

## شناخت اثرات عدم قطعیت پارامترهای موثر در مدلسازی پایداری سواحل رودخانه‌ها در مقابل مکانیزم گسیختگی طاقی شکل (مطالعه موردی رودخانه کردان)

محمدهادی داودی<sup>1</sup>، امیر صمدی<sup>2</sup>، ابراهیم امیری تکلدانی<sup>3</sup>، حسن رحیمی<sup>4</sup>

1- استادیار، مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی در کشاورزی و منابع طبیعی، تهران

2، 3 و 4- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

amsamadi@ut.ac.ir

### خلاصه

عدم مطالعه گسترده پدیده گسیختگی طاقی شکل در سواحل چندلایه رودخانه‌ها توسط محققین مختلف و فقدان روابط تحلیلی کامل و مستدل برای تخمین ضریب اطمینان پایداری ساحل، نشانگر اهمیت تعیین و اندازه‌گیری پارامترهای موثر در پایداری ساحل می‌باشد. به دلیل وجود مشکلات فنی و اجرایی و عدم امکان ثبت تغییرات زمانی پارامترهای موثر در پایداری طاق آویزان در طبیعت، تخمین برخی از پارامترهای موثر به راحتی میسر نبوده لذا در برخی موارد با پذیرفتن درصدی خطا در محاسبات مربوطه، با استفاده از تجارب و اطلاعات موجود نسبت به تخمین مقدار آنها اقدام می‌شود. از آنجا که تاکنون روابط ساده‌ای برای تحلیل پایداری گسیختگی طاقی شکل مورد استفاده قرار گرفته، برای تعیین میزان تأثیر پارامترهای موثر نیز تحقیقات بسیار اندکی به عمل آمده است. در این تحقیق با در نظر گرفتن اثر تمامی پارامترهای موثر در تحلیل پایداری طاق‌های تشکیل شده در سواحل رودخانه و با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از سواحل رودخانه کردان در استان البرز، پایداری سواحل رودخانه در مقابل گسیختگی طاقی شکل بررسی و اثرات عدم قطعیت موجود در تعیین پارامترهای بکار رفته در مدلسازی پایداری ساحل مشخص شده است. مقدار ضریب اطمینان ساحل در برابر گسیختگی برشی طاق آویزان به ترتیب اهمیت نسبت به تغییرات ارتفاع طاق، عمق ناحیه تحتانی طاق، عمق توسعه ترک کششی در طاق، چسبندگی و وزن مخصوص مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان بیشترین حساسیت را داشته در حالی که حساسیت ضریب اطمینان نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک درونی مصالح، زاویه مربوط به افزایش مقاومت در اثر مکش منفی، عمق جریان آب رودخانه و رقم آب زیرزمینی ناچیز می‌باشد.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت، حساسیت، طاقی شکل، ساحل رودخانه، طاق آویزان.

### 1. مقدمه

فرسایش سواحل رودخانه یکی از عمده‌ترین منابع تولید رسوبات است که به دلیل اثرگذاری بر خصوصیات مجاری رودخانه‌ها، در توسعه پهنه سیلابی و مدیریت منابع آب بسیار اهمیت دارد. فرسایش سواحل از یک سو موجب ایجاد خسارت‌های فراوان به اراضی و تاسیسات مجاور ساحل می‌گردد و از سوی دیگر حفاظت سواحل برای مقابله با آن نیز بسیار پرهزینه می‌باشد.

عقب‌نشینی ساحل رودخانه یک فرآیند کلیدی در دینامیک جریان رودخانه بوده که محدوده وسیعی از عوامل فیزیکی، محیط زیستی و اقتصادی - اجتماعی در محیط رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (رینالدی و داربی، 2008). اهمیت عقب‌نشینی ساحل رودخانه با توجه به مطالعات مربوط به درصد رسوبات حاصل از ساحل به رسوبات حوضه آبریز تقویت می‌شود. براین اساس، مصالح حاصل از ساحل بخش بزرگی از بار رسوبی کل رودخانه را تشکیل می‌دهند (سایمون و داربی، 2002). اطلاعات بدست آمده از مسیرهای تحت بررسی در سراسر ایالات متحده آمریکا نشان داده است که فرسایش ساحل یک منبع مهم بار رسوبی در بسیاری از رودخانه‌های آن کشور می‌باشد که موجب از دست رفتن اراضی حاصل خیز کشاورزی مجاور ساحل گردیده و سالانه میلیون‌ها دلار خسارت مادی ایجاد می‌نماید. بال (1997) در مطالعات خود در رودخانه سورن علیا در کشور انگلستان، گزارش نمود که در مقیاس سالیانه، حدود 17 درصد از مواد معلق موجود در آب از طریق فرسایش سواحل می‌باشد که این مشارکت در مقیاس ماهیانه و لحظه‌ای به ترتیب به 38 و 64 درصد می‌رسد.

