

ارزیابی نتایج رفتارنگاری مغارهای زیرزمینی سد مسجد سلیمان

مصطفی پاشانجاتی - کارشناس ارشد شرکت پایاب زمزم
بابک الهیان - کارشناس شرکت پایاب زمزم
مهدی موسوی - استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران
احمد جعفری - استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده

نیروگاه سد مسجد سلیمان در دو بخش شامل "فاز یک" و "طرح توسعه" بر روی رودخانه کارون اجرا گردیده است. این نیروگاه در سنگهای رسوبی که مربوط به سازند بختیاری است قرار دارد. ابعاد بسیار بزرگ مغار نیروگاه به همراه هندسه سه بعدی پیچیده مجموعه فضاهای اطراف این مغار، اجرای یک برنامه جامع رفتارنگاری را ضروری نموده است. از نصب حدود ۲۰۰ ابزار و ثبت اطلاعات حاصله در طی ۴ سال اجرای مغار، رفتار توده سنگ در برگیرنده سازه کاملاً ثبت شد. بر اساس نتایج ثبت شده از رفتار مغار، طرح اولیه سیستم نگهداری دچار تغییراتی گردید که کفایت هر مرحله از طرح توسط ابزارهای نصب شده به تایید رسید. در حال حاضر حفر مغار نیروگاه به اتمام رسیده و جایبیهایی توده سنگ به حالت پایداری رسیده است. مقاله حاضر به ارائه نتایج این برنامه رفتارنگاری می پردازد.

مقدمه

رود کارون با طولی در حدود ۸۴۰ کیلومتر و حوضه آبریزی به وسعت شصت هزار کیلومتر مربع از به هم پیوستن رودخانه های فرعی آب ونگ، بهشت آباد، دوآب، بازفت، خرسان، و منج تشکیل می شود. مسیر این رودخانه از رشته کوههای زاگرس شروع و پس از عبور از کنار شهرهای ایذه، مسجد سلیمان، شوشتر، اهواز و خرمشهر به خلیج فارس خاتمه می یابد. مطالعات اولیه این طرح توسط مشارکت دو شرکت مهاب قدس و ایگز (از کشور کانادا) انجام و سپس در سال ۱۳۶۸ توسط دو شرکت مشانیر و لامایر (از کشور آلمان) بازنگاری شد. بر اساس نتایج این مطالعات تصمیم به احداث یک سد و نیروگاه در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان مسجد سلیمان گرفته شد. این طرح در ابتدا سد و نیروگاه کارون ۴ و سپس سد و نیروگاه گدارلندر نام گرفت اما از زمستان ۱۳۷۵ به سد و نیروگاه برق - آبی مسجد سلیمان تغییر نام داد.

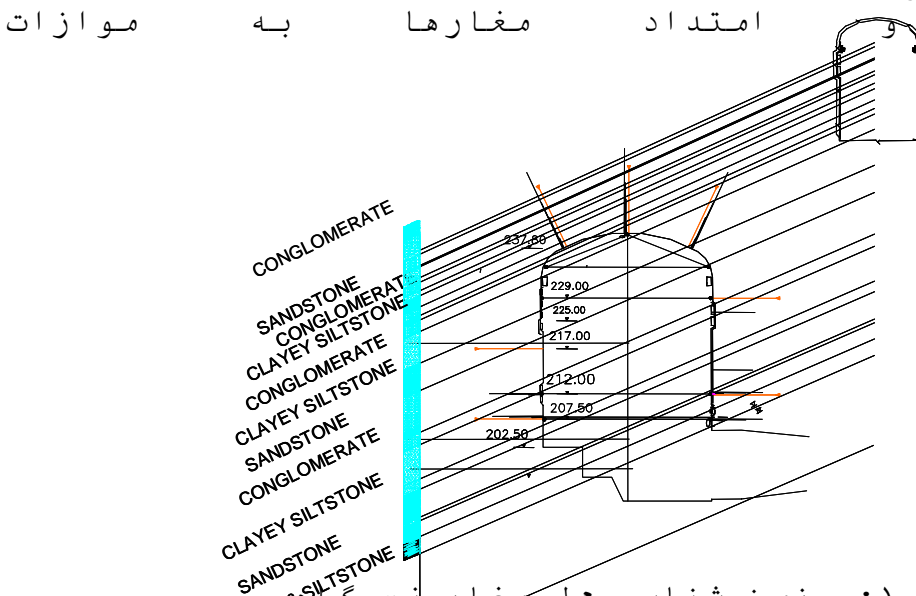
سد مسجد سلیمان از نوع سنگریزه ای با هسته رسی به ارتفاع ۱۷۷ متر، طول تاج ۴۸۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر و عرض پی ۷۰۲ متر احداث

گردیده است. نیروگاه مسجد سلیمان در دو بخش شامل "فاز یک" و "طرح توسعه" اجرا شده است. فاز یک این طرح شامل یک مغار نیروگاه با طول ۱۵۶ متر عرض ۳۰ متر و ارتفاع ۵۰ متر و مغار ترانسفورمر با عرض ۱۳,۶ متر طول ۱۱۰ متر و ارتفاع ۲۱ متر و تونل های آب بر با قطرهای کمتر می باشد. از نظر ارتفاعی سقف مغار نیروگاه از کف مغار ترانسفورمر ۹ متر پایین تر و از نظر عرضی، محورهای آنها ۳۰ متر با هم فاصله دارند. همچنین امتداد هر دو فضا یکسان می باشد. طرح توسعه نیروگاه سد مسجد سلیمان در امتداد مغار نیروگاه فاز یک می باشد که ابعاد مشابه فاز یک داشته و طول کمتری نسبت به فاز یک دارد (۱۱۲ متر). مغار ترانسفورمر طرح توسعه دقیقاً مشابه مغار ترانسفورمر فاز یک می باشد.

