

Sistem pengelasan jasad batuan untuk jasad batuan dalam penerowongan dan pembinaan bawah tanah – Pembangunan, kekangan dan keperluan masa hadapan

(Rock mass classification for rock mass in tunnelling and underground excavation - Development, limitation and way forward)

HAMZAH HUSSIN^{1,3,4,*}, MOHD HARIRI ARIFIN²

¹Jabatan Geosains, Fakulti Sains Bumi, Universiti Malaysia Kelantan, 17600 Jeli, Kelantan, Malaysia

²Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

³Geohazard Research Group, Fakulti Sains Bumi, Universiti Malaysia Kelantan, 17600 Jeli, Kelantan, Malaysia

⁴UMK-Tropical Reseach Center (UMK-TRaCe), Fakulti Sains Bumi, Universiti Malaysia Kelantan, 17600 Jeli, Kelantan, Malaysia

* Corresponding author email address: hamzah.h@umk.edu.my

Abstrak: Dalam dekad terakhir ini, penggunaan sistem pengelasan jasad batuan dalam rekabentuk kejuruteraan telah digunakan secara intensif. Kebimbangan mengenai potensi kegagalan yang boleh berlaku secara tempatan atau global pada sesebuah jasad batuan yang boleh berlaku disebabkan oleh pengaruh geologi (contoh; ketakselajaran, air, luluhawa) dan bukan geologi (contoh; beban binaan, gegaran) perlu diberi perhatian serius. Kemampuan sistem pengelasan untuk menunjukkan keadaan jasad batuan secara ringkas dan efektif sangat membantu dalam kerja-kerja kejuruteraan. Terdapat dua keadaan sistem pengelasan digunakan untuk pembinaan bawah tanah iaitu aktiviti penerowongan dan perlombongan. Bagi pembinaan terowong, sistem seperti Rock Mass Rating / Perkadaran Jasad Batuan (RMR), Sistem Q, Kaedah Japanese Highway (JH), Geological Strength Index / Indeks Kekuatan Geologi (GSI) dan Rock Mass Quality Rating / Perkadaran Kualiti Jasad Batuan (RMQR) merupakan sistem yang biasa digunakan. Walau bagaimanapun, kelemahan sistem tersebut ialah ketidaksesuaian digunakan untuk jasad batuan yang terlindung akibat litupan *shotcrete* kerana kekangan untuk mendapatkan maklumat satah ketakselajaran. Kelemahan ini menyebabkan perlunya satu kaedah kajian dan sistem pengelasan jasad batuan yang baru untuk mengatasi kekurangan tersebut.

Kata Kunci: Pengelasan jasad batuan, penerowongan, pembinaan bawah tanah, shotcrete

Abstract: In the last few decades, rock mass classification had been used intensively in engineering design. The concern arises for the potential occurrence of localized or global rock mass failure due to geological (such as discontinuities, water, weathering) and non-geological (such as construction load, vibration) factors should be taken into consideration. The ability of a classification system to represent the rock mass condition in a straightforward and effective way can assist in engineering works. Two classification systems can be applied in underground construction such as tunneling and mining. In tunnel construction, the Rock Mass Rating (RMR), Q System, Japanese Highway (JH) Method, Geological Strength Index (GSI) and Rock Mass Quality Rating (RMQR) are commonly used. However, these systems cannot be applied for rock mass covered by shotcrete due to difficulty in observing the discontinuity planes. Therefore, a new investigation method and rock mass classification for rock mass covered by shotcrete is vital to overcome this limitation.

Keywords: Rock mass classification, tunneling, underground excavation, shotcrete

PENGENALAN

Sistem pengelasan jasad batuan merupakan tulang belakang dalam kaedah rekabentuk emperikal. Dalam kebanyakan projek pembinaan bawah tanah pada zaman sekarang, sistem pengelasan berfungsi sebagai salah satu komponen utama memberi maklumat tentang keadaan jasad batuan bagi memastikan sebuah projek pembinaan mampu dihasilkan dengan jayanya. Dalam tempoh masa 70 tahun, banyak sistem pengelasan jasad batuan telah dicadangkan. Walau bagaimanapun, catatan secara tidak formal menunjukkan sistem pengelasan telah digunakan lebih awal berbanding sistem yang sedia ada berdasarkan binaan infrastruktur seperti kuari bawah tanah di Bada (Tumir Laut Turki) dan Qurna (Mesir) dan bandar bawah tanah di Cappadocia dan Gua Buddha Bezeklik, Timur Turkistan (Aydan *et al.*, 2014).

Penggunaan sistem pengelasan jasad batuan sangat berguna semasa peringkat perancangan awal pembangunan, di mana data atau maklumat mengenai jasad batuan sangat terhad. Penggunaan sistem pengelasan jasad batuan boleh membantu mengelaskan kualiti dan kestabilan jasad batuan (Ghani *et al.*, 2016; Goh *et al.*, 2016). Empat kaedah asas digunakan untuk menentukan kekuatan jasad batuan iaitu menggunakan model matematik, sistem pengelasan jasad batuan, ujian berskala besar dan *back analysis* (Krauland *et al.*, 1989; Aydan *et al.*, 1997; Rahimi *et al.*, 2014).

Penggunaan satu atau lebih sistem pengelasan dapat memberikan gambaran yang jelas tentang komposisi dan ciri-ciri jasad batuan bagi memberi maklumat awal sistem sokongan yang diperlukan, anggaran kekuatan dan perubahan sifat jasad batuan (Hoek *et al.*, 1995). Sistem pengelasan digunakan untuk mengelaskan satu kawasan atau singkapan yang mempunyai sifat geomekanikal yang sama bagi menilai keupayaan kestabilan dan memilih sistem sokongan yang sesuai (Chen & Liu, 2007; A'ssim & Xing, 2010), selain dapat memastikan interaksi antara pelbagai bidang (cth jurutera, arkitek, kontraktor) dapat dilakukan dengan berkesan dan saling memahami antara satu sama lain berkenaan pencirian, pengelasan dan pengetahuan sifat jasad (Stille & Palmström, 2003; Tomás *et al.*, 2012).

Dalam tahun 1970-an, beberapa sistem pengelasan jasad batuan diperkenalkan untuk pembinaan terowong, pengorekan bawah tanah dan pembinaan cerun. Sistem pengelasan ini telah digunakan secara meluas dan intensif dalam rekabentuk kejuruteraan dan pembinaan untuk menentukan sifat jasad batuan berskala besar. Kaedah pengelasan digunakan apabila maklumat untuk menghasilkan model secara eksplisit/jelas tidak lengkap dan cukup atau akibat kekangan masa dan kos dalam pengendalian pembinaan. Antara sistem pengelasan jasad batuan yang banyak digunakan adalah Rock Structure Rating/Perkadaran Struktur Batuan (RSR) (Wickham *et al.*, 1972), RMR (Bieniawski, 1973; 1975; 1979; 1989) dan Sistem Q (Barton *et al.*, 1974).

