

تحلیل پایداری تکیه گاههای سد کارون ۴ با استفاده از نظریه بلوکی

نویسنده: دکتر حسین معماریان* و نوشین فلک ناز**

Stability analysis of Karoon IV Dam Abutments by block theory

By: Dr. H. Memarian*, and N. Falaknaz**

چکیده:

تحلیل پایداری توده سنگهای دارای سطوح گسستگی از دیر باز مورد توجه طراحان سازه های مهندسی بوده و در این رابطه روشهای چندی نیز ارائه شده است. یکی از روشهای جدید، که تا این تاریخ بیشتر برای تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی به کار گرفته شده، نظریه بلوکی است. در این مقاله، از این نظریه برای تحلیل پایداری دامنه های سنگی تکیه گاههای سد کارون ۴، واقع در مسیر جاده شهر کرد به ایذه استفاده شده است. به این منظور با استفاده از گسستگیهای ساختاری توده سنگ، ابتدا بلوکهای کلیدی شناسائی شدند و سپس برآیند تنش های اعمال شده از طرف بدنه سد، نیروی آب، وزن بلوکها و نیروی زلزله، با استفاده از روشهایی چون تصاویر استریوگرافیک و تعادل حدی، به دست آمد. با به کارگیری این داده ها در نظریه بلوکی، مدهای شکست و بزرگی نیروی لازم برای ایجاد گسستگی، به صورت تابعی از زاویه اصطکاک موجود در سطح گسستگی ها تعیین و در نهایت ضریب ایمنی محاسبه گردید. از بررسی های انجام شده مشاهده گردید که کلیه بلوکهای شناسائی شده در هر دو تکیه گاه سد کارون ۴، با مفروضات در نظر گرفته شده، پایدار می باشند. نتایج این بررسی با روش تحلیل تعادل حدی Hock & Bray و نیز مقایسه و دیده شد که ضریب ایمنی به دست آمده از نظریه بلوکی پائین تر از مفادیر به دست آمده از روش تحلیل تعادل حدی می باشد و لذا حساسیت این روش به تغییر فاکتورهای مؤثر بر پایداری بلوکها، بیشتر است. به همین دلیل و نیز از آن جهت که این روش می تواند برای بلوکهای با هر تعداد وجه نیز به کار رود، می توان از آن به عنوان جایگزین مناسب روشهای تحلیل تعادل حدی در تحلیل پایداری دامنه ها، به ویژه در معادن روباز و تکیه گاه سدها استفاده نمود.

واژه های کلیدی: نظریه بلوکی، تحلیل پایداری، سد کارون ۴، تحلیل مدی، تعادل حدی.

Abstract

Stability analysis of discontinuous rock masses has long been a field of interest for rock engineers. Among few methods, which have been introduced so far, the recent geometrical method called block theory, has found to be suitable, specially for the stability analysis of tunnels and underground spaces. In this study, block theory has been used for the stability analysis of abutments of Karoon IV Dam in southern Iran. In this respect, first the key blocks have been defined, using the mapped discontinuities. Then the resultant stresses, exerted by the dam, water, block weights and earthquake, have been calculated, using stereographic projection and limiting equilibrium methods. Hiring these data in block theory, the failure modes and the magnitude of forces required for failure, have been defined as a function of discontinuities' friction. Finally, safety factors have been estimated for each block. Present study showed that, all the selected blocks in the abutments of Karoon IV are safe, with regard to

the supposed assumptions. Checking the mentioned results with the limiting equilibrium method of Hoek and Bray showed that the block theory gives a lower value of safety factor, almost universally. As the sensitivity of block theory to the changes in the factors responsible for the instability of blocks is higher, and as it can be used for the blocks with any number of faces, the block theory could be applied instead of limiting equilibrium methods, in the stability analysis of dam abutments and open pit mines.

Key Words: Block theory, Karoon IV Dam, stability analysis, modal analysis, limiting equilibrium.

۱- مقدمه

بررسی قرار گرفت و ضرایب اطمینان محاسبه گردید. در پایان، برای اطمینان از صحت بررسی‌های انجام شده، از روش تعادل حدی هوک و بری، سود جسته شد.

۲- سد کارون ۴

سد کارون ۴ یکی از طرح‌های مهم برق آبی کشور است که بر روی رودخانه کارون در حال احداث می‌باشد. این سد در نزدیکی مرز استان چهارمحال و بختیاری و خوزستان و در فاصله ۱۸۵ کیلومتری جنوب غربی شهر کرد و ۸۵ کیلومتری شهر ایذه جای دارد.

محدوده طرح کارون ۴ در منطقه کوه‌های بختیاری، از رشته کوه‌های زاگرس، واقع شده است. روند عمومی کوه‌ها در این منطقه شمال غربی- جنوب شرقی است. در این منطقه، از یک طرف رشته کوه‌های زاگرس شرایط مناسبی را برای ریزش‌های جوی به وجود آورده است و از طرف دیگر وجود دره‌های ژرف در مسیر جریان رودها، امکانات بالقوه‌ای را از نظر سد سازی و تولید انرژی پدید آورده است (شکل ۱).

طرح کارون ۴ شامل سد مخزنی و نیروگاه می‌باشد. سد از نوع بتنی دو قوسی به ارتفاع ۲۳۰ متر، با طول تاج ۳۳۷ متر، است. تراز پی و تاج سد از سطح دریا به ترتیب ۸۰۲ و ۱۰۳۲ متر می‌باشد. به منظور تولید برق، نیروگاه سطحی در جناح چپ پایاب سد و در ساحل رودخانه منج با توان قابل بهره برداری ۱۰۰۰ مگاوات پیش بینی شده است. سیستم انحراف آب از دو رشته تونل در ساحل راست، با مقاطع دایره‌ای و نعل اسبی شکل با قطرهای ۹/۵ و ۱۱ متر تشکیل شده است.

حفاری‌هایی که در توده‌های سنگی دارای چندین دسته ناپیوستگی صورت می‌گیرد، می‌تواند سبب رها شدن بلوک‌های سنگ با اندازه‌های مختلف گردد. جابجایی بلوک‌هایی که بحرانی‌ترین وضعیت را دارند، باعث سست شدن بلوک‌های مجاور می‌گردد و سقوط و لغزش این بلوک‌ها می‌تواند برای فعالیتهای مهندسی تهدید کننده باشد. در مقابل اگر این بلوک‌ها شناسایی شده و از پایداری آنها اطمینان حاصل گردد، کل حفاری ایمن خواهد بود. اساس نظریه بلوکی نیز بر همین اصل استوار است.

