

УДК 502/504

**МНОГОАТРИБУТНЫЙ РЕЙТИНГ ОБЪЕКТОВ ПОСТАВКИ ИЗВЕСТНЯКА
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

С. Вуйич¹, Ж. Праштало¹, М. Попович², П. Степанович¹, Я. Нешкович¹

¹Горный институт,

E-mail: slobodan.vujic@rifeograd.ac.rs, 11000, г. Белград, Сербия

²Белградский университет, 11000, г. Белград, Сербия

Представлена модель многоатрибутного ранжирования параметров производственных объектов как возможный подход к решению задач по оптимизации поставок на угольные ТЭЦ известняка, использующегося в качестве сорбента. Учитываются экологические требования, обеспечивающие очистку дымовых газов от серы, качество сырья, важность рациональной подачи известняка. Исследования выполнены на основе модели Promethee.

Многоатрибутное ранжирование, известняк, ресурсы, термоэнергетика

DOI: 10.15372/FTPRPI20230517

Технологические и экологические проблемы сероочистки дымовых газов угольных тепловых электростанций давно вызывают интерес профессионалов и ученых [1]. В Сербии имеются многочисленные залежи известняка для использования его в качестве сорбента в процессе очистки дымовых газов от серы. В этой связи возникает вопрос рационального планирования поставок известняка на угольные электростанции теплоэнергетического комплекса, зависящего от изменчивости структуры производства во времени.

Цель настоящей работы — представить результаты анализа применения многоатрибутного моделирования к решению рассматриваемого вопроса. В дальнейшем планируется исследование однокритериальной оптимизации со сравнительным анализом обоих подходов.

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

В состав теплоэнергетического комплекса Сербии входят четыре объекта-потребителя (угольные ТЭЦ) и 15 объектов-производителей (карьеры) как потенциальные поставщики известняка удовлетворительного качества [2, 3]. Временная изменчивость сложной структуры комплекса обусловила необходимость проведения анализа поставок известняка по трем сценариям.

Сценарий А. Комплекс состоит из трех потребителей известняка — тепловых электростанций T_1 , T_2 и T_4 (T_3 строится) и 15 потенциальных поставщиков — карьеры K_1, K_2, \dots, K_{15} (рис. 1а).

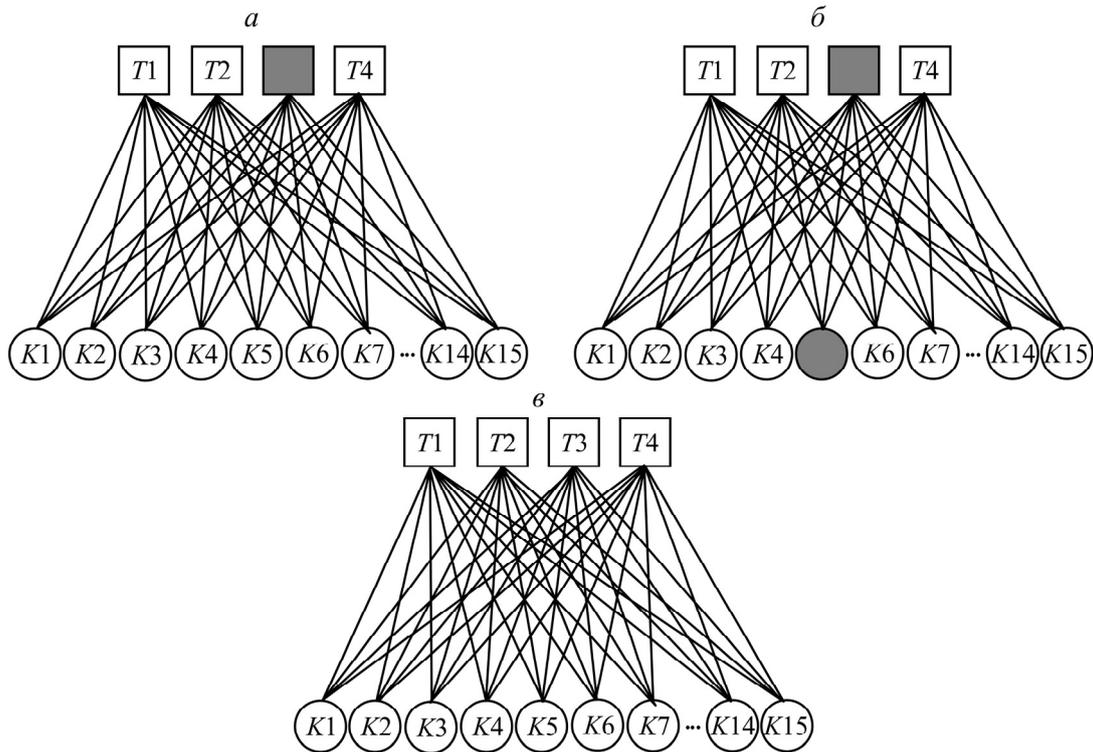


Рис. 1. Конфигурация теплоэнергетического комплекса по сценариям А (а), В (б), С (в)

