

تحلیل پایداری شکست واژگونی بلوکی در شیروانی‌های سنگی مشرف به دریاچه سدها

مهدی امینی*^۱، طهورا اکبرپور^۲

۱- استادیار دانشگاه تهران، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، mamni@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان؛ tahura_akbarpur@yahoo.com

(دریافت ۲۱ مرداد ۹۱، پذیرش ۱۱ اسفند ۹۲)

چکیده

در این تحقیق، اثرات حضور و تغییرات سطح آب دریاچه سدها در شکست واژگونی بلوکی شیروانی‌های سنگی مشرف به آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا ابتدا تاریخچه‌ای کوتاه از تحقیقات انجام شده پیرامون شکست واژگونی ارائه می‌گردد. سپس مدلی تئوری برای شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی بلوکی مشرف به دریاچه سدها در حالات مختلف آب‌گیری پیشنهاد می‌شود. در این مدل، بلوک‌های سنگی با تیرستون مدل شده و تعادل بلوک با حل معادلات استاتیکی ارزیابی می‌گردد. در ادامه، بر اساس مدل پیشنهادی و معادلات تعادل حدی راهکار جدیدی برای تحلیل پایداری شیروانی‌های مذکور ارائه می‌شود. به دلیل این که تحلیل پایداری این شیروانی‌ها بر اساس این مدل زمان‌بر می‌باشد، با کمک روابط مذکور، کد کامپیوتری ویژه‌ای تهیه گردید که با استفاده از روش گام به گام پایداری شیروانی را در برابر شکست واژگونی بلوکی در حالات سه‌گانه آب‌گیری دریاچه سد پیش‌بینی می‌کند. این کد اطلاعات شیروانی و بیشینه‌ی سطح آب دریاچه را از کاربر دریافت کرده و در حالت‌های مختلف آب‌گیری سد، فاکتور ایمنی شیروانی را محاسبه و ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب دریاچه سد موجب تغییر فاکتور ایمنی شیروانی‌های سنگی مذکور می‌شود، به طوری که بحرانی‌ترین حالت فروافت سریع آب و ایمن‌ترین حالت افزایش سریع سطح آب دریاچه سد پیش‌بینی می‌شود. در پایان شیروانی مشرف به ورودی تونل‌های انتقال آب سد مشمپای زنجان با استفاده از روش و کد ارائه شده در این تحقیق مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی

واژگونی بلوکی، دریاچه سد، آب‌گیری، تعادل حدی

۱- مقدمه

یا تخلیه‌ی سریع) عمدتاً سطح آب به صورت سریع تغییر می‌کند. بنابراین تغییرات سطح آب موجود در دریاچه سد می‌تواند باعث ایجاد سه حالت مختلف گردد که در هر یک از این حالت‌ها، شیروانی فاکتور ایمنی منحصر به فردی دارد. از آنجایی که فاکتور ایمنی شیروانی تحت شرایط مختلف آب‌گیری متفاوت است، تحلیل پایداری آن بر اساس فاکتور ایمنی به دست آمده در شرایط عادی می‌تواند با خطای زیادی همراه باشد و آن چنان که عملاً دیده شده است موجب واژگونی شیروانی شود. با توجه به این‌که تاکنون روش مناسبی برای تحلیل شیروانی‌های مذکور در شرایط مختلف آب‌گیری ارائه نشده است، در این تحقیق با استفاده از معادلات و کد کامپیوتری ارائه شده، پس از به دست آوردن فاکتور ایمنی هر یک از سه حالت مذکور، کمینه آن به عنوان فاکتور ایمنی شیروانی پیشنهاد می‌گردد. سنگی با یک دسته بلوک که روی یک سطح شیب‌دار قرار گرفته است مدل می‌شود. نیروهایی که

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

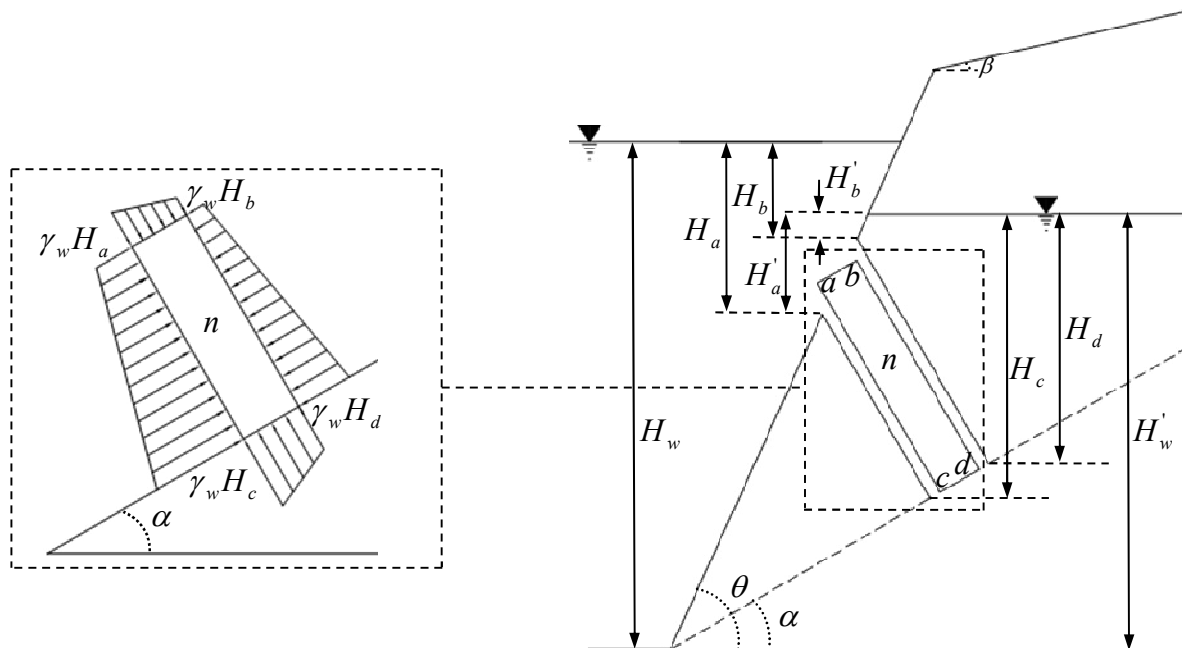
در پی لغزش شیب‌های مشرف به دریاچه سد Vaiont ایتالیا در سال ۱۹۶۳، که منجر به سرریز آب از بدنه آن گردید،

به بلوک‌های شیروانی اثر می‌کنند در جهت‌های موازی و عمود بر سطح شیب‌دار تجزیه شده و تعادل بلوک با حل معادلات استاتیکی مشخص می‌گردد. این روش چندین بار به صورت نمودار و کد کامپیوتری برای تحلیل شکست واژگونی بلوکی ارائه شده است [8]-[10]. بعد از سال ۱۹۸۶، بر مبنای تقسیم‌بندی Goodman and Bray، تحقیقات زیادی روی شکست‌های واژگونی بلوکی و واژگونی خمشی انجام شد [11]-[21]. در مقالات مذکور تاثیرات تغییر سطح آب دریاچه سد در شکست واژگونی مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق با استفاده از معادلات و کد کامپیوتری ارائه شده، روش جدیدی بر مبنای معادلات تعادل حدی و روش گام به گام ارائه می‌شود که در آن پس از به دست آوردن فاکتور ایمنی در حالات سه‌گانه آب‌گیری، کم‌ترین مقدار به دست آمده به عنوان فاکتور ایمنی شیروانی پیشنهاد می‌گردد.

