مجله علمی پژوهش های کاربردی در علوم زمین (سال اول)
شماره ۱ / بهار ۱۳۹۵ / ص ۴۱- ۲۸

بررسی و انتخاب ماشین حفر تونل(TBM) مناسب بـر حسب پارامترهای ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی‌مهندسی (مطالعه موردی تونل زمستانه فریدونشهر اصفهان)

مهدی رضایی آدریانی[۱]، فریبا کارگران بافقی[۲]، محسن رضائی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی‌مهندسی، دانشگاه یزد

[۲] دکتری زمین‌شناسی، دانشگاه یزد

[۳] دانشجوی دکتری زمین‌شناسی‌مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

مهدی رضایی آدریانی

Mahdiadareani71@gmail.com

چکیده

مقاله جهت انتخاب TBM تونل زمستانه فریدون‌شهر اصفهان ارائه شده و ضمن معرفی انواع ماشین‌های حفر تونل، معیارهای زمین‌شناسی‌مهندسی و ژئوتکنیکی مؤثر بر انتخاب ماشین‌های حفار تونل اقدام به طبقه‌بندی‌مهندسی توده‌سنگ و انتخاب ماشین حفار تمام مقطع تونل شده است. در این مطالعه از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای انتخاب بهترین ماشین حفر تونل استفاده شده است. در روش AHP از دسته‌بندی ماشین‌های حفر تونل براساس نگهداری همزمان جبهه‌کار و پیرامونی استفاده شده است. همچنین ۱۴ معیار زمین‌شناسی‌مهندسی، ژئوتکنیکی و هندسی‌تونل جهت تحلیل انتخاب شد. که در پایان ماشین سپرترکیبی با وزن ۰/۳۵ در روش فازی انتخاب شد

واژگان کلیدی: تونل زمستانه- روش سلسله مراتبی- ماشین حفر تونل- TBM- AHP

مقدمه

عدم کفایت آب‌های سطحی باعث شد تا در نواحی مختلف، تلاش برای یافتن منابع دیگری جهت تهیه آب آغاز گردد. حفر چاه، قنات و انحراف آب چشمه‌ها به مناطق مورد نیاز، تمهیداتی در این زمینه بود، که با انتقال آب از حوضه‌ای به حوضه دیگر توسط تونل‌ها، امروزه وارد مرحله جدیدی شده است[۱]. در این میان، حوضه آبریز زاینده رود به عنوان یکی از مناطق کم آب ولی پر مصرف، همواره چشم به حوضه‌های پر آب اطراف همانند حوضه آبریز کارون و دز داشته تا با استفاده از آن‌ها بخشی از کمبود آب را در محدوده مرکزی ایران جبران نماید. تونل زمستانه به منظور انتقال آب از حوضه دز به حوضه زاینده رود در حال مطالعه می‌باشد[۲]. برای حفر تونل روش های مختلفی وجود دارد که یکی از این روش‌ها استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع است. در صورت استفاده از این روش باید با توجه به گستردگی این نوع از ماشین‌ها بهترین ماشین با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیکی و هندسه تونل انتخاب شود، چرا که مدت زمان پروژه و یا حتی به اتمام رسیدن و ثمر بخش بودن آن مستلزم انتخاب صحیح آن می‌باشد[۳]. برای انتخاب این ماشین‌ها(سفارش) باید تمام شرایط زمین‌شناسی‌مهندسی، ژئوتکنیکی، مکانیک سنگی و سایر عوامل مانند پارامترهای زیست محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شود. از آنجایی که تعداد معیارها برای انتخاب زیاد بوده و هر کدام نیز دارای واحد متفاوتی می‌باشند تصمیم‌گیری در این باره کاری بسیار دشوار است. در این مواقع نیاز به ابزاری قدرتمند برای انتخاب این دستگاه‌ها به چشم می‌خورد[۴]، نمونه‌ای از این ابزارها روش انتخاب فازیه سلسله مراتبی(AHP) می‌باشد که در این مقاله با استفاده از این روش TBM مناسب جهت حفر تونل زمستانه فریدون شهر انتخاب خواهد شد.

۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات هندسی تونل:

از نظر جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین مختصات جغرافیایی $49^{\circ}\ 8'$ تا $50^{\circ}\ 2'$ طول شرقی و $32^{\circ}\ 6'\ 9"$ تا $32^{\circ}\ 9'\ 5"$ عرض شمالی قرار گرفته است. مختصات ورودی مسیر تونل منتخب $49^{\circ}\ 9'\ 3"$ طول شرقی و $32^{\circ}\ 8'\ 1"$ عرض شمالی است. همچنین خروجی این تونل نیز دارای مختصات جغرافیایی $49^{\circ}\ 9'\ 7"$ طول شرقی و $32^{\circ}\ 8'\ 8"$ عرض شمالی می‌باشد و تونل دارای روندی شمال-شرقی ـ جنوب‌غربی می‌باشد[۲].

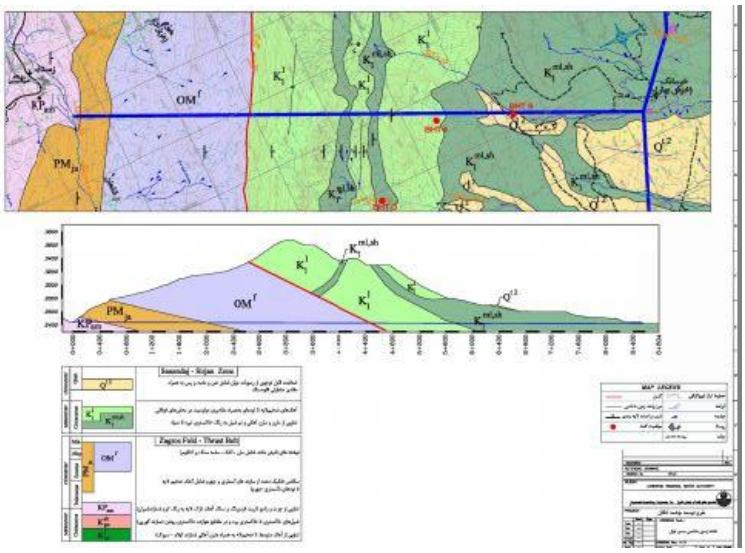
شکل۱: موقعیت جغرافیایی تونل زمستانه

تونل انتقال آب زمستانه دارای حدود ۸۶۰۰ متر طول می‌باشد و از نظر زمین‌شناسی در زون ساختاری سنندج ـ سیرجان و زاگرس بلند واقع شده است و گسل اصلی معکوس زاگرس این تونل را قطع می‌کند. قطر تمام شده تونل حدود ۳/۲ متر بوده وشکل مقطع بسته به روش حفاری دایره و یا نعل اسبی خواهد بود.

۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی محور تونل:

۲-۱- زمین‌شناسی:

قسمت ورودی تونل با بخش آهکی سازند امیران برخورد می‌کند، که بر روی آنها، آهک‌های ضخیم لایه آسماری- جهرم قرار گرفته است. این واحدهای سنگی دارای کیفیت توده سنگ خوبی بوده و سنگ میزبان مناسبی برای تونل‌زنی می‌باشند. بر روی تشکیلات آسماری– جهرم، نهشته های فیلیش مانند که مخلوطی از مارن، آهک، ماسه سنگ و کنگلومرا می‌باشند، قرار گرفته‌اند. این تشکیلات محیطی ناهمگن را به وجود آورده است و به تناوب توده سنگ‌های با کیفیت مناسب و نامناسب در مسیر تونل قرار می‌گیرند. این تشکیلات بوسیله گسل معکوس زاگرس از زون سنندج- سیرجان جدا شده‌اند. در فرادیواره گسل معکوس زاگرس، آهک و شیل و مارنهای آهکی متعلق به کرتاسه به تناوب قرار دارند. در بخش‌های آهکی، سیماهایی از توسعه کارست مشاهده می‌شود. از جمله این سیماها، چشمه‌های خدنگستان و چشمه‌لنگان می‌باشند که در محل کنتاکت آهک‌ها و شیل‌ها تخلیه می‌شوند[۲]. از نظر زمین شناسی ساختمانی، مهمترین پدیده در مسیر تونل گسل معکوس زاگرس می‌باشد که تونل را در اواسط آن قطع می‌کند و حفاری در داخل زون این گسل از چالش‌های پیش‌روی این تونل است. [۲].



شکل ۲: زمین‌شناسی محور تونل زمستانه

۲-۲- خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی محور تونل:

۲-۲-۱- مقاومت فشاری، کششی و یا برشی ماده سنگ:

۲-۲-۱-۱- مقاومت فشاری:

مقاومت فشاری را با آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری[1] مشخص خواهیم نمود. این پارامتر به دلیل مشخص نمودن میزان بار قابل تحمل سنگ های تونل در برابر فشار ناشی از جک‌های رانشی دستگاه و میزان مقاومت سنگ در برابر سر حفاری دستگاه و... دارای اهمیت می‌باشد.

[1]- UCS

جدول۲: میانگین UCS در گمانه‌های مختلف

شماره گمانه	سازند های حفاری شده	میانگین(UCS(MPA
BHT3		۹۶,۷۵
BHT4		۹۲,۳۸
BHT5		۵۸,۳۲

هرچه میزان مقاومت تراکمی افزایش پیدا کند باید از ماشین‌های حفر تونل دوسپره به سمت ماشین‌های باز حرکت کرد. پارامتر مقاومت برشی با آزمایش برش مستقیم[۲] در آزمایشگاه مشخص شده و دلیل بیان آن اهمییت این پارامتر در مشخص کردن جنس ابزار برش، نوع ماشین از نظر نوع و اندازه جک‌های رانشی و... می‌باشد. در جدول ۳-۶ میزان مقاومت برشی برای سه حفاری انجام شده در طول تونل را نشان می‌دهد که نماینده میزان این پارامتر برای وزن دهی به آن خواهد بود. (این مقاومت برشی مربوط به درزه می‌باشد)

جدول۳: میانگین مقاومت برشی مستقیم در گمانه‌های مختلف

شماره گمانه	سازند های حفاری شده	ϕ	C(Kpa)
BHT3		۳۴,۵۲	۶۱,۴۴
BHT4		۳۸,۷	۲۳
BHT5		۳۵	۳۷۰

هرچه مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها افزایش یابد باید از ماشین‌های حفر تونل دوسپره به سمت ماشین‌های باز حرکت کرد.

۲-۲-۲- شاخص کیفیت سنگ (RQD)[۳]:

در جدول ۴-۶ میزان RQD برای هر سه گمانه حفاری شده نشان داده شده است.

جدول۴: میانگین RQD در گمانه‌های مختلف

شماره گمانه	سازند های حفاری شده	RQD
BHT3		72.08
BHT4		۹1.91
BHT5		۹۰,۱

لئونارد در سال ۱۹۸۴ اظهار داشته که به عنوان قاعده ی کلی میزان RQD کمتر از ۲۵ ، زمین نرم است و استفاده از ماشین باز تنها در زمین های با RQD بالاتر از ۴۵ امکان پذیر است و در زمین هایی که RQD بین ۲۵ تا ۴۵ دارند، استفاده از روش چالزنی و انفجار توصیه می شود. در این گونه زمین‌ها مدت زمانی که باید صرف نگهداری شود زیاد است و این امر باعث افت عملکرد ماشین باز می شود و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی باشد. به اعتقاد سینها نیز، نمی توان از ماشین باز در حفر ماشین هایی با RQD بین ۲۵ تا ۴۵ استفاده کرد[۱۶] .

۲-۲-۳- درزه‌داری ناپیوستگی موجود در محل:

عامل اصلی تعیین کننده‌ی خصوصیات فیزیکی و مهندسی توده سنگ می‌باشند. عامل اصلی ناپایداری و کاهش مقاومت جبهه‌ی کار و دیواره‌های تونل بوده و موجب تسریع فرآیند هوازدگی و تاثیرات مخرب فشارآب حفره‌ای در توده سنگ می‌گردد. همچنین تعیین کننده مسیر و جهت و شدت حرکت جریان آب‌های زیر زمینی، در توده سنگ‌ها، می‌باشند. به علت خصوصیت‌های کاملا تاثیرگذار درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، بایستی بررسی مقدماتی مفصلی، قبل از شروع حفاری، در این رابطه انجام گیرد[۱۲]. از میان سایر ویژگی‌های ژئومکانیکی

[2] - Direct shear test
[3] - Rock qualety

(شامل سختی برشی و سختی نرمال سطح ناپیوستگی، مقدار زبری و اتساع سطح درزه) و نیز ویژگی‌های هندسی سطح ناپیوستگی (شامل فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، تداوم سطح ناپیوستگی‌ها، جهت‌یابی و بازشدگی سطح ناپیوستگی)، فاصله‌داری ناپیوستگی بیش‌ترین تاثیر را در انتخاب روش تونل‌سازی دارد[9].