این نظریه نخستین بار توسط Goodman & Shi, (1984) مطرح گردید. تا کنون از این نظریه بیشتر برای تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی و تونل‌ها استفاده شده است و تنها تعداد معدودی گزارش از کاربرد این روش برای تحلیل پایداری تکیه گاه‌های سد‌ها منتشر گردیده است (Hatzor and Goodman 1997). با استفاده از این نظریه تشخیص بلوک‌های بالقوه خطرناک، نوع شکست و تعیین محل بلوک‌ها امکان پذیر می‌گردد. بلوک‌هایی که خطرناکترین وضعیت استقرار را دارند بلوک کلیدی (Key block) نامیده می‌شوند. از آنجائیکه شکل و مکان بلوک‌های کلیدی کاملاً سه بعدی است، در شناسایی و تعیین آنها از تحلیل‌های سه بعدی استفاده می‌شود. به این منظور آگاهی از وضعیت ساختارهای زمین شناسی و هم چنین خواص مکانیکی توده سنگ، از جمله زاویه اصطکاک داخلی سطوح گسستگی، ضروری است. به این ترتیب، طراحی شکل و راستای حفاری، در سنگ‌های بلوکی و تمهیدات مورد نیاز برای نگهداری، به صورت ایمن و اقتصادی امکان پذیر می‌گردد.

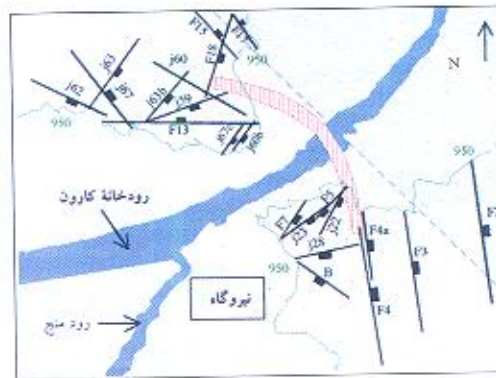
در این بررسی ابتدا داده‌های ساختاری و ژئوتکنیکی تکیه گاه‌های سد کارون ۴ شناسایی گردید و با اتکاء به آنها، بلوک‌های عمده سازنده توده سنگ شناسایی شدند. در ادامه، پایداری بلوک‌ها در شرایط مختلف مورد

۳- ویژگیهای توده سنگهای تکیه گاهها

فراهم آمده است. برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴ آزمایشهای برجا و آزمایشگاهی متعددی صورت گرفته است که خلاصه ای از نتایج آن در جدول (۲) فراهم آمده است. با توجه به نتایج بررسی های انجام شده، زاویه اصطکاک (F) و چسبندگی (C) سطوح ناپوستگی در محدوده تکیه گاههای سد به ترتیب برابر ۳۰ و صفر در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری سطح درزه (JCS) نیز برای کلیه ناپوستگی ها در سنگ آهک مقاوم به طور متوسط ۱۱MPa در نظر گرفته شده است.

تکیه گاههای سد کارون ۴ به روی سنگهای آهکی و آهک ماری متوسط تا سبیر لایه (به سبیرای ۲ تا ۲۰ متر) سازند آسماری قرار می گیرد. لایه بندی در این محدوده، به طور عمده دارای جهت شیب ۲۱۵° و شیب ۶۵° به سمت پایاب است. دهانه تونل های انحراف آب و بخش های پایینی دریاچه سد روی سازند پابده قرار گرفته است (شکل ۱).

در تکیه گاههای سد کارون ۴ گسستگی های ساختاری عبارتند از لایه بندی (B)، گسل ها (F) و درزه های عمده (J)، (شکل های ۱ و ۲). مجموعه این گسستگیها حالتی بلوکی به این تکیه گاهها داده است. در جدول (۱) مشخصات سطوح اصلی گسستگی در تکیه گاههای سد کارون ۴



شکل ۱. نقشه زمین شناسی - ساختاری ساده شدهٔ سد کارون ۴



(الف)



(ب)

شکل ۲. نمایش گسستگی های ساختاری سد کارون ۴. نمای عمود افق از نمای نزدیک (الف)

۴- شناسایی بلوکها

جدول ۱. مشخصات گسستگی های اصلی در محدوده تکیه گاههای سد کارون ۴.

عنوان	شیب	جهت شیب	طول (m)
F3	۴۵	۰۸۲	۱۰۰ <
F4	۸۰	۸۰	۱۰۰ <
F4a	۳۷	۰۸۵	۵۰ <
F5	۷۰	۱۱۵	۷۵
F6	۴۵	۱۴۰	۶۰
F6a	۳۵	۰۵۵	۱۰۰ <
F7	۴۷	۱۴۰	۱۰۰
F9	۴۰	۱۲۰	۵۰
F11	۳۳	۰۱۷	۷۰
F12	۴۰	۰۶۵	۷۰
F13	۳۷	۳۶۰	۳۴۵
F15	۴۰	۰۴۲	۱۰۰ <
F16	۰۱۷	۳۰۵	۲۵ <
F17	۳۵	۰۵۵	۹۰ <
F18	۵۰	۱۱۰	۸۵ <
J 23	۴۵	۱۴۵	۱۰۰ <
J 28	۲۸	۳۵۰	۶۰
J 59	۵۰	۱۵۰	۱۰۰
J 60	۲۰	۰۳۰	۴۵ <
J 62	۵۰	۲۱۰	۲۵ <
J 63	۴۷	۱۲۵	۱۰۰ <
J 67	۴۰	۰۵۲	۱۰۰

توده سنگهای ساختمانی سد کارون ۴، به لحاظ وجود لایه بندی، سیستم های درزه و گسل ها، دارای یک ساختار متشکل از بلوک های سنگی می باشند. از این رو، رفتار تکیه گاههای این سد تا حد زیادی متأثر از عملکرد و تأثیر متقابل این بلوک ها بر یکدیگر است. به همین دلیل، برای تحلیل پایداری تکیه گاههای آن، از نظریه بلوکی استفاده شده است. برای شناسایی بلوک های قابل حرکت، که بوسیله تقاطع گسستگی های توده سنگ و سطوح آزاد تشکیل شده اند، به راستای نسبی گسستگی ها و سطوح آزاد نیاز داریم. مشخصات این ناپیوستگی ها (میانگین شیب و جهت شیب) در جدول (۱) آمده است. با استفاده از نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰ ساختمانی سد (شکل ۱) بلوک هائی با سه، چهار یا تعداد بیشتری وجوه، که در اثر تقاطع درزه ها، گسل ها و شکستگی های اصلی بوجود آمده اند، شناسایی گردید. به عنوان مثال گسلهای F4 و F7 و درزه اصلی J28 مثلث ABC را بوجود می آورند، شکل (۶-الف). با افزودن یک سطح آزاد (دامنه)، با شیب ۳۴° به این شکل در تکیه گاه چپ، یک بلوک چهار وجهی تشکیل می شود (بلوک ۳ در جدول ۳ و شکل ۴). به این ترتیب ۲۹ بلوک در تکیه گاههای چپ و راست شناسایی گردید که مشخصات آنها در جدول ۳ آمده است.

