

## مطالعه پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ در تونل طولانی صفا- بهرامجرد،

### با احتساب عدم قطعیت

دکتر پرویز معارف‌وند  
ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
parviz\_moaref@yahoo.fr

دکتر کوروش شهریار  
ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
k.shahriar@aut.ac.ir

حسن عرب‌نژاد\*  
ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
hsn.mine@yahoo.com

### خلاصه مقاله

تونل‌های طولانی در عمق زیاد معمولاً در مناطق کوهستانی واقع شده‌اند و اطلاعات کمی در رابطه با شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ژئوتکنیکی آنها وجود دارد. تونل هرچه عمیق‌تر باشد، اطلاعات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی سنگ‌های در برگیرنده آن با عدم قطعیت‌های بزرگتری روبرو است و امکان برخورد به شرایط مخاطره‌انگیز و پیش‌بینی نشده برای حفر تونل بیشتر است. روش در نظر گرفتن عدم قطعیت توصیف توده‌سنگ و پارامترهای آن با استفاده از توزیع آماری به جای مقادیر قطعی می‌باشد. در بکارگیری روابط تجربی تخمین مقاومت توده‌سنگ اغلب از متوسط یا میانگین پارامترهای ورودی استفاده می‌شود، ولی در حقیقت پارامترهای ورودی، مقادیر ثابتی نیستند و اگر پارامترهای ورودی را به صورت توزیع وارد شود، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج محاسبات خواهد داشت. به همین دلیل در تونل بلند انتقال آب صفا- بهرامجرد برای بررسی تاثیر عدم قطعیت مقاومت توده‌سنگ مسیر تونل از روش‌های احتمالاتی و روابط تجربی استفاده شد. در این تحقیق به جای استفاده از مقادیر ثابت در پارامترهای ورودی، مقاومت سنگ بکر و سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ (RMR) به صورت توزیع احتمالاتی در نرم‌افزار @Risk وارد گردید و نتایج تعیین مقاومت توده‌سنگ به صورت توزیع احتمالاتی بدست آمد.

کلمات کلیدی: تونل‌های طولانی، عدم قطعیت، مقاومت توده‌سنگ، شبیه‌سازی مونت کارلو، روابط تجربی

### ABSTRACT

Long tunnels at great depth are usually located in mountainous areas and very little is known about the geological, hydrogeological and geotechnical conditions. As much deeper as the tunnel is, the larger uncertainties about geological and geomechanical datas in surrounding rock mass emerge and the probability of encountering adverse or unforeseen conditions for tunneling becomes higher. The correct way of considering the uncertainty for describing the rock mass and its parameters are using statistical distributions instead of singular deterministic values. When applying this procedure to rock engineering design problems, most users consider only the average or mean properties, In fact, all of these input parameters exhibit a distribution about the mean, even under the most ideal conditions, and these distributions can have a significant impact upon the design calculations. Therefore, in water transfer tunnel of Safa-Bahramjerd in the length of 63.5 kilometers, probability methods and empirical correlations used for analyzing rock mass uncertainty effect on tunnel pass. In this case study, instead of using deterministic values in input parameters, intact rock strength and rock mass classification system (RMR), are estimated in the form of probability distribution and result of rock mass strength determination is gained in the form of probability distribution.

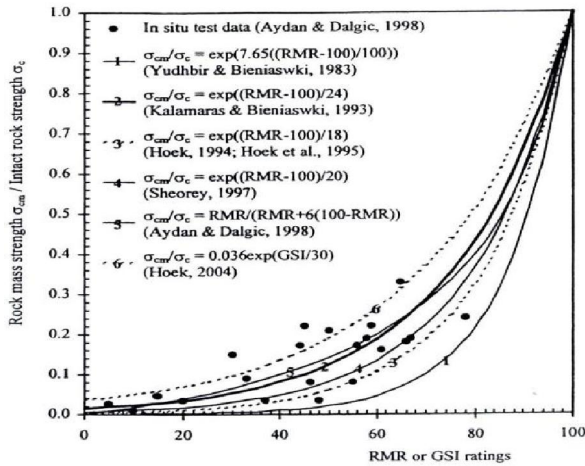
**Key words:** Long Tunnels, Uncertainty, Rock Mass Strength, Monte-Carlo Simulation, empirical correlations



