

# برآورد مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری شیل های سازند شمشک با استفاده از الگوریتم منطق فازی

مهدی کیانپور<sup>۱</sup>، محمد سیاری<sup>۲</sup>، علی ارومیه‌ای<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۲۰

## چکیده

مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری از مشخصه‌های بسیار مهم سنگ بکر در مهندسی سنگ و زمین شناسی مهندسی است. به دلیل مشکلات اندازه گیری مستقیم این مشخصه‌ها و لزوم وجود امکانات آزمایشگاهی، در برآورد این دو مشخصه، اغلب از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. در این تحقیق، مدل‌هایی برای برآورد مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری شیل‌های سازند شمشک در منطقه سیاه‌بیشه با استفاده از روش‌های آماری و منطق فازی ارائه شده است. برای این منظور از خواص چگالی، تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای که به سادگی قابل اندازه گیری هستند، استفاده شده است. هر دو روش رگرسیون آماری چندمتغیره و منطق فازی، کارایی خوبی در برآورد مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری این سنگ‌ها نشان می‌دهند. تغییرات ضریب رگرسیون ( $R^2$ )، شاخص‌های عملکرد (VAF) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به دست آمده برای مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری برآورد شده از روش رگرسیون چندمتغیره و روش منطق فازی، نشان‌دهنده کارایی بهتر و دقت بیشتر مدل منطق فازی ارائه شده نسبت به روش رگرسیون چندمتغیره در برآورد هر دو ویژگی مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری شیل‌های مورد مطالعه است.

**کلید واژه‌ها:** منطق فازی، سازند شمشک، شیل، مدول تغییر شکل پذیری، مقاومت تراکمی تک محوری.

\*نویسنده مسئول: مهدی کیانپور

E-mail: mehdikianpoor61@yahoo.com

## ۱- مقدمه

اجرای پروژه‌های مهندسی در سنگ، به شناخت بسیاری از مشخصه‌های ژئومکانیکی سنگ بکر همچون وزن واحد حجم، مقاومت تراکمی تک محوری، مقاومت کششی، مدول‌های تغییر شکل پذیری و ... نیاز دارد. اندازه گیری برخی از این مشخصه‌ها از جمله مقاومت تراکمی تک محوری و مدول‌های تغییر شکل پذیری در آزمایشگاه به ویژه در سنگ‌های رسی و شیل‌ها، به دلیل مشکلات موجود در تهیه نمونه، مستلزم صرف وقت زیاد و هزینه بالاست. افزون بر این، نتایج حاصل وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، نحوه بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل خارجی و غیره دارد. به منظور رفع این مشکلات و تعیین سریع شاخصی برای نشان دادن مقاومت سنگ، آزمایش‌های ساده‌ای همچون آزمایش بار نقطه‌ای، آزمایش چکش اشمیت، آزمایش پانچ، آزمایش سرعت صوت و روش‌های غیر مستقیم برآورد مقاومت تراکمی تک محوری از خواص فیزیکی و سنگ‌نگاری توسط محققان مختلف از جمله، AlvarezGrima & Babuska (1999), Cargil & Shakoor (1990), Edet (1992), Fahy & Guccione (1979), Gokceoglu (2002), Howarthand & Rowlands (1986), Shakoor & Bonelli (1991), Ulusay et al. (1994) پیشنهاد شده است.

انجام این آزمایش‌ها به همراه قضاوت صحیح کارشناسی می‌تواند برآوردی از خواص مورد نیاز سنگ بکر در مراحل اولیه طراحی ارائه دهد (Grasso & Mahtab, 1992). به دلیل تنوع رفتاری سنگ‌ها، کاربرد روابط تجربی به دست آمده بسیار محدود است و به همین علت بررسی روش‌های غیر مستقیم برآورد خواص مکانیکی برای انواع سنگ‌ها در مناطق و سازندهای مختلف، ضروری به نظر می‌رسد.

در این تحقیق با استفاده از دو روش آماری و منطق فازی مدل‌هایی به منظور برآورد مقاومت تراکمی تک محوری و مدول تغییر شکل پذیری شیل‌های سازند شمشک ارائه شده است. به منظور تحلیل آماری از نرم افزار 8 DATAFIT و به منظور تحلیل فازی از نرم افزار 7 MATLAB استفاده شده است.

## ۲- زمین شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۱۳۰ کیلومتری جاده کرج- چالوس (۱۰ کیلومتری تونل کتدوان و در محل پروژه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه) و در دامنه‌های شمالی سلسله جبال البرز واقع شده است و از نظر تقسیم بندی زون‌های زمین شناسی ایران در زون 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 ذخیره‌ای سیاه‌بیشه با گسترش سطحی و ژرفی مناسب انتخاب شده‌اند.

سازندهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه عمدتاً در محدوده سنی پالئوزویک و مزوزویک قرار دارند. سازند شمشک به سن لیا س جوان‌ترین سازند زمین شناسی در منطقه مورد مطالعه است. این سازند با ستبرای ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ متر متشکل از ماسه‌سنگ‌های میکایی، سیلت‌سنگ، شیل و رس سنگ، همراه با رگه‌های زغال و باقیمانده گیاهان است. نمونه‌های شیل شامل شیل‌های سیاه - خاکستری با مقادیر متفاوت ماسه و سیلت هستند (شیل سیلتي و شیل ماسه‌دار) و اغلب به صورت تناوبی با دیگر سنگ‌ها از مانند ماسه‌سنگ، سیلت سنگ و زغال سنگ مشاهده می‌شوند (وحدتی، ۱۳۷۹؛ آقاناتی، ۱۳۸۳؛ درویش زاده، ۱۳۷۱).

بررسی‌های انجام شده و بازدید از نواحی توزیع این سازند (هم در چارگوش نقشه بلده و هم در چارگوش نقشه مرزن آباد) نشان می‌دهد که نمونه‌های شیل در منطقه مورد مطالعه، تنوع رفتاری زیادی دارند و تا حد زیادی نماینده شیل‌های این سازند در سایر مناطق توزیع آن است.

## ۳- خواص سنگ‌نگاری شیل‌های مورد مطالعه

شیل‌های مورد مطالعه در نامگذاری مقاطع میکروسکوپی با عنوان شیل‌های سیلتي و شیل‌های ماسه‌ای نامگذاری می‌شوند. اجزای اصلی تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل کانی‌های رسی، کوارتز، فلدسپار مسکوویت و سیمان ریزبلور است. افزون

$$\text{UCS}=17.14 I_{s(50)}-4.3n+7.361p \quad R^2=0.79 \quad (1) \text{ رابطه}$$

$$E_s=1.3484 I_{s(50)}-0.851n+11.844p-25.0835 \quad R^2=0.677 \quad (2) \text{ رابطه}$$

در شکل ۵، رابطه بین مقادیر UCS و  $E_s$  برآورد شده با استفاده از روابط ۱ و ۲ با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه، نشان داده شده است.

