معرفی برنامه رایانه‌ای ویژه جهت تعیین پارامترهای مهندسی توده‌های سنگی*

غلامرضا خانلری و سید داود محمدی
اعضای هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا همدان

تاریخ: دریافت ۸۱/۱۰/۲٤ پذیرش ۸٤/٤/۸

چکیده

به منظور تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی و یا سطوح شیبدار سنگی، داشتن پارامترهای مقاومتی توده سنگ لازم و ضروری است. برای تعیین این پارامترها از معیارهای موجود، مانند معیار شکست هوک ـ براون و یا موهرـ کولمب و غیره استفاده می‌شود. در این مقاله برنامه رایانه‌ای(که توسط نگارندگان نوشته شده و به افتخار آقایان هوک و براون نام‌گذاری شده)، معرفی گردیده است که به کمک آن می‌توان با داشتن عمق فضای زیرزمینی یا سطح گسیختگی شیروانی سنگی، وزن واحد حجم توده سنگ، *GSI* (شاخص مقاومت زمین شناختی)، σci(مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر) و mi (پارامتر معیار هوک – براون برای سنگ بکر)، کلیه پارامترهای مورد نیاز طراحی(۱۲ مورد) در توده سنگ را با سرعت و دقت بالا محاسبه نمود و مورد استفاده قرار داد.

مقدمه

نظر به اهمیت حضور درزه‌ها و سیستم‌های شکستگی در توده‌های سنگی و نقش آن‌ها در رفتار مهندسی توده سنگ که تاکنون توسط افراد بسیاری از دیدگاه‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است[۱]، [۲]، [۳] در تحلیل پایداری حفریات زیرزمینی و یا شیروانی‌های

---

*مقاله به عنوان تکنیکال نت در مجله زمین‌شناسی مهندسی چاپ می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

سنگی، چنانچه تعداد دسته درزه‌ها بیش از ٤ دسته درزه باشد، معمولاً محیط را شبه پیوسته در نظر می‌گیرند و برای تحلیل از پارامترهای مهندسی توده سنگ استفاده می‌شود[٤].از آنجایی که تعیین کلیه پارامترهای توده سنگ با استفاده از آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی پرهزینه و زمان بر است، لذا در اکثر موارد، این پارامترها با روش تجربی تخمین زده می‌شوند. یکی از این روش‌ها ، استفاده از معیار تجربی هوک ـ براون است که پارامترهای مذکور را با دقت قابل قبولی به دست می‌دهد. در این مقاله به منظور محاسبه دقیق و سریع کلیه پارامترهای توده سنگ با روش فوق، برنامه رایانه‌ای ویژه‌ای ارائه شده است. شایان ذکر است که در هنگام نوشتن این سطور، برنامه رایانه‌ای با نامRocLab 1.0 توسط آقای Hoekدر سال ۲۰۰۲ نوشته شده که مشابه با این برنامه است، ولی برنامه نوشته شده در این مقاله، قبل از برنامه ایشان و در راستای انجام پروژه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی[٥]در سال ۲۰۰۱ نوشته شده و از آن دفاع شده است. همچنین تفاوت برنامه ارائه شده در این مقاله با برنامه RocLab 1.0، در تاثیر دادن مستقیم عمق تونل یا سطح گسیختگی شیروانی سنگی در محاسبات مربوط به تنش است.