روابط تجربی که تعیین ویژگی ناپیوستگی‌ها را نیز در بردارد، استفاده می‌شود. شکل ۳ مقایسه تعدادی از روابط تجربی با تست‌های برجای انجام شده توسط آیدان و دالجیک (۱۹۹۸) را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2005). با توجه به تست‌های برجای انجام شده برای بدست آوردن مقاومت توده‌سنگ همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، از رابطه تجربی شماره ۵ (آیدان و دالجیک) برای بدست آوردن مقاومت توده‌سنگ استفاده شده است. این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{RMR}{(RMR + 6(100 - RMR))} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_{cm}$  مقاومت توده‌سنگ،  $\sigma_{ci}$  مقاومت سنگ بکر بر حسب MPa و RMR عدد توده‌سنگ می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ نسبت به سنگ‌بکر با توجه به RMR و GSI (Zhang et al., 2005)

#### مدل محاسباتی و پارامترهای ورودی

در شبیه‌سازی احتمالاتی، پارامترهای مقاومت سنگ بکر و امتیاز توده‌سنگ (RMR) برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به صورت توزیع در قطعات مختلف مسیر تونل آورده شده است. با توجه به کمبود اطلاعات در رابطه با خواص زون‌های گسلی مسیر تونل، برای مدل‌سازی آنها مقدار حداقل عدد امتیاز توده‌سنگ به ۱۵ و مقاومت سنگ بکر به صفر در توزیع ورودی کاهش یافت. با توجه به مدل محاسباتی و پارامترهای ورودی تعریف شده مقاومت توده‌سنگ مسیر تونل به صورت احتمالاتی بدست آمد.

برای نمونه با توجه به جدول ۲ در قطعه ۱ مسیر تونل مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر ۱۰ تا ۱۹ MPa و RMR توده‌سنگ ۴۰ تا ۵۰ می‌باشد. در این نرم‌افزار مقاومت سنگ بکر در قطعه یک به شکل توزیع یکنواخت از ۱۰ تا ۱۹ MPa (شکل ۴) و RMR توده‌سنگ به صورت توزیع بتا با مقادیر حداقل ۴۰، حداکثر ۵۰ و مد ۴۴ (شکل ۵) وارد گردید. با وارد کردن این دو توزیع در رابطه ۱ با استفاده از نرم‌افزار @Risk و به روش مونت‌کارلو با ۱۰۰۰ بار تکرار مقاومت توده‌سنگ قطعه یک مسیر به شکل توزیع (شکل ۶) بدست آمد.

توان میزان عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه را با توجه به انتظارات مورد نظر بدست آورد. این نرم‌افزار قادر است نتایج بدست آمده را بصورت گرافیکی نیز ارائه دهد، این قابلیت باعث فهم بهتر و سریع‌تر جواب‌ها می‌گردد (زارع نقدی و همکاران، ۱۳۸۵).

#### مقاومت توده‌سنگ

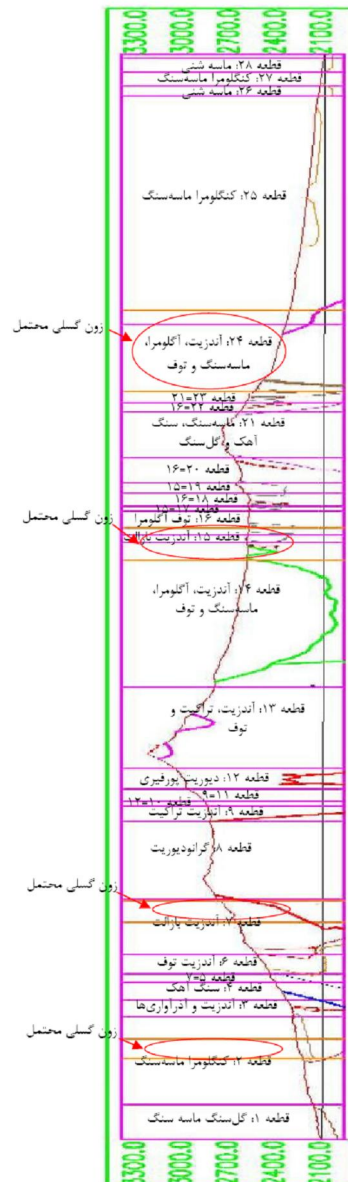
مقاومت توده‌سنگ اغلب به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و مقاومت سنگ بکر و مقاومت برشی درزه‌ها از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید. امروزه روش‌های متعارف برای تعیین مقاومت توده‌سنگ به صورت زیر می‌باشد:

