

تخمین نسبت هدر رفت انرژی در حفاری توسط TBM بر اساس مدل رفتاری توده سنگ، مطالعه موردی "قطعه دوم تونل انتقال آب کرج به تهران"

مجید میراحمدی^{۱*}؛ مرتضی احمدی^۲؛

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- گروه مکانیک سنگ، بخش معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹

چکیده

امروزه با پیشرفت روزافزون تکنولوژی نیاز به انرژی نیز رو به افزایش بوده و به دلیل هزینه بالای تولید انرژی، کاهش هدر رفت آن بسیار ضروری است. حفاری در زمین جزو فعالیت‌های مهم در صنعت ژئوتکنیک، معدن و نفت می‌باشد. استفاده از TBM در حفر فضاهای زیرزمینی به دلیل مزایای زیادی که نسبت به روش‌های سنتی و سایر روش‌های مکانیزه دارد، روز بروز در حال افزایش است. مهمترین معیار اندازه‌گیری مقدار مصرف انرژی در TBM انرژی ویژه حفاری است که برابر با مقدار کار انجام شده برای حفر واحد حجم سنگ می‌باشد. این انرژی از لحاظ تئوری باید با سطح زیر منحنی کامل تنش-کرنش که انرژی کرنشی توده سنگ نامیده می‌شود، برابر باشد ولی در واقع مقدار زیادی انرژی به دلایل مختلف مانند خردایش بیش از حد سنگ، غلبه بر اصطکاک بین سنگ و ابزار برش یا هدر رفت انرژی در قسمتهای مکانیکی هدر می‌رود. هدف از این تحقیق تخمین نسبت هدررفت انرژی در سنگ‌های با کیفیت مختلف با استفاده از اطلاعات واقعی ثبت شده در حفاری با TBM می‌باشد. براساس مدل‌های رفتاری سنگ، نسبت هدر رفت انرژی در حفاری با TBM تعیین شد. به عنوان مطالعه موردی از پروژه قطعه دوم تونل انتقال آب کرج به تهران استفاده شده است. بر این اساس با محاسبه نسبت انرژی ویژه حفاری به انرژی کرنشی و نسبت انرژی کرنشی برای توده سنگ و تعیین ارتباط این دو پارامتر، مقدار نسبت هدر رفت انرژی در سنگ‌های با کیفیت مختلف تعیین شد. نتایج تحقیق نشان داد مقدار انرژی ویژه حفاری با افزایش عمق و کیفیت توده سنگ رابطه مستقیم دارد. نسبت انرژی کرنشی (ψ) و هدر رفت انرژی (λ) با یکدیگر رابطه معکوس داشته و روابطی برای پیش بینی مقدار هدر رفت انرژی بر اساس نسبت انرژی کرنشی در سنگ‌های با کیفیت مختلف ارائه شد.

واژگان کلیدی

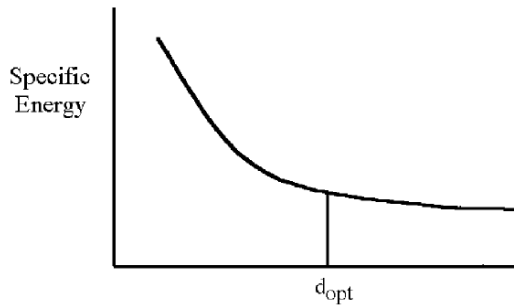
حفاری مکانیزه، انرژی کرنشی، انرژی ویژه حفاری، نسبت هدر رفت انرژی، TBM و تونل انتقال آب کرج به تهران.

۱- مقدمه

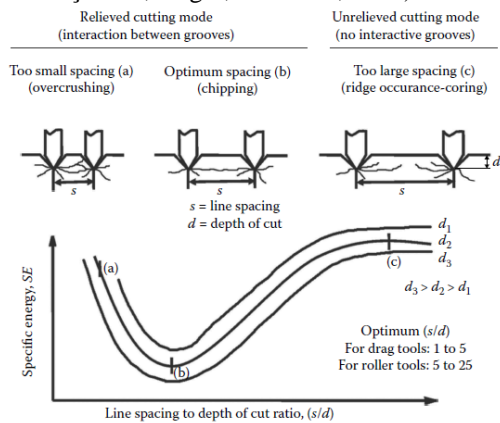
تولید و همچنین کاهش هدر رفت انرژی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. مهمترین معیار تعیین میزان انرژی مصرف شده در TBM انرژی ویژه حفاری می‌باشد. مقدار انرژی ویژه به عوامل مختلفی مانند پارامترهای توده سنگ، خصوصیات ماشین و فاکتورهای عملیاتی وابسته است. مطالعات زیادی توسط محققین مختلف برای تعیین ارتباط بین این پارامترها با مقدار انرژی ویژه انجام شده است. مفهوم انرژی ویژه اولین بار از حفاری در صنعت نفت وارد مهندسی سنگ شد (Teale, 1965). انرژی ویژه براساس

با پیشرفت تکنولوژی تمایل به حفاری مکانیزه در کلیه فعالیت‌های عمرانی و معدنی در حال افزایش است. این افزایش به دلیل مزایای زیاد و در عین حال نقایص ناچیز این روش می‌باشد. دستگاه‌های حفاری (TBM) از عمومی‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌های حفاری مکانیزه در حال حاضر می‌باشند که توانایی حفاری در شرایط بسیار متنوع زمین شناسی را دارا می‌باشند، به همین دلیل طراحی بهینه این دستگاه‌ها برای شرایط مورد نظر به منظور کاهش هزینه‌های

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: majidmirahmadi@pnu.ac.ir



شکل ۱- تغییرات انرژی ویژه نسبت به عمق نفوذ کاتر (Çopur, Tunçdemir, Bilgin, & Dincer, 2001)



شکل ۲- خردایش ایجاد شده در نسبت های مختلف فاصله به عمق (Bilgin, Copur, & Balci, 2013)

انرژی ویژه بر اساس رابطه (۱) قابل محاسبه است (Teale, 1965):

$$SE = \left(\frac{F}{A}\right) + \left(\frac{2\pi}{A}\right)\left(\frac{NT}{u}\right) \quad (1)$$

که در این رابطه:

SE : انرژی ویژه بر حسب مگاژول بر متر مکعب $\left(\frac{MJ}{m^3}\right)$

F : نیروی محوری (kN)