۳- بررسی مکانیزم شکست واژگونی بلوکی به همراه اثرات حضور آب

همان‌طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است، افزایش نیروی محوری و لنگر خمشی با ارتفاع آب رابطه مسقیم داشته و با حرکت از تاج به سمت پنجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. با توجه به این‌که کدام حالت آب‌گیری مد نظر باشد، این نیروها می‌توانند در کاهش یا افزایش پایداری شیروانی موثر باشند. از این‌رو با در نظر گرفتن این‌که سطح آب درون شیروانی و دریاچه سد در چه ارتفاعی قرار دارد، هر

Müller در سال ۱۹۶۸ برای نخستین بار پیشنهاد کرد که بخشی از این ناپایداری‌ها در اثر چرخیدن بلوک‌های سنگی رخ داده است [1]. در سال ۱۹۷۱، Ashby این ناپایداری را در آزمایشگاه مدل‌سازی نموده و نام آن را واژگونی نهاد [2]. از سال ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۶، به کمک مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی، تحقیقات متعددی پیرامون مکانیزم شکست واژگونی انجام شد [3]-[5]. تحقیقات De Freitas and Waters در سال ۱۹۷۳، متخصصان علم ژئوتکنیک و ژئومورفولوژی را متقاعد ساخت که شکست واژگونی یکی از انواع مستقل و مهم شکست در شیروانی‌های سنگی است [6]. در سال ۱۹۷۶، Goodman and Bray شکست‌های واژگونی را به چهار دسته بلوکی، خمشی، بلوکی-خمشی و ثانویه تقسیم‌بندی کرده و یک راهکار ریاضی برای ارزیابی شکست واژگونی بلوکی ارائه نمودند [7]. در این روش که مبتنی بر معادلات تعادل حدی است، شیروانی همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، شکست واژگونی بلوکی زمانی اتفاق می‌افتد که در توده‌سنگ دو دسته ناپیوستگی وجود داشته باشد. به دلیل این‌که این دو دسته ناپیوستگی رشد وسیعی یافته‌اند، هنگام حضور آب توزیع فشار هیدرواستاتیک برای هر بلوک به صورت دوزنقه‌ای در طرفین، کف و بالای بلوک خواهد بود (شکل ۱). فشار هیدرواستاتیکی آب موجب افزایش نیروی محوری و لنگر خمشی در انتهای بلوک‌های سنگی می‌شود.



شکل ۱: توزیع فشار هیدرواستاتیک بین بلوکی برای شکست واژگونی بلوکی در دریاچه‌سدها

مطابق شکل ۲، برای بلوک‌هایی که شماره آن‌ها بیش از n' است بلوک به طور کامل زیر آب قرار ندارد. ولی برای بلوک‌هایی که شماره آن‌ها کمتر از n' است کل بلوک زیر سطح آب واقع شده است. بر این مینا، می‌توان بلوک‌های سنگی را بر اساس موقعیت آن‌ها نسبت به سطح آب دریاچه به پنج حالت زیر تقسیم‌بندی نمود:

- ۱- سطح آب بالاتر از بلوک قرار دارد.
- ۲- سطح آب یال ab را قطع می‌کند.
- ۳- سطح آب یال ac را قطع می‌کند.
- ۴- سطح آب یال cd را قطع می‌کند.
- ۵- سطح آب پایین‌تر از بلوک قرار دارد.

در این بخش از تحقیق برای حالت‌های مختلف آب‌گیری سد، موقعیت بلوک نسبت به سطح آب تعیین شده و سپس طولی از دیواره بلوک که زیر آب قرار دارد به دست می‌آید:

۳-۱- آب‌گیری یا تخلیه تدریجی

این دو حالت زمانی اتفاق می‌افتند که آب‌گیری یا تخلیه با سرعت انجام نشود و توده سنگ فرصت اشباع شدن توسط آب یا از دست دادن آب بین بلوکی و خارج شدن از حالت اشباع را داشته باشد.

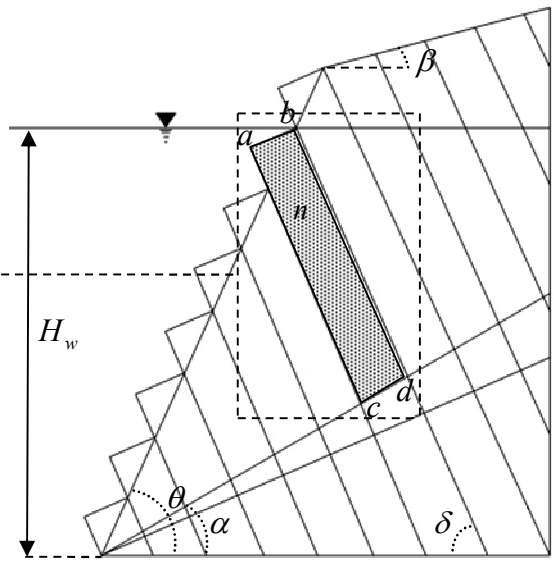
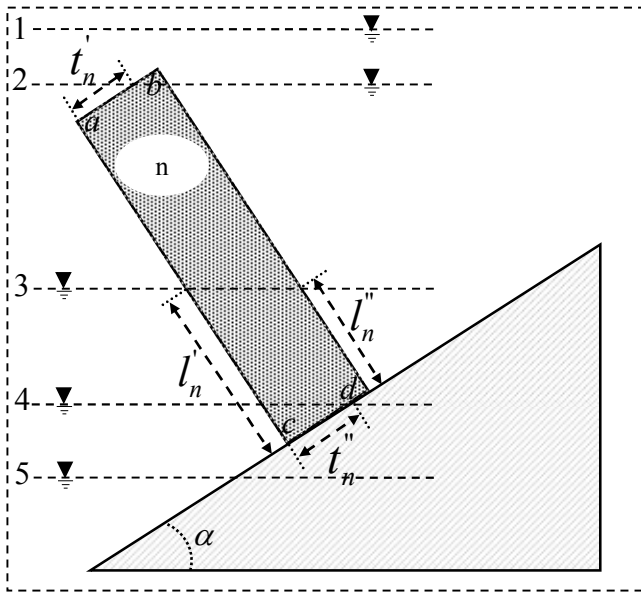
در این وضعیت سطح آب درون توده برابر سطح آب دریاچه سد فرض می‌شود. با توجه به روابط هندسی و مثلثاتی، فاصله هر یک از رئوس بلوک تا سطح آزاد آب طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد (شکل ۲):

