



PAWEŁ SZCZEPANKIEWICZ

Nascon Sp. z o.o.
pawel.szczepankiewicz@nascon.pl

Weryfikacja modelu obliczeniowego stanu konstrukcji nawierzchni drogowej bazującego na sprężystych warstwach skończonych wykorzystanego w programie MWS Pavement Design

W niniejszym artykule przedstawiono weryfikację i ocenę zbieżności wyników z modelu obliczeniowego konstrukcji nawierzchni według programu MWS Pavement Design, w stosunku do wykorzystywanego w Polsce modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Obydwa modele są stosowane przy wyznaczaniu stanu konstrukcji nawierzchni drogowej, tj. naprężeń, odkształceń i przemieszczeń układu warstwowego. Dane pozyskane z obliczeń wykorzystywane są do oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej.

Głównym czynnikiem determinującym metodologię prowadzonych obliczeń jest rodzaj projektowanej konstrukcji, a dokładniej jej warstwa jezdna – najczęściej wykonana z mieszanek mineralno-asfaltowych, względnie stanowiących sztywne płyty betonowe. Ze względu na znaczny udział nawierzchni wykonanych w technologii warstw jezdnych z mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA), artykuł skupiać się będzie na metodach obliczeń tego rodzaju nawierzchni.

Obok najczęściej stosowanego w Polsce *Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych* [3] i dobierania konstrukcji „typowych” pojawia się coraz częściej stosowana metodologia indywidualnych obliczeń konstrukcji nawierzchni. Przewagą indywidualnego projektowania jest możliwość doboru konstrukcji pod kątem konkretnego przypadku obliczeniowego – w odniesieniu do obciążenia ruchem pojazdów, budową geologiczną podłoża, dostępnością materiałów oraz ewentualne innych wymagań, np. zastosowania konkretnego rodzaju warstw jezdnych nawierzchni, pod warunkiem określenia parametrów materiałowych takiej warstwy, niezbędnych w danej metodzie obliczeniowej.

Indywidualne projektowanie konstrukcji nawierzchni drogowej ma na celu wyliczenie trwałości zmęczeniowej, tj. dopuszczalnej liczby osi standardowych (aktualnie 100 kN), którą dana nawierzchnia może przenieść aż do wystąpienia stanu granicznego nośności. W przypadku projektowania mechanistyczno-empirycznego, metodologia obliczeń obejmuje dwie części: część mechanistyczną, czyli dobór modelu obliczeniowego łącznie z wyliczeniem stanu konstrukcji (naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia) oraz część empiryczną, czyli wyznaczenie trwałości zmęczeniowej poprzez bazowanie na wzorach wyznaczonych doświadczalnie.

Najczęściej stosowane są modele bazujące na sprężystym zachowaniu się każdej z warstw. Są to między innymi porównywane w niniejszym artykule: model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej (stosowany m.in. w znanym, lecz nie wspieranym już programie *BISAR 3.0* [7]) oraz model skończonych warstw sprężystych – stosowany m.in. w programie *MWS Pavement Design* [8].

Obecnie wiele programów wspomagających projektowanie konstrukcji bazuje na modelach warstw sprężystych. Istnieje również szereg programów bazujących na metodzie elementów skończonych, uwzględniających np. nieliniowość lub anizotropie warstw. Przegląd części takich programów opracowano w ramach projektu COST333 [6].

W artykule dokonano porównania dwóch modeli obliczeniowych, bazujących na warstwach sprężystych obciążonych na stropie najwyższej położonej warstwy siłą równomiernie rozłożoną. Są to:

- model wielowarstwowej półprzestrzeni (stosowany m.in. w programie *BISAR 3.0* [7]),
- model sprężystych warstw skończonych (stosowany w programie *MWS Pavement Design* [8]).

Założenia modelu bazującego na wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej są znane i zostały opisane między innymi w pracach [2] i [9], w dalszej części artykułu zostaną przedstawione założenia modelu sprężystych warstw skończonych.

