

MODELOWANIE PROGRAMEM MIDAS W PROGNOZOWANIU POZIOMU DRGAŃ GRUNTU W SĄSIEDZTWIE TRAS KOLEJOWYCH¹

Jan S. Pietras

mgr inż., Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem,
Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155
Kraków tel. 12 628 25 79, e-mail: jpietras@pk.edu.pl

Jakub Zięba

mgr inż., Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem,
Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155
Kraków tel. 12 628 25 79, e-mail: zieba.pk@gmail.com

Streszczenie. *Z wprowadzeniem na polskich torach kolei dużych prędkości, składu Pendolino staje się coraz bardziej istotnym problemem określenie poziomu drgań generowanych jego przejazdem na drogę i środowisko. W artykule przedstawiono analizę zastosowania modułu GTS NX programu MIDAS wykorzystującego metodę elementów skończonych do analizy wpływu taboru zestawu pociągu Pendolino na środowisko. Przedstawiono metodykę badań terenowych określenia poziomu drgań na środowisko, rozpoznania warunków geotechnicznych w profilach pomiarowych przy trasie kolejowej na Centralnej Magistrali Kolejowej. Podano założenia i dane z badań, które zostały wykorzystane do budowy, kalibracji i weryfikacji wyników przyjętego modelu numerycznego w programie MIDAS. Wyniki analizy wskazały na ograniczenia w zastosowaniu modułu GTS NX programu MIDAS do analizy wpływu taboru kolejowego na środowisko.*

Słowa kluczowe: *koleje dużych prędkości, Pendolino, Midas, GTS NX, Centralna Magistrala Kolejowa, wpływ taboru kolejowego na środowisko*

1. Wprowadzenie

Razem z pojawieniem się na polskich torach nowych składów Pendolino oraz zwiększaniem prędkości pociągów powstaje pytanie, jaki wpływ na środowisko mogą mieć nowe składy pociągów, których prędkość może sięgać nawet 290 km/h. Możliwość osiągnięcia takiej prędkości daje odpowiednia konstrukcja takich składów w szczególności sposób rozwiązania układu napędowego [11]. Układ napędowy w odróżnieniu do starszych typów składów jeżdżących po polskich torach ma system zespołowy (rozproszony). Jest to jedna z najistotniejszych cech pociągów Pendolino, gdyż w taki sposób siła napędowa jest rozłożona i jest zlokalizowana w kilku różnych osiach pociągu. Skutkiem takiego rozwiązania jest to, że maksymalne obciążenie na oś nie przekracza $17 \div 18$ ton. W przypadku rozwiązań - lokomotywa plus wagony, które są dostępne obecnie na rynku, nacisk na oś napędzającą pociąg przy jeździe około 200 km/h może wynosić nawet $21 \div 22$ tony. Zatem wybór rozwiązania i do-

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Pietras J.S. 50%, Zięba J. 50%

puszczenie różnych typów pociągów na tej samej linii kolejowej, przy tej samej prędkości poruszania, może mieć różny wpływ na środowisko.

Powyższe ograniczenia w kontekście trwałości, a także stateczności nasypów kolejowych [2,5], a co za tym idzie kosztów utrzymania nasypów kolejowych i konstrukcji inżynierskich infrastruktury kolejowej, powinny być uwzględniane przy dopuszczeniu do ruchu różnych składów i ustaleniu prędkości przejazdów tych składów, dla których wpływ na środowisko będzie w zakresie wartości dopuszczalnych.

2. Skład kolejowy Pendolino

Pendolino jest to model pociągów produkowanych przez firmę Alstom, firma ta jest obecna w 21 krajach świata i dostarcza rozwiązania składów zespołowych od 1974 roku. Firma od początku tworzyła rozwiązanie składów, które wykorzystując istniejącą infrastrukturę kolejową potrafią jeździć ze znacznie większą prędkością niż rozwiązania lokomotywa plus wagony. Wzorując się na rozwiązaniach pociągów szybkich kolei we Francji i Japonii oraz dostępnych technologiach powstały składy, które mogą osiągać średnią prędkość około 250 km/h.

