

تحلیل پایداری چاه انتقال آب سد صفا با مقایسه نتایج حاصل از روش های عددی (FLAC2D و FLAC3D) و تجربی

مصطفی شریف زاده
ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Sharifzadeh@aut.ac.ir

کاوه آهنگری
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
Kaveh.Ahangari@gmail.com

احد ضیائی*
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
A.Zyaei_2008@yahoo.com

سعید آلودری
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
Saeed_prsn@yahoo.com

خلاصه مقاله

چاه انتقال آب سد صفا، در استان کرمان و در ۳۰ کیلومتری شمال خاور شهرستان بافت واقع شده است. سد صفا با هدف تامین آب شرب شهرستان کرمان در حال احداث است و تونل انتقال آن که با چاه مورد نظرتقاطع دارد، جهت انتقال آب منظور گردیده است. در این مطالعه ابتدا جهت تحلیل پایداری مورد نیاز با استفاده از روش های تجربی موجود نظیر RMR و Q به بررسی پایداری چاه در سازند مربوطه (تناوب مارن و گل سنگ) پرداخته شده و سیستم نگهداری مورد نیاز تعیین گردیده است. در ادامه نیز با داشتن پارامترهای ژئومکانیکی مسیر چاه، اعمال شرایط مرزی و در نظر گرفتن مقاطعی از چاه، مدل های مختلفی با استفاده از نرم افزارهای تفاضل محدود دوبعدی و سه بعدی FLAC2D و FLAC3D ساخته شده است. کلیه محاسبات در دو مرحله، قبل از حفر چاه، بلافاصله بعد از حفر چاه انجام شده و در هر مرحله، کلیه تنش ها و جابه جایی ها در اطراف چاه محاسبه شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن المان های مختلف موجود در نرم افزارهای FLAC2D و FLAC3D و مدل کردن آنها در شرایط منطقه، مشخص شد که چاه مورد نظر از پایداری لازم برخوردار بوده و نیاز به نصب هیچگونه سیستم نگهداری ندارد.

ABSTRACT

Shaft of Safa dam is under construction about 30 Km far from the north-east of Baft city which is located in kerman province and the tunnel intersect whit this shaft. . In this paper, at first the stability of shaft in the formations have been investigated by using empirical methods such as RMR and Q and then the required support system has been determined. In following by using numerical software Flac5.0, with having shaft way geomechanic parameters and putting boundary conditions for some sections of shaft, different methods have also been produced. All of the computations was performed in two steps: the first step was before excavation, the second step was immediately after excavation and in each step all stresses and displacements around the tunnel were computed. Then, for controlling the displacement around of tunnel with considering the different elements in flac5.0 and simulating them in regional conditions determine the shaft don't need support for stability.

کلمات کلیدی: تحلیل پایداری، روش عددی، روش تجربی، سیستم نگهداری، پارامترهای ژئومکانیکی

جدول (۱): نتایج حاصل از تحلیل با استفاده از طبقه بندی RMR

همانگونه که امتیازهای محاسبه شده برای رده بندی Q نشان می دهند (جدول ۲) مارن ها و گل سنگ ها، دارای محدوده کاملاً مشخص نمی باشند و می توان آن ها را در یک محدوده در نظر گرفت. برای برآورد سیستم نگهداری پیشنهادی این رده بندی لازم است دهانه معادل تونل با توجه به نوع کاربری و نوع نگهداری تونل در بلند مدت محاسبه شود. باتوجه به اینکه این تونل در زمان بهره برداری دارای پوشش بتنی مسلح خواهد بود لذا اندازه معادل

$$D_r = \frac{5.85}{1.6} = 3.65$$

خواهد بود که ۵/۸۵ ارتفاع بزرگترین مقطع تونل و ۱/۶ ESR به دست آمده است. بنابراین سیستم نگهداری پیشنهادی این روش برای تونل در هر کدام از توده سنگ ها به شرح زیر است. مارن ها و گل سنگ ها: ۷/۵ تا ۲۵ سانتی متر شاکریت مسلح و پیچ سنگ به فواصل ۱ تا ۱/۵ متر.