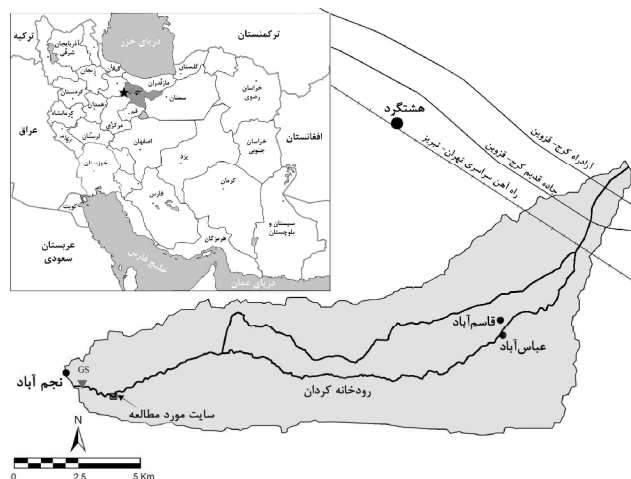
با توجه به تخریب گسترده طاق‌های آویزان پدید آمده در سواحل رودخانه‌های مرکب متشکل از مصالح چسبنده فوقانی و مصالح غیر چسبنده تحتانی، مطالعه وضعیت پایداری سواحل این دسته از رودخانه‌ها برای کسب اطلاع از وضعیت و سرعت تغییرات سواحل و عقب‌نشینی آنها الزامی است.

بررسی‌هایی اندک انجام شده در زمینه گسیختگی طاقی شکل موید این نکته است که عموماً مصالح تشکیل دهنده قسمت تحتانی ساحل به مرور زمان در اثر فرسایش ناشی از جریان آب رودخانه و اختلاط ذرات خاک با آب رودخانه و یا از طریق فرسایش درونی مصالح تشکیل دهنده ساحل (ناشی از تاخیر زمانی در پائین افتادن سطح آب آبراهه و سطح آب زیرزمینی و تولید نیروی زیر فشار قابل ملاحظه در هنگام پائین افتادن سطح آب پس از عبور سیلاب) شسته شده و موجب ایجاد غارها یا حفراتی در زیر سطح ساحل می‌شود. در نتیجه ساحل فوقانی بصورت طاقی آویزان درآمده و به علت نیروی چسبندگی بین ذرات خاک و یا مقاومت ریشه‌های گیاهان (در صورت وجود) بر سر جایش استوار می‌ماند. سقوط طاق آویزان بر اثر یک‌سری عوامل مختلف پدید خواهد آمد. با گذشت زمان، بر اثر خیس و خشک شدن طاق آویزان به دلیل وقوع سیلاب‌های متمادی، به تدریج از چسبندگی مصالح طاق کاسته شده و بواسطه ایجاد نیروی فشار منفذی ناشی از اختلاف فاز بین افت سطح آب رودخانه و سطح آب زیرزمینی و نیز افزایش عمق حفرات زیر ساحل که منجر به افزایش نیروی وزن طاق آویزان می‌شود، امکان سقوط طاق فراهم شده و در نهایت بخش عظیمی از ساحل که بصورت آویزان درآمده بود، در لحظه‌ای خاص بصورت ناگهانی به داخل رودخانه واژگون می‌گردد. با انتقال مصالح جمع شده در مقابل ساحل توسط جریان رودخانه به سمت پائین‌دست، این پدیده مجدداً بوقوع پیوسته و منجر به عقب‌نشینی پی‌درپی ساحل می‌شود. تورن و تاوی (1981) با انجام تحقیقات وسیع، سه مکانیزم مختلف گسیختگی طاق‌های آویزان شامل گسیختگی نوع برشی، شعاعی و کششی را معرفی نمودند.

رودخانه کردان در استان البرز بعد از عبور از جاده قدیم کرج- قزوین و خط آهن سراسری تبریز- تهران دارای شرایط تشکیل طاق‌های آویزان می‌باشد که این طاق‌ها نیز در معرض گسیختگی نوع طاقی شکل قرار گرفته و ضمن اتلاف حجم عظیمی از خاک مستعد کشاورزی مزارع و باغات حاشیه رودخانه، موجب انتقال حجم زیادی از رسوبات به پایین‌دست می‌شوند. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است. از آنجا که تراکم جمعیت در حاشیه قسمت‌های انتهایی رودخانه کردان بسیار زیاد می‌باشد و سال‌ها اهالی منطقه با خطر تخریب مزارع و باغات در حاشیه رودخانه دست و پنجه نرم می‌کنند، انجام مطالعات مهندسی رودخانه و ارائه راه کارهای مناسب برای کاهش سرعت فرسایش و عقب‌نشینی سواحل رودخانه به شدت احساس می‌شود. اما با توجه به هزینه‌های گزاف نصب ادوات مورد نیاز برای پایش تغییرات پارامترهای موثر در ناپایداری و تخریب سواحل رودخانه و همچنین مشکلات پیشروی دیده‌بانی صحرائی سواحل رودخانه کردان، مدلسازی پایداری سواحل رودخانه با توجه به مکانیزم‌های مختلف گسیختگی و علی‌الخصوص گسیختگی نوع طاقی شکل بسیار ضروری می‌باشد. در ادامه مقاله، دقت برآورد و تخمین پارامترهای مورد استفاده در تحلیل پایداری سواحل رودخانه و همچنین میزان تاثیر عدم قطعیت آنها بر اعتمادپذیری نتایج حاصل از مدل پایداری طاق‌های آویزان مورد بررسی قرار گرفته است. ضمناً برای درک بهتر اهمیت موضوع و مشاهده وضعیت تخریب سواحل رودخانه کردان در محدوده مورد مطالعه، در شکل 2 وقوع گسترده گسیختگی نوع طاقی شکل در سواحل این رودخانه پس از فروکش سیلاب و همچنین در زمان وقوع دو سیلاب مخربی که در سال‌های آبی 88-1386 رخ داده، نشان داده شده است.

