

بررسی ارتباط بین بهره‌وری ماشین حفر تونل دو سپره و سیستم امتیازدهی توده سنگ

امید لطفی؛ ابراهیم قاسمی*

دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۲

چکیده

در این مقاله ارتباط بین سیستم امتیازدهی توده سنگ (*RMR*) با بهره‌وری (*U*) ماشین حفر تونل دو سپره مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در ابتدا گزارش‌های روزانه‌ی حفاری در تونل انتقال آب نوسود (قطعه جنوبی لیله) مورد بررسی و مقدار *RMR* و تأخیرهای پروژه در سازندهای مختلف زمین‌شناسی در ۴/۵ کیلومتر از طول این تونل ثبت گردید. نتایج نشان داد که بهره‌وری کلی ماشین ۱۰ درصد و بیشترین تأخیرها مربوط به شرایط نامساعد زمین‌شناسی (*GRRD*) می‌باشد. در ادامه ارتباط بین *RMR* با *GRRD* و *U* به کمک فرم‌های گوناگون آنالیز رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. در میان روابط تجربی توسعه داده شده، بهترین روابط به منظور پیش‌بینی *GRRD* و *U* در تونل مورد مطالعه به صورت تابع چند جمله‌ای درجه دو می‌باشند. سپس با ایجاد یک پایگاه داده‌ی بزرگ‌تر شامل داده‌های شش پروژه‌ی تونل‌سازی یک مدل جامع به منظور ارزیابی بهره‌وری *TBM*‌های دو سپره ارائه شد. این مدل به فرم لگاریتمی بوده و قادر است به کمک مقادیر *RMR* تخمین اولیه‌ی *U* برای ماشین‌های *TBM* دو سپره فراهم آورد. برای این مدل، شاخص‌های آماری عملکرد یعنی ضریب تعیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*) و واریانس خطا (*VAF*) به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۰۳ و ۰/۹۱ درصد به دست آمدند. نتایج نشان داد که تمامی معادلات پیشنهاد شده در این مقاله از دقت قابل قبولی برخوردارند و می‌توانند با نرخ خطای قابل قبولی تخمین اولیه‌ی *GRRD* و *U* بر اساس مقدار *RMR* ارائه دهند.

واژگان کلیدی

ماشین حفر تونل (*TBM*)، بهره‌وری (*U*)، امتیاز توده سنگ (*RMR*)، تأخیرات مرتبط با شرایط نامساعد زمین‌شناسی (*GRRD*)، آنالیزهای رگرسیون.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین آن‌ها ضریب بهره‌وری (*U*) می‌باشد. ضریب بهره‌وری بصورت درصدی از مدت زمان حفاری به کل مدت زمان کاری تعریف می‌شود. بهره‌وری *TBM* به عواملی همچون نوع سنگ و شرایط توده‌سنگ، پارامترهای عملیاتی ماشین، جهت شیب تونل (شیب مثبت یا منفی)، محدودیت‌های عملیاتی، شرایط خاص محل احداث پروژه، عوامل مدیریتی و تجربه‌ی پیمانکار بستگی دارد [۲۰۱]. می‌توان گفت کلیه‌ی

در پروژه‌های تونلسازی با استفاده از ماشین حفر تونل تمام مقطع (*TBM*) پیش‌بینی دقیق عملکرد ماشین یکی از پارامترهای اساسی در تعیین اقتصاد پروژه است. پیش‌بینی‌های غیر دقیق می‌تواند به افزایش هزینه‌ی حفاری و گاهاً غیر اقتصادی بودن پروژه منجر شود. شاخص‌های گوناگونی برای ارزیابی عملکرد *TBM*‌های سنگ سخت ارائه شده است که

* نویسنده مسئول: e_ghasemi@cc.iut.ac.ir

بهره‌وری *TBM* های نوع باز ارائه کنند [۱۳، ۱۲]. فروغ و همکاران در سال ۲۰۱۲ با بررسی قطعه‌های ۱ و ۲ تونل انتقال آب کرج-تهران، مشخصه‌های اصلی توده سنگ و تأثیر آن‌ها بر بهره‌وری *TBM* را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. یانگیز^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۳ هفت پروژه‌ی تونل‌سازی مختلف را از منظر رابطه‌ی بین سیستم طبقه‌بندی توده سنگ *RMR* و بهره‌وری *TBM* (نوع باز و دو سپره) مورد ارزیابی قرار دادند [۱۵]. فرخ در سال ۲۰۱۲ در رساله‌ی دکترای خود با ایجاد یک پایگاه داده مشکل از ۳۱۷ پروژه‌ی تونل‌سازی در سراسر جهان توانست برای هر یک از اجزای معادله بهره‌وری، رابطه‌ی مجزا استخراج کند [۱]. فروغ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با بررسی تونل انتقال آب کرج-تهران، تلاش کردند تا از مقادیر *RMR* برای پیش‌بینی شاخص‌های نرخ نفوذ، نرخ پیشروی، بهره‌وری *TBM* و همچنین تأخیرات ناشی از شرایط نامساعد زمین‌شناسی^{۱۲} (*GRRD*) استفاده کنند [۱۶].

بی شک یکی از مهمترین پارامترهای اثرگذار بر بهره‌وری ماشین *TBM* کیفیت توده سنگ می‌باشد زیرا سنگ ضعیف می‌تواند باعث بسیاری از تأخیرات زمین‌شناسی و در نتیجه کاهش بهره‌وری شود. در این مقاله سعی بر آن است تا با استفاده از مقادیر *RMR* روابطی به منظور ارزیابی تأخیرات زمین‌شناسی (*GRRD*) و مقدار بهره‌وری ماشین (*U*) ارائه کرد. از این رو ابتدا در تونل انتقال آب نوسود (قطعه جنوبی لیل) ارتباط بین *RMR* با *GRRD* و *U* مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس برای اولین بار بر اساس داده‌های موجود از شش پروژه‌ی تونل‌سازی در سرتاسر دنیا که در تمامی آن‌ها ماشین *TBM* دو سپره برای حفر تونل به کار رفته شده است، مدلی جامع برای تخمین بهره‌وری *TBM* های دو سپره ارائه خواهد شد. این مدل قادر است تخمین اولیه و قابل قبولی از بهره‌وری ماشین بر اساس سیستم امتیازدهی توده سنگ پیش از شروع عملیات حفاری ارائه کند.

