقطعی از ساحل آبراهه پایلیون از سرشاخه‌های رودخانه میسوری در آمریکا در مقابل گسیختگی دایره‌ای بررسی شده است. نتایج بررسی‌های صحرایی حکایت از وقوع گسیختگی دایره‌ای در مقطع موردنظر می‌نماید [۶]. نتایج آزمون پایداری با مدل جدید وقوع گسیختگی دایره‌ای که در طبیعت نیز به وقوع پیوسته را تأیید می‌نماید. پس از اجرای مدل برای اطلاعات موجود مقطعی از آبراهه پایلیون، ضریب اطمینان پایداری ساحل با توجه به گسیختگی دایره‌ای و مشخصات هندسی دایره لغزش بحرانی در جدول ۲ ارائه شده است. در این محاسبات مبدا مختصات در محل پاشنه ساحل در نظر گرفته شده و با توجه به نتایج تحلیل مدل، عرض مرکز دایره لغزش از محل پاشنه ساحل (مبدا) برابر ۵/۳۳ متر به سمت خارج شیب می‌باشد و احتمال تخریب ساحل موردنظر مطابق آنچه در طبیعت رخ داده وجود دارد.

جدول ۲- مشخصات هندسی دایره لغزش بحرانی و ضریب اطمینان پایداری مقطع موردنظر آبراهه پایلیون

FS	عرض مرکز دایره لغزش از پاشنه ساحل	ارتفاع مرکز دایره لغزش از بستر آبراهه	شعاع دایره لغزش	حجم مصالح گسیخته شده	موقعیت ترک کششی از لبه فوقانی ساحل
—	(m)	(m)	(m)	( $m^3/m$ )	(m)
۰/۹۰	۵/۳۳	۱۳/۳۳	۱۴/۳۰	۱۹/۷۶	۲/۷۰

### گسیختگی طاقی شکل

در این مثال، تحلیل پایداری مقطعی از ساحل رودخانه کردان واقع در استان تهران در مقابل گسیختگی طاقی شکل صورت گرفته است. برای مشاهدات صحرایی صورت گرفته در رودخانه کردان، ضریب اطمینان پایداری ساحل با توجه به شکل‌های مختلف گسیختگی در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۳، پایداری ساحل در دو حالت بررسی شده است. ابتدا برای زمانی که ساحل خشک می‌باشد و سپس در شرایط پس از وقوع سیلاب که ساحل کاملاً اشباع شده و سطح آب رودخانه نیز فروکش کرده است. نتایج حاصله شرایط تخریب ایجاد شده در طبیعت را تأیید می‌نمایند و پایداری طاقی‌های آویزان مزبور عمدتاً پس از وقوع سیلاب و اشباع شدن خاک، در مرحله فروکش سیلاب در حالت بحرانی واقع شده و در معرض گسیختگی طاقی شکل نوع شعاعی قرار خواهند گرفت. متأسفانه به دلیل فقدان اطلاعات کامل صحرایی (سطح آب سطحی و زیرزمینی و عمق آب داخل ترک کششی) در مورد رودخانه کردان و عدم امکان محاسبه نیروهای هیدرواستاتیک و فشار آب منفذی، بررسی ضریب اطمینان پایداری ساحل در مقابل گسیختگی طاقی شکل نوع برشی با استفاده از روابط ارائه شده در این تحقیق مقدور نمی‌باشد (روابط ۱۵-۱۳). در نتیجه، با توجه به محدود بودن اطلاعات موجود و دسترسی نداشتن به اطلاعات سطح آب سطحی و زیرزمینی، در حال حاضر امکان مقایسه دقیق تر روش‌ها وجود ندارد.

جدول ۳- محاسبات تحلیل پایداری طاقی شکل با مدل EMSAR در رودخانه کردان، ایران

موقعیت ساحل	مقطع	مشخصات هندسی طاق آویزان (متر)				ضرایب اطمینان در مقابل اشکال مختلف گسیختگی محتمل		وضعیت رطوبت ساحل
		L	y	HB	BW	FST	FSB	
روستای نجم‌آباد	۱	۰/۰	۱/۸	۳/۸۲	۰/۷۳	∞	۱/۰۱	خشک
	۲	۰/۰	۰/۹	۳/۷۰	۰/۶۴	∞	۰/۹۲	اشباع
روستای عباس‌آباد	۳	۰/۰	۲/۲	۲/۵۵	۰/۴۵	∞	۰/۱۷	خشک
	۴	۰/۰	۱/۰	۲/۴۰	۰/۸۰	∞	۰/۱۳	اشباع
	۵	۰/۰	۱/۰	۲/۴۰	۰/۸۰	∞	۰/۸۶	خشک
	۶	۰/۰	۱/۰	۲/۴۰	۰/۸۰	∞	۰/۶۶	اشباع

