



## تخمین مقاومت تراکمی تک محوری سنگ تراورتن محلات با استفاده از آزمایش شاخص بار نقطه‌ای

سعید دهقان<sup>۱</sup>، قاسم ستاری<sup>۲\*</sup>

(۱) دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات sa\_dehghan@yahoo.com

(۲) دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، عضو باشگاه پژوهشگران جوان ghsattari@azad.ac.ir

\* عهده‌دار مکاتبات

### چکیده

مقاومت تراکمی تک محوری یکی از مهمترین پارامترهایی است که در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ برای مطالعات مکانیک سنگ به عنوان آزمایش پایه مورد نیاز می‌باشد. انجام دقیق این آزمایش با وجود ظاهری ساده بسیار مشکل می‌باشد، لذا در سال‌های اخیر کوشش‌هایی مبنی بر تخمین این پارامتر با استفاده از آزمایش‌هایی غیرمستقیم و ساده (نظیر آزمایش شاخص بار نقطه‌ای) به وسیله‌ی محققین مختلف انجام گردید و روابط مختلفی هم برای این منظور ارائه شده است.

این مقاله با استفاده از داده‌های حاصل از انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ تراورتن محلات، رابطه‌ای میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای ارائه می‌دهد. جهت تعیین ارتباط بین مقادیر حاصل از انجام آزمایشات، از مدل‌سازی ریاضی استفاده شد. بررسی‌های آماری میان این دو پارامتر نشان دهنده‌ی دقت بیشتر معادله‌ی غیرخطی نسبت به معادله‌ی خطی است. همچنین بررسی پارامتر مؤثر تخلخل و افزودن این پارامتر به روابط موجود، سبب بهبود ضریب همبستگی میان مقادیر تخمینی و مقادیر آزمایشگاهی در معادلات غیرخطی چند متغیره گردید. با توجه به اختلاف مقادیر تخمینی و آزمایشگاهی موجود، معادلات به دست آمده دارای دقت قابل قبولی می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** تخلخل، سنگ تراورتن، شاخص بار نقطه‌ای، ضریب همبستگی، مطالعات آزمایشگاهی، مقاومت تراکمی تک محوری

## Estimating of uniaxial compressive strength by using point load index for travertine rock of Mahallat

S. Dehghan<sup>1</sup> & Gh. Sattari<sup>2</sup>

- 1) Department of Mining Engineering, Islamic Azad University, Mahallat Branch, Mahallat, I. R. Iran
- 2) Department of Mining Engineering, Faculty of Graduate Studies, Islamic Azad University of South Tehran, Tehran, I. R. Iran

**Abstract**

The uniaxial compressive strength (UCS) is one of the most important parameters that is needed and determined for studying rock mechanics of intact rock in most rock engineering projects. In spite of simple appearance of this test, the careful performance is very difficult. Therefore, scientists have made many attempts for indirect estimation of this parameter using simple tests (such as point load index (Is)) and they generated some relations between these parameters.

This paper presents the new relationship between UCS and Is by using laboratory tests on Travertine samples of Mahallat. To determine the relations between parameters, the mathematical modeling has been used. Statistical analyses show that the nonlinear equation has a higher correlation coefficient than the linear; also, by estimating another effective parameter, porosity, and by adding it to the last equation, the correlation coefficient between actual and predicted data was improved in multiple non-linear equations. The comparison between actual and predicted results has proved acceptably accurate.

**Key words:** correlation coefficient, text laboratory, point load index, test, porosity, travertine rock, Uniaxial compressive strength.

و آنالیز آماری داده‌ها از نرم افزار اس پی اس اس (SPSS) استفاده شده است.

**۱- مقدمه**

مقاومت تراکمی تک محوری یکی از مهمترین و مرسوم ترین پارامترهایی است که در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. نحوه‌ی اندازه‌گیری این پارامتر (of Rock Mechanic) به دو استاندارد آی اس آر ام (ISRM 1981, International Society) و ای اس تی ام (ASTM: American Society for Testing and Materials) تعیین گردیده است. انجام دقیق این آزمایش با وجود ظاهری ساده، بسیار مشکل بوده و مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه، در اختیار داشتن دستگاه‌های گران و حساس بوده و در عین حال نتایج حاصل وابستگی شدیدی به عوامل خارجی، خطاهای انسانی، ابعاد نمونه، نحوه‌ی بارگذاری و غیره دارد. همچنین در مراحل ابتدایی مطالعات، زمانی که مقادیر با دقت کمتر مقاومت مد نظر است، می‌توان از روش‌های غیرمستقیم و سریع و آسان همچون آزمایش شاخص بار نقطه‌ای، آزمایش چکش اشمیت، آزمایش سرعت عبور موج فشاری استفاده نمود. این آزمایش‌ها به آماده‌سازی اندک و یا گاهی به هیچ نوع آماده‌سازی نمونه احتیاج نداشته و به راحتی در محل قابل انجام می‌باشند.

