

تعیین اثر عدم قطعیت پارامترها بر اعتبار نتایج تحلیل پایداری طاق‌های آویزان در سواحل چندلایه رودخانه‌ها

امیر صمدی^{۱*}، ابراهیم امیری تکلدانی^۲، محمدهادی داودی^۳، حسن رحیمی^۴

چکیده

با توجه به مشکلات موجود در مطالعه صحرایی پدیده گسیختگی طاقی شکل، امکان ثبت تغییر شکل‌های لحظه‌ای طاق آویزان تا زمان وقوع تخریب در ساحل رودخانه وجود ندارد و لذا نمی‌توان وقوع گسیختگی برشی و چرخشی در طاق‌های آویزان تخریب شده در طبیعت را از یکدیگر متمایز نمود. در این مقاله، اثرات عدم قطعیت موجود در تعیین پارامترهای موثر در تحلیل پایداری طاق آویزان بر اعتبار نتایج تحلیل، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، اثرات تغییرات هر پارامتر مجزا بر ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در شرایطی که مقدار سایر پارامترها ثابت باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. برای تخمین عدم قطعیت مرتبط با هر پارامتر، تمایز بین (۱) خطاهای اندازه‌گیری و (۲) عدم قطعیت‌های مربوط به تغییرپذیری طبیعت ذاتی هر پارامتر مدنظر قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که عدم قطعیت‌های پارامترها آنقدر بزرگ هستند که احتمال بروز خطا در تخمین‌ها خیلی زیاد بوده و در این میان عدم قطعیت پارامترهای ارتفاع و عرض طاق آویزان، عمق ترک کششی و چسبندگی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان دارای اهمیت شایانی هستند. همچنین از آنجا که عدم قطعیت‌های پارامترها در وهله اول از تغییرپذیری طبیعت ذاتی پارامترها ناشی می‌شود تا از خطاهای اندازه‌گیری، لذا بایستی در روش‌های نمونه‌برداری صحرایی دقت بسیار زیادی صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، تحلیل حساسیت، ساحل رودخانه، گسیختگی طاقی شکل، عدم قطعیت.

ارجاع: صمدی ا. امیری تکلدانی ا. داودی م. ه. و رحیمی ح. ۱۳۸۹. تعیین اثر عدم قطعیت پارامترها بر اعتبار نتایج تحلیل پایداری طاق‌های آویزان در سواحل چندلایه رودخانه‌ها. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷): ۶۹-۷۹.

۱- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
۳- دانشیار مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی در کشاورزی و منابع طبیعی
۴- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
× نویسنده مسئول: amsamadi@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۱/۱۲

مقدمه

فرسایش سواحل رودخانه علاوه بر اینکه باعث ایجاد خسارت به زمین‌های کشاورزی و املاک مجاور ساحل رودخانه می‌شود، غالباً موجب ورود رسوبات ریزدانه به داخل جریان رودخانه شده و مشکلات رسوب‌گذاری در پایین‌دست را نیز به دنبال خواهد داشت (داربی و تورن ۱۹۹۴). فرسایش مصالح ساحل رودخانه بواسطه فرسایش توده‌ای جدی‌ترین عامل از دیدگاه مدیریت منابع آب می‌باشد (داپورتو و همکاران ۲۰۰۳). تخریب گسترده طاق‌های آویزان در سواحل رودخانه‌های چندلایه متشکل از مصالح چسبیده فوقانی و مصالح غیرچسبیده تحتانی، از مکانیزم‌های غالب فرسایش توده‌ای سواحل رودخانه‌ها می‌باشد که بدلیل پیچیدگی مکانیزم آن و مشکلات مطالعه صحرایی چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است (رینالدی و داربی ۲۰۰۸).

علیرغم وقوع گسترده گسیختگی‌های طاقی‌شکل در رودخانه‌های دارای سواحل مرکب، تاکنون بعلت مشکلات مطالعه صحرایی فرسایش در سواحل رودخانه‌ها، عدم امکان دیده‌بانی پیوسته صحرایی از شروع گسیختگی تا وقوع تخریب و نیز عدم امکان تعیین ضخامت حفره تحتانی ساحل در زمان جریان آب، در این زمینه مطالعات کافی توسط محققین مختلف انجام نشده و روابط تحلیلی کامل و مستدل برای این نوع گسیختگی ارائه نشده است. همچنین 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.

تعیین میزان دقت پارامترهای موثر در پایداری طاق 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 گسترده تعیین دقیق پارامترهای اصلی نشان می‌دهد که هر پارامتر برحسب ایجاد عدم قطعیت در تحلیل پایداری ساحل رودخانه، اثر متفاوتی اعمال می‌نماید که بیشتر مورد توجه قرار نگرفته است. لذا گستردگی عدم قطعیت‌های پارامترها که بر اعتبار نتایج مدل تحلیل پایداری طاق آویزان اثر می‌گذارد، همچنان ناشناخته است. بنابراین هدف از این مقاله پر کردن خلأ مذکور در تحلیل پایداری طاق‌های آویزان

رودخانه، بوسیله تبیین مفهوم عدم قطعیت مرتبط با تعیین پارامترهای اصلی موثر در پایداری سواحل طاقی‌شکل رودخانه‌ها می‌باشد.

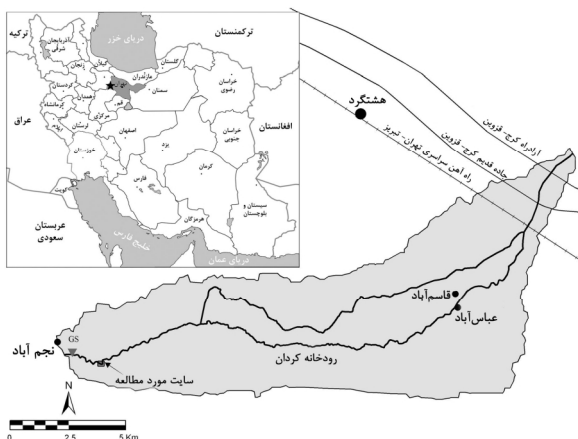
مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مورد مطالعه