Сценарий В. Комплекс включает в себя три потребителя известняка — $T1$, $T2$ и $T4$ (рис. 1б). В структуре 14 добывающих объектов, так как предполагается, что карьер $K5$ с наименьшими запасами прекратил добычу согласно данным, приведенным на рис. 2.

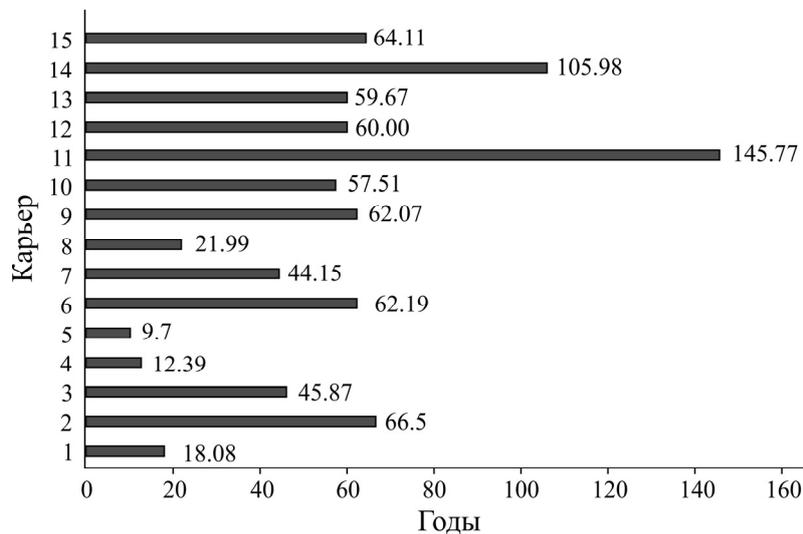


Рис. 2. Срок эксплуатации карьеров

Сценарий С. В комплексе четыре потребителя известняка — $T1$, $T2$, $T3$, $T4$. Поскольку на карьере $K5$ установлены новые запасы известняка, в конфигурации снова 15 потенциальных поставщиков (рис. 1в).

Необходимые параметры для многоатрибутного анализа включают:

— для карьеров: установленные запасы известняка — Z , млн т; производственная мощность — Q , тыс. т/год; срок эксплуатации рудника — T , лет; качество известняка — β_{CaCO_3} , %; цена производства сырья — C , у. е./т. Цены и затраты в работе выражаются в условных единицах, так как изменение стоимости и обменных курсов валют может привести к проблемам и путанице;

— для тепловых электростанций: необходимое годовое количество известняка, т/год, удельные затраты (расходы) на транспортировку известняка от карьеров до тепловых электростанций (тр), у. е./т; удельные общие затраты — цена сырья + транспортные расходы (ор), у. е./т (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Комплексные параметры для многоатрибутного анализа