W 2011 r. Polska spółka P.K.P. Intercity podpisała z firmą Alstom kontrakt na dostarczenie 20 zespołów składających się z 7 członów pociągów New Pendolino. Każdy skład posiada rozproszony napęd, co oznacza, że w składzie nie ma lokomotywy, a za napęd odpowiadają silniki rozmieszczone w różnych miejscach pojazdu. Pierwszym składem przybyłym do Polski jest skład ED250. Od tego czasu skład daje możliwości testowania pociągu przed rozpoczęciem włączenia go do siatki przewozów właściciela.

W listopadzie 2013 r. na m.in. 184 km testowego odcinka Centralnej Magistrali Kolejowej przeprowadzono testy składu ED250. Jednym z celów testu było sprawdzenie oddziaływania składu Pendolino przy różnych, a także maksymalnych prędkościach na otoczenie, na podłoże gruntowe, które miało zarówno zróżnicowaną budowę geologiczną jak i poziom zwierciadła wód gruntowych. Podczas przejazdu różnego typu pociągów, przy różnych prędkościach badano drgania podkładu i nasypu kolejowego. Zjawiska dynamiczne związane z oddziaływaniem pojazdów szybnymi prędkościami z torem są złożone i podane w pracach m.in. autorów [1]. Pomierzone zostały również w badaniach terenowych drgania, we wszystkich trzech kierunkach, w punktach, w różnych odległościach od konstrukcji nasypu kolejowego. Pomiar taki stanowiło badanie propagacji drgań w gruncie [6,7].

3. Rozpoznanie podłoża gruntowego

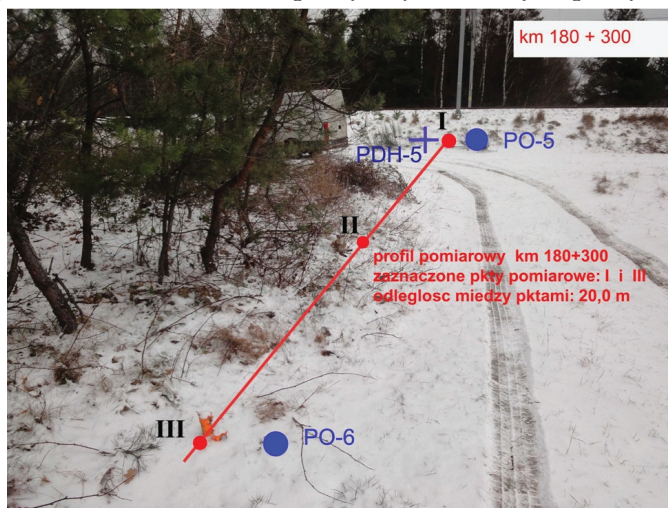
Jednym z istotnym elementów testów, jakie przeprowadzono na Centralnej Magistrali Kolejowej było wstępne rozpoznanie podłoża gruntowego i ogólnie warunków gruntowych. Badania te zostały przeprowadzone przez Zakład Współ-

działania Budowli z Podłożem, który wchodzi w część Instytutu Mechaniki Budowli i Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej i zostały zebrane w opracowaniu „Dokumentacja badań podłoża dla zadania: Wstępne rozpoznanie warunków gruntowych w punktach pomiarowych dynamicznego oddziaływania składu Pendolino na otoczenie” [4]. Warunki gruntowe w przypadku określenia propagacji fali mają znaczący wpływ, gdyż stanowią ośrodek, przez który rozprządza się fala.

Do analizy wybrano jeden z trzech rozpoznanych wstępnie profili na tym obszarze charakteryzujący się prostszymi warunkami geotechnicznymi w porównaniu do dwóch pozostałych oraz tym, że rozpoznany profil znajdował się w całości w strefie aeracji (profil pomiarowy (stanowisko) 2 - przekrój: km 180 + 300) wg [6, 7].

Rozpoznanie geotechniczne wykonano bezpośrednio przy profilu i punktach pomiarowych, gdzie były zlokalizowane węzły z akcelerometrami profili pomiarowych badań oddziaływania składu pociągu Pendolino na środowisko gruntowe. W każdej z tych linii punkty badawcze zlokalizowano w dwóch węzłach badawczych: pierwszy położony u podnóża skarpy kolejowej, drugi przy punkcie pomiarowym (Nr III wg [6]) zlokalizowanym w odległości 20 m od skarpy (rys. 1). Rozpoznanie objęło wiercenia i sondowania dynamiczne oraz laboratoryjne oznaczenia klasyfikacyjne [10].

