ارزیابی کارایی معیارهای شکست موهر کلمب و هوک و براون در پیش بینی رفتار شکست سنگهای نرم

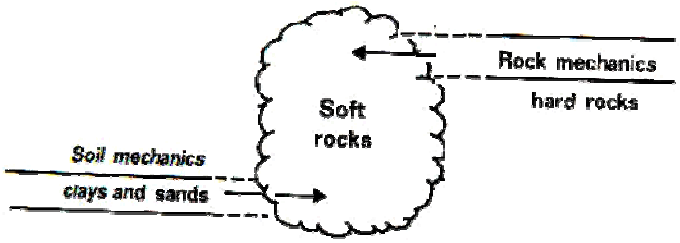
عبدالهادی قزوینیان، استادیار گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران*
ذبیح‌الله مرادیان، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران* *
علی فتحی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس
* تلفن: ۳۳۸۰-۸۸۰۱۱۰۰۱ ، نمابر: ۸۸۰۲۸۲۳۶، پست الکترونیکی: Abdolhadi@yahoo.com
** تلفن: ۳۳۸۰-۸۸۰۱۱۰۰۱ ، نمابر: ۸۸۰۲۸۲۳۶، پست الکترونیکی: z_moradian@yahoo.com

چکیده
مطالعه ژئوتکنیکی مصالح حد واسط خاک و سنگ مانند خاکهای سخت – سنگهای نرم نزدیک به سه دهه است که مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به جایگاه ویژه ای که سنگهای نرم در دانش ژئوتکنیک دارند، بررسی ویژگیهای ژئو تکنیکی و ژئو مکانیکی این مواد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. سنگ نرم مارن به عنوان یکی از مساله سازترین این مصالح در سازه های سطحی و زیرزمینی محسوب می شود. به منظور بررسی رفتار شکست مارن، هفت گروه داده ازپنج منطقه مختلف زاگرس تهیه و آزمایشهای مقاومت فشاری تک محوری ، سه محوری و برزیلین بر روی آنها انجام شد. در مرحله بعد به ارزیابی کارآیی دو معیار موهر کلمب (به عنوان یک معیار ارائه شده برای مصالح خاکی)، و هوک و براون (به عنوان یک معیار ارائه شده برای سنگهای سخت) در مورد مارن پرداخته شده است. بر اساس نتایج این تحقیق معیار موهر کلمب به دلیل ارائه پوش خطی در تمامی حالات، نمی تواند به صورت مناسبی بر زوج داده هایی که رفتار غیرخطی دارند، برازش شود. از طرفی این معیار در ناحیه کشش کارایی مناسبی ندارد. از نتایج آنالیز حاصل از برازش پوش معیار هوک و براون بر روی داده‌های مارن، مشاهده شده است که اگر چه این معیار از قابلیت برازش بهتری نسبت به معیار موهر کلمب برخوردار می باشد، اما نمی توان از این معیار در تخمین پارامتر های مکانیکی سنگ مارن بصورت قابل قبولی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: *سنگ نرم، معیار شکست، موهر کلمب، هوک و براون، مارن*

۱- مقدمه

از لحاظ تاریخی مصالح ژئوتکنیکی در دو مقوله وسیع به نام مصالح خاکی و مصالح سنگی قرار می گیرند. سنگ‌های نرم از لحاظ مقاومتی در مرز بالایی مصالح خاکی در علم مکانیک خاک، و مرز پایینی مصالح سنگی در علم مکانیک سنگ قرار دارند[۱ و۲] (شکل ۱).



شکل ۱: *جایگاه سنگ‌های نرم در طیف مصالح ژئوتکنیکی* [۲]

در سال‌های اخیر مطالعات محدودی به منظور بررسی خصوصیات ژئومکانیکی این مواد که دارای رفتار سخت‌تر، شکننده‌تر، با ناپیوستگی بیشتر و در نهایت تورم پذیری کمتر نسبت به خاک می‌باشند، صورت گرفته است. از طرف دیگر سنگ‌های نرم به مقدار قابل توجهی نسبت به سنگ‌های سخت از مقاومت پایینتری برخوردار بوده، رفتار شکنندگی کمتر و قابلیت تراکم‌پذیری بیشتری داشته و آب تاثیر بسزایی بر رفتار آن‌ها دارد.

