

Wybrane warunki ograniczające do modelu optymalnego doboru technologii bezwykopowej budowy przewodów podziemnych

Dr inż. Agata Zwierzchowska, Katedra Sieci i Instalacji Sanitarnych,
Politechnika Świętokrzyska, Kielce

1. Wprowadzenie

Pierwszą polską pracą naukową dotyczącą problematyki technologii bezwykopowych była praca doktorska prof. Andrzeja Kuliczковского „Możliwości optymalizacji przebudowy magistralnej sieci kanalizacyjnej na przykładzie lewobrzeżnego Wrocławia”. Zawierała ona ekonomiczne uzasadnienie celowości stosowania technologii bezwykopowych i stworzyła naukowe podstawy dla dalszego ich rozwoju. Profesor Andrzej Kuliczkowski jest również autorem pierwszego modelu matematycznego dotyczącego technologii bezwykopowej budowy. Model ten i opracowany program komputerowy umożliwił ustalenie kiedy bardziej efektywna ekonomicznie jest metoda bezwykopowa od metody wykopowej. Bazując na pracach profesora Kuliczковского, kilka lat temu autorka artykułu opracowała model matematyczny AZ-01 [4], który umożliwia dobór optymalnej technologii bezwykopowej budowy przewodów podziemnych. W modelu tym zastosowano metodę systematycznego przeszukiwania rozwiązań oraz logikę binarną. Wielkości wejściowe, warunki ograniczające zapisano w postaci wektorów i macierzy. Ich elementom przypisano wartości ze zbioru $\{0,1\}$. Jest to model tradycyjny wymagający precyzyjnych informacji o wielkościach wejściowych i warunkach ograniczających. Modele takie często nie są w stanie rozwiązać wielu praktycznych problemów, np.: stosując model AZ-01 często otrzymywano jako wielkość wyjściową kilka potencjalnie możliwych do zastosowania technologii bezwykopowej budowy przewodów podziemnych. Aby dokonać jednoznacznego wyboru optymalnej technologii bezwykopowej budowy dla danej realizacji, autorka opracowała model matematyczny wykorzystujący oceny jakościowe, stosując rozmyte metody modelowania. Jednym z elementów modelu jest przyjęcie warunków ograniczających. Zapisano je jako zmienne lingwistyczne, czyli takie, które są oceniane poprzez oceny lingwistyczne, zwane również wartościami lingwistycznymi. Oprócz wartości lingwistycznych do oceny zmiennych lingwistycznych przyjęto również liczby rozmyte. Do warunków ograniczających należą: długości jednorazowo wbudowywanych przewodów podziemnych w danej tech-

nologii bezwykopowej; możliwość wbudowania przewodu o danej średnicy w danej technologii bezwykopowej; możliwość wbudowania przewodu podziemnego w danym rodzaju gruntu daną technologią bezwykopową; możliwość wbudowania przewodu w gruncie nawodnionym, poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej; możliwość wbudowania przewodu z danego materiału w danej technologii bezwykopowej; dokładność wbudowania przewodu podziemnego w danej technologii bezwykopowej; minimalna wysokość przykrycia gruntem nad wierzchołkiem przewodu; maksymalna możliwa wysokość zwierciadła wody gruntowej powyżej dna wbudowywanego przewodu. W niniejszym artykule zostaną omówione wybrane warunki ograniczające.