انواع بلوکها: یک بلوک حجمی است که از تقاطع حداقل ۴ نیم فضا (صفحه) به وجود می آید. به عنوان مثال، بلوک چهار وجهی شکل (۳) از تقاطع سه نیم فضای درزه و یک نیم فضای سطح آزاد تشکیل شده است. پنج نوع بلوک متصور در ساختمانی سد کارون ۴ در شکل (۴) آمده است. بلوک نوع (V)، یک بلوک نامحدود بوده و خطری برای حفاری ندارد. نوع دیگری از بلوکهایی که حول حفاری تشکیل می شوند بلوکهای محدود می باشند. قابلیت حرکت این بلوکها نه تنها به هندسه بلوک، بلکه به زوایای اصطکاک روی وجوه و جهت نیروی برآیند نیز بستگی دارد. برخی از بلوکهای محدود، به علت شکل مخروطی خاص آنها، غیرقابل حرکت می باشند (نوع IV در شکل ۴). این بلوکها بیشتر در تونل ها قابل رویت هستند. اما نوع دیگری از بلوکهای محدود وجود دارند که مخروطی نبوده و قابل حرکت می باشند. در این رابطه می توان سه نوع بلوک قابل حرکت را تشخیص داد. بلوک نوع III راستای نسبی مناسبی نسبت به نیروی برآیند دارد، به نحوی که حتی بدون وجود اصطکاک روی وجوهش، پایدار می ماند. بلوکهایی از نوع II بالقوه ناپایدار هستند و تمایل به حرکت به داخل فضای آزاد دارند و در صورتی که زوایای اصطکاک روی وجوه

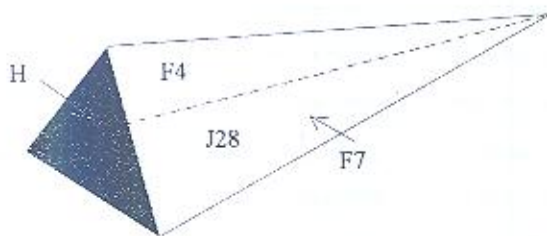
جدول ۲. پارامترهای رفتاری و مقاومتی توده سنگهای سد کارون ۴.

پارامتر	سنگ آهک متخلخل		سنگ آهک مقاوم	سنگ آهک
	ضعیف	مقاوم		
چگالی (gr/cm^3)	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۶
مدول تغییر شکل (GPa)	۲/۵	۲/۵	۶/۵	۹
نسبت بواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲
ظرفیت باریبری مجاز (MPa)	۲/۵	۳/۵	۶	۱۳
زاویه اصطکاک (درجه)	۳۰°	۳۰°	۳۸°	۴۵°
چسبندگی (KPa)	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰

دایره عظیمه و دایره کوچک می باشد با استفاده از نرم افزار اتوکد ۱۴ تهیه شد و سپس شعاع و مختصات مرکز دایره عظیمه مربوط به هر صفحه درزه با گسل با استفاده از روابط (۱) و (۲) به دست آورده شد.

در شکل (۶) رخنمون (الف) و تصویر استریوگرافی (ب) صفحات تشکیل دهنده بلوک ۳ تکیه گاه چپ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد، از تقاطع دایره عظیمه معرف صفحات درزه مناطق با چند ضلعی هائی، با اضلاع دارای اتحاء حاصل می شود، که هرم در (JP) نامیده می شوند. هر یک از این مناطق با یک عدد، که ارقام آن برابر تعداد وجوه هرم درزه است (در اینجا سه رقم)، شامل ارقام 0 و 1 نمایش داده می شود که در آن رقم 0 نیم فضای بالائی صفحه یا U_i و رقم 1 نیم فضای پائینی صفحه یا L_i را نشان می دهند (شکل ۵). ترتیب این ارقام مطابق ترتیب شماره گذاری دسته درزه ها می باشد. به عنوان مثال عدد 100 نشان دهنده هرم درزه ای می باشد که همزمان در زیر صفحه ۱ (زیر گسل F_4) و بالای صفحات ۲ و ۳ (بالای گسل F_7) و درزه J_{28}) قرار دارد (شکل ۶-ب). در اینجا برای تعیین کد هرم های درزه، شماره گسل ها و درزه ها و لایه بندی مطابق با جدول (۱)، در نظر گرفته شده اند. به این ترتیب کلیه صفحات ناپیوستگی تشکیل دهنده بلوک ها در هر دو تکیه گاه، از طریق تصویر استریوگرافی ترسیم گردید. کد هرم درزه کلیه بلوک های موجود در تکیه گاههای چپ و راست کارون ۴ در جدول (۳) آمده است. به طور مشابه، اگر تصویر استریوگرافی سطوح آزاد را رسم نمایم حجم حاصل از تقاطع این صفحات هرم حفاری (EP) نامیده می شود. هرم فضا (SP) متمم هرم حفاری می باشد.

در جدول (۴) مشخصات سطوح آزاد تکیه گاههای سد کارون ۴ فراهم آمده است. دیواره دره در محل سد به صورت قائم یا شیبدار بوده و یا از سطح لایه بندی تبعیت می کند (جدول ۴). تصویر استریوگرافی صفحه قائم، با خط راستی که از مرکز دایره مرجع می گذرد مشخص می گردد (شکل ۷). توده سنگ تکیه گاهها در این شکل هاشورخورده است.



شکل ۳. بلوک ۳ تکیه گاه چپ متشکل از سه صفحه درزه و یک سطح آزاد.

نغزشی، خیلی ناچیز باشد، حرکت خواهند کرد. این بلوکها را بلوکهای کلیدی بالقوه می نامند. اما یک بلوک کلیدی واقعی (نوع I) بلوکی است که نه تنها قابل حرکت باشد بلکه به صورت غیر ایمن نسبت به حفاری جهت یابی شده باشد. چنین بلوکهایی، بدون سیستم نگهداری، پایدار نیستند (شکل ۴).

