



UNIwersytet  
PRZYRODniczy  
WE WROCLAWIU

WYDZIAŁ PRZYRODniczo-TECHNOLOGICZNY

**mgr inż. Łukasz Gil**

## **Czynniki techniczno-eksploatacyjne warunkujące bezpieczne użytkowanie ciągników rolniczych**

Technical and operational factors influenced  
the safe use of agricultural vehicles

**Rozprawa doktorska  
wykonana pod kierunkiem:**

**dra hab. inż. Jarosława Czarneckiego, prof. UPWr**

Wrocław, 2023 r.

## Spis treści:

1. WSTĘP.....	3
2. PRZEGLĄD LITERATURY.....	8
2.1. Sposoby i warunki eksploatacji ciągników rolniczych i przyczep .....	8
2.2. Parametry opisujące eksploatację pojazdu rolniczego, parametry układu koło podłoże .....	10
2.2.1 Dynamika koła nienapędzanego i napędzanego .....	10
2.2.2 Pojęcie przyczepności .....	13
2.2.3 Charakterystyka procesu hamowania.....	18
2.3. Wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na przyczepność koła pojazdu rolniczego - wyniki badań naukowych .....	23
2.3.1 Obciążenie pionowe koła, a właściwości trakcyjne .....	25
2.3.2 Ciśnienie powietrza w oponie, a właściwości trakcyjne .....	27
2.4. Symulacja ruchu pojazdów za pomocą specjalistycznych programów komputerowych - wady i zalety .....	31
3. CEL I ZAKRES PRACY .....	35
3.1. Cel pracy .....	35
3.2. Zakres pracy .....	36
4. METODYKA BADAŃ .....	37
4.1. Ogólna koncepcja badań .....	37
4.2. Opis stanowiska badawczego .....	37
4.3 Opis podłoży wykorzystanych do badań .....	40
4.4 Opis przebiegu badań.....	44
4.5. Statystyczne opracowanie wyników badań .....	44
4.6 Wykorzystanie wyników do komputerowego prognozowania zdarzeń .....	45
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA .....	46
5.1. Wyniki analizy statystycznej .....	76
5.2. Opracowanie modeli opisujących maksymalną siłę przyczepności .....	79
5.3. Wyniki przykładowych symulacji ruchu pojazdów z programu PC-Crash .....	80
6. WNIOSKI .....	93
7. STRESZCZENIE .....	95
Spis literatury .....	96
Spis tabel .....	102
Spis rysunków.....	102
Wykaz oznaczeń .....	106

## 1. WSTĘP

W ostatnich dekadach obserwuje się znaczny rozwój gospodarstw rolnych, które poprzez inwestycje w mechanizację przy jednoczesnym zastosowaniu nowych technologii dążą do poprawy wydajności zbiorów oraz ich jakości. Istotną rolę dla wydajności prac polowych odgrywa czas ich wykonania - krótszy czas wykonania prac polowych lub transportowych możliwy jest do osiągnięcia poprzez wprowadzanie do użycia nowych, coraz to bardziej wydajnych i zaawansowanych technologicznie maszyn czy ciągników, które dają możliwość poruszania się z większą prędkością ale mają także większą masę i moc [Bauer i inni 2013, Brennensthal 2021] Pierwotnie ciągniki o mocy zbliżonej do 30 KM dedykowane były głównie do mało powierzchniowych gospodarstw. Zastosowanie w nich prostych układów jezdnych i napędowych pozwalało na przemieszczanie się po utwardzonych drogach jedynie z prędkościami rzędu 2-4 km/h w związku z czym możliwości wykorzystania ich w transporcie była mocno ograniczona [Habich 1948].

Pierwsze dwie dekady XX wieku były okresem wprowadzania przez konstruktorów zmian w układach jezdnych i napędowych ciągników co miało przyczynić się do ich większej uniwersalności. Pomysł konstruktorów polegający na zastąpieniu stosowanych dotychczas ciężkich kół żelaznych, kołami z oponami pneumatycznymi wpłynęło na zmniejszenie masy ciągników, przełożyło się to na mniej negatywny wpływ oddziaływania pojazdu na podłoże, a także pozwoliło na uzyskiwanie przez nie większych prędkości przy jednoczesnym zmniejszeniu spalania [Białczyk 2005, Goering, Hansen 2004]. Wybuch II Wojny Światowej i inwestycje na potrzeby przemysłu zbrojeniowego zahamował rozwój pojazdów typowych dla rolnictwa. Kontynuacja prac nad udoskonalaniem zwłaszcza układów napędowych w ciągnikach rolniczych rozpoczęła się więc dopiero pod koniec lat 40. Tak jak przed, jak również po II wojnie światowej kontynuowano produkcje ciągników małych, dedykowanych do niewielkich gospodarstw. Konstruktorzy dzięki nabytemu podczas wojny doświadczeniu w produkcji na potrzeby armii, zaraz po niej aż do lat 70. rozpowszechniali pojazdy z układem jezdnym gąsiennicowym. Zaletami tych konstrukcji był dobry uciąg oraz mały nacisk jednostkowy na podłoże, lecz główną ich wadą przesądzającą o późniejszym zanikaniu zainteresowania tego rodzaju sprzętem był brak praktycznej możliwości wykorzystania ich do transportu po drogach publicznych [Białczyk 2005]. Produkcje z końca lat 40-tych, w których standardem było wykorzystanie kół ogumionych i znaczne poprawienie konstrukcji układów napędowych pozwoliło na uzyskiwanie przez ciągniki coraz to większej prędkości, zarówno tej

roboczej, jak i transportowej. W kolejnych dekadach, do końca lat 80-tych XX wieku, zmiany konstrukcyjne ciągników rolniczych dotyczyły głównie układów napędowych. Dokonano m.in. zmian polegających na wprowadzeniu w zamian za mechaniczne, niesynchroniczne skrzynie biegów, nowych synchronizowanych i zautomatyzowanych skrzyni, dodatkowo stosując także wzmacniacze momentu obrotowego.

Współczesne ciągniki rolnicze mają bardzo złożone układy konstrukcyjne obejmujące zarówno część mechaniczną, hydrauliczną, jak i rozbudowane instalacje i systemy elektryczne i elektroniczne. Celem jest osiągnięcie jak największych wydajności. O ile samo generowanie mocy w silniku czy jej przenoszenie stanowi obecnie ściśle kontrolowane procesy, to słabym ogniwem jest przeniesienie mocy z układu jezdnego na podłoże. To właśnie na styku kół lub gąsienic z podłożem występują największe straty energii. Jest to związane z pogorszeniem przyczepności. Oprócz aspektu energetycznego negatywnym następstwem będzie tu zagrożenie utraty stateczności ruchu, co może skończyć się przemieszczaniem pojazdu w kierunku niezgodnym z wolą operatora czy też przewróceniem pojazdu. Te względy sprawiają, że badanie przyczepności w odniesieniu do pojazdów rolniczych wydaje się zasadne zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Badania nad przyczepnością kół pojazdów są prowadzone od momentu pojawienia się pierwszych pojazdów kołowych. W przypadku pojazdów samochodowych głównym aspektem jest zapewnienie bezpieczeństwa i ten kierunek badań wydaje się dobrze rozpoznany. Nieco inna sytuacja występuje w przypadku pojazdów rolniczych, gdzie badania nad przyczepnością koncentrują się głównie na ograniczaniu strat energii. Należy jednak pamiętać, że większość współczesnych pojazdów rolniczych jest przystosowana do użytkowania w pracach transportowych po drogach publicznych – zazwyczaj z większymi prędkościami niż to ma miejsce w trakcie prac polowych. Przykładowo ciągnik JCB Fastrac 8000 może osiągać prędkość do 70 km/h, a niektóre modele serii T-Serie marki Valtra są wyposażone w przekładnię o wysokim zakresie prędkości, pozwalającą na osiągnięcie prędkości powyżej 60 km/h (na przykład model Valtra T234 może osiągnąć prędkość maksymalną do 70 km/h). To determinuje nowe zagrożenia, które nie występowały w przypadku konstrukcji sprzed 30-40 lat. Zagrożenia te mogą być w dużej mierze związane z utratą przyczepności kół do podłoża. To z kolei sprawia, iż zasadne staje się przeanalizowanie pewnych mechanizmów w układzie koło pojazdu rolniczego – podłoże w aspekcie bezpieczeństwa ruchu.

Kolejnym ważnym aspektem dotyczącym współczesnych pojazdów rolniczych jest ich masa. Jak wspomniano na początku rozdziału, jedną z ważniejszych rzeczy jest wydajność pracy, a ta ściśle zależy nie tylko od prędkości ale również od szerokości roboczej maszyn

polowych. Osiągnięcie większej szerokości roboczej wiąże się zazwyczaj ze zwiększeniem ciężaru maszyny, która dodatkowo potrzebuje bardziej wydajnego (a więc również – cięższego) ciągnika rolniczego. To wszystko sprawia, że masy współczesnych zestawów „ciągnik-maszyna” lub „ciągnik-przyczepa” są znacznie wyższe niż to miało miejsce w latach 70. czy 80. XX wieku. Przykładowo bardzo popularny ciągnik marki Ursus C-330 produkowany w latach 1967-1987 ważył 1495 kg, model C-360 produkowany w latach 1976 – 1994 ważył 2700 kg, a model C-385 produkowany w latach 1969 – 1983 ważył 3525 kg. Dla porównania nowoczesne ciągniki jak na przykład ciągnik marki Massey Ferguson 8S.265 produkowany od roku 2020 waży około 7500 kg, ciągnik New Holland T7.315 produkowany w latach 2015-2019 waży około 8000 kg, a ciągnik Case IH Magnum AFS Connect produkowany w latach 2019-2022 waży około 9000 kg. Współczesne przyczepy stosowane w transporcie rolniczym również uległy pewnej ewolucji i cechują się znacznymi wymiarami i masami. Przykładowo przyczepa marki Pronar T653 ma masę własną 1950 kg i DMC równą 5950 kg inny model Pronar T672 ma masę własną 2990 kg i DMC ok 11 000 kg, przyczepa marki Hummel model RMU 24100/L ma masę własną 3300 kg i DMC równą 12000 kg, a przyczepa marki Wielton model PRS-2/W masę własną 2800 kg i DMC równą 8800 kg. Z przytoczonych przykładów wynika, że masy całkowite współczesnych zestawów złożonych z ciągnika i przyczepy mogą dochodzić do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu ton. Wprowadzane na przestrzeni ostatnich lat zmiany w konstrukcji ciągników i ich wyposażenie doprowadziły do tego, że coraz to nowsze pojazdy są w stanie wykonać daną pracę szybciej, sprawniej i przy coraz to mniejszym udziale człowieka. Postęp techniki i dynamiki wzrostu gabarytów ciągników rolniczych doprowadził także do tego, że dawne małe i wolne ciągniki wykorzystywane wyłącznie do prac polowych po pewnych przemianach stawały się coraz bardziej pojazdami uniwersalnymi i w tej chwili wykorzystuje się je w podobnym stopniu tak samo do celów transportowych jak i do prac polowych. Wpływ takich przemian ma odzwierciedlenie w użytkowaniu ciągników na bardzo zróżnicowanych podłożach i w różnych warunkach terenowych czy atmosferycznych. Masa, prędkość oraz parametry trakcyjne ciągnika poruszającego się po różnych podłożach mają wpływ na jego oddziaływanie na to podłoże co z kolei skutkuje zmianami stateczności i kierowności, a więc może doprowadzić do powstawania zagrożeń w aspekcie bezpieczeństwa jazdy.

Analiza skutków i przyczyn wypadków w ruchu drogowym jest dotychczas bardzo dobrze rozpoznana w przypadku pojazdów typowo drogowych (samochody osobowe, motocykle, samochody ciężarowe, autobusy), mniej w tej kwestii zbadane są pojazdy rolnicze, a ich konstrukcja, wynikająca często z innego niż transport zastosowania, nie pozwala jednak

na przyjmowanie uproszczeń czy pomijanie niektórych parametrów takich chociażby jak masa ładunku, jego przemieszczanie się, lub zmiana ciśnienia powietrza w oponach nie wynikająca z nagłych zdarzeń czy stanów awaryjnych, a z ingerencji kierującego/operatora co nie występuje raczej w przypadku pojazdów samochodowych. Obecnie analiza zagrożeń związanych z niekontrolowaną utratą panowania nad pojazdem lub rekonstrukcją zdarzeń drogowych odbywa się bardzo często poprzez wykorzystanie zaawansowanych, specjalistycznych programów komputerowych wspomagających procesy obliczeniowe i umożliwiające wykonanie symulacji przebiegu założonego ruchu danego pojazdu lub jego rekonstrukcji zgodnie z ujawnionymi śladami zaistniałego zdarzenia. Najbardziej popularne w Polsce programy pozwalające wykonać symulację ruchu pojazdów z uwzględnieniem zasad dynamiki to austriacki PC-Crash firmy DSD oraz polski V-Sim firmy Cybid z Krakowa, które umożliwiają między innymi zaprojektowanie środowiska ruchu, po którym poruszać ma się badany pojazd, wybranie z dostępnych katalogów konkretnych modeli pojazdów, którym są już przypisane niektóre cechy takie jak np. charakterystyka silnika, wymiary, masy i inne dane indywidualne udostępnione przez producentów tych pojazdów. Do symulacji ruchu programy te wykorzystują stosowne algorytmy obliczeniowe, a jej przebieg odbywa się zgodnie z prawami fizyki i mechaniki. Użytkownik może oczywiście wprowadzić zmiany w konstrukcję pojazdu, w jego wszystkie parametry, co pozwala na zaprojektowanie identycznego lub zbliżonego pojazdu do tego, którego ruch chce się odzwierciedlić. Wprowadzenie tych zmian musi być jednak poprzedzone zdobyciem wiedzy nie tylko o konstrukcji pojazdu ale jego specyficznym sposobie poruszania się czy reakcji na niektóre czynniki zewnętrzne lub eksploatacyjne. Aby przebieg takich symulacji dawał zatem pożądane rezultaty należy do takiego programu wprowadzić chociażby współczynniki przyczepności kół do podłoża, masy pojazdów czy określone czynności, które mógłby wykonać kierujący podczas ruchu, takie jak skręt kołem kierownicy, podjęcie hamowania, czy przyspieszanie. Z uwagi na powyższe, programy te są wykorzystywane zarówno przez osoby zajmujące się ustalaniem przyczyn zaistniałych już wypadków jak np. biegli sądowi ale również przez konstruktorów i inżynierów weryfikujących zachowanie pojazdów przed wprowadzaniem do ich konstrukcji pewnych zmian lub na etapie ich projektowania. Jak wspomniano powyżej, w przypadku pojazdów samochodowych zagrożenia niekontrolowanej utraty panowania nad pojazdem są dobrze rozpoznane, a pojazdy te posiadają zazwyczaj bardzo mocno rozbudowane systemy bezpieczeństwa czynnego i biernego, z jednej strony wspomagając kierującego w sytuacjach nietypowych, nagłych, a z drugiej minimalizując skutki ewentualnych zdarzeń. Produkowane kilkadziesiąt czy nawet kilkanaście lat temu pojazdy rolnicze w ogóle większości tych

systemów nie posiadają, gdyż bezpieczeństwo podczas poruszania się pojazdów rolniczych po drogach było marginalizowane. Było to podyktowane faktem, iż funkcje transportowe takich pojazdów stanowiły jakby dodatek do głównego zastosowania jakim były prace polowe ale także tym, że niskie prędkości osiągane przez te pojazdy wiązano z małymi skutkami ewentualnych wypadków. Wydaje się zatem, że w przypadku pojazdów rolniczych, które nie są już wyłącznie wykorzystywane do prac polowych, a ich powszechnym zadaniem jest także transport i to z możliwością uzyskiwania dużych prędkości, w których to dodatkowo przed wyjechaniem z pola na drogę dochodzi często do istotnych zmian w obciążeniu, a często także do ingerencji w ciśnienie powietrza w kołach, koniecznym staje się zbadanie wpływu różnych czynników techniczno – eksploatacyjnych na bezpieczeństwo podczas prac transportowych.

Określenie zagrożeń i opisanie rzeczywistego przebiegu ruchu pojazdów rolniczych podczas ich przemieszczania się po różnych nawierzchniach pozwolić może także na pełniejsze wykorzystanie programów symulacyjnych, które służą zarówno do celów weryfikacji zmian w konstrukcji tych pojazdów przed ich dopuszczeniem do ruchu jak i do zrekonstruowania zaistniałych już zdarzeń z udziałem tego typu pojazdów. Analiza i opisanie zjawisk towarzyszących ruchowi pojazdów rolniczych na różnych nawierzchniach pozwoli na wyeliminowanie niedostatecznej liczby danych empirycznych opisujących chociażby współpracę koła pojazdu z podłożem w różnym jego stanie.

## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

### 2.1 Sposoby i warunki eksploatacji ciągników rolniczych i przyczep

Współczesne ciągniki rolnicze są produkowane w różnych klasach i typach. Wyróżnia się ciągniki małe, średnie, duże i ciężkie. W zależności od modelu, typu ciągnika i jego przeznaczenia mogą one również osiągać inne maksymalne prędkości. Prędkość ciągnika może być dostosowana do konkretnego zabiegu agrotechnicznego, takiego jak orka, siew, nawożenie itp. Niektóre ciągniki rolnicze są zoptymalizowane do prac na polu, podczas gdy inne mają cechy konstrukcyjne odpowiednie również do transportu lub zastosowań komunalnych. Prędkość ciągnika jest również determinowana przez moc i charakterystykę silnika. Zastosowanie poszczególnych grup ciągników sprowadza się do tego, że ciągniki małych mocy wykorzystywane są do prac komunalnych, sadowniczych i ogrodniczych. Ciągniki średnich mocy najczęściej są jednostkami pomocniczymi przy pracach polowych lub pełnią funkcję ciągnika głównego w gospodarstwach o mniejszych arealach. Z kolei ciągniki o dużej mocy silnika biorą udział w najbardziej energochłonnych pracach lub są ciągnikami głównymi w gospodarstwach o dużych arealach [www 1].

Istotną rolę w eksploatacji ciągników w gospodarstwach rolnych odgrywają zestawy transportowe złożone z ciągnika i przyczepy lub przyczep. Przyczepy używane w rolnictwie różnią się w zależności od rozmiaru, przeznaczenia i pojemności. Najmniejsze przyczepy jednoosiowe mają zwykle masę od około 500-1000 kg, podczas gdy większe modele mogą mieć masę sięgającą 3000-4000 kg. Większe przyczepy dwuosiowe są bardziej stabilne w związku z czym mogą przenosić większe obciążenia. Ich masy mogą wynosić od 2000-4000 kg dla mniejszych modeli oraz do 10 000-15000 kg lub więcej dla większych i bardziej wydajnych przyczep. Na przykład dwuosiowa przyczepa marki Wielton model PRS-2/W10 o masie własnej 3900 kg ma homologacyjną ładowność równą 10 000 kg [www 2], przyczepa marki Pronar model PT612L o masie własnej 4500 kg i ładowności 12 000 kg [www 3], a przyczepa marki Metaltech model DBL 8 posiada masę 3605 kg i ładowność 8000 kg [www 4]. Do transportu płodów rolnych często używane są przyczepy samozaładowcze. Mogą one mieć masę całkowitą od kilku ton do nawet kilkudziesięciu ton, w zależności od specyfikacji i zastosowania. Przyczepy rolnicze z uwagi na inne przeznaczenie różnią się od przyczep ciężarowych pod względem konstrukcyjnym. Przewożenie zbiorów, nawozów, paszy i innych materiałów rolniczych oraz wykorzystywanie przyczep rolniczych głównie na polach i w gospodarstwach rolnych wymusza nieco inną konstrukcję niż w przypadku przyczep



ciężarowych, które umożliwiają bezpieczne przemieszczanie ładunków na długich odległościach i są często wykorzystywane w sektorze transportu dalekiego zasięgu. Przyczepy rolnicze mają również zwykle mniejszą pojemność ładunkową niż przyczepy ciężarowe. Jest to związane z faktem, że przyczepy rolnicze są zazwyczaj przeznaczone do przewożenia lekkich lub nieco cięższych ładunków, takich jak zboże czy pasza. Pozwala to na zastosowanie w nich prostszej konstrukcji, składającej się jedynie z ramy, platformy ładunkowej i osi. Przyczepy ciężarowe są konstrukcyjnie bardziej złożone, posiadają zazwyczaj większą liczbę osi, zawieszenia pneumatyczne czy inne zaawansowane funkcje mocowania ładunku, które umożliwiają przewożenie towarów na długie odległości.



Rys. 1. Przykłady przyczep stosowanych w rolnictwie

Należy jeszcze wspomnieć o fakcie, iż pojazdy rolnicze, w odróżnieniu od pojazdów drogowych, są przystosowane do pracy w różnych warunkach terenowych. Mogą się przemieszczać zarówno na podłożach o względnie dużej sztywności, jak i na podłożach odkształcalnych. Niestety może to mieć negatywny wpływ na zjawiska zachodzące w trakcie eksploatacji. Ten sam zestaw pojazdów wyposażony w konkretny rodzaj ogumienia będzie się bowiem poruszał w skrajnie różnych warunkach, co wynika z różnych parametrów podłoży

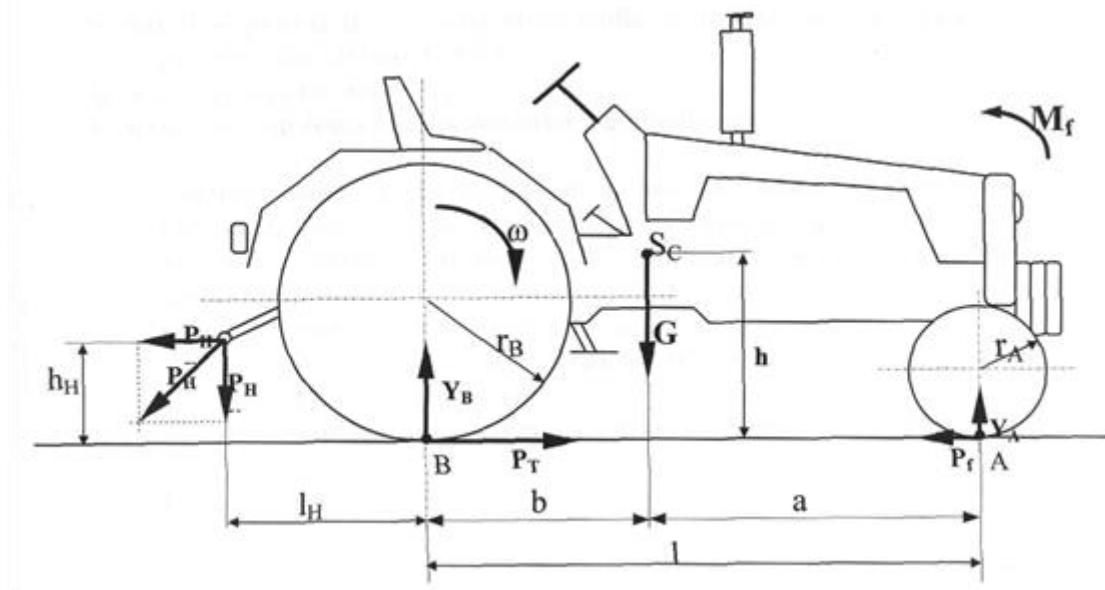
(np. jazda robocza w polu na miękkiej glebie i jazda transportowa po drodze asfaltowej). To z kolei wpływa na różne warunki przenoszenia siły napędowej. W praktyce może to oznaczać, że cechy konstrukcyjne, które na odkształcalnym podłożu są korzystne, na podłożu o małej odkształcalności będą niekorzystne. Z tego płynie wniosek, że uniwersalność eksploatacji pojazdów rolniczych niesie za sobą pewne konsekwencje związane zarówno z ekonomiką ruchu (ograniczanie zużycia energii), jak i bezpieczeństwem eksploatacji.

## 2.2 Parametry opisujące eksploatację pojazdu rolniczego, parametry układu koło-podłoże

### 2.2.1 Dynamika koła nienapędzanego i napędzanego

Przemieszczanie się każdego pojazdu kołowego możliwe jest dzięki występowaniu siły przyczepności. Parametry ruchu pojazdu można wyznaczyć posługując się bilansem mocy jak i równoważnymi mu bilansami energii lub sił. Pojazd w ruch wprowadzany jest siłą napędową, która musi być na tyle duża aby przeciwdziałać oporom ruchu takim jak opór toczenia, powietrza, wzniesienia czy bezwładności masy pojazdu [Mitschke 1977, Prochowski 2016].