پارامترها	مارن و گل سنگ
RQD	۲۰-۵۰
J _n	۱۲-۱۵
J _r	۱-۲
J _a	۳
J _w	۰/۶۶-۰/۱
SRF	۱
Q	۰/۲۵-۲/۵
کیفیت سنگ	بسیار ضعیف تا ضعیف

جدول (۲): ردیف های مربوط به رده بندی Q و امتیازهای آن

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری به روش عددی

تجربه نشان داده که روش های تجربی و مشاهده ای نمی توانند به تنهایی رفتار سازه های زیرزمینی را به شکل مناسب و مطمئن تحلیل کنند در این قسمت با نگرش شبه پیوسته بودن محیط (به دلیل خرد بودن توده سنگ منطقه)، توده سنگ به عنوان محیط پیوسته تلقی می شود. به منظور تحلیل عددی تونل مورد نظر از نرم افزار FLAC 5 استفاده شده است. در تحلیل پایداری چاه انتقال سد صفا با استفاده از نرم افزار FLAC 5 مقاطع مختلفی از چاه با در نظر گرفتن شرایط منطقه به ترتیب زیر اقدام به مدلسازی شد [۲].

۱. ایجاد مدل (مش بندی، مشخصات مصالح و شرایط داخلی و مرزی).
۲. حل مدل اولیه و رساندن آن به تعادل اولیه.
۳. حفر و حل مدل تا رسیدن به تعادل نهایی بدون نگهداری.
۴. کنترل جابه جایی ها و زون پلاستیک در اطراف حفره.
۵. در صورت نیاز مراجعه به بند ۳ و نصب نگهداری و در نهایت حل مدل تا رسیدن به تعادل نهایی.

تعیین نسبت تنشهای افقی به قائم (K)

با توجه به عدم انجام آزمایش های برجا برای تعیین نسبت تنش های افقی به قائم، بایستی از قضاوت مهندسی، روابط تجربی و بررسی موارد مشابه بر اساس اطلاعات موجود استفاده نمود. توده سنگ در برگیرنده تونل و اساساً توده سنگ ساختمانی سد صفا در زمره توده سنگ های نرم قرار می گیرد. ضمن آنکه این توده سنگ تحت اثر تنش های تکتونیکی، بسیار در زده ر می باشد و مشاهدات انجام شده در گالری های اکتشافی، حاکی از وجود دسته درزه های متعدد و گسل هایی با جابجایی نسبتاً کم است. باتوجه به نوع سنگ ها که دارای منشأ رسوبی می باشند، بدون در نظر گرفتن

مقدمه

حفر چاه موجب می شود وضعیت اولیه تنش ها در زمین دست خوش تغییرات شده و در اطراف چاه، تمرکز تنش ایجاد گردد که این تمرکز، عکس العمل محیط اطراف تونل را به دنبال خواهد داشت. در صورت کمتر بودن مقاومت سنگ در مقایسه با تنش اعمال شده (مرتبط با میزان روباره و شرایط ژئوتکنیکی)، تغییر شکل ها در سنگ افزایش می یابد که نتیجه آن افزایش همگرایی و تخریب چاه خواهد بود. در این گونه چاه ها، تأثیرات تنش ها بر پایداری بیشتر از شرایط ساختاری ناپیوستگی ها حائز اهمیت هستند. بنابراین با بکارگیری تکنیک های ویژه حفاری و وسائل نگهداری مناسب و نصب به موقع آنها می توان به طراحی بهینه سیستم حفاری و نگهداری در نتیجه پایداری چاه پرداخت. ضمن اینکه لازمه طراحی سیستم مناسب، شناخت کافی از محیط و استفاده از روشی است که بتواند نحوه رفتار توده سنگ در بر گیرنده چاه را پیش بینی نموده و سیستم حفاری و نگهداری مناسب را طراحی نمود.

