

УДК 622.23.05 + 679.8 + 67.05

**ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАМНЕРЕЗНЫХ МАШИН  
С АЛМАЗНЫМИ ОТРЕЗНЫМИ ДИСКАМИ  
НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТОДА РЕГРЕССИИ**

**А. Гуни**

*Университет Мугла им. Ситки Кочмана,  
E-mail: aguney@mu.edu.tr, 48000, г. Мугла, Турция*

Рассмотрена возможность прогнозирования производительности камнерезных машин с помощью моделей на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) и метода статистической регрессии (МР), использующих в качестве входных параметров значения твердости породы по Шору, Шмидту и совокупной твердости по Шору – Шмидту. Для подтверждения корректности применяемых ИНС- и МР-моделей выполнено сравнение производительности, измеренной в производственных условиях и полученной в результате прогноза. Анализ данных показал высокую корреляцию между экспериментом и прогнозом. Показано, что производительность камнерезного оборудования можно спрогнозировать с помощью предложенных моделей, которые являются инструментом оценки рентабельности предприятия по обработке природного камня на основе поверхностной твердости породы.

*Твердость по Шору, твердость по Шмидту, производительность камнерезной машины, метод статической регрессии, искусственная нейронная сеть*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190612

Турция, имея весомую долю на мировом рынке, улучшила свои экономические позиции в направлении создания запасов, производства и экспорта природного камня. Добытые в карьере мраморные блоки поступают на предприятия для их дальнейшей обработки и представляются на рынке в виде готовой продукции, составляющей ~85 % экспорта природного камня из Турции. На предприятиях по обработке мрамора для его раскройки применяются круговые отрезные диски с алмазным напылением. Затраты на резание, включающие в себя стоимость потребленной энергии и алмазных дисков, составляют значительную часть в себестоимости обработки мрамора.

Выявлению зависимостей между затратами на энергию и производительностью камнерезной машины посвящены многие исследования. В [1] выполнены эксперименты по резанию семи различных типов мрамора, рассчитаны силы резания и удельное энергопотребление, а также предложен эмпирический подход с использованием метода множественной регрессии на основе свойств породы. В [2] описаны искусственные нейронные сети и регрессионные модели на основе данных о пористости, угле внутреннего трения и коэффициенте сцепления для прогнозирования производительности изготовления плит камнерезной машиной. ИНС-модели показали более корректные результаты. В [3] при резке использовались два диска разного диа-

метра и разной концентрации алмазного напыления без изменения параметров режущей части. Выявлено снижение износа абразивного слоя с увеличением глубины резания и концентрации алмазного напыления. На примере 15 различных пород изучено влияние вязкости разрушения и хрупкости породы на удельную энергию резания диском [4]. Разработаны модели, основанные на методе простой и множественной регрессии и нечеткой логике для оценки удельной энергии с учетом свойств породы. В [5] выполнены эксперименты по разрушению образцов четырех типов мрамора магматического происхождения при постоянных параметрах резания для определения удельной энергии, соответствующей каждому типу мрамора. Анализ влияния физических и механических свойств породы на энергию резания методом регрессии показал, что пористость породы и предел ее прочности на одноосное сжатие оказывают значительное влияние на энергию резания. В [6] дана оценка влияния параметров резания мрамора на потребление энергии с помощью ИНС и системы ANFIS. Входными параметрами выступали твердость породы, скорость вращения диска пилы и скорость подачи, в качестве выходного — удельная энергия резания. Прогнозируемые результаты оказались близки к экспериментальным. В [7] представлены исследования зависимости уровня шума от разных скоростей вращения диска и подачи при резании белого мрамора типа Afyon циркулярной пилой.

Эксперименты по резанию мрамора Mugla диском в заводских условиях выполнены для изучения влияния размера зерна мрамора на производительность камнерезной машины на основе твердости по Шору и Шмидту [8]. Для построения ИНС-модели продолжительности резания проведены эксперименты над зеленым мрамором типа Usak с применением лабораторной пилы [9]. Входные параметры — скорость подачи, частота вращения диска пилы и глубина резания, выходной — время резания. При постановке входных параметров в модель прогнозируемая продолжительность резания оказалась близка к измеренной экспериментально. В [10] обнаружена высокая корреляция между удельной энергией и пределом прочности на одноосное сжатие. В [11] испытаны ИНС- и МР-модели, которые сравнили с помощью массива тестовых данных. Оба подхода к проведению моделирования способны предоставлять корректные прогнозы удельного энергопотребления с приемлемым уровнем точности, при этом ИНС-модель оказалась более точной, чем МР-модель.

