



МЕЂУСЕКТОРСКА АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ЗАГАЂЕЊА РАДОМ
ТЕРМОЕЛЕКТРАНА НИКОЛА ТЕСЛА И ПОВРШИНСКИХ КОПОВА
ЛИГНИТА РБ КОЛУБАРА РЕПУБЛИКА СРБИЈА

INTERSECTORAL ANALYSIS OF POLLUTION PROCESSES CAUSED
BY THE OPERATION OF THE THERMAL POWER PLANT NIKOLA TESLA
AND OPEN PIT LIGNITE MINES, MB KOLUBARA, REPUBLIC OF SERBIA

DOI: 10.5937/RG2502153M

Стручни рад
Expert paper

Светомир Максимовић¹
Жељко Праштало²
Раде Шарац²

Svetomir Maksimović¹
Željko Praštalo²
Rade Šarac²

¹Академија инжењерских наука Србије, Србија

¹Academy of Engineering Sciences of Serbia

²Рударски институт д.о.о. Београд

²Mining institute Ltd. Belgrade

svetomir.maksimovic@gmail.com

svetomir.maksimovic@gmail.com

Примљен 29. 9. 2025; Рецензиран 23. 10. 2025; Прихваћен 23. 10. 2025.

Received 29 September 2025; Received in revised version 23 October 2025; Accepted 23 October 2025

Сажетак: *Проштеривање уља као стратегичке енергетике је изражено у многим европским државама. Није спорно да планирање енергетике мора уважити еколошке и економске циљеве. Владе и креатори политике морају енергетску одрживост уравнијено сироводити и дати могућност да се енергетска сигурност оствари у континуитету. То значи да се веза између енергије, животне средине и економије мора објективно ускладити. Међусекторска анализа је управо алат који уружа могућност таквог сагледавања.*

У раду је само једним делом, применом међусекторске анализе, анализиран однос неких загађивача насталих у процесу производње у термоелектранама „Никола Тесла“ (ТЕНТ) и површинским коповима лигнита у РБ „Колубара“ и производних резултата у производном делу Јавног предузећа „Електрик Србије“.

Кључне речи: МЕЂУСЕКТОРСКЕ АНАЛИЗЕ, ЗАГАЂЕНОСТ, ПОВРШИНСКИ КОПОВИ, ТЕРМОЕЛЕКТРАНЕ

Abstract: *The expulsion of coal as a strategic energy source is expressed in many European countries. It is indisputable that energy planning must take into account environmental and economic goals. Governments and policymakers must implement energy sustainability in a balanced manner and provide an opportunity for energy security to be achieved in continuity. This means that the relationship between energy, the environment and the economy must be objectively harmonized. Intersectoral analysis is precisely the tool that enables such perception.*

The paper only analyzes in one part, by applying cross-sectoral analysis, the relationship between some pollutants generated in the production process of the Thermal Power Plants Nikola Tesla (TPPNT) and open-pit lignite mines at the Kolubara coal mine, and production results in the production part of the Public Enterprise «Electric Power Industry of Serbia».

Key words: CROSS-SECTORAL ANALYSES, POLLUTION, OPEN-PIT MINING, THERMO-POWER PLANTS

УВОД

Европска енергетска заједница је анализирала и установила да 16 термоелектрана на угаљ у земљама Западног Балкана загађује регион и Европу више него свих осталих 250 термоелектрана на угаљ у Европи [1]. Без обзира на тачност наведене компарације проблем је евидентан и има негативну еколошку димензију.

Ако се посматрају финални производи, угаљ и електрична енергија, анализа процеса загађивања је веома захтевна и сложена. Производња угља и електричне енергије проузрукује емисију штетних материја и то не само у њиховом производном делу, него и у претходним производним активностима. Многе „чисте“ привредне гране користећи електричну енергију и угаљ у процесу производње су индиректни загађивачи и то се даље преноси на више нивое.

Познато је да је производња електричне енергије у термоелектранама на лигнит у РС највећи појединачни загађивач. Ради се о старим термокапацитетима које сагоревају лигнит све мање топлотне моћи.

Укупна инсталисана снага ТЕНТ износи 3.346 MW и годишње се произведе око 28.484 GWh електричне енергије. Производња угља у РБ „Колубара“ одвија се на четири активна копа и износи у просеку 30 милиона тона годишње. За потребе ТЕНТ испоручује се 28,5 милиона тона, а за финалну потрошњу, укључујући и прераду угља 1,5 милиона тона.

Међусекторска анализа пружа могућност да се утврди на који начин компоненте финалне порошње утичу на укупну загађеност, који део укупних емисија иде на терет личне потрошње, извоза итд. и колико се загађеност избегава увозом електричне енергије и угља. За анализу процеса загађивања користе се коефицијенти загађивања. За анализу човекове животне средине Леонтијеф у међусекторску анализу укључује додатне индустријске гране које се баве заштитом животне средине („Antipollution – industries“). У овом раду су приказане методе међусекторске анализе процеса загађивања у производном делу ЈП „Електропривреда Србије“.