زمین شناسی مسیر چاه چاه انتقال آب سد صفا به ارتفاع ۲۱ متر و دارای دو مقطع به قطرهای ۳ و ۳/۴ در جناح چپ سد واقع شده است. بر اساس اطلاعات حاصل از حفاری گمانه های اکتشافی در محدوده خروجی چاه، حداکثر ضخامت مواد نابرجا حدود ۲۳ متر برآورده شده است. سازه چاه انتقال تماماً در لایه های سنگی قرمز بالایی و با روباره کافی در نظر گرفته شده است. شیب لایه بندی در مسیر چاه حدود N23/19 بوده و چاه انتقال با زاویه حاده لایه های سازند قرمز بالایی را قطع می کند. از نظر ژئوتکنیکی، گسلی در پایین دست ساختمانی قرار گرفته است. این گسل با راستای خاوری-باختری و شیب نزدیک به قائم به صورت نرمال بوده که حداکثر جابه جایی آن حدود ۲ تا ۳ متر در منتهی الیه قسمت خاوری در سازند قرمز بالایی می باشد [۳].

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری به روش تجربی

در تحلیل پایداری چاه انتقال آب سد صفا از روش های تجربی RMR و Q استفاده شده است. برای انجام طبقه بندی ژئومکانیکی RMR، توده سنگ مسیر چاه به تعدادی واحدهای ساختمانی تقسیم شده است (واحدهای دارای مشخصات زمین شناسی نسبتاً مشابه در یک واحد قرار گرفته اند). بر اساس مطالعات انجام شده، مقدار امتیاز طبقه بندی RMR برای توده سنگ مسیر تونل برابر با ۲۰ تا ۳۰ برآورد می گردد و تحلیل پایداری بر اساس طبقه بندی RMR در جدول (۱) مشخص می باشد.

ارزیابی	امتیاز RMR: ۲۰-۳۰
کلاس توده سنگ	ضعیف
متوسط زمان پاجرایی	۱۰ ساعت برای دهانه ۲/۵ متری
چسبندگی توده سنگ	۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال
زاویه اصطکاک توده سنگ	۱۵-۲۵
نحوه حفاری	۱ تا ۱/۵ متر پیشروی در مرحله اول، نصب ساپورت بطور همزمان با حفاری ۱۰ متر از جبهه کار
راکبولت	بولت گذاری منظم به طول ۴ تا ۵ متر و فاصله ۱ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره ها با تور سیجی
شاکریت	۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر در تاج و ۱۰۰ میلی متر در اطراف
قاب های فلزی	قاب های فلزی سبک به فاصله ۱/۵ متر در محل های مورد نیاز

می‌گردد. سپس با قرار دادن نقاط مشاهده‌ای در قسمت‌های مختلف چاه میزان جابه‌جایی انجام گرفته در داخل چاه برابر با $6/6$ میلی‌متر در مقطع $1/5$ متر و $6/9$ میلی‌متر در مقطع $1/7$ متر محاسبه گردید. سپس پایداری زون‌های سنگی مسیر تونل از روش ارائه شده توسط ساکورایی استفاده می‌شود. این روش که موسوم به کنترل مستقیم کرنش است بر مبنای پارامتر کرنش بحرانی پایه نهاده شده است. ساکورایی سه اخطار کرنش را برای سنگ ارائه داده است که بر اساس مدول الاستیسیته سنگ استوار هستند. بر این اساس، رابطه (۱) حد بالای کرنش (کرنش شکست) و رابطه (۲) حد پایین کرنش را ارائه می‌دهند. رابطه (۲) میانگین لگاریتمی این دو رابطه را نشان می‌دهد [۶] که E : مدول دگرشکلی‌پذیری توده‌سنگ بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. با توجه به اینکه خروجی نرم‌افزار عددی به‌صورت میزان جابه‌جایی است و کرنش از روابط بالا محاسبه می‌شود، به‌منظور محاسبه جابه‌جایی مجاز از رابطه (۴) زیر استفاده می‌شود. که در آن U_c جابه‌جایی مجاز و a شعاع معادل چاه است.

