

تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی مشرف به نیروگاه سد سردشت

با در نظر گرفتن اثر کلیواژ توده سنگ

حسن بخشنده امنیه^{۱*}، سعید طایی سمیرمی^۲، مرتضی رحیمی^۳

پذیرش مقاله: ۹۱/۱۰/۶

دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۵

چکیده

از آنجا که ساختگاه سد سردشت دربرگیرنده توده سنگ‌های دگرگون شده اسلیتی است، سطوح مشخص کلیواژ از ویژگی‌های بارز این سنگ بوده و موجب کاهش مقاومت توده سنگ می‌گردد. بنابراین ارزیابی پایداری سازه‌های جانبی سد شامل فضاهای زیرزمینی و شیروانی‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. جهت تحلیل پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت از روش‌های تعادل حدی، نرم‌افزار SLIDE و روش عددی تفاضل محدود، نرم‌افزار دو بعدی FLACSLOPE برای حالت‌های بدون در نظر گرفتن اثر کلیواژ، با در نظر گرفتن اثر کلیواژ و اثر زون‌های خرد شده استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای حالت‌های با در نظر گرفتن اثر کلیواژ و اثر زون‌های خرد شده، شیب شیروانی از ضریب اطمینان قابل قبولی برخوردار نمی‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر اثر کلیواژ بر پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت، بررسی‌های آماری نیز صورت گرفت. با توجه به منحنی تابع توزیع تجمعی، ضریب اطمینان حدود ۶۸٪ داده‌ها کمتر از ۱٫۷ برآورد گردید که این امر نشان دهنده اثر زیاد کلیواژ بر کاهش مقاومت فشاری توده سنگ اسلیتی است. بنابراین شیب حدود ۱:۶ ارائه شده در نقشه حفاری مطالعات مرحله اول، در این توده سنگ ناپایدار است.

کلید واژه‌ها: تحلیل پایداری، روش تعادل حدی، شیروانی‌های سنگی، کلیواژ سنگ، نرم‌افزار FLACSLOPE

۱. استادیار گروه معتن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، bakhshandeh@kashanu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

۳. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

امروزه با توجه به افزایش فعالیت‌های معدنی و عمرانی، تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی از اهمیت زیادی برخوردار است. این تحلیل‌ها به سوی ارزیابی ایمنی و طراحی اساسی شیروانی‌های حفاری شده و شرایط تعادل شیروانی‌های طبیعی هدایت می‌شوند. انتخاب تکنیک‌های تحلیلی، وابسته به شرایط حساسیت، پتانسیل نوع شکست و محدودیت‌ها و نقاط ضعف ذاتی در هر روش می‌باشد. پایداری شیب می‌تواند به صورت فاکتور ایمنی (نسبت مقاومت برشی به تنش برشی مورد نیاز جهت تعادل)، کرنش (شروع کرنش‌های بزرگ)، احتمال شکست (کمیت پایداری با توزیع احتمال مختلف بین مقاومت و نیروهای جابه‌جایی) و طراحی فاکتور مقاومت و بار بیان شود (Wyllie and Mah, 2004, Wyllie, 2005).

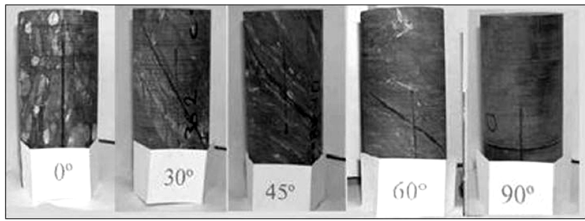
وجود سطوح ناپیوستگی‌هایی مثل سطوح لایه‌بندی، چین‌ها، گسل‌ها، زون‌های برشی، درزه‌ها، کلیواژ و غیره وجه تمایز بین توده‌سنگ و ماده سنگ است که سنگ را از حالت بکر و سالم به یک ماده دارای شکستگی تبدیل می‌کند (Giani, 1988). توده‌های سنگی درزه‌دار ممکن است به دو نوع متفاوت در طبیعت مشاهده شوند. در نوع اول درزه‌ها با پراکندگی زیاد و به صورت گسترده در تمامی توده توزیع شده‌اند، به طوری که رفتار توده سنگ تحت تأثیر تنش‌ها یک رفتار همسان‌گرد تلقی می‌شود. در نوع دوم توده‌های سنگی، یک درزه و یا دسته درزه غالب، رفتار توده را تحت تأثیر قرار داده و بسته به زاویه‌ی بین تنش‌های اصلی و امتداد جهت یافتگی، مقاومت فشاری توده سنگ تابعی از هندسه و خواص مکانیکی درزه است که به اصطلاح به این سنگ‌ها، سنگ‌های با رفتار ناهمسانگرد گفته می‌شود (Tien et al., 2006, Nasser et al., 2003, Tien and Kuo, 2001). غالباً حداکثر مقاومت فشاری سنگ‌های ناهمسانگرد در زاویه جهت یافتگی نزدیک به ۰ یا ۹۰ درجه و حداقل مقاومت فشاری آنها در زاویه جهت یافتگی حدود ۳۰ تا ۴۵ درجه رخ می‌دهد. ناهمسانگردی مقاومتی در سنگ‌هایی با کانی‌هایی که به صورت صفحه‌ای چیده شده‌اند، نظیر میکا و رس، سنگ‌های با کانی‌های طویل نظیر هورنبلند، سنگ‌های با

ترکیبی از دو کانی نظیر ماسه و شیل و در سنگ‌هایی با مجموعه درزه‌های بیشتر رخ می‌دهد (Xue-min et al., 2010, Al-Harhi, 1998).

