

ANALIZA STATECZNOŚCI NASYPU KOLEJOWEGO Z WBUDOWANĄ WARSTWĄ ODPADÓW¹

Elżbieta Pilecka

dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem, tel.: +48 /12/ 628 25 79, e-mail: epilecka@pk.edu.pl

Dariusz Szwarkowski

mgr inż., doktorant PK, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę stateczności nasypu kolejowego z wbudowaną warstwą odpadów. Analizie numerycznej poddano przykładowy nasyp kolejowy na linii CMK. Nasyp zmodernizowano, stosując wbudowaną warstwę z odpadów i przeprowadzono obliczenia uwzględniające aktualnie stawiane wymagania nasypom kolejowym. Analizę wykonano przy użyciu programu komputerowego MIDAS GTS[®]. Na tym etapie badań, przeprowadzone analizy wykazały, że wbudowanie w nasyp warstwy z odpadów (strzępów gumowych, lub mieszaniny popiołowo-żuźłowej) nie pogorszyło wskaźnika stateczności i nośności podtorza. Rokuje to pozytywnie na ewentualną możliwość wbudowywania warstw odpadów w nasypy kolejowe.

Słowa kluczowe: analiza stateczności, odpady przemysłowe, strzępy gumowe

1. Wstęp

W ramach perspektywy finansowej na lata 2014-2020 w ramach Europejskiego Funduszu Spójności [1] na zabiegi związane z modernizacją, rozbudową infrastruktury kolejowej zostało przeznaczonych 4 mld euro. Przeznaczenie znaczących środków unijnych na transport kolejowy, w porównaniu z latami poprzednimi, daje olbrzymie możliwości rozwojowe dla polskich kolei, pod warunkiem, że zostaną one optymalnie wykorzystane, efektywniej niż miało to miejsce dotychczas. Jedną z planowanych inwestycji, jest modernizacja linii CMK, w celu dostosowania jej do standardów kolei dużych prędkości (min. 200 km/h).

Zwiększenie prędkości dopuszczalnych na rozważanej linii z 160 km/h do planowanych 200 km/h, wiąże się ze zwiększeniem oddziaływań dynamicznych przekazywanych na torowisko nasypu kolejowego.

O ile wzrost obciążeń do prędkości 160 km/h można traktować jako liniowy, to prędkości rzędu 200-250 km/h gwałtownie zmieniają ich charakter. Podniesienie prędkości eksploatacyjnej na linii CMK, wiąże się z koniecznością przeprowadzenia dodatkowych analiz istniejących nasypów pod względem zachowania wymaganych współczynników pewności zawartych w wytycznych Id-3 [2].

1 Wkład procentowy poszczególnych autorów: Pilecka E. 90%, Szwarkowski D. 10%

Przeprowadzenie wymienionego sposobu postępowania jest konieczne ze względu na stosunkowo długi okres eksploatacji nasypów kolejowych.

Istotną rolę w analizie nasypów odgrywa modelowanie komputerowe. Umożliwia ono określenie aktualnego zachowania się nasypu kolejowego, jak i przyszłej jego pracy, przy zwiększonych obciążeniach.

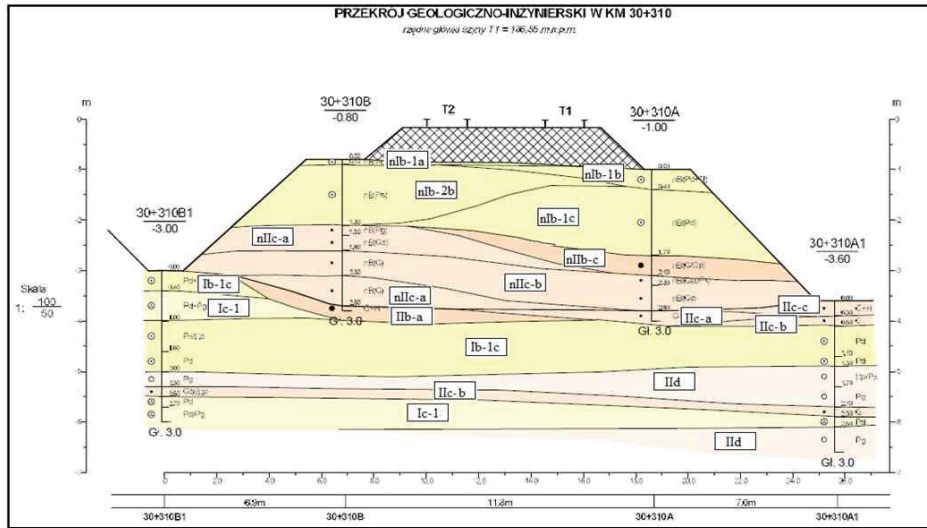
Wzrost obciążeń i charakter oddziaływań powoduje spadek współczynnika pewności. Niska wartość współczynnika charakteryzuje nasyp w stanie równowagi granicznej. Niezbędne jest zastosowanie zabiegów wzmacniających nasyp kolejowy. Do najczęściej stosowanych należą: wbudowanie warstwy geotekstylii, wzmocnienie murami oporowymi zabezpieczającymi bezpośrednio przed osunięciem skarpy nasypu, stosowane są również zabiegi wzmocnienia warstwy podtorza, czy wymiana gruntów wbudowanych w nasyp.

Zabiegi te są kosztowne, wiążące się często z koniecznością rozebrania fragmentu, lub nawet całości istniejącego nasypu. Jest to związane jednak ze spełnieniem dodatkowych kryteriów, szczególnie w przypadku projektów infrastrukturalnych, związanych z minimalizacją negatywnych skutków oddziaływania na środowisko. Interesujące wydaje się zatem podejście zastosowane przez wykonawców branży drogowej: firmę Mostostal[®] i hiszpańską ACCIONA[®], podczas realizacji inwestycji związanych z budową drogi serwisowej do pasa startowego lotniska w Tenerife na Wyspach Kanaryjskich [3], czy realizacji drogi dojazdowej do terminalu produkcyjno – przeładunkowego. Wymienione inwestycje uzyskały dodatkowe dofinansowanie z funduszu europejskiego, poprzez zastosowanie w nasypach drogowych innowacyjnego podejścia, polegającego na wbudowaniu warstwy strzępów gumowych, uzyskanych z recyklingu zużytych opon samochodowych. Umożliwiło to spełnienie kryteriów finansowania inwestycji z funduszy unijnych w ramach rozwoju infrastruktury i ochrony środowiska, związanej z efektywnym wykorzystaniem odpadów przemysłowych. Wbudowanie strzępów gumowych w nasyp spowodowało ich wykorzystanie bezpośrednio w konstrukcji, nie powodując powstania dodatkowych miejsc składowania odpadów.