2. Długości jednorazowo wbudowywanych przewodów podziemnych w danej technologii bezwykopowej

Długości jednorazowo wbudowywanych odcinków przewodów podziemnych wynoszą od 15 m do 3000 m, w zależności od zastosowanej technologii bezwykopowej, warunków gruntowych oraz średnicy wbudowywanego przewodu. Dla metod z grupy mikrotunelowania, istotnym czynnikiem mającym wpływ na długość wbudowywanych odcinków jest zastosowany system transportu urobku. Długości przecisków wynoszą do 80 m dla urządzeń z transportem urobku przenośnikiem ślimakowym i do około 150 m dla systemów płuczkowych i próżniowych bez zastosowania pośrednich stacji przeciskowych. Dość znaczna różnica w długości wbudowywanych przewodów pomiędzy metodami mikrotunelowania z systemem usuwania urobku przenośnikiem ślimakowym, a płuczkowym i próżniowym wynika z faktu, iż opory (straty spowodowane tarcieniem) przy transportowaniu urobku za pomocą płuczki lub sposobem próżniowym są znacznie mniejsze niż przy zastosowaniu przenośników ślimakowych. Kolejne ograniczenie długości wbudowywanych przewodów w przypadku metod mikrotunelowania jest spowodowane dopuszczalną siłą przecisku rur. Jednakże w przypadku mikrotunelowania z płuczkowym i próżniowym systemem usuwania urobku możliwe jest za-

stosowanie pośrednich stacji przeciskowych. Wówczas, długości te znacznie się wydłużają i osiągają do 200 m dla mikrotunelowania z próżniowym transportem urobku oraz do 1000 m dla mikrotunelowania z płuczkowym transportem urobku. Teoretycznie poprzez zastosowanie pośrednich stacji przeciskowych długość jednorazowo wbudowywanych odcinków przewodów jest nieograniczona, problemem jednak jest transport urobku, a w szczególności dobór pompy o dostatecznej mocy, zapewniającej transport urobionego gruntu, zarówno dla systemu próżniowego, jak i płuczkowego. Praktycznie jednak pośrednie stacje przeciskowe stosuje się tylko dla przewodów przełazowych, ze względu na możliwość późniejszego demontażu siłowników oraz pierścieni oporowych i dosunięcia rur przewodowych w miejscu stacji pośrednich za pomocą kolejnych stacji jeszcze nierozmontowanych. Możliwe jest również zastosowanie pośrednich stacji przeciskowych dla przewodów nieprzełazowych, jednakże konieczne jest, po wbudowaniu danego odcinka, wykonanie wykopu w miejscu stacji pośredniej celem jej demontażu i wykonania w tym miejscu np. studni rewizyjnej.

Dla metod mikrotunelowania wykorzystujących w sterowaniu laser, istotnym czynnikiem mającym wpływ na długość wbudowywanych jednorazowo przewodów jest rozproszenie wiązki laserowej poprzez unoszące się w powietrzu cząstki stałe (zapylenie). Dla małych średnic przewodów (szczególnie poniżej 400 mm) dodatkowym czynnikiem zwiększającym rozproszenie promienia lasera jest podwyższona temperatura panująca we wnętrzu wbudowywanego przewodu i związane z tym zjawisko unoszenia i falowania podgrzanego powietrza (konwekcja). Dodatkowo wiązka lasera może ulegać załamaniu na granicy warstw powietrza o różnej temperaturze. Różnice w temperaturze mogą powstawać np. na granicy wykopu początkowego i wbudowywanego przewodu. Dla przewodów o małych średnicach istotne są również problemy z chłodzeniem (pojawiające się przy większych długościach wbudowywanych jednorazowo przewodów), między innymi hydraulicznych cylindrów siłowników i innych elementów urządzenia do mikrotunelowania, w związku z utrudnioną wymianą powietrza we wbudowywanym przewodzie.

Długości wbudowywanych jednorazowo przewodów dla metod z grupy przecisków hydraulicznych osiągają maksymalnie 80 m. Ograniczenie to spowodowane jest stosowanym systemem urabiania i transportu gruntu. W większości tych metod do transportu urobku stosuje się system przenośników ślimakowych, natomiast do urabiania gruntu wiertło ślimakowe lub głowice wielonożową. Tak jak dla metod mikrotunelowania z tym transportem urobku, opory transportowania urobionego gruntu są dość znaczne. W metodach tych istotny jest również fakt, iż moment obrotowy przenoszony jest na wiertło ślimakowe lub głowicę wielonożową, poprzez przenośnik ślimakowy, z wiertnicy umieszczonej w wykopie początkowym.

Ważnym czynnikiem mającym wpływ na długość wbudowywanych jednorazowo przewodów jest rodzaju gruntu, a w szczególności wielkość tarcia powierzchniowego gruntu o wprowadzany rurociąg oraz zjawisko kohezji występujące między gruntem a rurociągiem.