۲- مطالعه موردی

منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب نوسود (قطعه جنوبی لیل) واقع در استان کرمانشاه می‌باشد. ورودی این تونل در ۶۵ کیلومتری شهرستان جوانرود در روستای بان‌لوان قرار گرفته است. قطر این تونل ۶/۱۲ متر و طول کلی آن ۲۵/۷ کیلومتر می‌باشد که با استفاده از یک *TBM* دو سپره حفاری شده است. وضعیت سنگ‌شناسی منطقه شامل تناوبی از سنگ‌های آهک، شیل و دولومیت مربوط به دوران‌های زمین‌شناسی کواترنری، تریاس، ژوراسیک و کرتاسه می‌باشد. در شکل ۱ مقطع زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه نشان داده شده است. در این مقاله وضعیت زمین‌شناسی ۴/۵ کیلومتر از مسیر این تونل از سمت رودخانه‌ی لیل

عواملی که باعث ایجاد تأخیر در حفاری می‌شوند می‌توانند باعث کاهش میزان بهره‌وری ماشین شوند.

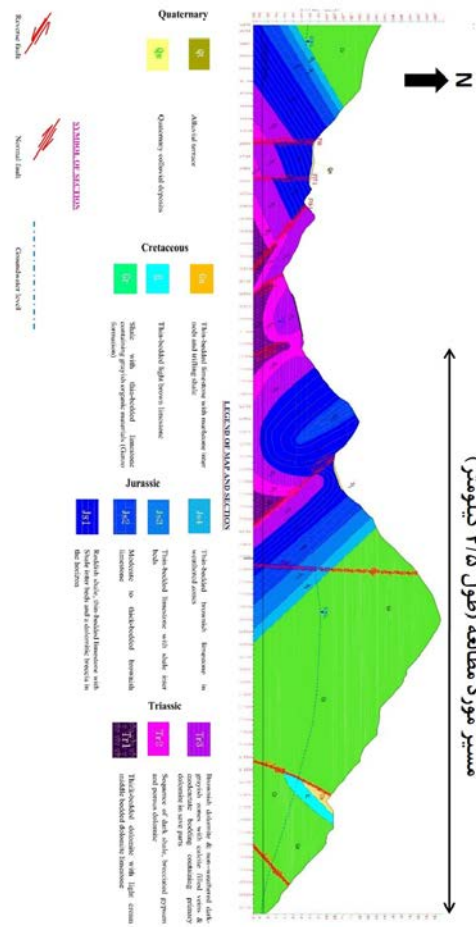
بهره‌وری *TBM* از آن جهت اهمیت بسیاری دارد که بر مقدار نرخ پیشروی و در نتیجه مدت زمان اجرا و هزینه‌های پروژه تأثیرگذار است. از این رو پیش‌بینی دقیق آن می‌تواند اثر مهمی بر برنامه‌ی زمان‌بندی و هزینه‌های پروژه داشته باشد. طی سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه‌ی پیش‌بینی بهره‌وری ماشین *TBM* در سنگ‌های سخت انجام شده است که در ادامه به طور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند. شارپ و ازدمیر^۱ در مدل مدرسه معدن کلرادو (*CSM*) با در نظر گرفتن تمام جنبه‌های عملیاتی ماشین *TBM* و فعالیت‌های اجرایی در محل و همچنین با توجه به شرایط زمین‌شناسی، یک مدل برای پیش‌بینی بهره‌وری توسعه دادند [۳]. یوهانسن^۲ با معرفی مدل نروژی (*NTH*) روابطی را به منظور پیش‌بینی بهره‌وری ماشین *TBM* توسعه داد [۴، ۵]. در این مدل برخی از پارامترهای زمین‌شناسی، ماشین و عملیاتی در نظر گرفته شده‌اند. بارتن^۳ در سال ۱۹۹۹ عملکرد *TBM* ها را در سنگ‌های گسل خورده و درزه‌دار مورد بررسی قرار داد و با ارائه‌ی مدل *Q_{TBM}* و چندین نمودار تجربی، روابطی به منظور تخمین بهره‌وری *TBM* ارائه کرد [۶]. ساینی^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۲ توانستند با استفاده از داده‌های سه تونل وارزو^۵، مائن^۶ و پیو^۷ واقع در شمال ایتالیا، یک مدل برای تخمین شاخص‌های نرخ نفوذ، نرخ پیشروی و بهره‌وری ارائه کنند. این مدل با استفاده از مقادیر *RMR* بدست آمده از سه پروژه‌ی مذکور ارائه شد [۷]. ریباجی و لیمبو فازیو^۸ در سال ۲۰۰۵ تأثیر کیفیت توده سنگ بر عملکرد ماشین دو سپره را در حفاری تونل وارزو مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۸]. اورعی و همکاران در سال ۱۳۸۷ میزان نرخ نفوذ و بهره‌وری *TBM* را در پروژه تونل انتقال آب کرج-تهران را با استفاده از مدل‌های *Q_{TBM}* و *NTH* مورد بررسی قرار دادند [۹]. کاردو^۹ و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از داده‌های ژئومکانیکی توده سنگ اطراف تونل خدماتی راه‌آهن کانیکولو گینوری^{۱۰} واقع در ایتالیا، ارتباط بین سیستم طبقه‌بندی سنگ *RMR* و بهره‌وری *TBM* را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. شریعت‌علوی و همکاران در سال ۱۳۸۹ با بررسی مورد مطالعاتی قطعه ۱ تونل انتقال آب قمرود، نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی را با استفاده از مدل‌های *NTH* و *CSM* تخمین زدند و با ادغام تأخیرات در نظر گرفته شده در این دو مدل، یک مدل جدید برای پیش‌بینی بهره‌وری و نرخ پیشروی *TBM* ارائه کردند [۱۱]. احمدی و نجاتی در سال ۱۳۸۹ بر اساس تحلیل‌های آماری اظهار داشتند که بین شاخص‌های *MQ* (*Q* اصلاح شده) و *NRMR* (*RMR* اصلاح نشده) و بهره‌وری *TBM* های نوع باز، رابطه‌ی معناداری وجود دارد. همچنین آن‌ها تلاش کردند تا با ایجاد یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی، یک مدل به منظور تخمین ضریب