Powyższa koncepcja wydaje się zatem być uzasadniona również w budownictwie kolejowym, w którym powyższe podejście nie było jak dotąd stosowane. W artykule zostanie przedstawiona koncepcja zmodernizowania istniejącego nasypu kolejowego na linii CMK w km 30+310 (odcinek I pomiędzy miejscowościami Grodzisk Mazowiecki – Biała Rawska). Nasyp kolejowy zostanie przeanalizowany pod względem stateczności przed jak i po wbudowaniu odpadów (strzępów gumowych). Analiza zostanie przeprowadzona dla prędkości 160 km/h i nacisku osi 221 kN. W artykule nie uwzględniono prędkości wyższych niż 160 km/h. Wyniki stanu odkształcenia i analizy stateczności uzyskano w programie MIDAS GTS[®], opartym na metodzie elementów skończonych.

2. Układ warstw geotechnicznych nasypu kolejowego i jego geometria

Analizowany nasyp kolejowy zlokalizowany jest w km 30+310 linii nr 4 CMK, pomiędzy miejscowościami Grodzisk Mazowiecki – Biała Rawska i charakteryzuje się złożoną budową geotechniczną. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w Rozporządzeniu [4], nasyp ten zakwalifikowano do II kategorii geotechnicznej. Warstwy geotechniczne istniejącego nasypu zostały wydzielone w oparciu o przeprowadzone sondowania, wykonane w ławach torowiska na głębokości 3 m od korony ławy oraz dwóch sondowań wykonanych w podłożu skarpu. Układ warstw geotechnicznych analizowanego nasypu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przekrój geologiczno-inżynierski w km 30+310 analizowanego nasypu kolejowego
Źródło: {5}

Parametry wydzielonych warstw geotechnicznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry charakterystyczne wydzielonych warstw geotechnicznych, wg {5}

| Lp. | Oznac. warst. geotech. | Rodzaj gruntu | Gęst. objęt. ρ [tm ⁻³] | Spój. c_u [kPa] | Kąt tarcia wew. ϕ_u [°] | Moduł odksz. pierwot. E_o [MPa] |
|-----|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | nlb-1a | Piaski drobne z domieszkami i przewarstwieniami | 1.65-1.75 | - | 29.9 | 38.3 |
| 2 | nlb-1b | Piaski drobne i piaski pyłaste z domieszkami i przewarstwieniami | 1.65-1.75 | - | 30.5 | 47.1 |
| 3 | nlb-1c | Piaski drobne i pyłaste | 1.65-1.75 | - | 31.0 | 56.4 |
| 4 | nlb-2b | Piaski średnie i grube z domieszkami | 1.70-2.00 | - | 33.1 | 81.3 |
| 5 | nllb-c | Gliny z przewarstwieniami | 2.05 | 13.7 | 13.4 | 16.9 |
| 6 | nllc-a | Gliny, gliny piaszczyste i piaski gliniaste z domieszkami i przewarstwieniami | 2.15-2.20 | 16.1 | 14.5 | 19.7 |

| | | | | | | |
|----|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------|------|------|
| 7 | nIIc-b | Gliny, gliny piaszczyste i piaski gliniaste z domieszkami i przewarstwieniami | 2.15-2.20 | 20.3 | 15.9 | 24.2 |
| 8 | Ib-1c | Piaski drobne i pylaste z domieszkami i przewarstwieniami | 1.65-1.90 | - | 31.0 | 57.4 |
| 9 | Ic-1 | Piaski drobne i pylaste z domieszkami i przewarstwieniami | 1.70-2.00 | - | 31.6 | 71.5 |
| 10 | IIb-a | Gliny, gliny piaszczyste i pylaste, pyły i piaski gliniaste z domieszkami i przewarstwieniami | 2.00-2.10 | 9.5 | 10.9 | 12.1 |
| 11 | IIc-a | Gliny, gliny piaszczyste i pylaste oraz piaski gliniaste, pyły i pyły piaszczyste z domieszkami i przewarstwieniami | 2.05-2.20 | 17.4 | 15.0 | 21 |
| 12 | IIc-b | Gliny, gliny pylaste, piaszczyste i piaszczyste zwięzłe, pyły, piaski gliniaste i pospółka gliniasta domieszkami i przewarst. | 2.00-2.20 | 20.3 | 15.9 | 24.2 |
| 13 | IIc-c | Gliny, gliny piaszczyste i pylaste oraz gliny piaszczyste i pylaste zwięzłe, pyły, pyły piaszczyste i piaski gliniaste z dom. i przewarst. | 2.00-2.20 | 24.9 | 17.0 | 28.8 |
| 14 | IIId | Gliny, gliny pylaste i piaszczyste, pyły, pyły piaszczyste i piaski gliniaste z dom. i przewarst. | 2.10-2.20 | 30.0 | 18.0 | 33.8 |

W analizowanym przekroju szerokość torowiska wynosi 14.60 m. Pochylenie poprzeczne torowiska jest równe 1.77%. Warstwa podsypki ma grubość 70 cm i rozpiętość 10.50 m, wydzielając dwie ławy torowiska. Lewa ława torowiska ma szerokość 2.20 m, natomiast szerokość prawej ławy torowiska jest równa 1.77 m. Szerokość korony przymy podsypki wynosi 7.6 m. W odległości 0,85 m od lewej krawędzi przymy podsypki znajduje się tor II. Nasyp kolejowy ma wysokość 2.61 m. Natomiast szerokość podstawy nasypu jest równa 24.30 m. Nachylenie skarp nasypu wynosi:

- nachylenie skarpy lewej – 1:2.15,
- nachylenie skarpy prawej – 1:1.85.

