



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



mr Nikola Džolev

**MODEL ENERGETSKOG ISKORIŠĆENJA
DEPONIJSKOG GASA NA DEPONIJAMA SA
RECIRKULACIJOM KONCENTRATA I
PROCEDNE VODE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:
Prof. dr Goran Vujić

Novi Sad, 2018.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :	
Идентификациони број, ИБР :	
Тип документације, ТД :	Монографска документација
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација
Аутор, АУ :	Никола Џолев
Ментор, МН :	Проф. Др Горан Вујић
Наслов рада, НР :	Модел енергетског искоришћења депонијског гаса на депонијама са рецикулацијом концентрата и процедурне воде
Језик публикације, ЈП :	Српски
Језик извода, ЈИ :	Српски/Енглески
Земља публиковања, ЗП :	Република Србија
Уже географско подручје, УГП :	Војводина
Година, ГО :	2018.
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт
Место и адреса, МА :	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	9/162/150/19/83/-/-
Научна област, НО :	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
Научна дисциплина, НД :	Управљање отпадом
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	депоније комуналног отпада, бакља, депонијски гас, рецикулација, процедурна вода, концентрат, енергетско искоришћење, реверзна осмоса
УДК	
Чува се, ЧУ :	Библиотека ФТН
Важна напомена, ВН :	
Извод, ИЗ :	Депонијски гас који настаје као резултат анаеробних процеса унутар отпада на депонији може да се искористи као обновљиви извор енергије, смањујући уједно и загађење ваздуха. Третман процедурне воде у савременим постројењима за пречишћавање реверзном осмосом даје нежељени остатак – концентрат, који се уобичајено рецикулише на депонију као вид третмана. Ова дисертација се бави утицајем рецикулације на продукцију депонијског гаса, како би се омогућила боља управљивост и предикција читавог процеса управљања отпадом са циљем одржања стабилне производње депонијског гаса и повећања могућности његовог искоришћења у термо-енергетским постројењима.
Датум прихватања теме, ДП :	
Датум одбране, ДО :	
Чланови комисије, КО :	Председник: др Дејан Убавин, ван. проф. Члан: др Бранка Гвозденац Урошевић, ван. проф. Члан: др Александар Анђелковић, доцент Члан: др Александар Јововић, ред. проф. Члан, ментор: др Горан Вујић, ред. проф.
	Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents HPKe, CC :	Doctoral dissertation
Author, AU :	Nikola Džolev
Mentor, MN :	Prof. Dr. Goran Vujić
Title, TI :	Model of landfill gas energy utilization at landfills with concentrate and leachate recirculation
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2018
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/162/150/19/83/-/-
Scientific field, SF :	Environmental Engineering and Occupational Safety and Health
Scientific discipline, SD :	Waste Management
Subject/Key words, S/KW :	Municipal waste landfill, torch, landfill gas, recirculation, leachate, concentrate, energy utilization, reverse osmosis
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	Landfill gas resulting from the anaerobic processes in the waste at the landfill can be used as a renewable energy source, reducing both air pollution. Treatment of leachate in modern plants for the purification using reverse osmosis gives unwanted residue - concentrate, which is typically recirculated back to the landfill as a form of its treatment. This thesis deals with the influence of recirculation in the production of landfill gas, to allow for better handling and prediction of entire process of waste management in order to maintain stable production of landfill gas and increasing opportunities for its utilization in thermal and power plants.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Dejan Ubavin, PhD, associate professor
	Member: Branka Gviozdenac Urošević, PhD, associate prof.
	Member: Aleksandar Anđelković, PhD, assistant professor
	Member: Aleksandar Jovović, PhD, full professor
	Member, Mentor: Goran Vujić, PhD, full professor
	Menthor's sign

Model energetskega iskoriščenja deponijskega plina na deponijah sa recirkulacijom koncentrata i procesne vode

Doktorska disertacija. Fakultet tehničkih nauka. Univerzitet u Novom Sadu

Rezime

Energetsko iskorišćenje deponijskega plina nije novina na modernim kontrolisanim deponijah komunalnog otpada kakve postoje u svetu i već dugi niz godina predstavljaju jedan od prevladajućih tretmana otpada, kojim se kroz inženjerski pristup i način vrši njegovo skladištenje, upravljanje i kontrola emisija u životnu sredinu.

Određivanje količina deponijskega plina tokom vremena rada deponije razmatrano je kroz brojne numeričke modele koji se baziraju korišćenju matematičkih izraza kojima se opisuje produkcija deponijskega plina. Karakteristika ovih modela, osim što se odnose na deponije za otpad specifičnog sastava u zavisnosti od regiona na kojem se deponija nalazi, jeste da su vrlo grubo u procenama, da se vrednosti umnogome razlikuju u zavisnosti od primenjenog modela, te da dobijene vrednosti predstavljaju godišnje proseke. Osim toga, ovi modeli ne prikazuju promenu količina generisanog deponijskega plina tokom kraćih vremenskih intervala i ne daju jasnu sliku svih uticajnih parametara koji mogu da doprinesu stabilnijoj proizvodnji, pa samim tim i većoj mogućnosti energetskega iskorišćenja deponijskega plina sa akcentom na veće iskorišćenje termo-energetskih postrojenja, pa samim tim i isplativost ovakvih projekata u praksi. Merenja na deponiji komunalnog otpada u Bjeljini, jedinoj u regionu sa ugrađenim savremenim sistemima pokazala su pravu sliku generisanja deponijskega plina u praksi sa svim uticajnim parametrima.

U okviru ove doktorske disertacije razvijen je model energetskega iskorišćenja deponijskega plina na deponijah sa recirkulacijom koncentrata i procesne vode. Kroz sveobuhvatno istraživanje bazirano na laboratorijskim analizama, merenjima na postrojenjima i dodatnim eksperimentalnim merenjima na terenu, praćeno brojnim numeričkim analizama određen je kvalitativno-kvantitativni uticaj koncentrata na proizvodnju deponijskega plina. Ovo je jedan od retkih primera istraživanja rađenih na deponiji realnih razmera s obzirom na to da nas brojna literatura upućuje na rezultate istraživanja sprovedenih u kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Zahvaljujući merenjima tokom vremenskog perioda u trajanju od 16 meseci praćenim detaljnim numeričkim analizama sa proračunima na bazi bilansa vlage kreiran je matematički model koji relativno precizno opisuje zavisnost produkcije deponijskega plina od prispele, odnosno akumulirane vlage unutar deponije. Ovaj model je iskorišćen za predikciju količina generisanog deponijskega plina na mesečnom i dnevnom nivou primenom različitih udela recirkulacije procesne vode na deponiji za koju se utvrdilo da ima dominantan uticaj u odnosu na druge faktore, pa i same degradabilne organske materije koncentrata, na produkciju deponijskega plina koja je predstavljala polaznu osnovu za ovo istraživanje.

Rezultati ovog istraživanja treba da omogućе veću upravljivost procesa proizvodnje deponijskega plina primenom recirkulacije procesne vode sa svim pratećim radnjama za njeno uspešno sprovođenje u praksi u cilju sprovođenja znatno većeg broja novih projekata izgradnje termo-energetskih postrojenja sa korišćenjem deponijskega plina kao obnovljivog izvora energije.

Ključne reči: deponije komunalnog otpada, baklja, deponijski gas, recirkulacija, procesna voda, koncentrat, energetskega iskorišćenje, reverzna osmoza

Model of landfill gas energy utilization at landfills with concentrate and leachate recirculation

Doctoral dissertation. Faculty of Technical Sciences. University of Novi Sad

Abstract

Energy utilization of landfill gas (LFG) is not new to the modern controlled municipal waste landfills that exist in the world and for many years is one of the prevailing treatment of waste, which is the engineering approach and the way it performs storage, management and control of emissions into the environment.

Determination of the amount of LFG over time of landfill operation is considered by many numerical models that are based on using mathematical expressions that describe the LFG production. Feature of these models, except they relate to landfills for the specific waste composition depending on the region in which the landfill is located, is that they are very rough in the estimates, that the values vary widely depending on the applied model, and that the values obtained represent an annual average. In addition, these models do not show the changes in amount of generated LFG during shorter time intervals, and does not give a comprehensive picture of all influencing parameters that can contribute to stable manufacture, and hence more possibilities for energy utilization of LFG in thermal and power plants, and therefore the profitability of these projects in practice. Measurements on solid waste landfill in Bijeljina, the only one in the region with a built-in modern systems have shown the real picture of the LFG generation into practice with all influential parameters.

Within this doctoral thesis is developed a model of LFG energy utilization at landfills with concentrate and leachate recirculation. Through comprehensive research based on laboratory analysis, measurement on the plants and further experimental measurements in the field, followed by a number of numerical analysis is determined by the qualitative and quantitative impact of the concentrate in the production of LFG. This is one of the few examples of research done on the landfill realistic proportions due to the fact that many of literature refers to the results of research carried out under controlled laboratory conditions. Thanks to the measurement over a time period of 16 months, followed by detailed numerical analysis and calculations based on the mass balance is created a mathematical model that relatively accurately describes the dependence of LFG production from the moisture that has been received and accumulated within the landfill. This model was used to predict the amount of LFG generated on the monthly and daily application of different portions of recirculating leachate at the disposal site which is found to have a dominant effect with respect to all the other factors, and even the degradable concentrate organic matter in the LFG production, which is constituted the starting point for this research.

The results of this study should provide greater manageability of the LFG production process using recirculation of leachate with all the necessary actions for its successful implementation in practice in order to implement a much larger number of new construction projects of thermal power plants using LFG as a renewable energy source.

Key words: municipal waste landfills, landfill gas, torch, recirculation, leachate, concentrate, energy utilization, reverse osmosis

Sadržaj

1	UVOD	1
1.1	DEFINISANJE PREDMETA I PROBLEMA ISTRAŽIVANJA	1
1.2	POTREBE ZA ISTRAŽIVANJEM	2
1.3	ISTRAŽIVAČKI CILJEVI I ZADACI	3
1.4	METODE ISTRAŽIVANJA	4
1.5	HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	5
1.6	KRATAK PRIKAZ SADRŽAJA RADA	5
2	PREGLED DOSADAŠNIH ISTRAŽIVANJA	7
2.1	LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA	7
2.2	ISTRAŽIVANJA NA DEPONIJAMA REALNIH RAZMERA	9
2.3	PRIMERI RECIRKULACIJE PROCEDNE VODE NA DEPONIJAMA REALNIH RAZMERA	14
2.4	EFIKASNOST PRIKUPljanJA DEPONIJSKIH GASOVA I ODBEGLE EMISIJE U OKOLINU	19
3	ANALIZA TEHNOLOGIJA ENERGETSKOG ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASAA	24
3.1	TEHNOLOGIJE SA DIREKTNIM KORIŠĆENJEM DEPONIJSKOG GASAA	24
3.1.1	<i>Kotlovi</i>	24
3.1.2	<i>Peći i sušare</i>	25
3.1.3	<i>Infracrveni grejači</i>	26
3.1.4	<i>Isparavanje procednih voda</i>	27
3.2	TEHNOLOGIJE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE	27
3.2.1	<i>Motori sa unutrašnjim sagorevanjem</i>	27
3.2.2	<i>Gasne turbine</i>	28
3.2.3	<i>Kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije</i>	28
3.3	TEHNOLOGIJE ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASAA U RAZVOJU	28
3.3.1	<i>Priključenje deponijskog gasa na cevovod gasa visokog kvaliteta</i>	29
3.3.2	<i>Kotlovi na pirolizu</i>	29
3.3.3	<i>Anaerobna digestija</i>	29
3.4	IZBOR ODGOVARAJUĆE TEHNOLOGIJE	30
3.5	UTICAJNI PARAMETRI ZA REALIZACIJU PROJEKATA ENERGETSKOG ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASAA	30
3.5.1	<i>Direktno korišćenje toplotne energije</i>	30
3.5.2	<i>Proizvodnja električne energije</i>	32
3.6	TRETMAN DEPONIJSKOG GASAA	33
3.6.1	<i>Tipovi sistema za tretman</i>	33
3.6.2	<i>Troškovi tretmana deponijskog gasa</i>	35
3.7	PREGLED TEHNOLOGIJA ENERGETSKOG ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASAA	36
4	OPIS ODABRANOG POSTROJENJA, POSTAVKA EKSPERIMENTA I ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA	38
4.1	KARAKTERISTIKE DEPONIJE	38
4.1.1	<i>Postrojenje za prečišćavanje procednih voda</i>	39
4.1.2	<i>Sistem za prikupljanje i sagorevanje deponijskog gasa</i>	41
4.2	METODOLOGIJA RADA	41
4.3	ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA	44
4.3.1	<i>Laboratorijska merenja</i>	44
4.3.2	<i>Merenja sastava i protoka gasa</i>	50
5	MODELOVANJE PRODUKCIJE DEPONIJSKOG GASAA PRIMENOM MATEMATIČKIH MODELA	55

5.1	UVOD.....	55
5.2	ULAZNI PODACI.....	56
5.3	7REZULTATI	56
5.3.1	<i>LandGEM model</i>	56
5.3.2	<i>IPCC model</i>	58
5.3.3	<i>Centralni istočno-evropski model</i>	59
5.4	UPOREDNA ANALIZA DOBUJENIH REZULTATA NA BAZI PRORAČUNA I MERENJA.....	60
6	ANALIZA UTICAJNIH PARAMETARA NA PRODUKCIJU DEPONIJSKOG GASA	63
6.1	MERENJA PROTOKA SAGORELIH GASOVA	63
6.2	UTICAJ VLAGE.....	67
6.2.1	<i>Bilans vlage</i>	67
6.2.2	<i>Uticaj dnevnih padavina na vlažnost otpada i produkciju deponijskog gasa</i>	80
6.2.3	<i>Analiza rezultata dijagrama na dnevnom nivou</i>	82
6.3	UTICAJ POTPRITISKA NA KARAKTERISTIKE DEPONIJSKOG GASA	86
6.4	POTENCIJALNI UTICAJ RECIRKULACIJE KONCENTRATA	91
6.4.1	<i>Uticaj elektroprovodljivosti i pH vrednosti koncentrata na produkciju deponijskog gasa</i>	91
6.4.2	<i>Uticaj režima rada postrojenja za prečišćavanje na produkciju deponijskog gasa</i>	99
6.5	RECIRKULACIJA KONCENTRATA I PROCEDNE VODE NA DEPONIJI	100
6.6	UTICAJ TEMPERATURE SPOLJAŠNJEG VAZDUHA.....	107
6.7	OSTALI UTICAJI	108
7	PRIMENA RECIRKULACIJE CA ASPEKTA ENERGETSKOG ISKORIŠĆENJA DEPONIJSKOG GASA	110
7.1	UPOREDNA ANALIZA MODELA PRODUKCIJE DEPONIJSKOG GASA SA ASPEKTA DOVEDENE VLAGE	110
7.1.1	<i>Istočno-evropski (srpski) model</i>	110
7.1.2	<i>IPCC model</i>	112
7.1.3	<i>LandGEM model</i>	113
7.1.4	<i>Uticaj vlage dovedene recirkulacijom koncentrata na produkciju deponijskog gasa</i>	115
7.2	STRATEGIJA UPRAVLJANJA RECIRKULACIJOM	117
7.2.1	<i>Kriterijumi optimizacije recirkulacije procedne vode</i>	117
7.2.2	<i>Optimizacija po kriterijumu 1</i>	118
7.2.3	<i>Optimizacija po kriterijumu 2</i>	122
8	ZAVRŠNE NAPOMENE I ZAKLJUČCI	124
8.1	OPŠTE NAPOMENE.....	124
8.2	ZAKLJUČCI	125
8.3	PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA	127
9	LITERATURA.....	130
10	SPISAK PUBLIKACIJA	139
11	BIOGRAFIJA	141

Lista slika

Slika 2.1 Poređenje kumulativnih količina padavina, stvarno generisane i recirkulisane procedne vode... 9	9
Slika 2.2 Promene pH vrednosti tokom recirkulacije procedne vode (Warith, 2002)	10
Slika 2.3 Promene vrednosti koncentracija HPK i BPK na deponiji Trail Road u Ontariju (Warith, 2002)..	10
Slika 2.4 Prosečne vrednosti protoka deponijskog gasa na mesečnom nivou (Yolo County, 1998).....	12
Slika 2.5 Kumulativne količine deponijskog gasa (Yolo County, 1998)	12
Slika 2.6 Kumulativne količine dovedene vlage kontrolisanoj ćeliji tokom vremena (Yolo County, 1998)	12
Slika 2.7 Normalizovane krive kumulativne proizvodnje gasa tokom vremena za 6 ćelija (Halvadakis, Findikakis, Papelis, & Leckie, 1988).....	13
Slika 2.8 Efekat recirkulacije na generisanje procedne vode (Reinhart, 1996)	14
Slika 2.9 Parametri procedne vode (El-Fadel, Bou-Zeid, Chahine, & Alayli, 2002)	16
Slika 2.10 Efekat drenažne mreže guma na protok procedne vode (Zhang, Heng, Jeng, & Xu, 2017)	19
Slika 2.11 Kontrolisano odlaganje otpada: Promena udela prikupljanja metana, sagorevanja na baklji i emisija u atmosferu u odnosu na ukupno generisane emisije na kontrolisanim deponijama u EU 28+ISL (EEA Report, 2018).....	21
Slika 2.12 Kontrolisano odlaganje otpada: Stopa prikupljanja i sagorevanja metana na baklji u 2016. godini (EEA Report, 2018)	22
Slika 4.1 Dijagram toka sistema za tretman procedne vode i prikaz mesta uzorkovanja	42
Slika 4.2 Raspored biotrnova (B), izlivnih mesta koncentrata (K)	43
Slika 4.3 Prikaz biotrna	43
Slika 4.4 Trenutna zavisnost HPK od elektroprovodljivosti na bazi laboratorijskih analiza: (a) procedne vode i koncentrata u zavisnosti od mesta uzorkovanja, (b) zajedno za procednu vodu i koncentrat, (c) permeata	45
Slika 4.5 Promena indikatora biodegradabilnosti tokom vremena rada deponije	46
Slika 4.6 Efikasnost rada postrojenja tokom perioda eksperimentalnih merenja	48
Slika 4.7 Promena elektroprovodljivosti	48
Slika 4.8 Promena pH vrednosti voda	49
Slika 4.9 Promena pH vrednosti procedne voda	49
Slika 4.10 Potencijalni protoci prikupljenog metana i deponijskog gasa tokom vremena razgradnjom suve organske materije iz koncentrata	50
Slika 4.11 Višak vlage u neposrednom okruženju biotrna B-5 sa najvećom produkcijom metana	52
Slika 4.12 Odlaganje koncentrata na deponiji biotrna	52
Slika 5.1 Ukupne emisije tokom vremena	57
Slika 5.2 Analiza osetljivosti protoka gasa	57
Slika 5.3 Protok metana i gasa tokom vremena	58
Slika 5.4 Analiza osetljivosti protoka gasa	59
Slika 5.5 Generisanje i prikupljanje metana i gasa	59
Slika 5.6 Analiza osetljivosti protoka gasa	60
Slika 5.7 Generisanje i prikupljanje metana i deponijskog gasa na bazi merenja	60
Slika 6.1 Sagorela količina gasova tokom vremena	64
Slika 6.2 Protok gasova na bazi očitanih vrednosti trenutnih merenja	64
Slika 6.3 Protok gasova na bazi merenja i proračuna	65
Slika 6.4 Krive protoka deponijskog gasa na dnevnom nivou na bazi trenutnih merenja protoka i prosečnih vrednosti na bazi ukupno izmerenih količina	65
Slika 6.5 Krive protoka deponijskog gasa po mesecima na bazi trenutnih merenja protoka i prosečnih vrednosti na bazi ukupno izmerenih količina u periodu od septembra 2014. do aprila 2016. godine	65
Slika 6.6 Promena prosečnih vrednosti protoka deponijskog gasa i metana	66
Slika 6.7 Promena prosečnih vrednosti koncentracije metana u deponijskom gasu	66
Slika 6.8 Kretanje vode kroz deponiju	68
Slika 6.9 Promena koeficijenta oticanja i temperature tokom vremena (Tatsi & Zouboulis, 2002).....	74

Slika 6.10 Zavisnost koeficijenta raspodele oticanja od spoljašnje temperature	74
Slika 6.11 Linearna kriva zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji	77
Slika 6.12 Kriva zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji opisana polinomom 3. stepena	77
Slika 6.13 Usporedna promena protoka gasa i rezultantne vlage akumulirane na deponiji	78
Slika 6.14 Krive zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji (pri $\omega_{rez} = 0$)	79
Slika 6.15 Usporedni prikaz vrednosti protoka deponijskog gasa, padavina i rezultujuće akumulirane vlage	81
Slika 6.16 Linearna kriva zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji	82
Slika 6.17 Usporedni prikaz promene protoka, padavina i akumulirane vlage tokom septembra 2014. godine	83
Slika 6.18 Usporedni prikaz promene protoka, padavina i akumulirane vlage po mesecima u periodu od oktobra 2014 do novembra 2015. godine	85
Slika 6.19 Izgled display-a na kojem korisnik vrši podešavanje otvorenosti ventila ili vakuuma (Uputstvo za korišćenje touch panela na baklji)	86
Slika 6.20 Zavisnost koncentracije metana od prisustva kiseonika u deponijskom gasu	88
Slika 6.21 Prikaz vrednosti O ₂ koncentracije i protoka deponijskog gasa u zavisnosti od OV u periodu 01-05.09.2014. godine (slike a i b) i periodu 12-17.09.2014. godine (slike c i d)	89
Slika 6.22 Promena O ₂ koncentracije u deponijskom gasu u periodu 09.03-04.12.2015. godine	90
Slika 6.23 Promena protoka deponijskog gasa i metana u periodu 09.03-04.12.2015. godine	90
Slika 6.24 Dijagram promene parametara procedne vode i deponijskog gasa tokom vremena	93
Slika 6.25 Promena faktora koncentracije i odnosa elektroprovodljivosti koncentrata i procedne vode ..	95
Slika 6.26 Promena pritiska na membranama	96
Slika 6.27 Promena protoka tokom vremena	97
Slika 6.28 Promena EC vrednosti i efikasnosti rada postrojenja	97
Slika 6.29 Nagli pad efikasnosti procesa prečišćavanja postrojenja (19-22.ciklus rada)	97
Slika 6.30 Promena ω vrednosti tokom meseci	98
Slika 6.31 Promena elektroprovodljivosti procedne vode – stvarne i računске vrednosti	99
Slika 6.32 Promena količine akumulirane vlage unutar otpada i protoka deponijskog gasa u zavisnosti od režima rada postrojenja za prečišćavanje (1 – režim rada u 2015.godini, 2 – režim rada u 2014. godini)	100
Slika 6.33 Produkcija deponijskog gasa za različite uslove recirkulacije koncentrata i procedne vode ($\varphi r = 0\%$)	101
Slika 6.34 Produkcija deponijskog gasa u zavisnosti od udela recirkulacije procedne vode ($\varphi r = 0\%$) ..	101
Slika 6.35 Produkcija deponijskog gasa u zavisnosti od udela recirkulacije procedne vode ($\varphi r = 100\%$)	102
Slika 6.36 Shema strujanja procedne vode i koncentrata na deponiji	103
Slika 6.37 Produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ωr i φr	105
Slika 6.38 Prosečna produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ωr i φr	106
Slika 6.39 Uticaj spoljašnje temperature na produkciju deponijskog gasa	107
Slika 6.40 Krive protoka deponijskog gasa po mesecima u zavisnosti od promene temperature spoljšanjeg vazduha	108
Slika 6.41 Krive protoka deponijskog gasa po danima u zavisnosti od promene temperature spoljšanjeg vazduha	108
Slika 7.1 Stopa povećanja protoka deponijskog gasa na primeru Istočno-evropskog (srpskog) modela ..	110
Slika 7.2 Uticaj vrednosti parametara ωr i φr na povećanje udela vlage recirkulacijom u odnosu na padavine	111
Slika 7.3 Stopa povećanja protoka deponijskog gasa na primeru IPCC modela	113
Slika 7.4 Prosečne vrednosti protoka generisanog deponijskog gasa u zavisnosti od k	114
Slika 7.5 Stopa povećanja protoka deponijskog gasa na primeru LandGEM modela	114
Slika 7.6 Povećanje protoka deponijskog gasa u odnosu na povećanje priliva vlage	115

Slika 7.7 Prikaz korigovanih vrednosti parametra ωr za date scenarije	121
Slika 7.8 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (mesečni proseci)	121
Slika 7.9 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (vrednosti na dnevnom nivou)....	121
Slika 7.10 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (mesečni proseci)	122
Slika 7.11 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (vrednosti na dnevnom nivou)..	122

Lista tabela

Tabela 2.1 Gruba procena broja godina potrebnih da se dostigne kvalitet konačnog odredišta za različite tipove procedne vode za dve stope produkcije procedne vode. Prosečna visina otpada je pretpostavljena sa 12 m.....	15
Tabela 3.1 Uobičajene veličine projekata sa direktnim korišćenjem deponijskog gasa (International Best Practices, GMI).....	26
Tabela 3.2 Instalirani električni kapacitet postrojenja za proizvodnju električne energije u pojedinim zemljama (International Best Practices, GMI).....	27
Tabela 3.3 Pregled tehnologija energetskog iskorišćenja deponijskog gasa (International Best Practices, GMI).....	36
Tabela 4.1 Parametri organskog zagađenja procedne vode i indikator biodegradabilnosti.....	46
Tabela 4.2 Izmerena koncentracija metana i bezdimenzioni protok deponijskog gasa po biotrnovima...	51
Tabela 5.1 Stopa generisanja deponijskog gasa tokom godina na bazi modela i merenja.....	61
Tabela 6.1 Izračunavanje vrednosti evapotranspiracije.....	73
Tabela 6.2 Vrednosti parametara mesečnih bilansa vlage na deponiji.....	76
Tabela 6.3 Prikaz merenih i računskih vrednosti protoka deponijskog gasa sa odstupanjima.....	78
Tabela 6.4 Prikaz merenih i računskih vrednosti protoka deponijskog gasa sa odstupanjima ($\omega_{rez} = 0$)...	79
Tabela 6.5 Vrednosti protoka deponijskog gasa po mesecima na bazi podataka dobijenih na dnevnom nivou.....	82
Tabela 6.6 Produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ω_r i φ_r	106
Tabela 6.7 Prosečna produkcija deponijskog gasa krajem posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ω_r i φ_r	106
Tabela 7.1 Povećanje prosečne produkcije deponijskog gasa za različite vrednosti parametara ω_r i φ_r	111
Tabela 7.2 Povećanje udela recirkulacijom procedne vode u odnosu na „zatečeno“.....	112
Tabela 7.3 Optimizovane vrednosti recirkulacije sa pripadajućim protocima deponijskog gasa.....	119
Tabela 7.4 Definisane scenarije sa različitim referentnim vrednostima $V_{gmax, mes}$	120
Tabela 7.5 Pregled optimizovanih vrednosti parametra ω_r po scenarijima.....	120

Posvećeno mojoj porodici i roditeljima

1 Uvod

Sanitarna deponija, kao deo lokacije na kojoj je moguće bezbedno odložiti komunalni otpad, predstavlja najjednostavnije prihvatljivo rešenje savremenog upravljanja otpadom. Na ovakav način se obezbeđuje izolovanje otpada od okoline, što omogućava upravljanje njegovim produktima, kao što su generisani deponijski gasovi i procedna voda, sa ciljem ograničavanja emisija zagađujućih materija u spoljašnju sredinu.

Kada su u pitanju sanitarne deponije, generalno, postoje dva koncepta, a to su: konvencionalna ili suva deponija i bioreaktorska ili vlažna deponija. Osnovni cilj projektovanja konvencionalnih sanitarnih deponija je da se na njima odlaže otpad tako da se smanji njegov negativan uticaj na ljude i životnu sredinu. Ove deponije se rade tako da se minimizira prodiranje vlage na deponiju kako bi se smanjile emisije koje potiču od procedne vode i gasova u okolinu. Ovakav koncept deponovanja generiše potencijalni problem i rizik po životnu sredinu koji se ostavlja u nasleđe budućim generacijama. Otpad godinama može da ostane „netaknut“ unutar deponije, koja, poput tempirane bombe, može u svakom trenutku da se aktivira usled havarija na sistemu i dovede do ozbiljnih negativnih uticaja na okolinu.

Napredno znanje ponašanja deponije i procesa razlaganja čvrstog komunalnog otpada dovelo je do koncepta koji je omogućio nadogradnju postojeće tehnologije, od skladištenja otpada, do pristupa, koji je baziran, na procesiranju otpada unutar deponije, odnosno tzv. bioreaktorskoj deponiji. Nasuprot konvencionalnoj deponiji, bioreaktorska deponija se projektuje tako da se u najvećoj meri obezbedi prodor vlage u otpad kako bi se smanjilo kretanje procedne vode u slojeve podzemnih voda, a intenziviralo generisanje deponijskog gasa pod kontrolisanim uslovima. Koncept bioreaktorske deponije je razvijen sa ciljem da se pojača i ubrza degradacija organskog otpada kontrolisanjem sadržaja vlage otpada, snabdevanjem nutrijentima i sejanjem mikroorganizama putem recirkulacije procedne vode, sa ciljem stabilizacije otpada i dovođenja u inertno stanje u kratkom vremenskom periodu. Za razliku od konvencionalne deponije ovaj koncept dozvoljava aktivno upravljanje bazirano na razumevanju bioloških, hemijskih i fizičkih procesa koji se na deponiji odvijaju.

Kao rezultat tretmana i većeg stepena razlaganja otpada unutar deponije, kao rezultat anaerobnih procesa, dodatno podstaknutih dejstvom vlage, generišu se značajnije veće emisije deponijskog gasa. Ove emisije je potrebno kontrolisano odvesti iz tela deponije kako bi se prvenstveno smanjio rizik od eksplozije, eliminisali neprijatni mirisi, smanjio rizik za okolna naselja, a potom kontrolisanim sagorevanjem redukovale i emisije metana u atmosferu smanjenjem uticaja na efekat staklene baste. U svetu današnjice, kada su energetska efikasnost i korišćenje energije dobijene iz obnovljivih izvora postali imperativ, sa ciljem da se u što većoj meri uspori proces globalnog zagrevanja planete i sve očiglednijih klimatskih promena, iskorišćenje deponijskog gasa u energetske svrhe treba da predstavlja dodatni motiv stručnjaka iz oblasti energetike, i svakako jedan od najznačajnijih zadataka stručnjaka koji se bave upravljanjem otpadom.

1.1 Definisane predmeta i problema istraživanja

Predmet istraživanja ovog rada jeste sanitarna deponija komunalnog otpada, anaerobnog tipa, sa recirkulacijom koncentrata. Koncentrat je zagađena, zapreminski redukovana i samim tim, koncentrovana procedna voda nastala iz tretmana prečišćavanja u postrojenju reverzne osmoze. Sa

ugrađenim sistemom za recirkulaciju procedne vode iz otpada, pre njenog tretmana u postrojenju za prečišćavanje, ovakva deponija se može svrstati u kontrolisanu sanitarnu deponiju, koja predstavlja prelazno rešenje od konvencionalne do bioreaktorske deponije. Recirkulacija koncentrata na deponiju predstavlja jedan od vidova njegovog tretmana o čijem uticaju postoje oprečna mišljenja u stručnoj javnosti, kao i pitanje da li se sa ovom praksom može nastaviti i u budućnosti s obzirom na uticaj zagađujućih materija iz koncentrata i njihovu akumulaciju stalnim dovođenjem na deponiju. Ova doktorska disertacija se neće baviti tokovima materijala i supstanci, već prvenstveno kvalitativnim i kvantitativnim uticajem koncentrata, odnosno procedne vode, na produkciju deponijskog gasa iz otpada, a samim tim i mogućnosti za njegovo energetske iskorišćenje.

Kvalitativan uticaj oglada se u prisustvu organske materije u procednoj vodi, a naročito koncentratu, potencijalu generisanja deponijskog gasa iz ove materije, kao i mogućnosti njene razgradnje prolaskom kroz otpad. Kvantitativan uticaj recirkulacije odnosi se u najvećoj meri na mogućnost za povećanje vlažnosti otpada čime bi se ostvarila njegova pojačana razgradnja, a samim tim i produkcija deponijskog gasa.

1.2 Potrebe za istraživanjem

U skladu sa Direktivom o promociji korišćenja energije iz obnovljivih izvora (Directive 2009/28/EC, 2009) i Odlukom Ministarskog saveta Energetske zajednice od 18. oktobra 2012. godine (D/2012/04/MS – EnZ) određen je veoma ambiciozan obavezujući cilj za Republiku Srbiju koji nalaže dostizanje 27% ukupnog učešća obnovljivih izvora energije u njenoj bruto finalnoj potrošnji energije do 2020. godine. Nacionalnim akcionim planom za obnovljive izvore energije (Akcioni plan, 2013), postavljen je cilj da se do 2020. godine dostigne kapacitet od 10 MW iz novih postrojenja koja koriste deponijski gas za proizvodnju električne energije. Trenutno u Srbiji nije izgrađena ni jedna elektrana koja koristi deponijski gas, dok je instalisani električni kapacitet postrojenja za proizvodnju električne energije iz deponijskog gasa do 2011. godine u svetu iznosio 3228 MW (International Best Practices, GMI). Sa druge strane, unapređenje postojeće prakse deponovanja otpada u Srbiji, koje se tiče prelaska sa otvorenih smetlišta na sanitarne deponije, kojima se postiže bezbednije i organizovanije odlaganja većih količina otpada i uspostavljanje boljih higijenskih i estetskih uslova, dovodi do povećane produkcije metana (CH₄). Metan je drugi najznačajniji gas sa efektom staklene bašte i odgovoran je za oko 40% globalnog zagrevanja tokom poslednjih 150 godina (Hansen, i drugi, 1998). Potencijal globalnog zagrevanja metana, koji u atmosferi opstaje 10 godina, sa procenom tokom 100-godišnjeg ciklusa je od 23 do 25 puta veći od ugljen-dioksida (Wuebbles & Hayhoe, 2002), a procene idu i do 28 puta (Stocker, i drugi, 2013).

Ovo govori, pre svega, o potrebi da se metan na odgovarajući način prikuplja i tretira, kako bi se sprečile njegove emisije u atmosferu, a potom i da se koristi u energetske svrhe. Iako politika upravljanja otpadom u zemljama Evropske unije, odavno svrstava sanitarnu deponiju kao četvrti i najmanje poželjan od alternativnih načina upravljanja odlaganjem čvrstog komunalnog otpada (Hjelmar, Johannessen, Knox, & et al., 1995), ključni razlog za veliku zastupljenost sanitarnih deponija oglada se u činjenici da su uporedne studije sprovedene u nekoliko zemalja među različitim alternativnim metodama tretmana čvrstog komunalnog otpada pokazale da je ovo ekonomski najpogodnija opcija (Lema, Mendez, & Blazquez, 1988), koja iz tog razloga predstavlja optimalno rešenje za zemlje u razvoju. Tokom godina u svetu je došlo do unapređenja koncepta sanitarnih deponija u naprednije tipove, kao što su kontrolisane i bioreaktorske deponije. Ovakav pristup tretmanu otpada više ne posmatra deponiju samo kao mesto za skladištenje otpada, već kao postrojenje za tretman otpada u kojem se vrši njegovo kontrolisano i ubrzano razlaganje (Christensen, Scharff, & Hjelmar, 2011).

Navedene činjenice jasno ukazuju na potrebu za saznanjima iz prakse rada sanitarnih deponija komunalnog otpada u vezi sa generisanjem deponijskog gasa, koje bi bilo podržano naučnim istraživanjima na deponijama koje imaju implementirane sisteme za prikupljanje i monitoring deponijskog gasa i procedne vode. S obzirom da se deponije projektuju sa kapacitetom odlaganja otpada tokom perioda od 30 godina, kao i da energetska postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa imaju vek trajanja u proseku od 15 do 30 godina, u zavisnosti od primenjene tehnologije, jasno je da se radi o projektima koji mogu da budu veoma atraktivni jer ispunjavaju veliki broj kriterijuma (tehnički, ekonomski, socijalno-društveni i dr.) koji su u saglasnosti sa održivim razvojem.

Prečišćavanje procedne vode na predmetnoj deponiji vrši se putem postrojenja za reverznu osmozu, dok se koncentrat tretira tako što se recirkulacijom vraća na deponiju. Pored recirkulacije koncentrata, postoji nezavisni cevovod za recirkulaciju procedne vode na deponiju. Recirkulacija procedne vode je vršena u početku rada deponije, da bi se ova praksa sa izgradnjom modernog postrojenja za prečišćavanje značajno smanjila i koristi se samo u meri da se na dnevnom nivou proveri rad cirkulacionih pumpi. To je praksa za koja bi u budućnosti mogla da se promeni sa ciljem postizanja optimalnog energetske iskorišćenja deponijskog gasa, kao i generalnog poboljšanja prakse upravljanja otpadom, što bi trebalo da bude podržano i istraživanjem u okviru ove doktorske disertacije.

U inženjerskoj praksi se za modelovanje produkcije deponijskog gasa koriste razni softverski alati nastali na bazi matematičkih modela generisanja deponijskog gasa. Međutim, iskustva u praksi govore da stvarne količine generisanog gasa mogu značajno da se razlikuju od količina dobijenih predikcijama na bazi postojećih modela. Sa druge strane ovi modeli daju predikciju količina generisanih gasova tokom dužeg vremenskog perioda, ali na nivou celogodišnjih vrednosti bez upliva u promene na godišnjem, mesečnom i dnevnom nivou, koje su značajne kada je reč o energetske iskorišćenju deponijskog gasa.

Rezultati dobijeni istraživanjima govore da je koncept bioreaktorskih deponija održiv, iako postoji relativno mali broj istraživanja na deponijama realnih razmera u odnosu na brojna laboratorijska istraživanja. Veliki broj izvedenih projekata u svetu govori o značajnom potencijalu za iskorišćenje deponijskog gasa u energetske svrhe. Međutim, zaključci upućuju na to da su potrebna dodatna istraživanja na deponijama realnih razmerama kako bi se održivost koncepta dodatno opravdala i dokazala, te ohrabrila dalja implementacija projekata energetske iskorišćenja deponijskog gasa. Naravno, stečeno znanje i iskustvo iz drugih delova sveta se može iskoristiti i predstavlja dobru osnovu za dalja istraživanja.

1.3 Istraživački ciljevi i zadaci

Da bi se pomoglo prevazilaženju problema vazanih za projektovanje, dimenzionisanje i rad sistema za upravljanje procednom vodom i deponijskim gasovima, poželjno je da se ima što je moguće veća kontrola nad njihovim generisanjem, što bi omogućilo da se proces prenese iz oblasti neizvesnosti do predvidljivosti. Istraživanje, predviđeno doktorskom disertacijom, treba da proveri činjenicu da kvalitativni i kvantitativni sadržaj vlage u otpadu, koji u značajnoj meri zavisi od klimatskih uslova (padavine, temperatura), ima značajan uticaj na generisanje deponijskog gasa iz otpada, a samim tim i na promenljivost njegovog protoka tokom vremena, koji prati dinamiku promene spoljašnjih uslova. Stoga će se ovo istraživanje, osim uticaja koncentrata, baviti i generalno uticajem vlage na generisanje deponijskog gasa, što je obuhvaćeno i eksperimentalnim delom rada kao sastavnim i neizostavnim delom istraživanja. Redovna i eksperimentalna merenja treba da dovedu u vezu potencijalne zavisnosti produkcije deponijskog gasa od uticajnih parametara, odnosno kreiranje krivih zavisnosti sa pratećim greškama mogućih odstupanja stvarnih i numeričkih dobijenih vrednosti, kako bi dalje mogao da se kreira i opiše model koji će u najboljoj meri opisati promene i omogućiti kreiranje željenih scenarija

upravljanja proizvodnjom deponijskog gasa i njegovog energetskog iskorišćenja u zavisnosti od postavljenih kriterijuma.

Celokupno istraživanje treba da pokaže u kojoj meri bi veća primena bioreaktorskog koncepta u radu deponije, podržanog recirkulacijom procedne vode, u odnosu na dosadašnju preovlađujuću primenu tradicionalnog koncepta, mogla da utiče na stopu generisanja deponijskog gasa i povećanje efikasnosti njegovog iskorišćenja u budućem energetskom postrojenju. Na ovakav način bi se omogućilo da energetska postrojenja ne budu ni poddimenzionisana (usvajanjem kapaciteta na bazi minimalnih količina gasa), a ni predimenzionisana (usvajanjem kapaciteta na bazi maksimalnih količina gasa). Manji kapaciteti od optimalnih bi za posledicu dali smanjenu efikasnost iskorišćenja generisanog gasa, uz spaljivanje većeg udela količina na baklji. Veći kapaciteti doveli do toga da su postrojenja veći deo vremena rade pri niskim opterećenjima ili da nisu u pogonu uopšte, što bi prouzrokovalo pad efikasnosti i nedovoljno iskorišćenje samih postrojenja.

Glavni zadatak koje se nalazi u osnovi ove doktorske disertacije je istraživanja uticaja recirkulacije koncentrata na produkciju deponijskog gasa na deponiji čvrstog komunalnog otpada praćeno monitoringom parametara koncentrata uz merenje sastava i protoka gasa na biotnovima kojima je pokrivena celokupna površina deponije. S obzirom da potencijal produkcije deponijskog gasa iz koncentrata zavisi od prisustva organske materije u njemu, jedan od posebnih zadataka istraživanja jeste određivanje potencijalnog i stvarnog uticaja organske materije sadržane u koncentratu na generisanje deponijskog gasa. Takođe treba utvrditi eventualnu promenljivost uticaja koncentrata tokom vremena rada koja potiče od primene same prakse recirkulacije, ali i od specifičnosti samog upravljanja recirkulacijom. Kako bi se ispitao uticaj recirkulacije na produkciju deponijskog gasa, treba utvrditi njen karakter i izolovati je od drugih uticaja i promena, što nije lak zadatak s obzirom na veći broj uticajnih parametara.

Cilj ovog istraživanja je razvoj modela energetskog iskorišćenja deponijskog gasa kao rezultat teorijskih analiza i merenja. Planirana merenja obuhvataju prethodna merenja relevantnih parametara rada postrojenja i naknadna eksperimentalna merenja. U poređnom analizom protoka gasa na bazi merenja i bilansa vlage na bazi teorijskih preporuka iz literature, te uz dodatnu korekciju faktora koji utiču na bilans vlage u skladu sa merenjima na realnoj deponiji, treba da se odredi zavisnost produkcije deponijskog gasa od dovedene vlage. Nastojace se sprovođenje uporedne analize na mesečnom i dnevnom nivou, kako bi se u najboljoj meri utvrdio karakter i značaj promena i njihova inertnost. Istraživanje treba da pokaže mogućnost predikcije generisanja deponijskog gasa u realnom vremenu, kao i primene odgovarajuće strategije recirkulacije koncentrata i procedne vode sa ciljem boljeg upravljanja procesima koji utiču na generisanje deponijskog gasa. Analizom vrednosti dobijenih proračunom i merenjima treba odrediti oblast uticaja recirkulacije, koja svakako predstavlja funkciju drugih nepoznatih parametara koji zavise od karakteristika deponovanog otpada.

1.4 Metode istraživanja

U cilju uspešnog odgovora na postavljene zadatke izvodi se eksperimentalna analiza koja se zasniva na uzorkovanju procedne vode i koncentrata na deponiji radi daljih laboratorijskih analiza. Osim toga, sprovode se i direktna merenja na deponiji korišćenjem kalibrisanih mernih uređaja. Na osnovu numeričke analize podataka dobijenih teorijskim i eksperimentalnim putem dolazi se do odgovarajućih zaključaka. Ovi zaključci se dalje koriste u sveobuhvatnijoj numeričkoj analizi, koja uključuje obradu prikupljenih relevantnih podataka tokom 2-godišnjeg rada postrojenja, sa ciljem kreiranja adekvatnog modela produkcije deponijskog gasa na bazi utvrđenih zavisnosti. Uzorak je definisan tako da testiranja modela pokazuju dovoljnu tačnost, tako da primena formiranog modela može da garantuje objektivna predviđanja i zaključke. Rezultati dobijeni modelovanjem na bazi utvrđenih zavisnosti za konkretan tip

deponije porede se sa vrednostima na bazi poznatih matematičkih modela. Sledi simulacija modela promenom ulaznih parametara, a potom i optimizacija koja u datim uslovima treba da obezbedi adekvatnu strategiju upravljanja recirkulacijom procedne vode i koncentrata sa ciljem većeg energetskeg iskorišćenja deponijskog gasa. U istraživanjima se koriste metode uporedne analize, metoda modelovanja i metoda numeričke simulacije.

1.5 Hipoteze istraživanja

Na osnovu postavljenog cilja definisana je i osnovna hipoteza, da se primenom modela energetskeg iskorišćenja deponijskog gasa može izvršiti optimizacija procesa produkcije deponijskog gasa, primenom adekvatne strategije recirkulacije procedne vode i koncentrata na deponiji, na bazi definisanih kriterijuma.

Za proveru hipoteze, u okviru istraživanja potrebno je da se ispune sledeći zadaci:

1. Sprovođenje teorijskih i laboratorijskih analiza mogućnosti produkcije deponijskog gasa iz organske materije sadržane u koncentratu i procednoj vodi koji se vraćaju na deponiju i utvrđivanje, koliko je moguće preciznije, funkcionalne zavisnosti dovedene vlage otpadu na produkciju deponijskog gasa;
2. Razvoj modela energetskeg iskorišćenja na bazi redovnih i eksperimentalnih merenja relevantnih parametara koji omogućuje adekvatnu tačnost rezultata u odnosu na vrednosti dobijene merenjima;
3. Sprovođenje analiza predloženih operativnih strategija i razmatranje primene recirkulacije koncentrata i procedne vode sa aspekta energetskeg iskorišćenja.

Posebne hipoteze istraživanja su:

1. Recirkulacija koncentrata utiče na povećanje količina generisanog deponijskog gasa;
2. Vlažnost otpada ima presudan uticaj na količine generisanog deponijskog gasa;
3. Produkcija deponijskog gasa na deponijama sa recirkulacijom koncentrata i procedne vode može se predstaviti odgovarajućim modelom koji se može koristiti u daljim simulacijama u cilju efikasne i pouzdane predikcije količina deponijskog gasa u realnom vremenu na bazi konkretnih klimatskih uslova i u zavisnosti od usvojenog režima recirkulacije;
4. Primenom kalibrisanog modela energetskeg iskorišćenja moguće je u boljoj meri upravljati procesom produkcije deponijskog gasa, a samim tim uticati i na povećanje efikasnosti njegovog energetskeg iskorišćenja, koji je u saglasnosti i sa drugim ciljevima upravljanja otpadom na deponiji.

1.6 Kratak prikaz sadržaja rada

U okviru uvoda definisan je predmet i problem istraživanja, obrazložene potrebe za ovakvim istraživanjem, ciljevi i zadaci, metode i hipoteze istraživanja.

U okviru drugog poglavlja dat je pregled korišćene literature u dosadašnjim istraživanjima koja je poslužila kao teorijska osnova za istraživanje sprovedeno u ovom radu. Izbor odgovarajuće stručne literature je obuhvatio brojna istraživanja sprovedena u laboratorijskim uslovima. S obzirom na predmetno istraživanje, razmatrani su posebno i detaljnije radovi sa merenjima i analizama sprovedenim na realnim deponijama.

S obzirom da je u osnovi ovog rada naglašeno energetska iskorisćenje deponijskog gasa, te da je predmetno istraživanje sprovedeno sa ciljem njegovog unapređenja i povećanja realizacije ovakvih projekata u praksi, treće poglavlje se bavi detaljnijom analizom i mogućnostima primene u praksi tehnologija energetska iskorisćenja deponijskog gasa.

U četvrtom poglavlju je opisano postrojenje na kojem je rađeno eksperimentalno istraživanje sa primenjenom metodologijom rada. Dobijeni rezultati merenja su tabelarno prikazani i analizirani uz donošenje odgovarajućih zaključaka.

U petom poglavlju su analizirani postojeći modeli koji se uobičajeno koriste u inženjerskoj praksi za proračun količina deponijskog gasa na deponiji tokom vremena. Ovi modeli su iskorisćeni za proračun količina deponijskog gasa na bazi ulaznih podataka koji se tiču konkretne deponije, da bi se kroz dalju analizu dobijeni rezultati uporedili sa rezultatima dobijenim na bazi merenja. Analizirana je osetljivost modela s obzirom na padavine, koje predstavljaju glavni izvor vlage koja se dovodi deponovanom otpadu.

Dalja numerička analiza se sprovodi u poglavlju 6, a tiče se sagledavanja glavnih uticajnih parametara na produkciju deponijskog gasa uporednom analizom podataka dobijenih različitim merenjima, među kojima su parametri koji opisuju karakteristike generisanog deponijskog gasa i procedne vode, parametri koji opisuju režim rada postrojenja, kao i meteorološki podaci. Cilj ove analize je izrada novog modela produkcije deponijskog gasa na konkretnoj deponiji, koji se bazira na bilansu vlage, kao najuticajnijem parametru, što se može zapaziti i na primeru korišćenih softvera na bazi matematičkih modela. Dobijena zavisnost produkcije deponijskog gasa od vlage je sa relativno malim odstupanjima, tako da količina prikupljenog deponijskog gasa u dobroj meri prati stvarno izmerene vrednosti. Analizirani su i ostali parametri koji mogu da imaju značajan uticaj na generisane količine deponijskog gasa, što je uporednom analizom i pokazano, ali nije uzeto u razmatranje i korekciju modela, s obzirom na relativno manji uticaj, koji se kao takav može svesti na najnižu moguću meru uz poštovanje odgovarajućih procedura tokom prakse rada na deponiji.

U sedmom poglavlju se razmatra uticaj recirkulacije koncentrata i procedne vode na deponiji putem numeričkih simulacija modela sa promenljivim režimom rada u recirkulaciji na produkciju deponijskog gasa. Vrš se poređenje rezultata na bazi zavisnosti utvrđene merenjima u poglavlju 6 sa rezultatima postojećih numeričkih modela. Na kraju se razmatra adekvatna strategija recirkulacije kocentrata i procedne vode optimizovanjem režima rada prema zadatim kriterijumima.

Zaključci doktorata sa pravcem daljih istraživanja su prezentovani u osmom poglavlju.

U devetom poglavlju se navodi literatura koja je korišćena tokom izrade doktorata, a koja sadrži 149 referenci, koje obuhvataju knjige, studije slučaja, zbornike radova sa naučnih konferencija, doktorske disertacije, odgovarajuću zakonsku regulativu, naučne radove iz časopisa i sa naučnih konferencija.

2 Pregled dosadašnjih istraživanja

2.1 Laboratorijska istraživanja

Kako bi se povećala dekompozicija otpada i skratilo vreme za njegovu stabilizaciju primenjuju se razne tehnike kojima se omogućava kontrola uticajnih parametara u cilju ostvarivanja optimalnih uslova za produkciju deponijskog gasa, među kojima su: povećanje sadržaja vlage, recirkulacija procedne vode, seckanje MSW, pH kontrola/baferovanje, dodavanje nutricijenata, inokulacija anaerobnim muljem i povećanje radne temperature (Barlaz, Ham, & Schaefer, 1990) (El-Fadel, Findikakis, & Leckie, Environmental impacts of solid waste landfilling, 1997). Recirkulacija procedne vode se pokazala kao najefikasniji metod povećanja biodegradacije u cilju ostvarivanja većih prinosa metana i nižih troškova tretmana otpada na deponiji, tako da je ona dodatno izučavana u kombinaciji sa primenom pomenutih metoda (Reinhart, McCreanor, & Townsend, 2002). Kao generalne prednosti recirkulacije, koje se tiču produkcije deponijskog gasa i tretmana procednih voda, dokazane putem laboratorijskih istraživanja, mogu da se navedu: stvaranje znatno većih količina procednih voda usled brže degradacije otpada, generisanje znatno većih količina biogasa uz nešto veće koncentracije metana, brži ulazak u fazu metanogeneze koja pogoduje ubrzanom razvoju metanogenih bakterija i dostizanje vršne produkcije metana iz otpada u simulatorskim bioreaktorima, poboljšanje kvaliteta i smanjenje zapremine procedne vode za dalji tretman, brža stabilizacija procednih voda. Sposobnost uklanjanja oksidirajuće materije, koja se izražava kroz parametre hemijske i biološke potražnje za kiseonikom (HPK i BPK) iz procednih voda, tokom metanogeneze omogućuje iskorišćenje anaerobnih deponija za biološki tretman procednih voda recirkulacijom, čime se ostvaruje i dodatna produkcija deponijskog gasa (Chan, Chu, & Wong, 2002) (Francois, Feuillade, Matejka, Lagier, & Skhiri, 2007) (Wang, i drugi, 2006) (Šan & Onay, 2001) (Sponza & Agdag, 2004).

Istraživanje (Francois, Feuillade, Matejka, Lagier, & Skhiri, 2007) je pokazalo da se primenom recirkulacije ostvaruje povećanje ukupnih količina oksidirajućih materija u procednim vodama i biogasu 2,1 puta veće u slučaju svežeg, a 1,4 puta veće u slučaju otpada starog 8 godina, nepromenjenog sastava. Udeo oslobođene oksidirajuće materije iz procedne vode u odnosu na ukupno oslobođenu oksidirajuću materiju u slučaju svežeg otpada iznosio je 22,4 i 27%, dok u slučaju starog otpada iznosio 2,8 i 3,2%, bez i sa recirkulacijom, respektivno. Konačno, u navedenom istraživanju je izmereno da se od ukupne količine oksidirajuće materije 82% do 89% oslobodi u formi gasa.

Visoka efikasnost biorektorskih kolona u kojoj je simulirana anaerobna deponija sa dodatkom vode (analogno padavinama u realnim uslovima) i recirkulacijom u metanogenoj fazi pokazala je visoku efikasnost uklanjanja HPK, koja iznosi blizu 95%, a pritom je najmanje zavisna od HPK opterećenja koje se unosi procednom vodom, za razliku od kolone sa simuliranim polu-aerobnim uslovima, kao i anaerobne kolone koja je imala samo dodatak vode bez recirkulacije. Deponijski sloj u inicijalnoj fazi nema mogućnost da tretira procedne vode. Međutim, recirkulacija procedne vode se pokazala korisnom da ubrza kultivaciju i propagiranje bakterijskih aktivnosti na deponiji i da podrži njenu sposobnost tretmana. Efekat recirkulacije procedne vode, u smislu njihovog prečišćavanja, je maksimiziran kada deponija dostigne stabilnu fazu (Wang, i drugi, 2006).

Dokazani pozitivni efekti recirkulacije procedne vode na primeru mnogobrojnih laboratorijskih istraživanja, kao i istraživanja sprovedenih na pilot postrojenjima, ohrabрили su širu primenu recirkulacije na deponijama realnih razmera kao jedan od tretmana procedne vode. Praksa recirkulacije procedne vode služi da popravi homogenost biohemijske sredine koja je potrebna za anaerobnu degradaciju

otpada, čime, kao rezultat, može efektivno da se skрати vreme potrebno za "stabilizaciju" otpada za gotovo 80-90%, dok troškovi tretmana mogu da se redukuju gotovo na četvrtinu odgovarajućih pojedinačnih tretmana (Pohland & Stephen, 1985).

Naravno, u cilju zaštite životne sredine, vremenom su postepeno uvođeni strožiji zakonski propisi po pitanju dozvoljenih emisija u okolinu, što je dovelo do primene kako naprednijih metoda prečišćavanja procedne vode, tako i do novih pristupa, politika i strategija kada je u pitanju upravljanje otpada, generalno, odnosno deponovanja, kao jednog od vidova tretmana otpada.

Istraživanja su takođe pokazala da povećanje protoka i učestalosti recirkulacije omogućuje generisanje većih količina biogasa, ali do određene granice, iznad koje može da izazove pojavu uslova kisele sredine usled prevelike stope hidrolize organske materije, što može da uspori aktivnosti metanogenih organizama, smanjujući značajno količinu biogasa i koncentraciju metana (Şan & Onay, 2001) (Sponza & Agdag, 2004). Različiti režimi recirkulacije su u mnogo većoj meri bili izraženi kod otpada sa većim sadržajem organske materije, gde je povećani protok u recirkulaciji uticao na velike probleme usled disbalansa između acidogeneze i metanogeneze u deponijskoj procednoj vodi, koji je posledica akumulacije volatilnih masnih kiselina i rezultuje niskim pH vrednostima i alkalitetom. Na primeru reaktora bez recirkulacije i sa recirkulacijom od 13% i 21% u odnosu na zapreminu reaktora, HPK masa koja se konvertuje u metan, iznosila je 4,4%, 16% i 6,44% za navedene reaktore, respektivno (Sponza & Agdag, 2004).

Kako bi se povećala efikasnost produkcije metana na deponijama sa tropskim klimatskim uslovima, gde su visoke temperature i isparavanja, recirkulacija procedne vode može da bude nedovoljna kako bi se održala vlažnost otpada, tako da bi opcija sa dodavanjem vode mogla da pomogne stabilizovanju nivoa vlage i stimulaciji biološke aktivnosti. Rezultati istraživanja sa 3 anaerobna reaktora, pokazali su da primena recirkulacije sa dodatkom vode daje kumulativnu produkciju metana koja je veća 3,2 i 6,1 puta od reaktora samo sa recirkulacijom i kontrolnog reaktora bez recirkulacije i dodatka vode, uz najkraći period stabilizacije koji iznosi 180, 290 i 270 dana za svaki od navedenih reaktora (Sanphoti, Towprayoon, Chairasert, & Nopharatana, 2006).

Osim samog uticaja koji sadržaj vlage unutar otpada ima na produkciju deponijskog gasa, istraživanje (Klink & Ham, 1982) je pokazalo da značajan uticaj ima i kretanje vlage, koje se može posmatrati i kroz recirkulaciju procedne vode. U poređenju sa otpadom istog sadržaja vlage, ali sa njenim minimalnim kretanjem, pokazalo se da kretanje vlage kroz čvrsti otpad koji se razgrađuje, povećava produkciju metana za 25% do 50%. Kretanje vlage kroz otpad koji se razlaže daje tzv. zaostali efekat, koji dovodi do kontinualno visokih protoka metana čak i nakon prestanka recirkulacije procedne vode. Ovo ukazuje na razliku između sadržaja vlage i kretanja vlage kao dve odvojene promenljive koje utiču na stopu generisanja metana, što je značajan rezultat za predviđanje protoka i razumevanje izmerenih protoka gasa na deponijama punih razmera, naročito uzimajući u obzir lokalne klimatske uslove (Klink & Ham, 1982). Sa druge strane laboratorijsko istraživanje (Hao, Wu, Wu, & Chen, 2008) je pokazalo da je dekompozicija čvrstog komulanog otpada u bioreaktoru A, u uslovima prezasićenja vlagom i bez recirkulacije procedne vode, bila znatno izraženija nego kod bioreaktora B, sa recirkulacijom procedne vode. Nakon 420 dana inkubacije konačna koncentracija HPK i pH vrednost su iznosili 1.000 g/m³ i 7,0, respektivno za bioreaktor A, odnosno 18.000 g/m³ i ispod 6,5, respektivno za reaktor B. Prinos gasa bioreaktora A bio je više od 2 puta veći u odnosu na bioreaktor B. Međutim, inhibicija procesa degradacije otpada sa povećanim otporom prolaza mase i akumulacije biogasa izazvana je, najverovatnije, prekomernom recirkulacijom procedne vode, koja je uticala na pojavu uslova kisele sredine.

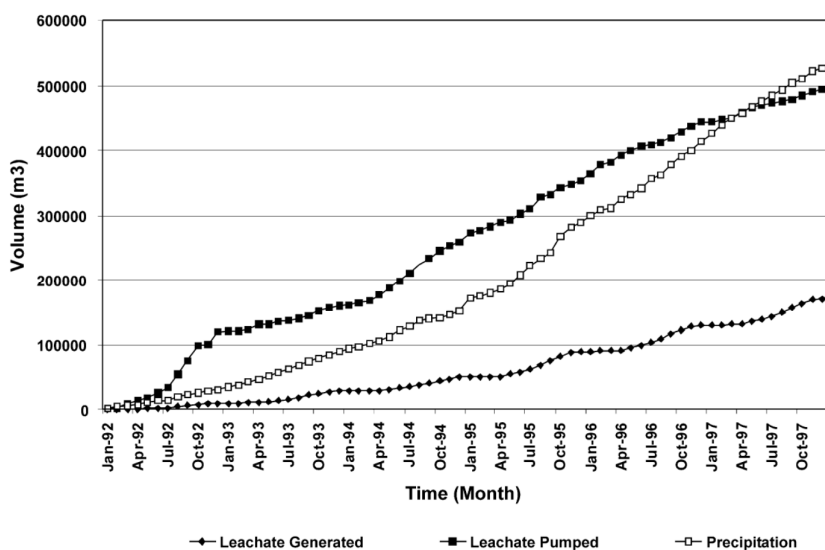
Pored primene recirkulacije u uslovima anaerobnog razlaganja otpada, u cilju brže degradacije otpada i bržeg oslobađanja novog prostora za deponije otpada, koji predstavlja problem u pojedinim državama, kao što je Tajvan, rađena su istraživanja sa primenom recirkulacije procedne vode primenom tehnologije aerobne deponije. Istraživanje na bioreaktorima dimenzija DxH=2,58x3,66 m je pokazalo da

Dodatak vodonik-peroksida (H_2O_2) recirkulisanoj procednoj vodi, što doprinosi stvaranju aerobnih uslova doprinosi bržoj biodegradaciji otpada, koja se čak i povećava kontinuitetom u dodavanju H_2O_2 , čije povećanje nije dovelo do inhibicije procesa razvoja bakterijske populacije. S obzirom na ostvarivanje željenog cilja, što je u ovom slučaju bila brža degradacija otpada, ovakvo rešenje je predloženo kao superiornije u odnosu na recirkulaciju procedne vode pod anaerobnim uslovima, kao i ubrizgavanje komprimovanog vazduha, čija primena se ograničava na kratke vremenske periode zbog visokih troškova energije (Huang, Hung, & Lu, 2012). Ovo istraživanje se navodi samo kao primer šire primene recirkulacije procedne vode u praksi upravljanja otpadom, čak i sa istim ciljem kada je reč o potpunijem razlaganju otpada, ali koje izlazi iz okvira predmeta istraživanja ove doktorske disertacije.

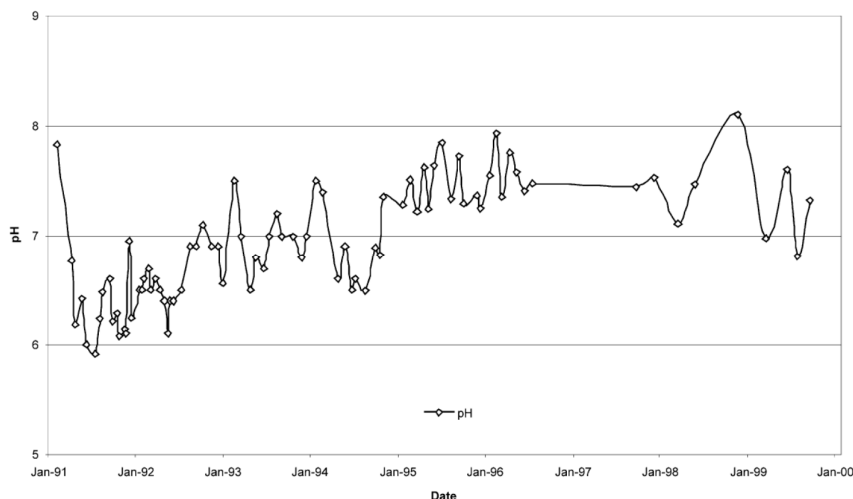
2.2 Istraživanja na deponijama realnih razmera

Primeri deponija realnih razmera u stručnoj literaturi su znatno ređi u odnosu na laboratorijska istraživanja, dok se podaci u vezi sa produkcijom deponijskog gasa u većini slučajeva ne prikazuju, naročito se ne porede sa dovedenom vlagom.

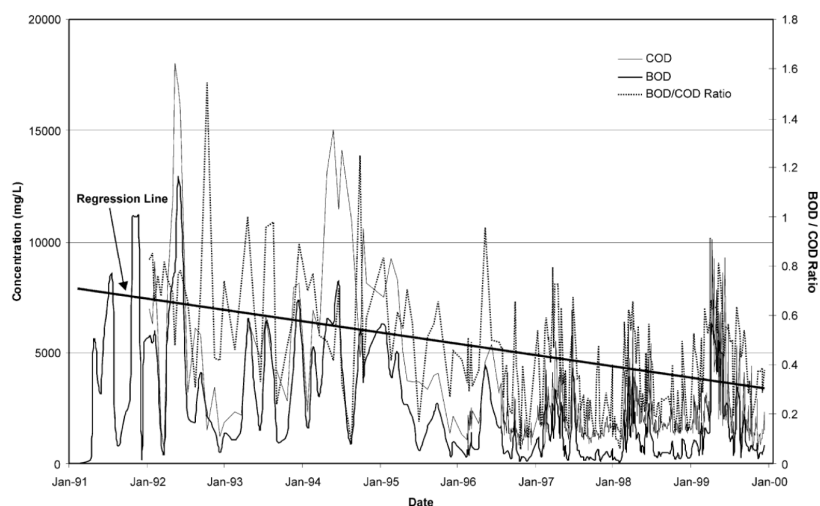
Istraživanje (Warith, 2002) se bavi praćenjem efekata koji veličina čvrstog otpada, recirkulacija procedne vode i bilans nutricijenata imaju na stopu biodegradacije čvrstog komunalnog otpada na eksperimentalnom laboratorijskom istraživanju. Pokazalo se da kod sitnijeg otpada može da se ostvari veća stopa biodegradacije. Dodatno su u radu prezentovani rezultati recirkulacije procedne vode na biodegradaciji otpada na deponiji realnih razmera, koja se nalazi u pokrajini Ontario u Kanadi, gde je procedna voda recirkulisana na deponovani otpad tokom 8 godina kroz infiltracione lagune pokazujući slične rezultate laboratorijskim. Među najznačajnijim rezultatima su povećanje pH vrednosti recirkulisane procedne vode od kisele sredine do opsega 7-8 nakon 2 godine recirkulacije, opadajući trend organskog opterećenja iskazan kroz HPK i BPK i oslobađanje vazdušnog prostora deponije usled ubranog sleganja i dekompozicije čvrstog otpada. Količine padavina, kao i procedne vode koja se generiše i recirkuliše pumpanjem na deponiju mogu se videti na slici 2.1, na kojoj se može videti da je stopa recirkulisane procedne vode nekoliko puta veća od stvarno generisane procedne vode i da je čak značajnije veća i od padavina. Slike 2.2 i 2.3 prikazuju porast pH vrednosti i smanjenje koncentracija HPK i BPK tokom perioda primene recirkulacije procedne vode.



Slika 2.1 Poređenje kumulativnih količina padavina, stvarno generisane i recirkulisane procedne vode (Warith, 2002)



Slika 2.2 Promene pH vrednosti tokom recirkulacije procedne vode (Warith, 2002)

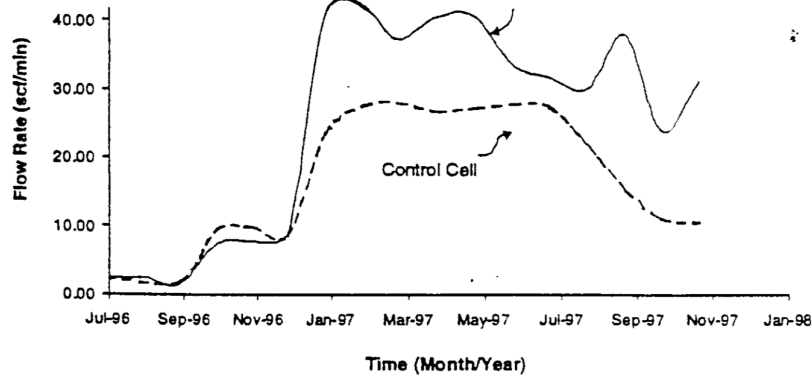


Slika 2.3 Promene vrednosti koncentracija HPK i BPK na deponiji Trail Road u Ontariju (Warith, 2002)

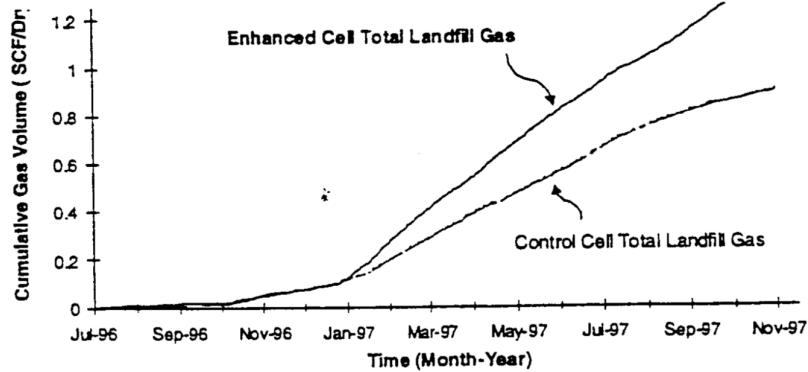
U dokumentu (Yolo County, 1998) iz 1998. godine se navodi da primena tehnologije kontrolisanog deponovanja rezultuje značajnim energetske potencijalom i benefitom za klimu. Kaže se da je iskorišćenje deponijskog gasa za energetske svrhe u SAD, procenjeno od strane EPA i drugih relevantnih institucija na nivou 10% od potencijala, dok bi primena tehnologije kontrolisanog deponovanja na dodatnih 50% otpada, koje je u tom trenutku deponovano u SAD, moglo obezbediti dovoljno metana da se pokrije 1% ukupnih potreba SAD. Ovaj dokument daje značajne podatke dobijene eksperimentalnim istraživanjem koje uključuje dve deponijske ćelije, napunjene sa 9.000 t otpada u periodu od aprila do oktobra 1995. godine, što se može posmatrati gotovo kao nivo deponije realnih razmera. Jedna ćelija je predstavljala konvencionalnu ili kontrolisanu ćeliju u smislu njenog izolovanja od dodatne vlage, dok je druga predstavljala stimulisanu deponiju koja je prihvatila dodatnu količinu vlage, koja je dolazila kao voda i procedna voda. Ćelije su opremljene velikim brojem temperaturskih senzora i sensorima vlage koji su priključeni na datalogger sa redovnim praćenjima. Ugrađen je sistem sa vertikalnim biotrnovima za ekstrakciju deponijskog gasa koji je pušten u rad 16.10.1996. godine, dok je dodavanje tečnosti kontrolisanoj deponiji počelo 23.10.1996. godine sa ciljem da se dovede potrebna količina vlage do kapaciteta zasićenja otpada. Kapacitet zasićenja je posmatran kao količina vode koja može da se apsorbira od strane otpada bez odvođenja, kao sunđer koji upija tečnost bez kapanja. S obzirom da otpad nije uniformni materijal, teško je odrediti momenat kada je dostignut kapacitet zasićenja s obzirom da se tečnosti kreću kroz materijal preferencijalnim tokovima. Odlučeno je da

trenutak dostizanja kapaciteta zasićenja bude kada količina generisane procedne vode bude 50% u odnosu na količinu vode koja se dodaje deponiji u toku dana, te da se tada prestane sa unosom vlage, a nastavi samo sa recirkulacijom procedne vode. Ukoliko količina procedne vode ostane ista ili poraste smatra se da je kapacitet zasićenja otpada dostignut, i obrnuto. Vršena je kontinualna kontrola vakuuma u sistemu prikupljanja deponijskog gasa putem prenosivog gasnog analizatora merenjem sastava deponijskog gasa, njegovim uzorkovanjem u različitim tačkama sistema za prikupljanje gasa, te praćenjem koncentracije azota kao indikatora. Glavni parametri koji se vezuju za bakterijske aktivnosti i generisajne metana su temperature i sadržaj vlage. Produkcija metana se može strogo pratiti temperaturom otpada unutar deponije, pri čemu je pokazano da je optimalna temperatura između 40 i 50 °C, dok pri temperaturama višim od 55 °C generisanje metana može da se uspori. Ovaj podatak se donekle razlikuje od optimalnog temperaturskog opsega za anaerobnu degradaciju prema istraživanju recirkulacije procedne vode sa kontrolom temperature (Mata-Alvarez, Martinez-Viturtia, & Torres, 1986) gde su dobijene optimalne vrednosti od 34 do 38 °C, sa i bez recirkulacije procedne vode.