در اکثر پروژه‌ها و نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی از معیار شکست موهر کلمب[۱] استفاده شده است. در این معیار، مقاومت توده‌های سنگی با مقاومت چسبندگی C و زاویهٔ اصطکاک ϕ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\tau = C + \sigma_n \tan\phi \qquad (۱)$$

در این رابطه τ مقاومت برشی و σ_n تنش عمودی وارد بر سطح شکست سنگ می‌باشد.

برای سنگ‌های سخت نیز معیارهای زیادی پیشنهاد شده که در منابع استاندارد موجود است. معیار هوک و براون[۳] یکی از معیارهایی است که در سنگ‌های سخت کاربرد وسیعی دارد. این معیار برای سنگ بکر به صورت زیر می باشد:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1\right)^{0.5} \qquad (۲)$$

که در آن σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های حداکثر و حداقل در لحظه گسیختگی، m_i مقدار ثابت هوک و براون برای سنگ بکر و σ_{ci} مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر می‌باشد.

مارن به عنوان یکی از مساله سازترین سنگهای نرم در کارهای ژئوتکنیکی به حساب می آید. مارن از ترکیب رس و کربنات کلسیم تشکیل شده و در نقاط مختلف، خصوصیات مهندسی، ترکیبات کانی‌شناسی و دیگر خصوصیات ژئوتکنیکی آن دارای تنوع زیادی می‌باشد. مقدار کربنات کلسیم ($CaCO3$) مارن بین ۳۵ تا ۶۵ درصد می‌باشد و به همان نسبت مقدار رس در آن متغیر است[۴].

اهمیت مطالعه سنگ‌های مارنی در ایران علاوه بر تنوع ویژگی‌های ژئوتکنیکی در نقاط مختلف، گسترش زیاد آنها در اغلب نقاط کشور و در تماس بودن با بسیاری از پروژه‌های معدنی و عمرانی است که در مطالعهٔ حاضر به بخشی از این مهم پرداخته شده است.

۲- انجام آزمایش و شرایط گزینش داده ها

نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، حاصل از نمونه‌های تهیه شده در محل و آزمایشگاه می‌باشند. نمونه‌های تهیه شده در محل، توسط ماشین مغزه‌گیری با لولهٔ مضاعف تهیه شدند. از آنجا که مارن به سرعت هوازده می‌شود، بایستی نمونه‌ها پس از برداشت، بلافاصله توسط پارافین محافظت شوند. برخی از نمونه‌ها، از بلوک‌های استخراج شده از مناطق مختلف زاگرس تهیه شده است. این عمل توسط دستگاه مغزه‌گیر موجود در آزمایشگاه که به دو سیستم خنک کننده آبی و هوای فشرده مجهز می‌باشد، انجام شده است. در این مطالعه برای جلوگیری از تاثیرات نامطلوب آب بر روی نمونه‌ها از سیستم خنک کنندهٔ هوای فشرده استفاده شده است. نمونه‌های استوانه‌ای، مطابق با استاندارد $ISRM$ [۵] تهیه شده است. به منظور تهیه زوج داده های مورد نیاز از تستهای مقاومت فشاری سه محوری، تک محوری و تست برزیلین استفاده گردید.

برای انتخاب داده‌های مناسب از میان داده‌های موجود، یکسری شرایط ویژه اعمال گردیده است. جهت کسب دقیق‌ترین نتایج از آنالیز داده‌ها دقت زیادی جهت جلوگیری از ورود داده‌های نامعتبر در میان داده‌های انتخاب شده صورت گرفته و به این طریق احتمال ورود داده‌های نامعتبر به حداقل رسیده است. شرایط اعمال شده جهت گزینش داده‌های معتبر به شرح زیر می‌باشد[۶]:

★ حداقل تعداد زوج دادهٔ (σ_3,σ_1) در هر گروه داده، نباید کمتر از ۵ باشد.

★ همهٔ داده‌ها باید شامل هر دو تنش اصلی در شکست و مقاومت تراکمی نامحصور (σ_C)، حاصل از آزمون باشند.

★ همهٔ زوج داده‌های هر گروه داده، باید تامین کنندهٔ حد انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر موگی [۷] باشند. این حد طبق پیشنهاد موگی، به صورت زیر است:

$$\sigma_1 > 4.4\sigma_3 \qquad (۳)$$

★ داده‌های هر گروه، باید در برگیرندهٔ محدودهٔ فشار محصور کننده پایین تا فشار محصور کنندهٔ نسبتاً بالا(کوچکتر از σ_C) باشند.