**۲- تحقیقات گذشته**

آزمایش شاخص بار نقطه‌ای به عنوان روش غیرمستقیم برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری یا کششی سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش به علت سادگی، آسان بودن آماده‌سازی نمونه و امکان انجام آزمایش در محل به طور گسترده‌ای به وسیله‌ی محققین مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رابطه‌ی کلی بین مقاومت تراکمی تک محوری (UCS) و شاخص بار نقطه‌ای ( $I_s$ ) به صورت رابطه‌ی یک است:

$$UCS = C I_s \quad (۱)$$

در این رابطه C ضریبی ثابت است که مقادیر مختلفی برای این ضریب ارائه شده است. انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ آی اس آر ام (ISRM 1985) این ضریب را بین ۲۵ - ۲۰ تعیین کرده است، اما محققین زیادی مقادیر متفاوتی بین ۱۰ - ۵۰ برای این ضریب به دست آورده‌اند که نشان دهنده‌ی این است که بسته به نوع سنگ، نحوه و محل انجام آزمایش این ضریب می‌تواند در محدوده‌ی وسیعی تغییر کند. بعضی از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف هم از معادله‌های  $y = ax$ ,  $y = ax + b$ ,  $y = ax^b$  یا  $y = ax^2 + b$  پیروی می‌کنند. در جدول ۱ تعدادی از روابط که به وسیله‌ی محققین میان این دو پارامتر تعیین گردیده، ارائه شده است.

موضوع اصلی این تحقیق ارزیابی آزمون شاخص بار نقطه‌ای برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری سنگ تراورتن محلات است که برای انجام این امر آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ تراورتن انجام گردید. برای تعیین ارتباط میان این دو

جدول ۱- روابط ارائه شده بین مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای توسط محققین مختلف

رابطه	ارائه کننده	رابطه	ارائه کننده
$UCS = 20 - 25 I_s$	ISRM 1985	$UCS = 15.3 I_s + 16.3$	D'andrea et al. 1965
$UCS = 8.6 - 16 I_s$	Vallejo et al. 1989	$UCS = 20.7 I_s + 29.6$	Deere & Miller 1966
$UCS = 23 I_s + 13$	Cargill & Shakoor 1990	$UCS = 24 I_s$	Broch & Franklin 1972
$UCS = 14 - 82 I_s$	Tsidzi 1991	$UCS = 23 I_s$	Bieniawski 1975
$UCS = 16 I_s$	Ghosh & Srivastava 1991	$UCS = 29 I_s$	Hassani et al. 1980
$UCS = 19 I_s + 12.7$	Ulusay et al. 1994	$UCS = 18.7 I_s - 13.2$	Singh 1981
$UCS = 12.5 I_s$	Chau & Wong 1996	$UCS = 14 I_s$	Forster 1983
$UCS = 14.3 I_s$	Smith 1997	$UCS = 16.5 I_s + 51$	Gunsallus & Kulhawy 1984
$UCS = 11.6 I_s + 22.5$	Gokceoglu & Zorlu 2003	$UCS = 8 - 18 I_s$	Palchik & Hatzor 2004
$UCS = 24.4 I_s$ $UCS = 3.86 (I_s)^2 + 5.65 I_s$	Quane & Russel 2003 1) Strong rocks 2) Weak rocks	$UCS = 16 I_s$ $UCS = 20 I_s$	Read et al. 1980 1) Sedimentary rocks 2) Basalt
$UCS = 7.3 (I_s)^{1.71}$ $UCS = 23 I_s$	Tsiambaos & Sabatakakis 2004 1) Power relation 2) Linear relation	$UCS = 25.67 (I_s)^{0.57}$ $UCS = 9.30 I_s + 20.04$	Grasso et al. 1992 1) Power relation 2) Linear relation
		$UCS = 8.41 I_s + 9.51$ $UCS = 23.62 I_s - 2.69$	Kahraman 2001 1) 22 different rock type 2) Coal measure rocks

\* UCS, Is (MPa)

سروش (۱۳۸۰) و با قطر ۵۴ میلی‌متر یا که مناسب‌ترین اندازه برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، استفاده گردید. مغزه‌گیری از بلوک‌های تراورتن به گونه‌ای انجام شد که تعداد و نمونه‌ی مورد نیاز برای هر آزمایش با توجه به ابعاد مناسب آن آزمایش فراهم گردید. لازم به ذکر است که تعداد ۲۳ مغزه از بلوک‌های تراورتن تهیه و به گونه‌ای آماده شدند که تعداد نمونه‌ی مورد نیاز برای آزمایش‌های مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای فراهم گشت. با توجه به نمونه‌های موجود، آزمایش تعیین تخلخل نیز با استفاده از روش اشباع و غوطه‌ورسازی و بر اساس استاندارد آی اس آر ام برای هر نمونه انجام شد.