Карьер	Z , млн т	Q , тыс. т/год	T , лет	β_{CaCO_3} , %	C , у. е./т	$T1$		$T2$		$T3$		$T4$	
						Потребление известняка, тыс. т/год							
						245		270		75		285	
						Расходы, у. е./т							
						тр	ор	тр	ор	тр	ор	тр	ор
K1	28.3	350	80.9	97.04	520	350.0	870.0	240.0	760.0	380.0	1490.0	880.0	1400.0
K2	13.3	200	66.5	99.57	520	567.4	1087.4	567.4	1087.4	313.4	833.4	1362.9	1882.9
K3	2.3	50	45.9	98.38	520	771.6	1291.6	771.6	1291.6	771.6	1291.6	2571.7	3091.7
K4	9.9	800	12.4	98.50	560	758.5	1318.5	715.3	1275.3	585.8	1145.8	1449.2	2009.2
K5	9.7	1000	9.7	97.54	570	771.6	1341.6	771.6	1341.6	771.6	1341.6	2312.7	2882.7
K6	9.3	150	62.2	94.39	650	758.5	1408.5	758.5	1408.5	585.8	1235.8	1362.9	2012.9
K7	7.2	162	44.2	97.97	580	844.8	1424.8	715.3	1295.3	931.2	1511.2	1708.3	2288.3
K8	6.6	300	22.0	97.00	600	844.8	1444.8	672.1	1272.1	931.2	1531.2	1708.3	2308.3
K9	17.4	280	62.1	95.19	570	672.1	1242.1	542.6	1112.6	629.0	1199.0	1708.3	2278.3
K10	17.3	300	57.5	97.04	630	466.7	1096.7	466.7	1096.7	466.7	1096.7	731.9	1361.7
K11	48.5	333	145.8	97.29	660	731.9	1391.9	731.9	1391.9	731.9	1391.9	547.5	1207.5
K12	18.0	300	60.0	95.34	540	715.3	1255.3	801.7	1341.7	499.5	1039.5	931.2	1471.2
K13	53.7	900	59.7	94.96	630	568.2	1198.2	568.2	1198.2	568.2	1198.2	771.6	1401.6
K14	79.5	750	106.0	97.02	630	568.2	1198.2	568.2	1198.2	568.2	1198.2	771.6	1401.6
K15	25.6	400	64.1	96.06	530	920.0	1450.0	920.0	1450.0	1362.9	1892.9	400.0	930.0

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОАТРИБУТНОЙ МОДЕЛИ

Для исследования применялась проверенная на практике модель Promethee, являющаяся одной из самых известных и широко используемых моделей в многокритериальном и многоатрибутном анализе [4 – 12]. В статье даны лишь основы концепции модели Promethee, которая ранжирует альтернативы путем их парного сравнения по каждому атрибуту / критерию [13, 14].

Чтобы применить модель Promethee, необходимо определить относительную значимость атрибута/критерия и тип функции предпочтения для каждой пары. Существует шесть основных типов функции: обычная, линейная, квазилинейная, градуированная, линейная с областью безразличия и гауссовская.

Процесс реализации математической модели является последовательным и включает в себя следующие этапы.

1. Определение отклонений путем сравнения пар:

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b), \quad j = 1, \dots, n,$$

$d_j(a,b)$ — разница между альтернативами a и b для каждого атрибута/критерия.

2. Определение функции предпочтения:

$$P_j(a,b) = F_j[d_j(a,b)], \quad j = 1, \dots, n,$$

в которой $P_j(a,b)$ — предпочтение альтернативы a над альтернативой b для каждого атрибута/критерия как функция $d_j(a,b)$.

3. Определение индекса предпочтения:

$$\forall a, b \in A, \quad \pi(a,b) = \sum_{j=1}^n P_j(a,b)w_j,$$

где $\pi(a,b)$ — сумма $P_j(a,b)$ для каждого атрибута/критерия, w_j — значимость j -го критерия.

4. Определение потока более высокого порядка (частичное ранжирование):

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a,x), \quad \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x,a),$$

$\phi^+(a)$, $\phi^-(a)$ — положительный или отрицательный поток для каждой альтернативы.

5. Определение чистого потока более высокого порядка (полное ранжирование):

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a),$$

$\phi(a)$ — чистый поток более высокого порядка для каждой альтернативы.

НАСТРОЙКА МОДЕЛИ

Установлено, что для полного модельного описания комплекса достаточно восьми признаков: мощность рудника — Q , т/год; срок эксплуатации рудника — T , лет; качество сырья — β_{CaCO_3} ; цена производства сырья — C , у. е./т, расходы на производство и транспортировку известняка для каждой теплоэлектростанции (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Категоризация атрибутов

Параметр	Q	T	β_{CaCO_3}	C	Расходы, у. е./т			
					$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
Метка атрибута	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	$A5$	$A6$	$A7$	$A8$
Значимость	0.15	0.10	0.70	0.55	0.70	0.70	0.70	0.70
Цель	max	max	max	min	min	min	min	min

На основе категоризации признаков и параметров комплекса определялись исходные многоатрибутные численные модели для трех сценариев A, B, C . Результаты численного моделирования представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Многоатрибутная модель