INTRODUCTION

The European Energy Community has analyzed and established that 16 coal-fired power plants in the Western Balkan countries pollute the region and Europe more than all other 250 coal-fired power plants in Europe [1]. Regardless of the accuracy of the above comparison, the problem is evident and has a negative environmental dimension.

If we look at the final products, coal and electricity, the analysis of the pollution process is very demanding and complex. The production of coal and electricity causes the emission of harmful substances, not only in their production part, but also in previous production activities. Many “clean” industries using electricity and coal in the production process are indirect pollutants and this is further transmitted to higher levels.

It is known that the production of electricity in lignite-fired power plants in the Republic of Serbia is the largest single polluter. These are old thermal capacities burning lignite of decreasing thermal power.

The total installed capacity of TPPNT is 3,346 MW producing approximately 28,484 GWh of electricity annually. Coal production at the Kolubara coal mine takes place at four active mines with an average of 30 million tons per year. For the needs of TPPNT 28.5 million tons are delivered, and 1.5 million tons for final consumption, including coal processing.

Cross-sectoral analysis provides an opportunity to establish how the components of final consumption affect total pollution, what part of total emissions is borne by personal consumption, exports, etc., and how much pollution is avoided by importing electricity and coal. Pollution coefficients are used for analyzing pollution processes. For the analysis of the human environment, Leontief includes additional industrial branches that deal with environmental protection in the intersectoral analysis (“Antipollution – industries”). This paper presents methods for the intersectoral analysis of pollution processes in the production part of the PE “Electric Power Industry of Serbia”.

ЛЕОНТИЕВА МАЋУСЕКТОРСКА АНАЛИЗА - ИНВЕРЗНА МАТРИЦА ТЕХНИЧКИХ КОЕФИЦИЈЕНАТА

Да би се успоставила анализа загађивања животне средине мора се поћи од методолошких основа модела међусекторске анализе, трансакционе улазно - излазне табеле и техничких коефицијената. За разлику од техничких коефицијената који показују директне потребе по јединици производње производног сектора (j) за потребе другог производног сектора (i), елементи инверзне матрице техничких коефицијената указују на начин распрострања укупних ефеката по целом производном систему који настају повећањем јединице екстерне реализације одређеног производног сектора.

Леонтиева анализа на примеру отвореног статичког инпут-оутпут модела има општи облик:

$$X = Ax + Y \quad (1)$$

Односно,

And,

$$(I - A)x = Y \quad (2)$$

где су:

- x - вектор производње;
- Y - вектор финалне потрошње;
- X - јединична матрица;
- A - матрица техничких коефицијената.

Where:

- x - production vector;
- Y - final consumption vector;
- X - unit matrix;
- A - technical coefficient matrix.

Даљим решавањем по x , једначина (2) добија следећи облик:

By further solving by x , equation (2) takes the following form:

$$x = (X - A)^{-1}Y \quad (3)$$

Овако изведена једначина изражава трошкове реализације одређеног производног сектора (j) у функцији од екстерних трошкова свих производних сектора. Елементи инверзне матрице $(X - A)^{-1}$ показују за колико ће се повећати трошкови реализације j-тог производног сектора ако додатни екстерни трошкови i-тог производног сектора порасту за јединицу.

The equation thus derived expresses the costs of realization of a certain production sector (j) as a function of the external costs of all production sectors. The elements of the inverse matrix $(X - A)^{-1}$ show by how much the costs of realization of the jth production sector will increase if the additional external costs of the ith production sector increase by one unit.

На основу података добијених из Извештаја о пословању ЈП „Електропривреда Србије“ за анализирану годину, урађена је основна

Based on the data obtained from the Business Report of the PE “Electric Power Industry of Serbia” for the analyzed year, the basic input -

улазно - излазна матрица производних сектора система РБ „Колубара“ и ТЕНТ и приказана је у табели 1.

output matrix of the production sectors of the MB “Kolubara” and TPPNT systems was prepared and is shown in Table 1.

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

RESEARCH RESULTS

Треба имати у виду и следеће параметре:

The following parameters should also be taken into account:

- Средња вредност доње топлотне моћи угља износи 7.390 kJ/kg.
- Инвестициона улагања у копове и термоблокове немају утицаја на основну улазно - излазну матрицу.
- Са повећањем цене испоручене електричне енергије пропорционално расте и цена угља.

- The average value of the lower heating value of coal is 7,390 kJ/kg.
- Investments in mines and thermal blocks have no impact on the basic input-output matrix.
- With an increase in the price of supplied electricity, the price of coal increases proportionally.