Najmniejsze długości jednorazowo wbudowywanych przewodów osiągane są przy zastosowaniu metod przecisków poprzez zagęszczanie gruntu, do których należy na przykład przecisk pneumatyczny przebijakiem. Są to metody niesterowalne, bez usuwania urobku, grunt jest przemieszczany na boki wbudowywanego rurociągu i zagęszczany.

Maksymalne długości wbudowywanych rurociągów, osiągane spośród wszystkich metod bezwykopowej budowy, są charakterystyczne dla technologii horyzontalnych przewiertów sterowanych i dochodzą do 2000 m, a dla modyfikacji tej technologii zwanej Inter Sect nawet do 3000 m.

W opracowanym modelu matematycznym „długości jednorazowo wbudowywanych przewodów podziemnych w danej technologii bezwykopowej”, jako warunek ograniczający, jest zmienną lingwistyczną, ocenianą poprzez liczby rozmyte. Dla zmiennej tej określono jej przestrzeń lingwistyczną w postaci zbioru:

$$C_L = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$$

gdzie:

c_1, c_2, \dots, c_n – liczby rozmyte stosowane do oceny zmiennej lingwistycznej „długości wbudowywanych jednorazowo przewodów podziemnych w danej technologii bezwykopowej”.

Określono również przestrzeń numeryczną w postaci trzech macierzy trójwymiarowych $C1, C2, C3$, odpowiednio o elementach: $c1_{ik2k5}$ i rozmiarze m na n_2 na n_5 , $c2_{ik3k5}$ i rozmiarze m na n_3 na n_5 , $c3_{ik4k5}$ i rozmiarze m na n_4 na n_5 , gdzie i to kolejne technologie bezwykopowej budowy przewodów podziemnych, k_2, k_3, k_4 to średnice rur, a k_5 to wielkość tarcia powierzchniowego gruntu o wbudowywany przewód podziemny. Dla zmiennej tej przyjęto trzy macierze, odpowiednio dla różnych materiałów rur, bowiem rury wykonane z różnych materiałów charakteryzują się różnie przyjmowaną średnicą. Przestrzeń numeryczna $C1$ jest określona dla materiałów rur takich, jak: bazalt, beton polimerowy, kamionka, stal, żelbet oraz żeliwo sferoidalne, dla których jako charakterystyczna przyjmowana jest średnica wewnętrzna. Przestrzeń numeryczna $C2$ jest określona dla materiałów rur takich, jak: polichlorek winylu oraz polietylen, dla których jako charakterystyczna przyjmowana jest średnica zewnętrzna. Przestrzeń numeryczna $C3$ jest określona dla rur z żywic poliestrowych wzmocnianych włóknem szklanym, dla których jako charakterystyczna przyjmowana jest średnica zewnętrzna, ale w innych typoszeregach niż dla wymienionych powyżej rur z polichloru winylu i polietyleny.

Następnie dla tejże zmiennej lingwistycznej określono funkcję przynależności, przyporządkowującą każdemu elementowi danej zmiennej pewną wartość z przedzia-

tu jednostkowego $[0, 1]$. Funkcje przynależności zapisano w postaci:

$$\begin{aligned} \mu_{C1}(c1_{ik_2k_5}): C1 &\rightarrow [0,1], \quad \forall c1_{ik_2k_5} \in C1 \\ \mu_{C2}(c2_{ik_3k_5}): C2 &\rightarrow [0,1], \quad \forall c2_{ik_3k_5} \in C2 \\ \mu_{C3}(c3_{ik_4k_5}): C3 &\rightarrow [0,1], \quad \forall c3_{ik_4k_5} \in C3 \end{aligned}$$

