

## مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه

امیر صمدی، ابراهیم امیری تکلدانی و حسن رحیمی\*

\* به ترتیب دانشجوی دکتری؛ استادیار؛ و استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و

منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۰۲۶۱)۲۲۲۶۱۸۱. پیام‌نگار: amsamadi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۱۱/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۲۸

### چکیده

فرسایش سواحل رودخانه، تخریب اراضی، و رسوبات حاصل از آنها در زمره مهم‌ترین مسائل مهندسی رودخانه و مدیریت منابع آب هستند که امروزه در اکثر مناطق جهان مورد توجه و مطالعه محققان قرار دارند. توانایی پیش‌بینی پایداری سواحل رودخانه‌های فرسایشی پیش‌نیاز توسعه مدل تعدیل عرض آبراههٔ آبرفتی و لازمه تخمین میزان فرسایش ساحل و بار رسوبی حاصل از آن است. در این تحقیق، یک مدل گسترده برای تحلیل پایداری سواحل رودخانه ارائه و به زبان برنامه‌نویسی فرترن در محیط Visual Fortran 6.5 کد شده است. این مدل، برخلاف اکثر مدل‌های پیشین که تنها بر مبنای گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای توسعه یافته‌اند، هر دو نوع گسیختگی را مدنظر قرار می‌دهد و امکان تحلیل پایداری را با استفاده از روش‌های مختلف موجود و مقایسه نتایج آنها فراهم می‌آورد. به علاوه، در مدل حاضر برای نخستین بار توانایی تحلیل پایداری ساحل با توجه به گسیختگی طاقی شکل میسر شده است. در این مدل بسته به جنس مصالح تشکیل‌دهنده ساحل، نحوه لایه‌بندی مصالح ساحل و ارتفاع و زاویه شیب ساحل، روش تحلیل مناسب انتخاب می‌شود 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.

### واژه‌های کلیدی

تحلیل پایداری، فرسایش سواحل رودخانه، گسیختگی دایره‌ای، گسیختگی صفحه‌ای، گسیختگی طاقی شکل

### مقدمه

مطالعه پایداری سواحل رودخانه‌ها را در دو دهه گذشته به طور گسترده محققان مختلف انجام و مدل‌های متعدد نیز جهت تحلیل پایداری سواحل رودخانه توسعه داده‌اند (Osman & Thorne, 1988; Darby & Thorne, 1996b; Amiri-Tokaldany, 2002). با این همه اکثر مدل‌های موجود تحلیل پایداری سواحل رودخانه، تنها قابلیت تحلیل پایداری ساحل را در اثر گسیختگی صفحه‌ای و برخی نیز قابلیت محاسبه پایداری را در برابر گسیختگی دایره‌ای به شکل خیلی ساده دارا هستند. این

تخریب سواحل رودخانه، اتلاف اراضی ساحلی، و تولید رسوبات ناشی از این دو فرایند در زمره مهم‌ترین مسائل مهندسی رودخانه و مدیریت منابع آب هستند که امروزه در اکثر مناطق جهان مورد توجه و مطالعه محققان 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 مهندسان رودخانه محسوب می‌شود.



سطح آب رودخانه صرف‌نظر کردند. تاثیرات فشار آب منفذی و هیدرواستاتیک در تحلیل توسعه یافته توسط سایمون و همکاران (Simon *et al.*, 1991) در نظر گرفته شده است، اما در آن محدودیت نیم‌رخ ساده ساحل رودخانه کماکان باقی است (Darby & Thorne, 1996b). رینالدی و کاساگلی (Rinaldi & Casagli, 1999) با توجه به تأثیر فشارهای آب منفذی منفی در بخش غیر اشباع ساحل، تأثیر تثبیت‌کنندگی فشار محصورکننده هیدرواستاتیک، و تأثیر بی‌ثبات‌کنندگی فشارهای آب منفذی مثبت در بخش اشباع ساحل تحلیل‌هایی ارائه داده‌اند. این تحلیل‌ها از تاثیر فشارهای آب منفذی در بخش‌های اشباع و غیراشباع نیم‌رخ ساحل تجسم واقع‌بینانه‌ای ایجاد می‌کند اما محدودیت فرض نیم‌رخ ساده ساحل همچنان باقی است (Amiri-Tokaldany, 2002). علاوه بر این، امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) تحلیلی برای پایداری ساحل رودخانه ارائه داد که در آن علاوه بر در نظر گرفتن تاثیر فشارهای آب منفذی مثبت و منفی، تاثیر فشار هیدرواستاتیک سطح آب رودخانه و آب موجود در ترک کششی و مصالح ساحل چندلایه و شکل هندسی طبیعی رودخانه به‌جای شکل ساده نیم‌رخ ساحل در نظر گرفته شده است. از آنجا که در شرایط واقعی زاویه سطح گسیختگی در لایه‌های مختلف خاک متفاوت است، این مدل نیز با توجه به سطح گسیختگی مستقیم در کلیه لایه‌های خاک ساحل دارای نقص است. از طرف دیگر، در این مدل نیز مانند برخی مدل‌ها نقش پوشش گیاهی در پایداری ساحل ساده لحاظ شده است. در کلیه مدل‌های فوق، فقط تحلیل پایداری در برابر گسیختگی صفحه‌ای در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، ایوب‌زاده و هوشیانی (Ayyoubzade & Hooshyani, 2004) مدلی ریاضی برای تغییرات عرضی رودخانه‌ها و کانال‌های

قبیل تحلیل‌ها هنگامی که تحت شرایط طبیعی به‌کار روند، با محدودیت‌هایی به شرح زیر همراه خواهند بود (Darby & Thorne, 1996b):

- نیم‌رخ‌های سواحل با شکل هندسی ساده برای مشخص کردن نیم‌رخ طبیعی سواحل رودخانه فرسایشی به‌خصوص در هنگام ایجاد ترک کششی، کافی نیست.
- صفحه گسیختگی منحصراً به عبور از پاشنه ساحل محدود می‌شود، در حالی که مشاهدات صحرایی وقوع این حالت را گاهی غیر واقع‌بینانه نشان می‌دهند.
- از تاثیرات فشارهای مثبت و منفی آب منفذی و فشار هیدرواستاتیک آب موجود در آبراهه، معمولاً صرف‌نظر می‌شود، یا با ترم ساده نسبت فشار منفذی مشخص می‌شود، یا سطح آب زیرزمینی موازی سطح زمین طبیعی فرض می‌شود.
- کاربرد تحلیل گسیختگی صفحه‌ای به سواحل بسیار تند محدود است.
- نقش پوشش گیاهی در پایداری ساحل رودخانه در نظر گرفته نمی‌شود.
- اکثر مدل‌های موجود، ساحل را مرکب از مصالح همگن در نظر می‌گیرند و تاثیر لایه‌های خاک مجزا درون ساختمان قائم ساحل به حساب نمی‌آید.
- مدلی جامع وجود ندارد که توانایی محاسبه پایداری سواحل را در برابر انواع مختلف گسیختگی‌ها دارا باشد.
- برخی از محدودیت‌های مذکور، به تنهایی یا همراه با هم در بسیاری از تحلیل‌های پایداری منتشرشده در سال‌های اخیر مشاهده می‌شود (Darby & Thorne, 1996b). به عنوان مثال، عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) شکل ساحل را به صورت طبیعی‌تر در نظر گرفته همچنین فرض کردند که سطح گسیختگی از پاشنه ساحل عبور می‌کند و از تاثیرات فشارهای آب منفذی و هیدرواستاتیک

### مواد و روش‌ها

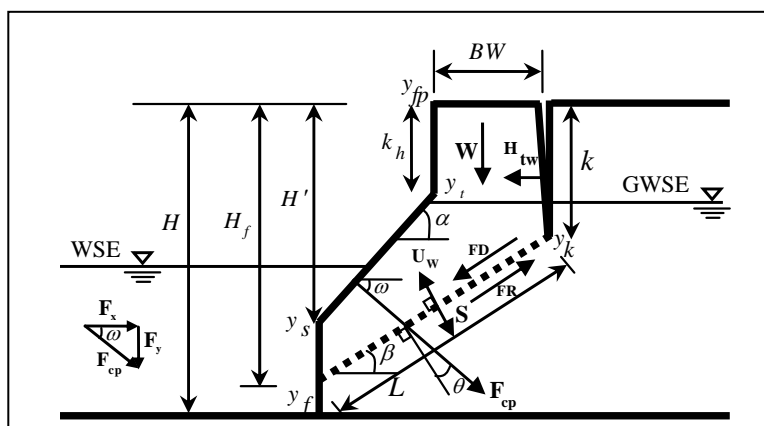
مدل جدید امکان تحلیل پایداری ساحل را با توجه به سه نوع گسیختگی عمده که در سواحل رودخانه‌ها رخ می‌دهد فراهم می‌آورد. این گسیختگی‌ها شامل گسیختگی صفحه‌ای، دایره‌ای، و طاقی شکل هستند که به‌منظور محاسبه پایداری ساحل در مقابل هریک از آنها، تحلیل‌های پایداری جداگانه‌ای در مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه ارائه شده است. در زیر، ویژگی‌های هر یک از تحلیل‌های فوق در مدل تشریح می‌شود.