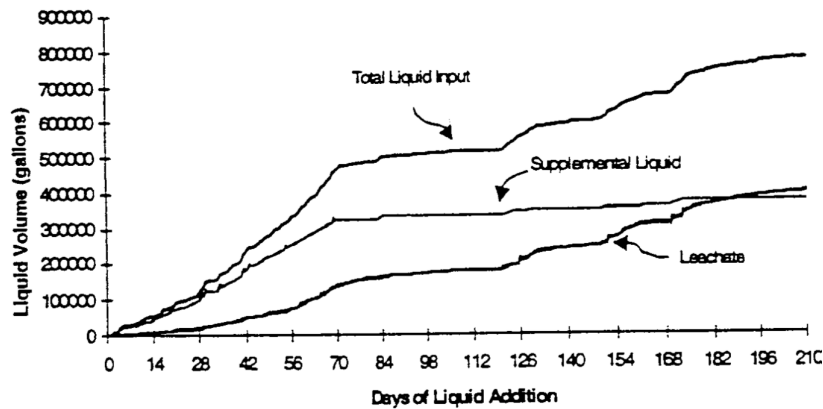
Recirkulacija je omogućila značajan pad koncentracije organskih zagađujućih materija u procednoj vodi, naročito HPK i BPK. Na slikama 2.4 se može zapaziti povećanje prosečne vrednosti protoka deponijskog gasa na mesečnom nivou od početka primene recirkulacije, dok su na slici 2.5 prikazane kumulativno generisane količine deponijskog gasa tokom vremena za obe ćelije sa uočljivim skokom vrednosti u stimulisanoj ćeliji od početka primene recirkulacije. Slika 2.6 prikazuje kumulativne količine dovedene vode i procedne vode recirkulacijom tokom vremena. Razlog za povećanje protoka gasa kontrolisane ćelije nije jasan, ali je očigledno u funkciji razvoja bakterijske populacije. Nagli pad protoka deponijskog gasa u kontrolisanoj ćeliji od jula do septembra 1997. godine pripisuje se smanjenju bakterijske populacije, koje je posledica isušivanja otpada usled uklanjanja vlage koja delom prelazi u deponijski gas koji se odvodi iz ove ćelije, a ovaj pad protoka gasa je naročito karakterističan i sa brzim reakcijama za biodegradabilni deo otpada. Ukupna količina proizvedenog gasa bila je 33% veća, prosečan protok gasa je bio 38% veći u stimulisanoj deponiji tokom 1997. godine, dok je prosečna koncentracija metana tokom ove godine iznosila 51% i 53% za kontrolisanu i stimulisanu deponiju, respektivno. Zabeležen je pad vrednosti HPK u stimulisanoj ćeliji sa 31 g/m³ u 27. danu, na vrednosti od 20,3; 5,92 i 2,77 g/m³ izmerenim u 44, 83 i 273. danu od početka dodavanja vode. Paralelno su praćeni i ostali parametri, među kojima je pH vrednost koja u navedenim danima iznosi: 7,6; 5,8; 8,5 i 7,09, što odgovara opisu razvoja anaerobnih faza od hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze. Još jedan značajan podatak u ovom dokumentu jeste da su istraživači uspeli da procene i numerički kvantifikuju kanalski protok, koji se dešava kada procedna voda pronađe putanje prolazeći brzo kroz otpad, i makroskopski protok procedne vode, koji se odlikuje sporim upijanjem unutar otpada, na stimulisanoj deponiji. Dobijene vrednosti iznose 17% i 83% za kanalski i makroskopski protok, respektivno, što govori da je postignuta uniformnost vlaženja otpada na visokom nivou s obzirom na veličine ćelija. Makroskopsko strujanje je potvrđeno permeabilnošću, koja se iskazuje kao brzina kojom procedna voda protiče kroz otpad. Kao jedan od značajnih razmatranja iz ovog istraživanja navode se uporedni podaci emisija metana tokom životnog veka rada konvencionalne i kontrolisane deponije. Navodi se da se u životnom veku konvencionalnih deponija 5% metana generiše i emituje u atmosferu pre postavljanja konačne prekrivke, u fazi ekstrakcije se generiše 70% metana, što sa efikasnošću prikupljanja od 90% daje dodatnih 7% emisija, dok se preostalih 25% metana generiše nakon 30 i više godina nakon zatvaranja deponije, što čini ukupno 37%. Sa druge strane, kod kontrolisanih deponija, kod kojih se omogućava dovođenje vlage, te stoga veći stepen dekompozicije otpada, imamo da se tokom celokupnog životnog veka deponije emituje samo 10% emisija, 5% pre postavljanja konačne prekrivke i 5% u fazi ekstrakcije deponijskog gasa, s obzirom da se je ovom slučaju efikasnost prikupljanja veća i procenjena na 95%. Otpad se u slučaju kontrolisane deponije u znatno većoj meri razgrađuje tako da nakon zatvaranja deponije nema više emisija u atmosferu, dok bi eventualno generisane emisije mogle lako da se eliminišu oksidisanjem na površini deponije primenom adekvatne prekrivke.



Slika 2.4 Prosečne vrednosti protoka deponijskog gasa na mesečnom nivou (Yolo County, 1998)



Slika 2.5 Kumulativne količine deponijskog gasa (Yolo County, 1998)



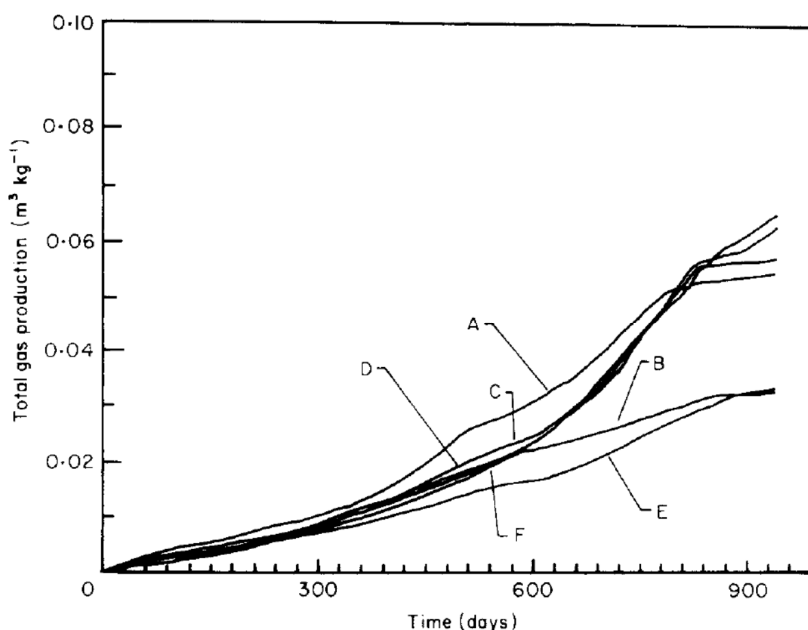
Slika 2.6 Kumulativne količine dovedene vlage kontrolisanoj ćeliji tokom vremena (Yolo County, 1998)

Istraživanje na deponiji realnih razmera Mountain View (Halvadakis, Findikakis, Papellis, & Leckie, 1988) u okolini San Franciska je pokazalo kako sinergijski efekat sadržaja vlage, sejanja i baferovanja utiču na metanogene procese unutar deponovanog komunalnog otpada i proučavani su u smislu dodatnih sadržaja vlage na bazi ukupne mase mešavine otpada, udela suvih čestica mulja suvom otpadu (sejanje/nutricijenti) i udela baferovanih čvrstih čestica u vodi koja je prisutna u mešavini otpada. Eksperiment je obuhvatio 6 deponijskih ćelija, dimenzija 30x30 m i dubine 15 m, kao reprezentata realnih deponija. Analiza je sprovedena sa sadržajima vlage u mulju u otpadu koji se dodaje

od 25% i 85%, respektivno. Čelije A, B i C imaju dodatak mulja od 151, 129 i 66 t, što je rezultovalo prosečnim sadržajem vlage od 34%, 33% i 30%, respektivno. Krive kumulativne proizvodnje gasa tokom vremena, normalizovane po jedinici mase suvog otpada, prikazane na slici 2.7, pokazuju sledeće:

- Generisanje biogasa unutar individualnih ćelije B, C, D i F je uniformno; u ćeliji B je nakon 580. dana naglo prestala proizvodnja gasa u trajanju od mesec dana, što se ne može objasniti dinamikom razvoja mikrobioloških aktivnosti, već greškom u radu sistema za prikupljanje gasova,
- Čelija A pokazuje bolji učinak u odnosu na sve ostale, kao rezultat recirkulacije procedne vode,
- Čelija E pokazuje najmanju proizvodnju biogasa kao posledicu zagađenja otpada toksičnim materijalima.

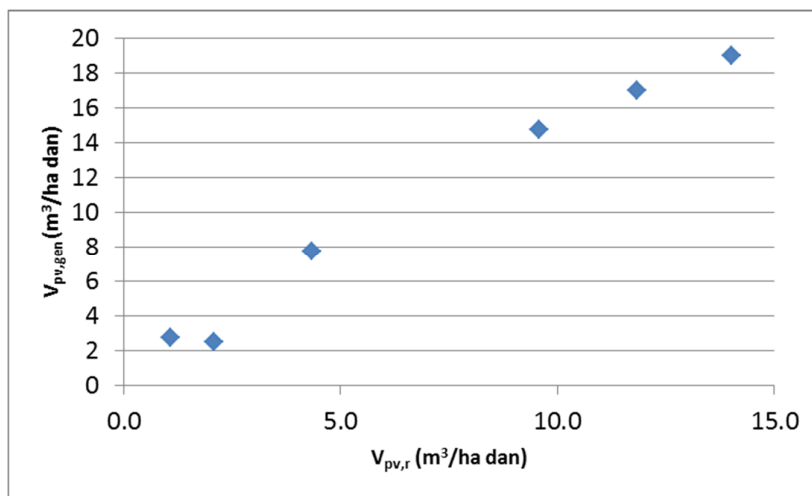
Kada je reč o koncentracijama metana, one su na početku u ćeliji A iznosile 40-45%, da bi nakon 44. dana došlo do iznenadnog pada koncentracije usled naglog dodatka značajne količine vode, za čiji oporavak je trebalo 2 meseca. Paralelno dolazi do pada temperature otpada unutar ćelije, što sve zajedno najverovatnije ukazuje na poremećaj metanogenih procesa i preovladavanje acidogenih procesa usled pojačane hidrolize zbog naglog dodatka vode. Koncentracija metana je postepeno rasla dostižući vrednosti koje su stabilizovane između 50-60% u narednih 9 do 10 meseci od početka praćenja, što je trend koji se vremenom uspostavio i u ostalim ćelijama.



Slika 2.7 Normalizovane krive kumulativne proizvodnje gasa tokom vremena za 6 ćelija (Halvadakis, Findikakis, Papelis, & Leckie, 1988)

Da bi se dobila benefit od recirkulacije, kontakt procedne vode i otpada mora da se obezbedi u meri koja neće prouzrokovati akumulaciju viška procedne vode na deponiji, izbijanje sa strana deponije i zagađivanje atmosferskih voda koje otiču. Pravilno upravljanje procedne vode zahteva razumevanje bilansa recirkulacije voda na deponiji. Akumulacija procedne vode van deponije je neophodna za pravilno upravljanje procednom vodom tokom ranih faza rada deponije, tokom pikova atmosferskih padavina, kao i nakon zatvaranja ćelija. Što je veća raspoloživa zapremina akumulacije u odnosu na veličinu ćelije deponije, upravljanje procednim vodama, u smislu njenog prečišćavanja eksternim postrojenjima, može da bude manja. Preporuke za akumulaciju u ranijim istraživanjima, tokom 80-tih godina, kretale su od 700 m³/ha do 1500-2000 m³/h. Deponijska postrojenja sa relativno malom

akumulacijom bila bi primorana da vrše recirkulaciju sa mnogo većim protocima. Slika 2.8 pokazuje odnos između generisanja i recirkulacije procedne vode, gde se vidi da veći protok recirkulacije procedne vode ($V_{pv,r}$) u stvarnosti doprinosi njenom većem generisanju ($V_{pv,gen}$) na deponiji. Izgleda kao da postrojenja sa malom akumulacijom koriste deponiju kao akumulacioni rezervoar, što ne mora da bude loše ukoliko bi se izbeglo stvaranje pondiranja i opterećenje donje prekrivke deponije, odnosno uz njihovu adekvatnu kontrolu. Preporuke za dodatnom akumulacijom koja bi obezbedila homogenu distribuciju procedne vode daju oko 10 puta veću zapreminu od zapremine generisane procedne vode. Naravno, potrebno je obezbediti i njeno uklanjanje u slučaju da se generiše u većoj meri kada se radi o otvorenim površinama deponije tokom ranih faza njenog rada, kako infiltracija ne bi dovela do pomenutih efekata. Postrojenja za akumulaciju moraju da se dimenzionišu da zadovolje 2 kriterijuma: da obezbede adekvatan kapacitet tokom pikova atmosferskih padavina, i da osiguraju mogućnost dovoljnih zapremina procedne vode da recirkuliše sa efektivnim protokom (Reinhart, 1996).



Slika 2.8 Efekat recirkulacije na generisanje procedne vode (Reinhart, 1996)

Skladištenje procedne vode unutar deponije se kvantifikuje korišćenjem koncepta kapaciteta polja ili sadržaja vlage pri kojoj se zadržava maksimalna količina vode kroz kapilarne sile nasuprot gravitaciji, dok bi dodatak dodatne vlage rezultovao kontinualnom generisanju procedne vode. Sadržaj vlage se može definisati na osnovama mase ili zapremine otpada, kao odnos mase vode prema masi suvog ili vlažnog otpada, ili kao odnos zapremine vode prema zapremini vlažnog otpada. U radu (Warith, Li, & Jin, 2005) se daje tabela sa vrednostima kapaciteta polja dobijenih iz različitih studija, gde se vidi da je opseg vrednosti širok i kreće se u rasponu od 20% do 54%, izraženo preko odnosa mase vlage prema masi vlažnog otpada, odnosno od 20% do 44% zapremine vlage prema zapremini vlažnog otpada. Ovako širok opseg je očekivan s obzirom da je kapacitet polja funkcija sastava, gustine, poroznosti, veličine čestica, preopterećenja i starosti otpada. Dodatno na deponijama realnih razmera postoje mrtve zone u masi otpada gde postoji kanalsko strujanje tako da se dodatna vlaga ne može dovesti, tako da je očekivani efektivni kapacitet zadržavanja vlage manji.

2.3 Primeri recirkulacije procedne vode na deponijama realnih razmera

Analize prezentovanih vrednosti otkrivaju da mnogi odnosi između glavnih fizičko-hemijskih karakteristika zagađenja, mogu reflektovati sastav organske materije u uzorcima procedne vode i oni su, zauzvrat, vezani sa starošću procedne vode, i stoga sa stepenom stabilizacije. Promene biodegradabilnosti procedne vode su uglavnom mera mogućnosti za tretman otpadne vode primenom bioloških procesa. Odnos BPK₅/HPK teži ka smanjenju sa starošću deponije, varirajući od 0,5 za relativno

"sveže" procedne vode do 0,2 za starije, stabilnije. Ova činjenica sugerira da veća proporcija organskih materijala postoji u "svežijim" procednim vodama koje su biodegradabilne i mogu da se uklone biološkim procesima. Takođe je objavljeno da se kod "svežih" ili nestabilnih procednih voda, kod kojih je odnos BPK₅/HPK veći od 0,3 i odlikuju se niskom pH i visokom HPK vrednošću, oko 80% ukupnog organskog ugljenika (TOC) sastoji se od volatilnih masnih kiselina (VFA) sa kratkim lancima sa molekularnom masom manjom od 120, što pokazuje visoku stopu anaerobne degradacije. Smanjenje ovog odnosa, praćeno povećanjem pH i HPK vrednosti procedne vode, dovodi do smanjenja udela organskog ugljenika od VFA na 5-30% u procednim vodama srednje starosti (BPK₅/HPK=0,1-0,3), uz dalje smanjenje u starim procednim vodama (BPK₅/HPK<0,1). Kako procedna voda stari tako se povećava udeo teško rastvorljivih i otpornih na degradaciju huminskih i fulvičnih kiselina uz opadanje biodegradabilnosti (Chian & DeWalle, 1976). Sa druge strane, otpad u fazi metanogeneze se odlikuje vrednošću indikatora BPK₅/HPK koja je manja od 0,3.

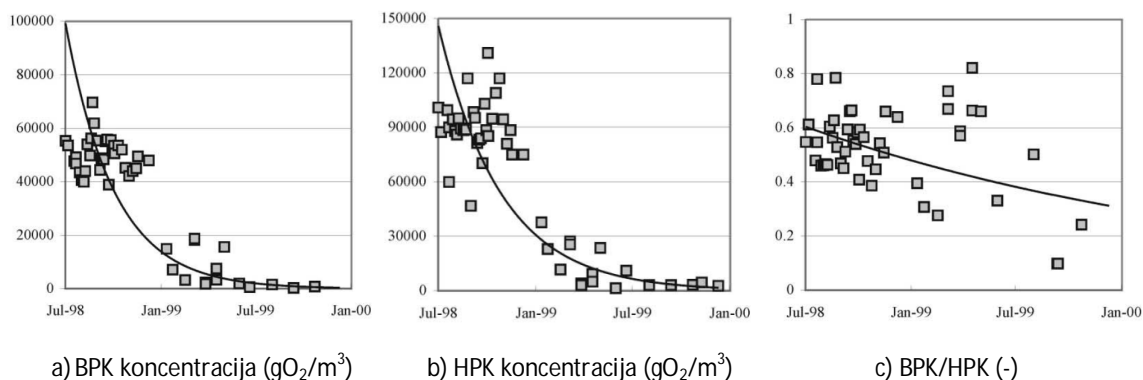
Brojna istraživanja opravdala su jedan od ciljeva bioreaktorskog rada deponije, a to je recirkulacija biološki degradabilne organske materije nazad na deponiju, čime se promovira degradacija (Reinhart, McCreanor, & Townsend, The bioreactor landfill – its status and future, 2002). Ovo nameće ideju, koja je u osnovi ovog istraživanja, a to je recirkulacija koncentrovanije, umesto razblažene, procedne vode sa cele deponije. Sličan predlog pominje se i u radu (Sormunen, Ettala, & Rintala, 2008), koji se bavi istraživanjem kvaliteta procednih voda unutar deponije po horizontalnom i vertikalnom preseku, kao i praćenjem promena tokom vremena. Autori su merenjima utvrdili da procedne vode unutar deponije imaju znatno veći sadržaj oksidirajuće materije, kao i veći odnos BPK₅/HPK, nego procedna voda na izlaznoj cevi iz deponije, što ukazuje na značajnu mogućnost anaerobne razgradnje otpada i organske materije recirkulacijom koncentrovanijih procednih voda. Izmerena koncentracija HPK procedne vode na izlazu iz deponije iznosila je samo 363 gO₂/m³, dok je prosečna vrednost iznosila čak 5.610 gO₂/m³, što je više od prosečne vrednosti od 3.810 gO₂/m³ za deponije starosti od 1 do 5 godina, koja se navodi u korišćenju literaturi. U dokumentu (Hjelmar, Andersen, & Hansen, 2000) se navodi da je uobičajena vrednost inicijalne koncentracije HPK procedne vode kod deponija čvrstog komunalnog otpada u opsegu od 20.000 gO₂/m³ sa BPK₅/HPK oko 0,5 dok se u periodu od 2 do 10 godina može očekivati njen pad na 2.000 gO₂/m³ i BPK₅/HPK manjim od 0,25. Ove vrednosti se razlikuju u zavisnosti od tipa otpada. Ako je cilj deponovanja da se dostigne kvalitet konačnog odredišta u razumnom vremenskom periodu, rad deponije i procedure upravljanja procednim vodama moraju da se prilagode tako da se obezbedi da se dovoljna količina vode ili procedne vode sliva kroz otpad tokom vremena kako bi se ovo postiglo. Funkcija procedne vode ima dvostruko dejstvo, kao medijum za reakciju i kao sredstvo transporta zagađivača izvan deponije. Procenjuje se da je potrebno da kroz otpad prodre količina vode od 3-4 m³/t da bi se dostigao kvalitet konačnog odredišta u smislu HPK, ukupnog organskog ugljenika i ukupnog azota (Hjelmar, i drugi, 1994). U tabeli 2.1 je prikazan vremenski period, sa grubim procenama, koji je potreban da se za različit tip otpada dostigne kvalitet konačnog odredišta pod različitim uslovima. Ovako dugačak vremenski period predstavlja ozbiljan problem i rizik po okolinu nakon predstanka aktivnog odlaganja otpada na deponiju, koje se projektuju da mogu da prime otpad u periodu od 30 godina.

Tabela 2.1 Gruba procena broja godina potrebnih da se dostigne kvalitet konačnog odredišta za različite tipove procedne vode za dve stope produkcije procedne vode. Prosečna visina otpada je pretpostavljena sa 12 m (Hjelmar, Johannessen, Knox, & et al., 1995)

Stopa produkcije procedne vode	Tip otpada			
	Opasan	ČKO	Neopasan i niskoorganski	Neorganski
Srednja (200 mm/god)	600	300	150	100
Visoka (400 mm/god)	300	150	75	50

Jedan od predloga recirkulacije koncentrovanije procedne vode na deponiju je razmatran na primeru velike deponije u Ontariju u Kanadi, gde podaci ukazuju da bi sveži otpad mogao da se deponije na stariji, pri čemu bi se stariji otpad ponašao kao bioreactor u smislu prečišćavanja i stabilizovanja visoke koncentracije zagađujuće organske materije koju nose procedne vode svežeg otpada. Rezultati ukazuju da bi planirano odlaganje otpada i dodatak fluida (prirodno ili navodnjavanjem) mogli da imaju važne uloge u tretmanu procedne vode pre njenog odlaganja sa deponije, smanjujući time i vek zagađenja deponije (Armstrong & Rowe, 1999).

Istraživanje varijacija u kvalitetu procedne vode pedsortiranog i baliranog otpada, rađeno je na deponiji komunalnog otpada, lociranoj na 16 km od Bejruta (Liban), koja sa očekivanom visinom otpada od preko 100 m predstavlja jednu od najdubljih deponija na svetu (El-Fadel, Bou-Zeid, Chahine, & Alayli, 2002). Ovakav proces tretmana otpada uticao je da sastav otpada bude visokog organskog sadržaja i vlažnosti. Istraživanje je pokazalo da tretman otpada, osim njegovog sastava, može da ima itekako značajan uticaj na proces biodegradacije otpada i kvalitet procedne vode. Pokazalo se da pomenuta procedura upravljanja otpadom nije usporila proces stabilizacije, dok se procedna voda odlikuje ekstremno visokim vrednostima zagađujućih organskih materija, naročito na početku procesa biodegradacije. Ovaj rad se bavi mehanizmima formiranja procedne vode, uticajnim faktorima na njen kvalitet, dok istraživanje predstavlja jedan od primera u praksi, koji ukazuju na činjenicu da je potrebna pažljiva analiza svih faktora na odabir pravog postrojenja i odgovarajućeg kapaciteta za tretman procedne vode. Slika 2.9 pokazuje promenu koncentracija uzorkovanih procednih voda u periodu od 18 meseci od početka primene navedenih procedura tretmana otpada, gde se vidi drastičan pad tokom relativno kratkog vremenskog perioda sa vrednosti neuobičajeno visokih koncentracija od preko 50.000 i 90.000 gO_2/m^3 , za BPK i HPK respektivno. Takođe je primetan značajan pad koncentracija ostalih zagađujućih materija u procednoj vodi, među kojima su praćeni: TOC, Ca, sulfati, nitrati, NH_4 , hlorid, Kjedal-N, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni i Zn, dok je pH vrednost porasla sa 5,8 na 8,2. Visoki početni sadržaj vlage, koji prevazilazi kapacitet zasićenja otpada vlagom na 55% do 65% u odnosu na zapreminu otpada, i visok organski sadržaj baliranog otpada omogućio je ulazak u fazu metanogeneze za ekstremno kratak vremenski period od godinu dana. Kao rezultat primenjene procedure, odloženi otpad je već nakon 2 godine ušao u „umereno stabilnu“ fazu sa vrednostima zagađujućih materija koje odgovaraju otpadu na deponiji starosti 10-15 godina.



Slika 2.9 Parametri procedne vode (El-Fadel, Bou-Zeid, Chahine, & Alayli, 2002)

Odlaganje koncentrata, recirkulacijom na otpad unutar deponije, je samo jedan od načina za njegov tretman. Pored ovog, u praksi mogu da se primenjuju i drugi tretmani, kao što su: kristalizacija koncentrata u formi CaSO_4 sa učvršćivanjem i odlaganjem čvrstih ostataka; skladištenje nakon isparavanja i sušenja; tretman obrađivanjem; ko-insineracija sa drugim otpadom; korišćenje kao voda za mešanje prilikom učvršćivanja letećeg pepela; recikliranje soli za industrijsko korišćenje (Yamada & Jung, 2006). Recirkulacija koncentrata je, svakako, najjeftinija opcija tretmana, ali i opcija sa podeljenim mišljenjem stručne javnosti kada su u pitanju posledice njene primene. Relativno je malo naučnih istraživanja na ovu temu. Prema istraživanju (Eipper & Maurer, 1999) uticaj recirkulacije koncentrata na

kvalitet procedne vode je zanemarljiv ili ograničen na period neposredno nakon početka recirkulacije, dok je prema istraživanju (Heyer & Stegman, 2002) dugoročna recirkulacija koncentrata nepogodna zbog izraženo negativnih efekata na produkciju procedne vode. Istraživanje (Talalaj, 2015) uticaja recirkulacije koncentrata, koji dolazi iz procesa prečišćavanja reverznom osmozom, na koncentracije organskih mineralnih materija procedne vode, pokazalo je da nakon inicijalnog perioda recirkulacije koncentrata koncentracije organskih jedinjenja (BPK, HPK) rastu, da bi se nakon 6 meseci stabilizovale. Ovo ukazuje da je recirkulacija koncentrata ubrzala razlaganje organske materije, a ovo je bilo naročito uočljivo na deponijskoj ćeliji sa novijim otpadom (Talalaj, 2015).

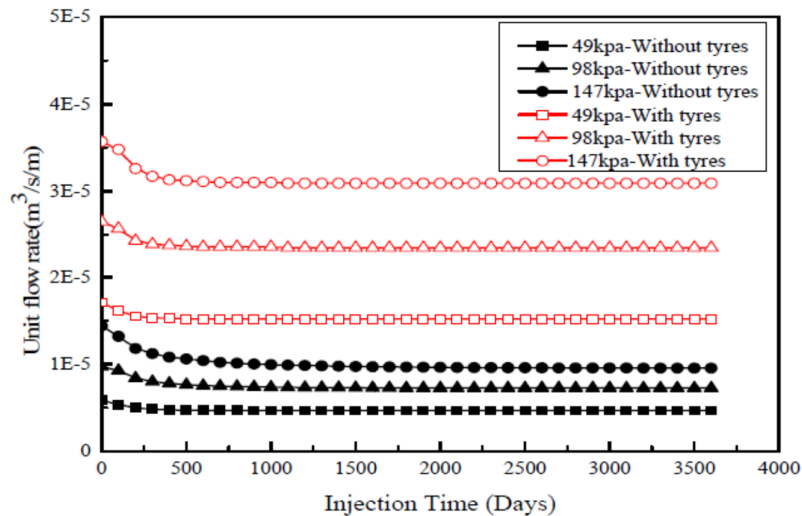
Generalno, jedan od najvećih izazova efektivne recirkulacije jeste ravnomerna distribucija vlage unutar otpada na deponiji. Efikasnost distribucije varira od primenjenog metoda, koji se međusobno razlikuju u kapacitetu recirkulacije, a zavisi i od činjenice da li se vrši na deponijskoj ćeliji sa aktivnim punjenjem otpadom ili se radi o zatvorenoj deponiji. Metode distribucije procedne vode u recirkulaciji koje se uobičajeno sprovode u praksi su: navodnjavanje prskanjem, infiltracioni bazeni, podpovršinski rovovi ili bunari i direktna primena na predvlaženju otpada na terenu (Reddy & Bogner, 2003) (Bioreactor Landfill for Sustainable Solid Waste Landfill Management, 2004). Za razliku od laboratorijskih uslova gde je efikasnost izdvajanja gasova visoka, očekivana efikasnost generisanja gasova iz procedne vode na realnim deponijama je znatno manja. Jedan od razloga je, svakako, pomenuto kanalsko strujanje vlage kroz otpad na deponiji, koje dovodi do proticanja vlage velikom brzinom kroz otpad, što za posledicu ima kvašenje otpada u znatno manjem obimu nego u laboratorijskim uslovima. Varijacija u kvalitetu procedne vode može da bude usled razlika u lokalnoj hidrauličkoj provodljivosti otpada i u zavisnosti od dnevnih prekrivki koje se koriste, što u velikoj meri može da utiče na tokove vode unutar tela deponije uzrokujući poželjne putanje procedne vode (Kjeldsen & Beaven, 2011).

Istraživanje uticaja protoka vode kroz otpad istih karakterisitka, samo u različitim razmerama (zapremine otpada $0,08 \text{ m}^3$ i $80,000 \text{ m}^3$ u laboratorijskom eksperimentu i na realnoj deponiji) pokazao je da je protok vode na deponiji realnih razmera mnogo manje uniforman nego u laboratorijskim reaktorima. Korišćenjem elementa obeleživača za ovaj eksperiment pokazalo se da u laboratorijskim uslovima oko 40% pora vode učestvuje u transportu rastvorene supstance, dok je ovaj udeo manji od 0,2% na posmatranj deponiji realnih razmera (Fellner, Döberl, Allgaier, & Brunner, 2009).

Sa druge strane, kako bi se odgovorilo izazovu i objasnilo do koje mere se numeričkim modelovanjem može predvideti degradacija otpada i promene koje prate razvoj gasa, koncentraciju zagađivača u procednoj vodi i sleganje otpada, sprovedeno je istraživanje koje obuhvata uporednu analizu podataka dobijenih eksperimentalnim laboratorijskim istraživanjem anaerobne degradacije komunalnog otpada dva uzorka različitih početnih uslova u reaktorima dimenzija $D \times H = 48 \times 90 \text{ cm}$, koji su praćeni tokom 919 dana, i istraživanja na izolovanoj ćeliji realnih razmera deponije u Holandiji dimenzija $A \times B = 55 \times 80 \text{ m}$, sličnih karakteristika otpada i tehničkih mogućnosti za kontrolu uslova unutar otpada kao u laboratorijskim bioreaktorima. Ovo istraživanje se fokusiralo na oblasti degradacije i hemijski ekvilibrijum, sa korekcijama na podmodelu nezasićenog protoka sa uvođenjem funkcija kapilarnih pritisaka i relativne permeabilnosti, kao i mogućnosti razvoja prelaznih graničnih uslova koji su neophodni za simulaciju kompleksnih programa upravljanja procednom vodom kao što je slučaj u realnim uslovima rada na deponiji. Istraživanje je pokazalo da ovako konsistentnim pristupom modelovanju može da se postigne visok stepen poklapanja dobijenih rezultata bez obzira na ogromnu razliku u obimu sprovedenih istraživanja. Neizbežan i najvažniji uticaj na rezultate različitih obima ispitivanja je svakako sadržaj vlage, koja se pokazala kao najveći inhibitor procesa. Kao najvažniji uticaj obima na konkretnom primeru pokazala se potreba da se redukuje sadržaj degradabilne materije koja doprinosi smanjenju prinosa gasa za polovinu i dodatak koji se zahteva kada je reč o efikasnosti njegovog prikupljanja. Očigledno je da je razlika u fizičkim karakteristikama otpada u oba slučaja doprinela ovome usled "džepova" nehomogenijeg otpada na deponiji realnih razmera koji su postajali izolovani i suvi, te su stoga isključeni iz kratkoročne produkcije gasa (White & Beaven, 2013).

Sadržaj vlage otpada je jedan od uticajnih faktora na snagu smicanja čvrstog komunalnog otpada i njegovu mobilnost, pored sastava, stepena kompaktnosti i starosti otpada. Sa povećanjem sadržaja vlage mobilizirana kohezija teži ka smanjenju, što dovodi i do smanjenja snage smicanja i može da ugrozi sigurnost deponije u konstrukcionom smislu (Gabr & Valero, 1995). Povećanje vlažnosti može negativno da utiče na stabilnost deponije, kako u dinamičkim (zemljotres), tako i u stacionarnim uslovima rada. Jedan od ključnih parametara i osobina otpada za procenu stope i tokova kretanja vlage kroz otpad, naročito na deponijama gde se razmišlja o recirkulaciji procedne vode je hidraulička provodljivost. Za procenu protoka fluida u zasićenom čvrstom komunalnom otpadu se uobičajeno koristi i razmatra Darsijev zakon (Powrie & Beaven, 1999). Hidraulička provodljivost je empirijski dobijena vrednost koja predstavlja lakoću kojom voda može da prođe kroz porozni medijum, te kao takva predstavlja funkciju poroznog medijuma i karakteristika fluida. Ona se povezuje sa unutrašnjom permeabilnošću, koja predstavlja lakoću sa kojom bilo koji fluid može da prođe kroz porozni medijum, te je stoga, funkcija samo poroznog medijuma. Kao i druge osobine otpada, nije neuobičajeno da vrednost hidrauličke provodljivosti varira u širokim granicama u okviru mase, s obzirom da zavisi od mnogobrojnih faktora od kojih su najznačajniji: sastav otpada, stepen kompaktnosti, pritiska preopterećenja i starosti otpada. Sve u svemu, heterogena priroda čvrstog komunalnog otpada, čije karakteristike se mogu menjati tokom vremena usled fizičko-hemijskih procesa, utiče na odabir geotehničkih parametara i predstavlja naročit izazov za projektante deponija. Primeri u praksi kada je dolazilo do obrušavanja deponija su pokazali da je podjednako bitno projektovati deponiju da se zadovolje reprezentativni geotehnički parametri otpada, kao i da se obezbedi da se konstrukcione i radne procedure na postrojenju deponije primenjuju u skladu sa predpostavkama iz projektne dokumentacije (Christensen, Scharff, & Hjelmar, 2011).

Kako bi se obezbedila uniformnija distribucija vlage unutar otpada na deponiji, što omogućuje njegovu potpuniju dekompoziciju i stabilizaciju, naročito kada je reč o recirkulaciji procedne vode, primenjuju se različita rešenja. Jedno od rešenja predstavljeno je u istraživanju (Zhang, Heng, Jeng, & Xu, 2017) koje se predlaže metodom konstrukcije prostrane mreže sačinjene od vezanih celovitih guma na deponiji komunalnog otpada tokom deponovanja u cilju ubrzanja recirkulacije procedne vode, ali i redukovanja potencijalnih negativnih efekata vlaženja otpada na stabilnost nagiba. Numerički model dvostruko propustljivog protoka je korišćen kako bi se posmatrao preferencijalni protok na graničnoj površini otpada guma i protok unutar otpada, a potom je dodatno ovaj model uvezan sa modelom čvrste mehanike, putem kojeg je određen lokalni faktor sigurnosti. Rezultati simulacije modela primenjenog na uprošćenu bioreaktorsku deponiju pokazali su da mreža guma može da ubrza stopu ubrizgavanja procedne vode unutar deponije i doprinese njenoj ravnomernijoj distribuciji, dok je u isto vreme popravljena stabilnost nagiba strana deponije ojačavanjem otpada u prisustvu guma. Slika 2.10 ilustruje varijaciju izlaznog protoka u zavisnosti od primenjenog pritiska ubrizgavanja procedne vode odakle se može videti da mreža guma ubrzava ubrizgavanje procedne vode čak do 3 puta. Rezultati dalje pokazuju veću zonu vlaženja otpada koja se širi stranično, dok se u modelu bez korišćenja mreže guma procedna voda slivala nadole ka dnu drenažnog sloja.



Slika 2.10 Efekat drenažne mreže guma na protok procedne vode (Zhang, Heng, Jeng, & Xu, 2017)

Naravno, postajala su i drugačija gledišta kada je reč o prednostima bioreaktorskih deponija i recirkulacije, koja se nalazi u osnovi ovog principa, u odnosu na konvencionalna rešenja sa minimiziranjem dovodenja vlage. U drugačijim stavovima se iznosi kritički osvrti u radu bioreaktorskih deponija sa ukazivanjem na teškoće i probleme rada ovih postrojenja u praksi. Glavni argumenti protiv bioreaktorskih deponija su sledeći: a) recirkulacija procedne vode zahteva dodatne zahteve za odgovarajućom prekrivkom i sistemom za prikupljanje procedne vode, b) nije moguće postizanje zahtevanog nivoa kontrole (sadržaj vode, temperature i nivoi kiseonika) na deponiji koja je ispod zemlje, c) deponija sa pojačanom biodegradacijom pretvara deponiju u postrojenje za tertman otpada, što nije kompatibilno sa dostizanjem minimalnog rizika. Međutim, na sve navedene potencijalne opasnosti i rizike se može u praksi odgovoriti pravim tehničkim rešenjem i dobrom praksom upravljanja, što zauzvrat daje mnogo veće smanjenje dugoročnog rizika koji nosi nestabilizovan otpad. Pored tehničkih, prepoznaju se i netehnička pitanja, među kojima se navode: niska svest o postojanju regulatornog okvira i negativna percepcija, neefikasno širenje informacija kada je reč o efikasnosti i ekonomskoj proceni i nerealistična vremenska očekivanja i posvećenost projektima bioreaktorskih deponija velikih razmera. Navodi se da studija deponija realnih razmera, koja uključuje promenu ponašanja deponije, koja odgovara različitim fazama razvoja biodegradacije, zahteva značajno duže istraživanje nego laboratorijski eksperimenti. U kontekstu novih tendencija, kada je reč o smanjenju udela biorazgradivog otpada koji je potrebno odložiti, bioreaktorske deponije bi trebale da se razmatraju kao deo integrisane strategije upravljanja otpada, dobro planirane i definisane kako bi se odredila najbolja kombinacija koja odgovara svakoj situaciji (Yuen, 2001).

2.4 Efikasnost prikupljanja deponijskih gasova i odbegle emisije u okolinu

Kao deo optimizovanog sistema integrisanog upravljanja otpadom potrebno je uvek razmotriti kako finansijske, tako i efekte po životnu sredinu kada se određuju načini na koji će se upravljati deponijama u budućnosti. Među ovim odlukama svakako je i primena odgovarajućeg pretretmana otpada, pri čemu se koriste tehnike termičkog, mehaničkog i biološkog pretretmana, a često i njihova kombinacija, pre konačnog odlaganja na deponiju. Izborom određenih tehnika pretretmana otpada omogućuje se kontrola ponašanja deponije, koja će imati za cilj ili dostizanje odgovarajućeg kvaliteta konačnog odredišta zagađujućih materija ili će da bude bioreaktorski tip deponije. Kada je reč o prvom cilju primenjivaće se insineracija, seckanje otpada na čestice manje od 2,5 cm koje inhibiraju proces

metanogeneze i proizvode 16 puta manje metana u odnosu na čestice veličine 25 cm, aerobni pretretman između 3 i 6 meseci omogućava smanjenje volatilnih čvrstih čestica za 30% što doprinosi biološkoj stabilizaciji otpada u velikoj meri i rezultuje smanjenom produkcijom deponijskog gasa i proceđivanjem organskog otpada za 90%. U slučaju promovisanja degradacije otpada na deponiji preporučljiva strategija može da bude seckanje otpada na veličinu između 2,5 i 10 cm nakon aerobnog pretretmana u trajanju od 1 do 2 meseca, koji je dokazan da daje procednu vodu manje vrednosti koncentracija HPK, sa gubitkom ugljenika manjim od 20% (Komilis, Ham, & Stegmann, The effect of municipal solid waste pretreatment on landfill behavior: a literature review, 1999).

Pod stabilizovanim uslovima metanogeneze, u kojoj je moguće ostvariti benefit sa aspekta energetskog iskorišćenja, deponijski gas sadrži u proseku 55-60% metana i 40-45% ugljen-dioksida sa količinama drugih gasova u tragovima (Barlaz, Schaefer, & Ham, 1989). Ove vrednosti koncentracija ostvarene su i u većini navedenih laboratorijskih istraživanja koja su se bavila proučavanjem uticaja recirkulacije procedne vode, dok je laboratorijskim istraživanjem (He, Shen, Wang, He, & Zhu, 2005) pokazano da se dodatnom primenom efektivnih mikroorganizama i metanogenih reaktora mogu dostići koncentracije metana u vrednosti 73-78% ili čak i znatno više koncentracije metana u biogasu u istraživanju tokom dvo-fazne anaerobne digestije (Ince, 1998). Za razliku od navedenih koncentracija metana, koje se vezuju za kontrolisane deponije na kojima se vrši aktivna razgradnja otpada i prikupljanje deponijskog gasa, na sanitarnim deponijama i otvorenim smetlištima koncentracija metana je znatno niža. Uzrok tome je svakako nepostojanje adekvatnih uslova za ostvarivanje anaerobnih procesa u celosti, a jedan od najvažnijih promenljivih faktora jeste spoljašnja temperatura, koja, uz nisku dubinu i starost otpada i zbog neadekvatnog sistema zaštite i termičke izolovanosti, utiče na velike sezonske i dnevne, ali i prostorne, varijacije koncentracije metana. Ovo je zabeleženo na primeru Novosadske deponije, gde su merenjima utvrđene koncentracije metana u rasponu od 0 do 34%, uz pad koncentracije na 0% tokom zimske sezone (Vujić, i drugi, 2010). Značajan, ali nešto manji uticaj temperature i godišnjih sezona, kao i uticaj starosti otpada na sastav deponijskog gasa, posmatran je na zatvorenoj deponiji – smetlištu Morelia u Meksiku, gde je na bazi jednogodišnjeg praćenja sa 16 različitih lokacija i 49 mesta uzorkovanja, utvrđena prosečna koncentracija metana tokom godine od 45,5% (González, i drugi, 2011).

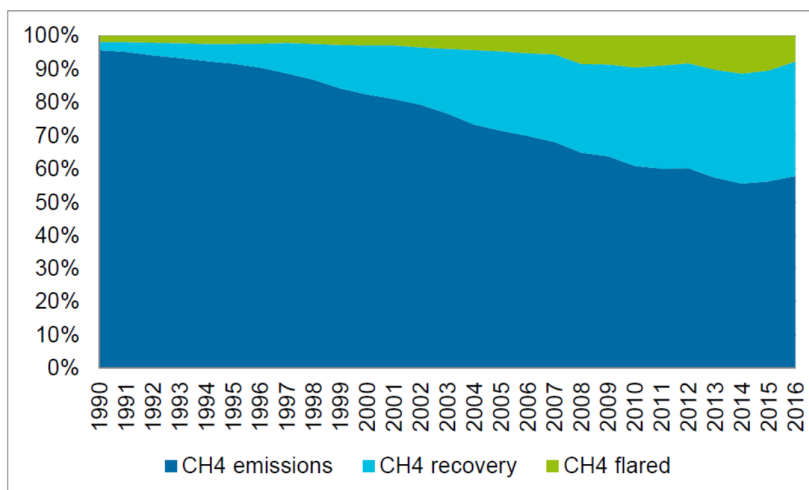
Uprkos činjenici da kvalitet i kvantitet deponijskog gasa često ne ispunjavaju zahteve za implementaciju neke od tehnologija za energetsko iskorišćenje, dok se u pojedinim slučajevima čak i pored odličnih energetskih pokazatelja slični projekti nisu sproveli, ukupne emisije metana koje se generišu sa deponije nisu zanemarljive. Emisije metana koje potiču iz sektora otpada su procenjene sa 18% udela u odnosu globalne emisije antropogenog metana emitovanog u 2004. godini (Bogner, i drugi, 2008). Tokom 2011. godine sa deponija SAD i Evope je emitovano 4,907 i 3,052 Mt metana, što čini 17,5% i 19,6% u odnosu na ukupne antropogene emisije metana (EEA Report, 2013) (Inventory of US GHG, 2013).

Značajne emisije metana sa deponija, koje nastavljaju da se generišu kroz čitav životni vek, u prvom redu usled dekompozicija različitih organskih materijala, koji su prisutni čak i u veoma starim i pokrivenim deponijama, dovele su do implementacije EU direktive o deponijama koja je postavila ciljeve za smanjivanje odlaganja materijala organskog porekla i drugog sagorivog otpada (1999/31/EC, 1999). Usklađujući zakonsku regulativu sa regulativom EU, vlada RS je usvojila Uredbu o odlaganju otpada na deponije (Uredba otpad, 2010), kojom se definiše u kojoj meri je potrebno smanjiti količine biorazgradivog komunalnog otpada na deponiju. Definisane su stope od min 25%, 50% i 65% smanjenja od ukupne količine po težini u periodima od 2012. do 2016. godine, od 2017. do 2019. godine i od 2020. do 2026. godine, respektivno. Ovakav pristup treba da obezbedi smanjenje potencijala generisanja metana na deponijama komunalnog otpada. Naime, poboljšanje postojećih praksi odlaganja otpada u Srbiji, koje se tiču prelaska sa otvorenih smetlišta na sanitarne deponije, kojima se postiže bezbednije i organizovanije odlaganje velikih količina otpada i uspostavljanje boljih higijenskih i estetskih uslova, vodi do povećanja produkcije metana. Prema dugoročnim ciljevima datim u Strategiji upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine, između ostalog se predviđa izgradnja 12 regionalnih centara za upravljanje

otpadom – regionalnih deponija sa pratećim postrojenjima za separaciju reciklabilnog otpada i transfer stanicama u svakom region (Strategija otpad, 2010).

Prema najnovijim podacima EEA izveštaja iz 2018. godine (EEA Report, 2018) se navodi da je od ukupno 1356 Mt smanjenih emisija CO₂ ekvivalenta u periodu od 1990. do 2016. godine na nivou EU-28+ISL, što čini smanjenje od 24% u odnosu na ukupne emisije (pri porastu GDP-a od 53%), čak 73 Mt pripada upravljanju otpada. Navedeni podatak govori o značajnom udelu poboljšanja u ovom sektoru. Emisije metana čine 11% ukupnih EU emisija gasova sa efektom staklene baste (GHG) u 2016. godini, koje su smanjene za 37% od 1990. godine na 457 Mt CO₂ ekvivalenta u 2016. godini. Anaerobni otpad generiše emisije metana sa udelom od 19% od ukupnih emisija iz ovog sektora. Sektor upravljanja otpadom je četvrti najveći sector u EU-28+ISL, posle sektora energetike, poljoprivrede i industrije, koji doprinosi sa 3% ukupnih GHG emisija u 2016. godini. Ukupne emisije koje potiču od otpada su smanjene za 41% sa 236 Mt u 1990. godini na 139 Mt u 2016. godini. Deponovanje čvrstog otpada doprinelo je smanjenju od čak 88% ukupnih emisija u sektoru upravljanja otpadom u periodu od 1990. do 2016. godine. Osnovne dve kategorije deponovanja čvrstog otpada čine kontrolisane i nekontrolisane (“divlje”) deponije koje su doprinele sa 2% i 0,3% ukupnim GHG emisijama 2016. godine, respektivno. Većina članica EU je smanjilo emisije za preko 70% sa stalnim kontinuitetom opadanja, ali je kod pojedinih članica došlo do porasta emisija metana zbog promene odlaganja otpada sa nekontrolisanih na kontrolisane deponije. Tako su u Republici Hrvatskoj emisije metana porasle sa 349 na 1279 tCO₂ ekvivalenta u periodu od 1990. do 2016. godine, što je trend koji bi se narednih godina mogao očekivati i u našoj zemlji.

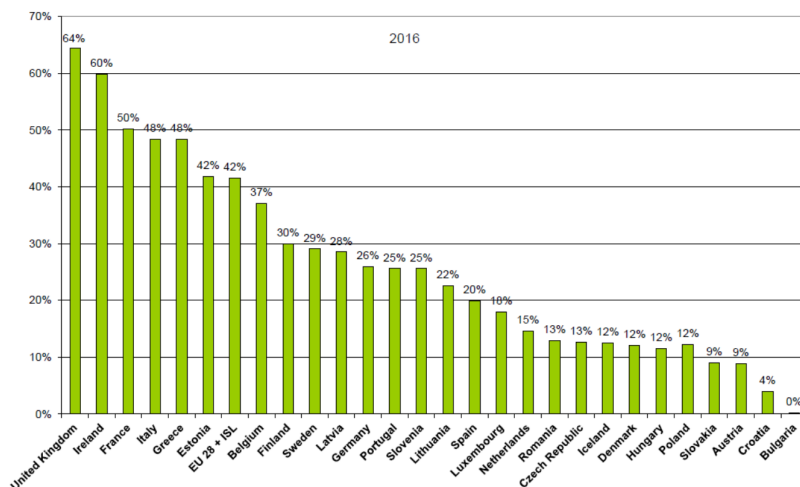
Pored nižih količina organskog ugljenika koji se odlaže na deponijama, glavni uticajni faktor smanjenja emisija metana je njegovo povećano prikupljanje na deponijama i sagorevanje na baklji, koje je na nivou EU-28+ISL povećano sa 4% na 42% od ukupno generisanih količina metana na kontrolisanim deponijama u periodu od 1990. do 2016. godine. 2016. godine je došlo do pada količina sagorelih na baklji za 5% u odnosu na 2015. godinu, što se objašnjava smanjenim količinama deponovanog otpada, a potom i zabranom odlaganja organskog materijala u deponovanom otpadu. Prikupljena količina metana je količina koja se uhvati za energetska iskorišćenje i specifična je vrednost za svaku državu koja ima značajan uticaj na nivo emisija. Na slici 2.11 je prikazana promena udela metana koji se prikupi, sagoreva na baklji i emituje.



Slika 2.11 Kontrolisano odlaganje otpada: Promena udela prikupljanja metana, sagorevanja na baklji i emisija u atmosferu u odnosu na ukupno generisane emisije na kontrolisanim deponijama u EU 28+ISL (EEA Report, 2018)

Dodatno se razmatra i količina metana koji sagoreva na baklji. Procentualni udeo prikupljenog i spaljenog metana dat je na slici 2.12 gde se može videti da ove količine variraju među zemljama

članicama između 0,2% u Bugarskoj i 64% u Velikoj Britaniji i zavise, između ostalog, od udela deponija za odlaganje čvrstog otpada koje poseduju instalacije za prikupljanje deponijskih gasova.



Slika 2.12 Kontrolisano odlaganje otpada: Stopa prikupljanja i sagorevanja metana na baklji u 2016. godini (EEA Report, 2018)

Istraživanje u Danskoj, prvoj državi EU koja je implementirala zabranu deponovanja otpada organskog porekla, koje je obuhvatilo 15 odabranih deponija koje se nalaze u različitim fazama životnog veka, uključujući otvorene, aktivne i zatvorene deponije, sa i bez prikupljanja deponijskog gasa za dalje korišćenje ili spaljivanje na baklji, pokazalo je da se ukupne emisije metana kreću u rasponu od 2,6 do 60,8 kg/h, odnosno 0,7-13,2 g/m²dan. Najveće emisije su izmerene na deponijama na kojima nije bio u funkciji sistem za prikupljanje i spaljivanje gasa, dok su svakako najmanje emisije na deponijama koje su bile decenijama zatvorene i sa ugrađenim bioprekivačem. Deponije sa seckanim otpadom, naročito sa nedavno odloženim otpadom, pokazale su najveće emisije gasova. Pritom se i efikasnost prikupljanja deponijskog gasa razlikuje u dijapazonu vrednosti od 41 do 81% (Mønster, Samuelsson, Kjeldsen, & Scheutz, 2015).

Istraživanje sa 13 testova, korišćenjem razvijene metode sa direktnim merenjem na licu mesta, izvedenih ubrizgavanjem malih količina obeleživača gasa na različitim lokacijama deponijske ćelije praćenih merenjima prikupljene mase predmetnog gasa, pokazali su efikasnost prikupljanja deponijskog gasa u okolini biotrna u rasponu od čak 70 do 90% (Yazdani, Imhoff, Han, Mei, & Augenstein, 2015).

Istraživanje upravljanja deponijskim gasom (Broun & Sattler, 2016) obuhvata razmatranje konvencionalnih i biorektorskih deponija komunalnog otpada u 100-godišnjem vremenskom periodu sa ciljem poređenja bilansa GHG emisija i potencijala generisanja električne energije od prikupljenog gasa korišćenjem motora sa unutrašnjim sagorevanjem, koje vodi ka smanjenju GHG emisija koje se proizvedu korišćenjem fosilnih goriva. Rezultati na bazi procena ukupne količine GHG emisija emitovanih u atmosferu, uključujući odbegle emisije metana i pomenute efekte smanjenja emisija iz fosilnih goriva proizvodnjom električne energije, daju da ekvivalentne vrednosti CO₂ gasova po t deponovanog otpada iznose 668 i 803 kg za konvencionalne i biorektorske deponije, respektivno. Naročito se ističe značaj ranog instaliranja aktivnog sistema za prikupljanje deponijskih gasova na biorektorskim deponijama i primena metoda istraživanja poboljšanja efikasnosti prikupljanja gasa tokom aktivnog deponovanja. Zajedničko za oba tipa deponije je da efikasnost prikupljanja deponijskog gasa ima značajan uticaj na GHG emisije i uštede, tako da se na svakih 10% povećanja efikasnosti prikupljanja smanjuju GHG emisije za 35-45%.

Istraživanje (Spokas, i drugi, 2006) se bavi procenom sveukupnog bilansa metana na deponijskim ćelijama u zavisnosti od dizajna, pokrivnih materijala i strategije upravljanja gasom. Situacija na terenu

uključivala je različite konfiguracije ćelije sa različitim prekrivkama sa i bez ugrađenog sistema za prikupljanje deponijskog gasa. Emisije metana su se kretale u opsegu od -2,2 do čak preko 10.000 t CH₄/m²dan. Rezultati ove studije, koji su korišćeni kao osnova za vodič od strane Francuske agencije za životnu sredinu (ADEME) za uobičajene vrednosti efikasnosti prikupljenih gasova, dali su vrednosti od 35% za ćeliju u radu sa aktivnim sistemom prikupljanja deponijskog gasa, 65% za privremeno zatvorenu ćeliju sa aktivnim sistemom prikupljanja deponijskog gasa, 85% za ćeliju sa konačnom glinenom prekrivkom i aktivnim sistemom prikupljanja deponijskog gasa i 90% za ćeliju sa geomembranskom konačnom prekrivkom i aktivnim sistemom prikupljanja deponijskog gasa. Deponije mogu privremeno odvojiti ili osloboditi metan. Promena u akumulaciji (skladištenju) metana je možda najteži pojam za kvantifikaciju bilansa. Ovaj pojam je funkcija nekoliko promenljivih uključujući kreiranje dodatnog praznog prostora razlaganjem otpada, sleganjem, koje se dešava usled povećanja praznog prostora, fluktuirajućih nivoa procedne vode u okviru deponije, promena u efikasnostima prikupljanja, promenama u količini rastvorenog metana u procednoj vodi, kao i promene u temperaturi i barometarskom pritisku. Svi ovi faktori dovode do promena u količini metana sadržanog unutar vazduhom ispunjene poroznosti deponije. Promena u zalihama u okviru prostora pora ispunjenih gasom daje značajan doprinos ukupnom bilansu metana, dok se na primeru ovog istraživanja pokazalo da promena na terenu uskladištenih zaliha deponijskog gasa može imati skoro 6 puta veći uticaj na bilans mase nego samo njegovo generisanje.

3 Analiza tehnologija energetske iskorisćenja deponijskog gasa

Postoji nekoliko načina za efektivno i održivo energetske iskorisćenje deponijskog gasa. Najčešće su u upotrebi tehnologije za direktno korišćenje i tehnologije proizvodnje električne energije (International Best Practices, GMI).

3.1 Tehnologije sa direktnim korišćenjem deponijskog gasa

U SAD, Australiji i mnogim evropskim zemljama, kao što su Švedska, Nemačka i Holandija, deponijski gas se komercijalno koristi umesto fosilnih goriva tokom više od 30 godina. Direktna primena deponijskog gasa podrazumeva njegovo korišćenje na licu mesta ili slanje cevovodom do obližnjeg krajnjeg korisnika. Potrebna dužina cevovoda će primarno odrediti ekonomsku izvodljivost projekta. Kada su u pitanju duži cevovodi njihova ekonomska prihvatljivost bi morala da se dokaže na osnovu analize koja uzima u obzir brojne parametre, od koji su među najznačajnijima: količina deponijskog gasa koji se prikuplja, potražnja za energijom od strane krajnjeg korisnika i cena goriva koje treba da se zameni deponijskim gasom. Cevovodi moraju da uključe i postrojenja za uklanjanje kondenzata, ili pre nego što on uđe u cevovod ili u fazama duž puta. Deponijski gas može da sagoreva u kotlovima ili drugoj opremi uz modifikaciju koja bi omogućila njegovo korišćenje. Korišćenje deponijskog gasa je odgovarajuće za rad u pogonima koji imaju ustaljenu i kontinualnu potrebu za gorivom. Serijski procesi sa promenljivom potražnjom toplotne energije nisu tako poželjni i mogu da rezultuju manjim iskorisćenjem deponijskog gasa, koji se prikuplja u kontinuitetu, i u takvom slučaju se šalje u većoj meri na sagorevanje u baklji.

Neka od postrojenja gde se uobičajeno primenjuje direktno korišćenje deponijskog gasa jesu: kotao, peći, sušare, infracrveni grejači i isparavanje procednih voda.

3.1.1 Kotlovi

Kotlovi mogu da koriste deponijski gas kao gorivo za proizvodnju pare ili vrele vode, koji mogu da se koriste za grejanje prostora, grejanje u procesu, dok para može da se koristi u parnim turbinama za proizvodnju električne energije.

Korišćenje deponijskog gasa na postojećim kotlovima obično zahteva modifikacije na gorioniku i na sistemu za dovod goriva. Većina komercijalnih ili industrijskih kotlova mogu da se adaptiraju da sagorevaju deponijski gas ili da ga ko-sagorevaju sa drugim gorivom. Oprema za adaptaciju goriva je komercijalno dostupna i široko korišćena, ali razmatranja koja su specifična za svako postrojenje moraju da se uzmu u obzir prilikom inženjerskih analiza i projektovanja. Naročito, mora da se uzme u obzir količina dostupnog deponijskog gasa, odnosno da li ona zadovoljava potrebe instalisanog kapaciteta kotla, s obzirom da troškovi u vezi sa adaptacijom kotlova mogu da variraju u zavisnosti od tipa kotla, korišćenog goriva i starosti kotla.

Modifikacije gorionika i cevovoda za dovod goriva mogu da zahtevaju automatsku ili ručnu kontrolu procesa snabdevanja goriva i rada kotla. Uobičajeni pristupi uključuju:

- **Ugradnju automatike za kontrolu procesa i paralelni sistem za dovod goriva**, čime se omogućuje mešanje deponijskog gasa sa drugim gorivima kako bi se podržala primena ko-sagorevanja, ili da se obezbedi momentalna promena na alternativno gorivo u slučaju gubitka pritiska deponijskog gasa na ulazu u jedinicu. Ova adaptacija je uobičajena kada se zahteva sigurnost u kontinuitetu snabdevanja, kao npr. kada su u pitanju potrošači pare, i može da obezbedi korisnicima fleksibilnost kombinovanog sagorevanja.
- **Ručnu kontrolu procesa** na kotlu, umesto sistema automatske kontrole. Ova adaptacija je najbolje prilagođena u scenarijima u kojima kotao nema potrebu neprekidnog snabdevanja i momentalnog prelaska na drugo gorivo, ukoliko se dođe do pada pritiska deponijskog gasa na ulazu u kotao. Takođe može da nađe i primenu na sistemu u kojem su dostupni drugi izvori toplote koji mogu da obezbede podršku (back-up) u snabdevanju potrošača toplotnom energijom. U ovom slučaju, implementiraju se ručne kontrole i sistem rada kotla nije integrisan u automatskom procesu kontrole sistema.

Deponijski gas se koristi u kotlovima širokog opsega veličina, od kotlova manje snage pa sve do velikih industrijskih jedinica. Osim ako nije podvgnut procesu sušenja u značajnijoj meri, deponijski gas je korozivan i može zahtevati konverziju standardne kotlovske opreme.

3.1.2 Peći i sušare

Peći i sušare mogu da koriste deponijski gas kao zamenu ili dopunu za konvencionalna goriva u proizvodnji cementa, opeke i keramike, gvožđa i čelika, drvnoj industriji i drugim sektorima. Za male aplikacije (kao što su lokalna opekarska ili grnčarska postrojenja) upotreba deponijskog gasa može da zadovolji kompletne ili većinu energetske potrebe. Kod postrojenja sa većom potrošnjom energije, deponijski gas se često koristi kao dopunsko gorivo kada njegovo snabdevanje ne može da pokrije zahteve proizvodnog postrojenja za gorivom u potpunosti. U ovim scenarijima, korišćenje deponijskog gasa obezbeđuje uštede troškova u industrijama sa energetski intenzivnim procesima, naročito kod proizvođača koji se oslanjaju na goriva koja se nabavljaju iz uvoza ili je njihova isporuka generalno nestabilna.

Obično je za korišćenje deponijskog gasa u ovim postrojenjima dovoljan delimičan tretman gasa (npr. uklanjanje kondenzata i filtracija), ali određena modifikacija opreme za sagorevanje može da bude neophodna radi prilagođavanja niskoj toplotnoj moći goriva. Sa stanovišta zaštite životne sredine, oprema koja sagoreva gorivo mora da ima odgovarajuće vreme zadržavanja gasova i da obezbedi adekvatnu temperaturu da bi se obezbedilo efikasno uništenje komponenti gasova koje se u tragovima nalaze u deponijskom gasu.

Dodatni primer korišćenja u industriji predstavljaju pojedine opštine koje koriste deponijski gas za pogon sušača sa rotacionim bubnjevima ili insinatora za mulj u postrojenjima za tretman vode. Često se dešava da se deponije i infrastrukture za tretman otpadnih voda granične jedna sa drugom, tako da upotreba deponijskog gasa može da ublaži opštini troškove za tretman otpadnih voda. Tabela 3.1 prikazuje tipične veličine projekata sa direktnim korišćenjem deponijskog gasa u ovim aplikacijama u SAD.

Tabela 3.1 Uobičajene veličine projekata sa direktnim korišćenjem deponijskog gasa (International Best Practices, GMI)

Tehnologija/primena	Procenjeni protok deponijskog gasa (m ³ /h)*	Broj instalacija u SAD
Sušare: Sušare opštinskog mulja	470 do 1300	4
Sušare: Industrijske aplikacije	1400 do 3100	3
Peći: Industrija gvožđa i čelika	510 do 2400	3
Kilns: Industrije opeke i cementa	680 do 3400	12
Aktivnosti zajednice zanatlija (grnčarstvo, duvanje stakla i metalurgija)	34 do 68	3

* Pretpostavlja se 50% metana u deponijskom gasu. Izvor: U.S.EPA LMOP Landfill and LFG Energy Project Database, podaci iz aprila 2011.

3.1.3 Infracrveni grejači

Infracrveni grejači stvaraju toplotnu energiju velikog intenziteta koja se bezbedno apsorbuje na podove i objekte unutar prostora. Infracrveni grejači su efektivni za lokalno grejanje, a koriste se i za grejanje velikih prostora. Postoje dve vrste infracrvenih grejača: keramički (svetli) i cevni (tamni ili nisko-intenzivni). Keramički infracrveni grejači su napravljeni od perforiranih keramičkih stranica, pokrivenih aluminijumskim reflektorom, i elektroventila koji prima mešavinu gasa i vazduha. Keramički infracrveni grejači obično rade na temperaturama između 800 °C i 1000 °C i imaju efikasnosti koje dostižu 93%. Cevni infracrveni grejači se sastoje od gasnog gorionika, zračne cevi i ekrana i rade na temperaturama između 400 °C i 600 °C. Zračna cev je napravljena od čelika i titanijuma i pokrivena je crnom silikonskom emulzijom, koja doprinosi kapacitetu zračenja grejača.

Infracrveno grejanje, sa korišćenjem deponijskog gasa kao izvora goriva, se uspešno sprovodi na nekoliko deponija u Kanadi, SAD i Ukrajini. Idealno je kada se u blizini deponije nalazi objekat sa potrebom za grejanje, kao što je zgrada za održavanje. U zavisnosti od lokacije, infracrveni grejač može da bude potreban samo sezonski, što može ograničiti korišćenje deponijskog gasa. Infracrveni grejači zahtevaju malu količinu deponijskog gasa i relativno su jeftini i laki za instaliranje i funkcionisanje. Trenutni projekti sa grejačima koriste od 20 do 50 m³/h deponijskog gasa. Infracrveni grejači ne zahtevaju ili zahtevaju minimalan tretman deponijskog gasa, sem u slučaju da su u gasu prisutni siloksani.

Primer korišćenja deponijskog gasa za grejanje infracrvenim grejačima je Khelmintsky deponija u Ukrajini, gde se deponijski gas koristi za pogon infracrvenih grejača instaliranih garaži koja se nalazi u okviru deponije (Infrared heater technology utilizing landfill gas in Ukraine, Final Report, 2010). Infracrveni grejači pretvaraju energiju deponijskog gasa u toplotnu energiju koja se bezbedno apsorbuje na površinama. Projekat uključuje dizajn i izgradnju sistema za prikupljanje i tretman gasa i instalaciju horizontalnog cevovoda.

Po uzoru na deponiju u Ukrajini, izveden je i projekat "Snabdevanje garaže deponijskim gasom i grejanje pomoću infracrvenih grejača na sanitarnoj deponiji u „Brijesnica“ u Bijeljini" (Project-06/14-LFG). Na ovoj deponiji, na kojoj je rađeno istraživanje u okviru ove doktorske disertacije, je izgrađen sistem za prikupljanje deponijskog gasa i njegovo sagorevanje na baklji. Deo količine prikupljenog deponijskog gasa se nakon prečišćavanja, korišćenjem aktivnog uglja, posebnim cevovodom odvodi do obližnjeg objekta u sklopu deponije. Nakon prolaska kroz merno-regulacionu stanicu ovaj gas se koristi za napajanje infracrvenog grejača toplotnog kapaciteta 24,1 kW za grejanje garaže. Razmatra se izgradnja gasne kotlarnice sa kotlom na deponijski gas toplotnog kapaciteta 35 kW, koji bi se koristio za pokrivanje potreba za grejanjem objekata u okviru deponijskog kompleksa. Deponija Brijesnica je jedina

u regionu koja ima ugrađen sistem za prikupljanje deponijskog gasa, dok je navedeni primer instalacije svakako prvi slučaj njegovog energetskeg iskorišćenja.

3.1.4 Isparavanje procednih voda

Dikretno korišćenje deponijskog gasa može da nađe primenu kod isparavanja procednih voda, čime se može smanjiti tretman procednih voda i troškovi prevoza u slučaju da se postrojenje za prečišćavanje ne nalazi na lokaciji deponije. Isparavanjem procednih voda se dobijaju koncentrovane tečnosti manje zapremine i lakše za odlaganje. Isparavanje procednih voda je dobra opcija za deponije u kojima odlaganje procednih voda nije dostupno ili je skupo, ili kada je prostor na deponiji ograničen i nedovoljan za ugradnju postrojenja potrebnog kapaciteta prečišćavanja procedne vode. Međutim, izvesni nus proizvodi isparavanja procednih voda (kao što su koncentrovane tečnosti ili soli) treba da budu sigurno odloženi ili tretirani.

Postoje tri kategorije komercijalnih sistema za isparavanje procednih voda: sušare tipa raspršivača, uređaji sa direktnim ubrizgavanjem, i najčešće korišćene – posude za isparavanje. Glavno obeležje i razlika između ovih sistema za isparavanje procednih voda jeste način prenosa toplote do procedne vode, koji može da bude direktan i indirektan, kao i tretman izlazne pare.

3.2 Tehnologije za proizvodnju električne energije

Deponijski gas može da se koristi kao gorivo u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem ili u gasnim turbinama koje pokreću električni generator ili generator na gas. Proizvedena električna energija može da se koristi za pokrivanje sopstvenih potreba na lokaciji kao što su duvaljke za sistem aktivnog prikupljanja gasa ili sistem za tretman procednih voda, odnosno da se proda lokalnoj električnoj mreži ukoliko za to postoje uslovi. Generalno, većina postrojenja sa korišćenjem deponijskog gasa se koristi za proizvodnju električne energije. Ukupno instalisani kapacitet postrojenja za proizvodnju električne energije u pojedinim zemljama prikazan je u tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Instalisani električni kapacitet postrojenja za proizvodnju električne energije u pojedinim zemljama (International Best Practices, GMI)

Zemlja	Zemlje u razvoju/tranziciji		Australija	Kanada	Velika Britanija	SAD
	CDM	Jl				
Kapacitet (MW)	242	13	164	67	1012	1730

3.2.1 Motori sa unutrašnjim sagorevanjem

Tehnologija koja se najčešće primenjuje u projektima koji se tiču proizvodnje električne energije od deponijskog gasa u opsegu od malih do relativno velikih snaga jeste korišćenje motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem su dostupni u različitim veličinama sa električnim snagama koje se kreću u opsegu manje od 0,2 MW do više od 3 MW po jedinici. Generisanje električnog kapaciteta od 1 MW zahteva sagorevanje između 500 i 540 m³/h deponijskog gasa sa udelom metana od 50%. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem koji koriste deponijski gas kao gorivo su komercijalno dostupni i mogu se nabaviti kao modularne jedinice ili u okviru paketa sa integrisanim generatorima u paralelnoj vezi. Često se kontejnerski sistemi instaliraju u serijama koje omogućavaju uključivanje i

isključivanje motora kao odgovor na promenu protoka gasa tokom vremena. Mnogi proizvođači su specijalno dizajnirali motore da koriste deponijski gas, odnosno druge biogasove.

3.2.2 Gasne turbine

Gasne turbine predstavljaju primer većih postrojenja tehnologije korišćenja deponijskog gasa za proizvodnju električne energije. Gasne turbine pogonjene deponijskim gasom su slične turbinama na prirodni gas osim što se, zbog nižeg kvaliteta gasa, koristi dva puta više ventila za regulaciju gasa i injektora. Većina gasnih turbina koja trenutno radi na deponijama su prostog ciklusa, jedno-osovinske mašine. Gasne turbine su generalno većih kapaciteta od motora sa unutrašnjim sagorevanjem i dostupne su u različitim veličinama od 1 MW do preko 10 MW. Mada su jedinice manjih gasnih turbina ili „mikroturbine“ (1 MW) korišćene na deponijama, one nisu uobičajene kao primarna generatorska jedinica. Većina projekata za proizvodnju električne energije korišćenjem deponijskog gasa, u kojima se primenjuju gasne turbine u SAD, nalaze se u opsegu od 3 do 5 MW, što zahteva održive protoke deponijskog gasa od preko 2000 m³/h. Gasne turbine su dostupne kao modularni i paketni sistemi. Modularni sistemi omogućavaju fleksibilnost prilikom promena kvaliteta i protoka deponijskog gasa.

Gasne turbine zahtevaju napajanje gorivom visokog pritiska u opsegu 11,4 do 13,8 bara natpritiska, tako da gasni kompresor mora da se ugradi ispred turbine. Gasni kompresor je osetljiviji deo opreme kada je u pitanju dugoročna pouzdanost i efikasan rad postrojenja. Zahtevi za komprimovanjem gasa uobičajeno upravljaju nivoom do kojeg je potrebno da se izvrši procesiranje deponijskog gasa, kako bi se obezbedila racionalizacija troškova funkcionisanja i održavanja postrojenja. Zahtevani pritisak deponijskog gasa može da potroši značajni udeo snage koja se generiše, rezultujući u nižoj energetskoj efikasnosti.

3.2.3 Kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije

Neki projekti proizvodnje električne energije mogu povećati svoju operativnu efikasnost. Primer za to su sistemi kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije (CHP), ili sistemi za kogeneraciju, koji generišu električnu energiju i koriste otpadnu toplotu da bi obezbedili toplotnu energiju. Toplotna energija koja se proizvede u ovakvim projektima može da se koristi na lokaciji deponije za grejanje, hlađenje, ili procesne potrebe, ili da se cevovodima odvede do obližnjih industrijskih i komercijalnih korisnika, čime se ostvaruje dodatni prihod projekta u odnosu na samo proizvodnju električne energije. Kogeneracija je često bolja ekonomska opcija za krajnje korisnike smeštene blizu deponije ili za projekte gde krajnji korisnik ima dovoljnu potražnju istovremeno za električnom energijom i otpadnom toplotom.