زمین شناسی منطقه

به طور کلی ۵ سازند، زمین شناسی منطقه طرح را تشکیل می دهند که عبارتند از :

۱) سازند بختیاری (۲) سازند آجاری (۳) سازند میشان (۴) سازند گچساران (۵) سازند آسماری. مغارهای زیرزمینی سد مسجد سلیمان (شکل ۱) در تکیه گاه راست سد و در واحدهای ۴ و ۵ سازند بختیاری واقع شده اند. شیب لایه ها در این محل بین ۳۰-۲۵ درجه است



شکل ۱: زمین شناسی محل مغار نیروگاه
 امتداد لایه بندی انتخاب شده است. سقف مغار نیروگاه در واحد ۵ سازند بختیاری بوده و رخنمون آن را کنگلومرا، ماسه سنگ و سنگ رس تشکیل می دهند. تقریباً تمام سقف مغار ترانسفورمر از جنس کنگلومرا و ماسه سنگ است.

پارامترهای ژئومکانیکی سنگ های منطقه

بر اساس آزمایشهای برجا و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده پارامترهای ژئومکانیکی برای سنگ های مختلف با توجه به زمین شناسی موجود در منطقه مطابق جدول یک بدست آمده است (Stabel,2002).

جدول ۱: پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه

نوع سنگ	مدول دگرشکل پذیری GPa	نسبت پواسون	چسبندگی MPa	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
کنگلومرا	۱۵	۰,۲	۲,۲۸	۴۳
ماسه سنگ	۷	۰,۲	۱,۶۷	۳۸
گل‌سنگ	۶	۰,۲۵	۰,۷۳	۳۰

برنامه ابزار بندی در طرح مسجد سلیمان:

بطور کلی مغار نیروگاه طرح توسعه سد مسجد سلیمان در تناوبی از سنگهای کنگلومرای تحکیم یافته، گل سنگ، سیلت و ماسه سنگ قرار دارد. بخش اعظم مغار ترانسفورمر نیز در کنگلومرا قرار گرفته است. مقاومت زیاد کنگلومرای محل و زیاد بودن فاصله داری درزه ها شرایط پایداری را در فضا های قرار گرفته در این بخش از جمله مغار ترانسفورمر ایجاد کرده است. در بخشهایی از مغار نیروگاه که لایه های ضعیف تر گل‌سنگ رخنمون دارند و شرایط توزیع تنش با توجه به ابعاد وسیع مغار فشارهای زیادی را بر توده سنگ اعمال می کند صور مختلفی از ناپایداری بروز می یابد که برای جلوگیری از تشدید آن نیاز به اعمال سیستمهای تقویتی می باشد.

با هدف ثبت رفتار توده سنگ در دو مغار مذکور تعدادی ایستگاه رفتار نگاری طبق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: نوع و محل ایستگاههای ابزار دقیق

ابزار های مصرفی	متر از ایستگاه های رفتار نگاری (از ابتدای مغار)						
	۱۰۷	۹۳	۷۵	۴۳	۲۵	۸	مغار نیروگاه
اکستنسومترهای ۱۵ و ۳۰ متری با ۴ انکر، بارسنجهای ۳۵ تنی و سلولهای فشار	۱۱۰	۱۰۰	۷۸	۵۸	۲۸	۰	مغار ترانسفورمر

همانگونه که بیان شد در طول مغار نیروگاه شش ایستگاه رفتار نگاری در نظر گرفته شده که برای رعایت اختصار نتایج دو ایستگاه میانی مغار (متر از ۴۳ و ۷۱) در اشکال ۲ تا ۷ نشان داده شده است. در مجموعه شکلهای سه گانه ارائه شده، بالاترین شکل نشانگر جابجایی مطلق سنگ، شکل میانی نشانگر بار قرائت شده بر روی بارسنج مجاور همین ابزار و شکل زیرین نشانگر جابجایی سنگ

نسبت به عمق می باشد. در ارتباط با نمودارهای ارائه شده موارد زیر را میتوان ذکر کرد:

- پس از اینکه کف مغار تا حدی حفاری شده و محل نصب ابزار در سقف از دسترس پرتاب سنگهای آتشفشانی خارج گردیده، اقدام به نصب واحد قرائت الکتریکی بر روی اکستنسومترها شده است. زمان این نصب در روی هر شکل با علامتی مشخص گردیده است.