Карьер	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Сценарий А								
K1	350 000	80.86	97.04	520	870.00	760.00	—	1400.00
K2	200 000	66.50	99.57	520	1087.35	1087.35	—	1882.89
K3	50 000	45.87	98.38	520	1291.56	1291.56	—	3091.69
K4	800 000	12.39	98.50	560	1318.49	1275.31	—	2009.23
K5	1000 000	9.70	97.54	570	1341.56	1341.56	—	2882.66
K6	150 000	62.19	94.39	650	1408.49	1408.49	—	2012.89
K7	162 000	44.15	97.97	580	1424.83	1295.31	—	2288.26
K8	300 000	21.99	97.00	600	1444.83	1272.14	—	2308.26
K9	280 000	62.07	95.19	570	1242.14	1112.63	—	2278.26
K10	300 000	57.51	97.04	630	1096.66	1096.66	—	1361.86
K11	333 000	145.77	97.29	660	1391.86	1391.86	—	1207.46
K12	300 000	60.00	95.34	540	1255.31	1341.66	—	1471.17
K13	900 000	59.67	94.96	630	1198.16	1198.16	—	1401.56
K14	750 000	105.98	97.02	630	1198.16	1198.16	—	1401.56
K15	400 000	64.11	96.06	530	1450.00	1450.00	—	930.00
Сценарий В								
K1	350 000	80.86	97.04	520	870.00	760.00	—	1400.00
K2	200 000	66.50	99.57	520	1087.35	1087.35	—	1882.89
K3	50 000	45.87	98.38	520	1291.56	1291.56	—	3091.69
K4	800 000	12.39	98.50	560	1318.49	1275.31	—	2009.23
K5	—	—	—	—	—	—	—	—
K6	150 000	62.19	94.39	650	1408.49	1408.49	—	2012.89
K7	162 000	44.15	97.97	580	1424.83	1295.31	—	2288.26
K8	300 000	21.99	97.00	600	1444.83	1272.14	—	2308.26
K9	280 000	62.07	95.19	570	1242.14	1112.63	—	2278.26
K10	300 000	57.51	97.04	630	1096.66	1096.66	—	1361.86
K11	333 000	145.77	97.29	660	1391.86	1391.86	—	1207.46
K12	300 000	60.00	95.34	540	1255.31	1341.66	—	1471.17
K13	900 000	59.67	94.96	630	1198.16	1198.16	—	1401.56
K14	750 000	105.98	97.02	630	1198.16	1198.16	—	1401.56
K15	400 000	64.11	96.06	530	1450.00	1450.00	—	930.00
Сценарий С								
K1	350 000	80.86	97.04	520	870.00	760.00	1490.00	1400.00
K2	200 000	66.50	99.57	520	1087.35	1087.35	833.43	1882.89
K3	50 000	45.87	98.38	520	1291.56	1291.56	1291.56	3091.69
K4	800 000	12.39	98.50	560	1318.49	1275.31	1145.80	2009.23
K5	1000 000	9.70	97.54	570	1341.56	1341.56	1341.56	2882.66
K6	150 000	62.19	94.39	650	1408.49	1408.49	1235.8	2012.89
K7	162 000	44.15	97.97	580	1424.83	1295.31	1511.17	2288.26
K8	300 000	21.99	97.00	600	1444.83	1272.14	1531.17	2308.26
K9	280 000	62.07	95.19	570	1242.14	1112.63	1198.97	2278.26
K10	300 000	57.51	97.04	630	1096.66	1096.66	1096.66	1361.86
K11	333 000	145.77	97.29	660	1391.86	1391.86	1391.86	1207.46
K12	300 000	60.00	95.34	540	1255.31	1341.66	1039.46	1471.17
K13	900 000	59.67	94.96	630	1198.16	1198.16	1198.16	1401.56
K14	750 000	105.98	97.02	630	1198.16	1198.16	1198.16	1401.56
K15	400 000	64.11	96.06	530	1450.00	1450.00	1892.89	930.00

РЕЗУЛЬТАТЫ РАНЖИРОВАНИЯ

Многоатрибутный порядок производственных объектов по трем сценариям приведен в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Результаты многоатрибутного анализа по сценариям А, В, С