3. Metodyka badań

Analizę przeprowadzono w oparciu o wymagania zawarte w Id-3[2]. Przyjęto następujące założenia w modelowaniu nasypu kolejowego:

- Nachylenie korony torowiska zostało pominięte. Zwiększono odpowiednio grubość warstw w celu wyrównania spadku poprzecznego.
- Analiza stateczności nasypu została przeprowadzona w płaskim stanie odkształcenia dla dwuwymiarowego modelu.
- Prędkość pojazdów kolejowych przyjęto równą 160 km/h, a nacisk osi równy 221 kN. Przyjęto obciążenie od dwóch pojazdów kolejowych poruszających się po przeciwnych tokach szynowych.
- Pominięto modelowanie warstwy podsypki z rusztem torowy, zastępując je obciążeniem równomiernie rozłożonym działającym w podstawie podsypki.

Obciążenie wyznaczono wg wzoru (2.4) normy BN-88/8932-02 [1]. Wartość obliczonego obciążenia wyniosła 92 kN/m².

- Dla wydzielonych warstw geotechnicznych przyjęto model fizyczny, jako idealnie sprężysto-plastyczny z liniowym warunkiem plastyczności (Culomba-Mohra).

Analizę rozpatrywanego nasypu podzielono na dwa etapy:

etap I – analiza nasypu w istniejących warunkach geologiczno - inżynierskich, poddanego działaniu obciążenia równomiernie rozłożonego o wartości 92 kPa, pochodzącego od nawierzchni kolejowej i poruszających się pojazdów kolejowych.

etap II – analiza nasypu z wbudowaną warstwą strzępów gumowych i odpadów przemysłowych, odpowiednio o grubości 0.80 m, 1.20 m (graniczna wartość przyjęta do głębokości podstawy nasypu).

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w Id-3 [20], podtorze kolejowe musi zachować trwałość na okres równy 100 lat. Natomiast współczynnik pewności skarp nasypów powinien wynosić:

- 2,0 – podtorza nowobudowane i dobudowywane,
- 1,5 – podtorza w eksploatacji,
- 1,3 – bezpośrednio po naprawie podtorza.

4. Charakterystyka odpadów wbudowywanych w nasyp kolejowy

Zasadniczym celem artykułu jest ocena wpływu dwóch rodzajów warstw odpadów (strzępów gumowych lub mieszanki popiołowo-żużlowej) na stateczność nasypu kolejowego. Warstwy strzępów gumowych powstają w wyniku mechanicznego rozdrabniania zużytych opon samochodowych. Uzyskane w ten sposób strzępy gumowe charakteryzują się określoną krzywą uziarnienia. Podczas ustalania składu granulometrycznego rozdrobnionych opon samochodowych, konieczne jest określenie dodatkowych parametrów charakteryzujących próbkę strzępów gumowych (określonych w tab. 2). Wyznaczone parametry służą do porównania uzyskanych wyników dla próbki strzępów gumowych uzyskanych z różnych typów zużytych opon samochodowych. Parametry określone dla próbki, która zostanie zastosowana w nasypie przedstawiono w tabelach poniżej (tab. 3).

Tabela 2. Zawartość parametrów w próbce strzępów gumowych użytej do modelowania (wg ACCIONA® {5})

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <i>Calkowita masa próbki [g]</i> | 20470 |
| <i>Masa stali występującej w próbce sposób luźny [g]</i> | 25 |
| <i>Masa strzępów gumowych zawierających wystające kawałki stali > 50 mm [g]</i> | 518 |
| <i>Masa strzępów gumowych zawierających wystające kawałki stali pomiędzy 25 mm a 50 mm [g]</i> | 504 |
| <i>% zawartość stali występującej w próbce w sposób luźny</i> | 0.12 |
| <i>% zawartość strzępów gumowych zawierających wystające kawałki stali > 50 mm [g]</i> | 2.5305 |
| <i>% zawartość strzępów gumowych zawierających wystające kawałki stali od 25 mm do 50 mm [g]</i> | 2.4621 |

Tabela 3. Parametry fizyko – mechaniczne strzępów gumowych, wg [5]

| Właściwości | Wartość | Przyjęte wartości w analizie |
|---------------------------------------|-------------|------------------------------|
| Ciężar objętościowy (kN/m^3) | 6 – 8.6 | 7.3 |
| Spójność (kPa) | 7 – 10 | 8.5 |
| Kąt tarcia wewnętrzznego ($^\circ$) | 29 - 34 | 31.5 |
| Moduł odkształcenia pierwotnego (MPa) | 0.45 – 1.10 | 0.8 |

Parametry fizyko-mechaniczne warstwy mieszanki popiołowo-żużlowej powstałej w wyniku spalania węgla kamiennego w Elektrowni „Skawina” zestawiono w tabelach 4 i 5 [6].

Tabela 4. Parametry fizyczne mieszanki popiołowo-żużlowej [6]

| Lp | Parametr | Wartość |
|----|------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Zawartość frakcji [%]: | |
| | - żwirowa Gr: $63 \div 2$ mm | 13.7 |
| | - piaskowa Sa $2 \div 0,063$ mm | 63.5 |
| | - pyłowa Si $0,063 \div 0,002$ mm | 21.1 |
| | - ilowa Cl $< 0,002$ mm | 1.7 |
| 2 | Nazwa wg [19] | Piasek pylasty (siSa) |
| 3 | Zawartość cząstek [%]: | |
| | $\leq 0,075$ mm | 24.5 |
| | $\leq 0,02$ mm | 12.0 |
| 4 | Wskaźnik jednorodności uziarnienia, Cu [-] | 13.5 |
| 5 | Gęstość właściwa szkieletu, q_s [g/cm^3] | 2.54 |
| 6 | Wilgotność optymalna, w_{opt} [%] | 30.6 |
| 7 | Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, q_{sk} [g/cm^3] | 1.26 |

Tabela 5. Parametry fizyko – mieszanki popiołowo-żużlowej [6]

| Właściwości | Wartość | Przyjęte wartości w analizie dla w_{opt} 30.6% |
|---------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|
| Ciężar objętościowy (kN/m^3) | 16 | 16 |
| Spójność (kPa) | 9 – 42 | 31 |
| Kąt tarcia wewnętrzznego ($^\circ$) | 31-47 | 35 |
| Moduł odkształcenia pierwotnego (MPa) | 5 | 0.8* |

*Wartość modułu przyjęta do analizy, jak dla strzępów gumowych, nie mająca wpływu na wskaźnik stateczności nasypu.

