

# برآورد متغیرهای مقاومت برشی شیل‌های سازند شمشک با استفاده از الگوریتم منطق فازی

مهدی کیانپور<sup>۱\*</sup>، محمد سیاری<sup>۲</sup>، علی ارومیه‌ای<sup>۳</sup> و محمدرضا نیکودل<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۴</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۲۲

## چکیده

مقاومت برشی از مهم‌ترین ویژگی‌های سنگ‌های رسی و شیل‌ها در مهندسی سنگ و زمین‌شناسی مهندسی به شمار می‌رود. به دلیل مشکلات موجود در تهیه نمونه دست‌نخورده، به دست آوردن متغیرهای مقاومت برشی این سنگ‌ها در آزمایشگاه همواره امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش برآورد متغیرهای مقاومت برشی شیل‌های سازند شمشک با استفاده از دیگر ویژگی‌های سنگ بررسی شده است. برای این منظور، ۳۰ نمونه از شیل‌های سازند شمشک از گمانه‌های حفاری شده در محل نیروگاه تلمبه-ذخیره‌های سیاه‌بیشه و از ژرفاهای مختلف گردآوری شد و متغیرهای مقاومت برشی (C و  $\phi$ )، چگالی، تخلخل، مقاومت کششی و درصد کوارتز برای هر نمونه در آزمایشگاه تعیین شد. داده‌های به دست آمده از روش‌های آماری و منطق فازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا روابطی میان متغیرهای مقاومت برشی و دیگر ویژگی‌های سنگ به دست آید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که متغیرهای مقاومت برشی شیل‌های مورد مطالعه می‌توانند با دقت قابل قبولی از مدل‌های منطق فازی ارائه شده برآورد شوند. ضرایب  $R^2$  میان مقادیر برآورد شده از مدل‌های منطق فازی با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه برای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۸۴ به دست آمد. افزون بر تغییرات ضرایب رگرسیون ( $R^2$ )، روند توزیع خطاهای محاسبه شده، شاخص‌های عملکرد (VAF) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به دست آمده برای متغیرهای مقاومت برشی برآورد شده از روش رگرسیون چندمتغیره و روش منطق فازی نشان‌دهنده کارایی و دقت بالای مدل منطق فازی ارائه شده و عدم کارایی مطمئن روش‌های آماری رگرسیون چندمتغیره در برآورد متغیرهای مقاومت برشی شیل‌های مطالعه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** شیل، سازند شمشک، متغیرهای مقاومت برشی، منطق فازی، رگرسیون چندمتغیره، ضرایب رگرسیون.

\*نویسنده مسئول: مهدی کیانپور

E-mail: m.kian61@yahoo.com

## ۱- پیش‌گفتار

سنگ‌های رسی و شیل‌ها در پوسته بالایی زمین گسترش زیادی دارند و در بیشتر طرح‌های مهندسی به ناچار با این سنگ‌ها روبه‌رو می‌شویم. از سوی دیگر تعیین متغیرهای مقاومت برشی خاک و سنگ در پروژه‌های عمرانی همواره از نیازهای اساسی بوده است. اندازه‌گیری این متغیرها در آزمایشگاه به ویژه در سنگ‌های رسی و شیل‌ها، به دلیل مشکلات موجود در تهیه نمونه، نیازمند به کاربردن وقت زیاد و هزینه بالاست. افزون بر آن نتایج حاصل وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، چگونگی بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل بیرونی و غیره دارد. در صورتی که نتوان متغیرهای مقاومت برشی این سنگ‌ها را به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد، ناگزیر باید از روش‌های غیرمستقیم با استفاده از دیگر ویژگی‌های سنگ که به آسانی قابل اندازه‌گیری هستند، استفاده شود و این امر ضرورت پژوهش در این زمینه را به خوبی نشان می‌دهد. در چند سال اخیر پژوهشگران مختلف از جمله Burak Goktepe et al. (2008), Hajdarwish (2006), Hajdarwish & Shakoor (2006), Marte et al. (2008), Olgaard et al. (1997), Sung et al. (2002), Younane et al. (2010) مطالعاتی روی برآورد غیرمستقیم مقاومت برشی سنگ‌ها و خاک‌های رسی از روش‌های آماری و فازی انجام داده‌اند.

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از روش‌های آماری و منطق فازی مدل‌هایی برای برآورد متغیرهای مقاومت برشی شیل‌های سازند شمشک در منطقه سیاه‌بیشه با استفاده از دیگر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ همچون چگالی، تخلخل، مقاومت کششی و درصد کوارتز ارائه شود. به منظور تحلیل آماری از نرم‌افزار DATAFIT8 و به منظور تحلیل فازی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

کندوان و در محل پروژه نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌های سیاه‌بیشه) و در دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز قرار گرفته است و از دید تقسیمات پهنه‌های زمین‌شناسی ایران در پهنه البرز قرار می‌گیرد (شکل ۱).

نمونه‌های شیل مورد مطالعه از بیش از ۲۰۰۰ متر مغزه حفاری شده در سازند شمشک و در محل نیروگاه تلمبه-ذخیره‌های سیاه‌بیشه با گسترش سطحی و ژرفایی مناسب انتخاب شده‌اند.

تشکیلات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بیشتر در محدوده سنی پالئوزویک و مزوزویک قرار دارند. سازند شمشک به سن لیا س جوان‌ترین سازند زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه است. این سازند با ستبرای ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ متر دارای ماسه‌سنگ‌های میکایی، سیلتستون، شیل و رس‌سنگ همراه با رگه‌های زغال و باقیمانده گیاهان است. نمونه‌های شیل شامل شیل‌های سیاه تا خاکستری با مقادیر متفاوت ماسه و سیلت هستند (شیل سیلتی و شیل ماسه‌دار) و بیشتر به صورت تناوبی با دیگر سنگ‌ها مانند ماسه‌سنگ، سیلتستون و زغال‌سنگ مشاهده می‌شوند (آقاناتی، ۱۳۷۱؛ درویش‌زاده، ۱۳۷۱).

بررسی‌های انجام شده و بازدید از نواحی پراکندگی این سازند (هم در چهارگوش نقشه بلده و هم در چهارگوش نقشه مرزن‌آباد) نشان می‌دهد که نمونه‌های شیل در منطقه مورد مطالعه، تنوع رفتاری زیادی دارند و تا حد زیادی نماینده شیل‌های این سازند در دیگر مناطق پراکندگی آن هستند.

## ۳- ویژگی‌های سنگ‌شناختی شیل‌های مورد مطالعه

شیل‌های مورد مطالعه در نام‌گذاری مقاطع میکروسکوپی با عنوان شیل‌های سیلتی و شیل‌های ماسه‌ای نام‌گذاری می‌شوند. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها کانی‌های رسی، کوارتز، فلدسپار، مسکوویت و سیمان ریزبلور هستند. کوارتز در

## ۲- زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۱۳۰ کیلومتری جاده کرج-چالوس (۱۰ کیلومتری تونل

دقیق از متغیرها نمی‌انجامند و معمولاً از محدوده‌ای که میانگین واقعی در آن محدوده قرار می‌گیرد (فاصله اطمینان) استفاده می‌شود. برای داده‌های مورد استفاده فاصله اطمینان ۹۵٪ و سطح خطای برآورد  $\alpha = 0.05$  در نظر گرفته شده است.

در یک آزمون آماری، ما می‌خواهیم مطمئن شویم آنچه که در مورد یک نمونه درست است، در مورد جامعه‌ای که نمونه از آن گرفته شده نیز درست خواهد بود یا خیر؟ درستی رگرسیون آماری و اهمیت ضریب  $R^2$  را می‌توان از آزمون  $t$  مشخص کرد. آزمون  $t$  با در نظر گرفتن این که متغیرها دارای توزیع عادی هستند و مشاهدات تصادفی بوده‌اند، انجام شده است. برای این منظور از نرم‌افزار Sigmaplot با استفاده از روش گام به گام (Stepwise) به برآورد ضرایب پرداخته شده است. نتایج به دست آمده برای روابط ۱ و ۲ در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است. مقدار  $t$  بحرانی برای روابط چندمتغیره به دست آمده با استفاده از جدول‌های استاندارد محاسبه می‌شود و با مقایسه آن با  $t$  محاسبه شده می‌توان درستی مدل به دست آمده را بررسی کرد. چنانچه مقدار  $t$  محاسبه شده بیشتر از مقدار  $t$  بحرانی باشد، فرضیه صفر (فرض کارایی نداشتن رابطه) رد می‌شود و رابطه آماری به دست آمده مورد تأیید قرار می‌گیرد. افزون بر آن عدد  $P$  معنی داری یا مقدار خطایی است که در رد فرضیه صفر انجام می‌دهیم. هرچه مقدار  $P$  کمتر باشد رد کردن فرضیه صفر ساده‌تر است و با رد فرضیه صفر در آزمون  $t$  به صورت غیر مستقیم، صحت رگرسیون به دست آمده تأیید می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول‌های ۴ و ۵ می‌توان روابط چندمتغیره به دست آمده را معتبر دانست.

$$c = 6.69696 + 3.99905TS - 2.73002n - 0.24314TS^2 + 0.115542n^2$$

$$R^2 = 0.62 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\phi = -2996.82 + 2144.19\rho + 1.52037Qz - 379.38\rho^2 - 0.0184962Qz^2$$

$$R^2 = 0.52 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در شکل ۵، رابطه میان مقادیر  $c$  و  $\phi$  برآورد شده با استفاده از روابط ۱ و ۲ با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه، نشان داده شده است. نتایج آزمون  $t$  انجام شده روی روابط موجود در شکل‌های ۵ - الف و ب، در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

#### ۶- سامانه منطق فازی (FIS)

اصول کلی منطق فازی توسط پروفیسور لطفی زاده (Lotfizadeh, 1973) برای ایجاد ارتباط منطقی میان کمیته‌ای نامفهوم در صحنه محاسبات نو ظاهر شد.