آن با RMR مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

به سمت رودخانه‌ی کردی‌قاسمان مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- متوسط مقدار RMR برای سازندهای مختلف [۱۷]

متوسط RMR	سازند زمین‌شناسی
۶۷	$Gr(a)$
۵۷	$Gr(b)$
۵۴	$Gr(c)$
۳۷	$Js1, Js2, Js3, Js4$
۳۶	$Tr3$
۳۵	$Tr2$
۳۳	Tr
۲۱	$Nahang 2F, F.14, F.15, F.17$ $Hemajgeh 2F$
۱۵	$4159 F$



شکل ۱- مقطع زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه [۱۷]

۳- ارتباط بین RMR با $GRRD$ و U در تونل انتقال آب نوسود

در این بخش ارتباط بین شاخص RMR با $GRRD$ و U در طول مسیر مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پیش از هر کاری لازم بود تا بهره‌وری ماشین در سازندهای مختلف زمین‌شناسی تعیین شود. برای این منظور مجموعه فعالیت‌ها و تأخیرها طی عملیات تونلسازی مطابق با نظر فرخ در سال ۲۰۱۲ همانند جدول ۲ به ده دسته تقسیم شدند. نکته‌ی قابل ذکر در این جدول این است که با وجود اینکه در TBM ‌های دو سپره نصب سگمنت‌های بتنی و حفاری به صورت همزمان انجام می‌گیرد، اما زمانی برای نصب سگمنت‌های بتنی و بهسازی شرایط زمین (T_{sp}) در نظر گرفته شده است. این مسأله به آن خاطر است که به علت ریزشی بودن زمین در برخی مقاطع خصوصاً نواحی گسله، امکان نصب سگمنت‌ها همزمان با حفاری وجود نداشته و لازم بوده است که برای نصب قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی فعالیت حفاری متوقف شود.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مسیر مورد بررسی از متر ۲۵۷۵۱ (مبدأ تونل) تا متر ۲۱۲۴۷/۷۹۳ (پایان مسیر مورد مطالعه) با طول کلی ۴/۵ کیلومتر از سازندهای $Gr, Js1, Js2, Js3, Js4, Tr1, Tr2, Tr3$ و نواحی گسله $4159 F, Nahang 2F, F.14, F.15, F.17$ و $Hemajgeh 2F$ عبور می‌کند. به منظور تکمیل اهداف این مقاله، با توجه به داده‌های ژئومکانیکی موجود مقدار RMR در سازندهای مختلف در طول این مسیر محاسبه شد. خلاصه‌ای از مقادیر به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که برخی از این سازندها با توجه به تغییرات وضعیت آب زیرزمینی و جهت لایه‌بندی نسبت به محور تونل، در متر ۲۰۰۰‌های مختلف دارای مقادیر RMR متفاوتی می‌باشند. در ادامه بهره‌وری ماشین TBM در سازندهای مختلف محاسبه و ارتباط

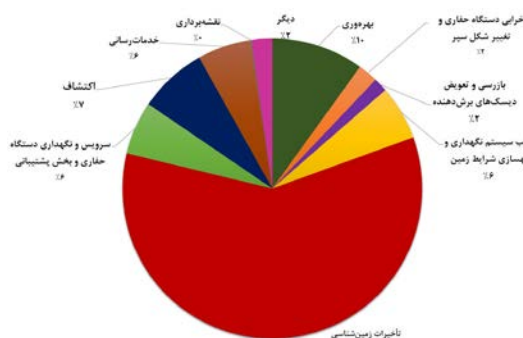
جدول ۲- دسته‌بندی فعالیت‌ها و تأخیرات

نماد	تعریف	فعالیت/مشکل ایجاد شده
T_b <td>زمان حفاری</td> <td>حفاری</td>	زمان حفاری	حفاری
T_{tbm} <td>اثر خرابی TBM و تغییر شکل سپر</td> <td>مشکل و خرابی TBM، تغییر شکل سپر</td>	اثر خرابی TBM و تغییر شکل سپر	مشکل و خرابی TBM ، تغییر شکل سپر
T_c <td>زمان بازرسی و تعویض ابزار برش</td> <td>بازرسی و تعویض دیسک‌های برش‌دهنده</td>	زمان بازرسی و تعویض ابزار برش	بازرسی و تعویض دیسک‌های برش‌دهنده
T_{sp} <td>زمان نصب سگمنت-</td> <td>نصب سگمنت، تزریق</td>	زمان نصب سگمنت-	نصب سگمنت، تزریق

و آبرگرفتنی سینه‌کار به دلیل شیب منفی تونل مهمترین عامل تأخیرها می‌باشد چرا که در این شرایط ماشین غرق و رها سازی و آماده‌سازی مجدد آن بسیار زمان‌بر است.

