ارزيابي عملکرد دو معيار شکست موهر- کلمب و هوک- براون در پيش‌بيني مقاومت فشاري تک‌محوره سنگ بکر

مهدی محمدی1

1استاديار، گروه مهندسي معدن، دانشگاه ولي عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ايران [mehdi.mohammadi@vru.ac.ir](mailto:mehdi.mohammadi@vru.ac.ir)

چكيده

مقاومت فشاري تک‌محوره يکي از مهمترين پارامترهاي مکانيکي سنگ بکر است، که در تحليل و طراحي‌ها کاربرد زيادي دارد. براي تعيين مقاومت فشاري تک‌محوره از آزمايش تنش تک‌محوره استفاده مي‌شود. از طرفي دو معيار شکست موهر- کلمب و هوک- براون نیز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از روش رگرسیون پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره را تخمین می‌زنند. در اين مقاله عملکرد دو معيار شکست مورد نظر در پيش‌بيني مقاومت فشاري تک‌محوره مورد ارزيابي قرار مي‌گيرد. داده‌هاي مورد نياز از پژوهش‌هاي معتبر گذشته استخراج شده است. ارزیابی بر اساس نرخ تغییرات بین مقاومت فشاری واقعی و مقاومت فشاری پیش‌بینی شده انجام شده است. نتايج نشان مي‌دهد که پيش‌بيني حاصل از دو معيار با مقدار واقعي متفاوت است، اما نتايج به دست آمده بر اساس معيار شکست هوک- براون به واقعيت نزديک‌تر است.

***واژه‌هاي کليدي:*** مقاومت فشاري تک‌محوره، معيار شکست هوک- براون، معيار شکست موهر- کلمب.

# مقدمه

خصوصیات مکانیکی سنگ ها، نقش کلیدی و اساسی در تحلیل و طراحی سازه های سطحی و زیرزمینی دارند]1[. اهمیت آنها به این دلیل است که، از این خصوصیات برای برنامه ریزی و استراتژی بلند مدت کارهای معدنی و عمرانی استفاده می شود. مقاومت فشاري تک‏محوره سنگ بکر يکي از مهمترين خصوصيات مکانيکي سنگ ها است، که در همه پروژه‏‏‏هاي سطحي و زيرزميني مانند پي سدها، تونل و مترو کاربرد دارد]2[. براي تعيين مقاومت فشاري تک‏محوره، بر اساس آيين‏نامه انجمن بين‏المللي مکانيک سنگ، نمونه آماده‏سازي شده را در آزمايشگاه، تحت تنش فشاري تک‏محوره قرار داده]4 ،3[ و مقاومت فشاري تک‏محوره تعيين مي‏شود. از طرفي دو معيار شکست موهر- کلمب ]5 [و هوک- براون] 8- 6[ نیز بر اساس داده های آزمایشگاهی و با استفاده از روش رگرسیون گیری پارامتر مقاومت فشاری تک محوره را تخمین می زنند. روش کار بدین ترتیب است که حداقل تعداد پنج نمونه آماده سازی شده در آزمایشگاه تحت تنش های جانبی متفاوت قرار گرفته و تنش بیشینه برای هر نمونه تعیین می شود و سپس در دستگاه تنش کمینه و تنش بیشینه با روش رگرسیون گیری، مقاومت فشاری تک محوره پیش بینی می شود. این دو معیار از پرکاربردترین معیارها هستند، از اینرو پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره با این دو معیار متدوال است و طراحان و تحليل گران در بسیاری از مواقع مقاومت فشاري تک محوره به دست آمده از اين دومعيار را در تحلیل استفاده مي نمايند. بنابراين چنانچه بين مقاومت فشاري واقعي و مقاومت فشاري پيش بيني شده حاصل از دومعيار اختلاف فراوانی باشد، اعتبار تحليل و طراحي کاهش مي يابد. در اين مقاله کارآيي دو معيار موهر- کلمب و هوک- براون را در تعيين مقاومت فشاري تک محوره مورد ارزيابي قرار مي گيرد. داده هاي مورد استفاده در اين تحقيق از پژوهش هاي معتبر از گذشته استخراج شده است.

