

## تخمین مدول یانگ استاتیکی و مقاومت تراکمی تک محوری بر اساس خصوصیات فیزیکی و دینامیکی سنگ آهک سازند آقچاگیل در حوضه خزر

حدیثه خاکزاد سوچلمایی<sup>۱</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۲\*</sup>، محمد غفوری<sup>۳</sup>، مریم ظفری<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

پارامترهای استاتیکی از جمله مهم ترین پارامترها در تخمین خصوصیات ژئومکانیکی می باشد. تعیین این داده ها به طور مستقیم در مطالعات درون چاهی بسیار هزینه بر بوده، لذا به طور معمول در دسترس نیستند و یا به صورت محدود اندازه گیری شده اند، از این رو محققین زیادی سعی در ارائه روابط تجربی نموده اند تا این پارامترها را از سایر خصوصیات برآورد نمایند. هدف مطالعه حاضر نیز ارزیابی پارامترهای مدول یانگ استاتیک و مقاومت تراکمی تک محوری سنگ آهک سازند آقچاگیل بر اساس خصوصیات فیزیکی و دینامیکی با استفاده از رگرسیون چندگانه می باشد. برای این منظور از رخنمون های سطحی سازند مورد نظر تعداد ۱۸ مغزه از ۱۰ بلوک آهکی تهیه شده و آزمایش های مختلف فیزیکی، مکانیکی و تعیین سرعت موج بر روی نمونه ها صورت پذیرفت. نتایج مطالعات حاضر نشان داد که از بین پارامترهای مختلف فیزیکی و دینامیکی سه متغیر چگالی، سرعت موج فشاری و مدول یانگ دینامیک رابطه بهتری را با مقاومت تراکمی تک محوری نشان می دهند. همچنین برای برآورد مدول یانگ استاتیکی متغیرهای تخریل و مدول یانگ دینامیک نتایج قابل قبول تری ارائه می کنند.

**کلیدواژه ها:** سنگ آهک متخلخل، پارامترهای استاتیکی، پارامترهای دینامیکی، خصوصیات فیزیکی، رگرسیون چندگانه، نرم افزار SPSS

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲. عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، [nhafezi@um.ac.ir](mailto:nhafezi@um.ac.ir)

۳. عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۴. مشاور صنعتی شرکت ملی نفت ایران، شرکت نفت خزر، تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

تمام انواع سنگ‌ها قابل اعتماد دانست. آن‌ها باید با احتیاط و فقط برای نوع خاص سنگ استفاده شوند (Abutaleb et al., 2017). در اکثر مشکلات و موارد بسیاری، بیش از یک متغیر مستقل مؤثر، در دسترس و مرتبط با متغیر وابسته است. لذا برآورد مقاومت یا مدول یانگ استاتیکی صرفاً بر اساس یک پارامتر می‌تواند با خطای قابل توجه همراه باشد، به همین دلیل ضریب رگرسیون چنین روابطی خیلی بالا نمی‌باشد. از جمله مزایای دیگر استفاده از این روش، این امکان را در اختیار قرار می‌دهد که با استفاده از تعداد محدودتری داده ولی با استفاده از چند پارامتر مؤثر بجای یک پارامتر روابط مناسب‌تری جهت برآورد مقاومت فشاری و مدول یانگ استاتیکی ارائه گردد. لازم به ذکر است که آزمون‌های فیزیکی و اولتراسونیک ( $V_s$ ,  $V_p$ ) آزمون‌های اولیه و متداول است که می‌تواند بر روی نمونه‌های سنگی در آزمایشگاه انجام شود. همچنین این آزمایش‌ها ارزان و غیر مخرب هستند و اطلاعات کافی در مورد آن‌ها وجود دارد. در نتیجه، ترکیبی از این پارامترها می‌تواند رفتار خوبی از پارامترهای مقاومتی را پیش‌بینی کند. تخمین پارامترهای استاتیکی در مخازن هیدروکربنی از جمله موضوعات مهم در مدلسازی ژئومکانیکی می‌باشد. با توجه به اینکه روابط زیادی توسط محققین جهت تخمین پارامترهای مهم استاتیکی ارائه شده است، این مسئله در مخازن هیدروکربنی با سازندهای ضعیف و بسیار ضعیف به طور گسترده‌ای پرداخته نشده است (Zoback., 2010). در پژوهش حاضر تلاش شده است با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های اخذ شده از رخنمون سازند آهکی آقچاگیل در استان گلستان، رابطه تجربی چندگانه مناسبی بین پارامترهای استاتیکی با پارامترهای دینامیکی و فیزیکی در این سازند برقرار گردد و از نتایج آن جهت برآورد خصوصیات مقاومتی در تجزیه تحلیل‌های ژئومکانیکی مخازن شمال ایران استفاده گردد.