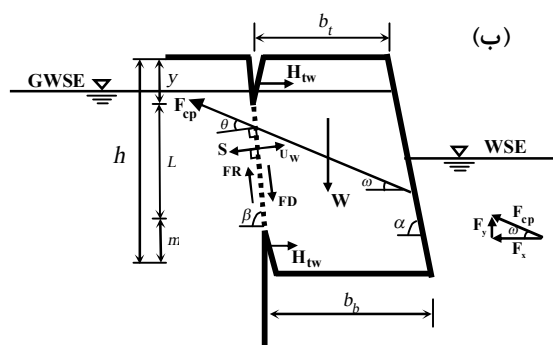
رودخانه کردان در غرب استان تهران بعد از عبور از جاده قدیم کرج- قزوین و خط آهن سراسری تبریز- تهران دارای شرایط مستعدی برای تشکیل طاق‌های آویزان می‌باشد که این طاق‌ها نیز عمدتاً در معرض گسیختگی نوع طاقی‌شکل قرار گرفته و ضمن اتلاف حجم عظیمی از خاک مستعد کشاورزی مزارع و باغات حاشیه رودخانه، موجب انتقال حجم زیادی از رسوبات به پایین‌دست می‌شوند. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $30^{\circ} 50'$ و $35^{\circ} 50'$ در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ نیز وقوع گسترده گسیختگی نوع طاقی‌شکل در سواحل رودخانه کردان پس از فروکش سیلاب و همچنین در زمان وقوع سیلاب نشان داده شده است.

تحلیل پایداری طاق‌های آویزان در سواحل رودخانه‌ها

سواحل رودخانه‌های جاری در رسوبات آبرفتی اغلب دارای یک ساختمان مرکب از مصالح غیرچسبیده (شن و ماسه) هستند که توسط یک لایه مصالح چسبیده (سیلت یا رس



شکل ۱- محدوده جغرافیایی مورد مطالعه رودخانه کردان در غرب استان تهران



شکل ۳- تحلیل پایداری طاق آویزان در حالت گسیختگی برشی: الف) صفحه گسیختگی قائم، ب) صفحه گسیختگی شیب‌دار

در شکل ۳ گسیختگی طاقی شکل نوع برشی و نیروها و پارامترهای دخیل در تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌های چندلایه با توجه به گسیختگی طاقی شکل نشان داده شده است. در این تحقیق، براساس نظریه تعادل حدی و با در نظر گرفتن نیروهای مختلف موثر در سطح لغزش، روابط کامل تری معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مقاله، "مدل گسترده تحلیل پایداری سواحل رودخانه‌ها" توسعه یافته توسط صمدی و همکاران (۱۳۸۷) با اصلاح زیرمدل تحلیل پایداری گسیختگی طاقی شکل براساس روابط ذیل، مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مذکور توانایی در نظر گرفتن اثرات عوامل موثر در پایداری طاق‌های آویزان در معرض گسیختگی برشی از جمله حضور ترک‌های کششی و اثرات فشارهای آب منفذی و هیدرواستاتیک را دارا است. روابط حاکم برای تحلیل پایداری گسیختگی نوع برشی طاق آویزان، با در نظر گرفتن دو حالت متفاوت صفحه گسیختگی قائم و شیب‌دار توسعه یافته است. ضریب اطمینان در برابر گسیختگی برشی طاق آویزان به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

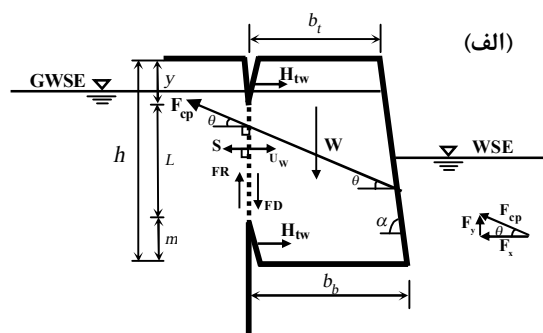
$$FS_{cs} = \frac{FR_{cs}}{FD_{cs}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، 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



شکل ۲- تخریب سواحل رودخانه کردان در محدوده مورد مطالعه: راست) پس از وقوع سیلاب، چپ) هنگام وقوع سیلاب

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 در اثر مکانیزم‌های گسیختگی برشی، چرخشی و کششی اتفاق می‌افتد (تورن و تاوی ۱۹۸۱). با توجه به مشکلات پیشروی دیده‌بانی صحرایی طاق‌های آویزان، تشخیص مکانیزم وقوع گسیختگی در زمان رخداد آن، کار بسیار دشواری است و نیز به دلیل عدم امکان ایجاد تمایز بین مکانیزم‌های گسیختگی برشی و چرخشی طاق آویزان در لحظه وقوع در طبیعت، اکثر محققان در سال‌های اخیر، مکانیزم گسیختگی نوع برشی را بعنوان مکانیزم غالب تخریب سواحل طاقی شکل رودخانه‌ها معرفی نموده‌اند و از رابطه گسیختگی برشی بسیار ساده تورن و تاوی (۱۹۸۱) برای بررسی وضعیت پایداری سواحل استفاده نموده‌اند. محققان مذکور همچنین بر این عقیده‌اند که رخداد گسیختگی نوع کششی بندرت در سواحل رودخانه‌ها مشاهده می‌شود (داری و همکاران ۲۰۰۷ و رینالدی و داری ۲۰۰۸).



پارامتر متغیر می‌باشد به شرح زیر انتخاب شده است (جدول ۲):

(۱) ارتفاع طاق آویزان مرجع (۲/۶ متر) در محدوده ۱/۲ تا ۵/۰ متر متغیر در نظر گرفته شده است.

(۲) عمق ترک کششی براساس تئوری‌های موجود که حداکثر عمق ترک کششی محدود به نصف ارتفاع ساحل می‌باشد (تورن و ابت ۱۹۹۳)، در بازه ۰/۰ تا ۱/۳ متر متغیر در نظر گرفته شده است.

(۳) عرض طاق آویزان مرجع (۰/۷ متر) نیز در محدوده ۰/۰۵ تا ۱/۳ متر متغیر می‌باشد.

(۴) مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی براساس محدوده مقادیر داده‌های مصالح تشکیل دهنده ساحل رودخانه‌ها که توسط داربی (۲۰۰۵) گزارش شده، انتخاب گردیده است.