تصویر استریوگرافی: تصویر استریوگرافی^۴ به عنوان مکمل روشهای برداری در نظریه بلوکی مورد استفاده قرار می گیرد. این روش، یک روش گرافیکی است که در مکانیک سنگ و زمین شناسی ساختاری کاربرد دارد. در این روش تصویر هر صفحه ای که از مرکز کره مرجع می گذرد یک دایره عظیمه است. با داشتن شیب و جهت شیب هر صفحه (α) می توان شعاع (r) و مرکز دایره عظیمه (OC) مربوط به آن را محاسبه کرد و در نهایت آن را رسم نمود:

چنین صفحه ای فضا را به دو قسمت تقسیم می کند. در

$$OC = R \cdot \tan \alpha$$

$$r = \frac{R}{\cos \alpha}$$

علوم زمین معمولاً از نیم کره پائینی و نقطه کاتونی بالائی برای رسم تصاویر استریوگرافیک استفاده می شود. در این حالت نیم فضای پائینی در داخل دایره عظیمه و نیم فضای بالائی در خارج از آن قرار می گیرد. حال اگر این صفحه از طریق نقطه کاتونی پائینی (Lower focal point) تصویر شده باشد، نیم فضای بالائی (U_i) آن داخل دایره عظیمه و نیم فضای پائینی (L_i) آن خارج دایره عظیمه آن صفحه قرار خواهد گرفت (شکل ۵). باید توجه داشت که در اینجا بر خلاف سنت رایج در زمین شناسی، ادامه کمان معرف تصویر استریوگرافیک در خارج از کره مرجع را نیز رسم می کنیم. به این ترتیب است که می توان بلوکی را که از اجتماع صفحات گستگی و سطوح آزاد تشکیل شده است، روی شبکه استریوگرافی نمایش داد.

۵- هرم های درزه و قابلیت حرکت

تشخیص بلوکهای محدود از نامحدود با استفاده از تئوری قابلیت حرکت، امکان پذیر می شود. به این منظور باید کلیه صفحات تشکیل دهنده هر یک از بلوک ها (گسل ها، درزه ها و لایه بندی) را روی شبکه استریوگرافی تصویر نمایم. برای انجام این کار ابتدا شبکه ولف، که ترکیبی از



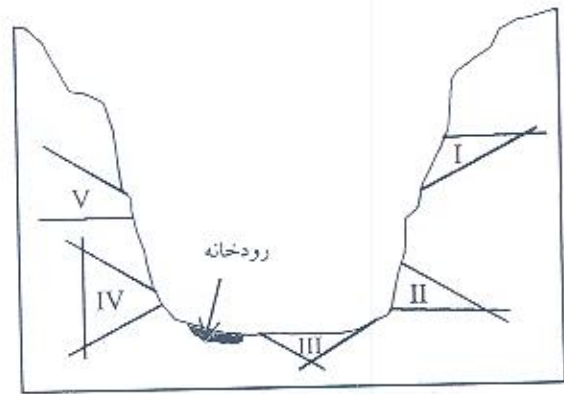
هرم درزه مربوط به صفحه لایه بندی تقاطع دارد و بنابراین نسبت به صفحه لایه بندی غیر قابل حرکت می باشد (شکل ۹-ب). این در حالی است که هرم درزه 100 با هرم حفاری سطح شیبدار 34° نیز تقاطع داشته و بنابراین بلوک ۳ نسبت به این صفحه نیز غیر قابل حرکت است (شکل ۹-ج).

قابلیت حرکت کلیه بلوک ها را می توان نسبت به ترکیب این سطوح آزاد نیز مورد بررسی قرار داد. براساس نظر ارائه شده توسط Shi (1984)، اگر سطح ترکیبی محدب باشد، هرم حفاری سطح ترکیبی اشتراک هرم های حفاری و هرم فضا نیز اجتماع هرم های فضای تنگ نک سطوح آزاد خواهد بود [۱]. با توجه به شیب و جهت شیب صفحات آزاد ساختگاه سد کارون ۴ ملاحظه می گردد که سطوح آزاد ترکیبی، محدب می باشند. به عنوان مثال قابلیت حرکت بلوک ۳ را نسبت به سطح ترکیبی حاصل از صفحه لایه بندی و سطح شیبدار 34° مورد بررسی قرار می دهیم (شکل ۱۰-الف). همانطور که ملاحظه می گردد هرم درزه 100 کاملاً داخل هرم فضای ناشی از این دو صفحه قرار می گیرد و بنابراین نسبت به ترکیب این دو صفحه قابل حرکت می باشد، اما نسبت به ترکیب سطح آزاد 34° و صفحه قائم غیر قابل حرکت می باشد (شکل ۱۰-ب).

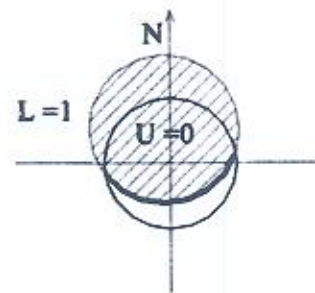
به این ترتیب، با کاربرد تئوری قابلیت حرکت، برای کلیه بلوک های تکیه گاههای چپ و راست، دیده شد که در تکیه گاه چپ ۵ بلوک قابل حرکت و در تکیه گاه راست ۷ بلوک قابل حرکت وجود دارد جدول (۵). سایر بلوک های موجود مخروطی یا نامحدود بوده و خطری برای پایداری تکیه گاهها ندارند.

۶- شناسایی انواع بلوکهای قابل حرکت (تحلیل مدی)

تما می بلوکهای بررسی شده، از تقاطع صفحات ناپیوستگی (هرم درزه) و سطوح آزاد (هرم حفاری) به وجود آمده اند. صرف نظر از اینکه هر بلوک چند وجه دارد، به سه طریق: الف) سقوط، ب) لغزش روی یک وجه، ج) لغزش روی دو وجه و در امتداد خط تقاطع آنها، می تواند جابجا شود. در نظریه بلوکی دو نوع تحلیل مدی (حالت) برای شناسایی انواع لغزش هر سیستم درزه وجود دارد. اولین نوع تحلیل مدی امکان تشخیص بلوکهای پایدار را از بلوکهای کلیدی بالقوه و بلوکهای کلیدی واقعی امکان پذیر می سازد و این در حالی است که جهت نیروی برآیند ثابت در نظر گرفته می شود. به این ترتیب، پس از آنکه بلوک های قابل حرکت شناسایی گردیدند، تحلیل مدی برای تعیین نوع شکست این بلوک ها صورت گرفت و نیروی برآیند مؤثر به روی بلوک ها محاسبه گردید. به این منظور، از روی نقشه ۱:۱۰۰۰ ساختگاه سد، نیمرخ های افقی به فواصل ۲۰ متر تهیه



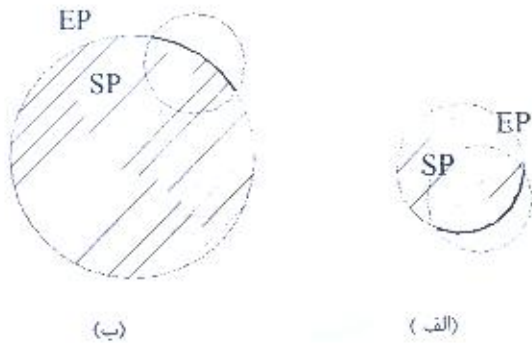
شکل ۴. نمایش شماتیک انواع بلوکهای قابل تشکیل در دیواره های یک دره با عملکرد ۴ دسته درزه اصلی.



