تخمين مقاومت تراكمي تک محوري سنگ تراورتن محلات با استفاده از تخلخل و شاخص بار نقطه اي

سعيد دهقان[۱]؛ قاسم ستاري[۲]؛ سعيد چهره چلگاني[۳]

۱- عضو هيات علمي دانشگاه آزاد واحد محلات، دانشجوي دكتراي معدن واحد علوم وتحقيقات. **sa_dehghan@yahoo .com**

۲- دانشجوي كارشناسي ارشد مهندسي معدن دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب. **ghasem .sattari@gmail .com**

۳- كارشناس ارشد فرآوري مواد معدني، دانشگاه آزاد واحد علوم وتحقيقات. **sos4552@gmail .com**

چكيده

مقاومت تراكمي تک محوري يكي از مهمترين پارامترهايي است كه در اكثر پروژه هاي مهندسي سنگ براي مطالعات مكانيک سنگ به عنوان آزمايش پايه مورد نياز بوده و تعيين مي گردد. انجام دقيق اين آزمايش با وجود ظاهري ساده بسيار مشكل مي باشد، لذا در سالهاي اخير كوشش هايي مبني بر تخمين اين پارامتر با استفاده از آزمايشهايي غير مستقيم و ساده (نظير آزمايش هاي شاخص بار نقطه اي , سختي اشميت , سرعت عبور موج فشاري ,...) به وسيله ي محققين مختلف انجام گرديد و روابط مختلفي نيز براي اين منظور ارائه شده است.

اين مقاله با استفاده از داده هاي حاصل از انجام مطالعات آزمايشگاهي برروي نمونه هاي سنگ تراورتن محلات، رابطه اي ميان مقاومت تراكمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي ارائه مي دهد. جهت تعيين ارتباط بين مقادير حاصل از انجام آزمايشات، از مدل سازي رياضي استفاده شده است. بررسي هاي آماري ميان اين دو پارامتر نشان دهنده دقت بيشتر معادله غيرخطي نسبت به معادله خطي است، همچنين بررسي پارامتر موثر تخلخل و افزودن اين پارامتر به روابط موجود، سبب بهبود ضريب همبستگي ميان مقادير تخميني و مقادير آزمايشگاهي در معادلات غير خطي چند متغيره گرديد. با توجه به اختلاف مقادير تخميني و آزمايشگاهي موجود، معادلات بدست آمده داراي دقت قابل قبولي مي باشند.

كلمات كليدی:مقاومت تراكمی تک محوری ، شاخص بار نقطه ای ، سنگ تراورتن ،ضريب همبستگی ، مطالعات آزمايشگاهی، تخلخل

Estimation Of Uniaxial Compressive Strength Using Point Load Index And Porosity For Travertine Of Mahallat

Saeed Dehghan , Ghasem Sattari And Saeed Chehreh Chelgani

Abstract

The uniaxial compressive strength (UCS) is one of the most important parameters that it is needed and determined for studding rock mechanics of intact rock in the most rock engineering projects. In spite of simple appearance of this test, the careful performance is very difficult, Therefore, scientists have many attempted for indirect estimating of this parameter using simple tests (such as point load index (I_s), Schmidt hammer, sound velocity, etc) and they generated some relations between these parameters.

This paper presented the new relationship between UCS and I_s by using laboratory test on Travertine samples of Mahallat. For determining the relations between parameters, the mathematical modeling had been used. Statistical analyses show that the nonlinear equation has the higher correlation coefficient than the linear; also by estimating another effective parameter, porosity, and by adding it to last equation, the correlation coefficient between actual and predicted data was improved in multiply non linear equation. The comparison between actual and predicted results has showed acceptable accurate.

