

УДК 539.42

**КОМБИНИРОВАННОЕ ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ  
И СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД**

**Э. Оздемир, Д. Э. Саричи**

*Университет Иненю, Факультет горного дела, 44280, г. Малатья, Турция*

Предел прочности при одноосном сжатии — широко используемый параметр для описания и классификации пород. Исследования обычно выполняются на образцах в сухом состоянии и при стандартных скоростях нагружения. В природе степень насыщения горных пород водой не равна нулю и скорость нагружения изменчива. Исследовались три различные осадочных породы из региона восточной Анатолии (Турция) для оценки влияния степени насыщения на их механические свойства, а также совместное влияние степени насыщения и скорости нагружения на предел прочности пород при одноосном сжатии. На высушенных в печи образцах с насыщенностью 35, 70 и 100 % в ходе испытаний определяли предел прочности при точечном нагружении, твердость Шмидта и Шора, скорость ультразвуковой волны и предел прочности на растяжение по бразильскому методу. Испытания предела прочности при одноосном сжатии проводили при 0, 35, 70 и 100 % степени насыщения и скорости нагружения 0.50, 0.75 и 1.00 кН/с. Результаты испытаний показали, что увеличение содержания воды приводит к снижению механических свойств на 40–50 %. Водопоглощение оказывает большое влияние на пределы прочности пород на растяжение и при точечном нагружении. Внутреннее давление, вызванное наличием воды, больше воздействует на растягивающие напряжения. Отмечено, что увеличение предела прочности при одноосном сжатии и скоростей нагружения вызывает буферный эффект в породах с низкой пористостью.

*Порода, предел прочности при одноосном сжатии, скорость нагружения, степень насыщения*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180606

Породы состоят из мелких зерен различной формы, размеров и направленности, поэтому они неоднородны и анизотропны. Физические и механические свойства горных пород определяются содержанием минералов, текстурой, пористостью, твердостью и хрупкостью. Данные свойства широко используются в горной промышленности, особенно при планировании и строительстве фундаментов, расчетах устойчивости и безопасности склонов, карьеров, защите и воссоздании древних зданий и памятников [1–4].

Предел прочности при одноосном сжатии — один из наиболее распространенных механических параметров в горной промышленности, строительстве, при расчете фундаментов и туннелей, наблюдениях устойчивости склонов, проектировании нефтяных месторождений и т. д. На прочность и деформируемость горных пород влияют как внутренние факторы — пористость, анизотропия, нарушения, размер и форма зерен, минеральный состав матрицы и цемента, природа контактов зерен, так и внешние факторы, в частности температура, содержание во-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда финансирования научных исследований Университета Иненю (проект № 2013/162).

ды и горное давление [5–7]. Наиболее важный внешний фактор — содержание воды. В большей степени это касается глинистых осадочных пород, где даже небольшое увеличение содержания воды может привести к значительному снижению прочности и других деформационных характеристик [1]. Исследования показали, что предел прочности при одноосном сжатии уменьшается вместе с увеличением содержания воды [8–10].

В [11] перечислены пять стадий размягчения и потери прочности в сланцах: снижение энергии разрушения, снижение капиллярного напряжения, увеличение порового давления, снижение трения, химическое и коррозионное разрушение, особенно в цементном или глинистом вяжущем веществе.

Измерение прочности горных пород — сложный, трудоемкий и дорогостоящий процесс. При проведении испытаний требуется высокое качество подготовки образцов [12, 13]. В частности, если порода является мягкой, слоистой, хрупкой или имеет трещины, не всегда возможно получить образцы керна в необходимых количествах. По этой причине определение предела прочности при одноосном сжатии проблематично. Размер образца и его форма, направление приложения нагрузок, условия эксперимента и параллельность граней имеют важное значение для результатов исследования. Для прогнозирования предела прочности при одноосном сжатии часто используют различные разрушающие и неразрушающие косвенные испытания. К ним относятся измерения скорости ультразвуковой волны и индекса точечной нагрузки, определение величины отскока по Шмидту. Прочность при точечном нагружении — альтернативный параметр для предела прочности при одноосном сжатии, и в геомеханической классификации З. Бенявского (RMR) используется именно он [14, 15].