به طور کلی اگر نیروی برشی (نیروی جابه‌جایی) بزرگتر از مقاومت برشی توده‌سنگ (نیروی مقاومت) روی سطح ناپیوستگی باشد، شیب ناپایدار خواهد بود (Kliche, 1999). یکی از قدیمی‌ترین بررسی‌های سطح شکست، منحنی Alexandre Collin در اواسط قرن ۱۹ است. او دریافت که سطح شکست رس در طول کانالی در فرانسه تقریباً یک کمان قوسی شکل دارد (Sjoberg, 1999). محققان زیادی شکست شیروانی‌های سنگی را با استفاده از روش تعادل حدی تحلیل کرده‌اند (مانند Piteau and Martin, 1982, Hoek and Bray, 1981). مطالعات Johansson - Axelsson در سال ۱۹۹۱ و Bromhead در سال ۱۹۹۲، نشان داد که شکل شکست سطح با رابطه بین پارامترهای مقاومت مواد و هندسه شیروانی قابل کنترل است. در سال ۲۰۰۳ رایج‌ترین روش برای طراحی شیب در شرایط زمین‌شناختی مختلف خاک و سنگ، فاکتور ایمنی در نظر گرفته شد که با توجه به نظریه Black - Jennings در سال ۱۹۶۳، برای سازه‌های دائمی از قبیل سدهای خاکی و برای بیشتر سطوح بالقوه بحرانی، مقدار فاکتور ایمنی نباید کمتر از ۱/۵ باشد (Johansson and Axelsson, 1992, Bromhead, 2002, Wyllie and Mah, 2004).

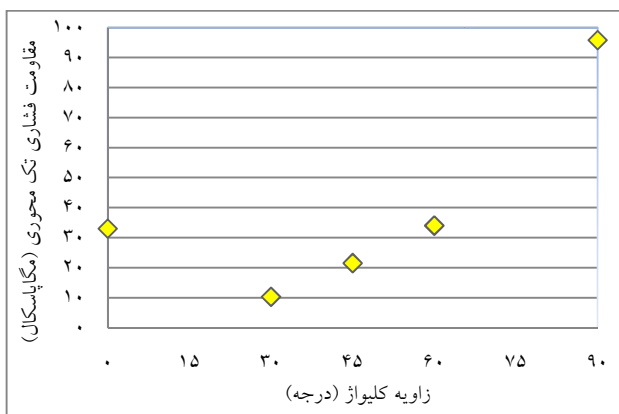
با در نظر گرفتن اینکه تولید برق به عنوان مهم‌ترین هدف طرح سد سردشت به شمار می‌رود، جانمایی سازه نیروگاه و به پیروی از آن مسیر سامانه انتقال آب به نیروگاه از چالش‌های اصلی مطالعات سد و نیروگاه سردشت به شمار می‌رود. در این مقاله اهمیت تأثیر ناهمسانگردی‌های توده سنگ از جمله تأثیر زاویه کلیواژ (زاویه بین جهت تنش اصلی و صفحه تورق توده سنگ) بر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بیان شده و پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت در حالت‌های مختلف بدون در نظر گرفتن اثر کلیواژ توده سنگ، با در نظر گرفتن اثر کلیواژ توده‌سنگ و اثر زون خرده شده با روش‌های تعادل حدی و عددی بررسی شده است. در ادامه به منظور

ناهمسان‌گردی ۹/۳۲ نشان می‌دهد که اسلیت می‌تواند جزو سنگ‌های با تورق زیاد (تورق پذیر) طبقه‌بندی شود.



شکل ۱. تأثیر زاویه کلیواژ بر مقاومت فشاری توده سنگ

اسلیتی (Goshtasbi et al., 2006)



شکل ۲. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری اسلیت نسبت

به زاویه کلیواژ (Goshtasbi et al., 2006)

Goshtasbi et al. (2006) همچنین آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره را بر روی نمونه سنگ‌های اسلیتی با زاویه کلیواژهای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه انجام داده است. در این آزمایش از معیارهای مختلفی از جمله معیارهای Donath، Hoek-Brown، Tien-Kuo، و Ramamurthy استفاده شده و مقدار چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و ثابت های m و s معیار Hoek-Brown از این آزمایش برآورد شده است. این پارامترها با زاویه کلیواژهای مختلف و با فشارهای محصورشدگی مختلف بررسی شده‌اند. نتیجه آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره نشان می‌دهد که اسلیت ناهمسان‌گردی U شکل دارد و بیشترین و کمترین مقاومت به ترتیب در زاویه کلیواژ ۹۰ و ۳۰ درجه است. بیشترین زاویه اصطکاک داخلی ۵۳ درجه در زاویه کلیواژ ۹۰ درجه (سنگ سالم) و کمترین زاویه اصطکاک داخلی ۱۹ درجه در زاویه کلیواژ ۳۰ درجه

نشان دادن اهمیت اثر کلیواژ توده سنگ اسلیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت بر مقاومت فشاری از تحلیل‌های آماری استفاده شده است.