Na ciągnik rolniczy działają określone siły i momenty – przykładowy schemat dynamiki ciągnika kołowego przedstawiono na rys. 2

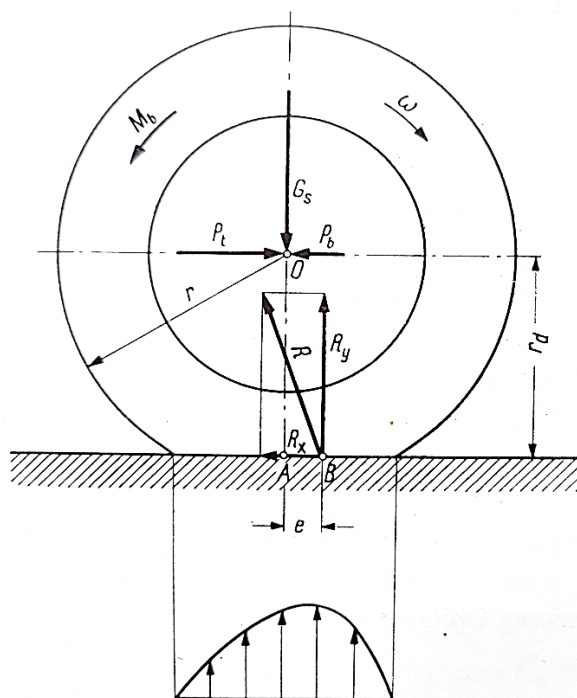


Rys. 2. Schemat układu sił i momentów działających na kołowy ciągnik rolniczy [Dajniak 1979]

$G$  - ciężar ciągnika,  
 $Y_A$  - reakcja pod kołami przednimi (w punkcie A) ciągnika,  
 $Y_B$  - reakcja pod kołami tylnymi (w punkcie B) ciągnika,  
 $P_H$  - siła uciągu. Jeżeli siła ta pochylona jest pod kątem  $\theta$ , to wówczas istnieją składowe tej siły,  
 $P_{HX}$  - składowa pozioma siły uciągu:  $P_H \cos \theta$ ,  
 $P_{HY}$  - składowa pionowa siły uciągu:  $P_H \sin \theta$ ,  
 $P_T$  - siła trakcyjna ( napędowa )  $P_T = Y(\text{koła lub kół napędowych}) \mu$ ,  
 $\mu$  - współczynnik przyczepności,  
 $P_f$  - siła oporów przetaczania  $P_f = (Y_A + Y_B) f$ ,  
 $f$  - współczynnik oporu przetaczania  $f = \tan \varphi$ ,  
 $r_A, r_B$  - promienie dynamiczne kół przednich (A) i kół tylnych (B),  
 $M_f$  - moment oporów przetaczania  $M_f = (Y_A + Y_B) r_B f$ ,  
 $L$  - rozstaw osi ciągnika,  
 $a$  - odległość punktu A od prostej prostopadłej do podłoża przechodzącej przez środek ciężkości ( $S_c$ ),  
 $b$  - odległość punktu B od prostej prostopadłej do podłoża przechodzącej przez środek ciężkości ( $S_c$ ),  
 $l_H, h_H$  - współrzędne zaczepu,  
 $h$  - wysokość położenia środka ciężkości nad podłożem,

Na ciągnik rolniczy podobnie jak na każdy pojazd kołowy działa siła ciężkości ( $G$ ). Siła ta powoduje wystąpienie reakcji pod przednimi i tylnymi kołami ciągnika (odpowiednio:  $Y_A, Y_B$ ). Przemieszczanie ciągnika możliwe jest dzięki wystąpieniu siły napędowej przyłożonej w punkcie styku kół napędowych z podłożem ( $P_T$ ). Na wszystkie koła ciągnika działa ponadto siła oporu przetaczania skierowana przeciwnie do kierunku jazdy ( $P_f$ ). W przypadku gdy ciągnik współpracuje z maszyną lub przyczepą na jego zaczepie lub trzypunktowym układzie zawieszenia występuje dodatkowo siła uciągu ( $P_H$ ) [ Białczyk, 2012].

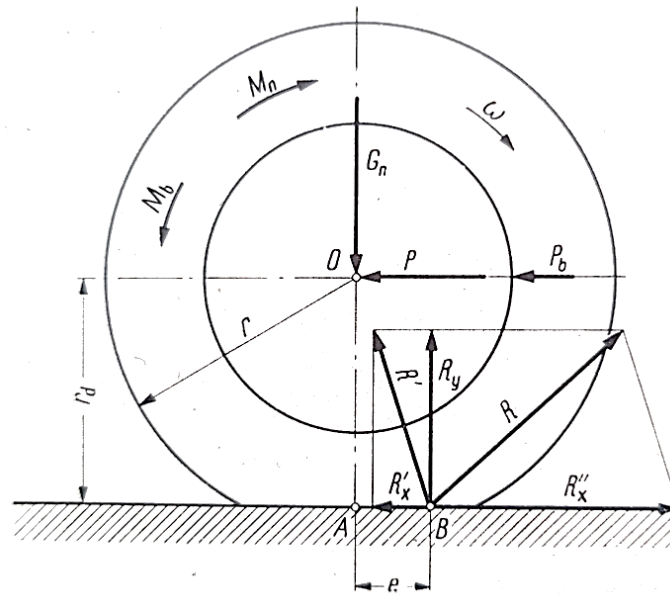
Analizę sił działających na samo koło pojazdu rolniczego należy przeprowadzić dla dwóch głównych przypadków. Pierwszym z nich jest toczenie się koła nienapędzanego. Przykład takiego układu sił i momentów (na podłożu sztywnym) został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Układ sił działających na koło nienapędzane na podłożu odkształcalnym [źródło: Dajniak 1979]

Zgodnie z rysunkiem 3 na koło toczone na podłożu odkształcalnym działa siła wynikająca z obciążenia pionowego (jest ona zależna od ciężaru pojazdu i rozkładu obciążenia na osie). Siła ta powoduje powstanie pionowej reakcji na styku koła z podłożem. W osi koła jest przyłożona siła  $P_t$  nazywana siłą pchającą – wynika ona z napierania pojazdu na oś. Na styku koła z podłożem występuje siła oporu toczenia koła – wynika ona z deformacji podłoża i ogumienia. Siła oporu toczenia oraz reakcji pionowej tworzą razem wypadkową ( $R$ ). Dodatkowo, w przypadku ruchu niejednostajnego (przyspieszanie lub wytracanie prędkości) na koło w osi działa siła bezwładności ( $P_b$ ) oraz moment bezwładności ( $M_b$ ) [Dajniak 1979, Prochowski 2016]. W praktyce korzystne warunki toczenia koła występują gdy siła oporu przetaczania ma możliwie małą wartość, a koło przemieszcza się ruchem ustalonym. Niestety w warunkach polowych odkształcalność podłoża jest najczęściej większa niż w warunkach drogowych, toteż wartości oporu przetaczania wpływają negatywnie na proces toczenia koła (zwiększają straty energii).

Odrębnym przypadkiem jest dynamika koła napędzanego. Układ sił i momentów działających na takie koło na podłożu odkształcalnym przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Układ sił i momentów działających na koło napędzane na podłożu odkształcalnym [źródło: Dajniak 1979]

Główną różnicą między dynamiką koła napędzanego, a nienapędzanego jest występowanie momentu obrotowego. W kole nienapędzanym taki moment nie występuje, zaś w kole napędzanym jest przyłożony do koła (wcześniej zostaje on przeniesiony z silnika pojazdu poprzez elementy układu napędowego). Przyłożenie momentu do koła powoduje wystąpienie poziomej siły reakcji na styku koła z podłożem (siła  $R_x''$ ). Jednocześnie na styku koła z podłożem działa również siła przeciwna do kierunku ruchu będąca efektem występowania oporu przetaczania. Tak, jak w przypadku koła nienapędzanego siła ta jest zależna od deformacji podłoża i opony. W płaszczyźnie pionowej możemy wyróżnić siłę obciążenia pionowego ( $G_n$ ) oraz reakcję na tę siłę ( $R_y$ ). W osi koła występuje również siła pozioma ( $P$ ), która jest efektem oddziaływania koła na elementy pojazdu – w praktyce ta siła jest równa sile uciągu, czyli użytecznej sile pojazdu [Dajniak 1985].

### 2.2.2 Pojęcie przyczepności

Koło napędowe (napędzane) służy do wywołania ruchu pojazdu w wyniku kontaktu z podłożem i przeniesienia siły będącej efektem przyłożenia momentu napędowego (obrotowego). Siła ta nosi nazwę siły trakcyjnej, siły napędowej lub siły jazdy (z ang. *driving*

force). Jej wielkość jest uzależniona wprost od wartości momentu obrotowego przyłożonego do koła, zgodnie ze wzorem 1:

$$P_T = \frac{M_o}{r_D} \quad (1)$$

gdzie:

$P_T$  – siła trakcyjna, N,

$M_o$  – moment obrotowy przyłożony do koła, Nm,

$r_D$  – promień dynamiczny koła, m.

Z powyższego równania wynika, że dla danego koła, przy promieniu zmieniającym się w niewielkim zakresie, wzrost momentu napędowego spowoduje wzrost siły trakcyjnej. Użyty we wzorze 1 promień dynamiczny jest parametrem wykorzystywanym do analizy dynamiki koła. Wartość tego promienia jest mniejsza niż promienia statycznego (geometrycznego) koła [Kiss 2003, Warczek 2010]. Dzieje się tak dlatego, iż uwzględnia ona deformację zarówno koła, jak i podłoża. Co za tym idzie zmniejszeniu ulega odległość między osią koła, a punktem przyłożenia siły trakcyjnej. To właśnie ta odległość stanowi wartość promienia dynamicznego.

Przenoszenie siły trakcyjnej na podłoże jest zależne nie tylko od parametrów pojazdu ale przede wszystkim od parametrów samego podłoża. Ma to szczególne znaczenie w przypadku pojazdów rolniczych, które są przystosowane zarówno do ruchu po podłożach o małej odkształcalności, jak i podłożach w dużym stopniu odkształcalnych.

Na podłożach odkształcalnych przenoszenie siły trakcyjnej odbywa się poprzez tzw. proces ścinania podłoża. W pewnym uproszczeniu polega ono na tym, że występy bieżnika opony zagłębiają się w podłoże skutkiem czego są w stanie wywrzeć nacisk na powstałe w ten sposób ścianki zagłębienia. W efekcie koło jest w stanie się przemieszczać [Bauer i in. 2013]. Zdolność podłoża do przeniesienia siły pochodzącej od momentu przyłożonego do koła determinuje warunki jego eksploatacji - przy małej wytrzymałości mechanicznej może bowiem dojść do zerwania (ścięcia) warstwy podłoża i przesunięcia jej w kierunku przeciwnym do założonego kierunku ruchu koła. Mówimy wówczas o tzw. zerwaniu przyczepności. Niestety zjawisko to jest niekorzystne z dwóch powodów. Po pierwsze dochodzi do zjawiska poślizgu koła, które jest jednym z powodów strat energii w układzie „koło – podłoże”. Po drugie zaś

przesuwanie warstw podłoża skutkuje degradacją jego struktury, co może mieć szczególne znaczenie w przypadku wielu podłoży użytkowanych rolniczo (np. zniszczenie warstwy korzeniowej roślin uprawnych). W zależności od rodzaju podłoża, na jakim są eksploatowane ciągniki zalecane są pewne sposoby poprawy ich przyczepności bazujące na równaniu Coulomba-Mohra [Kaczmarczyk, Czurczak 2020] opisującym wielkość naprężeń stycznych - w tym wypadku pochodzących od przyłożonego momentu napędowego (wzór 2).

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (2)$$

gdzie:

$\tau$  – naprężenia styczne na styku koła z podłożem, Pa,

$c$  – spójność podłoża, Pa,

$\sigma$  - naprężenia normalne podłoża, Pa,

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego podłoża, °

Jeżeli we wzorze 2 obie strony równania zostaną pomnożone przez powierzchnię styku kół z podłożem, to uzyskana zostanie formuła opisująca wielkość siły trakcyjnej w zależności od parametrów podłoża:

$$P_T = c \cdot A + G \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (3)$$

gdzie:

$P_T$  – siła na styku koła z podłożem (siła przyczepności), N,

$c$  – spójność podłoża, Pa,

$A$  – powierzchnia styku koła z podłożem, m<sup>2</sup>,

$G$  – obciążenie pionowe koła, N,

$\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego podłoża, °

Zgodnie z powyższym równaniem można wskazać dwa główne kierunki zwiększania siły przyczepności – pierwszym z nich jest zwiększenie powierzchni kontaktu kół z podłożem, zaś drugim – zwiększenie pionowej siły obciążającej koło. Pierwszy ze sposobów da lepsze efekty (większy przyrost siły trakcyjnej) na podłożach o dużej spójności (np. glina). Technicznie jest on realizowany poprzez zastosowanie kół o większej szerokości bieżnika bądź

obniżenie ciśnienia powietrza w oponach. Drugi natomiast sposób jest zalecany na podłożach o dużym tarciu wewnętrznym (np. piasek). W tym przypadku polega on na zamontowaniu dodatkowych obciążników [Kezdi 1969].

W przypadku podłoży o małej odkształcalności przenoszenie siły trakcyjnej odbywa się poprzez siłę tarcia występującą na styku opony z podłożem. Pojazdy rolnicze z takimi sytuacjami mają do czynienia w trakcie prac transportowych. Na podłożach o małej odkształcalności przenoszenie siły napędowej zachodzi w odmienny sposób niż na podłożach odkształcalnych. Możliwość przemieszczania się pojazdu uzależniona jest od uzyskania większej wartości siły napędowej w porównaniu z siłami stanowiącymi opory tego ruchu co wynika z bilansu sił działających na ten pojazd. Przeniesieniu napędu na układ jezdny towarzyszą różne zjawiska począwszy od strat sprawności, strat mocy, oddziaływania koła na podłoże czy poślizgu. Z uwagi na opisane we wstępie główne zastosowanie pojazdów rolniczych do prac polowych, większość badań związanych z mechaniką układu koło - podłoże ukierunkowane jest na oddziaływanie koła na nawierzchnie rolnicze, odkształcalne. O ile w przypadku pojazdów typowo drogowych (samochodowych) zależność przyczepności od czynników eksploatacyjnych i zewnętrznych jest opisana w wystarczający sposób w wielu publikacjach to nie da się tego samego stwierdzić o badaniach nad kołami pojazdów rolniczych. Przenoszenie sił stycznych pomiędzy oponą, a nawierzchnią jezdni sprowadza się do tego, że powstające podczas tego kontaktu zjawisko poślizgu względnego koła jest zależne od wartości siły przyczepności, która pozwala przy znanym obciążeniu pionowym na wyznaczenie współczynnika przyczepności. W celu określenia tego parametru można zastosować model uproszczony przedstawiający bezwymiarowy współczynnik przyczepności  $\mu$  jako zależność siły wypadkowej stycznej do podłoża ( $P_T$ ) od pionowego obciążenia ( $G$ ), opisuje się ją zgodnie ze wzorem 4:

$$P_T = \mu \cdot G \quad (4)$$

Pomiędzy poślizgiem wzdłużnym na kole hamowanym gdzie  $r\omega < V_0$  i napędzanym gdzie  $r\omega > V_0$  występuje pewne rozróżnienie, które definiuje się jako tzw. różnicę prędkości transportu  $V_t = r\omega$  i prędkości ruchu środka koła  $V_0$  podzieloną przez większą z nich [Mitschke 1987]:

$$S = \frac{r\omega - V_0}{\max(r|\omega|, |V_0|)} \quad (5)$$



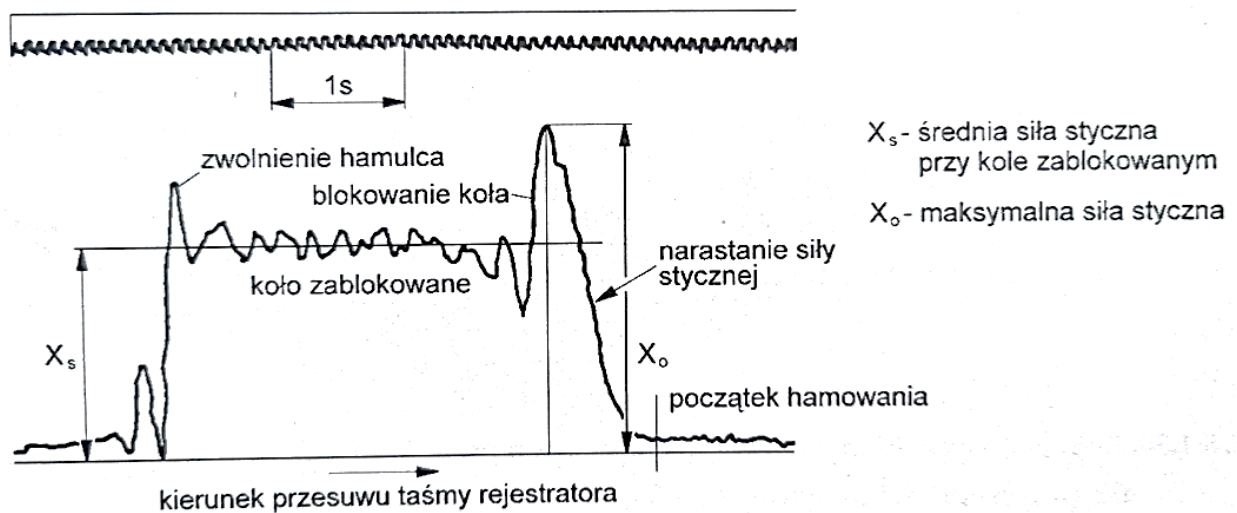
gdzie:

$\omega$  – chwilowa prędkość kątowa koła hamowanego lub napędzanego,

$r$  – promień koła,

$V_0$  – prędkość ruchu środka koła

Podczas hamowania koła nienapędzonego zmiany przebiegu wartości siły stycznej  $X$  zarejestrowanej podczas badań przedstawiono następująco:



Rys. 5. Przebieg zmian wartości siły stycznej  $X$  podczas hamowania koła nienapędzonego ze stałą prędkością [Wierciński 1985].

Jak można zauważyć na tym zarejestrowanym zapisie przebiegu wartości siły stycznej podczas hamowania koła, wartość tej siły narasta do momentu zablokowania koła i po osiągnięciu maksymalnej wartości  $X_0$  spada do pewnej średniej wartości  $X_s$ . Przebieg ten przy stałej wartości obciążenia pionowego koła obrazuje jednocześnie przebieg zmian wartości współczynnika przyczepności przy zablokowanym kole. Obraz ten ukazuje zatem dwie charakterystyczne wartości współczynnika przyczepności – maksymalną, którą określa się jako współczynnik przyczepności przylgowej  $\mu_p$  występującą przy toczącym się kole z częściowym poślizgiem względnym oraz pewnej wartości średniej, która przedstawia wartość współczynnika przyczepności ślizgowej  $\mu_s$  kiedy koło jest zablokowane, a więc poślizg względny wynosi 100% ( $s = 1$ ).

W tabeli 1 przedstawiono najczęściej występujące zakresy współczynnika przyczepności wg różnych danych literaturowych oraz badań Instytutu Ekspertyz Sądowych [Wierciński, Reza 2011]

Rodzaj i stan nawierzchni		Współczynnik przyczepności	
		przyłgowej $\mu_p$	ślizgowej $\mu_s$
Beton	suchy	0,8–1,08	0,7–0,9
	mokry	0,25–0,75	0,15–0,65
Asfalt	suchy	0,7–1,08	0,6–0,9
	mokry	0,4–0,6	0,3–0,5
Kostka kamienna czysta	sucha	0,7–0,8	
	mokra	0,4–0,5	
Kostka kamienna zakurzona	sucha	0,6–0,7	
	mokra	0,25–0,35	
Klinkier	suchy	0,7–0,8	
	mokry	0,4–0,5	
Droga gruntowa twarda	sucha	0,5–0,6	0,2–0,3
	mokra	0,3–0,4	0,2–0,3
Żwir		0,45	0,5
Droga pokryta śniegiem		0,1–0,4	0,1–0,3
Droga oblodzona		0,05–0,15	0,05–0,2

Tab. 1. Zakresy współczynnika przyczepności przyłgowej i ślizgowej najczęściej występującego w literaturze naukowej.

Jak podaje Wierciński i Reza [2011], bardzo często przedstawione w badaniach wyniki uzyskanych wartości współczynników przyczepności zawierają się w stosunkowo szerokich zakresach co spowodowane jest małą powtarzalnością wyników pomiarów, które zależą od warunków i metod badań. Wartość współczynnika przyczepności zależy także od rodzaju i stanu nawierzchni, poślizgu względnego, typu i materiału opony, rzeźby bieżnika, prędkości jazdy, nacisku jednostkowego na nawierzchnię itp. [Arczyński 1994].

### 2.2.3 Charakterystyka procesu hamowania

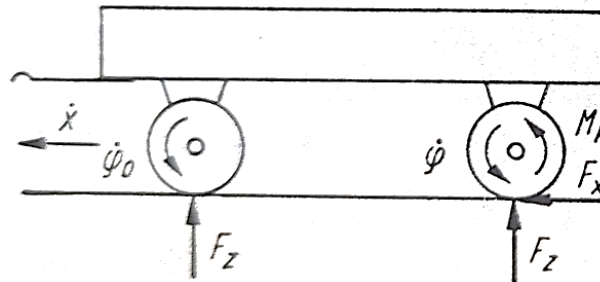
Opisanie parametrów ruchu pojazdu można przeprowadzić dokonując analizy bilansu energii, sił lub równoważnej im mocy. Przyjmując, że pojazd stoi na płaskim, równym terenie

i nie działają na niego istotne siły zewnętrzne, które mogłyby wprawić go w ruch, to jego ruszenie z miejsca wywoływane jest siłą napędową przeniesioną od silnika do kół. Siła ta musi oczywiście być na tyle duża aby przeciwdziałać się siłom oporu powietrza, toczenia czy bezwładności masy pojazdu. Każdy pojazd kołowy porusza się po nawierzchni drogi kontaktując się z jego nawierzchnią wyłącznie poprzez powierzchnię kół, a jego ruch można opisać jako przyspieszony w fazie napędzania, jednostajny lub opóźniony podczas procesu hamowania. Jeżeli pojazd porusza się ze stałą prędkością czyli nie jest ani napędzany ani hamowany to pomijając sytuację oporu wzniesienia i pomijalny wpływ oporu toczenia, na jego koła nie działają istotne siły i obracają się one z pewną prędkością kątową stojącą w zależności z prędkością liniową pojazdu. Można przyjąć, że w ruchu jednostajnym stateczność i sterowność nad pojazdem jest w pełni zachowana nawet w przypadku zmiennego stanu nawierzchni drogi, pojazd porusza się zadaniem przez kierującego torem ruchu, nie występują negatywne, niebezpieczne zjawiska [Anioła i in. 2000]. Jeżeli jednak podczas jazdy kierujący pojazdem z przyczyn wynikłych z warunków drogowych lub na skutek zaistnienia sytuacji nietypowej, sytuacji zagrożenia, rozpocznie proces hamowania to oddziaływanie kół na nawierzchnię diametralnie się zmienia i wraz z pojawieniem się obciążenia kół momentem zmieniającym wartość siły obwodowej oraz ich prędkości obrotowej dochodzi do powstania niepożądanych zjawisk poślizgu, a to może doprowadzić do znoszenia pojazdu poza zadany tor ruchu. Jak wspomniano powyżej, zjawiska te są ściśle powiązane z przyczepnością kół do nawierzchni. Powyżej na rysunku 5, przedstawiono przebieg hamowania i zmiany narastania wartości siły stycznej podczas tego procesu. Opisano także, że po osiągnięciu maksymalnej wartości siły stycznej dochodzi do zerwania przyczepności kół i powstaje zjawisko ich ślizgu co doprowadza do zmniejszenia wartości tej siły w związku ze zmniejszeniem przyczepności. W takiej sytuacji przenoszona przez koła siłę ( $F_{x_s}$ ) można także przedstawić jako iloczyn współczynnika przyczepności ślizgowej ( $\mu_2$ ) i nacisku koła ( $F_z$ ):

$$F_{x_s} = \mu_2 \cdot F_z \quad (6)$$

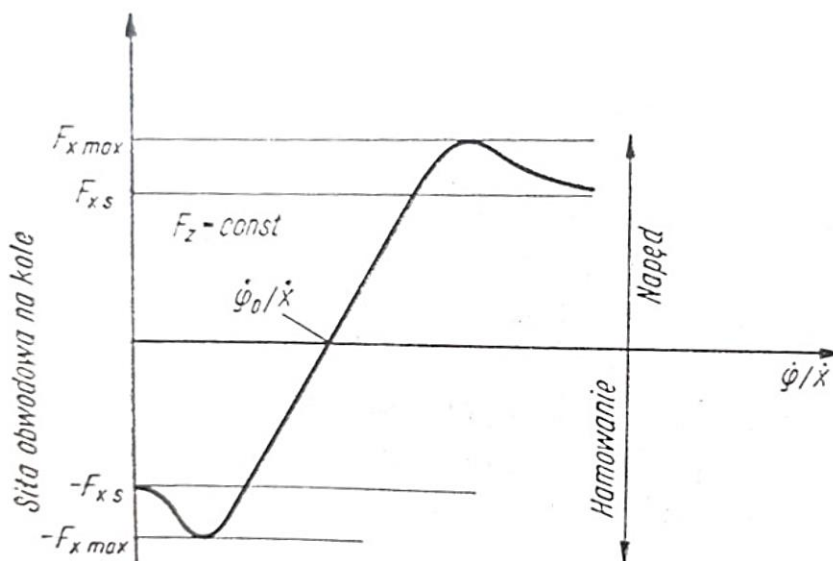
W związku z powyższym, dla takiej samej prędkości postępowej osi kół z uwagi na ich różne wartości prędkości kątowych mogą powstawać różne wartości sił obwodowych. Powstałe podczas hamowania na kole swobodnie toczącym się i kole napędowym siły

i momenty przedstawiono na rysunku 6, gdzie pokazano schemat hamowania koła toczącego się swobodnie i koła napędowego przyczepy.



Rys. 6. Przedstawienie sił obwodowych, prędkości kątowych i momentów na kole toczącym się swobodnie i jednym hamowanym lub napędzanym przy tym samym nacisku pionowym  $F_z$  każdego z kół.

Na rysunku 6, przedstawiono siły i momenty występujące przy takiej samej prędkości postępowej osi kół ( $\dot{x}$ ) gdzie to znajdujące się z przodu przyczepy jako swobodnie toczące się nie jest obciążone momentem i obraca się z pewną prędkością kątową ( $\dot{\varphi}_0$ ), a koło na tylnej osi obciążone momentem ( $M_k$ ) obraca się z prędkością ( $\dot{\varphi}$ ). Jeżeli na oba koła działa taka sama siła nacisku pionowego ( $F_z$ ) i zmieniający jest moment  $M_k$  to przy pominięciu oporu toczenia zmienia się także prędkość kątowa ( $\dot{\varphi}$ ). Przebieg tej siły obwodowej na kołach można przedstawić na wykresie w funkcji prędkości kątowej koła ( $\dot{\varphi}$ ) odniesionej do takiej samej prędkości postępowej obu kół ( $\dot{x}$ ).

