

## رویکرد جامع در مطالعه وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق (مجموعه تونل های آزادراه خرم آباد - پل زال)

سیدحامد موسوی<sup>۱</sup>، مصطفی شریف زاده<sup>۲\*</sup>

پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۵

دریافت مقاله: ۸۹/۶/۲

### چکیده

در این مقاله الگوی مطالعه تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق با رویکرد سیستماتیک و قابل کاربرد در تونل سازی ارائه می شود. در الگوی ارائه شده، در یک فرایند سیستماتیک، در ابتدا داده های توده سنگ در مراحل مختلف مطالعات ژئوتکنیک جمع آوری می شوند، سپس داده های به دست آمده از توده سنگ بر مبنای پارامترهای شاخص، طبقه بندی می شوند و در نهایت براساس آن قابلیت کمیت عمق در مدل سازی تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ با روش های کیفی و کمی تأیید می شود. تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق برای طراحی تونل به کار می رود. در این الگو طبقه بندی داده های خصوصیات توده سنگ براساس پارامترهای شاخص، امکان به روزرسانی و تعمیم نتایج مطالعات گذشته به موارد مشابه را ممکن می کند. در این صورت، مطالعات ژئوتکنیک به یک ساختار جامع با هدف نهایی معلوم، تبدیل می شود که در تکامل پایگاه داده ها نقش مؤثری ایفا می کند. کارایی الگوی پیشنهادی برای بررسی تغییرپذیری ۱۱ خصوصیت توده سنگ شامل: بازشدگی، تداوم، فاصله داری درزها، مقاومت فشاری سنگ بکر، مدول الاستیسیته، شاخص کیفی توده سنگ (RQD)، شاخص مقاومت ژئومکانیکی مینا (BRMR)، شاخص شرایط درزه داری (JCR)، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری توده سنگ و فاکتور پیوستگی نسبت به عمق در ۱۲ جفت تونل آزادراه خرم آباد- پل زال مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش عمق اندازه گیری، از ۵۰ به ۲۵۰ متر خصوصیات توده سنگ بهبود می یابد، به طوری که امتیاز شرایط درزه داری در رده بندی ژئومکانیکی مینا (BRMR) از ۱۵-۱۰ به ۳۰-۲۵ افزایش می یابد و امتیاز ژئومکانیکی مینا (BRMR) حدود ۲۰-۴۵ عدد افزایش می یابد که معادل با بهبود رده بندی کیفیت توده سنگ به اندازه حداقل یک کلاس می باشد. همچنین فاکتور پیوستگی از  $CF > 30$  به  $3 < CF < 6$  کاهش می یابد که سنگ توده ای (پیوسته معادل) به سنگ پیوسته - ناپیوسته (بلوکی - سنگ بکر) تبدیل می شود. بهبود کیفیت توده سنگ در عمق به دلیل محصور بودن توده سنگ، کاهش هوازدگی و نظایر آن است، بنابراین، تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق در طراحی سیستم نگهداری، انتخاب روش حفاری و مهندسی کردن قراردادهای مراحل ابتدایی تونل سازی به کار می رود.

کلید واژه ها: خصوصیات توده سنگ، رده بندی توده سنگ، ژئوتکنیک، عمق اندازه گیری، تغییرپذیری، خرم آباد- پل زال

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) [sehamoosavi@gmail.com](mailto:sehamoosavi@gmail.com)

۲. استادیار دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) [sharifzadeh@aut.ac.ir](mailto:sharifzadeh@aut.ac.ir)

## مقدمه

از آن جایی که اطلاعات ما در مورد جهان اطرافمان محدود است، اگر یک کمیت خاص به دفعات اندازه‌گیری شود، مقایسه اندازه‌گیری‌ها، تفاوت کمی مقادیر ثبت شده را تأیید می‌کند و آن کمیت مقدار یکتایی را به خود اختصاص نمی‌دهد (Shahriar et al., 2008). این تغییرپذیری داده‌های یک کمیت در علوم مرتبط با زمین‌شناسی و مطالعات ژئوتکنیکی، عدم قطعیت نامیده می‌شود. به بیان ریاضی اگر مقدار واقعی کمیت را  $X$  فرض کنیم و تغییرات اندازه‌گیری‌ها در پیرامون مقدار واقعی را با  $\alpha$  نشان دهیم، مجموعه مقادیر اندازه‌گیری ( $y$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Baecher and Christian, 2003):

$$y = x + \alpha$$

یکی از انواع عدم قطعیت یا تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ عدم قطعیت شناختی می‌باشد که به چگونگی و میزان شناخت یک فرایند مربوط می‌شود (Bestfit, 2003). فرایندها براساس فرضیات ساده کننده تعریف می‌شوند که نسبت به واقعیات طبیعت متفاوت هستند، بنابراین ناتوانی در کمی کردن صحیح تمامی پارامترهای معرف یک فرایند، منشأ تغییرپذیری شناختی را تشکیل می‌دهد. آزمایش‌ها و افزایش مشاهدات برای تشخیص عوامل مؤثر بر تغییرپذیری و کاهش عدم قطعیت شناختی استفاده می‌شود و ارائه نتایج آزمایش‌ها با روابط تجربی، تغییرپذیری داده‌ها را جهت داده و پیش‌بینی آن‌ها را ممکن می‌کند (Bestfit, 2003).

یکی از پارامترهایی که برای مدل‌سازی و تخمین تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ مورد توجه محققین قرار گرفته است، عمق اندازه‌گیری می‌باشد. در شکل ۱ شمای وابستگی برخی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق نشان داده شده است. همچنین جدول ۱ روابطی را برای تخمین تغییرپذیری برخی پارامترهای توده سنگ را نسبت به عمق نشان می‌دهد. در شرایطی که از لحاظ فنی اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌ها (مثلاً توپوگرافی خشن و عدم دسترسی) ممکن نیست، این روابط برای تخمین شرایط توده‌سنگ با اهداف طراحی به کار می‌روند. در حالی که فرایند تعیین روابط جدول ۱ بر پایه

داده‌های جمع‌آوری شده از یک محدوده زمین‌شناسی بوده و موردی می‌باشند. در این مقاله در یک رویکرد سیستمی، تغییرات خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق برای استفاده در تونل‌سازی با یک الگوی جامع مطالعه می‌شود. با توجه به طبقه‌بندی خصوصیات توده‌سنگ براساس پارامترهای معرف توده‌سنگ، در الگوی مطالعه وابستگی خصوصیات توده‌سنگ نسبت به عمق، می‌توان نتایج به دست آمده را در شرایط مشابه به پروژه‌های دیگر تعمیم داد. در این مقاله ابتدا الگوی مطالعه وابستگی خصوصیات توده‌سنگ معرفی می‌شود. سپس الگوی پیشنهادی برای داده‌های ژئوتکنیکی ۱۲ جفت تونل‌های آزادراه خرم آباد - پل‌زال به کار می‌رود. و سرانجام نتایج مطالعه وابستگی خصوصیات توده‌سنگ نسبت به عمق بحث می‌شود.

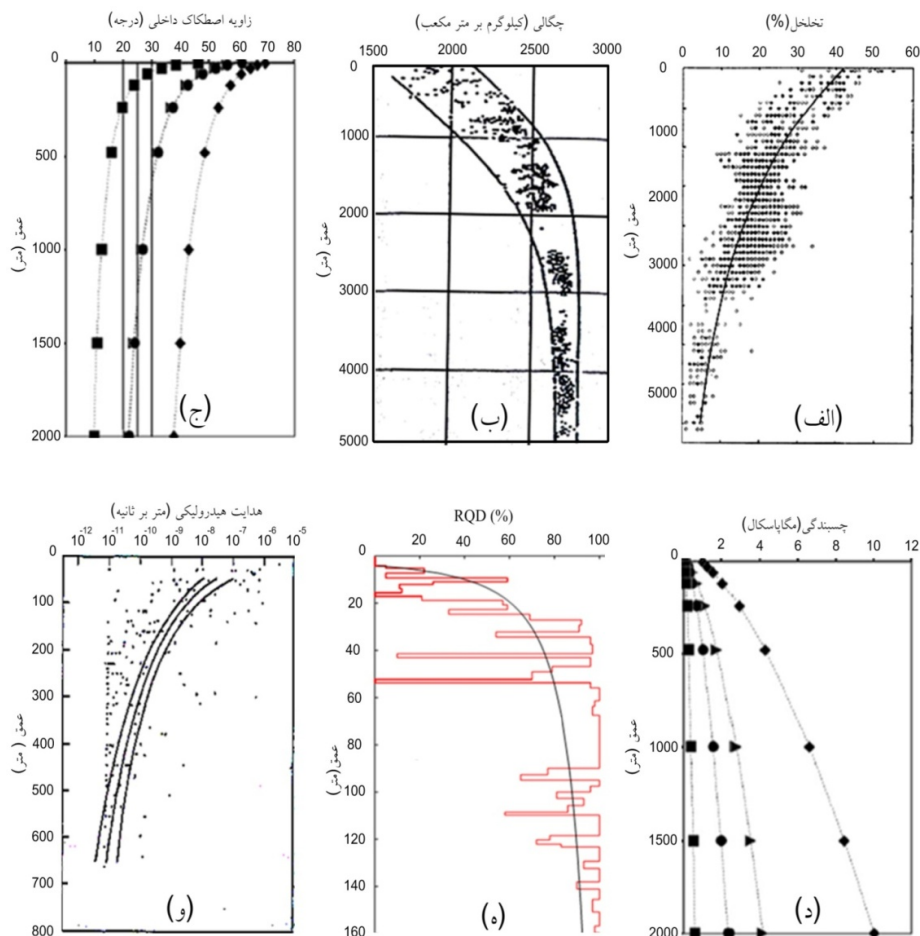
## ۱- الگوی جامع مطالعه وابستگی خصوصیات توده سنگ

## نسبت به عمق

مطالعات ژئوتکنیکی یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر پروژه‌های تونل‌سازی به حساب می‌آید که از قبل از مرحله حفر تونل شروع، و تا بعد از حفر هم ادامه می‌یابد. به بیان دیگر مطالعات ژئوتکنیک ضمن پیشرفت احداث تونل گسترش می‌یابند و شامل مطالعات دفتری، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات برجای می‌باشد (Sharma and Saxena, 2001). نوع و میزان این مطالعات با ترسیم طرح اولیه از پروژه تونل‌سازی و مخاطرات احتمالی تعیین می‌شود. طرح اولیه مطالعات ژئوتکنیکی با تجربیات گذشته تعیین می‌شود و کلیه پارامترهای رفتاری حاکم بر پروژه تونل و شرایط توده سنگ را شامل می‌شود. به عنوان مثال طرح اولیه در پروژه‌های احداث تونل شامل سنگ بکر، ناپیوستگی‌ها، پارامترهای تنش و آبشناسی، پارامترهای تونل از قبیل ابعاد و هندسه مقطع تونل و روش حفاری می‌باشد (Palmstrom and Stille, 2008). انجام کارهای ژئوتکنیکی همزمان با پیشروی تونل، طرح اولیه در نظر گرفته شده را بررسی نموده و تأیید یا

برخی خصوصیات توده سنگ از جمله مدول تغییر شکل پذیری، مقاومت فشاری توده سنگ، مقاومت برشی، مقاومت کششی توده سنگ و پارامترهای مقاومتی سنگ استفاده می شوند. بنابراین حیطه مطالعات ژئوتکنیک در یک مثلث با سه گوشه شامل ۱- تشخیص پارامترهای حاکم بر پروژه تونل، ۲- اجرای مطالعات ژئوتکنیک، ۳- طبقه بندی توده سنگ تکامل می یابد (شکل ۲).

