Edited with the trial version of
Foxit Advanced PDF Editor
To remove this notice, visit:
www.foxitsoftware.com/shopping

کاربرد مدلسازی محیط ناپیوسته در شناخت ناپایداری‌های ساختاری در شیب‌های سنگی درزه‌دار

علی نورزاد[i]; محمد امین‌پور

چکیده

تحلیل پایداری شیب‌های سنگی با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته عددی، به شکل قابل توجهی طی سال‌های اخیر توسعه یافته است. روش های معمول تحلیل پایداری شیب‌های سنگی به مسائل ساده شامل هندسه و شرایط بارگذاری ساده محدود می شوند و به این سبب، بینش محدودی از مکانیزم شکست شیب فراهم می آورند. بسیاری از مسائل پایداری شیروانی ها با پیچیدگی هایی از قبیل هندسه، غیر ایزوتروپی بودن مصالح، رفتار غیر خطی، تنش های درجا و وجود چندین فرآیند مرکب (از قبیل فشار منفذی، بارگذاری لرزه‌ای و ...)، هم چنین وجود ناپیوستگی ها که فرآیند شکست را کنترل می کنند، مسئله انتشار گسیختگی و ... همراه هستند. در این مقاله، با مقایسه نتایج روش‌های تعادل حدی احتمالاتی و روش المان مجزا در تحلیل پایداری شیب سنگی مورد مطالعه، اهمیت توجه به محدودیت‌ها و قابلیت‌های هر روش و مزایای استفاده توأم این روش‌ها در تحلیل جامع یک شیب سنگی درزه‌دار نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: روش تعادل حدی احتمالاتی، نرم‌افزار SLOPE/W، روش المان مجزا، کدUDEC ، شیب سنگی، سد گتوند علیا

Application of discontinuous media modeling to investigate the structural instabilities in jointed rock slopes

Ali Noorzad; M. Aminpoor

ABSTRACT

Utilization of advanced numerical techniques on rock slope stability analysis has been developed for many years. Conventional forms of analysis are limited to simplified problems in their scope of application, encompassing simple slope geometries and basic loading conditions, and as such, providing only little insight into slope failure mechanism. However, many rock slope stability problems involve complexities relating to geometry, material anisotropy, non-linear behavior, in situ stresses and the presence of several coupled processes (e.g. pore pressures, seismic loading and etc.) and also fracture propagation, existence of discontinuities which control the failure procedure. In this paper, the importance of considering limitations and the abilities of different methods have been studied in order to have a complete analysis of a jointed rock slope. Comparing the results obtained from the case study with both probabilistic limit equilibrium and distinct element methods demonstrate the capability of the proposed approach.

KEYWORDS: PROBABILISTIC LIMIT EQUILIBRIUM METHOD, SLOPE/W SOFTWARE, DISTINCT ELEMENT METHOD, UDEC CODE, ROCK SLOPE, GOTVAND DAM

[i] دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) noorzad@pwut.ac.ir

۱- مقدمه

تحلیل پایداری شیروانی‌ها عموماً جهت طراحی عملی مطمئن برای شیب‌های موجود در حفاری‌ها (مانند معادن روباز، حفاری راه‌ها و ...) و یا تعیین شرایط تعادل در شیب‌های طبیعی صورت می‌گیرد. امروزه، دامنه گسترده‌ای از ابزارهای تحلیل پایداری شیروانی‌ها، هم برای شیب‌های سنگی و هم شیب‌های مخلوط خاکی-سنگی وجود دارد که از تکنیک تعادل حدی در شیب‌های ساده نامحدود و گسیختگی صفحه‌ای تا کدهای پیچیده مرکب المان محدود-مجزا متغیر است. امروزه با وجود دامنه گسترده اهداف مورد نظر در کاربرد روش‌های عددی، ضروری است که کاربر کاملاً با توانایی‌ها و محدودیت‌های ذاتی هر یک از روش‌ها آشنا باشد. برای مثال، تعادل حدی همچنان به عنوان معمول‌ترین روش حل مسائل مهندسی شیب‌های سنگی باقی مانده است، اگرچه اکثر گسیختگی‌ها با تغییر شکل‌های داخلی پیچیده و شکستگی همراه هستند که شباهت کمی با فرضیات موجود در اغلب آنالیزهای تعادل حدی دارد. در عمل می‌بایست تکنیک تعادل حدی همراه با مدل‌سازی عددی استفاده شود تا بتوان مزیت‌های هر دو را به حداکثر رساند (Eberhardt, 2003).