ارزیابی خواص مکانیکی سنگ یکی از مهمترین اجزای پروژه های مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی است. اغلب پارامترهای استاتیکی مورد استفاده در این پروژه‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مدول یانگ استاتیک (Es) می‌باشند. این پارامترها ورودی مهم برای سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ، معیار شکست سنگ، تجزیه و تحلیل سازه‌های زیرزمینی و روش‌های تحلیلی و طراحی عددی مانند طراحی حفاری‌های تونل می‌باشند (Jahed Armaghani et al., 2015). مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و خصوصیات الاستیکی سنگ‌ها مانند مدول یانگ و نسبت پواسون به‌طور گسترده‌ای برای برآورد تنش‌های درونی، تحلیل پایداری چاه، بررسی میزان تراکم مخزن و پیش‌بینی فشار بهینه حفاری استفاده می‌شود (Najibi et al., 2015). مقاومت فشاری و ثابت‌های الاستیکی بیانگر واکنش به شرایط تنش‌های اعمالی بر روی نمونه سنگ هستند و از این‌رو معمولاً در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lacy, 1997). ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و شکل سنگ‌دانه، درجه سیمان‌شدگی و ناهمگنی، روی ویژگی مکانیکی سنگ تأثیرگذار می‌باشند (Mavko et al., 2009). روش‌های تعیین این پارامترها مخرب، گران و وقت‌گیر است و به تعداد زیادی نمونه‌ی با کیفیت بالا نیازمند است. به منظور غلبه بر این مشکلات، بسیاری از مطالعات امکان یک روش آسان و سریع برای پیش‌بینی UCS و Es را براساس روش‌های غیرمستقیم یا تست‌های غیرمخرب مورد بررسی قرار داده‌اند. تاکنون روابط تجربی متعددی بین خصوصیات استاتیک و دینامیک گروه‌های مختلف سنگ‌ها توسط محققین مختلف ارائه شده است. در جدول (۱) برخی از روابط متداول در این خصوص آورده شده است. از نتایج تحلیل‌های رگرسیون ساده گزارش شده در این مطالعات، به این نتیجه رسیدند که هیچ ارتباط واحدی را نمی‌توان برای

جدول ۱: ارائه برخی از روابط تجربی برای تعیین پارامترهای استاتیک توسط محققین (در جدول (۱)  $E_s$  مدول یانگ استاتیک بر حسب (GPa)،  $E_d$  مدول یانگ دینامیک بر حسب (GPa)، UCS مقاومت فشاری تک محوری بر حسب (MPa)،  $n$  درصد تخلخل و VP سرعت موج فشاری بر حسب (Km/s) می باشد).

Experimental Eq.	Reference	Description	NO.
$E_s = 0.264V_p^{2.04}$	(Lacy., 1997)	Sedimentary	1
$E_s = 0.74E_d - 0.82$	(Eissa and Kazi., 1988)	Sedimentary	2
$E_s = 0.541E_d + 12.852$	(Ameen et al., 2009)	Limestone	3
$UCS = 13.8E_s^{0.51}$	(Chang., 2004)	Limestone with 10<UCS<300MPa	4
$UCS = 2.28 + 4.1089E_s$	(Bradford et al., 1998)	Sandstone, Worldwide	5
$UCS = 135.9 \exp(-4.8n)$	(Chang., 2004)	low- to moderate-porosity (0.0–0.2), high UCS (10–300 MPa)	6
$UCS = 11.05E_s^{0.66}$	(Najibi et al., 2015)	Limestone, Iran	7
$UCS = 4.31 \left(\frac{E_d}{10}\right)^{1.706}$	(King., 1983)	Igneous&metamorphic	8
$UCS = 21.677V_p + 21.427$	(Yasar and Erdogan., 2004)		9
$E_s = 0.169 V_p^{3.32}$	(Najibi et al., 2015)	Limestone, Iran	10
$E_s = 82.127e^n - 0.0496^n$	(Ameen et al., 2009)		11
$E_s = 0.867E_d - 2.085$	(Brotons et al., 2016)	Calcarenite	12
$E_s = 118.54e^n - 0.0542n$	(Ameen et al., 2009)	Dolomite	13
$E_s = 104.75e^n - 0.0579n$	(Ameen et al., 2009)	Limestone	14
$E_s = 0.6722(E_d)^{1.0573}$	(Kidambi and Kumar., 2016)	Carbonate	15
$E_s = 1.9089(E_s)^{1.0165}$	(Kidambi and Kumar., 2016)	Carbonate	16

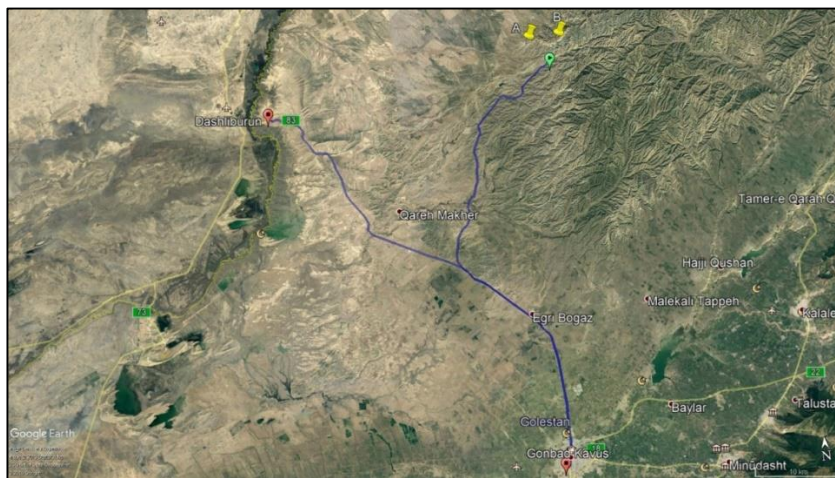
## ۲. معرفی منطقه مطالعاتی

چلکن و سرمتین است. این توالی با رسوبات کرتاسه و تشکیلات شیل توفدار ادامه می یابد (بحرینی و اتحاد، ۱۳۹۳). رخنمون سازند آقچاگیل در ایران بسیار محدود بوده و به عنوان سنگ مخزن زون های خزر و کپه داغ محسوب می - باشد. اما سست و ضعیف بودن سازند امکان اخذ مغزه درون چاهی را غیر ممکن کرده، از طرفی دانش و استفاده بهینه از این واحد بر اقتصاد صنعت نفت تأثیر می گذارد. علاوه بر این، مدل سازی ژئومکانیکی به طور گسترده ای در حفاری، تولید و تراکم مخزن به کار می رود. خواص مکانیکی و فیزیکی این واحد تعداد زیادی از زمین شناسان را نه تنها در ایران بلکه در کشورهای دیگر جلب کرده است. بنابراین، مطالعات در این واحد می تواند برای شناخت سنگ آهک با ویژگی های مشابه زمین شناسی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش حاضر سازند آقچاگیل در برش آق بند (گنبد کاووس) مناسب ترین رخنمون را جهت نمونه گیری