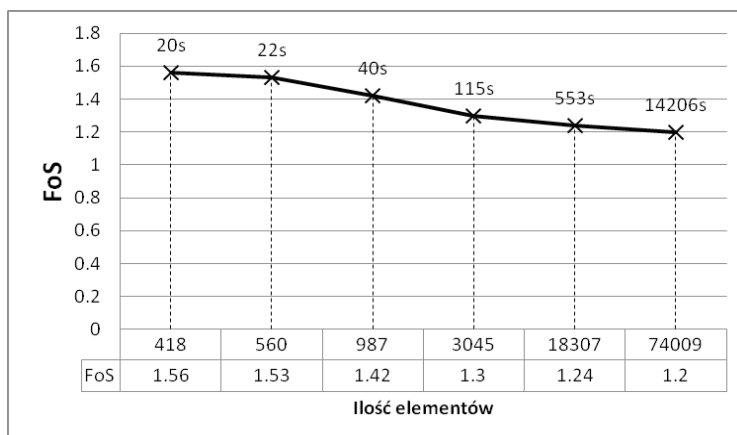
5. Założenia modeli obliczeniowych

Analizę stateczności nasypu kolejowego przeprowadzono w programie numerycznym opartym na metodzie elementów skończonych MIDAS GTS®.

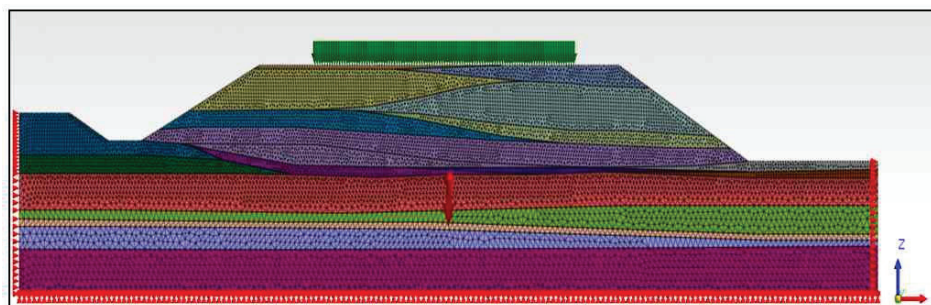
DYSKRETYZACJA OBSZARU: Na rys. 2 przedstawiono zależność wskaźnika stateczności (FoS) od gęstości siatki podziału ośrodka. Jak widać wartość wskaźnika zmniejsza się w miarę zwiększania ilości elementów siatki obliczeniowej. Wynika to ze zwiększenia dokładności obliczeń. Zwiększa się jednak czas obliczeń. W etapach I, II, dla przyjętej grubości warstwy odpadów dokonano zagęszczenia siatki, zwiększając liczbę elementów, szczególnie w nasypie, w celu dokładnego określenia wartości współczynnika pewności oraz rozkładu stref naprężeń i odkształceń. Analizując rys. 3 w programie MIDAS GTS® wygenerowano 21430

elementów. Ze względu na złożony przebieg warstw geotechnicznych, w nasypie użyto elementów trójkątnych. Wymiar boków elementów skończonych w nasypie nie przekracza 10 cm.

WARUNKI BRZEGOWE: Dla lewej i prawej krawędzi modelu przyjęto warunki brzegowe w postaci przegubów przesuwnych względem osi pionowej, uniemożliwiających przemieszczenia w kierunku poziomym. Przemieszczenia dolnego modelu zostały zablokowane na kierunku poziomym i pionowym, poprzez zastosowanie przegubów nieprzesuwnych.



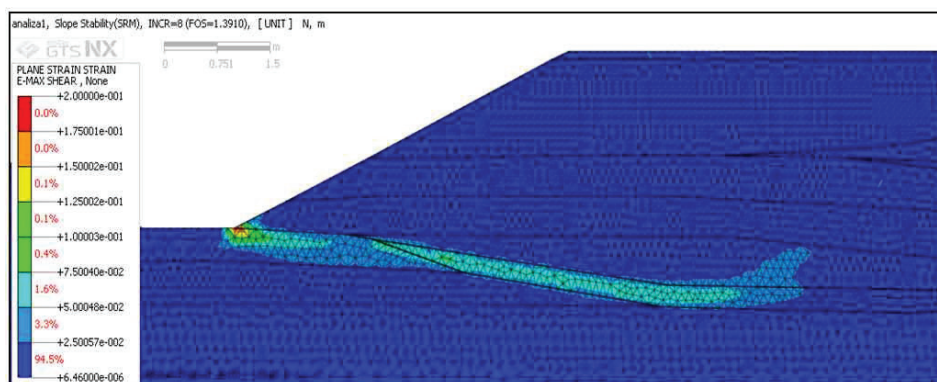
Rys. 2. Zależność wskaźnika stateczności (FoS) od gęstości siatki podziału ośrodka



Rys. 3. Model nasypu kolejowego z przebiegiem warstw geotechnicznych, z warunkami brzegowymi (program MIDAS GTS®)