(۵) مقدار زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش (ϕ^b) در محدوده ۱۰ تا ۲۶ درجه انتخاب شده است.

(۶) سطح آب رودخانه در مقابل ساحل و رقوم آب زیرزمینی در پشت ساحل نیز از کمترین مقدار (صفر) نسبت به بستر رودخانه تا سطح بده لبریزی انتخاب شده است.

محدوده‌های انتخابی فوق‌الذکر برای در برگرفتن شرایط محدوده وسیعی از طاق‌های آویزان موجود در سواحل رودخانه کردان و نیز سایر رودخانه‌های مستعد تخریب بر اثر مکانیزم گسیختگی طاقی شکل نوع برشی در نظر گرفته شده است.

عدم قطعیت موجود در پارامترها

برای تخمین بزرگی عدم قطعیت مرتبط با هر پارامتر مورد بررسی، تمایز بین (۱) خطاهای اندازه‌گیری و (۲) عدم قطعیت‌های مربوط به تغییرپذیری طبیعت ذاتی هر پارامتر مدنظر می‌باشد. این دو منبع خطا در تعیین پارامترها، غالباً از نظر بزرگی دارای تفاوت قابل ملاحظه‌ای هستند.

پارامترهای ریخت‌شناختی رودخانه شامل ارتفاع و عرض طاق آویزان به آسانی قابل اندازه‌گیری هستند، حتی با استفاده از ابزار ساده نقشه‌برداری که دقت آنها در حدود $\pm 0/05$ متر می‌باشد. با توجه به ارتفاع و عرض طاق آویزان مرجع، خطای اندازه‌گیری نسبی این پارامترها خیلی

برشی طاق آویزان، با درنظر گرفتن دو حالت متفاوت صفحه گسیختگی قائم (رابطه ۲) و شیب‌دار (رابطه ۳) بصورت زیر حاصل می‌گردند:

(۲)

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

$$FS_{cs(Sloped)} = \frac{C'L + S \tan \phi^b + (W \cos \beta + F_{cp} \cos \theta - U_w - H_{tw} \sin \beta) \tan \phi'}{W \sin \beta - F_{cp} \sin \theta + H_{tw} \cos \beta}$$

که W = نیروی وزن طاق آویزان، F_{cp} = نیروی برآیند فشار محصورکننده هیدرواستاتیک بر روی طاق، H_{tw} = نیروی فشار هیدرواستاتیک آب داخل ترک‌های کششی، S = نیروی فشار آب منفذی منفی عمود بر سطح گسیختگی طاق، U_w = نیروی فشار آب منفذی مثبت (نیروی زیرفشار) عمود بر سطح گسیختگی طاق، θ = زاویه بین برآیند نیروی هیدرواستاتیک و صفحه عمود بر سطح لغزش طاق، ϕ^b = زاویه مبین نرخ افزایش مقاومت بر اثر مکش، L = طول سطح لغزش طاق، β = زاویه صفحه گسیختگی طاق، α = زاویه سطح جلویی طاق آویزان، و ϕ' 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. لازم به توضیح است که در فرمول‌های فوق، از اثر تنش برشی ناشی از جریان آب در آبراهه بر روی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان بعثت مقدار بسیار اندک آن نسبت به نیروی هیدرواستاتیک صرفنظر شده است. لازم به ذکر است که کلیه قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل مزبور در مرجع صمدی و همکاران (۱۳۸۷) بیان گردیده است.

محدوده پارامترهای بکار رفته برای تحلیل حساسیت

یک طاق آویزان واقعی در مسیر رودخانه کردان (که از این به بعد "طاق مرجع" نامیده می‌شود، جدول ۱)، برای برقراری ضریب اطمینان پایداری در شرایط تعادل حدی ($FS_{cs}=1.12$) انتخاب شده است. بنابراین امکان تغییر مقادیر پارامترها در جهت پایداری یا ناپایداری طاق آویزان وجود دارد. سپس اثرات تغییرات هر پارامتر مجزا بر ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در شرایطی که مقدار سایر پارامترها ثابت باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمون‌های حساسیت انجام گرفته، محدوده‌ای که هر

جدول ۱- مشخصات طاق آویزان مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها*

پارامتر	مقدار	پارامترهای ورودی	پارامترهای خروجی
ارتفاع طاق آویزان (m)	۲/۶		
عمق ترک کششی (m)	۱/۰		
عرض طاق آویزان (m)	۰/۷		
عمق جریان رودخانه (m)	۱/۰		
رقوم آب زیرزمینی (m)	۱/۰		
چسبندگی مصالح طاق آویزان (kPa)	۱۹		
وزن واحد حجم خشک مصالح (kN/m^3)	۱۷/۶		
وزن واحد حجم اشباع مصالح (kN/m^3)	۲۰		
زاویه اصطکاک داخلی مصالح ($^{\circ}$)	۲۶		
زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش ($^{\circ}$)	۱۸		
<hr/>			
ضریب اطمینان پایداری در برابر گسیختگی برشی با زاویه 90° درجه (-)	۱/۱۲		
ضریب اطمینان پایداری در برابر گسیختگی برشی با زاویه 80° درجه (-)	۱/۲۵		
ضریب اطمینان پایداری در برابر گسیختگی برشی با زاویه 70° درجه (-)	۱/۴۸		

* توضیح: مقادیر عمق ترک کششی، عمق جریان رودخانه، سطح آب زیرزمینی و زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش بصورت زمانی اندازه‌گیری نشده‌اند، 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 حدی باشد انتخاب شده است (یعنی $FS_{cs} = 1/12$ برای $\beta = 90$).

(خطای اندازه‌گیری و تغییرپذیری طبیعت ذاتی) مناسب خواهد بود (جدول ۲).

