

MODELI ZA PROCENU STVARANJA DEPONIJSKOG GASA

MODELS FOR ESTIMATION OF LANDFILL GAS EMISSIONS

Milica KARANAC,

**Inovacioni centar Tehnološko - metalurškog fakulteta u Beogradu,
Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, mkaranac@tmf.bg.ac.rs,**

Dimitrije STEVANOVIĆ,

**Inovacioni centar Tehnološko - metalurškog fakulteta u Beogradu,
Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, dstevanovic@tmf.bg.ac.rs,**

Stefan MANDIĆ-RAJČEVIĆ

**Inovacioni centar Tehnološko - metalurškog fakulteta u Beogradu,
Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, stefan.mandicrajcevic@gmail.com,**

Mića JOVANOVIĆ

**Tehnološko - metalurški fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu,
Beograd, Srbija, mica@tmf.bg.ac.rs,**

Jovan JOVANOVIĆ

**Inovacioni centar Tehnološko - metalurškog fakulteta u Beogradu,
Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, jovankl@outlook.com**

Deponije predstavljaju značajan izvor gasova sa efektom staklene bašte. Usled mikrobiološkog razlaganja otpada, u anaerobnim uslovima, dolazi do stvaranja deponijskog gasa (LFG) koji spada u obnovljive izvore energije. LFG pretežno je sastavljen od CH₄ i CO₂. S obzirom na to da je LFG jedan od najvećih izvora antropogene emisije metana, veoma je značajno vršiti procenu količine LFG koji može nastati na deponiji. Procena nastalog LFG značajna je i sa aspekta projektovanja sistema za sakupljanje, tretman i iskorišćenje gasa.

Emisije LFG mogu se odrediti primenom matematičkih modela za procenu emisije ili metodom direktnog merenja. U ovom radu predstavljeni su, najčešće korišćeni, matematički modeli za procenu nastale količine LFG. Ograničenja u primeni pojedinih modela odnose se na kvantitet i kvalitet raspoloživih podataka. Takođe, predstavljeni su parametri od kojih zavisi potencijal stvaranja metana i koji se primenjuju u navedenim modelima.

Ključne reči: deponijski gas; obnovljivi izvori energije; emisije metana; zaštita životne sredine; modeli za procenu deponijskog gasa

Landfills are a significant source of greenhouse gas emissions. Landfill gas (LFG) is generated in anaerobic conditions as a result of the microbiological degradation of organic waste, but LFGs also classify as a renewable source of energy, mainly composed of CH₄ i CO₂. In regard to the fact that landfills are the most significant anthropogenic source of methane emissions, the estimation of LFG is crucial in landfill design as concerns LFG collection systems and treatment. A number of mathematic models and measurement methods exist that can estimate LFG emissions. The limitations in the application of certain models relate to the available qualitative and quantitative data. This article presents such current models for LFG estimation; in addition, it reviews the parameters for potential emissions.

Key words: landfill gas; renewable energy; methane emission; environment protection; model for estimation of landfill gas generated

I. Uvod

Deponijski gas (*eng. Landfill gas*, LFG) nastaje mikrobiološkom razgradnjom otpada i odvija se u nekoliko faza. LFG sačinjen je od CH₄, CO₂ i nemetanskih organskih jedinjenja koja često sadrže opasne i isparljive organske materije. Procena stvaranja i emisije LFG veoma je važna s obzirom na značajan doprinos emisijama gasova sa efektom staklene bašte, kao i za projektovanje sistema za prikupljanje deponijskog gasa, određivanje broja bunara, veličina cevi, tipa i snage gasnog kompresora itd. Takođe, prema evropskom Protokolu o registru ispuštanja i prenosa zagađujućih supstanci (*eng. Protocol on pollutant release and transfer register*, PRTR) deponije spadaju u objekte za koje se vrši praćenje ispuštanja zagađujućih materija. Procena stvaranja LFG može se vršiti pomoću matematičkih modela ili metodama direktnog merenja [1-4]. Postoje brojni radovi u kojima je vršena procena nastajanja LFG pomoću različitih modela [4-8]. U radu će biti prikazani najčešće korišćeni, matematički modeli, kao i parametri koji u njima figurišu. Predstavljani modeli pretežno se koriste za proračun emisije CH₄.

