



# SMARTENVI PROJEKT

**INTELIĞENTNE NARZĘDZIA DLA ZMNIĘSZANIA ZAGROŻEŃ DLA  
NASZEGO ŚRODOWISKA I ZASOBÓW WODNYCH POPRZEZ  
REKULTYWACJĘ NIEUPORZĄDKOWANYCH SKŁADOWISK**

**IO 1**

**Narzędzie decyzyjne do rekultywacji  
nieuporządkowanych składowisk**

**Instrukcja**



**Silesian University  
of Technology**



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



*This project is funded by the Erasmus+ Programme of the European Union. However, European Commission and Turkish National Agency cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.*



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

Wiodący partner:

Politechnika Śląska, Gliwice, Poland

Partnerzy:

Gebze Technical University, Kocaeli, Turcja

Pamukkale University, Denizli, Turcja

Petroleum-Gas University of Ploiești, Ploiești, Rumunia

Training 2000 psc, Mondavio, Włochy

Denizli Metropolitan Municipality, Denizli, Turcja

Municipality of Fano, Fano, Włochy

Sofia University "St. Kliment Ohridski", Bułgaria

R&D Center "Biointech" Ltd., Bułgaria

Integracja narzędzia i część związana z biogazem została opracowana przez: Politechnikę Śląską,  
Część związana ze stabilnością składowiska została opracowana przez: Gebze Technical University,  
Część związana z odciekami została opracowana przez: Pamukkale University





Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

## Spis treści

Wprowadzenie .....	4
Proces ewaluacji .....	6
Emisja gazu składowiskowego.....	7
Odcieki.....	10
Zagrożenia związane ze stabilnością .....	12
Opis danych wejściowych i wyjściowych.....	14
Sekcja opisu składowiska odpadów .....	14
Opis rekultywacji .....	16
Wyniki - podsumowanie.....	18
Wyniki – gaz składowiskowy .....	18
Wyniki - odcieki .....	21
Wyniki - stabilność.....	21
Literatura .....	23



## Wprowadzenie

Narzędzie decyzyjne do rekultywacji nieuporządkowanych składowisk to narzędzie, które pozwala na ocenę nieuporządkowanego składowiska odpadów pod kątem jego wpływu na środowisko naturalne. Narzędzie może pomóc w ocenie potencjalnych korzyści płynących z rekultywacji nieuporządkowanych składowisk odpadów. Ocena obejmuje cały cykl życia, od początku istnienia składowiska do końca. Pozwala to na ocenę skutków środowiskowych przeprowadzenia lub zaniechania rekultywacji składowiska. Jest to zatem narzędzie, które może dostarczyć decydentom cennych informacji i argumentów za lub przeciw rekultywacji.

Narzędzie jest dostępne online na komputerach stacjonarnych i urządzeniach mobilnych. Korzystanie z niego jest ogólnodostępne i nie jest ograniczone do żadnej lokalizacji grupy użytkowników.

Narzędzie przygotowane jest w 6 różnych wersjach językowych: angielskiej, tureckiej, polskiej, włoskiej, rumuńskiej i bułgarskiej. Narzędzie jest dostępne na stronie projektu: <https://smart-envi.gtu.edu.tr/>.



Wersja angielska



Wersja turecka



Wersja polska



Wersja włoska



Wersja rumuńska



Wersja bułgarska

Narzędzie jest dostępne online i zostało zaprojektowane tak, aby było przyjazne dla użytkownika. Obliczenia są wykonywane w czasie rzeczywistym zaraz po wprowadzeniu danych. System wykonuje skomplikowane operacje matematyczne i ogromną liczbę obliczeń. W związku z tym mogą wystąpić niewielkie opóźnienia w działaniu systemu.



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

Rekultywacja nieuporządkowanych składowisk jest zadaniem o kluczowym znaczeniu dla ochrony środowiska i zdrowia publicznego. Nieuporządkowanego składowiska mogą prowadzić do uwalniania szkodliwych chemikaliów i zanieczyszczeń do gleby i wód gruntowych, przyczyniać się do zanieczyszczenia powietrza i emisji gazów cieplarnianych oraz tworzyć niehigieniczne warunki, które mogą zwiększać ryzyko przenoszenia chorób.

Dlatego niezbędna jest ocena działań rekultywacyjnych nieuporządkowanych składowisk, aby upewnić się, że są one skuteczne w łagodzeniu tych zagrożeń i że zasoby przeznaczone na rekultywację są efektywnie wykorzystywane.

Korzystanie z internetowego systemu oceny rekultywacji nieuporządkowanych składowisk może pomóc w promowaniu przejrzystości, odpowiedzialności i skuteczności w tych krytycznych wysiłkach na rzecz ochrony środowiska i zdrowia publicznego.

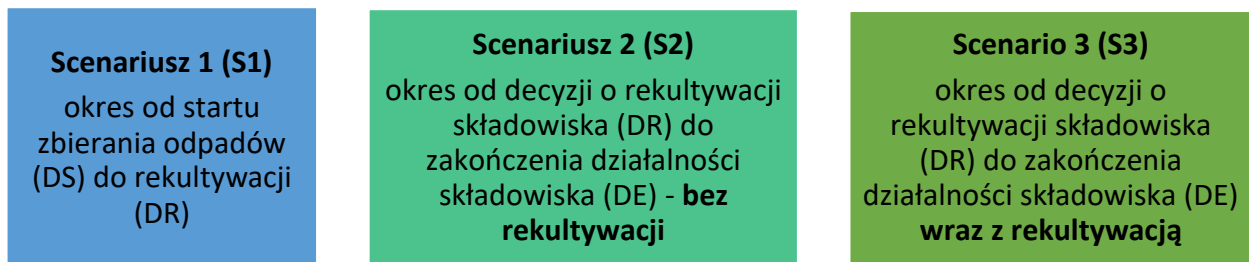
Należy zauważyć, że narzędzie online do **oceny rekultywacji nieuporządkowanych składowisk odpadów zostało zaprojektowane głównie do celów edukacyjnych**. Narzędzie dostarcza użytkownikom informacji o znaczeniu rekultywacji nieuporządkowanych składowisk. Może również zapewnić użytkownikom lepsze zrozumienie zagrożeń dla środowiska i zdrowia publicznego związanych z nieuporządkowanymi składowiskami, a także potencjalnych korzyści płynących z właściwej ich rekultywacji. Korzystając z narzędzia, interesariusze, tacy jak członkowie społeczności, decydenci i organizacje ekologiczne, mogą uzyskać głębsze zrozumienie procesu rekultywacji, co może pomóc w budowaniu wsparcia dla wysiłków rekultywacyjnych i zachęcaniu do bardziej zrównoważonych praktyk gospodarowania odpadami. Narzędzie może zapewnić znaczne korzyści w ocenie rekultywacji nieuporządkowanych składowisk, jednak zawiera pewne uproszczenia lub założenia, które mogą dać mniej rygorystyczne wyniki. Dlatego ważne jest, aby ostrożnie podchodzić do wyjść systemu i wykorzystywać je jako jedno z kilku danych wejściowych w procesie decyzyjnym. Nie powinien być jedyną podstawą podejmowania decyzji. Konieczna jest wszechstronna i szczegółowa analiza, aby upewnić się, że działania rekultywacyjne są skuteczne w ochronie środowiska.



## Proces ewaluacji

Narzędzie ocenia trzy okresy cyklu życia składowiska. Pierwszy to okres od początku jego istnienia (DS), czyli czasu przyjęcia pierwszej partii odpadów, do czasu, kiedy rozważamy podjęcie decyzji o jego rekultywacji (DR). Analizę tego okresu stanowi scenariusz 1.

Drugi to okres od wydania decyzji o rekultywacji do zakończenia działalności składowiska (DE). W tym okresie analizowane są dwa alternatywne scenariusze. Scenariusz 2 to sytuacja, gdy rekultywacja nie została zrealizowana, a scenariusz 3 to sytuacja, gdy rekultywacja została przeprowadzona.



Rys. 1. Scenariusze analizy nieuporządkowanych składowisk.

Proces analizy odbywa się w kilku krokach (rys. 2). Na początku użytkownik określa podstawowe parametry składowiska. Następnie określone są elementy, które będą realizowane w ramach rekultywacji. Po wprowadzeniu odpowiednich danych system wylicza wskaźniki, które będą przydatne dla decydentów i które uwypuklają najważniejsze aspekty oddziaływania składowiska na środowisko naturalne.



Rys. 2. Kroki analizy.

Rozważane są 3 główne rodzaje oddziaływań. Są one związane z:

- Gaz składowiskowy,
- odcieki,
- stabilność.