در زمان مدل‌های تحلیل پایداری ساحل رودخانه در مقابل گسیختگی طاقی شکل، تخمین مقدار پارامترهای اصلی موثر در تعیین پایداری طاق‌های آویزان، ضروری می‌باشد. این پارامترها عبارتند از:

- 1- شکل هندسی مقطع ساحل (ارتفاع و عرض طاق آویزان)،
- 2- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان (چسبندگی، زاویه اصطکاک درونی و دانسیته تراکم)،
- 3- مشخصات هیدرولوژیکی جریان رودخانه (ارتفاع سطح آب رودخانه و رقم سطح آب زیرزمینی).



شکل 1- محدوده جغرافیایی مورد مطالعه رودخانه کردان در استان البرز

تعیین میزان دقت این پارامترها بستگی به آن دارد که چه روشی (اندازه‌گیری مستقیم صحرایی، اندازه‌گیری آزمایشگاهی، اندازه‌گیری غیرمستقیم و یا تخمین توسط مدل‌های مختلف) برای برآورد آنها مورد استفاده قرار گیرد. دامنه وسیع تعیین دقیق پارامترهای اصلی نشان می‌دهند که هر پارامتر برحسب ایجاد عدم قطعیت در تحلیل پایداری ساحل رودخانه، اثر متفاوتی اعمال می‌نماید. اما این موضوع در مطالعات قبلی محققین مورد توجه قرار نگرفته است. لذا گستردگی عدم قطعیت‌های پارامترها که بر اعتمادپذیری نتایج مدل تحلیل پایداری طاق آویزان اثر می‌گذارد، ناشناخته است. بنابراین هدف از این مقاله شناخت مفهوم عدم قطعیت مربوط به پارامترهای اصلی موثر در پایداری سواحل طاقی شکل رودخانه از طریق انجام چند سری آزمون حساسیت مدل می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق به منظور تهیه یک راهنمای مناسب برای تعیین پارامترهای اصلی مدل‌های تحلیل پایداری طاق‌های آویزان ساحل رودخانه در مقابل مکانیزم گسیختگی نوع برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه، مدل تحلیل پایداری ساحل مورد استفاده در این تحقیق و آزمون‌های حساسیت مربوطه معرفی شده‌اند.

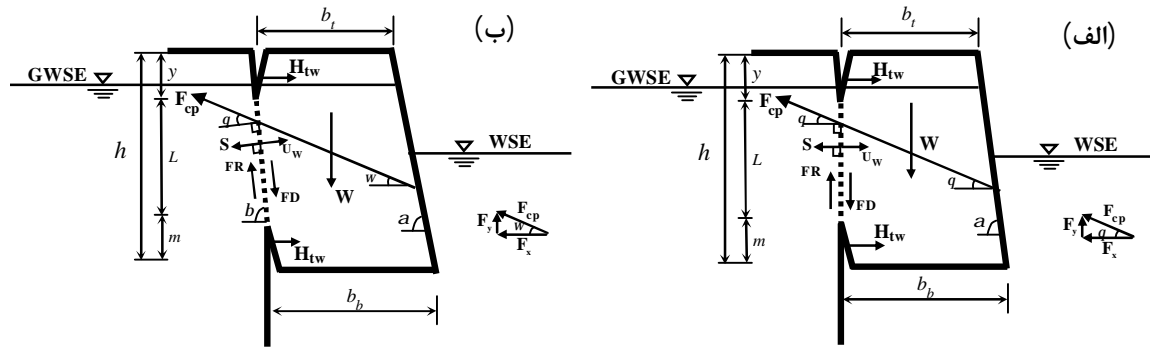


شکل 2- تخریب طاق‌های آویزان تشکیل شده در سواحل رودخانه کردان: (راست) پس از وقوع سیلاب مورخ 22 اسفند 1386 (بده پیک سیلاب در ایستگاه نجم آباد 12/15 مترمکعب در ثانیه)، (چپ) هنگام وقوع سیلاب مورخ 10 اردیبهشت 1388 (بده پیک با دوره بازگشت دو ساله معادل 18/4 مترمکعب در ثانیه)