Табела 1, Основна улазно - излазна табела производних сектора РБ „Колубаре“ и ТЕНТ приказана је у 10⁶ РСД
Table 1, The basic input-output table of the production sectors of MB «Kolubara» and TPPNT is shown in 10⁶ RSD

| Примаоци Users Даваоци Donors | | Репродукциона потрошња / Reproduction consumption | | | | | | | | УРП TRC | ФП FC | РС DF | |
|--|--------------------------|---|------------|------------|------------|----------|--|-------------------|-------------|------------|----------|----------|-------------|
| | | Производња и прерада угља Coal production and processing | | | | | Производња електричне Енергије у ТЕ Electricity production in TPPs | | | | | | |
| | | К-1 K-1 | К-2 K-2 | К-3 K-3 | К-4 K-4 | КП KP | ТЕНТ-1 TPPNT-1 | ТЕНТ-2 TPPNT-2 | ТЕК TPPK | | | | ТЕМ TPPM |
| К-1 K-1 | ПШУ Coal prod & proc. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 196 | 3.063 | 0 | 0 | 3.259 | 77 | 3.336 |
| К-2 K-2 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 639 | 6.609 | 0 | 0 | 7.248 | 185 | 7.433 |
| К-3 K-3 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.364 | 269 | 1.712 | 538 | 9.883 | 0 | 9.883 |
| К-4 K-4 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 300 | 0 | 0 | 50 | 0 | 350 | 60 | 410 |
| КП KP | | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 52 | 3 | 59 | 3.000 | 3.059 |
| ТЕНТ-1 TPPNT-1 | ПЕТЕ El.cons.inTPPs | 36 | 117 | 0 | 0 | 0 | 925 | 0 | 0 | 0 | 1.078 | 17.506 | 18.584 |
| ТЕНТ-2 TPPNT-2 | | 35 | 115 | 0 | 0 | 0 | 0 | 516 | 0 | 0 | 666 | 16.700 | 17.366 |
| ТЕК TPPK | | 0 | 0 | 574 | 42 | 118 | 0 | 0 | 129 | 0 | 863 | 3.737 | 4.600 |
| ТЕМ TPPM | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 30 | 1.170 | 1.200 |
| Укупно Total | | 71 | 232 | 574 | 42 | 422 | 9.124 | 10.457 | 1.943 | 571 | 23.436 | 42.435 | 65.871 |
| Производња Production | | 3.265 | 7.201 | 9.309 | 368 | 2.637 | 9.460 | 6.909 | 2.657 | 629 | 42.435 | | |
| РСР AF | | 3.336 | 7.433 | 9.883 | 410 | 3.059 | 18.584 | 17.366 | 4.600 | 1.200 | 65.871 | | |

| | |
|---|--|
| ППУ - Производња и прерада угља у РБ Колубара CPP - Coal production and processing at MB | РС - Расподељена средства DF - Distributed funds |
| ПЕЕТЕ - Производња електричне енергије у термоелектранама (ТЕНТ) PEETE - Electricity production in TPPs (TPPNT) | РСР - Расположива средства AF - Available funds |
| УРП - Укупна репродукциона потрошња TRC - Total reproduction consumption | ПК - Површински коп OPM - Open pit mine |
| ФП - Финална потрошња FC - Final consumption | ТЕНТ - Термоелектрана „Никола Тесла“ TPPNT - Thermal Power Plant „Nikola Tesla“ |

У моделу смо издвојили следеће вредности:

In the model, we have extracted the following values:

а) Техничке коефицијенте (нормативи производње)

a) Technical coefficients (production standards)

$$A_{[aij]} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,01055 & 0,17638 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,034384 & 0,380571 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,396255 & 0,01549 & 0,372174 & 0,448333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,098071 & 0 & 0 & 0,01087 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001308 & 0 & 0 & 0,011304 & 0,00250 \\ 0,010791 & 0,015740 & 0 & 0 & 0 & 0,049774 & 0 & 0 & 0 \\ 0,010492 & 0,015471 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,029713 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05808 & 0,10244 & 0,038575 & 0 & 0 & 0,02804 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02500 \end{vmatrix}$$

$$(I - A)^{-1} = \begin{vmatrix} 1.002 & 0.003 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.011 & 0.183 & 0.000 & 0.000 \\ 0.005 & 1.007 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.036 & 0.396 & 0.000 & 0.000 \\ 0.005 & 0.007 & 1.023 & 0.040 & 0.019 & 0.427 & 0.020 & 0.392 & 0.470 \\ 0.000 & 0.000 & 0.001 & 1.001 & 0.099 & 0.000 & 0.000 & 0.013 & 0.001 \\ 0.000 & 0.000 & 0.001 & 0.001 & 1.002 & 0.000 & 0.000 & 0.012 & 0.003 \\ 0.011 & 0.017 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.053 & 0.009 & 0.000 & 0.000 \\ 0.011 & 0.016 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.001 & 1.039 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.061 & 0.108 & 0.051 & 0.026 & 0.001 & 1.054 & 0.028 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.026 \end{vmatrix}$$