II. Nastajanje LFG

Količina nastalog LFG zavisi od sastava, kompaktnosti, starosti i dubine deponije, faze razgradnje otpada (aerobna / anaerobna), dubine deponije, meteoroloških uslova, sadržaja vlage, pH, temperature, prisustva nutrijenata, itd. U anaerobnoj fazi razgradnje otpada količina nastalog LFG je najveća. Većina modela ima pik stvaranja LFG u godini zatvaranja deponije, nakon čega počinje da opada.

III. Modeli za procenu stvaranja LFG

Američka agencija za zaštitu životne sredine (U.S. EPA) razvila je prve modele '70. god. prošlog veka. Procena stvaranja LFG vrši se pomoću različitih modela u zavisnosti od raspoloživih podataka. Modeli mogu biti nultog, prvog i drugog reda, višefazni ili njihova kombinacija. Najznačajniji parametri od kojih zavisi količina stvorenog CH₄ su konstanta brzine stvaranja metana - k , potencijal stvaranja metana - L_0 , količina i sastav otpada. Za procenu emisija različitih jedinjenja prisutnih u LFG trebalo bi prvo da se proceni ukupna emisija gasova sa deponije. Za emisije CH₄ sa deponija karakteristična je faza kašnjenja, jer se otpad sporije raspada tokom vremena.

Konstanta brzine stvaranja CH₄ zavisi od sastava/vrste otpada, radnih uslova deponije, meteoroloških uslova i pH. Računa se pomoću k -ne :

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}, 1/\text{god} \quad (1)$$

- $t_{1/2}$ je vreme poluraspada, odnosno vreme potrebno da se organski ugljenik u otpadu raspadne na polovinu početne mase. Vrednosti k kreću se u intervalu od 0,03 do 0,4, a standardna vrednost je 0,05 ($t=14$ god.). Vrednost k mogu se eksperimentalno odrediti primenom EPA Metoda 2E ili Metoda 3C [9].

Potencijal stvaranja CH₄ je maksimalna količina nastalog LFG tokom procesa anaerobne razgradnje otpada u funkciji od sadržaja vlage i organskog otpada. Računa se u zavisnosti od modela ili se uzima uobičajena vrednost od 100 m³/Mg.

$$L_0(X) = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times 16/12, G_{gCH_4}/G_{gotpada} \quad (2)$$

$$L_0 = 1 \times VOC \times 22,4/M_1 + 1/2 \times VOC \times 22,4/M_2 = 11,2 \times VOC(1/M_1 + 1/M_2), m^3/Mg \quad (3)$$

- *MCF* je korekcionni faktor za aerobno razlaganje otpada, uvodi se u proračun jer nije ce-
lo telo deponije u anaerobnim uslovima. Za određivanje *MCF* neophodno je znati dubinu i tip
deponije.

- *DOC* određuje udeo organskog ugljenika u komunalnom otpadu koji se može razgra-
diti mikrobiološkim reakcijama. Može se izračunati kao prosečni udeo ugljenika u pojedinim
komponentama. Ukoliko nema preciznih podataka o sastavu otpada, onda se usvaja uobičajje-
na vrednost.

$$DOC = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,3 \times D), \text{ kgC/kgotpad} \quad (4)$$

- DOC_f je razgradiva frakcija *DOC*

- *F* je frakcija (maseni udeo) metana u deponijskom gasu 45-50%

$$A = (1 - e^{-k}) / k \quad (5)$$

$$Q_{CH_4} = \sum [A \times k \times MSWT \times MSWF \times L_0 \times e^{-k(t-k)}] \quad (6)$$

- *A* je vremenski faktor,

- *MSWT* je ukupna godišnja količina proizvedenog komunalnog otpada (Gg/god),

- *MSWF* je udeo deponovanog komunalnog otpada (%).