6. Wyniki analizy wstępnej

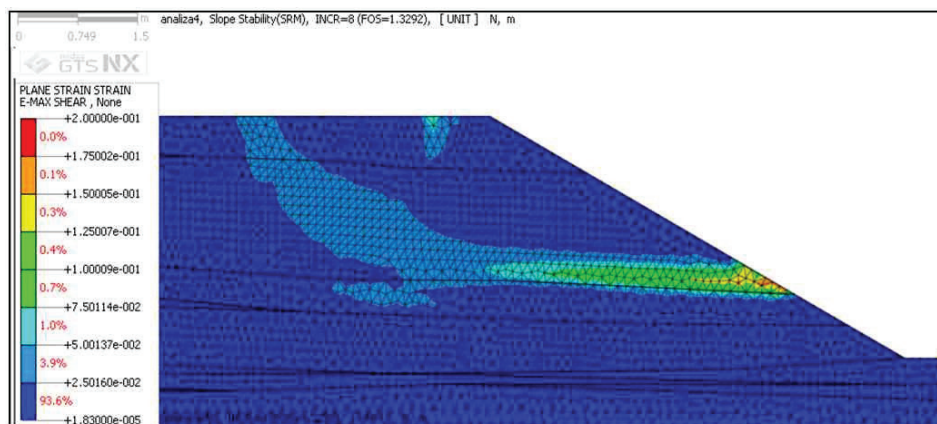
Analizę stateczności rozpoczęto od określenia wskaźnika stateczności dla nasypu bez wbudowanej warstwy strzępów gumowych. Rezultat obliczeń przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy lewej (opracowanie własne, program MIDAS GTS®)

W wyniku przeprowadzenia obliczeń dla skarpy lewej uzyskano wskaźnik stateczności równy $FoS = 1.39$. Wyznaczona powierzchnia poślizgu obejmuje swoim zasięgiem ławę torowiska, bezpośrednio zagrażając stateczności nasypu oraz konstrukcji nawierzchni kolejowej. Analiza wykazała, że lewa skarpa nasypu nie spełnia wymagań zawartych w Id-3 [2] ($FoS > FoS_{min} = 1.5$).

Natomiast wskaźnik stateczności skarpy prawej wraz z przebiegiem odkształceń postaciowych ilustruje rys. 5.



Rys. 5. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy prawej (program MIDAS GTS®)

Wynik analizy skarpy prawej wskazuje, że początkowa utrata stateczności nastąpi już przy wskaźniku stateczności równym 1.32. Wyznaczona powierzchnia poślizgu obejmuje swoim zasięgiem ławę torowiska, zagrażając bezpośrednio stateczności nasypu oraz konstrukcji nawierzchni kolejowej.

Przeprowadzona analiza wskazuje, iż konieczne jest wykonanie zabiegów wzmacniających skarpy prawą, w celu podniesienia wskaźnika stateczności do mi-

nimalnej, wymaganej przepisami [2] wartości, wynoszącej 1.5. Dodatkowo, analizując nośność ławy torowiska, należy podnieść moduł odkształcenia pierwotnego do wartości 120 MPa, wymaganego dla linii magistralnych.

7. Wyniki analizy po wzmocnieniu podtorza

W wyniku przeprowadzonej analizy wstępnej rozpatrywanego nasypu kolejowego, przewidziano wykonać zabiegi mające na celu:

- podniesienie modułu odkształcenia podtorza do wartości 120 MPa,
- wzmocnienie skarpy nasypu w celu zapewnienia wymaganego wskaźnika pewności wynoszącego 1.5.

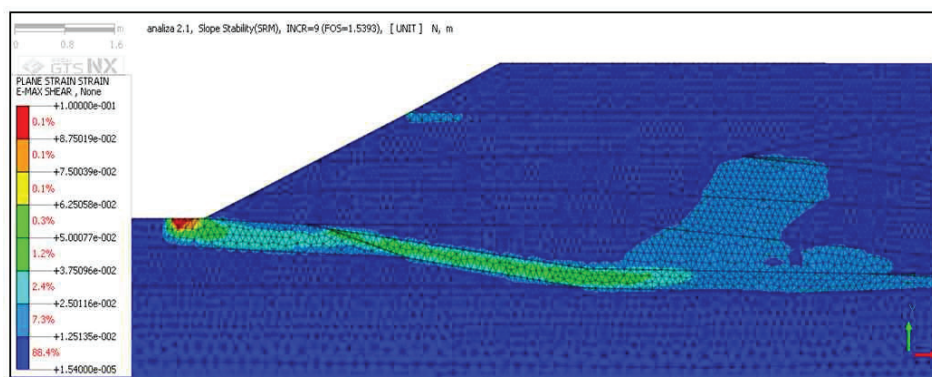
W tym celu zaprojektowano wykonanie warstwy wzmocnionej, zgodnie z wymaganiami zawartymi w Id-3 [2]. Obliczono grubości warstwy ochronnej, w celu podniesienia modułu odkształcenia podtorza do wartości 120 MPa, dla linii kategorii magistralnej. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z dokumentacją Id-3 [2] dotyczącą wymiarowania warstw ochronnych torowiska. Przeprojektowano również nachylenie skarpy prawej, zwiększając je z poziomu 1:1.85 do wartości 1:2.25.

Warstwę ochronną przewidziano wykonać z dwóch zagęszczonych osobno warstw gruntu nIb-2b, wzmocnionych spoiwem hydraulicznym o grubości 35 cm. Parametry warstwy przyjęto na podstawie danych z nasypu autostrady A4 Jarosław - Radymno:

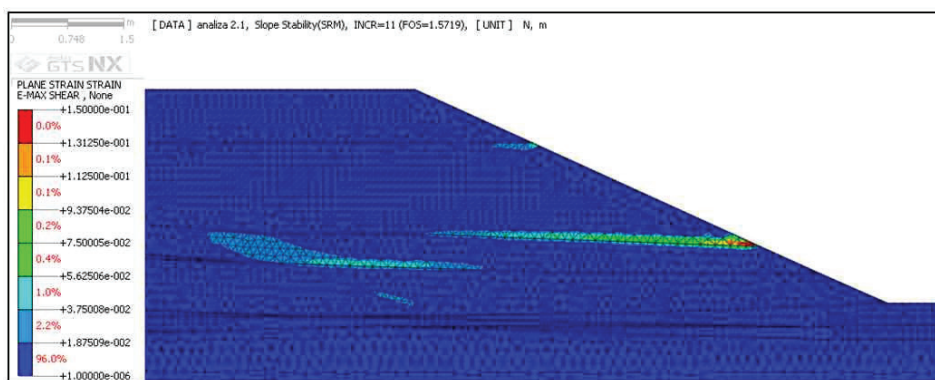
Tabela 6. Parametry warstwy ochronnej podtorza [23]

| Mieszanka | Kąt tarcia ϕ [°] | Kohezja c [kPa] |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Grunt + 4% Tefra15 q_{opt} 100% | 33.1 | 71.52 |

Wyniki analizy stateczności nasypu ze wzmocnioną warstwą podtorza przedstawiono na rysunkach poniżej.