۲. رفتار مقاومت ناهمسان‌گردی اسلیت

ناهمسان‌گردی یکی از فاکتورهای مؤثر بر رفتار توده سنگ بوده و شامل سطوح تورق، اثر کلیواژ، شیب‌توزیته، درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی و زون‌های برشی می‌باشد. در طبیعت سنگ‌های آذرین بیشتر رفتار همسان‌گرد داشته و معمولاً سنگ‌های دگرگونی دارای رفتار ناهمسان‌گرد هستند. تحقیقات زیادی روی رفتار ناهمسان‌گردی سنگ‌هایی مثل شیل، اسلیت، ماسه‌سنگ‌ها، گنایس و غیره انجام شده که از این جمله می‌توان به (Donath (۱۹۶۴)، Hoek (۱۹۶۸)، Brown (۱۹۷۷)، Ramamurthy (۱۹۹۸)، Tien-Kuo (۲۰۰۱)، Xue-min et al., 2010, Al-Harathi, 1998). همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، Goshtasbi (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری توده سنگ اسلیتی با زاویه کلیواژ ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه انجام داده است. در شکل ۲ مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل زاویه کلیواژ توده سنگ اسلیتی نشان داده شده است. شکل منحنی بین تنش اصلی و زاویه کلیواژ، نوع ناهمسان‌گردی را نشان می‌دهد. در حالت کلی سه نوع ناهمسان‌گردی U شکل، جناحی (شانه‌ای) شکل و موجی شکل وجود دارد که با توجه به شکل ۲ ناهمسان‌گردی توده سنگ اسلیتی از نوع U شکل است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، اسلیت در زاویه ۹۰ درجه دارای مقاومت حداکثر و در زاویه ۳۰ درجه دارای مقاومت حداقل می‌باشد. بنابراین نسبت ناهمسان‌گردی به صورت رابطه ۱ می‌تواند بیان شود (Xue-min et al., 2010, Goshtasbi et al., 2006).

$$R_c = \frac{\sigma_{c \max}}{\sigma_{c \min}} \quad (1)$$

که در آن R_c نسبت ناهمسان‌گردی، $\sigma_{c \max}$ حداکثر مقاومت فشاری و $\sigma_{c \min}$ حداقل مقاومت فشاری است. نسبت

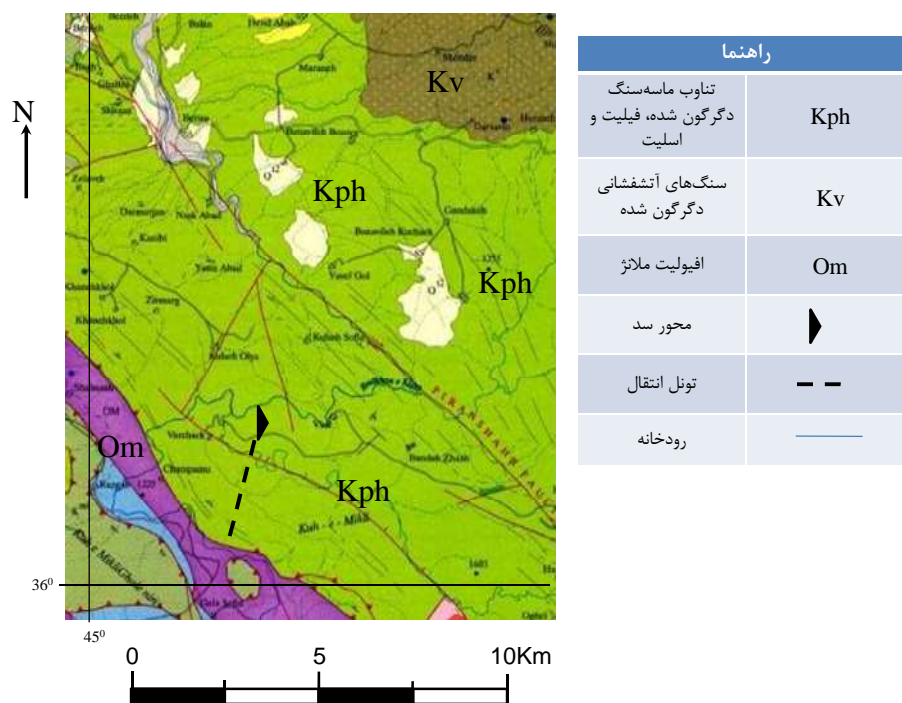
اولیه به فراوانی در سطح منطقه در رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری به صورت ماسه سنگ‌هایی که بعضاً آثار دگرگونی خفیف در آنها دیده می‌شود قابل تشخیص است. کلیواژ به عنوان مهم‌ترین اثر ناهمسانگردی در توده سنگ مطرح است که در افق‌های متشکل از تناوب فیلیت و اسلیت چین خوردگی‌های فرعی به ظهور ساختار موج در طبقات سنگی منجر شده است (مهندسی مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰).