اصلاح می کند. در ادامه مطالعات داده های به دست آمده برای قابلیت کاربرد در شرایط مشابه و تعیین پارامترهای معرف توده سنگ طبقه بندی می شوند. در این زمینه رده بندی های توده سنگ از جمله  $RQD$ ,  $GSI$ ,  $RMR$ ,  $Q$ ,  $RMi$ , ... ارائه می شوند. از سوی دیگر، تعیین طرح اولیه مطالعات ژئوتکنیکی برای تشخیص صحیح رده بندی مهندسی سنگ به کار می رود، و رده بندی ها از طریق روابط تجربی برای تعیین



شکل ۱- وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به تغییرپذیری عمق: الف: تخلخل (Athy, 1930)، ب: چگالی (Hawley, 2006)، ج: زاویه اصطکاک داخلی (Hoek, 2002)، د: چسبندگی (Hoek, 2002)، ه: شاخص کیفی توده سنگ (Kwon et al., 2006)، و: هدایت هیدرولیکی (Carlsson and Olsson, 1978)

گروه اول: پارامترهای سنگ بکر شامل تخلخل، چگالی، محتوی آب، سرعت صوت، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری تک محوری و نظایر آن، گروه دوم: پارامترهای درزه ها شامل بازشدگی،

در شکل ۳ الگوی مطالعه وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق نشان داده شده است. در این الگو در مرحله اول پارامتری که تغییرات آن نسبت به عمق مطالعه می شود انتخاب می شود. این پارامترها در ۵ گروه طبقه بندی شده اند.

در قالب یک الگوی سیستمی مطالعه می‌شود که هدف تونل‌سازی در آن از طریق پارامترهای طبقه‌بندی کننده مرحله سوم لحاظ شده است. بنابراین ازراده‌های ژئوتکنیکی ۱۲ جفت تونل‌های آزادراه خرم‌آباد - پل زال برای کاربرد و اعتبارسنجی الگوی پیشنهادی استفاده شده است.

### معرفی پروژه آزادراه خرم‌آباد - پل زال

در طول ۱۰۵ کیلومتری مسیر آزادراه خرم‌آباد - پل زال ۱۲ جفت تونل احداث شده است. این آزادراه با هدف تخصیص مسیر ایمن و کوتاه (به جای مسیر پرپیچ‌وخم و خطرناک قدیم با طول ۱۶۵ کیلومتر) بین دو شهر خرم‌آباد و پل زال در نزدیکی اندیمشک احداث می‌شود. با احداث این مسیر زمان تقریبی سفر از ۱۵۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه کاهش می‌یابد که با کاهش مصرف سوخت، استهلاک وسیله نقلیه، آلودگی هوا، افزایش ایمنی سفر همراه است (شکل ۴).

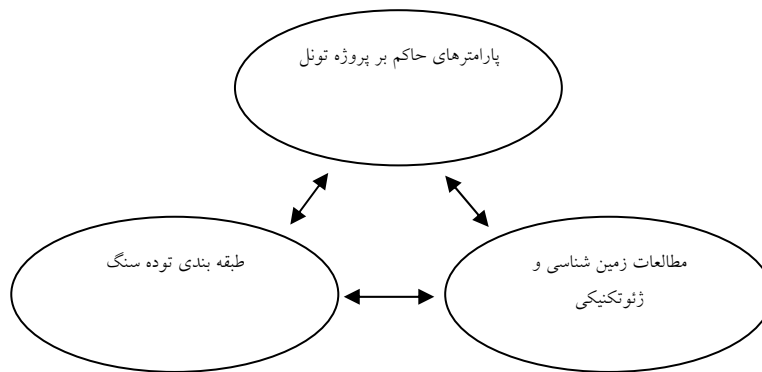
زمین‌شناسی ساختاری منطقه شامل تاقدیس پهن و باز هرندی است که صفحه محوری آن با شیب ۷۵ درجه در کیلومتر ۹۳، مسیر آزادراه را قطع می‌کند. سنگ دربرگیرنده تونل‌های این آزادراه شامل شیل آهکی و سنگ‌آهک است. در این تحقیق برای بررسی اثر خصوصیت تکتونیکی منطقه نسبت به عمق، فاصله کیلومترهای ۶۰-۷۰ دور از تاقدیس و فاصله کیلومترهای ۸۵-۹۵ نزدیک به تاقدیس در نظر گرفته شده است. شکل هندسی مقطع تونل‌ها نعل اسبی (اصلاح شده) با عرض ۱۴ متر و ارتفاع ۱۳ متر می‌باشد. شیب آزادراه در تونل‌ها ۶-۲ درصد می‌باشد. فاصله محوری تونل‌ها در محدوده ۱۰۰-۴۰ متر تغییر می‌کند. همچنین سطح ایستابی آب زیرزمینی در مسیر آزادراه ۱۰۰-۲۰ متر پایین‌تر از مسیر می‌باشد. حفاری در تمامی تونل‌ها با روش چالزنی و آتشباری انجام می‌شود (شرکت مهندسی مشاور ایران استن، ۱۳۸۷).

تداوم، فاصله‌داری، زبری، پرکنندگی، هوازدگی و نظایر آن، گروه سوم: پارامترهای نواحی خرد شده و ضعیف شامل ضخامت، شیب و امتداد زون، ابعاد قطعات و نظایر آن، گروه چهارم: پارامترهای آب زمین‌شناختی شامل هدایت هیدرولیکی و نظایر آن، گروه پنجم: پارامترهای تنش شامل تنش‌های افقی، تنش‌های قائم و نسبت تنش را می‌باشد. بعد از مشخص شدن پارامتری که تغییرات آن نسبت به عمق مدل می‌شود، در مرحله دوم مطالعات ژئوتکنیک برای اندازه‌گیری‌ها اقدام می‌شود. در مرحله سوم، داده‌ها برحسب ۱- عمق اندازه‌گیری، ۲- نوع سنگ، ۳- وضعیت ساختاری منطقه (تغییرشکل‌پذیری و شکستگی) و ۴- پارامترهای مؤثر بر رفتار توده‌سنگ (وضعیت آب زمین‌شناسی زیرزمینی حین حفر و تنش‌های القایی، ابعاد و هندسه مقطع، روش حفاری) طبقه‌بندی می‌شود. با طبقه‌بندی، تأثیر پارامترهایی که کمی نشده‌اند، لحاظ می‌شود. در مرحله چهارم تغییرپذیری پارامترهای توده سنگ نسبت به عمق با استفاده از روش‌های الف: کیفی (شماتیک) و ب: تحلیلی تحقیق می‌شود. در مرحله پنجم با تأیید وابستگی تغییرات خصوصیات توده‌سنگ نسبت به عمق، قابلیت عمق برای توجیه تغییرپذیری پارامترهای مهندسی بررسی می‌شود. در نهایت، در مرحله ششم نیز نتایج به دست آمده برای طراحی در تونل‌سازی استفاده می‌شود.

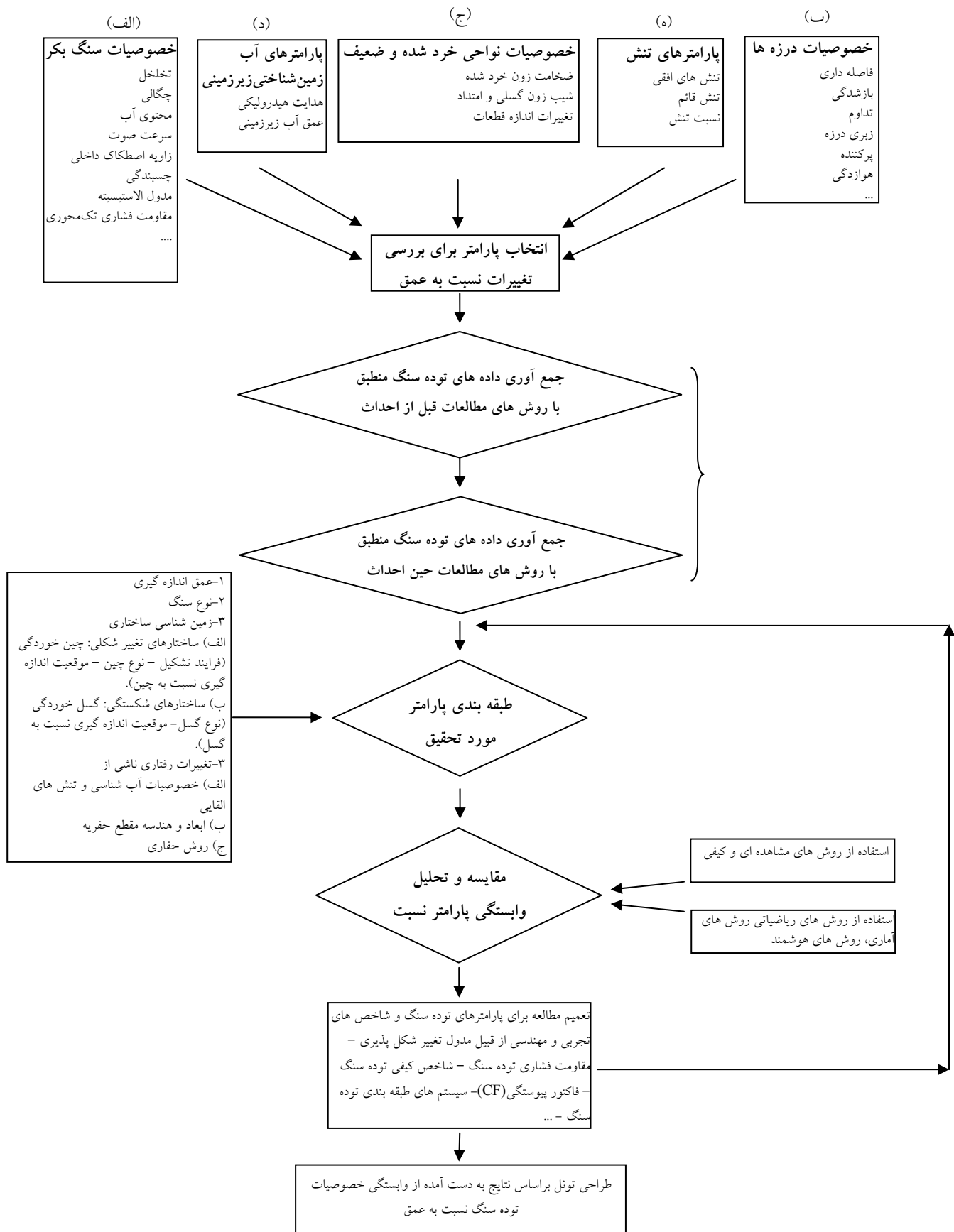
با کاربرد این الگو، مشکل وابستگی خصوصیات توده‌سنگ نسبت به عمق برطرف می‌شود و با اعمال پارامترهای طبقه‌بندی کننده مرحله سوم، قابلیت تعمیم نتایج به شرایط مشابه فراهم می‌شود. همچنین این الگو اغلب مطالعات ژئوتکنیک تکامل یافته (شکل ۲) را شامل می‌شود. به‌نحوی که در مرحله اول کلیه پارامترهای توده‌سنگ برای تغییرپذیری نسبت به عمق لحاظ شده است. همچنین داده‌های ژئوتکنیکی اندازه‌گیری شده، در مرحله سوم طبقه‌بندی می‌شوند. در واقع به این صورت وابستگی خصوصیات توده‌سنگ نسبت به عمق