Карьер	Чистый поток			Положительный поток			Отрицательный поток		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
K1	0.691	0.688	0.486	0.786	0.787	0.693	0.095	0.099	0.207
K2	0.631	0.609	0.690	0.794	0.781	0.827	0.163	0.172	0.137
K3	-0.040	-0.077	-0.054	0.431	0.412	0.432	0.471	0.489	0.486
K4	0.095	0.039	0.176	0.509	0.482	0.556	0.414	0.443	0.380
K5	-0.269	—	-0.268	0.304	—	0.315	0.574	—	0.583
K6	-0.665	-0.673	-0.560	0.156	0.151	0.210	0.821	0.824	0.770
K7	-0.269	-0.299	-0.340	0.327	0.313	0.298	0.596	0.612	0.638
K8	-0.321	-0.348	-0.406	0.288	0.278	0.254	0.609	0.626	0.660
K9	-0.055	-0.088	-0.001	0.445	0.432	0.465	0.500	0.520	0.465
K10	0.341	0.335	0.399	0.608	0.608	0.647	0.267	0.273	0.248
K11	-0.144	-0.128	-0.196	0.379	0.391	0.362	0.524	0.519	0.558
K12	-0.121	-0.156	0.039	0.408	0.396	0.493	0.529	0.552	0.454
K13	0.041	0.027	0.079	0.467	0.456	0.484	0.426	0.429	0.404
K14	0.225	0.210	0.231	0.532	0.526	0.537	0.307	0.316	0.306
K15	-0.138	-0.138	-0.276	0.399	0.401	0.336	0.538	0.539	0.612

Согласно значениям чистого потока более высокого порядка (полное ранжирование), карьеры оцениваются как потенциальные поставщики известняка для теплоэнергетического комплекса (рис. 3).

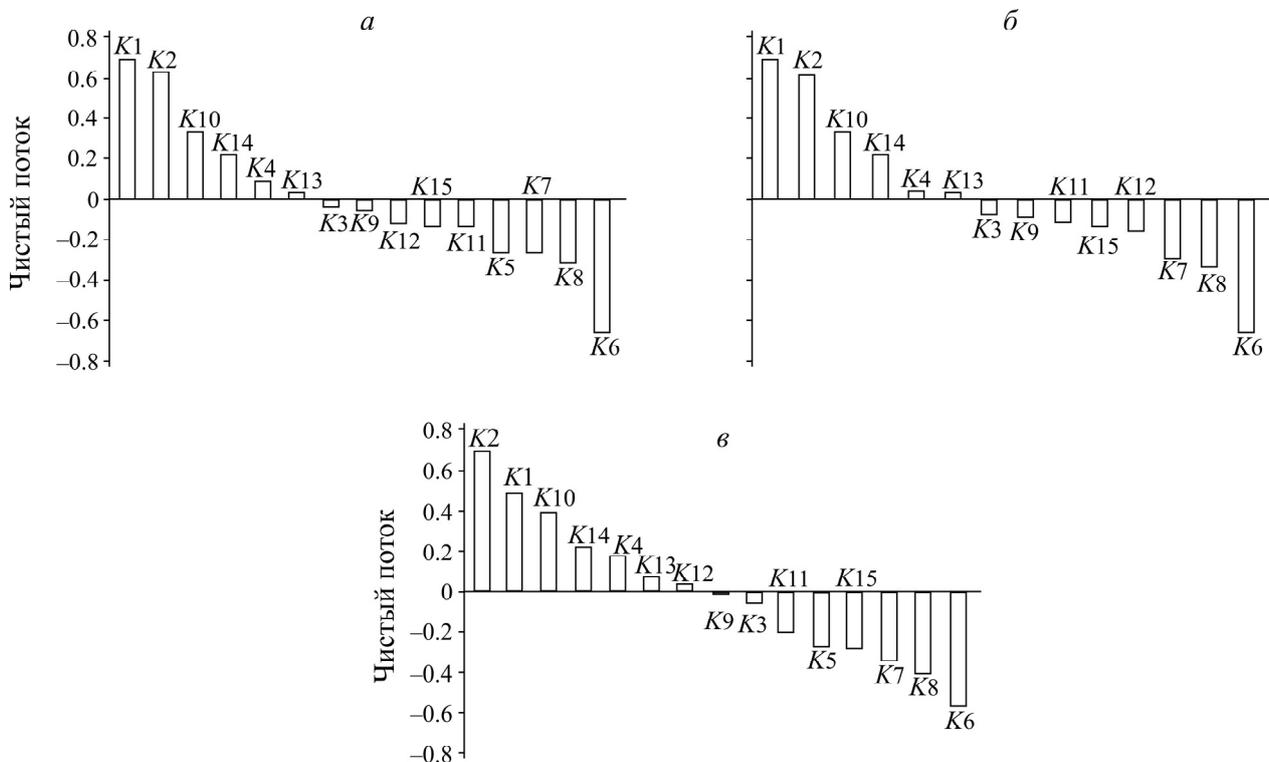


Рис. 3. Ранг карьеров по сценариям А (а), В (б), С (в)

Ранжирование первых восьми известняковых карьеров для сценария *A* (15 производственных и 3 пользовательских объекта) совпадает со сценарием *B* (14 производственных и 3 пользовательских объекта). Отличие по порядку после девятой позиции в рейтинговом списке обусловлено выходом из системы карьера *K5*. Порядок карьеров в рейтинге по сценарию *C* (15 производственных и 4 пользовательских объекта) изначально отличается от сценариев *A* и *B*, что является следствием изменения параметров, вызванного вводом в эксплуатацию тепловой электростанции *T3*.