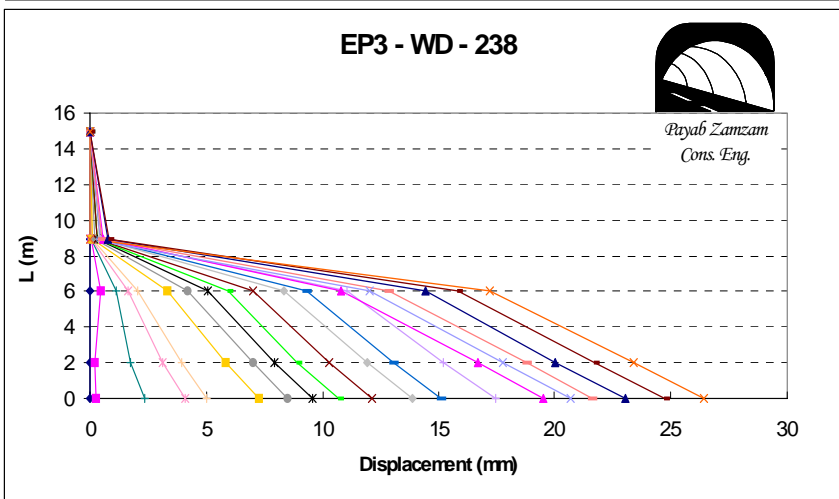
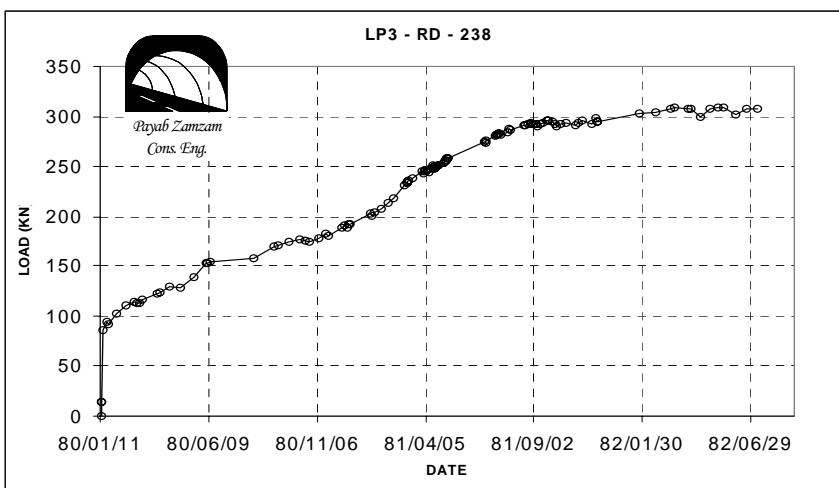
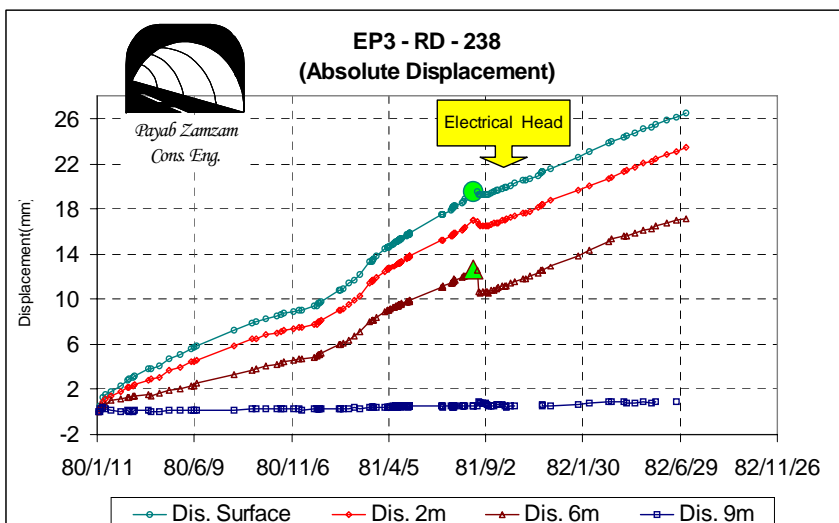
- در برخی از شکلهای (نظیر شکل ۶) نیروی بارسنج به دلیل افزایش زیاد ناشی از جابجایی زمین و نزدیک شدن به حد تسلیم بولت بار از روی بولت مربوطه آزاد شده و مجدداً در سطح پائین تری از بار قرار گرفته است. در برخی موارد که سنگ به جابجایی خود ادامه داده (نظیر شکل ۲) و بار بارسنج آزاد نگردیده، مقدار نیرو به حد تسلیم بولت رسیده و مشاهده میشود که با افزایش جابجایی سنگ نیروی بارسنج تغییر عمده ای نداده است.

- ترسیم میزان جابجایی سنگ در عمق تونل چنانچه از اشکال میانی هویداست نشانگر آن است که به مرور زمان مقدار جابجاییها افزوده شده و مقدار آن نسبت به عمق میرا می شود. روند میرا شدن جابجایی نسبت به عمق چنانکه مشاهده میشود یک شکل نمایی منفی داشته و مشابه نتایجی است که از سایتهای دیگر گزارش شده است. با استفاده از این نمودارها میتوان عمق سست شدگی توده سنگ را تعیین نمود. بر این اساس بیشتر جابجایی در عمق بین ۹-۱۲ متر برای بخش D/S، بین اعماق ۶-۷ متر برای بخش میانی و حدود ۵ متر برای بخش U/S متمرکز شده است. با توجه به طول بولتهای نصب شده در مغار که در جدول ۵ به آن اشاره شده است میتوان مشاهده کرد که طول بولت ها در D/S عمدتاً برای تامین هدف نگهداری کافی بوده است و این طول برای U/S مقداری محافظه کارانه می باشد.