در جهان واقعیات، آدمی بسیاری از مفاهیم را به صورت فازی (fuzzy به معنای غیردقیق، ناواضح و مبهم) درک می‌کند و به کار می‌بندد. در مجموعه فازی هر یک از این صفات بر پایه تابع عضویت تعریف و میان صفر تا یک ارزش‌گذاری می‌شوند. این روش به شیوه‌های تفکر و تعلم انسان نزدیک است. به طور کلی طراحی سامانه‌های منطق فازی به دو روش (Mamdani & Assilian (1975) و Sugeno (1985) انجام می‌شود.

در چند سال اخیر سامانه‌های منطق فازی کاربرد زیادی در مهندسی سنگ و زمین‌شناسی مهندسی پیدا کرده‌اند. یکی از دلایل استفاده از منطق فازی در علوم زمین و مهندسی سنگ، توانایی زیاد این سامانه‌ها در حل مسایل چندمتغیره و غیرخطی نسبت به روش‌های آماری است. در حقیقت کارایی سامانه منطق فازی در برآورد ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها در استفاده از داده‌های نامفهوم و با همبستگی پایین و رسیدن به مدل‌هایی با همبستگی بالا است که آن‌را تبدیل به شیوه‌ای مقتدر و کاربردی کرده است. پژوهش‌های پژوهشگران مختلف از جمله

اندازه سیلت و ماسه در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود و مهم‌ترین کانی غیر رسی در این سنگ‌ها به شمار می‌رود.

افزون بر اجزای اصلی یادشده، اجزای فرعی تشکیل دهنده شامل گلوکونیت و سربست، کانی‌های کدر، خرده‌سنگ‌ها، زغال و اکسیدهای آهن است (شکل ۲). با وجود تفاوت کم در اجزای تشکیل دهنده شیل‌های مورد مطالعه، تفاوت‌های زیادی در رفتار مکانیکی این سنگ‌ها (ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری) مشاهده شد که این خود نشان‌دهنده تأثیر بسزای میزان تخلخل، چگالی، درصد خاص، چگونگی ارتباط دانه‌ها با یکدیگر، وجود و یا نبود شکستگی‌های میکروسکوپی در رفتار مکانیکی این سنگ‌هاست.

#### ۴- نتایج آزمایشگاهی

از آنجا که رفتار مکانیکی شیل‌ها به شدت تحت تأثیر ناهمسان‌گردی این سنگ‌ها قرار می‌گیرد، در این پژوهش به منظور جلوگیری از اثر هرگونه ناهمسان‌گردی، ۳۰ نمونه شیل که محور مغزه حفاری عمود بر سوی لایه‌بندی آنهاست (بیشترین زاویه انحراف ۶ درجه) انتخاب و آزمایش شدند.

متغیرهای مقاومت برشی ( $c$  و  $\phi$ )، مقاومت کششی (TS)، تخلخل ( $n$ )، چگالی ( $\rho$ ) و درصد کوآرتز ( $Qz$ %) در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس تعیین شده است.

آزمایش تعیین مقاومت سه‌محوری روی نمونه‌ها تحت سه تنش همه جانبه ( $\sigma_3$ ) مختلف برای هر نمونه و مطابق با استاندارد ISRM صورت گرفته است. مقادیر  $\sigma_3$  برای همه نمونه‌ها یکسان و برابر  $2MPa$ ،  $5MPa$  و  $8MPa$  در نظر گرفته شده است. با استفاده از مقادیر  $\sigma_3$  به کار رفته و مقادیر  $\sigma_1$  (تنش اصلی در لحظه شکست) به دست آمده و توسط نرم‌افزار ROCKDATA پوس مور برای هر نمونه رسم و مقادیر  $c$  و  $\phi$  محاسبه شده است.

در جدول ۱ به ترتیب مقادیر اولیه داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه به صورت جدا برای هر نمونه و در جدول ۲ نتایج تحلیل‌های آماری اولیه روی داده‌های به دست آمده ارائه شده است.

#### ۵- تحلیل‌های آماری

تحلیل‌های آماری از روش‌های رایج در مهندسی سنگ و زمین‌شناسی مهندسی برای به دست آوردن مدل‌های پیش‌بینی‌کننده با استفاده از داده‌های موجود است که بیشتر به دو صورت رگرسیون ساده و چندمتغیره صورت می‌گیرد. در اینجا برای به دست آوردن رگرسیون ساده، افزون بر معادله خطی ( $y=ax+b$ )، معادلات توانی ( $y=ae^{bx}$ )، نمایی ( $y=ae^{bx}$ ) و لگاریتمی ( $y=a\ln x+b$ ) نیز بررسی شدند. ضرایب رگرسیون برای معادلات حاصل از بهترین حالت برازش در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج به دست آمده از جدول ۴، نشان‌دهنده وجود بیشترین همبستگی میان TS و  $n$  با  $c$  و همبستگی بیشتر میان  $\rho$  و  $Qz$  با  $\phi$  است. با توجه به وجود همبستگی نسبی و همچنین آسانی اندازه‌گیری ویژگی‌هایی چون TS،  $\rho$  و  $Qz$ ، در این پژوهش، روش‌های غیر مستقیم برآورد  $c$  و  $\phi$  با استفاده از این ویژگی‌ها بررسی شده است.

روند تغییرات  $c$  و  $\phi$  شیل‌های مورد مطالعه در برابر  $\rho$ ،  $n$ ،  $Qz$  و  $TS$  در نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴ به همراه بهترین روابط برازش شده نشان داده شده است. در مرحله بعد تحلیل آماری به روش رگرسیون چندمتغیره روی داده‌ها انجام شد. روابط سه‌متغیره (دو متغیره مستقل و یک متغیره وابسته) ۱ و ۲، به ترتیب نشان‌دهنده بهترین روابط چندمتغیره به دست آمده به منظور برآورد  $c$  و  $\phi$  هستند. از آنجا که برآوردهای آماری از نمونه‌ها به دست می‌آیند، همیشه به برآوردهای

ارتباط منطقی میان ورودی‌ها و خروجی‌ها از یک سری قواعد شرطی (rule) استفاده شده است (Alvarez Grima, 2000).

در ANFIS برای آموزش متغیرهای مربوط به بخش مقدم قواعد (rules) که توابع تعلق mf را مشخص می‌کنند از روش گرادینان نزولی (gradient descent) استفاده می‌شود و برای شناسایی متغیرهای بخش تالی از روش کمترین مربعات (least squares) استفاده می‌شود، بنابراین یک الگوریتم خودساز برای دسته‌بندی فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Jang, 1993). در این روش تعداد، نوع و متغیرهای mfها و همچنین ماهیت قوانین و چگونگی غیرفازی کردن به صورت هوشمند و خودکار، بر پایه داده‌های موجود به گونه‌ای طراحی می‌شود که مدل منطقی فازی حاصل، کمترین خطا و بیشترین نزدیکی را با داده‌های موجود داشته باشد. در مدل‌های طراحی‌شده در این پژوهش در FIS اول به منظور برآورد c (شکل ۶-الف)، ۴ قانون (rule) و در FIS دوم (شکل ۶-ب) برای برآورد  $\phi$ ، ۵ قانون تنظیم شده است.

mfهای خروجی که متغیرهای آنها به صورت ماتریس‌هایی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، جواب‌های به دست آمده از مدل‌های فازی هستند. برای روش سوگنو، افزون بر اعداد ثابت (معادلات درجه صفر)، معادلات درجه ۱ به بالا نیز می‌توانند باشند. در این پژوهش mfهای خروجی سامانه فازی طراحی‌شده بر پایه روش سوگنو با درجه ۱ (خطی)، به صورت یک ماتریس  $m \times n$  است. هر سطر این ماتریس معرف عامل‌های یک mf است. یعنی شمار سطور نشان‌دهنده شمار mfها است.

در مدل طراحی‌شده به منظور برآورد c پس از ۱۱ دوره آموزش و در مدل طراحی‌شده به منظور برآورد  $\phi$  پس از ۹ دوره آموزش، خطای مدل به مقدار کمینه خود رسید (شکل ۷).

در شکل ۸ مقادیر خروجی مدل‌های منطقی فازی با مقادیر داده‌های آموزش داده شده در طراحی ANFIS مقایسه شده است.

#### ۸- چگونگی عملکرد مدل منطقی فازی

روش عملکرد مدل را می‌توان در سه مرحله تشریح کرد:

۱- ابتدا داده‌های ورودی بر پایه mfهای ورودی ارائه‌شده در شکل ۶ تبدیل به مجموعه‌های فازی می‌شوند.