Metoda sprężystych warstw skończonych należąca do grupy przybliżonych metod analitycznych, cechuje się ścisłym rozwiązaniem wewnątrz ośrodka uwarstwionego oraz przybliżonym odwzorowaniem obciążenia brzegu ośrodka. Metoda obliczeniowa polega na dokładnym rozwiązaniu zagadnienia dla obciążeń brzegu przyjętych jako okresowa funkcja trygonometryczna (takie ścisłe rozwiązania istnieją w postaci zamkniętej), a następnie na złożeniu kilkuset takich rozwiązań. Podstawą jest twierdzenie Fouriera o rozwinięciu funkcji w szereg trygonometryczny oraz zasada superpozycji (przybliżeniem rozwiązania jest suma szczególnych rozwiązań dla obciążenia o kształcie okresowych funkcji trygonometrycznych) [10, 11].

W modelu wykorzystuje się prawo Hooke’a wyrażające naprężeniowe równania równowagi za pomocą odkształceń (równania konstytutywne):

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{1}{E} \cdot [\sigma_{xx} - \nu \cdot \sigma_{yy} - \nu \cdot \sigma_{zz}]$$

$$\varepsilon_{yy} = -\frac{1}{E} \cdot [\sigma_{yy} - \nu \cdot \sigma_{xx} - \nu \cdot \sigma_{zz}]$$

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{1}{E} \cdot [\sigma_{zz} - \nu \cdot \sigma_{xx} - \nu \cdot \sigma_{yy}]$$

$$\varepsilon_{xy} = -\frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{xy}$$

$$\varepsilon_{xz} = -\frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{xz}$$

$$\varepsilon_{yz} = -\frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{yz}$$

w których:

E – moduł sprężystości

ε_{ij} – składowe odkształcenia

σ_{ij} – składowe naprężenia

ν – współczynnik Poissona

Obydwa modele opierają się na założeniu jednorodnych izotropowych warstw sprężystych. Można zatem stwierdzić, że pod kątem fizycznego opisu zachowania materiału oba porównywane metody obliczeniowe są bliźniacze.

W następnej kolejności omówiono schemat modelu skończonych warstw sprężystych przedstawiony na rysunku 1, w którym:

E_i – moduł sprężystości i -tej warstwy modelu konstrukcji

ν_i – współczynnik Poissona i -tej warstwy modelu konstrukcji

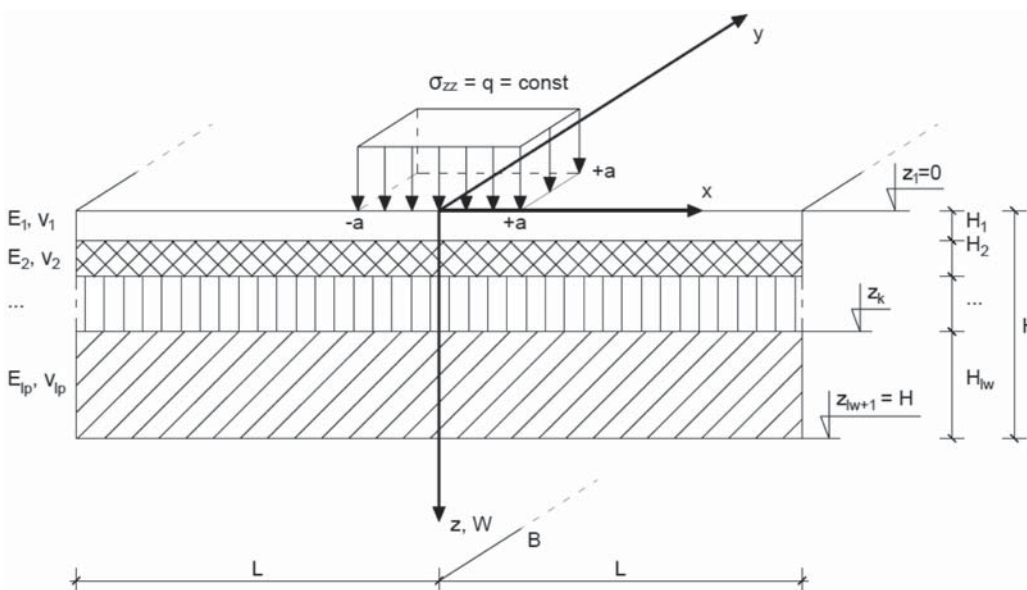
H_i – grubość i -tej warstwy modelu konstrukcji

