

تخمین ضرائب سختی قائم و برشی ناپیوستگی‌ها به روش آماری

نورالدین نیک‌عادت^۱، علیرضا یاراحمدی بافقی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت اردیبهشت ۹۳، پذیرش آذر ۹۳)

چکیده

در تحلیل پایداری سازه‌های ژئومکانیکی، توجه به پارامترهای مقاومتی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در محیط‌های ناپیوسته سنگی، شرایط ناپایداری به صورت مضاعف توسط ضرائب مقاومتی ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود. مقاومت فشاری سطوح درزه، ضریب زبری، مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ، ضریب سختی نرمال و برشی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار ناپیوستگی‌ها می‌باشند که اغلب توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی تعیین می‌شوند. از میان این پارامترها، تعیین ضریب سختی نرمال و برشی درزه، به علت نیاز به انجام آزمایش‌های برجا و استفاده از تجهیزات بزرگ و گران قیمت، هزینه بر بوده و امکان وجود خطای آزمایشگاهی و انسانی در محاسبه آن‌ها بالا است. در این پژوهش تلاش شده است که با استفاده از مقادیر کمی برخی از پارامترهای سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها که به نظر می‌رسند با ضریب سختی نرمال و برشی ناپیوستگی در ارتباط باشند مقادیر این ضرائب تخمین زده شود. برای این منظور، داده‌های موجود حاصل از آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و برجا جمع‌آوری و مطالعه گردید. تحلیل‌های آماری تک متغیره و چند متغیره این داده‌ها ارتباط قابل توجهی میان ضریب سختی نرمال، برشی و پارامترهای سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها را نشان داد به طوری که تخمین ضریب سختی نرمال و برشی ناپیوستگی‌ها از دیگر پارامترها مانند زبری درزه، مقاومت فشاری درزه، مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ، مدول سنگ و مقاومت فشاری تک محوره ممکن گردید.

کلمات کلیدی

ضریب سختی برشی و نرمال درزه، آمار چند متغیره

۱- مقدمه

آزمایشگاهی نیز می‌تواند قرار گیرد [۵]. وابستگی سختی برشی به ضریب زبری ناپیوستگی (JRC) و مقاومت فشاری دیواره‌ی ناپیوستگی (JCS) نیز توسط باندیس^۳ و همکاران گزارش شده است [۷].

با توجه به اهمیت سختی ناپیوستگی در تحلیل‌های عددی نیاز به تخمین این پارامترها برای رسیدن به نتایج واقعی‌تر امری ضروری است ولی با توجه به هزینه‌ی بالا و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های برج‌این امر مهم انجام نمی‌گیرد. از این رو در این پژوهش سعی شده است که این پارامتر با تحلیل‌های آماری و رگرسیونی تخمین زده شود و نتایج قابل قبولی برای تخمین سختی نرمال ناپیوستگی بر اساس پارامترهای مقاومتی سنگ بکر مانند مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته و پارامترهای توده سنگ مانند مدول تغییر شکل پذیری و ضریب زبری ناپیوستگی و مقاومت فشاری ناپیوستگی محاسبه و بر اساس ارتباط سختی نرمال و برشی ناپیوستگی، مقدار سختی برشی ناپیوستگی تخمین زده شده است.

۲- تحلیل آماری

در این پژوهش ضرایب سختی ناپیوستگی بر اساس داده‌های خام جمع‌آوری شده از نتایج آزمایش‌های برج‌این و برش مستقیم با استفاده از تحلیل‌های آماری ارزیابی شده است. برای انجام این پژوهش حدود ۳۵۰ داده از آزمایش‌های برشی برج‌این و آزمایشگاهی انجام شده بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۲ جمع‌آوری شد که از این تعداد داده برای تحلیل سختی از تعداد ۱۵۰ داده استفاده شد و از این تعداد داده حدود ۵۰ مجموعه داده دارای تمامی پارامترهای مؤثر بودند که برای تحلیل رگرسیون دو متغیره، چند متغیره و شبکه‌ی عصبی استفاده شد. موقعیت مکانی داده‌های اصلی استفاده شده در تحلیل در شکل ۱ با رنگ قرمز نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت مکان جمع‌آوری داده‌ها