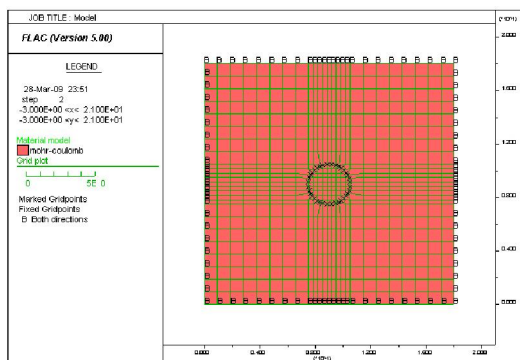
بنابراین میزان جابه‌جایی مجاز که از روابط ساکورایی بدست آمد برابر با $2/8$ میلی‌متر برای مقطع $1/5$ متر و $3/41$ میلی‌متر برای مقطع $1/7$ متر محاسبه گردید. نحوه مدل‌سازی، وضعیت تنش‌های به وجود آمده بعد از حفر چاه، میزان جابه‌جایی صورت گرفته در دیواره چاه برای شعاع $1/5$ و $1/7$ متر، وضعیت بردارهای جابه‌جایی در داخل چاه و زون پلاستیک ایجاد شده در اطراف چاه به ترتیب در اشکال (۱) تا (۶) نشان داده شده است.

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (1)$$

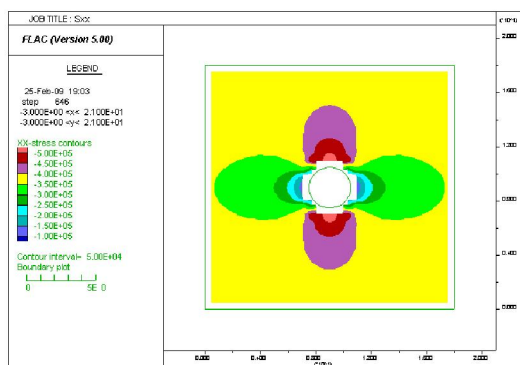
$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (2)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = U_c/a \quad (4)$$



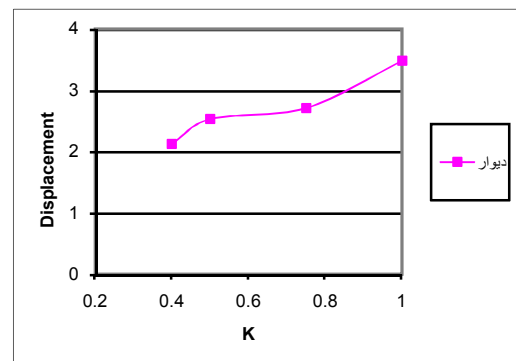
شکل (۱): نحوه مدل‌سازی



شکل (۲): وضعیت تنش‌های به وجود آمده در اطراف چاه

تنش‌های تکتونیک این نسبت در حدود $0/4$ تا $0/5$ است ولی باتوجه به وجود این تنش‌ها می‌توان با اطمینان این نسبت را بیش از این مقادیر دانست. از سوی دیگر نرم بودن جنس سنگ، وجود درزه، ترک‌ها و گسله‌های متعدد حاصل از تنش‌های تکتونیک در توده سنگ و نزدیکی محل تونل به دره حاصل از فرسایش رودخانه عواملی در جهت کاهش این نسبت هستند [۳]. سایر روابط موجود از جمله روابط ارائه شده توسط شوری^۱ در سال ۱۹۹۴ و ۲۰۰۱ نیز بدون در نظر گرفتن تنش‌های تکتونیک مقادیر (K) را برای توده سنگ نظیر توده سنگ‌های ساختمانی سد در اعماق مورد نظر کمتر از ۱ برآورد می‌نمایند [۴].