Елементи инверзне матрице $(I - A)^{-1}$ показују да повећање финалне потрошње Y_1 за јединицу узрокује повећање производње угља на К-1 (x_1) од 1,002 јединица, повећање производње угља на К-2 (x_2) од 0,005 јединица, повећање производње угља на К-3 (x_3) од 0,005 јединица, повећање производње електричне енергије у ТЕНТ-1 (x_6) од 0,011 јединица и ТЕНТ-2 (x_7) од 0,011 јединица. Истим поступком се утврђује финална потрошња електричне енергије у ТЕНТ-1 (y_6) за јединицу, повећањем производње електричне енергије (x_6) од 1,053 јединица, повећањем производње угља на К-1 (x_1) од

The elements of the inverse matrix $(I - A)^{-1}$ show that an increase in final consumption Y_1 per unit causes an increase in coal production at K-1 (x_1) of 1 TPPNT.002 units, an increase in coal production at K-2 (x_2) of 0.005 units, an increase in coal production at K-3 (x_3) of 0.005 units, an increase in electricity production at TPPNT-1 (x_6) of 0.011 units and TENT-2 (x_7) of 0.011 units. The same procedure determines the final electricity consumption in TPPNT -1 (y_6) per unit, by increasing electricity production (x_6) by 1.053 units, increasing coal production at K-1 (x_1) by 0.011 units, K-2 (x_2) by 0.036 units, K-3 (x_3) by 0.427 units, increasing

0,011 јединица, К-2 (x_2) од 0,036 јединица, К-3 (x_3) од 0,427 јединица, повећање производње електричне енергије у ТЕНТ-2 (x_7) од 0,001 јединица и ТЕК (x_8) од 0,026 јединица.

Слично техничким коефицијентима a_{ij} , коефицијенти загађења z_j^k дефинисани су на основу претпоставке линеарне зависности између обима производње производног сектора j , с једне стране, и количине емитоване штетне материје k у сектору j с друге стране [1]:

$$e_j^k = z_j^k x_j \quad (4)$$

$$z_j^k = e_j^k / x_j \quad (5)$$

где су:

e_j^k - Укупне емисије штетне материје k у производном сектору j ;

x_j - Обим производње j -тог сектора;

z_j^k - Коефицијент загађења j -тог сектора (представља специфичну емисију штетне материје k по јединици производа производног сектора j).

electricity production in TENT-2 (x_7) by 0.001 units and TEK (x_8) by 0.026 units.

Similar to the technical coefficients a_{ij} , the pollution coefficients z_j^k are defined based on the assumption of a linear dependence between the volume of production of the production sector j , on the one hand, and the amount of emitted harmful substance k in sector j on the other hand [1]:

where:

e_j^k - Total emissions of harmful substance k in production sector j ;

x_j - Production volume of the j th sector;

z_{kj} - Pollution coefficient of the j th sector (represents the specific emission of harmful substance k per unit of product of the production sector j).

Матрица емисије E добија следећи облик:

The emission matrix E takes the following form:

$$E = \begin{bmatrix} e_1^1 & e_2^1 & e_3^1 & \dots & e_n^1 \\ e_1^2 & e_2^2 & e_3^2 & \dots & e_n^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ e_1^r & e_2^r & e_3^r & \dots & e_n^r \end{bmatrix} \quad (6)$$

Применом релације (5) и матрице (6) добија се матрица загађења z :

By applying relation (5) and matrix (6), the pollution matrix z is obtained:

$$z = \begin{bmatrix} z_1^1 & z_2^1 & z_3^1 & \dots & z_n^1 \\ z_1^2 & z_2^2 & z_3^2 & \dots & z_n^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ z_1^r & z_2^r & z_3^r & \dots & z_n^r \end{bmatrix} \quad (7)$$

Матрица емисије исказана преко z има следећу релацију:

The emission matrix expressed in terms of z has the following relation:

$$E = z * D(x) \quad (8)$$

And,

$$z = E * [D(x)]^{-1} \quad (9)$$

Где је $D(x)$ дијагонална матрица вектора x , а $[D(x)]^{-1}$ њена инверзна матрица.

Where $D(x)$ is the diagonal matrix of the vector x , and $[D(x)]^{-1}$ is its inverse matrix.

На основу прегледа документације Јавног предузећа „Електропривреда Србије“, друге расположиве документације и рачунски изведених вредности, формирана је табела емисије штетних материја (табела 2).

Based on a review of the documentation of the Public Enterprise “Electric Power Industry of Serbia”, other available documentation and calculated values, a table of emissions of harmful substances was formed (Table 2).