گسل‌های اصلی زیادی در محدوده طرح سد سردشت قرار دارند که مهمترین گسل نزدیک به ساختگاه سد، گسل زیرمرگ است و در فاصله حدوداً ۵۰۰ متری پایین‌دست محور سد قرار دارد. هم‌چنین تنش‌های اصلی حاکم بر منطقه باعث ایجاد سیستم کلیواژ در توده سنگ شده است که جهت شیب عمومی آن به سمت شمال شرق است. علاوه بر آن باعث پیدایش زون‌های برشی متعددی در گستره ساختگاه سد شده، که عموماً هم‌راستا با جهت کلی نیروهای حاکم دارای روند شمال شرقی - جنوب شرقی هستند. این زون‌ها از F1 تا F20 نامگذاری شده‌اند که در شکل ۴ گسل زیرمرگ و دو زون برشی نشان داده شده است (مهندسی مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰).

(سنگ با صفحه متورق) رخ می‌دهد. مقدار چسبندگی برای زاویه کلیواژهای کمتر از ۶۰ درجه حدود ۷ مگاپاسکال است که با افزایش زاویه کلیواژ چسبندگی افزایش می‌یابد. در ثابت‌های m و s معیار Hoek-Brown مقدار m ناهمسان‌گردی U شکل دارد، در حالی که مقدار s در زاویه کلیواژ کمتر از ۶۰ درجه ثابت است و با افزایش این زاویه، مقدار s افزایش می‌یابد.

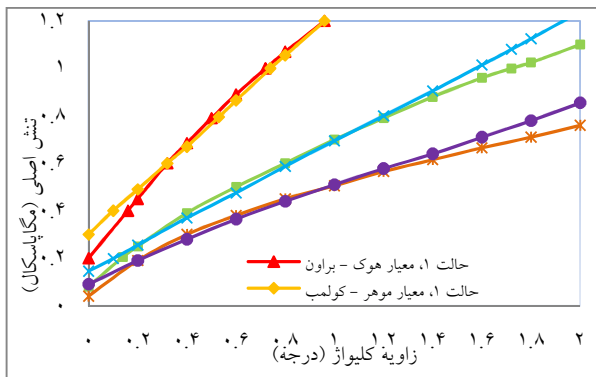
۳. موقعیت زمین‌شناختی و جغرافیایی سد و نیروگاه سردشت

طرح سد و نیروگاه سردشت در شمال‌شرقی ایران و در جنوب‌شرقی شهرستان سردشت از استان آذربایجان غربی در مختصات جغرافیایی ۳۳ - ۴۵° طول شرقی و ۳۶ - ۰۴° عرض شمالی و بر روی رودخانه کلاس قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، ساختگاه سد و سازه‌های مربوطه در پهنه گسترده‌ای از ردیف رسوبی کرتاسه قرار گرفته که دگرگونی ضعیفی را پشت سر گذاشته است. این پهنه گسترده که به لحاظ ترکیب سنگ‌شناختی اولیه از تناوب شیل و ماسه سنگ تشکیل شده، تحت اثر دگرگونی دینامیکی به تناوب اسلیت و فیلیت تبدیل شده است اما اثرات سنگ



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی سد سردشت (مهندسی مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰)

بر حسب معیار گسیختگی Hoek- Brown و پارامترهای معیار گسیختگی Mohr-Coulomb که در محدوده تنش معادل با روباره ۲۰ متر برای سه حالت مذکور محاسبه گردیده، آورده شده است (مهندسی مشاور مشانیر، ۱۳۹۰). همان‌طور که از این جدول ملاحظه می‌شود به دلیل اثر کلیواژ مقدار مدول یانگ در حالت ۲ کمتر از سایر حالت‌های بررسی شده است. همچنین پوش‌های گسیختگی غیرخطی این معیارها در شکل ۵ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حالت ۱ دارای بیشترین مقاومت و حالت ۲ دارای کمترین مقاومت فشاری است.



شکل ۵. پوش گسیختگی Hoek- Brown و Mohr-

Coulomb معادل برای حالت‌های مختلف توده سنگ اسلیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت



شکل ۴. رخنمون گسل زیرمرگ و زون‌های خرد شده مربوطه در ساختگاه سد سردشت

(مهندسی مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰)

۴. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ سد سردشت

بررسی گمانه‌های اکتشافی نشان می‌دهد که اکثر درزه‌ها به صورت مایل نسبت به محور حفاری واقع شده‌اند. مقدار بازشدگی سطح درزه نیز در درزه‌های باز بین ۰٫۵ تا ۲٫۵ میلی‌متر است که از این رو بازشدگی درزه‌ها قابل ملاحظه نیست. سطح ۵۰ درصد درزه‌ها نیز صاف و نزدیک به ۳۴ درصد به صورت نامنظم است. به لحاظ درجه هوازدگی نیز سطوح درزه‌ها عموماً در حد اندکی هوازده تا سالم ارزیابی شده‌اند (مهندسی مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰). پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ اسلیتی در سه حالت بدون در نظر گرفتن اثر کلیواژ (حالت ۱)، با در نظر گرفتن اثر کلیواژ (حالت ۲) و با در نظر گرفتن اثر زون‌های خرد شده (حالت ۳) بررسی شده است. در جدول ۱ پارامترهای مقاومتی توده سنگ