## 2. روش تحلیل پایداری سواحل طاقی شکل رودخانه‌ها

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 سریع تر 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 که عقب‌نشینی ساحل فوقانی اغلب با گسیختگی این طاق‌ها اتفاق می‌افتد (تورن و تاوی، 1981). در شکل 3 گسیختگی طاقی شکل نوع برشی و نیروها و پارامترهای دخیل در تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌های طبیعی با توجه به این نوع گسیختگی نشان داده شده است. علاوه بر تورن و تاوی (1981) که نسبت به معرفی سه مکانیزم مختلف گسیختگی طاقی شکل اقدام نموده‌اند، محققین دیگری چون ون‌ارت (1985)، میشل و کیرشنر (2002) و جاسپرز فاکس (2006) نیز روابط دیگری برای تحلیل حالت‌های مختلف گسیختگی طاقی شکل ارائه نموده‌اند که نتایج بررسی‌های انجام شده توسط صمدی و همکاران (1387) بیان‌گر کاربرد فرضیات متفاوتی برای نیروهای مختلف موثر در سطح لغزش و همچنین نحوه توزیع آنها توسط هریک از محققین می‌باشد. لذا به علت فقدان مطالعات جامع در این زمینه و عدم دسترسی به بانک اطلاعاتی کاملی در زمینه گسیختگی طاقی شکل در سواحل رودخانه‌ها، ضرورت دارد این حالت خاص فرسایش سواحل با دقت بیشتری براساس اهمیت جملات بکار رفته در رابطه تحلیل پایداری ارزیابی شود. علاوه بر آن، متأسفانه به علت عدم امکان تعیین مکانیزم گسیختگی ساحل رودخانه در طبیعت، محققان به ناچار در مطالعات خود از روابط مربوط به گسیختگی ساده برشی برای تحلیل پایداری طاق‌های آویزان استفاده نموده‌اند (مثل، داربی و همکاران، 2007؛ رینالدی و داربی، 2008؛ لویی و همکاران، 2008). محققان مذکور اشاره نموده‌اند که در مطالعات صحرایی خویش، وقوع گسیختگی کشتی را چندان مشاهده ننموده‌اند. با توجه به استناد تحقیقات اخیر به وقوع مکانیزم گسیختگی ساده برشی در طاق‌های آویزان تشکیل شده در سواحل رودخانه‌های مورد مطالعه، برای روشن شدن تأثیر پارامترهای موثر در تحلیل پایداری این گونه سواحل، در این تحقیق نیز از فرض وقوع گسیختگی برشی طاق آویزان که توسط اکثر محققان در دهه اخیر مورد اشاره قرار گرفته، استفاده گردیده است. از این رو با استفاده از روابط تکامل یافته زیر برای گسیختگی نوع برشی ساحل رودخانه، تحلیل

حساسیت پارامترهای موثر در پایداری انجام شده است. این مکانیزم گسیختگی، یکی از ساده‌ترین مکانیزم‌های گسیختگی است که بعلت ناتوانی در تشخیص نحوه گسیختگی طاق در طبیعت، تاکنون توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این مکانیزم براساس مبانی حاکم بر گسیختگی صفحه‌ای در سواحل کوتاه و با شیب تند رودخانه‌ها توسعه یافته است اما در روابط قبلی که توسط محققین ارائه شده است، شکل ساده‌ای از آن، صرفاً بصورت نسبت مقاومت برشی خاک روی سطح لغزش و وزن طاق آویزان برای تعیین ضریب اطمینان پایداری ملاک قرار گرفته است. در این تحقیق با هدف نزدیک نمودن رابطه تحلیل پایداری به شرایط واقعی طبیعت که عوامل مختلفی علی‌الخصوص نیروی مکش ناشی از غیر اشباع بودن طاق آویزان، نیروهای هیدرواستاتیک ناشی از سطح آب رودخانه و یا جریان آب زیرزمینی بر پایداری طاق اثرگذارند، نسبت به توسعه روابط کامل تر در سطح لغزش اقدام شده است.



شکل 3- تحلیل پایداری طاق آویزان در حالت گسیختگی برشی: (الف) صفحه گسیختگی قائم، (ب) صفحه گسیختگی شیب‌دار