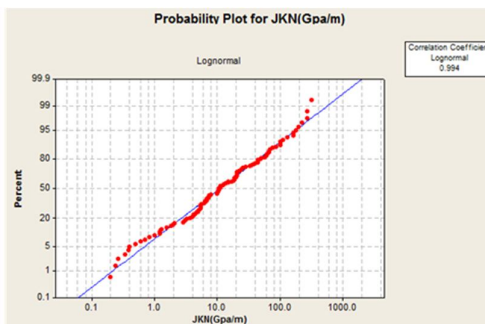
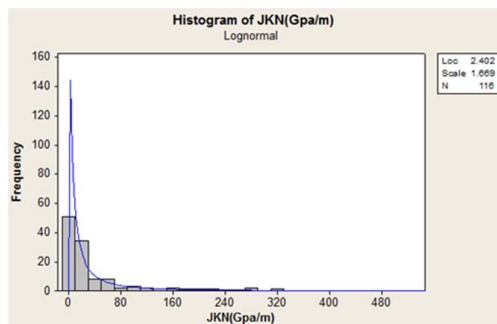
توده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها رفتار مکانیکی پیچیده‌ای مانند انیزوتروپی، پسماند، اتساع و کرنش‌های برگشت‌ناپذیر ارائه می‌دهند که کنترل‌کننده‌ی رفتار کلی سازه است. بسیاری از سازه‌های سنگی بایستی در مقیاس بزرگ در توده‌سنگ درزه‌دار ایجاد شوند که این سازه‌ی سنگی را برای طراحی و نگهداری دچار مشکل می‌کند. پایداری این نوع سازه‌ها به‌طور اصلی تحت تأثیر توزیع و رفتار ناپیوستگی‌ها قرار می‌گیرد، رفتار توده‌سنگ نیز به مشخصه‌های ترکیب تشکیل‌دهنده‌ی سنگ بکر و هم با مشخصه نقاط ضعف داخل توده‌سنگ ارتباط دارد. این نقاط ضعف می‌توانند درزه‌های طبیعی، جدایش لایه‌ای و شکستگی‌ها باشد. برای توده سنگ‌ها در واقع تغییر شکل ناپیوستگی‌ها اصلی‌ترین جز و واکنش توده‌سنگ ناپیوستگی‌دار به تغییر شرایط تنش است [۱]. تغییر شکل پذیری درزه‌ها را می‌توان با تعیین منحنی‌های تنش تغییر شکل توصیف کرد. سختی ناپیوستگی‌های سنگی اصطلاحی است که برای تشریح این منحنی‌ها در هر دو جهت عمودی و مماس استفاده می‌شود. گودمن^۱ و همکاران عبارات سختی عمودی (K_n) و سختی برشی (K_s) را به ترتیب نسبت بین نرخ تغییرات تنش عمودی - جابجایی عمودی و تنش برشی و جابجایی برشی معرفی کرده‌اند [۲]. ویژگی سختی برشی و عمودی توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۳، ۴، ۵، ۶]. کمیت بالا به همراه مقادیر جابجایی برشی حداکثر، جابجایی برشی باقیمانده و بیشینه‌ی بسته شدن ناپیوستگی امکان محاسبه سهم ناپیوستگی‌ها در جابجایی کل توده‌سنگ را فراهم می‌کند [۲].

سختی برشی و عمودی ناپیوستگی‌ها از مهم‌ترین داده‌های ورودی برای مدل‌سازی عددی توده سنگ‌های درزه‌دار است [۷، ۲، ۱]. همچنین سختی عمودی ناپیوستگی نقش اساسی بر ارتباط با جریان سیال در ناپیوستگی‌ها دارد [۱] بنابراین لزوم شناخت عوامل مؤثر بر سختی ناپیوستگی‌های سنگی در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ضروری بوده تا بدین وسیله تعیین مقدار آن به شکل مناسب و صحیح انجام گیرد. تحقیقات زیادی برای بررسی عوامل مؤثر بر سختی درزه انجام گرفته است. روسو^۲ نشان داد که مقادیر سختی برشی تحت تأثیر تکنیک

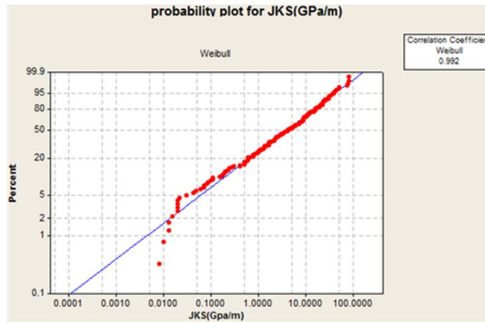
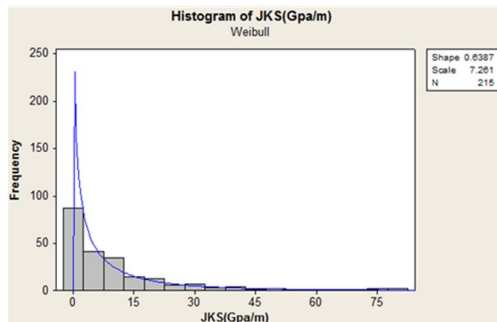
جدول ۱: توصیف آماری سختی نرمال درزه

کمینه	بیشینه	انحراف معیار	میانگین	
۰/۲	۳۱۹/۲	۵۹/۲۹	۳۴/۹۶	سختی نرمال ناپیوستگی Gpa/m
۰/۰۰۸	۸۰/۱	۱۴/۷۲	۹/۹۰۵	سختی برشی ناپیوستگی Gpa/m