حوضه دریای خزر به عنوان یک حوضه بزرگ رسوبی بین ترکمنستان، آذربایجان، قزاقستان، روسیه و ایران واقع شده که از جمله حوضه های رسوبی با پتانسیل گازی محسوب می - شود. در اواخر قرن ۱۹ دستیابی به منابع قابل توجه نفت در طبقات پلیوسن زیرین در منطقه آذربایجان (شوروی سابق)، قفقاز و باکو که به سری تولیدی معروف بود منجر به گسترش چشمگیر فعالیت های اکتشافی در خشکی و فلات قاره دریای خزر و پس از آن شبه جزیره کراسنودسک (ترکمنباشی) گردید (بحرینی و اتحاد، ۱۳۹۳). حفاری اکتشافی در دشت گرگان با توجه به برداشت های ژئوفیزیکی و داده هایی که از سازه های حفاری در ترکمنستان در سال ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ بدست آمده است، منجر به معرفی میدان (دشت گرگان) گردید. توالی چینه شناسی این میدان، از بالا به پایین شامل سازندهای گروه اول متشکل از باکو، آپشرون، آقچاگیل،

پلیوسن پایینی (سازند چلکن) و در زیر ته‌نشست‌های پلیوسن بالایی -کواترنر (سازند آپشرون) قرار گرفته است (آقانیاتی، ۱۳۸۳).

برش آق‌بند در شمال شرق گنبد کاووس و در حوالی روستایی به نام آق‌بند قرار گرفته است. راه دسترسی به مقطع مذکور جاده اصلی گنبد به داشلی برون می‌باشد که در کیلومتر ۲۵ مسیر یاد شده به سمت شرق منحرف می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت رخنمون سطحی (نقاط A, B) و راه‌های دسترسی به سازند آق‌چاگیل در حوالی روستای آق‌بند (گنبد کاووس)

شرایط اشباع انجام شد تا بیشتر شبیه به شرایط واقعی ساختگاه، و همچنین اجازه می‌دهد تا مقایسه بهتری از نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون به طور گسترده برای ایجاد مدل پیش‌بینی در میان پارامترهای مرتبط استفاده شود. (شکل ۳). در جدول (۳) نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.

داشته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر هست که سازند مذکور در رخنمون نیز بسیار ضعیف بوده و امکان اخذ مغزه استاندارد به تعداد بالا را غیرممکن کرده است. در شکل (۲) ستون چینه‌شناسی سازند در برش آق‌بند ملاحظه می‌شود. سازند آق‌چاگیل معرف نهشته‌های دریایی پلیوسن بالایی است که برش الگوی آن در خاور دریای خزر، در شبه‌جزیره ترکمنباشی (کراسنودسک) ترکمنستان متشکل از سنگ آهک، مارن، رس و ماسه به رنگ خاکستری متمایل به سفید است که به‌طور هم‌شیب بر روی ردیف‌های

۳. نمونه‌گیری و انجام آزمایشات

تعداد ۱۰ بلوک از بخش‌های مختلف رخنمون سازند آق‌چاگیل برداشته شده و به آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه فردوسی مشهد منتقل گردید. در آزمایشگاه ۱۸ مغزه از بلوک‌ها تهیه شد و آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی مطابق استاندارد ASTM روی نمونه‌های سنگی تعیین شده در



شکل ۳. (a و b) رخنمون سطحی سنگ آهک سازند آقچاگیل، (c) نمونه‌های استاندارد برای آزمون سرعت موج فشاری، (d و e)، آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، (f) آزمون سرعت موج برشی

جدول ۲. آزمون‌های آزمایشگاهی انجام‌شده و ارائه استانداردهای آن

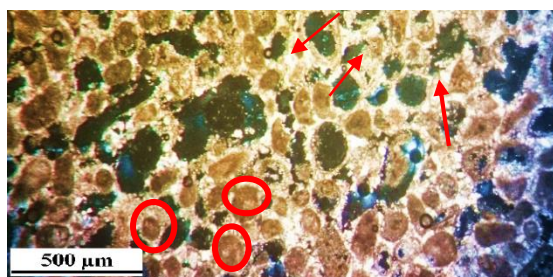
پارامترهای تعیین‌شده	نوع آزمایش
نام‌گذاری سنگ بر اساس طبقه‌بندی (Folk.,1974).	بررسی مقطع نازک میکروسکوپی
شامل: درصد جذب آب (W%)، درصد تخلخل (n%) و چگالی ( $\rho$ ) برحسب ( $\text{gr/cm}^3$ )	آزمون فیزیکی (ISRM.1981)
شامل: مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) برحسب (MPa) و مدول یانگ استاتیک ( $E_s$ ) برحسب (GPa)	آزمون مکانیکی (ASTM:D2845)
شامل: سرعت موج ( $V_s$ و $V_p$ ) برحسب (Km/s)، مدول یانگ دینامیک (Ed) برحسب (GPa) با توجه به رابطه (Goodman.,1989)	آزمون دینامیکی (ASTM:D2938)

جدول ۳. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی فیزیکی، دینامیکی، استاتیکی (برای توضیح علامت اختصاری موجود در جدول زیر به جدول ۲ رجوع شود)