Trzy główne rodzaje oddziaływań są uważane za najważniejsze, ponieważ mają one znaczący wpływ na środowisko.



**Gaz składowiskowy:** Emisje gazów składowiskowych są jednym z najbardziej znaczących skutków środowiskowych nieuporządkowanych składowisk. Na składowiskach uwalniane są gazy, takie jak metan, dwutlenek węgla i lotne związki organiczne, które mogą przyczyniać się do zanieczyszczenia powietrza i emisji gazów cieplarnianych. W szczególności metan jest silnym gazem cieplarnianym, który ma znaczący wpływ na zmiany klimatyczne. Odpowiednio zaprojektowane i utrzymywane systemy zarządzania gazami składowiskowymi mogą pomóc ograniczyć te emisje i zmniejszyć ich wpływ na środowisko i zdrowie publiczne.

**Odcieki:** Odciek to ciecz, która powstaje, gdy woda przesącza się przez odpady na składowisku, zbierając po drodze zanieczyszczenia. Odcieki mogą zanieczyścić wody gruntowe i powierzchniowe, prowadząc do degradacji środowiska i zagrożeń dla zdrowia publicznego. Właściwie zaprojektowane i utrzymywane systemy zarządzania odciekami mogą pomóc zmniejszyć wpływ emisji odcieków na środowisko i zdrowie publiczne.

**Stabilność:** Stabilność nieuporządkowanego składowiska odnosi się do jego zdolności do zachowania solidnej konstrukcji i niezapadania się lub znacznego osiadania. Stabilność jest ważna, ponieważ zawalenia i osiadanie może prowadzić do erozji gleby, uszkodzenia pobliskiej infrastruktury i potencjalnych szkód dla pracowników i społeczeństwa. Odpowiednio zaprojektowane i utrzymywane środki inżynierskie w zakresie składowisk mogą pomóc w zapewnieniu stabilności składowiska i zmniejszeniu tego ryzyka.

Motywową do uwzględnienia tych trzech czynników w narzędziu był fakt, że poprzez łagodzenie tych skutków poprzez odpowiednią rekultywację można zminimalizować zagrożenia dla środowiska i zdrowia publicznego oraz promować zrównoważone praktyki gospodarowania odpadami.

### Emisja gazu składowiskowego

Biogaz to naturalnie występujący gaz, który powstaje w wyniku rozkładu materiałów organicznych przez mikroorganizmy w warunkach beztlenowych. Składowiska odpadów są jednym z głównych źródeł wytwarzania biogazu, ponieważ zawierają duże ilości odpadów organicznych, które rozkładają się w czasie.

Proces wytwarzania biogazu na składowiskach rozpoczyna się od deponowania na składowisku odpadów organicznych. Podczas rozkładu odpady wytwarzają mieszaninę gazów, w tym metan ( $\text{CH}_4$ ), dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) i inne gazy śladowe. Ta mieszanina gazów jest znana jako gaz składowiskowy (LFG).

Rekultywacja składowiska odpadów to proces przywracania starego lub opuszczonego składowiska odpadów do stanu funkcjonalnego i bezpiecznego. W kontekście wykorzystania gazu składowiskowego proces ten obejmuje wydobycie i wykorzystanie gazu składowiskowego (LFG) jako odnawialnego źródła energii, przy jednoczesnym uwzględnieniu problemów środowiskowych związanych ze składowiskami.

Rekultywacja składowiska zwykle obejmuje kilka etapów, w tym usunięcie wszelkich pozostałych materiałów odpadowych z okolic składowiska, wykonanie instalacji systemu zbierania gazów oraz wdrożenie środków zapobiegających dalszemu zanieczyszczeniu środowiska. System zbierania gazu jest kluczowym elementem utylizacji gazu składowiskowego, ponieważ umożliwia wychwytywanie i przetwarzanie LFG, które następnie mogą być wykorzystane do produkcji energii elektrycznej lub ciepła.



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

LFG można pozyskiwać ze składowiska za pomocą systemu rur i pomp. Wydobyty gaz można następnie poddać obróbce i wykorzystać jako źródło energii. Metan jest najcenniejszym składnikiem LFG, ponieważ może być wykorzystany jako paliwo do wytwarzania energii elektrycznej, ogrzewania lub jako paliwo transportowe.

Po ekstrakcji gazu można go przetwarzać w celu usunięcia zanieczyszczeń, takich jak wilgoć, siarkowodór i inne zanieczyszczenia. Oczyszczony gaz może być następnie wykorzystany do wytwarzania energii elektrycznej lub jako paliwo do innych zastosowań.

**Głównym składnikiem gazu składowiskowego jest CH<sub>4</sub> (metan), który jest gazem cieplarnianym.** CH<sub>4</sub> skuteczniej zatrzymuje ciepło w atmosferze niż CO<sub>2</sub>, a potencjał globalnego ocieplenia szacuje się na 28 razy wyższy niż CO<sub>2</sub> w perspektywie 100 lat.

**CO<sub>2</sub> (dwutlenek węgla) jest składnikiem gazu składowiskowego (LFG), który powstaje w wyniku rozkładu odpadów organicznych na składowisku.** Chociaż CO<sub>2</sub> jest gazem cieplarnianym, który przyczynia się do zmiany klimatu, CO<sub>2</sub> wytwarzany w wyniku rozkładu odpadów organicznych jest uważany za „neutralny dla klimatu” z wielu powodów.

Po pierwsze, węgiel zawarty w odpadach organicznych rozkładających się na składowisku pierwotnie pochodził z atmosfery z procesu fotosyntezy. W związku z tym CO<sub>2</sub> wytwarzany podczas rozkładu po prostu zwraca węgiel, który był już obecny w obiegu węgla. Kontrastuje to z wykorzystaniem paliw kopalnych, w przypadku których dwutlenek węgla przechowywany pod ziemią przez miliony lat jest uwalniany do atmosfery, przyczyniając się do wzrostu netto poziomu CO<sub>2</sub> w atmosferze.

Po drugie, kiedy LFG jest wychwytywany i wykorzystywany jako źródło energii, CO<sub>2</sub> wytwarzany podczas spalania jest równoważony redukcją emisji CO<sub>2</sub>, która wynikałaby ze stosowania paliw kopalnych. Innymi słowy, emisje CO<sub>2</sub> z utylizacji LFG są równoważone redukcją emisji z innych źródeł energii.

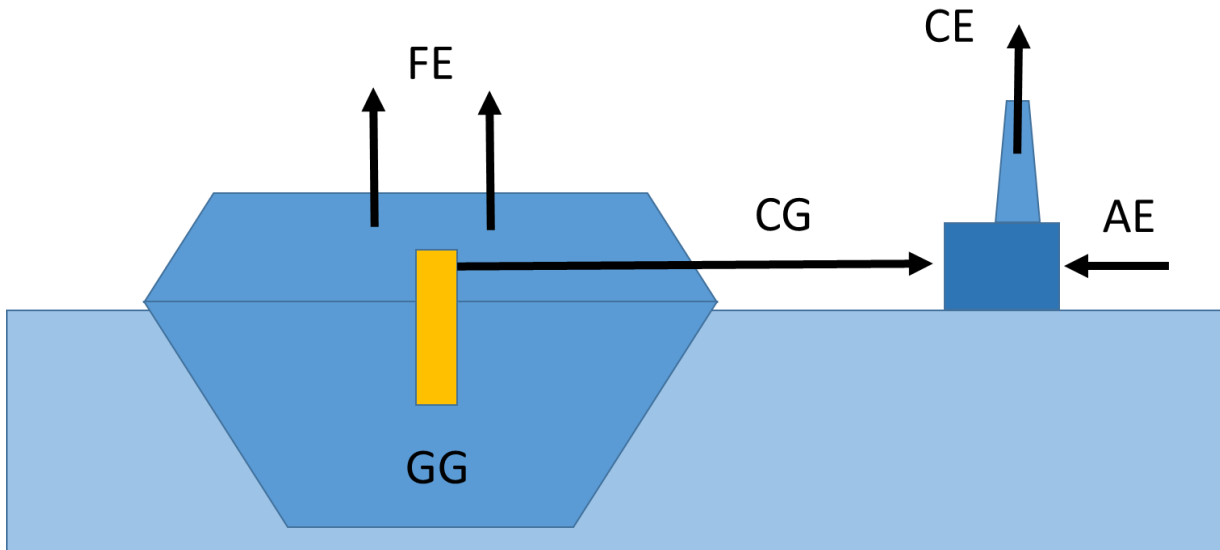
Wreszcie, gdy LFG nie jest wychwytywany i wykorzystywany, metan (CH<sub>4</sub>) zawarty w gazie może przedostać się do atmosfery, gdzie jest znacznie silniejszym gazem cieplarnianym niż CO<sub>2</sub>. Dzięki wychwytywaniu i wykorzystywaniu LFG emisje metanu ze składowisk odpadów można znacznie zmniejszyć, zapewniając korzyści netto w zakresie emisji gazów cieplarnianych.