۱- معیارهای تجربی شکست و سیستم‌های طبقه‌بندی تجربی

۲- تحلیل برگشتی از شکست‌های موجود

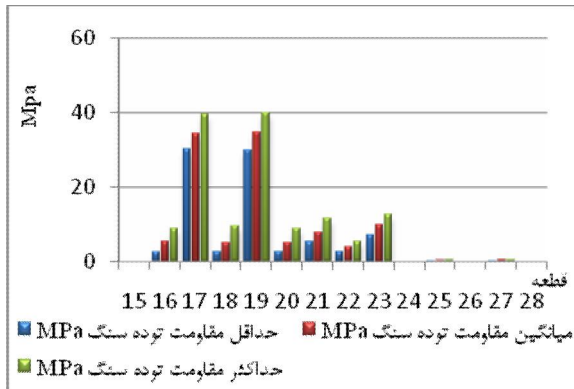
۳- آزمایش‌های بزرگ مقیاس

۴- مدل‌سازی ریاضی

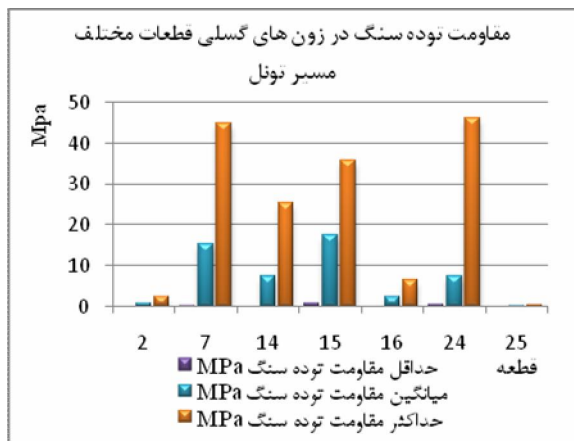


شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال آب صفابهرامچرد

بدلیل وجود ناپیوستگی‌ها، توده‌سنگ مقاومت فشاری تک‌محوری کمتری نسبت به سنگ بکر دارد. عموماً برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ، از



شکل ۷: مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر مقاومت توده سنگ در قطعات مختلف مسیر تونل



شکل ۸: مقادیر حداقل، میانگین و حداکثر مقاومت توده سنگ در زون های گسلی مسیر تونل

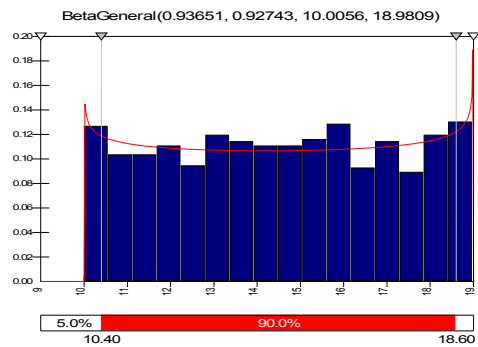
همانطور که در شکل های ۷ دیده می شود در بخش مرکزی تونل دامنه تغییرات نتایج بدست آمده از تعیین مقاومت توده سنگ بالا می باشد. این تغییرات بالا بدلیل عدم قطعیت بیشتر در مقاومت سنگ بکر و RMR می باشد. در زون های گسلی همانطور که در شکل ۸ دیده می شود، این تغییرات افزایش قابل ملاحظه ای می یابد. اگر این تغییرات به صورت احتمالاتی در روابط تعیین رفتار توده سنگ در نظر گرفته شود تاثیر قابل ملاحظه ای بر نتایج خواهد داشت.

