

УТИЦАЈ ДЕПОНИЈЕ КОМУНАЛНОГ ОТПАДА НА ЗАГАЂИВАЊЕ ВАЗДУХА – ПРИМЈЕР ДЕПОНИЈЕ „ЦРНИ ВРХ” КОД ЗВОРНИКА, БОСНА И ХЕРЦЕГОВИНА

Душица Пешевић^{1*} и Небојша Кнежевић²

¹Универзитет у Бањој Луци, Природно-математички факултет, Бања Лука, Република Српска, БиХ

²Универзитет у Бањој Луци, Рударски факултет, Приједор, Република Српска, БиХ

Сажетак: Проучавана је површинска емисија депонијског гаса, као и имисионе концентрације аерополутаната током 8 мјесеци како би се процијенио утицај депоније „Црни врх“ код Зворника на квалитет ваздуха. Депонијски гасови су гасови који настају као посљедица природног процеса разградње органског отпада који се одлаже на депонијама. Ови гасови могу се ослобађати у атмосферу из депонија и имају озбиљан утицај на животну средину. Један од највећих проблема у вези са депонијским гасовима је њихов утицај на климатске промјене. Поред тога, депонијски гасови такође могу имати локални утицај на квалитет ваздуха и здравље људи, посебно у случају високих концентрација сумпор-водоника, који има јак и непријатан мирис и може изазвати респираторне и друге здравствене проблеме код људи. Резултати мјерења емисије депонијског гаса са високим процентом присутног кисеоника (од 16.38 % до 19.46 %) и ниским концентрацијама угљен-диоксида (мање од 1 %) и метана (од 3.5 % до 4.1 %) показују да је на мјесту мјерења присутан свјеже одложени отпад у којем је доминантан аеробни процес разградње. Упоредо са мјерењем емисије депонијског гаса мјерене су и имисионе концентрације 11 параметара за праћење квалитета ваздуха: угљен-моноксида (СО), сумпор-диоксида (SO₂), озона (O₃), азотних оксида (NO, NO₂, NO_x), укупних лебдећих честица (УЛЧ), лебдећих честица (PM₁₀), укупних угљоводоника (ТНС), метана (CH₄) и неметанских угљоводоника (NMHC). Анализом добијених резултата мјерења наведених параметара може се закључити да измјерене концентрације полутаната у ваздуху на локалитету регионалне депоније „Црни врх“ не прелазе граничне вриједности према Уредби о граничним вриједностима квалитета ваздуха.

Кључне ријечи: депонија, утицај, квалитет ваздуха, депонијски гас, отпад, депонија „Црни врх”.

Original scientific paper

IMPACT OF MUNICIPAL WASTE LANDFILL ON AIR POLLUTION – THE EXAMPLE OF “CRNI VRH” LANDFILL NEAR ZVORNIK, BOSNIA AND HERZEGOVINA

Dušica Pešević^{1*} and Nebojša Knežević²

¹University of Banja Luka, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Banja Luka, Republic of Srpska, B&H

²University of Banja Luka, Faculty of Mining, Prijedor, Republic of Srpska, B&H

Abstract: The surface emission of landfill gas was studied, as well as the imission concentrations of air pollutants during 8 months in order to assess the impact of the “Crni vrh” landfill near Zvornik on air quality. Landfill gases are gases that arise as a result of the natural process of decomposition of organic waste that is disposed of in landfills. These gases can be released into the atmosphere from landfills and have a serious environmental impact. One of the biggest problems with landfill gases is their impact on climate change. In addition, landfill gases can also have a local impact on air quality and human health, especially in the case of high concentrations of hydrogen sulphide that has a strong and unpleasant odour and can cause respiratory and other health problems in humans. The results of measuring the emission of landfill gas with a high percentage of oxygen present (ranging from 16.38 % to 19.46 %) and low concentrations of carbon dioxide (less than 1 %) and methane (ranging from 3.5 % to 4.1 %) show that freshly deposited waste in which the aerobic decomposition process is dominant is present at the measurement site. Along with the measurement of landfill gas emission, the emission concentrations of 11 air quality monitoring parameters were also measured as follows: carbon monoxide (CO), sulphur dioxide (SO₂), ozone (O₃), nitrogen oxides (NO, NO₂, NO_x), total suspended particles (TSP), suspended particles (PM₁₀), total hydrocarbons (THC), methane (CH₄) and non-methane hydrocarbons (NMHC). The measurement result analysis of the mentioned parameter leads to a conclusion that the measured pollutant concentrations in the air at the location of the regional landfill “Crni vrh” do not exceed the limit values according to the Regulation on limit values of air quality.

Keywords: landfill, impact, air quality, landfill gas, waste, “Crni vrh” landfill.

* Аутор за кореспонденцију: Душица Пешевић, Универзитет у Бањој Луци, Природно-математички факултет, Младена Стојановића 2, 78000, Бања Лука, Република Српска, Босна и Херцеговина, Е-mail: dusica.pesevic@pmf.unibl.org
Corresponding author: Dušica Pešević, University of Banja Luka, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Mladena Stojanovića 2, 78000 Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina, E-mail: dusica.pesevic@pmf.unibl.org

УВОД

Пораст продукције чврстог отпада као резултат економског развоја и раста становништва постао је један од најзначајнијих еколошких проблема нашег времена. Око 1.3 милијарде тона отпада годишње генерише се широм свијета, а Свјетска банка је прогнозирила да ће горња цифра вјероватно порасти на 2.2 милијарде тона до 2025. године, односно до скоро 4 милијарде тона до 2100. године. Депоноване отпада сматра се најекономичнијом и најприхваћенијом методом одлагања отпада (Kumar & Sharma, 2014; Cudjoe & Acquah, 2021) посебно у земљама у развоју. Иако би депоноване отпада требало да буде посљедње у хијерархији управљања отпадом због највеће емисије гасова стаклене баште у поређењу са другим системима управљања отпадом, оно је и даље веома уобичајено широм свијета (Zuberi & Ali, 2015). Европска унија (ЕУ) и остатак „златне милијарде“ који уживају висок животни стандард стварају око 420 милиона тона комуналног отпада, од чега се најмање 210 милиона тона (50 %) одлаже на депоније (Themelis & Ulloa, 2007; Ciula et al., 2018). Посматрано на глобалном нивоу депоновани чврсти комунални отпад износи негдје близу 1.5 милијарди тона (Murphy & McKeogh, 2004; Themelis & Ulloa, 2007).

Према подацима ЕУ статистике у Босни и Херцеговини је 95 % комуналног отпада одложено на депоније будући да се употреба међутретмана као што су спаљивање, гасификација и рециклажа активно не практикују за ефикасно уклањање отпада у овој држави. Према подацима Агенције за статистику Босне и Херцеговине, процијењена количина произведеног комуналног отпада у 2018. години износи 1243973 t, односно 355 kg по становнику годишње или 0.97 kg по становнику на дан.

Ова студија представља наставак истраживања у области управљања отпадом у Босни и Херцеговини (Pešević, 2022; Pešević & Marković, 2018; Pešević & Crnogorac, 2008; Topić et al., 2013). Примарни проблем који се обично налази на депонијама је производња високих концентрација метана и угљен-диоксида, те испарљивих органских једињења која су узрок

INTRODUCTION

The increase in solid waste generation as a result of economic development and population growth has become one of the most significant environmental problems of our time. About 1.3 billion tons of waste are generated annually worldwide, and the World Bank has forecast that the above figure will probably increase to 2.2 billion tons by 2025, or to almost 4 billion tons by 2100. Landfilling is considered the most economical and accepted method of waste disposal (Kumar & Sharma, 2014; Cudjoe & Acquah, 2021) especially in developing countries. Although landfilling should be the last in the waste management hierarchy due to the highest greenhouse gas emissions compared to other waste management systems, it is still very common worldwide (Zuberi & Ali, 2015). The European Union (EU) and the rest of the “golden billion” who enjoy a high standard of living generate about 420 million tons of municipal waste, out of which at least 210 million tons (50 %) are landfilled (Themelis & Ulloa, 2007; Ciula et al., 2018). Observed at the global level, the deposited solid municipal waste amounts to somewhere close to 1.5 billion tons (Murphy & McKeogh, 2004; Themelis & Ulloa, 2007).

According to the data of EU statistics in Bosnia and Herzegovina, 95 % of municipal waste is deposited in landfills, since the use of intermediate treatments such as incineration, gasification and recycling are not actively practised for efficient waste removal in this country. According to the data of the Agency for Statistics of Bosnia and Herzegovina, the estimated amount of municipal waste generated in 2018 was 1243973 t, i.e. 355 kg per inhabitant per year or 0.97 kg per inhabitant per day.

This study is a continuation of research in the field of waste management in Bosnia and Herzegovina (Pešević, 2022; Pešević & Marković, 2018; Pešević & Crnogorac, 2008; Topić et al., 2013). The primary problem commonly found in landfills is the production of

многих непријатних мириса. У Босни и Херцеговини је у последње двије деценије отпочео процес изградње санитарних депонија са циљем ограничавања емисија загађујућих материја у спољашњу средину. Међутим, одлагање отпада и даље представља пријетњу људском здрављу и животној средини стварањем депонијског гаса и различитих полутаната (Tansel & Inanloo, 2019) и представља потенцијалне здравствене ризике (Zhang et al., 2021; Marti et al., 2014), јер садрже потенцијално токсична хемијска једињења, која настају различитим хемијским, физичким и биолошким процесима разградње отпада. Депонијски гас такође може да садржи једињења у траговима као што су: алифатични и ароматични угљоводоници, халогенована једињења и једињења која садрже силицијум до укупне концентрације од 2000 mg/m^3 (Schweigkofler & Niessner, 2001), као и друга хемијска једињења као што су: алкани, циклоалкани, терпени, алкохоли и кетони, једињења сумпора и друга једињења (Allen et al., 1997). Ароматична једињења, главна група неметанских угљоводоника у депонијском гасу, сматрају се једним од најопаснијих типова загађивача ваздуха са неуротоксичним, канцерогеним и тератогеним својствима. Бензен, толуен, етилбензол, ксилен и стирен били су доминантна ароматична једињења у депонијском гасу, који су документовани и у аеробним и анаеробним условима (Duan et al., 2021).

