DAM AND TUNNEL CONFERENCE & EXPO همایش و نمایشگاه سد و تونل
ششمین همایش و نمایشگاه سد و تونل ایران
The 6th Dam and Tunnel Conference & Exhibition
16 - 17 February 2021
۲۸ -۲۹ بهمن‌ماه ۱۳۹۹

استفاده از روش شبکه عصبی جهت تعیین فواصل همگرایی سنج (مطالعه موردی: تونل T1 جاده جایگزین سد هراز)

مسعود قائمی ، احمد رضایی محلاتی، علی رباط‌جزی، عبدالحکیم جاوید، محمدجعفر هدایتی

چکیده

در گذشته معمولا مهندسان اجرایی ژئوتکنیک بر حسب بازدیدهای میدانی از تونل و وضعیت زمین شناسی موجود بطور سلیقه ای از همگرایی سنج به عنوان ابزار رفتارنگاری تونل استفاده می کردند. در این مقاله با بکارگیری از شبکه عصبی مصنوعی و برنامه المان مجزا، معیاری را برای فاصله بهینه بین ایستگاه‌های همگرایی سنج براساس پارامترهای ژئوتکنیکی معرفی کرد. برای ایجاد شبکه عصبی جهت برآورد فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی سنج، ابتدا داده‌ها را وارد نرم‌افزار متلب می شوند، سپس در فایل اول اطلاعات مربوط به ورودی شبکه عصبی که دارای ۵ متغیر و به تعداد ۲۵ داده طبقه بندی شده‌اند وارد می شوند. لایه ورودی متشکل از ۵ نرون که شامل ارتفاع سربار، مقاومت فشاری تک محوره، مقدار RQD ، مدول الاستسیته و مقدار RMR می‌باشد. لازم به ذکر است که خروجی این شبکه میزان فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی سنج که از نتایج جاده جایگزین سد هراز تهیه شده است، می‌باشد. بدین ترتیب برای پیش‌بینی فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی داخل تونل، پارامترهای مورد نیاز شبکه در ۱۲ مجموع داده در مسیر تونل را از محل مطالعات، وارد کرده و شبکه عصبی مقدار فواصل بهینه مورد نیاز این ایستگاه‌ها در محدوده ای که پارامترهای ژئومکانیکی وارد شده اند را پیش‌بینی می کند. برای اعتبار بخشیدن به نتایج، از برنامه المان مجزای 3DEC استفاده می‌شود. برای این مدل سازی تونل به طول ۱۶۲۸ متر مدل شده و نقاط ثبت نشست در مدل به فاصله دو متر قرار داده می‌شود. پس از انجام تحلیل‌ها، پلات‌های نشست و تغییرشکل تمام نقاط تعریف شده ، فراخوانده می‌شود و نقاطی که دارای حداکثر نشست باشد، معرفی می‌شوند و می‌توان در مورد فاصله بین نصب ایستگاه‌های همگرایی سنج بر اساس این نتایج نظر داد.

۱ – مقدمه

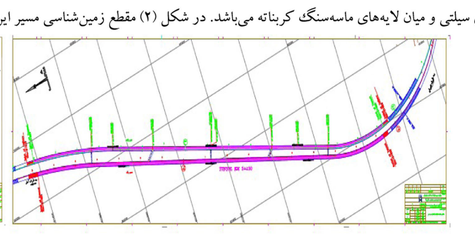
امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی و گسترش استفاده از سیستم‌های کامپیوتری در محاسبات سنگین، سیستم‌های هوشمند کامپیوتری و به طورکلی هوش مصنوعی از اهمیت روز افزونی برخوردار شده‌اند. این مقوله در علوم مختلف مهندسی از جایگاه بسیار مناسبی بهره‌مند است به گونه‌ای که در این علوم پژوهشگران و مهندسان برای حل آن‌ها با روش‌های معمول بسیار دشوار و یا حتی غیرممکن می‌باشد، رو به این شاخه علمی آورده‌اند. همگرائی سنج ابزاری است برای سنجش جابجایی نسبی نقاط سطحی سازه‌ها کاربرد دارد. این وسیله در انواع مختلف فضاهای زیرزمینی مانند : تونل ، چاه و مغار استفاده می‌شود. سیستم همگرا سنجی از دو قسمت اصلی، پین و متر همگراسنجی تشکیل شده است. در حفاری‌های زیرزمینی ، پین‌های همگراسنجی بایستی در اولین فرصت نصب شوند تا تغییر شکل سطحی ناشی از دور شدن سینه کار حفاری ، خزش زمین و یا کنش حایل بندی تعیین گردد. بسته به جنس زمین ، فاصله مقاطع می‌تواند بین ۲۵ تا ۱۰۰ متر باشد. البته در موارد خاص مانند محل عبور فضاهای زیرزمینی از نزدیکی یکدیگر (کنار یا روی هم) این فاصله می‌تواند به حدود چند متر تقلیل یابد. از مزایای روش همگراسنجی می‌توان به : سرعت ، سهولت و ارزانی نسبی در نصب نقاط اندازه‌گیری و قرائت‌های مربوطه اشاره کرد. [۴]