نحوه‌ی انجام آزمایش بارنقطه‌ای با توجه به نمونه‌های موجود به صورت محوری و برطبق استانداردهای آی اس آر ام و آی اس تی ام (ISRM, ASTM D 5731) (فهیمی فر و سروش ۱۳۸۰) با نسبت طول به قطر یک به یک می‌باشد. همچنین آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری براساس استاندارد آی اس تی ام ASTM-D 2938 (فهیمی فر و سروش ۱۳۸۰) و با استفاده از نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر دو به یک انجام شد. در تصویر ۱ نمای از نحوه‌ی انجام آزمایشات و در جدول ۲ نیز نتایج حاصل از انجام آزمایشات آورده شده است.

#### ۴- آنالیز داده‌ها

در این بخش اطلاعات آماری و روابط حاصل از انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های سنگ تراورتن ارائه شده است (جدول ۳).

در تصاویر ۲ تا ۴ نمودارهای هیستوگرام آزمایشات مختلف به صورت مجزا ارائه شده است.

ذکر این نکته لازم است که با توجه به وجود روابط متعدّد برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری از آزمایش شاخص بار نقطه‌ای، هدف اصلی از تعیین رابطه‌ی جدید برای سنگ تراورتن محلات این مسئله بود که روابط موجود گذشته میان این پارامترها در مورد سنگ تراورتن محلات مصداق پیدا نمی‌کند، برای روشن شدن این موضوع یکی از معتبرترین این روابط بررسی می‌شود.

همان‌طور که در بخش دو گفته شد میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای رابطه‌ای به صورت  $UCS = C I_s (50)$  وجود دارد که معتبرترین و قابل قبول‌ترین ضریب C مربوط به مقداری است که انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ آی اس آر ام بین ۲۵-۲۰ تعیین شده

به‌طورکلی روابط ریاضی ارائه شده برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری کاربردی بوده، اما باید به این نکته توجه داشت که روابط گوناگونی که به وسیله‌ی محققین مختلف در این زمینه به دست آمده است به نوع سنگ و شرایط و چگونگی انجام آزمایش بستگی دارد و در صورت به کارگیری هر یک از این روابط باید به این نکات توجه داشت.

#### ۳- مطالعات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشات مختلف، بلوک‌های سنگی تراورتن از محدوده‌ی معادن حاجی آباد و آتشکوه محلات تهیه و سپس جهت انجام آزمایشات مربوطه از بلوک‌های سنگی نمونه‌های استوانه‌ای (مغزه) با استاندارد آی اس تی ام (ASTM-D 4543) (فهیمی فر

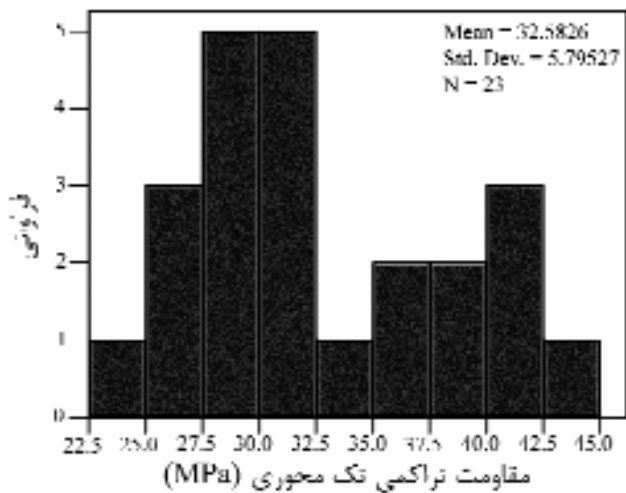
جدول ۳- آنالیز آماری داده‌های حاصل از انجام آزمایشات مختلف

تخلخل (%)	شاخص بار نقطه‌ای (MPa)	مقاومت تراکمی تک محوری (MPa)	تعداد
۲۳	۲۳	۲۳	۶/۹۷۷
۸/۱۴	۳/۱۷	۳۱	۲/۹۷
۲/۹۷	۱/۹۱	۲۸	۲/۹۶۲
۸/۱۷۵	۲/۲۹۲	۳۳/۵۸۵	۲/۹۷
۱۱/۱۵	۴/۱۱	۴۳/۵۰	۱۱/۱۵
۱۰/۱۸	۲/۲۰	۱۹/۶۰	۱۰/۱۸