Następnie, mając funkcje przynależności, określono poszczególne zbiory rozmyte, czyli zbiory par: stopnia przynależności i elementu. Przy czym stopień przynależności informuje w jakim stopniu dany element należy do zbioru rozmytego. Zbiory rozmyte zapisano odpowiednio jako $C1_R, C2_R, C3_R$:

$$\begin{aligned} C1_R &= \{(c1_{ik_2k_5}, \mu_{C1}(c1_{ik_2k_5})); c1_{ik_2k_5} \in C1, \mu_{C1}(c1_{ik_2k_5}) \in [0,1]\} \\ C2_R &= \{(c2_{ik_3k_5}, \mu_{C2}(c2_{ik_3k_5})); c2_{ik_3k_5} \in C2, \mu_{C2}(c2_{ik_3k_5}) \in [0,1]\} \\ C3_R &= \{(c3_{ik_4k_5}, \mu_{C3}(c3_{ik_4k_5})); c3_{ik_4k_5} \in C3, \mu_{C3}(c3_{ik_4k_5}) \in [0,1]\} \end{aligned}$$

gdzie:

- $\mu_{C1}(c1_{ik_2k_5})$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej $C1$,
- $c1_{ik_2k_5}$ – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej $C1$,
- $\mu_{C2}(c2_{ik_3k_5})$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej $C2$,
- $c2_{ik_3k_5}$ – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej $C2$,
- $\mu_{C3}(c3_{ik_4k_5})$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej $C3$,
- $c3_{ik_4k_5}$ – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej $C3$.

3. Możliwość wbudowania przewodu o danej średnicy w danej technologii bezwykopowej

Zakres średnic wbudowywanych przewodów w technologiach bezwykopowej budowy wynosi od 45 mm do 3000 mm. W chwili obecnej rozszerza się go nawet do 4200 mm. Oczywiście nie ma uniwersalnej technologii, za pomocą której można wbudować rurociąg lub kanał o średnicy zarówno 45 mm, jak i 3000 mm. Maksymalna średnica przewodu wbudowanego w technologii bezwykopowej budowy zależy przede wszystkim od sposobu urabiania gruntu oraz systemu transportu urobku. I tak dla technologii, w których grunt jest tylko zagęszczany wokół przebijaka lub wprowadzanej rury, np. przecisk pneumatyczny przebijakiem, maksymalna średnica zewnętrzna rurociągu lub kanału wbudowywanego w tych technologiach wynosi 200 mm, ze względu na fakt, że nie ma usuwania urobku, grunt jest tylko zagęszczany. Dla technologii, w których usuwanie urobku odbywa się za pomocą przenośnika ślimakowego, np. przeciski hydrauliczne maksymalna średnica wbudowywanego przewodu wynosi 1200 mm. Ograniczenie to wynika z faktu, iż moment obrotowy napędzający głowicę wielonożową lub wiertło ślimakowe (urabiające grunt) jest przekazywany poprzez system przenośników ślimakowych. Toteż, czym większa średnica przewodu, tym większe wymiary ślimaka i więk-

szy wymagany moment obrotowy do wprawienia w ruch przenośnika ślimakowego i głowicy urabiającej. Dla technologii z grupy mikrotunelowania istnieje również dolna granica zakresu średnic wbudowywanych przewodów. Spowodowane jest to faktem, iż wbudowywany przewód musi pomieścić system usuwania urobku (w przypadku systemów płuczkowych i pneumatycznych są to rury transportujące urobek, podające płuczkę i inne, a w przypadku systemów ślimakowych – przenośniki ślimakowe prowadzone w rurach osłonowych), przewody hydrauliczne, przewody zasilające i inne.

Ze względu na fakt, jak to wspomniano wcześniej, iż nie ma uniwersalnej technologii, za pomocą której można wbudować przewód podziemny w całym zakresie rozważanych średnic, tzn. od 45 mm do 3000 mm, to dla warunku ograniczającego, jakim jest „możliwość wbudowania przewodu podziemnego o danej średnicy w danej technologii bezwykopowej” przyjęto przestrzeń lingwistyczną zmiennej w postaci zbioru $D_1 = \{\text{brak możliwości, mała możliwość, średnia możliwość, duża możliwość, pełna możliwość}\}$. Jak można zauważyć, ta zmienna lingwistyczna jest oceniana przez wartości lingwistyczne, należące do podanego powyżej zbioru.