۲- تونل جاده جایگزین سد مخزنی هراز (T1)

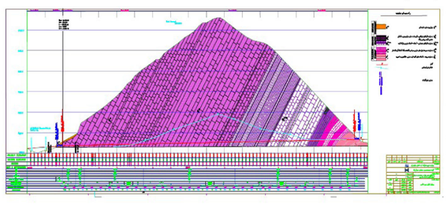
در پروژه سد مخزنی هراز به منظور احداث سد و جایگزینی جاده¬های فعلی، سیستم تونل¬های جاده جایگزین در نظر گرفته شده است. سیستم مسیرهای جاده جایگزین شامل دو رشته تونل با D شکل، راه¬ها و چهار پل می¬باشد. با توجه به شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافی خاص منطقه و وضعیت خط سنگ، احداث دو رشته تونل به عنوان گزینه برتر از لحاظ فنی و اقتصادی شناخته شده است.

۲-۱- شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل

با توجه به نقشه‌های مسیر تونل شکل(۱) تونل ها در تمامی طول مسیر، زیر سطح ایستابی قرار دارد که در حالت عادی بدلیل نفوذپذیری بسیار کم توده سنگ دربرگیرنده، نفوذ آب حداقل خواهد بود و در صورت وجود گسل‌های احتمالی و زون‌های خرد شده حاصل از آن‌ها احتمال ورود موضعی آب به داخل تونل را می‌توان پیش‌بینی نمود. از نظر سنگ چینه‌شناسی، مسیر تونل از مصالح بخش دولومیتی و آهکی می‌گذرد. این مصالح شامل تناوبی از سیلتستون،الیکا، مارن های سیلتی و میان لایه‌های ماسه‌سنگ کربناته می‌باشد. در شکل (۲) مقطع زمین‌شناسی مسیر این تونل نشان داده شده است.



شکل۱: نقشه محدوده مسیر تونل جاده جایگزین هراز



شکل۲: نقشه محدوده مسیر تونل جاده جایگزین هراز

با توجه به سطوح ناپیوستگی برداشت شده شامل لایه‌بندی و ۱ دسته‌درزه اصلی بوده است که محدوده تونل را نیز دربرمی گیرد. که مشخصات این ناپیوستگی‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات دسته‌درزه‌های تونل T1 جاده جایگزین سد هراز

Specification	Classification	J1 (%)	Bedding (%)	Consideration
Spacing(Cm)	<2			Measured Dip/Dip direction of Joints Is : J1: 66/130 BEDDING: 45/270
	2-6			
	6-20			
	20-60			
	60-200	100	100	
	200-600			
	>600			
Persistence(m)	<1	34		
	1-3	52	68	
	3-10			
	10-20	18	17	
	>20		54	
Aperture(mm)	<0.1			
	0.1-0.25	0.2	0.23	
	0.25-0.5	0.31	0.41	
	0.5-2.5			
	2.5-10			
	10-100			
	100-1000			
Infilling	Clean			
	Calcite			
	Oxide			
	Loam			
	Gypsum	2		
	Gouge			
Roughness	Smooth			
	Rough	100	100	
	Slick			