در این تحقیق به منظور مقایسه کارآیی معیارهای شکست در ناحیه کشش، کلیه گروه‌هایی که فاقد زوج دادهٔ کششی بودند از میان داده‌ها حذف شدند.

شرایطی که در راستای گزینش داده‌ها بیان شد، بر روی همه زوج داده های جمع‌آوری شده اعمال شد. به این ترتیب از میان داده‌های مذکور، هفت گروه داده واجد شرایط تشخیص داده شد و سایر داده‌ها از روند مطالعات، حذف شدند. این گروه ها به همراه زوج داده های آنها در جدول (۱) آورده شده اند.

جدول ۱: *گروه داده های مورد استفاده برای ارزیابی معیارها*

گروه		$\sigma_t(MPa)$	$\sigma_c(MPa)$						
1	$\sigma_3(MPa)$	-0.50	0	1	1.50	3	3.50	-	-
	$\sigma_1(MPa)$	0	7.48	17.04	20.60	24.87	27.46	-	-
2	$\sigma_3(MPa)$	-1.80	0	2	5	8	11	-	-
	$\sigma_1(MPa)$	0	19.65	36.58	46.86	59.38	82.28	-	-
3	$\sigma_3(MPa)$	-0.82	0	0.50	1.50	3	6	8	-
	$\sigma_1(MPa)$	0	10.67	15.55	21.43	24.86	35.40	42.10	-
4	$\sigma_3(MPa)$	-0.78	0	0.50	1.50	3	5.50	-	-
	$\sigma_1(MPa)$	0	9.30	14.63	17.07	22.37	33.20	-	-
5	$\sigma_3(MPa)$	-1.34	0	1	2.50	3.50	7	10	-
	$\sigma_1(MPa)$	0	19.30	33.60	42.45	47.60	65.60	91.08	-
6	$\sigma_3(MPa)$	-0.48	0	0.50	1.50	2	3	4	7
	$\sigma_1(MPa)$	0	13.12	21.62	30.31	31.50	40.10	45.86	66.80
7	$\sigma_3(MPa)$	-0.39	0	0.5	1.50	3	5	-	-
	$\sigma_1(MPa)$	0	8.57	11.61	15.46	21.92	26.20	-	-

۳- ارزیابی معیار موهر کلمب

معیار موهر کولمب رفتار مقاومتی سنگ و خاک را بطور کاملا خطی ارائه می دهد. به عبارت دیگر، این معیار یک معیار خطی است. بسیاری از محققین از جمله فرانکلین[۸] و هوک و براون[۳] پس از انجام تستهای سه محوری بر روی انواع مختلف سنگ، نشان دادند رایج ترین رفتار سه محوری سنگها به صورت غیرخطی است. بنابراین هیچ یک از معیارهای خطی (از جمله معیار موهر کلمب)، از دقت کافی برخوردار نیستند. نقطه ضعف دیگر معیارهای خطی این است که تقاطع آن با محور منفی مقاومت کششی را به دست نمی دهد. در واقع این مقدار خیلی بیشتر از مقاومت کششی تک محوری سنگ می باشد، لذا این معیار تا محلی که تقاطع خط مقاومت کششی است مورد استفاده قرار می گیرد[۷].

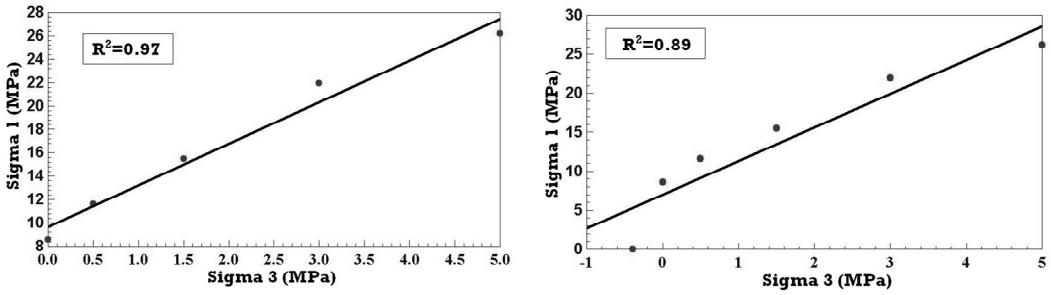
اغلب معیار موهر کلمب در مکانیک خاک مورد استفاده قرار می گیرد، چرا که بسیاری از انواع خاکهای دانه درشت غیر چسبنده، دارای پوشهای مقاومت تقریبا مخروطی با مقاومت کششی صفر می باشند، در حالی که انحنای پوش واقعی سنگها، بیشتر از آنچه این معیار نشان می دهد، می باشد.