جدول ۳- مدت زمان فعالیت‌ها و تأخیرهای ایجاد شده در مسیر

مورد مطالعه	
فعالیت/تأخیر ایجاد شده	مدت زمان فعالیت/تأخیر ایجاد شده (روز)
T_b	۱۳۲
T_{ibm}	۲۸
T_c	۲۰
T_{sp}	۷۸
T_g	۷۸۶
T_m	۷۶
T_f	۹۸
T_u	۷۶
T_{sur}	۲
T_o	۳۰
جمع روزهای کاری	۱۳۲۶



شکل ۲- تقسیم‌بندی زمان‌های صرف شده برای فعالیت‌های مختلف در مسیر مورد مطالعه

با توجه به این مسأله که بیشترین سهم تأخیرات ایجاد شده در حفاری تونل مورد مطالعه مربوط به شرایط نامساعد زمین‌شناسی می‌باشد، در ابتدا ارتباط بین $GRRD$ و RMR مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر متوسط $GRRD$ در سازندهای مختلف با توجه به مقدار RMR آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار صفر برای $GRRD$ در این جدول بیانگر آن است که در سازند مورد نظر هیچ تأخیری از بابت شرایط نامساعد زمین‌شناسی رخ نداده است. ارتباط بین مقادیر $GRRD$ با RMR با استفاده از فرم‌های گوناگون آنالیز رگرسیون (خطی، لگاریتمی و چند جمله‌ای درجه دو) مورد بررسی قرار گرفت

های بتنی و بهسازی شرایط زمین

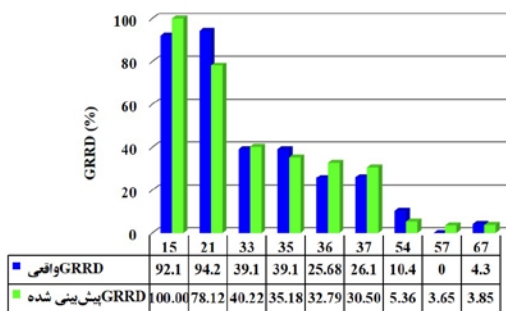
تأخیرات ناشی از شرایط نامطلوب زمین‌شناسی	T_g	تمیز کاری محل سگمنت و محدوده سپر به علت ریزش مصالح سست، پدیده‌ی مجاله‌شوندگی، نشت آب به داخل تونل، آبرگرفتنی تونل
تأخیرات ناشی از سرویس و نگهداری و بخش TBM	T_m	سرویس و نگهداری هیدرولیکی و مکانیکی TBM ، شارژ و آپارات نوار نقاله
تأخیرات ناشی از پشتیبانی	T_f	حفاری گمانه شناسایی و تزریق پیشرو در گمانه‌ها
تأخیرات ناشی از سیستم‌های خدمات رسانی	T_u	تأخیرات ناشی از قطعی برق، ایجاد مخزن آب و سیستم آبکشی، توسعه و تعمیرات سیستم ریلی، نصب و تعمیرات سیستم تهویه
تأخیرات ناشی از فعالیت‌های نقشه‌برداری	T_{sur}	نقشه‌برداری
تأخیرات متفرقه	T_o	بازدید مشاور و کارفرما از سینه‌کار، دیگر تأخیرات (شامل عدم وجود ماشین‌آلات کافی، تعویض شیفت و ...)

سپس با بررسی دقیق گزارش‌های روزانه‌ی حفاری، مدت زمان‌های اختصاص یافته برای هر یک از فعالیت‌ها و تأخیرها استخراج شد. خلاصه‌ای از نتایج در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود مدت زمان تکمیل مسیر مورد مطالعه ۱۳۲۶ روز بوده است که تنها ۱۳۲ روز آن صرف حفاری و مابقی صرف سایر فعالیت‌ها و تأخیرها شده است. این بدان معنی است که بهره‌وری ماشین در این مسیر در حدود ۱۰ درصد بوده است. در حالی که مقدار متوسط بهره‌وری TBM در پروژه‌های تونلسازی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است. می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهره‌وری ماشین در این تونل نسبت به سایر پروژه‌های حفاری مکانیزه مقدار کمی محسوب می‌شود. شاید بتوان از دلایل مهم این کاهش را عدم انتخاب مناسب ماشین و شرایط نامساعد زمین‌شناسی برشمرد. مطابق جدول ۳، شرایط نامساعد زمین‌شناسی منجر به تأخیر ۷۸۶ روزه در پروژه شده است. هجوم آب به داخل تونل و آبرگرفتنی سینه‌کار، برخورد با نواحی گسله، ریزش مصالح سست به داخل تونل و پدیده‌ی مجاله‌شوندگی از جمله مشکلات ناشی از شرایط نامساعد زمین‌شناسی در این پروژه بوده است. در میان آن‌ها هجوم آب

پارامتر گزارش کردند. بررسی رابطه پیشنهادی در این مقاله و رابطه فروغ و همکاران نشان می‌دهد که کمترین مقدار $GRRD$ در RMR بین ۵۰ تا ۷۰ حاصل می‌شود و در سنگ با کیفیت پایین‌تر یا بالاتر از این بازه مقدار $GRRD$ افزایش می‌یابد.

در شکل ۴ مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده‌ی $GRRD$ با استفاده از رابطه چند جمله‌ای درجه دو (جدول ۵) ارائه و مقایسه شده است. علاوه بر R^2 ، شاخص‌های آماری دیگری همچون خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$) و واریانس خطا (VAF) را می‌توان به صورت زیر برای پیش‌بینی عملکرد معادلات تجربی به کار برد:

که در این معادلات Var واریانس، A_i مقدار واقعی پارامتر، P_i مقدار پیش‌بینی شده و N تعداد نمونه‌ها می‌باشند. شاخص $RMSE$ بیانگر انحراف در داده‌ها است و با کاهش مقدار آن عملکرد مدل افزایش می‌یابد. زمانی که مقدار $RMSE$ صفر باشد، مدل توسعه یافته عالی خواهد بود. شاخص VAF به منظور بررسی اینکه مدل تا چه حدی می‌تواند واریانس در داده‌ها را توضیح دهد استفاده می‌شود. مقادیر بالای VAF بیانگر عملکرد بهتر مدل می‌باشد. هنگامی که مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده کاملاً یکسان باشند، مقدار VAF برابر با ۱۰۰ به دست می‌آید. شاخص $RMSE$ و VAF برای معادله‌ی چند جمله‌ای درجه دو به ترتیب ۷/۰۴ و ۹۵/۴۰ به دست آمد که بیانگر این است که این معادله قادر است با نرخ خطای قابل قبولی $GRRD$ را پیش‌بینی کند.