z_k – głębokość na styku warstw modelu

a – połowa długości boku obciążenia kwadratowego

L – półszerokość rozpatrywanego obszaru obliczeniowego wzdłuż osi x

B – półszerokość rozpatrywanego obszaru obliczeniowego wzdłuż osi y



Rys. 1. Schemat modelu sprężystych warstw skończonych (przekrój w centrum obciążenia równomiernie rozłożonego, wzdłuż osi x) [12]

Dla modelu zostały przyjęte następujące założenia:

- na poziomie $z = 0$ występuje pionowe obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni kwadratowej oraz brak naprężeń poza tym kwadratem,
- we wnętrzu modelu, na granicach warstw z_k zachodzi ciągłość przemieszczeń oraz naprężeń działających na tych poziomych płaszczyznach,
- na poziomie $z = H$ brak jest przemieszczeń pionowych oraz poziomych,
- model jest ograniczony w płaszczyźnie poziomej, a obszar obliczeniowy ma wymiary $L \times B$.

W stosunku do założeń modelu stosowanego w programie BISAR 3.0 różnicą w modelu warstw skończonych jest kształt obciążenia oraz ograniczenia warstw. W modelu półprzestrzeni sprężystej obciążenie ma kształt kołowy, a warstwy są nieograniczone w poziomie. W modelu warstw skończonych obciążenie ma kształt kwadratowy, natomiast warstwy są ograniczone w płaszczyźnie zarówno pionowej, jak i poziomej. Ograniczenie modelu skutkuje występowaniem dwóch dodatkowych parametrów L i B , określających obszar obliczeniowy. Podane różnice mają wpływ na dokładność oraz zbieżność obliczeń.

Przykłady obliczeniowe konstrukcji nawierzchni








Porównanie programów przeprowadzono w przypadku wybranych konstrukcji drogowych – typowych dla obciążenia ruchem KR2 oraz KR5 (zgodnie z [3]). Podstawowymi parametrami do przeprowadzenia obliczeń trwałości zmęczeniowej są: odkształcenia poziome na spodzie najniższej warstwy wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej oraz pionowe odkształcenia na powierzchni podłoża gruntowego. Podane wartości będą brane pod uwagę w poszczególnych modelach obliczeniowych.

Bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni założono grupę nośności podłoża G3, w której moduł $E_2 \geq 35$ MPa.

W tabeli 1 przedstawiono konstrukcje nawierzchni dla kategorii ruchu KR2 i KR5. Przyjęto rozwiązania z Katalogu [3]. W przypadku górnych warstw konstrukcji nawierzchni: Typ A1; oraz w przypadku dolnych warstw konstrukcji nawierzchni: Typ 12 w przypadku KR2 oraz Typ 3 w przypadku KR5.

Tabela 1. Konstrukcje nawierzchni przyjęte do obliczeń

	KR2	KR5
	4	4
	8	8
	20	12
	22	20
	15	17
	25	25
	20	20

	Warstwa ścieralna z mieszanki mineralno-asfaltowej
	Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego
	Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego
	Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3
	Warstwa podbudowy pomocniczej z mieszanki niezwiązanej o CBR≥60%
	Warstwa mrozoochronna z mieszanki niezwiązanej o CBR≥30%
	Warstwa ulepszonego podłoża stabilizowanego spoiwem hydraulicznym lub wapnem

Podstawowymi parametrami warstw w obu modelach obliczeniowych są: grubość warstwy, moduł sprężystości (lub moduł sztywności w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych) oraz współczynnik Poissona.