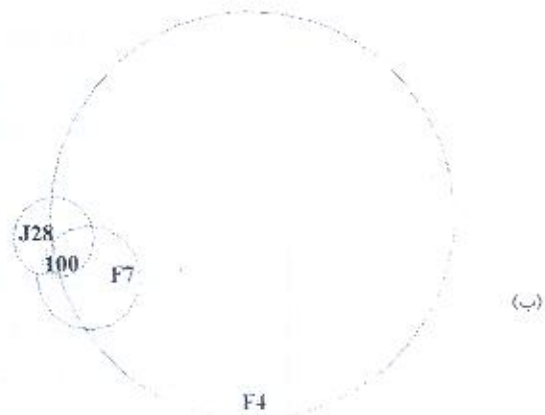
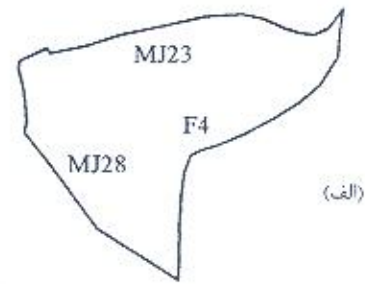
شکل ۵. نمایش درزه ۲۸ با شیب 28° و جهت شیب 350° در تکیه گاه چپ سد کارون ۴ در شبکه استریو گرافی.

تصویر استریو گرافی صفحه لایه بندی و سطح شیبدار (دامنه) نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. از آنجائیکه توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴ در نیم فضای پائینی هر یک از این سطوح آزاد قرار دارد، بنابراین خارج دایره عظیمه معرف هرم حفاری (EP) و داخل آنها (نواحی هاشور خورده) نماینده هرم فضا (SP) می باشد.

به طور کلی یک بلوک قابل حرکت است اگر هرم درزه آن با هرم حفاری تقاطعی نداشته باشد (Goodman 1989) حال اگر دیوار قائم تکیه گاه چپ را به عنوان سطح آزاد بلوک ۳ در نظر بگیریم (خط AB معرف هرم حفاری است) هرم درزه 100 تنها هرمی است که با توجه به شرایط حکمفرما در محل تشکیل می شود. از تطبیق دادن شکل (۶-ب) و (۷) ملاحظه می گردد که هرم درزه 100 با هرم حفاری تقاطعی دارد و در برخورد با سطح آزاد (هرم حفاری) یک بلوک نوع IV را می سازد. قابلیت حرکت بلوک ۳ تکیه گاه چپ نسبت به صفحه لایه بندی و سطح شیبدار مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود هرم درزه 100 با



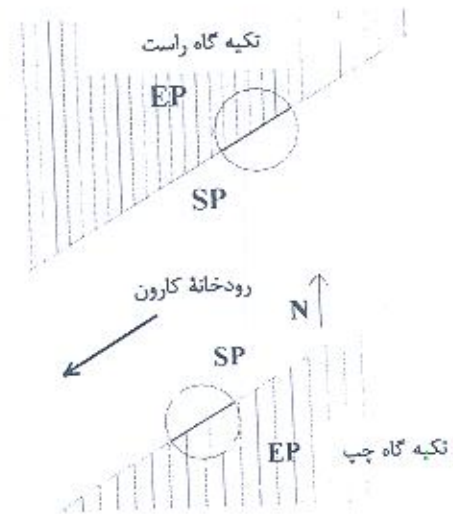
شکل ۸. تصویر استریوگرافی (الف) سطح شیبدار. (ب) لایه بندی.



شکل ۶. رختمون بلوک ۳ تکیه گاه چپ سد کارون ۴ (الف)، نمایش بلوک ۳ تکیه گاه چپ در شبکه استریوگرافی (ب).

جدول ۳. کد هرم های درزه تکیه گاههای چپ و راست سد کارون ۴.

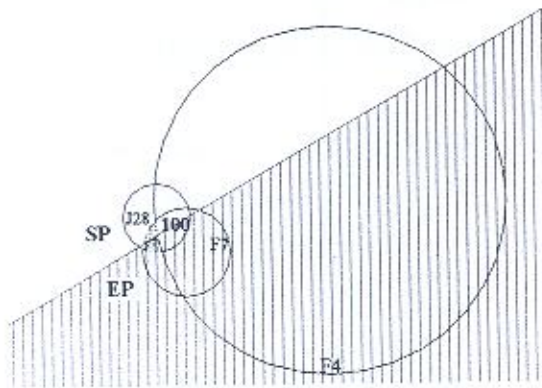
کد هرم درزه	صفحات تشکیل دهنده بلوک	شماره بلوک
100	J 23, J 19, F4	L1
100	J 28, J 23, F4	L2
100	J 28, F7, F4	L3
101	J 22, F7, F4a.	L4
110	J23, J 22, F4a	L5
100	J 28, F7, F3	L6
1000	J 19, F9, F6, F4	L7
10001	Bedding, F9, F6, F6a, F4	L8
10000	J 28, J 22, F5, F4a, F3	L9
110001	J23, F9, F6, F6a, F5, F4	L10
10000	J 28, F9, F6, F6a, F4	L11
1000	J 28, MJ 23, F5, F3	L12
1000	J 22, F5, F4a, F3	L13
100	J 23, F5, F3	L14
010	MJ 63, MJ60, F13	R15
000	MJ 63, MJ 59, F13	R16
011	MJ 59, F15, F13	R17
000	MJ 60, MJ 59, F13	R18
001	MJ 62, MJ 59, F13	R19
010	MJ 60, F15, F13	R20
001	F13, F12, F11	R21
010	MJ 67c, F13, F11	R22
010	MJ 60b, F13, F11	R23
000	MJ 67, F13, F11	R24
0100	MJ 67, MJ 63, MJ 60, F13	R25
0100	MJ 63, MJ 59, F15, F13	R26
0110	MJ 60, F16, F15, F13	R27
0100	MJ 63, F18, F17, F13	R28
0101	MJ 62, F18, F17, F13	R29



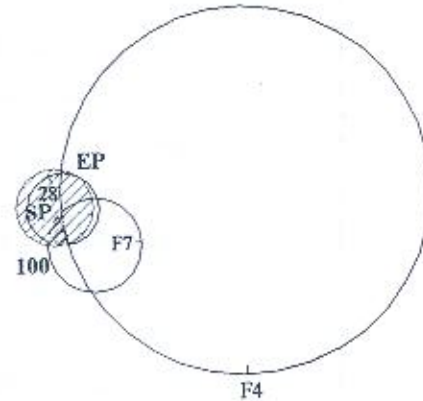
شکل ۹. تصویر استریوگرافی صفحه قائم در تکیه گاههای چپ و راست سد کارون ۴.