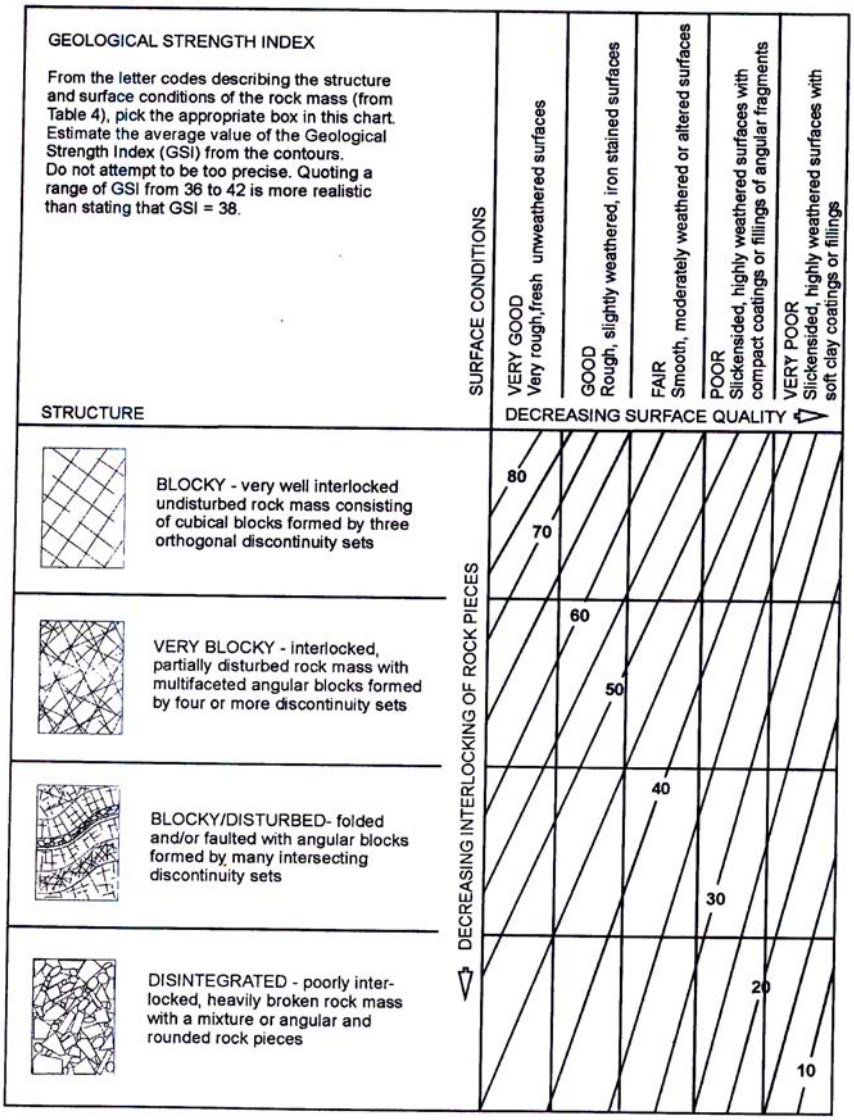
بحث

به طور کلی، برخی از پارامترهای مهندسی توده سنگ که جهت طراحی تونل‌ها یا تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: مقاومت تراکمی تک محوری توده سنگ، مقاومت کششی توده سنگ، مدول تغییر شکل توده سنگ، پارامترهای معیار هوک- براون برای توده سنگ(m_b , s)، چسبندگی توده سنگ، زاویه اصطکاک داخلی و غیره است. برای محاسبه این پارامترها براساس معیار هوک- براون، به روش زیر عمل می‌کنیم:

۱- تعیین مقدار *GSI* (Geological Strength Index) مربوط به توده سنگ: ابتدا از روی جدول‌های سال۱۹۹۵ یا سال۱۹۹۹[٦] که توسط هوک و براون ارائه شده، تعیین می‌شود (شکل۱). لازم به ذکر است که در سال۲۰۰۱ نیز جدولی جداگانه برای تعیین *GSI* مربوط به سنگ‌های فلیشی توسط مارینوس و هوک ارائه شده است[۷].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]



شکل ۱: تخمین مقدار *GSI* [6]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

۲- تعیین مقدار m_i : m_i پارامتر معیار هوک ـ براون برای سنگ بکر نامیده می‌شود که از آزمایش‌های مقاومت تراکمی سه محوری به دست می‌آید و یا از جدول‌های ویژه‌ای که آقایان هوک و براون برای این کار ارائه داده‌اند(شکل ۲)، تخمین زده می‌شود.

۳- تعیین مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر: این پارامتر از آزمایش تراکم تک محوری بر روی سنگ بکر و یا آزمایش بارگذاری نقطه‌ای (Point load test) به دست می‌آید. همچنین این پارامتر را می‌توان برای هر نوع سنگ، از روی جدولی که توسط هوک- براون [٦] ارائه شده، تخمین زد(شکل۳).

بعد از تعیین پارامترهای مذکور می‌توان آن را در معیار هوک – براون به کار برد.