Moduł sprężystości jest stałą materiałową będącą stosunkiem naprężenia oraz odkształcenia występującego w zakresie odkształceń sprężystych w danym materiale. Współczynnik Poissona jest stosunkiem odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego przy osiowym stanie naprężenia. Zarówno wartość modułu sprężystości, jak też współczynnika Poissona, powinna być ustalana indywidualnie do danego materiału i temperatury jego pracy.

Stale materiałowe poszczególnych warstw analizowanych konstrukcji zestawiono w tabeli 2.

Przedstawione w tabeli 1 konstrukcje nawierzchni zostały wprowadzone oraz obliczone dla obu modeli obliczeniowych. Modele zostały obciążone jednakową siłą 50 kN, przy ciśnieniu kontaktowym 850 kPa.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń odkształceń w punktach krytycznych konstrukcji nawierzchni oraz procentowe różnice wartości (jako wyjściowy model przyjęto wielowarstwowa półprzeźroczystą). Punkty krytyczne w konstrukcji nawierzchni stanowią: punkt w osi obciążenia na dolnej powierzchni warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych oraz punkt w osi obciążenia na górnej powierzchni podłoża gruntowego.

W celu dokonania weryfikacji dotyczącej różnic wyników wpływających na obliczaną trwałość zmęczeniową, dla wyznaczonych wartości obliczono trwałość zmęczeniową obu konstrukcji stosując kryteria AASHTO 2004 (spękań warstw asfaltowych) i Instytutu Asfaltowego (deformacji strukturalnych podłoża). Założone parametry do obliczeń przedstawiono w tabeli 4 i tabeli 5 [4], [5].

Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej poszczególnych konstrukcji przedstawiono w tabelach od 6 do 9.

Tabela 2. Stałe materiałowe warstw przyjęte do obliczeń

Warstwa	KR2		KR5	
	Moduł sprężystości/sztywności	Współczynnik Poissona	Moduł sprężystości/sztywności	Współczynnik Poissona
Warstwa ścieralna z AC	9300	0,3	–	–
Warstwa ścieralna z SMA	–	–	7300	0,3
Warstwa wiążąca z AC	8800	0,3	10300	0,3
Górna warstwa podbudowy zasadniczej z AC	–	–	9800	0,3
Dolna warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej	400	0,3	400	0,3
Warstwa podbudowy pomocniczej z mieszanki niezwiązanej	–	–	250	0,3
Warstwa mrozoochronna z mieszanki niezwiązanej	200	0,3	200	0,3
Warstwa ulepszonego podłoża stabilizowanego spoiwem hydraulicznym	150	0,3	150	0,3
Podłoże gruntowe G3, E = 35 MPa, ν = 0,35				

Tabela 3. Wyniki obliczeń odkształceń w punktach krytycznych konstrukcji nawierzchni

Model	Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych [m/m]		Odkształcenia pionowe na powierzchni podłoża gruntowego [m/m]	
	KR2	KR5	KR2	KR5
Wielowarstwowa półprzestrzeń sprężysta	0,000159	0,000065	-0,000378	-0,000142
Sprężyste warstwy skończone	0,000158	0,000063	-0,000369	-0,000136
Różnice	0,78%	2,25%	2,33%	4,09%

Tabela 4. Parametry przyjęte do obliczeń trwałości zmęczeniowej nawierzchni w przypadku kategorii ruchu KR2

