

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

11.11.11

۱۳۸۷/۱۰/۲۷  
۱۳۸۷/۱۰/۲۷



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی معدن

پایان نامه تخصصی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن - گرایش مکانیک سنگ

## استفاده از ویژگی‌های توده سنگ در تخمین نرخ نفوذ TBM

مطالعه موردی: تونل انتقال آب نوسود

استاد راهنما:

دکتر حسین توکلی

مؤلف:

عمار گلین مقدم

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۲۷

تیر ۱۳۸۷

اطلاعات درج شده  
تسبیح

(ب)

۱۱۰۸۷۸



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی معدن  
دانشکده فنی و مهندسی  
دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: عمار گلین مقدم

استاد راهنما:  
دکتر حسین توکلی

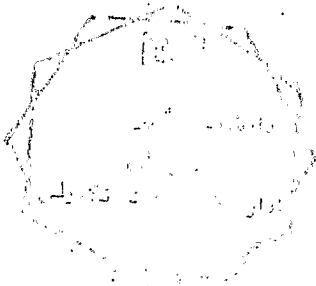
داور ۱: دکتر رضا رحمان نژاد

داور ۲: دکتر محمد حسین باقری پور

داور ۳:

تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: آقای دکتر منصوری

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است.



(ج)

پیشتر به  
پر و مادر مهربان و فداکارم  
که کفایت سهولت میدبخش  
کلامت سنه آرا مشرب بخش  
و کلمات سر مشق من  
در زنگیم لجه و خلابه

## تشکر و تدر دانی

اکنون که به فضل الهی نگارش این پایان نامه پایان یافته است، بر خود لازم می دانم از دکتر حسین توکلی به واسطه راهنمایی ها و مساعدتشان، قدر دانی نمایم.

از مهندس علی شریف دینی مدیر عامل محترم موسسه مهندسی رهاب و مهندس سیامک افشین سرپرست کارگاه از گله که امکان انجام این پایان نامه را فراهم نمودند، کمال سپاسگزاری را دارم.

همچنین از دوستان عزیزم مهندس فرهاد داوودیان، مهندس مهدی زارع و مهندس روح الله گلین مقدم به واسطه حضور سبزشان، کمال تشکر را دارم.

از پدر و مادر بزرگوار و برادران عزیزم عماد و جواد که حضور معنویشان مایه دلگرمی بود، کمال امتنان را دارم.

توفیق، رفیق راهشان باد.

## چکیده

امروزه، استفاده از ماشین حفر تونل (TBM) در پروژه‌های عمرانی، به خصوص در تونل‌های طویل، به عنوان انتخابی برتر، مورد پذیرش قرار گرفته است. علت این امر، سرعت و کیفیت بالای حفاری، کاهش اختلالات ناشی از حفاری در اطراف تونل و سطح زمین، امنیت بیشتر کارگران و... است. با توجه به سرمایه‌گذاری اولیه بالای حفاری با TBM و نیاز به زمان‌بندی جهت اتمام پروژه، پیش‌بینی عملکرد TBM ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، نرخ نفوذ TBM در چهار کیلومتر ابتدایی تونل انتقال آب نوسود با استفاده از دو روش تجربی  $Q_{TBM}$  و روش آماری رگرسیون چند متغیره خطی محاسبه شده است. در روش تجربی  $Q_{TBM}$ ، نرخ نفوذ TBM با استفاده از پارامترهای روش Q و چند پارامتر اضافی که نمایانگر برهمکنش بین ماشین و سنگ، میانگین نیروی کاتر، طبیعت ساینده سنگ و فشار وارد بر سینه کار است، محاسبه شد. با توجه به در دسترس بودن داده‌های مربوط به نرخ نفوذ واقعی برای چهار کیلومتر ابتدایی تونل، مقایسه نتایج، همبستگی ۰/۲۹ بین نرخ نفوذ واقعی و نرخ نفوذ به دست آمده از روش  $Q_{TBM}$  را نشان داد. سپس به کمک رگرسیون چند متغیره خطی، نرخ نفوذ TBM محاسبه شد. در این روش شش پارامتر مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی برزیلی، شاخص نرخ حفاری، تخلخل، فاصله داری درزه‌ها و زاویه آن‌ها با محور تونل به عنوان متغیر مستقل و نرخ نفوذ واقعی به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و به کمک نرم افزار SPSS رابطه‌ای برای نرخ نفوذ TBM بر حسب متغیرهای مستقل به دست آمد. در رابطه به دست آمده، مقاومت کششی و تخلخل حضور نداشتند که نشان‌دهنده تاثیر کم آنها روی نرخ نفوذ TBM بود. نرخ نفوذ به دست آمده از این روش همبستگی بسیار خوبی با نرخ نفوذ واقعی داشت (۰/۷۳). با استاندارد سازی ضرایب، میزان تاثیر هر پارامتر نیز به دست آمد. با توجه به عدم تغییر قابل ملاحظه شرایط زمین در ادامه تونل، رابطه بدست آمده به عنوان پیش‌بینی کننده نرخ نفوذ TBM پیشنهاد شد.