جدول ۱. پارامترهای مقاومتی توده سنگ اسلیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت در معیار Mohr-Coulomb و Hoek- Brown

(مهندسی مشاور مشانیر، ۱۳۹۰)

معیار Mohr-Coulomb		پارامترهای توده سنگ (حاصل از معیار Hoek- Brown)			پارامترهای ورودی مدل Hoek- Brown			توده سنگ
φ (°)	c (MPa)	E (GPa)	s_b	m_b	GSI	m_i	σ_{ci} (MPa)	
۴۳	۰٫۳	۳٫۳	۰٫۰۰۱۱	۰٫۵۶۶	۳۹	۵	۴۰	حالت ۱
۲۱	۰٫۱۱	۰٫۹	۰٫۰۰۰۶	۰٫۲۷۴	۳۳	۳	۷	حالت ۲
۲۹	۰٫۱۴	۱٫۱	۰٫۰۰۰۱	۰٫۱۷	۲۰	۳	۴۰	حالت ۳

۵. تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی مشرف به نیروگاه

سد سردشت

با توجه به طبیعت بسیار درزه‌دار توده‌سنگ و فاصله‌داری کم‌درزه‌ها و ارتفاع زیاد ترانشه می‌توان توده‌سنگ را به صورت پیوسته در نظر گرفت. لذا برای انجام تحلیل پایداری از روش تعادل حدی دو بعدی، نرم‌افزار SLIDE، با فرض وقوع گسیختگی دایره و روش عددی تفاضل محدود، نرم افزار دو بعدی FLACSLOPE با توجه به فرض پیوستگی توده‌سنگ منطقه استفاده گردید. از جمله روش‌های معروف بر مبنای روش تعادل حدی روش بیشاپ بوده که از اصل تعادل همان جهت تخمین فاکتور ایمنی استفاده می‌نماید. فاکتور ایمنی در روش تعادل حدی به صورت نسبت مقاومت برشی به تنش برشی مورد نیاز جهت تعادل محاسبه می‌شود (Rocscience, 2003). محاسبه ضریب ایمنی در نرم‌افزار FLACSLOPE با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی انجام می‌شود. تکنیک کاهش مقاومت برشی، ابتدا توسط Zinkivich در سال ۱۹۷۵ برای محاسبه ضریب ایمنی شیب متشکل از مواد مختلف با المان‌های محدود مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات مقاومت برشی (C, ϕ) برای هر مرحله طبق روابط ۲ و ۳ می‌توانند محاسبه شوند (خدابنده لو و بهادریگی، ۱۳۹۰).

$$C^{trial} = \left(\frac{1}{F^{trial}}\right)C \quad (2)$$

$$\phi^{trial} = Arc \tan\left(\left(\frac{1}{F^{trial}}\right) \tan \phi\right) \quad (3)$$

که در آن F^{trial} فاکتور ایمنی کاهش یافته، ϕ^{trial} زاویه اصطکاک کاهش یافته و C^{trial} نیروی چسبندگی کاهش یافته بر حسب Mpa می‌باشد. نتایج تحلیل پایداری در سه حالت مختلف توده‌سنگ و برای هر دو معیار گسیختگی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقدار فاکتور ایمنی در سه حالت مختلف توده سنگ