KEJURUTERAAN BATUAN DAN SISTEM PENGELASAN KUALITI JASAD BATUAN

Jasad batuan biasanya mempunyai beberapa set ketakselajaran yang menyebabkan jasad batuan bersifat anisotropik. Keadaan ini menyebabkan satu sistem rujukan diperlukan untuk mengelas jasad batuan. Sistem pengelasan menjadi tulang belakang dalam projek kejuruteraan yang kompleks seperti terowong atau bukaan bawah tanah. Kebanyakan terowong yang dibina sekarang menggunakan pelbagai jenis sistem pengelasan yang sedia ada. Walau bagaimanapun, sistem pengelasan jasad batuan mempunyai kekangan yang tersendiri (Stille & Palmström, 2003):

- i. Konsep pengelasan jasad batuan yang kurang jelas menjadi perdebatan mengenai kegunaannya sebagai sumber maklumat dalam reka bentuk kejuruteraan.
- ii. Pengguna (ahli geologi dan jurutera) perlu tahu limitasi untuk setiap sistem pengelasan dan kesesuaiannya untuk diaplikasi berdasarkan keadaan tapak projek.

Sistem pengelasan jasad batuan untuk projek pembinaan bawah tanah sangat diperlukan kerana wujud ketidakpastian tinggi semasa pembinaan berbanding dengan pembinaan di bahagian permukaan. Pengetahuan tentang keadaan jasad batuan pada peringkat awal pembinaan boleh memberi pilihan yang terbaik dalam projek kejuruteraan samada dari segi kos, masa dan keselamatan.

TUJUAN SISTEM PENGELASAN KUALITI JASAD BATUAN

Kualiti jasad batuan boleh dinilai pada peringkat sebelum, semasa dan selepas pembinaan. Penilaian yang dilakukan pada peringkat berbeza boleh memberikan kelas kualiti jasad batuan yang berbeza. Perbezaan kualiti ini boleh disebabkan oleh perubahan saiz cerapan singkapan dan jumlah data yang boleh diukur. Kebanyakan sistem pengelasan sedia ada seperti RMR, Sistem Q, RMQR dan Kaedah JH merupakan sistem yang selalu diaplikasikan pada peringkat semasa pembinaan.

Sistem pengelasan jasad batuan bertujuan membolehkan maklumat keadaan dan kualiti jasad batuan sentiasa dikemaskini supaya perancangan dan tindakan susulan boleh dirangka dengan lebih mudah, cepat dan sistematik jika keadaan memerlukan. Secara umum, sistem penilaian kualiti jasad batuan menilai kualiti dan kestabilan struktur terowong dan mengenalpasti potensi geobencana selepas satu tempoh masa penggunaannya yang panjang. Sistem pengelasan jasad batuan menggariskan tiga matlamat utama iaitu:

- i. Untuk mengenalpasti kawasan yang bermasalah atau tidak selamat di sepanjang terowong
- ii. Untuk mengelaskan keadaan dan potensi geobencana jasad batuan mengikut keutamaan berdasarkan menggunakan pendekatan kuantitatif
- iii. Untuk memberikan satu maklumat yang lengkap bagi membolehkan pemantauan, penilaian lanjutan dan/atau langkah mitigasi dilakukan terhadap jasad batuan

KEGUNAAN SISTEM PENGELASAN DALAM KEJURUTERAAN BATUAN

Penggunaan sistem pengelasan jasad batuan bertujuan untuk menilai dan memilih sistem sokongan yang sesuai supaya struktur binaan dapat bertahan/stabil untuk jangka masa panjang. Sistem pengelasan jasad batuan digunakan untuk mengelaskan satu kawasan atau singkapan yang mempunyai sifat geomekanikal yang sama, bertujuan untuk menilai kestabilan dan memilih sistem sokongan yang sesuai (Milne *et al.*, 1999; Chen & Liu, 2007; A'ssim & Xing, 2010). Bieniawski (1976) menyatakan tujuan sistem pengelasan jasad batuan adalah:

- i. Untuk membahagikan jasad batuan dalam kumpulan yang mempunyai sifat yang sama
- ii. Untuk memahami sifat untuk setiap kumpulan jasad batuan
- iii. Untuk memudahkan perancangan dan reka bentuk pengalihan batuan berdasarkan data kuantitatif yang diperlukan bagi menyelesaikan masalah kejuruteraan
- iv. Untuk menyediakan maklumat dalam bentuk yang mudah bagi komunikasi berkesan di kalangan semua orang yang terlibat dalam projek kejuruteraan

Pandangan oleh Stille & Palmström (2003) dan Tomás *et al.* (2012) menyatakan sistem pengelasan dihasilkan bagi memenuhi beberapa aspek seperti berikut:

- i. Bagi memastikan komunikasi antara pelbagai bidang (contoh; jurutera, arkitek, kontraktor) dapat dilakukan dengan berkesan dan saling memahami antara satu sama lain berkenaan pencirian, pengelasan dan pengetahuan sifat jasad batuan. Perkara ini penting bagi memastikan keputusan yang dicapai merupakan satu keputusan terbaik.
- ii. Jasad batuan bukan hanya dikelaskan dalam satu-satu sistem, tetapi juga bertujuan untuk mendapatkan maklumat keberkesanan sistem pengelasan dan sebarang kemungkinan ianya telah disalah tafsir.

Dalam dekad ini, sistem pengelasan jasad batuan diaplikasikan secara intensif dalam rekabentuk kejuruteraan. Potensi kegagalan jasad batuan berskala kecil atau besar yang disebabkan pengaruh geologi (contoh; ketakselajaran, air, luluhawa) dan bukan geologi (contoh; beban binaan, gegaran) perlu diberi perhatian serius. Kemampuan sistem pengelasan untuk menyampaikan keadaan jasad batuan secara tepat dan efektif sangat membantu dalam kerja-kerja kejuruteraan.

SISTEM PENGELASAN JASAD BATUAN UNTUK PEMBINAAN BAWAH TANAH

Sistem pengelasan yang dihasilkan oleh Terzaghi (1946) merupakan permulaan kepada penghasilan dan penggunaan sistem pengelasan moden seperti RSR (Wickham *et al.*, 1972), RMR (Bieniawski, 1974; 1989) dan sistem Q (Barton *et al.*, 1974). Kewujudan pelbagai sistem pengelasan pada

masa sekarang boleh digunakan untuk satu atau lebih aplikasi. Sebagai contohnya, sistem pengelasan RMR, MRMR dan Sistem Q telah terbukti sesuai digunakan untuk pembinaan terowong dan perlombongan bawah tanah. Terdapat sistem yang direka bentuk untuk pembinaan bawah tanah (contoh; RMR dan Sistem Q) telah digunakan untuk cerun batuan dan ada sistem yang telah diubah suai bagi kegunaan cerun batuan (contoh; Rock Mass Strength / Kekuatan Jasad Batuan (RMS), Slope Mass Rating / Perkadaran Jasad Cerun (SMR), Slope Rock Mass Rating / Perkadaran Jasad Batuan Cerun (SRMR) dan Continuous Slope Mass Rating / Perkadaran Jasad Batuan Berterusan (CSMR) merupakan ubah suai daripada sistem RMR) (Pantelidis, 2009).