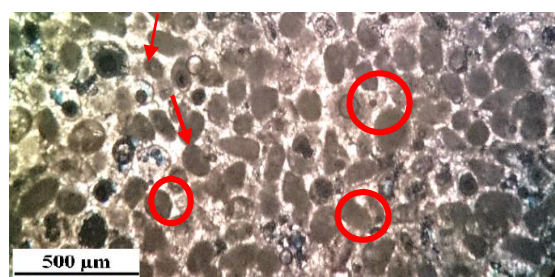
UCS(MPA)	ES(GPA)	ED(GPA)	VP(KM/S)	VS(KM/S)	W%	N%	P (G/CM3)	NUMBER
10.70	0.185	16.65	3.139	1.817	11.68	20.67	1.98	1
11.10	0.175	11.58	3.125	1.622	11.64	19.45	1.67	2
11.30	0.171	11.94	3.125	1.500	12.11	21.50	1.99	3
9.90	0.143	14.10	3.102	1.657	11.78	20.81	1.98	4
12.10	0.206	16.34	3.187	1.657	11.17	19.74	2.26	5
11.34	0.175	16.70	3.123	1.703	11.61	20.33	2.23	6
9.52	0.121	13.78	3.047	1.560	11.46	23.71	1.94	7
11.40	0.168	15.74	3.187	1.785	11.35	19.81	1.94	8
11.20	0.170	15.53	3.185	1.724	10.87	19.80	2.02	9
12.20	0.190	15.79	3.248	1.790	10.84	19.30	1.97	10
10.40	0.195	12.03	3.158	1.750	11.75	21.52	2.05	11
13.28	0.166	12.26	3.164	1.746	11.27	20.13	2.06	12
13.77	0.188	15.82	3.252	1.754	11.52	18.86	1.98	13
11.20	0.178	15.46	3.231	1.758	11.24	18.55	1.83	14
11.46	0.151	16.31	3.152	1.719	12.62	22.28	1.99	15
11.00	0.187	15.79	3.175	1.676	11.61	19.75	1.71	16
13.26	0.187	14.62	3.215	1.758	11.91	20.50	2.18	17
11.70	0.159	15.13	3.133	1.689	11.78	23.04	2.17	18

مقاومت خیلی کم قرار می‌گیرد. تخلخل بالا و چگالی پایین به ترتیب ۲۰/۸ و ۱/۸۱ پایین بودن مقادیر مدول یانگ استاتیک را تأیید می‌کند. بر اساس مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی نام سنگ بر اساس نام‌گذاری فولک «اواسپار» یا آهک آئیدی با سیمان اسپاریتی تعیین گردید که به دلیل میکریتی شدن تشخیص هسته آئید ممکن نیست. دو مقطع از مجموع ۱۰ مقطع بررسی شده انتخاب شده است (شکل ۶).

با توجه به نتایج آزمون‌های تعیین خصوصیات فیزیکی، سنگ آهک‌های سازنده آقچاگیل بر اساس رده‌بندی (Anon.,1979) در رده سنگ‌های با تخلخل بالا جای گرفته است. همچنین با توجه به نتایج آزمون تراکم تک‌محوری سنگ مذکور بر اساس رده‌بندی (Bieniawski.,1973) در رده سنگ با مقاومت خیلی کم جای گرفته است. در رده‌بندی (Coats., 1964) در رده سنگ‌های بسیار ضعیف نام‌گذاری شده است. بر اساس رده بندی مهندسی (Deere and Miller.,1966) در رده سنگ با



ب



الف

شکل ۶. بررسی مقطع میکروسکوپی سنگ آهک متخلخل سازنده آقچاگیل دو مقطع الف و ب آهک آئیدی در حالت نور (PPL) را نشان می‌دهد در دو مقطع الف و ب آئید با دایره و سیمان اسپاریتی با فلش مشخص شده است. در مقطع الف نسبت آئید به سیمان از مقطع ب بیشتر و همچنین تخلخل مقطع ب از مقطع الف بیشتر است.

## ۴. رگرسیون چندگانه

دو روش عمده رگرسیون در آمار وجود دارد: تجزیه و تحلیل ساده و چند متغیره. در واقع رگرسیون خطی چندگانه پیش‌بینی تغییرات بیش از یک متغیر مستقل را روی یک متغیر وابسته نشان می‌دهد که در آن همه متغیرها باید از نوع کمی پیوسته باشند. برای برازش و تحلیل یک مدل رگرسیون خطی چندگانه باید از روش‌های ماتریسی استفاده شود. در این پژوهش از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۵ استفاده شده است. برای ساخت این مدل نیاز به بیان فرضیاتی است، فرضیه نخست بیان می‌کند که مدل برازش داده شده از نظر آماری معنی‌دار نیست، در صورتی که فرضیه بعدی بیان می‌کند که حداقل وجود یکی از متغیرهای کنترل در مدل الزامی است. اینکه کدام متغیر بایستی در مدل باشد و چه متغیری باید از مدل خارج شود بستگی به تأیید یا رد فرضیه‌ها دارد. پس از انجام تمام این آزمون‌ها در مرحله آخر آزمون کفایت مدل در قسمت تحلیل باقیمانده انجام می‌شود و در صورت تأیید تمام فرضیه‌ها مدل نهایی انتخاب شده و رابطه آن نوشته می‌شود تا در پیش‌بینی‌ها از آن استفاده شود. معادل نهایی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

۴-۱. ساخت مدل برای پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ استاتیکی

در این پژوهش از روش عقب‌رونده (Backward) در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. به طوری که در ابتدا تمام متغیرها وارد مدل می‌شوند. مقادیر  $R^2$  (ضریب تعیین) و Sig