### نتیجه گیری

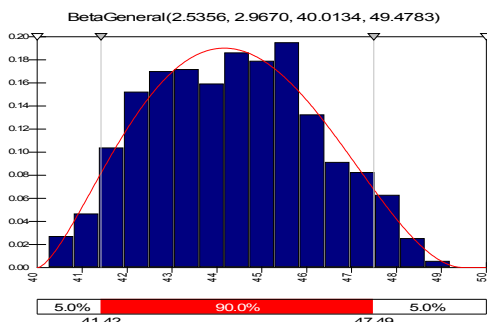
بایستی در نظر داشت که، نتایج تعیین مقاومت توده سنگ براساس داده هایی است که با آزمایش بر روی نمونه های سنگی مسیر تونل در آزمایشگاه، بررسی های محلی و قضاوت مهندسی بدست آمده است و نتایج کاملا قابل اطمینانی ندارند. در نتیجه نتایج بدست آمده صرفا یک کمک برای تصمیم گیرنده می باشد و اساسی را برای مطالعات بیشتر در اختیار ما قرار می دهد.

با بررسی تاثیر عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی تونل طولانی صفا- بهرامجرد مقاومت توده سنگ مسیر تونل به شکل توزیع احتمالاتی در قطعات مختلف و زون های گسلی بدست آمد، که نتایج زیر را شامل می شود:

- دامنه تغییرات مقاومت توده سنگ در بخش کوهستانی مسیر تونل با توجه به عدم قطعیت بیشتر داده های ورودی بالا می باشد.
- با توجه به عدم مطالعه کافی در زون های گسلی نتایج بدست آمده در این زون ها عدم قطعیت بالایی دارند.

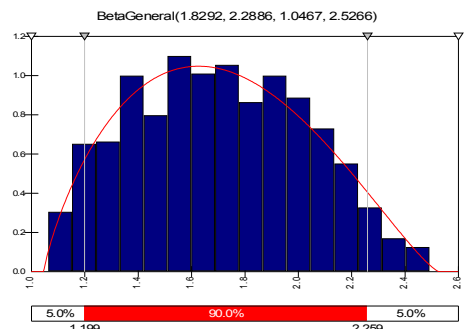


شکل ۴: توزیع مقاومت سنگ بکر در نرم افزار @Risk برای قطعه ۱ مسیر تونل بر حسب MPa

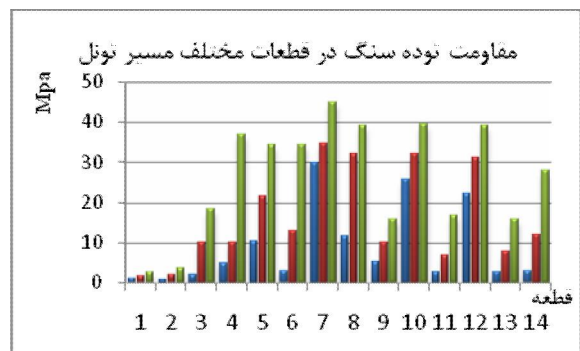


شکل ۵: توزیع RMR ورودی در نرم افزار @Risk برای قطعه ۱ مسیر تونل

این رویه برای تمامی قطعات مسیر تونل انجام شد. نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقاومت توده سنگ مسیر تونل با استفاده از نرم افزار @Risk در شکل های ۷ و ۸ آورده شده است.



شکل ۶: توزیع مقاومت توده سنگ قطعه ۱ مسیر تونل، با استفاده از رابطه آیدان و دالچیک و نرم افزار @Risk بر حسب MPa



۳- شرکت مهندسی مشاور هلیل آب، "گزارش زمین‌شناسی تونل صفا - بهرامجرد"، طرح تامین آب دراز مدت شهر کرمان، ۱۳۸۰.

4- Ast-Holzmann Baugesellschaft m.b.H., "Geotechnical Report", Kerman Long Term Water Supply Project, Kerman, 2001.