۲- همانند شکل ۶ و بر پایه قوانین تنظیم‌شده بر مبنای منطق and (تابع Prod) (Kessell & Gustafson, 1979) دو ورودی برای هر قانون برهم کنش داشته که نتیجه پایانی آن به صورت درجه تأثیر  $W_{ii}$  و یک رابطه  $Z_i$  بیان می‌شود. در این جا  $Z_i$  به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$Z_i = a_i x_i + b_i y_i + c \quad \text{رابطه (۳)}$$

۳- برای غیر فازی کردن می‌توان مقدار Z (که نتیجه برآورد شده از مدل است) را از رابطه ۴ محاسبه کرد.

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i \left( \frac{W_{ii}}{\sum W_{ii}} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه ۴، n تعداد قوانین،  $W_{ii}$  درجه تأثیر هر قانون و  $Z_i$  نتیجه عملکرد هر قانون است. می‌توان گفت که در این روش برای غیر فازی کردن و محاسبه Z، از امید ریاضی  $Z_i$ ها با فراوانی بهنجار شده  $\sum W_{ii}$ ها نسبت به عدد ۱ استفاده می‌شود.

ضرایب a، b و c در ماتریس‌های ارائه‌شده در شکل ۶ به ترتیب از چپ به راست ارائه شده‌اند.  $x_i$ ها در ماتریس ارائه‌شده در شکل ۶ - الف معرف TS و  $y_i$ ها معرف n و در شکل ۶- ب  $x_i$ ها معرف p و  $y_i$ ها معرف (Qz) % برای هر نمونه هستند.

در شکل ۹، روش عملکرد هر دو FIS طراحی‌شده در برآورد c و  $\phi$  یک نمونه از شیل‌های مورد مطالعه (۲/۶۶، % Qz=۳۵، n=۸/۶، TS=۴/۳) نشان داده

(AlvarezGrima & Babuska (1999), Gokceoglu (2002), Finol et al. (2001), Den Hartog et al. (1997), Singh et al. (2004), Wang et al. (2005) در راستای برآورد ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها با استفاده از داده‌هایی عمدتاً با همبستگی پایین و در پایان رسیدن به مدل‌هایی با همبستگی مطمئن، کارایی این روش را به اثبات رسانده است.

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از سامانه منطقی فازی، مدل‌هایی برای برآورد متغیرهای مقاومت برشی (c و  $\phi$ ) شیل‌های سازند شمشک با استفاده از ویژگی‌های مقاومت کششی (TS)، تخلخل (n)، چگالی (p) و درصد کوارتز (% Qz) ارائه شود. با وجود این که با استفاده از روش‌های آماری ساده و چندمتغیره نمی‌توان به روابط مطمئن دست پیدا کرد، استفاده از روش منطقی فازی به تشکیل مدل‌هایی با ضرایب همبستگی مطمئن که از روش‌های آماری قابل دست‌یابی نیستند، خواهد انجامید.

#### ۷- طراحی سامانه منطقی فازی

سامانه‌های منطقی فازی (FIS) ارائه‌شده در این پژوهش بر پایه روش سوگنو با درجه ۱ (خطی) و به کمک نرم‌افزار 7 MATLAB طراحی شده‌اند.

در این پژوهش دو سامانه فازی جدا از هم، یکی برای برآورد c و دیگری برای برآورد  $\phi$  ارائه شده است که به منظور برآورد c از متغیرهای ورودی مقاومت کششی (TS) و تخلخل (n) و به منظور برآورد  $\phi$  از متغیرهای ورودی چگالی (p) و درصد کوارتز (% Qz) استفاده شده است.

آماده‌سازی، ورود داده‌ها و طراحی FIS با استفاده از روش هوشمند ANFIS (Jang (1993) که ترکیبی از دو رهیافت فازی و عصبی است، صورت گرفته است. واژه ANFIS از Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference System برگرفته شده است. این ابزار قدرتمند می‌تواند با ترکیب اطلاعات از منابع مختلف مانند مدل‌های تجربی، مکاشفات و داده‌ها، توسعه مؤثر مدل‌ها را آسان کند. ANFIS را می‌توان به عنوان یک شبکه عصبی که دارای متغیرهای فازی بوده و یا به عنوان یک سامانه فازی که دارای ساختار موازی توزیع‌شده است در نظر گرفت. علت دورگه نامیدن این سامانه نیز در همین است که می‌توان سامانه را هم به صورت عصبی و هم به صورت فازی دید. در این ساختار مجموعه‌های فازی را می‌توان به عنوان وزن ارتباطات و متغیرهای ورودی و خروجی را به عنوان نرون‌ها تفسیر کرد که عمل الگوریتم یادگیری به کار رفته در آن اصلاح ساختارها، متغیرها و یا هر دوی آنها است (افزودن و حذف کردن نرون‌ها و تغییر وزن‌ها). در این حالت با استفاده از الگوریتم آموزش شبکه عصبی متغیرهای ورودی و خروجی سامانه فازی تعیین و طراحی بهینه FIS انجام می‌شود. (در نرم‌افزارهای تخصصی طراحی مدل‌های فازی مانند MATLAB جعبه ابزاری برای فازی کردن داده‌ها و طراحی بهینه FIS به وسیله ANFIS تعبیه شده است). در بسیاری از مدل‌ها دانش مربوط به توصیف رفتار سامانه در خود مجموعه داده‌های آن پنهان است که استخراج اطلاعات آن (برای فازی کردن) به صورت دستی از میان آن همه اطلاعات، زمان بسیار زیاد و وقت و سعی فراوانی می‌خواهد و معمولاً با خطای زیاد همراه است. هنگامی که مجموع‌های از داده‌ها در بردارنده اطلاعاتی درباره چگونگی عملکرد سامانه مورد طراحی باشند، استفاده از روش ANFIS می‌تواند نویدبخش ارائه راه حلی مناسب برای طراحی سامانه باشد، زیرا شبکه‌های عصبی به کار رفته در این روش، توانایی آموزش از روی مجموعه داده‌ها را به صورت هوشمند دارند.

ورودی‌های یک سامانه منطقی فازی، مجموعه‌های غیر فازی هستند که در مرحله اول باید تبدیل به مجموعه‌های فازی (fuzzy set) شوند. این کار توسط معادلات فازی‌ساز به نام mf (membership function) صورت می‌گیرد. در این پژوهش mfها برای هر دو سامانه، با استفاده از روش ANFIS به دست آمده‌اند و برای ایجاد

سیاه‌بیشه با استفاده از روش‌های آماری و روش منطق فازی سوگنو ارائه شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

- با استفاده از تحلیل رگرسیون ساده و چندمتغیره، روابطی میان  $\phi$  با متغیرهای  $\rho$  n, TS, %Qz به‌دست آمد که با توجه به ضرایب رگرسیون به دست آمده و غیرتصادفی بودن روند توزیع خطاها می‌توان گفت این روابط کارایی مطمئنی در برآورد  $\phi$  و  $C$  نشان نمی‌دهند.

- به منظور برآورد  $C$  و  $\phi$  دو مدل منطق فازی با استفاده از روش سوگنو و روش ANFIS طراحی شد که هر کدام دارای ۲ ورودی متفاوت هستند. مقادیر  $C$  و  $\phi$  برآورد شده از این مدل‌ها همبستگی قابل قبولی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهند.

- افزون بر ضرایب رگرسیون و روند توزیع خطاهای محاسبه‌شده، از دو شاخص VAF و RMSE نیز به منظور بررسی کارایی مدل‌های به‌دست آمده استفاده شده است که مقادیر این شاخص‌ها نیز کارایی خوب روش منطق فازی را تأیید می‌کنند. مقادیر شاخص‌های VAF و RMSE به ترتیب ۶۲/۳۸ و ۳/۴۸ برای  $C$  برآوردشده از روش رگرسیون چندمتغیره و ۹۷/۶۵ و ۰/۸۷ برای  $C$  برآورد شده از روش منطق فازی به‌دست آمد. این مقادیر به ترتیب ۴۹/۵۸ و ۷/۷۹ برای  $\phi$  برآوردشده از روش رگرسیون چندمتغیره و ۸۵/۶۴ و ۴/۱۵ برای  $\phi$  برآوردشده از روش منطق فازی محاسبه شد. این ارقام نشان می‌دهند که مدل‌های ارائه‌شده بر پایه روش منطق فازی سوگنو، کارایی بهتر و دقت بیشتری در برآورد هر دو ویژگی  $C$  و  $\phi$  نسبت به روابط حاصل از روش‌های آماری چندمتغیره دارند.

شده است که خروجی آنها  $c=4/4$  و  $\phi=65/2$  است. به منظور درک بهتر چگونگی عملکرد سامانه فازی طراحی شده قوانین به کار گرفته شده در ساخت مدل‌های فازی در زیر هر شکل نشان داده شده است. در واقع برآورد  $C$  و  $\phi$  در شکل ۹ با استفاده از قوانین ارائه‌شده و نمودارهای mf در شکل ۶ صورت می‌گیرد.