В настоящей работе изучено совместное влияние насыщения и скорости нагружения на предел прочности при одноосном сжатии ненасыщенных и водонасыщенных образцов. Для того чтобы продемонстрировать влияние насыщения на предел прочности известняков, доломитов и травертинов, проведены испытания образцов с различными степенями насыщения (0, 35, 75 и 100 %) при разных скоростях нагружения (0.50, 0.75 и 1.00 кН/с).

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены три осадочные породы — травертин, известняк и доломит. Для экспериментальных работ на заводах по производству мрамора и на открытых карьерах в различных областях Турции (Эрзурум, Малатья, Адьяман) отобраны 30 образцов в виде блоков с размерами  $30 \times 30 \times 50$  см. Расположение месторождений показано на рис. 1. Подготовка и тестирование образцов выполнены в Лаборатории механики горных пород горнотехнического факультета университета Иненю. Испытание физических свойств образцов проводили в соответствии со спецификациями Международного общества по механике горных пород (ISRM) и TCO (TSE) [16–21]. Физические свойства и результаты рентгенодифракционного и рентгенофлуоресцентного анализов приведены в табл. 1, 2.

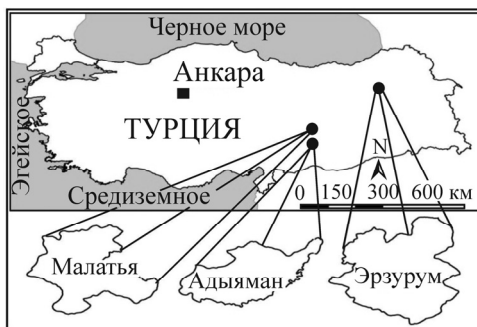


Рис. 1. Карта с расположением областей отбора образцов

ТАБЛИЦА 1. Физические, химические и минералогические свойства горных пород

Порода	Пористость, %	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>			Водопоглощаемость, %		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Минералогический состав
		сухой	естественный	насыщенный	Масса	Объем		
Известняк	3.24	2.69	2.69	2.69	0.15	0.41	2.78	Кальцит
Травертин	10.55	2.47	2.47	2.49	1.20	2.95	2.77	Кальцит
Доломит	5.42	2.62	2.62	2.65	1.36	3.56	2.75	Доломит, кальцит

ТАБЛИЦА 2. Результат рентгенофлуоресцентного анализа образцов, %

Образец	Известняк	Доломит	Травертин
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16420	0.73940	0.06111
MgO	0.32900	14.33000	0.45500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08789	2.16800	0.04010
SiO <sub>2</sub>	0.00110	0.00110	0.00110
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01165	0.00846	0.00365
K <sub>2</sub> O	0.00120	0.01850	0.00120
CaO	54.77000	40.97000	59.13000
TiO <sub>2</sub>	0.01160	0.00800	0.00034
MnO	0.00303	0.02370	0.00285
ZnO	0.00240	0.33610	0.00686
SrO	0.01983	0.02266	0.02489
PbO	0.00081	0.14260	0.00240
Na <sub>2</sub> O	2.12000	2.72000	2.20000
Потери при прокаливании	40.73000	40.95000	40.13000
Всего	102.25270	102.43850	103.05950

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В соответствии с процедурами, предложенными Международным обществом по механике горных пород и ТСО, для оценки влияния содержания воды на механические свойства проводилась серия лабораторных испытаний по определению следующих параметров: прочность при точечном нагружении, твердость Шмидта – Шора, скорость продольной волны, предел прочности на растяжение по бразильскому методу.