# معيار شکست موهرکلمب و هوک براون

بر اساس معيار شکست موهرکلمب، بين تنش نرمال و تنش برشي مماس بر صفحه شکست بر روي يک نمونه تحت تنش سه محوره رابطه اي خطي وجود دارد]9[. معادله 1 ارتباط بين تنش هاي روي صفحه شکست را نمايش مي دهد (شکل 1 الف).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

در رابطه فوق، پارامترهاي  به ترتيب چسبندگي و زاويه اصطکاک داخلي که همان پارامترهاي مقاومت برشي است؛ ناميده مي شوند، تنش نرمال و تنش هاي برشي روي صفحه شکست هستند.]10[. معيار موهر- کلمب بر اساس تنش هاي بيشينه و تنش هاي کمينه نيز ارائه شده است.

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

پارامترهاو (مقاومت فشاري تک محوره)، در عمل پس از انجام آزمايش سه محوره بر روي تعداي نمونه و تعيين تنش هاي حداکثر در تنش هاي جانبي مختلف و با استفاده از روش رگرسيون و به دست مي آيند (شکل 1 ب).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| الف : بر اساس تنش هاي روي صفحه شکست | ب: بر اساس تنش هاي اصلي |
| شکل (1): معيار شکست موهرکلمب | |

معيار هوك براون بر پايه آزمايش و تجربه روي تعدادي پروژه ها و نتايج آزمايشگاهي توسط هوک و براون توسعه داده شده است. عمومي ترين شـــکل اين معيار که هم حالت اصـــلي و هم حالت اصلاح شده را در برمي گيرد توسط رابطه زيربيان مي شود]11[.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

 تنش اصلي کمينه و تنش اصلي بيشينه،،, a پارامترهاي ثابت توده سنگ هستند، مقاومت فشاري سنگ بکر است. پارامتر a بزرگتر يا مساوي با 5/0 است.a و s براي سنگ بکر به ترتيب برابر با 5/0 و 1 است.]1[. در نتیجه این معیار برای نمونه سنگ بکر به صورت زير تبديل مي شود]12[.

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

در عمل براي تعيين وتعدادي نمونه تحت تاثير تنش جانبي قرار داده و سپس با تعيين تنش حداکثر، با استفاده از روش رگرسيون گيري پارامترهاي مورد نظر پيش بيني مي شوند. شکل 2 الف، منحني معيار شکست را بر اساس تنش های اصلی و شکل 2 ب معيار شکست هوک براون را براساس تنش هاي روي صفحه شکست نمايش مي دهد.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| الف) بر اساس تنش هاي اصلي | ب) بر اساس تنش هاي روي صفحه شکست |
| شکل (2): معيار شکست هوک براون | |

# داده هاي استفاده شده در مطالعه

براي مطالعه و بررسي مقاومت فشاري تک محوره بر اساس دو معيار شکست موهر- کلمب و هوک- براون نياز به داده هايي استاندارد مي باشد از اين رو نتايج آزمايشات انجام شده از مقالات معتبر استخراج و مطالعه بر روي آنها انجام مي شود. داده هاي استفاده شده در اين مطالعه در جدول 1 نمايش داده شده است]13[. این داده ها شامل، نمونه سنگ های آمفيبوليت کي تي بي، گرانيت وسترلي، دولوميت دوهمن، تراکيت ميزوهو است]13[. جدول 1 نشان می دهد، براي تعيين مقاومت فشاري تک محوره، سنگ آمفيبوليت کي تي بي، سه آزمايش تنش تک محوره انجام شده است. در اين تحقيق ميانگين اين آزمايشات (که برابر با 164مگاپاسکال است) در نظر گرفته می شود.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول (1): داده های استفاده در این تحقیق (نمونه سنگ آمفيبوليت کي تي بي، گرانيت وسترلي، دولوميت دوهمن، تراکيت ميزوهو) | | | | | | | |
| **آمفيبوليت کي تي بي** | | **گرانيت وسترلي** | | **دولوميت دوهمن** | | **تراکيت ميزوهو** | |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 158 | 0 | 201 | 0 | 257 | 0 | 100 | 0 |
| 160 | 0 | 231 | 2 | 400 | 25 | 193 | 15 |
| 176 | 0 | 430 | 20 | 488 | 45 | 253 | 30 |
| 410 | 30 | 605 | 38 | 568 | 65 | 300 | 45 |
| 702 | 60 | 620 | 38 | 624 | 85 | 339 | 60 |
| 868 | 100 | 747 | 60 | 679 | 105 | 365 | 75 |
| 1147 | 150 | 889 | 77 | 724 | 125 | 419 | 100 |
|  |  | 1024 | 100 |  |  |  |  |