#### ۶- سامانه منطقی فازی (FIS)

اصول کلی منطق فازی توسط پروفیسور لطفی زاده (Lotfzadeh, 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 غیر دقیق، ناواضح و مبهم) درک می‌کند و به کار می‌بندد. در مجموعه فازی هر یک از این صفات براساس تابع عضویت تعریف و از صفر تا یک ارزش گذاری 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 بسیاری 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 مسائل چندمتغیره و غیر خطی نسبت به روش‌های آماری است. در حقیقت کارایی سامانه منطق فازی در برآورد خواص مکانیکی سنگ‌ها در استفاده از داده‌های نامفهوم و با همبستگی پایین و رسیدن به مدل‌هایی با همبستگی بالاست که آنرا تبدیل به شیوه‌ای مقتدر و کاربردی کرده است. تحقیقات محققان مختلف از جمله Gokceoglu (2002), AlvarezGrima & Babuska (1999) و Den Hartog et al. (1997) و Finol et al. (2001) به منظور برآورد خواص مکانیکی سنگ‌ها با استفاده از داده‌هایی عمدتاً با همبستگی پایین و در نهایت رسیدن به مدل‌هایی با همبستگی مطمئن، کارایی این روش را به اثبات رسانده است.

در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از سامانه منطق فازی، مدل‌هایی برای برآورد UCS و  $E_s$  شیل‌های سازند شمشک با استفاده از مشخصه‌های  $n$  و  $p$  ارائه شد. با وجود اینکه از بین این مشخصه‌ها تنها  $I_{s(50)}$  همبستگی قابل قبولی با UCS نشان می‌دهد، اما استفاده از دیگر مشخصه‌ها باعث کارایی هرچه بهتر مدل‌های پیش‌بینی کننده و در نهایت رسیدن به مدل‌هایی با ضریب اطمینان مطمئن که از روش‌های آماری قابل دستیابی نیستند، خواهد شد.

سامانه منطق فازی (FIS) ارائه شده در این تحقیق بر اساس روش Sugeno با درجه ۱ (خطی) و با استفاده از روش ANFIS (Jang (1993) که ترکیبی از دو رهیافت فازی و عصبی است، به کمک نرم‌افزار 7 MATLAB طراحی شده است. روش ANFIS ابزار قدرتمندی است که می‌تواند با ترکیب اطلاعات، از منابع مختلف نظیر مدل‌های تجربی، مکاشفات و داده‌ها، توسعه مؤثر مدل‌ها را تسهیل کند. در این مدل‌ها سامانه را به کمک قواعد اگر-آنگاه توصیف می‌کنند که این قواعد در ساختاری شبکه‌ای پیاده‌سازی شده‌اند. در این تحقیق دو سامانه فازی مجزا، یکی به منظور برآورد UCS و دیگری به منظور برآورد  $E_s$  ارائه شده است که هر دو دارای ۳ ورودی مشترک  $n$ ،  $p$  و  $I_{s(50)}$  هستند. خروجی‌های به دست آمده از این دو سامانه فازی UCS و  $E_s$  هستند (شکل ۶).

ورودی‌های یک سامانه منطق فازی، مجموعه‌های غیر فازی هستند که در مرحله اول باید تبدیل به مجموعه‌های فازی (fuzzy set) شوند. این کار توسط معادلات فازی‌سازی به نام mf (membership function) انجام می‌شود. در این تحقیق mfها برای هر دو سامانه، با استفاده از روش ANFIS به دست آمده‌اند که در شکل‌های ۷ و ۸، نشان داده شده‌اند. mfهای خروجی برای روش Sugeno، افزون بر اعداد ثابت (معادلات درجه صفر)، می‌توانند معادلات درجه ۱ به بالا هم باشند. mfهای خروجی

بر اجزای اصلی ذکر شده، اجزای فرعی تشکیل دهنده شامل گلو کونیت و سریسیت، کانی‌های کدر، خرده‌سنگ‌ها، زغال و اکسیدهای آهن است (شکل ۲). با وجود تفاوت اندک در اجزای تشکیل دهنده شیل‌های مورد مطالعه، تفاوت‌های زیادی در رفتار مکانیکی این سنگ‌ها (خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری) مشاهده شد که این خود نشان‌دهنده تأثیر بسزای میزان تخلخل، چگالی، سیمان، نحوه ارتباط دانه‌ها با یکدیگر، وجود و یا عدم وجود 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، لذا در این تحقیق، به منظور جلوگیری از اثر هرگونه ناهمسانگردی، ۷۲ نمونه شیل که محور مغزه حفاری عمود بر جهت لایه‌بندی آنهاست (بیشترین زاویه انحراف ۶ درجه)، انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفتند.

تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مانند مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS)، شاخص بار نقطه‌ای ( $I_{s(50)}$ )، مدول تغییر شکل پذیری یانگ و تری ( $E_s$ )، تخلخل ( $n$ )، چگالی ( $p$ )، سرعت عبور موج فشاری ( $V_p$ ) و مقاومت کششی ( $T_p$ ) در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است.

آزمایش بار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مورد مطالعه به روش محوری و با جهت بارگذاری عمود بر لایه‌بندی سنگ انجام شده است. اشکال شکست نامعتبر در این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM Standards (2000)، شناسایی و از بین داده‌های موجود حذف شدند. همچنین از آنجا که انجام این آزمایش بر روی نمونه‌های با مقاومت تراکمی تک‌محوری کمتر از ۱۵ مگاپاسکال توصیه نمی‌شود (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰)، بنابراین، همه داده‌های مربوط به نمونه‌های با مقاومت کمتر از ۱۵ مگاپاسکال حذف شدند. دیگر آزمایش‌ها مطابق با روش‌های پیشنهادی در استاندارد ISRM انجام شده‌اند. در جدول ۱، مقادیر اولیه داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه، ارائه شده است.

#### ۵- تحلیل‌های آماری

تحلیل آماری از جمله روش‌های رایج در مهندسی سنگ و زمین‌شناسی مهندسی برای به دست آوردن مدل‌های پیش‌بینی کننده با استفاده از داده‌های موجود است که اغلب به دو صورت رگرسیون ساده و چندمتغیره انجام می‌شود. در اینجا برای به دست آوردن رگرسیون ساده، افزون بر معادلات خطی ( $y=ax+b$ )، معادلات توانی ( $y=ax^b$ )، نمایی ( $y=ae^{bx}$ ) و لگاریتمی ( $y=a \ln x+b$ ) نیز بررسی می‌شوند. ضرایب رگرسیون برای معادلات حاصل از بهترین حالت برازش در جدول ۲، آورده شده است. نتایج به دست آمده از جدول ۲، نشان‌دهنده وجود همبستگی بهتر بین UCS و  $E_s$  با مشخصه‌هایی چون  $n$ ،  $I_{s(50)}$  و  $p$  است، در حالی که مشخصه‌هایی چون  $T_p$  و  $V_p$  همبستگی کمتری را با UCS و  $E_s$  نشان می‌دهند.