برای تحلیل آماری سختی نرمال و برشی ناپیوستگی به منظور کشف و حذف داده‌های خارج از ردیف از نمودار Box plot استفاده شد. سپس تابع توزیع باقیمانده‌ی داده‌ها مشخص شد به‌طوری‌که برای ضریب سختی نرمال ناپیوستگی در بازه‌ی Gpa/m (۰-۳۲۰) از تابع توزیع لاگ نرمال و برای ضریب سختی برشی ناپیوستگی در بازه‌ی Gpa/m (۰-۸۰) از تابع توزیع ویبول تبعیت می‌کند. در جدول ۱ به‌طور خلاصه توصیف آماری مربوط به ضرایب سختی نرمال و برشی ناپیوستگی آمده است. نمودار مربوط به این توزیع آماری در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: توزیع آماری ضریب سختی نرمال ناپیوستگی و نمودار هیستوگرام



شکل ۳: توزیع آماری ضریب سختی برشی ناپیوستگی و نمودار هیستوگرام

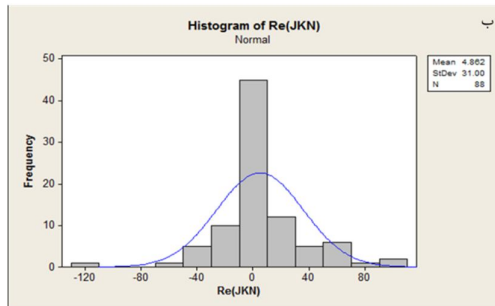
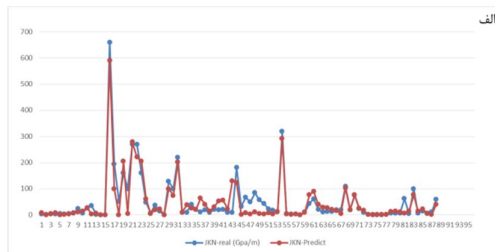
۹۴ درصد، مربوط به مقاومت فشاری تک محوره با مدول الاستیسیته‌ی سنگ است. ارتباط بین ضرایب سختی ناپیوستگی با هم در حدود ۷۶ درصد و این دو پارامتر با بقیه‌ی پارامترها ۶۴ درصد است.

۲-۱- ارتباط بین ضرایب سختی نرمال و برشی ناپیوستگی‌ها

در مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها، یکی از راه‌های نزدیک شدن به شرایط مقاومت ناپیوستگی‌ها در مقابل جابجایی نرمال و برشی، در نظر گرفتن ارتباط بین ضرایب سختی نرمال و

تحلیل خوشه‌ای به روشی گفته می‌شود که با استفاده از آن می‌توان داده‌های نمونه را به چند خوشه یا طبقه، رده‌بندی کرد به‌طوری‌که داده‌های قرار گرفته‌شده در هر خوشه، بر اساس درصد نشان داده‌شده شباهت وجود داشته باشد و بین خوشه‌ها بر اساس درصد بیش‌ترین تفاوت و ناهمگونی وجود داشته باشد. به منظور تعیین میزان ارتباط گروهی بین پارامترها بعد از حذف داده‌های خارج از محدوده‌ی قابل قبول نمودار خوشه‌بندی بین پارامترها به صورت شکل ۴ تهیه گردید تا درصد ارتباط بین پارامترها به دست آید. با توجه به این نمودار بیش‌ترین ارتباط حدود

متغیر Y معمولاً خروجی پاسخ یا متغیر وابسته نامیده می‌شود و $X_i - Y$ ورودی‌ها، برگشت‌کننده‌ها، متغیرهای توضیحی یا متغیرهای مستقل نامیده می‌شوند. بهترین برازش بین پارامترهای ورودی و ضریب مقاومت نرمال توسط یک معادله نمایی حاصل گردید که دارای ضریب همبستگی بالایی است که برای تخمین ضریب سختی نرمال مناسب است. در این رابطه علاوه بر پارامترهای مقاومتی توده سنگ سختی برشی نیز مستقیماً وارد شده است.



شکل ۵: (الف). نمودار میزان تطابق بین مقدار واقعی و مقدار محاسبه شده (ب). نمودار توزیع خطا برای معادله ۱

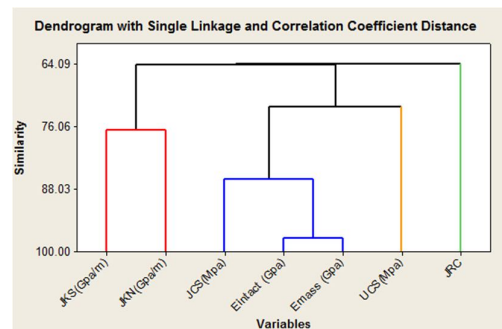
شکل ۶ - الف میزان هم‌پوشانی سختی نرمال به‌دست‌آمده از رابطه ۲ و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. میزان خطای این رابطه با مقدار میانگین $5/68$ و انحراف استاندارد 28 از مقایسه مقادیر تخمین و واقعی به‌دست‌آمده است. رابطه ۳ بر اساس پارامترهای مقاومتی توده سنگ بدون حضور سختی برشی به‌دست‌آمده است.