اگر $GSI >$ ۲۵ باشد، خواهیم داشت [۸] :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b + \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + S)^a$$

$$m_b = m_i \, exp(\frac{GSI - 100}{28})$$

$$S = exp(\frac{GSI - 100}{9})$$

$$a = 0.5$$

اگر $GSI \leq$ ۲۵ باشد، خواهیم داشت:

$$S = 0$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19 — Greywacke (18)	Siltstone 9	Claystone 4
	Non-Clastic	Organic		Chalk 7 — Coal (8-21)		
		Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
		Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 25 - 31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists 4 - 8	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
			Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
			Norite 22			
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

In deciding upon the value of σ_{ci} for foliated rocks, a decision has to be made on whether to use the highest or the lowest uniaxial compressive strength obtained from

شکل ۲: تخمین مقدار mi برای سنگ‌های مختلف[6]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

Grade*	term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index(MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremly Strong	>250	>10	Specimen can only be chipped with a Geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quarrtzite
R5	Very strong	100-250	4-10	Speciment requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphbolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite. Limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	strong	50-100	2-4	Speciment requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25-50	1-2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete,shist,shale,siltstone
R2	Weak	5-25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty , shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1-5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremly weak	0.25-1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

*Grade according to Brown(1981)

** Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength blow 25 MPa to yield
highly ambiguous results.

شکل ۳: جدول تخمین مقاومت تراکمی تک محوری انواع سنگ‌ها[٦]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.2228683 7.1382.1.3.2.7]

مقاومت کششی تک محوری توده سنگ از رابطه زیر محاسبه می‌شود[٦]:

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_c}{2}(m_b - \sqrt{m_b^{\,2} + 4S})$$

با توجه به این که در معیار هوک ـ براون ، محاسبه ϕ و C توده‌های سنگی مشکل است، برای تعیین این پارامترهای از معیار موهر ـ کولمب استفاده می‌شود. داریم[٦]:

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + K\sigma_3$$

که σ_{cm}مقاومت تراکمی تک محوری توده سنگ و K شیب خط نمودار σ_1 نسبت به σ_3 است. مقادیر ϕوC به صورت زیر محاسبه می‌گردند[٦]:

$$Sin\phi = \frac{K-1}{K+1}$$

$$C = \frac{\sigma_{cm}(1-Sin\phi)}{2Cos\phi}$$

که مقدار K و σ_{cm} در روابط فوق، از طریق محاسبات رگرسیون خطی به دست می‌آید. σ_nو τ از روی تنش‌های اصلی (σ_3,σ_1) به صورت زیر محاسبه می‌شود[٦]:

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3} + 1}$$

$$\tau = \sigma_n - \sigma_3 \frac{\sqrt{\partial\sigma_1}}{\partial\sigma_3}$$

برای ۲۵ $< GSI$ خواهیم داشت :

$$\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3} = 1 + \frac{m_b\sigma_c}{2(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

برای ۲۵ $\geq GSI$ خواهیم داشت :

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\sigma_3} 1 + am^a{}_b(\frac{\sigma_3}{\sigma_c})^{a-1}$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

لازم به یادآوری است که در روابط فوق‌الذکر، اگر عمق تونل و یا سطح گسیختگی شیروانی سنگی کوچکتر یا مساوی ۳۰ متر باشد، مقدار تغییرات σ_3 به صورت $0 < \sigma_3 < \sigma_V$ بوده که در این صورت :

$$\sigma_V = \text{عمق} \times \text{وزن واحد حجم توده سنگ}$$

است[٦] و جهت محاسبه تنش قائم به وزن واحد حجم توده سنگ نیاز است. اگر عمق مورد نظر بیش از ۳۰ متر باشد، مقدار σ_3 حداکثر تا σ_c ۰/۲۵ افزایش می‌یابد و به تعیین وزن واحد توده سنگ نیازی نیست. بنابراین در قسمت عملیات رگرسیونی برای تعیین K و σ_{cm}، این مهم را باید مدنظر قرار داد[۷] .

مقدار مدول الاستیک توده‌های سنگی (E_m) را نیز می‌توان از رابطه زیر به دست آورد[٦]:

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\, 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \; (GPa)$$

که رابطه فوق برای $\sigma_{ci} < 100\ MPa$ به کار می‌رود.