Terdapat dua jenis sistem pengelasan iaitu yang bersifat kuantitatif dan kualitatif. Sistem kualitatif merupakan kaedah penerangan berdasarkan cerapan bagi memberi maklumat sifat atau keadaan jasad batuan tersebut. Antara sistem yang menggunakan pendekatan ini ialah GSI dan teori beban batuan (rock load theory). Sistem pengelasan seperti RMR, Sistem Q dan RSR pula merupakan sistem jenis kualitatif iaitu menggunakan maklumat daripada beberapa parameter yang diberi perkadaran tertentu. Jumlah akhir daripada setiap parameter akan menentukan kelas jasad batuan tersebut. Jadual 1 menunjukkan ringkasan sistem pengelasan jasad batuan yang telah dihasilkan oleh pengkaji-pengkaji terdahulu, bermula dari tahun 40-an sehingga sekarang.

SISTEM PENGELASAN JASAD BATUAN UNTUK PENEROWONGAN

Proses pembangunan yang pesat serta penggunaan teknologi baru menyebabkan permintaan bagi membangunkan sistem perhubungan yang baik seperti keretapi atau jalan raya, pembinaan empangan, tempat perlindungan bencana, kawasan strategik tentera atau tempat pelupusan sisa radioaktif meningkat (Da-Ming, 2010; Chen *et al.*, 2015; Merkin & Konyukhov, 2016; Vähäaho, 2016). Pembinaan infrastruktur terowong bagi kegunaan awam atau industri agak berbeza berbanding untuk perlombongan. Salah satu asas yang membezakan keduanya ialah geometri terowong (orientasi terowong, kedalaman serta kecerunan) dan keadaan tekanan biasanya tidak mengalami perubahan yang ketara bergantung kepada kegunaannya berbanding perlombongan yang sentiasa berubah-ubah disebabkan pengaruh lokasi dan saiz longgokan bijih (Milne *et al.*, 1999). Sistem pengelasan RSR, RMi, GSI, RMR dan Sistem Q merupakan antara yang biasa digunakan untuk pembinaan terowong (Tuğrul, 1998; Milne *et al.*, 1999; Chen & Liu, 2007; Hajiazizi & Khatami, 2013; Rahmati *et al.*, 2014).

Sistem pengelasan RSR yang diperkenalkan oleh Wickham *et al.* (1972; 1974) bertujuan untuk menjelaskan kaedah kuantitatif kualiti jasad batuan dan memilih kaedah penstabilan yang paling berkesan. Hasil pengelasan RSR digunakan untuk merekabentuk sistem sokongan untuk

Jadual 1: Ringkasan sistem pengelasan jasad batuan bawah tanah.

Nama sistem pengelasan	Singkatan	Aplikasi	Sumber	Catatan
Teori beban batuan (rock load theory)		Terowong	Terzaghi (1946)	Sistem pengelasan terawal yang menggunakan sistem pengelasan jasad batuan untuk sokongan terowong
Rock Structure Rating	RSR	Terowong bersaiz kecil	Wickham <i>et al.</i> (1972)	Sistem pertama yang menggunakan perkadaran untuk pengelasan jasad batuan serta boleh digunakan untuk merekabentuk sistem penstabilan dalam terowong
Perkadaran Jasad Batuan	RMR	Terowong, lombong, pendasaran, cerun	Bieniawski (1974), Bieniawski (1989), Şen & Sadagah (2003), Romana (2015)	Sistem yang paling banyak digunakan dalam pengelasan jasad batuan. Mengandungi enam parameter, antaranya keadaan ketakselajaran, air bawah tanah, kekuatan batuan utuh.
Sistem Q	Q	Terowong dan bukaan bawah tanah	Barton <i>et al.</i> (1974), Barton (2002).	Digunakan untuk merekabentuk sistem sokongan untuk pembinaan bawah tanah. Sering menjadi rujukan dalam industri pembinaan terowong.
Mining Rock Mass Rating	MRMR	Perlombongan	Laubscher (1977), Laubscher & Jakubec (2001)	Sistem yang menjadikan RMR sebagai asas dengan pertambahan parameter air dalam perkadaran
Modified basic RMR	MBR	Perlombongan	Cummings <i>et al.</i> (1982), Kendorski <i>et al.</i> (1983)	Sistem pengelasan yang diubah suai daripada RMR berdasarkan kepada 6 parameter yang hampir sama dengan RMR
Surface Rock Classification	SRC	Perlombongan	De Vallejo (1983)	Pengelasan yang menggunakan data dari permukaan bagi menentukan keadaan jasad di bahagian bawah permukaan
Simplified Rock Mass Rating	SRMR	Perlombongan, cerun	Brook & Dharmaratne (1985)	Ubahsuai dari RMR dan MRMR dengan tidak mengambil kira pengaruh RQD. Tiga komponen utama ialah kekuatan baha batuan, jarak dan jenis ketakselajaran.
Central Mining Research Institute-Indian School of Mines rock mass rating	CMRI-ISM RMR	Perlombongan	Venkateswarlu <i>et al.</i> (1989)	Sistem yang diubahsuai daripada RMR dengan mengambil kira lima parameter bagi menilai keadaan bahagian bumbung.
Modified RMR	M-RMR	Perlombongan	Ünal <i>et al.</i> (1992), Unal (1996)	Sesuai digunakan untuk jasad batuan yang lemah, anisotropic dan mempunyai lempung
Index Kekuatan Geologi	GSI	Perlombongan, terowong, cerun	Hoek & Brown (1997), Sonmez & Ulusay (1999), Marinos & Hoek, (2000), Marinos, 2010), Hoek <i>et al.</i> (2013)	Dihasilkan untuk menentukan kekuatan jasad batuan berdasarkan cerapan lapangan dengan pelbagai keadaan jasad batuan
Coal Mine Roof Rating	CMRR	Perlombongan	Mark <i>et al.</i> (1994)	Sistem yang menekankan keperluan untuk penstabilan di bahagian bumbung lombong bawah tanah
Index Jasad Batuan	RMi	Terowong	Palmstrøm (1995)	Sistem digunakan untuk mencirikan kekuatan jasad batuan sebagai bahan pembinaan.
Q_{TBM}	Q_{TBM}	Terowong	Barton (1999)	Direka khusus untuk penggunaan TBM dalam industri pembinaan terowong
JH Method	JH Method	Terowong	Akagi <i>et al.</i> (2001)	Empat parameter asas digunakan iaitu kekuatan bahan batuan, luluhawa, jarak antara ketakselajaran dan keadaan ketakselajaran
Hierarchical Rock Mass Rating	HRMR	Terowong	Miranda (2007), Miranda <i>et al.</i> (2014)	Menggunakan RMR sebagai asas, sistem ini hanya sesuai digunakan jasad batuan granit yang mempunyai jumlah ketakselajaran sedikit
Tunnel Electrical resistivity Prospecting System	TEPS	Terowong	Ryu <i>et al.</i> (2010)	Kaedah keberintangan elektrik digunakan untuk mendapatkan anomali jasad batuan di bahagian depan terowong semasa pembinaan berjalan
Mine Improvement of Rock Mass Rating	M-IRMR	Perlombongan	Liu & Dang (2014)	Sistem yang dihasilkan khusus untuk perlombongan bawah laut bagi menentukan kestabilan lombong
Rock Mass Quality Rating System	RMQR	Terowong	Aydan <i>et al.</i> (2014)	Digunakan untuk menganggar sifat geomekanikal jasad batuan dengan menggunakan lima parameter
Q_{HLW}	Q_{HLW}	Terowong / cavern	Chen <i>et al.</i> (2015)	Diguna secara khusus untuk pembinaan tempat pembuangan sisa radioaktif bawah tanah
Weak Rock Mass Rating	W-RMR	Perlombongan	Warren <i>et al.</i> (2016)	Korelasi antara USCS-RMR khusus bagi bahan bumi yang lemah/sangat lemah