در جدول ۸ مقادیر  $C$  و  $\phi$  به‌دست آمده از مدل‌های منطق فازی ارائه شده برای تک تک نمونه‌ها در کنار مقادیر به‌دست آمده در آزمایشگاه و مقادیر برآورد شده از روش آماری رگرسیون چند متغیره نشان داده شده است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، روابط میان مقادیر  $C$  و  $\phi$  برآورد شده از روش منطق فازی و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، نشان داده شده است که به ترتیب ضرایب رگرسیون  $(R^2)$  ۰/۹۵ و ۰/۸۴ دارند. بنابراین مقادیر به دست آمده از روش منطق فازی، همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهند. نتایج آزمون  $t$  روی روابط فوق در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

چگونگی انطباق مقادیر خروجی مدل‌های فازی ارائه‌شده بر داده‌های ورودی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

در شکل ۱۳، مقادیر خطاهای محاسبه‌شده در برآورد  $C$  و  $\phi$  از هر ۲ روش منطق فازی و رگرسیون چندمتغیره در برابر  $C$  و  $\phi$  به دست آمده در آزمایشگاه، نشان داده شده است که نشان‌دهنده کاهش قابل ملاحظه مقادیر خطاهای محاسبه‌شده از روش فازی نسبت به روش آماری در بیشتر نمونه‌ها و توزیع تصادفی‌تر خطاهای به دست آمده از روش منطق فازی است.

## ۹- بررسی کارایی مدل‌های به دست آمده

روابط میان  $C$  و  $\phi$  برآوردشده از روش‌های آماری و منطق فازی با مقادیر به‌دست آمده در آزمایشگاه به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نشان داده شده‌اند. ضرایب رگرسیون میان مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده، نتایج آزمون‌های آماری و درصدهای خطای محاسبه‌شده (شکل ۱۳)، می‌توانند به عنوان شاخص‌های خوبی برای بررسی کارایی مدل‌های به دست آمده استفاده شوند. افزون بر آن شاخص عملکرد (VAF) (رابطه ۵) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۶) برای محاسبه کارایی مدل‌های پیش‌بینی کننده بسیار مفید هستند، که توسط پژوهشگران مختلف از جمله Alvarez Grima & Babuska (1999) ; Finol et al. (2001) و GokCeoglu (2002) استفاده شده است.

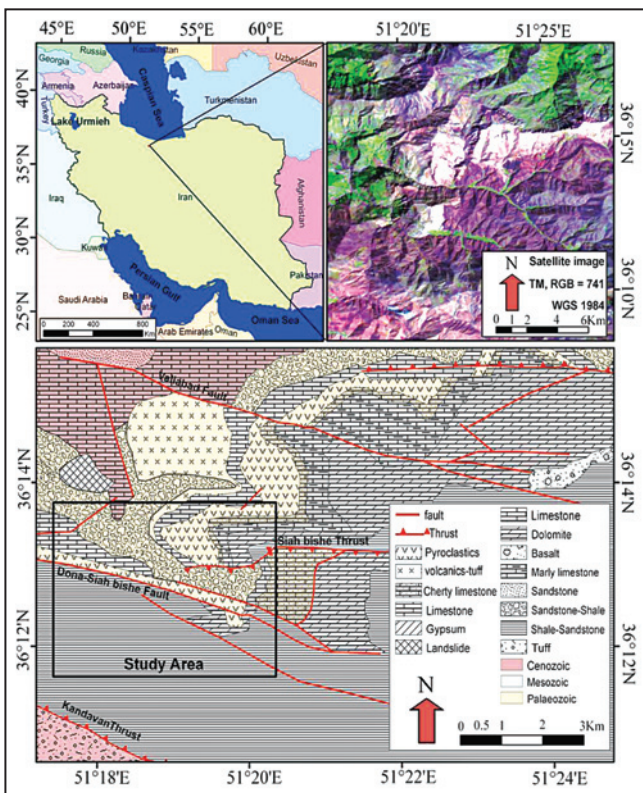
$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)}\right) \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

در روابط ۵ و ۶،  $y$  و  $y'$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هستند. هر چه مقدار VAF بزرگ‌تر و RMSE کوچک‌تر باشد، مدل پیش‌بینی کننده برآورد واقعی‌تری ارائه می‌دهد. بنابراین اگر VAF برابر ۱۰۰ و RMSE برابر صفر باشد، مدل به‌دست آمده، بهترین برآورد را ارائه خواهد کرد. مقادیر VAF و RMSE برای مدل‌های آماری چندمتغیره و فازی طراحی شده در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. با مقایسه میان شاخص‌های محاسبه‌شده برای مدل‌های به‌دست آمده از روش منطق فازی و روش رگرسیون چندمتغیره (جدول ۳) می‌توان به کارایی هر چه بهتر سامانه منطق فازی ارائه‌شده برای برآورد  $C$  و  $\phi$ ، نسبت به روش آماری چندمتغیره پی‌برد.

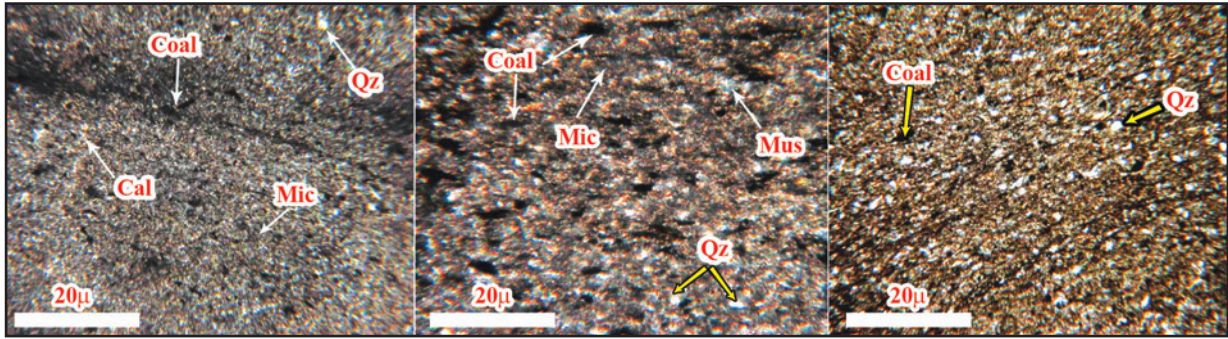
## ۱۰- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی برای برآورد  $C$  و  $\phi$  شیل‌های سازند شمشک در منطقه

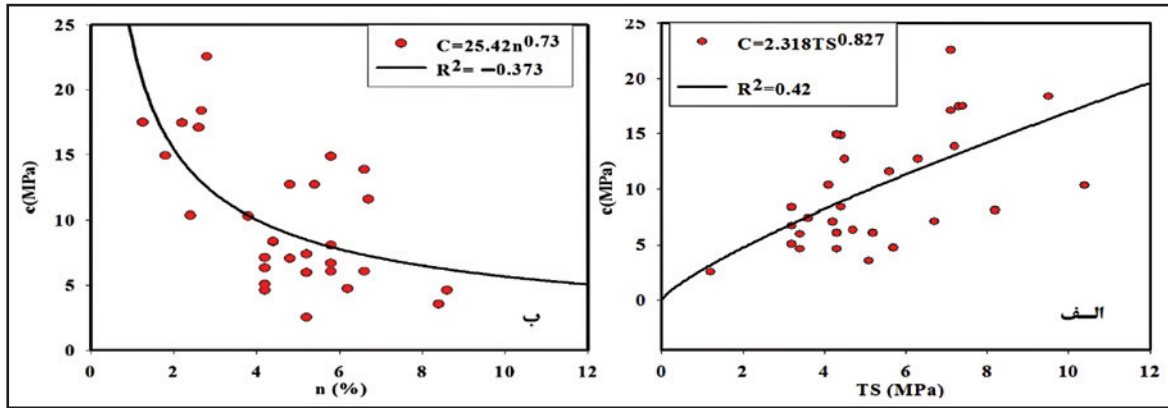


شکل ۱- محدوده مورد مطالعه در نقشه جغرافیایی و زمین‌شناسی (نقشه زمین‌شناسی با استفاده از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مرزن‌آباد (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۹) تهیه شده است).