در نتیجه می‌توان گفت که نسبت تنش‌های برجا در محدوده مسیر تونل و به طور کلی توده سنگ ساختمانی بین $0/5$ تا ۱ است. بر این اساس تحلیل تونل‌ها می‌تواند برای بحرانی‌ترین مقدار K انجام شود. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، بحرانی‌ترین مقدار مربوط به $K=1$ است. لازم به توضیح است که این نتیجه‌گیری در شرایطی بدست آمده که به علت کم بودن عمق تونل، تنش‌های قائم دارای مقادیر زیادی نمی‌باشند. در غیر این صورت ممکن است نسبت تنش‌ها کمتر از ۱ بحرانی شوند. علاوه بر موارد فوق، آنالیز حساسیتی جهت تعیین مقدار تنش منطقه به عمل آمد که در نمودار (۱-۴) نشان داده شده است. همانطور که از نمودار (۱) مشاهده می‌شود با افزایش نسبت تنش مقدار جابه‌جایی صورت گرفته در تونل به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بنابراین بر طبق نمودار زیر در بحرانی‌ترین حالت مقدار K برابر یک در نظر گرفته شد.



نمودار (۱): تغییرات جابه‌جایی دیواره چاه به ازاء مقادیر مختلف K

مقدار	پارامترها
$2470 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	دانشیه
$0/3$ گیگاپاسکال	مدول الاستیسیته توده‌سنگ
$0/35$	ضریب پواسون توده‌سنگ
$0/11$ مگاپاسکال	چسبندگی توده‌سنگ
۲۰ درجه	زاویه اصطکاک داخلی
۷۰۰ پاسکال	مقاومت کششی توده‌سنگ
۰ درجه	زاویه اتساع

جدول (۳): مشخصات ژئومکانیکی مواد تشکیل دهنده مسیر چاه انتقال آب سد

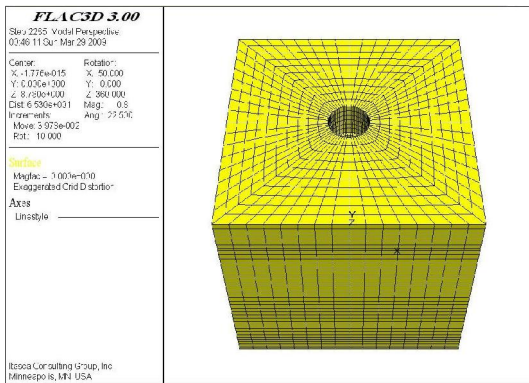
صفا [۱۱]

تحلیل پایداری چاه انتقال آب سد صفا با روش دو بعدی

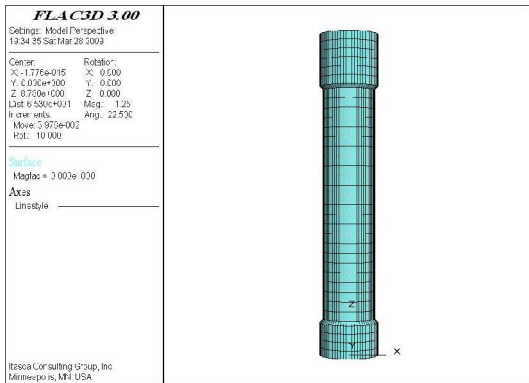
جهت تحلیل پایداری چاه اقدام به مدل‌سازی مقاطع مختلف چاه با شعاع‌های $1/7$ و $1/5$ متر گردید. پس از تخصیص مواد و رساندن مدل به تعادل اولیه، مدل حفر