۲- معرفی طرح مورد مطالعه: زمین‌شناسی مهندسی و ساختاری ساختگاه سد گتوندعلیا

۲-۱- زمین‌شناسی ساختگاه

سنگ ساختگاه متشکل از نهشته‌های سازند آغاجاری با میان چینه‌های ماسه‌سنگ، لای‌سنگ و گلسنگ می‌باشد (AJn) که با کنگلومرای سازند بختیاری پوشیده شده است (BKn). دره محل احداث سد و نیروگاه، شکل زمین ریختی مرکبی دارد که فرآیندهای دینامیکی درونی و بیرونی در شکل‌گیری آن مؤثر بوده است. برش عرضی دره نمایانگر دیواره‌های قائمی است که بر روی رسوبات سست با ضخامت کمتر قرار گرفته‌اند. تناوب سنگ‌های سخت و رسوبات سست زیرین (با زاویه قرار کمتر) یک نوع فرسایش پلکانی را نشان می‌دهد. جابجایی عناصر روی دامنه در هر دو ساحل به صورت سقوط سنگ‌ها و لغزش بوده است. سقوط سنگ‌ها حاصل جدایش قطعات یا تکه‌های کوچک از جدارهای سنگی است که در پای ارتفاعات به حالت تعادل رسیده‌اند. این عناصر به صورت مخروط‌های واریزه‌ای و یا حرکت در دامنه‌ها و مجاری، به صورت آبشست در پای دامنه بر روی هم انباشته شده‌اند. به طور کلی سازندهای آغاجاری و بختیاری به عنوان سنگ بستر و نهشته‌های عهد حاضر به عنوان روباره در محل طرح برونزد دارد. شکل ۱ مقطع شماتیک ساختگاه و مقطع زمین‌شناسی شیب جناح راست سد را نشان می‌دهند (Mahab Ghodss, 2007).

۲-۲- سازند بختیاری

مجموعه‌ای متشکل از کنگلومرای آهکی و چرت‌دار است که تناوبی از میان لایه‌های ماسه سنگی و گلسنگی نیز دارد. فرسایش ارتفاعات و انباشتگی آنها در دامنه‌ها و مناطق پست‌تر موجب تشکیل این رسوبات شده است. در بین بخش کنگلومرایی، میان‌لایه‌های ریزدانه به رنگ قهوه‌ای کم رنگ تا آجری وجود دارد. تغییرات جانبی رخساره و بسته شدن عدسی شکل آنها در واقع تغییرات رخساره‌ای در هر دو جهت عمود و افقی را نشان می‌دهد. در محدوده ساختگاه سد و نیروگاه، سطح تماس سازندهای بختیاری و آغاجاری در تراز ۱۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد (بستر رودخانه در تراز ٦٨ متر از سطح دریا واقع است) (Mahab Ghodss, 2007).

۳- تحلیل به روش تعادل حدی

۳-۱- کاربرد روش تعادل حدی در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

استفاده از تکنیک‌های تعادل حدی در جایی که جابجایی‌های انتقالی یا دورانی در سطوح گسیختگی مشخص رخ می‌دهند معمول است. در واقع این روش‌ها معمول‌ترین روش‌های حل به کار رفته در مهندسی شیب‌های سنگی هستند؛ اگرچه بسیاری از گسیختگی‌ها با

تغییر شکل‌ها و شکستگی‌های داخلی پیچیده‌ای همراه هستند که همخوانی اندکی با فرضیات بلوک صلب دو بعدی مورد استفاده در تحلیل تعادل حدی دارند. با این حال، آنالیز تعادل حدی ممکن است برای گسیختگی بلوکی ساده در طول ناپیوستگی‌ها یا شیب‌های سنگی که بسیار خرد شده یا هوازده هستند (و رفتاری مشابه محیط خاکی دارند) بسیار مناسب باشد.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در کدهای کامپیوتری تعادل حدی موجود رخ داده که شامل موارد زیر است:

– توأم کردن کدهای دو بعدی تعادل حدی با تحلیل المان محدود تنش و جریان آب زیرزمینی (مانند SIGMA/W، SEEP/W و SLOPE/W در مجموعه Geo-Slope 2000- Geo-Slope).