۲-۲-۳-۱-فاصله داری[۴]:

می‌توان مهم‌ترین فاکتور برای ناپیوستگی‌ها را فاصله داری نامید زیرا که مشخص کنند قطر کفشک‌های رانشی و تعداد سپرهای دستگاه می‌باشد. بارتن در سال ۲۰۰۰ اظهار داشت در مواردی که وضعیت شکستگی و ناپیوستگی ها در توده سنگ به نحوی باشد که ناپایداری عمده در سینه‌ی کار تونل در حین عملیات حفاری ایجاد نماید و سبب ریزش بلوک های سنگی موجود در سینه کار تونل شود، امکان تشکیل حفرات بزرگ در بالای تونل وجود دارد که عبور از این شرایط تنها با به کارگیری ماشین های سپری ممکن است [۱۷]. در زمین هایی که فاصله داری ناپیوستگی های موجود کمتر از ۰,۶ باشد، ماشین های تونلزنی بدون سپر به خاطر محدودیت در بکارگیری چنگک ها ممکن است دچارمشکل شوند، این امر برای ماشین های تلسکوپی مشکلات کمتری را ایجاد می کند. چرا که اولا این ماشین چنگک های بزرگتری داشته و ثانیا این گونه ماشین ها قابلیت این را دارند تا بدون استفاده از چنگک ها به صورت یک ماشین تک سپری عمل می کنند و نیروی پیشران خود را از جک های عقبی تامین کنند[۱۳].

۲-۲-۴- همگرایی زمین[۵]:

این پدیده در سنگ‌های دارای سیمان از خانواده آرژیلات‌ها به وجود می‌آید. یکی از دشوارترین شرایط زمین شناسی مواجه با زمین همگرا شونده است. این پدیده معمولا در سنگ‌های ضعیف (از جمله میکاشیست، سنگ رس، شیل رسی و رس‌های مارنی) با روباره ی زیاد رخ می‌دهد. اگر رفتار همگرا شوندگی برای زمین پیش‌بینی شود، استفاده از ماشین سپری بایستی به دقت بازبینی شود. یک ماشین باز با سقف قابل تنظیم رایج و نگهدارنده‌های کناری انعطاف پذیری زیادی داشته و احتمال کمتری برای گیر افتادن دارد. از سوی دیگر در چنین شرایطی دیواره تونل ممکن است قادر به تحمل نیروی چنگک‌ها نباشد که در این حالت می‌توان از روش‌های موقتی دیواره از جمله صفحات پوششی(برای توزیع دیوارگیر) و یا از سیلندرهای کمکی اعمال نیروی پیشران استفاده کرد. اگر شرایط زمین‌شناسی درصد زیادی از مسیر تونل برای استفاده از ماشین تونل‌زنی باز مناسب باشد، اما اگر بخش کوچکی از مسیر تونل شرایط همگرا شونده داشته باشد استفاده از یک ماشین سپری ضروری است[۲۰]. اگرچه ماشین تک سپری به خاطر طول کمتر سپر این ماشین احتمال گیر افتادن کمتری دارد، اما این ماشین ذاتا کندتر از ماشین تلسکوپی است. علاوه بر این عکس العمل‌های نیروی فشارنده و گشتاور این سپر به لاینینگ وابسته است. از آن‌جاکه در ماشین تونل‌زنی سپری تلسکوپی عملیات نصب لاینینگ به صورت مستقل از عملیات حفاری انجام می‌شود، در نتیجه نرخ پیشروی ماشین تونل‌زنی تمام مقطع تلسکوپی بیشتر از ماشین تک سپری است و لذا در سنگ‌های با رفتار مچاله شوندگی منظم و نرخ پایین همگرایی، عملکرد ماشین تونل‌زنی تلسکوپی بهتر است[۲۱]. به دلیل وجود این گونه از سنگ‌ها در دیواره تونل زمستانه و وجود روباره زیاد(حداکثر ۱۳۰۰ متر) به خصوص که گسل اصلی زاگرس نیز در زیر این روباره زیاد قرار گرفته است، امکان وقوع این پدیده بسیار بالا خواهد بود.

۲-۲-۵- زون‌های گسلی[۶]:

زون گسلی بزرگ‌ترین و مخرب‌ترین مانع بر سر راه احداث و پایداری سازه‌های زیر زمینی، بویژه تونل‌ها، می‌باشد.بررسی‌های زمین شناسی دقیق اولیه، در تعیین مناطق گسل خوردگی، و به سبب آن، تغییر مسیر کلی تونل، امری ضروریست. اگر ماشین نوع باز بدون انجام عملیات گمانه زنی اکتشافی با این شرایط مواجه شود، شرایط ممکن است برای مقابله با این مشکل بسیار وخیم باشد. اما هنگامی که با یک ماشین سپری (تک سپر یا تلسکوپی) به یک گسل مشابه برخورد شود، اگرچه امکان ادامه حفاری وجود ندارد، ولی عملیات به‌سازی در ناحیه گسلی از داخل سپر امکان پذیر بوده و همزمان با آن ماشین ممکن است از مدفون شدن کامل محافظت شود[۱۷]. به نظر سینها زون گسلی بر اساس عرض آن به سه دسته تقسیم می‌شود. سینها معتقد است که ماشین تونل زنی باز می‌تواند از منطقه گسلی با عرض کمتر از

[4] -Spacing
[5]- Land convergence
[6] -Fault

۰/۹ متر عبور کند و در عبور از منطقه گسلی با عرض بین ۰/۹ تا ۹ متر مشکل خواهد داشت و در منطقه گسلی با عرض بیش از ۹ متر عبور ماشین غیر ممکن است[۱۶]. به دلیل وجود گسل اصلی زاگرس با عرض زون خردشده بیشتر از ۹ متر گویای این امر است که گسل اصلی زاگرس نقش تعیین کننده‌ای در انتخاب TBM تونل زمستانه دارد.