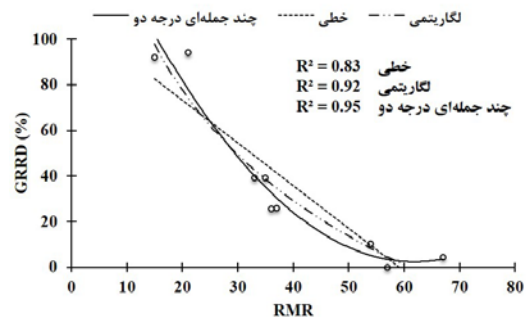
شکل ۴- مقایسه‌ی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده $GRRD$ براساس رابطه چند جمله‌ای درجه ۲

در ادامه طی روندی مشابه، ارتباط بین بهره‌وری ماشین RMR در طول مسیر مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۴ مقادیر متوسط بهره‌وری در سازندهای مختلف با توجه به مقدار RMR آن‌ها گزارش شده است. ارتباط بین مقادیر RMR با U با استفاده از فرم‌های گوناگون آنالیز رگرسیون (توابع نمایی، خطی،

شکل ۳ مشاهده شود) و خلاصه‌ای از معادلات توسعه یافته در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۴- مقادیر $GRRD$ و U بر اساس RMR

U (%)	$GRRD$ (%)	RMR
۰/۳	۹۲/۱	۱۵
۱/۴	۹۴/۲	۲۱
۱۴/۲	۳۹/۱	۳۳
۱۷/۱	۳۹/۱	۳۵
۱۷		۳۶
		۳۷
		۵۴
		۶۷

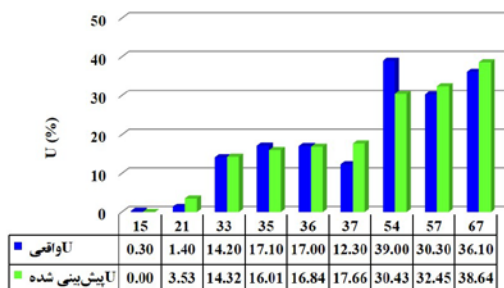


شکل ۳- رابطه‌ی بین مقادیر $GRRD$ و RMR بر اساس فرم‌های گوناگون آنالیز رگرسیون

جدول ۵- معادلات توسعه یافته به منظور پیش‌بینی $GRRD$

R^2	معادله
۰/۸۳	$GRRD(\%) = -1.8713RMR + 110.59$
۰/۹۲	$GRRD(\%) = -69.89 \ln(RMR) + 287.0$
۰/۹۵	$GRRD(\%) = 0.0454RMR^2 - 5.6099RMR + 175.91$

همانگونه که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود تمامی معادلات توسعه یافته ضریب تعیین (R^2) بالایی دارند و می‌توانند با دقت قابل قبولی $GRRD$ را پیش‌بینی کنند. اما در میان آن‌ها معادله‌ی چند جمله‌ای درجه دو، بیشترین مقدار R^2 را دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفته که این معادله بهترین معادله برای ارزیابی $GRRD$ در تونل مورد مطالعه می‌باشد. شایان ذکر است که فروغ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از داده‌های تونل انتقال آب کرج-تهران، ارتباط بین $GRRD$ و RMR را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نیز مشابه این مقاله رابطه‌ی چند جمله‌ای از نوع درجه دو بین این دو



شکل ۶- مقایسه‌ی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده U براساس رابطه چند جمله‌ای درجه ۲

۴- ارتباط بین RMR با بهره‌وری TBM های دو سپره (مدل جامع)

در این بخش سعی بر آن است تا با ایجاد یک پایگاه داده گسترده یک مدل جامع به منظور ارزیابی U ماشین‌های دو سپره با توجه به مقدار RMR ارائه شود. البته باید ذکر شود که لفظ جامع از این بابت به کار رفته است که مدل پیشنهادی بر اساس کلیه داده‌های در دسترس از پروژه‌های شامل ماشین‌های دو سپره توسعه پیدا کرده است و نه از بابت اینکه مدل تمامی پارامترهای مؤثر بر بهره‌وری را در نظر گرفته است. هدف اصلی توسعه این مدل، آن است که بتوان پیش از شروع عملیات حفاری با توجه به کیفیت سازند، تخمین اولیه‌ای از بهره‌وری ماشین ارائه کرد.

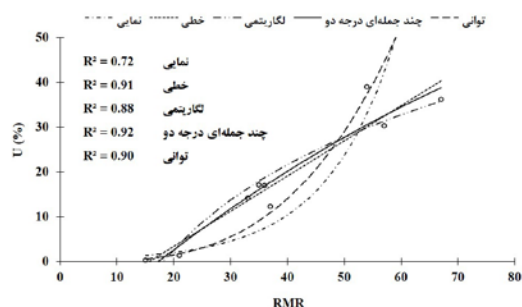
به منظور توسعه‌ی این مدل علاوه بر داده‌های تونل انتقال آب نوسود، داده‌های پنج پروژه‌ی تونلسازی دیگر گردآوری شدند [۱۵]. این پروژه‌ها شامل تونل‌های انتقال آب کرج (ایران)، وارزو (ایتالیا)، پیو (ایتالیا)، ماناپوری (نیوزلند) و تونل راه آهن کانیکولو گینوری (ایتالیا) می‌باشند. شایان ذکر است که در تمامی این پروژه‌ها برای حفاری تونل از TBM دو سپره استفاده شده است. خلاصه‌ای از مشخصات این تونل‌ها و ماشین‌های مورد استفاده در منبع [۱۵] یافت می‌شود.