Profil podłoża gruntowego zbudowany był z osadów czwartorzędowych pochodzenia aluwialnego związanych z działalnością akumulacyjną rzeki Pilicy. Uwarstwione podłoże w profilu budowały głównie piaski średnie i piaski drobne w wyraźnie dających się wydzielić warstwach o poziomym zaleganiu. W profilu litologicznym stwierdzono cienkie przewarstwienia gruntami: pyłami i pyłami piaszczystymi. Grunty gruboziarniste występowały w stanie zagęszczenia od luźnych do zagęszczonych, a drobnoziarniste od plastycznych do miękkoplastycznych wg [4].



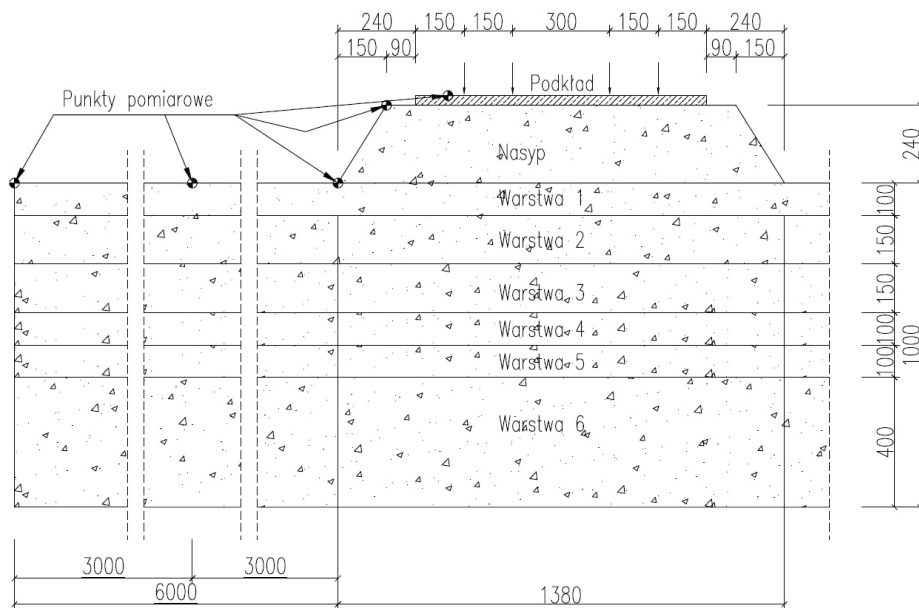
Rys. 1. Linia pomiarowa km 180+300 (odcinek pomiędzy punktami I – III wg [6,7] profilu pomiarowego. Zaznaczono lokalizacje części punktów badawczych rozpoznania geotechnicznego (wiercenia ręczne PO-5 i PO-6; sondowania dynamiczne PDH-5) wg[4]

4. Wyniki badań terenowych

Podczas badań na Centralnej Magistrali Kolejowej na odcinku testowym wykonano rejestrację 21 przejazdów składów „Pendolino”, które przejeżdżały z prędkością od 40 do 290 km/h [6,7]. Podczas każdego z przejazdów zostały pomierzone w założonych profilach pomiarowych przyspieszenia w 9 punktach w 3 kierunkach: x - prostopadłym do toru, y - równoległym do toru i z - jako przyspieszenia pionowe. Wynikiem pomiarów był przebieg czasowy przyspieszeń [cm/s^2] w czasie przejazdu pociągu Pendolino.