Model nultog reda ne uzima u obzir efekat starosti otpada. Formiranje LFG konstantno
je tokom vremena. $t_0 < t < t_f$

$$Q = \frac{M \times L_0}{(t_f - t_0)} \quad (7)$$

Model prvog reda (*eng. First order model, FOD (TNO)*) koristi uticaj starosti otpada
na stvaranje LFG. Količina stvorenog LFG ekvivalentna je količini odloženog otpada. Za
svaku jedinicu otpada, stvaranje LFG eksponencijalno opada. FOD model zahteva podatke
koje bi trebalo prikupiti ili proceniti za istorijskih odložen otpad tokom vremenskog perioda
od 3 do 5 godina poluraspada u cilju postizanja prihvatljivih, tačnih rezultata. U zavisnosti od
dostupnih podataka razvijeni su Tier 1 i Tier 2 FOD modeli:

Tier 1a: zasnovan je na podacima o sastavu otpada;

Tier 1b: zasnovan je na tipu deponije;

Tier 2: specifičan za jednu zemlju i koristi više parametara za proračun kao što su pro-
centualni udeo dnevne i konačne prekrivke kao i njihove osobine, procentualni udeo pokriven-
osti površine deponije sa konačnom prekrivkom i sistemom za sakupljanje gasa.

$$\alpha_t = \zeta 1.87 A C_0 k_1 e^{-k_1 t} \text{ TNO} \quad (8)$$

$$Q = M \times L_0 \times k \times e^{-k \times (t - t_0)} \quad (9)$$

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (10)$$

$$L_0 = DDOC_m \times F \times 16/12 \quad (11)$$

$$DDOC_{maT} = DDOC_{mdT} + (DDOC_{maT-1} \times e^{-k}) \quad (12)$$

$$DDOC_{mdT} = DDOC_{maT-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (13)$$

$$CH_4 \text{ stvoreno} = DDOC_{mdT} \times F \times 16/12 \quad (14)$$

$$CH_4 \text{ emisija} = \left[\sum_x CH_4 \text{ stvoreno}_{x,T} - R_T \right] \times (1 - OX_T) \quad (15)$$

- R je regenerisani metan, odnosno masa termički obrađenog CH_4 koji je spaljen na baklji ili se koristi kao gorivo za proizvodnju električne ili toplotne energije (Gg/god)

- OX je oksidacijski faktor ($=0$), odnosno količina/frakcija CH_4 koji je oksidovao u gornjem/prekrivnom sloju ili u delovima gde je prisutan kiseonik.

Modifikovan model prvog reda pretpostavlja da je stvaranje CH_4 u početku nisko, a potom raste do maksimuma nakon čega eksponencijalno da opada. Uvodi se k za frakciju sporo i brzo razgradivog otpada.

$$Q = M \times L_0 \times \frac{k+s}{s} \times \left[1 - e^{-s \times (t-t_0)} \right] \times k \times e^{-k \times (t-t_0)} \quad (16)$$

Multiphase model baziran je na modelu prvog reda. Različite frakcije otpada imaju drugačiji stepen razgradnje. Količina stvorenog gasa ekvivalentna je količini odloženog otpada.

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 1.87 AC_{0,i} k_{1,i} e^{-k_{1,i} t} \quad (17)$$

$$Q = M \times L_0 \times \left[F_r \times k_r \times e^{-k_r \times (t-t_0)} + F_s \times k_s \times e^{-k_s \times (t-t_0)} \right] \quad (18)$$

3 - phase model zasniva se na usvajanju istih vrednosti parametara k i L_0 za sve deponije. Vreme kašnjenja nije uzeto u obzir, već se smatra da se LFG stvara odmah nakon odlaganja opada i da eksponencijalno raste.