(سطح معنی‌داری یا خطای نوع دوم) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد متغیرهایی که مقادیر Sig بالای ۰/۰۵ را داشته از مدل خارج شده تا زمانی که بهترین مدل ممکن به دست آید. لازم به ذکر است که مقدار Sig باید برای تک‌تک پارامترها مورد بررسی قرار گیرد، زیرا ممکن است Sig برای مدل کلی مقدار کمتر از ۰/۰۵ را نشان دهد اما برخی از پارامترها مقدار Sig بیشتر از ۰/۰۵ را داشته و شرایط حضور در مدل را ندارند. برای مقاومت فشاری تک‌محوری پنج مدل توسط نرم‌افزار ارائه شده است، که در هر مرحله متغیری حذف می‌شود تا مدل کامل‌تری حاصل گردد. در جدول (۴) مقادیر  $R^2$  و حذف پارامترها که کفایت وجود در مدل را ندارند نشان داده شده است. در جدول (۵) تغییرات Sig و F (میانگین مربعات رگرسیون پیش‌بینی‌شده به میانگین مربعات باقی‌مانده) برای همه پارامترها در پنج مدل انتخابی و در جدول (۶) دلایل حذف برخی پارامترها نشان داده شده است. جدول (۶) نشان می‌دهد که مدل پنجم مناسب‌ترین مدل با سه متغیر Ed, Vp و مقادیر چگالی می‌باشد. تنها در مدل پنجم مقادیر Sig تک‌تک متغیرها کمتر از ۰/۰۵ است، مقدار F بزرگترین مقدار است. در نتیجه مدل نهایی برای پارامتر مقاومت تراکمی تک‌محوری به صورت زیر می‌باشد.

$$UCS = -0.322E_d + 19.89V_p + 3.101 \text{ Density} - 52.489$$

$$R^2 = 0.74 \quad RMSE = 0.77 \quad (2)$$

جدول ۴. مدل‌های ارائه شده برای مقاومت فشاری تک‌محوری توسط نرم‌افزار SPSS

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.909 <sup>a</sup>	.826	.705	.60852
2	.905 <sup>b</sup>	.819	.720	.59254
3	.893 <sup>c</sup>	.797	.712	.60062
4	.877 <sup>d</sup>	.768	.697	.61603
5	.862 <sup>e</sup>	.744	.689	.62431
a. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, ES, VP, porosity				
b. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, VP, porosity				

c. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, VP
d. Predictors: (Constant), Density, W, ED, VP
e. Predictors: (Constant), Density, ED, VP

جدول ۵. جدول آنوا (تغییرات مقادیر Sig و F)

ANOVA <sup>a</sup>						
Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	17.602	7	2.515	6.791	.004 <sup>b</sup>
	Residual	3.703	10	.370		
	Total	21.305	17			
2	Regression	17.443	6	2.907	8.280	.001 <sup>c</sup>
	Residual	3.862	11	.351		
	Total	21.305	17			
3	Regression	16.976	5	3.395	9.412	.001 <sup>d</sup>
	Residual	4.329	12	.361		
	Total	21.305	17			
4	Regression	16.371	4	4.093	10.785	.000 <sup>e</sup>
	Residual	4.933	13	.379		
	Total	21.305	17			
5	Regression	15.848	3	5.283	13.554	.000 <sup>f</sup>
	Residual	5.457	14	.390		
	Total	21.305	17			
a. Dependent Variable: UCS						
b. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, ES, VP, porosity						
c. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, VP, porosity						
d. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, VP						
e. Predictors: (Constant), Density, W, ED, VP						
f. Predictors: (Constant), Density, ED, VP						

جدول ۶. نحوه حذف هر یک از متغیرها در مدل عقب رونده

Coefficients <sup>a</sup>						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-71.191	19.195		-3.709	.004
	Porosity	-.213	.237	-.267	-.901	.389
	ES	7.942	12.118	.147	.655	.527
	ED	-.497	.140	-.716	-3.549	.005
	VP	20.146	5.064	.952	3.979	.003
	VS	4.050	2.767	.293	1.464	.174
	W	1.166	.598	.521	1.950	.080
	Density	4.491	1.332	.641	3.372	.007
2	(Constant)	-70.721	18.678		-3.786	.003
	Porosity	-.256	.222	-.320	-1.153	.273
	ED	-.461	.125	-.663	-3.680	.004
	VP	20.809	4.831	.983	4.307	.001
	VS	3.928	2.688	.284	1.462	.172
	W	1.101	.574	.492	1.918	.081
	Density	4.526	1.296	.646	3.492	.005
3	(Constant)	-74.831	18.584		-4.027	.002
	ED	-.438	.125	-.631	-3.495	.004
	VP	22.708	4.604	1.073	4.932	.000
	VS	3.492	2.697	.253	1.295	.220
	W	.681	.450	.304	1.515	.156



4	Density	3.590	1.024	.513	3.505	.004
	(Constant)	-71.612	18.890		-3.791	.002
	ED	-.353	.110	-.509	-3.223	.007
	VP	23.870	4.631	1.127	5.154	.000
	W	.521	.443	.233	1.174	.261
5	Density	3.410	1.041	.487	3.276	.006
	(Constant)	-52.849	10.211		-5.176	.000
	ED	-.322	.108	-.463	-2.986	.010
	VP	19.890	3.198	.939	6.219	.000
	Density	3.101	1.021	.443	3.039	.009

a. Dependent Variable: UCS

مقدار Sig نیز ۰/۰۱ و مقدار F بزرگترین مقدار نسبت به سایر مدل‌ها به دست آمده است جدول (۹). در نتیجه مدل نهایی برای پارامتر مدول یانگ استاتیکی به فرم زیر می‌باشد:

$$E_s = -0.009 Porosity + 0.005E_d + 0.280$$

$$R^2 = 0.60 \quad RMSE = 0.013 \quad (۳)$$

۲-۴. رگرسیون چندگانه برای مقادیر مدول یانگ استاتیکی

جدول (۷) انواع مدل‌های پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. در مجموع پنج مدل ارائه شده است که در هر مرحله متغیری حذف می‌شود تا مدل کامل‌تری حاصل گردد. جدول (۸) نشان می‌دهد که مدل پنجم مناسب‌ترین مدل است و تنها دو متغیر Porosity و Ed شرط حضور در مدل را دارا می‌باشند.