Знание производительности камнерезного оборудования — важный фактор для инвесторов, принявших решение вложить капитал в создание предприятия по обработке мрамора. Цель настоящей работы — оценка производительности камнерезных машин, применяемых при изготовлении мраморных плит на месторождении Мугла.

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Использовался мрамор с торговыми названиями Mugla белый, Milas лимонный, сиреневый и фиолетовый. В табл. 1 приведены местоположения его добычи и обработки [8].

ТАБЛИЦА 1. Список типов испытуемого мрамора

Мрамор	Предприятие и его местоположение	Местоположение карьера
Milas лимонный	Ayhan Mermer, Ятаган	Деревня Кестанеджи
Milas белый	Dur-Tas Mermer, Ятаган	Миляс
Milas сиреневый	Dumanlar Mermer, Баир	Деревня Кестанеджи
Mugla фиолетовый	Dumanlar Mermer, Баир	Деревня Кестанеджи
Mugla белый	Ermas Mermer, Ятаган	Ятаган
Mugla белый	Demircioglu Mermer, Ятаган	Баир
Mugla белый	Kirci Mermer, Ятаган	Деревня Козагач

Средние значения физических и механических свойств типов мрамора из табл. 1:

Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	27.30
Водонасыщенность, %	0.07
Пористость, %	0.25
Скорость прохождения ультразвука, м/с	5.10
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	82.71
Предел прочности на растяжение, МПа (Бразильский метод)	5.17
Предел прочности на сосредоточенную нагрузку, МПа	3.55
Предел прочности на трехточечный изгиб, МПа	14.90
Предел прочности на истирание Бэме, см <sup>3</sup> /50 см <sup>2</sup>	23.00

Твердость по Шору и Шмидту определялась экспериментально в лаборатории, производительность камнерезной машины измерялась на предприятиях по обработке мрамора. Для построения ИНС-и МР-моделей использовалось 16 наборов данных, для проверки моделей случайно выбирались семь наборов (табл. 2) [8]. Согласно табл. 2, строились ИНС- и МР-модели, в которых входными параметрами выступали твердость по Шору, Шмидту и совокупная твердость по Шору – Шмидту.

ТАБЛИЦА 2. Экспериментальные данные

Мрамор	Предприятие	Производительность, м <sup>2</sup> /ч	Твердость	
			по Шору	по Шмидту
Для разработки моделей				
Milas лимонный	Ayhan Mermer	27	47.2	58
		27	47.0	56
		27	47.3	56
		30	47.2	56
Milas белый	Dur-Tas Mermer	33	45.5	58
		33	45.2	55
		38	45.3	56
		37	45.0	56
Milas сиреневый	Dumanlar Mermer	26	49.2	62
		26	48.5	63
		26	49.9	63
		26	47.1	61
Mugla фиолетовый	Dumanlar Mermer	24	51.6	66
		24	49.4	66
		24	51.7	65
		24	50.2	63
Для испытания моделей				
Milas лимонный	Ayhan Mermer	30	47.2	56
Milas белый	Dur-Tas Mermer	33	45.5	58
Milas сиреневый	Dumanlar Mermer	26	49.9	62
Mugla фиолетовый	Dumanlar Mermer	24	51.6	66
Mugla белый	Ermas Mermer	29	45.2	50
Mugla белый	Demircioglu Mermer	27	45.1	50
Mugla белый	Kirci Mermer	34	43.1	54

## ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Искусственные нейронные сети — логическое программное обеспечение, разработанное для выполнения базовых функций человека путем имитации механизма работы мозга, такой как способность извлекать новую информацию путем обучения, воспоминания и осуществления обобщений. Они применяются в физике, математике, электронике, компьютерной инженерии. Их практическое использование заключается в быстрой классификации систем в различных формах и структурах, а также в оценке и управлении массивами данных. Широкое применение ИНС получили в решении сложных инженерных задач, не разрешимых традиционными методами. В отличие от математических моделей, ИНС используют моделирование, основанное на наблюдении или на данных, полученных экспериментально [12].