آنالیز رگرسیون برای معیار موهرکلمب به روش خطی و بر روی همه گروه های مارن انجام شد (جدول۲). از نتایج آنالیزهای انجام شده بر روی گروه‌های مختلف مارن برمی آید که معیار موهر کلمب در تمامی موارد مقاومت کششی سنگ را بیشتر از مقدار به دست آمده توسط آزمایش ارائه داده است. این معیار برای داده های مارن، σ_t را در بهترین حالت، 1.8 برابر و در بدترین حالت، 4.2 برابر σ_t به دست آمده از آزمایش تخمین می زند. به طور میانگین مقدار σ_t تخمین زده شده توسط این معیار، برای مارن، 2.56 برابر مقدار σ_t به دست آمده از آزمایش می باشد. در شکل (۲) پوش برازش شده معیار موهر کلمب بر روی گروه هفتم داده‌های مارن برای دو حالت در نظر گرفتن و نگرفتن زوج داده کششی

با هم مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود با حذف زوج داده کششی مقدار ضریب تعیین به صورت قابل توجهی افزایش یافته که این موضوع موید عدم کارآیی معیار مذکور در ناحیهٔ کشش می‌باشد. همچنین این معیار σ_c را در بهترین حالت، 0.98 برابر و در بدترین حالت، 0.82 برابر و به طور میانگین 0.93 برابر σ_c به دست آمده از آزمایش تخمین می زند. بنابراین این معیار تخمین نسبتاً قابل قبولی از مقاومت فشاری تک محوری ارائه می دهد.

جدول ۲: *نتایج ارزیابی کارایی معیار موهر کلمب بر روی داده های سنگ مارن*

Group	Test		Formula		$\frac{\sigma_{t2}}{\sigma_{t1}}$	$\frac{\sigma_{c2}}{\sigma_{c1}}$	R^2	
	σ_{c1} (Mpa)	σ_{t1} (MPa)	σ_{c2} (Mpa)	σ_{t2} (Mpa)			With Tensile	Without Tensile
1	7.48	-0.5	7.26	-1.145	2.2902	0.9706	0.91	0.92
2	19.65	-1.8	18.11	-3.489	1.9386	0.9216	0.96	0.99
3	10.67	-0.82	10.09	-2.17	2.6462	0.9456	0.90	0.96
4	9.03	-0.78	8.34	-1.752	2.2463	0.9236	0.94	0.98
5	19.3	-1.34	19	-2.544	1.8981	0.9845	0.93	0.96
6	13.12	-0.48	12.03	-1.288	2.6834	0.9169	0.92	0.97
7	8.57	-0.39	7.06	-1.638	4.2001	0.8238	0.89	0.97



الف- *با در نظر گرفتن زوج داده کششی* ***ب***- *بدون در نظر گرفتن زوج داده کششی*

شکل ۲: *برازش معیار شکست موهر کلمب بر روی داده‌های گروه هفتم*

۵- ارزیابی معیار هوک و براون

بررسی های هوک و براون[۳] بر روی سنگهای نرم نشان داد که ضریب رگرسیون حاصله از تحلیل ها، برای این سنگها بطور چشمگیری کمتر از ضریب رگرسیون بدست آمده برای سنگهای سخت است.

جانستون[۶] با استفاده از داده های چهار ماسه سنگ بکر، اعلام کرد که معیار هوک و براون با ثابت m_i برابر ۱۵ (طبق پیشنهاد هوک و براون)، تخمین دست پایینی برای مقاومت قوی ترین سنگ و تخمین دست بالایی برای ضعیف ترین سنگ ارائه می دهد، ضمن اینکه برای دو سنگ دیگر سازگاری خوبی ندارد.