$$JK_n = \exp(0.0419JK_s - 0.426JRC + 0.012JCS + 0.024E_i - 0.036E_m + 0.0067UCS + 4.01) \quad R=0.911 \quad (2)$$

$$JK_n = \exp(-0.342JRC + 0.0119JCS + 0.0496E_i - 0.047E_m - 0.0105UCS + 4.84) \quad R=0.77 \quad (3)$$

برشی است. از این رو اولین رابطه‌ی برقرار شده بین این دو ضریب بر اساس حدود 100 از 300 مورد مطالعاتی بر اساس روش رگرسیونی Stepwise ارتباط زیر برقرار شده است. در رابطه‌ی زیر JK_n ضریب نرمال درزه JK_s است. ضریب برشی درزه است. در شکل ۵- الف نتایج به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۱) با خط قرمز و داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده با خط آبی نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که تطابق و هم‌پوشانی بالایی بین نتایج به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۱) و نتایج آزمایش‌ها وجود دارد. در شکل ۵- ب میزان خطای بین داده‌های واقعی و نتایج به دست آمده از رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است. با توجه به گسترده‌ی $100-1$ برابری بین سختی برشی و نرمال درزه میزان انحراف معیار به‌دست‌آمده قابل قبول است.

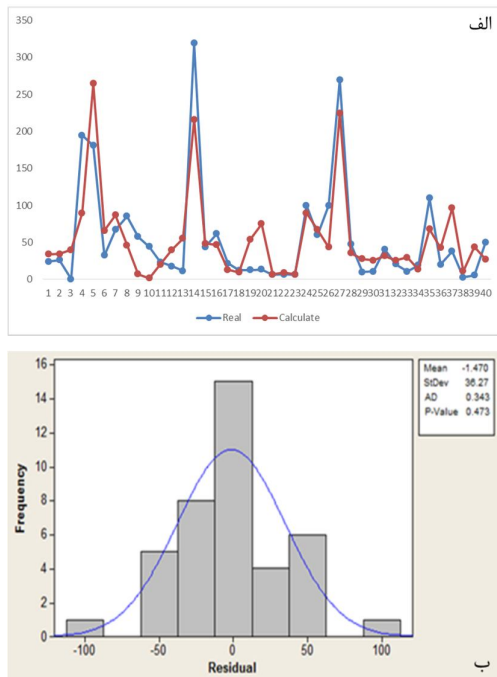
$$JK_n = 2.86JK_s \quad R=0.857 \quad (1)$$



شکل ۴: نمودار خوشه‌بندی بین پارامترها

۲-۲- ارتباط بین ضرایب سختی ناپیوستگی‌ها و پارامترهای مقاومتی توده سنگ

برای به دست آوردن یک رابطه‌ی ریاضی بین ضرایب سختی با پارامترهای مقاومتی توده سنگ از رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی استفاده شد. هدف تحلیل رگرسیون، تعیین بهترین مدلی است که بتواند متغیر خروجی با متغیرهای ورودی متعدد را تعیین کند. در بیشتر حالات تحلیل رگرسیون فرآیندی است که تعیین‌کننده چگونگی ارتباط متغیر Y با یک یا چند متغیر X_i باشد.



شکل ۷: (الف) نمودار میزان تطابق بین مقدار واقعی و مقدار محاسبه شده (ب) نمودار توزیع خطا برای معادله ۳

رابطه ۴ ارتباط بین Jks و پارامترهای مقاومتی توده سنگ را مشخص می‌کند اما به دلیل پایین بودن درجه همبستگی آن غیر قابل استفاده است. لذا پیشنهاد می‌گردد برای یافتن مقادیر سختی نرمال و برشی ناپیوستگی‌ها ابتدا Jkn را از رابطه ۲ تخمین و سپس از رابطه ۲ مقدار Jks را برآورد نمود.

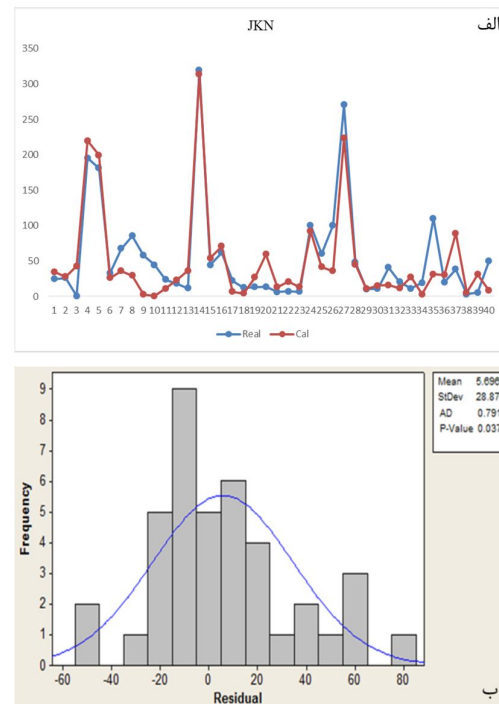
$$JK_s = \exp(-0.0227JRC + 0.0118JCS + 0.057E_i + 0.0566E_m - 0.0093UCS + 1.85)$$

$$R=0.52 \quad (4)$$

پارامترهای مؤثر سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها علاوه بر نزدیکی بیشتر به واقعیت، ساده و ارزان نیز باشند.