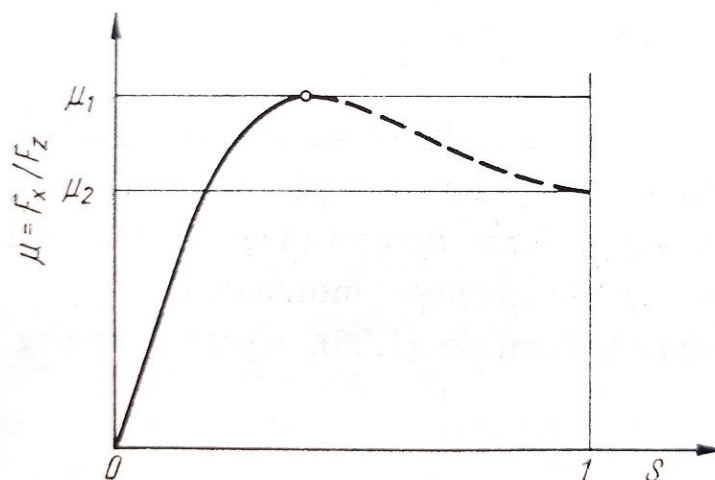


Rys. 7. Przebieg siły obwodowej na kole w funkcji prędkości kątowej  $\dot{\varphi}$  odniesionej do prędkości  $\dot{x}$ .

Z wykresu na rysunku 7 można odczytać, że dla małych dodatnich lub ujemnych wartości sił obwodowych czyli przy małych siłach napędowych lub hamujących, zależność pomiędzy siłą obwodową, a prędkością kątową i postępową kół ma przebieg prawie liniowy. Zależność ta staje się degresywna po przekroczeniu maksymalnej wartości siły obwodowej. Jak wynika ze wzoru (6), współczynnik przyczepności  $\mu$  jest zależny od wartości siły obwodowej działającej na koło ( $F_x$ ), którą również opisuje się jako siłę przyczepności koła do podłoża, oraz od wartości nacisku tego koła na podłoża ( $F_z$ ). Można zatem zapisać bezwymiarowy współczynnik przyczepności w następujący sposób:

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (7)$$

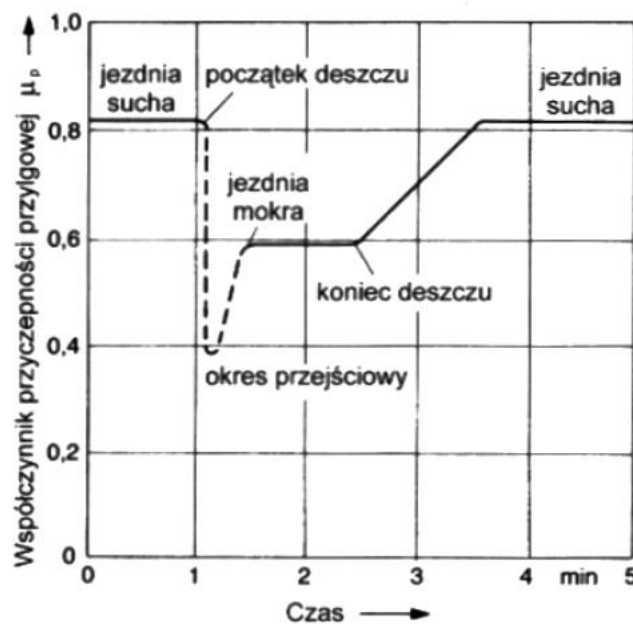
Z uwagi na to, że współczynnik przyczepności ( $\mu$ ) jest funkcją poślizgu ( $S$ ), a jej przebieg jest w przybliżeniu taki sam dla napędu i hamowania to zależność tych dwóch parametrów można przedstawić na wykresie w następujący sposób:



Rys. 8. Wykres zależności współczynnika przyczepności  $\mu$  od poślizgu  $S$ .

Z powyższych wzorów i przebiegów wynika, że w procesie hamowania występują trzy fazy. Wyodrębnić można fazę narastania wartości siły przyczepności działającej na koło, co w literaturze opisywane jest także jako faza narastania opóźnienia hamowania [red. Wierciński J., Reza A. 2011], chwila osiągnięcia maksymalnej wartości siły przyczepności oraz faza spadku tej siły do pewnej wartości ślizgowej koła.

Z uwagi na fakt, że hamowanie zależy zarówno od powstałej na kołach siły jak i od przyczepności tych kół, proces hamowania można rozpatrywać pod kątem wielu czynników techniczno-eksploatacyjnych zależnych od rodzaju i sprawności hamulców [Świder P. Wach W. Ziaja M. 1994], rodzaju nawierzchni [Lewandowski A. 2002] czy na przykład rodzaju ogumienia i jego właściwości [Jędrzejczak A. 1980] [Jaworski J. 1987] ale także pod kątem czynników związanych ze zmieniającymi się warunkami zewnętrznymi takimi jak stan nawierzchni [Wrzesiński T. 1973]. Jak wynika bowiem z przeprowadzonych badań, zarówno na mokrej nawierzchni [Navin F. 1995] jak i na nawierzchni zmrożonej lub pokrytej lodem [Reimpell J., Sponagel P. 1988], dochodzi do znacznego zmniejszenia wartości współczynnika przyczepności kół. Jak się okazuje, w przypadku nawierzchni mokrej wpływ na proces hamowania ma nie tylko grubość warstwy wody, która prowadzi do negatywnego zjawiska aquaplaningu [Pokorski J., Szwabik B. 1998] ale także od czasu zalegania wody na nawierzchni drogi. Znaczny spadek przyczepności kół ogumionych do jezdni występuje wtedy już na chwilę po wystąpieniu opadów deszczu co przedstawia wykres na rysunku 9.



Rys. 9. Spadek współczynnika przyczepności przylgowej zależna od czasu zalegania wody na drodze [Świder P., Janczur R. 2011]

Z wykresu przedstawionego na rysunku 9 wynika, że dla badania przyczepności kół i powiązanego z tym zjawiskiem współczynnika przyczepności w przypadku nawierzchni mokrych znaczenie ma nie tylko sam fakt występowania wody czy wielkość jej warstwy ale i czas jej zalegania na drodze, co wynika z faktu zmiany położenia wody na drodze w związku

z ruchem przejeżdżających po niej pojazdów, nachyleniem nawierzchni drogi czy jej splukiwanie i wysychanie. Wyniki pomiarów hamowania, a więc ustalenia maksymalnej przyczepności na takiej nawierzchni mogą zatem różnić się od siebie w zależności od miejsca pomiaru i czasu jaki minął od początku deszczu. Utrzymanie takiej samej wilgotności nawierzchni podczas kolejnych badań (prób) wydaje się zatem bardzo trudne, stąd możliwe są pewne różnice w otrzymywanych wynikach.

### **2.3 Wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na przyczepność koła pojazdu rolniczego – wyniki badań naukowych**

Zależności pomiędzy parametrami eksploatacyjno-technicznymi a właściwościami trakcyjnymi były przedmiotem wielu badań naukowych w dziedzinie nazwanej terramechaniką. Badania te można podzielić ze względu na kilka kryteriów. Pierwszym z nich jest sposób prowadzenia eksperymentów – wyróżnia się tu badania laboratoryjne, w których w warunkach sztucznych (laboratoryjnych) symuluje się pewne stany użytkowania koła pojazdu a wyniki eksperymentu odnosi się do warunków rzeczywistych – przykładem może być tu np. badanie przyczepności koła w kanale glebowym. Drugą grupę badań stanowią badania polowe – te prowadzone są w warunkach rzeczywistych, a badane koło zamontowane jest w pojeździe o konstrukcji niezmienionej w porównaniu do standardowych warunków użytkowania [Vantsevich 2008, Tiwari 2009].

Drugie kryterium podziału badań z zakresu terramechaniki uwzględnia rodzaj analizowanych parametrów. W pierwszej grupie badań wyróżnia się eksperymenty opisujące zależności pomiędzy przyjętymi czynnikami, a właściwościami trakcyjnymi koła takimi jak siła przyczepności, siła trakcyjna, współczynnik oporów przetaczania, poślizg, siła uciągu. W drugiej zaś grupie badań w opisywanym kryterium podziału uwzględnia się natomiast wpływ czynników (najczęściej parametrów techniczno-eksploatacyjnych) na oddziaływanie koła na wybrane podłoża. Te badania są charakterystyczne dla podłoży rolniczych, a ich celem jest wykazanie czy dane warunki eksploatacji nie przyczyniają się do nadmiernego zagęszczania gleby.

Kolejne kryterium podziału badań dotyczy charakteru eksperymentu. W tym podziale wyróżnia się badania statyczne, w których koło nie wykonuje ruchu postępowego i nie ma przyłożonego momentu obrotowego. Ten typ badań najczęściej jest stosowany do oceny

oddziaływania koła na podłoża. Z kolei druga grupa badań to badania dynamiczne, gdzie celowo wymuszany jest ruch koła (w przyłożonym momencie lub tylko poprzez swobodne toczenie). To właśnie ten typ eksperymentów jest najczęściej stosowany do oceny właściwości trakcyjnych takich jak siła przyczepności, opór przetaczania, poślizg czy sprawność trakcyjna [Turner 1993].

Kolejne kryterium podziału badań z zakresu terramechaniki jest związane z samą techniką pomiarową i metodyką badań. Po części podział ten wynika z podziału badań na laboratoryjne i polowe. Osobną kwestię stanowi natomiast metodyka opracowania i analizy uzyskanych wyników. Jeżeli chodzi o zastosowaną aparaturę, to w badaniach polowych przeważają eksperymenty prowadzone z udziałem rzeczywistych ciągników wyposażonych w odpowiednie czujniki. Jeśli celem jest pomiar siły uciągu, to stosuje się zestawy składające z dwóch ciągników połączonych holem sztywnym, w którym montuje się siłomierz. Jednocześnie mierzona jest prędkość jazdy (rzeczywista) oraz prędkości obrotowa koła napędowego (przeliczania na tzw. prędkości teoretyczną), co pozwala na obliczenie poślizgu koła. Dysponując takim zestawem danych można obliczyć praktycznie wszystkie najważniejsze parametry trakcyjne, takie jak sprawność trakcyjna, opór przetaczania, moc całkowita koła, moc uciągu, moc tracona na opór przetaczania i moc tracona na poślizg. Takie badania prowadzili m.in. Zoz [1979], Taylor [1988], Zoz [2002], Turner [1993], Zoz i Turner [1994] czy Raheman i Jha [2006]. Drugą grupę stanowią badania w kanale glebowym co jest charakterystyczne dla eksperymentów prowadzonych w warunkach laboratoryjnych. W tym przypadku koło jest toczone w kanale wypełnionym glebą i wykonywany jest pomiar siły uciągu oporu przetaczania czy prędkości rzeczywistej i teoretycznej. Przykładami badań tego typu są m.in. eksperymenty prowadzone przez Taghavifara i Mardaniego (2013) czy Gharibkhaniego i in. (2012). Z racji tego, że badania w kanale glebowym są obarczone pewnymi wadami (m.in. trudność w odwzorowaniu rzeczywistych warunków polowych) są one obecnie prowadzone rzadziej niż nadania w warunkach rzeczywistych. Mogą być np. stosowane w części rozpoznawczej całego cyklu badań (przed przeprowadzeniem części polowej eksperymentu).

Osobną kwestię stanowi metodyka opracowania wyników. W starszych badaniach z zakresu terramechaniki używano prostych technik obliczeniowych pozwalających na obliczenie parametrów trakcyjnych z uzyskanych wyników pomiarów, jednak komputeryzacja sprawiła, iż obecnie coraz częściej korzysta się z zaawansowanych programów, które umożliwiają nie tylko podanie samych wyników ale również opracowanie modeli matematycznych opisujących zależności pomiędzy czynnikami eksperymentu,



a analizowanymi parametrami trakcyjnymi. Przykładami prac, w których przeprowadzono modelowanie są prace Mohsenimanesha i in. [2009], Sharmy i Pandey [1997], Abd-El-Gawwada [1998, 1999], Błaszkiwiczka i Szafarza [2009], Rebatiego i Longhavi [2006], Carmana [2003]. W ostatnich latach coraz popularniejszym narzędziem w opracowaniu modeli opisujących współpracę koła napędowego z glebą jest metoda elementów skończonych (MES, FEM) – zastosowaniem takiej techniki zajmował się Xia K. [2010]. W opracowaniu wyników pomiarów używa się również coraz częściej sztucznych sieci neuronowych (SSN, ANN) [Yadav, Raheman 2023], [Taghavifar i in. 2015], [Pentoś, Pieczarka 2017].

Czynniki, które uwzględnia się podczas badań z zakresu terramechaniki można podzielić na techniczno–eksploatacyjne (obciążenie pionowe koła, ciśnienie powietrza w ogumieniu, rodzaj bieżnika, wymiary opony) oraz te, które są związane z podłożem (zwięzłość, spójność, wytrzymałość na naprężenia styczne, stopień pokrycia roślinnością) [Zoz 1979, 2003], [Wulfsohn 2009].

### **2.3.1 Obciążenie pionowe koła, a właściwości trakcyjne**

Obciążenie pionowe stanowi siłę pionową przypadającą na koło; w warunkach statycznych kierunek działania tej siły przechodzi przez oś koła. Wartość siły obciążenia pionowego wynika wprost w ciężaru pojazdu i rozkładu tego ciężaru na osie [Dajniak 1979, Zoz 2003, Jakliński 2006]. Obciążenie pionowe jest jednym z głównych czynników uwzględnianych w badaniach z zakresu terramechaniki.

W literaturze problematyka wpływu obciążenia pionowego na właściwości trakcyjne jest szeroko rozpoznana. W licznych publikacjach wykazywano polepszenie parametrów trakcyjnych na skutek zwiększenia obciążenia (tzw. dociążanie). Pranav i Pandey [2008] badali wpływ zmian obciążenia na właściwości uciągowie agregatów polowych i wykazali, że zwiększenie obciążenia pozwala na spadek poślizgu kół ciągnika oraz wzrost sprawności trakcyjnej. Stoilov i Kostadinov [2009] również badali wpływ obciążenia kół napędowych na właściwości uciągowie – wykazali, że prawidłowy dobór obciążenia na przedniej i tylnej osi pojazdu roboczego pozwala na zwiększenie sprawności trakcyjnej i spadek poślizgu – opracowali w tym celu współczynnik, który informuje o rozkładzie obciążenia i podali jego optymalne wartości. Jednak Serrano i in. [2009] wykazali, że przy niektórych pracach polowych dociążenie opon poprzez napełnienie ich płynem skutkuje nawet 5-10% zwiększenie

zużycia energii przez koło ciągnika w efekcie czego rośnie zużycie paliwa. Musonda i in. [1989] badali natomiast wpływ różnych wariantów obciążenia stosowanych w ciągniku wyposażonym w opony pojedyncze i podwójne – określany był wpływ tych zmian na sprawność trakcyjną. Wykazali, że dociążenie kół może skutkować wzrostem sprawności nawet o 20 punktów procentowych (17%). Wertz i in. [1990] zbadali kilka ciągników rolniczych przy pracach polowych i wykazali, że te ciągniki, które miały osie obciążone zgodnie z zaleceniami producentów wykazywały wyższą siłę uciągu i sprawność w porównaniu z ciągnikami obciążonymi niezgodnie z zaleceniami. Podobne stwierdzenia i zalecenia można znaleźć w pracy Zoz i in [1995]. Z kolei Burt i in. [1983] wykazali, że zwiększanie obciążenia pionowego pozwala na polepszenie parametrów trakcyjnych (wzrost sprawności trakcyjnej) jedynie przy jednoczesnym kontrolowaniu ciśnienia powietrza w oponach. Wykazali również, iż dociążanie daje lepsze efekty dla opon radialnych. Kim i in. [2005] badali wpływ czynników na właściwości trakcyjne ciągników o różnych masach i wykazali, że większe obciążenie osi w większości przypadków sprzyja poprawie właściwości uciągowych (umożliwia uzyskanie większej siły uciągu). Gee-Clough i in. [1982] badali natomiast dwie opony ciągnikowe o różnych rozmiarach poddane różnym obciążeniom pionowym w wyniku wlewania cieczy do ich wnętrza. Wykazali, że odpowiednie balastowanie koła pozwala na wzrost sprawności trakcyjnej, przy czym przesunięciu ulega punkt osiągnięcia tej sprawności (przy wyższych obciążeniach jest ona osiągnięta przy niższym poślizgu koła). W pracy Jadhav i in. [2013] przedstawiono wyniki badań ciągników wyposażonych w opony o różnych obciążeniach pionowych i ciśnieniach pompowania; badania były prowadzone w warunkach polowych a eksperyment obejmował m.in. pomiar siły uciągu oraz wyznaczenie poślizgu przy dwóch zabiegach agrotechnicznych. Wykazano, że w większości przypadków dociążenie kół pozwala na osiągnięcie większych wartości sprawności trakcyjnej (nawet o kilkanaście punktów procentowych). Serano i in. [2008] analizowali dwa główne sposoby poprawy właściwości trakcyjnych w postaci zwiększania obciążenia i obniżania ciśnienia pompowania opon. Wykazali, że jedynie ten drugi sposób okazał się efektywny w przypadku badanego agregatu ciągnikowego, ponieważ koło poddane większemu obciążeniu pionowemu cechowało się większymi stratami energetycznymi (zapewne związane to było ze zwiększonym oporem przetaczania). Taghavifar i Mardani [2013] prowadzili natomiast badania koła w kanale glebowym przy różnych wartościach obciążeń i ciśnień pompowania. Analizowali wpływ zmian tych czynników na wartości oporu przetaczania i wykazali, że niezależnie od ciśnienia pompowania i prędkości jazdy zwiększenie obciążenia pionowego skutkuje przyrostem siły oporu przetaczania, co ma związek z bardziej intensywnym zagęszczaniem podłoża glebowego.

Do podobnych wniosków doszli również Garibkhani i in. [2012], badali oni wpływ obciążenia na opór przetaczania koła ciągnika rolniczego. Janulevicius i Damanuskas [2022] przeprowadzili badania, w których analizowali wpływ szeregu czynników na możliwości zmniejszenia poślizgu kół napędowych ciągnika. Wykazali, że jeśli chodzi o obciążenie pionowe kół, to bardziej pozytywny efekt można osiągnąć poprzez dociążanie kół na osi tylnej – tam bowiem przyrost obciążenia skutkował większym przyrostem siły uciągu niż w przypadku kół na osi przedniej. W pracy Farhadi i in. [2020] również badane były różne czynniki eksploatacyjno-techniczne i ich wpływ na wybrane właściwości trakcyjne. Autorzy wykazali, że dociążanie kół powoduje co prawda przyrost oporu przetaczania, jednak jest on względnie mały w porównaniu do osiąganego jednocześnie spadku poślizgu koła. W efekcie po zwiększeniu obciążenia osiągnano zazwyczaj wyższe wartości sprawności trakcyjnej.

Z przedstawionego przeglądu literatury dotyczącej wpływu obciążenia na właściwości trakcyjne wynika, iż nie zawsze jest to czynnik korzystny. W większości prac wykazywano co prawda, że zwiększenie obciążenia pionowego skutkuje przyrostem siły trakcyjnej, spadkiem poślizgu koła, a zatem polepszeniem przyczepności, jednak równocześnie towarzyszy temu przyrost oporu przetaczania. W niektórych przypadkach tempo przyrostu oporu przetaczania może być większe niż tempo spadku poślizgu w efekcie czego sprawność trakcyjna po zwiększeniu obciążenia będzie ulegać spadkowi. Takie podejście uwzględnia jednak tylko aspekt energetyczny (mniejsza sprawność, to większe straty energii). Jeśli analiza wpływu dociążenia dotyczyć miałaby tylko aspektu bezpieczeństwa, to dociążanie należałoby uznać za czynnik korzystny, ponieważ wpływa on wprost na polepszenie przyczepności. W praktyce oznaczałoby to zwiększenie maksymalnej siły hamującej.

### **2.3.2 Ciśnienie powietrza w oponie, a właściwości trakcyjne**

Drugim czynnikiem, który jest bardzo często brany pod uwagę jako mogący mieć wpływ na właściwości trakcyjne jest ciśnienie powietrza w oponach pojazdu rolniczego. Obecnie ten parametr ma szczególne znaczenie, ponieważ w wielu współczesnych ciągnikach ciśnienie powietrza w ogumieniu może być zmieniane podczas jazdy – z wykorzystaniem systemów kontroli ciśnienia.

Ciśnienie powietrza (pompowania) było przedmiotem wielu publikacji naukowych z zakresu terramechaniki. W pracy Serrano i in. [2009] przedstawiono zależności pomiędzy

ciśnieniem powietrza w oponach ciągnika rolniczego a sprawnością trakcyjną. Wykazano, że zwiększenie ciśnienia powietrza o 25% skutkuje spadkiem sprawności trakcyjnej nawet o kilkanaście punktów procentowych, co w bezpośredni sposób przełoży się na zużycie paliwa przez silnik ciągnika (autorzy badali również ten aspekt). W pracy Juna i in. [2004] badaniu poddano opony o dwóch ciśnieniach pompowania (100 i 240 kPa) i oceniono wpływ ciśnienia na siłę uciągu i sprawność trakcyjną kół wyposażonych w te opony. Wykazano, że zwiększenie ciśnienia powoduje kilkunastoprocentowy spadek zarówno siły uciągu, jak i sprawności trakcyjnej. Elwaleed i in. [2006] osiągnęli bardzo podobne wyniki, przy czym badali dodatkowo opór przetaczania i wykazali, że wzrost ciśnienia pompowania powoduje co prawda spadek oporu przetaczania jednak jest on niewspółmiernie mały do wzrostu poślizgu, co w konsekwencji wpływa negatywnie na sprawność trakcyjną. Smerda i Cupera [2010] oceniali natomiast wpływ zmian ciśnienia powietrza w czterech rozmiarach opon na zmiany wartości współczynnika przyczepności i moc uciągu. Wykazali, że przy mniejszym ciśnieniu możliwe jest osiągnięcie większych wartości współczynnika przyczepności i mniejszego poślizgu. Jeśli chodzi o moc uciągu, to tu wpływ nie był aż tak duży, co zapewne było spowodowane faktem, iż przy zmniejszeniu ciśnienia rośnie opór przetaczania, który zabiera część mocy dostarczanej do koła. W badaniach Lee i Kim [1997] wyznaczono natomiast charakterystykę zmian współczynnika przyczepności oraz sprawności trakcyjnej w funkcji zmian ciśnienia pompowania w zakresie 70 – 160 kPa, przy różnych prędkościach jazdy ciągnika. Stwierdzono, że ciśnienie pompowania ma istotny wpływ na wartości współczynnika przyczepności (między skrajnymi wartościami ciśnienia różniły się one nawet o ponad 20%). Wpływ ciśnienia na sprawność trakcyjną okazał się nieco mniejszy z uwagi na przyrosty oporu przetaczania po zmniejszeniu ciśnienia pompowania. Gholkar i Salokhe [2009] badali zależności między ciśnieniem pompowania opon ciągnika (zastosowali trzy poziomy 130; 100 i 70 kPa) i oceniali wpływ tego parametru na moc uciągu. Wykazali, iż przy wyższych obciążeniach pionowych koła najkorzystniejsze jest zastosowanie ciśnienia pompowania 100 kPa, zaś przy najniższym obciążeniu pionowym najwyższe wartości mocy uciągu dotyczyły najwyższego ciśnienia pompowania – podobnie jak w poprzednio opisywanych przypadkach mogło to być spowodowane dużym przyrostem oporu przetaczania na skutek zmniejszenia ciśnienia pompowania – w takim przypadku znaczna część mocy jest tracona na pokonanie oporu przetaczania (deformacja opony) skutkiem czego moc uciągu ulega zmniejszeniu. Bart i in. [1983] oceniali wpływ redukcji ciśnienia powietrza w oponach na zmiany poślizgu i sprawności trakcyjnej. Analizując wyniki, stwierdzili, że zmniejszenie ciśnienia powietrza w oponie pozwala na osiągnięcie redukcji poślizgu nawet o kilkanaście punktów procentowych

(w zależności od podłoża, na którym prowadzone były badania – autorzy stosowali 3 rodzaje podłoży różniących się zwięzłością). Jednocześnie okazało się, że po zmniejszeniu ciśnienia możliwe jest osiągnięcie wyższej sprawności trakcyjnej, jednak ta tendencja dotyczyła jedynie wybranych podłoży o mniejszej zwięzłości (w przypadku podłoży bardziej zwięzłych dochodzi do zbyt dużych strat energii związanych z deformacją opony). Bashford i in. [1993] badali natomiast trzy ciągniki wyposażone w opony o różnych rozmiarach z różnymi wartościami ciśnień pompowania. Badania prowadzili na zaoranej glebie oraz ściernisku po pszenicy. Wykazali, iż zmniejszenie ciśnienia ze 124 do 55 kPa pozwala na znaczne zwiększenie sprawności trakcyjnej na obu analizowanych podłożach. Problematyka doboru ciśnienia w oponach ciągnika została przedstawiona również w pracy Zoza i Turnera [1994], gdzie przedstawiono różne przypadki opon ciągnikowych pompowanych zmiennymi wartościami ciśnień. Wykazano, że zmniejszenie ciśnienia powietrza w oponach, zwłaszcza na podłożach o dużej odkształcalności, skutkuje wzrostem sprawności trakcyjnej (do kilkunastu punktów procentowych) oraz zmniejszeniem poślizgu (o co najmniej kilka punktów procentowych). To właśnie w wymienionej publikacji pojawia się określenie „*overinflated tire*”, które oznacza oponę przepompowaną, czyli z takim ciśnieniem, które nie zapewnia wymaganych właściwości trakcyjnych. W pracy Battiato i Diserens [2013] badaniom poddano opony ciągnikowe napompowane do czterech poziomów ciśnienia (60, 90, 120 i 160 kPa) i wykazano, że redukcja ciśnienia może się okazać skutecznym sposobem na polepszenie właściwości trakcyjnych. Osiągnięto bowiem istotne spadki poślizgu, przyrosty współczynnika oporu przetaczania oraz znaczny wzrost mocy uciągu. Do podobnych spostrzeżeń doszli Jadhav i in. [2013], którzy przeprowadzali badania ciągnika z napędem na cztery koła użytkowanego podczas wybranych zabiegów agrotechnicznych. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy ci wykazali, że podczas zabiegu kultywatorowania zmniejszenie ciśnienia skutkowało relatywnie dużymi przyrostami sprawności trakcyjnej (rzędu kilkunastu punktów procentowych). Z kolei przy zabiegu orki zmiany te nie było już tak znaczące (maksymalnie kilka punktów procentowych). W pracy Taghavifara i Mardaniego [2013] analizowany był wpływ zmian ciśnienia pompowania opon ciągnikowych na zmiany oporu przetaczania, badania te prowadzone były na glebie, przy trzech różnych prędkościach jazdy ciągnika. Autorzy wykazali, iż niezależnie od prędkości jazdy zmniejszanie ciśnienia powietrza w oponach skutkuje przyrostem oporu przetaczania (różnica między skrajnymi poziomami ciśnienia dochodziła do 150 N co odpowiadało ok. 70% przyrostowi). Bardzo podobne zależności zostały przedstawione przez Gharibkhaniego i in. [2012], którzy badali pojedynczą oponę ciągnikową w kanale glebowym, przy zadanych sześciu wartościach ciśnienia pompowania (od 30 do 210 kPa). Autorzy

wykazali, że zwłaszcza przy pierwszych trzech najniższych poziomach ciśnienia dochodzi do znacznego wzrostu oporu przetaczania badanego koła – tendencja ta była widoczna przede wszystkim przy wysokich wartościach obciążenia pionowego. Zaznaczyć jednak należy, iż sama analiza zmian oporu przetaczania może się okazać niewystarczająca dla oceny efektów zmniejszenia ciśnienia pompowania. Należy jeszcze bowiem brać pod uwagę potencjalne zmniejszenie poślizgu, którego tempo spadku może okazać się większe niż tempo przyrostu oporu toczenia. W efekcie może okazać się, że po zmniejszeniu ciśnienia, pomimo przyrostu oporu toczenia sprawność trakcyjna nie będzie ulegać spadkowi, a może nawet rosnąć. To z jakim przypadkiem będziemy mieli do czynienia zależne jest od warunków glebowych (przede wszystkim odkształcalności podłoża).