### گسیختگی صفحه‌ای<sup>۲</sup>

این نوع گسیختگی عموماً در سواحل با شیب تند و ارتفاع کم و در شرایطی رخ می‌دهد که ساحل رودخانه از مصالح چسبنده تشکیل شده است (Samadi, 2005). در این حالت، پایداری ساحل رودخانه با محاسبه نسبت نیروهای مقاوم به مخرب مؤثر بر بحرانی‌ترین سطح گسیختگی بررسی می‌شود. این بررسی معمولاً نیازمند شناسایی شکل سطح گسیختگی بحرانی است. در شکل ۱، خصوصیات هندسی ساحل جهت تحلیل پایداری در برابر گسیختگی صفحه‌ای و نیروهای مؤثر در آستانه گسیختگی بلوک نشان داده شده است.

فرسایش‌پذیر توسعه دادند که این مدل قابلیت تحلیل پایداری صفحه‌ای را بر اساس روش عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) و حالت بسیار ساده‌ای از گسیختگی دایره‌ای را بر اساس روش عثمان (Osman, 1985) بدون در نظر گرفتن نیروی زیر فشار داراست. شایان ذکر است که تحلیل پایداری بر اساس مدل ایوب‌زاده و هوشیانی (Ayyoubzade & Hooshyani, 2004) را پیش از این داری و تورن (Darby & Thorne, 1996a) ارائه داده‌اند.

در نتیجه، توسعه مدلی گسترده با توانایی تحلیل پایداری ساحل در برابر انواع گسیختگی‌های عمده (صفحه‌ای، دایره‌ای، و طاقی شکل) که در سواحل رودخانه به‌وقوع می‌پیوندد ضروری است و محدودیت‌های موجود نیز تا حد امکان باید برطرف شوند. بدین منظور، مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه<sup>۱</sup> در این تحقیق ارائه شده است. این مدل برخلاف اکثر مدل‌های پیشین که تنها بر مبنای گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای توسعه یافته‌اند، هر دو نوع گسیختگی را در نظر دارد و علاوه بر آن توانایی تحلیل پایداری ساحل را با توجه به گسیختگی طاقی شکل داراست که بخش قابل توجهی از تخریب سواحل رودخانه‌ها را شامل می‌شود.



شکل ۱- مشخصات هندسی ساحل و نیروهای مؤثر بر

آستانه لغزش بلوک در اثر گسیختگی صفحه‌ای

- مؤلفه نیروی فشار محصورکننده هیدرواستاتیک موازی

$$\text{سطح گسیختگی } (F_{cp} \sin \theta)$$

- مؤلفه نیروی فشار هیدرواستاتیک در اثر آب موجود در

ترک کششی (در حالتی که سطح آب زیرزمینی بالاتر

از کف ترک باشد) موازی سطح گسیختگی

$$(H_{tw} \cos \beta)$$

بنابراین، برابند نیروهای محرک در عرض واحد بلوک

با رابطه زیر بیان می‌شود (Amiri-Tokaldany, 2002):

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

که در آن،

$W$  = وزن بلوک گسیخته شده؛  $F_{cp}$  = نیروی فشار

محصورکننده هیدرواستاتیک؛  $H_{tw}$  = نیروی فشار

هیدرواستاتیک آب داخل ترک کششی؛  $\beta$  = زاویه صفحه

گسیختگی؛ و  $\theta$  = زاویه بین برابند نیروی هیدرواستاتیک و

صفحه عمود بر سطح لغزش است.

نیروهای مقاوم در برابر گسیختگی صفحه‌ای مؤثر بر

عرض واحد بلوک (شکل ۱) نیز عبارت‌اند از:

- نیروی چسبندگی مؤثر بر سطح صفحه گسیختگی

$$\text{عمود بر سطح گسیختگی } (CL)$$

- نیروی فشار آب منفذی منفی عمود بر سطح

$$\text{گسیختگی } (S)$$

- مؤلفه نیروی وزن بلوک عمود بر سطح گسیختگی

$$(W \cos \beta)$$

- مؤلفه نیروی محصورکننده هیدرواستاتیک عمود بر

$$\text{سطح گسیختگی } (F_{cp} \cos \theta)$$

در این شکل،  $WSE$  = ارتفاع سطح آب

رودخانه؛  $R.I.$  = ارتفاع کف رودخانه؛  $N.G.$  = رقوم سطح

زمین طبیعی؛ و  $GWSE$  = ارتفاع سطح آب زیرزمینی

است. نقاط  $y_f$  = رقوم پاشنه ساحل؛  $y_s$  = رقوم کف بخش

قائم در قسمت تحتانی ساحل؛  $y_t$  = رقوم کف بخش قائم

در قسمت فوقانی ساحل؛  $y_{fp}$  = رقوم سطح زمین طبیعی

یا دشت سیلابی؛ و  $y_k$  = رقوم کف ترک کششی نیز برای

معرفی شکل هندسی ساحل رودخانه به کار رفته‌اند.

همچنین  $H$ ،  $H_f$  و  $H'$  به ترتیب = ارتفاع کل ساحل،

ارتفاع محل عبور صفحه گسیختگی از سطح ساحل، و

ارتفاع بخش غیرفرسایشی ساحل رودخانه؛  $k$  = عمق ترک

کششی موجود؛  $k_h$  = عمق ترک کششی قبلی؛ و  $BW$  =

عرض بلوک گسیخته شده از ساحل است. برای تعیین

پایداری ساحل، باید ضریب اطمینان در برابر گسیختگی

صفحه‌ای به شرح زیر محاسبه شود:

$$FS = \frac{FR}{FD} \quad (1)$$

که در آن،

$FS$  = ضریب اطمینان در مقابل لغزش بلوک؛ و  $FR$  و  $FD$

به ترتیب = برابند نیروهای مقاوم و محرک مؤثر بر عرض

واحد بلوک دارای پتانسیل گسیختگی است که از اینجا به

بعد به طور اختصار بلوک نامیده می‌شود. بر این اساس،

گسیختگی بلوک هنگامی رخ می‌دهد که نسبت نیروهای

مقاوم به محرک و به عبارت دیگر ضریب اطمینان

محاسبه شده کمتر از یک شود. نیروهای محرک مؤثر بر

عرض واحد بلوک (شکل ۱) عبارت‌اند از:

- مؤلفه نیروی وزن بلوک موازی سطح گسیختگی

$$(W \sin \beta)$$

معمولاً منحنی شکل هستند و این مسئله باعث تغییر جهت سطح گسیختگی می‌شود. در این حالت، صفحه گسیختگی به صورت قوس دایره‌ای یا منحنی لگاریتمی است (Samadi, 2005). 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،  $FS_i =$  ضریب اطمینان پایداری در قطعه  $i$ ؛  $S_{a_i} =$  مقاومت برشی موجود در قطعه پسیج شده در قطعه  $i$ ؛  $U_{W_i} =$  نیروی فشار آب منفذی مثبت عمود بر سطح گسیختگی در قطعه  $i$ ؛  $F_{cp_i} =$  نیروی هیدرواستاتیک آب رودخانه در قطعه  $i$ ؛  $W_i =$  وزن قطعه  $i$ ؛  $N'_i =$  نیروی قائم مؤثر بر کف قطعه  $i$ ؛  $WSE =$  ارتفاع سطح آب رودخانه؛  $GWSE =$  ارتفاع سطح آب زیرزمینی؛  $Z_{L_i} =$  نیروی بین قطعه‌ای چپ در قطعه  $i$ ؛  $Z_{R_i} =$  نیروی بین قطعه‌ای راست در قطعه  $i$ ؛  $h_{tc} =$  ارتفاع آب داخل ترک کششی؛  $\alpha_i =$  زاویه ساحل قبل از وقوع گسیختگی در قطعه  $i$ ؛  $\beta_i =$  زاویه صفحه گسیختگی در قطعه  $i$ ؛  $b_i =$  عرض قطعه  $i$ ؛  $h_i =$  ارتفاع متوسط قطعه  $i$ ؛  $S_i =$  نیروی فشار آب منفذی منفی عمود بر سطح گسیختگی در قطعه  $i$ ؛ و  $H_{tw} =$  نیروی فشار هیدرواستاتیک ناشی از اعمال نیرو از طرف آب موجود در ترک کششی است. نقاط  $y_f =$  رقوم پاشنه ساحل؛  $y_{fp} =$  رقوم سطح زمین طبیعی یا دشت سیلابی؛ و  $y_k =$  رقوم کف ترک کششی نیز برای معرفی شکل هندسی ساحل رودخانه به کار رفته‌اند.

