

## تعیین مقاومت فشاری تک محوری سنگ اطراف تونل‌های دسترسی در معدنکاری جبهه کار طویل با استفاده از سیستم فازی ممدانی

محمّد رضائی\*<sup>۱</sup> و عباس مجدّی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mrezaei17@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، amajdi@ut.ac.ir

(\* عهده‌دار مکاتبات)

دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۸؛ دریافت اصلاح شده: ۱۳۹۲/۴/۲۰؛ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۳؛ قابل دسترس در تارنما: ۱۳۹۲/۹/۳۰

### چکیده

مقاومت فشاری تک محوری، یکی از پارامترهای مهم در پروژه‌های زمین‌شناسی مهندسی، معدنکاری، ژئوتکنیک و مهندسی سنگ می‌باشد. برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری در آزمایشگاه، نمونه‌های با کیفیت بالا مورد نیاز است. این نمونه‌ها را همیشه نمی‌توان از سنگ‌های ضعیف، لایه‌ای نازک و با زمینه بلوکی تهیه کرد. بنابراین، توسعه مدل‌های پیش‌گویانه برای تعیین خصوصیات مکانیکی سنگ از جمله مقاومت فشاری تک محوری زمینه، مبحث مهمی در مهندسی سنگ می‌باشد. در این مقاله، از مدل فازی ممدانی و مدل آماری، برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری سنگ بر اساس اطلاعات حاصل از سنگ اطراف تونل‌های دسترسی در معدنکاری جبهه کار طویل استفاده شد. برای انجام مدلسازی، از ۹۳ سری داده مربوط به انواع مختلف سنگ استفاده شده است. از این تعداد، ۷۵ سری برای طراحی و ۱۸ سری برای آزمون مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سه پارامتر سختی اشمیت، تخلخل و دانسیته، به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. در این مطالعه، برای آزمون عملکرد مدل‌ها، از شاخص‌های جذر متوسط مربعات خطا و ضریب تصمیم‌گیری استفاده شد. برای مدل‌های فازی و آماری، ضریب تصمیم‌گیری به ترتیب برابر ۹۴/۳ و ۸۷/۹ درصد و جذر متوسط مربعات خطا به ترتیب برابر ۳/۲ و ۶/۸ محاسبه شد. نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی مدل فازی به‌طور چشمگیری بالاتر از مدل آماری بوده و نتایج آن کاملاً به مقادیر واقعی نزدیک می‌باشد. همچنین، بر اساس آنالیز حساسیت مدل فازی، سختی اشمیت بیشترین و تخلخل کمترین تأثیر را بر مقدار مقاومت فشاری تک محوری دارند.

**واژه‌های کلیدی:** مقاومت فشاری تک محوری، مدل فازی ممدانی، آنالیز حساسیت.

### ۱- مقدمه

شیب‌ها، سقف و کف در معدنکاری، تونل‌ها و همچنین در ساختمان‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است. پایداری سازه‌ها در پروژه‌های مهندسی سنگ به خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ و سنگ سالم مانند مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و غیره

بسیاری از سازه‌های روباز و زیرزمینی، بر پایه انواع مختلف توده‌سنگ با ترکیبات هموزن یا دانه‌ای طراحی می‌شوند. پایداری این سازه‌ها در دراز مدت بسیار مهم می‌باشد. پایداری با دوام برای

است. در این روش، سختی سنگ به‌عنوان واکنش مواد سنگی به وسیله ضربه‌زن در نظر گرفته می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به هزینه کم و انعطاف پذیری بالای آن اشاره کرد (Meulenkamp & Alvarez Grima 1999). کیانپور و همکاران (۱۳۹۰) از روش‌های غیرمستقیم دیگری از جمله بار نقطه‌ای، برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری شیل‌های سازند شمشک استفاده نمودند. حیدری و همکاران (Heidari et al. 2011) و سینگ و همکاران (Sing et al. 2011) از این روش برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ استفاده نمودند. یکی از معایب روش‌های غیرمستقیم آن است که به-جای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، آنرا پیش‌بینی می‌کنند، بنابراین ممکن است در بعضی موارد نتیجه نامناسبی داشته باشد.

در سال ۱۹۹۳، وروال و مولدر (Verwaal & Mulder 1993) امکان پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های سنگی با استفاده از اطلاعات حاصل از آزمایش سختی اشمیت را مورد بررسی قرار دادند آسف (Asef 1995) بر اساس تحقیقات خود پیشنهاد کرد که دستگاه آزمایش سختی اشمیت می‌تواند به‌عنوان یک تست شاخص برای تعیین ویژگی‌های مقاومتی سنگ در نظر گرفته شود. وروال، مولدر و آسف برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری از مدل‌های آماری نیز استفاده نمودند.

برای رفع مشکلات ذکر شده، می‌توان از مدل‌های پیش‌گویانه مانند سیستم‌های هوشمند استفاده کرد. در یک دهه گذشته، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی کاربردهای زیادی در مهندسی سنگ و ژئوتکنیک داشته است محققان بسیاری در مطالعات خود از سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی استفاده نمودند (Nguyen 1985, Sakurai & Shimizu 1987, Davis & Keller 1997, Huang & Siller 1997, Binaghi et al. 1998, Juang et al. 1998, Ali & Chawathe 2000, Nawari & Liang 2000, Finol et al. 2001, Sarat et al. 2011). در رابطه با کاربرد این روش‌ها در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری نیز می‌توان به مطالعات انجام شده توسط مولنکامپ و آلوارز گریما (Meulenkamp & Alvarez Grima 1999) اشاره کرد که در آن از شبکه عصبی بر پایه نوع و چگالی سنگ، تخلخل، سختی و اندازه دانه برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری استفاده شده است. در این مقاله از مدل فازی ممدانی برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری سنگ اطراف تونل‌های دسترسی معدنکاری جبهه کار طولی استفاده شده است. جهت بررسی عملکرد مدل فازی، نتایج حاصل از آن با نتایج مدل آماری و همچنین داده‌های واقعی مقایسه شده است. در طراحی این مدل‌ها، از اطلاعات نمونه سنگ‌های اطراف تونل‌های دسترسی معادن زغال (شامل انواع مختلفی از سنگ‌های با مقاومت کم تا سنگ‌های بسیار سخت) استفاده شد.