جدول ۱- روابط تجربی پیشنهادی توسط محققین در استفاده از عمق (Z) برای تخمین تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ (موسوی، ۱۳۸۸)

ملاحظات	روابط پیشنهاد شده	پارامتر مورد بررسی
تخلخل اولیه، $k$ ثابت	$n=n_{z0}e^{-kZ}$	تخلخل (n) (%)
	$n=0.496e^{-0.556Z}$	
ثابت B	$n=n_{z0}-B.\log Z$	
چگالی اولیه، $\rho_{z0}$ ثابت	$\rho=\rho_{z0}+A.\log(Z/z_0)$	چگالی ( $\rho$ ) (کیلوگرم بر مترمکعب)
چگالی در عمق $z$ ، $\rho_{zm}$ ثابت	$\rho_{zm} - (\rho_{zm} - \rho_{z0}) e^{-BZ} = \rho$ $2.72-1.2 e^{-0.846Z} = \rho$	
$k, l$ ثابت	$c=kZ^l$	چسبندگی (c) (مگاپاسکال)
	$\Phi=-k\ln(Z)+1$	زاویه اصطکاک داخلی ( $\Phi$ ) (درجه)
	$RQD=109.8-219.74/Z^{0.5}$	شاخص کیفی توده سنگ (RQD)
ثابت $\alpha$ ، RMR شاخص ژئومکانیکی	$E_m=0.3Z^\alpha.10^{(RMR-20)/38}$	مدول تغییرشکل پذیری ( $E_m$ ) (گیگاپاسکال)
	$E_m=0.14*Z+9.87$	
JS پارامترهای سطح درزه، JC شرایط درزه داری	$E_{m\_est}=0.124Z+0.488UCS+0.422RQD+1.072JS-.556JC$	
$K_0$ هدایت هیدرولیکی اولیه (اندازه گیری شده در سطح زمین)، $A$ ثابت	$K=K_0e^{-AZ}$	هدایت هیدرولیکی (K) (متر بر ثانیه)
	$K=10^{-(1.6\log Z+4)}$	
	$K=5.57+0.352 \log Z-0.978(\log Z)^2+0.167(\log Z)^3$	
$K_0$ هدایت هیدرولیکی اولیه (اندازه گیری شده در سطح زمین)، $\mu$ ثابت	$K=K_0(1-Z/\mu)^\beta$	
	$\sigma_v=0.027Z$	تنش عمودی ( $\sigma_v$ ) مگاپاسکال
	$0.3+100/Z < K < 0.5+1500/Z$	نسبت تنش (K)
$\sigma_v$ تنش قائم، $\sigma_H$ تنش افقی، $v$ نسبت پواسون، $E_H$ مدول تغییرشکل پذیری اندازه گیری شده در راستای افقی، $\beta$ ضریب انبساط حرارتی سنگ، $G$ گرادیان زمین گرمایی	$\sigma_H = \sigma_v \cdot v/(1-v) + \beta E_H G(Z+1000)/1-v\sigma$	تنش های افقی ( $\sigma_H$ )



شکل ۲- اندرکنش پارامترهای حاکم بر تونل - مطالعات ژئوتکنیکی - طبقه بندی های توده سنگ (موسوی، ۱۳۸۸)



شکل ۳- الگوی مطالعات خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق با کاربرد در تونل سازی (موسوی، ۱۳۸۸)

محاسبات آن‌ها به ازای داده‌های جدول ۳ در جدول ۴ جانمایی می‌شود.

#### مطالعه تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق

##### - تحلیل کیفی

تحلیل کیفی شامل هر روشی است که نتایج در یک فرآیند کیفی مثلا از طریق مشاهده برآورد می‌شود. در این مطالعه از تصاویر جعبه‌ای (BOX PLOT) استفاده شده است. در تصاویر جعبه‌ای پارامترهای آماری شامل مینیمم، چارک اول، میانه، چارک سوم و ماکزیمم نمونه داده‌ها و در مجموع شمای توزیع به نمایش در می‌آید. شمای نمودار جعبه‌ای داده‌های هر یک از پارامترهای تعیین شده در مرحله ۱ الگوی شکل ۳ در پیوست آورده شده است. نمودار جعبه‌ای نشان می‌دهد که تغییرپذیری (توزیع آماری) داده‌ها در گروه  $FAL_1$  مشابه  $NAL_1$  و  $FAL_2$  مشابه  $NAL_2$  است و گروه  $AL$  حالت خاص را نشان می‌دهد. یعنی در برخی پارامترها توزیع  $AL_1$  مشابه  $FAL_1 - NAL_1$ ، در برخی  $AL_2$  مشابه  $FAL_2 - NAL_2$  و در جایی دیگر  $AL_1$  مشابه  $AL_2$  می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد که توزیع داده‌های گروه  $FAL_1$  و  $NAL_1$  با توزیع داده‌های گروه  $FAL_2$  و  $NAL_2$  متفاوت می‌باشد.



شکل ۴- موقعیت جغرافیایی آزادراه خرم آباد-پل زال

##### - تحلیل واریانس

در این تحلیل با استفاده از واریانس و میانگین، توزیع نمونه‌های گروه‌های شش‌گانه مقایسه می‌شود و تفاوت یا تشابه آن‌ها

برای مطالعه وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق، در مرحله اول پارامترهای بازشدگی، فاصله‌داری، تداوم درزه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیسیته، و برای اجتناب از تکرار، از مرحله پنجم، شاخص کیفی توده سنگ (RQD)، شرایط درزه‌داری (JCR)، شاخص ژئومکانیکی مینا (BRMR)، فاکتور پیوستگی (CF)، مدول تغییرشکل‌پذیری و مقاومت فشاری توده سنگ انتخاب شده‌اند. در مرحله قبل از احداث، برداشت‌های زمین‌شناخت و مطالعات ژئوتکنیکی بر روی رخنمون‌های سطحی و ترانشه‌های جانبی انجام شده است. با احداث حفریه، مطالعات ژئوتکنیکی در طول مسیر تونل‌ها و تهیه نقشه‌های حین احداث برداشت شده‌اند (مرحله دوم الگو). خصوصیات درزه‌ها با روش خط برداشت (Scan Line) تعیین شده‌اند. مقاومت فشاری (UCS) و مدول الاستیسیته نیز با استفاده از آزمایش چکش اشمیت و تبدیل عدد برگشت چکش با روابط تجربی ۴-۱ تعیین شده‌اند (Zhang, 2005).

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 6.9 * 10^{[0.0087 \rho R_n(L) + 0.16]} & 1 \\ \sigma_c &= 12.74 e^{0.185 \rho R_n(L)} & 2 \\ E &= 0.6005 \rho R_n(L) - 2.0276 & 3 \\ E &= 0.192 \rho^2 R_n(L) - 12.71 & 4 \end{aligned}$$

در مرحله سوم براساس نوع سنگ و ویژگی‌های تکتونیکی، سه طبقه‌بندی  $FAL$  (سنگ آهک دور از تاقدیس)،  $NAL$  (سنگ آهک نزدیک به تاقدیس) و  $AL$  (سنگ آهک آرژیلیکی) به دست می‌آید که با در نظر گرفتن پارامتر عمق اندازه‌گیری‌ها در دو مرحله سطحی و حین احداث تونل، وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق در ۶ طبقه  $FAL_{1,2}$ ،  $NAL_{1,2}$  و  $AL_{1,2}$  مطالعه می‌شود. در جدول ۳ بخشی از ۱۲۵ داده استفاده شده برای تحلیل وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق آورده شده است (موسوی، ۱۳۸۸). شایان توجه است که مدول تغییرشکل‌پذیری و مقاومت فشاری توده سنگ نیز با میانگین‌گیری از روابط تجربی نشان داده شده در جدول ۲ محاسبه می‌شوند و مقادیر مختلف