Ogólnie rzecz biorąc, chociaż CO<sub>2</sub> wytwarzany w wyniku rozkładu odpadów organicznych na składowiskach przyczynia się do zmiany klimatu, uważa się, że jest on „neutralny dla klimatu”, gdy LFG jest wychwytywany i wykorzystywany jako źródło energii odnawialnej. Wynika to z faktu, że węgiel w odpadach jest już częścią obiegu węgla, kompensacji emisji z paliw kopalnych oraz redukcji emisji metanu ze składowisk.

**W narzędziu wszystkie emisje CO<sub>2</sub> – czyli swobodna emisja gazu składowiskowego, jak również emisje z oczyszczalni tego gazu – traktowane są jako neutralne klimatycznie. Emisje CH<sub>4</sub> są traktowane jako wątek zmian klimatycznych. Ze względów praktycznych CH<sub>4</sub> jest przeliczany na ekwiwalent CO<sub>2</sub>, aby ułatwić rzeczowy wpływ różnych emisji na środowisko.**

Wytwarzanie biogazu na składowiskach może przynieść znaczące korzyści środowiskowe i ekonomiczne. Wydobywając i wykorzystując LFG, składowiska mogą zmniejszyć emisje gazów cieplarnianych i przyczynić się do produkcji energii odnawialnej. Ponadto wykorzystanie biogazu jako źródła paliwa może zmniejszyć zależność od paliw kopalnych i zapewnić zrównoważone źródło energii.

Rysunek 3 przedstawia ilustracje emisji ze składowisk uwzględnionych w narzędziu.



Rys. 3. Emisje poddane ewaluacji w narzędziu.

W narzędziu oceniane są następujące parametry gazów:

- **Wytwarzanie gazu składowiskowego (GG)** – obliczenie wykonane na podstawie masy, składu frakcji oraz środowiska (mokre, suche, średnie).
- **Emisja powierzchniowa (FE)** – emisja gazu składowiskowego, który nie jest odbierany przez system zbierania gazu (sprawność poniżej 100%)
- **Zebrany gaz składowiskowy (KG)** – część wytworzonego gazu składowiskowego, która jest odbierana systemem odbioru gazu i kierowana do instalacji utylizacji.
- **Emisja uniknięta (EA)** – emisja, która nie nastąpi z powodu wymiany źródeł energii (na ten parametr ma wpływ lokalizacja instalacji oraz parametry lokalnej sieci energetycznej);
- **Emisja ze spalania (CE)** – emisja z instalacji utylizacji gazu składowiskowego (pochodnia lub odzysk energii). W instalacji następuje proces spalania i zamiana CH<sub>4</sub> na CO<sub>2</sub>. Ten CO<sub>2</sub> jest neutralny dla klimatu, co oznacza, że CE zawsze wynosi 0.
- **Emisja efektywna (EE)** – końcowa emisja wszystkich wyprodukowanych gazów cieplarnianych w ekwiwalencie CO<sub>2</sub>, w tym FE, CE, AE oraz efektywność odbioru gazów i wytwarzania energii. **Można to traktować jako miarę rzeczywistego oddziaływania składowiska na środowisko w kategorii oddziaływania na zmiany klimatu.**

Jeśli 1 kWh energii z sieci, która emituje X kg CO<sub>2</sub>, zostanie zastąpiona energią z innego źródła, które emituje Y kg CO<sub>2</sub>, to możemy powiedzieć, że działanie to spowodowało zmianę wpływu na środowisko. Zastępując jedno źródło energii innym, uniknęliśmy części emisji. Te uniknięte emisje to różnica między emisjami CO<sub>2</sub> związanymi z wykorzystaniem obu źródeł energii: AE=X-Y.

**Uniknięte emisje** odnoszą się do redukcji emisji gazów cieplarnianych, która miałaby miejsce, gdyby nie podjęto określonej działalności. W przypadku wykorzystania gazu składowiskowego (LFG) do wytwarzania energii istnieje kilka sposobów na uniknięcie emisji.

Biorąc pod uwagę uniknięte emisje, efektywna emisja gazów cieplarnianych (EE) może zatem być ujemna i powodować ulgę w środowisku zgodnie z równaniem:

$$EE=FE+CE-AE$$



Wykorzystanie LFG można traktować jako źródło energii odnawialnej, może wyprzeć wykorzystanie paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny, które podczas spalania emitują duże ilości CO<sub>2</sub> i innych gazów cieplarnianych. Używając LFG zamiast paliw kopalnych, unika się emisji CO<sub>2</sub> i innych gazów cieplarnianych, co prowadzi do zmniejszenia ogólnego śladu węglowego wytwarzania energii.

Prognoza i ocena emisji gazów szkodliwych dokonywana jest w oparciu o model LandGEM Agencji Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych.

## Odcieki

Odcieki składowiskowe to ścieki o dużej zawartości zanieczyszczeń i substancji toksycznych. Odciek jest wyjątkowo szkodliwy dla środowiska. Jednym z najważniejszych skutków odcieków ze składowisk jest mieszanie się z ekosystemami wodnymi, takimi jak jeziora i strumienie, powodując wzrost glonów i planktonu. Ilość tlenu w wodzie spada, a życie ekosystemu wodnego jest z czasem zagrożone. Ze względu na wysoką toksyczność odcieki ze śmieci stanowią poważne zagrożenie dla wód gruntowych i powierzchniowych. Zawartość odcieków składowiskowych zależy od składu odpadów, warunków klimatycznych oraz wieku i stopnia degradacji odpadów stałych.

Jakościowe i ilościowe właściwości odcieków składowiskowych zależą od wielu czynników, z których niektóre są trudne do kontrolowania, takie jak warunki pogodowe, cechy hydrologiczne, skład i wiek odpadów itp.). Wszystkie te elementy implikują krytyczne kwestie zarządzania, które doprowadziły do odmiennego podejścia systemowego, zarówno na poziomie europejskim, jak i krajowym.

Z ilościowego punktu widzenia produkcja odcieków jest w dużej mierze związana z czynnikami zewnętrznymi (infiltracja wód opadowych, zarówno powierzchniowych, jak i podziemnych) oraz wewnętrznymi, takimi jak poziom zawilgocenia ścieków oraz bilans wodny związany z reakcjami biochemicznymi unieszkodliwiania ścieków.

Czynnikii zewnętrzne dotyczą w szczególności:

- Charakterystyka meteorologiczna i hydrogeologiczna terenu, w szczególności związana z opadami, temperaturami, nasłonecznieniem lub wiatrem, infiltracją zbiorników wodnych, zarówno powierzchniowych, jak i podziemnych.
- Model zagospodarowania składowiska: obecność drenażu, systemu wykładziny pierwotnej lub wtórnej, dobowa rozbudowa i pokrycie zbiornika na odpady, możliwa recyrkulacja odcieków.
- Charakterystyka odpadów: skład odpadów, poziom zawartości wilgoci, możliwe obróbki wstępne, wielkość, stopień zwartości.

Skład i oddziaływanie odcieków różni się znacznie w zależności od składowiska, nawet w obrębie danego składowiska. Należy zauważyć, że nawet przy braku czynników zewnętrznych (np. systemu przykrywania składowiska) beztlenowy rozkład odpadów i wytwarzanie odcieków trwa nawet po zakończeniu cyklu życia składowiska. Oznacza to, że zarządzający składowiskami muszą utrzymywać funkcjonowanie odwadniaczy i oczyszczalni, zapewniając jednocześnie ochronę otaczającego środowiska przed zanieczyszczeniem, zgodnie z przepisami krajowymi.



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

Z jakościowego punktu widzenia niemożliwe jest opisanie typowego składu odcieków składowiskowych, na który wpływają różne czynniki, które w szczególny sposób wpływają na proces biodegradacji odpadów, przyczyniając się tym samym do przesiąkania różnych zanieczyszczeń.

Głównymi czynnikami wpływającymi na przebieg biodegradacji są

- Stopień zawilgocenia składowanych odpadów
- Ilość i rodzaj składników organicznych (zwłaszcza osady ściekowe, kompost niezgodny ze specyfikacją)
- Poziomy metali i/lub substancji toksycznych z baterii, narkotyków, rozpuszczalników itp.
- Poziomy selektywnej zbiórki odpadów wokół składowiska, które mogą różnić się rodzajem unieszkodliwiania odpadów.