5- Kerman Regional Water Authority, "Kerman Long Term Water Supply Project", Tender Documents, Vol. 3, Project Summary & Data for Tenders, I.R. Iran, Ministry of Energy, 2000.

6- Mahab Ghodss Consulting Engineers, "Safa-Bahramjerd Tunnel, Financing, Design, Construction, Supply, Installation and Commissioning", Kerman Long Term Water Supply Project, 2000.

7- Viglconsult ZT, "Kerman Long Term Water Supply Project", Safa-Bahramjerd Tunnel - Segmental Lining Design, 2004.

8- Zhang, L., Hudson, J.A., "Engineering Properties of Rocks", ElsevierL Geo-Engineering Book Series, Volume 4, Britain, 2005.

• شرایط ناهمگن زمین‌شناسی با قابلیت تغییرات بالا در رفتار توده‌سنگ -  
ها به علت وجود زون‌های گسلی عمده

• پیشنهادات زیر جهت بهبود نتایج بررسی تاثیر عدم قطعیت داده می-  
شود:

• مطالعات بیشتر در زون‌هایی که عدم قطعیت بالایی دارند

• مطالعات ساختار سنگ در عمق و یک ارزیابی کامل از جنبه‌های زمین-  
شناسی ساختاری اشاره شده، سیستم درزه‌داری و گسل خوردگی  
منطقه‌ای

• بدست آوردن مجدد مقاومت توده‌سنگ با توجه به پیشرفت پروژه و  
داده‌های جدید

### منابع و مراجع

۱- زارع نغدهی، مسعود و جدیری شکری، بهشاد و جمشاسب، فرشاسب، "معرفی  
نرم‌افزار @Risk برای تحلیل ریسک پروژه‌های معدنی"، پنجمین کنفرانس  
دانشجویی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۵.

۲- شرکت آب منطقه‌ای کرمان، "طرح تامین آب درازمدت شهر کرمان"، کرمان،  
۱۳۸۱.

جدول ۲- خلاصه واحدهای زمین‌شناسی و طبقه‌بندی آنها در طول تونل (مهندسی مشاور هلیل آب، ۱۳۸۰).

(Kerman Regional Water Authority, 2000)، (Mahab Ghodss consulting engineers, 2000) و (Viglconsult ZT, 2004)