مقاومت فشاری سنگ در طراحی سازه‌های سطحی و زیرزمینی (به‌منظور تأمین اهداف پایداری دراز مدت) پارامتر مهمی می‌باشد. در مهندسی معدن از مقاومت فشاری تک محوری در تحلیل پایداری پایه‌های معدن جبهه کار طولی، تونل‌های دسترسی و پایداری شیب و ... استفاده می‌شود (Singh et al. 2009).

به‌طورکلی، مقاومت یک سنگ با بافت و ترکیبات مینرالوژی آن در ارتباط است. در این زمینه، ترکیبات مینرالوژی (نوع سنگ)، دانسیته، تخلخل و سختی سنگ پارامترهای بسیار مهمی می‌باشند. سختی سنگ تابع عواملی از جمله نوع و چسبندگی مرزی کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین‌کننده سختی یک سنگ است (Hoek & Brown 1980). برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری روش‌های استاندارد وجود دارد که توسط آی‌اس‌آر‌ام (International Society for Rock Mechanics, ISRM 1981) و آی‌اس‌تی‌ام (American Society for testing and materials, ASTM 1984) پیشنهاد شده است. در این روش‌های معمول، تعیین مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های سنگی در آزمایشگاه و بر اساس آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و بار نقطه‌ای انجام می‌گیرد. در روش آزمایشگاهی با افزایش نیروی فشاری تک محوری، کرنش نمونه سنگ اندازه‌گیری می‌شود. تنش در لحظه شکست به‌عنوان حداکثر مقاومت سنگ در نظر گرفته می‌شود.

تعیین مقاومت فشاری تک محوری در آزمایشگاه نیازمند نمونه‌هایی با شکل منظم و با کیفیت بالا می‌باشد. البته این نمونه‌ها را نمی‌توان همیشه از سنگ‌های ضعیف، لایه‌ای نازک با زمینه بلوکی و با شکستگی زیاد استخراج کرد. برای غلبه بر این مشکل، می‌توان بر اساس پارامترهایی مانند چکش اشمیت (Hisashi & Yukinori 2008)، بار نقطه‌ای (دهقان و ستاری ۱۳۸۶) و خواص فیزیکی و پتروگرافیکی سنگ که حاصل کار دیگر محققان است، از مدل‌های پیش‌گویانه استفاده کرد (Bell 1978, Fahy & Guccion 1979, Shakoore & Bonelli 1991, Edet 1992, Ulusay et al. 1994, Howarth & Rowlands 1986).

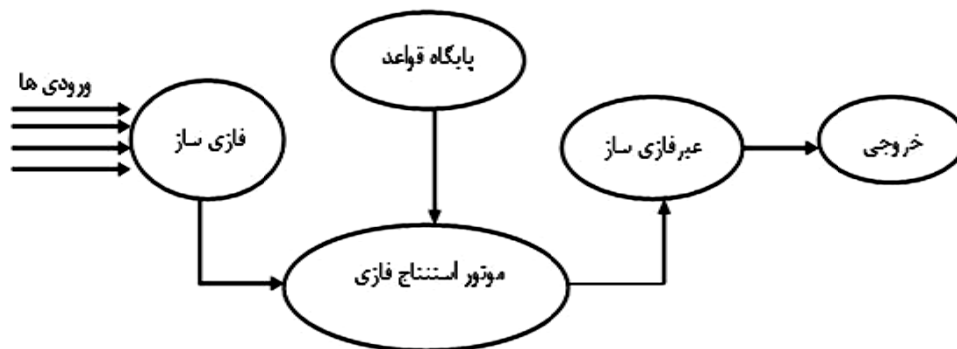
چکش اشمیت وسیله‌ای است که برای تخمین رابطه تجربی بین قرائت‌های برگشتی چکش و مقاومت فشاری تک محوری سنگ استفاده می‌شود.

استفاده از این وسیله، روشی غیرمستقیم و غیرمخرب برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری سنگ می‌باشد. این چکش از یک وسیله ضربه زن (گلوله ساخته شده از کاربید تنگستن) و یک دستگاه الکترونیکی برای اندازه‌گیری سرعت جهش (واکنش) تشکیل شده

## ۲- تحلیل پایداری به روش تئوری بلوکی

قواعد هستند که خروجی را به کمک روش‌های مبتنی بر اصول منطق فازی از ورودی‌های خاص پیش‌بینی می‌کنند. یک سیستم فازی برای تعیین خروجی فازی، به تعدادی ورودی فازی و مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه نیاز دارد. کاربر مقادیر عددی را وارد می‌کند، این مقادیر باید به متغیرهای فازی تبدیل شده تا به وسیله قوانین فازی پردازش شوند (مرحله استنتاج). نتیجه مرحله استنتاج، مقادیر فازی می‌باشد که بایستی با استفاده از روش‌های غیرفازی سازی به عدد تبدیل شوند (متکان و همکاران ۱۳۸۸). نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی، به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام گرفته می‌باشد. مرحله بعدی ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است. سیستم‌های فازی مختلف از اصول و روش‌های متفاوتی برای ترکیب این قواعد استفاده می‌کنند (Tzamos & Sofianos 2006).

روش پیاده‌سازی سیستم فازی که به وسیله گزاره‌های شرطی «اگر-آنگاه» انجام می‌پذیرد، شامل چهار مرحله کلی فازی‌سازی مقادیر عددی ورودی، پایگاه قواعد فازی (بیان قواعد سیستم)، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌سازی مقادیر فازی خروجی می‌باشد (Iphar & Goktan 2006). ساختار اصلی یک سیستم فازی، چهار مرحله فوق را شامل می‌شود که در تصویر ۱ نشان داده شده است (Rezaei et al. 2011a).