یک از حالات قابل بررسی می‌باشد. برای ارزیابی حالات مختلف حضور آب در شیروانی مجاور دریاچه سد، چهار حالت مختلف (آب‌گیری تدریجی و تخلیه تدریجی، آب‌گیری سریع و فروافت سریع آب) قابل تصور خواهد بود. با توجه به مکانیزم حضور آب در دیواره و اثرات فشار هیدرواستاتیک آب بر پایداری بلوک‌ها، حالت‌های اول و دوم مشابه یک‌دیگر بوده و تحت عنوان آب‌گیری یا تخلیه تدریجی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین برای بررسی پایداری شکست واژگونی بلوکی در مجاورت دریاچه‌سدها سه حالت زیر تحلیل می‌گردد:

- حالت اول: آب‌گیری یا تخلیه تدریجی
- حالت دوم: آب‌گیری سریع
- حالت سوم: فروافت سریع آب (تخلیه سریع)

در این تحقیق با بررسی موارد مذکور روابط عمومی برای تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل واژگونی بلوکی مجاور دریاچه‌سدها ارائه خواهد شد. برای تعیین نیروهای هیدرواستاتیک وارد بر هر بلوک باید سطح آب نسبت به گوشه‌های بلوک تعیین شود. اگر محل تقاطع سطح آب دریاچه با شیروانی سنگی بلوک n' فرض گردد، بر اساس روابط هندسی شماره بلوک n' به صورت زیر به دست می‌آید (در این رابطه علامت [] برای تابع جزء صحیح به کار رفته است):

$$n' = \left[\frac{H_w \sin(\theta + \delta)}{t \cdot \sin \theta} \right] + 1 \quad (1)$$



حالت‌های مختلف برای سطح فرضی آب در دیواره

شکل ۲: مدل تئوری شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی بلوکی در حالت آب‌گیری تدریجی

$$\text{If } H_{a,n} \leq 0 \text{ و } H_{d,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{If } H_{d,n} \leq 0 \text{ و } H_{c,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = \frac{H_{c,n}}{\cos \delta} \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{If } H_{c,n} < 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = 0 \\ l'_n = 0 \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} H_{a,n} = H_w - \frac{(n-1)t \sin \theta - t \sin \delta \cos(\theta + \delta)}{\sin(\theta + \delta)} \\ H_{b,n} = H_w - n \cdot \frac{t}{\sin(\theta + \delta)} \cdot \sin \theta \\ H_{c,n} = H_w - \frac{(n-1)t \sin \alpha}{\sin(\alpha + \delta)} \\ H_{d,n} = H_{c,n} - t \cos \delta \end{cases} \quad (2)$$

در این حالت بر اساس روابط هندسی می‌توان پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل بلوک n را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\text{If } n < n' \rightarrow \begin{cases} t'_n = t''_n = t \\ l'_n = l''_n = l_n \end{cases} \quad (3)$$

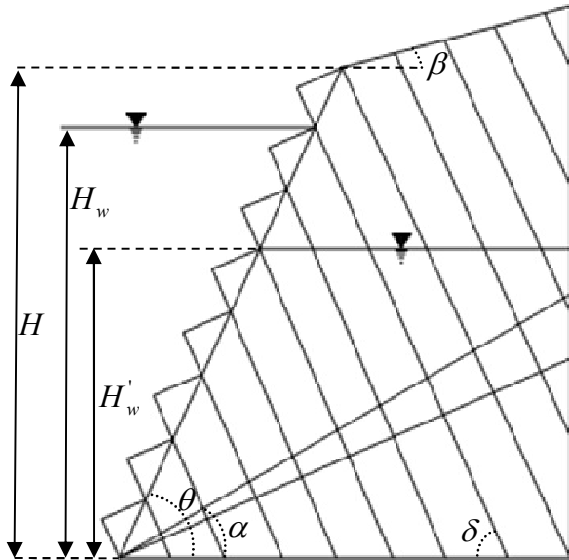
$$\text{If } H_{b,n} \leq 0 \text{ و } H_{a,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = \frac{H_{a,n}}{\cos \delta} \\ t''_n = t \\ l'_n = l_n \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (4)$$

درون توده پایین‌تر از سطح آب در دریاچه سد باشد، نیروی پایدارکننده‌ای از طرف آب به شیروانی سنگی وارد می‌شود که تا اشباع شدن توده سنگ وجود دارد و می‌تواند باعث افزایش پایداری شیروانی گردد. در این حالت فاصله نقاط واقع بر کف بلوک تا سطح آب درون توده قبل از آب‌گیری محاسبه می‌شود.

۲-۳- آب‌گیری سریع

در این وضعیت آب در زمان کوتاه به صورت سیلابی وارد دریاچه سد می‌شود به طوری که سرعت اشباع شدن توده از سرعت آب‌گیری کم‌تر بوده و سطح آب درون توده تقریباً متاثر از سطح آب در دریاچه سد نمی‌باشد (شکل ۳).

$$\text{If } H_{c,n} < 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = 0 \\ l'_n = 0 \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (15)$$



شکل ۳: مدل تئوری شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل واژگونی بلوکی در حالت آب‌گیری سریع

اگر $H_{b,n} \leq 0$ و $H_{a,n} > 0$ باشد آن‌گاه پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل بلوک n به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{If } H'_{b,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = \frac{H_{a,n}}{\cos \delta} \\ t''_n = t \\ l'_n = l_n \\ l''_n = l_n \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{If } H'_{b,n} \leq 0 \text{ و } H'_{a,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = \frac{H_{a,n}}{\cos \delta} \\ t''_n = t \\ l'_n = l_n \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{If } H'_{a,n} \leq 0 \text{ و } H_{d,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = \frac{H_{a,n}}{\cos \delta} \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (18)$$

فاصله هر یک از رئوس بلوک تا سطح آزاد آب طبق روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} H_{a,n} = H_w - \frac{(n-1)t \sin \theta - t \sin \delta \cos(\theta+\delta)}{\sin(\theta+\delta)} \\ H_{b,n} = H_w - n \cdot \frac{t}{\sin(\theta+\delta)} \cdot \sin \theta \\ H_{c,n} = H'_w - \frac{(n-1)t \sin \alpha}{\sin(\alpha+\delta)} \\ H_{d,n} = H_{c,n} - t \cos \delta \end{cases} \quad (8)$$

$H'_{a,n}$ و $H'_{b,n}$ به ترتیب فاصله رئوس a و b از سطح آب درون توده سنگ می‌باشد (شکل ۲):

$$H'_{a,n} = (H'_w - \frac{(n-1)t \sin \theta - t \sin \delta \cos(\theta+\delta)}{\sin(\theta+\delta)}) \quad (9)$$

$$H'_{b,n} = (H'_w - n \cdot \frac{t}{\sin(\theta+\delta)} \cdot \sin \theta) \quad (10)$$

در این حالت بر اساس روابط هندسی می‌توان پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل بلوک n را به صورت محاسبه کرد.