Podsumowując rozważania na temat wpływu ciśnienia powietrza w ogumieniu na właściwości trakcyjne można stwierdzić, że w wielu przypadkach na podłożach odkształcalnych redukcja ciśnienia wpływa pozytywnie na właściwości trakcyjne, ponieważ powoduje zmniejszenie poślizgu na skutek lepszego kontaktu opony z podłożem (zwiększenie powierzchni kontaktu). Co prawda w wielu opisywanych wynikach badań dochodziło również do jednoczesnego wzrostu oporu przetaczania, jednak nie zawsze towarzyszył temu spadek sprawności trakcyjnej. W przypadku podłoży o małej odkształcalności liczba badań kół pojazdów rolniczych w aspekcie zmian właściwości trakcyjnych przy różnych ciśnieniach pompowania jest niewielka, toteż zasadne wydaje się przeprowadzanie takich eksperymentów. Wspomnieć należy także, że z przeprowadzonych badań nad sterownością pojazdów wynika, że zmiana ciśnienia powietrza w ogumieniu zwłaszcza niektórych tylko jego kół ma wpływ na sterowność pojazdu [Janczur. R., Świder P. 2002] Przy spadku ciśnienia w kole do utraty stateczności może dochodzić już przy prędkości ok 50 km/h. Problem ten stanowiący zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu zależy jednak od indywidualnych cech pojazdu i zmiennych czynników takich jak usytuowanie środka ciężkości, czy obciążenia kół. Szczególną uwagę należałoby poświęcić procesowi hamowania koła pojazdu rolniczego na podłożu o małej odkształcalności – może się bowiem okazać, że przy różnych ciśnieniach pompowania wartość maksymalnej siły hamującej będzie różna, a to będzie miało znaczenie praktyczne dla bezpieczeństwa ruchu pojazdu.

## **2.4 Symulacja ruchu pojazdów za pomocą specjalistycznych programów komputerowych – wady i zalety**

Specjalistyczne programy komputerowe takie jak na przykład bardzo popularne na polskim rynku V-Sim oraz PC-Crash wykorzystywane są do wspomaganie rekonstrukcji wypadków drogowych lub symulacji ich ruchu celem sprawdzenia zachowania się pojazdu w określonych warunkach środowiskowych. Przeprowadzenie symulacji ruchu musi zostać poprzedzone wybraniem z katalogów programu odpowiedniego modelu pojazdu i zweryfikowanie lub wprowadzenie przez użytkownika jego danych masowych, geometrycznych, charakterystyki silnika położenia środka masy czy sztywności zawieszenia. Jeżeli potrzebnego pojazdu w bazie programu nie ma to użytkownik musi taki pojazd zaprojektować co wymaga od niego znajomości wszystkich wymaganych danych. Podobne wymagania dotyczą środowiska ruchu czyli nawierzchni, po której ma poruszać się badany pojazd i sprowadza się to do określenia współczynnika przyczepności kół do nawierzchni. Programy te zawierają w swoich formułach obliczeniowych odpowiednie dla danego zjawiska algorytmy uwzględniając tym samym zasady dynamiki [www 5].

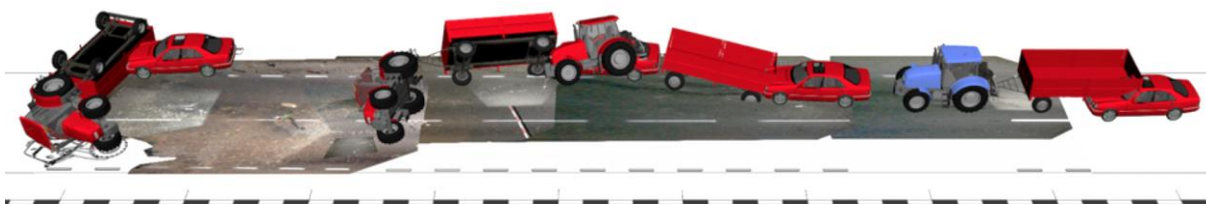
Zaletami takich programów jest stosunkowo szybkie przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych pojazdów występujących w ruchu drogowym lub poza drogowym (jak np. pojazdy nietypowe, specjalne). Pojazdy te, jak wspomniano powyżej, można wybrać z dostępnych w bazie programów katalogów, a przy braku niektórych pojazdów lub istotnych dla sprawy szczegółów może sam je wprowadzić. Zaletą jest duża liczba dostępnych modeli samochodów osobowych, ciężarowych czy przyczep ciężarowych, brakuje jednak modeli odpowiadających pojazdom rolniczym i przyczepom dla nich dedykowanych. Również środowisko, w którym zamierza się przeprowadzić symulację ruchu pojazdu można zaprojektować poprzez dość szczegółowe zbudowanie drogi, określając kąt jej nachylenia, zaprojektowanie na niej przeszkód terenowych jeżeli takie występują w rzeczywistości oraz co najistotniejsze dla każdego fragmentu tego środowiska można, a nawet należy przypisać rodzaj nawierzchni i jej stan co opisuje się podaniem współczynnika przyczepności przyłgowej. Przyjęcie różnej nawierzchni realizowane jest zatem przez programy jako powierzchnia o innej, indywidualnej przyczepności i sprowadza się do automatycznego doboru przez program współczynnika  $\mu$ . Ten parametr jest więc zależny od tego czy użytkownik wybierze ruch pojazdu na nawierzchni betonowej, asfaltowej, trawiastej czy innej, oraz czy jej stan ma być suchy czy mokry lub oblodzony (współczynniki te dobierane są przez program automatycznie

jako dane przypisane konkretnym nawierzchniom, i wynikają z badań naukowych). Współczynniki przyczepności wprowadzone przez program również mogą być modyfikowane przez użytkownika co pozwala na indywidualne odwzorowanie warunków, które występowały np. podczas wypadku, który jest poddawany analizie. Do programów tego typu mogą być importowane ortofotomapy czy chmury punktów ze skaningu laserowego (np. system eSURV) co pozwala na wykonanie wizualizacji i animacji 3D przebiegu wykonanych symulacji przy ustawieniu kamery obserwatora w różnym miejscu, w tym także wewnątrz pojazdu.



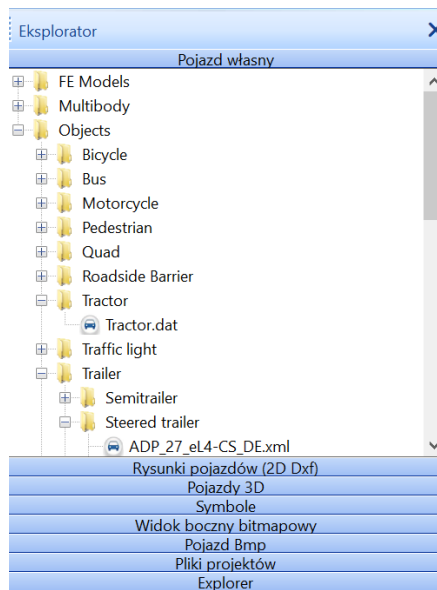
Rys. 10. Przykładowe środowisko ruchu do przeprowadzenia symulacji w programie V-SIM.

Źródło: [www5](#).



Rys. 11. Przykładowy widok 3D przebiegu symulacji zderzenia samochodu osobowego z ciągnikiem rolniczym z przyczepą na drodze twardej. Źródło: [www6](#).





Rys. 12. Okno eksploratora umożliwiające konstrukcję pojazdu „własnego” w programie PC Crash.

Źródło: licencja własna programu PC Crash.

Główną wadą programów tego typu jest niepewność obliczeń [ Wach, Unarski 2007] wynikająca z niedokładności pomiarów na miejscu zdarzenia, brak precyzyjnych danych dotyczących współczynnika przyczepności, jego zmienności w zależności od zmiennych warunków drogowych, rodzaju opon, brak precyzyjnych danych dotyczących własności fizycznych pojazdów czy danych samego zdarzenia, jeżeli rozpatrywany jest problem, który już zaistniał [Krzemień 2016]. Bazy programów tego typu są przez ich producentów cyklicznie uzupełniane o aktualizacje danych samochodów osobowych, motocykli czy pojazdów ciężarowych, które stanowią największy udział w ruchu drogowym lecz w bardzo niewielkim stopniu zawierają one informacje o pojazdach rolniczych, nie nadążając tym samym za postępem rozwoju transportu w rolnictwie. Spowodowane jest to zapewne małą ilością badań nad takimi pojazdami w ruchu drogowym (na nawierzchniach nieodkształcalnych). Powoduje to w przypadku badania pojazdu rolniczego, konieczność projektowania przez użytkownika programu pojazdu „własnego” gdyż katalogi programów nie zawierają w ogóle bądź zawierają szczątkowe dane o parametrach pojazdów rolniczych. Specyfika tych pojazdów, ich duże gabaryty, masy, nietypowe rozłożenie środka masy, duże naciski na koła, specyficzne czynności wykonywane przez rolników podczas użytkowania pojazdów w pracach polowych (choćby ingerencja w ciśnienie pompowania kół) powoduje, że badania naukowe powinny dostarczać większej ilości danych odnośnie zachowania tych pojazdów w ruchu drogowym w sytuacjach nietypowych, dynamicznych np. podczas hamowania w różnych warunkach. To właśnie modelowanie pojazdów, ich konstrukcja, która wynika ze zdobytych przez

użytkownika programu danych jest kluczowa do wprowadzenia poprawnych wartości i warunkuje uzyskanie poprawnych wyników obliczeniowych programu. Aspekt ten jest kolejnym czynnikiem niepewności o czym wspomniał w swojej pracy W.Wach [2014].

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, iż stosunkowo dobrze rozpoznane są zagadnienia związane ze zmianami właściwości trakcyjnych opon pojazdu rolniczego w zależności od zadanych czynników techniczno-eksploatacyjnych na nawierzchniach odkształcalnych gdzie prowadzone były liczne badania nad wpływem konstrukcji opony, pionowego obciążenia koła czy ciśnienia powietrza w oponie na parametry takie jak siła uciągu, siła trakcyjna, współczynnik przyczepności czy sprawność trakcyjna, a nawet moc uciągu. Jednak badania te łączyło to, że były one prowadzone w przeważającej części na podłożach typowo rolniczych takich jak spulchniona lub utwardzona gleba, ściernisko czy darń. Z uwagi na fakt, iż współczesne pojazdy rolnicze są konstrukcyjnie przystosowane do efektywnego przemieszczania się nie tylko na podłożach rolniczych, ale również w warunkach dróg publicznych, twardych to zasadne wydaje się przeprowadzanie badań zmiany przyczepności opon tych pojazdów również na podłożach utwardzonych lub twardych (nieodkształcalnych).

Drugim aspektem, który dotychczas w literaturze wypadkowej jest opisany fragmentarycznie, jest hamowanie koła pojazdu rolniczego. O ile do tej pory licznie przeprowadzane były badania na kołem napędowym czy swobodnie toczonym w pojeździe rolniczym, to tego samego nie można powiedzieć o kole hamowanym. Przyczepność koła napędowego i hamowanego zależy co prawda od tych samych parametrów, jednak dynamika procesu napędzania i hamowania koła jest inna – w związku z tym zasadne jest dokładne rozpoznanie procesów jakie towarzyszą hamowaniu koła pojazdu rolniczego. Wyniki takich badań z pewnością okażą się przydatne nie tylko z naukowego, ale również z praktycznego punktu widzenia, ponieważ współczesne pojazdy rolnicze i złożone z nich zestawy poruszają się coraz częściej po drogach publicznych z coraz to większymi prędkościami, a znaczenia dla bezpieczeństwa ruchu mają także ich duże masy i gabaryty. Mając to na uwadze, istotne jest zapewnienie bezpiecznych warunków ruchu nie tylko podczas prac polowych, ale również przy czynnościach transportowych. Kolejnym słabo opisanym w literaturze aspektem jest przyczepność kół pojazdów nie wyposażonych we własny napęd. Przykładem mogą być tu chociażby przyczepy rolnicze, których koła dostosowane są do przenoszenia dużych obciążeń pionowych z racji masy przewożonych ładunków. O ile koła ciągników rolniczych (zwłaszcza napędowe) są opisane bardzo licznie w aspekcie właściwości trakcyjnych i strat energii, to w odniesieniu do opon pojazdów ciągniętych da się dostrzec pewną lukę, która powinna być wypełniona.

### 3. CEL I ZAKRES PRACY

#### 3.1 Cel pracy

Tendencje rozwojowe współczesnych pojazdów rolniczych obejmują głównie wzrost ich wydajności, a to wymusza zwiększanie rozmiarów i wzrost masy pojazdów. Niestety taka tendencja niesie za sobą wiele niekorzystnych skutków – podczas eksploatacji w warunkach polowych może przede wszystkim dochodzić do nadmiernego zagęszczania podłoża glebowego. Z kolei podczas prac transportowych głównym zagrożeniem związanym z dużą masą pojazdu lub zestawu pojazdów jest duża bezwładność i możliwość utraty kontroli przez kierującego w przypadku pogorszenia warunków przyczepności kół do podłoża.

Z przeprowadzonej analizy materiałów źródłowych z zakresu terramechaniki pojazdów rolniczych wynika, że na podłożach odkształcalnych zagadnienia związane z przyczepnością i przenoszeniem mocy są rozpoznane w bardzo dużym stopniu. Niestety w przypadku podłoży o małej odkształcalności ta problematyka w odniesieniu do pojazdów rolniczych jest rozpoznana niewystarczająco. Badania opon pojazdów rolniczych na podłożach takich jak beton, asfalt, czy kostka opisane są w sposób fragmentaryczny – najczęściej jako punkt odniesienia do bardziej precyzyjnych badań polowych. Zważywszy, że współczesne pojazdy rolnicze osiągają coraz większe prędkości niezbędne staje się uzupełnienie tej luki.

Kolejnym aspektem badawczym, jaki wydaje się zasadny jest określenie możliwości zastosowania programów komputerowych do symulacji zachowania się pojazdów rolniczych w zadanych warunkach eksploatacji. Programy komputerowe są od dawna stosowane do symulacji zdarzeń drogowych z udziałem pojazdów samochodowych, jednak z przeprowadzonej analizy materiałów źródłowych, a także z doświadczeń własnych autora wynika, iż programy te mają pewne ograniczenia i uproszczenia, które sprawiają, że pewne zjawiska zachodzące w trakcie ruchu pojazdu rolniczego (np. podczas zerwania przyczepności koła) mogą być opisane w niewystarczający czy wręcz błędny sposób. Z tego powodu zasadna wydaje się analiza możliwości zastosowania takich programów w odniesieniu do konkretnych warunków eksploatacji pojazdu rolniczego lub ustalenie jakiej wartości współczynnika przyczepności należy dobrać aby ruch takiego pojazdu zasymulować w zależności od jego parametrów techniczno – eksploatacyjnych.

Mając na uwadze przedstawione powyżej względy, jako główny cel pracy przyjęto ocenę czynników wpływających na przyczepność koła pojazdu rolniczego na wybranych podłożach o niskiej odkształcalności. Wyznaczono następujące cele cząstkowe:

- ocena wpływu zmian pionowego obciążenia koła na maksymalne wartości siły przyczepności,
- ocena przemieszczeń poziomych na styku koła z podłożem, odpowiadających osiągnięciu maksymalnej siły przyczepności,
- wyznaczenie oraz analiza współczynników przyczepności przyłgowej koła pojazdu rolniczego na wybranych podłożach

### **3.2 Zakres pracy**

Zakres pracy obejmował eksperyment prowadzony przy użyciu laboratoryjnego stanowiska do pomiaru siły przyczepności oraz przemieszczeń poziomych. Założono, że badane koło zostanie unieruchomione, co pozwoli na wyznaczenie maksymalnej siły przyczepności (z racji braku toczenia koła nie będzie występował opór przetaczania). Założono, że w badaniach zostanie użyta opona nienapędowa przeznaczona do przyczep rolniczych i przyczepianych maszyn rolniczych (takich jak opryskiwacze czy roztrząsacze obornika). Wybór opony wynikał z przeprowadzonego przeglądu materiałów źródłowych, z którego wywnioskowano, iż opony ciągnikowe są dość dobrze opisane, jednak opony przeznaczone do przyczep są zbadane fragmentarycznie. Wyznaczona w badaniach maksymalna siła przyczepności ma odzwierciedlać siłę jaka rzeczywiście może wystąpić na kołach przyczepny lub przyczepianej maszyny rolniczej w sytuacji całkowitego zahamowania kół. Ostatnim etapem opracowania wyników będzie wykorzystanie wybranych wyników pomiarów do symulacji zachowania się zestawu pojazdów ciągnik - przyczepa rolnicza – ta część zostanie przeprowadzona przy użyciu specjalistycznego programu do symulacji zdarzeń drogowych PC-Crash.

## **4. METODYKA BADAŃ**

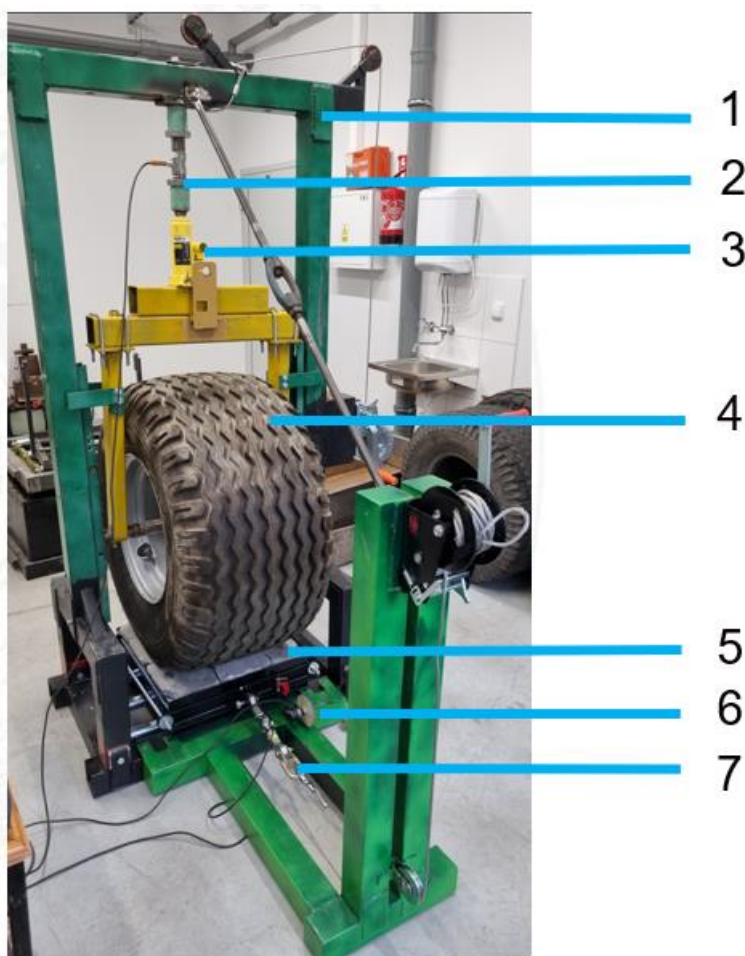
### **4.1 Ogólna koncepcja badań**

Podczas ustalania koncepcji przebiegu badań założono, że będą one prowadzone wyłącznie w formie laboratoryjnej, a ich wyniki zostaną zweryfikowane poprzez przeprowadzenie symulacji ruchu pojazdów w jednym ze specjalistycznych programów komputerowych przeznaczonych do wspomagania rekonstrukcji wypadków ( V-SIM lub PC-Crash). Na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, przeprowadzono pomiary siły przyczepności w warunkach zmiennego podłoża oraz zmiennego stanu tego podłoża (podłoże suche i mokre), a także zmiennego ciśnienia powietrza w użytej do badań oponie oraz zmiennego obciążenia pionowego koła.

### **4.2 Opis stanowiska badawczego**

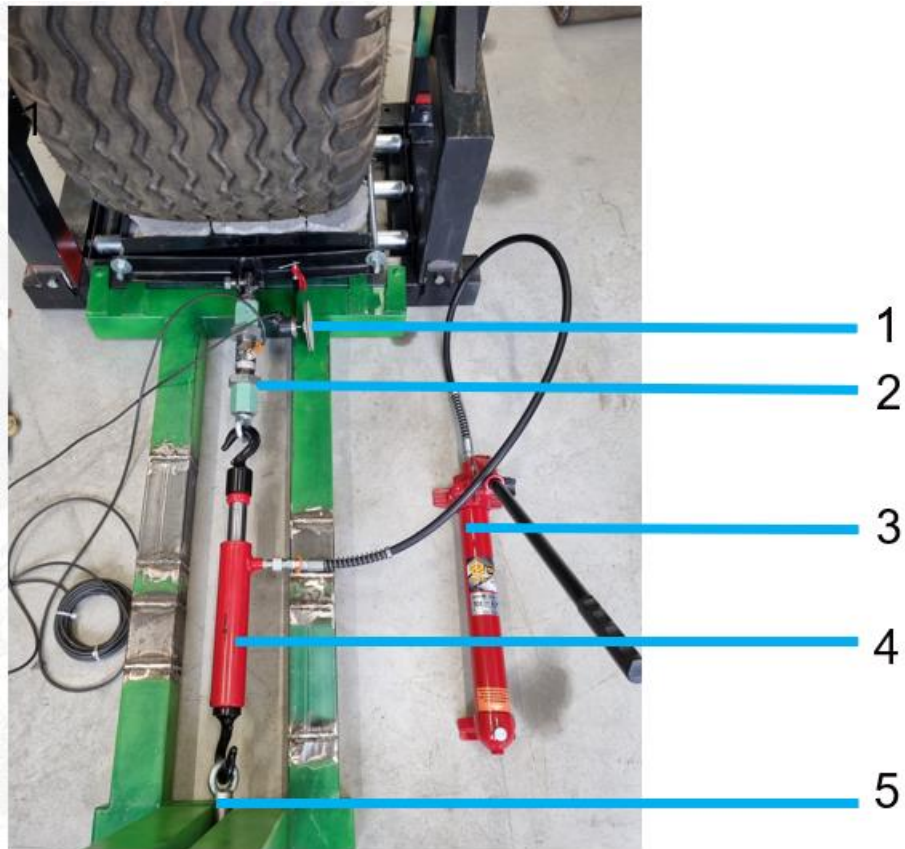
Stanowisko badawcze zostało skonstruowane w taki sposób aby podwieszona na ramie koło przeznaczone do zastosowania w przyczepach rolniczych nie mogło się obracać, aby było zablokowane. Bezpośrednio pod kołem na rolkach umieszczano wykonaną z blachy skrzynkę badawczą, która wypełniona była badanym podłożem. Do skrzynki badawczej w jej przedniej części zamocowano czujnik do pomiaru jej przemieszczenia oraz siłomierz, który rozciągany był przez siłownik hydrauliczny (odwrotnego działania tj. na skutek wzrostu ciśnienia w komorze roboczej dochodziło do stopniowego zmniejszania skoku tłoczyska). Taki układ konstrukcyjny stanowiska pozwalał na zasymulowanie sytuacji zerwania przyczepności przez całkowicie zablokowane koło. Ideą było wyznaczenie maksymalnej siły hamującej. Od góry na ramie, na której znajdowało się koło zamocowano siłomierz z siłownikiem hydraulicznym, którego celem miało być zadanie i utrzymanie określonego obciążenia pionowego. Dane z obu siłomierzy jak i czujnika pomiaru odległości przekazywane były do komputera, który korzystając ze specjalistycznego oprogramowania umożliwia bieżący podgląd na uzyskiwane wyniki i ich zapis.

Poniżej na rysunku nr 13 przedstawiono ogólny schemat stanowiska badawczego.



Rys. 13. Widok ogólny stanowiska badawczego: 1 – rama; 2 – siłomierz; 3 – siłownik hydrauliczny; 4 – koło; 5 – skrzynka z badaną nawierzchnią; 6 – czujnik pomiaru przemieszczenia skrzynki; 7 – siłomierz.

Na rysunku 14 przedstawiono szczegółowy widok konstrukcji układu wymuszającego ruch skrzynki z nawierzchnią poddaną badaniu. Układ ten został zaprojektowany w taki sposób aby zwiększanie ciśnienia roboczego w pompie powodowało skracanie czynnej długości siłownika (ściągacza). W ten sposób osiągnano płynne przemieszczanie się skrzynki z badanym podłożem. Cylinder siłownika ściągającego był zamocowany na stałe do ramy za pomocą ucha (5). Między końcówką tłoczyska siłownika ściągającego, a skrzynką zamontowano przegubowo siłomierz indukcyjny TecSis o dokładności pomiaru 1 N i zakresie 0 – 20000 N. Wartość przesunięcia skrzynki badawczej była wyznaczana z wykorzystaniem czujnika obrotowo – impulsowego MOK40. Wartościami mierzonymi przez czujnik MOK40 był kąt obrotu, który następnie przeliczano na wartości dróg. Dokładność pomiaru kąta wynosiła  $0,1^\circ$ . Czujnik przemieszczał się razem ze skrzynką, a zamontowane na nim kółko toczyło się po poziomej powierzchni ramy.