تصویر ۱- ساختار اصلی سیستم فازی (تشنه لب و همکاران ۱۳۷۸)

شده‌اند که در بین آنها تابع عضویت مثلثی و دوزنقه‌ای بیشترین کاربرد را دارند. در مدل فازی، رفتار سیستم به وسیله قواعد «اگر-آنگاه» توصیف می‌شود. یک پایگاه قواعد فازی از مجموعه قواعد «اگر-آنگاه» فازی تشکیل می‌شود. پایگاه قواعد فازی از این نظر که سایر اجزاء سیستم فازی برای پیاده‌سازی این قواعد به شکل مؤثر و کارا استفاده می‌شوند، قلب سیستم فازی محسوب می‌شود. ترکیب قواعد فازی و استنتاج خروجی، توسط موتور استنتاج فازی انجام می‌گیرد. در یک موتور استنتاج فازی، اصول منطق فازی برای ترکیب قواعد اگر-آنگاه

استفاده از تئوری منطق فازی، در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسور لطفی‌زاده توسعه یافت. از آن زمان به بعد این تئوری به ابزار مهمی در بخش‌های مختلف مهندسی تبدیل و جایگزین شیوه‌های مرسوم طراحی و مدل‌سازی سیستم شد. فرآیند تصمیم‌گیری در محیط فازی مشابه فرآیند تصمیم‌گیری در مغز انسان است، به طوری که روزانه انبوهی از اطلاعات مبهم را دریافت نموده و پس از تجزیه و تحلیل، تصمیم‌گیری می‌نماید (Chuang 1995, Zadeh 1965).

در تئوری کلاسیک، هر عنصر یا به یک مجموعه تعلق دارد و یا تعلق ندارد. در مجموعه‌های فازی، از روش‌های غیرصریح بر اساس عدم قطعیت استفاده می‌شود که در آن عناصر مورد استفاده به صورت عدد نبوده و در قالب متغیرهای زبانی (کیفی) می‌باشند (کشتکار و همکاران ۱۳۸۸). مجموعه فازی به وسیله تابعی در بازه [۰، ۱] تعریف می‌شود. برای هر عضو در یک مجموعه، درجه عضویتی اختصاص می‌یابد که می‌تواند به بیش از یک مجموعه با درجه عضویت‌های مختلف تعلق داشته باشد. عضویت اختصاصی که ناشی از دانش افراد خبره می‌باشد، به هر یک از اعضا درجه‌بندی می‌شود. این مفهوم با استفاده از توابع عضویت بیان می‌گردد که به مجموعه‌های فازی توانایی انعطاف‌پذیری برای مدل‌سازی عبارات توصیفی معمول را می‌دهد (Acaroglu et al. 2008, Aydin 2004). سیستم‌های فازی، سیستم‌های خبره مبتنی بر

با توجه به آنکه در قواعد «اگر-آنگاه» سیستم فازی از مقادیر کلامی یا کیفی استفاده می‌شود، لذا مقادیر عددی ورودی باید به مقادیر کیفی تبدیل شوند. عمل تبدیل مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به مقادیر کیفی یا عبارات توصیفی، اصطلاحاً به فازی‌سازی معروف است. فازی‌سازی مقادیر حقیقی در ورودی سیستم، به وسیله تابع عضویت انجام می‌گیرد. شکل تابع عضویت به نوع سیستم مطالعه بستگی داشته و می‌تواند به صورت خطی (مثلثی یا دوزنقه‌ای) و یا غیرخطی باشد. (Mathworks 1995). اشکال مختلفی از توابع عضویت مطرح

## ۳- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده

جمع‌آوری داده، یکی از مراحل مهم در مدلسازی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی می‌باشد. در این تحقیق، از اطلاعات مربوط به نمونه‌های سنگی اطراف تونل‌های دسترسی جبهه کار زغال استفاده شد. در این مطالعه، پارامترهای سختی اشمیت، دانسیته، تخلخل سنگ و مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری شدند. برای این منظور، از نمونه‌های مختلف سنگی با اندازه NX (۵۴ میلپتر)، استوانه‌ای و نسبت ارتفاع به قطر ۲/۵ به ۱ مطابق با روش پیشنهادی ISRM استفاده شد. در این تحقیق، ۹۳ سری داده برای مدلسازی فازی و آماری جمع‌آوری گردید. از این تعداد، ۷۵ سری برای طرح ریزی مدل‌ها و ۱۸ سری نیز برای آزمون عملکرد مدل‌ها استفاده شدند. داده‌های مورد استفاده در مدلسازی شامل انواع مختلفی از سنگ‌ها با مقاومت کم تا سنگ‌های بسیار سخت می‌باشند. انواع مختلف سنگ‌های مورد استفاده همراه با میانگین مقاومت فشاری تک محوری در جدول ۱ آورده شده‌اند. پارامترهای ورودی و خروجی و همچنین مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده نیز در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

در پایگاه قواعد فازی به‌وسیله نگاشتی از مجموعه فازی در ورودی به مجموعه فازی در خروجی استفاده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که در مرحله استنتاج فازی از روی متغیرهای ورودی فازی (کیفی)، توابع عضویت (مقادیر فازی) و قواعد سیستم، متغیرهای خروجی فازی استخراج می‌شوند (Iphar & Goktan 2006). مدل‌های فازی بر اساس موتور استنتاج کاربردهای متفاوتی دارند. از معمول‌ترین مدل‌های فازی می‌توان به مدل فازی ممدانی، مدل فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ (Takagi-Sugeno-Kang)، مدل فازی تسوکاموتو (Tsucamoto) و مدل فازی سینگلتن (Singleton) اشاره نمود. تفاوت موتورهای استنتاج در بخش نتیجه قواعد، روش اجتماع و غیرفازی‌سازی می‌باشد (Iphar & Goktan 2006, Sonmez et al. 2003). در پایان عملیات و محاسبات استنتاج فازی، حاصل عمل به‌صورت متغیری کیفی خواهد بود که برای استفاده از نتایج، باید آنها را به مقادیر عددی تبدیل نمود، این عمل غیرفازی‌سازی نام دارد. انواع مختلفی از روش‌های غیرفازی‌سازی مانند غیرفازی‌سازهای مرکز ثقل، میانگین مراکز و ماکزیمم وجود دارد. متداول‌ترین و بهترین غیرفازی‌ساز مورد استفاده در سیستم‌های فازی و کنترل فازی، غیرفازی‌ساز مرکز ثقل می‌باشد (Iphar & Goktan 2006).