# بحث

در اين بخش، مقاومت فشاري تک محوره بر اساس دو معيار شکست موهر- کلمب و هوک - براون و در دو حالت پيش بينی مي شود، بر اساس جدول 1 برای هر چهار نمونه سنگ مقاومت فشاری واقعی تعیین شده است. بنابراین در حالت اول، ارزیابی با در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی در رگرسیون گیری انجام می شود و در حالت دوم، مقاومت فشاري بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاري واقعی تخمین زده می شود. در هر دو حالت براي ارزيابي عملکرد از رابطه نرخ تغييرات (رابطه 5) استفاده شده است. در رابطه فوق نرخ تغييرات بر حسب درصد، مقادير مقاومت فشاري تک محوره واقعی و مقادير پيش بيني شده بر اساس دو معيار شکست است.

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

# 4-1 پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره بر اساس معیار موهر کلمب

در گام اول پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره بر اساس معیار موهر کلمب انجام می شود. همان طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، پیش بینی به دو صورت انجام می شود. ابتدا با در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی پیش بینی انجام می شود و سپس پیش بینی بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری تک محوره تک محوره برای چهار نوع سنگ انجام می شود (جداول 2و 3).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول (2): پیش بینی مقاومت فشاری بر اساس معیار شکست موهرکلمب با در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی | | | | |
| **نوع سنگ** | **آمفيبوليت کي تي بي** | **گرانيت وسترلي** | **دولوميت دوهمن** | **تراکيت ميزوهو** |
| مقاومت فشاری تک محوره | 8/219 | 1/248 | 9/298 | 9/139 |
| نرخ تغییرات% | 34 | 23 | 16 | 40 |

همچنین برای نمونه سنگ ها نرخ تغییرات بر اساس رابطه 5 محاسبه و در جداول 2 و3 نمایش داده شده است. جداول 2 و3 نشان می دهد که بین نتایج پیش بینی شده و مقاومت فشاری واقعی اختلاف وجود دارد. اما مقایسه بین دو جدول نشان می دهد که با در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی در محاسبات نرخ تغییرات کمتر است (جدول 2). این موضوع بیانگر این است، در صورتی که مقاومت فشاری واقعی در محاسبات در نظر گرفته شود، نتایج پیش بینی شده به واقعیت نزدیک تر است. به عنوان مثال برای نمونه سنگ گرانیت وسترلی مقاومت فشاری واقعی 201 مگاپاسکال است در صورتی که مقاومت فشاری در جداول 2و 3 به ترتیب 1/248 و 7/270 مگاپاسکال پیش بینی شده است. همچنین نرخ تغییرات به ترتیب 23 و 35 درصد تعیین شده است.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول (3): پیش بینی مقاومت فشاری بر اساس معیار موهرکلمب بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی | | | | |
| **نوع سنگ** | **آمفيبوليت کي تي بي** | **گرانيت وسترلي** | **دولوميت دوهمن** | **تراکيت ميزوهو** |
| **مقاومت** فشاری تک محوره | 6/283 | 7/270 | 5/339 | 1/171 |
| نرخ تغییرات% | 73 | 35 | 32 | 71 |