با توجه به ضرایب رگرسیون به دست آمده و همچنین سهولت اندازه‌گیری مشخصه‌هایی مانند  $n$  و  $I_{s(50)}$  نسبت به دیگر مشخصه‌ها، بنابراین در این تحقیق، روش‌های غیر مستقیم برآورد UCS و  $E_s$  با استفاده از این مشخصه‌ها بررسی شده است. روند تغییرات UCS و  $E_s$  شیل‌های مورد مطالعه در مقابل  $n$ ،  $p$  و  $I_{s(50)}$  در نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴، به همراه بهترین روابط برازش شده، نشان داده شده است.

با توجه به اینکه روابط به دست آمده از رگرسیون ساده (به غیر از رابطه UCS در مقابل  $I_{s(50)}$ ) کارایی مطمئنی ندارند، بنابراین در مرحله بعد تحلیل آماری به روش رگرسیون چندمتغیره بر روی داده‌ها انجام شد. روابط چهار متغیره (سه متغیر مستقل و یک متغیر وابسته) و ۱۰ به ترتیب نشان‌دهنده بهترین روابط چندمتغیره به دست آمده به منظور برآورد UCS و  $E_s$  هستند.

شده و درصدهای خطای محاسبه شده، به عنوان شاخص های خوبی برای بررسی کارایی مدل های به دست آمده استفاده کرد. افزون بر این شاخص عملکرد (VAF) (رابطه ۵) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۶) برای محاسبه کارایی مدل های پیش بینی کننده، بسیار مفید هستند، که توسط محققان مختلف از جمله Gokceoglu (2002) و Finol et al. (2001), Alvarez Grima & Babuska (1999) مورد استفاده قرار گرفته اند.

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

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

در روابط ۵ و ۶،  $y'$  به ترتیب مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده هستند. هرچه مقدار VAF بزرگ تر و RMSE کوچک تر باشد، مدل پیش بینی کننده برآورد واقعی تری ارائه می دهد. بنابراین اگر VAF برابر ۱۰۰ و RMSE برابر صفر باشد، مدل به دست آمده، بهترین برآورد را ارائه خواهد داد. مقادیر VAF و RMSE برای مدل های آماری چندمتغیره و فازی طراحی شده در جدول ۳، ارائه شده اند. با مقایسه بین شاخص های محاسبه شده برای مدل های به دست آمده از روش منطق فازی و روش رگرسیون چندمتغیره (جدول ۳)، می توان به کارایی هر چه بهتر سامانه منطق فازی ارائه شده برای برآورد UCS و  $E_s$  نسبت به روش آماری چندمتغیره پی برد.

## ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل هایی برای برآورد UCS و  $E_s$  شیل های سازند شمشک در منطقه سیاهبیشه با استفاده از روش های آماری و روش منطق فازی سوگنو ارائه شد و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- با استفاده از تحلیل رگرسیون ساده، روابطی بین UCS و  $E_s$  با متغیرهای  $n$ ،  $I_{s(50)}$  و  $\rho$  به دست آمد که اغلب این روابط کارایی مطمئنی در برآورد UCS و  $E_s$  نشان نمی دهند، لیکن با استفاده از روش های آماری چندمتغیره و منطق فازی می توان مدل های قابل قبولی ارائه داد.
- ۲- دو رابطه چندمتغیره برای برآورد UCS و  $E_s$  به دست آمد. با توجه به ضرایب رگرسیون این روابط، می توان کارایی قابل قبول آنها را در برآورد هر دو مشخصه UCS و  $E_s$  انتظار داشت.
- ۳- به منظور برآورد UCS و  $E_s$  دو مدل منطق فازی با استفاده از روش سوگنو طراحی شد که هر کدام دارای ۳ ورودی مشترک  $n$ ،  $I_{s(50)}$  و  $\rho$  هستند. مقادیر UCS و  $E_s$  برآورد شده از این مدل ها همبستگی بهتری با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه، نسبت به مدل های به دست آمده از روش رگرسیون چندمتغیره، نشان می دهند.
- ۴- مقادیر شاخص های VAF و RMSE به ترتیب ۷۹/۲۳ و ۹/۸۸ برای UCS برآورد شده از روش رگرسیون چندمتغیره و ۹۲/۱۹ و ۶/۱۲۵ برای UCS برآورد شده از روش منطق فازی به دست آمد. این مقادیر به ترتیب ۶۶/۱۲۲ و ۱/۸۰۸ برای  $E_s$  برآورد شده از روش رگرسیون چندمتغیره و ۸۷/۰۸ و ۱/۱۱۷ برای  $E_s$  برآورد شده از روش منطق فازی محاسبه شد. این ارقام نشان می دهند که مدل های ارائه شده بر اساس روش منطق فازی سوگنو، کارایی بهتر و دقت بیشتری در برآورد هر دو مشخصه UCS و  $E_s$  نسبت به روابط حاصل از روش های آماری چندمتغیره دارند.

سامانه فازی طراحی شده بر اساس روش Sugeno با درجه ۱ (خطی)، به صورت یک ماتریس  $m \times n$  است. هر سطر این ماتریس معرف فاکتورهای یک mf است. یعنی تعداد سطور نشان دهنده تعداد mfها است.

در هر FIS برای ایجاد ارتباط منطقی بین ورودی ها و خروجی ها به یک سری قواعد شرطی (rule) نیاز است (Alvarez Grima, 2000). در FIS اول به منظور برآورد UCS (شکل ۷)، ۶ قانون (rule) و در FIS دوم (شکل ۸) برای برآورد  $E_s$ ، ۷ قانون تنظیم شده است.

نحوه عملکرد مدل را می توان در سه مرحله تشریح کرد:

۱- ابتدا داده های ورودی بر اساس mfهای ارائه شده در شکل های ۷ و ۸ تبدیل به مجموعه های فازی می شوند.

۲- مانند شکل ۹ و بر اساس قوانین تنظیم شده بر مبنای منطق and (تابع Prod) Gustafson (1979) سه ورودی برای هر قانون، بر هم کنش داشته که نتیجه نهایی آن به صورت درجه تأثیر  $W_{ii}$  و یک رابطه  $Z_i$  بیان می شود. در اینجا  $Z_i$  به صورت رابطه (۳) بیان می شود.

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

۳- برای غیر فازی کردن، می توان مقدار  $Z$  (که در واقع نتیجه برآورد شده از مدل است) را از رابطه (۴) محاسبه کرد.