Podczyszczanie odpadów i składowanie na składowisku to kolejne dwa ważne czynniki, które wpływają na wodochłonność masy odpadowej, prowadząc do migracji zanieczyszczeń w odciekach.

Z badań skonsolidowanych wynika, że stężenie zanieczyszczeń w odciekach jest wyższe w ciągu pierwszego roku funkcjonowania składowiska, stopniowo zmniejszając się z biegiem lat. Tendencja ta wpływa na parametry organiczne chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) i biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT) oraz główne sole nieorganiczne (metale ciężkie, siarczany itp.)

Usuwanie materiału organicznego na podstawie ChZT, BZT i amoniaku z odcieków jest zwykle warunkiem wstępnym przed odprowadzeniem odcieków do wód naturalnych.

Od strony mikrobiologicznej namnażanie się grzybów i bakterii jest hamowane przez typowe warunki środowiskowe (wysokie temperatury i pH) podczas procesu biodegradacji.

W narzędziu oceniane są następujące parametry odcieków:

- **Produkcja odcieków** to całość ścieków pochodzących z opadów atmosferycznych oraz zawartość wody w odpadach stałych.
- **Ilość odcieków** po zagęszczaniu ilość ścieków w przypadku użytkowania zagęszczarki na terenie nieuporządkowanego składowiska.
- **Zawartość ścieków** stałych to wilgotność odpadów stałych zgodnie ze składem.
- Ilość odcieków pochodzących z opadów atmosferycznych to opady deszczu i śniegu na powierzchni.
- **Ron (Total)** pokazuje infiltrację opadów atmosferycznych na powierzchni.
- **Roff (Total)** pokazuje przepływ opadów na powierzchni.
- **Chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT)** jest obliczane na podstawie składu odpadów.
- **Ładunek ChZT** jest obliczany na podstawie stężenia ChZT i objętości odcieku.



## Zagrożenia związane ze stabilnością

Niestabilność na zboczu składowiska może skutkować niebezpieczeństwem dla ludzi, skażeniem otaczającego środowiska i szkodami materialnymi. Ponadto, gdy na składowisku wystąpi awaria zbocza, gaz zawarty w odpadach (jeśli występuje) może zostać uwolniony do środowiska, co niekorzystnie wpływa na środowisko. W rezultacie utrzymanie bezpiecznego funkcjonowania i stabilności składowisk jest podstawowym obowiązkiem rządów i specjalistów ds. ochrony środowiska (Toprak i in., 2021). Jest to również ważne dla osób, które mieszkają w niewielkiej odległości od składowisk.

Stabilność zbocza jest często mierzona za pomocą współczynnika bezpieczeństwa (FS). Współczynnik bezpieczeństwa zbocza to stosunek wytrzymałości gruntu na ścinanie do naprężenia ścinającego potencjalnej powierzchni ślizgowej zbocza. Zazwyczaj definicja współczynnika bezpieczeństwa to

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

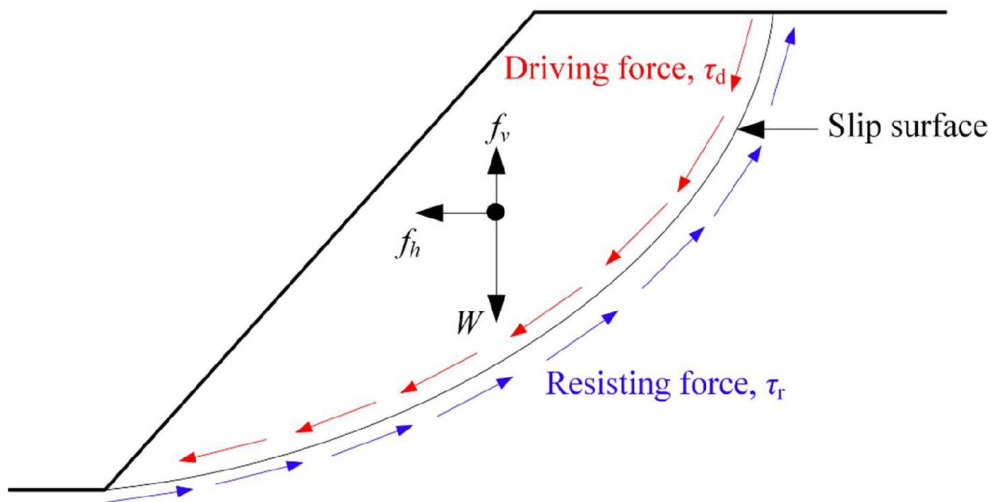
W tym równaniu  $\tau_f$  to średnia wytrzymałość gruntu na ścinanie, a  $\tau_d$  to średnie naprężenie ścinające na potencjalnej powierzchni ślizgowej.

Gdy składowiska są budowane na obszarach narażonych na trzęsienia ziemi, konieczne jest zwrócenie uwagi na efekt trzęsienia ziemi podczas projektowania i zarządzania składowiskiem. W warunkach trzęsienia ziemi metoda pseudostatyczna jest jedną z najczęściej stosowanych metod. Metoda ta jest również jednym z najprostszych sposobów idealizacji zbocza poddanego trzęsieniu ziemi. Chociaż siła trzęsienia ziemi jest dynamiczna, za główną przyczynę niestabilności można uznać siłę bezwładności. Przyspieszenie spowodowane trzęsieniem ziemi jest postrzegane jako wytwarzanie sił bezwładności w podejściu pseudostatycznym. Siły trzęsienia ziemi działają zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. Definicja sił to

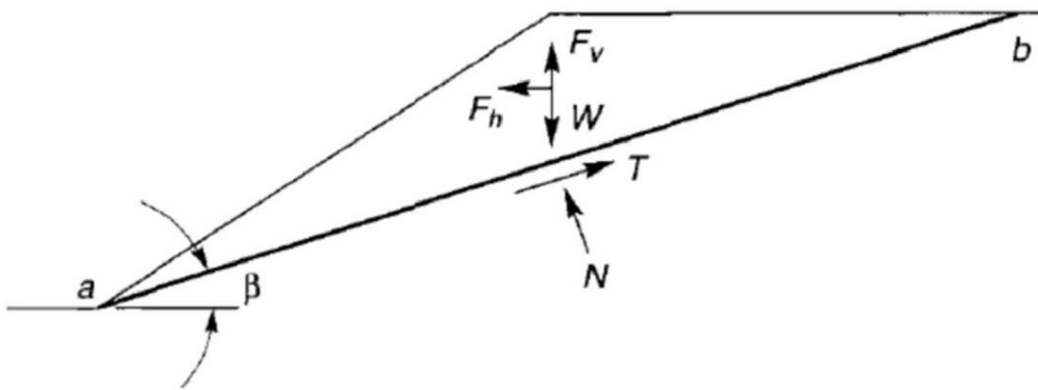
$$f_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$f_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

gdzie  $k_v$  i  $k_h$  są bezwymiarowymi pionowymi i poziomymi współczynnikami pseudostatycznymi, a  $W$  jest masą masy zniszczenia. Siły działające na zboczu dla kołowej powierzchni zniszczenia i liniowej powierzchni zniszczenia można zobaczyć na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Siły działające na zbocze w pseudostatycznej analizie stateczności zbocza dla kołowej powierzchni zniszczenia.



Rys. 5. Siły działające na zbocze w pseudostatycznej analizie stateczności zbocza dla liniowej powierzchni zniszczenia.

FS nachylenia na ryc. 5 można obliczyć za pomocą następującego równania:

$$FS = \frac{\text{resisting force}}{\text{driving force}} = \frac{c l_{ab} + [(W - F_v) \cos \beta - F_h \sin \beta] \tan \varphi}{(W - F_v) \sin \beta + F_h \cos \beta}$$

Jak pokazano w równaniu, kohezja ( $c$ ), kąt tarcia wewnętrznego ( $\varphi$ ), ciężar jednostkowy odpadów wpływający na ciężar ślizgowy, współczynniki sejsmiczne  $k_h$  i  $k_v$  mogą wpływać na wyniki wzoru na obliczenie FS nachylenia. Poziom odcieków wpływa na masę jednostkową odpadów oraz ciśnienie wody na składowisku, więc jest to również ważny parametr.



## Opis danych wejściowych i wyjściowych

W celu skorzystania z narzędzia użytkownik powinien podać niezbędne dane.

