

Teoretyczno-doświadczalne
studium układu element
jezdny – podłoże odkształcalne

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Jarosław Pytka

Teoretyczno-doświadczalne studium układu element jezdny – podłoże odkształcalne



Politechnika Lubelska
Lublin 2011

Opiniodawca:

prof. dr hab. inż. Leon Bogdan Prochowski, Wojskowa Akademia Techniczna

dr hab. inż. Jerzy Adam Warmiński, prof. Politechniki Lubelskiej

Skład i łamanie: ESUS Druk Cyfrowy

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2011

ISBN: 978-83-62596-29-4

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: ESUS Agencja Reklamowo-Wydawnicza Tomasz Przybylak

www.esus.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

Streszczenie	9
Opis oznaczeń i skrótów	11
1. Wprowadzenie	15
1.1 Zagadnienia podstawowe.....	15
1.2 Osiągi elementów jezdnych na podłożu odkształcalnym	17
1.3 Modelowanie podłoża odkształcalnego	22
1.4 Wybrane metody doświadczalne w badaniach układu element jezdny podłoże odkształcalne	25
1.4.1 Metody wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożach odkształcalnych.....	26
1.4.1.1 Czujniki do wyznaczania naporu materiału podłoża odkształcalnego	26
1.4.1.2 Metody wyznaczania odkształceń w podłożach odkształcalnych	28
1.4.2 Metody wyznaczania sił i momentów działających na koło jezdne	29
1.5 Przykłady zastosowania badań układu element jezdny – podłoże odkształcalne.....	30
1.6 Cel i zakres pracy.....	32
2. Metody badań własnych	35
2.1 Metody i urządzenia do wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożach odkształcalnych wywołanych obciążeniem pojazdów	35
2.1.1 Tensometryczny czujnik naporu	35
2.1.2 Wzorcowanie czujników naporu.....	39
2.1.2.1 Wpływ wilgotności materiału gruntowego.....	42
2.1.2.2 Kalibracje z użyciem materiałów wzorcowych	43
2.1.2.3 Przygotowanie i wzorcowanie czujników do badań podłoży śniegowych	44
2.1.3 Wyznaczanie niepewności pomiarów naporu w podłożu	45
2.1.4 Głowica SST	46
2.2 Wyznaczanie odkształceń w podłożach odkształcalnych	48
2.2.1 Metoda optoelektroniczna.....	48
2.3 Instalacja aparatury badawczej	49

2.4	Metody i urządzenia do wyznaczania sił i momentów na kołach pojazdu	51
2.4.1	Sześcioskładnikowy dynamometr do wyznaczania sił i momentów na kole.....	52
2.4.2	Kalibracja dynamometru.....	55
2.4.3	Montaż na pojeździe badawczym i pierwsze próby	55
2.5	Program badań	57
2.5.1	Obiekty badań	57
2.5.2	Pojazd badawczy.....	60
2.5.3	Charakterystyka badanych podłoży	62
2.5.4	Ramowy program badań doświadczalnych	64
2.5.4.1	Wyznaczanie naprężeń i odkształceń.....	64
2.5.4.2	Jednoczesne wyznaczanie naprężeń w podłożu i sił trakcyjnych na pojeździe	64
2.5.4.3	Identyfikacja układu koło – podłoże odkształcalne	64
2.5.4.4	Wyznaczanie naprężeń i sił trakcyjnych na podłożach śniegowych	65
2.5.4.5	Wyznaczanie siły bocznej na kołach kierowanych.....	64

3. Analiza naprężeń i odkształceń w podłożu wywołanych obciążeniem elementów jezdnych

3.1	Analiza naprężeń w podłożu.....	67
3.1.1	Ogólna analiza stanu naprężeń w podłożu wywołanych obciążeniem elementów jezdnych.....	67
3.1.2	Wpływ obciążenia kół na naprężenia w glebie.....	71
3.1.3	Wpływ nacisku jednostkowego	76
3.1.4	Wpływ wielokrotnych przejazdów ciągnika rolniczego na wartości naprężeń w podłożu	78
3.1.5	Wpływ prędkości jazdy na naprężenia w podłożu powodowane obciążeniem pojazdu.....	80
3.1.6	Wpływ rodzaju podłoża na naprężenia pod obciążeniem pojazdu	84
3.1.7	Wpływ trybu pracy koła na naprężenia oktaedryczne	87
3.1.8	Dyskusja.....	89
3.2	Analiza odkształceń powodowanych obciążeniem elementów jezdnych	92
3.2.1	Wpływ obciążenia pojazdu na odkształcenia objętościowe i postaciowe	92
3.2.2	Odształcenia podłoża podczas wielokrotnych przejazdów	95
3.2.3	Odształcenia podłoża pod taśmą gąsienicy.....	97
3.2.4	Zależność naprężenie-odkształcenie dla podłoża piaszczystego	98
3.3	Podsumowanie	100

4. Analiza siły bocznej w układzie koło – podłoże odkształcalne	103
4.1 Wprowadzenie	103
4.2 Metody badawcze	104
4.2.1 Sterowanie	106
4.2.2 Procedury badawcze	108
4.3 Wyniki	111
4.3.1 Dyskusja wyników	122
4.4 Podsumowanie	123
5. Modelowanie współpracy elementów jezdnych z podłożem odkształcalnym	125
5.1 Korelacyjny model naprężeń i sił trakcyjnych	126
5.1.1 Korelacja naprężenia głównego S_I i siły obciążenia pionowego F_v	126
5.1.2 Korelacje naprężeń oktaedrycznych i siły uciągu	128
5.1.2.1 Korelacja wartości średnich naprężeń i siły uciągu	128
5.1.2.2 Korelacja wartości chwilowych naprężeń i siły uciągu	131
5.1.3 Korelacja naprężenia MNS i siły oporu toczenia F_{OP}	133
5.1.4 Dyskusja wyników	135
5.2 Parametryzacja modelu układu pojazd – podłoże odkształcalne	137
5.2.1 Procedury badawcze	138
5.2.2 Wyniki badań	139
5.2.3 Rekonstrukcja modelu	142
5.2.4 Walidacja modelu	143
5.3 Identyfikacja modelu układu koło – podłoże odkształcalne	144
5.3.1 Fizyczne podstawy modelu	145
5.3.2 Wprowadzenie do metody identyfikacji systemów	148
5.3.2.1 Teoretyczne podstawy identyfikacji systemów	149
5.3.2.2 Schemat metody identyfikacji systemów	150
5.3.3 Metody badań własnych	152
5.3.3.1 Wyznaczanie reakcji podłoża na koło jezdne	153
5.3.3.2 Wyznaczanie naprężeń w podłożach odkształcalnych powodowanych obciążeniem koła	153
5.3.4 Odtwarzanie modeli matematycznych	154
5.3.5 Wyniki obliczeń symulacyjnych	155
5.3.5.1 Wpływ rodzaju podłoża	157
5.4 Modelowanie dynamiki poprzecznej układu koło – podłoże odkształcalne	159
5.4.1 Model fizyczny	159
5.4.2 Model matematyczny	160
5.4.3 Przykładowe wyniki	163
5.5 Podsumowanie	165

6. Badania współpracy elementów jezdnych z podłożem śnieżnym	167
6.1 Ogólna charakterystyka podłoży śnieżnych.....	167
6.1.1 Wytrzymałość mechaniczna śniegu	167
6.1.2 Mechaniczne własności śniegu	168
6.1.3 Twardość śniegu.....	168
6.1.4 Przejezdność w warunkach zimowych	168
6.1.5 Cel i zakres badań	169
6.2 Badania naporów w głębokim śniegu powodowanych obciążeniem gąsienicy ratrak	170
6.2.1 Badania	170
6.2.1.1 Instalacja czujników w śniegu	170
6.2.1.2 Opis miejsca i przebiegu badań	171
6.2.2 Wyniki i ich analiza	172
6.2.3 Dyskusja wyników.....	176
6.3 Wyznaczanie stanu naprężeń w śniegu zmrożonym powodowanych obciążeniem samochodu ciężarowego	177
6.3.1 Metody i warunki badań	177
6.3.2 Wyniki.....	179
6.4 Wyznaczanie siły bocznej na kołach kierowanych samochodu osobowo-terenowego na śniegu mokrym	180
6.4.1 Metodyka badań.....	180
6.4.2 Wyniki.....	182
6.5 Podsumowanie	184
7. Podsumowanie. Dyskusja wyników i wnioski końcowe	187
Literatura.....	191

STRESZCZENIE

Jednym z zagadnień terramechaniki jest opis układu element jezdny – podłoże odkształcalne, niezbędny do określania osiągow trakcyjnych kół lub gąsienic pojazdów poruszających się w warunkach terenowych. W większości modeli stosowanych w praktyce badawczej lub inżynierskiej, wielkościami wejściowymi do wyznaczania reakcji nawierzchni są naciski jednostkowe, powodowane obciążeniem elementów jezdnych. Takie podejście nie uwzględnia wielokierunkowych oddziaływań przestrzennych w ośrodku podłoża odkształcalnego. Głównym celem niniejszej pracy było udoskonalenie opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne z uwzględnieniem analizy naprężeń i odkształceń w podłożu, powodowanych obciążeniem pojazdów.

Ponieważ przyjęta w pracy strategia opierała się głównie na wykorzystaniu wyników badań doświadczalnych, a odpowiednie metody i urządzenia nie były dostępne, podjęto się opracowania własnych rozwiązań metodycznych. Opracowano tensometryczny czujnik naporu do badań materiałów rozdrobionych i trójfazowych oraz optoelektroniczną metodę wyznaczania odkształceń w podłożu, powodowanych obciążeniem pojazdów. Metody doskonalono w zakresie dokładności i powtarzalności wyników a efektem tych prac było m.in. opracowanie sposobu i urządzenia do kalibracji czujników naporu z uwzględnieniem rodzaju i stanu materiału badanego. Utylitarnym efektem opracowań metodycznych było wdrożenie metody wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożu w formie procedury badawczej w certyfikowanym laboratorium badawczym Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku.

Na podstawie analizy wyników pomiarów naprężeń i odkształceń wywołanych obciążeniem pojazdów stwierdzono, że zastosowana metoda pomiarowo-badawcza jest wystarczająco dokładna i umożliwia badanie wpływu obciążenia koła, prędkości jazdy, trybu pracy koła (toczenie swobodne, napędzanie), wielokrotnych przejazdów w jednym śladzie na wartości i kształt przebiegów naprężeń oraz na wielkość odkształceń podłoża. Stwierdzono przydatność metody do opisu przedmiotowego układu i podjęto próbę konstruowania własnych modeli układu element jezdny – podłoże odkształcalne. Opracowane modele bazowały na analizowanych wynikach badań doświadczalnych. Do najprostszych modeli należały korelacje naprężeń oktaedrycznych w podłożu oraz sił trakcyjnych, zmierzonych na pojeździe. Dalszym rozwinięciem był model oparty na zależności Boussinesq'a, który parametryzowano z wykorzystaniem naprężeń wyznaczonych w podłożu.

Stwierdzono dobrą lub dostateczną zdolność predykcyjną otrzymanego modelu.

Kolejnym krokiem było konstruowanie modeli układu koło – podłoże odkształcalne z wykorzystaniem wyznaczonych doświadczalnie przebiegów sił działających na pojedyncze koło jezdne zamiast sił globalnych na pojeździe, jak w poprzednich modelach. W porównaniu do modeli korelacyjnych, stwierdzono wyraźną poprawę w zakresie własności predykcyjnych i dopasowania wyników symulacji do rezultatów pomiarów. Modele otrzymywano metodą identyfikacji systemów, korzystając z oprogramowania MATLAB SI Toolbox™.

Powyższe modele posiadały charakter pół-doświadczalny a ich konstrukcja opierała się na odtwarzaniu zależności matematycznych na podstawie analizy wielkości wejściowych i wyjściowych dla badanego układu, przy czym były to dane uzyskane w pomiarach poligonowych. Nieco inną konstrukcję posiadał model siły bocznej, działającej od podłoża odkształcalnego na koło kierowane samochodu. Znajomość i możliwość przewidywania charakterystyk siły bocznej ma podstawowe znaczenie w analizie stabilności ruchu pojazdu. Przy opracowaniu modelu przeprowadzono analizę zjawisk zachodzących w układzie koło kierowane – podłoże odkształcalne a przyjęty model fizyczny opisano równaniami różniczkowymi. Otrzymano nieliniowy model uwzględniający efekty dynamiczne w wilgotnych podłożach gruntowych poprzez wprowadzenie tzw. lepkości naprężeniowej Eyringa-Pukosa. Rozwiązanie przeprowadzono z użyciem pakietu MAPLE™. Na jakość otrzymywanych wyników wpływał sposób parametryzacji modelu, przy czym nie wszystkie parametry udało się przyjąć na podstawie wyników badań własnych.

Podsumowując część pracy dotyczącą modelowania układu koło – podłoże odkształcalne stwierdzono, iż możliwe jest otrzymywanie modeli w oparciu o dwie strategie: (1) na podstawie korelowania wyników badań doświadczalnych, bez wnikania w istotę zjawisk zachodzących w obszarze wzajemnych oddziaływań koło – podłoże oraz (2) na podstawie przyjętego modelu fizycznego. Przewaga jednej czy drugiej strategii pozostaje sprawą dyskusyjną.

Ostatni rozdział monografii opisuje przykład praktycznego zastosowania opracowanych metod w odniesieniu do pojazdów i maszyn poruszających się po podłożach śnieżnych.

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem zawartym w rozprawie było opracowanie własnych, nowych metod badawczych oraz ich aplikacja do opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne a także uzyskanie wyników możliwych do wykorzystania w praktyce inżynierskiej i przyszłych pracach badawczych.

OPIS OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- A – powierzchnia kontaktu w modelu siły jazdy, m^2
 a – współczynnik dla rozkładu normalnego przy założonym poziomie ufności pomiaru naporu
 $a_1...a_n$ – współczynniki funkcji opisujących sygnały wyjściowe
 B – powierzchnia kontaktu w modelu siły oporu toczenia, m^2
 b – szerokość elementu jezdnego, m
 $b_1...b_m$ – współczynniki funkcji opisujących sygnały wejściowe
 C – spójność gruntu, kN/m^2
 E – moduł Younga materiału membrany czujnika naporu, N/m^2
 E_1, E_2 – moduły sprężystości gleby w modelu trójelementowym, N/m^2
 $e(t)$ – odkształcenie podłoża w funkcji czasu
 e_0 – sygnał wyjściowy czujnika naporu, mV/V
 $F(t)$ – naprężenie w podłożu w funkcji czasu
 F_J – siła jazdy, N
 F_{OP} – siła oporu toczenia na podłożach odkształcalnych, N
 F_R – siła reakcji pionowej nawierzchni, N
 F_U – siła uciągu, N
 F_V, F_{IP}, F_L – składowe obciążenia koła jezdnego, działające od pojazdu N
 F_Z, F_X, F_Y – reakcje podłoża działające na koło, N
 f – odkształcenie opony, m
 f_t – współczynnik oporu toczenia,
 f_{Fy} – współczynnik siły bocznej,
 G – ciężar, N
 $G(q)$ – transmitancja
 H – parametr korelacji dla składowych naprężeń ścinających
 I – parametr korelacji dla składowych naprężeń ścinających
 K – współczynnik odkształcalności gruntu
 k_c, k_ϕ – parametry stanu gruntu, $kN/m^{n+1,2}$
 L – długość elementu jezdnego (taśmy gąsienicy, narty), m
 l – długość cięciwy łuku strefy kontaktu koła (opony) z odkształconą nawierzchnią, m
 M_Z, M_X, M_Y – momenty na kole jezdnym, Nm
 MNS, σ_{oct} – średnie naprężenie normalne na płaszczyźnie oktaedrycznej, kPa
 m – odległość między podparciem ramienia sondy odkształcenia gruntu i głowicy SST, m

N – liczba dokonanych pomiarów sygnałów wejścia i wyjścia
 n – bezwymiarowy wykładnik stanu gruntu
 $OCTSS, \tau_{oct}$ – naprężenie ścinające na powierzchni oktaedrycznej, kPa
 P – obciążenie membrany czynnej czujnika naporu, N
 p – naprężenie normalne (napór), kPa
 Q – parametr korelacji dla składowych naprężeń normalnych
 R_0 – promień czynnej membrany czujnika naporu, m
 r – odległość czujnika naporu od punktu przyłożenia obciążenia, m
 r_d – promień dynamiczny opony, m
 $SX, SY, SZ, SN1, SN2, SN3$ – napory mierzone głowicą SST, kPa
 s – poślizg elementu jezdnego, %
 T – parametr (2) korelacji dla składowych naprężeń normalnych
 t – grubość membrany czujnika naporu, m
 t_{Fy} – czas narastania siły bocznej na kole jezdnym, s
 U – niepewność rozszerzona pomiaru naporu
 $U_{A'}, U_B$ – składniki niepewności pomiaru naporu, odpowiednio I-go i II-go rzędu
 U_i – niepewność złożona pomiaru naporu
 $u(t)$ – sygnał wejściowy
 V_N – funkcja kryterialna
 ν – lepkość gleby, Ns/m²
 ν_1, ν_2 – pionowe przemieszczenia sondy zagłębienia i głowicy SST, m
 x – przesunięcie reakcji normalnej podłoża
 Y_c – maksymalne ugięcie membrany czujnika naporu w punkcie środkowym, m
 $y(t)$ – sygnał wyjściowy
 Z – zbiór doświadczalnie wyznaczonych wartości sygnałów wejścia i wyjścia
 z – głębokość koleiny, m

 α – kąt bocznego znoszenia pojazdu
 β – kąt obrotu koła jezdnego
 δ – kąt skrętu kół kierowanych
 ε – współczynnik przenikalności dielektrycznej śniegu
 ε_y – odkształcenie gruntu w kierunku pionowym, m/m
 $\varepsilon_T, \varepsilon_R$ – odkształcenia membrany czujnika, odpowiednio obwodowe i promieniowe, m/m
 Θ – wektor współczynników
 μ – jednostkowa obwodowa reakcja styczna podłoża na kole
 ψ – kąt określający położenie punktu wyznaczania naprężeń w podłożu względem punktu przyłożenia obciążenia
 φ – kąt tarcia wewnętrznego
 $\varphi(t)$ – wektor sygnałów wejściowych

ν – współczynnik Poissona materiału membrany czujnika naporu

$\bar{g}$, g_i – odpowiednio wartość średnia i wartość i-tej próbki zmierzonego naporu dla i powtórzeń, kPa

σ , σ_x , σ_y , σ_z – naprężenia normalne, kPa

τ , τ_{xy} , τ_{zx} , τ_{yz} – naprężenie styczne, kPa

ν – współczynnik koncentracji naprężeń

APC – Armoured Personnel Carrier

ARX – AutoRegressive model with eXtrainpot

HMMWV – High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle

MMC – Micro Memory Card

MNS – Mean Normal Stress

MBT – Main Battle Tank

NLHW – Non-Linear Hammerstein-Wiener model

NLARX – Non-Linear AutoRegressive model with eXtrainpot

OCTSS – Octahedral Shear Stress

PIDZ – Process Model with Delay and Zero

SST – Stress State Transducer

TCP – Tactical Personnel Carrier

TDR – Time Domain Reflectometry

WKN – współczynnik koncentracji naporu

1. WPROWADZENIE

1.1 Zagadnienia podstawowe

Mechanika układu element jezdny – podłoże odkształcalne jest zagadnieniem dynamicznym i przestrzennym. Ze względu na właściwości typowych podłoży odkształcalnych (grunty, gleby, śnieg) oraz biorąc pod uwagę inną, niż na twardym podłożu odkształcalność pneumatycznych kół jezdnych, zagadnienie wymaga odrębnego rozwiązania. Metody stosowane w przypadku nawierzchni nieodkształcalnej są nieodpowiednie. Szczególnie odkształcalność podłoża (objętościowa i postaciowa) ma wpływ na własności jezdne i osiągi pojazdu, gdyż powoduje powstawanie dodatkowego składnika oporu toczenia. Ponadto, istotna jest zmienność i nieprzewidywalność przyczepności w układzie element jezdnych – podłoże odkształcalne, co znacząco pomniejsza wskaźniki dynamiczne pojazdu. Ujęcie wszystkich czynników opisujących warunki współpracy elementów jezdnych z podłożem odkształcalnym nie jest możliwe przy użyciu jednolitego współczynnika przyczepności, stosowanego w modelach dynamiki układu koło – podłoże utwardzone.

Problemy związane z opisem układu element jezdny – podłoże odkształcalne istniały już dużo wcześniej przed wynalezieniem pojazdów mechanicznych, gdyż koło jako element jezdny istnieje od tysięcy lat. Kłopoty z nieprzewidywalną i pogorszoną trakcją na drogach gruntowych były tym bardziej odczuwalne, że dawniej po prostu nie było sieci dróg utwardzonych. Grunty stanowiące podłoża trakcyjne, są w istocie mieszaniną cząstek o zróżnicowanych wymiarach i kształtach, które mogą być między sobą połączone siłami spójności, wówczas tworzą strukturę. Powstawanie siły napędowej jako reakcji na działanie momentu obrotowego przyłożonego do koła jezdnego wiąże się ze zniszczeniem struktury podłoża przez ścinanie. Podstawy teoretyczne dla rozwiązania tego problemu stworzył Coulomb w roku ok. 1776, kiedy to zaproponował tzw. hipotezę o dwu stałych:

$$\tau = C + p \operatorname{tg}(\varphi) \quad (1.1)$$

gdzie: τ – naprężenie styczne, C – spójność, p – naprężenie normalne, φ – kąt tarcia wewnętrznego.

Na podstawie zależności (1.1) możliwe było wyznaczenie wartości naprężeń stycznych na powierzchni styku elementu jezdnego z podłożem, na której panuje naprężenie normalne p , zaś materiał podłoża charakteryzuje się spójnością C i kątem tarcia wewnętrznego φ . Mimo, iż intencją Coulomba nie było rozwiązywanie zagadnień trakcji pojazdów na nie przygotowanych drogach gruntowych, to jednak tzw. hipoteza o dwu stałych okazała się wielce użyteczna w rozwiązywaniu problemów terramechanicznych. Prostota zależności (1.1),

a także łatwość wyznaczania parametrów podłoża sprawiły, że obecnie wiele modeli współpracy elementów jezdnych z podłożem opiera się na tym równaniu. Należy jednak znać oczywiste ograniczenia tej metody, m. in. hipoteza Coulomba nie daje żadnych informacji na temat odkształcenia materiału podłoża, co, biorąc pod uwagę wysoką odkształcalność podłoży gruntowych, może być źródłem poważnych błędów.

W latach 60 – tych XX wieku rozwinęła się dyscyplina terramechaniki, głównie za sprawą polskiego badacza G.M. Bekkera. Prowadził on badania z zakresu współpracy elementów jezdnych z różnymi podłożami odkształcalnymi. Pojęcie element jezdny odnosi się do części, podzespołów lub mechanizmów pojazdu lub maszyny, stykających się z podłożem i umożliwiających ruch pojazdu, maszyny względem podłoża. Owocem badań Bekkera był pół-doświadczalny model, w którym podłoże opisane jest przy użyciu współczynników k_c , k_ϕ , charakteryzujących odkształcalność oraz tzw. bezwymiarowego wykładnika stanu gruntu n :

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (1.2)$$

gdzie: b – szerokość elementu jezdnego, z – głębokość koleiny.

Model ten, wraz z licznymi modyfikacjami znalazł szerokie zastosowanie w wielu przedsięwzięciach naukowych, jak również w praktyce, na przykład w konstruowaniu elementów i układów jezdnych pojazdów. W połączeniu z modelem Coulomba, wzór Bekkera definiuje siły trakcyjne, czyli siłę oporu toczenia F_{op} i siłę jazdy F_j , szczególnie dla gąsienicowych układów jezdnych na podłożach piaszczystych.

$$F_j = b \int \tau dx \quad (1.3)$$

$$F_{op} = b \int \sigma dz \quad (1.4)$$

gdzie: τ – naprężenia styczne, σ – naprężenia normalne

W przypadku kołowych układów jezdnych, stosując wzór Bekkera otrzymuje się mniej dokładne wyniki, ze względu na nierównomierny rozkład nacisków jednostkowych na powierzchni kontaktu. Dodatkowo, podłoża lessowe i ilaste charakteryzują się obecnością piku na krzywej ścinania, co powoduje otrzymywanie nieprecyzyjnych wartości siły jazdy.

Przytoczone tu niedogodności prostych metod obliczeniowych bazujących na hipotezie Coulomba oraz modelu Bekkera skłoniły badaczy do poszukiwania rozwiązań o szerszych możliwościach w zakresie różnych rodzajów podłoży, jak i rodzajów i konstrukcji elementów jezdnych. Szczególnie podłoża o wysokiej odkształcalności, takie jak luźne gleby czy świeży śnieg oraz pneumatyczne koła ogumione wymagają nowych metod badawczych.

Jednym z podstawowych problemów badawczych jest opis mechaniki procesu deformacji podłoża trakcyjnego, wywołanej obciążeniem elementów jezdnych. Znajomość samego rozkładu nacisków na powierzchni kontaktu bywa niewystarczająca, gdyż nie wiadomo, w jaki sposób obciążenia są rozprzestrzeniane w ośrodku. Ponieważ tzw. równania konstytutywne, czyli zależności między naprężeniami i odkształceniami dla materiałów typu grunty, gleby zazwyczaj nie są znane, trafnym wyborem mogą być badania doświadczalne na rzecz opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne w formie modeli empirycznych.

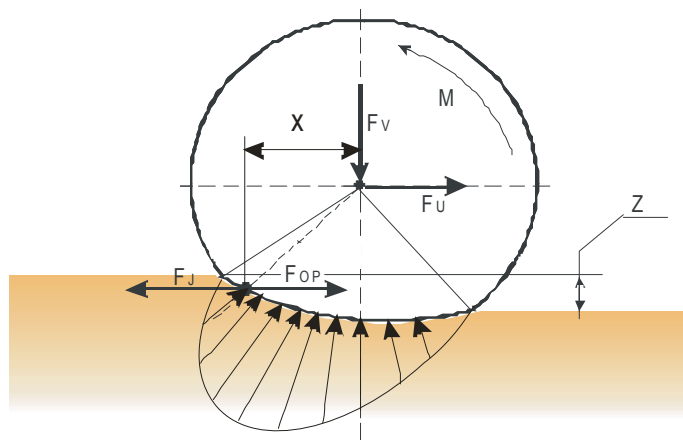
1.2 Osiągi elementów jezdnych na podłożu odkształcalnym

Zasadnicza różnica pomiędzy podłożem odkształcalnym a jezdnią utwardzoną uwidacznia się w mechanizmie generowania obwodowej reakcji stycznej. Na nieodkształcalnej nawierzchni drogowej reakcja styczna jest w przybliżeniu tożsama z siłą tarcia między oponą a nawierzchnią, natomiast w przypadku gruntów czy innych podłoży odkształcalnych tarcie powierzchniowe stanowi pewną część oddziaływania, w wyniku którego powstaje obwodowa reakcja styczna. Udowodnił to Foda (1991), wprowadzając model współpracy koła z nawierzchnią odkształcalną, który zakładał podział obszaru kontaktu na strefę poślizgu i strefę pełnego kontaktu. Model bazujący na tym założeniu wykazywał dobrą zgodność jedynie dla warunków statycznych. Ścinanie podłoża stanowi podstawowy mechanizm generowania reakcji umożliwiającej ruch pojazdu na podłożu odkształcalnym. Moment napędowy przyłożony do koła powoduje odkształcenia opony i podłoża, a bieżnik wchodzi w „zazębienie” z materiałem podłoża i powoduje jego ścinanie. Występujące wówczas odkształcenia powodują poślizg elementów jezdnych. Wartość obwodowej reakcji stycznej jest zależna od rozkładu nacisku i naprężeń stycznych na powierzchni kontaktu. Opór ścinania materiału podłoża przez elementy bieżnika lub ostrogi gąsienicy jest identyfikowany z siłą jazdy. Siła jazdy F_J wraz z siłą oporu toczenia F_{Op} zwane są siłami trakcyjnymi (Jakliński, 1999, Wulfshon, 1992) i powiązane są zależnością:

$$F_U = F_J - F_{Op} \quad (1.5)$$

gdzie F_U jest siłą uciągu. Ponadto Wulfshon (1992) do sił trakcyjnych zaliczył siłę obciążenia pionowego F_v .

Graficzna reprezentacja sił trakcyjnych została przedstawiona na rysunku 1.1. Jak widać, siły F_J i F_{Op} generowane są w obszarze styku koła z podłożem. Nadmieniamy, że na rysunku tym celowo nie zaznaczono reakcji pionowej (przedstawiono tylko siły trakcyjne).



Rys. 1.1. Siły trakcyjne w układzie koło ogumione – podłoże odkształcalne

Wątpliwości może rodzić interpretacja siły oporu toczenia. Na gruncie klasycznej mechaniki koła, opór toczenia interpretowano jako przesunięcie punktu przyłożenia reakcji pionowej podłoża (x na rysunku 1.1), co w efekcie powoduje moment oporu, równoważony momentem napędowym. Stosunek x/r , gdzie r jest promieniem statycznym koła (Mitschke, Wallentowitz, 2005), definiuje współczynnik oporu toczenia, f_t . Zomotor (1991) zdefiniował współczynnik oporu toczenia f_t z użyciem promienia dynamicznego, r_d . W przypadku podłoża odkształcalnego głównym składnikiem oporu toczenia jest odkształcenie podłoża. W ten sposób interpretowano opór toczenia kół zaprzęgów konnych (Morin 1840) i identyfikowano tę wielkość z siłą, co jest niezgodne z interpretacją mechaniczną. Heyde (1957) identyfikował opór toczenia na podłożu odkształcalnym jako moment obrotowy, który jako pierwszy jest równoważony przez moment napędowy, a pozostała nadwyżka umożliwia ruch postępowy. Ponadto, według Heyde'go zarówno opór toczenia jak i siła obwodowa były siłami pozornymi, jednak ich wprowadzenie znacznie upraszcza analizę zagadnienia. Interpretacja Heyde'go nie była wystarczająca, głównie przez to, że dotyczyła układu bieżnego ciągnika z tylnym kołem napędowym. Swoją interpretację zaproponował Komandi (1999), rozpatrując siły na pojedynczym kole. Wyszczególnił różnicę pomiędzy toczeniem koła, które jest ruchem płaskim, a obrotem. Zauważył, że obracanie się koła wokół osi nie było równoważne z ruchem postępowym i obrotowym równocześnie. Potrzebna była dodatkowa siła, by nastąpił ruch postępowy. W przypadku koła toczącego (napędzanego) dodatkowa siła była przyłożona w pobliżu osi koła. Dla koła napędowego, punkt przyłożenia siły znajdował się na powierzchni kontaktu z podłożem. W takim

rozumieniu dodatkowa siła, powodująca ruch postępowy była siłą rzeczywistą a jej zwrot był zgodny z kierunkiem ruchu koła.

Metody wyznaczania siły oporu toczenia na podłożu nieutwardzonym zakładały, że praca siły była tożsama z energią potrzebną do odkształcenia podłoża (Jakliński, 1999).

Według Wulfsohna (1992), siły trakcyjne określono w funkcji naprężenia stycznego i normalnego:

$$F_U = \int [\sigma \cos(\psi) + \tau \sin(\psi)] d\alpha \quad (1.6)$$

$$F_V = \int [\tau \cos(\psi) + \sigma \sin(\psi)] d\alpha \quad (1.7)$$

Główną trudnością przy wyznaczaniu sił trakcyjnych z powyższych wzorów było wyznaczenie rozkładu naprężeń na powierzchni kontaktu element jezdny – podłoże. Wspomniany we wstępie model Bekkera zakładał równomierny rozkład naprężeń. Sołtyński (1976) wprowadził równanie na siłę jazdy z uwzględnieniem modelu gruntu zaproponowanego przez Bekkera:

$$F_J = 2bl(C = p \operatorname{tg}(\varphi) \{1 - \frac{K}{sl} [1 - e^{\frac{-sl}{K}}]\}) \quad (1.8)$$

Równanie Sołtyńskiego wykazywało dobrą zgodność w wynikach z pomiarami dla pojazdów gąsienicowych na gruntach, dla których krzywa ścinania miał charakter asymptotyczny, bez tzw. piku. Wynikało z tego ograniczenie metody do podłoży piaszczystych. Ponadto, założenie o równomiernym rozkładzie nacisków nie gwarantowało uzyskania wiarygodnych wyników w przypadku kołowych układów bieżnych.

Innym zagadnieniem było wyznaczenie granic całkowania, czyli określenie powierzchni kontaktu elementu jezdny z podłożem. Najprostsze modele zakładały się płaską lub rozwijalną powierzchnię kontaktu, jednak w celu uzyskania wysokiej precyzji wyników, uwzględniano odkształcenia powierzchni gruntu w trzech wymiarach. Wulfsohn (1992) wyznaczył siły trakcyjne z uwzględnieniem trójwymiarowego kształtu powierzchni kontaktu element jezdny – podłoże. Rozkład naprężeń został wyznaczony z uwzględnieniem następujących założeń upraszczających:

- odkształcenia objętościowe gruntu są wynikiem działania naprężeń normalnych;
- zależność między naprężeniem normalnym a odkształceniem objętościowym opisano funkcją logarytmiczną;
- odkształcenie objętościowe gruntu pod kołem opisano funkcją trzech zmiennych i ich pochodnych cząstkowych.

Uzyskane wyniki okazały się dokładniejsze niż dla dwuwymiarowej powierzchni kontaktu.

Z punktu widzenia modelowania dynamiki ruchu pojazdu istotnym zagadnieniem było modelowanie opony z uwzględnieniem odkształcalności promieniowej, osiowej i bocznej. Optymalnym rozwiązaniem okazało się zastosowanie metody elementów skończonych. W podrozdziale 1.2 przytoczono modele Ferversa (1999) oraz Shoop (2001), w których odkształcalna opona współpracowała z odkształcalnym gruntem. Wyniki prezentowane w cytowanych pracach były obiecujące, choć Shoop stwierdziła, że „... modelowanie strukturalne opony jest zadaniem z pogranicza sztuki i nauki, ze względu na liczbę istotnych czynników oraz niestabilność i dlatego metody empiryczne i półempiryczne są w tym zakresie bardziej racjonalne”.

Analityczne modele opisujące siły działające od podłoża na koło stanowiły aproksymację wyników doświadczalnych, uzyskanych na stanowiskach bębnowych, rzadziej na pojazdach rzeczywistych. Na uwagę zasługuje seria modeli Pacejki (2004) (MAGIC FORMULA, Delft-Tyre). Często stosowany był również model HSRI-UMTRI. Algorytmy modeli zawierały zależności matematyczne bez odniesienia do zjawisk fizycznych zachodzących w oponie. Współczynniki użyte do parametryzacji nie posiadały znaczenia fizycznego.

Przykładem modelu tworzonego według innej filozofii, z uwzględnieniem analizy zjawisk fizycznych w oponie i jak najdokładniejszego ich opisu w korelacji z wynikowymi siłami na kole był model FTire (Gipser, 2005). Oponę zamodelowano jako pierścień składający się ze skończonej liczby mas dyskretnych. Pierścień był rozciągliwy i elastyczny w trzech kierunkach głównych. Połączenia między elementami pierścienia zrealizowano jako elementy sprężyste z tłumieniem, przy czym liczba stopni swobody umożliwiała modelowanie odkształceń w trzech kierunkach, także lokalnych. Kinematyka modelu umożliwiała przemieszczenia mas skończonych w płaszczyźnie pierścienia a także poza nią. Model był kompatybilny z typowymi systemami *MBS*. Obszar zastosowania modelu FTire obejmował analizy dynamiki ruchu pojazdu, w tym również badań stabilności ruchu oraz także zaawansowane badania symulacyjne na rzecz komfortu jazdy.

Uwzględnienie zjawisk dynamicznych w stanach nieustalonych miało duże znaczenie w przypadku modelowania dynamiki i stabilności ruchu, szczególnie w przypadku opon terenowych, zwykle większych i o dużej bezwładności. Badania w tym zakresie prowadzone były w trzech ośrodkach: na Uniwersytecie Hohenheim (Niemcy), Harper Adams oraz Cranfield (Wielka Brytania). Przykładowy model dynamiki koła ogumionego przedstawił Ferhabd begovic (2003). Model opracowano w środowisku MATLAB/Simulink. Uwzględniono szerszy zakres ciśnień w oponie (0.5 – 2.0 Bar) a także wyższe wartości obciążenia pionowego, co w efekcie prowadziło do znacznych odkształceń opony. *HTM (Hohenheim Tyre Model)*

oparto na nieliniowej modyfikacji modelu Voigta-Kelvina. Charakterystyczną cechą modelu HTM było wprowadzenie prędkości jazdy jako wielkości wejściowych, zamiast poślizgu. Siły i momenty działające na koło wyznaczano w trzech kierunkach na podstawie równań uwzględniających nieliniową charakterystykę koła ogumionego w postaci:

$$F = c_1 f^{c_2} + d_1 \frac{1}{v^{d_2}} \dot{f} \quad (1.9)$$

gdzie F – siła działająca na koło, f – odkształcenie opony, c_1 , c_2 – współczynniki sztywności, d_1 , d_2 – współczynniki tłumienia opony.

Współczynniki sztywności i tłumienia wyznaczono w próbie dynamicznego testu zrzutu na stanowisku opisanym w pracy Ferhadbegovica (2003). Współczynniki te posiadają sens fizyczny, i, jak podkreśla autor cytowanej publikacji, w razie braku możliwości ich wyznaczenia, szacowanie ich wartości było łatwiejsze w porównaniu do abstrakcyjnych współczynników w modelach matematycznych.

W przypadku gdy koło ogumione współpracuje z nawierzchnią o znacznych nierównościach, stosowano opis dynamiki pionowej opony wywodzący się z modelu Voigta-Kelvina. Natomiast w przypadku dynamiki poziomej, Crolla (1987) zastosował modyfikację polegającą na zastąpieniu układów równoległych elementów sprężystych i tłumiących układami szeregowymi (model Maxwella), w obu kierunkach: wzdłużnym i poprzecznym. Dalsze modyfikacje polegały na zastępowaniu tłumików wiskotycznych elementami z histerezą dla lepszego odwzorowania właściwości karkasu opony. Wpływało to na zmiany częstotliwości własnej opony dla momentu stabilizującego.

Na bazie modelu Bekkera powstało wiele modeli i algorytmów obliczeniowych do wyznaczania sił trakcyjnych i ich charakterystyk, szczególnie siły uciągu. W poszczególnych rozwiązaniach stosowano różne metody wyznaczania stałych materiałowych, które były konieczne do parametryzacji modeli. Muro (1993) przeprowadził test ściskania próbek gruntu, na bazie którego parametryzował model współpracy koła sztywnego z podłożem odkształcalnym. Upadhyaya (1997) wyznaczył charakterystyki $F_v(s)$ przy użyciu wózka dynamometrycznego. Na podstawie wyników pomiarów polowych wyznaczył empiryczne wartości parametrów równania na siłę uciągu, które następnie weryfikowano wynikami eksperymentalnymi, uzyskując wartości współczynników regresji w granicach 0,8 – 0,91.

Parametryzacja równań określających siły trakcyjne stanowiła problem ze względu na trudności wyznaczania poślizgu koła na podłożu odkształcalnym, wynikające z jednoczesnych odkształceń podłoża i opony. Shibusawa (1996)

zaproponował własny model regresji dla sił trakcyjnych. Upadhyaya (1997) założył, że zerowy poślizg występował przy zerowej sile uciągu. Jednak, jak wskazują wyniki eksperymentalne i aproksymowane krzywe regresji, zerowy poślizg mógł mieć miejsce przy ujemnych wartościach siły uciągu.

1.3 Modelowanie podłoża odkształcalnego

W badaniach współpracy elementów jezdnych z podłożem odkształcalnym kluczowa jest znajomość mechanicznych własności materiału podłoża. Tak zwane równania konstytutywne, czyli zależności między naprężeniami i odkształceniami dla danego materiału stanowią podstawę opisu mechanicznych własności materii (Cottrell, 1970). W przypadku gruntów czy gleb, opis taki umożliwił model Bekkera w połączeniu z równaniem Coulomba. Model ten nie zapewnił wymaganej dokładności wyników, szczególnie w przypadku kołowych układów jezdnych oraz na gruntach o wysokiej spójności (Jakliński, 1999). Korzystniejszym rozwiązaniem okazał się trójelementowy model Maxwella (Pukos, 1991). Był to model, w którym grunt opisano elementami sprężystymi i lepkościowym. Uwzględniono trójpostaciowy charakter ośrodka gruntowego, który posiada trzy podstawowe własności mechaniczne materii, sprężystość, lepkość i plastyczność. Wanjii (1997) zaproponował algorytm obliczeniowy i równania na siły trakcyjne z uwzględnieniem rozkładu naprężeń w gruncie według modelu Maxwella. Stałe materiałowe konieczne do obliczeń, to moduły sprężystości gruntu, które wyznaczono w testach penetracji gruntu obciążanego przy użyciu płytki wzorcowej. Zmiennymi niezależnymi, niezbędnymi do obliczeń były poziome współrzędne punktów wejścia i wyjścia opony w kontakt z gruntem. Model weryfikowano dla gruntu piaszczysto – lessowego, uzyskując dobrą korelację z wynikami doświadczalnymi.

W opisie układu element jezdny – podłoże odkształcalne często stosowano modele wywodzące się z teorii plastyczności (Mundl, 1996, Shop, 2001). Takie podejście wymagało zdefiniowania deformacji plastycznej materiału podłoża, w szczególności:

- własności sprężyste materiału (dla odkształceń odwracalnych);
- matematyczny opis powierzchni granicznej pomiędzy obszarem zachowań sprężystych i plastycznych;
- gradient płynięcia plastycznego dla opisanego deformacji plastycznej ;
- prawo utwardzenia materiału.

Parametry modeli bazujących na teorii plastyczności są definiowane w układzie nacisk – naprężenie dewiatorowe lub nacisk – objętość właściwa, przy czym wykorzystuje się kilka hipotez: Treski, Hubera – Misesa, Mohra – Coulomba, Drucker – Pragera lub Lamego, które określają warunki – zależności pomiędzy

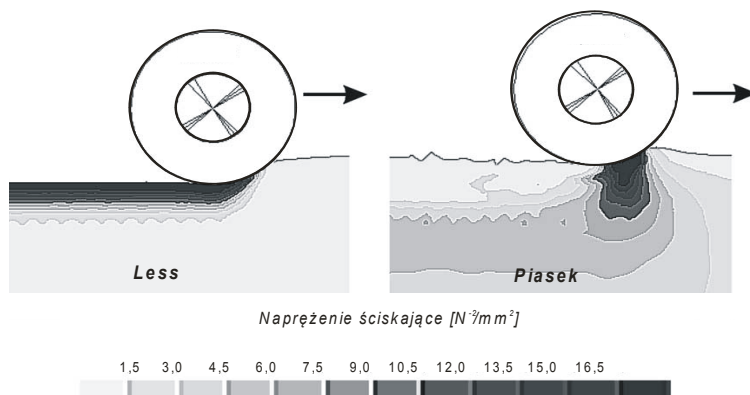
naprężeniami a ich niezmiennikami. W praktyce parametryzacja modeli plastycznych sprowadza się do wyznaczenia spójności gruntu, kąta tarcia wewnętrznego, parametrów linii stanu krytycznego, modułu sprężystości oraz współczynnika Poissona.

Przykładem zastosowania teorii plastyczności były symulacje wzajemnego oddziaływania bieżnika opony samochodowej z warstwą śniegu, przeprowadzone przez Mundla i innych (1996). Badania w tym zakresie prowadzono się dla dwóch przypadków: śniegu głębokiego i płytkiego, tzw. fundamentowanego (ang. *deep/shallow snow*), gdy na rozkład naprężeń nie wpływa efekt podłoża utwardzonego pod warstwą śniegu oraz gdy warstwa ta jest na tyle płytka, że rozkład naprężeń i deformacja śniegu pod kołem następuje w kierunku horyzontalnym jako skutek powierzchni utwardzonej. Przyjęto się, że minimalna grubość warstwy śniegu, przy której wpływ podłoża nie występuje to $2/3$ średnicy koła pojazdu. Badania symulacyjne dla głębokiego śniegu prowadzono w ośrodkach amerykańskich, przede wszystkim w CRREL (Abele, 1990, Shapiro, 1997, Shop, 1999, 2001, 2006).

Aktualną tendencją w opisie profilu terenu, nie będącego drogą utwardzoną, jest poszukiwanie funkcji losowych zapewniających wymagany poziom dokładności odwzorowania przy jednoczesnej prostocie opisu: możliwie niewielka liczba parametrów, krótki czas cyklu obliczeniowego (Brudnak, 2007, Gorsich, 2003, Sandu, 2005 i 2007). Rozwiązania z tego zakresu znalazły zastosowanie w symulatorach jazdy terenowej, wdrażanych w USA. Przykładem może być system VDMS (*Vehicle Dynamics and Mobility Server*), który jest kompletną platformą symulacyjną zawierającą model pojazdu na bazie systemu MBS, model układu koło – podłoże odkształcalne, wspomniany opis profilu terenu zwany tutaj *high-resolution digital terrain*, a także algorytm omijania przeszkód nieprzejezdnych (Brudnak, 2007). Inne przykłady praktycznego zastosowania polegały na testowaniu bezzałogowych pojazdów do jazdy w terenie, w tym również łazików marsjańskich. Między innymi, prowadzono symulacje w celu doboru procedury uwolnienia łazików *Mars Rover* oraz *Mars Discovery*, które utknęły w luźnej glebie marsjańskiej odpowiednio w roku 2005 oraz 2009.

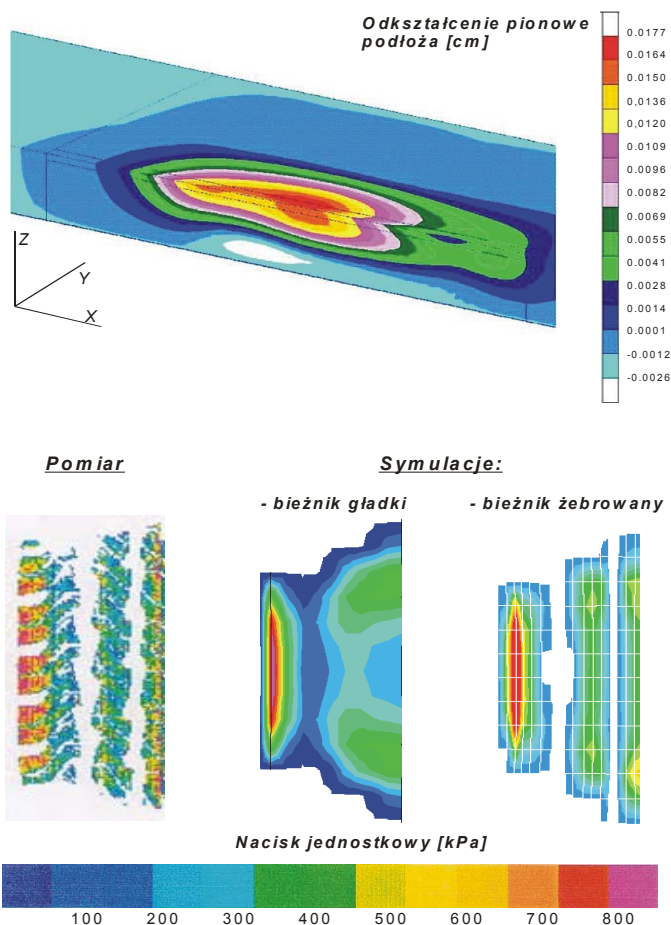
Osiągnięciem ostatnich lat w zakresie badań współpracy elementów jezdnych z podłożami odkształcalnymi jest zastosowanie metody elementów skończonych do wyznaczania rozkładów naprężeń oraz odkształceń w gruncie, ale także odkształceń elementów jezdnych, głównie opon niskociśnieniowych. W ten sposób możliwe jest uwzględnianie wszystkich istotnych czynników i zjawisk wpływających współpracę elementów jezdnych z podłożem odkształcalnym. W wielu pracach badawczych, zastosowano modele bazujące na mechanice stanów krytycznych: Drucker Pragera, CAM Clay oraz ich modyfikacje (Aubel, 2005, Fervers, 1999 i 2004, Mundl, 1996, Shop i inni, 2006). Pierwsze analizy miały charakter dwuwymiarowy, a wraz ze wzrostem

możliwości obliczeniowych komputerów, symulacje wzajemnego oddziaływania w układzie element jezdny – podłoże odkształcalne rozszerzano do 3D. Najistotniejsze osiągnięcia z tego zakresu należy przypisać badaczom z Uniwersytetu Bundeswery w Hamburgu, Niemcy oraz *CRREL (Cold Regions Research Engineering Laboratory)* w USA. Aubel (2005) opracował metodę symulacji współpracy koła ogumionego z nawierzchnią odkształcalną, początkowo w 2D, którą Fervers (2007) rozszerzył do 3D, uzyskując możliwość wyznaczania stanu naprężeń i odkształceń w gruncie a także odkształceń promieniowych i stycznych opony (rys.1.2).



Rys.1.2. Stan naprężeń i odkształceń w gruncie oraz odkształcenia opony w kontakcie z gruntem (Fervers, 2004).

W badaniach symulacyjnych współpracy opony samochodowej z podłożem śnieżnym, Shoop (2001) zastosowała model śniegu w mechanice stanów krytycznych (tzw. model „kruchej pianki”). Model ten reprezentował własności mechaniczne głębokiego, luźnego śniegu. Metoda umożliwiła wyznaczenie rozkładu naprężeń normalnych i odkształceń w śniegu, odkształceń opony oraz wartości oporu toczenia. Wyniki charakteryzowała dobra zgodność z rezultatami eksperymentów (rys.1.3). Ocenia się, że metody obliczeniowe MES są odpowiednie dla materiałów podłoży odkształcalnych, umożliwiając bowiem pełną, trójwymiarową analizę wzajemnego oddziaływania koła lub gąsienicy z ośrodkiem gruntowym lub śniegiem, przy jednoczesnym uwzględnieniu zjawisk zachodzących w ogumieniu (odkształcenia). Możliwe jest również precyzyjne symulowanie efektów różnorodnych czynników, m.in. rzeźby bieżnika, sztywności mieszanki gumowej i innych własności mechanicznych ogumienia. Niezależnie, wciąż odczuwalny jest brak wyników badań doświadczalnych, niezbędnych w celu weryfikacji i walidacji metod obliczeniowych.



Rys. 1.3. Stan odkształceń w śniegu pod obciążeniem koła samochodowego (powyżej) oraz rozkład nacisków na powierzchni bieżnika opony (Shoop, 2001).

1.4 Wybrane metody doświadczalne w badaniach układu element jezdny – podłoże odkształcalne

Metodologia badań w rozpatrywanym zakresie tematycznym obejmuje różnorodne metody i urządzenia. Do podstawowych należą metody badań penetrometrycznych, w wyniku których uzyskuje się tzw. indeks stożka a także metoda bewametryczna. Bewametr jest urządzeniem do wyznaczania parametrów modelu Bekkera (stąd nazwa: **Bekker's value meter**). W literaturze przedmiotu można znaleźć liczne publikacje opisujące metodykę oraz wyniki badań uzyskanych z wykorzystaniem powyższych metod.

W niniejszym podrozdziale przedstawione zostaną metody badań naprężeń i odkształceń w podłożach odkształcalnych a także sił działających w układzie koło – podłoże odkształcalne.

1.4.1 Metody wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożach odkształcalnych

1.4.1.1 Czujniki do wyznaczania naporu materiału podłoża odkształcalnego

Doświadczalne metody wyznaczania naprężeń w materiałach rozdrobnionych (grunty, gleby) polegają na pomiarach naporu. Terminem napór określa się oddziaływanie materiału sypkiego, granularnego, rozdrobnionego na jednostkę powierzchni. Do pomiarów naporu wykorzystuje się następujące rodzaje czujników:

- czujniki membranowe, w których napór materiału powoduje odkształcenie sprężyste membrany, do której przymocowany jest element pomiarowy (tensometr, piezoelement);
- czujniki hydrauliczne i pneumatyczne, w których napór materiału powoduje wzrost ciśnienia płynu pośredniczącego, zamkniętego w szczelnym układzie, przetwornik ciśnienia może być oddalony od punktu pomiaru;
- czujniki z elementem drgającym, w których napór materiału powoduje zmianę częstości drgań własnych elementu.

W praktyce badawczej stosowane są zarówno czujniki dostępne komercyjnie jak i konstrukcji własnej. Zastosowanie gotowych czujników certyfikowanych ułatwia kompletowanie stanowisk badawczych, jednakże wielu badaczy decyduje się na opracowanie własnych czujników, co jest rozwiązaniem tańszym, szczególnie w przypadku konieczności spełnienia specyficznych kryteriów.

Czujniki membranowe

Czujniki membranowe charakteryzują się najwyższą dokładnością pomiarów i są przeznaczone do pomiarów dynamicznych i statycznych, choć w przypadku długotrwałych pomiarów statycznych możliwe są zakłócenia pracy czujników w efekcie dryfu tzw. zera czujnika. Ponadto wadą czujników membranowych z tensometrami jest ich podatność na zmiany temperatury. Należy wówczas stosować dodatkowe elementy kompensujące lub przeprowadzać kalibracje temperaturowe.

W najnowszych rozwiązaniach czujników naporu stosuje się membrany sprężyste i przetworniki tensometryczne lub piezoelektryczne. Membrany mogą być wykonane ze stali, duralu lub tytanu. Moduł sprężystości tych materiałów jest znacznie wyższy od modułu sprężystości materiału podłoża odkształcalnego.

Według Horna (1994), stosunek modułów sprężystości membrany i gleby powinien wynosić 10:1. Względy praktyczne skłaniają do stosowania duralu jako materiału na membrany, ze względu na 3-krotnie niższą wartość modułu sprężystości w porównaniu do stali. Dzięki temu, czujnik z membraną duralową ma lepszą czułość.

Nichols (1987) podał wytyczne konstrukcyjne dla czujników tensometrycznych. Stosunek grubości czujnika do jego średnicy nie powinien przekraczać 0.1, zaś powierzchnia czynna membrany powinna stanowić najwyżej 45% powierzchni całkowitej przetwornika. Zachowanie tych proporcji ma na celu eliminację zakłóceń pomiarów, związanych z koncentracją naprężeń na krawędziach przetwornika.

Znaczący wkład w rozwój metod i czujników pomiaru naporu był wynikiem prac badawczych prowadzonych w *WES (Waterways Experimental Station)*. Zbudowano tam kilka różnych czujników naporu, przy czym były to czujniki hydrauliczne i membranowe. Warty uwagi rozwiązaniem był czujnik oznaczony jako *WES*. Był to czujnik z cieczą pośredniczącą, z tensometrem, jako elementem pomiarowym.

Czujniki hydrauliczne i pneumatyczne

Czujniki hydrauliczne charakteryzują się szerokim zakresem pomiarowym, zależnym od charakterystyki przetwornika. W przypadku czujników membranowych na zakres pomiarowy wpływa również wymagana odporność mechaniczna membrany. Wadą czujników hydraulicznych jest konieczność całkowitego odpowietrzenia układu, co sprawia trudności przy napełnianiu czujników cieczą pośredniczącą. Konieczne jest również zapewnienie szczelności połączeń układu hydraulicznego.

Zastosowanie czujników hydraulicznych opisał Hammel (1994). Cylindryczne czujniki o średnicy 100mm i wysokości 28mm wykonano jako sztywne korpusy, zamknięte od góry gumową membraną. Medium pośredniczącym był w tym przypadku olej, którego ciśnienie mierzono za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. Czujnik napełniano olejem przez elastyczny przewód o długości 500mm. Po umieszczeniu czujnika w podłożu, zwiększano ciśnienie oleju w celu uzyskania optymalnego kontaktu membrany z cząstkami ośrodka. Czujniki instalowano na głębokości 250mm, jeden w linii centralnej, drugi 150, następny 300mm, prostopadle do kierunku ruchu pojazdu.

Czujniki z elementem drgającym cechuje najwyższa odporność mechaniczna i stabilność czasowa. Ze względu na znaczną inercję mechaniczną nie nadają się do pomiarów dynamicznych. Posiadają zazwyczaj charakterystykę nieliniową.

1.4.1.2 Metody wyznaczania odkształceń w podłożach odkształcalnych

Wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń w podłożach odkształcalnych, powodowanych obciążeniem pojazdów wymaga stosowania specjalnych metod i urządzeń pomiarowych. Poniżej przedstawiono opisy kilku wybranych metod i urządzeń.

Fotograficzna metoda wyznaczania odkształceń ośrodka glebowego została opracowana przez Yu Qun (1992). Przy użyciu kamery rejestrowano przemieszczenia punktów pomiarowych w materiale badanym, umieszczonym w przezroczystym boksie, po ścianie którego przesuwiał się penetrometr pół-stożkowy. W ten sposób możliwe było wyznaczanie odkształceń gleby podczas deformacji w płaszczyźnie środkowej przekroju poprzecznego próbki.

Van den Akker (1989) zastosował metodę znacznikową do wyznaczania odkształceń gleby powodowanych obciążeniem kołami ciągnika rolniczego. W metodzie znacznikowej wykorzystano krótkie pręciki z tworzywa sztucznego, pomalowane farbą luminescencyjną. Znaczniki umieszczano w wybranych punktach profilu glebowego. Podczas deformacji gleby, zmiany położenia znaczników rejestrowano kamerą video.

Inną metodę wyznaczania odkształceń gleby pod kołami pojazdów opracował Ochitin (1991). W glebie, na dwóch głębokościach umieszczono płaskie płytki, które miały możliwość przemieszczania się pionowo wraz z odkształcającym się materiałem. Podczas przejazdu rejestrowano przemieszczenia płytek a następnie wyznaczano odkształcenia.

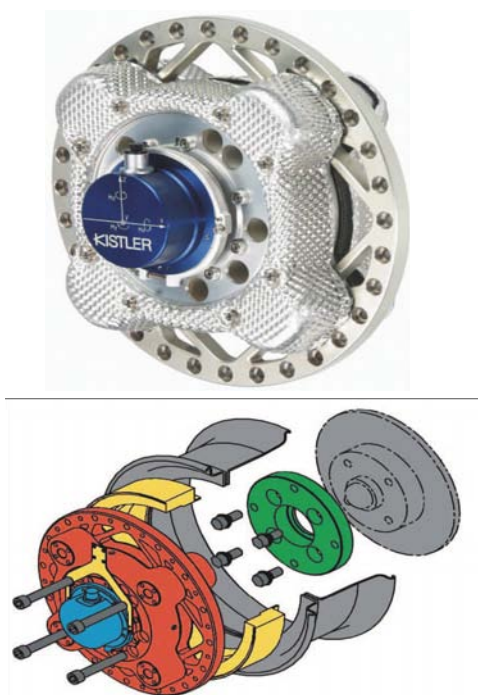
Metoda odwzorowująca opracowana przez Kühnera (1993) polegała na rejestracji ruchu sztywnego ramienia łączącego przetwornik przemieszczenia z próbnikiem umieszczonym w gruncie. Ramię łączące podparto w łożysku, dzięki czemu możliwe były przemieszczenia w dwóch kierunkach: pionowym i poziomym. Przetwornikiem przemieszczenia był układ elektromechaniczny, z systemem rolek i potencjometrów wieloobrotowych.

W rozwiązaniach stosowanych przez Arvidssona (2001) pomiar przemieszczenia w gruncie realizowano przy pomocy czujników ciśnienia, które reagowały na zmiany pionowego położenia głowicy pomiarowej, umieszczonej w punkcie pomiarowym.

Ponieważ do pełnego opisu mechaniki układu element jezdny – podłoże odkształcalne konieczna jest znajomość zarówno naprężeń jak i odkształceń w ośrodku, optymalna metoda badawcza powinna umożliwić pomiary obu wielkości jednocześnie. Rozwiązanie jednoczesnego pomiaru naprężeń i odkształceń w gruncie w wersji zaproponowanej przez Autora, zostanie opisane w rozdziale 2.

1.4.2 Metody wyznaczania sił i momentów działających na koło jezdne

Metody badawcze z wykorzystaniem dynamometrów do wyznaczania sił i momentów działających na koło jezdne samochodu rozwinęły się w latach 70-80'-tych XX wieku, głównie w Europie (Niemcy, Szwajcaria) oraz w Stanach Zjednoczonych. Dynamometry kołowe (*ang. wheel dynamometers*) były budowane najczęściej w formie modyfikowanej obręczy koła, montowanej do piasty (Weber, 1972, Martini, 1983, Loh, 1992, Krupp, 1994). Stosowano także rozwiązania polegające na instalacji czujników w przebudowanej piaście koła (Weiger, 1987). Jako przetworniki stosowano tensometry elektrooporowe (Loh, 1992, Kuchler, 2002) lub przetworniki piezokwarcowe (Evers, 2003). Podstawowe zastosowanie dynamometrów stanowiło wyznaczanie sił i momentów działających na koło od strony pojazdu lub reakcji generowanych w układzie koło – nawierzchnia. Dynamometry kołowe służą do wyznaczania wartości sił i momentów zredukowanych do osi piasty koła, zatem pomiary sił trakcyjnych lub sił występujących w obszarze styku koła z podłożem wymagają uwzględnienia wpływu ogumienia na mierzone wielkości.