Табела 2, Емитиране количине штетних материја у производним секторима
Table 2, Emissions of harmful substances in production sectors

| Врста емисија Type of emissions | | Емитиране количине (t/год.) / Emissions (t/year) | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|---|------------|------------|------------|----------|---|------------------|------------|------------|
| | | Производња и прерада угља Coal production and processing | | | | | Производња електричне енергије у термоелектранама Electricity production in thermal power plants | | | |
| | | К-1 К-1 | К-2 К-2 | К-3 К-3 | К-4 К-4 | КП КР | ТЕНТ-1 ТПНТ-1 | ТЕНТ-2 ТПНТ-2 | ТЕК ТПК | ТЕМ ТПМ |
| Е | CO ₂ | 15.000 | 20.000 | 30.000 | 5.000 | 21.500 | 9.750.000 | 9.600.000 | 2.500.000 | 750.000 |
| | SO ₂ | 7.121 | 9.943 | 12.317 | 211 | 794 | 88.000 | 89.000 | 15.000 | 5.000 |
| | NO _x | 2.857 | 3.653 | 4.897 | 98 | 361 | 16.900 | 16.700 | 4.500 | 1.640 |

Применом релације (9) добијене су следеће вредности:

Applying relation (9) the following values were obtained:

$$z = \begin{bmatrix} 4,4964 & 2,6906 & 3,0354 & 12,1951 & 7,0283 & 524,6475 & 552,7680 & 543,4750 & 624,9975 \\ 2,1346 & 1,3376 & 1,2462 & 0,5146 & 0,2595 & 4,7353 & 5,1246 & 3,2608 & 4,1666 \\ 0,8564 & 0,4914 & 0,4955 & 0,2390 & 0,1180 & 0,9094 & 0,9616 & 0,9782 & 1,3667 \end{bmatrix}$$

Из матрице z (7) преузет је само један ред коефицијената загађивања (у овом случају загађивач је сумпор-диоксид SO₂):

From the matrix z (7) only one row of pollution coefficients is taken (in this case the pollutant is sulfur dioxide SO₂):

$$z = [2,1346 \ 1,3376 \ 1,2462 \ 0,5146 \ 0,2595 \ 4,7363 \ 5,1246 \ 3,2608 \ 4,1666] \quad (10)$$

За међусекторску анализу процеса загађивања, вектор z из релације (10) се доводи у облик дијагоналне матрице $D(z)$. Међусобна емисиона повезаност производних сектора добија се мултиплицирањем једначине (3) с леве стране са матрицом $D(z)$ [1].

For the cross-sector analysis of the pollution process, the vector z from relation (10) is brought into the form of a diagonal matrix $D(z)$. The mutual emission connection of the production sectors is obtained by multiplying equation (3) on the left side with the matrix $D(z)$ [1].

$$D(z) * x = D(z) * (I - A)^{-1} * y \quad (11)$$

Множењем матрице $D(z)$ и матричног мултипликатора $(I - A)^{-1}$ добијамо „матрични мултипликатор емисије“, у овом случају за штетну емисију SO₂.

By multiplying the matrix $D(z)$ and the matrix multiplier $(I - A)^{-1}$, we obtain the “matrix emission multiplier”, in this case for the six-phase emission of SO₂.

Са v ћемо означити матрични производ $D(z) * (I - A)^{-1}$. За штетну материју SO₂ матрични мултипликатор емисије има следећи облик:

We will denote the matrix product $D(z) * (I - A)^{-1}$ by v . For the harmful substance SO₂, the matrix emission multiplier has the following form:

$$v = \begin{pmatrix} 2,1389 & 0,0064 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0235 & 0,3906 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0067 & 1,3470 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0496 & 0,5455 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0062 & 0,0087 & 1,2749 & 0,0498 & 0,0237 & 0,5321 & 0,0249 & 0,4885 & 0,5857 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0005 & 0,5151 & 0,0509 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0067 & 0,0005 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0002 & 0,0002 & 0,2600 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0031 & 0,0008 \\ 0,0521 & 0,0805 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 4,9863 & 0,0426 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0564 & 0,0820 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0051 & 5,3244 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,1989 & 0,0282 & 0,1663 & 0,0848 & 0,0033 & 3,4369 & 0,0913 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 4,2749 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Из матрице v може се закључити да је сваки финални производ (произведени угаљ за широку потрошњу) на К-1 оптерећен укупном емисијом и то: директном емисијом К-1 у висини од 2,1389 јединица и индиректним емисијама од 0,0067 јединица са К-3, 0,0521 јединице из ТЕНТ-1 и 0,0564 из ТЕНТ-2.

$$\sum z_i \cdot a'_3 = 2,1389 + 0,0067 + 0,0521 + 0,0564 = 2,2541 \quad (13)$$

Сходно претходном примеру може се на исти начин утврдити да је финални производ (електрична енергија) у ТЕ оптерећен укупном емисијама:

$$\sum z_i \cdot a'_6 = 4,9863 + 0,0496 + 0,5321 + 0,0051 + 0,0848 = 5,6579 \quad (14)$$

тј. директном емисијом ТЕНТ-1 у висини 4,9863 јединица и индиректним емисијама од К-1 у висини 0,0235 јединица, ПК-2 у вредности 0,0496 јединица, К-3 у вредности 0,5321 јединица, ТЕНТ-2 у вредности 0,0051 јединица и ТЕК у вредности 0,0848 јединица.