Пределы прочности при одноосном сжатии, на растяжение и при точечном нагружении, а также скорость ультразвуковой волны, твердости Шмидта и Шора измерялись при четырех степенях насыщения. Помимо остальных испытаний, предел прочности при одноосном сжатии определялся не только для различного содержания воды, но и для разных скоростей нагружения. Все испытания проводили при комнатной температуре. Использовали четыре набора образцов с различным водосодержанием. Данные степени насыщения обозначены как *a*, *b*, *c* и *d*. Вначале образцы сушили в вентилируемой печи при 105°C не менее 24 ч до получения постоянной массы. Затем их помещали в воду до достижения 35, 70, 100%-й степени насыщения. Содержание воды в образцах вычисляли по формуле  $W_n = [(m_w - m_d) / m_d] \cdot 100$ , где  $m_w$ ,  $m_d$  — вес образцов до и после высухания, г; группы *a*, *b*, *c* и *d* показывали водонасыщенность образцов. Группа *a* относилась к сухим образцам, группа *b* — к 35%-й степени насыщения, группа *c* — к 70%-й, а группа *d* — к полностью водонасыщенным образцам. Первоначальные испытания предела прочности при одноосном сжатии выполняли на четырех образцах с различными степенями насыщения. Позднее тесты повторяли при другой скорости нагружения (0.75 и 1.00 кН/с).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 3 приведены средние значения механических свойств образцов при разных степенях насыщения. На рис. 2 показано влияние содержания воды на параметры прочности. В сухом состоянии механические свойства пород принимались за 100 %. В зависимости от увеличения водонасыщенности произошедшие изменения определены в процентах. Видно, что значения прочности образцов уменьшаются при росте влагонасыщенности. В травертине эта тенденция наблюдалась в большей степени. Травертин — порода с наименьшей прочностью, поскольку имеет высокую открытую пористость. Доломит характеризуется наибольшей степенью водопоглощения, но значения его механических свойств выше, чем у травертина. Известняк — порода с наивысшей прочностью, самым низким водопоглощением и самым высоким удельным весом (в сухом, естественном и полностью водонасыщенном состоянии).

Давление воды в порах породы вызывает снижение прочности и твердости, оказывает прямое воздействие на раскрытие трещин. Когда поры заполнены водой, это приводит к уменьшению поверхностной энергии берегов трещин и снижению свободной поверхностной энергии. Происходит распространение микротрещин, что способствует уменьшению предела упругости и пиковой прочности [22]. В образце травертина, который содержит много взаимосвязанных и несвязанных пор, снижение прочности и твердости максимально. Результат испытаний показал, что внутреннее давление, вызванное поровой водой и водопоглощающей способностью, сильнее влияет на прочность при растяжении по бразильскому методу и при точечном нагружении.

ТАБЛИЦА 3. Средние значения механических свойств пород при разных степенях водонасыщения

Параметр	Группа	Известняк	Доломит	Травертин
Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	<i>a</i>	83.37	77.49	44.64
	<i>b</i>	81.97	62.61	40.16
	<i>c</i>	77.27	56.32	34.03
	<i>d</i>	66.96	49.87	26.18
Индекс точечной нагрузки, МПа	<i>a</i>	5.48	6.01	2.99
	<i>b</i>	5.08	5.09	2.91
	<i>c</i>	4.39	4.22	2.73
	<i>d</i>	4.24	4.08	2.59
Предел прочности на растяжение, МПа	<i>a</i>	6.03	5.50	3.53
	<i>b</i>	5.15	4.17	3.09
	<i>c</i>	5.01	3.83	2.85
	<i>d</i>	4.95	3.73	2.56
Твердость по Шмидту	<i>a</i>	43.12	42.56	35.40
	<i>b</i>	42.70	39.00	31.56
	<i>c</i>	41.88	37.04	29.16
	<i>d</i>	39.68	36.56	28.24
Твердость по Шору	<i>a</i>	61.00	60.18	51.52
	<i>b</i>	56.06	56.20	46.20
	<i>c</i>	47.90	47.66	40.70
	<i>d</i>	42.14	41.72	33.94
Скорость волны, м/с	<i>a</i>	5995	4885	4521
	<i>b</i>	6042	5038	4800
	<i>c</i>	6099	5151	5157
	<i>d</i>	6169	5246	5424