T : گشتاور (kNm)

N : سرعت دوران $\left(\frac{rev}{min}\right)$

A : سطح مقطع حفاری (m^2)

u : نرخ پیشروی $\left(\frac{m}{min}\right)$

همانطور که در رابطه (۱) مشاهده می شود فرآیند خردایش در حفاری توسط TBM بطور همزمان ناشی از نیروی عمودی ناشی از حرکت دستگاه به سمت جلو و گشتاور ناشی از چرخش کله حفار دستگاه می باشد. نیروی عمودی نیرویی است که باید به طور عمود بر جهت چرخش وارد شود تا دیسک برنده به مقدار از قبل تعیین شده به داخل سنگ نفوذ کند. این نیرو در واقع تعیین کننده میزان نیروی محوری ماشین حفاری است و از رابطه (۲) بدست می آید (Acaroglu, Ozdemir, & Asbury, 2008)

$$F = F_N \cdot N \quad (2)$$

مطالعه Teale بصورت تابعی از نیروی محوری دستگاه، گشتاور دستگاه، نرخ نفوذ و سطح مقطع حفاری بیان شد. روش آزمایشگاهی تعیین انرژی ویژه استفاده از دستگاه برش خطی (LCM) است که اولین بار در مدرسه معدن کلرادو استفاده شد. با استفاده از این دستگاه می توان عملکرد بهینه TBM را پیش بینی کرد. عملکرد بهینه TBM به مفهوم داشتن حداکثر برش با صرف کمترین انرژی یا به عبارت دیگر حالتی است که مقدار انرژی ویژه به کمترین حد خود برسد. برای هر توده سنگ این مقدار انرژی یک مقدار بهینه دارد که کمترین مقدار انرژی ویژه می باشد. از لحاظ تئوری مقدار انرژی ویژه بهینه برابر با سطح زیر منحنی کامل تنش- کرنش بوده و انرژی کرنشی توده سنگ نامیده می شود. ولی در واقعیت اینطور نیست و به دلیل هدر رفتن انرژی در قسمتهای مختلف، انرژی ویژه حفاری بیشتر از انرژی کرنشی توده سنگ می باشد. در بخشهای بعدی مفاهیم انرژی ویژه حفاری، انرژی کرنشی توده سنگ و نیز نسبت انرژی کرنشی تشریح شده است. سپس این مقادیر برای توده سنگ مسیر تونل کرج-تهران محاسبه شده و با مقایسه این پارامترها مقدار هدر رفت انرژی در لایه های با کیفیت متفاوت محاسبه شده است.

۲- مفهوم انرژی ویژه حفاری

یکی از مهمترین فاکتورهای موثر بر میزان هزینه و زمان در پروژه حفاری، مقدار انرژی ویژه حفاری می باشد. این انرژی برابر با مقدار کار مورد نیاز برای حفر واحد حجم توده سنگ می باشد. انرژی ویژه حفاری به عنوان معیاری برای تعیین میزان کارایی عملیات حفاری نیز استفاده می شود. در حفاری توسط ماشینهای حفر تمام مقطع مقدار این انرژی وابسته به مقدار نیروی محوری و نیروی دورانی دستگاه می باشد. با ثابت بودن مقدار نیروهای دستگاه و افزایش نرخ نفوذ، میزان انرژی ویژه حفاری کاهش می یابد. عملیات حفاری توسط TBM از نوع حفاری دورانی می باشد. در این نوع حفاری ابتدا ابزار برش توسط نیروی محوری به داخل توده سنگ فرو برده شده و سپس توسط نیروی دورانی چرخیده می شود. برای یک کاتر منفرد همانطور که در شکل (۱) دیده می شود یک عمق نفوذ بهینه (d_{opt}) وجود دارد. ولی برای دو کاتر مجاور همانطور که در شکل (۲) دیده می شود یک نسبت فاصله به عمق نفوذ $\left(\frac{s}{d}\right)$ بهینه وجود دارد که مقدار انرژی ویژه در آن کمترین مقدار را دارد. اگر این نسبت بیشتر از مقدار بهینه باشد بین برشها ایجاد پل سنگ شده و فرآیند خردایش به درستی اتفاق نمی افتد و اگر کمتر از نسبت بهینه باشد، باعث خردایش بیش از حد شده و در هر دو حالت مقدار انرژی ویژه افزایش پیدا می کند.

و خردایش می‌شود و هر دو عامل باعث افزایش انرژی ویژه حفاری می‌شوند.

با مشخص بودن انرژی ویژه، مقادیر نرخ نفوذ (ICR) و نرخ برش پیوسته (PR) نیز از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$ICR = \eta \frac{P}{SE} \quad (4)$$

$$PR = \frac{4\eta P}{SE\pi D^2} \quad (5)$$

که در روابط بالا:

η : نرخ انتقال انرژی از کاترهد به توده سنگ

P : قدرت کاترهد

D : قطر کاترهد

Pomeroy (1963) انرژی ویژه را از رابطه (۶) محاسبه نمود (*Pomeroy, 1963*)

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (6)$$

که در این رابطه:

SE : انرژی ویژه ($\frac{MJ}{m^3}$)

FC : نیروی برنده (KN)

Q : حجم خرده‌های حفاری در واحد طول برش ($\frac{m^3}{Km}$)

با توجه به در نظر گرفته شدن نیروی محوری و گشتاور در رابطه (۱)، در این تحقیق به منظور افزایش دقت در تخمین مقدار انرژی ویژه حفاری از رابطه مذکور بر اساس اطلاعات واقعی ثبت شده در حفاری قطعه دوم تونل انتقال آب کرج به تهران استفاده شده است.

