

کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ در ارزیابی پایداری

فضاهای زیرزمینی

مسعودصادقی^{۱*}؛ وامق رسولی^۲

چکیده

دستیابی به طراحی بهینه در فعالیتهای مهندسی سنگ، نیازمند شناخت عوامل موثر و روابط بین آنها است. امروزه سیستم‌های مهندسی سنگ در تحلیل فرایندهای پیچیده مهندسی سنگ کاربرد روزافزونی دارند. در این روش عوامل مهم روی قطر اصلی ماتریس قرار گرفته و اندرکنش بین آنها با مقادیر کمی در عناصر غیر قطری تعیین و سپس به کمک این ماتریس میزان اثردهی و اثرپذیری هر عامل در سیستم ارزیابی می‌شود. در این مقاله یک سیستم مهندسی با کدگذاری ماتریس اندرکنش و با استفاده از ریاضیات فازی ساخته شده است. از این سیستم برای ارزیابی پایداری تونل آب‌بر سد سیمره در ناحیه خردشده گراین استفاده شده است. نتایج به دست آمده با طبقه‌بندی‌های مهندسی توده‌سنگ انجام شده مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که لایه‌بندی و گسل‌ها مهم‌ترین عوامل کاهش ناپایداری در ناحیه گراین هستند. با استفاده از این روش، توده‌سنگ ناحیه خردشده گراین در کلاس پایداری III (به نسبت پایدار) قرار می‌گیرد که به نتایج طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ صورت گرفته نزدیک است.

کلمات کلیدی

سیستم‌های مهندسی سنگ، پایداری تونل، طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ، ناحیه خردشده، سد سیمره.

Application of Rock Engineering Systems in Evaluation of Stability of Underground Excavations

Masoud sadeghi; Vamegh rasouli

ABSTRACT

In rock engineering practice, understanding the most effective parameters and their relationships is important in order to obtain an optimum engineering design. The applications of rock engineering system (RES) in the analysis of complicated rock engineering processes have been widespread. In this method, the main parameters are located along the diagonal of the matrix, and their interactions are quantified by assigning values in the off-diagonal elements. Then, this matrix is used to assess the amount of cause and effect of each parameter within the whole system. In this paper, a rock engineering systems is constructed where the coding of the matrix is made using fuzzy mathematics. This system is used to analyze the stability of the water transmit tunnel of Seymareh Dam within the crushed zone of Graben rocks. The results are compared to those of the rock mass classification systems. It is observed that the bedding and faults are the two major factors of instability. Using the new method, the Graben rock is classified in group III, i.e. moderately stable rock, which is close to what predicted using rock classification system.

KEYWORDS

Rock engineering systems (RES), tunnel stability, engineering rock mass classification systems, crushed zone, seymareh dam.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۵/۲/۱۸

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۲/۲۵

^{۱*} نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر: masoud7882@aut.ac.ir

^۲ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی نفت؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر: vrasouli@aut.ac.ir



۱- مقدمه

مسائل چندمتغیره بسیار مناسب است؛ که در تحقیق حاضر از این روش استفاده شده است. ساختار این عملگر فازی به صورت رابطه (۲) تعریف می شود [۲]:

$$B = AOR = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n)$$
$$b_j = \min\left\{1, \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}\right\} \quad (2)$$

در رابطه فوق B ماتریس هدف، A ماتریس ضرایبی وزن، R ماتریس همبستگی و O عملگر فازی است.

۲-۳- ماتریس همبستگی R

پنج کلاس پایداری به صورت خیلی پایدار، پایدار، به نسبت پایدار، ناپایدار و خیلی ناپایدار به شکل مجموعه $V = \{v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5\}$ و n عامل u_1, u_2, \dots, u_n به صورت مجموعه $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ در نظر بگیرید. به این ترتیب درجه عضویت i -امین عامل در j -امین کلاس پایداری به صورت r_{ij} تعریف و ماتریس R برای هر کلاس پایداری به شکل رابطه (۳) به دست می آید [۲]:

$$R_i = [r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3} \ r_{i4} \ r_{i5}] \quad (3)$$

۲-۴- ماتریس ضرایب وزنی A

به طور کلی، اهمیت هر عامل در پایداری فضاهای زیرزمینی با یکدیگر متفاوت است؛ بنابراین می توان هر عامل را با ضریب وزنی خاصی مشخص نمود. ماتریس ضرایب وزنی عوامل به صورت رابطه (۴) تعریف می شود [۲]:

$$A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n) \quad (4)$$
$$a_j \geq 0, \sum_{i=1}^n a_i$$