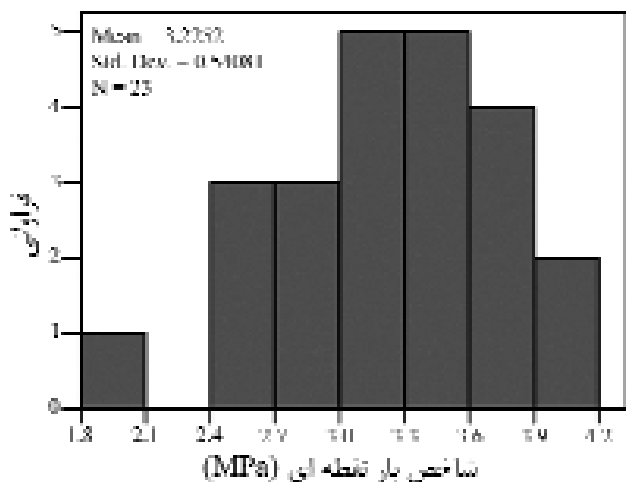
\*به دلیل وجود مدهای متعدد، کوچکترین مد قرار داده شده است.



تصویر ۱- نحوه‌ی انجام آزمایشات، (A) آزمایش بار نقطه‌ای، (B) آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری



تصویر ۲- نمودار توزیع تجمعی (هیستوگرام) آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری سنگ تراورتن



تصویر ۳- نمودار توزیع تجمعی (هیستوگرام) آزمایش شاخص بار نقطه‌ای سنگ تراورتن

جدول ۲- نتایج آزمایشات مختلف بر روی نمونه‌های سنگ تراورتن محلّات

شماره نمونه	UCS(MPa)	Is (MPa)	N (%)	شماره ی نمونه	UCS (MPa)	Is (MPa)	N (%)
۱	۳۹۲	۳/۸۹	۰/۹۷	۱۳	۳۲/۸	۳/۵۲	۳/۹۷
۲	۴۱/۵	۳/۷۲	۹/۴۵	۱۴	۲۵/۲	۲/۰۶	۳/۷۸
۳	۴۳/۵	۳/۳۹	۹/۷۶	۱۵	۲۸	۲/۶۱	۶/۶۶
۴	۳۱	۴/۱۱	۲/۹۹	۱۶	۲۵/۲	۲/۵۲	۹/۶۴
۵	۳۷/۹	۳/۶۳	۸/۱۴	۱۷	۲۸	۲/۷۳	۲/۱۱
۶	۴۱/۶	۳/۳۶	۶/۳۸	۱۲	۲۵/۸	۲/۶۳	۹/۵۱
۷	۴۱/۱	۳/۰۲	۳/۹۵	۱۹	۳۰/۱	۲/۹۱	۴/۸۹
۸	۲۷/۱	۴/۰۱	۸/۳۲	۲۰	۲۹/۹	۲/۹۲	۱۰/۲۷
۹	۲۸/۷	۳/۸۷	۹/۱۳	۲۱	۳۱	۳/۱۶	۴/۵۰
۱۰	۲۳/۹	۱/۹۱	۱۱/۱۵	۲۲	۳۰/۱	۳/۰۸	۹/۲۲
۱۱	۳۳/۴	۳/۶۰	۷/۴۲	۲۳	۲۹/۵	۳/۱۷	۹/۲۹
۱۲	۳۵/۶	۳/۳۲	۸/۹۸				

متغیر (های) مستقل می باشد. این رابطه ممکن است از نوع خطی یا غیر خطی باشد. تابعی که ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته را بیان می کند به تابع رگرسیون مرسوم است. برای انجام رگرسیون خطی ساده و چندگانه ی امروزه از نرم افزارهای آماری متعددی بهره گرفته می شود که نرم افزار اس پی اس اس از متداول ترین آن ها است. نحوه ی عمل در نرم افزار اس پی اس اس به این قرار است که با مشخص کردن متغیرهای مستقل به عنوان ورودی و متغیر وابسته به عنوان خروجی، موتور نرم افزار با توجه به میزان مقادیر ورودی و خروجی معادله ای را ایجاد می کند که به وسیله ی آن می توان میزان متغیر وابسته را بر حسب پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل) تخمین زد. این معادله در سطح اعتماد آماری دارای ۹۵ درصد دقت است. به عبارت دیگر جواب های معادله ی ایجاد شده نسبت به مقادیر واقعی (متغیر وابسته) دارای ضریب همبستگی (R) در سطح اعتماد مهندسی می باشند. هر چه میزان ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک تر باشد معادله ی ایجاد شده توسط نرم افزار دارای دقت بالاتری است.