Keywords*:* Uniaxial Compressive Strength, Point Load Index, Travertine Rock, correlation coefficient, Laboratory Test, Porosity

۱- مقدمه

مقاومت تراکمي تک محوري يکي از مهمترين و مرسوم ترين پارامترهايي است که در اکثر پروژه هاي مهندسي سنگ به طور گسترده مورد استفاده قرار مي گيرد. نحوه اندازه گيري اين پارامتر به وسيله هر دو استاندارد ISRM و ASTM [۱] تعيين گرديده است. انجام دقيق اين آزمايش با وجود ظاهري ساده، بسيار مشکل بوده و مستلزم آماده سازي دقيق نمونه، در اختيار داشتن دستگاههاي گران و حساس و در عين حال نتايج حاصل وابستگي شديدي به عوامل خارجي، خطاهاي انساني، ابعاد نمونه، نحوه بارگذاري و دارد. همچنين در مراحل ابتدايي مطالعات (يا بطور کلي) زماني که مقادير کمتر مقاومت مدنظر است، مي توان از روش هاي غير مستقيم و سريع و آسان همچون آزمايش شاخص بار نقطه اي، آزمايش چکش اشميت، آزمايش سرعت عبور موج فشاري که براي نشان دادن مقاومت سنگ پيشنهاد شده است، استفاده نمود. اين آزمايش ها به آماده سازي اندک و ياگاهي به هيچ نوع آماده سازي نمونه احتياج نداشته و به راحتي در محل قابل انجام مي باشد.

موضوع اصلي اين تحقيق ارزيابي آزمون شاخص بار نقطه اي براي تخمين مقاومت تراکمي تک محوري سنگ تراورتن محلات و بررسي اثر تخلخل بر روي اين رابطه است که براي انجام اين امر آزمون هاي آزمايشگاهي بر روي نمونه هاي سنگ تراورتن انجام گرديده است. براي تعيين ارتباط ميان پارامترها و آناليز آماري داده ها از نرم افزار SPSS استفاده شده است.

۲- تحقيقات گذشته

آزمايش شاخص بار نقطه اي به عنوان روش غير مستقيم براي اندازه گيري مقاومت فشاري يا کششي سنگ ها مورد استفاده قرار مي گيرد. اين آزمايش به علت سادگي، آسان بودن آماده سازي نمونه و امکان انجام آزمايش در محل به طور گسترده اي به وسيله ي محققين مختلف مورد استفاده قرار مي گيرد.

رابطه کلي بين مقاومت تراکمي تک محوري (UCS) و شاخص بار نقطه اي (I_s) به صورت رابطه (۱) است :

$$UCS = CI_S(50) \qquad (۱)$$

در اين رابطه C ضريبي ثابت است که مقادير مختلفي براي اين ضريب ارائه شده است، انجمن بين المللي مکانيک سنگ [۱] اين ضريب را بين ۲۵- ۲۰ تعيين کرده است اما محققين زيادي مقادير متفاوتي بين ۱۰-۵۰ براي اين ضريب به دست آورده اند که نشان دهنده اين است که بسته به نوع سنگ ونحوه ومحل انجام آزمايش اين ضريب مي تواند در محدوده وسيعي تغيير کند. بعضي از روابط ارائه شده توسط محققين هم از معادله هاي $y = ax$ ،$y = Ax + b$ ،$y = ax^b$ و يا $y = ax^2 + b$ پيروي مي کنند. در جدول (۱) تعدادي از روابط که به وسيله محققين ميان اين دو پارامتر تعيين گرديده, ارائه شده است.

به طور کلي روابط رياضي ارائه شده براي تخمين مقاومت تراکمي تک محوري کاربردي بوده، اما بايد به اين نکته توجه داشت که روابط گوناگوني که به وسيله محققين مختلف در اين زمينه بدست آمده است به نوع سنگ و شرايط و چگونگي انجام آزمايش بستگي دارد و در صورت به کار گيري هر يک از اين روابط بايد به اين نکات توجه داشت.

