

# بررسی مکانیزم لغزش‌های پیش‌رونده در شیروانی‌های اطراف مخازن و ناپایداری شیروانی‌های لسی

حسین غیاثیان و حسین حیاتی

**چکیده:** احداث یک مخزن در مجاورت شیب‌های ناپایدار یا دارای قابلیت ناپایدار شدن، شرایط بارگذاری شیروانی‌ها و در بعضی موارد خواص مکانیکی خاک را تحت تاثیر قرار داده و ممکن است شرایط لغزش در شیروانی‌ها را فراهم سازد. در این مقاله به پیش‌بینی لغزش شیروانی‌های اطراف مخزن سد گلستان ۲ پرداخته شده است. ساختگاه سد گلستان ۲ از خاک ریزشی موسوم به لس پوشیده شده که پارامترهای مقاومتی آن نسبت به تغییرات رطوبت خاک حساس می‌باشند. آنالیز پایداری شیروانی‌ها شامل آنالیز معین و آنالیز احتمالاتی است که در آنالیز احتمالاتی برای پارامترهای خاک واریانس‌های منطقی در نظر گرفته و در پایان با استفاده از احتمال گسیختگی محاسبه شده، حجم خاک ناشی از لغزش‌های محتمل برآورد گردیده است. همچنین مکانیسم لغزش‌ها و هندسه سطوح لغزش و نیمرخ پایدار نهایی شیروانی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیزهای انجام شده نشان می‌دهد تعدد و پراکندگی لغزش‌ها در امتداد خط ساحلی زیاد و در عین حال حجم و ابعاد آن‌ها کوچک است. حجم کل لغزش‌های محتمل حدود چهار درصد حجم مفید مخزن برآورد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** لغزش-پایداری شیروانی‌ها-گسیختگی پیش‌رونده-آنالیز احتمالاتی-لس

## ۱. مقدمه

اهمیت مساله لغزش در مخازن سدها هم از جهت اقتصادی و هم از نظر اجتماعی قابل تامل است. تحقیقات کمیته ویژه سدهای بزرگ (ICOLD (2002 نشان می‌دهد که بیشترین آسیب‌ها متوجه سازه‌های مجاور و وابسته سد است و در عین حال یک سوم لغزش‌ها پتانسیل به مخاطره انداختن جان انسان‌ها را دارند. لغزش شیروانی‌های اطراف مخازن سدها معمولاً در طی پرکردن دریاچه و سال‌های نخستین بهره برداری از سدها به وقوع می‌پیوندد. منطقه شمال کشور و استان گلستان به عنوان یکی از استان‌های شمالی به لحاظ منابع آب جزء غنی ترین مناطق ایران می‌باشد. سد مخزنی گلستان ۲ در حدود ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان گنبد کاووس در استان گلستان بر روی رودخانه گرگانرود قرار دارد و هم اکنون عملیات اجرایی آن در حال انجام می‌باشد (کارفرمای این پروژه سازمان آب منطقه ای مازندران و گلستان و مشاور و

طراح آن مهندسین مشاور تهران برکلی می‌باشد). سد گلستان ۲ با حجم مخزن ۵۳ میلیون متر مکعب و با ارتفاع از کف ۲۳ متر به عنوان یکی از ۳ سد پیش‌بینی شده در طرح مرکز با هدف تنظیم و ذخیره آب برای مصارف کشاورزی بر روی رودخانه گرگانرود احداث می‌شود. منطقه گنبد کاووس را دشت وسیعی می‌پوشاند که از رسوبات ماسه ای و سیلتی غیر متراکم لسی موسوم به ماسه‌های بادی پوشیده شده‌اند. با توجه به حساسیت این مصالح در برابر آب و احتمال تغییر پارامترهای مقاومتی پس از آبیگری مخزن و نیز با توجه به تجربه وقوع لغزش‌ها و ناپایداری‌های شیروانی‌های حاشیه مخزن سد گلستان ۱، در این تحقیق به بررسی و پیش‌بینی رفتار شیروانی‌های اطراف مخزن و ابعاد و پیامدهای وقوع لغزش‌ها پرداخته شده است.

## ۲. مطالعات ژئوتکنیکی و انتخاب پارامترهای مقاومتی

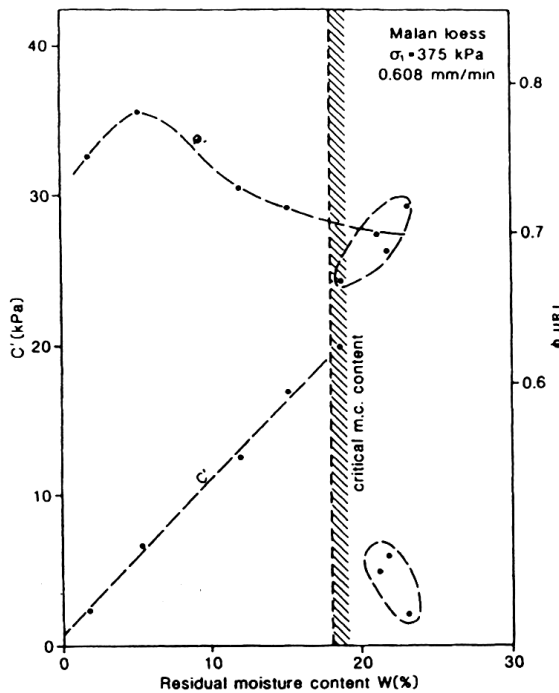
### لس

خاک‌های لسی در زمره رسوبات بادی محسوب شده و در گروه خاک‌های موسوم به خاک‌های ریزشی طبقه‌بندی می‌شوند. در این خاک‌ها، دانه‌های درشت‌تر (در اندازه لای) معمولاً با ساختاری لانه زنبوری توسط مواد سمنته مثل رس یا کانی‌های دیگر همچون آهک یا گچ به یکدیگر چسبانده شده‌اند. ریزش لس بیشتر به علت

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۹/۲۳ و پس از بازنگری‌های لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۱۱ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر حسین غیاثیان، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، [hossghia@iust.ac.ir](mailto:hossghia@iust.ac.ir)  
حسین حیاتی، کارشناس ارشد مهندسی عمران، [hayatimahin@hotmail.com](mailto:hayatimahin@hotmail.com)

مطالعه از بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده توسط شرکت مشاور بر مبنای ۱۴ گمانه با اعماق ۵۵ الی ۷۵ متری و هم چنین نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نگارندگان استفاده شده است. تعداد کل نمونه‌های دست خورده ۳۶ و نمونه‌های دست نخورده ۲۴ می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها شامل آزمایش دانه بندی و حدود اتر برگ، آزمایش تک محوری، آزمایش سه محوری، آزمایش تحکیم، آزمایش رهمبندگی، آزمایش پین هول و آزمایش‌های شیمیایی می‌باشند.



شکل ۱. تاثیر درصد رطوبت بر پارامترهای مقاومتی لس (Derbyshire et al., 1994)



شکل ۲. دیواره‌های قائم خاک لسی در ساحل رودخانه گرگانرود (بالادست سد گلستان ۱)

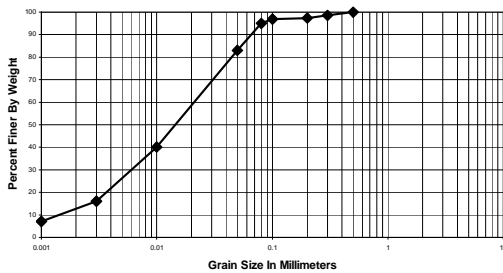
کاهش مقاومت برشی این مواد ناشی از جذب رطوبت و ایجاد شرایط اشباع در خاک می‌باشد.