۳- پیش‌بینی فواصل ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در نحوه تهیه پیش‌بینی فواصل ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مهم‌ترین قسمت بررسی و آنالیز مجموعه داده‌های مناسب است. مجموعه داده مناسب مجموعه‌ای است که قابل اطمینان باشد، به دقت اندازه‌گیری شده باشد و یا از منابع مناسب گردآوری شده باشد، دارای تعداد پارامترهای کافی برای بررسی پیچیدگی مسئله به شکل مناسب باشد و پارامترها دارای گستردگی و توزیع مناسب در بازه خود باشند. برای تولید شبکه عصبی تخمین فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی، ابتدا داده‌ها را دو فایل اکسل جداگانه وارد نرم‌افزار متلب می‌کنیم. بدین صورت که در فایل اول داده‌های مربوط به ورودی شبکه عصبی که دارای ۵ متغیر و به تعداد ۲۵ داده دسته‌بندی شده‌اند را وارد می‌کنیم. ماتریس ورودی شبکه از ۵ فاکتور شامل خصوصیاتی است که برای پیش‌بینی فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی در تونل لازم است. این داده‌ها به همراه مقادیر حداکثر و حداقل آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر حداقل و حداکثر داده‌های ورودی شبکه عصبی

پارامتر	واحد	Min	Max
ارتفاع سربار (Z)	m	40	125
مقاومت فشاری تک محوره	MPa	31	68
RQD	%	35	70
مدول الاستسیته	(GPa)	17	54
RMR	-	30	77

در فایل دوم مقادیر هدف یعنی مقادیر نتایج فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی که مربوط به ۲۵ گروه داده می‌باشد را وارد برنامه متلب می‌کنیم. جدول (۳) مقادیر حداکثر و حداقل داده‌های خروجی شبکه را نشان می‌دهد.

جدول ۳:مقدار حداقل و حداکثر هدف شبکه عصبی

پارامتر	واحد	Min	Max
فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی	m	13	50

۳-۱- ایجاد شبکه عصبی مصنوعی

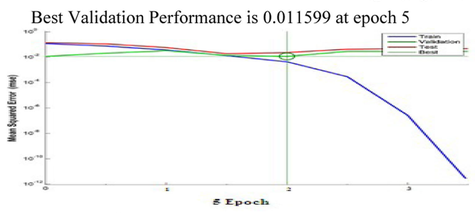
از پرکاربردترین انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه پرسپترون چندلایه که جزو شبکه‌های جدید هستند و کارایی و مزیت زیادی دارند به همراه الگوریتم لونبرگ-مارکوارت با آموزش با نظارت می‌باشد مبنای کار قرار گرفت. جهت پیاده‌سازی طرح فوق در شبکه عصبی مصنوعی از نرم‌افزار (MATLAB R2018) و جعبه‌ابزار شبکه عصبی آن استفاده گردیده است. جعبه‌ابزار این نسخه از نرم‌افزار، نسبت به نسخه‌های قبلی کاراتر و راحت‌تر می‌باشد و نیز سرعت آموزش و آنالیز نیز در این نسخه بالاتر از نسخه‌های پیشین است. در این قسمت برای رسیدن به بهترین شبکه که کمترین خطا را داشته باشد، آزمون‌های مختلفی انجام گرفته است. در شبکه پرسپترون چندلایه، با تغییر تعداد نرون‌های لایه‌های مخفی، تغییر ضریب مومنتوم، تغییر نرخ یادگیری، استفاده از توابع فعال‌ساز مختلف، تغییر تعداد دوره در روش‌های الگوریتم یادگیری پس خطا و روش گرادیان مزدوج، بهترین شبکه برگزیده شده است. لایه ورودی متشکل از ۵ نرون که شامل ارتفاع سربار، مقاومت فشاری تک محوره، RQD، مدول الاستسیته و مقدار RMR می‌باشد؛ و همچنین خروجی این شبکه میزان فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی که از نتایج تونل جاده جایگزین سد مخزنی هراز تهیه شده است می‌باشد. طبق جدول (۴) شبکه مورد استفاده در این تحقیق دارای سه لایه مخفی و لایه خروجی آن شامل یک نورون می‌باشد. لایه مخفی اول دارای تعداد ۸ نرون با تابع تانژانت سیگموئید، لایه مخفی دوم دارای تعداد ۴ نرون با تابع تانژانت سیگموئید و لایه مخفی سوم دارای تعداد ۲ نرون با تابع تانژانت سیگموئید می‌باشد. شکل (۳) مراحل شبکه عصبی مدل شده را نشان می‌دهد.