۳- مفهوم انرژی کرنشی توده سنگ

هنگامی که یک جسم تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد، نه تنها در هر نقطه آن تنش ایجاد می‌شود، بلکه این نیروها باعث می‌شود که جسم تغییر شکل داده و وضعیت نقاط مختلف آن نسبت به یکدیگر با وضعیت اولیه تفاوت کند. تغییر نقطه اثر نیروهای اعمالی به سیستم باعث می‌شود که در هنگام اعمال این نیروها مقداری کار انجام گیرد. کار مزبور که توأم با تغییر شکل جسم در وضعیت تنش می‌باشد باعث ذخیره مقداری انرژی به صورت انرژی ارتجاعی در جسم می‌شود. این انرژی ذخیره شده در جسم انرژی کرنشی نامیده می‌شود (*Brady & Brown, 2006*)

طبق مطالعات *Dehkordi et al (2013)* انرژی کرنشی برابر با سطح زیر منحنی کامل تنش-کرنش می‌باشد و به رفتار توده سنگ، مقاومت اوج و باقیمانده توده سنگ و کرنش متناسب با میزان مقاومت اوج و باقیمانده بستگی دارد (*Soleiman Dehkordi, Shahriar, Moarefvand, & Gharouninik, 2013*)

۳-۱ مدل‌های رفتاری توده سنگ

بهترین روش مطالعه رفتار توده سنگ منحنی کامل تنش-کرنش

که در این رابطه:

F : نیروی محوری (kN)

F_N : نیروی عمودی (kN)

N : تعداد کاترهای روی کاترهد

گشتاور میانگین نیروی مورد نیاز جهت چرخش دیسک برنده در عمق نفوذ مشخص می‌باشد. این نیرو تعیین کننده میزان قدرت و گشتاور دستگاه بوده و از رابطه (۳) بدست می‌آید (*Acaroglu, Ozdemir, & Asbury, 2008*):

$$T = \sum_{i=1}^N F_{R_i} \cdot L_i \quad (3)$$

در این رابطه:

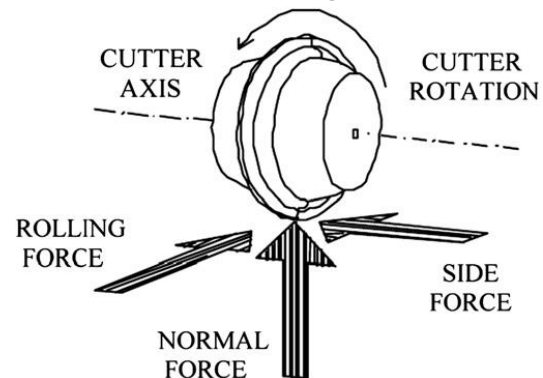
T : گشتاور مورد نیاز کاترهد (kNm)

F_R : نیروی دورانی (kN)

L_i : فاصله بین مرکز کاترهد تا کاتر i ام

N : تعداد کاتر

نیروهای جانبی در واقع ناشی از ایجاد خردایش و آزاد شدن یک سمت سنگ و در مقابل ایجاد فشار در سمت مقابل می‌باشند. این نیروها برای طراحی تعادل کاترهد استفاده می‌شوند. شکل (۳) نیروهای وارد بر کاتر را نشان می‌دهد.

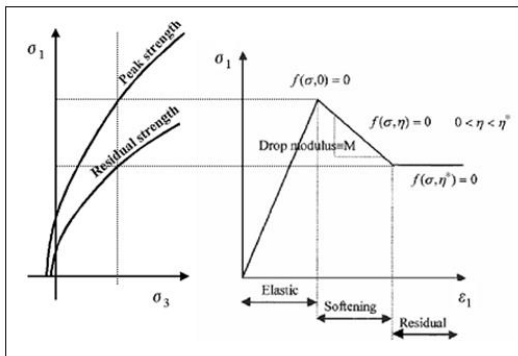


شکل ۳- نیروهای وارد بر کاتر (*Medel-Morales & Botello-Rionda, 2013*)

مقدار نیروی محوری و گشتاور دستگاه براساس جنس، مقاومت و رفتار توده سنگ متفاوت است. با افزایش کیفیت و مقاومت فشاری توده سنگ، مقدار نیروی محوری نیز افزایش پیدا می‌کند. افزایش یا کاهش بیش از اندازه نیروی محوری باعث تاثیر منفی در خردایش و افزایش انرژی ویژه حفاری مورد نیاز می‌شود. افزایش بیش از اندازه نیروی محوری باعث فرورفتن بیش از حد و گیر افتادن ابزار برش در سازند می‌شود و از سوی دیگر کم بودن نیروی محوری باعث عدم نفوذ ابزار برش به داخل سازند و هرز چرخیدن آن می‌شود و در هر دو حالت مقدار انرژی ویژه حفاری افزایش پیدا می‌کند. همینطور افزایش بیش از حد گشتاور منجر به افزایش خردایش و فرسایش سریعتر ابزار برش می‌شود، کاهش بیش از حد آن باعث عدم چرخش

این مدل هستند (Alejano, Alonso, Rodriguez-Dono, & Fernandez-Manin, 2010) در این تحقیق از معیار کرنش نرم‌شوندگی هوک و براون استفاده شده است. این معیار به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$f(\sigma_\theta, \sigma_r, \eta) = \sigma_\theta - \sigma_r - \sqrt{m(\eta)\sigma_r\sigma_{ci} + S(\eta)\sigma_{ci}^2} \quad (7)$$



شکل

۵- پوشه‌های تنش اوج و باقیمانده و منحنی‌های تنش-کرنش (Alejano, Alonso, Rodriguez-Dono, & Fernandez-Manin, 2010)

پارامتر پلاستیک بصورت $\eta = \gamma^p = \varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p$ بوده و معادلات $m(\eta)$ و $S(\eta)$ عبارت است از:

$$m(\eta) = \begin{cases} m^{peak} - \frac{m^{peak} - m^{res}}{\eta^*} \eta & 0 < \eta < \eta^* \\ m^{res} & \eta \geq \eta^* \end{cases} \quad (8)$$

$$S(\eta) = \begin{cases} s^{peak} - \frac{s^{peak} - s^{res}}{\eta^*} \eta & 0 < \eta < \eta^* \\ s^{res} & \eta \geq \eta^* \end{cases} \quad (9)$$

پارامترهای m^{peak} , m^{res} , s^{peak} و s^{res} بیانگر مقادیر ثابت های m و S در حالت های اوج و باقیمانده می باشد.

