



تملیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا

ممدرضا قزوینی^۱ و عبدالهادی قزوینیان^۲

۱) کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، mohammad.ghazvini@gmail.com

۲) دانشیار دانشگاه تربیت مدرس تهران، abdolhadi@yahoo.com

(* عهده‌دار مکاتبات)

دریافت: ۹۱/۸/۱۳؛ دریافت اصلاح شده: ۹۲/۳/۸؛ پذیرش: ۹۲/۴/۹؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۲/۶/۱۵

چکیده

سد گتوند علیا با ارتفاع ۱۸۰ متر، از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی می باشد. این سد، بلندترین سد خاکی ایران بوده و هدف فاز اول آن تولید ۱۰۰۰ مگاوات برق است. در این طرح، چهار تونل آب‌بر با قطر ۱۲/۶ متر در ساحل سمت چپ ساختگاه سد حفاری می‌شوند. نگهداری این تونل‌ها که جزء تاسیسات دائمی سد بشمار می‌رود، از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این تحقیق، تحلیل پایداری تونل‌های آب‌بر و طراحی نگهداری موقت این سازه‌ها می‌باشد. در این پژوهش، تحلیل پایداری تونل‌ها با استفاده از روش‌های تجربی (طبقه‌بندی RMR) و روش عددی و توسط نرم‌افزار FLAC صورت گرفت. در نهایت، سیستم نگهداری موقت با استفاده از روش تجربی و عددی برای تونل‌های مورد مطالعه پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: سد گتوند علیا، سد سنگریزه‌ای با هسته رسی، روش تجربی، روش عددی، نرم افزار FLAC.

۱- مقدمه

است. سد گتوند دارای تاجی به طول ۷۶۰ متر و عرض ۱۷ متر می‌باشد. تراز تاج سد نیز ۲۴۶ متر از سطح دریا می‌باشد. همچنین نیروگاهی روباز با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات انرژی برق (قابل توسعه تا ۲۰۰۰ مگاوات)، در پایین دست محور سد، در ساحل چپ رودخانه ساخته شده است (Iran Water and Power Resources Development Company 2012).

حفر فضاهای زیرزمینی، از دیرباز بنا به دلایل مختلفی از جمله احداث نیروگاه‌های آبی و استخراج معادن، مورد توجه مهندسان بوده است. عوامل زمین‌شناختی و پارامترهای رفتاری سنگ‌ها، نقش اساسی در مطالعات و اجرای یک پروژه دارد. پایداری فضاهای بزرگ

طرح سد و نیروگاه گتوند علیا از طرح‌های بزرگ عمرانی کشور می‌باشد. ساختگاه سد در استان خوزستان و به مختصات جغرافیایی $48^{\circ}56'10''$ طول شرقی و $32^{\circ}16'8''$ عرض شمالی بر روی رودخانه کارون، بین مسجد سلیمان و سد تنظیمی گتوند، در فاصله ۳۸۲/۸ کیلومتری از دهانه رودخانه و در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان شوشتر، در بخش گتوند ساخته شده است (تصویر ۱). این سد آخرین سد بلندی است که بر روی رودخانه کارون ساخته می‌شود. سد مورد مطالعه از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی بوده و با ارتفاع ۱۸۰ متر، بلندترین سد خاکی ایران می‌باشد. عرض این سد در پی، ۱۰۷۵ متر

قزوینی و قزوینیان: تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا

های آماده در این زمینه، می‌توان ادعا نمود که هر سازه زیرزمینی با هر مشخصه‌ای را می‌توان مدل کرده و قبل از اجرا، تحلیلی به‌لحاظ مسائل پایداری یا اعمال سیستم نگهداری انجام داد. به‌طور کلی، کنترل پروژه‌ها با استفاده از روش‌های عددی و تجربی انجام می‌شود. هدف از این تحقیق، تحلیل پایداری تونل‌های آب‌بر و طراحی نگهداری موقت این سازه‌ها می‌باشد. بدین منظور، تحلیل پایداری تونل‌ها با استفاده از روش طبقه‌بندی RMR و روش عددی و توسط نرم‌افزار FLAC صورت گرفت. در نهایت، سیستم نگهداری موقت با استفاده از روش تجربی و عددی برای تونل‌های فوق پیشنهاد گردید.

زیرزمینی، تحلیل تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجاد شده پس از حفاری و راه‌های بهینه‌سازی حفاری از اهمیت خاصی در حفر فضاهای زیرزمینی برخوردار می‌باشد. تا دهه ۶۰ میلادی، طراحی و اجرای فضاهای زیرزمینی بر مبنای روش فرم بسته و اصول تجربی استوار بود. اولین طبقه‌بندی در سال ۱۹۴۶ توسط ترزاقی ارائه شد (Terzaghi 1946). از دهه ۶۰ به بعد با پیشرفت سریع علوم کامپیوتر و مهندسی از جمله مکانیک محیط‌های پیوسته و ناپیوسته، روش‌های تحلیلی و تئوریک به‌سرعت رونق یافت. امروزه با وجود کامپیوترهای با سرعت بالا و در دسترس بودن برنامه-



تصویر ۱- موقعیت جغرافیایی سد گتوند علیا (سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران ۱۳۹۰)

گلسنگ است. واحدهای اصلی تشکیل دهنده‌ی سازند بختیاری نیز کنگلومرا با میان‌لایه‌های گلسنگ و ماسه سنگ می‌باشند. بین دو سازند بختیاری و آغاچاری میان سازندی با عنوان سازند انتقالی

۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی

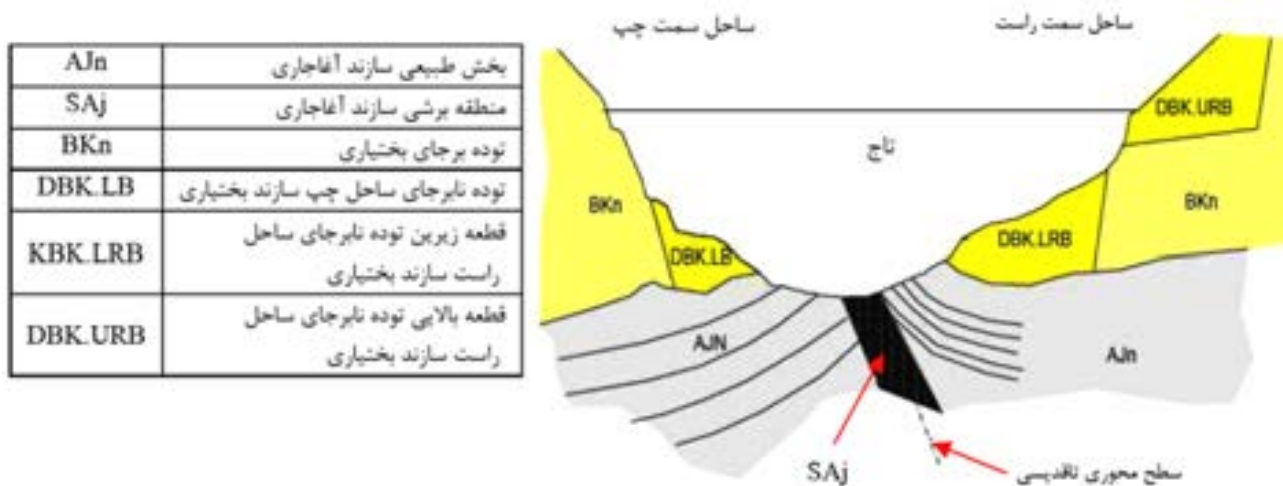
در محدوده‌ی مورد مطالعه، دو سازند آغاچاری و بختیاری سنگ بستر را تشکیل داده‌اند. سازند آغاچاری شامل ماسه‌سنگ، لای‌سنگ و

قزوینی و قزوینیان: تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های آب‌بر سد گنوند علیا

(Transitional) قرار دارد که شامل میان‌لایه کنگلومرا- گلسنگ، لای- سنگ و ماسه‌سنگ است (Mahab Gods 2008) (تصویر ۲). توده- (۱). سنگ مسیر تونل‌های آبرسان، براساس مطالعات و برداشتهای انجام

جدول ۱- طبقه‌بندی توده‌سنگ مسیر تونل‌های آبرسان (شرکت مهندسين مشاور مهاب قدس ۱۳۸۷)

نوع سنگ	واحد سنگی	توصیف نوع سنگ
۱	1a	کنگلومرای بکر قوی در سازند بختیاری
	1b	کنگلومرای بکر ضعیف در سازند بختیاری
۲	2	میان‌لایه گلسنگ- لای‌سنگ- ماسه‌سنگ در سازند آغاچاری
۳	3a	میان‌لایه قوی کنگلومرا- گلسنگ/لای‌سنگ/ ماسه‌سنگ در سازند انتقالی
	3b	میان‌لایه ضعیف کنگلومرا- گلسنگ/لای‌سنگ/ ماسه‌سنگ در سازند انتقالی



تصویر ۲- طرحی شماتیک از واحدهای سنگی ساختگاه سد (شرکت مهندسين مشاور مهاب قدس ۱۳۸۷)

مجموع امتیازات ۶ پارامتر (طبق رابطه ۱) امتیاز نهایی RMR را تعیین می‌کنند (Choi & Park 2002، وفائیان ۱۳۸۴، هوک ۱۳۸۱).

رابطه (۱) $RMR = R_s + R_{RQD} + R_{sd} + R_{cd} + R_w + R_{od}$ در این رابطه، R_s مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر، R_{RQD} شاخص کیفیت سنگ، R_{sd} فاصله ناپیوستگی‌ها، R_{cd} وضعیت ناپیوستگی‌ها، R_w وضعیت آبهای زیرزمینی و R_{od} جهت ناپیوستگی-ها می‌باشد (جلالی ۱۳۸۱).

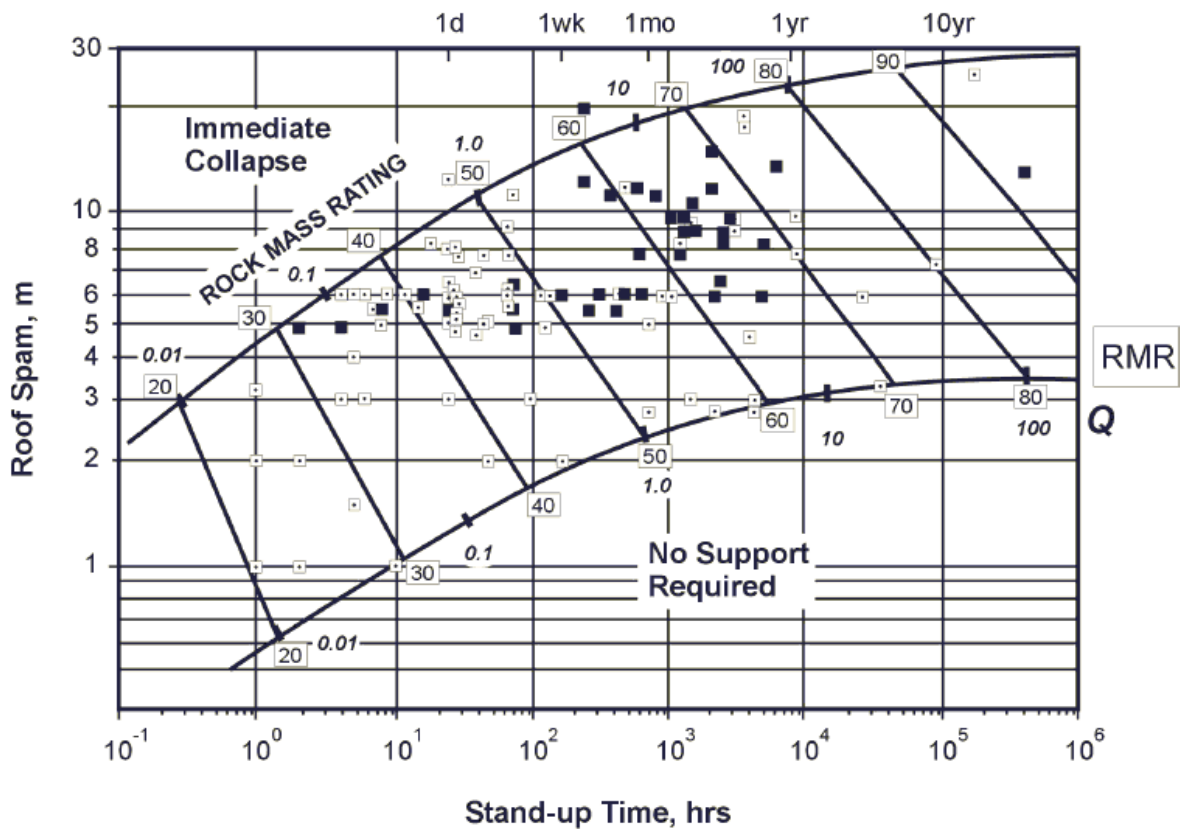
در این طبقه‌بندی، سنگها از نظر کیفیت به انواع خوب یا بد تقسیم نمی‌شوند، بلکه عددی که ممکن است از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ تغییر کند، معرف مشخصات سنگ می‌باشد. بطور کلی اعداد بزرگتر، سنگ با کیفیت بهتر را معرفی می‌کنند (فرهودی و همکاران ۱۳۸۶).

نموداری نیز توسط بینیاوسکی (Bieniawski 1979) ارائه گردید که

۳- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری به روش تجربی

روش‌های تجربی، بر اساس تجربه و در طی پروژه‌ها و شرایط مختلف جمع‌آوری می‌شوند. طبقه‌بندی مهندسی سنگ، پایه و اساس روش‌های تجربی است و کاربرد گسترده‌ای در مهندسی سنگ دارد. به‌طور کلی، با ترکیب یافته‌های مشاهده شده به‌همراه تجربه و قضاوت مهندسی، می‌توان توده‌سنگ را طبقه‌بندی نموده و شرایط توده‌سنگ و میزان نگهداری لازم را مورد ارزیابی قرار داد. هر طبقه‌بندی، کوششی برای ارزیابی توده‌سنگ در هر پروژه بوده و از این‌رو گزینش پارامترهای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد (معماریان ۱۳۷۴). در این مقاله از سیستم طبقه‌بندی RMR استفاده شده است. روش RMR، برای اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط بینیاوسکی ارائه گردید (Bieniawski 1974, 1976, 1979, 1989). در این روش،

با داشتن مقدار عددی RMR و عرض دهانه فضای موردنظر، می‌توان زمان پایداری سازه (بدون استفاده از وسایل نگهداری) را بدست آورد (تصویر ۳). این زمان در ارائه روش اجرا و زمان نصب نگهداری می‌تواند بسیار مفید باشد (Milne et al. 1998).



تصویر ۳- رابطه بین زمان خودایستایی حفاریات بدون نگهداری و مقدار RMR (Barton 2008)

نایبوستگی در سازند بختیاری و همچنین فاصله زیاد نایبوستگی‌ها در میان این سازند و سازند آغاچاری، می‌توان آنها را به‌عنوان یک محیط پیوسته فرض نمود. بنابراین، در این پژوهش از نرم‌افزار FLAC که یک برنامه صریح تفاضل محدود است و بر مبنای محاسبات لاگرانژین برای مدل‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ کارایی دارد، استفاده شد. با توجه به نوع واحدهای سنگی در سازندهای بختیاری، سازند انتقالی و سازند آغاچاری، برای روش تحلیلی و مدلسازی عددی، سه مقطع انتخاب شد. (جدول ۴).

اطلاعات حاصل از سیستم طبقه‌بندی RMR و همچنین سیستم نگهداری پیشنهادی این روش در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه شده‌اند.

۴- مدلسازی عددی

امروزه، برای کاهش ریسک ساخت و تحلیل و شبیه‌سازی رفتار سازه‌ها، از نرم‌افزارها استفاده می‌شود. یکی از این نرم‌افزارها FLAC می‌باشد که برنامه‌ای بسیار کامل و معتبر در زمینه ساخت سد، تونل، معدن و غیره است (خداپنده‌لو ۱۳۸۴). با توجه به عدم وجود

جدول ۲- اطلاعات حاصل از سیستم طبقه‌بندی RMR توده‌سنگ تونل‌های آبرسان

مدت زمان پایداری	امتیاز	نوع سنگ
۸ سال برای دهانه ۱۲/۶ متری	۸۷ - ۸۴	1a
ریزش بلافاصله	۵۵ - ۴۹	1b
ریزش بلافاصله	۵۲ - ۳۸	2
۴ روز برای دهانه ۱۲/۶ متری	۶۹ - ۵۳	3a
ریزش بلافاصله	۵۶ - ۴۸	3b

جدول ۳- سیستم نگهداری پیشنهادی روش طبقه‌بندی RMR

شاخصیت		میل مهار (با قطر ۲۰ میلیمتر)		نوع سنگ
ضخامت (میلیمتر)		فاصله‌داری (مترمربع)		
دیواره‌ها	تاج	طول (متر)		
-	-	-	-	1a
۳۰	۵۰ - ۱۰۰	۱/۵ - ۲	۴	1b
۱۰۰	۱۰۰ - ۱۵۰	۱ - ۱/۵	۴ - ۵	2
۳۰	۵۰ - ۱۰۰	۱/۵ - ۲	۴	3a
۳۰	۵۰ - ۱۰۰	۱/۵ - ۲	۴	3b

جدول ۴- مقاطع مختلف جهت مدلسازی عددی

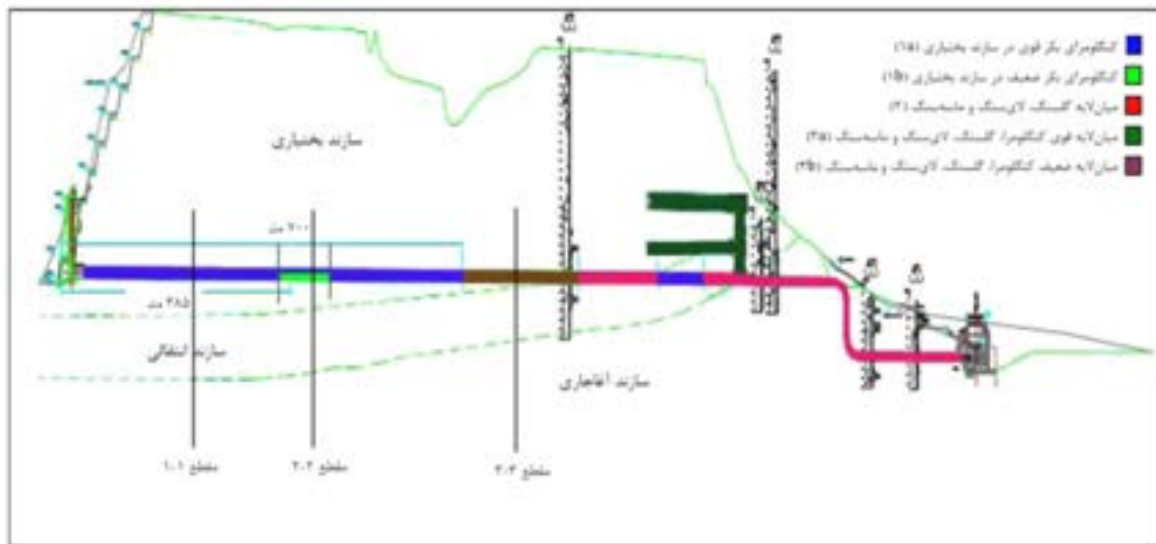
نام مقطع	فاصله از دهانه تونل (متر)	واحد سنگی	فاصله سقف تونل از سطح زمین (متر)
مقطع ۱-۱	۲۰۰	1a	۲۷۰
مقطع ۲-۲	۴۰۰	1b	۲۵۰
مقطع ۳-۳	۸۰۰	3b	۲۳۵

در این بخش، واحدهای 1a، 1b و 3b با استفاده از نرم‌افزار FLAC مورد تحلیل قرار گرفتند. در این تحلیل، مدلی با ابعاد ۱۰۴ متر در ۱۰۴ متر در نظر گرفته شد. مدل رفتاری مورد استفاده در این پژوهش، مدل پلاستیک موهر-کولمب است. این مدل، رفتار سنگ‌ها را در بخش الاستیک نفی نکرده، بلکه در صورتی که رفتار آنها از الاستیک خارج شده و به منطقه پلاستیک برسد را نیز شامل می‌شود. از پارامترهای مورد نیاز جهت تعیین مدل رفتاری موهر-کولمب می‌توان به مدول

الاستیک یانگ، نسبت پواسون، مقاومت چسبندگی و مقاومت کششی سنگ و زاویه اصطکاک و زاویه اتساع اشاره کرد (جدول ۵). به علت محدودیت ارائه تمام نتایج و تحلیل‌ها در این مقاله، تنها مدل سازی انجام شده بر روی مقطع (۱-۱) از مسیر مورد نظر در تصویر ۴ ارائه می‌شود. برای هر یک از مقاطع تونل آب‌بر، مقادیر جابجایی قائم و افقی و نیز کرنش برشی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است.

جدول ۵- پارامترهای معیار شکست موهر-کولمب در واحدهای سنگی 1a، 1b و 3b (شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس ۱۳۸۷)

واحد سنگی	زاویه اصطکاک (درجه)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت چسبندگی (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)
1a	۵۲	۴/۴	۱/۷۲	۰/۲۳	۹/۰
1b	۴۴	۳/۹	۱	۰/۲۵	۶/۰
3b	۳۵	۲/۲	۰/۷۵	۰/۳	۵/۰



تصویر ۴ - موقعیت واحدهای ژئوتکنیکی ۱a، ۱b، ۲، ۳a و ۳b در راستای تونل شماره ۱ و مقاطع بکار رفته در مدل‌سازی (Mahab Gods 2008)

