

## مطالعه صحرایی و آزمایشگاهی پدیده گسیختگی طره‌ای در سواحل رودخانه تشکیل شده از مصالح چسبنده

امیر صمدی\*، محمدهادی داودی، ابراهیم امیری تکلدانی و حسن رحیمی\*\*

\*نگارنده مسئول، نشانی: قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی آب،  
تلفن: ۸۳۷۱۱۴۶ (۰۲۸۱)، پیام‌نگار: amsamadi@gmail.com

\*\* به‌ترتیب استادیار گروه مهندسی آب دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)؛ دانشیار بازنشسته پژوهشکده  
حفاظت خاک و آبخیزداری؛ دانشیار و استاد بازنشسته گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران  
تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۲۶

### چکیده

در مطالعات صحرایی، تشخیص مکانیزم گسیختگی طاق‌های آویزان پدیده آمده در سواحل رودخانه‌ها ممکن نیست و از این‌رو، این نوع گسیختگی شایع سواحل رودخانه‌ها به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. بدین منظور دو نمونه خاک مستعد تشکیل طاق آویزان از سواحل رودخانه‌های داخلی تهیه شده و آزمایش‌های گوناگون برای تعیین مشخصات فیزیکی، شیمیایی، و مکانیکی آنها انجام پذیرفت. از هر یک از نمونه‌ها، سه بلوک خاک با تراکم‌های مختلف ایجاد و عملیات زیرشویی ناشی از جریان آب رودخانه تا زمان وقوع گسیختگی در طاق آویزان به صورت دستی انجام گردید و وضعیت پایداری بلوک خاک آویزان در هر گام ارزیابی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که دست‌کم برای شرایط آزمایشگاهی این تحقیق، مکانیزم گسیختگی طاقی شکل غالب از نوع چرخشی است که این موضوع با الگوی تخریب طاق‌های آویزان در سواحل رودخانه کردن نیز مطابقت دارد. علاوه بر آن، مکانیزم گسیختگی در خاک چسبنده CL پیشرونده و همراه با توسعه ترک کششی است در حالی که در خاک غیرچسبنده ML، مکانیزم گسیختگی به صورت لحظه‌ای است و تغییر شکل چندانی در قسمت فوقانی بلوک خاک مشاهده نمی‌شود.

### واژه‌های کلیدی

سواحل مرکب، عقب نشینی ساحل، فرسایش رودخانه‌ای، گسیختگی برشی، گسیختگی طاقی شکل

### مقدمه

است (Dapporto *et al.*, 2003). بنابراین، مطالعات مربوط به گسیختگی توده‌ای سواحل رودخانه‌ها، به واسطه نقش آن در تولید مقدار قابل توجهی از رسوبات و در نتیجه اثرگذاری بر خصوصیات مجاری رودخانه‌ها و توسعه پهنه سیلابی، اهمیت زیادی دارد. از میان فرآیندهای مختلف فرسایش سواحل رودخانه‌ها، گسیختگی صفحه‌ای، فرسایش درونی مصالح تشکیل‌دهنده ساحل، و گسیختگی طاقی شکل عمده‌ترین انواع گسیختگی ساحل تشخیص داده شده‌اند (Darby & Thorne, 1997).

عقب‌نشینی ساحل به واسطه انواع مختلف فرسایش، فرآیندی کلیدی در دینامیک جریان رودخانه است که محدودهای وسیع از عوامل فیزیکی، زیست‌محیطی، و اقتصادی-اجتماعی در محیط رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Rinaldi & Darby, 2008). دامنه‌ای وسیع از فرآیندهای مجزا در عقب‌نشینی ساحل رودخانه مشارکت دارند (Thorne, 1982)، اما فرسایش توده‌ای جدی‌ترین عامل عقب‌نشینی سواحل از دیدگاه مدیریت منابع آب



تحقیقات صحرایی و شرایط خاص وقوع گسیختگی در طاق آویزان مرتبط دانست.

با توجه به شرایط پیچیده وقوع گسیختگی طاقی شکل در سواحل رودخانه، اندازه‌گیری‌های لازم برای مدل‌سازی پایداری این‌گونه سواحل، علی‌الخصوص در زمان وقوع گسیختگی، کاری است بسیار سخت که نیازمند صرف مدت زمان طولانی در حاشیه سواحل رودخانه‌هاست. از سویی دیگر، در صورت وقوع این نوع گسیختگی در زمانی که جریان آب در رودخانه جاری است، مطالعه پدیده پیچیده‌تر خواهد شد. از این‌رو، در اکثر تحقیقات در زمینه فرسایش سواحل رودخانه‌ها، صرفاً وقوع این نوع گسیختگی گزارش شده و به دلیل ناممکن بودن تشخیص مکانیزم آنی گسیختگی در لحظه وقوع در صحرا، اکثر محققان فرض می‌کنند که گسیختگی از نوع برشی رخ می‌دهد تا بتوانند از روابط ساده موجود برای بررسی پایداری ساحل در مقابل گسیختگی طاقی شکل استفاده کنند و ضریب اطمینان پایداری را تخمین بزنند (از جمله می‌توان به مطالعات اخیر داربی و همکاران (Darby *et al.*, 2007) و رینالدی و داربی (Rinaldi & Darby, 2008) اشاره کرد).

با توجه به تحقیقات دو دهه گذشته، به نظر می‌رسد برای شناخت بهتر از مکانیزم گسیختگی طاق آویزان، باید الگوی توزیع تنش و مقاومت کششی و فشاری در سطح گسیختگی با تحقیقات گسترده‌تری بررسی شود. همچنین، با توجه به مشکلات پیش روی مطالعه صحرایی این پدیده، به نظر می‌رسد بتوان با انتقال تحقیقات به داخل آزمایشگاه و مدل‌سازی فرآیند مزبور، شناخت کامل‌تری از پارامترهای مؤثر به دست آورد. از این‌رو، هدف اصلی این تحقیق بررسی آزمایشگاهی پدیده گسیختگی طاقی شکل است که به دلیل پیچیدگی و مشکلات کار، در صحرا به راحتی قابل بررسی نیست. لذا،

مطالعه نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی محققان در اکثر رودخانه‌ها نیز حاکی از میزان بالای فرسایش ساحل رودخانه در اثر گسیختگی توده‌ای است. برای مثال، در مطالعات مرحله شناسایی سال ۱۹۹۵ در طول ۱۰۷ کیلومتر از سواحل ناپایدار رودخانه میسوری علیا در پایین دست سد فورت پک در مونتانا مشاهده شده است که ۴۸ کیلومتر از سواحل ناپایدار بر اثر گسیختگی صفحه‌ای، ۳۵ کیلومتر بر اثر فرسایش درونی ناگهانی، ۲۱ کیلومتر بر اثر گسیختگی طاقی شکل، و تنها سه کیلومتر بر اثر گسیختگی دایره‌ای شکل تخریب شده است (Darby & Thorne, 1997).

در زمینه فرسایش سواحل در رودخانه‌های طبیعی مطالعات زیادی شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات Thorne & Tovey, 1981; Thorne, 1999; Osman & Thorne, 1988; Darby & Thorne, 1996; Simon *et al.*, 1999; Darby *et al.*, 2000; Amiri-Tokaldany, 2002; Darby *et al.*, 2007; Rinaldi & Darby, 2008 اشاره کرد.

اکثر این تحقیقات صرفاً رایج‌ترین مکانیزم گسیختگی سواحل، یعنی گسیختگی صفحه‌ای در سواحل شیب‌دار را بررسی کرده‌اند و در زمینه پایداری ساحل در برابر انواع گسیختگی‌های طاقی شکل با محدودیت‌های اساسی روبه‌رو هستند. در میان تحقیقات نام برده شده، تنها تورن و تاوی (Thorne & Tovey, 1981) به صورت جدی درباره گسیختگی طاقی شکل شایع در رودخانه‌های با سواحل چند لایه بررسی‌هایی کرده‌اند. اما فرضیات ساده‌سازی به کار رفته توسط تورن و تاوی اکنون فاقد اعتبارند و ضرورت دارد برای شناخت بهتر این پدیده، تحقیقات کامل‌تری در این خصوص انجام شود (Van Eerd, 1985 & Samadi, 2007). بی‌شک یکی از دلایل مسکوت ماندن موضوع و نپرداختن به تحقیقات گسترده در این زمینه را می‌توان با مشکلات پیش‌روی