۲-۲- تخمین پارامترهای مقاومتی

برای تعیین رفتار کرنش نرم شونده توده سنگ بر اساس معیار هوک-براون، اطلاعات پایه زیر مورد نیاز است:

۱- پارامترهای اوج شامل $(a, S^{peak}, m_b^{peak})$ و GSI^{peak}

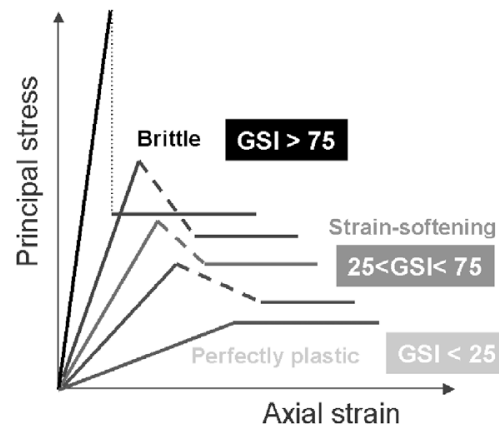
۲- پارامترهای باقیمانده شامل (a, S^{res}, m_b^{res}) و GSI^{res}

۳- پارامترهای دگرشکلی قبل و بعد از شکست

۳-۲-۱- تخمین پارامترهای اوج

هوک در سال ۱۹۹۴ معیار اصلاح شده زیر را جهت تخمین مقاومت

می‌باشد (Goodman, 1991). از آنجا که تعیین رفتار پس از شکست نیاز به دستگاه‌های مجهز دارد، نیاز به مدل‌هایی برای پیش‌بینی رفتار پس از شکست می‌باشد. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، هوک و براون (۱۹۹۷) رفتار پس از شکست توده سنگ را بر اساس شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) به سه دسته رفتار پلاستیک کامل، رفتار کرنش نرم شونده و رفتار شکننده تقسیم بندی کردند. (Hoek, 1994) (Hoek, Kaiser, & Bawden, 2000) (Hoek, Marinos, & Benissi, 1998)



شکل ۴- رفتار پس از شکست توده سنگ بر اساس شاخص مقاومت زمین‌شناسی (Alejano, Rodriguez-Dono, Alonso, & Manin, 2009)

می‌توان رفتار شکننده و پلاستیک کامل را حالت‌های خاصی از رفتار کرنش نرم‌شونده در نظر گرفت که در آنها مدول افت به ترتیب برابر با بینهایت و صفر می‌باشد. از اینرو رفتار توده‌سنگ در این تحقیق کرنش نرم‌شونده در نظر گرفته شده است.

رفتار کرنش نرم شونده با یک گذار تدریجی از مقاومت اوج به مقاومت باقیمانده مشخص می‌شود که با پارامتر نرم‌شوندگی (η) کنترل می‌شود. گذار در مسیری تعریف می‌شود که رفتار الاستیک تا زمانی که پارامتر نرم‌شوندگی صفر است، وجود دارد. رفتار نرم‌شوندگی هنگامی اتفاق می‌افتد که $0 < \eta < \eta^*$ باشد و مرحله باقیمانده هنگامی به وقوع می‌پیوندد که $\eta > \eta^*$ باشد. η^* به صورت مقداری از پارامتر نرم‌شوندگی تعریف می‌شود که گذار میان مراحل نرم شوندگی و باقیمانده را تعیین می‌کند. شکل (۵) یک آزمایش مقاومت فشاری سه محوره انجام شده بر روی یک نمونه مصالح با رفتار کرنش نرم شونده می‌باشد. شیب مرحله نرم شوندگی (مدول افت) با M نشان داده شود، اگر مدول افت به بینهایت میل کند رفتار توده سنگ کاملاً شکننده بوده و اگر به صفر میل کند رفتار جسم کاملاً پلاستیک خواهد بود. بنابراین مدل‌های رفتاری کاملاً شکننده، الاستیک-شکننده-پلاستیک و پلاستیک کامل موارد حدی

سنگ خوب مقادیر پیش-بینی شده جهت پارامترهای باقیمانده بیشتر از حالت واقعی می‌باشند. *Cai et al. (2007)* رابطه (۱۷) را جهت تخمین پارامترهای باقیمانده ارائه داده‌اند (*Cai, Kaiser, Tasaka, & Minami, 2007*)

$$m_r = 0.65m_b \quad s_r = 0.04s \quad (\sigma_c)_r = 0.2\sigma_c \quad (17)$$

این رابطه در توده‌سنگ با درزه‌داری ملایم و یا در توده سنگ که درزه‌ها با مواد پرکننده پر شده باشند و یا در توده سنگ با درزه‌داری بسیار کم به کار می‌رود. همچنین آنها رابطه (۱۸) را جهت تخمین میزان اندیس مقاومت زمین‌شناسی باقیمانده ارائه نمود.

$$GSI_r = 0.7GSI \quad (18)$$

که در روابط فوق، GSI_r و GSI به ترتیب اندیس زمین‌شناسی اوج و باقیمانده می‌باشند. همچنین m_r و s_r ، ثابت‌های توده‌سنگ در حالت باقیمانده می‌باشند. روابط فوق‌الذکر توسط چندین محقق مورد تردید قرار گرفت (*Sakurai, 1997*). در این تحقیق مقادیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی باقیمانده بر اساس دستورالعمل کابی توسط رابطه (۱۹) تخمین زده شده است (*Cai, Kaiser, Tasaka, & Minami, 2007*)

$$GSI_{res} = GSI \cdot e^{-0.134GSI} \quad (19)$$

۳-۲-۳- تخمین پارامترهای تغییر شکل‌پذیری قبل و بعد از نقطه اوج

جهت تبیین رفتار توده سنگ، مشخص شدن پارامترهای تغییر شکل‌پذیری توده سنگ قبل و بعد از نقطه اوج از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. پارامترهای مهم جهت تبیین رفتار پیش از شکست توده سنگ شامل مدول دگرشکل‌پذیری و نیز نسبت پواسون می‌باشد. لذا به منظور تخمین مدول دگرشکل‌پذیری توده سنگ از رابطه (*Hoek & Diederichs, 2005*) استفاده شده است. علت اصلی استفاده از این رابطه در نظر گرفتن تأثیر کلیه فاکتورهای موثر در تخمین مدول دگرشکل‌پذیری همچون مدول الاستیسیته ماده سنگ، فاکتور اغتشاش می‌باشد (*Hoek & Diederichs, 2005*).

$$E_{rm} = E_i \cdot \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{(75 + 25D - GSI)}{11}}} \right) \quad (20)$$

در این رابطه D فاکتور اغتشاش توده سنگ می‌باشد. همچنین ضریب پواسون نیز یکی از پارامترهای موثر در رفتار جسم قبل از شکست می‌باشد. ولیکن این پارامتر معمولاً بین ۰/۲۵ تا ۰/۳ تغییر می‌یابد و با افزایش کیفیت توده سنگ معمولاً کاهش می‌یابد.