در شکل 3، نیروهای مختلف موثر بر سطح لغزش طاق آویزان در حالت بروز گسیختگی طاقی شکل نوع برشی نشان داده شده‌اند. بر این اساس روابط حاکم برای تحلیل پایداری گسیختگی نوع برشی طاق آویزان، با در نظر گرفتن دو حالت متفاوت صفحه گسیختگی قائم (رابطه 2) و شیب‌دار (رابطه 3) توسعه یافته است. ضریب اطمینان در برابر گسیختگی برشی طاق آویزان به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$FS_{cs} = \frac{FR_{cs}}{FD_{cs}} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $FS_{cs}$  = 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 در معرض 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. در نتیجه روابط حاکم برای تحلیل پایداری گسیختگی نوع برشی طاق آویزان، با در نظر گرفتن دو حالت متفاوت صفحه گسیختگی قائم (رابطه 2) و شیب‌دار (رابطه 3) بصورت زیر حاصل می‌گردند:

$$FS_{cs(Vertical)} = \frac{C'L + S \tan f^b + (F_{cp} \cos q - U_W - H_{tw}) \tan f'}{W - F_{cp} \sin q} \quad (2)$$

$$FS_{cs(Sloped)} = \frac{C'L + S \tan f^b + (W \cos b + F_{cp} \cos q - U_W - H_{tw} \sin b) \tan f'}{W \sin b - F_{cp} \sin q + H_{tw} \cos b} \quad (3)$$

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 عمود بر سطح گسیختگی،  $U_W$  = نیروی فشار آب منفذی مثبت (نیروی زیر فشار) عمود بر سطح گسیختگی،  $\theta$  = زاویه بین برآیند نیروی هیدرواستاتیک و صفحه عمود بر سطح لغزش،  $f^b$  = زاویه مبین نرخ افزایش مقاومت بر اثر مکش،  $b_l$  و  $b_b$  = به ترتیب

عرض تحتانی (عمق زیرشویی) و عرض فوقانی طاق آویزان،  $y$  و  $m$  به ترتیب عمق ترک کششی فوقانی و تحتانی،  $h$  = ارتفاع طاق آویزان،  $L$  = طول سطح لغزش در راستای قائم،  $\beta$  = زاویه صفحه گسیختگی،  $\alpha$  = زاویه سطح جلو طاق آویزان، و  $F'$  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 می باشد.

### 3. روش حساسیت سنجی پارامترهای موثر در مدلسازی پایداری طاق آویزان

هدف اصلی این مقاله، شناخت مفهوم عدم قطعیت مربوط به تعیین مقدار پارامترهای اصلی ورودی مدل در مقابل اعتمادپذیری موجود در تخمین پایداری طاق آویزان در مقابل مکانیزم گسیختگی نوع برشی است.

برای تعیین اثرات پارامترهای مستقل پایداری ساحل، اثرات آنها بر ضریب اطمینان (FS) در چند سری آزمون تحلیل حساسیت مدل مطابق نگرش ارائه شده توسط ون دیول و داربی (2007) می باشد (برگرفته از صمدی و همکاران، 2009). در این نگرش، یک طاق آویزان واقعی در مسیر رودخانه کردن برای برقراری ضریب اطمینان پایداری در شرایط تعادل مرزی ( $FS=1.12$ ) انتخاب شده است. بنابراین امکان تغییر مقادیر پارامترها در جهت پایداری یا ناپایداری طاق آویزان وجود دارد (صمدی و همکاران، 2009). مشخصات هندسی طاق بر اساس اندازه گیری های صحرائی در بازدیدهای میدانی، مصالح تشکیل دهنده ساحل براساس نتایج آزمون های مکانیک خاک و شرایط سطح آب رودخانه و آب زیرزمینی نیز براساس بازدیدهای میدانی، شواهد محلی و سطح داغاب انتخاب و در جدول 1 ارائه شده است. در آزمون های حساسیت انجام گرفته، محدوده ای که هر پارامتر متغیر می باشد به شرح زیر انتخاب شده است (جدول 2):

1) ارتفاع طاق آویزان مرجع ( $2/6$  متر) در محدوده  $1/2$  تا  $5/0$  متر متغیر می باشد. محدوده انتخابی برای در برگرفتن شرایط محدوده وسیعی از طاق های آویزان موجود در سواحل رودخانه کردن و سایر رودخانه های مستعد تخریب بر اثر مکانیزم گسیختگی طاقی شکل نوع برشی در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است که احتمال تشکیل طاق آویزان با ارتفاع کمتر از 1 متر نیز محتمل می باشد، اما در محدوده مورد بررسی رودخانه کردن، طاق های آویزان تشکیل شده عمدتاً دارای ارتفاع بیش از 1 متر همراه با ترک کششی عمیق می باشند و حداکثر ارتفاع طاق مشاهده شده نیز  $4/5$  متر بوده است.

جدول 1- مشخصات طاق آویزان مرجع مورد استفاده در شبیه سازی ها \*

پارامتر	مقدار	
ارتفاع طاق آویزان (متر)	2/6	
عمق ترک کششی (متر)	1/0	
عرض طاق آویزان (متر)	0/7	
عمق جریان رودخانه (متر)	1/0	پارامترهای ورودی
رقوم آب زیرزمینی (متر)	1/0	
چسبندگی مصالح طاق آویزان (kPa)	19	
وزن واحد حجم خشک مصالح ( $kN/m^3$ )	17/6	
وزن واحد حجم اشباع مصالح ( $kN/m^3$ )	20	
زاویه اصطکاک داخلی مصالح ( $^{\circ}$ )	26	
زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش ( $^{\circ}$ )	18	
-----		
ضریب اطمینان پایداری در برابر گسیختگی برشی با زاویه $90^{\circ}$ درجه (-)	1/12	پارامترهای خروجی
ضریب اطمینان پایداری در برابر گسیختگی برشی با زاویه $70^{\circ}$ درجه (-)	1/48	