اگر $H_{b,n} < 0$ باشد در این صورت:

$$\text{If } H'_{b,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = t \\ t''_n = t \\ l'_n = l_n \\ l''_n = l_n \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{If } H'_{b,n} \leq 0 \text{ و } H'_{a,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = t \\ t''_n = t \\ l'_n = l_n \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{If } H'_{a,n} \leq 0 \text{ و } H_{d,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = t \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{If } H_{d,n} \leq 0 \text{ و } H_{c,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = t \\ t''_n = \frac{H_{c,n}}{\cos \delta} \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (14)$$

درزه‌ای مقداری زمان لازم است. بنابراین سطح آب درون توده مشابه شکل ۴ است. در این وضعیت که بحرانی‌ترین حالت به شمار می‌رود، وجود آب درون توده می‌تواند باعث ناپایداری شیروانی شود. توزیع فشار هیدرواستاتیک بین درزه‌ای در شکل ۵ قابل مشاهده است. در این شرایط فاصله هر یک از رئوس بلوک مفروض تا سطح آزاد آب طبق روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} H_{a,n} = 0 \\ H_{b,n} = 0 \\ H_{c,n} = H'_w - \frac{(n-1)t \sin \alpha}{\sin(\alpha+\delta)} \\ H_{d,n} = H_{c,n} - t \cos \delta \end{cases} \quad (26)$$

پارامترهای مورد استفاده برای بلوک n با توجه به روابط هندسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{If } n < n' \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = t \\ l'_n = l''_n = l_n \end{cases} \quad (27)$$

$$\text{If } H_{d,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (28)$$

$$\text{If } H_{d,n} \leq 0 \text{ و } H_{c,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = \frac{H_{c,n}}{\cos \delta} \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (29)$$

$$\text{If } H_{c,n} < 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = 0 \\ l'_n = 0 \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (30)$$

$$\text{If } H_{d,n} \leq 0 \text{ و } H_{c,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = \frac{H_{a,n}}{\cos \delta} \\ t''_n = \frac{H_{c,n}}{\cos \delta} \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{If } H_{c,n} < 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = 0 \\ l'_n = 0 \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (20)$$

اگر $H_{a,n} < 0$ باشد پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل بلوک n به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\text{If } H'_{b,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = l_n \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{If } H'_{b,n} \leq 0 \text{ و } H'_{a,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (22)$$

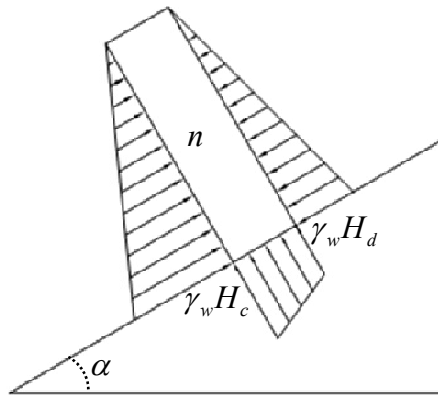
$$\text{If } H'_{a,n} \leq 0 \text{ و } H_{d,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = t \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = \frac{H_{d,n}}{\sin \delta} \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{If } H_{d,n} \leq 0 \text{ و } H_{c,n} > 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = \frac{H_{c,n}}{\cos \delta} \\ l'_n = \frac{H_{c,n}}{\sin \delta} \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (24)$$

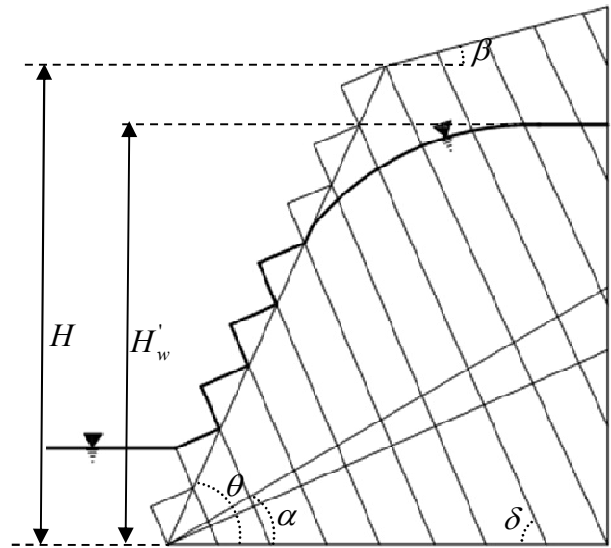
$$\text{If } H_{c,n} < 0 \rightarrow \begin{cases} t'_n = 0 \\ t''_n = 0 \\ l'_n = 0 \\ l''_n = 0 \end{cases} \quad (25)$$

۳-۳- فروافت سریع (تخلیه سریع)

در حالت فروافت سریع آب فرض می‌شود پس از گذشت مدت زمان نسبتاً طولانی از آب‌گیری و اشباع شدن توده، آب با سرعت تخلیه شود. در این شرایط سطح آب درون توده فوراً صفر نمی‌شود چرا که توده اشباع است و برای تخلیه شدن آب بین



شکل ۵: توزیع فشار هیدرواستاتیک بین درزه‌ای در حالت فروافت سریع



شکل ۴: مدل تئوری شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل شکست واژگونی بلوکی در حالت فروافت سریع

۴- تحلیل پایداری شیروانی مجاور دریاچه سد در برابر شکست واژگونی بلوکی

پس از به دست آوردن فاصله رؤس بلوک از سطح آزاد آب برای هر یک از حالت‌های آب‌گیری یا تخلیه، سایر مراحل مشابه بوده و با استفاده از یک راهکار مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نیروهای عمل‌کننده بر بلوک در شکل ۶ نشان داده شده است. نیروهای هیدرواستاتیکی وارد بر بلوک به طریق زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{u,n} = \frac{\gamma_w(H_{a,n}+H_{b,n})l'_n}{2} \quad (31)$$

$$F_{d,n} = \frac{\gamma_w(H_{c,n}+H_{d,n})l''_n}{2} \quad (32)$$

$$F_{l,n} = \frac{\gamma_w(H_{a,n}+H_{c,n})l'_n}{2} \quad (33)$$

$$F_{r,n} = \frac{\gamma_w(H_{d,n}+H_{b,n})l''_n}{2} \quad (34)$$

هم‌چنین نقطه اثر این نیروها، به ترتیب، از روابط زیر به دست می‌آید:

$$m_{u,n} = \frac{l'_n(2H_{b,n}+H_{a,n})}{3(H_{b,n}+H_{a,n})} \quad (35)$$

$$m_{d,n} = \frac{l''_n(2H_{d,n}+H_{c,n})}{3(H_{d,n}+H_{c,n})} \quad (36)$$

$$m_{l,n} = \frac{l'_n(2H_{a,n}+H_{c,n})}{3(H_{a,n}+H_{c,n})} \quad (37)$$

$$m_{r,n} = \frac{l''_n(2H_{b,n}+H_{d,n})}{3(H_{b,n}+H_{d,n})} \quad (38)$$

برآیند کل نیروهای وارد بر هر بلوک (نیروی وزن، نیروی هیدرواستاتیک، نیروی اصطکاک موجود در کف و بدنه بلوک) نشان می‌دهد که آیا بلوک پایدار بوده یا دارای پتانسیل لغزش، واژگونی و واژگونی-لغزش است. بنابراین تحلیل هر بلوک را می‌توان به چهار بخش تقسیم بندی نمود:

الف) بلوک n دارای پتانسیل شکست واژگونی است و در برابر لغزش پایدار است. در این حالت شرایط زیر برقرار است:

$$\begin{cases} e = 0 \\ Q_{n-1} = P_{n-1} \cdot \tan \phi_d + c_d \cdot K_n \\ Q_n = P_n \cdot \tan \phi_d + c_d \cdot J_n \\ S_n < N_n \cdot \tan \phi_b + c_b \cdot t \end{cases} \quad (39)$$

نقطه اثر نیروهای P_{n-1} و P_n به ترتیب برای بلوک‌های واقع در پایین بلوک تاج شیروانی، بلوک تاج شیروانی و بلوک‌های بالای آن به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\begin{cases} J_n = l_n \\ K_n = l_n - t \cdot \tan(\theta - \frac{\pi}{2} - \delta) \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} J_n = l_n - t \cdot \tan(\frac{\pi}{2} - \delta - \beta) \\ K_n = l_n - t \cdot \tan(\theta - \frac{\pi}{2} - \delta) \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} J_n = l_n - t \cdot \tan(\frac{\pi}{2} - \delta - \beta) \\ K_n = l_n \end{cases} \quad (42)$$

بر این اساس و با استفاده از تعادل گشتاورها حول نقطه O (شکل ۶) مقدار نیروی $P_{n-1,t}$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x = 0 \rightarrow P_{n-1,s} &= [P_n(1 - \tan \phi_b \tan \phi_d) \\ &+ W_n \cos \delta \\ &- W_n \sin \delta \tan \phi_b \\ &- c_b t - c_d \tan \phi_b (J_n - K_n) \\ &- \frac{Y_w}{2} \tan \phi_b ((H_{a,n} \\ &+ H_{b,n})t'_n - (H_{d,n} \\ &+ H_{c,n})t''_n) + \frac{Y_w}{2} ((H_{b,n} \\ &+ H_{d,n})l''_n - (H_{c,n} \\ &+ H_{a,n})l'_n)] / (1 \\ &- \tan \phi_b \tan \phi_d) \end{aligned} \quad (46)$$

ج) بلوک n دارای پتانسیل شکست واژگونی- لغزش است. در این حالت شرایط زیر برقرار است:

$$\begin{cases} S_n = N_n \cdot \tan \phi_b + c_b \cdot t \\ Q_n = P_n \cdot \tan \phi_d + c_d \cdot J_n \\ Q_{n-1} = P_{n-1} \cdot \tan \phi_d + c_d \cdot K_n \end{cases} \quad (47)$$

اگر مقادیر $P_{n-1,s}$ و $P_{n-1,t}$ هر دو مثبت باشند، بلوک دارای پتانسیل واژگونی- لغزش است. یعنی در حین واژگون شدن می- لغزد. در این وضعیت نیروی بین بلوکی برابر با بیشینه مقادیر $P_{n-1,s}$ و $P_{n-1,t}$ در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{n-1,t,s} = \text{Max}(P_{n-1,t}, P_{n-1,s}) \quad (48)$$

د) بلوک n در برابر شکست واژگونی و لغزش پایدار است. در این حالت مقادیر $P_{n-1,s}$ و $P_{n-1,t}$ هر دو منفی هستند. با توجه به این که بلوک‌ها نمی‌توانند به یکدیگر نیروی منفی وارد کنند، نیروی بین بلوکی صفر در نظر گرفته می‌شود. مقدار واقعی P_{n-1} از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$P_{n-1} = \text{Max}(P_{n-1,t}, P_{n-1,s}, P_{n-1,t,s}, 0) \quad (49)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان به صورت گام به گام مقادیر نیروهای بین ستون‌سنگی را برای تمامی ستون‌سنگ‌ها محاسبه نمود. با داشتن P_0 (نیروی فرضی مورد نیاز برای پایداری بلوک ۱)، پایداری شیروانی در برابر شکست واژگونی بلوکی در حالات مختلف آب‌گیری به صورت زیر ارزیابی می‌گردد:

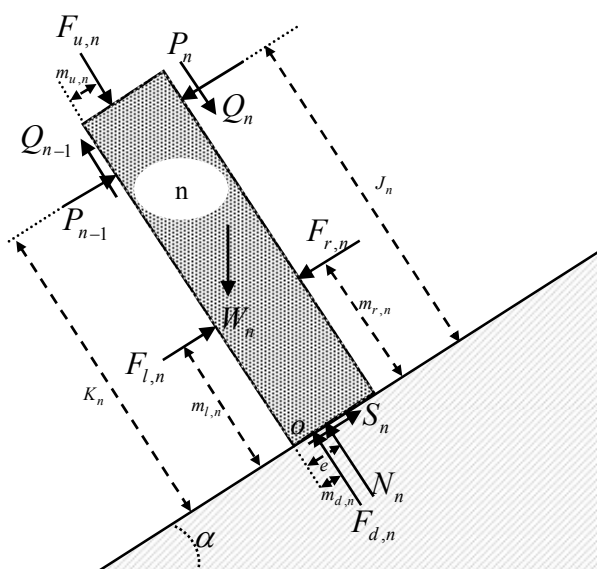
$P_0 > 0$ ← شیروانی ناپایدار است.

$P_0 < 0$ ← شیروانی پایدار است.

$P_0 = 0$ ← شیروانی در مرز تعادل قرار دارد.

به دلیل این که محاسبه نیروهای بین ستون‌سنگی مطابق با روابط فوق، به صورت دستی، بسیار زمان‌بر است کد کامپیوتری ویژه‌ای بر مبنای محاسبات انجام شده در این تحقیق نوشته شد. این کد اطلاعات مربوط به خصوصیات هندسی و ژئومکانیکی شیروانی سنگی و سطح آب دریاچه سد را از کاربر دریافت کرده و نیروی-های بین بلوکی را در شرایط مختلف آب‌گیری محاسبه می‌نماید.

$$\begin{aligned} \Sigma M_o = 0 \rightarrow P_{n-1,t} &= [P_n(t \tan \phi_d - J_n) \\ &- \frac{1}{2} W_n l_n \cos \delta \\ &+ \frac{1}{2} W_n t \sin \delta + c_d J_n t \\ &+ \frac{Y_w}{6} t_n'^2 (2H_{b,n} + H_{a,n}) \\ &- \frac{Y_w}{6} t_n''^2 (2H_{d,n} + H_{c,n}) \\ &+ \frac{Y_w}{6} l_n'^2 (2H_{a,n} + H_{c,n}) \\ &- \frac{Y_w}{6} l_n''^2 (2H_{b,n} + H_{d,n})] \\ &/ (-K_n) \end{aligned} \quad (43)$$