**کلمات کلیدی:** ماشین حفر تونل (TBM)، نرخ نفوذ TBM، روش  $Q_{TBM}$ ، رگرسیون چند متغیره خطی، همبستگی، تونل

انتقال آب نوسود

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول کلیات
۴	فصل دوم تونل انتقال آب نوسود
۵	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲: اهمیت و لزوم پروژه
۷	۳-۲: موقعیت جغرافیایی کلی تونل نوسود
۷	۱-۳-۲: قطعه اول تونل نوسود
۷	۲-۳-۲: قطعه دوم تونل نوسود
۸	۴-۲: مشخصات تونل
۸	۵-۲: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی
۹	۶-۲: زمین‌شناسی عمومی منطقه
۱۳	۷-۲: زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل
۱۳	۱-۷-۲: تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل
۱۳	۲-۷-۲: گسله‌ها
۱۵	۳-۷-۲: ناپیوستگی‌ها
۲۱	۴-۷-۲: پارامترهای فیزیکی و مقاومتی ماده سنگ
۲۱	۵-۷-۲: طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها
۲۵	۸-۲: نتیجه‌گیری

## فصل سوم

۲۶	رگرسیون چند متغیره خطی
۲۷	۱-۳: مقدمه
۲۸	۲-۳: مدل‌های رگرسیونی ساده
۲۹	۱-۲-۳: برآورد حداقل مربعات پارامترها
۳۱	۲-۲-۳: فواید برازش به روش حداقل مربعات
۳۲	۳-۲-۳: برآورد $\sigma^2$
۳۲	۳-۳: مدل‌های رگرسیونی چند متغیره
۳۴	۴-۳: برآورد پارامترهای مدل
۳۴	۱-۴-۳: برآورد حداقل مربعات ضرایب رگرسیون
۳۸	۲-۴-۳: تعبیر هندسی برآورد حداقل مربعات
۴۰	۳-۴-۳: خواص برآورد گرهای حداقل مربعات
۴۰	۱-۳-۴-۳: برآورد $\sigma^2$
۴۱	۵-۳: فاصله‌های اطمینان در رگرسیون چند متغیره
۴۱	۱-۵-۳: فواصل اطمینان برای ضرایب رگرسیون
۴۲	۲-۵-۳: برآورد فاصله‌ای میانگین متغیر وابسته
۴۳	۶-۳: آزمون فرض در رگرسیون چند متغیره خطی
۴۳	۱-۶-۳: آزمون معنی دار بودن رگرسیون
۴۵	۲-۶-۳: آزمون‌های مربوط به هر یک از ضرایب رگرسیون
۴۷	۷-۳: ضرایب رگرسیونی استاندارد شده
۵۰	۸-۳: شاخص‌های رگرسیونی و معیارهای مناسب مدل
۵۱	۱-۸-۳: همبستگی بین دو متغیر