جدول ٤: مشخصات شبکه‌ی مورد استفاده

شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون	تعداد نرون لایه	تابع محرک
لایه مخفی اول	6	Tansig
لایه مخفی دوم	4	Tansig
لایه مخفی سوم	2	Tansig
لایه خروجی	1	Purelin

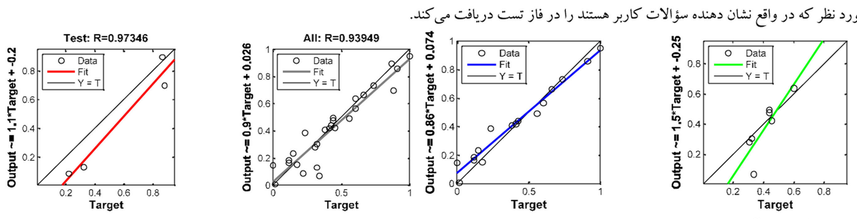
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

پس از آماده کردن شبکه مرحله بعد اجرا کردن برنامه با استفاده از نرم‌افزار متلب می‌باشد. وقتی که شبکه برای اولین بار اجرا می‌شود ممکن است نتایج مطلوب را بدست نیاورد نتایج مطلوب را بدست نیاورد اما زمانی که دوباره تکرار شود یادگیری شبکه افزایش می‌یابد. زمانی که متوسط مربعات خطا (MSE) به کمترین مقدار رسید نتیجه شبکه قابل قبول می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است آموزش در صورتی متوقف می‌شود که خطا در چند اجرای متوالی افزایش یابد. درنتیجه می‌توان گفت که نتایج شبکه قابل قبول می‌باشد.



شکل٤: خطای آموزش (Train)، اعتبارسنجی (Validation) و آزمایش (Test)

با توجه به سرعت همگرایی الگوریتم لونبرگ-مارکوارت در شبکه‌های پیشرو، از این الگوریتم جهت آموزش شبکه استفاده شده است. با توجه به شکل (۵) میزان موفقیت شبکه در آموزش داده ها برابر ۰/۹۸۴۴۳ و اعتبارسنجی برابر ۰/۸۴۷۲۶ می‌باشد. لازم به ذکر است که وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. ازاین‌رو داده‌های ورودی به شبکه نرمالایز شدند.کارایی یک شبکه عصبی در فاز تست آن تعیین می‌شود. برای این منظور، شبکه عصبی نمونه‌های مورد نظر که در واقع نشان دهنده سؤالات کاربر هستند را در فاز تست دریافت می‌کند.



شکل۶: نتایج رگرسیون تست و مجموع شبکه

شکل۵: نتایج رگرسیون آموزش و اعتبارسنجی شبکه

نمونه‌های تست فاقد خروجی هستند و شبکه عصبی باید خروجی این نمونه‌ها را تخمین بزنند. مکانیزم تست شبکه عصبی، خروجی نمونه‌های تست را با استفاده از نگاشت به دست آمده در فاز آموزش تخمین می‌زند. هرچه پاسخ شبکه برای نمونه‌های تست به پاسخ واقعی نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده این است که نگاشت تشکیل شده توسط شبکه عصبی، به نگاشت سیستم مسئله نزدیک‌تر است؛ به عبارت دیگر، میزان کارایی شبکه عصبی برای حل مسئله مورد نظر مشخص می‌شود. از شکل (۶) می‌توان برداشت کرد که شبکه در آموزش و تعمیم موفقیت داشته که توانسته داده‌های تست را با رگرسیون ۰/۹۷۳۴۶ تخمین بزند.