رابطه ی خطی به دست آمده به همراه ضریب همبستگی آن میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه ای برای سنگ تراورتن با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی (جدول ۲) ارائه شده است.

$$UCS=16.62 + 4.947 I_s \quad R=0.46 \quad (2)$$

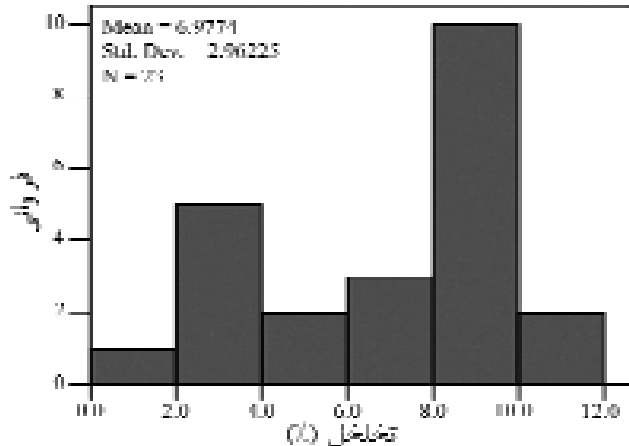
در این رابطه UCS مقاومت تراکمی تک محوری (MPa)،  $I_s$  شاخص بار نقطه ای (MPa) و R ضریب همبستگی می باشند. با توجه به پایین بودن مقدار ضریب همبستگی به دست آمده از رابطه ی خطی، ارتباط غیرخطی میان این دو پارامتر با استفاده از نرم افزار، مورد بررسی قرار گرفت. ارتباط غیرخطی (معادله ی درجه سوم) میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه ای در رابطه ی ۳ ارائه شده است. در تصویر ۵ نمودار مربوط به روابط ارائه شده دیده می شود.

$$UCS=222.858-235.260 I_s+8848 I_s^2-10404 I_s^3 \quad (3)$$

$$R=0.72$$

با توجه به تصویر ۵، ارتباط غیرخطی میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه ای برای سنگ تراورتن محلات دارای ضریب همبستگی بالاتری است. در واقع افزایش ضریب همبستگی

است. این مقدار با توجه به نتایج آزمایش بر روی ۱۰۰ نمونه سنگ به دست آمده است. انجمن بین المللی مکانیک سنگ آی اس آر ام این رابطه را برای کلیه ی سنگ ها قابل تعمیم دانسته است. در جدول ۴ نتایج آزمایشات سنگ تراورتن با رابطه ی مذکور مقایسه می شود.



تصویر ۴- نمودار توزیع تجمعی (هیستوگرام) آزمایش تعیین تخلخل سنگ تراورتن

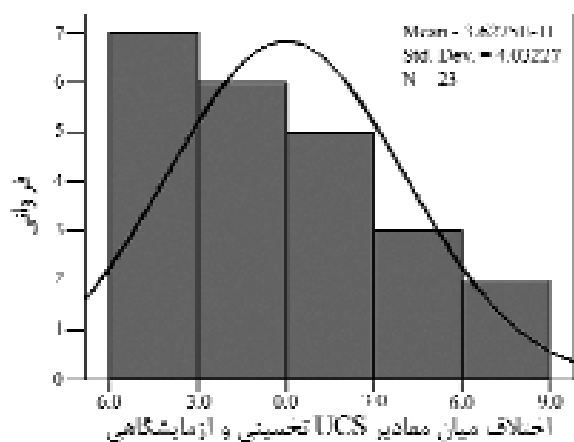
با توجه به جدول ۴، این رابطه در مورد سنگ تراورتن محلات صحت نداشته، در نتیجه جهت تخمین مقاومت تراکمی از آزمایش شاخص بار نقطه ای رابطه ی جدیدی تعیین می گردد.

جدول ۴- مقایسه ی نتایج به دست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی با رابطه ی آی اس آر ام (ISRM) برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری از آزمایش شاخص بار نقطه ای

شماره ی نمونه	UCS (MPa)	$I_s$ (MPa)	شماره ی نمونه	UCS=20-25 $I_s$ (MPa)	$I_s$ (MPa)	UCS (MPa)
۱	۳۹/۲	۳/۵۲	۱۳	۷۷/۸-۹۷/۲۹	۳/۸۹	۳۹/۲
۲	۳۱/۵	۳/۱۶	۱۴	۷۴/۸-۹۳/۵	۳/۷۴	۳۱/۵
۳	۴۳/۵	۲/۶۱	۱۵	۶۷/۸-۸۴/۷۵	۳/۳۹	۴۳/۵
۴	۳۱	۲/۵۴	۱۶	۸۲/۲-۱۰۲/۷۵	۴/۱۱	۳۱
۵	۳۷/۹	۲/۷۳	۱۷	۷۲/۶-۹۰/۷۵	۳/۶۳	۳۷/۹
۶	۴۱/۶	۲/۶۳	۱۲	۶۷/۲-۸۴	۳/۳۶	۴۱/۶
۷	۴۱/۱	۲/۸۱	۱۹	۶۰/۴-۷۵/۵	۳/۰۲	۴۱/۱
۸	۲۷/۱	۲/۹۲	۲۰	۸۰/۲-۱۰۰/۲۵	۴/۰۱	۲۷/۱
۹	۲۸/۷	۳/۱۶	۲۱	۷۷/۴-۹۶/۷۵	۳/۸۷	۲۸/۷
۱۰	۲۳/۹	۳/۰۸	۲۲	۳۸/۲-۴۷/۷۵	۱/۹۱	۲۳/۹
۱۱	۳۲/۴	۳/۱۷	۲۳	۷۲-۹۰	۳/۶۰	۳۲/۴
۱۲	۳۵/۶			۶۶/۴-۸۳	۲/۳۲	۳۵/۶