۵۱	۳-۸-۲: ضریب تعیین چند متغیره
۵۳	۳-۹: معنادار بودن سطح آزمون
۵۲	۳-۱۰: روش های رگرسیونی گام به گام
۵۳	۳-۱۰-۱: انتخاب پیشرو
۵۴	۳-۱۰-۲: حذف پسرو
۵۴	۳-۱۰-۳: رگرسیون گام به گام
۵۵	۳-۱۰-۴: روش ENTER
۵۵	۳-۱۰-۵: روش REMOVE
۵۵	۳-۱۰-۶: بررسی مدل های رگرسیون
۵۶	۳-۱۰-۷: قواعد توقف در روش های گام به گام
۵۷	۳-۱۱: نتیجه گیری

## فصل چهارم

۵۸	تخمین نرخ نفوذ و پیشروی TBM با استفاده از روش QTBM
۵۹	۴-۱ مقدمه
۶۴	۴-۲: Q و QTBM
۷۴	۴-۳: نرخ نفوذ و نرخ پیشروی
۷۶	۴-۴: رابطه بین نرخ نفوذ، پیشروی و QTBM
۷۶	۴-۴-۱: تخمین زمان پیشروی
۷۷	۴-۵: تعیین ضریب بهره وری
۷۸	۴-۶: نتیجه گیری

## فصل پنجم

۸۰	تخمین نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با استفاده از روش‌های تجربی و آماری
۸۱	۱-۵ مقدمه
۸۲	۲-۵: تخمین نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با استفاده از روش $Q_{TBM}$
۸۸	۳-۵: تخمین نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با روش رگرسیون چند متغیره
۸۸	۱-۳-۵: جمع آوری داده‌ها
۸۸	۱-۱-۳-۵: ویژگی‌های سنگ بکر
۹۱	۲-۱-۳-۵: مشخصات ناپیوستگی‌ها
۹۲	۳-۱-۳-۵: اندازه گیری عملکرد TBM در تونل
۹۳	۲-۳-۵: بررسی تاثیر ویژگی‌های مهندسی سنگ در نرخ نفوذ TBM تونل نوسود
۹۵	۳-۳-۵: آنالیز پارامترهای موثر در نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با روش رگرسیونی گام به گام پیشرو
۹۷	۴-۳-۵: اعتبار سنجی مدل رگرسیونی
۹۸	۵-۳-۵: آنالیز پارامترهای موثر در نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با روش رگرسیونی ENTER
۹۹	۶-۳-۵: آنالیز پارامترهای موثر در نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با روش رگرسیونی پسرو
۱۰۱	۷-۳-۵: آنالیز پارامترهای موثر در نرخ نفوذ TBM تونل نوسود با روش رگرسیونی REMOVE
۱۰۲	۴-۵: انتخاب بهترین روش رگرسیونی
۱۰۳	۵-۵: نتیجه گیری
	<b>فصل ششم</b>
۱۰۴	نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۰۵	۱-۶: نتیجه گیری
۱۰۷	۲-۶: پیشنهادها
۱۰۹	<b>منابع</b>

# فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

۷	شکل ۱-۲: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
۳۳	شکل ۱-۳: مدل فضای رگرسیونی با دو متغیر مستقل
۳۹	شکل ۲-۳: تعبیر شهودی برآورد حداقل مربعات در فضای سه بعدی
۶۶	شکل ۱-۴: ارتباط بین $Q$ ، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی
۶۷	شکل ۲-۴: چارت برای طراحی نگهداری SFRS
۶۸	شکل ۳-۴: تاثیر نسبت $\frac{\sigma_e}{F}$ بر نرخ نفوذ TBM
۷۰	شکل ۴-۴: راست- تاثیر زاویه ناپیوستگی‌ها ( $\beta$ ) در نرخ نفوذ TBM، چپ- زاویه ناپیوستگی‌ها ( $\beta$ ) نسبت به کاتر
۷۱	شکل ۵-۴: مقدار CLI برای سنگهای مختلف
۷۱	شکل ۶-۴: رابطه CLI با عمر کاتر
۷۳	شکل ۷-۴: ارتباط بین مقدار $Q_{TBM}$ و نرخ نفوذ و پیشروی
۷۴	شکل ۸-۴: برآورد اولیه ضریب $m$ به عنوان تابعی از $Q$
۷۷	شکل ۹-۴: تغییرات نرخ نفوذ و پیشروی در برابر $Q_{TBM}$ بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از حفر ۱۴۵ تونل
۹۰	شکل ۱-۵: همبستگی بین DRI و مقاومت فشاری سنگ بکر برای کوارتز، سیلتستون و سندستون
۹۰	شکل ۲-۵: همبستگی بین DRI و مقاومت فشاری سنگ بکر برای گرانیت، گنایس، شیست
۹۱	شکل ۳-۵: مقادیر DRI برای انواع سنگ‌ها بر اساس NTH

# فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۶	جدول ۱-۲: مختصات ورودی و خروجی تونل
۱۱	جدول ۲-۲: واحدهای سنگی شناسایی شده در گستره مورد بررسی و ضخامت هر یک از آنها
۱۴	جدول ۳-۲: مجموعه‌های لیتولوژیکی مسیر تونل
۱۶	جدول ۴-۲: مشخصات ناپوستگی‌ها در کیلومتر ۴-۰
۲۲	جدول ۵-۲: نتایج آزمون‌های صحرایی جهت تعیین مقاومت تک محوره سنگ
۲۳	جدول ۶-۲: نتایج آزمایشات آزمایشگاهی
۲۴	جدول ۷-۲: نتایج طبقه‌بندی واحدهای مختلف زمین‌شناسی
۳۵	جدول ۱-۳: داده‌های مربوط به رگرسیون چند متغیره
۴۴	جدول ۲-۳: آنالیز واریانس برای معنی‌دار بودن رگرسیون در رگرسیون چند متغیره
۷۴	جدول ۱-۴: تعیین مقدار $m$ با استفاده از مقدار $Q$
۷۸	جدول ۲-۴: بدست آوردن ضریب بهره‌دهی با استفاده از روش NTH
۸۳	جدول ۱-۵: رده بندی $Q$ برای واحدهای زمین شناسی چهار کیلومتر اول تونل
۸۵	جدول ۲-۵: نتایج CLI برای نمونه‌های ارسالی به نروژ
۸۷	جدول ۳-۵: تخمین نرخ نفوذ و پیشروی با روش QTBM برای واحدهای زمین‌شناسی چهار کیلومتر اول تونل نوسود
۹۲	جدول ۴-۵: طبقه بندی کلاس ناپوستگی‌ها

- جدول ۵-۵: داده‌های ورودی برای تحلیل رگرسیونی ۹۴
- جدول ۶-۵: روابط و ضرایب همبستگی پارامترهای موثر در نرخ نفوذ TBM ۹۴
- جدول ۷-۵: تغییرات همبستگی معمولی و تعدیل یافته در مدل‌های تولید شده با روش پیشرو ۹۶
- جدول ۸-۵: مدل‌های تولید شده، ضرایب و انحراف معیار آنها، نتایج آزمون t و میزان معنادار بودن هر مدل با نرخ نفوذ واقعی با روش پیشرو ۹۷
- جدول ۹-۵: نتایج آزمون F جهت تعیین معنادار بودن همبستگی‌های به دست آمده با روش پیشرو ۹۸
- جدول ۱۰-۵: مدل‌های تولید شده، ضرایب و انحراف معیار آنها، نتایج آزمون t و میزان معنادار بودن هر مدل با نرخ نفوذ واقعی با روش ENTER ۹۹
- جدول ۱۱-۵: نتایج آزمون F جهت تعیین معنادار بودن همبستگی‌های به دست آمده با روش ENTER ۹۹
- جدول ۱۲-۵: مدل‌های تولید شده، ضرایب و انحراف معیار آنها، نتایج آزمون t و میزان معنادار بودن هر مدل با نرخ نفوذ واقعی با روش پسرو ۱۰۰
- جدول ۱۳-۵: تغییرات همبستگی معمولی و تعدیل یافته در مدل‌های تولید شده با روش پسرو ۱۰۱
- جدول ۱۴-۵: نتایج آزمون F جهت تعیین معنادار بودن همبستگی‌های به دست آمده ۱۰۱
- جدول ۱۵-۵: مدل‌های تولید شده، ضرایب و انحراف معیار آنها، نتایج آزمون t و میزان معنادار بودن هر مدل با نرخ نفوذ واقعی با روش REMOVE ۱۰۲