3.3 Tehnologije iskorišćenja deponijskog gasa u razvoju

Kao dodatak tehnologijama sa direktnim korišćenjem deponijskog gasa za proizvodnju toplotne energije i tehnologijama za proizvodnju električne energije, koje su u široj primeni, postoji nekoliko tehnologija u razvoju, koje obećavaju iskorišćenje deponijskog gasa na globalnom nivou. Ove tehnologije nisu dosada korišćene u širokim razmerama, ali se, pod izvesnim uslovima, pokazuju kao tehnički i ekonomski izvodljive.

3.3.1 Priklučenje deponijskog gasa na cevovod gasa visokog kvaliteta

Deponijski gas može da se podvrgne tretmanu čišćenja do nivoa da se proizvede ekvivalent kvalitetnom gasu u cevovodu (prirodni gas), komprimovanom prirodnom gasu (KPG) ili utečnjenom prirodnom gasu (TPG). Gas visokog kvaliteta može da se ubrizga u cevovod prirodnog gasa i koristi za industrijske svrhe. KPG ili TPG može da se koristi npr. za pogon vozila na deponiji ili za snabdevanje flote vozila dizajniranih da koriste ova goriva. Neophodno je da gasovito gorivo, proizvedeno iz deponijskog gasa, zadovoljava standarde kvaliteta goriva propisanih od strane regulatornih agencija ili nezavisnih organizacija za goriva dobijena od deponijskog gasa, kako bi moglo da predstavlja adekvatnu zamenu za gasna goriva. Da bi se ispunili ovi standardi, potreban je celovit tretman kojim bi se u velikoj meri povećao sadržaj metana u gasu i smanjio ugljen-dioksid, azot, kiseonik i sadržaj vlage. Postojeće tehnologije za tretman gasa su relativno skupe. Membranski ili pritisni proces pročišćavanja apsorpcijom gasa zahteva da se instaliraju dodatni gasni kompresori, dok pogon i održavanje ovih sistema može da bude relativno kompleksno. Projekti prečišćavanja deponijskog gasa su generalno implementirani samo na veoma velikim deponijama ili tamo gde je postojala velika potražnja za KPG ili TPG, što je češći slučaj u SAD nego u drugim državama. Dodatno se može zahtevati kvalitetnije upravljanje radom sistema za prikupljanje gasa (polje sa biotrnovima), kako bi se ograničilo prodiranje kiseonika i azota u deponijski gas. Primarni razlog za prisustvo kiseonika i azota u deponijskom gasu je vazduh koji sa usisava preko površine deponije unutar sistema za prikupljanje gasa. Prodiranje vazduha može često da se minimizira podešavanjem vakuuma bunara i popravljanjem nepropusnosti pokrivača deponije. Slična iskustva zabeležena su i u radu deponije u Bjeljini, što je pokazano i eksperimentalnim merenjima, o čemu će biti reči u narednom poglavlju.

3.3.2 Kotlovi na pirolizu

Piroliza je tip niskotemperaturske insineracije otpada koja se odvija pod skoro anaerobnim uslovima. Tehnologija pirolize može da se koristi za uništavanje poluvolatilnih organskih komponenti u otpadnim materijalima, kao što je inficiran bolnički otpad. U kotlovima na pirolizu, otpadni materijal se konvertuje u sagorivi gas ili tečnost koji mogu da se koriste i kao gorivo za kotao. Kotao može da koristi deponijski gas kao dodatni izvor goriva, pri čemu se ne zahteva velika količina. Protok deponijskog gasa od 170 m³/h može da bude dovoljan.

3.3.3 Anaerobna digestija

Iako nije tehnologija za dobijanje deponijskog gasa iz čvrstog komunalnog otpada (ČKO), anaerobna digestija (AD) se primenjuje na nekim deponijama kao alternativa deponovanju i prikupljanju emisija metana iz tokova otpada. Anaerobna digestija se takođe koristi u nekim zajednicama da procesira odvojeno prikupljeni otpad iz tokova hrane. Dva primarna metoda AD su dizajn sa rezervoarom i dizajn u zemlji. Dizajn sa posudom, koji uključuje rezervoar iznad površine zemlje za prihvatanje organskog otpada, je široko korišćen u industriji tretmana otpadnih kanalizacionih voda. Cilj dizajna sa posudom za ČKO je da se ubrza stopa dekompozicije u termofilnoj fazi da bi se postigla povećana produkcija metana. Nasuprot ovome, dizajn u zemlji, koji čine pokriveni anaerobni reaktori u zemlji, predviđaju ugradnju fleksibilnog pokrivača preko organske frakcije ČKO. Ovaj dizajn se široko koristi u projektima sa životinjskim stajnjakom ili industrijskim otpadnim vodama. Za dizajn u zemlji sa korišćenjem ČKO se zahteva utečnjavanje organske frakcije otpada pre njene dalje cirkulacije kroz reaktor. Tipično, komunalni otpad u reaktoru je inokulisan procednim vodama i razlaganje otpada se dešava na nižim temperaturama, tipično mezofilne faze razlaganja. Organska frakcija ČKO (ili odvojeno

prikupljenog otpada hrane) se koristi kao sirovina u zatvorenom digestoru, gde se razlaže uz prisustvo bakterija pod kontrolisanim anaerobnim uslovima kako bi se proizveo digestorski gas, koji sadrži srednje do visoke koncentracije metana, i uobičajeno se koristi za proizvodnju električne energije. Sa digestorima, praktično 100% proizvedenog gasa se prikuplja i koristi, dok je efikasnost prikupljanja gasa na deponijama niža.

3.4 Izbor odgovarajuće tehnologije

Za deponije u kojima se vrši energetska iskorisćenje deponijskog gasa, primarni izbori su tehnologije za proizvodnju električne energije ili direktno korišćenje deponijskog gasa kao goriva. Izbor najbolje tehnologije za dobijanje energije za konkretnu deponiju će zavisi od velikog broja faktora. Opšta razmatranja za izbor odgovarajućih tehnologija za energetska iskorisćenje deponijskog gasa moraju da uzmu u razmatranje sledeće uticajne faktore:

- Garantovanu isporuku otpada (sastava i količine);
- Udaljenost od mreže (elektro mreže, toplovoda, gasovoda);
- Lokalni i regulatorni okvir;
- Količinu i trajanje potencijala produkcije deponijskog gasa za proizvodnju energije;
- Mogućnosti za prodaju električne energije mreži (infrastrukturni i regulatorni okvir);
- Potrebe na lokaciji za toplotnom i električnom energijom;
- Kapitalna ulaganja i troškove pogona sistema, uključujući tretman gasa, transport i troškove;
- Finansijska razmatranja (očekivani prihodi od prodaje za proizvodnju električne energije ili direktno korišćenje, krediti za smanjenje ekvivalentnih CO₂ emisija u atmosferu, druge subvencije finansiranja, način finansiranja, i povrat investicionih ulaganja);
- Raspoloživost lokalnih snabdevača za isporuku opremu i održavanje opreme;
- Raspoloživost iskusnih operatera za upravljanje i održavanje opreme;
- Raspoloživost sigurnih ugovora (kupovina i prodaja energije i ugovori u vezi sa pravom korišćenja gasa).

3.5 Uticajni parametri za realizaciju projekata energetskog iskorisćenja deponijskog gasa

3.5.1 Direktno korišćenje toplotne energije

Glavne koristi u aplikacijama sa direktnim korišćenjem toplotne energije su da one maksimizuju korišćenje gasa, zahtevaju ograničen tretman i omogućavaju mešanje sa drugim gorivima. Aplikacije sa direktnom primenom toplotne energije su demonstrirane na širokom dijapazonu projekata različitih veličina sve dok postoje podudaranja između količine raspoloživih količina deponijskog gasa i potražnje potencijalnih krajnjih korisnika, ili adekvatne količine deponijskog gasa kao dodatka potrošnji primarnog goriva krajnjeg korisnika. Primene sa direktnim korišćenjem toplotne energije mogu doneti najviše koristi kada propisi ili tržište električne energije ograničavaju prodaju električne energije dobijene korišćenjem deponijskog gasa.

Faktori koje je potrebno razmotriti u proceni pogodnosti projekta direktnog korišćenja toplotne energije uključuju:

- **Energetske zahteve krajnjeg korisnika u smislu količine i kvaliteta deponijskog gasa.** Količina raspoloživog deponijskog gasa i njegov sadržaj metana mora da se razmotri i uporedi sa potrebama postrojenja za toplotnom energijom ili parom i nominalnim ulaznim kapacitetima toplotnih izvora. Krajnji korisnici sa velikim dnevnim ili sezonskim fluktuacijama u potražnji goriva su manje poželjni, s obzirom da se deponijski gas proizvodi na lokaciji sa relativno konstantnim protokom i nije izvodljivo njegovo skladištenje za odloženu potrošnju na postrojenju. Dodatno, kvalitet gasa i način njegovog tretmana, potrebnog za konkretno krajnje korišćenje, moraju da se razmotre u analizi ekonomske izvodljivosti.
- **Zahteve za adaptacijom opreme radi boljeg iskorišćanja deponijskog gasa.** Postoje takođe razmatranja za krajnjeg korisnika na projektovanju opreme koja treba ili da ko-sagoreva deponijski gas i druga dodatna goriva ili koja koristi deponijski gas kao primarno gorivo sa prirodnim gasom ili drugim gorivom samo kao back-up izvorom. Konfiguracija sistema za dovod goriva treba da se adaptira u smislu dodavanja gorionika za korišćenje deponijskog gasa i sistema za kontrolu procesa da bi se izvršilo prilagođavanje izabranim izvorima goriva, odnosno da se izvrši modifikacija postojećih sistema. Peći, koje se koriste u industrijama proizvodnje opeke i cementa, uobičajeno tolerišu širok dijapazon kvaliteta goriva i mogu zahtevati niže troškove adaptacije.
- **Lokaciju krajnjeg korisnika.** Lokacija krajnjeg korisnika će diktirati neophodnu dužinu i lokaciju cevovoda za transport deponijskog gasa. Deponija mora da bude locirana relativno blizu krajnjeg korisnika (generalno manje od 10 ili 15 km) kako bi se postigao adekvatan povraćaj investicije za ovaj tip projekta energetske iskorišćenja deponijskog gasa, s obzirom da kapitalni i troškovi rada dužeg cevovoda mogu da utiču na povećanje neto troškova isporučenog deponijskog gasa i umanje njegovu konkurentnost u odnosu na tradicionalna goriva. Međutim, čak i u slučaju veće udaljenosti projekat može da bude ekonomski izvodljiv, u zavisnosti od količine prikupljenog gasa na deponiji, energetske opterećenja opreme koja koristi gas i troškova goriva. Dodatno, lokacija krajnjeg potrošača će odrediti putanju cevovoda. Prelaz preko železničkih pruga, vodenih tokova ili glavnih drumova će imati uticajan faktor na ukupne troškove i izvodljivost konstrukcije cevovoda.
- **Razmatranje troškova.** Troškovi u vezi sa tretmanom gasa, cevovodom i konverzijom opreme koja koristi deponijski gas, kao i troškovi rada i održavanja, moraju se uzeti u razmatranje. Ekonomija projekta za energetske iskorišćenje deponijskog gasa se poboljšava što je krajnji korisnik bliže deponiji. Dalje, pitanja prava prolaza cevovoda će uticati na troškove i cenu pri kojoj deponijski gas može da se isporučuje i prodaje krajnjem korisniku. Dodatno, krajnji korisnik mora da investira u opremu koja omogućuje kombinovano korišćenje deponijskog gasa i tradicionalnih goriva, kako bi se upravljalo dugoročnim neizvesnostima i promenama u protoku deponijskog gasa, kao i u izradu kvalitetnog cevovoda. Dugoročna finansijska stabilnost krajnjeg korisnika takođe treba da se razmotri. Kako bi projekat bio ekonomski isplativ u smislu pokrivanja ukupnih investicionih troškova, zahteva se životni vek trajanja projekta od obično 10 do 15 godina.

Faktori koje je potrebno razmotriti u određivanju pogodnosti za korišćenje deponijskog gasa na lokaciji uključuju:

- **Infracrvene grejače ili druge opcije u vezi sa grejanjem prostora.** Mala količina zahtevanog deponijskog gasa za projekte sa infracrvenim grejačima ili za male kotlove koji se koriste za grejanje škola ili administrativnih zgrada i sezonska priroda zahteva za toplotnom energijom mogu učiniti ove projekte troškovno neopravdanim za sopstveno korišćenje ukoliko deponija ne poseduje sistem za prikupljanje i spaljivanje deponijskog gasa. Međutim, infracrveni grejači rade dobro kada se uparuju sa već implementiranim rešenjima spaljivanja deponijskog gasa na baklji i/ili energetskim projektima na lokaciji jer infracrveni grejači mogu da koriste malu količinu ostataka gasa koja bi inače bila spaljena na baklji.

- **Razmatranja u vezi sa isparavanjem procednih voda.** Sistemi za isparavanje procednih voda su generalno ekonomski izvodljivi samo na lokacijama gde postoji adekvatna isporuka deponijskog gasa da bi se obezbedilo isparavanje generisane količine procednih voda i kada su troškovi za alternativne metode tretmana i odlaganja procednih voda visoki. Tipična deponija zahteva oko 0,15 m³ deponijskog gasa za isparavanje 1 l procednih voda. Isparivači su dostupni u širokom opsegu veličina, a u pojedinim slučajevima se korišćenje posuda većih veličina pokazalo kao ekonomski prihvatljiva opcija zahvaljujući nižim jediničnim investicionim ulaganjima.

Potencijal za proizvodnju energije sa deponija čvrstog komunalnog otpada na nacionalnom nivou razmatran je u mnogim istraživanjima, kao npr. za Čile korišćenjem preporučenog metodološkog pristupa baziranog na tehno-ekonomskoj proceni (Bidart, Schultmann, & Fröhling, 2013), gde su razmatrane alternative proizvodnje električne energije, među kojima su: korišćenje deponijskog gasa, direktno pretvaranje otpada u energiju i prikupljanje i poboljšanje kvaliteta deponijskog gasa za ubacivanje u cevovod. Procena opcija je bila na bazi kriterijuma kao što su troškovi proizvodnje, tehnički i ekonomski potencijal i kratkoročni izazovi za državu. Procenjen tehnički potencijal opcija bio je 1,1 TWhe/god i 2,2 TWhe/god za prve dve opcije, dok je tehnički potencijal za gas poboljšanog kvaliteta procenjen na 260 MM Nm³/god. Na troškove generisanja energije u velikoj meri utiče veličina energetske postrojenja, kao i naseljenost u blizini deponije i njena konstrukcija. Poređenja radi, Republika Čile ima 2 puta više stanovnika od Republike Srbije, gde je prosečna proizvodnja električne energije u periodu od 2007-2013. godine iznosila 36,4 TWhe/god (Džolev, 2014).

3.5.2 Proizvodnja električne energije

Geografska ograničenja i potrebe za modifikacijom opreme u vezi sa direktnim korišćenjem mogu da budu prevaziđeni upotrebom deponijskog gasa za pogon opreme za proizvodnju električne energije na deponiji. Generalno, motori sa unutrašnjim sagorevanjem su dokazani kao troškovno najefikasnije rešenje i pouzdana tehnologija za proizvodnju električne energije korišćenjem deponijskog gasa, naročito za projekte srednjih veličina. Gasne turbine su opcija za projekte korišćenja deponijskog gasa koji podržavaju kapacitet proizvodnje od najmanje 3 do 5 MW. Drugi faktori koji treba da se ocenjuju prilikom razmatranja proizvodnje električne energije od deponijskog gasa, uključuju:

- **Efikasnost električne konverzije.** Efikasnost električne konverzije je indikator koji predstavlja udeo energetske vrednosti deponijskog gasa koji može da se konvertuje u električnu snagu. Efikasnost električne konverzije varira u zavisnosti od izabrane tehnologije. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem imaju veću efikasnost nego većina gasnih turbina. Međutim, veoma visoke nadmorske visine ili visoke spoljašnje temperature smanjuju efikasnost motora sa unutrašnjim sagorevanjem.
- **Potencijal proizvodnje električne energije.** Pouzdanost opreme za proizvodnju električne energije i isporuka goriva do postrojenja za proizvodnju električne energije će odrediti realnu količinu proizvedene električne energije.
- **Održavanje i servis postrojenja za proizvodnju električne energije.** Potreba i obim preporučenih rezervnih delova moraju da se procene na osnovu raspoloživosti ovih delova u određenoj zemlji, odnosno vremena koje je potrebno za nabavku ovih delova iz uvoza. Rad postrojenja za proizvodnju električne energije u saglasnosti sa specifikacijom potrebne opreme i redovnim održavanjem će smanjiti habanje komponenata sistema i dozvoliti operaterima da planiraju isključenja, smanjujući time zastoj postrojenja. Razvoj plana za rutinsko vođenje i praćenje analiza ulja na motoru je važan da pomogne operaterima postrojenja da procene rane probleme u procesu rada postrojenja.
- **Mogućnost da se odgovori na promene u količini deponijskog gasa tokom vremena.** Modularna priroda motora sa unutrašnjim sagorevanjem i gasnih turbina omogućuje fleksibilnost za dodatna povećanja kapaciteta kao odgovor na povećanu produkciju deponijskog

gasa. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem ili mikroturbine mogu da se pridodaju u fazama malog povećanja kapaciteta, sa nižim kapitalnim investicionim ulaganjima, nego kada su u pitanju gasne turbine.

- **Raspoloživost tačke interkonekcije na električnu mrežu.** Uobičajeno, projekti proizvodnje električne energije iz deponijskog gasa se oslanjaju na postojeću infrastrukturu za isporuku električne energije na tržište jer troškovi izgradnje obimne nove infrastrukture nisu dozvoljeni. Projektant treba da ispita raspoloživost i tipove obližnjih električnih vodova i električnih trafostanica. Obližnji električni vodovi koji su pogodni da obezbede priključenje na elektrodistributivnu mrežu i trafostanice predstavljaju prednost za razvoj projekta. Povezivanje može da bude značajan investicioni trošak i zahteva pažljivo istraživanje vezano za dozvole i odobrenja koji mogu uveliko da variraju, u zavisnosti od specifičnih zahteva za konkretnu lokaciju.
- **Razmatranje troškova.** Troškovi uključuju troškove kapitalnih ulaganja i troškove osoblja za nabavku i ugradnju opreme potrebne za tretman gasa i proizvodnju električne energije kao i za prateće troškove za rad i održavanje. Poslednje podrazumeva osoblje i materijale koji se koriste za funkcionisanje sistema i izvođenje rutinskog održavanja i popravki, uključujući periodične remonte opreme. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem zahtevaju komparativno male kapitalne troškove po kWh proizvedene električne energije, ali imaju veće troškove rada i održavanja nego gasne turbine.

3.6 Tretman deponijskog gasa

Pre nego što se odvede do energetskeg postrojenja, potrebno je izvršiti proces konverzije deponijskog gasa, koji uobičajeno podrazumeva njegov tretman radi uklanjanja vlage, odnosno zaostalog kondenzata, koji se nije prethodno prikupio u sistemima za uklanjanje kondenzata, zajedno sa česticama i drugim nečistoćama. Zahtevi za tretmanom zavise od zahteva krajnjeg potrošača. Primarna opcija tretmana deponijskog gasa, kako za tehnologije za proizvodnju električne energije, tako i za tehnologije za direktno korišćenje radi proizvodnje toplotne energije, je uklanjanje vlage, s obzirom da je deponijski gas zasićen i može da bude korozivan za opremu. Za direktno korišćenje deponijskog gasa na kotlovima i pećima zahteva se minimalni tretman. Sistemi tretmana kod projekata za proizvodnju električne energije od deponijskog gasa uobičajeno uključuju serije filtera za uklanjanje nečistoća koje mogu oštetiti komponente motora i turbine, te smanjiti efikasnost sistema.

3.6.1 Tipovi sistema za tretman

Sistemi, koji će ovde biti ukratko opisani odnose se na tretman koji se izvodi pre direktnog korišćenja, kao i u projektima proizvodnje električne energije za tretman. Ovi procesi mogu da se podele na procese primarnog i sekundarnog tretmana. Većina sistema za primarni tretman uključuju odvođenje vode i filtraciju za uklanjanje vlage i čestica. Odvođenje vode može da bude jednostavno, koje se vezuje za fizičko uklanjanje slobodne vode ili kondenzata u deponijskom gasu kroz relativno jednostavan uređaj – knock-out posuda za kondenzat. Knock-out posuda za kondenzat usporava brzinu gasa dovoljno za gravitaciono izdvajanje tečnosti koja se javlja. Knock-out posuda treba da se postavi što je moguće bliže ulazu u pobuđivač gasa, koliko je to izvodljivo. Nakon toga, tečnost može da se odvede ili ispumpa do skladišnog rezervoara za odlaganje. Knock-out posude su u stanju da private velike protoke gasa (veće od 10.000 m³/h) i da uklone više od 1 l vode u minuti.

U savremenim projektima je uobičajeno da se uklanja vodena para ili vlaga u deponijskom gasu putem hlađenja gasa i kompresije. Hlađenje deponijskog gasa izaziva kondenzaciju vodene pare, što

utiče na odvlaživanje. Kondenzat se odvaja u hvataču ugrađenom posle opreme za hlađenje i uklanja se preko sifona ili pumpe. Uobičajene temperature za hlađenje gasa se nalaze u opsegu od -4° do 10°C . Kompresija gasa pre hlađenja služi za dalju dehidraciju vazduha. Gasna kompresija se uobičajeno određuje udaljenošću od sistema za korišćenje energije i na osnovu zahteva opreme za ulaznim pritiskom, čije vrednosti se uobičajeno kreću od ispod 100 do blizu 700 kPa. Odvlaživanje deponijskog gasa rezultuje u povećanoj efikasnosti i zaštiti opreme koja koristi deponijski gas. Hlorisane i halogenizovane komponente, kao i druge komponente rastvorljive u vodi se takođe uklanjaju kondenzatom.

Sistemi za sekundarni tretman su projektovani da obezbede mnogo veće prečišćavanje gasa u odnosu na ono koje se dobija korišćenjem samo sistema za primarni tretman. Sistemi za sekundarni tretman mogu koristiti vešestruke procese čišćenja u zavisnosti od potrebne specifikacije gasa opreme koja ga koristi. Ovi procesi mogu da uključe kako fizičke, tako i hemijske tretmane. Tip sekundarnog tretmana zavisi od konstituenata koji treba da budu uklonjeni za željenu krajnju upotrebu. Dva zagađivača u tragovima, čije uklanjanje iz deponijskog gasa može da se zahteva, su:

- **Siloksani:** Siloksani se mogu naći u proizvodima za domaćinstvo i komercijalnu upotrebu koji nalaze svoj put u čvrstom otpadu i otpadnim vodama (odnosi se na deponije koje primaju mulj iz tretmana otpadnih voda). Siloksani u deponiji volatiraju u deponijski gas i prelaze u silikon-dioksid prilikom sagorevanja deponijskog gasa. Silikon-dioksid (inače, glavni sastojak peska) se skuplja u unutrašnjosti motora za unutrašnje sagorevanje i gasnim turbinama, kao i na cevima kotla, potencijalno smanjujući efikasnost opreme, što rezultuje značajno većim troškovima za održavanje. Potreba za tretman siloksana zavisi od nivoa siloksana u deponijskom gasu (koji varira među deponijama) i od preporuka proizvođača odabrane energetske tehnologije. Uklanjanje siloksana može da bude skupo, pa samim tim predstavlja izazov kada je u pitanju odluka da se investira u tretman siloksana, što zavisi od konkretnog projekta u celini.
- **Jedinjenja sumpora:** Ova jedinjenja, koja uključuju sulfide i disulfide (hidrogen sulfide), su korozivna u prisustvu vlage. Količina ovih jedinjenja je relativno mala i zahtev za bilo kakav dodatni tretman deponijskog gasa ne mora da bude obavezan, naročito na deponijama koje prihvataju samo tipičan čvrsti komunalni otpad. Veća količina jedinjenja se očekuje na deponijama koje prihvataju građevinske i materijale od rušenja, gde je veća verovatnoća zahteva za dodatnim tretmanom.

Uobičajenije tehnologije, koje se najviše koriste u praksi, za sekundarni tretman su adsorpcija i apsorpcija. Adsorpcija uključuje fizičku adsorpciju zagađivača na površini adsorbenta kao što je aktivni uglj ili silikon gel. Adsorpcija je uobičajena tehnologija za uklanjanje siloksana iz deponijskog gasa. Apsorpcija (ili ispiranje) uključuje hemijsku ili fizičku reakciju zagađivača sa rastvaračem ili čvrstim reaktantom. Apsorpcija je uobičajena tehnologija za uklanjanje sumpornih jedinjenja iz deponijskog gasa.

Sistemi za filtraciju mogu da budu ugrađeni kako bi se obezbedio dodatni tretman deponijskog gasa. Čestice u deponijskom gasu, koje ulaze u opremu, mogu da izazovu njeno oštećenje i habanje. Čestice mogu da se kontrolišu ili prolaskom gasnog toka kroz filtersko jastuče (uobičajeno napravljeno od žice od inox-a ili geotekstila), ili alternativno korišćenjem ciklonskog separatora. Cikloni su u stanju da uklone čestice veličine do $15\ \mu\text{m}$, pa čak i do $5\ \mu\text{m}$ kod ciklona veće efikasnosti, dok su filterski jastučići efektivni do veličine od $2\ \mu\text{m}$. Oba sistema su sklona da se blokiraju i stoga se zahteva periodično održavanje kako bi se uklonile akumulirane čvrste čestice.

3.6.2 Troškovi tretmana deponijskog gasa

Zahtevani tretman deponijskog gasa za projekte njegovog energetskog iskorišćenja može da bude u opsegu od jednostavnog uklanjanja vlage i čestica do skupljeg uklanjanja korozivnih i abrazivnih zagađivača. Specifičan tip i primena opreme za korišćenje deponijskog gasa mogu zahtevati različite nivoe tretmana deponijskog gasa. Primarna forma tretmana deponijskog gasa je da se ukloni određeni udeo vodene pare iz zasićenog deponijskog gasa, što smanjuje troškove održavanja korišćenja opreme. Čistiji gas može da rezultuje bitnom smanjenju korozije i smanjenim troškovima održavanja u toku veka trajanja opreme. Nivo tretmana deponijskog gasa i prateći trošak će zavisiti od zahtevane čistoće gasa krajnjeg potrošača, npr. siloksani će da izazovu manje problema kod kotlova, nego kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem ili gasnih turbina.

Kompromis za uprošćeni i jeftiniji tretman deponijskog gasa daje povećanje troškova za održavanje opreme. Sistem za tretman svakako predstavlja kapitalno ulaganje. U slučaju da se ne koristi sistem za tretman, ili se koristi uprošćeni sistem koji zahteva niža ulaganja, velika je verovatnoća povećanja troškova za rad i održavanje, dugoročno gledano, što bi za posledicu dovelo do troškova za zamenu opreme usled kraćeg veka trajanja. Za većinu projekata, preporučuje se ugradnja sistema za hlađenje, kojim se vrši odvlaživanje i filtriranje deponijskog gasa, radi uklanjanja slobodnih tečnosti i čestica pre nego što se cevovodom odvedu do motora ili kompresora. Drugi tretmani, koji uključuju odvođenje hidrogen-sulfida ili siloksana, zavise od zahteva projekta i konkretnog nivoa zagađenja deponijskog gasa.

U praksi rada deponija na kojima se proizvodi deponijski gas za energetsko iskorišćenje, koje nemaju ugrađeni sistem za tretman gasa hlađenjem, operateri su bili u mogućnosti da pogone motore, ali su se suočavali sa problemima vezano za koroziju usled nastajanja kiselina i čestica u zoni sagorevanja. Ovo je rezultovalo potrebama za češćom zamenom ulja i periodičnim održavanjem opreme, a u nekim slučajevima ekstremnim habanjem na cilindrima motora.

Nečistoće iz deponijskog gasa utiču na pad efikasnosti gasnih motora smanjujući na taj način ekonomsku održivost projekata energetskog iskorišćenja. Istraživanje uticaja jedinjenja u tragovima deponijskog gasa na deponiji Odayeri u Istanbulu, kao što su hidrokarbonati, siloksani i volatilni halogenizovani hidrokarbonati tokom trogodišnjeg perioda pokazali su niz problema kada je reč o radu, održavanju i efikasnosti rada postrojenja. Problemi u pogonu se ispoljavaju kroz stvaranje naslaga u komori za sagorevanje, turbopunjaču i hladnjaku motora, čak i pre planiranih servisnih održavanja. Visoki nivoi hidrogen-sulfida, kao i hlorizovana i fulorizovana jedinjenja dovode do korozije delova motora i smanjuju vek trajanja ulja motora, dok prisustvo siloksana rezultuje formiranjem naslaga, povećavajući troškove održavanja motora, što sve zajedno upućuje na potrebu za predtretmanom deponijskog gasa kada se on koristi u postrojenjima za energetsko iskorišćenje (Sevimoglu & Tansel, 2013). Tretman jedinjenja organsko-metalskog porekla, kao što su siloksani, omogućuje bolje upravljanje održavanjem motora. Osim toga, pokazalo se da efikasnost rada postrojenja značajno zavisi od koncentracije metana u deponijskom gasu, koja može da ide i do 35%, dok bi nivo kiseonika trebao da bude manji od 5% da bi se deponija održavala pod anaerobnim uslovima. Takođe, sadržaj volatilnih organskih jedinjenja u deponijskom gasu može da ima negativan efekat po zdravlje radnika tokom dužeg perioda izlaganja, tako da bi morala da se koristi zaštitna oprema uz redovna praćenja zdravlja radnika.

3.7 Pregled tehnologija energetskega iskorišćenja deponijskog gasa

Tabela 3.3 daje pregled tehnologija za energetske iskorišćenje deponijskog gasa, o kojima se govorilo u ovom poglavlju. Za svaku od navedenih tehnologija su date po kolonama prednosti, nedostaci i zahtevi u pogledu tretmana deponijskog gasa.

Sveukupna izvodljivost LFGE projekta za konkretnu deponiju zavisi od brojnih tehničkih razmatranja, kao što su sastav i količina otpada, kvalitet i količina deponijskog gasa, i raspoloživost i lokacija pogodnog krajnjeg korisnika. Razumevanje, ocenjivanje i izbor odgovarajuće LFGE tehnologije korišćenja deponijskog gasa je suštinski važno za sveukupnu izvodljivost i uspeh LFGE projekata. Dokazane i tehnologije u razvoju nude praktična rešenja za efektivnu primenu LFGE projekata za direktno korišćenje i proizvodnju električne energije, uključujući tretman deponijskog gasa za uklanjanje vlage, čestica i drugih nečistoća. (Hansen, i drugi)

Tabela 3.3 Pregled tehnologija energetskega iskorišćenja deponijskog gasa (International Best Practices, GMI)

Prednosti	Mane	Zahtevi za tretman deponijskog gasa
Direktno korišćenje - srednji kvalitet gasa kroz cevovod		
Kotao, sušač i grejač u procesu		
Mogu da koriste maksimalni protok prikupljenog gasa	Troškovi su vezani za dužinu cevovoda; korisnik energije mora da bude u blizini	Treba da se poboljša kvalitet gasa ili da se adaptira oprema
Troškovno efikasni		
Zahteva se ograničeno uklanjanje kondenzata i tretman filtriranja		
Ne zahteva se velika količina deponijskog gasa i on može da se meša sa drugim gorivima		
Infracrveni grejač		
Relativno jeftini	Sezonsko korišćenje može da ograniči korišćenje deponijskog gasa	Zahtevaju se tretmani delimičnog uklanjanja kondenzata i filtriranja
Laki za ugradnju		
Ne zahtevaju veliku količinu gasa		
Mogu da se uvežu sa drugim energetskim projektom		
Isparavanje procednih voda		
Dobra opcija za deponiju gde je odlaganje procednih voda skupo	Visoki kapitalni troškovi	Zahtevaju se tretmani delimičnog uklanjanja kondenzata i filtriranja
Električna energija		
Motor sa unutrašnjim sagorevanjem		
Visoka efikasnost u poređenju sa gasnim turbinama i mikroturbinama	Relativno visoki troškovi održavanja	Minimalno se zahteva primarni tretman deponijskog gasa; za optimalan rad motora, sekundarni tretman može da bude neophodan
Dobro podudaranje veličina sa izlazom gasa na mnogim deponijama	Relativno visoke emisije u vazduh	
Relativno niski troškovi po kW instalisane snage u poređenju sa gasnim turbinama i mikroturbinama	Isplativost može da bude na granici u zemljama sa niskom cenom električne energije	
Efikasnost raste kada se koristi otpadna toplota		
Mogu se dodati/ukloniti motori		

uporedo sa trendom produkcije gasa		
Gasna turbina		
Ekonomija obima, s obzirom da troškovi po kW generisanog kapaciteta padaju sa povećanjem veličine turbine dok efikasnost raste	Efikasnost opada kada jedinica radi pod delimičnim opterećenjem	Minimalno se zahteva primarni tretman deponijskog gasa; za optimalan rad motora, sekundarni tretman može da bude neophodan
Efikasnost raste kada se koristi toplota	Zahteva visoku kompresiju gasa	
Otporniji na oštećenja od korozije	Visoka parazitska opterećenja	
Niske emisije azotnih oksida	Ekonomija	
Relativno kompaktna	Isplativost može da bude na granici u zemljama sa niskom cenom električne energije	
Mikroturbina		
Zahteva niži protok gasa	Isplativost može da bude na granici u zemljama sa niskom cenom električne energije	Zahteva prilično intenzivan primarni i sekundarni tretman deponijskog gasa
Može da radi sa nižim procentom metana		
Niske emisije azotnih oksida		
Relativno lako povezivanje na mrežu		
Mogućnost da se dodaju i uklone jedinice sa promenama raspoloživih količina gasa		
Direktno korišćenje - visoki kvalitet gasa kroz cevovod		
Kvalitetan gas u cevovodu		
Može da se preda u cevovod prirodnog gasa	Povećani trošak kao rezultat striktnog upravljanja radom bunara koje treba da ograniči prodiranje kiseonika i azota u deponijski gas	Zahteva intenzivno i potencijalno skupo procesiranje deponijskog gasa
CNG (komprimovani prirodni gas) ili LNG (tečni prirodni gas)		
Alternativna goriva za vozila na deponiji ili rinfuza za kamione za prevoz i za isporuku opštem komercijalnom tržištu	Povećani trošak kao rezultat striktnog upravljanja radom bunara koje treba da ograniči prodiranje kiseonika i azota u deponijski gas	Zahteva intenzivno i potencijalno skupo procesiranje deponijskog gasa

4 Opis odabranog postrojenja, postavka eksperimenta i analiza dobijenih rezultata

Za potrebe eksperimentalne analize izabrana je Regionalna deponija „EKO-DEP“ koja se nalazi u Bjeljini. Ova deponija, za ovdašnje uslove veoma moderna i tehnološki opremljena, predstavlja jednu od retkih u regionu koja ima ugrađen aktivan sistem sakupljanja deponijskog gasa sa ciljem njegovog kontrolisanog odvođenja iz tela deponije radi sagorevanja na baklji i sprečavanja emitovanja metana u atmosferu. Osim ovog, postoji i sistemom za prečišćavanje procedne vode najnovije tehnologije primenom reverzne osmoze sa recirkulacijom koncentrata i/ili procedne vode na deponiju.

Podaci dobijeni putem eksperimentalnih istraživanja i merenja imaju zadatak da upotpune podatke dobijene redovnim praćenjima i merenjima na deponiji tokom relevantno dugog vremenskog perioda, te pomognu daljim naporima kreiranja modela koji u najboljoj meri opisuje funkcionalnu zavisnost produkcije deponijskog gasa od relevantnih uticajnih parametara, koji su kao takvi prepoznati u stručnoj literaturi. Cilj istraživanja je dobijanje modela koji će rezultatima iz prakse rada deponije upotpuniti dosadašnje matematičke modele uz dobijanje preciznijih predikcija količina deponijskog gasa tokom vremena bazirajući se u najvećoj meri na uticaj organske materije i vlage koja se dovodi otpadu kako padavinama, što je slučaj i sa poznatim modelima, tako i recirkulacijom koncentrata i procedne vode, koji su u osnovi tehničkog rešenja predmetne deponije i karakteristični su za ovo istraživanje. Najveći akcenat u istraživanjima ove doktorske disertacije daje se upravo na razmatranju mogućnosti povećanja energetskog iskorišćenja deponijskog gasa recirkulacijom procedne vode i koncentrata. Poboljšan tretman otpada u smislu vlage bi, osim očekivano veće produkcije deponijskog gasa, trebao neminovno da dovede do bolje stabilizacije samog otpada tokom vremena, kao i većoj kontroli gasova i procednih voda koji se generišu unutar otpada i emituju u spoljašnju sredinu. Uticaj i sudbina zagađujućih materija, koje se kao takve recirkulacijom vraćaju u telo deponije, neće se razmatrati ovim istraživanjem.

Praćenje podataka odnosi se na vremenski period od aprila 2014. godine do maja 2016. godine. Dobijene vrednosti sa postrojenja na bazi merenja, koje će se iskoristiti za potrebe ovog istraživanja, odnose se na period od septembra 2014. godine do decembra 2015. godine. U periodu od decembra 2015. godine do februara 2016. godine izvršeno je niz eksperimentalnih i laboratorijskih merenja na predmetnoj deponiji.

4.1 Karakteristike deponije

Deponija "Brijesnica" se nalazi u zapadnom delu Opštine Bijeljina, a udaljena je oko 2 km od periferije grada sa istočne strane, i oko 1,5 km od najbližih naselja sa severozapadne i zapadne strane. Deponija je radu od početka 2010. godine, a do početka 2016. godine deponovano je nešto više od 180.000 tona komunalnog otpada. Čelija deponije na kojoj se vrši aktivno odlaganje otpada zauzima oko 4 ha, dok raspoloživi kapaciteti deponije obuhvataju dodatne dve čelije površine oko 4 ha i 3 ha, čija je izgradnja predviđena u budućnosti.

4.1.1 Postrojenje za prečišćavanje procednih voda

Procedne vode se prihvataju u telu deponije drenažnim cevnom sistemom od perforiranih PVC cevi i drenažnim tepihom od prirodne mešavine peska i šljunka po dnu tela deponije i odvođe se do prijemnog bazena. U prijemnom bazenu, zapremine 300 m³, vrši se delimična aeracija procednih voda uduvavanjem vazduha, što dovodi do oksidacije rastvorenih materija te smanjenja dela organskog zagađenja (smanjenje BPK₅, HPK), kao i taloženja većih suspendovanih čestica. Odmah uz prijemni aeracioni bazen nalazi se egalizacioni bazen zapremine 60 m³, gde se ispušta procedni filtrat, koji se odvodi na postrojenje reverzne osmoze (RO) radi daljeg prečišćavanja. Koncentrat sa membrane se tretira tako što se putem linije za recirkulaciju odlaže nazad u aktivnu ćeliju na deponiji. Nezavisno od koncentrata, postoji posebna linija za recirkulaciju neprečišćene procedne vode, ali se nakon puštanja u rad postrojenja za prečišćavanje, aprila 2014. godine, recirkulacija procedne vode obavlja u zanemarljivo malim količinama. Postrojenje reverzne osmoze je tipsko postrojenje koje je potpuno automatizovano i celokupna oprema je smeštena u kontejneru, koji se sastoji od sledećih jedinica: doziranje kiseline koja služi za regulaciju pH filtrata, filtera za predfiltraciju filtrata, jedne faze prečišćavanja filtrata, PLC monitora i računara i sistema rezervoara. Moduli su najnaprednije tehnologije, a sastoje se od cevi pod pritiskom sa hidrauličkim diskovima i radijalnim/zrakastim kanalima (RCDT), koje drži centralna napregnuta šipka. Koristi se 8-ugaoni poliamidni tip membranskih jastučića minimalne površine membrana u modulu 11 m², dok je trenutno instalirano 12 ovakvih modula. Predviđeni kapacitet postrojenja u smislu njegovog protoka je 1,46 m³/h. Postrojenje je opremljeno mernim uređajima putem kojih se vrše merenja relevantnih parametara, potrebnih za ispravno funkcionisanje sistema. Vrednosti se očitavaju u kontinuitetu na svakih par minuta, dok se podaci skladište u kompjuteru. Neki od parametara koji se očitavaju su: elektroprovodljivost, temperatura, ukupna zapremina i trenutni protoci procedne vode koja ulazi u postrojenje i permeata koji se ispušta u okolinu, pH vrednosti i radni pritisci.

Na bazi preciznih merenja elektroprovodljivosti (EP) moguće je pratiti efikasnost rada postrojenja i reagovati u slučaju da je ona narušena. U cilju smanjenja zagađenja procednih voda, koje se iz deponije dopremaju u prijemni rezervoar, vrši se njihovo mešanje sa tehničkim otpadnim vodama koje potiču od pranja vozila, a koje karakteriše niži stepen zagađenosti. S obzirom da se koncentrat kao ostatak procesa prečišćavanja vraća nazad na deponiju, pa samim tim i zagađujuće materije, postoji potencijalna opasnost povećanja koncentracije polutanata novonastalih procednih voda koje će se generisati u telu deponije. Stepem zagađenja procednih voda može se jednostavno pratiti preko elektroprovodljivosti procedne vode na ulazu u postrojenje, što predstavlja prvi indikator koji se prati i treba da signalizira u slučaju porasta vrednosti iznad očekivanog nivoa, što bi moglo da ugrozi životnu sredinu usled potencijalnog zagađenja podzemnih voda. Ovakvi poremećaji svakako zahtevaju reakciju operatera i stražnjaka koji održavaju čitav sistem od praćenja samog procesa prečišćavanja do adekvatnog odlaganja koncentrata. Na deponiji se u skladu sa propisima kvaliteta voda (Pravilnik Sl. glasnik 44/01) (Pravilnik Sl. glasnik 44/01) (Uredba Sl. glasnik 42/01) obavlja redovan monitoring na kvartalnom nivou, koji čine detaljne laboratorijske analize zagađujućih materija u procednoj vodi, permeatu, kao i podzemnim vodama uzorkovanim na definisanim mernim mestima/plezometrima, na osnovu čega se izdaju odgovarajući izveštaji (Izveštaji za kvalitet vode, 2015). Osim toga u skladu sa propisima u vezi sa kvalitetom vazduha (Zakon o kvalitetu vazduha, 2011) (Uredba o vrijednostima kvaliteta vazduha, 2012) takođe se obavljaju redovna izveštavanja (Izveštaji za kvalitet vazduha, 2015). Dobijene vrednosti se proveravaju da li su u dozvoljenim granicama propisanim izdatim dozvolama (Dozvola za upravljanje otpadom za JP Eko-dep)(Ekološka dozvola za JP Eko-dep). Međutim, pored redovnih postoje i vanredne kontrole u slučaju narušavanja kvaliteta procedne vode, indikovano promenama vrednosti praćenih parametara iznad dozvoljenog nivoa, daljim detaljnijim vanrednim proverama i merenjima na definisanim mernim mestima (t, pH, HPK, BPK itd.).

Efikasnost uređaja RO se uobičajeno izražava preko udela uklonjene elektroprovodljivosti u odnosu na početnu vrednost sa kojom procedna voda ulazi u postrojenje za prečišćavanje, a zavisi od

više parametra sa strane hemijskog i fizičkog dela procesa prečišćavanja. Sa hemijske strane tretman sirove deponijske procedne vode vrši se dodatkom sumporne ili hlorovodonične kiseline, koje se upotrebljavaju u cilju rastvaranja hemijskih elemenata i sprečavanja rasta bioloških formacija. Primarni zadatak efikasnijeg snižavanja pH vrednosti je sprečavanje taloženja tvrdih nanosa na membranskim površinama. Sa obzirom na visoki radni pritisak, koji se uobičajeno kreće od 30 do 90 bara, i pad tog pritiska kroz svaki pojedinačni nivo membrane u RCDT modulima, koji je potreban za uspešnu separaciju i takođe pod uticajem nelamilarnih – turbulentnih protočnih kanala, formacija tvrdih nanosa postaje neizbežna ukoliko se procedna voda ne bi tretirala kiselinom. Sekundarni zadatak je onemogućavanje uslova za rast bakterija odnosno bioloških formi koje variraju sa temperaturom sirove procedne vode i biološkom aktivnošću. Na ovakav način regulacijom pH vrednosti kroz dozirano podešavanje unosa kiseline može uspešno da se ostvari kontinuirani rad takvog postrojenja sa ciljem da se postigne “ustaljeni” radni režim, s obzirom na stvarno radno vreme postrojenja u kojem se vrši pročišćavanje vode. Tako se na primer na svakih 50-200 radnih sati postrojenje se zaustavlja kako bi se obavio automatizovani ciklus hemijskog čišćenja, koji je podeljen u alkalni i kiseli tip čišćenja. Alkalni tip čišćenja se radi da bi se nakon manjeg taloženja u radnom periodu ponovo postigli svi protočni parametri i efikasnost rada postrojenja.

Sirove deponijske procedne vode imaju uobičajenu pH vrednost između 8,0 do 8,5. To naravno zavisi od starosti i vrste otpada, od starosti procedne vode (zadržavanja vode u telu deponije i biološke faze u kojoj se ona nalazi), od količine padavina i od drugih tečnosti koje stalno ili privremeno ulaze u telo deponije.

Koncentrat kao “tehnološki ostatak” posle separacije može da se tretira na više načina. Idealno bi bilo da se taj ostatak potpuno eliminiše nekim drugim tehnološkim procesom i da se ne vraća u telo deponije, čime se izbegava rast koncentracije polutanata u telu deponije. Sa druge strane koncentrat bi mogao da bude koristan u slučaju da se njime pravilno rukuje, što bi trebalo da pokaže i istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji. U otvoreni (nepokriveni) deo tela deponije uvek dolaze i padavine koje prelazeći preko odloženog otpada stvaraju veći deo deponijske procedne vode. Koncentrat bi trebao tako da se recirkuliše da uobičajeno ne utiče direktno na parametre procedne vode, kad se s njim rukuje korektno. To znači da koncentrat, koji se vraća na deponiju, treba uspešno da se distribuira odgovarajućim razvodom na više lokacija na deponiji u smislu da može prostorno i vremenski sporo da se distribuira u telo deponije vlažeći otpad u najvećoj mogućoj meri. Treba da se nastoji da se putanja koncentrata održava tako da se izbegava direktno izlivanje u drenažnu cev, odnosno mešanje sa novonastalom procednom vodom, jer se tako stvara direktan krug gde vremenom dolazi do nekontrolisanog rasta koncentracije procedne vode koja se šalje u postrojenje za prečišćavanje.

Posmatrajući telo deponije kao živi bioreaktor, kao i da se deponija u fizičkom smislu vremenom sporo, ali konstantno menja, može se korektnim rukovanjem postići odlaganje koncentrata na način koji minimalno utiče na parametre sirove procedne vode, tako da ne predstavlja potencijalni budući tehnološki problem u smislu povećanja stepena zagađenja na ulaznoj strani postrojenja RO.

Generalno, bilo kakav dodatak i porast koncentracije zagađivača u sirovoj vodi (kao što je i dodatak kiseline) povećava nivo elektroprovodljivosti, a u primeru upotrebe tehnologije RO za prečišćavanje deponijske procedne vode to je neizbežno. Kao posledica snižavanja pH vrednosti (uobičajeno oko 6,0 – 6,5) koncentrat, kao i permeat, ulaze u kiseli opseg. Permeat se nakon RO uvek tretira se NaOH zbog neutralizacije pre ispuštanja u okolinu ili kanalizaciju (u zavisnosti od tipa RO, kao i namene i zahteva prečišćavanja), dok se koncentrat direktno recirkuliše i distribuira na telo deponije. Na osnovu mehanizma za namensko smanjivanje pH vrednosti sirove procedne vode pre prečišćavanja reverznom osmozom, mogu da se naslute eventualne posledice i uticaj na koncentrat, što će pokazati i dijagrami promene elektroprovodljivosti tokom vremena.

Veoma je bitno za postrojenje reverzne osmoze, da sam proces separacije radi u konstantnim uslovima, bez obzira na promenu ulaznih parametara procedne vode. Prednost ovakvih sistema je velika

fleksibilnost u radu u poređenju sa klasičnim tehnologijama, kako bi se dostigla dugoročna efikasnost samog procesa, koja se ogleda u postizanju odgovarajućih hemijskih i parametara protoka.

4.1.2 Sistem za prikupljanje i sagorevanje deponijskog gasa

Postrojenje za sagorevanje deponijskog gasa, tzv. baklja, pušteno je u rad od septembra 2014. godine. Konstruisana baklja je zatvorenog tipa, koja radi sa visokom efikasnošću sagorevanja deponijskog gasa. Deponijski gas se prikuplja lokalno sa biotrnova i transportuje sistemom cevovoda na bazi potpritiska, obezbeđenog radom duvaljke, do glavnog kolektora, odakle odlazi u baklju. Neposredno pre ulaska u baklju, vrše se merenja karakteristika deponijskog gasa, koja se očitavaju i beleže od strane operatera. Kao deo redovnog održavanja, obavlja se praćenje i podešavanje potpritiska gasa u cevovodu na usisnoj strani pre duvaljke, a pre i posle knock-out postrojenja. Glavna merenja karakteristika deponijskog gasa obavljaju se putem mernog uređaja na samoj baklji, sa prikazivanjem trenutnih vrednosti sledećih parametara: temperature sagorevanja, ukupno sagorela količina deponijskog gasa, protok deponijskog gasa, koncentracije kiseonika i metana u deponijskom gasu, otvorenost ventila na usisu u glavni kolektor i potpritisk ventila. Postoji mogućnost zadavanja stepena otvorenosti ventila ili potpritiska na usisu na zadatu vrednost, što je predmet praćenja i usklađivanja sa produkcijom deponijskog gasa tokom vremena i kao rezultat daje odgovarajući protok i sastav deponijskog gasa. Neznatan deo od ukupno proizvedene količine gasa (trenutno oko 0,1%) se dodatno prečišćava i odvodi posebnim gasovodom do obližnjeg objekta gde se koristi za njegovo zagrevanje u zimskom periodu.

Ukoliko se uzme u obzir opisana konstrukcija deponije i integrisanih sistema kojima se omogućuje lakše generisanje i upravljanje emisijama procednih voda i deponijskih gasova, deponija u Bjeljini bi se pre mogla svrstati u kontrolisane nego obične sanitarne deponije (Christensen, Scharff, & Hjelmar, Landfilling: Concepts and Challenges, 2011). Distribucija procedne vode i koncentrata na deponiji vrši se direktnim izlivanjem sa šaftova preko fleksibilnog creva. Ovakav način distribucije predstavlja znatno nepovoljnije rešenje u odnosu na tipične slučajeve koji se primenjuju u praksi bioreaktorskih deponija, gde se primenjuju rešenja sa distributivnim ograncima i disperznim rovovima u koje se smeštaju perforirane cevi (Reddy & Bogner, 2003) i očigledno je da se trenutno, na ovakav način, ne obezbeđuje ni blizu ravnomerna raspodela koncentrata i procedne vode unutar otpada na deponiji. Premda se radi o relativno malim količinama izlivenog koncentrata, za koje se ne očekuje da izazovu stvaranje većih barica na terenu deponije, usled zasićenja otpada vlagom, izlivanje koncentrata na jednom mestu svakako može da bude povoljno za analizu koja prati ovo istraživanje, a tiče se praćenja količina lokalno generisanog deponijskog gasa.

4.2 Metodologija rada

Metodologija rada, koja se tiče predmetnog istraživanja, bazira se na eksperimentalnim merenjima, čije vrednosti se, uz analizu redovnih merenja parametara rada postrojenja, koriste za realizaciju postavljenog cilja istraživanja. Eksperimentalna merenja, rađena za potrebe ovog istraživanja, mogu se podeliti u 3 grupe. Prve dve grupe čine laboratorijska merenja vršena na uzorcima procedne vode i koncentrata, dok se treća grupa merenja tiče utvrđivanja sastava i protoka deponijskog gasa na biotrnovima.

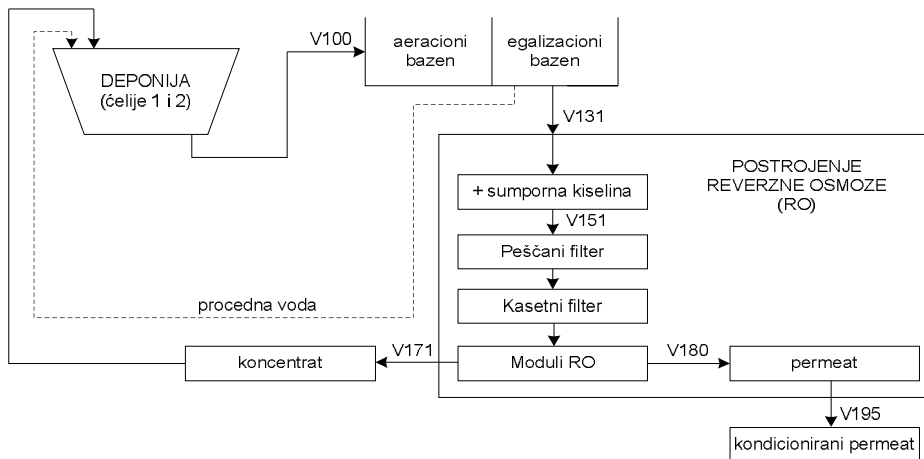
Slika 4.1 daje shematski prikaz mernih mesta u okviru postrojenja za prečišćavanje, na kojima su izvršena uzorkovanja za potrebe laboratorijskih merenja. Uzorkovanje procedne vode je vršeno sa sledećih mernih mesta: V100 – procedna voda na izlaznoj cevi koja dolazi direktno sa deponije, V131 –

procedna voda na izlazu iz egalizacionog bazena i ulazu u postrojenje za prečišćavanje, V151 – procedna voda nakon kondicioniranja radi sniženja pH vrednosti, V171 – koncentrat iz procesa reverzne osmoze (RO), V180 – permeat na izlazu iz modula za prečišćavanje RO, V195 – kondicionirani permeat pH vrednosti bliske neutralnoj, spreman za odlaganje u vodotokove.

Analiza u okviru prve grupe merenja je imala za cilj eksperimentalno određivanje prinosa biogasa i sadržaja suve i suve organske materije, koji bi trebalo da budu u korelaciji. Ova analiza je urađena za uzorke dobijene sa mernih mesta V131 i V171, primenom metode (VDI 4630). Sadržaj suve materije i organske suve materije određen je u skladu sa SRPS EN 15934: 2013 i SRPS EN 15935: 2013. Uzorkovanje je izvršeno 03.12.2015. godine, sa merenjima generisanog biogasa u trajanju od mesec dana.

Analiza u okviru druge grupe merenja je rađena radi laboratorijskog određivanja uticajnih parametara na produkciju biogasa iz procedne vode, među kojima su HPK i BPK₅, uz utvrđivanje njihove elektroprovodljivosti (EP). Uzorkovanje je trajalo u periodu od 03.12-10.12.2015. godine sa prikupljanjem uzoraka na dnevnoj bazi, a tokom puna dva ciklusa rada postrojenja za prečišćavanje. Krajnji ciljevi ove analize su sledeći:

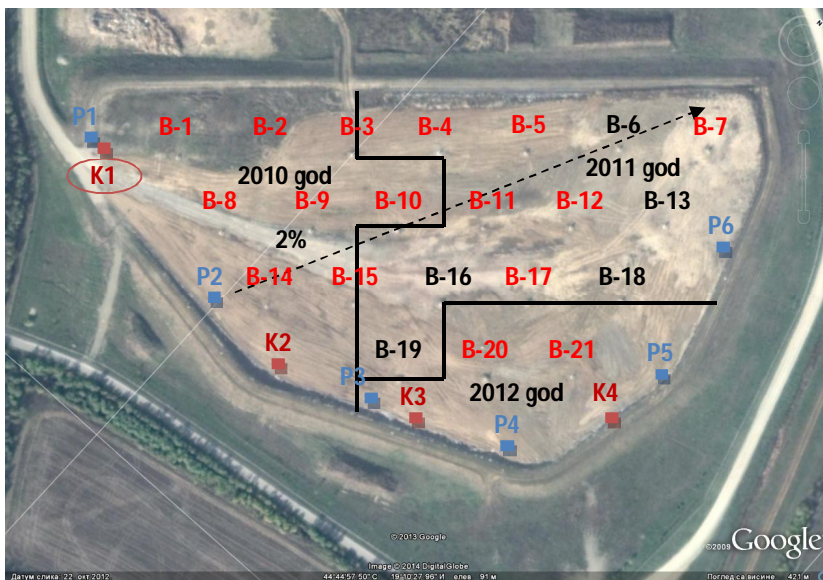
- Izračunavanje teorijskog potencijala produkcije deponijskog gasa iz koncentrata na bazi HPK vrednosti;
- Utvrđivanje „starosti“ procednih voda na bazi vrednosti indikatora BPK₅/HPK i, shodno tome, mogućnosti njihovog prečišćavanja recirkulacijom na bazi podataka iz literature;
- Određivanje stepena degradacije biogasa korišćenjem vrednosti prinosa biogasa iz prve grupe merenja i poređenje ove vrednosti sa vrednostima dobijenim na bazi indikatora BPK₅/HPK;
- Praćenje efikasnosti rada postrojenja na uklanjanju zagađujućih koncentracija, kao i poređenje sa vrednostima tokom perioda koji je protekao od početka primene recirkulacije koncentrata, dobijenih na bazi merenja sa postrojenja za prečišćavanje.



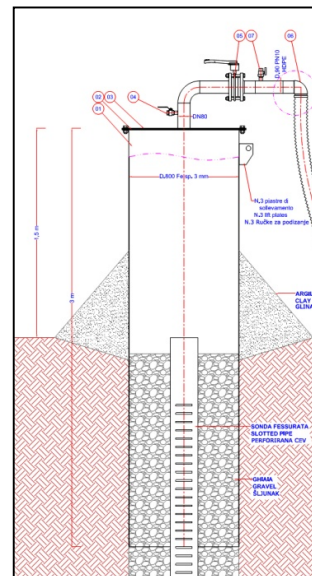
Slika 4.1 Dijagram toka sistema za tretman procedne vode i prikaz mesta uzorkovanja

Treća grupa merenja obavljena je tokom više navrata, u periodu od 04.12-10.12.2015. godine, kao i 24.02.2016. godine, što se može videti u tabeli 4.2. Na slici 4.2 dat je satelitski snimak aktivne ćelije deponije sa rasporedom biotrnova na kojima su obavljena merenja sastava deponijskog gasa, dok je shematski prikaz konstrukcije tipičnog biotrna na deponiji dat na slici 4.3. Uzorkovanje deponijskog gasa izvršeno je preko kontrolnog ventila koji se nalazi na izlaznoj cevi iz biotrna. Na biotrnovima označenim crnom bojom nije bilo mogućnosti uzorkovanja deponijskog gasa bilo zbog nepostojanja kontrolnog

ventila (B-16, B-18, B-19) ili zato što su pojedini biotrnovi bili fizički odvojeni sa centralnog sistema skupljanja deponijskog gasa zbog odlaganja otpada u neposrednoj blizini (B-6, B-13). Sastav deponijskog gasa meren je korišćenjem gasnog analizatora proizvođača Geotech, tip: Gem2000 Plus, prethodno kalibrisanog u laboratoriji za merenje koncentracija metana, ugljen-dioksida i kiseonika.



Slika 4.2 Raspored biotrnova (B), izlivnih mesta koncentrata (K) i procedne vode (P) i pravac glavne drenažne cevi



Slika 4.3 Prikaz biotrna

S obzirom da nije bilo mogućnosti za direktno merenje brzine strujanja deponijskog gasa unutar cevi, izvršeno je merenje brzine na izlazu iz kontrolnog ventila kada je on u potpunosti otvoren. Ova merenja mogu da daju okvirno, relativni odnos protoka gasa na biotrnovima, s obzirom da je njihova geometrija identična (isti prečnik izlazne cevi i ventila na svim biotrnovima). Merenja brzine gasa su izvedena korišćenjem uređaja proizvođača Testo, tip: 435-1. Merenja su pokazala da brzina gasa varira u širokim granicama, usled preosetljivosti mernog instrumenta, ali i malog izlaznog otvora, tako da se ne može govoriti o velikoj preciznosti merenja. Sa druge strane, regulacija protoka na biotrnovima je izvedena ručnim putem preko leptirastih slavina, na način da je na biotrnovima bližim magistralnom cevovodu i baklji ona delimično otvorena, dok je na biotrnovima koji se nalaze dalje otvorena u potpunosti, u cilju ostvarivanja sličnih potpritisaka na biotrnovima. Ova merenja rađena su samo jedanput 10.12.2015. godine.

Ciljevi treće grupe merenja jesu:

- Utvrđivanje postojanja i održivosti anaerobnih uslova na deponiji, u prostornoj i vremenskoj dimenziji, te poređenje dobijenih vrednosti sa podacima iz literature;
- Analiza dobijenih vrednosti i eventualnih promena u zavisnosti od lokalnih uslova i karakteristika deponovanog otpada, kao što su: sastav, starost i dubina, sa posebnim akcentom na uticaj recirkulacije koncentrata na produkciju deponijskog gasa.

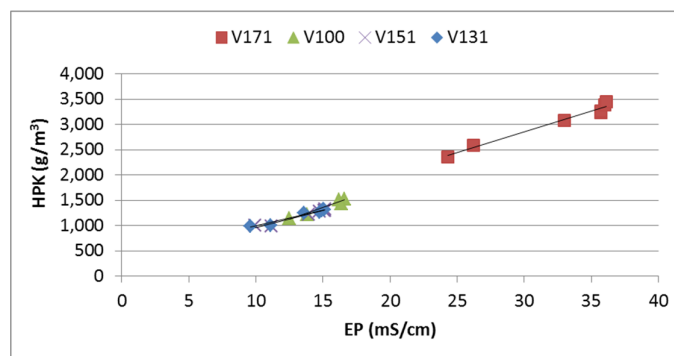
4.3 Analiza rezultata eksperimentalnog istraživanja

4.3.1 Laboratorijska merenja

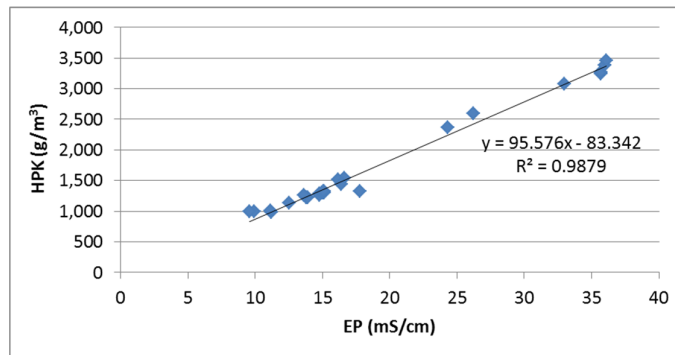
Rezultati analize 1 u okviru laboratorijskih merenja pokazali su da se uzorci karakterišu relativno niskim sadržajem suve materije (SM) i organske suve materije (OSM), što nije uobičajeno za supstrate koji se uobičajeno razmatraju za proizvodnju biogasa u anaerobnim reaktorima. Sadržaj SM i OSM iznosio je 0,5% i 0,13% za procednu vodu (V131) i 1,75% i 0,41% za koncentrat (V171). Praktično, iz dobijenih rezultata se vidi da samo četvrtina SM predstavlja organsku frakciju podložnu razgradnji i proizvodnji biogasa. Takođe se vidi da je sadržaj SM i OSM koncentrata 3,5, odnosno 3,15 puta veći kod koncentrata u odnosu na procednu vodu, što govori i o njegovom većem potencijalu produkcije deponijskog gasa za istu zapreminu. Zapravo, ovaj odnos predstavlja proizvod faktora koncentracije, iskazan odnosom zapremine procedne vode koja uđe u postrojenje za prečišćavanje i koncentrata koji izađe iz postrojenja, i efikasnosti postrojenja za uklanjanje zagađujuće organske materije.

Nizak sadržaj SM i OSM uzrokovao je probleme pri eksperimentalnom određivanju prinosa biogasa. Naime, eksperimentalna analiza je koncipirana tako da u reaktore ide tačno propisana količina OSM uzorka i inokulata koji inicira razgradnju. Usled izuzetno niskog sadržaja OSM, nije bilo moguće postaviti eksperiment u skladu sa metodom propisanim VDI 4630, usled neodgovarajuće zapremine korišćenih reaktora. Uzorak V171 je, uz modifikaciju eksperimentalne metode, ipak ispitan u pogledu prinosa biogasa i rezultati su pokazali da je prinos biogasa nepostojeći, odnosno da nije moguće proizvoditi biogas iz tog supstrata.

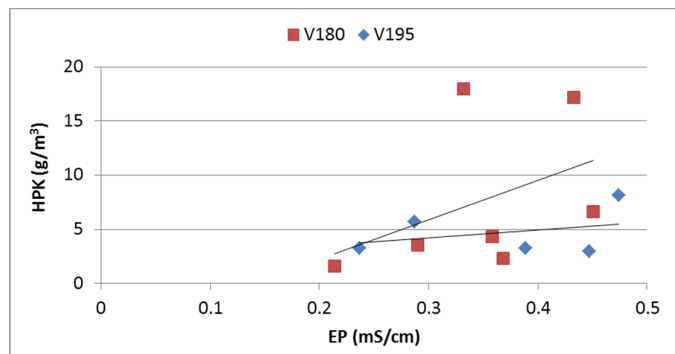
Kada je u pitanju analiza 2 pokazalo se da su HPK u prilično bliskoj korelaciji sa EP vrednosti, uz srednje kvadratne greške u iznosima $R^2=0,9536$; $0,9527$; $0,9602$ i $0,9758$ za merna mesta uzorkovane procedne vode (V100, V131, V151) i koncentrata (V171), respektivno, kao što se vidi na slici 4.4a. Ukoliko se posmatra zajednička prava koja obuhvata sva navedena merna mesta, koja su u opsegu EP od 9,57 do 36,1 mS/cm, dobija se još bolja zavisnost u odnosu na laboratorijski određenu HPK vrednost, sa srednjom kvadratnom greškom u iznosu 0,9879 (slika 4.4b). Kada je u pitanju permeat sa izrazito niskim EP vrednostima u intervalu od 0,21 do 0,47 mS/cm, vidimo da postoji velika rasutost tačaka, sa srednjim kvadratnim greškama koje iznose $R^2=0,1807$ i $0,1105$ u tačkama V180 i V195, odnosno da nije moguće sa odgovarajućom preciznosti izvesti linearnu ni bilo koju drugu zavisnost između navedenih parametara (slika 4.4c). Na osnovu dobijenih rezultata moglo bi se zaključiti, barem u slučaju ovih uzoraka, da HPK vrednost u dobroj meri zavisi od vrednosti EP, što ne znači da ovo važi u svakom trenutku rada deponije i generisanja procedne vode i da se ova zavisnost nije menjala.



(a)



(b)



(c)

Slika 4.4 Trenutna zavisnost HPK od elektroprovodljivosti na bazi laboratorijskih analiza: (a) procedne vode i koncentrata u zavisnosti od mesta uzorkovanja, (b) zajedno za procednu vodu i koncentrat, (c) permeata

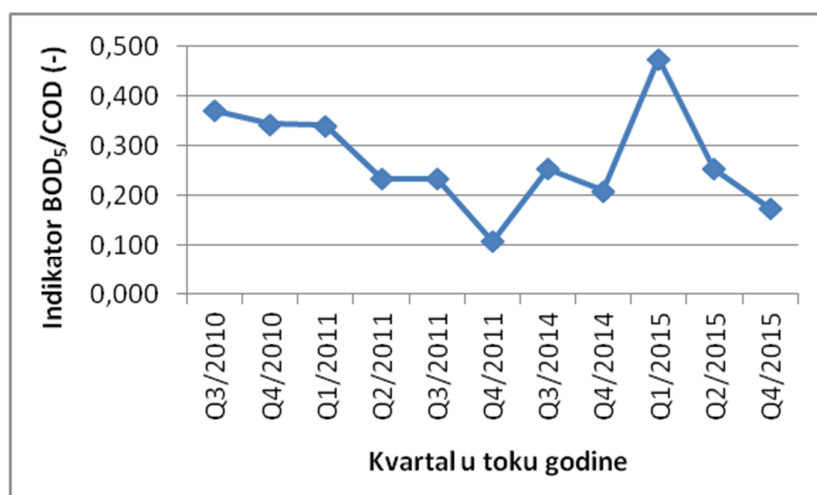
Pošto vrednosti koncentracije zagađivača (HPK, BPK, EP) variraju široko, što se pokazuje čak i na dnevnoj bazi, ovo bi se moglo mnogo bolje opisati korišćenjem odgovarajućih odnosa između različitih zagađivača, umesto apsolutnih vrednosti (Clement, 1995). Utvrđena činjenica se može koristiti za određivanje nepoznatih HPK vrednosti tokom vremena na bazi poznatih EP vrednosti koje se u kontinuitetu mere i očitavaju na postrojenju za prečišćavanje. Utvrđivanje bezdimenzione zavisnosti kako bi se ukazalo na moguće odnose između analiziranih parametara (Mason, Gunst, & Hess, 1989) često se koristi u istraživanjima u sklopu tzv. multi-varijantne Pearsonove analize. Realna fizička zavisnost ovih parametara ne postoji, i najverovatnije je odnos između ovih veličina promenljiv tokom vremena. Na ovakav način dobijene HPK vrednosti se mogu koristiti kao približne, s obzirom da ne postoje podaci na bazi merenja, ukoliko bi se želeli da se odredi eventualni uticaj ogranske materije koncentrata na produkciju deponijskog gasa tokom vremena.

U poređenju sa drugim deponijama slične starosti, procedne vode na deponiji, koja je predmet istraživanja, imaju prilično nisku vrednost HPK i BPK₅ koncentracija (Tabela 4.1), koje su po svojim vrednostima bliže starim deponijama (Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan, & Moulin, 2008). Prema (Francois, Feuillade, Matejka, Lagier, & Skhiri, 2007) stabilizovana procedna voda, koju odlikuje pad HPK vrednosti ispod definisane granične vrednosti od 2000 gO₂/m³, je pokazatelj da je otpad u značajno meri degradiran. Premda je niska koncentracija oksidirajuće materije u procednoj vodi koja dolazi sa deponije, ne znači da je otpad degradiran, o čemu svedoče i značajne količine produkovanog deponijskog gasa sa pripadajućim koncentracijama metana. Na osnovu toga moglo bi se zaključiti da unutar deponije dolazi u značajnoj meri do mehanizma spiranja, kao posledica kanalskog strujanja, što dovodi do pojave niskih koncentracija zagađujućih materija u procednoj vodi koja se odvodi sa deponije.

Na osnovu vrednosti indikatora BPK_5/HPK , datih u tabeli 4.1, procedna voda, koja dolazi iz deponije, bi se mogla svrstati u vodu srednje starosti. Ovaj odnos varira tokom vremena, kao što se vidi i na bazi ovog merenja. Slika 4.5 prikazuje promenu odnosa BPK_5/HPK tokom vremena od početka rada deponije na bazi pomenutih redovnih 3-mesečnih laboratorijskih analiza (Izveštaji za kvalitet vode, 2015). Veći deo BPK, koji predstavlja udeo u biodegradabilnom delu HPK, se razgrađuje tokom procesa stabilizacije, tako da se udeo BPK_5/HPK smanjuje tokom vremena jer će ne-biodegradabilni udeo HPK u velikoj meri ostati nepromenjen u ovom procesu. Vrednosti dobijene eksperimentalnim merenjima u ovom istraživanju ukazuju da je biodegradabilnost koncentrata veća u odnosu na procedne vode koje dolaze iz deponije, što uz povećanu BPK vrednost znači da je iz koncentrata moguće dobiti veću količinu deponijskog gasa, nego što bi se dobilo samo recirkulacijom procedne vode, barem kada se radi o formiranju deponijskog gasa iz degradabilne organske materije. Na bazi vrednosti OSM i indikatora BPK_5/HPK , uz preporuke date u literaturi, procenjuje se vrednost stepena degradacije organske materije u procednoj vodi na 0,3. U istraživanju (Sormunen, Ettala, & Rintala, 2008) vrednost indikatora BPK_5/HPK , koji predstavlja meru biodegradabilnosti otpada, iznosi uglavnom 0,05-0,2 u većini posmatranih biotrnova, što se navodi kao tipično za deponiju u fazi metanogeneze, gde ovaj opseg iznosi 0,02-0,24, ukazujući na degradaciju organske materije unutar deponije. Kao što se iz tabele 4.1 može videti vrednosti indikatora BPK_5/HPK su znatno navedenih iznad vrednosti čime bi indirektno moglo da se zaključi i da su vrednosti koncentracije HPK procedne vode unutar otpada na deponiji takođe daleko veće od gore pomenutih vrednosti, što bi moglo da ukazuje na znatno veći potencijal za produkciju deponijskog gasa u odnosu na onaj koji dolazi sa recirkulacijom koncentrata na deponiju.