۳- انواع ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل[۷]:

ماشین های حفر تونل را می توان بر اساس پارامترهای گوناگونی مانند نوع نیروی محرکه، عملکرد دستگاه و غیره تقسیم بندی نمود که انتخاب هر کدام از این طبقه بندی ها بستگی به هدف استفاده از این نوع از ماشین ها دارد. در این مطالعه سعی شده است که ماشین های حفر تونل بر اساس عملکرد، نوع نگهدارنده ی جبهه کار و پیرامون آن و نگهدارنده همزمان پیرامونی و جبهه کار، تقسیم شوند. در این مقاله از طبقه بندی بر اساس نگهداری همزمان جبهه کار و پیرامونی تونل استفاده شده است. به دلیل سنگی بودن مسیر تونل تنها به ماشین‌های حفار تمام مقطع سنگ اشاره شده است.

جدول۵: انواع ماشین‌ها در طبقه‌بندی ماشین‌ها براساس نگهداری همزمان جبهه‌کار و پیرامون تونل

بدون انجام نگهداری همزمان	ماشین مین بیم یا تیر اصلی	G
	ماشین جدار تراش	F
نگهداری همزمان پیرامونی	ماشین سپرچنگک‌دار با جبهه‌کار باز	e
	ماشین سپر سگمنتی با جبهه‌کار باز	D
	ماشین سپر تلسکوپی	C
نگهداری همزمان جبهه‌کار و پیرامونی	ماشین سپر با نگهدارنده مکانیکی	b
	ماشین سپر ترکیبی	A

[7] - Tunell Boring Machine

۴- معیارهای انتخاب:

جدول۶: معیارهای انتخاب ماشین‌های حفر تونل

پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی	مقاومت فشاری، کششی و یا برشی ماده سنگ		A
	شاخص کیفی توده سنگ (RQD)		B
	فاصله داری ناپیوستگی موجود در محل		C
	شرایط مخاطره آمیز ژئوتکنیکی	همگرایی زمین	N
		زون های گسلی	D
		ناپایداری سینه کار تونل	F
		ناپایداری دیواره تونل	G
		هجوم آب زیر زمینی	E
		نشت گاز	H
پارامترهای هندسی تونل	قطر تونل		K
	طول تونل		J
	شیب کف تونل		L
	وجود قوس در مسیر تونل		M
	عمق تونل		I

۵- روش سلسله مراتبی(AHP)[8]

در ارزیابی هر موضوعی نیاز به معیاری برای اندازه گیری یا شاخص داریم، انتخاب شاخص مناسب به ما این امکان را می‌دهد که مقایسه درستی در بین گزینه‌های مختلف داشته باشیم. اما وقتی که چند یا چندین شاخص برای ارزیابی در نظر گرفته می‌شود، کار ارزیابی پیچیده می‌شود و پیچیدگی کار زمانی بالا می‌گیرد که معیارها از جنس‌های مختلف باشند. یکی از ابزارهای توانمند برای چنین شرایطی "فرآیند تحلیل سلسله مراتبی" یا AHP است. می‌توان گفت که توسط AHP مساله تصمیم‌گیری ابتدا ساختار داده شده و سپس گزینه‌های مختلف موجود بر اساس معیارهای مطرح در تصمیم‌گیری با هم مقایسه و اولویت انتخاب هر یک از آنها مشخص می‌شود[۲۲،10].

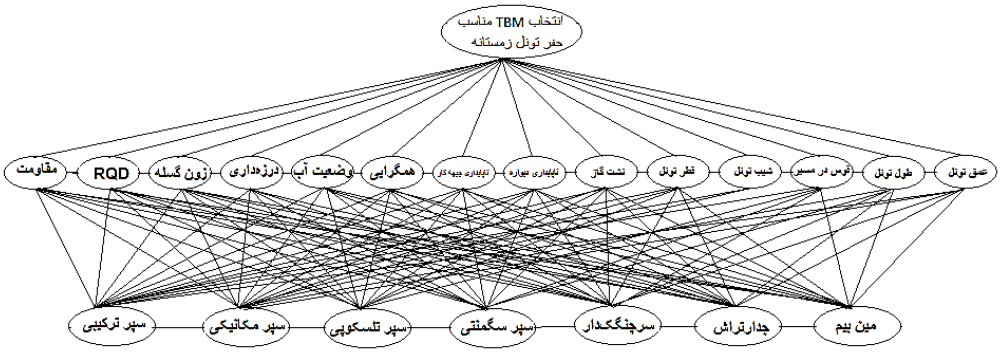
۵-۱- انجام تحلیل سلسله مراتبی

یک تحلیل سلسله مراتبی شامل مراحل زیر می‌باشد.

۵-۱-۱- نمایش گرافیکی سلسله مراتبی پروژه:

اولین قدم در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ساخت یک نمایش گرافیکی از مسئله می‌باشد که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها به ترتیب در سطرهای اول دوم وسوم قرار داده می‌شوند. شکل ۳ سلسله مراتبی مربوط به پروژه تونل نتقال آب زمستانه را نمایش می‌دهد[11].