با روش‌های تعادل حدی و عددی

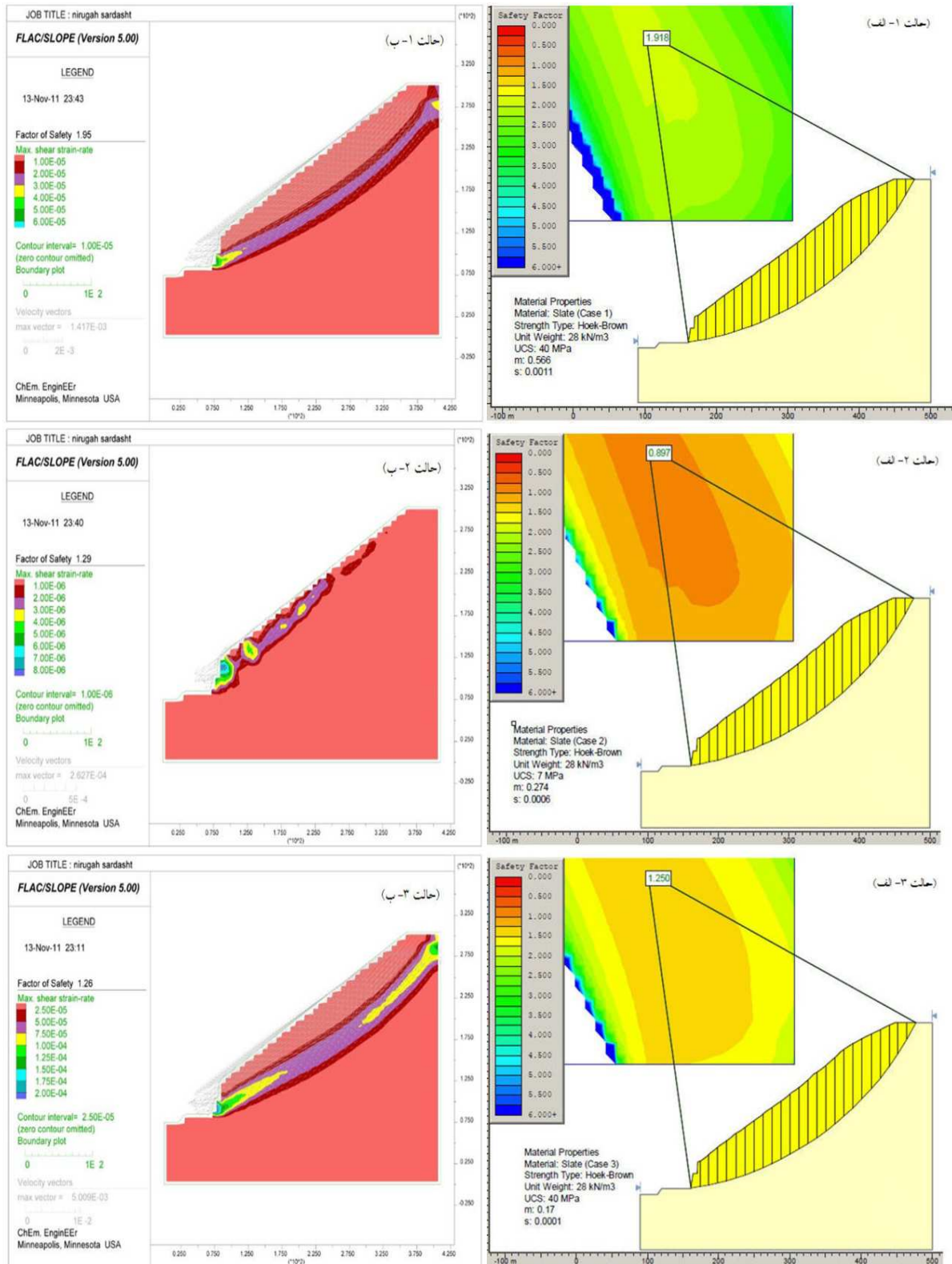
روش عددی	روش تعادل حدی		خواص توده‌سنگ
	مدل رفتاری Mohr-Coulomb	مدل رفتاری Hoek-Brown	
۱/۹۵	۱/۹۲	۱/۹۴	حالت ۱
۱/۲۹	۰/۸۹	۱/۲۹	حالت ۲
۱/۲۶	۱/۲۵	۱/۲۱	حالت ۳

دایره‌های گسیختگی و ضریب اطمینان پایداری برای شرایط مختلف توده‌سنگ با معیار گسیختگی Hoek-Brown با روش تعادل حدی و Mohr-Coulomb با روش عددی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به در نظر نگرفتن اثر کلیواژ در حالت ۱، بیشترین مقدار ضریب اطمینان مربوط به حالت ۱ و کمترین آن مربوط به حالت ۲ است که در مدل رفتاری Hoek-Brown کمتر از یک به دست آمده است. طبق نظریه Black Jennings شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت در حالت ۱ پایدار است. با توجه به در نظر نگرفتن اثر کلیواژ بر مقاومت فشاری و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ اسلیتی نمی‌توان به ضریب اطمینان محاسبه شده اطمینان داشت. همچنین در حالت‌های ۲ و ۳ نیز ضریب اطمینان کمتر از مقدار مجاز برآورد شده می‌باشد.

۶. تحلیل آماری اثر کلیواژ بر پایداری شیروانی‌های سنگی

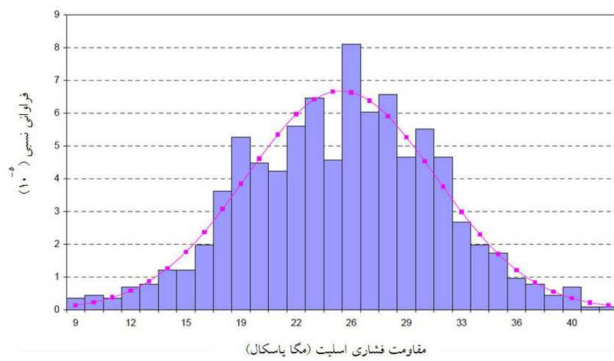
مشرف به نیروگاه سد سردشت

با انجام تحلیل آماری، اثر کلیواژ بر پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سردشت مورد بررسی بیشتر قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، مقاومت فشاری تک‌محوری وابستگی محسوسی به زاویه کلیواژ با محور بارگذاری نمونه دارد. کمترین مقاومت فشاری ۵ مگاپاسکال و در زاویه کلیواژ ۳۰ درجه اندازه‌گیری شده و بیشترین آن حدود ۵۰ مگاپاسکال و در زاویه نزدیک به صفر برآورد شده است.