\* توضیح: مقادیر عمق ترک کششی، عمق جریان رودخانه، سطح آب زیرزمینی و زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش اندازه گیری نشده اند، اما مقادیر آنها با توجه به شرایط محلی موجود، سطح داغاب و تجربیات میدانی برای اطمینان از اینکه مقدار ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در حالت پایداری مرزی باشد انتخاب شده است (یعنی  $FS=1/12$  برای  $b=90$ ).

- (2) محدوده عمق ترک کششی براساس تئوری ارائه شده توسط تورن و ایت (1993) که حداکثر عمق ترک کششی محدود به نصف ارتفاع ساحل می باشد، برگزیده شده است. از آنجا که ارتفاع طاق آویزان مرجع  $2/6$  متر انتخاب شده است، محدوده عمق ترک کششی از  $0/0$  تا  $1/3$  متر متغیر می باشد.
- (3) عرض طاق آویزان مرجع ( $0/7$  متر) در محدوده  $0/05$  تا  $1/3$  متر متغیر می باشد. محدوده انتخابی برای در برگرفتن محدوده وسیعی از طاق های آویزان در سواحل رودخانه کردن و سایر رودخانه های مستعد تخریب بر اثر مکانیزم گسیختگی طاقی شکل نوع برشی در نظر گرفته شده است.
- (4) مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی (چسبندگی مصالح، وزن واحد حجم و زاویه اصطکاک داخلی مصالح) براساس محدوده مقادیر داده های مصالح تشکیل دهنده ساحل رودخانه ها که توسط داری (2005) گزارش شده، انتخاب گردیده است. اما برای محافظه کاری، این محدوده مقادیر به میزان  $\pm 25\%$  گسترده تر شده تا آزمون های حساسیت محدوده وسیعی از انواع مصالح تشکیل دهنده سواحل رودخانه ها را در بر گیرد.
- (5) براساس نتایج ارائه شده توسط رینالدی و کاساگلی (1999) در زمینه افزایش مقاومت ظاهری مصالح ساحل غیراشباع، مقدار زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش ( $f^b$ ) در محدوده  $10$  تا  $26$  درجه انتخاب شده است.
- (6) براساس ارتفاع طاق آویزان مرجع، سطح آب رودخانه در مقابل ساحل و رقوم آب زیرزمینی در پشت ساحل از کمترین مقدار (صفر نسبت به بستر رودخانه) تا سطح بده لبریزی انتخاب شده است.

#### 4. نتایج تحلیل حساسیت

در جدول 2، محدوده تغییرپذیری پارامترهای مختلف موثر در تحلیل پایداری براساس توضیحات بخش 3 درج شده است. علاوه بر آن مقادیر عدم قطعیت ناشی از خطای اندازه گیری و تغییرپذیری ذاتی طبیعی هر پارامتر نیز براساس نتایج تحقیقات صمدی و همکاران (2009) انتخاب شده است. آستانه تغییرپذیری ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان ( $\pm 15\%$ ) بصورت اختیاری برای نشان دادن تغییر قابل ملاحظه ای در پایداری طاق آویزان نسبت به حالت طاق آویزان مرجع در نظر گرفته شده است. در شرایطی که عدم قطعیت های مربوط به هر پارامتر (بیشینه عدم قطعیت در خطای اندازه گیری و تغییرپذیری ذاتی طبیعی) از محدوده های محاسبه شده در جدول 2 تجاوز نماید، نشان دهنده وجود عدم قطعیت بزرگی در ضریب اطمینان پایداری شبیه سازی شده می باشد. بر این اساس، نتایج تحلیل حساسیت ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در مقابل تغییر مقادیر پارامترهای اصلی طاق آویزان در جدول 2 خلاصه شده است.

رابطه بین محدوده تغییر پذیری پارامتر ( $PR$ ) و عدم قطعیت پارامتر ( $PU$ )، برای تعیین اثر کلی عدم قطعیت پارامتر بر اعتمادپذیری مدل سازی پایداری طاق آویزان (برگرفته از صمدی و همکاران، 2009) استفاده شده است. بدین منظور، چهار گروه مجزا برای توصیف اثر پارامترها بر اعتمادپذیری ضریب اطمینان شبیه سازی شده تعریف گردیده است: (1) بی اهمیت ( $PU < PR$ )، (2) مهم بالقوه ( $PU \approx PR$ )، (3) مهم ( $PU > PR$ )، و (4) بسیار مهم ( $PU \gg PR$ ).