بر این اساس این پژوهش بر مبنای داده‌های به‌دست‌آمده از تحقیقات و آزمایش‌های قبلی بر اساس روش تحلیل رگرسیونی انجام گرفت و نتایج قابل قبولی به دست آمد. بر مبنای تحلیل آماری تابع توزیع ضرایب سختی نرمال در بازه‌ی Gpa/m (۰-۳۲۰) از تابع توزیع لاگ نرمال و ضریب سختی برشی ناپیوستگی در بازه‌ی Gpa/m (۰-۸۰) از تابع توزیع ویبول تبعیت می‌کند. با برقراری رگرسیون دو متغیره بین پارامترهای مرتبط با

شکل ۷ میزان هم‌پوشانی بین ارتباط ضریب سختی نرمال ناپیوستگی و پارامترهای مکانیکی تخمین زده شده از رابطه ۳ و مقدار واقعی نشان داده شده است. برای این رابطه میزان خطا با میانگین -1.47 و انحراف 38.27 به‌دست‌آمده است.



شکل ۶: (الف) نمودار میزان تطابق بین مقدار واقعی و مقدار محاسبه شده (ب) نمودار توزیع خطا برای معادله ۲

۳- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت و تأثیر ضرایب سختی در تحلیل‌های عددی برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر بایستی این ضرایب با دقت بالاتری تعیین و تخمین زده شود ولی از آن جایی که محاسبه‌ی این ضرایب هزینه زیاد و زمان‌بر است در بیشتر تحلیل‌ها بر اساس فرضیاتی این ضرایب که گاهی دور از واقعیت هستند و یا حداقل بدون شناخت به میزان خطا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این‌رو در این پژوهش سعی بر این است که با تخمین این ضرایب بر مبنای برخی از

compression and in situ". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geo-mechanics, Abstracts, 13: 167-172

[6] John, K.W., 1970. "Civil engineering approach to evaluate strength and deformability of regularly jointed rock". Proceeding of 11th Symposium on Rock Mechanics, pp. 68-82

[7] Barton, N.R., 1972. "A model study of rock-joint deformation" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9: 579-602

[8] Yazdani, M, Sharifzadeh, M, Kamrani, K. Ghorbani, M, 2012. "Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach", Tunneling and Underground Space Technology 28 \41-48

[9] Palassi, M., Asadollahi, P., "Tunnel Design Using Continuum and Discontinuum Approaches and the Effect of Joint Orientation on the Design". 2007.

[10] Nutakor, D, Daemon, J, 2006, "Experimental determination of stiffness of joint in welded tuff" Final Technical report.

[11] Li, c, "Deformation modulus of jointed rock masses in three- dimensional space" Lulea University of Technology, SE-971 87 Lulea, Sweden

[12] Belytschko, T. Plesha, M. Dowding, C, H. 1984 "a computer method for stability analysis of caverns jointed rock" international journal for analytical and numerical methods in geo-mechanic, vol 8 473- 492.

[13] Vardakos, S, 2003, "Distinct Element Modeling of the Shimizu Tunnel No.3 in Japan" Virginia Polytechnic Institute and State University.

[14] Damjanac, B, 2008, "phase of long- term cavern stability" supporting technical report. Itasca consulting group, Inc.

[15] Perazzelli, p, Rotonda, T, 2009 "Stability Analysis of on active marble Quarry by DEM Modelling" Proceedings of the International Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses, Tucson, Arizona, USA, January 7-8

[16] Flavio L, 2005, "Rock mechanics characterization of the rock mass" summary of primary data SKB

[17] Choi, S O, Chung, S, K. 2004. "Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton-Bandis constitutive model in UDEC". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, No. 3

[18] Fernando, T, 2008, "Numerical Analyses of the Hanging wall at the Kiirunavaara Mine" Licentiate Thesis.

[19] Wang, J, G, Ichikawa, Y, Leung, C, F, 2003 "A constitutive model for rock interfaces and joints" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) 41-53

[20] Staub, I, Fredriksson, A, Outters, N, 2002 "Strategy for a Rock Mechanics Site Descriptive Model" SKB

ضرایب سختی بیش‌ترین ارتباط بین J_{kn} و J_{ks} برقرار می‌شود.

نمودار Dendrogram بیش‌ترین ارتباط را بین UCS و E_{intact} و این گروه با JCS و گروه جدید با E_{mass} و JRC را نشان می‌دهد. در نهایت گروه تشکیل‌شده از پارامترهای سنگ بکر و توده سنگ ارتباط ۶۴.۰۹ درصدی را با ضرایب سختی نشان می‌دهد و از طرفی بین ضرایب سختی ناپیوستگی ارتباط ۷۶.۰۹ درصدی دیده می‌شود.