۳- مطالعات آزمايشگاهي

براي انجام آزمايشات مختلف بلوک هاي سنگي تراورتن از محدوده معادن حاجي آباد و آتشکوه محلات تهيه و سپس جهت انجام آزمايشات مربوطه از بلوک هاي سنگي نمونه هاي (مغزه) استوانه اي با استاندارد ASTM D4543 [۱] و با قطر ۵۴ ميليمتر (NX) که مناسب ترين نوع براي انجام مطالعات آزمايشگاهي مي باشند، تهيه گرديد. مغزه گيري از بلوک هاي تراورتن به گونه اي انجام شد که تعداد و نمونه مورد نياز براي هر آزمايش با توجه به ابعاد مناسب آن آزمايش فراهم گرديد، لازم به ذکر است که تعداد ۲۳ مغزه از بلوک هاي تراورتن تهيه شد. اين ۲۳ مغزه به گونه اي آماده شدند که تعداد نمونه مورد نياز براي آزمايش هاي مقاومت

تراكمي تك محوري و شاخص بار نقطه اي فراهم گشت، همچنين با توجه به نمونه هاي موجود، آزمايش تعيين تخلخل نيز (با استفاده از روش اشباع و غوطه ور سازي و بر اساس استانداردISRM [۱]) براي هر نمونه انجام شد[۲].

نحوه انجام آزمايش بارنقطه اي با توجه به نمونه هاي موجود به صورت محوري و برطبق استانداردهاي ISRM ,ASTM 5731 [۱] با نسبت طول به قطر يک به يک مي باشد، همچنين آزمايش مقاومت تراكمي تك محوري با استفاده از نمونه هايي با نسبت طول به قطر دو به يک و بر اساس استاندارد ASTM D2938 [۱] انجام شد. در جدول (۲) نتايج حاصل از انجام آزمايشات آورده شده است[۲].

جدول ۱- روابط ارائه شده بين مقاومت تراكمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي توسط محققين مختلف **[۳]-[۶]**

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

* UCS ,I_S(MPa)

٤- آناليز داده ها و روابط آماري

در اين بخش اطلاعات آماري و روابط حاصل از انجام آزمايش ها بر روي نمونه هاي سنگ تراورتن ارائه شده است. در جدول (۳) بررسي آماري اين داده ها ارائه شده است .

جدول۲- نتايج آزمايشات مختلف برروي نمونه هاي سنگ تراورتن محلات **[۲]**

N(%)	Is (MPa)	UCS(MPa)	شماره نمونه	N(%)	Is (MPa)	UCS(MPa)	شماره نمونه
۳,۹۷	۳,۵۲	۳۲,۹	۱۳	۰,۹۷	۳,۸۹	۳۹,۲	۱

۲	۴۱,۵	۳,۷۴	۹,۴۵	۱۴	۳۵,۴	۳,۰۶	۳,۷۸
۳	۴۳,۵	۳,۳۹	۹,۷۶	۱۵	۲۸,۰	۲,۶۱	۶,۶۶
۴	۳۱,۰	۴,۱۱	۲,۹۹	۱۶	۲۵,۲	۲,۵۴	۹,۶۴
۵	۳۷,۹	۳,۶۳	۸,۱۴	۱۷	۲۸,۰	۲,۷۳	۲,۱۱
۶	۴۱,۶	۳,۳۶	۶,۳۸	۱۸	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	۳۱,۰	۳,۱۶	۴,۵۰
۱۰	۲۳,۹	۱,۹۱	۱۱,۱۵	۲۲	۳۰,۱	۳,۰۸	۹,۲۲
۱۱	۳۲,۴	۳,۶۰	۷,۴۲	۲۳	۲۹,۵	۳,۱۷	۹,۲۹
۱۲	۳۵,۶	۳,۳۲	۸,۹۸	-	-	-	-

جدول ۳- آناليز آماري داده هاي حاصل ازانجام آزمايشات مختلف

	مقاومت تراكمي تک محوري (MPa)	شاخص بار نقطه اي (MPa)	تخلخل (%)
تعداد	۲۳	۲۳	۲۳
ميانگين	۳۲,۵۸۲۶	۳,۲۲۵۲	۶,۹۷۷۴
ميانه	۳۱	۳,۱۷	۸,۱۴
مد*	۲۸	۱,۹۱	۰,۹۷
انحراف استاندارد	5.79527	۰.54081	2.96225
واريانس	33.58514	۰.29248	8.77494
كمينه	23.90	1.91	۰,۹۷
بيشينه	43.50	4.11	11.15
دامنه تغييرات	19.60	2.20	10.18

* به دليل وجود مدهاي متعدد، كوچكترين مد قرار داده شده است.