Rys. 14. Widok szczegółowy układu wymuszającego ruch skrzynki z podłożem: 1 – czujnik obrotowy do pomiaru przemieszczenia skrzynki; 2 – siłomierz; 3 – hydrauliczna pompa liniowa o napędzie ręcznym; 4 – siłownik odwróconego działania (tzw. ściągacz hydrauliczny); 5 – ucho mocowania do ramy.

Do eksperymentu wykorzystano przeznaczoną do użytkowania w przyczepach rolniczych nową oponę radialną, która nie nosiła śladów zużycia. Opona ta posiadała oznaczenie 500/50R17, jej wymiary przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry techniczne opony użytej do badań.

Oznaczenie opony	Średnica zewnętrzna [mm]	Szerokość [mm]	Średnica osadzenia [mm]	Maksymalna nośność [kg]
500/50R17	930	500	432	3250





Rys. 15. Ogólny widok opony oraz czoła bieżnika.

Badana opona była przeznaczona do maszyn i pojazdów rolniczych jako tzw. opona nośna. Konstrukcyjnie nie jest ona przystosowana do przenoszenia momentu obrotowego – powinna być montowana na osiach pchanych lub wleczonych. W praktyce opony tego typu są stosowane w dużych przyczepach transportowych, w wozach asenizacyjnych, rozsiewaczach nawozów oraz opryskiwaczach.

#### **4.3 Opis podłoży wykorzystanych do badań**

Do badań wykorzystano fragmenty nawierzchni dróg, których próbki umieszczono w skonstruowanych pod wymiar stanowiska badawczego specjalnych skrzynkach z blachy. Pierwszą z nawierzchni była utwardzana droga gruntowa prowadząca na pola uprawne oraz do silosów zbożowych. Podłożem tym była gleba sklasyfikowana jako glina piaszczysta z domieszką drobnego kruszywa budowlanego (o granulacji maksymalnej części stałych 7-10 mm). Została ona pobrana z drogi dojazdowej do pól – droga ta była użytkowana głównie przez agregaty ciągnikowe oraz rolnicze zestawy transportowe. Przed badaniami gleba została zagęszczona do wartości zwięzłości w przedziale 5,5 – 6,0 MPa, zagęszczanie wykonano



przejeżdżając po glebie kilkakrotnie kołem ciągnika rolniczego. Tak przygotowane próbki glebowe wycięto i umieszczono w skrzynkach wykorzystywanych w części badawczej eksperymentu.



Rys. 16. Widok drogi dojazdowej do pól, z której pobrano próbki nawierzchni do badań.



Rys. 17. Widok zakopanej w polu skrzynki badawczej podczas procesu ubijania nawierzchni gruntowej



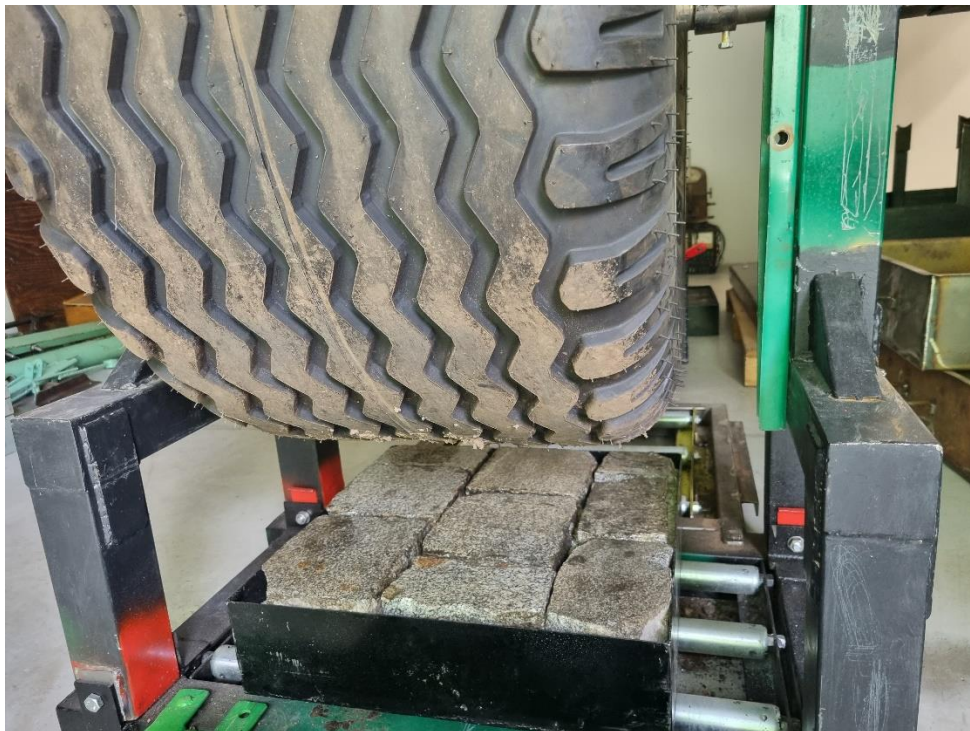


Rys. 18. Wykorzystane do badań utwardzone podłoże gruntowe w stanie suchym (góra) i mokrym (dół) w trakcie eksperymentu

Drugą próbką nawierzchni był fragment drogi zbudowanej z kostki granitowej. Kostka została pozyskana z drogi dojazdowej do pola uprawnego przy zjeździe z asfaltowej drogi publicznej. Skrzynka została w całości wypełniona odpowiednio dobranymi blokami kamiennymi o kształtach zbliżonych do prostopadłościanu. Wymiary pojedynczego bloku wynosiły ok 15x15x17 cm. Górna powierzchnia każdego bloku tworzyły jedną płaszczyznę,



a przestrzenie między kostkami zostały wypełnione spoiwem budowlanym w postaci mieszanki piasku i cementu. Przeznaczona do badań kostka granitowa została pozyskana z drogi w trakcie jej remontu dzięki czemu zarówno ułożenie poszczególnych bloków w skrzynce badawczej jak i wypełnienie jej spoin zostało wykonane przez specjalistyczną firmę remontową, która w taki sam sposób układała tę kostkę na drodze.



Rys. 19. Wykorzystane do badań podłoże z kostki granitowej w stanie suchym (góra) i mokrym (dół)

#### **4.4 Opis przebiegu badań**

Badanie właściwe polegało na wymuszeniu ruchu skrzynki badawczej z podłożem względem unieruchomionego koła. W pierwszej kolejności pod uniesionym kołem umieszczano skrzynkę z badanym podłożem po czym opuszczano koło. Następnie przy użyciu siłownika hydraulicznego wywierano obciążenie pionowe, którego wartość ustalano na podstawie pomiaru siłomierzem. Ruch skrzynki był realizowany za pomocą ściązacza hydraulicznego aż do momentu całkowitego zerwania przyczepności koła. Podczas badań stosowano trzy poziomy obciążenia pionowego koła: 4905 N, 7357 N i 9810 N. (równoważne naciskowi ciężaru: 500 kg, 750 kg, 1000 kg). Taki wybór obciążeń podyktowany był względami praktycznymi (przykładowo najniższe obciążenie odpowiadałoby sytuacji obciążenia jednego koła pustej przyczepy, zaś najwyższe odpowiadałoby przyczepie załadowanej). Drugim czynnikiem było ciśnienie powietrza w oponie – stosowano trzy poziomy tego czynnika: 0,8 bara, 1,2 bara i 1,6 bara. Ciśnienie powietrza było zmieniane za pomocą zewnętrznego kompresora, a weryfikacja wartości realizowana była za pomocą ręcznego manometru. Każdy pomiar będący kombinacją przedstawionych czynników był wykonywany w trzech powtórzeniach.

#### **4.5 Statystyczne opracowanie wyników badań**

Analiza statystyczna wyników badań została przeprowadzona w programie Statistica 12.5. W pierwszej kolejności założono sprawdzenie warunków stosowalności analizy wariancji. W tym celu wykonano testy jednorodności Wariancji (Levene'a) oraz normalności rozkładu (Shapiro-Wilka). W przypadku spełnienia warunków stosowalności przeprowadzono analizę wariancji na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . W ramach analizy wariancji wykonano testy post-hoc służące określeniu różnic pomiędzy poszczególnymi poziomami czynników. Testy post-hoc zostały przeprowadzone metodą najmniejszej istotnej różnicy (test NIR, test LSD Fishera). Analiza statystyczna obejmowała również wyznaczanie modeli matematycznych opisujących zależności pomiędzy siłą przyczepności, a przyjętymi czynnikami. Ta część analizy statystycznej została wykonana przy użyciu programu TableCurve 2.0.

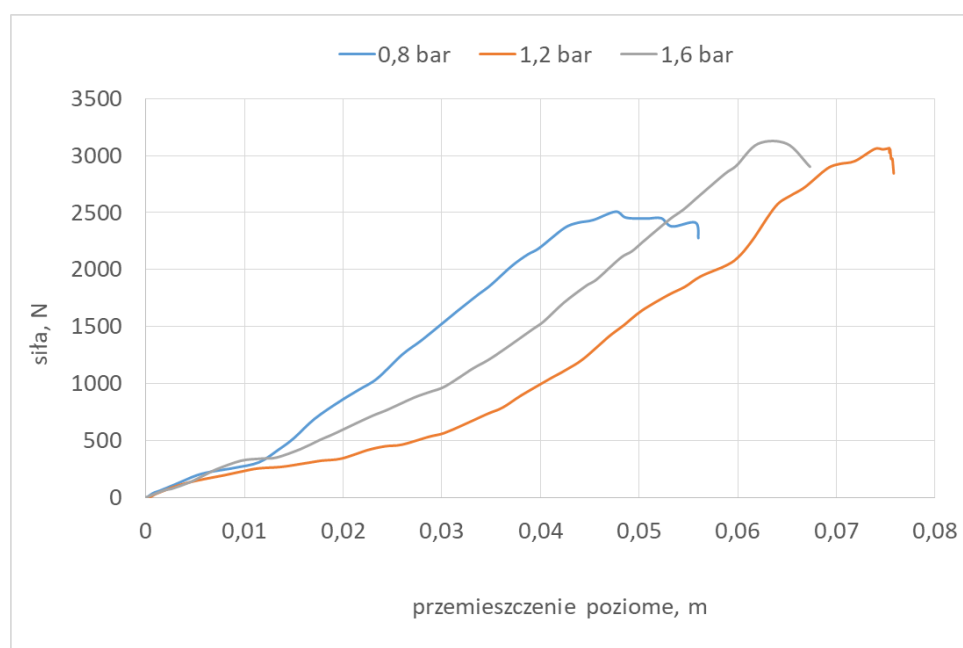
#### 4.6 Wykorzystanie wyników do komputerowego prognozowania zdarzeń

Opracowane wyniki badań w postaci przedstawienia wartości współczynnika przyczepności koła do badanych nawierzchni w różnym ich stanie oraz przy różnym obciążeniu pionowym i ciśnieniu powietrza w kole, pozwoliły na wykonanie symulacji ruchu zestawu ciągnika rolniczego z przyczepą przy założeniu takich właśnie zmiennych warunkach. Warunki te symulowano poprzez założenie różnych, wynikających z przeprowadzonych badań wartości współczynnika przyczepności przyłgowej. Symulacje ruchu pojazdów zostały przeprowadzone w specjalistycznym programie komputerowym do wspomaganie rekonstrukcji przebiegu wypadków drogowych – PC Crash. Program ten jest dedykowany m.in. biegłym sądowym czy inżynierom zajmującym się projektowaniem w dziedzinie konstrukcji pojazdów. Parametry geometryczne, masowe czy rozmiar opon, wykorzystane do symulacji ruchu zestawu ciągnik-przyczepa rolnicza odpowiadały rzeczywistym ich danym i zostały one importowane z oficjalnych stron producentów tych pojazdów. Wykonując symulacje założono konkretne środowisko ruchu, którego nawierzchnia została tak opisana aby współczynnik jej przyczepności odpowiadał wynikom uzyskanym w badaniach stanowiskowych. W symulacji założono dynamiczne hamowanie zespołu pojazdów tj. ciągnika rolniczego wraz przyczepą. Ponadto do kolejnych symulacji wprowadzano różne obciążenia przyczepy tak aby całkowita jej masa odpowiadała pionowym obciążeniom koła stosowanym podczas badań tj. 500 kg, 750 kg i 1000 kg na koło (odpowiednio 4905N, 7357N i 9810N). Zakładano także różny stan ciśnienia w kołach – czynnik ten realizowano poprzez zmianę współczynnika przyczepności na poszczególnych fragmentach drogi. Wyniki badań wykorzystywano zatem jako dane wejściowe, potwierdzone, weryfikując zachowanie zestawu pojazdów przy takich zmiennych parametrach. Celem przeprowadzonych symulacji było sprawdzenie zagrożeń jakie niesie ze sobą ryzyko utraty stateczności i kontroli nad pojazdem, które to może być wywołane utratą przyczepności kół pojazdu na różnych nawierzchniach lub dynamicznie zmieniającym się obciążeniu lub ciśnieniu powietrza w kole lub kołach.

## 5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Zgodnie z koncepcją badań ocenie poddano wybrane parametry związane z przenoszeniem siły przyczepności na różne podłoża. W pierwszej kolejności przeanalizowano przebiegi siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego. Pojęcie „przemieszczenie” dotyczyło przesunięcia skrzynki z badanym podłożem względem unieruchomionego koła. Celem tej części analizy wyników badań było wykazanie zmian przebiegu siły przyczepności na różnych podłożach przy różnych parametrach eksploatacyjnych.

Na rysunku 20 przedstawiono przebiegi siły przyczepności koła na utwardzonym podłożu glebowym w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N.

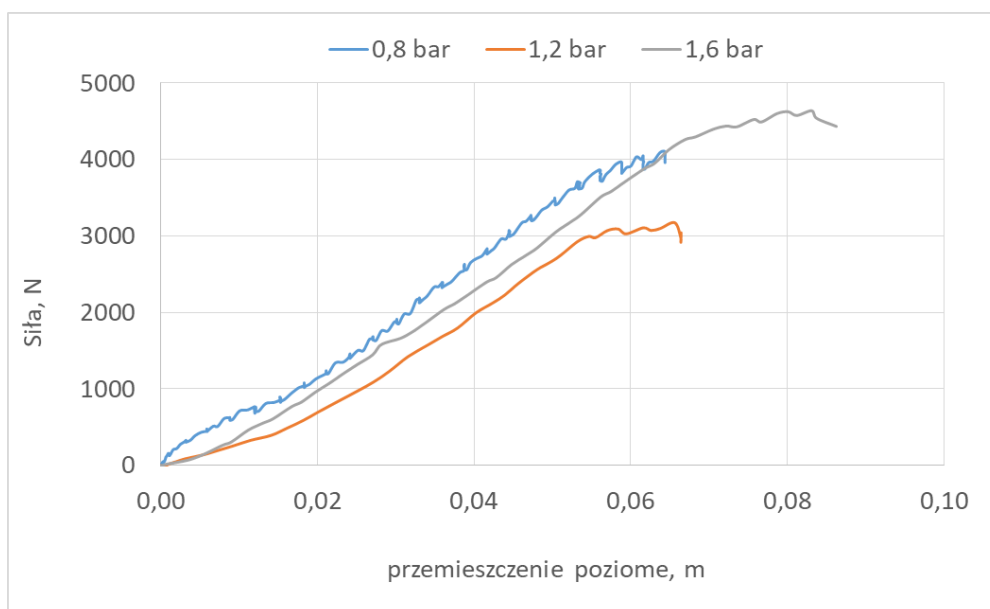


Rys. 20. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N

Analizując powyższy przebieg można stwierdzić, że każdemu ciśnieniu powietrza w oponie odpowiadała inna charakterystyka zmian siły przyczepności. Jedyne do przemieszczenia ok. 0,01 m wszystkie przebiegi cechują się zbliżonym kształtem. Przy wartościach przemieszczeń 0,01 – 0,05 m najwyższe wartości siły osiągało koło z oponą o ciśnieniu 0,8 bara. Nieco niższe wartości siły przyczepności w tym zakresie osiągnięto przy ciśnieniu pompowania równym 1,6 bara, zaś najniższe wartości odpowiadały ciśnieniu 1,2 bara.

Jednocześnie można zauważyć, iż opona o najniższym ciśnieniu pompowania cechowała się najniższą maksymalną wartością siły przyczepności (ok. 2500 N) w porównaniu z oponami przy dwóch pozostałych ciśnieniach. Ta maksymalna wartości siły przyczepności została również osiągnięta przy najmniejszej deformacji poziomej (ok. 0,047 m). W przypadku opony o ciśnieniu pompowania 1,2 bara wartość maksymalna siły przyczepności nie różniła się znacząco od opony napompowanej do wartości 1,6 bara – w obu przypadkach maksymalna siła przyczepności wyniosła ok. 3100-3200 N, jednak wartości te zostały osiągnięte przy różnych deformacjach poziomych (przy ciśnieniu 1,2 bara deformacja wyniosła 0,076 m, zaś przy ciśnieniu 1,6 bara – 0,063 m).

Na rysunku 21 przedstawiono przebiegi siły przyczepności w funkcji przemieszczenia na suchym utwardzonym gruncie, przy obciążeniu pionowym koła 7357 N.

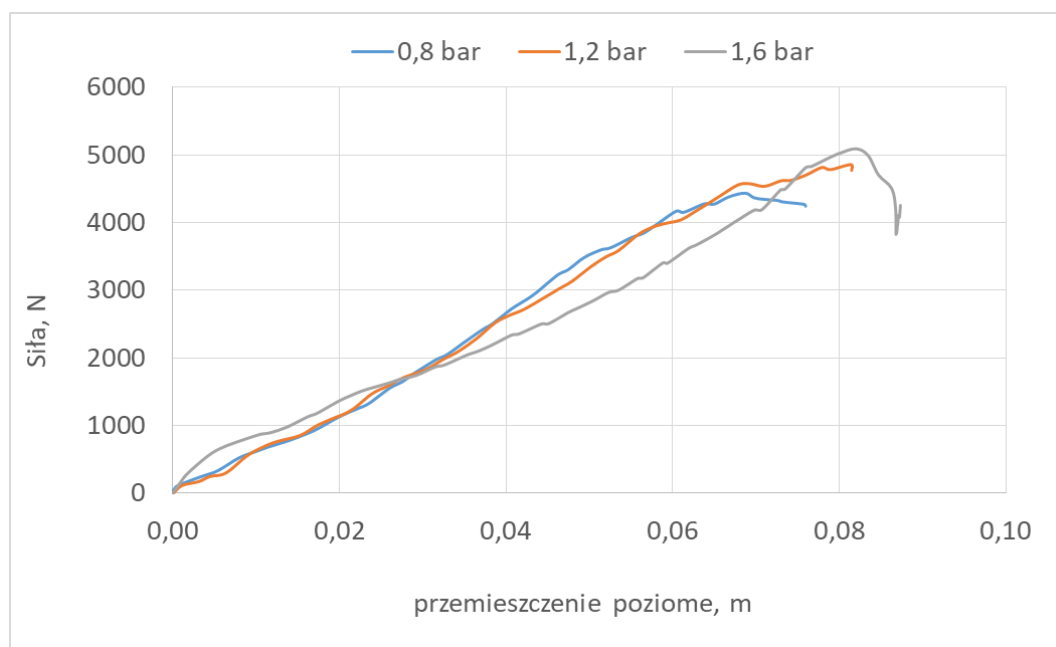


Rys. 21. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N

Przy wyższym obciążeniu pionowym (7357 N – rys. 21) tendencje zmian siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego były nieco inne niż w poprzednio opisywanym przypadku. W zakresie przemieszczeń 0 – 0,055 wszystkie trzy przebiegi mają zbliżony charakter zmian, przy czym wartości sił przy tych samych przemieszczeniach się różnią – najwyższe osiągane są przez koło z oponą o ciśnieniu 0,8 bara, zaś najniższe – przy ciśnieniu pompowania 1,2 bara (ta dysproporcja jest zbliżona do tej, która wystąpiła przy niższym obciążeniu pionowym). W przypadku ciśnień 0,8 i 1,2 bara maksymalna siła została osiągnięta przy przemieszczeniu ok. 0,06 m, natomiast przy ciśnieniu pompowania 1,6 bara

wartość przemieszczenia poziomego odpowiadająca maksymalnej sile przyczepności wyniosła ponad 0,08 m.

Kolejne zestawienie przebiegów sił przyczepności na utwardzonym suchym gruncie. przestawiono na rysunku 22. Dotyczy ono najwyższego obciążenia pionowego (9810 N).

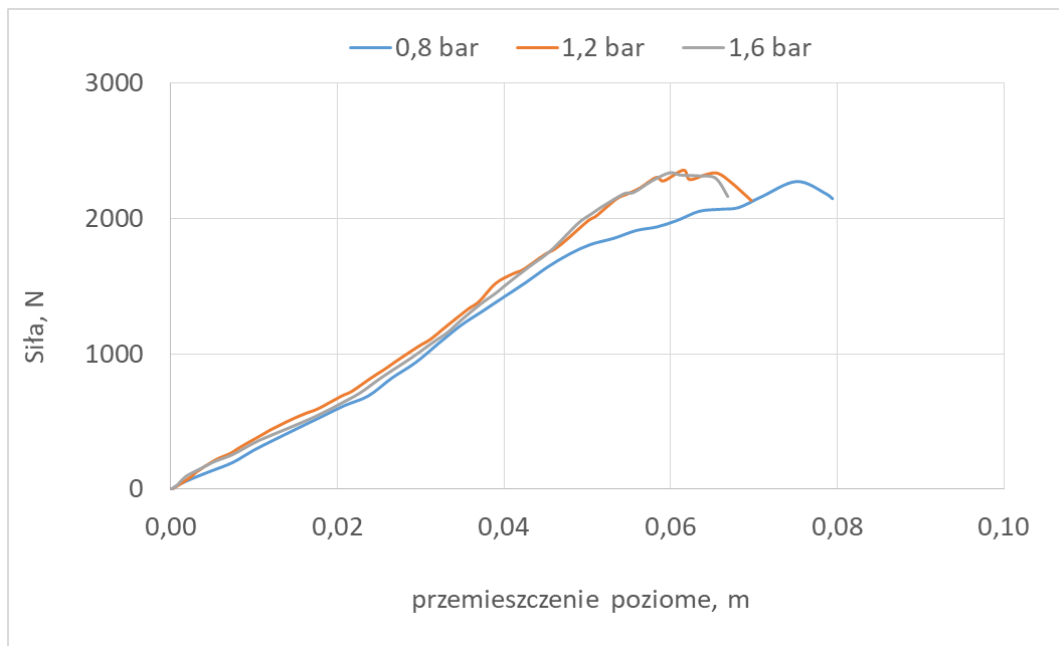


Rys. 22. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N

Analizując przebiegi z powyższego rysunku można stwierdzić, że przy ciśnieniach pompowania 0,8 bara i 1,2 bara przebiegi siły przyczepności są do siebie bardzo zbliżone. Ta zależność utrzymuje się aż do wartości przemieszczenia ok 0,065 m. Przy wyższych wartościach przemieszczeń poziomych większe wartości siły przyczepności dotyczyły opony o ciśnieniu powietrza 1,2 bara. Z kolei przy ciśnieniu 1,6 bara siła przyczepności w zakresie przemieszczeń 0 – 0,03 m jest wyższa niż przy dwóch pozostałych ciśnieniach, zaś po przekroczeniu przemieszczenia poziomego 0,03 m jej wartość zaczyna spadać poniżej przebiegów zarejestrowanych przy dwóch pozostałych ciśnieniach. Wartości maksymalne siły przyczepności przy ciśnieniach pompowania 0,8 i 1,2 bara zostały osiągnięte przy przemieszczeniu pionowym ok. 0,065 m, zaś w przypadku najwyższego ciśnienia pompowania wartość przemieszczenia odpowiadającego najwyższej sile przyczepności wynosiła 0,085 m.

Kolejnymi analizowanymi przypadkami były przebiegi siły przyczepności na podłożu gruntowym w stanie mokrym. Na rysunku 23 przedstawiono je dla najniższego poziomu obciążenia pionowego (4905 N).

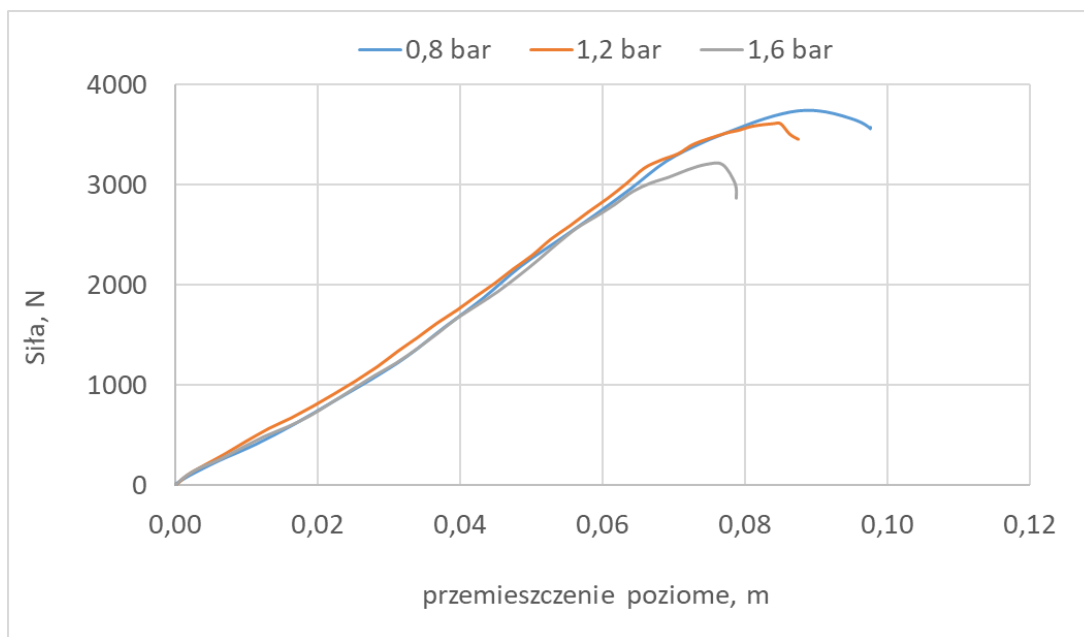




Rys. 23. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N

Analiza przebiegów przedstawionych na rysunku 23 oraz ich porównanie z poprzednio opisywanymi przypadkami pozwala stwierdzić, iż zwiększenie wilgotności podłoża znacząco zmienia charakterystykę przebiegów siły przyczepności. Przy początkowych wartościach przemieszczeń poziomych (do ok 0,04 m) wartości siły przyczepności oraz charakter jej zmian jest bardzo zbliżony dla wszystkich trzech ciśnień pompowania. Dopiero po przekroczeniu przemieszczenia poziomego 0,04 m uwidacznia się różnica pomiędzy przebiegiem dla najniższego ciśnienia pompowania (0,8 bara) i dwóch pozostałych przebiegów- przy najniższym ciśnieniu wartości siły są niższe. Nie stwierdzono natomiast różnic pomiędzy wartościami siły przyczepności osiąganymi przez oponę o ciśnieniach 1,2 i 1,6 bara.