پایگاه داده‌ی گردآوری شده شامل ۶۳ داده می‌باشد که در آن RMR پارامتر ورودی و U پارامتر خروجی بوده است. به منظور کاهش پراکندگی داده‌ها و توسعه‌ی مدل با دقت بالاتر، مطابق جدول ۷ مقادیر RMR به دسته‌های ۵ تایی دسته‌بندی و برای توسعه‌ی مدل از مقادیر متوسط RMR (RMR_m) و مقادیر متوسط U (U_m) برای هر دسته استفاده شده است. این امر پیش از این توسط سایپگنی به منظور بررسی رابطه‌ی بین RMR و نرخ نفوذ TBM انجام شده است [۷]. حاصل کار باعث کاهش داده‌ها به ۱۶ مورد با پراکندگی کمتر شد.

جدول ۷- متوسط بهره‌وری (U_m) بر اساس متوسط امتیاز توده

لگاریتمی، چند جمله‌ای درجه دو و توانی) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵ مشاهده شود). همچنین خلاصه‌ای از معادلات توسعه یافته در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس مقادیر ضریب تعیین، بهترین معادله برای پیش‌بینی U ، معادله‌ی چند جمله‌ای درجه دو می‌باشد. شایان ذکر است که یانگیز و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر اساس داده‌های هفت پروژه تونلسازی مختلف روابط گوناگونی را برای پیش‌بینی U با استفاده از RMR توسعه دادند که تماماً به فرم چند جمله‌ای درجه دو بودند. لذا نتیجه به دست آمده در این مقاله مطالعات پیشین را تأیید می‌کند. به طور کلی می‌توان براساس نتایج این مقاله و مقالات گذشته چنین بیان کرد که بیشترین میزان بهره‌وری ماشین در RMR حدوداً بین ۵۰ تا ۷۰ حاصل می‌شود و در سنگ با کیفیت ضعیف‌تر یا قویتر از این بازه مقدار بهره‌وری کاهش می‌یابد.

در شکل ۶، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده‌ی U بر اساس معادله چند جمله‌ای درجه دو (جدول ۶) ارائه و مقایسه شده است. بر اساس این مقادیر شاخص‌های $RMSE$ و VAF برای معادله‌ی مذکور به ترتیب ۳/۶۳ و ۹۲/۳۷ به دست آمدند که بیانگر دقت بالای معادله در پیش‌بینی مقدار U می‌باشد.



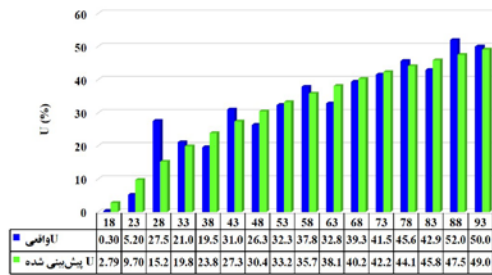
شکل ۵- رابطه‌ی بین مقادیر U و RMR بر اساس فرم‌های گوناگون آنالیز رگرسیون

جدول ۶- معادلات توسعه یافته به منظور پیش‌بینی U

R^2	معادله
۰/۷۲	$U(\%) = 0.3807e^{0.0826RMR}$
۰/۹۱	$U(\%) = 0.7861RMR - 12.374$
۰/۸۸	$U(\%) = 27.395\ln(RMR) - 79.488$
۰/۹۱	$U(\%) = -0.004RMR^2 + 1.1152RMR - 18.125$
۰/۸۹	$U(\%) = (9E - 05)RMR^{3.2548}$

جدول ۸- معادلات توسعه یافته به منظور پیش‌بینی U_m

معادله	R^2
$U_m(\%) = 2.9066e^{0.037RMR}$	۰/۴۸
$U_m(\%) = 0.5779RMR - 0.4877$	۰/۸۷
$U_m(\%) = 28.184\ln(RMR) - 78.67$	۰/۹۱
$U_m(\%) = -0.0047RMR^2 + 1.1023RMR - 12.529$	۰/۹۰
$U_m(\%) = 0.0075RMR^{2.0485}$	۰/۶۴



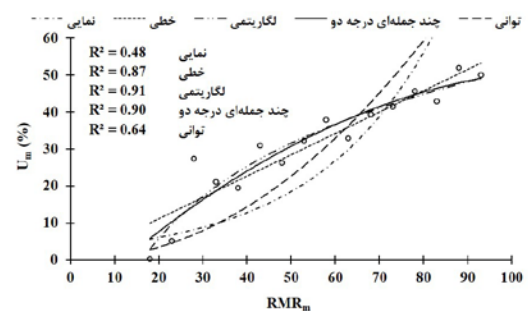
شکل ۸- مقایسه‌ی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده U_m بر اساس رابطه لگاریتمی

در ادامه به منظور ارائه‌ی یک الگوی راهنما برای تخمین اولیه‌ی بهره‌وری TBM ‌های دو سپره بر اساس کلاس سنگ (با توجه به مقدار RMR)، پایگاه داده‌ی آنالیز و جدول ۹ و شکل ۹ به دست آمدند. همانطور که در شکل و جدول مذکور ملاحظه می‌شود با بهبود کیفیت سنگ مقدار متوسط بهره‌وری افزایش می‌یابد. به طور مثال برای سنگ‌های کلاس II مقدار بهره‌وری TBM دو سپره می‌تواند بین ۱۶ تا ۵۸ درصد (با مقدار متوسط ۳۹/۶ درصد) متغیر باشد. واضح است هر چقدر ماشین مورد استفاده به روزتر و تجربه‌ی مدیریت و پرسنل کاری بیشتر باشد، مقدار بهره‌وری به مقدار حداکثر نزدیک‌تر می‌شود. برای سنگ‌های کلاس V متوسط بهره‌وری TBM برابر ۰/۳۰ درصد می‌باشد که مقدار بسیار ناچیزی است. بررسی پایگاه داده نشان می‌دهد که سنگ‌های کلاس V اغلب مربوط به زون‌های گسله و به شدت خرد شده در طول مسیر تونل می‌باشد که گذر از آن‌ها بسیار مشکل و زمان‌بر است. لذا طبیعی به نظر می‌رسد که مقدار بهره‌وری در چنین شرایطی افت محسوسی داشته باشد. نکته قابل ذکر در مورد نتایج این بخش (معادله لگاریتمی و شکل ۹) این است که خروجی به دست آمده از آنها تنها تخمین اولیه‌ی از مقدار بهره‌وری ماشین را بر اساس کیفیت سنگی که باید حفاری شود، ارائه می‌دهند. خروجی به دست آمده می‌تواند در مراحل اولیه