تحلیل رگرسیونی چند متغیره بین ضرایب سختی با بقیه پارامترها نشان داد بهترین راه حل برای یافتن مقادیر سختی نرمال و برشی ناپیوستگی‌ها ابتدا تخمین J_{kn} از رابطه ۳ و سپس برآورد J_{ks} از رابطه ۱ است.

۴- تشکر و قدردانی

از دوستان و همکاران سعید ادیب زاده، حمیرا سلیمیان، ابوالفضل عبدالمهی، حسین ملایمت، محمد لطفی، محسن محبی، مسعود بیطارنژاد شیرازی، حمیدرضا خاتمی، هادی عطاپور، کیت اوان^۸، بالازس واسارهیرلی^۷، جیک دایمون^۸، جیولین سیدل^۹، هایبرفیلد^{۱۰}، دیوید نیوتاکار^{۱۱}، حمید بهرامی، محمد امین پور، جرومی دیوریز^{۱۲}، هلن پییرس^{۱۳} که در جمع‌آوری داده و به انجام رساندن این پژوهش کمک کردند تشکر و قدردانی می‌کنم.

۵- مراجع

[1] Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983. "**Fundamentals of Rock Joint Deformation**" international Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geo-mechanics, Abstract, 20(6): 249-268.

[2] Goodman, R.E., Taylor, R.L., Brekke, T.L., 1968. "A model for the mechanics of jointed rock" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division: proceedings of the American Society of Civil Engineers, 94(SM3): 637-659.

[3] Infanti, N., Kanji, M.A., 1978. "In situ shear strength, normal and shear stiffness determinations at Agua Vermelha Project" Proceeding of 3rd International congress of IAEG, Madrid, Vol. 2, pp. 175-183.

[4] Kulhaway, F.H., 1978. "Geo-mechanical model for rock foundation settlement" Journal of the Geo-technical Division: Proceedings at American Society of Civil Engineers I 06(GT2): 21 L-227.

[5] Rosso, R.S., 1976. "A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial

- 1- Goodman
- 2- Rosso
- 3- Bandis
- 4- Joint normal stiffness
- 5- Joint shear stiffness
- 6- Keith Evan
- 7- Balazs Vasarhelyi
- 8- Jaak Daemon
- 9- Julian Seidel
- 10- Habeirfield
- 11- David Nutakar
- 12- Jerome Duriez
- 13- Helen Pearce

[21] Melin, H, 2012 “Controlling parameters for normal and shear behavior of rock fractures-a study of direct shear test data” SKB

[22] Hung, O, Coate, D F, 1998“Deformability of joints and its relation to rock foundation settlements” Can. Geo-tech. J. vol. 15

۶- پیوست

جدول ۲: بخشی از داده‌های استفاده شده

Rock Type	JKN (Gpa/m)	JKS (Gpa/m)	JRC	I (deg)	JCS (Mpa)	θ_{base}	θ_j	C_j (Mpa)	Eintact (Gpa)	Emass (Gpa)	UCS (Mpa)	References
Granite		15.456	12_14	12.6					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		8.48		15.5					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		14.06		13.5					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		20.064		7.9					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		12.138		12					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		17.248		8.1					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		8.976		5.4					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Gneiss		24.96		6.8					45.9		184	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		6.264	8_10	11.1					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		10.38	8_10	4.8					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		3.654	8_10	7.5					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		14.742	8_10	7.4					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		20.28	8_10	9.2					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		19.76	8_10	7.6					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Marble		14.742	8_10	5.2					29.6		87	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Serpentinite		19.2	18-20	15.1					39.4		74	G. Grasselli, P. Egger(2005)
Serpentinite		11.93	18-20	25.2					39.4		74	G. Grasselli, P. Egger(2005)
Granite bed rock	319.2	36.3	5.6	2.9	190.3						230	Hanna. Melin(2012)
Gabro series Ophiolite	4.6	1.64		55			32.8	0.9	40.8	28	98.2	H.Bahrami