KR2			
Symbol	Nazwa	Wartość	Jednostka
E	Moduł sztywności najniższej warstwy z MMA	8800	MPa
V _b	Zawartość objętościowa asfaltu w najniższej warstwie MMA	11	v/v %
V _a	Zawartość objętościowa wolnych przestrzeni w najniższej warstwie MMA	7	v/v %
v	Współczynnik Poissona	0,30	-
FC	Ilość spękań zmęczeniowych w stosunku do całej powierzchni pasa ruchu	10	%
k	Współczynniki doświadczalne zgodne z metodą Instytutu Asfaltowego wykorzystaną w KTKNPIP 2014 r.	0,0105	-
m	[3]	0,223	-

Tabela 5. Parametry przyjęte do obliczeń trwałości zmęczeniowej nawierzchni w przypadku kategorii ruchu KR5

KR5			
Symbol	Nazwa	Wartość	Jednostka
E	Moduł sztywności najniższej warstwy z MMA	9800	MPa
V _b	Zawartość objętościowa asfaltu w najniższej warstwie MMA	10	v/v %
V _a	Zawartość objętościowa wolnych przestrzeni w najniższej warstwie MMA	8	v/v %
v	Współczynnik Poissona	0,30	-
FC	Ilość spękań zmęczeniowych w stosunku do całej powierzchni pasa ruchu	10	%
k	Współczynniki doświadczalne zgodne z metodą Instytutu Asfaltowego wykorzystaną w KTKNPIP 2014 r.	0,0105	-
m	[3]	0,223	-

Tabela 6. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni KR2 w przypadku wartości z modelu sprężystych warstw skończonych

Odkształcenia w punktach krytycznych			
ε _t	Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych	0,0001578	m/m
ε _p	Odkształcenia pionowe na powierzchni podłoża gruntowego	0,0003690	m/m
Trwałość zmęczeniowa nawierzchni podatnej			
N _f	Kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych	1,062	mIn osi 100 kN/pas/T
N _s	Kryterium deformacji strukturalnych podłoża	3,319	mIn osi 100 kN/pas/T

Tabela 7. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni KR2 w przypadku wartości z modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej

Odkształcenia w punktach krytycznych			
ε _t	Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych	0,0001590	m/m
ε _p	Odkształcenia pionowe na powierzchni podłoża gruntowego	0,0003778	m/m
Trwałość zmęczeniowa nawierzchni podatnej			
N _f	Kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych	1,031	mIn osi 100 kN/pas/T
N _s	Kryterium deformacji strukturalnych podłoża	2,985	mIn osi 100 kN/pas/T

Tabela 8. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni KR5 w przypadku wartości z modelu sprężystych warstw skończonych

Odkształcenia w punktach krytycznych			
ε _t	Odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych	0,0000632	m/m
ε _p	Odkształcenia pionowe na powierzchni podłoża gruntowego	0,0001364	m/m
Trwałość zmęczeniowa nawierzchni podatnej			
N _f	Kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych	18,447	mIn osi 100 kN/pas/T
N _s	Kryterium deformacji strukturalnych podłoża	287,914	mIn osi 100 kN/pas/T

Tabela 9. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni KR2 w przypadku wartości z modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej

Odształcenia w punktach krytycznych			
ϵ_t	Odształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych	0,0000648	m/m
ϵ_p	Odształcenia pionowe na powierzchni podłoża gruntowego	0,0001422	m/m
Trwałość zmęczeniowa nawierzchni podatnej			
N_f	Kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych	16,766	mln osi 100 kN/pas/T
N_s	Kryterium deformacji strukturalnych podłoża	238,771	mln osi 100 kN/pas/T

Tabela 10. Podsumowanie obliczeń trwałości zmęczeniowej w przypadku poszczególnych konstrukcji nawierzchni oraz modeli obliczeniowych

Model	Trwałość zmęczeniowa			
	Kryterium spękań MMA [mln osi 100 kN/pas/T]		Kryterium deformacji strukturalnej podłoża [mln osi 100 kN/pas/T]	
	KR2	KR5	KR2	KR5
Wielowarstwowa półprzestrzeń sprężysta	1,031	14,068	2,985	238,771
Sprężyste warstwy skończone	1,062	15,479	3,319	287,914
Różnica	3,01%	10,03%	11,19%	20,58%

Tabela 10 przedstawia podsumowanie obliczeń trwałości zmęczeniowej i różnice procentowe wartości dla obu modeli.