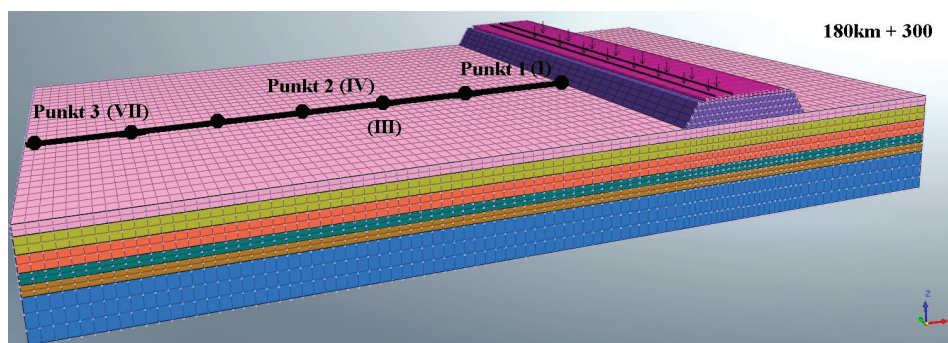
5. Program MIDAS GTS NX

Wykonanie badań polowych i laboratoryjnych pozwalają na zbudowanie schematu podkładu kolejowego oraz podłoża gruntowego w zakresie występowania punktów pomiarowych, które mogą posłużyć jako podstawa do budowy modelu MES w programie MIDAS GTS NX.



Rys. 2. Schematyczny przekrój przez nasyp (torowisko) i podłoże gruntowe z wydzielonymi warstwami geotechnicznymi przyjęty do obliczeń numerycznych

Siatka MES w programie Midas [3] została wygenerowana automatycznie poprzez zaimportowanie modelu przestrzennego z programu AutoCAD. Następnie na podstawie przeprowadzonego rozpoznania podłoża gruntowego zostały określone parametry geotechniczne, które zostały przypisane kolejnym, wydzielonym w profilu warstwom.



Rys. 3. Model MES programu MIDAS wraz z naniesionymi punktami profilu pomiarowego oraz z punktami przyłożenia sił od wózków składu Pendolino

Model MES zbudowany był z 45942 węzłów i 44700 elementów. W rzucie model miał wymiary 100x80 m, a przekrój zgodnie ze schematem rys. 2.

Ostatecznie na podstawie badań geotechnicznych [4] wydzielono warstwy, których parametry przedstawiono w Tabeli 1 i wykorzystano w modelowaniu numerycznym. Ponadto na podstawie badań klasyfikacyjnych gruntów określono parametry E i n , których wartości przyjęto zgodnie z literaturą [8,9].

Tabela 1. Parametry geotechniczne warstw w modelu numerycznym

	Podkład	Nasyp	Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4	Warstwa 5	Warstwa 6
Model	Elastic	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
E [kN/m ²]	23000000	130000	23000	16000	23000	16000	23000	32000
ν	0,18	0,25	0,3	0,33	0,3	0,33	0,3	0,28
γ [kN/m ³]	23	19	18	19	18	19	18	22
c [kN/m ²]	-	15	0	10	0	15	0	18
ϕ [deg]	-	35	30	28	35	28	42	37

Na rys. 3 przedstawiono profil pomiarowy z naniesionymi punktami I, IV, VII, w których odczytano przyspieszenia w trakcie badań terenowych oraz punkty 1, 2, 3, w których wyniki przyspieszeń zostały policzone w programie MIDAS GTS NX. Odległości między punktami 1, 2, 3 zgodnie ze schematem na Rys. 2 są od siebie oddalone o 30m.

Analiza dynamiczna modelu została wykona w programie Midas wykorzystując moduł zadawania siły poruszającej się na podkładzie zgodnie z Rys. 3 dla pociągów szybkich kolei [3]. Zadano siły o wartości 170kN wg [11].

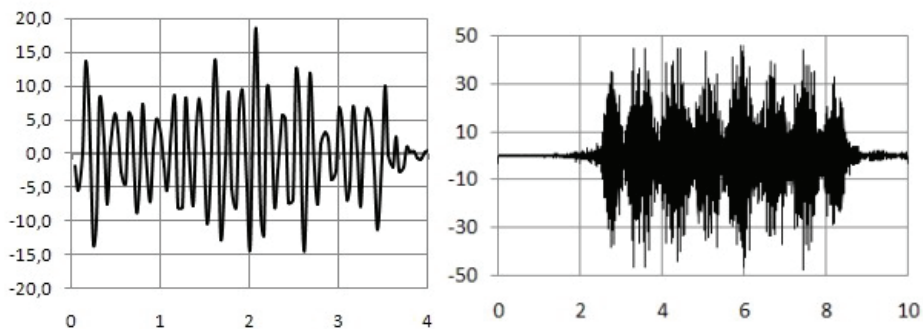
6. Zestawienie wyników doświadczalnych i modelowania

W celu lepszej prezentacji w poniższym punkcie zestawiono wyniki badań doświadczalnych jak i modelowania. Przedstawiono i porównano wyniki dla przypadku przejazdu pociągiem Pendolino po trasie z prędkością 200 km/h z trzech

czujników w odniesieniu do trzech węzłów siatki MES – określonych dalej jako punkty 1, 2 i 3.