Jadual 2: Perubahan perkadaran RMR (Milne *et al.*, 1999).

Parameter	1973	1974	1975	1976	1989
Kekuatan bahan batuan	10	10	15	15	15
RQD	16	20	20	20	20
Bukaan ketakselajaran	30	30	30	30	20
Separation of joints	5				
Keterusan ketakselajaran	5				
Air bawah tanah	10	10	10	10	15
Luluhawa	9				
Kedaaan ketakselajaran		15	30	25	30
Orientasi ketakselajaran		15			
Orientasi jurus dan kemiringan binaan	3-15		0-12	0-12	0-12

Jadual 3: Pembahagian sub-kelas pengelasan RMR (Romana, 2015).

RMR	Ubahasuai		Bieniawski asal	
	Sub-kelas	Penerangan	Penerangan	Kelas
90-100	Ia	Tersangat bagus	Sangat bagus	I
80-90	Ib	Sangat bagus		
70-80	IIa	Bagus ke sangat bagus	Bagus	II
60-70	IIb	Bagus ke sederhana		
50-60	IIIa	sederhana ke bagus	Sederhana	III
40-50	IIIb	Sederhana ke lemah		
30-40	IVa	lemah ke sederhana	Lemah	IV
20-30	IVb	Lemah ke sangat lemah		
10-20	Va	Sangat lemah	Sangat lemah	V
0-10	Vb	Tersangat lemah		

terowong berdasarkan cadangan dalam sistem Terzaghi. Sistem RMR oleh Bieniawski (1973) merupakan salah satu sistem yang paling banyak digunakan. Sistem ini telah mengalami evolusi pada tahun 1974, 1975, 1976, 1989 dan 2014 berdasarkan pemahaman yang lebih baik berkenaan kepentingan setiap parameter dalam sistem dan pengalaman semasa proses pembinaan (Milne *et al.*, 1999; Celada *et al.*, 2014). Secara keseluruhan, sebanyak 351 kajian kes telah menggunakan sistem pengelasan ini sehingga tahun 1989 (Bieniawski, 1989).

Jadual 2 menunjukkan evolusi dalam sistem RMR dan perubahan perkadaran untuk setiap parameter. Enam parameter digunakan dalam pengelasan iaitu kekuatan batuan utuh (ujian mampatan sepaksi atau ujian beban titik), nilai rock quality designation / penanda mutu batuan (RQD), jarak antara ketakselajaran, keadaan ketakselajaran, keadaan air bawah tanah, dan orientasi ketakselajaran. Nilai RMR ditentukan dengan menjumlahkan perkadaran setiap parameter. Kualiti jasad batuan yang dinilai kelaskan kepada lima iaitu jasad batuan sangat baik hingga sangat lemah. Kualiti jasad batuan yang berbeza memerlukan sistem sokongan yang berbeza.

Satu perkadaran baru untuk sistem RMR khusus untuk pembinaan terowong yang bersaiz besar dengan bukaan antara 10 - 14m lebar telah dicadangkan oleh Romana (2015). Penggunaan teknik mekanikal moden seperti Tunnel Boring Machine / mesin pengorekan terowong (TBM), *roadheaders* dan pemotongan batuan membolehkan saiz binaan infrastruktur menjadi semakin besar. Terowong bersaiz 14m lebar merupakan binaan bersaiz normal bagi kegunaan pengangkutan sekarang. Perkadaran jasad batuan bersaiz besar dibahagikan kepada lima kelas utama dan 10 sub-kelas dengan perbezaan perkadaran antara kelas berjulat 10 seperti ditunjukkan dalam Jadual 3.

Penggunaan sistem RMR yang intensif di dalam industri telah menghasilkan beberapa sistem pengelasan baru yang diadaptasi dari sistem asal bagi digunakan dalam industri perlombongan bawah permukaan. Antara sistem yang diperkenalkan ialah MRMR, RMS, MBR, SRMR, SMR, HRMR dan CMRI-ISM RMR. Walaupun pengenalan banyak sistem baru, kebanyakan penggunaan dalam industri masih menggunakan sistem RMR kerana sifatnya yang mudah diaplikasikan di lapangan. Walau bagaimanapun, terdapat kelemahan yang ketara pada sistem ini iaitu penggunaannya

tidak sesuai untuk jasad batuan yang sangat lemah serta tidak sensitif kepada perubahan kecil pada kualiti jasad batuan (Milne *et al.*, 1999; Liu & Dang, 2014). Keadaan ini menyumbang kepada penghasilan sistem pengelasan W-RMR khusus untuk jasad batuan yang sangat lemah yang mengintegrasikan dua sistem pengelasan berbeza iaitu RMR dan USCS (United Soil Classification System) (Warren *et al.*, 2016).

Sistem Q diperkenalkan oleh Barton *et al.* (1974) dan mengalami evolusi sehingga tahun 2002 juga merupakan sistem yang banyak digunakan untuk pembinaan terowong. Sistem Q yang asal menggunakan enam parameter utama iaitu nilai RQD, jumlah set ketakselajaran, kekasaran ketakselajaran, alterasi ketakselajaran, keadaan air pada ketakselajaran dan faktor tekanan. Sistem Q diringkaskan berdasarkan Persamaan 1:

$$Q = RQD/J_n * J_r / J_a * J_w / SRF \quad \text{Persamaan 1}$$

Dimana:

- RQD = penanda mutu batuan
 J_n = bilangan set ketakselajaran
 J_r = bilangan/keadaan kekasaran ketakselajaran
 J_a = bilangan/keadaan perubahan ketakselajaran
 J_w = faktor penurunan kehadiran air pada ketakselajaran
 SRF = faktor penurunan tegasan

Nilai numerikal dalam sistem Q berbeza-beza bergantung kepada skala logaritma daripada 0.001 sehingga 1000. Nilai tersebut dikelaskan kepada sembilan kategori seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 4. Kelebihan utama Sistem Q ialah secara relatif sensitif kepada perubahan kecil yang berlaku pada jasad batuan dan kelemahannya ialah sukar untuk digunakan bagi pengguna yang tidak mempunyai cukup pengalaman. Sistem Q mengalami dua kali tempoh penambahbaikan major iaitu pada 1993 dan 2002 (Barton, 2002; Palmstrom & Broch, 2006).