تحلیل پایداری چاه انتقال آب سد صفا با روش سه بعدی

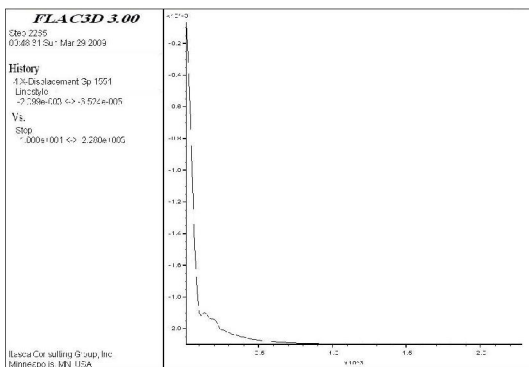
مراحل مدل‌سازی سه بعدی همانند مدل‌سازی دو بعدی است (۱ و ۴). همانطور که در قسمت قبل در مورد روند مدل‌سازی صحبت شد، در این قسمت همانند قبل مدل‌سازی به صورت سه بعدی انجام شده است و حداکثر جابه‌جایی مورد نظر پس از قرار دادن ۵ نقطه مشاهده‌ای در داخل چاه اندازه‌گیری شده است. سپس با مقایسه حداکثر جابه‌جایی انجام شده در داخل چاه و مقایسه آن با جابه‌جایی بدست آمده از روابط ساکورایی پایداری یا عدم پایداری چاه بررسی شد. میزان جابه‌جایی صورت گرفته در داخل چاه برابر با ۲/۱ میلی‌متر محاسبه گردید که در مقایسه با جابه‌جایی مجازی که از روابط ساکورایی بدست آمد (۶/۶ میلی‌متر)، پایدار بودن چاه اثبات می‌شود. در اشکال (۷) تا (۱۰) نحوه مدل‌سازی، جابه‌جایی صورت گرفته در داخل چاه و زون پلاستیک اطراف تونل نشان داده شده است.



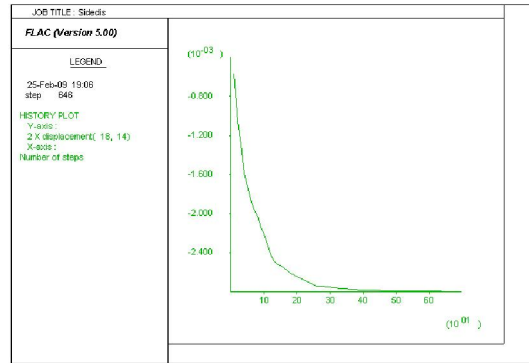
شکل (۷) نحوه مش بندی انجام شده



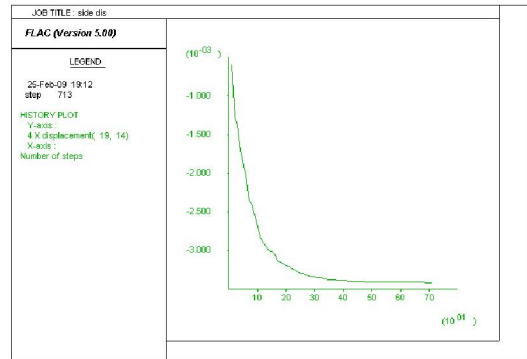
شکل (۸) نحوه مدل‌سازی صورت گرفته



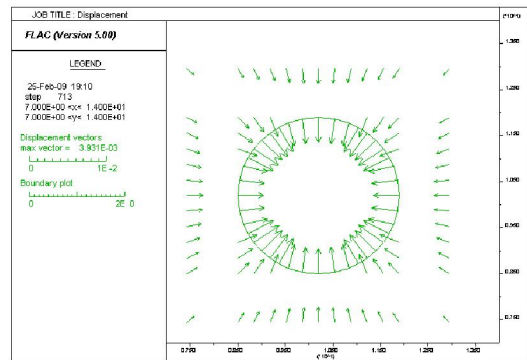
شکل (۹): جابه‌جایی صورت گرفته در دیواره چاه شکل