مهمترین پارامتر جهت تعیین رفتار پس از شکست توده سنگ مدول افت می‌باشد. همواره رفتار پس از شکست توده سنگ چه در

توده سنگهای درزه دار ارائه نمود (*Hoek, Analysis of rockfall hazards, 2000*)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (10)$$

که پارامترهای معادله فوق‌الذکر عبارت است از:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (11)$$

$$S = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (12)$$

در روابط بالا σ_1 و σ_3 ، مینیمم و ماکزیمم تنشهای اصلی، m_b ثابت توده سنگ هوک و براون، a و S ، ثابت‌های توده سنگ می‌باشند که مقادیر مذکور برای ماده سنگ به ترتیب ۰/۵ و ۱ می‌باشند و مقدار a برای توده سنگ از رابطه (۱۳) بدست می‌آید (*Hoek, Analysis of rockfall hazards, 2000*) همچنین D فاکتور اغتشاش و m_i ثابت ماده سنگ می‌باشد.

$$a = 0.65 - (GSI/200) \leq 0.6 \quad \text{برای } GSI < 25 \quad (13)$$

$$\frac{m_b}{m_i} = \frac{s}{3} \quad \text{برای } GSI > 25 \quad (14)$$

همچنین جهت تخمین میزان تنش محصور کننده حداقل در اعماق زیاد از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (15)$$

که σ'_{cm} مقاومت توده سنگ می‌باشد و از رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$\sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (16)$$

در شرایطی که مقادیر تنش افقی از تنش قائم بیشتر باشد، می‌توان بجای مقدار γH ، در رابطه فوق مقدار تنش افقی حداکثر را قرار داد (*Hoek, Strength of rock and rock masses, 1994*).

۳-۲-۳- تخمین پارامترهای باقیمانده

در رفتار کرنش نرم‌شونده همانطور که در شکل (۵) ارائه شد، مقاومت توده سنگ پس از شکست کاهش یافته و با تحمل مقداری جابجایی به مقاومت باقیمانده کاهش می‌یابد. در این تحقیق برای تخمین پارامترهای مقاومتی باقیمانده از معیار اصلاح شده هوک و براون استفاده شده است، با این تفاوت که نسبت به حالت اوج GSI_{res} جایگزین GSI_{peak} می‌شود. محققین مختلف روشهای مختلفی برای تخمین GSI_{res} پیشنهاد کردند. بر اساس نظر (*Bieniawski, 1976*) میزان GSI_{res} ۳۶٪ مقدار GSI_{peak} می‌باشد (*Bieniawski, 1976*). این رابطه تجربی در توده سنگ بسیار ضعیف مقادیر بسیار کمی را جهت پارامترهای باقیمانده ارائه می‌دهد، در حالی که در توده

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - 1.59 \quad \text{III} \quad (26)$$

در این تحقیق از تراز شماره I به منظور تخمین میزان کرنش متناسب با نقطه اوج توده سنگ استفاده شده است. همچنین جهت یافتن میزان تغییرات کرنش رخ داده در حالت گذار از مقاومت اوج به مقاومت باقیمانده می توان با فرض خطی بودن رفتار جسم پس از نقطه شکست و با محاسبه مدول افت جسم و نیز با محاسبه مقادیر مقاومت اوج و باقیمانده با استفاده از روابط ذیل مقدار تغییرات کرنش مذکور را بدست آورد (Dehkordi, Shahriar, Maarefvand, & Gharouninik, 2011)

$$M = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma_{1res} - \sigma_{1peak}}{\varepsilon_{1res} - \varepsilon_{1peak}} \quad (27)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma_{1res} - \sigma_{1peak}}{M} \quad (28)$$

که در این روابط M ، مدول افت، σ_{1res} ، تنش اصلی حداکثر در نقطه باقیمانده، σ_{1peak} ، تنش اصلی حداکثر در نقطه اوج، ε_{1res} ، کرنش محوری در نقطه باقیمانده، ε_{1peak} ، کرنش محوری در نقطه اوج و $\Delta \varepsilon$ ، تغییرات میزان کرنش از مقاومت اوج تا باقیمانده می باشد.

۳-۲-۵- تخمین انرژی کرنشی

همانطور که در شکل شماره (۶) نمایش داده شده است، انرژی کرنشی به دو بخش انرژی ذخیره شده قبل از نقطه اوج و انرژی باقیمانده بعد از نقطه اوج تقسیم شده است و برای ساده سازی رفتار بصورت کاملاً خطی در نظر گرفته شده است. می توان با در اختیار داشتن پارامترهای مقاومت اوج و باقیمانده و نیز با داشتن مقادیر کرنش در حالت اوج و نیز تغییرات کرنش پس از نقطه اوج (حالت گذار از نقطه اوج به مقاومت باقیمانده) مقادیر انرژی باقیمانده پس از نقطه اوج و ذخیره شده تا قبل از نقطه اوج را بر اساس روابط (۲۹) و (۳۰) بدست آورد (Dehkordi, Shahriar, Maarefvand, & Gharouninik, 2011)

$$W_{pre} = \frac{1}{2} \sigma_{1peak} \cdot \varepsilon_{1peak} \quad (29)$$

$$W_{post} = \frac{1}{2} [\sigma_{1peak} + \sigma_{1res}] \cdot \Delta \varepsilon \quad (30)$$

در روابط بالا W_{pre} و W_{post} به ترتیب انرژی کرنشی ذخیره شده قبل از نقطه اوج و انرژی کرنشی باقیمانده بعد از نقطه مذکور می باشد. همچنین ε_{1peak} ، مقدار کرنش متناسب با نقطه اوج و $\Delta \varepsilon$ برابر با تغییرات کرنش از مقاومت اوج تا مقاومت باقیمانده می باشد.