Tabela 4.1 Parametri organskog zagađenja procedne vode i indikator biodegradabilnosti

Parameter	Datum uzorkovanja	Merno mesto i opis			
		V100	V131	V151	V171
		Izaz iz cevi	Izlaz iz bazena	Pre RO	Koncentrat
HPK (g/m^3)	03.12.2015.	1,328	995	1,000	2,366
BPK_5 (g/m^3)		394	224	604	900
BPK_5/HPK (-)		0.30	0.23	0.60	0.38
HPK (g/m^3)	09.12.2015.	1,511	1,326	1,325	3,458
BPK_5 (g/m^3)		314	850	930	1,016
BPK_5/HPK (-)		0.21	0.64	0.70	0.29



Slika 4.5 Promena indikatora biodegradabilnosti tokom vremena rada deponije

Stehiometrijskim izjednačavanjem reakcije oksidacije metana dobijamo da su za oksidaciju 1 mola metana potrebna 2 mola molekula kiseonika, što u konačnom bilansu daje da je iz 1 g HPK moguće

teorijski dobiti 350 ml_N metana. Odgovarajuće poređenje stehiometrije oksidisanih organskih jedinjenja sa bilansom anaerobne konverzije po Buswell-u, potvrđuje ovaj rezultat (VDI 4630). Pošto je poznato iz praktičnog iskustva da se oko 10% opterećenja konvertovane oksidirajuće materije (HPK) troši na novo stvaranje biomase, može da se pretpostavi da će pod praktičnim uslovima kompletna degradacija 1 g HPK da proizvede oko 320 ml_N metana. Bilans HPK je široko rasprostranjen empirijski parametar, naročito u oblasti anaerobnog tretmana otpadnih voda, za procenu efikasnosti prečišćavanja.

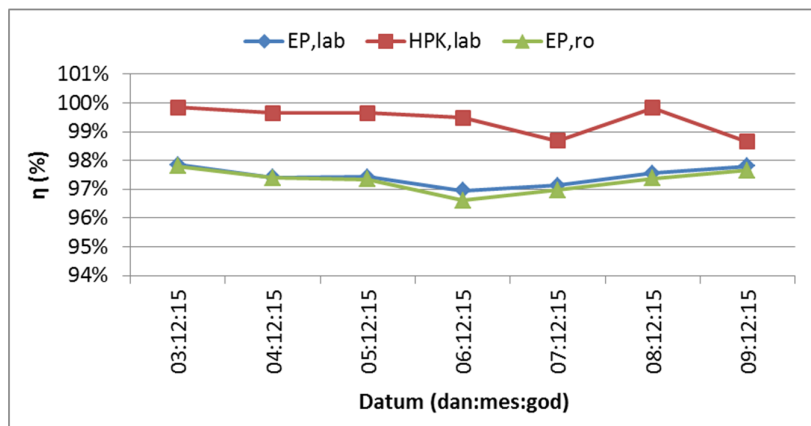
Na osnovu poznatih HPK vrednosti koncentrata može se izračunati količina biogasa koja bi se teorijski mogla dobiti iz koncentrata (VDI 4630), korišćenjem sledeće relacije:

$$D_{HPK} = \frac{100V_{gas}x_{CH_4}}{320m_{HPK}} \quad (4.1)$$

gde je:

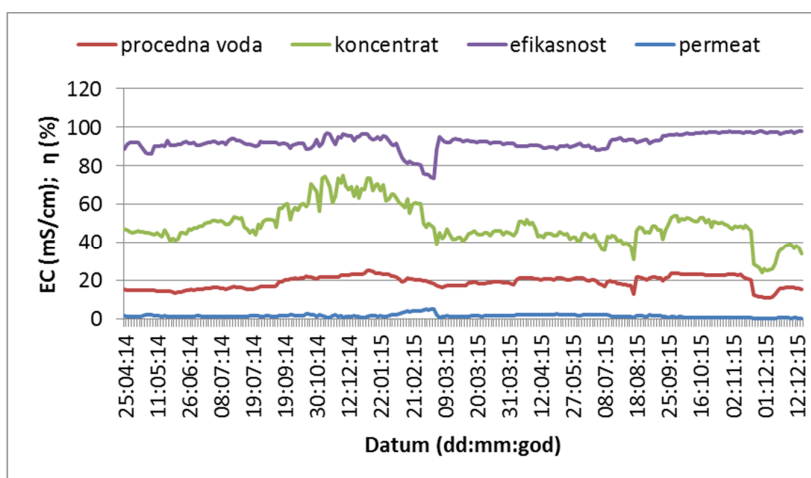
- D_{HPK} - stepen degradacije HPK [%]
- V_{gas} - zapremina biogasa [ml_NCH₄/g]
- x_{CH_4} - udeo metana u biogasu [%]
- m - masa supstrata [g]
- COD - hemijska potrošnja kiseonika koncentrata [mgO₂/l]

Na osnovu izmerenih HPK i EP vrednosti, procedne vode na ulazu i permeata na izlazu iz postrojenja RO, određuje se efikasnost uklanjanja pomenutih parametara kao odnos razlike njihovih vrednosti na ulazu i izlazu iz postrojenja i vrednosti na ulazu u postrojenje RO. Promena efikasnosti tokom 2 ciklusa rada postrojenja RO prikazana je na slici 4.6. Kada je u pitanju EP data je kriva promene na bazi vrednosti dobijenih direktnim očitavanjem sa postrojenja RO i vrednosti na bazi laboratorijskih merenja uzoraka. Kao što se može videti postoji izvesna razlika, ali je ona gotovo zanemarljiva. Što se tiče konkretnih merenja dobijeni rezultati pokazuju da ne postoji značajniji pad efikasnosti tokom rada ciklusa, odnosno da se ona održava na prilično visokom nivou. Drugi ciklus, koji je trajao od 06-10.12.2015. godine počinje sa primetnijim padom efikasnosti kada je u pitanju EP, ali se nakon toga beleži čak rast, što se može objasniti kao rezultat čišćenja peščanog filtra 07.12.2015. godine. Zapažaju se varijacije u efikasnosti uklanjanja HPK, ali je ona i dalje na vrlo visokom nivou. Prosečne efikasnosti uklanjanja EP i HPK vrednosti iznose 97,4% i 99,4%, respektivno. Dobijeni rezultati su u korelaciji sa rezultatima dobijenim u sličnom istraživanju sprovedenom u realnim uslovima rada deponije, gde je efikasnost uklanjanja zagađujućih materija tokom 8 uzastopnih ciklusa iznosila 96,3% do 98,2%, odnosno 92,8% do 99,9%, za EP i HPK, respektivno (Talalaj & Biedka, 2015). U pomenutom radu se pokazalo, između ostalog, da je porast EP procedne vode od 7680 do 9430 mS/cm uticao na smanjenje efikasnosti uklanjanja HPK sa 99,9% na 92%. Pad efikasnosti HPK, ali u znatno manjoj meri, se može zapaziti i u ovom istraživanju, što se može povezati i sa činjenicom da je ona od prvog do poslednjeg dana bila u blagom porastu od 9,92 do 15,14 mS/cm. Navedena efikasnost je potvrđena i u brojnim laboratorijskim istraživanjima, među kojima je (Chianese, Ranauro, & Verdone, 1999), gde je čak ustanovljena zavisnost efikasnosti uklanjanja HPK i drugih zagađujućih materija od HPK vrednosti tretirane procedne vode. Dobijene matematičke relacije pokazuju da porast HPK vrednosti procedne vode dovodi do pada efikasnosti procesa prečišćavanja, koji je relativno mali pri niskim vrednostima HPK (do 1749 g/m³), a razlikuje se u zavisnosti od posmatrane zagađujuće supstance.



Slika 4.6 Efikasnost rada postrojenja tokom perioda eksperimentalnih merenja

Potencijalni uticaj degradabilne organske materije koncentrata na produkciju deponijskog gasa tokom vremena zavisice, između ostalog, od dva parametra, a to su efikasnost rada postrojenja RO i faktora koncentracije (F_k), koji se izražava kao odnos protoka procedne vode na ulazu u postrojenje RO i koncentrata na izlazu iz postrojenja. Naime, što je vrednost F_k veća to je protok koncentrata manji u odnosu na protok procedne vode. Sa druge strane, što je veća efikasnost prečišćavanja postrojenja, to je HPK vrednost koncentrata veća. Pad efikasnosti prečišćavanja mogao bi svakako da utiče na povećanje HPK vrednosti permeata, a smanjenje koncentrata. Na slici 4.7 je prikazana promena EP procedne vode, koncentrata i permeata od početka rada postrojenja. Povećanje EP, HPK i BPK vrednosti procedne vode i koncentrata, praćeno smanjenjem pH vrednosti, kao što je prikazano na slici 4.8, u skladu je sa rezultatima dobijenim u istraživanju (Talalaj, 2015). Promena pH vrednosti procedne vode, na bazi merenja na izlaznoj cevi iz deponije, tokom redovnih kvartalnih laboratorijskih analiza, prikazana je na slici 4.9. Može se zabeležiti značajniji pad pH vrednosti procedne vode sa prosečne vrednosti 9 na vrednost 6,56 u 4. kvartalu 2014. godine (merenja izvršena 28.11.2014. godine), da bi već u sledećem kvartalu ova vrednost ponovo značajno porasla na vrednosti preko 9, na kom nivou je ostala tokom daljeg vremena.



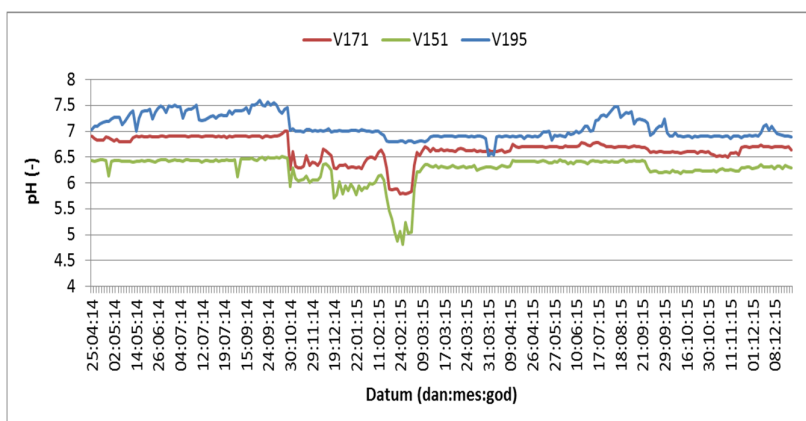
Slika 4.7 Promena elektroprovodljivosti

Zabeleženo smanjenje pH vrednosti može da bude usled stimulacije hidrolitičkih i fermentativnih bakterija u deponovanom otpadu, koji bi mogli da rezultuju karboksilnim kiselinama. Na mlađim deponijama se proces mineralizacije i rastvaranja dešava u značajnijoj meri, što je rezultat intenzivnijih transformacija karakterističnih za početni period rada deponije (acidogena faza) i recirkulaciju koncentrata (Talalaj, 2015). Prema nalazima (Bilgili, Demir, & Özkaya, 2007), više pH

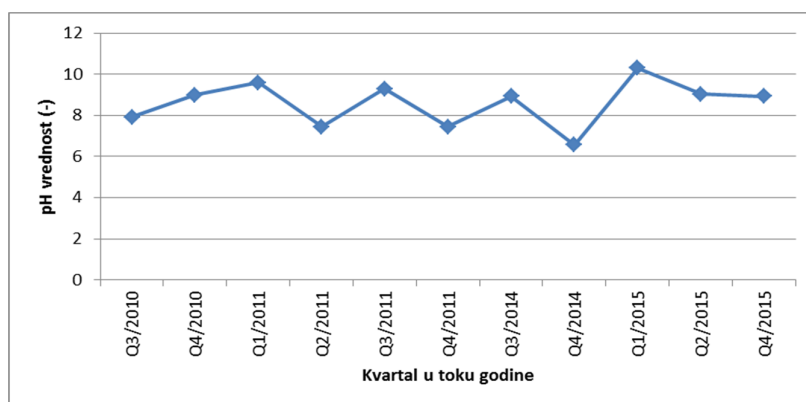
vrednosti uzrokuju rastvaranje pojedinih hemikalija koje se ne razlažu ili transformišu pod anaerobnim uslovima, što može da dovede do porasta EP i karakteristično je za stare deponije.

Naime, tokom rada postrojenja došlo je do naglog pada pH vrednosti procedne vode na mernom mestu V151, što je za posledicu imalo smanjenje pH vrednosti koncentrata, odnosno povećanje elektroprovodljivosti (EC) procedne vode i koncentrata. Kao što se iz navedenih podataka iz literature može videti, ova pojava nakon početne recirkulacije koncentrata nije neuobičajena. Međutim, nezavisno od navedenih istraživanja, glavni uzrok pogoršanja pH vrednosti, a samim tim i elektroprovodljivosti, je kvar na senzoru koji meri pH vrednost procedne vode na mernom mestu V131. Ovaj senzor je pokazivao veću od realne vrednosti, što je uticala na veći unos kiseline radi sniženja na zadatu vrednost, te shodno tome, nepotrebno velik pad i niske vrednosti na izlazu.

Disbalans metanogenih i kiselinskih bakterija mogao bi da bude potencijalni uzrok i dovede do smanjenja produkcije deponijskog gasa tokom vremena. S obzirom da su optimalne pH vrednosti procedne vode, koje pogoduju metanogenezi, u opsegu od 6,4 do 7,2 (Farquhar & Rovers, 1973), ovo ukazuje na činjenicu da je pad pH vrednosti koncentrata na vrednosti niže od 6 u periodu od 21.02-28.02.2015. godine, mogao da utiče na delimično smanjenje produkcije deponijskog gasa. Postoji potencijalni uticaj i sumnja da bi smanjena pH vrednost koncentrata mogla da utiče na narušavanje procesa metanogeneze unutar otpada na deponiji, te ukoliko i postoji, da se odrazi na produkciju deponijskog gasa na nivou čitave deponije. Ovaj uticaj će se razmotriti kasnije tokom istraživanja (poglavlje 6) i prethodnih sveobuhvatnijih analiza svih relevantnih uticajnih parametara na generisanje deponijskog gasa kako bi se dodatno utvrdio i pravi uzrok ovim promenama i da li su uticale na generisanje deponijskog gasa.

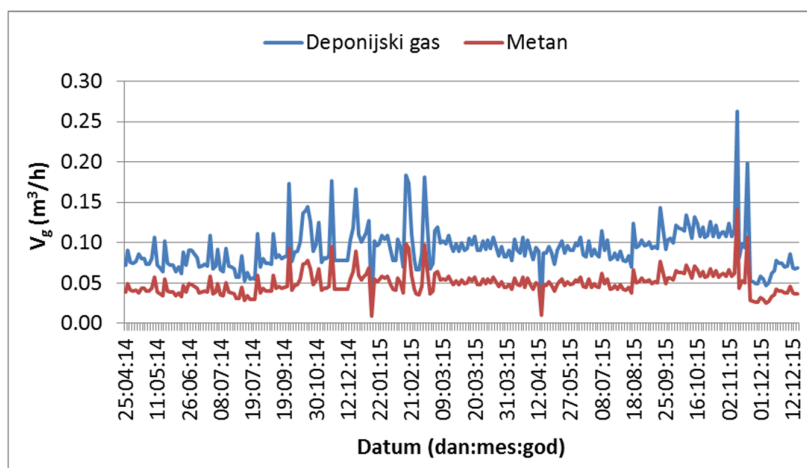


Slika 4.8 Promena pH vrednosti voda



Slika 4.9 Promena pH vrednosti procedne voda

Uvrštavanjem prosečne HPK vrednosti koncentrata, dobijene tokom eksperimentalnih merenja, uz pretpostavku stepena degradacije koncentrata od 0,3, dobija se da maksimalno moguća količina metana koja se dobija recirkulacijom koncentrata iznosi $0,29 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{m}^3$ koncentrata. Sa koncentracijom metana u deponijskom gasu od 53,8% ovo daje realan potencijal od $0,48 \text{ m}^3\text{deponijskog gasa}/\text{m}^3$ koncentrata. Ukoliko bi se koristila pretpostavka da je zavisnost HPK od EP tokom vremena bila konstantna, mogla bi da se izračuna produkcija deponijskog gasa iz koncentrata, na bazi poznatih vrednosti EP na bazi merenja, koje su prikazane na slici 4.7. Uzimajući u obzir stvarne količine odloženog koncentrata, uz uprošćenje da je izdvajanje gasa iz koncentrata ravnomerno tokom vremena (postrojenje je u proseku u pogonu tek 35% od ukupno proteklog vremena, što je uzeto u obzir, ali dinamika rada nije razmatrana), te pretpostavljajući da je efikasnost prikupljanja gasa iz biotrnova oko 57% (vrednost dobijena proračunom u narednom poglavlju), dobija se kriva teorijskih, odnosno maksimalno mogućih protoka prikupljenog metana i deponijskog gasa produkovanih tokom vremena razgradnjom suve organske materije iz koncentrata, kao što je prikazano na slici 4.10. Poređenjem ove krive sa protocima gasa koji se odvede sa cele deponije (slika 5.7) vidi se da teorijski potencijal generisanja gasa iz koncentrata čini tek 0,07% u odnosu na ukupne količine, posmatrano na bazi prosečnih vrednosti tokom proteklog perioda. Uticaj koncentrata tokom vremena mogao bi da bude promenljiv u zavisnosti od toga da li je postrojenje u radu ili ne. Stvarne i očekivane vrednosti generisanja deponijskog gasa iz koncentrata mogu da budu samo niže od ovog potencijala, a njihov međusobni odnos može se definisati kao efikasnost izdvajanja gasova na deponiji iz oksidirajuće materije. Da bi se ova efikasnost, makar i grubo odredila, potrebno je izvršiti merenja na gasu generisanom na deponiji. Jasno je da je ovo praktično nemoguće dokazati postojećim merenjima na bazi ukupno prikupljenih količina, zbog relativno malog uticaja gasa iz koncentrata na ukupne količine generisanog gasa, malih promena količina tokom vremena i inertnosti samog procesa izdvajanja gasova iz koncentrata. Jedini način za eventualno pokazivanje uticaja jeste vršenje direktnih merenja koncentracije i protoka deponijskog gasa na samim biotrnovima.



Slika 4.10 Potencijalni protoci prikupljenog metana i deponijskog gasa tokom vremena razgradnjom suve organske materije iz koncentrata

4.3.2 Merenja sastava i protoka gasa

Izmerene vrednosti koncentracije metana u deponijskom gasu na biotrnovima, kao i brzina strujanja deponijskog gasa na izlazu iz kontrolnog ventila, prikazani su u tabeli 4.2. Dobijene vrednosti pokazuju sledeće:

- koncentracije su u svim biotrnovima prilično visoke, čak i iznad vrednosti koje se u literaturi navode kao uobičajene kod anaerobnih deponija u stabilnoj metanskoj fazi (Barlaz, Schaefer, & Ham, 1989), pri čemu je prisustvo kiseonika na svim biotrnovima u većini slučajeva manje od 0,1%;
- koncentracije metana su prilično ujednačene na celoj površini deponije, tako da prosečna razlika između maksimalne i minimalne vrednosti koncentracija tokom svih merenja ne prelazi 5%;
- promena koncentracija metana na biotrnovima tokom perioda u kojem je vršeno merenje je vrlo malo varirala.

Drastičan pad koncentracija metana, koji je zabeležen u nekolicini biotrnovima, posledica je uvlačenja vazduha kroz otpad u blizini biotrna. Ovakav slučaj se desio prilikom merenja 10.12.2015. godine, a razlog tome je bio kratkotrajno povećanje stepena otvorenosti ventila na glavnom kolektoru sa 30% na 40%, što je uticalo na naglo povećanje ukupnog protoka deponijskog gasa sa 146 na 156 m³/h. Kao posledica otvaranja ventila došlo je do naglog prodora vazduha na biotrn B-14, na koji se povećanje potpritiska najviše odrazilo s obzirom da je i jedan od najbližih duvaljci, što je uticalo na drastično smanjenje koncentracije metana. Prosečne vrednosti koncentracije metana na nivou svih biotrnova zajedno iznosile su 62,2%, 62,4% i 62,6% za merenja po danima 04.12, 06.12. i 08.12.2015. godine, respektivno, dok je ista bila nešto niža i iznosila 60,7% i 60,5% tokom merenja izvršenih 10.12.2015 i 24.02.2016. godine. Ovi podaci ukazuju da je deponija zaista u stabilnoj metanskoj fazi na celoj površini. Na slici 4.2 su prikazane unutrašnje granice kojima je deponija podeljena na oblasti u zavisnosti od kalendarskih godina kada je započeto deponovanje prvog sloja otpada, visine oko 2,5 m. Tokom 2013. i 2014. godine deponovan je drugi sloj otpada i to na način da se izvrši horizontalno ravnanje otpada po deponiji, što znači da je na najvišoj koti dna deponije odložena najmanja visina drugog sloja otpada, i obrnuto. Od početka 2015. godine do početka 2016. godine vrši se deponovanje 3. sloja otpada, krećući se od najniže kote deponije u pravcu najviše kote. Ovo daje da je visina otpada na deponiji različita. Na delu gde se prvo počelo sa odlaganjem, a koji ima najvišu visinsku kotu dna, visina deponovanog otpada iznosi 4-5 m. U delu deponije sa najnižom visinskom kotom dna, koja je 2 m niža u odnosu na najvišu kotu, visina otpada doseže oko 10 m.

Tabela 4.2 Izmerena koncentracija metana i bezdimenzioni protok deponijskog gasa po biotrnovima

Oznaka biotrna	Datum merenja					C (CH ₄) (%)	v (m/s)	H (m)	H/v (-)
	12/4/15	12/6/15	12/8/15	12/10/15	02/24/16				
B-1	64.1%	64.1%	64.3%	64.3%	64.5%	64.3%	2.2	4.5	0.48
B-2	63.0%	62.9%	63.3%	63.3%	63.2%	63.1%	2.7	4.8	0.56
B-3	62.8%	62.9%	63.2%	63.0%	63.6%	63.1%	2.0	5.1	0.38
B-4	63.2%	63.0%	63.1%	62.9%	50.6%	60.6%	0.8	5.4	0.14
B-5	63.2%	63.3%	63.6%	63.4%	-	63.4%	4.3	5.7	0.75
B-7	60.1%	60.3%	60.9%	-	58.2%	59.9%	1.7	10.0	0.17
B-8	63.0%	63.3%	63.3%	63.4%	63.5%	63.3%	2.0	5.5	0.36
B-9	63.1%	63.3%	63.5%	63.4%	63.8%	63.4%	2.7	5.0	0.53
B-10	60.7%	61.7%	60.5%	59.2%	63.4%	61.1%	1.1	5.3	0.20
B-11	63.2%	64.1%	64.5%	63.5%	48.1%	60.7%	2.3	5.7	0.39
B-12	61.5%	-	-	-	-	61.5%	-	6.0	-
B-14	62.9%	63.2%	63.1%	37.4%	63.1%	57.9%	1.0	6.0	0.17
B-15	59.1%	59.4%	60.0%	59.4%	60.5%	59.7%	2.0	6.5	0.31
B-17	61.6%	61.2%	61.7%	62.2%	61.1%	61.6%	-	7.5	-
B-20	63.1%	62.4%	62.7%	62.7%	62.4%	62.7%	2.3	6.3	0.36
B-21	61.1%	61.3%	61.6%	61.5%	61.1%	61.3%	2.4	6.6	0.36
Prosek:	62.2%	62.4%	62.6%	60.7%	60.5%	61.7%	2.1	6.5	0.37

Poređenjem prosečnih vrednosti koncentracija metana po grupama biotrnovima u zavisnosti od godine početka odlaganja otpada dobija se da ona iznosi 63,4%, 61,1% i 61,8% na delovima deponije sa početkom odlaganja otpada u 2010, 2011 i 2012. godini, respektivno. Ovo jasno ukazuje da delovi deponije sa starijim otpadom daju veće koncentracije metana u deponijskom gasu. S obzirom da su delovi deponije sa starijim otpadom znatno manjih visina u odnosu na ostale delove deponije, može se zaključiti da visina otpada ne utiče na sastav, odnosno kvalitet deponijskog gasa.

Na osnovu dobijenih vrednosti nije moguće zaključiti da visina otpada utiče na protok deponijskog gasa, mereno kroz njegovu brzinu na izlazu iz kontrolnog ventila (slika 4.3), s obzirom da bi dobijene vrednosti H/v trebale da budu manje ili više identične. S obzirom da ovo slučaj moglo bi se generalno zaključiti da je generisanje deponijskog gasa na deponiji različito. Upečatljivo je npr. da biotrn B-5 ima ubedljivo najveću brzinu, pa samim tim i protok deponijskog gasa, kao i najveći odnos brzine i visine otpada, a razlog tome može se tražiti u činjenici da je biotrn u trenutku merenja, za razliku od svih ostalih, bio okružen vodom, što se može videti na slici 4.11. Ova činjenica je mogla uticati na znatno veću lokalnu vlažnost otpada, i stoga veću produkciju deponijskog gasa.



Slika 4.11 Višak vlage u neposrednom okruženju biotrna B-5 sa najvećom produkcijom metana

Na gore prikazanoj slici 4.2 se mogu uočiti izlivna mesta koncentrata i procedne vode, pri čemu je od trenutka puštanja u rad postrojenja RO korišćeno izlivno mesto K-2, koje je zamenjeno izlivnim mestom K-1, neposredno pre prvih eksperimentalnih merenja prikazanim u ovom istraživanju. Izlivanje koncentrata odvijalo se preko creva koje se povezuje na ventil izlivnog šahta i spušta unutar rova u otpadu dimenzija $A \times B \times H = 1 \times 0,5 \times 1$ m, na udaljenosti od oko 15 m od biotrna B-1, što se može videti na slici 4.12.



Slika 4.12 Odlaganje koncentrata na deponiji biotrna

Sa slike 4.2 je jasno uočljivo da se drenažna cev, postavljena na dnu deponije, nalazi znatno bliže izlivnom mestu K-2 u odnosu na izlivno mesto K-1. Ovo je moglo da utiče na skraćivanje putanje toka koncentrata na mestu K-2 direktno u izlivnu cev i manju mogućnost za razgradnju organske materije iz

koncentrata radi produkcije deponijskog gasa. U prilog ovome govori činjenica da je EP procedne vode na ulazu u postrojenje za prečišćavanje RO (V131) naglo opala sa vrednosti 20,1 mS/cm na vrednost 12,3 mS/cm nakon promene izlivnog mesta koncentrata 25.11.2015. godine. Ovo je najveći zabeleženi pad ovog parametra, uz istovremeno dostizanje najniže vrednosti od početka recirkulacije koncentrata na deponiju, što nedvismisleno ukazuje da je novo mesto izlivanja koncentrata K-1 znatno bolje sa aspekta kvašenja otpada i eventualne produkcije deponijskog gasa, barem kada se radi o početnom periodu ispuštanja koncentrata na ovom izlivnom mestu. Malo je verovatno da su padavine mogle da utiču na smanjenje EP razređivanjem procedne vode iz otpada, s obzirom da uporedna analiza padavina i EP ovako nešto nije pokazala tokom prethodnog perioda. Sa druge strane, EP vrednost je uspela da se zadrži i tokom narednog perioda, uz blagi rast, na relativno niskom nivou, što se može videti sa slike 4.7. Prosečne koncentracije metana u periodu prvih merenja od 04.10. do 08.10.2015. godine na biotrnovima B-14 i B-15, koji su redom najbliži izlivnom mestu K-2, iznose 63,1% i 59,7%, respektivno. Ovo može ukazati na uticaj koncentrata na povećanje koncentracije metana na biotrn B-14, ali je ovaj uticaj teže dokaziv, s obzirom da biotrn B-14 u delu sa starijim otpadom, čiji biotrnovi pokazuju povećane koncentracije metana, o čemu je već bilo reči. Sa druge strane, da je povećana koncentracija metana na biotrn B-14 bila posledica uticaja izlivanja koncentrata u njegovoj blizini, njen pad bi bio najverovatnije zabeležen tokom merenja 24.02.2016. godine, s obzirom na vremenski period koji je protekao, što nije bio slučaj.

Najznačajniji rezultat merenja sastava deponijskog gasa, koji bi mogao prvenstveno da se dodeli uticaju izlivenog koncentrata, je povećana koncentracija metana na biotrn B-1. Prosečne vrednosti od 64,2% i 64,5% u vremenskom razdoblju od 2,5 meseca, predstavljaju povećanje od 1,02% u odnosu na prosečnu vrednost obližnjih biotrnova, relevantnih za poređenje, s obzirom da su smešteni u delu otpada iste prosečne starosti. Ako bi se uzeo relativni uticaj protoka biotrna B-1 u odnosu na ukupni protok deponijskog gasa izmeren na baklji, dobilo bi se da u stvarnosti ovo povećanje iznosi oko 0,025 m³/h metana. Takođe može da se zapazi da je recirkulacija koncentrata pokazala uticaj na povećanje koncentracije metana već nakon 10 dana od početka njene primene.

Drugi uočljiv, i veoma važan, uticaj odlaganja koncentrata je da podržava degradaciju otpada dovođenjem dodatne vlage.

Drugi, veoma važan uticaj odlaganja koncentrata je da podržava degradaciju otpada dovođenjem dodatne vlage. Optimalni sadržaj vlage omogućava transport nutrijenata, mikroorganizma i međuproizvoda koji omogućavaju pojačanu biodegradaciju otpada koja rezultuje produkcijom metana, dok sa druge strane slabi biodegradaciju inhibitora, kao što su sulfati i teški metali. Stoga, sadržaj vlage ima efekat na sve druge indikatore deponijskog gasa sa vodećom ulogom. Dominantni uticaj vlage na produkciju metana je takođe objašnjen u istraživanju gde su autori koristili metod multi-kriterijalne analize za predikciju količina generisanog deponijskog gasa, gde mu je dodeljena najveća težinska vrednost (Emkes, Coulon, & Wagland, 2015).

Ukoliko bi se posmatrao odnos brzine gasa, kao mera protoka gasa, i visine otpada, kao mere količine lokalno odloženog otpada, može se zapaziti da je relativni protok deponijskog gasa u odnosu na količinu otpada na biotrn B-1 među najvećim od svih biotrnova, odnosno oko 30% veći od proseka, kao što se može videti iz tabele 4.2. Postoje drugi parametri koji utiču na veću količinu deponijskog gasa na biotrn B-1 u odnosu na prosek, kao što su bolja pokrivenost otpada zemljom, koja doprinosi većoj efikasnosti prikupljanja deponijskog gasa zbog manje odbeglih emisija. Sa druge strane, oko biotrna B-1 je uočljiva gusta vegetacija, koja bi mogla da utiče na veće isparavanje vlage sa površine i manji priliv vlage unutar otpada, što bi za posledicu dalo manje količine generisanog deponijskog gasa.

Uzimajući u obzir prosečnu HPK vrednost koncentrata i odložene zapremine tokom prvog perioda merenja od 04-10.12.2014. godine, potencijalno povećanje produkcije metana iz koncentrata, teorijski, ukoliko bi se celokupna količina suve organske materije oslobodila iz otpada u formi gasa, bila bi 0,099 m³/h metana. Ukoliko bi se izmerena vrednost povećanja protoka metana podelila sa

proračunskom vrednosti metana, koja predstavlja teorijski potencijal u slučaju da kompletna organska materija pređe u deponijski gas, dobila bi se efikasnost uklanjanja HPK od 25%. Kada su u pitanju istraživanja recirkulacije procedne vode na pilot postrojenjima, daleko manjih razmera, dobijena je ukupna efikasnost uklanjanja HPK od 63 do 70%, dok je nakon prvog dana recirkulacije ova vrednost iznosila 40 do 48% (režim dvodnevne recirkulacije) (Rodriquez, Castrillon, Maranon, Sastre, & Fernandez, 2004). HPK vrednosti procedne vode su bile u opsegu od 3500 g/m³ do 5000 g/m³, dok je odnos BPK₅/HPK iznosio od 0,2 do 0,37, što je slično izmerenim vrednostima koncentrata koji se generiše na deponiji koja je predmet ovog istraživanja. Takođe, ne može se sa sigurnošću reći da li bi se uklanjanja organske materije iz koncentrata manifestovalo direktno kroz povećanje koncentracije metana u deponijskom gasu ili kroz povećanje protoka.

Uzimajući u obzir navedene reference iz literature reklo bi se da je dobijena efikasnost uklanjanja HPK mnogo bliža teorijskom potencijalu nego što bi se zaista mogla očekivati ovako visoka vrednost u stvarnosti, s obzirom da se radi o merenjima na deponiji realnih razmera, kao i da je izlivno mesto koncentrata nalazi na prilično velikoj udaljenosti od biotrna B-1.

Na osnovu sprovedenog istraživanja mogu se generalno doneti sledeći zaključci:

- Uticaj organske materije koncentrata na produkciju deponijskog gasa je zanemarljivo mali. Laboratorijska analiza je pokazala nepostojeće količine dok teorijski potencijal na bazi proračuna daje maksimalne vrednosti od 0,1 m³/h metana ili udeo od 0,07% u odnosu na ukupno generisane količine deponijskog gasa.
- Postoji potencijalno negativan uticaj na produkciju deponijskog gasa recirkulacije koncentrata kao posledica narušenih vrednosti parametara, kao što je EP i pH vrednosti, koji će se u daljem toku doktorata detaljnije proanalizirati, imajući u vidu sagledavanje celokupne slike koja uključuje sve relevantne uticajne parametre na produkciju deponijskog gasa.
- Merenja protoka deponijskog gasa na biotrnovima, čak i sa izraženim većim greškama, su pokazala znatno veći uticaj vlage koncentrata na produkciju deponijskog gasa. Protok na biotrn B-1, koji je najbliži izlivnom mestu pokazao je vrednosti 30% veće u odnosu na prosek gasa na deponiji, što čini oko 1% u odnosu na ukupni protok deponijskog gasa izmeren na baklji.
- Efikasnost uklanjanja HPK iz koncentrata i prelazak u deponijski gas bi se mogla proceniti na 25% uz pretpostavku da kompletna organska materija pređe u deponijski gas i da se manifestuje kroz povećanje koncentracije metana.

5 Modelovanje produkcije deponijskog gasa primenom matematičkih modela

5.1 Uvod

Jedan od najvažnijih parametara za studiju opravdanosti projekta i procenu rizika, kao i za izbor odgovarajućih kapaciteta postrojenja, je svakako dobra procena i predikcija količina deponijskog gasa koji će se proizvoditi tokom vremena. Modelovanje produkcije deponijskog gasa u inženjerskoj praksi se postiže korišćenjem različitih softverskih alata, kreiranih na bazi matematičkih modela generisanja deponijskog gasa. Ovi modeli mogu da budu nultog, prvog i drugog reda, multifazni modeli i modeli koji su zasnovani na kombinaciji navedenih modela. U Srbiji su najčešće u upotrebi: LandGEM model, 2006 IPCC model, Ukrajinski model i Centralni-istočno evropski model, za koje postoje prilagođeni softveri sa detaljnim vodičima u kojima su prikazane formule, kao i način korišćenja (EPA LandGEM, 2005) (IPCC, 2006) (Ukrain Model, 2009) (CE Model, 2013), što će se primeniti za modelovanje količina deponijskog gasa i za predmetnu deponiju. Postoje i drugi slični modeli koji su u velikom broju izvedeni od ovih modela ili adaptirani za korišćenje u različitim zemljama ili regionima, uzimajući u obzir njihove specifičnosti, kao što su: sastav otpada, klimatske ili druge parametre, koji mogu značajno da se razlikuju. Na bazi matematičkih modela vrši se predviđanje produkcije deponijskog gasa na godišnjem nivou, dok se koncentracija metana u deponijskom gasu uobičajeno usvaja ili procenjuje na bazi uobičajenih vrednosti koje se javljaju u praksi i kao takve unose od strane korisnika.

Glavna razlika između inženjerskih modela u praksi je da li se koriste u razvijenim ili zemljama u razvoju. Sanitarne deponije u zemljama u razvoju primaju otpad koji obično nije prethodno odvojen ili tretiran postupcima, koji mogu biti mehanički, biološki i hemijski (npr. recikliranje, kompostiranje, insineracija i sl.), što je slučaj u razvijenim zemljama, tako da se sastav finalnog otpada koji se odlaže na deponiju u velikoj meri razlikuje. Razlike su naročito vezane za sadržaj organskog otpada koji pretežno dolazi hranom, a koji je u znatno većem udelu zastupljen u državama u tranziciji, kao što je Republika Srbija, u odnosu na razvijene države u Evropi i svetu. Prema istraživanju iz 2009. godine (Vujić, i drugi, 2009), prosečni morfološki sastav komunalnog otpada u Republici Srbiji sadrži 30,96% biorazgradivog otpada, dok je u istoj godini udeo ostataka od hrane u komunalnom otpadu razvijenih državama, kao što su SAD i Engleska, zastupljen sa 12% (EPA, 2009) i 13% (Papageorgiou, Barton, & Karagiannidis, 2009), respektivno.

Istraživanje rađeno sa različitim kategorijama otpada uzorkovanim u Danskoj (Mou, Scheutz, & Kjeldsen, Evaluating the biochemical methane potential (BMP) of low-organic waste at Danish landfills, 2014) pokazalo je da uzorci mešanog i sekanog otpada nisko-organskog sadržaja, daju slične vrednosti biometanskog potencijala u dijapazonu od 5,4-9,1 kg CH₄/t vlažnog otpada i vrednosti degradabilnog organskog ugljenika podložnog raspadanju u opsegu 0,44-0,7% ukupne mase vlažnog otpada, koje su mnogo manje nego vrednosti koje se dobijaju kod tradicionalnog komunalnog otpada MSW, a koje se uobičajeno postavljaju u postojećim modelima prvog reda. Tek ovakvo jedno istraživanje omogućilo je da se procene stvarne emisije metana korišćenjem postojećih modela prvog reda za procenu generisanja deponijskog gasa sa modernih deponija koje primaju otpad niske organske vrednosti. Većina nisko-organskih uzoraka otpada pokazali su mnogo niže vrednosti parametra k (stopa generisanja metana) u poređenju sa podrazumevanim numeričkim vrednostima u postojećim FOD (First Order Decay) modelima, tako da je primena tradicionalnih FOD modela pokazala veoma neizvesne rezultate, kao i značajnu razliku između procena dobijenih modelom i merenja na terenu (Amini, Reinhart, & Mackie,

2012) (Lamborn, 2012) (Mou, Scheutz, & Kjeldsen, Evaluating the methane generation rate constant (k value) of low-organic waste at Danish landfills, 2015).

Korišćenjem raspoloživih podataka dobijenih monitoringom prikupljenih količina i sastava deponijskog gasa tokom vremena, na deponiji u Bjeljini, uradiće se uporedna analizu stvarnih vrednosti u odnosu na podatke dobijene korišćenjem pomenutih numeričkih modela. Prikupljeni podaci su nastali kao rezultat redovnih dnevnih očitavanja sa gasnog analizatora ugrađenog neposredno pred ulazak deponijskog gasa u baklju, vršenih od strane operatera na deponiji tokom vremenskog perioda od 15 meseci, kao i periodičnih merenja koncentracija na samim biotrnovima, korišćenjem mobilnog gasnog analizatora, kao deo eksperimentalnog istraživanja, opisanog u prethodnom odeljku. Cilj ove analize jeste da se utvrdi preciznost numeričkih modela u odnosu na stvarno dobijene vrednosti, pri čemu će se najveći akcenat dati uticaju vlage, odnosno padavina, na produkciju deponijskog gasa, s obzirom na temu i postavljene hipoteze u ovom doktoratu. U tom pogledu, testiraće se osetljivost korišćenih modela u odnosu na različite klimatske zone, koje se u softverima uobičajeno definišu opsegom količine padavina na godišnjem nivou.

5.2 Ulazni podaci

Osnovni parametri i njihove vrednosti, koji su korišćeni kao ulazni podaci za modelovanje produkcije deponijskog gasa, su sledeći:

- Sastav otpada koji odgovara u najboljoj meri gradu Nišu, kao što je dato Centralnim-istočno evropskim modelom;
- Godišnje padavine u 2015. godini su bile 696 mm/god (Sajt HMZRS, 2018);
- Precizne količine odloženog otpada na godišnjem nivou, izražene u t/god, od 2010. do 2015. godine iznosile su redom 32.125; 31.801; 29.732; 29.483; 29.866; 30.000, sa procenom porasta količina na godišnjem nivou od 1% nakon 2015. godine;
- Procenjena gustina otpada na deponiji je 0,8 t/m³;
- Trenutna prosečna dubina otpada iznosi oko 6,5 m;
- Udeo zapremine otpada gde su ugrađeni i funkcionalno aktivni biotrnovi je 100%, bez konačne prekrivke, međuprekrivka prekriva otpad na udelu od 70% od ukupne površine deponije, dok se dnevnim prekrivačem pokriva preostali deo u udelu od 10%;
- Kompaktori za otpad se koriste redovno, nema curenja procedne vode sa površine deponije niti stvaranja bazena.

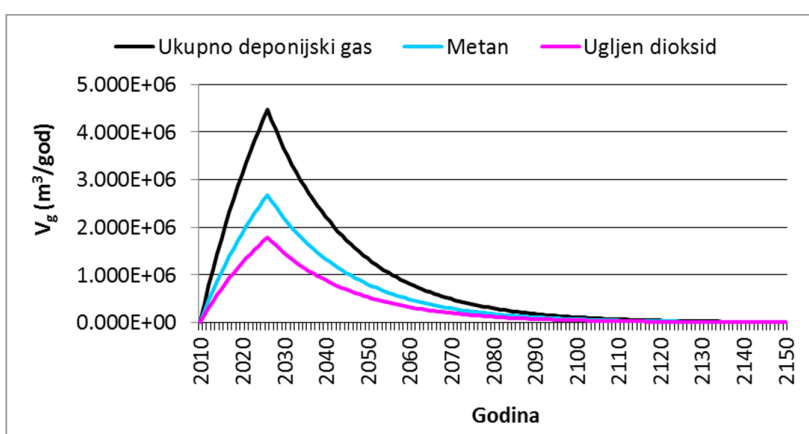
5.3 Rezultati

5.3.1 LandGEM model

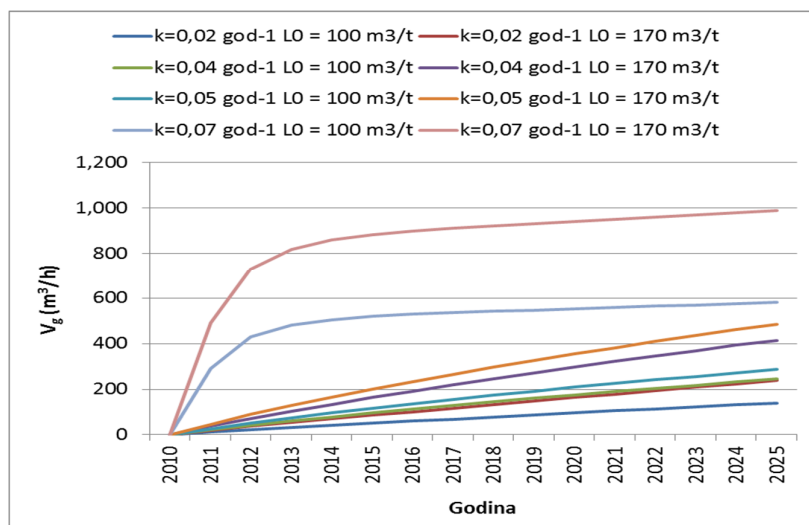
Osim ukupnih emisija deponijskog gasa, ovaj model daje podatke o individualnim emisijama CH₄, CO i NMOCs i drugih zagađivača. Softver pruža širok opseg vrednosti parametara koje korisnik bira, a koje imaju značajan uticaj na proces degradacije otpada na deponiji. Ponuđene vrednosti su bazirane na empirijskim podacima dobijenim sa deponija komunalnog otpada u SAD. Produkcija deponijskog gasa u ovom modelu je bazirana na jednačinama prvog reda, pri čemu se koriste sledeći ulazni parametri: k – stopa generisanja metana, (god⁻¹), L₀ – potencijal generisanja metana, (m³ t⁻¹) i sadržaj metana (% po zapremini), M₀ – ukupna količina čvrstog komunalnog otpada generisanog tokom godina.

Parametar k definiše brzinu generisanja metana degradacijom otpada na deponiji, koja zavisi od sadržaja vlage, raspoloživosti nutrijenata za mikroorganizme, pH vrednosti i temperature u telu deponije. L_0 definiše koliko metana pod idealnim uslovima može da se dobije degradacijom otpada, što uglavnom zavisi od sastava deponovanog otpada. Ukoliko se drugačije ne specificira, program automatski definiše prisustvo metana u sastavu deponijskog gasa od 50%, ali omogućuje i unošenje drugačijih vrednosti od strane korisnika.

Slika 5.1 prikazuje prognozirane prosečne godišnje vrednosti protoka deponijskog gasa tokom vremena, prema ponuđenim vrednostima od strane softvera za konvencionalne deponije, koje uključuju $k=0.05$ i $L_0=170 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, a za unet sadržaj metana od 57% (prosečna vrednost prema merenju na deponiji u 2015. godini). Kao što može da se vidi na slici 5.2, stopa generisanja deponijskog gasa tokom vremena zavisi umnogome od ulaznih podataka sa velikim varijacijama u dobijenim rezultatima. Parametri L_0 i M_0 su nepromenjeni dok se variraju parametri k i L_0 . Uticaj klimatske zone je praktično izražen kroz parametar k .



Slika 5.1 Ukupne emisije tokom vremena



Slika 5.2 Analiza osetljivosti protoka gasa

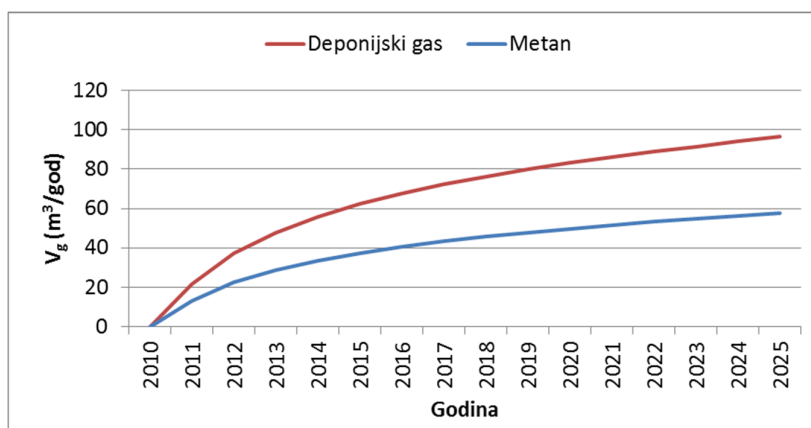
5.3.2 IPCC model

Ovaj model predstavlja revidovani IPCC model iz 1996. godine. Korišćeni metod u ovoj analizi je zasnovan na pretpostavci da je produkcija deponijskog gasa zavisna od vremena kada je otpad odložen na deponiju, što daje mnogo verodostojnije rezultate produkcije tokom dužeg vremenskog perioda (FOD). Za primenu ovog metoda, neophodno je da se unese više podataka, koji pored sastava i količine otpada uključuju karakteristike deponije gde se otpad odlaže.

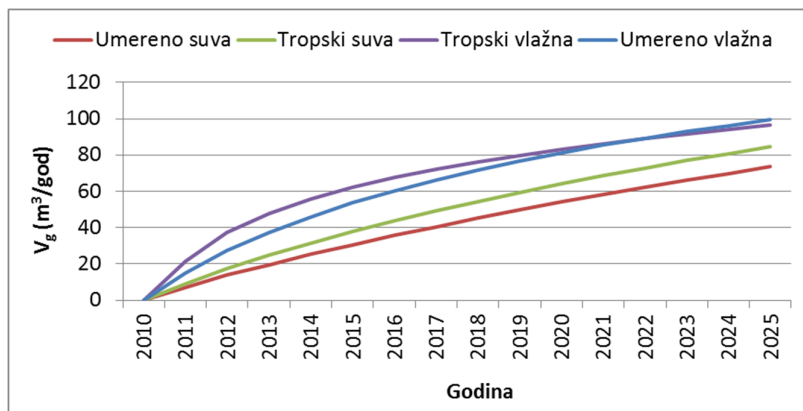
Rezultati modelovanja produkcije deponijskog gasa su generalno zavisni od sledećih ulaznih parametara: DOC – degradabilni organski ugljenik, (t C po t otpada), DOC_r – udeo DOC koji je predmet degradacije, (-), MCF – metanski korekcionni faktor, (-), sadržaj metana (% po zapremini), k – stopa generisanja metana (god^{-1}), MSW – ukupna količina čvrstog komunalnog otpada generisana tokom godina.

DOC je organski ugljenik koji je predmet biohemijske degradacije i proračunava se kao srednja vrednost degradabilnog organskog ugljenika sastavnih komponenata otpada. DOC_r je deo ugljenika koji se razlaže u formi deponijskog gasa koji napušta telo deponije, za razliku od dela DOC koji ne može da se razloži u potpunosti ili se razlaže veoma polako pod anaerobnim uslovima. MCF je parameter koji uzima u obzir karakteristike deponije i način upravljanja otpadom. Kod kontrolisanih deponija njegoa vrednost je 1, kao najveća. Parameter k zavisi od sastava otpada jer svaka frakcija otpada ima različitu k vrednost, kao i klimatskih uslova, odnosno prosečnih godišnjih padavina. Veće vrednosti parametra k ukazuju da će produkcija metana u datom vremenskom periodu biti intenzivnija usled brzih reakcija razlaganja otpada, i obrnuto.

Uzimajući u obzir navedene opšte uslove za deponiju u Bjeljini i preporučene empirijske vrednosti iz literature za parametre modela, koji odgovaraju tropskim vlažnim klimatskim uslovima (padavine između 600 i 699 mm god^{-1}), dobija se dijagram prosečnih godišnjih vrednosti časovne produkcije deponijskog gasa, kao što je prikazano na slici 5.3. Na slici 5.4 je prikazana osetljivost modela na različite klimatske uslove. Očigledno, više padavina ima uticaj na veće količine produkovanog deponijskog gasa. Poređenjem umereno vlažnih i tropski vlažnih klimatskih uslova može se zaključiti da se kod tropski vlažnih klimatskih uslova u početku odvija brža degradacija otpada sa većim količinama deponijskog gasa tokom godina, dok kasnije postaje sporija, čak i sa manjim godišnjim količinama u odnosu na umereno vlažne klimatske uslove, na kraju posmatranog vremenskog perioda.



Slika 5.3 Protok metana i gasa tokom vremena

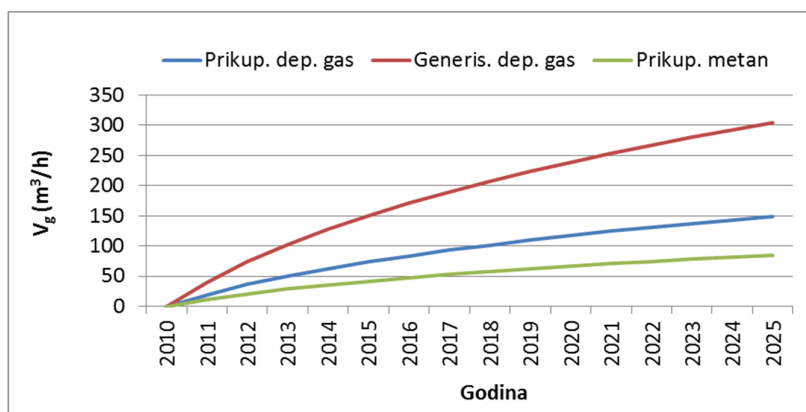


Slika 5.4 Analiza osetljivosti protoka gasa

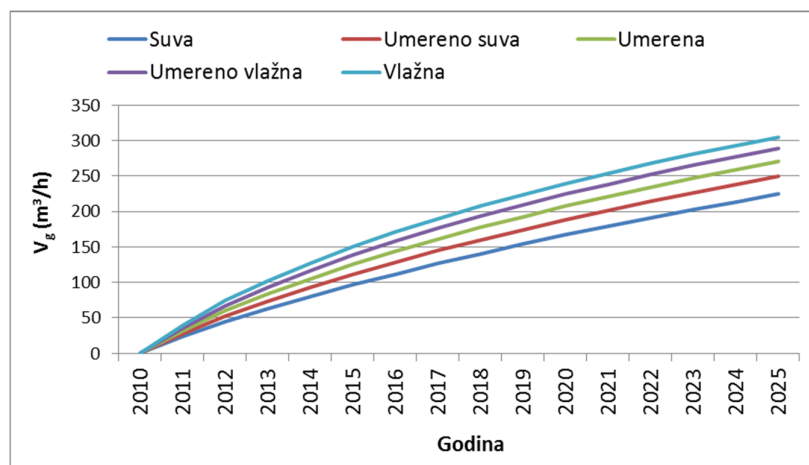
5.3.3 Centralni istočno-evropski model

Ovaj model je razvijen prvobitno kao "ukrajinski" od strane Agencije za zaštitu životne sredine (EPA) i Globalne Metanske Inicijative (GMI) u cilju procene troškovne efikasnosti, izvodljivosti i potencijalnih benefita energetskog iskorišćenja deponijskog gasa. Centralni istočno-evropski (CEE) model sadrži, između ostalog, bazu podataka o sastavu otpada za 4 najveća grada u Srbiji, a kreiran je usvajanjem Ukrajinskog modela, sa visokim stepenom preciznosti usled sličnih klimatskih uslova, kao i praksi upravljanja otpadom i karakteristikama deponija. Ovaj model, kao i IPCC 2006 model, koristi jednačinu prvog reda koja je modifikovana u ovom programu dodatnim parametrima. Za razliku od prethodnih modela, ovaj model omogućuje izračunavanje efikasnosti prikupljanja deponijskog gasa, koja za konkretnu deponiju u Bjeljini, na bazi unetih podataka, iznosi 49%.

Kriva generisanih količina deponijskog gasa sa projektovanim količinama prikupljenog deponijskog gasa i metana tokom vremena, prikazana je na slici 5.5 za umereno vlažne klimatske uslove koji odgovaraju godišnjoj količini padavina u Bjeljini. Slika 5.6 prikazuje senzitivnost promene prosečnog protoka deponijskog gasa u zavisnosti od klimatske zone. Kao što se može videti, povećanje padavina u vlažnijim klimatskim uslovima praćeno je povećanjem količine generisanog deponijskog gasa. Ovaj model, za razliku od prethodnih, daje mogućnost izračunavanja efikasnosti prikupljanja deponijskog gasa, koja predstavlja odnos prikupljenog ili produkovanog i generisanog deponijskog gasa, uzimajući u obzir veliki broj različitih parametara koji karakterišu deponiju. Ukoliko bi se, na primer, prosečna dubina otpada uzela sa 15 m, kao što je finalno planirano, umesto 7 m, što je trenutni slučaj, efikasnost prikupljanja deponijskog gasa bi bila 57%, što bi dalo 16% veći protok u odnosu na vrednosti prikazane na slici 5.5.



Slika 5.5 Generisanje i prikupljanje metana i gasa

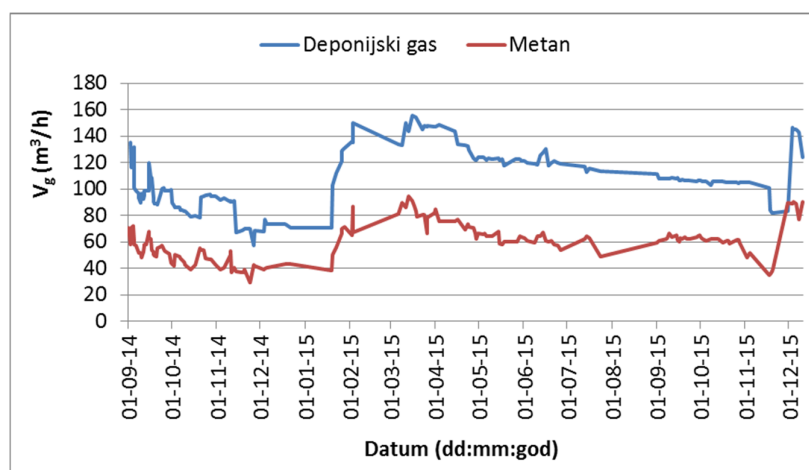


Slika 5.6 Analiza osetljivosti protoka gasa

Može se zapaziti da postoji velika razlika između prikazanih modela kada je reč o klimatskim zonama, čije razlike u količinama generisanog deponijskog gasa u zavisnosti od primenjene klimatske zone iznose 707%, 30% i 36% za LandGEM, IPCC 2006 i Centralni-istočno evropski model, respektivno. Kao što može da se vidi, uticaj vlage koja se dovodi otpadu je daleko najizraženiji u LandGEM modelu.

5.4 Uporedna analiza dobijenih rezultata na bazi proračuna i merenja

Slika 5.7 prikazuje krive protoka deponijskog gasa i metana od puštanja u rada sistema za prikupljanje deponijskog gasa i njegovo spaljivanje na baklji. Ovi podaci su dobijeni na bazi merenja, koja se vrše u kontinuitetu, te očitavaju od strane operatera na deponiji u kraćim ili dužim vremenskim intervalima. Merni uređaji se nalaze nakon prolaska gasova kroz glavne kolektore, neposredno pre spaljivanja na baklji.



Slika 5.7 Generisanje i prikupljanje metana i deponijskog gasa na bazi merenja

Tabela 5.1 prikazuje godišnje proseke časovnih protoka generisanog deponijskog gasa u periodu od 2010. do 2016. godine primenom gore navedenih modela predikcije, kao i realne vrednosti dobijene na bazi merenja. Kako izmerene vrednosti predstavljaju protok prikupljenih količina deponijskog gasa, one su podeljene proračunski određenom vrednosti efikasnosti prikupljanja, korišćenjem centralnog istočno-evropskog modela, kako bi se dobile uporedive ukupne vrednosti generisanog deponijskog gasa.

Tabela 5.1 Stopa generisanja deponijskog gasa tokom godina na bazi modela i merenja

Model	Parametri	Godine						
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
LandGEM	$k=0,05 \text{ god}^{-1}$; $L0 = 170 \text{ m}^3/\text{t}$	0	46	90	128	164	199	233
IPCC 2006	Topski vlažna (600-699 mm/god)	0	22	37	48	56	62	68
CEE model	Umereno vlažna (600-699 mm/god)	0	40	74	102	127	150	190
Merenja	(696 mm u 2015) (Sajt HMZRS, 2018)	-	-	-	-	-	172	237

Kao što se može videti iz tabele 5.1 najmanja odstupanja rezultata na bazi matematičkog modelovanja u odnosu na vrednosti dobijene merenjima, dobijena su primenom LandGEM modela. Zadovoljavajući rezultati su dobijeni takođe korišćenjem centralnog-istočno evropskog modela primenjenog za Srbiju. S obzirom da se efikasnost prikupljanja deponijskog gasa ne određuje na bazi merenja, već samo približno na bazi proračuna, u slučaju da je stvarna vrednost viša od proračunske, rezultati merenja bi bili niži, odnosno bliži vrednostima dobijenim korišćenjem CEE modela. IPCC 2006 model je pokazao najveća odstupanja od realnog slučaja sa najmanjim vrednostima.

Ukoliko se uporedi aritmetički prosek protoka očitanih putem merenja, tokom perioda od 01.09.do 28.02. tokom sezona 2014/2015 i 2015/2016, dobijaju se rezultujuće vrednosti od 101 i 107 m^3/h , respektivno. Generalno se protoci deponijskog gasa menjaju u velikoj meri, što bi moglo da bude posledica promena sledećih okolnosti: padavina tokom vremena, režima rada postrojenja za prečišćavanje i procedure odlaganja koncentrata i rada sistema za prikupljanje deponijskih gasova. Poređenjem protoka deponijskog gasa tokom navedenih vremenskih perioda moglo bi se zaključiti da nema značajnijih promena ovog parametra. Štaviše, prosečan protok u drugoj sezoni je čak i mali niži, imajući u vidu da očekivani rast na godišnjem nivou, usled povećanja količine deponovanog otpada. Kada su u pitanju padavine, ukupna količina iznosi 378 i 393 mm tokom dela sezone 2014/2015 i sezone 2015/2016, respektivno, prema (Đorđević & Trkulja, 2016), dok količina koncentrata u recirkulaciji iznosi 645 i 764 m^3 ili 14,7 i 17,4 mm koncentrata tokom dela sezone 2014/2015 i sezone 2015/2016, respektivno, prema (Protokoli iz prečištača, 2016). To ukupno daje veći priliv vlage u sezonu 2015/2016 u odnosu na 2014/2015 za 15 mm kada je reč o padavinama, odnosno 2,7 mm, kada je reč o izlivenom koncentratu, što ukupno predstavlja 17,7 mm, što bi moglo da predstavlja dobru osnovu za povećanje protoka generisanog deponijskog gasa.

Sa druge strane, relevantnije vrednosti prosečnih protoka deponijskog gasa mogu se dobiti deljenjem ukupnih količina deponijskog gasa sa ukupnim brojem sati rada tokom posmatranog perioda, što daje 84 i 115 m^3/h , sa razlikom od čak 37%. Iz ovih rezultata može da se zaključi ili da su periodi sa većim protocima trajali duže, ili da je baklja bila kraće vreme u zastoju tokom druge sezone. Od trenutka puštanja u rad, baklja je bila u zastoju oko 15% ukupnog vremena. Očekivano povećanje protoka po modelima, shodno promeni količina deponovanog otpada iznosi: 17%, 9% i 26% za LandGEM, IPCC 2006 i CIE model, respektivno.

Uporedna analiza produkcije deponijskog gasa i metana korišćenjem 3 različita komercijalna softverska alata bazirana na matematičkim modelima uz odgovarajuća podešavanja, pokazala je relativno dobro poklapanje sa merenjima na terenu u studiji slučaja na deponiji u Bjeljini. Rezultati teorijskog modelovanja u odnosu na rezultate dobijene na bazi merenja, pokazali su manja odstupanja korišćenjem modela LandGEM (15% i -2%) i Centralnog istočno-evropskog modela (-13% i -20%), dok su

se najveća odstupanja vrednosti pojavila korišćenjem IPCC 2006 modela (-64% i -71%), tokom 2015. i 2016. godine, respektivno. Klimatske zone sa pripadajućim opsegom padavina tokom godine, korišćene za analizu osetljivosti generisanja protoka deponijskog gasa i metana, pokazale su najveći uticaj i razlike među razmatranim modelima.

Postoje brojne tendencije i nastojanja istraživača za razvijanjem novih modela koji će omogućiti precizniju procenu emisija metana, kao važne za kvantifikovanje GHG emisija i potencijala generisanja električne energije. U radu (Karanjekar, i drugi, 2015) se navodi da postojeći modeli, uključujući LandGEM i IPCC, često u značajnoj meri uprošćavaju tretman činjenica kao što su padavine i spoljašnja temperature, koji značajno mogu da utiču na produkciju gasa. Upravo iz razloga preciznijeg "hvatanja" emisija, u cilju proizvodnje energije, razvijen je i CLEEN (Capturing Landfill Emissions for Energy Needs) model, koji još uvek zahteva ulazne podatke koji se mogu lako dobiti, kao što su: sastav otpada, godišnje padavine i spoljašnja temperatura. Vrednosti stope generisanja metana k na bazi jednačina prvog reda dobijene su primenom višestruke linearne regresije, dok je model razvijen na bazi merenja dobijenih sa 27 reaktora laboratorijskih razmera, sa varijacijama sastava otpada (od 0 do 100%), prosečnih stopa padavina od 2,6 i 12 mm/dan i temperature od 20, 30 i 37 °C. Namera istraživača je da sekundarnim skaliranjem korišćenjem regresionih jednačina izvrše korekciju k vrednosti korišćenjem vrednosti prikupljenog deponijskog gasa sa deponija realnih razmera, koje su niže od laboratorijskih, na bazi podataka dobijenih merenjima sa 11 konvencionalnih deponija. Dobijene vrednosti korišćenjem ovog modela pokazale su u 4 od 6 slučajeva bliže realnim vrednostima u odnosu na LandGEM i IPCC model.

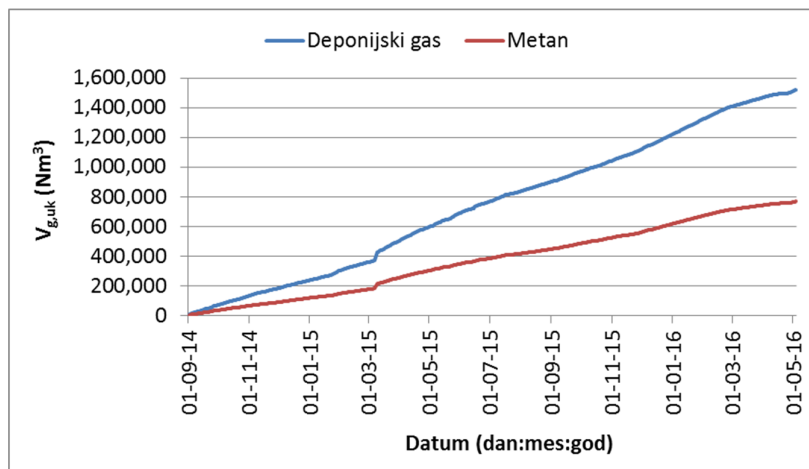
6 Analiza uticajnih parametara na produkciju deponijskog gasa

U cilju boljeg razumevanja uticaja vlage, koje će omogućiti veći uvid u potencijal recirkulacije koncentrata, a naročito procedne vode, na produkciju deponijskog gasa, sledi sveobuhvatna i detaljna analiza glavnih relevantnih uticajnih parametara na bazi dostupnih podatka dobijenih merenjima količine vlage na ulazu i izlazu iz deponije, kao i protoka deponijskog gasa, tokom 15-mesečnog perioda rada deponije. Uzimaju se u obzir postojeće procedure upravljanja otpadom koje se primenjuju u praksi rada deponije, kao što je dato u karakteristikama deponije u predhodnom poglavlju. Pretpostavlja se da većina karakteristika, kao što su sastav otpada, njegov tretman na deponiji, pokrivenost deponije i sl. ostaju nepromenjeni tokom perioda proučavanja. Neki od glavnih parametara koji mogu da se mere na deponiji, a nisu direktno uključeni u korišćene modele, koji se tiču produkcije deponijskog gasa i metana, su: sadržaj vlage u otpadu, alkalitet kao CaCO_3 , pH, odnos BPK/HPK, HPK, BPK, temperatura, Zn, Fe, Cl i sadržaj amonijaka. U istraživanju koje je uzimalo u obzir multikriterijalnu analizu (MCA) navedenih parametara, koja se pokazala uspešnom u poređenju numerički dobijenih i stvarnih vrednosti, sadržaj vlage u otpadu je tretan sa najvećim težinskim faktorom (Emkes, Coulon, & Wagland, 2015). Zato će se naredna analiza bazirati na izradi bilansa vlage na deponiji, na osnovu poznatih vrednosti dobijenih merenjima, što će dati osnovu za uporednu analizu i praćenje protoka generisanih deponijskih gasova i njihovih promena tokom vremena.

6.1 Merenja protoka sagorelih gasova

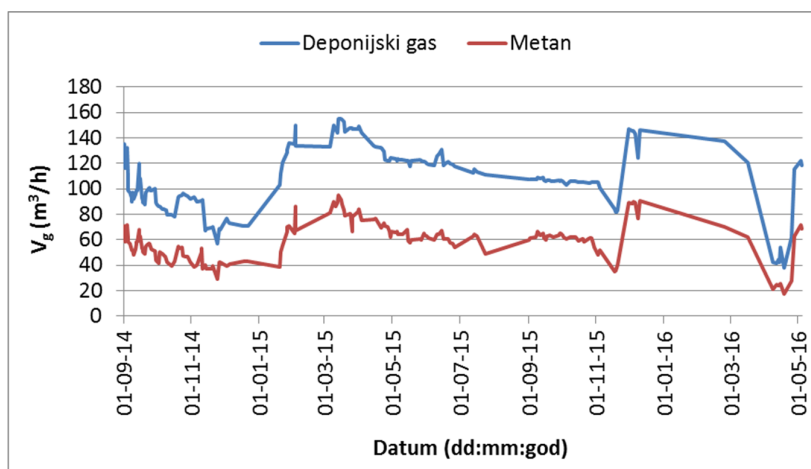
Na slici 6.1 je prikazana promena ukupne količine deponijskih gasova i metana sagorelih na baklji tokom vremena. Može se primetiti da kriva u kasnijem periodu ima veći nagib, koji je i promenljiv tokom vremena, što je u saglasnosti sa krivama časovnih protoka deponijskog gasa i metana, prikazanim na slici 5.7. Na slikama 6.2 i 6.3 prikazane su vrednosti protoka deponijskih gasova i metana na časovnom nivou dobijene očitavanjem na bazi merenja u datom trenutku (slika 6.2), odnosno na bazi prosečenih vrednosti protoka deponijskog gasa između dva očitavanja ukupno sagorelih količina (slika 6.3). Ukupne količine i protoci sagorelog metana su dobijene proračunom na bazi očitanih vrednosti koncentracija metana. Na slici 6.1 se može videti nagli skok nagiba krive, što se takođe primećuje po naglom skoku protoka na slici 6.3. Naime, očitavanja ukupno sagorelih količina gasova pokazuju da je prosečni protok deponijskih gasova u periodu 07-09.03.2015. godine iznosio čak $793 \text{ m}^3/\text{h}$. Stvarno izmeren protok dana 09.03.2015. godine u 11:00 h je bio $150,1 \text{ m}^3/\text{h}$, što je svakako jedna od najvećih izmerenih vrednosti, ali je daleko niža od dobijenog proseka. Teorijski, postoje sledeće mogućnosti za ovako nešto. Jedna realna mogućnost je da je uređaj za merenje pokazao pogrešna merenja, a druga da je operater napravio grešku u očitavanju. Treća mogućnost je da je protok gasova zaista bio toliki, što je nesrazmerno veće od uobičajeno izmerenih vrednosti. Ovakav primer navodi se kao mogućnost potencijalnih grešaka prilikom merenja zbog eventualnih kvarova na mernim instrumentima, odnosno grešaka očitavanja od strane operatera. Parametar koji ima najveći uticaj je svakako vlaga, odnosno padavine, koje su mogle da utiču na trenutno povećanje vlažnosti otpada, pa samim tim i nagli skok protoka gasova. Ovakvi ekstremi zabeleženi su u sledećim vremenskim periodima: 03.09.2014, 02-03.06.2015, 15-16.06.2015. i 14.07.2015. godine kada su protoci deponijskog gasa redom iznosili 246, 244, 394 i $295 \text{ m}^3/\text{h}$, a na koje će se kasnije u toku analize obratiti pažnja kako bi se utvrdilo da li se zaista radi o greškama. Nažalost, protok deponijskog gasa nije očitavan ni svakodnevno, a postoje i duži intervali bez očitavanja, tako da

su moguće izvesne greške i odstupanja stvarnih u odnosu na vrednosti prikazanih na dijagramima, čak i kada je reč o merenjima trenutnih protoka. Čak i sa potencijalnim greškama, dobijene vrednosti na bazi merenja bi generalno trebale da posluže sprovođenju dalje analize.