Для прогноза производительности камнерезной машины использовалась ИНС многослойного восприятия (MLP), по своей архитектуре представляющая MLP-сеть. На рис. 1 показаны три типа слоев: слой входных параметров, слой выходных параметров и скрытые слои. Каждый нейрон входного слоя назначен к атрибуту данных и производит выходные параметры, равные масштабному значению соответствующего атрибута. Скрытые слои, количество которых составляет один или два, располагаются между входными и выходными слоями [13].

Взаимосвязь между слоями  $i$  и  $j$  обозначают как  $w_{ij}$  и называют весом. ИНС изучает данные взаимосвязи между слоями и генерирует надежный прогноз и классификацию. Во время фазы обучения взаимосвязи оптимизируются для минимизации предопределенной функции [14]. Рассчитывается весовая сумма входных параметров к нейрону. Выходные параметры и активация нейрона определяется функцией активации. Обучение MLP-сети — важнейшая часть для выполнения задачи, представляющая собой определение наилучших весовых связей между нейронами для нахождения минимального различия между фактическим и прогнозируемым значением зависимой переменной. Наиболее используемый алгоритм обучения — обратная передача. При этом такие параметры, как количество входных, выходных и скрытых нейронов, а также функция активации, влияют на эффективность ИНС. В задаче прогнозирования, основанной на зависимости “причина – следствие”, количество входных нейронов равно количеству независимых переменных, а количество выходных нейронов — количеству зависимых переменных.

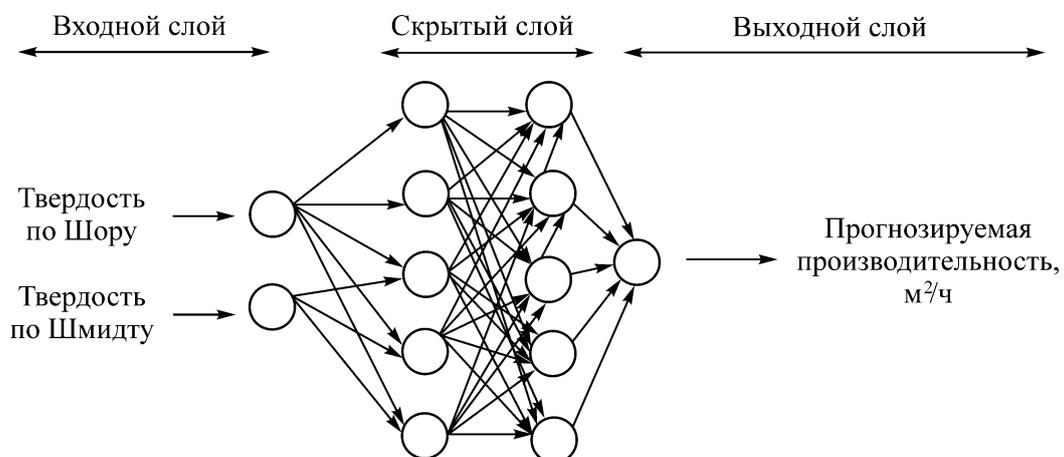


Рис. 1. Типовая MLP-структура искусственной нейронной сети

ТАБЛИЦА 3. Структуры ИНС-моделей

Модель	Количество нейронов			Функция активации		Функция обучения	Показатель качества
	входных	скрытых	выходных	первая	вторая		
ИНС-I				Линейная	Касательная сигмоида	Trainlm	Средне-квадратическое отклонение
ИНС-II	1	5	1	Касательная сигмоида	Касательная сигмоида		
ИНС-III				Касательная сигмоида	Линейная		

**ПОСТРОЕНИЕ ИНС-МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАМНЕРЕЗНОЙ МАШИНЫ**

В настоящей работе ИНС-модели строились с помощью пакета Neural Network (nntool) в программном обеспечении MATLAB R 2009. Моделирование выполнялось с помощью трех моделей [15]. Для первой входным параметром выступала твердость по Шору, для второй — твердость по Шмидту, для третьей — совокупная твердость по Шору – Шмидту. Выходным параметром являлась производительность камнерезной машины, для оценки которой испытывалось множество разных архитектур ИНС. В решении инженерных задач применялся алгоритм “упреждение – обратная передача”. Сетевые архитектуры, выдающие наиболее корректные результаты, определялись как ИНС-I, ИНС-II и ИНС-III (табл. 3). Конфигурация модели ИНС-III в программном обеспечении MATLAB 2009 показана на рис. 2.