Model drugog reda koristi veliki broj reakcija prvog reda sa različitim opisom složenih reakcija koje se odigravaju tokom razgradnje otpada.

Scholl Canion model je najčešće korišćen model za određivanje stvaranja CH_4 . Primeњуje kinetiku raspada prvog reda, stvaranje CH_4 odmah dostiže pik, zanemaruje sadržaj vlage i fazu kašnjenja.

$$\frac{-dG}{dt} = kG \quad (19)$$

$$G = G_0 \times e^{-k \times t} \quad (20)$$

$$V = G_0 - G = G_0 \times \left(1 - e^{-k \times t} \right) \quad (21)$$

$$Q = k \times G = \sum_{i=1}^n r_i \times k_i \times G_{oi} \times e^{-k_i \times t_i} \quad (22)$$

Palos Verdes model koristi kinetiku raspadanja prvog reda sa sledećim pretpostavkama: da postoje dve faze stvaranja gasa - u prvoj fazi raste, a u drugoj fazi eksponencijalno opada i u obe faze nastaje ista zapremina gasa; pik se javlja na prelazu između povećanja i smanjenja u prvoj i drugoj fazi; organska frakcija sastoji se od brzo, umereno i sporo razgradivog otpada; krajnji prinos za svaku organsku frakciju je na osnovu udela odgovarajuće frakcije u otpadu.

$$V = V_0 \times e^{-k_1 \times t} \quad (23)$$

$$G = \frac{G_0}{2} \times e^{-k_2 \times \left(t - \frac{t_1}{2}\right)} \quad (24)$$

$$V = G_0 \times \left[1 - \frac{1}{2} \times e^{-k_2 \times \left(t - \frac{t_1}{2}\right)} \right] \quad (25)$$

Šeldon Arleta model (sličan Palos Verdes modelu) pretpostavlja eksponencijalni rast krive u prvoj fazi, a u drugoj fazi eksponencijalni pad. Maksimalna stopa stvaranja LFG je u trenutku kada nastane oko polovine gasa, čak i oko 35% ukupne količine gasa. Model razmatra dve kategorije otpada: 1) brzo razgradiv sa vremenom poluraspada od 9 godina i ukupnog vremena proizvodnje gasa od 26 god. i 2) sporo razgradiv otpad čije je vreme poluraspada 16 god. i vreme stvaranja gasa je 103 god.

Triangular model pretpostavlja da je u prvoj fazi stopa stvaranja CH₄ linearna, potom se u drugoj fazi linearno smanjuje. Uzima se u obzir dodatno kašnjenje, odnosno vreme početka stvaranja CH₄ od 1 godine. Organske komponente podeljene su na brzo (od 3 meseca do 5 godina) i na sporo (preko 25 god.) razgradive. Maksimalna stopa nastajanja LFG je tokom prve (za brzo razgradivi) i pete godine (za sporo razgradiv otpad) od početka odlaganja otpada. Kada je nizak sadržaj vlage stvaranje LFG je linearno (najbolji je sadržaj u rasponu od 50-60%).

$$Q_{sp} = \frac{2 \times L_0}{t_f} \quad (26)$$

$$L_0 = \frac{1}{2} \times t_f \times Q_{sp} \quad (27)$$

GASFILL model uključuje fazu kašnjenja stvaranja CH₄. U prvoj fazi je grana hiperpoličnog rasta, a u drugoj fazi grana eksponencijalnog smanjenja. Pretpostavlja se da CO₂ nastaje u istoj molarnoj količini kao CH₄ i da se otpad sastoji od brzo, umereno i sporo razgradivih komponenata.