جدول ۴. مشخصات سطوح آزاد تکیه گاههای سد کارون ۴.

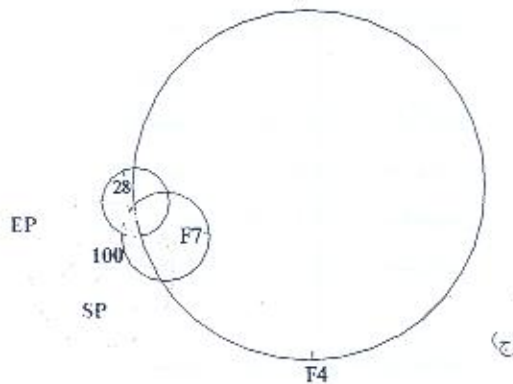
تکیه گاه راست		تکیه گاه چپ		مشخصات سطوح آزاد
شیب (α)	جهت شیب (β)	شیب (α)	جهت شیب (β)	
۹۰	۰۳۰	۹۰	۰۳۰	صفحه قائم
۶۵	۲۱۵	۶۵	۲۱۵	لایه بندی
۳۶	۳۳۰	۳۴	۳۳۰	سطح شیبدار



(ب)

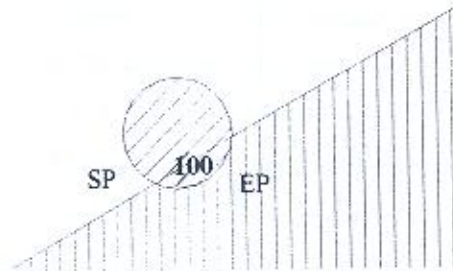


(الف)



(ج)

شکل ۹. بررسی قابلیت حرکت بلوک ۳ تکیه گاه چپ نسبت به صفحه قائم (الف)، سطح شیبدار ۳۴ (ب) و صفحه لایه بندی (ج).



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. بررسی قابلیت حرکت بلوک ۳ تکیه گاه چپ.

(الف) نسبت به ترکیب صفحه لایه بندی و سطح شیبدار ۳۴، (ب) نسبت به سطح شیبدار ۳۴ و صفحه قائم.

شد. به عنوان مثال شکل (۱) نقشه سطوح گستگی در تراز ۹۵۰ متر است. سپس برآیند نیروهای مؤثر به روی بلوکها شامل وزن، فشار برکنش آب وارد بر سطوح بلوک، بار زلزله و نیروهای رانشی بدنه سد، تحت اثر فشار آب در تراز نرمال، محاسبه شد.

- **وزن بلوک ها:** برای تعیین وزن بلوکها با استفاده از نیمیخ های افقی مساحت و حجم بلوک ها در هر مقطع محاسبه گردید و در نهایت با توجه به آنکه چگالی توده سنگ ساختگاه سد کارون ۴ حدود $2/5 \text{ ton/m}^3$ می باشد، وزن هر یک از بلوک ها به دست آمد. در جدول (۶) محاسبات نیروی وزن برای بلوک ۳ تکیه گاه چپ آورده شده است.
- **نیروی آب:** برای محاسبه نیروی آب وارد بر هر صفحه ناپیوستگی ابتدا مساحتی از آن صفحه ناپیوستگی که در تشکیل بلوک شرکت داشته است و سپس فشار آب وارد بر هر صفحه و در نهایت نیروی آب محاسبه شد.
- **بار زلزله:** برای محاسبه بار زلزله دو مقدار شتاب افقی طراحی (DBI) و شتاب طراحی بیشینه (MDI) برای کنترل پایداری تکیه گاهها در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه امکان وقوع زلزله در جهات مختلف وجود دارد، نیروی زلزله محاسبه شده در بحرانی ترین راستا، یعنی راستای لغزش بلوک، اعمال گشته است.
- **نیروهای رانشی بدنه سد:** تنش های بدنه سد، در بارگذاری عادی، که با استفاده از برنامه اجزا محدود محاسبه شده بود، در محاسبات نیروهای رانشی بدنه سد مورد استفاده قرار گرفت. همچنین لازم است سطح مقطعی از سد که در تماس با بلوک مورد نظر است محاسبه گردد.

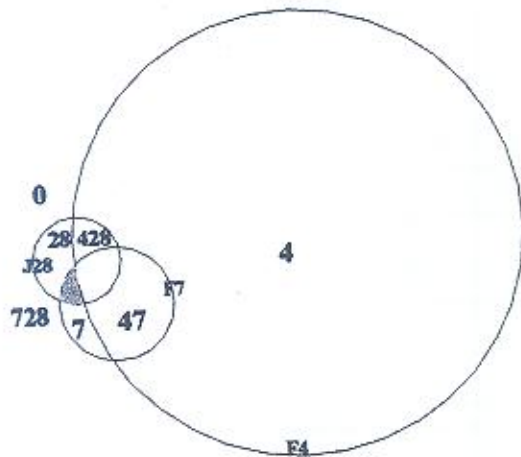
لازم به ذکر است که برآیند نیروهای فوق، در بارگذاری عادی (Usual load) غیر عادی (Unusual load) و فوق العاده (Extra load) با استفاده از روش گرانیکی (Priest, 1985) محاسبه گردید. نتایج مربوط به محاسبات فوق، برای بلوک ۳ تکیه گاه چپ، در جدول (۶) آمده است. شکل (۱۱) تحلیل مدی بلوک ۳ تکیه گاه چپ را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود اگر نیروی برآیند داخل هرم درزه قرار گیرد، هرم درزه مد سقوط را خواهد داشت و علامت 0 به آن تعلق می گیرد. این در حالی است که رقم ۱ معرف لغزش روی صفحه ۱ و رقم ۲ به معنای لغزش روی صفحات ۱ و ۲ می باشد. در شکل ۱۱ در سه مورد لغزش روی یک صفحه (صفحات ۴، ۷ و ۲۸) و در سه مورد لغزش روی دو صفحه به طور همزمان (صفحات ۲۸، ۷، ۴) و تنها در یک مورد نوع سقوط را

داشته ایم. همانطور که ملاحظه می گردد بلوک مورد نظر ما (هرم درزه 100) در فصل مشترک دو صفحه ۷ و ۲۸ لغزش می کند.