Увођењем вектора Y у једначину (13) добијамо укупну емисију SO_2 (Табела 3).

From the matrix v it can be concluded that each final product (produced coal for general consumption) at K-1 is loaded with total emissions, namely: direct emissions K-1 in the amount of 2.1389 units and indirect emissions of 0.0067 units from K-3, 0.0521 units from TPPNT-1 and 0.0564 from TPPNT-2.

According to the previous example, it can be determined in the same way that the final product (electricity) in TE is loaded with total emissions:

i.e. direct emission of TЕНТ-1 in the amount of 4.9863 units and indirect emissions from K-1 in the amount of 0.0235 units, OPM-2 in the amount of 0.0496 units, K-3 in the amount of 0.5321 units, TPPNT-2 in the amount of 0.0051 units and TPPK in the amount of 0.0848 units.

By introducing the vector Y into equation (13) we obtain the total emission of SO_2 (Table 3).

Табела 3, Производ „матричној мултипликатора емисије“ и финалне потрошње, емисија настала због SO_2
Table 3, Product of the «emission matrix multiplier» and final consumption, emission caused by SO_2

| | Емисија настала због SO_2 / SO_2 Emissions | | | | | | | | | Укупно Total |
|------------|--|------------|------------|------------|----------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-----------------|
| | К-1 К-1 | К-2 К-2 | К-3 К-3 | К-4 К-4 | КП КР | ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | ТЕНТ-2 ТППНТ-2 | ТЕК ТППК | ТЕМ ТППМ | |
| К-1 К-1 | 164,70 | 1,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 411,39 | 6.543,73 | 0,00 | 0,00 | 7.121,00 |
| К-2 К-2 | 0,52 | 249,20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 868,30 | 8.824,98 | 0,00 | 0,00 | 9.943,00 |
| К-3 К-3 | 0,48 | 1,61 | 0,00 | 3,00 | 71,10 | 9.314,19 | 415,83 | 1.825,52 | 685,27 | 12.317,00 |
| К-4 К-4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 30,91 | 154,46 | 0,00 | 0,00 | 25,04 | 0,59 | 211,00 |

| | Емисија настала због SO ₂ / SO ₂ Emissions | | | | | | | | | Укупно Total |
|-------------------|--|------------|------------|------------|----------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-----------------|
| | К-1 К-1 | К-2 К-2 | К-3 К-3 | К-4 К-4 | КР КР | ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | ТЕНТ-2 ТППНТ-2 | ТЕК ТППК | ТЕМ ТППМ | |
| КР КР | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 781,47 | 0,00 | 0,00 | 11,58 | 0,94 | 794,00 |
| ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | 4,01 | 14,90 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 87.269,67 | 711,42 | 0,00 | 0,00 | 88.000,00 |
| ТЕНТ-2 ТППНТ-2 | 4,34 | 15,17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 89,28 | 88.891,21 | 0,00 | 0,00 | 89.000,00 |
| ТЕК ТППК | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,69 | 498,90 | 1.484,51 | 55,10 | 12.853,00 | 106,80 | 15.000,00 |
| ТЕМ ТППМ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5.000,00 | 5.000,00 |
| Укупно Total | 174,05 | 282,06 | 0,00 | 35,61 | 1.505,93 | 99.437,34 | 105.442,27 | 14.715,14 | 5.793,60 | 227.386,00 |

Укупна емисија SO₂ износи 227.386 јединица, од тога у К-1 7.121 јединица, К-2 9.943 јединица, К-3 12.317 јединица итд. Емисионих 164,7 јединица у К-1 настало је због 411,4 јединица у ТЕНТ-1 и 6.543,7 јединица у ТЕНТ-2. То значи да је финална продаја угља у К-1 проузроковала 164,7 јединица директних и 0,52, 0,48, 4,01 и 4,34 јединица индиректних емисија SO₂ односно 174,05 укупних емисионих јединица. С друге стране, финална продаја струје у ТЕНТ-1 проузроковала је 87.269,67 јединица директних, а 411,39; 868,30; 9.314,19; 89,28 и 1.484,51 јединица индиректних емисија SO₂ тј. укупно 99.437,34 емисионих јединица.

Претходно урађена анализа за SO₂ примењена је и при анализи штетних материја CO₂ и NO_x и добијене су следеће емисије (табеле 4 и 5).