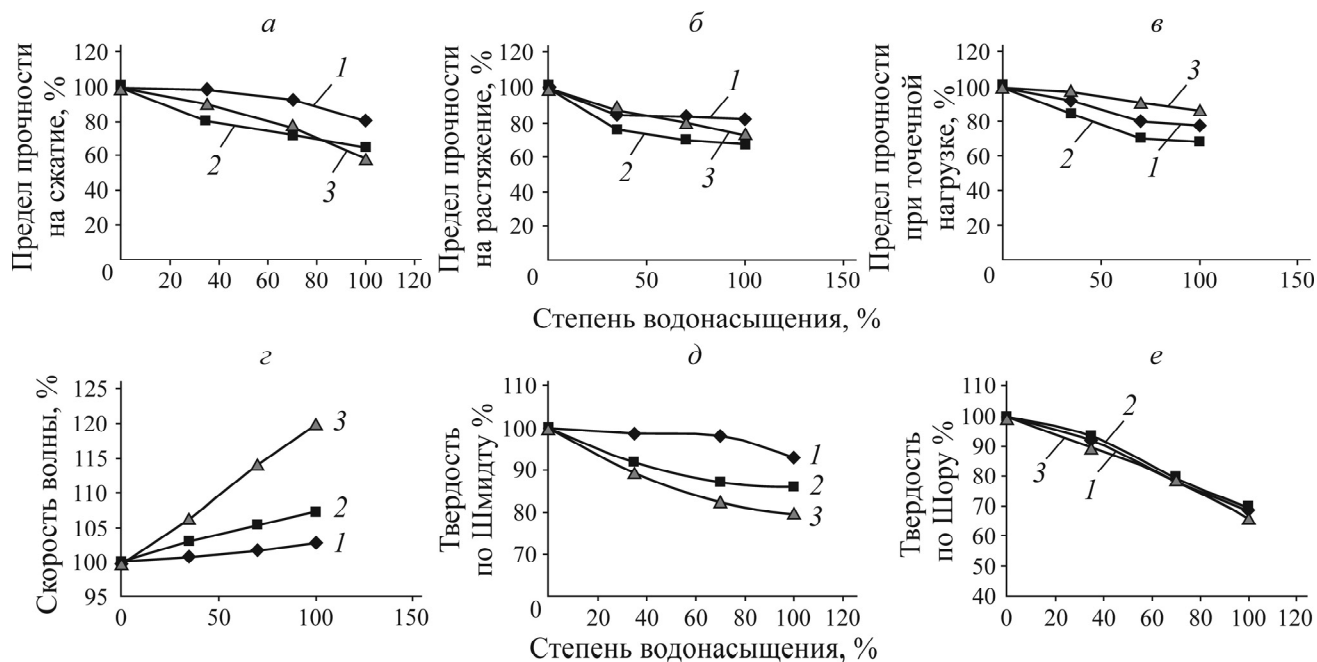


Рис. 2. Изменение предела прочности на одноосное сжатие (а), прочности на растяжение (б), прочности при точечной нагрузке (в), скорости волны (г), твердости Шмидта (д), твердости по Шору (е) от степени водонасыщения: 1 — известняк; 2 — доломит; 3 — травертин

Для определения комбинированного влияния степени насыщения и скорости нагружения испытания проводились при 0, 35, 70 и 100%-й водонасыщенности и при 0.50, 0.75 и 1.00 кН/с. Результаты испытаний приведены в табл. 4. Они показали, что при увеличении содержания воды от сухого до влагонасыщенного состояния предел прочности при одноосном сжатии уменьшается. Травертин имеет самые значительные повреждения по сравнению с другими образцами. Пористость, структура пор и их распределение по размеру являлись важными факторами, влияющими на прочность и разрушение пород. Большое воздействие на прочность оказало уменьшение сцепления, вызванное проникновением воды через частицы, а также водопоглощающая способность образцов и количество поглощенной воды. Высокие показатели поглощения воды в травертинах (Эрзурум) и доломитах (Адыяман) отрицательно сказались на значениях прочности при одноосном сжатии.

ТАБЛИЦА 4. Результаты измерений предела прочности при одноосном сжатии с различным содержанием воды и интенсивностью нагружения, МПа

Скорость нагружения, кН/с	Степень водонасыщения, %	Известняк	Доломит	Травертин
0.50	0	83.37	77.49	44.64
	35	81.97	62.61	40.16
	70	77.27	56.32	34.03
	100	66.96	49.87	26.18
0.75	0	97.05	82.47	47.92
	35	95.06	70.32	42.96
	70	90.52	64.39	36.51
	100	88.35	66.98	33.22
1.00	0	109.18	90.29	52.58
	35	98.82	77.79	46.85
	70	93.25	71.51	42.52
	100	90.90	70.68	38.55

Для оценки влияния содержания воды и скоростей нагружения на предел прочности горных пород при одноосном сжатии построены графики (рис. 3). Значения предела прочности в сухих условиях считались равными 100%. Происходящие изменения свойств образцов построены в зависимости от увеличения водонасыщенности и различной скорости нагружения. Отношения между пределом прочности при одноосном сжатии и водонасыщенностью показаны на рис. 3.