Jadual 4: Pengelasan jasad batuan berdasarkan Sistem Q (Barton *et al.*, 1974).

Nilai Q	Kelas batuan	Pengelasan
400-1000		Tersangat bagus
100-400	A	Terlalu bagus
40-100		Sangat bagus
10-40	B	Bagus
4-10	C	Sederhana
1-4	D	Lemah
0.1-1.0	E	Sangat lemah
0.01-0.1	F	Terlalu lemah
0.001-0.01	G	Tersangat lemah

Seperti RMR, penghasilan sistem baru berdasarkan Sistem Q telah mewujudkan Q_{TBM} dan Q_{HLW} . Keperluan penghasilan dua sistem ini disebabkan kekurangan yang wujud dalam Sistem Q sedia ada disamping tidak sesuai digunakan dalam keadaan tertentu. Q_{TBM} terhasil daripada perkembangan penggunaan mesin TBM untuk pembinaan terowong. Sistem ini menggunakan parameter seperti nilai RQD, keadaan ketakselajaran, keadaan tekanan, kekuatan bahan batuan, kandungan mineral kuarza dan daya tolakan TBM bagi mengukur kadar penembusan pengorekan (Barton, 1999). Sistem Q_{HLW} pula khusus digunakan bagi pembinaan tempat pelupusan sisa radioaktif. Pentambahan parameter seperti zon retakan, kimia air dan kesan terma diambilkira untuk pembinaan ini bagi mengelak kebocoran radioaktif dari kawasan simpanan (Chen *et al.*, 2015).

GSI merupakan sistem pencirian jasad batuan yang dibangunkan bagi memenuhi maklumat data yang tepat dan boleh dipercayai, terutamanya yang berkaitan dengan sifat jasad batuan yang digunakan dalam analisis numerikal bagi membina terowong, cerun dan pendasaran (Marinos *et al.*, 2005). Sistem GSI merupakan sistem yang menggabungkan dua elemen iaitu cerapan jasad batuan di lapangan dan pengalaman penggunaan sistem Q dan RMR (Singh & Goel, 1999). Sistem Q dan RMR yang bersifat kualitatif didapati tidak sesuai digunakan untuk jasad batuan yang lemah akibat canggaaan tektonik yang hebat dan heterogenous kerana memberi nilai pengelasan yang tidak menyakinkan.

Penggunaan sistem GSI untuk menganggarkan sifat sesebuah jasad batuan berdasarkan cerapan ciri jasad batuan bagi menggambarkan bahan, keadaan struktur dan sejarah geologinya. Sistem awal dibangunkan oleh?? pada 1994 dan berkembang sehingga 2010 boleh digunakan untuk pelbagai keadaan geologi, termasuklah jasad batuan yang berfoliasi dan terich serta jasad batuan yang heterogenous seperti flysch (Marinos, 2010).

Sistem GSI mengalami proses evolusi oleh penyelidik seperti Hoek & Brown (1997), Sonmez & Ulusay (1999), Marinos & Hoek (2000), Marinos (2010), dan Hoek *et al.* (2013) berdasarkan cabaran yang dihadapi semasa proses pembinaan serta tujuan penggunaannya. Pada peringkat awal, sistem GSI bersifat kualitatif sepenuhnya, tetapi penyelidikan seterusnya telah menukarnya ke sistem kauntitatif (Cai *et al.*, 2004). Walaupun GSI direka untuk digunakan dalam pelbagai keadaan jasad batuan, terdapat situasi dimana sistem GSI tidak sesuai digunakan seperti pada jasad batuan yang mempunyai orientasi dan corak ketakselajaran yang jelas (Marinos, 2010).

PARAMETER DALAM SISTEM PENGLASAN JASAD BATUAN PENEROWONGAN DAN PEMBINAAN BAWAH TANAH

Setiap sistem pengelasan secara kuantitatif menggunakan gabungan beberapa parameter bagi menghasilkan satu sistem yang lengkap. Setiap parameter diberi perkadaran masing-masing mengikut keutamaan atau potensi pengaruh

Jadual 5: Parameter yang digunakan dalam sistem pengelasan jasad batuan untuk pembinaan terowong.

Parameter	RSR	RMR ₈₉	Sistem Q	Q _{HLW}	GSI	RMi	HRMR	JH Method	RMQR	TEPS
Size blok	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-
Orientasi kekar membentuk blok	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-
Bil. set ketakselajaran	-	-	X	-	-	X	-	-	X	-
Panjang ketakselajaran	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-
Jarak antara ketakselajaran	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-
Kekuatan ketakselajaran	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-
Jenis batuan	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-
Keadaan tegasan	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
Air bawah tanah	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-
Kekuatan batuan utuh	-	X	X	-	X	X	X	-	-	-
Luluhawa	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Kesan letupan	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-
Keberintangan elektrik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Zon retakan	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Kesan terma	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
Kebolehbinaan	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-

kepada kualiti jasad batuan. Parameter yang biasa digunakan dalam pengelasan kualiti jasad batuan ialah kekuatan bahan batuan, ciri, sifat dan orientasi ketakselajaran, luluhawa, dan keadaan air bawah tanah (Bieniawski, 1989; Stille & Palmström, 2003; Pantelidis, 2009; Liu & Dang, 2014). Perbandingan parameter yang digunakan dalam setiap sistem pengelasan ditunjukkan dalam Jadual 5.

KESESUAIAN SISTEM PENGELASAN JASAD BATUAN SEDIA ADA UNTUK JASAD BATUAN TERLINDUNG

Singkapan terlindung merujuk kepada singkapan yang ditutup atau diselaputi oleh shotcrete bagi bertujuan untuk melindungi atau menstabilkan jasad batuan tersebut. Berdasarkan analisis sistem pengelasan jasad batuan khusus untuk pembinaan terowong, sistem Q dan RMR paling banyak digunakan di samping penggunaan beberapa sistem pengelasan jasad batuan lain seperti Kaedah JH, RMQR, Q_{HLW} dan lain-lain (Barton, 2002; Aksoy, 2008; Azit & Ismail, 2014; Aydan & Tokashiki, 2015; Chen *et al.*, 2015). Sistem pengelasan jasad batuan tersebut secara umumnya hanya boleh diaplikasikan apabila ada singkapan yang boleh dicerap secara terus terutamanya sebelum, semasa dan selepas pembinaan. Satu parameter utama yang digunapakai oleh semua sistem ialah satah ketakselajaran. Dua ciri utama yang dilihat pada satah ketakselajaran ialah keadaan dan geometri satah ketakselajaran.