۳- سیستم های مهندسی سنگ

به طور کلی، فعالیت های مهندسی سنگ شامل ساز و کارهای اندرکنش پیچیده بسیاری هستند. امروزه، روش سیستم های مهندسی سنگ به عنوان روشی موثر در تحلیل ساز و کارهای پیچیده و حل مسائل مهندسی سنگ گسترش یافته است. طبق تئوری سیستم های مهندسی سنگ، همه طبقه بندی های مهندسی سنگها را می توان به صورت تابعی از عوامل قطری ماتریس اندرکنش در نظر گرفت. انتخاب عوامل و وزندهی آنها در سیستم طبقه بندی توده سنگ با کدگذاری ماتریس اندرکنش تعیین می شود [۴].

۳-۱- انتخاب عوامل اصلی

انتخاب عوامل اصلی در ارزیابی پایداری، مهم ترین موضوع سیستم های مهندسی سنگ و تشکیل ماتریس اندرکنش است. با استفاده از نظرات کارشناسی، شرایط خاص منطقه و

پایداری فضاهای زیرزمینی مانند مغار نیروگاه های برق- آبی، تونل های انتقال آب و فضاهای زیرزمینی معدنی از مهم ترین مسائل مربوط به پژوهش های عمرانی و معدنی به شمار می آید. عوامل متعددی مانند تنش های برجا، ساختار توده سنگ، روش های حفاری، عمق حفاری، ابعاد و شکل حفاری، کیفیت ماده سنگ و توده سنگ، بر پایداری فضاهای زیرزمینی اثر می گذارند. با افزایش تعداد عوامل، مدل سازی ساز و کارها و مسیرهای اندرکنش به وسیله روش های مرسوم مشکل می شود. بنابراین نیاز به استفاده از روش های تحلیلی جدید برای تجزیه و تحلیل فرایندهای پیچیده مهندسی سنگ ضروری است [۵].

ابداع انواع سیستم های طبقه بندی توده سنگ و کاربرد آنها در مهندسی سنگ، گام مهمی در ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی است. اگرچه، به طور کلی، محدوده مقادیر عوامل در ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی در بیشتر روش های محاسباتی ثابت در نظر گرفته می شود، در روش های معمول طبقه بندی توده سنگ، عدم اطمینان ناشی از ناقص بودن داده ها و مبهم بودن اطلاعات به طور مستقیم در محاسبات وارد نمی شود [۵]. در این مقاله اهمیت اثرگذاری عوامل بر پایداری فضاهای زیرزمینی بر پایه تئوری سیستم های مهندسی سنگ (Hudson, 1992) بررسی شده است. در این بررسی از منطق فازی برای اعمال عدم اطمینان استفاده شده است.

۲- چند مفهوم پایه در ریاضیات فازی

۲-۱- مجموعه فازی

مفهوم مجموعه فازی برای اولین بار به وسیله پرفسور لطفی زاده (۱۹۶۵) معرفی شد. مجموعه فازی A شامل عضو x به صورت رابطه (۱) تعریف می شود:

$$A = \{\mu(x), x\} \quad (1)$$

که $\mu(x)$ درجه عضویت x در مجموعه A است. درجه عضویت مقداری بین ۰ تا ۱ دارد. تابع عضویت، تابعی است که درجه تعلق x در A را مشخص می نماید. تابع عضویت با توجه به اهداف محاسباتی و واقعیت های حاکم بر سیستم انتخاب می شود [۲].

۲-۲- عملگر فازی

انواع متنوعی از عملگرهای فازی در کاربردهای عملی استفاده می شود. عملگر فازی مدل وزندهی متوسط [۲] برای