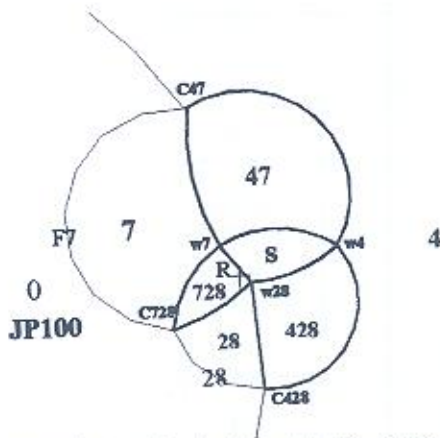
نوع دیگر تحلیل مدی، که در این بررسی انجام شد، تشخیص نواحی مدی لغزشی برای هر یک از هرم های درزه، با فرض متغیر بودن جهت نیروی برآیند، می باشد. در تکیه گاه سدها، بزرگی و جهت نیروی آب مؤثر به روی وجوه بلوک، با نوسان سطح مخزن، تغییر خواهد کرد. از آنجائی که در تحلیل پایداری براساس نیروی ثقل (به عنوان نیروی اصلی) اغلب نیم کره پائینی مورد نظراست، بنابراین باید تصویر استریو گرافی کلیه صفحات گستگی مجدداً با استفاده از نقطه کانونی بالائی (نیم کره پائینی) تصویر شوند. حال توجه خود را به هرم درزه 100 معطوف می کنیم، اگر جهت نیروی برآیند مؤثر (R_p) تغییر کند، نوع لغزش هرم درزه نیز تغییر می کند. بنابراین کل صفحه تصویر را به نواحی تعادل، یعنی نواحی که نیروی (R_p) می تواند داخل آن بدون تغییر نوع شکست حرکت کند، تقسیم نمودیم.

برای رسم نواحی تعادل، مؤلفه های بردارهای نرمال رویه بالای صفحات گستگی (W_i) و بردارهای لبه (فصل مشترک صفحات ناپیوستگی) به دست آورده شد. سپس دایره عظیمه متصل کننده بردارهای نرمال و بردارهای لبه رسم گردید و به دنبال آن مد لغزش تعیین شد. مد سقوط مربوط به ناحیه ای داخل هرم درزه (JP) می باشد و رقم 0 به آن تعلق می گیرد. مد لغزش ۱، معرف لغزش روی یک صفحه، مثلثی کروی است که گوشه های آن C_{ij} ، W_i و C_{ik} می باشد. همچنین مد لغزش ۲، معرف لغزش روی دو وجه ۱ و ۲ به طور همزمان، بوسیله مثلث کروی که گوشه های آن W_i ، C_{ij} و W_j می باشد، مشخص می گردد. وقتی کل صفحه تصویر به این طریق تقسیم شد یک ناحیه بسته دیگر خواهیم داشت که فاقد هرگونه لغزش می باشد و نشانه "S" به معنای ایمن، به آن تعلق می گیرد. اگر نیروی برآیند در این ناحیه قرار گیرد، حتی اگر زاویه اصطکاک وجوه صفر باشد، بلوک پایدار خواهد بود. گوشه های ناحیه ایمن، نرمال های صفحات گستگی یعنی W_i ، W_j و W_k می باشند.

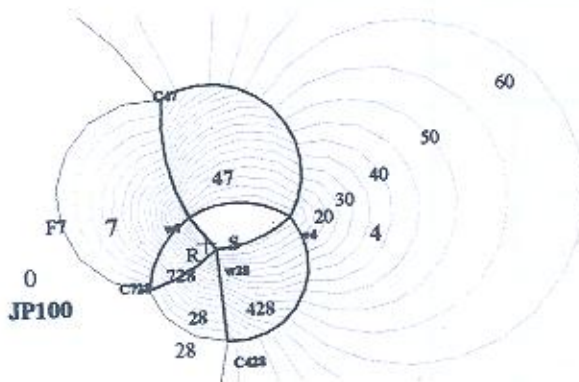
نواحی تعادل بلوکهای ۳ تکیه گاه چپ در شکل (۱۲) آورده شده است. به عنوان مثال مد لغزش ۷ مربوط به ناحیه ای است که گوشه های آن C_{47} ، W_7 و C_{728} می باشد و مد لغزش ۲۸ ناحیه ای است که گوشه های آن W_{28} ، C_{728} و W_7 می باشد. گوشه های ناحیه ایمن نیز در این شکل به ترتیب W_4 ، W_7 و W_{28} هستند. سایر نواحی را نیز می توان به همین ترتیب مشاهده کرد. اگر نیروی برآیند در بارگذاری غیر عادی (R_p) را روی این شکل تصویر نماییم، این نیرو داخل ناحیه ۲۸ قرار خواهد گرفت و بنابراین بلوک پایدار شده و روی صفحات ۷ و ۲۸ و در



شکل ۱۱. نمایش انواع لغزش بلوک ۳ تکیه گاه چپ با استفاده از شبکه استریوگرافی.



شکل ۱۲- نمایش نواحی تعادل برای بلوک ۳ تکیه گاه چپ تحت نیروی برآیند R_F



شکل ۱۳- نمایش کنتورهای اصطکاک برای بلوک ۳ تکیه گاه چپ.

امتداد خط تقاطع آنها لغزش خواهد کرد (شکل ۱۲). در این شکل نیروی برآیند با علامت + مشخص شده است. با انجام بررسی های مشابه برای کلیه بلوک ها، سه بلوک در تکیه گاه چپ و سه بلوک در تکیه گاه راست نسبتاً ناپایدار تشخیص داده شدند.

۶- تحلیل پایداری

پس از انجام تحلیل مدی برای هرم های درزه ای که زوایای اصطکاک درزه های آنها معلوم است، تحلیل تعادل حدی برای هر بلوک انجام شد. به این ترتیب داخل نواحی تعادل، منحنی های زاویه اصطکاک لازم برای تعادل رسم گردید. منحنی های اصطکاک برای نواحی با مد لغزش از مکان هندسی دایره عظیمه و برای نواحی با مد لغزش از مکان هندسی دایره کوچک حول عمود به صفحه می باشند. بزرگی هر منحنی حساسی از مقدار زاویه اصطکاک مورد نیاز روی صفحات لغزشی می باشد، به نحوی که نیروی لغزش خالص را صفر کند.

در شکل (۱۳) کنتورهای اصطکاک در فاصله ۰ تا ۹۰ درجه برای JP 100 بلوک ۳ تکیه گاه چپ نشان داده شده است. به این ترتیب حلقه هایی حول JP تشکیل می شود. در حقیقت کنتورهای اصطکاک، زوایای را که برای تعادل لازم می باشد، با توجه به راستای نسبی نیروی برآیند و زوایای اصطکاک هر وجه، نشان می دهند.