جدول ۶- میزان جابجایی های افقی و قائم بدون نصب نگهداری در مقطع ۱-۱

موقعیت	جابجایی قائم (میلیمتر)		جابجایی افقی (میلیمتر)	
	سقف	کف	دیواره راست	دیواره چپ
تونل راست	۱۱/۰۶	۶/۹۲۷	۱/۹۱۶	۲/۰۷۴
تونل چپ	۱۰/۷۴	۶/۸۹۸	۲/۱۰۸	۱/۹۷۵

جدول ۷- میزان جابجایی های افقی و قائم بدون نصب نگهداری در مقطع ۲-۲

موقعیت	جابجایی قائم (میلیمتر)		جابجایی افقی (میلیمتر)	
	سقف	کف	دیواره راست	دیواره چپ
تونل راست	۱۱/۹۲	۱۰/۲۱	۳/۳۷۴	۳/۵۰۹
تونل چپ	۱۱/۶۱	۱۰/۱۵	۳/۵۰۹	۳/۴۵۹

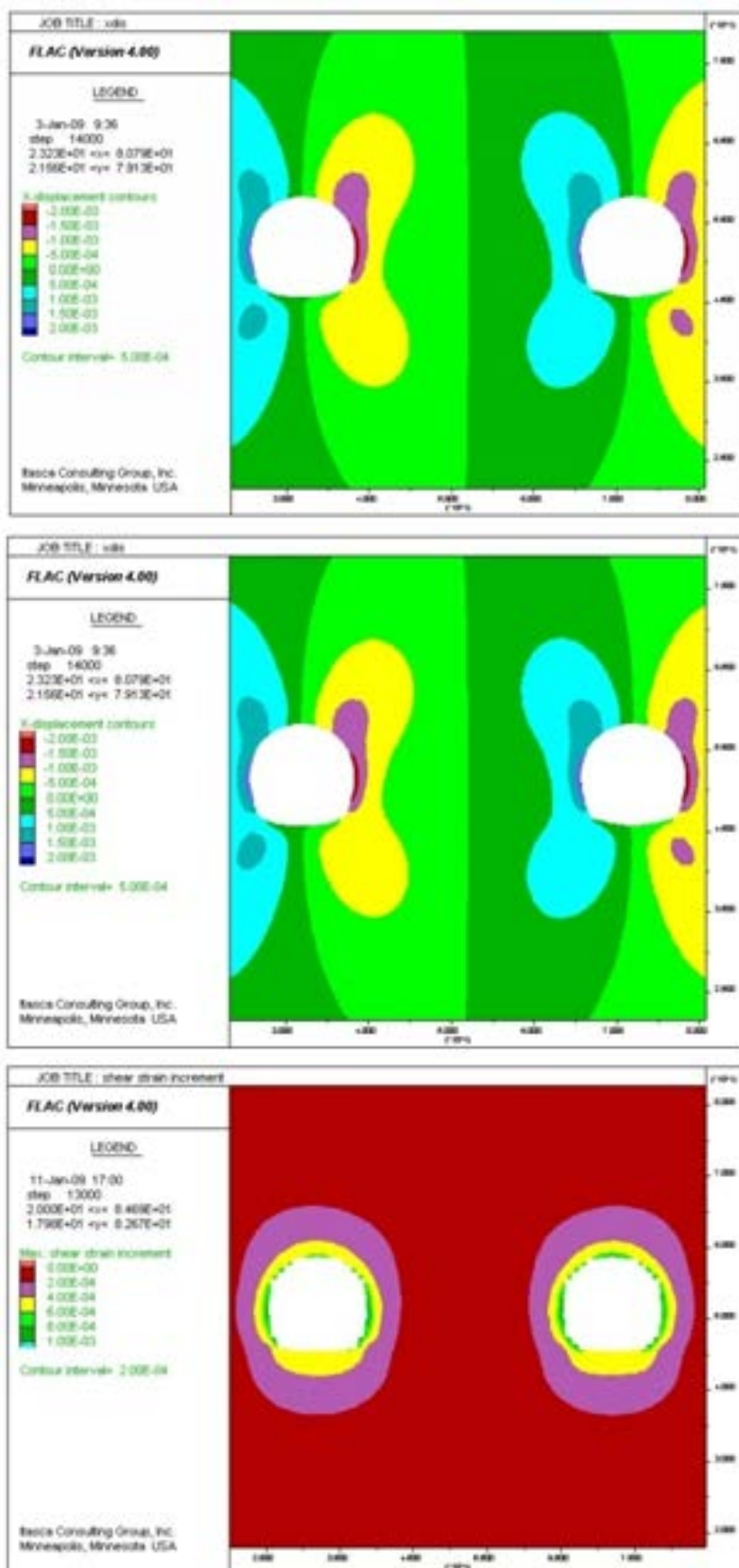
جدول ۸- میزان جابجایی های افقی و قائم بدون نصب نگهداری در مقطع ۳-۳

موقعیت	جابجایی قائم (میلیمتر)		جابجایی افقی (میلیمتر)	
	سقف	کف	دیواره راست	دیواره چپ
تونل راست	۲۴/۵۲	۱۲/۸۸	۹/۰۸۴	۹/۸۳۰
تونل چپ	۲۴/۰۰	۱۲/۸۴	۹/۴۹۰	۹/۰۴۲

جابجایی به دست آمده از اطراف حفره زیرزمینی، می‌توان به پایداری و عدم پایداری سازه زیرزمینی دست یافت. اگر میزان جابجایی در اطراف حفریات زیرزمینی کمتر یا مساوی مقدار بحرانی باشد، در این صورت می‌توان گفت که سازه پایدار خواهد بود. میزان جابجایی بحرانی را می‌توان با استفاده از قضاوت مهندسی و نوع استفاده‌ای که از سازه زیرزمینی می‌شود، بدست آورد.