Rys.1.4. Przykładowy dynamometr do pomiaru sił i momentów na kole pojazdu. Rozwiązanie firmy KISTLER

Pomimo, iż obecnie dostępne dynamometry wieloelementowe do wyznaczania sił i momentów działających na koło są dojrzałe konstrukcyjnie a oferta rynkowa jest bogata (rys.1.4), nadal istnieje przestrzeń dla prac badawczo-rozwojowych w tym zakresie. Przykładem jest dynamometr przeznaczony do wyznaczania sił i momentów na kole motocykla (Kuchler, 2002). Dynamometr został zaprojektowany i zrealizowany przez firmę BMW do badań własnych. Ze względu na brak odpowiedniego dynamometru (dostępne rozwiązania były za duże i za ciężkie) inżynierowie z BMW zdecydowali się na budowę własnego systemu. Głównym elementem był przetwornik wieloelementowy zbudowany z użyciem tensometrów elektrooporowych. Bezpośrednio do przetwornika montowano elementy pośredniczące, umożliwiające zabudowę na piaście koła oraz montaż opony. Urządzenie miało niewielką masę i nie wpływało na dynamikę obiektu badanego. Dane pomiarowe przesyłano drogą radiową, a odbiornik i rejestrator sygnałów mieszczono się w kufrze motocykla. Dynamometr został użyty w badaniach, których celem było wyznaczanie obciążeń kół oraz ramy motocykla BMW R1200 (rys.1.5), podczas jazdy po nawierzchni drogowej oraz po nierównościach i przeszkodach terenowych.



Rys.1.5. Dynamometr do pomiaru sił i momentów działających na koło motocykla, zrealizowany przez firmę BMW

1.5 Przykłady zastosowania badań układu element jezdny – podłoże odkształcalne

Pierwotne zastosowanie badań w omawianym zakresie polegało głównie na określeniu własności trakcyjnych różnych mechanizmów jezdnych oraz na

optymalizacji osiągnięć pojazdów w terenie. Podstawową korzyścią było uzyskanie danych dla konstruktorów w celu doskonalenia konstrukcji pojazdów i ich zespołów. Najważniejszym beneficjentem końcowym było wojsko, w którym występowała największa liczba obiektów technicznych, przeznaczonych do jazdy terenowej.

Postępująca w latach powojennych mechanizacja prac polowych w rolnictwie spowodowała zagrożenie środowiska w wyniku zagęszczania gleby podczas jazdy ciężkich maszyn i pojazdów. Odkształcenia luźnej, porowatej gleby miały charakter natychmiastowy i nieodwracalny tak, że nawet systematyczne prace orne nie przywracały wyjściowej struktury gleby. Dalszym skutkiem było zachwianie równowagi wodno-powietrznej w glebach, głównie ze względu na zmianę rozkładu wielkości porów, co prowadziło do gorszych plonów i ogólnej degradacji środowiska glebowego. Modelowanie ośrodka glebowego podczas deformacji wymagało uwzględnienia trójfazowego charakteru (fazy: stała, gazowa i cieczą występują w glebie w określonych proporcjach). Zagadnienie to stało się głównym celem badawczym w wielu ośrodkach badawczych (NSDL Auburn, USA, CAU Kiel, Niemcy, CSICO, Canberra, Australia, Wageningen, Holandia, IA PAN, Lublin).

Obecnie najnowszą dziedziną, w której modelowanie układu koło – podłoże odkształcalne nabiera coraz większego znaczenia jest astronautyka a ściślej, eksploracja ciał niebieskich. Aby umożliwić realizację różnych zadań badawczych na powierzchni Księżyca czy planet, potrzebne są odpowiednie środki transportu. Popularne stają się pojazdy typu *rover*, mogące poruszać się w różnorodnych warunkach terenowych. Posiadają one zazwyczaj układ jezdny o 4-8 kołach, przy czym wszystkie koła jezdne są z reguły napędzanymi. Charakter misji wymaga, by były to pojazdy autonomiczne, również w zakresie przejezdności.

Spektrum zastosowań prezentowanych badań rozszerza się, gdy uwzględnimy wzrostową tendencję liczby i powszechności użycia różnego rodzaju pojazdów tzw. rekreacyjnych *UAV* (*Utility Aerial Vehicle*), inaczej quadów a także pojazdów samochodowych kategorii *SUV* (*Sport Utility Vehicle*). Biorąc pod uwagę coraz wyższe osiągi pojazdów oraz masowość ruchu po bezdrożach, omawiane zagadnienia stają się ważne ze względu na bezpieczeństwo kierujących i pasażerów tych pojazdów.

Inną, nie mniej ważną dziedziną, w której wykorzystuje się osiągnięcia terramechaniki jest lotnictwo ogólne. Użytkowanie samolotów lekkich i sportowych jest często związane z operowaniem z lotnisk trawiastych, również prowizorycznych lądowisk. Wpływ układu koło – podłoże na osiągi samolotu przy starcie lub lądowaniu jest istotny. Wysokie wartości współczynnika oporu toczenia znacząco wydłużają start. Dotyczy to również lotnisk z utwardzonym pasem startowym przy zaleganiu pokrywy śnieżnej.

1.6 Cel i zakres pracy

Przedstawione zagadnienia z zakresu współpracy mechanizmów jezdnych z podłożem odkształcalnym stanowią przekrój archiwalnych i aktualnie prowadzonych prac w wiodących ośrodkach badawczych. W zastosowaniach praktycznych najczęściej stosowane są proste metody, bazujące na pomiarach penetrometrycznych czy też bewametrycznych. Główną grupę odbiorców stanowią wojska pancerne i zmechanizowane, gdzie wymagane jest szybkie i w miarę pewne rozpoznanie terenu i jego przejezdności. W przypadku, gdy analizie podlegają również osiągi pojazdu, konieczne są rozwiązania bardziej precyzyjne. Można tu wymienić mechanikę stanów krytycznych oraz metody w MES.

Mimo zastosowania zaawansowanych metod komputerowego modelowania, zagadnienie wydaje się być odległe od satysfakcjonującego rozwiązania, szczególnie w zakresie mechaniki ośrodka podłoża odkształcalnego, poddanego działaniu wszechstronnych obciążeń dynamicznych. Wynika to z niedoskonałości modeli podłoży odkształcalnych, bazujących na hipotezie Coulomba oraz teorii lepkosprężystości. Drugim niedostatkiem są niewielkie zasoby wyników doświadczalnych, jak również brak optymalnych metod pomiarowo-badawczych.

Zasadniczym celem podjętym w ramach niniejszej rozprawy było udoskonalenie naukowego opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne na podstawie dwóch wielkości mechanicznych: naprężeń w podłożu, powodowanych obciążeniem podczas przejazdu koła czy gąsienicy oraz sił generowanych w obszarze styku elementu jezdnego z podłożem. Wielkości użyte do opisu badanego układu dobrano tak, by stanowiły sygnały wejściowe i wyjściowe zgodne z metodą identyfikacji systemów, którą zastosowano do odtwarzania modeli matematycznych analizowanych układów.

Opracowanie własnych metod i urządzeń pomiarowo-badawczych, ich wzorcowanie z uwzględnieniem specyfiki ośrodków badanych a także opracowanie metod i procedur polowych stanowiło cele cząstkowe, odmienne dla poszczególnych zadań, związanych np. z badaniami na poszczególnych podłożach, w warunkach zimowych, itd.

W zakresie pracy mieściły się różne rodzaje podłoży, jednakże badania prowadzono zasadniczo na glebach i gruntach lessowych oraz piaszczystych. Suchy piasek jest materiałem bezkohezyjnym, a o jego wytrzymałości na ścinanie decyduje tarcie wewnętrzne. Inaczej jest w przypadku mokrej, plastycznej gliny (lessu), której własności mechaniczne są wynikiem sił spójności. Występujące w naturze gleby i grunty są mieszaninami lessów, ilów oraz piasku o zróżnicowanym rozkładzie granulometrycznym. Badania prowadzono również na podłożach torfowych, które charakteryzują się bezpostaciowością oraz wysoką czułością na zmiany wilgotności. Odrębnym zagadnieniem było podjęcie badań na podłożach

śnieżnych. Pomiary naporów i wyznaczanie naprężeń w śniegu stanowią oryginalny wkład własny w dziedzinie badań wzajemnego oddziaływania elementów jezdnych z podłożami śnieżnymi.

2. METODY BADAŃ WŁASNYCH

W niniejszym rozdziale przedstawiono metody zastosowane przez Autora w badaniach, ze szczególnym uwzględnieniem własnych opracowań metodyki badawczej. Opis układu element jezdny – podłoże odkształcalne na podstawie analizy stanu naprężeń i odkształceń oraz sił działających na koła jezdne wymagał zastosowania niestandardowych metod pomiarowych. Ponieważ większość metod i urządzeń badawczo-pomiarowych stanowiło rozwiązania własne Autora, zawarto i opisano ich szczegóły.

2.1 Metody i urządzenia do wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożach odkształcanych wywołanych obciążeniem elementów jezdnych

2.1.1 Tensometryczny czujnik naporu

Ze względu na zalety czujników membranowych w pomiarach naporu, potwierdzone w literaturze oraz w badaniach własnych, zdecydowano o wyborze tego rozwiązania. Najważniejsze zalety czujników membranowych w porównaniu do pozostałych to:

- stabilny sygnał, niska upływność;
- wskazanie do pomiarów dynamicznych;
- odporność mechaniczna, odporność przeciwwilgociowa i przeciwpylowa;
- mała wrażliwość na zakłócenia pól elektromagnetycznych;
- niewielkie wymiary;
- w połączeniu z mikro wzmacniaczem sygnału, czujnik jest szczególnie przydatny w badaniach polowych.

Czujnik tensometryczny funkcjonuje jako rezystor o zmiennej rezystancji, przy czym zmiany te są powodowane rozciąganiem lub ściskaniem tensometru, który jest przyklejony do elementu sprężystego. W celu ustalenia parametrów geometrycznych elementu sprężystego konieczne jest przeanalizowanie stanu odkształceń elementu sprężystego pod działaniem obciążenia. Schemat odkształceń membrany pod obciążeniem pokazano na rys. 2.1. Odkształcenia promieniowe i obwodowe w środku membrany są jednakowe:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_T = \frac{3R_0(1-\nu^2)}{8t^2 E} \quad (2.1)$$

Odkształcenia promieniowe wzdłuż promienia maleją i uzyskują wartości poniżej zera.

odkształcenia obwodowe maleją do zera na krańcach membrany:

$$\varepsilon_{R0} = \frac{-3R_0^2(1-\nu^2)}{4t^2E} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{T0} = 0 \quad (2.3)$$

W celu zapewnienia liniowości przetwornika, ugięcie membrany nie może przekraczać pewnej wartości odniesionej do grubości membrany: np. aby osiągnąć nieliniowość rzędu 0.3%, ugięcie membrany nie powinno przekroczyć $\frac{1}{4}$ grubości membrany. Równanie 2.4 stanowi zależność na ugięcie membrany w punkcie środkowym:

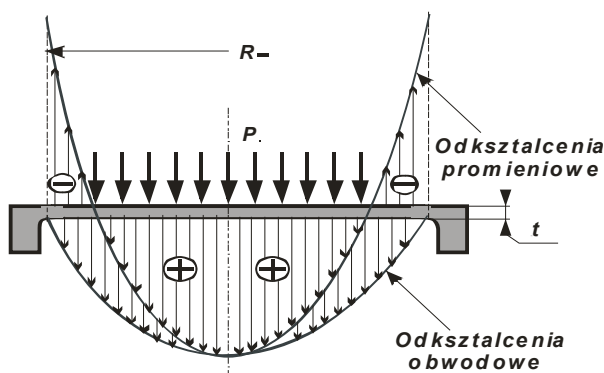
$$Y_c = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16t^3E} \quad (2.4)$$

Sygnał wyjściowy w stanie pełnego nasycenia dla wskaźnika mostka równego 2.0 wyraża się następującym równaniem:

$$e_0 = 0,75PR_0^2 \frac{1-\nu^2}{4t^2E} \quad (2.5)$$

Przekształcając równanie (2.5) otrzymano zależność określającą grubość membrany w funkcji promienia membrany, modułu sprężystości materiału membrany oraz zakładanego maksymalnego obciążenia zewnętrznego:

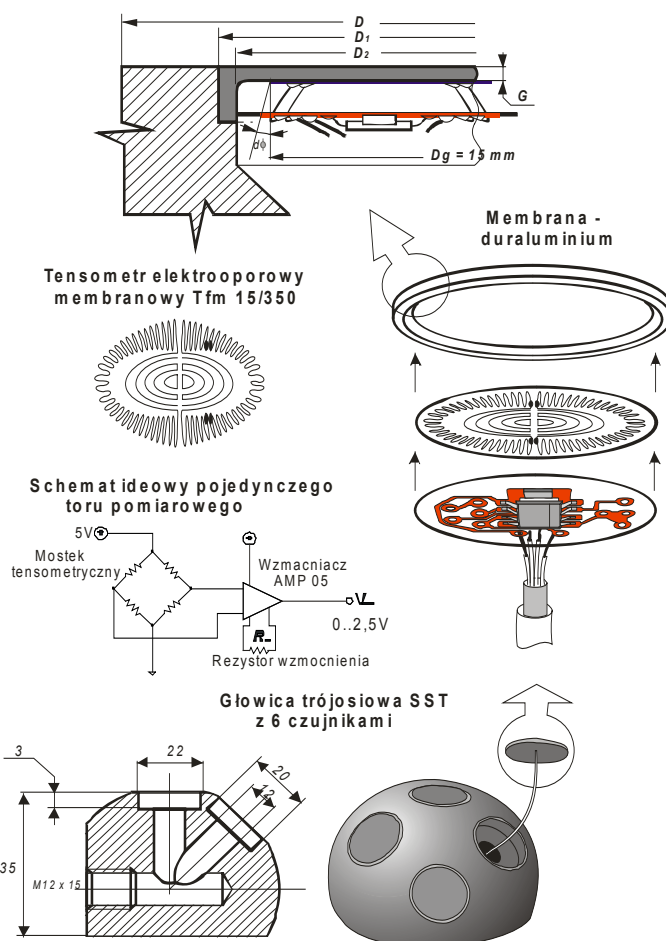
$$t = \sqrt{0,75PR_0 \frac{1-\nu^2}{e_0E}} \quad (2.6)$$



Rys. 2.1. Rozkład odkształceń membrany czujnika naporu

Wykorzystując powyższe zależności zaprojektowano czujniki o grubości membrany 0.6 i 0.8 mm, co dało następujące stałe czujników: 1.7 mV/kPa oraz 0.6 mV/kPa. Ponieważ w większości przypadków do badań używane są czujniki o większym zakresie pomiarowym (grubość membrany 0.8 mm), wykonano serię tych czujników i poddano badaniom kalibracyjnym. Ponadto wykonano też czujniki o średnicy 10mm, do badań podłoży śniegowych oraz 30mm do badań porównawczych.

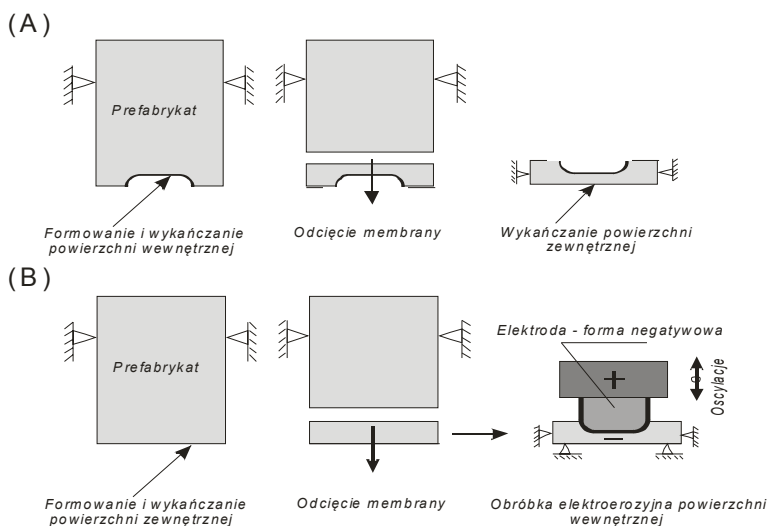
Konstrukcja czujnika przedstawiona jest na rysunku 2.2. Czujnik zbudowano w formie okrągłej membrany podpartej obwodowo. Taka konstrukcja narzuciła zastosowanie tensometrów membranowych w układzie pełnego mostka, w którym dwie gałęzie pracują na rozciąganie promieniowe, zaś dwie pozostałe są odkształcane obwodowo i zlokalizowane są w pobliżu środka membrany.



Rys. 2.2. Schemat budowy czujnika naporu oraz schemat instalacji czujnika w głowicy SST

Głównym elementem jest membrana, która została zaprojektowana jako całość z korpusem czujnika. Dobór materiału na membrany czujników tensometrycznych jest kluczowy, głównie w przypadku pomiarów dynamicznych. Membrany czujników wykonuje się ze stali duralu bądź tytanu. Tytan jest szczególnie wartościowy, gdyż wytrzymałość zmęczeniowa membrany powinna zapewniać odpowiednio dużą liczbę cykli.

Ze względu na dostępność, jako materiał do wykonania membran wybrano duraluminium. Membrany o grubości większej niż 0.5mm wykonano metodą toczenia i szlifowania. Ze względu na wpływ naprężeń resztkowych na funkcjonowanie czujników (dryf punktu zera czujnika), stosowano odprężanie trwające ok. 3 miesiące, w temperaturze ok. 4°C. Tensometry foliowe klejono termoutwardzalnie na wewnętrzną powierzchnię membrany. Wzmacniacze montowano w przestrzeni korpusu czujnika zaś połączenia elektryczne realizowano przewodami DNE 0.20. Zlokalizowanie wzmacniacza bezpośrednio przy mostku tensometrycznym eliminuje zakłócenia, które mogą zniekształcać mierzony sygnał. Ponadto, wyeliminowano niekorzystne efekty elektrochemiczne występujące na lutach (miedź – cyna – miedź). Dla serii czujników przeznaczonych do badań podłoży śniegowych przy ujemnych temperaturach do lutowania stosowano lutowie odporne na tzw. „dżumę cynową”, zawierające domieszkę antymonu.



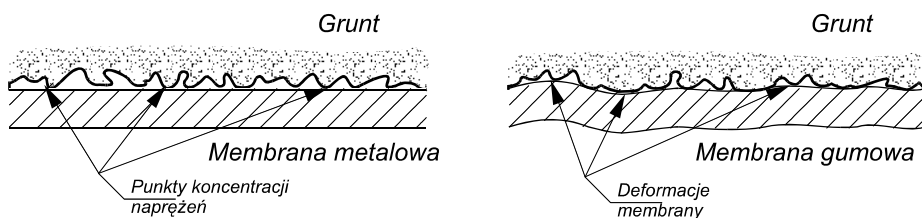
Rys.2.3. Technologia membran czujników naporu. A – membrany o grubości powyżej 0.5mm, B – membrany cienkie, 0.3mm.

Zbudowano również serię czujników o średnicy czynnej 10mm. Ponieważ czujniki te projektowano na zakres 100kPa, obliczeniowa grubość membrany

wyniosła ok. 0.3mm. Wykonanie tak cienkiej membrany przy zakładanej tolerancji $\pm 0.01\text{mm}$ oraz chropowatości powierzchni 0.63 wymagało zastosowania innej technologii niż w przypadku grubszych membran. Szlifowanie powierzchni zewnętrznej wymagałoby użycia znacznych sił w uchwytach obróbkowych, co prowadziło do trwałych uszkodzeń delikatnej membrany (pierwsza seria membran została całkowicie zepsuta). Rozwiązaniem tego problemu było zastosowanie technologii drążenia elektroerozyjnego. W pierwszym etapie obrabiano powierzchnię zewnętrzną membrany do stanu końcowego. Następnie, po stronie wewnętrznej, drążono wybranie do uzyskania grubości i promieni przejść i była to obróbka ostateczna. W tej operacji użyto elektrody, stanowiącej formę negatywową wewnętrznej powierzchni membrany. Technologie membran przedstawiono schematycznie na rysunku 2.3.

2.1.2 Wzorcowanie czujników naporu

Wzajemne oddziaływanie czujnik – materiał podłoża odkształcalnego wpływa na uzyskiwane wyniki pomiarów. Membrana czujnika tensometrycznego jest zazwyczaj sztywniejsza niż podłoże, co powoduje, że odkształcenia membrany są mniejsze, niż to wynika z rzeczywistego stanu naprężenia. Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku czujników hydraulicznych, z membraną gumową o sztywności mniejszej od sztywności materiału podłoża. Stosunek sztywności membrany do sztywności materiału badanego determinuje charakterystykę czujnika. Zagadnieniem tym zajmowali się Peattie i Sparrow (w: Horn, 1994 oraz Kobiela, 1991). W ogólności czujnik naporu w podłożu odkształcalnym jest ciałem obcym o sztywności różnej od cząstek ośrodka. W przypadku, gdy membrana czujnika wykonana jest z materiału o sztywności wyższej niż materiał podłoża, wyniki pomiaru są zawyżone. Czujnik charakteryzuje się wyższym progiem czułości, a w trakcie pomiarów występować może zjawisko koncentracji naprężeń w ośrodku badanym. W drugim przypadku, gdy membrana jest bardziej podatna niż ośrodek badany, wyniki pomiarów będą niższe od wartości rzeczywistych. Membrana zapewnia lepszy kontakt z cząstkami podłoża, lecz występuje zjawisko przesklepiania – nad czujnikiem może wystąpić miejscowy zanik naporu, co zaniża wartości mierzone (patrz rys. 2.4).



Rys. 2.4. Schemat współpracy ośrodka gruntowego z membranami

Ze względu na trójfazowy i granularny charakter podłoży odkształcalnych, wzorcowanie i kalibracja czujników naporu powinna uwzględniać zjawiska w strefie kontaktu czujnika z ośrodkiem:

- kontakt czujnika z ośrodkiem następuje poprzez pewną ograniczoną liczbę punktów kontaktów, na których może następować koncentracja naprężeń;
- zmiany wilgotności ośrodka powodują jego uplastycznienie, co również wpływa na kontakt z czujnikiem.

Wyróżniamy następujące metody kalibracji czujników naporu:

- kalibracja w gazie, stosowana zazwyczaj jako wstępna ;
- kalibracja w materiale badanym.

Harris i Bakker (1994) wykazali, że istnieje graniczna wilgotność materiału badanego (gleby), przy której wynik kalibracji w materiale jest zgodny z kalibracją w gazie. Dla typowych gleb graniczna wilgotność wynosi 45-55%, ale należy zaznaczyć, iż przy tej wilgotności gleba zamienia się w prawie płynne błoto. W praktyce mamy do czynienia z wilgotnością rzędu 3-15%.

Opracowana przez Autora własna metoda wzorcowania czujników naporu w materiałach rozdrobnionych i trójfazowych polega na wyznaczaniu charakterystyk (mV-kPa) czujnika, poddanego oddziaływaniu zewnętrznemu, przenoszonemu przez określoną warstwę materiału, przy czym możliwe jest zastosowanie materiału rzeczywistego (gleby, grunty) lub modelowego (kulki stalowe). Ponieważ wartość nacisku w materiale, w miejscu zamocowania czujnika (dno komory kalibracyjnej) jest nieznana i trudna do oszacowania metodami analitycznym i dlatego aby założenie, że obciążenie zewnętrzne będzie przenoszone przez cząstki materiału w całości było słuszne, stosować należy ciągłe i możliwie cienkie warstwy materiału pośredniczącego.

Wynikają stąd dalsze uwarunkowania:

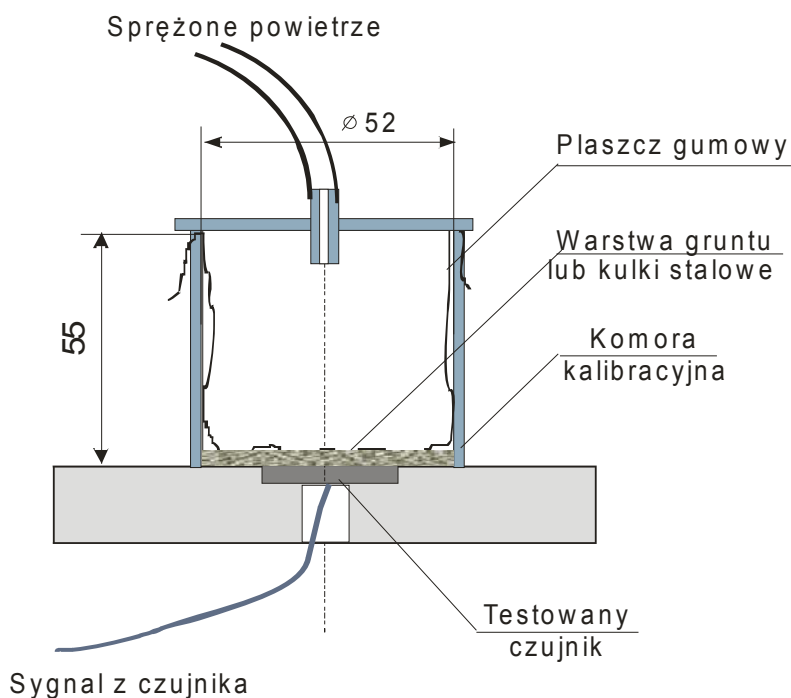
- materiał użyty do wzorcowania powinien być nieodkształcalny (materiały wzorcowe);
- efekty brzegowe (tarcie cząstek materiału o ścianki komory) powinny być zminimalizowane.
- Sposób realizacji obciążenia zewnętrznego może być w zasadzie dowolny, choć w myśl ogólnie przyjętych procedur wzorcowania, najodpowiedniejsze są następujące metody:
- użycie obciążników wzorcowych;
- obciążanie siłownikiem, kontrolowane czujnikiem certyfikowanym z klasą kalibracyjną.

W przeprowadzonym eksperymencie obciążenie zewnętrzne realizowano poprzez oddziaływanie ciśnieniem gazu (powietrza) na warstwę materiału. Zastosowano trzy materiały gruntowe: less, piasek oraz torf a także kulki stalowe łożyskowe o średnicy 2.5, 3.0 , 4.0 i 5.0mm. Pomiar ciśnienia realizowano

przyrządem-wzorcem klasy 1. Szczegóły stanowiska przedstawiono na rysunku 2.5. Sposób przygotowania i ułożenia materiałów w komorze kalibracyjnej był następujący:

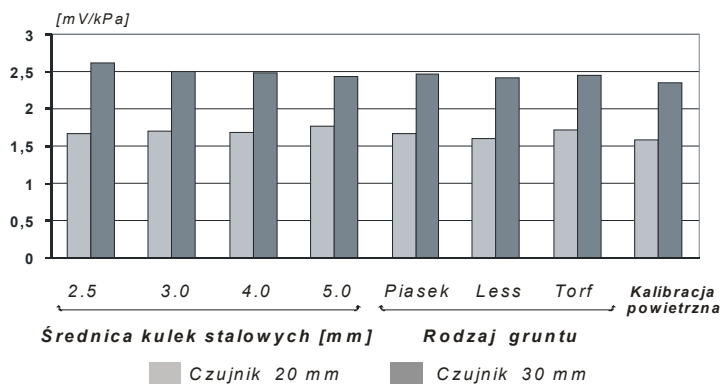
- wilgotność materiału w granicach 0 do 15% dla piasku i lessu oraz 37.5% dla torfu, z krokiem co 2.5%
- materiał układano cienką (ok. 1 mm), równomierną warstwą na dnie kalibratora;
- kulki stalowe układano warstwami, od 1 do 10.

Obciążenie zewnętrzne zadawano z krokiem co 25 kPa, od 0 do 200 kPa. W przeprowadzonych badaniach zastosowano dwa czujniki membranowe o średnicach 20 i 30 mm.



Rys. 2.5. Schemat stanowiska do wzorcowania czujników naporu

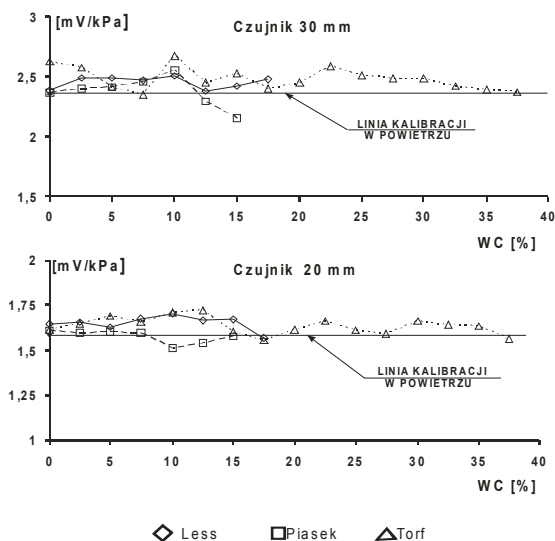
Na podstawie wyników kalibracji stwierdzono, iż charakterystyka wzorcowanych czujników jest liniowa w rozpatrywanym zakresie obciążeń. Na rysunku 2.6 zobrazowano odpowiedzi czujników na maksymalne obciążenie dla badanych materiałów rzeczywistych i modelowych (jedna warstwa kulek), przy czym grunty w rozpatrywanym przypadku miały wilgotność 0%.



Rys. 2.6. Odpowiedzi czujników 20 i 30 mm na obciążenie 200 kPa dla różnych materiałów kalibracyjnych oraz dla kalibracji w powietrzu

2.1.2.1 Wpływ wilgotności materiału gruntowego

Przy zerowej wilgotności materiału gruntowego (po suszeniu 24 h w temperaturze 105° C) stała czujnika jest niemal identyczna jak dla kalibracji w powietrzu (pozioma linia na rys. 2.7). Im wyższa wilgotność materiału wzorcowego, tym większa jest wartość stałej czujnika, wyznaczonej na podstawie jego odpowiedzi na obciążenie. Sensor staje się wówczas bardziej czuły.



Rys. 2.7. Wpływ wilgotności materiału gruntowego na wyniki kalibracji czujników 20 i 30mm.

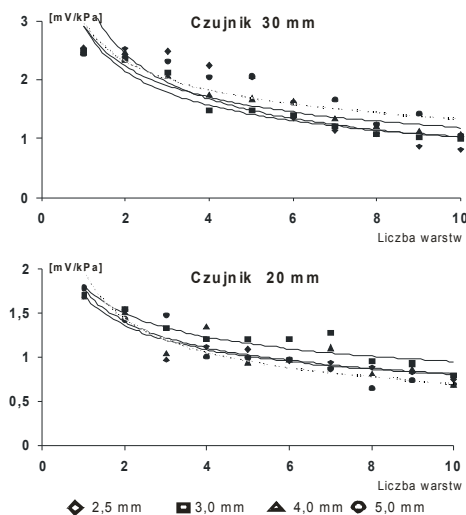
Efekt wilgotności okazał się najbardziej znaczący w przypadku torfu. Dla piasku uzyskano inwersję trendu przy wilgotności ok. 7.5 – 12.5%, czułość zmalała. Można to wytłumaczyć efektem tzw. spójności pozornej, występującej w piasku przy pewnej wilgotności i objawiającej się umocnieniem materiału.

2.1.2.2 Kalibracje z użyciem materiałów wzorcowych

Zależność między liczbą warstw kulek a stałą czujnika pokazano na rysunku 2.8. Wartość stałej czujnika dla rosnącej liczby warstw miała tendencję regresywną. Mogło to być efektem tarcia kulek o ścianki kalibratora lub, rosnącej z każdą dodaną warstwą odległości czujnika od obciążenia, co opisane jest w równaniu Boussinesq:

$$p = \frac{3P}{2\pi r^2} \quad (2.7)$$

gdzie: P – obciążenie, p – napór mierzony przez czujnik, r – odległość czujnika od punktu przyłożenia obciążenia.



Rys. 2.8. Wpływ liczby warstw kulek na stałe czujników 30 i 20 mm.

Warto zwrócić uwagę na wartości odchyleń standardowych stałych czujnika dla różnych liczb warstw kulek. W materiałach wzorcowych takich jak kulki stalowe łożyskowe, efekty związane z rozrzutem średnicy poszczególnych cząstek – tak istotne w przypadku gruntów – są praktycznie pomijalne. Jaka była zatem przyczyna rozrzutów wartości wskazanej przez czujniki? Rozpatrywano efekt geometrii układów przestrzennych. Według Skibińskiego, (1922), możliwe są dwie

różne kompozycje kulek w których (1) każda kulka dotyka trzech innych z warstwy poniżej oraz (2) każda kulka dotyka dwóch z warstwy poniżej. Kompozycja (2) jest układem niestabilnym, jednak była brana pod uwagę, gdyż wystarczy aby choć jedna kulka z danej warstwy dotykała czterech kulek z warstwy niższej, by układ stawał się stabilny. Zatem liczba kulek w warstwie stykającej się z czujnikiem mogła być różna, co sprawia, że napór determinowany liczbą kontaktów przyjmował różne wartości.

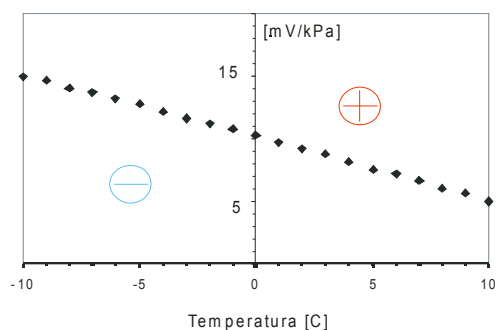
2.1.2.3 Przygotowanie i wzorcowanie czujników do badań podłoży śniegowych

Badanie naporów w podłożach śniegowych wymagało specjalnego przygotowania czujników i aparatury. Niskie temperatury oraz zjawisko kondensacji pary wodnej mogą powodować wadliwe działanie lub uszkodzenie podzespołów elektronicznych. Także charakterystyki kalibracyjne czujników są inne ze względu na wpływ temperatury.

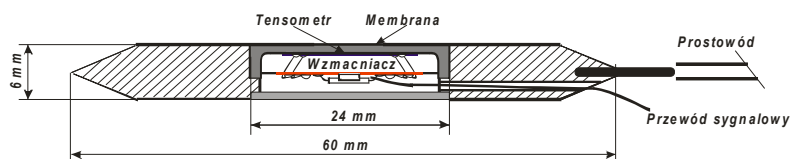


Rys. 2.9. Testy aparatury w komorze niskich temperatur

Testom poddano kompletny zestaw pomiarowy czujniki – komputer, umieszczając całość w komorze niskich temperatur (rys. 2.9). Na podstawie tych prób stwierdzono, że użycie standardowego komputera klasy Notebook w warunkach zimowych jest niepraktyczne, a do zapisu danych pomiarowych korzystne będzie zastosowanie rejestratora DAT Sony P204x. Urządzenie to posiada zakres temperatur roboczych od -40°C . Następnie przeprowadzono testy kalibracyjne czujnika 20 mm w niskich temperaturach. Określono stałą czujnika dla temperatur od -10°C do $+10^{\circ}$ a wyniki pokazano na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Wyniki prób kalibracyjnych czujnika naporu



Rys. 2.11. Niskoprofilowy czujnik naporu do badań śniegu

Przygotowano dwa zestawy aparaturowe: (1) głowica SST z czujnikami 20mm do badań naporów w warstwie śniegu zmrożonego oraz (2) cztery czujniki w korpusach niskoprofilowych do badań w śniegu głębokim (patrz rys. 2.11). Czujniki niskoprofilowe zbudowane zostały z typowych przetworników naporu o średnicy 30mm.

2.1.3 Wyznaczanie niepewności pomiarów naporu w podłożu

Błąd standardowy pomiaru naporu obliczano z uwzględnieniem rozszerzonego zakresu niepewności pomiaru. Niepewność wyznaczano na podstawie dwóch składowych: U_A i U_B .

Składnik niepewności pierwszego rzędu U_A wyznaczono z następującej zależności:

$$U_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\sum (\bar{g} - g_i)^2}{2}} \quad (2.8)$$

gdzie: $\bar{g}$ – odpowiednio wartość średnia i wartość i-tej próbki zmierzonego naporu dla $i = 5$ powtórzeń.

Składnik niepewności drugiego rzędu U_B wyznaczono z poniższej zależności:

$$U_B = \frac{\Delta g + 2 \times 0.001}{\sqrt{3}} \quad (2.9)$$

gdzie: (1) Δ – odchyłka pomiarowa otrzymana z krzywej kalibracji czujnika naporu; jeśli pomiary wykonywano z użyciem 6-cio czujnikowych głowic *SST*, wybierano wartość maksymalną wśród 6 odchyłek dla poszczególnych czujników wchodzących w skład głowicy; (2) 0.001 jest rozdzielczością systemu pomiarowego

Następnie wyznaczano niepewność złożoną:

$$U_i = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (2.10)$$

Ostatecznie określano tzw. niepewność rozszerzoną:

$$U = a \times U_i \quad (2.11)$$

gdzie: $a = 1,96$ – współczynnik dla rozkładu normalnego przy założonym poziomie ufności 0.95.

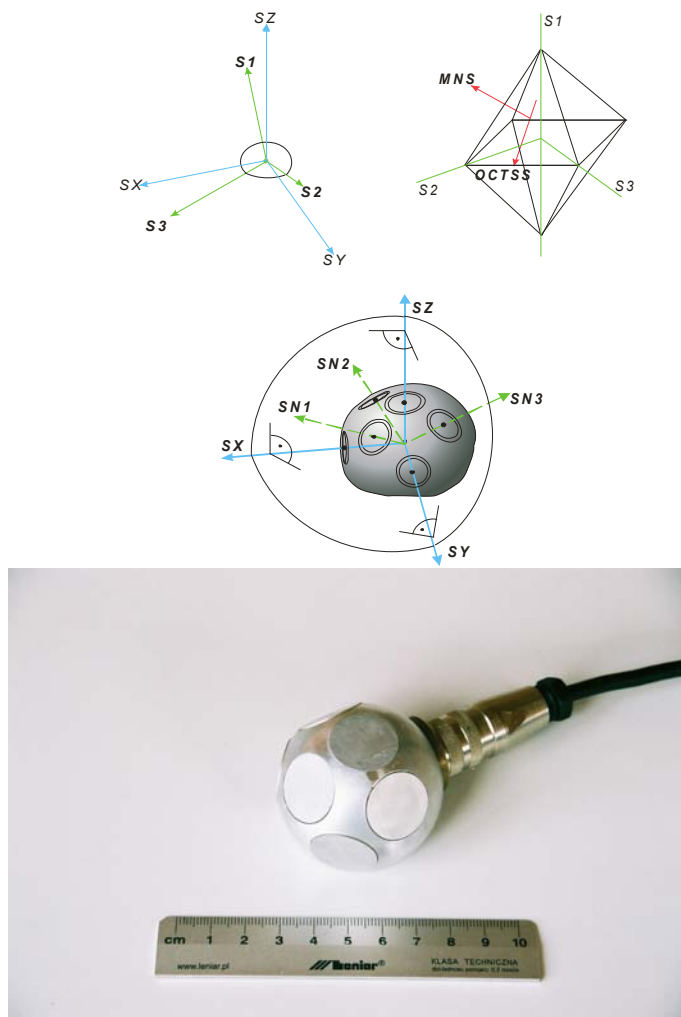
2.1.4 Głowica SST

Głowica *SST* (ang. *Stress State Transducer*) jest urządzeniem pomiarowo-badawczym, pozwalającym wyznaczyć składowe stanu naprężeń w materiale podłoża odkształcalnego.

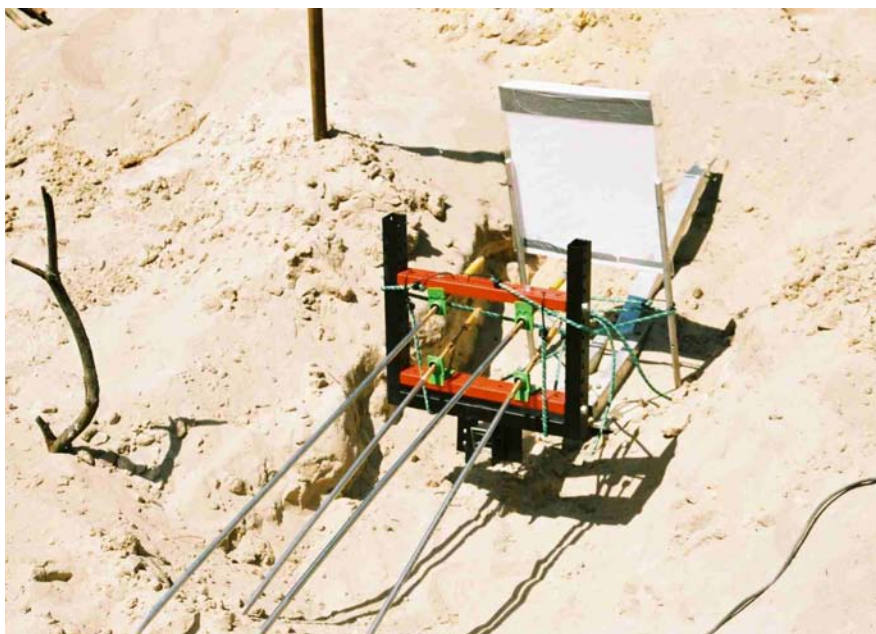
Wyznaczanie naprężeń odbywa się przy założeniu, że wielkość naprężenia jest tożsama z wielkością naporu, mierzoną przez czujniki w głowicy *SST*. W myśl tego założenia, wyznaczane naprężenia są wartościami uśrednionymi z pola powierzchni membran. Dysponując wynikami pomiarów następujących naporów w podłożu: *SX*, *SY*, *SZ*, *SN1*, *SN2* i *SN3* (rys. 2.12), możliwe jest analityczne wyznaczenie składowych stanu naprężenia: naprężenia główne *S1*, *S2*, *S3*, ich cosinusy kierunkowe, średnie naprężenie normalne (izotropowe) *MNS* oraz naprężenie ścinające na powierzchni oktaedrycznej, *OCTSS*.

W skład głowicy SST wchodzi 6 czujników naporu. Geometria głowicy została przedstawiona na rysunku 2.12. Odpowiednie zorientowanie wzajemne czujników uzyskano poprzez umieszczenie ich w korpusie, w którym wytoczone są gniazda czujników oraz kanały na przewody sygnałowe. W osi korpusu zabudowane jest gniazdo wielostykowe, przykręcana pokrywa zamyka korpus od dołu. Złącze wielostykowe umożliwia rozłączne połączenie kabla sygnałowego z głowicą, odporne na wilgoć, kurz i zanieczyszczenia.

Algorytm wyznaczania składowych stanu naprężeń oraz ich cosinusów kierunkowych zawarto w pracy Pytki (2007).



Rys. 2.12. Schemat stanu naprężeń oraz głowicy SST. Widok głowicy zbudowanej przez Autora



Rys. 2.14. Widok stanowiska badawczego metody optoelektronicznej II-generacji

W urządzeniu drugiej generacji zastosowano cztery projektory laserowe, połączone z czterema sondami odkształcenia. Sondy umieszczano na planie kwadratu lub prostokąta. Rama podtrzymująca łożyska wspierające miała możliwość regulacji położenia punktów podparcia. Dwie dolne sondy umieszczano zwykle na głębokości 25-35cm, górne na 10-15cm, zaś głowice *SST* umieszczano odpowiednio na głębokości 15 i 25cm pod powierzchnią. Wyznaczanie odkształceń podłoża metodą optoelektroniczną wiązało się z koniecznością analizy obrazu. Polegała ona na wyznaczaniu współrzędnych położenia czterech plamek świetlnych podczas przejazdu. Jako wynik końcowy otrzymywano czworokąt utworzony z czterech plamek (1) przed przejazdem, w formie nieznieskształconej, (2) po przejeździe (Pytka, 2005).

2.3 Instalacja aparatury badawczej

Przed pomiarem głowice *SST* umieszczano na wybranej głębokości w podłożu. W badaniach używano łącznie do 4 głowic, które w zależności od szczegółowego programu badań umieszczano na różnych głębokościach pod osią koła lub w pewnej odległości od osi. Stosowano następujące warianty:

- dwie głowice instalowane na głębokości 15 i 30cm pod powierzchnią w osi koła;
- trzy głowice na głębokości: 15, 30 i 45cm;
- trzy głowice pod osią koła jak wyżej, czwarta na głębokości 30cm w odległości 30cm od krawędzi śladu koła.

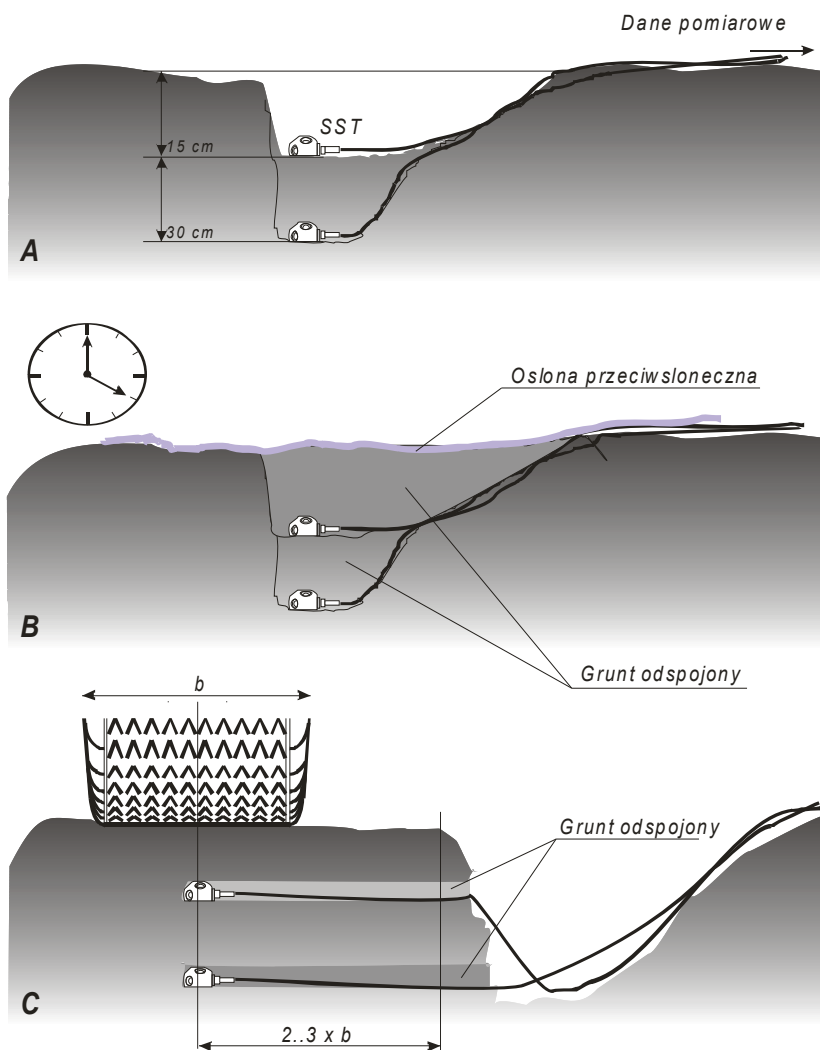
Sposób instalacji głowicy zależał od rodzaju gruntu. Z założenia instalacja głowic nie powinna powodować naruszenia struktury materiału podłoża. W przypadku podłoża piaszczystego (rys. 2.15A), które nie tworzy struktury, instalacja głowicy polegała na umieszczeniu poziomo na głębokości badanej warstwy, następnie zasypaniu materiałem podłoża.

Materiał podłoża lessowego tworzy strukturę, co oznacza, że instalacja głowicy metodą opisana powyżej mogła wpływać na wyniki pomiarów. Dlatego też, zastosowano metodę z odczekaniem (3-6 godzin) po zainstalowaniu głowic tak, by procesy cementacji i agregacji zachodzące w tym czasie doprowadziły do odbudowy struktury (rys. 2.15B).

Instalacja w torfach wymagała odmiennej metody. Obecność szaty roślinnej oraz silne ukorzenienie powoduje, że zastosowanie powyższych metod nie rokowało dobrych rezultatów. Opracowano metodę umieszczania głowic w profilu glebowym (rys. 2.15C). Metoda ta polegała na wykopaniu profilu glebowego w pewnej odległości od przewidywanej trasy przejazdu koła i wykonaniu poziomych kanałów o kształcie i wymiarach jak przekrój poprzeczny głowicy *SST*. Następnie, ruchem poziomym umieszczano głowicę aż do ustalonego położenia względem ściany profilu.

Instalacja optoelektronicznego systemu do wyznaczania odkształceń podłoża następowała w trakcie instalacji głowic *SST*. Sondy głębokości umieszczano w tym samym odkopie, co głowice tak, by nie powstawało nowe miejsce uszkodzenia struktury materiału podłoża. Dwie sondy instalowano na głębokości 25-35cm, zaś dwie górne na głębokości 0-15cm, w zależności od rodzaju próby. W przypadku, gdy odkształcenia wyznaczano pod obciążeniem koła napędzającego (np. wyznaczanie siły uciągu), górne sondy instalowano pod cienką warstwą materiału podłoża. Istotne było wzajemne ułożenie sond oraz przewodów sygnałowych z głowic *SST*. Pozostałe elementy systemu optoelektronicznego instalowano w odległości wynikającej z długości sond. Kamery video montowano na statywie tak, by w kadrze mieścił się pełny ekran. W dni słoneczne stosowano dodatkową osłonę, która poprawiała kontrast rejestrowanego obrazu.

Nieco inne metody stosowano w przypadku umieszczania głowicy *SST* oraz czujników niskoprofilowych w śniegu. Szczegóły opisano w rozdziale 6.



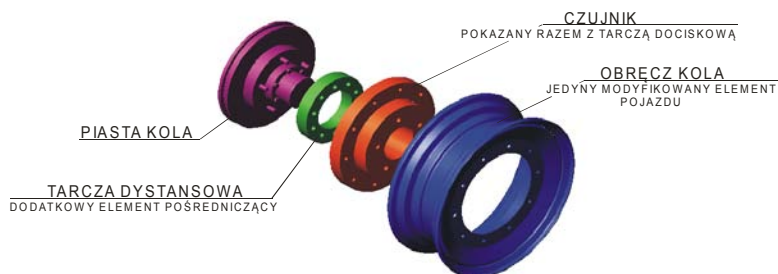
Rys. 2.15. Metody umieszczania głowic SST w różnych rodzajach podłoża odkształcalnego. Opis w tekście.

2.4 Metody i urządzenia do wyznaczania sił i momentów na kołach pojazdu

W niniejszym podrozdziale przedstawiono dynamometr zaprojektowany i zrealizowany przez Autora jako własne rozwiązanie metodyki badawczej. W porównaniu do rozwiązań dostępnych komercyjnie, przedstawiany dynamometr charakteryzuje się podobnymi parametrami przy znacznie niższych kosztach wytworzenia.

2.4.1 Sześcioskładnikowy dynamometr do wyznaczania sił i momentów na kole

Przy doborze aparatury do realizacji założonych w programie zadań badawczych brano pod uwagę różnorodne kryteria. W przypadku wyboru dynamometru, ze względów ekonomicznych zdecydowano się zrealizować dynamometr według własnego projektu. Opracowane urządzenie umożliwilo pomiar 6-ciu wielkości: sił i momentów działających na koło (F_z - F_x - F_y // M_z - M_x - M_y) oraz rejestrację wartości sił i momentów z częstotliwością próbkowania 100 Hz dla każdej z wielkości mierzonych. Przewidziano możliwość instalacji dynamometru na różnych pojazdach (lekki pojazd terenowy, samochód ciężarowy, transporter opancerzony). Instalację dynamometru na pojeździe badanym zrealizowano za pomocą połączeń gwintowych z użyciem śrub wzmocnionych. Zastosowanie dynamometru nie wymagało żadnych zmian konstrukcyjnych w układzie jezdnym pojazdu badanego a także nie zmieniło rozstawu kół ani nie powodowało żadnych innych zmian w geometrii zawieszenia (Pytko, 2008).



Rys. 2.16. Schemat konstrukcyjny dynamometru

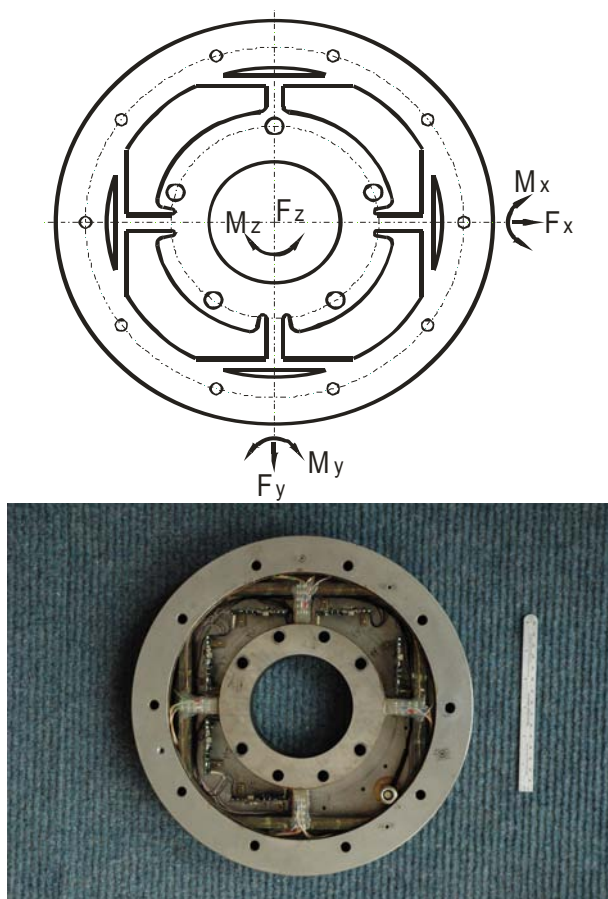


Rys. 2.17. Elementy składowe dynamometru

Konstrukcja dynamometru składa się z następujących podzespołów i elementów (patrz rys. 2.16 oraz 2.17):

- czujnik sześciokładnikowy;
- modyfikowana obręcz koła oraz opona;
- elementy dodatkowe: tarcza pośrednia, nakładka oraz śruby mocujące;
- elektroniczne urządzenie do zapisu i przesyłu danych pomiarowych.

Zasadniczym podzespołem dynamometru był czujnik zbudowany z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych, naklejanych na cztery elementy sprężyste, łączące pierścień zewnętrzny i wewnętrzny. Wzmacniacze sygnału zlokalizowano w niewielkiej odległości od tensometrów w celu zminimalizowania zakłóceń, szumów oraz dla uzyskania zwartej, kompaktowej konstrukcji. Schemat i widok czujnika pokazano na rysunku 2.18.



Rys. 2.18. Czujnik sześcioelementowy jako podstawowy podzespół dynamometru

Do zapisu danych pomiarowych zaprojektowano i wykonano specjalizowane urządzenie wykorzystujące technikę mikroprocesorową. W pierwszej wersji urządzenie umożliwiało zapis danych pomiarowych w pamięci wewnętrznej. Najważniejsze cechy urządzenia rejestrującego wyszczególniono poniżej:

- przetwarzanie analogowo-cyfrowe, częstotliwość minimum 100Hz dla każdego kanału, 8 kanałów czynnych;
- zapis danych cyfrowych do pamięci ulotnej EPROM;
- zapis danych na karcie pamięci MMC (Micro Memory Card);
- możliwość przesyłu danych poprzez łącze RS232 (po zakończonej próbie).
- małe wymiary (ok. 10×10×4 cm) i mała masa, zasilanie bateryjne.

Częstotliwość próbkowania dynamometru dobrano podobnie jak w przypadku głowicy SST. Wartość tej częstotliwości, 100Hz była wystarczająca w przypadku, gdy prędkość jazdy nie przekraczała 20 km/h.

Druga, ulepszona wersja urządzenia rejestrującego umożliwiała komunikację z komputerem przenośnym za pomocą łącza radiowego Bluetooth™. Cztery dynamometry zabudowane na kołach jezdnych wyposażono w mikroprocesorowe urządzenia nadawczo-odbiorcze, które komunikując się z urządzeniem bazowym w komputerze PC Laptop. System realizował przesył danych pomiarowych ze wszystkich kanałów czynnych każdego z czterech dynamometrów jednocześnie. Obsługę protokołu przesyłu danych zapewniał specjalistyczny program komputerowy, zainstalowany w komputerze bazowym oraz w pamięci podręcznej mikroprocesorów urządzeń rejestrujących.

Po zapisaniu obserwowanych sygnałów z dynamometru na komputerze następowało ich przetwarzanie i poszukiwane wartości sił oraz momentów działających na koło w funkcji kąta obrotu koła są następujące:

$$\begin{aligned}
 F'_y &= F_y \\
 F'_z &= F_z \cos(\beta) + F_x \sin(\beta) \\
 F'_x &= F_x \cos(\beta) + F_z \sin(\beta) \\
 M'_y &= M_y \\
 M'_z &= M_x \cos(\beta) + M_z \sin(\beta) \\
 M'_x &= M_x \sin(\beta) + M_z \cos(\beta)
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Ważnym etapem w realizacji i przygotowaniu dynamometru do pomiarów było uwzględnienie wpływu masy urządzenia na dynamikę ruchu pojazdu badawczego oraz obserwowane wartości sił i momentów. Wzrost masy koła o ok. 10 kg wymagał kompensacji w celu zachowania charakterystyki dynamicznej zawieszenia w zakresie do 30 Hz. Jedną z metod kompensacji wpływu dodatkowej masy nieresorowanej było zwiększenie sztywności zawieszenia, co uzyskano przez zwiększenie ciśnienia w oponie o ok. 25%. Podobne zabiegi stosował Loh (1989), stwierdzając pełną

kompensację w rozpatrywanym zakresie częstotliwości a zasadniczą zaletą tego rozwiązania polegała na braku ingerencji w mechaniczny układ zawieszenia pojazdu.

2.4.2 Kalibracja dynamometru

Przed rozpoczęciem badań poligonowych przeprowadzono kalibrację dynamometru. Czujnik zabudowano w zaciskach maszyny wytrzymałościowej i przeprowadzono pomiary wskazań poszczególnych kanałów (F_z , F_x , F_y , M_z , M_x , M_y) przy wzrastającym obciążeniu. W celu kalibracji poszczególnych kanałów, czujnik ustawiano w odpowiedni sposób, tak by działające obciążenie było jednorodne (składowe boczne równe zeru) dla danej osi (X-Y-Z). Przeprowadzono sześć serii pomiarów dynamometrycznych przy różnych ustawieniach czujnika w maszynie wytrzymałościowej (rys.2.19).



Rys. 2.19. Kalibracja dynamometru na maszynie wytrzymałościowej (ZEPWN, Marki)

Odnotowano liniowe charakterystyki dla wszystkich mierzonych sił i momentów. Nieliniowość czujnika nie przekraczała 1%, co było wynikiem porównywalnym jak dla urządzeń oferowanych na rynku. Czujnik posiadał liniowe charakterystyki w pełnym zakresie. Szczegółowe wyniki oraz opis kalibracji zawarto w pracy Autora (Pytko, 2007).

2.4.3 Montaż na pojeździe badawczym i pierwsze próby

Instalacja dynamometru na pojeździe badawczym nie wymagała żadnych dodatkowych zmian w zawieszeniu czy układzie napędowym pojazdu. Kompletny dynamometr montowano w miejsce koła jezdniego. Prostota instalacji była jednym

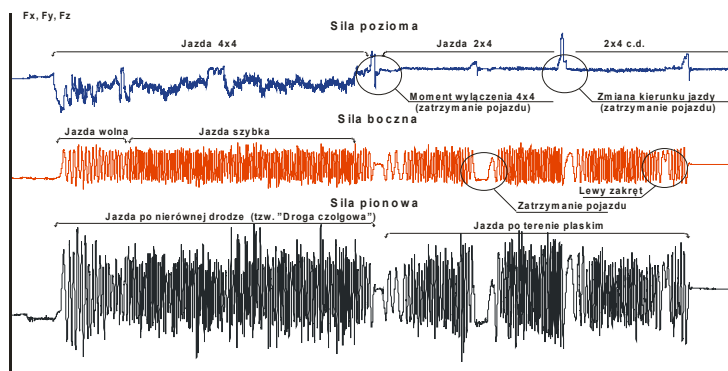
z wymogów, związanym z dostosowaniem urządzenia do badań w warunkach polowych. Szczegóły dotyczące czynności montażowych zawarto w pracy Pytki, (2007).

Przykładowy pojazd badawczy AMZ Dzik MED z zabudowanym dynamometrem w miejscu przedniego prawego koła pokazano na fotografii (rys. 2.20).

Pierwsze próby dynamometru przeprowadzono z użyciem pojazdu SUZUKI Vitara 1,6, wyposażonego w manualnie włączany/wyłączany napęd 4×4. Próby przeprowadzono na poligonie Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku. Jazdy testowe odbywały na podłożu piaszczystym o wilgotności ok. 7-9 %. Wyniki uzyskane podczas jednej z jazd testowych przedstawiono na rysunku 2.21. Więcej informacji na temat dynamometru a także jego wykorzystania w praktyce badawczej zawarto w publikacjach Autora (Pytki, 2007, 2008 oraz 2010).



Rys. 2.20. Pojazd badawczy AMZ Dzik MED z zainstalowanym dynamometrem



Rys. 2.21. Przykładowy przebieg sił i momentów zmierzonych przy użyciu dynamometru zainstalowanego w miejsce przedniego prawego koła pojazdu Suzuki Vitara

2.5 Program badań

2.5.1 Obiekty badań

Realizacja przyjętego programu badań eksperymentalnych wymagała doboru odpowiednich pojazdów, zdolnych do poruszania się w różnorodnych warunkach terenowych. Jako, że perspektywicznym odbiorcą uzyskanych wyników badań były wojska lądowe oraz producenci pojazdów wojskowych, tego typu samochody zostały użyte do badań w najszerszym zakresie. Do badań w zakresie wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożach użyto pojazdów STAR 944 i 1466. Posiadają one układy jezdne o wszystkich kołach napędzanych (odpowiednio 4×4 i 6×6), natomiast ich przestrzenie ładunkowe umożliwiły badanie wpływu obciążenia, poprzez stopniowany załadunek. Pojazdy te charakteryzowały się dobrymi własnościami terenowymi i mogły być użyte w trudnych warunkach (badania na mokrych podłożach torfowych). Przeprowadzono również badania z użyciem samochodu HMMWV (*High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle*) Hummer, jednak ze względu na krótki okres dostępności udało się przeprowadzić jedynie skrócony program prób. Badania naprężeń i odkształceń podłoża piaszczystego wykonano również z użyciem pojazdów gąsienicowych: czołgu oraz transporterów opancerzonych.