[8]- Analytical Hierarchy process



شکل۳: نمودار سلسله مراتبی تونل زمستانه

۵-۱-۲- محاسبه وزن ها:

در فرآیند سلسله مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوط به خود در سطح بالاتر بصورت زوجی مقایسه می‌شوند و وزن آن‌ها محاسبه می‌گردد، که این وزن‌ها را وزن نسبی می‌نامیم. دراین مقایسه‌ها تصمیم گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهند نمود به گونه‌ای که اگر عنصرI با عنصرJ مقایسه شود تصمیم گیرنده خواهد گفت که اهمیت i بر j یکی از حالات زیر است[۲۳،11]:

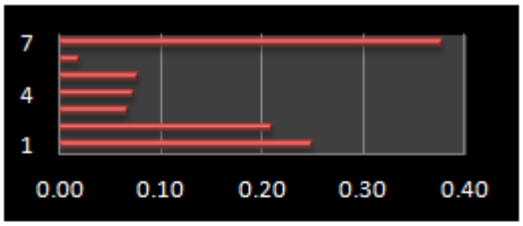
ارزش	وضعیت مقایسه i نسبت به j	توضیح
۱	ترجیح یکسان[9]	شاخص i نسبت به j اهمیت برابر دارد و یا ارجحیتی نسبت به هم ندارند.
۳	کمی برتر[10]	گزینه یا شاخص i نسبت به j کمی مهمتر است.
۵	خیلی برتر[11]	گزینه یا شاخص i نسبت به j مهمتر است.
۷	خیلی زیاد برتر[12]	گزینه i دارای ارجحیت خیلی بیشتری از j است.
۹	کاملاً برتر[13]	گزینه i از j مطلقاً مهمتر و قابل مقایسه با j نیست.
۲،۴۶، ۸	بینابین	ارزشهای بینابین را نشان می‌دهد مثلا ۸، بیانگر اهمیتی زیادتر از ۷ و پایین‌تر از ۹ برای i است.

جدول۹: مقادیر ارائه شده توسط توماس ال ساعتی[14] جهت تبدیل مقادیر کیفی به کمی[11]

۵-۱-۳- محاسبه وزن نسبی:

در این مرحله بردار ارجعیت هر کدام از گزینه‌ها نسبت به معیارهای موجود مشخص می‌شود. در جداول و نمودارهای زیر ارزش نسبی هرکدام از معیارها و گزینه‌ها مشخص شده

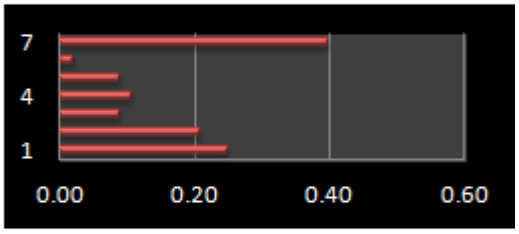
[9] - Equally Preferred
[10] - Moderately Preferred
[11] - Strongly Preferred
[12] - Very strongly Preferred
[13] - Extremely Preferred
[14] - Thomas L. Saati



شکل۴: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار مقاومت و سختی

A	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱/۵	۱/۶	۱/۷	۱/۷	۱/۹	۱/۸
b	۵	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۹	۱/۸
c	۶	۵	۱	۱/۲	۱	۱/۹	۱/۷
d	۷	۵	۲	۱	۱	۱/۹	۱/۷
e	۷	۵	۱	۱	۱	۱/۷	۱/۶
f	۹	۹	۹	۹	۷	۱	۴
g	۸	۸	۷	۷	۶	۱/۴	۱

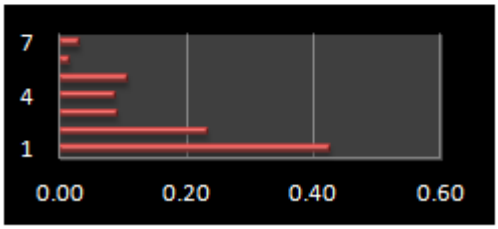
جدول ۱۰: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار مقاومت و سختی



شکل۵: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار RQD

B	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱/۴	۱/۵	۱/۶	۱/۶	۱/۲	۱/۹
b	۴	۱	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱/۹
c	۵	۴	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۹
d	۶	۴	۱	۱	۲	۱/۲	۱/۹
e	۶	۴	۱	۱/۲	۱	۱/۲	۱/۵
f	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۱/۵
g	۹	۹	۹	۹	۵	۵	۱

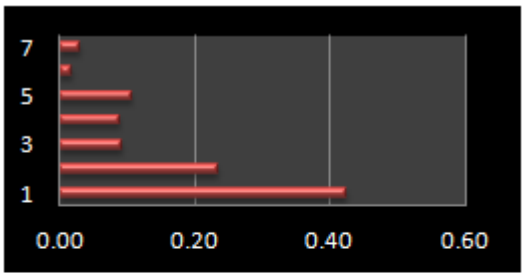
جدول ۱۱: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار RQD



شکل ۶ وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار درزه‌داری

C	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۲	۶	۶	۷	۹	۸
b	۱/۷	۱	۶	۶	۵	۹	۷
c	۱/۶	۱/۶	۱	۱	۱/۲	۹	۷
d	۱/۶	۱/۶	۱	۱	۱/۲	۹	۷
e	۱/۷	۱/۵	۲	۲	۱	۹	۶
f	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱	۱/۴
g	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۴	۱

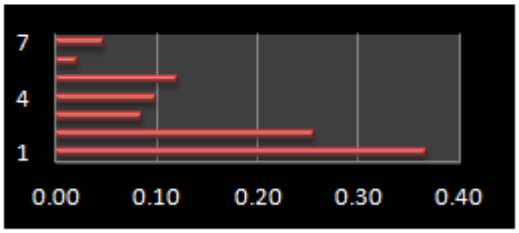
جدول ۱۲: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار درزه‌داری



شکل۷: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار زون گسله

D	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۶	۷	۷	۷	۹	۸
b	۱/۶	۱	۶	۶	۷	۹	۸
c	۱/۷	۱/۶	۱	۲	۱	۹	۷
d	۱/۷	۱/۶	۱/۲	۱	۱	۹	۷
e	۱/۷	۱/۷	۱	۱	۱	۷	۶
f	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۷	۱	۱/۴
g	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۴	۱

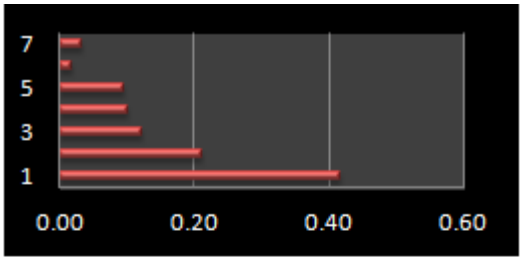
جدول ۱۳: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار زون گسله