جدول ۱- انواع سنگ‌های مورد استفاده در مدلسازی همراه با میانگین مقاومت فشاری تک محوری آنها

ردیف	نوع سنگ	میانگین مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	ردیف	نوع سنگ	میانگین مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)
۱	دیاباز	۳۰۳٫۱۸	۲۰	ریولیت	۲۰۰
۲	گابرو	۲۸۵٫۵	۲۱	آنورتوزیت	۲۰۰
۳	الیوین	۲۸۰	۲۲	گنایس	۱۷۴٫۴
۴	آمفیبولیت	۲۸۰	۲۳	اسلیت	۱۷۰
۵	دلریت	۲۷۵	۲۴	انیدریت	۱۵۰
۶	گرانودیوریت	۲۷۵	۲۵	دولومیت	۱۴۳
۷	اکلوژیت	۲۷۰	۲۶	مرمریت	۱۳۵٫۲
۸	سرپانتین	۲۶۳٫۹۷	۲۷	سیلتستون	۱۳۱٫۴۹
۹	دونیت	۲۶۰	۲۸	آهک	۱۱۶٫۸۴
۱۰	نوریت	۲۶۰	۲۹	ماسه سنگ	۱۰۴٫۹۹
۱۱	کوارتزیت	۲۵۷٫۸۷	۳۰	توف	۹۷
۱۲	کوارتز دیوریت	۲۵۰	۳۱	پیچستون	۹۰
۱۳	گرونا	۲۵۰	۳۲	شیل	۸۵
۱۴	پریدوتیت	۲۵۰	۳۳	مارن	۸۵
۱۵	پروکسینیت	۲۴۵	۳۴	ژیپس	۷۵٫۳
۱۶	بازالت	۲۳۱	۳۵	تالک	۶۱٫۶۶
۱۷	دیوپسید	۲۳۰	۳۶	کنگومرا	۳۸
۱۸	گرانیت	۲۲۴٫۵۳	۳۷	شیست	۳۳٫۶
۱۹	سینیت	۲۱۸			

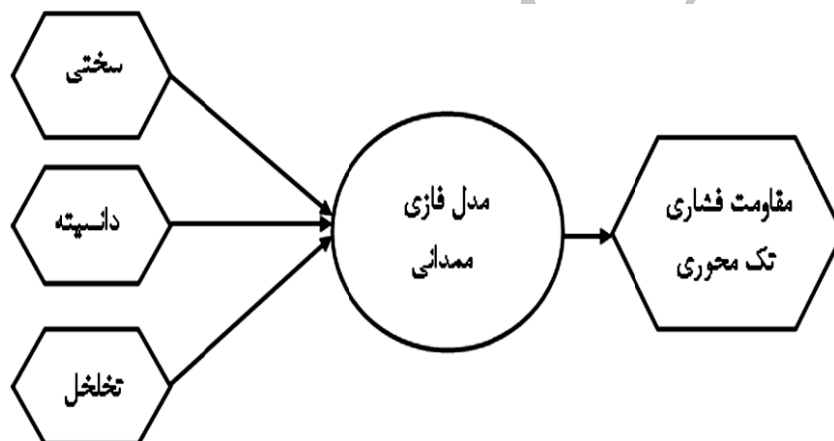
جدول ۲- توصیف آماری داده‌های مورد استفاده

نوع	پارامتر	ماکزیمم	مینیمم	دامنه تغییرات	میانگین	انحراف معیار	واریانس
	سختی (-)	۶۴/۳۳	۲۵/۲۵	۳۹/۰۸	۵۱/۳۸	۸/۳۴	۶۹/۶۶
ورودی	دانسیته (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۳/۸	۱/۶۵	۲/۱۵	۲/۵۰	۰/۴۷	۰/۲۲
	تخلخل (درصد)	۳۰	۰/۲۲	۲۹/۷۸	۸/۶۱	۶/۷۲	۴۵/۱۷
خروجی	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	۲۸۲	۲۳	۲۴۹	۱۲۵/۹۳	۷۳/۰۸	۵۳۴۱

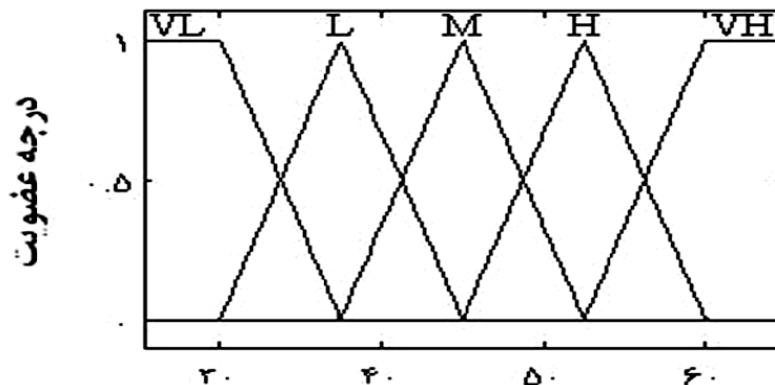
#### ۴- طراحی مدل فازی

متغیرهای ورودی و خروجی استفاده می‌شود. توابع عضویت ورودی‌ها به صورت کم (Low)، متوسط (Medium) و زیاد (High) می‌باشد. به عنوان مثال، می‌توان به نشانه‌های خیلی کم (VL)، متوسط (M) و خیلی زیاد (VH) اشاره کرد. ساختار سیستم فازی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری در تصویر ۲ و توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی در تصاویر ۳ تا ۶ نشان داده شده است.

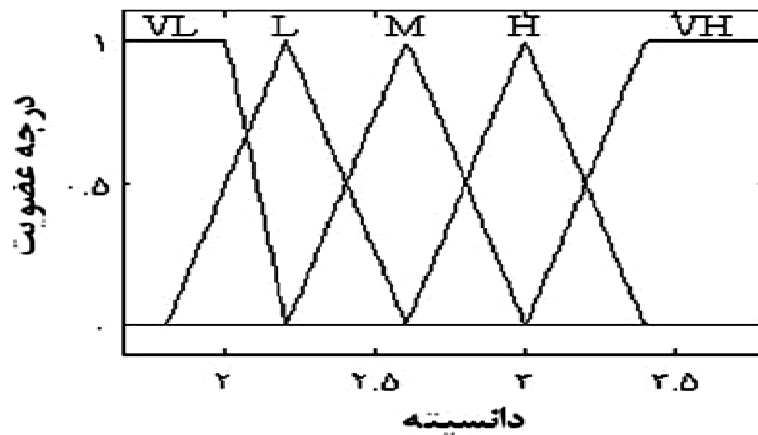
در ساخت مدل فازی، اولین مرحله فازی‌سازی مقادیر ورودی و خروجی است که با استفاده از توابع عضویت صورت می‌گیرد. توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای معمول‌ترین توابع عضویت مورد استفاده در مدل‌های فازی شرطی (اگر-آنگاه) می‌باشند (Iphar & Goktan, 2006, Sonmez, et al. 2003). از این توابع برای فازی‌سازی