Podobnie jak dla zmiennej „długości jednorazowo wbudowywanych przewodów podziemnych w danej technologii bezwykopowej”, przestrzeń numeryczną zapisano w postaci trzech macierzy $D1, D2, D3$, odpowiednio o elementach: $d1_{ik_2}$ i rozmiarze m na n_2 , $d2_{ik_3}$ i rozmiarze m na n_3 , $d3_{ik_4}$ i rozmiarze m na n_4 , gdzie i to kolejne technologie bezwykopowej budowy przewodów podziemnych, a k_2, k_3, k_4 to średnice rur.

Podobnie również zapisano funkcje przynależności:

$$\begin{aligned} \mu_{D1}(d1_{ik_2}): D1 &\rightarrow [0,1], \quad \forall d1_{ik_2} \in D1 \\ \mu_{D2}(d2_{ik_3}): D2 &\rightarrow [0,1], \quad \forall d2_{ik_3} \in D2 \\ \mu_{D3}(d3_{ik_4}): D3 &\rightarrow [0,1], \quad \forall d3_{ik_4} \in D3 \end{aligned}$$

Poszczególne zbiory rozmyte dla zmiennej „możliwość wbudowania przewodu o danej średnicy w danej technologii bezwykopowej” zapisano odpowiednio jako $D1_R, D2_R, D3_R$:

$$\begin{aligned} D1_R &= \{(d1_{ik_2}, \mu_{D1}(d1_{ik_2})); d1_{ik_2} \in D1, \mu_{D1}(d1_{ik_2}) \in [0,1]\} \\ D2_R &= \{(d2_{ik_3}, \mu_{D2}(d2_{ik_3})); d2_{ik_3} \in D2, \mu_{D2}(d2_{ik_3}) \in [0,1]\} \\ D3_R &= \{(d3_{ik_4}, \mu_{D3}(d3_{ik_4})); d3_{ik_4} \in D3, \mu_{D3}(d3_{ik_4}) \in [0,1]\} \end{aligned}$$

gdzie:

- $\mu_{D1}(d1_{ik_2})$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej $D1$,
- $d1_{ik_2}$ – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej $D1$,
- $\mu_{D2}(d2_{ik_3})$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej $D2$,
- $d2_{ik_3}$ – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej $D2$,
- $\mu_{D3}(d3_{ik_4})$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej $D3$,
- $d3_{ik_4}$ – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej $D3$.

4. Możliwość wbudowania przewodu podziemnego w gruncie nawodnionym, poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej

Nie wszystkie technologie bezwykopowej budowy można stosować w gruntach poniżej poziomu wody gruntowej. Dotyczy to przede wszystkim technologii przecisków pneumatycznych przebijań (zarówno sterowalnej, jak i niesterowalnej), przy użyciu których budowa przewodów podziemnych w gruncie nawodnionym może być wysoce nieefektywna. Dlatego też przyjmuje się, że technologie te nie są stosowane w gruntach nawodnionych. Wiąże się to z faktem, iż przebijań pneumatyczny porusza się w gruncie wykorzystując zjawisko tarcia powierzchniowego gruntu o zewnętrzną powierzchnię. W gruntach nawodnionych wielkość tego tarcia jest niewielka, i co za tym idzie efektywność przemieszczania się przebijań w gruncie jest również niewielka. Przestrzeń lingwistyczną dla tej zmiennej zapisano jako zbiór $E_L = \{\text{brak możliwości, mała możliwość, średnia możliwość, duża możliwość, pełna możliwość}\}$, natomiast przestrzeń numeryczną zapisano w postaci macierzy E o elementach e_i i rozmiarze m na 1 , gdzie i to kolejne technologie bezwykopowej budowy przewodów podziemnych.

Dla zmiennej lingwistycznej „możliwość wbudowania przewodu w gruncie nawodnionym, poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej” funkcję przynależności określono w postaci:

$$\mu_E(e_i): E \rightarrow [0,1], \quad \forall e_i \in E$$

Zbiór rozmyty zapisano jako E_R :

$$E_R = \{(e_i, \mu_E(e_i)); e_i \in E, \mu_E(e_i) \in [0,1]\}$$

gdzie:

$\mu_{E_i}(e_i)$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej E ,

e_i – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej E .