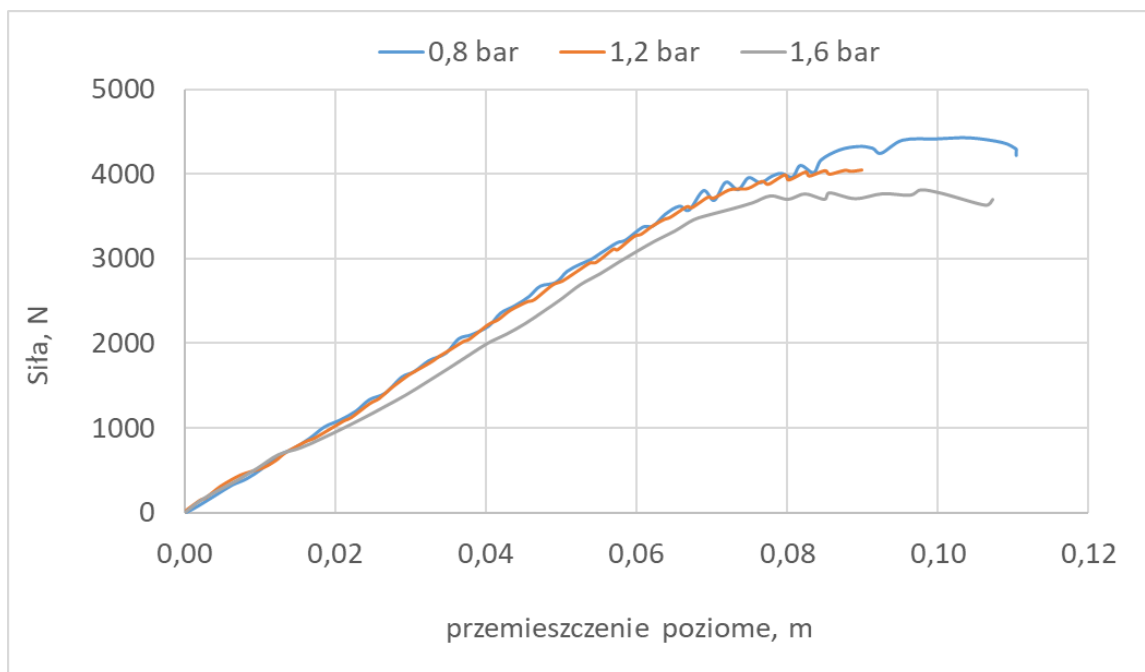
Zmieniając obciążenie pionowe do poziomu 7357 N przeanalizowano przebiegi siły przyczepności na podłożu gruntowym w stanie mokrym. co przedstawiono na rysunku 24.



Rys. 24. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N

Jak można zaobserwować na rysunku 24 zwiększenie obciążenia pionowego koła do wartości 7357 N wpłynęło na wydłużenie zakresu takich samych przebiegów siły przyczepności dla różnych ciśnień powietrza w oponie aż do przemieszczenia poziomego nieco ponad 0,06 metra. Dopiero po przekroczeniu tej wartości odnotowano zależność ciśnienia w oponie od wartości maksymalnej siły przyczepności. W odróżnieniu do przebiegu przy najniższym obciążeniu koła przedstawionym na poprzednim wykresie, najniższa wartość siły przyczepności występowała przy najwyższym ciśnieniu pompowania (1,6 bara), a różnica pomiędzy przebiegiem dla najniższego ciśnienia pompowania (0,8 bara) i średnim (1,2 bara) była niewielka ale sama wartość tej siły była wyższa.

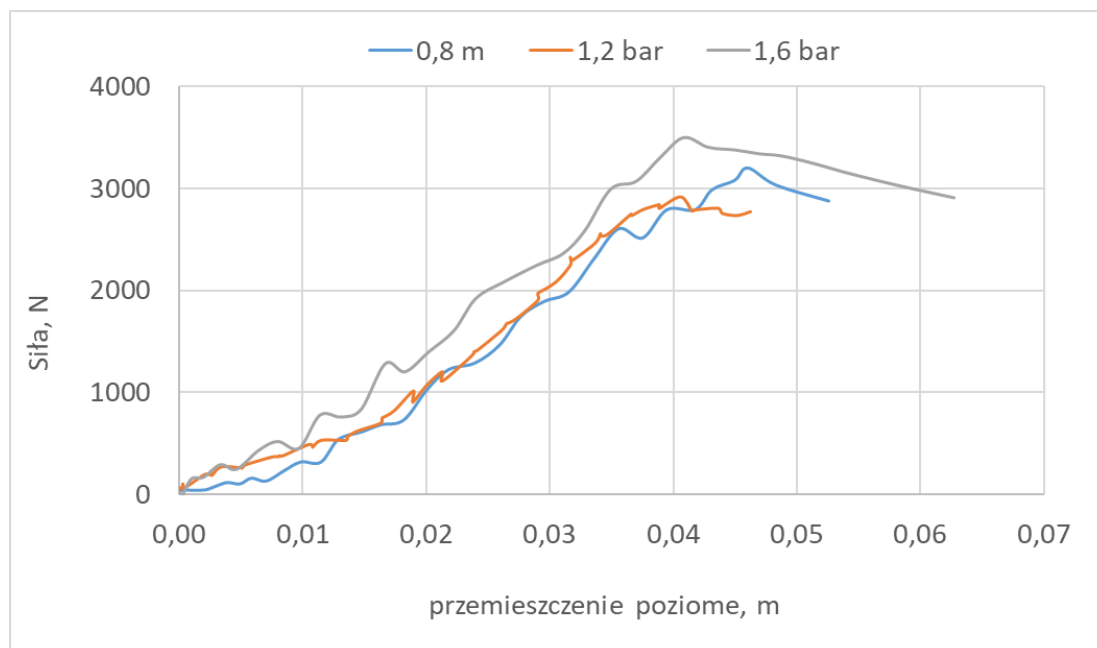
Przebiegi siły przyczepności na podłożu gruntowym w stanie mokrym przy maksymalnym z założonych obciążeń pionowych (9810 N) przedstawiono na rysunku 25.



Rys. 25. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N

Przy najwyższym obciążeniu pionowym działającym na badane koło (9810 N) zmiana ciśnienia pompowania wywoływała podobne skutki jak przy obciążeniu średnim (7357 N), którego przebiegi na mokrym utwardzonym gruncie przedstawiono na rysunku 24. Po zadaniu maksymalnego obciążenia koła przebiegi siły przy ciśnieniu 0,8 bara i 1,2 bara były do siebie bardzo zbliżone, a przebieg siły przy ciśnieniu najwyższym (1,6 bara) był do nich zbliżony w zakresie od zera aż do wartości przemieszczenia poziomego bliskiego 0,08 metra. Taka zgodność przebiegów pod względem deformacji poziomej stanowiła poziom wyższy o ok 30% niż przy obciążeniu koła średnim ciężarem (7357 N). Maksymalne wartości siły przyczepności dla wszystkich poziomów ciśnienia także były wyższe przy obciążeniu maksymalnym (9810 N) w porównaniu z przebiegami przy obciążeniach niższych. Dla wszystkich ciśnień pompowania koła (0,8 1,2 i 1,6 bara) maksymalne wartości siły zostały osiągnięte przy przemieszczeniu poziomym bliskim wartości ok. 0,08 – 0,09 m, czyli tylko nieznacznie większej niż koniec zakresu, do którego wszystkie trzy przebiegi były do siebie zbliżone.

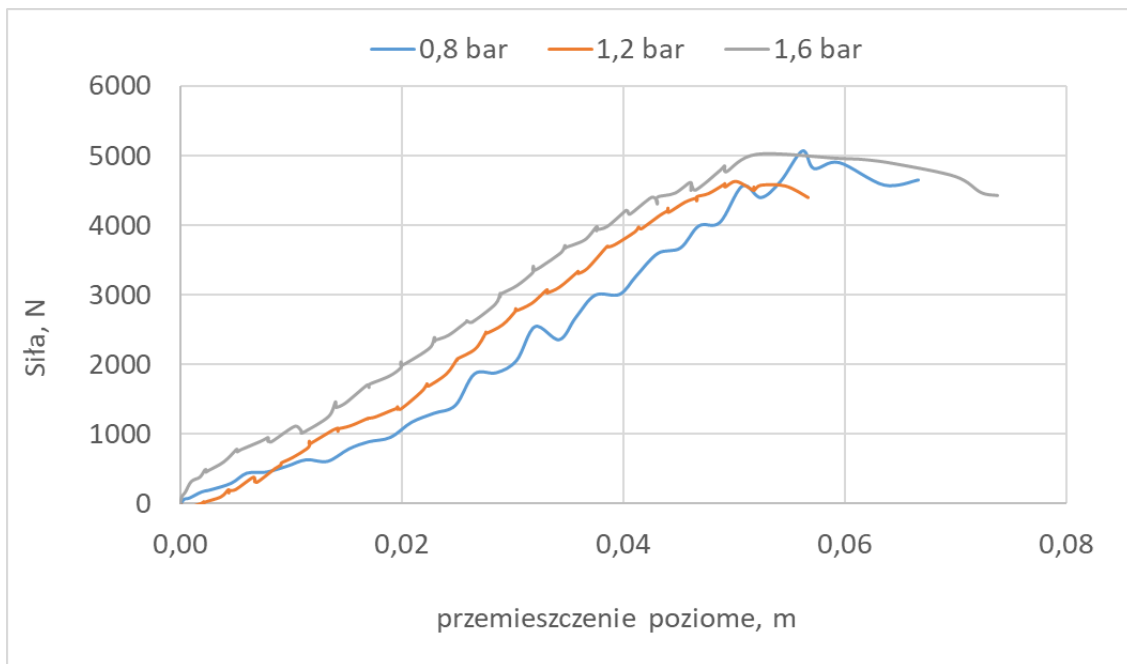
Następnie dokonano analizy przebiegu siły przyczepności od przemieszczenia poziomego koła na drugim z badanych podłoży, którym była kostka granitowa. Przedstawiony poniżej rysunek 26 przedstawia przebieg siły w funkcji przemieszczenia poziomego na suchej kostce granitowej przy obciążeniu pionowym badanego koła równym 4905 N.



Rys. 26. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N

Jak można zauważyć na rysunku 26, przebiegi siły dla wartości ciśnienia pompowania koła 1,2 bara i 1,6 bara na samym początku zakresu jego przemieszczenia poziomego (0,00 – 0,01 m) różniły się od siebie nieznacznie w przeciwieństwie do wartości najniższej ciśnienia (0,8 bara). Następnie w okolicy przemieszczenia poziomego ok 0,015 m przebieg siły przy ciśnieniu najwyższym (1,6 bara) przedstawiał wartości wyższe niż przebiegi dla ciśnień niższych (0,8 i 1,2 bara), które to od tego miejsca do wartości ok 0,04 m przemieszczenia miały przebiegi zbliżone do siebie. Przy tej wartości deformacji opony (0,04 m) doszło do osiągnięcia najwyższej wartości siły przyczepności dla ciśnienia średniego (1,2 bara), która wynosiła niespełna 3000 N. Nieco większą wartość siły (ok 3200 N) osiągnięto przy zadanym ciśnieniu najniższym równym 0,8 bara. Z kolei dla ciśnienia najwyższego (1,6 bara) maksymalna wartość siły przyczepności osiągnęła wartość ok 3500 N.

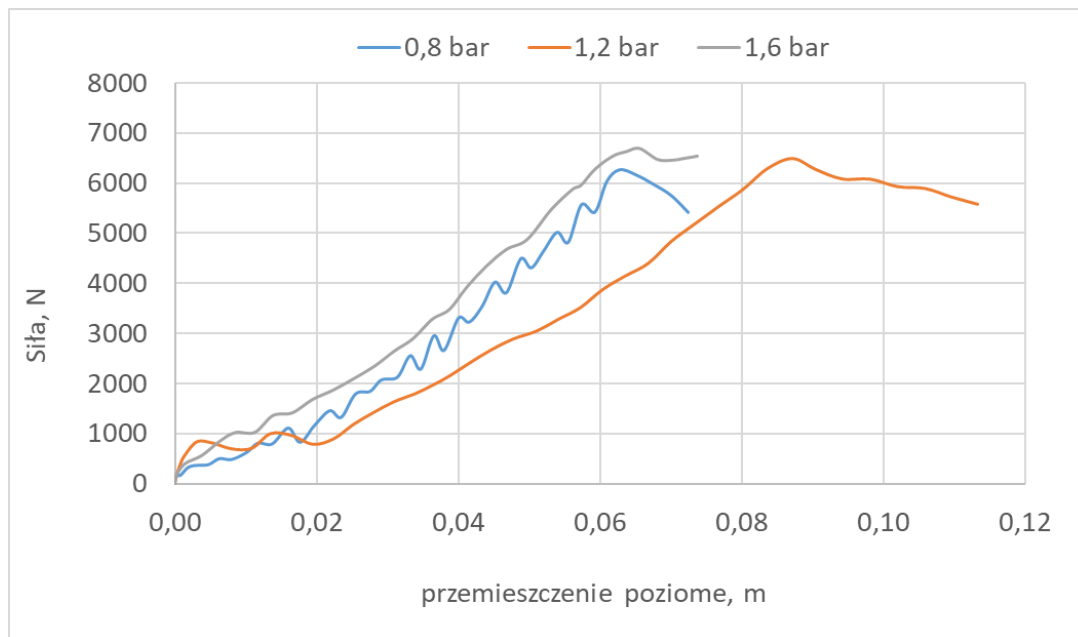
Dla takich samych zmiennych parametrów ciśnienia powietrza w oponie oraz jej pionowym obciążaniu przeprowadzono analizę przebiegu siły w funkcji przemieszczenia koła na suchej kostce granitowej dla obciążenia średniego wynoszącego 7357 N. Przebiegi te przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N

Zmiana obciążenia pionowego działającego na koło z wartości najniższej (4905 N) do wartości średniej (7357 N) doprowadziła do zarejestrowania nieco odmiennych przebiegów siły w funkcji przemieszczenia. Przede wszystkim można zauważyć, że przy obciążeniu 7357N (rys 27) dla różnych wartości ciśnienia przebiegi te nie pokrywają się ze sobą lub nie są nawet do siebie zbliżone już od samego początku zakresu przemieszczenia poziomego koła. Przebiegi te są jednak blisko równoległe do siebie i w zakresie od zera do około 0,05 metra przemieszczenia poziomego koła najniższe wartości siły przyczepności osiągnęto dla ciśnienia najniższego (0,8 bara), a najwyższe dla ciśnienia najwyższego (1,6 bara). Tendencja ta zmieniła się w górnym obszarze zakresu tego przemieszczenia i do zerwania przyczepności koła od podłoża, czyli osiągnięcia najwyższej wartości siły dla najniższego ciśnienia pompowania koła (0,8 bara) doszło przy podobnych wartościach siły jak w przypadku ciśnienia najwyższego (1,6 bara) czyli przy około 5000 N. Przy średniej wartości ciśnienia równej 1,2 bara, maksymalna wartość siły przyczepności wynosiła niespełna 4600 N.

Na kolejnym rysunku (rys 28) przedstawiono przebieg siły przyczepności w funkcji deformacji opony (jej poziomego przemieszczenia) przy wymuszeniu największego nacisku pionowego na badane koło (9810 N) na nawierzchni złożonej z suchej kostki granitowej.

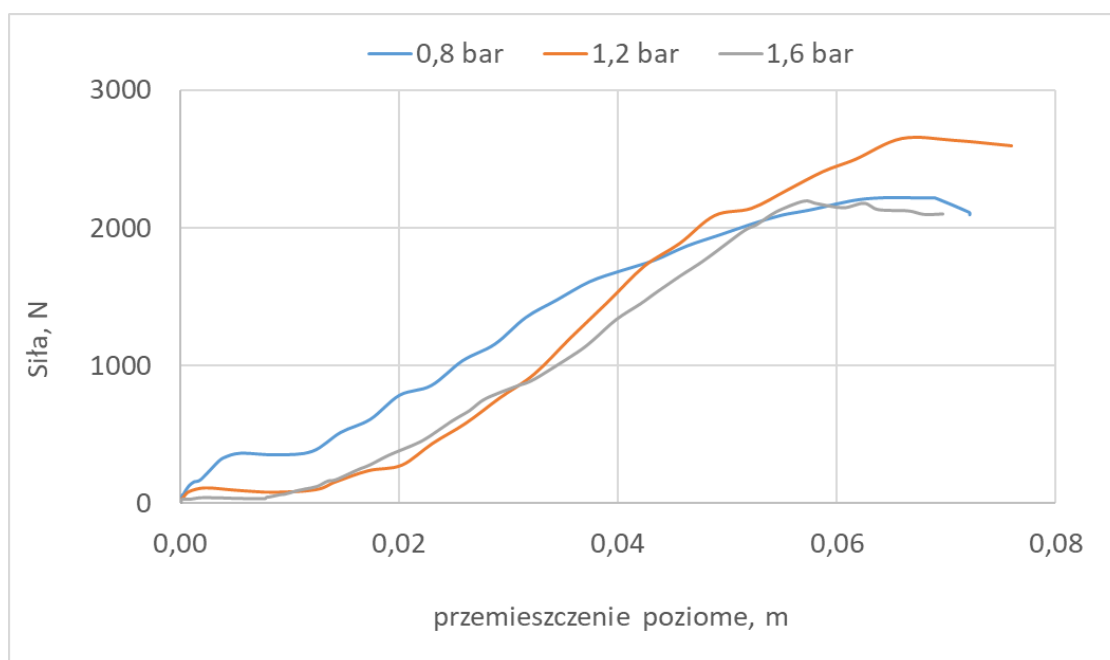


Rys. 28. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N.

Obciążenia koła największym ciężarem (9810 N) zmieniło nieco przebiegi sił przy różnych ciśnieniach jego pompowania w porównaniu z poprzednimi, niższymi obciążeniami na suchej kostce granitowej. Maksymalne wartości siły przyczepności osiągały wartości oczywiście najwyższe przy najwyższym obciążeniu koła ale w zakresie od około 0,019 do zerwania przyczepności koła od podłoża przebieg siły dla ciśnienia najniższego (0,8 bara) nie był już przebiegiem o najniższych wartościach jak to miało miejsce przy niższych obciążeniach koła na tej nawierzchni. Można zauważyć, że przebieg siły przy ciśnieniu najwyższym (1,6 bara) i najniższym (0,8 bara) osiągały zbliżone wartości praktycznie w całym zakresie przemieszczenia poziomego, a przebieg siły dla ciśnienia pośredniego (1,2 bara) odbiegał od nich i osiągał o wiele niższe wartości. Maksymalne wartości siły przyczepności dla wszystkich ciśnień pompowania koła mieściły się w przedziale od około 6200 do około 6600 N. Największą wartość siły odnotowano dla ciśnienia najwyższego (1,6 bara), a dla ciśnień 0,8 i 1,2 bara wartości te były zbliżone. Do zerwania przyczepności przy ciśnieniach najniższym i najwyższym doszło przy przemieszczeniu poziomym około 0,06 – 0,07 metra natomiast dla ciśnienia pośredniego (1,2 bara) przy przemieszczeniu koła na ok 0,9 metra.

W następnej fazie badań dokonano zmiany stanu nawierzchni złożonej z kostki granitowej polewając ją wodą. Przebieg siły przyczepności w funkcji deformacji poziomej

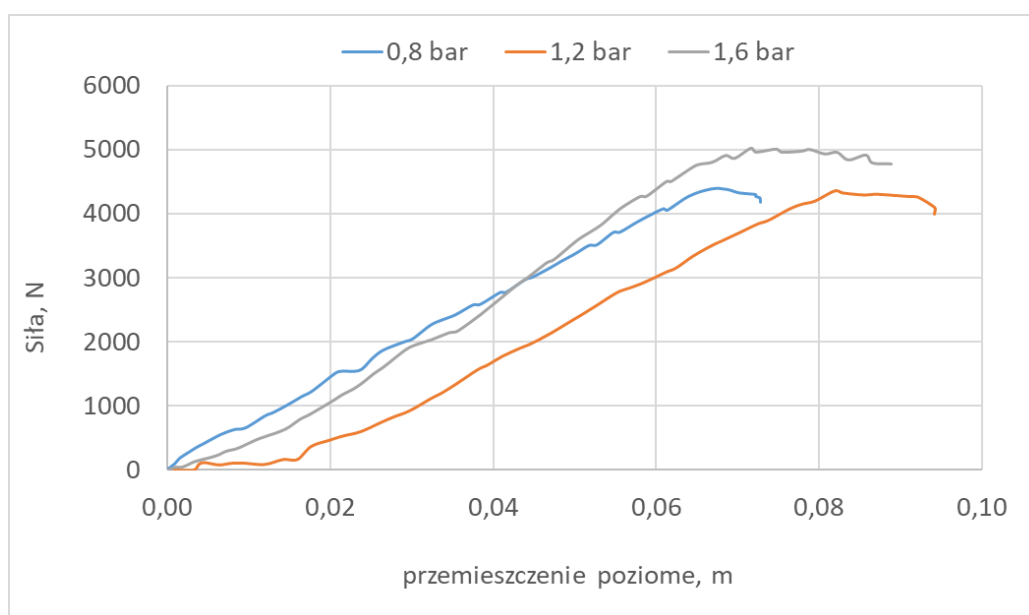
opony (przeszczenia poziomego) dla takich warunków przy minimalnym obciążeniu pionowym koła (4905 N) przedstawia rysunek 29.



Rys. 29. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N.

Zmiana stanu nawierzchni kostki granitowej z suchej na moką diametralnie zmieniła przebiegi sił dla zadawanych ciśnień powietrza w badanym kole. Jak widać na rysunku 29, w początkowym zakresie przebiegu siły (od 0,00 do ok 0,04 metra przemieszczenia poziomego koła) najwyższe wartości siły odnotowano dla najniższego ciśnienia pompowania koła (0,8 bara), a w podobnym zakresie, bo do ok 0,03 metra przemieszczenia koła, przebiegi siły dla pozostałych dwóch ciśnień (1,2 i 1,6 bara) miały zbliżone wartości siły. Najwyższą wartość siły przyczepności zanotowano dla ciśnienia pośredniego (1,2 bara), która wynosiła około 2650 N. Dla ciśnienia najniższego (0,8 bara) i najwyższego (1,6 bara) do zerwania przyczepności koła czyli osiągnięcia maksymalnych wartości siły przyczepności doszło przy podobnych wartościach około 2200 N. Maksymalne wartości siły przyczepności dla ciśnienia najniższego równego 0,8 bara osiągnięto najszybciej tj. przy najmniejszym przemieszczeniu poziomym koła (ok 0,055 metra). Dla ciśnień wyższych tj. 1,2 i 1,6 bara do osiągnięcia maksymalnych wartości siły doszło przy przemieszczeniu koła na odległość ok 0,065 – 0,07 metra.

Obciążając koło ciężarem równym 7357 N na niezmienionej mokrej nawierzchni kostki granitowej odnotowano przedstawione na rysunku 30 przebiegi sił przyczepności w funkcji odkształcenia poziomego koła.

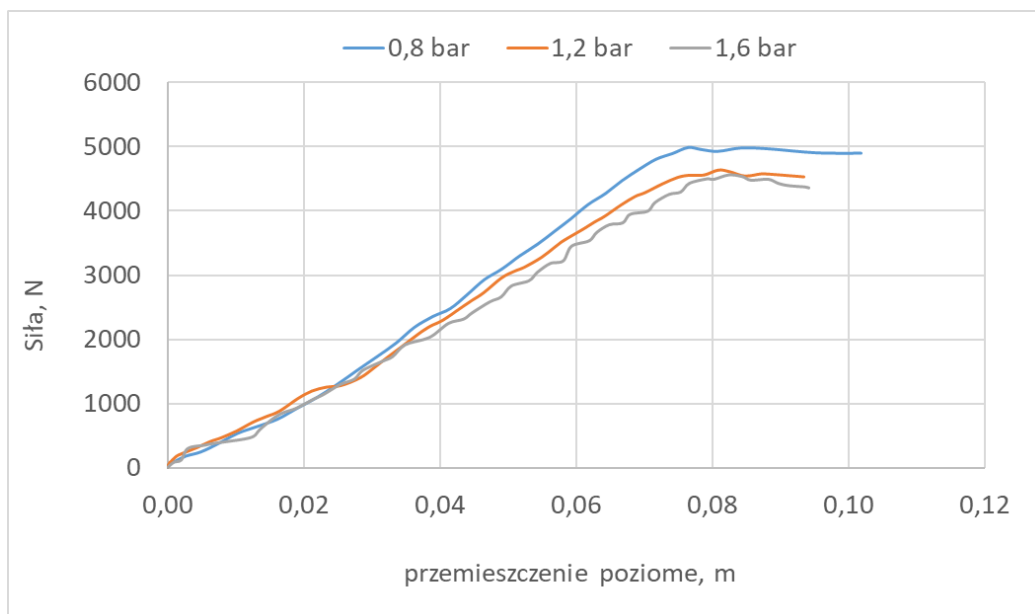


Rys. 30. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N.