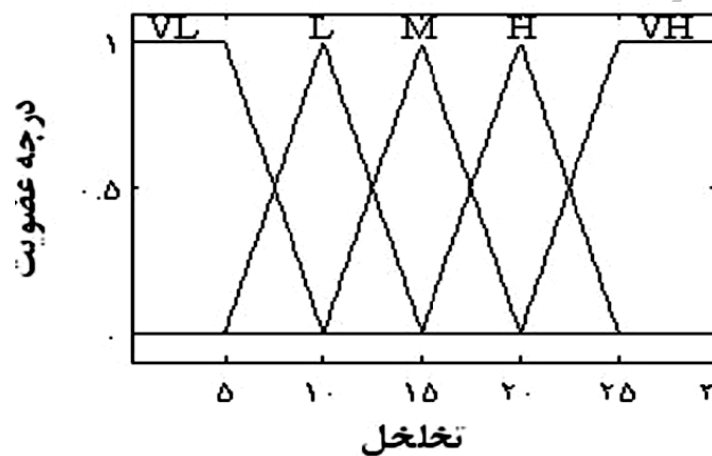
تصویر ۲- ساختار سیستم فازی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری



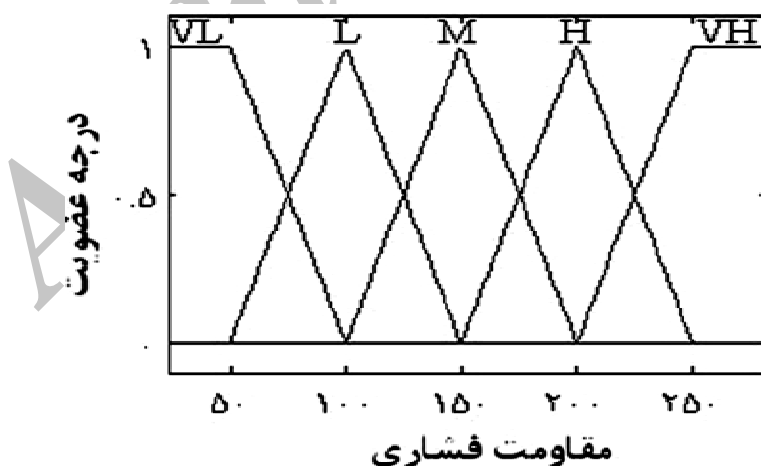
تصویر ۳- تابع عضویت سختی



تصویر ۴- تابع عضویت دانسیته



تصویر ۵- تابع عضویت تخلخل



تصویر ۶- تابع عضویت مقاومت فشاری تک محوری

مرحله بعدی در ساخت مدل فازی، ایجاد پایگاه قواعد فازی است. در پایگاه قواعد، مدل از ۷۵ قاعده اگر-آنگاه استفاده شده است. پس از ایجاد پایگاه قواعد، با انتخاب موتور استنتاج و روش غیرفازی‌سازی مناسب، مدل‌سازی تکمیل می‌شود. به دلیل آسان‌تر بودن تفسیر و تحلیل موتور استنتاج ممدانی در مقایسه با دیگر روش‌های استنتاج، این روش یکی از معمول‌ترین الگوریتم‌های استنتاج مورد استفاده در سیستم‌های فازی می‌باشد (Iphar & Goktan 2006, Acaroglu et al. 2008, Sonmez et al. 2003). در این تحقیق، از موتور استنتاج ممدانی برای

موتور استنتاج ممدانی در مقایسه با دیگر روش‌های استنتاج، این روش یکی از معمول‌ترین الگوریتم‌های استنتاج مورد استفاده در سیستم‌های فازی می‌باشد (Iphar & Goktan 2006, Acaroglu et al. 2008, Sonmez et al. 2003). در این تحقیق، از موتور استنتاج ممدانی برای

ترکیب قواعد فازی استفاده شد. برای عددی کردن نتایج فازی حاصل از مرحله استنتاج نیز از روش مرکز ثقل که متداول‌ترین و بهترین غیرفازی‌ساز مورد استفاده در سیستم‌های فازی است، استفاده شد (Hellendoorn & Thomas 1993). پس از این مراحل، در صورت اجرای مدل و وارد کردن هر مقدار از پارامترهای ورودی، مدل قادر به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد. اجرا و پیاده سازی مراحل مدل فازی، در محیط نرم افزار متلب (MATLAB) انجام شد. بخشی از داده‌ها (۱۸ سری) به‌عنوان داده آزمون، برای ارزیابی مدل جهت نشان دادن ارتباط بین پیش‌بینی حاصل از مدل فازی و مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته شدند (تصویر ۷). همبستگی بالای نتایج حاصل از مدل فازی (۰/۹۴) با مقادیر واقعی نشان می‌دهد که سیستم فازی قادر به پیش‌بینی و تعیین میزان مقاومت فشاری تک محوری با دقت بالا می‌باشد.

بر این اساس، تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی با مدل پیشنهادی وجود دارد. علاوه بر این، برتری الگوریتم پیشنهادی برای تحلیل زون بحرانی لغزش و ریزش پیش‌رونده فراتر از توان تحلیل توسط روش‌های عددی ذکر شده است.

همچنین الگوریتم پیشنهادی، توانایی تحلیل دو نوع لغزش دامنه را با مکانیسم کاملاً متفاوت دارا می‌باشد. با توسعه چنین الگوریتم‌هایی، توانایی تحلیل دامنه‌های سنگی و تطابق آنها با واقعیت بیشتر می‌گردد. سرعت فرآیند تحلیل پایداری توسط الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر روش گروه‌کلیدی، بسیار بیشتر از روش‌های عددی می‌باشد.

$$R^2 = 100 \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (A_{ipred} - \bar{A}_{pred})(A_{imeas} - \bar{A}_{meas})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_{ipred} - \bar{A}_{pred})^2 \sum_{i=1}^n (A_{imeas} - \bar{A}_{meas})^2}} \right]^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{imeas} - A_{ipred})^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این روابط؛  $A_{imeas}$   $i$  امین مقدار اندازه‌گیری شده (واقعی)،  $A_{ipred}$   $i$  امین مقدار پیش‌بینی شده،  $n$  تعداد سری‌های داده و  $\bar{A}_{meas}$  و  $\bar{A}_{pred}$  به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) و پیش‌بینی شده می‌باشند.

نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. بر این اساس، ضریب تصمیم‌گیری حاصل از مدل فازی، بیشتر و جذر متوسط مربعات خطای آن کمتر از مدل رگرسیون می‌باشد.

جدول ۳- ارزیابی عملکرد مدل فازی و رگرسیون چند متغیره

شاخص	مدل فازی	مدل رگرسیون چند متغیره
ضریب تصمیم‌گیری	۰/۹۴/۳	۰/۸۷/۹
جذر متوسط مربعات خطا	۳/۲	۶/۸

رگرسیون چند متغیره، روشی آماری است که برای بررسی رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل و همچنین تجزیه و تحلیل داده در مدل‌سازی به‌کار می‌رود (Eskandari et al. 2004). از این روش می‌توان در پیش‌بینی خروجی و به‌دست آوردن رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی استفاده کرد. محققین بسیاری در زمینه‌های مختلف معدنکاری، از این روش استفاده نموده‌اند (Jennrich 1995, Finol et al. 2001, Rezaei et al. 2011b). در این تحقیق نیز از روش آماری رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری (بر اساس پارامترهای سختی اشمیت، دانسیته و تخلخل) استفاده شد. ارتباط بین پارامترهای ورودی و مقاومت فشاری تک محوری بر اساس رگرسیون چند متغیره، با استفاده از نرم افزار اسپاس (SPSS) آنالیز شد که حاصل آن به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد.

## ۵- مدل آماری

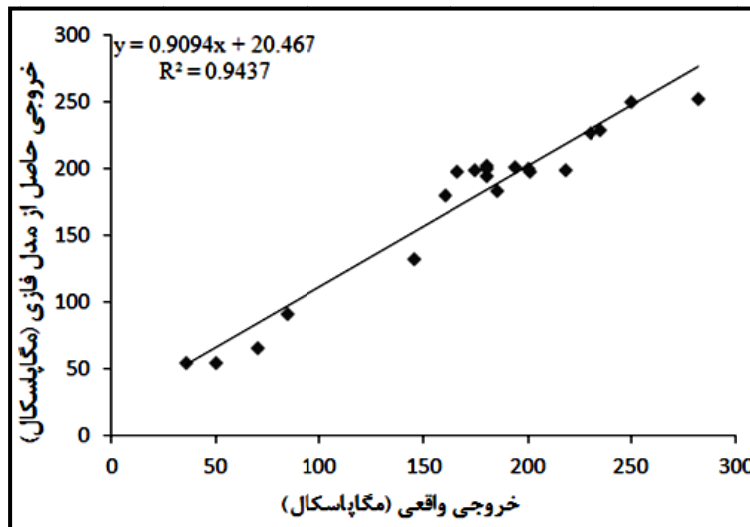
رگرسیون چند متغیره، روشی آماری است که برای بررسی رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل و همچنین تجزیه و تحلیل داده در مدل‌سازی به‌کار می‌رود (Eskandari et al. 2004). از این روش می‌توان در پیش‌بینی خروجی و به‌دست آوردن رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی استفاده کرد. محققین بسیاری در زمینه‌های مختلف معدنکاری، از این روش استفاده نموده‌اند (Jennrich 1995, Finol et al. 2001, Rezaei et al. 2011b). در این تحقیق نیز از روش آماری رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری (بر اساس پارامترهای سختی اشمیت، دانسیته و تخلخل) استفاده شد. ارتباط بین پارامترهای ورودی و مقاومت فشاری تک محوری بر اساس رگرسیون چند متغیره، با استفاده از نرم افزار اسپاس (SPSS) آنالیز شد که حاصل آن به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد.

$$\text{(تخلخل)} - ۳/۲۴ - (\text{دانسیته}) ۷/۶۲ + (\text{سختی اشمیت}) ۳/۷۴ - ۲۲۹ = \text{مقاومت فشاری تک محوری}$$

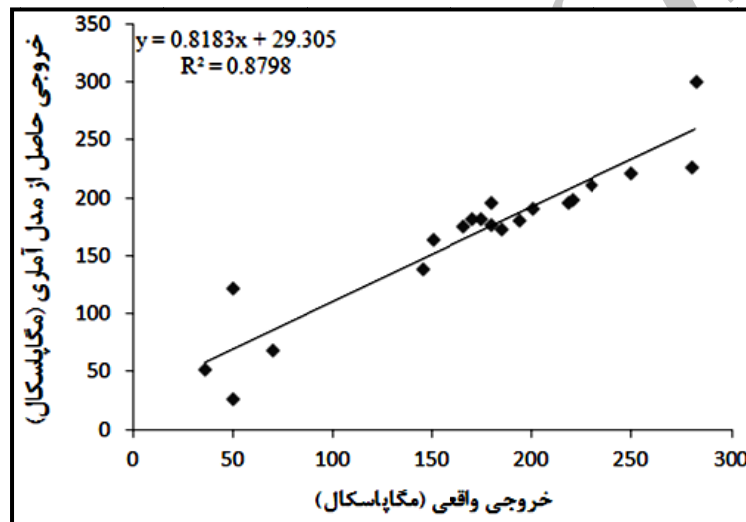
ارزیابی مدل رگرسیون نیز با استفاده از داده‌های آزمون (داده‌های به-کار رفته جهت ارزیابی مدل فازی) انجام شد. همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوری حاصل از رگرسیون چند متغیره (رابطه ۱) با مقادیر واقعی برابر با ۰/۸۷ می‌باشد (تصویر ۸).

## ۶- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد مدل فازی و رگرسیون چند متغیره و همچنین مقایسه آن‌ها، از شاخص‌های عملکرد ضریب تصمیم‌گیری (Determination Coefficient) و جذر متوسط مربعات خطا (Root



تصویر ۷- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری حاصل از مدل فازی و مقادیر واقعی



تصویر ۸- ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری حاصل از مدل رگرسیون و مقادیر واقعی

(۴) (رابطه)

$$X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$$

هر عضو از پارامتر ورودی به وسیله یک بردار طول به تابع هدف متصل می‌شود (رابطه ۵).

(۵) (رابطه)

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\}_1$$

میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر روی تابع هدف ( $I_{ij}$ ) از رابطه ۶ تعیین می‌شود.