يكي از روش هاي آماري براي تعيين ارتباط بين پارامتر هاي مختلف استفاده از روش رگرسيون گيري(كمترين مربعات) مي باشد، در مبحث رگرسيون، هدف يافتن رابطه اي بين متغيرهاي وابسته و متغير(هاي) مستقل مي باشد. اين رابطه ممكن است از نوع خطي يا غير خطي باشد. تابعي كه ارتباط بين متغيرهاي مستقل و وابسته را بيان مي كند به تابع رگرسيون مرسوم است. براي انجام رگرسيون خطي ساده و چندگانه امروزه از نرم افزارهاي مهندسي متعددي بهره گرفته مي شود كه نرم افزار SPSS از متداولترين آنهاست.

در نرم افزار SPSS نحوه عمل بدين قرار است كه با مشخص كردن متغيرهاي مستقل بعنوان ورودي و متغير وابسته به عنوان خروجي، موتور نرم افزار با توجه به ميزان مقادير ورودي و خروجي معادله اي را ايجاد مي كند كه بوسيله آن مي توان ميزان متغير وابسته را بر حسب پارامترهاي ورودي(متغيرهاي مستقل) تخمين زد. اين معادله در سطح اعتماد مهندسي (۹۵%) داراي دقت است، بعبارت ديگر جواب هاي معادلة ايجاد شده نسبت به مقادير واقعي (متغير وابسته) داراي ضريب همبستگي (R) در سطح اعتماد مهندسي مي باشند. هر چه ميزان ضريب همبستگي به عدد ۱ نزديک تر باشد معادلة ايجاد شده توسط نرم افزار داراي دقت بالاتري است.

در زير رابطه خطي بدست آمده به همراه ضريب همبستگي آن ميان مقاومت تراكمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي براي سنگ تراورتن با توجه به نتايج به دست آمده از آزمايش هاي آزمايشگاهي (جدول ۲) ارائه شده است.

$$UCS = 16.62 + 4.947 I_S \qquad R = 0.46 \qquad (2)$$

که در آن

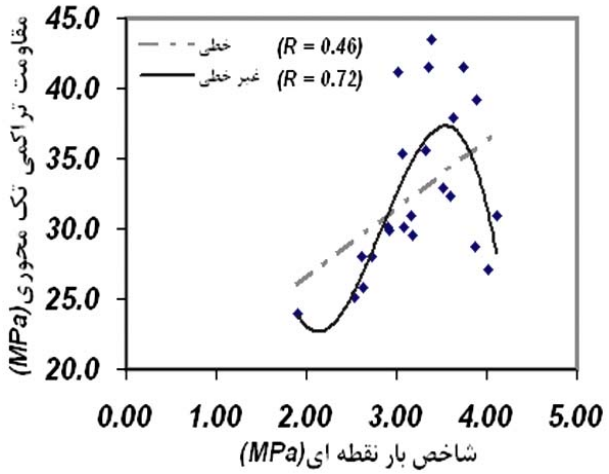
UCS: مقاومت تراكمي تک محوري (مگا پاسكال)

I_S: شاخص بار نقطه اي (مگا پاسكال)

R: ضريب همبستگي

با توجه به پايين بودن مقدار ضريب همبستگي بدست آمده از رابطه خطي، ارتباط غير خطي ميان اين دو پارامتر با استفاده از نرم افزار مورد بررسي قرار گرفت. ارتباط غير خطي(معادله درجه سوم) ميان ميان مقاومت تراكمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي در رابطه (۳) ارائه شده است. در شكل (۱) نمودار مربوط به روابط ارائه شده نشان داده شده است.