شکل۸: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار آب‌های زیرزمینی

E	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۵	۶	۶	۶	۷	۶
b	۱/۵	۱	۴	۴	۵	۷	۶
c	۱/۶	۱/۴	۱	۱/۲	۱/۳	۷	۵
d	۱/۶	۱/۴	۲	۱	۱/۳	۷	۵
e	۱/۶	۱/۵	۳	۳	۱	۵	۴
f	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱	۱/۶
g	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۶	۱

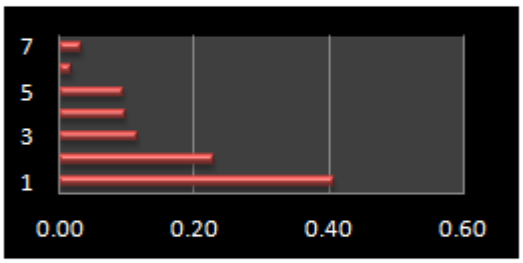
جدول ۱۴: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار آب‌های زیرزمینی



شکل۹: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار ناپایداری سینه‌کار

F	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۰	۰	۶	۶	۹	۸
b	۱/۰	۱	۳	۴	۴	۹	۸
c	۱/۰	۱/۳	۱	۲	۱	۹	۷
d	۱/۶	۱/۴	۱/۲	۱	۱	۹	۷
e	۱/۶	۱/۴	۱	۱	۱	۷	۶
f	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۷	۱	۱/۴
g	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۴	۱

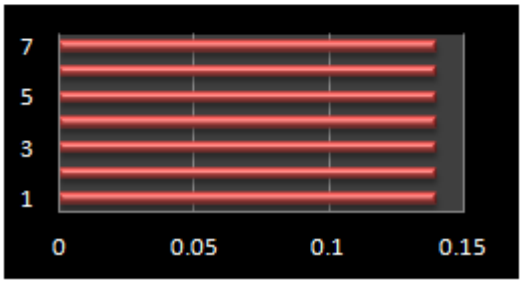
جدول ۱۵: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار ناپایداری سینه‌کار



شکل۱۰: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار ناپایداری دیواره

G	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۴	۰	۶	۶	۹	۸
b	۱/۴	۱	۴	۴	۴	۹	۸
c	۱/۰	۱/۴	۱	۲	۱	۹	۷
d	۱/۶	۱/۴	۱/۲	۱	۱	۹	۷
e	۱/۶	۱/۴	۱	۱	۱	۷	۶
f	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۷	۱	۱/۴
g	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۴	۱

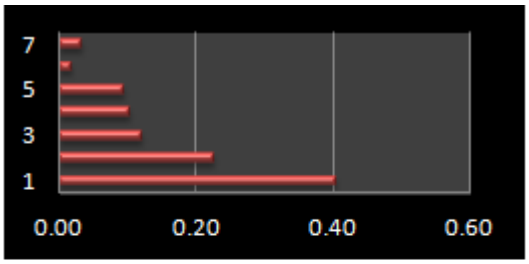
جدول ۱۶: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار ناپایداری دیواره



شکل۱۱: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار نشت گاز

H	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
b	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
c	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
d	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
e	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
f	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
g	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

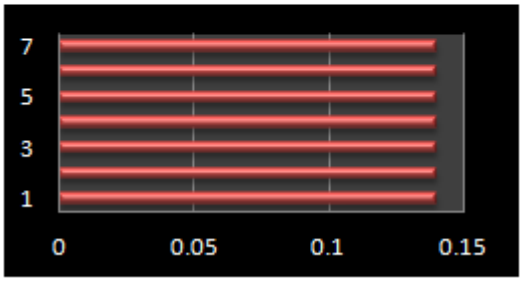
جدول ۱۷: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار نشت گاز



شکل۱۲: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار عمق تونل

I	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
b	۱/۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
c	۱/۱	۱/۱	۱	۱	۱	۱	۱
d	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱	۱	۱	۱
e	۱/۱	۱/۱	۱	۱	۱	۱	۱
f	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱	۱/۱
g	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱	۱

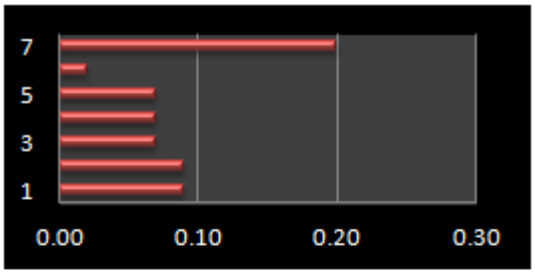
جدول ۱۸: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار عمق تونل



شکل۱۳: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار طول تونل

J	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
b	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
c	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
d	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
e	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
f	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
g	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

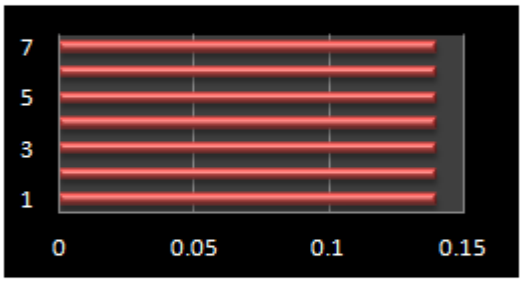
جدول ۱۹: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار طول تونل



شکل۱۴: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار قطر تونل

K	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱/۳	۱/٤	۱/٥	۱/٥	۱/۷	۱/۹
b	۳	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۷	۱/٦
c	٤	۳	۱	۲	۲	۱/۷	۱/٥
d	٥	۳	۱/۲	۱	۳	۱/۷	۱/۹
e	٥	۳	۱/۲	۱/۳	۱	۱/٥	۱/۹
f	۷	۷	۷	۷	٥	۱	٦
g	۹	٦	٥	۹	۹	۱/٦	۱

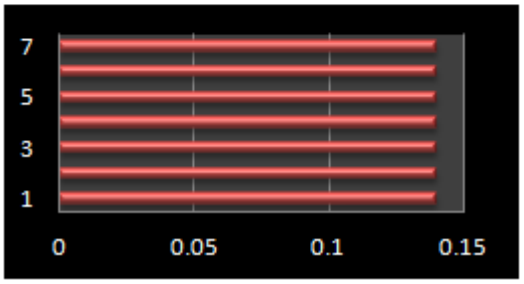
جدول ۲۰: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار قطر تونل