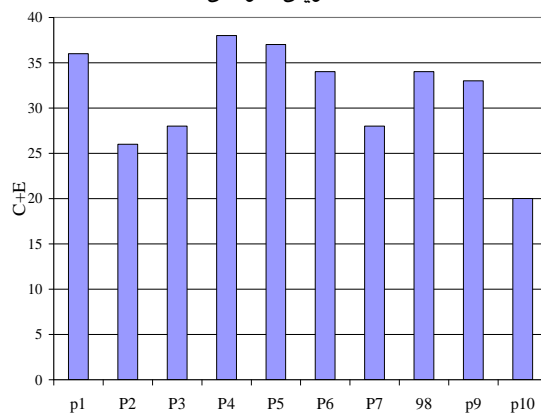


روش عوامل بر اساس شدت اندرکنش هر جفت از عوامل از مقدار عددی صفر (بدون اندرکنش) تا مقدار ۴ (اندرکنش قوی) کدگذاری می‌شوند. در این روش، عوامل موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش آنها با یکدیگر بر حسب میزان آن با کدگذاری در عناصر غیرقطری ماتریس مشخص می‌شود. بدین ترتیب مجموع خانه‌های سطری، معرف اثری است که عامل موجود در آن سطر روی دیگر عوامل دارد و مجموع خانه‌های ستونی معرف اثری است که عامل موجود در آن ستون از دیگر عوامل گرفته است [۴]. مقادیر کدگذاری به صورت نمودار اثر-تاثیر و هیستوگرام شدت اندرکنش هر عامل در شکل (۱) نشان داده شده است. در این تحقیق پارامترهای σ_c , R_{QD} , S_d , ϕ_j یا C_j , R_h و $W_g(P_w, F_s)$ به عنوان عوامل بحرانی موثر بر پایداری در نظر گرفته شده‌اند.

تجربه‌های عملی در مسائل پایداری فضا‌های زیرزمینی می‌تواند عوامل اصلی ماتریس اندرکنش را تعیین نمود. در این مقاله با توجه به شرایط ساختگاه، کیفیت عمومی توده‌سنگ و نوع حفاری، ۱۰ عامل اصلی موثر بر پایداری فضا‌های زیرزمینی انتخاب شده‌اند. این عوامل عبارتند از: (۱) مقاومت تک محوری ماده‌سنگ (۲) مدول الاستیسیته ماده‌سنگ (۳) کیفیت ماده‌سنگ؛ سخت یا نرم (۴) شاخص کیفی توده‌سنگ RQD (۵) فاصله‌داری درزه‌ها (۶) خواص مقاومتی ناپیوستگی‌ها (۷) نسبت مقاومت تک‌محوری به تنش اصلی حداکثر (۸) اندازه حفاری که به صورت نسبت مساحت حفاری به محیط حفاری تعریف شده است (۹) شرایط عمومی آب زیرزمینی (مقدار جریان نشت، F_s یا فشار آب درزه‌ای، P_w و ۱۰) هندسه حفاری. عوامل، روی قطر اصلی ماتریس اندرکنش قرار گرفته و با استفاده از روش نیمه‌کمی خبره کدگذاری شده است. در این

P_1	۴	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۳	۱
۳	P_2	۲	۲	۱	۱	۱	۰	۲	۰
۲	۲	P_3	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۱
۲	۲	۱	P_4	۴	۳	۲	۲	۲	۲
۱	۱	۱	۴	P_5	۴	۲	۲	۲	۲
۲	۲	۱	۲	۳	P_6	۲	۲	۲	۱
۳	۱	۲	۱	۱	۰	P_7	۲	۲	۰
۱	۱	۲	۳	۳	۳	۲	P_8	۳	۱
۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۲	P_9	۲
۰	۰	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	P_{10}

الف- ماتریس اندرکنش



ب- هیستوگرام شدت اندرکنش عوامل

شکل (۱) ماتریس اندرکنش، نمودار اثر-تاثیر و هیستوگرام شدت اندرکنش عوامل [۳]

۲-۳- انتخاب تابع عضویت و طبقه بندی عوامل در کلاس‌های طبقه‌بندی

تجربیات کارشناسی و سپس با اصلاح تابع به صورت سعی و خطا تخمین زده می‌شود [۲]. در این مقاله با فرض توزیع نرمال داده‌ها از تابع عضویت نرمال طبق رابطه (۵) استفاده شده است [۳]:

انتخاب تابع عضویت برای عوامل یکی از مشکل‌ترین مسائل در محاسبات چند متغیره فازی است. به طور معمول تابع عضویت، ابتدا با آزمایش نتایج به دست آمده، داده‌های آماری و

به سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها یک جدول کمی از کلاس‌های پایداری مرتبط با هر یک از عوامل در جدول (۱) پیشنهاد شده است [۲].