آزمایشگاه و چه در شرایط برجا شدیداً وابسته به کیفیت توده سنگ و تنش محصورکننده می باشد. بر اساس این مشاهدات مقادیر زیر جهت برآورد مدول افت توده سنگ (M)، بر اساس GSI^{peak} و سطح تنش محصورکننده و نیز مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ ($\sqrt{S^{peak}} \cdot \sigma_{ci}$)، توسط (Alejano et al (2009) پیشنهاد شده است (Alejano, Rodriguez-Dono, Alonso, & Manin, 2009)

$$M = -\omega \cdot E \quad (21)$$

مقادیر ω وابسته به GSI^{peak} ، سطح تنش محصورکننده (σ_3) و نیز مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ یعنی

($\sqrt{S^{peak}} \cdot \sigma_{ci}$) بوده و می تواند بر اساس روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه شود (Fernandez- & Alejano, Alonso, Rodriguez-Dono, Manin, 2010)

$$\omega = [0.004e^{0.07680GSI^{peak}}] \cdot \left[\frac{\sigma_3}{\sqrt{S^{peak} \cdot \sigma_{ci}}} \right]^{-1} \quad \text{اگر} \quad \frac{\sigma_3}{\sqrt{S^{peak} \cdot \sigma_{ci}}} \geq 0.1 \quad (22)$$

$$\omega = [0.004e^{0.07680GSI^{peak}}] \cdot \left[\frac{\sigma_3}{\sqrt{S^{peak} \cdot \sigma_{ci}}} + 0.05 \right]^{-1} \quad \text{اگر} \quad \frac{\sigma_3}{\sqrt{S^{peak} \cdot \sigma_{ci}}} \geq 0.1 \quad (23)$$

در این تحقیق رفتار پس از شکست توده سنگ طبق روابط بالا تعیین و مقدار مدول افت محاسبه شده است.

۳-۲-۴- تخمین مقادیر کرنش اوج و تغییرات کرنش رخ داده در حالت گذار از مقاومت اوج به مقاومت باقیمانده

یکی از پارامترهای اساسی به منظور تخمین میزان انرژی کرنشی، پارامتر کرنش می باشد. بدین منظور جهت تخمین میزان کرنش توده سنگ در نقطه اوج از رابطه ساکورایی استفاده شده است. ساکورایی سه تراز هشدار خطر را به منظور تخمین میزان کرنش مجاز توده سنگ ارائه نمود که تراز شماره I نشان دهنده پایداری کوتاه مدت و تراز شماره III نشان دهنده پایداری بلند مدت سازه خواهد بود.

ولیکن از تراز شماره II به منظور تراز طراحی استفاده خواهد شد.

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - \quad I \quad 0.85 \quad (24)$$

$$\text{Log} \varepsilon_c = -0.25 \text{Log} E - \quad II \quad 1.22 \quad (25)$$

شود. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود واحدهای موجود در مسیر تونل مورد مطالعه بر اساس لایه‌ها، اختلاف ساختاری و ویژگی‌های ژئوتکنیکی به ۱۸ بخش زمین‌شناسی مهندسی تقسیم‌بندی شده‌اند. این تونل به روش حفاری مکانیزه و توسط دستگاه *TBM* دو سپره مدل *S323* شرکت *Herrenknecht* حفر شده است. خصوصیات این دستگاه در جدول (۲) مشاهده می‌شود. به منظور ثبت داده‌های مربوط به عملکرد ماشین حفار ۱۰۱۱۴ مقطع به فاصله ۱/۳ متر از یکدیگر در طول تونل در نظر گرفته شده و اطلاعات مربوط به نیروی محوری، گشتاور، سرعت دوران و نرخ نفوذ در کلیه مقاطع ثبت شده است.

جدول ۲- خصوصیات فنی دستگاه *TBM* مدل *S323*

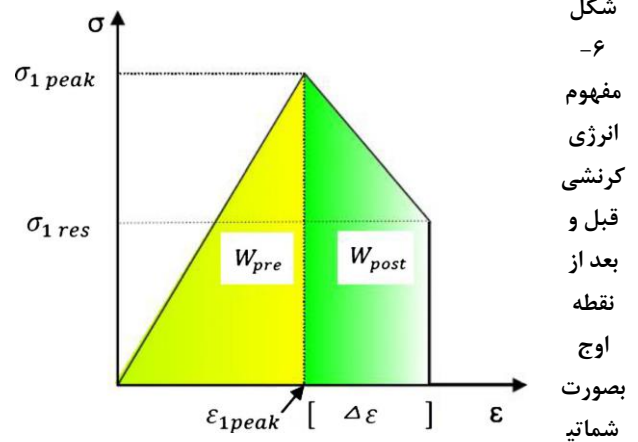
<i>TBM</i> دو سپره	نوع ماشین حفاری
۱۶۶ متر	طول ماشین
۱۰٫۶ متر	طول سپر
۷۵۰ تن	وزن ماشین
۱۷۰ تن	وزن سپر
۴۵ تن	وزن کاترهد
۳۱ عدد	تعداد دیسک های حفار
۷۵ میلی‌متر	میانگین فاصله داری دیسک ها

۵- تخمین میزان هدررفت انرژی

در این بخش ابتدا بر اساس داده‌های ثبت شده *TBM* در مقاطع مختلف مسیر تونل و رابطه (۱) مقدار انرژی ویژه حفاری در هر مقطع محاسبه شده و سپس بر اساس جنس و عمق لایه مورد نظر و به روش میانگین گیری مقدار انرژی ویژه حفاری برای هر لایه و در عمق مشخص تعیین شده است که بر همین اساس ۸۶ داده بدست آمده است. مشاهده شده است که با افزایش عمق و تنشهای جانبی و تغییر رفتار از شکننده به تغییر شکل پذیر، مقدار انرژی ویژه حفاری افزایش می‌یابد.

برای تخمین مقدار انرژی کرنشی توده سنگ و نسبت انرژی کرنشی نیز برای هر لایه در اعماق مشخص بر اساس روش ذکر شده در بخش (۳) عمل می‌شود. برای تعیین خواص مقاومتی توده سنگ در نقاط اوج و باقیمانده از نرم افزار *Roclab* استفاده شده است. در هر دو حالت از خواص سنگ بکر استفاده شده و تنها تفاوت در مقدار *GSI* اوج و باقیمانده است.

مفاهیم فوق در شکل (۶) نشان داده شده است.