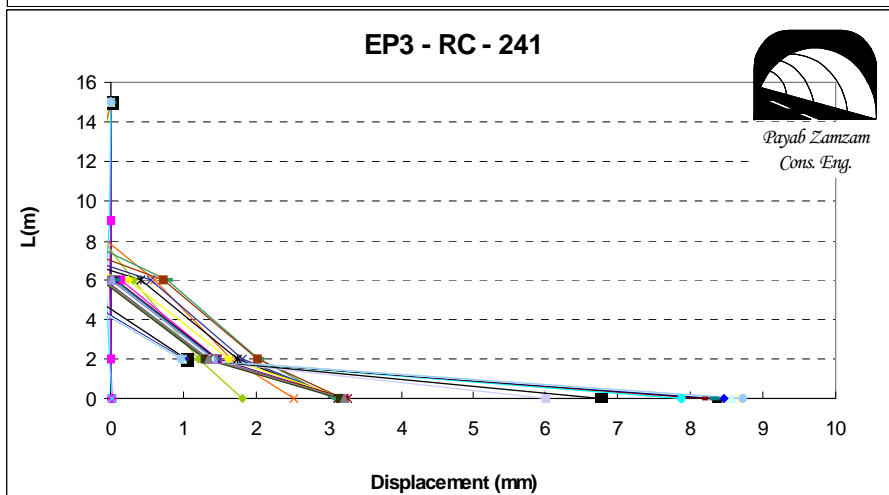
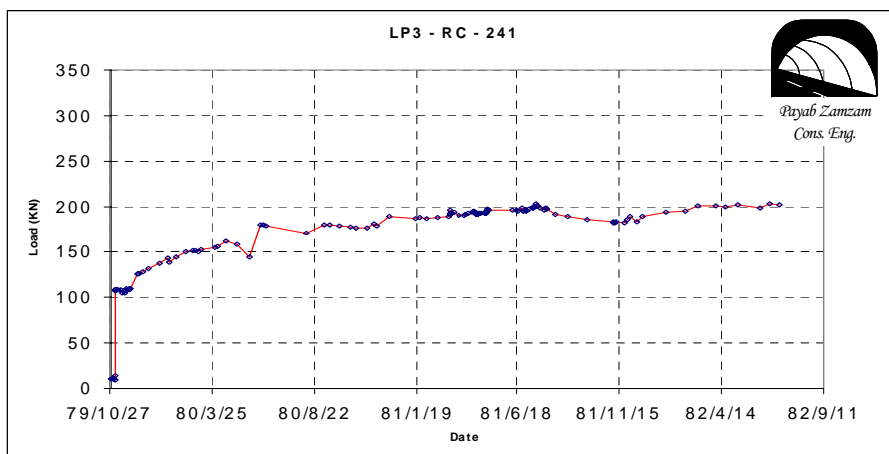
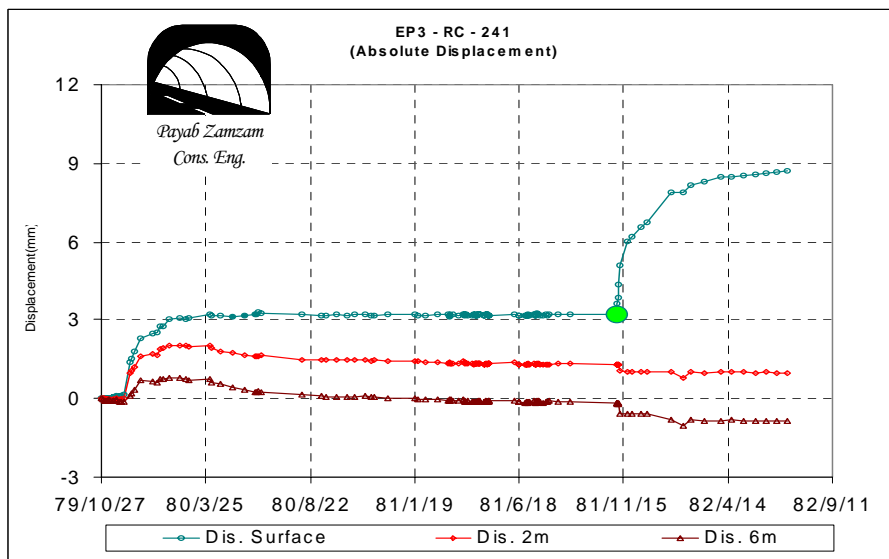
- مقایسه نتایج جابجایی مغار در بخش بالا دست (U/S)، بخش میانی سقف (CL) و بخش پایین دست (D/S) نشان میدهد که مقدار جابجایی به ترتیب از سمت بالادست به سمت پایین دست مغار افزایش می یابد. این اثر ناشی از رخنمون لایه گلسنگ در پایین دست و حضور کنگلومرای یکپارچه در بالادست می باشد. در جدول ۳ جمع بندی مربوط به مقدار جابجایی سطحی در این سه بخش به همراه عمق زون سست شده و مقدار افزایش بار بارسنج هم جوار آن ارائه شده است.

جدول ۳: جمع بندی اطلاعات جابجایی در سقف مغار نیروگاه

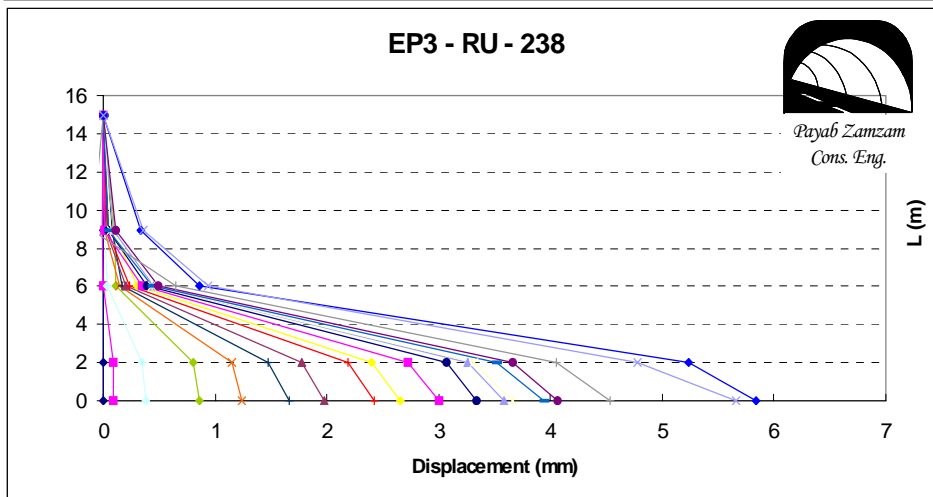
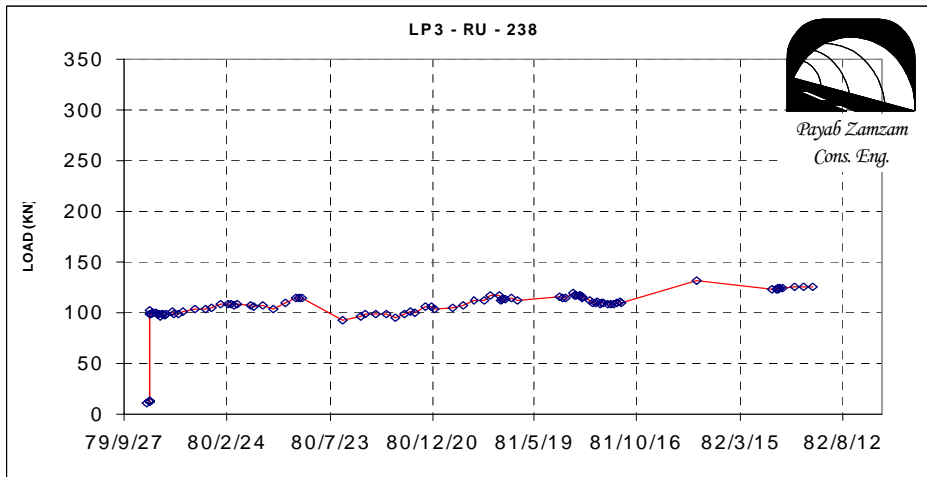
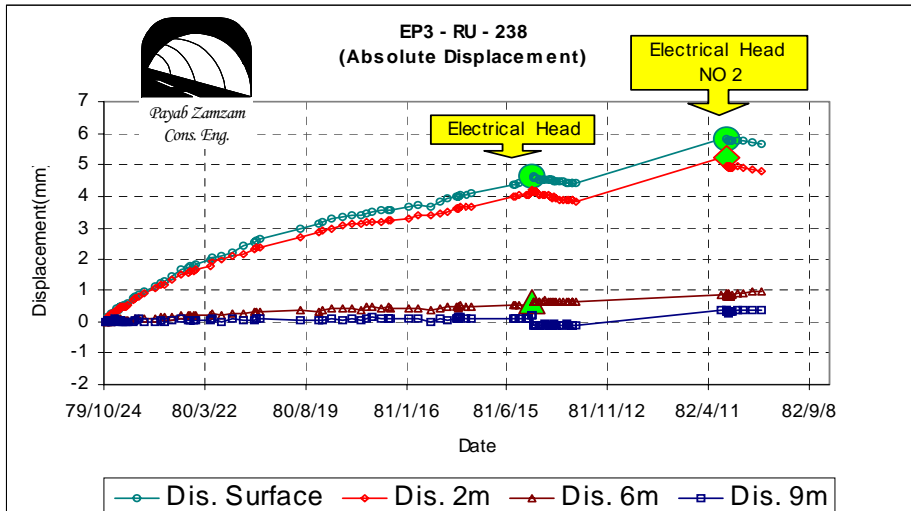
محل	جابجایی سطحی (mm)	عمق حرکت سنگ (m)	افزایش بار بارسنج (KN)
پایین دست	۲۴	۹-۱۲	۲۳۰
میانی	۱۰	۶-۷	۱۲۰
بالا دست	۴,۶	۵-۶	۵۰