رامامورتی[۹] با امتحان معیار هوک و براون برای سنگ بکر، نتیجه گیری کرد که مقاومت تخمین زده شده از طریق این معیار در فشار محصورکننده پایین تر، بیشتر و در فشار محصورکننده بالاتر، کمتر است و در فشار محصور کننده باز هم بالاتر، این معیار تخمین دست بالایی از مقاومت به دست می دهد.
او اعلام کرد که مقدار m_i ، با افزایش فشار محصور کننده، کاهش می یابد، و در نظر گرفتن یک مقدار ثابت m_i برای هر نوع سنگی ، ناصحیح خواهد بود. رامامورتی، پراکندگی وسیعی در مقادیر m_i برای گروههای مختلف سنگ مشاهده نمود. این مقادیر همراه با مقادیر پیشنهاد شده توسط هوک و براون در جدول (۳) ارائه شده اند.
رائو[۶] خط انتقال موگی را برای نتایج تست چهار نوع ماسه سنگ، سنگ آهک ایندیانا و توف تالسومی رسم نمود. او چنین نتیجه گرفت که مقاومت تخمین زده شده توسط معیار هوک و براون در σ_3 پایین تر، بیشتر و در σ_3 بالاتر، کمتر است.

جدول ۳: *حدود تخمین زده شده و مقادیر پیشنهاد شده m_i (در $s=1$)، برای سنگ بکر*[۹]

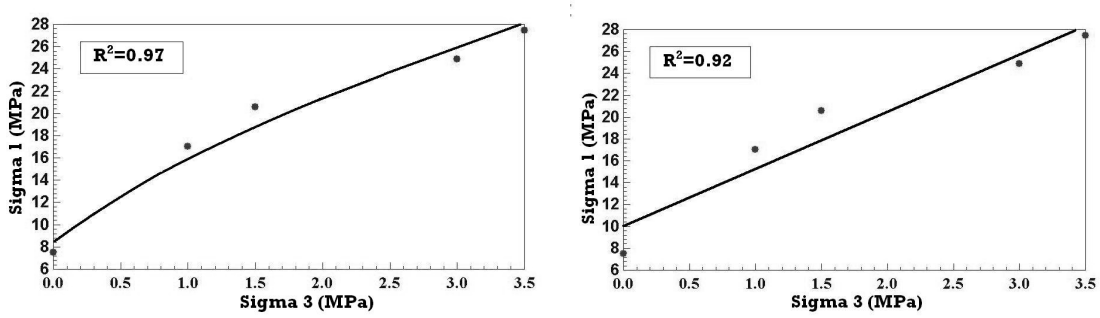
نوع سنگ	مقدار m_i	
	m_i پیشنهادشده توسط هوک و براون	محدوده تخمین زده شده m_i توسط رامامورتی
کربناتی	7	1.320-14.420
آرژیلیتی	10	-0.091-10.200
آرنایتی	15	-3.170-21.000
آذرین	25	0.950-32.840

به منظور ارزیابی معیار هوک و براون، از روش برازش غیرخطی استفاده گردید و مقدار m_i و ضریب رگرسیون (R^2) برای هر گروه داده تعیین شد (جدول۴). محدوده تغییرات m_i از 12.09 تا 28.55 و مقدار متوسط آن برابر 17.31 به دست آمده است،که از مقدار پیشنهاد شده توسط هوک و براون در جدول (۳) بسیار بیشتر می باشد.
جهت برازش این معیار بر زوج داده ها، در مواردی (گروههای ۲ و ۵ جدول۱) باید زوج داده (0 و σ_3) از میان مابقی زوج داده ها حذف گردد تا آنالیز انجام شود. این همان مطلبی است که شئوری[۷] نیز به آن اشاره نموده است(منفی شدن مقدار مقاومت فشاری تک محوری). با حذف زوج داده کششی برازش بر روی این گروه ها نیز انجام گردید.
با بررسی گروه هایی که معیار هوک و براون بر روی آن ها برازش شده مشخص شد که این معیار در سه گروه تخمین دست بالایی از مقاومت فشاری تک محوری ارائه می دهد. در یک مورد تخمین قابل قبولی از σ_c و در یک مورد دیگر تخمین نسبتا پایینی ارائه داده است. از طرفی نتایج جدول (۴) نشان می دهد که این معیار تخمین درستی از مقاومت کششی ارائه می دهد.

در شکل (۳) منحنی برازش شده دو معیار بحث شده بر روی داده های گروه اول در ناحیه تراکم آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود علی رغم اینکه زوج داده کششی از میان داده ها حذف شده است، اما باز هم معیار هوک و براون نسبت به معیار موهر کلمب از قابلیت برازش بیشتری برخوردار می باشد.