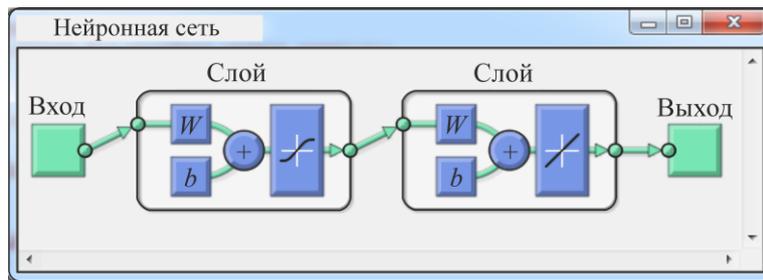


Рис. 2. Архитектурная конфигурация модели ИНС-III

Модели ИНС-I, ИНС-II, ИНС-III и МР-I, МР-II, МР-III, в основе которых лежит экспериментально определенная твердость по Шору, Шмидту и Шору – Шмидту, строились для оценки производительности камнерезных машин с дисками с алмазным напылением. Измеренная производительность в условиях предприятия и производительность, прогнозируемая моделями ИНС-I, ИНС-II, ИНС-III, представлена в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение фактических значений производительности камнерезной машины с прогнозируемой ИНС-моделями, м<sup>2</sup>/ч

Мрамор	Производительность камнерезной машины			
	фактическая	ИНС-I	ИНС-II	ИНС-III
Милас лимонный	30	29	31	29
Милас белый	33	31	32	34
Милас сиреневый	26	27	26	24
Мугла фиолетовый	24	25	25	25
Мугла белый	29	30	29	28
Мугла белый	27	32	28	28
Мугла белый	34	33	30	35

## МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ

Метод статистической регрессии, взятый для прогнозирования производительности как наиболее удобный статистический метод для косвенной оценки эмпирических уравнений, активно используется при моделировании. Эффективность модели зависит от большого количества влияющих факторов. В настоящей работе метод регрессии реализован с помощью программного обеспечения SPSS 17. Входные данные из табл. 2 для разработки моделей, применяемые для обучения ИНС, также служили для создания МР-модели, а данные из табл. 2 для испытания моделей — для тестирования. Для оценки производительности камнерезной машины регрессия твердости по Шору и Шмидту анализировались отдельно, а для учета совокупной твердости по Шору–Шмидту рассматривалась множественная регрессия (табл. 5). В табл. 6 показано сравнение значений производительности камнерезных машин, измеренных в условиях предприятия и прогнозируемых моделями МР-I, МР-II и МР-III.

ТАБЛИЦА 5. Зависимости, применяемые для разработки моделей МР-I, МР-II, МР-III

Модель	Производительность камнерезной машины, м <sup>2</sup> /ч	<i>r</i>	<i>t</i>	<i>F</i>
МР-I	83.665 – 1.186SH	0.71	7.756	25.984
МР-II	50.317 – 0.380SCH	0.48	6.425	7.641
МР-III	94.525 + 0.402SCH – 1.914SH	0.75	8.109	16.308

Примечание. Твердость по Шору — SH, по Шмидту — SCH

ТАБЛИЦА 6. Сравнение фактических значений производительности камнерезной машины с прогнозируемыми МР-моделями, м<sup>2</sup>/ч

Мрамор	Производительность			
	фактическая	МР-I	МР-II	МР-III
Milas лимонный	30	28	29	29
Milas белый	33	30	29	34
Milas сиреневый	26	26	27	24
Mugla фиолетовый	24	22	26	25
Mugla белый	29	29	31	28
Mugla белый	27	31	31	28
Mugla белый	34	32	30	35

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕРЕННЫХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАМНЕРЕЗНОЙ МАШИНЫ

При выявлении зависимости между измеренными значениями производительности и прогнозируемыми с помощью моделей ИНС-I, II, III и МР-I, II, III получены весьма значимые результаты. В моделях I, II и III в качестве входных параметров используются твердость материала по Шору, Шмидту и совокупная твердость по Шору–Шмидту соответственно, а в качестве выходного параметра — производительность камнерезной машины.