## علام

AR	نرخ پیشروی
BTS	مقاومت کششی برزیلی
CLI	اندیس عمر کاتر
DPW	فاصله بین ناپیوستگی‌ها
DRI	شاخص نرخ حفاری
F	نیروی کاتر
GSI	شاخص مقاومت زمین شناسی
$J_a$	شاخص هوازدگی درزه‌ها
$J_n$	ضریب دسته درزه
$J_r$	فاکتور زبری درزه
$J_w$	فاکتور کاهش درزه
k	نسبت تنش افقی به قائم
L	طول کل مغزه
m	شیب منفی زمان
n	تخلخل
Q	طبقه بندی کیفی توده سنگ
q	درصد کوارتز
RQD	شاخص کیفی سنگ
$RQD_0$	شاخص کیفی سنگ در راستای تونل
R	همبستگی

$R^2$	ضریب تعیین چند گانه
RMi	اندیس توده سنگ
RMR	طبقه بندی ژئومکانیکی سنگ
RSR	امتیاز ساختاری سنگ
SRF	ضریب کاهش تنش
TBM	ماشین حفر تونل
U	ضریب بهره وری
UCS	مقاومت فشاری یک محوره
$\delta$	زاویه محور تونل و ناپیوستگی‌ها
$\gamma$	چگالی توده سنگ
$\sigma_{cm}$	مقاومت فشاری توده سنگ
$\sigma_{tm}$	مقاومت کششی توده سنگ
$\sigma_{\theta}$	تنش القایی وارد بر سینه کار

فصل اول

کلیات



امروزه، استفاده از ماشین حفر تونل<sup>۱</sup> (TBM) در پروژه های عمرانی، به خصوص در تونل های طویل، به عنوان انتخابی برتر، مورد پذیرش قرار گرفته است. علت این امر، سرعت و کیفیت بالای حفاری، کاهش اختلالات ناشی از حفاری در اطراف تونل و سطح زمین، امنیت بیشتر کارگران و... است [۱]. با توجه به سرمایه گذاری اولیه بالای حفاری با TBM و نیاز به زمان بندی جهت اتمام پروژه، پیش بینی عملکرد TBM ضروری به نظر می رسد. از زمانی که اولین TBM ساخته شد، آنالیز عملکرد ماشین و بهبود مدل های پیش بینی هدف نهایی بیشتر محققان بوده است [۲].

در این تحقیق، نرخ نفوذ TBM با استفاده از دو روش تجربی  $Q_{TBM}$  و روش آماری رگرسیون چند متغیره خطی برای تونل انتقال آب نوسود پیش بینی شده و نتایج حاصل با داده های واقعی مقایسه می شود. و روش مناسب جهت پیش بینی نرخ نفوذ TBM پیشنهاد می شود.