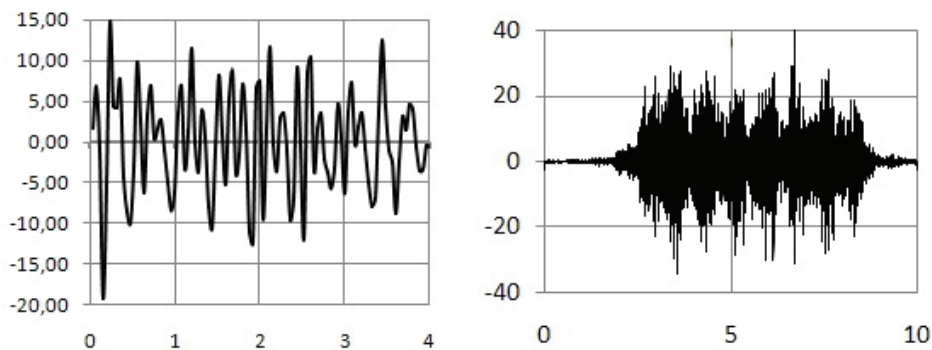
Pierwszym porównywanym czujnikiem był czujnik zamontowany bezpośrednio przy nasypie kolejowym – określany dalej jako punkt 1. Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń programem MIDAS GTS NX w 3 kierunkach.

Kierunek X



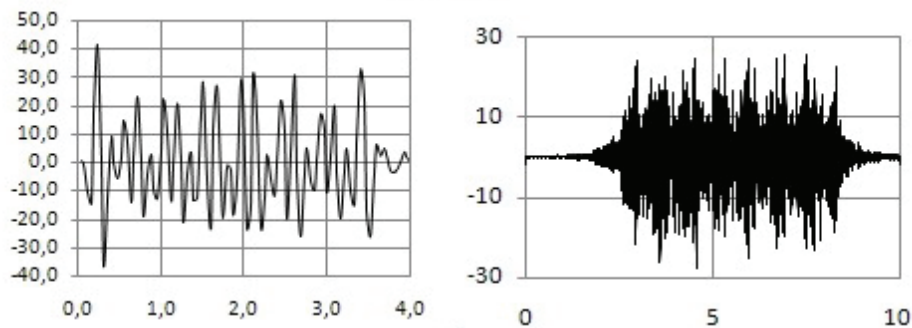
Rys. 4. Składowa w kierunku X obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h {m/s²} w punkcie 1

Kierunek Y



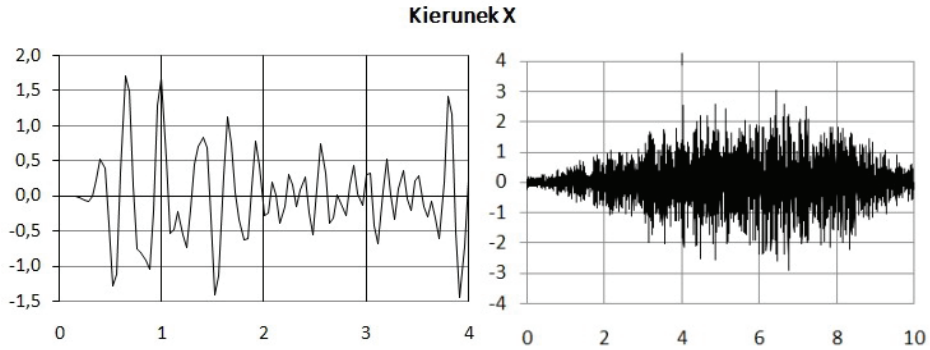
Rys. 5. Składowa w kierunku Y obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h {m/s²} w punkcie 1