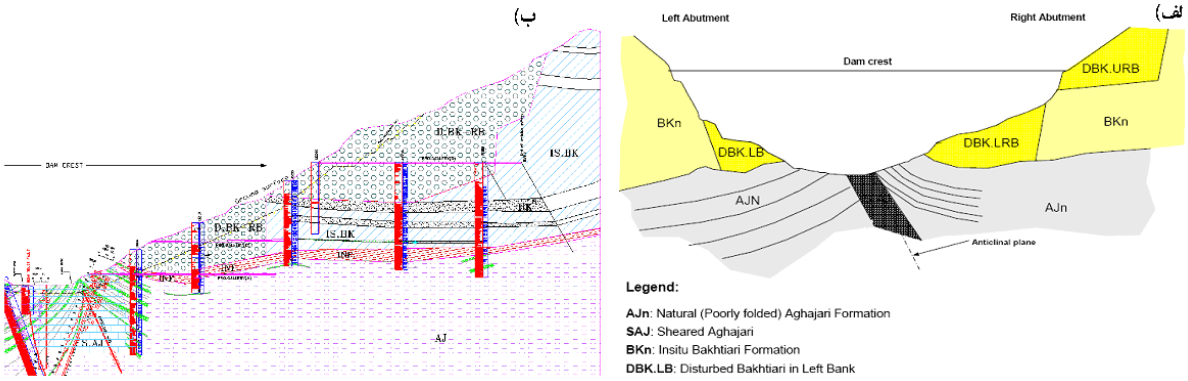
– توسعه روش‌های سه بعدی تعادل حدی (مانند Hungr و همکاران 1989 و Lam & Fred 1993 Lund).

– توسعه تکنیک‌های احتمالاتی تعادل حدی (مانند Rocscience ،Rocscience 2001b-SWEDGE 2001c -ROCPLANE).

– توانایی تحلیل مسلح‌سازی های مختلف.

– کاربرد معیار مقاومت برشی خاک غیر اشباع.

– تجسم و گرافیکی‌سازی بسیار پیشرفته و ترسیمات پیش و پس از فرآیند.



شکل ۱– الف) مقطع شماتیک ساختگاه و ب) مقطع زمین‌شناسی شیب جناح راست سد گتوند علیا

۳-۲- تحلیل شیب سنگی جناح راست سد گتوند علیا به روش تعادل حدی احتمالاتی

کاربرد افزاینده ارزیابی ریسک در مهندسی، و نیاز به در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها در تحلیل شیب، به گسترش ابزارهای تعادل حدی احتمالاتی منجر شده است. نامعینی‌های ذاتی موجود در تعیین پارامترهای مکانیکی خاک ارزش آنالیز احتمالاتی در این حوزه را دو چندان می‌کند. در واقع آنالیز احتمالاتی قادر است قسمتی از خطاهای غیر قابل پیشگیری در عملیات آزمایشگاهی را جبران نماید.

در آنالیز پایداری معین (Deterministic analysis) اگر ضریب ایمنی (FS) کمتر از یک باشد، شیب را ناپایدار و اگر بزرگتر از یک باشد، وضعیت شیب را پایدار توصیف می‌کنیم. این نتیجه‌گیری تنها در صورتی صحیح است که پارامترهای مقاومتی واقعی دقیقاً برابر مقادیر فرض شده در آنالیز باشند. اما اگر این پارامترها مقدار ثابتی نداشته باشند و حول یک مقدار میانگین نوسان و پراکندگی داشته باشند، به کار بردن یک ضریب ایمنی برای بیان وضعیت پایداری شیروانی غیر قابل توجیه و غیر منطقی است. به عبارتی اگر ارزیابی ناپایداری شیب‌های یک منطقه وسیع مطرح است (که در این ارتباط، مطالعات ژئوتکنیکی بر روی نمونه‌های گرفته شده انجام و محدوده‌ای برای پارامترهای خاک مشخص شده است) بحث تحلیل آماری مطرح می‌شود که میزان درصد احتمال ناپایداری را متناسب با تغییرات این پارامترها بیان نماید.

۳-۲-۱- عدم قطعیت پارامترهای ورودی

برای بیان عدم قطعیت مجموعه‌ای از داده‌ها، می‌توان از عبارت ضریب هم پراکنش (Covariance) استفاده کرد که برابر با نسبت مقدار انحراف استاندارد به میانگین است ($Cov = \frac{S}{\overline{X}}$). این ضریب برای بیان عدم قطعیت به‌کار می‌رود. مقادیر ضریب عدم قطعیت برای مراحل مختلف طراحی مطابق جدول ۱ پیشنهاد شده‌است.

برای انجام تحلیل تعادل حدی احتمالاتی در این تحقیق از نرم‌افزار SLOPE/W استفاده شده است. در این نرم‌افزار، مقدار متوسط و واریانس هر پارامتر وارد می‌شود و فرض نرم‌افزار بر آن است که پارامتر مورد نظر با توجه به مقدار میانگین و واریانس از توزیع نرمال تبعیت می‌کند.