На рис. 3а, б, в, д представлены зависимости производительности, измеренной в заводских условиях, от прогнозируемого значения, полученного с помощью моделей ИНС-I, МР-I и ИНС-II и МР-II соответственно. Коэффициенты корреляции для моделей группы I составляют 0.788 и 0.791 соответственно, что свидетельствует о высокой (87%) взаимосвязи между рассматриваемыми значениями (рис. 4а), а для моделей группы II — 0.785 и 0.582. Модель ИНС-II обеспечивает высокое (87%) соответствие между значениями производительности, измеренными в заводских условиях, и полученными в результате прогноза. Модель МР-II показала среднее (57%) соответствие результатов (рис. 4в).

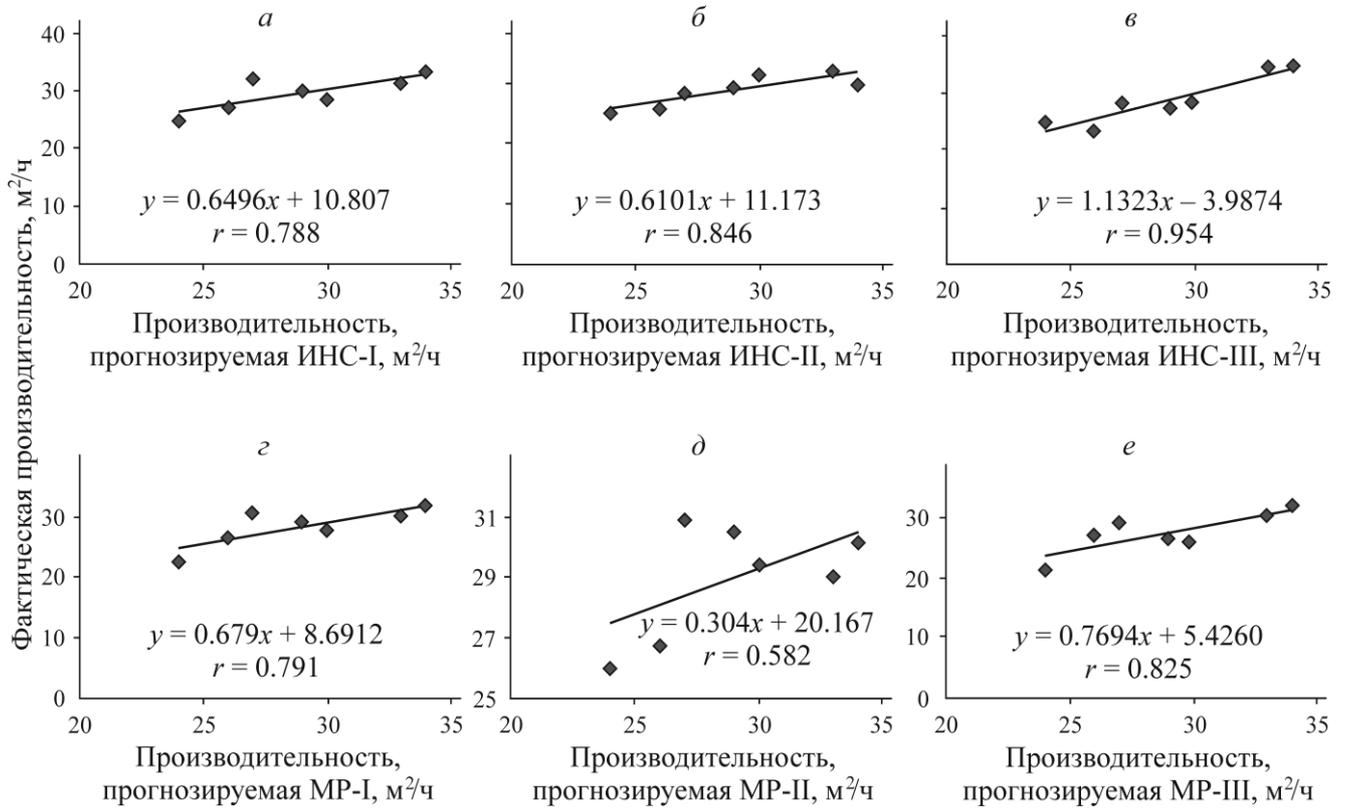


Рис. 3. Корреляция между фактической производительностью камнерезной машины и прогнозируемой моделями ИНС-I (а), ИНС-II (б), ИНС-III (в) и МР-I (г), МР-II (д), МР-III (е)