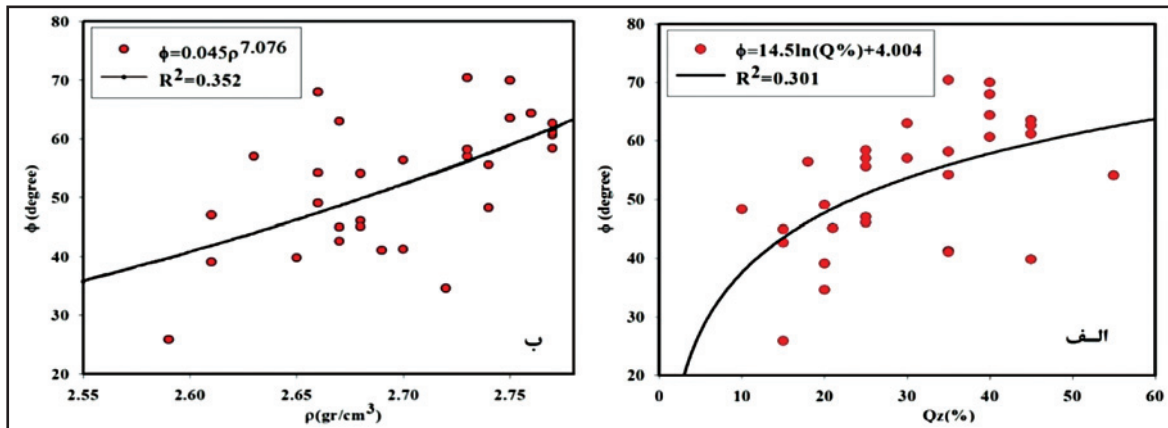




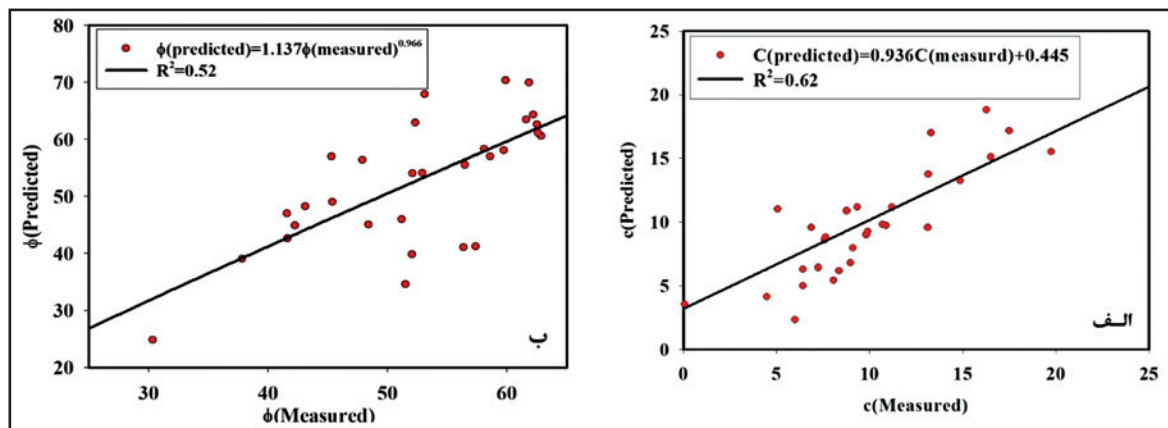
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های شیل مورد مطالعه (Qz=کوارتز، Mus=مسکویت، Mic=سیمان ریزبلور، Cal=کلسیت، Coal=زغال)



شکل ۳- روند تغییرات C در برابر الف (TS) و ب (n)

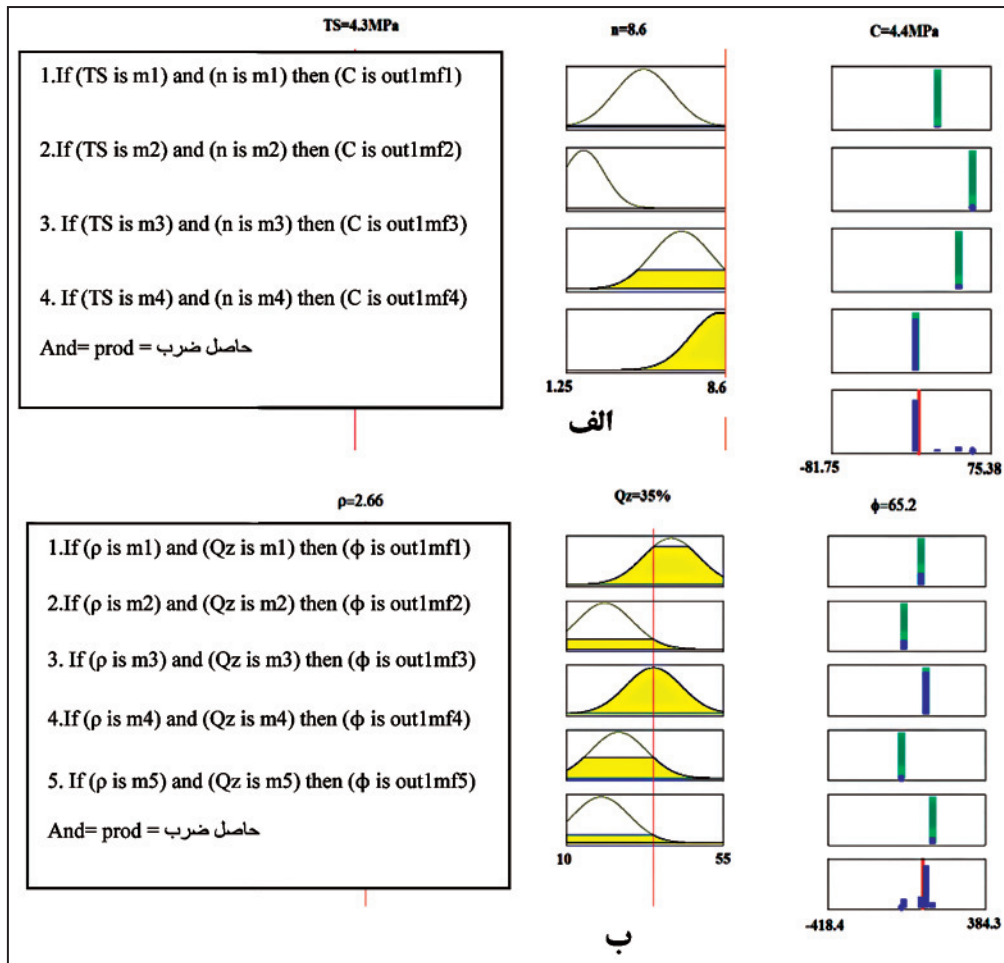


شکل ۴- روند تغییرات phi در برابر الف (Qz%) و ب (rho)

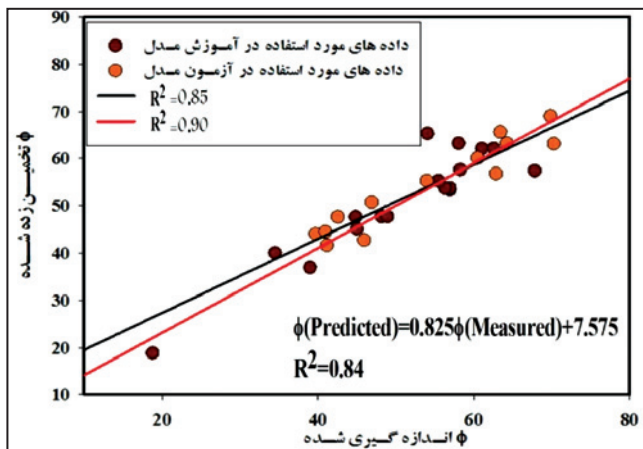


شکل ۵- ارتباط میان c و phi برآورد شده از الف) رابطه ۱ و ب) رابطه ۲ با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه

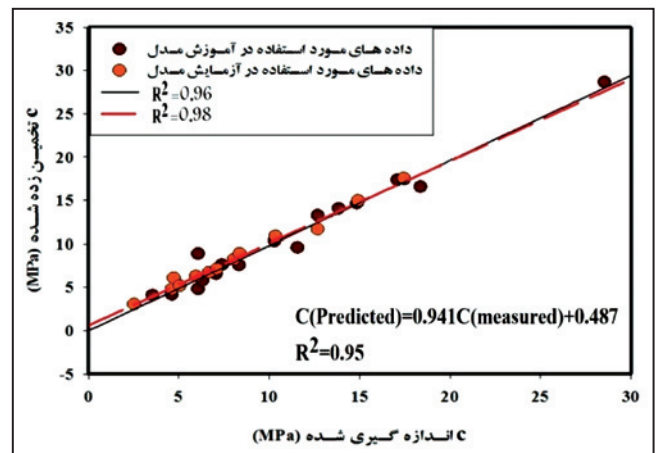




شکل ۹- چگونگی عملکرد FIS ها در برآورد الف) C و ب)  $\phi$

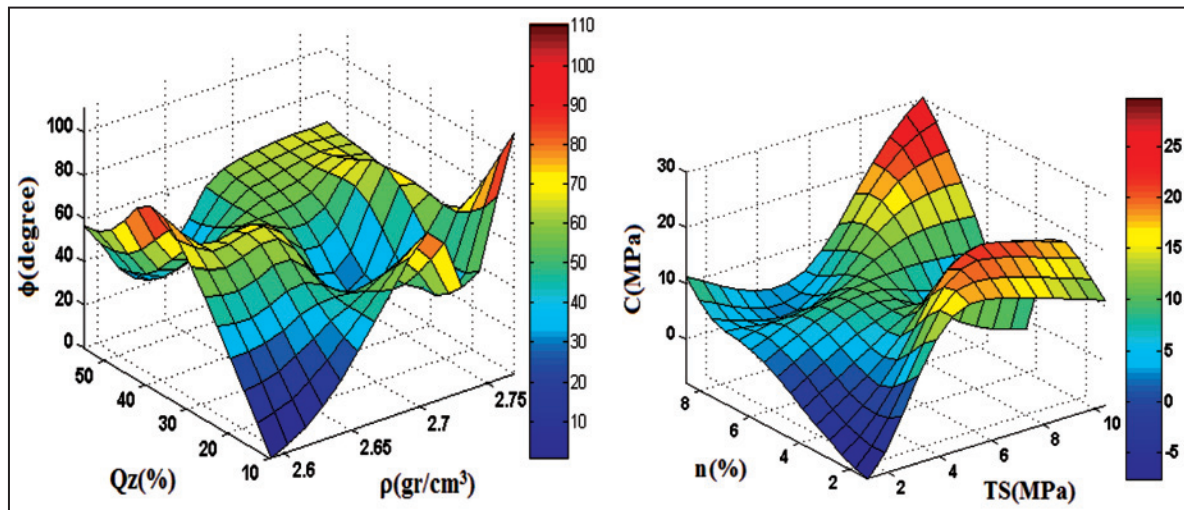


شکل ۱۱- روابط میان  $\phi$  برآورد شده از روش منطق فازی با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه

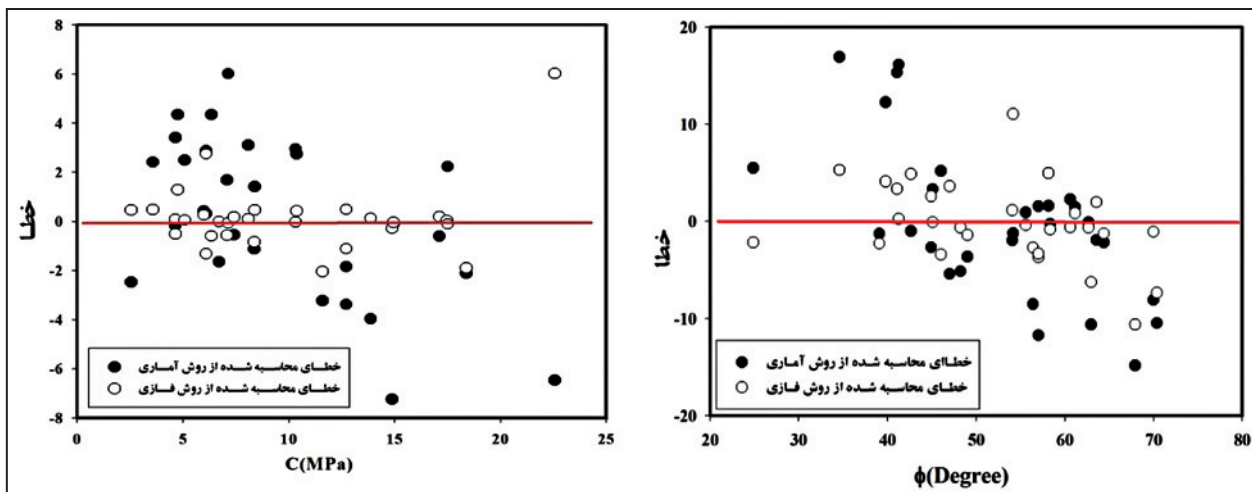


شکل ۱۰- روابط میان C برآورد شده از روش منطق فازی با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه





شکل ۱۲- مقادیر خروجی به دست آمده از نرم‌افزار MATLAB منطبق بر داده‌های ورودی



شکل ۱۳- مقادیر خطای محاسبه شده در برآورد C و phi از روش‌های آماری چندمتغیره و منطق فازی

جدول ۱- داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه

| شماره نمونه | رطوبت (%) | %Qz | n (%) | $\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ) | TS (MPa) | $\Phi$ (°) | C (MPa) |
|-------------|-----------|-----|-------|------------------------------|----------|------------|---------|
| ۱۶          | ۲/۳۶      | ۳۵  | ۴/۴   | ۲/۷۳                         | ۳/۲      | ۵۸/۱۵      | ۸/۳۶    |
| ۱۷          | ۱/۰۸      | ۴۰  | ۴/۴   | ۲/۷۷                         | ۴/۴      | ۶۰/۶۰      | ۸/۳۹    |
| ۱۸          | ۱/۴۴      | ۱۸  | ۳/۸   | ۲/۷۰                         | ۱۰/۴     | ۵۶/۴۰      | ۱۰/۳۲   |
| ۱۹          | ۱/۵۳      | ۴۰  | ۲/۴   | ۲/۷۶                         | ۴/۱      | ۶۴/۳۵      | ۱۰/۳۷   |
| ۲۰          | ۲/۱۳      | ۴۵  | ۶/۷   | ۲/۷۷                         | ۵/۶      | ۶۱/۱۵      | ۱۱/۵۹   |
| ۲۱          | ۲/۰۹      | ۲۰  | ۴/۸   | ۲/۶۱                         | ۴/۵      | ۳۹/۰۸      | ۱۲/۷۱   |
| ۲۲          | ۱/۷۷      | ۴۵  | ۵/۴   | ۲/۶۵                         | ۶/۳      | ۳۹/۸۰      | ۱۲/۷۱   |
| ۲۳          | ۲/۳۱      | ۴۵  | ۶/۶   | ۲/۷۷                         | ۷/۲      | ۶۲/۶۴      | ۱۳/۸۷   |
| ۲۴          | ۱/۸۹      | ۲۰  | ۵/۸   | ۲/۶۶                         | ۴/۴      | ۴۹/۰۲      | ۱۴/۸۸   |
| ۲۵          | ۱/۱۲      | ۳۵  | ۱/۸   | ۲/۶۹                         | ۴/۳      | ۴۱/۰۶      | ۱۴/۹۴   |
| ۲۶          | ۰/۷۸      | ۲۰  | ۲/۶   | ۲/۷۲                         | ۷/۱      | ۳۴/۶۰      | ۱۷/۱۱   |
| ۲۷          | ۲/۱۳      | ۳۰  | ۲/۲   | ۲/۶۷                         | ۷/۳      | ۶۲/۹۶      | ۱۷/۴۷   |
| ۲۸          | ۱/۹۳      | ۲۵  | ۱/۲۵  | ۲/۷۴                         | ۷/۴      | ۵۵/۵۷      | ۱۷/۵۰   |
| ۲۹          | ۱/۴۴      | ۲۵  | ۲/۶۷  | ۲/۷۷                         | ۹/۵      | ۵۸/۳۵      | ۱۸/۳۹   |
| ۳۰          | ۱/۸۰      | ۱۵  | ۲/۸   | ۲/۵۹                         | ۷/۱      | ۱۸/۸۷      | ۲۸/۵۷   |

| شماره نمونه | رطوبت (%) | %Qz | n (%) | $\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> ) | TS (MPa) | $\Phi$ (°) | C (MPa) |
|-------------|-----------|-----|-------|------------------------------|----------|------------|---------|
| ۱           | ۱/۲۳      | ۴۵  | ۵/۲   | ۲/۷۵                         | ۱/۲      | ۶۳/۵۲      | ۲/۵۵    |
| ۲           | ۲/۱۴      | ۲۵  | ۸/۴   | ۲/۶۱                         | ۵/۱      | ۴۷/۰۱      | ۳/۵۷    |
| ۳           | ۱/۱۶      | ۳۵  | ۸/۶   | ۲/۶۶                         | ۴/۳      | ۵۴/۱۶      | ۴/۶۳    |
| ۴           | ۲/۲۳      | ۴۰  | ۴/۲   | ۲/۶۶                         | ۳/۴      | ۶۷/۹۳      | ۴/۶۴    |
| ۵           | ۲/۰۱      | ۱۵  | ۶/۲   | ۲/۶۷                         | ۵/۷      | ۴۲/۶۴      | ۴/۷۵    |
| ۶           | ۲/۱۲      | ۲۵  | ۴/۲   | ۲/۶۸                         | ۳/۲      | ۴۶/۰۳      | ۵/۰۸    |
| ۷           | ۱/۷۸      | ۳۵  | ۵/۲   | ۲/۷۳                         | ۳/۴      | ۷۰/۳۷      | ۵/۹۸    |
| ۸           | ۲/۴۴      | ۳۰  | ۶/۶   | ۲/۷۳                         | ۴/۳      | ۵۷/۰۷      | ۶/۰۶    |
| ۹           | ۰/۹۸      | ۲۵  | ۵/۸   | ۲/۶۳                         | ۵/۲      | ۵۷/۰۲      | ۶/۰۹    |
| ۱۰          | ۱/۹۳      | ۲۱  | ۴/۲   | ۲/۶۸                         | ۴/۷      | ۴۵/۰۹      | ۶/۳۴    |
| ۱۱          | ۲/۵۳      | ۵۵  | ۵/۸   | ۲/۶۸                         | ۳/۲      | ۵۴/۰۶      | ۶/۷۰    |
| ۱۲          | ۲/۴۵      | ۱۵  | ۴/۸   | ۲/۶۷                         | ۴/۲      | ۴۴/۹۲      | ۷/۰۸    |
| ۱۳          | ۱/۶۸      | ۳۵  | ۴/۲   | ۲/۷۰                         | ۶/۷      | ۴۱/۲۴      | ۷/۱۳    |
| ۱۴          | ۱/۹۹      | ۱۰  | ۵/۲   | ۲/۷۴                         | ۳/۶      | ۴۸/۲۵      | ۷/۴۱    |
| ۱۵          | ۱/۷۰      | ۴۰  | ۵/۸   | ۲/۷۵                         | ۸/۲      | ۶۹/۹۶      | ۸/۰۸    |