$$Q_j = Q_{pj} \times e^{-\lambda_j \times (t - t_{1j})} \quad (28)$$

LFGGEN model je kombinacija Triangular Model i GASFILL pretpostavke su da prva faza stvaranja metana linearno raste, čemu prethodi faza kašnjenja. Druga faza predstavljena je kinetikom prvog reda, sa eksponencijalnim smanjenjem stvaranja gasa. Model ima dodatne funkcije, kao što su teorijsko stehiometrijsko stvaranje metana i ugljen dioksida, faktori biorazgradivosti, biohemijski potencijal metana (BMP), i U.S. EPA Tier 3, biorazgradiv čvrst otpad je podeljen na jedanaest kategorija; data je klasifikacija vlažnosti: mokra, srednja i suva; stepen biorazgradivosti otpada (u funkciji od vlage) je klasifikovan kao: brz, umeren, i spor; uključuje vreme kašnjenja t_0 , karakteristična vremena, zavise od tipa otpada i vlage.

$$Q_{sp} = L_0 \times \frac{2 \times k}{k \times (t_p - t_0) + 2}, \quad Q_{sp} = 0, \quad 0 < t < t_{0j} \quad (29)$$

$$k = \frac{-\ln 0,01}{t_{99} - t_p} = \frac{4,6052}{t_{99} - t_p} \quad (30)$$

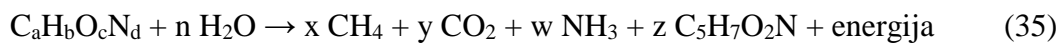
$$Q_{spj} = \frac{Q_{spi}}{2} \times \left[\frac{t - t_{oj}}{t_{pj} - t_{oj}} + \frac{(t-1) - t_{oj}}{t_{pj} - t_{oj}} \right], t_{0j} < t < t_{pj} \quad (31)$$

$$Q_{spj} = \frac{Q_{spi}}{2} \times \left[e^{-k_j [t - t_{pj}]} + e^{-k_j [t - 1 - t_{pj}]} \right], t_{pj} < t < t_{99} \quad (32)$$

$$Q = \sum Q_{sj} \times M_i \quad (33)$$

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_c - Q_{ob})^2} \quad (34)$$

Stehiometrijski model zasniva se na opštoj stehiometrijskoj reakciji. Ograničenje modela je povezanost sa stehiometrijskim procenama otpadnih frakcija koje nisu biorazgradive (lignin, plastika), kao i ograničenja u pogledu sadržaja vlage i toksina.



GasSim softver razvijen je da obezbedi metodologije za standardnu procenu rizika koja će omogućiti ispunjavanje zakonskih obaveza u vezi sa gasovitim emisijama iz deponije. Za koršćenje modela značajno je poznavati karakteristike deponije, geometriju i inženjerske parametre (karakteristike slojeva, tj. geoloških barijera), karakteristika geološke barijere - prekrivnog sloja. Oko 10% metana oksiduje u CO₂. Emisije iz prekrivnog sloja se računaju pomoću Darsijevog zakona.

$$L_1 = \frac{L \times \left[\frac{1}{([CH_4]/100)} \right]}{V_m} \times M \quad (36)$$

Postoji nekoliko verzija softvera. GasSim2 je naslednik verzije Gassim 1.0 - 1.5. Gassim 1.0 - 1.5 dozvoljava unos karakteristika za deponiju u celini, dok u GasSim2 mogu se unositi karakteristike svake ćelije. Namenjen je samo za stručni kadar, jednostavan je za korišćenje, ali su ulazni parametri ključni za upotrebu.