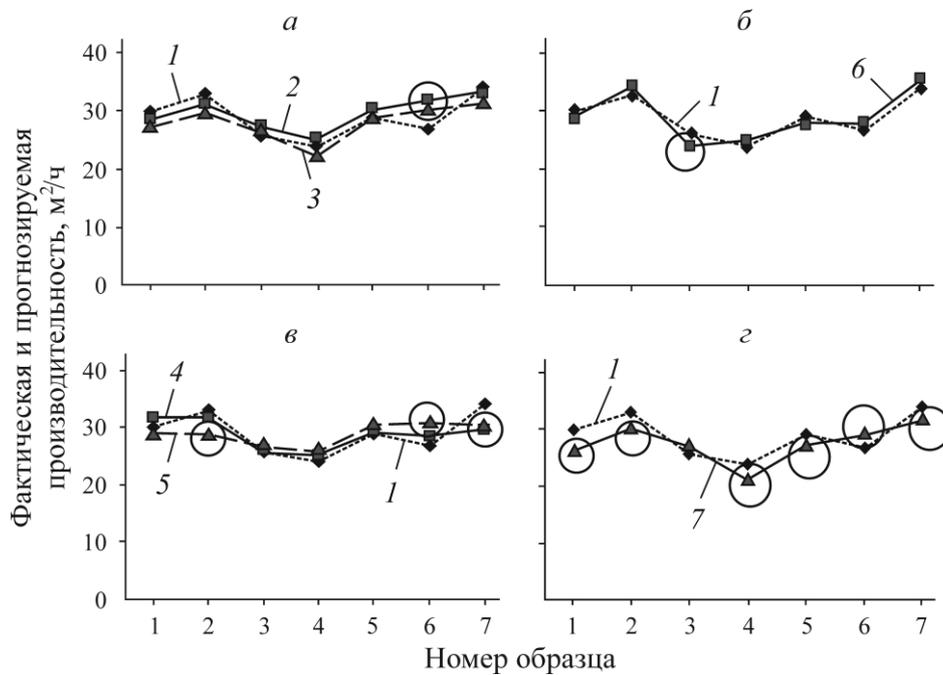


Рис. 4. Сравнительный анализ фактической (1) и прогнозируемой производительности моделями ИНС-I (2) и МР-I (3) на основе твердости по Шору (а), моделями ИНС-II (4) и МР-II (5) на основе твердости по Шмидту (в) и моделями ИНС-III (6) и МР-III (7) на основе совокупной твердости по Шору – Шмидту (б, г)

На рис. 3в, е представлена корреляция между фактической производительностью камнерезной машины и ее величиной, прогнозируемой моделями ИНС-III и МР-III. Коэффициенты корреляции между измеренной и прогнозируемой производительностью составляют 0.954 и 0.825, что соответствует высокой взаимосвязи (87 %) между измеренными значениями производительности в заводских условиях и прогнозируемой моделью ИНС-III на основе совокупной твердости по Шору–Шмидту (рис. 4б). Модель МР-III показала низкое (14 %) соответствие результатов экспериментов фактическим данным (рис. 4г).