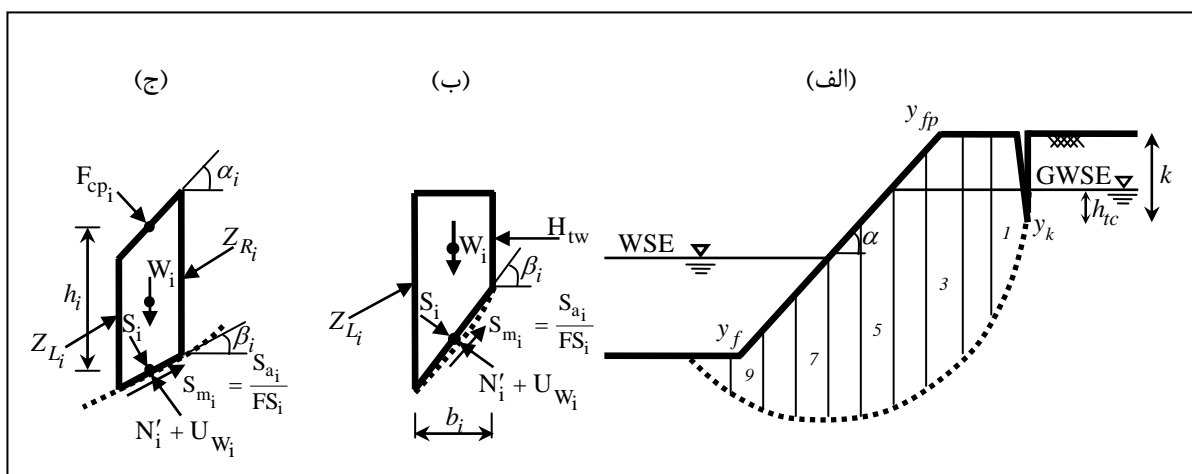
- نیروی فشار آب منفذی مثبت (نیروی زیرفشار) عمود بر سطح گسیختگی  $(U_W)$ ،  
 - مؤلفه نیروی هیدرواستاتیک ناشی از اعمال نیرو از طرف آب موجود در ترک کششی (در حالتی که سطح آب زیرزمینی بالاتر از کف ترک باشد) عمود بر سطح گسیختگی  $(H_{tw} \sin \beta)$ .  
 بنابراین، برآیند نیروهای مقاوم در عرض واحد بلوک عبارت است از (Amiri-Tokaldany, 2002):

$$FR = CL + S \tan \phi^b + (W \cos \beta + F_{cp} \cos \theta - U_W - H_{tw} \sin \beta) \tan \phi' \quad (3)$$

که در آن،  
 $\phi^b =$  زاویه مبین میزان افزایش مقاومت بر اثر مکش؛  
 $L =$  طول سطح لغزش؛ و  $\phi'$  و  $C'$  به ترتیب متوسط وزنی زاویه اصطکاک درونی مؤثر و متوسط وزنی چسبندگی مؤثر مصالح خاکی تشکیل دهنده ساحل در هر بازه از رودخانه است. در مدل جدید نیز اثر تنش برشی اعمال شده توسط جریان آب موجود در آبراهه روی مصالح ساحل رودخانه به‌طور مستقیم در نظر گرفته نشده است زیرا در اکثر آبراهه‌ها میزان تنش برشی در مقابل نیروی هیدرواستاتیک قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه، این محدودیت بر تحلیل پایداری ساحل رودخانه تأثیر نخواهد گذاشت (Amiri-Tokaldany, 2002).

### گسیختگی دایره‌ای<sup>۱</sup>

گسیختگی‌های عمیق از محل پاشنه ساحل در سواحل بلند مرکب از مصالح چسبنده با زوایای شیب کوچک، به دلیل جهت تنش‌های اصلی در تغییرات خاک با عمق،



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

گشتاورها حول مرکز دایره گسیختگی مورد آزمون محاسبه و از نیروهای برشی میان قطعات صرف نظر شده است. با توجه به شکل ۲، گشتاور کل نیروهای مؤثر در هر قطعه حول مرکز دایره گسیختگی عبارت است از:

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 و بر این اساس ضریب اطمینان محاسبه شده است. در این روش تعادل نیروها در جهت قائم برای هر قطعه و تعادل

$$\sum M_o = \sum_{i=1}^n \left[ W_i + F_{cp_i} \cos \alpha_i \right] R \sin \beta_i - \sum_{i=1}^n F_{cp_i} \sin \alpha_i \left( R \cos \beta_i - h_i \right) - \sum_{i=1}^n \left[ S_{m_i} \right] R + H_{tw} \left( R \cos \beta_1 - \frac{h_{tc}}{3} \right) = 0 \quad (4)$$

$$S_{m_i} = \frac{C'_i L_i + S_i \tan \phi_i^b + N'_i \tan \phi'}{FS_i} \quad (5)$$

در رابطه ۵، صورت کسر معادل مقدار مقاومت برشی موجود در امتداد قاعده هر قطعه در داخل توده خاک است. اگر ضریب اطمینان برای تمامی قطعات مورد تحلیل مشابه باشد، با قرار دادن معیار موهر-کولمب در معادله ۴ می توان نوشت:

که در آن،  $R$  = شعاع دایره گسیختگی؛ و  $n$  = تعداد کل قطعات است. شایان ذکر است که ترم نیروی فشار هیدرواستاتیک آب موجود در ترک کششی ( $H_{tw}$ ) فقط برای قطعه اول (در صورت وجود ترک) در یکی از مرزهای آن اعمال می شود. مقاومت برشی بسیج شده موهر-کولمب در امتداد قاعده هر قطعه ( $S_{m_i}$ ) با رابطه زیر بیان می شود:

مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل ...

بدین منظور مطابق رابطه ۶، مقدار  $FS$  به گونه‌ای تعیین می‌شود که:

$$FS = \frac{FR}{FD} \quad (6)$$

$$f(FS) = FS \times FD - FR = 0.0 \quad (11)$$

که در آن،

$$FR = \sum_{i=1}^n \left[ C'L_i + S_i \tan \phi_i^b + N'_i \tan \phi' \right] \quad (7)$$

شود.

در روش تکرار نیوتن-رافسون، پیش‌بینی متوالی مقدار

ضریب اطمینان با استفاده از روابط زیر خواهد بود:

$$FS_{j+1} = FS_j - \frac{f(FS)}{f'(FS)} \quad (12)$$

$$f'(FS) = FD - \frac{\partial(FR)}{\partial(FS)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial(FR)}{\partial(FS)} = \sum_{i=1}^n \tan \phi' \left[ \frac{\sin \beta_i (S_i \tan \phi_i^b + C'L_i + N'_i \tan \phi')}{M_{\beta_i} \times FS^2} \right] \quad (14)$$

در رابطه ۱۲،  $j =$  تعداد تکرارهاست.

در این روش، مقدار اولیه ضریب اطمینان با استفاده از روش معمولی یا روش فلنیوس تعیین می‌شود. 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 می‌شود.

### گسیختگی طاقی شکل<sup>۱</sup>

سواحل رودخانه‌های جاری در رسوبات آبرفتی اغلب

$$FD = \sum_{i=1}^n \left[ \left( W_i + F_{cp_i} \cos \alpha_i \right) \sin \beta_i + H_w \left( \cos \beta_i - \frac{h_c}{3R} \right) - F_{cp_i} \sin \alpha_i \left( \cos \beta_i - \frac{h_i}{R} \right) \right] \quad (8)$$

است.