Total SO₂ emissions are 227,386 units, of which 7,121 units in Q-1, 9,943 units in Q-2, 12,317 units in Q-3, etc. The 164.7 emission units in Q-1 were due to 411.4 units in TPPNT -1 and 6,543.7 units in TPPNT-2. This means that the final sale of coal in Q-1 caused 164.7 units of direct and 0.52, 0.48, 4.01 and 4.34 units of indirect SO₂ emissions, or 174.05 total emission units. On the other hand, the final sale of electricity in TPPNT -1 caused 87,269.67 units of direct, and 411.39; 868.30; 9,314.19; 89.28 and 1,484.51 units of indirect SO₂ emissions, i.e. a total of 99,437.34 emission units.

The previously performed analysis for SO₂ was also applied to the analysis of harmful substances CO₂ and NO_x and the following emissions were obtained (Tables 4 and 5).

Табела 4, Производ „матричног мултипликатора емисије“ и финалне потрошње, Емисија настала због CO₂
 Table 4, Product of the «emission matrix multiplier» and final consumption, Emissions due to CO₂

| | Емисије настале због CO ₂ / CO ₂ Emissions | | | | | | | | | Укупно Total |
|-------------------|--|------------|------------|------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-----------------|
| | К-1 К-1 | К-2 К-2 | К-3 К-3 | К-4 К-4 | КР КР | ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | ТЕНТ-2 ТППНТ-2 | ТЕК ТППК | ТЕМ ТППМ | |
| К-1 К-1 | 34,92 | 2,50 | 0 | 0 | 0 | 866,55 | 13.740,76 | 0 | 0 | 14.956,73 |
| К-2 К-2 | 1,03 | 501,24 | 0 | 0 | 0 | 1.696,33 | 17.793,85 | 0 | 0 | 19.992,45 |
| К-3 К-3 | 1,17 | 3,92 | 0 | 7,28 | 173,10 | 22.689,53 | 1.013,69 | 4.446,66 | 1.669,12 | 30.004,47 |
| К-4 К-4 | 0 | 0 | 0 | 732,44 | 3.621,90 | 0 | 0 | 592,31 | 14,27 | 4.960,92 |
| КР КР | 0 | 0 | 0 | 0,42 | 21.126,90 | 0 | 0 | 315,03 | 24,69 | 21.467,04 |
| ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | 444,37 | 1.650,01 | 0 | 0 | 0 | 9.671.256,22 | 78.854,06 | 0 | 0 | 9.752.204,66 |

| | Емисије настале због CO ₂ / CO ₂ Emissions | | | | | | | | | Укупно Total |
|-------------------|--|------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------|-----------------|
| | К-1 К-1 | К-2 К-2 | К-3 К-3 | К-4 К-4 | КР КР | ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | ТЕНТ-2 ТППНТ-2 | ТЕК ТППК | ТЕМ ТППМ | |
| ТЕНТ-2 ТППНТ-1 | 468,19 | 1.636,20 | 0 | 0 | 0 | 9.677,32 | 9.591.242,53 | 0 | 0 | 9.603.024,24 |
| ТЕК ТППК | 0 | 0 | 0 | 3.521,72 | 83.151,60 | 247.365,03 | 9.076,45 | 2.140.638,06 | 17.804,24 | 2.501.557,10 |
| ТЕМ ТППМ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 750.259,46 | 750.259,46 |
| Укупно Total | 1.261,68 | 3.793,87 | 0 | 4.261,86 | 108.073,50 | 9.953.550,98 | 9.711.721,34 | 2.145.992,06 | 769.771,78 | 22.698.427,07 |

Табела 5, Производ „мајричног мултипликатора емисије“ и финалне потрошње, Емисија настала због NO_x
Table 5, Product of the «emission matrix multiplier» and final consumption, Emissions due to NO_x

| | Емисије настале због NO _x / NO _x Emissions | | | | | | | | | Укупно Total |
|-------------------|--|------------|------------|------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-----------------|
| | К-1 К-1 | К-2 К-2 | К-3 К-3 | К-4 К-4 | КР К-Р | ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | ТЕНТ-2 ТППНТ-1 | ТЕК ТППК | ТЕМ ТППМ | |
| К-1 К-1 | 66,07 | 0,48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 164,56 | 2.616,89 | 0,00 | 0,00 | 2.848.00 |
| К-2 К-2 | 0,18 | 91,54 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 309,86 | 3.249,82 | 0,00 | 0,00 | 3.651.40 |
| К-3 К-3 | 0,19 | 0,65 | 0,00 | 1,19 | 28,20 | 3.704,30 | 165,33 | 725,73 | 272,49 | 4.898.08 |
| К-4 К-4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 14,35 | 71,10 | 0,00 | 0,00 | 11,58 | 0,23 | 97,26 |
| КР КР | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 354,60 | 0,00 | 0,00 | 5,23 | 0,35 | 360,19 |
| ТЕНТ-1 ТППНТ-1 | 0,77 | 2,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 16.762,75 | 136,94 | 0,00 | 0,00 | 16.903,31 |
| ТЕНТ-2 ТППНТ-2 | 0,82 | 2,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 17,51 | 16.684,97 | 0,00 | 0,00 | 16.706,15 |
| ТЕК ТППК | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,34 | 149,70 | 444,65 | 16,70 | 3.852,85 | 32,06 | 4.502,30 |
| ТЕМ ТППМ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1.640,57 | 1.640,57 |
| Укупно Total | 68,03 | 98,37 | 0,00 | 21,89 | 603,60 | 21.403,63 | 22.870,65 | 4.595,39 | 1.945,70 | 51.607,26 |