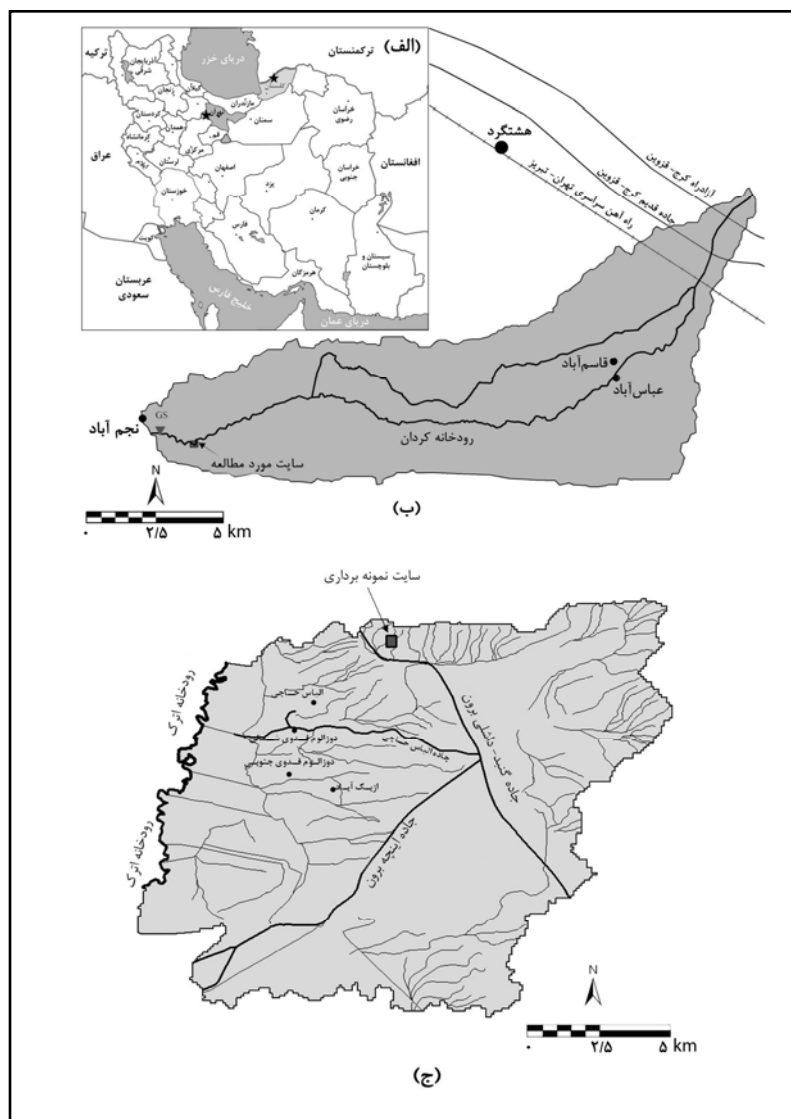
سراسری تهران- تبریز و روستای نجم‌آباد در بازه زمانی ۸۸-۱۳۸۳ بررسی شد (شکل ۱).

علاوه بر آن، به منظور مطالعه آزمایشگاهی پدیده گسیختگی طاقی شکل، نمونه‌های خاک رس جمع‌آوری شده از سواحل این رودخانه و نیز نمونه‌های لُس از سواحل سرشاخه‌های رودخانه اترک در محدوده بخش داشلی‌برون استان گلستان تهیه شده است (شکل ۱).

این پدیده در کنار مطالعه اجمالی صحرائی، با ساخت تعدادی ساحل رودخانه و ایجاد طاق‌های آویزان به صورت مصنوعی در آزمایشگاه نیز مطالعه شد.

## مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، برخی قسمت‌های سواحل رودخانه کردان حد فاصل محل تقاطع راه آهن



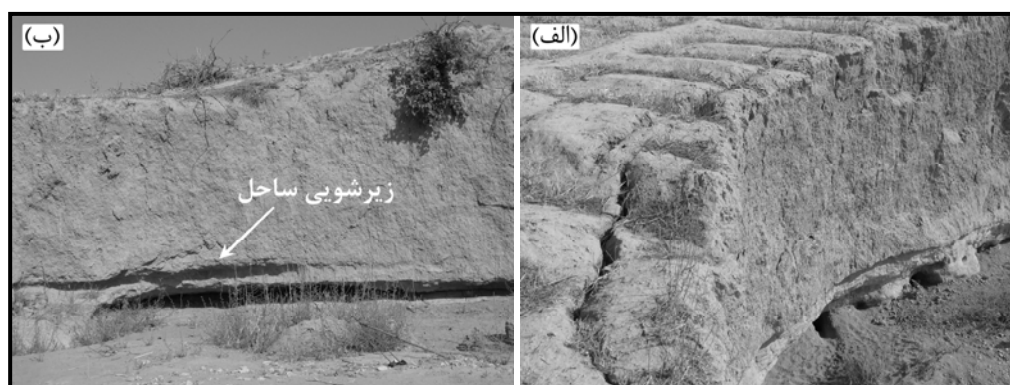
شکل ۱- الف) موقعیت مناطق مورد مطالعه در نقشه ایران، ب) نقشه زیرحوضه رودخانه کردان و محل سایت مورد مطالعه (GS: ایستگاه هیدرومتری نجم‌آباد)، ج) نقشه زیرحوضه سرشاخه‌های رودخانه اترک و محل سایت نمونه‌برداری.

نتایج بررسی‌های صحرائی در بازه زمانی فوق مؤید این نکته است که فرآیند تشکیل طاق‌ها در رودخانه کردان به دو دلیل است. یکی که عمدتاً در قسمت‌های ابتدایی رودخانه (علی‌الخصوص در سواحل مزارع مجاور

و آبشستگی مصالح قسمت تحتانی ساحل، به ویژه در جریان‌های سیلابی کم‌عمق، بوده است (شکل ۲-ب) که موجب ایجاد حفره‌هایی با عمق بیش از یک متر در درون ساحل شده بود. این در حالی بود که چسبندگی نسبتاً قوی بین مصالح تشکیل‌دهنده ساحل، موجب سیمانی شدن ذرات شده و باعث پایدار ماندن قسمت‌های فوقانی ساحل شده بود.

میزان عقب‌نشینی ساحل در این قسمت از رودخانه بسیار بالاست: سالانه حدود ۱-۲ متر در قسمت‌های مختلف ساحل.

ساحل) مشاهده شد و نسبتاً محدود بود، فشار آب منفذی ناشی از آبیاری مزارع مجاور ساحل بود که به صورت فرسایش درونی (ناشی از نیروی نشست) موجب تخلیه قسمت‌های تحتانی ساحل رودخانه می‌شد. نمونه‌ای از این نوع فرآیند در شکل ۲-الف نشان داده شده است که در آن توسعه ترک کششی در قسمت فوقانی ساحل موجب جدا شدن بلوک‌های خاک از ساحل و هدر رفتن بخش بسیار بزرگی از خاک زراعی مناسب روستاها شده است. دلیل مهمتر که موجب زیرشویی و تشدید تشکیل طاق‌های آویزان در رودخانه شده بود، فرسایش رودخانه‌ای

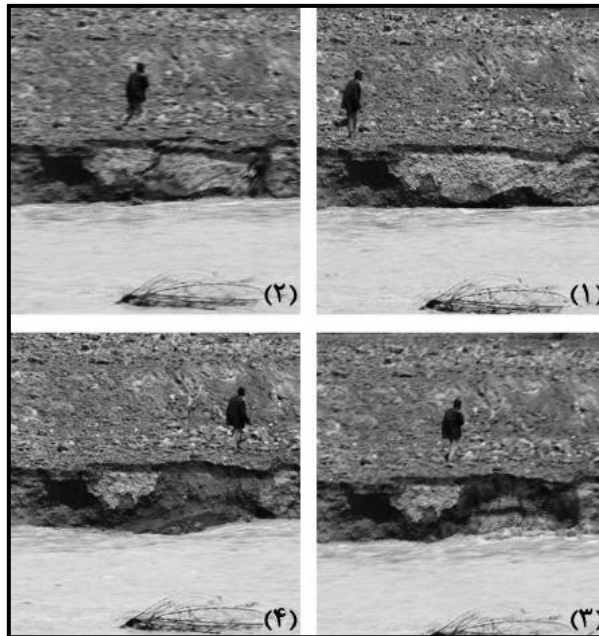


شکل ۲-الف) تشکیل طاق آویزان در مزرعه مجاور ساحل در اثر فشار آب منفذی و توسعه ترک کششی در قسمت فوقانی ساحل، ب) زیرشویی و غارکشی بخش تحتانی ساحل در اثر فرسایش رودخانه‌ای.

مشاهده نیم‌رخ عرضی طاق آویزان، تشخیص مکانیزم وقوع گسیختگی در لحظه وقوع در رودخانه‌های طبیعی، امری بسیار مشکل و توأم با اشتباهات سهوی خواهد بود. برای مثال در شکل ۳، نمونه‌ای از وقوع گسیختگی در یک طاق آویزان در ساحل رودخانه کردان در مجاورت روستای عباس‌آباد در جریان سیلاب مورخ ۱۰ اردیبهشت ۸۸ نمایش داده شده است.

با توجه به الگوی تخریب ساحل رودخانه که در تصاویر متوالی به نمایش درآمده، تشخیص نوع مکانیزم گسیختگی برشی یا چرخشی طاق آویزان بسیار سخت است.