با محاسبه مجموع نیروها در جهت قائم برای هر قطعه، مقدار نیروی عمودی مؤثر بر هر قطعه از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$N'_i = \frac{I}{M_{\beta_i}} \left[ W_i - S_i \sin \phi_i^b + C'L_i \left( \frac{\sin \beta_i}{FS} \right) - U_{W_i} \cos \beta_i + F_{cp_i} \cos \alpha_i \right] \quad (9)$$

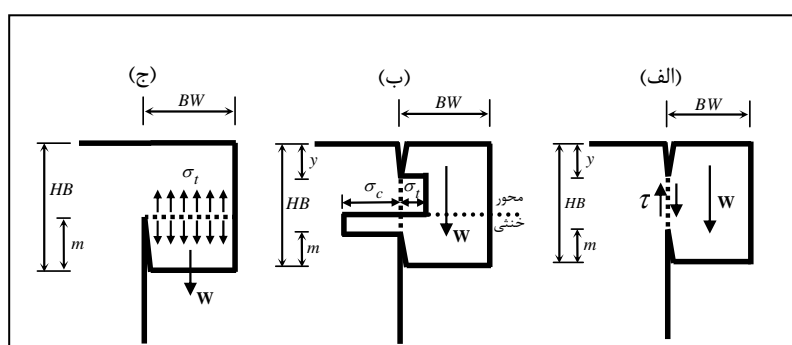
که در آن،  $M_{\beta_i}$  عبارت است از:

$$M_{\beta_i} = \cos \beta_i \left[ 1 + \frac{\tan \beta_i \tan \phi'}{FS} \right] \quad (10)$$

در صورت استفاده از نسبت فشار منفذی ( $r_u$ ) به جای جمله فشار منفذی مثبت و منفی، در معادله ۹ به جای جمله  $U_{W_i}$  از عبارت  $r_u W_i$  استفاده و در نتیجه فشار منفذی منفی  $(S_i \tan \phi_i^b)$  در تمامی معادلات برابر صفر می‌شود. با توجه به معادلات ۶ تا ۱۰، ضریب اطمینان پایداری ( $FS$ ) در دو سمت رابطه ۶ موجود است و برای حل آن از روش تکرار نیوتن-رافسون استفاده می‌شود.

دارای ساختمانی است مرکب از مصالح غیرچسبنده (شن و ماسه) که لایه مصالح چسبنده (سیلت یا رس ماسه‌ای) آن را پوشانده است. 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 مسئله باعث گسیختگی ناحیه تحتانی ساحل

و ایجاد طاق‌های آویزانی از مواد چسبنده می‌شود. عقب‌نشینی ساحل فوقانی اغلب با گسیختگی این طاق‌ها اتفاق می‌افتد. 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.



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 (Thorne & Tovey, 1981)

تورن و تاوی (Thorne & Tovey, 1981) با استفاده از تعادل ایستایی و نظریه تیرها معادلات زیر را برای تحلیل پایداری طاق‌های آویزان ارائه کردند:

$$\frac{FSS}{A} = \frac{(\beta_c - x_c)}{2r} \quad (15)$$

$$\frac{FSB}{A} = \frac{\beta_c^2}{(1+r)B'} \quad (16)$$

$$\frac{FST}{A} = \frac{B}{(1-\beta_c)} \quad (17)$$

تورن و تاوی (Thorne & Tovey, 1981) با توجه به مشاهدات صحرایی از رودخانه‌های متشکل از سواحل مرکب که قسمت‌های تحتانی آنها از مصالح درشت‌دانه غیر چسبنده و قسمت‌های فوقانی آنها از مصالح چسبنده تشکیل شده بود، سه مکانیزم اصلی گسیختگی طاقی شکل شامل گسیختگی برشی، شعاعی، و کششی را معرفی کردند. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است به منظور تحلیل پایداری طاق آویزان تنها اندازه‌گیری مشخصات هندسی طاق و نیز مشخصات فنی خاک موردنیاز است. در این تحلیل آثار ترک‌ها و شکاف‌های ایجاد شده در خاک نیز مدنظر قرار می‌گیرد.



نیز استخراج کرده‌اند. اگرچه به نظر می‌رسد فرضیات تورن و تاوی (Thorne & Tovey, 1988) در خصوص اثبات رابطه ۱۶ صحیح نبوده است.

### قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل

از مدل‌های تحلیل پایداری ساحل رودخانه که تاکنون محققان توسعه داده‌اند، هیچ یک توانایی تحلیل مفصل پایداری ساحل را در مقابل شکل‌های مختلف گسیختگی و به ویژه گسیختگی طاقی شکل ندارد (Osman & Thorne, 1988; Darby & Thorne, 1996b; Amiri-Tokaldany, 2002). با این همه، مدل‌های معدودی چون مدل داربی و تورن (Darby & Thorne, 1996a) و ایوب‌زاده و هوشیانی (Ayyoubzade & Hooshyani, 2004) که دو نوع گسیختگی صفحه‌ای و دایره‌ای را مدنظر قرار داده‌اند، فرضیات ساده‌ای را به کار برده‌اند. برای مثال، در این دو مدل حالت ایجاد ترک کششی در گسیختگی دایره‌ای لحاظ نشده و از نیروی سطح آب رودخانه و سطح آب زیرزمینی نیز صرف‌نظر شده است و تنها دوایری بررسی شده‌اند که از پاشنه ساحل عبور می‌کنند. در بخش گسیختگی صفحه‌ای نیز هر دو مدل روابط بسیار ساده عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) را به کار برده‌اند. بر این اساس، با توجه به نقص موجود در اکثر مدل‌های پیشین در به کارگیری تنها یک روش جهت تحلیل یا به کارگیری حالت ساده‌ای از تخریب، در مدل حاضر روندنمای کاملی برای تحلیل پایداری سواحل رودخانه توسعه یافته که قابلیت تجزیه و تحلیل حالت‌های غالب گسیختگی سواحل را داراست. مکانیزم‌های گسیختگی ساحل بر اثر فرایندهای فرسایشی مختلف، به اندازه، شکل هندسی، ساختمان یا

که در آنها،

$$A = \frac{\sigma_t}{\gamma_s \times BW} \quad (18)$$

و  $r =$  نسبت بین مقاومت کششی ( $\sigma_t$ ) و مقاومت فشاری خاک ( $\sigma_c$ )؛ و  $\sigma_t =$  مقدار مقاومت کششی خاک است. آجاز (Ajaz, 1973) مقدار  $r$  را ۰/۱ توصیه کرده است. پایداری یک بلوک به تغییرات مقدار  $r$  کمتر حساس است به طوری که تغییر در مقدار  $r$  با ضریب دو، تنها موجب تغییر مقدار ضریب ایمنی به میزان کمتر از ۱۰ درصد می‌شود (Thorne & Tovey, 1981). کمیت‌های  $\beta_c$ ،  $B$ ،  $x_c$  و  $B' =$  اعداد بدون بعدی هستند که تنها به شکل هندسی طاق آویزان وابسته‌اند و مطابق شکل ۳ عبارت‌اند از:

$$B = \frac{BW}{HB} \quad (19)$$

$$B' = B \left[ \frac{\beta_c}{\beta_c - x_c} \right]^2 \quad (20)$$

$$\beta_c = \left( \frac{HB - m}{HB} \right) \quad (21)$$

$$x_c = \left( \frac{y}{HB} \right) \quad (22)$$

در روابط ۱۵ تا ۲۲،  $FSS =$  ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی؛  $FSB =$  ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی شعاعی؛  $FST =$  ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی کششی؛  $HB =$  ارتفاع بلوک خاک آویزان؛  $BW =$  عرض بلوک خاک آویزان؛  $y =$  عمق ترک فوقانی؛ و  $m =$  عمق ترک تحتانی ایجادشده در اثر خشکی خاک است. گفتنی است که روابط فوق را نویسندگان این مقاله