سنگ (RMR_m)

$U_m(\%)$	RMR_m	RMR
۰/۳۰	۱۸	۱۵-۲۰
۵/۲۰	۲۳	۲۰-۲۵
۲۷/۵۰	۲۸	۲۵-۳۰
۲۱/۰۶	۳۳	۳۰-۳۵
۱۹/۵۷	۳۸	۳۵-۴۰
۳۱/۰۰	۴۳	۴۰-۴۵
۲۶/۳۳	۴۸	۴۵-۵۰
۳۲/۳۳	۵۳	۵۰-۵۵
۳۷/۸۶	۵۸	۵۵-۶۰
۳۲/۸۳	۶۳	۶۰-۶۵
۳۹/۳۵	۶۸	۶۵-۷۰
۴۱/۵۰	۷۳	۷۰-۷۵
۴۵/۶۶	۷۸	۷۵-۸۰
۴۲/۹۰	۸۳	۸۰-۸۵
۵۲/۰۰	۸۸	۸۵-۹۰
۵۰/۰۰	۹۳	۹۰-۹۵

سپس ارتباط بین RMR_m و U_m به کمک آنالیز رگرسیون در فرم‌های گوناگون (نمایی، خطی، لگاریتمی، چند جمله‌ای درجه دو و توانی) مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۷). همچنین معادلات توسعه داده شده همراه با ضرایب تعیین آن‌ها در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به مقادیر ضریب تعیین می‌توان نتیجه گرفت که بهترین رابطه به منظور ارزیابی بهره‌وری ماشین‌های حفاری دو سپره رابطه لگاریتمی با ضریب تعیین ۰/۹۱ می‌باشد. مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده‌ی بهره‌وری با استفاده از این رابطه در شکل ۸ ارائه و مقایسه شده است. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد این معادله، دو شاخص $RMSE$ و VAF محاسبه شدند که به ترتیب برابر با ۰/۰۰۳ و ۰/۹۱ درصد به دست آمدند. مقادیر این دو شاخص نشان می‌دهند که مدل توسعه داده شده قادر است با مقدار خطای قابل قبولی مقادیر بهره‌وری را برای TBM ‌های دو سپره پیش‌بینی کند.



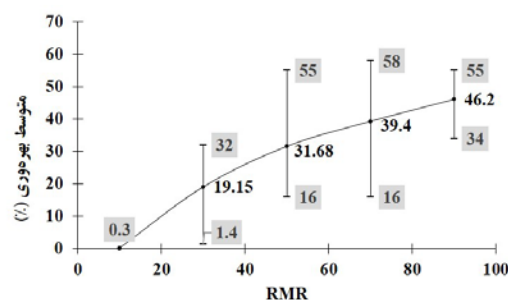
شکل ۷- رابطه‌ی بین مقادیر RMR_m و U_m بر اساس فرم‌های گوناگون آنالیز رگرسیون

سازندهای گوناگون جمع‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بهره‌وری کلی ماشین ۱۰ درصد می‌باشد. بدون شک یکی از دلایل اصلی پایین بودن بهره‌وری نسبت به سایر پروژه‌های حفاری مکانیزه عدم انتخاب مناسب ماشین با توجه به شرایط زمین‌شناسی می‌باشد. پر واضح است که با انتخاب مناسب ماشین می‌توان بهره‌وری را در یک وضعیت مناسب حفظ کرد. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین تأخیرها در این تونل مرتبط با شرایط نامساعد زمین‌شناسی بود. بنابراین در ادامه ارتباط بین RMR با تأخیرهای مرتبط با شرایط نامساعد زمین‌شناسی ($GRRD$) و U به کمک آنالیزهای رگرسیونی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر این اساس دو معادله‌ی چند جمله‌ای درجه دو برای پیش‌بینی $GRRD$ و U بر اساس مقدار RMR توسعه یافتند. عملکرد این معادلات با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، $RMSE$ و VAF مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر دو معادله قادر هستند با مقدار خطای قابل قبولی $GRRD$ و U را پیش‌بینی کنند. در بخش بعدی این مقاله با گردآوری پایگاه داده‌ی گسترده‌تری شامل شش پروژه‌ی تونل‌سازی واقع در کشورهای ایران، ایتالیا و نیوزلند، ارتباط بین U و RMR به کمک آنالیزهای رگرسیونی در فرم‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌ی کار توسعه‌ی روابط گوناگون در فرم‌های نمایی، خطی، لگاریتمی، چند جمله‌ای درجه دو و توانی برای پیش‌بینی U بر اساس مقدار RMR بود که در میان این روابط، رابطه‌ی لگاریتمی بالاترین عملکرد را برخوردار بود. خروجی به دست آمده از این مدل‌ها را می‌توان به عنوان تخمینی مفید در مراحل اولیه تونلسازی در نظر گرفت. در آخر باید ذکر کرد هر چند معادلات توسعه داده شده از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند اما پر واضح است که با جمع‌آوری داده‌های بیشتر می‌توان روابط دقیق‌تری توسعه داد. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر دیگر همچون پارامترهای ماشین و پارامترهای عملیاتی و مدیریتی مدل‌های کارآمدتری را برای پیش‌بینی بهره‌وری توسعه داد.