برنامه رایانه‌ای :

برنامه رایانه‌ای مورد بحث این پژوهش به زبان Visual Basic نوشته شده است. به طور کلی این برنامه تحت ویندوز عمل نموده و کار با آن بسیار ساده و آسان است، به نحوی که بعد از نصب برنامه فوق بر روی رایانه و با کلیک کردن بر روی آیکون مربوط به آن، ابتدا صفحهٔ اصلی برنامه نمایان می‌شود که شامل موارد ذیل است:

الف) ویژگی‌های مربوط به عمق تونل یا سطح گسیختگی مورد نظر که شامل دو حالت m ۳۰ ≤ عمق و m ۳۰< عمق است.

ب) محدوده‌های وارد نمودن وزن واحد حجم توده سنگ و عمق مورد نظر: این دو محدوده فقط هنگامی ظاهر می‌شود که عمق مساوی یا کمتر از ۳۰ متر را انتخاب کنیم. اگر نشانگر موس(Mouse) را بر روی این قسمت‌ها نگهداریم، مشخص می‌شود که باید وزن واحد حجم توده سنگ را بر حسب MN/m^3 وارد کنیم به این صورت که دکمه سمت چپ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

موس (Mouse) را فشار داده، آن محدوده انتخاب می‌شود و پارامتر مذکور را وارد می‌کنیم.

ج) محدوده وارد نمودن مقدار مقاومت تراکمی تک محوری سنگ بکر(σ_{ci}): با فشردن دکمه سمت چپ موس در این محدوده، مقدار σci را وارد می‌کنیم. با نگه داشتن نشانگر موس بر روی این قسمت، مشخص می‌شود که این پارامتر را باید بر حسب MPa وارد کرد.

د) محدوده واردکردن *GSI* : با فشردن دکمه سمت چپ موس در این محدوده، مقدار *GSI* را وارد می‌کنیم. با نگه داشتن نشانگر موس بر روی این قسمت، نام کامل مخفف *GSI* نمایان می‌شود.

ه) محدوده وارد کردن mi : با فشردن دکمه سمت چپ موس در این محدوده، مقدار mi را وارد می‌کنیم. با نگه داشتن نشانگر موس بر روی این قسمت، مفهوم mi نمایان می‌شود.

بعد از وارد کردن پارامترهای ورودی مورد نیاز، تنها با کلیک نمودن بر روی قسمت Run، برنامه رایانه‌ای اجرا شده و کلیه پارامترهای توده سنگ مورد نظر را (۱۲مورد) با سرعت و دقت بالا و با ارائه واحدهای آن به دست می‌دهد. پارامترهای به دست آمده عبارتند از: مقاومت تراکمی تک محوری توده سنگ، مقاومت کششی توده سنگ، مدول تغییر شکل توده سنگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ، تنش قائم اعمال شده و پارامترهای m_b ، s، a، K، A و B که هر کدام از پارامترهای اخیر در خروجی برنامه توصیف شده‌اند.

بعد از محاسبه پارامترهای توده سنگ، می‌توان آن را با منوی Save برنامه ذخیره کرد، و سپس آن را با هر برنامه دیگری مثلاً word، Excel و غیره باز(open with) کرده و آن را چاپ (Print) کرد.