Kierunek Z

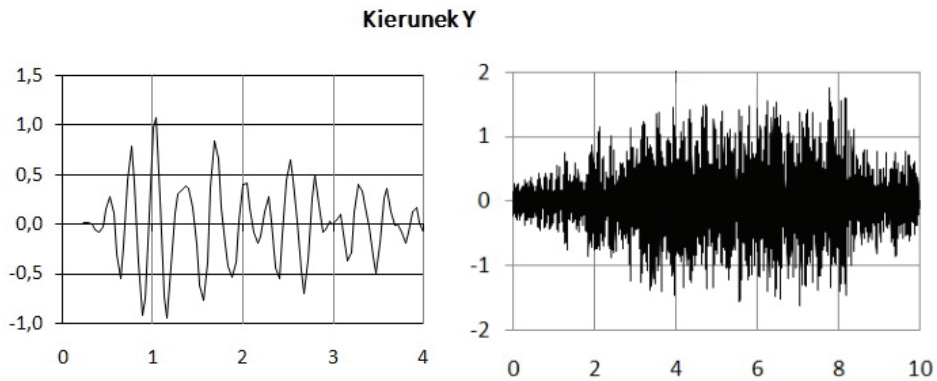


Rys. 6. Składowa w kierunku Z obliczona w programie Midas i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h {m/s²} w punkcie 1

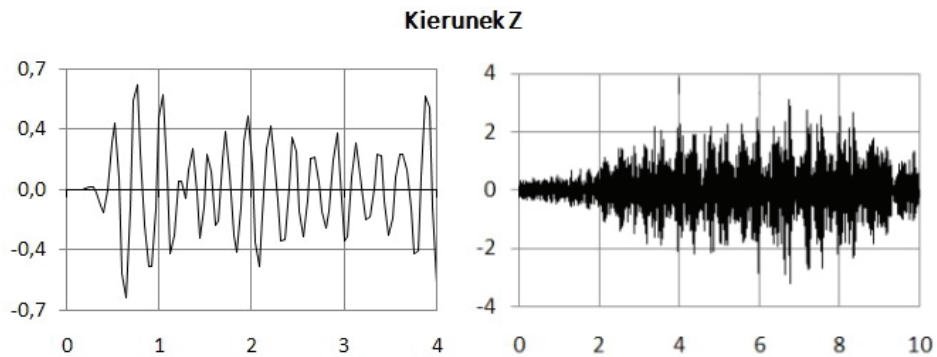
Drugim porównywanym czujnikiem był czujnik zamontowany bezpośrednio pod nasypem kolejowym, – określany dalej jako punkt 2. Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń programem MIDAS GTS NX w 3 kierunkach.



Rys. 7. Składowa w kierunku X obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h (m/s^2) w 2 punkcie

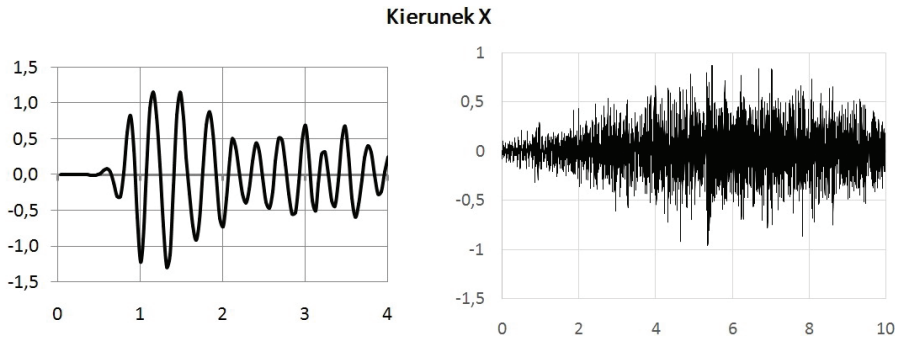


Rys. 8. Składowa w kierunku Y obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h (m/s^2) w 2 punkcie

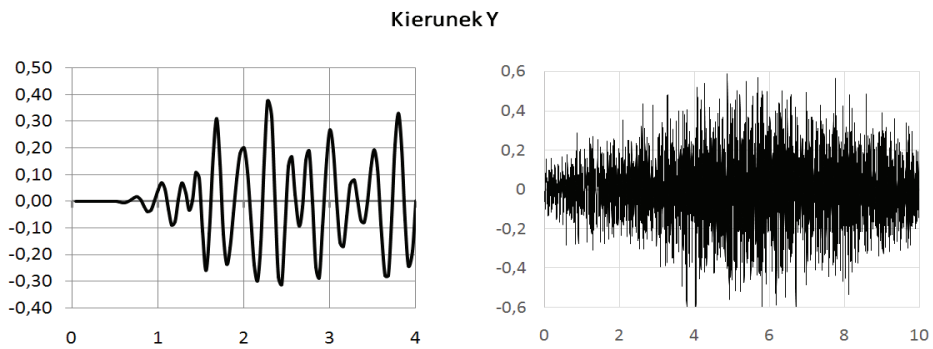


Rys. 9. Składowa w kierunku Z obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h (m/s^2) w 2 punkcie