Innym pojazdem wojskowym użytym w badaniach był AMZ Dzik w wersji medycznej. Był to pojazd zbudowany na bazie podwozia IVECO, z opancerzonym nadwoziem skonstruowanym przez AMZ Kutno. Został wykorzystany do gromadzenia danych doświadczalnych do identyfikacji układu koło-podłoże i z jego użyciem zrealizowano pełny program prób na trzech różnych podłożach (less, piasek, torf).

Mając na uwadze ewentualną przydatność wyników dla rolnictwa, w badaniach użyto również ciągników rolniczych MF 255 i Ursus C360. Problem zagęszczania i degradacji środowiska glebowego jako skutek używania coraz cięższych maszyn i pojazdów jest nadal istotny i wymaga prowadzenia ciągłych badań dla lepszego poznania mechaniki gleby podczas obciążania. Badania prowadzono na glebie piaszczystej oraz lessowej, wykorzystywanych w rolnictwie. Zrealizowany program badań polowych dotyczył określania wpływu kolejnych przejazdów na naprężenia i odkształcenia w glebie powodowane obciążeniem kół jezdnych ciągnika rolniczego.

Tabela 2.1 Podstawowe dane techniczne pojazdów kołowych użytych w badaniach polowych

Pojazd	Ogumienie	Masa, kg	Obciążenie pionowe kół, kN		
			PRZÓD	TYŁ I	TYŁ II
STAR 1466	14.00×20	8180	20,55	10,18	11,09
		11780	21,90	18,09	19,20
		14180	23,24	22,40	24,42

Pojazd	Ogumienie	Masa, kg	Obciążenie pionowe kół, kN		
			PRZÓD	TYŁ I	TYŁ II
STAR 944	12.00×20	5560	16.90	10.1	–
Hummer	37×12.50 R 16.50 LT	4665	13.25	9.75	–
AMZ Dzik	b.d.	6610	b.d.	b.d.	–
MF 255	7.50×20, 15.00×30	3100	5.15	10.8	–



Rys. 2.22. Pojazdy wojskowe uczestniczące w badaniach: STAR 1466, HMMWV Hummer, czołg pola walki

Tabela 2.2 Podstawowe dane techniczne pojazdów gąsienicowych

Pojazd	Masa, kg	Powierzchnia kontaktu, m ²	Obciążenie kół nośnych, kN
MBT	44 000	5,22 (0,08)*	31.40/35.67/38.35/37.37/38.65/35.73
APC	12 300	1,83 (0,036)*	11.87/9.90/10.50/9.71/8.78/8.15
TPC	9 300	2,18 (0,043)*	6.27/7.75/8.14/8.33/8.43/8.53
SnowGroomer	8 411	2×1.318×4.140	Nacisk uśredniony 7.7 kPa

Oznaczenia: MBT - czołg pola walki, APC - transporter opancerzony, uzbrojony, TCP - transporter opancerzony nieuzbrojony. (*) W nawiasach podano powierzchnię pojedynczego ogniwa gąsienicy.

Realizacja idei pojazdu badawczego, opisanego w podrozdziale 2.3.2 wymagała doboru uniwersalnego pojazdu terenowego, z możliwością włączania i wyłączania napędu wszystkich kół, zmiany ogumienia, instalacji aparatury badawczej, itd. Wybrano samochód SUZUKI Vitara 1.6. Konstrukcja zawieszenia oraz rozmiary kół tego pojazdu umożliwiły dopasowanie dynamometrów do pomiaru sił i momentów. Ponadto, pojazd wyposażono w zestaw do badań dynamicznych (robot sterujący, DGPS).

Oprócz powyżej opisanych pojazdów, w programie badań uczestniczyły dwa inne obiekty. Do badań na śniegu głębokim użyto ratraka Bombardier Snow Groomer 200, który jest samojezdną gąsienicową maszyną roboczą do przygotowania i utrzymania tras narciarskich i charakteryzuje się szczególnie niskim naciskiem jednostkowym pod taśmą gąsienicy.

Uzupełnieniem powyższego opisu ogólnego obiektów badań są tabele i charakterystyki techniczne, zawarte w podrozdziałach dotyczących poszczególnych zadań badawczych.



Rys. 2.23. Ratrak Bombardier SnowGroomer

2.5.2 Pojazd badawczy

Specjalizowane pojazdy do badań drogowych lub poligonowych użytkowano w jednostkach badawczo rozwojowych przemysłu motoryzacyjnego (BMW) lub przez wiodące instytuty badawcze (Coutermarsh and Shoop, 2009). Pierwszy rodzaj stanowiły obiekty powstałe na bazie seryjnych pojazdów, w których zainstalowano aparaturę pomiarowo-badawczą i dokonano niezbędnych przeróbek. Stosowano również specjalne pojazdy badawcze, budowane od podstaw, jako mobilne laboratoria. Konstrukcja specjalnych pojazdów badawczych umożliwiała zmiany podstawowych parametrów konstrukcyjnych (rozkład masy na osie, rozstaw kół, osi, geometria zawieszenia, itd. (Zomotor, 1991). Głównym celem stosowania pojazdów badawczych było testowanie nowych konstrukcji, rozwiązań, podzespołów oraz badania na rzecz rozwoju nowych konstrukcji a także badania o charakterze podstawowym z zakresu dynamiki ruchu samochodu lub terramechaniki.

Pojazd badawczy zastosowany przez Autora skompletowano na bazie samochodu terenowo-osobowego Suzuki Grand Vitara, napędzanego 16-zaworowym silnikiem benzynowym o mocy 104 KM. Koła jezdne posiadały rozmiar 15", szerokość opon wynosiła między 195 a 255 mm. Ważną zaletą pojazdu bazowego był układ przeniesienia napędu, który umożliwiał jazdę w trybie 4x4, gdy wszystkie koła były napędzane, bez mechanizmu różnicowego międzyosiowego oraz w trybie 2x4, gdy napędzane były tylko koła tylne.

Wyposażenie pomiarowo-badawcze składało się z następujących systemów:

1. Cztery sześćelementowe dynamometry do wyznaczania sił i momentów na kołach jezdnych. Sterowanie pomiarami oraz przesył danych odbywał się bezprzewodowo z poziomu przenośnego komputera będącego elementem wyposażenia pojazdu
2. Robot sterujący kołem kierownicy pojazdu, umożliwiający sterowanie z różnymi prędkościami kątowymi oraz realizację zadanych obrotów kierownicy, manewrów standardowych, itd. Robot składał się z pierścieniowego siłownika montowanego na kierownicy, konstrukcji wsporczej z dwoma czujnikami momentu kierownicy, centralnej jednostki sterującej oraz zasilacza.
3. Różnicowy system GPS zintegrowany z platformą inercyjną do wyznaczania położenia oraz kinematycznych parametrów ruchu pojazdu. Dokładność pozycjonowania wynosiła 20 mm, zaś czas akwizycji 0.01s.
4. Komputer sterujący pracą robota, DGPS oraz do obsługi dynamometrów na kołach jezdnych poprzez łącze radiowe
5. Czujnik prędkości jazdy CORREVIT L400 o zwiększonym zakresie montażu pionowego +/- 260 mm, przydatnym szczególnie w warunkach terenowych. Wraz z czujnikiem pojazd wyposażono w rejestrator cyfrowy DAT do zapisu danych pomiarowych.

6. Głowice SST do pomiarów naprężeń w podłożu wraz z oprzyrządowaniem.
7. Miernik wilgotności TDR, ręczne urządzenie do natychmiastowego pomiaru wilgotności gruntu lub stałej dielektrycznej śniegu, koniecznej do wyznaczenia gęstości.



Rys. 2.24. Samochód terenowo-osobowy Suzuki Vitara zaadoptowany na pojazd badawczy



Rys. 2.25. Systemy wyposażenia pomiarowo-badawczego. Od góry: robot sterujący – siłownik na kierownicy, konstrukcja wsporcza, DGPS.

Ponadto, w zależności od potrzeb, pojazd wyposażano w przetwornicę 12V/230V do zasilania urządzeń sieciowych z instalacji elektrycznej albo agregat prądotwórczy HONDA 650W. Pojazd oraz poszczególne systemy pokazano na fotografiach. Więcej szczegółów można znaleźć w publikacji autora (Pytko, 2010).

2.5.3 Charakterystyka badanych podłoży

Podłoże odkształcalne, to w myśl definicji przyjętej przez Autora podłoże, które pod obciążeniem elementem jezdnym (koło, gąsienica) odkształca się o wartość większą niż odkształcenie elementu jezdny. Zatem do podłoży odkształcalnych zaliczają się typowe grunty oraz gleby, śnieg.

Różnorodność gruntów i gleb a także innych podłoży odkształcalnych sprawiła, iż konieczne było dokonanie wyboru podłoży typowych lub wzorcowych. Typowy grunt lub gleba rolnicza jest mieszaniną różnych frakcji, począwszy od najdrobniejszych cząstek koloidów, ilów, poprzez lessy, drobny, średni i gruby piasek, kończąc na kamieniach, których rozmiary sięgają kilkunastu centymetrów. Rozpatrując zagadnienie doboru podłoży od strony ich własności trakcyjnych lub mechanicznych wybrano podłoże lessowe i piaszczyste. Plastyczne własności podłoży lessowych uwiadamiają się szczególnie w warunkach podwyższonej wilgotności, natomiast tarcie wewnętrzne w tym materiale jest stosunkowo niewielkie, szczególnie, gdy wilgotny less osiąga granicę płynności i zaczyna zachowywać się jak ciecz. Dla odmiany, typowy piasek w warunkach niskiej wilgotności pozbawiony jest plastyczności i spójności, a o jego wytrzymałości na ścinanie decyduje wzajemne oddziaływanie cząstek (tarcie wewnętrzne). Wzrost wilgotności powoduje, że piasek uzyskuje tzw. spójność pozorną, tym większą, im mniejsze są cząsteczki, bo wówczas siły powierzchniowe oraz efekty kapilarne są bardziej znaczące. Badania na gruncie piaszczystym prowadzono na terenie poligonu WITPiS Sulejówek, natomiast grunt lessowy otrzymano jako urobek przy wykonywaniu wykopu pod fundament na terenie budowy pewnego obiektu w Lublinie.

Trzecim podłożem dobranym do programu badawczego był torf, zwany też glebą leśną. Typowe torfy cechuje wysoka dynamika własności mechanicznych w funkcji wilgotności. Są to materiały bezpostaciowe, a ich własności wytrzymałościowe zmieniają się w bardzo szerokich granicach. Określenie wpływu wilgotności podłoży na naprężenia czy siły trakcyjne nie było celem pracy, jednak w przypadku torfu przeprowadzono badania w warunkach niskiej i wysokiej zawartości wody w podłożu. Badania na torfach suchych prowadzono na terenie poligonu WITPiS Sulejówek, w okresie wczesnojesiennym. W przypadku torfów mokrych poligon badawczy urządzono na obszarze łąkowo-leśnym, nieopodal miejscowości Glinnik, województwo lubelskie.

Powyższe ośrodki gruntowe były badane przy braku roślinności. Wyjątek stanowiły torfy, w przypadku których nie było możliwe całkowite usunięcie systemów korzeniowych, stanowiących część składową struktury tego podłoża.

Tabela 2.3 Charakterystyka badanych gruntów

Parametr	Less	Piasek
$n, -$	0.68	1.2296
$k_c, \text{kN/m}^{(n+1)}$	56	39,31
$k_\phi, \text{kN/m}^{(n+2)}$	64	105.1
$s_{\max}, \text{kN/m}^2$	78	103
przy nacisku 100 kN/m ²		
K, K_w, cm	0.38	0.51
$c, \text{kN/m}^2$	3.04	0.7
$\phi, ^\circ$	33	29,3
Gęstość, g/cm ³	1.64	1.72

Podobne kryteria doboru zastosowano w przypadku programowania badań na glebach użytkowanych rolniczo i tu zdecydowano o prowadzeniu prób na glebie lessowej, dla której poligon urządzono w okolicach miejscowości Paulinów, k. Nałęczowa, województwo lubelskie oraz na glebie piaszczystej, w miejscowości Mała Kłoda, k. Kurowa, województwo lubelskie.

Odminną grupą podłoży badanych w ramach pracy były śniegowe podłoża trakcyjne. Warunki klimatyczne naszego kraju a także większości państw Europy gwarantują obecność pokrywy śnieżnej w okresie zimowym, a jej grubość, nawet na terenach nizinnych nierzadko przekracza 25 cm. Badacze zajmujący się przejezdnością i osiąganymi pojazdami na śniegu (CRREL, USA, SFL Davos Szwajcaria) rozróżniają dwa zasadnicze rodzaje pokrywy śnieżnej: śnieg głęboki (*deep snow*) oraz śnieg tzw. fundamentowany (*shallow snow*), a parametrem określającym rodzaj pokrywy jest jej grubość. Przyjmuje się, że jeżeli grubość pokrywy wynosi więcej niż 1/3 średnicy koła jezdnego, mamy do czynienia z głębokim śniegiem. Różnica między śniegiem fundamentowanym a głębokim uwidacznia się szczególnie w zakresie rozkładu nacisków pod kołem i w przypadku śniegu fundamentowanego wpływ twardego podłoża jest istotny.

Zgodnie z przyjętym programem, badania zrealizowano na śniegu fundamentowanym i głębokim. Wyznaczanie stanu naprężeń oraz sił działających na koło jezdne w śniegu fundamentowanym zmrożonym i mokrym przeprowadzono na terenie poligonu WITPiS Sulejówek. Wyznaczanie naporu w śniegu głębokim, powodowanego obciążeniem ratraka przeprowadzono w Dolinie Świńskiej, w rejonie Kasprowego Wierchu w Tatrach.

2.5.4 Ramowy program badań doświadczalnych

2.5.4.1. Wyznaczanie naprężeń i odkształceń

Wyznaczanie naprężeń i odkształceń w gruntach i glebach przeprowadzono na różnych podłożach: lessowym, piaszczystym oraz torfowym (torf suchy i mokry) a ponadto na dwóch różnych glebach rolniczych, lessowej i piaszczystej.

W badaniach używano 1, 2 lub 3 głowice SST instalowane na głębokości: 15, 25 i 40cm. Realizowano po minimum 5 powtórzeń. W przypadku podłoża lessowego i piaszczystego oraz na glebach rolniczych lessowej i piaszczystej, instalowano optoelektroniczny system wyznaczania odkształceń podłoża.

Poszczególne zadania badawcze zaprogramowano następująco:

- wpływ wybranych czynników: obciążenie pionowe koła (3 wartości obciążenia w zależności od masy ładunku, pojazd STAR 1466), ciśnienie w ogumieniu (2 wartości, nominalna i obniżona do wartości, przy której jeszcze nie występowało obracanie opony na obręczy koła), prędkość jazdy (3 wartości);
- wpływ kolejnych przejazdów (od 1 do 6 przejazdów);
- wpływ trybu pracy koła jezdnego (toczenie swobodne i napędzanie)
- naprężenia i odkształcenia powodowane obciążeniem taśmy gąsienicy

2.5.4.2. Jednoczesne wyznaczanie naprężeń w podłożu i sił trakcyjnych na pojeździe

Badania zaprogramowano dla dwóch podłoży: lessowego i piaszczystego. Stosowano dwa ułożenia głowicy SST: standardowe i obrócone o 90 wokół osi podłużnej, przy czym obie głowice użyte jednocześnie, umieszczano na głębokości ok. 15cm. Wyznaczano naprężenia w podłożu oraz siły: uciągu i oporu toczenia. Synchronizację pomiarów sił i naprężeń uzyskano przez jednoczesne uruchamianie zapisu danych w komputerach obsługujących oba systemy pomiarowe. Prędkość jazdy podczas toczenia swobodnego wynosiła ok. 3-5km/h, natomiast podczas wyznaczania siły uciągu pojazd dojeżdżał do punktu pomiarowego z prędkością ok. 10km/h, gdzie następowało przyhamowanie przez pojazd holowany, w celu uzyskania maksymalnej siły uciągu. Liczba powtórzeń dla każdego wariantu wynosiła minimum 5.

2.5.4.3. Identyfikacja modelu koło-podłoże odkształcalne

Badania przeprowadzono na trzech różnych podłożach: lessowym, piaszczystym oraz torfowym suchym. Wyznaczano stan naprężeń w podłożu przy użyciu jednej głowicy SST zainstalowanej na głębokości 15cm oraz siły i momenty działające na koło pojazdu badawczego od podłoża. Inaczej niż w przypadku sił trakcyjnych na pojeździe, nie stosowano pojazdu hamującego, zaś efekty dynamiczne (wygenerowanie maksymalnej siły napędowej) uzyskano przez gwałtowne

przyspieszenie. Siłę oporu toczenia wyznaczano przy odłączonym napędzie kół przednich. Przeprowadzono po 5 powtórzeń dla każdego wariantu.

2.5.4.4. Wyznaczanie naprężeń i sił trakcyjnych na podłożach śniegowych

Wyznaczanie naprężeń w podłożu pod obciążeniem pojazdów przeprowadzono na śniegu głębokim, obciążanym gąsienicą ratraka oraz na śniegu zmrożonym, powodowane obciążeniem samochodu ciężarowego STAR 944. Istotna różnica polegała na tym, że naprężenia w śniegu głębokim wyznaczano z użyciem 4 niskoprofilowych, jednoosiowych czujników naporu, umieszczanych na różnej głębokości pod powierzchnią, natomiast w przypadku śniegu zmrożonego użyto głowicy SST, umieszczonej na poziomie podłoża gruntowego.

W badaniach na śniegu głębokim wyznaczano napory wywołane obciążeniem ratraka przejeżdżającego z prędkością ok. 5km/h a pomiary powtarzano dla kolejnych 6 przejazdów. Wykonano dwie serie pomiarów w dwóch punktach badawczych.

W badaniach na śniegu zmrożonym przeprowadzono pomiary siły oporu toczenia i uciągu, jednocześnie z pomiarami naprężeń. Podobnie, jak w poprzednich zadaniach wykonano po 5 powtórzeń.

2.5.4.5. Wyznaczanie siły bocznej na kołach kierowanych

Siłę boczną na kołach kierowanych wyznaczano na podłożu piaszczystym i lessowym oraz na śniegu mokrym. W zadaniu tym zastosowano automatyczne sterowanie kołem kierownicy za pomocą robota zainstalowanego w pojeździe i dzięki temu możliwe było sterowanie z powtarzalnymi parametrami jak poniżej:

- szybkość narastania obrotu kierownicy (prędkość kątowa): 100, 500 i 1500 °/sek. dla trapezowego wymuszenia obrotem kierownicy;
- częstotliwość sinusoidalnego wymuszenia obrotem kierownicy: 0.5, 1.0 oraz 2.5 Hz

Wyznaczano siłę boczną na obu kołach kierowanych podczas skrętów w prawo i w lewo. Wykonano po minimum 5 powtórzeń dla każdego wariantu. Dalsze szczegóły dotyczące sposobu przeprowadzania prób z tego zakresu zawarto w rozdziale 5.

3. ANALIZA NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ W PODŁOŻU POD OBCIĄŻENIEM ELEMENTÓW JEZDNYCH

Naprężenia i odkształcenia wywołane obciążeniem pojazdów stanowią ważne wielkości wejściowe w wielu rozwiązaniach problemu współpracy elementów jezdnych z podłożem odkształcalnym. Zasadnicza różnica między nawierzchnią utwardzoną a podłożem odkształcalnym polega na tym, że obciążenia wywierane przez pojazd na nawierzchnię twardą rozkładają się na znacznej powierzchni, która działa niczym ciało sztywne, zaś podłoże miękkie podlega miejscowym, znacznym odkształceniom, które mają charakter natychmiastowy i nieodwracalny. W wielu pracach badawczych podkreślano znaczenie naprężeń i odkształceń w modelowaniu układu element jezdny – podłoże odkształcalne (Foda, 1991, Muro, 1993, Wanji, 1997, Wulfsohn, 1992). Większość modeli opisujących współpracę koła lub gąsienicy z podłożem odkształcalnym umożliwia wyznaczanie sił trakcyjnych jako funkcje naprężeń i odkształceń w podłożu. Jednakże, obciążenia generowane podczas jazdy, przekazywane są przez elementy jezdne w sposób złożony, a ich rozkład w ośrodku podłoża ma charakter przestrzenny i silnie niejednorodny. Rozkład naprężeń i odkształceń w podłożu zależy od rodzaju i stanu podłoża, masy pojazdu, rozmiaru ogumienia, prędkości jazdy, poślizgu kół jezdnych, itd. Znajomość tych zależności stanowi podstawę do tworzenia i doskonalenia modeli opisujących układ element jezdny – podłoże odkształcalne.

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę naprężeń i odkształceń powodowanych obciążeniem elementów jezdnych pojazdów w czasie jazdy. Zamieszczono i omówiono wyniki uzyskane w badaniach doświadczalnych, przeprowadzonych z użyciem metod i obiekty pojazdów scharakteryzowanych w poprzednim rozdziale pracy.

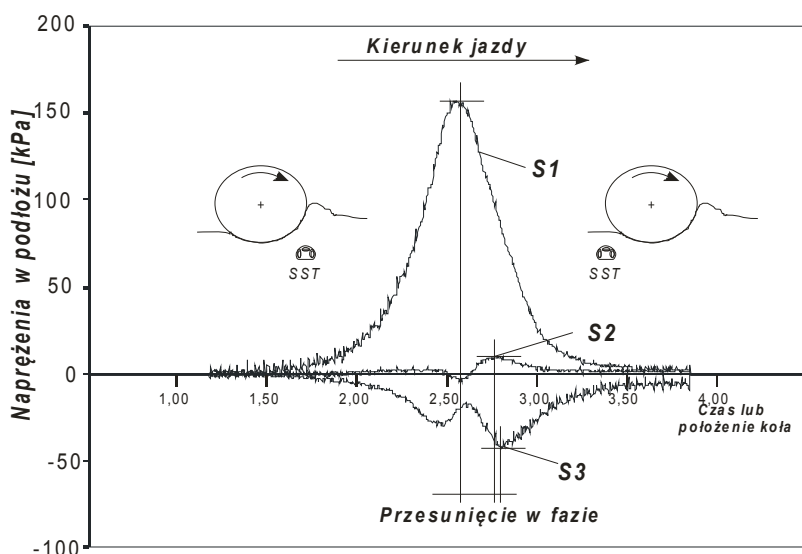
3.1 Analiza naprężeń w podłożu

3.1.1 Ogólna analiza stanu naprężeń w podłożu wywołanych obciążeniem elementów jezdnych

Stan naprężenia w materiale podłoża odkształcalnego, wywołany obciążeniami od przejeżdżających pojazdów posiada charakter niejednorodny i rozkład przestrzenny. Górną granicę stanowi powierzchnia styku mechanizmu jezdnego z podłożem, zaś oddziaływanie w głąb ośrodka może występować do 50 cm głębokości. Badania z użyciem głowic *SST* umożliwiają wyznaczenie składowych stanu w układzie normalnym ($S1$, $S2$, $S3$) oraz w układzie oktaedrycznym (MNS i $OCTSS$). Na

rysunku 3.1 przedstawiono przebieg składowych stanu naprężeń w układzie normalnym, wywołanego obciążeniem pojedynczego przejazdu koła ogumionego.

Najeżdżające koło powoduje stopniowy przyrost naprężeń w punkcie pomiarowym, aż do wystąpienia maksymalnej wartości naprężenia $S1$. Dwa pozostałe naprężenia, $S2$ i $S3$ uzyskują maksima przesunięte w fazie w stosunku do $S1$. Naprężenie $S3$ uzyskuje dwa razy maksimum lokalne, jedno przed najazdem koła, drugie podczas zjazdu koła z miejsca pomiaru. Jest to konsekwencją spychania materiału podłoża przed kołem (pierwsze maksimum) oraz działania siły napędowej od koła na podłoże (drugie maksimum).

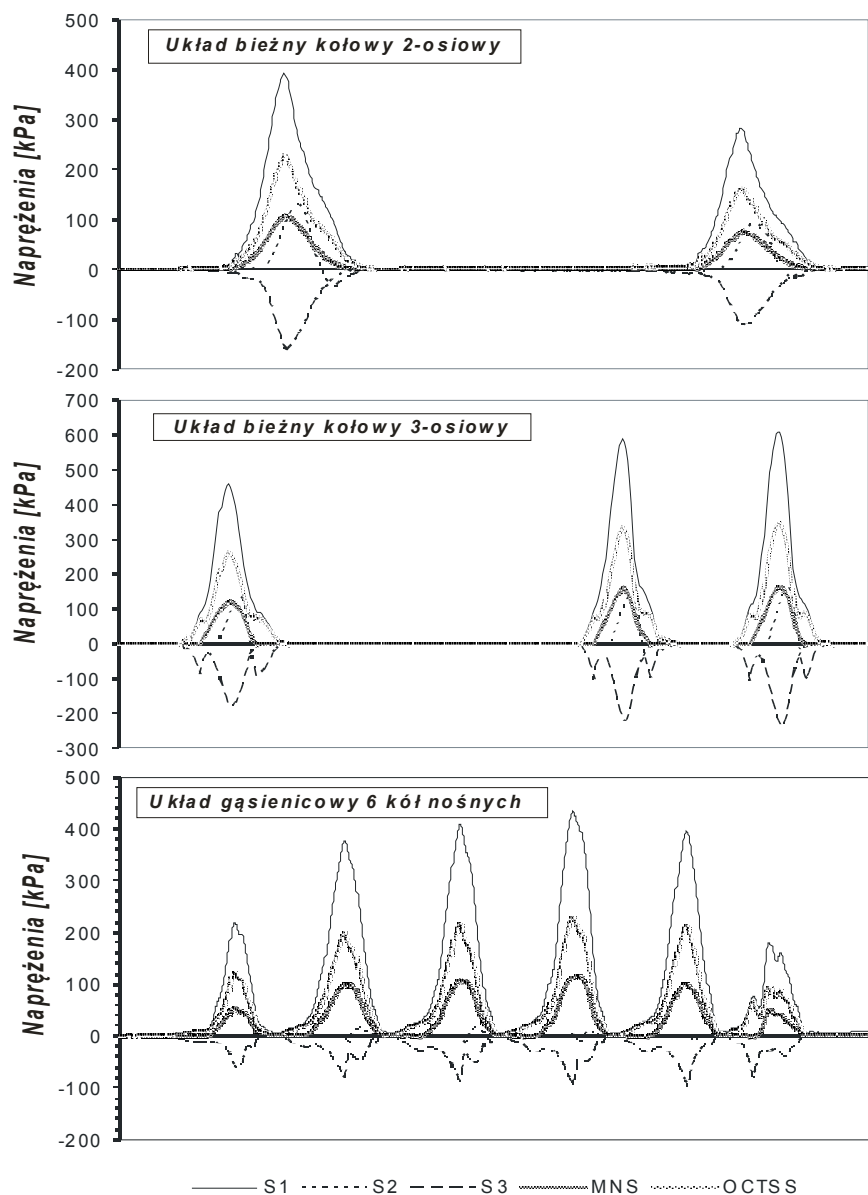


Rys. 3.1. Przykładowe przebiegi składowych naprężeń pod obciążeniem koła ogumionego.

W momencie, gdy koło znajduje się dokładnie nad głowicą, $S3$ maleje, ale nie do zera. Wszechstronne obciążenie gruntu pod kołem powoduje, że naprężenie to nie może przyjmować wartości zerowej (oprócz przypadków, gdy zmienia znak).

Naprężenie $S2$ jest funkcją siły poziomej poprzecznej. Jest zatem mniej podatne na obciążania występujące podczas jazdy na wprost. Jeżeli przejazd jest idealnie centryczny wówczas $S2$ uzyskuje małe wartości.

W przeprowadzonych badaniach najwyższe wartości uzyskiwało naprężenia $S1$. Jest to składowa dominująca w układzie naprężeń normalnych. Oś naprężenia $S1$ jest niemal zgodna z kierunkiem osi Z , a więc z dominującym kierunkiem obciążenia.



Rys. 3.2. Przebiegi naprężenia S_I dla pojazdów o różnej budowie układu bieżnego. Od góry: kołowy o 2 osiach, kołowy o 3 osiach, gąsienicowy o 6 kół nośnych.

Na wykresach przedstawiających przebiegi składowych stanu naprężeń (rys.3.2) występują piki, których liczba jest równa liczbie osi jezdnych danego

pojazdu. Dlatego też, na rysunku 3.2 dla pojazdów kołowych mamy wykres z dwoma i z trzema pikami, zaś dla pojazdu gąsienicowego występuje sześć pików. Taki kształt przebiegu składowych stanu naprężenia informuje o tym, że po ustąpieniu obciążenia (po zjeździe koła znad głowicy) następuje relaksacja naprężeń w materiale podłoża. Naprężenia resztkowe (rezydualne) są małe, co pozwala traktować materiał podłoża jako quasi-elastyczny. W przypadku pojazdów z gąsienicowym układem bieżnym, w gruncie pomiędzy kołami bieżnymi naprężenia relaksują się mniej intensywnie. Naprężenia występujące pomiędzy pikami wynikają z rozkładu obciążenia na całej długości taśmy gąsienicy. Rzeczywisty przebieg naprężeń pod taśmą gąsienicy różni się od niektórych przewidywań teoretycznych, według których, skutkiem napięcia taśmy gąsienicy, rozkład naprężenia powinien mieć kształt prostokątny, gdy nie występuje siła uciągu oraz trapezowy (ew. trójkątny), gdy siła uciągu powoduje moment unoszący przód pojazdu. Wy tłumaczeniem intensywnej relaksacji naprężeń w podłożu po ustaniu obciążenia są również wysokie wartości nacisków jednostkowych. W większości przypadków zarejestrowane naprężenia S_I na głębokości 15cm przekraczały 300kPa, nierzadko osiągały 500 a nawet 700kPa. Pod tak wysokim naciskiem grunt podlega nagłym odkształceniom, które prowadzą do jego konsolidacji. W efekcie materiał podłoża staje się quasi-sprężysty, a po ustaniu obciążenia naprężenie powraca do stanu pierwotnego.

W mechanice gruntów istnieje pojęcie naprężenia prekompresji (ang. pre-compression stress). Jego wartość jest trudna do zdefiniowania i oszacowania. Jedną z metod wyznaczania tej wielkości jest badanie edometryczne, w którym cylindryczna próbka gruntu jest poddawana działaniu obciążenia, a mierzone są dwie wielkości jednocześnie: nacisk działający na próbkę oraz jej ugięcie (odkształcenie wzdłuż osi pionowej). Wartość nacisku, przy którym odkształcenie zaczyna nagle rosnać, może być identyfikowana z naprężeniem prekompresji. Na podstawie badań własnych, Autor stwierdził, że podobnie jak w testach laboratoryjnych grunt zachowuje się w podczas obciążania przez mechanizmy jezdne. Przykładowa wartość naprężenia prekompresji, wyznaczona doświadczalnie w warunkach polowych, wyniosła ok. 10-20 kPa i rosła dla kolejnych cykli obciążania (dla kolejnych przejazdów koła). Także kształt wykresu naprężenie-odkształcenie zmieniał się dla kolejnych cykli, punkt przegięcia stawał się bardziej wyraźny. Zatem naprężenie prekompresji jest tożsame lub dobrze skorelowane z naprężeniami resztkowymi, które obserwuje się w podłożu obciążonym taśmą, między kołami jezdnyymi. Ponieważ badane podłoża odkształcalne posiadają cechy plastyczności, więc nie należy się spodziewać, aby naprężenia resztkowe utrzymywały się przez dłuższy okres czasu. Zauważono, iż przerwa pomiędzy kolejnymi przejazdami (zawsze nie

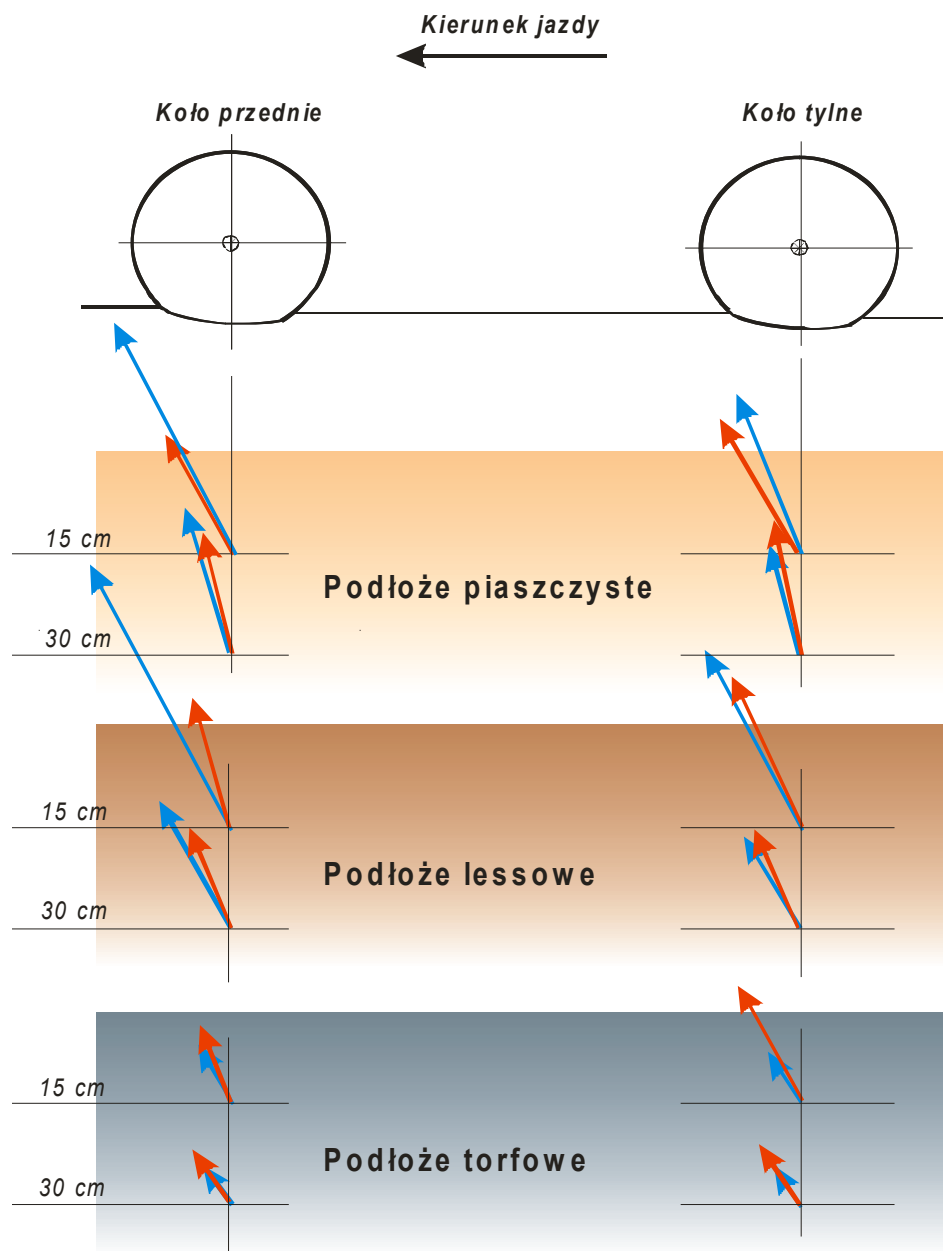
krócej niż 3-5 minut) to wystarczająco długi czas, by w podłożu zaszła pełna relaksacja naprężeń, a naprężenia resztkowe nie wpływały na dokładność wyników.

Metoda badawcza z użyciem głowicy *SST* pozwala wyznaczyć nie tylko wartości i przebiegi czasowe naprężeń głównych oraz oktaedrycznych, ale również cosinusy kierunkowe naprężeń głównych (Way, 1996). Najważniejsze są cosinusy kąta naprężenia *SI* w momencie kulminacji (gdy koło jest nad głowicą). Na rysunku 3.3 przedstawiono wektory naprężenia *SI* w trzech badanych podłożach, obciążonych kołami samochodu STAR 944 podczas toczenia swobodnego oraz napędzania. Wektory *SI* narysowano dla momentu, w którym *SI* osiąga maksimum, co odpowiada w przybliżeniu chwili, w której oś koła pokrywa się z osią głowicy *SST*. W rzeczywistości zawsze istnieje minimalne przesunięcie, lecz jest ono do pominięcia w tych analizach. Na podstawie rysunku 3.3 stwierdzono, że na wektor naprężenia *SI* wpływał rodzaj podłoża, głębokość punktu pomiaru oraz tryb pracy koła: toczenie, napędzanie. W przypadku toczenia, wektor *SI* jest bardziej odchylony od pionu niż przy napędzaniu. Stwierdzono na podstawie uzyskanych wyników, że oddziaływanie elementu jezdnego na podłoże różni się dla toczenia i napędzania i wpływa na wypadkową reakcji podłoża. Dla większości przypadków, odchylenie wektora *SI* od pionu jest większe na głębokości 15cm. Wektor *SI* zmienia swój kierunek w warstwie podłoża, która podlega intensywnym odkształceniom (0 – 15cm), zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym. Odkształcenia głębszych warstw podłoża są mniejsze.

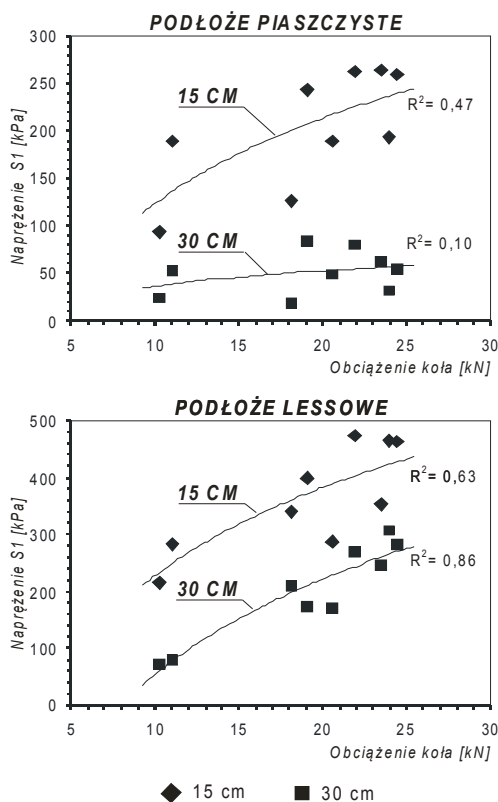
Na rysunku 3.3 można zauważyć tendencje co do wartości naprężeń w różnych podłożach, powodowanych obciążeniem pojazdu STAR 944. Naprężenia w podłożu piaszczystym i lessowym były znacznie (2 – 3 razy) większe od naprężeń w podłożu torfowym.

3.1.2 Wpływ obciążenia kół na naprężenia w podłożu

Ważnym parametrem od strony pojazdu, wpływającym na wartości naprężeń w podłożu jest obciążenie koła oraz skojarzony z tym nacisk jednostkowy. Nacisk jednostkowy na powierzchni kontaktu koło – podłoże nieutwardzone jest funkcją obciążenia koła oraz powierzchni kontaktu. Wyznaczanie powierzchni kontaktu koła ogumionego (odkształcalnego) z odkształcalną nawierzchnią gruntu jest zagadnieniem poruszonym przez wielu badaczy. Propozycja Autora polega na pominięciu wyznaczania powierzchni kontaktu, jako wielkości pośredniej w łańcuchu obciążenie – powierzchnia kontaktu – naprężenia w podłożu. Dla jednego typu i rozmiaru opon, przy niezmiennym ciśnieniu w ogumieniu jest to prawidłowy tok myślowy.



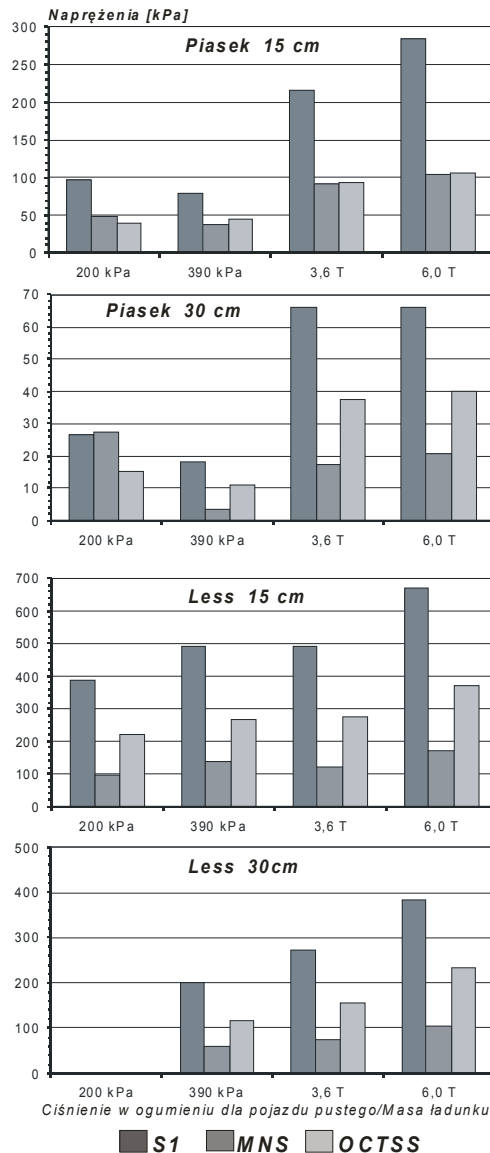
Rys. 3.3. Wektory naprężenia S_1 pod kołami pojazdu STAR 944 na trzech różnych podłożach dla 2 głębokości pomiaru: 15 i 30cm. Kolorami oznaczono tryb pracy koła: niebieski – toczenie swobodne, kolor czerwony – napędzanie.



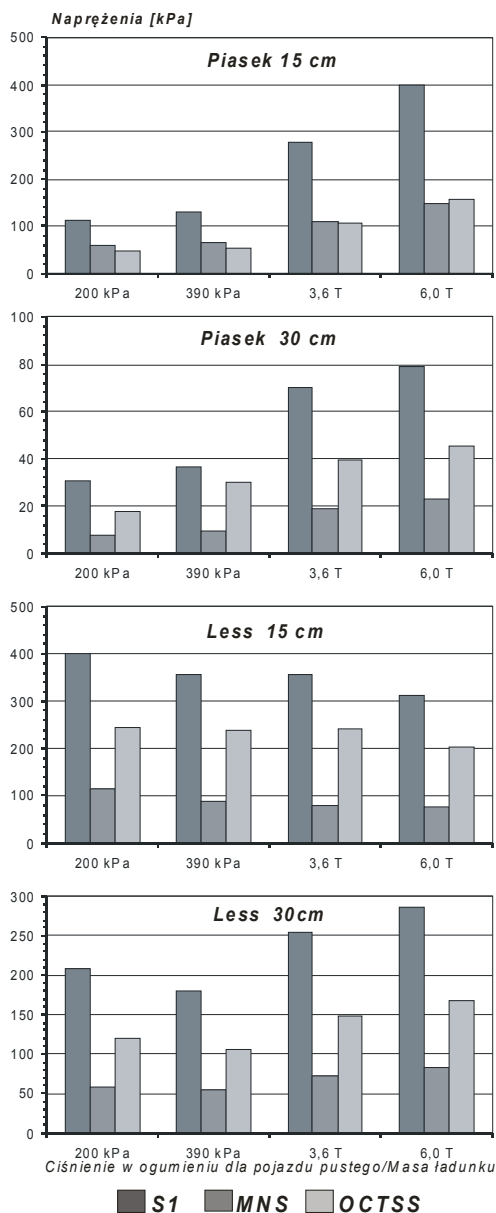
Rys. 3.4. Napięcie S_1 w funkcji obciążenia pionowego kół pojazdu STAR 1466 wyznaczone w podłożu piaszczystym i lessowym.

Napięcie główne S_1 w funkcji obciążenia kół dla pojazdu STAR 1466 w różnych stanach załadunku na dwóch podłożach pokazano na rysunku 3.4. Wykreślone linie trendu graficznie obrazują zależność, na podstawie której można wnioskować o pewnych różnicach w oddziaływaniu koła na badane grunty. O ile charakter linii trendu dla wyników uzyskanych na głębokości 15cm jest podobny i można mówić o podobnych warunkach współpracy koła z podłożem, to sytuacja jest znacząco inna w przypadku napiężeń zmierzonych na głębokości 30cm. Krzywa obciążenie – napięcie na głębokości 30cm dla podłoża piaszczystego jest prawie płaska, podczas gdy dla lessowego wykazuje charakter wyraźnie progresywny. Na podstawie tej analizy można wnioskować, że różnica między badanymi podłożami polega m.in. na tym, że strefa oddziaływania obciążenia w podłożu lessowym jest znacznie większa niż w piaszczystym. Less przy niskiej wilgotności (3-7%) jest materiałem o quasi - elastycznych właściwościach, co objawia się szczególnie po przekroczeniu napięcia prekompresji. Natomiast podłoże piaszczyste wykazuje znaczny

pionowy gradient naprężenia, a granica oddziaływania obciążenia jest położona płycej. Potwierdzają to również badania odkształcenia gruntów, których wyniki przedstawiane i omawiane są w podrozdziale 3.2. Odkształcalność podłoża piaszczystego przy podobnej wilgotności jest większa.



Rys. 3.5. Naprężenia *S1*, *MNS* i *OCTSS* w funkcji ładunku pojazdu STAR 1466 dla podłoża piaszczystego i lessowego dla trybu pracy koła: toczenie



Rys. 3.6. Naprężenia *SI*, *MNS* i *OCTSS* w funkcji ładunku pojazdu STAR 1466 dla podłoża piaszczystego i lessowego. Tryb pracy koła: napędzanie

W pewnych sytuacjach korzystnie jest określać warunki współpracy koło-po-dłoże oraz osiągi pojazdu w funkcji masy całkowitej. Szczególnie w przypadku

operacji logistycznych czy transportu ładunków istotnym parametrem jest masa całkowita pojazdu. Na rysunkach 3.5 i 3.6 pokazano wartości maksymalne naprężeń *SI*, *MNS* i *OCTSS*, uśrednione z 3 kół pojazdu STAR 1466 dla różnych wartości masy ładunku oraz dla dwóch różnych wartości ciśnienia w ogumieniu.

Na rysunku 3.5 przedstawiono wyniki dla toczenia swobodnego, zaś na rysunku 3.6 dla napędzania. Wzrost masy całkowitej pojazdu powoduje wyższe wartości naprężeń. Nieoczekiwany efekt obniżonego ciśnienia w ogumieniu (naprężenia rosną, zamiast maleć jak oczekiwano) można tłumaczyć następująco. Naprężenia były wynikiem oddziaływań wszechstronnych, których wypadkowy wektor wyznaczono na podstawie pomiarów z użyciem głowicy *SST*. Możliwa była sytuacja, że obciążenie przenoszone było przez większą powierzchnię styku opony o niższym ciśnieniu a jednocześnie występowała koncentracja naprężeń na czujnikach głowicy, co w efekcie redukowało efekt obniżenia ciśnienia i zwiększenia powierzchni kontaktu. Potwierdzono to wynikami pomiarów odkształceń. Podłoże piaszczyste odkształcało się bardziej intensywnie niż lessowe (patrz p.3.2.1), a w podłożu piaszczystym zaobserwowano odwrotny wpływ obniżonego ciśnienia w ogumieniu. Dodatkowo, należy brać pod uwagę fakt, iż w badaniach, których wyniki przedstawiono na rysunkach 3.5 i 3.6 brał udział pojazd wyposażony w opony terenowe o wysokiej sztywności i niskim współczynniku wypełnienia rzeźby bieżnika, co dodatkowo zredukowało spodziewany efekt zmniejszonego ciśnienia w ogumieniu.

Naprężenia pod obciążeniem kół podczas próby uciągu pojazdu STAR 1466 uzyskały wartości niższe niż w próbach przejazdów swobodnych. Tendencja wzrostu wartości naprężeń dla rosnącej masy ładunku (obciążeń kół) była zachowana w przypadku podłoża piaszczystego (15 i 30cm) oraz lessowego na głębokości 30cm, natomiast naprężenia w podłożu lessowym na głębokości 15cm przy napędzaniu nie korelowały z obciążeniem.

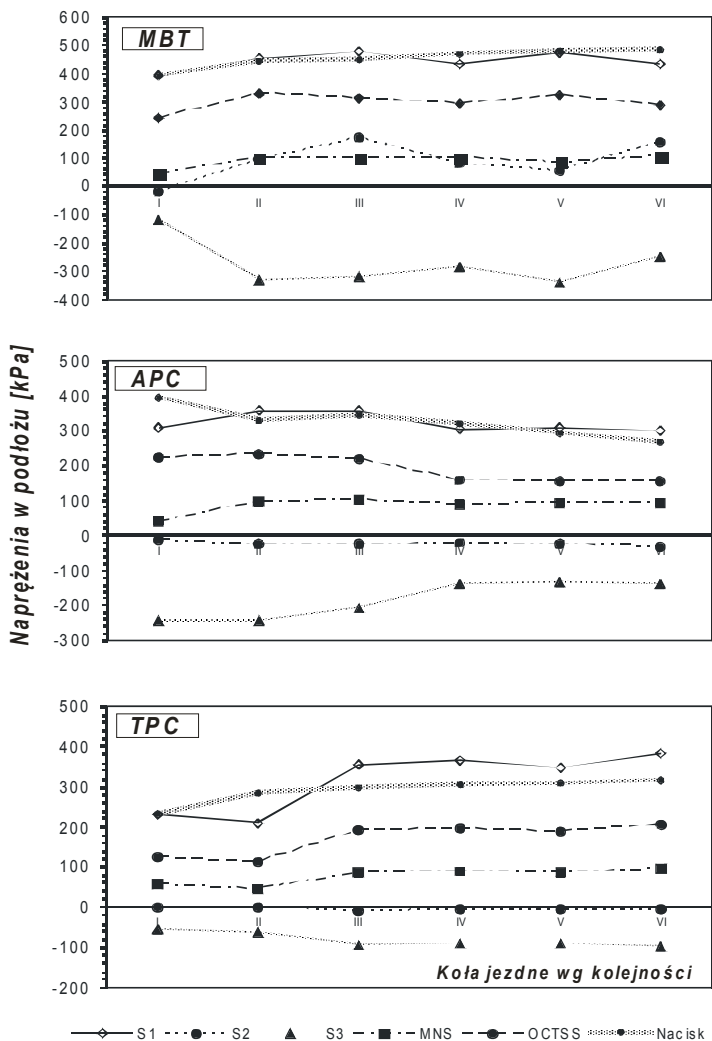
Niższe wartości naprężeń w podłożu wyznaczone przy napędzaniu można wytłumaczyć efektem deformacji postaciowej podłoża na skutek ścinania. W przypadku napędzania, naprężenia ścinające są znacznie większe niż wytrzymałość doraźna gruntu, co prowadzi do dynamicznej deformacji (zniszczenia) struktury. Grunt pod kołami jest „mielony” i przemieszcza się a stan naprężeń zmienia się. Zwiększa się powierzchnia kontaktu i objętość podłoża, w której generuje się reakcja na oddziaływania koła.

3.1.3 Wpływ nacisku jednostkowego

W badaniach prowadzonych z użyciem gąsienicowych wozów bojowych, naprężenia w podłożu odnoszono do nacisków jednostkowych liczonych z założenia, że obciążenie danego koła nośnego przenoszone jest na podłoże przez powierzchnię jednego elementu taśmy (ogniwa). Było to założenie o najniekorzystniejszych warunkach współpracy koło – gąsienica – podłoże. W takim przypadku,

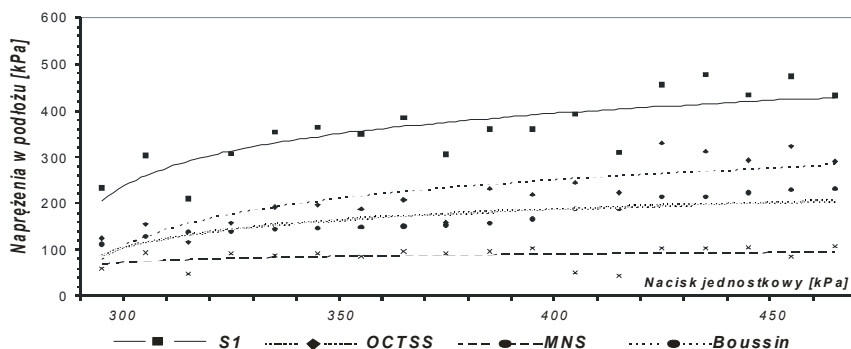
gdy obciążenie jest przenoszone przez tylko jedno ogniwo, istotne są dwa parametry: obciążenie koła oraz kształt ogniwa, opisany np. współczynnikiem kształtu lub stosunkiem powierzchni kontaktu horyzontalnej do pionowej.

Obciążenie kół jezdnych oraz rozkład nacisku jednostkowego wpływają na stan naprężenia w podłożu podczas przejazdu pojazdu gąsienicowego. Na rysunku 3.7 przedstawiono wartości składowych stanu naprężeń na jednym wykresie wraz z naciskiem jednostkowym pod kołami jezdnymi (linia grubsza).



Rys. 3.7. Naprężenia w gruncie piaszczystym pod obciążeniem pojazdów gąsienicowych wraz z wartościami nacisków jednostkowych

Punkty na osi poziomej oznaczają kolejne koła jezdne, od I do VI. Stwierdzono, że naprężenie *SI* w podłożu piaszczystym, wywołane obciążeniem taśmy gąsienicy pojazdów *MBT* i *APC* było dobrze skorelowane z wartością nacisku jednostkowego. W przypadku najlżejszego z pojazdów gąsienicowych, *TPC* wyznaczone wartości naprężenia *SI* są wyższe od wartości nacisku jednostkowego dla czterech ostatnich kół jezdnych. Może to być spowodowane dociążeniem tylnych kół jezdnych. Zbiorcze zestawienie wartości naprężeń *SI*, *MNS* i *OCTSS* w funkcji nacisku jednostkowego pokazano na rysunku 3.8.



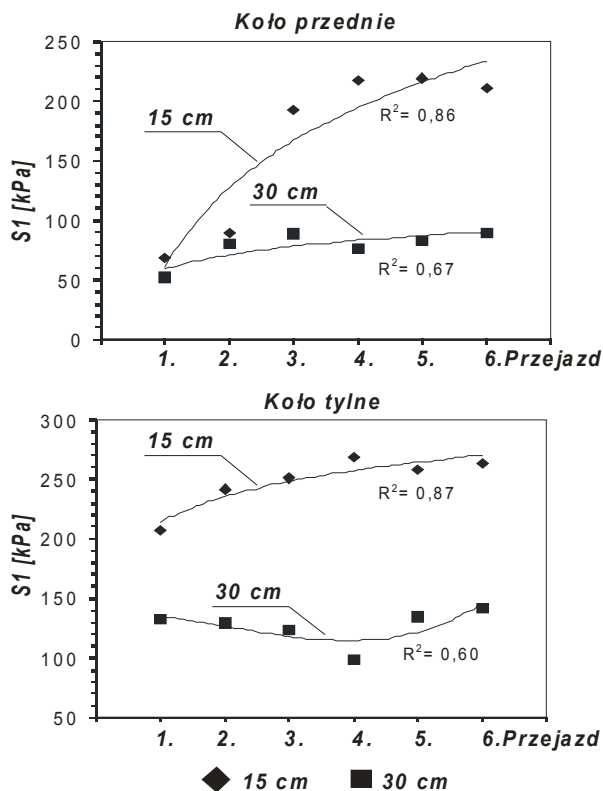
Rys. 3.8. Naprężenia w podłożu piaszczystym powodowane obciążeniem pojazdów gąsienicowych w funkcji nacisku jednostkowego

Na wykresie tym naniesiono również wartości naprężenia pionowego wyznaczone ze wzoru Boussinesq’a. Zależność nacisk jednostkowy – naprężenie w podłożu piaszczystym posiada charakter funkcji logarytmicznej. Nieoczekiwane wysokie różnice pomiędzy wartościami naprężenia *SI* oraz naprężenia pionowego wyznaczonego z teorii Boussinesq’a skłania do pewnych refleksji. Po pierwsze porównując naprężenie główne *SI* i naprężenie pionowe *SZ*, należy rozróżnić te wielkości. Naprężenie *SZ* osiągało wartości niższe niż naprężenie *SI*. Wyniki doświadczalne w porównaniu z przewidywaniami teoretycznymi mogą wykazywać różnice, ponieważ wskaźnik rejestracji dla czujników tensometrycznych w pomiarach naprężeń w podłożach odkształcalnych jest większy od jedności (wynik mierzony jest większy od wartości rzeczywistej, Schwanghart, 1991).

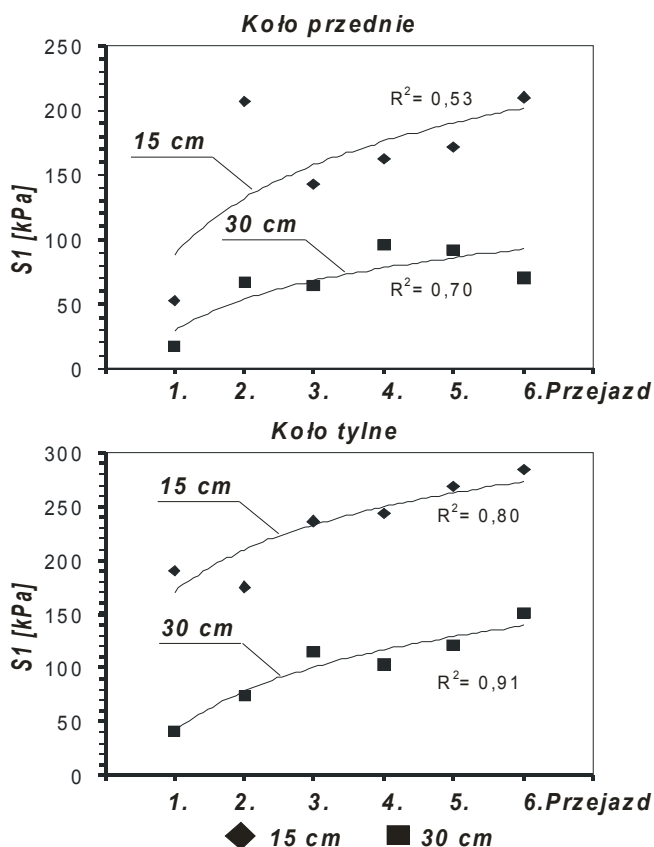
3.1.4 Wpływ wielokrotnych przejazdów ciągnika rolniczego na wartości naprężeń w glebie

Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na wartości składowych stanu naprężeń w podłożu pod obciążeniem kół jest liczba kolejnych przejazdów. Jest to szczególnie ważne, jeśli analizujemy jazdę w kolumnie, gdy pierwszy pojazd ma

pod kołami teren nie zagęszczony, a kolejne pojazdy jadą w śladzie. Inny przypadek, gdzie badanie wpływu kolejnych przejazdów jest ważne to problem ugniata-
 nia gleb rolniczych kołami ciągników i maszyn rolniczych. Na rysunkach 3.9 a i b
 przedstawiono wykresy wartości naprężenia S_1 zmierzone na głębokości 15 i 30 cm
 w glebie piaszczystej i lessowej w funkcji kolejnych przejazdów. Zaobserwowano,
 że najwyższy przyrost wartości naprężeń występował między pierwszym a drugim
 oraz drugim i trzecim przejazdem. Kolejne przejazdy (4-ty, 5-ty i 6-ty) powodowały
 mniej znaczące zmiany, szczególnie w glebie piaszczystej. Zdarzały się nawet przy-
 padki, gdy kolejny przejazd powodował generowanie naprężeń mniejszych od po-
 poprzedniego. Intensywność przyrostu wartości naprężeń była większa dla głębokości
 pomiaru 15 cm, co wynikało z pionowego rozkładu naprężeń w glebie. Zauważono
 również różnice w przyrostach naprężeń dla kół przednich i tylnych. Koła przednie
 generowały mniejsze naprężenia niż tylne, natomiast przyrosty procentowe warto-
 ści naprężeń były większe dla kół przednich.



Rys. 3.9a. Naprężenia w glebie piaszczystej powodowane obciążeniem kół ciągnika rolniczego MF 255 w funkcji kolejnych przejazdów



Rys. 3.9b. Naprężenia w glebie lessowej powodowane obciążeniem kół ciągnika rolniczego MF 255 w funkcji kolejnych przejazdów

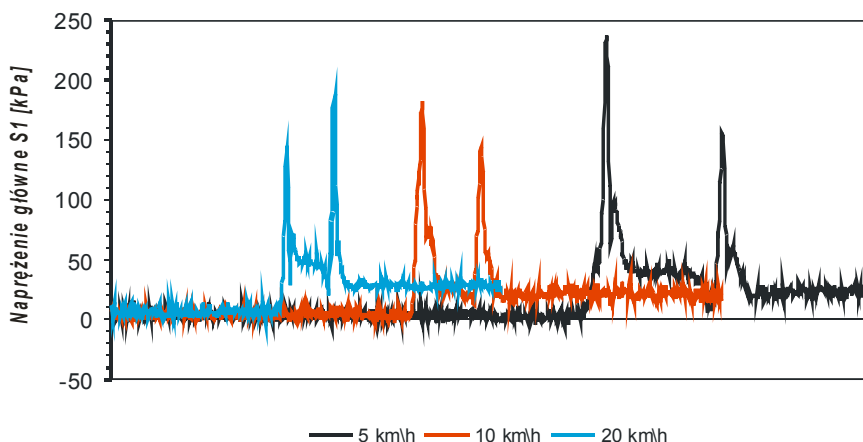
3.1.5 Wpływ prędkości jazdy na naprężenia w podłożu powodowane obciążeniem pojazdu

Prędkość jazdy jest wielkością, która wpływa na warunki współpracy koła lub gąsienicy z podłożem. Z literatury wiadomo, że parametr ten wpływa na odkształcenia gruntów i gleb. Na rysunku 3.10 przedstawiono przebiegi naprężenia S_I wyznaczone na podstawie pomiarów naporów w podłożu piaszczystym podczas przejazdu pojazdu STAR 944 z różną prędkością. Głowica SST umieszczona była na głębokości ok. 35-40cm, dlatego wartości naprężeń były niższe od prezentowanych wcześniej dla tego pojazdu.