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

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

ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $k$  در ماتریس های ارائه شده در شکل های ۷ و ۸ به ترتیب از چپ به راست ارائه شده اند. در واقع،  $x_i$ ها معرف  $I_{s(50)}$ ،  $y_i$ ها معرف  $n$  و  $h_i$ ها معرف  $\rho$  برای هر نمونه است.

در شکل ۹، نحوه عملکرد هر دو FIS طراحی شده در برآورد UCS و  $E_s$  یک نمونه از شیل های مورد مطالعه ( $I_{s(50)} = 2/1$ ،  $n = 4/4$  و  $\rho = 2/7$ )، نشان داده شده است که خروجی آنها  $UCS = 35/2$  و  $E_s = 6/37$  است.

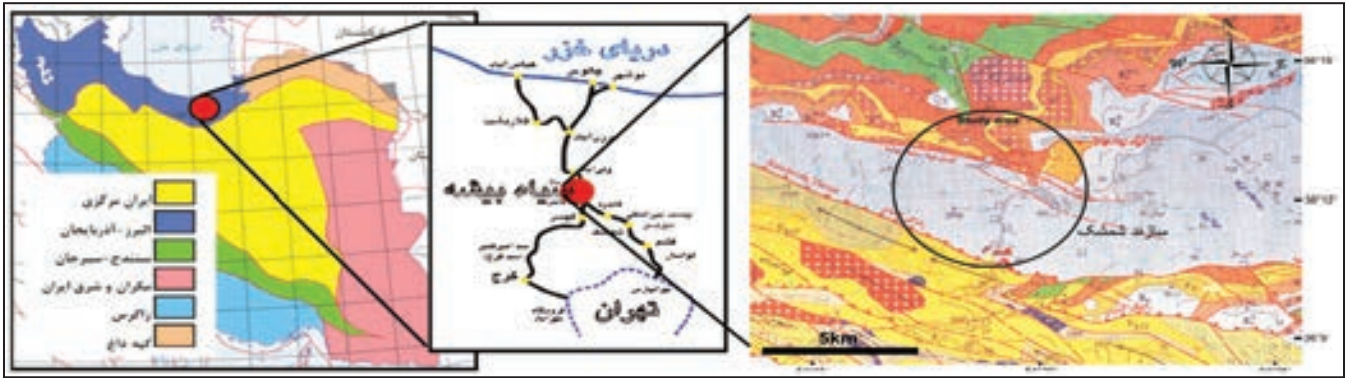
در شکل ۱۰، روابط بین UCS و  $E_s$  برآورد شده از روش منطق فازی و مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه، نشان داده شده است که به ترتیب دارای ضرایب رگرسیون ( $R^2$ ) ۰/۹۲ و ۰/۸۷ هستند. بنابراین مقادیر به دست آمده از روش منطق فازی نسبت به روش آماری رگرسیون چندمتغیره، همبستگی بهتری با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه، نشان می دهند.

در شکل ۱۱، مقادیر درصد خطاهای محاسبه شده در برآورد UCS و  $E_s$  از هر روش منطق فازی و رگرسیون چندمتغیره در مقابل UCS و  $E_s$  به دست آمده در آزمایشگاه، نشان داده شده است که نشان دهنده کاهش درصد خطاهای محاسبه شده از روش فازی نسبت به روش آماری در اغلب نمونه هاست.

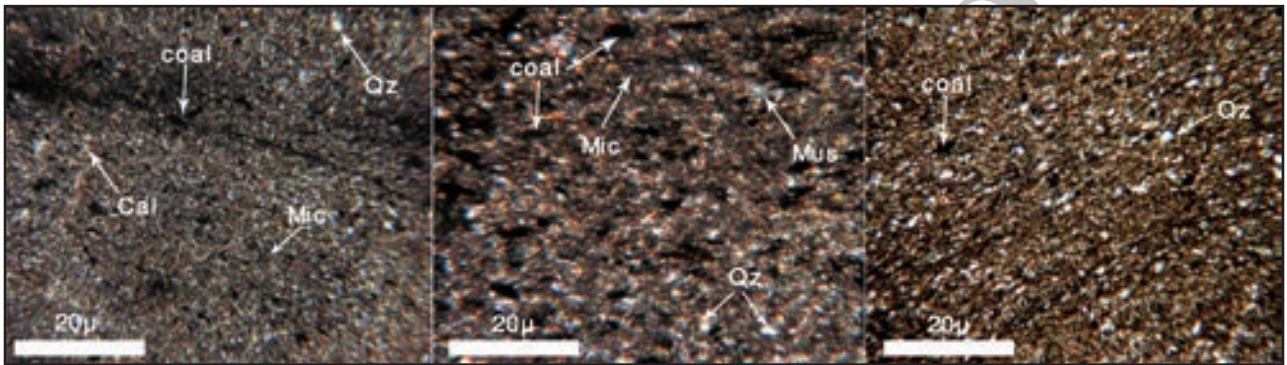
## ۷- بررسی کارایی مدل های به دست آمده

روابط بین UCS و  $E_s$  برآورد شده از روش های آماری و منطق فازی با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه به ترتیب در شکل های ۵ و ۱۰، نشان داده شدند. در حقیقت، نمی توان از ضرایب رگرسیون بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر برآورد