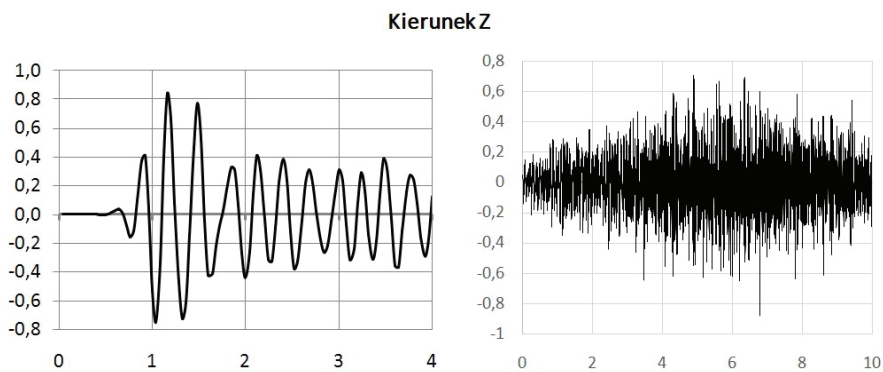
Trzecim porównywanym czujnikiem był czujnik najdalej oddalony od nasypu, w odległości ok. 60 m. Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń programem MIDAS GTS NX w 3 kierunkach.



Rys. 10. Składowa w kierunku X obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h (m/s^2) w 3 punkcie



Rys. 11. Składowa w kierunku Y obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h (m/s^2) w 3 punkcie



Rys. 12. Składowa w kierunku Z obliczona w programie MIDAS i zarejestrowana podczas przejazdu pociągu Pendolino z prędkością 200 km/h (m/s^2) w 3 punkcie

Można zauważyć, że w przypadku porównania tych trzech punktów wartości przyspieszeń w punktach w różnych kierunkach są co do wartości podobne. Także charakter tych przebiegów wykazuje również pewne cechy podobieństwa.

Największe rozbieżności wykazuje porównanie wartości przyspieszeń otrzymanych bezpośrednio na zamodelowanym podkładzie. Może to wynikać z zastosowania uproszczonego modelowania strefy koło – tor – podkład betonowy oraz zamodelowania nasypu kolejowego jedną warstwą o stałym parametrze.

Rzeczywiste wyniki pomiarów drgań w analizowanym profilu pomiarowym, jakie zostały uzyskane podczas testów w listopadzie 2013 r. na testowym odcinku Centralnej Magistrali Kolejowej według [6] są wyższe niż otrzymane w analizie numerycznej programem MIDAS GTS NX. Wyniki przyspieszeń otrzymane w trakcie pomiarów przejazdu pociągu Pendolino na nasypie kolejowym są zdecydowanie wyższe niż otrzymane z modelu numerycznego.

Ponadto zaobserwowano większe drgania konstrukcji nasypu podczas przejazdów pociągów Pendolino w odniesieniu do przejazdów pociągów rozkładowych. Jak podkreślają autorzy [6] poziom tych drgań nie ma jednak wpływu na bezpieczne użytkowanie konstrukcji na testowanym odcinku.

7. Wnioski

Przedstawione opracowanie stanowi pierwszą w Polsce próbę wykorzystania programu MIDAS GTS NX w analizie numerycznej wpływu na środowisko pociągu Pendolino, przeprowadzoną po testach Pendolino na Centralnej Magistrali Kolejowej. Parametry w analizie numerycznej przyjęto po wstępnym określeniu warunków gruntowych i określeniu koniecznych parametrów modelu MES.