### Sekcja opisu składowiska odpadów

W tej sekcji należy zdefiniować składowisko odpadów podając następujące informacje:

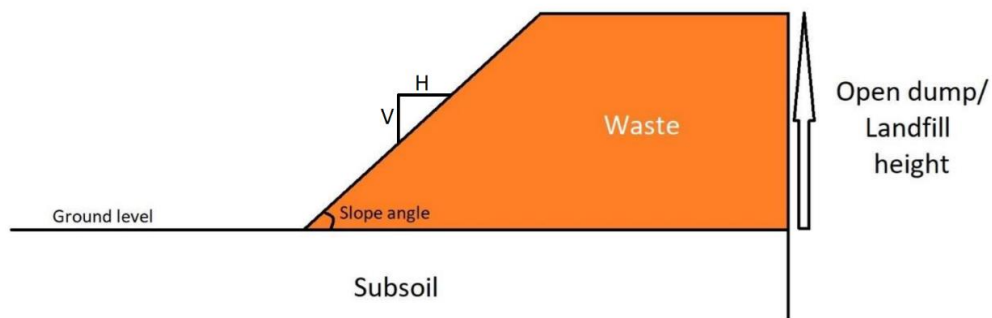
- **Rok rozpoczęcia eksploatacji (DS)** – rok, w którym składowano pierwsze odpady na składowisku.
- **Koniec roku eksploatacji** – określi czas od początkowego czasu eksploatacji składowiska do momentu zatrzymania składowiska w celu przyjęcia odpadów.
- **Składowane odpady** – łączna masa odpadów składowanych na składowisku (w tonach) w chwili jego zamknięcia (DE).
- **Środowisko** – uproszczony opis środowiska, w którym znajduje się zrzut. Użytkownik może wybrać mokre, suche lub średnie. Wpłynęłoby to na objętość i skład gazu składowiskowego;
- **Kraj** – lokalizacja duplikatu, który jest potrzebny do obliczenia potencjalnych oszczędności emisji gazów cieplarnianych w wyniku zastąpienia energii elektrycznej z sieci energią wytwarzaną z gazu składowiskowego (jeśli obejmuje to rekultywację). Po prawej stronie przedstawiono wskaźnik emisji CO<sub>2</sub> odniesiony do MWh energii elektrycznej z sieci w określonej lokalizacji. Jest obliczany automatycznie.
- **Opady (mm/rok)** – Opady odnoszą się do każdej postaci wody, która spada z atmosfery i dociera do powierzchni Ziemi. Może to obejmować deszcz, śnieg, deszcz ze śniegiem, grad i inne formy opadów. Opady występują, gdy kropelki wody lub kryształki lodu w chmurach stają się na tyle duże, że pod wpływem grawitacji spadają na ziemię. Opady będą miały wpływ na wytwarzanie odcieków.
- **Całkowita powierzchnia składowania (m<sup>2</sup>)** – Całkowita powierzchnia składowania ma znaczący wpływ na powstawanie odcieków. Ociek to ciecz, która powstaje w wyniku przenikania wody przez odpady, zazwyczaj na składowisku odpadów lub innym składowisku odpadów. Ilość wytwarzanych odcieków może zależeć od kilku czynników, w tym ilości obecnych odpadów, rodzaju odpadów, zawartości wilgoci i obszaru przechowywania. Większy obszar składowania może prowadzić do składowania większej ilości odpadów, co może skutkować wyższym poziomem generowania odcieków. Ponadto większa powierzchnia składowania może pozwolić na gromadzenie się większej ilości wilgoci w odpadach, co prowadzi do zwiększonej produkcji odcieków.
- **Zagęszczanie w obszarze** – użytkownik może wybrać tak, czy zagęszczanie jest stosowane, a nie, czy nie. Zagęszczanie składowisk jest ważnym aspektem projektowania i eksploatacji składowisk.
- **Stopień zagęszczenia (%)**. Zagęszczanie odnosi się do procesu kompresji materiałów odpadowych na składowisku w celu zmniejszenia ich objętości i stworzenia większej przestrzeni na dodatkowe odpady. Skuteczne zagęszczanie może również pomóc zminimalizować produkcję odcieków poprzez zmniejszenie ilości powietrza i wody, które mogą przedostać się do odpadów. Może to pomóc w zapobieganiu zanieczyszczeniu wód gruntowych i zmniejszeniu ryzyka szkód w środowisku. Czy na nieuporządkowanym



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

składowisku znajdują się tereny zamknięte – Składowiska mogą składać się z kilku części (partii). Tereny zaśmiecone są zamykane i zasypywane ziemią. Wyrzucanie śmieci trwa do innych sekcji na nieuporządkowanym składowisku.

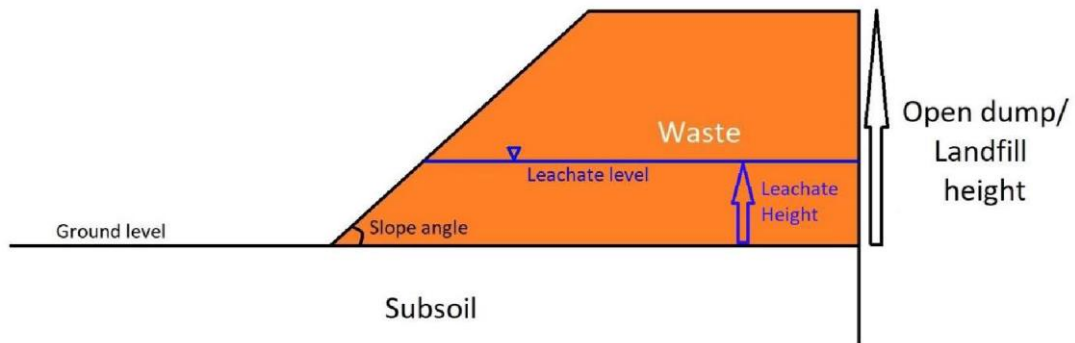
- **Procent powierzchni zamkniętej (%)** – procent powierzchni (działki), na której składowisko śmieci jest zagospodarowane i zasypane ziemią na składowisku nieuporządkowanym.
- **Skład frakcji odpadów** – należy podać dane dotyczące udziału papieru, tekstyliów, żywności, odpadów ogrodowych, osadów ściekowych, pieluch jednorazowych, drewna i słomy w ogólnej masie składowanych odpadów. Dane wejściowe należy podać w %. Ułamek internetowy jest obliczany automatycznie. Suma wszystkich ułamków powinna wynosić 100%. Jeżeli wartość ułamka obojętnego jest mniejsza od 0 oznacza to, że wprowadzone dane nie były poprawne i należy je sprawdzić. Skład frakcji odpadów odnosi się do różnych rodzajów i ilości materiałów odpadowych. Skład odpadów może wpływać na właściwości odcieków, w tym na ich pH, skład chemiczny i potencjalne szkody dla środowiska. Na przykład odpady organiczne mogą wytwarzać duże ilości odcieków ze względu na wysoką zawartość wilgoci i biodegradowalność. Podobnie gaz składowiskowy jest wytwarzany jako produkt uboczny rozkładu materiałów odpadowych na składowisku. Skład odpadów może wpływać na rodzaje i ilości wytwarzanych gazów. Na przykład odpady organiczne mogą wytwarzać znaczne ilości metanu, który jest silnym gazem cieplarnianym i przyczynia się do zmian klimatu.
- **Wysokość składowiska** – reprezentuje aktualną wysokość nieuporządkowanego składowiska/składowiska od poziomu gruntu. Użytkownik może wybrać wartość całkowitą z zakresu od 10 m do 60 m (rys. 6).
- **Kąt nachylenia** – jest to kąt nachylenia nieuporządkowanego składowiska. Można wybrać 1V/1H (1 pionowa: 3 poziome, 18,43°), 1V/2H (1 pionowa: 2 poziome, 26,57°) i 1V/3H (1 pionowa: 1 pozioma, 45°) (Rys. 6).



Rys. 6. Wysokość i kąt nachylenia składowiska

- **Poziom wody (odcieku) powyżej poziomu gruntu/wysokości składowiska** – określa to ilościowo stosunek wysokości odcieku do wysokości nieuporządkowanego składowiska. Dostępne opcje to 0 (brak poziomu odcieków w ściekach), 0,25 i 0,75 (rys. 7).