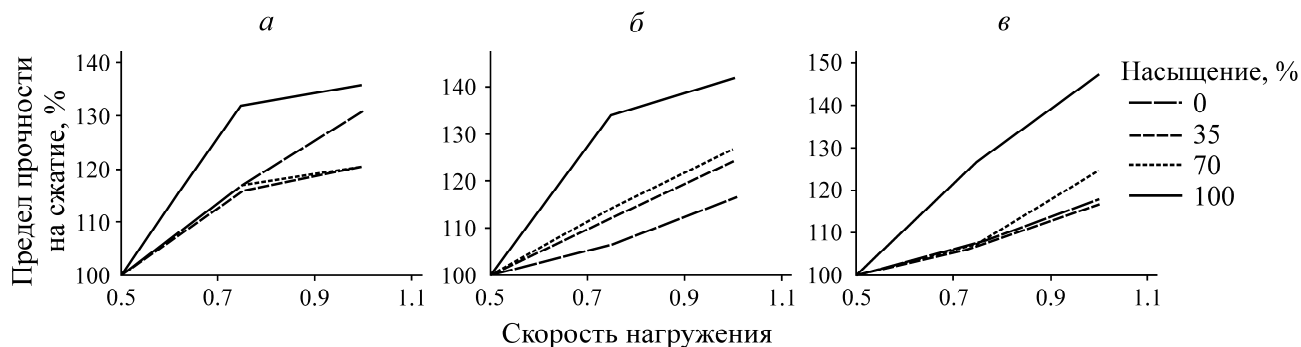


Рис. 3. Изменение предела прочности при одноосном сжатии известняка (*а*), доломитов (*б*), травертинов (*в*) в зависимости от скорости нагрузки и водонасыщенности

В сухом состоянии увеличение скорости нагружения привело к увеличению предела прочности при одноосном сжатии. В случае 35%-го насыщения образцов известняка и доломита увеличение предела прочности произошло при достижении скорости нагружения 0.75 кН/с, а затем значение стало постоянным. В образце травертина увеличение интенсивности насыщения и нагружения также способствовало увеличению предела прочности при одноосном сжатии. Согласно [23, 24], увеличение скорости нагружения приводит к увеличению предела прочности. В породах с низкой пористостью повышение степени насыщения и скорости нагружения препятствует росту предела прочности при одноосном сжатии, то же самое наблюдается и в высокопористых породах. Отметим, что когда содержание воды, скорость нагружения и свойства горных пород оцениваются вместе, пористость является важной характеристикой для определения комбинированного влияния нагрузки и скорости насыщения.

## ВЫВОДЫ

Для изучения влияния водосодержания на свойства пород определены прочность при точечном нагружении, скорость ультразвуковой волны, проведены испытания прочности на растяжение по бразильскому методу, определение предела прочности при одноосном сжатии, твердости по Шмидту и Шору на образцах известняка, доломита и травертина при различной водонасыщенности (0, 35, 70 и 100%). Обнаружено, что значения механических свойств уменьшаются при увеличении содержания воды. Это снижение выражено в процентах. Невозможно получить общий закон для всех типов пород, но установлено, что давление воды в порах влияет на прочность при растяжении, особенно в пористых породах.

Для объяснения влияния водосодержания и скорости нагружения на предел прочности при одноосном сжатии образцы известняка, доломита и травертина испытывали при различных степенях насыщения (0, 35, 70 и 100%) и различной скорости нагружения (0.50, 0.75 и 1.00 кН/с).

В сухом состоянии увеличение скорости нагружения привело к росту значений предела прочности. При уровне насыщения 35% увеличение скорости нагружения способствовало повышению предела прочности при одноосном сжатии в образцах доломита и травертина, но бы-

ло незначительным в известняке. При степени насыщения 70 % по мере увеличения скорости нагружения значения предела прочности продолжали расти в образцах травертина и доломита, но оставались такими же у известняка. Когда степень насыщения достигала 100 %, образцы пород вели себя так же, как если бы они находились в состоянии 70 %-го насыщения.