بررسی‌های تکمیلی در سواحل مورد مطالعه مؤید این نکته بود که طاق‌های آویزان عمدتاً در اوایل بهار همراه با ذوب شدن برف‌ها در زمان باز شدن دریچه‌های بند واقع در بالادست مسیر، در اثر جریان کم‌عمق سیلاب رودخانه و در اثر فرسایش رودخانه‌ای مصالح پاشنه ساحل، تشکیل می‌شوند. سپس، طاق‌های پدیده آمده، بسته به مدت زمان سیلاب و مشخصات ژئوتکنیکی مصالح، در حین سیلاب یا بعد از آن، بر اثر گسیختگی طاقی شکل به داخل رودخانه واژگون می‌شوند. اما به دلیل برخی مشکلات دیده‌بانی صحرائی این پدیده از جمله گسیختگی لحظه‌ای و غیرقابل پیش‌بینی طاق آویزان و نیز مقذور نبودن



شکل ۳- مراحل تخریب طاق آویزان تشکیل شده در ساحل رودخانه کردن در جریان سیلاب مورخ ۱۰ اردیبهشت ۱۳۸۸.

آزمایشگاه مدنظر قرار نگرفته و در نتیجه موضوع شناخت مکانیزم گسیختگی طاقی شکل در شرایط مختلف با استفاده از دو جنس خاک با مشخصات ذکر شده و سه دانسیته مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تأثیر یکسان ارتفاع طاق آویزان در برآورد نیروهای محرک و مقاوم مؤثر بر سطح لغزش، می توان از اثر ارتفاع طاق آویزان در رابطه ضریب اطمینان طاق چشم پوشی کرد و طبق رابطه ۱ صرفاً با تعیین سه پارامتر باقیمانده، به مدل سازی طاق آویزان در آزمایشگاه پرداخت (Samadi, 2011).

$$FS_{CS} = C / (\gamma_s \cdot BW) \quad (1)$$

که در آن،  $FS_{CS}$  = ضریب اطمینان پایداری طاق آویزان در برابر گسیختگی برشی؛  $C$  = چسبندگی مصالح؛  $\gamma_s$  = وزن مخصوص مصالح و  $BW$  = عرض بلوک است. در نتیجه، ارتفاع طاق آویزان در تمامی آزمایشها ثابت در نظر گرفته شده و صرفاً عرض بلوک (عمق زیرشویی) با زمان افزایش یافته است.

به منظور مطالعه آزمایشگاهی پدیده گسیختگی طاقی شکل، ابتدا مشخصات فیزیکی، شیمیایی، و مکانیکی نمونه خاکهای جمع آوری شده از سواحل در معرض تخریب رودخانه کردن (۲ نمونه از روستای عباس آباد و ۴ نمونه از روستای نجم آباد) و سرشاخه های رودخانه اترک (۱ نمونه) تعیین شد. بدین منظور آزمایشهای مورد نیاز شامل دانه بندی، حدود اتربرگ، پروکتور استاندارد، آزمونهای شیمیایی املاح داخل خاک، وزن مخصوص ظاهری، و آزمون برش مستقیم و سه محوری روی نمونهها انجام شد (جدول ۱). نمونههای مورد استفاده برای آزمونهای مقاومت برشی بر اساس وزن مخصوص ظاهری خاک از نمونه دست خورده بازسازی شدند. آزمایشهای دانه بندی و حدود اتربرگ نشان داد که بافت مصالح سواحل در مجاور روستای عباس آباد لوم سیلتی (CL-ML) و در مجاور روستای نجم آباد لومی (CL) است.

با توجه به اینکه مطالعه آزمایشگاهی روی تخریب طاقهای آویزان رودخانهها سابقه ندارد و نیز امکان تعمیم نتایج حاصل از مطالعات محدود روی یک طاق آویزان به سایر طاقهای آویزان تشکیل شده در رودخانه وجود ندارد، در این تحقیق شبیه سازی طاق آویزان خاص در داخل

جدول ۱- خلاصه‌ای از آزمایش‌های ژئوتکنیکی (فیزیکی، شیمیایی، و مکانیکی) روی نمونه خاک‌های جمع‌آوری شده از سواحل رودخانه کردان و سرشاخه‌های رودخانه اترک\*

نمونه	موقعیت	طبقه‌بندی خاک	بافت خاک			خواص خمیرائی		آنالیزهای شیمیایی											وزن مخصوص ظاهری		چسبندگی		زاویه اصطکاک داخلی
			رس	سیلت	ماسه	PI	LL	pH	EC	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sup>3--</sup>	HCO <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sup>4--</sup>	DS	UU				
			(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(میلی زمینس)	(-)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(میلی اکی والان در لیتر)	(کیلو نیوتن بر مترمکعب)	(کیلو پاسکال)	(درجه)			
۱	عباس‌آباد	CL-ML	۱۲/۵	۶۷/۵	۲۰	۲۲/۱	۶/۴	۳/۶	۷/۷	۴	۵/۵	۴۲/۶	۱۳/۲	۲۶/۴	۱۲/۵	۰/۱۳	۱۷/۷	-	-	-			
۲	عباس‌آباد	CL-ML	۱۷/۵	۴۵	۳۷/۵	۲۴/۸	۶/۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۷/۶	-	-	-				
۳	عباس‌آباد	CL-ML	۱۶	۴۶/۵	۳۷/۵	۲۵/۶	۱۱/۱	۳/۴	۸/۷	۳/۵	۱۴/۵	۴۲/۷	۵/۶	۱۰/۴	۴۴/۳	۰/۳۲	۱۷/۸	۲۲/۷	۱۹/۶	۲۷/۸			
۴	نجم‌آباد	CL	۲۲/۵	۴۵	۳۲/۵	-	-	۱۰/۱	۸/۶	۴	۱۱	۱۱۳/۱	۲۰	۲۸	۸۰	۰/۴۶	۱۷/۵	-	-	-			
۵	نجم‌آباد	CL	۱۶	۶۶	۱۸	۲۴	۱۱/۵	۸/۵	۸/۵	۳/۵	۳۰	۷۹/۱	۱۹/۶	۲۸/۴	۶۴	۰/۴۸	۱۷/۶	۱۹	۲۶	-			
۶	نجم‌آباد	CL	۱۴	۳۵	۵۱	-	-	۷/۴	۸/۷	۵	۱۰	۸۸/۷	۱۸	۲۱/۲	۶۴	۰/۵۲	۱۷/۵	۱۸/۵	۲۸/۱	-			
۷	دانشلی برون	ML	۱۰	۸۵	۵	-	-	۳/۴	۸	۴/۵	۱۸	۳۹/۲	۲۸	۱۲	۲۱	۰/۶۳	۱۵/۳	۹/۶	۳۱	-			

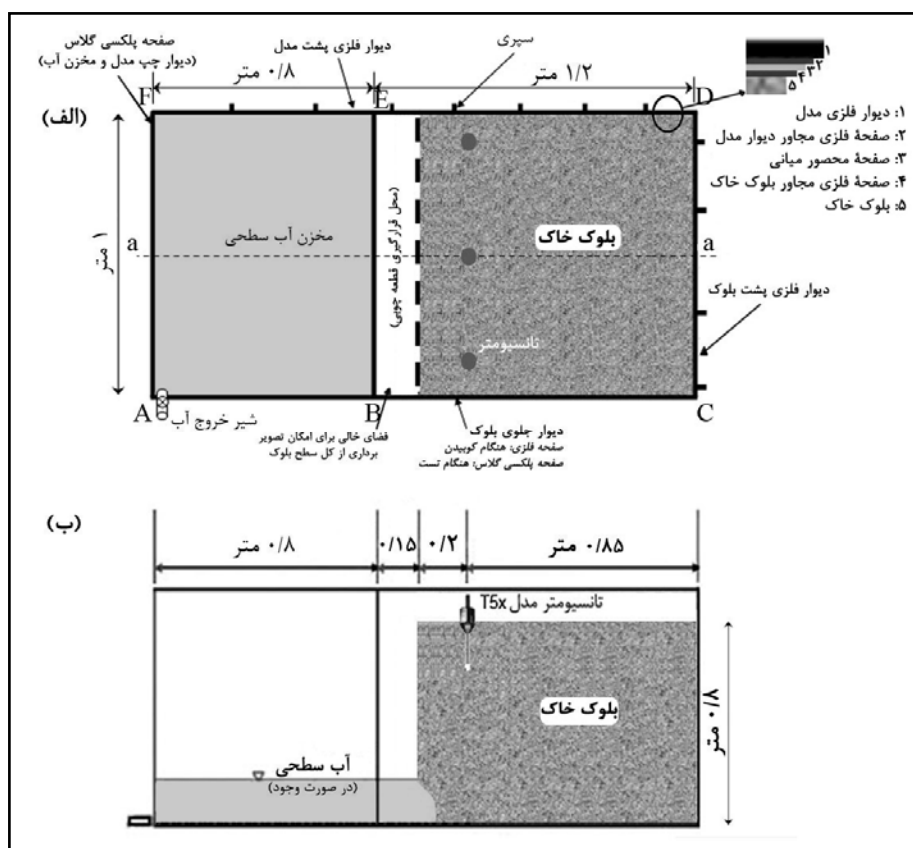
\* توضیح علائم: CL=رس با پلاستیسیته کم، CL-ML=رس سیلت، LL=حد روانی، PI=نمایه خمیری، EC=هدایت الکتریکی، pH=اسیدیته، CO<sup>3--</sup>=کربنات، HCO<sup>3-</sup>=بی‌کربنات، Cl<sup>-</sup>=کلر، SO<sup>4--</sup>=سولفات، Ca<sup>++</sup>=کلسیم، Na<sup>+</sup>=سدیم، K<sup>+</sup>=پتاس، Mg<sup>++</sup>=منیزیم، DS=تست برش مستقیم، UU=تست سه‌محوری سریع.