#### ۱-۴- آنالیزها و روابط آماری

یکی از روش های آماری برای تعیین ارتباط بین پارامترهای مختلف استفاده از روش رگرسیون گیری (کمترین مربعات) می باشد. در مبحث رگرسیون، هدف یافتن رابطه ای بین متغیرهای وابسته و



تصویر ۷- اختلاف میان مقادیر مقاومت تراکمی تک محوری تخمین زده شده از رابطه ی (۳) با مقادیر آزمایشگاهی سنگ تراورتن محلات تخلخل به عنوان عاملی مؤثر بر روی مقاومت تراکمی تک محوری روابط خطی و غیرخطی آن‌ها برای سنگ تراورتن محلات در معادلات ۴ و ۵ ارائه شده است.

$$UCS = 35.722 - 0.451N \quad R = 0.23 \quad (4)$$

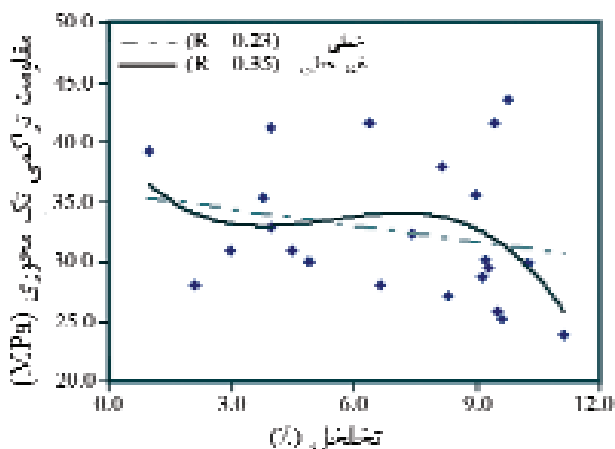
$$UCS = 40.296 - 4.734N^2 + 0.955N^2 - 0.058N^3 \quad (5)$$

$$R = 0.35$$

در این رابطه UCS مقاومت تراکمی تک محوری (MPa)،

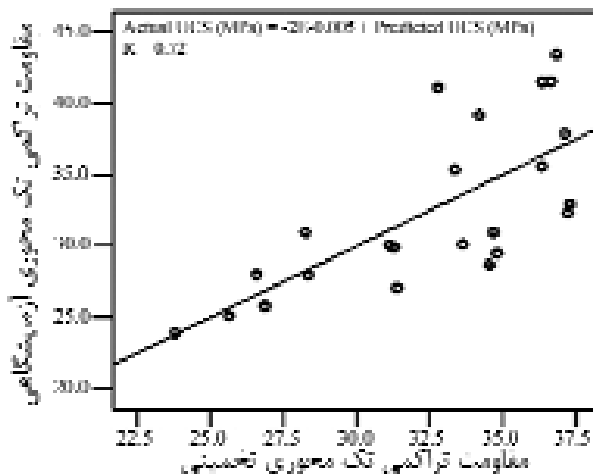
تخلخل (%) و R ضریب همبستگی می باشد.

روابط ارائه شده میان تخلخل و مقاومت تراکمی تک محوری، ضریب همبستگی مناسبی نبوده و فاقد اعتبار است. در صورتی که رابطه ی غیرخطی آن نسبت به رابطه ی خطی از ضریب همبستگی بالاتری برخوردار است. نمودار مربوط به روابط ۴ و ۵ در تصویر ۸ نشان داده شده که میزان مقاومت تراکمی تک محوری با افزایش تخلخل کاهش می یابد. جهت بررسی تأثیر همزمان تخلخل و شاخص بار نقطه ای بر روی مقاومت تراکمی تک محوری و با توجه



تصویر ۸- رابطه ی میان مقاومت تراکمی تک محوری و تخلخل سنگ تراورتن محلات

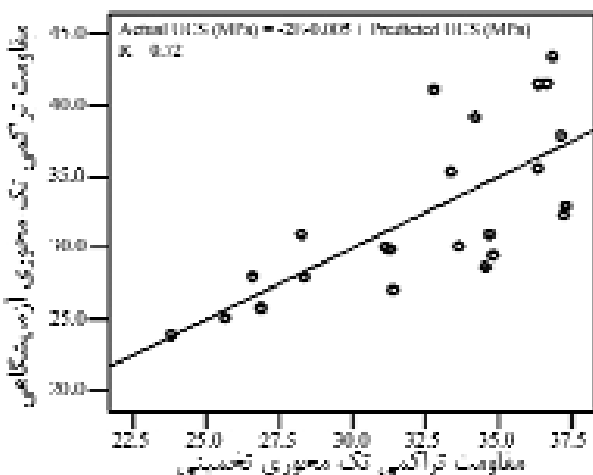
این رابطه ( $R=0.72$ ) نشان دهنده ی غیرخطی بودن این ارتباط می باشد.