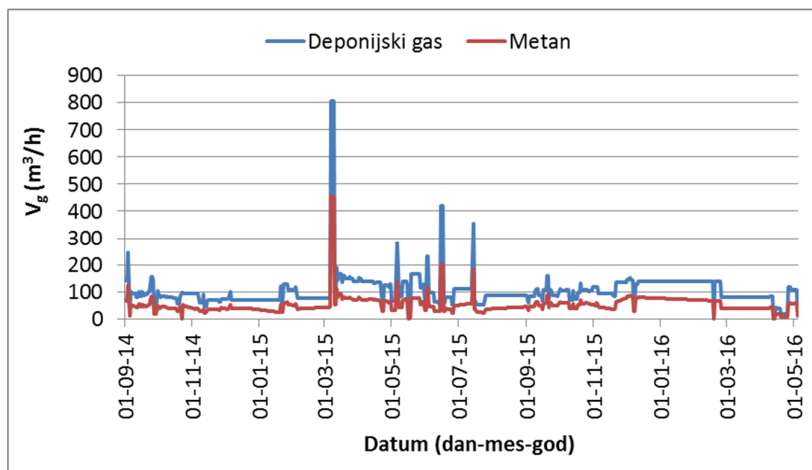


Slika 6.1 Sagorela količina gasova tokom vremena

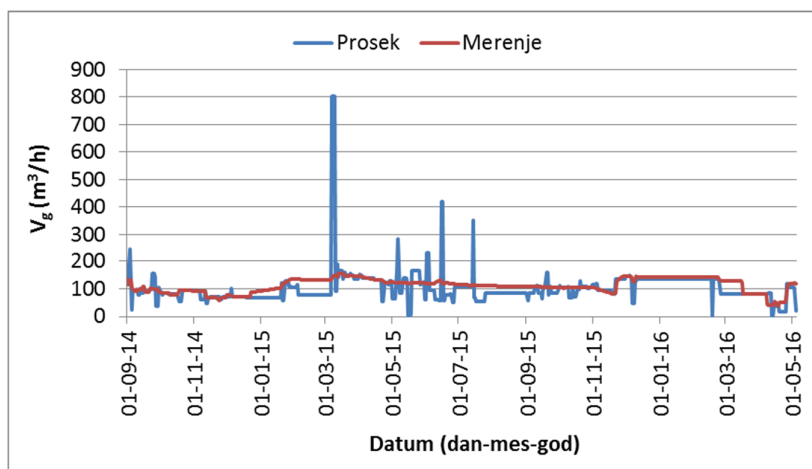
Slike 6.4 i 6.5 prikazuju uporedne krive protoka deponijskog gasa na bazi trenutnih merenja i prosečnih vrednosti između dva merenja ukupno sagorelih količina gasova, pri čemu slika 6.4 prikazuje protoke na dnevnom, a slika 6.5 na mesečnom nivou. Po logici stvari, kada su u pitanju analize na mesečnom nivou, trebalo bi da budu tačnije vrednosti. Ako pogledamo krive na slici 6.5, vidimo da u martu mesecu imamo najveće odstupanje između dve krive. S obzirom da je u ovom mesecu bilo očitavanja protoka tokom čak 14 različitih dana, malo čudi ovolika razlika i navodi na eventualnu sumnju u verodostojnost mernog instrumenta, na šta upućuje i gore navedena zapažanja u vezi protoka gasa u ovom mesecu. Kada su u pitanju dnevna očitavanja, uz zanemarivanje ekstrema krivih, može se zaključiti da su dobijene vrednosti prilično ujednačene, tako da će se dalje razmatrati vrednosti dobijene na bazi trenutnih merenja.



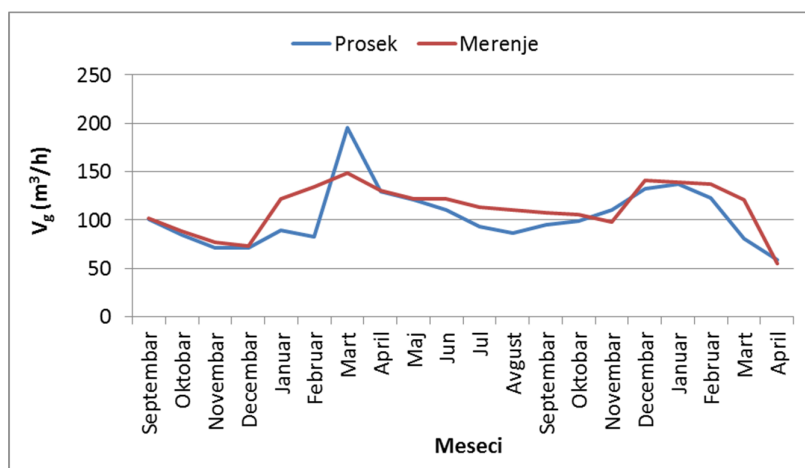
Slika 6.2 Protok gasova na bazi očitanih vrednosti trenutnih merenja



Slika 6.3 Protok gasova na bazi merenja i proračuna

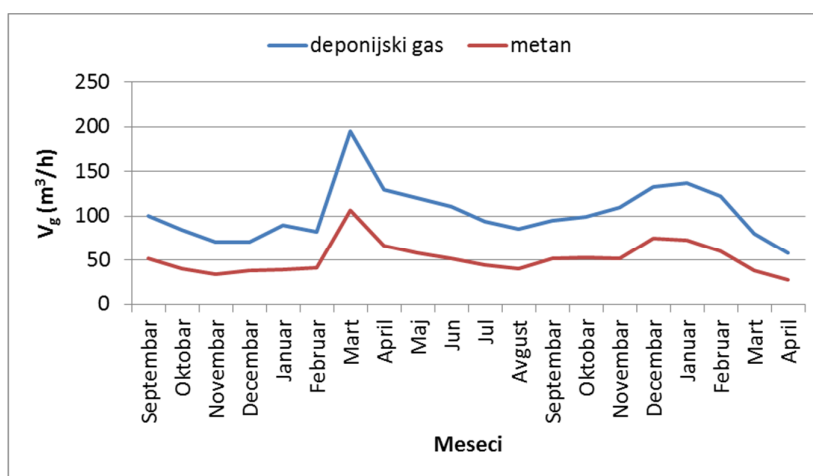


Slika 6.4 Krive protoka deponijskog gasa na dnevnom nivou na bazi trenutnih merenja protoka i prosečnih vrednosti na bazi ukupno izmerenih količina

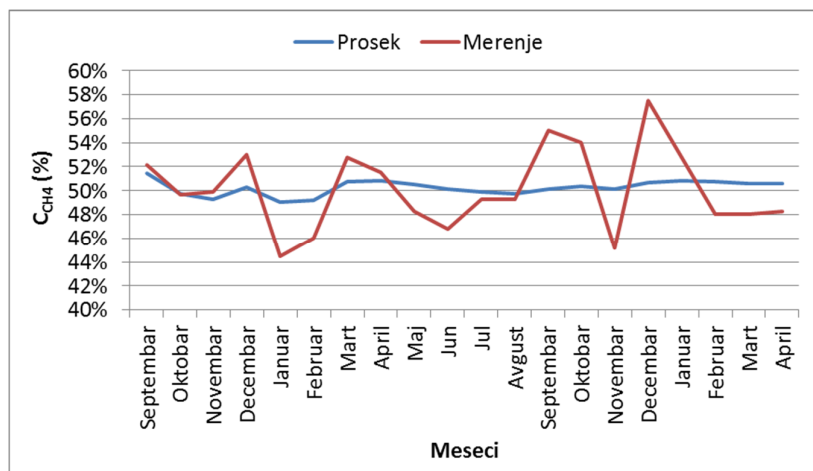


Slika 6.5 Krive protoka deponijskog gasa po mesecima na bazi trenutnih merenja protoka i prosečnih vrednosti na bazi ukupno izmerenih količina u periodu od septembra 2014. do aprila 2016. godine

Slika 6.6 prikazuje prosečne vrednosti protoka deponijskog gasa i metana tokom meseci, dok slika 6.7 prikazuje uporedne krive promena prosečnih mesečnih vrednosti koncentracije metana u deponijskom gasu koji se dovodi na sagorevanje u baklju, dobijene na bazi mesečnih proseka očitanih koncentracija i na bazi mesečnog proseka koncentracija dobijenih iteracijama na dnevnom nivou. Drugi način obračuna daje mnogo uravnoteženije vrednosti, koje se mogu smatrati merodavnijim za korišćenje jer uzimaju u obzir proteklo vreme između dva uzastopna merenja. Može se primetiti da kriva promene koncentracije metana, prikazana na slici 6.7, prati promenu krive protoka generisanih gasova. Kako se protok menja, tako se, ali u daleko manjoj meri, može uočiti i promena koncentracija metana. To znači da uslovi koji pogoduju generisanju većih količina deponijskih gasova utiču i na povećanje koncentracije metana, i obrnuto. Sa druge strane, trenutna očitavanja govore nam da vrednosti koncentracija metana u deponijskom gasu mogu da budu promenljive tokom vremena, te da se kreću u nešto širem opsegu od 44% do 58%, što uspunjava minimalne zahteve za dalje korišćenje u nekom od energetskih postrojenja koji se navode u istraživanju (Sevimoglu & Tansel, 2013).



Slika 6.6 Promena prosečnih vrednosti protoka deponijskog gasa i metana u periodu od septembra 2014. do aprila 2016. godine



Slika 6.7 Promena prosečnih vrednosti koncentracije metana u deponijskom gasu u periodu od septembra 2014. do aprila 2016. godine

Na bazi prethodnih istraživanja i rezultata iz literature, prvo će se proanalizirati najuticajnijih parametar na produkciju deponijskog gasa, a to je vlaga.

6.2 Uticaj vlage

6.2.1 Bilans vlage

Brzina stvaranja procedne vode uobičajeno zavisi od količine vode koja se nalazi u otpadu i od količine padavina koja padne na deponovani otpad. Klimatski uslovi značajno utiču na brzinu stvaranja procednih voda i to tako što je količina ovih voda mnogo veća u zoni visokih padavina od onih u zoni sa malim padavinama. Topografija tla utiče na smer kretanja bujice, kao i na količinu vode koja ulazi i izlazi iz zone deponije. Tradicionalni pristup projektovanju sanitarnih deponija, za razliku od modernih rešenja bioreaktorskih deponija, bazira se na minimiziranju količine vlage koja se dovodi u telo deponije, radi smanjenja emisija koje potiču od otpada i, shodno tome, njihovim lakšim upravljanjem, barem kada je u pitanju period aktivnog deponovanja otpada, o čemu je već bilo reči ranije. Ove emisije, kao što je rečeno, mahom čine generisane procedne vode i deponijski gasovi, a mogu značajno da utiču na kvalitet prirodnih recipijenata kao što su tlo, voda i vazduh, bilo na lokalnom nivou ili da doprinose povećanju parametara zagađenja na globalnom nivou, kao što je globalno zagrevanje vazduha itd. Smanjenje količine vode koja iz okolne zone dospeva u deponiju postiže se postavljanjem straničnih kanala oko tela deponije, tako da se padavine sa pristupnih saobraćajnica sakupljaju u kišnim kanalima postavljenim pored puta.

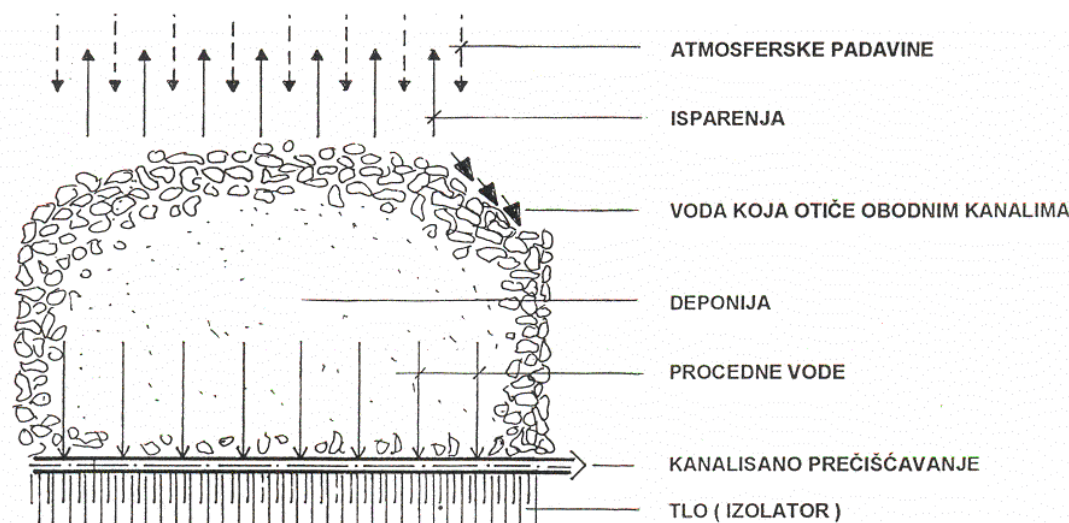
Određivanje količine procednih voda je kritičan projektni parametar, jer količina i zagađenje generisanih procednih voda znatno utiču na troškove rada deponije, naročito u slučajevima kada se predviđa sakupljanje i tretman ovih voda. Ovo se naročito odnosi na sanitarne deponije kod kojih se uobičajeno ne razmatra aspekt energetskog iskorišćenja deponijskog gasa, već se prvenstveno misli da se zadovolje ograničenja koja nameću zakonski propisi u pogledu emisija, kao što je to slučaj i na deponiji koja je predmet ovog istraživanja. Glavna prepreka za uspešan tretman procedne vode je teškoća u identifikovanju i kvantifikovanju njihovih uobičajenih karakteristika. Ako je postrojenje za tretman projektovano samo za prosečan kvalitet i kvantitet procedne vode, ono će povremeno da bude preopterećeno u praksi, usled visokih pikova zagađenja i/ili velikih količina tokom izvesnih vremenskih perioda. Stoga, postrojenje za tretman treba da bude dimenzionisano uzimajući u vidu maksimalnu koncentraciju i količinu zagađivača - najgori mogući scenario. Stoga su detaljne informacije o sezonskim varijacijama karakteristika procedne vode esencijalne za dizajn efikasnog sistema za tretman (Tatsi & Zouboulis, 2002).

Proceđivanje od strane kiše počinje da se dešava čim postelja otpada dostigne sadržaj vlage od 45%, što u praksi znači da u većini slučajeva do 13,5 cm vode po metru otpada može da se apsorbuje pre nego što procedna voda počne da se produkuje, mada ovo pretežno zavisi od početnog sadržaja vlage deponovanog čvrstog otpada (Chu, Cheung, & Wong, 1994).

Na najnižem delu deponije, procedna voda se nalazi na površini i formira veštački bazen za prikupljanje, gde ostaje nekoliko meseci, podvrgnuta prirodnom slabljenju/stabilizaciji, bez oksigenacije. Procenjuje se da je najviše jedna recirkulacija moguća, sa izuzetkom preferencijalnih tokova. Praksa korišćenja prostog bazena za prikupljanje procednih voda je veoma često korišćena na mnogim sanitarnim deponijama, u najmanju ruku u Mediteranskoj oblasti (Tatsi & Zouboulis, 2002). Ova praksa se koristi i na sanitarnoj deponiji u Bjeljini, pre dalje obrade procedne vode u postrojenju RO.

U pravilno lociranoj i isprojektovanoj deponiji u kojoj se vrši sanitarno deponovanje otpada, procedne vode se stvaraju prvenstveno od padavina koje dospeju na telo deponije.

Ulaz i izlaz voda iz tela deponije mogu se pojednostavljeno prikazati kao na slici 6.8.



Slika 6.8 Kretanje vode kroz deponiju

Više matematičkih modela je razvijeno sa namerom da se predvidi količina produkovane procedne vode poznavajući osnovne hidrološke faktore (Lema, Mendez, & Blazquez, 1988). Količina procednih voda može da se predvidi proračunskim putem uz uslov zadovoljavanja jednog od osnovnih zakona, a to je bilans mase. Za predikciju količine procedne vode može se za početak koristiti jednostavan opšti izraz hidrološkog bilansa mase tipa (Canziani & Cossu, 1989):

$$V_{pv} = V_{pad} - V_{po} - ET \quad (6.1)$$

gde je:

- V_{pv} - količina procedne vode [m^3]
- V_{pad} - količina padavina [m^3]
- V_{po} - količina vode iz površinskog toka [m^3]
- ET - stvarna vrednost evapotranspiracije [m^3]

Korišćena metodologija primenjenog hidrološkog bilansa (Canziani & Cossu, 1989), ne uzima u obzir vlažnost deponovanog otpada.

Ovaj izraz važi samo za deponije koje su projektovane kao sanitarne, što omogućuje da nema curenja vode u podzemne vode kroz izolaciju aktivnog basena, koja čini sastavni deo ovako projektovanog rešenja. Isto tako, zahvaljujući vodonepropusnosti izolacije, podzemne vode ne mogu da se infiltriraju u telo deponije ni sa bočnih strana, ni sa dna. Sa druge strane, kao što je gore rečeno, deponija se projektuje tako da atmosferska voda ne ulazi iz šireg basena, zahvaljujući odgovarajućim kanalima konstruisanim za oticanje atmosferske vode, kojima se površinski tok usmerava dalje od tela deponije.

Vlažnost otpada se tokom vremena menja, odnosno deo vlage se u većoj ili manjoj meri zadržava, makar parcijalno, unutar dela otpada u telu deponije, do mere da ne utiče na zasićenje tog otpada vlagom i generisanje nove količine procedne vode. S obzirom na ovakvu mogućnost, usvaja se u

daljoj analizi pretpostavka da deo procedne vode ostaje u deponiji, što daje modifikaciju gornjeg izraza, kao što sledi:

$$V_{pv} = V_{pad} - V_{po} - ET - \Delta V_a \quad (6.2)$$

gde je:

- ΔV_a - promena akumulirane vlage na deponiji [m^3]

Autor pretpostavlja da upravo rezultatna vlaga koje preostaje, odnosno koja se akumulira unutar otpada, ima krucijalni uticaj na količine produkovanog deponijskog gasa. Dalji tok proračuna radi se sa ciljem izračunavanja V_a , čija promena će se u uporednoj analizi pratiti u odnosu na stopu produkcije deponijskog gasa kako bi se eventualno utvrdila zavisnost ovih parametara.

Pri prvoj aproksimaciji količina procedne vode može da se smatra proporcionalna zapremini vode koja prodire kroz deponovani otpad. Smanjenje količine vode koja ulazi u deponiju ima, stoga, veliki uticaj na smanjenje stope generisanja procedne vode. Proračun hidrološkog bilansa se radi prateći dalje metodologiju (Tatsi & Zouboulis, 2002) po kojoj se početni sadržaj vode deponovanog otpada ne uzima u obzir.

Međutim, pored padavina, koje su nezaobilazno prisutne na svim deponijama, sa razlikama shodno klimatskim uslovima, na konkretnoj deponiji je potrebno uzeti u obzir sve ulazne parametre, koji doprinose povećanju sadržaja vlage na deponiji, čime se gornji izraz dalje modifikuje, kao što sledi:

$$V_{pv} = V_{ul} - V_{po} - ET - \Delta V_a \quad (6.3)$$

gde je:

- V_{ul} - ukupna količina vlage koja se dovodi na deponiju [m^3]

Pretpostavljeno je da nema drugih priliva vode na deponiju sa prirodnih izvora, osim, u slučaju predmetne deponije, tokova koji dolaze recirkulacijom. Pored recirkulacije u praksi rada pojedinih deponija na unos vlage može da utiče npr. odlaganje kanalizacionog mulja sa delimično uklonjenom vlagom i sl. Dalji tok proračuna prati izračunavanje ponaosob svakog od članova izraza (6.3), kao što sledi u narednim redovima:

$$V_{ul} = V_{pad} + V_k + V_{pv,r} \quad (6.4)$$

$$V_k = V_{pv} - V_{per} \quad (6.5)$$

gde je:

- V_k - količina koncentrata koji se recirkulacijom vraća na deponiju [m^3]
- $V_{pv,r}$ - količina procedne vode koja se recirkulacijom vraća na deponiju [m^3]
- V_{per} - količina permeata koji se ispušta u prirodne recipijente [m^3]

Udeo tokova recirkulacije u padavinama u posmatranom 15-mesečnom periodu iznosi 4% i 2% za koncentrat i procednu vodu, respektivno. Vrednost količine koncentrata, koja se generiše tokom vremena, se dobija kao razlika vrednosti količina procedne vode koja uđe u postrojenje za prečišćavanje i permeata koji se ispušta u okolinu, čije vrednosti se prate u kontinuitetu. Praksa recirkulacije procedne vode na deponiji u posmatranom periodu nije postojala sa ovom namerom od trenutka puštanja u rad postrojenja za prečišćavanje RO, iako postoje tehnički uslovi da se meri primenjuje (cevovod za recirkulaciju, cirkulacione pumpe itd.). Zadatak ovog modela jeste upravo da pokaže kako bi ova praksa

mogla da utiče u budućnosti na povećanje protoka deponijskog gasa kroz ciljano povećanje vlage na deponiji, barem kada se radi o proračunima. Kako je rečeno u razgovoru, operateri na deponiji svakodnevno uključuju u rad cirkulacione pumpe (radna i rezervna) naizmenično za recirkulaciju procedne vode u trajanju od 15 min, iz razloga provere i održavanja njihovih funkcija. Uzimajući u obzir navedeno, uz projektovani kapacitet, dobijena je gruba računica količine procedne vode koja se recirkuliše na dnevnom nivou, korišćenjem sledećeg izraza:

$$V_{pv,r} = \dot{V}_{cp} \tau \quad (6.6)$$

gde je:

- \dot{V}_{cp} - protok cirkulacione pumpe pri projektovanom padu pritiska (radna tačka) [m³/s]
- τ - definisano prosečno 15-minutno dnevno opterećenje, [s] ($\tau = 900$ s)

Propustljivost međuslojeva zemlje koji se nalaze u deponiji utiče na brzinu kretanja vode naniže. Količina procednih voda se smanjuje pri povećanom površinskom oticanju vode, intenzivnijim isparavanjem vode sa površine deponije i smanjenjem vlage u prekrivnim slojevima zemlje. Količina medijuma koji otiče sa površine deponije može se izračunati iz sledeće formule:

$$V_{po} = V_{ul} \cdot \psi_o \cdot \psi_{var} \quad (6.7)$$

gde je:

- V_{po} - površinsko oticanje [m³]
- ψ_o - koeficijent oticanja padavina [m³]
- ψ_{var} - varijacije koeficijenta oticanja [-]

Koeficijent oticanja padavina ψ_o je empirijski koeficijent čija vrijednost zavisi od hrapavosti završnog sloja površine sa koje se prikupljaju padavine (uz uslov postojanja minimalnog nagiba prema građevinskim standardima). Vrednosti koeficijenta oticanja mogu biti različite. Tako se one u tehničkoj literaturi kreću od 1 za kose krovove (kompletna količina vode se odvodi u ovom slučaju), 0,7 do 0,9 za ravne krovove, asfaltirane, betonirane, popločane i druge uređene površine, do vrednosti 0,6 za uređene i neuređene zelene i druge površine na tlu bez završnog sloja. Što je površina hrapavija ova vrednost je niža i manje će se padavina odvoditi oticanjem, a više zadržavati. Dakle, kada je u pitanju zemlja, zavisice od tipa zemlje, nagiba terena, prisustva vegetacije i sl. U radu (Canziani & Cossu, 1989) je za prosečnu vrednost koeficijenta oticanja usvojena vrednost 0,3 za peskovito i golo zemljište. Proračun će pokazati da je bilans vlage na deponiji izuzetno osetljiv na vrednost ovog parametra, čija se tačna vrednost ne može drugačije odrediti, osim kada postoje merenja, kao što je to slučaj u ovom istraživanju.

Dalji tok proračuna usmeren je ka računanju ukupno raspoložive količine vlage, prateći sledeće formule:

$$V_{rasp1} = V_{uk} - V_{po} \quad (6.8)$$

$$V_{rasp2} = V_{rasp1} + V_{p,z} \quad (6.9)$$

$$V_{rasp,uk} = V_{rasp2} - ET \quad (6.10)$$

gde je:

- V_{rasp1} - raspoloživa vlaga koja se dovede otpadu nakon površinskog oticanja [m³]

- $V_{p,z}$ - početni sadržaj vlage koja se otpadu dovodi zemljom za prekrivanje [mm] (usvojeno $V_{p,z} = 20$ mm, osim u period od juna do septembra kada se uzima $V_{p,z} = 0$ mm) [40]
- V_{rasp2} - raspoloživa vlaga koja se dovede otpadu računajući i vlagu koja se dovodi zemljom [mm]
- $V_{rasp,uk}$ - ukupno raspoloživa količina vlage kada se uzme u obzir i evapotranspiracija, [mm]

Da bi izvršili proračun procednih voda, prvenstveno je neophodno odrediti vrednost evapotranspiracije. Evapotranspiracija (ET) predstavlja zbir stvarnih gubitaka vode putem isparavanja (evaporacije) čvrstog tla i mulja s jedne strane i transpiracije biljaka s druge strane. Dinamička (potencijalna) evapotranspiracija (ETP) predstavlja evapotranspiraciju koja bi mogla da se dogodi kada bi bilo viška vlage na odgovarajućim površinama. Za obračun hidrološke vrednosti, koristi se dinamička evapotranspiracija.

Potencijal evapotranspiracije na mesečnom nivou može se odrediti pomoću Thornthwaite-ove jednačine:

$$ETP = PE = (PE)_x \left[\frac{DT}{360} \right] \quad (6.11)$$

$$(PE)_x = 160 \left[\frac{10T_i}{J} \right]^\alpha \quad (6.12)$$

$$J = \sum J_i \quad (6.13)$$

$$J_i = 0,09 T_i^{\frac{3}{2}} \quad (6.14)$$

$$\alpha = 0,016J + 0,5 \quad (6.15)$$

$$\frac{DT}{360} = 0,1217P \quad (6.16)$$

gde je:

- $ETP = PE$ - korigovana potencijalna evapotranspiracija (mm/mes)
- $(PE)_x$ - prosečna potencijalna evapotranspiracija (mm/mes)
- T_i - srednja mesečna temperatura vazduha [°C]
- J - godišnji indeks temperature [-]
- α - koeficijent površinskog toka [-]
- J_i - mesečni indeks temperature [-]
- P - prosečan broj dnevnih sati za svaki mesec u godini [%]

Prosečan broj dnevnih sati tokom svakog meseca u godini je određen na bazi dostavljenih izveštaja (Izveštaji za kvalitet vazduha, 2015), dok su srednje mesečne temperature, kao i količina padavina za potrebe daljeg proračuna, dobijene iz zvaničnih izveštaja (Đorđević & Trkulja, 2016) Meteorološke stanice Bijeljina preuzetim sa sajta republičkog Hidrometeorološkog zavoda. U tabeli 6.1 su prikazane vrednosti evapotranspiracije korišćenjem gore navedenih formula i vrednosti spoljašnjih mesečnih temperatura.

Konačno se ΔV_a može odrediti iz izraza koji slede:

$$V_{rez} = V_{rasp,uk} - V_{p,z} \quad (6.17)$$

$$\Delta V_a = V_{rez} - V_{pv} \quad (6.18)$$

gde je:

- V_{rez} - rezultujuća količina dovedene vlage deponiji, [mm/mes]

Cilj konačnog bilansiranja jeste da se odredi ukupno akumulirana vlaga unutar otpada, koja bi bila analogna njegovoj vlažnosti, od koje zavisi stopa generisanja deponijskog gasa. Ili, kao što sledi:

$$V_{a,i+1} = V_{a,i} + \Delta V_{a,i+1} \quad (6.19)$$

gde je:

- $V_{a,i}$ - ukupno akumulirana vlaga u deponiji tokom i-tog meseca [mm/mes]
- $V_{a,i+1}$ - ukupno akumulirana vlaga u deponiji tokom i+1-og meseca [mm/mes]
- $\Delta V_{a,i+1}$ - promena akumulirane vlage na deponiji od i-tog do i+1-ov meseca [mm/mes]

Parametar V_a se na drugi način može predstaviti sledećim izrazom:

$$V_a = V_{ak} + V_{lag} - V_{pv,g} \quad (6.20)$$

$$V_{ak,max} = aW \quad (6.21)$$

gde je:

- V_{ak} - količina vlage u otpadu na deponiji akumulirana adsorpcijom [mm]
- $V_{ak,max}$ - maksimalna količina vode koja se može akumulirati u otpadu (kapacitet zasićenja) [mm]
- V_{lag} - količina generisane procedne vode koja se akumulira i „čuva“ unutar deponijske lagune [mm]
- $V_{pv,g}$ - količina procedne vode koji se izgubi prelaskom u deponijski gas [mm]
- a - sposobnost absorpcije otpada (predstavlja maksimalnu količinu vode koju otpad može da zadrži, umanjeno za količinu vode koja je stvorena procesima biorazgradnje, pre nego što dođe do ocedivanja) [mm/t]
- W - težina otpada u deponiji [t]

Dalja analiza se neće baviti određivanjem pojedinačnih parametara u izrazu 6.19, čije vrednosti bi se delimično i mogle izračunati na osnovu datih formula. Radi uprošćenja će se eliminisati vrednosti parametra V_{lag} i $V_{pv,g}$ i posmatraće se kao da se kompletno akumulirana vlaga unutar deponije absorbuje unutar otpada povećavajući time njegovu vlažnost.

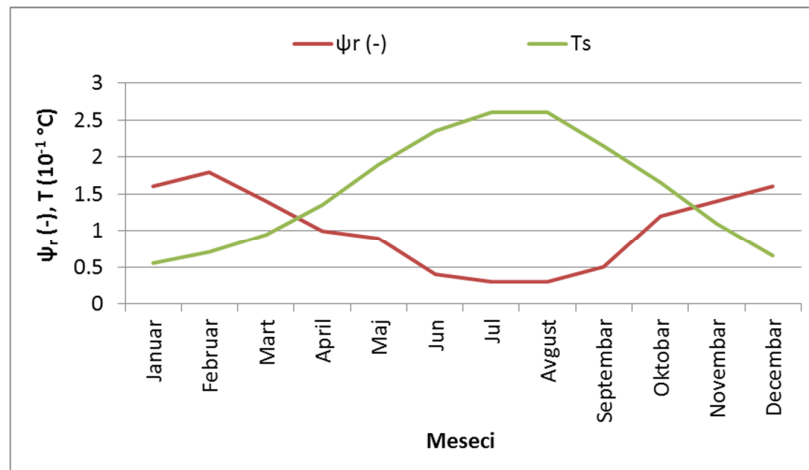
Tabela 6.1 Izračunavanje vrednosti evapotranspiracije

Mesec	T_i (°C)	J_i	$(PE)_x$	P (%)	(DT)/360	ETP (mm)
Januar	3.02	0.47	60.966	38%	0.04569	2.79
Februar	3.11	0.49	63.637	42%	0.05071	3.23
Mart	8.63	2.28	277.623	48%	0.05857	16.26
April	13.68	4.56	539.783	55%	0.06749	36.43
Maj	19.19	7.57	879.356	60%	0.07358	64.70
Jun	20.82	8.55	988.574	64%	0.07774	76.85
Jul	23.68	10.37	1190.309	63%	0.07677	91.38
Avgust	24.47	10.89	1248.028	59%	0.07119	88.85
Septembar	18.12	6.94	809.095	51%	0.06227	50.38
Oktobar	13.26	4.34	515.756	44%	0.05360	27.64
Novembar	7.65	1.90	233.361	39%	0.04736	11.05
Decembar	3.21	0.52	66.687	35%	0.04310	2.87

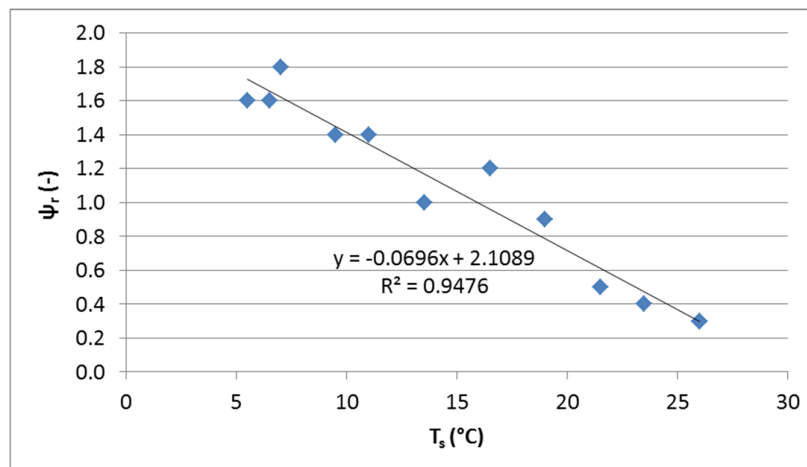
Kako padavine čine najveći deo unosa vode na deponiju, od vrednosti koeficijenta oticanja umnogome zavisi količina generisane procedne vode. Vrednost ovog koeficijenta se određuje tako da deponija bude u stacionarnom stanju, odnosno da je zadovoljen bilans vlage. Kada bi se za ovaj koeficijent usvojila niža vrednost u odnosu na stvarnu vrednost dolazilo bi do većeg zadržavanja, odnosno akumulacije vlage na deponiji. To bi dovelo do značajnog i konstantnog rasta vlažnosti otpada, a samim tim bi i protoka generisanog deponijskog gasa, što nije slučaj. Prekomerna količina akumulirane vode bi u jednom trenutku dovela do stvaranja lokalnih barica na deponiji, koje bi se sve više širile jer deponija ne bi bila u stanju da primi celokupnu količinu vlage, što iz prakse znamo da nije bio slučaj tokom posmatranog vremenskog perioda. Sa druge strane, više vrednosti od usvojene dovele bi do smanjenja vlažnosti otpada na deponiji, sa vidljivim i izraženim smanjenjem protoka deponijskih gasova. Ova vrednost omogućuje da se pri datim uslovima rada, uzimajući u obzir merenja svih relevantnih parametara tokom meseci, zadovolji bilans vlage. Uvrštavanjem svih vrednosti u bilans u više iteracija dobijena je vrednost ovog parametra od 0,38, koja će se dalje koristiti. Usvojena vrednost se uklapa i prema opisima iz literature, s obzirom da površina deponije ne predstavlja golo zemljište (vrednost iz literature 0,3), a nije ni u potpunosti ozelenjena travom (vrednost iz literature 0,6). Dobijena vrednost koeficijenta odgovara godišnjem proseku.

S obzirom na različite klimatske uslove tokom godine, sa različitim temperaturama spoljašnjeg vazduha koje bi mogle da utiču na stanje tla i njegovu hrapavost uzimaju se varijacije koeficijenta oticanja. Korišćena je zavisnosti koeficijenta oticanja od temperature koja je određena na bazi vrednosti iz literature (Canziani & Cossu, 1989). Ovaj koeficijent je uz koeficijent oticanja jedan od ključnih parametara, koji utiče na ukupne količine vode od padavina koja ne ulazi, već otiče sa površinskog sloja deponije, odnosno na ukupni bilans vlage.

Na slici 6.9 je dat uporedni prikaz krivih usvojenih vrednosti koeficijenta raspodele oticanja i temperature, dok slika 6.10 prikazuje vrednost koeficijenta oticanja i pripadajućih spoljašnjih temperatura, koje se sa velikom preciznošću mogu povezati linearnom zavisnošću. Temperature su određene kao aritmetički prosek dnevnih maksimuma i minimuma za poslednjih 30 godina u Solunu (Prognoza za Solun).



Slika 6.9 Promena koeficijenta oticanja i temperature tokom vremena (Tatsi & Zouboulis, 2002)



Slika 6.10 Zavisnost koeficijenta raspodele oticanja od spoljašnje temperature

Nagib terena, koji indirektno utiče na vrednost koeficijenta apsorpcije, je važan činilac kod proračuna količine filtrata. Prema projekcijama vezanim za tehničko rešenje predmetne deponije, navodi se da kod deponija u nagibu 60 - 70% padavina isparava i otiče sa površine deponije, oko 25% učestvuje u biotermičkim procesima koji se dešavaju u sloju deponovanih otpadaka na dubini od 0,5 - 2,0 m, dok ostatak padavina, 5 - 15%, kao procedna voda prolazi do dna deponije, odakle se odvodi na prečišćavanje (Glavni projekat, 2012). Iz povezanih studija izvedenih na deponijskim lokacijama koje su u potpunosti kontrolisane, zapaža se da količina proizvedene procedne vode iznosi između 15 i 50% u odnosu na odgovarajuće padavine, a zavisi uglavnom od tipa konačne deponijske prekrivke i od načina sabijanja otpada (Canziani & Cossu, 1989). Na primeru predmetne deponije ovaj odnos je iznosio 13,1% u period od septembra 2014 do decembra 2015. godine. Primenom gore opisane metodologije proračuna, te daljim prilagođavanjem proračuna i usvajanjem pomenutih koeficijenata, dobija se da 50% od ukupne količine padavina otiče sa deponije, dok 20% isparava u evapotranspiraciji, što čini ukupno 70% padavina. Ukupna količina vlage koja se po proračunu zadržava u otpadu na deponiji, odnosno učestvuje u biotermičkim procesima iznosi 30%, što je otprilike u saglasnosti sa projekcijama datim projektom i predstavlja dodatnu potvrdu da je bilans vlage uspešno sproveden.

Ukupna izmerena godišnja produkcija procedne vode na predmetnoj deponiji iznosi 106,4 mm, što je gotovo identičan podatak vrednosti od 107 mm generisane procedne vode, prema proračunu za deponiju u Solunu (Tatsi & Zouboulis, 2002). Ova vrednost je u opsegu vrednosti potencijalnih stopa generisane procedne vode izmerenih na drugim mestima u Evropi, koje mogu da variraju od manje od

50 mm/god do preko 400 mm/god, pretežno u zavisnosti od lokalnih klimatskih uslova. Npr. na deponiji blizu Madrida u Španiji proračunska produkcija procedne vode iznosi 7 mm/god, na deponiji blizu Pavia u Italiji je 82 mm/god, dok na deponiji blizu Atine u Grčkoj, gde su padavine 387 mm/god, iznosi 40-60 mm/god (Hjelmar, Johannessen, Knox, & et al., 1995). Kao što se može videti količina generisane procedne vode na deponiji u Bjeljini ima otprilike 2 puta veću vrednost u odnosu na deponiju blizu Atine, pri dvostruko većoj godišnjoj količini padavina, što daje isti proporcionalni udeo generisane procedne vode u odnosu na padavine. Niži udeo generisane procedne vode u Bjeljini (13,1%) u odnosu na deponiju u Solunu (24,2%) svakako može da bude rezultat deponijske prekrivke i načina sabijanja otpada. Količina generisane procedne vode na deponiji u Bjeljini je skoro dvostruko niža od srednje stope generisanja procedne vode date u tabeli 1.1, te bi se, shodno vrednostima iz pomenute tabele, moglo zaključiti da je potreban znatno duži vremenski period da se, pri ovoj stopi generisanja procedne vode, obezbedi stabilizacija otpada na deponiji, koji bi na bazi podataka iz navedene tabele mogao da se proceni na period od 450-600 godina.

Kao što je predthodno već opisano, pre dovođenja procedne vode u postrojenje za prečišćavanje, ona se akumulira u prihvatnim rezervoarima. Ovi rezervoari mogu se u smislu vlage posmatrati i kao baferi koji smanjuju raspoloživu količinu vlage unutar otpada sa smanjenim uticajem na generisanje deponijskog gasa, koristeći sledeći izraz:

$$V_{a,i+1,rez} = V_{a,i+1} - V_{ak}(\omega_{i+1} - \omega_i) \quad (6.22)$$

gde je:

- $V_{a,i+1,rez}$ - rezultujuća akumulirana vlaga u deponiji tokom i+1-og meseca [mm/mes]
- V_{ak} - zapremina akumulacionih rezervoara [m^3 ; mm/ m^2 deponije]
- ω_i, ω_{i+1} - stepen ispunjenosti akumulacionih rezervoara u i-tom, i+1-om mesecu [-]

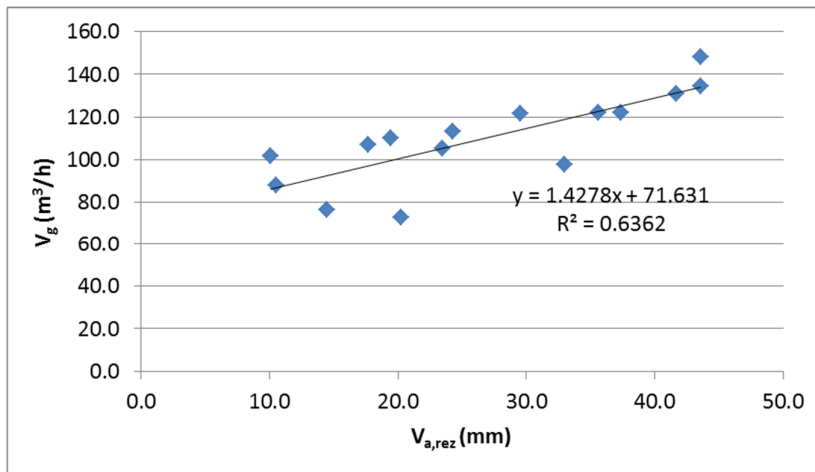
Vrednosti ω_i su pretpostavljene tokom meseci kako bi se dobilo najbolje uklapanje proračunskih vrednosti uz minimalna odstupanjima u odnosu na stvarno izmerene vrednosti produkcije deponijskog gasa.

Na osnovu datih formula kojima je opisan model bilansa vlage na deponiji dobijaju se rezultati iskazani po mesecima, koji su prikazani u tabeli 6.2. Vrednosti količina pojedinih parametara dobijenih merenjima i iskazanim u apsolutnim vrednostima (m^3) su deljenjem sa površinom deponije, koja iznosi od 43.795 m^2 , pretvorene u mm/ m^2 , kako bi se nastavio dalji proračun.

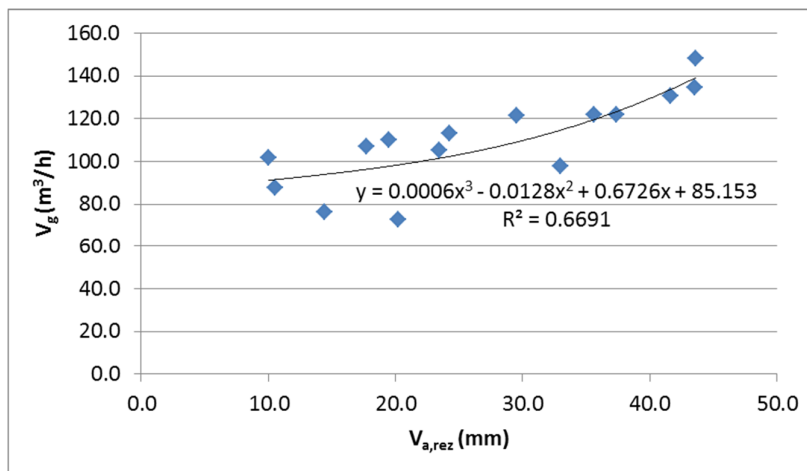
Tabela 6.2 Vrednosti parametara mesečnih bilansa vlage na deponiji

Mesec	V _{pad} (mm)	V _{pv,aps} (m ³)	P _{p,aps} (m ³)	V _{k,aps} (m ³)	V _{rpv,aps} (m ³)	V _{uk,aps} (m ³)	V _{uk} (mm)	ψ _{var} (-)	V _{po} (mm)	V _{rasp1} (mm)	V _{p,z} (mm)	V _{rasp2} (mm)	ETP (mm)	ET (mm)	V _{rasp,uk} (mm)	V _{rez} (mm)	V _a (mm)	ω _{rez} (-)	V _{a,rez} (mm)
Sep-14	109.2	547.0	413.4	133.6	45.4	4961.4	113.3	0.8	36.3	77.0	0	77.0	50.4	50.4	26.6	26.6	14.2	0.5	10.0
Okt-14	56.1	148.9	104.8	44.1	46.9	2547.9	58.2	1.2	26.7	31.5	20	51.5	27.6	27.6	23.9	3.9	14.6	1	10.5
Nov-14	13.0	188.1	140.0	48.1	45.4	662.8	15.1	1.5	8.7	6.5	20	26.5	11.1	11.1	15.4	0.0	10.3	0.5	14.4
Dec-14	76.0	300.5	220.0	80.5	46.9	3455.8	78.9	1.8	55.2	23.7	20	43.7	2.9	2.9	40.8	20.8	24.3	1	20.2
Jan-15	59.2	236.2	178.0	58.2	46.9	2697.8	61.6	1.9	44.5	17.1	20	37.1	2.8	2.8	34.4	14.4	33.3	0.5	37.4
Feb-15	64.9	364.4	231.7	132.7	42.3	3017.4	68.9	1.9	49.6	19.3	20	39.3	3.2	3.2	36.1	16.1	41.1	0.2	43.5
Mar-15	93.4	892.6	589.3	303.3	46.9	4440.7	101.4	1.5	58.1	43.3	20	63.3	16.3	16.3	47.0	27.0	47.7	0.7	43.6
Apr-15	56.8	517.1	368.2	148.9	45.4	2681.8	61.2	1.2	26.9	34.3	20	54.3	36.4	36.4	17.9	0.0	35.9	0	41.7
Maj-15	100.1	311.9	206.6	105.3	46.9	4536.1	103.6	0.8	30.4	73.1	20	93.1	64.7	64.7	28.4	8.4	37.2	0.2	35.6
Jun-15	22.4	229.0	155.3	73.7	45.4	1100.1	25.1	0.7	6.3	18.8	0	18.8	76.8	18.8	0.0	0.0	32.0	0.5	29.5
Jul-15	11.3	374.5	239.1	135.4	46.9	677.2	15.5	0.5	2.7	12.8	0	12.8	91.4	12.8	0.0	0.0	23.5	0.4	24.3
Avg-15	39.4	139.5	87.8	51.7	46.9	1824.1	41.7	0.4	6.4	35.2	0	35.2	88.9	35.2	0.0	0.0	20.3	0.5	19.4
Sep-15	72.8	369.3	234.8	134.5	45.4	3368.2	76.9	0.8	24.8	52.1	0	52.1	50.4	50.4	1.7	1.7	13.6	0	17.7
Okt-15	83.2	488.1	299.2	188.9	46.9	3879.6	88.6	1.2	39.9	48.7	20	68.7	27.6	27.6	41.0	21.0	23.4	0	23.4
Nov-15	86.0	319.2	192.3	126.9	45.4	3938.7	89.9	1.6	53.9	36.1	20	56.1	11.1	11.1	45.0	25.0	41.2	1	32.9

Krivo na slikama 6.11 i 6.12 prikazuju tačke koje predstavljaju presek vrednosti protoka deponijskog gasa dobijenih na bazi aritmetičkog proseka trenutnih očitavanja (y-osa) i vrednosti rezultujuće akumulirane vlage unutar tela deponije (x-osa). Slika 6.11 daje prikaz trend linije sa linearnom zavisnosti, dok slika 6.12 daje trend liniju zavisnosti protoka od rezultujuće akumulirane vlage opisanu polinomom 3. stepena. Dobijene vrednosti srednje kvadratne greške iznose $R^2=0,6362$ i $0,6691$, što pokazuje da sa solidnom pouzdanošću može da se daje predikcija protoka deponijskog gasa koji se prikuplja iz deponije.



Slika 6.11 Linearna kriva zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji



Slika 6.12 Kriva zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji opisana polinomom 3.stepena

Vrednosti protoka dobijenih direktnim merenjima na deponiji i na bazi proračuna, korišćenjem formula generisanih krivih zavisnosti, sa relativnim odstupanjima, dati su u tabeli 6.3. Može se uočiti da prosečna apsolutna vrednost odstupanja po mesecima tokom čitavog perioda u slučaju linearne zavisnosti iznosi 9,4%, dok u slučaju polinoma 3.stepena ona iznosi 10,3%. Kao što se iz tabele može videti, maksimalna odstupanja u slučaju linearne zavisnosti iznose 37,5%, a krive polinova 3.stepena 34,8%, i obe se odnose na decembar 2014. godine. Ako bi se izuzeli meseci septembar, novembar i decembar 2014. godine i novembar 2015. godine, sve ostale vrednosti su sa odstupanjima računskih u odnosu na stvarne vrednosti protoka gasa nižim od 10% ili prosečno 4,2% kod krive linearne zavisnosti i 5,8% kod krive polinoma 3. stepena. Ako se ima u vidu da su vrednosti protoka deponijskog gasa varirale tokom meseci od 73,1 m^3/h u decembru 2014.godine do 148,2 m^3/h u martu 2015. godine, što je razlika od 202%, moglo bi se zaključiti da je dobijena prilično precizna zavisnost. Ovome treba dodati i činjenicu da je tokom vremena neminovno došlo do povećanja protoka deponijskog gasa usled povećanja količina odloženog otpada na deponiji, o čemu je bilo reči u prethodnom odeljku, kao i da postoje i drugi uticajni parametri na produkciju deponijskog gasa.

Razlozi navedenih odstupanja nastojće da se odrede istraživanjem uticaja ostalih parametara kroz dalju analizu, koja će se dodatno sa mesečnog spustiti na dnevni nivo.

Tabela 6.3 Prikaz merenih i računskih vrednosti protoka deponijskog gasa sa odstupanjima

Mesec	$V_{a,rez}$ (mm)	$V_{g,m}$ (Nm ³ /h)	$y=1,4278+71,631$			$Y=0,0006x^3-0,0128x^2+0,6726+85,153$		
			$V_{g,r}$ (Nm ³ /h)	Ψ_g (%)	$ \Psi_g $ (%)	$V_{g,r}$ (Nm ³ /h)	Ψ_g (%)	$ \Psi_g $ (%)
Sep-14	10.0	101.8	86.0	-15.6%	15.6%	91.2	-10.4%	10.4%
Oct-14	10.5	87.9	86.6	-1.4%	1.4%	91.5	4.1%	4.1%
Nov-14	14.4	76.6	92.2	20.4%	20.4%	94.0	22.7%	22.7%
Dec-14	20.2	73.1	100.5	37.5%	37.5%	98.5	34.8%	34.8%
Jan-15	37.4	122.0	125.0	2.5%	2.5%	123.8	1.5%	1.5%
Feb-15	43.5	134.5	133.8	-0.5%	0.5%	139.7	3.9%	3.9%
Mar-15	43.6	148.2	133.9	-9.6%	9.6%	139.9	-5.6%	5.6%
Apr-15	41.7	130.7	131.1	0.3%	0.3%	134.4	2.8%	2.8%
May-15	35.6	122.1	122.5	0.3%	0.3%	119.9	-1.8%	1.8%
Jun-15	29.5	121.5	113.8	-6.3%	6.3%	109.3	-10.0%	10.0%
Jul-15	24.3	113.3	106.3	-6.2%	6.2%	102.5	-9.5%	9.5%
Aug-15	19.4	110.2	99.4	-9.8%	9.8%	97.8	-11.2%	11.2%
Sep-15	17.7	107.1	96.9	-9.6%	9.6%	96.4	-10.0%	10.0%
Oct-15	23.4	105.3	105.1	-0.2%	0.2%	101.6	-3.5%	3.5%
Nov-15	32.9	97.7	118.7	21.5%	21.5%	114.9	17.6%	17.6%
Prosek	27.0	110.1	110.1	-	9.4%	110.9	-	10.3%

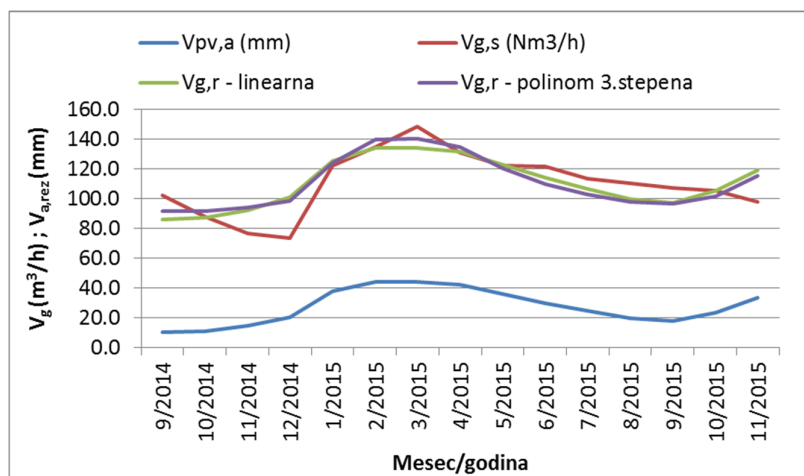
$V_{g,m}$ - protok deponijskog gasa na bazi mesečnog proseka dobijenog merenjima trenutnih vrednosti [m³/h]

$V_{g,r}$ - protok deponijskog gasa na bazi proračuna [m³/h]

Ψ_g - relativno odstupanje proračunske vrednosti produkcije deponijskog gasa u odnosu na merenja [-]

$|\Psi_g|$ - apsolutna vrednost relativnog odstupanja proračunske vrednosti u odnosu na merenja [-]

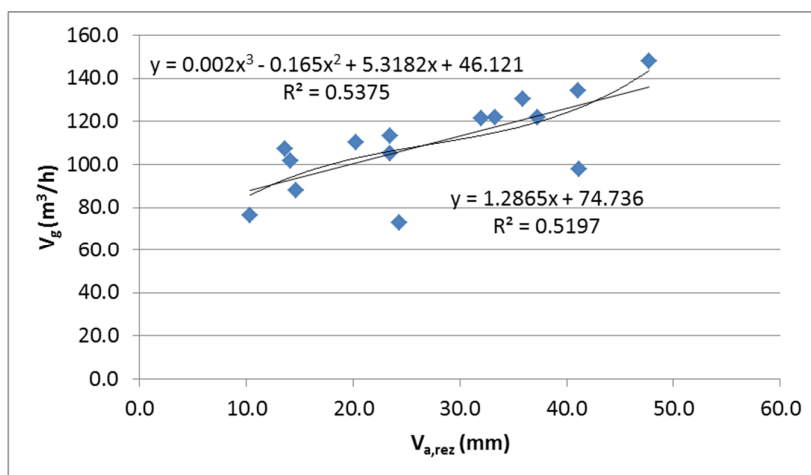
Na slici 6.13 su prikazane krive koje opisuju promene rezultujuće akumulirane vlage na deponiji i produkcije deponijskog gasa. Poređenjem krivih dobijenih merenjima i proračunom mogu se zapaziti manja odstupanja.



Slika 6.13 Uporedna promena protoka gasa i rezultatne vlage akumulirane na deponiji u periodu od septembra 2014 do aprila 2015. godine

S obzirom da je vrednost ω_{rez} pretpostavljena tako da se dobiju najmanja odstupanja sa najvećim uklapanjem proračunske i stvarne krive produkcije deponijskog gasa, interesantno je videti koliki zapravo može da bude uticaj akumulacije na protok i produkciju deponijskog gasa. Slika 6.14 prikazuje tačke preseka protoka deponijskog gasa mesečnih proseka na bazi merenja i rezultujuće akumulirane vlage za slučaj da je $\omega_{rez} = 0$, što bi značilo da je zanemaren uticaj akumulacije procedne vode van tela deponije. Na istoj slici prikazane su i krive trenda sa pratećim formulama i odstupanjima,

izražene kroz linearnu zavisnost i preko polinoma 3. stepena. Kao što se može videti, u slučaju linearne krive dobija se zavisnost sa malim razlikama u vrednosti nagiba krive i sloBPKnog člana, dok su odstupanja tačaka od rezultujuće krive nešto veća, što se vidi iz niže vrednosti R^2 . U tabeli 6.4 koja daje prikaz vrednosti protoka deponijskog gasa dobijenih merenjima i na bazi proračuna korišćenjem formula krivih zavisnosti dobija se da prosečne apsolutne vrednosti odstupanja po mesecima tokom predmetnog perioda iznose 11,0% i 11,4%, u slučaju krive linearne zavisnosti i polinoma 3.stepena. Kao što se može videti, odstupanje, odnosno osetljivost na dobijene rezultate, je malo kada se radi o količinama akumulirane procedne vode van otpada, bilo da se ona naliza u akumulacionim rezervoarima ili u drenažnom sloju deponije.



Slika 6.14 Krive zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji (pri $\omega_{rez} = 0$)

Tabela 6.4 Prikaz merenih i računskih vrednosti protoka deponijskog gasa sa odstupanjima ($\omega_{rez} = 0$)

Mesec	$V_{pv,a}$ (mm)	$V_{g,s}$ (Nm ³ /h)	$y = 1,2865x + 74,736$			$y = 0,002x^3 - 0,165x^2 + 5,3182x + 46,121$		
			$V_{g,r}$ (Nm ³ /h)	Ψ_g (%)	$I\Psi_{g,l}$ (%)	$V_{g,r}$ (Nm ³ /h)	Ψ_g (%)	$I\Psi_{g,l}$ (%)
Sep-14	14.2	101.8	93.0	-8.7%	8.7%	94.0	-7.7%	7.7%
Oct-14	14.6	87.9	93.5	6.5%	6.5%	94.9	7.9%	7.9%
Nov-14	10.3	76.6	88.0	14.9%	14.9%	85.7	11.8%	11.8%
Dec-14	24.3	73.1	106.0	45.1%	45.1%	106.6	45.9%	45.9%
Jan-15	33.3	122.0	117.6	-3.6%	3.6%	114.1	-6.5%	6.5%
Feb-15	41.1	134.5	127.6	-5.1%	5.1%	124.8	-7.2%	7.2%
Mar-15	47.7	148.2	136.1	-8.1%	8.1%	141.5	-4.5%	4.5%
Apr-15	35.9	130.7	120.9	-7.4%	7.4%	116.9	-10.5%	10.5%
May-15	37.2	122.1	122.6	0.5%	0.5%	118.6	-2.8%	2.8%
Jun-15	32.0	121.5	115.9	-4.6%	4.6%	112.9	-7.1%	7.1%
Jul-15	23.5	113.3	104.9	-7.4%	7.4%	105.9	-6.5%	6.5%
Aug-15	20.3	110.2	100.8	-8.5%	8.5%	102.8	-6.7%	6.7%
Sep-15	13.6	107.1	92.2	-13.9%	13.9%	92.9	-13.3%	13.3%
Oct-15	23.4	105.3	104.9	-0.4%	0.4%	105.9	0.6%	0.6%
Nov-15	41.2	97.7	127.7	30.7%	30.7%	125.0	27.9%	27.9%
Prosek	27.5	110.1	110.1	-	11.0%	110.1	-	11.4%

Naravno, osnovna namena rezervoara jeste da prihvati višak generisane procedne vode sa deponije u slučaju velike količine padavina, koja ne bi stigla tako brzo da se tretira u postrojenju za prečišćavanje. Njegova uloga je baferska, kako bi se smanjio potreban kapacitet, a samim tim i investicija, u postrojenje za prečišćavanje. Kao što je ranije rečeno, prihvatanje i čuvanje procedne vode

u rezervoarima se u praksi koristi radi aeracije, kao i mešanja sa organski čistom vodom koja se tu sliva prilikom pranja automobile, sa ciljem da se HPK vrednosti procedne vode smanji u što većoj meri radi lakšeg i jeftinijeg tretmana u postrojenju za prečišćavanje. Naravno, iz ugla produkcije deponijskog gasa, u slučaju da se želi povećanje protoka, bolje je da se rezervoar manje koristi za prihvatanje i čuvanje procedne vode, a da se ona u većoj meri recirkulacijom vraća na deponiju, o čemu će biti više reči kasnije.

6.2.2 Uticaj dnevnih padavina na vlažnost otpada i produkciju deponijskog gasa

Dosašnji rezultati uporedne analize akumulirane vlage na deponiji i produkcije deponijskog gasa sa uprosječnim vrednostima na mesečnim nivou pokazali su očekivane rezultate. Dobijene krive zavisnosti mogu svakako da budu od pomoći u predikcijama protoka po mesecima s obzirom na vrednosti padavina koje se mogu očekivati na bazi istorijskih proseka, što za neku grublju analizu može da bude korisno za srednjeročno planiranje proizvodnje u budućem postrojenju koje koristi jednu od tehnologija energetskog iskorišćenja opisanih u ovom radu. Međutim, ako pogledamo promenu krivu protoka deponijskog gasa, može zapaziti značajne oscilacije i nagle promene tokom vremena. Da bi se bolje razumele ove promene, uticaj vlage, ali i uticaji drugih relevantnih parametara, dalja analiza će se sa prosečnih mesečnih vrednosti spustiti na nivo dnevnih promena, s obzirom na raspoložive vrednosti dobijene merenjima. Osim toga, ovo je jedini način da se odredi inertnost samog procesa generisanja deponijskog gasa na deponiji nakon unoše „poremećaja“. Na kraju, veće poznavanje ovog procesa omogućiće bolje upravljanje otpadom na deponiji i planiranje procesa proizvodnje deponijskog gasa u kraćim vremenskim periodima, što će rezultovati bolje usklađivanje rada, a samim tim i veću efikasnost rada energetskog postrojenja.

Očekivanja su da kreirani model bilansa vlage na deponiji može da posluži praćenjima na dnevnom nivou. Samim tim urađen je identičan bilans vlage, samo što su korišćene vrednosti dobijene merenjima po danima, umesto dosada razmatranih sumarnih i uprosječnih mesečnih vrednosti. Za izračunavanje protoka deponijskog gasa korišćena je formula opisane linearnom zavisnosti protoka od rezultujuće akumulirane vlage. Ovako dobijene vrednosti poređene su sa izmerenim vrednostima protoka deponijskog gasa. Analize koje slede prate odstupanja računskih od izmerenih vrednosti uz nalaženje mogućih logičkih objašnjenja uzimajući u obzir relevantne uticajne parametre.

Očitavanja parametara deponijskog gasa na baklji su vršena u različitim i nejednakim vremenskim intervalima u rasponu od jednog dana do čak nekoliko nedelja. S obzirom na relativno učestale i skokovite promene trenutnih vrednosti protoka deponijskog gasa, promene protoka u intervalima između dva uzastopna merenja se ne mogu precizno opisati, kakav je nagib krive i da li ona ima istu tendenciju kada je reč o rastu, odnosno padu. O razlikama i potencijalnim greškama je već bilo reči. Da bi se uporedna analiza izvela sa većom preciznošću posmatrane krive mogućih protoka deponijskog gasa na dnevnom nivou rađenih po dve metode.

Kada je u pitanju prva metoda vrednosti protoka na dnevnom nivou su usvojeni na sledeći način:

- U danima kada je obavljano očitavanje trenutnih vrednosti protoka usvojena vrednost protoka predstavlja aritmetičku vrednost svih očitavanja u toku dana;
- U danima kada nije bilo očitavanja usvojena vrednost zavisi od toga da li je u periodu između dva susedna očitavanja bilo padavina ili ne. Ako nije bilo padavina logično je da protok gasa blago pada zbog gubitaka vlage usled evapotranspiracije na dnevnom nivou, dok u suprotnom raste. Ovom logikom se usvaja vrednost prethodnog ili narednog merenja.
- Kada su u pitanju duži vremenski intervali između dva merenja vršena je interpolacija podataka po danima na bazi vrednosti protoka deponijskog gasa između dva merenja. Ovo daje samo uprošćen približan, a ne i precizan prikaz, u slučajevima kada je bilo padavina u posmatranim

vremenskim intervalima. Nepoznanica je, naravno, da li je tokom ovih intervala dolazilo do promene pravca krive (rast i pad protoka gasa).

Za izračunavanje protoka deponijskog gasa po drugoj metodi koristi se sledeći izraz:

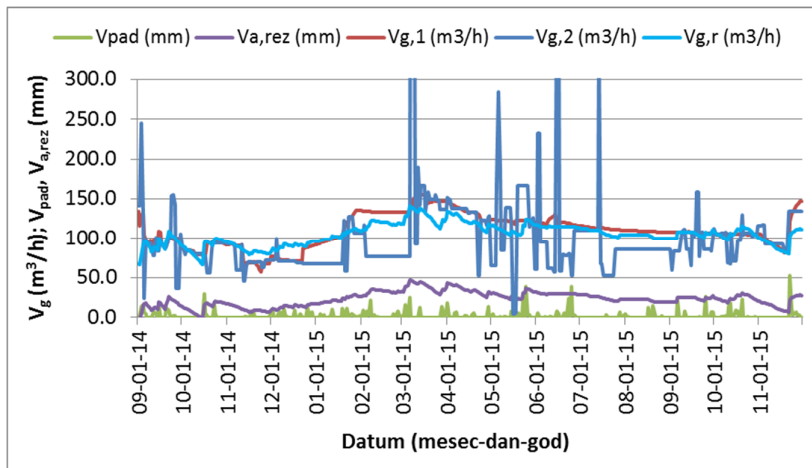
$$V_g = \frac{G_{g,d} - G_{g,d-1}}{T} \quad (6.23)$$

gde je:

- V_g - protok deponijskog gasa [m^3/h]
- T - proteklo vreme između dva uzastopna merenja [h]
- $G_{g,d}$ - ukupna količina sagorelog deponijskog gasa između dva uzastopna merenja [m^3]

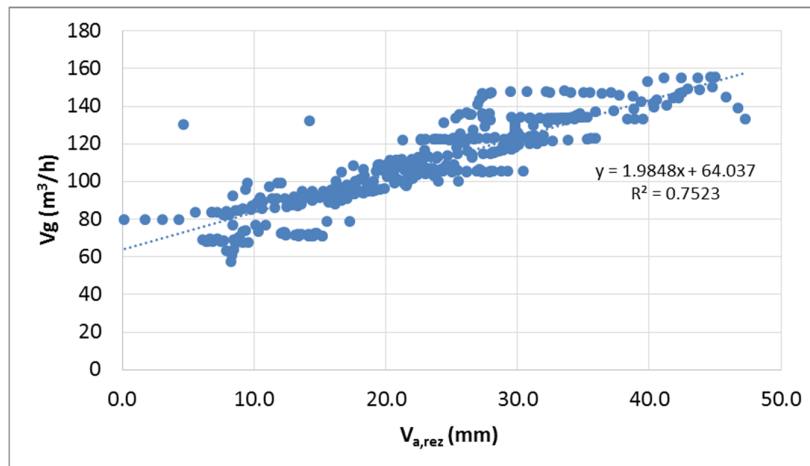
Na slici 6.15 se mogu videti krive protoka deponijskog gasa na bazi merenja, za svaku od primenjene metode ($V_{g,1}$ i $V_{g,2}$), kriva protoka na bazi proračuna ($V_{g,r}$), kriva padavina (V_{pad}) i rezultujuće akumulirane vlage ($V_{a,\text{rez}}$). Na prvi pogled je uočljivo je da su krive $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$ bliske sa veoma malim odstupanjima. Kriva $V_{g,2}$ pokazuje znatno veće oscilacije i odstupanja, tako da će se dalja analiza najviše bazirati na vrednostima protoka dobijenim primenom prve metode. Ekstremi krive $V_{g,2}$ mogu da ukažu na periode sa dužim zastojsima u radu baklje zbog čega je prosečna vrednost protoka sagorelog deponijskog gasa bila niska, kao npr. tokom februara 2015. godine, dok ekstremi mogu da budu posledica nagomilanih količina deponijskih gasova tokom zastoja rada baklje, s obzirom da kriva pokazuje da se javljaju nakon perioda. Kada u dužem vremenskom periodu nemamo trenutnih očitavanja protoka može da bude od značaja i uporedna analiza vrednosti sa krive $V_{g,2}$.

Kada su u pitanju padavine i akumulirana vlaga na deponiji uočljiv je rast krive $V_{a,\text{rez}}$ nakon perioda sa učestalijim padavinama. Obrnuto, tokom perioda sa manje padavina primetan je pad krive. Naravno, kao što bilans vlage pokazuje, a vidi se i sa slike 6.15 padavine nisu jedine merodavne za proračun rezultujuće vlage. Takođe se vidi da ima perioda kada kriva $V_{a,\text{rez}}$ ne raste, čak i opada, nakon obimnijih padavina u u drugoj polovini juna 2015. godine, što je takođe praćeno i padom protoka deponijskog gasa prikazanog na krivoj $V_{g,1}$.



Slika 6.15 Uporedni prikaz vrednosti protoka deponijskog gasa, padavina i rezultujuće akumulirane vlage

Na slici 6.16 su prikazane tačke sa vrednostima protoka na bazi merenja po prvog metodi i akumulirane vlage na deponiji po danima tokom analiziranog vremenskog perioda opisane krivom linearne zavisnosti.



Slika 6.16 Linearna kriva zavisnosti protoka deponijskog gasa od akumulirane vlage na deponiji

Tabela 6.5 daje prikaz prosečnih odstupanja na mesečnom nivou, dobijenih na bazi aritmetičkih proseka dnevnih vrednosti na bazi merenja po prvoj metodi i proračuna. Kao što se vidi i na slici 6.16 i tabeli 6.4, odstupanja od linije trenda su znatno manja u odnosu na krive dobijene na bazi mesečnih vrednosti (slika 6.13).

Tabela 6.5 Vrednosti protoka deponijskog gasa po mesecima na bazi podataka dobijenih na dnevnom nivou

Mesec/god	9/14	10/14	11/14	12/14	1/15	2/15	3/15	4/15	5/15	6/15	7/15	8/15	9/15	10/15	11/15	Prosek
$V_{g,1}$ (m ³ /h)	102	88	76	77	109	134	145	134	122	121	113	109	107	105	106	110
$V_{g,r}$ (m ³ /h)	92	88	86	91	104	118	128	122	113	115	107	103	105	107	96	105
ψ_g (%)	-9	1	13	17	-5	-11	-12	-9	-8	-5	-5	-6	-2	2	-10	-3
$ \psi_g $ (%)	9	1	13	17	5	11	12	9	8	5	5	6	2	2	10	8

S obzirom da trenutne padavine predstavljaju znatno veću količinu vlage u jedinici vremena u odnosu na dnevne proseke koji bi se dobili na bazi vrednosti mesečnih količina padavina, očekivanja su da nakon obilnijih padavina dolazi do značajnijih povećanja vlažnosti otpada što bi trebalo da rezultuje izraženim trenutnim povećanjima protoka generisanog deponijskog gasa.

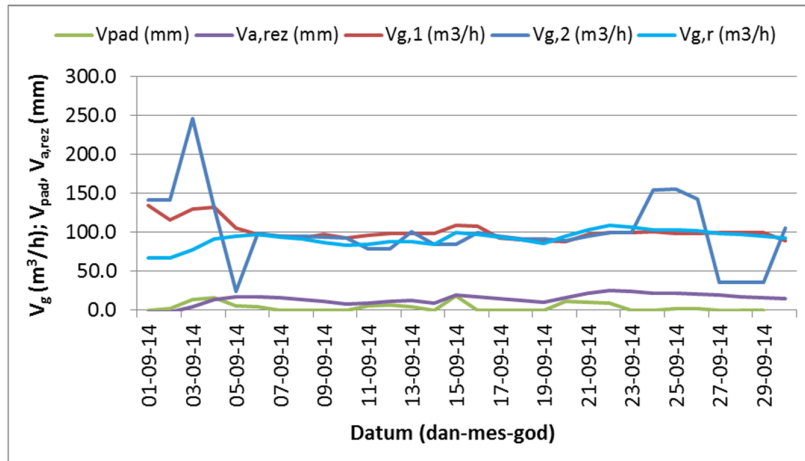
6.2.3 Analiza rezultata dijagrama na dnevnom nivou

Na slici 6.17 koja prikazuje krive promene protoka, padavina i akumulirane vlage na deponiji mogu se jasno uočiti sledeće stvari:

- Kriva $V_{g,r}$ u značajno meri poklapa sa krivom $V_{g,1}$. Dobijene vrednosti su gotovo identične tokom dužeg vremenskog perioda u toku meseca.
- Najveće razlike između krivih $V_{g,r}$ i $V_{g,1}$ su na početku meseca, što predstavlja i početak merenja na sistemu nakon puštaja baklje u rad. O ovom uticaju će biti više reči nešto kasnije.
- Promene krivih $V_{g,r}$ i $V_{g,1}$ se prate međusobno na gotovo svim prelazima. Sa slike se jasno može videti da padavine utiču na povećanje na krivoj $V_{a,rez}$, što je praćeno brzom reakcijom deponije na povećanje protoka deponijskog gasa iskazano kroz vrednosti krive $V_{g,1}$. Ovo je naročito uočljivo u danima 03-04.09, 11.09, 15.09 i 20-22.09. Samo ovaj period posmatranja je dovoljan da se

izvede zaključci o uticaju padavina i vlage na produkciju deponijskog gasa, dok dobra uklapanja navedenih krivih samo potvrđuju dobijenu numeričku zavisnost.

- Kriva $V_{g,2}$ takođe pokazuje dobro poklapanje sa vrednostima $V_{g,1}$, odnosno $V_{g,r}$, osim u periodima naglog rasta i pada, gde se očigledno radi o privremenim prekidima rada baklje i gde su dobijene vrednosti nerealne i neočekivane, kada je reč o padavinama, naročito u periodu 24-26.09. kada je zabeležen nagli rast, dok je 27-29.09. isto tako zabeležen nagli pad, dok u čitavom periodu gotovo da nije bilo padavina.