جهت انجام تحلیل آماری نتایج آنالیزهای تعادل حدی، پارامترهای مقاومت برشی مصالح شیب (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و همچنین وزن مخصوص این توده‌های سنگی به عنوان پارامترهای ورودی در تحلیل آماری انتخاب شده‌اند. با توجه به تجربیات و منابع فنی موجود در زمینه کاربرد احتمالات در مهندسی ژئوتکنیک، برای معرفی پارامترهای ورودی از توزیع نرمال استفاده شده است. مقدار انحراف استاندارد هر پارامتر نیز با فرض عدم قطعیت ۰/۱ (معادل عدم قطعیت متوسط)، محاسبه و برای انجام آنالیز به نرم‌افزار معرفی شده است. انحراف استاندارد برای یک پارامتر به این معناست که ٦٨/٥ درصد مقادیر آن پارامتر در بازه ($\overline{X}+S$ و $\overline{X}-S$) قرار می‌گیرند که $\overline{X}$ میانگین داده‌ها و S انحراف استاندارد است. مشخصات ژئوتکنیکی برای مصالح مختلف که برای تحلیل تعادل حدی بکار رفته در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱- مقادیر ضریب عدم قطعیت در مراحل مختلف طراحی (Hoke E., 2000)

مراحل طراحی	طراحی مقدماتی؛ عدم قطعیت نسبتاً زیاد	طراحی جامع؛ عدم قطعیت متوسط	تحلیل برگشتی؛ عدم قطعیت کوچک
ضریب عدم قطعیت	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۵

جدول ۲- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح ساختگاه و سد گتوند علیا (Mahab Ghodss, 2007)

سازند و ناحیه مصالح	وزن مخصوص (kN/m^3)		چسبندگی (MPa)		زاویه اصطکاک داخلی (degree)	
	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک
AJn	۲۵	۲۳	۰/۵٤۰	۰/۵۰۰	۲٦	۲۹
S.AJ	۲۵	۲۳	۰/۵۰۰	۰/٤٤۰	۱۷/۵	۲٤
BKn	۲۵	۲۳	۰/٦۹۰	۰/۹۸۰	۳۵	۵۱
DBK	۲۵	۲۳	۰/٤٦۰	۰/۳۹	۲۹	٤۰
INF	۲۵	۲٤	۰/٦٤۰	۰/۸۳۲	۲۹	۳۷/۷
BKs	۲۵	۲٤	۱/۰۰۰	۱/۳۰۰	۳۳	٤۲/۹
Core	۲۰/۱	۱۹/۱	۰/۰۰	۰/۱۰۰	۲۸	۲۰

۳-۲-۲- نتایج تحلیل شیب سنگی به روش تعادل حدی احتمالاتی

ضریب اطمینان در واقع شاخصی است که پایداری نسبی شیب را بیان می‌کند و به سطح واقعی ریسک شیب که از قابلیت اطمینان داده‌های ورودی ناشی می‌شود اشاره‌ای ندارد. در یک تحلیل احتمالاتی، دو شاخص برای کمی کردن سطح ریسک شیب وجود دارد؛ یکی احتمال گسیختگی و دیگری شاخص قابلیت اطمینان.

در واقع، احتمال گسیختگی برابر احتمال به دست آمدن ضریب اطمینان کوچکتر از ۱ است. نوع دیگری از بررسی ناپایداری همان چیزی است که تحت عنوان شاخص قابلیت اطمینان از آن نام برده می‌شود. شاخص قابلیت اطمینان (β)، به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{(\overline{X} - 1.0)}{S} \qquad (۱)$$

که در آن $\overline{X}$ میانگین و S انحراف استاندارد ضریب ایمنی آزمایشی است. همچنین می‌توان آن را راهی برای نرمالیزه کردن ضریب ایمنی با توجه به عدم قطعیت آن به حساب آورد.

نتایج تحلیل تعادل حدی احتمالاتی برای شیب تکیه‌گاه شمالی سد گتوند علیا در مقطع محور سد در حالات استاتیک و شبه‌استاتیک در جدول ۳ خلاصه شده است.

نتایج نشان می‌دهند که وقوع زلزله نمی‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پایداری شیب داشته باشد و این بدین معناست که پایداری کلی شیب حتی پس از وقوع زلزله نیز می‌تواند قابل اعتماد باشد. البته نتایج تعادل حدی معرف رفتار عمومی شیب هستند و بخاطر محدودیت‌های این روش، قضاوتی درباره رفتار لایه‌های ناپیوسته موجود در شیب نمی‌توان داشت.