۳-۳- ارزیابی شبکه

برای بررسی کارایی شبکه‌ها با معماری متفاوت و مقایسه آن‌ها با هم و قضاوت در انتخاب بهترین شبکه، نیاز به معیاری است که بر اساس آن بتوان کارایی شبکه را مورد بررسی قرار داد به این منظور از مقادیر خطاها استفاده می‌شود. خطای مطلق(E_a): این خطا نشان‌دهنده مقدار خطا در کل مجموعه مورد نظر است. هر چه مقدار این خطا کمتر باشد، نشان از تفاوت کمتر بین داده‌های تخمین زده شده توسط مدل و داده‌های واقعی می‌باشد.

$$E_a = |M_B - P_B| \quad (۱)$$

که M_s میانگین مقادیر فواصل ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی اندازه‌گیری شده، P_s میانگین مقادیر فواصل ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی تخمین زده شده است. درصد خطای مطلق(E_r) که شاخص بیان کننده درصد خطا در کل مجموعه مورد نظر است برابر است با:

$$E_r = \left(\frac{|M_B - P_B|}{M_B}\right) \times 100 \quad (۲)$$

جذر متوسط مربعات خطا (RMSE): این شاخص نیز نشان دهنده متوسط خطا بین نتایج به‌دست آمده از آنالیزها و خروجی مدل‌ها می‌باشد، با این تفاوت که تمرکز بیشتری بر روی خطاهای بزرگ‌تر دارد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{N}(x_i - y_i)^2}{N}} \quad (۳)$$

که x_i ، y_i به ترتیب مقدار تخمین زده شده و مقدار واقعی اندازه‌گیری شده است و N نیز تعداد زوج داده‌های موجود می‌باشد. هرگاه مقدار خطای مقادیر واقعی و تخمین زده شده از خطای شبکه کمتر باشد، نشان از مناسب بودن معماری شبکه و مراحل آموزش آن دارد. به عبارتی بیانگر آن است که شبکه با مقدار خطای گفته شده بهترین جواب ممکن را برای مدل‌سازی تابع هدف، تخمین می‌زند.

جدول ٥: مشخصات شبکه عصبی مورد استفاده

ساختار شبکه	تابع انتقال	E_r	E_a	RMSE
6-4-2-1	T-T-T-P	0.038	0.296	0.29

۳-٤- نتایج شبکه عصبی مصنوعی

پس از آموزش، با معرفی هر بردار ورودی به شبکه، خروجی متناظر آن بدست می‌آید که مرحله بازخوانی نام دارد. لازم به ذکر اینکه آموزش شبکه تنها یک بار صورت می‌گیرد، ولی در مرحله بازخوانی می‌توان به ازای ورودی‌های مختلفی که به شبکه داده می‌شود، خروجی مطلوب را از آن دریافت نمود. مکانیزم تست یا مکانیزم فراخوانی شبکه عصبی از اطلاعاتی که مکانیزم آموزش یا الگوریتم یادگیری استخراج کرده است، استفاده نموده و به سؤالات کاربران پاسخ می‌دهد. مکانیسم تست، اطلاعات را از ساختار شبکه عصبی بازیابی می‌کند. در واقع ساختار شبکه عصبی نقش یک نوع حافظه را در این سیستم به عهده دارد. مکانیزم آموزش این حافظه را پر می‌کند و مکانیزم تست در زمان بهره‌برداری از شبکه عصبی، از اطلاعات ذخیره شده در این حافظه استفاده می‌کند.