وقوع گسیختگی‌های صفحه‌ای در سواحل کوتاه و با شیب تند از لحاظ علمی به اثبات رسیده است و وقوع گسیختگی دایره‌ای نیز به سواحل بلند و ملایم محدود می‌شود (Samadi, 2005). یکی دیگر از حالت‌هایی که احتمال تشکیل آن در طبیعت وجود دارد، شرایطی است که ساحل به صورت ناهمگن و مرکب از مصالح مختلف لایه‌لایه‌ای باشد. در این شرایط دو حالت اصلی وجود دارد، اول اینکه مصالح تشکیل‌دهنده بخش تحتانی ساحل چسبنده است و با لایه‌هایی از مصالح غیرچسبنده پوشیده شده است. در این حالت حضور مصالح چسبنده در زیر مصالح غیرچسبنده (شن و ماسه) معمولاً موجب تشکیل تراس در رودخانه می‌شود که تمایل به محافظت از مصالح غیرچسبنده فوقانی را در برابر فرسایش رودخانه‌ای و بیش از حد شیب‌دار شدن ساحل دارد (Thorne & Tovey, 1981). در حالت دیگر، مصالح غیرچسبنده بخش تحتانی ساحل با لایه‌ای از مصالح چسبنده پوشیده می‌شود. در این حالت بسته به اندازه، جنس، و مقاومت مصالح غیرچسبنده تشکیل‌دهنده ساحل در برابر عوامل فرسایشی مختلف، احتمال آبشستگی بخش تحتانی ساحل و ایجاد طاق آویزانی از مصالح چسبنده ساحل فوقانی وجود دارد. در این صورت، وضعیت پایداری طاق آویزان با استفاده از روابط معرفی شده در بخش قبلی بررسی می‌شود. اما اگر مصالح بخش تحتانی ساحل در برابر آبشستگی با جریان رودخانه و فرسایش درونی مصالح مقاوم باشد و جابه‌جا نشود، طاق آویزان ایجاد نمی‌شود و مانند حالت مصالح همگن و چسبنده بسته به ارتفاع و زاویه شیب ساحل، امکان بروز گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای وجود خواهد داشت پس از بررسی اطلاعات هندسی مقطع موردنظر ساحل، این دو نوع گسیختگی بر اساس معیارهای ارائه‌شده قابل تفکیک از یکدیگر هستند. برخلاف سواحل غیرچسبنده که پایداری آنها مستقل از ارتفاع است، پایداری سواحل چسبنده به طور وسیع به زاویه و ارتفاع ساحل وابسته است. در این نوع سواحل، گسیختگی به واسطه لغزشی عمیق در محل پاشنه ساحل به وجود می‌آید. علت این مسئله بیشتر بودن میزان ازدیاد مقاومت برشی با افزایش عمق در مقابل تنش برشی مصالح چسبنده است. بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های محققان پیشین،

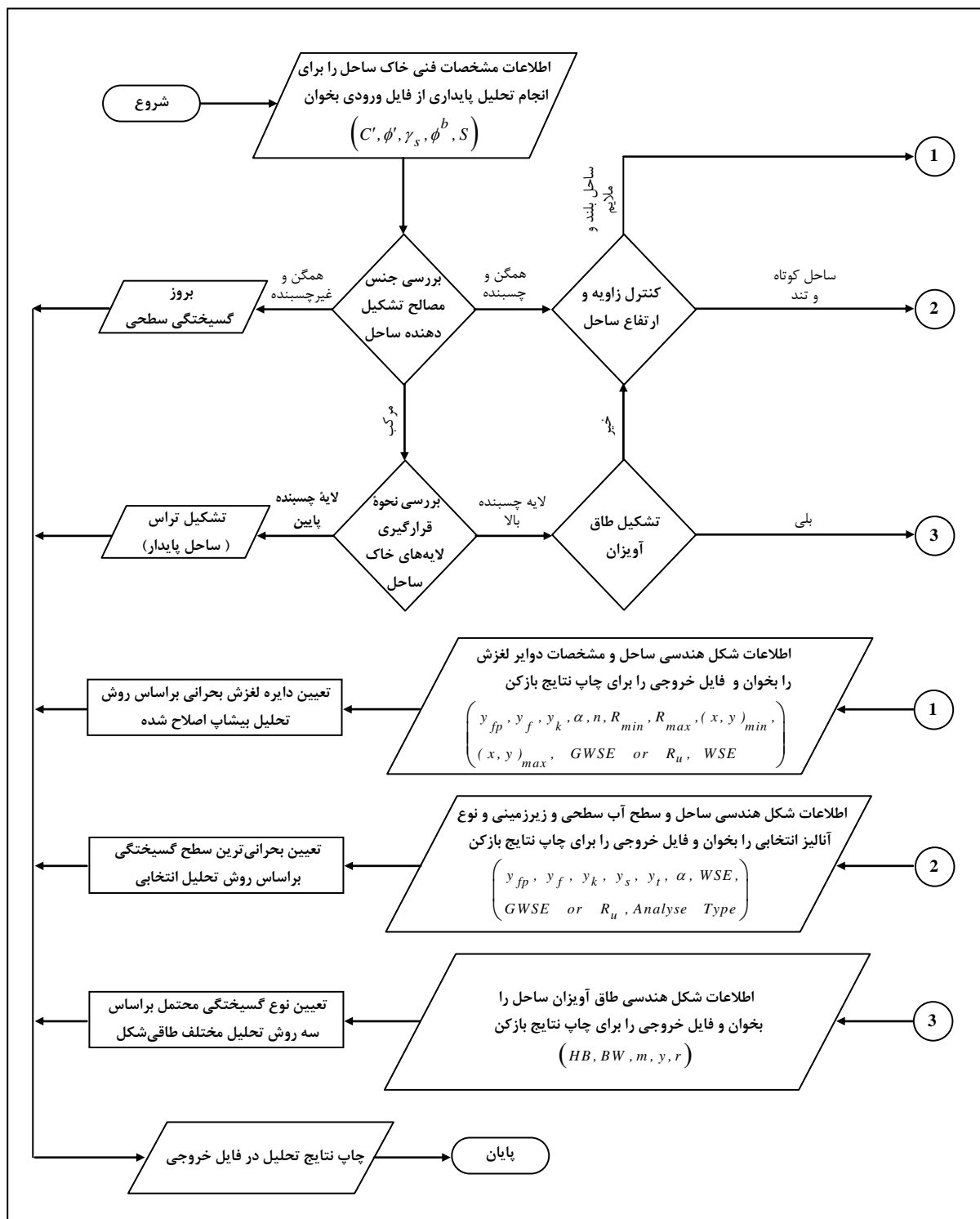
نحوه قرارگیری لایه‌های خاک ساحل، و به مشخصات فنی مصالح ساحل وابسته‌اند. سواحل بر این اساس به سه گروه ساحل همگن، و غیرچسبنده، همگن و چسبنده یا مرکب تقسیم می‌شوند. پس از تفکیک جنس مصالح تشکیل‌دهنده ساحل با توجه به نمونه‌برداری و آزمون خاک آن، ساحل موردنظر در قالب یکی از سه مورد فوق طبقه‌بندی می‌شود. ساحل متشکل از مصالح غیرچسبنده، نیازی به بررسی اطلاعات هندسی سواحل موردنظر ندارد زیرا گسیختگی این نوع سواحل عمدتاً به صورت لغزش سطحی و ریزش مصالح به داخل جریان است و تحلیل آن نیز تنها براساس نسبت زاویه اصطکاک داخلی ذرات و زاویه شیب ساحل صورت می‌پذیرد. در این حالت، گسیختگی رخ داده در زمره گسیختگی توده‌ای<sup>۱</sup> ساحل قرار نمی‌گیرد و برای بررسی پایداری ساحل و برآورد زمان دقیق وقوع گسیختگی ذرات غیرچسبنده واقع بر سطح ساحل و حجم گسیختگی ناشی از آن روابط مشخصی نیز وجود ندارد. در صورتی که ساحل متشکل از مصالح چسبنده باشد، بسته به شکل هندسی، ارتفاع، و زاویه شیب ساحل امکان بروز گسیختگی صفحه‌ای یا دایره‌ای وجود خواهد داشت که پس از بررسی اطلاعات هندسی مقطع موردنظر ساحل، این دو نوع گسیختگی بر اساس معیارهای ارائه‌شده قابل تفکیک از یکدیگر هستند. برخلاف سواحل غیرچسبنده که پایداری آنها مستقل از ارتفاع است، پایداری سواحل چسبنده به طور وسیع به زاویه و ارتفاع ساحل وابسته است. در این نوع سواحل، گسیختگی به واسطه لغزشی عمیق در محل پاشنه ساحل به وجود می‌آید. علت این مسئله بیشتر بودن میزان ازدیاد مقاومت برشی با افزایش عمق در مقابل تنش برشی مصالح چسبنده است. بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌های محققان پیشین،

محدوده شعاع آنها و میزان تغییر بین دو مقدار متوالی را برای مدل مشخص کند.