باید توجه داشت که حالت اشباع کامل شیب نیز که وضعیت شیب پس از بارش شدید باران را شبیه‌سازی می‌کند یک حالت بسیار بدبینانه است و بخاطر عمق زیاد شیب و زاویه تند آن که رواناب زیادی تولید می‌کند نمی‌تواند محتمل باشد.

٤- مدل‌سازی محیط ناپیوسته

٤-١- کاربرد مدل‌سازی محیط ناپیوسته در مسائل تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

اگر شیب سنگی از چندین دسته درزه که مکانیزم گسیختگی را کنترل می‌کنند تشکیل شده باشد، یک شیوه مدلسازی محیط ناپیوسته می‌تواند مناسب‌تر باشد. روش‌های محیط ناپیوسته حوزه مسئله را به عنوان مجموعه‌ای از اجسام یا بلوک‌های مجزا و متعامل (با اثرات متقابل با هم) تعریف می‌کنند که تحت بارهای خارجی هستند و انتظار می‌رود با زمان، جابجایی قابل توجه داشته باشند. این متدلوژی مجموعاً به روش المان گسسته (Discrete element method) شناخته می‌شود.

توسعه پروسه المان گسسته یک گام مهم در مدلسازی و دریافت رفتار مکانیکی توده سنگ‌های درزه‌دار بوده است. آنالیز ناپیوسته اجازه لغزش و باز و بسته شدن مابین بلوک‌ها یا ذرات را می‌دهد. اصل اساسی در روش المان گسسته این است که معادله تعادل دینامیکی برای هر بلوک در سیستم فرموله شده و مکرراً حل شود تا جایی که شرایط مرزی و قوانین تماس و حرکت ارضاء شوند. بنابراین این روش نحوه پیدایش پدیده اندرکنش پیچیده غیر خطی بین بلوک‌ها را توضیح می‌دهد.

روش محیط ناپیوسته‌ای که به شکل برجسته هم اکنون در عمل کاربرد دارد، کد المان مجزای UDEC (Itasca، ۲۰۰٤) است. این کد برای بررسی انواع مختلفی از مکانیزم‌های گسیختگی شیب سنگی به کار رفته است؛ از جمله مکانیزم‌های مسطح ساده (Costa و همکاران، ۱۹۹۹) تا ناپایداری پیچیده واژگونی عمیق (Board و همکاران، ۱۹۹٦؛ Benko و Stead، ۱۹۹۹؛ Hutchison و همکاران، ۲۰۰۰؛ Nichol و همکاران، ۲۰۰۲) و ناپایداری کمانشی (Stead و Eberhardt، ۱۹۹۷) را می‌توان نام برد. این محققین نیاز به در نظر گرفتن هم سنگ سالم و هم تغییر مکان‌های تحت کنترل درزه‌ها را در تحلیل ناپایداری‌های پیچیده شیب سنگی عملاً نشان داده‌اند.

٤-٢- مدل‌سازی المان مجزای شیب سنگی جناح راست سد گتوند علیا

تحلیل شیب به روش المان مجزا این قابلیت را دارد که رفتار ناپیوستگی‌های موجود را شبیه‌سازی نماید.

وجود دسته درزه‌ها و صفحات لایه‌بندی در ناحیه کنگلومرای نابرجای بختیاری می‌تواند به ناپایداری‌های ساختاری بیانجامد که یک تحلیل المان مجزای مناسب می‌تواند این ناپایداری‌ها را پیش‌بینی نماید. مشخصات مصالح بکار رفته در مدل المان مجزای شیب در جدول ٤ دیده می‌شود. جدول ٥ نیز مشخصات بکار رفته برای ناپیوستگی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج تحلیل تعادل حدی احتمالاتی شیب سنگی جناح شمالی سد گتوند برای زمان قبل از ساخت سد

نوع تحلیل	شرایط شیب	حداقل ضریب ایمنی (FS_{min})	شاخص قابلیت اطمینان (Reliability index)	احتمال کمتر از ۱/۵ شدن ضریب ایمنی (٪)	احتمال کمتر از ۱/۰ شدن ضریب ایمنی (٪)
استاتیک	طبیعی	۲/۳٦٤	١٤/١٧٣	۰	۰/۰۰
	اشباع	۱/۱۳۱	۱/۸٦٤	۱۰۰	۳/۵۰
شبه‌استاتیک	طبیعی	۱/٦٦٦	۱۳/۰۰٤	۰	۰/۰۰