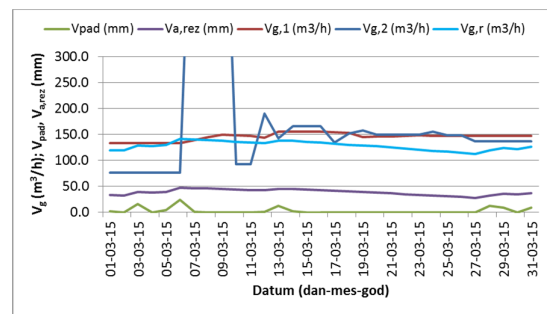
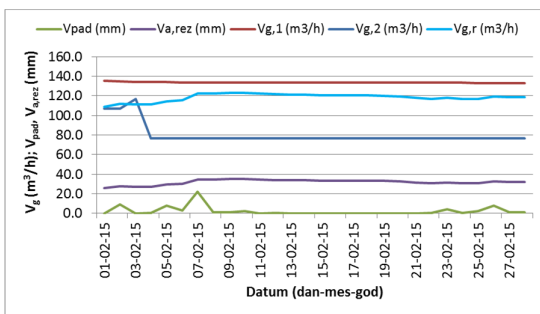
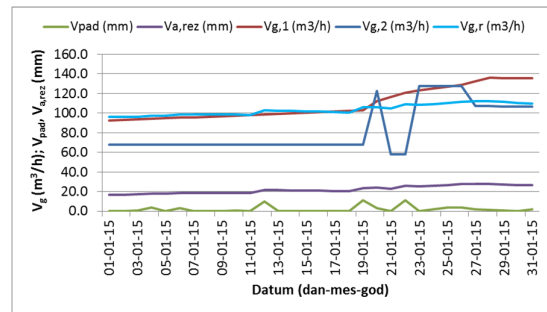
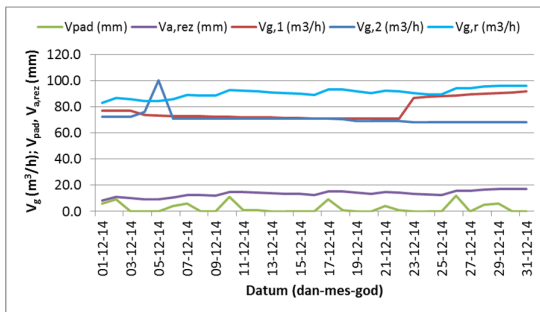
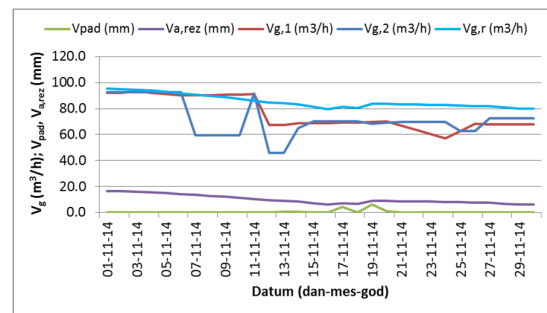
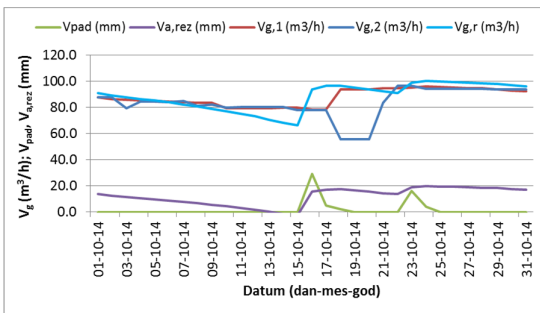


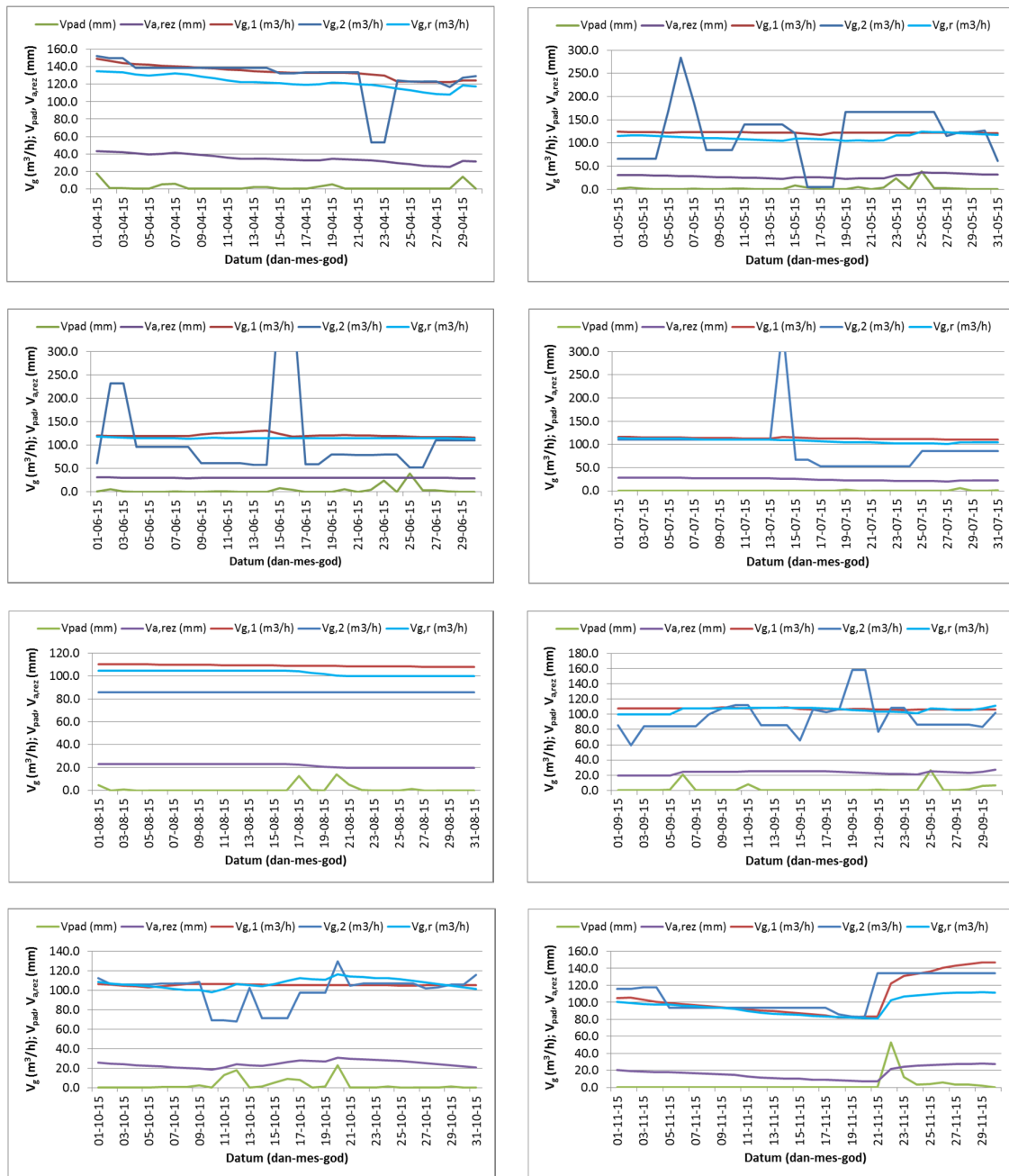
Slika 6.17 Uporedni prikaz promene protoka, padavina i akumulirane vlage tokom septembra 2014. godine

Na slici 6.18 je dat uporedni prikaz krivih promene protoka deponijskog gasa, padavina i rezultujuće akumulirane vlage po mesecima tokom čitavog posmatranog perioda, gde se mogu uočiti iste ove promene uz nešto veća ili manja odstupanja $V_{g,r}$ u odnosu na $V_{g,1}$, ali u relativno uskim granicama. Ovaj period može se ukratko opisati sledećim zapažanjima:

- Nakon obilnih padavina od 29 mm 16.10.2014. godine i dodatnih 5 mm narednog dana protok gasa je 17.10.2014. godine u 14:30 h i dalje bio na istom nivou. Sledeće očitavanje protoka je bilo 20.10.2014. godine kada je zabeležen skok sa prethodnih 78,4 na 93,8 m³/h. Pretpostavlja se da je brzo nakon merenja 17.10. došlo do porasta protoka, ali ovo ipak predstavlja izvesno kašnjenje.
- Od 12.11.2014. godine zabeležen je nagli pad krive protoka deponijskog gasa dobijene merenjima. Ovaj pad je očigledan na obe krive $V_{g,1}$ i $V_{g,2}$, što nije očekivano s obzirom na bilans vlage i dolazi do odstupanja sa krivom $V_{g,r}$. Trend ovako niskih protoka nastavlja se do 12.12.2014. godine, da bi nakon toga došlo do naglog porasta i izjednačavanja sa numerički dobijenom vrednosti. Dodatni kratkotrajni pad protoka deponijskog gasa u ovom periodu zabeležen je 24.11.2014. godine sa prethodne vrednosti 70,3 na 57,3 m³/h, da bi narednog dana opet porastao na 68,4 m³/h. Ovaj protok predstavlja najnižu vrednost tokom čitavog posmatranog perioda. Očigledno je da ovako pogoršanje protoka nema veze sa vlagom, tako da će se ovom fenomenu posvetiti posebna pažnja u narednom odeljku kroz uporednu analizu promene vrednosti drugih uticajnih parametara.
- U periodu od 23.12.2014 do 19.01.2015. godine krive $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$ se u značajnom meri preklapaju, da bi nakon ovog perioda kriva $V_{g,1}$ krenula značajno da raste u odnosu na $V_{g,r}$. Kriva $V_{g,2}$ je sa dosta nižim vrednostima od druge dve krive sve do početka marta 2015. godine, da bi od sredine marta do kraja aprila pratila krivu $V_{g,1}$, što bi moglo da govori da je baklja bila u neprekidnom radu.
- Od početka februara do 23.05.2015. godine krive $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$ idu gotovo paralelno sa manjim ili većim odstupanjima, pri čemu kriva $V_{g,r}$ pokazuje niže vrednosti, koje se navedenog datuma gotovo izjednačavaju i ostaju jednake do kraja meseca jula 2015. godine.

- Period od juna do oktobra karakteriše mnogo manje padavina, te uz veće evapotranspiracije nivo rezultujuće akumulirane vlage opada, pa samim tim i produkcija deponijskog gasa. Padavine tokom ovog perioda ne utiču u značajnoj meri na $V_{a,rez}$ pa samim tim i na povećanje protoka gasa.
- U avgustu dolazi do nešto većih odstupanja između krivih $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$ koje i dalje prati isti trend promena, da bi se taj trend uz mala odstupanja u vrednostima krivih nastavio do kraja septembra.
- U oktobru dolazi do izvesnih odstupanja krive $V_{g,1}$, koja beleži male promene, i krive $V_{g,r}$, da bi se one ponovo preklepile početkom novembra 2015. godine i sa istom tendencijom pada i vrednostima ostale do 21.11.2015. godine. Nakon obilnih padavina od 52,5 mm 22.11.2015. godine, odnosno ukupno 86 mm u periodu od 22 do 29.11.2015. godine zabeležen je skok protok gasa na baklji sa 83,2 na 146,7 m^3/h , što je bilo i očekivano iz ugla akumulirane vlage, ali ne u ovolikoj meri, tako da su se krive $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$ ponovo malo razdvojile. Krive $V_{g,1}$ i $V_{g,2}$ imaju sličnu tendenciju rasta. S obzirom da u periodu od 20-30.11.2015. godine nisu rađena očitavanja na baklji intenzitet rasta krive je usklađen proporcionalno vrednosti padavina u ovom periodu.





Slika 6.18 Uporedni prikaz promene protoka, padavina i akumulirane vlage po mesecima u periodu od oktobra 2014 do novembra 2015. godine

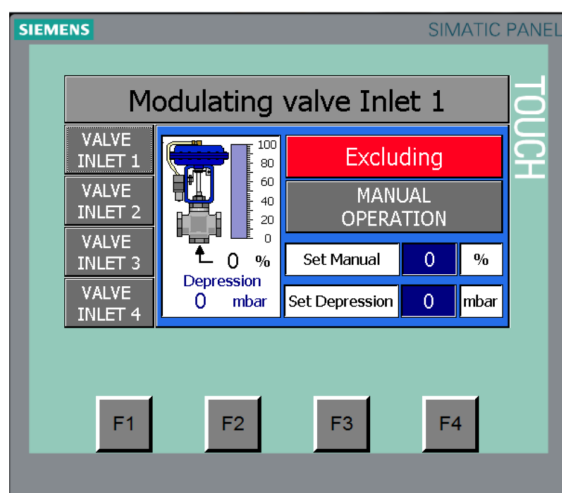
Na osnovu dosadašnje analize može se zaključiti da model dobijen bilansiranjem vlage na deponiji uz korišćenje izmerenih vrednosti padavina, protoka procedne vode i koncentrata, kao i protoka deponijskog gasa koji se odvodi iz deponije, pokazuje visoku tačnost kada je reč o zavisnosti protoka deponijskog gasa od priliva vlage na deponiju. Dobijeni rezultati daju dobru osnovu za njegovo dalje korišćenje u cilju predikcije količina produkovanog deponijskog gasa simuliranjem različitih priliva vlage na deponiju. To daje dobru osnovu za dalje istraživanje potencijalnog uticaja recirkulacije procedne vode na deponiju umesto slanja u postrojenje za prečišćavanje.

Kako bi se bolje objasnile pojedine nelogičnosti i neočekivane promene u stopi produkcije deponijskog gasa, dalji rad će se bazirati na analizi potencijalnih uticaja drugih relevantnih parametara

koji mogu da izazovu iole značajnije promene. Pritom će se nastojati da se uticaj posmatranih parametara izoluje od drugih, kako jedni druge svojim dejstvom ne bi potirali. Ovo se omogućuje izborom adekvatnih vremenskih intervala za koje postoje merenja i u kojima postoji dominantni poremećaj posmatranog uticajnog parametra.

6.3 Uticaj potpritiska na karakteristike deponijskog gasa

U ovom odeljku analiziraće se uticaj potpritiska u sistemu za prikupljanje i sagorevanje deponijskog gasa na njegov protok i sastav. Posmatraće se dani u kojima dolazi do promene u stepenu otvorenosti ventila koji se nalaze na glavnom kolektoru na usisu deponijskog gasa. Preko ugrađene automatike korisnik ima mogućnost ručnog zadavanja stepena otvorenosti ventila, ili potpritiska gasa na usisu, s obzirom da su ventili upravljani motornim pogonom, kao što se može videti na slici 6.19. Stepenu otvorenosti ventila ima direktan uticaj na potpritisk, odnosno vakuum, u cevovodu, preko kojeg se ostvaruje direktno usisavanje gasa iz deponije preko ugrađenih biotrnova. Što je veći stepen otvorenosti ventila na kolektoru, veći je i potpritisk na usisu, pa samim tim i protok deponijskog gasa, i obrnuto. Sa druge strane, imamo sam anaerobni proces unutar deponije, uz uslove, koji više ili manje pogoduju produkciji deponijskog gasa, pa samim tim rezultuju i generisanim količinama. Intenzitet vakuuma u sistemu treba da se održava da bude u skladu sa generisanim količinama deponijskog gasa kako bi se postiglo tzv. stacionarno stanje, koje podrazumeva da se odvodi ona količina gasa koju deponija zaista proizvede prirodnim putem.



Slika 6.19 Izgled display-a na kojem korisnik vrši podešavanje otvorenosti ventila ili vakuuma (Uputstvo za korišćenje touch panela na baklji)

Najbolji pokazatelj da je vakuum odgovarajući jeste izmerena minimalna koncentracija kiseonika (O_2) u deponijskom gasu, koja u anaerobnim uslovima rada deponije treba da bude jednaka nuli. Porast vrednosti O_2 koncentracije u deponijskom gasu često može da bude pokazatelj da je vakuum veći od idealne vrednosti i da se crpi veća količina gasova nego što deponija proizvede. Veći vakuum dovodi do usisavanja spoljašnjeg vazduha u sistem. Ovo se najpre dešava na biotrnovima gde je najveći potpritisk, odnosno gde ventili nisu adekvatno regulisani tj. u dovoljnoj meri pritvoreni, kao i na onim biotrnovima gde je visina i poroznost prekrivnog sloja zemlje najmanja, pa je samim tim veća propustljivost atmosferskog vazduha. Ovakav slučaj može se uočiti u tabeli 4.2 gde se vidi pad koncentracije metana na biotrn B-14 na 37,4%, izmerena dana 12.10.2015. U isto vreme, koncentracija O_2 je iznosila čak 5,5%. Da je najverovatnije u pitanju privremeni poremećaj govori podatak da je prosečna koncentracija

metana u periodu od 04-08.12.2015. godine iznosila 63,1%, te da je na ovom nivou bila i 24.02.2016. godine.

Sa druge strane, u slučaju da deponija proizvodi veću količinu deponijskog gasa nego što se odvede, što bi se desilo da je vakuum manji od idealne vrednosti, može da dođe do „curenja“ deponijskog gasa kroz telo deponije u spoljašnju sredinu, smanjujući efikasnost njegovog prikupljanja, ili u gorem slučaju do stvaranja „džepova“ i skupljanja unutar deponije, što bi moglo da poveća opasnost od eksplozije i požara.

Dakle, upravljanje procesom prikupljanja deponijskog gasa na predmetnoj deponiji se trenutno rešava tako da se mora pratiti stopa produkcije i, shodno tome reagovati podešavanjem većeg ili manjeg stepena otvorenosti ventila, odnosno vakuuma, čime se postiže usklađenost generisanja deponijskog gasa sa radom postrojenja za njegovo prikupljanje. Prikazana promena koncentracije metana usled prisisa vazduha je trenutna i predstavlja direktni uticaj. Međutim, postoji i indirektni uticaj, koji se ogleda u tome da usled usisa spoljašnjeg vazduha unutar otpada na deponiji dolazi do slabije produkcije metana zbog poremećaja anaerobnog procesa i potrebe da se prvo utroši prispela količina kiseonika na deponiji, što predstavlja poremećaj koji ima određenu inertnost.

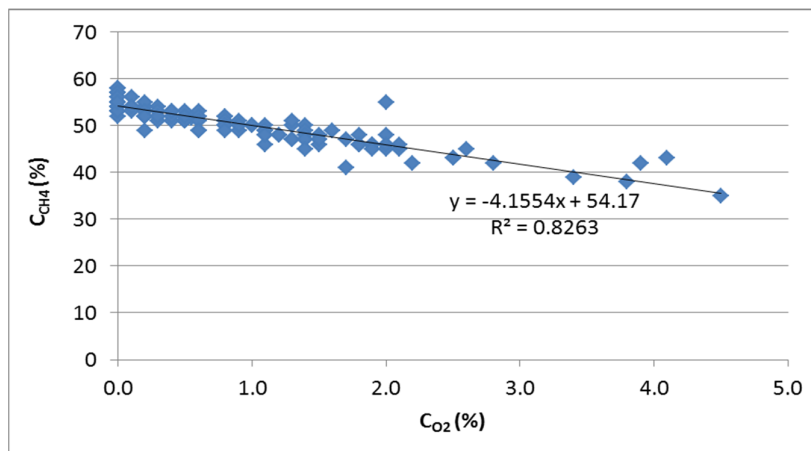
Slika 6.20 upravo pokazuje zavisnost koncentracija metana od kiseonika u deponijskom gasu, na osnovu očitavanja merenja na baklji. Kao što se može videti, zavisnost se sa visokom tačnošću može opisati pravom linijom. Dobijena zavisnost je u potpunoj saglasnosti sa činjenicom da koncentracija kiseonika u vazduhu iznosi 20,95%, odnosno da se proporcionalno unetoj količini kiseonika u sistem unosi i celokupna koncentracija vazduha koju on čini, pa se za taj udeo smanjuje i koncentracija metana. Trend linija, koja sa relativno malim odstupanjima ($R^2 = 0,8263$) opisuje zavisnost koncentracije metana od koncentracije kiseonika u deponijskom gasu na bazi merenja, može se opisati korišćenjem sledećeg izraza:

$$C(CH_4) = 54,17 - \frac{C(O_2)}{0,2406} \quad (6.24)$$

gde je:

- $C(CH_4)$ - koncentracija metana u deponijskom gasu [%]
- $C(O_2)$ - koncentracija kiseonika u deponijskom gasu [%]

Osim što usis spoljašnjeg vazduha u sistem dovodi do pada koncentracije metana, dolazi i do pada protoka deponijskog gasa, o čemu je bilo reči ranije (slike 6.6 i 6.7), kada se pokazalo da je kriva promene koncentracije metana u dobroj meri prati promene protoka deponijskog gasa. To znači da uslovi koji pogoduju povećanju koncentracije metana dovode i do generisanja većih količina deponijskog gasa.



Slika 6.20 Zavisnost koncentracije metana od prisustva kiseonika u deponijskom gasu

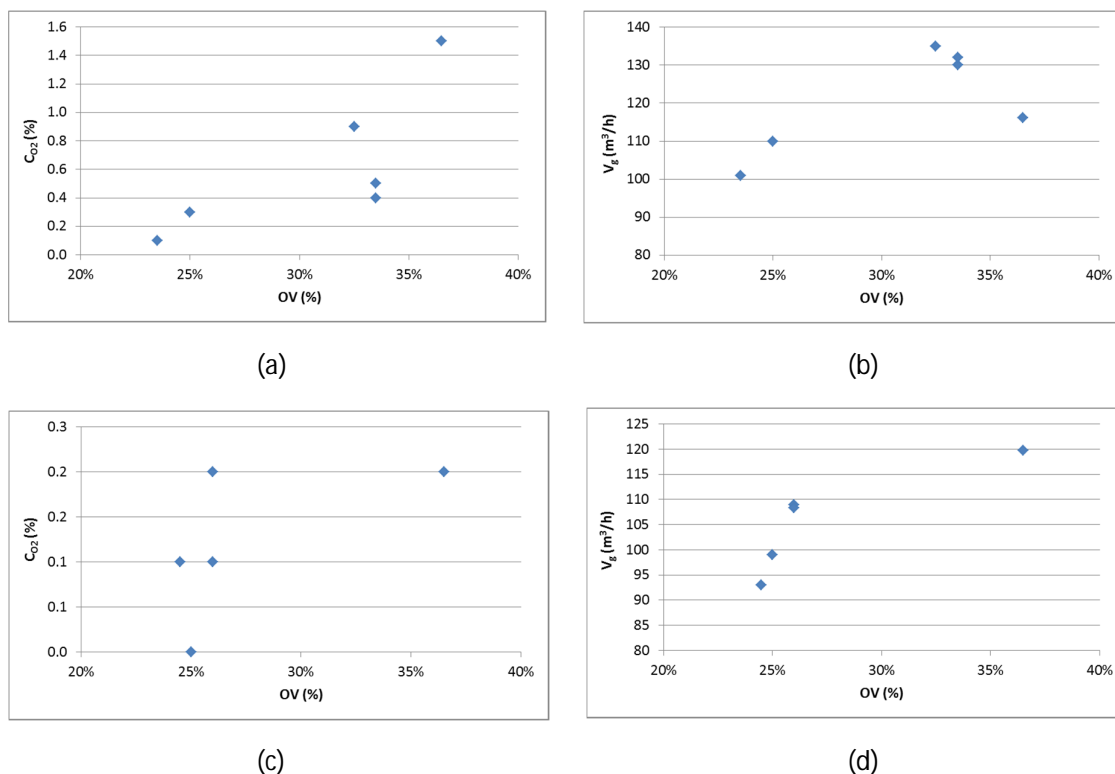
Kada je u pitanju rad sistema za prikupljanje i sagorevanje deponijskog gasa, najviše promena bilo je nakon puštanja u rad postrojenja za sagorevanje. Promene relevantnih parametara, kao što su stepen otvorenosti ventila na kolektoru i vakuuma, su svakako imale za cilj da se utvrde uslovi koji omogućavaju optimalan rada sistema za prikupljanje deponijskog gasa, odnosno usklađenost sa prirodnim procesima generisanja gasa unutar otpada na deponiji.

Uticaj stepena otvorenosti ventila na O_2 koncentraciju i protok deponijskog gasa, koji sagoreva na baklji, upečatljiv je na slici 6.21 (a)-(d). Vremenski periodi obuhvaćeni posmatranjima karakteristični su po promenama stepena otvorenosti ventila. Sve vrednosti koje će se navoditi odnose se na protok deponijskog gasa koji se određuje po prvoj metodi, odnosno predstavlja trenutno izmerene vrednosti protoka na baklji.

Od početka rada baklje, 01.09.2014. godine stepen otvorenosti ventila (OV) je bio 30% i 35%, dok je potpritisak bio 3 i 2 mbara za ventile V_1 i V_4 , respektivno, kroz koje prolazi celokupan protok deponijskog gasa. Dana 02.09.2014. godine OV je povećana na 35% i 38%, za ventile V_1 i V_4 respektivno, dok je potpritisak bio 3 mbara na oba ventila. Ovo je izazvalo povećanje O_2 koncentracije sa 0,9% na 1,5%, praćeno padom CH_4 koncentracije sa 49% na 47%. Smanjenjem OV dana 03.09.2014. godine na 32% i 35%, O_2 koncentracija je opala na 0,4%, uz povećanje CH_4 koncentracije na 51%. Dana 05.09.2014. godine u 8:30 h izvršeno je dalje smanjenje OV na 25%, što je dovelo do dodatnog smanjenja O_2 koncentracije na 0,3% i povećanja CH_4 koncentracije na 52%. Istog dana u 12 h dodatno je smanjena OV na 23% i 24% za ventile V_1 i V_4 , respektivno, što je uticalo na dalje smanjenje O_2 koncentracije na 0,1% i povećanja CH_4 koncentracije na 54%. Kao posledica promena OV podpritisak na ventilima je opadao sa 3 mbara, u periodu od 01-04.09.2014. godine, na 2 mbara, a potom i 1 mbar nakon promena OV izvršenih 05.09.2014. godine. Smanjenje O_2 koncentracije praćeno je i naglim smanjenjem protoka deponijskog gasa, na šta je takođe uticalo smanjenje vakuuma. Tako je protok deponijskog gasa sa početne vrednosti od $135 \text{ m}^3/\text{h}$ opao na $105 \text{ m}^3/\text{h}$, prema merenjima izvršenim 01.09. i 05.09.2014. godine. Uticaj OV na protok deponijskog gasa objašnjava i veliko odstupanje krivih $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$ tokom ovog perioda, što se može videti na slici 6.18.

Dana 15.09.2014. godine izvršen je eksperiment sa praćenjem promene protoka deponijskog gasa nakon izvršenih promena OV. Jedno merenje je izvršeno u 21:50 h, kada je OV povećana sa 25% za oba ventila na 35% i 38%, dok je drugo bilo u 22:10 h, kada je OV smanjena na 25% i 27% za ventile V_1 i V_4 , respektivno. Vrednosti protoka deponijskog gasa bile su $119,7 \text{ m}^3/\text{h}$ prilikom prvog merenja i $108,6 \text{ m}^3/\text{h}$, prilikom drugog merenja, dok je O_2 koncentracija iznosila 0,2% i 0,1%. Sa smanjenjem OV izmereni vakuum je sa 2 i 3 mbara, opao na 1 i 2 mbar na ventilima V_1 i V_4 , respektivno. Ova kratkotrajna promena potpritiska je pokazala da su izazvani poremećaji doveli do značajne promena u protoku deponijskog gasa, kao i da je reakcija u protoku bila brza. Sa druge strane, pokazalo se i da ova

kratkotrajna promena nije dovela do ozbiljnijih i trajnijih posledica na narušavanje O_2 koncentracije i smanjenje protoka deponijskog gasa.

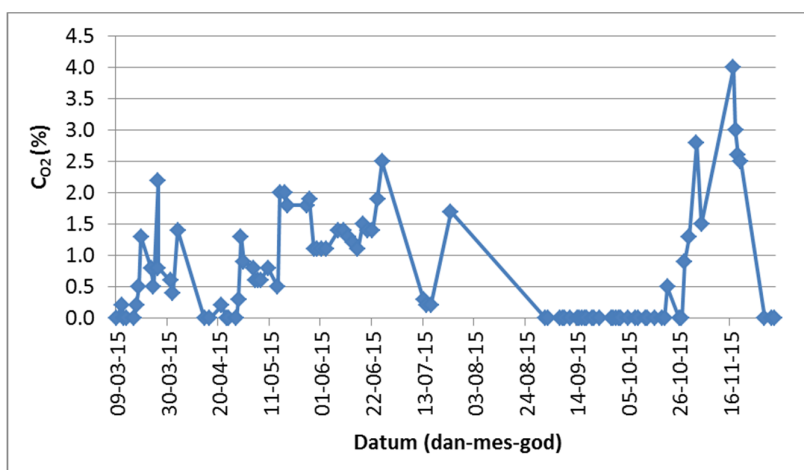


Slika 6.21 Prikaz vrednosti O_2 koncentracije i protoka deponijskog gasa u zavisnosti od OV u periodu 01-05.09.2014. godine (slike a i b) i periodu 12-17.09.2014. godine (slike c i d)

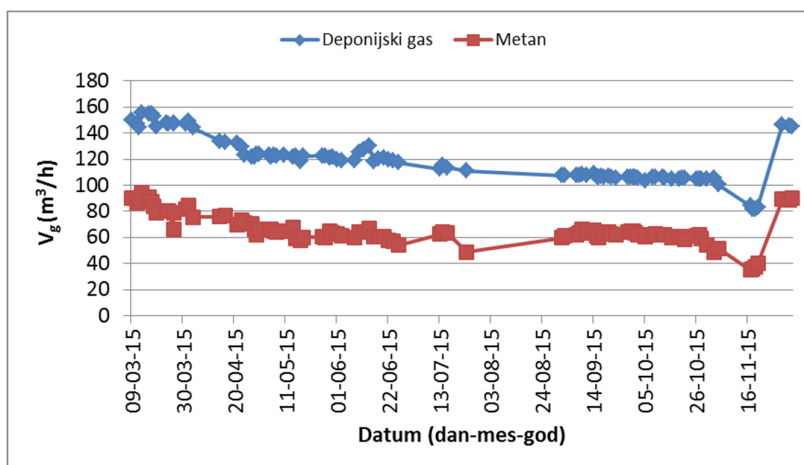
Dana 10.11.2014. godine smanjena je OV u trajanju od 1 h sa 27% i 25% na 22% i 23%, V_1 i V_4 , respektivno. Ovo je dovelo do „popravke“ O_2 koncentracije, čija vrednost je pala sa 2,8% na 0,2%, što je uticalo na povećanje koncentracije metana sa 42% na 52%. Nakon povećanja otvorenosti ventila V_1 na 25%, dok je ventil V_4 ostao sa nepromenljivom otvorenošću od 23% sastav gasa je praktično ostao nepromenjen. Već sledećeg dana se, pri nepromenjenoj otvorenosti ventila, sastav gasa pogoršao time što je O_2 koncentracija porasla na 3,8%, sa smanjenjem udela metana na 38%. Upravo u periodu od 12.11 do 24.12.2014. godine dešava sedrastičan pad protoka deponijskog gasa sa 91.4 m^3/h na 57.3 m^3/h , da bi tek 01.12.2014. godine protok porastao sa 68,1 m^3/h na 76,8 m^3/h . O ovim promenama je bilo reči u prethodnom odeljku, kada je zabeleženo veliko odstupanje krivih $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$. S obzirom da se OV nije menjala, ovaj pad vrednosti treba tražiti kroz drugi potencijalni uticaj koji je doveo do značajnih poremećaja unutar samog anaerobnog procesa na deponiji.

Dana 06.03.2015. godine povećana je OV sa 24% i 26% na ventilima V_1 i V_4 , respektivno, na 30% za oba ventila. Ova promena je uticala na povećanje protoka deponijskog gasa sa 133 na 150,1 m^3/h . Ovo je najviši protok zabeležen u vremenskom periodu obuhvaćenom ovim istraživanjem. Upravo u ovom periodu dolazi i do razdvajanja krivih $V_{g,1}$ i $V_{g,r}$, pri čemu dolazi do povećanja vrednosti krive $V_{g,1}$ u odnosu na krivu $V_{g,r}$, da bi od 25.05.2015. godine ponovo došlo do njihovog preklapanja. Povećanje OV je moglo da utiče na veći protok deponijskog gasa koji se dovodi na baklji radi sagorevanja, ali je ovo svakako praćeno i većom stopom generisanja deponijskog gasa na deponiji, o čemu svedoče i niske O_2 koncentracije tokom marta, kada su protoci bili najveći. S obzirom da OV ostaje nepromenjena do kraja perioda posmatranja, tokom perioda sa manjom stopom produkcije gasa na deponiji dolazilo je do povećanja O_2 koncentracije, što je pokazatelj da je vrednost vakuuma usled veće OV bila veća od „idealne“ vrednosti. Na slici 6.22 se može videti da koncentracija O_2 u značajnoj meri varira tokom

vremena, praćeno u periodu od 09.03 do 04.12.2015. godine, moēe se zakljućiti da vakuum nije izbalansiran kako treba. Slika 6.22 uporedo prati promenu protoka deponijskog gasa i metana u pomenutom vremenskom periodu. Ako se uporede ova dva dijagrama uoćljivo je da koncentracija O₂ ima uticaj na protok deponijskog gasa, ali da nije, sama po sebi, dovoljan podatak za izraćunavanje protoka generisanog deponijskog gasa. Najstabilniji period po pitanju kolićina deponijskog gasa i metana jeste od 01.09 do 27.10.2015. godine kada su vrednosti O₂ koncentracije bile jednake nuli. Kao što je i oćekivano, ovo prate i visoke vrednosti koncentracije metana, koje su se kretale u opsegu od 52% do 57%, sa prosećnom vrednošću od 55%. Zahvaljujući ovako visokim vrednostima koncentracije metana njegov protok je stabilizovan i ne pada u odnosu na prethodni period. Isto se odnosi i na protok deponijskog gasa, koji, za razliku od protoka metana, dostiēe minimalne vrednosti. Porećdenjem dijagrama na slikama 6.22 i 6.23 uoćljivo je da koncentracija O₂ ima trenutni uticaj na protok metana, dok je uticaj na protok deponijskog gasa takoēe primetan, ali manji. Ovo se moēe videti u poremećajima koncentracija O₂ u periodu 26.06. i 24.07.2015. godine, kada je ona iznosila 2,5% i 1,7%, što se manifestovalo izraćenim smanjenjem protoka metana, dok je protok deponijskog gasa ostao gotovo nepromenjen.



Slika 6.22 Promena O₂ koncentracije u deponijskom gasu u periodu 09.03-04.12.2015. godine



Slika 6.23 Promena protoka deponijskog gasa i metana u periodu 09.03-04.12.2015. godine

Dosadašnja razmatranja i analiza govore u prilog činjenici da uticaj vakuuma nije zanemarljiv i da u znaćajnoj meri utiće kako na sastav, tako i na protok deponijskog gasa. Naravno, s obzirom da se generisane kolićine deponijskog gasa menjaju tokom vremena, logićno je da se i idealna vrednost vakuuma menja i prati ove promene. Upravljanje vakuumom treba da bude prateći proces

optimizovanog upravljanja proizvodnjom deponijskog gasa. Dobro upravljanje se postiže stalnim praćenjem stvarno generisanih količina deponijskog gasa, ali još bolje i planiranjem procesa unapred, a koje se postiže prognoziranjem količina poznavanjem glavnih uticajnih parametara, među kojima je svakako opisani uticaj akumulirane vlage na deponiji.

6.4 Potencijalni uticaj recirkulacije koncentrata

Kao što se pokazalo eksperimentalnim istraživanjem, koje se nalazi u osnovi ove doktorske disertacije, recirkulacija koncentrata može da doprinese povećanju produkcije deponijskog gasa preko dva nezavisna efekta. Jedan se ogleda u razlaganju organske materije, prisutne u koncentratu, pri čemu dolazi do njegovog prečišćavanja i izdvajanja metana u deponijskom gasu. Ovaj uticaj se pokazao gotovo zanemarljivim kada je reč o ukupno proizvedenim količinama deponijskog gasa, naročito ako se ima u vidu dokazano nizak sadržaj organske materije koncentrata podložne daljem razlaganju. Merenja na lokalnom nivou, u okolini samog izlivnog mesta koncentrata, pokazala su da uticaj na povećanje produkcije metana postoji, ali da je on mali, čak i na lokalnom nivou. Grubim merenjima se ispostavilo da je znatno veći uticaj na produkciju deponijskog gasa koji se unosi povećanim vlaženjem otpada od strane koncentrata. Ovo je bio podstrek za dalju detaljniju analizu uticaja vlage kreiranjem modela produkcije deponijskog gasa zasnovanog na njenom bilansu. Analiza vlage koja se dovodi recirkulacijom tiče se isključivo njenog potencijalnog uticaja na produkciju deponijskog gasa, pri čemu se ostali elementi analize zanemaruju, kao što je uticaj na čvrstoću otpada i stabilnost strana (Christensen, Scharff, & Hjelmar, Landfilling: Concepts and Challenges, 2011), te eventualna praćenja mogućih zona vlaženja otpada i načina na koji je to u praksi moguće u većoj meri ostvariti primenom različitih rešenja, čiji su primeri ranije navedeni (Zhang, Heng, Jeng, & Xu, 2017).

6.4.1 Uticaj elektroprovodljivosti i pH vrednosti koncentrata na produkciju deponijskog gasa

U ovom odeljku se nastoji da se uporednom analizom relevantnih parametara sagleda šira slika uticaja recirkulacije sa naglaskom na kvalitet procedne vode i koncentrata na produkciju deponijskog gasa. U tom smislu kreirana je slika 6.24 sa krivama koje prate promene u toku vremena EP i pH vrednosti procedne vode i koncentrata u odnosu na padavine, $V_{a,rez}$ i $V_{g,1}$.

Istraživanja su pokazala da se elektroprovodljivost i ostale vrednosti menjaju periodično u zavisnosti od sezone, a najviše od padavina. Tako tokom kišnih sezona imamo smanjenje ove vrednosti, odnosno povećanje tokom sušnih perioda, što se objašnjava razređivanjem procednih voda koje se mešaju sa padavinama (Tatsi & Zouboulis, 2002), što se vidi i na bazi ove analize na slici 6.24. Sa druge strane imamo promene kada je reč o kvalitetu procedne vode i koncentrata, opisane u odeljku 4, koje su u saglasnosti sa rezultatima pojedinih istraživanja koja su se bavila uticajem recirkulacije koncentrata dobijenog iz postrojenja za prečišćavanje koje koristi RO (Talalaj, 2015). Akcenat ove analize će se dati na istraživanju mogućih uzroka na promenu kvaliteta procednih voda i koncentrata i njihovih eventualnih posledica, odnosno uticaja na generisanje deponijskog gasa, nastojanjima da se dovedu u vezu njihove promene tokom vremena.

Sa slike 6.24 se može zapaziti da je nagli i naizgled nelogičan pad protoka deponijskog gasa u periodu od 12.11 do 22.12.2014. godine u odnosu na krivu $V_{g,r}$, a za koji se u prethodnom odeljku pokazalo da nema veze sa vakuumom u gasovodu, praćen porastom EP recirkulisnog koncentrata (EP_k). Upravo 12.11.2014. godine zabeležen je nagli skok EP_k sa 56,3 na 64,9 mS/cm pri nepromenjenoj elektroprovodljivosti procedne vode (EP_{pv}) od 21,6 mS/cm, dok je vrednost $V_{g,r}$ naglo opala sa 91,4

m^3/h na $67,4 \text{ m}^3/\text{h}$. U daljem toku sledi povećanje EP_k , čija vrednost dostiže maksimum od $73,7 \text{ mS/cm}$ dana 23.12.2015. godine. Potom sledi njen blagi pad i manje oscilacije, da bi izmerena vrednosti iznosila $67,1 \text{ mS/cm}$ dana 20.01.2015. godine. U periodu od 22.12.2014. do 19.01.2015. godine $V_{g,1}$ je porastao sa $70,9$ na čak $103 \text{ m}^3/\text{h}$, ali nažalost nije bilo redovnih očitavanja merenja protoka na baklji koja bi ukazala kako su se tačno promene dešavale. Međutim, na slici 6.18 se vidi da je vrednost krive $V_{g,2}$ u navedenom periodu ostala nepromenjena na vrednosti od $68 \text{ m}^3/\text{h}$, što predstavlja njenu najnižu vrednost tokom čitavog analiziranog perioda. Doduše, smanjeni protok krive $V_{g,2}$, koja je sa trendom niske vrednosti od $76,9 \text{ m}^3/\text{h}$ bila i tokom perioda od 04.02 do 06.03.2015. godine, može se pripisati i usmeravanju protoka deponijskog gasa na lokalni gasovod koji vodi ka IC grejaču, instaliranom za grejanje garaže (Project-06/14-LFG), s obzirom da je u ovom periodu sistem bio podešen tako da je isključivo moglo da bude u radu jedno postrojenje, baklja ili IC grejač, koji je pušten u rad početkom decembra 2015. godine. Nakon 19.01.2015. godine EP_k nastavlja da pada, što je praćeno povećanjem $V_{g,1}$, čija je vrednost u periodu od 19.01 do 28.01.2014. godine porasla sa 103 na $136 \text{ m}^3/\text{h}$, značajnije više od vrednosti krive $V_{g,r}$.

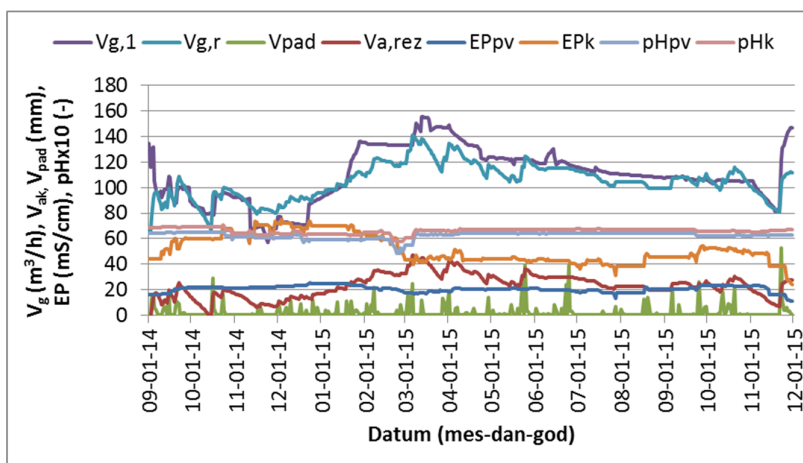
Pad krive $V_{a,rez}$, kao rezultat bilansa vlage na deponiji, sa konstantnim padom od 24.10.2014. godine dovodi do minimuma od $6,1 \text{ mm}$ dana 16.11.2014. godine. Dalje sledi blagi porast krive, ali takav da je 12.12.2014. godine $V_{a,rez}$ iznosila tek $12,9 \text{ mm}$. Ovo je u stvarnosti rezultovalo malim količinama generisane procedne vode, što je dalo da u periodu od 24.12.2014 do 20.01.2015. godine nije radilo postrojenje za prečišćavanje procedne vode jer bilo potrebe. Shodno tome, nije bilo ni recirkulacije koncentrata na deponiju. Ova činjenica mogla je da doprinese „oporavku“ i stabilizaciji anaerobnih procesa unutar deponije, što je, uz povećanje $V_{a,rez}$ dovelo do značajnog porasta protoka prikupljenih količina deponijskog gasa, uprkos i dalje relativno visokoj vrednosti EP_k .

Elektroprovodljivosti na početku i kraju perioda od 13-26.11.2015. godine, kada postrojenje za prečišćavanje nije radilo, pokazala su nagli pad elektroprovodljivosti koncentrata sa $47,8$ na $28,3 \text{ mS/cm}$, odnosno procedne vode sa $20,6$ na $12,1 \text{ mS/cm}$, što su ujedno i najniže vrednosti od početka rada postrojenja za prečišćavanje. Ovako niske vrednosti, sa manjim oscilacijama, održale su se i u narednih par meseci. Razlog za ovakav pad leži u gore navedenoj činjenici da je promenjeno izlivno mesto koncentrata koje je omogućilo znatno bolju distribuciju koncentrata unutar deponije i sprečavanje kratkog strujanja do izlivne drenažne cevi. Uzastopna merenja sa očitavanjima 20.11. i 30.11.2015. godine zabeležila su nagli skok krive $V_{g,1}$ sa $83,2$ na $146,7 \text{ m}^3/\text{h}$, što je znatno veće povećanje u odnosu na krivu $V_{g,r}$, kao što se može videti na slikama 6.18 i 6.24. Dodatno povećanje protoka u stvarnosti moglo bi se povezati sa naglim smanjenjem EP_{pv} , što bi predstavljao indirektni pokazatelj boljeg upravljanja recirkulacijom koncentrata koje rezultuje potpunijim vlaženjem otpada i većom efikasnošću uklanjanja zagađujućih organskih materija. Organske materije iz procedne vode prelaze u deponijski gas generalno potiču manjim delom od koncentrata, a većim delom od procedne vode koja se nalazi u telu deponije znatno veće HPK i BPK vrednosti u odnosu na razblaženu procednu vodu koja se odvodi sa deponije (Sormunen, Ettala, & Rintala, 2008)

Sa slike 6.24 se može zapaziti da tok krive EP_{pv} zavisi od toka krive $V_{a,rez}$, na način da je opadanje krive $V_{a,rez}$ praćeno rastom krive EP_{pv} , i obrnuto. Prema toku krivih moglo bi se zapaziti da ove promene nisu momentalne, odnosno da se realizuju sa izvesnom inercijom. Promene opisane u prethodnim paragrafima, sa stvaranjem očigledne razlike $V_{g,1}$ u odnosu na $V_{g,r}$ mogle bi da ukažu na uticaj elektroprovodljivosti izlivenog koncentrata na generisane količine deponijskog gasa, osim toga što je, takođe, očigledno da promena EP_{pv} prati promenu $V_{a,rez}$. Naglo i prekomerno povećanje EP_k 12.11.2014. godine uticalo je na smanjenje $V_{a,rez}$, da bi se vrednosti $V_{a,rez}$ stabilizovale odmah nakon vraćanja EP_{pv} u normalu. Sa druge strane, nagli pad EP_k nakon 26.11.2015. godine može da se dovede u vezu sa izraženim povećanjem $V_{a,rez}$.

Kao što sa prikazanog dijagrama na slici 6.24 može da se vidi, pH vrednost koncentrata i procedne vode se održavaju na konstantnom nivou. Ovo se postiže automatikom unutar samog

postrojenja za prečišćavanje. Sa slike se vidi da su prosečne pH vrednosti u periodu od 25.04.2014. do 17.02.2015. godine iznosile su 6,3 i 6,7 za procednu vodu i koncentrat, respektivno. Navodno, usled neispravnosti senzora pH vrednosti na ulazu procedne vode (151) došlo je do poremećaja u periodu od 14.02. do 07.03.2015. godine kada je zabeležen nagli pad pH vrednosti sa prosekom tokom ovog perioda od 5,5 i 6,1 za procednu vodu i koncentrat, respektivno. Ovo su vrednosti daleko od optimalnog opsega za generisanje deponijskih gasova, koji je između 7.5 i 9.0, kao što je dao (Emkes, Coulon, & Wagland, 2015), koji u sprovedenoj multikriterijalnoj analizi visoko rangira uticaj pH vrednosti procedne vode kao treći na listi sa težinskim faktorom od 0,15, dok su uticajniji jedino sadržaj vlage i alkalitet kao CaCO_3 koji se uzimaju sa vrednostima težinskih faktora od 0,26 i 0,21, respektivno. Tako bi realno moglo da se očekuje da povećanje pH vrednost koncentrata koji se izliva na deponiju utiče na povećanje količina generisanog deponijskog gasa, i obrnuto. Pad pH vrednosti procedne vode i koncentrata prikazan na slikama 4.8 i 6.24, kao i očigledan pad pH vrednosti procedne vode na bazi kvartalnih analiza (slika 4.9) na vrednosti ispod preporučenog opsega vrednosti mogao je eventualno da izazove poremećaj metanogenih procesa i smanjenje produkcije deponijskog gasa, kao što bi povećanje pH vrednosti koncentrata eventualno moglo da ima pozitivan uticaj na povećanje protoka deponijskog gasa. Ovo je poznati uticaj i pokazan u gotovo svim laboratorijskim istraživanjima na bioreaktorima. Međutim, ovaj lokalni uticaj, možda i ne tako veliki, ne može da se odredi s obzirom da u pomenutom vremenskom periodu nije bilo očitavanja merenja. Protoci 03.02. i 06.03. koji po metodi 1 iznose 133 i 134 m^3/h , dok po metodi 2 za čitav period imamo drastičan pad protoka sagorelih količina deponijskog gasa od 76,9 m^3/h , dok neposredno pre i posle imamo znatno veće količine od čak 150,1 m^3/h i čak 804 m^3/h sa očitavanjem i računanjem po metodama 1 i 2, respektivno.



Slika 6.24 Dijagram promene parametara procedne vode i deponijskog gasa tokom vremena

6.4.1.1 Uticaj režima rada postrojenja za prečišćavanje RO na elektroprovodljivost koncentrata i procedne vode

Kao što se iz prethodnog odeljka moglo zaključiti, promena EP_k van granica dozvoljenog opsega vrednosti može da ima uticaj na protok deponijskog gasa usled poremećaja metanogenih procesa unutar deponije. S obzirom da značajan uticaj na vrednosti EP_{pv} i EP_k ima i sezona u toku godine, te da vrednosti elektroprovodljivosti zavise od akumulirane vlage na deponiji, one se dodatno mogu posmatrati i kao indirektni pokazatelji, odnosno indikator procesa generisanja deponijskog gasa. Što su vrednosti niže, to je veća verovatnoća da je sa procesima generisanja deponijskog gasa sve u redu, bilo da su vrednosti $V_{a,rez}$ veće ili da je tretman koncentrata njegovim pravilnim odlaganjem na deponiji bolji.

U ovom odeljku analiziraće se uticajni faktori na EP_{pv} i EP_k . S obzirom da su vrednosti

međusobno zavisne, kao i da na EP_k utiče i sam proces prečišćavanja procedne vode, cilj ove analize je i da se što bolje opiše proces njenog prečišćavanja u postrojenju RO. Uporedno bi trebalo pratiti i vlažnost otpada na deponiji kao jedan od "prirodnih" uticajnih faktora na EP_{pv} . Osim na stvaranje uslova koji mogu da utiču na proces generisanja deponijskog gasa, vrednosti elektroprovodljivosti, koje se u kontinuitetu prate na postrojenju RO, predstavljaju značajan indikator kada je reč o uticaju na životnu sredinu. Povećanje elektroprovodljivosti je primarni „alarm“ ljudima u održavanju da nešto nije u najboljem redu i da je potrebno preduzeti određene korake u cilju rešavanja problema, a ovo je i signal da se urade dodatna merenja i analize zagađenosti površinskih voda i sl.

Vrednost EP_k u prvom redu zavisi od postavljenih radnih parametara postrojenja, koji će se u ovom odeljku pratiti. Kada je u pitanju rad postrojenja, na prvom mestu, kao rezultantu procesa pratimo faktor koncentracije (F_k), koji se može definisati kao odnos protoka procedne vode i koncentrata, što se može iskazati sledećim izrazom:

$$F_k = \frac{\dot{V}_{pv}}{\dot{V}_k} \quad (6.25)$$

gde je:

- \dot{V}_{pv} - protok procedne vode [m^3/h]
- \dot{V}_k - protok koncentrata [m^3/h]

Generalno, što je veći ovaj odnos, to je zapremina koncentrata manja, ali je, shodno tome, njegova elektroprovodljivost veća. Generalno se može uspostaviti sledeća relacija:

$$\dot{V}_{pv} \cdot EP_{pv} = \dot{V}_k \cdot EP_k + \dot{V}_p \cdot EP_p \quad (6.26)$$

Odakle sledi da je:

$$EP_k = \frac{\dot{V}_{pv} \cdot EP_{pv} - \dot{V}_p \cdot EP_p}{\dot{V}_k} = \frac{F_k \cdot \dot{V}_k \cdot EP_{pv} - \dot{V}_p \cdot EP_p}{\dot{V}_k} = F_k \cdot EP_{pv} - \frac{\dot{V}_p \cdot EP_p}{\dot{V}_k} \quad (6.27)$$

gde je:

- EP_{pv} - elektroprovodljivost procedne vode [mS/cm]
- EP_k - elektroprovodljivost koncentrata [mS/cm]
- EP_p - elektroprovodljivost permeata [mS/cm]
- \dot{V}_p - protok permeata [m^3/h]

Kao što se može videti iz izraza (6.28) EP_k zavisi od EP_p , s obzirom da se permeat kao prečišćeni deo procedne vode ispušta u prirodni recipijent. EP_p zavisi od efikasnosti prečišćavanja (η_{RO}), koja se može definisati kao:

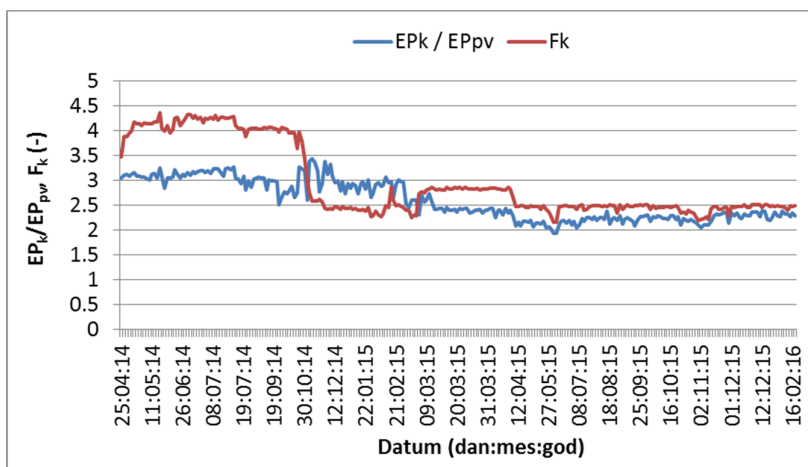
$$\eta_{RO} = 1 - \frac{EP_p}{EP_{pv}}$$

Odnosno, sledi da je:

$$EP_{pv} = \frac{EP_p}{1 - \eta_{RO}} \quad (6.28)$$

Procesi unutar postrojenja RO su kompleksni. Slika 6.25 pokazuje promenu F_k i EP_k/EP_{pv} tokom vremena rada postrojenja za prečišćavanje reverznom osmozom. Ovi parametri zavise od više

parametara rada postrojenja, od kojih su najvažniji: primenjeni pritisci na membranama, protoci i stanje membrana po pitanju zaprljanosti. Kao što se sa slike može videti F_k ne mora da bude u direktnoj vezi sa EP_k/EP_{pv} . Postrojenje je pogonjeno u režimu rada kojim se teži ostvarivanju ujednačene vrednosti EP_k/EP_{pv} . Na slici 6.25 se može zapaziti da je do februara 2015. godine vrednost EP_k/EP_{pv} bila sa oscilacijama oko 3, od marta do sredine aprila održavala se na vrednosti oko 2,4, potom tokom narednih mesec dana iznosi oko 2,1, da bi zatim ponovo porasla i održavala se na vrednosti oko 2,4. Najveće oscilacije ovog odnosa bile su u periodu od sredine septembra 2014. godine do kraja februara 2015. godine. Slike 6.26-6.28 prikazuju promene ostalih uticajnih parametara kojima je opisan režim rada ovog postrojenja RO, a to su: primenjeni pritisci (slika 6.26), protoci (slika 6.27) i efikasnost rada postrojenja (slika 6.28).



Slika 6.25 Promena faktora koncentracije i odnosa elektroprovodljivosti koncentrata i procedne vode

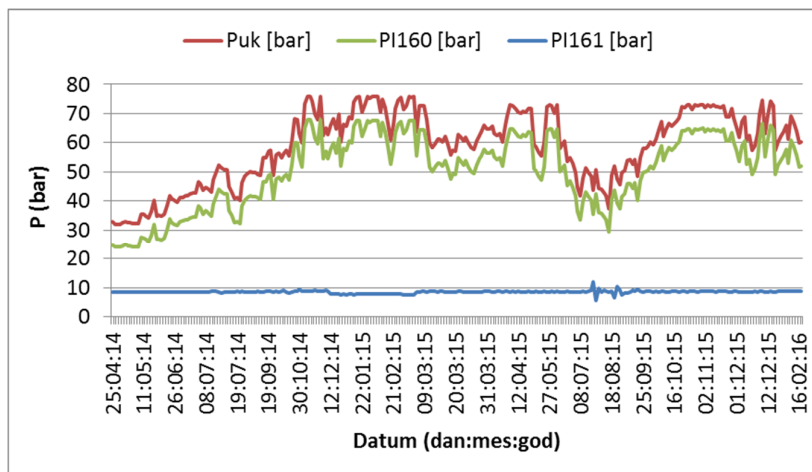
Sa početka rada postrojenja rađeni su razni testovi sa ciljem da se uspostavi optimalno funkcionisanje postrojenja, što je nesumljivo dovelo i do različitih poremećaja u radu. Prvi test je bio definisanje broja časova rada između 2 čišćenja, pa je prvi ciklus trajao čak 220 h. Već drugi ciklus je trajao 125 h, dok trajanje od 3 do 13. ciklusa iznosilo 110 h rada postrojenja. Dalje su svi ciklusi trajali 100 h. Problem sa predugim vremenom trajanja procesa između dva prečišćavanja je što dolazi do bioloških naslaga koje dovode do ireverzibilnih procesa zaprljanja na samim membranama. Osim očekivanog pada efikasnosti, koja je neminovna tokom trajanja ciklusa, sa dužim radom dolazi do drastičnog pada i trajnog narušavanja efikasnosti, što se može uočiti i nakon završenog procesa prečišćavanja. Do sličnih saznanja došlo se u istraživanju (Schiopu, i drugi, 2012).

Efikasnost prečišćavanja u 1. ciklusu (u periodu 25.04-08.05.2014. godine) se menja od maksimalnih 92% sa padom do 86%, kao što se može videti na slici 6.28. Da bi se efikasnost prečišćavanja povećala, održavajući ostale parametre rada postrojenja na zadatim vrednostima, dolazi do porasta pritiska na membranama postrojenja. Pri nepromenjenom protoku pritisak raste u kontinuitetu iz ciklusa u ciklus, od prosečne vrednosti 32,4 bara u 1. ciklusu do završetka 12. ciklusa dana 30.10.2014. godine, kada dostiže maksimalnu vrednost pritiska od 76 bara, sa prosečnom vrednosti po ciklusu od 71,6 bara (slika 6.26). Sa slike 6.28 se vidi kontinualan rast elektroprovodljivosti od početka puštanja u rad postrojenja za prečišćavanje od početnih vrednosti 15,4 i 47 mS/cm za procednu vodu i koncentrat, respektivno. Dalje se može zapaziti nagli porast EP_k od početka septembra (9.ciklus) sa 44,1 mS/cm. U 12. ciklusu (u periodu 22.10-30.10.2014. godine) ova vrednost je porasla sa prosečnih 58,4 mS/cm na 66,5 mS/cm. Povećanje EP_k praćena je i povećanjem EP_{pv} sa 15,7 mS/cm od početka septembra do proseka od 21,4 mS/cm u 12. ciklusu rada postrojenja. Da bi se odnos EP_k/EP_{pv} održao, u 13.ciklusu (u periodu 11.11-26.11.2014. godine) dolazi do naglog smanjenja protoka koncentrata sa 1112 l/h na 825 l/h, odnosno procedne vode sa 1551 l/h na 1321 l/h, dok je protok permeata porastao sa 439 l/h na 496

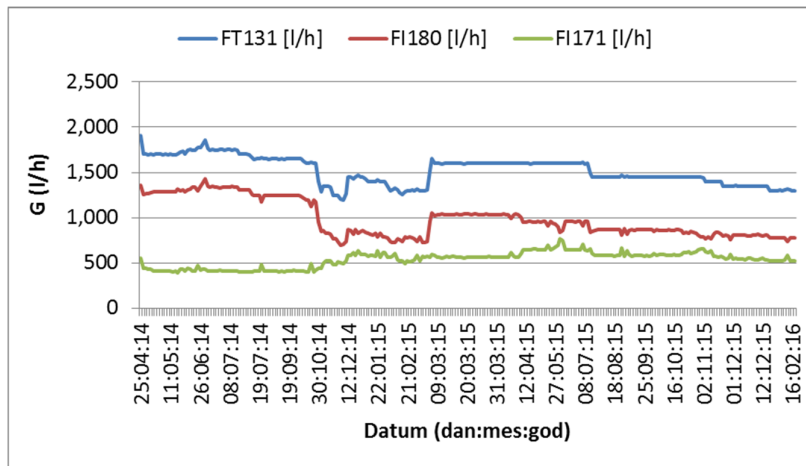
l/h. Ovako niske vrednosti protoka sa prosekom od 1341, 788 i 533 l/h za procednu vodu, koncentrat i permeat, respektivno, trajale su do završetka 22. ciklusa. Od 19. do 22. ciklusa (u periodu 29.01-28.02.2015. godine) dolazi do naglog i konstantnog pada efikasnosti procesa prečišćavanja sa 94,8% na 73,6%, što se može videti na slici 6.29. Očigledno je da je došlo do procesa ireverzibilnog zaprljanja filtera i da čak ni nakon redovnog hemijskog čišćenja filtera na kraju ciklusa efikasnost nije uspeła ni malo da se poboljša, već je bila u konstantnom opadanju. Pre početka 23. ciklusa očigledno su zamenjene membrane na postrojenju za prečišćavanje, nakon čega ono nastavlja da radi ispravno. Padu EP_k doprinelo je u značajnoj meri i povećanje elektroprovodljivosti permeata, čija je prosečna vrednost od 18. do 22. ciklusa (u periodu 20.01-28.02.2015. godine) iznosila 1,4, 1,8, 3,3, 3,8, 4,8 mS/cm.

Od 19. ciklusa EP_k počinje da opada sa vrednosti od 70,1 mS/cm, da bi ovaj pad u 22. ciklusu bio sa 60,1 na 50,2 mS/cm. Povećanje protoka sa 1305, 732 i 573 l/h na vrednosti 1524, 962 i 562 l/h za procednu vodu, koncentrat i permeat, respektivno, uz smanjenje vrednosti ukupnog pritiska sa 74,3 bara u 22. ciklusu, na 69,9 bara u 23. ciklusu (u periodu 07-10.03.2015. godine) uz njegov dalji pad, uticalo je na povećanje F_k , ali smanjenje vrednosti EP_k/EP_{pv} . Sve u svemu, smanjenje protoka uz povećanje elektroprovodljivosti permeata, uticalo je na smanjenje ukupne količine koncentrata i ukupno zagađujućih čestica koje se šalju na deponiju. Ovo je konačno dovelo i do smanjenja vrednosti EP_{pv} .

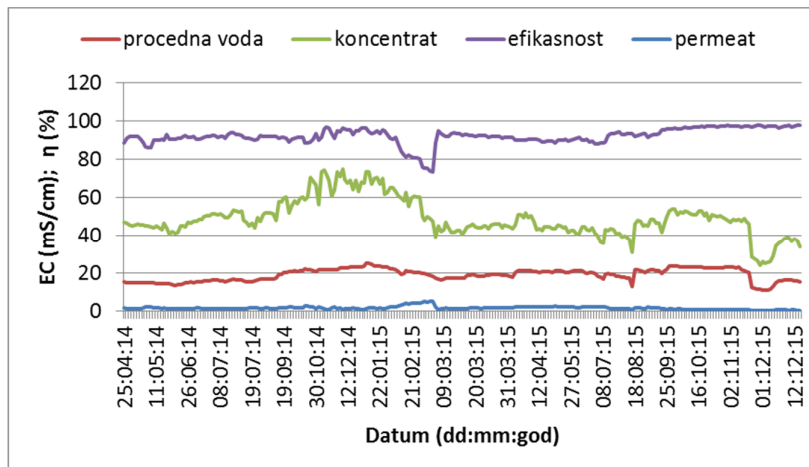
U daljem radu elektroprovodljivost se održava u granicama sa manjim promenama tokom vremena. Od 23-35. ciklusa (u periodu 07.03-08.07.2015. godine), efikasnost prečišćavanja je bila u proseku 91% po ciklusu, sa приметnim padovima iz ciklusa u ciklus. Od 36-39. ciklusa (u periodu od 15.07-23.09.2015. godine), prosečna efikasnost prečišćavanja je iznosila 93,2%, dok od 40. do 52. Ciklusa (u periodu 24.09.2015-17.02.2016. godine), efikasnost po ciklusu iznosi prosečnih 97,2%. Povećanje efikasnosti prečišćavanja može svakako da bude rezultat smanjenja protoka od 36. ciklusa, odnosno većeg porasta pritiska na membranama od 40. ciklusa. Povećanje efikasnosti rezultovalo je smanjenju EP_{per} , sa direktnim uticajem na povećanje EP_k , što u konačnom dovodi i do porasta EP_{pv} .



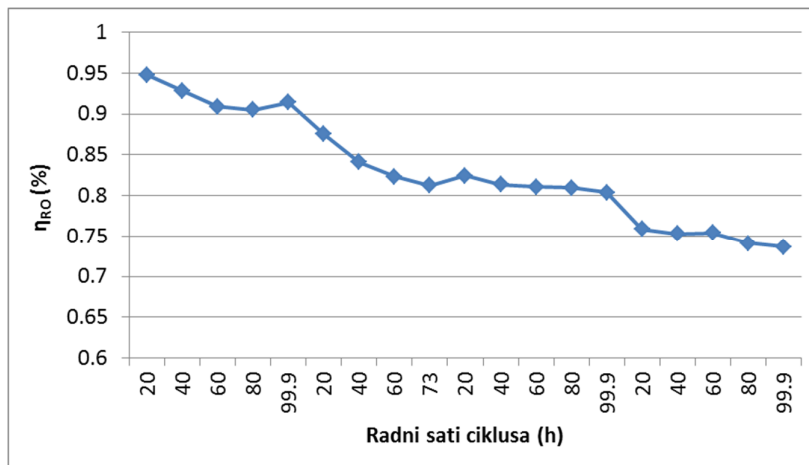
Slika 6.26 Promena pritiska na membranama



Slika 6.27 Promena protoka tokom vremena



Slika 6.28 Promena EC vrednosti i efikasnosti rada postrojenja



Slika 6.29 Nagli pad efikasnosti procesa prečišćavanja postrojenja (19-22.ciklus rada)

S obzirom da se koncentratom vraćaju zagađujuće materije na deponiju, koje utiču na EP_{pv} , kao i da u određenoj meri može da dođe do kratkog strujanja koncentrata do drenažne cevi i njegovog mešanja sa vlagom unutar otpada na deponiji, može se logički zaključiti da će porast EP_k uticati i na

povećanje EP_{pv} . Cilj je, naravno, da ovaj uticaj bude što manji. To se može postići dobrom distribucijom koncentrata, tako da prolaskom kroz deponiju dolazi do delimične razgradnje prisutne organske materije i smanjenja njegove elektroprovodljivosti. Sa druge strane, kada i dolazi do mešanja, ono bi moglo da bude znatno izraženije i nepovoljnije tokom perioda niže vlažnosti otpada jer je udeo protoka koncentrata u tom slučaju veći. Elektroprovodljivost procedne vode koja se vraća sa deponije mogla bi se računski iskazati korišćenjem sledeće relacije:

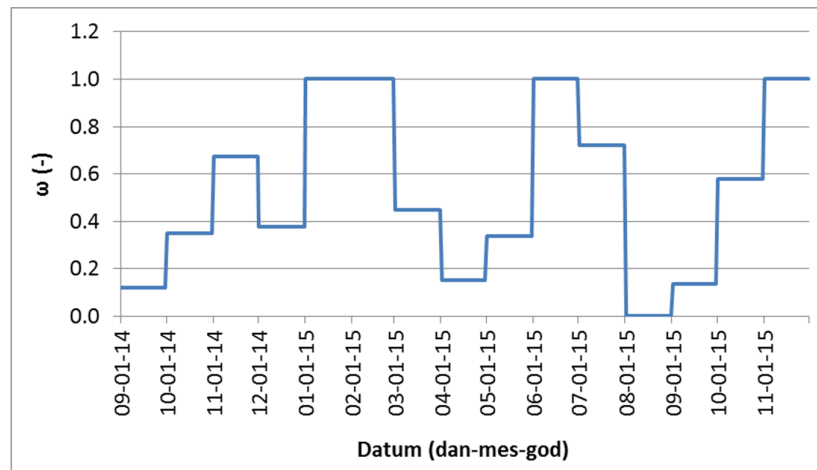
$$EP_{pvr,n} = \frac{(V_{pv} + V_{a,rez}) \cdot EP_{pvr,n-1} + V_k \cdot (1 - \omega_k) \cdot EP_k}{V_{pv} + V_{a,rez} + V_k} \quad (6.29)$$

gde je:

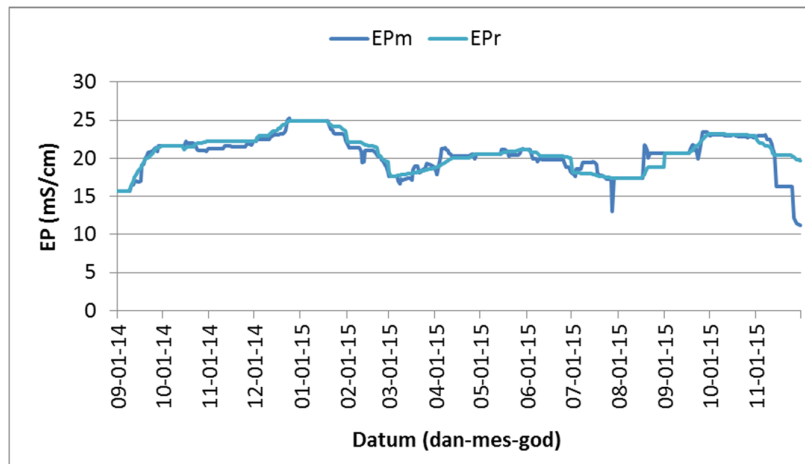
- $EP_{pvr,n}$ - računaska vrednost elektroprovodljivosti procedne vode u danu „n“ [mS/cm]
- $EP_{pvr,n-1}$ - računaska vrednost elektroprovodljivosti procedne vode u danu „n-1“ [mS/cm]
- ω_k - udeo koncentrata koji nije u kratkom strujanju [-]

Što je vrednost ω_k veća, bolja je distribucija koncentrata unutar deponije, odnosno manji je uticaj koncentrata na promenu elektroprovodljivosti procedne vode.

Poredeći vrednosti elektroprovodljivosti dobijene na bazi merenja i proračuna može se izračunati vrednost ω_k , tako da dobijena odstupanja između ovih vrednosti budu minimalna moguća. Izračunavanjem prosečne vrednosti ω_k na mesečnom nivou, dobija se promena prikazana na slici 6.30. Izraz 6.29 pokazuje da povećanje EP_k dovodi neminovno i do povećanja vrednosti EP_{pv} , osim u slučaju kada je $\omega_k = 1$. Maksimalna vrednost EP_{pv} od 25,3 mS/cm dostiže se 24.12.2014. godine, dok je izmerena vrednost 20.01.2015. godine iznosila 24,4 mS/cm. Dalje, sledi pad vrednosti, kako za procednu vodu, tako i za koncentrat, što se poklapa i sa povećanjem akumulirane vlage unutar deponije. Slika 6.31 prikazuje krive elektroprovodljivosti procedne vode dobijene merenjima i računskim putem na osnovu usvojenih vrednosti ω_k .