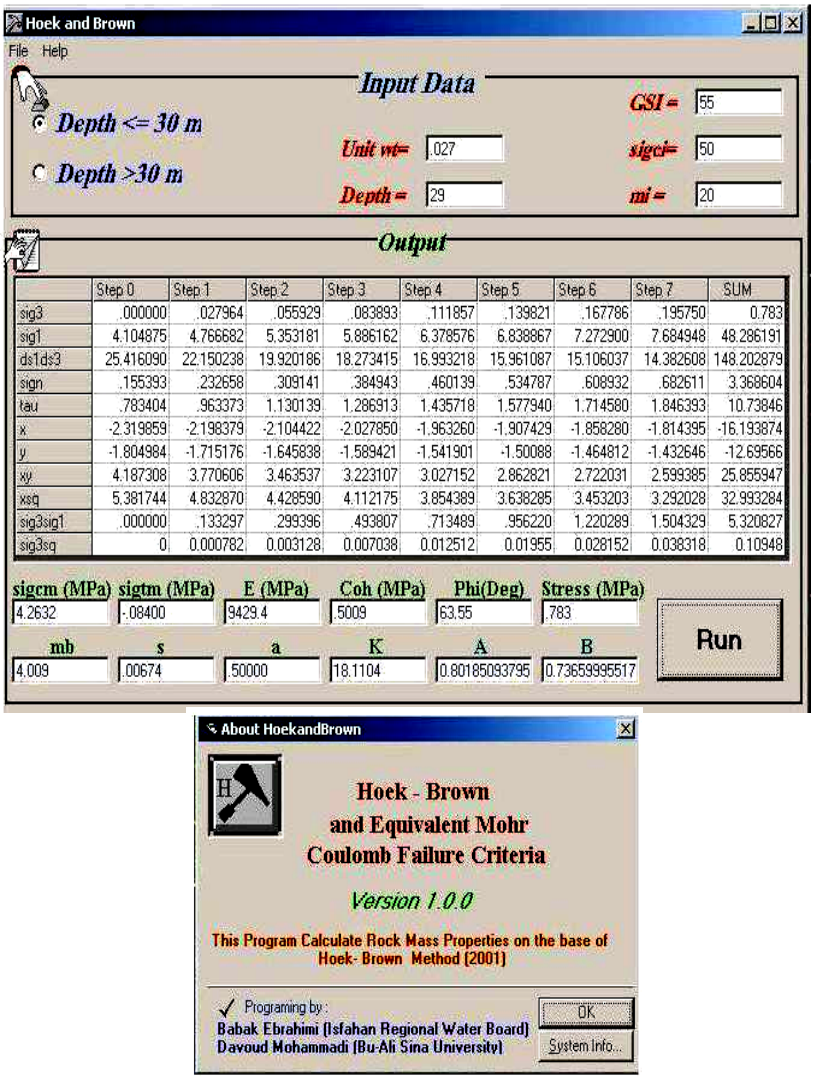
برای آشنایی با این برنامه رایانه‌ای، در ادامه مثالی آورده می‌شود.

مثال: فرض کنید مشخصات توده سنگ در برگیرنده یک تونل و عمق آن به صورت زیر است:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

عمق تونل ۲۹ متر، وزن واحد حجم توده سنگ $0.027\ MN/m^3$ ، $GSI = 55$ ، $m_i = 20$ ، $\sigma_{ci} = 50MPa$، است. در شکل ٤ صفحه اصلی برنامه رایانه‌ای، پارامترهای ورودی، خروجی و در شکل ۵ نتایج تحلیل‌ها و محاسبات آورده شده است.



شکل ٤: صفحه اصلی برنامه رایانه‌ای ویژه جهت محاسبه پارامترهای مهندسی توده‌های سنگی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

شکل ۵: نتایج تحلیل‌ها و محاسبات به دست آمده برای مثال ارائه شده

| Hoek - Brown and Equivalent Mohr Coulomb Failure Criteria |

Input

sigci=50 mi=20 GSI=55

Depth Of Failur Surface or Tunnel Below Slope is Less Than 30 Meters

Depth=29 Unit wt= 0.027 Vertical Stress= .783

Output

sigcm=4.2632 sigtm=-.08400 k=18.1104

mb=4.009 phi=63.55 coh=.5009

E= 9429.4 a=.50000 s=.00674

B= 0.73659995517552 A= 0.801850937957741

-1-

sig3	sig1	ds1ds3	sign	tau	x
.000000	4.104875	25.416090	.155393	.783404	-2.319859
.027964	4.766682	22.150238	.232658	.963373	-2.198379
.055929	5.353181	19.920186	.309141	1.130139	-2.104422
.083893	5.886162	18.273415	.384943	1.286913	-2.027850
.111857	6.378576	16.993218	.460139	1.435718	-1.963260
.139821	6.838867	15.961087	.534787	1.577940	-1.907429
.167786	7.272900	15.106037	.608932	1.714580	-1.858280
.195750	7.684948	14.382608	.682611	1.846393	-1.814395
SUM					
0.783	48.286191	148.202879	3.368604	10.73846	-16.193874

-2-

y	x	xsq	sig3sig1	sig3sq
-1.804984	-2.319859	5.381744	.000000	0.00000
-1.715176	-2.198379	4.832870	.133297	0.000782
-1.645838	-2.104422	4.428590	.299396	0.003128
-1.589421	-2.027850	4.112175	.493807	0.007038