- در بخش گسیختگی صفحه‌ای، مدل حاضر نه تنها قابلیت محاسبه زاویه گسیختگی ساحل را با استفاده از روش‌های ساده‌ای مانند روش لوهنس و هندی (Lohnes & Handy, 1968)، عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988) و امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) داراست، امکان محاسبه زاویه گسیختگی ساحل نیز با استفاده از روش داربی-تورن (که در این مدل اصلاح شده است) در حالت حضور کلیه نیروهای مؤثر در سطح لغزش وجود دارد. در این زمینه، حالات مختلف نحوه قرارگیری سطح آب زیرزمینی و سطح آب رودخانه با توجه به شکل هندسی ساحل جهت تعیین نیروی فشار آب منفذی مثبت و نیروی فشار هیدرواستاتیک آب رودخانه در نظر گرفته می‌شود و در هر حالت با استفاده از روابط مربوط، نیروهای بالابرنده و نیروی هیدرواستاتیک ناشی از آب رودخانه محاسبه خواهند شد. برخلاف مدل‌های پیشین که برای 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 دارد و در نهایت بحرانی‌ترین شرایط را مشخص می‌کند.

مقطع(های) بازه‌ای از ساحل رودخانه در مقابل گسیختگی محتمل آن مقطع(ها)، فهرست می‌شود. شکل ۴ به اختصار مراحل طی شده در مدل جدید را برای تحلیل پایداری ساحل نشان می‌دهد. مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR) که در این تحقیق توسعه یافته، علاوه بر اینکه توانایی تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌ها را با توجه به هر سه نوع گسیختگی محتمل فوق‌الذکر داراست، در زمینه تحلیل پایداری ساحل در اثر گسیختگی دایره‌ای و صفحه‌ای نیز نسبت به مدل‌های پیشین مزایایی به شرح زیر دارد:

- در بخش گسیختگی دایره‌ای، مدل جدید توانایی در نظر گرفتن ترک کششی در قسمت فوقانی ساحل (سطح دشت سیلابی) یا روی شیب ساحل را داراست و علاوه بر در نظر گرفتن نیروهای هیدرواستاتیک ناشی از آب موجود در ترک و فشار هیدرواستاتیک ناشی از آب رودخانه، نیروی فشار منفذی را با استفاده از ضریب فشار یا سطح آب زیرزمینی در محاسبات منظور می‌کند. همچنین، اگر اطلاعاتی نظیر ارتفاع معادل مکش خاک وجود داشته باشد، مدل توانایی در نظر گرفتن نیروی فشار منفذی منفی را در هر یک از قطعات مورد تحلیل با روش ساده‌شده بیشاپ داراست. در زمینه تعداد دوایر لغزش، تعداد قطعات مورد تحلیل، موقعیت مرکز دوایر، و همچنین شعاع آنها هیچگونه محدودیتی در مدل جدید وجود ندارد و کاربر می‌تواند به سادگی محدوده قرارگیری مرکز دوایر لغزش و



شکل ۴- روندنمای محاسبات در مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه

### نتایج و بحث

در این بخش، توانایی مدل در تحلیل پایداری ساحل در مقابل شکل‌های مختلف گسیختگی با ارائه مثال‌های عددی مرتبط با حالت گسیختگی مورد نظر تشریح می‌شود.

### گسیختگی صفحه‌ای

در این مثال، پایداری مقطعی از ساحل آبراهه هوتوفیا، از سرشاخه‌های رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا در مقابل گسیختگی صفحه‌ای بررسی شده است. مطابق اطلاعات صحرایی موجود، بافت خاک تشکیل‌دهنده ساحل چسبنده، شیب ساحل تند ( $\alpha > 60^\circ$ )، و ارتفاع ساحل کوتاه ( $H < 10m$ ) است. بر این اساس وقوع گسیختگی صفحه‌ای در این حالت محتمل‌ترین نوع گسیختگی است که در طبیعت نیز به وقوع پیوسته است. در این مثال، علاوه بر تحلیل پایداری از طریق روابط و مدل‌های موجود و مقایسه نتایج، مقدار بحرانی عمق ترک کششی محاسبه شده با مدل گسترده نیز با مقدار اندازه‌گیری شده عمق ترک کششی در طبیعت مقایسه شده است. در جدول ۱، مشخصات فنی و هندسی ساحل و همچنین مشخصات هندسی بلوک گسیختگی مشاهده شده ارائه شده است. در این جدول،  $VB =$  حجم بلوک گسیخته شده؛  $\gamma_s =$  متوسط وزنی وزن مخصوص مصالح ساحل؛ و  $\alpha =$  زاویه شیب ساحل می‌باشند و سایر پارامترها در بخش‌های قبلی معرفی شده‌اند.

در مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه (EMSAR)، برخی از محدودیت‌های موجود در مدل‌های قبلی مرتفع شده است، با این همه برخی از محدودیت‌ها همچنان باقی است. به دلیل اینکه در طبیعت انتظار وقوع یک صفحه گسیختگی کاملاً مستقیم در سواحل چندلایه بعید است، توسعه تحلیل پایداری بر اساس روش‌های تعادل حدی و در نظر گرفتن سواحل چندلایه همراه با سطح گسیختگی مستقیم در تمامی لایه‌ها، تاثیر چندانی 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 شد 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 شد و از تاثیر نوسانات موجود در سطح آب رودخانه که به جهت وزش باد مربوط است چشم‌پوشی 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. همانند اکثر مدل‌های تحلیل پایداری قبلی، نقش پوشش گیاهی با توجه به پیچیدگی‌ها و تاثیرات متفاوت و ناشناخته گیاهان مختلف در پایداری ساحل که به نوعی به شرایط آب و هوایی و اقلیم منطقه مورد مطالعه بر می‌گردد، به صورت خیلی ساده با لحاظ کردن افزایش در چسبندگی ناشی از وجود ریشه‌ها و افزایش در وزن بلوک ناشی از حضور گیاه در مدل در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و فنی مقطعی از آبراهه هوتوفیا در آمریکا (Amiri-Tokaldany, 2002)

$\gamma_s$	$\phi'$	$C'$	$k_h$	$k$	$\beta$	$\alpha$	$VB$	$BW$	$H'$	$H$
(کیلونبوتن بر متر مکعب)	(درجه)	(کیلوپاسکال)	(متر)	(متر)	(درجه)	(درجه)	(مترمکعب بر متر)	(متر)	(متر)	(متر)
۲۱/۲	۱۴	۲۲	۰/۰	۳/۳۶	۵۷	۷۶	۱۰/۲۹	۱/۴	۵/۹۹	۶/۴

در روش امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002)، مشخصات هندسی بلوک و عمق ترک کششی بحرانی توسط مدل جدید پیش‌بینی شده که نتایج حاصل در مقابل مقادیر مشاهده شده در طبیعت در بخش انتهایی جدول ۲ نمایش داده شده است. مطابق جدول ۲، روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) بدون نیاز به ورود مقدار عمق ترک کششی مشاهده شده، بحرانی ترین حالت گسیختگی را محاسبه و کلیه پارامترهای هندسی بلوک جدا شده از ساحل شامل عمق و موقعیت ترک کششی و زاویه صفحه گسیختگی را تعیین می‌کند. مقدار عمق ترک کششی پیش‌بینی شده با مدل با مقدار مشاهده شده در آبراهه تفاوت دارد اما مقدار عمق ترک کششی در مقایسه با سایر پارامترها نظیر زاویه ساحل و چسبندگی مصالح ساحل در تحلیل پایداری ساحل چندان مؤثر نیست (Samadi, 2005). مطابق نتایج روش امیری تکلدانی (اصلاح شده) در جدول ۲، این روش در مقایسه با سایر روش‌های قبلی که در بخش فوقانی جدول به آنها اشاره شده است، مقدار عرض بلوک گسیختگی و حجم مصالح ناشی از تخریب ساحل را بسیار نزدیک‌تر به واقعیت تخمین می‌زند، هرچند زاویه گسیختگی را به مقداری ناچیز از زاویه بهینه روش‌های قبلی کمتر برآورد می‌کند. با این همه، توانایی مدل حاضر در تخمین پایداری پیش از وقوع گسیختگی با تخمین عمق ترک کششی محتمل انکارناپذیر است.