Slika 6.30 Promena ω vrednosti tokom meseci



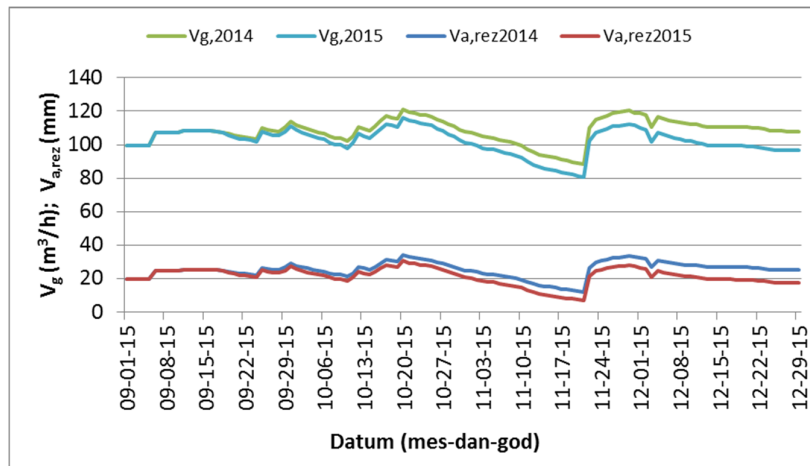
Slika 6.31 Promena elektroprovodljivosti procedne vode – stvarne i računске vrednosti

Dakle, predmetnom analizom se nastojalo da se dovede u vezu promena elektroprovodljivosti procedne vode, osim sa padavinama, takođe i sa promenama režima rada postrojenja, odnosno njegovih glavnih parametara (pritisak, protok, zaprljanost membrana). Porast elektroprovodljivosti procedne vode se neminovno dešava zbog recirkulacije koncentrata. Da li će se ona kretati ka višim ili nižim vrednostima zavisi od distribucije koncentrata na deponiji, dok je na osnovu uporedne analize krivih zapaženo da i vlažnost otpada na deponiji ima značajan uticaj, što je i uzeto u obzir u daljem razmatranju.

6.4.2 Uticaj režima rada postrojenja za prečišćavanje na produkciju deponijskog gasa

Smanjenjem faktora koncentracije tokom vremena, o čemu je bilo reči u prethodnom odeljku, došlo je do povećanja količine koncentrata koji se izliva na deponiju. Tako je količina koncentrata koja se izlila na deponiju u periodu septembar-decembar iznosila 306 i 609 m³/h u kalendarskoj 2014 i 2015. godini, respektivno, uprkos činjenici da je količina padavina u ovom periodu bila prilično ujednačena sa vrednostima od 254 i 248 mm. Povećanje navedenih količina izlivenog koncentrata prati smanjenje smanjenja faktora koncentracije sa prosečnih 3,3 na 2,4. Sa druge strane povećala se i količina procedne vode koja se direktno crpi sa deponije radi odvođenja na prečišćavanje, sa 1184 na 1593 m³. Ovo daje da je u uporednom periodu u kalendarskoj 2014. godini veća količina vlage ostajala na deponiji nego u 2015. godini, a koja potiče od promene u režimu rada postrojenja za prečišćavanje.

Ako bi postrojenje za prečišćavanje procedne vode radilo u istom režimu rada kao u 2014. godini prosečan protok gasa, dobijen putem proračuna, bi u periodu od početka septembra do kraja decembra 2015. godine iznosio 108,2 m³/h, što je 5,8% više u odnosu na prosečnu vrednost protoka gasa od 102,3 m³/h pri stvarnim uslovima rada ovog postrojenja. Ova promena se može videti se na slici 6.32. Ovo je pokazatelj uticaja rada postrojenja za prečišćavanje, koji deličimno potiče od postavljenih parametara režima rada samog postrojenja, a delom od vremena rada postrojenja i količine procedne vode koja se odvodi sa deponije. Naposletku, režim rada postrojenja je uslovljen i upravlja se upravo parametrima procedne vode, kao što je elektroprovodljivost, koja zavisi od distribucije koncentrata unutar otpada i spoljnih uticaja na vlažnost otpada na deponiji, o čemu je bilo reči. Sve navedeno govori o međusobnoj zavisnosti parametara u kojem poremećaj u jednom delu procesa dovodi do promene parametara u drugom delu. Konkretno u ovom slučaju, režim rada postrojenja za prečišćavanje utiče na recirkulaciju koncentrata i odvođenje procedne vode, koji zajedno mogu da imaju uticaj na produkciju deponijskog gasa.



Slika 6.32 Promena količine akumulirane vlage unutar otpada i protoka deponijskog gasa u zavisnosti od režima rada postrojenja za prečišćavanje (1 – režim rada u 2015. godini, 2 – režim rada u 2014. godini)

6.5 Recirkulacija koncentrata i procedne vode na deponiji

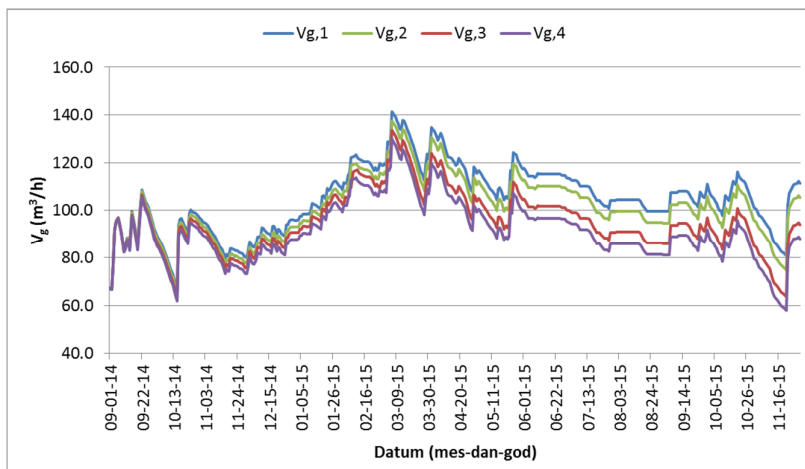
Dosadašnji tok analize uticajnih parametara na produkciju deponijskog gasa pokazao je da recirkulacija koncentrata na deponiju može da pruži značajan doprinos povećanju ukupnih količina deponijskog gasa. Pored recirkulacije koncentrata, predmetna deponija, takođe, ima mogućnost recirkulacije procedne vode, koja se trenutno ne koristi. Dokazani dominirajući uticaj vlage na produkciju deponijskog gasa, svakako ohrabruje dalja razmišljanja u pravcu simulacije kreiranog modela radi predviđanja produkcije deponijskog gasa u slučaju povećanja količine procedne vode u recirkulaciji. Recirkulacija procedne vode je, osim uobičajenih prikazanih praksi dobrog upravljanja radom deponije, jedan od mogućih načina za kontrolisano upravljanje produkcijom deponijskog gasa, s obzirom da se na parametre koji potiču od klimatskih uslova (temperature, padavine i sl.) uobičajeno ne može uticati.

Na slici 6.33 su prikazani dijagrami produkcije deponijskog gasa u zavisnosti od količine vlage koja se dovodi recirkulacijom koncentrata i procedne vode na deponiju, za sledeće režime rada:

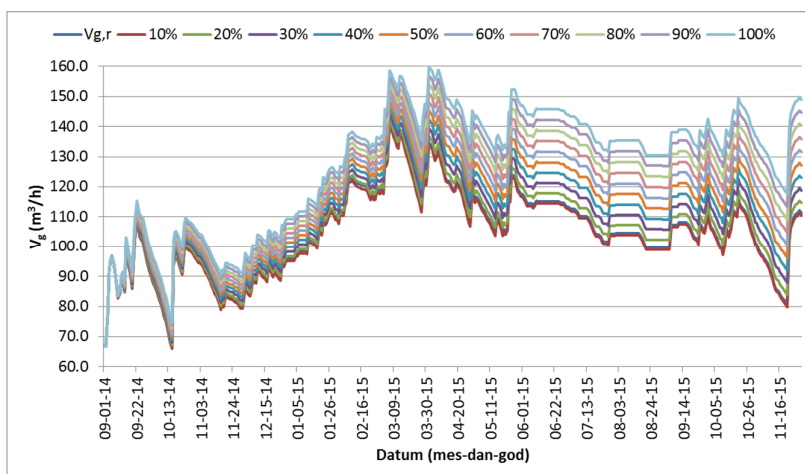
- 1) postojeći uslovi recirkulacije procedne vode i koncentrata;
- 2) sa postojećom recirkulacijom koncentrata, a bez recirkulacije procedne vode;
- 3) sa postojećom recirkulacijom procedne vode, a bez recirkulacije koncentrata;
- 4) bez recirkulacije procedne vode i koncentrata.

Kao što se sa slike 6.33 može videti, dovođenje vlage deponiji, makar i u malim količinama, ima vidljiv uticaj na povećanje ukupnog protoka deponijskog gasa. Poređenjem dobijamo da protoci deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda iznose: 111,4; 105,3; 93,9 i 88 m³/h, dok prosečan protok gasa u recirkulaciji tokom posmatranog perioda iznosi: 105,0; 101,1; 95,3 i 91,5 za slučajeve 1-4 respektivno. U analiziranim slučajevima uočljive su znatno veće razlike u protoku deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u odnosu na prosečne vrednosti tokom posmatranog perioda. Tako razlika između slučaja sa recirkulacijom procedne vode i koncentrata u odnosu na slučaj bez ikakve recirkulacije iznosi 27% i 15%, kada je u pitanju protok gasa na kraju posmatranog perioda i prosečna vrednost protoka gasa u ovom periodu. Priliv vlage na deponiju recirkulacijom u kontinuitetu rezultovaće i kontinualnim povećanjem akumulirane vlage, odnosno sve većim rastom protoka deponijskog gasa u odnosu na slučaj bez recirkulacije. Na slici 6.33 je prepostavljeno da ne postoji višak procedne vode u recirkulaciji koja se dodatno koristi za povećanje akumulirane vlage unutar deponije, što bi značilo da kompletan višak procedne vode u kratkom strujanju prolazi direktno do drenažne cevi, a potom do

postrojenja za prečišćavanje. Ukoliko bi se isti princip primenio za različite udele recirkulacije procedne vode (ω_r) tokom posmatranog vremenskog perioda, sa opsegom vrednosti od 10% do 100%, dobili bi se dijagrami kao na slici 6.34. Ovo bi značilo da se pre ulaska u postrojenje za prečišćavanje prvo vrši recirkulacija procedne vode u datom udelu, dok bi se ostatak tretirao u postrojenju za prečišćavanje sa recirkulacijom koncentrata u istom udelu kao što je to bio stvarno slučaj na osnovu merenja.

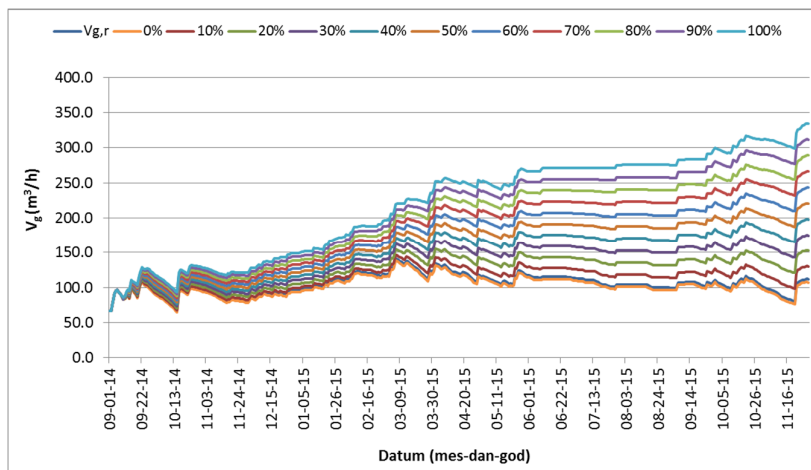


Slika 6.33 Produkcija deponijskog gasa za različite uslove recirkulacije koncentrata i procedne vode ($\varphi_r = 0\%$)



Slika 6.34 Produkcija deponijskog gasa u zavisnosti od udela recirkulacije procedne vode ($\varphi_r = 0\%$)

Krive na slici 6.35 prikazuju dijagrame produkcije deponijskog gasa za različite vrednosti ω_r , ali ovog puta uz pretpostavku da se kompletan višak vode ostvaren recirkulacijom koristi i raspodeljuje direktno za povećanje vlažnosti otpada. Ovo je granični slučaj i predstavlja maksimalno moguću produkciju deponijskog gasa, odnosno teorijski potencijal. Ako se udeo recirkulisane procedne vode koja se iskoristi za povećanje vlažnosti otpada iskaže preko koeficijenta φ_r , sa opsegom vrednosti od 0 do 100%, krive na slikama 6.33 i 6.34 predstavljaju slučaj za $\varphi_r = 0\%$, dok krive na slici 6.35 predstavljaju slučaj za $\varphi_r = 100\%$. U oba analizirana slučaja relevantna količina generisane procedne vode, koja se uzima kao osnova za proračun, je ista i jednaka je dobijenim vrednostima na bazi merenja tokom posmatranog perioda.



Slika 6.35 Produkcija deponijskog gasa u zavisnosti od udela recirkulacije procedne vode ($\varphi_r = 100\%$)

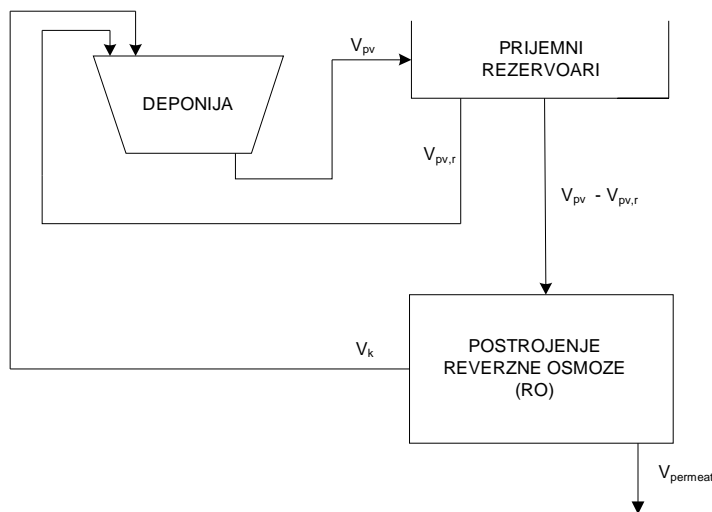
Kao što se sa prikazanih slika može zapaziti, protoci deponijskog gasa pri $\varphi_r = 100\%$ su znatno veći nego pri $\varphi_r = 0\%$. Kada je reč o slučaju za $\varphi_r = 100\%$, na kraju posmatranog perioda protoci iznose od 107,4 do 334,7 m³/h, za ω_r od 0 do 100%, što daje razliku od 311,6% u граниčnim slučajevima, kada nemamo recirkulaciju procedne vode na deponiji i kada se procedna voda u potpunosti recirkuliše. Prosečne vrednosti protoka deponijskog gasa u posmatranom periodu iznose od 102,2 do 218,4 m³/h, što daje razliku do 213,7%. Tada ne bi dolazilo do povećanja vlažnosti otpada na deponiji, pa samim tim ni do povećanja produkcije deponijskog gasa, dok bi se količina generisane procedne vode koja se odvodi sa deponije konstantno povećavala.

Realan slučaj u praksi je negde između граниčnih slučajeva, što znači da bi se deo procedne vode u recirkulaciji iskoristio za povećanje vlažnosti otpada na deponiji, a deo na povećanje količine procedne vode koja se generiše i koju je potrebno odvesti sa deponije. Koliki je stvarni odnos ne može tačno da se utvrdi bez merenja na bazi dodatnog eksperimentalnog istraživanja. Razlozi koji utiču da je $\varphi_r < 100\%$ su svakako kanalska strujanja vode u otpadu pri čemu dolazi do vlaženja samo dela otpada, dok do značajnog dela otpada u praksi vlaga ne dopire, čak i kada se radi o padavinama, koje uniformno pokrivaju čitavu površinu deponije. Otpad koji se vlaži lokalno brzo dostiže kapacitet zasićenja vlagom (ili kapacitet polja), tako da se kompletan višak vraća kao procedna voda, odnosno ne usmerava se na vlaženje novih količina otpada. Što je bolja i ravnomernija distribucija procedne vode, sa većom disperzijom vlage, očekivana vrednost ovog koeficijenta će biti viša. U praksi recirkulacije bi se ovo, na nivou postojeće tehničke opremljenosti, moglo postići češćim promenama izlivnih mesta, odnosno izlivanjem koncentrata istovremeno sa više izlivnih mesta. Odnosno, ugradnjom horizontalnih cevovoda unutar otpada sa perforiranim cevima i sl., kao što je navedeno ranije (Reddy & Bogner, 2003). Ovo bi dodatno moglo da utiče na smanjenje gubitka procedne vode usled oticanja i evapotranspiracije, koji su u ovoj analizi uzimani u obzir. Potpunija recirkulacija, odnosno povećanja vrednosti parametra φ_r , mogla bi da se ostvari i recirkulacijom u više prolaza.

Na ovakav način smo se, makar i teorijski, približili biorektorskom principu tretmana otpada na deponiji u cilju povećanja količina deponijskog gasa i potencijalno većem energetskom iskorišćenju. Naravno, postoje i fizička ograničenja koja nameće sam projektni koncept deponije, odnosno do koje mere je ona projektovana da može fizički da izdrži opterećenje uzrokovano viškom vlage, kako ne bi došlo do potencijalnog propuštanja hidroizolacije. Višak vlage, koje otpad na deponiji eventualno ne bi mogao da primi, mogao bi da se manifestuje i stvaranjem barica.

Umesto celokupne količine procedne vode koja bi se tretirala u postrojenju za prečišćavanje, sa povećanjem recirkulacije bi se tretirala samo novonastala razlika u količini generisane procedne vode, koja se javlja u slučajevima $\omega_r, \varphi_r < 100\%$. Na slici 6.36 je shematski prikazano strujanje, odnosno

recirkulacija, procedne vode i koncentrata u krugu koji povezuje deponiju, rezervoar za prikupljanje procedne vode i postrojenja za prečišćavanje.



Slika 6.36 Shema strujanja procedne vode i koncentrata na deponiji

Novonastala količina vode u recirkulaciji, koja bi se kao takva koristila za dopunu modela bilansa vlage, bi se na osnovu slike 6.36 mogla opisati i urediti na način koji sledi:

$$V_{pv,r} = \omega_r \varphi_r V_{pv,gen} \quad (6.30)$$

gde je:

- $V_{pv,r}$ - količina procedne vode u recirkulaciji [m^3]
- ω_r - udeo recirkulacije procedne vode [%]
- φ_r - udeo recirkulisane procedne vode sa direktnim uticajem na povećanje vlažnosti otpada
- $V_{pv,gen}$ - generisana procedna voda na deponiji

$$V_{v,r} = V_{k,gen} + V_{pv,r} \quad (6.31)$$

gde je:

- $V_{v,r}$ - količina vlage u recirkulaciji sa direktnim uticajem na povećanje vlažnosti otpada na deponiji [m^3]
- $V_{k,gen}$ - generisana količina koncentrata koji se recirkulacijom vraća na deponiju [m^3] (recirkulacija koncentrata je uvek 100%)

Ubacivanjem izraza (6.30) u (6.31) dobijamo:

$$V_{v,r} = V_{k,gen} + \varphi_r \cdot \omega_r \cdot V_{pv,gen} \quad (6.32)$$

Na sličan način možemo odrediti količinu procedne vode koja se dovodi postrojenju za prečišćavanje reverznom osmozom (V_{RO}):

$$V_{RO} = V_{pv,gen} - V_{pv,r} = V_{pv,gen} - \varphi_r \cdot \omega_r \cdot V_{pv,gen} = V_{pv,gen} \cdot (1 - \varphi_r \cdot \omega_r) \quad (6.33)$$

Ova količina procedne vode praktično figuriše u formuli za bilans vlage koja preostaje na deponiji kao izlazna veličina. Količina koncentrata koji se dobija iz procesa prečišćavanja i šalje recirkulacijom na deponiju određuje se dalje iz sledećeg izraza:

$$V_{k,gen} = \frac{V_{RO}}{F_k} = \frac{V_{pv,gen}}{F_k} \cdot (1 - \varphi_r \cdot \omega_r) \quad (6.34)$$

Izraz za faktor koncentracije se može definisati kao:

$$F_k = \frac{V_{pv}}{V_k} \quad (6.35)$$

gde je:

- V_k - stvarna količina koncentrata dobijenog na bazi merenja na postrojenju RO tokom proteklog vremenskog perioda [m^3]

Uz usvajanje da je:

$$V_{pv} = V_{pv,gen} \quad (6.36)$$

Ubacivanjem izraza 6.35 u izraz 6.36 dobijamo:

$$V_{k,gen} = V_k \cdot (1 - \varphi_r \cdot \omega_r) \quad (6.37)$$

Konačno, uvrštavanjem izraza (6.37) u izraz (6.32) dobija se:

$$V_{v,r} = V_k \cdot (1 - \varphi_r \cdot \omega_r) + \varphi_r \cdot \omega_r \cdot V_{pv,gen} \quad (6.38)$$

Ili malo drugačijim sređivanjem izraza:

$$V_{v,r} = V_k + \varphi_r \cdot \omega_r \cdot (V_{pv,gen} - V_k) \quad (6.39)$$

U slučaju da ne postoji recirkulacija procedne vode, kao što je bila dosadašnja praksa i granični slučaj, imali bismo sledeće:

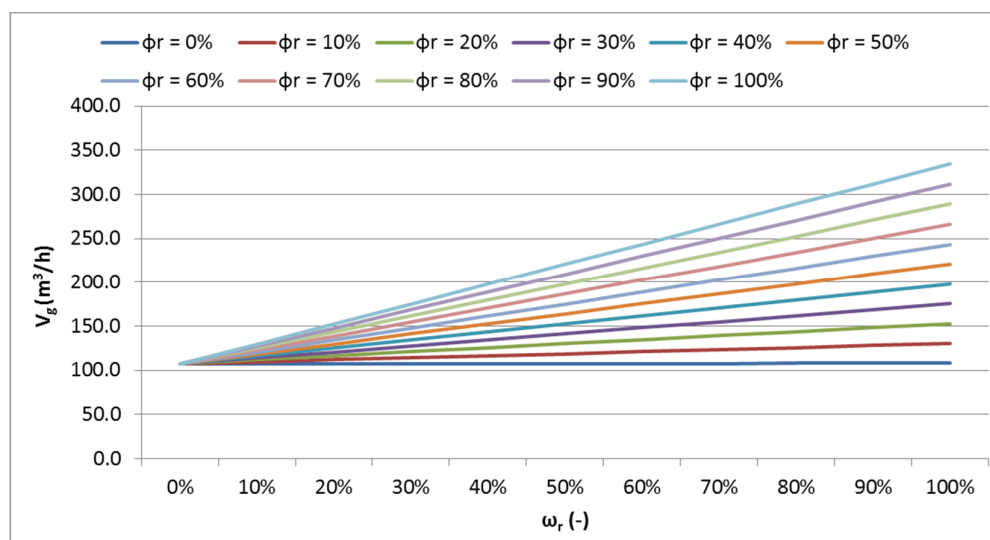
$$\omega_r = 0 \quad (6.40)$$

$$V_{v,r} = V_k \quad (6.41)$$

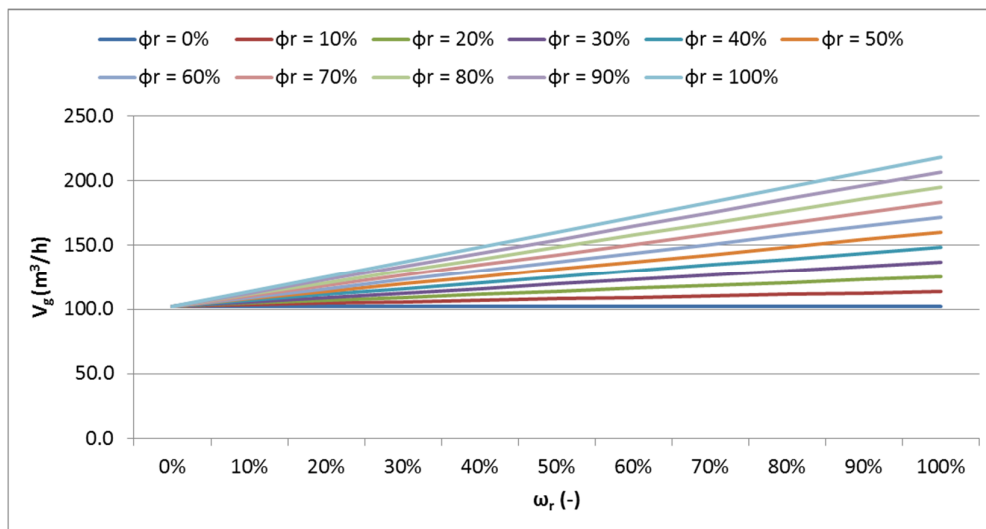
Vrednost $V_{v,r}$ se dodaje vrednosti količine padavina koje dospevaju na deponiju i dalji tok proračuna se sprovodi na isti način kao što je ranije opisano. Uvrštavanjem gore navedenih formula u proračun bilansa vlage dolazi se do potencijalnih vrednosti produkcija deponijskog gasa na deponiji za slučaj da se vršila recirkulacija procedne vode i u zavisnosti od njenog stvarnog uticaja na povećanje vlažnosti otpada. Dobijene vrednosti su vezane za realne podatke dobijene merenjima na deponiji tokom posmatranog vremenskog perioda. Slika 6.37 daje vrednosti protoka deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda (30.11.2015. godine), dok slika 6.38 daje prosečan protok za čitav posmatrani period za ω_r od 0 do 100%, pri φ_r od 0 do 100%, sa stepenima od po 10%. Računato je da će celokupan višak procedne vode koja se dobija povećanjem recirkulacije, a ne utroši se direktno na povećanje vlažnosti otpada, da se odvodi postrojenju za prečišćavanje reverznom osmozom, kako se količina procedne vode u recirkulaciji ne bi povećavala. Takođe se uzima da će recirkulacija novonastalog koncentrata da utiče u potpunosti na povećanje vlažnosti otpada, kao što je i dosada posmatrano.

Na takav način se dobija šira realna slika oblasti u kojoj akumulirana vlaga na deponiji može da se kreće, pa samim tim i produkcija deponijskog gasa. Količina procedne vode u recirkulaciji, koja utiče na povećanje vlažnosti otpada, je linearno zavisna od vrednosti faktora ω_r i φ_r . Kao što se sa slike može videti, produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog vremenskog perioda se za vrednosti φ_r od 0 do 100%, pri $\omega_r = 100$, kreće u opsegu od 107,4 do 334,7 m³/h, dok se prosečna vrednost tokom čitavog perioda kreće od 102,2 do 218,4 m³/h. Slične vrednosti se dobijaju varijacijom ω_r od 0 do 100%, pri $\varphi_r = 100\%$. Na osnovu poznatih vrednosti φ_r i ω_r na bazi dijagrama sa slikama 6.37 i 6.38 mogu da se odrede vrednosti očekivanog protoka deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda, odnosno njegova prosečna vrednost tokom posmatranog perioda. Tako npr. za vrednosti $\omega_r = 30\%$ i $\varphi_r = 50\%$, što bi značilo da se tokom čitavog vremenskog perioda išlo sa recirkulacijom procedne vode od 30% od ukupno generisane količine na deponiji sa mogućnošću upijanja vlage unutar otpada od 50%, očekivani protok deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda bi iznosio 141,2 m³/h, dok bi prosečan protok deponijskog gasa na deponiji bio 119,5 m³/h. U odnosu na dobijene vrednosti od 111,4 i 105 m³/h, ovakva praksa omogućila bi povećanje protoka deponijskog gasa od 26,7% na kraju i 13,8% u odnosu na prosečnu vrednost tokom posmatranog perioda.

Radi boljeg uvida, tačan prikaz vrednosti na osnovu kojih su dobijene krive zavisnosti na slikama 6.37 i 6.38 dat je u tabelama 6.6 i 6.7.



Slika 6.37 Produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ω_r i φ_r



Slika 6.38 Prosečna produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ω_r i ϕ_r

Tabela 6.6 Produkcija deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ω_r i ϕ_r

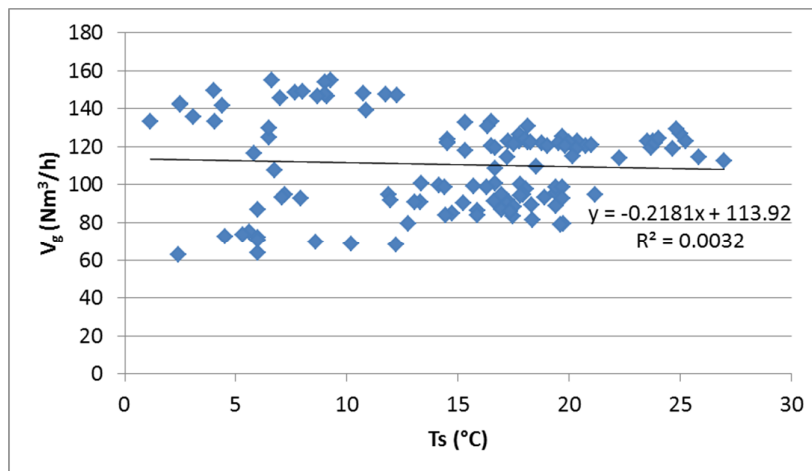
$\phi_r \backslash \omega_r$	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	107.4	107.4	107.4	107.5	107.6	107.6	107.7	107.7	107.8	107.9	107.9
10%	107.4	109.7	111.9	114.2	116.5	118.8	121.1	123.4	125.7	128.0	130.4
20%	107.4	111.9	116.4	120.9	125.5	130.0	134.6	139.2	143.7	148.3	152.9
30%	107.4	114.1	120.9	127.7	134.5	141.3	148.1	155.0	161.8	168.7	175.5
40%	107.4	116.4	125.4	134.4	143.5	152.6	161.7	170.8	179.9	189.0	198.1
50%	107.4	118.6	129.9	141.2	152.5	163.9	175.3	186.6	198.0	209.4	220.9
60%	107.4	120.9	134.4	147.9	161.6	175.2	188.8	202.5	216.2	229.9	243.6
70%	107.4	123.1	138.9	154.7	170.6	186.5	202.4	218.4	234.4	250.4	266.4
80%	107.4	125.4	143.4	161.5	179.7	197.8	216.1	234.3	252.6	270.9	289.1
90%	107.4	127.6	147.9	168.3	188.7	209.2	229.7	250.2	270.8	291.3	311.9
100%	107.4	129.9	152.4	175.1	197.8	220.6	243.4	266.2	289.0	311.8	334.7

Tabela 6.7 Prosečna produkcija deponijskog gasa krajem posmatranog perioda u zavisnosti od parametara ω_r i ϕ_r

$\phi_r \backslash \omega_r$	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	102.2	102.2	102.2	102.2	102.2	102.3	102.3	102.3	102.3	102.3	102.3
10%	102.2	103.4	104.5	105.7	106.9	108.0	109.2	110.3	111.5	112.7	113.8
20%	102.2	104.5	106.8	109.1	111.5	113.8	116.1	118.4	120.7	123.0	125.4
30%	102.2	105.7	109.1	112.6	116.1	119.5	123.0	126.5	130.0	133.5	136.9
40%	102.2	106.8	111.4	116.1	120.7	125.3	130.0	134.6	139.2	143.9	148.5
50%	102.2	108.0	113.7	119.5	125.3	131.1	136.9	142.7	148.5	154.3	160.2
60%	102.2	109.1	116.1	123.0	129.9	136.9	143.9	150.8	157.8	164.8	171.8
70%	102.2	110.3	118.4	126.5	134.6	142.7	150.8	159.0	167.1	175.3	183.5
80%	102.2	111.4	120.7	129.9	139.2	148.5	157.8	167.1	176.5	185.8	195.1
90%	102.2	112.6	123.0	133.4	143.8	154.3	164.8	175.3	185.8	196.3	206.8
100%	102.2	113.7	125.3	136.9	148.5	160.1	171.8	183.4	195.1	206.8	218.4

6.6 Uticaj temperature spoljašnjeg vazduha

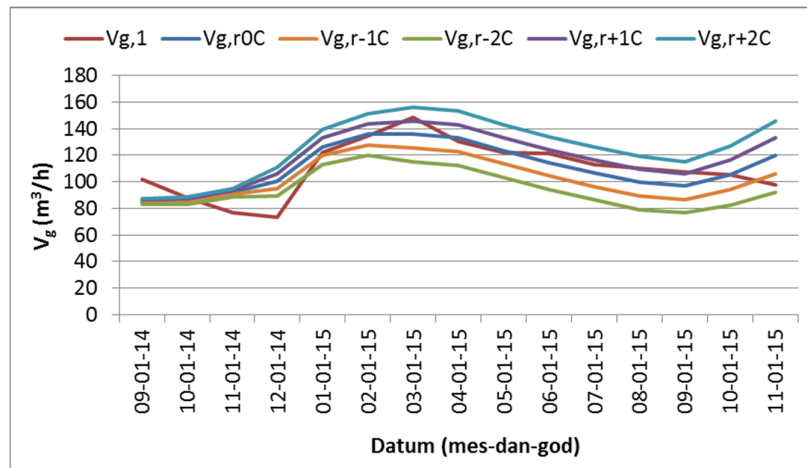
Poznato je da temperatura okoline pogoduje bakterijskim aktivnostima koje u anaerobnim uslovima omogućuju generisanje deponijskog gasa. Za razliku od neizolovanih deponija, gde spoljašnja temperatura ima značajan uticaj u generisanju deponijskog gasa, kod izolovanih sanitarnih deponija, kao što je predmetna, to nije slučaj, što se vidi i na slici 6.39 gde su prikazane tačke sa vrednostima protoka deponijskog gasa na bazi merenja i pripadajućim prosečnim dnevnim temperaturama kada su vršena očitavanja. Može se veoma lako uočiti velika disperzija tačaka oko linije trenda bez mogućnosti da se izvede bilo kakava zavisnost protoka gasa od spoljašnje temperature, kao što je i očekivano.



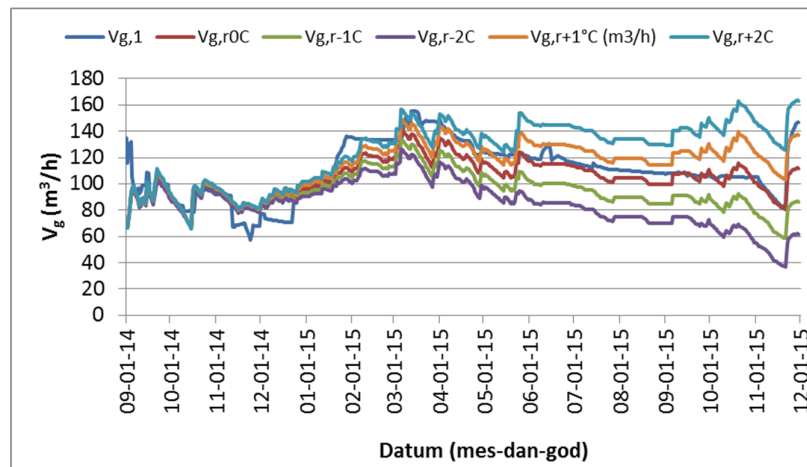
Slika 6.39 Uticaj spoljašnje temperature na produkciju deponijskog gasa

Međutim, postoji svakako indirektni uticaj temperature koji se može analizirati u kontekstu bilansa vlage na deponiji, čiji uticaj se u pokazao u praksi, a u ovom radu dodatno i numerički kvantifikovao. Naime, spoljašnja temperatura utiče na vrednost evapotranspiracije (ET) i varijacije koeficijenta oticanja padavina (ψ_{var}), što se može videti u prikazanim formulama proračuna bilansa vlage. Pri porastu temperatura značajno raste vrednost ET , što je i logično jer veće temperature rezultuju većim isparavanjem i time utiču da manje ulazne vlage dospeva u telo deponije. Sa druge strane, porastom spoljašnje temperature ψ_{var} se smanjuje, što omogućuje da više ulazne vlage dospeva unutar deponije. Za navedene parametre važi i obrnut slučaj promene vrednosti. Navedeni uticaji imaju međusobno suprotnosmerno dejstvo.

Slike 6.40 i 6.41 prikazuju uticaj temperature na produkciju deponijskog gasa iz ugla bilansa vlage razmatrajući slučajeve različitih spoljašnjih temperatura dok vrednosti svih ostalih parametara ostaju nepromenjene, pri čemu slika 6.40 daje očekivane promene bilansiranjem na mesečnom nivou, dok slika 6.41 daje promene bilansiranjem na dnevnom nivou. Simulirani su slučajevi za razliku u spoljašnjih temperatura od -2, -1, +1 i +2 °C u odnosu na vrednosti spoljašnje temperature po danima tokom posmatranog vremenskog perioda. Može se videti da sa promenama prosečne spoljašnje temperature dolazi do značajnije promene protoka deponijskog gasa. Očigledno dominira uticaj temperature na vrednost ψ_{var} , u odnosu na promene ET , tako sa povećanjem spoljašnje temperature dolazi do rasta produkcije deponijskog gasa i obrnuto.



Slika 6.40 Krive protoka deponijskog gasa po mesecima u zavisnosti od promene temperature spoljšanjeg vazduha



Slika 6.41 Krive protoka deponijskog gasa po danima u zavisnosti od promene temperature spoljšanjeg vazduha

6.7 Ostali uticaji

Stalno povećanje količine otpada utiče na postepeno povećanje protoka generisanog deponijskog gasa, nezavisno od svih ostalih uticaja. Rezultati modelovanja iz poglavlja 5 pokazali su da očekivano povećanje protoka po modelima, shodno promeni količina deponovanog otpada iznosi: 17%, 9% i 26% za LandGEM, IPCC 2006 I CIE model, respektivno. Ako se posmatraju podaci na bazi merenja, promena tokom perioda od 01.09.do 28.02. daje rezultujuće vrednosti protoka od 101 i 107 m³/h, na bazi aritmetičkog proseka očitanih merenja, odnosno 84 i 115 m³/h, koji se dobijaju deljenjem ukupno sagorelih količina deponijskog gasa sa ukupnim brojem sati rada baklje, u sezonama 2014/2015 i 2015/2016, respektivno. Navedene razlike ne uzimaju u obzir druge uticajne parametre, koje je teško izolovati. Prosečne koncentracije metana, koje su bile 54 i 57% u sezonama 2014/2015 i 2015/2016, respektivno, mogu se pripisati analiziranom uticaju potpritiska. U drugoj sezoni je ostvarena bolja regulacija potpritiska, a moguće je da je vršeno i redovnije pražnjenje prikupljenog kondenzata iz gasnog cevovoda, što su operateri na deponiji prepoznali kao potencijalnu prepreku koja dovodi do povećanja pada pritiska i smanjenja protoka deponijskog gasa.

Zaključno sa 28.02.2015. godine za rad IC grejača potrošeno je ukupno 6.965 m³ deponijskog gasa, što čini 0,5% od ukupno sagorele količine gasa na baklji, koja je na ovaj dan iznosila 1.407.223 m³. Ovo je praktično zanemarljivo u odnosu na ukupno prikupljene količine deponijskog gasa. Međutim, protok gasa na grejaču može da bude i do 5% u odnosu na protok na baklji. S obzirom na ovu činjenicu, kao i tehničko rešenje kojim se omogućava paralelan rad baklje i grejača na zahtev korisnika, kao i da se gasovod održava u nadpritisku da bi grejač mogao da radi, moguće oscilacije protoka gasa na baklji u zavisnosti od rada grejača nisu tako zanemarljive i mogle su da uzrokuju razlike između krivih proračunskih i stvarnih vrednosti deponijskog gasa.

Rezultati istraživanja na deponiji Sudokwon, najvećoj u Koreji, sprovedenog u cilju procene potencijala godišnjih količina generisanja metana primenom empirijskih formula na bazi BMP i lisimetarskih testova, i LandGEM modela, pokazali su da promene u količini otpada imaju znatno veći uticaj na predviđanje potencijala metana u odnosu na promene sastava otpada (Cho, Moon, & Kim, 2012). Razlog za ovo je da nije bilo značajnih razlika u potencijalu generisanja metana (L_0) individualno deponovanog otpada različitih sastava komponenti. Navodi se da, uprkos različitim modelima predviđanja potencijala generisanja metana, postoji još uvek neizvesnost kada je reč o vrednosti parametra L_0 .

Uticaj atmosferskog pritiska na količine prikupljenog deponijskog gasa nije zabeležen. Osetljivost fluksa gasa na barometarski pritisak je daleko veći kod deponija koje imaju sopstvenu ventilaciju. Istraživanje na deponiji sa pasivnim sistemom prikupljanja deponijskog gasa u severnoj Nemačkoj (Gebert & Groengroeft, 2006), koje se bavilo monitoringom dinamike emisija merenjima pritiska deponijskog gasa, protoka i sastava, kao i atmosferskog pritiska i temperature, pokazalo je da su emisije deponijskog gasa direktno vezane sa promenama atmosferskog pritiska, dnevnim varijacijama i prelazima pritiska na usponima i padovima. Dinamika emisija je pokazala ne samo različite količine emitovanog metana, već i uspostavljanje različitih profila sastava deponijskog gasa.

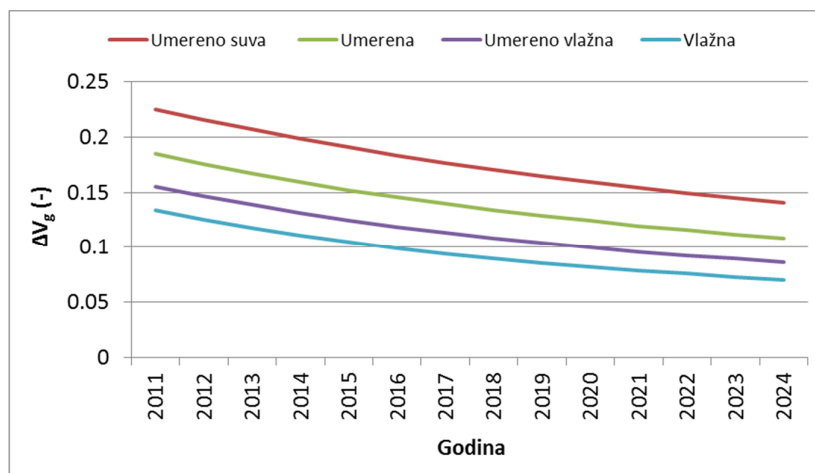
Većina deponija čvrstog komunalnog otpada u regionu nemaju postrojenja za prikupljanje proizvedenog biogasa, a još veći problem je što se na deponijama ne radi adekvatno u cilju sprečavanja emisija metana, širenja požara, dima i mirisa od samozapaljenja otpada. Simulacija difuzije metana i potencijalnog uticaja na populaciju, u slučaju kada bi celokupna količina generisanog metana bila emitovana u atmosferu (da nema postrojenja za prikupljanje i sagorevanje deponijskog gasa), urađena je pomoću ADMS5 softvera korišćenjem meteoroloških podataka za 3 sezone. Ovo istraživanje je pokazalo da su nivoi koncentracije metana relativno mali na udaljenosti od 1.500 m od deponije tokom letnjeg perioda, dok su više od dvostruko veći tokom proleća i zime, što je i očekivano, s obzirom na sezonski promenljive uticaje temperature i vlage koji utiču na proces oksidacije metana prolaskom kroz gornji prekrivač deponije. Meteorološki parametri, koji se uglavnom u ovakvim simulacijama vezuju za brzinu i pravac dominantnog vetra, koncentracije metana u vazduhu, koje dosežu do naseljenih lokacija, su veoma male u poređenju sa relevantnom literaturom (Vujić, i drugi, 2016).

7 Primena recirkulacije ca aspekta energetskog iskorišćenja deponijskog gasa

7.1 Uporedna analiza modela produkcije deponijskog gasa sa aspekta dovedene vlage

7.1.1 Istočno-evropski (srpski) model

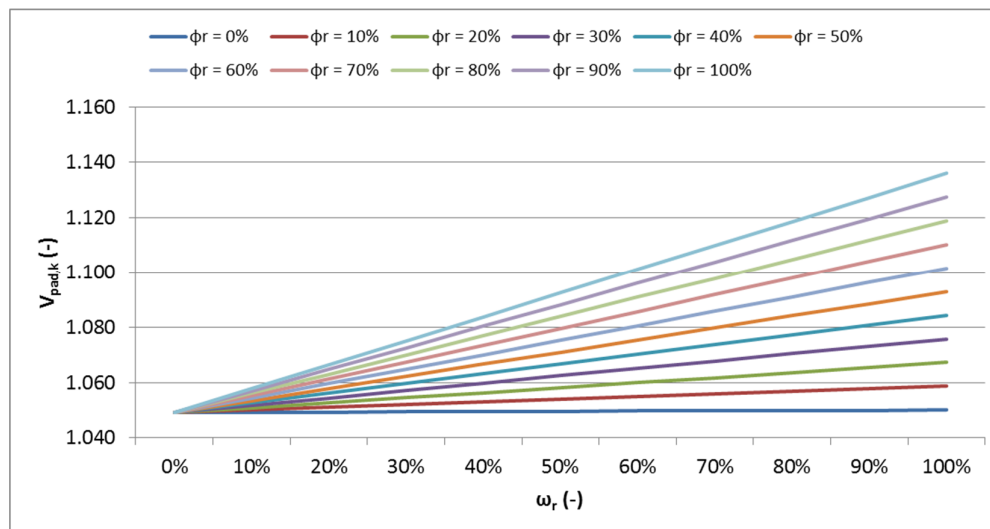
Na slici 7.1 je na primeru istočno-evropskog (srpskog) modela prikazana stopa povećanja generisanja deponijskog gasa tokom vremena za različite vrednosti količine padavina, shodno klimatskim uslovima, sa vrednostima koje bi odgovarale periodu od 15 meseci, analogno rezultatima ovog istraživanja. Povećanja predstavljaju odnos produkcije deponijskog gasa za količinu padavina koje odgovaraju prosečnim vrednostima za susedne klimatske zone. Kriva crvene boje predstavlja udeo povećanja protoka deponijskog gasa pri padavinama od 450 mm/god, za područja sa umereno suvom klimom, u odnosu na protok sa prosekom padavina od 350 mm/god, koliko je pretpostavljeno za područja sa suvom klimom. Kriva zelene boje predstavlja udeo povećanja protoka deponijskog gasa pri padavinama od 550 mm/god, za područja sa umerenom klimom u odnosu na protok sa prosekom padavina od 450 mm/god za umereno suhu klimu, i tako redom. Prosečna vrednost padavina za područja sa vlažnom klimom uzeta je sa 750 mm/god.



Slika 7.1 Stopa povećanja protoka deponijskog gasa na primeru Istočno-evropskog (srpskog) modela

Kao što se može videti stopa povećanja generisanog deponijskog gasa je najveća u prvim godinama rada deponije da bi tokom vremena opadala. Povećanjem nivoa padavina na svakih 100 mm povećanje stope generisanja deponijskog gasa se naizgled smanjuje. Međutim, povećanja stope generisanja deponijskog gasa su proporcionalna povećanju udela padavina. Ako bismo povećanje ulazne količine vlage recirkulacijom na deponiju iskazali kroz povećanje padavina, dobile bi se vrednosti kao na slici 7.2. Kao što se može zapaziti na slici 7.2, recirkulacija koncentrata daje povećanje priliva vlage od 4,9%, dok bi se pri maksimalno mogućoj recirkulaciji, sa vrednostima parametara ω_r i φ_r od 100%, ostvarilo povećanje priliva vlage od nešto manje od 14%. Međutim, povećanje prosečne produkcije deponijskog gasa bi u tom slučaju moglo da dostigne čak 114% u odnosu na slučaj bez recirkulacije

procedne vode, što se može videti i na osnovu vrednosti datih u tabeli 7.1. Za uslove vlažne klime, kojoj odgovara slučaj analizirane deponije, stopa povećanja produkcije deponijskog gasa u 2015.godini iznosi 10%. Za uslove umereno vlažne klime ova vrednost je nešto veća i iznosi 12%.



Slika 7.2 Uticaj vrednosti parametara ω_r i ϕ_r na povećanje udela vlage recirkulacijom u odnosu na padavine

Korišćenjem dobijenog modela na bazi ovog istraživanja dobija se da je povećanje produkcije deponijskog gasa od 10% moguće postići recirkulacijom procedne vode koja omogućava povećanje ukupno dovedene vlage na deponiji od svega 0,8%, kao što je prikazano u tabeli 7.2 zatamnjeno sivom bojom. U odnosu na povećanje padavina od 15%, koliko je slučaj na primeru srpskog modela, model iz ovog doktorata daje čak 18 puta veću osetljivost vlage na produkciju deponijskog gasa. Navedeno povećanje vlažnosti i protoka deponijskog gasa deluje relativno lako da se postigne u praksi primenom recirkulacije. U tabeli 7.1 je prikazano povećanje prosečne produkcije deponijskog gasa na godišnjem nivou u odnosu na vrednosti parametara ω_r i ϕ_r . Zatamnjene ćelije table u sivoj boji daju najbliže moguće kombinacije vrednosti parametara ω_r i ϕ_r koje obezbeđuju povećanje prosečne godišnje produkcije deponijskog gasa od 10%. Ako bi se npr. uzela kombinacija vrednosti parametara ω_r i ϕ_r od 10% i 90%, prema prikazanim podacima u tabeli 6.6, protok deponijskog gasa na kraju postmatranog perioda iznosio bi 127,6 m³/h, umesto 107,4 m³/h, koliko je izmereno bez recirkulacije, što daje povećanje od 19,2%.

Tabela 7.1 Povećanje prosečne produkcije deponijskog gasa za različite vrednosti parametara ω_r i ϕ_r

$\phi_r \backslash \omega_r$	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
10%	0%	1%	2%	3%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%
20%	0%	2%	5%	7%	9%	11%	14%	16%	18%	20%	23%
30%	0%	3%	7%	10%	14%	17%	20%	24%	27%	31%	34%
40%	0%	5%	9%	14%	18%	23%	27%	32%	36%	41%	45%
50%	0%	6%	11%	17%	23%	28%	34%	40%	45%	51%	57%
60%	0%	7%	14%	20%	27%	34%	41%	48%	54%	61%	68%
70%	0%	8%	16%	24%	32%	40%	48%	56%	64%	71%	79%
80%	0%	9%	18%	27%	36%	45%	54%	63%	73%	82%	91%
90%	0%	10%	20%	31%	41%	51%	61%	71%	82%	92%	102%
100%	0%	11%	23%	34%	45%	57%	68%	79%	91%	102%	114%

Tabela 7.2 Povećanje udela recirkulacijom procedne vode u odnosu na „zatečeno“ stanje za različite vrednosti parametara ω_r i ϕ_r

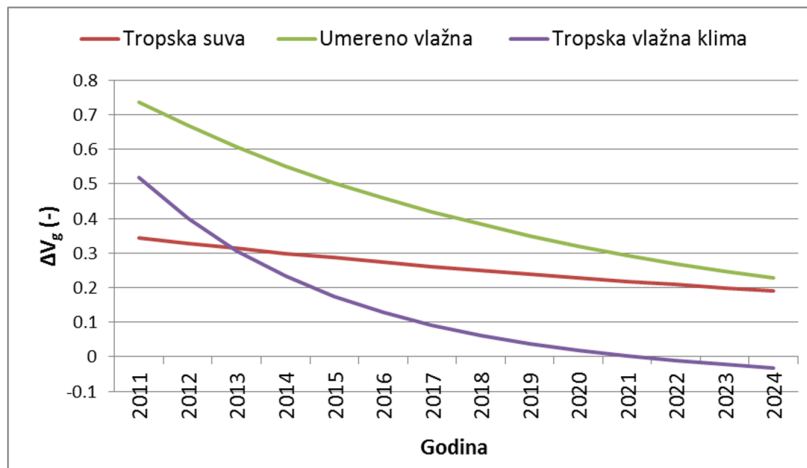
$\phi_r \backslash \omega_r$	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001
10%	1.000	1.001	1.002	1.003	1.004	1.005	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009
20%	1.000	1.002	1.003	1.005	1.007	1.009	1.010	1.012	1.014	1.016	1.017
30%	1.000	1.003	1.005	1.008	1.010	1.013	1.015	1.018	1.020	1.023	1.026
40%	1.000	1.003	1.007	1.010	1.013	1.017	1.020	1.024	1.027	1.030	1.034
50%	1.000	1.004	1.008	1.013	1.017	1.021	1.025	1.029	1.034	1.038	1.042
60%	1.000	1.005	1.010	1.015	1.020	1.025	1.030	1.035	1.040	1.045	1.050
70%	1.000	1.006	1.012	1.017	1.023	1.029	1.035	1.041	1.047	1.052	1.058
80%	1.000	1.007	1.013	1.020	1.027	1.033	1.040	1.047	1.053	1.060	1.066
90%	1.000	1.007	1.015	1.022	1.030	1.037	1.045	1.052	1.060	1.067	1.075
100%	1.000	1.008	1.017	1.025	1.033	1.041	1.050	1.058	1.066	1.075	1.083

7.1.2 IPCC model

Slično prethodnom primeru, na slici 7.3 je prikazana stopa povećanja generisanja deponijskog gasa tokom vremena za različite klimatske uslove za IPCC model. Povećanja predstavljaju odnos produkcije deponijskog gasa za susedne klimatske zone sa pripadajućom prosečnom količinom padavina prema samoj njihovoj podeli. Kriva crvene boje predstavlja odnos produkcije deponijskog gasa pri prosečnim padavinama od 465 mm/god, koje odgovaraju području sa tropsko suvom klimom, u odnosu na produkciju sa prosekom padavina od 395 mm/god, koje odgovaraju području sa umereno suvom klimom. Kriva zelene boje predstavlja odnos produkcije deponijskog gasa pri padavinama od 550 mm/god, za područja sa umereno vlažnom klimom, u odnosu na produkciju sa prosekom padavina od 465 mm/god za tropsko suhu klimu. Na kraju, kriva ljubičaste boje predstavlja odnos produkcije deponijskog gasa pri padavinama od 650 mm/god, za područja sa tropskom vlažnom klimom u odnosu na produkciju sa prosekom padavina od 550 mm/god za umereno vlažnu klimu.

Na primeru ovog modela se može zapaziti da je stopa povećanja generisanog deponijskog gasa sa povećanjem padavina takođe najveća na početku, da bi tokom vremena padala. Za razliku od istočno-evropskog (srpskog) modela, razlika u produkciji deponijskog gasa u odnosu na količinu padavina je daleko veća, kao što je očigledan različit pad stope produkcije tokom vremena za različite krive. Dobija se da za umereno vlažnu klimu kriva povećanja produkcije deponijskog gasa sa povećanjem padavina u odnosu na susednu klimu sa nižim padavinama, ima najviše vrednosti tokom čitavog 15-godišnjeg perioda. Vrednosti stope povećanja produkcije deponijskog gasa tokom vremena za ovu klimu padaju sa 74% na 23%. Tropska suva klima ima umerene vrednosti i pad stope povećanja generisanog deponijskog gasa u odnosu na povećanje padavina, koje ide od 34% do 19%, dok tropska vlažna klima ima pad stope koji ide od 52% do -3%. Negativni pad stope govori da je produkcija deponijskog gasa, premda još uvek nije dostigla svoju maksimalnu vrednost, koja se očekuje u 15. godini rada deponije, daje manju produkciju deponijskog gasa u zoni tropski vlažne klime u odnosu na umereno vlažnu klimu. Ovo je moguće bržim raspadom otpada u tropski vlažnoj klimi u odnosu na umereno vlažnu, kao što je prikazano na slici 5.4, gde se vidi da vrednosti protoka deponijskog gasa u poslednjim godinama u umereno vlažnoj klimi imaju veće vrednosti u odnosu na tropski vlažnu klimu, nasuprot očekivanom.

Za uslove tropske vlažne klime, kojoj odgovara slučaj analizirane deponije, stopa povećanja produkcije deponijskog gasa u 2015. godini iznosi 16%. Za uslove umereno vlažne klime ova vrednost iznosi 42%, dok za uslove tropske suve klime iznosi 23%.

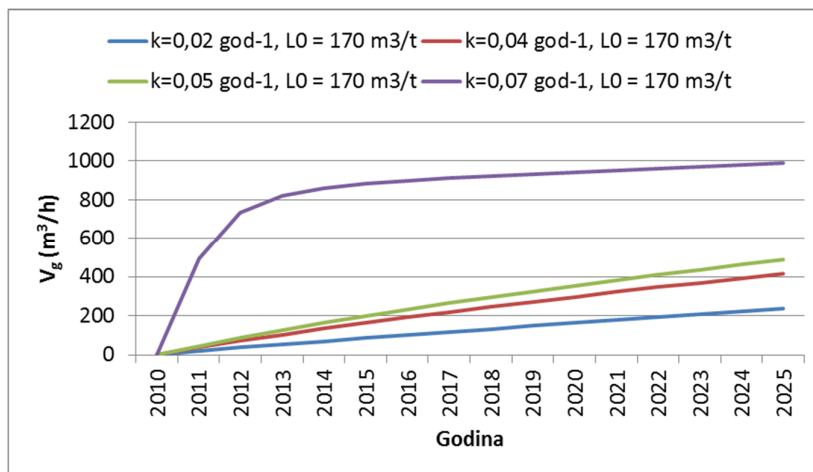


Slika 7.3 Stopa povećanja protoka deponijskog gasa na primeru IPCC modela

Dobijena zavisnost na bazi ovog istraživanja daje da je povećanje produkcije deponijskog gasa od 16% i 42%, moguće povećanjem ukupno dovedene vlage na deponiji za 1,2%, odnosno 3%, za slučaj umereno vlažne i tropske suve klime, respektivno. Navedeni podaci se mogu videti u tabelama 7.1 i 7.2, u ćelijama zatamnjenim u plavoj i zelenoj boji, što je moguće postići kombinacijom parametara ω_r i ϕ_r prikazanom u navedenim tabelama. U odnosu na povećanje padavina od 18%, koliko je slučaj na primeru IPCC modela, model iz ovog doktorata daje čak 6 i 15 puta veći uticaj povećanja dovođenja vlage na produkciju deponijskog gasa za umereno vlažnu i tropsku klimu, respektivno. Ako bi se npr. uzela kombinacija vrednosti parametara ω_r i ϕ_r od 20% i 70% za ostvarivanje rezultata tropski vlažne klime, protok deponijskog gasa na kraju postmatranog perioda bi iznosio $138,9 \text{ m}^3/\text{h}$, što daje povećanje od 29,3%. Sa kombinacijom vrednosti parametara ω_r i ϕ_r od 40% i 90% za ostvarivanje rezultata umereno vlažne klime, protok deponijskog gasa na kraju postmatranog perioda iznosio bi $188,7 \text{ m}^3/\text{h}$, što daje povećanje od 75,6%. Kada je u pitanju uticaj padavina, ovaj model daje veći uticaj u odnosu na srpski model.

7.1.3 LandGEM model

Kao što je iz već opisanih matematičkih modela moglo da se zapazi, najveća odstupanja u produkciji deponijskog gasa zabeležena su u LandGEM modelu. Rezultati dobijeni korišćenjem ovog modela zavise od dva glavna ulazna podatka koje unosi korisnik, a to su L_0 i k . L_0 zavisi od tipa i sastava deponovanog otpada, a za konvencionalne deponije je svakako najbliža ponuđena vrednost $170 \text{ m}^3/\text{h}$. Slika 7.4 prikazuje prosečne vrednosti deponijskog gasa koje se dobijaju korišćenjem LandGEM modela za različite vrednosti koeficijenta k , odnosno stopu padavina, koje bi se mogle predstaviti različitim klimatskim područjima. Podsećanja radi, ovo je model čije vrednosti za uslove $k=0,05$ najbliže odgovaraju rezultatima merenja na deponiji u Bjeljini.

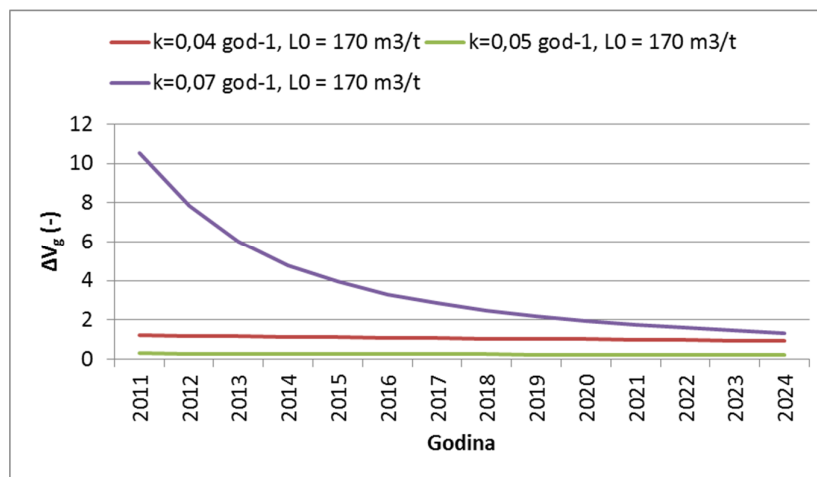


Slika 7.4 Prosečne vrednosti protoka generisanog deponijskog gasa u zavisnosti od k

Na slici 7.5 su prikazane krive stope povećanja generisanog deponijskog gasa tokom vremena za različite vrednosti količine padavina, na isti način kao što je urađeno na prethodnim modelima. Kriva ljubičaste boje predstavlja odnos produkcije deponijskog gasa za područja vlažnijom klimom, koju karakteriše veća količina padavina, dok preostale krive predstavljaju klime sa manjom količinom padavina.

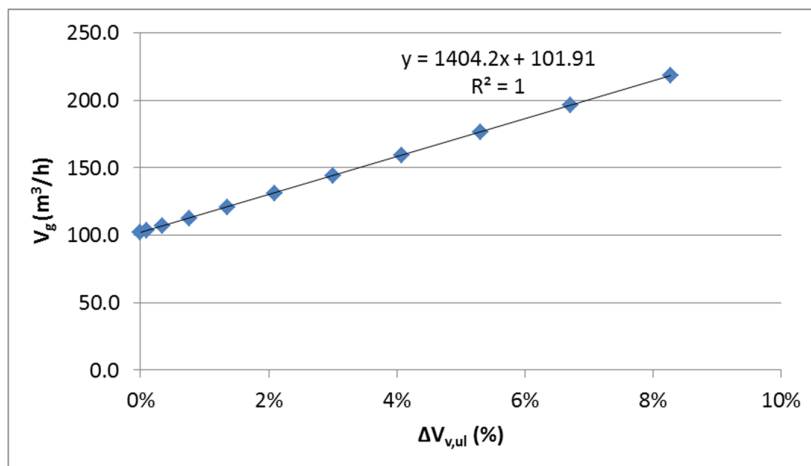
Na primeru ovog modela se mogu zapaziti izvesne razlike u odnosu na prethodne. Stopa povećanja generisanog deponijskog gasa za krivu kojoj odgovaraju najveće vrednosti padavina, sa vrednošću parametra $k=0,07$, ima drastičan pad, i to sa veoma visokih početnih vrednosti 20 do 50 puta većim nego u ostalim modelima. Ostale krive imaju znatno blaži pad tokom vremena, koji je manji u odnosu na prethodno analizirane modele. Kriva koju karakteriše vrednost parametra $k=0,04$ ima stopu povećanja generisanog deponijskog gasa u odnosu na klimu sa manje padavina, koja opada sa 122% na 94%. Kriva sa vrednosti parametra $k=0,05$ ima stopu povećanja generisanja deponijskog gasa u odnosu na susednu klimu sa manje padavina, koja opada sa 30% na 22%, što je mnogo bliže vrednostima dobijenim u ostalim modelima.

Za klimu kojoj odgovara parametar $k=0,05$, najbliže slučaju analizirane deponije, stopa povećanja produkcije deponijskog gasa u 2015.godini iznosi 27%. Kod klime koja je opisana parametrom $k=0,07$, stopa povećanja produkcije deponijskog gasa u 2015.godini iznosi 394%.



Slika 7.5 Stopa povećanja protoka deponijskog gasa na primeru LandGEM modela

Na bazi dobijenih prosečnih godišnjih vrednosti protoka deponijskog gasa i povećanja udela priliva vlage primenom recirkulacije od 0 do 100% dobijena je kriva zavisnosti, kao što je prikazano na slici 7.6. Na bazi zavisnosti date na slici 7.6 moguće je odrediti prosečnu vrednost protoka deponijskog gasa na godišnjem nivou za povećanje priliva vlage van granica ostvarenih recirkulacijom, kao i obrnuto, izračunavanje vrednosti povećanja priliva vlage za zadate vrednosti protoka deponijskog gasa. Sa date slike se može uočiti da svaki procenat povećanja priliva vlage u odnosu na postojeću količinu ulazne vlage, koja uključuje padavine sa recirkulacijom koncentrata, doveo bi do povećanja produkcije deponijskog gasa za 13,8%.



Slika 7.6 Povećanje protoka deponijskog gasa u odnosu na povećanje priliva vlage

Korišćenjem zavisnosti krive na slici 7.6 dobija se da je povećanje produkcije deponijskog gasa od 27% i 394%, moguće povećanjem ukupno dovedene vlage na deponiji za 2%, i 28,7%, za slučaj klime sa vrednostima koeficijenta $k=0,05$ i $0,07$. Povećanje od 2% je moguće postići kombinacijom parametara ω_r i φ_r kao što je prikazano u tabelama 7.1 i 7.2 u ćelijama zatamnjеним crvenom bojom. Ovaj model daje daleko veći uticaj, odnosno osetljivost, količine padavina na produkciju deponijskog gasa, u odnosu na Istočno-evropski (srpski) model. Povećanje priliva vlage od 28,7%, daleko prevazilazi ono što bi se teorijski moglo postići primenom 100% recirkulacije procedne vode. Kao i u slučaju recirkulacije procedne vode, to bi značilo da celokupna razlika povećanja priliva vlage na deponiju ode na povećanje vlažnosti otpada. Povećanje priliva vlage na deponiji pri datoj klimi nije izvodljivo jer bi to značilo priliv od 940 mm na godišnjem nivou, što odgovara realnoj količini padavina u oblastima odgovarajućih klimatskih uslova. Ovo bi moglo da znači da bi deponija sličnih karakteristika i uslova rada u drugoj klimatskoj zoni mogla teorijski da produkuje datu količinu gasova. Prikaz krivih iz LandGEM modela je pokazao znatno veći potencijal produkcije deponijskog gasa u odnosu na ostale modele, što se pokazuje kao moguće koristeći dobijenu zavisnost produkcije od priliva vlage i može da predstavlja određeni vid verifikacije rezultata modela na bazi sprovedene analize u okviru ovog istraživanja.

7.1.4 Uticaj vlage dovedene recirkulacijom koncentrata na produkciju deponijskog gasa

Na bazi dosadašnjih razmatranja uticaj dovedene vlage koncentrata na produkciju deponijskog gasa mogao bi da se kvantifikuje na jedan od sledeća 3 načina:

- 1) Korišćenjem vrednosti krivih prikazanih na slici 6.33 kao razlika količina dobijenih krivama 1 (postojeća recirkulacija procedne vode i koncentrata) i 2 (postojeća recirkulacija procedne vode, bez recirkulacije koncentrata);

- 2) Primenom zavisnosti prikazane na slici 7.6 na bazi podataka dobijenih u tabelama 6.6, 6.7, 7.1 i 7.2;
- 3) Uparednom analizom izmerenih vrednosti protoka deponijskog gasa na biotrnovima u blizini lokacija izlivanja koncentrata u odnosu na ostale biotrnove.

Dobijeni rezultati primenom prvog način daju, tokom posmatranog vremenskog perioda (od 01.09.2014. do 30.11.2015. godine), prosečne vrednosti protoka deponijskog gasa od 104,9 i 95,3 m³/h, odnosno 10% veće količine gasa u slučaju primene recirkulacije koncentrata. Procedna voda i koncentrat u recirkulaciji se koriste za proračun ulazne vlage na deponiji, koja utiče na akumulaciju vlage unutar otpada, ali se ova količina ne tretira kada je reč o njenom direktnom uticaju na povećanje rezultujuće akumulirane vlage. Računa se da se stvara višak procedne vode u odnosu na postojeće količine, koji se u daljem proračunu ne tretira.

Kada je reč o drugom načinu, korišćenjem date zavisnosti za prliv vlage za dodatnih 4,9%, koliko se trenutno dovodi recirkulacijom koncentrata, što se može ostvariti kombinacijom parametra ω_r i φ_r u vrednosti 80% i 70%, došlo bi do generisanja 63% veće količine deponijskog gasa u odnosu na protok bez recirkulacije procedne vode, a sa recirkulacijom koncentrata. U ovom slučaju se pretpostavlja da se kompletna količina procedne vode u recirkulaciji, koja čini 56% ukupno generisanih količina, koristi za povećanje rezultujuće akumulirane vlage na deponiji, umesto što bi se tretirala u postrojenju za prečišćavanje, kao dosada. Višak procedne vode se, kao i u prethodnom slučaju, ne tretira u daljem proračunu.

U slučaju primene trećeg načina analiza pokazuje da je protok gasa na obližnjim biotrnovima B-1, B-2, B-3 i B-9 veći od proseka biotrnova na deponiji za 30%, 53%, 4% i 44%, što daje potencijalni uticaj na povećanje ukupnog protoka od 6,9%. Ne može se tačno utvrditi koliki je delokrug koncentrata od mesta izlivanja do pojedinih biotrnova, pa samim tim i njegovo pravo dejstvo na povećanje vlažnosti otpada.

Prvi i drugi način na osnovu numeričke analize, indirektnim putem na bazi merenja, daju potencijalni, makar i teorijski, uticaj recirkulacije koncentrata na povećanje vlažnosti, pa samim tim i stope produkcije deponijskog gasa, dok treći način više predstavlja pokušaj da se uticaj vlage koncentrata na stopu produkcije deponijskog gasa kvantifikuje u realnim uslovima rada na bazi direktnih merenja zatečenog postojećeg stanja.

Razlika od eventualnih, realno ostvarljivih rezultata do rezultata koji bi se teoretski mogli ostvariti može da bude usled toga što u stvarnosti dolazi do gubitka koncentrata oticanjem i evapotranspiracijom u većoj meri nego što je proračunom uzeto u obzir. Razlog za ovo je površinsko izlivanje, kao i izlivanje relativno velikih količina koncentrata sa jednog mesta u odnosu na npr. padavine, kao i oticanje dela koncentrata makroskopskim strujanjem i strujanjem u kratkom krugu direktno do drenažne cevi. Ako je sudeći pa dobijenim vrednostima, može se zaključiti da je trenutnoj realnosti na ovoj deponiji bliži slučaj sa $\varphi_r = 0\%$. Kao što je ranije navedeno, boljom distribucijom koncentrata, a potom i procedne vode, sa direktnim ubrizgavanjem u telo deponije, u praksi bi se moglo uticati kako na povećanje vrednosti parametra φ_r , tako i na smanjenje navedenih gubitaka količine van tela deponije, čime bi se mogao ostvariti veći uticaj koncentrata i, barem delimično, približio potencijalu prikazanom u drugom načinu.

S obzirom na, makar i teorijski dobijenu, zavisnost stope produkcije deponijskog gasa od rezultujuće vlage koja se akumulira na deponiji, može se zaključiti da postoji značajan potencijal za povećanje protoka deponijskog gasa, pa samim tim i njegovo energetske iskorišćenje, primenom recirkulacije procedne vode, o čemu će biti više reči u odeljku koji sledi. Istraživanje generisanja gasa i emisija na eksperimentalnoj ćeliji kapaciteta 36.659 t otpada u Brazilu (Maciel & Jucá, 2011), koje uključuje poznavanje tačnog sastava otpada sa monitoringom produkcije i emisija deponijskog gasa, geotehničke i biološke procene, uz korišćenje 3 tipa konačne prekrivke, pokazali su takođe značajan

uticaj vlage na produkciju deponijskog gasa. Naime, rezultati istraživanja su pokazali da se otpad razgrađuje 4-5 puta brže u tropski vlažnim klimatskim uslovima nego što daju predviđanja tradicionalnih modela prvog reda korišćenjem uobičajenih parametara.

7.2 Strategija upravljanja recirkulacijom

Vrednosti parametra recirkulacije ω_r i φ_r zavise od sposobnosti samog otpada, odnosno deponije u celosti, kao makro sistema, da absorbuje vlagu. S obzirom na promenljivost vremenskih uslova tokom godine, uz ograničenja koja nameće sam otpad, vrednosti ovih parametara su takođe promenljive tokom godine. Za potrebe analize koja sledi, uvode se pretpostavke da je vrednost parametra φ_r nepromenljiva tokom godine i da ima vrednost 100% bez obzira na promenljivu vrednost ω_r i drugih parametara. To znači da će kompletna količina procedne vode u recirkulaciji koja se dovede deponiji da se iskoristi za vlaženje otpada bez stvaranja dodatne količine procedne vode. Krive zavisnosti dobijene u dosadašnjim razmatranjima važe za nepromenljive vrednosti ω_r i φ_r tokom vremena, dok je naredna analiza pokušaj da se izvrši odgovarajuća optimizacija koja uključuje promenu ω_r vrednosti po mesecima kako bi se zadovoljili postavljeni kriterijumi, odnosno da se utvrdi najbolja strategija upravljanja recirkulacijom shodno postavljenim ciljevima. Proporcionalno udelu recirkulacije procedne vode recirkuliše se i koncentrat, kao ostatak procesa prečišćavanja procedne vode, kao i u dosadašnjim analizama, što predstavlja i postojeću praksu njegovog tretmana na samoj deponiji.