در شکل ۶ مقایسه چندگانه تحلیل واریانس عمق اندازه‌گیری ۶ گروه نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که همان تحلیل شکل ۵ یعنی تفاوت توزیع اندازه‌گیری‌های سطحی (۱) با اندازه‌گیری‌های درون تونل (۲) در سنگ‌آهک به دست می‌آید. همچنین مشاهده می‌شود که عمق اندازه‌گیری‌های گروه  $AL_2$  در حد بین عمق اندازه‌گیری گروه  $NAL_2 - FAL_2$  و  $AL_1 - FAL_1 - NAL_1$  می‌باشد و بنابراین از عمق اندازه‌گیری می‌توان به خوبی برای پیش‌بینی تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ به عنوان یک عامل معرف استفاده کرد. و همچنین حالت خاص توزیع گروه  $AL_{1,2}$  را توضیح می‌دهد. بنابراین برای بررسی تعمیم تحلیل واریانس از نمایش خوشه‌بندی سلسله مراتبی فاصله میانگین<sup>۳</sup> استفاده شده است. برای این منظور خوشه‌بندی برای سه گروه پارامتری الف: فاصله‌داری، تداوم درزه ای، بازشدگی، مقاومت فشاری سنگ بکر و مدول الاستیسیته ب:  $JCR, RQD, BRMR$ ، مدول تغییرشکل‌پذیری، مقاومت فشاری توده‌سنگ و فاکتور پیوستگی ج: مجموع پارامترهای گروه‌های الف و ب انجام می‌شود (شکل ۷). همچنین شکل ۸ خوشه‌بندی سلسله مراتبی عمق اندازه‌گیری داده‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر دو شکل ۷ و ۸، گروه  $FAL_1 - NAL_1$  و  $FAL_2 - NAL_2$  در یک خوشه قرار می‌گیرند و گروه  $AL$  حالت خاصی را نشان می‌دهد که با توزیع نمونه داده‌های عمق اندازه‌گیری همخوانی دارد. یعنی اگرچه در شکل ۷-الف  $AL_{1,2}$  در یک خوشه اند ولی به دلیل فاصله زیاد همان تعبیر شکل ۸ را نشان می‌دهد. همچنین تفاوت خوشه‌بندی‌ها تفاوت نمونه داده‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توانیم تغییرات خصوصیات توده‌سنگ را نسبت به تغییرات عمق مدل کنیم. یعنی عمق اندازه‌گیری، یک پارامتر معرف برای توصیف مدل توده‌سنگ را در تحلیل‌های رگرسیونی ساده، چندگانه، خطی و غیرخطی و روش‌های هوشمند تشکیل می‌دهد. از مقایسه داده‌ها نسبت به تغییرات عمق از ۵۰ تا ۲۵۰ متر نتایج جدول ۵ مورد توجه قرار می‌گیرد.

تعیین می‌شود. همچنین این تحلیل نشان می‌دهد که تفاوت یا تشابه تحلیل شده بین گروه‌ها در نمونه، از تفاوت یا تشابه جامعه داده‌ها ناشی می‌شود. در این روش فرض (فرض صفر) می‌شود که میانگین جامعه‌ها با هم برابر می‌باشد. بنابراین نسبت دو واریانس درون گروهی و برون گروهی محاسبه می‌شود. طبق فرض (فرض صفر) حاصل این نسبت می‌بایست نزدیک به یک باشد. اما اگر نسبت دو واریانس هرچه از مقدار ۱ بزرگتر باشد تفاوت جامعه داده‌ها معنی‌دارتر است. در این تحقیق فرآیند تعیین تفاوت یا تشابه توزیع داده‌ها با مقایسه چندگانه انجام می‌گیرد. در مقایسه چندگانه اختلاف میانگین جفت نمونه‌های داده‌ای به دست می‌آید و ۱ در نظر گرفتن سطح اعتماد (خطای آماری ۵ درصد) فاصله اطمینان جفت نمونه تعیین می‌شود. اگر فاصله اطمینان به دست آمده همواره بزرگتر از صفر یا همواره کوچک‌تر از صفر باشد، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار یکی از جفت‌ها می‌باشد. اگر فاصله اطمینان شامل صفر باشد، جفت نمونه تفاوت معنی‌داری با هم ندارند و فرض صفر رد نمی‌شود. شکل ۵ مقایسه‌های چندگانه برای گروه‌های شش‌گانه را نشان می‌دهد. مقایسه‌های چندگانه تحلیل واریانس تشابه توزیع نمونه داده‌های  $NAL_1 - FAL_1$ ،  $NAL_2 - FAL_2$  و تفاوت نمونه داده‌های  $NAL_1 - FAL_1$  با  $NAL_2 - FAL_2$  را تأیید می‌کند. همچنین حالت خاص گروه  $AL$  نسبت به گروه‌های دیگر در پارامترهای مختلف مشاهده می‌شود. از تحلیل واریانس می‌توان نتیجه گرفت که نمونه داده‌های اندازه‌گیری مرحله سطحی (۱) نسبت به اندازه‌گیری‌ها در مسیر تونل (۲) متفاوت می‌باشد، همچنین نتیجه گرفته شده است که خاستگاه این تفاوت مربوط به جامعه داده‌ها می‌باشد. همچنین تشابه  $NAL_1$  با  $FAL_1$  و  $NAL_2$  با  $FAL_2$  نیز با تطبیق تکنیکی ملایم به دلیل تاقدیس پهن هرندی توضیح داده می‌شود. حالت خاص گروه  $AL$  نیز به خاطر ترکیبات رسی سنگ‌آهک رسی می‌باشد که نسبت به فرایندهای حاکم در رخنمون‌ها و همچنین نسبت به تنش‌ها رفتار متفاوتی نسبت به سنگ‌آهک از خود بروز می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که سنگ‌آهک و سنگ‌آهک آرژیلیکی هر یک رفتار مشخصی نسبت به عوامل محیطی دارند.



جدول ۲- روابط تجربی برای تخمین مقاومت فشاری توده سنگ ( $\sigma_{cm}$ ) و مدول تغییرشکل پذیری ( $E_m$ ) (Zhang, 2005)

مقاومت فشاری توده سنگ، (MPa)	ارائه دهنده	مدول تغییرشکل پذیری، (GPa)	ارائه دهنده
5: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = e^{\frac{7.65(RMR - 100)}{100}}$	Yudhbir, 1983	13: $E_m = \frac{E \left[ 0.0028RMR^2 + 0.9 \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right) \right]}{100}$	Bieniawski, 1990
6: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = e^{\frac{RMR - 100}{19.75}}$	Ramamurthy, 1985-6, 1993		Kim, 1993
7: $\sigma_{cm} = 0.5e^{0.06RMR}$	Trueman, 1988 & Asef, 2000	14: $E_m = 300 \exp(0.07RMR) * 10$	Mitri, 1994
8: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = e^{\frac{RMR - 100}{24}}$	Bieniawski, 1993	15: $E_m = \frac{E}{2} \left[ 1 - \cos\left(\pi * \frac{RMR}{100}\right) \right]$	Gokceoglu, 2003
9: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = e^{\frac{GSI - 100}{18}}$	Hoek, 1994-5	16: $E_m = 0.0736^{0.0755RMR}$	
10: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = e^{\frac{RMR - 100}{20}}$	Sheorey, 1997	17: $E_m = 0.1451e^{0.0654GSI}$	Hoek, 2004
11: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = \frac{RMR}{RMR + 6(100 - RMR)}$	Aydan, 1998	18: $E_m = 0.33e^{0.064GSI}$	Sonmez, 2006 Zhang, 2004
12: $\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_c} = 0.036e^{\frac{GSI}{30}}$	Hoek, 2004	19: $E_m = E * 10^{\left[ \frac{(RMR - 100)(100 - RMR)}{4000 \exp\left(-\frac{RMR}{100}\right)} \right]}$	
		20: $E_m = E * 10^{0.0196RQD - 1.91}$	
		21: $E_m = 1.8E * 10^{0.0196RQD - 1.91}$	
		22: $E_m = 0.2E * 10^{0.0196RQD - 1.91}$	

جدول ۳- بخشی از داده‌های ۱۲۵ گانه برای بررسی وابستگی خصوصیات توده سنگ و تحلیل واریانس

No.	De(m)	Sp(cm)	Pe(m)	Ap(mm)	$E_i$ (Gpa)	UCS <sub>i</sub> (Mpa)	RQD(%)	JCR	BRMR	UCS <sub>m</sub> (Mpa)	$E_m$ (Gpa)	CF
1	6	15	5	13	28	75	70	13	48	4	6	86
2	2	10	6	20	43	75	50	12	42	3	3	130
3	26	10	5	6	47	75	70	14	48	4	8	130
4	4	20	8	16	42	70	65	9	44	3	6	65
5	210	250	2	0.1	50	110	87	27	82	31	30	5
6	145	110	2	1	45	95	80	21	65	12	16	11
7	165	115	2	0.1	45	85	85	24	70	14	20	11
8	20	45	4	8	43	70	75	16.5	54.5	5	11	28
9	75	50	2	4	50	80	80	19	61	8	16	26
10	140	110	2	2	46	85	80	24	68	13	17	11
11	90	50	5	3	46	80	75	15	55	6	11	26
12	100	50	8	2	45	95	80	20	62	10	15	26
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
46	3	5	15	15	31	65	50	9	36	2	2	260
47	13	20	9	20	36	70	60	11.5	45.5	3	5	65
48	8	60	4	16	37	70	65	10	47	4	6	21
49	220	200	1	0.1	44	110	80	25	73	20	19	6
50	175	100	3	1	44	95	75	16	58	9	12	13
51	60	40	5	2	47	70	68	12.5	48.5	4	8	32
52	160	95	3	2	46	85	85	14	59	8	16	13
53	240	220	1	0.1	44	110	80	25	78	26	23	5
54	180	170	1	0.1	44	95	75	23	68	14	16	7
55	115	90	3	2	44	85	75	16	58	8	12	14
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
122	95	60	4	2	44	74	70	17	59	7	11	21
123	60	30	4	2	45	62	68	11	50	4	8	43
124	3	20	6	6	20	50	52	6	45	2	2	65
125	55	30	4	5	30	65	68	10	53	5	7	43