5. Maksymalna możliwa wysokość zwierciadła wody gruntowej powyżej dna wbudowywanego przewodu

Istotnym parametrem ograniczającym w modelu, ze względu na zapewnienie prawidłowej pracy uszczelnień oraz śluz – urządzeń stosowanych do bezwykopowej budowy przewodów podziemnych, jest maksymalna dla danej technologii wysokość zwierciadła wody gruntowej powyżej dna wbudowywanego przewodu. Parametr ten zależy przede wszystkim od systemu usuwania urobku stosowanego w danej technologii. W metodach, w których transport urobku odbywa się za pomocą przenośnika ślimakowego, pomimo specjalnie zaprojektowanych elementów rur osłonowych, przenośników ślimakowych oraz żerdzi wiertniczych do pracy w warunkach poniżej poziomu wody gruntowej, maksymalna wysokość zwierciadła

wody gruntowej powyżej dna wykonywanego rurociągu wynosi tylko około 3 m. Dla metod, w których transport urobku odbywa się w sposób hydrauliczny (np. mikro-tunelowanie) maksymalna możliwa wysokość zwierciadła wody gruntowej ponad dnem wykonywanego rurociągu dochodzi nawet do 30 m.

Przestrzeń lingwistyczna zmiennej „maksymalna możliwa wysokość zwierciadła wody gruntowej powyżej dna wbudowywanego przewodu” jest zbiorem

$$J_L = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$$

gdzie:

j_1, j_2, \dots, j_n – liczby rozmyte stosowane do oceny zmiennej lingwistycznej „maksymalna możliwa wysokość zwierciadła wody gruntowej powyżej dna wbudowywanego przewodu”. Natomiast przestrzeń numeryczną zapisano w postaci macierzy J o elementach j_i i rozmiarze m na 1 , gdzie i to kolejne technologie bezwykopowej budowy przewodów podziemnych.

Funkcję przynależności dla tej zmiennej zapisano w postaci:

$$\mu_J(j_i): J \rightarrow [0,1], \quad \forall j_i \in J$$

Zbiór rozmyty zapisano jako J_R :

$$J_R = \{(j_i, \mu_J(j_i)); j_i \in J, \mu_J(j_i) \in [0,1]\}$$

gdzie:

$\mu_J(j_i)$ – stopień przynależności poszczególnych elementów zmiennej lingwistycznej J ,

j_i – poszczególne elementy zmiennej lingwistycznej J .

6. Podsumowanie

Określenie warunków ograniczających, to pierwszy etap tworzenia modelu matematycznego optymalnego doboru technologii bezwykopowej budowy przewodów podziemnych z zastosowaniem rozmytych metod modelowania. Obejmuje on określenie zmiennych lingwistycznych oraz ich przestrzeni, przyjęcie funkcji przynależności i przypisanie stopni przynależności. Opracowanie modelu z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych umożliwi stworzenie doskonalszego modelu, w porównaniu z opracowanym wcześniej modelem AZ-01, pozwalającego na wybór najlepszej technologii lub uszeregowanie wybranych technologii bezwykopowej budowy od najbardziej odpowiedniej do najmniej odpowiedniej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kuliczkowski A., Kryteria wyboru metody bezodkrywkowej dla kanałów budowanych w warunkach miejskich. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1979, nr 11, s. 323–326
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją prof. Andrzeja Kuliczkowskiego. Technologie bezwykopowe w Inżynierii Środowiska. Wydawnictwo Seidel-Przywecki 2010, s. 735
- [3] Zwierzchowska A., Konceptcja optymalnego doboru technologii bezwykopowej budowy przewodów podziemnych z zastosowaniem rozmytych metod modelowania. Instal 2011, nr 12, s. 39–42
- [4] Zwierzchowska A., Optymalizacja doboru metod bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej nr 38, Kielce 2003, s. 163