۱-۴- بررسی میزان پایداری تونل‌های آب‌بر سد با استفاده از روش کرنش بحرانی

پس از تعیین مقدار جابجایی در توده‌سنگ اطراف تونل‌ها (تصویر ۵) لازم است تا با توجه به نتایج به دست آمده، وضعیت پایداری تونل‌ها مورد بررسی قرار گیرد. میزان جابجایی در اطراف حفره زیرزمینی، پارامتر قابل استفاده در تخمین پایداری تونل می‌باشد. بر اساس مقدار



تصویر ۵ - الف: جابجایی‌های قائم در انتهای حفاری دو تونل مقطع ۱-۱ بدون نصب سیستم نگهداری، ب: جابجایی‌های افقی در انتهای حفاری دو تونل مقطع ۱-۱ بدون نصب سیستم نگهداری و ج: کرنش برشی در انتهای حفاری دو تونل مقطع ۱-۱ بدون نصب سیستم نگهداری

استفاده از روابط ساکورایی نیز برای تخمین میزان کرنش بحرانی مناسب است. این روش برای کنترل همگرایی تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساکورایی (Sakurai 1997) رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و کرنش بحرانی برای مواد مختلف ارائه داد. در این حالت می‌توان میزان جابجایی‌ها را با استفاده از روش‌های عددی محاسبه و با جابجایی بحرانی بدست آمده توسط ساکورایی مقایسه نمود. در صورت تجاوز جابجایی از حد مجاز، سازه باید مورد تقویت و نگهداری قرار گیرد. ساکورایی نحوه به دست آوردن کرنش بحرانی (ϵ_c) را به صورت روابط ۲ و ۳، ارائه نمود.

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\gamma_c = (1 + \nu) \epsilon_c \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این حالت، ضریب ایمنی به صورت خودکار بین ۱ تا ۳ در محاسبات منظور می‌شود. کرنش بحرانی حاصل از سنگ بکر به روش آزمایشگاهی، تحت تاثیر عوامل محیطی نظیر درجه حرارت، رطوبت و غیره قرار نمی‌گیرد، بنابراین، روشی قابل اعتماد می‌باشد. مقدار جابجایی بحرانی نیز از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$U_c = \epsilon_c \times a \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه، U_c جابجایی بحرانی و a شعاع تونل می‌باشد (Sakurai 1997). پس از تعیین مقدار جابجایی در توده سنگ اطراف تونل‌ها، لازم است تا بر اساس نتایج به دست آمده، وضعیت پایداری تونل‌ها را مورد بررسی قرار داد.

در این تحلیل، مقدار کرنش برشی حاصل از مدل‌سازی عددی با مقدار کرنش برشی مجاز مقایسه شده است. در صورتی که مقدار کرنش برشی از کرنش بحرانی کمتر باشد، سازه پایدار است. نتایج این تحلیل در جدول ۹ آورده شده است.

در این رابطه، E مدول یانگ سنگ بکر (بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع)، ϵ_c کرنش بحرانی در مقاومت فشاری تک محوره، γ_c کرنش بحرانی و ν ضریب پواسون می‌باشد. کرنش بحرانی برای توده سنگ از رابطه ۴ بدست می‌آید.

$$\epsilon_{cm} = \frac{\sigma_{cm}}{E_m} = \frac{m \sigma_c}{n E} = \left(\frac{m}{n} \right) \epsilon_c \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، E_m و σ_{cm} به ترتیب مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته توده سنگ می‌باشند. مقادیر m و n نیز ضرایبی هستند که مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ بکر را به توده سنگ تبدیل می‌کنند. در این حالت، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته توده سنگ به دلیل وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، کمتر از سنگ بکر خواهد شد. بنابراین ضرایب m و n بین صفر تا یک خواهند بود. مقادیر m و n را می‌توان با استفاده از روش برجا (آزمایش جک تخت و آزمایش برشی