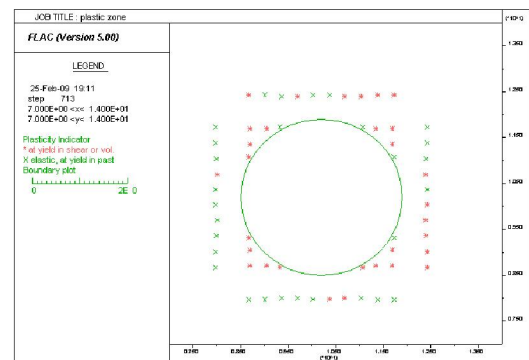
شکل (۳): جابه‌جایی صورت گرفته در دیواره چاه با مقطع ۳ متر



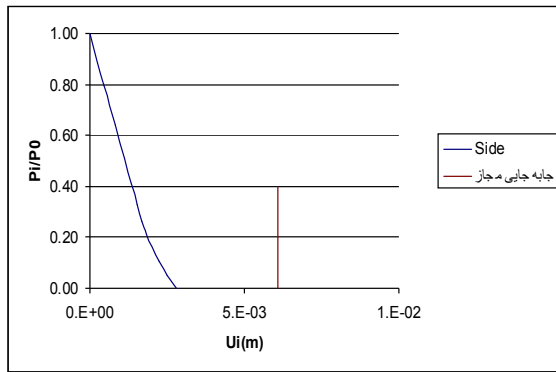
شکل (۴): جابه‌جایی صورت گرفته در دیواره چاه با مقطع ۳/۴ متر



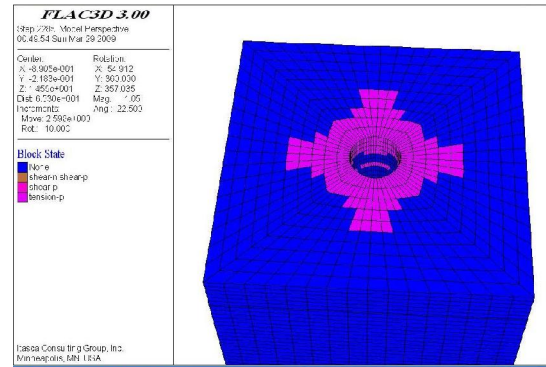
شکل (۵): بردارهای جابه‌جایی صورت گرفته در اطراف چاه شکل



شکل (۶): زون پلاستیک اطراف چاه



نمودار (۲): منحنی واکنش زمین و جابه جایی مجاز محاسبه شده در چاه انتقال آب سد صفا



(۱۰): زون پلاستیک اطراف چاه

بحث، جمع بندی و نتیجه گیری

بحث

نرم افزار FLAC 5، رفتار سازه‌هایی را که در سنگ‌های خرد شده، خاک و یا مصالح دیگری که هنگام رسیدن به حد تسلیم، جریان پلاستیک می‌یابند را مدل‌سازی می‌کند و طی آن مصالح به وسیله عناصر و یا مناطقی نشان داده می‌شوند که مجموعاً شبکه‌ای را می‌سازند. این شبکه به وسیله کاربر به گونه‌ای تعدیل می‌شود که با شکل هدفی که باید مدل‌سازی شود تطابق می‌یابد. هر یک از عناصر بر اساس قوانین تنش- کرنش از قبل تعیین شده خطی و یا غیرخطی، در برابر نیروهای اعمال شده و یا محدودیت مرزی واکنش نشان می‌دهند. اگر تنش اعمالی به اندازه کافی بزرگ باشد که سبب تسلیم مصالح و جریان یافتن آنها شود، شبکه طراحی شده نیز عملاً تغییر شکل می‌دهد و به سوی مصالحی که نماینده آن است حرکت می‌کند. با توجه به اینکه خصوصیات سنگ‌های منطقه، دارای درزه شکاف متعدد می‌باشد (کاملاً خرد شده) و خصوصیات محیط شبه پیوسته را داراست، بنابراین بهترین نرم افزار جهت تحلیل پایداری تونل‌های انحراف، نرم افزار FLAC می‌باشد.