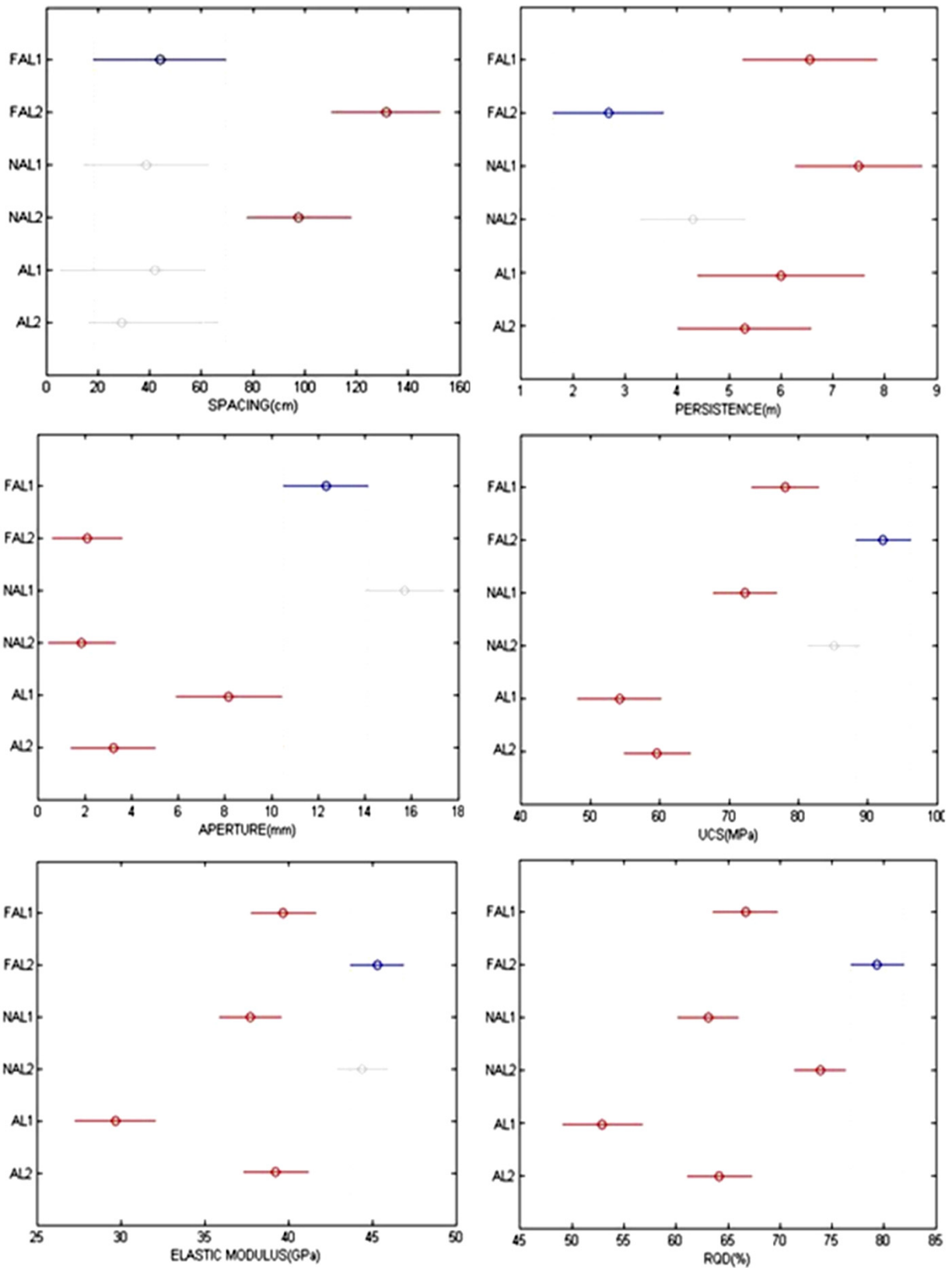
No: identification number, De: depth, Sp: spacing, Pe: persistence, Ap: aperture, UCS<sub>i</sub>: UCS,  $E_i$ : elastic modulus, UCS<sub>m</sub>: rock mass strength,  $E_m$ : deformation modulus, BRMR: basic rock mass rating, CF: continuity factor.

جدول ۴- الف: محاسبه مقاومت فشاری توده سنگ در داده های جدول ۳ براساس روابط تجربی جدول ۲

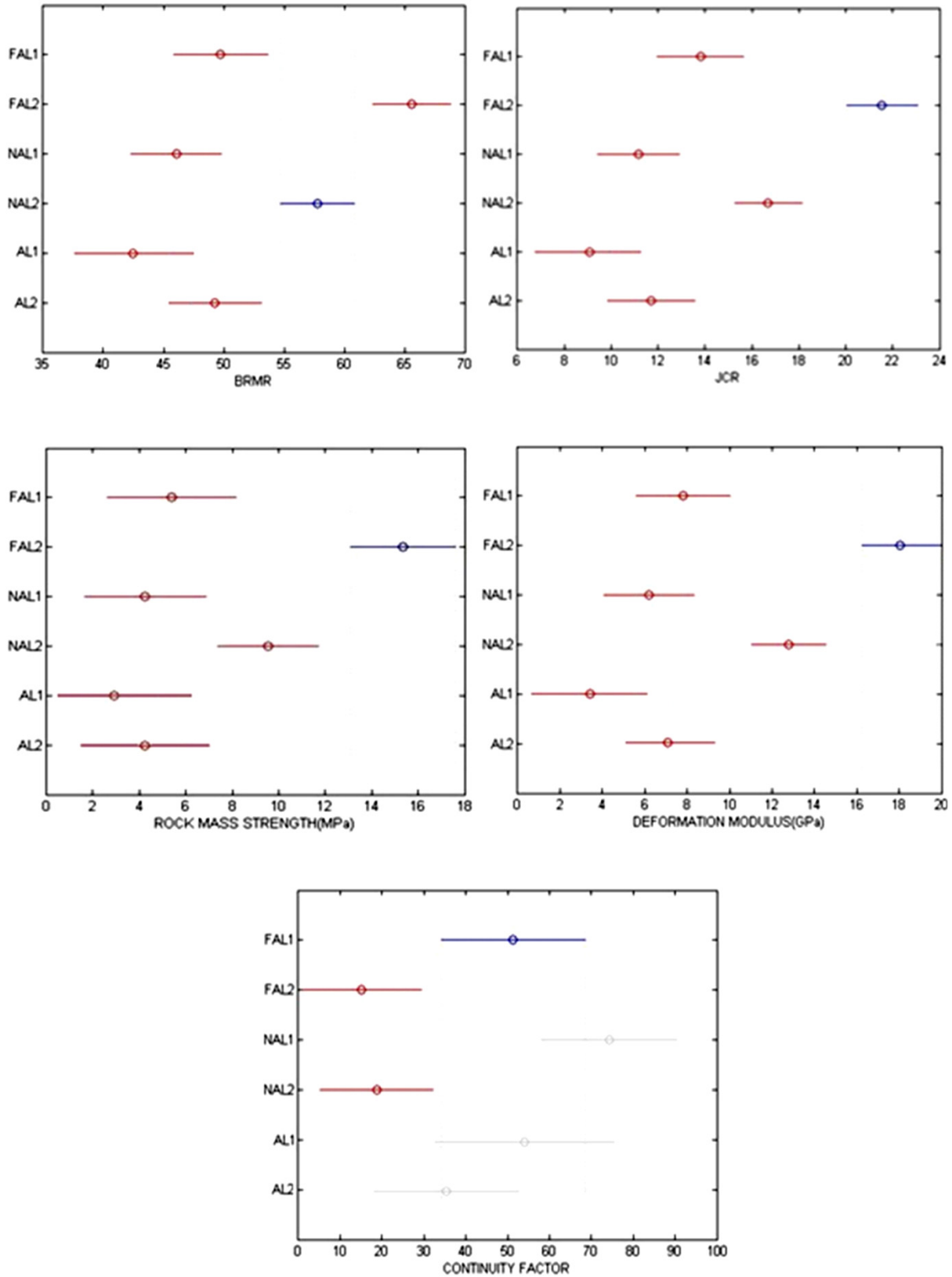
No.	De(m)	UCS <sub>i</sub> (Mpa)	BRMR	RMR	Eq.5	Eq.6	Eq.7	Eq.8	Eq.9	Eq.10	Eq.11	Eq.12	UCS <sub>m</sub> (Mpa)
1	6	75	48	41	0.82	3.22	5.85	6.41	2.14	3.92	7.78	8.96	4
2	2	75	42	35	0.51	2.34	4.08	4.99	1.53	2.90	6.17	7.33	3
3	26	75	48	41	0.82	3.22	5.85	6.41	2.14	3.92	7.78	8.96	4
4	4	70	44	37	0.56	2.43	4.60	5.07	1.60	2.99	6.24	7.32	3
5	210	110	82	75	16.24	28.99	45.00	38.81	20.77	31.51	36.66	40.83	31
6	145	95	65	58	3.82	10.11	16.22	16.50	6.97	11.63	17.77	20.01	12
7	165	85	70	63	5.01	11.81	21.90	18.19	8.24	13.36	18.78	21.15	14
8	20	70	54.5	47.50	1.26	4.25	8.64	7.85	2.86	5.07	9.17	10.39	5
9	75	80	61	54	2.37	6.88	12.76	11.76	4.70	8.02	13.09	14.74	8
10	140	85	68	61	4.30	10.61	19.43	16.73	7.37	12.09	17.57	19.78	13
11	90	80	55	48	1.49	4.99	8.91	9.16	3.37	5.94	10.67	12.07	6
12	100	95	62	55	3.04	8.62	13.56	14.57	5.91	10.01	16.08	18.11	10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
46	3	65	36	29	0.28	1.47	2.85	3.37	0.95	1.87	4.14	5.21	2
47	13	70	45.5	38.5	0.63	2.63	5.04	5.40	1.74	3.23	6.61	7.70	3
48	8	70	47	40	0.71	2.85	5.51	5.75	1.89	3.49	7	8.09	4
49	220	110	73	66	8.16	17.94	26.23	26.68	12.60	20.10	26.88	30.25	20
50	175	95	58	51	2.24	6.96	10.66	12.33	4.73	8.20	14.04	15.85	9
51	60	70	48.5	41.5	0.80	3.09	6.03	6.12	2.06	3.76	7.40	8.51	4
52	160	85	59	52	2.16	6.57	11.32	11.50	4.47	7.71	13	14.66	8
53	240	110	78	71	11.96	23.43	35.40	32.86	16.64	25.80	31.88	35.74	26
54	180	95	68	61	4.81	11.87	19.43	18.71	8.24	13.52	19.64	22.11	14
55	115	85	58	51	2.00	6.23	10.66	11.03	4.23	7.33	12.56	14.18	8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
122	95	74	59	52	1.88	5.72	11.32	10.01	3.89	6.71	11.32	12.76	7
123	60	62	50	43	0.79	2.97	6.60	5.77	1.98	3.58	6.92	7.92	4
124	3	50	45	38	0.43	1.83	4.89	3.78	1.21	2.25	4.63	5.41	2
125	55	65	53	46	1.04	3.65	7.90	6.85	2.45	4.37	8.08	9.11	5