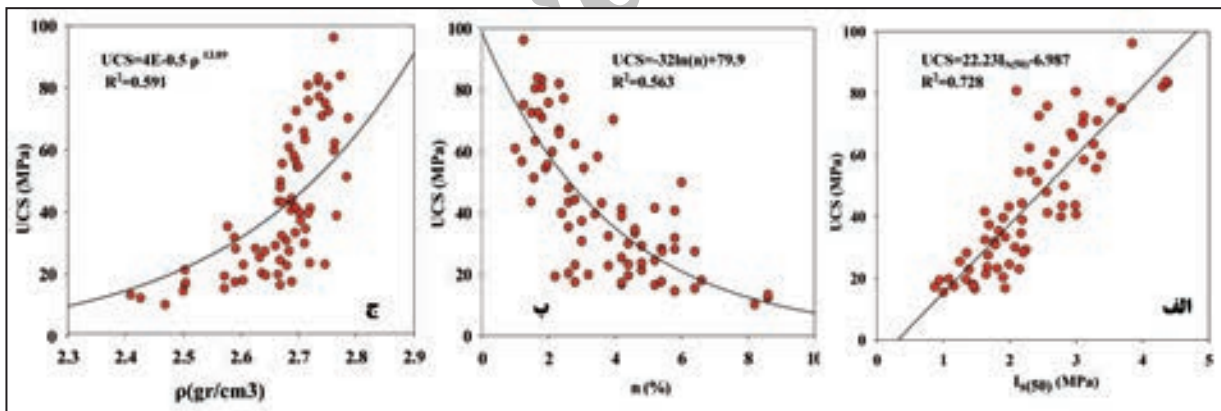




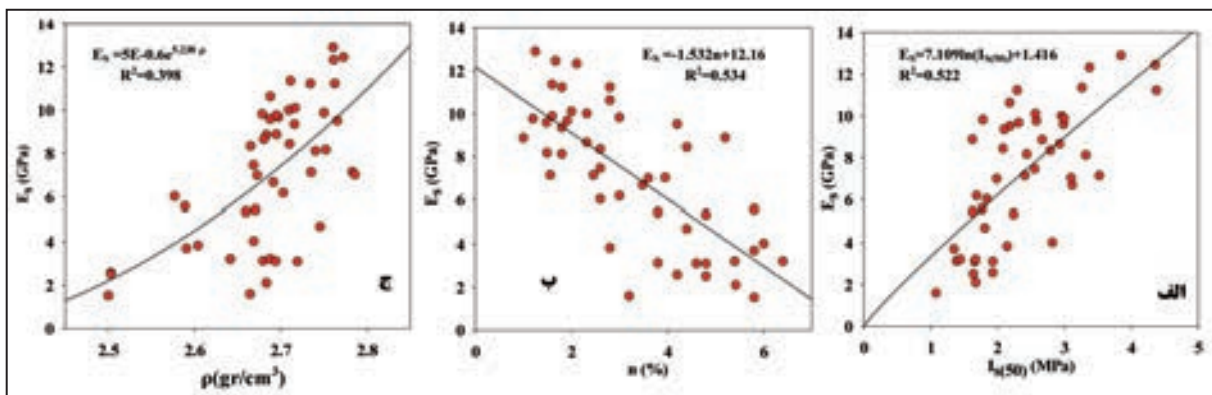
شکل ۱- محدوده مورد مطالعه در نقشه جغرافیایی و زمین‌شناسی (منبع نقشه زمین‌شناسی: نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ چارگوش مرزن‌آباد سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی) (وحدتی دانشمند، ۱۳۷۹)



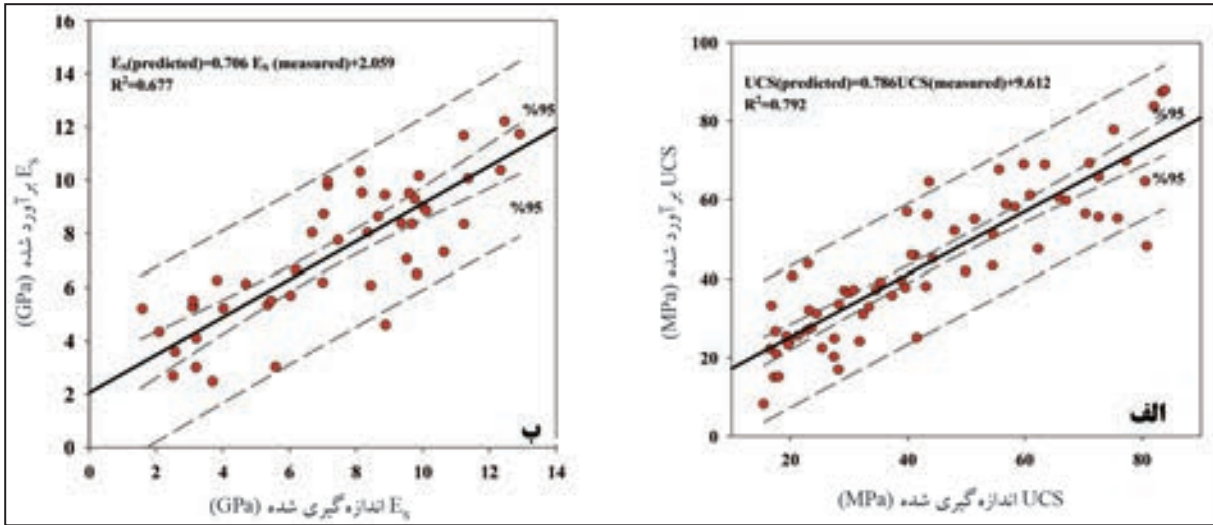
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های شیل مورد مطالعه (کوآرتز=Qz، مسکوویت=Mus، زغال سنگ=Coal، کلسیت=Cal، سیمان ریزپلور=Mic)



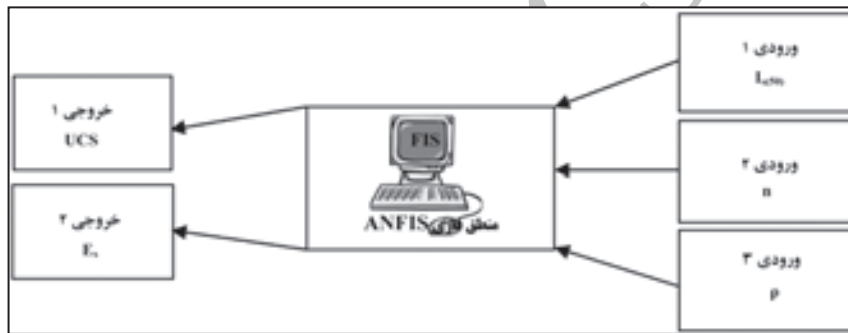
شکل ۳- روند تغییرات UCS در برابر  $I_{s(50)}$  (الف)، n (ب) و  $\rho$  (ج)



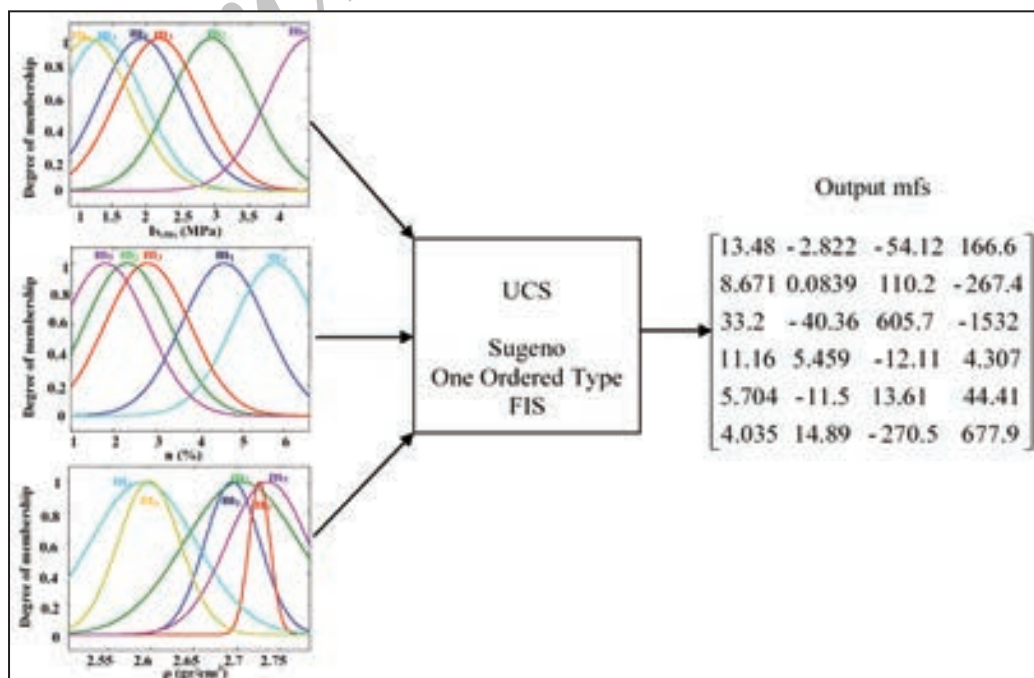
شکل ۴- روند تغییرات  $E_s$  در برابر  $I_{s(50)}$  (الف)، n (ب) و  $\rho$  (ج)