پارامترهای ژئوتکنیکی طاق آویزان ساحل نیز با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری استاندارد، در صحرا یا در آزمایشگاه، بصورت نسبتاً دقیق قابل تعیین هستند. خطاهای اندازه‌گیری چسبندگی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان (خطای مطلق $\pm 0/1$ kPa معادل $\pm 0/5\%$ خطای نسبی برای طاق آویزان مرجع) و وزن واحد حجم مصالح (خطای مطلق $\pm 0/2$ kN/m^3 معادل $\pm 1/1\%$ خطای نسبی برای طاق آویزان مرجع) دارای مقادیر نسبتاً کم مطلق و بسیار کم نسبی هستند. در مقابل، با وجود تخمین نسبتاً دقیق زاویه اصطکاک درونی مصالح (خطای مطلق $\pm 2^{\circ}$)، به دلیل مقدار قابل ملاحظه خطای مطلق در مقابل مقدار این پارامتر برای طاق آویزان مرجع، خطای نسبی اندازه‌گیری تا حدودی بیشتر ($\pm 8\%$) می‌باشد. برای تعیین تغییرپذیری طبیعی پارامترهای مزبور نیز از بانک داده‌های داریبی (۲۰۰۵) استفاده شده است. بر این اساس، عدم قطعیت ناشی از تغییرپذیری طبیعت ذاتی پارامترهای ژئوتکنیکی نیز معادل ± 2 برابر انحراف معیار مقادیر پارامترها در نظر گرفته شده است (جدول ۲). منبع اصلی عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی نیز تغییرپذیری طبیعت ذاتی

کوچک (برای مشخصات ارتفاع و عرض طاق آویزان مرجع در نظر گرفته شده به ترتیب $\pm 2\%$ و $\pm 7\%$) هستند. برای تعیین تغییرپذیری طبیعی پارامترها، از بانک جامع داده‌های ارتفاع سواحل رودخانه میسوری (سوئیکسون و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده شده است. داده‌های مزبور از توزیع آماری نرمال تبعیت می‌کنند و با توجه به تشابه ابعادی ارتفاع و عرض طاق آویزان، می‌توان نتایج بررسی آماری ارتفاع ساحل را برای تعیین محدوده تغییرات ارتفاع و عرض طاق آویزان در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار داد. اگرچه نمی‌توان اطمینان داشت که تغییرپذیری طبیعی این بازه مطالعاتی خاص، نمونه کاملی از رودخانه‌های معمول باشد، با این وجود در این تحقیق عدم قطعیت تغییرپذیری طبیعی ارتفاع ساحل معادل ± 2 برابر انحراف معیار ارتفاع ساحل مشاهده شده (متر $1/95$ σ_H) در نظر گرفته شده است که این میزان معادل پذیرش 95% فاصله اطمینان با فرض توزیع نرمال داده‌های مذکور می‌باشد. لذا تخمین عدم قطعیت نسبی (با مقدار ارتفاع متوسط ساحل $5/43$ متر)، نشان‌دهنده مقدار تغییرپذیری طبیعی $\pm 72\%$ ، که بسیار بزرگتر از خطاهای اندازه‌گیری مربوط به این پارامتر می‌باشد. در نتیجه کاربرد مقدار بزرگتر عدم قطعیت تخمینی حاصل از این دو منبع

پارامترهای ژئوتکنیکی می‌باشد.

برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب در مقابل ساحل، روش‌های اندازه‌گیری استاندارد مختلفی وجود دارد که قادر هستند که ارتفاع سطح آب را با دقت بالایی (خطای مطلق ± 0.02 متر یا $\pm 2\%$ خطای نسبی برای طاق آویزان مرجع) اندازه‌گیری نمایند. لذا تغییرپذیری این پارامتر در داخل بازه موردنظر قابل صرفنظر می‌باشد.

سه پارامتر باقیمانده (زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش منفی، رقوم آب زیرزمینی و عمق ترک کششی)، به آسانی قابل اندازه‌گیری بصورت مستقیم نمی‌باشند یا اندازه‌گیری این پارامترها بصورت معمول صورت نمی‌پذیرد. در نتیجه، این پارامترها معمولاً براساس تجربیات کاربر یا با کاربرد برخی مدل‌ها تخمین زده می‌شوند. به این دلیل، خطاهای اندازه‌گیری این پارامترها به آسانی قابل تعیین نمی‌باشند و در عوض، عدم قطعیت‌های تخمین آنها منحصراً مربوط به تغییرپذیری طبیعت ذاتی پارامتر می‌باشد. با توجه به اینکه ترک کششی تابعی از ارتفاع طاق آویزان ساحل می‌باشد (تورن و ایت ۱۹۹۳)، در نتیجه تغییرپذیری طبیعی عمق ترک کششی مشابه تغییرپذیری طبیعی ارتفاع ساحل منظور شده است. محدوده تغییر زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش منفی بصورت $10^\circ \leq \phi^b \leq 26^\circ$ توصیه شده است (رینالدی و کاساگلی ۱۹۹۹). با فرض توزیع نرمال زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش در اطراف مقدار متوسط محدوده مذکور (18°)، مقدار ± 2 برابر انحراف معیار برای تشخیص تغییرپذیری طبیعت ذاتی پارامتر برابر با محدوده نسبی $\pm 48\%$ در اطراف مقدار متوسط پارامتر است. بنابراین، این مقدار در ادامه تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، هرچند بایستی اذعان نمود که احتمال بی‌دقتی در تخمین مزبور وجود دارد. در پایان، برای رقوم آب زیرزمینی نیز مشابه سطح آب رودخانه عمل شده است. اما تغییرپذیری موضعی شرایط آب زیرزمینی معمولاً ناشناخته باقی می‌ماند. برای این موضوع، عدم قطعیت اختیاری به میزان $\pm 25\%$ برای این پارامتر در تحلیل‌ها اختصاص داده شده است.

نتایج و بحث

در شکل‌های ۴ تا ۶، تغییرات مقادیر ضریب اطمینان در اثر تغییر پارامترهای کنترل‌کننده موثر بر پایداری طاق آویزان ساحل در محدوده مورد اشاره در جدول ۲ نشان

داده شده است. در این شکل‌ها، محدوده‌ای از مقادیر پارامترها که باعث ایجاد $\pm 15\%$ تغییر در ضریب اطمینان شبیه‌سازی (نسبت به طاق آویزان مرجع) شده‌اند، با یک ناحیه سایه خورده مشخص شده است. آستانه تغییر $\pm 15\%$ بصورت اختیاری برگزیده شده است. اما مقصود از محدوده ۱۵ درصد، نشان دادن محدوده‌ای با تغییر حائز اهمیت در پایداری طاق آویزان نسبت به حالت طاق آویزان مرجع می‌باشد. در واقع ناحیه تیره‌رنگ، محدوده تغییرات پارامتر (نسبت به طاق آویزان مرجع) را که اثر نسبتاً ناچیزی بر ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده دارد مشخص می‌نماید. در مواردی که عدم قطعیت‌های موجود در پارامتر (براساس جدول ۲) از محدوده‌های محاسبه شده در شکل‌ها تجاوز نماید، پارامتر مزبور دارای عدم قطعیت زیادی در شبیه‌سازی ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان هست.