Учитывая совокупный эффект насыщения и скорости нагружения, увеличение предела прочности при одноосном сжатии и рост скорости насыщения создают буферный эффект в породах с низкой пористостью. В высокопористых породах наблюдается повышение предела прочности при одноосном сжатии. Низкопористые породы плохо выдерживают внезапные нагрузки в условиях водонасыщения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yılmaz I.** Influence of water content on the strength and deformability of gypsum, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2010, Vol. 47, Issue 2. — P. 342–347.
2. **Harrison H. P. and Hudson J. A.** Engineering rock mechanics. Part. 2. Illustrative worked examples, UK, Pergamon Press, 2000.
3. **Goel R. and Singh B.** Engineering rock mass classification tunneling foundations and landslides, UK, Butterworth-Heinemann, 2011.
4. **Kolymbas D., Lavrikov S. V., and Revuzhenko A. F.** Deformation of anisotropic rock mass in the vicinity of a long tunnel, *J. Min. Sci.*, 2012, Vol. 48, Issue 6. — P. 962–974.
5. **Mishra D. A. and Basu A.** Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system, *Eng. Geol.*, 2013, Vol. 160. — P. 54–68.
6. **Kahraman S.** Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2001, Vol. 38, Issue 7. — P. 981–994.
7. **Yesiloglu-Gultekin N., Sezer E. A., Gökceoglu C., and Bayhan H.** An application of adaptive neuro fuzzy inference system for estimating the uniaxial compressive strength of certain granitic rocks from their mineral contents, *Exp. Syst. with Appl.*, 2013, Vol. 40, Issue 3. — P. 921–928.
8. **Barefield E. and Shakoor A.** The effect of degree of saturation on the unconfined compressive strength of selected sandstones, 10<sup>th</sup> IAEG Int. Congress, UK, 2006.
9. **Ajolloian R. and Karimzadeh L.** Geotechnical rock mass evaluation of Givi dam site (case study, Ardabil Iran), 10<sup>th</sup> Int. Cong. on Rock Mech. (Technology road map for Rock Mech.), Johannesburg, SAIMM, 2003.
10. **Vasarhelyi B.** Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in dry and saturated conditions, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2003, Vol. 62, Issue 3. — P. 245–249.
11. **Van Eeckhout E. M. and Peng S. S.** The effect of humidity on the compliances of coal mine shales, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1975, Vol. 12, Issue 11. — P. 335–340.
12. **Bieniawski Z. T. and Bernede M. J.** Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1979, Vol. 16, Issue 2. — P. 138–140.
13. **ASTM D 4543.** Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances, Philadelphia, 2001.
14. **Bieniawski Z.T.** Engineering rock mass classification, New York, Wiley, 1989.
15. **Cevik A., Akcapınar-Sezer E., Cabalar A. F., and Gökceoglu C.** Modeling of the uniaxial compressive strength of some clay-bearing rocks using neural network, *Appl. Soft Comp.*, 2011, Vol. 11, Issue 2. — P. 2587–2594.
16. **TS 699.** Tabii yapı taşları-muayene ve deney metodları, TSE, Ankara, 1987 [In Turkish].

17. **TS 6809.** Mohs sertlik cetveline göre sertlik tayini, TSE, Ankara, 1989 [In Turkish].
18. **TS EN 1936.** Doğal taşlar-Deney metodları-Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk toplam ve açık gözeneklilik tayini, TSE, Ankara, 2010 [In Turkish].
19. **ISRM.** Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1978, Vol. 15, Issue 3. — P. 89–97.
20. **ISRM.** Suggested methods for determining Sound Velocity, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, Issue 2, 1978. — P. 53–58.
21. **ISRM.** Suggested methods for determining ponit Load Strength, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1985, Vol. 22, Issue 2. — P. 51–60.
22. **Vasarhelyi B. and Ledniczky K.** Influence of water-saturation and weathering on mechanical properties of Sivac marble, 9<sup>th</sup> Int. Cong. on Rock Mech., Paris, 1999.
23. **Kumar A.** The effect of stress rate and temperature on the strength of basalt and granite, Geophys., 1968, Vol. 33, Issue 3. — P. 501–510.
24. **Peng S.** A note on the fracture propagation and time-dependent behaviour of rocks in uniaxial tension, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1975, Vol. 12, Issue 4. — P. 125–127.

*Поступила в редакцию 20/І 2018  
После доработки 6/ІХ 2018  
Принята к публикации 28/ХІ 2018*