ک (Dehkordi, Shahriar, Maarefvand, & Gharouninik, 2011)

با توجه به روابط فوق، مقدار انرژی کرنشی از رابطه (۳۱) بدست می‌آید:

$$W = W_{pre} + W_{post} \quad (31)$$

(Dehkordi et al. (2011) نسبت انرژی کرنشی را بصورت رابطه (۳۲) تعریف نموده‌اند (Dehkordi, Shahriar, Maarefvand, & Gharouninik, 2011):

$$\Psi = \frac{W_{post}}{W_{pre}} \quad (32)$$

که در این رابطه Ψ نسبت انرژی کرنشی می‌باشد. با مشخص شدن مقادیر انرژی ویژه و انرژی کرنشی برای همه لایه‌ها، نسبت هدر رفت انرژی از رابطه (۳۳) بدست می‌آید:

$$\Lambda = \frac{SE}{W} \quad (33)$$

که در این رابطه Λ نسبت هدررفت انرژی می‌باشد. هر چه مقدار Λ بیشتر باشد میزان هدر رفت انرژی در فرآیند خردایش نیز بیشتر بوده و بالعکس. با توجه به مدل‌های رفتاری ارائه شده توسط هوک و براون بر اساس *GSI* مقدار هدر رفت انرژی برای لایه‌های با مدل‌های رفتاری متفاوت بررسی شده است.

۴- مشخصات ژئومکانیکی تونل مورد مطالعه

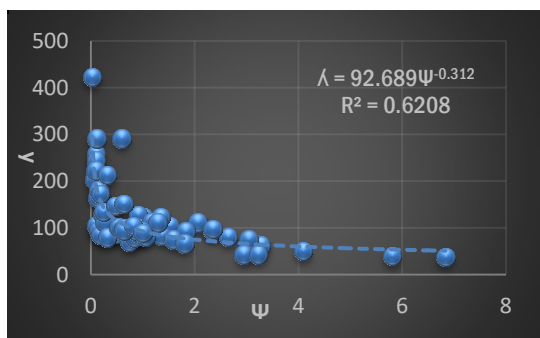
بخش دوم تونل تامین آب کرج-تهران با طول ۱۴ کیلومتر و قطر حدود ۴/۵ متر در استان تهران قرار دارد. این تونل بخشی از یک طرح تامین آب به منظور آب آشامیدنی برای تهران است که از سد امیر کبیر (کرج) آغاز شده و به تصفیه خانه تهران (شماره ۶) ختم می‌شود.

جدول ۱- مشخصات ژئومکانیکی لایه های مسیر تونل

واحد زمین شناسی مهندسی	نشانه	GSIPeak	$\sigma_{ci}(MPa)$	$\sigma_{cm}(MPa)$	$E_{rm}(GPa)$
Diorite	DIO	65-75	100-200	61.7	15
Gabbro	GA	60-70	100-200	57.4	12.5
Lithic Crystal Tuff	LCT	40-50	50-100	15.2	5
Ash and Lithic Tuff	AL	35-45	50-100	13.7	4
Lithic and Lapili Tuff	LL	60-70	50-100	32.6	7.5
Lapili Tuff	LT	50-60	50-100	16.2	5
Gabbro Rubble	BG	55-65	50-75	17.1	7.5
Thick Lithic Tuff	LC	50-60	100-150	31.2	7.5
Lithic and Ash Tuff	LA	55-65	50-100	20.8	7.5
Massive Lipili Tuff	MLT	50-60	50-100	26.3	5
Monzonite	MO	70-80	100-200	69.3	15
Gray Tuff	GT	50-60	50-100	16.6	5
Lithic Lapili Tuff	LLT	65-75	100-150	43.5	10
Ash Tuff	AT	35-45	50-100	8.8	2.5
Cream Tuff	CT	70-80	100-150	44.5	10
Gray Lithic Tuff	GLT	45-55	50-100	22.5	5
Green and Cream Tuff	TU	45-55	100-150	24.7	7.5
Ash Lithic Tuff	ALT	40-50	50-100	9.9	4

برای توده سنگ با کیفیت متوسط و رفتار کرنش نرم‌شونده، مقدار نسبت انرژی کرنشی کمتر از سنگهای دارای رفتار پلاستیک و بیشتر از سنگهای شکننده است ($0 < \Psi < 7$). همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود مقدار نسبت هدر رفت انرژی بیشتر از توده سنگ ضعیف بوده و رابطه معکوس با نسبت انرژی کرنشی دارد. رابطه توانی زیر برای تخمین نسبت هدر رفت انرژی براساس نسبت انرژی کرنشی در این گروه از توده سنگ ها پیشنهاد شده است:

$$\lambda = 92.689\Psi^{-0.312} \quad R^2 = 0.6208 \quad (35)$$



شکل ۸- ارتباط بین نسبت انرژی کرنشی و هدر رفت انرژی برای توده سنگ دارای رفتار کرنش نرم‌شونده ($75 \leq GSI \leq 25$)

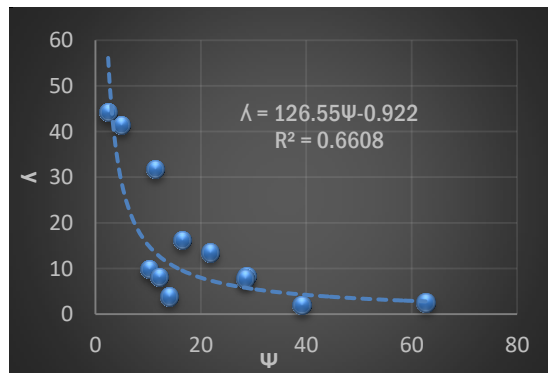
در توده سنگ شکننده نسبت انرژی کرنشی پایین تر از سایر گروهها است ولی نسبت هدر رفت انرژی بالاتر است. همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود رابطه بین پارامترهای مذکور در این گروه نیز معکوس و از نوع توانی می‌باشد:

$$\lambda = 37.065\Psi^{-0.431} \quad R^2 = 0.8418 \quad (36)$$

نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق و تنشهای محصور کننده و افزایش کیفیت توده سنگ مقدار انرژی کرنشی افزایش می‌یابد. با افزایش کیفیت توده سنگ و نیز کاهش تنش محصور کننده رفتار توده سنگ به سمت رفتار الاستیک شکننده میل می‌نماید و بالطبع نسبت انرژی کرنشی به صفر نزدیک می‌شود و مدول افت نیز به بی-نهایت میل می‌کند و بالعکس با کاهش کیفیت توده‌سنگ و نیز افزایش فشار محصور کننده رفتار توده سنگ به سمت رفتار الاستیک-پلاستیک میل نموده و نسبت انرژی کرنشی افزایش می‌یابد و مدول افت در چنین حالتی به سمت صفر نزدیک می‌شود.