شکل۱۵: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار شیب کف تونل

L	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
b	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
c	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
d	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
e	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
f	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
g	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

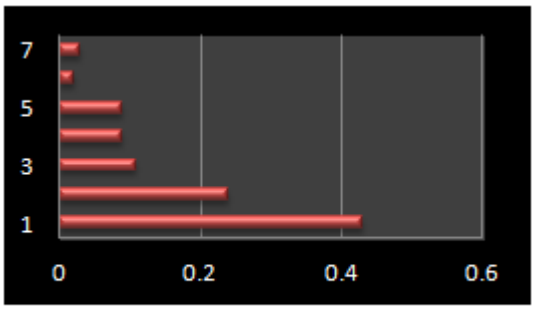
جدول ۲۱: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار شیب کف تونل



شکل۱۶: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار قوس در تونل

M	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
b	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
c	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
d	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
e	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
f	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
g	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۲۲: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار قوس در تونل



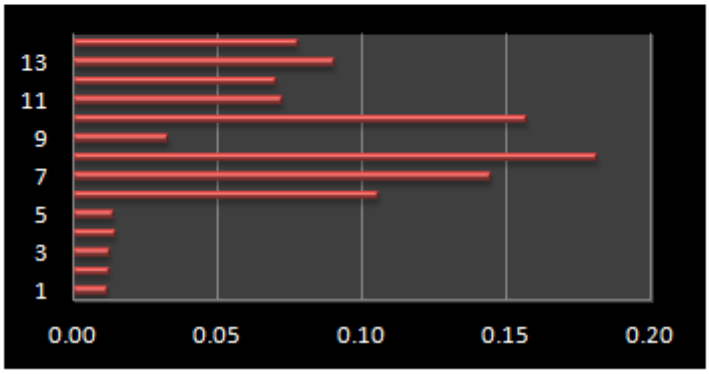
شکل۱۷: وزن نسبی ماشین‌ها براساس معیار همگرایی زمین

N	a	b	c	d	e	f	g
a	۱	٥	٦	۷	۷	۹	۸
b	۱/٥	۱	٥	٥	٥	۹	۸
c	۱/٦	۱/٥	۱	۲	۱	۹	۷
d	۱/۷	۱/٥	۱/۲	۱	۱	۹	۷
e	۱/۷	۱/٥	۱	۱	۱	۷	٦
f	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۷	۱	۱/٤
g	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/٦	٤	۱

جدول ۲۳: مقایسه زوجی ماشین‌ها براساس معیار همگرایی زمین

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	۱	۱	۱	۱/۳	۱/۲	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۶
B	۱	۱	۱	۱	۱/۲	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۶
C	۱	۱	۱	۱	۱	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۶
D	۳	۱	۱	۱	۱	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۶
E	۲	۱/۲	۱	۱	۱	۱/۸	۱/۹	۱/۹	۱/۴	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱/۵
F	۹	۹	۹	۹	۸	۱	۱/۵	۱/۵	۶	۱/۵	۲	۲	۲	۲
G	۹	۹	۹	۹	۱/۹	۵	۱	۱	۷	۱	۳	۲	۲	۲
H	۹	۹	۹	۱/۹	۹	۵	۱	۱	۷	۵	۳	۲	۲	۳
I	۵	۵	۱/۵	۵	۴	۱/۶	۱/۷	۱/۷	۱	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۴
J	۹	۱/۹	۹	۹	۹	۵	۱	۱/۵	۷	۱	۳	۴	۴	۳
K	۷	۷	۷	۷	۷	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۵	۱/۳	۱	۱	۱/۳	۱/۲
L	۱/۷	۷	۷	۷	۷	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۵	۱/۴	۱	۱	۱/۲	۱/۲
M	۶	۶	۶	۶	۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۴	۱/۴	۳	۲	۱	۲
N	۶	۶	۶	۶	۵	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۴	۱/۳	۲	۲	۱/۲	۱

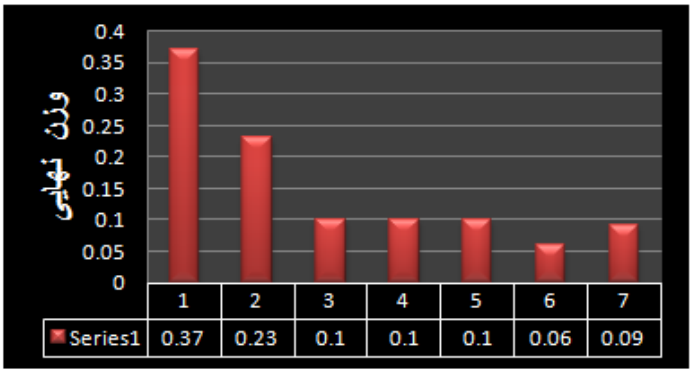
جدول۲۴: مقایسه زوجی معیارها با یک‌دیگر



شکل۱۸: مقایسه زوجی معیارها با یک‌دیگر

۵-۱-۴- محاسبه وزن نهایی:

از آنجا که وزن معیارها منعکس کننده اهمیت آن‌ها در تعیین هدف بوده و وزن هر گزینه نسبت به معیارها سهم آن گزینه در معیار مربوطه می‌باشد به سهولت می‌توان گفت که وزن نهایی هر گزینه از مجموع حاصل ضرب وزن هر معیار در وزن گزینه مربوطه از آن معیار بدست می‌آید. با محاسبه وزن نسبی برای تک تک معیار و ماشین‌ها براساس دستورالعمل روش سلسله مراتبی اقدام به محاسبه وزن نهایی ماشین‌ها شد که نتیجه را می‌توان به صورت نمودار زیر نمایش داد.