# 4-2- پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره بر اساس معیار هوک- براون

پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره و نرخ تغییرات بر اساس معیار هوک براون با در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی و بدون در نظر گرفتن مقاومت فشار واقعی به ترتیب در جداول 4و 5 نمایش داده شده است. مقایسه بین دو جدول نشان می دهد، در حالتی که مقاومت فشاری واقعی در محاسبات در نظر گرفته شود نتایج به واقعیت خیلی نزدیک تر است.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول (4): پیش بینی مقاومت فشاری بر اساس معیار هوک براون با در نظر گرفتن مقاومت فشاری حاصل از تنش تک محوره | | | | |
| **نوع سنگ** | **آمفيبوليت کي تي بي** | **گرانيت وسترلي** | **دولوميت دوهمن** | **تراکيت ميزوهو** |
| مقاومت فشاری تک محوره | 4/147 | 8/189 | 3/271 | 4/115 |
| نرخ تغییرات% | 10 | 5 | 5 | 15 |

به عنوان مثال برای مثال نمونه سنگ دولومیت دوهمن نرخ تغییرات، با در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی 5 درصد و بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی برابر با 18 درصد تعیین شده است و یا برای سنگ تراکیت میزوهو نیز به ترتیب 15 و 50 درصد نرخ تغییرات متفاوت است. بنابراین نتایج نشان می دهد که در هر حالت اختلاف بین مقاومت فشاری واقعی و پیش بینی شده وجود دارد.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول (5): پیش بینی مقاومت فشاری بر اساس معیار هوک براون بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری حاصل از تنش تک محوره | | | | |
| **نوع سنگ** | **آمفيبوليت کي تي بي** | **گرانيت وسترلي** | **دولوميت دوهمن** | **تراکيت ميزوهو** |
| مقاومت فشاری تک محوره | 8/121 | 176 | 9/303 | 9/149 |
| نرخ تغییرات% | 26 | 12 | 18 | 50 |

اما نتایج کدام یک از دو معیار به واقعیت نزدیک تر است؟ برای بررسی این موضوع نرخ تغییرات تعیین شده برای سنگ های مختلف در شکل 3 با هم مقایسه شده اند. مقایسه بین نتایج نشان می دهد که پیش بینی نتایج بر اساس معیار هوک براون به واقعیت نزدیک تر است. شکل3 نشان می دهد نتایج حاصل از معیار هوک - براون در هر دوحالت (با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی) به واقعیت نزدیک تر است و چنانچه مقاومت فشاری واقعی در محاسبات در نظر گرفته شود اختلاف بسیار کم است.

به عنوان مثال برای نمونه سنگ آمفیبولیت کی تی بی بر اساس معیار موهر- کلمب با و بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی نرخ تغییرات به ترتیب برابر است با 34 و73 درصد در صورتی که بر اساس معیار هو- براون به ترتیب 10 و 26 درصد تعیین شده است. دلیل این موضوع غیرخطی بودن معیر شکست هوک- براون است. در نتیجه ارزیابی نشان می دهد که عملکرد معیار هوک- براون به مراتب بهتر از عملکرد معیار موهر-کلمب است. بنابراین در تحلیل و طراحی یک سازه چنانچه از معیار هوک- براون استفاده شود و مقاومت فشاری واقعی نیز در محاسبات در نظر گرفته شود، تحلیل قابل اعتماد و دقت بالاتری دارد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل(3): مقایسه نتایج پیش بینی شده حاصل از دومعیار شکست بر اساس نرخ تغییرات. (,MC1 MC2: معیار شکست موهرکلمب به ترتیب با و بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی). (,HB1 HB2: معیار شکست هوک- براون به ترتیب با و بدون در نظر گرفتن مقاومت فشاری واقعی). |