Rys. 6. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy lewej, z warstwą ochronną (program MIDAS GTS®)

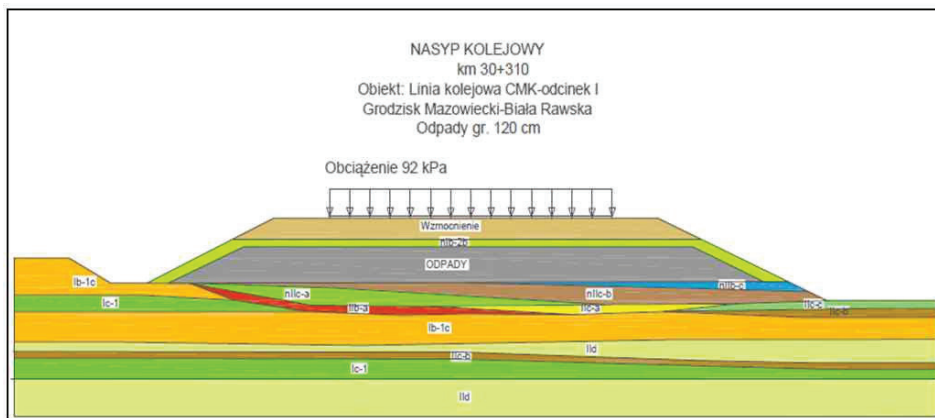


Rys. 7. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy prawej, ze warstwą ochronną (program MIDAS GTS®)

Przeprowadzona analiza nasypu kolejowego, ze wzmocnioną warstwą podtorza kolejowego wykazała, że zabiegi mające na celu zwiększenie nośności i polepszenie wskaźnika stateczności, głównie skarpy prawej nasypu (rys. 6 i 7). W wyniku zastosowanego wzmocnienia podtorza i przeprojektowania nachylenia skarpy prawej nasypu, zwiększono wskaźnik stateczności nasypu:

- dla skarpy lewej z poziomu 1.39 do wartości 1.54 (10.79%),
- dla skarpy prawej z poziomu 1.33 do wartości 1.57 (18.05 %).

8. Analiza nasypu z wbudowaną warstwą odpadów grubości 1.20 m

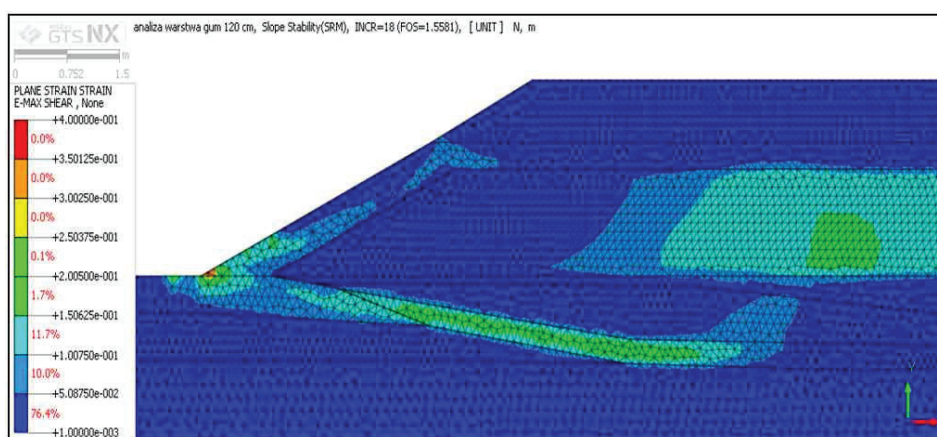


Rys. 8. Układ warstw z wbudowaną warstwą odpadów i wzmocnieniem podtorza, warstwy wg tab. 1 (program AutoCAD®)

Zasadniczą analizę stateczności nasypu kolejowego rozpoczęto od zamodelowania warstwy strzępów gumowych grubości 120 cm. Przyjęty w obliczeniach wymiar warstwy stanowić będzie podstawę dla nasypu zmodernizowanego na linii na odcinku linii nr 4 (CMK), w km 30+310. Warstwa strzępów gumowych

zostanie ułożona na głębokości 2.20 m poniżej ławy torowiska, na geowłókninie. Strzępy gumowe należy ułożyć w trzech warstwach o grubości 40 cm, zagęszczając każdą warstwę z osobna. Całość zostanie spięta w opaskę z geowłókniny. Wykonana warstwa zostanie obsypana gruntem o grubości 1 m, pochodzącym z warstwy geotechnicznej nIb-2b, w celu minimalizacji negatywnych skutków związanych ze starzeniem się materiału pod działaniem promieni UV i czynników biologicznych. Na warstwie strzępów gumowych zaprojektowano wykonanie warstwy przejściowej o grubości 30 cm, z gruntu pochodzącego z warstwy geotechnicznej nIb-2b. Następnie zostanie ułożona warstwa wzmocnionego podtorza, układana w dwóch warstwach o grubości 35 cm, odpowiednio zagęszczonych (rys. 8).