پیشتر اشاره شد که یکی از قابلیت‌های مدل جدید نسبت به مدل‌های پیشین آن است که به ورود مشخصات هندسی بلوک جهت تحلیل پایداری ساحل نیاز ندارد و از این رو امکان ارزیابی توانایی مدل در پیش‌بینی عمق ترک کششی بحرانی با عمق ترک کششی مشاهده شده در طبیعت وجود دارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج تحلیل پایداری با سایر روش‌ها که نیازمند ورود مقدار عمق ترک کششی یا زاویه صفحه گسیختگی برای تحلیل هستند امکان‌پذیر خواهد بود. پس از اجرای مدل، نتایج پیش‌بینی شده عرض بلوک، زاویه صفحه گسیختگی و حجم رسوبات حاصل از شکست توده‌ای ساحل با روش‌های مختلف به دست آمده و در جدول ۲ با مقادیر مشاهده شده مقایسه شده‌اند. مقادیر بهینه روش‌های مورد بررسی در جدول مزبور مشخص شده‌اند که حکایت از برتری روش امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) در پیش‌بینی مقادیر عرض و حجم بلوک و زاویه صفحه گسیختگی دارد. یادآوری می‌شود که در این تحلیل محدودیت موجود در روش امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) که عمق ترک کششی موجود ( $k$ ) را معادل عمق ترک کششی قبلی ( $k_h$ ) در نظر می‌گرفت مرتفع و همانند سایر روش‌ها عمق ترک کششی موجود برای تحلیل پایداری ساحل رودخانه براساس مبانی آن روش استفاده شده است. از طرف دیگر، با مجهول در نظر گرفتن عمق ترک کششی

جدول ۲- مشخصات هندسی بلوک پیش‌بینی شده با روش‌های مختلف و مشخصات هندسی و عمق ترک کششی پیش‌بینی شده با مدل گسترده و مقایسه آنها با مقادیر مشاهده شده در طبیعت

مشاهده شده				پیش‌بینی شده				نام روش
<i>VB</i>	<i>BW</i>	$\beta$	<i>k</i>	<i>VB</i>	<i>BW</i>	$\beta$	<i>k</i>	
(متر مکعب بر متر)	(متر)	(درجه)	(متر)	(متر مکعب بر متر)	(متر)	(درجه)	(متر)	
				۱۰/۸۹	۱/۷۱	۴۵/۰	----	لوهنس - هندی
				۱۱/۵۰	۱/۸۳	۴۳/۹	----	عثمان - تورن
				۱۱/۵۰	۱/۸۳	۴۳/۹	----	داربی - تورن
۱۰/۲۹	۱/۴	۵۷	۳/۳۶	۱۰/۸۶*	۱/۷۰*	۴۵/۱*	----	امیری تکلدانی
				۱۰/۲۷	۱/۵۰	۴۴/۶	۲/۹۵	امیری تکلدانی (اصلاح شده)

\* مقادیر بهینه

است و مدل موجود علاوه بر در نظر گرفتن نیروهایی که به طور معمول در روش ساده شده بیشاپ در نظر گرفته می‌شود، نیروی هیدرواستاتیک ناشی از آب موجود در ترک کششی را در قطعه اول و نیروی فشار منفذی منفی را در تمامی قطعات در محاسبات در نظر می‌گیرد. پس از اجرای مدل برای اطلاعات موجود مقطعی از آبراهه پاپیلیون، ضریب اطمینان پایداری ساحل با توجه به گسیختگی دایره‌ای و مشخصات هندسی دایره لغزش بحرانی در جدول ۴ ارائه شده است. در این محاسبات مبدا مختصات در محل پاشنه ساحل در نظر گرفته شده و با توجه به نتایج اجرای مدل، عرض مرکز دایره لغزش از محل پاشنه ساحل (مبدا) برابر ۵/۳۳ متر به سمت خارج شیب است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، ضریب اطمینان محاسبه شده برای پایداری ساحل، بر احتمال تخریب ساحل مورد نظر مطابق آنچه در طبیعت رخ داده تاکید می‌کند.

### گسیختگی دایره‌ای

در این مثال، پایداری مقطعی از ساحل آبراهه پاپیلیون از سرشاخه‌های رودخانه میسوری در آمریکا در مقابل گسیختگی دایره‌ای بررسی شده است. مطابق اطلاعات صحرایی موجود، بافت خاک تشکیل دهنده ساحل، چسبنده و شیب ساحل نسبتاً ملایم ( $\alpha < 60^\circ$ ) اما ارتفاع ساحل کوتاه ( $H < 10m$ ) است. نتایج بررسی‌های صحرایی حکایت از وقوع گسیختگی دایره‌ای در مقطع مورد نظر دارد و نتایج آزمون پایداری نیز وقوع گسیختگی دایره‌ای را که در طبیعت نیز به وقوع پیوسته تائید می‌کند. بدین منظور، تحلیل پایداری بر اساس روش ساده شده بیشاپ صورت گرفته که در قسمت گسیختگی دایره‌ای بخش مواد و روش‌ها بدان اشاره شد. در جدول ۳، مشخصات فنی و هندسی ساحل ارائه شده است. تحلیل پایداری ساحل در مقابل گسیختگی دایره‌ای با و بدون حضور ترک کششی توسط مدل گسترده توسعه یافته در این تحقیق انجام شده

جدول ۳- مشخصات هندسی و فنی مقطعی از آبراهه پایلیون در آمریکا  
(Soenksen et al., 2003)

$\gamma_s$	$\phi'$	$C'$	$k$	$\alpha$	$H$
(کیلونیوتن بر متر مکعب)	(درجه)	(کیلوپاسکال)	(متر)	(درجه)	(متر)
۱۷/۹	۲۶	۷/۶	۰/۶	۵۸	۷/۹

جدول ۴- مشخصات هندسی دایره لغزش بحرانی و ضریب اطمینان پایداری مقطع مورد نظر آبراهه پایلیون

$F_S$	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
—	(متر)	(متر)	(متر)	(متر مکعب بر متر)	(متر)
۰/۹۰	۵/۳۳	۱۳/۳۳	۱۴/۳۰	۱۹/۷۶	۲/۷۰

### گسیختگی طاقی شکل

گسترده توسعه یافته و در این تحقیق میسر شده است. پس از اجرای مدل برای مشاهدات صحرایی صورت گرفته در رودخانه سورن، ضریب اطمینان پایداری ساحل با توجه به شکل‌های مختلف گسیختگی در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل شرایط تخریب ایجاد شده در طبیعت را تأیید می‌کند. در واقع با ایجاد ترک کششی در اثر خشکی مصالح ساحل در قسمت تحتانی بلوک آویزان، ساحل در آستانه تخریب قرار می‌گیرد و با توسعه ترک کششی در قسمت فوقانی تخریب می‌شود. در جدول ۶ مشخص شده که ضریب اطمینان پایداری ساحل در مقابل گسیختگی شعاعی کمتر از یک و تخریب ساحل بدیهی است. علاوه بر این، مشاهده شد که توسعه ترک کششی فوقانی بر ضریب اطمینان پایداری ساحل در مقابل گسیختگی کششی بی‌تاثیر است.

در این مثال، تحلیل پایداری مقطعی از ساحل رودخانه سورن واقع در ولز در مقابل گسیختگی طاقی شکل بر اساس روابط ارائه شده توسط تورن و تاوی (Thorne & Tovey, 1981) که مولفان نیز آن را اثبات کرده‌اند، صورت پذیرفته است. در جدول ۵، مشخصات فنی و هندسی ساحل ارائه شده است. مشخصات فنی خاک ساحل و شواهد طبیعی، وقوع پدیده زیرکنی در ناحیه تحتانی ساحل و اختلاط مصالح غیرچسبنده ساحل تحتانی با جریان رودخانه را که منجر به ایجاد طاق آویزان مرکب از مصالح چسبنده ساحل فوقانی می‌شود، تأیید می‌کند.