شکل ۵- ارتباط بین UCS و  $E_s$  برآورد شده از رابطه (۱) الف) و رابطه (۲) ب) با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه خطوط خط چین، معرف خطوط اطمینان و پیش بینی ۹۵ درصد هستند)

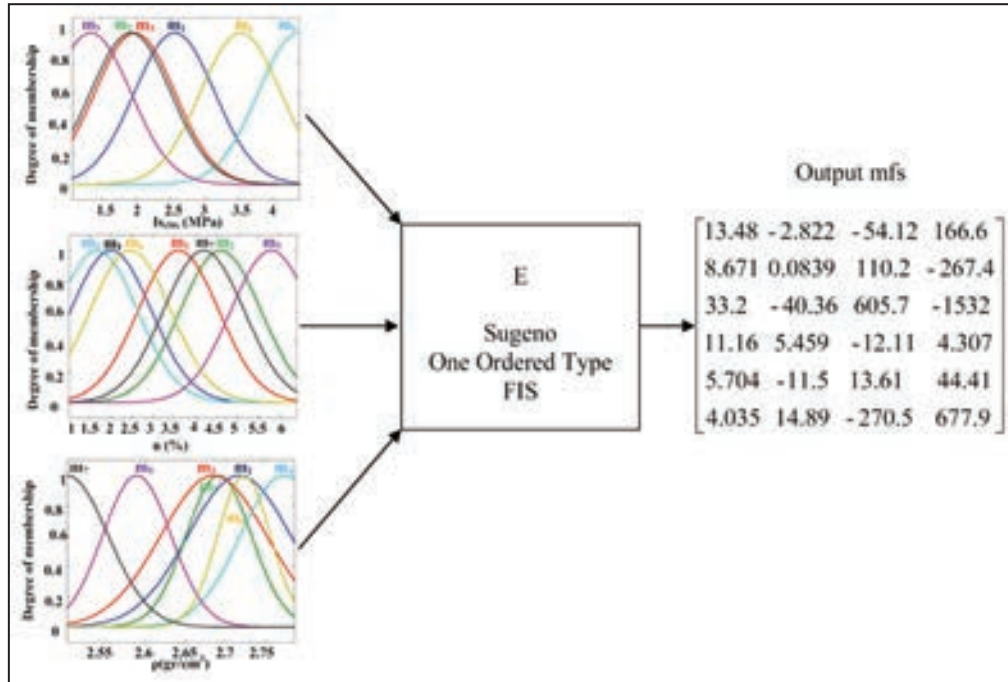


شکل ۶- ساختار اولیه سامانه منطق فازی به منظور برآورد UCS و  $E_s$

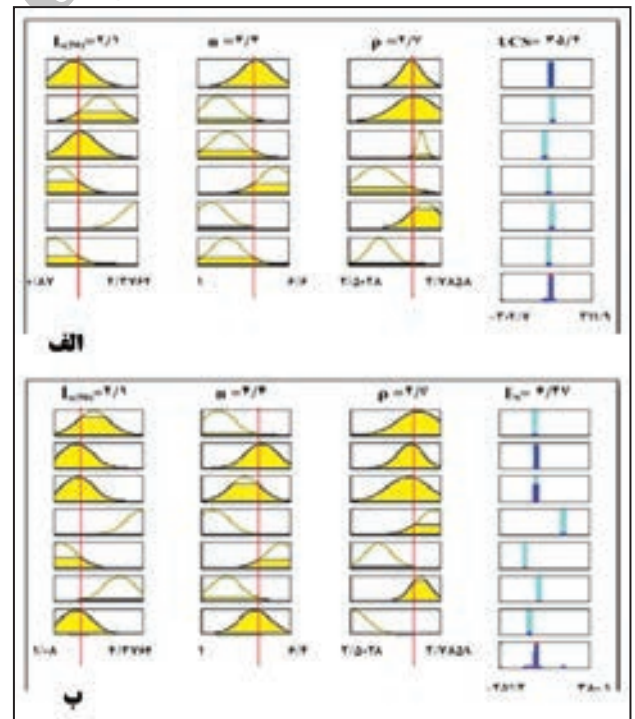
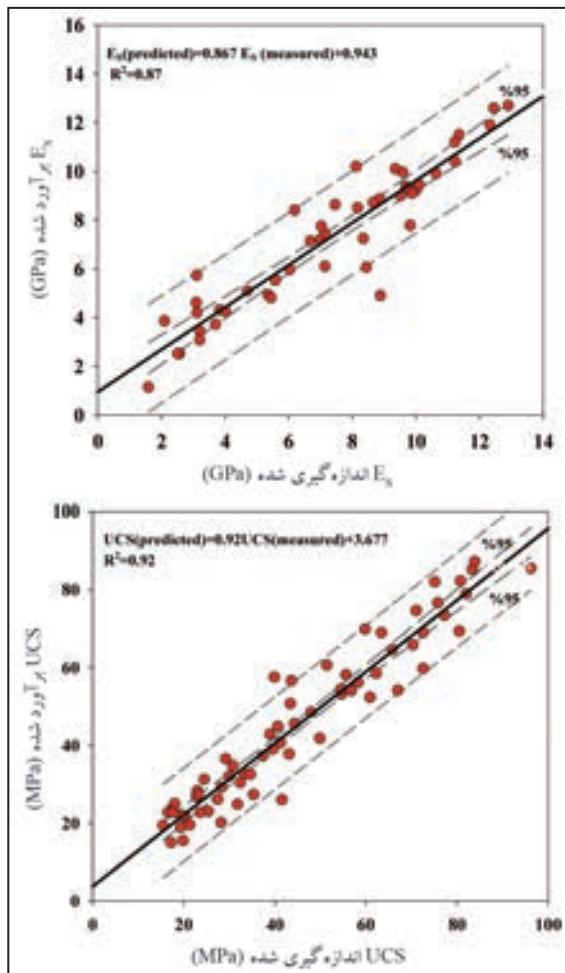