با توجه به توضیحات فوق، شکل ۴ منحنی‌های عدم قطعیت بدست آمده برای پارامترهای مشخصات هندسی طاق آویزان، شامل ارتفاع طاق آویزان (شکل ۴-الف)، عرض طاق آویزان (۴-ب) و عمق ترک کششی (۴-ج) را نشان می‌دهد. در شکل ۴-الف، یک ارتباط غیرخطی بین ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و ارتفاع طاق آویزان مشخص می‌باشد که در آن پایداری طاق آویزان به ارتفاعات نسبتاً کم (متر < 2) بسیار حساس و به مقادیر ارتفاع بلندتر طاق آویزان دارای حساسیت کمتری است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که محدوده عدم قطعیت $\pm 15\%$ در ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده برای حالت صفحه برشی قائم، همراه با تغییرات نسبتاً بزرگی در ارتفاع طاق آویزان (PR)، محدوده پارامتر، بین $2/1$ و $3/3$ متر می‌باشد. این میزان کمتر از عدم قطعیت موجود در تعیین پارامتر ارتفاع طاق آویزان ($PU = \pm 72\%$ ، مطابق جدول ۲) می‌باشد. از رابطه بین محدوده پارامتر (PR) و عدم قطعیت پارامتر (PU) برای تعیین اثرات عدم قطعیت پارامتر بر اعتبار نتایج تحلیل پایداری طاق آویزان ساحل رودخانه استفاده می‌شود. بدین منظور چهار دسته مختلف برای توصیف اثر پارامترها بر اعتمادپذیری نتایج مدل تعریف می‌شود: (۱) بی‌اهمیت ($PU \ll PR$)، (۲) دارای اهمیت بالقوه ($PU \approx PR$)، (۳) مهم ($PU > PR$) و بسیار مهم ($PU \gg PR$). با توجه به مشاهدات بعمل آمده در حالت خاص ارتفاع طاق آویزان ساحل رودخانه، این

جدول ۲- خلاصه نتایج آزمون‌های تحلیل حساسیت نشان‌دهنده اهمیت عدم قطعیت پارامترها بر میزان اعتبار ضریب اطمینان پایداری شبیه‌سازی شده

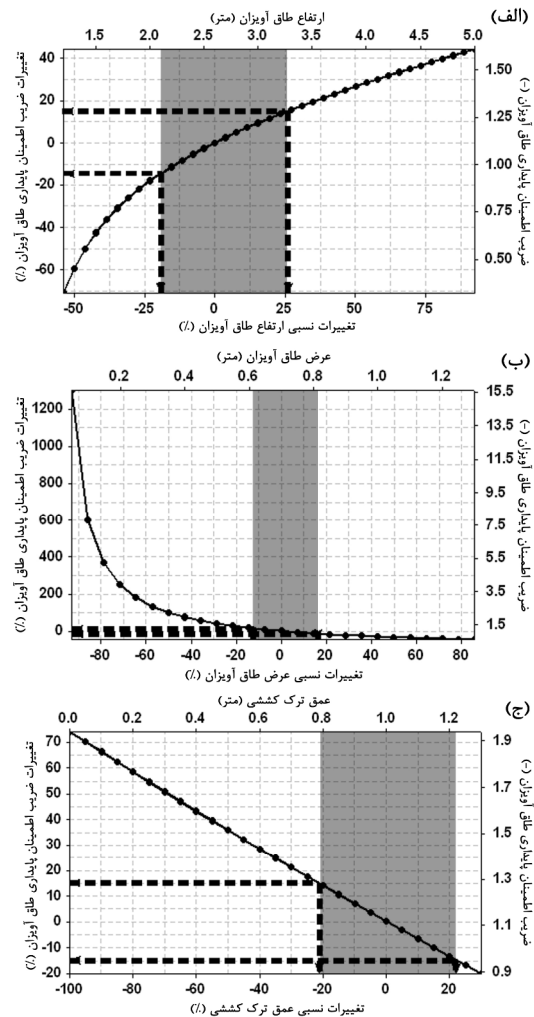
پارامتر طاق آویزان	محدوده تغییر پارامتر برای ایجاد ۱۵٪ تغییر در ضریب اطمینان (%)			عدم قطعیت تعیین پارامترها (%)	پارامتر طاق آویزان
	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 80^\circ$	$\beta = 70^\circ$		
ارتفاع طاق آویزان (m)	-۱۸/۸ → +۲۵/۸	-۲۱/۲ → +۲۸/۵	-۲۲/۷ → +۳۱/۵	± ۷۲	بسیار مهم
عمق ترک کششی (m)	-۲۱/۰ → +۲۲/۰	-۲۳/۰ → +۲۴/۰	-۲۴/۰ → +۲۵/۰	± ۷۲	بسیار مهم
عرض طاق آویزان (m)	-۱۲/۹ → +۱۷/۱	-۱۲/۹ → +۱۸/۶	-۱۴/۳ → +۲۰/۰	± ۷۲	بسیار مهم
چسبندگی مصالح (kPa)	-۱۵/۶ → +۱۵/۶	-۱۶/۸ → +۱۶/۸	-۱۸/۹ → +۱۸/۹	± ۲۹۸	بسیار مهم
وزن واحد حجم خشک مصالح (kN/m^3)	-۱۱/۵ → +۱۵/۶	-۱۲/۱ → +۱۶/۸	-۱۲/۵ → +۱۸/۲	± ۱۴	مهم
زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)	-۶۵/۴ → +۹۲/۳	-۶۵/۴ → +۹۲/۳	-۶۵/۴ → +۸۳/۵	± ۳۶	بی اهمیت
زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش ($^\circ$)	نامشخص اما ± ۴۸٪ (توضیح بیشتر در بخش "نتایج و بحث")			± ۴۸	بی اهمیت
عمق جریان رودخانه (m)	-۵۶/۰ → +۳۶/۰	-۵۵/۰ → +۳۴/۰	-۵۳/۰ → +۳۱/۰	± ۲	بی اهمیت
رقوم آب زیرزمینی (m)	-۶۰/۰ → +۵۷/۰	-۶۵/۰ → +۶۱/۰	-۶۸/۰ → +۶۵/۰	± ۲۵ (فرضی)	بی اهمیت