شکل ۶: دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر ستون سنگ n

ب) بلوک n دارای پتانسیل لغزش بوده و در برابر شکست واژگونی پایدار است. در این حالت شرایط زیر برقرار است:

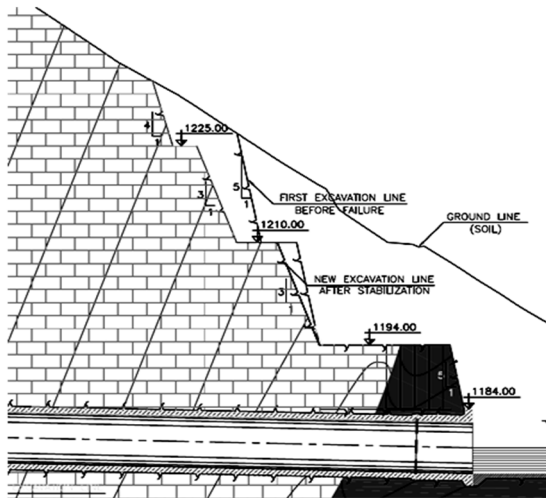
$$\begin{cases} e = t/2 \\ S_n = N_n \cdot \tan \phi_b + c_b \cdot t \end{cases} \quad (44)$$

هم‌چنین فرض می‌شود:

$$\begin{cases} Q_{n-1} \cong P_{n-1} \cdot \tan \phi_d + c_d \cdot K_n \\ Q_n \cong P_n \cdot \tan \phi_d + c_d \cdot J_n \end{cases} \quad (45)$$

در این شرایط طبق معادلات تعادل حدی مقدار $P_{n-1,s}$ به صورت زیر تعیین می‌شود:

تحقیق، یک مثال موردی با استفاده کد مذکور مورد تحلیل قرار گرفت که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.



شکل ۸: خط حفاری شیروانی سنگی در تونل انحراف آب سد مشمپا قبل و بعد از پایدارسازی

با توجه به این که سطح آب زیرزمینی در محل دهانه مورد تحلیل پایین پیش‌بینی شده است شیروانی تقریباً خشک می‌باشد. بنابراین می‌توان شیروانی فوق را قبل از شکست و بعد از پایدارسازی، با استفاده از کد ارائه شده در این تحقیق با شرط $H'_w = H_w = 0$ ، تحلیل نموده و نتایج را با واقعیت مقایسه کرد. در جدول ۱ اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل این شیروانی قبل و بعد از پایدارسازی ارائه شده است. پایداری این شیروانی با کد ارائه شده در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد از مجموع ۱۶۱ بلوک موجود در شیروانی قبل از عملیات پایدارسازی، نیروهای بین بلوکی از بلوک ۱ تا بلوک ۱۳۸ مثبت و از بلوک ۱۳۹ تا ۱۶۱ منفی می‌باشند. بنابراین از نظر تئوری، دو زون پایدار و ناپایدار در شیروانی قابل تعیین است. این نتیجه با واقعیت تطابق دارد. زیرا همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، هرچند بخش عمده شیروانی در اثر شکست واژگونی فروریخته ولی یک زون پایدار در انتهای شیب باقی مانده است. فاکتور ایمنی کلی این شیروانی در برابر شکست واژگونی ۰/۹۷۸ برآورد شده است که با واقعیت هم‌خوانی خوبی دارد. زیرا به این دلیل که شیروانی ناپایدار شده است فاکتور ایمنی آن باید حدوداً برابر ۱ باشد. بعد از تعدیل شیب، تمامی بلوک‌ها به تعادل رسیده و فاکتور ایمنی کلی شیروانی ۱/۵۵ می‌باشد.

بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که شرایط زمین‌شناسی دهانه ورودی تونل‌های انتقال آب به نیروگاه (تونل‌های جناح چپ)

سپس با توجه به نیروی P_0 وضعیت پایداری شیروانی را کنترل و به کاربر ارائه می‌کند. برای بررسی بهتر نتایج حاصل از این

۵- مثال موردی (شیروانی سنگی مشرف به ورودی

تونل‌های انتقال آب سد مشمپای زنجان)

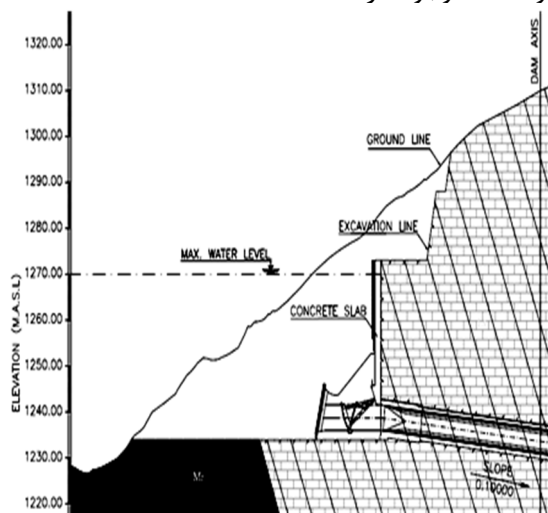
سد خاکی - سنگریزه‌ای مشمپا با ارتفاع نهایی ۱۲۴ متر در فاصله ۱۱۵ کیلومتری غرب شهرستان زنجان بر روی رودخانه قزل‌اوزن در حال ساخت می‌باشد. این سد دارای دو رشته تونل انتقال آب در جناح چپ بدنه می‌باشد که وظیفه انتقال آب به چهار توربین نیروگاه را بر عهده دارند. سربز سد همراه با تونل‌های انحراف آب با مجموع طول ۴۰۰ متر در جناح راست بدنه قرار دارند. برای ساخت این سد نخست حفاری شیروانی‌های مشرف به دهانه‌های ورودی و خروجی تونل‌های انحراف آب شروع گردید تا شرایط مناسبی برای احداث تونل‌ها فراهم گردد. برای احداث دهانه خروجی این تونل‌ها باید یک شیروانی سنگی با ارتفاع ۳۳ متر و شیب کلی ۷۱ درجه در سنگ آهک لایه‌ای و گل‌سنگ حفاری می‌شد. ولی در حین حفاری در بخشی از این شیروانی، شکست واژگونی بزرگی در توده سنگ رخ داد (شکل ۷). خوش‌بختانه این ناپایداری در هنگام شب و زمانی رخ داد که کارگاه تعطیل بود و بنابراین خطر جانی در

پی نداشت. ولی خسارت مالی وارده به پروژه بالغ بر ۷۵۰۰ میلیون ریال برآورد گردید. همچنین این ناپایداری عملیات حفاری در خروجی تونل‌ها را به مدت شش ماه متوقف نمود. در نهایت با تعدیل شیب شیروانی و تغییر محل خروجی تونل‌ها دهانه مذکور حفاری و تونل‌های انحراف نیز احداث گردید (شکل ۸).