جدول ۴: *نتایج ارزیابی کارایی معیار هوک و براون بر روی داده های سنگ مارن*

Group	Test		Formula		$\frac{\sigma_{t2}}{\sigma_{t1}}$	$\frac{\sigma_{c2}}{\sigma_{c1}}$	$\mathbf{m_i}$	R^2	
	σ_{c1} (Mpa)	σ_{t1} (MPa)	σ_{c2} (Mpa)	σ_{t2} (Mpa)				With Tensile	Without Tensile
1	7.48	-0.5	8.67	-0.5	1	1.16	17.28	0.99	0.97
2	19.65	-1.8	-	-	-	-	-	-	0.99
3	10.67	-0.82	10.63	-0.82	1	1	12.86	0.99	0.98
4	9.03	-0.78	9.5	-0.78	1	1.05	12.09	0.99	0.98
5	19.3	-1.34	-	-	-	-	-	-	0.99
6	13.12	-0.48	13.72	-0.48	1	1.05	28.55	1.00	0.99
7	8.57	-0.39	6.26	-0.39	1.01	0.73	15.8	0.97	0.99



الف- *معیار موهر کلمب* ***ب***- *معیار هوک و براون*

شکل ۳: *منحنی برازش معیار های شکست موهر کلمب و هوک و براون بر روی داده های گروه اول در ناحیه تراکم*

۶- نتیجه‌گیری

۱- معیار موهر کلمب به دلیل ارائه پوش خطی در تمامی حالات، نمیتواند به صورت مناسبی بر زوج داده های سنگهای مارنی که بیشتر رفتار غیرخطی دارند، برازش شود.

۲- معیار موهر کلمب در تمامی موارد مقاومت کششی مارن را بیشتر از مقدار به دست آمده توسط آزمایش ارائه داده است. همچنین با حذف زوج دادهٔ کششی، مقدار ضریب تعیین به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند که این موضوع عدم کارآیی معیار مذکور را در ناحیهٔ کشش تایید می‌کند.

۳- از برازش گروههای ۷ گانه مارن بر معیار هوک و براون مشخص شد که این معیار از کارایی بیشتری نسبت به معیار موهر کلمب برای پیش بینی رفتار شکست سنگهای نرم برخوردار می باشد، اما نمی توان از آن در تعیین پارامترهای مکانیکی این سنگها بصورت قابل قبولی استفاده نمود.

۴- با توجه به نتایج بدست آمده از سنگ نرم مارن، معیار هوک و براون به عنوان معیار ارائه شده برای سنگهای سخت و معیار موهرکلمب به عنوان معیار ارائه شده برای خاک، نمی توانند در تمامی حالات به صورت شایسته ای برای پیش بینی رفتار شکست سنگهای نرم (حد واسط خاک و سنگ سخت) به کار روند.

۷- مراجع:

1. Johnston, I. w., 1993, Soft rock engineering, comprehensive rock engineering, Vol. 1, P.P. 367 – 393.
2. Johnston, I. w., Novella, E. A., 1993, Soft rock in the geotechnical spectrum, Proc. Geot. En. Of hard soils and soft rocks, Vol. 1, P.P. 177 – 183.
3. Hoek, E., Brown, E.T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses J. Geotech. Eng. Div., ASCE 106 (GT9), P.P. 1013-1035.
4. Atalla, M., 1993, Description, classification and testing of calcareous rock similar soils, Proc. Geot. En. Of hard soils and soft rocks, Vol. 1, P.P. 21 – 27.
5. ISRM., Suggested methods, rock characterization, testing and monitoring, Brown, E. T., Editor. Oxford, Pergamon Press, 1981, P. 211.
6. Hossaini, S. M. F., Some aspects of the strength characteristics of intact and jointed rocks, Ph. D. Thesis, 1993, the university of New South Wales, Sydney, Australia.
7. Sheorey, P. R., Empirical rock failure criterioa, A. A. Balkema, Roterdam, Brookfield, 1997, P. 176.
8. Franklin, J. A., 1971, Triaxial strength of rock materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.3, No. 2, P.P. 86-98.
9. Ramamurthy, T., 1986, Stability of rock mass, Indian J., Vol. 16, No. 1, P.P. 1-74.