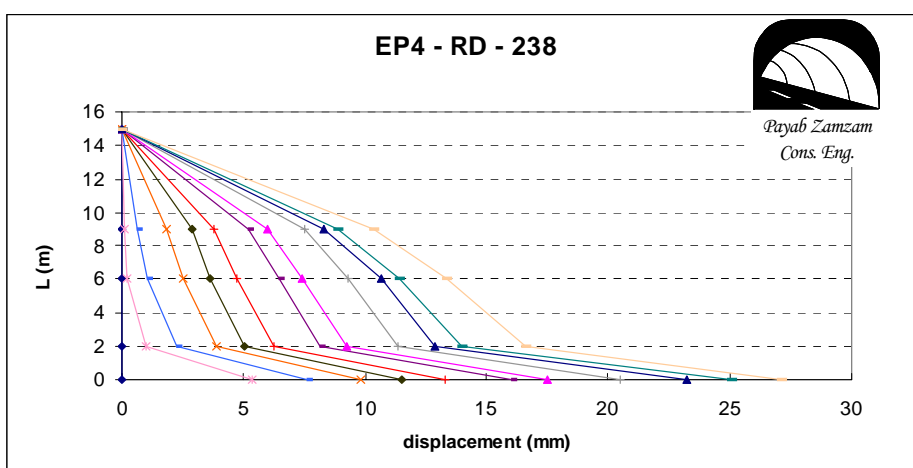
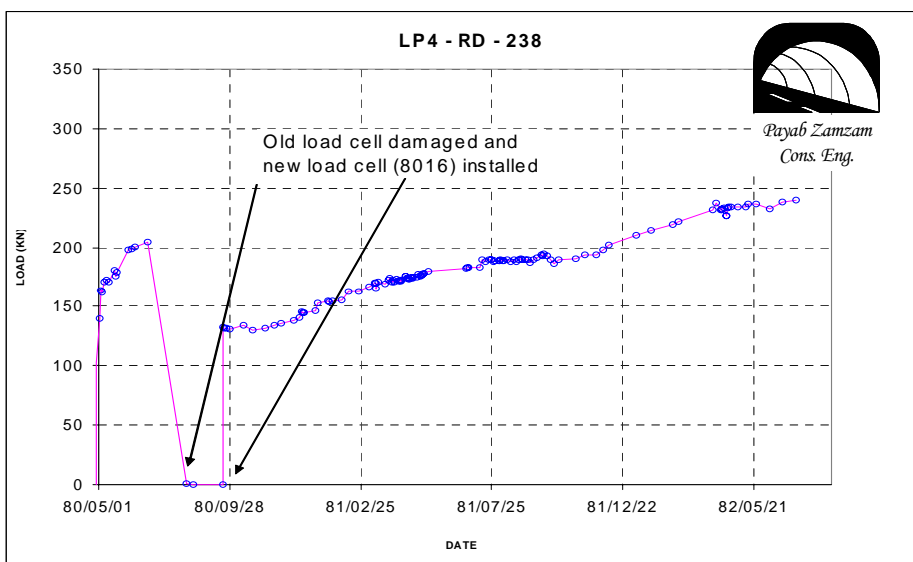
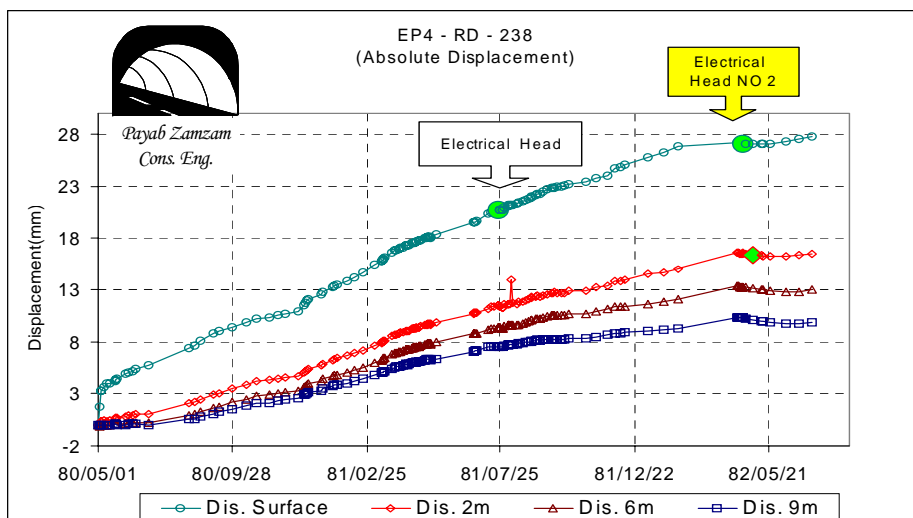
شکل ۲ - نمودارهای کشیدگی سنج ، بارسنج و جابجایی - عمق در
متر ۴۳ ، D/S