پروژه‌های تونلسازی (پیش از شروع عملیات حفاری) به منظور تخمین هزینه‌ها و برنامه‌ریزی زمانی پروژه مفید واقع شود. واضح است که به منظور تخمین دقیق بهره‌وری علاوه بر کیفیت توده سنگ، پارامترهای دیگری همچون پارامترهای ماشین، عملیاتی و مدیریتی باید مد نظر قرار گیرند که دسترسی به چنین پارامترهای نیازمند شروع عملیات حفاری است.

جدول ۹- تخمین بهره‌وری با توجه به کلاس سنگ

کلاس سنگ	محدوده RMR	متوسط بهره‌وری (%)
V (خیلی ضعیف)	۰-۲۰	۰/۳۰
IV (ضعیف)	۲۰-۴۰	۱۹/۱۰
III (متوسط)	۴۰-۶۰	۳۱/۷۰
II (خوب)	۶۰-۸۰	۳۹/۴۰
I (خیلی خوب)	۸۰-۱۰۰	۴۶/۳۰



شکل ۹- گستره‌ی تغییرات بهره‌وری با توجه به کلاس سنگ

۵- بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی دقیق بهره‌وری ماشین حفر تونل (TBM)، نقش قابل ملاحظه‌ای بر زمان تکمیل و اقتصاد پروژه‌های تونل‌سازی دارد. هدف از این مقاله، ارائه‌ی روابط تجربی ساده برای ارزیابی بهره‌وری ماشین‌های TBM دو سپره با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ بود. با توجه به این مسأله که سیستم طبقه‌بندی RMR جنبه‌های مختلفی از توده‌سنگ را در نظر می‌گیرد، از این پارامتر به منظور پیش‌بینی مقادیر بهره‌وری ماشین حفاری دو سپره و تأخیرات زمین‌شناسی استفاده شد. در ابتدا برای توسعه‌ی روابط مورد نظر، گزارش‌های حفاری ۴/۵ کیلومتر از تونل انتقال آب نوسود (قطعه جنوبی لبله) مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر RMR و بهره‌وری ماشین TBM در

۶- منبع‌ها

[1] Farrokh, E. (2012). Study of Utilization Factor and Advance Rate of Hard Rock TBMs (PHD Thesis). *The*

Pennsylvania State University, Department of Energy and Mineral Engineering, Pennsylvania.

[2] Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993). A new model for performance prediction of hard rock TBM. *Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, (pp. 793-809).

[3] Sharp, W., & Ozdemir, L. (1991). Computer Modelling for TBM Performance Prediction and Optimization. *Proceedings of the International Symposium on Mine Mechanization and Automation vol 1(4)*, (pp. 57-66).

[4] Johannessen, O. (1988). *NTH Hard Rock Tunnel Boring*. NTH/NTNU Trondheim, Norway Project Report 1-88.

[5] Johannessen, O. (1994). *NTH Hard Rock Tunnel Boring*. NTH/NTNU Trondheim, Norway Project Report 1-94.

[6] Barton, N. (1999). TBM Performance estimation in rock using Q_{TBM} . *Tunnels and Tunneling International* 31(9), 30-33.

[7] Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A., & Cardone, G. (2002). TBM performance estimation using rock mass classifications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39(6), 771-788.

[8] Ribacchi, R., & Lembo Fazio, A. (2005). Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation (Varzo tunnel). *Rock Mechanics and Rock Engineering* 38(2), 105-127.

[۹] اورعی، س.ک.، صالح‌زاده، ح.، صالحی، ب. (۱۳۸۷). محاسبه بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه TBM در پروژه تونل انتقال آب کرج-تهران با استفاده از مدل‌های تجربی. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران.

[10] Cardu, M., Oreste, P., & Cicala, T. (2009). Analysis of the tunnel boring machine advancement on the Bologna-Florence railway link. *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2 (2), 416-420.

[۱۱] شریعت علوی، ح.، کاکایی، ر.، زور آبادی، م.، علیزاده صوری، ب.، عبداللهی، م. (۱۳۸۹). محاسبه ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی دستگاه حفاری تمام مقطع TBM در سنگ‌های سخت مطالعه موردی: قطعه ۱ تونل انتقال آب قمرود. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره پنجم، شماره نهم.

[۱۲] احمدی، م.، نجاتی، ح. (۱۳۸۹). تخمین ضریب بهره‌وری TBM بر اساس شاخص‌های سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ و نیروی نفوذ ماشین. نشریه علمی-پژوهشی معدن، دوره پنجم، شماره دهم، ۶۵-۷۱.

[۱۳] نجاتی، ح.، احمدی، م. (۱۳۸۹). تخمین ضریب بهره‌وری ماشین حفر تونل (TBM) با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی. فصل نامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی و محیط زیست، سال چهارم، شماره ۱۲.

[14] Frough, O., Torabi, S., & Tajik, M. (2012). Evaluation of TBM utilization using rock mass rating system: a case study of Karaj-Tehran water conveyance tunnel (lots 1 and 2). *Journal of Mining & Environment, Vol.3, No.2*, 89-98.

[15] Yagiz, S., Kim, T., Frough, O., & Torabi, S. R. (2013). A Rock Mass Rating system for predicting TBM utilization. *In ISRM International Symposium-EUROCK 2013*. International Society for Rock Mechanics.

[16] Frough, O., Torabi, S. R., & Yagiz, S. (2015). Application of RMR for Estimating Rock-Mass-Related TBM Utilization and Performance Parameters: A Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(3), 1305-1312.

[۱۷] شرکت مهندسیین مه‌اب قدس (۱۳۹۴). مقطع زمین‌شناسی پروژه تونل انتقال آب نوسود.

-
- ¹ Sharp and Ozdemir
 - ² Johannessen
 - ³ Barton
 - ⁴ Sapigni
 - ⁵ Varzo
 - ⁶ Maen
 - ⁷ Pieve
 - ⁸ Ribacchi and Limbo Fazio
 - ⁹ Cardu
 - ¹⁰ Vaglia
 - ¹¹ Yagiz
 - ¹² Ground related downtime