شکل ۷: شکست واژگونی در خروجی تونل انحراف آب سد مشمپای زنجان

آب‌گیری سریع فاکتور ایمنی شیروانی سنگی در برابر شکست واژگونی به ترتیب ۱/۴، ۱/۴۱ و ۱/۸۵ می‌باشد که نشان‌دهنده پایداری شیروانی است. ولی در حالت فروافت سریع، فاکتور ایمنی شیروانی ۰/۲۵ می‌گردد که نشان می‌دهد احتمال ناپایداری توده‌سنگ وجود دارد.



شکل ۹: شیروانی سنگی مشرف به ورودی تونل‌های انتقال آب سد

مشمپا

مشابه شیروانی مذکور می‌باشد. به علاوه این دهانه در محل دریاچه سد قرار دارد و بعد از حفاری بخش‌هایی از آن به زیر آب فرورفته و اشباع می‌شود (شکل ۹). بنابراین این امکان وجود دارد که در حین حفاری یا بعد از بهره‌برداری از پروژه، شیروانی مشرف به این تونل نیز ناپایدار شود. اگر این شیروانی در حین حفاری ناپایدار شود خسارات جانی، مالی و زمانی قابل توجه برای پروژه در پی خواهد داشت. هم‌چنین بعد از آب‌گیری سد نیز در صورت وقوع ناپایداری احتمال مسدود شدن دهانه ورودی تونل و یا انتقال بلوک‌های سنگی کوچک به نیروگاه و تخریب توربین‌ها وجود دارد. بنابراین تحلیل پایداری این شیروانی در حین حفاری و بعد از بهره‌برداری از پروژه (در شرایط مختلف آب‌گیری شامل آب‌گیری یا تخلیه تدریجی، فروافت سریع یا آب‌گیری سریع) با استفاده از روش پیشنهادی و کد ارائه شده در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات هندسی و ژئومکانیکی توده‌سنگ در دهانه‌ی ورودی تونل‌های انتقال در جدول ۲ نشان داده شده است. با استفاده از روش و کد ارائه شده در این تحقیق این شیروانی در حالت خشک (در حین حفاری) و شرایط مختلف آب‌گیری سد تحلیل گردید. نتایج حاکی از آن است که در حالت‌های خشک (در حین حفاری)، آب‌گیری یا تخلیه تدریجی و

جدول ۱: مشخصات هندسی و ژئومکانیکی شیروانی سنگی مشرف به خروجی تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان

ردیف	نام پارامتر	قبل از پایدارسازی	بعد از پایدارسازی	واحد
۱	θ	۷۱	۶۴/۴	درجه
۲	α	۵۰	۵۰	درجه
۳	β	۳۰/۳	۳۰/۳	درجه
۴	δ	۵۰	۵۰	درجه
۵	H	۳۳	۴۱	متر
۶	H_w	۰	۰	متر
۷	t	۰/۵	۰/۵	متر
۸	γ	۲۱۰۰	۲۱۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب
۹	ϕ_b, ϕ_d	۳۹	۳۹	درجه
۱۰	c_b	۲۳/۴	۲۳/۴	کیلوپاسکال
۱۱	c_d	۵۰	۵۰	کیلو پاسکال
۱۲	γ_w	۱۰۰۰	۱۰۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب

جدول ۲: مشخصات هندسی و ژئومکانیکی شیروانی سنگی مشرف به ورودی تونل‌های انتقال آب سد مشمپای زنجان

ردیف	نام پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
۱	θ	۶۰	درجه
۲	α	۵۰	درجه
۳	β	۳۷	درجه
۴	δ	۵۰	درجه
۵	H	۷۱/۸	متر
۶	H_w	۳۵/۵	متر
۷	H'_w	۱۰	متر
۸	t	۰/۵	متر
۹	γ	۲۱۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب
۱۰	γ_{sat}	۲۵۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب
۱۱	در حالت خشک ϕ_b, ϕ_d	۳۹	درجه
۱۲	در حالت اشباع ϕ_b, ϕ_d	۳۷	درجه
۱۲	c_b	۲۳/۴	کیلو پاسکال
۱۳	c_d	۵۰	کیلو پاسکال
۱۴	γ_w	۱۰۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، روشی جدید برای تحلیل پایداری شکست واژگونی در شیروانی‌های سنگی مشرف به دریاچه سدها ارائه شد. به دلیل زمان‌بر بودن محاسبات دستی، کد کامپیوتری ویژه‌ای برای تحلیل شیروانی‌ها تهیه گردید. این کد اطلاعات شیروانی و پیشینه‌ی سطح آب دریاچه را از کاربر دریافت کرده و در حالت-های مختلف آب‌گیری سد، فاکتور ایمنی شیروانی را محاسبه و ارائه می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب دریاچه سد موجب تغییر فاکتور ایمنی شیروانی‌های سنگی مذکور می‌شود. به طوری که بحرانی‌ترین

حالت فروافت سریع آب و ایمن‌ترین حالت افزایش سریع سطح آب دریاچه سد پیش‌بینی می‌شود. با استفاده از کد ارائه شده در این تحقیق، یک مثال موردی (شیروانی مشرف به ورودی تونل-های انتقال آب سد مشمپا) تحلیل شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این تحلیل‌ها، شیروانی مورد مطالعه در زمان حفاری، آب‌گیری سریع، آب‌گیری تدریجی و یا تخلیه تدریجی پایدار است، ولی در شرایط تخلیه سریع آب احتمال ناپایداری آن وجود دارد.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان تحقیق بر خود لازم می‌دانند از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند آقای مهندس فریدون بهرامی سامانی

عضو هیأت مدیره شرکت مهندسی مشاور تماوان تشکر و قدردانی نمایند.