Управљање депонијским гасовима је значајан изазов за све земље које се суочавају са проблемом одлагања отпада на депоније. Депонијски гасови су мјешавина гасова који настају у процесу разградње органског отпада на депонијама. Квалитативно, депонијски гас у великој мјери зависи од фазе распадања отпада унутар депоније. Ови гасови углавном се састоје од метана, угљен-диоксида, азота и кисеоника, али такође могу садржати и друге гасове, укључујући и штетне супстанце попут сумпор-водоника и амонијака. У стабилизovanом метаногеном стању, што је фаза од интереса из перспективе енергетског искориштавања, главне компоненте депонијског гаса су метан (од 40 % до 60 %), угљен-диоксид (од 35 % до 50 %), азот (од 0 % до 20 %), кисеоник (од

high concentrations of methane and carbon dioxide, and volatile organic compounds that are the cause of many unpleasant odours. In Bosnia and Herzegovina, in the last two decades, the process of building sanitary landfills has started with the aim of limiting the pollutant emissions into the external environment. However, waste disposal still poses a threat to human health and the environment through the generation of landfill gas and various pollutants (Tansel & Inanloo, 2019) and poses potential health risks (Zhang et al., 2021; Marti et al., 2014), as they contain potentially toxic chemical compounds, which are generated by different chemical, physical and biological processes of waste decomposition. Landfill gas may also contain trace compounds such as: aliphatic and aromatic hydrocarbons, halogenated compounds and silicon-containing compounds up to a total concentration of 2000 mg/m^3 (Schweigkofler & Niessner, 2001), as well as other chemical compounds such as: alkanes, cycloalkanes, terpenes, alcohols and ketones, sulphur compounds and other compounds (Allen et al., 1997). Aromatic compounds, the main group of non-methane hydrocarbons in landfill gas, are considered one of the most dangerous types of air pollutants with neurotoxic, carcinogenic and teratogenic properties. Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene were the dominant aromatic compounds in landfill gas, which were documented under both aerobic and anaerobic conditions (Duan et al., 2021).

Landfill gas management is a significant challenge for all countries facing the problem of landfill waste. Landfill gases are a mixture of gases produced in the process of decomposition of organic waste in landfills. Qualitatively, landfill gas largely depends on the stage of waste decomposition inside the landfill. These gases mainly consist of methane, carbon dioxide, nitrogen and oxygen, but can also contain other gases, including harmful substances such as hydrogen sulphide and ammonia. In the stabilised methanogenic state, which is the phase of interest from

0 % до 1 %) и сумпор-водоник (од 50 ppm до 200 ppm) (Bove & Lunghi, 2006). Депонијски гасови имају веома штетан утицај на животну средину, како на локалном, тако и на глобалном нивоу. На локалном нивоу, депонијски гасови могу изазвати непријатан мирис и довести до загађења ваздуха, што може негативно утицати на здравље људи и животиња у околини депоније. Депонијски гасови могу бити штетни за здравље људи, посебно у случају високих концентрација сумпор-водоника које могу изазвати различите респираторне и друге здравствене проблеме. Депонијски гасови могу изазвати и локално загађење воде и земљишта, јер се њиховим емитовањем у земљиште могу проузроковати проблеми са загађењем подземних вода.

На глобалном нивоу, депонијски гасови доприносе ефекту стаклене баште, чиме се повећава глобално загријавање и климатске промјене. Метан, који чини велики дио депонијских гасова, гас је са ефектом стаклене баште и има око 25 пута већи утицај на загријавање атмосфере од угљен-диоксида. Депонијски гас је рангиран као трећи највећи извор глобалних антропогених емисија метана, одговоран за отприлике 9–12 % тих емисија у 2005. години (IPCC, 2007). У Сједињеним Америчким Државама (САД) депоније чврстог комуналног отпада представљају такође трећи највећи антропогени извор емисија метана, чинећи приближно 14.5 % ових емисија у 2020. години (US EPA, 2022). Према овом извору, емисије метана са депонија комуналног отпада на простору САД у 2020. години биле су приближно једнаке емисији из око 20.3 милиона путничких возила која се возе годину дана или емисији CO₂ из скоро 11.9 милиона домаћинстава која користе енергију током једне године.

Како би се смањио утицај депонијских гасова на животну средину, постоји неколико мјера које се могу примијенити. Да би се одстранили негативни утицаји и неконтролисано ширење депонијског гаса на савременим санитарним депонијама изводи се планско сакупљање и спаљивање у контролисаним условима у циљу смањења њихове емисије у атмосферу. С друге стране, депонијски гас сматра

the perspective of energy utilisation, the main components of landfill gas are methane (from 40 % to 60 %), carbon dioxide (from 35 % to 50 %), nitrogen (from 0 % to 20 %), oxygen (from 0 % to 1 %) and hydrogen sulphide (from 50 ppm to 200 ppm) (Bove & Lunghi, 2006). Landfill gases have a very harmful environmental impact, both locally and globally. At the local level, landfill gases can cause unpleasant odours and lead to air pollution, which can negatively affect the health of people and animals around the landfill. Landfill gases can be harmful to human health, especially in the case of high concentrations of hydrogen sulphide that can cause various respiratory and other health problems. Landfill gases can also cause local water and soil pollution, because their emission into the soil can cause problems with groundwater pollution.

Globally, landfill gases contribute to the greenhouse effect, increasing global warming and climate change. Methane, which makes up a large part of landfill gases, is a greenhouse gas and has about 25 times more influence on atmospheric warming than carbon dioxide. Landfill gas is ranked as the third largest source of global anthropogenic methane emissions, responsible for approximately 9–12 % of these emissions in 2005 (IPCC, 2007). In the United States of America (USA), municipal solid waste landfills are also the third largest anthropogenic source of methane emissions, accounting for approximately 14.5 % of these emissions in 2020 (US EPA, 2022). According to this source, methane emissions from municipal waste landfills in the USA in 2020 were approximately equal to the emissions from about 20.3 million passenger vehicles driven for a year or the CO₂ emissions from nearly 11.9 million households using energy for a year.

In order to reduce the environmental impact of landfill gases, there are several measures that can be applied. In order to eliminate the negative impact and the uncontrolled landfill gas dispersion at modern sanitary landfills, planned collection and incineration are carried out under controlled conditions in order to reduce their emissions into the at-

се обновљивом енергијом која може замијени-ти фосилна горива. Могу се развити и при-мијенити технологије за пречишћавање депонијских гасова, што омогућава коришћење њихове енергетске вриједности (гријање, топла вода, струја, гориво у возилима) (Bicheldey & Latushkina, 2010; Sisani et al., 2016).

Европска комисија усвојила је директиву 31/1999/СЕ по којој је сакупљање и спаљивање на бакљи обавезно, препоручујући коришћење енергије овог гаса. Ако има топлотну вриједност од око 18 MJ/Nm³, овај гас може се искористити за добијање топлоте и/или електричне енергије.

У Босни и Херцеговини, управљање депонијским гасовима представља изазов, с обзиром на то да су многе депоније неуређене и неадекватно опремљене за сакупљање и пречишћавање гасова. У том смислу, потребно је уложити напоре у развој система за управљање депонијским гасовима и обезбиједити одговарајућу инфраструктуру за ову врсту технологије како би се смањио негативни утицај депонијских гасова на животну средину. Такође, важно је да се смањи количина органског отпада која се одлаже на депонију, како би се смањила емисија метана. У ту сврху, потребно је подстаћи примјену других метода за управљање органским отпадом, попут компостирања или производње биогаза.

Циљ овог рада је да утврди састав депонијских гасова током посматраног периода, као и имисионе концентрације аерополутаната како би се процијенио утицај депоније „Црни врх“ код Зворника на квалитет ваздуха.

МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

Истраживано подручје

Локација депоније се налази непосредно испод истоименог превоја Црни врх, у долини лијеве притоке Црног потока. Удаљена је од центра Зворника око 20 km и налази се у близини магистралног пута Зворник – Тузла (Сл. 1). У ближој околини нема насеља. Локацију депоније одредили су представници локалне власти Зворник. Надморска висина

mosphere. On the other hand, landfill gas is considered a renewable energy that can replace fossil fuels. Technologies for the purification of landfill gases can be developed and applied, enabling the use of their energy value (heating, hot water, electricity, vehicle fuel) (Bicheldey & Latushkina, 2010; Sisani et al., 2016).

The European Commission adopted directive 31/1999/CE, according to which the collection and flaring is mandatory, recommending the use of energy from this gas. If it has a calorific value of about 18 MJ/Nm³, this gas can be used to obtain heat and/or electricity.

In Bosnia and Herzegovina, landfill gas management is a challenge, given that many landfills are unorganised and inadequately equipped for gas collection and purification. In this sense, it is necessary to invest efforts in the development of landfill gas management systems and to provide appropriate infrastructure for this type of technology in order to reduce the negative environmental impact of landfill gases. Also, it is important to reduce the amount of organic waste that is disposed of in the landfill, in order to reduce the emission of methane. For this purpose, it is necessary to encourage the application of other methods for organic waste management, such as composting or biogas generation.

The aim of this paper is to determine the composition of landfill gases during the observed period, as well as the emission concentrations of air pollutants in order to assess the air quality impact of the “Crni vrh” landfill near Zvornik.