## ساخت مدل آزمایشگاهی

با توجه به ابهامات موجود در خصوص مکانیزم گسیختگی طاقی شکل و نیز فقدان تحقیقات آزمایشگاهی در گذشته، پس از اجرای آزمایش‌های مقدماتی در مدل اولیه و جمع‌بندی نتایج به دست آمده (Samadi, 2011)، یک مدل فیزیکی (مخزن) طراحی شد. این مدل از جنس فولاد با ابعاد داخلی (طول × ارتفاع × عرض)  $200 \times 100 \times 100$  سانتی‌متر ساخته شد (شکل ۴). برای مقاوم‌سازی آن در حین کوبیدن لایه‌های خاک در داخل آن، تعدادی سپری روی بدنه و کف مخزن جوش داده شد. با توجه به ضرورت در نظر گرفتن فضای مناسب در داخل مخزن برای عملیات زیرشویی ساحل با دست، قسمتی از آن در نیمه سمت چپ (دیوارهای AF و AB) با دیواره‌های پلکسی‌گلاس طراحی شد تا امکان استفاده از آن به عنوان منبع آب نیز میسر باشد. در حین ساخت مدل فیزیکی، کوبیدن لایه‌های مختلف خاک باعث وارد آمدن نیروی بسیار زیادی به دیواره‌های اطراف بلوک می‌شد، لذا دو دیوار متحرک فلزی در داخل مخزن در نظر گرفته شد. این دیوارها بعد از کوبیدن خاک از اطراف بلوک برداشته می‌شدند. علاوه بر آن، برای رفع مشکل اصطکاک بین بلوک و دیوار DE مخزن، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، ۳ صفحه فلزی ۳ میلی‌متری قبل از شروع عملیات کوبیدن خاک در محل موردنظر قرار داده شد. برای خارج کردن صفحات بعد از ساخت مدل فیزیکی ساحل، دو طرف صفحه میانی (صفحه شماره ۳ در شکل ۴)، با روغن آغشته شد تا با کمترین اصطکاک با صفحات مجاور خود، به کمک جرثقیل از مخزن خارج شوند. سپس به ترتیب صفحات شماره ۲ و ۴ با جرثقیل از مخزن خارج شد. با این کار فاصله مناسب

بین بلوک خاک و دیوار DE مخزن قبل از شروع آزمایش ایجاد گردید. دیوار BE مدل نیز که در مقابل بلوک خاک قرار می‌گرفت و نشانگر بخش در معرض جریان طاق آویزان در داخل رودخانه بود، به صورت متحرک طراحی شد و بعد از خاتمه عملیات تراکم مصالح، با باز کردن پیچ‌های دور تا دور آن، از شیار مربوطه با جرثقیل خارج شد. با توجه به اینکه در صورت ساخت بلوک خاک در فضای موردنظر، قسمت چپ بلوک (مجاور دیوار BE) در پشت نبشی به کار گرفته شده در وسط مخزن مخفی بود و امکان تصویربرداری از نمای کامل بلوک خاک در حین گسیختگی وجود نداشت، فاصله‌ای به اندازه ۱۵ سانتی‌متر بین دیوار BE و بلوک خاک در نظر گرفته شد و یک صفحه چوبی متراکم در محل مزبور قرار داده شد. حد فاصل این دو صفحه نیز با شبکه چوبی مشبک پر شد (موقعیت صفحه با خط‌چین در شکل ۴ مشخص شده است).

صفحه و شبکه چوبی مزبور پس از خاتمه عملیات تراکم خاک برداشته شدند و در نتیجه موقعیت بلوک خاک عقب‌تر قرار گرفت و در صورت چرخش بلوک در داخل مدل، امکان رویت و تصویربرداری از تغییرشکل‌های ایجاد شده به وجود آمد. همچنین، لازم بود که دیوار مقابل دوربین‌ها (BC) برای مشاهده وضعیت بلوک خاک در داخل آن، از جنس پلکسی‌گلاس باشد. در نتیجه برای اجتناب از تغییرشکل آن در هنگام کوبش لایه‌ها، ابتدا یک صفحه فلزی در محل مورد نظر تعبیه شد و پس از کوبیدن لایه‌های خاک و تشکیل بلوک مورد نظر، صفحه فلزی فوق با جرثقیل ۳ تنی مستقر در محدوده مدل برداشته و صفحه پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر جایگزین آن شد.



شکل ۴- الف) پلان مدل فیزیکی طراحی و ساخته شده، ب) مقطع طولی a-a

خاک دانه‌ها پخش شود. سپس خاک موردنظر به داخل مدل منتقل شد و بعد از پخش کردن در سطح مدل، با استفاده از چکش کوبیده شد. برای کوبیدن لایه‌های خاک از دو عدد چکش دستی با سطح مقطع مربع و دایره و وزن‌های مختلف و همچنین یک عدد چکش وایبره برقی با سطح مقطع ۱۰۰ و ۹۰۰ سانتی‌مترمربع، بسته به تراکم مورد نیاز در آزمایش، استفاده شد.

ارتفاع بلوک در تمامی آزمایش‌ها به طور یکسان معادل ۸۰ سانتی‌متر (۸ لایه ۱۰ سانتی‌متری با تراکم خاک موردنیاز) در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از تماس خاک با دیواره‌های مدل در هنگام کوبیدن، یک لایه پارچه توری در طرفین بلوک خاک قرار داده شد تا در زمان خارج نمودن صفحات متحرک از داخل مدل، بر اثر چسبیدگی سطح خاک با صفحات مورد استفاده، سطح خارجی بلوک خاک تخریب نشود (شکل ۵- الف).

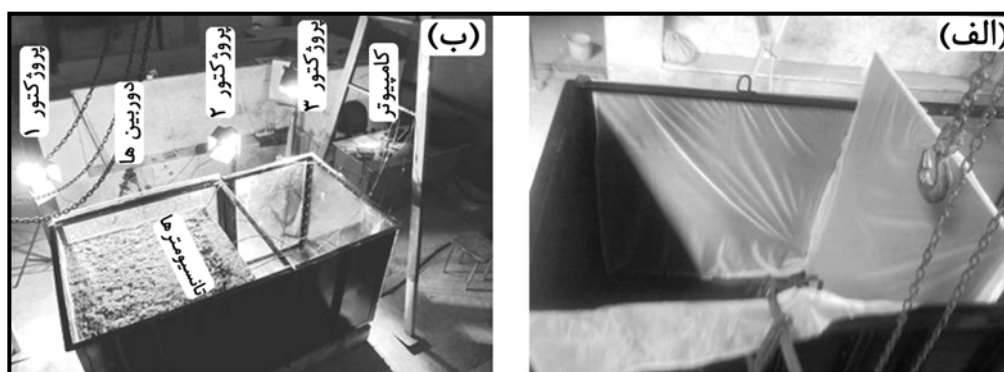
## مراحل آماده‌سازی بلوک خاک و نحوه اجرای آزمایش‌ها

برای اجرای آزمایش‌ها، قطعات بلوک‌های تخریب شده یا فرسایش یافته از سواحل رودخانه‌ها به محل آزمایشگاه منتقل و با چکش و غلتک خرد شد و مصالح خاکی عبور کرده از سرنده ۵ میلی‌متری برای آزمایش به کار گرفته شدند. مراحل مزبور پس از اجرای هر آزمایش برای تخریب بلوک‌ها و آماده‌سازی خاک مورد نیاز در آزمایش‌های بعدی عیناً تکرار شد. کلیه آزمایش‌ها بر اساس رطوبت بهینه حاصل از آزمون پروکتور اجرا شد و بدین‌منظور بعد از برآورد وزن خاک خشک و آب مورد نیاز در هر لایه، خاک وزن شده روی چندین صفحه فلزی پهن و با استفاده از آبپاش، مقدار آب مورد نیاز بدان اضافه شد. اضافه کردن آب مرحله به مرحله و همراه با زیر و رو کردن خاک بود تا رطوبت به طور تقریباً یکسان بین تمام



فاصله خیلی کم از بلوک خاک وجود داشت اما با توجه به طولانی بودن مدت زمان آزمایش و اینکه تعیین لحظه وقوع گسیختگی امکان‌ناپذیر بود، رهگیری تغییرات موضعی لحظات قبل از گسیختگی و حین آن با استفاده از این دوربین میسر نبود. لذا برای رفع این تنگنا، دوربین فیلم‌برداری در مجاورت این دوربین و با فاصله نسبتاً کمی از آن نصب شد. در هنگام اجرای آزمایش‌ها برای ایجاد نور کافی در سطح بلوک خاک، از سه پروژکتور ۱۰۰۰ وات، که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح بلوک خاک قرار گرفته بودند، استفاده شد. برای جلوگیری از تردد در محدوده مدل و بروز اختلال در تصویربرداری به واسطه ایجاد لرزش در دوربین‌ها یا ایجاد سایه در نورپردازی مقابل بلوک خاک، محدوده مدل به طور کامل استتار شد (شکل ۵-ب).

یکی از مزایای منحصر به فرد آزمایش‌های مدل فیزیکی این تحقیق، نسبت به تحقیقات صحرایی، امکان مشاهده و تصویربرداری از مقطع ساحل (طاق آویزان)، همزمان با گسترش فرآیند زیرشویی و تشکیل طاق آویزان است. در این آزمایش‌ها همزمان از دوربین عکس‌برداری با دقت بالا (۱۰ مگاپیکسل) - برای ثبت تصاویر از لحظات مختلف توسعه عمق زیرشویی - و نیز دوربین فیلم‌برداری با کیفیت HD - برای تصویربرداری متوالی الگوی تغییر شکل بلوک خاک در طول آزمایش - استفاده شد. هر دو دوربین دقیقاً در راستای صفحه قائم جلو بلوک خاک (مرز BC) و در تراز مسای با نقطه وسط بلوک مستقر و تراز شدند؛ صفحه تصویر آنها نیز موازی صفحه مدل است. با توجه به اینکه سرعت دوربین عکس‌برداری ۲ تا ۳ فریم در ثانیه بود، امکان تهیه تصاویر متوالی با



شکل ۵- الف) نصب توری پارچه‌ای در دیوارهای طرفین مدل قبل از ریختن خاک داخل مدل برای جلوگیری از اتصال خاک با صفحات موقت، ب) جانمایی پروژکتورها، دوربین‌های تصویربرداری، تانسیومترها، دیتالاگر و کامپیوتر قابل حمل در هنگام آزمایش.

شد. تصویر آرایش تانسیومترها روی سطح بلوک خاک در حین اجرای آزمایش در شکل ۵-ب نمایش داده شده است.

در خلال اجرای آزمایش‌ها، مکش خاک به دلیل استفاده نکردن از آب تغییر محسوسی نکرد اما به دلیل افزایش حرارت ناشی از نور پروژکتورها، به میزان جزئی افزایش یافت (جدول ۲).

برای کنترل فشار آب منفذی در داخل بلوک خاک، سه عدد تانسیومتر مینیاتوری ساخت شرکت UMS آلمان (مدل T5x) با قطر و طول شافت به ترتیب ۵ و ۱۰۰ میلی‌متر روی بلوک خاک و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری لبه چپ بلوک نصب (شکل ۵-ب) و از یک عدد دیتالاگر ۸ کاناله مدل DL6 ساخت شرکت Delta-T برای ثبت اطلاعات تانسیومترها به هنگام اجرای آزمایش‌ها استفاده

جدول ۲- اطلاعات کلی آزمایش‌ها و مشخصات گسیختگی‌های به وقوع پیوسته \*

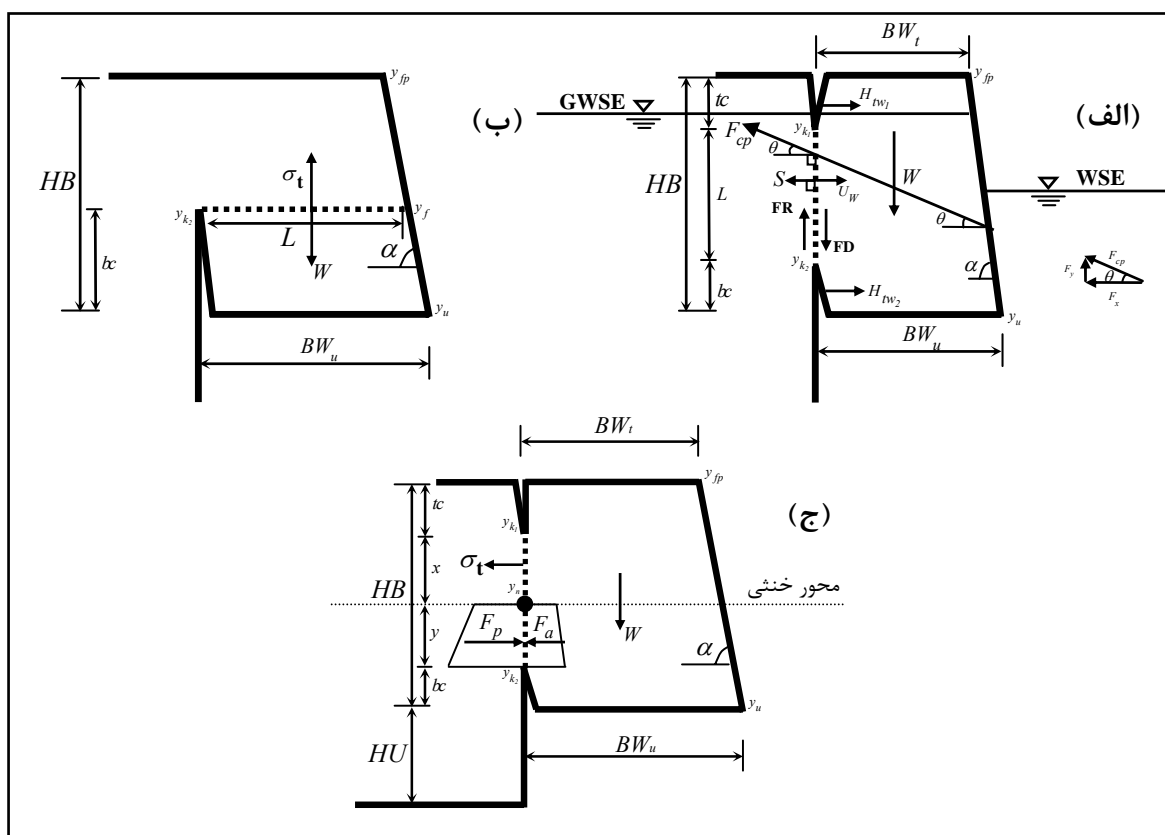
آزمون	بافت خاک	رطوبت بهینه ( $\omega$ )	دانسیته خشک ( $\gamma_d$ )	چسبندگی ( $C'$ )	زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi'$ )	مکش ثابت شده در سطح طاق ( $S$ )	زاویه افزایش مقاومت در اثر مکش (فرضی) ( $\phi^b$ )	آب حجمی خاک در حالت اشباع ( $\theta_s$ )	آب حجمی خاک در زمان آزمایش ( $\theta_w$ )	عمق زیر شویی ( $BW_u$ )	گسیختگی کششی	ضخامت لایه ( $bc$ )	طول سطح لغزش با طاق ( $L$ )	ارتفاع طاق ( $HB$ )	عرض فوقانی طاق ( $BW_f$ )	عرض تحتانی طاق ( $BW_u$ )
		(درصد)	(گرم بر سانتی‌متر مکعب)	(کیلوپاسکال)	(درجه)	(کیلوپاسکال)	(درجه)	(-)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)		(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)
۱		۱۳	۱/۵	۶	۱۵	۱۹/۶	۰/۴۴	۰/۲	۲۳	<input checked="" type="checkbox"/>	۱۵	۲۲	۶۰	۳۶	۲۳	
۲	CL	۱۳	۱/۷	۱۴	۱۶/۵	۲۱/۹	۰/۳۷	۰/۲۲	۲۸	<input checked="" type="checkbox"/>	۱۵	۲۲	۶۰	۴۰	۲۸	
۳			۱/۸	۱۷	۱۷	۲۳/۶	۰/۳۳	۰/۲۳	۴۰	<input checked="" type="checkbox"/>	۱۵	۳۰	۶۰	۵۵	۴۰	
۴			۱/۴	۲	۱۸	۱۳	۰/۴۷	۰/۲۲	۱۵	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	۷۵	۴۱	۱۵	
۵	ML	۱۵/۶	۱/۵	۲/۵	۲۱/۵	۱۳/۷	۰/۴۳	۰/۲۳	۲۵	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	۷۵	۴۸	۲۵	
۶			۱/۶	۴/۵	۲۴	۱۴/۹	۰/۴	۰/۲۵	۴۰	<input checked="" type="checkbox"/>	۱۵	۲۲	۶۰	۵۰	۴۰	

توضیح علائم:  وقوع گسیختگی مورد نظر،  عدم وقوع گسیختگی مورد نظر.

## نتایج و بحث

رودخانه اترک برگزیده شد و تأثیر تغییر دانسیته و جنس خاک در پایداری طاق آویزان مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات کلی آزمایش‌ها به همراه نوع مکانیزم گسیختگی طاق‌ها در جدول ۲ درج شده است. برای درک بهتر الگوی تخریب در مکانیزم‌های گسیختگی مختلف طاق آویزان (جدول ۲)، شکل تخریب و پارامترهای مؤثر در تحلیل طاق آویزان در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

با توجه به وزن مخصوص ظاهری مصالح، جدول ۱، و محدوده تغییرپذیری طبیعی دانسیته مصالح (Samadi et al., 2009)، در آزمایش‌های مدل فیزیکی سه دانسیته ۱/۵، ۱/۷ و ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای خاک CL رودخانه کردان و سه دانسیته ۱/۴، ۱/۵ و ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای خاک ML سرشاخه‌های



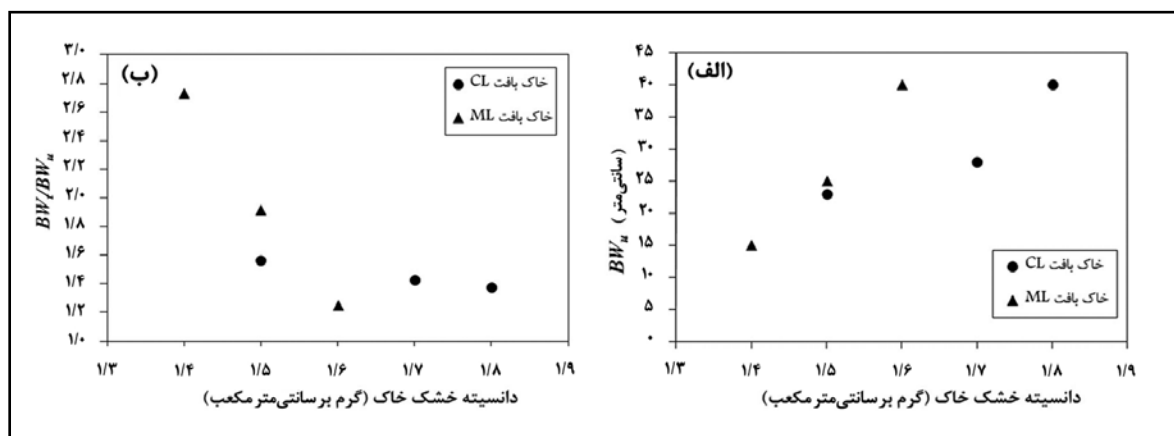
شکل ۶- مکانیزم‌های گسیختگی طاقی (الف: گسیختگی برشی در امتداد خط چین، ب) گسیختگی شعاعی در سراسر خط چین، ج) گسیختگی چرخشی حول محور خنثی خط چین (Samadi, 2011).

آزمایش‌های هر دو نوع خاک نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته، نسبت عرض فوقانی توده گسیخته شده به عمق زیرشویی طاق آویزان کاهش می‌یابد (شکل ۷). این کاهش در خاک بافت ML محسوس‌تر است. همچنین، به دلیل مقاومت کمتر خاک ML، نمونه‌های مزبور در اعماق زیرشویی کمتری در معرض تخریب قرار گرفتند.

براساس آزمون‌های اجرا شده برای هر دو جنس خاک مورد استفاده، با افزایش دانسیته، عمق زیرشویی قابل تحمل طاق افزایش می‌یابد (شکل ۷). به عبارت دیگر با افزایش دانسیته، نیروی چسبندگی و اتصال بین ذرات خاک افزایش یافته و برای گسیختگی طاق آویزان باید وزن آن افزایش یابد. از سوی دیگر، نتایج

تصاویر تخریب‌ها شامل بلوک‌های خاک قبل از وقوع گسیختگی و همچنین مکانیزم بوقوع پیوسته برای تمامی ۶ آزمون، در شکل‌های ۸ الی ۱۳ نشان داده شده‌اند.

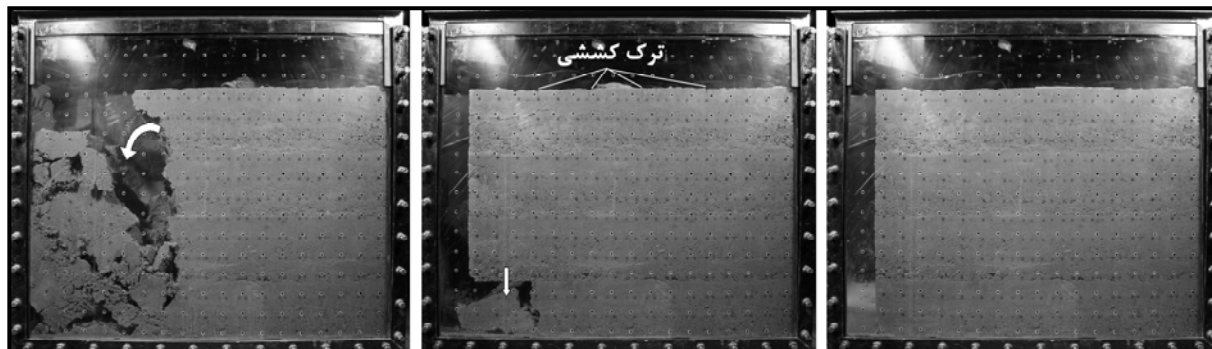
نتایج بررسی تصاویر و فیلم‌های تهیه شده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم‌های گسیختگی فقط از نوع کششی و چرخشی هستند و وقوع گسیختگی برشی در هیچ یک از این آزمایش‌ها مشاهده نشد.



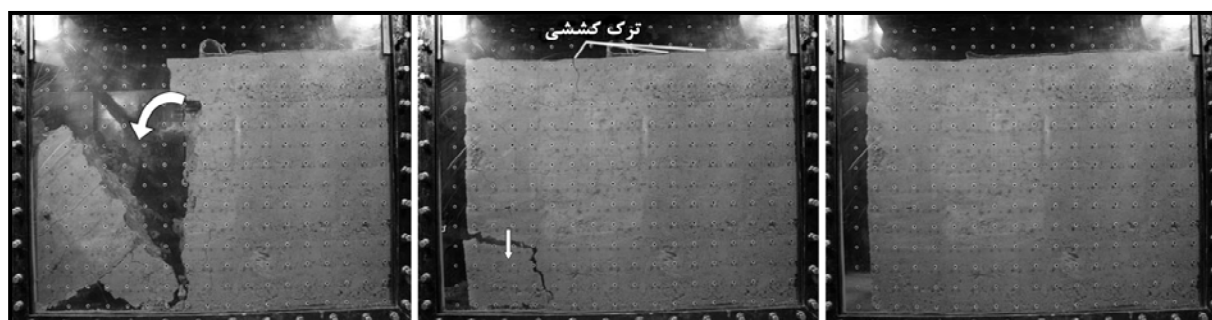
شکل ۷- الف) رابطه دانسیته خشک و حداکثر عمق زیرشویی پایدار طاق آویزان، ب) رابطه دانسیته خشک و نسبت عرض فوقانی به تحتانی طاق پس از گسیختگی.

متراکم‌سازی هر لایه جدیدتر، این اتفاق تکرار می‌شود. در حالی که ذرات خاک در درون لایه متراکم می‌شوند، اتصال آن لایه به لایه قبلی صرفاً از طریق چسبندگی ذرات دارای آرایش موازی صورت می‌گیرد و قفل‌شدگی بین ذرات دو لایه مجاور وجود ندارد. این مکانیزم مشابه حالتی است که در آن اتصال لایه‌های مجاور خاک یا بتن، اتصال سرد نامیده می‌شود و مقاومت برشی آن (صرف‌نظر از عمق) کمتر از مقاومت برشی تک‌تک لایه‌هاست. لذا در آزمایش‌های مدل فیزیکی این تحقیق، پدیده ناهمروندی یا غیر ایزوتروپ بودن اثرگذار بوده که به دلیل روش کار انتخاب شده امری اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود. این موضوع را می‌توان یکی از کاستی‌های روش مطالعه آزمایشگاهی، در مقایسه با شرایط طبیعی دانست که با انتقال بلوک طبیعی رودخانه به داخل آزمایشگاه و اجرای آزمایش روی آن مرتفع می‌شود.

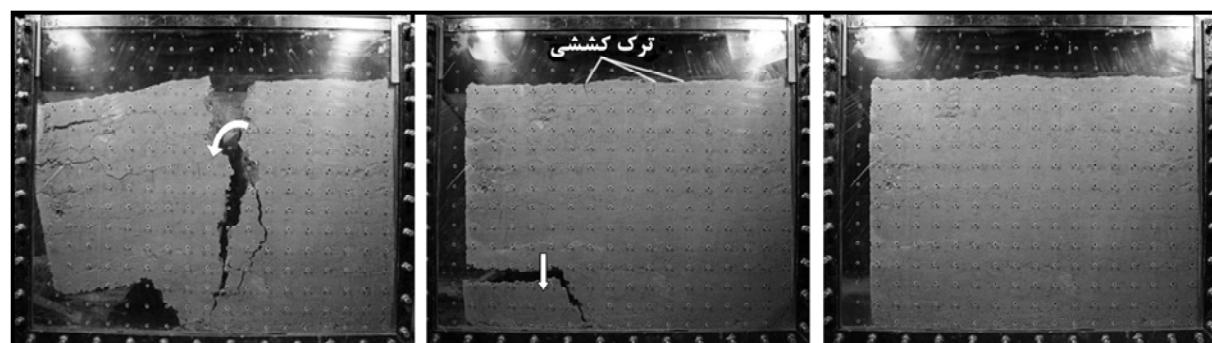
در آزمون‌های ۱ تا ۳ مربوط به خاک رودخانه کردن، با توجه به خاصیت پلاستیسیته خاک CL، با گذشت زمان و تخلیه بخش تحتانی ساحل، در قسمت فوقانی آن تغییر شکل‌هایی پدیده آمد که به مرور زمان باعث ایجاد تعدادی ترک کششی قابل مشاهده در لبه فوقانی ساحل شد. در هر سه آزمایش، ابتدا قسمت تحتانی بلوک خاک در اثر ایجاد یک سطح ضعیف بین ذرات لایه‌های خاک، در اثر نیروی کششی از بلوک جدا شد و به داخل مدل سقوط کرد. ایجاد سطح ضعیف در مرز لایه‌های خاک کوبی به دلیل تغییر جهت آرایش ذرات خاک (به ویژه خاک‌های ریزدانه دارای شکل پولکی) بود. در حین متراکم‌سازی هر لایه، آرایش ذرات در سطوح فوقانی و تحتانی به صورت افقی و موازی سطح تراکم درآمدند، در حالی که ذرات میانی آرایش درهم داشتند و در حین تراکم در یکدیگر قفل و موجب افزایش مقاومت برشی می‌شدند. با



شکل ۸- تصاویر آزمون ۱ با دانسیته خشک ۱/۵ گرم بر سانتی مترمکعب: راست) قبل از ایجاد حفره تحتانی، وسط) وقوع گسیختگی کششی در بخش تحتانی طاق، چپ) گسیختگی چرخشی طاق آویزان.



شکل ۹- تصاویر آزمون ۲ با دانسیته خشک ۱/۷ گرم بر سانتی مترمکعب: راست) قبل از ایجاد حفره تحتانی، وسط) وقوع گسیختگی کششی در بخش تحتانی طاق، چپ) گسیختگی چرخشی طاق آویزان.



شکل ۱۰- تصاویر آزمون ۳ با دانسیته خشک ۱/۸ گرم بر سانتی مترمکعب: راست) قبل از ایجاد حفره تحتانی، وسط) وقوع گسیختگی کششی در بخش تحتانی طاق، چپ) گسیختگی چرخشی طاق آویزان.

کششی موجود در قسمت فوقانی ساحل به سمت داخل مدل تمایل پیدا می‌کند و با ادامه این روند، از محل یکی از ترک‌های کششی توسعه می‌یابد و از بلوک خاک جدا و به داخل مدل واژگون می‌شود. نتایج آزمایش‌ها (جدول ۲) مؤید این موضوع است که با افزایش دانسیته خاک،

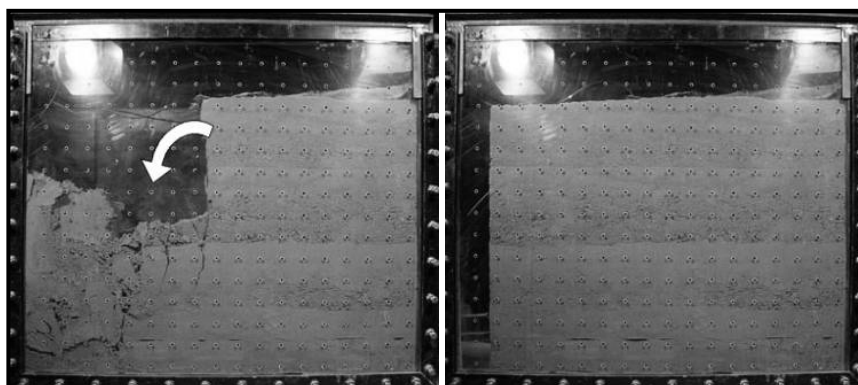
جریان آب در شرایط طبیعی رودخانه، قطعات مزبور را حمل می‌کند و با شسته شدن رسوبات، این روند فرسایش سرعت بیشتری می‌گیرد. در این آزمایش‌ها، پس از وقوع گسیختگی کششی در بخش تحتانی ساحل، طاق آویزان باقیمانده به تدریج بر اثر گشتاور ناشی از نیروی

خاک، عمق زیرشویی قبل از تخریب بسیار کمتر از آزمایش‌های ۱ الی ۳ است. در این آزمایش‌ها صرفاً گسیختگی کششی در آزمون ۶، و با حداکثر دانسیته و عمق زیرشویی، مشاهده شد.

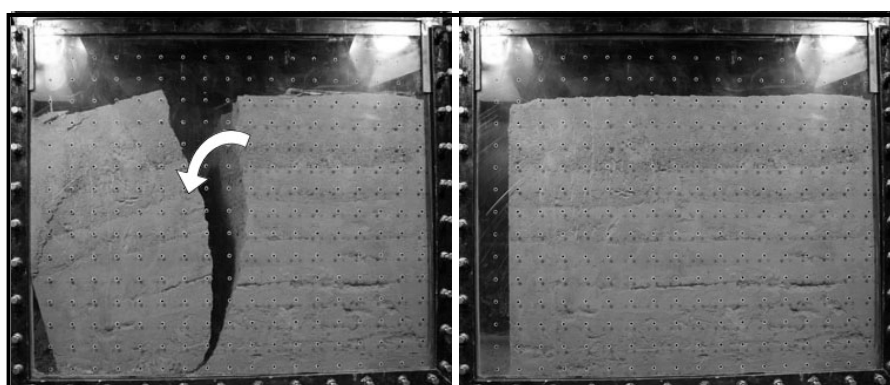
در هر سه آزمون، گسیختگی اصلی تحت مکانیزم چرخش طاق آویزان صورت گرفت. در این آزمایش‌ها نیز مشابه آزمایش‌های قبلی، با افزایش دانسیته مصالح، عمق زیرشویی، و عرض فوقانی بلوک گسیخته شده از ساحل افزایش می‌یابد.

عمق زیرشویی و همچنین ضخامت ناحیه کششی فوقانی طاق توسعه یافته و طاق آویزان در عرض بزرگتری از باقیمانده بلوک جدا شده است.

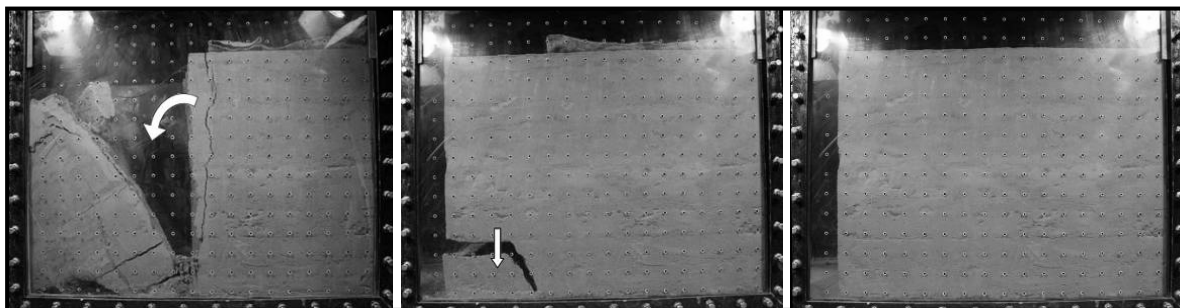
بر اساس آزمون‌های ۴ الی ۶ در خاک فاقد خاصیت پلاستیسیته با بافت ML، با گذشت زمان و تخلیه بخش تحتانی ساحل، در قسمت فوقانی آن تغییرشکل‌های چندانی مشاهده نمی‌شود و آهنگ توسعه ترک کششی نیز در لبه فوقانی ساحل مشاهده نمی‌شود. در آزمایش‌های این نوع خاک، به دلیل چسبندگی بسیار پایین بین ذرات



شکل ۱۱- تصاویر آزمون ۴ با دانسیته خشک ۱/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب: راست) قبل از ایجاد حفره تحتانی، چپ) گسیختگی چرخشی طاق آویزان و متلاشی شدن آن به علت عدم وجود چسبندگی.



شکل ۱۲- تصاویر آزمون ۵ با دانسیته خشک ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب: راست) قبل از ایجاد حفره تحتانی، چپ) گسیختگی چرخشی طاق آویزان.



شکل ۱۳- تصاویر آزمون ۶ با دانسیته خشک ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب: راست) قبل از ایجاد حفره تحتانی، وسط) وقوع گسیختگی کششی در بخش تحتانی طاق، چپ) گسیختگی چرخشی طاق آویزان.

### نتیجه گیری

گسیختگی قرار می گیرند.

۴- دو عامل اصلی تشکیل طاق عبارتند از نیروی فشار آب منفذی ناشی از سطح آب زیرزمینی داخل ساحل و نیروی فرساینده جریان آب داخل رودخانه. تحقیقات نشان می دهد که عامل دوم مؤثرتر است.

۵- در این تحقیق از اثر جریان آب داخل رودخانه صرف نظر شده و نقش فرسایشی آن در ایجاد حفره و تشکیل طاق به طور دیگری لحاظ شده است. گسیختگی های مشاهده شده در رودخانه کردن نیز عمدتاً در زمان خشکی رودخانه وقوع یافته و می توان نتیجه گیری کرد که نیروهای هیدرواستاتیک آب رودخانه در حفظ پایداری طاق آویزان نقش دارند و نه در تخریب آن.

۶- با توجه به تأثیر عامل اصطکاک (چسبندگی) بین خاک ریزدانه و دیواره مدل، برخلاف تحقیقات قبلی مانند لی و همکاران (Li *et al.*, 2009) و تقوی و همکاران (Taghavi *et al.*, 2010) ضرورت دارد برای اجرای تحقیقات آزمایشگاهی روی مکانیزم گسیختگی طاقی شکل، فاصله ای مناسب بین بلوک خاک و دیواره مدل لحاظ شود تا اثر درگیری بین بلوک خاک و مدل از بین برود.

۷- از آنجا که با افزایش دانسیته، عمق زیرشویی برای وقوع گسیختگی افزایش می یابد، می توان نتیجه گرفت که

در تحقیق حاضر برای اولین بار مدلی فیزیکی برای مطالعه آزمایشگاهی گسیختگی طاقی شکل طراحی و ساخته شد و تأثیرات جنس مصالح تشکیل دهنده ساحل (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، دانسیته آنها و عمق زیرشویی طاق آویزان بر رفتار طاق و مکانیزم گسیختگی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی بررسی های صحرایی و آزمایشگاهی این تحقیق عبارتند از:

۱- وقوع مکانیزم گسیختگی طاقی شکل در سواحل رودخانه های چندلایه با مصالح فوقانی چسبنده محتمل است. همچنین وقتی مصالح ساحل رودخانه همگن و چسبنده باشند نیز امکان تشکیل طاق بر اثر جریان دائمی و کم عمق رودخانه وجود دارد.

۲- تشخیص مکانیزم گسیختگی در لحظه وقوع در طبیعت به دلیل محصور شدن ساحل از اطراف ممکن نیست و از سوی دیگر لحظه وقوع گسیختگی نیز از پیش قابل تعیین نخواهد بود.

۳- بررسی های صحرایی رودخانه کردن نشان می دهد که طاق عمدتاً در زمان وقوع سیلاب تشکیل می شود اما بخشی از آنها در زمان طغیان رودخانه تخریب خواهد شد و اغلب آنها با فروکش کردن سیلاب و طی زمان، در اثر تقابل بین نیروهای مقاومتی و وزن طاق در معرض

با افزایش وزن مخصوص مصالح تشکیل دهنده طاق، تأثیر نیروهای مقاومتی آن بیشتر از نقش تخریب کننده نیروی وزن است.

۸- دست کم برای شرایط آزمایشگاهی این تحقیق، برای دو جنس مصالح به کار رفته، مکانیزم گسیختگی غالب از نوع چرخشی است که این موضوع با الگوی تخریب طاق‌های آویزان در سواحل رودخانه کردان نیز مطابقت دارد. لذا به نظر می‌رسد فرض ساده‌انگارانه محققان قبلی در وقوع مکانیزم برشی در طبیعت باید تجدیدنظر شود.

۹- عمق زیرشویی در سواحل تشکیل شده از مصالح چسبنده با بافت CL، به ویژه در دانسیته‌های پایین، بیشتر از سواحل تشکیل شده از مصالح لُس با بافت ML است.

۱۰- با توسعه عمق زیرشویی، در خاک‌های چسبنده دارای خاصیت پلاستیسیته، توسعه ترک کششی در

قسمت فوقانی بلوک خاک مشاهده و طاق نیز در امتداد یکی از ترک‌های فوقانی تخریب می‌شود. اما توسعه ترک کششی در خاک بافت ML مشهود نیست؛ ترک‌های ایجاد شده مویی و غیرقابل رؤیت هستند.

۱۱- مکانیزم گسیختگی در خاک چسبنده به صورت پیشرونده و همراه با توسعه ترک کششی است. اما در خاک غیرچسبنده، مکانیزم گسیختگی سریع‌تر (لحظه‌ای) است و قبل از وقوع گسیختگی، تغییرشکل چندانی در قسمت فوقانی بلوک خاک مشاهده نمی‌شود.

### قدردانی

محققان لازم می‌دانند از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای تأمین امکانات آزمایشگاهی و همچنین ساخت مدل فیزیکی، قدردانی کنند.

### مراجع

- Amiri-Tokaldany, E. 2002. A model of bank erosion and equilibrium bed topography in river bends. PhD Thesis. University of Southampton. UK.
- 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(12): 1303-1323.
- Darby, S.E. and Thorne, C.R. 1996. Development and testing of riverbank-stability analysis. *J. Hydraul. Eng.* 122(8): 443-454.
- Darby, S. E. and Thorne, C. R. 1997. Discussion of Development and testing of riverbank-stability analysis. *J. Hydraul. Eng.* 123(11): 1052-1053.
- Darby, S. E., Gessler, D. and Thorne, C. R. 2000. Computer program for stability analysis of steep, cohesive riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms*. 25(2): 175-190.
- Darby, S. E., Rinaldi, M. and Dapporto, S. 2007. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *J. Geophys. Res.* 112(F03022): 1-15.
- Li, S., Knappett, J. and Feng, X. 2009. Investigation of slope stability influenced by change of reservoir water level in three gorges of China. In: Liu, J., Zhang, H., Liu, X. (Eds). *Flow in porous media: from phenomena to engineering and beyond conference*. International Forum on Porous Flow and Applications. April. 24-26. Wuhan. China. 911-916.
- Osman, A. M. and Thorne, C. R. 1988. Riverbank stability analysis. I: Theory. *J. Hydraul. Eng.* 114 (2): 134-150.



- 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.
- Samadi, A. 2007. Personal Communication with Prof. Colin Thorne. Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering. Uni. Tehran. IRAN.
- Samadi, A., Amiri-Tokaldany, E. and Darby, S. E. 2009. Identifying the effects of parameter uncertainty on the reliability of riverbank stability modeling. *Geomorphol.* 106, 219-230.
- Samadi, A. 2011. Experimental, and Analytical Investigation of the Stability of Riverbanks against Cantilever Failure. PhD Thesis. Dept. Irrigation and Reclamation Engineering. Uni. Tehran. IRAN. (in Farsi)
- Simon, A., Curini, A., Darby, S. E. and Langendoen, E. J. 1999. Streambank mechanics and the role of bank and near-bank processes in incised channels. In: Darby, S. E., Simon, A. (Eds). *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*. John Wiley and Sons. Ltd. Chichester. U.K. 123-152.
- Taghavi, M., Dovoudi, M. H., Amiri-Tokaldany, E. and Darby, S. E. 2010. An analytical method to estimate failure plane angle and tension crack depth for use in riverbank stability analyses. *Geomorphol.* 123(1-2): 74-83.
- Thorne, C. R. and Tovey, N. K. 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms.* 6, 469-484.
- Thorne, C. R. 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey, R. D., Bathurst, J. C., and Thorne, C. R. (Eds). *Gravel Bed Rivers*. John Wiley & Sons. Ltd. Chichester. U.K. 227-271.
- Thorne, C. R. 1999. Bank processes and channel evolution in the incised rivers of North-Central Mississippi. In: Darby, S. E., Simon, A. (Eds). *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*, John Wiley & Sons. Ltd. Chichester. U.K. 97-121.
- Van Eerdt, M. M. 1985. Salt marsh cliff stability in the Oosterschelde. *Earth Surface Processes and Landforms.* 10(2): 95-106.



## **Field and Laboratory Study of Cantilever Failure Phenomenon in Cohesive Riverbanks**

**A. Samadi\*, M. H. Davoudi, E. Amiri-Tokaldany, and H. Rahimi**

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Dept. of Water Eng., Faculty of Engineering & Technology, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. E-Mail: amsamadi@gmail.com

Received: 1 January 2011, Accepted: 17 December 2011

Because it is not possible to recognize the mechanism of cantilever failure in field studies, this type of common failure in riverbanks is investigated in the laboratory. For this purpose, two samples of susceptible soil that forms an overhanging block in riverbanks are used for physical model tests to determine their physical, chemical and mechanical characteristics. Soil blocks of different densities were formed and then undermined by hand at specific depths over specific time increments and the stability of the overhanging block were assessed at each step. The results showed that, under these laboratory study conditions, the dominant failure mechanism is toppling. This finding is in accordance with the overhanging failure pattern in the Kordan Riverbanks. It was also found that the failure mechanism in cohesive soil is progressive and accompanied by tension crack development. In Loess material, the failure mechanism is momentary and no deformations in the upper part of the soil block are observed.

**Keywords:** Bank retreat, Cantilever failure, Composite riverbanks, Fluvial erosion, Shear failure