شکل۱۹: وزن نهایی ماشین‌ها در پایان تحلیل سلسله مراتبی

۶- نتیجه‌گیری:

یکی از اساسی‌ترین مسائل تونل‌زنی مکانیزه به خصوص تونل‌زنی با استفاده از TBMها انتخاب نوع ماشین است. برای انتخاب راه‌های متنوعی وجود دارد که از جمله بهترین آن‌ها روش AHP می‌باشد. انتخاب ماشین حفر تونل مناسب برای حفر تونل انتقال آب زمستانه با استفاده از نرم افزار اکسپرت‌چویس۱۱ بر پایه‌روش AHP انجام گرفت. در روش فازی AHP از دسته‌بندی ماشین‌های حفر تونل براساس نگهداری همزمان جبهه‌کار و دیواره تونل استفاده شده است. ماشین‌های سپر ترکیبی، ماشین سپر با نگهدارنده مکانیکی، ماشین سپر تلسکوپی، ماشین سپرسگمنتی، ماشین سر چنگک‌دار، ماشین جدار تراش و ماشین مین بیم یا تیر اصلی که در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی شرکت داده شده‌اند به ترتیب وزن‌های مطلق ۰/۰،۲۱/۳۵ ،۰/۰،۱/۰،۱/۱، ۰/۰،۰/۰۶ و ۰/۰۹ را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین ماشین حفر تونل مناسب جهت حفر قطعه شمال شرقی تونل زمستانه ماشین سپر ترکیبی با وزن مطلق ۰/۳۵ می‌باشد.

نتایج دیگر به دست آمده از این تحلیل:

۱- از بین سه دسته معیار زمین‌شناسی‌مهندسی، ژئوتکنیکی و هندسی تونل دو دسته معیار زمین‌شناسی‌مهندسی و ژئوتکنیکی دارای اهمیت بیشتری می‌باشند، زیرا که مواد زمین‌شناسی به عنوان میزبان تونل و مصالح اصلی ساخت تونل قلمداد می‌گردند.

۲- دلیل برتری TBMهای دوسپره نسبت به نوع تک‌سپره در سرعت بالاتر و پایداری بیشتر در شرایط مخاطره آمیز ژئوتکنیکی می‌باشد اگر چه که هزینه خرید و آماده سازی نوع دوسپره بالاتر می‌باشد ولی به دلیل سریع‌تر شدن عملیات حفاری وکاهش زمان انجام پروژه نه تنها باعث جبران این هزینه اضافی می‌شود بلکه موجب سودآوری در مدت زمان حفاری طولانی‌تر نیز خواهد شد.

۳- اگر چه TBMهای تک سپره نسبت به نوع دو سپره دارای طول سپر کوتاه‌تری هستند وبرای حفاری در زمین‌های همگرا شونده مناسب‌تر است ولی به دلیل سرعت پایین این دستگاه‌ها احتمال گیرکردن سپر در مواجه با این شرایط زمین‌شناسی بالا است.

۴- اگرچه درصد مشارکت زون گسله گسل اصلی زاگرس نسبت به دو سازند K_1^1 و $K_1^{ml,sh}$ ناچیز است، ولی نقش تاثیرگذار اصلی را در انتخاب نوع TBM ایفا می‌کند. چرا که این معیار تاثیر مستقیم بر فشار آب منفذی، ناپایداری دیواره و جبهه‌کار تونل، RQD، هوازدگی ماده سنگ و درزه‌های تونل و... دارد.

۵- از بین معیارهای مورد استفاده برای انتخاب دستگاه ۴ معیار زون گسله، آب‌های زیرزمینی، وضعیت درزه‌داری و همگرایی زمین مهم‌تر می‌باشند، زیرا باعث بالا بردن ریسک هزینه و زمان در پروژه و کاهش پایداری تونل می‌شوند.

۶- معیارهای زون گسله، آب‌های زیرزمینی، وضعیت درزه‌داری، همگرایی زمین، ناپایداری دیواره، ناپایداری جبهه کار و عمق تونل نوع TBM را به سمت دوسپره حرکت می‌دهد.

۷- معیارهای مقاومت وسختی، RQD و قطر تونل نوع TBM را به سمت نوع باز حرکت دادند.

۸- معیارهای نشت گاز، طول تونل، وجود قوس در مسیر تونل و شیب کف تونل تاثیری در انتخاب ماشین ندارند که دلیل آن را می‌توان اجرایی بودن این پارامترها دانست.

.

منابع و مراجع

[۱] رنجبر، م، مهدی نژاد نوری، ع ، خادمی حمیدی، ج، ۱۳۹۰،نقش پارامترهای زمین شناسی و مخاطرات ژئوتکنیکی در انتخاب ماشین تونل زنی، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل

[۲] شرکت مهندسین مشاور زایند آب، تهیه اسناد تونل زمستانه فریدون شهر – گزارش مقدماتی، ۱۳۹۲

[۳] افتخاری، م ، باغبانان، ع، باقر پور، ر، ۱۳۹۱، بررسی تاثیر پارامترهای اجرایی TBM بر نرخ نفوذ آن با استفاده از روش شبکه های عصبی مصنوعی، مطالعه موردی تونل بلند زاگرس، نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

[4] shang, et al., A case history of tunnel boring machine jamming in an inter layer shear zone at the yellow River Diversion project in china, 2004.

[۵] صالحی، مهندس بهرام، فن تونل زنی با TBM ، انتشارات صانعی، ۱۳۸۶.

[۶] ۶-کولونل،اتیس،ویلیامز. مهندسی و طراحی تونل و شفت در سنگ، دکتر حسین صالح زاده، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، ۱۳۸۸

[۷] وتوکوری، وی.اس.ک. کاتسویاما، درامدی بر مکانیک سنگ، محمد فاروق حسینی، نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۸۷

[۸] مرتضی.کرمی، لهراسب. فرامرزی، راحب. باقرپور" بررسی تاثیر عوامل زمین شناسی و خصوصیات ژیومکانیکی توده سنگ بر انتخاب ماشین حفاری تمام مقطع در تونل انتقال آب سبزکوه" نشریه زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، شماره۲، دوره ۸، صفحات ۲۱۹۴- ۲۱۶۹، ۱۳۹۳.

[9] Barton N., TBM tunneling in Jointed and faulted rock. Balkema, Brookfield, 2000.

[۱۰]قدسی‌پور، سید حسن، " مباحثی در تصمیم‌گیری چند معیاره "، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، چاپ سوم، ۱۳۸۱.

[11] Panou, K.D. and Sofianos, A.I. (۲۰۰۲) “ fuzzy multicriteria evaluation system for the assessment of tunnels visa`-vis surface roads: theoretical aspects -part I” In Tunnelling and Underground Space Technology, ۱۷ :۱۹۵–۲۰۷