جدول۴- مشخصات مصالح بکار رفته در تحلیل به روش المان مجزا

	سنگ بکر ناحیه نابرجای بختیاری (Intact rock of D.BK)	توده سنگ ناحیه بختیاری برجا (Rock mass of IN.BK)
مدول بالک (GPa)	۷/۸۱٦	٤/۰۰۰
مدول برشی (GPa)	۵/٦۲۰	۲/٤۰۰
زاویه اصطکاک داخلی (degree)	۵۰	۵۲
چسبندگی (MPa)	۱۰	۰/۵
مقاومت کششی (MPa)	۷/۳۰۰	۲/۱٤۰
چگالی (t/m^3)	۲/۳۰۰	۲/٤۸۰

جدول ۵- مشخصات بکار رفته برای ناپیوستگی‌ها در مدل المان مجزا

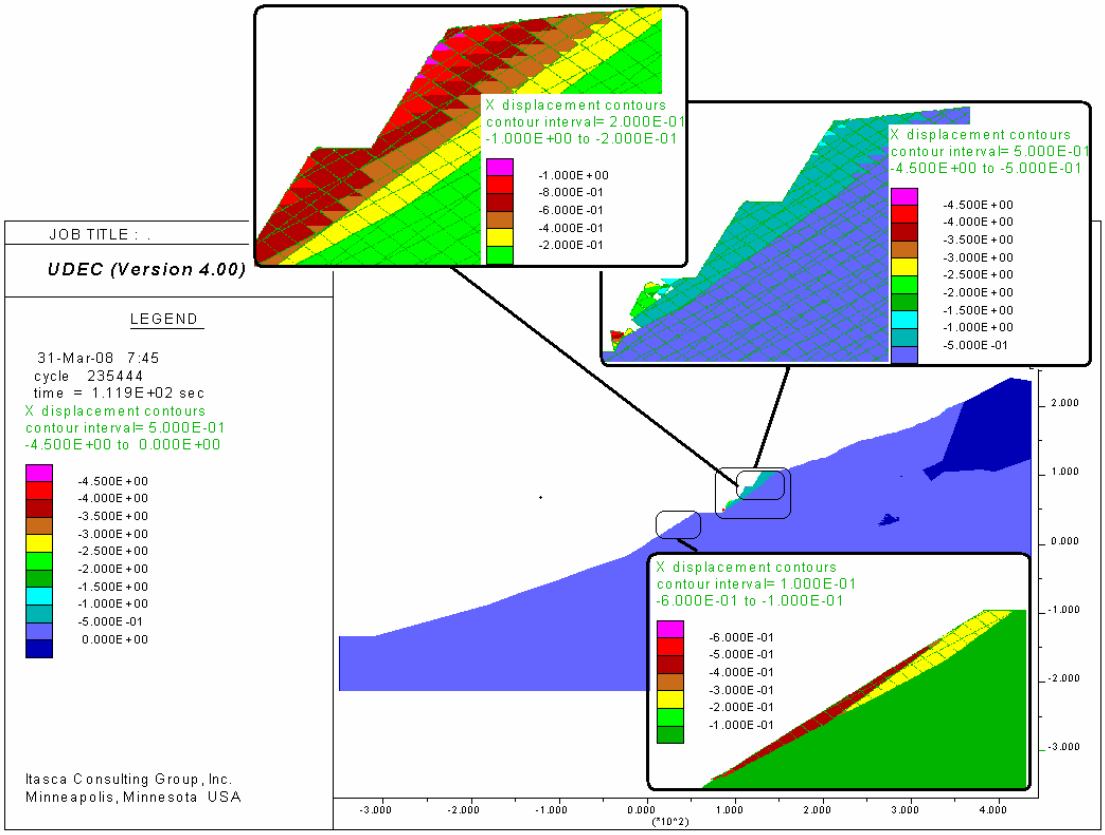
	دسته درزه ۱ (J1)	دسته درزه ۲ (J2)	سطوح لایه‌بندی
Jkn (GPa/m)	۰/٦۸۰	۰/٦۸۰	۰/۵۲۰
Jks (GPa/m)	۰/۱۷۰	۰/۱۷۰	۰/۱۳۰
زاویه اصطکاک (degree)	۲۰	۳۰	۳۰
چسبندگی (kPa)	۰	۰	۰
مقاومت کششی (MPa)	۰	۰	۰

برای تحلیل شیب به روش المان مجزا ، زمان قبل از ساخت سد انتخاب شده است. برای این تحلیل پس از اعمال تنش‌های برجا و رسیدن مدل به حالت تعادل اولیه، خاکبرداری از سطح طبیعی زمین تا سطح نهایی حفاری در مقطع محور سد در دو مرحله مدل‌سازی شده است.