MATERIALS AND METHODS

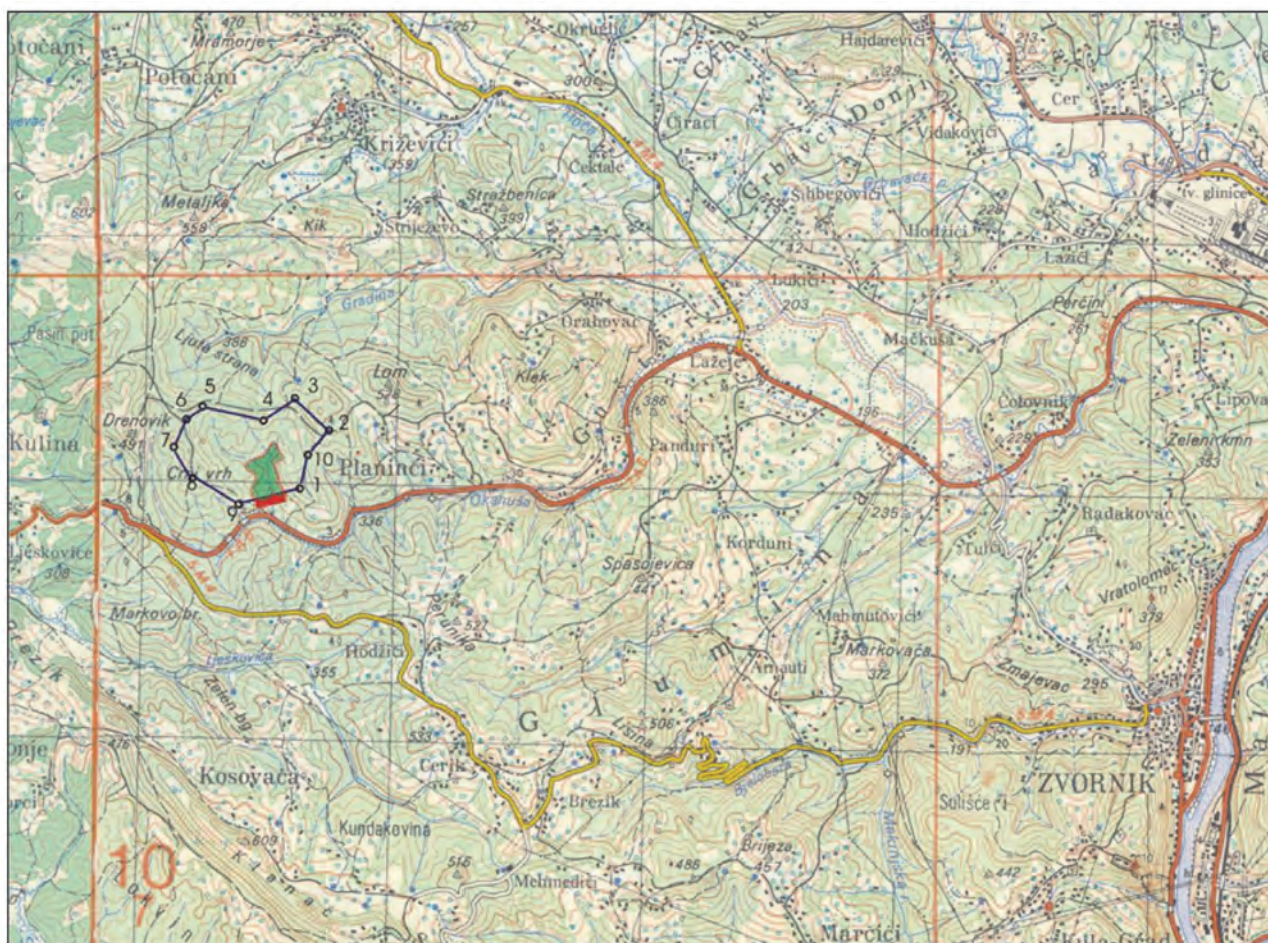
Research Area

The landfill is located directly below the eponymous Crni vrh pass, in the valley of the left tributary of Crni potok. It is about 20 km away from the centre of Zvornik and is located near the main road Zvornik – Tuzla (Fig. 1). There are no settlements in the immediate vicinity. The landfill location was determined by representatives of the Zvornik local government. The altitude of the

ДУШИЦА ПЕШЕВИЋ И НЕБОЈША КНЕЖЕВИЋ
DUŠICA PEŠEVIĆ AND NEBOJŠA KNEŽEVIĆ

регионалне депоније „Црни врх“ је од 365.00 m н. в. (кота ножице насипа) до 395.00 m н. в. (кота круне насипа – II фаза изградње). Истражно подручје припада брежуљкасто-брдовитим теренима источног дијела Републике Српске. Површина му је избраздана бројним потоцима и јаругама између којих се налазе брда или издужене брдске косине. Истраживани терен се налази у границама 300 m до 500 m н. в. (Црни врх 500 m; Дреновик 490.4 m).

“Crni vrh” regional landfill ranges from 365.00 m a. s. l. (elevation of the embankment toe) to 395.00 m a. s. l. (elevation of the embankment crown – II phase of construction). This research area belongs to the hilly terrain of eastern Republic of Srpska. Its surface is furrowed by numerous streams and ravines between which there are hills or elongated mountain slopes. The research terrain is located between 300 m and 500 m a. s. l. (Crni vrh 500 m; Drenovik 490.4 m).



Сл. 1. Просторни положај санитарне депоније „Црни Врх“
Fig. 1. Spatial location of the “Crni Vrh” sanitary landfill

Санитарна регионална депонија „Црни врх“ код Зворника почела је са радом 2017. године. Изградњом ове депоније ријешено је питање одлагања отпада из 7 општина у Републици Српској (Зворник, Братунац, Власеница, Милићи, Осмаци, Сребреница и Шековићи), као и двије општине у Федерацији Босне и

“Crni vrh” sanitary regional landfill near Zvornik started operating in 2017. The construction of this landfill solved the issue of waste disposal from 7 municipalities in the Republic of Srpska (Zvornik, Bratunac, Vlasenica, Milići, Osmaci, Srebrenica and Šekovići), as well as two municipalities in Fed-

Херцеговине (Калесија и Сапна). Општина Живинице у Федерацији Босне и Херцеговине такође привремено користи ову депонију за одлагање отпада.

Депонија располаже укупном површином од 69 ха (од тога 4.8 ха отпада на тијело депоније, а остатак на заштитни појас), капацитета 40000 t годишње за период од 20 година. Ова депонија налази се у близини старе депоније „Црни врх“ која је била велики еколошки проблем у овој регији, због лошег управљања отпадом. Нова санитарна депонија изграђена је у складу са европским стандардима, тако да задовољава све потребне критеријуме за одлагање отпада. Према подацима ЈП „Регионална депонија“ Зворник, на ову санитарну депонију је у току 2020. године депоновано 18349.67 t комуналног чврстог отпада што представља просјек од 58.81 t по дану и смањење у односу на 2019. годину од непуних 8 %.

Ова санитарна депонија представља значајан корак у рјешавању проблема неодогавајућег управљања отпадом у регији, а њеним коришћењем смањује се емисија штетних гасова у ваздух, као и загађивање воде и земљишта. На депонији је изграђена санитарна ћелија за одлагање отпада (постављена је непропусна HDPE фолија на површини од 42000 m²), а запремина активних ћелија је 687000 m³ (Министарство за просторно уређење, грађевинарство и екологију Републике Српске, 2020). Систем за дегасификацију је пасивног типа са бунарима за дегасификацију, а процједна вода се рециркулише на депонију, као што је предвиђено еколошком дозволом. Депонија посједује лагуну за процједне воде у којој се врши биолошко прочишћавање процједних вода. Такође, ова депонија има и слојевити систем одлагања отпада, који је осмишљен тако да спријечи загађење земљишта и подземних вода. Све ове активности допринијеле су смањењу емисије штетних гасова и унапређењу управљања отпадом у региону, што је позитивно утицало на животну средину и здравље људи у овом подручју. Ипак, процес дегасификације депоније је врло осјетљив и захтијева стално праћење квалитете ваздуха и гасова који настају разградњом отпада.

eration of Bosnia and Herzegovina (Kalesija and Sapna). Živinice municipality in Federation of Bosnia and Herzegovina also temporarily uses this landfill for waste disposal.

It has a total area of 69 ha (out of which 4.8 ha are occupied by the landfill body, and the rest by the protective belt), with a capacity of 40000 t per year for a period of 20 years. This landfill is located near the old “Crni vrh” landfill, which was a major environmental problem in this region, due to poor waste management. The new sanitary landfill was built in accordance with European standards, so it meets all the necessary waste disposal criteria. According to the data of JP “Regional Landfill” Zvornik, 18349.67 tons of municipal solid waste were deposited at this sanitary landfill in 2020, which represents an average of 58.81 t per day and a decrease compared to 2019 of less than 8 %.

This sanitary landfill represents a significant step in solving the problem of inadequate waste management in the region, and its use reduces the emission of harmful gases into the air, as well as water and soil pollution. A sanitary cell for waste disposal was built at the landfill (impervious HDPE film was installed on an area of 42000 m²), and the volume of active cells is 687000 m³ (Министарство за просторно уређење, грађевинарство и екологију Републике Српске, 2020). The degassing system is of the passive type with degassing wells, and the leachate is recirculated to the landfill, as required by the environmental permit. It has a leachate lagoon where biological purification of leachate is carried out. Also, this landfill has a layered waste disposal system, which is designed to prevent soil and groundwater pollution. All these activities have contributed to the reduction of harmful gas emissions and the improvement of waste management in the region, which has had a positive effect on the environment and human health in this area. However, the landfill degassing process is very sensitive and requires constant monitoring of the quality of air and gases generated by waste decomposition.