2020-1-TR01-KA226-VET-098150



Rys. 7. Poziom i wysokość odcieku

- **Masa jednostkowa odpadów ( $\gamma$ )** – określa ilościowo wagę przypadającą na jednostkę objętości odpadów. Użytkownik może wybrać wartość całkowitą z zakresu od 6 do 14 kN/m<sup>3</sup>.
- **Spójność odpadów ( $c$ ) (0 - 80 kPa)** – oznacza tendencję cząstek odpadów do zlepiania się. Jest to jeden z parametrów wytrzymałości na ścinanie. Wytrzymałość na ścinanie definiuje się jako maksymalne naprężenie ścinające, jakie odpad może wytrzymać bez uszkodzenia. Użytkownik może wprowadzić wartość całkowitą z zakresu od 0 do 80 kPa.
- **Kąt tarcia wewnętrznego odpadu ( $\phi$ ) (0-50 st.)** – to kolejny parametr wytrzymałości na ścinanie. Użytkownik może wprowadzić wartość całkowitą z zakresu od 0° do 50°.
- **$k_h$  (poziomy współczynnik pseudostatyczny) i  $k_v$  (pionowy współczynnik pseudostatyczny)** – służą do obliczania poziomych i pionowych sił wywołanych przez potencjalne trzęsienie ziemi. Są bezwymiarowe. Dostępne opcje to 0 – 0, 0,05 – 0, 0,05 – kh/2, 0,05 – kh, 0,1 – 0, 0,1 – kh/2, 0,1 – kh, 0,2 – 0, 0,2 – kh/2, 0,2 – kh, 0,3 – 0, 0,3 – kh/2, 0,3 – kh, 0,4 – 0, 0,4 – kh/2, 0,4 – kh.
- **Teoretycznie wartości współczynników sejsmicznych** powinny opierać się na jakimś wskaźniku wielkości siły bezwładności, jaką siły dynamiczne trzęsienia ziemi wywołują w zboczu. Ponieważ zbocza gleby nie są sztywne, a szczytowe przyspieszenie trzęsienia ziemi trwa tylko przez krótki czas, stosowane w praktyce wartości przyspieszenia są zwykle znacznie niższe niż szacunkowe przyspieszenia szczytowe. Wybór współczynników wykorzystywanych w badaniu stateczności zbocza zasadniczo opiera się na przepisach projektowych stosowanych w danym kraju. Z pewnością zależy to od lokalizacji składowiska/składowiska w odniesieniu do mapy sejsmicznej. W literaturze dostępne są również pewne uogólnione sugestie, takie jak Marcuson i Franklin (1983), Hynes-Griffin i Franklin (1984) oraz Melo i Sharma (2004).

## Opis rekultywacji

W tej sekcji użytkownik może opisać jakie działania zostaną podjęte w procesie rekultywacji. Należy podać następujące informacje:

- **Rok rekultywacji składowiska (DR)** – rok, w którym zakończono rekultywację.
- **Wykorzystanie gazu** – należy określić, jaki rodzaj gazu składowiskowego będzie realizowany. Można wybrać odzysk energii lub Flarę. Gaz składowiskowy, który powstaje jako produkt uboczny rozkładu materiałów odpadowych na składowisku, może być wykorzystany jako źródło energii odnawialnej. Gaz składowiskowy zwykle zawiera duże ilości metanu, który można wychwycić i wykorzystać do wytwarzania energii elektrycznej, ogrzewania budynków lub napędzania pojazdów. Wykorzystanie gazu składowiskowego jako źródła energii ma kilka zalet. Po pierwsze, może przyczynić się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych poprzez



wychwytywanie metanu, który w przeciwnym razie zostałby uwolniony do atmosfery. Metan jest silnym gazem cieplarnianym, który według szacunków jest ponad 20 razy skuteczniejszy w zatrzymywaniu ciepła niż dwutlenek węgla, co sprawia, że jego wychwytywanie i wykorzystanie jest skutecznym sposobem łagodzenia zmian klimatycznych. Po drugie, wykorzystanie gazu składowiskowego może stanowić źródło energii odnawialnej, które może pomóc w ograniczeniu zależności od paliw kopalnych. Może to przyczynić się do bezpieczeństwa energetycznego i pomóc w promowaniu bardziej zrównoważonego systemu energetycznego.

- **Wydajność odbioru gazu (%)** – użytkownik ma możliwość zdefiniowania dawki gazu składowiskowego, który będzie odbierany. 100% oznacza, że cały gaz składowiskowy zostanie zebrany i wykorzystany. Gaz składowiskowy można zbierać różnymi metodami, w tym studniami, rurami zbiorczymi itp. Niestety żaden system zbierania gazu nie jest w 100% skuteczny. Wydajność zbierania gazu wahała się od 13 do 86%, przy średniej na poziomie 50%. wartości te różnią się w zależności od kraju (np. w Szwecji -58%, Wielkiej Brytanii -64% i USA -63%) i zależą od wielu czynników, takich jak płytkie kolektory gazu, wycieki z instalacji (np. studnie odciekowe, silniki gazowe), niski odzysk gazu z powodu minimalnej produkcji gazu lub braku gromadzenia gazu w aktywnych komórkach odpadowych. Użytkownik powinien określić średnią wydajność na podstawie analizy technicznej proponowanego rozwiązania (Duan Z. et al. 2022).
- **Sprawność wytwarzania energii (%)** – użytkownik może określić, jaka część potencjału energetycznego gazu zostanie wykorzystana. Innymi słowy, jest miarą efektywności wytwarzania energii z gazu składowiskowego. Ta porcja wpłynie na wynik w przypadku wybrania odzysku energii. Po zebraniu gaz może zostać oczyszczony i przetworzony w celu usunięcia zanieczyszczeń, zanim zostanie wykorzystany jako źródło energii. Projekty wykorzystania gazu składowiskowego mogą mieć różną skalę, od małych projektów na miejscu po operacje komercyjne na dużą skalę. Sprawność wytwarzania energii jest różna dla różnych opcji. Na przykład turbiny gazowe mają sprawność netto około 30-40%, silniki gazowe wykazują wartości do 46%. Dzięki zastosowaniu rozwiązań z odzyskiem ciepła sprawność netto turbin gazowych wzrasta do prawie 60%, a w przypadku silników o około 50%. Użytkownik powinien określić średnią wydajność na podstawie analizy technicznej proponowanego rozwiązania.
- **Materiał przykrycia** – użytkownik ma możliwość zdefiniowania warstwy przykrycia składowiska zakładanej w trakcie procesu rekultywacji. Można wybrać glebę piaszczystą – nachylenie 0-7%, glebę piaszczystą – nachylenie >7%, glinę – nachylenie 0-7%, glinę – nachylenie >7%. Współczynnik płynięcia powierzchniowego pokazany jest po wybraniu materiału pokrycia. Jest obliczany automatycznie. Materiał przykrywający stosowany na składowisku odpadów odgrywa ważną rolę w kontrolowaniu powstawania i migracji odcieków. Zapobiegając przedostawaniu się wody na składowisko, materiał pokrycia może również wpływać na jakość powstających odcieków. Jeśli materiał pokrycia nie jest skuteczny w zapobieganiu infiltracji wody, powstały odciek może zostać zanieczyszczony zanieczyszczeniami z materiałów odpadowych.
- **Nowy kąt nachylenia** – kąt nachylenia można zmniejszyć. Dostępne opcje to 1V/1H (1 pionowa: 3 poziome, 18,43°), 1V/2H (1 pionowa: 2 poziome, 26,57°) i 1V/3H (1 pionowa: 1 pozioma, 45°).



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

- **Nowa wysokość składowiska** – wysokość składowiska można zmniejszyć. Użytkownik może wprowadzić wartość całkowitą z zakresu od 10 m do 60 m.
- **Nowy poziom wody (odcieku) nad terenem/wysokości składowiska** – użytkownik może zmniejszyć stosunek poziomu wody (odcieku) nad terenem do wysokości składowiska. Dostępne opcje to 0 (brak odcieków w odpadach), 0,25 i 0,75.
- **Przyszła wysokość składowiska bez rekultywacji** – reprezentuje przyszłą wysokość nieuporządkowanego składowiska/składowiska od poziomu gruntu bez rekultywacji. Użytkownik może wybrać wartość całkowitą z zakresu od 10 m do 60 m.
- **Przyszły poziom wody (odcieku) powyżej poziomu gruntu/składowiska bez rekultywacji** – określa ilościowo stosunek przyszłej wysokości odcieku do wysokości składowiska bez rekultywacji. Dostępne opcje to 0 (brak odcieków w odpadach), 0,25 i 0,75.

## Wyniki - podsumowanie

W tej części ogólnej przedstawiono najważniejsze wyniki obliczeń. W przejrzystej tabeli użytkownik może porównać wartości dla wszystkich 3 scenariuszy.

Wyniki dla Scenariusza 1 dają przegląd oddziaływania składowiska na środowisko od początku jego istnienia do dnia podjęcia decyzji o rekultywacji. Są to wyniki odnoszące się do minionego okresu. Porównanie scenariuszy 2 i 3 daje wyobrażenie o możliwym oddziaływaniu na środowisko w przyszłości – tj. od momentu podjęcia decyzji o rekultywacji do końca okresu funkcjonowania składowiska. Różnicę między wynikami dla obu scenariuszy można uznać za wartość samej decyzji i powinna być motywacją do podjęcia rekultywacji.