جدول ۷. مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار برای مدول یانگ استاتیکی

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.809 <sup>a</sup>	.655	.466	.015141
2	.809 <sup>b</sup>	.654	.510	.014508
3	.808 <sup>c</sup>	.652	.545	.013979
4	.800 <sup>d</sup>	.640	.562	.013710
5	.779 <sup>e</sup>	.607	.555	.013825
a. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, VP, porosity				
b. Predictors: (Constant), VS, W, ED, VP, porosity				
c. Predictors: (Constant), W, ED, VP, porosity				
d. Predictors: (Constant), W, ED, porosity				
e. Predictors: (Constant), ED, porosity				

جدول ۸. جدول آنوا برای مدول یانگ استاتیکی (تغییرات Sig و F)

ANOVA <sup>a</sup>						
Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.005	6	.001	3.476	.035 <sup>b</sup>
	Residual	.003	11	.000		
	Total	.007	17			
2	Regression	.005	5	.001	4.539	.015 <sup>c</sup>
	Residual	.003	12	.000		
	Total	.007	17			
3	Regression	.005	4	.001	6.093	.005 <sup>d</sup>
	Residual	.003	13	.000		
	Total	.007	17			
4	Regression	.005	3	.002	8.285	.002 <sup>e</sup>
	Residual	.003	14	.000		
	Total	.007	17			
5	Regression	.004	2	.002	11.603	.001 <sup>f</sup>

	Residual	.003	15	.000		
	Total	.007	17			
a. Dependent Variable: ES						
b. Predictors: (Constant), Density, VS, W, ED, VP, porosity						
c. Predictors: (Constant), VS, W, ED, VP, porosity						
d. Predictors: (Constant), W, ED, VP, porosity						
e. Predictors: (Constant), W, ED, porosity						
f. Predictors: (Constant), ED, porosity						

جدول ۹. نحوه حذف هر یک از متغیرها در مدل عقب رونده

Coefficients <sup>a</sup>						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.059	.477		.124	.904
	Porosity	-.005	.006	-.360	-.941	.367
	ED	.005	.003	.357	1.435	.179
	VP	.083	.123	.213	.676	.513
	VS	-.015	.069	-.060	-.222	.828
	W	-.008	.015	-.196	-.553	.591
	Density	.004	.033	.034	.132	.897
2	(Constant)	.073	.447		.163	.873
	Porosity	-.005	.004	-.329	-1.149	.273
	ED	.005	.003	.370	1.698	.115
	VP	.083	.118	.212	.702	.496
	VS	-.017	.065	-.066	-.263	.797
	W	-.009	.012	-.222	-.794	.442
3	(Constant)	.065	.429		.152	.882
	Porosity	-.005	.004	-.331	-1.200	.252
	ED	.004	.002	.341	1.883	.082
	VP	.076	.111	.193	.683	.507
	W	-.008	.011	-.205	-.782	.448
4	(Constant)	.352	.089		3.956	.001
	Porosity	-.006	.004	-.418	-1.749	.102
	ED	.005	.002	.391	2.411	.030
	W	-.011	.010	-.269	-1.120	.282
5	(Constant)	.280	.062		4.518	.000
	Porosity	-.009	.002	-.616	-3.777	.002
	ED	.005	.002	.407	2.497	.025

a. Dependent Variable: ES

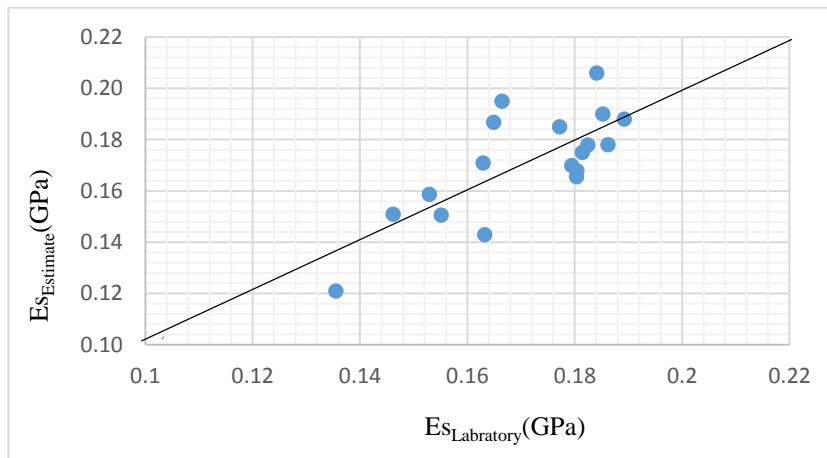
##### ۵. ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل

پس از تعیین مدل رگرسیونی چندگانه به مقایسه تخمین پارامترهای استاتیکی حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمون آزمایشگاهی پرداخته شده است. با توجه به اینکه خطای RMSE روابط محاسبه شده است، مقادیر استاتیک تخمینی با

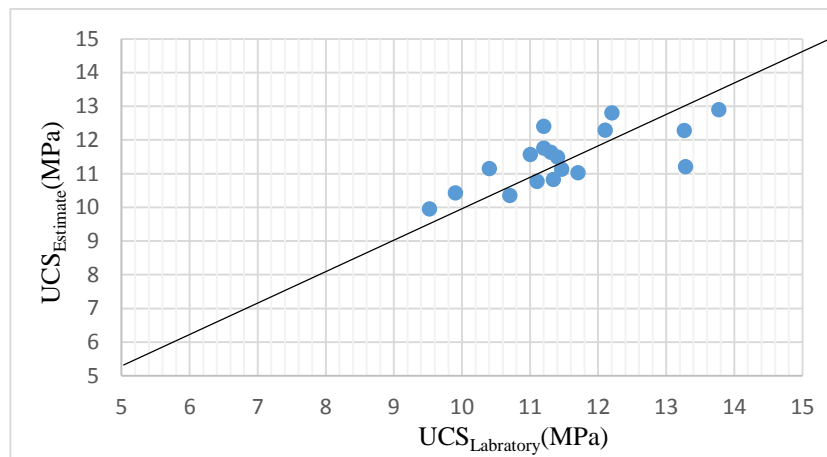
مقادیر آزمایشگاهی نسبت به خط ۱ به ۱ سنجیده شده است

(شکل ۴ و ۵).