Мјеста за узорковање

У циљу праћења емисије депонијских гасова са предметне депоније извршено је тзв. „секвентно узорковање”, тј. узорковање испусног гаса, при чему се анализа истог изводи на излазу гасног бунара (перфорирана PVC цијев) који одводи депонијски гас из тијела депонијске санитарне касете. У средишту депоније настаје надпритисак, па депонијски гас преко вертикалних одвода прелази у околину (ваздух). Системи за екстракцију депонијског гаса из тијела депоније састоје се од вертикалних и хоризонталних гасних бунара (зденаца). Вертикални бунари су перфориране PVC цијеве промјера 110 mm, постављене у самој фази израде депонијских касета. Ови бунари тренутно служе за дегасификацију одложеног отпада, а након одређеног периода (по завршетку метаногене анаеробне фазе деградације) повезују се хоризонталним цијевима.

Мјерења имисијских концентрација релевантних показатеља квалитета ваздуха извршена су на самој депонији (на платоу поред надстрешнице за смјештање механизације) (Сл. 2).

Sampling Locations

In order to monitor landfill gas emissions from the landfill in question, the so-called “sequential sampling”, i.e. exhaust gas sampling was conducted, where the analysis is performed at the exit of the gas well (perforated PVC pipe) that drains landfill gas from the body of the landfill sanitary cassette. The over-pressure occurs in the center of the landfill, so the landfill gas passes into the environment (air) via vertical drains. Systems for extracting landfill gas from the landfill body consist of vertical and horizontal gas wells. Vertical wells are perforated PVC pipes with a diameter of 110 mm, installed in the very stage of landfill cassette construction. These wells are currently used for the degassing of disposed waste, and after a certain period of time (after the completion of the methanogenic anaerobic degradation phase) they are connected with horizontal pipes.

Measurements of immission concentrations of relevant air quality indicators were performed at the landfill itself (on the plateau next to the canopy for the placement of machinery) (Fig. 2).



Сл. 2. Сателитски снимак локације (Google Earth снимак)

Fig. 2. Satellite image of the location (Google Earth image)

Методe мјерења

У циљу мјерења емисије депонијских гасова на депонији „Црни врх“, у периоду од августа 2022. године до марта 2023. године, извршена су мјерења једном мјесечно и то сљедећих параметара: кисеоник, метан, угљен-диоксид и сумпор-водоник. За мјерење температуре и протока гасова коришћен је вишефункционални анализатор гасова Testo 325 који ради на бази електрохемијских сензора (Сл. 3). Додатно, коришћен је Dräger X-am 2000, преносиви уређај опремљен сензорима за мјерење специфичних (H_2S , CO , O_2) и запаљивих/експлозивних гасова (CH_4) који се продукују у опасној средини.

Measurement Methods

In order to measure landfill gas emissions at the “Crni vrh” landfill, in the period from August 2022 to March 2023, measurements were made once a month of the following parameters: oxygen, methane, carbon dioxide and hydrogen sulphide. To measure temperature and gas flow, Testo 325, a multifunctional gas analyser, was used, which works on the basis of electrochemical sensors (Fig. 3). Additionally, the Dräger X-am 2000, a portable device equipped with sensors for measuring specific (H_2S , CO , O_2) and flammable/explosive gases (CH_4) generated in a hazardous environment, was used.



Сл. 3. Анализатор гасова Testo 325

Fig. 3. Testo 325 gas analyser

У циљу одређивања квалитета амбијенталног ваздуха на истраживаном простору, у периоду од 15. августа 2022. до 31. марта 2023. године, извршена су континуирана свакодневна мјерења следећих параметара: угљен-моноксида (CO), сумпор-диоксида (SO₂), озона (O₃), азотних оксида (NO, NO₂, NO_x), укупних лебдећих честица (УЛЧ), лебдећих честица (PM₁₀), укупних угљоводоника (THC), метана (CH₄) и неметанских угљоводоника (NMHC).

Мониторинг квалитета ваздуха извршен је покретном еколошком лабораторијом опремљеном одговарајућим анализаторима и узоркивачем (Сл. 4). За одређивање нивоа SO₂ у околном ваздуху коришћена је метода ултравиолетне флуоресценције (BAS EN 14212:2013), мјерење азотних оксида извршено је хемилуминисценцијом (BAS EN 14211:2013), угљен-моноксида недисперзивном инфрацрвеном спектроскопијом (BAS EN 14626:2013), а озона ултравиолетном фотометријом (BAS EN 14625:2013). Анализатор за мјерење укупних угљиководоника и метана користи пламено ионизацијску методу, а гравиметријски узоркивач укупних чврстих честица и PM₁₀ стандардну гравиметријску методу (BAS EN 12341:2015) (Сл. 5).

In order to determine the ambient air quality in the investigated area, in the period from August 15, 2022 to until March 31, 2023, continuous daily measurements of the following parameters were carried out: carbon monoxide (CO), sulphur dioxide (SO₂), ozone (O₃), nitrogen oxides (NO, NO₂, NO_x), total suspended particles (TSP), suspended particles (PM₁₀), total hydrocarbons (THC), methane (CH₄) and non-methane hydrocarbons (NMHC).

Air quality monitoring was carried out by a mobile environmental laboratory equipped with appropriate analysers and a sampler (Fig. 4). The ultraviolet fluorescence method was used to determine the level of SO₂ in the surrounding air (BAS EN 14212:2013), nitrogen oxides were measured by chemiluminescence (BAS EN 14211:2013), carbon monoxide (CO) was measured by non-dispersive infrared spectroscopy (BAS EN 14626:2013), and ground-level ozone by ultraviolet photometry (BAS EN 14625:2013). The analyser for measuring total hydrocarbons and methane uses the flame ionization method, and the gravimetric sampler for total solid particles and PM₁₀ uses the standard gravimetric method (BAS EN 12341:2015) (Fig. 5).



Сл. 4. Анализатор HORIBA JAPAN
Fig. 4. HORIBA JAPAN analyser



Сл. 5. Гравиметријски узоркивач
укупних чврстих честица и PM₁₀
Fig. 5. Gravimetric sampler of total
solid substances and PM₁₀

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Квалитет и квантитет депонијског гаса првенствено зависе од састава и старости отпада, а затим осталих фактора као што су: присуство и количина кисеоника у депонији, садржаја влаге, киселости, метеоролошких параметара (температура, падавине, атмосферски притисак и влажност ваздуха) и праксе управљања депонијом (степен сабијања и дебљине прекривеног слоја). Највећи дио депонијског гаса формира се бактеријском разградњом органског отпада, тако да количина генерисаног гаса зависи од количине органског отпада у депонији. Производња депонијског гаса почиње у року од неколико мјесеци након одлагања отпада и углавном траје око десет година или више, у зависности од састава отпада и доступности влаге. Годишња производња углавном достиже свој максимум три до осам година након депоновања. У свјеже одложеном отпаду почиње аеробна деградација отпада под утицајем аеробних микроорганизама и траје све док има доступног кисеоника. Вријеме трајања аеробног процеса зависи од количине заробљеног кисеоника у порама тијела депоније као и у самом отпаду, од степена збијености отпада, те од брзине прекривања отпада дневним прекривним слојем. Када се сав кисеоник потроши почиње продукција метана. Количина одложеног биоразградивог отпада директно утиче на настанак депонијских гасова и бројних полутаната који утичу на квалитет ваздуха у околини депоније (Mor et al., 2006). Директива Савјета ЕУ 1999/31/ЕС поставила је стратегије за смањење одлагања биоразградивог отпада на депоније, са циљем спречавања или смањења било каквих штетних утицаја на животну средину (СЕС, 1999).

Депонијски гас који садржи око 45–55 % метана може се убацити у мрежу цијеви за прикупљање гаса и користити као извор енергије. С друге стране, неконтролисаним испуштањем депонијског гаса повећава се емисија гасова са ефектом стаклене баште који негативно утичу на животну средину.

Депоније се могу посматрати као постројења за претварање биогаса у електричну енергију, и не само да покривају унутрашњу

RESULTS AND DISCUSSION

The quality and quantity of landfill gas primarily depends on the composition and age of the waste, and then on other factors such as the presence and amount of oxygen in the landfill, moisture content, acidity, meteorological parameters (temperature, precipitation, atmospheric pressure and air humidity), and landfill management practices (degree of compaction and thickness of the covered layer). The greatest part of landfill gas is generated by bacterial decomposition of organic waste, so the amount of generated gas depends on the amount of organic waste in the landfill. Landfill gas generation begins within a few months of waste disposal and generally lasts about ten years or more, depending on the composition of the waste and the availability of moisture. Annual generation generally peaks three to eight years after deposition. In freshly deposited waste, aerobic degradation of waste begins under the influence of aerobic microorganisms and continues as long as there is available oxygen. The duration of the aerobic process depends on the amount of trapped oxygen in the landfill body pores as well as in the waste itself, on the degree of waste compaction, and on the speed of covering the waste with a daily covering layer. When all the oxygen is used up, methane generation begins. The amount of disposed biodegradable waste directly affects the generation of landfill gases and numerous pollutants that affect the air quality in the vicinity of the landfill (Mor et al., 2006). EU Council Directive 1999/31/EC set out strategies to reduce the disposal of biodegradable waste in landfills, with the aim of preventing or reducing any adverse environmental impact (СЕС, 1999).

Landfill gas containing about 45–55 % methane can be fed into a network of gas collection pipes and used as an energy source. On the other hand, the uncontrolled release of landfill gas increases the emission of greenhouse gases that have negative environmental impacts.