Zwiększenie obciążenia koła z wartości 4905 N do 7357 N doprowadziło do odnotowywania wyższych wartości maksymalnych sił przyczepności. Zauważono, że przebiegi siły dla wartości ciśnienia 0,8 bara i 1,6 bara, a więc najmniejszego i największego, w zakresie od początku pomiaru do wartości około 0,05 metra są do siebie zbliżone, a przebieg siły dla ciśnienia pośredniego (1,2 bara) był znacznie niższy (osiągał mniejsze wartości siły w zakresie przemieszczenia poziomego koła). Maksymalną wartość siły przyczepności koła do podłoża osiągnięto przy największym ciśnieniu pompowania koła (1,6 bara) i wynosiła ona około 5000 N. Dla ciśnień niższych 0,8 bara i 1,2 bara do zerwania przyczepności koła dochodziło przy podobnych wartościach siły, które wynosiły ok 4350-4380 N. Maksymalne wartości siły odnotowano przy deformacji poziomej koła bliskiej 0,07 metra dla ciśnienia 0,8 bara i 1,6 bara, a dla pośredniej wartości ciśnienia powietrza w kole (1,2 bara) deformacja ta wynosiła nieco ponad 0,08 metra.

Zwiększenie obciążenia pionowego działającego na badane koło do wartości 9810 N przy założonych ciśnieniach pompowania koła na 0,8, 1,2 i 1,6 bara pozwoliło na ustalenie przebiegów siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego koła przedstawione na rysunku 31.

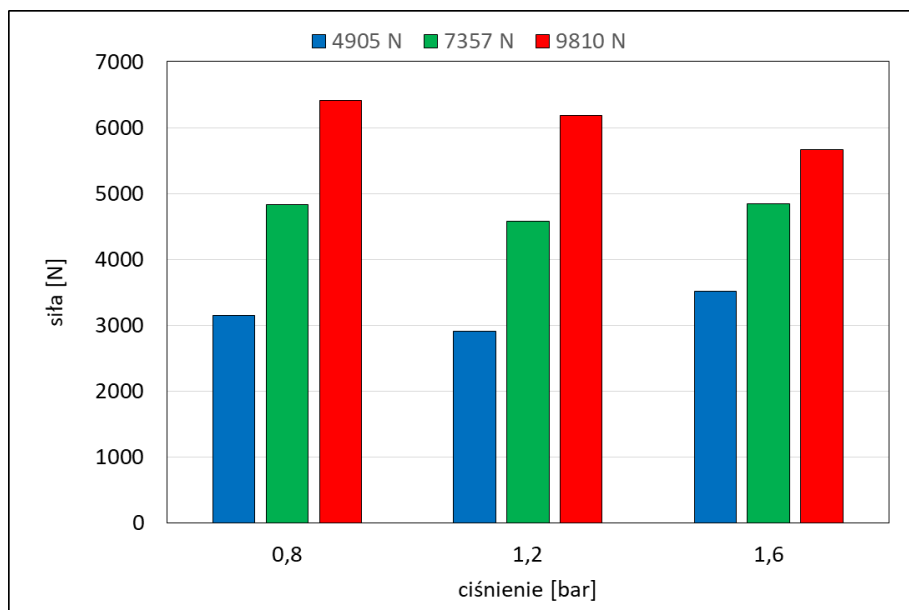




Rys. 31. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N.

Jak można dostrzec na rysunku 31, przebiegi siły przyczepności dla każdego z zakładanych ciśnień pompowania koła (0,8, 1,2 i 1,6 bara) w zakresie jego przemieszczenia od zera do około 0,04 metra osiągały zbliżone wartości. Do zerwania przyczepności koła od podłoża dla każdego ciśnienia powietrza w kole dochodziło po przemieszczeniu poziomym koła na odległość około 0,08 metra. Najniższą wartość maksymalną siły przyczepności odnotowano dla ciśnienia najwyższego (1,6 bara), wartość ta była zbliżona do wartości siły przy ciśnieniu pompowania 1,2 bara i wynosiły one kolejno około 4560 – 4630 N. Przy ciśnieniu powietrza w kole równym 0,8 bara odnotowano maksymalną wartość siły przyczepności na poziomie około 5000 N. Wartości te zatem nie różniły się znacznie od tych odnotowywanych dla pośredniego obciążenia pionowego koła (7357 N).

W dalszej kolejności przeprowadzono analizę maksymalnych wartości siły przyczepności zablokowanego koła w zależności od ciśnienia jego pompowania i obciążeń pionowych na nie działających. Na rysunku 32 przedstawiono wartości tego parametru na pierwszym z badanych podłoży – kostce granitowej w stanie suchym.

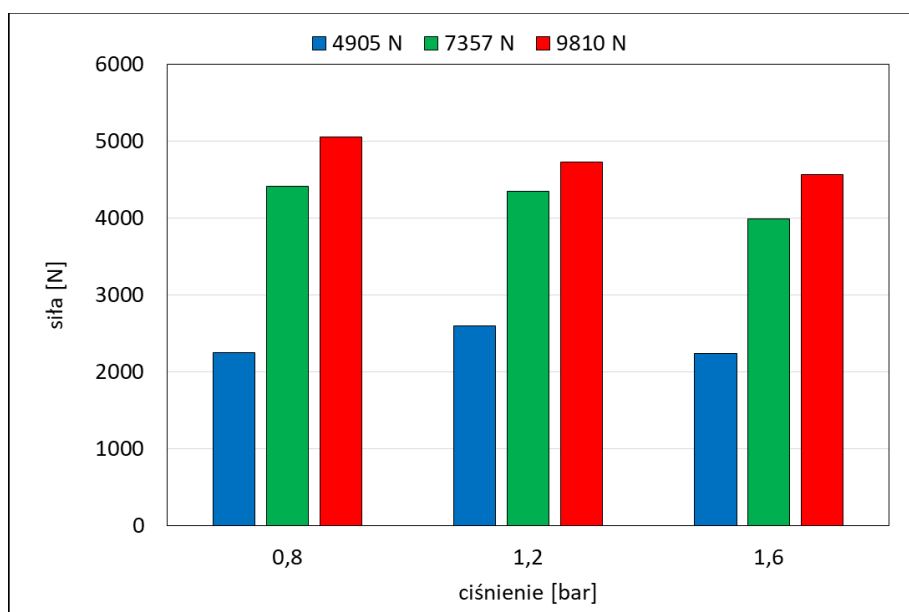


Rys. 32. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnięte na kostce suchej

Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 32, najwyższe wartości siły przyczepności stwierdzono przy najwyższej wartości obciążenia pionowego (9810 N). W przypadku najniższego ciśnienia powietrza w oponie (0,8 bara) wartość maksymalnej siły przyczepności wyniosła 6408,8 N. Dla kolejnych dwóch wartości ciśnień powietrza w kole (1,2 bara i 1,6 bara) przy obciążeniu pionowym 9810 N wartości siły przyczepności wyniosły odpowiednio 6189,6 i 5663,1 N. Przy obciążeniu pionowym 7357 N siły przyczepności osiągały wartości 4836,8 N, 4583,2 N oraz 4837,9 N odpowiednio dla ciśnień powietrza w kole 0,8, 1,2, 1,6 bara. W przypadku najniższego obciążenia pionowego (4905 N) maksymalne siły przyczepności osiągnęły natomiast wartości w zakresie od 2914,8 N (przy ciśnieniu powietrza w kole 1,2 bara) do 3520,2 N (przy najwyższym ciśnieniu pompowania). Analizując tendencje zmian siły przyczepności na skutek zmian obciążenia pionowego można jednoznacznie stwierdzić, iż we wszystkich przypadkach wzrost obciążenia pionowego skutkował wzrostem siły przyczepności. Najwyższe wartości przyrostów stwierdzono przy ciśnieniu pompowania 1,2 bara – różnice wyniosły 57% po pierwszym zwiększeniu obciążenia i 35% po kolejnym dociążeniu. Przy wszystkich trzech ciśnieniach pompowania zaobserwowano, że większe przyrosty siły przyczepności występowały po pierwszym zwiększeniu obciążenia pionowego (z 4905 do 7357 N) – średni przyrost wyniósł 49%. Drugie zwiększenie obciążenia (z 7357 do 9810 N) powodowało mniejsze przyrosty siły przyczepności (maksymalnie o 35%, średnio o 28%). Ponadto zaobserwowano, że im wyższe ciśnienie pompowania, tym mniejsze przyrosty

siły hamującej na skutek wzrostu obciążenia pionowego. Analizując wpływ zmian ciśnienia pompowania na wartości sił przyczepności stwierdzono, że przy najwyższym obciążeniu wzrost ciśnienia pompowania skutkowałam spadkiem siły przyczepności (odpowiednio o 3,5% i 8,9%). Przy pozostałych dwóch obciążeniach pionowych pierwsze zwiększenie ciśnienia pompowania skutkowałam niewielkim spadkiem siły przyczepności zaś kolejne – wzrostem (o maksymalnie 20%).

Na rysunku 33 przedstawiono wartości maksymalnej siły przyczepności na tym samym podłożu tj. kostce granitowej, której nawierzchnia została pokryta warstwą wody.



Rys. 33. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnięte na kostce mokrej

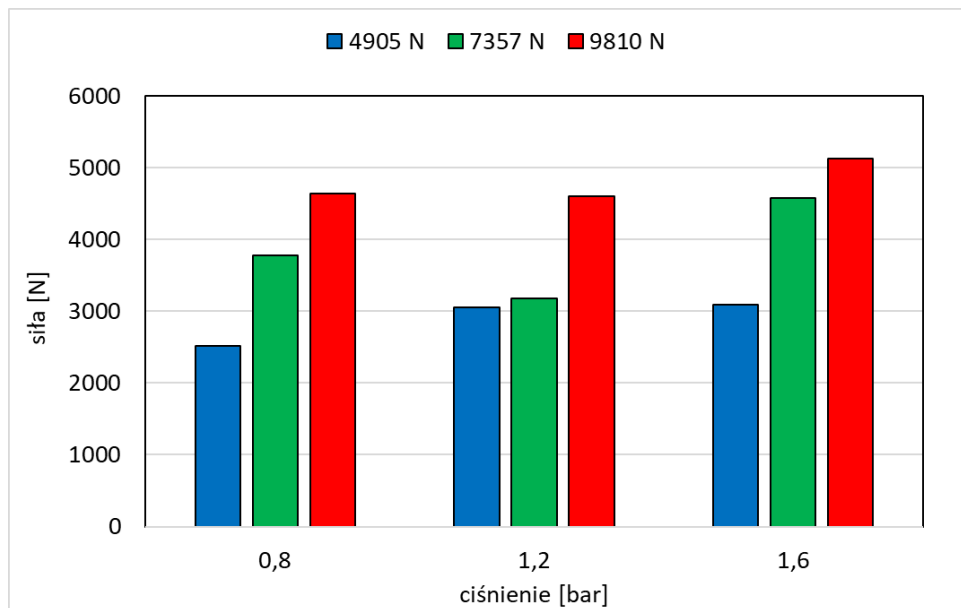
Jak można dostrzec na wykresie przedstawionym na rysunku 33, podobnie jak na kostce suchej, najwyższe wartości siły przyczepności zmierzono przy najwyższym obciążeniu pionowym (9810 N). Najwyższą wartość tej siły stwierdzono przy najniższym analizowanym ciśnieniu powietrza w oponie tj. 0,8 bara (5052 N). Zwiększenie ciśnienia powietrza w kole przy maksymalnym obciążeniu (9810 N) powodowało spadek siły przyczepności. Zmierzono kolejno dla ciśnienia 1,2 bara wartość siły przyczepności równą 4723 N (co stanowiło spadek o 6,5 %), a dla ciśnienia 1,6 bara wartość siły równą 4559 N ( spadek wartości o 9,75 % w stosunku do wartości przy 0,8 bara oraz 3,5 % w odniesieniu do wartości siły przy ciśnieniu 1,2 bara). Maksymalną wartość siły przyczepności przy średnim obciążeniu pionowym (7357 N) odnotowano dla najniższego ciśnienia (0,8 bara) 4416 N, dla ciśnienia średniego (1,2 bara) wartość ta wynosiła 4344 N co stanowiło zmniejszenie siły o 1,6 %, a dla najwyższego ciśnienia

1,6 bara odnotowano spadek siły o kolejne 8,3 % do wartości 3986 N. Zmieniając obciążenie do najniższej z analizowanych wartości (4905 N) zmierzono następujące wartości siły przyczepności dla poszczególnych ciśnień powietrza w oponie – 2254 N (dla ciśnienia najniższego – 0,8 bara), 2596 N (1,2 bara) oraz 2240 N (dla najwyższego ciśnienia 1,6 bara). Wartości siły przyczepności dla najniższego obciążenia pionowego (4905 N) były najniższe, a zmiany ciśnienia powietrza w kole nie skutkowały znacznymi przyrostami siły przyczepności (zmiana ciśnienia z wartości 0,8 bara na 1,2 bara spowodowało wzrost siły o 15,1 %, a wzrost do wartości 1,6 bara spadek wartości siły o 13,7 % do wartości porównywalnej do ciśnienia najniższego – 0,8 bara).

Zaobserwowano, że zmiana stanu nawierzchni kostki brukowej z suchej na moką spowodowało obniżenie maksymalnych wartości zmierzonych sił dla poszczególnych ciśnień przy takich samych obciążeniach. Wartości te były niższe na kostce mokrej o 28,3 %, 10,9 % i 36,3 % kolejno dla ciśnienia 0,8, 1,2 i 1,6 bara oraz najniższego obciążenia (4905 N), 8,7 %, 5,2 % i 17,6 % przy średnim obciążeniu (7357 N) oraz 21,2 %, 23,7 % i 19,5 % przy obciążeniu najwyższym – 9810 N kolejno dla ciśnień 0,8, 1,2 i 1,6 bara.

Obserwując tendencję zmian wartości siły przyczepności przy różnych obciążeniach pionowych i dla takiego samego ciśnienia powietrza w kole odnotowano, iż wartość siły zwiększała się wraz ze wzrostem obciążenia na koło. Zjawisko to było wyraźnie widoczne pomiędzy obciążeniem pionowym najniższym (4905 N) i średnim (7357 N) gdzie zmiany wynosiły 95,9%, 67,4 % i 77,9 % kolejno dla ciśnień powietrza w oponie 0,8, 1,2 i 1,6 bara. Różnice pomiędzy obciążeniem pionowym 7357 N, a 9810 N wynosiły dla ciśnień 0,8, 1,2 i 1,6 bara kolejno 14,4 %, 8,7 % i 14,4 %.

Poniżej, na rysunku 34 przedstawiono wartości siły przyczepności na drugim z badanych podłoży – utwardzonym gruncie w stanie suchym.



Rys. 34. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnięte na suchym twardym gruncie

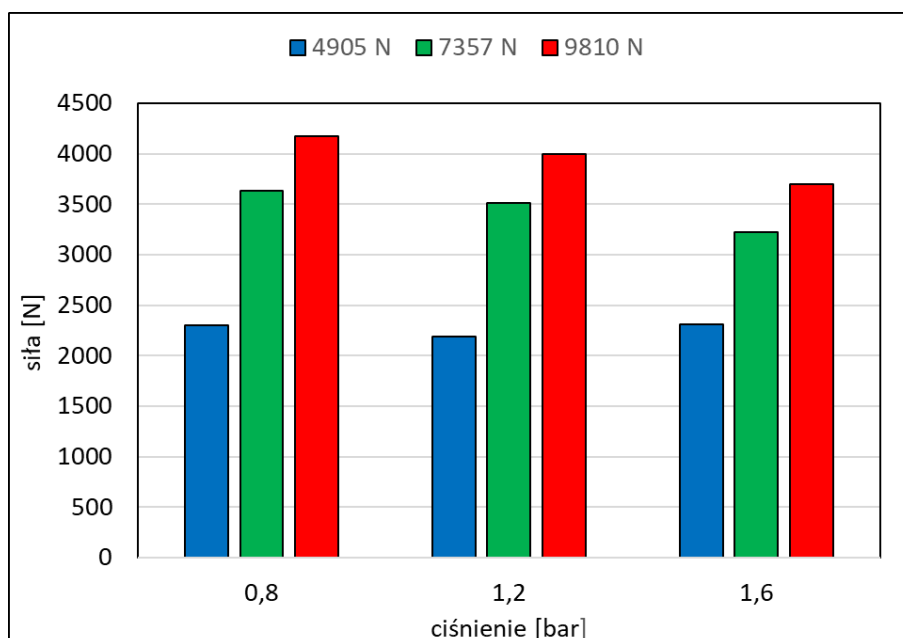
Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 34, najwyższe wartości siły przyczepności, podobnie jak na kostce brukowej, stwierdzono przy najwyższej wartości obciążenia pionowego (9810 N). W przypadku najniższego ciśnienia powietrza w oponie (0,8 bara) wartość maksymalnej siły przyczepności wyniosła 4646 N, a zwiększając wartości ciśnień powietrza w kole (do 1,2 bara i 1,6 bara) przy tym samym obciążeniu pionowym 9810N odnotowano maksymalne wartości siły przyczepności równe odpowiednio 4608 N i 5122 N. W przeciwieństwie do wartości tej siły na suchej kostce brukowej, maksimum dla suchego gruntu występowało przy najwyższym ciśnieniu powietrza w oponie. Przy obciążeniu pionowym 7357 N i kolejno dla ciśnień powietrza w kole 0,8, 1,2, 1,6 bara siły przyczepności osiągały wartości 3779 N, 3184 N i 4573 N. W przypadku najniższego obciążenia pionowego wynoszącego 4905 N, odnotowano maksymalne siły przyczepności wynosiły 2512 N, 3052 N oraz 3093 N odpowiednio dla 0,8 bara, 1,2 bara i 1,6 bara.

Zmiany wartości siły przyczepności w zależności od obciążenia pionowego dla każdego ciśnienia powietrza w oponie wskazywały tendencję wzrostową tej siły wraz ze wzrostem obciążenia pionowego na koło. Wartości przyrostów dla ciśnienia 0,8 bara wyniosły 50,4% po pierwszym zwiększeniu obciążenia (z 4905 N do 7357 N) i 22,9% po kolejnym dociążeniu (do 9810 N). Dla ciśnienia 1,2 bara zmiana obciążenia z 4905 N do 7357 N spowodowała przyrost siły przyczepności o 4,3 %, a dociążenie koła do 9810 N wzrost o kolejne 44,7 %. W przypadku najwyższej wartości ciśnienia w oponie (1,6 bara) zwiększenie

obciążenia pionowego koła z wartości 4905 N do 7357 N spowodowało wzrost siły przyczepności o 47,8 %, podobnie jak dociążenie do wartości 9810 N, które spowodowało przyrost o kolejne 12%.

Analizując wpływ zmian ciśnienia powietrza w oponie na wartości sił przyczepności stwierdzono, że przy najniższym obciążeniu wzrost ciśnienia powietrza w oponie skutkowało zwiększeniem wartości siły przyczepności o 21,5% (z 0,8 na 1,2 bara) oraz 1,3 % (dla zmiany z 1,2 na 1,6 bara). Przy pozostałych dwóch obciążeniach pionowych (7357 N i 9810 N) pierwsze zwiększenie ciśnienia powietrza w kole skutkowało niewielkim spadkiem siły przyczepności (odpowiednio -0,8 i - 15,7%) zaś kolejne – wzrostem o wartości 11,2 % i 43,6%.

Na rysunku 35 przedstawiono wartości siły przyczepności na utwardzonym gruncie po zmianie jego stanu nawierzchni na moką.



Rys. 35. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnęte na mokrym twardym gruncie

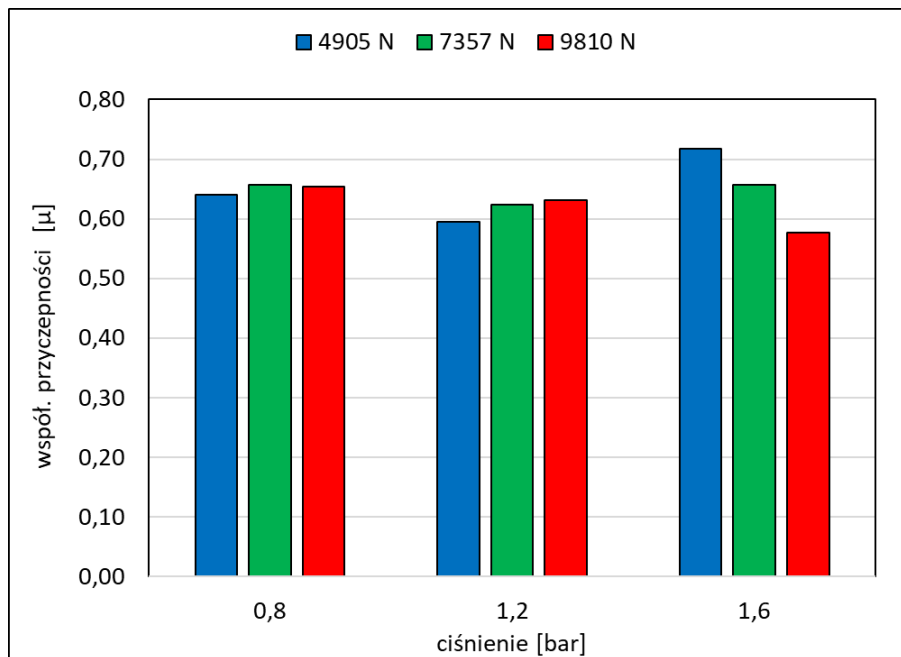
Analizując przebieg wykresu przedstawionego na rysunku 35 można wskazać, że najwyższe wartości siły przyczepności zaobserwowano przy najwyższym obciążeniu pionowym (9810 N), jednak w przeciwieństwie do twardej nawierzchni gruntowej w stanie suchym najwyższą wartość tej siły na mokrym gruncie stwierdzono przy najniższym z analizowanych ciśnień powietrza w oponie tj. 0,8 bara (maksimum na poziomie 4175 N). Zwiększanie ciśnienia powietrza w kole przy maksymalnym obciążeniu (9810 N) powodowało spadek siły przyczepności. Dla ciśnienia 1,2 bara wartość siły przyczepności wynosiła 3998 N

(spadek wartości o 4,2 %), a dla ciśnienia 1,6 bara odnotowano wartość siły równą 3696 N (spadek o kolejne 7,5 %). Maksymalną wartość siły przyczepności przy średnim obciążeniu pionowym (7357 N) odnotowano także dla najniższego ciśnienia (0,8 bara), wynosiła ona 3634 N, dla ciśnienia powietrza w kole równego 1,2 bara wartość ta wynosiła 3515 N co było spadkiem siły o 3,3 %, a dla najwyższego ciśnienia 1,6 bara odnotowano spadek siły o kolejne 8,3 % do wartości 3224 N. W przypadku najniższego pionowego obciążenia koła (4905 N) zmierzono maksimum siły przyczepności na poziomie 2295 N (dla ciśnienia najniższego – 0,8 bara), 2193 N ( 1,2 bara) oraz 2306 N (dla najwyższego ciśnienia 1,6 bara). Wartości siły przyczepności dla najniższego obciążenia pionowego (4905 N) były najniższe, a zmiany ciśnienia powietrza w kole nie skutkowało znacznymi przyrostami siły przyczepności (zmiana ciśnienia z wartości 0,8 bara na 1,2 bara spowodowało spadek wartości siły o 4,5 %, a wzrost ciśnienia powietrza w oponie do wartości 1,6 bara spowodował wzrost wartości tej siły o 5,2 % do wartości siły porównywalnej do jej tej uzyskanej przy ciśnieniu najniższym tj. 0,8 bara).

Podobnie jak na kostce granitowej zaobserwowano, że zmiana stanu nawierzchni utwardzonego gruntu z suchego na mokry spowodowało obniżenie maksymalnych wartości zmierzonych sił dla poszczególnych ciśnień przy takich samych obciążeniach. Wartości te były niższe na mokrym utwardzonym gruncie o -8,6 %, -28,2 % i -25,4 % kolejno dla ciśnienia 0,8, 1,2 i 1,6 bara przy najniższym obciążeniu (4905 N), oraz -3,8 %, +10,4 % i -29,5 % przy średnim obciążeniu (7357 N) oraz -10,1 %, -13,2 % i -27,8 % przy obciążeniu najwyższym – 9810 N kolejno dla ciśnień 0,8, 1,2 i 1,6 bara.

Analizując tendencję zmian wartości siły przyczepności przy różnych wartościach obciążenia pionowego w odniesieniu do takiego samego ciśnienia zaobserwowano, iż wartość siły przyczepności zwiększała się wraz ze wzrostem obciążenia pionowego na koło. Zmiany te, podobnie jak na kostce brukowej były wyraźnie widoczne pomiędzy najniższym obciążeniem pionowym (4905 N) i średnim (7357 N) gdzie zmiany wynosiły 58,3 %, 60,3 % i 39,8 % kolejno dla ciśnień powietrza w oponie 0,8, 1,2 i 1,6 bara. Różnice pomiędzy obciążeniem pionowym 7357 N, a 9810 N wynosiły dla ciśnień 0,8, 1,2 i 1,6 bara kolejno 14,9 %, 13,7 % i 14,6 %.

Drugim z analizowanych parametrów związanych z przenoszeniem siły przyczepności na różne podłoża był obliczony maksymalny współczynnik przyczepności. Na rysunku 36 przedstawiono wartości tego parametru na pierwszym z badanych podłoży – kostce granitowej w stanie suchym.



Rys. 36. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na suchej kostce granitowej

Jak można dostrzec na wykresie przedstawionym na rysunku 36, najwyższe wartości współczynnika przyczepności stwierdzono przy najniższej wartości obciążenia pionowego (4905 N) oraz przy najwyższym ciśnieniu powietrza w oponie (1,6 bara). Maksymalna wartość współczynnika przyczepności wyniosła dla tych parametrów 0,72. Dla kolejnych dwóch wartości ciśnień powietrza w kole (1,2 bara i 1,6 bara) przy najniższym pionowym obciążeniu koła (4905 N) wartości współczynnika przyczepności wynosiły odpowiednio 0,64 i 0,59. Przy pośrednim obciążeniu pionowym (7357 N) współczynnik przyczepności osiągał wartość 0,66, 0,62, i 0,66 odpowiednio dla ciśnień powietrza w kole 0,8, 1,2, 1,6 bara. W przypadku najwyższego obciążenia pionowego (9810 N) maksymalne wartości współczynnika przyczepności wynosiły 0,65, 0,63 i 0,58 (przy ciśnieniu powietrza w kole odpowiednio dla 0,8 bara, 1,2 bara i 1,6 bara).