Na podstawie wykresu (rys.3.10) zauważono, że wyznaczone wartości naprężeń w podłożu piaszczystym są niższe przy prędkości 20km/h niż przy 5

i 10km/h. Ponadto, stwierdzono zmianę wzajemnych proporcji naprężeń występujących w podłożu pod obciążeniem koła przedniego i tylnego. Dla prędkości 5km/h obciążenie kołem przednim generowało naprężenie wyższe obciążenie kołem tylnym (co było logiczną konsekwencją rozkładu obciążenia kół). Podobne proporcje były zachowane dla prędkości 10km/h, zaś podczas przejazdu z prędkością 20km/h wystąpiła zamiana: naprężenia pod obciążeniem kołem przednim były niższe niż pod kołem tylnym.

Na czterech wykresach rysunku 3.11 przedstawiono wartości maksymalne naprężenia S_I w funkcji prędkości jazdy. Wykresy A, B i C odpowiadają przypadkom pojazdu nieobciążonego z nominalnym ciśnieniem w oponach (A), pojazdu obciążonego ładunkiem 3,6 T (B) oraz ładunkiem 6 T (C). Za wyjątkiem przypadku (B), mamy do czynienia z odwrotnie proporcjonalną zależnością prędkości jazdy i naprężenia S_I . Różnice wartości naprężenia S_I powodowanego obciążeniem kół przednich i tylnych nie były istotne, podobnie jak wpływ obciążenia pojazdu.

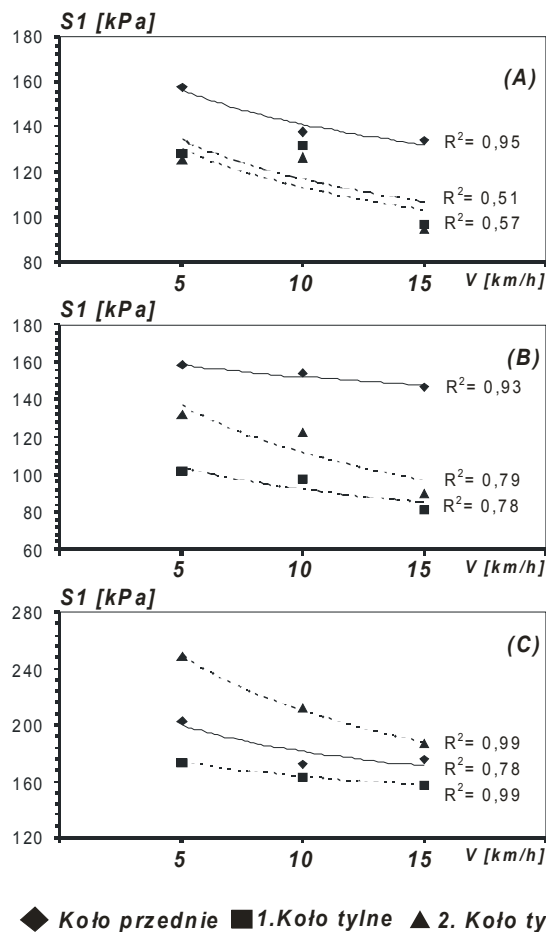


Rys. 3.10. Przebiegi czasowe naprężenia S_I w podłożu piaszczystym na głębokości 35-40cm pod obciążeniem pojazdu STAR 944, jadącego z różną prędkością

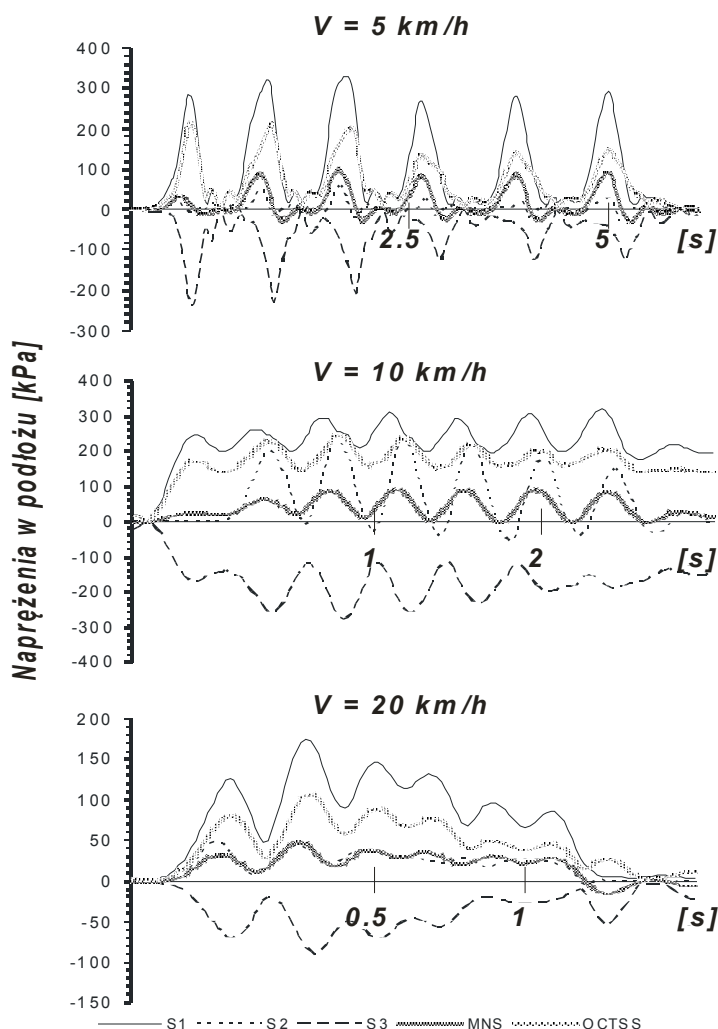
Wpływ prędkości na naprężenia badano również dla pojazdów gąsienicowych. W testach przeprowadzonych na podłożu piaszczystym, transporter *APC* przejeżdżał z prędkością 5, 10 i 20 km/h. Przykładowe przebiegi składowych stanu naprężeń przedstawiono na rysunku 3.12.

Na wykresie górnym rysunku 3.12 przedstawiono przykładowe przebiegi naprężeń w podłożu piaszczystym, powodowanych obciążeniem taśmą gąsienicy pojazdu *APC*. Na wykresie występują piki wartości maksymalnych pod kolejnymi kołami nośnymi oraz relaksacja naprężeń w podłożu między kołami. Na

drugim wykresie, przedstawiającym wartości uzyskane przy prędkości 10km/h, kształt przebiegu zmienił się: amplituda wartości naprężeń była mniejsza, zaś wartości maksymalne były niższe. Stwierdzono wpływ prędkości nie tylko na wartości maksymalne a również na rozkład naprężeń w podłożu powodowanych obciążeniem taśmą gąsienicy. Na trzecim wykresie zauważono, że maksymalne wartości naprężeń przy prędkości 20km/h były niższe a ponadto zaobserwowano zmianę proporcji pomiędzy wartościami maksymalnymi dla poszczególnych kół jezdnych. Podsumowując stwierdzono wpływ prędkości na wartości maksymalne naprężeń oraz na rozkład naprężeń w podłożu pod taśmą i pod kołami nośnymi pojazdu.



Rys. 3.11. Wpływ prędkości jazdy i obciążenia na wartości maksymalne naprężeń w podłożu piaszczystym powodowanych obciążeniem kół pojazdu STAR 1466, jadącego z prędkością 5, 10 i 20km/h.

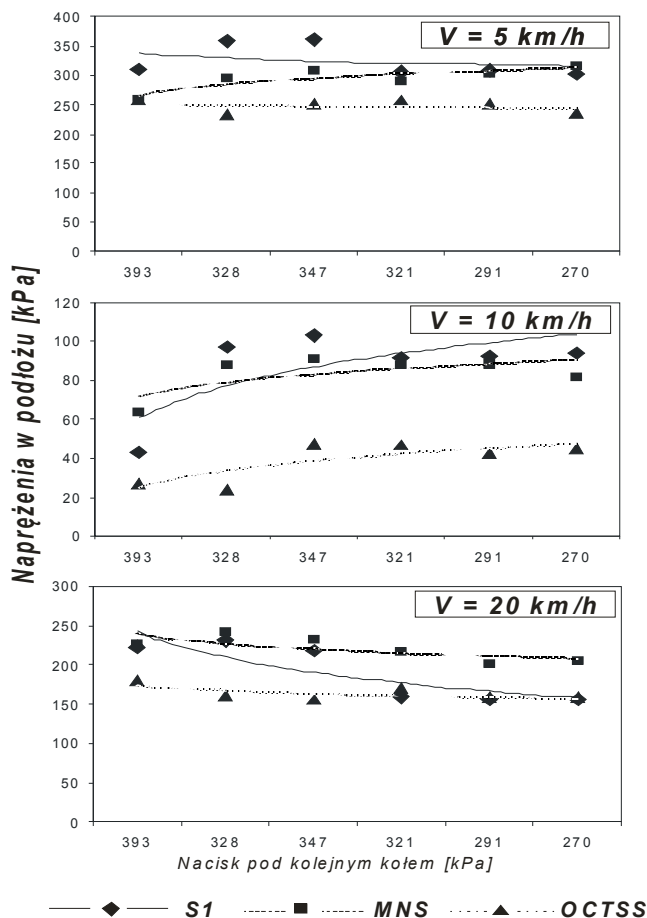


Rys. 3.12. Przebiegi czasowe składowych stanu naprężeń w podłożu piaszczystym powodowanych obciążeniem pojazdu gąsienicowego APC, jadącego z prędkością 5, 10 i 20 km/h.

Na rysunku 3.13 przedstawiono wyniki analizy naprężeń pod kołami jezdnyymi transportera gąsienicowego jadącego z różną prędkością. Na osi poziomej wszystkich trzech wykresów oznaczono wartości nacisków jednostkowych pod kolejnymi kołami jezdnyymi (nie jest to oś rosnących nacisków!).

W ten sposób próbowano przeanalizować wpływ kolejnych obciążeń pod następującymi po sobie kołami jezdnyymi. Przy prędkości 5 i 10 km/h nie

zaobserwowano wyraźnych tendencji, przy 20km/h wartości naprężeń były znacznie niższe. Stwierdzono wzrost wartości maksymalnych naprężeń w podłożu powodowanych obciążeniem kolejnych kół jezdnych, przy braku korelacji z wartością nacisku jednostkowego.



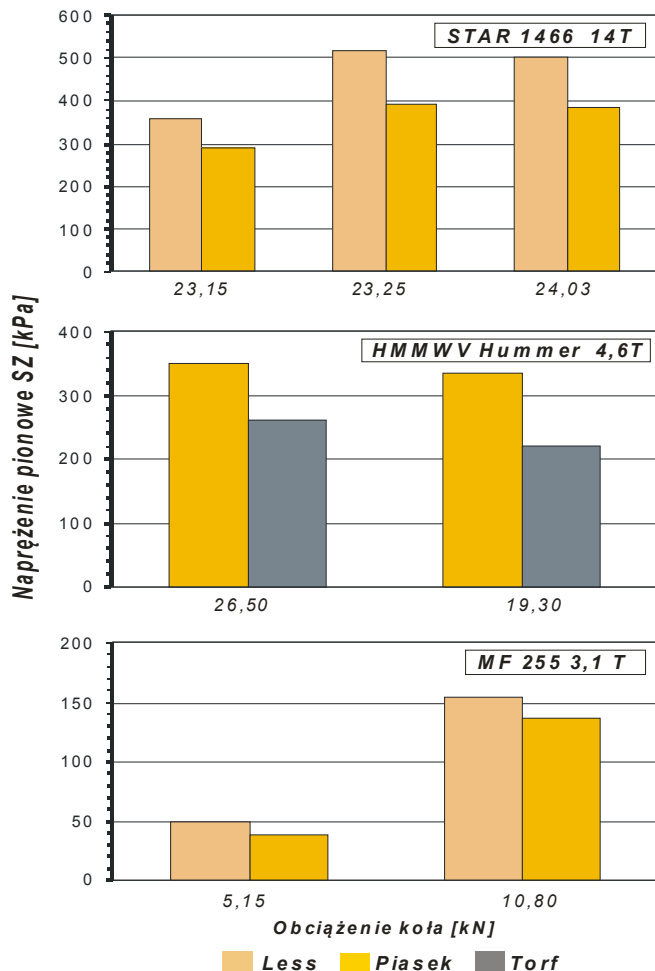
Rys. 3.13. Wpływ prędkości jazdy na wartości maksymalne naprężeń w podłożu piaszczystym powodowanych obciążeniem kolejnych kół jezdnych pojazdu APC, jadącego z prędkością 5, 10 i 20km/h.

3.1.6 Wpływ rodzaju podłoża na naprężenia pod obciążeniem pojazdu

Badania naprężeń powodowanych obciążeniem pojazdu prowadzono na trzech różnych podłożach odkształcalnych: piaszczystym, lessowym i torfowym oraz na

zmrożonym śniegu. Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ rodzaju podłoża na rozkład i wartości naprężeń pod obciążeniem kół jezdnych danego pojazdu. Na rysunku 3.14 przedstawiono wartości naprężenia pionowego SZ w różnych podłożach na głębokości 15cm. Zaobserwowano następujące tendencje i zależności:

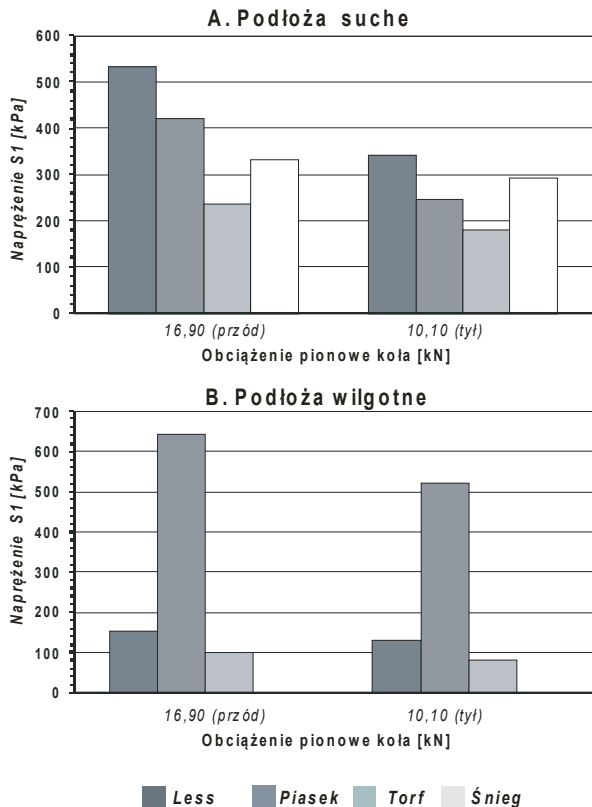
- naprężenie SZ w podłożu lessowym osiągają najwyższe wartości;
- nieco mniejsze wartości SZ wyznaczono w podłożu piaszczystym;
- najniższe wartości naprężenia SZ odnotowano w podłożu torfowym, przy czym zauważono różnicę wartości naprężenia wyznaczonego w torfie wilgotnym (15% wilgotności wagowej) oraz suchym (5-7 % w/w).



Rys. 3.14. Wartości naprężenia SZ na głębokości 15cm w trzech podłożach odkształcalnych, spowodowane obciążeniem pojazdów.

Badania z użyciem ciągnika rolniczego przeprowadzono na glebach wykorzystywanych rolniczo. Były to gleby piaszczysta i lessowa, mieszaniny piasku i lessu. Wypadkowe własności mechaniczne takich podłoży wynikają z proporcji piasku do lessu, dlatego też różnice wartości naprężenia S_z na dolnym wykresie rysunku 3.14 są mniej znaczne niż dla czystych podłoży lessowego i piaszczystego. Ponadto, gleby rolnicze były w stanie spulchnionym, luźnym. Pozostałe podłoża były silnie zagęszczone, szczególnie na głębokościach poniżej 30cm.

Najszerzy program badań zrealizowano z użyciem pojazdu STAR 944. Badano naprężenia wywołane obciążeniem kołami tego pojazdu w podłożach suchych i wilgotnych oraz w śniegu zmrożonym. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.15. Wartości naprężeń różnią się dla badanych podłoży, co potwierdza spostrzeżenie z podrozdziału 3.1.1. Najwyższe wartości naprężeń wyznaczono w podłożu lessowym, nieco niższe w piaszczystym, zaś zdecydowanie najniższe w torfowym.

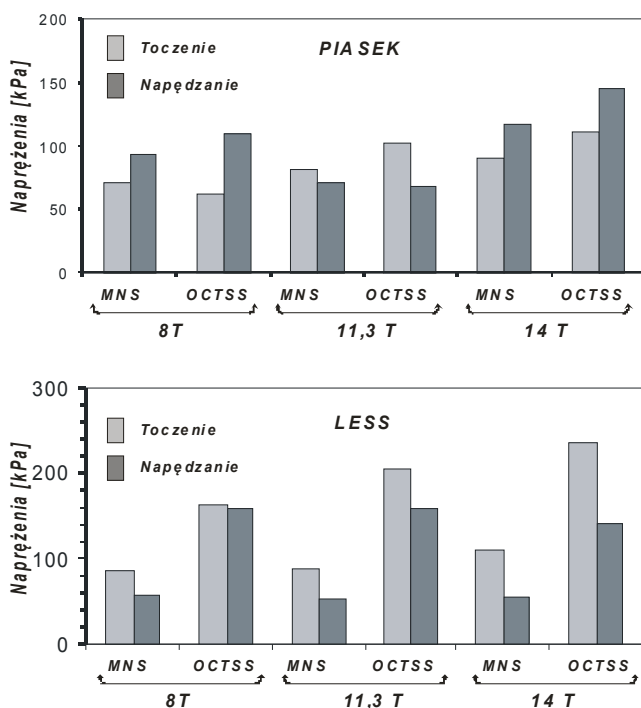


Rys. 3.15. Wartości maksymalne naprężenia S_I w badanych podłożach odkształcalnych na głębokości 15cm, powodowanego obciążeniem pojazdu STAR 944

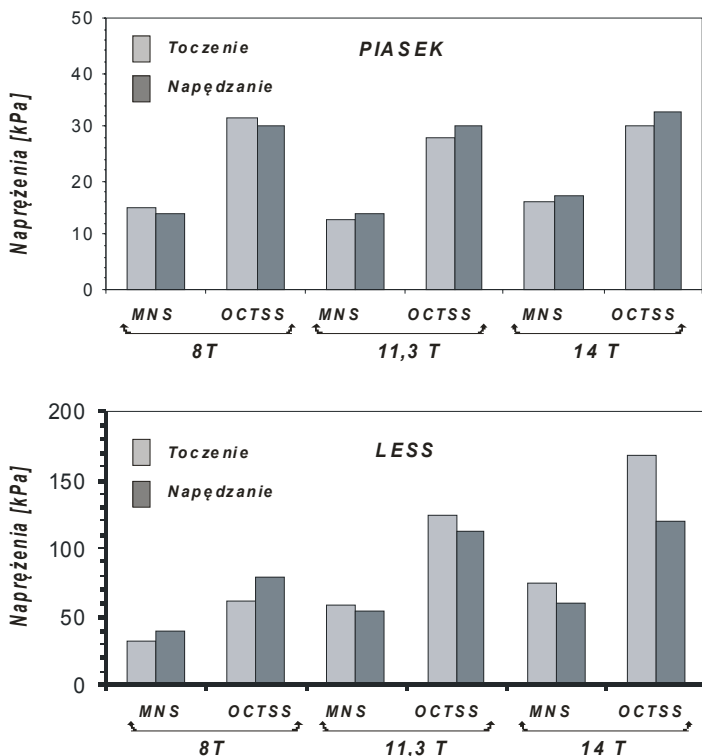
3.1.7 Wpływ trybu pracy koła na naprężenia oktaedryczne

Naprężenia oktaedryczne *MNS* (*Mean Normal Stress*) i *OCTSS* (*Octahedral Shear Stress*) stanowią składowe tzw. oktaedrycznego stanu naprężeń, w którym naprężenie ścinające powoduje zmianę kształtu bazowego oktaedru (ośmiościanu foremnego) bez zmiany jego objętości, zaś średnie naprężenie normalne powoduje zmianę objętości bez zmiany kształtu. Dlatego też, wielkości naprężeń oktaedrycznych są reprezentatywne dla ścinania i wszechstronnego ściskania materiału podłoża, powodowanego obciążeniem elementu jezdnego. Wyniki analizy naprężeń oktaedrycznych stanowiły dane wejściowe prostego modelu korelacyjnego, opisanego w rozdziale 4.2. Na rysunkach 3.16a i b przedstawiono graficznie wartości naprężeń *OCTSS* i *MNS* powodowanych obciążeniem kół pojazdu STAR 1466, dla dwóch analizowanych trybów pracy koła (toczenie i napędzanie) na gruncie lessowym i piaszczystym. Nadmieniamy, że prezentowane wartości naprężeń to średnie z pięciu powtórzeń.

Zauważono, że tryb pracy koła (napędzanie-toczenie) miał znaczący wpływ na wartości naprężeń oktaedrycznych w podłożu lessowym. W podłożu piaszczystym wpływ trybu pracy koła był mniej znaczący, a ponadto odwrotny.

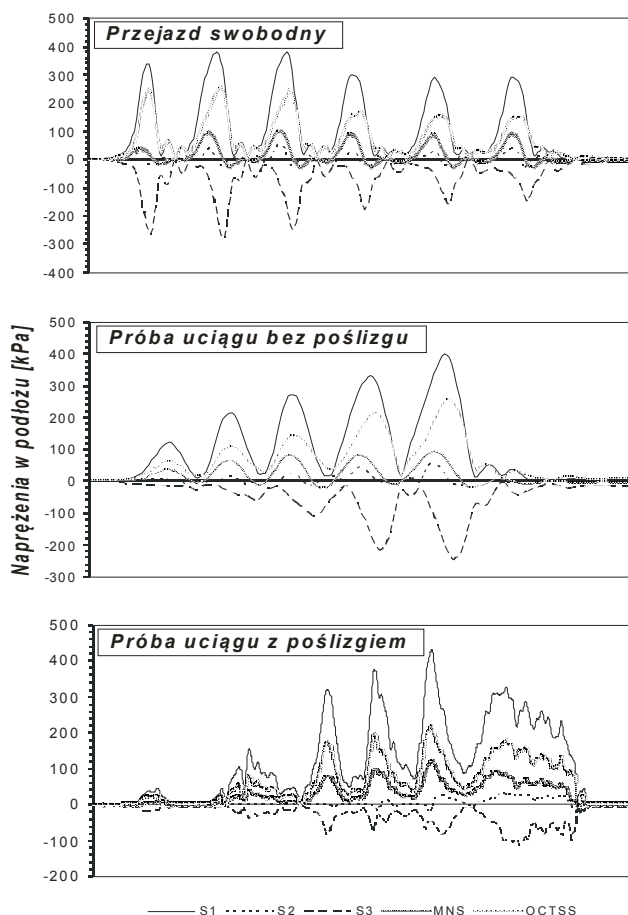


Rys.3.16a. Naprężenia *MNS* i *OCTSS* w podłożu piaszczystym i lessowym w funkcji masy całkowitej pojazdu STAR 1466. Głębokość pomiaru 15 cm.



Rys.3.16b. Napężenia MNS i OCTSS w podłożu piaszczystym i lessowym w funkcji masy całkowitej pojazdu STAR 1466. Głębokość pomiaru 30 cm.

Na rysunku 3.17 przedstawiono wyniki pomiarów uzyskanych z użyciem pojazdów gaśnicowych. Wybrano przebiegi naprężeń w podłożu piaszczystym podczas przejazdu swobodnego (toczenia) oraz podczas jazdy z poślizgiem taśmy gaśnicy, równym 20 oraz 60%. Wykres środkowy, przedstawiający wyniki uzyskane przy niskiej wartości poślizgu taśmy, stanowi przykład trójkątnego rozkładu naprężeń w podłożu pod taśmą. Wzrastające wartości maksymalne naprężeń pod kolejnymi kołami nośnymi były wynikiem unoszenia przodu pojazdu i dociążenia kół tylnych. Odnotowano tylko 5 pików, co oznacza brak obciążenia pierwszym kołem nośnym (jest ono całkowicie uniesione). W tej próbie przebiegi naprężeń były gładkie, natomiast przy poślizgu taśmy ok. 60%, uzyskane przebiegi naprężeń były piłokształtne, co można uzasadniać wzbudzeniem się drgań wzdłużnych jako wynik luzów w układzie przeniesienia napędu.



Rys. 3.17. Wpływ poślizgu taśmy gąsienicy na przebiegi naprężeń w podłożu piaszczystym. Wykres górny – jazda swobodna (bez poślizgu), środkowy – jazda z poślizgiem 20%, dolny – jazda z poślizgiem 60%.

3.1.8 Dyskusja

Wyznaczanie stanu naprężeń powodowanych obciążeniem pojazdów i maszyn w podłożach odkształcalnych były przedmiotem wielu prac i przedsięwzięć badawczych. Prowadzono je m. in. na Uniwersytecie Technicznym w Monachium (Bowling, 1986, Schwanghart, 1991), Uniwersytecie w Kilonii (Horn, 1994, Kuhner, 1993, Horn, 2003), Uniwersytet w Cranfield, Wielka brytania (Hetherington, 1987, 2001, 2002), USDA Auburn, USA (Nichols, 1987, Raper, 1995, Way, 1996, Bailey, 1996), Uniwersytet w Queensland, Australia

(Harris, 1994, Bakker, 1995), CSIRO, Canberra, Australia (Kirby, 1999) a także w Polsce (Jakliński, 1999, 2006). Głównym celem cytowanych prac było wyznaczenie wartości naprężeń w podłożu oraz modelowanie oddziaływania koła ogumionego na glebę.

Wyróżniono dwa rodzaje aparatury stosowanej w tego typu badaniach: (1) czujniki naporu normalnego, umieszczane na różnych głębokościach w linii środkowej koła lub poza nią (Booling, 1986, Hammel, 1994, Jakliński, 1999, Hetherington, 2001, 2002), (2) głowice pomiarowe wieloczujnikowe (Nichols, 1987, Way, 1996, Bailey, 1996, Horn, 2003, Muro, 1999). Pierwszą metodą określano rozkład pionowych i poziomych naprężeń normalnych, natomiast metoda z użyciem głowic pozwalała na wyznaczenie stanu naprężenia w punkcie pomiarowym. Stosowano zwykle jedną, rzadziej kilka głowic umieszczanych na różnej głębokości.

Cytowane prace badawcze opisują w większości badania laboratoryjne, prowadzone najczęściej w kanałach glebowych z użyciem pojedynczych kół obciążających glebę. Badano wpływ następujących parametrów: ciśnienie w ogumieniu oraz obciążenie koła. Rzadziej prowadzone były badania w warunkach polowych, z użyciem pojazdów, czy maszyn (Harris, 1994, Abu-Hamdeh, 2003).

Wyniki naprężeń w glebie prezentowane w cytowanych pracach co do wartości maksymalnych jak i kształtu przebiegów są podobne do wyników zawartych w niniejszej rozprawie. Przykładowo, Abu-Hamdeh uzyskał wartości naprężenia głównego na poziomie 150 i 270 kPa, przy czym naprężenie wyznaczono w glebie ilastej, obciążonej kołami ciągnika rolniczego o masie odpowiednio 4587 i 5887 kg. W badaniach zastosowano niespotykaną metodę umieszczania głowicy pomiarowej, przez zakopanie i odczekanie 15 miesięcy (!). Tak długi okres czasu oczekania przed pomiarami był niepraktyczny, szczególnie w przypadku badań uwzględniających kilka czynników (ciśnienie w ogumieniu, obciążenie, prędkość jazdy, itd.), wymagających wielu powtórzeń. Abu-Hamdeh wykonał tylko po jednym przejeździe pomiarowym dla obu wartości masy całkowitej ciągnika. Metodę umieszczania i kalibracji głowicy *SST* w płaszczu wypełnionym glebą zastosował Harris (1994). Metoda wymagała użycia rozbudowanego oszalowania wykopu i przyrządów pomocniczych. Z doświadczeń Autora wynika, że stosowanie prostych metod opisanych w rozdziale 2 było optymalnym rozwiązaniem pod warunkiem przeprowadzania określonej liczby powtórzeń (minimum 5).

Stwierdzono podobieństwo wyników uzyskanych przez Autora w zakresie proporcji wzajemnych wartości maksymalnych naprężeń głównych i oktaedrycznych. Najwyższe wartość uzyskiwało naprężenie główne *SI*, naprężenia oktaedryczne były na poziomie 40-60% *SI*, przy czym *OCTSS* przewyższało *MNS* (Nichols, 1987, Way, 1996 oraz Bailey, 1996).

Wpływ wielokrotnych przejazdów na naprężenia w glebie ilastej, obciążonej kołami ciągnika rolniczego badał Horn (2003). Wyniki prezentowane w tej pracy

były podobne do uzyskanych przez Autora. Kolejne przejazdy powodowały przyrosty naprężeń, za wyjątkiem II-go przejazdu, kiedy to wartości naprężeń były mniejsze niż w pierwszym. Podobne tendencje odnotowano w przypadku gleby piaszczystej, z tym, że spadek wartości naprężeń miał miejsce najczęściej w IV przejeździe, dla tylnego koła.

Interesujące spostrzeżenia poczyniono porównując przebiegi i wartości naprężeń w podłożu powodowanych obciążeniem pojazdów kołowych i gąsienicowych. Zaobserwowano pewne logiczne podobieństwa na wykresach dla obu rodzajów układów jezdnych (liczba pików na wykresie=liczba kół jezdnych) ale również znaczące różnice. Chodzi przede wszystkim o zjawisko relaksacji naprężeń pomiędzy momentami przejazdów kół jezdnych. Zjawisko to miało miejsce w przypadku pojazdów z kołowym układem jezdny, natomiast wyniki uzyskane w badaniach z użyciem pojazdów gąsienicowych pokazały, że relaksacja naprężeń w podłożu pomiędzy momentami przejazdów kół nośnych jest znacznie mniej intensywna. Jest spowodowane napięciem taśmy gąsienicy a korzystnym tego następstwem jest znacznie większa długość obszaru współpracy element jezdny – podłoże, gwarantująca możliwość generowania znacznej siły jazdy.

Prezentowane w powyższym rozdziale wyniki uzyskano w badaniach z wykorzystaniem różnych obiektów (pojazdów), na kilku różnych podłożach odkształcalnych. W poszczególnych zadaniach uwzględniano istotne, zdaniem Autora czynniki, które wpływają na naprężenia generowane w podłożu. Taka różnorodność warunków i obiektów badań miała z jednej strony dać możliwość praktycznego sprawdzenia opracowanych metod badawczych. Wykonanie wielu serii pomiarów w różnorodnych warunkach, podłożach, przy szerokim zakresie zadawanych obciążeń pozwoliło stwierdzić, że opracowane metody i aparatura pomiarowo-badawcza spełnia stawiane wymagania. Uzyskane wyniki badań polowych, obok wyników kalibracji stanowią mogą cenne źródło informacji w zakresie metodyki badawczej. Drugim, istotnym osiągnięciem było uzyskanie oryginalnych wyników pokazujących wpływ analizowanych czynników (różne obiekty, obciążenia pionowe, tryb pracy koła, prędkość jazdy, różne podłoża, itd.) na wartości i przebiegi naprężeń oraz odkształceń w podłożu. W tym przypadku o wartości naukowej uzyskanych wyników decyduje ich unikalność w nawiązaniu do zasobów literatury przedmiotu. Ponieważ podejmowane zagadnienie jest przedmiotem prac badawczych w wielu ośrodkach naukowych, wyniki uzyskane przez Autora będą podlegały dyskusji naukowej oraz cytowaniu przez innych badaczy.

Reasumując, stwierdza się, że nowość prezentowanych przez autora wyników polega głównie na tym, że zostały one uzyskane w warunkach rzeczywistych, z użyciem różnych pojazdów a dodatkowo w badaniach uwzględniono szereg czynników, dotąd nie badanych (prędkość jazdy, tryb pracy koła). Ważnym osiągnięciem są opracowane i ciągle doskonalone metody pomiarowe, w tym czujniki

naporu oraz metodologia ich kalibracji z uwzględnieniem specyfiki badanych materiałów. Uzyskane wyniki zostaną wykorzystane w modelowaniu układu element jezdny – podłoże odkształcalne, o czym traktuje rozdział 4.

3.2 Analiza odkształceń powodowanych obciążeniem elementów jezdnych

3.2.1 Wpływ obciążenia pojazdu na odkształcenia objętościowe i postaciowe

Na rysunku 3.18 pokazano przykładowe widoki ekranu systemu optoelektronicznego podczas rejestracji odkształceń podłoża. Fotografia A przedstawia położenie początkowe, po ustawieniu sond i projektorów laserowych w stanie gotowości. Na rysunku B pokazano, jak plamki świetlne zmieniły położenie wskutek przemieszczeń sond odkształcenia podczas przejazdu. Położenie końcowe po przejeździe pojazdu, ukazuje fotografia C. W celu wyznaczenia odkształceń bazowego czworokąta utworzonego przez 4 projektory zabudowane na końcach sond odkształcenia podłoża, przeliczono współrzędne położenia plamek względem położenia początkowego (odniesienia).



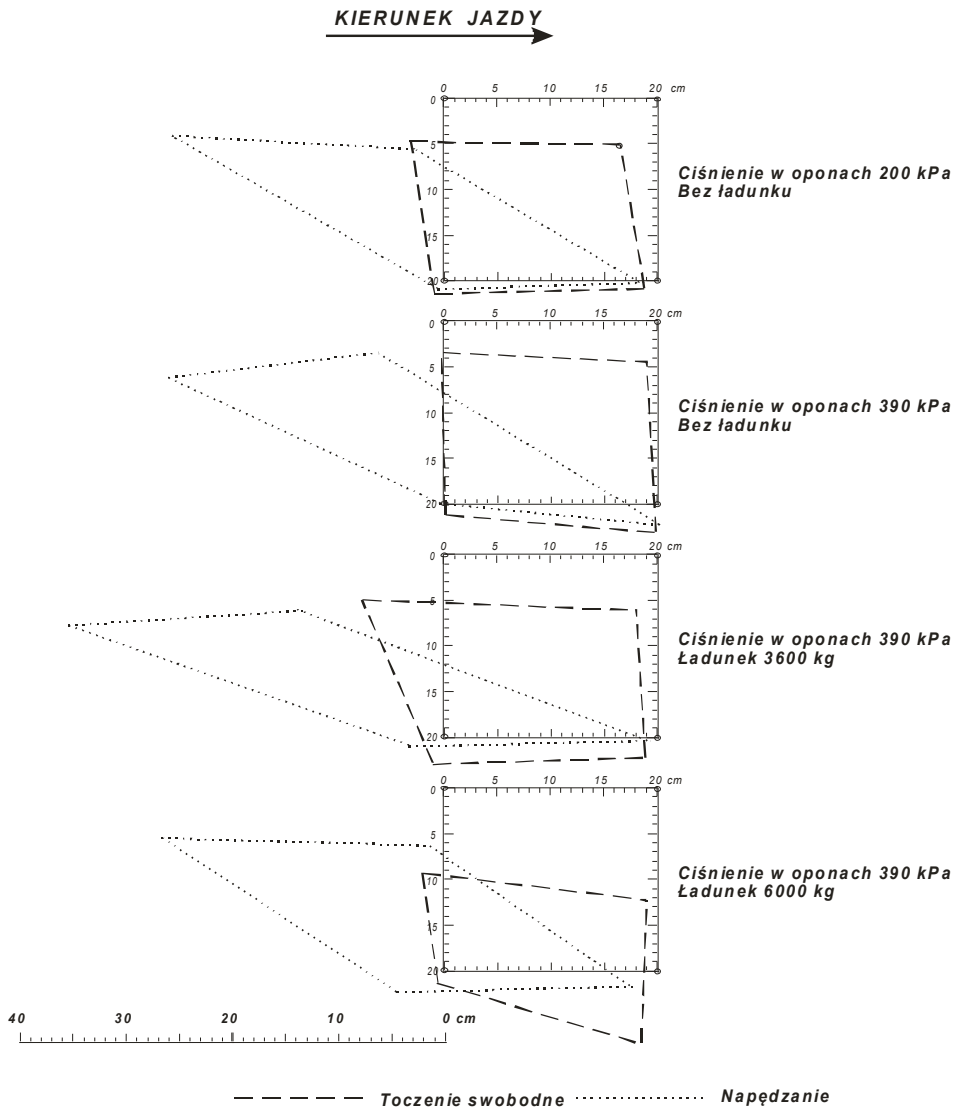
Rys. 3.18. Przykładowe widoki ekranu podczas rejestracji odkształceń podłoża powodowanych obciążeniem pojazdu. Opis w tekście.

Odształcenia podłoża wyznaczano jednocześnie ze stanem naprężeń dla toczenia i napędzania. W przypadku pojazdu STAR 1466, badania odbywały się na dwóch podłożach, lessowym i piaszczystym oraz dla trzech ładunków i przy obniżonym ciśnieniu w ogumieniu. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 3.19 i 3.20, odpowiednio dla podłoża piaszczystego i lessowego.

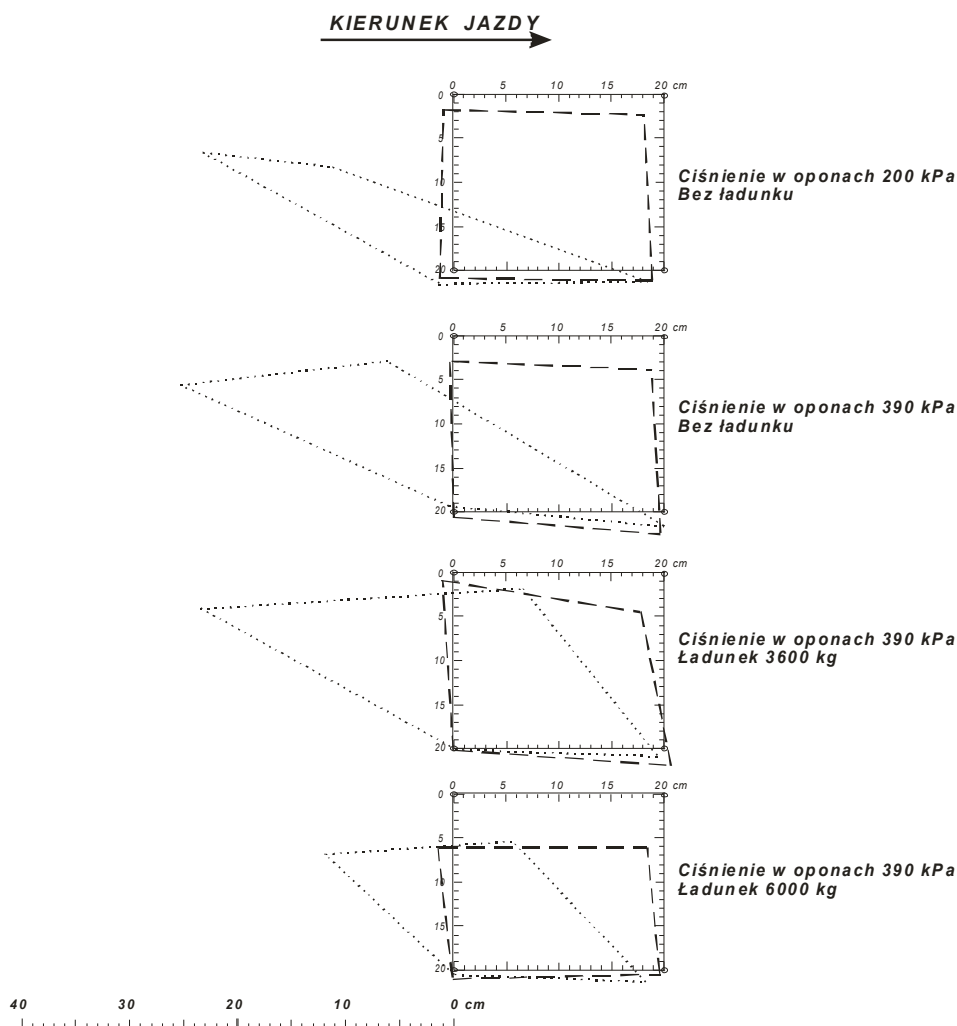
Każdy wykres na rysunkach składa się z kwadratu bazowego, który jest odzwierciedleniem położenia plamek laserowych przed próbą oraz z dwóch czworokątów. Linia kreskowana odnosi się do toczenia swobodnego, zaś linia kropkowana do napędzania. Analizując kształt czworokątów stwierdzono, że zasadnicza różnica między toczeniem swobodnym a napędzaniem polegała na sposobie odształcenia podłoża. Podczas toczenia swobodnego podłoże odształciło się objętościowo w kierunku pionowym. Niewielkie odształcenie postaciowe miało miejsce w przypadku podłoża piaszczystego. Obciążenie wpływało na wielkość odształcenia. Porównując dwa rodzaje podłoża, stwierdzono, że odształcenia objętościowe podłoża piaszczystego były większe niż podłoża lessowego. W przypadku odształceń postaciowych, różnica między dwoma podłożami była mniej znacząca. Ponadto, wielkość odształcenia postaciowego mierzona maksymalną wartością przesunięcia poziomego plamki, dla obu podłoży była prawie jednakowa przy ładunku 0 i 3,6 T oraz przy obniżonym ciśnieniu w ogumieniu. W przypadku ładunku 6 T poziome przesunięcie plamki w obu podłożach było mniejsze. Wytlumaczeniem mógł być efekt dużego obciążenia pionowego a w konsekwencji silne zagęszczenie i umocnienie podłoża.

Przedstawione wyniki badań wymagają komentarza od strony metodycznej. Zastosowana metoda wyznaczania odształceń wprowadza błąd, który wiąże się z ugięciem sond odształcenia podłoża. Do tej pory przetestowano kilka różnych rozwiązań sond. Były to sondy wykonane z płaskownika aluminiowego, które ugięły się w pierwszym przejeździe pojazdu. Potem należało prowadzić pojazd dokładnie w tym samym śladzie, gdyż w przeciwnym wypadku sonda ulegała zniszczeniu. Następnie, zastosowano sondy wykonane z rurek aluminiowych, lecz ich wytrzymałość była niska. Dodatkowo, prostowanie zgiętych sond prowadziło do ich pęknięcia, jeśli ich wcześniej nie podgrzano. Ostatnim etapem było zastosowanie rurek ze stali nierdzewnej. Tego rodzaju sondy charakteryzują się wysoką sztywnością i wskaźnikiem wytrzymałości na zginanie, przez co prawie nie ulegały odształceniom plastycznym. W trakcie pomiarów zauważono, że sondy odształcają się sprężysto (po czym powracają do pierwotnego kształtu), co nie było zarejestrowane przez układ optoelektroniczny. Szacunkowo, wielkość odształceń sprężystych występujących podczas prób wynosiła od kilku do kilkudziesięciu milimetrów na długości 1,80m. Daje to w efekcie błąd pomiaru odształcenia podobnego rzędu, przy czym jest to błąd zaniżający wynik ostateczny. Wciąż prowadzone są próby z różnymi koncepcjami sond odształcenia podłoża.

Obecnie testowane jest rozwiązanie przystosowane do badań w podłożu śnieżnym, gdzie wymagane jest, by sonda oprócz sztywności i wskaźnika wytrzymałości posiadała również niską masę tak, by nie osiadała w świeżym śniegu pod wpływem ciężaru własnego.



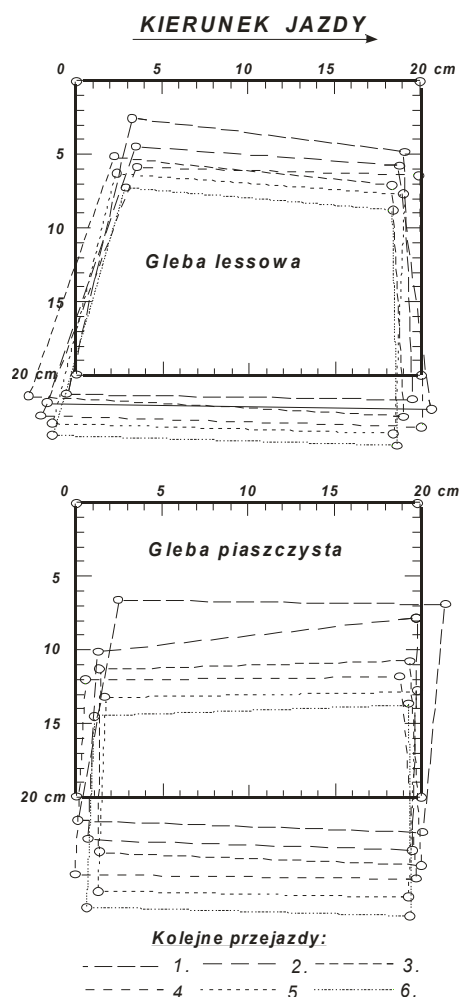
Rys. 3.19. Odształcenia podłoża piaszczystego powodowane obciążeniem kołami pojazdu STAR 1466



Rys. 3.20. Odształcenia podłoża lessowego powodowane obciążeniem kołami pojazdu STAR 1466

3.2.2 Odształcenia podłoża podczas wielokrotnych przejazdów

Badanie wpływu wielokrotnych przejazdów na odształcenia podłoża przeprowadzono z użyciem ciągnika rolniczego MF255 na glebach wykorzystywanych rolniczo. Wyznaczanie odształceń wykonywano jednocześnie z pomiarami składowych stanu naprężeń (wyniki pomiarów naprężeń omówiono w p. 3.1.4.). Ciągnik wykonał po sześć przejazdów w jednym śladzie (koleinie), podczas których gleba ulegała narastającym odształceniom. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3.21.



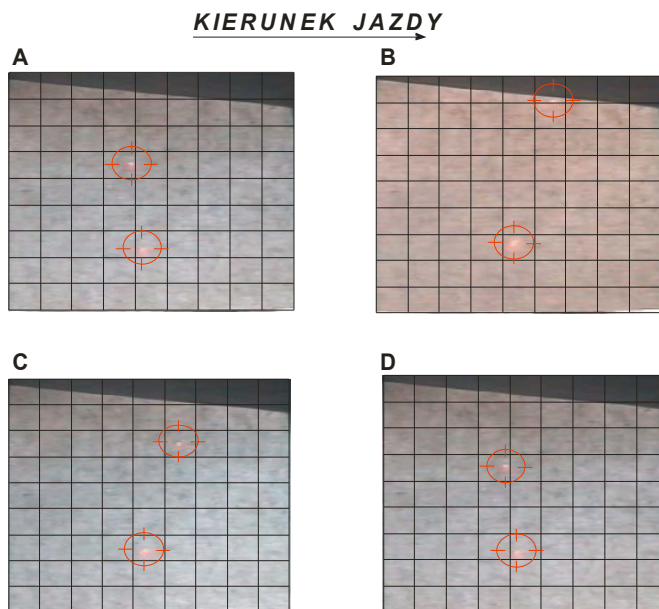
Rys. 3.21. Odształcenia gleby piaszczystej i lessowej powodowanych obciążeniem ciągnika rolniczego MF 255 jako wynik kolejnych przejazdów

Na podstawie wyników zaprezentowanych na rysunkach 3.20 i 3.21 stwierdza się, że charakter odształceń zależy od rodzaju gleby. W przypadku gleby lessowej wystąpiły odształcenia objętościowe oraz postaciowe, natomiast w glebie piaszczystej głównie odształcenia objętościowe. Ponadto, większe odształcenia objętościowe stwierdzono w glebie piaszczystej. Prezentowane wykresy są logicznym uzupełnieniem wyników odształceń powodowanych obciążeniem pojazdu STAR 1466, przedstawionych i omówionych w p.3.2.1. Wpływ kolejnych przejazdów odnotowano szczególnie pomiędzy 1. a 2. oraz 2. a 3. przejazdem, gdzie przyrost

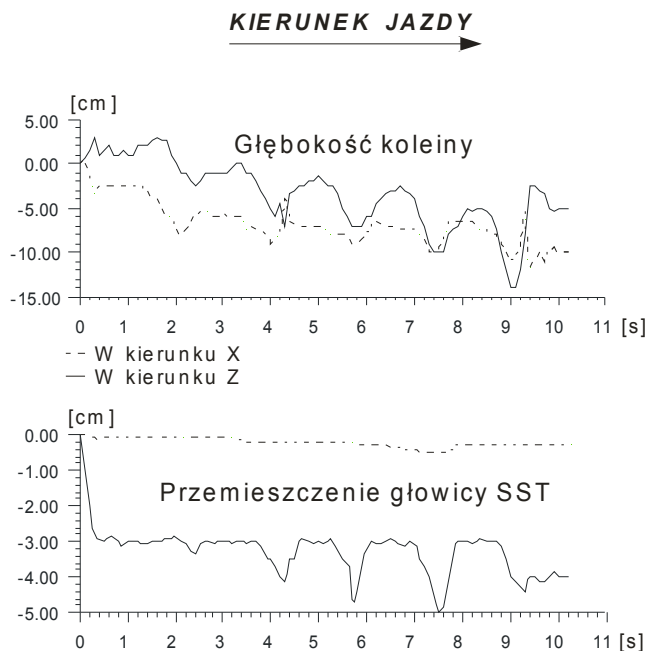
odkształcenia był największy. Ponadto, stwierdzono różnicę w przyroście odkształceń dolnej warstwy gleby (dolne krawędzie czworoscianów). Przyrost odkształceń był bardziej intensywny w glebie piaszczystej niż w lessowej. Oznacza to, że obszar intensywnego zagęszczania w glebie lessowej znajdował się bliżej powierzchni, zaś gleba piaszczysta odkształcała się w głąb, aż do podglebia.

3.2.3 Odkształcenia podłoża pod taśmą gąsienicy

Przykładowe kadry z kamery rejestrującej przemieszczenia plamek laserowych na ekranie podczas przejazdu wozu bojowego *MBT* pokazano na rysunku 3.22. Fotografia A obrazuje położenia wyjściowe (przed najazdem), B – odkształcenie podłoża wywołane obciążeniem pierwszego koła nośnego, C – maksymalne odkształcenie, pod III kołem nośnym, D – po przejeździe. Ostateczne wyniki w formie przebiegów przemieszczeń głowicy oraz sondy głębokości koleiny pokazano na rysunku 3.23. Badania przeprowadzono z użyciem systemu optoelektronicznego „pierwszej generacji”, tzn. wyposażonego w dwa projektory laserowe połączone z sondą głębokości koleiny i głowicą *SST*. W ten sposób możliwe było wyznaczanie głębokości koleiny i przemieszczeń głowicy, a na podstawie tych danych wyznaczono odkształcenie względne przy założeniu, że pierwotna warstwa podłoża miała grubość 150 mm (odległość między łożyskami podporowymi ramion projektorów sondy koleiny i głowicy *SST*). Opisany zestaw nie pozwalał na wyznaczanie odkształceń postacowych, tak jak nowsze urządzenie zbudowane z użyciem 4 sond odkształcenia.



Rys. 3.22. Przykładowe kadry z kamery rejestrującej ruch plamek laserowych. Opis w tekście.



Rys. 3.23. Odształcenia podłoża piaszczystego pod obciążeniem taśmy pojazdu gąsienicowego

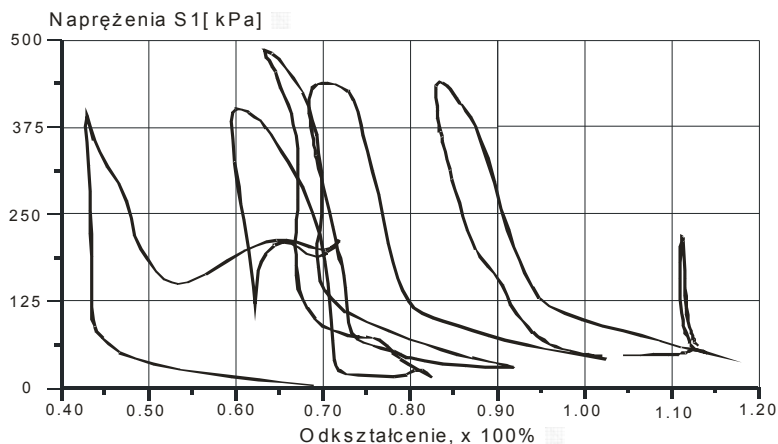
Na wykresach rysunku 3.23 zamieszczono przebieg zagłębienia taśmy gąsienicy oraz przemieszczania głowicy *SST* podczas jednokrotnego przejazdu pojazdu gąsienicowego z prędkością ok. 5 km/h. Przemieszczenia sondy głębokości koleiny zachodzą w kierunku pionowym i poziomym, co można interpretować jako odształcenia objętościowe i postaciowe wierzchniej warstwy podłoża. Natomiast przemieszczenia głowicy *SST* zachodzą prawie wyłącznie w kierunku pionowym, co z kolei świadczy o braku ścinania podłoża na głębokości położenia głowicy (ok. 15cm). Nadmieniamy, iż był to przejazd przy minimalnym poślizgu. Prezentowany wykres pokazuje zjawisko nakładania się kolejnych odształceń podłoża podczas sekwencyjnego obciążania podłoża przez kolejne koła jezdne.

3.2.4 Zależność naprężenie-odkształcenie dla podłoża piaszczystego

Bezpośrednie zestawienie wyników naprężeń i odształceń w podłożu pozwoliło otrzymać krzywą naprężenie-odkształcenie dzięki temu, że wyniki składowe były uzyskane jednocześnie. Krzywa naprężenie-odkształcenie jest graficzną reprezentacją tzw. równania konstytutywnego, które dla danego materiału jest

podstawowym opisem właściwości mechanicznych. Przebieg tej krzywej, jej kształt, obecność pętli histerezy, itd., stanowią ważną informację o własnościach mechanicznych danego materiału.

Metoda wyznaczania naprężeń i odkształceń opracowana i stosowana przez Autora umożliwiła jednocześnie wyznaczenie naprężeń i odkształceń podłoża piaszczystego, powodowanych obciążeniem pojazdu gąsienicowego *MBT*. Na rysunku 3.24 pokazano krzywą naprężenie-odkształcenie, wyznaczoną na podstawie wyników eksperymentalnych, zgodnie z wzorem (2.12). Poszczególne elementy krzywej (pętli) zostały otrzymane dla momentów, gdy badany obszar podłoża był obciążany kołami jezdnyymi, kolejno, począwszy od I-go aż do VI-go. Kształt poszczególnych pętli, choć różni się znacznie, zawiera charakterystyczne punkty przegięcia, które wystąpiły w momencie osiągnięcia naprężenia prekompresji. Po jego przekroczeniu charakter krzywej zmienił się i stała się bardziej stroma. Stwierdzono, że dla poszczególnych kół jezdnych wystąpiła histereza a szerokość pętli utworzonej w wyniku obciążania i odciążania była znaczna. Dla pierwszego koła jeznego zjawisko histerezy było minimalne, głównie ze względu na stosunkowo niewielkie obciążenie pionowe, wynikające z rozkładu masy pojazdu na poszczególne koła jezdne.



Rys. 3.24. Eksperymentalna krzywa naprężenie-odkształcenie otrzymana dla podłoża piaszczystego.

Podsumowując wyniki prezentowane w tej części pracy stwierdzono, że badania z zakresu wzajemnego oddziaływania element jezdny – podłoże nieutwardzone powinny uwzględniać mechaniczne reakcje podłoża, opisane wartościami naprężeń i odkształceń. Wyznaczanie samych naprężeń w podłożu lub nacisków pod kołem daje wynik niepełny i o węższym zakresie praktycznego stosowania.

3.3 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę naprężeń i odkształceń w podłożach odkształcalnych na podstawie wyników pomiarów połowych z użyciem pojazdów kołowych i gąsienicowych. Czynniki mające wpływ na naprężenia i odkształcenia można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Do pierwszej z nich należą rodzaj podłoża oraz jego własności. Porównując dwa typowe podłoża stwierdzono, że naprężenia w podłożu lessowym były większe niż w piaszczystym, a najbardziej prawdopodobną przyczyną tej różnicy była odkształcalność obu rodzajów podłoża. Istotne znaczenie miał również pionowy rozkład naprężeń: wartości naprężeń malały wraz z głębokością pomiaru.

Do drugiej grupy czynników wpływających na badane wielkości należały konstrukcja i parametry pojazdów oraz rodzaj manewru. Rodzaj układu jezdnego (kołowy, gąsienicowy), liczba kół jezdnych, obciążenie koła, ciśnienie w ogumieniu wpływały znacząco na wartości oraz kształt przebiegów naprężeń. Efekt był różnicowany dla badanych podłoży. Rodzaj manewru: napędzanie, toczenie, jazda z różną prędkością oraz wielokrotne przejazdy wpływały na wartości i przebiegi naprężeń a także odkształceń podłoża.

Najważniejszą korzyścią wynikającą z analizy stanu naprężeń i odkształceń była możliwość rozpatrywania reakcji podłoża na złożony stan obciążenia, występujący podczas ruchu elementu jezdnego. Zastosowana metoda badawcza umożliwiła analizę składowych stanu naprężenia, co znacznie poszerzyło możliwości opisu układu o oddziaływania przestrzenne. Ważną zaletą w stosunku do metod tradycyjnych była również możliwość określania cosinusów kierunkowych składowych naprężeń, dzięki czemu uzyskano informację co do orientacji wektorów, a przykład praktycznego wykorzystania w tym zakresie zawarto w rozdziale dotyczącym współpracy koła podwozia samolotu z nawierzchnią lotniska trawia-stego.

Stwierdzona wysoka dokładność metody wyznaczania naprężeń i odkształceń w podłożu wywołanych obciążeniem elementów jezdnych, skłania do podejmowania badań analitycznych w zakresie opisu współpracy kół ogumionych czy gąsienic z podłożami odkształcalnymi. Modelowanie osiągow elementów jezdnych na podłożach odkształcalnych z wykorzystaniem wyznaczonych doświadczalnie naprężeń i odkształceń jest celowe, jeśli uwzględnimy brak uniwersalnej teorii (tzw. równań konstytutywnych) opisującej zachowanie się podłoża odkształcalnego podczas deformacji. Zaprezentowane w niniejszym rozdziale wyniki można wykorzystać m.in. do parametryzacji istniejących modeli współpracy element jezdny – podłoże odkształcalne lub do tworzenia nowych modeli, o charakterze doświadczalnym lub pół-doświadczalnym. Korzyści z zastosowania tego typu modeli do symulacji i przewidywania osiągow mechanizmów jezdnych mogą być

znaczne, w zakresie projektowania i rozwoju nowych konstrukcji a także poprawy warunków eksploatacji obiektów istniejących. Tworzenie nowych modeli opisujących zależności naprężeń i odkształceń pod obciążeniem elementów jezdnych może mieć praktyczne znaczenie dla przewidywania skutków oddziaływania pojazdów i maszyn na ekosystem, szczególnie zagęszczenia i degradacji środowiska glebowego.

Kolejne rozdziały pracy będą zawierać analizę otrzymanych wyników w celu uzyskania szerszego i pełniejszego opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne.

4. ANALIZA SIŁY BOCZNEJ W UKŁADZIE KOŁO-PODŁOŻE ODKSZTAŁCALNE

4.1 Wprowadzenie

Siła boczna, działająca od podłoża na koła, determinuje własności jezdne samochodu w zakresie ruchu krzywoliniowego i stabilności. Jest ona zależna od wielu zmiennych i parametrów: obciążenia koła, kąta skrętu koła, rozmiaru i rodzaju ogumienia, ciśnienia w ogumieniu, rodzaju i stanu nawierzchni, opisanych jednolicebowym współczynnikiem przyczepności bocznej (Mitschke, Wallentowitz, 2005, Pacejka, 2002). W przypadku, gdy pojazd porusza się po nawierzchni podłoża odkształcalnego, generowanie siły bocznej odbywa się w sposób inny niż na drodze o nawierzchni utwardzonej. Przede wszystkim, niższa przyczepność podłoża odkształcalnego powoduje, że składowa siły bocznej pochodząca od tarcia powierzchniowego jest znacznie zredukowana. Zjawisko, które determinuje mechanizm powstawania siły bocznej na gruntach i glebach to przede wszystkim ścinanie w warstwie wierzchniej podłoża odkształcalnego. Ponadto, odkształcalność objętościowa gruntów czy śniegu powoduje powstanie koleiny, w której porusza się koło kierowane, a siła boczna jest w znacznym stopniu wytwarzana jako reakcja ściany koleiny na obciążenie koła (Davari i inni, 2007). Różnorodność podłoży odkształcalnych oraz dynamika zmian ich własności mechanicznych powodują, że badania w tym zakresie są uzasadnione, tym bardziej, że wzrasta zainteresowanie szybkobieżnymi pojazdami terenowymi (*SUV*, *SAV*, transportery wojskowe)

Wyznaczanie siły bocznej w układzie koło – podłoże odkształcalne możliwe jest na trzy sposoby: (1) w tzw. kanałach glebowych, (2) bezpośrednio na pojeździe lub (3) za pomocą wózka dynamometrycznego. Niezależnie od przyjętych warunków badań, do wyznaczania siły bocznej stosuje się urządzenia zwane *wheel tester*. Przykładem mogą być urządzenia zbudowane na Hohenheim University, Niemcy (Armbruster 1987), czy Harper Adams, Anglia (Schlotter 2003). Pierwszy z wymienionych posiadał zawieszenie dla koła badawczego na wahaczu wleczonym i wyposażony był w hydrauliczny system dociążania a także możliwość ustawienia kąta skrętu w zakresie 0 - +/- 30 ° (rys.4.1). Ponieważ koło badawcze było napędzane, możliwe było prowadzenie testów z poślizgiem wzdłużnym. Znane jest też rodzime rozwiązanie, tester kół Poltrak, zbudowany i użytkowany przez Politechnikę Warszawską, Filia w Płocku (Jakliński, 1999). Innym rozwiązaniem, ograniczonym do stosowania w warunkach polowych było użycie pojazdu testowego, wyposażonego w dynamometry zabudowane w kołach jezdnych (Shoop 1994) lub z dołączanym wózkiem dynamometrycznym albo też ze sztywno mocowanym kołem na zawieszeniu umożliwiającym ustawienie kąta skrętu oraz obciążenia pionowego.