جدول ۲- تحلیل آماری داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف روی شیل‌های سازند شمشک

| ویژگی  | تعداد نمونه | استاندارد | محدوده تغییرات | میانگین | انحراف استاندارد |
|--------|-------------|-----------|----------------|---------|------------------|
| $\rho$ | ۳۰          | ISRM      | ۲/۵۹-۲/۷۷      | ۲/۶۹۸   | ۰/۰۵۲۱۵          |
| Qz     | ۳۰          | ISRM      | ۱۰-۵۵          | ۳۰/۳    | ۱۱/۴۰۵           |
| TS     | ۳۰          | ISRM      | ۱/۲-۱۰/۴       | ۵/۰۶۶   | ۲/۰۵۳            |
| n      | ۳۰          | ISRM      | ۱/۳۵-۸/۶       | ۴/۷۳۴   | ۱/۸۰۴            |
| $\phi$ | ۳۰          | ISRM      | ۱۸/۸۷-۷۰/۳۷    | ۵۲/۳۹۴  | ۱۱/۷۰۸           |
| c      | ۳۰          | ISRM      | ۲/۵۵-۲۸/۵۷     | ۱۰/۱۱   | ۵/۷۷             |

جدول ۳- ضرایب رگرسیون ( $R^2$ ) میان خواص فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

| ویژگی  | $\rho$        | Qz               | TS            | n             | $\phi$        | c |
|--------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---|
| $\rho$ | ۱             |                  |               |               |               |   |
| Qz     | ۰/۱۴۱ (خطی)   | ۱                |               |               |               |   |
| TS     | ۰/۰۰۵ (نمایی) | ۰/۰۷۶ (لگاریتمی) | ۱             |               |               |   |
| n      | ۰/۰۹۶ (نمایی) | ۰/۰۳۵ (خطی)      | ۰/۱۷۶ (توانی) | ۱             |               |   |
| $\phi$ | ۰/۳۵۲ (توانی) | ۰/۳۰۱ (لگاریتمی) | ۰/۰۹۶ (نمایی) | ۰/۰۳۱ (خطی)   | ۱             |   |
| c      | ۰/۰۰۴ (توانی) | ۰/۰۳۸ (خطی)      | ۰/۴۲۱ (توانی) | ۰/۳۷۳ (توانی) | ۰/۱۳۵ (نمایی) | ۱ |

جدول ۴- نتایج آزمون t بر روی رابطه ۱

|                 | ضریب     | خطای استاندارد | آماره t | t بحرانی | P      |
|-----------------|----------|----------------|---------|----------|--------|
| $y_0$           | ۶/۹۹۶۹۶  | ۳/۳۵۷۲         | ۱/۹۹۴۸  | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۷۱۴ |
| TS              | ۳/۹۹۹۰۵  | ۱/۷۵۲۳         | ۲/۲۸۲۱  | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۳۱۳ |
| n               | -۲/۷۳۰۰۲ | ۰/۸۸۲۲         | -۳/۰۹۴۵ | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۴۹۴ |
| TS <sup>2</sup> | -۰/۲۴۳۱۴ | ۰/۱۱۴۵         | -۲/۱۲۳۵ | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۲۴۹ |
| n <sup>2</sup>  | ۰/۱۱۵۵۴۲ | ۰/۰۵۹۶         | ۱/۹۳۶۲  | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۴۷۸ |

جدول ۵- نتایج آزمون t بر روی رابطه ۲

|                 | ضریب       | خطای استاندارد | آماره t  | t بحرانی | P      |
|-----------------|------------|----------------|----------|----------|--------|
| $y_0$           | -۲۹۶۶/۸۲   | ۱۴۰/۸۸۷۰       | -۲/۱۱۷۸  | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۴۲۴ |
| $\rho$          | ۲۱۴۴/۱۹    | ۱۱۹۷/۰۲۹۵      | ۱/۷۹۱۲۶  | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۱۸۶ |
| Qz              | ۱/۵۲۰۳۷    | ۰/۷۷۷۸         | ۱/۹۵۴۶   | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۳۱۹ |
| $\rho^2$        | -۳۷۹/۳۸۰۲  | ۱۹۳/۹۱۷۴       | -۱/۹۵۶۴  | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۲۸۸ |
| Qz <sup>2</sup> | -۰/۰۱۸۴۹۶۲ | ۰/۰۱۰۲         | -۱/۸۱۳۳۵ | ۱/۷۰۳    | ۰/۰۴۲۶ |

جدول ۶- نتایج آزمون t بر روی رابطه شکل ۵-الف

|       | ضریب   | خطای استاندارد | آماره t | t بحرانی | P       |
|-------|--------|----------------|---------|----------|---------|
| $y_0$ | ۰/۴۴۵۴ | ۰/۱۹۲۷         | ۲/۳۱۱۴  | ۱/۶۹۹    | ۰/۰۴۶۹  |
| a     | ۰/۹۳۶۱ | ۰/۱۳۵۸         | ۶/۸۹۵۳  | ۱/۶۹۹    | <۰/۰۰۰۱ |

جدول ۷- نتایج آزمون t بر روی رابطه شکل ۵-ب

|       | ضریب  | خطای استاندارد | آماره t | t بحرانی | P       |
|-------|-------|----------------|---------|----------|---------|
| $y_0$ | ۱/۱۳۷ | ۰/۵۱۸۱         | ۲/۱۹۴۵  | ۱/۶۹۹    | ۰/۰۱۲۷  |
| a     | ۰/۹۶۶ | ۰/۱۸۸۳         | ۴/۸۴۲۸  | ۱/۶۹۹    | <۰/۰۰۰۱ |

جدول ۸- مقادیر c و  $\phi$  برآورد شده از روش منطق فازی و آماری به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

| C     | C آماری | C فازی | $\phi$ | $\phi$ آماری | $\phi$ فازی |
|-------|---------|--------|--------|--------------|-------------|
| ۸/۳۶  | ۷/۲۳    | ۷/۵۳   | ۵۸/۲۵  | ۵۹/۷۵        | ۶۳/۱۰       |
| ۸/۳۹  | ۹/۸۱    | ۸/۸۶   | ۶۰/۶۰  | ۶۲/۸۶        | ۶۰/۰۰       |
| ۱۰/۳۲ | ۱۳/۲۸   | ۱۰/۳۰  | ۵۶/۴۰  | ۴۷/۸۷        | ۵۳/۷۰       |
| ۱۰/۳۷ | ۱۳/۱۲   | ۱۰/۸۰  | ۶۴/۳۵  | ۶۲/۱۹        | ۶۳/۱۰       |
| ۱۱/۵۹ | ۸/۳۶    | ۹/۵۵   | ۶۱/۱۵  | ۶۲/۶۰        | ۶۲/۰۲       |
| ۱۲/۷۱ | ۹/۳۳    | ۱۳/۲۰  | ۳۹/۰۸  | ۳۷/۸۲        | ۳۶/۸۰       |
| ۱۲/۷۱ | ۱۰/۸۷   | ۱۱/۶۰  | ۳۹/۸۰  | ۵۲/۰۵        | ۴۳/۹۰       |
| ۱۳/۸۷ | ۹/۹۰    | ۱۴/۰۰  | ۶۲/۶۴  | ۶۲/۵۲        | ۶۲/۰۱       |
| ۱۴/۸۸ | ۷/۶۴    | ۱۴/۶۰  | ۴۹/۰۲  | ۴۵/۴۰        | ۴۷/۶۰       |
| ۱۴/۹۴ | ۱۴/۸۵   | ۱۴/۹۰  | ۴۱/۰۶  | ۵۶/۳۷        | ۴۴/۶۰       |
| ۱۷/۱۱ | ۱۶/۵۲   | ۱۷/۳۰  | ۳۴/۶۰  | ۵۱/۵۰        | ۳۹/۹۰       |
| ۱۷/۴۷ | ۱۷/۴۹   | ۱۷/۵۰  | ۶۲/۹۶  | ۵۲/۳۳        | ۵۶/۷۰       |
| ۱۷/۵۰ | ۱۹/۷۴   | ۱۷/۴۰  | ۵۵/۵۷  | ۵۶/۴۸        | ۵۵/۲۰       |
| ۱۸/۳۹ | ۱۶/۲۷   | ۱۶/۵۰  | ۵۸/۳۵  | ۵۸/۱۰        | ۵۷/۵۰       |
| ۲۸/۵۷ | ۱۶/۱۰   | ۲۸/۶۰  | ۲۴/۸۷  | ۳۰/۳۶        | ۲۲/۷۰       |
| ۲/۵۵  | ۰/۰۷    | ۳/۰۱   | ۶۳/۵۲  | ۶۱/۶۰        | ۶۵/۵۰       |
| ۳/۵۷  | ۵/۹۹    | ۴/۰۵   | ۴۷/۰۱  | ۴۱/۵۹        | ۵۰/۶۰       |
| ۴/۶۳  | ۴/۴۶    | ۴/۷۲   | ۵۴/۱۶  | ۵۲/۹۴        | ۶۵/۲۰       |
| ۴/۶۴  | ۸/۰۶    | ۴/۱۳   | ۶۷/۹۳  | ۵۳/۰۹        | ۵۷/۳۰       |
| ۴/۷۵  | ۹/۱۱    | ۶/۰۳   | ۴۲/۶۴  | ۴۱/۶۵        | ۴۷/۵۰       |
| ۵/۰۸  | ۷/۵۸    | ۵/۱۴   | ۴۶/۰۳  | ۵۱/۲۰        | ۴۲/۶۰       |
| ۵/۹۸  | ۶/۴۱    | ۶/۲۵   | ۷۰/۳۷  | ۵۹/۹۰        | ۶۳/۰۱       |
| ۶/۰۶  | ۶/۴۱    | ۴/۷۷   | ۵۷/۰۷  | ۵۸/۵۹        | ۵۳/۳۰       |
| ۶/۰۹  | ۸/۹۷    | ۸/۸۵   | ۵۷/۰۲  | ۴۵/۳۰        | ۵۳/۷۰       |
| ۶/۳۴  | ۱۰/۶۹   | ۵/۷۵   | ۴۵/۰۹  | ۴۸/۴۱        | ۴۵/۰۱       |
| ۶/۷۰  | ۵/۰۶    | ۶/۷۰   | ۵۴/۰۶  | ۵۲/۰۸        | ۵۵/۲۰       |
| ۷/۰۸  | ۸/۷۶    | ۶/۵۲   | ۴۴/۹۲  | ۴۲/۴۵        | ۴۷/۵۰       |
| ۷/۱۳  | ۱۳/۱۵   | ۷/۰۷   | ۴۱/۲۴  | ۵۷/۳۷        | ۴۱/۵۰       |
| ۷/۴۱  | ۶/۸۷    | ۷/۵۸   | ۴۸/۲۵  | ۴۳/۱۱        | ۴۷/۶۰       |
| ۸/۰۸  | ۱۱/۱۹   | ۸/۱۸   | ۶۹/۹۶  | ۶۱/۸۶        | ۶۸/۹۰       |