Landfills can be seen as plants for converting biogas into electricity, and they not

потрошњу објекта, већ и доприносе енергетској мрежи (Karapidakis et al., 2010; Yechiel & Shevah, 2016). Према Themelis и Ulloa (2007) од 2001. године било је око 955 депонија које су сакупљале биогас или депонијски гас, а највећи број је у САД, затим у Њемачкој и Уједињеном Краљевству. Коришћење депонијског гаса као горива за производњу електричне и топлотне енергије може бити важан начин за смањење утицаја депоније на животну средину и представља једноставан начин коришћења обновљивог извора енергије (Desideri et al., 2003; Kumar et al., 2004).

Резултати мјерења емисије депонијског гаса са високим процентом присутног кисеоника, који се креће у распону од 16.38 % до 19.46 %, показују да је на мјесту мјерења присутан свјеже одложени отпад у којем је доминантан аеробни процес разградње. То потврђују ниске концентрације угљен-диоксида који је присутан у концентрацији мањој од 1 %, као и метана у распону од 3.5 % до 4.1 % (Таб. 1). Ниске вриједности метана указују да се још нису стекли услови за њихово енергетско искоришћавање.

Сумпор-водоник (водоник-сулфид), који је познат по свом неугодном и интензивном мирису, креће се у распону од 8.0 % до 9.2 %. Сумпор-водоник је запаљив, експлозиван безбојан гас, који у малим концентрацијама има мирис покварених јаја.

only cover the internal consumption of the facility, but also contribute to the energy network (Karapidakis et al., 2010; Yechiel & Shevah, 2016). According to Themelis and Ulloa (2007), as of 2001, there were about 955 landfills that collected biogas or landfill gas, the largest number being in the USA, followed by Germany and the United Kingdom. The use of landfill gas as fuel for the generation of electricity and heat can be an important way to reduce the environmental impact of landfill and is a simple way of using a renewable energy source (Desideri et al., 2003; Kumar et al., 2004).

Measurement results of the emission of landfill gas with a high percentage of oxygen present, ranging from 16.38 % to 19.46 %, show that there is freshly deposited waste at the measurement site, in which the aerobic decomposition process is dominant. This is confirmed by low concentrations of carbon dioxide, which is present in a concentration of less than 1 %, as well as methane in the range of 3.5 % to 4.1 % (Tab. 1). Low values of methane indicate that the conditions for their energy utilisation have not yet been achieved.

Hydrogen sulphide, which is known for its unpleasant and intense odour, ranges from 8.0 % to 9.2 %. Hydrogen sulphide is a flammable, explosive, colourless gas, which in small concentrations has the smell of rotten eggs.

Таб. 1. Резултати мјерења емисије депонијског гаса на локацији депоније „Црни врх“ у периоду од августа 2022. до марта 2023. године

Tab. 1. Results of landfill gas emission measurements at the “Crni vrh” landfill site in the period from August 2022 to March 2023

Период мјерења / Measurement period	O ₂ (%)	CH ₄ (%) vol.	CO ₂ (%) vol.	H ₂ S (ppm)
Август / August	19.46	4.11	0.88	9.22
Септембар / September	18.12	3.98	0.87	9.14
Октобар / October	18.04	3.94	0.79	9.06
Новембар / November	18.01	3.91	0.80	9.08
Децембар / December	17.71	3.54	0.78	8.79
Јануар / January	16.38	3.88	0.71	8.55
Фебруар / February	17.21	3.74	0.69	8.02
Март / March	17.16	3.65	0.62	8.00

Познато је да депоније емитују и друге аерополутанте. Депоније су идентификоване као опасан извор загађивача ваздуха према Стратегији о токсичности ваздуха у урбаним срединама Америчке агенције за заштиту животне средине. У циљу утврђивања садржаја загађујућих материја у ваздуху на локацији регионалне санитарне депоније „Црни врх“, вршено је континуирано мјерење квалитета ваздуха у периоду од 15. августа 2022. до 31. марта 2023. године. Извршено је мјерење имисионих концентрација честица прашине мање од 10 μm (PM_{10}), мјерење имисијских концентрација SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , O_3 , THC , NMHC и CH_4 (Таб. 2).

PM се стварају на депонијама као резултат људских дејстава механичким процесима који укључују сортирање, бацање и сабијање отпада булдожерима, нагомилавање земље и кретање возила преко претходно депонованог отпада (Salami & Popoola, 2023; Choi & Fernando, 2008). Димензије честица присутних у атмосфери обухватају широк обим, од 0.002 μm до 100 μm , а честице аеродинамичног пречника 10–100 μm називају се укупне лебдеће честице (Chow & Watson, 2002). PM се могу подијелити у три групе на основу величине: груба фракција са аеродинамичким пречником мањим од 10 μm (PM_{10}) која се формира када се веће чврсте честице разбију механички; фина фракција са аеродинамичким пречником између 2.5 μm и 10 μm ($\text{PM}_{2.5}$) који се претежно формирају од гасова; и ултрафине фракције са аеродинамичким пречницима у опсегу мањим од 2.5 μm и мањим од 0.1 μm ($\text{PM}_{0.1}$) који настају као резултат нуклеације (Salami & Popoola, 2023). У Републици Српској су Уредбом о условима за мониторинг квалитета ваздуха (Службени гласник Републике Српске, број 124/12) укупне таложне материје дефинисане као честице пречника већег од 10 μm , које се услед сопствене тежине преносе из ваздуха на разне површине (земљиште, вегетација, вода, грађевине и др.). Таложне честице сматрају се најмање ризичним, јер не могу допријети дубоко у плућа ни далеко од извора емисије, али до негативног утицаја по здравље изложеног становништва ипак може доћи услед могуће директне ин-

Landfills are known to emit other air pollutants as well. They are identified as a hazardous source of air pollutants by the United States Environmental Protection Agency Urban Air Toxics Strategy. In order to determine the content of air pollutants at the "Crni vrh" regional sanitary landfill location, continuous air quality measurements were carried out in the period from August 15, 2022 to March 31, 2023. The immission concentrations of dust particles smaller than 10 μm (PM_{10}) were measured, the immission concentrations of SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , O_3 , THC , NMHC and CH_4 were measured (Tab. 2).

PM is generated in landfills as a result of human actions by mechanical processes that include sorting, dumping and compaction of waste by bulldozing, soil compaction and vehicle movement over previously deposited waste (Salami & Popoola, 2023; Choi & Fernando, 2008). The dimensions of particles present in the atmosphere cover a wide range, from 0.002 μm to 100 μm , and particles with an aerodynamic diameter of 10–100 μm are called total suspended particles (Chow & Watson, 2002). PM can be divided into three groups based on size: the coarse fraction with an aerodynamic diameter of less than 10 μm (PM_{10}) which is formed when larger solid particles are broken up mechanically; the fine fraction with an aerodynamic diameter between 2.5 μm and 10 μm ($\text{PM}_{2.5}$) which is mainly formed from gases; and ultrafine fractions with aerodynamic diameters in the range of less than 2.5 μm and less than 0.1 μm ($\text{PM}_{0.1}$) resulting from nucleation (Salami & Popoola, 2023). In the Republic of Srpska, according to the Regulation on conditions for air quality monitoring (Republic of Srpska Official Gazette, number 124/12), total sediments are defined as particles with a diameter greater than 10 μm , which due to their own weight are transferred from the air to various surfaces (soil, vegetation, water, buildings, etc.). Sediments are considered the least risky, because they cannot reach deep into the lungs or far from the emission source, but the negative impact on health of the exposed popula-

ДУШИЦА ПЕШЕВИЋ И НЕБОЈША КНЕЖЕВИЋ
DUŠICA PEŠEVIĆ AND NEBOJŠA KNEŽEVIĆ

Таб. 2. Средња мјесечна вриједност анализираних параметара у ваздуху на локацији депоније „Црни врх“ у периоду од 15. августа 2022. до 31. марта 2023. године
Tab. 2. Average monthly value of the analysed parameters in the air at the “Crni vrh” landfill location in the period from August 15, 2022 to March 31, 2023

Анализирани полутанти / Analysed pollutants	CO (mg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	УЛЧ/ TSP	PM ₁₀ (µg/m ³)	ТНС	CH ₄	NMHC
Август / August	0.34	14.51	64.89	15.27	24.87	22.02	34.92	34.29	1630.52	1145.57	233.82
Септембар / September	0.28	18.93	55.84	15.37	32.72	48.1	37.8	29.07	1589.99	1164.57	194.96
Октобар / October	0.32	26.31	37.72	9.91	12.31	22.49	38.99	29.99	1624.67	1136.86	208.49
Новембар / November	0.46	31.97	34.78	32.07	39.91	72.77	43.92	33.78	1692.92	1133.06	227.15
Децембар / December	0.84	13.56	30.69	27.19	32.25	59.66	47.53	36.56	1693.8	1139.34	232.81
Јануар / January	1.12	18.56	22.75	19.43	22.02	41.59	44.41	34.16	1731.18	1167.22	223.27
Фебруар / February	0.58	10.79	9.04	16.24	18.51	34.75	26.79	20.61	1472.6	1111.8	155.88
Март / March	0.87	29.84	23.2	22.84	27.05	49.87	33.41	26.46	1688.76	1166.73	200.07

халације након емисије, али и секундарним путем након таложења кроз ланац исхране (Hall et al., 1994).

Највећа средња мјесечна вриједност лебдећих честица PM_{10} измјерена је током децембра и износила је $36.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$. На основу узорковања концентрације лебдећих честица PM_{10} током анализираног периода (август 2022. – март 2023.) може се констатовати да је просјечна концентрација лебдећих честица PM_{10} износила $30.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Највећа средња дневна вриједност концентрације износила је $48.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ и забиљежена је у мјесецу јануару 2023. године, а најнижа просјечна дневна вриједност износила је $11.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, забиљежена истог мјесеца. Измјерене просјечне дневне концентрације биле су испод граничне вриједности од $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ дефинисане Уредбом о вриједностима квалитета ваздуха (Службени гласник Републике Српске, број 124/12), али неке од забиљежених вриједности биле су врло близу граничне вриједности, што треба имати у виду при будућем раду ове депоније.