تصویر ۵- رابطه ی میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه ای سنگ تراورتن محلات

در ادامه با مقایسه ی مقادیر به دست آمده از رابطه ی ۳ و مقادیر آزمایشگاهی مقاومت تراکمی تک محوری به بررسی اختلاف میان آن‌ها پرداخته می شود. تصاویر ۶ و ۷ نشان دهنده ی این ارتباط و میزان اختلاف میان این مقادیر می باشند.

با توجه به تصاویر ۶ و ۷ ضریب همبستگی موجود میان مقادیر آزمایشگاهی و تخمینی حاصل از رابطه ی (۳) مبین اختلاف قابل قبولی در تخمین مقاومت تراکمی تک محوری می باشد.



تصویر ۶- ارتباط میان مقادیر مقاومت تراکمی تک محوری تخمین زده شده از رابطه ی (۳) با مقادیر آزمایشگاهی سنگ تراورتن محلات

همان طور که اشاره شد، با توجه به نمونه های موجود، آزمایش تعیین تخلخل نیز با استفاده از اشباع و غوطه وری و بر اساس روش های آی اس آر ام برای هر نمونه انجام شد. جهت بررسی

به روابط ۳ و ۵، رابطه‌ی ۶ ارائه گردیده است.

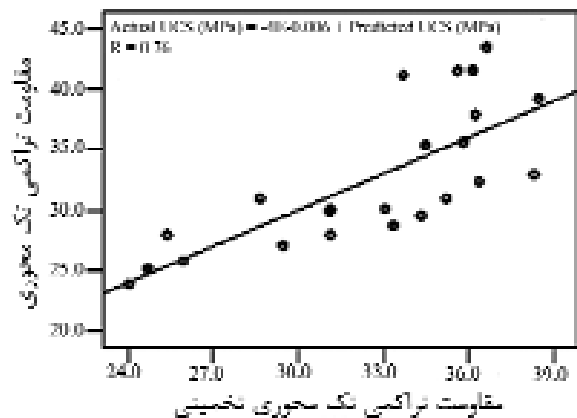
$$UCS = 253.649 - 263.566I_s + 98.976I_s^2 - 11.651I_s^3 \quad (6)$$

$$R = 0.76$$

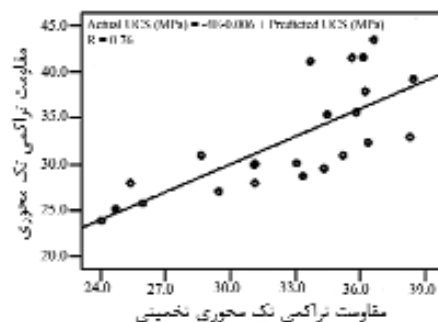
$$-1.958N + 0.127N^2$$

در این رابطه UCS مقاومت تراکمی تک محوری (MPa)،  $I_s$  شاخص بار نقطه‌ای (MPa)،  $N$  تخریل (%) و  $R$  ضریب همبستگی می‌باشند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بررسی همزمان این دو پارامتر سبب افزایش ضریب همبستگی شده و نتایج حاصله نشان دهنده‌ی کاهش خطای مقادیر به دست آمده از رابطه‌ی ۶ نسبت به رابطه‌ی ۳ می‌باشند. در تصویر ۹ ارتباط میان مقادیر حاصل از این رابطه با مقادیر واقعی UCS نشان داده شده است. تصویر ۱۰ فراوانی اختلاف میان این مقادیر را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی فراوانی اختلاف (تصاویر ۳ و ۶) میان مقادیر حاصل از روابط ۳ و ۶ نشان دهنده‌ی کاهش خطا و در



تصویر ۹- ارتباط میان مقادیر مقاومت تراکمی تک محوری تخمین زده شده از رابطه‌ی ۶ با مقادیر آزمایشگاهی سنگ تراورتن محلات



تصویر ۱۰- اختلاف میان مقادیر مقاومت تراکمی تک محوری تخمین زده شده از رابطه‌ی ۶ با مقادیر آزمایشگاهی سنگ تراورتن محلات

نتیجه افزایش میزان دقت در رابطه‌ی ۶ می‌باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

آزمون‌های غیرمستقیم همچون آزمایش شاخص بار نقطه‌ای که برای تخمین مقاومت تراکمی تک محوری استفاده می‌شوند، به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند قابل حمل بودن، استفاده آسان و ارزان، قابلیت انجام آزمایش سرزمین و عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه و یا آماده‌سازی اندک، مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند.