۸- ضمایم

جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده

۱	H	ارتفاع شیروانی	۲۲	$H_{d,n}$	فاصله‌ی راس d از سطح آزاد آب (شکل ۱)
۲	H_w	ارتفاع آب در دریاچه سد (شکل ۱)	۲۳	$H'_{a,n}$	فاصله‌ی راس a از سطح آزاد آب درون توده سنگ (شکل ۱)
۳	H'_w	ارتفاع آب درون شیروانی در حالات مختلف آب‌گیری (شکل ۱)	۲۴	$H'_{b,n}$	فاصله‌ی راس b از سطح آزاد آب درون توده سنگ (شکل ۱)
۴	n'	شماره بلوکی که روی آن سطح آب دریاچه با شیروانی در تماس است (رابطه ۱)	۲۵	\emptyset_d	زاویه اصطکاک بین ستون سنگ‌ها
۵	δ	زاویه ناپیوستگی‌های توده‌سنگ نسبت به افق (شکل ۲)	۲۶	\emptyset_b	زاویه اصطکاک درزه‌ها در پایه ستون سنگ‌ها
۶	θ	زاویه سطح شیروانی سنگی نسبت به افق (شکل ۱)	۲۷	c_b	مقاومت چسبندگی سطح درزه‌های پایه ستون سنگ‌ها
۷	A	زاویه سطح کلی شکست واژگونی بلوکی نسبت به افق (شکل ۱)	۲۸	c_d	مقاومت چسبندگی سطح درزه‌ها در بین ستون سنگ‌ها
۸	β	زاویه سطح بالایی شیروانی سنگی نسبت به افق (شکل ۱)	۲۹	P_n, P_{n-1}	نیروهای نرمال وارد به ستون سنگ n از طرف ستون سنگ-های مجاور آن (شکل ۶)
۹	γ	وزن مخصوص حالت خشک مصالح سنگی	۳۰	Q_n, Q_{n-1}	نیروهای برشی وارد به ستون سنگ n از طرف ستون سنگ-های مجاور آن (شکل ۶)
۱۰	γ_{sat}	وزن مخصوص حالت اشباع مصالح سنگی	۳۱	J_n, K_n	فاصله نقطه اثر نیروهای P_n, P_{n-1} از تکیه‌گاه (شکل ۶)
۱۱	W_n	وزن ستون سنگ n (شکل ۶)	۳۲	S_n	نیروی موازی سطح لغزش در پایه ستون سنگ n (شکل ۶)
۱۲	T	ضخامت ستون سنگ‌ها	۳۳	N_n	نیروی نرمال موجود در پایه ستون سنگ n (شکل ۶)
۱۳	l_n	طول بلوک n	۳۴	e	فاصله بین نقطه اثر نیروی N_n تا پایه ستون سنگ (شکل ۶)
۱۴	γ_w	وزن مخصوص آب	۳۵	$F_{u,n}$	نیروی وارد به بلوک n از طرف آب در وجه بالایی بلوک (شکل ۶)
۱۵	t'_n	طول زیر آب بلوک n در وجه بالایی بلوک (شکل ۲)	۳۶	$F_{d,n}$	نیروی وارد به بلوک n از طرف آب در وجه پایینی بلوک (شکل ۶)
۱۶	t''_n	طول زیر آب بلوک n در وجه پایینی بلوک (شکل ۲)	۳۷	$F_{l,n}$	نیروی وارد به بلوک n از طرف آب در وجه سمت چپ بلوک (شکل ۷)
۱۷	I'_n	طول زیر آب بلوک n در وجه سمت چپ بلوک (شکل ۲)	۳۸	$F_{r,n}$	نیروی وارد به بلوک n از طرف آب در وجه سمت راست بلوک (شکل ۶)
۱۸	I''_n	طول زیر آب بلوک n در وجه سمت راست بلوک (شکل ۲)	۳۹	$m_{u,n}$	طول بازوی گشتاور نیروی $F_{u,n}$ حول نقطه O (شکل ۶)
۱۹	$H_{a,n}$	فاصله راس a از سطح آزاد آب (شکل ۱)	۴۰	$m_{d,n}$	طول بازوی گشتاور نیروی $F_{d,n}$ حول نقطه O (شکل ۶)
۲۰	$H_{b,n}$	فاصله راس b از سطح آزاد آب (شکل ۱)	۴۱	$m_{l,n}$	طول بازوی گشتاور نیروی $F_{l,n}$ حول نقطه O (شکل ۶)
۲۱	$H_{c,n}$	فاصله راس c از سطح آزاد آب (شکل ۱)	۴۲	$m_{r,n}$	طول بازوی گشتاور نیروی $F_{r,n}$ حول نقطه O (شکل ۶)

مراجع

- [13] Bobet, A. (1999) *Analytical solutions for toppling failure (Technical Note)*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36, 971–80.
- [14] Sageseta, C., Sanchez, J. M. and Caizal, J. (2001) *A general solution for the required anchor force in rock slopes with toppling failure*. Int. J. Rock Mech. Min.Sci., 38, 421–35.
- [15] Adhikary, D. P., Dyskin, A. V., Jewell, R. J. and Stewart, D. P., 1997. *A Study of the Mechanism of Flexural Toppling Failure of Rock Slopes*, Rock Mech. Rock Engng. (1997) 30 (2), 75-93.
- [16] Adhikary, D. P., Guo H., 2002. *An orthotropic Cosserat elasto-plastic model for layered rocks*, Rock Mech. Rock Engng. 35 (3), 161–170
- [17] Adhikary, D. P., Dyskin and A. V., 2007. *Modeling of progressive and instantaneous failure of foliated rock slopes*, Rock Mech. Rock Engng, 40 (4), 349–362.
- [18] Amini M., Majdi A., Aydan Ö., 2008. *Stability Analysis and the Stabilization of Flexural Toppling Failure*, Rock Mech. Rock Engng., DOI 10.1007/s00603-008-0020-2.
- [19] Amini M., 2009, *Dynamic and static slope stability analysis and stabilization of flexural toppling failure (Theoretically, experimentally and case histories)*, Ph.D. thesis, University of Tehran, Tehran, Iran.
- [20] Aydan Ö., Amini M., (2009), *An experimental study on rock slopes against flexural toppling failure under dynamic loading and some theoretical considerations for its stability assessments*, journal of the school of marine science and technology, Tokai university, Vol. 7, No. 2, pp. 25-40.
- [21] Brideau M., Stead D., 2009, *Controls on block toppling using a three dimensional distinct element approach*, Rock Mech. Rock Engng, DOI 10.1007/s00603-009-0052-2
- [1] Müller, L., 1968. *New considerations on the Vaiont slide*. Rock Mech. Eng. Geol. 6, 1-91.
- [2] Ashby J., 1971. *Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes*, M Sc thesis, Imperial College, University of London.
- [3] Cundall, P.(1971) *A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems*. Proc. Int. Symp. on Rock Fracture. Nancy, France, Paper 11–8.
- [4] Hoffmann, H., 1974. *Zum Verformungs und Bruchverhalten regelmäßig geklüfteter Felsböschungen*. Rock Mech. Suppl. 3, 31-34.
- [5] De Freitas, M. H. and Watters, R. J., 1973. *Some field examples of toppling failure*, Geotechnique 23 (4), 495-514.
- [6] Pritchard, M. A., and Savigny, K. W., 1990. *Numerical modelling of toppling*. Can. Geotech. J, Vol. 27, pp. 824.
- [7] Goodman, R. E., and Bray, J. W., 1976. *Toppling of rock slopes*, ASCE Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder Colorado, Vol. 2, pp. 201-234.
- [8] Zambak, C., (1984), *Design charts for rock slopes susceptible to toppling*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 8, 1039-1062.
- [9] Choquet P. and Tanon D. D.B., (1985), *Nomograms for the assessment of toppling failure in rock slopes*, 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, 19-30
- [10] Hoek, E. and Bray, J. (1977) *Rock Slope Engineering*, 1st edn, IMM, London.
- [11] Wyllie, D. C., 1980. *Toppling rock slope failures examples of analysis and stabilization*. Rock Mech. 13 (2), 89-98.
- [12] Aydan, Ö. and Kawamoto, T., 1992: *Stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization*, Rock Mech. Rock Engng. 25 (3), 143-165.