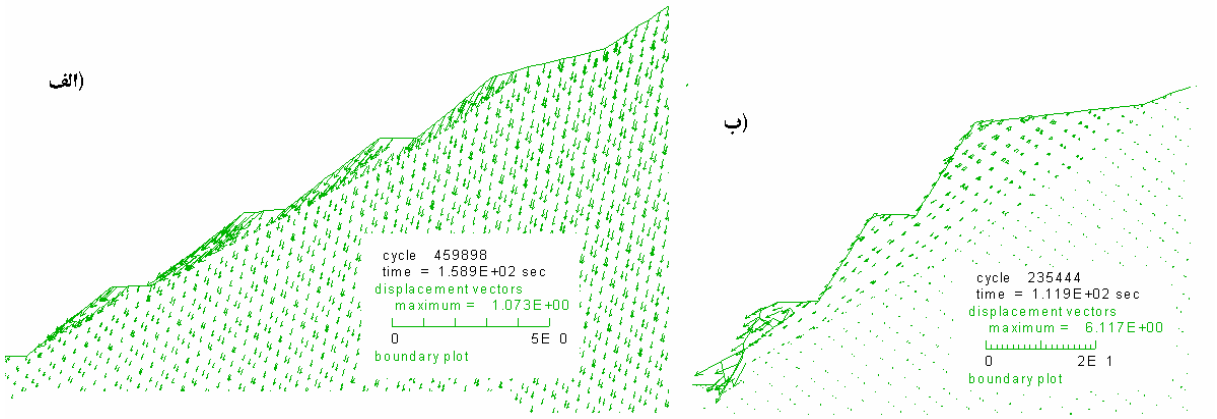
٤-۲-۱- نتایج تحلیل شیب سنگی به روش المان مجزا

برخلاف نتایج روش تعادل حدی که وضعیت شیب را در حالت طبیعی، حتی با وقوع زلزله کاملا پایدار معرفی می‌کرد، نتایج روش المان مجزا، وقوع ناپایداری‌های سطحی در ناحیه برم‌های حفاری شده مشرف بر تاج سد را پیش‌بینی می‌نماید. تذکر این نکته ضروری است که در این روش نیز پایداری کلی شیب مشاهده می‌شود و وقوع ناپایداری مربوط به ناحیه سطحی در محل برم‌های حفاری شده می‌باشد. این بدین معناست که اگرچه لغزش عمیق شیب نامحتمل است، اما وقوع ناپایداری در صفحات لایه‌بندی پس از حفاری پی

سد قابل پیش‌بینی می‌باشد. شکل ۲ کنتور تغییرمکان افقی در شیب را پس از حدود ۲۳۵،۰۰۰ سیکل از محاسبات مدل نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تغییرشکل‌های پیش‌رونده در سطح شیب است.



شکل۲- کنتور تغییرمکان افقی در مدل المان مجزای شیب که امکان لغزش عمیق برم‌های مشرف به تاج سد را پیش‌بینی می‌کند (این تغییرشکل‌ها پیش‌رونده بوده و با ادامه محاسبات مدل افزایش می‌یابند)



شکل ۳- بردارهای تغییرمکان در ناحیه برم‌های مشرف به تاج سد برای زوایای حفاری ۱ : ۱ (الف) و ۰/۵ : ۱ (ب) در این ناحیه (مدل‌سازی برم‌ها با زاویه حفاری شیب تندتر (ب) ناحیه گسترده‌تری را مستعد لغزش معرفی می‌کند)

٤-۲-۲- کاهش زاویه شیب برم‌های مشرف بر تاج سد به عنوان راهکاری برای تأمین پایداری

زاویه اولیه حفاری برم‌های مشرف بر تاج سد در مقطع محور سد ۰/۵ : ۱ بوده است. با بروز ناپایداری در مدل المان مجزای شیب تحت این زاویه حفاری در ناحیه برم‌ها، کاهش زاویه شیب این برم‌ها می‌تواند یک راه حل به حساب بیاید. به این منظور مدل دیگری ساخته شد و مراحل تعادل اولیه و دو مرحله