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مقادیر تخمینی نشان داده است که مقادیر تخمینی اختلاف کمی با نتایج آزمایشگاهی دارد. مقادیر روی خط یک به یک و یا با اختلاف اندک حول خط مورد نظر واقع شده است.



شکل ۴. مقایسه مقادیر تخمینی مدول یانگ استاتیک با نتایج آزمون آزمایشگاهی نسبت به خط یک به یک

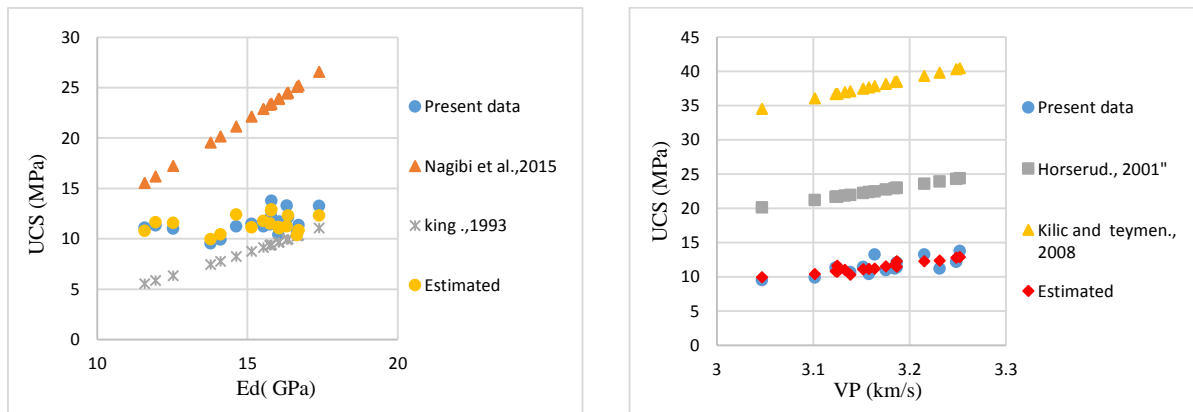


شکل ۵. مقایسه مقادیر تخمینی مقاومت تراکمی تک محوری با نتایج آزمون تراکم تک محوری نسبت به خط یک به یک

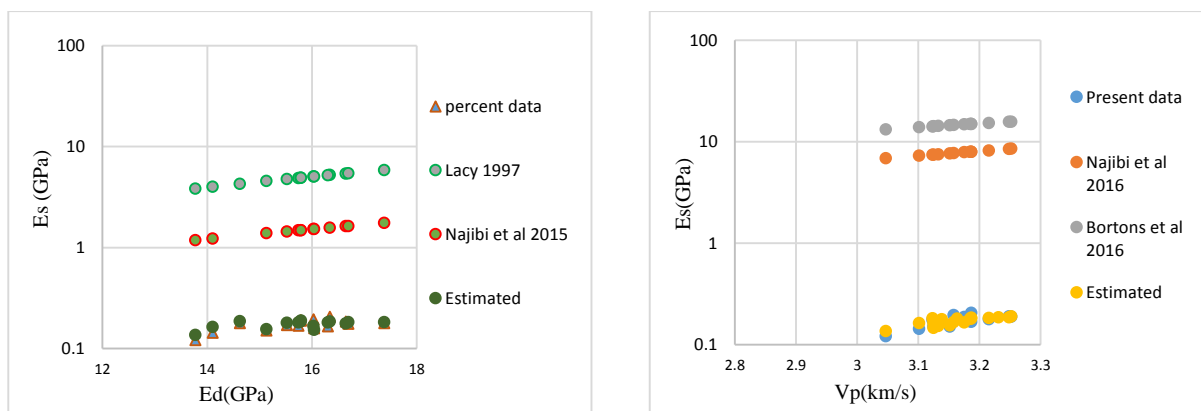
پارامترها با روابط ارائه شده توسط سایر محققین، در کنار مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی با چند پارامتر (تعیین شده در این مقاله) آورده شده است.

۶. مقایسه مقادیر تخمینی با مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر تعیین شده با روابط محققین

در شکل ۶ و ۷ مقایسه پارامترهای استاتیکی (مدول یانگ استاتیک و مقاومت تراکمی تک محوری) تخمینی از سایر



شکل ۶. مقایسه مقاومت تراکمی تک‌محوری محاسبه شده با چند متغیر با برخی از روابط ارائه شده توسط سایر محققین و نتایج آزمایشگاهی



شکل ۷. مقایسه پارامتر مدول یانگ استاتیک محاسبه شده با چند متغیر با برخی از روابط ارائه شده توسط سایر محققین و نتایج آزمایشگاهی