شکل ۷- سامانه فازی طراحی شده به منظور برآورد UCS



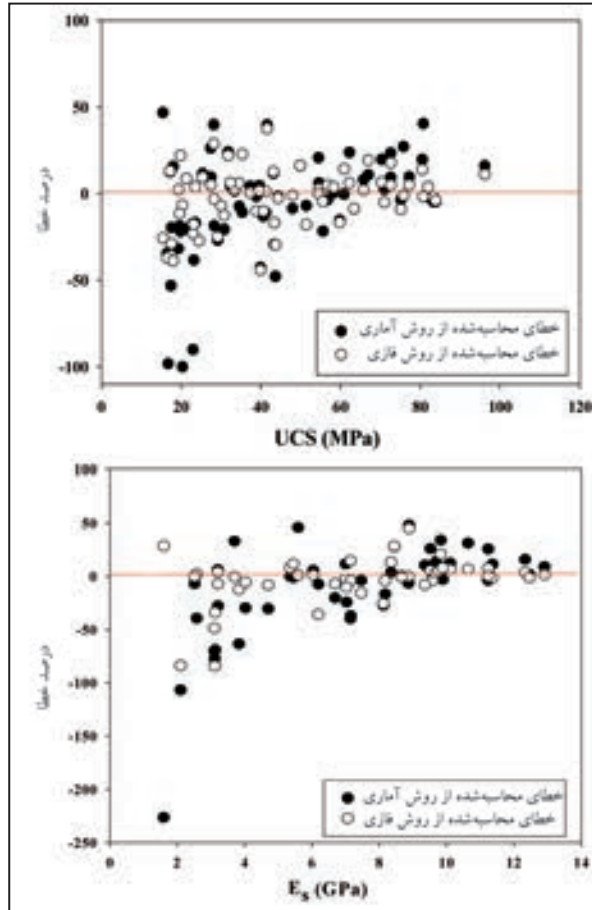


شکل ۸- سامانه فازی طراحی شده به منظور برآورد  $E_p$



شکل ۹- نحوه عملکرد FISها در برآورد UCS (الف) و  $E_p$  (ب)

شکل ۱۰- روابط بین UCS و  $E_p$  برآورد شده از روش منطق فازی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (خطوط خط‌چین، معرف خطوط اطمینان و پیش‌بینی ۹۵ درصد هستند)



شکل ۱۱- درصد‌های خطا در برآورد UCS و  $E_s$  از روش‌های آماری چندمتغیره و منطق فازی

جدول ۱- تحلیل آماری داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف بر روی شیل‌های سازند شمشک

ویژگی	علامت	تعداد نمونه	استاندارد	محدوده تغییرات	میانگین	میان	انحراف استاندارد	واریانس
مقاومت تک محوری	UCS(MPa)	۷۲	ISRM	۹۶/۲۰-۱۰/۲۱	۴۲/۵۶	۳۹/۲۵	۲۲/۴۴	۵۰۳/۷۴
شاخص بار نقطه‌ای	$I_{s(50)}$ (MPa)	۶۸	ISRM,ASTM	۴/۳۸-۰/۸۷	۲/۳۱	۲/۱۷۶	۰/۸۳۸	۰/۷۰۳
مدول یانگ وتری	$E_s$ (GPa)	۴۸	ISRM	۱۲/۹۰-۱/۵۹	۷/۱۴۱۶	۷/۳۰۷	۱۰/۳۴	۱۰/۳۴
چگالی	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	۷۲	ISRM	۲/۴۱-۲/۷۹	۲/۶۶۷	۲/۶۸۷	۰/۸۲۳	۰/۰۰۷
تخلخل	n(%)	۷۲	ISRM	۱/۰-۸/۶۰	۳/۶۴۹	۳/۳	۱/۸۳	۳/۳۵
مقاومت کششی	TS(MPa)	۶۴	ISRM	۱۰/۳۱-۱/۲	۵/۴۱	۵/۰۵	۲/۳۰	۵/۳۰
سرعت موج فشاری	$V_p$ (m/sec)	۷۲	ISRM	۴۹۲۷/۷۴-۲۱۶۱/۷۵	۳۵۲۹/۹۵	۳۶۵۷/۵۵	۷۵۴/۰۷	۵۵۵۱۳۴/۶
درصد رطوبت	$\omega$ (%)	۷۲	ISRM	۳/۴۴-۰/۳۲	۲/۳۴	۲/۳۱	۱/۸۶	۳/۱۱

جدول ۲- ضرایب رگرسیون ( $R^2$ ) بین خواص فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

$E_s$	$I_{s(50)}$	UCS	$I_{s(50)}$	n	$\rho$	TS	$V_p$
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۶۸۸ (توانی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)
۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)
۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)
۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)
۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)
۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)
۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۷۲۸ (خطی)	۰/۵۶۳ (لگاریتمی)	۰/۳۵۶ (نمایی)	۰/۴۰۳ (خطی)	۰/۴۱۳ (توانی)	۰/۴۷۸ (توانی)	۰/۲۸۷ (نمایی)

جدول ۳- مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های VAF و RMSE

مدل	پارامتر تخمین‌زده شده	VAF(%)	RMSE
رگرسیون چندمتغیره	UCS	۷۹/۲۳	۹/۸۸
رگرسیون چندمتغیره	$E_s$	۶۶/۱۲۲	۱/۸۰۸
منطق فازی	UCS	۹۲/۰۱۹	۶/۱۲۵
منطق فازی	$E_s$	۸۷/۰۸	۱/۱۱۷

### کتابنگاری

- وحدتی دانشمند، ف.، ۱۳۷۹- نقشه زمین‌شناسی مرزن‌آباد، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، شماره ۶۲۶۲، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آفانیاتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۱- زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۹۰۱ صفحه.
- فهیمی‌فر، الف.، سروش، ح.، ۱۳۸۰- آزمایش‌های مکانیک سنگ، جنبه‌های نظری و استانداردها، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۷۱۹ صفحه.

### References

- Alvarez Grima, M. & Babuska, R., 1999- Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci* 36, pp. 339-349.
- Alvarez Grima, M., 2000 - Neuro-fuzzy modeling in engineering geology. A.A. Balkema, Rotterdam, 244 pp.
- ASTM Standards, D 5731-95., 2000- Standard test method for determination of the point load strength index of rock, *Annual Book of ASTM Standards* 04.08., pp. 1442-1448.
- Cargill, J. S. & Shakoor, A., 1990- Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci* 27 (6), pp. 495-503.
- 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-cutting trencher. *International Journal of Approximate Reasoning* 16, pp. 43-66.
- Edet, A., 1992- Physical properties and indirect estimation of microfractures using Nigerian carbonate rocks as examples. *Engineering Geology* 33, pp. 71-80.
- Fahy, M. P. & Guccione, M. J., 1979- Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* XVII (4), pp. 467-485.
- Finol, J., Guo, Y.K. & Jing, X.D., 2001- A rule based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 29, pp. 97-113.
- Gokceoglu, C., 2002- A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology* 66, pp. 39-51.
- Grasso, P., Xu, S. & Mahtab, A., 1992- Problems and promises of index testing of rock. In: Tillerson, Waversik (Eds.), *Rock Mechanics*. Balkema, Rotterdam, pp. 879-888.
- Gustafson, D. E., 1979 - Kessel WC. Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix. In: *Proc. IEEE CDC*. San Diego, CA, pp.700-76
- 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* 9, pp. 169-179.
- 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.
- 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* XXVIII (1), pp. 55-71.
- Sugeno, M., 1985- *Industrial applications of fuzzy control*, New York, USA. Elsevier Science Pub. Co. 269 pp.
- 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, *Eng. Geol* 38, pp. 138-157.