Kekangan mula timbul apabila penilaian semula jasad batuan perlu dilakukan selepas satu tempoh masa yang lama (contoh; selepas 15-20 tahun) di mana infrastruktur telah siap dibina dan menghadapi halangan bagi menilai kembali sebarang perubahan kualiti atau sebarang potensi masalah yang boleh timbul. Permasalahan yang paling jelas untuk menilai kualiti jasad batuan ialah ketiadaan singkapan untuk dicerap dan diukur kerana telah diliputi oleh shotcrete. Keadaan ini menyebabkan sistem pengelasan yang sedia ada tidak mampu untuk digunapakai. Jika penilaian tidak dapat dilakukan, sebarang perubahan yang berlaku pada jasad batuan tidak dapat dinilai dan ini boleh melemahkan cerun batuan kerana perubahan pada kualiti jasad batuan boleh berlaku akibat pengaruh seperti luluhawa, perubahan regim aliran air, perubahan tegasan dan lain-lain. Penghasilan satu sistem baru yang boleh menilai jasad batuan yang terlindung akibat tutupan shotcrete perlu dihasilkan. Justeru itu, penilaian berkala pada setiap jasad batuan dapat dilakukan walaupun wujud halangan pada bahagian permukaannya.

KEPERLUAN SISTEM PENGELASAN JASAD BATUAN BAHARU

Isu yang perlu diambil kira ialah bagi menghasilkan sistem pengelasan baru khusus untuk singkapan terlindung oleh shotcrete pada bahagian permukaan. Kaedah yang perlu dipilih perlu mempunyai kemampuan untuk menembusi

halangan tersebut disamping boleh memberikan maklumat-maklumat geologi seperti kewujudan dan ketumpatan satah ketakselajaran, kehadiran air bawah tanah, atau mengesan zon-zon geologi yang lemah. Berdasarkan ciri yang ditekankan, kemungkinan penggunaan teknik geofizik merupakan kaedah yang paling sesuai. Walaupun wujud pelbagai kaedah dalam geofizik, dua teknik yang boleh ditekankan ialah survei keberintangan geoelektrik.

Survei keberintangan geoelektrik boleh memberikan maklumat berharga untuk pengelasan jisim batuan, terutamanya dalam mengenal pasti struktur geologi dan ketakselajaran yang boleh menjejaskan kestabilan jasad batuan. Survei keberintangan geoelektrik adalah berdasarkan prinsip bahawa jenis batuan yang berbeza mempunyai kerintangan elektrik yang berbeza. Oleh itu, dengan mengukur kerintangan elektrik batuan, adalah mungkin untuk membezakan antara jenis batu yang berbeza dan membuat kesimpulan sifatnya. Beberapa kajian telah menunjukkan keberkesanan survei keberintangan geoelektrik dalam mengenal pasti struktur geologi, zon lemah, dan ketakselajaran dalam jisim batuan, yang penting untuk menentukan kestabilan dan kelakuannya jasad batuan yang berbeza. Oleh itu survei keberintangan geoelektrik boleh menjadi alat yang berguna untuk jurutera dan ahli geologi dalam mereka bentuk sistem sokongan yang sesuai untuk projek kejuruteraan batuan.

Beberapa kajian telah menunjukkan kegunaan survei keberintangan geoelektrik dalam pengelasan jisim batuan. Sebagai contoh, Shamsabadi *et al.* (2016) menggunakan survei keberintangan geoelektrik untuk menilai kestabilan cerun batu di Iran. Mereka mendapati bahawa survei keberintangan geoelektrik dapat mengenal pasti kehadiran ketakselajaran dalam jisim batuan dan orientasinya, yang membantu menentukan mekanisme kegagalan yang berpotensi dan mereka bentuk langkah penstabilan yang sesuai. Penggunaan survei keberintangan geoelektrik oleh Kong *et al.* (2015), Dong *et al.* (2016) dan Mahmoud & Sadek (2017) menunjukkan keberkesanan dalam mengesan darjah keretakan jasad batuan dan kehadiran air bawah tanah.

Begitu juga, Wu *et al.* (2017) menggunakan survei keberintangan geoelektrik untuk menyiasat struktur geologi dan sifat jasad batuan terowong di China. Mereka mendapati bahawa survei keberintangan geoelektrik dapat mengenal pasti kehadiran zon lemah dan patah tulang dalam jisim batuan, yang penting untuk menentukan kestabilan terowong dan mereka bentuk langkah sokongan yang sesuai. Dalam kajian lain, Wang *et al.* (2018) menggunakan survei keberintangan geoelektrik untuk menyiasat sifat jasad batuan dalam lombong arang batu di China. Mereka mendapati bahawa survei keberintangan geoelektrik dapat mengenal pasti taburan sifat jasad batuan di sekeliling, yang penting untuk mereka bentuk kaedah perlombongan dan sistem sokongan yang sesuai.

Walau bagaimanapun, penggunaan kaedah tomografi keberintangan geoelektrik tidak cukup untuk menilai

jasad batuan secara komprehensif. Ini kerana kualiti jasad batuan juga dikawal oleh faktor lain seperti kekuatan bahan batuan dan aliran air bawah tanah seperti yang dicadangkan dalam sistem RMR. Parameter ini tidak dapat diperolehi daripada analisis tomografi keberintangan geoelektrik, tetapi memerlukan pemetaan dan cerapan di lapangan. Kecelakaan struktur sistem sokongan terowong seperti pengawatan bolt batuan, rekahan dan jatuhnya shotcrete juga boleh dijadikan petunjuk keadaan jasad batuan disebalik lapisan shotcrete.

KESIMPULAN

Kesimpulannya, intergrasi kaedah survei tomografi keberintangan geoelektrik dan pemetaan geologi kejuruteraan merupakan pendekatan terbaik bagi menghasilkan sistem pengelasan baharu yang boleh menilai kualiti jasad batuan terlindung. Penghasilan sistem baharu ini membolehkan jasad batuan dinilai secara berterusan tanpa sebarang halangan atau kekangan. Sebarang perubahan yang berlaku pada jasad batuan boleh dikesan pada peringkat awal dan membolehkan baik pulih dapat dilakukan pada kadar segera. Langkah ini penting bagi mengelakkan geobencana yang lebih besar berlaku pada masa akan datang.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak editor jurnal dan para pewasit yang telah memberikan komen penambahbaikan yang berharga dalam penulisan artikel ini. Penghargaan juga diberikan kepada Universiti Malaysia Kelantan dan Kementerian Pengajian Tinggi yang menyokong kajian ini melalui geran penyelidikan bernombor FRGS/1/2020/WAB07/UMK/03/1.

SUMBANGAN PENGARANG

Idea penulisan, metodologi dan analisis, penulisan jurnal, penyediaan dana: HH; penulisan dan penyuntingan jurnal: MHA.