# نتیجه گیری

از مهمترین خصوصیات مکانیکی که در تحلیل وطراحی پروژه های عمرانی و معدنی کاربرد دارد، مقاومت فشاري تک محوره است. علاوه بر تعيين مقاومت فشاري تک محوره با استفاده از آزمايش تنش تک محوره، از دو معیار شکست موهر- کلمب و هوک- براون نیز بر اساس داده های آزمایشگاهی و با استفاده از روش رگرسیون پارامتر مقاومت فشاری تک محوره تخمین زده می شود. در اين مقاله عملکرد دو معيار شکست مورد نظر در پيش بيني مقاومت فشاري تک محوره مورد ارزيابي قرار مي گيرد. داده هاي مورد نياز از پژوهش هاي معتبر گذشته استخراج شده است. نتايج نشان مي دهد که پيش بيني حاصل از دو معيار با مقدار واقعي متفاوت است، اما نتايج به دست آمده بر اساس معيار شکست هوک- براون و در حالتی که از مقاومت فشاری واقعی در محاسبات استفاده شود، به واقعيت نزديک تر است. بنابراین در تحلیل و طراحی یک سازه چنانچه از معیار هوک- براون استفاده شود و مقاومت فشاری واقعی نیز در محاسبات در نظر گرفته شود، تحلیل قابل اعتماد و دقت بالاتری دارد.

# مراجع

[1] Singh, R.; Vishal, V.; Singh, T. N.; Ranjith, P.G.; “A comparative study of generalized regression neural network approach and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of unconfined compressive strength of rocks”, Neural Comput & Applic, Vol: 23, p.p. 499–506, 2013.

[2] Mohammadi, M.; and Tavakoli H.; “A study of the behaviour of brittle rocks subjected to confined stress based on the Mohr–Coulomb failure criterion”, Geomechanics and Geoengineering, Vol: 10, P. 57–67, 2015.

[3] ISRM; “Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol: 16, P. 135–140, 1979.

[4] Mishra, D.A.; Basu, A.; “Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system”, Engineering Geology , Vol: 160, p.p. 54–68, 2013.

[5] Labuz, J.F.; and Zang, A.; “Mohr–Coulomb Failure Criterion”, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol: 45, p.p.975–979, 2012.

[6]Carranza-Torres, C.; “Some comments on the application of the Hoek–Brown failure criterion for intact rock and rock masses to the solution of tunnel and slope problems”, In: Barla G, Barla M, editors, MIR 2004 – X Conference on rock and engineering mechanics, Torino, Italy, Pàtron Editore, Bologna; 24–25 November 2004. p. 285–326. [Chapter 10].

[7] Hoek, E.; “Strength of jointed rock masses”, Ge´otechnique, Vol: 33(3), p.p.187–223, 1983.

[8] Hoek, E.; “Estimating Mohr–Coulomb friction and cohesion values from the Hoek–Brown failure criterion”; Int J Rock Mech Min Sci; Vol: 27, p.p.227–229, 1990.

[9] Heyman, J.; “Coulomb’s Memoir on Statics”, London: Cambridge University Press, 1972.

[10] Jaeger, J.C.; and Cook, N.G.W.; “Fundamentals of Rock Mechanics”, 3rd edn. London: Chapman & Hall, 1979.

[11] Hoek, E; Carranza-Torres, C.; Corkum, B.; “Hoek-Brown failure criterion—2002 Edition”, In: Hammah R, Bawden W, Curran J, Telesnicki M (eds) Proceedings of NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology. Toronto (downloadable for free at Hoek’s corner, <http://www.rocscience.com>) 2002.

[12] Hoek, E.; Brown, E.T.; “Practical estimates of rock mass strength”, Int J Rock Mech Min Sci, Vol: 34(8), p.p.1165–1186, 1997.

[13] You, M.; “Mechanical characteristics of the exponential strength criterion under conventional triaxial stresses”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol:47, p.p. 195–204, 2010.