قطعه	کیلومتر	سنگ شناسی	مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (MPa)	طبقه‌بندی توده‌سنگ		روباره (متر)
				RMR	Q	
۱	۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵	گل سنگ ماسه‌سنگ	۱۹-۱۰	۵۰-۴۰	۱/۱-۰/۵۵	۵۲-۵
۲	۲۰۰۵ تا ۲۴۶+۷	کنگلو ماسه‌سنگ	۱۹-۱۰	۶۰-۳۵	۵/۷-۰/۳	۲۵۰-۱۴
۳	۷+۲۴۶ تا ۸+۱۹۶	اندزیت و آذرآواری‌ها	۸۰-۵۰	۵۰-۴۰	۲-۰/۶	۳۰۰-۱۷۳
۴	۸+۱۹۶ تا ۹+۲۴۴	سنگ‌آهک	۸۰-۵۰	۷۰-۴۰	۱۱-۰/۶	۳۰۰-۲۳۰
۵	۹+۲۴۴ تا ۹+۷۱۵	اندزیت بازالت	۱۵۰-۵۰	۶۵-۶۰	۶-۵	۳۵۰-۲۸۷
۶	۹+۷۱۵ تا ۱۰+۸۵۵	اندزیت توف	۱۵۰-۲۵	۶۵-۴۰	۶/۲-۰/۵	۴۰۰-۳۰۳
۷	۱۰+۸۵۵ تا ۱۴+۱۱۵	اندزیت بازالت	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۶۰	۶-۵	۶۵۰-۳۷۸
۸	۱۴+۱۱۵ تا ۱۸+۶۹۹	گرانودیوریت	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۵۵	۶-۴	۸۵۰-۴۰۰
۹	۱۸+۶۹۹ تا ۱۹+۵۹۸	اندزیت تراکیت	۷۰-۲۵	۶۵-۶۰	۶-۵	۷۵۰-۵۷۵
۱۰	۱۹+۵۹۸ تا ۱۹+۸۶۲	دیوریت پورفیری	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۵۵	۶-۴	۷۵۰-۶۷۶
۱۱	۱۹+۸۶۲ تا ۲۰+۵۷۳	اندزیت تراکیت	۷۰-۲۵	۶۵-۴۰	۶/۲-۰/۵	۹۵۰-۷۴۶
۱۲	۲۰+۵۷۳ تا ۲۱+۷۸۹	دیوریت پورفیری	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۵۵	۶-۵	۱۰۰۰-۸۸۷
۱۳	۲۱+۷۸۹ تا ۲۶+۵۶۵	اندزیت تراکیت توف	۷۰-۲۵	۶۵-۴۰	۵-۰/۵	۱۱۵۰-۶۹۴
۱۴	۲۶+۵۶۵ تا ۳۵+۰۶۵	اندزیت آگلومرا ماسه‌سنگ توف	۱۵۰-۲۵	۶۰-۴۰	۶-۰/۶	۷۷۹-۴۶۷
۱۵	۳۵+۰۶۵ تا ۳۵+۵۲۸	اندزیت بازالت	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۶۰	۶-۵	۵۲۷-۴۷۸
۱۶	۳۶+۸۸۲ تا ۳۵+۵۲۸	توف آگلومرا	۴۵-۲۵	۶۰-۴۰	۶-۰/۶	۴۵۲-۵۰۰
۱۷	۳۷+۸۸۲ تا ۳۷+۱۷۶	اندزیت بازالت	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۶۰	۶-۵	۴۶۸-۴۲۸
۱۸	۳۷+۱۷۶ تا ۳۷+۹۶۹	توف آگلومرا	۴۵-۲۵	۶۰-۴۰	۶-۰/۶	۵۳۴-۴۷۰
۱۹	۳۸+۹۶۹ تا ۳۸+۵۵۹	اندزیت بازالت	۱۷۰-۱۵۰	۶۵-۶۰	۶-۵	۷۰۰-۵۳۴
۲۰	۳۸+۵۵۹ تا ۴۰+۰۳۶	توف آگلومرا	۴۵-۲۵	۶۰-۴۰	۶-۰/۶	۶۸۰-۴۷۰
۲۱	۴۰+۰۳۶ تا ۴۲+۷۲۹	ماسه‌سنگ سنگ‌آهک گل سنگ	۸۰-۵۰	۵۱-۴۰	۲-۱	۸۱۰-۵۳۹
۲۲	۴۲+۷۲۹ تا ۴۳+۲۵۹	توف آگلومرا	۲۵-۴۵	۴۵-۴۰	۶/۶-۰/۶	۵۷۰-۵۲۱
۲۳	۴۳+۲۵۹ تا ۴۳+۹۲۹	ماسه‌سنگ سنگ‌آهک گل سنگ	۸۰-۵۰	۵۱	۲	۵۱۱-۵۰۳
۲۴	۴۳+۹۲۹ تا ۴۷+۸۵۶	اندزیت آگلومرا ماسه‌سنگ توف	۱۷۰-۲۵	۶۰-۴۰	۶-۰/۶	۵۰۳-۲۵۰
۲۵	۴۷+۸۵۶ تا ۶۱+۳۷۶	کنگلو ماسه‌سنگ گل سنگ	۵-۳	۳۵-۳۰	۳/۰-۰/۲	۲۵۰-۴۲
۲۶	۶۱+۳۷۶ تا ۶۱+۹۵۱	ماسه شنی	-	۲۰	۰/۰۶	۴۲-۳۱
۲۷	۶۲+۶۸۸ تا ۶۱+۹۵۱	کنگلو ماسه‌سنگ	۵-۳	۴۰	۵/۰	۳۱-۱۷
۲۸	۶۳+۴۷۵ تا ۶۲+۶۸۸	ماسه شنی	-	۲۰	۰/۰۶	۱۷-۹