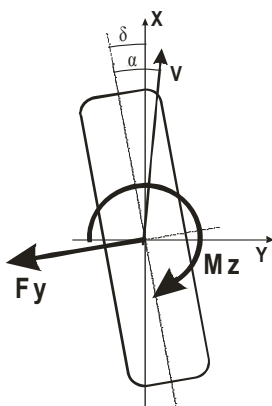


Rys. 4.1. Tester kołowy z Uniwersytetu Hohenheim (Ferhabbegovic, 2006)

Celem niniejszego rozdziału była eksperymentalna analiza siły bocznej, działającej na koła kierowane pojazdu samochodowego, jadącego po podłożu odkształcalnym.

4.2 Metody badawcze

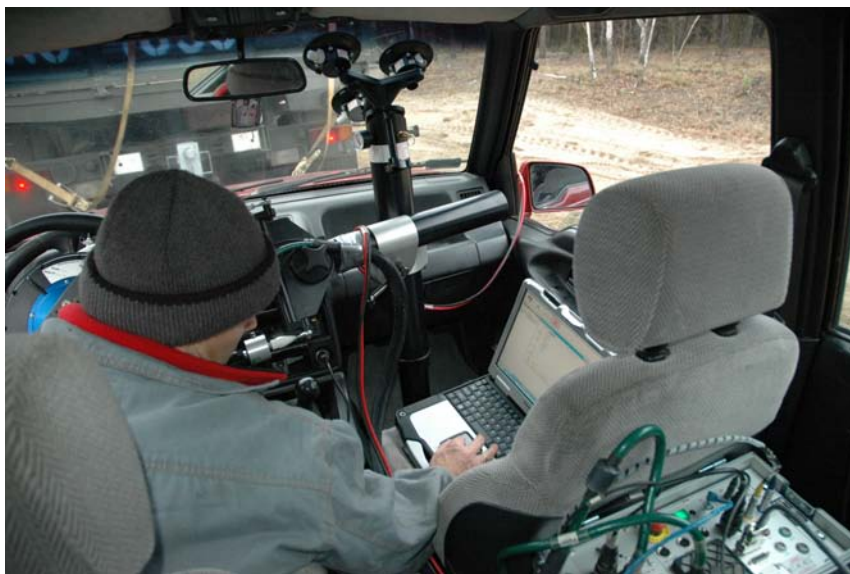
Jeśli przyjmiemy, że koło jezdne zostało skręcone (obrócone wokół osi sworznia zwrotnicy) o kąt δ , a jednocześnie samochód jedzie w kierunku tworzącym z płaszczyzną koła kąt α , wówczas siła boczna F_y , działa jak na rysunku 4.2, od podłoża na koło. Jeżeli przy skręconych kołach kierowanych pojazd będzie poruszał się ruchem prostoliniowym, niezależnie od działających sił bocznych, wówczas zachodzi przypadek szczególny, tj. kąty α i δ są równe. Zachowując ten warunek, pojazd badawczy może być użyty do wyznaczania wartości sił bocznych. Wymaga to odpowiedniego rozwiązania połączenia samochodu holującego z pojazdem badawczym.



Rys. 4.2. Uproszczony schemat działania siły bocznej F_y , na kole jezdny skreconym o kąt δ

Badania przeprowadzono z użyciem pojazdu badawczego Suzuki VITARA, opisanego w rozdziale 2. Wykorzystano zestaw aparaturowy składający się z 2 dynamometrów, zainstalowanych na kołach przednich (kierowanych), robota sterującego oraz systemu *DGPS* do ustalania i korygowania toru jazdy. Masa pojazdu do prób wynosiła 1400 kg, ogumienie wszystkich kół jezdnych miało rozmiar 195/95/R15, ciśnienie w ogumieniu wynosiło 190 kPa i było o ok.25% wyższe od nominalnego, w celu usztywnienia opon. Zgodnie z przyjętym założeniem, badano efekt podłoża odkształcalnego, zatem koła jezdne teoretycznie powinny być kołami sztywnymi. W praktyce jest to trudne do spełnienia, jednak przyjęto, że podwyższone ciśnienie w ogumieniu spowoduje takie usztywnienie opon, że ich ugięcie nie wpłynie na wyniki.

Podczas prób w pojeździe znajdowały się 2 osoby: kierowca obsługujący również robota oraz osoba do obsługi aparatury do pomiarów kołami dynamometrycznymi. Jednocześnie pomiarów i sterowania kołem kierownicy zrealizowano przy użyciu triggera elektronicznego. Częstość próbkowania wynosiła 0.01 s.



Rys. 4.3. Widok wnętrza kabiny pojazdu badawczego podczas jazd testowych

Zgodnie z przyjętym programem badań, próby prowadzono na dwóch różnych podłożach gruntowych oraz w głębokim, mokrym śniegu. Podłoża gruntowe to piasek oraz less o parametrach opisanych w rozdziale 2. Badania w warunkach zimowych przeprowadzono na śniegu o gęstości ok. 450 – 500 kg/m³, o

temperaturze 0°C , przy temperaturze powietrza otaczającego $+2^{\circ}\text{C}$ (wyniki badań na nawierzchniach śnieżnych zawarto w rozdziale 6).

Istota pomiarów polegała na tym, że pojazd badawczy był holowany prosto liniowo na wyznaczonym odcinku przygotowanego podłoża (ok. 15×100 m) i podczas tej jazdy robot wprawiał w ruch koło kierownicy. Ze względu na efekty dynamiczne, istotny był sposób sterowania. Innym, ważnym elementem metody pomiaru siły F_y był sposób holowania pojazdu badawczego. Zagadnienia te zostaną omówione w kolejnych podrozdziałach.

4.2.1 Sterowanie

W badaniach dynamiki poprzecznej samochodu stosuje się metodę odpowiedzi na zadany impuls kołem kierownicy, przy czym możliwe są następujące rodzaje wymuszeń: (1) skok jednostkowy, (2) wymuszenie sinusoidalne jednookresowe, (3) wymuszenie sinusoidalne ciągłe, (4) impuls trójkątny, (5) dowolne wymuszenie zmiennowartościowe. Wymuszenia (1) i (2) dają wyniki w dziedzinie czasu, natomiast trzy pozostałe stosowane są do analizy częstotliwościowej. Zomotor (1991) opisał metody badań w tym zakresie stosowane w wybranych krajach, i tak na przykład w USA i w Niemczech stosuje się metodę skoku jednostkowego koła kierowniczego. Badania są prowadzone w warunkach nieustalonych i wymagają toru pomiarowego o znacznych rozmiarach (ok. 100×100 m). W krajach skandynawskich badania prowadzi się stosując pojedyncze wymuszenie sinusoidalne. Testy z ciągłym wymuszeniem sinusoidalnym przeprowadza się w Niemczech, zaś w Japonii stosuje się metody badawcze bazujące na pojedynczym wymuszeniu trójkątnym. Dowolne wymuszenie zmiennowartościowe, możliwe do zrealizowania na torze o szerokości typowej jezdni, praktykowane jest w Niemczech oraz w Anglii.

Skok jednostkowy jest niemożliwy do realizacji w warunkach rzeczywistych, dlatego też zastępczo stosowane jest wymuszenie trapezoidalne. Jest ono wykorzystywane w badaniach samochodów (Mitschke, Wallentowitz, 2005, Zomotor, 1991, Abe, 2009) a także w badaniach dynamiki lotu samolotów (Yechout, 2003). Norma ISO 7401 określa warunki przeprowadzania prób drogowych z wykorzystaniem wymuszenia trapezoidalnego w badaniach dynamiki w stanach nieustalonych. Wybrane parametry testów na nawierzchniach utwardzonych są następujące: prędkość początkowa 80 km/h, prędkość kątowa obrotu kierownicy min. $200^{\circ}/\text{s}$, kąt obrotu kierownicy 35.1° . Wielkościami wyjściowymi są przyspieszenie boczne, prędkość kątowe odchylenia i przechylenia, moment na kole kierownicy oraz kąt bocznego znoszenia (Mitschke, Wallentowitz, 2005, Zomotor, 1991). Test stosowany jest także w metodach subiektywnej oceny własności jezdnych (Heißing, 2002).

Do testów na podłożach odkształcalnych przyjęto zmodyfikowane parametry:

- prędkość ok. 5-10 km/h, maksymalna możliwa prędkość jazdy pojazdu badawczego na badanych podłożach;
- prędkość kątowa obrotu koła kierownicy: 100, 500 oraz 1500°/s;
- przyjęto również wartość graniczną kąta skręcenia koła kierownicy, wynoszącą 180°, co odpowiada kątowi skręcenia kół 10° oraz czas utrzymania maksymalnego skręcenia kierownicy równy odpowiednio 3 lub 5 sekund (patrz rysunek 4.4).

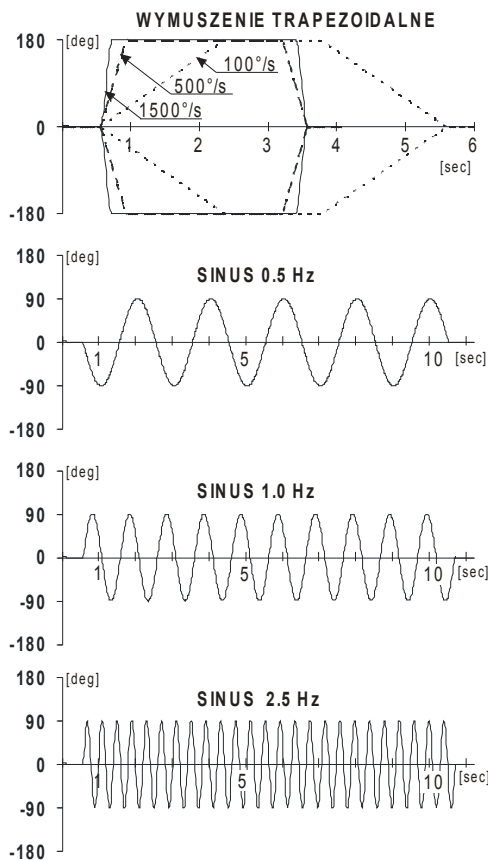
Komentarza wymaga dobór wartości prędkości kątowej kierownicy. Najniższa wartość, 100°/s, odpowiada sterowaniu powolnemu, w praktyce prawie nie występuje, gdyż wówczas promień skrętu jest bardzo duży. Wartość pośrednia jest charakterystyczna dla typowej jazdy z energicznym sterowaniem, natomiast trzecia, maksymalna wartość prędkości kątowej obrotu kierownicy odpowiada sterowaniu na granicy możliwości człowieka, do realizacji przez wprawnego kierowcę sportowego, czy testowego.

Drugim sposobem sterowania kołami skrętnymi pojazdu było zadawanie impulsu harmonicznego przez dostatecznie długi czas, by uzyskać warunki ustalone. Jest to typowa próba odpowiedzi częstotliwościowej układu dla stanów ustalonych, stosowana w praktyce badawczej. Wymuszenie harmoniczne ma istotne znaczenie praktyczne. Keller, (2008) zastosował manewr slalomu na głębokim, luźnym piasku z bramkami o szerokości 15 m do badania przejezdności i zwrotności prototypu samochodu terenowego Mercedes GLK. W trakcie prób pojazd był sterowany przez kierowcę, nie robota, jednak zadawane impulsy kierownicą sprowadzały się do wymuszeń sinusoidalnych.

Zasadniczymi parametrami wymuszenia harmonicznego są częstotliwość oraz amplituda. Mitschke, Wallentowitz (2005) podkreślają, że częstotliwości z zakresu 0.1 – 1.5 Hz posiadają praktyczne znaczenie dla typowego kierowcy. Do prób na podłożach odkształcalnych wybrano wymuszenie sinusoidalne o następujących parametrach:

- częstotliwość przebiegu wymuszenia: 0.5, 1.0 oraz 2.5 Hz;
- amplituda 90°, co odpowiada kątowi skrętu kół 5°;
- czas trwania min. 10 sekund.

Badanie z zastosowaniem ciągłego wymuszenia sinusoidalnego wymaga prowadzenia jazdy testowej na tyle długo, by warunki ustaliły się. Konieczne było przygotowanie odpowiednio długiego odcinka pomiarowego. W praktyce wystarczył tor o długości ok. 50 m, jednak w przypadku podłoża piaszczystego miał on długość ok. 100 m i w ten sposób podczas jednego przejazdu całego toru przeprowadzano 2 jazdy testowe (powtórzenia).

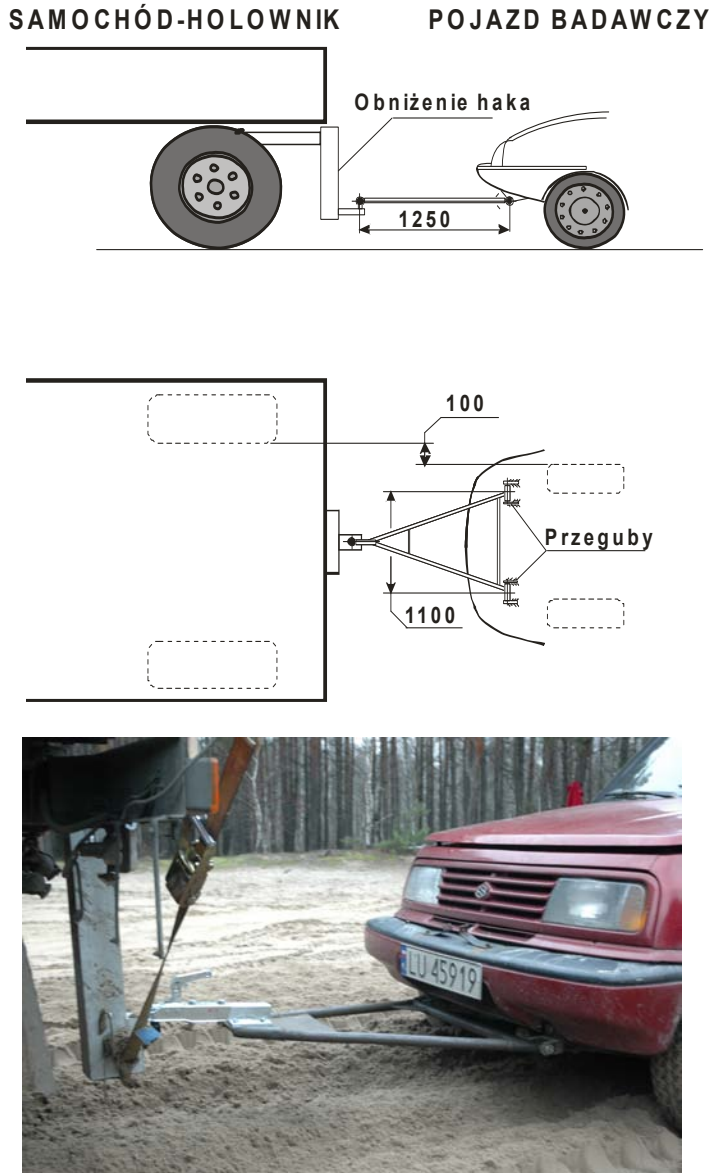


Rys. 4.4. Przebiegi kąta obrotu koła kierownicy dla poszczególnych wymuszeń kołem kierownicy.

4.2.2 Procedury badawcze

Podczas jazd testowych pojazd badawczy pełnił funkcję holowanego stanowiska pomiarowo-badawczego. Kąt bocznego znoszenia, będący wielkością determinującą siłę F_y , może być identyfikowany z kątem skręcenia kół przednich tylko wówczas, gdy zachowany jest prostoliniowy tor ruchu. W praktyce warunek ten spełniono stosując do holowania ciężki samochód terenowy STAR 266. Założono, że siły od pojazdu badawczego przenoszone na samochód-holownik nie będą powodowały istotnych zmian toru jazdy. Założenie to zostało zweryfikowane pozytywnie na podstawie pomiarów toru jazdy z użyciem systemu *DGPS*. Do holowania skonstruowano trójramienny hol sztywny, który umożliwiał względne przemieszczenia pojazdu badawczego i holownika w pionie, w celu kompensacji nierówności podłoża. Schemat oraz widok holu przedstawiono na

rysunku 4.5. Połączenie holu z pojazdem zrealizowano na dwóch przegubach ze sworzniem. W celu wyeliminowania lub zminimalizowania składowej pionowej siły holującej skonstruowano sztywne obniżenie położenia haka holowniczego, tak by osie przegubów łączących pojazd z holą znajdowały się w linii poziomej z osią zaczepu kulistego.



Rys. 4.5. Schemat oraz widok holu użytego do testów

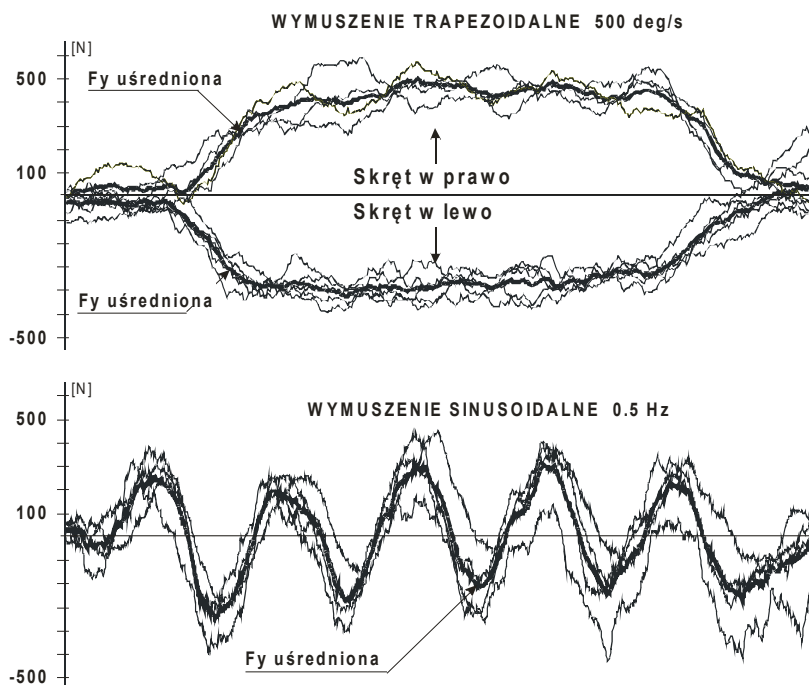
Jazdy testowe odbywały się z prędkością ok. 7-8 km/h. Ponieważ wykonywano min. 5 powtórzeń dla każdego wariantu, konieczne było spulchnianie i wyrównywanie nawierzchni badanych podłoży po każdym przejeździe. W tym celu użyto ciągnika rolniczego z osprzętem (patrz rys. 4.6). W wyniku zabiegów rekultywacyjnych nawierzchnia była spulchniona do głębokości ok. 20 cm i wyrównana. Samochód-holownik posiadał rozstaw kół szerszy od pojazdu badawczego, tak by nie następowało ugniatanie nawierzchni na torze kół dynamometrycznych (przetaczały się one po spulchnionej nawierzchni).



Rys. 4.6. Badania poligonowe. Zdjęcie górne – przykładowa jazda testowa, dolne – przygotowanie nawierzchni przed kolejną jazdą.

4.3 Wyniki

Dane pomiarowe poddano analizie w celu uzyskania przebiegów, bądź liczb opisujących wpływ badanych podłoży oraz zadanych parametrów sterowania na siłę F_y . Po zsynchronizowaniu przebiegów zmierzonych sił na kole oraz kąta obrotu i momentu na kierownicy, sporządzano przebiegi czasowe, zgodne w fazie. Ponieważ dla każdego wariantu przeprowadzono po 5 powtórzeń, a dzięki zastosowaniu robota każda jazda testowa odbywała się przy powtarzalnych parametrach wymuszenia i w jednakowych warunkach glebowych, przebiegi uśredniono. Przykładowe wyniki uśredniania pokazano na rysunku 4.7. Przedstawione wykresy pokazują wielkość rozrzutów wartości siły F_y , linią grubszą nakreślono przebieg uśredniony. Są to przebiegi dla jednego z kół kierowanych, w przypadku sterowania z wymuszeniem trapezoidalnym dla skrętu w prawo i w lewo.

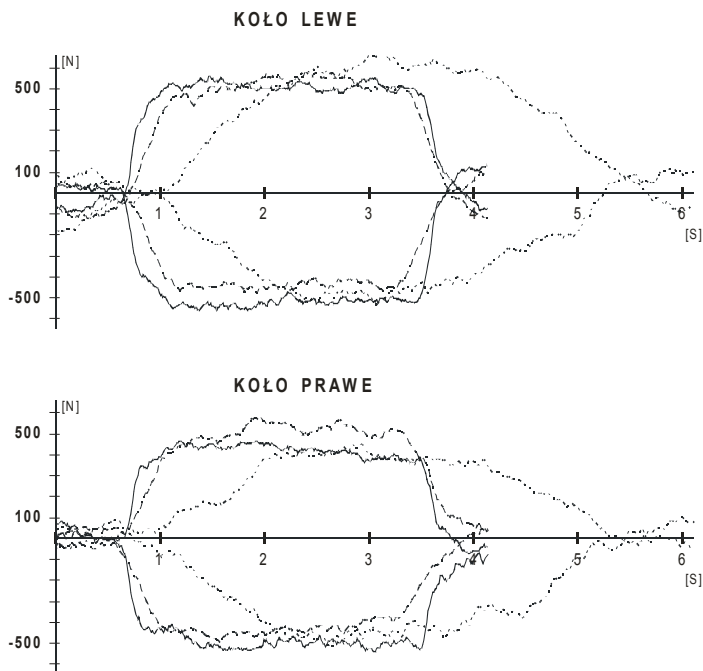


Rys. 4.7. Przykładowe przebiegi czasowe z powtórzeń oraz przebieg uśredniony siły F_y .

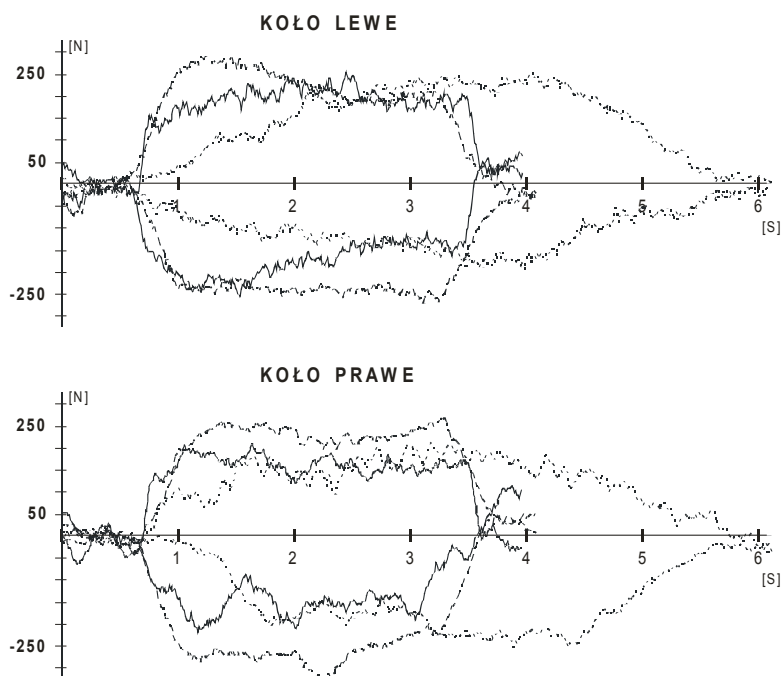
Uśrednione przebiegi czasowe siły F_y pokazano na rysunkach 4.8 – 4.11 dla dwóch badanych podłoży gruntowych oraz dla zastosowanych wymuszeń.

Kolejnym etapem redukcji danych było wyszukiwanie maksymalnych wartości w pikach na przebiegach siły F_y dla sterowania z wymuszeniem trapezoidalnym. Wyznaczono również średnią wartość szczytową (na podstawie 100 kolejnych punktów przebiegu w stanie nasycenia). Dane te posłużyły do wyznaczenia (1) współczynnika siły bocznej f_{F_y} , czyli stosunku siły maksymalnej w pikach do uśrednionej wartości szczytowej $F_{y\max}/F_{y\bar{s}}$, oraz (2) czasu narastania siły bocznej t_{F_y} . Czynniki t_{F_y} określa czasowe opóźnienie układu koło-podłoże odkształcalne i jest związany z efektami reologicznymi, plastycznością oraz lepkością materiału podłoża przy założeniu, że badany element jezdny zachowuje się jak koło sztywne. Rysunek 4.12 przedstawia schematycznie metodę wyznaczania wyżej opisanych współczynników, natomiast dane liczbowe zawarto w tabeli 4.1 oraz pokazano na rysunkach 4.13 i 4.14.

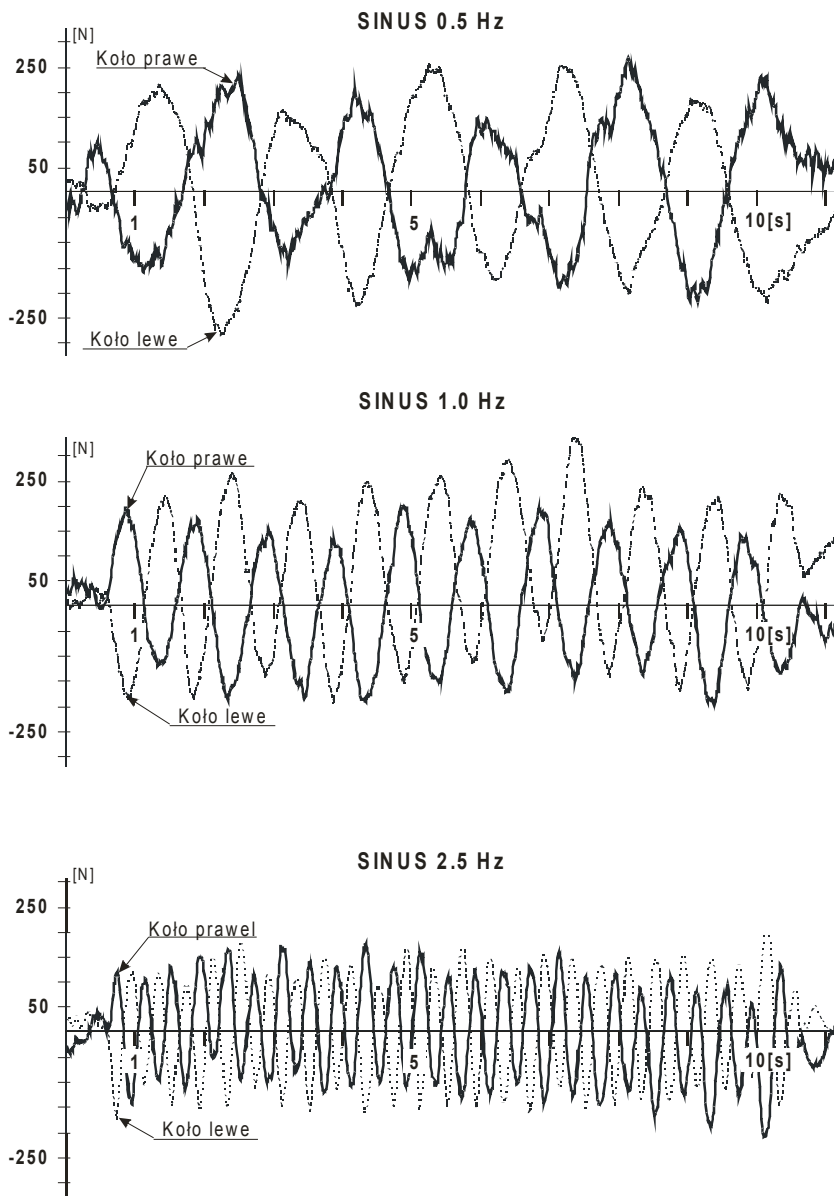
Na podstawie wyników pomiarów siły F_y sporządzono wykresy Bodego. Czasowe przebiegi siły F_y analizowano w ten sposób, że dla ustalonych warunków, które następowały po ok. 4-6 sekundach, odczytywano amplitudy wartości siły oraz przesunięcie w fazie w stosunku do przebiegu wymuszenia. Było to możliwe dzięki synchronizacji pomiarów siły oraz przebiegu kąta obrotu koła kierownicy. Uzyskano po 3 punkty na wykresie Bodego dla zastosowanych częstotliwości: 0.5, 1.0 i 2.5 Hz. Wykresy aproksymowane funkcjami wielomianowymi zostały przedstawione na rysunkach 4.15 i 4.16.



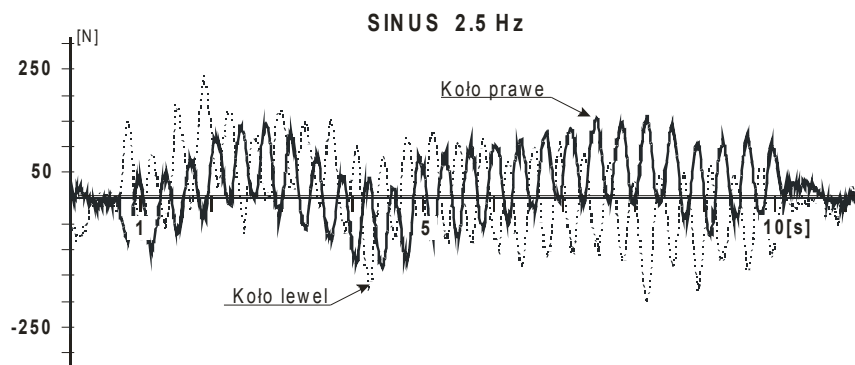
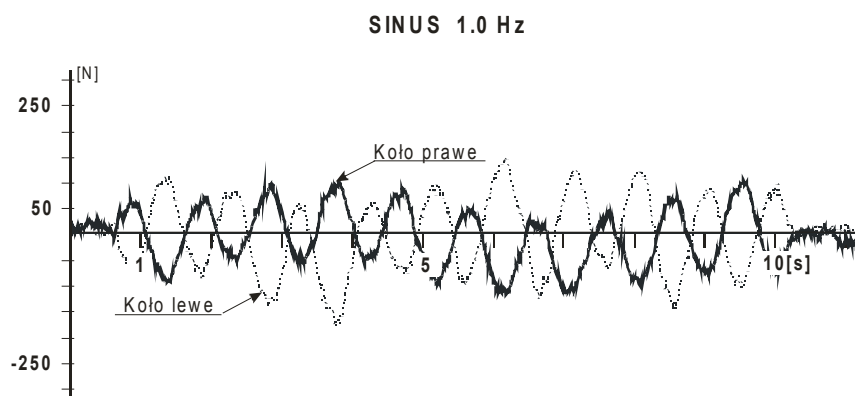
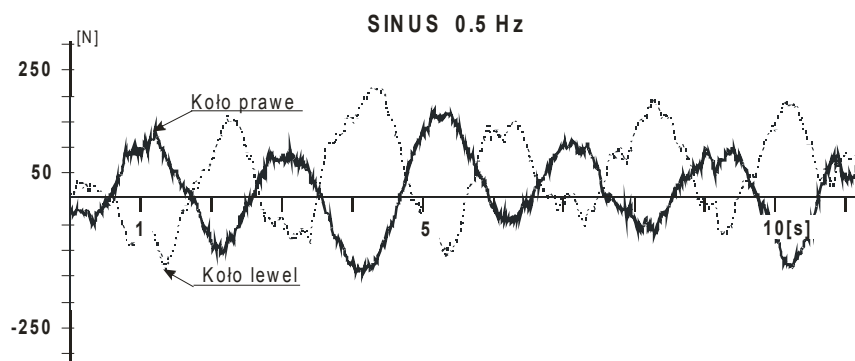
Rys. 4.8. Siła F_y na kołach kierowanych pojazdu badawczego. Sterowanie z wymuszeniem trapezoidalnym, podłoże lessowe.



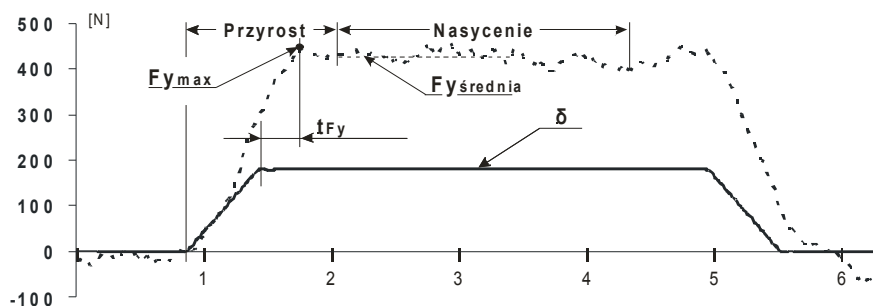
Rys. 4.9. Siła F_y na kołach kierowanych pojazdu badawczego. Sterowanie z wymuszeniem trapezoidalnym, podłoże piaszczyste.



Rys. 4.10. Siła F_y na kołach kierowanych pojazdu badawczego. Sterowanie z wymuszeniem sinusoidalnym, podłoże lessowe.



Rys. 4.11. Siła F_y na kołach kierowanych pojazdu badawczego. Sterowanie z wymuszeniem sinusoidalnym, podłoże piaszczyste.



Rys. 4.12. Schemat wyznaczania wartości maksymalnej, uśrednionej oraz czasu narastania siły F_y .

Tabela 4.1. Wartości siły F_y oraz współczynniki wyznaczone z uśrednionych przebiegów dla sterowania z wymuszeniem trapezoidalnym

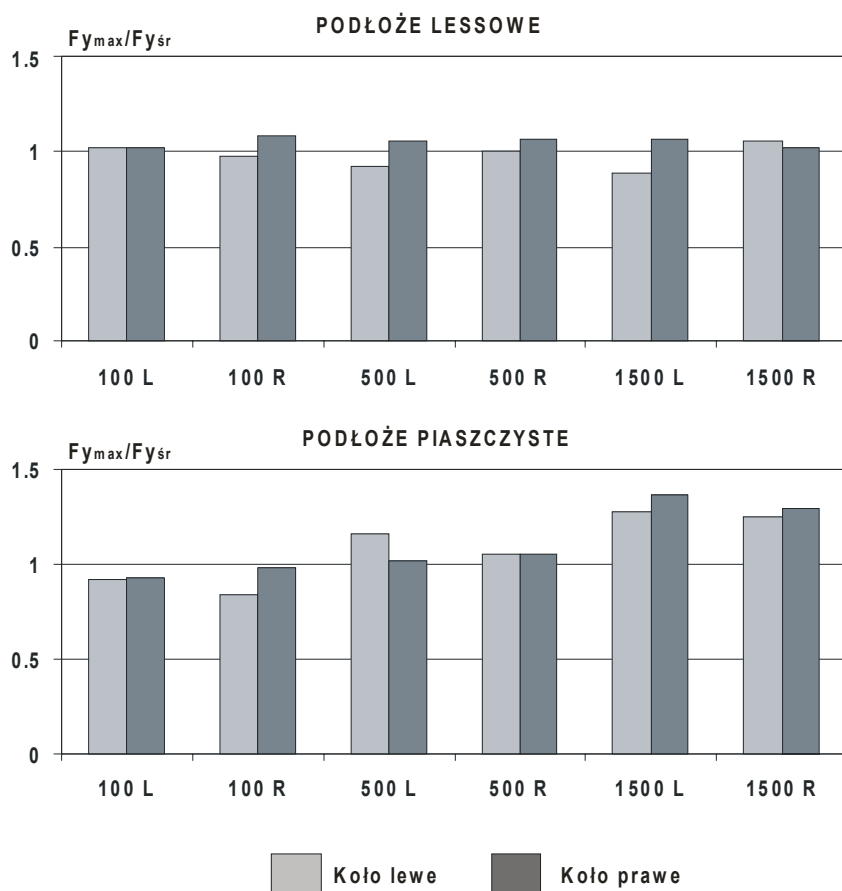
PODŁOŻE LESSOWE						
Kolo lewe						
$\Delta\delta/\Delta t$	100 L	100 R	500 L	500 R	1500 L	1500 R
$F_{y\text{średnia}}$	493.8119	-502.954	411.6	-456.64	482.505	-455.6
$F_{y\text{max}}$	503	-546	433	-487.43	511	-467
f_{F_y}	1.018607	1.085587	1.051992	1.067427	1.059056	1.025022
t_{F_y}	0.55	0.56	0.24	0.20	0.15	0.13
Kolo prawe						
$\Delta\delta/\Delta t$	100 L	100 R	500 L	500 R	1500 L	1500 R
$F_{y\text{średnia}}$	-430.528	366.2005	-475.56	415.64	-469.772	396.7723
$F_{y\text{max}}$	-438.43	356.12	-441.32	415.92	-417.56	418.33
f_{F_y}	1.018354	0.972473	0.928001	1.000674	0.888856	1.054333
t_{F_y}	0.41	0.50	0.17	0.12	0.12	0.11
PODŁOŻE PIASZCZyste						
Kolo lewe						
$\Delta\delta/\Delta t$	100 L	100 R	500 L	500 R	1500 L	1500 R
$F_{y\text{średnia}}$	156.22	-108.32	217.5	-193.2	126.33	-142.277
$F_{y\text{max}}$	170.3465	-129.835	187.6114	-183.158	162.32	-178.54
f_{F_y}	0.917072	0.83429	1.159311	1.054825	1.284889	1.254874
t_{F_y}	0.87	1.02	0.26	0.31	0.10	0.06

PODŁOŻE PIASZCZYSTE						
Koło prawe						
$\Delta\delta/\Delta t$	100 L	100 R	500 L	500 R	1500 L	1500 R
$F_{y_{\text{srednia}}}$	-201.04	180.21	-270.12	251.54	-206.54	196.34
$F_{y_{\text{max}}}$	-216.87	183.56	-265.933	238.4507	-151.502	151.5842
f_{F_y}	0.927007	0.98175	1.015744	1.054893	1.363285	1.295254
t_{F_y}	0.92	0.90	0.25	0.42	0.13	0.10

Analizując wyniki zawarte na rysunkach 4.9, 4.10 oraz w tabeli 4.1 widać, że wyznaczone w pomiarach wartości siły F_y różnią się w zależności od rodzaju podłoża. Dla lessu są one ok. 2-krotnie wyższe niż dla piasku. Można to tłumaczyć większą odkształcalnością podłoża piaszczystego, które będąc bardziej podatne, generuje niższe wartości reakcji na sterowanie (kąt skręcenia koła). Tendencja taka występowała również dla poziomej reakcji stycznej, F_x (siły napędowej) mierzonej na obu podłożach (Pytka, 2006).

Nie stwierdzono znaczącego wpływu prędkości kątowej skrętu kierownicą na wartości maksymalne siły F_y na podłożu lessowym. Efekt taki jest natomiast wyraźnie widoczny w przypadku siły F_y wyznaczonej na podłożu piaszczystym: największe wartości uzyskiwano w przypadku sterowania z prędkością kątową 500 °/s.

Współczynnik siły bocznej f_{F_y} , którego wartości zawarto w tabeli 4.1 oraz na rysunku 4.13, wskazuje ponownie na różnice pomiędzy badanymi podłożami odkształcalnymi. O ile dla podłoża lessowego wartość tego współczynnika jest niemal stała dla zastosowanych prędkości kątowych skrętu kierownicą i wynosi około 1, to w przypadku piasku mamy do czynienia z wyraźnym wpływem prędkości kątowej sterowania na wartości f_{F_y} , które zmieniają się w zakresie ok. 0.8 – 1.3. Im większa jest kątowa prędkość obrotu kierownicą, tym większa jest wartość współczynnika siły f_{F_y} . Zatem, w przypadku szybkiego, energicznego sterowania na podłożu piaszczystym występuje zjawisko, które można określić jako przesterowanie. Również i w tym przypadku przyczyną może być odkształcalność piasku, ale również efekty reologiczne i tzw. umocnienie, występujące w przypadku szybkich odkształceń w materiałach rozdrobnionych i granularnych. Efekty te nie występują lub są mniej intensywne w podłożu lessowym, którego materiał, plastyczna glina generuje mniejsze tarcie wewnętrzne. Należy tu zwrócić uwagę na wpływ wilgotności badanych podłoży gruntowych. Woda zawarta w porach jest odpowiedzialna za powstawanie efektów reologicznych oraz lepkościowych.

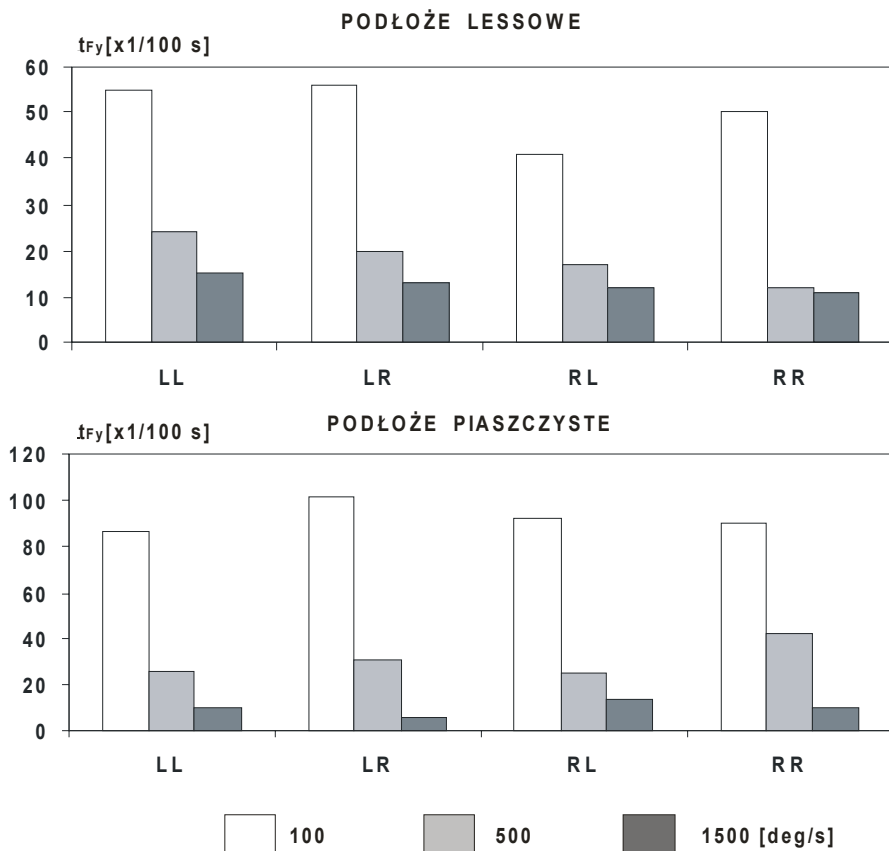


Rys. 4.13. Wartości współczynnika siły bocznej f_{Fy} otrzymane dla badanych podłoży odkształcalnych

Objawia się to chwilowym, gwałtownym wzrostem naprężeń, po którym następuje relaksacja. Woda zawarta między cząsteczkami koloidów i ilów w materiale podłoża lessowego wpływa na efekty reologiczne i lepkościowe znacznie mniej, niż w przypadku piasku, głównie ze względu na zjawiska kapilarne. Mezzo- i makropory w piasku ułatwiają lepki przepływ cieczy między cząsteczkami, natomiast woda występująca w mikroporach lessu wymaga przyłożenia znacznie większych naprężeń zewnętrznych.

Czas narastania siły bocznej t_{Fy} , którego wartości zawarto w tabeli 4.1 oraz na rysunku 4.14 opisuje opóźnienie układu koło – podłoże odkształcalne na impuls sterowania. Największy czas narastania dla obu badanych podłoży występował przy prędkości kątowej obrotu kierownicą równej $100^\circ/\text{s}$. Różnica między dwoma

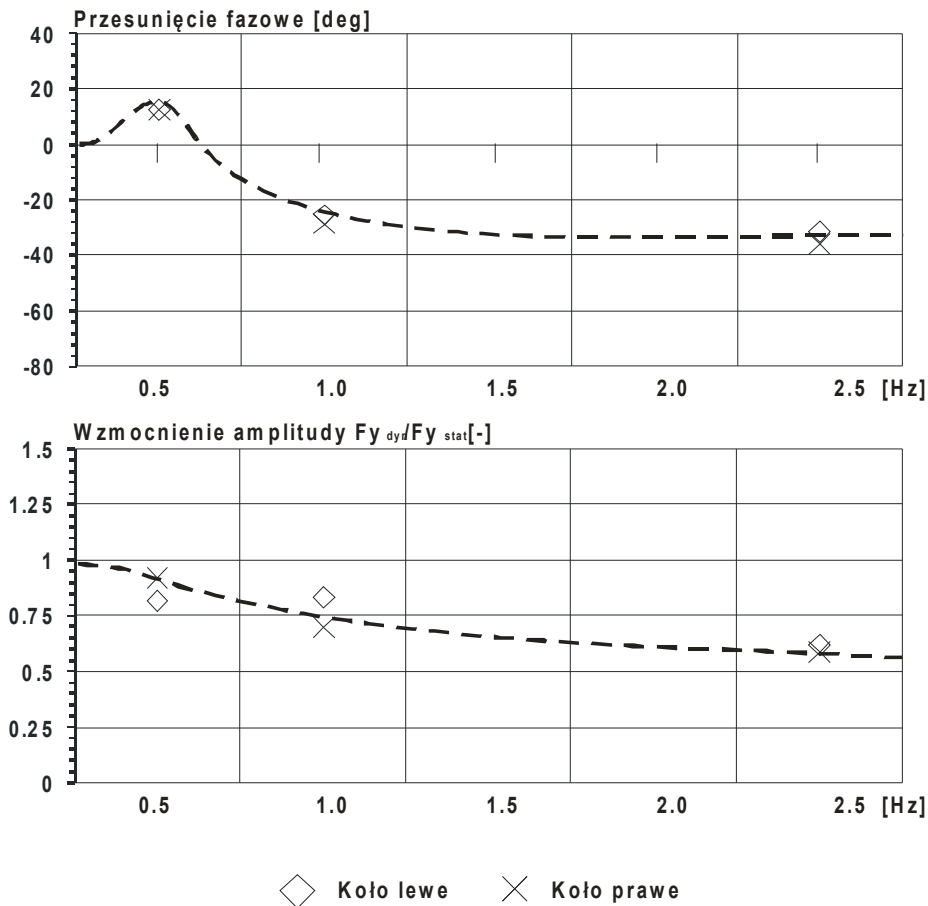
badanymi podłożami jest znacząca ($t_{F_y} \approx 0.5$ s dla podłoża lessowego, $t_{F_y} \approx 0.9$ s dla podłoża piaszczystego). O ile ta różnica jest logicznie wytłumaczalna (efekty reologiczne i lepkościowe), to efekt prędkości sterowania jest nieoczekiwany. Spodziewany był odwrotny wpływ prędkości kątowej, tj. największe opóźnienie układu dla największej prędkości.



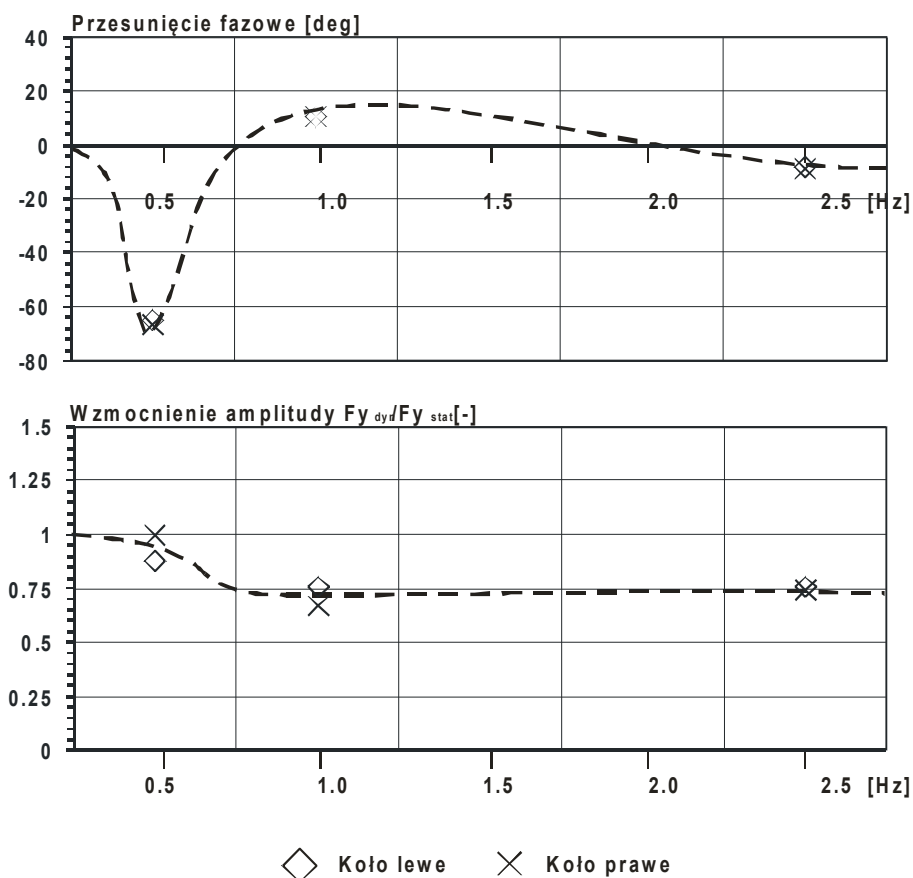
Rys. 4.14. Czas narastania siły bocznej t_{F_y} dla różnej prędkości sterowania na badanych podłożach

W przypadku sterowania z wymuszeniem sinusoidalnym, różnica między dwoma badanymi podłożami objawia się podobnie jak przy wymuszeniach trapezoidalnych, w wartościach maksymalnych siły F_y . Są one znacząco (nie-mal 2-krotnie) większe na podłożu lessowym w porównaniu do piaszczystego. Wykresy Bodego, na podstawie których można analizować i oceniać własności dynamiczne układu, przedstawiono na rysunkach 4.15 i 4.16. Ze względu na to,

iz pomiary wykonywano przy relatywnie niskiej prędkości jazdy, spodziewano się charakterystyki jak dla układu opóźniającego I-go rzędu. Uzyskane wyniki potwierdzają to przypuszczenie. Na charakterystykach amplitudowych występuje obszar przejściowy, pomiędzy członem proporcjonalnym i całkującym. Obszar przejściowy wyznacza częstotliwość sztywności skrętnej (ang. *cornering frequency*), która wynosi odpowiednio 0.5 oraz 0.7 Hz dla układów koło – podłoże lessowe oraz piaszczyste. Podobnie, możliwe jest wyznaczenie częstotliwości sztywności skrętnej z charakterystyki fazowej. Schlotter i Keen (2003) wyznaczyli częstotliwość sztywności skrętnej dla opony 20.8 R38 przy prędkości jazdy 10 km/h dwoma sposobami: na podstawie charakterystyki amplitudowej oraz charakterystyki fazowej. Uzyskane wyniki różniły się dość znacznie między sobą.



Rys.4.15. Charakterystyki częstotliwościowe siły F_y generowanej w podłożu lessowym



Rys.4.16. Charakterystyki częstotliwościowe siły F_y generowanej w podłożu piaszczystym

Obydwa badane systemy koło – podłoże odkształcalne posiadają charakter członu inercyjnego, jednakże charakterystyki fazowe pokazują pewne różnice. Siła F_y generowana w podłożu piaszczystym przy częstotliwości impulsu wymuszenia 0.5 Hz osiągała maksimum przesunięte w fazie w stosunku do przebiegu wymuszenia o ok. 60°. Przy częstotliwości impulsu wymuszenia 1.0 Hz przesunięcie wyniosło ok. 15°, natomiast przy najwyższej częstotliwości impulsu wymuszenia równej 2.5 Hz, przesunięcie osiągnęło wartość ujemną (wyprzedzenie), równą w przybliżeniu 7°. Inny trend otrzymano dla układu koło-podłoże lessowe, dla którego przesunięcie fazowe przebiegu siły F_y zmieniał charakter z wyprzedzenia o ok. 17° dla częstotliwości 0.5 Hz na opóźnienie równe około 23-30° dla dwóch wyższych częstotliwości impulsu wymuszenia kołem kierownicy.

Uzyskane wykresy charakterystyk częstotliwościowych siły F_y są podobne do charakterystyk momentu na kole kierownicy, przedstawionych w pracy Mitschke, Wallentowitz (2005).

4.3.1 Dyskusja wyników

Najobszerniejszy program prób w zakresie badań siły F_y na podłożach odkształcalnych zrealizowano na Uniwersytecie Technicznym w Monachium (Schwanghart, 1968, 1981, 1999). Badania prowadzono zarówno w warunkach laboratoryjnych, w kanale glebowym o wymiarach ok. 5×30 m a także w warunkach poligonowych. Tester z kołem badawczym holowano za ciężkim ciągnikiem. Wyznaczano wartości siły F_y w funkcji kąta bocznego poślizgu oraz poślizgu wzdłużnego. Pomiary przeprowadzono w warunkach ustalonych z użyciem opon ciągników i pojazdów rolniczych.

Plessner (1997) oraz Schlotter (2006) przeprowadzili badania charakterystyk siły F_y w warunkach dynamicznych za pomocą testera z Hohenheim. Ustawienia kąta skrętu koła badawczego odbywało się w trybie zmian sinusoidalnych z różnymi częstotliwościami. Wyniki tych badań w formie wykresów Bodego posłużyły m.in. do wyznaczania tzw. drogi relaksacji dla badanych opon. Badania przeprowadzono na nawierzchni utwardzonej.

Shoop (1994) oraz Coutermarsh i Shoop (2009) przeprowadzili badania sił trakcyjnych, w tym również siły F_y przy użyciu pojazdu badawczego CIV (*CRREL Instrumented Vehicle*). Pomiary siły F_y prowadzone były na różnych nawierzchniach zimowych (świeży śnieg puszysty, śnieg zleżały, śnieg zmrożony, śnieg ubity, lód). Sterowanie kierownicą odbywało się ręcznie, zatem nie było uzyskano powtarzalności testów w zakresie wartości maksymalnych jak i przebiegu kąta bocznego poślizgu. Wyniki przedstawiono w formie zależności jednostkowej siły F_y / F_z od kąta bocznego znoszenia.

Prezentowane przez Autora wyniki w porównaniu do powyżej przytoczonych prac z literatury przedmiotowej charakteryzują się nowością, szczególnie w zakresie sposobu sterowania na podłożach odkształcalnych. Należy jednak mieć na względzie pewne aspekty, wymagające podjęcia dalszych prac badawczo-rozwojowych. Przede wszystkim, pomiary dynamometrem 6-cio elementowym dają w wyniku wartości sił zredukowanych do osi koła, nie zaś do obszaru styku opony z podłożem. Założono, że jeśli odkształcalność podłoża jest dużo większa od odkształcalności opony, wówczas błąd wynikający z tego uogólnienia jest pomijalny. W tym celu zastosowano ciśnienie wewnętrzne w ogumieniu większe o ok. 20% od nominalnego (190 zamiast 160 kPa). Jednak w przyszłych badaniach warto zwrócić uwagę na aplikację metod pomiarowych umożliwiających wyznaczanie sił w obszarze styku (Hüsenmann, Goertz, 2005). Innym problemem z zakresu metodyki pomiarów było określenie wpływu bezwładności układu

kierowniczego, tarcia suchego oraz luzów w mechanizmach sterowania. W celu zminimalizowania tych efektów, przeprowadzono generalną naprawę układu sterowania i zawieszenia pojazdu badawczego.

Prezentowane w niniejszym rozdziale wyniki, oprócz wartości poznawczej mogą mieć również zastosowanie w praktyce. Otrzymane przebiegi oraz wartości siły F_y można wykorzystać w modelowaniu układu koło-podłoże odkształcalne w zakresie dynamiki poprzecznej. Tego rodzaju próbę podjęto w podrozdziale 5.4.

4.4 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę sił bocznej działającej na koła kierowane od podłoża odkształcalnego z uwzględnieniem dynamiki procesu sterowania. Zaproponowano własną metodę wyznaczania siły F_y , polegającą na pomiarach przy użyciu sześćcioelementowych dynamometrów, zabudowanych na kołach kierowanych pojazdu badawczego. Sterowanie pojazdu zrealizowano z użyciem robota, dzięki czemu wyeliminowano efekt regulatora (kierowcy) a przebiegi sterowań cechowały się wysoką powtarzalnością i precyzją. Pomiary siły F_y wykonano dla dwóch typowych sterowań: trapezowego, stosowanego w badaniach dynamicznej odpowiedzi układu, oraz sinusoidalnego, do badań w warunkach ustalonych. Pomiary przeprowadzono na podłożach lessowym i piaszczystym (pomiar na śniegu opisano w rozdziale 6). Uzyskano przebiegi siły F_y dla różnych wartości parametrów sterowania: prędkości kątowej obrotu koła kierownicy oraz częstotliwości sinusoidalnego impulsu sterującego. Zdefiniowano i określono współczynnik siły bocznej f_{Fy} oraz czas narastania siły bocznej t_{Fy} . Wyznaczone wartości tych współczynników mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w analizie dynamiki poprzecznej ruchu samochodu na podłożach odkształcalnych.

Uzyskane wyniki skłoniły do opracowania własnego modelu układu koło – podłoże odkształcalne, uwzględniającego wpływ dynamiki sterowania na siłę F_y na wilgotnych podłożach glebowych.

5. MODELOWANIE WSPÓŁPRACY ELEMENTÓW JEZDNYCH Z PODŁOŻEM ODKSZTAŁCALNYM

Modelowanie współpracy elementów jezdnych z podłożem możliwe jest na cztery sposoby: (1) na podstawie danych eksperymentalnych, (2) przy użyciu metod podobieństwa, (3) przy użyciu prostych modeli tzw. półempirycznych oraz (4) przy użyciu złożonych modeli fizycznych [6].

Do pierwszej grupy należą modele bazujące na wynikach uzyskanych w badaniach doświadczalnych. Tego typu modele wykorzystują metody regresji w celu aproksymacji przebiegów wartości zmierzonych i zależności matematycznych. Kolejne grupy modeli bazują na teoretycznych opisach opony. Najbardziej skomplikowane modele grupy (4) umożliwiają prowadzenie zaawansowanych badań symulacyjnych, ale ze względu na stopień złożoności i czasochłonność obliczeń numerycznych, ich przydatność w badaniach dynamiki pojazdów jest ograniczona. Modele z grupy (1) charakteryzują się strukturą opisaną parametrami, których uzyskanie jest możliwe metodą identyfikacji. Przykładem jest model MAGIC FORMULA (Pacejka, 2004), w którym matematyczny opis charakterystyki ogumienia bazuje na funkcjach trygonometrycznych. Wyniki symulacji z wykorzystaniem modelu Pacejki charakteryzują się bardzo dobrym dopasowaniem do wyników doświadczalnych w zakresie wartości sił F_y , F_x oraz momentu M_z .

Odkształcalność podłoża gruntowego sprawia, że element jezdny pracuje w zupełnie innych warunkach niż w przypadku nawierzchni utwardzonej. Przede wszystkim maleje przyczepność a zależność jednostkowej reakcji poziomej podłoża od poślizgu, μ -s, może mieć charakter monotoniczny, rosnący (podłoże piaszczyste wilgotne lub lessowe suche), jak również może posiadać maksimum lokalne w obszarze poślizgu 20-50% (podłoże lessowe wilgotne, śnieżne). Rozróżniamy zatem dwa rodzaje przyczepności: poślizgową i przylgową. Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na stan podłoża jest jego wilgotność. Zmienia się ona w szerokim zakresie w ciągu roku, ale również dobową dynamiką może być znaczna, np. latem. Wilgotność materiału podłoża determinuje własności mechaniczne i wpływa znacząco na osiągi mechanizmów jezdnych.

Znane są co najmniej 24 różne czynniki wpływające na mechaniczne własności gleb (Pukos, 1991). Niektóre z nich są funkcjami czasu, inne zaś pozostają we wzajemnych zależnościach. Można domniemywać, że struktura modelu z grupy (4), uwzględniającego powyższe czynniki, byłaby bardzo skomplikowana, zaś jego parametryzacja wymagałaby wyznaczenia wartości, przebiegów czasowych lub wzajemnych korelacji wszystkich czynników. Stwierdza się zatem, że

tworzenie takiego modelu dla praktyki badawczej i inżynierskiej w zakresie dynamiki pojazdów jest niecelowe i nieopłacalne.

Mając na uwadze powyższe, zaproponowano metodę modelowania empirycznego i identyfikacji modeli z wykorzystaniem wyników badań doświadczalnych. Taka droga do tworzenia modelu układu koło ogumione – podłoże odkształcalne wydaje się słuszną, zważywszy, że stopień skomplikowania zjawisk w obszarze koło – podłoże gruntowe jest znaczny i uwzględnianie choćby niektórych czynników wpływających na wzajemną współpracę elementu jezdnego i podłoża odkształcalnego jest zadaniem bardzo trudnym.

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki analiz przeprowadzonych z użyciem danych doświadczalnych otrzymanych w badaniach poligonowych z użyciem pojazdów. Głównym celem tych analiz było otrzymywanie modeli współpracy elementów jezdnych z różnymi podłożami odkształcalnymi.