رده بندی مهندسی سنگ‌ها دیر و میلر در رده سنگ‌های با مقاومت خیلی پایین قرار می‌گیرد. رابطه چند متغیره بین خصوصیات فیزیکی و دینامیکی با پارامتر وابسته مدول الاستیک سنگ مورد مطالعه از دقت خوبی جهت پیش‌بینی برخوردار است، در رابطه‌ی بدست آمده متغیرهای تخریخ و مدول یانگ دینامیک تأثیر گذار بوده و ضریب تغییرات رابطه مزبور ۰/۷۴ و خطای RMSE آن ۰/۷۷ می‌باشد که نشان دهنده دقت خوب رابطه است. برای پارامتر مقاومت فشاری تک-محوری نیز از بین متغیرهای فیزیکی و دینامیکی پارامترهای چگالی، سرعت موج فشاری و مدول یانگ دینامیک در مدل نهایی جای گرفته‌اند، ضریب تغییرات رابطه‌ی مذکور ۰/۶۰ و خطای RMSE آن برابر با ۰/۱۳ می‌باشد. مقایسه نتایج حاصله با سایر روابط تجربی نشان می‌دهد که خطای رابطه

همان‌طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، تخمین این پارامترهای وابسته (مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول یانگ استاتیک) با پارامترهای دینامیکی و فیزیکی مقادیری نزدیک به نتایج آزمایشگاهی داشته و در مقایسه با روابطی که سایر محققین برای تخمین این پارامترها ارائه داده‌اند نتایج بهتری داشته است.

#### ۷. نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سازند آفچاگیل می‌باشد که از جمله سنگ‌های مخزنی مهم در شمال کشور است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سازند آفچاگیل دارای مقاومت و مدول پایینی می‌باشد و در

پیشنهادی در مطالعه حاضر کمتر از روابط تجربی موجود است و با اطمینان می‌توان از این روابط در برآورد خصوصیات استاتیکی سازند آقچاگیل در مطالعات ژئومکانیک استفاده نمود.

مقاله حاضر، با همکاری شرکت ملی نفت خزر با کد تصویب‌نامه طرح پژوهش صنعتی ۹۶۰۲۰۵ انجام شده است و استخراج شده از پایان‌نامه با کد تصویب‌نامه درون دانشگاهی ۳/۴۶۴۰۵ می‌باشد.

#### ۸. تقدیر و قدردانی

#### ۹. منابع

- آقنابتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. چاپ دوم، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور. ۴۳۹ صفحه.
- بحرینی، س.ر.، اتحاد، ک.، ۱۳۹۳. زمین‌شناسی حوضه جنوب خزر از نگاهی دیگر. چاپ اول، انتشارات سارگل. ۱۲۳ صفحه.
- مهاجر سلطانی، ح.، ۱۳۹۲. زمین‌شناسی رسوبی و ارزیابی پتروفیزیکی سازند آقچاگیل در گستره خزر جنوبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. چاپ شده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات (تهران).
- Aboutaleb, S., Behnia, M., Bagherpour, R. and Bluekian, B., 2018. Using non-destructive tests for estimating uniaxial compressive strength and static Young's modulus of carbonate rocks via some modeling techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1717-1728.
- Ameen, M. S., Smart, B. G. D., Somerville, J. M. C., Hammilton, S., Naji, N. A., 2009. Prediction rock mechanical properties of carbonated from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghavar field, Saudi Arabia), *Int. J. Rock. Mech. Min Sci.*
- Anon, OH., 1979. Classification of Rocks and Soils for Engineering Geological Mapping. Part 1: Rock and Soil Materials, *Bull Int Assoc Eng Geol*, 19: 355-71.
- ASTM D284., 1996. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 14.02, ASTM, USA.
- ASTM D2938., 2002. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08 & 03.01 & 14.02, ASTM, USA.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15(12).
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., Martínez-Martínez, J., Benavente, D. and Gómez-Heras, M., 2016. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Materials and structures*, 49(8), 3021-3037.
- Bradford, I.D.R., Fuller, J., Thompson, P.J. and Walsgrove, T.R., 1998. January. Benefits of assessing the solids production risk in a North Sea reservoir using elastoplastic modelling. In *SPE/ISRM rock mechanics in petroleum engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Blanton, T.L. and Olson, J.E., 1997. January. Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers.
- Coates, DF., 1964. Classification of Rocks for Rock Mechanics. Paper presented at the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.
- Chang, C.D., 2004. Empirical rock strength logging in boreholes penetrating sedimentary formations. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 7(3), 174-183.
- Deere, Don Uel, and RP Miller., 1966. *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*, Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering.

- Eissa, A., and Kazi, A., 1988. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 479 - 482.
- Folk R. L., 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*: Austin, Texas, Hemphill Publishing Company.
- Goodman, R.E., 1989. *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Horsrud, P., 2001. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations, *SPE Drill. Comple.* 16 (02), 68-73
- ISRM., 1981. Suggested Methods, Rock characterization testing and monitoring, In: Brown, E.T. (Ed.), Oxford: Pergamon Press.
- Jahed Armaghani, D., Tonnizam Mohamad, E., Momeni, E., Narayanasamy, M.S., Mohd Amin, M.F., 2015. An adaptive neuro-fuzzy inference system for predicting unconfined compressive strength and Young's modulus: a study on Main Range granite, *Bull Eng Geol Environ* 74:1301-1319.
- Kidambi ,T., Kumar, G.S., 2016. Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141: 38-51.
- King, M., 1983. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield, Paper presented at the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.
- Lacy, L. L., 1997. Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs, *SPE38716*.
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 2009. *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media*, 2nd Cambridge University Press.
- Militzer, H., Stoll, R., 1973. Einige Beiträge der Geophysik zur prim datenerfassung im Bergbau, *Neue Bergbautechnik. Leipzig*, 3: 21-25.
- Najibi, A. R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., Asef, M. R., 2015. Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran. *J. Pet. Sci. Eng.* 126: 78-82.
- Yasar, E., and Y Erdogan., 2004. Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 871-875.
- Zoback, Mark D., 2010. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 505p.