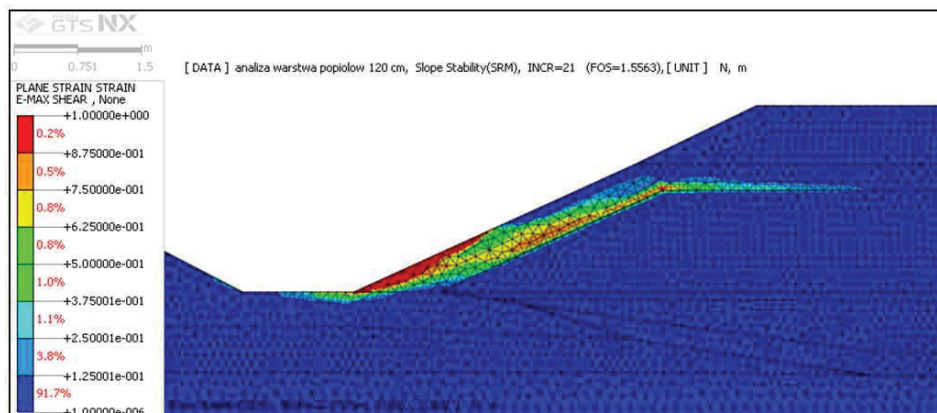
Wyniki analizy stateczności nasypu z wbudowaną warstwą odpadów i wzmocnionym podtorzem przedstawiono na rysunkach poniżej.



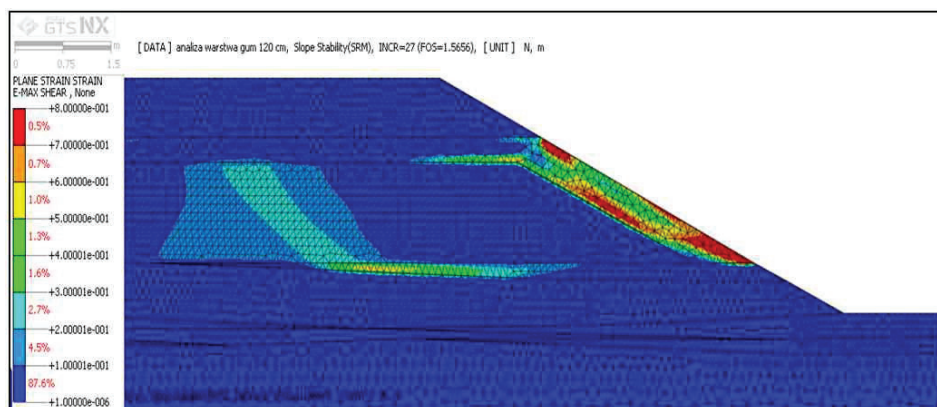
Rys. 9. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy lewej, z warstwą strzępów gumowych, gr. 120 cm (program MIDAS GTS®)

W wyniku przeprowadzenia obliczeń uzyskano wskaźnik stateczności równy $FoS = 1.55$ (rys. 9). Wyznaczona powierzchnia poślizgu obejmuje swoim zasięgiem koronę torowiska, bezpośrednio zagrażając stateczności nasypu oraz konstrukcji nawierzchni kolejowej. Analiza przeprowadzona wykazała, że lewa skarpa nasypu, z warstwą strzęp gumowych o grubości 120 cm, spełnia wymagania zawarte w Id-3 ($FoS > FoS_{min} = 1.5$). Strefa odkształceń postaciowych przebiega w podstawie nasypu, wzdłuż warstwy geotechnicznej IIb-a. Koncentracja stref maksymalnych odkształceń postaciowych występuje bezpośrednio w podstawie nasypu, w warstwach geotechnicznych IIb-a i nIIc-a.

W wyniku przeprowadzonej analizy dla skarpy lewej z wbudowaną warstwą odpadów z mieszaniny popiołowo-żuźlowej otrzymano wskaźnik stateczności $FoS = 1.55$ (rys. 10). Jednak maksymalne przemieszczenia postaciowe są w tym przypadku większe. U podstawy nasypu osiągają maksymalne wartości co odzwierciedla powierzchnię wbudowanej warstwy odpadów. Można więc przypuszczać, że warstwa geotechniczna nIb-2b będzie powierzchnią poślizgu i skarpa straci stateczność.



Rys. 10. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy lewej, z warstwą mieszanki popiołowo-żużlowej, gr. 120 cm (program MIDAS GTS®)

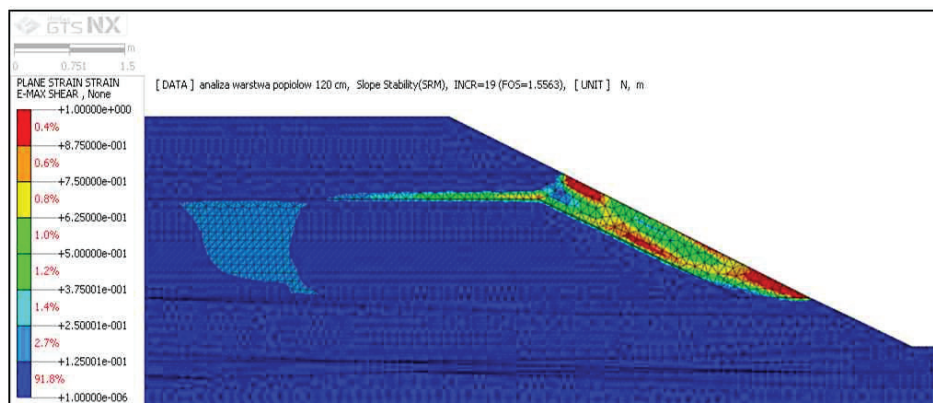


Rys. 11. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy prawej, z warstwą strzępów gumowych, gr. 120 cm (program MIDAS GTS®)

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wskaźnik stateczności równy $FoS = 1.56$ (rys. 11). Miejsce wystąpienia niestateczności skarpy prawej przebiega wzdłuż bocznych granic warstw strzępów gumowych. Propagacja powierzchni poślizgu, będzie następowała wzdłuż wspomnianej warstwy, powodując osunięcie się materiału gruntu z warstwy geotechnicznej n1b-2b, wskutek utraty wytrzymałości na ścinanie. Osuwające się masy gruntu spowodują odsłonięcie warstw strzęp gumowych w opasce z geowłókniny, narażając warstwę na negatywne oddziaływanie czynników atmosferycznych, wpływając degradująco na parametry wytrzymałościowe rozpatrywanej warstwy.