پارامتر دارای درجه اهمیت بسیار مهم در اعتبار مقادیر ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده است (جدول ۲). شکل ۴- ب یک رابطه غیرخطی معکوس بین ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و عرض طاق آویزان را نشان می‌دهد که نشان دهنده پاسخ نسبتاً حساس در عرض‌های کم طاق آویزان (متر $< 0/5$) و در مقابل، پاسخ با حساسیت کم در عرض‌های زیاد طاق آویزان از ساحل می‌باشد. براساس محدوده عدم قطعیت موجود در ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و مقدار عدم قطعیت موجود در تخمین پارامتر عرض طاق آویزان ($\pm 72\%$)، دست‌کم برای طاق آویزان مورد بررسی در این تحقیق، عدم قطعیت‌های موجود در تعیین پارامتر عرض طاق آویزان دارای درجه اهمیت بسیار مهم در اعتبار ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده هستند (جدول ۲). شکل ۴-ج نیز یک رابطه خطی معکوس بین ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و عمق ترک کششی موجود را نشان می‌دهد که براساس آن حساسیت ضریب اطمینان در محدوده اعماق ترک کششی طاق آویزان مورد شبیه‌سازی ثابت می‌باشد. در مورد این پارامتر، محدوده عدم قطعیت $\pm 15\%$ در ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده با تغییر نسبتاً کم عمق ترک کششی

(بین $0/8$ تا $1/2$ متر) همراه است و در نتیجه، عدم قطعیت‌های موجود در تخمین پارامتر عمق ترک کششی طاق آویزان ساحل رودخانه زیاد است و این پارامتر دارای درجه اهمیت بسیار مهمی در اعتبار ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده می‌باشد (جدول ۲). شکل ۵- الف نشان می‌دهد که یک رابطه خطی مثبت بین ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و چسبندگی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان وجود دارد که نشانگر حساسیت یکسان این پارامتر در محدوده مقادیر مورد بررسی است. اما در مورد زاویه اصطکاک داخلی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان (شکل ۵- ب)، یک رابطه خطی ثابت بین ضریب اطمینان و زاویه اصطکاک داخلی مصالح وجود دارد که نشان‌دهنده عدم حساسیت ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مصالح دست‌کم برای طاق آویزان مرجع مورد استفاده در این تحقیق (در حالت صفحه برش قائم) می‌باشد. اگرچه این موضوع برخلاف نتایج تحقیقات پارکر و همکاران (۲۰۰۸) و صمدی و همکاران (۲۰۰۹) می‌باشد اما با بررسی رابطه تحلیل پایداری طاق آویزان در حالت صفحه برشی قائم (رابطه ۲)، مشاهده می‌شود که زاویه

پایداری طاق آویزان و وزن واحد حجم مصالح تشکیل دهنده آن وجود دارد (شکل ۵-ج). با توجه به توضیحات فوق، در مورد چسبندگی مصالح تشکیل دهنده طاق آویزان، محدوده تحت تاثیر پارامتر $(\pm 15/6\%)$ در مقابل عدم قطعیت طبیعی پارامتر به میزان $\pm 298\%$ بسیار ناچیز است که بیانگر درجه اهمیت بسیار مهم این پارامتر در اعتبار پیش‌بینی‌های پایداری ساحل رودخانه است. با توجه به شرایط حاضر، تغییر زاویه اصطکاک داخلی مصالح حتی در محدوده تغییر کامل آن $(\phi' < 90^\circ)$ برای اعمال تغییر لازم در ضریب اطمینان به منظور افزایش از مقدار آستانه $\pm 15\%$ ، ناکافی است و مسلماً مقدار این تغییر بسیار بزرگتر از تغییر $\pm 36\%$ در این مقاله می‌باشد. لذا با توجه به عدم تغییر ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مصالح، تغییر این پارامتر بر اعتبار نتایج شبیه‌سازی‌ها بی‌اهمیت می‌باشد (جدول ۲). عدم قطعیت مربوط به پارامتر وزن واحد حجم مصالح تشکیل دهنده ساحل $(\pm 14\%)$ به میزان جزئی بیشتر از محدوده تحت تاثیر پارامتر $(-11/5\% \text{ تا } +15/6\%)$ است که بیانگر درجه اهمیت مهم آن بر اعتبار پیش‌بینی‌ها می‌باشد. شکل ۵-د نیز یک رابطه خطی و مثبت بین ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش را نمایش می‌دهد. اما تغییرات زاویه مزبور حتی در محدوده تغییر کامل آن $(\phi^b < 10^\circ)$ برای اعمال تغییر لازم در ضریب اطمینان به منظور افزایش از مقدار آستانه $\pm 15\%$ ، ناکافی است. از آنجا که تغییر لازم در زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش برای ایجاد $\pm 15\%$ تغییر در ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده کماکان نامشخص می‌باشد، اما مقدار این تغییر بایستی بسیار بزرگتر از تغییر $\pm 48\%$ در این مقاله باشد. لذا با توجه به محدوده کوچک ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده $(-1/9\% \text{ تا } +2/0\%)$ در مقابل تغییر گسترده زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش، تغییر این پارامتر بر اعتبار نتایج شبیه‌سازی‌ها بی‌اهمیت می‌باشد (جدول ۲).