ادامه جدول ۲: بخشی از داده‌های استفاده شده

Rock Type	JKN (Gpa/m)	JKS (Gpa/m)	JRC	I (deg)	JCS (Mpa)	θ_{base}	θ_j	C_j (Mpa)	Intact (Gpa)	Emass (Gpa)	UCS (Mpa)	References
Limestone	7.08	5.88					23.7	0.13				Sung.o.choi & Ki.seog Kim(2003)
Marble	60	16	6		75				70.4		86.7	Perazzenli,P and et al(2009)
Limestone	11.19	0.588					34		5.34		17.13	Mahendra Singh&Bhawani Singh(2008)
welded tuff(healded joint filled with vapor phase meniral deposite) Average	26	10.82			40.6					8.29		D.Nutakov,J.Dae men(2004)
Boise sand with dry, rough sawed joint	35.1	1.29								7.46		Kulhawy(1978)
Marly sand filled joint	1.96	2.34										Kulhawy(1978)
Closely jointed shale zone in limestone	0.24	0.02								40	116	Kulhawy(1978)
Wet shale interbed	0.26	0.02										Kulhawy(1978)
Fresh joint in Calcite		6.87	11.8		154							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Calcite		4.02	11.8		154							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Calcite		2.31	11.8		154							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Calcite		1.65	11.8		154							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Weathered joint in Calcite		1.89	6.2		53							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Weathered joint in Calcite		1.05	6.2		53							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Weathered joint in Calcite		0.66	6.2		53							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Weathered joint in Calcite		0.4	6.2		53							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Dolorite		4.98	7.1		167							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Dolorite		3.39	7.1		167							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Dolorite		2.24	7.1		167							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Dolorite		1.75	7.1		167							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Dolorite		2.19	7.1		76							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Fresh joint in Dolorite		1.34	7.1		76							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Gabro series Ophiolite	4.14	1.09			55		24	0.86	40.8	28	98.2	H.Bahrami
Andesite with Clay and perite filling	0.2	0.07					32	0.015	15.2	10	63	M.Mosavi et al(2009)
Andesite with Calcite and perite filling	11.2	4					32	0.015	15.2	10	63	M.Mosavi et al(2009)
Fresh Limestone	18.9	1.677	11.8		154					80	190	Bandis et al(1983)
Toppash Spring Tuff	2360	1180					35	22	19.8		60	M.C. Christianson et al(2004)
Topopash Spring Tuff(fine grained feldespar and silica) cooling joint set 1 and 4	1360 – 1750	2.5 – 2.2	2.4	1.4- 2.2	100	34	33.4	0.032	29.57- 41.62	32.5	150	U.S. Department of Energy- Las Vegas, Nevada 89134-6321(2007)

ادامه جدول ۲: بخشی از داده‌های استفاده شده

Rock Type	JKN (Gpa/m)	JKS (Gpa/m)	JRC	I (deg)	JCS (Mpa)	θ_{base}	θ_j	C_j (Mpa)	Eintact (Gpa)	E _{mass} (Gpa)	UCS (Mpa)	References
Fresh joint in Dolorite		0.86	7.1		76							M.Mosavi, H.Atai(2011)
Schist II	1875	1500	11		64	44			75		80	C. Li1
Schist	660	231	7		56	38			66		68	C. Li2
Greywake schist (I)	195	39	5		47	33			39		51	C. Li3
coal	6.72	8.53					30	0.069	8.3		18.6	P.weidony, D.Antonow
sedimentary rock	160.3	80.1					35	15.3				Z. Fu, E. Evgin et al(2011)
sierra white granite	100	1.7	6		130						180	T.Belytschko(1984)
Granodiorite	14.3+-2.5	8.9							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	14.3+-2.5	16.6							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	14.3+-2.5	21.6							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	14.3+-2.5	23.2							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	37.7+-2.3	80.7							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	37.7+-2.3	227							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	37.7+-2.3	250.2							60-70		100-120	M. Boulon
Granodiorite	37.7+-2.3	286.3							60-70		100-120	M. Boulon
coborge limeStone	160.3	80.1			92.16		35	38	36.04			B.Damjanac(2008)
weak sherman fall limestone	47.8	23.9	7.8		30.08		35	12	10.7			B.Damjanac(2008)
conglomerate	6.8	1.7					20	0	18	15	30	A. Noorzad, M. Aminpoor and H. Salari(2008)
sandstone	38	7.6	5				30	0.2	19	10	72	M. Palassi, P.Asadollahi
sandstone	3.31-141.36	0.57-66.69	4		23				30	25	63	Moon(1987)
diorite to monzdiorite	100	30	6		63	31			80		180	Flavio Lanaro(December 2005)
Rhyodacite	110	9					35-41	0	60-100		133	Malmgren and Nordlund (2005)
red shale	20	7.692					30	0.5			70	Lahmeyer Co(2005)
Topopash Spring Tuff(fine grained feldespar and silica) VPP joint set 3	870 - 720	1.8	12_16	8.4-8.8	100	34	44.5	0.74	29.57-41.64	32.5	150	U.S. Department of Energy- Las Vegas, Nevada 89134-6321(2007)
Topopash Spring Tuff(fine grained feldespar and silica) cooling joint set 2	1750 - 1240	2.2 - 1.9	4_8	2.8-4.4	100	34	33.4	0.032	29.57-41.63	32.5	150	U.S. Department of Energy- Las Vegas, Nevada 89134-6321(2007)
j.s.1	6.17	5.16	5		50		35.4	5	16		300	Sung O. Choi, So-Keul Chung(2004)
j.s.2	6.7	5.96	4		50		33.5	5	16		300	Sung O. Choi, So-Keul Chung(2004)
j.s.3	6.34	4.7	5		50		38.9	5	16		300	Sung O. Choi, So-Keul Chung(2004)
Granitic gneiss	1	0.5					34.9	0.2				Y.Q.Liu et al
Tectono-metamorphic	1.2	0.6					36.2	0.3				Y.Q.Liu et al