قبلاً اشاره شد که امکان تحلیل پایداری ساحل در مقابل گسیختگی طاقی شکل برای اولین بار توسط مدل



جدول ۵- مشخصات هندسی و فنی مقطعی از رودخانه سورن در ولز (Thorne & Tovey, 1981)

مشاهدات صحرائی	$y$	$m$	$r$	$\sigma_c$	$\sigma_t$	$\gamma_s$	BW	HB
	(میلی متر)	(میلی متر)	—	(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	(کیلو نیوتن بر متر مکعب)	(متر)	(متر)
ساعت ۳:۰۰ بعدازظهر، ۱۵ سپتامبر ۱۹۷۷ (بلوک پایدار)	۰	۰						
ساعت ۳:۱۵ بعدازظهر، ۱۷ سپتامبر ۱۹۷۷ (ایجاد ترک کششی تحتانی بر اثر خشکی)	۰	۸۰						
ساعت ۳:۳۰ بعدازظهر، ۱۷ سپتامبر ۱۹۷۷ (توسعه ترک کششی در قسمت فوقانی بلوک آویزان و گسیختگی شعاعی اندکی پس از ساعت ۳:۳۰ بعد از ظهر)	۵۰	۸۰	۰/۰۸	۹۸	۷/۵	۱۵/۳	۰/۳	۰/۴

جدول ۶- وضعیت پایداری مقطع مورد نظر ساحل رودخانه سورن در مقابل گسیختگی طاقی شکل

وضعیت	زمان	FST	FSB	FSS
۱	ساعت ۳:۰۰ بعدازظهر، ۱۵ سپتامبر ۱۹۷۷	∞	۲/۰۲	۱۰/۲۱
۲	ساعت ۳:۱۵ بعدازظهر، ۱۷ سپتامبر ۱۹۷۷	۶/۱۳	۱/۲۹	۸/۱۷
۳	ساعت ۳:۳۰ بعدازظهر، ۱۷ سپتامبر ۱۹۷۷	۶/۱۳	۰/۹۲	۶/۸۹

### نتیجه گیری

برخی از این نقص‌ها، در این مقاله یک مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه ارائه شد که می‌تواند پایداری سواحل رودخانه‌های دربردارنده شرایط فیزیکی مختلف را در مقابل حالت‌های غالب گسیختگی توده‌ای شامل گسیختگی صفحه‌ای، دایره‌ای، و طاقی شکل تحلیل کند.

ارائه مدل‌های دقیق و کامل تحلیل پایداری سواحل در برابر انواع گسیختگی‌ها، یکی از الزامات اساسی در مهندسی رودخانه است. محققان مدل‌های زیادی برای تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌ها توسعه داده‌اند اما همه آنها کم و بیش نقص‌هایی دارند. به منظور برطرف کردن

مقادیر عرض و حجم بلوک و زاویه صفحه گسیختگی در مقایسه با سایر روش‌ها برای مقطع موردنظر آبراهه هوتوفیا بهتر برآورد می‌شود.

- مقادیر عرض و حجم بلوک پیش‌بینی‌شده با روش امیری تکلدانی (اصلاح‌شده) در حالت نامعین‌بودن عمق ترک کششی نسبت به مقادیر بهینه که در حالت معین‌بودن عمق ترک محاسبه شده‌اند مطابقت بیشتری با مقادیر مشاهده شده دارند.

• **گسیختگی دایره‌ای:**

- تحلیل پایداری مقطعی از ساحل آبراهه پایلیون با استفاده از روش ساده‌شده بیشاپ، احتمال تخریب ساحل را به شکل‌های مختلف نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین دایره گسیختگی ساحل دارای شعاع ۱۴/۳ متر همراه با توسعه ترک کششی به عمق ۶۰ سانتی‌متر در فاصله ۲/۷ متری از لبه فوقانی ساحل است.

• **گسیختگی طاقی شکل:**

- نتایج تحلیل پایداری با استفاده از روش تورن و تاوی (Thorne & Tovey, 1981) وقوع گسیختگی از نوع شعاعی را که در مقطع موردنظر رودخانه سورن مشاهده شده است تأیید می‌کند. در واقع، با ایجاد ترک کششی در اثر خشکی مصالح ساحل در قسمت تحتانی بلوک آویزان، ساحل در آستانه تخریب قرار می‌گیرد و با توسعه ترک کششی در قسمت فوقانی ساحل تخریب می‌شود.

در مدل جدید، تحلیل پایداری ساحل در مقابل گسیختگی صفحه‌ای با استفاده از روش‌های مختلفی مانند روش لوهنس و هندی (Lohnes & Handy, 1968)، عثمان و تورن (Osman & Thorne, 1988)، داربی و تورن (Darby & Thorne, 1996b)، داربی و تورن اصلاح‌شده و امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002) 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. با توجه به شیب تند سواحل رودخانه‌ها و ارتفاع کم سواحل اگر چه احتمال وقوع گسیختگی دایره‌ای بسیار پایین است، اما در مدل حاضر امکان تحلیل پایداری ساحل رودخانه در مقابل این نوع گسیختگی نیز میسر هست. بدین منظور از روش ساده‌شده بیشاپ به صورت اصلاح‌شده و با در نظر گرفتن نیروی مکش و نیروی هیدرواستاتیک در اثر آب موجود در ترک کششی، استفاده شده است.

برای تحلیل پایداری سواحل در مقابل شکل‌های غالب گسیختگی شامل صفحه‌ای، دایره‌ای، و طاقی شکل از این مدل در سه رودخانه مختلف استفاده شد تا توانایی آن ارزیابی شود که نتایج آن به شرح زیر است:

• **گسیختگی صفحه‌ای:**

- مدل نشان می‌دهد که در تحلیل گسیختگی صفحه‌ای با روش امیری تکلدانی (Amiri-Tokaldany, 2002)

**قدردانی**

نگارندگان لازم می‌دانند که از قطب علمی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران که تامین هزینه‌های مالی این تحقیق را بر عهده داشته‌اند قدردانی کنند.

- Ajaz, A. 1973. Stress-strain behaviour of compacted clays in tension and compression. Ph.D. Thesis. Cambridge University. UK.
- Amiri-Tokaldany, E. 2002. A model of bank erosion and equilibrium bed topography in river bends. Ph.D. Thesis. Deptment. of Civil and Environmental Engineering. University of Southampton. Southampton. UK.
- Ayyoubzade, S. A. and Hooshyani, B. 2004. Mathematical model of rivers and erodible channels cross changes. *Inter. J. Eng. Sci.* 15(2): 97-115. (in Farsi)
- Darby, S. E. and Thorne, C. R. 1996a. Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers. I: Model development. *J. Hydraulic Eng.* 122(4):184-193.
- Darby, S. E. and Thorne, C. R. 1996b. Development and testing of riverbank-stability analysis. *J. Hydraulic 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. 1985. Channel width response to changes in flow hydraulics and sediment load. Ph.D. Thesis. Colorado State University. Fort Collins. CO, USA.
- Osman, A. M. and Thorne, C. R. 1988. Riverbank stability analysis. I: Theory. *J. Hydraulic Eng.* 114(2): 134-150.
- Samadi, A. 2005. Determination the location and depth of tension crack and their effects on riverbank stability. M.Sc. Thesis. Deptment of Irrigation and Reclamation Engineering. University of Tehran. Tehran. Iran. (in Farsi)
- 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.
- Thorne, C. R. and Osman, A. M. 1988. Riverbank stability analysis. II: Applications. *J. Hydraulic Eng.* 114(2): 151-172.
- Thorne, C. R. and Tovey, N. K. 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms.* 6(5): 469-484.

## **Extensive Model of Stability Analysis of Riverbanks**

**A. Samadi<sup>\*</sup>, E. Amiri- Tokaldany and H. Rahimi**

<sup>\*</sup>Corresponding Author: Ph.D. student, University of Tehran, P. O. Box: 4111, Tehran, Iran. E-mail: amsamadi@ut.ac.ir

Riverbank erosion, land loss and associated sedimentation are river engineering and water resources management problems of global significance. The ability to predict riverbank stability on eroding rivers is the prerequisite of developing a channel width adjustment model and is essential for estimating riverbank erosion and associated sedimentation. In this research, a detailed model for stability analysis of riverbanks is introduced. Contrary to most available models developed based only on one type of planar or rotational failure, the new model includes both these types of failure, providing the ability to analysis bank stability using other available methods and compare the results. Furthermore, this new, unique model has the ability to analyze riverbank stability against cantilever failure. The most suitable analysis method was first selected based on bank material characteristics and stratification and the height and slope angle of the riverbank. The stability of the riverbank was then analyzed based on probable failure methods. The application of the new model providing examples of different types of failure is described.

**Key Words:** Cantilever Failure, Planar Failure, River Bank Erosion, Rotational Failure, Stability Analysis