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

-1.541901	-1.963260	3.854389	.713489	0.012512
-1.50088	-1.907429	3.638285	.956220	0.01955
-1.464812	-1.858280	3.453203	1.220289	0.028152
-1.432646	-1.814395	3.292028	1.504329	0.038318

----------SUM----------

-12.69566	-16.193874	32.993284	5.320827	0.10948

((TERM DEFINATION))

1) GSI : Geological Strength Index
2) sigci : Unaxial Compressive Strength(MPa)
3) mi : Hoek & Brown Constant for Intact Rock
4) sigcm : Uniaxial Compressive Strength for Rock mass(MPa)
5) sigtm :Tensil Strength for Rock mass (MPa)
6) E : Deformation Modulus (MPa)
7) Coh : Cohesive Strength for Rock mass(MPa)
8) Phi : Friction Angle for Rock mass (Deg)
9) stress : Vertical Stress (MPa)
10) mb :Hoek and Brown Constant for Rock mass
11) s : Hoek and Brown Constant for Rock mass
12) a : Constant
13) K : Slope of the line Relating sig1 and sig3
14) A : Constant
15) B : Constant

References----------

****For More Information Look at : ****

a) Paul Marinos and Evert Hoek(2001), {Estimating the geological properties of heterogeneous rock masses such as flysch} Bull. Eng Geol Env 60:85-92

b) Evert Hoek and ET. Brown (1997), {Practical Estimates of rock mass strength} Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 34 (8) : 1165- 1186

Programing : Gholam reza Khanlari and Davoud Mohammadi

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

نتیجه‌گیری :

با توجه به این که در تحلیل پایداری سطوح شیبدار سنگی و یا فضاهای زیرزمینی، داشتن پارامترهای مهندسی توده سنگ لازم و ضروری است، لذا برنامه رایانه‌ای به زبان Basic Visual نوشته شده که تنها با استفاده از مقادیر *GSI*، وزن واحد حجم توده سنگ و عمق موردنظر، کلیه پارامترهای توده‌های سنگی را سریع و دقیق محاسبه نموده و در اختیار کاربر قرار می‌دهد. از آنجایی که تعیین پارامترهای مهندسی فوق بسیار وقت گیر و پرهزینه هستند، لذا استفاده از این برنامه، براحتی و با هزینه بسیار ناچیز می‌تواند اطلاعات مفید و ذی‌قیمتی در اختیار محققین قرار دهد. با توجه به این مزایا پیشنهاد می‌شود برای تعیین پارامترهای توده‌های سنگی از این برنامه استفاده شود.

منابع :

۱- خانلری، غلامرضا، محمدی، سید داود، حیدری، فریدون. رده بندی مهندسی سنگ‌های آهکی ساختگاه سد کارون ۲، محور۳ -A بر اساس رده بندی‌های WCS و RMR و مقایسه آن‌ها . مجموعه مقالات ششمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. ۵ تا ۷ شهریور ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۸۱) صفحه ۷۱۹ .

2. Khanlari, G.R .Application of Rock Mass Charactrisation to Slope Stability Problems. Ph.D. Thesis (1996) University of Wollongong.

3.Khanlari, G.R. Data Acquisition of Rock Mass Strength from Laboratory Testing. Eight International congress international association for engineering geology and the environment.(1998)21-25 september, Vancover, Canada.

٤- هوک، ای و براون، ای، تی. سازه‌های زیرزمینی در سنگ(ترجمه: فهیمی‌فر، احمد)، انتشارات آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری، (۱۳۷٦) ۵۹۰ صفحه .

۵- محمدی، سیدداود. بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی‌مهندسی مسیر تونل گلاب. پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا (۱۳۸۱) ۲۲۰ صفحه.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1382.1.3.2.7]

6. Hoek, E .Rock Engineering, Course Notes(1999)www. Math Works . com
7. Marinos , P and Hoek, E .Estimating the geothechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull eng geol Env 60: (2001) 85-92.

۸- شئوری، پی . آر. معیارهای تجربی گسیختگی در سنگ. (ترجمه: اجل لوئیان ، رسول و محمدی، سید داود) ، انتشارات دانشجو همدان،(۱۳۸۰) ۲۰۵ صفحه.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.2228683 7.1382.1.3.2.7]