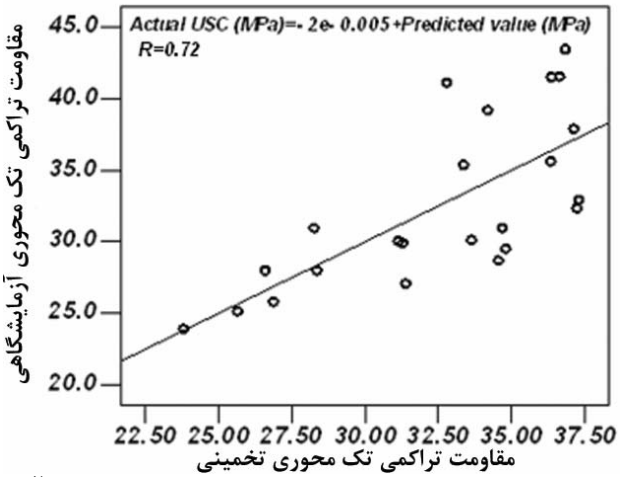
$$UCS = 222.858 - 235.260 I_S + 88.481 {I_S}^2 - 10.404 {I_S}^3 \qquad R = 0.72 \qquad (3)$$



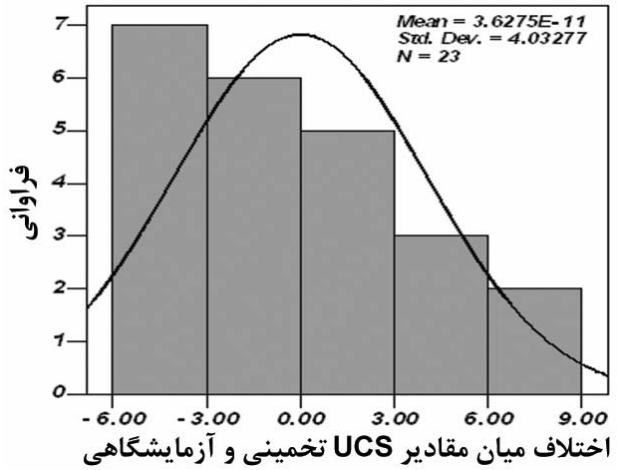
شكل ۱- رابطه ميان مقاومت تراكمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي سنگ تراورتن محلات

با توجه به شكل (۱)، ارتباط غير خطي ميان مقاومت تراكمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي براي سنگ تراورتن محلات داراي ضريب همبستگي بالاتري است. در واقع افزايش ضريب همبستگي اين رابطه (R = 0.72) نشان دهنده غير خطي بودن اين ارتباط مي باشد.

در ادامه با مقايسه مقادير بدست آمده از معادله (۳) و مقادير آزمايشگاهي مقاومت تراكمي تک محوري به بررسي اختلاف ميان آنها پرداخته مي شود. شكل هاي (۲) و (۳) نشان دهنده اين ارتباط و ميزان اختلاف ميان اين مقادير مي باشند.



شکل ۲- ارتباط میان مقادیر مقاومت تراکمي تک محوري تخمین زده شده از رابطه(۳) با مقادیر آزمایشگاهي سنگ تراورتن محلات



شکل ۳- اختلاف میان مقادیر مقاومت تراکمي تک محوري تخمین زده شده از رابطه(۳) با مقادیر آزمایشگاهي سنگ تراورتن محلات

با توجه به شکل هاي (۲) و (۳) ضریب همبستگي موجود میان مقادیر آزمایشگاهي و تخميني حاصل از رابطه (۳) مبین اختلاف قابل قبولي در تخمین مقاومت تراکمي تک محوري مي باشد.

جهت بررسي تخلخل به عنوان عاملي موثر بر روي مقاومت تراکمي تک محوري روابط خطي و غیر خطي آنها براي سنگ تراورتن محلات در معادلات (۴) و (۵) ارائه شده است.