Wynik obliczeń numerycznych porównano z wynikami badań drgań gruntu i niektórych elementów nawierzchni podczas przejazdów testowych pociągu Pendolino i innych pociągów na linii CMK. W artykule porównano przyspieszenia dla trzech wybranych punktów położonych na linii pomiarowej w odległościach odpowiednio 1, 30 i 60 m od nasypu kolejowego. Zgodnie z punktem 6 można stwierdzić, iż wartość maksymalnych przyspieszeń jest, co do wartości zbliżona. Ponadto charakter przyspieszeń obliczonych metodą numeryczną jest zbliżony z charakterem przyspieszeń otrzymanych w pomiarach terenowych propagacji drgań. W tym aspekcie program MIDAS GTS NX może być w przyszłości wykorzystywany do określenia przybliżonego poziomu drgań w gruncie na obszarze przylegających do linii kolejowych.

Dysponując dokładnym rozpoznaniem warunków geotechnicznych nasypu i podłoża gruntowego, a zwłaszcza parametrami dynamicznymi gruntu określonymi metodami bezpośrednimi w terenie, można wykorzystując program MIDAS GTS NX określić wpływ oddziaływania składu kolejowego np. Pendolino na środowisko gruntowe. Analiza może stanowić podstawę do wytypowania miejsc, w których powinny zostać przeprowadzone badania pomiarów drgań w terenie,

które obecnie stanowią jedyną wiarygodną metodę określenia rzeczywistych przyspieszeń w gruncie.

W celu potwierdzenia poprawności zaprezentowanego podejścia powinny zostać przeprowadzone dodatkowe badania i obliczenia dla innych, odmiennych warunków geologiczno-inżynierskich, przy równoczesnym rozpoznaniu bezpośrednimi badaniami in-situ dynamicznych parametrów wytrzymałościowych gruntu. Analizę należy również poszerzyć o analizę przejazdu pociągów z różnymi prędkościami.

Wykorzystanie programu do określenia przyspieszeń nasypu kolejowego wraz z podkładem wymaga dokładniejszego rozpoznania i zamodelowania tej strefy.

Bibliografia

- [1] Bogacz R., Czyczuła W., Wybrane zagadnienia dynamiki kolei dużych prędkości, przegląd badań dotyczących toru. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, nr 2(101)/2013, Kraków 2013.
- [2] Cała M., Stopkowicz A., Metody do weryfikacji. Wybrane metody analizy stateczności nasypów kolejowych. Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie Maj – Czerwiec 2007.
- [3] MIDAS GTS NX Analysis Reference, 260 pages, <http://www.midasgtsnx.com/>.
- [4] Pilecka E., Pietras J.S., Zięba J., Morman J., Przydatek P., Dokumentacja badań podłoża dla zadania: Wstępne rozpoznanie warunków gruntowych w punktach pomiarowych dynamicznego oddziaływania składu Pendolino na otoczenie. Praca własna Zakładu Współdziałania Budowli z Podłożem, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, archiwum, 2013.
- [5] Pilecka E., Zdanowicz-Dejnak M., Analiza wpływu warunków geotechnicznych podtorza na stateczność nasypów kolejowych w aspekcie kolei dużych prędkości na podstawie modelowania numerycznego. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, nr 2(101)/2013, Kraków 2013.
- [6] Stypuła K., Tataro T., Wybrane wyniki pomiarów drgań wywołanych testowymi przejazdami pociągu Pendolino na CMK. IX Seminarium „Wpływ hałasu i drgań wywołanych eksploatacją...” Wibroszyn-2014, Kraków, 2014.
- [7] Tataro T., Stypuła K., Analiza wyników pomiarów drgań gruntu i niektórych elementów nawierzchni podczas przejazdów testowych pociągu Pendolino i innych pociągów na linii CMK w uzgodnionych lokalizacjach w torze nr 1, szlaku Psary-Góra Włodowska, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, archiwum, 2014.
- [8] Wiłun Z., Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2001.

- [9] Lambe W.T., Whitman R.V., *Mechanika Gruntów*. Arkady, Warszawa, 1978.
- [10] PN-EN ISO 14688:2006, *Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów*. Część 1 i 2.
- [11] Pismo Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej Nr TK-7as-0701-8(2)/13z dnia 31 lipca 2013 r.: http://senat.gov.pl/gfx/senat/userfile/_public/k8/dokumenty/stenogram/oswiadczenia/obremski/3503o.pdf