جدول ۴- ب: محاسبه مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ در داده های جدول ۳ براساس روابط تجربی جدول ۲

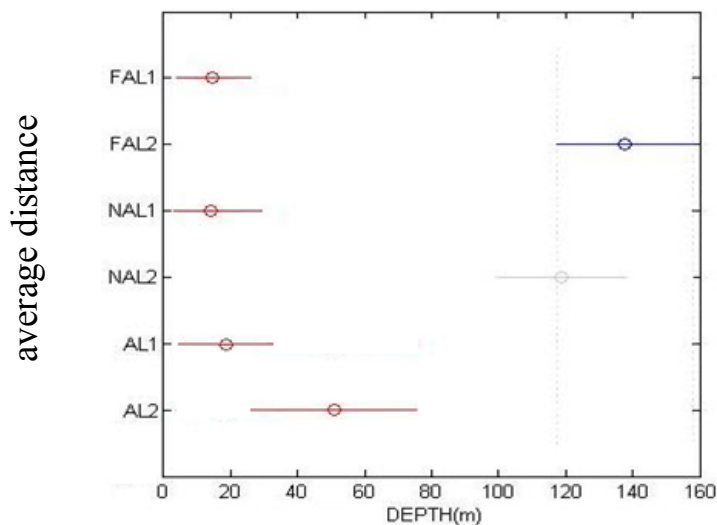
No.	De(m)	RQD(%)	BRMR	RMR	E <sub>i</sub> (Gpa)	Eq.13	Eq.14	Eq.15	Eq.16	Eq.17	Eq.18	Eq.19	Eq.20	Eq.21	Eq.22	E <sub>m</sub> (Gpa)
1	6	70	48	41	28	2.84	5.29	10.08	1.63	1.53	3.30	7.41	6.90	12.42	1.38	6
2	2	50	42	35	43	3.27	3.47	11.72	1.03	1.03	2.25	7.75	4.50	8.10	0.90	3
3	26	70	48	41	47	4.76	5.29	16.92	1.63	1.53	3.30	12.43	11.59	20.86	2.32	8
4	4	65	44	37	42	3.52	3.98	12.64	1.20	1.18	2.56	8.67	8.36	15.04	1.67	6
5	210	87	82	75	50	19.91	57.16	42.65	21.18	14.12	29.11	42.18	25.53	45.96	5.10	30
6	145	80	65	58	45	9.82	17.39	28.07	5.87	4.65	9.81	25.48	17.02	30.65	3.40	16
7	165	85	70	63	45	11.40	24.68	31.41	8.56	6.44	13.50	29.57	21.09	37.97	4.21	20
8	20	75	54.5	47.5	43	5.82	8.34	19.79	2.66	2.34	5.01	16.03	13.13	23.64	2.62	11
9	75	80	61	54	50	8.88	13.14	28.11	4.34	3.58	7.59	24.58	18.92	34.05	3.78	16
10	140	80	68	61	46	10.78	21.45	30.76	7.36	5.65	11.88	28.58	17.40	31.33	3.48	17
11	90	75	55	48	46	6.36	8.64	21.53	2.76	2.42	5.17	17.55	14.05	25.29	2.81	11
12	100	80	62	55	45	8.32	14.09	26.00	4.68	3.82	8.10	22.96	17.02	30.65	3.40	15
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
46	3	50	36	29	31	1.72	2.28	5.99	0.66	0.70	1.53	3.53	3.25	5.84	0.65	2
47	13	60	45.5	38.5	36	3.24	4.44	11.62	1.35	1.30	2.82	8.18	5.78	10.41	1.16	5
48	8	65	47	40	37	3.58	4.93	12.77	1.51	1.43	3.10	9.22	7.37	13.25	1.47	6
49	220	80	73	66	44	12.50	30.44	32.57	10.73	7.84	16.36	31.19	16.65	29.97	3.33	19
50	175	75	58	51	44	6.91	10.65	22.67	3.46	2.94	6.27	19.18	13.44	24.19	2.69	12
51	60	68	48.5	41.5	47	4.87	5.48	17.28	1.69	1.58	3.41	12.79	10.63	19.15	2.13	8
52	160	85	59	52	46	7.53	11.42	24.42	3.73	3.14	6.68	20.90	21.56	38.81	4.31	16
53	240	80	78	71	44	15.10	43.20	35.46	15.66	10.87	22.54	34.68	16.65	29.97	3.33	23
54	180	75	68	61	44	10.32	21.45	29.43	7.36	5.65	11.88	27.34	13.44	24.19	2.69	16
55	115	75	58	51	44	6.91	10.65	22.67	3.46	2.94	6.27	19.18	13.44	24.19	2.69	12
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
122	95	70	59	52	44	7.20	11.42	23.36	3.73	3.14	6.68	20.00	10.85	19.53	2.17	11
123	60	68	50	43	45	5.00	6.09	17.57	1.89	1.74	3.755	13.33	10.18	18.33	2.04	8
124	3	52	45	38	20	1.76	4.29	6.31	1.30	1.26	2.73	4.40	2.28	4.11	0.46	2
125	55	68	53	46	30	3.80	7.51	13.10	2.37	2.12	4.55	10.39	6.79	12.22	1.36	7



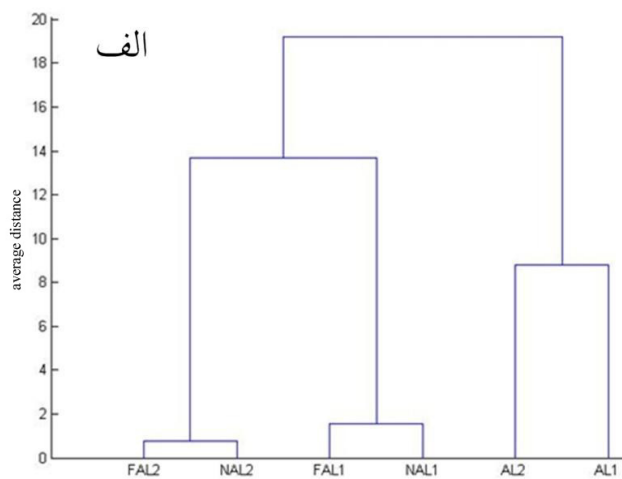
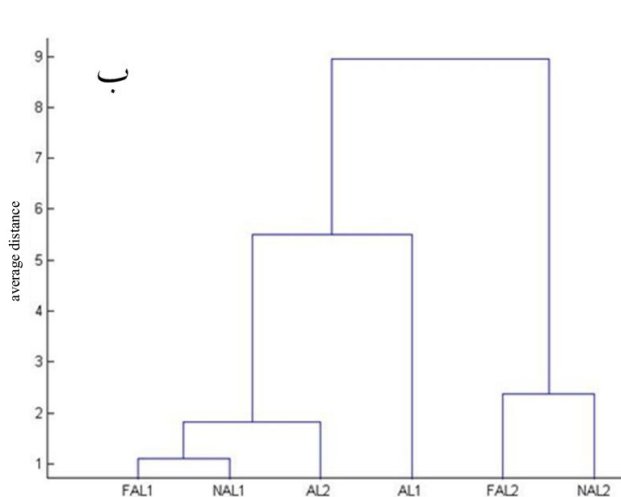
شکل ۵- مقایسه چندگانه تحلیل واریانس در بررسی وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق



ادامه شکل ۵- مقایسه چندگانه تحلیل واریانس در بررسی وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق

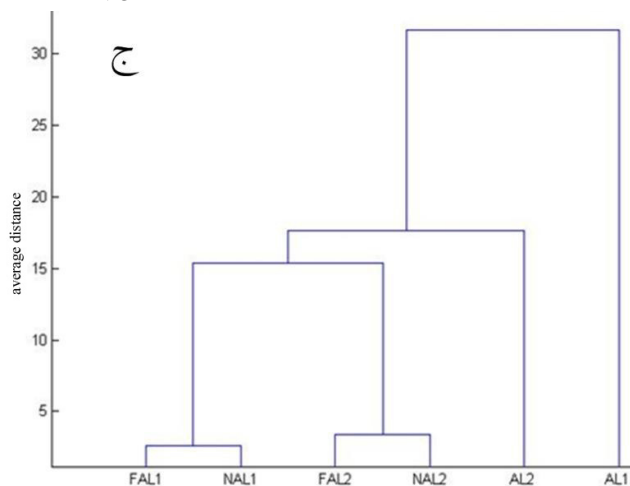
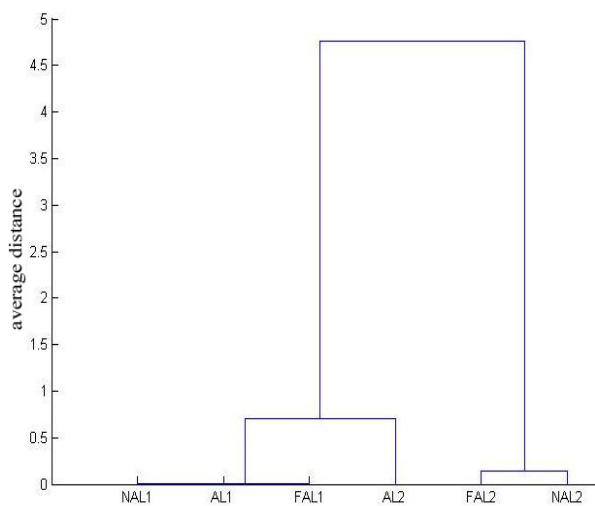


شکل ۶- مقایسه چندگانه تحلیل واریانس عمق اندازه گیری خصوصیات توده سنگ



شکل ۷- خوشه بندی سه گروه داده توده سنگ، الف: فاصله داری، بازشدگی، تداوم درزه ای، مدول الاستیسیته و UCS - ب: JCR, RQD

BRMR، مدول تغییرشکل پذیری، مقاومت فشاری توده سنگ و فاکتور پیوستگی



ادامه شکل ۷- خوشه بندی سه گروه داده توده سنگ،

ج: گروه داده های الف و ب.