در فصل دوم ضرورت طرح توضیح داده شده و منطقه مورد مطالعه از لحاظ موقعیت جغرافیایی، زمین شناسی عمومی و مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش منطقه مورد مطالعه به واحدهای زمین شناسی متفاوتی تقسیم شده و ویژگی های سنگ بکر، گسله ها و ناپوستگی ها در این واحدها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نتایج مطالعات آزمایشگاهی و

---

1 - Tunnel Boring Machine

صحرائی مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان توده‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های  $RQR$ ،  $GSI$ ،  $Q$ ،  $RMR$ ،  $RMi$  و  $RSR$  طبقه‌بندی شده‌اند.

در فصل سوم، روش آماری تحلیل رگرسیونی خطی توضیح داده می‌شود. بدین منظور ابتدا رگرسیون یک متغیره خطی بررسی شده و معادلات آن ذکر شده است. سپس مدل رگرسیون چند متغیره خطی توضیح داده شده و روش به دست آوردن پارامترهای مدل به همراه معادلات مرتبط با آن آورده شده است. در ادامه میزان معناداری روش‌های رگرسیونی به کمک آزمون فرض‌ها توضیح داده می‌شود. در پایان این فصل انواع روش‌های رگرسیونی چند متغیره خطی توضیح داده می‌شود.

در فصل چهار بعد از اشاره‌ای کوتاه به انواع روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ  $TBM$ ، پیش‌بینی نرخ نفوذ  $TBM$  با استفاده از روش  $QTBM$  توضیح داده می‌شود. در ادامه فاکتور بهره‌وری و پارامترهای موثر بر آن توضیح داده شده و روش به دست آوردن نرخ پیشروی  $TBM$  مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل پنجم ابتدا نرخ نفوذ  $TBM$  در ۴ کیلومتر ابتدایی تونل انتقال آب نوسود توسط روش  $QTBM$  محاسبه می‌شود. سپس نرخ نفوذ  $TBM$  به کمک انواع روش‌های رگرسیونی چند متغیره خطی و به کمک نرم افزار  $SPSS$  محاسبه می‌شود. برای هر روش میزان همبستگی و آماره‌هایی که معناداری مدل را تعیین می‌کنند، محاسبه می‌شود. در پایان نتایج حاصل از این دو روش با نرخ نفوذ واقعی  $TBM$  مقایسه شده و رابطه‌ای جهت تخمین نرخ نفوذ  $TBM$  پیشنهاد می‌شود.

در فصل ششم نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پیشنهادهایی ارائه می‌شود.

فصل دوم

تول انتقال آب نوسود

## ۲-۱: مقدمه

طرح تونل انتقال آب نوسود بخشی از طرح بزرگ تأمین آب دشت‌های گرمسیری غرب کشور است که اجرای آن امکان انحراف آب رودخانه سیروان (پنجمین رودخانه پرآب کشور) را به داخل کشور فراهم می‌نماید. طول کل مسیر انتقال آب حدود ۴۶۰ کیلومتر برآورد گردیده است. طرح تونل نوسود که حدود ۵۲ کیلومتر از کل مسیر را تشکیل می‌دهد، به دو قطعه تقسیم شده است. ورودی تونل، در قطعه اول و از لحاظ جغرافیایی در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان پاوه از توابع استان کرمانشاه و در محل روستای هیروی واقع شده است. خروجی تونل، در قطعه دوم و در مجاورت روستای ازگله در ۶۰ کیلومتری شمال شهرستان سرپل‌ذهاب قرار گرفته است. تونل نوسود با مقطع دایره‌ای با قطر حفاری ۶/۷۳ متر، قطر نهایی ۶ متر و دبی ۷۰ متر مکعب بر ثانیه به صورت جریان آزاد (۷۰ درصد مقطع تونل) طراحی گردیده است [۳].

قطعه دوم این تونل که از رودخانه ليله تا روستای ازگله به طول ۲۶ کیلومتر می‌باشد، توسط موسسه مهندسی رهاب وابسته به قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیا و به وسیله ماشین حفار تونل با سپر دوپل<sup>۱</sup> در حال حفاری است [۴].

---

1 - Double Shield TBM