IPCC model (eng. *The Intergovernmental Panel on Climate Change*) razvijen je 2006. godine. Proračunava emisiju LFG (prikupljanje, spaljivanje, korišćenje, oksidaciju metana) na osnovu modela raspadanja prvog reda. Propisima je zahtevano da se obezbedi kontrola, upravljanje kretanjem i oslobađanjem LFG; minimiziranje uticaja na globalno zagrevanje; upravljanje mirisima; i izveštavanje o emisijama (PRTR). Postoje dve opcije za IPCC u zavisnosti od raspoloživih podataka. Prva opcija je multifazni model zasnovan na sastavu otpada (raspoloživost svake vrste otpada). Druga opcija zasnovana je na monofaznom modelu za rasuti otpad. Kada je sastav otpada je relativno nepromenljiv obe opcije daju slične rezultate. Međutim, kada se javljaju brze promene u sastavu otpada, opcije mogu dati drugačiji rezultat. Postoji softver „IPCC Inventory“ za izračunavanje svih antropogenh emisija koji podržava IPCC model.

$$Q_{T,x} = k \times R_x \times L_0 \times e^{-k(T-x)} \quad (37)$$

$$Q_T = \sum Q_{T,x} \quad (38)$$

$$CH_4 \text{ stvoreno} = \sum \times \left[A \times k \times MSWT \times MSWF \times L_0 \times e^{-k(t-k)} \right] \quad (39)$$

$$CH_4 \text{ emisija} = \left[\sum_x CH_4 \text{ stvoreno}_{x,T} - R_T \right] \times (1 - OX_T) \quad (40)$$

LandGEM model je softver razvijen od strane U.S. EPA za kvantifikovanje LFG sa deponije. Prvo izdanje softvera izrađeno je 1991. god. i zasniva se na jednačini brzine raspada prvog reda. Model proračunava stepen stvaranja CH₄ tokom radnog veka deponije i nekoliko godina nakon njenog zatvaranja. Karakteriše ga relativno jednostavan pristup proučavanju nastanka LFG. Model je nastao na osnovu empirijskih podataka američkih deponija. Daje nešto veće rezultate, jer ne uzima u obzir različit sadržaj organske materije, već ukupnu količinu otpada (deo je inertan). Osnovni model koji koristi softver pretpostavlja da je količina deponovanog otpada stalna (IPCC Tier 1 model)

$$Q = 2 \sum_{i=1}^n k \times L_0 \times M_i \times e^{-k \times t_i} \quad (41)$$

Nepohodni ulazni podaci za procenu nastale količine gasa su: projektovani kapacitet deponije, količina nastalog otpada na mestu ili količina godišnjeg prihvatanja; vrsta otpada, konstanta stvaranja metana k , potencijal stvaranja metana L_0 , broj godina prihvatanja otpada, zapreminskog udeo CH₄ i CO₂ u LFG, koncentracija nemetanskih jedinjenja (npr. Heksana) Mogu se koristiti uobičajene vrednosti za k i L_0 ili specifične vrednosti za datu lokaciju koje se mogu razviti kroz različita probna merenja. Za procenu stvarnih emisija u modelu su prisutne default vrednosti faktora AP-42. U model su ubačena dva seta standardnih vrednosti za proračune emisija prema propisanim zahtevima i prema razvoju inventara emisija (AP-42 podešavanja). Softver kao rezultat daje količine nastalog LFG po komponentama, kao i grafički prikaz emisija tokom vremena.

GMI (*eng. Global Methane Initiative*) razvio je osam modela za procenu LFG specifičnih za svaku zemlju (Centralna Amerika, Ekvador, Meksiko, Kolumbija, Ukrajina, Filipini i Tajland) koji predstavljaju kombinaciju LandGEM ili IPCC modela i detaljnih informacija za svaku zemlju. Svi GMI modeli razvijeni su nakon proučavanja regionalnih klimatskih uslova i automatski se dodeljuju vrednosti za k i L_0 . Većina modela automatski izračunava efikasnosti sakupljanja na osnovu: uslova deponovanja, dubina deponije/visina otpada, stepena sabijanja otpada, karakteristika sloja za oblaganje dna i prekrivnog sloja, prekrivni sloj (dnevni, srednji, konačni), upravljanje procednim vodama.