نسبت هدر رفت انرژی مشاهده می شود و رابطه توانی به عنوان رابطه دارای بیشترین همبستگی بین پارامترهای مذکور انتخاب شده است.

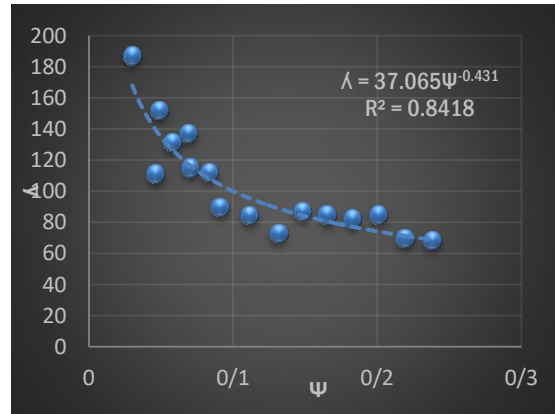
$$\lambda = 126.55\Psi^{-0.922} \quad R^2 = 0.6608 \quad (34)$$



شکل ۷- ارتباط بین نسبت انرژی کرنشی و هدر رفت انرژی برای توده سنگ دارای رفتار پلاستیک ($GSI < 25$)

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق برای پیش بینی رفتار پس از شکست توده سنگ از مدل رفتاری کرنش نرم‌شونده استفاده شد و مشخص شد که با افزایش کیفیت توده سنگ و کاهش تنشهای محصور کننده شیب منحنی پس از نقطه اوج (مدول افت) افزایش و به تبعه آن مقدار نسبت انرژی کرنشی کاهش می‌یابد. همچنین مقدار انرژی ویژه حفاری با افزایش عمق و کیفیت توده سنگ رابطه مستقیم دارد. با بررسی آماری نسبت‌های انرژی کرنشی (Ψ) و هدر رفت انرژی (λ) مشاهده شد که این دو نسبت با یکدیگر رابطه معکوس داشته و روابطی برای پیش بینی مقدار هدر رفت انرژی بر اساس نسبت انرژی کرنشی در سنگ‌های با کیفیت مختلف ارائه شد. در سنگ‌های با کیفیت بالا همزمان با رانده شدن ابزار برنده به داخل توده سنگ توسط نیروی محوری، به دلیل رفتار شکننده توده سنگ، فرآیند خردایش اتفاق می‌افتد و نیروی دورانی که ابزار برش را می‌چرخاند در واقع کار مفیدی انجام نمی‌دهد و فقط باعث خرد شدن بیش از حد توده سنگ و هدر رفت انرژی می‌شود.



شکل ۹- ارتباط بین نسبت انرژی کرنشی و هدر رفت انرژی برای توده سنگ دارای رفتار شکننده ($GSI > 75$)

روابط به دست آمده برای تخمین میزان هدر رفت انرژی بر اساس نسبت انرژی کرنشی برای هر سه دسته توده سنگ در جدول شماره (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- روابط پیشنهادی جهت پیش بینی مقدار هدر رفت انرژی بر اساس نسبت انرژی کرنشی

کیفیت توده سنگ	$GSI > 75$	$75 \leq GSI \leq 25$	$GSI < 25$
رابطه	$\lambda = 37.065\Psi^{-0.431}$	$\lambda = 92.689\Psi^{-0.312}$	$\lambda = 126.55\Psi^{-0.922}$

۷- منابع ها

- [1] Acaroglu, O., Ozdemir, L., & Asbury, B. (2008). A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 600-608.
- [2] Alejano, L. R., Alonso, E., Rodriguez-Dono, A., & Fernandez-Manin, G. (2010). Application of the convergence-confinement method to tunnels in rock masses exhibiting Hoek-Brown strain-softening behaviour. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(1), 150-160.
- [3] Alejano, L. R., R.-D. A., A. E., & Manin, G. F. (2009). Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 689-705.
- [4] Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification of jointed rock masses. *Exploration for Rock Engineering*, 97, 106-110.
- [5] Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C. (2013). *Mechanical excavation in mining and civil industries*. CRC press.
- [6] Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media.
- [7] Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., & Minami, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 247-265.
- [8] Çopur, H., Tunçdemir, H., Bilgin, N., & Dincer, T. (2001). Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines. *Mining Technology*, 149-157.
- [9] Dehkordi, M. S., Shahriar, K., Maarefvand, P., & Gharouninik, M. (2011). Application of the strain energy to estimate the rock load in non-squeezing ground condition. *Archives of Mining Sciences*, 56(3), 551-566.
- [10] Goodman, R. E. (1991). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- [11] Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2, 31-38.

- [12]Hoek, E. (2000). Analysis of rockfall hazards. *Practical rock engineering*, 117-136.
- [13]Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (2000). Support of underground excavations in hard rock. CRC Press.
- [14]Hoek, E., Marinos, P., & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57, 151-160.
- [15]Medel-Morales, R. C., & Botello-Rionda, S. (2013). Design and optimization of tunnel boring machines by simulating the cutting rock process using the discrete element method. *Computación y Sistemas*, 17(3), 329-339.
- [16]Pomeroy, C. D. (1963). Breakage of coal by Wedge Action Factors Affecting. *Colliery Guardian*, 642-648.
- [17]Sakurai, S. (1997). Lessons learned from field measurements in tunnelling. *Tunnelling and underground space technology*, 12(4), 453-460.
- [18]Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- [19]Soleiman Dehkordi, M., Shahriar, K., Moarefvand, P., & Gharouninik, M. (2013). Application of the strain energy to estimate the rock load in squeezing ground condition of Eamzade Hashem tunnel in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 1241-1248.
- [20]Teale, R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 2(1), 57-73.