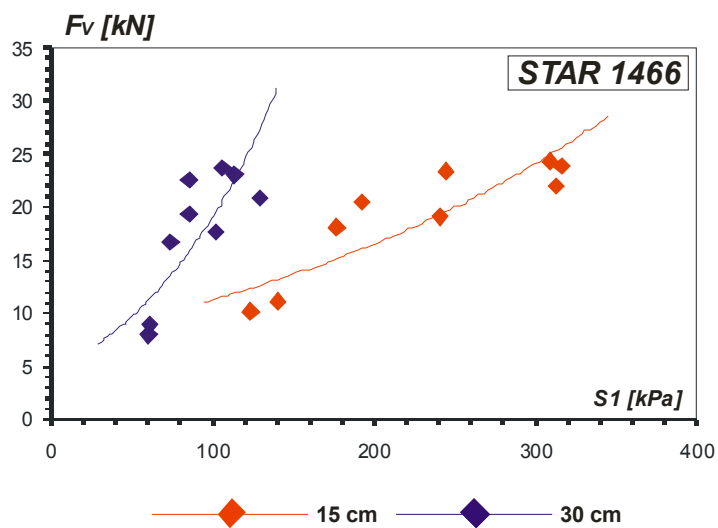
5.1 Korelacyjny model naprężeń i sił trakcyjnych

Modelowanie układu koło-podłoże odkształcalne poprzez tworzenie korelacji wielkości wejściowych i wyjściowych jest metodą, w której możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie wyników doświadczalnych. Korelacje sił trakcyjnych i naprężeń w podłożu przedstawione w niniejszym podrozdziale konstruowano z wykorzystaniem wyników, które zostały zaprezentowane i omówione w rozdziale 3. Tworzenie korelacji naprężeń i sił trakcyjnych było możliwe m.in. dzięki temu, że wielkości te wyznaczano jednocześnie podczas badań doświadczalnych.

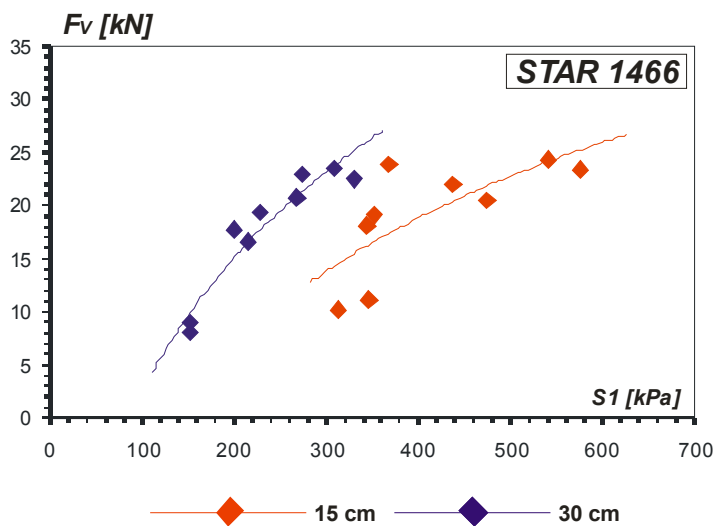
5.1.1 Korelacja naprężenia głównego S_I i siły obciążenia pionowego F_V

Poszukiwano korelacji między naprężeniem głównym S_I a siłą obciążenia pionowego F_V , przy czym zastosowano metodę korelacji średnich wartości naprężeń (średnia z kilku przejazdów) z wartością siły obciążenia pionowego, przypadającej na dane koło. Korelację otrzymano dla pojazdu STAR 1466, dla którego przeprowadzono badania z uwzględnieniem wpływu ładunku.

Zależności w formie wykresu przedstawiono na rysunkach 5.1 i 5.2, odpowiednio dla podłoża piaszczystego i lessowego. Dla obydwu podłoży zależność naprężenie główne S_I - obciążenie pionowe F_V jest monotoniczna rosnąca, przy czym dla podłoża piaszczystego jest progresywna, zaś dla lessowego regresywna.



Rys. 5.1. Zależność naprężenie główne S_1 – siła obciążenia pionowego F_v dla samochodu ciężarowego STAR 1466 na podłożu piaszczystym



Rys. 5.2. Zależność naprężenie główne S_1 – siła obciążenia pionowego F_v dla samochodu ciężarowego STAR 1466 na podłożu lessowym

Aproksymacja wyników z zastosowaniem krzywej o charakterze progresywnym wymaga komentarza. Progresywny charakter zależności na podłożu piaszczystym świadczy o tym, że wzrost wartości naprężenia powoduje coraz wyższy przyrost obciążenia, co świadczy o stopniowym zagęszczaniu podłoża i wzroście jego nośności. Jest to cecha charakterystyczna dla gruntów piaszczystych, stąd wybór progresywnej linii trendu na rysunku 5.1. Można się spodziewać, że przy pewnej wartości obciążenia lub po określonej liczbie cykli obciążania (po wielu przejazdach w śladzie) zagęszczenie podłoża osiągnie taki stopień, że będzie on przenosił dowolnie wielkie obciążenia. Natomiast w przypadku podłoża lessowego spodziewana odpowiedź na obciążenie zewnętrzne to plastyczne płynięcie, szczególnie w przypadku znacznej wilgotności materiału podłoża.

Na rysunkach 5.1 i 5.2 zamieszczone są po dwa wykresy, odnoszące się do dwóch głębokości pomiaru naprężeń: 15 i 30 cm. Są one względem siebie przesunięte, równolegle wzdłuż osi poziomej, przy czym wykres dla głębokości 30 cm leży w obszarze niższych wartości naprężeń. Matematyczny opis zależności przedstawiono w Tabeli 5.1. Zależności opisano funkcją wykładniczą e^x , przy czym wartości współczynników dobierano metodą najmniejszych kwadratów. Zastanawiające jest to, że współczynnik R^2 jest dla podłoża piaszczystego większy dla mniejszej głębokości, zaś dla podłoża lessowego – odwrotnie, jest większy dla naprężeń mierzonych na większej głębokości. Może to skłaniać do przypuszczeń, że rozrzuty mierzonych naprężeń w obu badanych podłożach rozkładają się przeciwnie: w piasku są one większe im głębszy jest punkt pomiaru a w lessie rozrzuty maleją ze wzrostem głębokości pomiaru naprężenia.

Przedstawiona na rysunkach 5.1 oraz 5.2 aproksymacja wyników pomiarów stanowi prognozę obserwowanych zależności o dość ograniczonej stosowalności w zakresie modelowania obserwowanego procesu. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż graficzna reprezentacja analizowanych zależności nie wybiega znacząco poza obszar uzyskanych wyników. Uzupełnienie stanowią funkcje opisujące zależności między siłami trakcyjnymi a naprężeniami w podłożu, zebrane w tabeli 5.1.

5.1.2 Korelacje naprężeń oktaedrycznych i siły uciągu

5.1.2.1. Korelacja wartości średnich naprężeń i siły uciągu

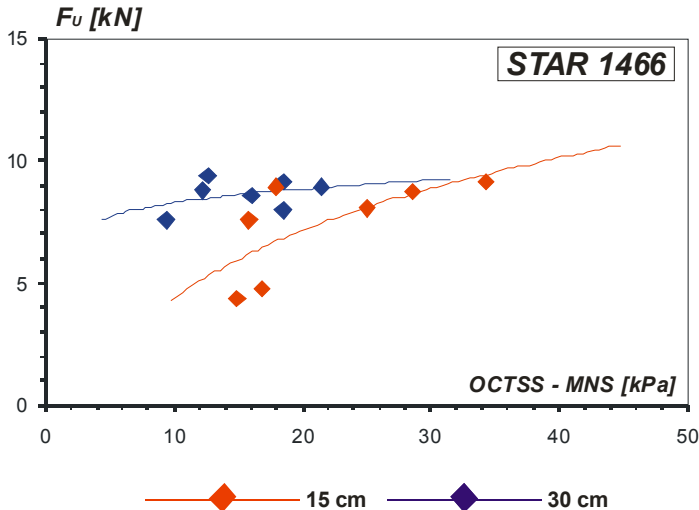
W rozdziale 3 przedstawiono i omówiono wyniki pomiarów naprężeń *SI*, *OCTSS* i *MNS* dla pojazdu STAR 1466 z uwzględnieniem wpływu ładunku. Na podstawie powyższych wyników otrzymano korelacje naprężeń oktaedrycznych z siłą uciągu. Metoda tworzenia korelacji polegała na zestawianiu średnich wartości naprężeń powodowanych obciążeniem kół jezdnych z wartością siły uciągu, przypadającą na dane koło według poniższej zależności:

$$F_U^k = F_U * F_{vk} / G \quad (5.1)$$

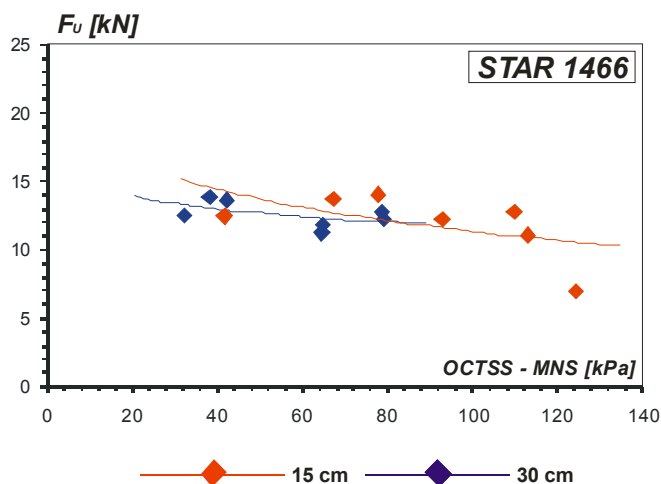
gdzie: F_U^k - siła uciągu przypadająca na koło, F_U – całkowita siła uciągu, F_{vk} – obciążenie pionowe danego koła, G – ciężar pojazdu.

Zgodnie z powyższym wyznaczono zależności między różnicą naprężeń oktaedrycznych ($OCTSS - MNS$) a siłą uciągu dla pojazdu STAR 1466. Naprężenie oktaedryczne $OCTSS$ (*Octahedral Shear Stress*) powodowane jest działaniem sił ścinających w układzie koło – podłoże i odnosi się do obwodowej reakcji stycznej na kole, będącej siłą napędową brutto (siłą jazdy). Natomiast średnie naprężenie normalne w układzie oktaedrycznym (*Mean Normal Stress*) generowane jest jako wynik obciążenia od sił normalnych. Jest zatem skojarzone z objętościowym odkształceniem podłoża, które stanowi główny składnik oporu toczenia na podłożach odkształcalnych. Zatem różnica naprężeń $OCTSS - MNS$ odpowiada różnicy siły jazdy i oporu toczenia, czyli sile uciągu.

Na rysunkach 5.3 i 5.4 przedstawiono korelacje otrzymane z wartości średnich naprężeń i siły uciągu dla pojazdu STAR 1466 na podłożu piaszczystym i lessowym. Zależności $F_U(OCTSS-MNS)$ opisano funkcją logarytmiczną (Tabela 5.1). Występuje monotoniczność funkcji opisujących otrzymane zależności. Monotoniczność funkcji zmienia się w zależności od podłoża: dla podłoża piaszczystego funkcje są rosnące, zaś dla podłoża lessowego malejące. Współczynnik regresji R^2 zawiera się w zakresie 0,14 – 0,5, przy czym większe wartości uzyskano dla podłoża lessowego.

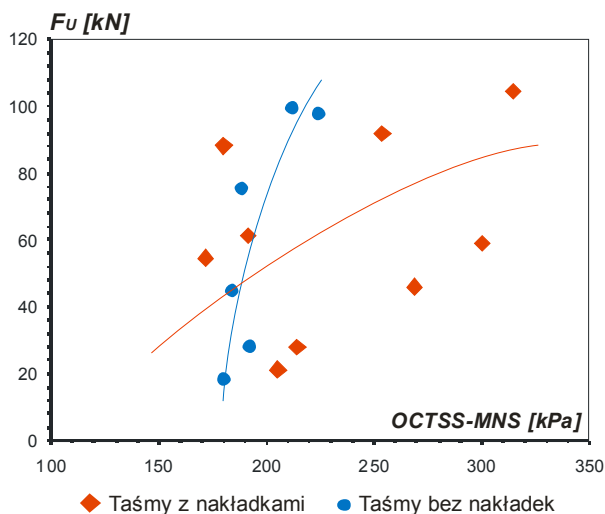


Rys. 5.3. Korelacja wartości średnich siły uciągu F_U i różnicy ($OCTSS - MNS$) dla pojazdu STAR 1466 na podłożu piaszczystym



Rys. 5.4. Korelacja wartości średniej siły uciągu F_u i różnicy ($OCTSS - MNS$) dla pojazdu STAR 1466 na podłożu lessowym

Jako uzupełnienie oraz w celu porównania zamieszczono również korelacje otrzymane dla pojazdu z gąsienicowym układem bieżnym. Na rysunku 5.5 mamy zależność siły uciągu od różnicy naprężeń $OCTSS - MNS$ na podłożu piaszczystym. Tu również zależności opisane są funkcjami monotonicznymi rosnące, podobnie jak w przypadku pojazdów kołowych na podłożu piaszczystym.



Rys. 5.5. Zależność siły uciągu F_u od wartości średniej różnicy ($OCTSS - MNS$) dla pojazdu gąsienicowego APC na podłożu piaszczystym

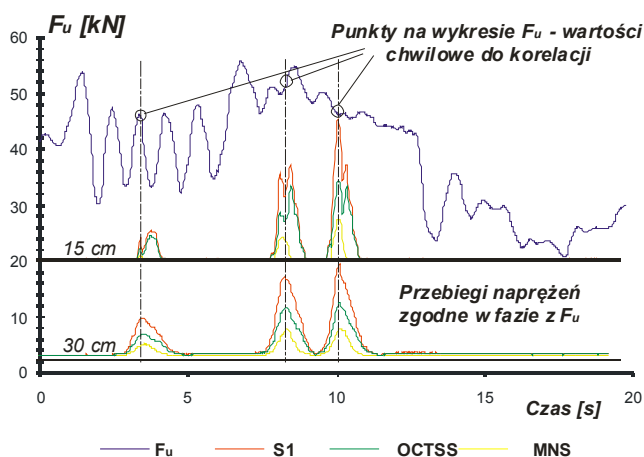
Wartości użyte do utworzenia zależności przedstawionych na rysunku 5.5 to

- średnie wartości naprężeń z powtórzeń dla poszczególnych kół jezdnych;
- maksymalne wartości siły uciągu rejestrowane, gdy dane koło jezdne przejeżdżało nad głowicą SST.

W przypadku wozu gaśienicowego do dyspozycji była tylko jedna głowica SST, więc otrzymane zależności odnoszą się do jednej głębokości pomiaru naprężeń, 10-15 cm. Należy zaznaczyć, że głowica ulegała znacznym przemieszczeniom pionowym w trakcie prób uciągu i dokładne ustalenie głębokości było trudne. Przedstawione zależności odnoszą się do dwóch przypadków: taśmy gaśienicy bez nakładek oraz taśmy z nakładkami. Znaczne rozrzuty wartości siły uciągu dla taśm gaśienicy bez nakładek utrudniły otrzymanie korelacji, jednak wybór regresywnej linii trendu uzasadniało zastosowanie elementów gumowych przenoszących siłę jazdy a także podobny charakter aproksymacji dla przypadku taśmy bez nakładek.

5.1.2.2. Korelacja wartości chwilowych naprężeń i siły uciągu

Przebiegi naprężeń i sił trakcyjnych były mierzone jednocześnie, zatem możliwe było zestawianie odpowiednich wielkości dla wybranego momentu czasowego. Wybór momentu czasowego ustalono na podstawie przebiegu naprężeń. Wybierano moment, w którym naprężenie $S1$ osiągało maksimum (wówczas koło znajduje się dokładnie nad głowicą). Przedstawiono to schematycznie na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Schemat metody korelowania wartości chwilowych naprężeń w podłożu i siły uciągu

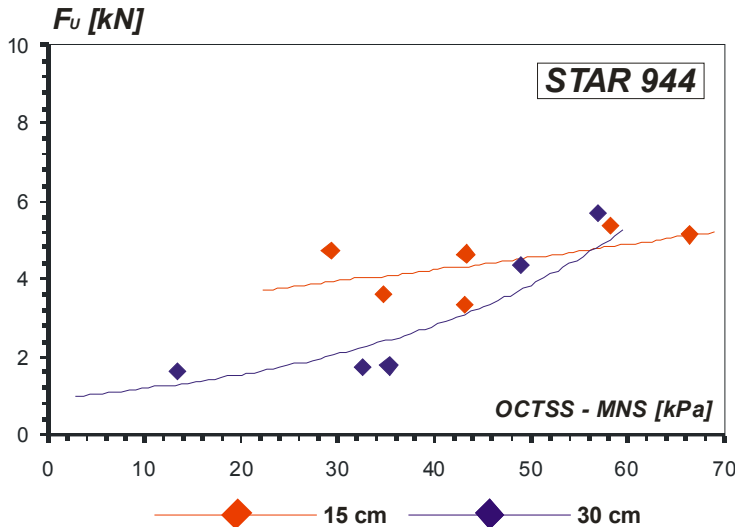
Do konstruowania zależności wybierano wartości naprężeń pod poszczególnymi kołami, oraz wartości chwilowe siły uciągu przypadające na dane koło według poniższej zależności:

$$F'_{U^k} = F'_{\underline{U}} * F_{V_k} / F_{V_c} \quad (5.2)$$

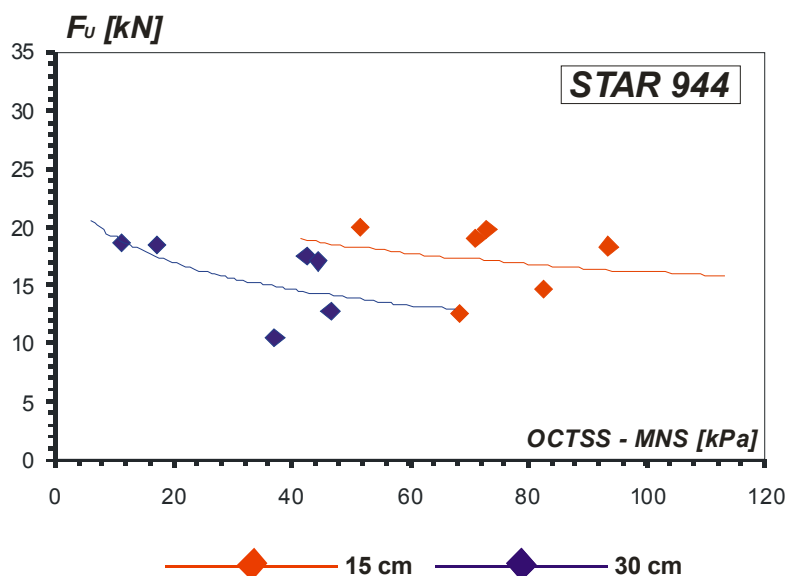
gdzie: F'_{U^k} - chwilowa siła uciągu przypadająca na dane koło, $F'_{\underline{U}}$ - całkowita chwilowa siła uciągu, odczytana z przebiegu.

Opisaną metodę zastosowano do konstruowania zależności dla pojazdu STAR 944 na podłożu piaszczystym i lessowym.

Na rysunkach 5.7 i 5.8 przedstawiono zależność siły F_U od różnicy naprężeń *OCTSS-MNS* dla pojazdu STAR 944 na dwóch podłożach otrzymane z korelacji wartości chwilowych. Funkcje opisujące otrzymane zależności były monotoniczne. Dla podłoża piaszczystego funkcje były rosnące, zaś dla podłoża lessowego malejące. Podobnie jak w przypadku zależności między naprężeniem S_I a siłą obciążenia pionowego F_p , wykres zależności otrzymanej z wartości naprężeń w podłożu na głębokości 30cm był przesunięty w kierunku niższych wartości naprężeń. Matematyczny opis zależności zawarto w tabeli 5.1. Zależności dla podłoża piaszczystego opisano funkcją wykładniczą e^x , natomiast dla podłoża lessowego funkcją potęgową. W przypadku obu rodzajów podłoży, współczynnik regresji R^2 był większy dla zależności otrzymanej na podstawie naprężeń w podłożu wyznaczonych na głębokości 30 cm. Aproksymacja wyników doświadczalnych dla podłoża piaszczystego była lepsza niż dla lessowego. Podobnie, jak w przypadku zależności otrzymywanych przez korelację wartości średnich (rys.5.3 i 5.4) znaczne rozrzuty wartości siły uciągu skłoniły do wyboru linii trendu będącej pewnym kompromisem między przesłankami fizykalnymi a jakością dopasowania, mierzoną współczynnikiem R^2 .



Rys. 5.7. Zależność siły uciągu F_U od wartości chwilowych różnicy naprężeń (*OCTSS – MNS*) dla pojazdu STAR 944 na podłożu piaszczystym

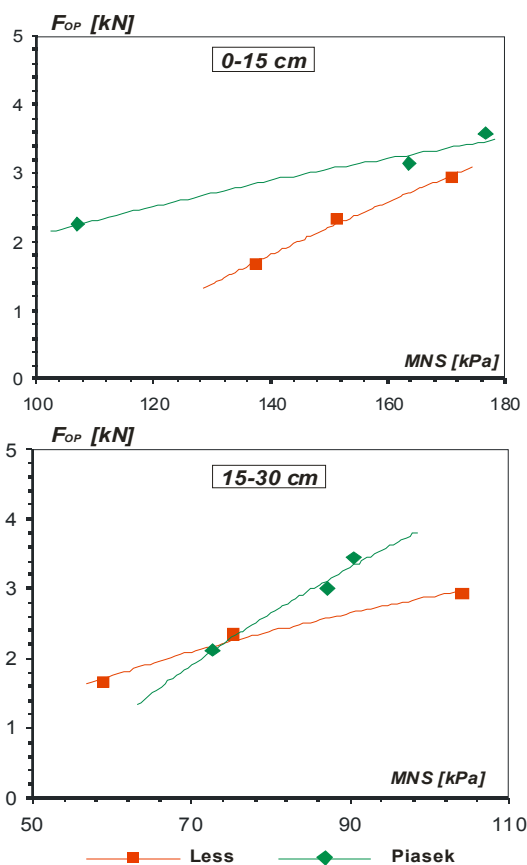


Rys. 5.8. Zależność siły uciągu F_u od wartości chwilowych różnicy naprężeń ($OCTSS - MNS$) dla pojazdu STAR 944 na podłożu lessowym

5.1.3 Korelacja naprężenia MNS i siły oporu toczenia F_{op}

Zależność otrzymano przez zestawienie odpowiednich wartości średnich naprężenia MNS z wartościami średnimi siły oporu toczenia F_{op} . W tym przypadku również zastosowano rozdział siły oporu toczenia na koła według przypadającego na dane koło obciążenia pionowego. Zależności te określono dla pojazdu STAR 1466.

Na podstawie wyników doświadczalnych otrzymano także zależność siły oporu toczenia F_{op} od naprężenia średniego normalnego, MNS , której wykres przedstawiono na rysunku 5.9. Górny wykres otrzymano na podstawie wartości naprężeń wyznaczonych na głębokości 15cm, dolny 30cm. Zależności opisano funkcją logarymiczną a współczynnik regresji osiągnął wartości najwyższe spośród wszystkich otrzymanych korelacji (Tabela 5.1).



Rys. 5.9. Zależność siły oporu toczenia F_{op} od wartości średniego naprężenia MNS dla pojazdu STAR 1466 na podłożu piaszczystym i lessowym

Tabela 5.1. Funkcje opisujące zależności między siłami trakcyjnymi a naprężeniami w podłożu

Głębokość [cm]	Funkcja opisująca zależność	R^2
$F_v = f(S1)$		
Podłoże piaszczyste		
15	$y = 7,7597e^{0,0038x}$	0,7432
30	$y = 5,7977e^{0,0113x}$	0,6135
Podłoże lessowe		
15	$y = 17,625\ln(x) - 86,747$	0,5326
30	$y = 21,03\ln(x) - 96,875$	0,9057

Głębokość [cm]	Funkcja opisująca zależność	R ²
$F_u = f(\text{OCTSS-MNS})$ dla wartości chwilowych		
Podłoże piaszczyste		
15	$y = 3,1714e^{0,0072x}$	0,2791
30	$y = 0,4826e^{0,0371x}$	0,7838
Podłoże lessowe		
15	$y = 37,449x^{-0,1822}$	0,0374
30	$y = 36,052x^{-0,2103}$	0,2764
$F_u = f(\text{OCTSS-MNS})$ dla wartości średnich		
Podłoże piaszczyste		
15	$y = 4,1532\ln(x) - 5,5203$	0,4757
30	$y = 0,823\ln(x) + 6,3993$	0,1406
Podłoże lessowe		
15	$y = -3,3307\ln(x) + 26,827$	0,29
30	$y = -1,3956\ln(x) + 18,146$	0,2937
$F_{op} = f(\text{MNS})$		
Podłoże piaszczyste		
15	$y = 2,292\ln(x) - 8,4142$	0,965
30	$y = 5,3184\ln(x) - 20,537$	0,9711
Podłoże lessowe		
15	$y = 5,7685\ln(x) - 26,695$	0,9878
30	$y = 2,2086\ln(x) - 7,2911$	0,9845

5.1.4 Dyskusja wyników

Monotoniczność funkcji opisujących zależności F_u -(*OCTSS-MNS*) należy interpretować jako wpływ udziału ścinania i ściskania w odkształceniu podłoża, wywołanym obciążeniem kół pojazdu. Rosnący charakter zależności dla podłoża piaszczystego świadczył o tym, że większe wartości siły uciągu, powodowały wzrost różnicy naprężeń. W podłożu piaszczystym większe naprężenia ścinające obserwowano przy wyższych wartościach siły F_u , więc charakter zależności był logiczny. Malejący charakter zależności dla podłoża lessowego świadczy o tym, że siła uciągu rośnie, gdy maleje różnica *OCTSS-MNS*. Mogło to mieć miejsce, gdy albo rosło *OCTSS*, albo malało *MNS*. Wartości naprężeń wskazywały, że w przypadku podłoża lessowego wyższym wartościom siły uciągu towarzyszyły wyższe wartości naprężeń ścinających wyznaczonych na głębokości 30 cm (dla

głębokości 15 cm było odwrotnie, ale wpływ siły uciągu nie był tu istotny, gdyż wartości naprężenia *OCTSS* nie zmieniały się dla rosnącej wartości siły F_U).

W przypadku podłoża piaszczystego, większe wartości siły uciągu powodowały, że naprężenia pod kołem rosły, zarówno na głębokości 15 jak i 30cm (patrz również rysunek 3.16a i b). Wynika stąd, że w podłożu lessowym wzrost siły uciągu powodował zmniejszenie naprężeń ścinających (na typowym wykresie zależności μ - s dla podłoża lessowego występuje „załamanie” krzywej, Shoop, 1994, Pytka i inni, 2006). Wprawdzie otrzymane zależności siły F_U od różnicy naprężeń w podłożu (*OCTSS-MNS*) były monotoniczne w całym zakresie, jednak opis matematyczny powinien uwzględniać obecność ekstremum lokalnego (maksimum). Do konstruowania zależności brano wartości maksymalne i to jest prawdopodobnie przyczyna, że są one monotoniczne w całym rozpatrywanym zakresie. W badaniach planowanych w przyszłości niezbędne będzie zbadanie charakteru tych zależności również dla niższych wartości siły F_U . Należy ponadto zaznaczyć, że charakter zależności (rosnąca lub malejąca) nie zmieniał się w zależności od przyjętej metody ich konstruowania. W opinii Autora metoda konstruowania zależności może mieć wpływ na parametryzację równań, natomiast nie należy się spodziewać, by wpływała na ich charakter. Zależności tworzone metodą z wykorzystaniem wartości chwilowych otrzymano na podstawie większej liczby punktów, więc ich korelacja była lepsza. Z drugiej strony powielano wówczas rozrzuty występujące w poszczególnych pomiarach. Metody otrzymywania zależności sił trakcyjnych od naprężeń w podłożu pozostają wciąż w fazie doskonalenia i mogą stanowić cel przyszłych badań.

Różnica pomiędzy podłożem lessowym i piaszczystym uwidoczniła się również w odkształceniach podłoża. W przypadku podłoża piaszczystego były one znacznie większe, a ponadto występowały na głębokości 30cm. Inna sytuacja miała miejsce w podłożu lessowym. Odkształcenia podłoża lessowego były mniejsze, a na głębokości 30 cm prawie nie występowały.

Otrzymane zależności siły uciągu F_U od różnicy naprężeń w podłożu (*OCTSS-MNS*) można interpretować na bazie porównania mechanicznych własności rozpatrywanych podłoży. Odkształcalne podłoże kohezyjne (plastyczna glina) oraz podłoże bezkohezyjne (suchy piasek) stanowią dwa przeciwstawne materiały. W pierwszym przypadku podłoże odkształca się, występują naprężenia ścinające o rozkładzie pionowym, siła napędowa generowana jest w objętości ośrodka. Zatem siła uciągu F_U zależy od różnicy naprężeń *OCTSS-MNS*. W utwardzonym podłożu oblodzonym nie występują odkształcenia, zaś siła napędowa zależy tylko od tarcia na powierzchni styku opona – podłoże. Na odkształcalnym podłożu kohezyjnym wzrost poślizgu koła powoduje przyrost siły napędowej, podczas gdy na lodzie zwiększenie mocy na kołach powoduje tylko wzrost poślizgu do 100% bez efektu na sile napędowej. Jeśli podłoże piaszczyste traktujemy jako podłoże

kohezyjne odkształcalne (można to czynić bez ryzyka uogólnień) a zagęszczone podłoże lessowe jako utwardzone podłoże, którego powierzchnia ulega ścinaniu, to powyżej opisane porównanie można odnieść do otrzymanych zależności. Less zachowuje się jak podłoże utwardzone z warstwą luźnego materiału, który ulega odkształceniu nie przenosząc naprężeń ścinających (tak jak warstwa lodu). Stąd też analogia między zależnością $\mu-s$ dla lodu i podłoża lessowego. Załamanie krzywej jest dla lodu bardziej wyraźne, bo podłoże lessowe jest materiałem kohezyjnym. Jest to również dowód tego, iż siły trakcyjne na podłożu odkształcalnym powstają jako reakcja objętości podłoża a nie tylko części jego powierzchni, która wchodzi w kontakt z elementem jezdnym, tak jak to zakładało cały szereg modeli w cytowanych pozycjach literatury (Foda, 1991, Jakliński, 1999, Muro, 1993, Shibusawa, 1999, Shop, 1994, Upadhyaya, 1997, Wanji, 1997, Wulfsohn, 1992). Na podstawie otrzymanych wyników udowodniono, że nie tylko naprężenia normalne mają rozkład pionowy, lecz również ścinające, w następstwie czego wynikowe siły na kole są efektem oddziaływań w półprzestrzeni ośrodka gruntowego. Pionowy rozkład naprężeń ścinających w materiale podłoża wynika przede wszystkim z odkształcalności gruntów i gleb, która powoduje, że gęstość w górnych warstwach jest wyższa, stąd też wyższe wartości naprężeń ścinających. Granularny charakter gruntów i gleb a także luźna struktura (lub jej brak) powodują, że naprężenia i odkształcenia posiadają rozkłady kierunkowe, przy czym dominacja siły ciężkości powoduje, że uprzywilejowany jest kierunek pionowy.

5.2 Parametryzacja modelu układu pojazd–podłoże odkształcalne

W bieżącym podrozdziale opisano metodę i wyniki modelowania układu pojazd – podłoże odkształcalne, bazującego na modelu Boussinesque (1885). W modelu tym rozkład naprężeń normalnych w podłożu opisany jest następującą zależnością:

$$\sigma = \frac{\nu F_z}{2\pi r^2} \cos^\nu(\psi) \quad (5.3)$$

Natomiast rozkład naprężeń ścinających wyraża się wzorem:

$$\tau = \frac{\nu F_z}{2\pi r^2} \cos^{\nu-1}(\psi) \sin(\psi) \quad (5.4)$$

W powyższych równaniach występuje współczynnik koncentracji naprężeń w podłożu ν , wprowadzony przez Fröhlicha (1934). Jest to liczba ujmująca właściwości mechaniczne gruntu czy gleby, które decydują o (1) pionowym rozkładzie naprężeń w ośrodku; (2) charakterze tego rozkładu. Im większe ν , tym

ośrodek jest bardziej podatny i zakres pionowy rozprzestrzeniania się naprężeń jest większy.

Na podstawie równań Bekkera (1969) siły trakcyjne można wyznaczyć jak poniżej:

- siła jazdy

$$F_J = b \int \tau dx \quad (5.5)$$

- siła oporu toczenia:

$$F_{OP} = b \int \sigma dz \quad (5.6)$$

Korzystając z teorii Bousinesque i wzorów Bekkera możliwe jest wyznaczenie sił trakcyjnych, pod warunkiem, że znamy wartości współczynnika ν . W tym przypadku ideą autora było zastosowanie metody identyfikacji w celu parametryzacji powyższego modelu. W miejsce naprężeń powierzchniowych σ i τ zaproponowano wstawić naprężenia oktaedryczne: średnie normalne MNS i ścinające $OCTSS$, wyznaczone na głębokości instalacji głowicy SST .

5.2.1 Procedury badawcze

W badaniach użyto pojazdu STAR 944 o charakterystyce podanej w tabeli 2.1. Pojazd został połączony z pojazdem hamującym przy użyciu liny i dynamometru. Oba pojazdy wykonywały manewr polegający na przejeździe przez punkt pomiarowy (miejsce, w którym zainstalowano głowice SST oraz układ rejestracji odkształceń podłoża) w następujący sposób:

- przejazd przez punkt pomiarowy kołami tylnymi pojazdu badawczego z maksymalnym poślizgiem (minimalna prędkość postępową i maksymalna możliwa prędkość obrotowa kół jezdnych) na podłożu piaszczystym;
- przejazd przez punkt pomiarowy kołami tylnymi pojazdu badawczego z maksymalną siłą uciągu na podłożu lessowym, torfowym i śnieżnym.

Badania przeprowadzono na czterech różnych podłożach odkształcalnych:

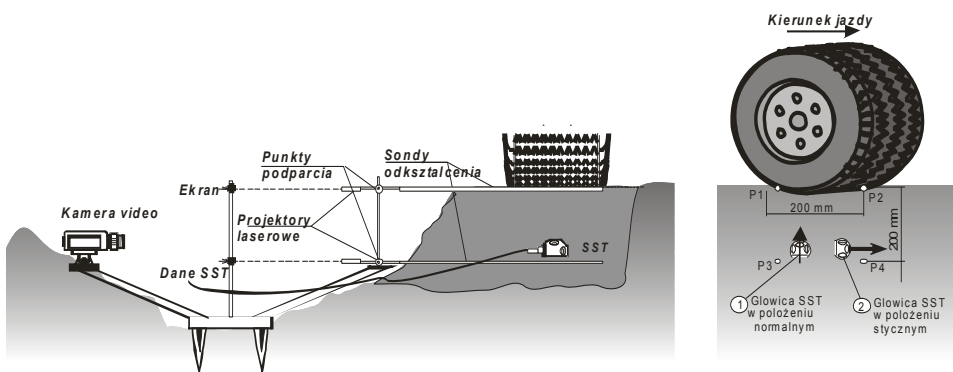
- podłoże piaszczyste, torfowe i śnieżne (WITPIS Sulejówek);
- podłoże lessowe (Dąbrowica k/Lublina).

Podczas przejazdu pojazdu badawczego przez punkt pomiarowy rejestrowano następujące wielkości:

- siła uciągu $F_{U\pm}$
- prędkość postępową pojazdu badawczego oraz prędkość obrotowa kół jezdnych
- napory w podłożu.

Na podstawie naporów zmierzonych w podłożu przy użyciu głowicy SST wyznaczono stan naprężeń.

Na rysunku 5.10 przedstawiono sposób instalacji aparatury pomiarowej w podłożu. Zwraca uwagę odmienny niż w dotychczas prowadzonych badaniach sposób umieszczenia głowic SST. Dwie głowice zostały umieszczone na głębokości ok. 15cm, jedna z nich w normalnej pozycji, druga w pozycji obróconej o 90 stopni tak, że czujnik nacisku pionowego zwrócony był w kierunku poziomym wzdłuż kierunku jazdy. Pierwsza głowica dostarczała danych do identyfikacji części modelu dotyczącej siły oporu toczenia (wymagany rozkład naprężeń normalnych), druga rejestrowała dane do identyfikacji części modelu z siłą uciągu, gdzie wymagane były naprężenia styczne.



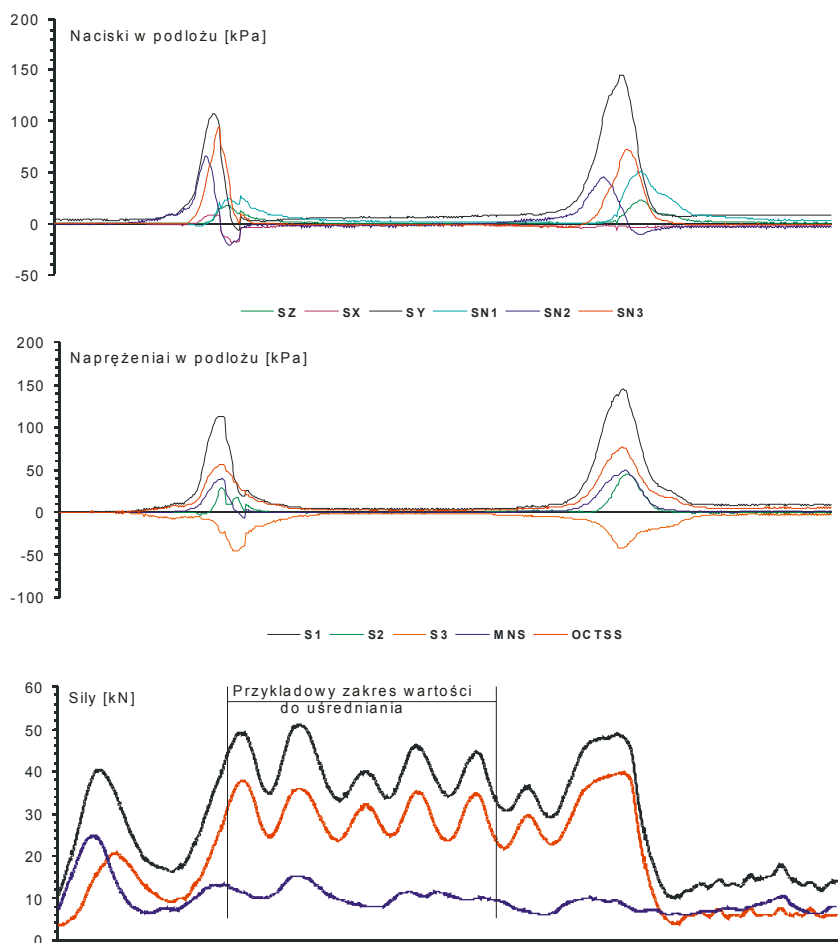
Rys. 5.10. Schemat instalacji aparatury pomiarowo-badawczej do badań odpowiedzi ośrodka odkształcalnego

5.2.2 Wyniki badań

Przykładowe wyników pokazano na rysunku 5.11. Należą do nich przebiegi naporów w podłożu oraz naprężeń wyznaczonych zgodnie z algorytmem (wg Pytki 2007), a także przebiegi sił trakcyjnych. Kompletny zestaw wyników otrzymano dla każdego przejazdu testowego i następujące wielkości były wybierane do dalszej analizy:

- maksymalne wartości naprężeń oktaedrycznych $OCTSS$ i MNS ;
- całki z przebiegów $OCTSS^{INTGR}$ i MNS^{INTGR} ;
- uśrednione wartości sił trakcyjnych;
- wartości A i B w poniższych równaniach:

$$F_j = A \times OCTSS^{INTGR}, F_{OP} = B \times MNS^{INTGR} \quad (5.7)$$



Rys. 5.11. Przykładowy zestaw danych otrzymywanych w badaniach

Tabela 5.2. Dane uzyskane na drodze eksperymentu – napężenia i siły trakcyjne.

Podłoże lessowe							
OCTSS	Peak	56,52	60,20	59,47	74,63	75,09	72,84
	Integer	22,14	31,48	36,89	35,87	29,58	41,91
MNS	Peak	50,76	41,12	46,94	24,54	27,28	37,94
	Integer	11,54	12,23	17,17	7,89	9,44	12,20
F_U		30,29		29,82		28,85	
F_{OP}		9,59		10,36		9,35	

Podłoże lessowe							
F_J		39,88		40,18		38,02	
A		3,437		3,290		2,420	
B		2,467		2,390		1,592	
Podłoże piaszczyste							
$OCTSS$	Peak	308,2	389,5	339,6	347,9	299,8	296,0
	Integer	32,13	41,87	38,88	52,23	77,22	67,53
MNS	Peak	558,9	304,6	301,5	459,1	237,4	210,7
	Integer	83,9	35,23	57,01	29,38	45,27	38,60
F_U		14,99		24,80		25,25	
F_{OP}		30,68		23,06		25,51	
F_J		45,67		47,86		50,76	
A		2,706		2,009		2,385	
B		1,353		1,432		1,348	
Podłoże torfowe							
$OCTSS$	Peak	127,9	219,9	223,5	107,1	103,6	160,6
	Integer	62,33	90,09	61,16	120,06	47,35	57,52
MNS	Peak	57,17	9,47	42,52	74,00	27,30	33,48
	Integer	3,33	3,01	6,71	11,90	5,45	7,15
F_U		22,01		19,79		19,06	
F_{OP}		6,58		5,77		5,83	
F_J		28,59		25,56		24,89	
A		0,783		0,929		1,037	
B		2,162		3,414		2,080	
Podłoże śnieżne							
$OCTSS$	Peak	104,7	174,2	159,6	232,29	202,4	201,0
	Integer	34,23	38,59	43,24	32,30	56,04	44,99
MNS	Peak	155,7	150,6	78,42	136,8	84,21	93,56
	Integer	64,36	48,06	18,05	27,01	9,04	18,25
F_U		6,24		7,26		7,28	
F_{OP}		9,39		10,64		10,51	
F_J		15,63		17,90		17,74	
A		1,174		0,945		0,999	
B		0,513		0,931		1,47	

Wyniki uzyskane z analizy danych doświadczalnych zawarto w tabeli 5.2. W kolumnach zawarto wyniki z trzech powtórzeń, dla każdego z nich po dwa: dla koła przedniego i tylnego. Wartości A i B przedstawiono w trzech kolumnach (dla trzech powtórzeń). Posiadają one fizycznie miano m^2 i zostały określone jako „wymaglinowane powierzchnie kontaktu”.

Zarówno wartości naprężeń jaki sił trakcyjnych są różne dla badanych podłoży. Rodzaj podłoża jest zatem jednym z czynników, który wpływa na wartości parametrów identyfikowanego modelu.

5.2.3 Rekonstrukcja modelu

Algorytm rekonstrukcji modelu wyglądał następująco:

- Estymacja wartości A i B , korelujących siły trakcyjne z odpowiadającymi im naprężeniami.
- Wyznaczenie wartości naprężeń z modelu Boussinesque i korelacja z danymi doświadczalnymi (naprężenia $OCTSS$ i MNS)
- Estymacja parametrów korelacji dla składowych naprężeń: G i H dla ścinających, Q i T dla normalnych

Wartości $A, B \dots T$ zawarto w Tabeli 5.3. Końcowa postać równań modelowych wygląda następująco:

$$F_J = 2A \left[G \int \frac{F_z^p \cos^2(\alpha) \sin(\alpha)}{2\pi r^2} d\alpha + H \int \frac{F_z^t \cos^2(\alpha) \sin(\alpha)}{2\pi r^2} d\alpha \right] \quad (5.8)$$

$$F_{Op} = 2B \left[Q \int \frac{F_z^p \cos^2(\alpha)}{2\pi r^2} d\alpha + T \int \frac{F_z^t \cos^2(\alpha)}{2\pi r^2} d\alpha \right] \quad (5.9)$$

Tabela 5.3. Wartości parametrów do rekonstrukcji modelu

PARAMETR		Rodzaj podłoża			
		Lessowe	Piaszczyste	torfowe	Śnieg
A	P+T	3,049	2,366	0,916	1,039
B	P+T	2,149	1,377	2,552	0,971
G	Przód	0,491	2,891	1,592	1,223
	Tył	1,039	4,401	1,731	2,964
H	Przód	0,257	0,054	0,187	0,132
	Tył	0,244	0,104	0,304	0,105
Q	Przód	0,193	1,623	0,208	0,536
	Tył	0,209	2,115	0,314	0,733

PARAMETR		Rodzaj podłoża			
		Lessowe	Piaszczyste	torfowe	Śnieg
<i>T</i>	Przód	0,187	0,096	0,055	0,215
	Tył	0,210	0,079	0,115	0,109

5.2.4 Walidacja modelu

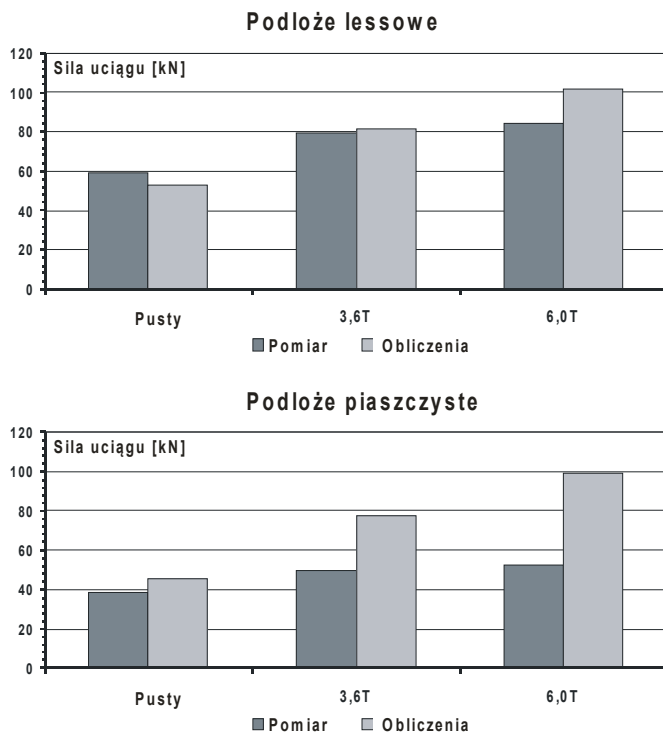
Opracowany model został poddany walidacji. Użyto w tym celu nowego zestawu danych (innego niż do parametryzacji). Wybrano wyniki otrzymanych w badaniach poligonowych pojazdów STAR 1466 oraz *HMMWV* Hummer. Samochód ciężarowy STAR 1466 testowano na podłożu lessowym i piaszczystym, natomiast samochód Hummer badano na podłożu piaszczystym i torfowym. W przypadku samochodu STAR 1466 uwzględniono wpływ ładunku (0, 3.6 oraz 6 T). Metody badawcze w zakresie pomiaru naprężeń, odkształceń i sił trakcyjnych opisano w rozdziale 2.

Wyniki uzyskane w badaniach poligonowych porównano z wynikami symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem otrzymanego modelu. Pokazano to na rysunku 5.12. Zdolność predykcyjna opracowanego modelu jest na poziomie dobrym lub wystarczającym. Różnice między wynikami doświadczalnymi a modelowymi mieszczą się w zakresie 3 – 47%. Rozbieżności te są największe dla pojazdu STAR 1466 dla najcięższego ładunku na podłożu lessowym. Wyjaśnieniem tych rozbieżności może być różnica w wilgotności badanych podłoży. W przypadku badań do parametryzacji modelu, wilgotność podłoża piaszczystego była na poziomie 7-8%, podczas gdy wilgotność tego podłoża podczas badań walidacyjnych była dużo niższa i wynosiła ok. 3%. Różnice wilgotności podłoża w przypadku testów z użyciem *HMMWV* Hummer były znacznie niższe, stąd też i lepsza predykcja modelu. Dodatkowo zauważono, że różnice między wynikami pomiarów i symulacji wzrastają przy wyższych wartościach obciążenia kół.

Tabela 5.4. Porównanie wartości zmierzonych i wyznaczonych na podstawie modelu osiąгов trakcyjnych pojazdów STAR 1466 i *HMMWV* Hummer

Parametr	Siła uciągu					
	Zmierzona [kN]	Obliczona [kN]	Różnica [%]	Zmierzona [kN]	Obliczona [kN]	Różnica [%]
14T 6x6 TRUCK						
Ociążenie	Podłoże lessowe			Podłoże piaszczyste		
b.o.	59,60	52,72	11,53	38,22	45,08	15,21
+3,6T	79,15	81,63	3,04	49,47	77,44	36,12
+6,0T	83,90	101,90	17,66	52,58	99,21	47,00

Siła uciągu						
Parametr	Zmierzona [kN]	Obliczona [kN]	Różnica [%]	Zmierzona [kN]	Obliczona [kN]	Różnica [%]
4,6T 4x4 HMMWV						
Masa	Podłoże lessowe			Podłoże piaszczyste		
4,665 kg	B.d.	26,77	-	7,50	7,25	3,3



Rys. 5.12. Porównanie wyznaczonej doświadczalnie i obliczonej z modelu wartości siły uciągu F_u dla pojazdu STAR 1466.

5.3 Identyfikacja modelu koło – podłoże odkształcalne

Prezentowany w niniejszym rozdziale model dotyczy zagadnienia dynamiki podłużnej i pionowej układu koło ogumione – podłoże odkształcalne. Siła obciążenia pionowego ograniczana jest nośnością gruntu, która w przypadku podłoży wilgotnych i luźnych jest niska. Wysoka odkształcalność takich podłoży skutkuje zagłębieniem koła i wzrostem oporów toczenia. Siła jazdy generowana

w układzie koło – podłoże zależy od przyczepności opony na danym gruncie (Sołtyński, 1978, Mischke, 2005, Prochowski, 2004). Należy jednak rozróżniać zjawiska przyczepności przylgowej, występującej, gdy nie nastąpi zerwanie połączenia kształtowego elementu jezdnego z podłożem oraz przyczepności poślizgowej, określanej dla pełnego poślizgu. Zagadnienie przyczepności poślizgowej zostało opisane w poprzednich podrozdziałach, gdzie analizowano oddziaływania kohezyjne w obszarze styku koła lub gąsienicy z podłożem a także ich wpływ na siły trakcyjne. Obecnie analizie poddane będzie zagadnienie przyczepności przylgowej, gdy poślizg koła napędowego jest niewielki, rzędu 5-10%, a siły trakcyjne są wynikiem przede wszystkim oddziaływań adhezyjnych.

Grunty spoiste pozwalają na uzyskanie znacznej przyczepności w odróżnieniu do gruntów sypkich (piaski), będących w stanie suchym. Faza ciekła w podłożach piaszczystych będzie skutkować tzw. spoistością pozorną, wywołaną pojawieniem się sił napięcia powierzchniowego między cząstkami ośrodka.

Ideą autora było otrzymanie matematycznego modelu opisującego związki sił działających od podłoża na koło, F_z i F_x z naprężeniami generowanymi w ośrodku podłoża. Wynikiem modelu będą wartości naprężeń generowanych w podłożu. Jest to zatem model oddziaływania koła lub innego elementu jezdnego na podłoże. Liczne modele współpracy bazowały na założeniu o oddziaływaniach powierzchniowych w układzie koło – podłoże (Bekker, 1966, Godbole, 1993, Muro, 1993, Wanjii, 1997). Wówczas istotne było wyznaczanie nacisków jednostkowych i naprężeń stycznych na powierzchni kontaktu. Włączenie naprężeń w ośrodku do opisu rozpatrywanego systemu może poprawić kompletność modelu, gdyż analizowane będzie to, co dzieje się wewnątrz ośrodka. Jest to istotne, gdy uświadomimy sobie, że złożony stan obciążeń wywołanych przejazdem koła generuje złożony i przestrzenny stan naprężeń w ośrodku. Rozważania ograniczono do jednego typu elementu jezdnego, koła ogumionego

5.3.1 Fizyczne podstawy modelu

Zakładając, że współpraca koła z podłożem zachodzi bez poślizgu wzdłużnego, wówczas reakcje podłoża generowane są przy braku ścinania gruntu, lub gdy jest ono pomijalnie małe. Aby taka sytuacja mogła mieć miejsce, naprężenie ścinające od elementu jezdnego nie może przekroczyć wartości granicznej przy danej wartości naprężenia normalnego (nacisku jednostkowego wywieranego przez oponę), zgodnie z kryterium Coulomba. Koło jezdne napędowe na podłożu odkształcalnym może pracować bez poślizgu przy spełnieniu następujących warunków:

- wysoka przyczepność opony względem nawierzchni;
- znaczna spójność materiału podłoża.

Pierwszy warunek jest zazwyczaj trudny do spełnienia, głównie ze względu na odkształcalność podłoża gruntowego czy śnieżnego. O ile np. piasek jest

materiałem poprawiającym warunki współpracy na sposób tarcia (stosowano tzw. piasecznice w parowozach, do zwiększenia współczynnika tarcia), jednak wymaga to znacznych wartości nacisku jednostkowego. W przypadku układu koło ogumione – podłoże odkształcalne dzieje się to kosztem zwiększonego oporu toczenia.

Drugi warunek możliwy jest do spełnienia w przypadku odkształcalnych podłoży spoistych, lessowych, ilastych lub piaszczystych wilgotnych. Spójność typowych podłoży odkształcalnych jest zależna od wilgotności, która waha się w szerokich granicach.

Można założyć, że bezpośrednia współpraca elementu jezdnego z podłożem odkształcalnym jest możliwa i temu będzie poświęcony niniejszy rozdział.

Ponieważ założono, że model będzie bazował na danych doświadczalnych, należy dokonać doboru wielkości mierzalnych w układzie koło – podłoże, które najlepiej opisują badany układ i na bazie których zostaną odtworzone równania modelu. Wybrano następujące wielkości:

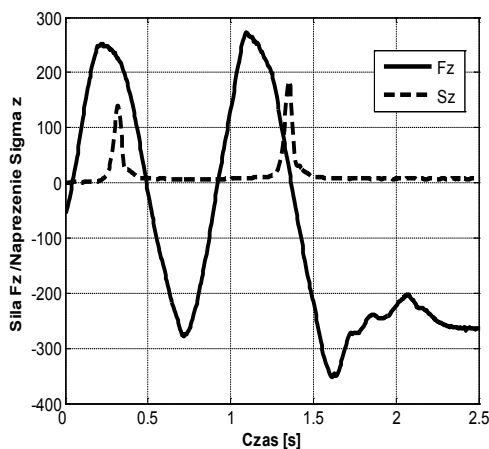
- reakcja pionowa F_z i naprężenie pionowe σ_z ;
- obwodowa reakcja styczna F_x i naprężenie styczne τ_{xy} .

W celu otrzymania danych do odtwarzania modelu analizowano fragment przebiegu siły i odpowiedni fragment przebiegu naprężenia. Następnie wyodrębniano zakres wartości siły, dla którego naprężenie osiągało wartości większe od spoczynkowego. Należy tu zaznaczyć, że dobre skorelowanie naprężeń i sił wymagało, by punkty charakterystyczne na wykresach obu tych wielkości były zgodne w czasie. Jednoczesny pomiar sił i naprężeń z wyzwaniem na komendę głosową nie zapewniał pełnej synchronizacji. Nawet gdyby użyto elektronicznego wyzwacza, tzw. *triggera*, nie byłoby gwarancji, że wyżej wspomniane przebiegi będą zgodne w fazie, ze względu na cyklometryczny charakter przebiegów sił na kole. Ponadto, istnieje przesunięcie w fazie, na które wpływa dynamika całego układu jezdnego, charakterystyka sprężystości zawieszenia oraz tłumienie. Tych efektów nie uwzględniano, jednak spodziewany wpływ na wyniki końcowe w przypadku, gdy przejazdy testowe odbywały się z niewielkimi prędkościami a pomiaru dokonywano w warunkach ustalonych.

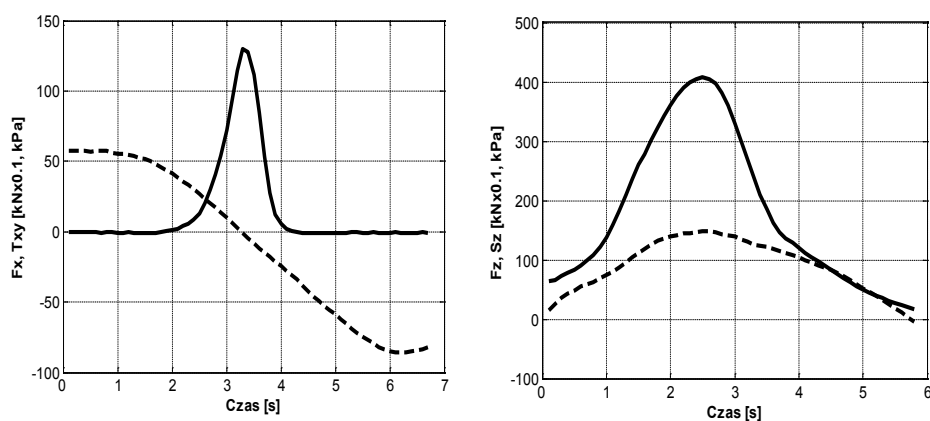
Przebiegi wybranych wielkości przygotowano w ten sposób, że dla połowy pełnego cyklu zmierzonego przez koło dynamometryczne dobierano równy co do długości trwania przebieg odpowiedniego naprężenia, przy czym pik tego przebiegu ustawiano w środku zakresu, tak by zgrał się on z pikiem (lub zerem) siły na kole. Takie „dopasowanie” przebiegów wartości sił i naprężeń nie wpływało istotnie na wynik ostateczny, gdyż przesunięcie fazowe w stosunku do położenia rzeczywistych zakresów wartości jest nieznaczne. Przykładowo, jeśli przesunięto wyodrębniony zakres naprężeń o ok. 100ms (10 jednostek czasu na

skali), to przy prędkości rzędu 5-7 km/h przemieszczenie wyniosło ok. 200mm. Odpowiada to sytuacji, w której pomiar sił następował w miejscu przesuniętym o 200mm w stosunku do miejsca pomiaru naprężeń. Założono, że ciągłość ośrodka podłoża odkształcalnego zapewniła niezmiennność stanu podłoża w rozpatrywanym zakresie.

Na rysunku 5.13 zamieszczono przykładowe przebiegi reakcji pionowej F_z i naprężenia σ_z . Natomiast na rysunku 5.14 przedstawiono sposób wyodrębniania zakresów danych sił i naprężeń do dalszej analizy. Przedstawione wykresy naprężeń i sił są zgodne w skali czasu.



Rys. 5.13. Przykładowe przebiegi sił i naprężeń, użytych do tworzenia modelu empirycznego



Rys. 5.14. Przebiegi sił i naprężeń po wyodrębnieniu fragmentów jako dane wejściowe

Wyniki uzyskane w pomiarach z użyciem czujnika sił na kole posiadały charakter funkcji cyklometrycznych. Konieczne było uwzględnienie tego w opracowaniu wyników i przygotowywaniu wyodrębnionych zakresów danych do identyfikacji. Do sygnałów o charakterystyce cyklometrycznej należały przebiegi F_x , F_z , M_x oraz M_z . Pozostałe sygnały posiadały charakterystyki czasowe. Taka sytuacja sprawiła, że w celu uzyskania prostych przebiegów (jako funkcji czasu) wymienionych sił i momentów konieczne było ich przeliczanie z uwzględnieniem kąтового położenia koła. Przebiegi naprężeń rejestrowanych podczas przejazdu koła (czyli przebiegi o charakterze cyklometrycznym) zestawiano z przebiegami sił bezpośrednio z czujnika, bez przeliczania. W ten sposób przygotowane dane posiadały podobny charakter.

W następnym podrozdziale zostanie przybliżona metoda identyfikacji systemów, jako narzędzie wybrane przez Autora do odtwarzania modeli matematycznych na podstawie danych doświadczalnych.

5.3.2 Wprowadzenie do metody identyfikacji systemów

W technice mamy zazwyczaj do czynienia ze złożonymi obiektami lub układami obiektów. W celu tworzenia nowych obiektów technicznych, lub lepszego poznania już istniejących, potrzebny jest opis sposobu ich działania. Opis zachowania się obiektu technicznego nazywamy jego modelem, przy czym możemy wyróżnić dwa zasadnicze rodzaje modeli obiektów:

- modele fizyczne, które zawierają prawa fizyczne opisujące w sposób optymalny zachowanie systemu;
- modele matematyczne, ujmujące funkcjonowanie obiektu lub układu w formie równania lub układu równań matematycznych.

Z powyższego podziału wynikają dwie zasadnicze metody otrzymywania modeli oraz ich rodzaje.

Klasyczne modelowanie obiektu lub systemu obiektów technicznych polega na (1) podziale obiektu na podzespoły, których charakterystyki są na tyle dobrze znane, że możliwe jest (2) wyprowadzenie ich matematycznych opisów, które następnie są (3) łączone w cały system opisów matematycznych, tworzący model.

Drugą metodą otrzymywania modeli jest analiza sygnałów wejściowych i wyjściowych, które opisują działanie systemu. Model odtwarzany jest na podstawie korelacji tych sygnałów. Metoda ta nosi nazwę IDENTYFIKACJI SYSTEMÓW (Ljung 1999, James 2002).

Podstawowe zadania badawcze w eksploatacji systemów to identyfikacja, analiza i synteza. Zadanie identyfikacji polega na dopasowaniu takiej struktury i mechanizmów działania modelu, które umożliwiają otrzymanie wartości wielkości wyjściowych. Identyfikacja systemów i procesów wymaga

rozpoznania zachowania badanego systemu oraz opracowania modelu adekwatnego, przy przyjętych założeniach i kryteriach. Identyfikacja pozwala również na uzyskanie modelu systemu, dla którego nie jest możliwe zastosowanie spójnej teorii, tak jak w przypadku dwóch pozostałych zadań, tj. analizy i syntezy.