شکل ۸- خوشه بندی عمق اندازه گیری داده های توده سنگ

### جدول ۵- تغییرات شرایط توده سنگ با تغییر عمق

اندازه گیری ها از ۵۰ متر به ۲۵۰ متر مطابق پارامترهای RMR

پارامتر اندازه گیری شده	محدوده تغییرات پارامتر	افزایش امتیاز BRMR
UCS (MPa)	از ۸۰-۶۰ به ۱۱۰-۱۰۰	۰-۲
فاصله داری درزه (cm)	از ۶۰-۳۰ به بیش از ۲۰۰	۵-۱۰
RQD (%)	از ۶۵-۵۵ به ۹۰-۸۵	۲-۴
شرایط درزه داری	از ۱۵-۱۰ به ۳۰-۲۵	۱۰-۲۰
شاخص ژئومکانیکی مبنا (BRMR)	از ۴۰-۵۵ به ۷۵-۸۵	۲۰-۴۵
فاکتور پیوستگی (CF)	از بیش از ۳۰ به ۳-۶	افزایش پایداری

#### - بحث

مدل سازی تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ با پارامترهای معرف روشی برای کاهش عدم قطعیت به شمار می رود. همچنین پیش بینی مدل توده سنگ با استفاده از روش های رگرسیونی و هوشمند برای ارائه روابط تجربی بین متغیرهای ورودی و پارامتر مورد بررسی امکان پذیر می شود. در این تحقیق وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق در ضمن یک الگوی سیستمی با استفاده از روش های کیفی و تحلیلی مطالعه شده است. در سنگ آهک های مسیر تونل های آزادراه خرم آباد- پل زال مشخص شده است که شرایط توده سنگ با امتیاز شاخص ژئومکانیکی پایه از عمق ۵۰ به ۲۵۰ متر حداقل به اندازه ۲۰ واحد (یک کلاس) افزایش می یابد. با در نظر گرفتن تغییرات فاکتور پیوستگی از  $CF > 30$  به  $3 < CF < 6$ ، افزایش عمق باعث تبدیل سنگ توده ای (پیوسته معادل) به سنگ پیوسته- ناپیوسته (بلوکی- سنگ بکر) می شود. در حقیقت تأثیر افزایش عمق در مشخصات درزه داری بیشتر از خصوصیات سنگ بکر می باشد به طوری که امتیاز شرایط درزه داری شاخص ژئومکانیکی از ۱۵-۱۰ به ۳۰-۲۵ افزایش می یابد. با در نظر گرفتن تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق می توان شرایط عمقی توده سنگ را از برداشت های سطحی تخمین و ارزیابی نمود. به علاوه گرادیان خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق بر طراحی نوع سیستم نگهداری، روش حفاری و سیکل های حفاری تأثیر می گذارد. در شکل ۹ تغییرات توده سنگ از سطح به عمق به صورت شماتیک نشان داده شده است. نتایج این

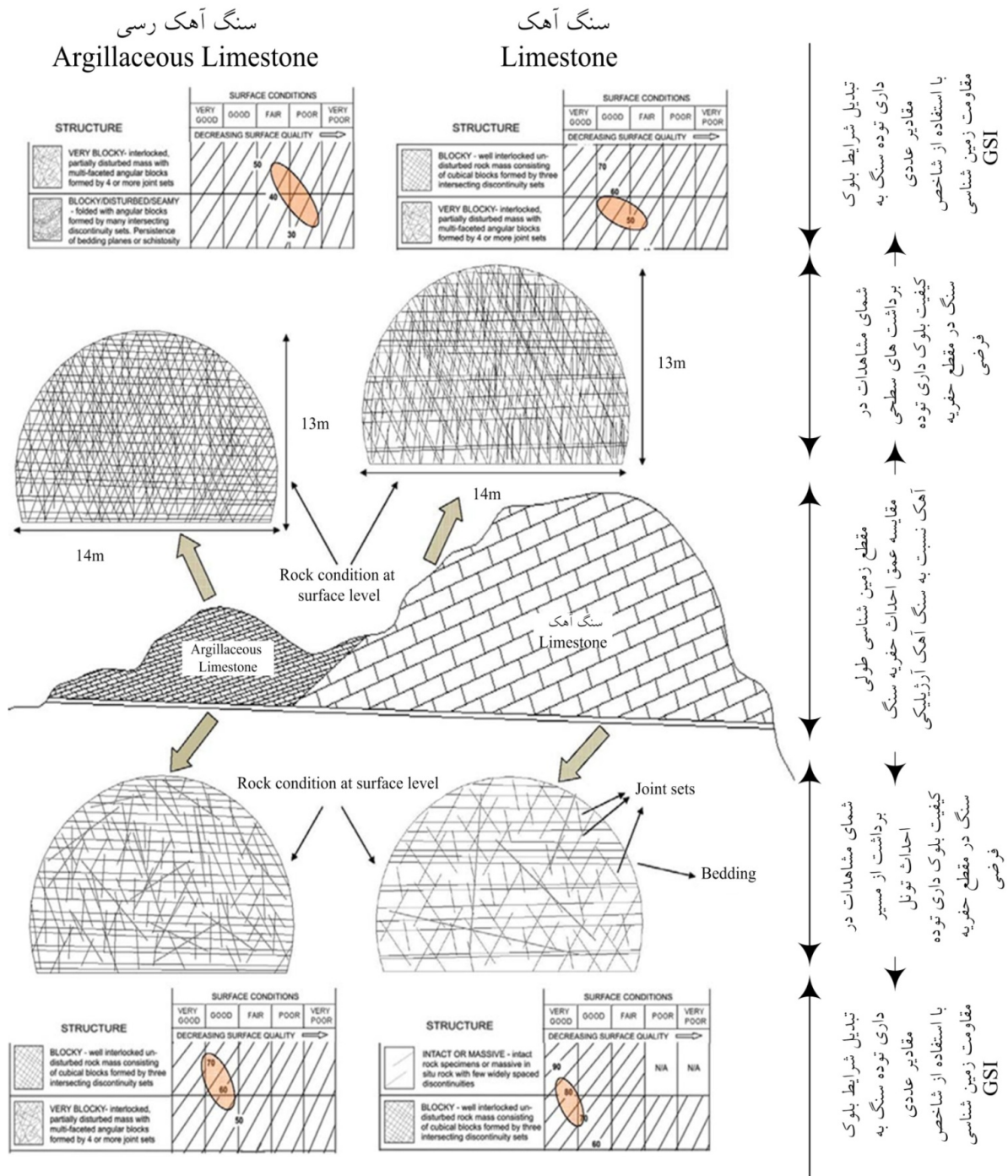
تحقیق با پیشنهاد مارینوس (Marinos and et.al., 2005) مبنی بر افزایش شرایط سطح درزه به اندازه یک خانه به سمت چپ و کاهش بلوکی شدگی به اندازه یک خانه به سمت بالا در امتیاز مقاومت زمین شناسی، تطابق دارد. در شکل ۱۰ همچنین شاخص کیفی توده سنگ با رابطه Kwon et al. (2006) و در شکل ۱۱ تغییرات مدول تغییر شکل پذیری نسبت به عمق با رابطه Chun, 2009 صحت سنجی شده است. برای این منظور ابتدا رابطه شاخص کیفی توده سنگ و رابطه خطی تک متغیره تخمین مدول تغییر شکل پذیری در جدول ۱ در شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب رسم شده و بر مبنای داده های جمع آوری شده در رخنمون های سنگی و در مسیر تونل، داده های RQD و مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در این تحقیق مطابق جدول ۶ در نظر گرفته شده اند. سپس با روش رگرسیونی روابطی برای داده های مدول تغییر شکل پذیری و RQD پیشنهاد می شود. همان طور که در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است وابستگی مدول تغییر شکل پذیری و RQD نسبت به عمق یک مکانیزم را نشان می دهد. یعنی با افزایش عمق، مدول تغییر شکل پذیری به صورت خطی افزایش می یابد. همچنین افزایش عمق، RQD به صورت توانی افزایش می یابد. افزایش کیفیت توده سنگ نسبت به عمق، همچنین کاهش هزینه های احداث تونل را به دنبال دارد. با فرموله کردن تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق در شرایطی که دسترسی برای انجام مطالعات ژئوتکنیکی وجود ندارد از نتایج و تجربیات قبلی با رویکرد الگویی می توان استفاده کرد. همچنین با تشخیص قوانین وابسته به عمق تغییرپذیری خصوصیات توده سنگ، می توان برای هر پروژه از انجام آزمون های تکراری اجتناب کرد.

#### - نتیجه گیری

بررسی وابستگی خصوصیات توده سنگ نسبت به عمق، ایده ای است که در این مقاله برای شناخت مدل توده سنگ با هدف کاهش عدم قطعیت با استفاده از الگوی سیستمی مطالعه شد. با استفاده از الگوی پیشنهادی، داده های مطالعات موردی طبقه بندی می شوند و نتایج آن ها برای شرایط طبقه بندی مشابه

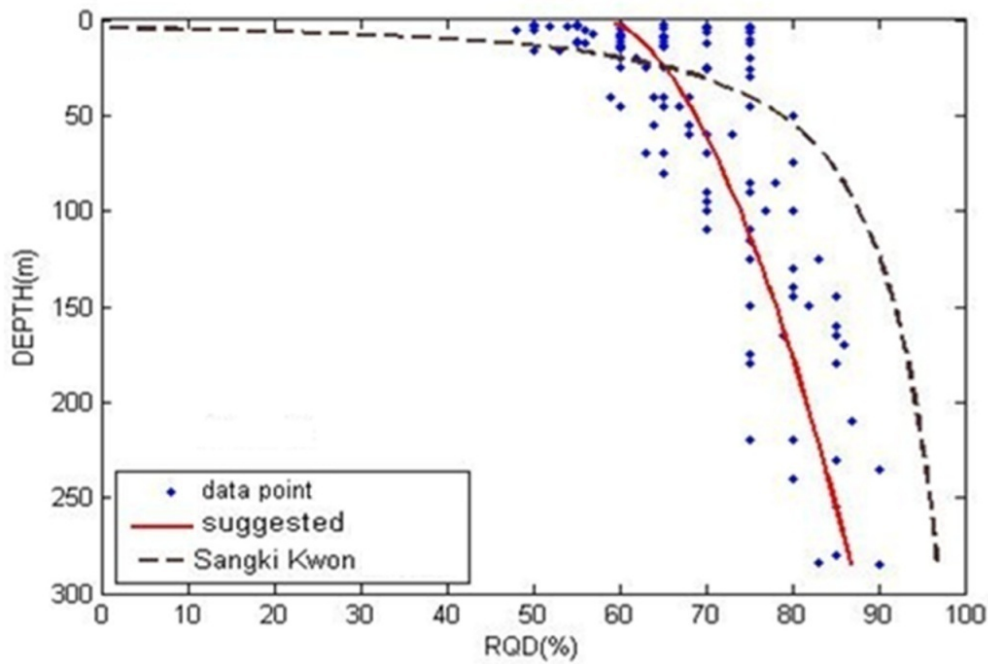
لحاظ شده است. نتایج در این مقاله نشان می‌دهد که خصوصیات توده سنگ به ویژه شرایط درزه‌داری با افزایش عمق از ۵۰ متر به ۲۵۰ متر بهبود می‌یابد (جدول ۵)، و سنگ از حالت توده‌ای (پیوسته معادل) به سنگ پیوسته-ناپیوسته (بلوکی-سنگ بکر) تبدیل می‌شود که برای طراحی فضاهای زیرزمینی و تعیین سیستم نگهداری تونل می‌بایست لحاظ شود.