ادامه جدول ۲: بخشی از داده‌های استفاده شده

Rock Type	JKN (Gpa/m)	JKS (Gpa/m)	JRC	I (deg)	JCS (Mpa)	θ_{base}	θ_j	C_j (Mpa)	Eintact (Gpa)	Emass (Gpa)	UCS (Mpa)	References
sale	1.76- 21.2	2.5- 19.95			18				3	1.88	22	Moon(1987)
basalt	60.99- 111.72	50.1- 92.34	9						63		202	Moon(1987)
granite	0.057- 14.19	0.0022- 6.6	6		110				60		195	Moon(1987)
Granite to Granodiorite	128	39					34	0.6	76	68		Billy Fälth, Harald Hökmark(2007)
Quartz monzonite to monzodiorite	100	29							80	62		Billy Fälth, Harald Hökmark(2007)
Granite to quartz monzodiorite	220	40							70	55		Billy Fälth, Harald Hökmark(2007)
Ottawa limestone 1	10.1	4	7.8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone2	*	4	8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone3	10.5	15	8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone4	*	9	8.1		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone5	40.6	10	7.4		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone6	20.4	8	8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone7	10.8	25	7.6		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone8		5	7.8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone9		12	8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Ottawa limestone10		22	8		120				50_85		150- 210	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone11	20	16	6						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone 12	10.5	6	7						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone 13	20.5	12	9						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone14	20.3	21	6						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone15	20.5	22	8						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone 16		25	7						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone 17		42	5.8						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone18	10.6	9	6.7						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Neapen sandstone19		22	5.9						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
Nepean sandstone 20	10.3	51	8						40_70		50-90	O.hunger et al(1987)
johnstone	5.4				8.3				0.9			Pearce(2002)
Phyllite	1.55	0.5					24	0.00004	1.4		1.9	E.Sharifi, M.Hashemi(2011)
Slate	1.24	0.41					23	0.00003	1.12		1	E.Sharifi, M.Hashemi(2011)
Carbolic schist	0.713	0.498					30.5	0.03				Y.Q.Liu et al
granite	10	5					25	1.5				Qiu-Ming et al(2005)
Gabro series Ophiolite	2.9	1.05		55			18	0.78	40.8	28	98.2	H.Bahrani

ادامه جدول ۲: بخشی از داده‌های استفاده شده

Rock Type	JKN (Gpa/m)	JKS (Gpa/m)	JRC	I (deg)	JCS (Mpa)	θ_{base}	θ_j	C_j (Mpa)	Eintact (Gpa)	E _{mass} (Gpa)	UCS (Mpa)	References
sandstone	2.1				21.7				3.2			Pearce(2002)
siltstone	3.9				55				25.4			Pearce(2002)
basalt	7.6				120				62			Pearce(2002)
granite	7.5				180				61			Pearce(2002)
Slate fresh	181.1	9.1	4		175					66	159	S. C. BANDIS(1983)
Slate moderately weathered	69		5.3		142					66	159	S. C. BANDIS(1983)
Slate weathered	32.6	0.955	6		77					66	159	S. C. BANDIS(1983)
dorrite fresh	67.1	3.365	6.1-6.8		167-182					78	165	S. C. BANDIS(1983)
dorrite weathered	50	1.52			60-76					78	165	S. C. BANDIS(1983)
limestone fresh to slightly weathered	85.3	4.26	5.6-11.4		152-170					49	152	S. C. BANDIS(1983)
limestone moderately weathered	57.7	2.125	12.4		94-120					49	152	S. C. BANDIS(1983)
limestone weathered	44.2	1.27	15		35-53					49	152	S. C. BANDIS(1983)
siltston fresh	43.9				105					28.5	84	S. C. BANDIS(1983)
siltston moderately weathered	20.8		8		67					28.5	84	S. C. BANDIS(1983)
siltston weathered	27.8		6.1		44					28.5	84	S. C. BANDIS(1983)
sanstone fresh		2.53								24	78	S. C. BANDIS(1983)
sanstone fresh to slightly weathered	23.4	2.98	8.6-10.7		68-95					24	78	S. C. BANDIS(1983)
sanstone moderately weathered	17.9	1.1	6.1-7.5		58-64					24	78	S. C. BANDIS(1983)
sanstone weathered	11.3	0.95	5		22					24	78	S. C. BANDIS(1983)
Limestone		8.774	14-16	12					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Limestone		5.564	14-16	15.5					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Limestone		14.88	14-16	8.4					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Limestone		23.03	14-16	8.9					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Limestone		22.081	14-16	8.5					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Limestone		7.548	14-16	9.5					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Limestone		10.885	14-16	7.3					14.9		25	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Granite		22.08	12_14	11.5					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Granite		13.11	12_14	15.9					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Granite		15.987	12_14	10.6					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Granite		7.168	12_14	13.4					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Granite		10.304	12_14	16					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)
Granite		16.912	12_14	14.2					48.4		173	G. Grassellia, P. Egger(2005)