نسبت مقاومت دست نخورده به مقاومت دست خورده لس حدود ۳ است [۲]. مطابق تعریف ترزاقی از حساسیت، لس‌ها در زمره خاک‌های نیمه حساس قرار می‌گیرند [۲]. مطابق معیار فدا، Fedas 1966 که حساسیت را نسبت مقاومت دست نخورده به مقاومت اشباع تعریف می‌کند، لس‌ها در زمره حساس‌ترین خاک‌های دانه ای به شمار می‌روند [۳]. این حساسیت بالای لس نسبت به تغییرات رطوبتی، آن را به مصالحی نامناسب برای کاربرد در سدهای خاکی تبدیل می‌نماید. تماس آب با ذرات لس منجر به حل شدن یا سست شدن پیوندهای سیمانی بین ذرات سیلت و کاهش غلظت یون‌های مثبت در اطراف رس و تضعیف پیوندهای رسی خواهد شد. بعضی از محققین از بررسی‌ها و مطالعات تفصیلی بر روی لس‌های آسیای مرکزی نتیجه گیری می‌کنند که مقاومت خاک‌های لسی پس از اشباع با مقاومت نمونه‌های دست خورده تطابق دارد. این محققان دلیل بسیج نشدن مقاومت برشی حداکثر در خاک را به هم ریختن آرایش اولیه ذرات لس پس از تماس با آب می‌دانند [۲].

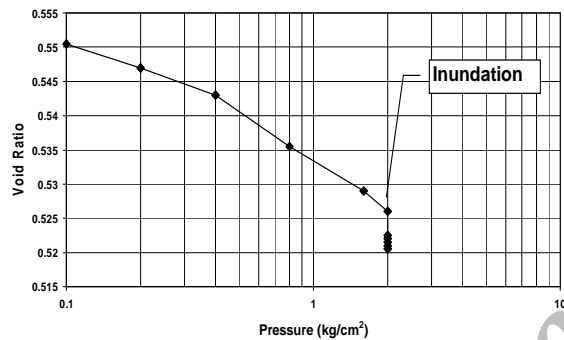
شکل ۱ تاثیر افزایش درصد رطوبت بر پارامترهای مقاومتی لس را نشان می‌دهد. در مورد زاویه اصطکاک مشاهده می‌شود که افزایش رطوبت از حالت خشک تا رطوبت حدود ۵ درصد منجر به افزایش زاویه اصطکاک تا یک مقدار حداکثر خواهد شد. پس از آن با افزایش رطوبت تا حد بحرانی (که نزدیک به حد خمیری خاک مورد آزمایش بوده است)، زاویه اصطکاک کاهش خواهد یافت. با افزایش بیشتر درصد رطوبت، زاویه اصطکاک موثر تغییر محسوسی نمی‌کند و تقریباً ثابت می‌شود. همچنین چسبندگی لس با افزایش رطوبت خاک از شرایط خشک تا رطوبت حد بحرانی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد رطوبت از این حد، چسبندگی به طور ناگهانی سقوط می‌کند که نمایانگر تاثیر عمده رطوبت اشباع در کاهش مقاومت برشی خاک لس می‌باشد. شکل ۲ نمایی از دیواره‌های قائم ساحل گرگانرود را در نزدیکی منطقه عرب سورنک نشان می‌دهد. این شکل نمایانگر چسبندگی بالای خاک لسی منطقه در شرایط خشک است. ولی همین خاک در شرایط اشباع به میزان زیادی چسبندگی موثر خود را از دست داده و لذا ترانشه‌های قائم ناپایدار می‌شوند که این رفتار در پروفیل پایدار نهایی شیروانی‌ها در مخزن سد گلستان ۱ در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این مسئله در بخش‌های بعدی مورد بحث بیشتر قرار خواهند گرفت.

کاوش‌های انجام گرفته در محدوده محور ساختگاه گلستان ۲ و نیز بالادست و پائین دست آن نشان می‌دهد که در سطح زمین تا مسافت قابل توجهی لایه‌های خاک در سطوح مرتفع از لس شامل سیلت و ماسه و در ترازهای پائینی در مجاورت جریان آب رودخانه از لایه‌های سیلتی رس دار و عدسی‌های ماسه ای سیلتی تشکیل یافته است [۱]. برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک منطقه مورد

را می‌توان جز خاک‌های ریزشی به حساب آورد (معیار هولتز [۶]) ولی پتانسیل ریزش ضعیف است (معیار آبلف [۶]).



شکل ۴. منحنی دانه بندی نمونه اخذ شده از ساختگاه سد گلستان ۲



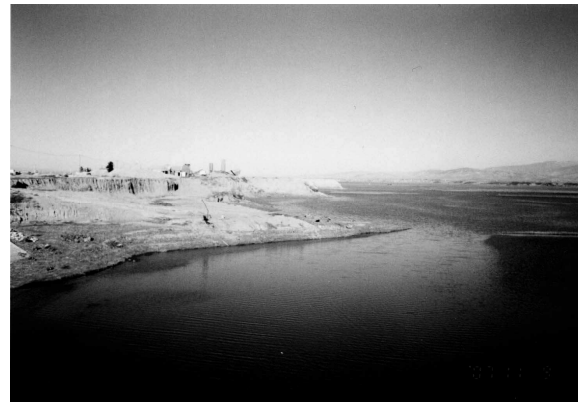
شکل ۵. آزمایش تحکیم منفرد (رمبندگی) نمونه اخذ شده از ساختگاه سد گلستان ۲

اگر چه خاک منطقه سد گلستان ۲ در آزمایش رمبندگی نشست زیادی ندارد، ولی از حساسیت بسیار بالایی در برابر جذب رطوبت برخوردار است و مقاومت زهکشی نشده آن ( $S_u$ ) پس از تماس با آب به شدت کاهش می‌یابد که این رفتار در نتایج آزمایش‌های سه محوری دیده می‌شوند. خلاصه ای از آزمایش‌های ۳ محوری انجام شده در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های سه محوری بر روی ۲۴ نمونه دست نخورده [۱۰]

پارامتر	آزمایش	حداقل	حداکثر	میانگین
$S_u$ (kPa)	UU	60	680	260
$C$ (kPa)	CU	30	80	60
$\phi$ (degree)	CU	25	35	30
$C'$ (kPa)	CU	30	50	40
$\phi'$ (degree)	CU	30	39	34

برای انجام آنالیز پایداری لازم است پارامترهای مقاومتی در دو حالت اشباع و نیمه اشباع تعیین گردند. اگر پارامترهای  $C'$  و  $\phi'$  به

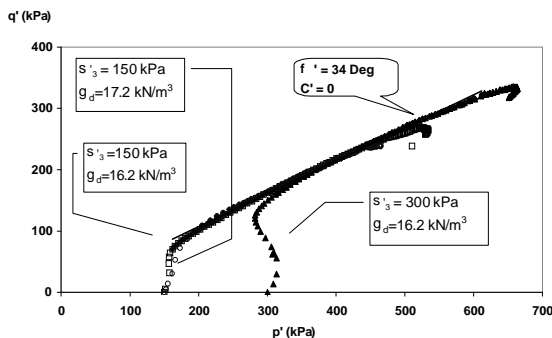


شکل ۳. پروفیل پایدار نهایی شیروانی‌ها در مخزن سد گلستان ۱

نتایج کامل آزمایش‌های فوق در گزارش تهیه شده توسط شرکت مشاور با نام «مجموعه مطالعات مرحله دوم سد گلستان ۲» موجود است [۴]. از این نتایج در این مطالعه استفاده شده است. همچنین در جهت کنترل صحت این آزمایش‌ها تعدادی آزمایش توسط نگارندگان نیز انجام شده است. کلیه آزمایش‌ها مطابق استاندارد ASTM انجام شده است. برای انجام آزمایش رمبندگی از روش آزمایش تحکیم منفرد که توسط هوستون (Houston, 1988) معرفی شده است، استفاده گردیده است [۵]. در این آزمایش نمونه دست نخورده با رطوبت طبیعی در دستگاه ادمتر قرار می‌گیرد و بار قائم در چند مرحله افزایش می‌یابد و هر بار به خاک اجازه تحکیم داده شود. فشار قائم تا رسیدن به حد تنش در محل افزایش می‌یابد. در این مرحله نمونه اشباع شده و خاک ریزش می‌نماید. در انتهای آزمایش میزان کرنش ریزشی اندازه گیری می‌شود.