(مرحله سوم الگو) مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین قابلیت به روزرسانی نتایج قبلی با افزایش مشاهدات در این الگو امکان‌پذیر است. به علاوه ایده مطالعات ژئوتکنیک تکامل یافته (شکل ۲) یعنی در نظر گرفتن ساختار اولیه مطالعات ژئوتکنیک قبل از اجرای برداشتها و طبقه‌بندی داده‌ها بعد از جمع‌آوری داده‌های ژئوتکنیکی در این الگو



شکل ۹- شمای تغییر پذیری شرایط توده سنگ از سطح به عمق در محل احداث تونل با افزایش شرایط سطح درزه و بلوکی شدگی به اندازه یک کلاس در شاخص مقاومت زمین شناسی و RMR (موسوی، ۱۳۸۸)

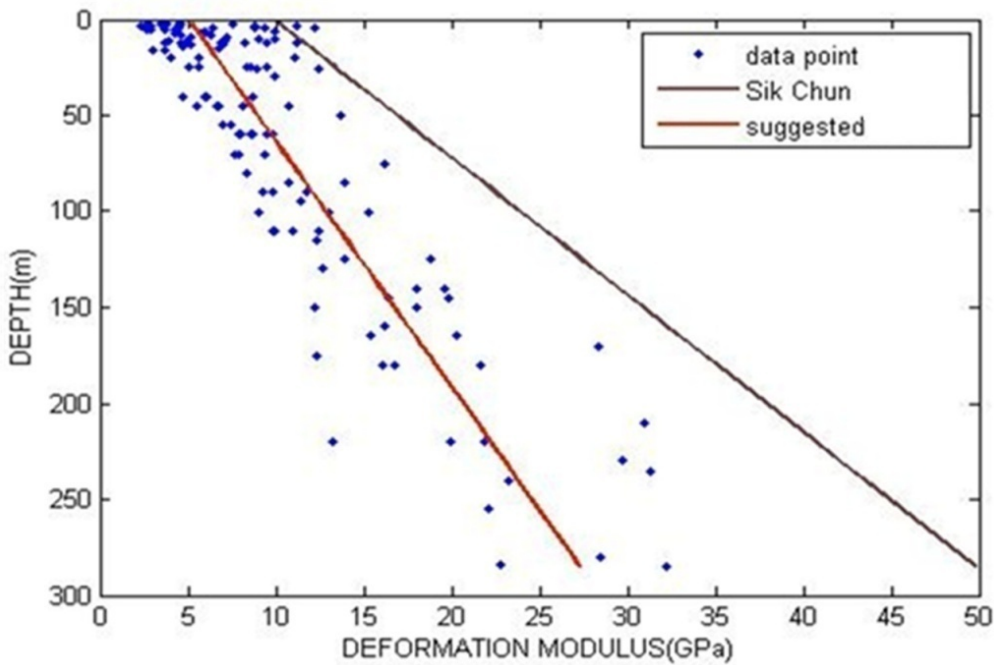




$RQD=109.8-219.74/Z0.5$ : Kwon et al. ( 2006)

$RQD=1.277*Z0.5533+57.66$ : Suggested

شکل ۱۰- مکانیزم افزایش RQD نسبت به عمق: مقایسه رابطه Kwon et al. (2006) با رابطه پیشنهادی در داده های آزادراه خرم آباد- پل زال.



$E_m=0.14*Depth+9.87$ : ByungSik Chun, 2009  $E_m=0.079*Depth+5.035$ : Suggested

شکل ۱۱- مکانیزم افزایش خطی مدول تغییر شکل پذیری نسبت به عمق، مقایسه رابطه Chun (2009) با تغییرات مدول تغییر شکل پذیری در داده های مسیر آزادراه خرم آباد - پل زال.

جدول ۶- داده‌های RQD و مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ برای تعیین روابط رگرسیونی برای صحت سنجی

با روابط تجربی جدول ۲

D.G.	No.	De(m)	RQD (%)	E <sub>m</sub> (Gpa)	D.G.	No.	De(m)	RQD (%)	E <sub>m</sub> (Gpa)	D.G.	No.	De(m)	RQD (%)	E <sub>m</sub> (Gpa)
FAL	1	6	70	6	NAL	46	3	50	2	AL	96	55	64	7
	2	2	50	3		47	13	60	5		97	5	48	2
	3	26	70	8		48	8	65	6		98	45	60	6
	4	4	65	6		49	220	80	19		99	5	56	4
	5	210	87	30		50	175	75	12		100	25	60	5
	6	145	80	16		51	60	68	8		101	3	54	2
	7	165	85	20		52	160	85	16		102	40	64	4
	8	20	75	11		53	240	80	23		103	20	60	4
	9	75	80	16		54	180	75	16		104	60	70	7
	10	140	80	17		55	115	75	12		105	5	50	2
	11	90	75	11		56	4	75	12		106	45	67	8
	12	100	80	15		57	4	70	8		107	5	56	3
	13	3	75	11		5	4.5	65	6		108	20	62	5
	14	3	70	8		59	4.5	60	4		109	12	55	3
	15	12	75	11		60	2	65	7		110	45	65	6
	16	12	70	8		61	2	60	4		111	12	56	4
	17	6	75	9		62	3	55	4		112	25	63	8
	18	2	50	4		63	11	65	7		113	90	70	9
	19	26	75	12		64	11	60	4		114	2	55	3
	20	4	70	9		65	12	75	9		115	70	63	7
	21	10	75	9		66	12	70	6		116	2	50	2
	22	10	75	9		67	13	65	7		117	40	59	5
	23	11	55	4		68	14	65	6		118	16	53	3
	24	11	55	3		69	14	60	4		119	80	65	8
	25	9	65	7		70	7	60	5		120	16	50	3
	26	9	60	5		71	7	57	4		121	45	60	5
	27	85	78	13		72	8	60	4		122	95	70	11
	28	285	90	32		73	60	73	9		123	60	68	8
	29	100	77	13		74	45	75	10		124	3	52	2
	30	50	80	13		75	25	70	8		125	55	68	7
	31	30	75	9		76	100	70	9					
	32	40	68	8		77	125	83	18					
	33	25	65	9		78	125	75	13					
	34	15	60	6		79	60	70	7					
	35	170	86	28		80	40	65	6					
	36	140	80	19		81	25	60	5					
	37	230	85	29		82	220	80	21					
	38	235	90	31		83	150	75	12					
	39	145	85	19		84	90	70	9					
	40	284	83	22		85	180	85	21					
	41	165	79	15		86	85	75	10					
	42	110	70	9		87	220	75	13					
	43	280	85	28		88	110	70	9					
	44	255	85	22		89	150	82	18					
	45	130	80	12		90	110	75	12					
				91	60	70	9							
				92	70	70	9							
				93	180	75	16							
				94	110	70	10							
				95	70	65	7							

D.G: data group, No: identification number, De: depth, RQD: rock quality designation, E<sub>m</sub>: deformation modulus.

**تشکر و قدردانی**

محل اجرای پروژه خرم آباد - پل زال و همچنین فراهم آوردن امکانات نرم افزاری و سخت افزاری برای جمع آوری داده ها تشکر و قدردانی می شود.

بدین وسیله از شرکت ایران استن به خاطر مساعدت ها و هماهنگی های انجام شده برای انجام بررسی های میدانی در

**منابع**

- شرکت مهندسی مشاور ایران استن. ۱۳۸۷. گزارش مرحله ۲ مطالعات ژئوتکنیک و زمین شناسی. مجموعه تونل های آزادراه خرم آباد - پل زال، ۱۸۷۷ صفحه.
- موسوی، س. ۱۳۸۸. مقایسه خصوصیات توده سنگ در شناسایی های قبل از اجرا با مقادیر واقعی اندازه گیری شده در حین اجرا- مجموعه تونل های آزادراه خرم آباد پل زال. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۲۰۷ صفحه.
- Athy, L.F. 1930. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. AAPG Bull, Vol. 14, p. 1-24.
- Baecher, G.B., Christian, J.T. 2003. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. USA: John Wiley&Sons, 605 p.
- Bestfit. 2003. Users guide bestfit. New York: Palisade corporation.
- Chun, B.S. 2009. Indirect estimation of the rock deformation modulus based on polynomial and multiple regression analyses of the RMR system. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46(3): 649-658.
- Carlsson, A., Olsson, T. 1978. Hydraulic properties of Sedish crystalline rocks; hydraulic conductivity and its relation to depth. Bull GeolInstUnivUppsala New Ser, 7, p. 71-84.
- Hawley, L. 2006. Instruments and Methods Borehole optical stratigraphy and neutron-scattering density measurements at Summit. Greenland Journal of Glaciology, Vol. 52, no. 179.
- Hoek, E. 2002. A brief history of the Hoek - Brown criterion. Program: RocLab.
- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. 2005. The geological strength index: applications and limitations. Bull EngGeol Environ, 64: 55-65.
- Palmstrom, H., Stille, H. 2008. Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. Tunnelling and Underground Space Technology, 23: 46-64.
- Kwon, s., Cho, W.J., Han, P.S. 2006. Concept development of an underground research tunnel for validating the Korean reference HLW disposal system. Tunneling and Underground Space Technology, 21(2): 203-217.
- Shahriar, K., Sharifzadeh, M., Khademi, J. 2008. Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. Tunnelling and Underground Space Technology, 23: 318-325.
- Sharma, V.M., Saxena, K.R. 2001. In-situ characterization of rocks.
- Zhang, L. 2005. "Engineering properties of rocks". Elsevier geo-engineering book series, Vol.4, 290 p.