بدین ترتیب برای پیش‌بینی فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی در تونل انتقال آب بازی‌دراز، پارامترهای مورد نیاز شبکه در ۵ مجموع داده در مسیر تونل را از محل مطالعات تونل انتقال آب بازی‌دراز وارد کرده و شبکه عصبی مقدار فواصل این ایستگاه‌ها را پیش‌بینی می‌کند.لازم به ذکر است که محدوده پیشبینی شده برای فاصله بین پین های همگرایی سنج تنها در مسیری از تونل که پارامترهای ژئومکانیکی آن ها به شبکه عصبی آموزش دیده شده، وارد می شوند قابل استفاده هستند. نتایج این پیش‌بینی در جدول (۷) و همچنین توصیف آماری پارامترهای ورودی در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ٦: توصیف آماری و نتایج تحلیل‌های آماری داده‌های ورودی از تونل جاده جایگزین هراز

		RMR	RQD		UCS	Z
N	Valid	5	5	5	5	5
Mean		30.221	40.000	15.00	50.000	100.000
Std. Deviation		38.0209	8165.	6.44	0.5	35.8248
Minimum		29.00	30.00	15.00	35.00	25.00
Maximum		75.00	80.00	80.00	80.00	130.00

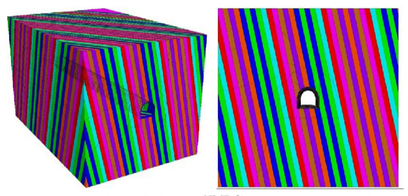
با وارد کردن مجموعه داده‌های هر زیرمجموعه به شبکه عصبی آموزش دیده، مقدار فاصله بین پین‌های همگرایی سنج در محدوده پارامتر وارد شده پیش‌بینی می‌گردد.

جدول ۷: پیش‌بینی فواصل ایستگاه‌های همگرایی‌سنجی در تونل انتقال آب بازی‌دراز

Valid N	فواصل ایستگاه‌های همگرایی سنجی	
1	11	معرفی پارامترهای Pd-1
2	25	معرفی پارامترهای Pd-2
3	33	معرفی پارامترهای Pd-3
4	38	معرفی پارامترهای Pd-4
5	58	معرفی پارامترهای Pd-5

٤- پیش‌بینی فواصل بین ایستگاه‌های همگرایی سنج با استفاده از نرم‌افزار 3DEC

به منظور ثبت جابجایی نقاط دیواره و سقف تونل با استفاده از نرم‌افزار DEC۳ ، تونل مدلسازی شده و تحلیل ها انجام می‌گیرد. در زیر به بررسی مدل ساخته شده و وضعیت پایداری پرداخته شده است. نرم‌افزار 3DEC یک برنامه سه‌بعدی است که بر اساس روش اجزاء مجزا، برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته، بکار می‌رود. اصول این نرم‌افزار مشابه نرم‌افزار دوبعدی UDEC می‌باشد. این نرم‌افزار قادر می‌باشد که محیط‌های ناپیوسته، مانند توده سنگ‌های درزه‌دار را تحت شرایط بارگذاری دینامیکی یا استاتیکی شبیه‌سازی و تحلیل نماید[۵]. پس از ساخت مدل و وارد کردن مشخصات بلوک‌ها و سطوح ناپیوستگی قبل از اینکه حفاری تونل انجام شود به نرم‌افزار اجازه داده می‌شود تا نیروها و جابجایی‌هایی که به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده‌اند بر مدل اعمال گردند تا نیروهای غیر تعادلی حذف شوند و یا به حداقل برسند. در مرحله بعد حفاری انجام می‌شود و بلوک‌هایی که فضای داخل تونل را تشکیل می‌دهند، از مدل حذف می‌شوند و بلافاصله تحلیل ادامه می‌یابد.. شکل (۷) مدل ایجاد شده درمحیط 3DEC به همراه دسته ناپیوستگی‌های مربوطه بعد از حفر تونل را نشان می‌دهد



شکل۷: مدل ایجاد شده در محیط 3DEC به همراه ناپیوستگی‌های موجود در تونل

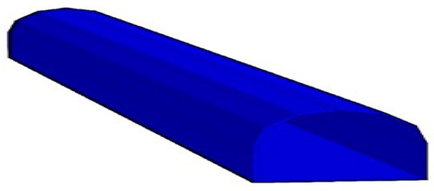
رفتار مکانیکی و شکل ظاهری توده‌سنگ متأثر از تعداد دسته‌درزه‌هایی است که همدیگر را قطع کرده‌اند. رفتار مکانیکی از این نظر تأثیر می‌پذیرد که تعداد دسته‌درزه‌ها، میزان تغییرشکل سنگ را قبل از آن که نیاز به بررسی گسیختگی بخش‌های سنگ بکر باشد، نشان می‌دهد. فواصل بین درزه‌ها نیز از عوامل مؤثر در ناپایداری توده‌های سنگی حفرشده در سنگ درزه‌دار هستند. فاصله‌داری، اندازه و شکل قطعات گسیخته شده را کنترل می‌کند.