Przedstawione na rysunku 12 wartości maksymalnych odkształceń postaciowych są w przypadku wbudowanej warstwy odpadów z mieszanki popiołowo-żużlowej większe niż w przypadku wbudowanej warstwy odpadów ze strzępów gumowych. Miejsce niestateczności skarpy prawej występuje wzdłuż bocznej powierzchni wbudowanej warstwy odpadów, podobnie jak w wyżej omawianym

przykładzie (rys. 11). Wynika z tego, że warstwa geotechniczna nIb-2b, wskutek utraty wytrzymałości na ścinanie osunie się po skarpie.



Rys. 12. Maksymalne odkształcenia postaciowe z zaznaczoną powierzchnią poślizgu, dla skarpy prawej, z warstwą mieszaniny popiołowo-żuźłowej, gr. 120 cm (program MIDAS GTS®)

9. Podsumowanie i wnioski końcowe

Na tym etapie badań, przeprowadzone analizy stateczności nasypu kolejowego wykazały, że obie skarpy po wykonaniu wzmocnienia są stateczne i spełniają wymagania zawarte w Id-3 (min. wskaźnik pewności dla nasypów w trakcie eksploatacji wynosi $FoS = 1.5$). Planowany zabieg wbudowania w nasyp warstwy z odpadów (strzępów gumowych, lub mieszaniny popiołowo-żuźłowej) nie pogorszyła wskaźnika stateczności i nośności podtorza.

Wbudowanie warstwy z odpadów w postaci strzępów gumowych lub mieszaniny popiołowo-żuźłowej nie wpływa zasadniczo na stateczność całego nasypu. Utrata stateczności w przypadku skarpy prawej mogłaby przebiegać wzdłuż bocznej krawędzi warstwy strzępów gumowych lub mieszaniny popiołowo-żuźłowej. Powierzchnia awarii nie zagraża stateczności nasypu i konstrukcji nawierzchni kolejowej. Grunt osunięty wzdłuż powierzchni poślizgu wyznaczonej w części zasadniczej analizy, odsłania boczną krawędź warstwy strzępów gumowych (mieszaniny popiołowo-żuźłowej). Warstwa zostaje narażona na oddziaływanie czynników atmosferycznych i negatywnego wpływu promieniowania UV, mającego znaczący wpływ na szybkość procesu starzenia, szczególnie warstwy strzępów gumowych, wpływających tym samym na pogorszenie parametrów wytrzymałościowych warstw, zagrażając w przyszłości stateczności nasypu. Przebieg mechanizmu zniszczenia dla skarpy lewej wykazuje odmienny charakter dla warstwy strzępów gumowych i mieszaniny popiołowo-żuźłowej. W przypadku strzępów rozwój stref odkształceń postaciowych następuje wzdłuż dolnej granicy warstwy zagrażając stateczności nasypu. Natomiast w przypadku wbudowania mieszaniny popiołowo-żuźłowej, strefy rozwoju odkształceń postaciowych są związane z utratą

stateczności wierzchniej warstwy gruntu, odsłaniając tym samym warstwę mieszaniny. Uzyskane wartości parametrów stateczności dla skarpy lewej i prawej są zbliżone i przekraczają wartość 1.5.

Tabela 7. Porównanie wskaźników stateczności dla powierzchni posłizgu o największym zasięgu

| <i>Analiza I Skarpa lewa</i> | <i>Analiza I Skarpa prawa</i> | <i>Analiza II Skarpa lewa</i> | <i>Analiza II Skarpa prawa</i> | <i>Analiza III Skarpa lewa</i> | <i>Analiza III Skarpa prawa</i> | <i>Analiza IV Skarpa lewa</i> | <i>Analiza IV Skarpa prawa</i> |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| 1.39 | 1.33 | 1.59 | 1.57 | 1.56 | 1.56 | 1.56 | 1.55 |

Analiza I – stateczność istniejącego nasypu kolejowego,

Analiza II – stateczności wzmocnionego nasypu kolejowego,

Analiza III – stateczności nasypu kolejowego z warstwą strzępów gumowych o grubości 120 cm,

Analiza IV – stateczności nasypu kolejowego z warstwą mieszaniny popiołowo-żuźłowej o grubości 120 cm,

Analizy przeprowadzone w niniejszym artykule wykazały, że warstwa odpadów w postaci strzępów gumowych lub mieszaniny popiołowo-żuźłowej może zostać wykorzystana przy modernizacji nasypów kolejowych. W celu dokładnego zbadania zachowania się nasypu kolejowego z wbudowaną warstwą odpadów konieczne jest przeprowadzenie badań doświadczalnych. Szczegółowe wyniki analiz stanu odkształceń i naprężeń zawarte są w pracy [8].

Literatura

- [1]Departament Koordynacji Polityki Strukturalnej: Programowania perspektywy finansowej 2014-2020-uwarunkowania strategiczne.
- [2]Wytyczne: Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, Załącznik do zarządzenia nr 9/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A, Warszawa.
- [3]Materiały prezentacyjne firmy ACCIONA®, 2011: Rectyre project. WP 2. Definition of transferable knowledge, Warszawa.
- [4]Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych (Dz. U. 2012 nr 0 poz. 463).
- [5]Materiały projektowe firmy Geopartner: Dokumentacja geotechniczna do celów projektowych, dla przygotowania modernizacji linii kolejowej E65 (tor 1 i 2) na odcinku linii Nr 4 (CMK) ze stacjami, Kraków, 2008.
- [6]Gruchot A., Zydroń T., Właściwości geotechniczne mieszaniny popiołowo-żuźłowej ze spalania węgla kamiennego w aspekcie jej przydatności do celów budownictwa ziemnego. Rocznik Ochrona Środowiska, Kraków, 2013.
- [7]Dokumentacja MIDAS GTS NX: New experience of Geo-Technical analysis System. Manual documentation, 2014.
- [8]Szwarkowski D., Analiza stateczności nasypu kolejowego z wbudowaną warstwą strzępów gumowych przy wykorzystaniu modelowania numerycznego. Praca magisterska, Kraków 2014.