براساس نتایج آزمون حساسیت انجام گرفته برای پارامتر ارتفاع طاق آویزان، مشاهده می شود که این پارامتر دارای اثر بسیار مهمی بر اعتمادپذیری ضریب اطمینان پایداری است (جدول 2). بصورت مشابه با ارتفاع طاق آویزان، ردیف های بعدی جدول 2 نشان می دهند که دست کم برای حالت طاق آویزان مرجع مورد بررسی در این تحقیق، عدم قطعیت های موجود در پارامترهای عرض طاق آویزان و عمق ترک کششی نیز اثر بسیار مهمی بر اعتمادپذیری ضریب اطمینان شبیه سازی شده دارند. همچنین مشاهده می شود که پارامتر چسبندگی مصالح تشکیل دهنده ساحل اثر بسیار مهم و پارامتر وزن واحد حجم مصالح اثر مهمی بر اعتمادپذیری ضریب اطمینان شبیه سازی شده دارند. با این وجود، ضریب اطمینان طاق آویزان استاندارد نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک درونی مصالح، زاویه افزایش مقاومت در برابر مکش، عمق جریان رودخانه و رقوم سطح آب زیرزمینی خیلی حساس نیست و عدم قطعیت مربوط به خطا در تخمین این پارامترها قابل ملاحظه نمی باشد.

#### 5. بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، اهمیت عدم قطعیت موجود در پارامترهای موثر در پایداری سواحل طاقی شکل رودخانه ها در مقابل گسیختگی نوع برشی با انجام تعدادی آزمون تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمون های حساسیت به شرح زیر می باشد:



جدول 2- محدوده مقادیر پارامترهای مورد استفاده در تحلیل حساسیت ها همراه با تخمین عدم قطعیت موجود در تخمین هر پارامتر (برگرفته از صمدی و همکاران، 2009)، و خلاصه نتایج تحلیل حساسیت نشان دهنده اهمیت عدم قطعیت پارامترها بر میزان اعتمادپذیری ضریب اطمینان پایداری شبیه سازی شده\*

پارامتر طاق آویزان	محدوده تغییرات	عدم قطعیت ناشی از خطای اندازه گیری (%)	عدم قطعیت ناشی از تغییر پذیری ذاتی طبیعی (%)	محدوده تغییر پارامتر برای ایجاد 15% تغییر در ضریب اطمینان (%)	تأثیر عدم قطعیت پارامتر بر اعتمادپذیری تخمین پایداری طاق آویزان
	$b = 90^\circ$	$b = 70^\circ$			
ارتفاع طاق آویزان (متر)	1/2-5/0	2/0	$\pm 72$	-22/7 $\rightarrow$ +31/5	-18/8 $\rightarrow$ +25/8
عمق ترك كششی (متر)	0/0-1/3	-	$\pm 72$	-24/0 $\rightarrow$ +25/0	-21/0 $\rightarrow$ +22/0
عرض طاق آویزان (متر)	0/05-1/3	7/0	$\pm 72$	-14/3 $\rightarrow$ +20/0	-12/9 $\rightarrow$ +17/1
چسبندگی مصالح طاق آویزان (kPa)	0/0-41/0	<1	$\pm 220$	-18/9 $\rightarrow$ +18/9	-15/6 $\rightarrow$ +15/6
وزن واحد حجم خشك مصالح ( $\text{kN/m}^3$ )	-24/0	1/1	$\pm 26$	-12/5 $\rightarrow$ +18/2	-11/5 $\rightarrow$ +15/6
زاویه اصطكاك داخلی مصالح <sup>(۹)</sup>	9/5-50	8/0	$\pm 40$	-65/4 $\rightarrow$ +83/5	-65/4 $\rightarrow$ +92/3
زاویه افزایش مقاومت در اثر مكش <sup>(۹)</sup>	10-26	-	$\pm 48$	نامشخص اما $\pm 48\%$	بی اهمیت
عمق جریان رودخانه (متر)	0/0-2/9	2/0	ناچیز	-53/0 $\rightarrow$ +31/0	-56/0 $\rightarrow$ +36/0
رقوم آب زیرزمینی (متر)	0/0-2/9	2/0	$\pm 25$ (فرضی)	-68/0 $\rightarrow$ +65/0	-60/0 $\rightarrow$ +57/0

\* توضیح: عدم قطعیت پارامترها براساس بزرگترین منبع عدم قطعیت (خطای اندازه گیری و تغییرپذیری طبیعی) انتخاب شده است.