Jak wynika z tabeli 10, procentowe różnice w trwałości zmęczeniowej w przypadku analizowanych modeli konstrukcji wynikające z krytycznego kryterium rosną wraz z grubością warstw nawierzchni. Ponieważ w obu konstrukcjach decydującym kryterium jest kryterium spękań warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych, maksymalne różnice trwałości zmęczeniowej konstrukcji sięgają około 10%.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że obydwa zastosowane modele obliczeniowe wykazują zbliżone wartości wynikowe stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń. Różnice w wartościach odkształceń poziomych na spodzie warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych w przypadku analizowanych konstrukcji nawierzchni nie przekraczają 3%, natomiast odkształceń pionowych na powierzchni podłoża gruntowego nie przekraczają 5%. Wartości odkształceń są nieznacznie większe przy modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Oznacza to wyższe wartości wyliczanych trwałości zmęczeniowych w przypadku modelu skończonych warstw sprężystych – wartości tym większe, im grubsze są analizowane konstrukcje. Maksymalne różnice w trwałości zmęczeniowej wyliczanej w obu modelach konstrukcji nawierzchni mieszczą się w granicach 10%.

Stwierdzone różnice w wynikach przeprowadzonych obliczeń, pomimo zastosowania w obu modelach jednorodnych izotropowych warstw sprężystych, równomiernie obciążonych na stropie najwyższej warstwy, są wynikiem odmiennego kształtu definiowanego obciążenia, jak również sposobu ograniczenia modeli. Wyliczone różnice w wynikach odkształceń można uznać za nieistotne do celów praktycznych wymiarowania nawierzchni.

W wyniku przedstawionej weryfikacji modelu obliczeniowego stosowanego w programie MWS Pavement Design można uznać, że stosując ten program uzyskuje się miarodajne wyniki zbliżone do wartości otrzymywanych w obliczeniach wg modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej.

Bibliografia

- [1] „Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych”, praca zbiorowa pod redakcją J. Judyckiego, WKŁ, Warszawa 2014 r.
- [2] „Mechanika nawierzchni drogowych” Nagórski R., PWN, Warszawa 2014 r.
- [3] „Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych” – załącznik do zarządzenia nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z 16.06.2014 r., Warszawa 2014 r.
- [4] „Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, Wymagania Techniczne WT-2 cz. I” – załącznik do zarządzenia nr 54 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 28.11.2014 r., Warszawa 2014 r.
- [5] „Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych, Wymagania Techniczne WT-2 cz. II” – załącznik nr 7 do zarządzenia Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 09.05.2016 r., Warszawa 2016 r.
- [6] „COST 333 Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action” ECSC-EEC-EAEC, Brussels, 1999 r.
- [7] <http://www.shell.com> (04.12.2017 r.)
- [8] <http://www.nascon.pl> (04.12.2017 r.)
- [9] „Zagadnienia statyki sprężystych półprzestrzeni warstwowych”, Jemioła S., Szwed A., Wydział Inżynierii Ładowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013 r.
- [10] „Rozwiązanie zagadnienia równowagi wielowarstwowego podłoża obciążonego pionowo na obszarze prostokątnym z zastosowaniem szeregów trygonometrycznych”, Gryczmański M., Archiwum Geotechniki, nr 2/1969.
- [11] „Zagadnienia współpracy fundamentów z liniowo i nieliniowo odkształcalnym podłożem”, Politechnika Wrocławska, raport serii SPR Nr 774, Wrocław 1996 r.
- [12] „Podręcznik użytkownika programu MWS Pavement Design”, Nascon Sp. z o.o., Tychy 2016 r.