در این مقاله، رابطه‌ی ریاضی میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای بر روی سنگ تراورتن محلات ارائه گردید. بررسی آماری میان این دو پارامتر نشان داد که رابطه‌ی غیرخطی  $(R=0.72)$  نسبت به رابطه‌ی خطی  $(R=0.46)$  از ضریب همبستگی بالاتری برخوردار است. رابطه‌ی میان مقاومت تراکمی تک محوری و تخریل، ضریب همبستگی مناسبی را نشان نداد، اما تأثیر همزمان مقادیر تخریل در رابطه‌ی میان مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه‌ای، سبب بهبود ضریب همبستگی  $(R=0.76)$  شده است.

مقایسه‌ی فراوانی اختلاف میان مقادیر تخمینی و واقعی با توجه به میزان دقت آن، می‌تواند معیاری مناسب جهت ارزیابی نتایج روابط ارائه شده در این خصوص باشد.

## مراجع

فهیمی‌فر، الف، سروش، ح.، ۱۳۸۰، آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها، تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، جلد اول.

American Society for Testing and Materials, 1984, "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens", *Soil and Rock, Building Stones: Annual Book of ASTM Standards 4.08*, Philadelphia, Pennsylvania: ASTM.

Bieniawski, Z. T., 1975, "Point load test in geotechnical practice", *Eng. Geol.*, Vol. 9 (1): 1-11.

Broch, E. & Franklin, J. A., 1972, "Point load strength test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 9 (6): 669-697.

Cargill, J. S. & Shakoor, A., 1990, "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 27: 495-503.

Chau, K. T. & Wong, R. H. C., 1996, "Uniaxial compressive strength and point load strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 33: 183-188.

D'andrea, D. V., Fischer, R. L. & Fogelson, D. E., 1965, "Prediction of compressive strength from other rock properties", *US Bureau of Mines Report of Investigations 6702*.

Deere, D. U. & Miller, R. P., 1966, "Engineering classification and index properties for intact rock", *Air Force*

- Weapons Lab. Tech. Report, AFWL-TR 65-116, Kirtland base, New Mexico.*
- Forster, I. R., 1983**, "The influence of core sample geometry on the axial point load test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 20: 291-295.
- Ghosh, D. K. & Srivastava, M., 1991**, "Point load strength: an index for classification of rock material", *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, Vol. 44: 27-33.
- Gokceoglu, C. & Zorlu, K., 2003**, "A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 17: 61-72.
- Grasso, P., Xu, S. & Mahtab, A., 1992**, "Problems and promises of index testing of rocks", In: *Tillerson J. R., Wawersik WR; editors, Proceedings of the 33rd US Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema: 879-888.*
- Gunsallus, K. L. & Kulhawy, F. H., 1984**, "A comparative evaluation of rock strength measures", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 21: 233-248.
- Hassani, F. P., Scoble, M. J. & Whittaker, B. N., 1980**, "Application of point load index test to strength determination of rock and proposals for new size-correction chart", In: *D. A. summers Editor, Proceeding of the 21st US symposium on rock mechanics, Rolla: 543-64.*
- ISRM Suggested Methods, 1981**, "Rock characterization testing and monitoring", *Oxford: Pergamon Press: x, 211p.*
- ISRM Suggested methods, 1985**, "Suggested method for determining point load strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 22: 53-60.
- Kahraman, S., 2001**, "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38: 981-994.
- Palchik, V. & Hatzor, Y. H., 2004**, "The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalk", *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 37 (4): 331-41.
- Quane, S. L. & Russel, J. K., 2003**, "Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits", *Eur. J. Mineral*, Vol. 15: 855-864.
- Read, J. R. L., Thornten, P. N. & Regan, W. M., 1980**, "A rational approach to the point load test", In: *Proceedings of the third Australian-New Zealand Geomechanics conference, Wellington: New Zealand institution of engineers Vol. 2: 35-39.*
- Singh, D. P., 1981**, "Determination of some engineering properties of weak rocks", In: *K., Akai, editor, Proceedings of the international symposium on weak rock, Rotterdam, Balkema: 21-24.*
- Smith, H. J., 1997**, "The point load test for weak rock in dredging applications", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34 (3/4): 702.
- Tsiambaos, G. & Sabatakakis, N., 2004**, "Considerations on strength of intact sedimentary rocks", *Eng. Geol.*, Vol. 72: 261-273.
- Tsidzi, K. E. N., 1991**, "Point load-uniaxial compressive strength correlation", In: *Wittke W. Proceedings of the Seventh ISRM Congress, Rotterdam: Balkema, Vol. 1: 637-639.*
- 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.*, Vol. 38: 138-157.
- Vallejo, L. E., Welsh, R. A. & Robinson, M. K., 1989**, "Correlation between unconfined compressive and point load strength for Appalachian rocks", In: *Khair A.W., editor, Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema: 461-468.*