- عدم قطعیت مربوط به خطای موجود در تخمین ارتفاع طاق آویزان، عرض طاق آویزان از ساحل، وزن واحد حجم مصالح تشکیل دهنده طاق و چسبندگی مصالح قابل ملاحظه است و براساس نتایج تحلیل حساسیت، ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در مقابل گسیختگی برشی طاق آویزان به تغییر این پارامترها بسیار حساس می باشد.
- در حالت کلی، ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان به مقدار زاویه اصطكاك درونی مصالح، زاویه افزایش مقاومت در اثر مكش، عمق جریان آب رودخانه و رقوم سطح آب زیرزمینی چندان حساس نمی باشد و عدم قطعیت مربوط به تخمین مقدار این پارامترها قابل اغماض می باشد. از این رو، بروز خطا در تعیین زاویه اصطكاك درونی مصالح، زاویه افزایش مقاومت در اثر مكش، سطح آب رودخانه و رقوم سطح آب زیرزمینی، عدم قطعیت چندان در برآورد ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان ایجاد نخواهد کرد.
- کاهش زاویه صفحه برش طاق آویزان موجب افزایش محدوده تغییرپذیری پارامترهای موثر در تحلیل پایداری برای ایجاد  $\pm 15\%$  تغییر در مقدار ضریب اطمینان می شود. به عبارت دیگر با کاهش زاویه صفحه برش، اثر عدم قطعیت موجود در تعیین مقدار پارامترهای موردنظر برای برآورد ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان تا حدودی بیشتر از حالت صفحه برش قائم می شود. شایان ذکر است که در مورد پارامتر زاویه اصطكاك درونی مصالح و سطح آب رودخانه، به دلیل شرایط خاص مدلسازی طاق آویزان مرجع مورد استفاده در این تحقیق، با کاهش زاویه صفحه برش، محدوده تغییرپذیری پارامتر به میزان جزئی کمتر از حالت صفحه برش قائم می باشد که به خاطر اثر متفاوت توزیع نیروهای محرک و مقاوم موثر در سطح لغزش طاق آویزان با زاویه برش قائم و شیب دار می باشد.

## 6. قدردانی

نگارندگان مقاله بر خود لازم می دانند از مرکز تحقیقات کم آبی و خشکسالی در کشاورزی و منابع طبیعی برای فراهم نمودن امکانات موردنیاز برای



انجام بازدیدهای متعدد صحرایی از سواحل در معرض تخریب رودخانه کردن و همچنین تامین امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز برای تعیین مشخصات خاک رودخانه کردن تشکر و قدردانی نمایند. همچنین از دفتر پژوهش های کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران به خاطر تامین بخشی از هزینه های این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

## 7. مراجع

1. Rinaldi, M. and Darby, S.E., (2008), "Advances in modelling river bank erosion process," In: Habersack, H., Piégay, H., Rinaldi, M. (Eds.), *Gravel-Bed Rivers 6: From Process Understanding to River Restoration*, Series Development in Earth Surface Processes. Elsevier, The Netherland, pp 213–239.
2. Simon, A. and Darby, S.E., (2002), "Effectiveness of grade-control structures in reducing erosion along incised river channels: the case of Hotophia Creek, Mississippi," *Geomorphology*, **42**, pp 229-224.
3. Bull, L.J., (1997), "Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the River Severn, UK," *Earth Surface Processes and Landforms*, **22** (12), pp 1109-1123.
4. Thorne, C.R. and Tovey, N.K., (1981), "Stability of composite river banks," *Earth Surface Processes and Landforms*, **6**, pp 469-484.
5. Van Eerd, M.M., (1985), "Salt marsh cliff stability in the Oosterschelde," *Earth Surface Processes and Landforms*, **10** (2), pp 95-106.
6. Micheli, E.R. and Kirchner, J.W., (2002), "Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 2. Measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics," *Earth Surface Processes and Landforms*, **27** (7), pp 687-697.
7. Jaspers Focks, D.J., (2006), "*Vetiver grass as bank protection against vessel-induced load*", MSc thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Hydraulic Engineering, The Netherlands.
8. صمدی، ا.، امیری تکلدانی، ا.، داودی، ه. و رحیمی، ح.، (1387)، "تحلیل پایداری سواحل رودخانه در مقابل گسیختگی طاقی شکل"، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران، ایران، 23-21 آبان، 8-1.
9. Darby, S.E., Rinaldi, M. and Dapporto, S., (2007). "Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks," *Journal of Geophysical Research*, **112** (F03022), doi:10.1029/2006JF000722.
10. Luppi, L., Rinaldi, M., Teruggi, L.B., Darby, S.E. and Nardi, L. (2008) "Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy)," *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**, pp 530-546.
11. Van de Wiel, M.J. and Darby, S.E., (2007), "A new model to analyse the impact of woody riparian vegetation on the geotechnical stability of riverbanks," *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, pp 2185-2198.
12. Samadi, A., Amiri-Tokaldany, E. and Darby, S.E., (2009), "Identifying the effects of parameter uncertainty on the reliability of riverbank stability modeling," *Geomorphology*, **106**, pp 219-230.
13. Thorne, C.R. and Abt, S.R., (1993), "Analysis of riverbanks instability due to toe scour and lateral erosion," *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, pp 835–843.
14. Darby, S.E., (2005), "Refined hydraulic geometry data for British gravel-bed rivers," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **131** (1), pp 60–64.
15. Rinaldi, M. and Casagli, N., (1999), "Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative porewater pressure: the Sieve River (Italy)," *Geomorphology*, **26**, pp 253–277.