5.3.2.1. Teoretyczne podstawy identyfikacji systemów

Niech $u(t)$ i $y(t)$ oznaczają odpowiednio sygnały wejścia i wyjścia względem czasu dla rozpatrywanego systemu. Zależności i wzajemne interakcje pomiędzy wejściem i wyjściem są nieznane i stanowią przedmiot naszych badań. Najbardziej podstawowa zależność opisująca działanie systemu dynamicznego wyrazić można liniowym równaniem różnicowym:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) \quad (5.14)$$

W celu uproszczenia zapisu możemy zastosować notację wektorową:

Θ – wektor współczynników

$\varphi(t)$ – wektor sygnałów wejściowych

Wówczas równanie (5.14) można zapisać następująco:

$$y(t) = \varphi^T(t) \Theta \quad (5.15)$$

Założmy, że dla danego systemu nie znamy wartości parametrów wektora Θ , ale mamy zarejestrowane (zmierzone doświadczalnie) sygnały wejścia i wyjścia w odstępie czasu $1 \leq t \leq N$, które zapiszemy następująco:

$$Z^N = \{u(1) \ y(1) \dots u(N) \ y(N) \} \quad (5.16)$$

Wyznaczenie współczynników w Θ możliwe jest przy użyciu metody najmniejszych kwadratów:

$$\min V_N(\Theta, Z^N) \quad (5.17)$$

$$V_N(\Theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t | \Theta)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \varphi^T(t) \Theta]^2 \quad (5.18)$$

Wartość Θ , dla której równanie (4.18) osiąga minimum oznaczmy jako $\hat{\Theta}$.

Wówczas:

$$\hat{\Theta} = \arg \min V_N(\Theta, Z^N) \quad (5.19)$$

Porównując pochodną do zera wyznaczymy minimum:

$$\frac{d}{d\Theta} V_N(\Theta, Z^N) = 0 \quad (5.20)$$

$$\frac{2}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)[y(t) - \varphi^T(t)\Theta] = 0 \quad (5.21)$$

$$\sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) = \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t)\Theta \quad (5.22)$$

Inaczej można zapisać:

$$\hat{\Theta} = \left[\sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \right]^{(-1)} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \quad (5.23)$$

Równania 5.14 i 5.23 tworzą archetyp metody identyfikacji sygnału.

5.3.2.2. Schemat metody identyfikacji systemów

Postulowanie modelu

W pierwszym etapie procesu identyfikacji konieczne jest wprowadzenie ogólnej wizji modelu danego systemu. Postulowanie modelu zależy od rodzaju i charakterystyki danego systemu czy obiektu. W przypadku systemu koło – podłoże odkształcalne podstawowymi zmiennymi mogą być siły lub naprężenia, przy czym zmiennymi wejściowymi mogą być siły działające od pojazdu na koło natomiast zmienne wyjściowe to naprężenia i odkształcenia podłoża oraz odkształcenia opony.

Na tym etapie możliwe jest modyfikowanie znanych modeli. Wówczas identyfikacja sprowadzi się do rekonstrukcji i parametryzacji modelu. W innym wypadku, gdy wyprowadzamy nowy model, identyfikacja pozwoli na estymację parametrów modelu.

Projekt i realizacja eksperymentu

Eksperyment jest podstawą metody identyfikacji systemów i właściwe jego zaprojektowanie warunkuje osiągnięcie końcowego sukcesu. Przede wszystkim

ważne jest uzyskanie wiarygodnych i powtarzalnych wyników. Eksperyment identyfikacji należy zaplanować w ten sposób, by możliwe było uzyskanie ciągu danych niezbędnych do przeprowadzenia identyfikacji. Niezbędna jest możliwość pomiaru założonych wielkości charakteryzujących rozpatrywany system, zgodnie z przyjętym w pierwszym punkcie modelem. Konieczne jest również uzyskanie wymaganej częstości próbkowania.

Otrzymywane w doświadczeniach dane mogą zawierać błędy związane z charakterystyką czujników a także z warunkami badań. Badania doświadczalne należy projektować tak, by błędy te były pomijalnie małe, lub by możliwe było ich diagnozowanie i filtracja.

W zakresie projektu eksperymentu mieści się metodyka badawcza, dobór przetworników, czujników, wzmacniaczy, systemów rejestracji a także ich właściwe przygotowanie, kalibracja, itd.

Analiza kompatybilności danych

Zadanie to polega głównie na oszacowaniu funkcji błędu, co może być zrealizowane na 2 poziomach:

- błąd równania – proces identyfikacji polega na uzyskaniu najlepszego dopasowania wielkości symulowanej do wyników badań poprzez zmianę parametrów równania;
- błąd wyjścia – startowym (początkowym) wyrażeniem jest rozwiązanie ogólnego równania ruchu pojazdu.

Do zaburzeń występujących w systemie koło – podłoże odkształcalne należą:

- zaburzenia pomiarowe, pojawiające się w mierzonym sygnale, szумы, sygnały obce;
- zaburzenia procesu pojawiające się na wyjściu, wynikające z czynników środowiskowych, w tym również zaburzenia związane z wysoką niestabilnością podsystemu podłoża odkształcalnego.

Analiza kompatybilności danych stanowi ważny etap w uzyskiwaniu wymaganych danych eksperymentalnych i wpływa bezpośrednio na efekt końcowy.

Określenie struktury modelu

W momencie, gdy dysponujemy kompletem danych doświadczalnych o spełnionych wymaganiach co do dokładności i powtarzalności, możliwe jest przejście do najważniejszego etapu identyfikacji systemu, czyli określania struktury modelu. Struktura modelu badanego systemu powinna charakteryzować się (1) zgodnością z przyjętym układem danych wejścia-wyjścia, (2) powinna umożliwiać estymację parametrów, (3) posiadać własności predykcyjne.

Struktura modelu jest określona na podstawie

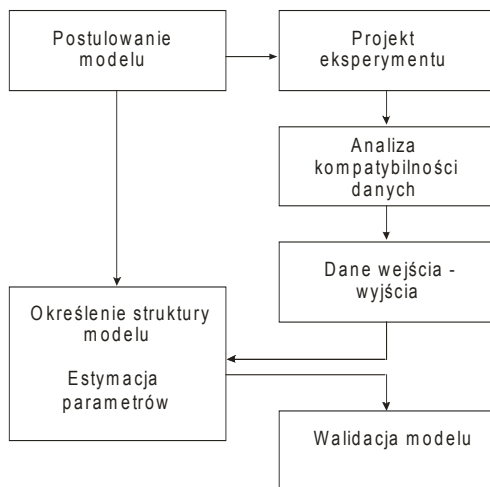
- równań modelu, które opisują zjawiska reprezentowane przez model, równania wiążą ze sobą wielkości wejściowe z wielkościami wyjściowymi;

- parametrów modelu, określanych na podstawie powyższych badań doświadczalnych, np. parametry uwzględniające wpływ rodzaju gleb i ich stanu;
- funkcji błędów.

Walidacja modelu

Walidacja modelu przeprowadza się na bazie danych pomiarowych, innych niż użyte do identyfikacji. Walidacja polega na zbadaniu wiarygodności modelu. Wyróżniamy następujące poziomy wiarygodności:

- wiarygodność funkcjonalna – jest poziomem wiarygodności całego modelu przy uzyskiwaniu zgodności z pewnymi wymaganymi funkcjonalnymi: np. czy model może być wykorzystany do przewidywań własności jezdnych w terenie;
- wiarygodność fizyczna jest poziomem poprawności założeń modelu w elementach tego modelu, w kategoriach i reprezentatywności dla leżących u ich podstaw zjawisk fizycznych.



Rys. 5.15. Schemat metody identyfikacji

5.3.3 Metody badań własnych

W myśl metody identyfikacji systemów konieczne było uzyskanie danych doświadczalnych, zawierających wartości sygnałów wejścia i wyjścia dla rozpatrywanego systemu. W naszym przypadku były to siły działające od pojazdu na koło i naprężenia w podłożu powodowane obciążeniem kół jezdnych. Badania przeprowadzono na trzech różnych podłożach okształcalnych: piaszczystym i torfowym (poligon WITPIS Sulejówek) oraz na podłożu lessowym (lotnisko wojskowe Sochaczew). Zgodnie z założeniami zawartymi w podrozdziale programie badań, pojazd badawczy przejeżdżał przez punkt pomiarowy przy zerowym

lub minimalnym poślizgu, ale z włączonym napędem osi, na kole której zainstalowano dynamometr.

5.3.3.1 Wyznaczanie reakcji podłoża na koło jezdne

Reakcje podłoża działające na koło pojazdu w ruchu wyznaczano z użyciem dynamometru opisanego w rozdziale 2. Dynamometr zainstalowany na pojeździe badawczym (Dzik MED) pokazano na rysunku 2.20. Urządzenie mierzy w sposób ciągły trzy siły i trzy momenty działające na koło w ruchu, a dane pomiarowe są cyfrowo przetwarzane i rejestrowane w pamięci układu elektronicznego, zainstalowanego w osi koła pojazdu. Więcej szczegółów tego urządzenia zawarto w publikacji Autora (Pytka, 2008).

5.3.3.2 Wyznaczanie naprężeń w podłożach odkształcalnych powodowanych obciążeniem koła

Do wyznaczania naprężeń osiowych i stycznych wykorzystane zostały głowice SST, przedstawione w rozdziale 2. Naprężenia w podłożu oraz siły działające na koło powinny być mierzone z jednakową częstotliwością. Głowica SST umożliwia wyznaczenie składowych osiowych tensora naprężenia $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ oraz składowych stycznych:

$$\tau_{xy} = -\left(\frac{3}{4}\right)(\sigma_{n2} + \sigma_{n3}) + \left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (5.24)$$

$$\tau_{xz} = \left(\frac{3}{4}\right)(\sigma_{n1} + \sigma_{n3}) - \left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (5.25)$$

$$\tau_{yz} = \left(\frac{3}{4}\right)(\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) - \left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (5.26)$$

gdzie $\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}$ to napory mierzone przez głowicę SST (patrz opis w rozdziale 2).



Rys. 5.16. Dynamometr do pomiaru sił i momentów na kole zainstalowany na pojeździe badawczym Dzik MED.

5.3.4 Odtwarzanie modeli matematycznych

Zadanie identyfikacji wykonano z użyciem programu komputerowego System Identification Toolbox pracującego w środowisku MATLAB. Pierwszym krokiem w każdej sesji identyfikacyjnej jest import danych. Wprowadzono dane wejściowe (siły na kole pojazdu) oraz dane wyjściowe (naprężenia w podłożu). Następnie przeprowadzono filtrację danych. W programie SI Toolbox został użyty filtr Butterwortha 5-go rzędu. Filtracja danych pozwoliła na uzyskanie większej dokładności estymacji parametrów modelu i w efekcie lepszego dopasowania krzywych modelowych do przebiegu danych pomiarowych. Kolejnym krokiem była estymacja modeli. Przystępując do odtwarzania modeli z wektorów danych do wyboru były trzy rodzaje modeli: modele liniowe parametryczne, modele nieliniowe, modele procesowe.

Modele typu ARX (*Auto Regression with eXtra inputs*), modele typu ARMAX (*Auto Regression Moving Average with eXtra inputs*), OE (*Output Error*) oraz BJ (*Box Jenkins*) należą do najprostszych a równocześnie najpowszechniej stosowanych. Estymacja parametrów modelu może odbywać się na dwa sposoby: ARX, czyli metodą regresji oraz IV (Instrumental Variables), czyli zmiennych instrumentalnych. W przypadku estymacji metodą regresji do wyboru był rząd wielomianów modelu (n_a , n_b) oraz opóźnienie sygnału wejściowego (n_k). Sekwencja tych trzech liczb znajdująca się w symbolu modelu, np ARX441 oznaczała model identyfikowany metodą regresji z wielomianem 4-go rzędu i opóźnieniem sygnału wejścia równym jednostce czasu.

W przypadku modeli nieliniowych możliwe były dwa rodzaje modeli:

- modele autoregresyjne ARX;
- modele Hammersteina-Wienera.

Nieliniowy model autoregresyjny (NLARX – *Non Linear ARX*) reprezentuje nieliniową strukturę równoległą, w której prosta transformacja zmierzonych sygnałów wejścia i wyjścia (tzw. regresorów) jest wykorzystywana w równoległych blokach liniowym i nieliniowym do opisu obserwowanego zjawiska. Ustalenie struktury tego typu modeli polega na wybraniu sygnałów we/wy (regresorów) oraz skonfigurowaniu estymatora nieliniowości. Struktura modelu może ale nie musi zawierać bloku liniowego. Model Hammerstein-Wienera posiada strukturę szeregową, na którą składają się nieliniowości wejścia i wyjścia. Sygnały we/wy są wprowadzane do modelu typu OE (*Output Error*) przez nieliniowości statyczne.

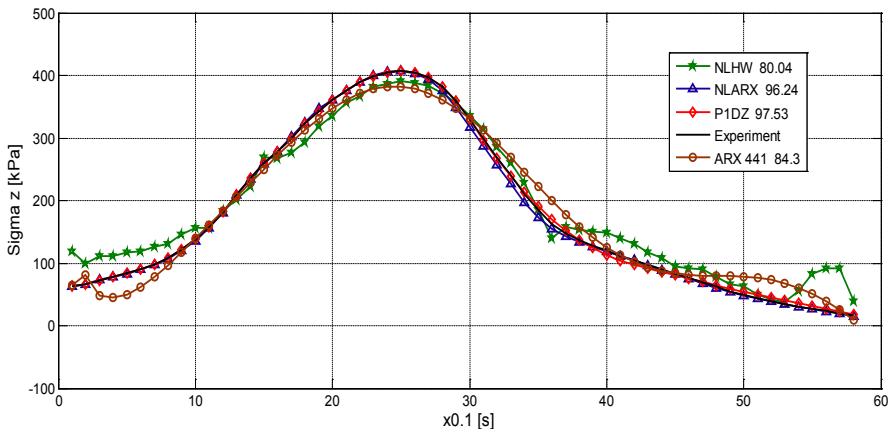
Modele w przestrzeni stanów są modelami ciągłymi opisanymi przy użyciu stałych czasowych, wzmocnienia, oraz zera procesu. Możliwe jest tworzenie modeli procesowych wielu zmiennych, dodatkowo możliwe jest wprowadzenie opisu szumu do struktury modelu. Typowym modelem w przestrzeni stanów jest tzw. transmitancja (*transfer function*):

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k} \quad (5.27)$$

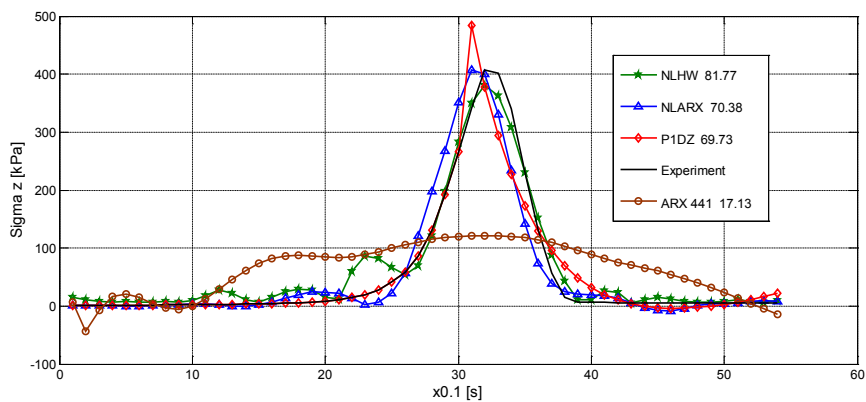
Struktura modelu może być definiowana przy pomocy stałych czasowych, Maksymalnie można wprowadzić 3 stałe czasowe, ale struktura modelu może też nie mieć żadnej takiej stałej. Oprócz opóźnienia i punktu zerowego możliwe jest wprowadzenie całkowania w modelu. Symbolika oznaczenia modeli w przestrzeni stanów jest zatem zależna od wprowadzanych elementów, i tak na przykład PIDIZ oznacza model procesowy z jedną stałą czasową, opóźnieniem, zerem procesu i całkowaniem.

5.3.5 Wyniki obliczeń symulacyjnych

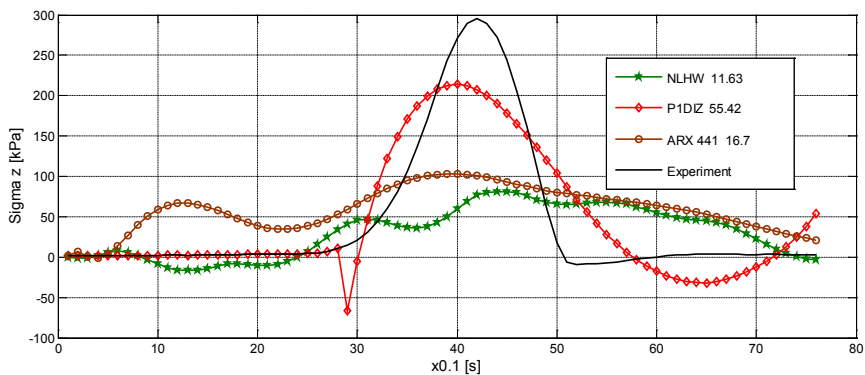
Na rysunkach 5.17 – 5.22 przedstawiono wyniki symulacji dla trzech grup modeli odtworzonych z użyciem danych doświadczalnych uzyskanych na trzech podłożach o kształtach. Wynikiem wyjściowym tych symulacji są przebiegi naprężeń powodowanych obciążeniem koła. Wyniki uzyskane z użyciem poszczególnych modeli oznaczono liniami kolorowymi, natomiast czarna, grubsza linia reprezentuje dane eksperymentalne do oceny przybliżenia modelu do eksperymentu. Legendy umieszczone w ramkach zawierają informacje odnośnie jakości dopasowania poszczególnych modeli. Im większa liczba przy oznaczeniu modelu tym lepsze dopasowanie, a teoretyczne maksimum wynosi 100.



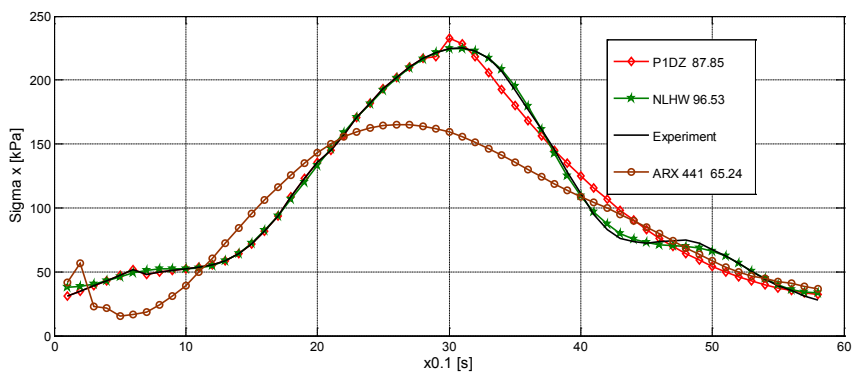
Rys. 5.17. Wyniki symulacji dla układu $F_z - \sigma_z$. Podłoże lessowe.



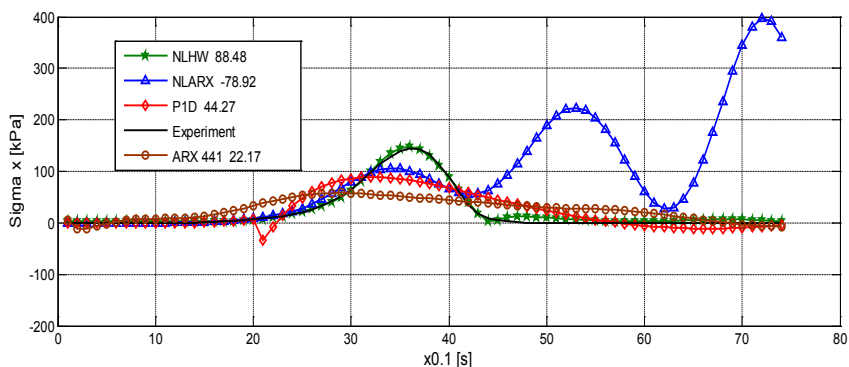
Rys. 5.18. Wyniki symulacji dla układu $F_z - \sigma_z$. Podłoże piaszczyste.



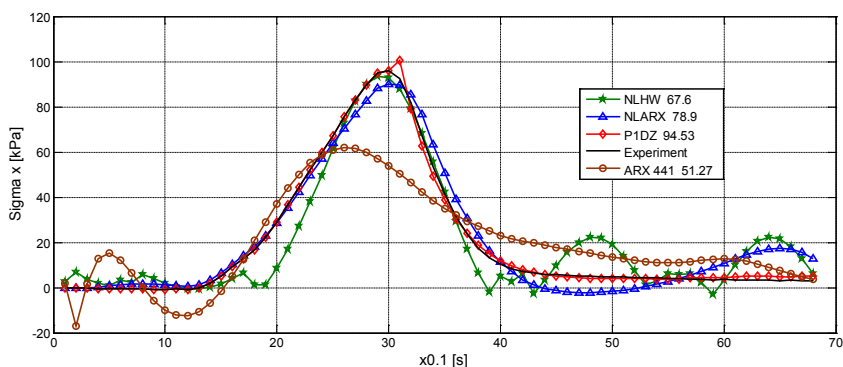
Rys. 5.19. Wyniki symulacji dla układu $F_z - \sigma_z$. Podłoże torfowe.



Rys. 5.20. Wyniki symulacji dla układu $F_x - \tau_{xy}$. Podłoże lessowe.



Rys. 5.21. Wyniki symulacji dla układu $F_x - \tau_{xy}$. Podłoże piaszczyste.



Rys. 5.22. Wyniki symulacji dla układu $F_x - \tau_{xy}$. Podłoże torfowe.

5.3.5.1. Wpływ rodzaju podłoża

Wybrane modele analizowano pod względem jakości dopasowania do przebiegów doświadczalnych a wyniki tej analizy zamieszczono w tabeli 5.5. Najkorzystniejsze dopasowania uzyskano w przypadku podłoża lessowego. Wyraźnie najgorsze dopasowania charakteryzują modele dla podłoża torfowego, podłoże piaszczyste mieści się pomiędzy. Wyniki zgodne są z analizą rozrzutów wartości naprężeń, przeprowadzoną przez autora i zamieszczoną w rozdziale 3. Odchylenia standardowe naprężeń w podłożu torfowym osiągały najwyższe wartości. Wyjaśnia to trudności w odtworzeniu modelu o dobrym dopasowaniu do wyników doświadczalnych uzyskanych na podłożu torfowym.

Najwyższy wskaźnik dopasowania uzyskano dla układu $F_z - \sigma_z$ na podłożu lessowym, wyniósł on 97.53. Model o tych parametrach należał do rodziny ARX (autoregresyjne modele liniowe). Należy nadmienić, że modele tego typu sprawdzały się

jedynie dla układu koło – podłoże lessowe. Nieliniowe modele typu Hammersteina-Wienera stanowią dobry wybór dla wszystkich badanych podłoży i układów z wyjątkiem układu $F_z - \sigma_z$ na podłożu torfowym. Bardzo dobre dopasowanie wyników symulacji z użyciem nieliniowych modeli autoregresyjnych uzyskano tylko dla wybranych przypadków, najlepsze dopasowanie 96.24 uzyskano dla układu $F_z - \sigma_z$ na podłożu lessowym. Ten sam model dawał dopasowanie na poziomie -80 dla podsystemu $F_x - \tau_{xy}$ na podłożu piaszczystym. Modele w przestrzeni stanów dawały dopasowania na poziomie średnim lub dostatecznym.

Wpływ rodzaju podłoża na wskaźnik dopasowania wyników symulacji do wyników doświadczalnych i wynikającą stąd jakość predykcyjną modeli można tłumaczyć na gruncie mechaniki badanych podłoży. Według przyjętych założeń, modele były odtwarzane na podstawie danych otrzymanych w warunkach bezpośredniej współpracy koła z podłożem. Sytuacja taka miała miejsce, gdy odkształcenia podłoża pod kołem były niewielkie lub o charakterze quasi-sprężystym. Było to łatwe do spełnienia dla silnie zagęszczonego podłoża lessowego, na którym przeprowadzono część badań. Natomiast suche podłoże piaszczyste charakteryzowało się wysoką odkształcalnością postaciową i objętościową, podobnie podłoże torfowe.

Podsumowując stwierdza się, że uzyskanie wiarygodnego modelu dla układu koło-podłoże odkształcalne na bazie danych eksperymentalnych jest trudne ze względu na różnorodność własności mechanicznych gruntów i gleb. Metoda polegająca na identyfikacji modeli na bazie samych tylko wyników doświadczalnych, bez odniesienia do podstaw fizycznych może dawać nie satysfakcjonujące wyniki. Mimo starannego przygotowania i przeprowadzenia eksperymentu do identyfikacji, niektóre z uzyskanych modeli posiadały niski wskaźnik dopasowania. Modele odtwarzane metodą identyfikacji mogą mieć praktyczne znaczenie, gdy ich stosowność ograniczymy do konkretnego typu podłoża.

Tabela 5.5 Porównanie wybranych modeli dla trzech badanych podłoży odkształcalnych

Rodzaj modelu	Less	Piasek	Torf
$F_z - \sigma_z$			
ARX 441	84.3	17.13	16.70
NLHW NLARX	80.04	81.77	11.63
	96.24	70.38	-
P1DZ/DIZ	97.53	69.73	55.42
$F_x - \tau_{xy}$			
ARX 441	65.24	22.17	51.27
NLHW NLARX	96.53	88.48	67.6
	-	-78.92	78.9
P1DZ/DIZ	87.85	44.27	94.53

5.4 Modelowanie dynamiki poprzecznej układu koło – podłoże odkształcalne

5.4.1 Model fizyczny

Grunty, gleby i inne naturalne podłoża trakcyjne są materiałami trójfazowymi, których rozdrobnione cząstki mogą tworzyć tzw. agregaty, krótkotrwałe struktury przestrzenne. W efekcie struktura gruntów, a zwłaszcza luźnych gleb jest porowata, zaś puste przestrzenie między cząstkami, czy agregatami wypełnia mieszanina dwóch faz, gazowej i ciekłej. Ekspozycja na oddziaływania atmosferyczne powoduje znaczną dynamikę zawartości wody w podłożu, co jest jednym z ważniejszych czynników determinujących własności mechaniczne materiałów glebowych. Naturalne podłoża odkształcalne posiadają w różnym stopniu każdą z trzech podstawowych własności mechanicznych materii: sprężystość, plastyczność oraz lepkość. Ostatnia z nich jest ściśle powiązana z obecnością fazy ciekłej. Pukos (1991) badał wpływ prędkości odkształcenia na zmiany mikrostruktury i własności mechaniczne gleb rolniczych. Autor ten wykazał niedostatek modeli reologicznych w zastosowaniach do opisu odkształceń gleb podczas szybkich deformacji i przedstawił własny model, w którym uwzględnił wpływ prędkości deformacji na sprężystość i lepkość gleb. Efekty te udowodnił eksperymentalnie i otrzymał model bazujący na teorii Eyringa. Model Pukosa zakłada, że gleba jest częściowo cieczą Newtonowską, której lepkość zależy od temperatury.

Zakładamy, że mechanizm powstawania siły bocznej F_y , działającej od podłoża na koło składa się z dwóch czynników: ścinania gruntu lub śniegu pod kołem podczas jego obrotu wokół osi sworznia zwrotnicy (czynnik dynamiczny), oraz reakcji podłoża przybocznym skręceniu koła (czynnik statyczny). Oznacza to, że po ustaniu obrotu koła wokół sworznia zwrotnicy (przy ustalonej wartości kąta znoszenia) siła F_y jest reakcją podłoża. Ścinanie podłoża występuje podczas ruchu skrętnego koła, w związku z tym, po ustaleniu kąta bocznego znoszenia nastąpi redukcja wartości siły bocznej, jako wynik relaksacji naprężeń. Podczas skrętu z wymuszeniem sinusoidalnym mamy do czynienia z ciągłym działaniem ścinania gruntu pod kołem, przy czym kierunek tensora naprężenia w podłożu zmienia się okresowo.

Model prezentowany w tej części pracy powstał na podstawie analizy wyników własnych, opisanych w rozdziale 4. Oddziaływania w układzie koło – gleba, w szczególności wszelkie efekty dynamiczne, opóźnienia względem impulsów sterujących można przyjąć jako wpływ lepkości dynamicznej gleby, którą determinuje zawarta w porach glebowych faza ciekła. Zmiany prędkości kątowej skrętu kół, omawiane w powyższych podrozdziałach wpływają na te efekty, gdyż lepkość dynamiczna jest funkcją prędkości odkształcenia.

5.4.2 Model matematyczny

Klasyczna teoria opisująca zagadnienia deformacji i płynięcia łatwo odkształcalnych materiałów nosi nazwę reologii (Kisiel, Lisiak (1966)). Spośród wielu modeli zaproponowanych do opisu tych zjawisk w glebach, model Poyntinga-Thomsona uwzględnia wszystkie efekty reologiczne, będąc jednocześnie stosunkowo prostym w opisie matematycznym. Poniższe równanie:

$$E_1 E_2 e(t) + (E_1 + E_2) \nu \frac{de}{dt} = E_1 F(t) + \nu \frac{dF}{dt} \quad (5.28)$$

w którym E_1 , E_2 to stałe sprężystości zaś ν jest lepkością, łączy naprężenie F , odkształcenie e , i ich pochodne.

Jak już wspomniano, Pukos (1991) wykazał, że stosowanie modeli reologicznych do opisu zjawisk w glebach, szczególnie w przypadku szybkich deformacji nie daje dobrych wyników, głównie ze względu na liniowość tych modeli. Także łączenie modeli oraz ich elementów daje zadowalających rezultatów. Zjawisko relaksacji naprężeń lepiej opisują struktury równoległe, natomiast przypadek, gdy $F = \text{constans}$ korzystniej jest modelować łącząc elementy szeregowo. Zmiany właściwości gleb podczas deformacji uniemożliwiają stosowanie liniowej teorii lepko-sprężystości.

Adaptacja statystycznej teorii Eyringa dla lepkości i sprężystości (Pukos (1991)) uwzględniła efekty czasowe oraz wpływ naprężenia:

$$\nu = \frac{A F(t)}{\sinh(B(t))} \quad (5.29)$$

$$E = \frac{C F(t)}{\arcsin h(D(F(t)))} \quad (5.30)$$

gdzie: A , B , C , D – stałe.

Jeśli założymy, że w przypadku gruntów lub gleb wilgotnych, wpływ efektów czasowych (dynamicznych) na lepkość jest znaczący, bądź, że w gruntach wilgotnych wartość lepkości jest bardziej podatna na prędkość deformacji i naprężenie niż w gruntach suchych, możemy uprościć rozważania i ustalić współczynniki sprężystości jako E_1 i E_2 , zaś do równania (5.28) wstawić zależność na lepkość, (5.29), co w efekcie daje następujące równanie różniczkowe:

$$E_1 E_2 e(t) + (E_1 + E_2) \frac{A F(t)}{\sinh(B F(t))} \frac{de}{dt} = E_1 F(t) + \frac{A F(t)}{\sinh(B(t))} \frac{dF}{dt} \quad (5.31)$$

Całkowanie przeprowadzono metodami numerycznymi, gdyż funkcja $\sinh$ (sinus hiperboliczny) jest nieelementarna. Funkcja $e(t)$, opisująca proces deformacji została opisana dwójako, jako przebieg trapezowy lub sinusoidalny. W pierwszym przypadku było to złożenie dwóch funkcji:

$$e_{T1}(t) = \dot{\delta} \cdot t$$

dla obszaru, gdzie kąt znoszenia rośnie (ramię trapezu) oraz

$$e_{T2}(t) = \delta \quad (5.32)$$

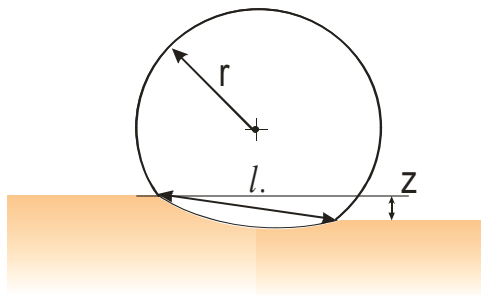
dla ustalonej wartości kąta znoszenia

W drugim przypadku proces deformacji opisano funkcją kąta skręcenia koła kierowanego:

$$e(t) = l \sin(\delta t) \quad (5.33)$$

gdzie: l jest długością cięciwy łuku strefy kontaktu opony z podłożem, zaś δ jest prędkością kątową obrotu koła kierowanego.

Dokładne wyznaczenie czynnika l było problematyczne. W wielu pracach stosowano model Bekkera lub inne, bardziej skomplikowane rozwiązania. Ponieważ zagadnienie wyznaczania powierzchni kontaktu opony z podłożem odkształcalnym nie jest celem tej pracy, wprowadzono rozwiązanie uproszczone. Zgodnie z poniższym rysunkiem oraz na podstawie wyznaczonych podczas badań deformacji pionowych badanych podłoży (głębokość koleiny), wartości l przyjęto jak w tabeli 5.6.



Rys. 5.23. Sposób wyznaczenia długości l

Tabela 5.6 Wartości czynnika l do równania (5.33)

GLEBA	Koleina, cm	L , cm
Piasek	18.5	61
Less	8	42.5

Ostateczna postać równania różniczkowego opisującego mechanizm powstawania siły F_y z uwzględnieniem efektów lepkościowych (tzw. *lepkość naprężeniowa Eyringa – Pukosa*) dla sterowania sinusoidalnego jest następująca:

$$E_1 E_2 l \sin(\delta t) + (E_1 + E_2) \frac{AF(t)}{\sinh(BF(t))} l \delta \cos(\delta t) = E_1 F(t) + \frac{AF(t)}{\sinh(B(t))} \frac{dF}{dt} \quad (5.34)$$

Natomiast wersja modelu dla sterowania z wymuszeniem trapezoidalnym składa się z dwóch części:

$$\frac{dF}{dt} + AE_1 \cdot \sinh(F(t)) - \frac{E_1 E_2 \delta \sinh(F(t))}{AF(t)} \cdot t = (E_1 + E_2) \cdot \frac{AF(t)}{\sinh(F(t))} \quad (5.35)$$

$$E_1 E_2 = E_1 F(t) + \frac{F(t)}{\sinh(AF(t))} \cdot \frac{dF(t)}{dt} \quad (5.36)$$

Równanie (5.35) dotyczy fragmentu, gdy koło jest skręcane (ramię trapezu), równanie (5.36) jest ważne dla obszaru ustalonej wartości kąta znoszenia δ . Jeżeli w równaniu (5.35) zmienimy znak przy trzecim członie z $(-)$ na $(+)$, wówczas otrzymamy równanie określające trzeci fragment impulsu sterującego, mianowicie skręcanie powrotne koła do pozycji neutralnej. Przy obliczaniu, jako warunek początkowy przyjęto wartość siły będącą rozwiązaniem równania dla końcowego punktu przedziału pierwszego.

Występujące w równaniu stałe E_1 i E_2 przyjęto za Wanji (1992) dla gleby piaszczystej, natomiast wartości współczynników A i B przyjęto jako jedności, ze względu na brak danych w tym zakresie. Dobór wartości stałych i współczynników występujących w równaniach zamieszczono w tabeli 5.7.

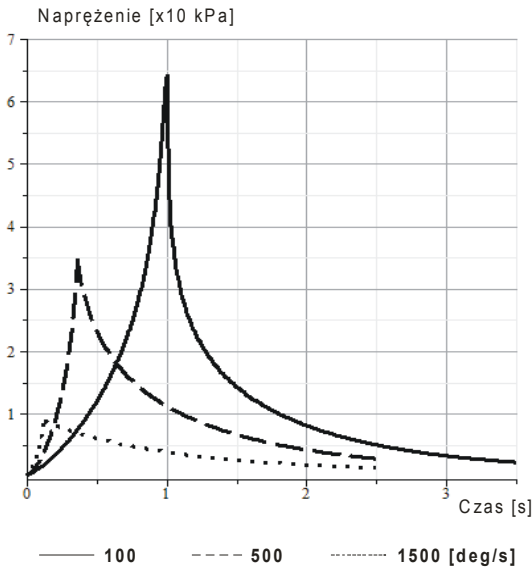
Tabela 5.7. Wartości stałych i współczynników do równań (5.34), (5.35) i (5.36)

GLEBA	$E_1, \text{MPa m}^{-1}$	$E_2, \text{MPa m}^{-1}$	A, B	$\dot{\delta}, \text{°/s}$ 100
Piasek	0.071	1.072	1	500
				1500

Jak już wcześniej wspomniano, całkowanie równań (5.34), (5.35) i (5.36) zostało przeprowadzone metodami numerycznymi. Jest to typowe zagadnienie początkowe, w którym uwzględniono warunek $F(0) = 0.001$. Jako narzędzia obliczeniowego użyto oprogramowania MAPLE™.

5.4.3 Przykładowe wyniki

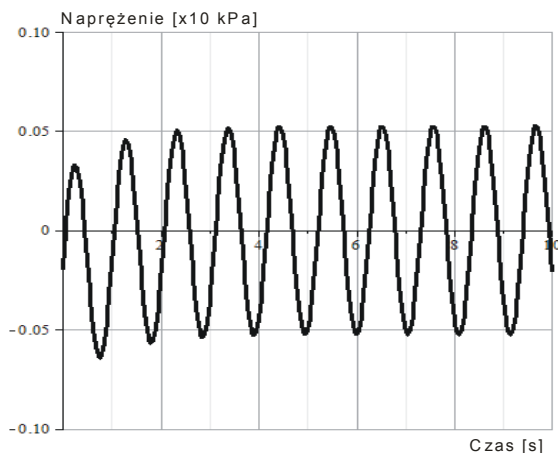
Na rysunkach 5.24 i 5.25 przedstawiono przebiegi naprężenia ścinającego pod kołem kierowanym dla trzech różnych wartości prędkości kątowej obrotu kierownicą w przypadku wymuszenia trapezowego oraz dla wybranej częstotliwości impulsu sinusoidalnego.



Rys. 5.24. Naprężenia ścinające w podłożu piaszczystym powodowane skrętem koła kierowanego. Sterowanie impulsem trapezoidalnym, z różnymi wartościami prędkości kątowej.

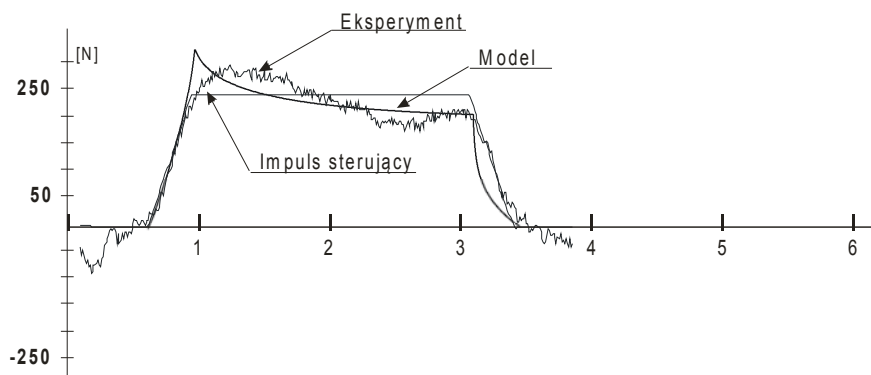
Wykresy naprężeń dla wymuszeń trapezowych (rys.5.24) zostały skonstruowane przez połączenie przebiegów dla funkcji obciążania i relaksacji. Charakterystyczny

pik wynikał z nieciągłości przyjętej teoretycznie funkcji obciążania. Przebiegi naprężeń wyznaczone dla obciążania posiadają charakter progresywny i są podobne do wyników uzyskanymi przez autora w badaniach dynamicznego obciążania monolitycznych próbek gleb (Pytko, Konstankiewicz, 2002). Fragment opisujący relaksację (pozioma krawędź trapezu na przebiegu funkcji obciążania) posiada charakter funkcji asymptotycznie malejącej, podobnie jak przebieg naprężenia, wyznaczony w monolitycznych próbkach gleby (Pytko, Konstankiewicz, 2002).



Rys. 5.25. Naprężenia ścinające w podłożu piaszczystym powodowane skrętem koła. Sterowanie sinusoidalne, częstotliwość impulsu wymuszającego 1 Hz.

Na rysunku 5.26 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych w obliczeniach z wykorzystaniem własnego modelu z wynikami pomiarów. Na wykresie zaznaczono również przebieg kąta skrętu koła (impuls sterujący).



Rys. 5.26. Porównanie przykładowych wyników obliczeń modelowych z wynikami eksperymentalnymi

Modelowy przebieg siły bocznej został uzyskany poprzez połączenie trzech wykresów dla poszczególnych etapów sterowania: narastanie kąta skrętu, utrzymanie na poziomie nasycenia oraz powrót do pozycji neutralnej. Przebieg opisano równaniem (5.35) od zera do punktu czasowego osiągnięcia maksymalnej wartości kąta skręcenia koła przez 0.72s, następnie równaniem (5.36), przez 2s, oraz równaniem (5.35), ale ze zmienionym znakiem przy trzecim członie, przez kolejne 0.72s. Taka konstrukcja opisu matematycznego dała w efekcie rozwiązanie z dwoma charakterystycznymi pikami, jak dla funkcji nieciągłej.

Porównując kształty przebiegów poszczególnych fragmentów otrzymanej krzywej modelowej z odpowiednimi odcinkami na krzywej doświadczalnej zauważa się podobieństwo. Pierwszy fragment reprezentują w obu przypadkach krzywe progresywne, choć na wykresie uzyskanym z pomiarów w końcowym fragmencie krzywa posiada punkt przegięcia i zmienia charakter na regresywną. Fragment wykresu dla stanu nasycenia kąta skręcenia koła został opisany krzywymi asymptotycznie malejącymi, co ma logiczne uzasadnienie, gdyż jest to przebieg typowy dla relaksacji naprężeń. Na wykresie uzyskanym na podstawie wyników pomiaru zauważono ekstremum lokalne (minimum). Graficzna reprezentacja ostatniego fragmentu jest krzywą regresywną, zarówno w przypadku modelu jak i wyników doświadczalnych.

Rozszerzenie modelu na inne podłoża, w tym badane podłoże lessowe wymaga oznaczenia stałych występujących w równaniach modelowych, w szczególności współczynników sprężystości. Doskonalenie modelu w ramach przyszłych badań może polegać na wprowadzeniu rzeczywistego przebiegu kąta skrętu kół, który różni się nieznacznie od teoretycznego (otoczenie punktów zwrotnych). Uzyskano by wówczas przebieg wynikowy bez punktów nieciągłości (pików).

5.5 Podsumowanie

Przedmiotem niniejszego rozdziału było modelowanie modelu układu element jezdny-podłoże odkształcalne z wykorzystaniem wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych, opisanych w poprzednich rozdziałach pracy. Składowe stanu naprężenia oraz siły trakcyjne wykorzystano do tworzenia modeli korelacyjnych, stanowiących zależności między naprężeniami w podłożu a siłami trakcyjnymi, pomierzonymi na pojeździe będącym w ruchu. Innym modelem był opis układu pojazd – podłoże odkształcalne na bazie wyznaczonych doświadczalnie składowych stanu naprężeń i sił trakcyjnych z wykorzystaniem metody identyfikacji systemów. Ze względu na ograniczone własności predykcyjne oraz stosunkowo niskie współczynniki regresji powyższych modeli, kolejnym krokiem było opracowanie modelu układu koło – podłoże odkształcalne na podstawie sił

działających na koło podczas ruchu oraz naprężeń w podłożu. Zastosowano metodę identyfikacji systemów, a uzyskane modele były znacząco lepsze w sensie dopasowania wyników obliczeń symulacyjnych do wyników pomiarów.

Opracowane modele układu element jezdny – podłoże odkształcalne należą do grupy tzw. modeli empirycznych lub semi-empirycznych. Ich charakterystyczną cechą jest opis przedmiotowego układu na podstawie analizy wielkości wejściowych i wyjściowych, reprezentatywnych dla wybranych zjawisk występujących w badanym układzie. Opis fizyczny został zredukowany do koniecznego minimum, wynikającego z zachowania podstawowych własności układu. Modele te charakteryzują się prostotą i niskimi wymaganiami w przypadku ich użycie do obliczeń symulacyjnych. Nie wymagają parametryzacji, jednak ich odtworzenie wymaga uzyskania miarodajnych i statystycznie reprezentatywnych wyników, co bywa trudne i kosztowne.

Inny charakter posiadał model opracowany dla siły bocznej działającej w układzie koło kierowane – podłoże odkształcalne, przedstawiony w podrozdziale 5.4. Opis matematyczny poprzedzono analizą zjawisk zachodzących w obszarze styku koła kierowanego z podłożem podczas skrętu. Model fizyczny, stanowiący podstawę do opracowania modelu matematycznego uwzględniał istotne zdaniem Autora i poparte wynikami prac innych badaczy zjawiska i własności badanego układu. Zastosowanie tego modelu w praktyce badawczej lub inżynierskiej wiąże się z koniecznością parametryzacji. W rozwiązaniu zaproponowanym w niniejszym rozdziale parametry modelu siły bocznej na kole kierowanym przyjęto z literatury. Rozszerzenie możliwości modelu o inne podłoża odkształcalne, w tym śnieżne, wymagać będzie opracowania metody wyznaczania współczynników sprężystości oraz parametrów układu na drodze pomiarów laboratoryjnych. Może to stanowić przedmiot przyszłych projektów i prac badawczych.

6. BADANIA WSPÓŁPRACY ELEMENTÓW JEZDNYCH Z PODŁOŻEM ŚNIEŻNYM

6.1 Ogólna charakterystyka podłoży śnieżnych

Śnieg jest materiałem trójfazowym, zawierającym lód, powietrze oraz wodę. Posiada budowę krystaliczną, a jego kryształy formują się w trakcie zamarzania wody. W celu dokładnego poznania i opisu własności danego śniegu, ważne jest by znać w jaki sposób i w jakiej temperaturze powstawał. Im wyższa temperatura otoczenia, tym wyższa gęstość śniegu. Wystawiony na działanie czynników atmosferycznych śnieg przechodzi przeobrażenia, określane jako metamorfizm. Czynnikiem sprawczym tych zjawisk jest gradient temperatury a wynikiem są zmiany w budowie krystalicznej. Możemy mówić o metamorfizmie konstruktywnym, którego wynikiem będzie rozrost kryształów. Metamorfizm destrukcyjny, zachodzący w wyniku ocieplenia, daje w wyniku zniszczenie kryształów.

Ważne właściwości śniegu, to m. in.:

- uziarnienie, które wynosi 0,2 – 5 mm dla świeżego śniegu naturalnego i 0,1 – 0,8mm dla śniegu naturalnego po obróbce mechanicznej lub dla śniegu sztucznego;
- gęstość, która może zmieniać się w granicach od 10-50 kg/m³ dla puchu, poprzez 100 kg/m³ dla typowego śniegu świeżego, 200-450 kg/m³ dla śniegu ubitego, zleżalego aż do 400-600 kg/m³ dla śniegu przygotowywanego mechanicznie (trasy zjazdowe);
- temperatura, która waha się w granicach od -45 do 0 °C i zależy od temperatury powietrza oraz gęstości śniegu;
- zawartość wody, która rośnie gwałtownie po osiągnięciu i przekroczeniu temperatury topnienia.

Mechaniczne własności śniegu są istotne dla oceny przejezdności oraz osiągnięć trakcyjnych pojazdów i maszyn wykorzystywanych w warunkach zimowych (Abele, 1990, Shapiro, 1997, Shoop, 2006, Wong, 1995). Zasadniczo chodzi tu o wytrzymałość mechaniczną, odkształcalność i podatność na zagęszczanie a także rozkłady naprężeń pod obciążeniem.

6.1.1 Wytrzymałość mechaniczna śniegu

Wytrzymałość mechaniczna śniegu zależy od rodzaju i liczby wiązań między poszczególnymi ziarnami. Istotne są także następujące procesy:

- spiekanie, które zachodzi przy zmianach stanu skupienia i jest naturalnym źródłem wytrzymałości, w temperaturze około 0 °C spiekanie zachodzi samoistnie;
- blokowanie, które zachodzi między kryształami o nieregularnych kształtach;

- zjawiska kapilarne, które mają miejsce w temperaturze powyżej 0°C i są napędzane siłami kapilarnymi pomiędzy kryształami i wodą zawartą między nimi;
- zamarzanie, gdy woda zawarta w śniegu zamarza ponownie a cząsteczki śniegu łączą się i wzrasta wytrzymałość.

Wytrzymałość mechaniczną można wyznaczać w testach enometrycznych oraz ścinania z użyciem próbek śniegu (Abele, 1975, Wong, 1992). Jednakże, badania na naturalnych śniegach są kłopotliwe, ze względu na trudności w odtworzeniu parametrów badanych próbek. Badania wykonuje się na próbkach sztucznego śniegu, które są poddawane testom ściskania przy stałej prędkości odkształcenia z jednoczesną rejestracją obciążenia i odkształcenia. Wytrzymałość na ścinanie może być wyznaczona w testach ścinania bezpośredniego na próbkach zagęszczonych. Moduł odkształcenia objętościowego dla śniegu, określający jego nośność, rośnie wraz z gęstością, podczas gdy wytrzymałość na ścinanie jest również funkcją wieku śniegu (Shapiro, 1997).

6.1.2 Mechaniczne własności śniegu

Śnieg jest materiałem plastyczno-lepko-sprężystym, którego reakcja na obciążenia mechaniczne jest zróżnicowana i zależy od prędkości odkształcenia: powolne obciążanie powoduje odkształcenia o charakterze plastycznym, a szybkie obciążenia mogą powodować odkształcenia sprężyste, szczególnie w śniegu o dużej gęstości (Shapiro, 1997, Shoop, 2006).

6.1.3 Twardość śniegu

Twardość śniegu można określić miarą siły oporu penetracji, wyznaczaną przy użyciu penetrometrów (Fauve, 2002). Różnice w twardości (świeży, ubity, sztuczny) są znaczne. Twardość wyznaczona penetrometrem z końcówką pomiarową o średnicy 5mm waha się w zakresie od 0.1 do 35 N (Satyawali, 2009).

Nadmienia się, że ogólne warunki fizyczne oraz własności mechaniczne śniegu zależą w sposób znaczny od czynników środowiskowych, takich jak promieniowanie słoneczne, wiatr, wilgotność powietrza oraz opady atmosferyczne (Fauve, 2002). Ponadto, własności śniegu zmieniają się w czasie, nierzadko zmiany te są bardzo dynamiczne. Podsumowując, śnieg jest materiałem o wysokiej niestabilności mechanicznej.

6.1.4 Przejezdność w warunkach zimowych

Przejezdność i osiągi trakcyjne pojazdów w warunkach zimowych zależą głównie od grubości pokrywy śnieżnej oraz od gęstości śniegu. Nośność podłoża śnieżnego jest silnie skorelowana z funkcją osiadania (Hetherington, 1987, Shoop, 2001, 2006, Wong, 1992). Świeży puch jest w stanie przenieść naciski rzędu 30 kPa, co

wystarcza dla pojazdów i maszyn wyposażonych w gąsienicowy układ jezdny. W przypadku pojazdów kołowych często występuje niedobór nośności i wówczas zachodzi potrzeba przygotowania podłoża poprzez mechaniczne ugniatanie, podgrzewanie, dodawanie środków chemicznych powodujących rozmarzanie a następnie krzepnięcie (Abele, 1990, Boonsinsuk, 1989). Świeży śnieg można w krótkim czasie przygotować tak, by jego nośność wyniosła ok. 200-250 kPa. Innym, ważnym zagadnieniem jest generowanie sił reakcji w układzie element jezdny – śnieg, w tym również reakcji bocznych, odpowiedzialnych za kierowalność i stabilność ruchu (Shoop, 2006, Wong, 1995). Zawartość fazy ciekłej, która pojawia się jako wynik miejscowych obciążeń od elementu jezdnego powoduje, że wartości tych sił są mniejsze niż na nawierzchniach utwardzonych.

W badaniach osiągow pojazdów oraz współpracy mechanizmów jezdnych z podłożami śnieżnymi stosuje się metody jak w przypadku gruntów i gleb. Istotną różnicą są warunki badań, niska temperatura oraz wilgotność, co wymaga specjalnego przygotowania aparatury (Shoop, 1994, Fauve, 2002).

Wyróżnia się dwa przypadki: (1) śnieg tzw. „fundamentowany”, czyli warstwa śniegu do ok. 40-50 cm na twardym podłożu oraz śnieg głęboki. Rozróżnienie to ma duże znaczenie w przypadku badań naporów, gdyż efekt podłoża w przypadku śniegu fundamentowanego jest znaczący (Shoop, 2001).

Optymalne przygotowanie tras narciarskich, zjazdowych i biegowych wymaga użycia metod oraz odpowiednich środków technicznych (Fauve, 2002). Jedną z metod jest mechaniczna obróbka śniegu, polegająca głównie na jego zagęszczaniu oraz mieszaniu. Do tego typu zabiegów stosuje się pojazdy – maszyny robocze, zwane potocznie ratrakami. Typowy ratrak (rys. 2.28) posiada gąsienicowy układ jezdny z 5-7 kołami nośnymi. Taśma gąsienicy wykonana jest z pasm zbrojonej gumy, dodatkowo usztywniona jest poprzecznymi listwami aluminiowymi, które służą także jako ostrogi przeciwpoślizgowe. Obciążenie pionowe siłą ciężkości rozkłada się na znaczną powierzchnię kontaktu taśma – podłoże, dzięki czemu obliczeniowe naciski jednostkowe wynoszą w granicach 3 – 10 kPa. Umożliwia to jazdę po świeżym, puszystym śniegu (Fauve, 2002).

6.1.5 Cel i zakres badań

Głównym celem badań było zebranie danych doświadczalnych do wykorzystania w modelowaniu układu element jezdny - podłoże śnieżne. Badania z użyciem ratraka prowadzono w ramach współpracy z instytucją zewnętrzną (Polskie Koleje Linowe) i celem ich było zebrane danych odnośnie rzeczywistych wartości naporów w śniegu, powodowanych obciążeniem taśmy gąsienicy ratraka. Badania na śniegu fundamentowanym przeprowadzono z użyciem kołowych pojazdów terenowych, nie posiadających żadnych specjalnych środków technicznych ułatwiających poruszanie się w śniegu. Celem tych badań było uzyskanie rzeczywistych wartości

naprężeń oraz sił trakcyjnych w przypadku wybranych podłoży śnieżnych dla analiz porównawczych oraz efektów poznawczych. W literaturze przedmiotu nie znaleziono prac badawczych publikujących wyniki naprężeń w śniegu, powodowanych obciążeniem pojazdów i maszyn. Zaplanowano następujące zadania badawcze:

- pomiary naporów w śniegu głębokim powodowanych obciążeniem taśmy gąsienicy ratraka;
- wyznaczanie stanu naprężeń oraz sił trakcyjnych w śniegu fundamentowanym pod obciążeniem pojazdu terenowego
- badania sił bocznych oraz stabilności ruchu pojazdu terenowego w śniegu mokrym.

6.2 Badania naporów w głębokim śniegu powodowanych obciążeniem gąsienicy ratraka

Badania naporów w głębokim śniegu przeprowadzono we współpracy i przy współudziale Polskich Kolei Linowych, KL Kasprowy w Zakopanem. Zasadniczym celem było określenie rzeczywistych wartości naporów w śniegu na różnych głębokościach.

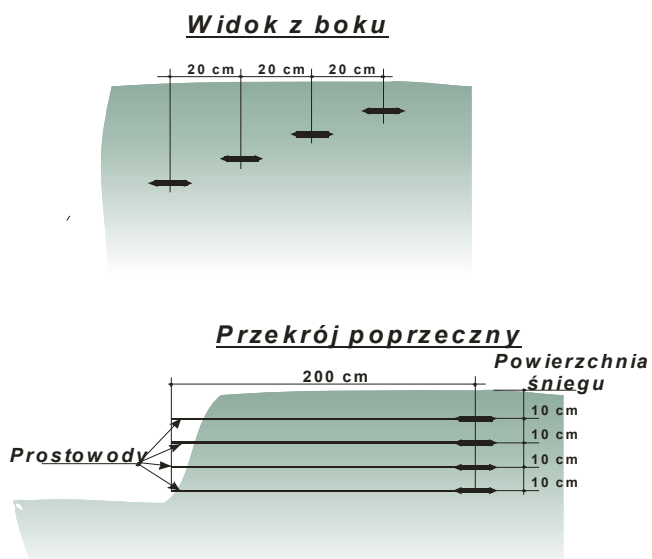
Z doświadczeń autora na podstawie badań z użyciem pojazdów gąsienicowych (bojowe wozy opancerzone), wynika jednoznacznie, iż rzeczywiste wartości nacisków jednostkowych różnią się znacznie od wartości obliczeniowych. Niejednokrotnie ta różnica sięga rzędu wielkości. Ponadto, na podstawie badań wiadomo, że występuje intensywna koncentracja naprężeń w podłożu pod kołami nośnymi pojazdu oraz ich relaksacja w podłożu między kołami.

Większość tras narciarskich w rejonie Kasprowego Wierchu prowadzona jest po terenie pokrytym szatą roślinną, a typowe grubości pokrywy śnieżnej wynoszą 100-250 cm. Zachodzi zatem podejrzenie, iż oddziaływanie pojazdu gąsienicowego może powodować znaczne obciążenie podłoża naturalnego, które w przypadku tras narciarskich stanowią pokryte śniegiem nasadzenia (kosówka, młode świerki, podszyt, itd.).

6.2.1 Badania

6.2.1.1 Instalacja czujników w śniegu

W przypadku śniegu głębokiego do badań użyto czujników jednoosiowych. Przy użyciu kevlarowych prostowodów o długości 2m, czujniki wbijano prostopadłe w płaszczyznę profilu śniegowego zachowując równoległość do podłoża. Szczegóły pokazano na rysunkach 6.1 i 6.2. W ten sposób umieszczano czujniki na głębokości do 50 cm, zachowując przy tym znaczną odległość punktu pomiaru od krawędzi profilu (1.5 – 2.0m).



Rys. 6.1. Schemat umieszczania czujników naporu w śniegu głębokim



Rys. 6.2. Instalacja czujników w śniegu głębokim

6.2.1.2 Opis miejsca i przebiegu badań

Badania zrealizowano w Dolinie Świńskiej, rejon Kasprowego Wierchu. Miejsce to jest intensywnie wykorzystywane przez uprawiających narciarstwo zjazdowe. Rozgrywane są tu m. in. zawody narciarskie, z mistrzostwami Polski włącznie. W badaniach wykorzystano ratrak produkcji firmy Bombardier. Dane techniczne maszyny zawarto w tabeli 2.2.

Wybrano teren płaski o rozmiarach ok. 10x25m. orientacyjna głębokość warstwy śniegu wynosiła ok. 2m. Świeżo spadły śnieg miał głębokość 8-10cm. Przed pomiarami dokonano badania gęstości śniegu metodą *TDR* (ang. *Time Domain Reflectometry*, Stacheder, 2005). Wyniki tych pomiarów zawarto w tabeli 6.1.

Badania prowadzono w dwóch różnych miejscach, instalując za każdym razem czujniki z zastosowaniem powyżej opisanej procedury. Wykonano odpowiednio 3 i 5 przejazdów wahadłowych dla obu ustawień (miejsc badawczych).

Na rysunku 6.3 przedstawiono fragmenty przejazdów ratraka nad czujnikami.

Tabela 6.1. Wyniki pomiarów TDR oraz rozkład gęstości śniegu w miejscu badań

Głębokość	0 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 30 cm	30 – 40 cm
TDR, ϵ	1.07	1.17	1.25	1.46
Gęstość śniegu [kg/m ³]	129	311	447	778



Rys. 6.3. Przejazd ratraka ponad czujnikami

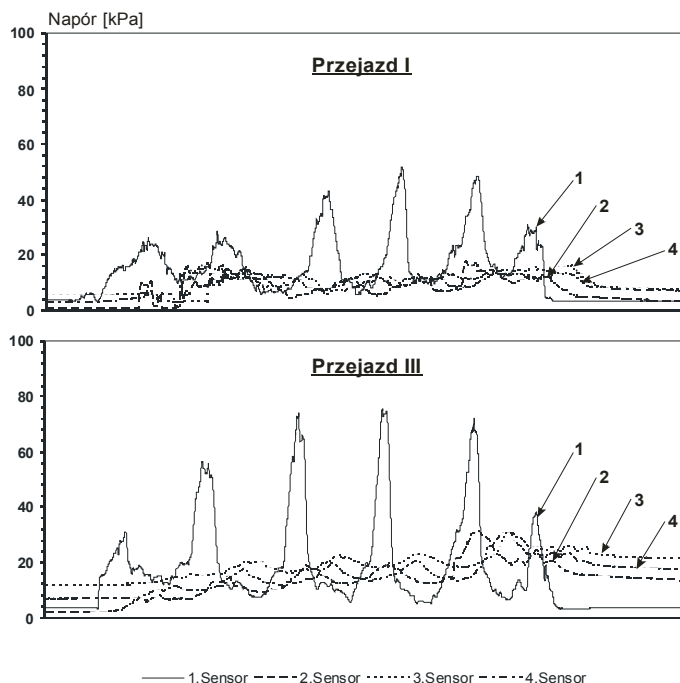
6.2.2 Wyniki i ich analiza

Wyniki pomiarów w postaci danych binarnych zapisanych na taśmie rejestratora wymagały opracowania i analizy. Procedura redukcji danych była następująca:

1. Z przebiegów zarejestrowanych podczas prób wyodrębniono fragmenty, gdzie wystąpiły niezerowe odpowiedzi czujników. Taki przykładowy przebieg dla pierwszego przejazdu na pierwszym ustawieniu pokazano na rysunku 6.4
2. Analizie poddano wyodrębnione przebiegi: odczytywano wartości maksymalne w pikach dla czterech czujników pod poszczególnymi kołami jezdnyymi (I, II, III, IV, V, VI)..
3. Następnie obliczono wartości średnie z pików dla poszczególnych przebiegów (dla czterech czujników z osobna) – wyniki pokazano na rysunku 6.5.

4. Kolejnym krokiem było wyznaczenie tzw. „wartości skutecznej” naporów. Jest to wartość średnia obliczona ze wszystkich dla danego przejazdu. Wyniki te pokazano na rysunku 6.6.

Ostatecznie obliczono wartości bezwymiarowego współczynnika będącego stosunkiem maksymalnej wartości naporu dla danego przejazdu do wartości skutecznej dla tego przejazdu (dla każdego z czterech czujników z osobna). Wyniki zobrazowano na rysunku 6.7.