$$\mu(x_i) = e^{-\frac{(x_i - a)^2}{c}} \quad (5)$$

در رابطه فوق a و c ضرایب مرتبط با توزیع و به ترتیب مقدار متوسط و انحراف معیار عامل مربوطه هستند. با مراجعه

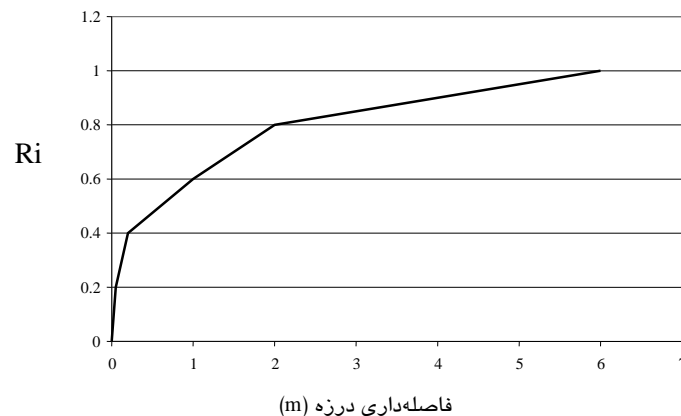
جدول (۱): کلاس‌های طبقه‌بندی پایداری مرتبط با هر عامل [۲]

کلاس پایداری عوامل		خیلی پایدار	پایدار	به نسبت پایدار	ناپایدار	خیلی ناپایدار
σ_c (MPa)		۱ کلاس	۲ کلاس	۳ کلاس	۴ کلاس	۵ کلاس
RQD(%)		۱۷۵-۲۰۰	۱۰۰-۱۷۵	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۱۰-۲۵
فاصله‌داری Sd(m)		۳-۶	۱-۳	۰/۳-۱	۰/۰۵-۰/۳	۰/۰۱-۰/۰۵
خواص مقاومتی ناپیوستگی‌ها	ϕ_j	۲۵-۴۵	۳۰-۳۵	۲۰-۳۰	۱۰-۲۰	۵-۱۰
	C_j (MPa)	۰/۳-۱	۰/۲-۰/۳	۰/۱۵-۰/۲	۰/۱-۰/۱۵	۰/۰۵-۰/۱
نسبت مساحت به محیط حفاری		۰/۵-۱/۵	۱/۵-۳	۳-۶	۶-۱۰	۱۰-۲۰
وضعیت آب زیرزمینی	Pw(MPa)	۰/۰۵-۰/۱	۰/۱-۰/۲۵	۰/۲۵-۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲
	Fs(l/min)	۰/۰۰۰۵-۰/۰۰۱	۰/۰۰۱-۱	۱-۵۰	۵۰-۵۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰

که TSI شاخص پایداری تونل و R_i مقدار مربوط به هر عامل در محدوده [۰ ۱] است که مانند آنچه در شکل (۲) برای فاصله‌داری درزه نشان داده شده، محاسبه می‌شود.

در این مقاله برای ارزیابی پایداری تونل، شاخص پایداری به صورت رابطه (۶) تعریف شده است:

$$TSI = \sum_{i=1}^n W_i R_i \quad (6)$$



شکل (۲): نمودار مقادیر پیوسته برای فاصله‌داری درزه

طبقه‌بندی کلاس‌های پایداری تونل بر اساس مقادیر شاخص پایداری تونل در جدول (۲) آورده شده است.

W_i ضریب وزنی هر عامل است که از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$W_i = \frac{C_i + E_i}{\sum C_i + E_i} \times 100 \quad (7)$$

جدول (۲): طبقه‌بندی کلاس‌های پایداری تونل

توصیف کلاس پایداری	خیلی پایدار	پایدار	متوسط	ناپایدار	خیلی ناپایدار
کلاس پایداری	۱	۲	۳	۴	۵
شاخص پایداری تونل	< ۰/۲۵	۰/۲۵ - ۰/۵	۰/۵ - ۰/۷	۰/۷ - ۰/۱۵	> ۰/۱۵

۴- مثال عملی

در این مقاله وضعیت پایداری تونل آبر نیروگاه سد سیمره در ناحیه خردشده گرابن در کیلومترهای ۰+۳۶۵ تا ۰+۴۲۹ بررسی و با نتایج طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها مقایسه شده است. تونل آبر طرح سد و نیروگاه سیمره در محدوده تاق‌دیس راوندی در سنگ آهک‌های سازند آسماری قرار گرفته است. تونل، مقطع دایره‌ای با قطر حفاری ۱۳ متر دارد. وجود دسته درزه‌های گوناگون، ریز گسل‌ها با پرتشگی رسی و خرده سنگی، وجود ناحیه خرد شده بلوکی و رطوبت به صورت قطرات آب از ویژگی‌های ناحیه خرد شده گرابن است. مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها در محدوده ناحیه گرابن در جدول (۳) آورده شده است [۱].

جدول (۳): مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها در

محدوده ناحیه خردشده گرابن [۱]

پارامتر	مقدار	
UCS(MPa)	۸۳/۴	
RQD(%)	۷۵	
S _d (m)	دسته درزه	۲
	لایه‌بندی	۰/۵
	گسل‌ها	۶
φ _j	دسته درزه	۵
	لایه‌بندی	۴۵
	گسل‌ها	۰
C _j (MPa)	دسته درزه	۰/۱۵
	لایه‌بندی	۱/۵
	گسل‌ها	۰
R _n (m)	۳/۲۵	
F _l (l/min)	<۱	

طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ این ناحیه به روش‌های RMR، Q و RMI (کمالی بندپی و همکاران، ۱۳۸۳) انجام شده است. کیفیت توده‌سنگ مورد مطالعه به روش Q به ازای مقادیر متفاوت ضریب کاهش تنش (SRF) و نوع نگهداری در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): کیفیت توده‌سنگ مورد مطالعه به روش Q [۱]

مقدار Q	کلاس توده‌سنگ	نوع نگهداری
Q ₁ =۳/۷۵	متوسط	بولت ۱×۱ متر؛ شاتکریت به ضخامت ۳ سانتی‌متر
Q ₂ =۳۷/۵	خوب	بولت تمام تزریق ۲×۲ متر
Q ₃ =۱۸/۷۵	خوب	بولت تمام تزریق ۱/۵×۱/۵ متر

شاخص پایداری تونل به ازای هر دسته ناپیوستگی با

استفاده از معادله (۶) و جدول (۱) محاسبه شده است. به این ترتیب که ابتدا با استفاده از جدول (۱) مقدار هر عامل مانند آنچه در شکل (۲) نشان داده شده، به دست می‌آید. سپس ضریب وزنی هر عامل با استفاده از ماتریس اندرکنش و معادله (۷) محاسبه شده که با جایگذاری در معادله (۶) مقدار شاخص پایداری تونل به دست می‌آید. نتایج این بررسی در جدول (۵) آمده است.

جدول (۵): شاخص پایداری به ازای دسته ناپیوستگی‌های منطقه

نوع ناپیوستگی	شاخص پایداری تونل	کلاس توده‌سنگ
دسته درزه	۰/۶	متوسط
لایه‌بندی	۰/۶۸	متوسط
گسل‌ها	۰/۶۲	متوسط

نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که توده‌سنگ در کلاس پایداری متوسط قرار می‌گیرد. همچنین به ترتیب اهمیت، صفحات لایه‌بندی، گسل‌ها و دسته درزه نقش موثری در ایجاد ناپایداری توده‌سنگ اطراف فضای حفاری دارند.

برای ارزیابی دقیق‌تر و آسانی در قضاوت مهندسی از ریاضیات فازی در ارزیابی پایداری تونل استفاده شده است. ماتریس ضرایب وزنی A با توجه به نتایج کدگذاری ماتریس اندرکنش در شکل (۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A = [0/17, 0/18, 0/175, 0/161, 0/161, 0/156] \quad (6)$$

با توجه به سه دسته ناپیوستگی با خواص متفاوت، با استفاده از معادله (۵) و جدول (۲)، ماتریس همبستگی R در سه حالت مختلف به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_J = \begin{bmatrix} 0 & 0/236 & 0/925 & 0 & 0 \\ 0/023 & 0/926 & 0/21 & 0/002 & 0 \\ 0/145 & 0 & 0 & 0/063 & 0/499 \\ 0 & 0/291 & 0/617 & 0/02 & 0/022 \\ 0 & 0/499 & 0/0 & 0/357 & 0/002 \end{bmatrix}$$

$$R_B = \begin{bmatrix} 0 & 0/236 & 0/925 & 0 & 0 \\ 0/023 & 0/926 & 0/21 & 0/002 & 0 \\ 0/007 & 0/21 & 0/88 & 0/009 & 0 \\ 0/001 & 0/291 & 0/617 & 0/02 & 0/022 \\ 0 & 0/499 & 0/0 & 0/357 & 0/002 \end{bmatrix}$$

$$R_F = \begin{bmatrix} 0 & 0/236 & 0/925 & 0 & 0 \\ 0/023 & 0/926 & 0/21 & 0/002 & 0 \\ 0/499 & 0 & 0 & 0/002 & 0/002 \\ 0 & 0/291 & 0/617 & 0/02 & 0/022 \\ 0 & 0/499 & 0/0 & 0/357 & 0/002 \end{bmatrix}$$

برای نمونه دیاگرام سه بعدی ماتریس همبستگی توده سنگ گرابن با در نظر گرفتن صفحات لایه‌بندی در شکل (۳) نشان داده شده است. در این دیاگرام درجه عضویت هر یک از عوامل موثر در ارزیابی پایداری در پنج کلاس پایداری نشان داده شده

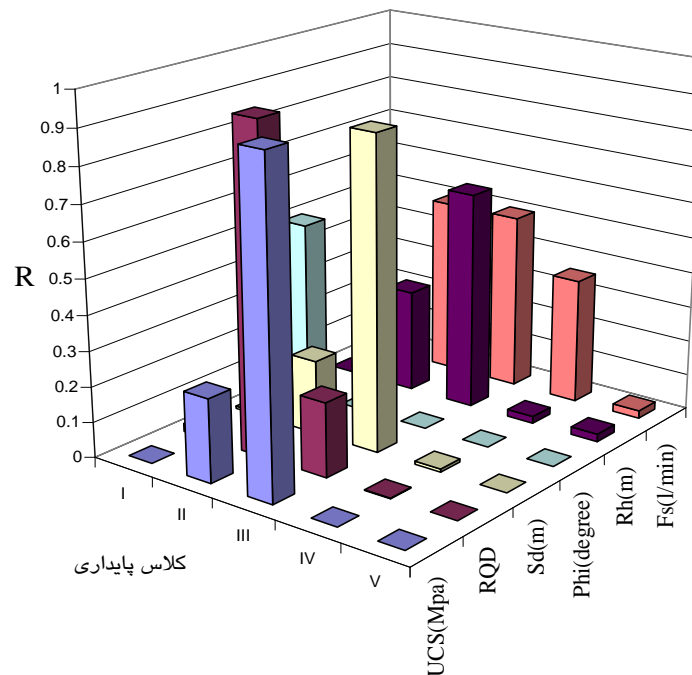
است. با توجه به درجه عضویت عوامل در کلاس‌های پایداری دیده می‌شود توده خردشده گرابن در رده پایدار تا به نسبت پایدار قرار گرفته است. سپس ماتریس هدف برای پنج کلاس پایداری، با استفاده از

رابطه (۲) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$B_J = [0.018 \quad 0.494 \quad 0.36 \quad 0.057 \quad 0.072]$$

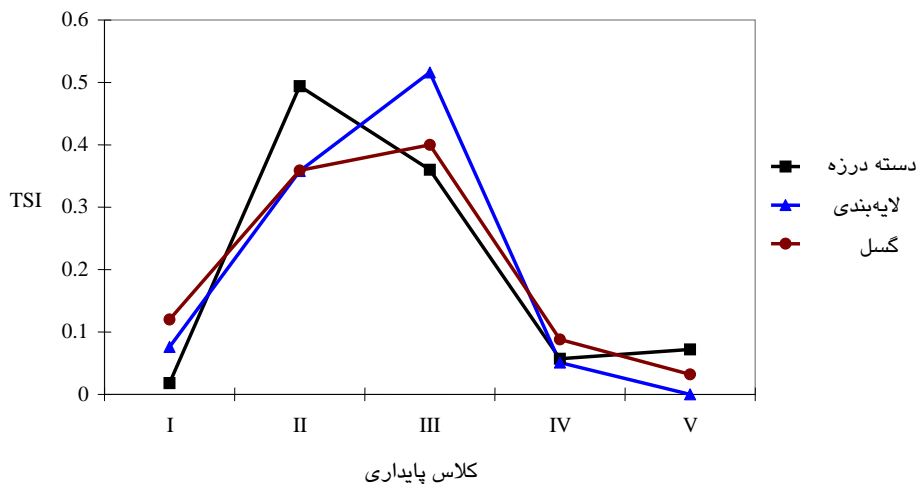
$$B_B = [0.076 \quad 0.358 \quad 0.516 \quad 0.051 \quad 0.00]$$

$$B_F = [0.12 \quad 0.359 \quad 0.4 \quad 0.088 \quad 0.032]$$



شکل (۳): دیاگرام سه بعدی ماتریس همبستگی ناحیه خردشده گرابن با در نظر گرفتن صفحات لایه بندی

شاخص پایداری تونل TSI به صورت یک عدد فازی از کلاس‌های طبقه‌بندی به‌ازای مشخصات هر دسته ناپیوستگی در



شکل (۴): شاخص پایداری تونل آبر در ناحیه خردشده گرابن به‌ازای خواص متفاوت ناپیوستگی‌ها

عضویت ۰/۵۱۶ و ۰/۴ در کلاس پایداری III (به نسبت پایدار) جای می‌گیرند. با توجه به حداکثر مقدار عضویت توده سنگ در کلاس‌های پایداری، مشخص می‌شود که به ترتیب صفحات لایه‌بندی و گسل‌ها، مهم‌ترین عوامل کاهش پایداری تونل آبر سد سیمره به‌شمار می‌آیند. پایداری فراهم کرده است که اطلاعات بیشتری درباره وضعیت

طبق نتایج به دست آمده، پایداری تونل به‌ازای مشخصات دسته درزه در کلاس II (پایدار) جای می‌گیرد؛ هرچند درجه عضویت توده سنگ در کلاس III نزدیک‌ترین مقدار به کلاس پایداری II و برابر با ۰/۳۶ به دست آمده است. پایداری تونل به‌ازای مشخصات لایه‌بندی و گسل‌ها به ترتیب با درجه همان‌طور که دیده می‌شود، TSI معیاری دقیق در ارزیابی

کارآمد در تجزیه و تحلیل عوامل مختلفی که بر روی یک فعالیت مهندسی سنگ اثرگذار هستند، بیان شد. نتایج نشان می‌دهند توده خردشده گرابن در رده سنگ‌های به نسبت پایدار جای می‌گیرد. همچنین لایه‌بندی و گسل‌ها به ترتیب مهم‌ترین عوامل کاهش پایداری تونل به شمار می‌آیند.

همچنین سیستم‌های مهندسی سنگ در ارزیابی پایداری فضاهاى زیرزمینی برخلاف روش‌های طبقه‌بندی معمول، محدود به تعدادی عوامل خاص نمی‌شود و می‌توان بسته به اهداف فعالیت و شرایط آن، تعداد عوامل موثر را افزایش داد و شدت اثرگذاری هر یک را بررسی نمود.

پایداری تونل نسبت به طبقه‌بندی‌های انجام شده ارائه می‌دهد. بنابراین با توجه به ارزیابی انجام شده، توده‌سنگ ناحیه خردشده گرابن در کلاس پایداری III (به نسبت پایدار) قرار می‌گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

عوامل زیادی در ارزیابی پایداری فضاهاى زیرزمینی اثرگذار هستند. این عوامل به صورت یک سیستم چند متغیره عمل می‌نمایند که با افزایش تعداد عوامل، تجزیه و تحلیل ارزیابی پایداری را با مشکل مواجه می‌کنند. در این مقاله، کاربرد و اهمیت سیستم‌های مهندسی سنگ به عنوان ابزاری

۶- مراجع

Hudson, J. A.; Rock engineering systems: theory and practice, 1st Edition, Ellis Horwood, Chichester, 1992.

Hudson, J.A. and Harrison, J. P. Engineering Rock Mechanics- An introduction to the principles. Elsevier Science, 1998.

[۱] کمالی بندپی، عباس؛ رفیعا، فرزانه؛ بینشیان، حسین؛ "پایداری تونل آب‌بر طرح سد و نیروگاه سیمره در زون خردشده گرابن"، مجموعه مقالات دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، ۱۳۸۳.

[۲] Ping, L.U., Hudson, J.A. ; *A fuzzy evaluation approach to the stability of underground excavations*, Eurock 93, Balkema, 1993.

[۳] Alvarez, G.M. Neuro-fuzzy modeling in engineering geology: applications to mechanical rock excavation, rock strength estimation and geological mapping. A.A.Balkema, 2000.