(۶) (رابطه)

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^m X_{ik} X_{jk} / \sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \sum_{k=1}^m X_{jk}^2}$$

## ۷- آنالیز حساسیت

یکی از اقدامات اساسی پس از مدل‌سازی، تعیین میزان حساسیت پارامتر خروجی نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی می‌باشد. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان روند کلی تأثیر نسبی پارامترهای ورودی مدل را بر خروجی (تابع هدف) تعیین نمود.

یکی از روش‌های جدید تعیین حساسیت جواب (خروجی) نسبت به پارامترهای ورودی، روش میدان کسینوسی (Cosine Amplitude Method) است (Jong & Lee 2004). در این روش، یک فضای چند بُعدی مفروض است که تعداد پارامترهای ورودی تعیین کننده بُعد آن می‌باشند (رابطه ۴).



نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل فازی با استفاده از روش فوق نشان می‌دهد که پارامتر سختی بیشترین و تخلخل کمترین تأثیر را بر تابع هدف (مقاومت فشاری تک محوری) دارند (تصویر ۹). با توجه به اینکه میزان تأثیر بدست آمده برای هر سه پارامتر بالای ۰/۹ است، بنابراین از پارامترهای تأثیر گذار در تعیین مقاومت فشاری تک محوری می‌باشند.

هر چه میزان تأثیر پارامتر ورودی بر هدف مورد نظر (خروجی) بیشتر باشد، مقدار بدست آمده به یک نزدیک می‌شود. در صورت عدم تأثیر پارامتر ورودی بر خروجی مورد نظر، مقدار بدست آمده برابر صفر خواهد بود. میزان تأثیر بالای ۰/۹، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه پارامتر بر خروجی و مقادیر زیر ۰/۸ بیانگر تأثیر ضعیف آن بر خروجی می‌باشد (Khandelwal & Singh 2007).



تصویر ۹- تأثیر پارامترهای ورودی بر مقاومت فشاری تک محوری

## ۸- نتیجه‌گیری

محوری سنگ می‌باشد. همچنین، نتیجه آنالیز حساسیت انجام گرفته بر روی خروجی مدل فازی نشان می‌دهد که هر سه پارامتر ورودی بر خروجی مؤثر می‌باشند، به طوری که سختی بیشترین تأثیر و تخلخل کمترین تأثیر را بر مقاومت فشاری تک محوری دارند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که مدل فازی قابلیت خوبی در پیش‌بینی و تعیین مقاومت فشاری تک محوری دارد و در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی ساده‌تر، سریع‌تر و اقتصادی‌تر است. بنابراین، می‌توان از سیستم فازی ممدانی به عنوان یک روش مطمئن برای تعیین مقاومت فشاری در کارهای مختلف معدنکاری مانند تحلیل شکست جبهه کار طولی، تحلیل پایداری تونل‌های دسترسی و پایه‌های آن، پایداری شیب و غیره استفاده کرد.

## مراجع

تشنه‌لب، م. صفارپور، ن. و افیونی، د.، ۱۳۷۸، "سیستم‌های فازی و کنترل فازی"، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.  
دهقان، س. و ستاری، ق.، ۱۳۸۶، "تخمین مقاومت تراکمی تک محوری سنگ تراورتن محلات با استفاده آزمایش شاخص بار نقطه-ای"، فصلنامه‌ی زمین شناسی کاربردی، سال سوم، شماره ۴: ۲۵۹-۲۵۲.  
کشتکار، م.، لطف پور، م.، معلمی، س. ع. و بافری، ع. م.، ۱۳۸۸، "تخمین گونه‌های سنگی، رخساره‌های سنگی و تراوایی در یکی از

روش فازی، قابلیت خوبی در مدل کردن سیستم‌های پیچیده و غیر خطی زمین‌شناسی مهندسی دارد. یکی از مزیت‌های مدل فازی آن است که به فرمول‌های تعریف شده به‌عنوان یک اصل یا قاعده اولیه برای ایجاد مدل‌های پیش‌گویانه بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده نیاز ندارد. اگرچه جمع‌آوری داده جهت طراحی مدل فازی و ساخت پایگاه قواعد مدل فازی پرهزینه و زمان‌بر است، اما جمع‌آوری این داده‌ها در طول عملیات آزمایشگاهی منظم، امکان‌پذیر می‌باشد. یکی دیگر از مزیت‌های مدل فازی آن است که بعد از طراحی و تهیه مدل، به‌دست آوردن نتایج خیلی سریع صورت می‌گیرد. در این تحقیق از یک مدل جدید بر اساس سیستم فازی ممدانی و همچنین روش آماری رگرسیون چند متغیره جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری استفاده شد. در این مطالعه، برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از شاخص-های ضریب تصمیم‌گیری و جذر متوسط مربعات خطا استفاده گردید. ضریب تصمیم‌گیری و جذر متوسط مربعات خطا به‌ترتیب برابر ۹۴/۳ درصد و ۳/۲ برای مدل فازی و ۸۷/۹ درصد و ۶/۸ برای مدل رگرسیون می‌باشد. ضریب تصمیم‌گیری بیشتر و جذر متوسط مربعات خطای کمتر حاصل از مدل فازی نسبت به مدل رگرسیون چند متغیره، نشان‌دهنده قابلیت بهتر مدل فازی در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک

- Engineering*, Vol. 29: 97-113.
- Heidari, M., Khanlari, G. R., Torabi Kaveh, M. & Kargarian, S., 2011**, "Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing", *Rock Mech Rock Eng*, doi: 10.1007/s00603-011-0196-8.
- Hellendoorn, H. & Thomas, C., 1993**, "Defuzzification in fuzzy controllers", *J Intell Fuzzy Syst*: 109-23.
- Hisashi, A. & Yukinori, M., 2008**, "Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness", *Bull Eng Geol Environ*, Vol. 67: 23-29.
- Hoek, E. & Brown, E. T., 1980, "Underground excavations in rock", *Institution of Mining and Metallurgy*, 527 pp.
- Howarth, D. F. & Rowlands, J. C., 1986**, "Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 9: 169-179.
- Huang, Y. T. & Siller, T. J., 1997**, "Fuzzy representation and reasoning in geotechnical site characterization". *Computers and Geotechnics*, Vol. 21: 65-86.
- Iphar, M. & Goktan, R. M., 2006**, "An application of fuzzy sets to the Diggability Index Rating Method for surface mine equipment selection", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 43: 253-266.
- ISRM Suggested Methods, 1981**, "Rock Characterization Testing and Monitoring", In: Brown ET (ed) *Oxford: Pergamon Press*: x, 211p.
- Jennrich, R. I., 1995**, "An Introduction to Computational Statistics-Regression Analysis", *Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall*.
- Jong, Y. H. & Lee, C. I., 2004**, "Influence of geological conditions on the powder factor for tunnel blasting", *International Journal of Rock Mechanic & Mining Sciences*, Vol. 41: 533-538.
- Juang, C. H. Jhi, Y. Y., & Lee, D. H., 1998**, "Stability analysis of existing slopes considering uncertainty", *Engineering Geology*, Vol. 49: 111-122.
- Khandelwal, M. & Singh, T. N., 2007**, "Evaluation of blast-induced ground vibration predictors", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27: 116-125.
- Mathworks, 1995**, "Fuzzy logic toolbox user's guide".
- Meulenkamp, F. & Alvarez Grima, M., 1999**, "Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36: 29-39.
- Nawari, N. O. & Liang, R., 2000**, "Fuzzy-based approach for determination of characteristic values of measured geotechnical parameters", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37: 339-349.
- Nguyen, V. U., 1985**, "Some fuzzy set applications in mining geomechanics", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 22: 369-379.
- Rezaei, M. Monjezi, M. & Yazdian Varjani, A., 2011a**, "Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining", *safety science*, Vol. 49: 298-305.
- Rezaei, M. Monjezi, M., Ghorbani Moghaddam, S. & Farzaneh, F., 2011b**, Burden prediction in blasting
- میادین گازی فارس ساحلی با استفاده از مدل سازی فازی"، فصلنامه‌ی زمین شناسی کاربردی، سال پنجم، شماره ۴: ۳۱۷-۳۱۱.
- کیانپور، م.، ارومیه‌ای، ع. و نیکودل م. ر.، ۱۳۹۰، "بررسی روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری شیلهای سازند شمشک"، فصلنامه‌ی زمین شناسی کاربردی، سال سوم، شماره ۱: ۹۰-۱۷.
- متکان، ع. ا.، سمیعا، ج.، پورعلی س. ح. و صفایی، م.، ۱۳۸۸، "مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه‌ی آبخیز لاجیم"، فصلنامه‌ی زمین شناسی کاربردی، سال سوم، شماره ۴: ۳۲۴-۳۱۸.
- Acaroglu, O. Ozdemir, L. & Asbury, B., 2008**, "A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 23: 600-608.
- Ali, M. & Chawathe, A., 2000**, "Using artificial intelligence to predict permeability from petrographic data", *Computers and Geosciences*, Vol. 26: 915-925.
- American Society for Testing and Materials, 1984**, "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens", *Soil and Rock, Building Stones: Annual Book of ASTM Standards 4.08, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM*.
- Asef, M. R., 1995**, "Equotip as an index lestfor rock strength properties", M.Sc. thesis, ITC Delft.
- Aydin, A., 2004**, "Fuzzy set approaches to classification of rock masses", *Engineering Geology*, Vol. 74: 227-245.
- Bell, F. G., 1978**, "The physical and mechanical properties of the Fell sandstone", *Nothumberland, England. Engineering Geology*, Vol. 12: 1-29.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F. & Rampini, A., 1998**, "Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster - Shafer approaches", *Natural Hazards*, Vol. 17: 77-97.
- Chuang, P. H., 1995**, "Use of fuzzy sets for evaluating shear strength of soils", *Computers & Geotechnics*, "Vol. 17: 425-446.
- Davis, T. J. & Keller, C. P., 1997**, "Modelling uncertainty in natural resource analysis using fuzzy sets and Monte Carlo simulation: slope stability prediction", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 11: 409-434.
- Edet, A., 1992**, "Physical properties and indirect estimation of microfractures using Nigerian carbonate rocks as examples", *Engineering Geology*, Vol. 33: 71-80.
- Eskandari, H., Rezaee, M. R. & Mohammadnia, M., 2004**, "Application of Multiple Regression and Artificial Neural Network Techniques to Predict Shear Wave Velocity from Wireline Log Data for a Carbonate Reservoir South-West Iran", *CSEG Recorder*.
- Fahy, M. P. & Guccione, M. J., 1979**, "Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data", *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. 2: 467-485.
- Finol, J. Guo, Y. K. & Dong, J. X., 2001**, "A rule-based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters", *Journal of Petroleum Science and*

operation using rock geomechanical properties, *Arabian Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s12517-010-0269-0.

**Sakurai, S. & Shimizu, N., 1987**, "Assessment of rock slope stability by fuzzy set theory", In: *Herget, G., Vongpaisal, S. (Eds.), Proceedings of the 6th Congress of the International Society for Rock Mechanics*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 503–506.

**Sarat, K. D., Pijush, S. & Akshaya, K. S., 2011**, "Application of Artificial Intelligence to Maximum Dry Density and Unconfined Compressive Strength of Cement Stabilized Soil", *Geotech Geol Eng*, Vol. 29: 329-342.

**Shakoor, A. & Bonelli, R. E., 1991**, "Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstone", *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. 3: 55–71.

**Singh, T. N., Ashutosh, K., Venkatesh, A., 2011**, "Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types", *Rock Mech Rock Eng.*, Vol. 45: 259-264.

**Singh, T. N., Jadhav, V. B. & Singh, S., 2009**, "A fuzzy approach to classify physico-mechanical rock property with varying pH of the surrounding medium", *Environ Geol.*, Vol. 56: 1383-1387.

**Sonmez, H. Gokceoglu, C. & Ulusay, R., 2003**, "An application of fuzzy sets to the geological strength index (GSI) system used in rock engineering", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 16: 251-269.

**Tzamos, S. & Sofianos, A. I., 2006**, "Extending the Q system's prediction of support in tunnels employing fuzzy logic and extra parameters", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 43: 938-949.

**Ulusay, R. Tureli, K. & Ider, M. H., 1994**, "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques", *Engineering Geology*, Vol. 37: 135-157.

**Verwaal, W. & Mulder, A., 1993**, "Estimating rock strength with the Equotip hardness tester", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Vol. 30: 659-662.

**Zadeh, L. A., 1965**, "Fuzzy sets", *Inf. Control*, Vol. 8: 338–353.