IV. Greške modela

Modeli za procenu emisija LFG mogu predvideti stvaranje gasa sa tačnošću od oko 50-60%. Mogući razlozi za greške su: netačne procene efikasnosti obnavljanja LFG, netačni podaci o količinama i sastavu otpada, varijacije u stvaranju gasa usled nehomogenosti deponije, prisustva različitih inhibitora ili nutrijenata. Takođe, promenljivi vremenski uslovi, koji utiču na dinamiku emisija LFG, teško se mogu predvideti godinama unapred. Najbolje rezultate daje model u kojem se sabiraju procene emisije metana računate prema frakcijama različitih vrsta otpada (sporo, brzorazgradiv). Velike razlike u rezultatima pokazuju da sadašnji modeli nisu dovoljno pouzdani za procenu emisije metana. Nijedan model nije opšte privlačen kao dovoljno precizan i isplativ. Model poput LandGem-a ima problem sa vremenskom konstantom, jer se smatra da otpad deponovan na početku i na kraju godine imaju isti L_0 , kao i k . Takođe, što je veća vrednost k - količina otpada smanjuje se sa vremenom, što u ovom modelu nije uzeto u obzir. Pojedini modeli podrazumevaju da su k i L_0 nezavisni parametri i da ne utiču jedan na drugi, što nije slučaj.

Za kalibraciju model postoje dve metode:

1) minimiziranje greške aritmetičke sredine primenom apsolutne vrednosti razlike, i 2) minimiziranje logaritamske greške koristeći apsolutnu vrednost prirodnog logaritma.

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_c - Q_{ob})^2} \quad (42)$$

V. Zaključak

U radu su predstavljeni matematički modeli za procenu nastajanja LFG. Izbor modela vrši se na osnovu raspoloživih podataka. Rezultati modela najviše zavise od kvaliteta i kvantiteta ulaznih podataka. Najčešće se koriste gotovi softverski paketi LandGem, Gassim i IPCC. Osnovne slabosti modela jesu nedovoljno precizni ulazni podaci (sastav i količina otpada, projektovani uslovi deponije, meteorološki uslovi) koji utiču na greške modela. Modeli su korisni alati za preliminarnu procenu nastalih količina LFG i mogu se koristiti prilikom izrada prethodnih studija opravdanosti o iskorišćenju nastalog LFG.

VI. Zahvalnica

Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti na projektu TR 34009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

VII. Literatura

- [1] **Kamalan, H., M. Sabour, N. Shariatamadari**, A Review on Available Landfill Gas Models, *Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (2), 79-92, 2011.
- [2] **Zhu, H., M. O. Letzel, M. Reiser, M. Kranert, W. Bächlin, T. Flassak**, A new approach to estimation of methane emission rates from landfills, *Waste Management*, 33, 2713-2719, 2013.
- [3] **Kumar, A., M.P. Sharma**, Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5, 50-61, 2014.
- [4] **Amini, H. R., D. R. Reinhart, A. Niskanen**, Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data, *Waste Management* 33, 2720-2728, 2013.
- [5] **Chalvatzaki, E., M. Lazaridis**, Estimation of greenhouse gas emissions from landfills: Application to the Aktrotiri Landfill site (Chania, Greece), *Global NEST Journal*, Vol 12, No 1, 108-116, 2010.
- [6] **Zishen, M., C. Scheutz, P. Kjeldsen**, Evaluating the methane generation rate constant (k value) of low-organic waste at Danish landfills, *Waste Management*, 35, 170-176, 2015.
- [7] **Jibran, M., S. Zuberi, S. F. Ali**, Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landfills in Pakistan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 117-131, 2015.
- [8] **Ganev, I., I. Naydenova**, Evaluation of Potential Opportunities for Electric Power Generation from Landfill Gas at "Tsalapitsa", *Serbian Journal Of Electrical Engineering*, Vol 11, No 3, 379-390, October 2014.
- [9] **Debra, R. R. Ayman, A. Faour, H. You**, First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills, EPA-600/R-05/072 June 2005.