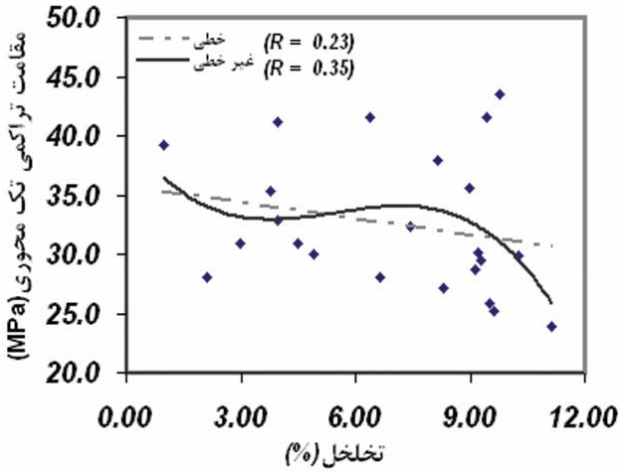
$$UCS = 35.722 - 0.451N \qquad R=0.23 \tag{4}$$

$$UCS = 40.296 - 4.734N + 0.955N^2 - 0.058N^3 \qquad R = 0.35 \tag{5}$$

که در آن

N: تخلخل (درصد)

با توجه به نتایج فوق، روابط ارائه شده میان تخلخل و مقاومت تراکمي تک محوري داراي ضریب همبستگي بالايي نمي باشند، در حالیکه رابطه غیر خطي نسبت به رابطه خطي از درجه اعتبار بالاتري برخوردار است. نمودار مربوط به روابط (۴) و (۵) در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴)، میزان مقاومت تراکمي تک محوري با افزایش تخلخل کاهش مي یابد.



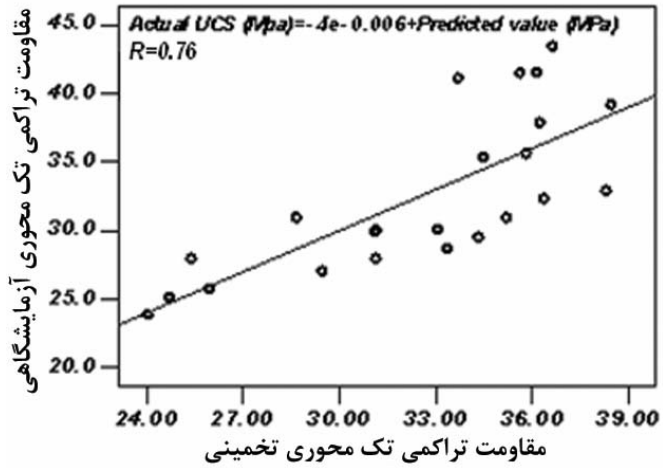
شکل ۴- رابطه میان مقاومت تراکمي تک محوري و تخلخل سنگ تراورتن محلات

جهت بررسي تأثير همزمان تخلخل و شاخص بار نقطه اي بر روي مقاومت تراکمي تک محوري و با توجه به روابط (۳) و (۵)، رابطه (۶) ارائه گرديده است.

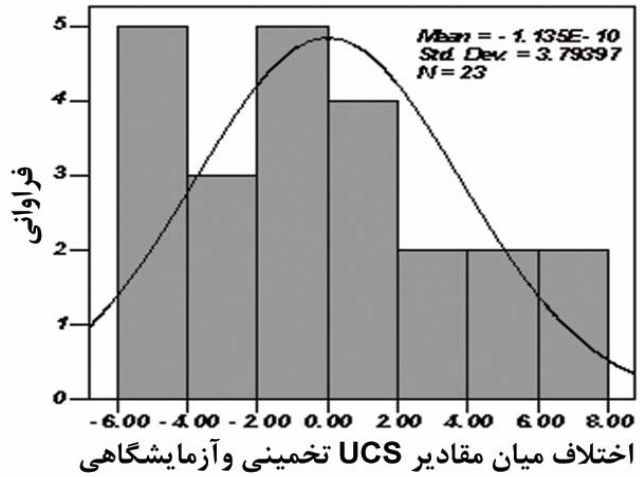
$$UCS = 253.649 - 263.566 I_S + 98.976 {I_S}^2 - 11.651 {I_S}^3 - 1.958 N + 0.127 N^2 \qquad R = 0.76 \qquad (6)$$