### ВЫВОДЫ

Производительность камнерезной машины, прогнозируемая ИНС- и МР-моделями на основе твердости по Шору, оказалась близкой к фактической (87 %), т. е. твердость по Шору — объективный входной параметр для обеих моделей. Результаты прогноза, полученные с помощью ИНС-модели на основе твердости по Шмидту, близки к фактической (87 %), а МР-модель показала среднее соответствие (57 %), т. е. твердость по Шмидту — объективный входной параметр для ИНС-модели, но он не подходит для МР-модели. Применение совокупной твердости по Шору–Шмидту в качестве входного параметра позволило достичь высокого уровня соответствия для ИНС-модели (87 %) и крайне низкого для МР-модели (14 %), т. е. использовать ее для оценки производительности не рекомендуется.

Твердость по Шору, Шмидту и совокупная твердость по Шору–Шмидту могут быть использованы в качестве входных параметров для ИНС-моделей, так как производительность камнерезной машины прогнозируется с высокими соотношениями соответствия 87 %. При увеличении количества входных параметров и общего объема данных возможно проведение более точной оценки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Büyüksağış İ. S.** Sawability analysis of marbles in circular daimond block cutting machines, Osmangazi University Graduate School, PhD Thesis, Turkey, 1998.
2. **Kahraman S., Altun H., Tezekici B. S., and Fener M.** Sawability prediction of carbonate rocks from strength parameters using artificial neural networks, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 2006, Vol. 43. — P. 157–164.
3. **Özçelik Y., Ünver B., and Bayram F.** Sawability classification of some natural stones with circular sawing and numerical modeling of sawing mechanism, TÜBİTAK, 2008. — 122 p.
4. **Şengün N.** Influence of fracture toughness and brittleness on cutting efficiency of circular diamond saws, Suleyman Demirel University, PhD Thesis, 2009, Isparta, Turkey.
5. **Şengün N., Altındağ R., and Koçcaz C. E.** The sawability analysis of some magmatic rocks found in Isparta Region, *J. Sci. and Eng. of Dokuz Eylul University*, 2009, Vol. 11, Issue 31. — P. 22–31.
6. **Caner M. and Akarşlan E.** Estimation of specific energy factor in marble cutting process using ANFIS and ANN, *J. Eng. Sci. of Pamukkale University*, 2009, Vol. 15, No. 2. — P. 233–239.
7. **Bayram A., Yaşitli N. E., and Özçelik Y.** The relations between noise level and cutting parameters in circular diamond sawing, 22<sup>nd</sup> Int. Min. Congr. of Turkey Proc. Book, 2011. — P. 407–413.
8. **Guney A.** Performance prediction of large-diameter circular saws based on surface hardness tests for Mugla (Turkey) marbles, *J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2011, Vol. 44. — P. 357–366.

9. **Güvenç U., Dursun M., and Çimen H.** Artificial neural network based modelling of cutting time in marble cutting Process, SDU Int. Tech. Sci., 2011, Vol. 3. — P. 9–16.
10. **Sengun N. and Altindag R.** Prediction of specific energy of carbonate rock in industrial stones cutting process, Arab. J. Geosciences, 2013, Vol. 6, Issue 4. — P. 1183–1190.
11. **Aydin G., Karakurt İ., and Hamzacebi C.** Performance prediction of diamond sawblades using artificial neural network and regression analysis, Arab. J. Sci. and Eng., 2015.
12. **İnan A.** Usage areas of artificial neural networks in power systems, J. Kaynak Electical, 1999, Vol. 119. — P. 104–114.
13. **Rumelhart D. E., Hinton G. E., and Williams R. J.** Learning internal representation by error propagation. In: Parallel and distributed processing: explorations in the microstructure of cognition, Foundations, MIT Press: Cambridge, MA, 1986, Vol. 1.
14. **Pontes F. J., Ferreira R. J., Silva B. M., Paiva P. A., and Balestrassi P. P.** Artificial neural networks for machining processes surface roughness modeling, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2010, Vol. 49. — P. 879–902.
15. **Taşdemir Ş.** The comparative study to determine surface roughness with artificial neural network and regression model, J. Selçuk Teknik-Online, 2011, Vol. 2. — P. 215–226.

*Поступила в редакцию 02/I 2018  
После доработки 20/XI 2019  
Принята к публикации 27/XI 2019*