به عنوان مثال در شکل (۱۳)، جهت نیروی برآیند R_F (بارگذاری غیر عادی) با علامت + نشان داده شده است. با توجه به جهت نیروی برآیند، دیده می شود که برای رسیدن به تعادل، حداقل زاویه اصطکاک 7° برای هر وجه لازم است. اگر زاویه اصطکاک وجوه هرم درزه را نیز داشته باشیم می توانیم ضریب ایمنی را محاسبه نماییم. ضریب ایمنی (F_S) با استفاده از تنازات زاویه اصطکاک مورد نیاز برای پایداری ($\tan \gamma$) به تنازات زاویه اصطکاک موجود درزه ها ($\tan \eta$) به دست می آید.

$$F_S = \frac{\tan \gamma}{\tan \eta} \quad (3)$$

از آنجائیکه حداقل زاویه اصطکاک وجوه این بلوک 28° می باشد، مطابق با تعریف ضریب ایمنی، این بلوک پایدار بوده و ضریب ایمنی آن برابر $4/33$ خواهد بود. ضریب ایمنی کلیه بلوکهای مورد بررسی در شرایط بار عادی، بار غیر عادی و بار فوق العاده به ترتیب پیش گفته تعیین گردید (جدول ۷).

با توجه به آنچه که گفته شد، تحلیل پایداری هر یک از هرمهای درزه به

جدول ۵. بلوک های قابل حرکت تکیه گاههای سد کارون ۴.

شماره بلوک ها	تکیه گاه
L2, L3, L6, L9, L12, L16	چپ
R16, R18, R21, R24, R26, R27	راست

جدول ۶. برآیند نیروهای وارد بر بلوک ۳ تکیه گاه چپ.

نیروها	مقدار نیرو (ton)	شیب نیرو	جهت نیرو	مؤلفه های نیروی برآیند			نیروی برآیند (ton)
				Z	Y	X	
وزن	۱۷۶۸۰۰۰	۹۰	۰	۰	۰	۱۷۶۸۰۰۰	
آب	۳۷۴۱۰۷/۵۱	۱۰	۲۶۰	-۳۶۲۸۲۶۸	-۶۳۹۷۶۷۲	۶۴۹۶۳/۰۸	
	-۱۵۱۸۱۰/۲۵	۴۳	۳۰۵	۹۰۹۴۷/۹۸	-۶۳۶۸۲/۴	۱۰۳۵۳۴/۳۴	
	-۳۲۳۹۴۲/۹۴	۶۲	۱۷۰	-۲۶۴۰۸/۷۶	۱۴۹۷۷۱/۵	-۲۸۶۰۲۴/۶۴	
زلزله	۲۵۳۶۰۰	۰	۳۵۰	-۶۱۴۰۲	۳۴۸۲۳۸/۰۲	۰	
تنش	۱۱۳۹۹۲۴/۴	۲۷	۱۸۵	-۸۸۵۲۲/۳۵	-۱۰۱۱۸۱۵/۱	۵۱۷۵۱۴/۸۵	

جدول ۷. ضریب ایمنی بلوک های کلیدی تکیه گاههای چپ و راست سد کارون ۴ با استفاده از نظریه بلوکی.

شماره بلوک	موقعیت (تکیه گاه)	ضریب ایمنی		
		بار عادی	بار غیر عادی	بار فوق العاده
L2	چپ	۳/۱۷	۳/۰۱۵	۲/۷۳۵
L3	چپ	۵/۰۵۸	۴/۳۳۰	۳/۷۸۳
L6	چپ	*	۶/۰۷۷	۵/۷۸۶
L16	راست	*	*	۲۰/۳۰۵
L18	راست	۵/۰۵۸	۲/۱۳۲	۲/۱۳۲
L26	راست	۷/۶۰۳	۶/۰۷۷	۶/۰۷۷

* نیروی برآیند در این حالت داخل ناحیه ایمن می افتد.

- کلیه بلوکهای شناسایی شده در تکیه گاههای چپ و راست سد کارون ۴، در شرایط بارگذاری عادی، غیر عادی و فوق العاده، با ضریب اطمینان مناسب، پایدار می باشند.
- صحت کلیه موارد فوق با استفاده از روش تحلیل تعادل حدی هوک و بری نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که ضریب ایمنی به دست آمده از روش بلوکی در همگی موارد پائین تر از مقادیر به دست آمده از روش تحلیل تعادل حدی می باشد.
- از آنجائیکه حساسیت این روش به تغییرات فاکتورهای مؤثر در پایداری بلوک ها، بیشتر از روش تحلیل تعادل حدی می باشد، پیشنهاد می شود که به عنوان جایگزین روش تعادل حدی در تحلیل پایداری تکیه گاه سدها و حفاریها در معادن روباز، مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

به این وسیله از جناب آقای مهندس رفیعا و جناب آقای مهندس خاکباز، که در طول انجام این تحقیق از راهنمایی های ارزنده ایشان سود جسته شد، تشکر و قدردانی می شود. همچنین لازم است از همکاری صمیمانه کلیه کارشناسان شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، به خصوص بخشهای مکانیک سنگ، ژئوتکنیک و سازه نیز تشکر نمایم.

Reference

- Goodman, R.E. & Shi, G.H., 1985 - Block Theory and its Application to Rock Engineering. Prentice Hall Englewood Cliff, New Jersey.
- Goodman, R.E. 1989- Introduction to Rock Mechanics. Wiley, New York.
- Hatzor, Y. & Goodman, R.E. 1997- Three dimensional back-analysis of saturated rock slope in discontinuous rock- case study. Geotechnique 47, No.4, 817-839.
- Preist, S.D. 1985- Hemispherical Projection Method in Rock Mechanics. London: George, Allen & Unwin.

* دانشیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

** کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ دانشگاه تهران

* Engineering Faculty, Tehran university, Tehran, Iran.

** Engineering Faculty, Rock Mechanics, Tehran, Iran

کمک مراحل زیر صورت گرفت:

- تعیین ترکیب نیم فضاها درزه (JP) که بلوکهای قابل حرکت را می دهند.
- تعیین مد لغزشی برای این قبیل بلوکها، با توجه به جهت نیروی برآیند.
- تعیین اینکه آیا بلوک حاصل شده از این JP بدون سیستم نگهداری پایدار خواهد ماند یا خیر.

۷- نتیجه گیری

نظریه بلوکی در چند سالی که از معرفی آن می گذرد، بیشتر برای تونلها و فضاها زیرزمینی به کار گرفته شده است. در این بررسی کارآئی این روش، برای فضاها روباز نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور تحلیل پایداری تکیه گاههای سد کارون ۴ با استفاده از نظریه بلوکی انجام شد. با توجه به ضرایب اطمینان لازم برای پایداری تکیه گاهها و از مقایسه نتایج جدول (۶) با این مقادیر، نتایج زیر به دست آمد: