

کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ در تحلیل پایداری شیروانی و پیشنهاد الگوی بهینه پایدارسازی

مسعود صادقی^۱؛ وامق رسولی^۲

چکیده

دستیابی به یک طراحی بهینه در فعالیت‌های مهندسی سنگ مستلزم شناسایی پارامترهای موثر و روابط بین آنها است. امروزه سیستم‌های مهندسی سنگ در تحلیل فرآیندهای پیچیده مهندسی سنگ کاربرد روزافزونی دارد. در این شیوه پارامترهای مهم روی قطر اصلی ماتریس قرار گرفته و اندرکنش بین پارامترها با مقداری کمی در عناصر غیر قطری تعیین و سپس به کمک این ماتریس میزان اثردهی و اثرپذیری هر پارامتر در سیستم ارزیابی می‌شود. در این مقاله ابتدا روش کدگذاری مدل تاثیر کامل دوتایی بررسی شده، سپس با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ خطرپذیری لغزش صفحه ای در یک شیروانی سنگی در دو حالت درزه سنگی اشباع و زهکشی شده تحلیل شده‌اند. به منظور شناسایی شیوه بهینه پایدارسازی یک شیروانی فرضی سه طرح مختلف به گونه‌ای در نظر گرفته شد که شرط پایداری با ضریب ایمنی ۱/۵ را تامین کنند. این طرح‌ها به ترتیب عبارتند از: ۱- تعدیل ارتفاع شیروانی با ثابت نگه داشتن زاویه شیروانی ۲- تعدیل زاویه شیروانی با ثابت نگه داشتن ارتفاع شیروانی ۳- تعدیل همزمان ارتفاع و زاویه شیروانی. نتایج نشان می‌دهد با انجام عملیات زهکشی خطرپذیری لغزش ۲۵٪ کاهش می‌یابد. با استفاده از تحلیل شدت اندرکنش پارامترها در سه طرح در نهایت طرح دوم به عنوان طرح بهینه معرفی شده است.

کلمات کلیدی

سیستم‌های مهندسی سنگ، ماتریس اندرکنش، پارامترهای بحرانی توده سنگ، لغزش صفحه ای، شیروانی سنگی

Application of rock engineering systems to the analysis of slope stability and proposing the optimum stabilization method

M.Sadeghi¹ & V.Rasouli²

ABSTRACT

In rock engineering practices, 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 interaction 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, firstly, the fully coupled model of coding the interaction matrix are reviewed. Then, RES is applied to the analysis of a plane failure risk in a rock slope for both saturated and drained situations. In order to recognize the optimum stabilization technique, three different alternatives are studied considering a safety factor of 1.5. These are: 1) reducing height of the slope by keeping the slope angle unchanged, 2) reducing the slope angle by keeping the slope height unchanged, and 3) changing both slope height and angle simultaneously. The results indicate that drainage reduces the failure risk by 25 percent. Comparing three different alternatives, the second method was chosen as the optimum stabilization technique.

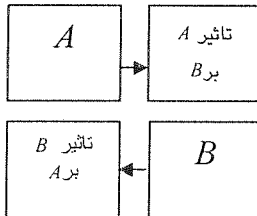
KEYWORDS

Rock Engineering System (RES), interaction matrix, slope stability

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر: masoud7882@aut.ac.ir

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

پارامترهای موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با یکدیگر بر حسب میزان آن با کدگذاری در عناصر فرعی ماتریس مشخص می‌شوند. بدین ترتیب مجموع خانه‌های سطری معرف اثری است که پارامتر موجود در آن سطر (P_i) روی دیگر پارامترها دارد و مجموع خانه‌های ستونی معرف تاثیری است که پارامتر موجود در آن ستون (P_i) از دیگر پارامترها پذیرفته است [۲].



شکل (۱): مفهوم کلی ماتریس اندرکنش [۲]

۲-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش

به منظور تفسیر سیستم‌های مهندسی سنگ، روش‌های متعددی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش ارائه شده است. کدگذاری باینری ۰ و ۱، روش نیمه کمی خیره، روش شیب خط، سلول‌های خودکار، روش انرژی، مدل تاثیر کامل دوتایی و شبکه‌های عصبی روش‌های مرسوم هستند که تاکنون برای کدگذاری ماتریس اندرکنش از آنها استفاده شده است. در این قسمت به تشریح روش مورد استفاده در مقاله می‌پردازیم.

۲-۱-۱- مدل تاثیر کامل دوتایی

اگر روابط مستقیم باینری بین متغیرها کمی و خطی باشند، تاثیر متغیر x_i روی متغیر x_j را می‌توان به صورت $x_j = k_{ij} x_i$ نشان داد. در مدل تاثیر کامل دوتایی همه مسیرهایی که x_i می‌تواند در x_j تاثیر بگذارد، شناسایی و ارزش‌گذاری می‌شود. برای مثال، تنش عمودی (σ_n) و جابجایی عمودی (d_n) را در نظر بگیرید. رابطه خطی و باینری σ_n و d_n به طور مثال به فرم $d_n = k_{\sigma_n, d_n} \sigma_n$ را می‌توان با آزمایش یک نمونه مغزه درزه دار به دست آورد؛ اما این رابطه خطی نمی‌تواند بیانگر همه آنچه در زمین اتفاق می‌افتد باشد. مسیرهای تاثیرگذاری تنش روی جابجایی عمودی می‌تواند به طور مثال به صورت {تنش - جابجایی}، {تنش - جریان آب - جابجایی}، {تنش - فشار آب - جریان آب - جابجایی} و یا به صورت حلقه برگشتی {جابجایی - تنش - فشار آب - جریان آب - جابجایی} باشد. با در نظر گرفتن همه تاثیرات بین متغیرها تاثیر کامل متغیر x_i روی متغیر x_j به صورت $x_j = G_{ij} x_i$ تعریف می‌شود. بنابراین رابطه $d_n = G_{\sigma_n, d_n} \sigma_n$ به معنی تاثیر جامع خطی σ_n

فعالیت‌های مهندسی سنگ شامل احداث فضا‌های روباز و زیرزمینی وضعیت اولیه برجای توده سنگ را مغشوش کرده و باعث ایجاد یک اندرکنش پویا بین پارامترهای توده سنگ و سازه می‌شود. با افزایش تعداد پارامترها، مدلسازی مکانیزم‌ها و مسیرهای اندرکنش پارامترها به وسیله روش‌های مرسوم و تکنیک‌های تحلیلی مشکل می‌شود. بنابراین نیاز به استفاده از روش‌های تحلیلی جدید به منظور تجزیه و تحلیل فرآیندهای پیچیده مهندسی سنگ ضروری است.

با توجه به این‌که بررسی قابلیت کاربرد روش سیستم‌های مهندسی سنگ موضوع مقاله است، در بخش بعدی با تفصیل بیشتری به معرفی این روش، نحوه کدگذاری ماتریس اندرکنش و تفسیر آن توجه شده است.

سپس به منظور تفهیم کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ، تحلیل پایداری یک شیروانی سنگی مطالعه شده است. به این منظور با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ خطرپذیری لغزش صفحه ای در یک شیروانی سنگی در دو حالت درزه سنگی اشباع و زهکشی شده تحلیل شد؛ سپس به منظور شناسایی شیوه بهینه پایداری شیروانی سه طرح مختلف به گونه ای در نظر گرفته شد که شرط پایداری با ضریب ایمنی ۱/۵ را تامین کنند. این طرح‌ها به ترتیب عبارتند از: ۱- تعدیل ارتفاع شیروانی با ثابت نگه داشتن زاویه شیروانی ۲- تعدیل زاویه شیروانی با ثابت نگه داشتن ارتفاع شیروانی ۳- تعدیل همزمان ارتفاع و زاویه شیروانی. با استفاده از تحلیل شدت اندرکنش پارامترها در سه طرح پیشنهادی، طرح دوم با کاهش ۲۸ درصدی شدت اندرکنش از حالت اولیه نسبت به دیگر طرح‌ها مزیت دارد. بنابراین، در این مقاله طرح پیشنهادی دوم شامل انجام عملیات زهکشی به منظور حذف تاثیر منفی فشار آب بر پایداری و کاهش ارتفاع شیروانی به ۲۰ متر با ثابت نگه داشتن زاویه شیروانی به عنوان گزینه بهینه معرفی شده است.

۲- سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و ماتریس

اندرکنش

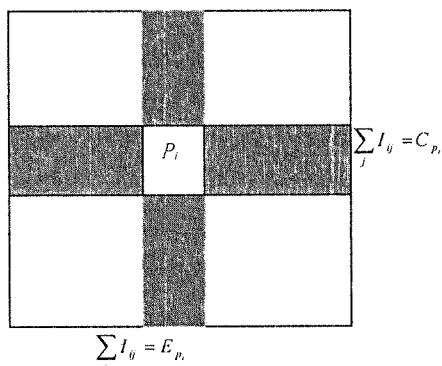
سیستم‌های مهندسی سنگ روشی است که امکان تجزیه و تحلیل همزمان روابط بین پارامترهای موثر توده سنگ، ساختگاه و سازه را دارد و آثار ناشی از اندرکنش آنها را بررسی می‌کند [۲]. در سیستم‌های مهندسی سنگ شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تاثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد (شکل ۱). در این روش،

روی d_n است. ماتریس اندرکنش کامل (G_{ij}) از روی ماتریس اندرکنش اولیه به دست می‌آید [۲].

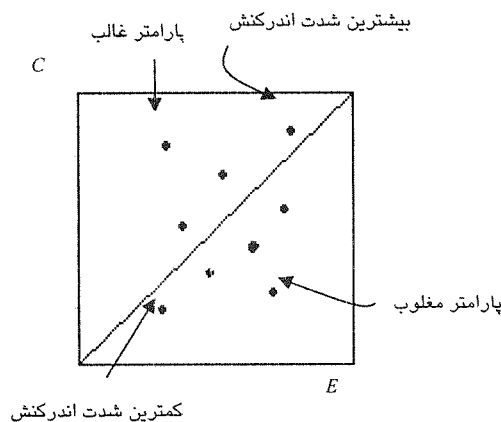
۲-۲- تفسیر ماتریس اندرکنش

در ماتریس اندرکنش اثر یک پارامتر روی سیستم، «اثر» و اثر سیستم روی پارامتر، «تاثیر» نامیده می‌شود [۲]. پارامتر P_i در ماتریس شکل (۲-الف) را در نظر بگیرید. سطر گذرنده از پارامتر P_i معرف اثر پارامتر مذکور روی همه پارامترهای سیستم و ستون گذرنده از پارامتر P_i معرف اثر پارامترهای سیستم روی پارامتر P_i است. با رسم نمودار اثر (C) در مقابل تاثیر (E) می‌توان شدت اندرکنش پارامترها و پارامترهای بحرانی را شناسایی کرد [۲]. پس از کدگذاری ماتریس در شکل (۲-الف) مقادیر اثر و تاثیر تمام پارامترها محاسبه شده و بر روی نمودار (۲-ب) رسم می‌شوند. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع ($C+E$) پارامتر بیشتر باشد، شدت اندرکنش

آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار عددی تفاضلی ($C-E$) (E) (با در نظر گرفتن علامت آن) بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور روی سیستم بیشتر خواهد بود. پارامتری که بیشترین مقدار ($C-E$) را دارد، پارامتر غالب و برعکس پارامتری که کمترین مقدار ($C-E$) را دارد، پارامتر مغلوب نامیده می‌شود. با مراجعه به نمودار $C-E$ ، می‌توان اطلاعات زیادی از وضعیت کلی سیستم بدست آورد؛ به طور مثال، چه پارامترهایی در اندرکنش بیشتر با کل سیستم بوده و به عبارتی فعال‌تر هستند؛ چه پارامترهایی غالب بوده و تغییرات آنها اثر بیشتری بر رفتار سیستم خواهد داشت، یا برعکس، کدام پارامترها مغلوب بوده و با تغییرات رفتار سیستم بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند. همچنین موقعیت اندرکنش متوسط روی خط $C=E$ ، میزان فعال بودن کل سیستم را نشان می‌دهد [۲].



(الف)



(ب)

شکل (۲): الف- مفهوم اثر و تاثیر مربوط به هر یک از پارامترها در ماتریس اندرکنش، ب- نمودار اثر - تاثیر [۲]

$$z_w = k_{z_w} z \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w b \sec \psi_p$$

$$N = W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p$$

$$T = V \cos \psi_p + W \sin \psi_p$$

در روابط فوق، W وزن بلوک سنگی، H ارتفاع شیروانی، ψ_f زاویه شیروانی، ψ_p زاویه صفحه لغزش با افق، z ارتفاع درزه کششی و z_w ارتفاع آب در درزه کششی است. مابقی پارامترها در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این مثال، مقادیر پارامترهای فوق به صورت زیر است:

۳- کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ در تحلیل

پایداری یک شیروانی سنگی

در این بخش به منظور تفهیم کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ؛ که در بخش قبل ارائه گردید، استفاده آن در تحلیل پایداری یک شیروانی سنگی مطالعه شد. هندسه یک شیب سنگی با پتانسیل لغزش صفحه‌ای و نیروهای وارد بر آن در شکل (۳) نشان داده شده است. روابط بین پارامترهای مختلف به صورت زیر می‌باشد:

$$W = \frac{\gamma_r}{2} [H^2 \cot \psi_p - H^2 \cot \psi_f - z^2 \cot \psi_p]$$

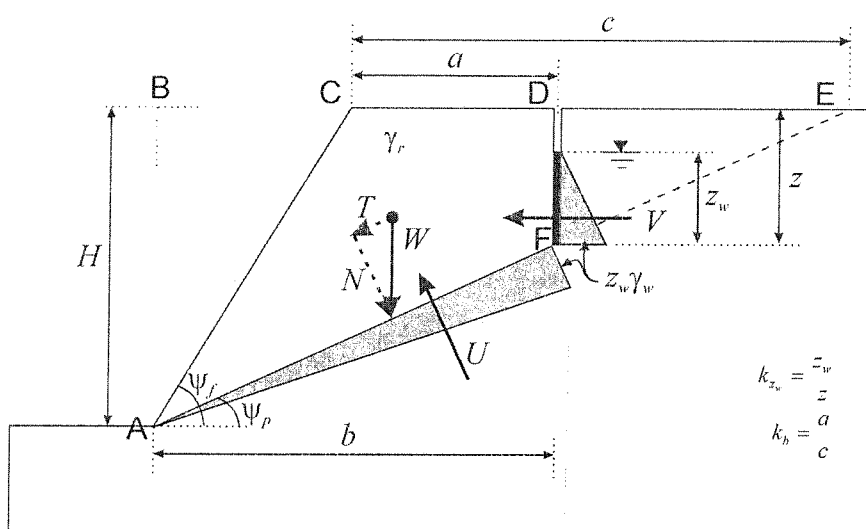
$$z = H - b \tan \psi_p$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2$$

ماتریس اندرکنش کدگذاری شده با مشتقات جزئی متناظر با این شیب سنگی در شکل (۴) نشان داده شده است [۴]. در این مثال ابتدا خطرپذیری لغزش شیروانی را در دو حالت اشباع و زهکشی شده بررسی می‌کنیم. در ادامه با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ سه طرح پایدارسازی شیروانی را ارزیابی کرده و در نهایت، طرح برتر معرفی می‌شود. ماتریس اندرکنش اولیه متناظر با این شیب سنگی در حالت اشباع در شکل (۵) نشان داده شده است. سپس با استفاده از روش مدل تاثیر کامل دوتایی، ماتریس اندرکنش کامل سیستم محاسبه شده است.

$H = 40m$
 $\psi_f = 85 \text{ deg}$
 $\psi_p = 30 \text{ deg}$
 $a = 30m$
 $z = 20.6m$
 $C_f = 0.1MPa$
 $\phi_f = 20 \text{ deg}$
 $\gamma_r = 0.026MN / m^3$

به دلیل سادگی روابط بین پارامترها از روش معادلات دیفرانسیل جزئی برای کدگذاری اولیه ماتریس اندرکنش استفاده شده است. در این روش، مشتق هر پارامتر x_i نسبت به x_j به عنوان اثر پارامتر x_j بر x_i در نظر گرفته شده است.



شکل (۳) هندسه شیروانی سنگی با لغزش صفحه ای و نیروهای وارد بر آن [۴]

H		I		$\gamma_r H (\cot \psi_p - \cot \psi_f)$				
	ψ_f			$\frac{\gamma_r}{2} H \operatorname{cosec}^2 \psi_f$				
		z		$-\gamma_r z \cot \psi_f$				
			z_w		$\gamma_r z_w$	$\frac{\gamma_r}{2} b \sec \psi_p$		
				W			$\cos \psi_p$	$\sin \psi_p$
					V		$-\sin \psi_p$	$\cos \psi_p$
						U	-1	
							N	
								T

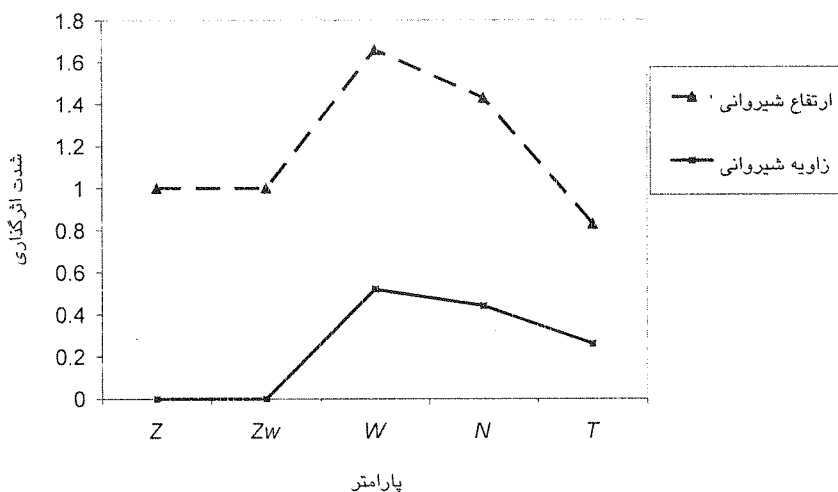
شکل (۴): ماتریس اندرکنش کدگذاری شده با مشتقات جزئی [۴]

H	.	۱	.	۱/۷	.	.	.	.
.	ψ_f	.	.	-۰/۵۲	.	.	.	.
.	.	Z	۱	-۰/۰۴۷	.	.	.	.
.	.	.	Z_{II}	.	-۰/۰۲۱	-۰/۰۲	.	.
.	.	.	.	W	.	.	۰/۱۸۶	-۰/۵
.	.	.	.	.	V	.	-۰/۱۵	۰/۱۸۶
.	.	.	.	.	.	U	-۱	.
.	.	.	.	.	.	.	N	.
.	.	.	.	.	.	.	.	T

شکل (۵): ماتریس اندرکنش اولیه متناظر با شیروانی سنگی در حالت اشباع

۱	.	۱	۱	۱/۶۶	.	.	۱/۴۲	۰/۸۲
.	۱	.	.	۰/۵۲	.	.	-۰/۴۴	-۰/۲۶
.	.	۱	۱	-۰/۰۴۷	.	.	-۰/۰۴	-۰/۰۲۲
.	.	.	۱	.	-۰/۰۲۱	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۰۲
.	.	.	.	۱	.	.	۰/۱۸۶	۰/۵
.	.	.	.	.	۱	.	-۰/۱۵	۰/۱۸۶
.	.	.	.	.	.	۱	-۱	.
.	.	.	.	.	.	.	۱	.
.	.	.	.	.	.	.	.	۱

شکل (۶): ماتریس اندرکنش تاثیر کامل دوتایی در حالت اشباع



شکل (۷): نمودار تاثیر تغییرات ارتفاع و زاویه شیب شیروانی بر دیگر پارامترها

افزایش ۱ واحد بر روی پارامترهای W ، N ، T و Z در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت اشباع، تاثیر ارتفاع شیروانی بر وزن بلوک و مولفه‌های عمودی و مماسی سطح درزه به عنوان پارامترهای موثر در پایداری شیروانی بیشتر از تاثیر زاویه بلوک است.

ماتریس اندرکنش تاثیر کامل دوتایی در شکل (۶) نشان داده شده است. به طور مثال با افزایش یک واحد ارتفاع، وزن بلوک به اندازه $1/66$ واحد و با افزایش یک واحد زاویه شیروانی، وزن بلوک به اندازه $0/52$ واحد افزایش می‌یابد. ارتفاع و زاویه شیب شیروانی از پارامترهای تحت کنترل طراح است که با تغییر هر یک از این دو پارامتر در محدوده مجاز آن می‌توان تاثیر آن را بر تغییرات دیگر پارامترها محاسبه کرد. تاثیر تغییرات ارتفاع و شیب شیروانی به ازای

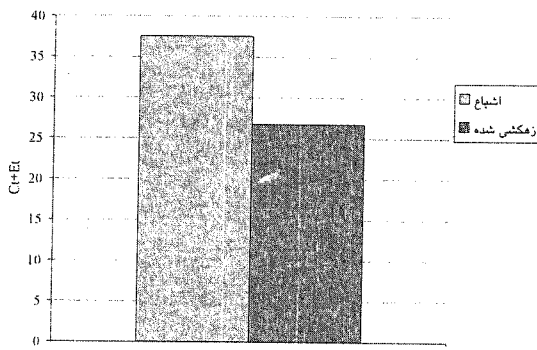
۳-۱- تاثیر عملیات زهکشی بر پایداری شیروانی

دارد؛ اما در مجموع شرط پایداری شیروانی را تامین نمی‌کند، چراکه تحت شرایطی؛ که در مثال آورده شد، مقدار ضریب ایمنی شیروانی در حالتی که درزه کششی پر از آب باشد 0.69 به دست می‌آید. با انجام عملیات زهکشی، مقدار ضریب ایمنی تنها 0.37 افزایش پیدا می‌کند که به ضریب ایمنی مورد نظر ($S.F = 1.5$) نمی‌رسد. نمودار مجموع شدت اندرکنش‌ها برای دو حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

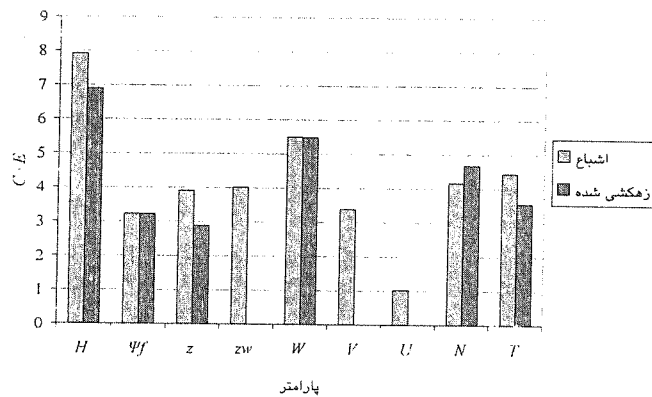
H	۰	۱	۱/۶۵	۱/۴۲	۰/۸۲
۰	ψ_f	۰	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۲۶
۰	۰	Z	-۰/۰۲۷	-۰/۰۴	-۰/۰۲۳
۰	۰	۰	W	۰/۸۶	۰/۵
۰	۰	۰	۰	N	۰
۰	۰	۰	۰	۰	T

شکل (۸): ماتریس اندرکنش کامل دوتایی در حالت زهکشی شده

با رخداد هر عملیات مهندسی در طی زمان، بایستی مجدداً ماتریس اندرکنش کدگذاری شود [۲]. با انجام عملیات زهکشی ماتریس اندرکنش به ۶ پارامتر تقلیل می‌یابد. در این حالت پارامترهای متاثر از آب درزه‌ای از ماتریس حذف شده و ماتریس اندرکنش مجدداً کدگذاری شده است (شکل ۸). نمودار ستونی $C_i + E_i$ در دو حالت اشباع و زهکشی شده در شکل (۹) آورده شده است. بر این اساس شدت اندرکنش مولفه عمودی برآیند نیروهای اعمالی بر سطح درزه در حالت زهکشی شده به علت حذف فشار آب درزه‌ای بیشتر از حالت اشباع است. شدت اندرکنش مولفه مماسی برآیند نیروهای اعمالی در حالت اشباع نیز به علت اثر افزایشی فشار آب درزه‌ای (V) بیشتر از حالت زهکشی شده است. اگر خطرپذیری لغزش را به عنوان تابعی از مجموع شدت اندرکنش کل پارامترها ($\sum C_i + E_i$) در نظر بگیریم، نتایج نشان می‌دهد خطرپذیری لغزش در حالت زهکشی شده ۲۵٪ کمتر از حالت اشباع بوده و درجه ریسک کمتری



شکل (۱۰): نمودار ستونی مجموع شدت اندرکنش کل پارامترها در دو حالت اشباع و زهکشی شده



شکل (۹): نمودار ستونی شدت اندرکنش پارامترها در دو حالت اشباع و زهکشی شده

۳-۲- ارزیابی طرح‌های پایدارسازی شیروانی

به منظور پایدارسازی شیروانی سه طرح به گونه ای در نظر گرفته شده است که شرط پایداری با ضریب ایمنی 1.5 را تامین کنند. جزئیات طرح‌های پیشنهادی در جدول (۱) آورده شده است. شدت اندرکنش کامل دوتایی پارامترها در شرایط اولیه شیروانی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

به منظور تعیین وزن هر پارامتر در پایداری شیروانی، شاخص پایداری شیب (SSI) را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$SSI = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \quad (2)$$

که در آن P_i مقدار مربوط به هر پارامتر و α_i وزن هر پارامتر است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha_i = \frac{C_i + E_i}{\sum C_i + E_i} \quad (3)$$

با توجه به روابط فوق شاخص SSI به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$SSI = 0.22H + 0.09\psi_f + 0.1Z + 0.11Z_w + 0.15W + 0.07V + 0.045U + 0.072N + 0.12T \quad (4)$$

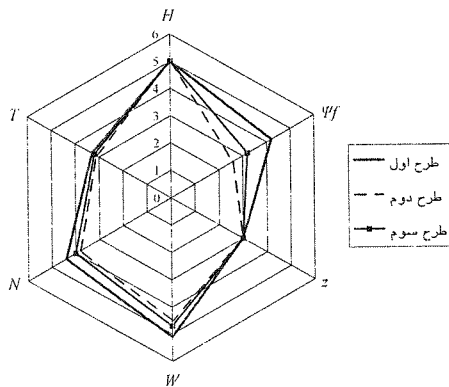
با توجه به رابطه به دست آمده پارامترهای ارتفاع شیروانی، زاویه شیروانی، وزن بلوک، ارتفاع درزه کششی، ارتفاع آب در درزه کششی و مولفه مماسی سطح درزه وزن بیشتری در پایداری سیستم دارند. این پارامترها تاثیر بیشتری بر بی‌نظمی (آنتروپی) سیستم داشته و بایستی به منظور کنترل سیستم از شدت اندرکنش آنها کاسته و پارامترهای غالب را

در این مقاله شدت اندرکنش متوسط (\bar{E}, \bar{C}) به عنوان معیار انتخاب طرح برتر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین مقدار شدت اندرکنش متوسط از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\bar{E} = \frac{\sum E_i}{n} \quad (5)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum C_i}{n}$$

اندرکنش متوسط هر یک از طرح‌های پایدارسازی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): شدت اندرکنش پارامترها در هر یک از طرح‌های پیشنهادی

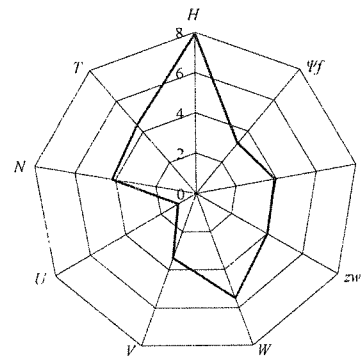
جدول (۱): جزئیات طرح‌های پایدارسازی شیروانی

طرح	توضیحات
۱	الف- ابتدا با عملیات زهکشی تاثیر منفی فشار آب بر پایداری خنثی می‌شود. ب- با ثابت نگه داشتن ارتفاع شیروانی، زاویه شیروانی به ۴۸ درجه رسانده شود.
۲	الف- همان ب- با ثابت نگه داشتن زاویه شیروانی، ارتفاع شیروانی به ۲۰ متر رسانده شود.
۳	الف- همان ب- به صورت همزمان ارتفاع به ۳۰ متر و زاویه شیروانی به ۵۸ درجه رسانده شود.

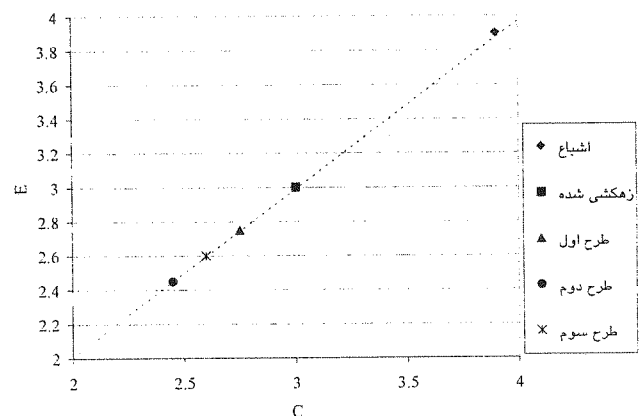
۴- نتیجه

در این مقاله، اهمیت و جایگاه سیستم‌های مهندسی سنگ به عنوان ابزاری کارآمد در تجزیه و تحلیل همزمان اندرکنش پارامترهای مختلفی که بر روی یک پروژه مهندسی سنگ تاثیرگذار هستند، بیان شد. به منظور نشان دادن کاربرد عملی این روش طی یک مثال عملی داده‌های هندسی و ژئومکانیکی متناظر با یک شیروانی به منظور تحلیل پایداری بررسی شد.

تعدیل کرد تا بی نظمی به حداقل و سیستم به شرایط پایداری برسد. شدت اندرکنش پارامترها در هر یک از طرح‌های پیشنهادی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با حذف پارامتر U, z و V از ماتریس اندرکنش در نتیجه زهکشی، شدت اندرکنش آنها به صفر می‌رسد. شدت اندرکنش زاویه شیروانی به عنوان یکی از پارامترهای موثر در طرح اول بیشترین مقدار و در طرح دوم کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت اندرکنش بقیه پارامترها تقریباً نزدیک به هم و قابل نظر کردن است.



شکل (۱۱): شدت اندرکنش کامل دوتایی پارامترها در حالت اولیه شیروانی



شکل (۱۳): اندرکنش متوسط طرح‌های پایدارسازی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود طرح دوم با کاهش ۳۸ درصدی شدت اندرکنش از حالت اولیه نسبت به دیگر طرح‌ها مزیت دارد. بنابراین طرح پیشنهادی دوم شامل انجام عملیات زهکشی به منظور حذف تاثیر منفی فشار آب بر پایداری و کاهش ارتفاع شیروانی به ۲۰ متر با ثابت نگه داشتن زاویه شیروانی به عنوان طرح بهینه پایدارسازی پیشنهاد می‌شود.

ضمن تشکیل ماتریس اندرکنش برای شیروانی مذکور در دو حالت بدون زهکشی و زهکشی شده ملاحظه شد که چگونه مجموع اندرکنش پارامترها در حالت دوم باعث کاهش پایداری شیروانی می‌شود. همچنین به منظور پایدارسازی شیروانی سه طرح کاهش ارتفاع، کاهش زاویه شیب شیروانی و تلفیق دو روش به‌عنوان گزینه‌های مهندسی در نظر گرفته شد و ضمن تفسیر ماتریس اندرکنش مشخص شد که گزینه دوم می‌تواند به‌عنوان راهکار بهینه مورد قبول واقع شود.

۵- مراجع

- [۱] Hudson, J. A., (1993) "The construction process". *Comprehensive Rock Engineering: principles, practice & projects. Vol. 2. Pergamon press, 1993.*
- [۲] Hudson, J. A.; *Rock engineering systems: theory and practice*, 1st Edition, Ellis Horwood, Chichester, 1992.
- [۳] Jiao, Y. and Hudson, J. A. ; *The fully-coupled model for rock engineering systems*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* Vol.32, p.p. 491-512, 1995.
- [۴] Millar, D. L., Jiao, Y., Arnold, P. N. and Hudson, J. A. ; *Rock engineering systems approach to risk assessment*. Rock Engineering Consultants, 7 the Quadrangle, Welwyn Garden City, Herts, AL8 6SG. Rock Engineering Group, Imperial College of Science Technology & Medicine, London, SW7 2BP, 1994