Највећа средња мјесечна вриједност укупних лебдећих честица (УЛЧ) измјерена је током децембра и износила је $47.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Просјечна концентрација УЛЧ за све вријеме мјерења износила је $38.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Највећа просјечна дневна вриједност концентрације износила је $63.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (измјерена у мјесецу јануару 2023. године), а најнижа просјечна вриједност износила је $30.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (измјерена истог мјесеца).

Угљен-моноксид (CO) је безбојан, без мириса и укуса, али веома токсичан гас за жива бића, јер спада у групу хемијских загушљиваца и највећих загађивача ваздуха. Настаје у току непотпуне оксидације органских материја. Истискујући кисеоник из рецептора црвених крвних зрнаца ствара карбоксихемоглобин, који ограничава транспорт и коришћење кисеоника у ткивима. Нивои CO на подручју истраживања кретали су се између $0.19 \text{mg}/\text{m}^3$ (измјерено у октобру 2022. године) и $2.17 \text{mg}/\text{m}^3$, колико је износила максимална средња дневна вриједност у јануару 2023. године. Просјечна концентрација CO за цијели период мјерења износила је $0.60 \text{mg}/\text{m}^3$. Највећа средња мјесечна вријед-

tion can still occur due to possible direct inhalation after emission, but also by secondary means after sedimentation through the food chain (Hall et al., 1994).

The highest mean monthly value of suspended particles PM_{10} was measured during December and amounted to $36.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The sampled concentration of PM_{10} suspended particles during the analysed period (August 2022 – March 2023) leads to a conclusion that the average concentration of PM_{10} suspended particles amounted to $30.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest average daily concentration value amounted to $48.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and was recorded in the month of January 2023, and the lowest average daily value amounted to $11.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, recorded in the same month. The measured average daily concentrations were below the limit value of $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ defined by the Regulation on air quality values (Republic of Srpska Official Gazette, number 124/12), but some of the recorded values were very close to the limit value, which should be taken into account in the future operation of this landfill.

The highest mean monthly value of total suspended particles (TSP) was measured during December and amounted to $47.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Average concentration of TSP for the entire measurement period was $38.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest average daily concentration value was $63.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ measured in January 2023, and the lowest average value was $30.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ measured in the same month.

Carbon monoxide (CO) is colourless, odourless and tasteless, but a very toxic gas for living beings, because it belongs to the group of chemical asphyxiants and the biggest air pollutants. It is generated during the incomplete oxidation of organic substances. Displacing oxygen from red blood cell receptors creates carboxyhaemoglobin, which limits the transport and use of oxygen in tissues. CO levels in the research area ranged between $0.19 \text{mg}/\text{m}^3$ (measured in October 2022) and $2.17 \text{mg}/\text{m}^3$, which was the maximum average daily value (measured in January 2023). Average CO concentration for the entire measurement period was $0.60 \text{mg}/\text{m}^3$. The highest

ност концентрације CO измјерена је током јануара и износила је 1.12 mg/m^3 . Утврђене просјечне вриједности за све вријеме мјерења су релативно ниске и доста испод граничне вриједности од 5 mg/m^3 по важећој Уредби.

Сумпор-диоксид (SO_2) је без боје, не гори нити ствара експлозивне смјеше. Оштрог је мириса (већина људи га може осјетити већ код његових концентрација у ваздуху од 1 ppm). Са становишта аерозагађености, важне су оне реакције сумпор-диоксида у атмосфери при којима настају SO_3 , H_2SO_4 или соли сулфатне киселине. Ове реакције могу бити фотохемијске или каталитичке. Сумпор-диоксид на собној температури може да реагује и као оксидирајуће средство. Сумпор-диоксид у контакту са вегетацијом може да изазове два типа оштећења листа: акутно и хронично оштећење. Акутно оштећење, изазвано релативно кратким утицајем већих концентрација сумпор-диоксида, манифестује се у оштећењу ћелија које се суше. Епидемиолошка истраживања су показала да утицај сумпор-диоксида на респираторни систем човјека зависи од његове концентрације у ваздуху. Поједина истраживања показују да су краткорочне промјене у концентрацијама SO_2 повезане са повећаним бројем хитних болничких пријема због респираторних болести и смрти узрокованих респираторним и кардиоваскуларним болестима (Brown et al., 2003).

Највећа средња мјесечна вриједност концентрација SO_2 у области истраживања измјерена је током новембра и износила је $31.97 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. На основу узорковања концентрације сумпор-диоксида током анализираниог периода може се констатовати да је просјечна концентрација SO_2 за цијели период мјерења износила $20.55 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Током периода мјерења просјечне дневне концентрације кретале су се између максималне средње дневне вриједности од $78.41 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ у мјесецу марту 2023. године и минималне вриједности од $7.19 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ забиљежене у децембру 2022. године, што је знатно ниже од граничне вриједности дате Уредбом која износи $125 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Озон (O_3) се формира у атмосфери фотохемијским реакцијама у присуству Сунчеве свјетлости и прекурсора загађујућих

mean monthly value of CO concentration was measured during January and was 1.12 mg/m^3 . The determined average values for the entire measurement period are relatively low and well below the limit value of 5 mg/m^3 according to the current Regulation.

Sulphur dioxide (SO_2) is colourless, does not burn or create explosive mixtures. It has a pungent smell (most people can already smell it at concentrations in the air of 1 ppm). From the aspect of air pollution, those reactions of sulphur dioxide in the atmosphere that produce SO_3 , H_2SO_4 or sulfuric acid salts are important. These reactions can be photochemical or catalytic. Sulphur dioxide at room temperature can also act as an oxidising agent. Sulphur dioxide in contact with vegetation can cause two types of leaf damage: acute and chronic damage. Acute damage, caused by a relatively short exposure to higher concentrations of sulphur dioxide, manifests itself in damage to cells that dry out. Epidemiological research has shown that the effect of sulphur dioxide on the human respiratory system depends on its concentration in the air. Some studies show that short-term changes in SO_2 concentrations are associated with increased number of emergency hospital admissions due to respiratory diseases and deaths caused by respiratory and cardiovascular diseases (Brown et al., 2003).

The highest average monthly value of SO_2 concentration in the research area was measured during November and amounted to $31.97 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Based on the sampled sulphur dioxide concentration during the analysed period, it can be stated that the average concentration of SO_2 for the entire measurement period amounted to $20.55 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. During the measurement period, the average daily concentrations ranged between the maximum mean daily value of $78.41 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (recorded in the month of March 2023) and the minimum value of $7.19 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (recorded in December 2022), which is significantly lower than the limit value given by the Regulation which amounts to $125 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Ozone (O_3) is generated in the atmosphere by photochemical reactions in the presence of sunlight and pollutant precursors, such as ni-

материја, као што су оксиди азота (NO_x) и испарљива органска једињења (VOC). Уништава се реакцијама са NO_2 и депонује се на земљу. Код благе изложености нижим концентрацијама озона јавља се надражај слузнице очију и горњих дисајних путева у виду сузења, печења у очима, гребања у грлу, стезања иза грудне кости и бол у виду раздирања у грудима и доводи до непродуктивног кашља. При 8-часовним концентрацијама које прелазе $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ долази до пораста броја смртних случајева за 5–9 %, у односу на изложеност на процијењеном позадинском нивоу (WHO, 2006).

Просјечна концентрација озона током анализираних периода износила је $34.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Највећа средња мјесечна вриједност озона измјерена је током августа и износила је $64.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Максимална средња дневна вриједност концентрације озона износила је $89.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ и забиљежена је у мјесецу августу, док је минимална износила $7.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ у мјесецу марту. Све измјерене просјечне дневне вриједности у проучаваном осмомјесечном периоду биле су испод $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ што је концентрација која се сматра циљаном вриједности у циљу заштите здравља људи према Уредби о граничним вриједностима квалитета ваздуха.

Под азотним оксидима сматра се смјеша азотних оксида међу којима највећу биолошку активност испољавају азот-моноксид (NO), азот-диоксид (NO_2) и азот-тетраоксид (N_2O_4). Азот-моноксид се врло брзо у ваздуху оксидише у азот-диоксид, споро у реакцијама са кисеоником, а много брже у реакцијама са озоном као оксидансом. Азот-диоксид, у присуству угљоводоника и ултраљубичастог свјетла, главни је извор тропосферског озона. Експерименталне студије на животињама и људима показују да је NO_2 , у краткорочним концентрацијама већим од $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, токсичан гас са значајним здравственим ефектима (WHO, 2006). Азотни оксиди продиру у организам путем респираторног система гдје на влажној слузници граде азотну и азотасту киселину. Због њихове слабе растворљивости у води, овај процес се одиграва више у доњим него у горњим респираторним путевима. Као јак ок-

sid (NO_x) and volatile organic compounds (VOC). It is destroyed by reactions with NO_2 and is deposited on the ground. Mild exposure to lower concentrations of ozone causes irritation of the mucous membranes of the eyes and upper respiratory tract in the form of tearing, burning in the eyes, scratching in the throat, tightness behind the sternum and pain in the form of tearing in the chest and leads to an unproductive cough. At 8-hour concentrations exceeding $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$, there is an increase in the number of deaths by 5–9 %, compared to exposure at the estimated background level (WHO, 2006).

Average ozone concentration during the analysed period amounted to $34.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest average monthly value of ozone was measured during August and amounted to $64.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum mean daily value of ozone concentration amounted to $89.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and was recorded in the month of August, while the minimum amounted to $7.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and was recorded in the month of March. All measured average daily values in the studied eight-month period were below $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which is considered the target value for the purpose of protecting human health according to the Regulation on limit values of air quality.