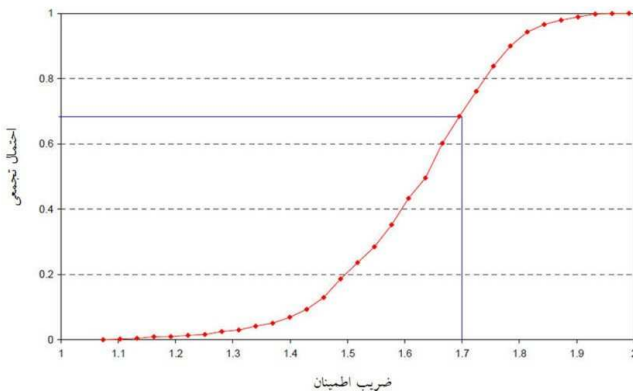
شکل ۶. تحلیل پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت در حالت‌های مختلف با روش

الف) تعادل حدی دایره‌ای با پارامترهای Hoek-Brown، ب) عددی با پارامترهای Mohr-Coulomb

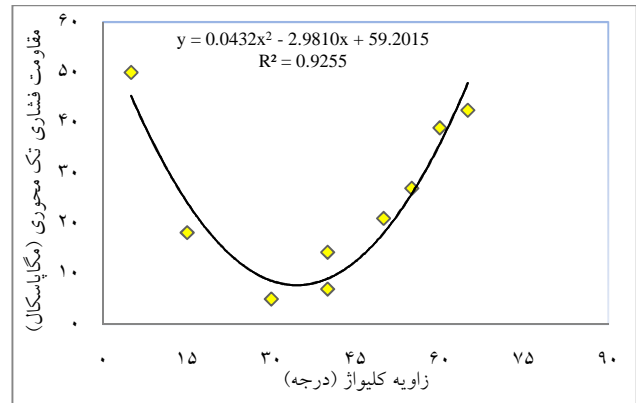


شکل ۸. توزیع احتمال مقاومت فشاری توده سنگ اسلبیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت برای انجام تحلیل پایداری

برای انجام تحلیل پایداری، حالت ۱ مبنای محاسبات ضریب اطمینان قرار گرفت و تنها مقاومت فشاری با توزیع احتمال نرمال نشان داده شده در شکل ۸ به عنوان متغیر تصادفی فرض گردید. در شکل ۹ تابع توزیع تجمعی ضریب اطمینان نشان داده شده، که بیشترین ضریب اطمینان حدود ۲ و کمترین آن اندکی بیش از ۱ است. چنانچه ضریب اطمینان مجاز با توجه به موقعیت حساس ترانشه، ۱٫۷ در نظر گرفته شود، می توان پی برد که حدود ۶۸٪ داده ها ضریب اطمینانی کمتر از مقدار مذکور را دارا هستند که این امر نشان دهندهی اثر زیاد کلیواژ بر کاهش مقاومت فشاری توده سنگ اسلبیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت است.



شکل ۹. توزیع تجمعی ضریب اطمینان در تحلیل احتمالاتی



شکل ۷. تغییرات مقاومت فشاری توده سنگ اسلبیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت با زاویه کلیواژهای مختلف (مهندسی مشاور مشانیر، ۱۳۹۰)

تابع توزیع احتمال نرمال بهترین انتخاب برای بیان توزیع پارامترهای ژئومکانیکی است. لذا همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده، پارامتر مقاومت فشاری با استفاده از توزیع نرمال (گوسی) با میانگین ۲۵ و انحراف معیار ۶ مگا پاسکال به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شد که میانگین و انحراف معیار از روابط ۴ الی ۶ به دست می آید (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

$$\mu = \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i = \frac{1}{N} (X_1 + X_2 + \dots + X_N) \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2 \quad (5)$$

$$\sqrt{S^2} = S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (6)$$

که در آن μ میانگین نمونه مورد نظر، σ^2 واریانس نمونه مورد نظر و S انحراف معیار (جذر واریانس) می باشد. همچنین منحنی توزیع نرمال با چولگی صفر به صورت رابطه ۷ بدست می آید (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

۷. نتیجه‌گیری

ناهمسان‌گردی از فاکتورهای مؤثر بر رفتار توده‌سنگ بوده و شامل سطوح تورق، اثر کلیواژ، شیستوزیته، درزه‌ها، زون‌های برشی و صفحات لایه‌بندی است. سه نوع ناهمسان‌گردی U شکل، جناحی (شانه‌ای) و موجی شکل وجود دارد که ناهمسان‌گردی توده سنگ اسلیتی از نوع U شکل است. مقاومت فشاری تک محوری وابستگی محسوسی به زاویه کلیواژ با محور بارگذاری نمونه دارد. کمترین مقاومت فشاری توده سنگ اسلیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت، ۵ مگاپاسکال و در زاویه کلیواژ ۳۰ درجه اندازه‌گیری شده و بیشترین آن حدود ۵۰ مگاپاسکال در زاویه نزدیک به صفر است. همچنین با توجه به نتیجه‌ی آزمایش سه محوره، علاوه بر تأثیر زاویه کلیواژ بر مقاومت فشاری، بر مقدار پارامترهای ژئومکانیکی سنگ اسلیتی از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ثابت‌های m و s در معیار هوک - براون نیز تأثیر قابل توجهی دارد. نتایج تحلیل به شرح ذیل است:

- ۱- با توجه به تحلیل‌های تعادل حدی (نرم‌افزار SLIDE) و عددی (نرم‌افزار FLACSLOPE) انجام شده بر روی شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سردشت برای حالت‌های با در نظر گرفتن اثر کلیواژ و اثر زون‌های خرد شده، شیب شیروانی از ضریب اطمینان قابل قبولی برخوردار نیست.
- ۲- مقدار فاکتور ایمنی در حالت با در نظر گرفتن اثر کلیواژ از حالت با در نظر گرفتن اثر زون‌های خرد شده کمتر می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که تأثیر کلیواژ از اثر زون‌های خرد شده

منابع

- حسینی پاک، ع.الف.، ۱۳۷۷. زمین‌آمار. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول.
 خدانداده لو، ف.، بهادر بیگی، د.، ۱۳۹۰. نرم افزار FLAC. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر. چاپ سوم.
 مهندسی مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰. گزارش زمین‌شناسی مهندسی مطالعات مرحله دوم. تهران.
 مهندسی مشاور مشانیر، ۱۳۹۰. گزارش بررسی، بازنگری و صحه‌گذاری مطالعات مرحله اول طرح سد و نیروگاه سردشت. تهران، فصل یازدهم.
 Al-Harathi, A.A., 1998. Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone, Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 50: 49-57.
 Bromhead, E.N., 2002. The stability of slopes. Blackie Academic and Professional., 2nd edition, London and New York, 441p.

بر توده‌سنگ اسلیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت بیشتر است.

- ۳- اثر کلیواژ بر پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سردشت نیز با روش تحلیل آماری بررسی شد. برای بیان توزیع پارامترهای ژئومکانیکی، تابع توزیع احتمال نرمال انتخاب شد که با توجه به منحنی تابع توزیع جمععی، ضریب اطمینان حدود ۰.۶۸/۱ داده‌ها کمتر از ۱/۷ برآورد گردید. این امر نشان دهنده‌ی اثر زیاد کلیواژ بر کاهش مقاومت فشاری توده‌سنگ اسلیتی مشرف به نیروگاه سد سردشت است.
- ۴- در تحلیل پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت با در نظر گرفتن اثر کلیواژ، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ اسلیتی از جمله مقاومت فشاری، چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش قابل توجهی دارند.
- ۵- فاکتور ایمنی به دست آمده در حالت بدون در نظر گرفتن اثر کلیواژ بر توده سنگ اسلیتی با توجه به شرایط واقعی توده سنگ (متورق و دارای سطوح کلیواژ) ناهمخوان است و نتایج آن نمی‌تواند ملاک پایداری شیروانی قلمداد شود.
- ۶- با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته، شیب ارائه شده در نقشه حفاری مطالعات مرحله اول (شیب حفاری ۶ قائم به ۱ افق) در این توده سنگ ناپایدار است و برای پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه سد سردشت باید تمهیدات لازم به عمل آید.

- Giani, G.P., 1992. Rock slope stability analysis. A.A.Balkema., United States of America, pp.47-73.
- Goshtasbi, K., Ahmadi, M., Seyedi, J., 2006. Anisotropic strength behavior of slates in the Sirjan-Sanandaj zone. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 106: 71-76.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981. Rock slope engineering. 3rd Edition, London, Institute of mining and Metallurgy.
- Johansson, L., Axelsson, K., 1992. Calculation of the slope stability using classical calculation methods, a comparison between different calculation programmes, Published in Swedish, the Swedish commission on slope stability, Report 2:91.
- Kliche, C.A., 1999. Rock slope stability. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. United States of America, 134p.
- Nasseri, M.H.B., Rao, K.S., Ramamurthy, T., 2003. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40: 3-23.
- Piteau, D., Martin, D., 1982. Mechanics of rock slope failure. Third International conference on Stability of Surface Mining, Vancouver, British Columbia, Society of Mining Engineering, pp. 113-169.
- Rocscience, Inc., 2003. 2D Limit Equilibrium Slope Stability for Soil and Rock Slope (SLIDE), A users manual, Version 5.
- Sjoberg, J., 1999. Analysis of large scale rock slopes. Department of Civil and Mining Engineering, Sweden, pp.11-35.
- Tien, Y.M., Kuo, M.Ch., Juang, Ch.H., 2006. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43: 1163-1181.
- Tien, Y. M., Kuo, M. C., 2001. A failure criterion for transversely isotropic rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38: 399-412.
- Walsh, M.J., 2003. Engineering and design slope stability. US Army Corps of Engineers, Washangton, DC, 205p.
- Wyllie, D., 2005. Foundations on rock. E and FN Spon is an imprint of the Taylor and Francis Group. New York, 457p.
- Wyllie, D., Mah, C., 2004. Rock slope engineering. Spon Press is an imprint of the Taylor and Francis Group. New York, 455p.
- Xue-min, Z., Feng, Y., Jun-sheng, Y., 2010. Experimental study on anisotropic strength properties of sandstone. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15: 1325-1335.