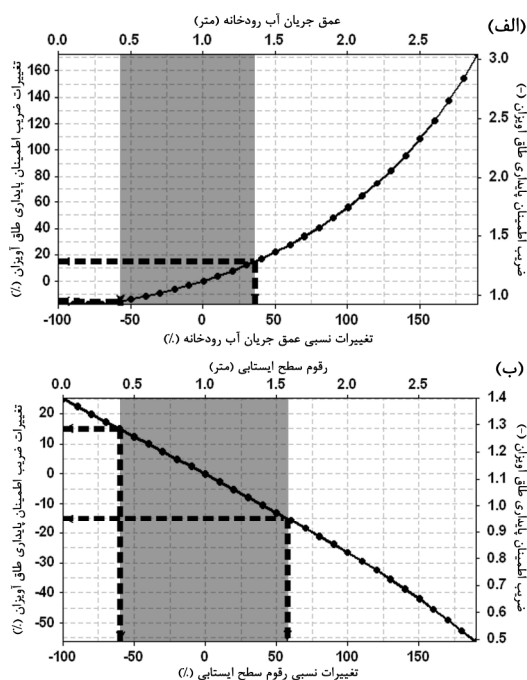
در مورد عمق جریان (شکل ۶-الف)، یک رابطه خطی مثبت بین ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان و عمق جریان رودخانه مشاهده می‌شود که بیانگر حساسیت تقریباً یکسان پایداری ساحل به عمق جریان رودخانه



شکل ۴- نتایج تحلیل پایداری طاق آویزان در مقابل تغییرات پارامترهای شکل هندسی: (الف) ارتفاع طاق؛ (ب) عرض طاق؛ (ج) و عمق ترک کششی.

مزبور صرفاً در برآیند نیروهای مقاوم عمود بر سطح لغزش اثرگذار است و از آنجایی که سطح آب رودخانه و آب زیرزمینی برابر در نظر گرفته شده‌اند، لذا مولفه نیروهای زیرفشار (U_w) و هیدرواستاتیک عمود بر سطح لغزش $(F_{cp} \cos \theta)$ معادل می‌باشند و با توجه به عدم وجود آب داخل ترک کششی، برآیند نیروهای مزبور مساوی صفر می‌باشند. در نتیجه در حالت خاص مورد بررسی، تغییر زاویه اصطکاک داخلی مصالح، تاثیری بر ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان ندارد اما با تغییر زاویه صفحه گسیختگی و اعمال تاثیر نیروی وزن طاق آویزان و تفاوت در توزیع نیروهای هیدرواستاتیک ناشی از آب رودخانه و رقوم آب زیرزمینی، تاثیر این پارامتر در رابطه ضریب اطمینان قابل محاسبه خواهد بود. همچنین یک رابطه معکوس غیرخطی و بسیار پیچیده بین ضریب اطمینان

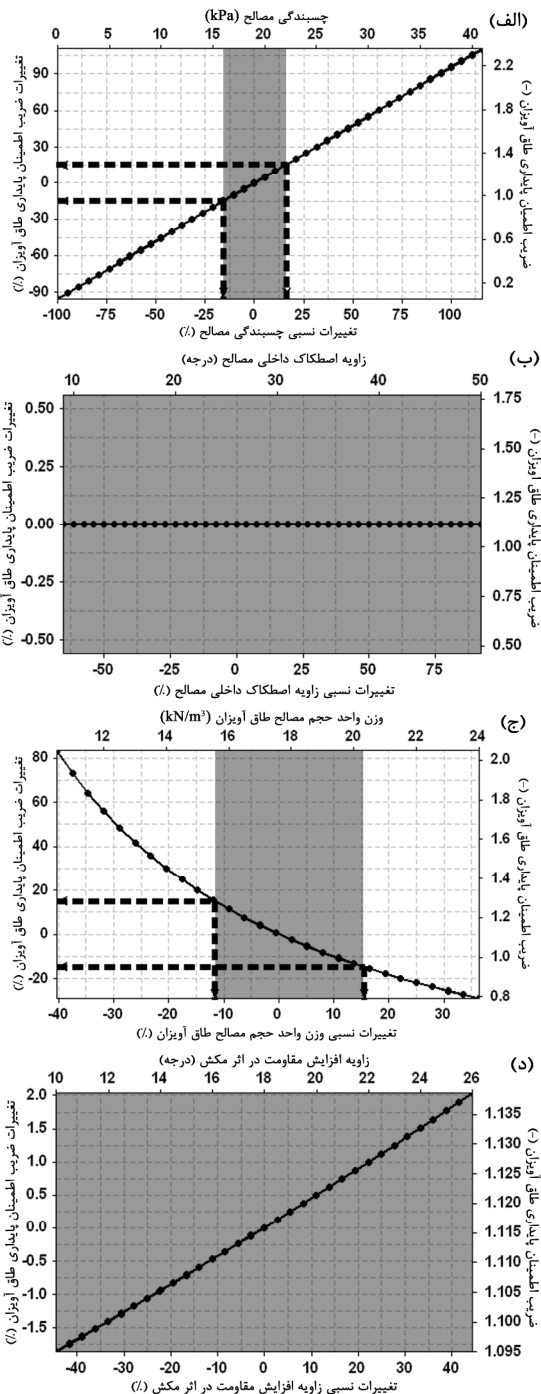
نشان می‌دهد که یک رابطه معکوس و تقریباً خطی بین ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده و رقوم آب زیرزمینی داخل ساحل رودخانه وجود دارد. همانند وضعیت موجود در ارتباط با عمق جریان رودخانه، این محدوده نیز بیش از عدم قطعیت موجود در تعیین پارامتر عمق سطح ایستابی است ($\pm 25\%$ مطابق جدول ۲). لذا عمق سطح ایستابی یا رقوم سطح آب زیرزمینی داخل ساحل رودخانه بر اعتبار نتایج ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده بی‌اهمیت است (جدول ۲).



شکل ۶- نتایج تحلیل پایداری طاق آویزان در مقابل تغییرات پارامترهای مشخصات هیدرولوژیکی رودخانه: (الف) عمق جریان رودخانه؛ و (ب) رقوم سطح ایستابی.