خاکبرداری پی با سطح جدید حفاری در آن مدل‌سازی گردید. در مدل جدید، زاویه برم‌های مشرف به تاج سد ۱:۱ فرض شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد که کاهش شیب اگرچه می‌تواند حجم ناحیه ناپایدار را به شکل محسوسی کاهش دهد، اما بروز ناپایداری در راستای صفحات لایه‌بندی هنوز محتمل است. شکل ۳، بردارهای تغییرمکان در ناحیه برم‌ها را در دو مدل مختلف نشان می‌دهد که در آن، کاهش حجم ناحیه ناپایدار در اثر کاهش زاویه شیب برم‌ها مشهود است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این مقاله نشان داد که روش معمول تعادل حدی که پرکاربردترین روش تحلیل شیب‌هاست حتی با استفاده از پیشرفت‌های رخداده در آن (یعنی کاربرد روش احتمالاتی) نمی‌تواند پیش‌بینی کاملی از رفتار شیب‌های سنگی درزه‌دار داشته باشد. این مسئله به این معناست که در عین این‌که این روش کاربردهای گسترده‌ای دارد و کارایی خود را در طول تاریخ مهندسی اثبات کرده است، اما اکتفا به آن بدون تامل درباره محدودیت‌ها و حوزه کاربرد می‌تواند خطرناک باشد. این مسئله از آن‌جا ناشی می‌شود که این روش، تمام توده شیب را به عنوان یک جسم پیوسته در نظر می‌گیرد و بنابراین بروز ناپایداری در آن تنها با بروز گسیختگی در مصالح ممکن است. نتایج تحلیل المان مجزای شیب نشان داد که شیب سنگی مورد مطالعه در عین پایداری کلی، در اثر لغزش صفحات لایه‌بندی، مستعد ناپایداری جزئی در نواحی سطحی است. باید توجه داشت که هندسه ناپیوستگی‌ها در شیب به شکل تقریبی است و با برداشت‌های محدودی برای کل ناحیه نابرجا تعمیم داده شده است. از طرفی نتایج این تحلیل، وقوع ناپایداری در ناحیه برم‌های مشرف به تاج سد را به زاویه حفاری و امتداد صفحات لایه‌بندی حساس نشان می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد مطالعه دقیق‌تر هندسه ناپیوستگی‌ها در نواحی سطحی کنگلومرای نابرجای بختیاری در ترازهای بالاتر از سد برای انجام تحلیل قابل اعتمادتری از رفتار این ناحیه از شیب ضروری باشد.

۶- منابع

Benko, B. and Stead, D., 1999. Analysis of two landslide case studies using numerical modeling. Proc. 13th Annual Vancouver Geotech. Soc. Symp., Vancouver, Canada, pp. 19–29.

Board, M., Chacon, E., Varona, P. and Lorig, L., 1996. Comparative analysis of toppling behaviour at Chuquicamata open-pit mine, Chile. Trans. Inst. Min. Metall. Sect A: Mining Industry 105, A11 – A21.

Costa, M., Coggan, J.S., Eyre, J.M., 1999. Numerical modelling of slope behaviour at Delabole slate quarry. Int. J. Surf. Min., Reclam. Environ. 13, 11 – 18.

Eberhardt, E. 2003. Rock slope stability analysis – Utilization of advanced numerical techniques geological engineering/Earth and Ocean Sciences, UBC, 6339 Stores Rd:4-5 , 8-9 & 23-29

Geo-Slope 2000. Geo-Slope Office (Slope/W, Seep/W, Sigma/W, CTran/W, Temp/W). Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canada.

Hoek, E. & Bray, J.W. 2000. Rock slope engineering. Elsevier Science Publishing: New York, 358 pp.

Hungr, O., Salgado, F.M. & Byrne, P.M. 1989. Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal 26 (4): 679-686.

Hutchison, B., Dugan, K. and Coulthard, M.A., 2000. Analysis of flexural toppling at Australian bulk minerals Savage River mine. Proc., GeoEng2000, Int. Conf. Geotech. Geol. Eng., Melbourne, CDROM Paper. 6 pp.

Itasca 2000. UDEC - Universal Distinct Element Code (Version 3.1). Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.

Lam, L. & Fredlund, D.G. 1993. A general limit equilibrium model of three-dimensional slope stability analysis.

Canadian Geotechnical Journal 30 (6): 905-919.
Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2007. Overall review of geological and geotechnical characteristics of gotvand dam site.
Nichol, S.L., Hungr, O. and Evans, S.G., 2002. Large scale brittle and ductile toppling of rock slopes. Can. Geotech. J. 39 (4), 773– 788.
Rocscience 2001b. SWEDGE - 3D Surface Wedge Analysis for Slopes (Version 4.0). Rocscience Inc., Toronto.
Rocscience 2001c. ROCPLANE - Planar Sliding Stability Analysis for Ro ck Slopes (Version 2.0). Rocscience Inc., Toronto.
Stead, D., Eberhardt, E., 1997. Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining. Eng. Geol. 46 (1), 41– 61.