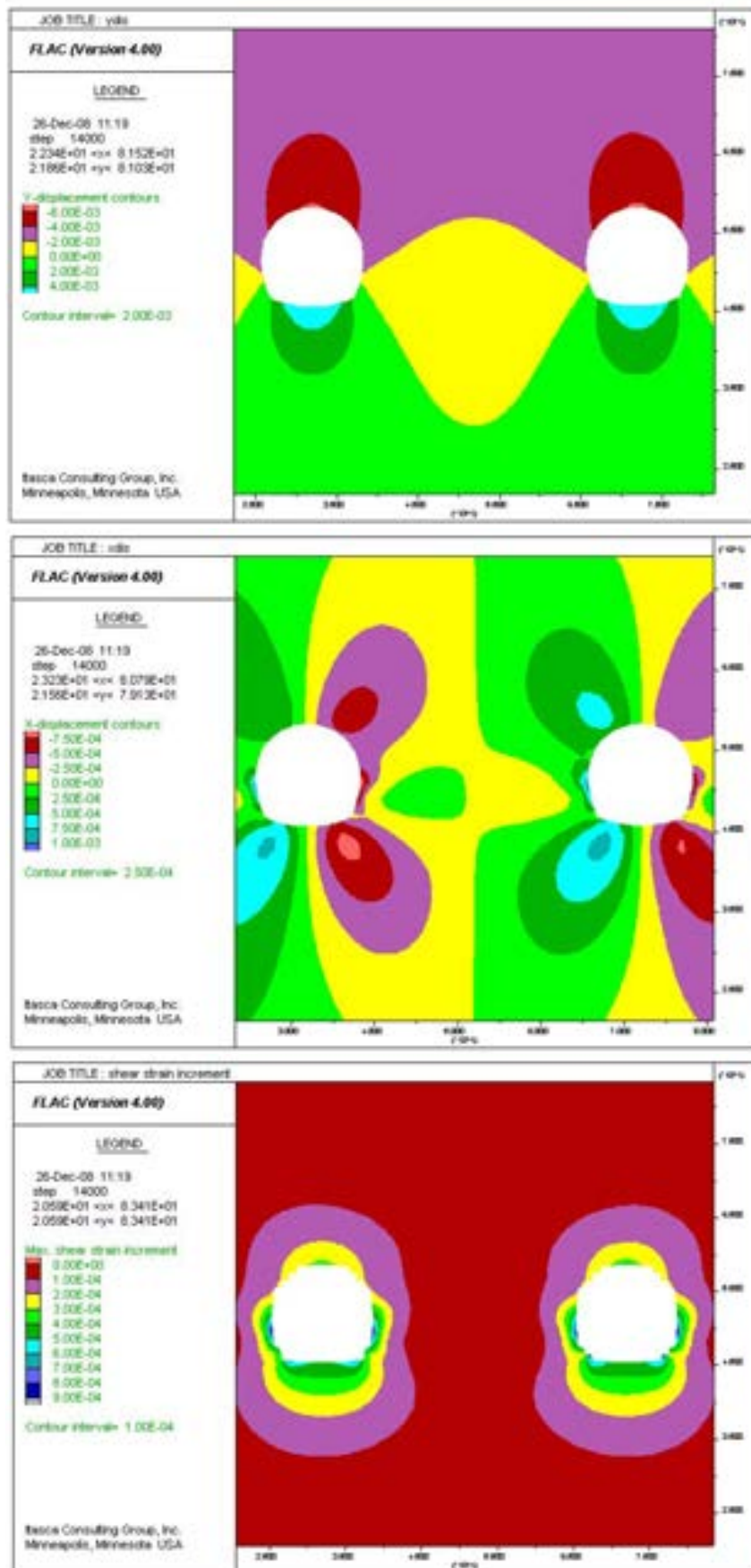
جدول ۹- نتایج حاصل از تحلیل پایداری تونل‌های آب‌بر سد گنوند علیا

مقطع	نوع سنگ	عمق (متر)	کرنش برشی مجاز	کرنش برشی حاصل از مدل‌سازی عددی	وضعیت پایداری
۱-۱	1a	۲۷۰	$1/898 \times 10^{-3}$	$1/183 \times 10^{-3}$	پایدار
۲-۲	1a - 1b	۲۵۰	$1/606 \times 10^{-3}$	$2/088 \times 10^{-3}$	ناپایدار
۳-۳	3b	۲۳۵	$1/231 \times 10^{-3}$	$3/756 \times 10^{-3}$	ناپایدار

شد که سیستم نگهداری تونل‌ها باید ترکیبی از میل‌مه‌ار و شاتکریت باشد. سیستم نگهداری تونل‌ها بر این اساس طراحی شده است. مدل‌سازی سیستم‌های نگهداری شامل شاتکریت و میل‌مه‌ار، به گونه‌ای است که بلافاصله بعد از حفاری، سیستم‌های نگهداری اعمال می‌شوند (تصویر ۶).

۴-۲- طراحی سیستم نگهداری

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل پایداری، لازم است برای کنترل جابجایی‌های سقف، کف و دیواره‌های تونل‌های آب‌بر سد گنوند علیا، سیستم نگهداری مناسبی طراحی شود. بر اساس مطالعات موردی انجام شده، طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ و همچنین روش تحلیلی، مشخص



تصویر ۶- الف: جابجایی‌های قائم در انتهای حفاری دو تونل مقطع ۱-۱ بعد از نصب سیستم نگهداری، ب: جابجایی‌های افقی در انتهای حفاری دو تونل مقطع ۱-۱ بعد از نصب سیستم نگهداری و ج: کرنش برشی در انتهای حفاری دو تونل مقطع ۱-۱ بعد از نصب سیستم نگهداری

قزوینی و قزوینیان: تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا

سیستم نگهداری پیشنهادی برای تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا با نرم‌افزار FLAC، در جدول ۱۰ آورده شده است. توجه به نتایج حاصل از تحلیل پایداری و مدل‌سازی عددی توسط

جدول ۱۰- سیستم نگهداری پیشنهادی، مطابق نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار FLAC

مشخصات شاتکریت	مشخصات میل‌مهار	طول (متر)	نوع سنگ	مقطع
ضخامت (میلی‌متر)	فاصله‌داری (متر مربع)			
۱۰۰	۲ × ۲	۶	1a	۱-۱
۱۰۰	۲ × ۲	۶	1a - 1b	۲-۲
۱۵۰	۱/۵ × ۱/۵	۶	3b	۳-۳

پس از نصب سیستم نگهداری و تعیین مقدار جابجایی در توده‌سنگ اطراف تونل‌ها، لازم است تا با توجه به نتایج بدست آمده، وضعیت پایداری تونل‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش، مقدار کرنش حاصل از مدل‌سازی عددی با مقدار کرنش بحرانی مقایسه شده است (جدول ۱۱).