Укупне емисије SO₂, CO₂ и NO_x се односе на сагоревање лигнита у термоблоквима, а у мањој мери за функционисање механизације на коповима, самоупале унутар копа и на рудничкој депонији. Како се ради о емисијама штетних гасова које су више пута веће од емисија у термоелектранама на угаљ у Европи, менаџери ЕПС морају сагледати све механизме њиховог смањења. У току су радови на решавању проблема одсумпоравања гасова у термоблоквима ТЕНТ, а рудничка технологија откопавања и третирања угља треба свести на оптимални ниво. Примена међусекторске анализе на годишњем нивоу може указати

Total SO₂, CO₂ and NO_x emissions relate to the combustion of lignite in thermal blocks, and to a lesser extent to the functioning of the mine machinery, self-ignition within the mine and at the mine dump. Since these are emissions of harmful gases that are several times higher than emissions from coal-fired thermal power plants in Europe, EPS's managers must consider all mechanisms for their reduction. Work is underway to solve the problem of gas desulphurization in TPPNT thermal blocks, and mining technology for mining and coal treatment should be reduced to an optimal level. The application of cross-sectoral analysis on an annual basis can indicate the effec-

на ефикасност свих уведених мера појединачно за сваки производни сектор и укупно стање у ЕПС.

ЗАКЉУЧАК

Познавање укупног оптерећења финалних производа емисијама штетних материја значајно је за спровођење заштите животне средине у економској политици не само Јавног предузећа „Електропривреда Србије“ већ и Републике Србије. Технолошке поступке на површинским коповима и термоелектранама на угаљ могуће је ефикасно анализирати применом међусекторске анализе. Приказани рад је конкретан приступ анализе процеса загађивања животне средине у производном сектору „Електропривреде Србије“ и може послужити менаџерима ЕПС у праћењу и дефинисању приоритета у ефикасном смањењу процеса загађивања штетним материјама.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

- [1] RERI Renewables and Environmental Regulatory Institute, Na Zapadnom Balkanu živimo u otrovnom oblaku, april 2022.
- [2] Гереке З., Чупић М.: Међусекторска анализа процеса загађивања човекове животне средине, СИМ-ОП-ИС, Херцег Нови, 1978.
- [3] Вујич С., Максимович С., Радосављевић М., Крунич Д.: Межотраслево моделирање и горнодобивајућа промисленност, Журнал Физико-техническе проблеме развојке полезних ископаемих, No 5, 2018, 78-87, УДК 622:338, DOI:10.15372/ФТ-ПРПИ20180508.
- [4] Maksimović S., Milinović Z., Miljanović I., Boševski S., Hudej M., Benović T.: Application of input-output analysis in corporate enterprises of epis thermal power sector, 3rd Bal-

ken Mining Congress, 01-03.10.2009., Izmir, Turkey, 2009, pp. 491-498, ISBN: 978-9944-89-782-2.

CONCLUSION

Knowing the total load of final products with emissions of harmful substances is important for the implementation of environmental protection in the economic policy not only of the Public Enterprise “Electric Power Industry of Serbia” but also of the Republic of Serbia. Technological processes in open-pit mines and coal-fired thermal power plants can be effectively analyzed by applying cross-sector analysis. The presented work is a concrete approach to the analysis of the environmental pollution process in the production sector of the «Electric Power Industry of Serbia» and can serve EPS’s managers in monitoring and defining priorities in effectively reducing the process of pollution with harmful substances.

- [5] Maksimović S., Polavder S., Partial model of production increase depending on the selected final consumption component, 7th Balkan Mining Congress, Prijedor, 2017, 177-182, ISBN 978-99955-681-7-7 (Faculty of Mining), COBOSS.RS-ID 6803736.
- [6] Fazal R., Aziz Ur Rehman S., Ishaq Bhatti M., Ur Rehman A., Arooj F., Hayat U., A Cross-Sectoral Investigation of the Energy–Environment–Economy Causal Nexus in Pakistan: Policy Suggestions for Improved Energy Management.
- [7] Документација Јавног предузећа Електропривреда Србије.