نتیجه‌گیری

اگرچه برخی از مطالعات قبلی با هدف شناخت تاثیر عدم قطعیت در پارامترهای موثر بر تحلیل پایداری سواحل رودخانه انجام شده است (به عنوان مثال، پارکر و همکاران ۲۰۰۸؛ لانجندون و سایمون ۲۰۰۸ و صمدی و همکاران ۲۰۰۹)، اما در این تحلیل‌ها حالت خاص گسیختگی طاقی شکل در سواحل چندلایه رودخانه‌ها (رودخانه‌های با ساحل چسبیده فوقانی) مدنظر قرار نگرفته است. لذا هدف این مقاله، پرداختن به این خلأ موجود در خصوص سواحل طاقی شکل رودخانه‌هاست. براساس نتایج آزمون‌های حساسیت این تحقیق، عدم قطعیت‌های مربوط به تخمین



شکل ۵- نتایج تحلیل پایداری طاق آویزان در مقابل تغییرات پارامترهای مشخصات ژئوتکنیکی مصالح تشکیل‌دهنده طاق آویزان ساحل رودخانه: (الف) چسبندگی خاک؛ (ب) زاویه اصطکاک داخلی؛ (ج) وزن واحد حجم مصالح؛ و (د) زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش برای طاق آویزان.

می‌باشد. براساس شکل مزبور و آستانه $\pm 15\%$ ضریب اطمینان وابسته به تغییرات پارامتر در کل محدوده داده‌ها، پارامتر عمق جریان آب بر اعتبار نتایج ضریب اطمینان شبیه‌سازی شده بی‌اهمیت است. در مقابل، شکل ۶- ب

مالی این طرح تحقیقاتی (کد ۸۷۰۴۱-۳-RIV) تشکر و قدردانی نمایند. همچنین از مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی در کشاورزی و منابع طبیعی برای فراهم نمودن امکانات لازم برای مطالعه صحرایی سواحل در معرض فرسایش رودخانه کردان سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- ۱- صمدی ا. امیری تکلدانی ا. و رحیمی ح. ۱۳۸۷. مدل گسترده تحلیل پایداری ساحل رودخانه. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۹(۲): ۳۷-۵۶.
- 2- Dapporto S. Rinaldi M. Casagli N. and Vannocci P. 2003. Mechanisms of riverbank failure along the Arno River, central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 1303-1323.
- 3- Darby S.E. 2005. Refined hydraulic geometry data for British gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 131(1): 60-64.
- 4- Darby S.E. and Thorne C.R. 1994. Prediction of tension crack location and riverbank erosion hazards along destabilized channels. *Earth Surface Processes and Landforms* 19: 233-245.
- 5- Darby S.E. Rinaldi M. and Dapporto S. 2007. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *Journal Geophysical Research* 112(F03022): 1-15.
- 6- Langendoen E.J. and Simon A. 2008. Modeling the evolution of incised streams. II: streambank erosion. *Journal of Hydraulic Engineering* 134: 905-915.
- 7- Parker C. Simon A. and Thorne C.R. 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology* 101: 533-543.
- 8- Rinaldi M. and Casagli N. 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressure: the Sieve River (Italy). *Geomorphology* 26: 253-277.
- 9- 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, 213-239.
- 10- 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: 219-230.

ارتفاع و عرض طاق آویزان از ساحل، عمق ترک کششی، چسبندگی مصالح و وزن واحد حجم مصالح تشکیل دهنده طاق برای اعمال اثر بر اعتبار نتایج تحلیل پایداری طاق آویزان، دست‌کم در آستانه $\pm 15\%$ و برای شرایط خاص موجود در طاق آویزان بکار رفته در این تحقیق قابل ملاحظه است. در مقابل، تاثیر عدم قطعیت‌های موجود در سایر پارامترهای کنترل کننده شرایط پایداری طاق آویزان (زاویه اصطکاک درونی مصالح، زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش، عمق جریان آب رودخانه و رقوم آب زیرزمینی) بر اعتبار نتایج تحلیل پایداری طاق آویزان از ساحل رودخانه، ناچیز می‌باشد.

اگرچه نتایج کمی ارائه شده در این مقاله، به مدل بکار رفته در این مطالعات وابسته است، یافته‌های کلی این تحقیق قابل تعمیم به محدوده وسیعی از مدل‌های تحلیل پایداری طاق آویزان از ساحل رودخانه (مبتنی بر روش تعادل حدی) می‌باشد. همین‌طور، این یافته‌ها مفاهیم مهمی برای محققانی که به منظور تحلیل مشکلات عقب‌نشینی ساحل و تعریض رودخانه می‌بایست از مدل‌های تحلیل پایداری ساحل رودخانه در برابر گسیختگی طاقی شکل استفاده نمایند، ارائه می‌نماید. منبع کلیدی عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی، تغییرپذیری طبیعت ذاتی ریخت‌شناسی و یا رسوب‌شناسی ساحل، علاوه بر خطای اندازه‌گیری موجود در تعیین مستقیم آنها می‌باشد. بر این اساس، محققان بایستی پارامترهای ریخت‌شناسی و رسوب‌شناسی ساحل را بصورتی برداشت نمایند که تغییرات آماری آنها بصورت آشکارتری مشخص شود. علی‌الخصوص با تکرار اندازه‌گیری‌ها، بایستی روش‌های مختلف نمونه‌برداری برای تعیین میزان تغییرپذیری پارامترها مورد بررسی قرار گیرد. نکته حائز اهمیت دیگر ابعاد مکانی و زمانی تغییرپذیری طبیعی پارامترها است که مشکلات چالش‌برانگیزی را در روش‌های نمونه‌برداری آشکار می‌کند. در این تحقیق، مشکلات تدارکاتی موجود شناخته شده است اما براساس عدم قطعیت‌های تخمین زده شده، یافته‌های حاصل نشان‌دهنده ضرورت انجام فراگیر نمونه‌برداری پارامترهاست.

سپاسگزاری

نگارندگان لازم می‌دانند از دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران به خاطر تامین هزینه‌های

- lateral erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 835-843.
- 13- Thorne C.R. and Tovey N.K. 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms* 6: 469-484 .
- 11- Soenksen P.J. Turner M.J. Dietsch B.J. and Simon A. 2003. Stream Bank Stability in Eastern Nebraska. Agriculture Water-Resources Investigations Report 03-4265. U.S. Geological Survey, Lincoln, Nebraska, USA.
- 12- Thorne C.R. and Abt S.R. 1993. Analysis of riverbanks instability due to toe scour and