W tej sekcji narzędzie pokazuje następujące wyniki obliczeń:

- **Emisja efektywna (całkowita emisja gazów cieplarnianych podana w Mg ekwiwalentu CO<sub>2</sub>)** – obejmuje emisje własne ze składowiska, instalacji utylizacji biogazu oraz emisję unikniętą dzięki energii wytworzonej z biogazu;
- **Wytwarzanie zielonej energii dzięki wykorzystaniu biogazu** – energia wytworzona w instalacji utylizacji biogazu;
- **Emisja odcieków (całkowita emisja ze składowiska)** - Suma ścieków pochodzących z opadów atmosferycznych oraz zawartość wody w odpadach stałych.
- **Chemiczne zapotrzebowanie na tlen** - Chemiczne zapotrzebowanie na tlen odcieku w zależności od składu odpadów.
- **Współczynnik bezpieczeństwa stateczności zbocza** – stosunek wytrzymałości odpadów na ścinanie do naprężeń ścinających potencjalnej powierzchni ślizgowej zbocza.
- **Stan bezpieczeństwa** - zgodnie z wyjściem „Współczynnik bezpieczeństwa” pokazuje stan zabezpieczenia składowiska przed zawaleniem się zbocza oraz sposób, w jaki zarządcy/pracownicy składowiska powinni w razie potrzeby zareagować na zaistniały problem.

## Wyniki – gaz składowiskowy

Wyniki są pogrupowane w sekcje związane ze scenariuszami. W każdym scenariuszu obliczane są następujące wyniki:



### Scenariusz 1

- **Wytwarzanie gazu składowiskowego (GG)** – jest to suma gazu składowiskowego, który został wytworzony od samego początku budowy składowiska odpadów (DS) do czasu podjęcia decyzji o rekultywacji (DR). Zdecydowana większość tego gazu została wyemitowana do atmosfery. Mógł być wykorzystany do wytwarzania zielonej czystej energii – ale nie ze względu na spóźnione decyzje o rekultywacji czy budowie dobrego składowiska od razu. Innymi słowy, jest miarą straconych i zmarnowanych szans.
- **Zebrany gaz składowiskowy (CG)** – reprezentuje ilość gazu składowiskowego zebranego na składowisku odpadów. Ponieważ scenariusz 1 odnosi się do odkrywki przed rekultywacją, zakłada się, że system zbierania gazu nie jest zainstalowany. W tym scenariuszu CG zawsze wynosi 0.
- **Emisja powierzchniowa (FE)** – w scenariuszu 1 oznacza to całkowitą emisję gazu składowiskowego od początku eksploatacji składowiska (DS) do daty rekultywacji (DR). To jest emisja, która już miała miejsce. Emitowany gaz składowiskowy składa się z kilku gazów. Większość z nich to CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub>. Emisja jest obliczana i wyrażana w ekwiwalencie CO<sub>2</sub>, który reprezentuje całkowity wpływ emitowanego gazu na zmiany klimatu. Przyjmuje się, że strumień odpadów kierowanych na składowisko jest stały przez cały okres eksploatacji. Oznacza to, że co roku deponowano tam taką samą ilość odpadów. Założenie to wpływa na szacowanie emisji biogazu i odcieków.
- **Emisja uniknięta (EA)** – ponieważ w scenariuszu 1 nie zainstalowano urządzeń do utylizacji gazu składowiskowego, nie ma szans na wytworzenie energii, która mogłaby zastąpić część energii z sieci. W tym scenariuszu AE zawsze wynosi 0.
- **Emisja efektywna (EE)** – w scenariuszu 1 EE jest tożsame z FE ze względu na brak instalacji odbioru gazu.
- **Wytwarzanie zielonej energii** – reprezentuje ilość energii, która zostanie wyprodukowana w okresie od DR do DE. Ponieważ w tym scenariuszu nie zainstalowano żadnych urządzeń wykorzystujących gaz, ilość energii wynosi zawsze 0.

### Scenariusz 2

- **Wytwarzanie gazu składowiskowego (GG)** – jest to suma gazu składowiskowego, który został wytworzony na składowisku w okresie od wydania decyzji o rekultywacji (DR) do zakończenia jego eksploatacji (DE). Podobnie jak w scenariuszu 1, w związku z brakiem instalacji odbioru gazu, gaz składowiskowy jest uwalniany do atmosfery w sposób swobodny. Mogłoby to być traktowane jako miara potencjalnego źródła zielonej energii, gdyby została podjęta decyzja o rekultywacji. Innymi słowy, jest miarą potencjalnie utraconych korzyści w przyszłości.
- **Zebrany gaz składowiskowy (CG)** – reprezentuje ilość gazu składowiskowego zebranego na składowisku odpadów w czasie od DR do DE. Ponieważ scenariusz 2 odnosi się do sytuacji, gdy rekultywacja nie jest realizowana, zakłada się, że system odbioru gazu nie jest zainstalowany. W tym scenariuszu CG zawsze wynosi 0.
- **Emisja powierzchniowa (FE)** – oznacza emisję, jaka nastąpi, jeśli nie zostanie podjęta decyzja o rekultywacji. Emisja jest obliczana dla czasu od podjęcia decyzji o rekultywacji (DR) do końca życia składowiska (DE), czyli czasu, w którym składowisko nie będzie już wytwarzać gazu



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

składowiskowego. Emisja jest obliczana i wyrażana w ekwiwalencie CO<sub>2</sub>. Podobnie jak w scenariuszu 1 cały gaz składowiskowy jest swobodnie emitowany do atmosfery. Jest to miara całkowitej ilości gazów cieplarnianych, które wystąpią w przyszłości.

- **Emisja uniknięta (AE)** – podobnie jak w scenariuszu 2 nie zainstalowano żadnych urządzeń utylizacji gazu, nie można spodziewać się unikniętej emisji. a AE zawsze wynosi 0.
- **Emisja efektywna (EE)** – w scenariuszu 2 EE jest tożsama z FE ze względu na brak instalacji odbioru gazu.

### Scenariusz 3

- **Wytwarzanie gazu składowiskowego (GG)** – jest to suma gazu składowiskowego, który został wytworzony na składowisku w okresie od wydania decyzji o rekultywacji (DR) do zakończenia jego eksploatacji (DE). Ilość gazu wytworzonego w scenariuszu 3 jest taka sama jak w scenariuszu 2. Jednak dzięki instalacji systemu odbioru gazu może on być wykorzystany w pochodni lub w instalacji odzysku energii.
- **Zebrany gaz składowiskowy (CG)** – reprezentuje ilość gazu składowiskowego zebranego na składowisku odpadów w czasie od DR do DE. W scenariuszu 3 zainstalowany jest system zbierania gazu. Nie jest to jednak w 100% skuteczne. W efekcie tylko część gazu powstającego na składowisku jest odbierana i transportowana do instalacji utylizacji gazu.
- **Emisja powierzchniowa (FE)** – Ponieważ system odbioru gazu nie jest w 100% sprawny, część gazu jest swobodnie emitowana do atmosfery bez wykorzystania. FE reprezentuje tę część gazu składowiskowego. FE reprezentuje emisję, jaka nastąpi, jeśli nie zostanie podjęta decyzja o rekultywacji. Emisja jest obliczana dla czasu od momentu podjęcia decyzji o zakończeniu eksploatacji składowiska (czas, w którym składowisko nie będzie już wytwarzać gazu składowiskowego). Emisja jest obliczana i wyrażana w ekwiwalencie CO<sub>2</sub>. Podobnie jak w scenariuszu 1 cały gaz składowiskowy jest swobodnie emitowany do atmosfery. Jest to miara całkowitej ilości gazów cieplarnianych, które wystąpią w przyszłości.
- **Emisja uniknięta (EA)** – w scenariuszu 3 zainstalowane są urządzenia utylizacji gazu. Jeśli jest to system odzyskiwania energii, energia z niego może zastąpić część energii z sieci. W rezultacie nastąpi pewna uniknięta emisja. Im wyższa sprawność systemu odbioru gazu i wyższa sprawność układu wytwarzania energii, tym większa ilość unikniętej emisji.
- **Emisja efektywna (EE)** – oznacza emisję, jaka nastąpi w przypadku podjęcia decyzji o rekultywacji. Emisja jest obliczana dla czasu od momentu podjęcia decyzji o zakończeniu eksploatacji składowiska (czas, w którym składowisko nie będzie już wytwarzać gazu składowiskowego). Jeżeli emisja jest niższa niż emisja wskazana w przypadku niepodjęcia rekultywacji, wynika to z lepszego zagospodarowania i wykorzystania gazu składowiskowego. Emisja może być nawet ujemna (wskazana jako wartość w nawiasie – np. (100) Mg CO<sub>2eq</sub> oznacza minus 100 MgCO<sub>2eq</sub>). Emisja ujemna mogłaby powstać w wyniku zastąpienia energii elektrycznej sieciowej w określonej lokalizacji energią elektryczną wytwarzaną z zebranego gazu składowiskowego. Jeżeli wpływ na środowisko z tego ostatniego jest mniejszy (w stosunku do jednostki energii) niż z sieci elektroenergetycznej, może wystąpić emisja ujemna. W tej sytuacji możemy mówić o odciążeniu środowiska.
- **Wytwarzanie zielonej energii** – to całkowita energia, która zostanie wytworzona w wyniku rekultywacji i wdrożenia odzysku energii z zebranego gazu składowiskowego.