با حفاری تونل در یک توده سنگ، محیط اطراف در معرض بارگذاری جدید قرار می‌گیرد، رفتار توده سنگ در مقابل این بارگذاری عموماً به صورت یک نمودار تنش در مقابل تغییر مکان نشان داده می‌شود. در سنگ‌های خوب با خصوصیات مقاومتی بالا، تونل‌ها بدون استفاده از هر گونه حائل پایدار می‌مانند. اما در سنگ‌های ضعیف لازم است سریعاً پایدارسازی مقطع صورت گیرد. در این رابطه می‌بایست اندرکنش میان حائل مورد استفاده و توده سنگ حفاری شده مورد مطالعه قرار گیرد. روش مرسوم برای این گونه مطالعات روش همگرایی - محصورشدگی می‌باشد. در این روش، منحنی پاسخ زمین با منحنی پاسخ حائل در نقطه‌ای متقاطع می‌گردند که به اصطلاح در این نقطه به تعادل می‌رسند.

در این تحقیق با استفاده از منحنی اندرکنش زمین، وضعیت و رفتار سنگ با استفاده از روش عددی دو بعدی و سه بعدی به تصویر کشیده شده سپس با استفاده از روابط مشهور ساکورایی، جابه‌جایی مجاز توده سنگ به دست آمده است. با رسم منحنی اندرکنش زمین و جابه‌جایی مجاز توده سنگ که در نمودار ۲ نشان داده شده، مشخص می‌گردد که چاه حفر شده از پایداری لازم برخوردار بوده و هیچ نیلزی به طراحی و نصب سیستم نگهداری ندارد.

جمع بندی و نتیجه گیری

- ۱- بر اساس مطالعات صحرایی و نقشه زمین‌شناسی تهیه شده چاه حفر شده در مسیر خود از سنگ‌های مارن، سیلتی مارن و گل‌سنگ، عبور می‌کند.
- ۲- نتایج اطلاعات برداشت شده از ناپیوستگی‌های توده سنگ وجود ۶ دسته درزه را نشان می‌دهند.
- ۳- مطابق رده‌بندی بنیاوسکی سنگ‌های مارن و سیلتی مارن مسیر تونل در رده ضعیف تا خیلی ضعیف قرار دارند.
- ۴- مطابق شاخص تونل سازی Q سنگ‌های مارن، گل‌سنگ، مارن سیلتی، در رده بسیار ضعیف تا ضعیف دارند که سیستم نگهداری لازم برای آن‌ها در قسمت‌های قبل شرح داده شده است.
- ۵- پس از انجام آنالیز عددی معین گردید که چاه انتقال آب سد صفا نیاز به نصب سیستم نگهداری ندارد.

مراجع

۱. باقرزاده، افضل، ۱۳۸۷، "مقدمه‌ای بر تحلیل با نرم افزار FLAC3D"، موسسه فرهنگی - هنری دیباگران.
۲. پناه بر، بهنام، قاسم پور، نادر، ۱۳۸۶، "تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی با استفاده از نرم افزار FLAC3D"، جهاد دانشگاهی دانشگاه امیر کبیر.
- ۳ گزارش مطالعات زمین شناسی مهندسی سد صفا، شرکت مهندسی مهتاب قدس
۴. مدنی، حسن، ۱۳۸۱، "تولن‌سازی (جلد سوم) - تحلیل پایداری"، چاپ اول، تهران، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
5. Jing, L., 2003, "A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modeling for Rock Mechanics and Rock Engineering", Division of Engineering Geology, Royal Institute of technology, Stockholm 44, Sweden.
6. Sakurai, S. (1997), "Lessons Learned from Field Measurements in Tunneling", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460