بر طبق آزمایش‌های دانه بندی و هیدرومتری، خاک محدوده سد گلستان ۲ دارای حدود صفر تا ۱۰ درصد ماسه ریز، ۵۰ تا ۸۰ درصد سیلت و ۱۵ تا ۴۰ درصد رس می‌باشد (شکل ۴). آزمایش‌های انجام شده از طرف شرکت مشاور و نگارنده تایید می‌کند خاک لسی منطقه سد گلستان ۲ بر طبق سیستم طبقه بندی یونیفاید از نوع CL-ML می‌باشد. خاک منطقه مورد نظر پلاستیسیته کمی داشته و به شدت مستعد فرسایش پذیری است [۱۰]. ضریب رمبندگی یا ضریب فرو ریزش به دست آمده از آزمایش‌های شرکت مشاور بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۲ قرار دارد. ضریب رمبندگی نمونه اخذ شده توسط نگارنده نیز ۰/۱۱ می‌باشد (شکل ۵). بنا بر طبقه بندی آبلف می‌توان پتانسیل ریزشی (رمبندگی) خاک منطقه را ضعیف برآورد نمود [۶]. مطابق معیار گیبز و بارا (Gibbs and Bara, 1962) با توجه به آنکه در شرایط طبیعی، رطوبت خاک از حد روانی آن کمتر است، نمی‌توان آن را جزء خاک‌های ریزشی طبقه بندی کرد. جمع بندی مطالب نشان می‌دهد که اگر پتانسیل نشست ناگهانی مبنای ارزیابی خاک‌های رمبند یا ریزشی به کار رود، خاک منطقه سد گلستان ۲

مورد مشابه است. آزمایش‌های سه محوری انجام شده توسط نگارنده مقدار  $C'$  را بین صفر و ۷ کیلو پاسکال برآورد می‌کند. پس از بررسی همه جوانب، برای انجام آنالیز پایداری بر روی شیروانی‌ها مقدار  $C'=15 \text{ kPa}$  که تقریباً معادل میانگین چسبندگی بدست آمده از آزمایش‌های مشاور و آزمایش‌های نگارنده می‌باشد و ضمناً با نتایج آنالیز برگشتی (Back Analysis) انجام شده بر روی ترانشه‌های طبیعی موجود در محل نیز همخوانی خوبی دارد استفاده شده است.



شکل ۶. پوش گسیختگی در آزمایش سه محوری بر روی نمونه اخذ شده از ساختگاه سد گلستان ۲

### ۳. فرضیات و آنالیزهای انجام شده

برای انجام آنالیزهای پایداری در این تحقیق از نرم افزار Slope-W که یکی از برنامه‌های بسته نرم افزاری Geo-Slope می‌باشد استفاده شده است. این نرم افزار توسط شرکت کانادایی «Geo-Slope International Ltd.» در سال ۲۰۰۲ ارائه شده و یکی از جدیدترین و معتبرترین برنامه‌های رایانه ای موجود برای آنالیز پایداری شیروانی‌ها بر اساس روش‌های تعادل حدی به شمار می‌رود. در میان روش‌های ذکر شده برای آنالیز پایداری به نظر می‌رسد روش‌هایی که تعادل ممان‌ها و نیروها را به طور همزمان ارضاء می‌کنند مناسب‌ترند [۹]. به همین منظور روش آنالیز GLE که تعادل نیرو و ممان را برقرار می‌کند، یک گزینه مناسب به شمار می‌رود. در این روش بین نیروی نرمال و برشی بین قطعه ای، رابطه ای به صورت زیر فرض می‌شود:

$$X = E\lambda f(x) \quad (1)$$

که در آن:

$X$ : نیروی برشی بین قطعه ای،

$E$ : نیروی نرمال بین قطعه ای،

$f(x)$ : تابع نیروی بین قطعه ای که جهت نسبی برابند نیروی بین قطعه ای را تعریف می‌کند،

دست آمده از نمونه‌های اشباع دست نخورده ( $34^\circ, 40 \text{ kPa}$ ) و نمونه‌های اشباع دست خورده ( $36^\circ, 40 \text{ kPa}$ ) را مقایسه نماییم، مشاهده می‌کنیم که نتایج بسیار به هم نزدیک است و این مسأله فرض فدا (Fedá, 1996) و سایر محققین در مورد تغییر حالت لس از حالت دست نخورده به حالت دست خورده در اثر اشباع را تقویت می‌کند. نمونه‌های دست خورده و نمونه‌های دست نخورده خاک لس پس از اشباع رفتار یکسانی داشته و مقاومت آن‌ها مشابه نمونه‌های دست خورده می‌باشد. به عبارت دیگر تاثیر آب در خاک لس منجر به افت مقاومت آن می‌شود و این تاثیر مشابه اثرات دست خوردگی است و هر دو پدیده متأثر از تغییرات ساختمان داخلی خاک می‌باشند. این نتایج با تحقیقات قبلی انجام شده روی خاک‌های لسی مطابقت دارد [۳ و ۸].

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های ۳ محوری بر روی ۳۶ نمونه دست خورده [۱۰]

پارامتر	آزمایش	حداقل	حداکثر	میانگین
$S_u$ (kPa)	UU_اشباع	90	150	120
$C'$ (kPa)	CU_اشباع	30	50	40
$\phi'$ (degree)	CU_اشباع	34	39	36
$C'$ (kPa)	CU_نیمه اشباع	40	100	70
$\phi'$ (degree)	CU_نیمه اشباع	30	35	32

نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط مشاور مقدار میانگین زاویه اصطکاک دست خورده در شرایط اشباع را  $36^\circ$  درجه و در شرایط نیمه اشباع  $32^\circ$  درجه برآورد می‌کند. آزمایش‌های سه محوری انجام شده توسط نگارنده نیز زاویه اصطکاک زهکشی شده در شرایط اشباع را حدود  $34^\circ$  درجه برآورد می‌نماید (شکل ۶). برای آنالیز پایداری شیروانی‌های طبیعی حاشیه مخزن سد گلستان از مقادیر میانگین زاویه اصطکاک زهکشی شده بدست آمده در آزمایش‌های انجام شده توسط مشاور به علت تعدد بیشتر آزمایشات و نتیجتاً اعتبار بالاتر آن‌ها استفاده می‌شود.

برای تعیین چسبندگی زهکشی شده  $C'$  در حالت نیمه اشباع با توجه به آنکه درصد رطوبت کمتر از حد خمیری خاک است (حد خمیری لس منطقه به طور متوسط برابر  $PL = 20$  می‌باشد) می‌توان با اعتماد کامل به نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط شرکت مشاور، مقدار  $C'$  را از میانگین مقادیر گزارش شده از این آزمایش‌ها تعیین کرد (منحنی چسبندگی در شکل ۱ در این محدوده از تغییرات درصد رطوبت پیوسته بوده و افت شدیدی ندارد). اما برای تعیین چسبندگی زهکشی شده اشباع ( $C'$ ) لازم است اطلاعات موجود مورد بررسی بیشتری قرار گیرند. آزمایش‌های سه محوری انجام شده از طرف شرکت مشاور مقدار میانگین  $C'$  را ۴۰ کیلو پاسکال و مقدار حداقل آن را ۳۰ کیلو پاسکال برآورد می‌کند (جدول ۱). نتایج آزمایش‌های دست خورده و دست نخورده در این

داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شده است (واریناس زاویه اصطکاک ۲ درجه و واریناس چسبندگی در آنالیزهای مختلف بین ۱۵ تا ۳۰ کیلو پاسکال می‌باشد).

برای انجام آنالیز احتمالاتی در این پروژه از روش مونت کارلو استفاده شده است. لازم به یادآوری است که کاربرد آنالیز احتمالاتی آنالیز معین را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. ابتدا ضریب اطمینان همه سطوح لغزش بر اساس مقادیر متوسط محاسبه شده و بحرانی‌ترین آن‌ها مستقل از آنالیز احتمالاتی معین می‌شود و سپس بر روی سطح لغزش بحرانی آنالیز احتمالاتی انجام می‌شود. مراحل آنالیز احتمالاتی در روش مونت کارلو عبارت است از [۹ و ۱۱]:

۱- انتخاب یک روش برای انجام آنالیز پایداری معین (نظیر روش بیشاپ اصلاح شده)

۲- تعیین مقدار متوسط و واریناس پارامترها بر اساس توزیع تصادفی نرمال.

۳- در این مرحله برنامه به تعداد دفعاتی که توسط کاربر تعیین شده است، برنامه را اجرا کرده و برای هر بار آنالیز به صورت تصادفی یک مقدار برای پارامترهای ورودی در نظر می‌گیرد.

۴- میانگین و واریناس ضرایب اطمینان محاسبه شده از هر آنالیز محاسبه شده و با فرض تبعیت آن‌ها از توزیع نرمال تابع چگالی احتمال و تابع توزیع احتمالاتی رسم می‌شود. در پایان این مرحله احتمال گسیختگی شیروانی و شاخص اطمینان مشخص می‌گردد.

### ۳-۲. لایه‌های خاک برای آنالیز پایداری

همان‌طور که بیان شد خاک‌های لسی نسبت به رطوبت بسیار حساس هستند و پارامترهای مقاومتی آن‌ها با افزایش درصد رطوبت یا درجه اشباع به شدت تغییر می‌یابد. به همین منظور کل توده خاک شیروانی به دو ناحیه اشباع و نیمه اشباع تقسیم می‌شود. ناحیه اشباع شامل لایه‌های زیر تراز نرمال آب مخزن، لایه مویبگی و لایه سطحی خاک تحت تأثیر بارندگی می‌باشد. منطقه بینابینی دو لایه سطحی و لایه مویبگی لایه نیمه اشباع تلقی می‌شود. برای دو لایه اشباع و نیمه اشباع مطابق آنچه مورد بررسی قرار گرفت پارامترهای مقاومتی در نظر گرفته شده است.

### ۴. آنالیز پایداری

آنالیزهای پایداری شامل آنالیز معین و آنالیز پایداری احتمالاتی می‌باشد. پس از ثبت اطلاعات مربوط به همه شیروانی‌ها، با توجه به متنوع بودن پروفیل هندسی شیب‌ها، کلیه شیروانی‌ها بر مبنای ارتفاع (H) و زاویه شیب (β) طبقه بندی شدند و مجموعاً ۱۲۵ دسته شیروانی با ارتفاع بین ۶ تا ۴۱ متر و زاویه شیب بین ۲۵ تا ۶۵ درجه مشخص و برای آن‌ها آنالیز پایداری انجام شده است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که عمده شیروانی‌ها پس از آگیری و در زمان عملکرد عادی مخزن پایدار می‌مانند و تنها تعداد کمی از

λ: ضریبی که نشان می‌دهد چه کسری از تابع نیروی بین قطعه ای برای محاسبه نیروی برشی باید به کار رود

تجربه نشان می‌دهد که انتخاب تابع نیروی نیمه سینوسی انطباق بهتری با شرایط شیروانی‌ها دارد [۹]. مطابق این روش به ازای مقادیر مختلف λ که بین صفر و یک متغیر است، مقادیر ضریب اطمینان  $F_m$  و  $F_f$  محاسبه می‌شوند.  $F_f$  ضریب اطمینان بدست آمده از نوشتن معادله تعادل افقی نیروها و  $F_m$  ضریب اطمینان بدست آمده از نوشتن معادله تعادل ممان‌ها می‌باشد. پس از رسم نموداری  $F_m$  و  $F_f$  بر حسب λ محل برخورد دو نمودار مشخص و ضریب λ مربوط به نقطه برخورد تعیین می‌شود. در واقع به این ترتیب مقداری از λ بدست می‌آید که به ازای آن هم تعادل نیروها و هم تعادل ممان‌ها برقرار است [۹]. در این تحقیق برای همه شیروانی‌ها آنالیز حساسیت انجام شده و در مجموع نتیجه گیری شده است که در حالت مخزن پر (Steady State) ضریب اطمینان بدست آمده از تعادل نیرویی و تعادل ممانی بسیار به هم نزدیک است و اختلاف آن‌ها به ندرت از ۰/۱۰ تجاوز می‌کند. لذا در آنالیزهای انجام شده در این تحقیق از روش‌های بیشاپ اصلاح شده و روش GLE استفاده شده است.

با توجه به آنکه شیروانی‌های پیرامون مخزن جزء شیب‌های طبیعی به حساب می‌آیند، آنالیز پایداری آن‌ها تنها در دو حالت وضعیت تعادل یافته در زمان پر بودن مخزن و حالت افت سریع آب مخزن انجام خواهد شد. دسایی (Desaiee, 1997) با آنالیز شیروانی‌های با هندسه و ضرایب نفوذ پذیری متفاوت به این نتیجه رسید که آنالیز تراوش برای این شیروانی‌ها از اهمیت ثانویه برخوردار است و در نتیجه در محاسبه ضریب اطمینان نیازی به انجام آنالیز تراوش نبوده و می‌توان با استفاده از سطح آزاد آب فشار منفذی را تخمین زد. به عبارتی شرایط هیدرواستاتیکی منظور می‌شود.

### ۳-۱. آنالیز احتمالاتی (Probabilistic Analysis)

در ارتباط با پایداری شیروانی‌های حاشیه یک مخزن لازم است به جای تعیین اعداد دقیق برای پارامترهای خاک، دامنه ای منطقی برای تغییرات این پارامترها منظور نموده و تأثیر پراکندگی داده‌های ژئوتکنیکی را در برآورد پایداری به حساب آورد. آنالیز احتمالاتی قادر است قسمتی از خطاهای غیرقابل پیشگیری در عملیات آزمایشگاهی و نامعینی‌های ذاتی موجود در تعیین پارامترهای مکانیکی را جبران نماید.

در انجام آنالیز احتمالاتی توسط نرم افزار Geo-Slope، کاربر مقدار متوسط و واریناس هر پارامتر را وارد نموده و فرض نرم افزار بر آن است که پارامتر مورد نظر با توجه به مقدار میانگین و واریناس از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. در آنالیز پایداری شیروانی‌ها برای وزن مخصوص، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی خاک و واریناس در نظر گرفته شده است. مقادیر واریناس‌های انتخاب شده از واریناس

طور کلی آیا همه لغزش‌هایی که ضریب اطمینان متناظر آن‌ها کوچکتر از یک است اتفاق خواهند افتاد. اگر بخواهیم برای آنالیز افت سریع آب مخزن به این سؤال پاسخ دهیم لازم است بر فرآیند تدریجی منجر به ناپایداری با دقت بیشتری تأمل گردد.

با شروع افت سریع آب از تراز نرمال اولیه، در اولین تراز که ضریب اطمینان بر روی یکی از سطوح لغزش به مقداری کمتر از یک برسد، اولین لغزش رخ می‌دهد و به همین ترتیب با قرار گرفتن ارتفاع آب در ترازهای کمتر، در هر مرحله اگر ضریب اطمینان کمتر از یک باشد، گسیختگی در ناحیه بعدی اتفاق خواهد افتاد. این روند تا رسیدن پروفیل شیروانی به پروفیل پایدار ادامه می‌یابد.

به نظر می‌رسد انتخاب چنین روندی برای پیش بینی لغزش‌های یک شیروانی نسبت به روش قبل به واقعیت نزدیک تر باشد. بنابراین روش B با مراحل زیر معرفی می‌شود:

۱- آنالیز پایداری اولیه با پروفیل هندسی اولیه شیب و با فرض  $H' = H'_o - 1$  (بر حسب متر) انجام می‌شود.  $H'_o$  ارتفاع استغراق اولیه شیروانی است. آنالیز برای هر یک متر افت آب انجام شده است.

۲- سطوح لغزش محتمل در پایان آنالیز مرحله قبل بررسی شده و ضریب اطمینان حداقل مشخص می‌شود.

۳- اگر در پایان مرحله ۲، برای تعدادی از سطوح لغزش، ضریب اطمینان کوچکتر از یک باشد، سطح لغزش متناظر با کوچکترین ضریب اطمینان ( $FS_{min}$ ) انتخاب و حجم لغزش مربوطه از روی شیروانی برداشته می‌شود و شیروانی با پروفیل باقیمانده و در همان تراز قبلی آب، مجدداً آنالیز می‌شود. این آنالیزها تا رسیدن به پروفیلی ادامه می‌یابد که ضریب اطمینان حداقل آن بزرگتر از یک باشد. اگر در پایان مرحله ۲، ضریب اطمینان حداقل بزرگتر از یک باشد به مرحله ۴ می‌رویم.

۴- سطح آب مقابل شیب یک متر پایین آورده شده و مرحله ۳ تکرار می‌شود.

۵- مرحله ۴ تا رسیدن  $H'$  به صفر ادامه می‌یابد.

### ۳-۱-۴. روش C

روش C مشابه روش B بوده و تنها تفاوت آن در این است که در مرحله ۳ به جای آنکه سطح لغزش مربوط به کوچکترین ضریب اطمینان ( $FS_{min}$ ) انتخاب شود، سطح لغزش مربوط به بزرگترین ضریب اطمینان کوچکتر از یک ( $FS_{max}$ ) انتخاب می‌شود. به طور کلی این روش منطقی‌ترین روش است هر چند که نتایج هر سه روش نزدیکی زیادی به هم دارند.

در واقع اگر گام‌های انتخاب شده برای کاهش سطح آب مخزن ( $\Delta H$ ) که در این مطالعه مساوی یک متر فرض شده است به اندازه کافی کوچک انتخاب شود، پروفیل‌های پایدار روش‌های C و B بر هم منطبق خواهند بود.

شیروانی‌ها که عمدتاً دارای شیب تند (بیش از ۵۰ درجه) می‌باشند، دارای ضریب اطمینان کوچکتر از یک خواهند شد. ولی بسیاری از شیروانی‌ها در شرایط افت سریع آب مخزن ضریب اطمینان کمتر از یک داشته و ناپایدار خواهند بود. در ادامه نحوه و مکانیسم گسیختگی‌ها، مراحل و حجم لغزش‌های محتمل و «پروفیل نهایی پایدار» شیروانی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۱-۴. پروفیل نهایی پایدار

برای یک شیروانی با هندسه مشخص ناپایداری هنگامی رخ می‌دهد که ضریب اطمینان حداقل شیب به یک کاهش یابد. در این شرایط لغزش در امتداد سطح بحرانی شکل می‌گیرد و هندسه شیروانی به وضعیت جدید تغییر می‌یابد. ولی این وضعیت جدید ممکن است در طول زمان تحت تاثیر شرایط افت سریع ناپایدار گردد و لغزش جدیدی در آن رخ دهد. لذا این فرایند می‌تواند چند مرحله تکرار گردد تا شیروانی به پروفیل پایدار نهایی برسد. درباره چگونگی رسیدن یک شیروانی از حالت ناپایدار به حالت پایدار تحت شرایط افت سریع آب مخزن، سه روش مورد بررسی قرار گرفته است. در هر سه روش، شرایط افت سریع آب را با قرار دادن ارتفاع آب مقابل شیروانی برابر صفر ( $H'=0$ ) در حالتی که تراز آب در داخل شیروانی در حالت قبل از افت آب قرار دارد منظور می‌نماییم.

### ۱-۱-۴. روش A

روش A که همان روش به کار گرفته شده برای انجام آنالیز پایداری شیروانی‌ها در این تحقیق بوده است، شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- آنالیز پایداری اولیه با پروفیل هندسی اولیه شیروانی و با فرض  $H'=0$  انجام می‌شود.

۲- سطوح لغزش بحرانی در پایان آنالیز مشخص شده و سطح لغزش متناظر با کمترین مقدار ضریب اطمینان انتخاب می‌شود. ضریب اطمینان محاسبه شده در این مرحله را ضریب اطمینان اولیه نامیده و آن را با  $FS_1$  نمایش می‌دهیم.

۳- حجم مربوط به سطح لغزش مرحله قبل، از شیروانی برداشته شده و پروفیل باقیمانده شیب مجدداً تحت شرایط افت سریع آب آنالیز می‌شود.

۴- مرحله ۳ مجدداً تکرار شده و این روند تا رسیدن ضریب اطمینان حداقل برابر یک ادامه می‌یابد.

### ۲-۱-۴. روش B

قبل از بیان مراحل روش B لازم است به علت انتخاب چنین روشی اشاره شود. اگر فرض کنیم بر روی یک شیروانی طبیعی آنالیز پایداری انجام شده و تعدادی سطوح لغزش با ضریب اطمینان کوچکتر از یک برای آن مشخص شده باشد، سؤال اساسی آن است کدام یک از لغزش‌های مشخص شده زودتر به وقوع می‌پیوندد و به

اولیه دارای ضریب اطمینان بزرگتر از یک در شرایط افت سریع خواهد بود. لغزش شیروانی در این مکانیسم شامل توده کم حجمی است که از ناحیه پنجه شیب تخریب می‌شود و دایره گسیختگی معمولاً از پنجه شیروانی و محل برخورد خط شیب شیروانی با خط تراز آب اولیه (تراز نرمال مخزن) می‌گذرد. در واقع دایره لغزش از مرز بین دو لایه اشباع شده و نیمه اشباع عبور می‌کند.

#### ۲- مکانیسم گسیختگی‌های زنجیره ای

در مواردی که ضریب اطمینان اولیه محاسبه شده کمتر از 0.9 باشد، معمولاً گسیختگی و لغزش شیروانی به صورت چند مرحله ای انجام خواهد شد. مراحل گسیختگی شیروانی در این مکانیسم معمولاً بین ۲ تا ۵ مرحله بوده و ممکن است به عقب نشینی شیروانی نیز بیانجامد. هر چه ضریب اطمینان اولیه یک شیروانی کمتر باشد میزان عقب نشینی بیشتر خواهد بود. به خصوص وقتی که ضریب اطمینان اولیه کمتر از 0.6 باشد سطوح گسیختگی جدید در هر مرحله، مستقل از سطح گسیختگی مرحله قبل است و عقب نشینی تاج ممکن است به بیش از ۲۰ متر برسد. اما در حالت‌های بینابینی یعنی وقتی ضریب اطمینان اولیه بین 0.6 و 0.9 باشد شیروانی رفتاری بین دو حد قبلی خواهد داشت. در این حالت اغلب سطوح گسیختگی بعدی در امتداد سطوح گسیختگی قبلی شکل می‌گیرند به نحوی که با هر لغزش قسمتی از پروفیل پایدار نهایی شیروانی ساخته می‌شود. پروفیل نهایی پایدار این شیب‌ها را می‌توان با دو قسمت مدل کرد که یکی با شیب ملایم و دیگری با شیب تند می‌باشد. به نظر می‌رسد مشخصات شیب ملایم متأثر از ارتفاع و زاویه شیروانی نباشد. بررسی پروفیل نهایی پایدار بسیاری از شیروانی‌های آنالیز شده (با مشخصات هندسی متفاوت) نشان می‌دهد که در بیشتر موارد زاویه قسمت ملایم پروفیل نهایی بین ۱۳ تا ۲۳ درجه است و به طور متوسط شیب آن ۱ به ۳ (قائم به افقی) می‌باشد. هر چه عقب نشینی تاج شیروانی بیشتر باشد، این شیب ملایم تر می‌شود.

زاویه شیب قسمت تندتر پروفیل نهایی پایدار (دیواره) بین ۵۰ و ۶۵ درجه بوده و هر چه ارتفاع شیروانی افزایش یابد، این زاویه بیشتر می‌شود و ارتفاع دیواره افزایش می‌یابد. این شیب با نزدیک شدن به سطح زمین به شیب قائم تبدیل می‌شود. شکل ۸ مراحل آنالیز پایداری یک شیروانی با ارتفاع ۳۸ متر و ارتفاع استغراق ۱۹ متر

( $\frac{H'}{H} = 0.5$ ) و زاویه شیب ۵۷/۵ درجه را در حالت افت سریع آب نشان می‌دهد.

می‌توان در پروفیل نهایی پایدار (مرحله ۸) شیب ملایم و شیب تند (دیواره) شکل گرفته را مشاهده کرد. بررسی مکانیسم گسیختگی‌ها در حالت افت سریع آب می‌تواند نکات جالب توجهی از وضع شیروانی‌های منطقه بدست دهد. نگاهی به پروفیل فعلی شیروانی‌ها در محل مخزن سد گلستان ۲ و در شرایطی که هنوز آنگیری انجام نشده است نشان می‌دهد بعضی از شیروانی‌ها دارای پروفیلی شبیه

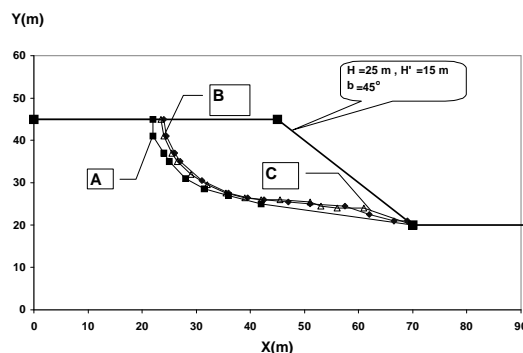
شکل ۷ پروفیل نهایی پایدار یک شیروانی با ارتفاع ۲۵ متر و ارتفاع استغراق اولیه ۱۵ متر و زاویه شیب ۴۵ درجه که از روش‌های A, B و A بدست آمده است را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، اگر چه روش A اندکی محافظه کارانه تر است ولی پروفیل نهایی پایدار محاسبه شده از روش‌های مختلف ذکر شده بسیار به هم نزدیک بوده و عملاً می‌توان گفت که انتخاب روش تعیین سطوح گسیختگی متوالی چندان بر پروفیل نهایی پایدار تاثیرگذار نمی‌باشد.

علی‌رغم آنکه سرعت همگرایی روش‌های C و B نسبت به روش A بیشتر است، دلایل نگارنده در انتخاب روش A برای آنالیز پایداری شیروانی‌ها در حالت افت سریع آب عبارتند از:

۱- روش A آنالیزها را از بحرانی ترین وضع آغاز می‌کند و لذا نتایج محافظه کارانه تری بدست می‌دهد.

۲- نگاهی کلی به نتایج آنالیزهای انجام شده توسط نرم افزار Slope-W در حالت افت سریع آب مخزن نشان می‌دهد که بین ضریب اطمینان اولیه محاسبه شده در روش A یعنی  $FS_1$  و مراحل لغزش‌های متوالی آن رابطه معناداری وجود دارد. با کاهش ضریب اطمینان  $FS_1$ ، مراحل لغزش‌های متوالی و عقب نشینی یک شیروانی افزایش می‌یابد. در ادامه برای طبقه بندی مکانیسم‌های لغزش از ضریب اطمینان  $FS_1$  استفاده خواهد شد.

۳- حجم محاسبات روش‌های C و B به مراتب از روش A بیشتر است.



شکل ۷. مقایسه پروفیل نهایی پایدار در حالت افت سریع آب بر اساس روش‌های A, B, و C

#### ۲-۴. مکانیسم گسیختگی

به طور کلی می‌توان مکانیسم گسیختگی و وقوع لغزش در شیروانی‌های حاشیه مخزن سد گلستان ۲ در شرایط افت سریع آب را در موارد زیر طبقه بندی کرد:

۱- مکانیسم خوردگی پنجه شیب

بر اساس نتایج بدست آمده برای شیروانی‌های مختلف اگر ضریب اطمینان اولیه  $FS_1$  بالاتر از 0.9 ( $FS_1 > 0.9$ ) باشد، لغزش شیروانی معمولاً یک مرحله ای بوده و پروفیل جدید شیروانی پس از فروریزی

حجم محتمل لغزش از جمع حجم محتمل لغزش در مراحل پیاپی گسیختگی بدست می‌آید.

$$V_{total} = V_t = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n (T.L.S.M)_i \times P_{f_i} \quad (3)$$

که n تعداد مراحل گسیختگی است.

آنالیز احتمالاتی احتمال گسیختگی همه شیبها را تعیین می‌نماید. حتی اگر ضریب اطمینان شیب بالای یک باشد، ممکن است احتمال گسیختگی شیب بالای صفر باشد و در نتیجه لازم است در این موارد نیز حجم توده لغزنده را محاسبه نماییم.

چنین محاسبه ای برای محاسبه حجم توده لغزش در هر یک از شیروانی‌ها به معنی پذیرفتن لغزش آن شیب نیست ولی می‌توان انتظار داشت در کل دریاچه تعدادی از شیروانی‌های با ضریب احتمال بالای ۱ بنابر قانون احتمالات تخریب شوند که البته در حالت آنالیز پایداری با مخزن پر (Steady State) به دلیل پایین بودن احتمال گسیختگی شیبها، این تعداد اندک خواهد بود.

با انجام آنالیز احتمالاتی به ترتیب شرح داده شده برای کل شیروانی‌های دریاچه، کل حجم خاکی که به دنبال آبیگری مخزن تخریب و وارد دریاچه می‌شود را ۲۰۸۷۰۰ متر مکعب برآورد می‌شود.

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i = 208700 \text{ m}^3 \quad (4)$$

با انجام آنالیز احتمالاتی به ترتیب شرح داده شده برای کل شیروانی‌های دریاچه کل حجم خاکی که پس از افت سریع آب مخزن تخریب و وارد دریاچه می‌شود ۱۵۸۸۹۰۰ متر مکعب پیش بینی می‌شود.

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i = 1588900 \text{ m}^3 \quad (5)$$

اگر حجم لغزشها با استفاده از نتایج آنالیز معین و بدون انجام آنالیز احتمالاتی محاسبه شود حجمی تقریباً معادل ۲ برابر این عدد بدست می‌آید (۴ میلیون متر مکعب) که غیر واقعی و غیر منطقی است.

لازم است حجم کل لغزشهای محتمل که نزدیک به ۱/۸ میلیون متر مکعب می‌باشد از نظر رسوبگذاری بر مخزن نیز مورد بررسی قرار گیرد. این رقم اگرچه نسبت به حجم رسوب ۴۰ ساله محاسبه شده برای مخزن سد گلستان ۲ که ۲/۵ میلیون متر مکعب می‌باشد قابل توجه است ولی به طور کلی، ناپایداری شیروانی‌های حاشیه مخزن حداکثر ۰/۰۴ حجم مفید مخزن را کاهش می‌دهد.

### ۶. نتیجه گیری

نتایج مطالعه انجام شده را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

(۱) آنالیزهای انجام شده در حالت افت سریع آب مخزن نشان می‌دهد در لغزشهای چند مرحله ای انتخاب سطوح لغزش مربوط به

به پروفیل‌های بدست آمده در آنالیز انجام شده برای شرایط افت سریع آب هستند (پروفیل دو خطی). این تشابه این نظریه را تقویت می‌کند شاید کل منطقه در گذشته‌های دور شرایط غرقابی و افت سریع آب را تجربه کرده است و همین شرایط دیواره‌های قائم و نزدیک به قائم را در منطقه به وجود آورده است. گزارش زمین شناسی تهیه شده توسط شرکت مشاور نیز این نظریه را مطرح می‌کند (اشکال ۲ و ۳).

بررسی پروفیل نهایی شیروانی‌های مختلف نشان می‌دهد که میزان عقب نشینی تاج به طور مستقیم با زاویه شیب متناسب است. برای یک شیروانی با ارتفاع خاک و ارتفاع استغراق مشخص، اگر زاویه شیب از یک حد بحرانی کمتر باشد، شیروانی عقب نشینی نخواهد داشت (لغزش شیروانی منجر به عقب نشینی تاج شیروانی نمی‌شود). ولی اگر زاویه شیب از حد بحرانی افزایش یافت، عقب نشینی شیب متناسب با افزایش این زاویه افزایش می‌یابد.

به عنوان مثال شکل ۹ پروفیل نهایی پایدار یک شیروانی ۳۵ متری با ارتفاع استغراق ۱۵ متر را به ازاء زاویه شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل پروفیل اولیه و نهایی شیروانی به ازای تغییر زاویه شیب از ۳۲/۵ تا ۶۰ درجه نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه شیب از یک حد بحرانی ( $\beta_{cr}$ ) عقب نشینی تاج آغاز شده و آنقدر ادامه می‌یابد تا پروفیل شیب به پروفیل نهایی پایدار مربوط به آن شیروانی که مستقل از زاویه شیب است برسد. جمع بندی مطالب مربوط به تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب اطمینان در حالت افت سریع آب مخزن را می‌توان در جدول ۳ خلاصه نمود. همانطور که مشاهده می‌شود برای یک شیروانی با ارتفاع مشخص H و ارتفاع استغراق ثابت H'، پروفیل نهایی پایدار مستقل از زاویه شیب  $\beta$  بوده و برای همه زاویه شیب‌هایی که از یک حد بحرانی بزرگترند یکسان است. بنابراین اگر پروفیل نهایی یکسان باشد شیب‌های تندتر (نزدیک به قائم) برای رسیدن به آن پروفیل عقب نشینی بیشتری خواهند داشت.

### ۵. محاسبه حجم لغزش محتمل توده‌های لغزنده

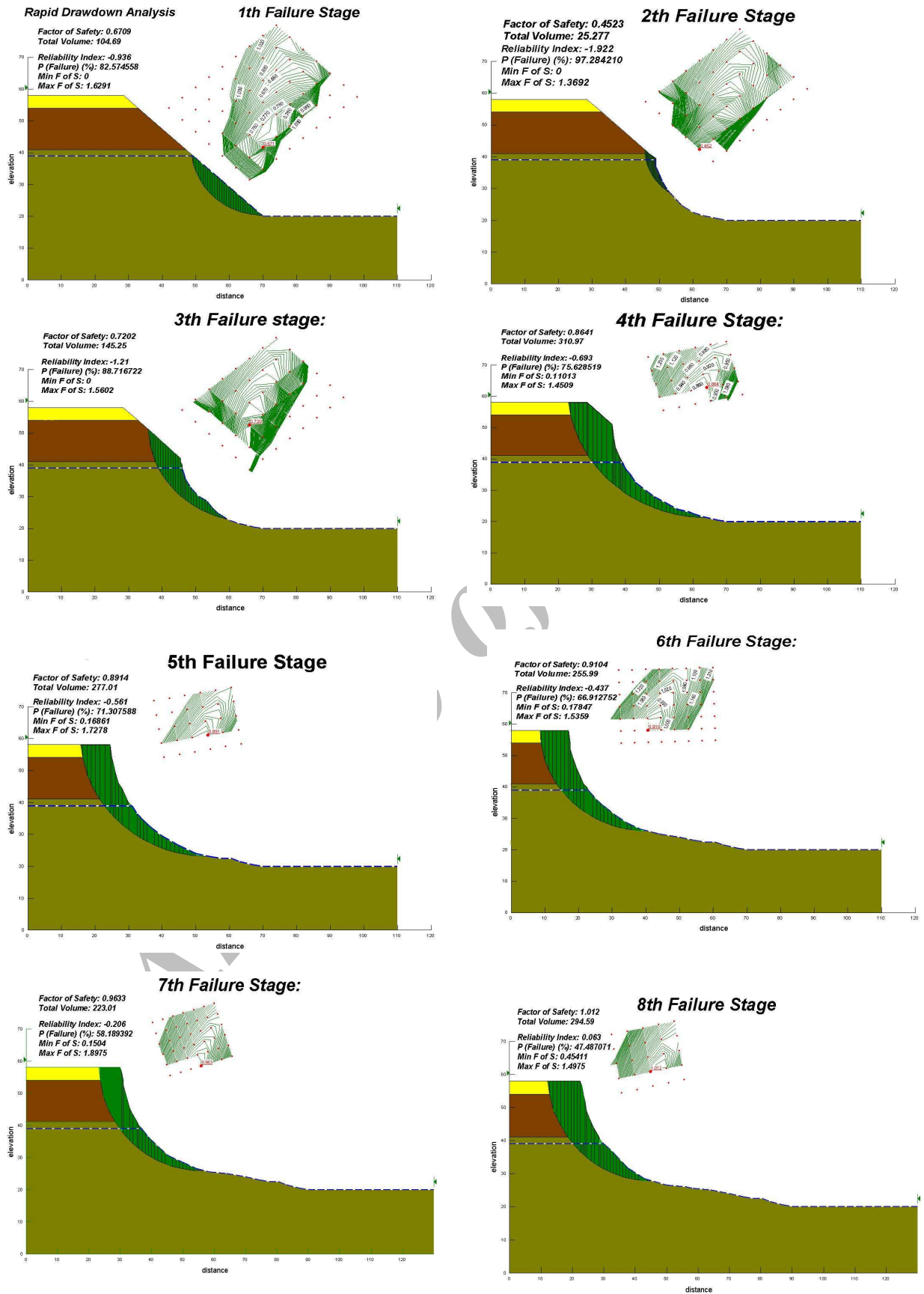
به طور کلی در محاسبه حجم محتمل توده لغزنده مراحل زیر انجام می‌شود:

- ۱- ابتدا حجم لغزش واحد طول شیروانی محاسبه می‌شود.
- ۲- حجم لغزش شیروانی از ضرب حجم لغزش واحد طول شیروانی در طول شیروانی محاسبه می‌شود.
- ۳- حجم محتمل لغزش از ضرب حجم لغزش بدست آمده از مرحله قبل در احتمال گسیختگی ( $P_f$ ) بدست می‌آید.

$$V = T.L.S.M.P_f \quad (2)$$

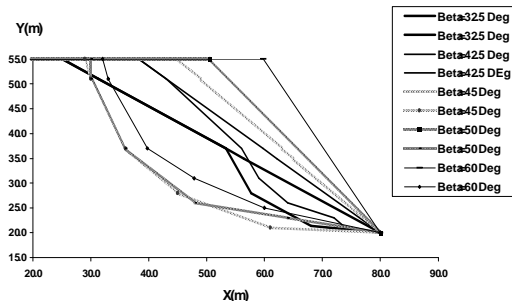
۴- در مورد شیروانی‌هایی که پس از لغزش اولیه، هنوز ضریب اطمینان پایداری آن‌ها کوچکتر از یک است و ممکن است برای رسیدن به پروفیل پایدار چند مرحله گسیختگی را تجربه کنند، کل





شکل ۸. مراحل گسیختگی چند مرحله ای در حالت افت سریع آب (مراحل ۱-۸)

کیلومتر از کل ساحل دریاچه سد با مسأله ناپایداری دامنه‌ها مواجه خواهد بود. شیروانی‌های بحرانی در موقعیت مکانی خاصی متمرکز نبوده و تقریباً در تمام طول خط ساحلی پراکنده اند.