٤-۱- مشخصات مدل ساخته شده در برنامه 3DEC

در تونل مدل شده مرز خارجی در فاصله بیش از پنج برابر شعاع تونل در نظرگرفته تا اثر زون تاثیر لحاظ گردد. معیار شکست در نظر گرفته شده مور- کولمب بوده و تنش قائم بر اساس میزان روباره و به صورت ثقلی فرض شده است. در مدل‌سازی 3DEC خصوصیات شاتکریت بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط شرکت مهندسی لحاظ شده است. مشخصات مقاومتی سیستم نگهداری پیشنهادی در جدول ۸ نشان داده شده است.

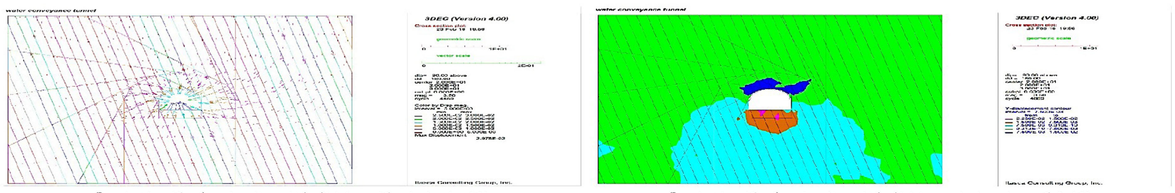
جدول ۸: خصوصیات شاتکریت

دانسیته (Kg/m^3)	E(MPa)	ν	K(MPa)	G (MPa)
2470	3.8e4	0.25	16700	12500



شکل۸: سیستم نگهداری شاتکریت مدل شده در برنامه 3DEC

در برنامه 3DEC ، تونل به طول ۴۲۰ متر مدل شده و نقاط ثبت جابجایی همانند پین‌های همگرایی در تونل به فاصله یک متر قرار داده می‌شود. پس از انجام تحلیل‌ها، پلات‌های جابجایی تمام نقاط تعریف شده، فراخوانده می‌شود و نقاطی که دارای بیشترین جابجایی باشد، معرفی می‌شوند و می‌توان در مورد فاصله بین نصب ایستگاه‌های همگرایی سنج بر اساس این نتایج نظر داد. شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب کنتورهای جابجایی و بردارهای جابجایی ایستگاه km ۰+۲۲۶ که حداکثر جابجایی در سقف و دیواره در این ایستگاه اتفاق افتاده را در پلات‌های گرفته شده نشان می‌دهد.



شکل۹: کنتورهای جابجایی در اطراف فضای حفاری‌شده (ایستگاه km ۱+۵۱۰)

شکل۱۰: جابجایی کل در اطراف فضای حفاری‌شده (ایستگاه km ۱+۵۱۰)

نتایج مدل‌سازی عددی

پس از معرفی نقاط ثبت جابجایی در فواصل یک متر به صورت سه نقطه ای همانند پین‌های همگرایی سنج، جابجایی این نقاط به صورت یک به یک بررسی شد و در نهایت نقاطی که در دیواره و سقف دارای بیشترین جابجایی بودند را بر اساس زیرواحد ها در جدول (۹) پیاده شدند. با توجه به جدول به غیر از زیرواحد Pd-1 بقیه زیرواحد ها نیاز به نصب پین‌های همگرایی بر اساس کیلومتراژ تعریف شده در جدول را دارند.