جدول ۹- نتایج آزمون t بر روی رابطه شکل ۸

| P       | t بحرانی | آماره t | خطای استاندارد | ضریب  |            |
|---------|----------|---------|----------------|-------|------------|
| ۰/۰۱۷۶  | ۱/۶۹۹    | ۱/۹۸۸۵  | ۰/۲۴۴۹         | ۰/۴۸۷ | $\gamma_0$ |
| <۰/۰۰۰۱ | ۱/۶۹۹    | ۳۰/۳۲۲۹ | ۰/۰۳۱۱         | ۰/۹۴۱ | $\phi$     |

جدول ۱۰- نتایج آزمون t بر روی رابطه شکل ۹

| P       | t بحرانی | آماره t | خطای استاندارد | ضریب   |            |
|---------|----------|---------|----------------|--------|------------|
| ۰/۰۲۹۵  | ۱/۶۹۹    | ۳/۲۵۹۵  | ۲/۳۲۴۰         | ۷/۵۷۵۱ | $\gamma_0$ |
| <۰/۰۰۰۱ | ۱/۶۹۹    | ۱۳/۷۶۰۹ | ۰/۰۶۲۰         | ۰/۸۲۵۲ | $\phi$     |

جدول ۱۱- مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های VAF و RMSE

| مدل               | متغیر برآورد شده | VAF (%) | RMSE |
|-------------------|------------------|---------|------|
| رگرسیون چندمتغیره | c                | ۶۲/۳۸   | ۳/۴۸ |
| رگرسیون چندمتغیره | $\phi$           | ۴۹/۵۸   | ۷/۷۹ |
| منطق فازی         | c                | ۹۷/۶۵   | ۰/۸۷ |
| منطق فازی         | $\phi$           | ۸۵/۶۴   | ۴/۱۵ |

### کتابنگاری

- آفانیاتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- درویش زاده، ع.، ۱۳۷۱- زمین شناسی ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۹۰۱ صفحه.
- وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۷۹- نقشه زمین شناسی مرزن آباد، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، شماره ۶۲۶۲، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

### References

- Alvarez Grima, M. & Babuska, R., 1999- Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. *International Journal of Rock Mechanics and Mining science*, Vol 36, pp. 339-349.
- Alvarez Grima, M., 2000 - Neuro-fuzzy modeling in engineering geology. A.A. Balkema, Rotterdam, 244pp.
- Burak Goktepe, A., Altunb, S., Altintasc, G. & Zcan Tand, O., 2008- Shear strength estimation of plastic clays with statistical and neural approaches, *International Journal of Building and Environment* 43, pp.849-860.
- Den Hartog, M. H. & Babuska, R., Deketh, H. J. R., Alvarez Grima, M., Verhoef, P. N. W. & Verbruggen, H. B., 1997- Knowledge-based fuzzy model for performance prediction of a rock-cuttingtrencher. *International Journal of Approximate Reasoning* 16, pp. 43-66.
- Finol, J., Guo, Y. K. & Jing, X. D., 2001- A rule based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters. *International Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol 29, pp. 97-113.
- Gokceoglu, C., 2002- A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strengthof Ankara agglomerates from their petrographic composition. *International Journal of Engineering Geology* 66, pp. 39-51.
- Gustafson, D. E. & Kessel, W. C., 1979- Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix. In: *Proc. IEEE CDC*. San Diego, CA, pp.700-761.
- Hajdarwish, A. & Shakoor, A., 2006- Predicting the shear strength parameters of mudrocks, Kent State University. IAEG. pp 603-607.
- Hajdarwish, A., 2006- Geological controls of shear strength behavior of mudrocks, a dissertation submitted to Kent State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Ph.D., Kent State University.
- Jang, J. S. R., 1993- ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems, *IEEE Transactions on Systems Man and cybernetics* 23 (3), pp. 665-685.
- Lotfizadeh, A., 1973- Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on Systems Man and cybernetics* 3 (1), pp. 28-44.
- Mamdani, E. & Assilian, S., 1975- An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 (1), pp. 1-13.
- Marte, G., Runar, N., Kaare, H. & Toralv, B., 2008- Normalized undrained shear strength of clay shales, *International Journal of Engineering Geology*, 99(1-2), pp. 31-39.
- Olgaard, D., Urai, J., Dell'Angelo, L., Nuesch, R. & Ingram, G., 1997- The influence of swelling clays on the deformation of mudrocks, *International Journal of Rock Mechanics*, 34(3), pp. 364-373.
- Singh, T. N., Verma, A. K., Singh, V. & Sahu, A., 2004- Slake durability study of shaly rock and its predictions, *International Journal of Environmental Geology*, 47(2), pp. 246-253.
- Sugeno, M., 1985- *Industrial applications of fuzzy control*, New York, USA. Elsevier Science Pub. Co. 269 pp.
- Sung, C. H., Priscilla, P. & Nelson, B., 2002- Characterization of Eagle Ford Shale, *International Journal of Engineering Geology*, 67 (3), pp. 169-183.
- Wang, K., Barna, R., Wang, Y., Boldin, M. & Hjelmervik, O. R., 2005- Application of artificial neural networks to predicate shale properties, *Lecture Notes in Computer Science*, 3498, 970 p.
- Younane, N., Son, K. H. & Minh, H., 2010- Mechanical characterization of small shale samples subjected to fluid exposure using the inclined direct shear testing device, *International Journal of Rock Mechanics and Mining science*. 47(3), pp. 355-367.

# A Fuzzy Model to Prediction of Shear Strength Parameters of Shemshak Formation Shales

M. Kianpour <sup>1\*</sup>, M. Sayari <sup>2</sup>, A. Uromeihy <sup>3</sup> & M. R. Nikudel <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph. D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Kharzmi University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph. D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2010 December 22

Accepted: 2011 September 13

## Abstract

Shear strength is one of the most important properties of mudrocks and shales in rock engineering and engineering geology. Because of the difficulty to obtain undisturbed samples of shales as required for determination of shear strength parameters, it is also the most difficult to evaluate. This research investigated properties that can be used to predict the shear strength parameters of Shemshak formation shales. Thirty samples of shales from various depths were collected from boreholes in Shemshak formation in the site of Siahbishe pumped storage powerhouse. Shear strength parameters ( $c$  and  $\phi$ ), tensile strength (TS), quartz percent (Qz %), porosity ( $n$ ) and density ( $\rho$ ) were determined in lab for each sample. Data were analyzed statistically and with fuzzy inference system to determine the relationships between shear strength parameters with other properties. Results show that cohesion and friction angle of shales can be meaningfully predicted from a few engineering properties by fuzzy inference system. The adjusted  $R^2$  values between measured and predicted values for cohesion and friction angle are 0.95 and 0.84 respectively. Also the variation of regression coefficient ( $R^2$ ), performance indices (VAF) and root mean square error (RMSE) with were calculated as for the shear strength parameters, obtained from the multiple regression model and the fuzzy inference system, revealed that the prediction performance and accuracy of the fuzzy models are high and multiple regression equations not have performance in prediction of shear strength parameters of shales.

**Keywords:** Shale, Shemshak formation, Shear strength parameters, Fuzzy inference system, Multivariate regression, Regression coefficient.

For Persian Version see pages 11 to 20

\*Corresponding author: M. Kianpour; E-mail: m.kian61@yahoo.com