شکل ۹. تاثیر زاویه شیب بر پروفیل پایدار نهایی در حالت

افت سریع آب  
( $H=35m$ ,  $H'=15m$ )

۳) لغزش‌های دامنه‌های طبیعی حاشیه مخزن سد گلستان ۲ علی- رغم گستردگی و پراکنده بودن در گروه لغزش‌های کم حجم طبقه بندی شده و مشکلی از نظر ایجاد امواج ناگهانی یا سرریز شدن سد و انسداد دره به وجود نخواهد آمد و می‌توان آن‌ها را جزء لغزش‌های موسوم به تانتا ( $\tan-ta$ ) به حساب آورد. اگر چه حجم کل لغزش‌های متحمل که نزدیک به  $1/8$  میلیون متر مکعب می‌باشد، نسبت به حجم رسوب ۴۰ ساله محاسبه شده برای مخزن سد گلستان ۲ که  $2/5$  میلیون متر مکعب می‌باشد، قابل توجه است ولی به طور کلی، ناپایداری شیروانی‌های حاشیه مخزن حداکثر  $0.4$  حجم مفید مخزن را کاهش می‌دهد.

۴) گزارش‌های ارائه شده به کمیته تخصصی لغزش‌های مخازن نشان می‌دهد که معمولاً عملیات پایدارسازی در مورد لغزش‌هایی انجام می‌شود که بالقوه فاجعه بارند. در چنین شرایطی جهت‌گیری تصمیم‌ها به سمت گزینه‌هایی نظیر مونیتورینگ و اعمال محدودیت برای عملکرد مخزن معطوف می‌شود. البته با توجه به آن که کاربری زمین‌های موجود در داخل محدوده خط اثر تغییر می‌کند، این روش اثرات ناخوشایندی بر محیط زیست زندگی انسانی باقی می‌گذارد. در مورد شیروانی‌های حاشیه مخزن سد گلستان ۲ پیشنهاد می‌شود در صورت تصمیم‌گیری بر پایدارسازی شیروانی‌ها از روش‌های اصلاح هندسی استفاده شود. روش بیو مهندسی هم یکی از روش‌های موثر کنترل فرسایش بوده و ضمن سازگاری با محیط زیست به ایجاد کارکردهای تفریحی برای دریاچه سد نیز کمک خواهد کرد.

ضرایب اطمینان حداقل یا حداکثر کوچکتر از یک، تاثیری در به- دست آوردن پروفیل پایدار شیروانی‌ها ندارد. همچنین فرض کاهش مرحله به مرحله سطح آب یا فرض افت کامل سطح آب در مقابل شیب، به پروفیل نهایی پایدار یکسان برای شیروانی می‌انجامد.

جدول ۳. وضعیت پایداری شیروانی‌ها در حالت افت سریع آب

$\frac{H'}{H}$	مکانیزم گسیختگی
$\frac{H'}{H} < 0.2$	عدم گسیختگی
$0.2 < \frac{H'}{H} < 0.3$	$\beta < 65^\circ$
	$\beta < 45^\circ$
$0.3 < \frac{H'}{H} < 0.4$	عدم گسیختگی - لغزش کم حجم در پنجه
	$\beta > 45^\circ$
	$\beta < 35^\circ$
	عدم گسیختگی - گسیختگی موضعی در پنجه
$0.4 < \frac{H'}{H} < 0.6$	$35 < \beta < 45^\circ$
	گسیختگی موضعی در پنجه
	$\beta > 45^\circ$
	پیش رونده بدون عقب نشینی
$0.6 < \frac{H'}{H} < 1.0$	$\beta < 30^\circ$
	عدم گسیختگی - گسیختگی موضعی در پنجه
	$30 < \beta < 40^\circ$
	پیش رونده بدون عقب نشینی
$0.6 < \frac{H'}{H} < 1.0$	$\beta > 40^\circ$
	پیش رونده بدون عقب نشینی
	$\beta < 30^\circ$
	عدم گسیختگی - گسیختگی موضعی در پنجه
$0.6 < \frac{H'}{H} < 1.0$	$30 < \beta < 40^\circ$
	گسیختگی پیش رونده بدون عقب نشینی
	$\beta > 40^\circ$
	گسیختگی پیش رونده بدون عقب نشینی

۲) لغزش‌های پیش بینی شده برای مخزن سد گلستان ۲ نسبتاً گسترده و پراکنده است. مطابق آنالیزهای انجام شده حدود  $4/2$

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 1, 1988.

[6] Rogers C. D. F., Dijkstra T. A and Smalley, I. J., "Hydro Consolidation and Subsidence of Loess: Studies from China, Russia, North America and Europe" Engineering Geology, Vol. 37, 1994, pp. 83-113.

[7] Gibbs H. J., Bara J. P., "Predicting Surface Subsidence from Basic Soil Tests", ASTM, STP(322), 1962, pp. 231-247.

[8] Dijkstra T. A., Rogers C. D. F., Smalley I. J., Derbyshire E., Li Y. J. and Meng X. M., "The Loess of North Central China: Geotechnical Properties and their Relation to Slope Stability" Engineering Geology, Vol. 36, 1994, pp. 153-171.

[9] Bromhead E. N., *The Stability of Slopes*. 2nd Edition, Blackie Academic & Professional, 1992.

[10] Desai C. S., "Drawdown Analysis of Slopes by Numerical Method", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. 7, 1977, pp. 667-676.

[11] Lambe T. W., Whitman R. V., *Soil Mechanics*, SI Version, John Wiley & Sons, 1969.

## قدردانی

این تحقیق با همیاری و اعتبار مالی شرکت سهامی مدیریت منابع آب وابسته به وزارت نیرو انجام شده است که بدین وسیله قدردانی و سپاسگزاری فراوان می‌شود.

## مراجع

[1] ICOLD, Reservoir Landslides: Investigation and management, *Guidelines and Case Histories*, GIGB ICOLD, Bulletin 124, 2002.

[2] Derbyshire E., Dijkstra T. A., Smalley I. J. and Li Y., "Failure Mechanisms in Loess and the Effect of Moisture Content Changes on Remolded Strength", Quaternary International, Vol. 24, 1994, pp. 5-15.

[3] Derbyshire E., Meng X. and Dijkstra T. A., *Landslides in the Thick Loess Terrain of North-West China*, John Wiley & Sons, 2000. Fedá, J., "Structural Stability of Subsident Loess Soil from Praha-Dejvice", Engineering Geology, Vol. 1, Issue 3, 1966, pp. 201-219.

[۴] مهندسين مشاور تهران برکلی، گزارش مطالعات مرحله اول و دوم سد گلستان ۲، ۱۳۷۴.

[5] Houston S. L., Houston W. N. and Spadola D. J., "Prediction of Field Collapse of Soils due to Wetting"

Archive of SID