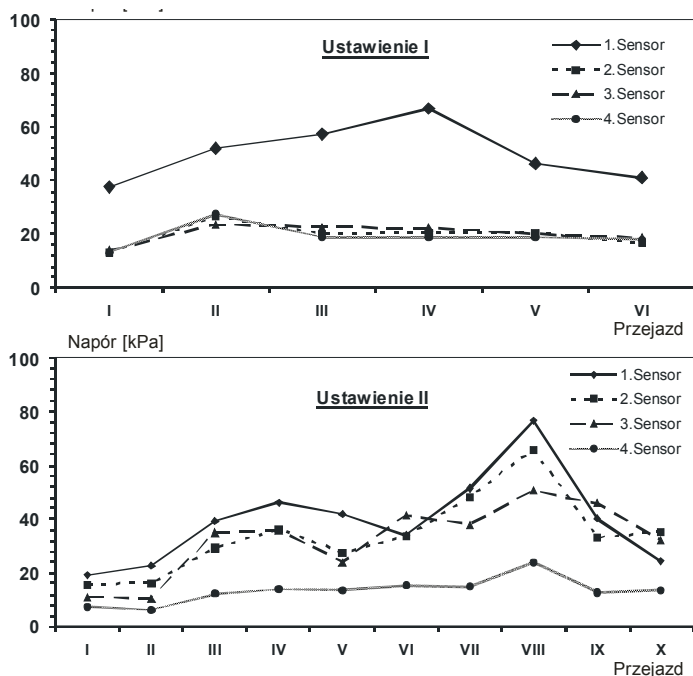


Rys. 6.4. Przykładowe przebiegi naporów pionowych w głębokim śniegu zmierzone przez cztery czujniki umieszczone na głębokościach 10, 20, 30 i 40 cm podczas przejazdu ratraka.

Badane przebiegi naporów charakteryzują się obecnością tzw. pików. Wartości maksymalne naporu w pikach są różne dla czterech czujników, zatem zależą od głębokości pomiaru, a wynikowa zależność jest logiczna – im głębiej, tym mniejsze są wartości naporów. Ponadto, na wartości naporów w pikach wpływa liczba przejazdów ratraka przez miejsce pomiaru.

Analizując wartości maksymalne w tabeli 6.2 i 6.3 zauważamy, że występuje wyraźna tendencja rosnąca dla kolejnych przejazdów. O ile w przypadku pierwszego przejazdu wartości te zawierają się w granicach 10 – 25kPa (1-sze miejsce pomiarowe) i 11-15kPa (2-gie miejsce), to wzrost dla kolejnych przejazdów jest

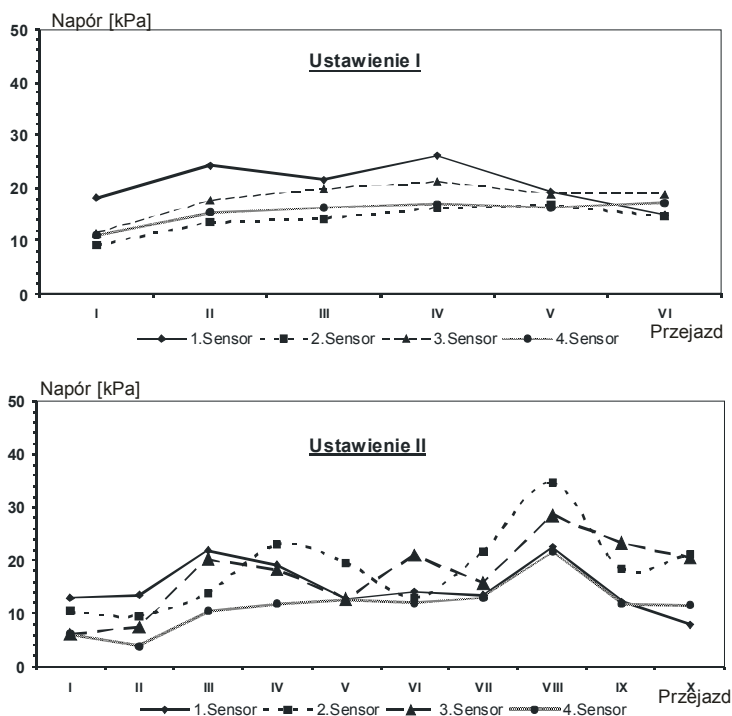
znaczny na tyle, że napory osiągają wartości rzędu 80-90 kPa. Powodem tej sytuacji jest umocnienie śniegu pod działaniem nacisku taśmy gąsienicy i jest to efekt zamierzony w przypadku użycia ratraka do przygotowania tras narciarskich. Jak podaje specjalistyczny podręcznik szwajcarski (Fauve, 2002), optymalne przygotowanie trasy zjazdowej polega głównie na wzmocnieniu wytrzymałości nawierzchni. W ubitym śniegu nacisk taśmy generuje większe napory, co świadczy o wzroście mechanicznej wytrzymałości podłoża. Należy również zwrócić uwagę na pewną tendencję polegającą na tym, że wzrost wartości naporów po kolejnych przejazdach ratraka jest różny dla czterech czujników. I tak, dla 1-go czujnika jest on najbardziej intensywny, zaś dla pozostałych, szczególnie dla 4-tego jest stosunkowo najniższy. Można to wytłumaczyć tym, że umocnieniu ulega jedynie wierzchnia warstwa śniegu, mniej więcej do głębokości 10-20cm, zaś podłoże (30cm i głębiej) pozostaje nie ugniecione. Spodziewany rozkład naporów dla pojazdu gąsienicowego jest linią zbliżoną do prostej, równoległą do osi OX a spodziewane naciski jednostkowe osiągają wartości zbliżone stosunku masy pojazdu odniesionej do powierzchni kontaktu (powierzchni taśmy gąsienicy). Dla ratraka Bombardier SnowGroomer wartości spodziewane oscylują w zakresie 5-7kPa. Skąd zatem wartości w pikach rzędu nawet 80-90kPa? Koncentracja naporów pod kołami jezdnymi objawia się



Rys. 6.5. Średnie z maksymalnych wartości naporów pod kołami jezdnyymi dla kolejnych przejazdów zmierzone w dwóch ustawieniach.

zwielokrotnieniem wartości w stosunku do przewidywanych lub podawanych przez producenta. Autor potwierdza również istnienie tego zjawiska w przypadku gąsienicowych wozów bojowych na gruntach piaszczystych na podstawie własnych badań doświadczalnych (Pytko Dąbrowski, 2001). Należy jednak zauważyć, że maksymalne wartości w pikach występują w krótkich przedziałach czasowych, zaś pomiędzy pikami następuje tzw. relaksacja naprężeń, inaczej odprężanie. Zatem rzeczywiste oddziaływanie maszyny na podłoże nie może być wyrażane wartościami maksymalnymi.

Kolejnym krokiem było wyznaczenie tzw. wartości skutecznej naporów, dla której wykres byłby istotnie linią prostą, równoległą do osi OX i oddaloną o wartość skuteczną, a zarazem taki przebieg byłby równoważny z przebiegiem z pikami. Inaczej mówiąc, wartości skuteczne proponowane przez autora to takie wartości naporów, które są generowane pod obciążeniem pojazdu, oddziałującego na podłoże zgodnie z teoretycznym, płaskim rozkładem nacisków. Wyznaczone wartości skuteczne naporów mieszczą się w zakresie od 10 do 35 kPa, i są wyższe od wartości teoretycznie przewidywanych. Analiza wartości naporów skutecznych na rysunku 6.6 wykazuje, iż ich przebiegi są funkcjami słabo monotonicznymi dla argumentów kolejnych przejazdów w przypadku miejsca 1-go oraz funkcjami z lokalnym maksimum dla miejsca 2-go. Maksimum występuje w VIII przejeździe maszyny, po czym wartości naporów maleją.

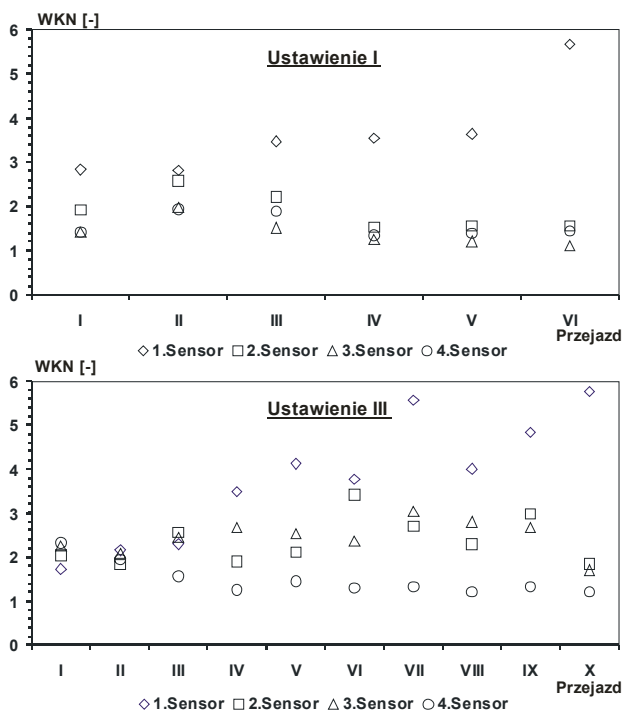


Rys. 6.6. Wartości skuteczne naporów w śniegu pod taśmą gąsienicy.

Intensywność zjawiska koncentracji naprężeń wyrażają wartości współczynników na rysunku 6.7. Określają one, ile razy maksymalne wartości z pików są większe od wartości skutecznych. Współczynniki osiągają wartości między 1.21 a 5.76, i są różne w zależności od czujnika (głębokość pomiaru): zasadniczo największe wartości odnotowano dla czujnika 1-go (umieszczonego na głębokości 10 cm). Współczynnik koncentracji naporów zmienia się również dla kolejnych przejazdów: rośnie wraz z kolejnymi przejazdami dla 1 czujnika, oraz maleje dla czujnika 4-tego. W przypadku czujników 2 i 3-go tendencja nie jest jednoznaczna, szczególnie jeśli porównamy wyniki z ustawienia 1-go i 2-go.

6.2.3 Dyskusja wyników

Analityczne wyniki rozkładów naporów pod obciążeniem taśmy gąsienicy uzyskał Muro, 1993. Jednak wartości maksymalne zawarte w tej pracy różnią się od otrzymanych przez autora dość znacznie (Muro: 7-10kPa, Pytka: 20-40kPa dla I-go przejazdu). Może to wynikać z nieuwzględniania efektu koncentracji naprężeń pod kołami jezdny przez autora cytowanej pracy. W literaturze przedmiotu nie znaleziono prac zawierających wyniki badań doświadczalnych naporów czy naprężeń w śniegu pod obciążeniem maszyn i pojazdów.



Rys. 6.7. Współczynniki koncentracji naporów dla kolejnych przejazdów.

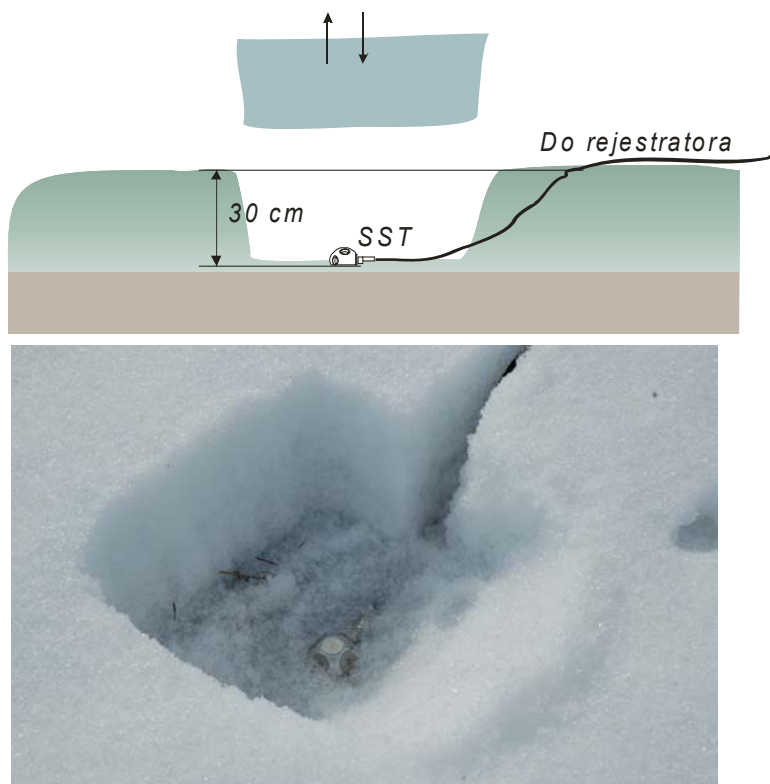
Pomiary naporów w śniegu prowadził Richmond, lecz wyników nie publikowano (Shoop, (2002-2009), korespondencja e-mail). Chcąc porównać lub zweryfikować wyniki prezentowane w tym rozdziale, sięgnęliśmy do prac autora, w których pokazano wyniki doświadczeń uzyskane z użyciem pojazdów gąsienicowych (wyniki te zawarto w rozdziale 3). Wartości naprężeń powodowanych obciążeniem czołgu, wyznaczonych w podłożu piaszczystym na głębokości 15 cm i nacisk uśredniony, wyznaczony z całej powierzchni kontaktu różniły się jeden rząd wielkości (nacisk średni 90kPa, naprężenie maksymalne w pikie 690kPa). Odkształcenia podłoża jako skutek przejazdu gąsienicy kształtują się podobnie. Występują bowiem piki pod kołami jezdnyymi a pomiędzy nimi podłoże odpręża się (rys.3.2c, 3.12). Zatem wyniki otrzymane dla śniegu, który jest materiałem podobnym do piasku suchego są prawidłowe. Można zatem wysnuć ogólny wniosek na podstawie otrzymanych wyników, że modele rozkładów naporów czy naprężeń oraz odkształceń pod obciążeniem taśmy gąsienicy w śniegu powinny uwzględniać efekty koncentracji naprężeń lub naporów pod kołami jezdnyymi. Współczynnik koncentracji naporów zaproponowany w tym rozdziale (wartości pokazane na rys. 6.7) może stanowić przykład praktycznego rozwiązania do wykorzystania w dalszych pracach badawczych z tego zakresu.

6.3 Wyznaczanie stanu naprężeń w śniegu zmrożonym powodowanych obciążeniem samochodu ciężarowego

6.3.1 Metody i warunki badań

Miejscem badań był poligon WITPiS Sulejówek. Na zmrożonym gruncie zalegała ok. 30-35 cm warstwa zleżalego, zmrożonego śniegu. Temperatura powietrza wynosiła ok. 0°C, natomiast temperatura śniegu -0.3°C. Program badań zakładał jednocześnie pomiary naporów w śniegu oraz sił trakcyjnych na pojeździe (siła uciągu w funkcji poślizgu, siła oporów toczenia).

Pomiary naporów przeprowadzono z użyciem głowicy *SST*, specjalnie przystosowanej do warunków zimowych (patrz rozdział 2). Instalacja głowicy *SST* polegała na wycięciu prostopadłościanu o wysokości równej zakładanej głębokości pomiaru, następnie umieszczeniu głowicy i ułożeniu przewodów, po czym całość zamykano wyciętym uprzednio prostopadłościanem. Pokazano to na rysunku 6.8. Taka metoda możliwa była do realizacji jedynie w śniegu zleżałym i zmrożonym.



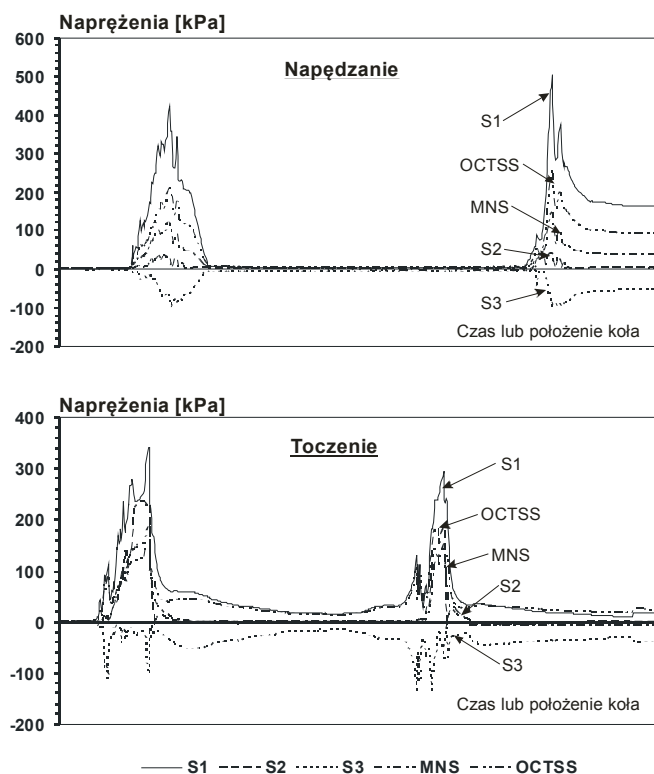
Rys. 6.8. Metoda umieszczania głowic SST w śniegu fundamentowanym



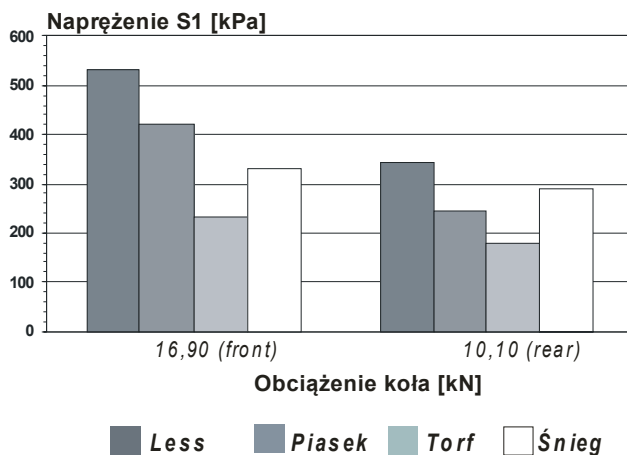
Rys. 6.9. Obiekt badań: samochód STAR 944, pod którego obciążeniem wyznaczano stan naprężeń w śniegu

6.3.2 Wyniki

Na rysunku 6.10 pokazano przykładowe przebiegi naprężeń w śniegu wyznaczonych na podstawie naporów zmierzonych głowicą SST. Zamieszczono wykresy dla dwóch trybów pracy kół jezdnych: napędzanie oraz toczenie swobodne. Uzyskano typowe przebiegi z pikiem, przy czym w przypadku napędzania aparatura zarejestrowała znaczne naprężenia resztkowe, będące najprawdopodobniej skutkiem przyhamowania pojazdu tuż za głowicą. W przypadku toczenia odnotowano większe wartości naprężeń niż w przypadku napędzania i ta tendencja jest utrzymać się dla wszystkich składowych stanu naprężenia. Interesujące było porównanie wartości naprężenia głównego *S1* dla śniegu oraz dla 3 innych podłoży odkształcalnych (lesowe, piaszczyste i torfowe) dla trybu pracy koła toczenie swobodne. Naprężenia w śniegu zmrożonym osiągały wartości podobne jak w podłożu piaszczystym (patrz rysunek 6.11). Należy uwzględnić fakt, iż były to naprężenia w śniegu fundamentowanym a odnotowany wzrost wartości wyznaczonych naprężeń mógł być efektem oddziaływania zmrożonego podłoża.



Rys. 6.10. Wybrane przebiegi naprężeń w śniegu powodowanych obciążeniem kół samochodu STAR 944



Rys. 6.11. Porównanie wartości średnich napężenia $S1$ w śniegu i w trzech innych podłożach dla swobodnego toczenia

6.4 Wyznaczanie siły bocznej na kołach kierowanych samochodu osobowo-terenowego na śniegu mokrym

Podobnie jak w przypadku podłoży gruntowych, siła boczna działająca na koło od podłoża śnieżnego ma zasadniczy wpływ na kierowność i stabilność ruchu pojazdu samochodowego. Czynnikiem, który wpływa na mechanizm powstawania siły bocznej na śniegu jest odkształcalność tego podłoża. Podobnie jak w przypadku podłoży gruntowych, powstaje koleina, w której porusza się koło kierowane, a siła boczna jest w znacznym stopniu wytwarzana jako reakcja ściany koleiny. Efekt adhezyjny, czy tarcie opona – podłoże, które są źródłem siły bocznej na nawierzchniach twardych, w przypadku gruntów jest niewielki, zaś w przypadku śniegu, szczególnie mokrego, jest pomijalnie mały. Sprawia to, że w przypadku cienkiej warstwy śniegu, wartość siły bocznej jest bardzo mała (problemy z utrzymaniem kierunku jazdy), zaś w śniegu głębokim, dodatkowe opory skrętu są niejednokrotnie tak duże, że powodują utratę kierowności i mobilności pojazdu.

W niniejszym podrozdziale opisano badania doświadczalne przeprowadzone na głębokim śniegu mokrym. Celem badań było wyznaczenie siły bocznej, działającej od podłoża na koła kierowane.

6.4.1 Metodyka badań

Siłę boczną na kołach kierowanych samochodu wyznaczano przy użyciu dynamometrów opisanych w rozdziale 2. Ze względu na warunki badań (mokry śnieg,

niska temperatura) dynamometry zostały przygotowane poprzez dodanie silikonowego uszczelnienia między korpusem a osłonami bocznymi czujników oraz uszczelnienie złącz przewodów sygnałowych. Dodatkowo uszczelniono również obudowę elektronicznego układu przesyłającego dane pomiarowe.

Metody pomiarowe, w tym sposób realizacji skrętów kół oraz wartości nastaw prędkości kątowych i częstotliwości zachowano jak w przypadku badań na podłożach gruntowych (rozdział 4). Również procedury badawcze i liczba powtórzeń prób były jak w przytoczonym zadaniu. Na fotografii (rys. 6.12) pokazano pojazd badawczy podczas przejazdu testowego na śniegu.



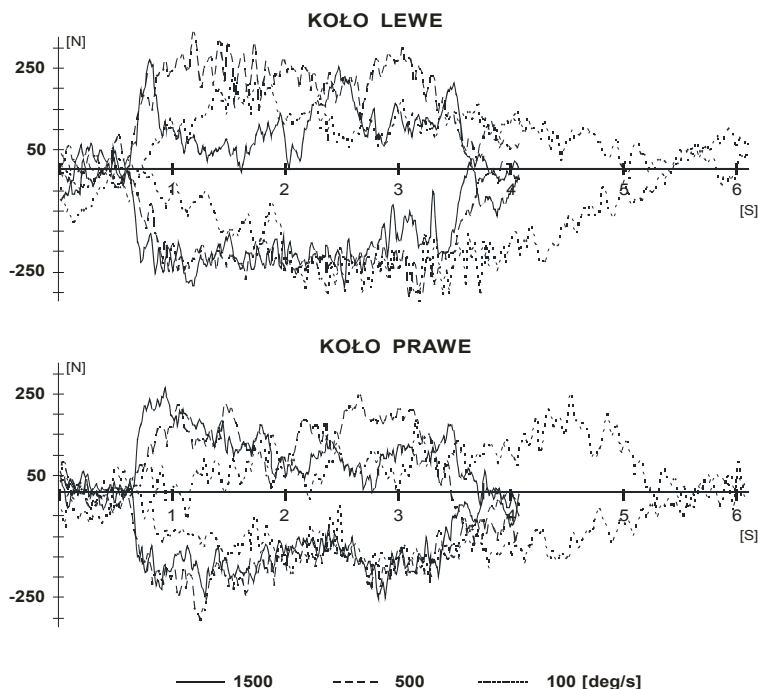
Rys. 6.12. Pojazd badawczy podczas jazdy testowej na podłożu śnieżnym oraz koło dynamometryczne do pomiaru siły bocznej

Badania przeprowadzono w lesie otaczającym poligon WITPiS Sulejówek, wzdłuż ok. 1km drogi leśnej. Umożliwiło to wykonanie wszystkich planowanych powtórzeń bez konieczności wielokrotnego przejazdu po tym samym śladzie.

Głębokość pokrywy śnieżnej wynosiła ok. 40-60 cm, co zalicza się do kategorii śniegu głębokiego. Temperatura śniegu wynosiła 0°C, natomiast temperatura powietrza +2 °C. Ze względu na brak mobilności pojazdu użytego jako badawczy w zastalych warunkach, podłoże do badań przygotowano poprzez plużenie.

6.4.2 Wyniki

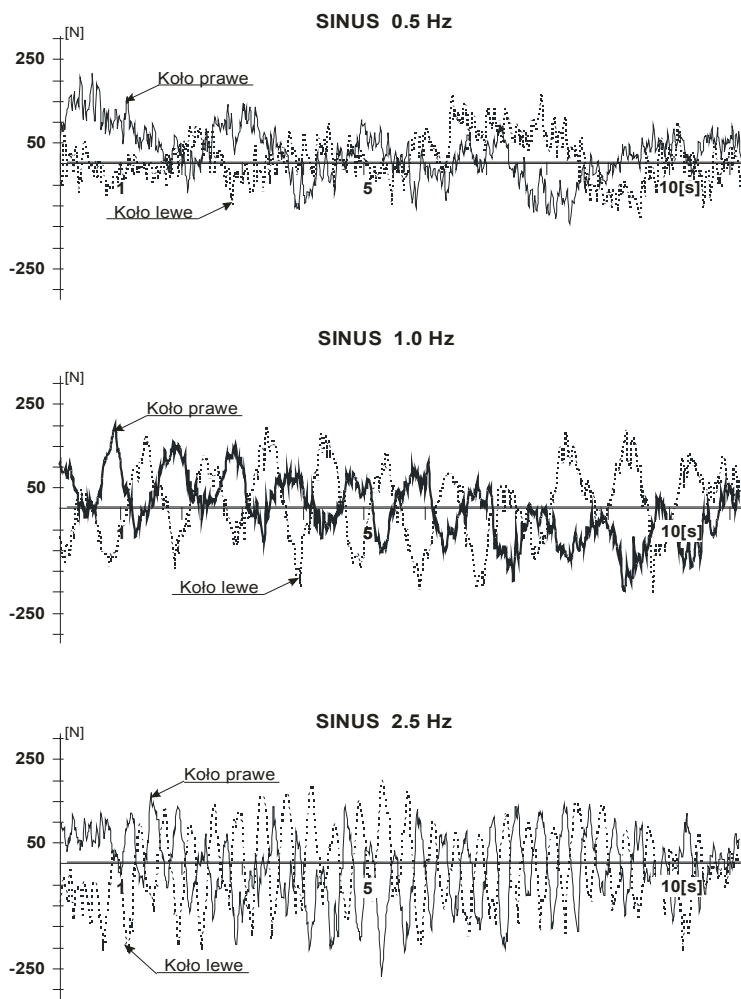
Uzyskane wyniki analizowano podobnie jak w przypadku badań na gruntach. Na rysunku 6.13 zamieszczono przebiegi czasowe siły bocznej na kole prawym i lewym dla różnych prędkości kątowych obrotu koła kierownicy.



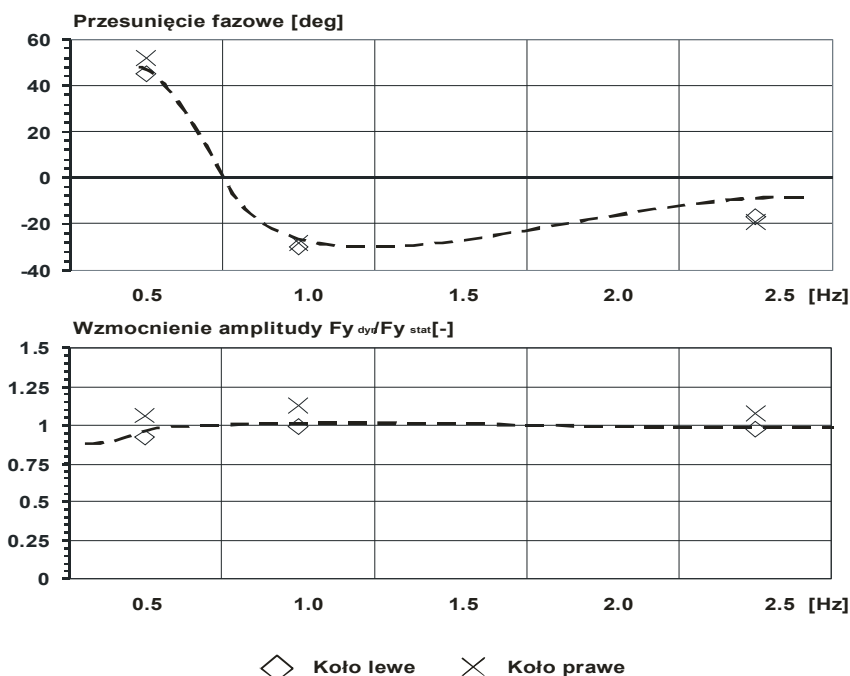
Rys. 6.13. Przebiegi siły bocznej F_y na śniegu mokrym dla różnych wartości prędkości kątowej obrotu kierownicy. Sterowanie impulsem trapezowym.

Siła boczna F_y na śniegu mokrym osiągała wartości porównywalne do wartości zmierzonych na podłożu piaszczystym. Zaobserwowano podobną odkształcalność obu podłoży (ok. 200mm pod obciążeniem koła przedniego pojazdu badawczego). Zastanawiające było, że w przypadku podłoża lessowego, na którym wyznaczona siła osiągnęła niemal dwukrotnie wyższą wartość, odkształcalność była znacznie niższa (ok. 70-80mm). Intuicyjny model generowania siły bocznej, w którym zakłada się, że powstaje one jako reakcja śniegu na napór ustawionego pod kątem koła skrętnego, nie sprawdził się w przypadku śniegu mokrego. Stwierdzono, że główne źródło siły

bocznej stanowi ścinanie podłoża pod kołem, szczególnie w początkowej fazie skrętu koła (widać to wyraźnie na rysunku 6.13), po czym wartości ustalają się na pewnym poziomie, niższym niż wartość szczytowa. W ramach niniejszej rozprawy nie podejmowano modelowania układu koło – podłoże śnieżne, głównie ze względu na stosunkowo mały zasób wyników doświadczalnych, jednak tego typu badania będą przedmiotem prac planowanych do realizacji w przyszłości. Metody stosowane i opisane do tej pory wydają się prawidłowe również w odniesieniu do podłoża śnieżnych, choć fizyczny model opisany w rozdziale 5 będzie wymagał modyfikacji z uwzględnieniem właściwości śniegu i ich wpływu na mechanikę układu element jezdny – podłoże.



Rys. 6.14. Przebiegi siły bocznej F_y na śniegu mokrym dla różnych częstotliwości ruchu obrotowego kołem kierownicy. Sterowanie impulsem sinusoidalnym.



Rys. 6.15. Charakterystyki częstotliwościowo-fazowe Bodego siły F_y na śniegu mokrym

6.5 Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały, że opracowane metody pomiarowe mogą być użyte do wyznaczania naporów, stanu naprężeń i sił trakcyjnych w warunkach zimowych, na podłożach śnieżnych.

Wyznaczone wartości maksymalne naporów w śniegu powodowanych obciążeniem taśmy gąsienicy ratraka wyniosły ok. 10-25kPa (w zależności od głębokości pomiaru) i zasadniczo rosły dla kolejnych przejazdów maszyny. Wartości maksymalne zmieniały się wraz z głębokością pomiaru: im głębiej tym były mniejsze. Absolutna maksymalna wartość naporu zmierzona w trakcie prób wynosiła 90.2kPa. Dla porównania nacisk buta turysty wynosi ok. 40-120kPa, koła samochodu osobowego 150-250kPa, samochodu ciężarowego 250-500kPa, czołgu pola walki nawet do 700kPa.

Wprowadzono pojęcie tzw. wartości skutecznej naporu w śniegu. Sens fizyczny tej wielkości pozwolił na lepszy opis oddziaływania maszyny na podłoże niż na podstawie wartości maksymalnych. Wartości skuteczne (średnie z całego przebiegu) były znacznie niższe niż wartości maksymalne i mieściły się w zakresie od

6 do 18kPa dla pierwszego przejazdu, z tendencją wzrostową dla kolejnych przejazdów. Maksymalna wartość skuteczna wynosiła ok. 35kPa. Koncentracja naporów w śniegu pod kołami jezdnyimi zależała od głębokości pomiaru a także od kolejnych przejazdów ratraka. Stopień koncentracji naporów (stosunek wartości maksymalnej do wartości skutecznej) zmieniał się w granicach od 1.2 do prawie 6.

Stan naprężeń powodowanych obciążeniem samochodu ciężarowego w zmrożonym śniegu fundamentowanym wyznaczono dla dwóch różnych trybów pracy koła, toczenia swobodnego i napędzania. Stwierdzono, że naprężenia w badanym podłożu śnieżnym osiągały wartości jak w przypadku podłoża piaszczystego. Podobnie, siła boczna wyznaczona na śniegu mokrym osiągała wartości zbliżone do wyznaczonych na podłożu piaszczystym.

Uzyskane wyniki posiadają przede wszystkim wartość poznawczą, gdyż w literaturze przedmiotu podobnych danych dotychczas nie publikowano. Wyniki mogą stanowić bazę dla przyszłych projektów i badań.

7. PODSUMOWANIE. DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI KOŃCOWE

Eksplotacja pojazdów i maszyn w warunkach terenowych zależy w znacznym stopniu od osiągnięć układu element jezdny – podłoże odkształcalne. Na własności jezdne w warunkach terenowych wpływa przede wszystkim odkształcalność gruntów, gleb czy śniegu i powoduje obniżenie wartości uzyskiwanej siły napędowej i bocznej a także wzrost oporów ruchu. Ze względu na znaczną liczbę czynników wpływających na zjawiska występujące w obszarze kontaktu elementu jezdnego z podłożem, opis przedmiotowego układu jest zadaniem trudnym i nadal aktualnym a przeprowadzona analiza literaturowa wykazała pewne braki, szczególnie w zakresie specjalistycznych metod badawczych i wyników doświadczalnych.

W pracy przedstawiono własny opis układu element jezdny – podłoże odkształcalne bazujący na analizie naprężeń i odkształceń podłoża oraz sił trakcyjnych. Istotną nowością w stosunku do rozwiązań znanych z literatury było użycie do opisu przedmiotowego układu naprężeń w podłożu, zamiast nacisków jednostkowych na powierzchni kontaktu. Najważniejszą korzyścią była możliwość rozpatrywania reakcji podłoża w układzie przestrzennym na wielokierunkowe, złożone obciążenie elementu jezdnego, z uwzględnieniem trybu pracy koła, toczenie swobodne i napędzanie, prędkości jazdy, wielokrotności przejazdu w śladzie, obniżonego ciśnienia w ogumieniu.

W pracy przedstawiono własne metody badawcze, zastosowane do opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne, w szczególności metodę pomiaru naporu w podłożu z użyciem czujnika tensometrycznego własnej konstrukcji, optoelektroniczną metodę wyznaczania odkształceń oraz wieloelementowy dynamometr do pomiaru sił i momentów na kole jezdny. Opracowano metodę wzorcowania czujników naporu, uwzględniającą rodzaj i stan materiału badanego. Uzyskane wyniki wskazują znaczący wpływ wilgotności gruntów, wynika stąd potrzeba wzorcowania czujników z użyciem próbki gruntu pobranej z punktu pomiarowego dla uzyskania wysokiej precyzji mierzonych naporów. Utylitarnym efektem było wdrożenie metod wyznaczania naprężeń i odkształceń podłoża w formie procedury badawczej w certyfikowanym laboratorium badawczym Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku.

Ważnym osiągnięciem było również opracowanie metody badań naporów w śniegu pod obciążeniem pojazdów. Specyfika tego materiału stawia wysokie wymagania co do konstrukcji czujników a także metod ich instalowania w śniegu. Przeprowadzone badania oraz prace rozwojowe umożliwiły wytworzenie własnych czujników naporu, które przy wymaganej czułości posiadają odpowiednią odporność mechaniczną a cały system pomiarowy nadaje się do pracy w warunkach zimowych.

Przedstawiono i opisano optoelektroniczną metodę wyznaczania odkształceń podłoża powodowanych obciążeniem pojazdu, która umożliwiła badanie odkształceń objętościowych oraz postaciowych. Sześcioelementowy dynamometr do pomiaru sił i momentów na kole pojazdu podczas jazdy opracowany i zastosowany w badaniach Autora był pierwszym tego typu urządzeniem w skali kraju. Zastosowano w nim nowoczesne rozwiązania, m. in. przesył danych drogą radiową z 4 kół jednocześnie.

Analiza wyników naprężeń i odkształceń pod obciążeniem pojazdów wykazała, że zastosowana metoda pomiarowo-badawcza była wystarczająco dokładna i umożliwiła badanie wpływu różnorodnych czynników na naprężenia i odkształcenia podłoża. Na tej podstawie stwierdzono przydatność metody do opisu przedmiotowego układu i podjęto próbę konstruowania własnych modeli. Opracowane modele bazowały na analizowanych wynikach badań doświadczalnych. Do najprostszych modeli należały korelacje naprężeń oktaedrycznych w podłożu i sił trakcyjnych. Ze względu na dobór wielkości korelowanych, szczególnie sił trakcyjnych mierzonych na pojeździe, współczynniki regresji dla otrzymanych zależności przyjmowały wartości między 0.3 a 0.9, ponadto stwierdzono dostateczną korelację siły uciągu z naprężeniami mierzonymi na głębokości 15cm w trybie pracy koła napędzanie. Wysokie wartości współczynnika regresji uzyskano dla korelacji siły oporu toczenia z naprężeniem oktaedrycznym normalnym. Dalszym rozwinięciem był model otrzymany na podstawie teorii Boussinesq'a, który parametryzowano z wykorzystaniem wyznaczonych wartości naprężeń w podłożu. Stwierdzono dobrą lub dostateczną zdolność predykcyjną otrzymanego modelu, a różnice między przykładowymi wynikami obliczeń a pomiarami kształtowały się w zakresie od 3 do 47%.

Kolejnym krokiem było konstruowanie modeli układu koło – podłoże odkształcalne. Użycie sił generowanych na pojedynczym kole zamiast sił globalnych na pojeździe, jak w poprzednich modelach, dało wyraźną poprawę w zakresie własności predykcyjnych i precyzji dopasowania wyników symulacji w stosunku do pomiarów. Modele otrzymywano przy użyciu metody identyfikacji systemów, korzystając z oprogramowania MATLAB SI ToolboxTM, a wskaźniki dopasowania kształtowały się dla większości odtworzonych modeli na poziomie 80-95%.

Powyższe modele posiadają charakter pół-doświadczalny a ich konstrukcja opierała się na odtwarzaniu zależności matematycznych na podstawie analizy wielkości wejściowych i wyjściowych, charakteryzujących przedmiotowy układ. Nieco inną konstrukcję posiada model siły bocznej działającej na koła kierowane samochodu podczas jazdy na podłożu odkształcalnym. Znajomość i możliwość przewidywania wartości i charakterystyk siły bocznej ma podstawowe znaczenie w analizie stabilności ruchu pojazdu. Przy opracowaniu modelu przeprowadzono analizę zjawisk zachodzących w układzie koło kierowane – podłoże odkształcalne

a przyjęty model fizyczny opisano odpowiednimi równaniami różniczkowymi. Otrzymano nieliniowy model uwzględniający efekty dynamiczne w podłożu, poprzez wprowadzenie tzw. lepkości naprężeniowej Eyringa-Pukosa. Rozwiązanie otrzymaniu z użyciem pakietu MAPLETM. Na jakość otrzymywanych wyników obliczeniowych wpływa sposób parametryzacji modelu, przy czym nie wszystkie parametry udało się przyjąć na podstawie wyników badań własnych.

Podsumowując część pracy dotyczącą modeli stwierdzono, iż w przypadku badanego układu możliwe jest otrzymywanie modeli w oparciu o dwie strategie: odtwarzanie modeli na podstawie wyników doświadczalnych, oraz modelowanie na podstawie przyjętego opisu fizycznego. Przewaga jednej czy drugiej strategii pozostaje sprawą dyskusyjną, choć Autor preferuje metody bazujące na eksperymencie.

W pracy przedstawiono również przykłady praktycznego zastosowania opracowanych metod doświadczalnych. Jednym z nich było wyznaczanie wartości naporów w śniegu pod obciążeniem, co miało praktyczne znaczenie w przypadku ratraka używanego do przygotowania tras narciarskich na obszarze chronionym (Tatrzański Park Narodowy).

Na podstawie badań oraz analiz przeprowadzonych w niniejszej pracy sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Opis układu element jezdny – podłoże odkształcalne możliwy jest na podstawie sił przenoszonych przez element jezdny, jako wielkości wejściowych oraz stanu naprężeń i odkształceń podłoża, jako wielkości wyjściowych. Stwierdzenie powyższe uzasadniono badając zależności sił i naprężeń dla różnych pojazdów poruszających się po różnych podłożach odkształcalnych.
2. Zaproponowane metody badawcze posiadają szeroki zakres stosowalności. Możliwe są badania różnych podłoży odkształcalnych, w tym również podłoży śnieżnych, zakres pomiarowy naporów w podłożu wynosi 0 – 700kPa. W badaniach mogą uczestniczyć różne pojazdy, kołowe i gąsienicowe. Możliwe jest prowadzenie badań w warunkach ustalonych jak i dynamicznych.
3. Stwierdzono, że dla układu koło – podłoże odkształcalne najkorzystniejsze pod względem dopasowania wyników symulacji do wyników pomiarów są modele tworzone przy użyciu metody identyfikacji systemów.
4. Możliwości praktycznego wykorzystania wyników niniejszej pracy są duże, szczególnie w zakresie badawczym jak i w praktyce inżynierskiej. Należy tu wymienić opracowania z zakresu konstrukcji czujników naporu, dynamometru do pomiaru sił na kole oraz procedur pomiarowych. Przykładową aplikację metod opracowanych w ramach rozprawy opisano w rozdziale 6, dotyczącym pomiarów naporów powodowanych obciążeniem pokrywy śnieżnej przez ratrak.

5. Przyszłe badania z zakresu analizy układu element jezdny – podłoże odkształcalne mogą dotyczyć następujących zagadnień:

- uwzględnienie efektów dynamicznych;
- doskonalenie opracowanych modeli (parametryzacja dla różnych podłoży);
- zastosowania w praktyce badawczej oraz inżynierskiej

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem zawartym w rozprawie było opracowanie własnych, nowych metod badawczych oraz ich aplikacja do opisu układu element jezdny – podłoże odkształcalne a także uzyskanie wyników możliwych do wykorzystania w praktyce inżynierskiej i przyszłych pracach badawczych.

LITERATURA

1. Abele, G., 1990: Snow Roads and Runways, CRREL Monograph 90-3. Hanover, NH.
2. Abu Hamdeh N., Reeder R., 2003. Measuring and predicting stress distribution under tractive devices in undisturbed soils. *Biosystems Engineering*, 85(4), pp. 493-502
3. Akker van den J.J.H, Stuiver H.J., 1989. A sensitive method to measure and visualize deformation and compaction of the subsoil with a photographed point grid.. *Soil&Tillage Research*, 14(1989) pp. 209-217
4. Arvidsson, J., Trautner, A., Van Den Akker, J.J.H., Schjønning, P., 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil and Tillage Research*, 60, pp. 79-89
5. Aubel T., 2005. FEM simulation of the interaction between elastic tyre and soft soil. 11 th Int. Conference of the ISTVS, Lake Tahoe, Nevada USA Vol. 2, pp. 791 - 802
6. Bailey A.C., Raper R.L., Way T.R., Burt E.C., Johnson C.E., 1996. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. *Journal of Terramechanics*, 33(1), pp.1-11
7. Bakker D.M., Harris H.D., Wong K.Y., 1995. Measurements of stress paths under agricultural vehicles and their interpretation in critical state space. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1995) pp. 247-260
8. Bekker M., 1969. Introduction to terrain-vehicle systems. Michigan Press, An Arbor, USA
9. Booling I., 1986. How to predict soil compaction from agricultural tires. *Journal of Terramechanics*, Vol.22, No. 4, pp. 205-223
10. Boussinesq J., 1885. Application des potentielles à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastique. Gauthier Villais, Paris
11. Brudnak M., Gunter D., Bylsma W., 2007. Modeling of Moguls on an Endurance Test Course. Proceedings of the Joint North America, Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics, Fairbanks, Alaska, USA, June 23-26, 2007

12. Burkard H., Calame C., 1998. Rotating Wheel Dynamometer with High Frequency Response. *Tire Technology International*, 1998, p.154
13. Crenshaw B.M., 1972. Soil-wheel interaction for high speed. *Journal of Terramechanics*, 8(3)
14. Cottrell A.H., 1970. Własności mechaniczne materii. PWN, Warszawa 1970
15. Coutermarsh G., Shoop S.A., 2009. Tire slip-angle force measurements on winter surfaces. *Journal of Terramechanics*, 46, pp. 157-163
16. Crolla D.A, El-Razaz A.S.A., 1987. A review of the combined lateral and longitudinal force generation of tyres on deformable surfaces. *Journal of Terramechanics*, 24(1987) 199-225.
17. Davari M.M., Noori H., Khodabakhshian M., Hemmat A., Sadeghi M., 2007. An investigation into the rollover conditions of a light offroad vehicle with consideration of soil- tire interaction. *Proceedings of the Joint North America, Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics*, Fairbanks, Alaska, USA, June 23-26, 2007
18. Dąbrowski J., 1997. Sprawozdanie WITPiS Nr 104/ZPG/97 z realizacji pracy pt. Opracowanie kryteriów przejezdności terenu przez pojazdy gąsienicowe. Etap I – analityczne opracowanie problemu przejezdności
19. Dąbrowski J., Pytką J., Tarkowski P., Zając M., 2006. Advantages of all-season versus snow tyres for off-road traction and soil stresses. *Journal of Terramechanics* 43, pp. 163-175
20. Evers W., Reichel J., Eisenkolb R., Ebhart I., 2003. The Wheel Dynamometer as a Tool for Chassis Development. *Kistler Technical Application Note*
21. Fauve, M., Rhyner H., and Schneebeli, M., 2002: Preparation and maintenance of pistes. *Handbook for practitioners*. Swiss federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos, Switzerland
22. Ferhabd begovic B., Brinkmann C., Kutzbach H.D., Bottinger S. (2006) *Hohenheim Tyre*
23. Model – A transient model for driving dynamics simulation. *Proc. 10th European ISTVS Conference*, 3-6 Oct. 2006, Budapest, Hungary
24. Fervers C., 1999. Phenomena of air-filled tires and soft terrain. *Investigations with FEM*. Doctoral Thesis, University of federal Armed Forces, Hamburg, Germany
25. Fervers C.W., 2004. Improved FEM simulation model for tire-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 41, 87-100
26. Foda M.A., 1991. On the prediction of drawbar pull – normal slip relationship for a pneumatic tyre moving on soft soil. *J. of Terramech.*, Vol. 28 (4), pp. 383-392

27. Frohlich K., 1934. Druckverteilung in Baugrunde. Verlag Julius Springer, Wien
28. Gipser, M., 2005. FTire: a physically based application-oriented tyre model for use with detailed MBS and finite-element suspension models. *Vehicle Systems Dynamics* 43(Supplement): 76 - 91
29. Gorsich, D.J., Gunter, D.D., Karlsen, R., Chaika, M. 2003. Terrain Roughness Standards for Mobility and Ultra-Reliability Prediction. SAE Technical Paper No. 2003-01-0218
30. Hammel K., 1994. Soil stress distribution under lugged tires. *Soil&Tillage Research* 32(1994), pp. 163-181
31. Harris H.D., Bakker D.M., 1994. A soil stress transducer for measuring in situ soil stresses. *Soil & Tillage Research*, 29(1994) pp. 35-48
32. Hetherington J.G., White J.N.: An investigation of pressure under wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 39, 2002, 85-93
33. Hetherington J.G., Littleton I.: The role of mean maximum pressure in specifying cross-country mobility for armoured fighting vehicle design. *Journal of Terramechanics*, 24, 1987, 263-280
34. Heyde H., 1957. Mechanik des Schleppers. Deutsche Agrartechnik, 7
35. Horn R, Lebert M, 1994. Soil compactability and compressivity. In: *Soil compaction in crop production*. Elsevier, Amsterdam
36. Horn R., Way, T., Rostek J., 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil&Tillage Research*, 73 (1-2), pp. 101-106
37. Hovland H.J., 1973. Soil inertia in wheel-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 10(3):47-65
38. Hüsenmann T., Goertz H., 2005. The mechatronic tyre for online determination of tyre contact patch forces. *VDI Berichte Nr. 1912*, pp.119-152
39. Jackowski J., Prochowski L., 1995. Symulacja współpracy ogumienia z nierównościami drogi. *Mat. V Konferencji Naukowej Badania symulacyjne w technice motoryzacyjnej*, Kazimierz Dln., 22-24 maja 1995, str. 104-109
40. Jakliński L., 1999. Modele oddziaływania koła pneumatycznego na glebę. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Seria Mechanika, Zeszyt 175*.
41. Jakliński L., 2006. Mechanika układu pojazd-teren w teorii i badaniach. Wybrane zagadnienia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006
42. James S.R., 2002. Lateral Dynamics of an Offroad Motorcycle by System Identification. *Vehicle System Dynamics* 38(2002) pp.1-22

43. Keller W., Nicklas S., Zander T., Keßler R., Höß J., Kobetz C., 2008. Extreme Belastungen wirkungsvoll testen. ATZ Extra, September 2008, 28-35
44. Kisiel, I, Lisiak B., 1966 Zarys reologii gruntów, Arkady Warszawa
45. Kobiela S, 1991. Application of pressure cells in civil engineering. Wroclaw University of Technology, Civil Engineering Series, No.63
46. Komandi G., 1999. An evaluation of the concept of rolling resistance. Journal of Terramechanics, Vol.36, pp. 159 – 166
47. Kuchler M., Schrupp R., 2002. Mehrkomponenten-Motorradmessnabe / Multiaxial Motorcycle Wheel Load Transducer. VDI-FVT Jahrbuch 2002, VDI Verlag Dusseldorf, pp. 91-119
48. Kuhner S., Horn R., Baumgartl T., Raper R., Bailey A., Johnson C., 1993. Stresses and particle displacement during wheeling. ASAE Paper No. 93-1092, St. Joseph MI, USA
49. Lin L., Sandu C., 2007. Stochastic Analysis of Tire Force Equations. SAE Technical Paper No. 2007 – 01 – 4259
50. Lin L., Sandu C., 2007. Development of Tire-on-Stochastic Snow Models Using a Polynomial Chaos Approach. Proceedings of the Joint North America, Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics, Fairbanks, Alaska, USA, June 23-26, 2007
51. Ljung L., 1999. System Identification. A theory for the user. Prentice Hall, NY
52. Loh R., Nohl F.W., 1992 Mehrkomponenten-Radmessnabe. Einsatzmöglichkeiten und Ergebnisse. ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) 94 (1992), 1, pp. 44-53
53. Lozia Z., 1992. An analysis of vehicle behaviour during lane-change manoeuvre on an uneven road surface. Vehicle System Dynamics, 20, S1, pp. 417 – 431
54. Lozia Z., 1998. Rollover thresholds of the biaxial truck during motion on an even road Vehicle System Dynamics, 29, S1, pp. 735 – 740
55. Martini K.H., 1985. Mehrkomponenten-Kraftmessung am rotierenden Rad. VDI-Berichte 533 (1985) pp.331-344
56. Mitschke M., Wallentowitz H., 2005. Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer Verlag
57. Morin M.A., 1840. Memoir sur le tirage des voitures. Comptes rendus de l'Academie des Sciences
58. Muro T., 1993. Tractive performance of a driven rigid wheel on soft ground based on the analysis of soil – wheel interaction. J. of Terramech., Vol. 30 (5), pp. 351-369

59. Muro, T., 1993: Performances of a tracked over-snow vehicle towing a roller up and down a shallow-sloped terrain. *Journal of Terramechanics*, Vol.30 (3), pp. 143-155.
60. Muro T., Kawahara S., Mitsubayashi T., 1999. Effects of centrifugal, vertical and horizontal vibri-tracked vehicles on soil compaction. *Proc. 13 th International Conference of the ISTVS*. Munich, Germany, September 1999, Part I, pp.301-308
61. Mundl R., Meschke G., Liederer W., 1996. Kraftübertragung von Profilstollen auf Schneefahrbahnen (Transmission of force by tread blocks on snow tracks). *VDI Bericht Nr. 1224*, pp. 294-317
62. Nichols, T.A., Bailey A.C., Johnson C.E., and Grisso R.D., 1987. A stress state transducer for soil. *Transactions of the ASAE* 30(5):1237-1241
63. Othikin A., Lipiec J., Tarkiewicz S., Sudakov A., 1991. Deformation of silty loam soil under the tractor tyre. *Soil&Tillage Research*, 19(1991), pp.187-195
64. Pacejka H., 2004. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Elsevier Press
65. Plessner J., 1997. *Dynamisches Verhalten von Ackerschlepperreifen in Vertikal- und Längsrichtung auf fester Fahrbahn*. Doctor thesis, University of Stuttgart, VDI-Verlag, Düsseldorf, Reihe 14, Nr. 83 (1997).
66. Prochowski L., 2004. *Mechanika ruchu. Seria Pojazdy Samochodowe*, WKiŁ Warszawa
67. Pukos A., 1983. Thermodynamic interpretation of soil medium deformation. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, No.22, pp.367-399
68. Pukos A., 1991. Odkształcenia gleby w zależności od rozkładów wielkości porów i cząstek fazy stałej, *Problemy Agrofizyki*, Zeszyt Nr 61, Instytut Agrofizyki PAN
69. Pytka J., Dąbrowski J., 2001. Determination of the stress-strain relationship for sandy soil in field experiments. *Journal of Terramechanics*, 38 (2001) pp.185-200
70. Pytka J., Konstankiewicz K., 2002. A new optical method for soil stress and strain investigation, *Soil & Tillage Research*, 65 (2002) pp. 243-251
71. Pytka J., 2005. Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil&Tillage Research*, 82 (2005) 77 – 88
72. Pytka J., Rusinek R., Dąbrowski J., Zając M., 2006. Determination of winter traction and snow stresses under loads of a grooming machine and a 4x4 5T truck, in *Proceeding of the 10th European ISTVS Conference*, Budapest, Hungary, October 2006.

73. Pytka J., Szymaniak G., Dąbrowski J., Rusinek R., 2007. Determination of snow stress state under vehicle loads. Proc. Joint North America, Asia-Pacific ISTVS Conf. Fairbanks, Alaska, USA, June 2007
74. Pytka J., 2007. Model i identyfikacja układu koło ogumione – podłoże odkształcalne. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego MNiSW.
75. Pytka J., 2008. A Wheel Dynamometer for Off-Road Vehicle Testing. SAE Technical Paper Series, Paper No. 2008-01-0482
76. Pytka J., 2009. Design consideration and calibration of pressure transducer for soil stress measurements. Journal of Terramechanics 46 (2009) 241-249
77. Pytka J., 2009. Determining and analysing the stress state under wheeled-vehicles loads. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 223 No. D2, pp. 233-253.
78. Pytka J., 2010. Determination of snow stresses under vehicle loads. Cold Regions Science and Technology 60 (2010) 137-145
79. Pytka J. 2010. Experimental research on stability of an off-road vehicle on deformable surfaces. SAE Technical Paper Series, Paper No. 2010-01-1898
80. Pytka J. 2010. An instrumented vehicle for off-road dynamics testing. Proc. of the Joint 9th Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics Sapporo, Japan, September 27 to 30, 2010
81. Pytka, J., 2010. Semiempirical model of a wheel-soil system. International Journal of Automotive Technology, 11(5), pp. 681-690
82. Raper R., Bailey A., Burt E., Way T., Liberati P., 1995. The effect of reduced inflation pressure on soil-tire interface stresses and soil strength. Journal of Terramechanics, 32(1), pp. 43-51
83. Rupp A., Diefenbach W., Grubisic V., 1994. Erfassung der mehraxialen Fahrbetriebsbelastungen mit dem Messrad VELOS. ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) 96 (1994) pp. 764-768
84. Sandu C., Sandu A., Lin L., 2005. Stochastic Modelling of Terrain Profiles and Soil Parameters. SAE Technical Paper No. 2005-01-3559
85. Sandu C., Lin L., 2007. Modeling and Simulation of 2D ARMA Terrain Models for Vehicle Dynamics Applications. SAE Technical Paper No. 2007-01-0138
86. Satyawali P.K., Schneebeil M., Peilmeier C., Stucki T., Singh A.K., 2009: Preliminary characterization of Alpine snow using SnowMicroPen. Cold Regions Science and Technology, Vol.55(2009), pp. 311-320.
87. Shapiro, L., Johnson, J., Sturm, M., Blaisdell, G., 1997: Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications. CRREL Report 97-3.

- U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.
88. Schlotter V., Keen A., 2003. The dynamic characteristics of off-road tyres. Proc. 9th European ISTVS Conference, Harper Adams, UK, Sept. 8-11, (2003)
 89. Schlotter V., 2006. Einfluss dynamischer Radlastschwankungen und Schräglaufwinkeländerungen auf die horizontale Kraftübertragung von Ackerschlepperreifen. Doctor Thesis, Universität Stuttgart, Shaker Verlag Aachen, (2006).
 90. Schwanghart H., 1968. Lateral forces on steered tyres in loose soil. Journal of Terramechanics, 1(1968)
 91. Schwanghart H., 1981. Messungen von Kräften an gelenkten, nicht angetriebenen Reifen. Proc. 7th ISTVS Conference, Calgary, Canada (1981)
 92. Schwanghart H., 1991. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. Journal of Terramechanics, (28), pp. 309-318
 93. Shibusawa S., Sasao A., 1996. Traction data analysis with the traction prediction equation. Journal of Terramechanics, Vol.33, No. 1, pp. 21 – 28
 94. Shoop S., Young B., Alger R., Davis J., 1994. Effect of test method on winter traction measurements. Journal of terramechanisc, (31) No.3, pp. 153-161
 95. Shoop S., 2001. Finite element modeling of tire-terrain Interaction. ERDC/CRREL Technical Report TR-01-16
 96. Shoop, S., Kestler, K., Haehnel, R., 2006: Finite element modeling of tires on snow. Tire Science and Technology, 34(1): 2–37.
 97. Skibiński K.: Equilibrium of granular materials (*in Polish*) Księgarnia naukowa Polsk. T-wa. Pedagog. Lwów i Księgarnia M. Arcta, Warszawa – Lwów, 1922
 98. Stacheder M., 2005: TDR and low-frequency measurements for continuous monitoring of moisture and density in a snow pack. International Agrophysics, 2005, Vol.19, pp. 75-78.
 99. Sołtyński A., 1976. Mechanika układu pojazd-teren. WMON, Warszawa
 100. Upadhyaya S.K., Sime M., Ranghuwanshi N., Adler B., 1997. Semi – empirical traction prediction equations based on relevant soil parameters. Journal of Terramechanics, Vol.34, No 3, pp. 141 – 15
 101. Verma B.P., Bailey A.C., Schafer R.L., Futral J.G., 1976. A pressure transducer in soil compaction study, Transactions of the ASAE 1976, pp.442 – 447
 102. Vishay Measurements Group, Inc., The Technical Staff of: Strain gage based transducers. Their design and construction Raleigh, North Carolina 27611, USA

103. Vishay Measurements Group, Inc., The Technical Staff of: Technical Note TN 510
104. Wanjii S., Hiroma T., Ota Y., Kataoka T., 1997. Prediction of wheel performance by analysis of normal and tangential stress distributions under the wheel – soil interface. *Journal of Terramechanics*, Vol.34, No 3, pp. 165 – 186
105. Waterways Experimental Station, 1944. Soil pressure cell investigation. Technical Report No. 210-1. Army Eng. WES, Vicksburg, MS, USA
106. Way T., Johnson C., Bailey A., Raper R., Burt E., 1996. Soil stress state orientation beneath a tire at various loads and inflation pressures. *Journal of Terramechanics* (33), pp. 185-194
107. Weber R., Fritz G., Fritz W., 1972. Eine Messnabe fuer 5-Freiheitsgrade und einem grossen Anwendungsbereich (In German). *Automobil Industrie*, 2(1972) pp. 49-55
108. Weber R., H.G. Persch H.G., 1976. Frequency response of tires – slip angle and lateral force. SAE Technical Paper No. 760030
109. Weiger G., Doerrie D., 1987. Mehrkomponenten-Messnaben zur Erfassung von Radkraeften – Vergleich verschiedener Konstruktionsprinzipien. *VDI-Berichte 632* (1987) pp. 159-167
110. Weiblen W., Kockelmann H., Burkard H., 1999. Evaluation of Different Designs of Wheel Force Transducers. SAE Paper No. 1999-00-1037
111. Wiernamm C., Werner D., Horn R., Rostek J., Werner B., 2000. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil&Tillage Research*, 53, pp. 117-128
112. Wong J.Y., Irwin G.J., 1992: Measurement and characterization of the pressure-sinkage data for snow obtained using a Rammsonde. *Journal of Terramechanics*, Vol. 29, No. 2, (1992), pp. 265-280.
113. Wong, J.Y., 1992: Expansion of the terrain input base for Nepean Tracked Vehicle Performance Model, NTVPM, to accept Swiss Rammsonde data from deep snow. *Journal of Terramechanics*, Vol.29, No.3, pp. 341-357.
114. Wong J.Y., 1995: Application of the computer simulation model NTVPM-86 to the development of a new version of the infantry fighting vehicle ASCOD. *Journal of Terramechanics*, Vol. 32, No. 1, (1995), pp 53-61.
115. Wong J.Y., 2009: Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations *Journal of Terramechanics*, Vol. 46, No. 4, (2009), pp.141-155.
116. Wulfsohn D., Upadhyaya S.K., 1992. Prediction of traction and soil compaction using three - dimensional soil – tyre contact profile. *J. of Terramechanics*, Vol. 29 (6) pp. 541-564

117. Yu Qun, Shen Jie, Dai Xianbin, 1992. Camera tracing and image processing system for soil deformation. *Journal of Terramechanics*, 29(1992), pp. 423-431