- **Wykres - Projekcja emisji (z rekultywacją i bez)** – ten wykres przedstawia porównanie wpływu na środowisko związanego ze zmianami klimatycznymi w przypadku podjęcia lub nie decyzji o rekultywacji. Innymi słowy, jest to wizualizacja wartości decyzji o podjęciu rekultywacji nieuporządkowanego składowiska odpadów.

## Wyniki - odcieki

- **Wytwarzanie odcieków** Odpowiada to całkowitej ilości ścieków pochodzących z opadów atmosferycznych i zawartości wody w odpadach stałych. Woda powstająca podczas fermentacji beztlenowej odpadów jest pomijana.
- **Ilość odcieku po zagęszczeniu** Jest to ilość ścieków w przypadku użycia zagęszczarki na nieuporządkowanym terenie składowiska
- **Zawartość odpadów stałych** Przedstawia wilgotność odpadów stałych według składu.
- **Ilość odcieku pochodząca z opadów atmosferycznych** Oznacza opady deszczu i śniegu na powierzchni.
- **Ron (ogółem)** Reprezentuje infiltrację opadów atmosferycznych na powierzchni.
- **Roff (ogółem)** Reprezentuje przepływ opadów na powierzchni.
- **Chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT)** Odpowiada chemicznemu zapotrzebowaniu tlenu na odciek. Wartość ta jest obliczana na podstawie składu odpadów.
- **Ładunek ChZT** Ten termin jest obliczany na podstawie stężenia ChZT i objętości odcieku.
- **Ilość odcieków do czasu rekultywacji** Jest to ocena czasu od początku do podjęcia decyzji o rekultywacji.
- **Załadunek ChZT do czasu rehabilitacji** Jest to ocena czasu od początku do czasu podjęcia decyzji o rehabilitacji.
- **Przyszła ilość odcieków bez rekultywacji** Stanowią ocenę czasu od momentu podjęcia decyzji o rekultywacji do końca życia składowiska bez rekultywacji.
- **Przyszłe obciążenie ChZT bez rekultywacji** Są to oceny czasu od momentu podjęcia decyzji o rekultywacji do końca aktywnego życia składowiska bez rekultywacji.
- **Przyszła ilość odcieków wraz z rekultywacją** Stanowią ocenę czasu od momentu podjęcia decyzji o rekultywacji do zakończenia eksploatacji składowiska wraz z rekultywacją. Ta wartość będzie wynosić „0”. Po rekultywacji wytwarzanie odcieków nie wzrasta z powodu zakrycia górnej powierzchni.
- **Przyszłe obciążenie ChZT wraz z rekultywacją** Stanowią ocenę czasu od momentu podjęcia decyzji o rekultywacji do końca czynnego życia składowiska wraz z rekultywacją. Ta wartość będzie wynosić „0”. Po renowacji obciążenie ChZT nie wzrasta z powodu zakrycia górnej powierzchni.

## Wyniki - stabilność

Wyniki określa się zgodnie z FS. Obliczane są następujące rezultaty:



2020-1-TR01-KA226-VET-098150

- **Współczynnik bezpieczeństwa stateczności zbocza** – stosunek wytrzymałości odpadu na ścinanie do naprężenia ścinającego potencjalnej powierzchni ślizgowej zbocza. Możliwe wyniki dla „Współczynnika bezpieczeństwa względem stateczności” można zobaczyć w Tabeli 1.
- **Stan bezpieczeństwa** – Zgodnie z danymi wyjściowymi „Współczynnik bezpieczeństwa” pokazuje stan zabezpieczenia składowiska przed zawaleniem się zbocza oraz sposób, w jaki zarządcy/pracownicy składowiska powinni zareagować na problem w razie potrzeby. Możliwe wyjścia dla „Warunków bezpieczeństwa” można zobaczyć w Tabeli 1.

Wyniki te są również obliczane dla każdego procesu rekultywacji i wszystkich procesów rekultywacji łącznie, aby zobaczyć wpływ każdej rekultywacji na stabilność składowiska. Dlatego też, w ramach wstępnej oceny, osoba upoważniona do nieuporządkowanego składowiska może łatwo zobaczyć wpływ tych opcji rekultywacji na składowisko. FS w odniesieniu do stateczności określa warunki statyczne i dynamiczne, a możliwe wyniki dla wyników można zobaczyć w tabeli 1.

Tabela 1: Możliwe wyniki w sekcji Wyniki obliczeń.

Warunki	FS przeciwko stabilności	Warunki bezpieczeństwa
Styczne ( $kh=0$ , $kv=0$ )	>1.5 1.1-1.5 <1.1	BEZPIECZNA NIEBEZPIECZNE — wymagana jest szczegółowa ponowna ocena NIEBEZPIECZNE — wymagane jest natychmiastowe działanie
Dynamiczne ( $kh \neq 0$ )	>1.2 <1.2	BEZPIECZNA NIE JEST BEZPIECZNE



## Literatura

1. Agdag, O.N., Yilmaz Cincin, R.G., Toprak, S., Kaplan, Y., Degirmenci, R., Agdag, F., Gebes, S., Cetin, B., De Angelis, E., Pikon, K., Kujumdzieva, A., Petrova, V., Panaitescu, C., Frulla, D., Dal, O., Balcik, C., De Angelis, K., Dinu, F., Nedeva, T., Bogacka, M. (2022). Rehabilitation Methods for Open Dumps and its Global Applications: SMARTEnvi Eu Project. 6th EurAsia Waste Management Symposium, 24-26 October 2022, İstanbul, Türkiye.
2. Dal O., (2023), "Static and Dynamic Slope Stability Of MSW Landfills", MSc. Thesis, Gebze Technical University, Kocaeli, Türkiye.
3. Duan Z. et al. Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations, Waste Management, Volume 139, 2022, Pages 269-278, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>.
4. Hynes-Griffin ME, Franklin AG. "Rationalizing the seismic coefficient method." U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1984, Miscellaneous Paper GL-84-13, 21 pp.
5. Marcuson WF, Franklin AG. "Seismic Design, Analysis, and Remedial Measures to Improve the Stability of Existing Earth Dams - Corps of Engineers Approach", in Seismic Design of Embankments and Caverns, T.R. Howard, Ed., New York, ASCE, 1983.
6. Melo, C., & Sharma, S. (2004, August). Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis. In 13th World conference on earthquake engineering (Vol. 369, p. 15).
7. Toprak S., Agdag O.N., Cetin B., De Angelis E., Pikon K., Kujumdzieva A., Petrova V., Panaitescu C., Degirmenci R., Frulla D., Dal O., Balcik C., Yilmaz Cincin R.G., De Angelis K., Dinu F., Nedeva T., Kaplan Y., Agdag F., Bogacka M., (2021a), "A Project on Reducing Risks Associated with MSW Open Dumps", 6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 1316-1325, Kocaeli, Türkiye.
8. Toprak, S., Cetin, B., Agdag, O.N., De Angelis, E., Górski, M., Kujumdzieva, A., Petrova, V., Panaitescu, C., Degirmenci, R., Frulla, D., Yilmaz Cincin, R.G., Balcik, C., Pikon, K., Dinu, F., Nedeva, T., Kaplan, Y., Dal, O., De Angelis, K., Agdag, F. (2021b). A Joint Effort to Reduce Hazards to the Environment and Water Resources by Rehabilitating Open Dumps. 14th International Congress on Advances in Civil Engineering, 6-8 September 2021, İstanbul, Türkiye.
9. Toprak S., Dal O., (2022), "Factors Affecting Slope Stability In Landfills", 18th National Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference, Kayseri, Türkiye (in Turkish).