جدول ۹: حداکثر جابجایی‌های ثبت شده بر اساس زیرواحد ها در برنامه 3DEC

زیر واحد	طول زیرواحد (m)	کیلومتراژ	حداکثر جابجایی ثبت شده در 3DEC		
			دیواره راست (mm)	سقف (mm)	دیواره چپ (mm)
Pd-1	30	0+030 Km	0.77	0.97	0.54
Pd-2	67	0+067 Km	5.47	11.67	6.13
Pd-3	1048	0+0140 Km	5.15	8.30	5.35
		0+270 Km	8.25	12.82	7.03
		0+420 Km	4.56	8.78	3.70
		0+710 Km	7.30	10.14	7.42
		0+920 Km	6.31	1428	9.11
		1+115 Km	4.95	12.13	6.50
Pd-4	130	1+275 Km	7.12	11.51	6.63
Pd-5	223	1+405 Km	8.43	11.45	6.71
		1+510 Km	6.32	10.41	6.86
		1+ 628 Km	4.83	11.31	5.09

نتیجه گیری

موقعیت نصب پین‌های همگرایی سنج در پروژه‌های حفاری تونل بر اساس تجربه مهندسین لحاظ می‌شود که این تصمیم با معایبی همراه خواهد بود. پیش‌بینی فواصل مناسب پین‌های همگرایی سنج قبل از حفاری و نصب به موقع پین‌ها می‌تواند در تکمیل طراحی مهندسی تونل و انتخاب سیستم نگهداری در صورت لزوم، کمک فراوانی نماید. در این مقاله برای پیش‌بینی فواصل پین‌های همگرایی سنج از برنامه‌های شبکه عصبی مصنوعی و 3DEC استفاده گردید. داده‌های شبکه عصبی بر اساس داده‌های تونل جاده جایگزین هراز مورد استفاده قرار گرفت و شبکه عصبی آموزش دیده شده را برای پیش‌بینی فاصله بین پین‌های همگرایی سنج در تونل انحراف بازی دراز استفاده شدند. تونل جاده جایگزین هراز (T1) دارای ۵ زیرواحد می‌باشد که خصوصیات ژئومکانیکی هر زیرواحد را در شبکه عصبی وارد کرده و مقدار فاصله پین‌های همگرایی سنج پیش‌بینی گردید.برای اعتبار سنجی شبکه عصبی آموزش دیده، از برنامه 3DEC استفاده گردید. در این برنامه ۵ زیرواحد در یک مدل ساخته شده و نقاطی به فاصله یک متر در دیواره‌ها و سقف تعبیه گردید. پس از انجام تحلیل، نقاطی که بیشترین جابجایی در آن ها صورت گرفته یادداشت می‌نماییم. با مقایسه فواصل پین‌های همگرایی سنج بدست آمده در شبکه عصبی و مقادیر حداکثر جابجایی‌های ثبت شده در برنامه 3DEC می‌توان دریافت که این فواصل در هر دو برنامه دارای مقدار تقریباً مشابه هستند.

مراجع

[۱] شاهوردیلو، م، احمدی، م،(۱۳۸۸). ابزاردقیق و رفتارنگاری در مهندسی سنگ، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تربیت مدرس.

[۲] کیا، س.م (۷۱۳۰) "شبکه‌های عصبی در MATLAB "، چاپ اول، ویرایش دوم، انتشارات کیان رایانه سبز

[۳] زارعی، حامد (۱۳۹۴)؛ ارائه معیار همگرایی در تونل‌های انتقال آب (مطالعه موردی تونل انتقال آب چهل چای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی شمس ، گنبدکاووس.

[۴]Moosavi, M., Khazaei, S.(2003), Absolute deformation profile measurement in tunnels using relative convergence measurements, proceedings, 11th fig symposium on deformation measurements, santorini, Greece, 2003

[۵]Itasca Consulting Group, Inc. 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code Manual), Version 4. Minneapolis: ICG, 2007

[۶] مهندسین مشاور مهاب قدس، ۱۳۸۰،گزارش فاز صفر زمین‌شناسی مهندسی مسیرهای جاده جایگزین هراز.

[۷] شرکت مهندسی مهاب قدس، ۱۳۹۲، گزارش اولیه زمین‌شناسی مهندسی مسیرهای جاده جایگزین هراز.