7.2.1 Kriterijumi optimizacije recirkulacije procedne vode

Neki od potencijalnih ciljeva, odnosno kriterijuma, kojima bi moglo da se teži odgovarajućim režimom recirkulacije procedne vode, a tiče se njenog uticaja na produkciju deponijskog gasa, su sledeći: 1) ostvarivanje što je moguće ravnomernijih vrednosti prosečnih protoka deponijskog gasa tokom meseci, 2) povećani protoci deponijskog gasa tokom zimskih, a smanjeni tokom letnjih meseci i 3) ostvarivanje maksimalne stope produkcije deponijskog gasa.

Kada je reč o kriterijumu 3, jasno je da se maksimalna produkcija postiže maksimalnom mogućom recirkulacijom, odnosno pri $\omega_r = 100\%$. Važi i obrnuto, a to je da će se minimalne količine proizvesti kada se recirkulacija ne primenjuje. Maksimalna stopa produkcije deponijskog gasa omogućila bi ostvarenje sledećih najvažnijih prednosti: 1) najveći stepen razgradnje i stabilizacije otpada tokom vremena, 2) odvođenje najveće moguće količine metana iz deponije njegovim kontrolisanim prikupljanjem i sagorevanjem na baklji ili energetskom postrojenju, što bi dalo najveću efikasnost prikupljanja metana i najmanje emisije u atmosferu nakon sagorevanja deponijskog gasa i konverzije metana u ugljen-dioksid, 3) proizvodnja veće količine energije i 4) minimiziranje količina procedne vode, pa samim tim i troškova rada postrojenja za prečišćavanje. Dalje, prilikom usvajanja kapaciteta energetskog postrojenja u cilju njegove optimizacije mogu se postaviti dodatni kriterijumi, kao što su: maksimalna efikasnost iskorišćenja energije iz deponijskog gasa, maksimalna proizvodnje energije ili ostvarivanje maksimalnog profita čitavog projekta. Kada bi cilj bio ostvarivanje maksimalne proizvodnje energije primenom odabrane energetske tehnologije, logično bi se težilo usvajanju većeg kapaciteta postrojenja. Za ostvarivanje veće efikasnosti rada logički bi se išlo ka smanjenju kapaciteta, kako se ne bi desilo da postrojenje mora da bude veći udeo vremena u pogonu pri opterećenjima manjim od nominalnog. Ako bi cilj bio optimizacija troškova i ostvarivanja maksimalnog profita, pored investicionog ulaganja i samih potreba potrošača, trebalo bi imati u vidu da se sami troškovi produkcije deponijskog gasa malo razlikuju, da je ovo praktično besplatan energent i da je bolje da se u što većoj meri iskoristi, makar i sa nižom efikasnošću rada energetskog postrojenja.

Sa druge strane, ukoliko bismo deponiju posmatrali kao ograničen izvor energije sa tačno definisanom vrednošću, koju bismo mogli da iskoristimo u potpunosti tokom dužeg vremenskog perioda, odnosno da upravljamo procesom raspadanja i stabilizacije otpada pod dejstvom vlage, analiza bi išla u pravcu željene produkcije tokom meseci, što se razmatra kriterijumima 1 i 2. Razmatranje ovih kriterijuma ima smisla kada je cilj ostvarivanje većeg stepena iskorišćenja postrojenja pogonom u nominalnom režimu rada uz prilagođavanje potrebama potrošača za energijom. Ovakvo razmatranje svakako treba uzeti sa rezervom s obzirom da je jedan od glavnih ciljeva što potpunija razgradnja otpada tokom aktivnog vremena njegovog rada i odlaganja na deponiju, kako bi se smanjili troškovi post održavanja deponije i posledice potencijalnih nekontrolisanih emisija u životnu sredinu tokom godina, dok je samo energetska iskorišćenje nus proizvod koji se dobija iz otpada. Kao što se moglo videti i iz rezultata korišćenih matematičkih modela deponijski gas iz otpada u praksi dostiže svoj veći ili manji maksimum u isto vreme, nakon 15 godina, zavisno od količine vlage koja se dovodi na deponiju, što bi razmatranje ovih kriterijuma činilo manje atraktivnim za analizu.

S obzirom da je u stvarnosti vrednost parametra φ_r daleko manja od 100%, sa većim ili manjim razlikama u vrednosti, kao i da značajna količina otpada ostaje fizički netaknuta u praksi rada deponije, može se uslovno govoriti o optimizaciji primenom različitih vrednosti parametra ω_r . Trebalo bi svakako nastojati da se ide sa što većim vrednostima ω_r koje otpad može da primi. U daljem toku rada izvršiće se proces optimizacije za prva dva navedena kriterijuma za vrednost $\varphi_r = 100\%$.

7.2.2 Optimizacija po kriterijumu 1

Ideja sa optimizovanjem vrednosti parametra ω_r radi ostvarivanja što ravnomernijih vrednosti prosečnih protoka deponijskog gasa tokom meseci jeste da se u mesecima sa većom produkcijom deponijskog gasa dovede manje vlage recirkulacijom procedne vode, i obrnuto. Izračunavanje ω_r u tom slučaju vrši se korišćenjem sledećeg izraza:

$$\omega_{r,mes} = \frac{V_{gmax,mes} - V_{g,mes}}{\Delta V_g \cdot \frac{\Delta x}{\Delta \omega_{r,10\%}}} \cdot \frac{V_{pv,r,mes}}{V_{pv,r,sr}} \quad (7.1)$$

gde je:

- $\omega_{r,mes}$ - prosečna vrednost udela recirkulacije procedne vode na mesečnom nivou [-]
- $V_{gmax,mes}$ - maksimalna prosečna mesečna vrednost protoka deponijskog gasa [m^3/h]
- $V_{g,mes}$ - prosečna mesečna vrednost protoka deponijskog gasa [m^3/h]
- ΔV_g - povećanje protoka deponijskog gasa u zavisnosti od povećanja priliva vlage [m^3/h]
- Δx - povećanje udela vlage u odnosu na padavine koji odgovara povećanju udela recirkulacije za 10% (iz modela dobijena vrednost $\Delta x = 0,8\%$)
- $\Delta \omega_{r,10\%}$ - povećanje udela recirkulacije za 10%
- $V_{pv,r,mes}$ - količina recirkulisane procedne vode u datom mesecu [m^3/mes]
- $V_{pv,r,sr}$ - prosečna mesečna količina recirkulisane procedne vode, [m^3/mes]

Na slici 7.6 prikazana je zavisnost protoka deponijskog gasa od procentualnog udela povećanja vlage dovedene deponiji iskazano u odnosu na padavine, što se može prikazati sledećim matematičkim izrazom:

$$V_g = V_{g,0} + \Delta V_g = 101,91 + 1404,2x \quad (7.2)$$

gde je:

- $V_{g,0}$ - prosečna godišnja vrednost protoka deponijskog gasa za slučaj bez recirkulacije procedne vode [m^3/h] ($V_{g,0} = 101,91 m^3/h$)

Zamenom izraza (7.2) u izraz (7.1) dobija se:

$$\omega_{r,mes} = \frac{V_{gmax,mes} - V_{g,mes}}{112,336} \cdot \frac{V_{pv,r,mes}}{V_{pv,r,sr}} \quad (7.3)$$

Ovako određena optimizovana vrednost parametra $\omega_{r,mes}$ ne uzima u obzir uticaj temperature spoljašnjeg vazduha po mesecima na koeficijent preraspodele oticanja - ψ i potencijalnu evapotranspiraciju – ETP, čiji je uticaj analiziran u prethodnom poglavlju, tako da ova vrednost nije u potpunosti precizno određena. Precizno određivanje vrednosti $\omega_{r,mes}$ uzimanjem u razmatranje navedenih parametara koji zavise od temperature bilo bi suviše komplikovano, što na kraju daleko prevazilazi i tačnost usvajanja vrednosti pojedinih parametara u ovoj analizi.

Tabela 7.3 daje vrednosti ω_r sa rezultujućim vrednostima prosečnog protoka deponijskog gasa po mesecima, dobijenim iz poznatih vrednosti parametara V_g , za slučaj kada ne postoji recirkulacija procedne vode, kao i vrednosti V_{pv} , dobijenih na bazi merenja, a koje figurišu u izrazu (7.3). U martu 2015.godine je ostvarena $V_{gmax,mes}$ sa vrednošću $125 m^3/h$, koja se kao takva uzima referentna za proračun. Optimizovanjem vrednosti parametra ω_r dobija se aritmetički mesečni prosek za čitav period od 28%, prosečan protok u poslednjem mesecu se povećava za 43,3%, dok se prosečan protok tokom čitavog perioda povećava za 25,3%.

Tabela 7.3 Optimizovane vrednosti recirkulacije sa pripadajućim protocima deponijskog gasa

Meseci	V_g ($\omega_r=0\%$) (m^3/h)	V_{pv} (mm)	ω_r (-)	$V_g(\omega_r)$ (m^3/h)
Sep-14	91.7	12.4	20%	94.2
Oct-14	87.1	3.4	82%	94.4
Nov-14	84.0	4.3	71%	97.5
Dec-14	88.5	6.9	39%	108.1
Jan-15	101.1	5.4	33%	123.7
Feb-15	115.7	8.3	8%	141.3
Mar-15	125.0	20.4	0%	151.4
Apr-15	119.1	11.8	4%	146.0
May-15	109.6	7.1	16%	137.4
Jun-15	111.7	5.2	19%	142.1
Jul-15	104.1	8.6	18%	136.2
Aug-15	99.2	3.2	60%	133.7
Sep-15	102.1	8.4	20%	138.9
Oct-15	109.9	11.6	10%	151.6
Nov-15	108.3	7.3	17%	155.2
Prosek	103.8	8.3	28%	130.1

U tabeli 7.4 su date vrednosti $V_{gmax,mes}$ koje su odabrane i kao takve određuju scenarije S1-S6. Na osnovu ovih vrednosti su izračunate vrednosti $\omega_{r,mes,sr}$, pre i nakon izvršene korekcije, kao i prosek $V_{g,mes}/V_{gmax,mes}$, koji se može posmatrati kao indikator uravnoteženosti protoka tokom meseci. Što je

ovaj odnos veći protok je uravnoteženiji. Tako vidimo da u scenariju S1 sa optimizovanim vrednostima ω_r imamo povećanje vrednosti ovog odnosa u poređenju sa scenarijom bez recirkulacije. Povećanjem referentnih protoka, odnosno recirkulacije tokom meseci, teže je ostvariti uravnoteženost protoka deponijskog gasa tokom vremena. Kada je u pitanju upravljanje protocima generisanog deponijskog gasa radi se o relativno inertnom procesu, koji omogućava postepene promene protoka, što je i logično ako se ima u vidu da je u pitanju deponija realnih razmera, mnogo većih u odnosu na bilo koje industrijsko postrojenje, kao i da na klimatske uslove nije moguće uticati, kao što ni vlažnost otpada ne može brzo i drastično da se menja.

Tabela 7.4 Definisane scenarija sa različitim referentnim vrednostima $V_{gmax,mes}$

Parametar	Scenario						
	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$V_{gmax,mes}$ (m ³ /h)	125.0	125.0	135	150	170	195	218
$\omega_{r,mes,sr}$ - proračun	0%	28%	39%	56%	78%	107%	133%
$\omega_{r,mes,sr}$ - korigovani	0%	28%	39%	51%	66%	80%	89%
Prosek u odnosu na max (1)	0.83	0.84	0.80	0.76	0.72	0.69	0.68
Prosek u odnosu na max (2)	0.88	0.93	0.90	0.87	0.85	0.83	0.82

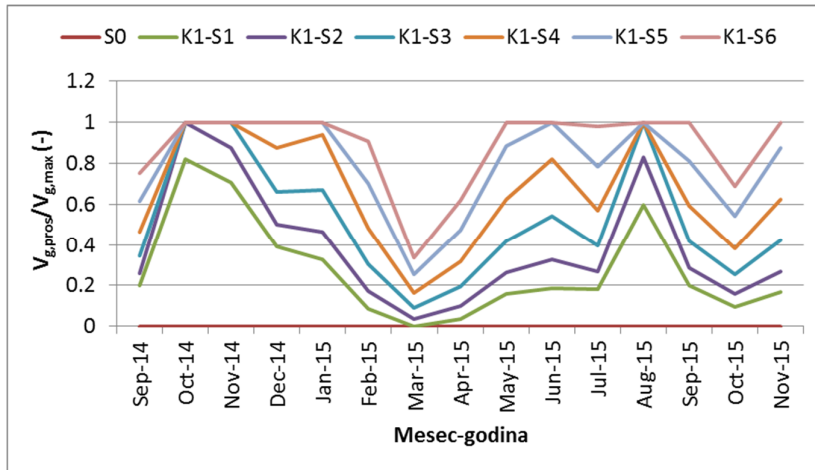
Prosek u odnosu na max (1) – odnos prosečne i maksimalne vrednosti $V_{g,mes}$ za period 09/2014-11/2015

Prosek u odnosu na max (2) – odnos prosečne i maksimalne vrednosti $V_{g,mes}$ za period 03-11/2015

Tabela 7.5 daje optimizovane vrednosti parametra ω_r po mesecima. S obzirom da parametar ω_r može teorijski da ima maksimalnu vrednost 100%, sve veće vrednosti su korigovane smanjenjem na 100%, a korigovane optimizovane vrednosti parametra $\omega_{r,mes,sr}$ za date scenarije su prikazane na slici 7.7. Pad odnosa prosečnih u odnosu na maksimalnu vrednost, odnosno smanjenje uravnoteženosti protoka po mesecima sa povećanjem $V_{gmax,mes}$ potiče upravo od potrebe da se vrednosti $\omega_{r,mes,sr}$ tokom većeg broja meseci naknadno koriguju.

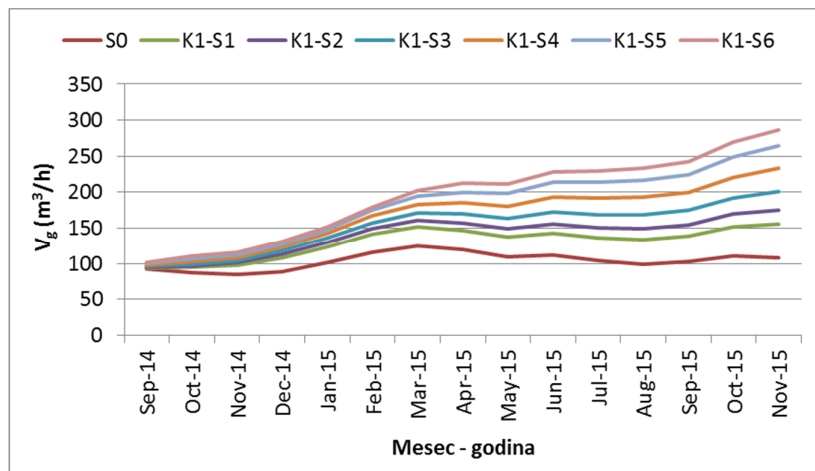
Tabela 7.5 Pregled optimizovanih vrednosti parametra ω_r po scenarijima

Meseci	Scenario						
	S0	K1-S1	K1-S2	K1-S3	K1-S4	K1-S5	K1-S6
Sep-14	0%	20%	26%	35%	47%	61%	75%
Oct-14	0%	82%	103%	136%	179%	233%	283%
Nov-14	0%	71%	88%	113%	148%	191%	230%
Dec-14	0%	39%	50%	66%	88%	115%	139%
Jan-15	0%	33%	46%	67%	94%	128%	160%
Feb-15	0%	8%	17%	30%	48%	70%	91%
Mar-15	0%	0%	4%	9%	16%	25%	34%
Apr-15	0%	4%	10%	19%	32%	47%	62%
Maj-15	0%	16%	26%	42%	63%	88%	112%
Jun-15	0%	19%	33%	54%	82%	117%	150%
Jul-15	0%	18%	27%	40%	57%	78%	98%
Avg-15	0%	60%	83%	118%	164%	222%	276%
Sep-15	0%	20%	29%	42%	59%	81%	101%
Okt-15	0%	10%	16%	26%	38%	54%	69%
Nov-15	0%	17%	27%	42%	62%	88%	111%
Prosek	0%	28%	39%	56%	78%	107%	133%

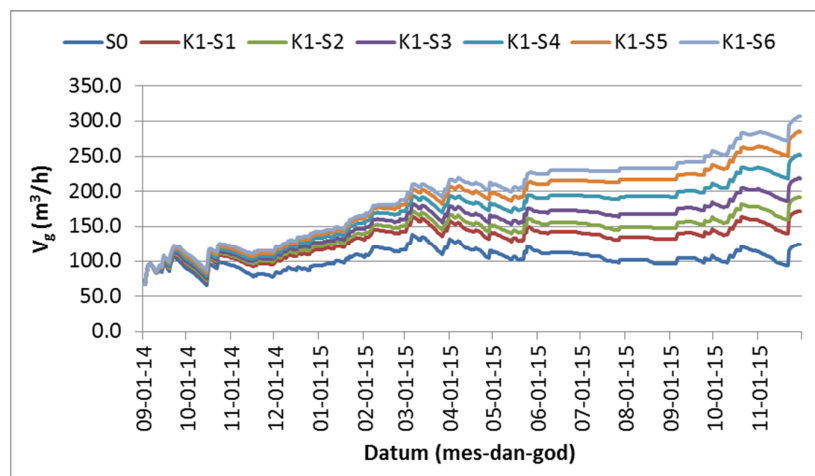


Slika 7.7 Prikaz korigovanih vrednosti parametra ω_r za date scenarije

Konačno, promena protoka deponijskog gasa za različite scenarije upravljanja procednim vodama data je na slikama 7.8 i 7.9, koje prikazuju prosečne mesečne i dnevne vrednosti.



Slika 7.8 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (mesečni proseci)

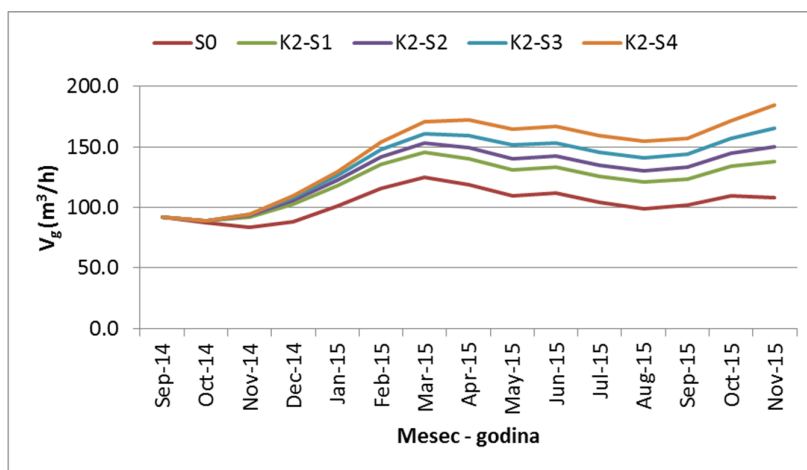


Slika 7.9 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (vrednosti na dnevnom nivou)

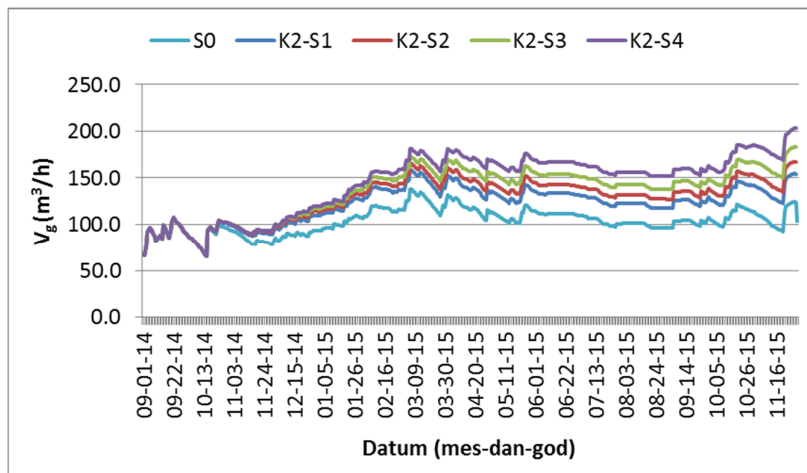
7.2.3 Optimizacija po kriterijumu 2

Optimizacija po kriterijumu 2 je izvršena tako što su preuzete vrednosti optimizovanih parametara $\omega_{r,mes,sr}$ po kriterijumu 1, s tim da su vrednosti recirkulacije za period od maja do septembra uzete sa 0%. Na taj način se težilo dobijanju uravnoteženih količina po mesecima uz uslov da se tokom zimskih meseci proizvode veće, a tokom letnjih manje količine deponijskog gasa. Razlog za postavljanje ovakvog kriterijuma može da bude npr. u smanjenoj potražnji toplotne energije tokom letnjih meseci, s obzirom da nema grejanja, kako bi kogeneraciono postrojenje radilo sa većim brojem radnih sati u nominalnom opterećenju, koje obezbeđuje veću efikasnost rada uređaja.

Slike 7.10 i 7.11 prikazuju promenu protoka deponijskog gasa za četiri različita scenarija (koja odgovaraju scenarijima K1-S1 do K1-S4 iz prethodne optimizacije) upravljanja procednim vodama sa prosečnim mesečnim i dnevnim vrednostima protoka deponijskog gasa.



Slika 7.10 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (mesečni proseci)



Slika 7.11 Protok deponijskog gasa tokom vremena za date scenarije (vrednosti na dnevnom nivou)

Odnos prosečnih vrednosti protoka deponijskog gasa za period 05-09.2015. godine i 10.2014-03.2015. godine iznosi 87%, 89%, 91% i 93%, dok je ovaj odnos kod kriterijuma 1 iznosio 91%, 95%, 99% i 103% za scenarije S1-S4, respektivno. Dobijene su generalno niže vrednosti protoka tokom letnjih

meseci u odnosu na zimske mesece, sa izraženim padom vrednosti u poređenju sa kriterijumom 1, čime je ispunjen cilj ovog kriterijuma.

Poslednja analiza pokazala je moguće strategije primene recirkulacije procedne vode u praksi u zavisnosti od postavljenih ciljeva. Na sličan način bi se mogla sprovesti analiza i optimizacija za neki drugi postavljeni kriterijum.

8 Završne napomene i zaključci

8.1 Opšte napomene

U ovoj doktorskoj disertaciji akcenat je dat na istraživanju uticaja recirkulacije koncentrata i procedne vode na deponiji komunalnog otpada na produkciju deponijskog gasa. Jedan od ciljeva je bio da se potencijalni uticaj i kvantifikuje numerički, ili barem da se odredi mogući opseg uticaja s obzirom na nepoznate vrednosti određenih uticajnih parametara. Jedna od najvećih nepoznanica svakako je vezana za hidrologiju, odnosno prisustvo i kretanje vode kroz deponiju, što je jedan od najbitnijih faktora koji utiču na degradaciju otpada, pa samim tim i prateće emisije, od kojih su svakako najvažniji procedna voda i deponijski gas. Parametri kao što su: hidraulička provodljivost, permeabilnost i dr. predstavljaju vrednosti koje se empirijski određuju, te se kao takvi nalaze u funkciji karakteristika otpada (sastav, stepen kompaktnosti, pritiska, opterećenja i starosti otpada), prekrivnog sloja zemlje, medijuma koji struji kroz otpad (voda, procedna voda), heterogene strukture samog otpada i njegove promenljivosti usled stalnih fizičko-hemijskih procesa itd. Ne zalazeći u samu strukturu otpada i određivanje ovih parametara, a na osnovu vrednosti dobijenih merenjima kreiran je model za konkretnu deponiju u čijoj osnovi se nalazi bilans vlage, a koji je dodatno opisan vrednostima parametara emisija sa deponija kao rezultat razlaganja otpada u kojem vlaga ima dokazano presudnu ulogu. U poređnom analizom dobijenih podataka utvrđena je na prvom mestu zavisnost stope produkcije deponijskog gasa od ulazne vlage, a potom i od drugih uticajnih parametara. Dobijena funkcionalna zavisnost je iskorišćena u daljim razmatranjima simuliranjem promenljivog režima recirkulacije koncentrata i procedne vode na deponiju, uz navedene neizvesnosti vezane za sam otpad, u cilju sagledavanja potencijalnog uticaja recirkulacije koncentrata i procedne vode na generisane količine deponijskog gasa i njegovo potencijalno veće energetske iskorišćenje.

Istraživanje je sprovedeno na deponiji u Bjeljini, jednoj od najmodernijih u regionu za deponovanje komunalnog otpada, sa ugrađenim savremenim postrojenjima za prikupljanje generisanog deponijskog gasa iz tela deponije i prečišćavanje procednih voda i sistema za monitoring emisija. Tačnost i obimnost izmerenih vrednosti najznačajnijih relevantnih parametara su u najvećoj mogućoj meri iskorišćene za sprovođenje sveobuhvatnog istraživanja, koje predstavlja pionirski poduhvat, naročito ako se ima u vidu da u stručnoj literature ne postoji mnogo sličnih istraživanja na deponijama realnih razmera. Jedan od najznačajnijih podataka dobijenih merenjima za analizu energetskog iskorišćenja jesu svakako vrednosti protoka deponijskog gasa dobijene merenjima. Period praćenja deponije tokom kojeg su detaljno analizirani prikupljeni podaci trajao je dve godine, odnosno 15 meseci tokom kojih su analizirane vrednosti dobijene paralelnim praćenjem rada navedenih postrojenja.

Na putu do željenog cilja istraživanja i provere postavljenih hipoteza prvo je analiziran uticaj koncentrata na produkciju deponijskog gasa koji se nakon prečišćavanja procedne vode tretira ponovnim vraćanjem tj. recirkulacijom na deponiju. Njegov uticaj razmatran je kroz kvalitativno-kvantitativnu analizu. Kvalitativna analiza rađena je kroz laboratorijsko određivanje potencijala generisanja deponijskog gasa prikupljenih uzoraka koncentrata, odnosno parametara hemijsko-bioloških potencijala koncentrata i procedne vode tokom dva uzastopna ciklusa rada postrojenja za prečišćavanje reverznom osmozom.

Merenja protoka deponijskog gasa na baklji su pokazala promene tokom vremena, a naročito su upečatljiva povećanja protoka deponijskog gasa tokom većih padavina, premda je uočljivo da to nije uvek slučaj. Ova zapažanja su navela autora na sveobuhvatnu numeričku analizu koja se bavi uticajima

različitih relevantnih parametara na produkciju deponijskog gasa, a naročita vlage, s obzirom da je njen uticaj dokazan kao najznačajniji i u stručnoj literaturi. Pored izučavanja mnogobrojnih rezultata i zaključaka laboratorijskih istraživanja u okviru teorijskog dela izrade ove doktorske disertacije, posebna pažnja posvećena je radovima na pilot i deponijskim postrojenjima realnih razmera sa akcentom na efekte primenom recirkulacije procedne vode i koncentrata, što je poslužilo kao osnova za pripremu predmetnog istraživanja.

8.2 Zaključci

Najznačajniji rezultat ovog istraživanja jeste svakako doprinos boljem razumevanju uticaja vlage na produkciju deponijskog gasa i samim tim njegovo veće energetske iskorišćenje. Dobijeni rezultati istraživanja, koje se zasniva na primeni recirkulacije koncentrata i procedne vode na deponiji, bi trebalo da doprinesu boljem upravljanju procesa produkcije deponijskog gasa sa predikcijama tačnih količina tokom vremena, većem korišćenju deponijskog gasa kao obnovljivog izvora energije, povećanju mogućnosti za implementaciju budućih projekata njegovog energetske iskorišćenja uz veću isplativost ovakvih projekata. Naravno, rezultati koji idu u prilog većem energetske iskorišćenju deponijskog gasa, praćeni su i dostizanjem najvažnijih ciljeva odlaganja otpada na deponijama, a to su: bolji tretman i stabilizacija otpada, niži prateći troškovi prečišćavanja procednih voda i monitoringa i, kao najvažniji, smanjeni uticaj rizik po životnu sredinu nakon prestanka aktivnog korišćenja deponije, odnosno njenog zatvaranja. Za razliku od svih dosadašnjih matematičkih modela koji daju predikcije sa prosečnim vrednostima protoka na godišnjem nivou, rezultati dobijeni primenjenom metodologijom omogućavaju praćenje promena na mesečnom i dnevnom nivou uz mogućnost boljeg planiranja i upravljanja proizvodnjom optimizacijom režima rada u recirkulaciji. Time je i postavljena osnovna hipoteza istraživanja u okviru ove doktorske disertacije dokazana.

Na osnovu sprovedenog istraživanja i analize dobijenih rezultata mogu da se navedu i sledeći korisni zaključci koji potvrđuju posebne hipoteze istraživanja:

- Uticaj organske materije koncentrata na produkciju deponijskog gasa nije dokazan eksperimentalnim određivanjem prinosa na bazi laboratorijske analize zbog niskih vrednosti suve organske materije supstrata, podložne razlaganju.
- Numeričkim putem uz pomoć dodatnih laboratorijskih analiza izračunat je teorijski potencijal produkcije deponijskog gasa iz koncentrata određivanjem HPK i BPK koncentracija, koje se kao relevantne analiziraju i u stručnoj literaturi. Maksimalne vrednosti generisanja metana iz koncentrata iznose 0,1 m³/h metana, što predstavlja udeo od 0,07% u odnosu na ukupno generisane količine.
- Merenja sastava deponijskog gasa na najbližem biotru mestu izlivanja koncentrata pokazala su da uticaj koncentrata na produkciju deponijskog gasa postoji i u praksi. Uz pretpostavku da kompletna organska materija koncentrata prelazi u deponijski gas, te ukoliko bi se to manifestovalo isključivo kroz povećanje koncentracije metana, efikasnost uklanjanja HPK iz koncentrata, odnosno njegova transformacija u deponijski gas bi se mogla proceniti na 25%. Deponija se u ovom slučaju ponaša kao biološki prečistač, što je dokazano brojnim laboratorijskim istraživanjima u metanogenoj fazi. S obzirom da je realnije da samo deo organske materije, biodegradabilni, pređe u deponijski gas, ova efikasnost bi mogla da bude i viša, što na deponijama realnih razmera nije realno očekivati, s obzirom da su slična merenja na mnogo manjim pilot postrojenjima dala efikasnost uklanjanja HPK koncentracije od 40 do 48% nakon prvog dana recirkulacije. Ne može se ni tačno utvrditi u kojoj meri samo kretanje koncentrata i procedne vode unutar deponije, znatno većih vrednosti HPK koncentracija,

doprinosi očiglednom povećanju koncentracije metana u deponijskom gasu s obzirom da slične analize i merenja ovog uticaja nisu zabeležene u stručnoj literaturi.

- Merenja protoka deponijskog gasa na biotrnovima, čak i sa izraženim većim greškama, su pokazala znatno veći uticaj vlage koncentrata na produkciju deponijskog gasa, tako da je protok na biotrn, koji je najbliži izlivnom mestu koncentrata, pokazao čak 30% veću vrednost u odnosu na očekivanu vrednost na bazi količine lokalno deponovanog otpada u blizini ovog biotrna. Koristeći istu metodologiju analize može se zapaziti da četiri najbližih biotrnova u odnosu na mesto izlivanja koncentrata daju prosečno 33% veći protok deponijskog gasa, što na nivou čitave deponije čini 6,9% i predstavlja potencijalni kvantitativni uticaj recirkulacije koncentrata.
- Bilans vlage na mesečnom nivou pokazao je veliko poklapanje krive dobijene direktnim merenjima protoka na deponiji i krive na bazi proračuna dobijenog korišćenjem modela. Prosečna odstupanja krivih na mesečnim nivoima su niža od 10%.
- Model pokazuje visoku tačnost i za predikciju protoka deponijskog gasa od priliva vlage na deponiju sa praćenjima na dnevnom nivou. Uporednom analizom bilansa vlage i protoka deponijskog gasa po danima dobijeni su odlični rezultati i poklapanja, pri čemu se pokazalo da očekivane promene nisu izostale, kao i da je reakcija deponije, na rezultujuću vlagu koja u nju dospeva, brza u smislu generisanja deponijskog gasa. Rezultati su pokazali da gotovo ni jedna promena na dnevnom nivou nije slučajna.
- Shodno značajnom uticaju vlage, rezultati proračuna su pokazali da značajan uticaj na generisanje količina deponijskog gasa ima i spoljašnja temperature. Temperatura otpada u izolovanoj sanitarnoj deponiji ne zavisi od spoljašnje temperature, pa samim tim ona nema direktan uticaj ni na uslove anaerobnog razlaganja otpada, što se pokazalo i dijagramom u slučaju predmetne deponije. Ovaj uticaj je indirektan, a simulacija na dnevnom nivou praćenja promena je pokazala da razlika u prosečnim godišnjim temperaturama ima značajan uticaj na protok deponijskog gasa. Temperatura ima dominantan uticaj na vrednost vrajacije koeficijenta oticanja (ψ_{var}), u odnosu na promene evapotranspiracije (ET). Povećanje spoljašnje temperature za 1 °C dovodi do rasta protoka deponijskog gasa na kraju posmatranog perioda za 10-15%, i obrnuto.
- Rezultati dobijeni numeričkom analizom na bazi modela produkcije deponijskog gasa na predmetnoj deponiji daju potencijalni uticaj vlage koja se dovodi recirkulacijom koncentrata u opsegu vrednosti od 10% do 63% u zavisnosti od vrednosti parametara φ_r , koji može da bude u opsegu od 0% do 100% i shodno tome utiče na pomenute granične uticaje. Ovaj parametar je definisan kao udeo recirkulisane procedne vode sa direktnim uticajem na povećanje vlažnosti otpada, a njegova vrednost u praksi opisuje u kojoj meri se radi o makroskopskom ($\varphi_r = 100\%$), a u kojoj o kanalskom strujanju vlage kroz otpad ($\varphi_r = 0\%$). Što je viša vrednost φ_r , recirkulacija će imati manji uticaj na generisanje dodatnih količina procedne vode.
- S obzirom da odlaganje koncentrata, koje se trenutno primenjuje, predstavlja najnepovoljniji vid njegove distribucije kroz otpad, pri čemu je očekivano da se veći deo koncentrata gubi oticanjem i evapotranspiracijom u odnosu na realne vrednosti (proračunom je uzeto kao da su u pitanju padavine), može se u stvarnosti očekivati niža vrednost parametra φ_r . Shodno tome izmereni uticaj od 6,9% i numerički dobijena vrednost od 10% su sličnog reda veličine.
- Uticaj dodatnog priliva vlage na otpad pokazao se mnogo većim na generisanje deponijskog gasa u odnosu na isti uticaj primenom uobičajeno korišćenih modela za predikciju količina deponijskog gasa. Premda je uticaj padavina u ovim modelima pokazan kao najznačajniji, merenja na deponiji su pokazala da je on znatno veći. Naravno, klimatski uslovi se ne mogu menjati, što daje da količina padavina ima manje-više određenu vrednost na godišnjem nivou. Jedini uporedni uticaj može se videti na primeru LandGEM modela za veće vrednosti parametra k , koja bi mogla da odgovara klimi sa većom količinom padavina. Model dobijen na bazi predmetnog istraživanja je značajan ne samo za deponije sa primenom recirkulacije procedne vode i koncentrata, već i za deponije koje se nalaze u drugim klimatskim zonama.
- Potpritisak i sistemu za prikupljanje deponijskog gasa ima takođe značajno uticaj kako na sastav, tako i na protok deponijskog gasa. Postoji idealna vrednost vakuuma koja bi trebala da se prati i

- održava tokom vremena u skladu sa promenama količina deponijskog gasa koje se generišu unutar otpada na deponiji. Upravljanje proizvodnjom deponijskog gasa i njegova optimizacija znače da se mora voditi računa o regulaciji vakuuma, što se postiže kontinualnim praćenjem stvarno generisanih količina, ali i boljim planiranjem procesa na bazi boljih predikcija generisanih količina u čemu daje doprinos i predmetno istraživanje. Izmerena odsupanja i poremećaji u protoku usled neadekvatnog vakuuma iznose i do 25%.
- Usled kanalskog strujanja u praksi recirkulacije koncentrata dolazi do neželjenog postepenog povećanja elektroprovodljivosti, što nije poželjno sa aspekta povećanja rizika od potencijalnog negativnog uticaja na okolinu. Na elektroprovodljivost procedne vode utiče u najvećoj meri distribucija koncentrata na deponiji, ali se na nju može uticati upravljanjem režimom rada postrojenja za prečišćavanje RO. U poređnom analizom produkcije deponijskog gasa i elektroprovodljivosti procedne vode i koncentrata se nije mogao nedvosmisleno dati odgovor, ali je zabeležen nagli pad protoka deponijskog gasa sa porastom elektroprovodljivosti, i obrnuto. Dolazi do naglog odstupanja krive stvarnih vrednosti protoka deponijskog gasa u odnosu na vrednosti dobijene proračunima.
 - Recirkulacija koncentrata takođe je mogla da ima negativan uticaj na produkciju deponijskog gasa u slučaju pada njegove pH vrednosti, kao što je bio slučaj u jednom periodu rada deponije, što se pokazalo i u padu pH vrednosti procedne vode na bazi kvartalnih analiza. Pad pH vrednosti koncentrata mogao je eventualno da izazove poremećaj metanogenih procesa i smanjenje produkcije deponijskog gasa, kao što bi povećanje pH vrednosti koncentrata eventualno moglo da ima pozitivan uticaj na povećanje protoka deponijskog gasa, s obzirom da je poznato da kisela sredina ne pogoduje razvoju metanogenih bakterija. Međutim, ovaj uticaj, koji bi takođe imao lokalno dejstvo na otpad u blizini mesta izlivanja, možda i ne tako veliki, nije mogao sa sigurnošću da se odredi i potvrdi s obzirom da u vremenskom periodu u kojem je došlo do pada pH vrednosti koncentrata, koji je navodno izazvan kvarom sonde za mrenje ove vrednosti na postrojenju za prečišćavanje, nije bilo očitavanja merenja protoka gasa na baklji.
 - Primenom kreiranog modela moguće je bolje upravljanje procesom generisanja deponijskog gasa primenom odgovarajuće strategije recirkulacije procedne vode. Strategija predstavlja optimizovano upravljanje režimom recirkulacije u zavisnosti od postavljenih kriterijuma. U cilju što potpunije razgradnje otpada na deponiji svakako bi bilo u interesu da se dovede što je moguća veća količina vlage, što bi kao rezultat dalo i najveće količine deponijskog gasa, koji bi se delom iskoristio, a delom kontrolisano spalio na baklji, čime bi se emisije u atmosferu svele na najmanju moguću meru. Dat je primer strategija koje za cilj imaju povećanje energetske iskorisćenja deponijskog gasa, ali i same energetske efikasnosti rada energetske postrojenja, gde se na primeru pod okolnostima $\varphi_r = 100\%$ pokazalo kako je moguće promenljivim udelima recirkulacije uticati na generisanje, ne samo većih, već i ravnomernijih količina deponijskog gasa tokom meseci u godini, imajući u vidu ostale uslove.

8.3 Pravci daljih istraživanja

Model dobijen ovim istraživanjem trebalo bi unaprediti podacima na bazi daljih eksperimentalnih istraživanja sa recirkulacijom procedne vode. Osim što bi se dala praktična provera modela kroz veću mogućnost upravljanja produkcijom deponijskog gasa primenom recirkulacije, ovakva istraživanja bi kao rezultat omogućila određivanje pretpostavljene nepoznate vrednosti parametra φ_r , koji predstavlja udeo recirkulisane procedne vode sa direktnim uticajem na povećanje vlažnosti otpada. Što je ovaj parametar veći, efikasnija je recirkulacija procedne vode na povećanje produkcije i energetske iskorisćenje deponijskog gasa. Tokom vremena se predviđa postepeno povećavanje recirkulacije procedne vode na deponiji ω_r do granice u kojoj je moguće ostvariti maksimalnu produkciju deponijskog gasa. Naravno, praksa će pokazati da li je i u kojoj meri izvodljiva recirkulacija procedne vode, koja pored tehničke izvodljivosti samog procesa, ne sme da naruši ostale neenergetske

parametre i ograničenja koja nameće samo tehničko rešenje deponije, kao i da ona nastavi da funkcioniše pod uslovima koji neće narušiti životnu sredinu sa prekoračenjima dozvoljenih emisija drugih supstanci i ostalih relevantnih činilaca koji su kao takvi definisani u dobijenim dozvolama za upravljanje otpadom i ekološkoj dozvoli.

Eksperimentalna istraživanja se mogu sprovesti za različite uslove rada, koji uključuju odabir izlivnog mesta procedne vode i koncentrata, odnosno njihove kombinacije, koji obezbeđuju različitu distribuciju unutar otpada. Predmetni model treba proveriti u praksi i na drugim deponijama koje poseduju adekvatan sistem za monitoring emisija generisanih procednih voda i deponijskih gasova, što bi omogućilo sticanje novih saznanja i validaciju numeričkog modela. Dalja istraživanja treba da obuhvate različite uslove i kada su u pitanju karakteristike otpada i prekrivnog materijala, naročito sa aspekta njihove permeabilnosti, odnosno mogućnosti propuštanja i upijanja vlage. Dalji napor u upravljanju otpada na deponiji treba da se usmere na primenu njegovog prethodnog tretmana i odabir odgovarajućih prekrivnih materijala, kao i tehničkih rešenja, poznatih u praksi, kojima bi se obezbedila bolja distribucija koncentrata i procedne vode, sa daljim praćenjima i merenjima uticaja na povećanje vlažnosti otpada i generisanje dodatnih količina deponijskog gasa.

Predmetna istraživanja bi mogla da se upare sa direktnim merenjima vlažnosti otpada na deponiji kako bi se stekla što realnija slika kada je reč o uniformnosti vlaženja otpada, odnosno uticaja dovedene vlage na vlažnost pojedinih delova otpada i shodno tome na karakteristike generisanog deponijskog gasa.

9 Literatura

- [1] Palma, L., Ferrantelli, P., Merli, C., & Petrucci, E. (2002). Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis. *Waste Management*, 22, 951–955.
- [2] (2018). Preuzeto sa Sajt Republičkog hidrometeorološkog zavoda Republike Srpske: <http://rhmrzs.com/>
- [3] Al-Kaabi, S. (2007). *Effect of salinity on biodegradation of MSW in bioreactor landfills* (PhD thesis izd.). Ottawa, Ontario, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering Carleton University.
- [4] Amini, H., Reinhart, D., & Mackie, K. (2012). Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. *Waste Management*, 32, 305–316.
- [5] (2013). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2011 and inventory report*. EEA (European Environment Agency).
- [6] (2018). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2016 and inventory report 2018*. EEA (European Environment Agency).
- [7] Armstrong, M., & Rowe, R. (1999). Effect of landfill operations on the quality of municipal solid waste leachate. *Proceeding Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, (str. 81-88). Cagliari, Italy.
- [8] Aziz, S., Aziz, H., Bashir, M., & Mojiri, A. (2014). Municipal Landfill Leachate Treatment Techniques: An Overview. U H. Aziz, & A. Mojiri (Urednici), *Wastewater Engineering: Advanced Wastewater Treatment Systems* (str. 228-224). Penang, Malaysia. doi:DOI: 10.12983/1-2014-03-01
- [9] Barlaz, M., Ham, R., & Schaefer, D. (1990). Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. *Crit Rev Environ Control*, 19, 557–584.
- [10] Barlaz, M., Schaefer, D., & Ham, R. (1989). Bacterial population development and chemical characteristics of decomposition in simulated sanitary landfill. *Applied and Environmental Microbiology*, 55, 55–65.
- [11] Bhalla, B., Saini, M., & Jha, M. (2013). Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2 (8).
- [12] Bidart, C., Schultmann, F., & Fröhling, M. (2013). Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives. *Applied Thermal Engineering*, 51, 1107-1115.
- [13] Bilgili, M., Demir, A., & Özkaya, B. (2007). Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid waste. *Journal of Hazardous Materials*, 143, 177–183.
- [14] Bilgili, S., Demir, A., & Özkaya, B. (2007). Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 143, 177–183.
- [15] *Bioreactor Landfill for Sustainable Solid Waste Landfill Management*. (2004). Thailand: Faculty of Engineering, Kasetsart University.
- [16] Bogner, J., Pipatti, R., Hashimoto, S., Diaz, C., Mareckova, K., Diaz, L., . . . Gregory, R. (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III. *Waste Management & Research*, 26, 11–32.
- [17] Broun, R., & Sattler, M. (2016). A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2664-2673.

- [18] Canziani, R., & Cossu, R. (1989). Landfill hydrology and leachate production. U T. Christensen, R. Cossu, & R. Stegmann, *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact* (str. 185-212). Academic Press, London.
- [19] Chan, G., Chu, L., & Wong, M. (2002). Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine. *Environmental Pollution*, 118, 393–399.
- [20] Chen, P. (1996). Assessment of leachates from sanitary landfills: impact of age, rainfall, and treatment. *Environment International - Journal*, 22(2), 225-237.
- [21] Chian, E., & DeWalle, F. (1976). Sanitary landfill leachates and their treatment. *Journal of Environmental Engineering Division*, 102 (EE2), 411-431.
- [22] Chianese, A., Ranauro, R., & Verdone, N. (1999). Treatment of landfill leachate by reverse osmosis. *Water Research*, 33 (3), 647-652.
- [23] Cho, H., Moon, H., & Kim, J. (2012). Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. *Bioresource Technology*, 109, 86–92.
- [24] Christensen, T., Scharff, H., & Hjelm, O. (2011). Landfilling: Concepts and Challenges. U T. Christensen (Ur.), *Solid Waste Technology & Management* (str. 685-694). A John Wiley and Sons Ltd.
- [25] Christensen, T., Scharff, H., & Hjelm, O. (2011). Landfilling: Geotechnology, Solid Waste Technology & Management. U K. Rowe (Ur.). A John Wiley and Sons, Ltd.
- [26] Chu, L., Cheung, K., & Wong, M. (1994). Variations in the chemical properties of landfill leachate. *Environmental Management*, 18 (1), 105-117.
- [27] Clement, B. (1995). Physico-chemical characterization of 25 French landfill leachates. *Proceedings of Sardinia 95, 5th International Landfill Symposium* (str. 315-325). Cagliari (Italy): CISA.
- [28] Cortázar, A., Lantarón, J., Fernández, O., Monzón, I., & Lamia, M. (2002). Modelling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part II: Biodegradation). *Waste Management & Research*, 20, 514–528.
- [29] (1999). *Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*. Journal of the European Communities L182/1. Preuzeto 2014
- [30] Desma, C. (2001). *Evaluation of Present and Emerging MSW Landfill Technology* (Master thesis izd.). Department of Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology.
- [31] (2009). *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*.
- [32] Đorđević, M., & Trkulja, V. (2016). Klimatološka analiza za 2016. godinu. Republički hidrometeorološki zavod. Preuzeto 2016 sa <http://rhzmzrs.com/>.
- [33] (n.d.). *Dozvola za upravljanje otpadom za JP Regionalna deponija „Eko-dep“ Bjeljina, broj: 15-962-76/09*. Banja Luka: Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju.
- [34] Dubois, E., & Mercier, A. (Urednici). (2009). *Energy recovery*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- [35] Džolev, N. (2014). *Direktive EU i održiv razvoj energetike u zgradarstvu*. Novi Sad, Vojvodina, Srbija: Fakultet tehničkih nauka.
- [36] Džolev, N., Vujić, G., Ubavin, D., Maoduš, N., & Milovanović, D. (2016). Comparative analysis of landfill gas production based on mathematical models and measurements. *ISWA World Congress*, (str. 1959-1968). Novi Sad.
- [37] Džolev, N., Vujić, G., Višković, M., Pap, S., & Bežanović, V. (2016). Impact assessment of concentrate recirculation on the landfill gas production. *ISWA World Congress*, (str. Novi Sad).
- [38] Ehrig, H. (1983). Quality and quantity of sanitary landfill leachate. *Waste Management&Research*, 1, 53-68.

- [39] Eipper, H., & Maurer, C. (1999). Purification of landfill leachate with membrane filtration based on the disc tube DT. U T. Christensen, R. Cossu, & R. Stegman (Ur.), *Proceedings of Seventh International Waste Management and Landfill Symposium-Sardinia 99*. Cagliari, Italy: CISA.
- [40] (n.d.). *Ekološka dozvola za JP Regionalna deponija „Eko-dep“ Bjeljina, broj: 15-96-306/08*. Banja Luka: Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju.
- [41] El-Fadel, M., Bou-Zeid, E., Chahine, W., & Alayli, B. (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management, 22*, 269–282.
- [42] El-Fadel, M., Findikakis, A., & Leckie, J. (1997). Environmental impacts of solid waste landfilling. *Journal of Environmental Management, 50*, 1–25.
- [43] El-Salam, M., & Abu-Zuid, G. (2015). Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research, 6*, 579–586.
- [44] Emkes, H., Coulon, F., & Wagland, S. (2015). A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. *Waste Management, 43*, 307–318.
- [45] Farquhar, G., & Rovers, F. (1973). Gas Production During Refuse Decomposition. *Water, Air, and Soil Pollution, 2*, 483-495.
- [46] Fellner, J., Döberl, G., Allgaier, G., & Brunner, P. (2009). Comparing field investigations with laboratory models to predict landfill leachate emissions. *29*, 1844–1851.
- [47] Francois, V., Feuillade, G., Matejka, G., Lagier, T., & Skhiri, N. (2007). Leachate recirculation effects on waste degradation: Study on columns. *Waste Management, 27*, 1259–1272.
- [48] Gabr, M., & Valero, S. (1995). Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal, 18*, 241-251.
- [49] Gebert, J., & Groengroeft, A. (2006). Passive landfill gas emission – Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidising biofilters. *Waste Management, 26*, 245–251.
- [50] (2012). *Glavni projekat prikupljanja i tretmana procjednih voda za regionalnu sanitarnu deponiju komunalnog čvrstog otpada „Brijesnica“, Bijeljina*. Institut za građevinarstvo „IG“ Banja Luka.
- [51] González, C., Buenrostro, O., Marquez, L., Hernández, C., Moreno, E., & Robles, F. (2011). Effect of Solid Wastes Composition and Confinement Time on Methane Production in a Dump. *Journal of Environmental Protection, 2*, 1310-1316. doi:10.4236/jep.2011.210151
- [52] Gurijalat, K., & Suflita, J. (1993). Environmental Factors Influencing Methanogenesis from Refuse in Landfill Samples. *Environmental Science & Technology, 27*, 1176-1181.
- [53] Halvadakis, C., Findikakis, A., Papelis, C., & Leckie, J. (1988). The mountain view controlled landfill project field experiment. *Waste Management & Research, 6*, 103-114.
- [54] Hansen, J., Sato, M., Lacis, A., Ruedy, R., Tegen, I., & Mathews, E. (1998). Climate forcings in the industrial era. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 95*, str. 12753–12758.
- [55] Hao, J., Wu, W., Wu, S., & Chen, Y. (2008). Municipal solid waste decomposition under oversaturated condition in coparison with leachate recirculation. *Process Biochemistry, 43*, 108-112.
- [56] He, R., Shen, D., Wang, J., He, Y., & Zhu, Y. (2005). Biological degradation of MSW in a methanogenic reactor using treated leachate recirculation. *Process Biochemistry, 40*, 3660–3666.
- [57] Hernández-Berriel, M., Mañón-Salas, M., Buenrostro-Delgado, O., Sánchez-Yáñez, J., & Márquez-Benavides, L. (2014). Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production. *Environmental Engineering and Management Journal, 13 (10)*, 2687-2695.
- [58] Heyer, K., & Stegman, R. (2002). Landfill management: leachate generation, collection, treatment and costs. Preuzeto 07 March 2014
- [59] Hjelm, O., Andersen, L., & Hansen, J. (2000). *Leachate emissions from landfills*. Swedish Environmental Protection Agency.
- [60] Hjelm, O., Johannessen, L., Knox, K., & et al. (1995). Composition and management of leachate from landfills within the EU. *Proceedings of Sardinia 95, 5th International Landfill Symposium* (str. 243-262). Cagliari, Italy: CISA.

- [61] Hjelmar, O., Johannessen, L., Knox, K., Ehrig, H., Flyvbjerg, J., Winther, P., & Christensen, T. (1994). *Management and Composition of Leachate from Landfills*. Final Report for the Commission of the European Communities, Water Quality Institute and Carl Bro Environmental a/s in co-operation with Knox Associates, University of Wuppertal and Technical University of Denmark.
- [62] Huang, F., Hung, J., & Lu, C. (2012). Enhanced leachate recirculation and stabilization in a pilot landfill bioreactor in Taiwan. *Waste Management & Research*, 30(8), 849–858. doi:10.1177/0734242X12448515
- [63] Ince, O. (1998). Performance of a two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater. *Water Research*, 32, 2707–13.
- [64] (2010). *Infrared heater technology utilizing landfill gas in Ukraine, Final Report*. Renewable Energy Agency (REA). U.S. Environmental Protection Agency, Landfill Methane Outreach Program.
- [65] (n.d.). *International Best Practices Guide for LFGE Projects, Chapter 4: Lanfill Gas Energy Utilization Technologies*. Global Methane Initiative.
- [66] (2013). *Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2011*. US Environmental Protection Agency, EPA 430-R-13-001. Preuzeto 2014
- [67] (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Solid Waste Disposal*. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES.
- [68] (2015). *Izveštaji o merenjima kvaliteta vazduha na lokaciji sanitarne deponije „Brijesnica“ Bjeljina, mesečni izveštaji za period 01.06.2014.-01.11.2015. godine*. Banja Luka: Tehničko ekološki zavod“ d.o.o.
- [69] (2015). *Izveštaji o merenjima kvaliteta voda na lokaciji sanitarne deponije „Brijesnica“ Bjeljina, kvartalni izveštaji za period 2011.-01.11.2015. godine*. Banja Luka: Tehničko ekološki zavod d.o.o.
- [70] Jokela, J. (2002). *Landfill Operation and Waste Management Procedures in the Reduction of Methane and Leachate Pollutant Emissions from Municipal Solid Waste Landfills* (PhD thesis izd.). Finland: Department of Biological and Environmental Science, University of Jyväskylä.
- [71] Karanjekar, R., Bhatt, A., Altouqui, S., Jangikhatoonabad, N., Durai, V., Sattler, M., . . . Chen, V. (2015). Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model. *Waste Management*, 46, 389–398.
- [72] Kinman, R., Nutini, D., Walsh, J., Vogt, W., Stamm, J., & Rickabaugh, J. (1987). Gas enhancement techniques in landfill simulators. *Waste Management & Research*, 5, 13-25.
- [73] Kjeldsen, P., & Beaven, R. (2011). *Landfilling: Hydrology*. U T. Christensen. A John Willey and Sons, Ltd.
- [74] Klink, R., & Ham, R. (1982). Effects of moisture movement on methane production in solid waste landfill samples. *Resources and Conservation*, 8, 29-41.
- [75] Koc-Jurczyk, J., & Jurczyk, L. (2007). Efficiency of removal of heavy metals from municipal landfill leachate. *Journal of Elementology*, 12 (4), 327-334.
- [76] Komilis, D., Ham, R., & Stegmann, R. (1999). The effect of landfill design and operation practices on waste degradation behavior: a review. *Waste Management&Research*, 17, 20-26.
- [77] Komilis, D., Ham, R., & Stegmann, R. (1999). The effect of municipal solid waste pretreatment on landfill behavior: a literature review. *Waste Management&Research*, 17, 10-19.
- [78] Lamborn, J. (2012). Observations from using models to fit the gas production of varying volume test cells and landfills. *Waste Management*, 32, 2352–2363.
- [79] (1995). *Landfill Bioreactor Design and Operation*. EPA/600/R/-95/146.
- [80] (2005). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*, EPA-600/R-05/047. United States Environmental Protection Agency.
- [81] Lema, J., Mendez, R., & Blazquez, R. (1988). Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review. *Water Air Soil Pollution*, 40, 223-250.
- [82] (n.d.). *LFG Supply and Heating of Garage by Infrared Heaters in Bjeljina Sanitary Landfill*. SEC Biomass, Kyiv, Ukraine.

- [83] Li, F., Wichmann, K., & Heine, W. (2009). Treatment of the methanogenic landfill leachate with thin open channel reverse osmosis membrane modules. *Waste Management*, 29, 960–964.
- [84] Maciel, F., & Jucá, J. (2011). Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, 31, 966–977.
- [85] Mali Sandip, T., Khare Kanchan, C., & Biradar Ashok, H. (2012). Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill. *Bioresource Technology*, 110, 10–17.
- [86] Mason, R., Gunst, R., & Hess, J. (1989). *Statistical Design and Analysis of Experiments*. 440-445: John Wiley and Sons.
- [87] Mata-Alvarez, J., Martinez-Viturtia, A., & Torres, R. (1986). A Simple Device to Measure Biogas Production in Laboratory Scale Digester. *Biotechnology letters*, 4(5), 319-322.
- [88] Mønster, J., Samuelsson, J., Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2015). Quantification of methane emissions from 15 Danish landfills using the mobile tracer dispersion method. *Waste Management*, 35, 177–186.
- [89] Mou, Z., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2014). Evaluating the biochemical methane potential (BMP) of low-organic waste at Danish landfills. *Waste Management*, 34, 2251–2259.
- [90] Mou, Z., Scheutz, C., & Kjeldsen, P. (2015). Evaluating the methane generation rate constant (k value) of low-organic waste at Danish landfills. *Waste Management*, 35, 170–176.
- [91] (2009). *Municipal Solid Waste Generation, recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2009*.
- [92] (2013). *Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije Republike Srbije*. Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine.
- [93] Nayak, B. (2009). *Microbial Population Analysis in Leachate From Simulated Solid Waste Bioreactors* (PhD thesis izd.). Department of Integrative Biology, University of South Florida.
- [94] Pap, S., Džolev, N., Adamovic, D., Radonic, J., Ubavin, D., Vujic, G., . . . Turk Sekulic, M. (2016). Evaluating biosorption for ion species and organic matter removal from landfill leachate. *ISWA World Congress*, (str. 1972-1983). Novi Sad.
- [95] Papageorgiou, A., Barton, J., & Karagiannidis, A. (2009). Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England. *Journal of Environmental Management*, 90, 2999-3012.
- [96] Pohland, F., & Stephen, R. (1985). *Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills*. School of Civil Engineering Georgia Institute of Technology. United States Environmental Protection Agency.
- [97] Powell, J. (2005). *Trace gas quality, temperature control and extent of influence from air addition at a bioreactor landfill* (Master thesis izd.). University of Florida.
- [98] Powrie, W., & Beaven, R. (Urednici). (1999). Hydraulic properties of household waste and implications for landfills. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 137, str. 235-247.
- [99] (n.d.). *Pravilnik o uslovima ispuštanja otpadnih voda u javnu kanalizaciju*. Sluzbeni glasnik Republike Srpske br.44/01.
- [100] (n.d.). *Pravilnik o uslovima ispuštanja otpadnih voda u površinske vode*. Sluzbeni glasnik Republike Srpske br.44/01.
- [101] *Prognoza za Solun*. (n.d.). Preuzeto sa https://www.meteoblue.com/sr/vreme/prognoza/modelclimate/solun_%D0%93%D1%80%D1%87%D0%BA%D0%B0_734077
- [102] Protokoli iz prečišćača. (2016). *Protokoli iz prečišćača, interni fajlovi skinuti sa SCADE postrojenja za prečišćavanje*.
- [103] Reddy, K., & Bogner, J. (2003). Bioreactor landfill engineering for accelerated stabilization of municipal solid waste. *International e-conference on modern trends in foundation engineering: Geotechnical challenges and solutions*. Madras, India: Indian Institute of Technology.
- [104] Reinhart, D. (1996). Full-scale experiences with leachate recirculating landfills: case studies. *Waste Management&Research*, 14, 347-365.

- [105] Reinhart, D., McCreanor, P., & Townsend, T. (2002). The bioreactor landfill – its status and future. *Waste Management & Research*, 20, 172 – 186.
- [106] Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 468–493.
- [107] Renou, S., Poulain, S., Givaudan, J., & Moulin, P. (2008). Treatment process adapted to stabilized leachates: Lime precipitation–prefiltration–reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, 313, 9–22.
- [108] Rodriguez, J., Castrillon, L., Maranon, E., Sastre, H., & Fernandez, E. (2004). Removal of Non-Biodegradable Organic Matter from Landfill Leachates by Adsorption. *Water Research*, 38, 3297–3303.
- [109] Salem, Z., Hamouri, K., Djemaa, R., & Allia, K. (2008). Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*, 220, 108–114.
- [110] Šan, I., & Onay, T. (2001). Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. *Journal of Hazardous Materials*, B87, 259–271.
- [111] Sanphoti, N., Towprayoon, S., Chairprasert, P., & Nopharatana, A. (2006). The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. *Journal of Environmental Management*, 81, 27–35.
- [112] Schiopu, A., Piuleac, G., Cojocaru, C., Apostol, I., Mamaliga, I., & Gavrilesu, M. (2012). Reducing environmental risk of landfills: leachate treatment by reverse osmosis. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11 (12), 2319–2331.
- [113] Schoeman, J., Steyn, A., Slabbert, J., & Venter, E. (2003). *Treatment of landfill leachate from hazardous and municipal solid waste*. Division of Water, Environment and Forestry Technology. Pretoria: CSIR.
- [114] Sevimgolu, O., & Tansel, B. (2013). Effect of persistent trace compounds in landfill gas on engine performance during energy recovery: A case study. *Waste Management*, 33, 74–80.
- [115] Sormunen, K., Ettala, M., & Rintala, J. (2008). Internal leachate quality in a municipal solid waste landfill: Vertical, horizontal and temporal variation and impacts of leachate recirculation. *Journal of Hazardous Materials*, 160, 601–607.
- [116] Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., . . . Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26, 516–525.
- [117] Sponza, D., & Agdag, O. (2004). Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry*, 39, 2157–2165.
- [118] Stanisavljević, N. (2012). *Modelovanje sistema za upravljanje otpadom primenom analize tokova materijala* (doktorska disertacija izd.). Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka.
- [119] Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press.
- [120] (2010). *Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine*. Sl. glasnik RS, br.29/10.
- [121] Talalaj, I. (2015). Mineral and organic compounds in leachate from landfill with concentrate recirculation. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2622–263.
- [122] Talalaj, I., & Biedka, P. (2015). Impact of concentrated leachate recirculation on effectiveness of leachate treatment by reverse osmosis. *Ecological Engineering*, 85, 185–192.
- [123] Tatsi, A., & Zouboulis, A. (2002). A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece). *Advances in Environmental Research*, 6, 207-219.
- [124] Theepharaksapan, S., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., & Yamamoto, K. (2011). Removal of pollutants and reduction of biotoxicity in a full scale chemical coagulation and reverse osmosis leachate treatment system. *Bioresource Technology*, 102, 5381–5388.

- [125] Ubavin, D. (2011). *Model emisije i redukcije metana – gasa staklene bašte generisanog na deponijama komunalnog otpada u Srbiji* (doktorska disertacija izd.). Fakultet tehničkih nauka.
- [126] (n.d.). *Uputstvo za korišćenje touch panela na baklji*. Ekstrakcija i sistem sagorijevanja biogasa, HT200 F200, Conveco.
- [127] (2010). *Uredba o odlaganju otpada na deponije*. Sl. glasnik RS, 92/2010.
- [128] (2012). *Uredba o vrijednostima kvaliteta vazduha*. Službeni glasnik Republike Srpske br.124/12.
- [129] (n.d.). *Uredbe o klasifikaciji voda i kategorizaciji vodotoka*. Službeni glasnik Republike Srpske br. 42/01.
- [130] (2013). *User's Manual – Central-Eastern Europe Landfill Gas Model*. SCS Engineers, Landfill Methane Outreach Program. U.S. Environmental Protection Agency .
- [131] (2009). *User's Manual Ukraine Landfill Gas Model*. Landfill Methane Outreach Program. U.S. Environmental Protection Agency .
- [132] (n.d.). *VDI 4630 Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*.
- [133] Vujić, B., Pavlović, M., Đurić, A., Vulić, M., Marčeta, U., & Džolev, N. (2016). Simulation of landfill gases dispersion into atmosphere. *ISWA World Congress*, (str. 1593-1602). Novi Sad.
- [134] Vujić, G. (2007). *Mogućnost energetske valorizacije izdvojenih gasova sa deponije komunalnog otpada* (doktorska disertacija izd.). Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka.
- [135] Vujić, G., Jovičić, N., Petrović-Đurović, N., Ubavin, D., Nakomčić, B., Jovičić, G., & Gordić, D. (2010). Influence of ambience temperature and operational-constructive parameters on landfill gas generation – Case study Novi Sad. *Thermal Science*, 14 (2), 555-564.
- [136] Vujić, G., Ubavin, D., Milovanović, D., Maooduš, N., Stanisavljevic, N., & Batinić, B. (2014). *Elaborat o proceni generisanih kolicina deponijskih gasova na deponiji „Brijesnica“*. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [137] Vujic, G., Ubavin, D., Stanisavljevic, N., & Batinic, B. (2012). *Upravljanje otpadom u zemljama u razvoju*. Novi Sad: FTN Izdavaštvo.
- [138] Vujić, G., Vujić, D., Batinić, B., Vojinović-Miloradov, M., Štrbac, D., Gvozdenac, B., . . . Dvornić, A. (2009). *Utvrđivanje sastava otpada i procene količine u cilju definisanja strategije upravljanja sekundarnim sirovinama u sklopu održivog razvoja Republike Srbije*. FTN-Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine-Novı Sad.
- [139] Wang, Q., Matsufuji, Y., Dong, L., Huang, Q., Hirano, F., & Tanaka, A. (2006). Research on leachate recirculation from different types of landfills. *Waste Management*, 26, 815–824.
- [140] Warith, M. (2002). Bioreactor landfills:experimental and field results. *Waste Management*, 22, 7–17.
- [141] Warith, M., Li, X., & Jin, H. (2005). Bioreactor landfills: State-of-the-art review. *Emirates Journal for Engineering Research*, 10 (1), 1-14.
- [142] White, J., & Beaven, R. (2013). Developments to a landfill processes model following its application to two landfill modelling challenges. *Waste Management*, 33, 1969–1981.
- [143] Wuebbles, D., & Hayhoe, K. (2002). Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57, 177–210.
- [144] Yamada, M., & Jung, S. (2006). Application of reverse osmosis for landfill leachate treatment. *Journal of Environmental Conservation Engineering*, 35, 182-188. doi:<https://doi.org/10.5956/jriet.35.182>
- [145] Yang, N., Damgaard, A., Kjeldsen, P., Shao, L., & He, P. (2015). Quantification of regional leachate variance from municipal solid waste landfills in China. *Waste Management*, 46, 362–372.
- [146] Yazdani, R., Imhoff, P., Han, B., Mei, C., & Augenstein, D. (2015). Quantifying capture efficiency of gas collection wells with gas tracers. *Waste Management*, 43, 319-327. doi:10.1016/j.wasman.2015.06.032
- [147] (1998). *Yolo County Controlled Landfill Bioreactor Project, Accelerating Landfill Gas Generation for Energy Production*. US EPA Archive Document.
- [148] Yuen, S. (2001). Bioreactor landfills: Do they work? *Geoenvironment 2001: 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics*. Newcastle.

- [149] (2011). *Zakon o kvalitetu vazduha*. Službeni glasnik Republike Srpske br. 124/11.
- [150] Zhang, H., Heng, J., Jeng, D., & Xu, H. (2017). Effects of Bonded Tyres on Leachate Recirculation of bioreactor Landfills. *The Open Civil Engineering Journal*, 11, 552-562. doi:10.2174/1874149501711010552

10 Spisak publikacija

Spisak naučnih i stručnih radova koji su objavljeni ili prihvaćeni za objavljivanje na osnovu rezultata istraživanja u okviru rada na doktorskoj disertaciji:

Rad u istaknutom međunarodnom časopisu sa impakt faktorom (M22)

- **Džolev N.**, Vujić G. (2016): Impact assessment of concentrate recirculation on the landfill gas production, *Thermal Science*, Vol. 20, No. 4, pp. 1283-1294, DOI 10.2298/TSCI160401137D

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)

- **Džolev N.**, Vujić G., Ubavin D., Maoduš N., Milovanović D. (2016): Comparative analysis of landfill gas production based on mathematical models and measurements, ISWA World Congress, Novi Sad, Serbia, 19-21 September 2016, ISBN 978-86-7892-837-6 (full paper in electronic version, pp 1959-1968)
- **Džolev N.**, Vujić G., Višković M., Pap S., Bežanović V. (2016): Impact assessment of concentrate recirculation on the landfill gas production, ISWA World Congress, Novi Sad, Serbia, 19-21 September 2016, ISBN 978-86-7892-837-6 (full paper in electronic version)
- Vujić B., Pavlović M., Đurić A., Vulić M., Marčeta U., **Džolev N.** (2016): Simulation of landfill gases dispersion into atmosphere, ISWA World Congress, Novi Sad, Serbia, 19-21 September 2016, ISBN 978-86-7892-837-6 (full paper in electronic version, pp 1593-1602)
- Pap S., **Džolev N.**, Adamović D., Radonić J., Ubavin D., Vujić G., Vojinović Miloradov M., Turk Sekulić M, (2016): Evaluating biosorption for ion species and organic matter removal from landfill leachate, ISWA World Congress, Novi Sad, Serbia, 19-21 September 2016, ISBN 978-86-7892-837-6 (full paper in electronic version, pp 1972-1983)

11 Biografija

Nikola M. Džolev je rođen 14. novembra 1979. godine u Novom Sadu, gde je završio osnovnu školu i Gimnaziju „Jovan Jovanović Zmaj“, ogledno-matematički smer. Diplomski rad sa temom „Gasne apsorpcione toplotne pumpe“ odbranio je 2004. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, pri tadašnjem Departmanu za energetiku, procesnu tehniku i zaštitu životne sredine, sa prosečnom ocenom u toku studiranja 9,03 (devet i 3/100). Postdiplomske studije je upisao školske 2004/2005. godine, na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinstva smer Toplotna tehnika – Upravljanje energijom u industriji. Magistarski rad sa temom „Direktive EU i održivi razvoj energetike u zgradarstvu“ odbranio je 2014. godine pri Departmanu za energetiku i procesnu tehniku. Doktorske studije na studijskom programu Inženjerstvo zaštite životne sredine upisuje 2014. godine. Dalja istraživanja nastavlja u oblasti upravljanja otpadom sa aspektom na energetska iskorišćenje deponijskog gasa na deponijama komunalnog otpada.

Nakon diplomiranja zaposlio se kao asistent pripravnik na katedri za toplotnu tehniku, gde je bio angažovan na izvođenju vežbi iz predmeta Klimatizacija, grejanje i hlađenje.

Od 2006. godine je zaposlen kao direktor u svojoj privatnoj firmi. U periodu 2006-2011. godine je u najvećoj meri bio angažovan na poslovima projektovanja i izvođenja radova na izradi instalacija i ugradnji opreme za grejanje i klimatizaciju, kao projektant i projekt menadžer. Od 2012-2018. godine bio je član konsultantskog tima na pružanju usluga iz oblasti energetske efikasnosti na projektu pod nazivom „Rehabilitacija sistema daljinskog grejanja u Srbiji – KfW faza IV“.

U periodu 2016-2018. godine ispred porodične firme Termo-inženjering doo (nosilac projekta: Investitor i Glavni izvođač radova), radi kao koordinator na izgradnji prvog energetske efikasne naselja u Srbiji „Solarna dolina“. Prva faza izgradnje, koja obuhvata preko 2000 m² izgrađenog je uspešno realizovana, dok se dalji nastavak realizacije projekta od ukupno 110 porodičnih kuća očekuje u narednom periodu (više informacija na: www.solarnadolina.rs)

Objavio je 14 radova na stručnim konferencijama i u časopisima u zemlji i inostranstvu iz oblasti upravljanja energijom, energetske efikasnosti, daljinskog grejanja i upravljanja otpadom.

Stručne ispite za oblasti Termotehnika i Energetska efikasnost zgrada položio je ispred Inženjerske komore Srbije. Posедуje licence Odgovornog projektanta termotehnike, termoenergetike, procesne i gasne tehnike i Odgovornog izvođača radova, i licencu Odgovornog projektanta za energetska efikasnost zgrada.

Član je Srpske kraljevske akademije inovacionih nauka i Inženjerske komore Srbije.

Govori engleski i makedonski jezik.