KONFLIK KEPENTINGAN

Kami dengan tulus menyatakan bahawa tidak ada konflik kepentingan yang dapat mempengaruhi hasil dapatan dan tafsiran data dalam penulisan jurnal ini. Kami tidak memiliki hubungan kewangan, kepemilikan saham, atau kepentingan lain yang dapat menyebabkan konflik kepentingan dengan pihak manapun yang terkait dengan penelitian ini. Semua sumber maklumat dan rujukan yang digunakan dalam penulisan jurnal ini juga disertakan dengan lengkap.

RUJUKAN / REFERENCES

- A'ssim, A., & Xing, Z. Y., 2010. Most Used Rock Mass Classifications for Underground Opening. *Am. J. Engg. & Applied Sci.*, 3(2), 403–11.
- Akagi, W., Ito, T., Shiroma, H., Sano, A., Shinji, M., Nishi, T., & Nakagawa, K., 2001. A Proposal of New Rock Mass

- Classification for Tunnelling. In: T. Kimura, M. Tateyama, & K. Adachi (Eds.), *Modern Tunnelling Science and Technology*, Swets & Zeitlinger, Kyoto. 371-377.
- Aksoy, C.O., 2008. Review of Rock Mass Rating Classification: Historical Development, Applications and Restrictions. *Journal of Mining Science*, 44(1), 51–63.
- Aydan, Ö., R. Ulusay, & T. Kawamoto, 1997. Assessment of Rock Mass Strength for Underground Excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 3–4.
- Aydan, Ö., & Tokashiki, N., 2015. Rock Mass Quality Rating (RMQR) for Rock Engineering. *International Journal of the JCRM*, 11(1), 17–20.
- Aydan, Ö., Reşat Ulusay, & Naohiko Tokashiki, 2014. A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(4), 1255–76.
- Azit, R., & Ismail, M.A.M., 2014. Rock Mass Classification System Used for Pahang-Selangor Raw Water Transfer Tunnel. In: Rohana Hassan, Marina Yusoff, Zulhabri Ismail, Norliyati Mohd Amin, & Mohd Arshad Fadzil (Eds.), *CIEC 2013: Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2013*, Springer Singapore, Singapore. 519–29. https://doi.org/10.1007/978-981-4585-02-6_45.
- Barton, N., Reidar, L., & J. Lunde, 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236.
- Barton, N., 1999. TBM Performance Estimation in Rock Using QTBM. *Tunnels and Tunneling International*, 31(9), 30–33.
- Barton, N., 2002. Some New Q-Value Correlations to Assist in Site Characterisation and Tunnel Design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 185–216.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Transactions of South African Institution of Civil Engineers*, 15(12), 335–44.
- Bieniawski, Z.T., 1976. Rock Mass Classification in Rock Engineering Applications. *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, 97–106. AA Balkema.
- Bieniawski, Z.T., 1979. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. *Proceedings Fourth Congress of the International Society For Rock Mechanics*, 2, 41–48.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York. 272 p.
- Bieniawski, Z.T., 1975. Case Studies: Prediction of Rock Mass Behavior by the Geomechanics Classification. *Proceedings of 2nd Australia–New Zealand Conference Geomechanics*, Brisbane, 36–41.
- Bieniawski, Z.T., 1974. Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunneling.” *Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech.*, 2, 27–32.
- Brook, N., & P.G.R. Dharmaratne, 1985. Simplified Rock Mass Rating System for Mine Tunnel Support. *Institution of Mining and Metallurgy Transactions*, 94.
- Cai, M., P.K. Kaiser, H. Uno, Y. Tasaka, & M. Minami, 2004. Estimation of Rock Mass Deformation Modulus and Strength of Jointed Hard Rock Masses Using the GSI System. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 3–19. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00025-X).
- Celada, B., Isidoro Tardáguila, Pedro Varona, A. Rodríguez, & Z.T. Bieniawski, 2014. Innovating Tunnel Design by an Improved Experience-Based RMR System. In: Arsenio Negro (Ed.), *World Tunnel Congress 2014*, 3, 1–9.
- Chen, C., & Liu, Y., 2007. A Methodology for Evaluation and Classification of Rock Mass Quality on Tunnel Engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 377–87. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.10.003>.
- Chen, L., J. Wang, Z.H. Zong, J. Liu, R. Su, Y.H. Guo, Y.X. Jin, W.M. Chen, R.L. Ji, H.G. Zhao, X.Y. Wang, X. Tian, H. Luo, & M. Zhang, 2015. A New Rock Mass Classification System QHLW for High-Level Radioactive Waste Disposal. *Engineering Geology*, 190, 33–51. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.02.006>.
- Cummings, R.A., F.S. Kendorski, & Z.T. Bieniawski, 1982. *Caving Rock Mass Classification and Support Estimation*. US Bureau of Mines Contract Report J., 100103.
- Da-Ming, Y., 2010. Construction and Development of Emergency Refuge System in Underground Mine. *Coal Science and Technology*, 11, 3.
- De Vallejo, L.I.G., 1983. A new rock classification system for underground assessment using surface data. *International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction*, hlm. 85–94.
- Dong, Y., Cao, Y., & Zhang, J., 2016. Evaluation of rock mass quality of highway tunnel using electrical resistivity imaging. *International Journal of Geomechanics*, 16(3), 04015065.
- Ghani, M.F. A., Norbert Simon, Goh, T.L., Tuan Rosli Tuan Mohamed, & Abdul Ghani Rafek, 2016. *Kajian Ketumpatan Lineamen Dalam Penilaian Potensi Jatuhan Batuan Di Kawasan Lembah Kinta*. *Sains Malaysiana*, 45(12), 1887–96.
- Goh, T.L., Md Selim Reza, Abdul Ghani Rafek, Ailie Sofyiana Serasa, Azimah Hussin, & Khai Ern Lee, 2016. Assessment of Ultimate Bearing Capacity Based on the Hoek-Brown Failure Criterion. *Sains Malaysiana*, 45(11), 1603–7.
- Hajiazizi, M., & Khatami, R.S., 2013. Seismic Analysis of the Rock Mass Classification in the Q-System. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 62, 123–30.
- Hoek, E., T.G. Carter, & M.S. Diederichs, 2013. *Quantification of the Geological Strength Index Chart*. 47th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association. San Francisco.
- Hoek, E., P.K. Kaiser, & W.F. Bawden, 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. CRC Press, Rotterdam. 228 p.
- Hoek, E., & Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–86.
- Kendorski, F.S., R.A. Cummings, Z.T. Bieniawski, & E.H. Skinner, 1983. Rock Mass Classification for Block Caving Mine Drift Support. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 193–223. International Society for Rock Mechanics, Chicago.
- Kong, L., Wei, J., & Feng, X., 2015. Application of Electrical Resistivity Imaging Method for Rock Mass Quality Index Evaluation in Tunnel Construction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(6), 742–747.
- Krauland, N., P. Söder, & G. Agmalm, 1989. Determination of Rock Mass Strength by Rock Mass Classification—Some Experiences and Questions from Boliden Mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics (Abstracts)*, 26, 115–23.
- Laubscher, D.H., & Jakubec, J., 2001. The MRMR Rock Mass Classification for Jointed Rock Masses. In: Richard L. Bullock, & William A. Hustrulid, (Eds.), *Underground Mining*

- Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Colorado. 475–481.
- Laubscher, D.H., 1977. Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-Mining Applications. *Trans. Instn. Min. Metall.*, 86, A1-8.
- Liu, Z., & Dang, W., 2014. Rock Quality Classification and Stability Evaluation of Undersea Deposit Based on M-IRMR. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 95–101.
- Mahmoud, S., & Sadek, M.A., 2017. Evaluation of Subsurface Geological Structures Using Electrical Resistivity Imaging Technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(10), 229.
- Marinos, P.V., 2010. New Proposed GSI Classification Charts for Weak or Complex Rock Masses. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(3), 1248–58.
- Marinos, P., & Hoek, E., 2000. GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. *ISRM International Symposium*, Melbourne. International Society for Rock Mechanics.
- Marinos, V., P. Marinos, & Evert Hoek, 2005. The Geological Strength Index: Applications and Limitations.” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55–65.
- Mark, C., Chase, F.E. & Molinda, G.M., 1994. Design of Longwall Gate Entry Systems Using Roof Classification. In: R.C. Simon, C.L., Mark, C., Tuchman, & R.J., Repsher (Eds.), *Proc. of New Technology for Longwall Ground Control*, Final Proc., Pittsburgh, 5-8.
- Merkin, V., & Konyukhov, D., 2016. Development of Moscow Underground Space Plans, Results, Perspectives. *Procedia Engineering*, 165, 663-72.
- Milne, D., J. Hadjigeorgiou, & R. Pakalnis, 1999. Rock Mass Characterization for Underground Hard Rock Mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(4), 383–91.
- Miranda, T., 2007. Geomechanical Parameters Evaluation in Underground Structures: Artificial Intelligence, Bayesian Probabilities and Inverse Methods. PhD Thesis, University of Minho, Barga, Portugal.
- Miranda, T., L. Ribeiro e Sousa, & Joaquim, T., 2014. Updating of the Hierarchical Rock Mass Rating (HRMR) System and a New Subsystem Developed for Weathered Granite Formations. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(6), 769–75. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.10.006>.
- Palmström, A., 1995. Characterization of Rock Masses by the RMI for Use in Practical Rock Engineering Purposes. PhD Thesis, University of Oslo, Norway.
- Palmstrom, A., & Broch, E., 2006. Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Reference to the Q-System. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 575–93. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.10.005>.
- Pantelidis, L., 2009. Rock Slope Stability Assessment through Rock Mass Classification Systems. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46, 315–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2008.06.003>.
- Rahimi, B., Shahriar, K., & Sharifzadeh, M., 2014. Evaluation of Rock Mass Engineering Geological Properties Using Statistical Analysis and Selecting Proper Tunnel Design Approach in Qazvin–Rasht Railway Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 206–22. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.010>.
- Rahmati, A., Lohrasb Faramarzi, & Manouchehr Sanei, 2014. Development of a New Method for RMR and Q Classification Method to Optimize Support System in Tunneling. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 8(4), 448–55.
- Romana, M., 2015. 2014 RMR New Guidelines for Tunnels. 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics. International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1-8.
- Ryu, H.H., Gye Chun Cho, Sung Don Yang, & Hyun Kang Shin, 2010. Development of a Tunnel Electrical Resistivity Prospecting System and Its Application. PhD Thesis, KAIST, Daejeon, Korea.
- Şen, Z., & Sadagah, B.H., 2003. Modified Rock Mass Classification System by Continuous Rating. *Engineering Geology*, 67(3), 269–80.
- Shamsabadi, A., Oraee, K., & Kalantari, M., 2016. Stability Evaluation of Rock Slopes using Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 572-581.
- Singh, B., & Goel, R.K., 1999. *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier. 267 p.
- Sonmez, H., & Ulusay, R., 1999. Modifications to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6), 743–60. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00043-1](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00043-1).
- Stille, H., & Palmström, A., 2003. Classification as a Tool in Rock Engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(4), 331–45.
- Terzaghi, K., 1946. Rock Defects and Loads on Tunnel Support. In: Robert Videtto Proctor & Thomas Lester White (Eds.), *Rock Tunneling with Steel Supports*. Commercial Shearing & Stamping Company. 271 p.
- Tomás, R., A. Cuenca, M. Cano, & J. García-Barba, 2012. A Graphical Approach for Slope Mass Rating (SMR). *Engineering Geology*, 124(1), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.10.004>.
- Tuğrul, A., 1998. The Application of Rock Mass Classification Systems to Underground Excavation in Weak Limestone, Atatürk Dam, Turkey. *Engineering Geology*, 50(3–4), 337–45. [https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00034-9](https://doi.org/http://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00034-9).
- Unal, E., 1996. Modified Rock Mass Classification: M-RMR System. *Milestones in Rock Engineering*, the Bieniawski Jubilee Collection. Balkema, Rotterdam, 203–223.
- Ünal, E., İ. Özkan, & R. Ulusay, 1992. Characterization of Weak, Stratified and Clay-Bearing Rock Masses. *Rock Characterization: ISRM Symposium, Eurock’92*, Chester, UK, 14–17 September 1992.
- Vähäaho, I., 2016. An Introduction to the Development for Urban Underground Space in Helsinki. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 324–28.

- Vallejo, L.I.G. De., 1983. A New Rock Classification System for Underground Assessment Using Surface Data. In International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, 85–94. Portuguese Geotechnical Society, Lisbon.
- Venkateswarlu, V., A.K. Ghose, & N.M. Raju, 1989. Rock-Mass Classification for Design of Roof Supports—a Statistical Evaluation of Parameters. Mining Science and Technology, 8(2), 97–107.
- Wang, X., Sun, Y., Wang, H., & Chen, M., 2018. Investigation of rock mass properties and coal seam distribution using electrical resistivity tomography in a coal mine. Geotechnical and Geological Engineering, 36(3), 1641-1650.
- Warren, S.N., Raj R. Kallu, & Chase K. Barnard, 2016. Correlation of the Rock Mass Rating (RMR) System with the Unified Soil Classification System (USCS): Introduction of the Weak Rock Mass Rating System (W-RMR). Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(11), 4507–18. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1090-1>.
- Wickham, G.E., H.R. Tiedemann, & Eugene H. Skinner, 1972. Support Determinations Based on Geologic Predictions. Proceedings of Conference Rapid Excavation and Tunneling, 43–64.
- Wickham G. E. & Tiedemann, H.R., 1974. Ground Support Prediction Model (RSR Concept). Advance Research Projects Agency of the Department of Defense, Bureau of Mines H0220075.
- Wu, Y., Wang, L., Liu, H., & Li, G., 2017. Investigation of geological structures and rock mass properties using electrical resistivity imaging in a tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 68, 152-162.

*Manuscript received 4 October 2021;
Received in revised form 6 April 2023;
Accepted 28 April 2023
Available online 26 May 2023*