همانطور که ملاحظه مي شود، بررسي همزمان اين دو پارامتر سبب افزايش ضريب همبستگي شده و نتايج حاصله نشان دهنده کاهش خطاي مقادير بدست آمده از رابطه (۶) نسبت به رابطه (۳) مي باشند. در شکل (۵) ارتباط ميان مقادير حاصل اين رابطه با مقادير واقعي UCS نشان داده شده است، شکل (۶) فراواني اختلاف ميان اين مقادير را نشان مي دهد.

مقايسه فراواني اختلاف(شکلهاي (۳) و (۶)) ميان مقادير حاصل از روابط (۳) و (۶) نشان دهنده کاهش خطا و در نتيجه افزايش ميزان دقت در رابطه (۶) مي باشد.



شکل ۵- ارتباط ميان مقادير مقاومت تراکمي تک محوري تخمين زده شده از رابطه(۶) با مقادير آزمايشگاهي سنگ تراورتن محلات



شکل ۶- اختلاف میان مقادیر مقاومت تراکمي تک محوري تخمین زده شده از رابطه(۶) با مقادیر آزمایشگاهي سنگ تراورتن محلات

۵- نتیجه گیري

آزمون هاي غیر مستقیم همچون آزمایش شاخص بار نقطه اي که براي تخمین مقاومت تراکمي تک محوري استفاده مي شوند، به دلیل داشتن ویژگي هایي مانند قابل حمل بودن, استفاده آسان و ارزان, قابلیت انجام آزمایش سرزمین و عدم نیاز به آماده سازي نمونه و یا آماده سازي اندک, مورد توجه بسیار قرار گرفته اند.

در این مقاله، رابطه ریاضي میان مقاومت تراکمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي بر روي سنگ تراورتن محلات ارائه گردید. بررسي آماري میان این دو پارامتر نشان داد که رابطه غیر خطي ($R = 0.72$) نسبت به رابطه خطي ($R = 0.46$) از ضریب همبستگي بالاتري برخوردار است. رابطه میان مقاومت تراکمي تک محوري و تخلخل ضریب همبستگي مناسبي را نشان نداده، اما تاثیر همزمان مقادیر تخلخل در رابطه میان مقاومت تراکمي تک محوري و شاخص بار نقطه اي، سبب بهبود ضریب همبستگي ($R = 0.76$) شده است.

مقایسه فراواني اختلاف میان مقادیر تخمیني و واقعي با توجه به میزان دقت آن، مي تواند معیاري مناسب جهت ارزیابي نتایج روابط ارائه شده در این خصوص باشد

٦- مراجع

[۱] فهیمي فر، ا حمد؛ سروش، حامد؛ (۱۳۸۰)؛ آزمایشهاي مکانیک سنگ؛ مباني نظري و استانداردها، مرکز نشر پروفسور حسابي، تهران، جلد اول

[2] دهقان، سعید؛ ستاری، قاسم؛ (۱۳۸۴)؛ طرح تعیین ارتباط بین مقاومت تراکمی تک محوری و شاخص بار نقطه ای سنگ تراورتن محلات، دانشگاه آزاد واحد محلات، محلات

[۳] Kahraman, S.; 2001; "*Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock*", Int J Rock Mech Min Sci Vol. 38, pp. 981-994

[٤] 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), pp.331–41.

[٥] Tsiambaos, G & Sabatakakis, N.; 2004; "*Considerations on Strength of Intact Sedimentary Rocks*", Eng Geol Vol. 72, pp.261-273.

[٦] Gokceoglua, C. and, 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, pp.61–72.