Nitric oxides are a mixture of nitrogen oxides, among which nitrogen monoxide (NO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen tetroxide (N_2O_4) exhibit the greatest biological activity. Nitrogen monoxide oxidizes very quickly in the air to nitrogen dioxide, slowly in reactions with oxygen, and much faster in reactions with ozone as an oxidant. Nitrogen dioxide, in the presence of hydrocarbons and ultraviolet light, is the main source of tropospheric ozone. Experimental studies on animals and humans show that NO_2 , in short-term concentrations higher than $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, is a toxic gas with significant health effects (WHO, 2006). Nitrogen oxides penetrate into the body through the respiratory system, where they form nitric and nitrous acid on the moist mucosa. Due to their low solubility in water, this process takes place more in the lower than in the upper respiratory tract. As a strong oxidant, nitrogen dioxide

сиданс азот-диоксид може да оштети епителни слој који покрива респираторни тракт, дјелује на промјену функције ћелијске мембране и отвара пут за лакши улаз молекула алергена у плућно ткиво (Hesterberg et al., 2009). И мале количине удахнутих азотних оксида, усљед лучења хистамина, могу повећати отпор у дисајним путевима и смањити дифузиони капацитет плућа. Тренутна референтна вриједност Свјетске здравствене организације од $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (годишња средња вриједност) постављена је да заштити јавност од здравствених ефеката гасовитог NO_2 , а иста гранична вриједност прописана је и Уредбом о вриједностима квалитета ваздуха у Републици Српској.

Просјечна дневна концентрација NO током осмомјесечног периода мјерења износила је $24.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Највећа средња мјесечна вриједност концентрација NO измјерена је током новембра и износила је $32.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Максимална дневна просјечна вриједност износила је $55.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (измјерена у новембру 2022. године), док је најнижа дневна просјечна вриједност износила $1.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (измјерена током октобра 2022. године). Уредба о вриједностима квалитета ваздуха не наводи граничне вриједности за NO .

Просјечна концентрација NO_2 у току цијелог периода мјерења износила је $26.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Највећа средња мјесечна вриједност NO_2 измјерена је током новембра и износила је $39.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Регистроване просјечне дневне концентрације су се кретале од максималне вриједности $70.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ до минималне $1.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ што представља нижу концентрацију од граничне вриједности за NO_2 која износи $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ према важећој Уредби.

Вриједности параметра NO_x представљају укупне суме појединачних параметара NO и NO_2 . Највећа средња мјесечна вриједност концентрација NO_x измјерена је током новембра и износила је $72.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Просјечна концентрација NO_x у току цијелог периода мјерења износила је $43.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Максимална дневна просјечна концентрација износила је $125.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (у новембру 2022.), док је најнижа вриједност била свега $2.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (у октобру

can damage the epithelial layer that covers the respiratory tract, change the function of the cell membrane and pave the way for easier entry of allergen molecules into the lung tissue (Hesterberg et al., 2009). Even small amounts of inhaled nitrogen oxides, due to the secretion of histamine, can increase the resistance in the airways and reduce the diffusion capacity of the lungs. Current reference value of the World Health Organization of $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (annual mean value) is set to protect the public from the health effects of gaseous NO_2 , and the same limit value is prescribed by the Regulation on air quality values in the Republic of Srpska.

Average daily concentration of NO during the eight-month measurement period amounted to $24.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest mean monthly value of NO concentration was measured during November and amounted to $32.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum daily average value amounted to $55.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (it was measured in November 2022), while the lowest daily average value amounted to $1.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (it was measured during October 2022). The Regulation on air quality values does not specify limit values for NO .

Average NO_2 concentration during the entire measurement period amounted to $26.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest average monthly value of NO_2 was measured during November and amounted to $39.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Registered average daily concentrations ranged from a maximum value of $70.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to a minimum of $1.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which represents a lower concentration than the limit value for NO_2 , which amounts to $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ according to the current Regulation.

Values of the NO_x parameter represent the total sums of the individual NO and NO_2 parameters. The highest average monthly value of NO_x concentration was measured during November and amounted to $72.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Average concentration of NO_x during the entire measurement period amounted to $43.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum daily average concentration amounted to $125.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in November 2022, while the lowest value was only $2.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in October of the same year.

исте године). Уредба о вриједностима квалитета ваздуха не наводи граничне вриједности за NO_x .

Угљоводоници представљају смјешу врло различитих органских једињења реда парафина, олефина и цикличних деривата са већим и мањим низом С-атома чије структуре није лако одредити. Токсичне особине угљоводоника су различите и вишеструке, а нарочито удружено дјеловање више угљоводоника различитих структура. Тровање угљоводоником, попут бензена, обично се јавља случајно удисањем или гутањем ових цитотоксичних хемијских једињења. Дјелују на дисајни систем, централни нервни систем, кожу и паренхимне и крвотворне органе. Неки од њих су канцерогени.

Нивои укупних угљоводоника (ТНС) на подручју истраживања кретали су се између $1325.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, забиљежено у септембру 2022. године, и $1949.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ колико је износила највећа просјечна дневна концентрација измјерена током новембра 2022. године. Просјечна имисијска концентрација укупних угљоводоника (ТНС) износила је $1640.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ за цијели период мјерења.

Метан (CH_4) је врло инертан и није отрован, али повећање концентрације у ваздуху утиче на смањење садржаја кисеоника. Метан настаје биолошким разградњом органских компоненти у отпаду, а прије свих целулозе. Метан гори блиједоплавим пламеном, експлозиван је у смјеши са ваздухом од 5 % до 15 %. Просјечна имисијска концентрација метана на проучаваном простору износила је $1145.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ за цијели период мјерења. Највећа просјечна дневна концентрација износила је $1210.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (измјерена током марта 2023. године), а најнижа просјечна дневна измјерена вриједност била је $1009.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (измјерена током октобра и новембра 2022. године). Највећа средња мјесечна вриједност концентрације метана измјерена је током јануара и износила је $1167.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Просјечна имисијска концентрација неметанских угљоводоника (НМНС) је износила $209.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ за цијели период мјерења. Највећа просјечна дневна концентрација износила је $288.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, а најнижа просјечна дневна измјерена вриједност $130.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, а обе вриједности забиљежене су током мјесеца септембра

The Regulation on air quality values (Republic of Srpska Official Gazette, number 124/12) does not specify limit values for NO_x .

Hydrocarbons represent a mixture of very different organic compounds of the order of paraffins, olefins and cyclic derivatives with a higher and lower number of C-atoms whose structures are not easy to determine. Toxic properties of hydrocarbons are different and multiple, especially the combined effect of several hydrocarbons of different structures. Hydrocarbon poisoning, such as benzene, usually occurs through accidental inhalation or ingestion of these cytotoxic chemical compounds. They act on the respiratory system, central nervous system, skin and parenchymal and hematopoietic organs. Some of them are carcinogenic.

The levels of total hydrocarbons (THC) in the research area ranged between $1325.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, recorded in September 2022, and $1949.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which was the highest average daily concentration (measured during November 2022). Average emission concentration of total hydrocarbons (THC) was $1640.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for the entire measurement period.

Methane (CH_4) is very inert and not poisonous, but increasing its concentration in the air affects the reduction of oxygen content. Methane is generated by the biological decomposition of organic components in waste, primarily cellulose. Methane burns with a pale blue flame; it is explosive in a mixture with air of 5 % to 15 %. Average emission concentration of methane in the studied area was $1145.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for the entire measurement period. The highest average daily concentration was $1210.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (measured during March 2023), and the lowest average daily measured value was $1009.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (measured during October and November 2022). The highest mean monthly value of methane concentration was measured during January and amounted to $1167.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Average immission concentration of non-methane hydrocarbons (NMHC) amounted to $209.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for the entire measurement period. The highest average daily concentration amounted to $288.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and the lowest average daily measured value amounted to $130.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and both values were recorded during the month of September 2022. The

2022. године. Највећа средња мјесечна вриједност концентрација NMHC измјерена је током августа и износила је $233.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Уредба о вриједностима квалитета ваздуха не наводи граничне вриједности за метан и NMHC.

Анализом добијених резултата мјерења наведених параметара током периода од 15. августа 2022. до 31. марта 2023. године може се закључити да измјерене концентрације полутаната у ваздуху на локалитету депоније „Црни врх“ не прелазе граничне вриједности према важећој Уредби о граничним вриједностима квалитета ваздуха у Републици Српској.

ЗАКЉУЧАК

На санитарној регионалној депонији „Црни врх“ код Зворника примјењује се савремена технологија одлагања отпада, што омогућава значајно смањење емисије штетних гасова и других загађујућих материја. Да би се смањио негативан утицај депонијских гасова на животну средину, постоји неколико могућих рјешења. Једно од њих је сакупљање депонијских гасова и њихово коришћење као извора енергије. Састав депонијских гасова на предметној депонији у проучаваном периоду показује ниске вриједности метана што указује да се још нису стекли услови за њихово енергетско искоришћавање.

Комбиновањем резултата из двије области истраживања, тј. емисије депонијских гасова и мониторинг амбијенталног ваздуха, може се добити ефикасна и потпуна студија утицаја депоније на квалитет ваздуха и живи свијет. Мониторинг амбијенталног ваздуха спроведен на депонији показује да није дошло до прекорачења граничних вриједности емисионих концентрација 11 параметара за праћење квалитета ваздуха. Међутим, неке од забиљежених вриједности лебдећих честица PM_{10} биле су врло близу граничне вриједности према важећој Уредби, што треба имати у виду при будућем раду ове депоније. И друге загађујуће материје у ваздуху које настају као резултат рада депонија могу да представљају пријетњу, не само по животну средину, већ и по здравље људи. Како би се спријечили нежељени утицаји депоније, неопходно је примијенити адекватне мјере за управљање депонијама и депонијским гасовима у циљу смањења њиховог утицаја на животну

highest mean monthly value of NMHC concentrations was measured during August and amounted to $233.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The Regulation on air quality values does not specify limit values for methane and NMHC.