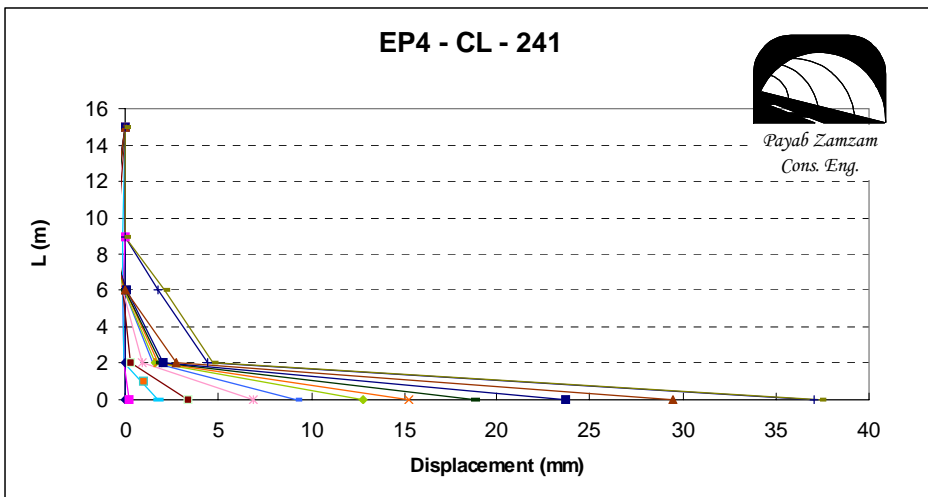
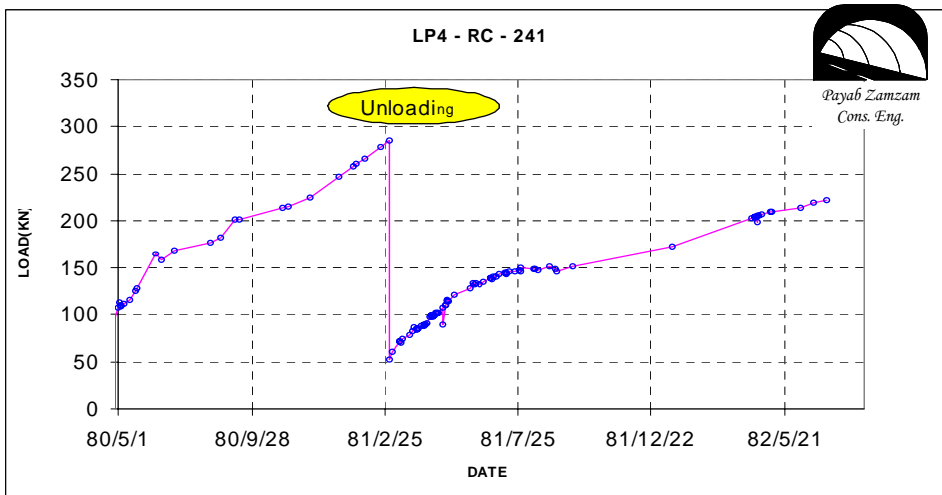
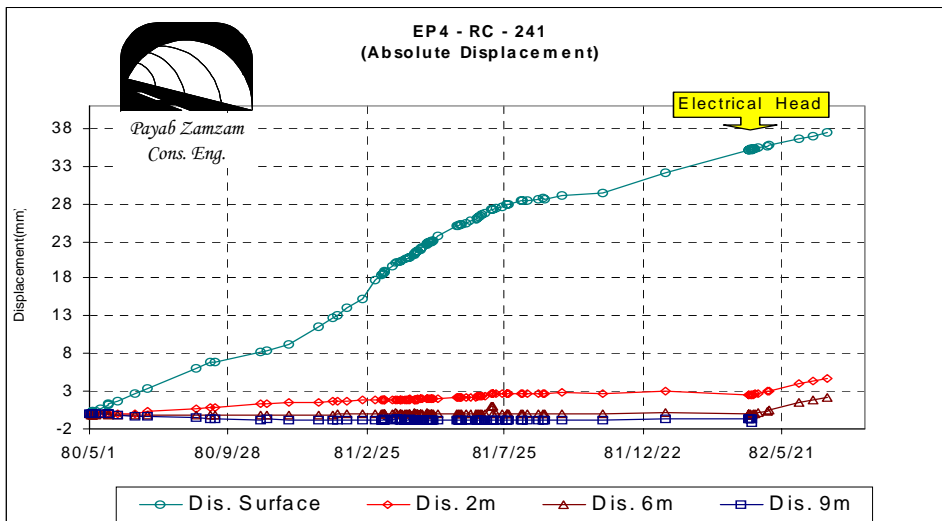
شکل ۳ - نمودارهای کشیدگی سنج ، بارسنج و جابجایی - عمق در
متر از ۴۳ ، C/L