Ранжирование карьеров определяет приоритет в выборе поставщика, но не план поставок известняка в теплоэнергетический комплекс. Например, согласно сценарию *C*, карьеры *K2*, *K1*, *K10* и *K14* с мощностями по производству известняка 350, 200, 300 и 750 тыс. т соответственно (общая сумма 1600 тыс. т) обеспечивают годовую потребность теплоэнергетического комплекса в сырье в размере 875 тыс. т. В случае поставки известняка по данному сценарию производственные мощности карьеров *K2*, *K1* и *K10* были бы задействованы на 100 %, а карьера *K14* — на 3.33 % от производственных возможностей. В этой связи четвертый поставщик привлекается только для дополнения необходимых мощностей, рационально ли это — вопрос для дополнительного анализа.

ВЫВОДЫ

Анализ ранжирования показал, что небольшие и средние изменения параметров объектов поставки известняка не влияют на стабильность решения. Многоатрибутный план снабжения также будет относительно стабильным. Однако тестирование чувствительности рангов с различной относительной значимостью показало сильную корреляцию, что указывает на необходимость более тщательного и объективного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Study** on the possibility of supplying limestone for flue gas desulfurization at the Kostolac CHP, Nikola Tesla CHP and new thermal facilities, Mining Institute and Tekon Belgrade, 2014. — 228 p.
2. **Šubaranović T., Vujić S., Radosavljević M., Dimitrijević B., Ilić S., and Jagodić Krunić D.** Multi-attribute scenario analysis of protection of Drmno open pit mine against groundwater, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 2. — P. 280–286.
3. **Vujić S. and Hudej M.** Multi-variable assessment of risk in selection of location and the way of open pit mines opening, *Proc. V Balkan Mining Congress, Ohrid*, 2013. — P. 1–6.
4. **Amankwah H.** Mathematical optimization models and methods for open-pit mining, Department of Mathematics Linköping University, Linköping, 2011. — 38 p.
5. **Baloyi V. D. and Meyer L. D.** The development of a mining method selection model through a detailed assessment of multi-criteria decision methods, Elsevier, *Results in Eng.*, 2020, Vol. 8. — 72 p.
6. **Dimitrijević B., Vujić S., Matic I., Majianac S., Praštalo J., Radosavljević M., and Čolaković V.** Multi-criteria analysis of land reclamation methods at Klenovnik open pit mine, Kostolac coal basin, *J. Min. Sci.*, 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 319–325.
7. **Hudej M., Vujić S., Radosavljević M., and Ilić S.** Multivariable selection of the main mine shaft location, *J. Min. Sci.*, 2013, Vol. 49, No. 6. — P. 950–954.

8. **Matos P. V., Cardadeiro E., Silva J. A., and Muylder C. F.** The use of multi-criteria analysis in the recovery of abandoned mines: a study of intervention in Portugal, *RAUSP Management J.*, 2018, Vol. 53. — P. 214–224.
9. **Opricović S.** Multi-criteria system optimization in construction. Belgrade, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 1998. — 302 p.
10. **Patyk M., Bodziony P., and Krysa Y.** A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of equipment selection for surface mining, *Energies*, 2021, Vol. 14. — P. 1–14.
11. **Stanojevic R.** Optimization of macroeconomic models, Belgrade, Velatra, 2001. — 512 p.
12. **Brans J. P., Vincke P., and Mareschal B.** How to select and how to rank projects — The promethee method, *European J. Operational Res.*, 1986, Vol. 24, No. 2. — P. 228–238.
13. **Nikolić I. and Borović S.** Multi-criteria optimization. Belgrade, Center of Military Schools of the Yugoslav Army, 1996. — 378 p.
14. **Vujić S.** Quantitative models for decision-making support in mining planning and design, Mining Institute Belgrade, 2023. — 254 p.

*Поступила в редакцию 03/V 2023
После доработки 05/VIII 2023
Принята к публикации 15/IX 2023*