### نتیجه‌گیری

در مدل جامع آنالیز پایداری ساحل رودخانه، تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌های دربردارنده شرایط فیزیکی مختلف در مقابل حالت‌های غالب گسیختگی توده‌ای شامل گسیختگی صفحه‌ای، دایره‌ای و طاقی شکل امکان‌پذیر می‌باشد. در این ارتباط سواحل مختلف به سه گروه ساحل همگن و غیرچسبنده، همگن و چسبنده یا مرکب تقسیم‌بندی می‌شوند. در سواحل متشکل از مصالح غیرچسبنده، گسیختگی توده‌ای به وقوع نخواهد پیوست و تخریب ساحل عمدتاً بصورت لغزش سطحی و ریزش مصالح به داخل جریان صورت می‌پذیرد و تحلیل آن نیز تنها براساس نسبت زاویه اصطکاک داخلی ذرات و زاویه شیب ساحل صورت می‌پذیرد. در سواحل متشکل از مصالح چسبنده، تخریب ساحل بسته به شکل هندسی، ارتفاع و زاویه شیب ساحل در اثر گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای به وقوع می‌پیوندد. براساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های سایر محققین، وقوع گسیختگی صفحه‌ای در سواحل کوتاه و با شیب تند محتمل می‌باشد و وقوع گسیختگی دایره‌ای نیز به سواحل بلند و ملایم محدود می‌شود. در شرایطی که ساحل غیرهمگن و مرکب از مصالح مختلف بصورت چند لایه باشد، بسته به نحوه قرارگیری لایه‌ها دو حالت اصلی بوجود می‌آید. در حالت نخست، مصالح چسبنده تشکیل دهنده بخش تحتانی ساحل با لایه‌هایی از مصالح غیرچسبنده پوشیده شده است، که در این حالت حضور مصالح چسبنده در زیر مصالح غیرچسبنده معمولاً



موجب تشکیل تراس در رودخانه می‌شود که تمایل به محافظت از مصالح غیرچسبنده فوقانی در برابر فرسایش رودخانه‌ای و بیش از حد شیب‌دار شدن ساحل دارد. در حالت دوم، مصالح غیرچسبنده بخش تحتانی ساحل با لایه‌ای از مصالح چسبنده پوشیده می‌شود، که در این حالت بسته به اندازه، جنس و مقاومت مصالح غیرچسبنده تشکیل دهنده ساحل در برابر عوامل فرسایشی مختلف، احتمال ایجاد گسیختگی صفحه‌ای، دایره‌ای یا طاقی شکل وجود دارد.

در مدل جدید انجام تحلیل پایداری ساحل در مقابل گسیختگی صفحه‌ای با استفاده از روش‌های مختلفی همچون روش لوهنس و هندی (۱۹۶۸)، عثمان و تورن (۱۹۸۸)، داربی و تورن (۱۹۹۶)، داربی و تورن اصلاح شده و امیری تکلدانی (۲۰۰۲) و مقایسه نتایج آنها امکان‌پذیر است. علاوه بر این در مدل حاضر بر خلاف مدل‌های پیشین، امکان پیش‌بینی عمق ترک کششی بحرانی و متعاقب آن مشخصات هندسی بلوک وجود دارد. اگر چه احتمال وقوع گسیختگی دایره‌ای با توجه به شیب تند سواحل رودخانه‌ها و ارتفاع کم سواحل بسیار پایین می‌باشد، اما در مدل حاضر امکان انجام تحلیل پایداری ساحل رودخانه در مقابل گسیختگی دایره‌ای نیز میسر می‌باشد. بدین منظور روش ساده شده بیشاپ به صورت اصلاح شده و با در نظر گرفتن نیروی مکش و نیروی هیدرواستاتیک در اثر آب موجود در ترک کششی، مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، در مدل جدید امکان تحلیل پایداری طاق آویزان توسط دو روش مختلف فراهم گردیده است، ضمن آنکه در حالت بروز گسیختگی طاقی شکل نوع برشی براساس روابط حاکم برای تحلیل پایداری گسیختگی نوع صفحه‌ای با در نظر گرفتن زاویه صفحه گسیختگی ۹۰ درجه، روابط تحلیل پایداری مورد تجدیدنظر قرار گرفته‌اند.

## مراجع

۱. 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.
2. Darby, S.E. and Thorne, C.R. (1996) Development and testing of riverbank-stability analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, **122**(8), 443-454.
3. Osman, A.M. and Thorne, C.R. (1988) Riverbank stability analysis. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, **114**(2), 134-150.
4. Amiri-Tokaldany, E. (2002) *A model of bank erosion and equilibrium bed topography in river bends*. PhD thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Southampton, Southampton, UK.
5. Thorne, C.R. and Tovey, N.K. (1981) Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms*, **6**(5), 469-484.
6. Soenksen, P.J., Turner, M.J., Dietsch, B.J. and Simon, A. (2003) *Stream bank stability in Eastern Nebraska*. Water-Resources Investigations Report 03-4265, U.S. Geological Survey, Lincoln, Nebraska, USA.