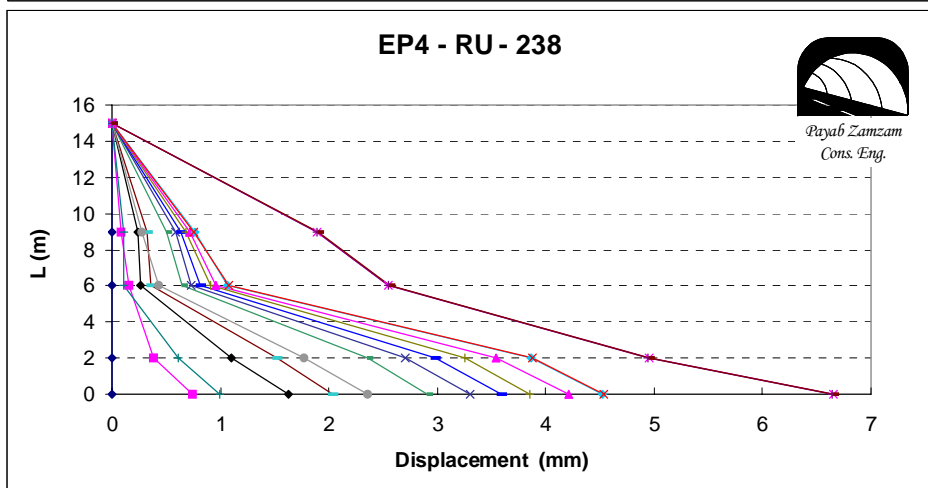
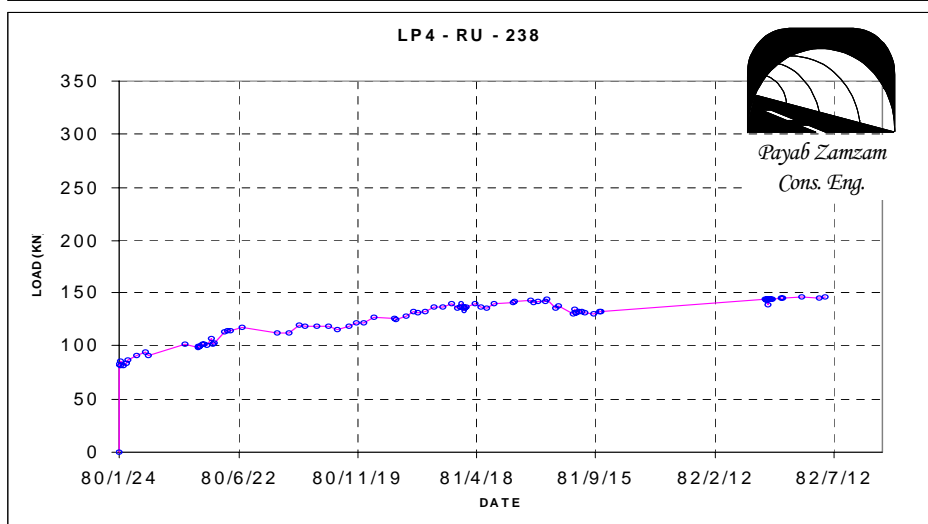
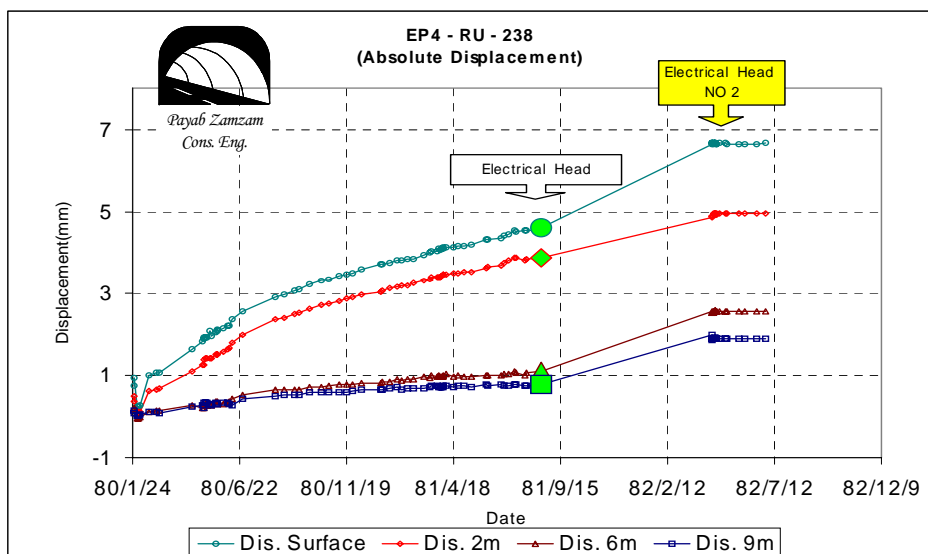
شکل ۴ - نمودارهای کشیدگی سنج ، بارسنج و جابجایی - عمق در
متراژ ۴۳ ، U/S



شکل ۵ - نمودارهای کشیدگی سنج ، بارسنج و جابجایی - عمق در
متر از ۷۱ ، D/S



شکل ۶ - نمودارهای کشیدگی سنج ، بارسنج و جا بجا یی - عمق در
متر از ۷۱، C/L



شکل ۷ - نمودارهای کشیدگی سنج ، بارسنج و جابجایی - عمق در
متر از ۷۱، U/S

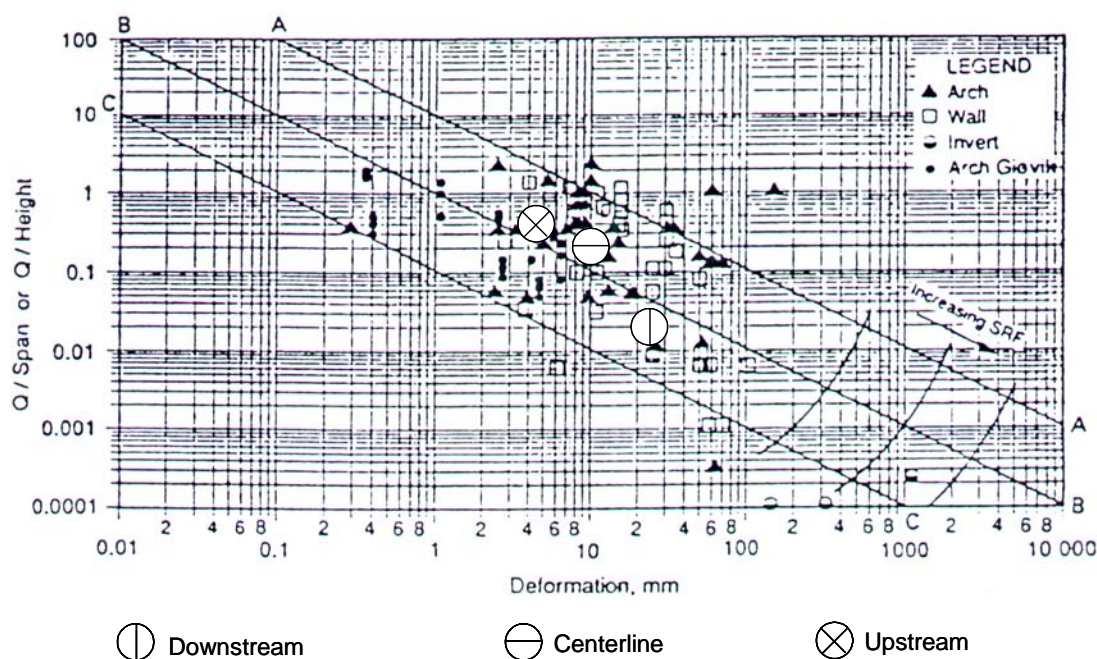
Barton (1999) با استفاده از اطلاعات بسیاری که از مغارهاي جهان جمع آوري کرده، رابطه اي تجربي بين مقدار جابجايي مغار نگهداري شده و ابعاد آن و همچنين كيفيت توده سنگ (Q) به شکل زیر ارائه کرده است:

$$\Delta(mm) = \frac{span(m)}{Q}$$

بر اساس مجموع اطلاعات جمع آوري شده از سایت، مقادير Q براي بخشهاي مختلف سقف مغار در جدول ۴ ارائه شده است. در صورتیکه جابجاييهاي ثبت شده در جدول ۳ را با مقدار پيشگويي شده توسط رابطه بالا و در شکل ۸ مقايسه نماييم مشاهده مي شود که مقادير جابجاييهاي ثبت شده در مغار در محدوده مقادير معمول ثبت شده در ساير نقاط جهان مي باشد.

جدول ۴: مقدار جابجايي ثبت شده در پروژه حاضر و در ساير پروژه هاي جهان

$\Delta(mm) = \frac{span(m)}{Q}$	Q	متوسط مقدار جابجايي ثبت شده (mm)	محل
۵۰	۰,۶	۲۴	پايين دست
۵	۶	۱۰	مياني
۲,۵	۱۲	۴,۶	بالا دست



شکل ۸: مقايسه نتايج جابجاييهاي ثبت شده و نتايج ساير پروژه هاي مشابه در جهان (Barton, 1999).

- جایابی های با روند افزایشی در بسیاری از بخشهای مغار بالاخص در بخش D/S مشاور طرح را متقاعد کرد تا اقدام به نصب تاندونهای اضافی تقویتی مطابق جدول ۵ نماید. روند افزایشی جایابیها قبل از نصب این ابزار و متوقف شدن این روند پس از نصب در نتایج ثبت شده توسط ابزار ها بخوبی آشکار بود. فشار معادلی که این سیستمهای نگهداری به مغار اعمال می کنند براساس روابطی که توسط Hoek (1999) ارائه شده، همچنین مقدار فشار وارد از طرف توده سنگ بر اساس معیار Q در جدول ۵ قید شده است. چنانچه از جدول بر می آید، فشار سقف در بخش پایین دست قبل از نصب تقویت اضافی بیش از فشار وسایل نگهداری بوده که این امر علت حرکات فزاینده سقف بوده است. پس از اعمال سیستم تقویتی اضافی، فشار وسایل نگهداری بیش از فشار سقف شده که باعث متوقف شدن جایابی سقف گردیده است. در بخش C/L و U/S همان وسایل اولیه نگهداری برای تامین پایداری کافی بوده است.

جدول ۵: فشار وارد از طرف وسایل نگهداری به سنگ

فشار معادل وارده به سقف از طرف وسایل نگهداری (MPa)		فشار وارد از سقف طبق روش Q (MPa)	سیستم نگهداری در مغار	نیروگاه
قبل از نصب تاندون	بعد از نصب تاندون			
۰,۱۹۲	۰,۲۸۸	۰,۲۲۵	D/S - بولت ۲۸ به طول ۶ و ۱۲ متر با فاصله داری ۱,۷۵ * ۱,۷۵ متر و تاندون ۴۰ به طول ۲۰ متر با فاصله داری ۲*۲ متر	
۰,۱۹۲	۰,۲۷۰	۰,۱	C/L - بولت ۲۸ به طول ۶ و ۱۲ متر با فاصله داری ۱,۷۵ * ۱,۷۵ متر و تاندون ۴۰ به طول ۲۰ متر با فاصله داری ۲*۲ متر	
۰,۱۹۲	۰,۲۵۳	۰,۰۵	U/S - بولت ۲۸ به طول ۶ و ۱۲ متر با فاصله داری ۱,۷۵ * ۱,۷۵ متر و تاندون ۴۰ به طول ۱۵ متر با فاصله داری ۲,۵*۲,۵ متر	
۰,۰۷۳		۰,۰۵	بولت ۲۸ به طول ۶ و ۱۲ متر با فاصله داری ۱,۷۵ * ۱,۷۵	ترانسفورمر

جمع بندي

برنامه وسیع ابزار بندي مجموعه فضا هاي زیر زميني در طرح توسعه نیروگاه سد مسجد سلیمان یکی از موفق ترین برنامه هاي ابزار بندي است که در کشور به تمامه توسط متخصصین داخلی اجرا شده است. در این برنامه که طی مدت ۴ سال اجرا گردید اطلاعات اخذ شده از ابزار ها این امکان را فراهم آورد تا در یک تعامل پیوسته و همگام با مشاور طرح، برنامه اولیه سیستم نگهداري تغییر یابد. مناطق بحرانی در این طرح قبل از بروز ناپایداری و ایجاد خسارت اعلام گردید و تمهیدات اضافه نگهداري اعمال شد. کافی بودن میزان تقویتهای اضافی توسط ثبت پیوسته داده ها و مشاهده تغییر روند افزایشی جابجائیها اثبات گردید. این برنامه در آینده نزدیک با نصب و راه اندازی سیستم خودکار جمع آوری داده ها (Data Acquisition System) به اتمام خواهد رسید.

فهرست منابع

Barton, N., (1999), "General report concerning some 20th century lessons and 21st century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment", 9th international congress on rock mechanics, Paris, France.

Stabel B. Bauckage, (2002), "Report on Godar-E-Landar HEPP, Extension Cavern Support".

Hoek, E., (1999), "Support for very weak rock associated with faults and shear zones", *Proceedings of the Rock Support and Reinforcement Practice in Mining Conference*, Rotterdam. Balkema.