# Quantifying the Ground Co-Seismic Variations by using High Rate GPS Data, Case Study: San-Simeon Earthquake 2003 Dec. 22 (California- United States of America)

S. Tabibi<sup>1</sup>, M. M. Hossainali<sup>1</sup> & Y. Djamour<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Geomatics College, National Cartographic Center, Tehran, Iran

Received: 2010 June 12

Accepted: 2010 October 12

## Abstract

Better understanding of earthquakes primarily requires more accurate dynamic and kinematic models for fault rupture. There are several methods for ground motion detection; each of them has its own advantages and limitations. The processes, needed for the estimation of displacements by the seismic data, generally increase the noise. Accelerometers, for example, record the details of strong ground motion close to the earthquake source; however it is difficult to transform the measured accelerations into displacement. Broadband seismometers are more sensitive and more accurate than accelerometers but even those may be saturated or clipped in far distances from a large earthquake. InSAR observations can provide good spatial images of some of the surface displacement components in the rupture area. It has, however, drawbacks in some regions, as the InSAR has no sufficient temporal resolution for the analysis of dynamic short period changes during an earthquake. Most of the GPS monitoring systems process the daily or hourly data in order to achieve the station coordinate with millimeter accuracy. But in warning systems, the temporal delay between the natural event and the act of warning must be the least as much as possible. Increasingly more continuous GPS receivers, established primarily for geophysical studies, are now running in seismic frequencies such as 1-Hz. GPS seismology is the unexpected result of the geodetic networks which at first were established to measure the deformation of plates and tectonic plate boundaries. A GPS receiver can accurately measure the movements in the geological time scales (i.e. 1 mm/yr) and that of seismology (i.e. 500 mm/sec). In this paper, the shape of the seismic waves, obtained from thirteen GPS stations, being in 36 to 74 kms of epicentral distances of San-Simeon Earthquake, 2003 are determined. The efficiency of the relative methods of positioning using high rate data has been analyzed; estimated co-seismic displacements have been validated using similar results obtained from the integration of seismic records.

**Keywords:** High-Rate GPS, Seismology, San-Simeon earthquake

For Persian Version see pages 97 to 102

\*Corresponding author: Y. Djamour; E-mail: djamour@ncc.org.ir

## A Fuzzy Model to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity of Shemshak Formation Shales

M. Kianpour<sup>1\*</sup>, M. Sayari<sup>2</sup>, A. Oromiea<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Faculty of Science, University of Esfahan, Esfahan, Iran.

Received: 2009 April 18

Accepted: 2010 October 12

## Abstract

The uniaxial compressive strength and modulus of deformability of intact rocks are highly important parameters for rock engineering and engineering geology projects. Because of the difficulty of measuring these parameters and the need for laboratory equipments for their prediction, indirect methods are often used. In this study, some predictive models using regression analysis and fuzzy inference system have been developed for the Shales cropping out in the Shemshak formation in Siabshishe area. For this purpose, a series of easy measurable parameters such as density, porosity and point load index were applied. Both multiple regression analyses and the fuzzy inference system

exhibited good performance in prediction of the uniaxial compressive strength and modulus of deformability. The variation of regression coefficient ( $R^2$ ), performance indices (VAF) and root mean square error (RMSE) were calculated as for the uniaxial compressive strength and the modulus of deformability obtained from the multiple regression model and the fuzzy inference system revealed that the prediction performances and accuracy of the fuzzy model are higher than those of multiple regression equations in prediction of uniaxial compressive strength and modulus of deformability.

**Keywords:** Fuzzy inference system, Shemshak formation, Shale, Modulus of deformability, Uniaxial compressive strength.

For Persian Version see pages 103 to 110

\*Corresponding author: M. Kianpour; E-mail: mehdikianpoor61@yahoo.com

## Biostratigraphy of Mobarak Formation at Valyabad Section, Chalous Road

N. Ranjkesh<sup>1</sup> & B. Hamdi\*

<sup>1</sup>Research Institute of Earth Science, Tehran, Iran

Received: 2010 March 03

Accepted: 2010 October 18

### Abstract

The Mobarak Formation with 347.5 m, thickness is well exposed in Valyabad section, at the Karaj - Chalus road. The lower contact with underlying Laloon Formation is disconformable, whereas stratigraphic relation to the overlying Dozdeband formation is transitional. According to the lithological character, the studied section can be subdivided into 11 rock units. The lower part of the fm. consist of dark-gray to black limestone as well as marly limestone, while upper part consist mainly of sandy limestone with interbeds of marlstone. According to the microfossil investigation, 14 genus and species have been recognized, which leads 2 conodont biozones. The both conodont biozones correspond to the international standard conodont biozonation which suggest an Early Tournisian to Middle Visian time interval. In addition, a Namurian age is suggested for deposits of informal Dozdeband Formation, based on foraminifers. Received conodont biozones are as:

*Neoprinioides peracutus* - *Polygnathus longiposticus* Assemblage - Zone, *Hibbardella roundya* - *Gnathodus girtyi* Assemblage - Zone

More over, 5 Holotorian species as well as 6 genera, 72 species foraminifers in form of 5 biozone have been distinguished. These biozones are as:

*Eotuberitina retigener* - *Endothyra spirilloformis* Assemblage - Zone

*Archaeodiscus permodiscus* - *Archaeodiscus(Paraarchaeodiscus)mixtus* Assemblage - Zone

*Endostaffella parva* - *Brunsinia pulchra* Assemblage - Zone

*Tuberitina bulbacea* - *Kammaena* sp. Barren Interval Zone

*Lipinella notata* - *Archaeodiscus planoarchaeodiscus* Assemblage - Zone

The studied foraminifers support the given age. Conodonts the Color Alteration Index(CAI) correspond 190 to 300 °C which indicate dry gas stage or empty of any hydrocarbon.

**Key words :** Biostratigraphy, Biozone, Conodont, Mobarak Formation, Valyabad

For Persian Version see pages 111 to 122

\*Corresponding author: B. Hamdi; E-mail: HBahaedin@yahoo.com