The analysis of the measurement results of the mentioned parameters during the period from 15 August 2022 to 31 March 2023 leads to a conclusion that the measured air pollutant concentrations at the "Crni vrh" landfill site do not exceed the limit values according to the current Regulation on limit values of air quality in the Republic of Srpska.

CONCLUSION

"Crni vrh" sanitary regional landfill near Zvornik applies modern waste disposal technology, which enables a significant reduction in the emission of harmful gases and other pollutants. In order to reduce the negative environmental impact of landfill gases, there are several possible solutions. One of them is the collection of landfill gases and their use as a source of energy. The composition of landfill gases at the landfill in question in the studied period shows low values of methane, which indicates that the conditions for their energy utilisation have not yet been achieved.

By combining results from two research fields, i.e., landfill gas emissions and ambient air monitoring, an efficient and complete study of the landfill's impact on air quality and living things can be obtained. Ambient air monitoring carried out at the landfill shows that the limit values of emission concentrations of 11 parameters for air quality monitoring were not exceeded. However, some of the recorded values of PM_{10} suspended particles were very close to the limit value according to the current Regulation, which should be taken into account in the future operation of this landfill. Other air pollutants that are generated as a result of landfill operations can pose a threat, not only to the environment and human health. In order to prevent the adverse landfill's impacts, it is necessary to implement adequate measures for the management of landfills and landfill gases in order to reduce their impact on the environ-

средину и климатске промјене. Такође, битно је и да се континуирано ради на унапређењу система управљања отпадом и да се подстиче свијест о важности правилне селекције отпада, јер количина и врста одложеног отпада утичу на квалитет ваздуха и друге елементе животне средине.

ment and climate change. It is also important to continuously work on improving the waste management system and to encourage awareness of the importance of proper waste selection, because the amount and type of disposed waste affects air quality and other elements of the environment.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Allen, M. R., Braithwaite, A., & Hills, C. C. (1997). Trace Organic Compounds in Landfill Gas at Seven UK Waste Disposal Sites. *Environmental Science & Technology*, 31(4), 1054–1061. <https://doi.org/10.1021/es9605634>
- Bicheldey, T. K., & Latushkina, E. N. (2010). Biogas Emission Prognosis at the Landfills. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7, 623–628. <https://doi.org/10.1007/BF03326172>
- Bove, R., & Lunghi, P. (2006). Electric Power Generation from Landfill Gas Using Traditional and Innovative Technologies. *Energy Conversion and Management*, 47(11–12), 1391–1401. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.08.017>
- Brown, T. P., Rushton, L., Mugglestone, M. A., & Meechan, D. F. (2003). Health Effects of a Sulphur Dioxide Air Pollution Episode. *Journal of Public Health*, 25(4), 369–371. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdg083>
- Desideri, U., Di Maria, F., Leonardi, D., & Proietti, S. (2003). Sanitary Landfill Energetic Potential Analysis: A Real Case Study. *Energy Conversion and Management*, 44(12), 1969–1981. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00224-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00224-8)
- Duan, Z., Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2021). Trace Gas Composition in Landfill Gas at Danish Landfills Receiving Low-Organic Waste. *Waste Management*, 122, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.001>
- Zuberi, M. J. S., & Ali, S. F. (2015). Greenhouse Effect Reduction by Recovering Energy from Waste Landfills in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.028>
- Zhang, Y., Ning, X., Li, Y., Wang, J., Cui, H., Meng, J., Teng, C., Wang, G., & Shang, X. (2021). Impact Assessment of Odor Nuisance, Health Risk and Variation Originating from the Landfill Surface. *Waste Management*, 126, 771–780. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.055>
- IPCC. (2007). *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Karapidakis, E. S., Tsave, A. A., Soupios, P. M., & Katsigiannis, Y. A. (2010). Energy Efficiency and Environmental Impact of Biogas Utilization in Landfills. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7, 599–608. <https://doi.org/10.1007/BF03326169>
- Kumar, A., & Sharma, M. P. (2014). Estimation of GHG Emission and Energy Recovery Potential from MSW Landfill Sites. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.11.004>
- Kumar, S., Mondal, A. N., Gaikwad, S. A., Devotta, S., & Singh, R. N. (2004). Qualitative Assessment of Methane Emission Inventory from Municipal Solid Waste Disposal Sites: A Case Study. *Atmospheric Environment*, 38(29), 4921–4929. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.052>
- Marti, V., Jubany, I., Pérez, C., Rubio, X., De Pablo, J., & Giménez, J. (2014). Human Health Risk Assessment of a Landfill Based on Volatile Organic Compounds Emission, Immission and Soil Gas Concentration Measurements. *Applied Geochemistry*, 49,

- 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.apgeoc-hem.2014.06.018>
- Mor, S., Ravindra, K., De Visscher, A., Dahiya, R. P., & Chandra, A. (2006). Municipal Solid Waste Characterization and Its Assessment for Potential Methane Generation: A Case Study. *Science of the Total Environment*, 371(1–3), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.04.014>
- Министарство за просторно уређење, грађевинарство и екологију Републике Српске. (2020). *Републички план управљања отпадом у Републици Српској за период 2019–2029*.
- Murphy, J. D., & McKeogh, E. (2004). Technical, Economic and Environmental Analysis of Energy Production from Municipal Solid Waste. *Renewable Energy*, 29(7), 1043–1057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.002>
- Pešević, D. (2022). *Upravljanje otpadom*. Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci.
- Pešević, D., & Marković, M. (2018). Uloga lokalne samouprave u uspostavljanju integralnog sistema upravljanja otpadom u Republici Srpskoj. U D. Filipović, D. Šantić, & M. Marić (Ur.), *Sedmi naučno-stručni skup sa međunarodnom učešćem „Lokalna samouprava u planiranju i uređenju prostora i naselja: Geneze i perspektive prostornog razvoja“*, *Zbornik radova* (str. 529–535). Asocijacija prostornih planera Srbije, Univerzitet u Beogradu – Geografski fakultet.
- Pešević, D., & Crnogorac, Č. (2008). Izbor lokacije deponije čvrstog otpada i uticaj na životnu sredinu na primjeru deponije „Ramići“ kod Banjaluke. *Гласник/Herald*, 12, 89–107.
- Salami, L., & Popoola, L. T. (2023). A Comprehensive Review of Atmospheric Air Pollutants Assessment Around Landfill Sites. *Air, Soil and Water Research*, 16. <https://doi.org/10.1177/11786221221145379>
- Sisani, F., Contini, S., & Di Maria, F. (2016). Energetic Efficiency of Landfill: An Italian Case Study. *Energy Procedia*, 101, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.009>
- Schweigkofler, M., & Niessner, R. (2001). Removal of Siloxanes in Biogases. *Journal of Hazardous Materials*, 83(3), 183–196. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00318-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00318-6)
- Tansel, B., & Inanloo, B. (2019). Odor Impact Zones Around Landfills: Delineation Based on Atmospheric Conditions and Land Use Characteristics. *Waste Management*, 88, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.028>
- Topić, M., Preradović, L., Stanković, M., Zimmermann, F., Fischer, W., Preradović, G., Pešević, D., & Topić, D. (2013). *Upravljanje otpadom u Republici Srpskoj: Analiza postojećeg stanja sa posebnim osvrtom na komunalna preduzeća*. Međunarodno udruženje naučnih radnika – AIS, Institut za geografiju i regionalno istraživanje Karl Frances.
- Themelis, N. J., & Ulloa, P. A. (2007). Methane Generation in Landfills. *Renewable Energy*, 32(7), 1243–1257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>
- US EPA. (2022). *Methane Emissions from Landfills*. <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas#methane>
- Hall, D. J., Upton, S. L., & Marsland, G. W. (1994). Designs for a Deposition Gauge and a Flux Gauge for Monitoring Ambient Dust. *Atmospheric Environment*, 28, 2963–2979. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90343-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90343-3)
- Hesterberg, T. W., Bunn, W. B., McClellan, R. O., Hamade, A. K., Long, C. M., & Valberg, P. A. (2009). Critical Review of the Human Data on Short-Term Nitrogen Dioxide (NO₂) Exposures: Evidence for NO₂ No-Effect Levels. *Critical Reviews in Toxicology*, 39(9), 743–781. <https://doi.org/10.3109/10408440903294945>
- CEC. (1999). Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste. *Official Journal of the European Communities*, 182, 1–19.
- Ciuła, J., Gaska, K., Generowicz, A., & Hajduga, G. (2018). Energy from Landfill Gas as an Example of Circular Economy. *EPJ Web of Conferences*, 30, Article 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183003002>

- Cudjoe, D., & Acquah, P. M. (2021). Environmental Impact Analysis of Municipal Solid Waste Incineration in African Countries. *Chemosphere*, 265, 129–186. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129186>
- Choi, Y. J., & Fernando, H. J. S. (2008). Implementation of a Windblown Dust Parameterization into MODELS-3/CMAQ: Application to Episodic PM Events in the US/Mexico Border. *Atmospheric Environment*, 42, 6039–6046. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.038>
- Chow, J. C., & Watson, J. G. (2002). Review of PM_{2.5} and PM₁₀ Apportionment for Fossil Fuel Combustion and Other Sources by the Chemical Mass Balance Receptor Model. *Energy & Fuels*, 16, 222–260. <https://doi.org/10.1021/ef0101715>
- WHO. (2006). *Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*. https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aq/en/
- Yechiel, A., & Shevah, Y. (2016). Optimization of Energy Generation Using Landfill Biogas. *Journal of Energy Storage*, 7, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.05.002>

Примљено / Received: 28. 06. 2023.

Исправљено / Revised: 19. 07. 2023.

Прихваћено / Accepted: 26. 07. 2023.