جدول ۱۱- نتایج تحلیل پایداری تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا، بعد از نصب سیستم نگهداری

وضعیت پایداری	کرنش در مدل FLAC	کرنش بحرانی	عمق (متر)	نوع سنگ	مقطع
پایدار	۹/۴۰۰ × ۱۰-۴	۱/۸۹۸ × ۱۰-۳	۲۷۰	1a	۱-۱
پایدار	۱/۶۰ × ۱۰-۳	۱/۶۰۶ × ۱۰-۳	۲۵۰	1a - 1b	۲-۲
پایدار	۱/۰۸۵ × ۱۰-۳	۱/۲۳۱ × ۱۰-۳	۲۳۵	3b	۳-۳

۵- نتیجه گیری

۱۰۰ میلی‌متر، میل‌مهاری به طول ۶ متر و فاصله‌داری ۱/۵ مترمربع نصب گردد. سیستم طبقه‌بندی RMR، برای مقطع ۳-۳، نصب شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر در تاج و ۳۰ میلی‌متر در دیواره‌ها را پیشنهاد می‌دهد. همچنین باید میل‌مهاری به طول ۴ متر و فاصله‌داری ۲ - ۱/۵ مترمربع نصب شوند. همچنین بر اساس روش عددی، باید شاتکریت به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر، میل‌مهاری به طول ۶ متر و فاصله‌داری ۱/۵ مترمربع نصب گردد.

مراجع

جلالی، محمد اسماعیل، ۱۳۸۱، "مروری بر مسائل مکانیک‌سنگ"، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران.
 خدابنده‌لو، فرشید و بهادر بیگی، داود، ۱۳۸۴، "نرم‌افزار FLAC"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
 سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، ۱۳۹۰، "معادن و معدنکاری در ایران".
 شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۷، "پارامترهای ژئومکانیکی تونل‌های آبرسان طرح سد و نیروگاه گتوند علیا"، نسخه پیش‌نویس.

براساس تحلیل پایداری تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا با استفاده از روشهای تجربی و عددی پس از اتمام حفاری‌ها و قبل از نصب سیستم نگهداری، می‌توان نتیجه گرفت که مقطع ۱-۱، بر اساس سیستم طبقه‌بندی RMR و روش عددی، پایدار و مقاطع ۲-۲ و ۳-۳، بر اساس سیستم طبقه‌بندی RMR و روش عددی ناپایدار می‌باشند. با توجه به تحلیل پایداری تونل‌های آب‌بر سد گتوند علیا با استفاده از روشهای تجربی و عددی پس از اتمام حفاری‌ها و بعد از نصب سیستم نگهداری، می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس سیستم طبقه‌بندی RMR، مقطع ۱-۱ نیازی به نصب سیستم نگهداری ندارد ولی مطابق با نتایج حاصل از روش عددی، این مقطع نیاز به نصب شاتکریت به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و میل‌مهاری به طول ۶ متر و فاصله‌داری ۲ مترمربع دارد. این سیستم برای مقطع ۲-۲، نصب شاتکریت به ضخامت ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر در تاج و ۳۰ میلی‌متر در دیواره‌ها را پیشنهاد می‌دهد. همچنین باید میل‌مهاری به طول ۴ متر و فاصله‌داری ۲ - ۱/۵ مترمربع نصب شوند. بر اساس روش عددی باید شاتکریت به ضخامت

فرهودی، ق.، رهنما، ج.، رحیمی، ع.، سامانی، ب. و کریمی، ا.، ۱۳۸۶، "زمین‌شناسی مهندسی و رده‌بندی مهندسی توده سنگ در ساختگاه سد خاکی قره پیری در شمال شرق شیراز"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، سال ۳ (۱): ۴۳-۳۳.

معماریان، حسن، ۱۳۷۴، "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۳ ص.

وفائیان، م.، ۱۳۸۴، "خواص مهندسی سنگها، تئوری‌ها و کاربردهای اجرایی"، انتشارات ارکان اصفهان، چاپ دوم، ۴۴۶ ص.

هوک، ا.، ۱۳۸۱، "مهندسی سنگ کاربردی"، ترجمه طاهریان، ع.، انتشارات دهخدا، ۵۱۲ ص.

Barton, N., 2008, "Rock engineering for drill and blast and TBM tunneling and important aspects of rock joints and rock mass behavior", *workshop, 4-5 February 2008, Iranian Society of Rock Mechanics (IRSRM), presented Tehran, Iran.*

Bieniawski, Z. T., 1974, "Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling", *In: Bieniawski, Z. T. (ed.), Advances in Rock Mechanics, Vol. 2A: 27-32, Washington, D.C., National Academy of Sciences.*

Bieniawski, Z. T., 1976, "Rock mass classification in rock engineering", *In: Bieniawski, Z. T. (ed.), Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symposium, Vol. 1: 97-106, Cape Town, Balkema.*

Bieniawski, Z. T., 1979, "The geomechanics classification in rock engineering applications", *Proc. 4th. Congress, Int. Soc. Rock Mech. Montreux, Vol. 2: 41-48.*

Bieniawski, Z. T., 1989, "Engineering Rock Mass classification", *Wiley, New York, 251 pp.*

Choi, S.Y. & Park, H. D., 2002, "Comparison among different criteria of RMR and Q-system for rock mass classification for tunnelling in Korea", *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17 (4): 391-401.*

Iran Water and Power Resources Development Company, 2012, "Upper Gatvand Project", <http://fa.iwpc.ir/Gotvand/default.aspx>, available at: 16 Nov. 2012.

Milne, D., Hadjigeorgiou, J. & Pakalnis, R., 1998, "Rock mass characterization for underground hard rock mines", *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13 (4): 383-391.*

Sakurai, S., 1997, "Lessons learned from field measurements in tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12 (4): 453-460.*

Terzaghi, K., 1946, "Rock tunneling with steel supports", *Youngstown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Co.*

Upper Gotvand Dam & HEPP, 2008, "Geology of the Power Tunnels", *Mahab Gods & Coyne et Bellier, JV Report*