Analizując tendencje zmian współczynnika przyczepności na skutek zmian obciążenia pionowego zauważono, że w przypadku ciśnienia najniższego (0,8 bara) oraz średniego (1,2 bara) wzrost obciążenia pionowego nie skutkował istotnymi zmianami współczynnika przyczepności. Wartości te, po dociążaniu pionowym koła były nieznacznie wyższe dla ciśnienia 0,8 i 1,2 bara. Różnicę w zmierzonych wartościach współczynnika przyczepności odnotowano w przypadku najwyższego z zakładanych ciśnień powietrza w oponie (1,6 bara). Przy takim ciśnieniu najwyższą wartość współczynnika przyczepności odnotowano przy najniższym obciążeniu, a dociążanie koła skutkowało stopniowym obniżaniem tego



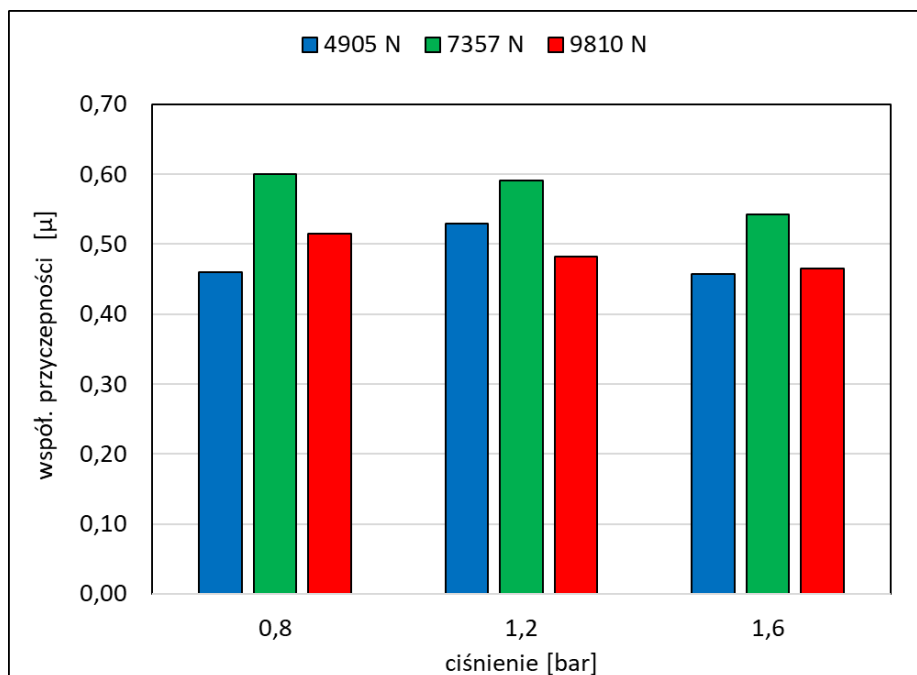
współczynnika. Różnica pomiędzy współczynnikiem przyczepności uzyskanym przy największym ciśnieniu powietrza w kole (1,6 bara) i dociążeniu pionowym koła z 4905 N na 7357 N wynosiła 8,4 %, a następnie dociążenie z wartości 7357 N na 9810 N spowodowało wzrost tego współczynnika o kolejne 12,2 %.

Analizując wpływ zmian ciśnienia powietrza w kole na wartości współczynnika przyczepności stwierdzono, że przy najwyższym obciążeniu pionowym koła wzrost ciśnienia pompowania skutkował spadkiem współczynnika przyczepności (odpowiednio o 3,4% i 8,5%). W przypadku średniego obciążenia pionowego koła ( 7357 N) pierwsze zwiększenie ciśnienia pompowania (z 0,8 bara do 1,2 bara) skutkowało niewielkim spadkiem siły przyczepności zaś kolejne (z 1,2 do 1,6 bara) – wzrostem do takiej samej wartości jak przy najniższym ciśnieniu powietrza w oponie. Do podobnej tendencji doszło w przypadku najniższego obciążenia pionowego koła (4905N). Pierwsza zmiana ciśnienia powietrza w kole (z wartości 0,8 bara na 1,2 bara) skutkowało nieznacznym obniżeniem wartości współczynnika przyczepności ( -7,1 %), a w następstwie zwiększenia tego ciśnienia do wartości 1,6 bara odnotowano zwiększenie współczynnika przyczepności o 17,2%.

Poniżej na rysunku nr 37 przedstawiono wykres zależności współczynnika przyczepności na mokrej kostce granitowej od ciśnienia powietrza w oponie przy różnym obciążeniu pionowym koła.

Jak można dostrzec na rysunku nr 37 zamieszczonym poniżej, najwyższą wartość współczynnika przyczepności odnotowano przy najmniejszym ciśnieniu powietrza (0,8 bara) oraz średnim obciążeniu pionowym koła (7357 N). Wartość ta wynosiła 0,6. Porównywalną, nieco mniejszą wartość współczynnika przyczepności – 0,59 odnotowano po zwiększeniu ciśnienia powietrza w oponie do wartości 1,2 bara (przy takim samym obciążeniu pionowym koła – 7357 N). Kolejne zwiększenie ciśnienia powietrza w kole do 1,6 bara spowodowało spadek współczynnika przyczepności do 0,54. Taka sama tendencja w zmianie współczynnika przyczepności podczas zwiększania ciśnienia w oponie miała miejsce w przypadku największego z zakładanych obciążeń tj. 9810 N. Przy ciśnieniu najniższym (0,8 bara) wartość współczynnika była równa 0,51, zmiana ciśnienia powietrza do wartości 1,2 bara spowodowała spadek współczynnika do 0,48, a przy 1,6 bara współczynnik przyczepności osiągnął wartość 0,46.

W przypadku najmniejszego obciążenia pionowego koła ( 4905 N) wartość współczynnika przyczepności wynosiła 0,46 dla najniższego ciśnienia powietrza w kole (0,8 bara), 0,53 dla 1,2 bara i 0,46 dla 1,6 bara.



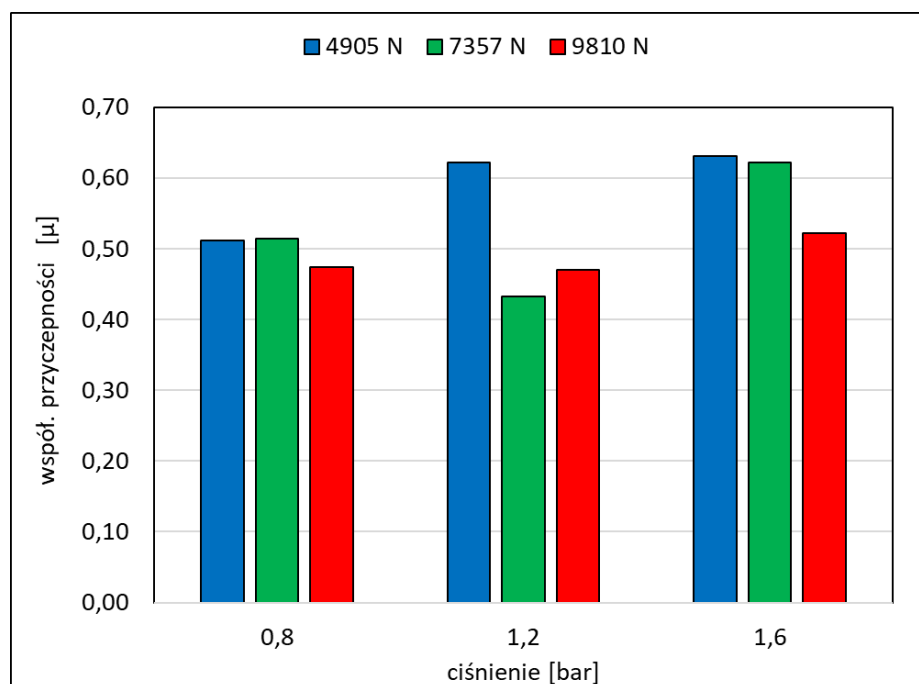
Rys. 37. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na mokrej kostce granitowej

Analizując tendencje obliczonych maksymalnych wartości współczynnika przyczepności dla poszczególnych wartości ciśnienia powietrza w kole można wskazać, że zmiana obciążenia pionowego koła skutkowałą wzrostem wartości tego współczynnika jednak wartości te przy takim samym obciążeniu ale zwiększonym ciśnieniu powietrza w kole nie różniły się znacznie od siebie (słupki na wykresie o tych samych kolorach).

Zaobserwowano także, że różnice w wartościach współczynników przyczepności na suchej i mokrej nawierzchni kostki granitowej wynosiły od kilku do kilkudziesięciu procent i wszystkie wartości współczynnika przyczepności uzyskane na mokrej nawierzchni były niższe od tych na tej samej nawierzchni suchej. Dla tego samego minimalnego pionowego obciążenia koła (4905 N) spadek wartości współczynnika przyczepności na nawierzchni mokrej wynosił dla ciśnienia powietrza w oponie 0,8, 1,2 i 1,6 bara kolejno 28,2 %, 11 % i 36,4 %. Dla obciążenia średniego (7357 N) różnice w wartościach współczynnika na mokrej nawierzchni w porównaniu do suchej wynosiły 8,7 %, 5,2 % oraz 17,6 %, a dla obciążenia maksymalnego 9810 N wynosiły one 21,2 %, 23,7 % oraz 19,5 %.

Poniżej na rysunku nr 38, zamieszczono wykres przedstawiający maksymalne wartości współczynnika przyczepności na suchej utwardzanej nawierzchni gruntowej

w zależności od ciśnienia powietrza w kole oraz przy różnych obciążeniach pionowych tego koła.



Rys. 38. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na suchej utwardzanej nawierzchni gruntowej

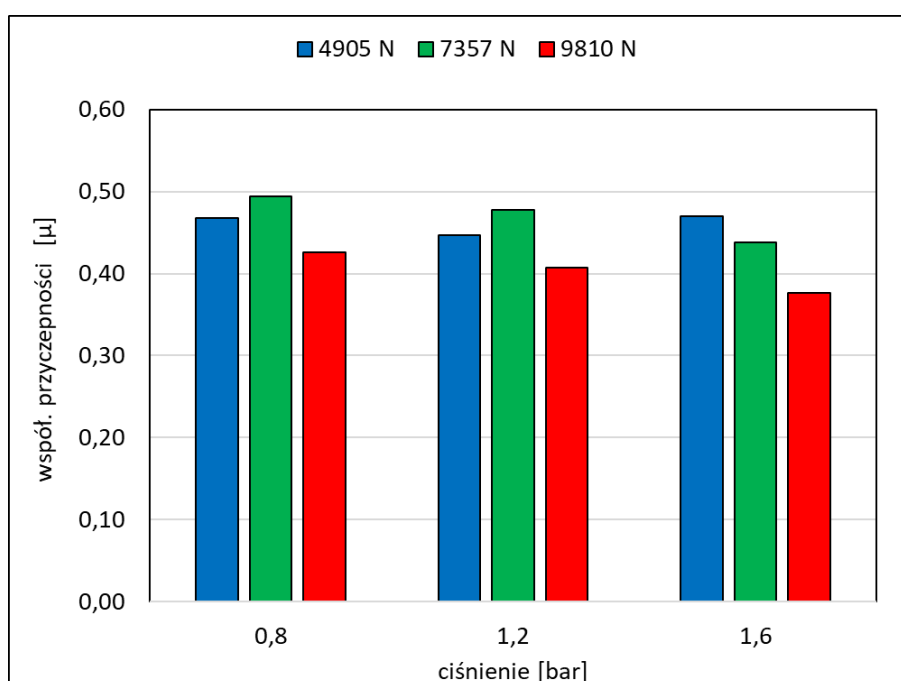
Z wykresu tego odczytać można, że najwyższa wartość współczynnika przyczepności występowała w przypadku najwyższego ciśnienia powietrza w oponie (1,6 bara) oraz przy najniższym obciążeniu pionowym koła (4905 N). Wartość ta wynosiła 0,63. Podobną wartość współczynnika przyczepności wynoszącą 0,62 uzyskano również przy najniższym obciążeniu koła i po zmniejszeniu ciśnienia powietrza w oponie do wartości 1,2 bara. Kolejne obniżenie tego ciśnienia do wartości 0,8 bara spowodowało już znacznie większy spadek wartości tego współczynnika do 0,51.

W przypadku średniego obciążenia koła (7357 N) również najwyższą wartość jego współczynnika przyczepności uzyskano przy ciśnieniu w oponie równym 1,6 bara. Wartość ta wynosiła 0,62. Obniżanie ciśnienia przy takim obciążeniu powodowało spadek wartości współczynnika przyczepności do wartości 0,43 (1,2 bara) i 0,51 (0,8 bara). Taka sama tendencja występowała w przypadku najwyższego obciążenia pionowego koła. Podobnie jak przy niższych obciążeniach, największą wartość współczynnika przyczepności odnotowano przy najwyższym ciśnieniu powietrza w oponie – 0,52, a zmniejszanie ciśnienia powietrza w oponie

powodowało spadek wartości współczynnika przyczepności koła. Wartości te wynosiły tak samo 0,47 zarówno dla ciśnienia 1,2 bara jak i dla 0,8 bara.

Analizując zmianę wartości współczynnika przyczepności dla takiego samego ciśnienia powietrza w oponie ale w zależności od zmiany obciążenia pionowego koła można wskazać, że dla każdego ciśnienia tendencja ta była taka sama. Każdorazowo najwyższy współczynnik przyczepności odnotowany został przy najmniejszym obciążeniu, a zwiększanie obciążenia powodowało spadek jego wartości. W przypadku ciśnienia 0,8 bara dla obciążenia pionowego koła 4905 N wartość współczynnika przyczepności wynosiła 0,51, a zwiększenie obciążenia do wartości 7357 N i 9810 N pozwalało odnotować wartość współczynnika odpowiednio 0,51 i 0,47. Dla ciśnienia powietrza w oponie 1,2 bara, wartość współczynnika przyczepności wynosiła 0,62 dla najniższego obciążenia (4905 N) oraz 0,43 i 0,47 dla obciążeń 7357 N i 9810 N. Dla najwyższej wartości ciśnienia powietrza w oponie wartości te wynosiły 0,63, 0,62 i 0,52 (odpowiednio dla 4905 N, 7357 N oraz 9810 N).

Poniżej na rysunku nr 39, zamieszczono wykres maksymalnych wartości współczynnika przyczepności na mokrej utwardzanej nawierzchni gruntowej w zależności od ciśnienia powietrza oraz przy różnych obciążeniach pionowych badanego koła.



Rys. 39. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na mokrej utwardzanej nawierzchni gruntowej

Jak można zaobserwować na rysunku 39, najwyższa wartość współczynnika przyczepności występowała w przypadku najniższej wartości ciśnienia powietrza w oponie (0,8 bara) oraz średniego obciążenia pionowego koła (7357 N) – wartość ta wynosiła 0,49. Zwiększając ciśnienie w oponach dla tego samego, średniego obciążenia pionowego koła (7357 N – zielone słupki na wykresie) uzyskano nieznacznie niższą wartość współczynnika przyczepności dla 1,2 bara (wartość 0,48) oraz dla 1,6 bara wartość 0,44.

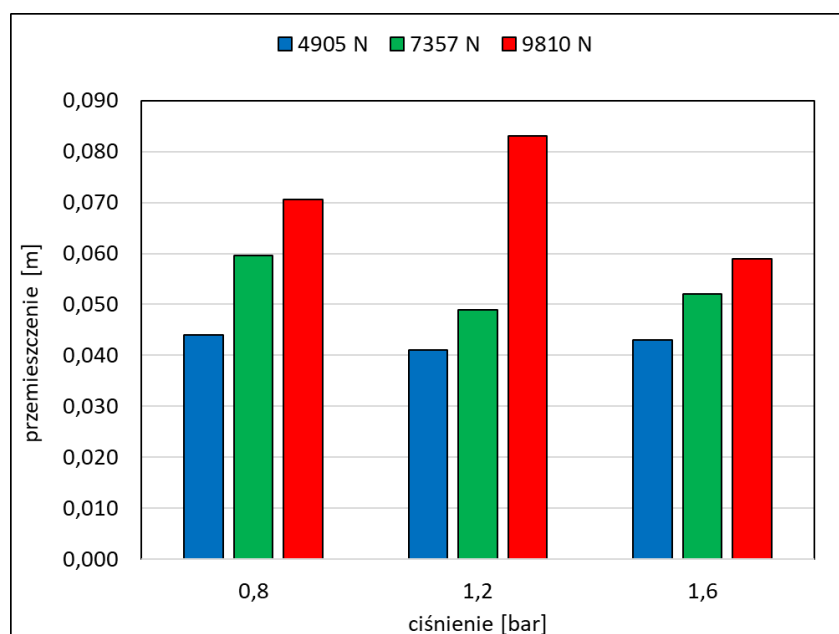
Dla najniższego obciążenia wynoszącego 4905 N (słupki niebieskie) wartości współczynnika przyczepności koła były takie same dla ciśnienia najniższego (0,8 bara) i najwyższego (1,6 bara) – 0,47. Dla pośredniej wartości ciśnienia 1,2 bara wartość ta była nieznacznie niższa i wynosiła 0,45. Z kolei dociażając pionowo koło do wartości najwyższej tj. 9810 N uzyskano najniższe wartości współczynnika przyczepności dla każdego z ciśnień. Współczynnik przyczepności był najwyższy dla ciśnienia najniższego (0,8 bara) i wynosił 0,43. Po zwiększeniu ciśnienia powietrza w oponie do wartości 1,2 bara współczynnik przyczepności koła wynosił 0,41, a kolejne zwiększenie ciśnienia w oponie do 1,6 bara spowodowało kolejny spadek wartości współczynnika przyczepności do 0,38.

Zaobserwowano, iż zwiększanie obciążenia pionowego koła powodowało przy najniższych wartościach ciśnienia powietrza w oponie (0,8 i 1,2 bara) początkowy nieznaczny wzrost współczynnika przyczepności, a następnie przy najwyższym ciśnieniu (1,6 bara) jego znaczny spadek. Wartości te przy ciśnieniu powietrza w oponie równym 0,8 bara zmieniały się po zwiększeniu obciążenia z 4905 N do 7357 N - wzrost współczynnika przyczepności o 5,3 % oraz po zwiększeniu obciążenia koła z 7357 N do 9810 N – spadek wartości współczynnika przyczepności o 13,8 %. Przy ciśnieniu powietrza 1,2 bara zwiększenie obciążenia koła z 4905 N do 7357 N prowadziło do zwiększenia współczynnika przyczepności o 6,4 %, a po kolejnym zwiększeniu obciążenia z 7357 N do 9810 N do zmniejszenia współczynnika przyczepności o 14,7 %. W przypadku największego z badanych ciśnień w oponie (1,6 bara) każdorazowe zwiększanie obciążenia pionowego koła powodowało zmniejszanie współczynnika przyczepności koła. Po zwiększeniu obciążenia z 4905 N do 7357 N współczynnik ten zmniejszył się o 6,8 %, a następnie po zwiększeniu obciążenia z 7357 N do 9810 N zmniejszył się on o kolejne 14 %.

Zaobserwowano również, że zmiana stanu nawierzchni utwardzanego gruntu z suchego na mokry spowodowało uzyskanie mniejszych współczynników przyczepności na nawierzchni mokrej od kilku do kilkudziesięciu procent w porównaniu z wynikami na nawierzchni suchej. Zauważono, że najmniejsze różnice procentowej zmiany współczynnika przyczepności dla takiego samego obciążenia pionowego koła uzyskiwano przy najniższym

ciśnieniu powietrza w oponie, a przy największym ciśnieniu powietrza w oponie zmiany współczynnika dla każdego obciążenia były największe. Wartości te przedstawiają się następująco: dla ciśnienia powietrza w oponie 0,8 bara wartość współczynnika przyczepności na nawierzchni mokrej była niższa niż na nawierzchni suchej przy obciążeniu koła 4905 N o -8,6%, dla obciążenia 7357 N o -3,8 %, a dla obciążenia 9810 N o -10,1 %. Po zwiększeniu ciśnienia do 1,2 bara na nawierzchni mokrej w porównaniu z suchą, różnica we współczynnikach przyczepności dla obciążenia 4905 N wynosiła -28,2 % dla obciążenia 7357 N +9,4 % oraz dla 9810 N -13,2 %. Dla najwyższej wartości ciśnienia powietrza w oponie 1,6 bara na nawierzchni mokrej współczynnik przyczepności koła był niższy niż na nawierzchni suchej przy obciążeniu 4905N o -25,4 %, przy obciążeniu 7357 N o -29,5 %, a przy 9810 N o -27,8%.

Kolejnym z analizowanych parametrów związanych z przenoszeniem siły przyczepności na różne podłoża była odległość przemieszczenia koła mierzona do chwili osiągnięcia maksymalnej wartości siły przyczepności. Na rysunku 40 przedstawiono wartości tego parametru na pierwszym z badanych podłoży – kostce granitowej w stanie suchym.



Rys. 40. Wartości przemieszczenia koła na suchej kostce granitowej

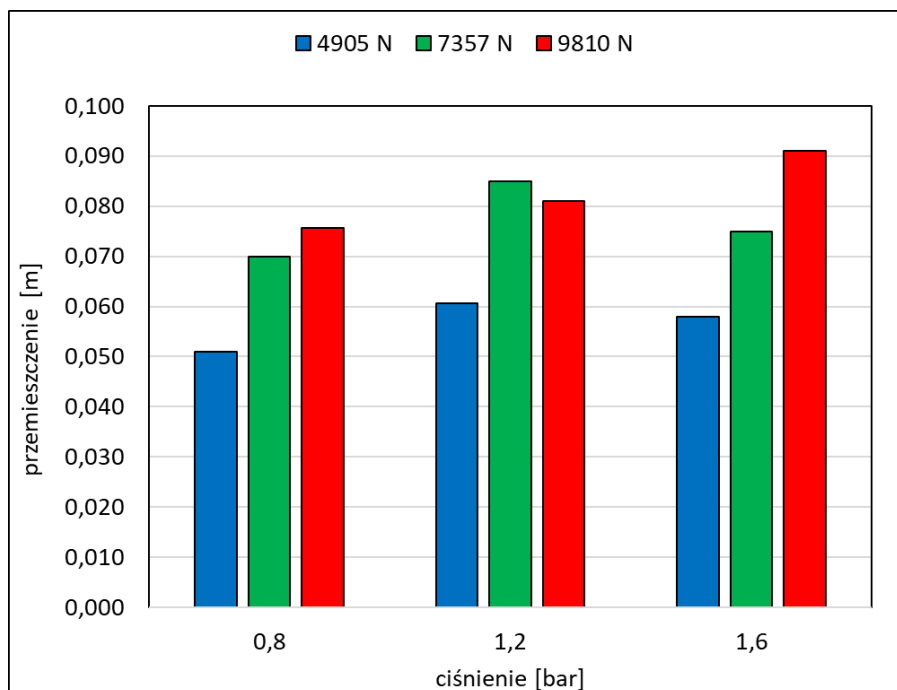
Analizując wykres na rysunku 40, należy wskazać, że największa wartość przesunięcia koła występowała przy największej wartości obciążenia pionowego koła (9810 N) oraz przy średnim obciążeniu tego koła (1,2 bara). Wartość ta wynosiła 0,083 metra. Przy najniższym ciśnieniu powietrza w oponie (0,8 bara) wartość przesunięcia koła wynosiła 0,071 metra, a dla

największego ciśnienia 0,059 m. Przy obciążeniu 7357 N najwyższa wartość przemieszczenia koła występowała przy najniższym ciśnieniu 0,8 bara – 0,060 metra. Zwiększenie ciśnienia powietrza w oponie na 1,2 bara spowodowało zmniejszenie tej odległości do 0,049 metra, a po kolejnym zwiększeniu tego ciśnienia do wartości 1,6 bara również odnotowano mniejsze przesunięcie koła – wartość 0,052 metra. Niewielkie różnice w odległości przemieszczenia koła zauważono dla najniższej wartości jego obciążenia pionowego (4905 N). Przy takim obciążeniu do największej wartości przesunięcia koła doszło, podobnie jak przy obciążeniu średnim (7357 N) przy najniższym ciśnieniu powietrza w oponie tj. 0,8 bara. Wartość ta wynosiła 0,044 metra. Zwiększanie wartości ciśnienia powietrza w oponie przy tym obciążeniu doprowadziło do nieznacznego spadku odległości przemieszczenia koła i tak dla ciśnienia 1,2 bara odległość ta wynosiła 0,041 metra, a dla 1,6 bara – 0,043 metra.

Zauważono, że zwiększanie obciążenia pionowego koła przy niezmiennych wartościach ciśnienia powietrza w oponie każdorazowo prowadziło do zwiększania odległości przesunięcia koła. Dla najniższego ciśnienia powietrza w oponie (0,8 bara) po zmianie obciążenia pionowego na tym kole z wartości 4905 N do 7357 N wartość przesunięcia koła zwiększyła się o 26,3 %, a po dociążeniu pionowo koła do 9810 N o kolejne 15,6 %. Przy ciśnieniu 1,2 bara zmiana z obciążenia najniższego (4905 N) do średniego (7357 N) spowodowała wzrost przesunięcia koła o 16,3 %, a dociążenie do maksymalnej wartości 9810 N o kolejne 41 %. W przypadku największej wartości ciśnienia tj. 1,6 bara, odnotowano zmianę przesunięcia koła przy zwiększeniu obciążenia pionowego koła z 4905 N do 7357 N o 17,3 %, a następnie przy obciążeniu 9810 N o kolejne 11,9 %.

Na rysunku 41 przedstawiono wartości maksymalnego przesunięcia koła na mokrej nawierzchni złożonej z kostki granitowej w zależności od wartości ciśnienia powietrza w oponie oraz wartości obciążenia pionowego działającego na to koło.

Jak zauważono podczas badań, największą wartość przesunięcia koła odnotowano przy największej wartości jego obciążenia pionowego (9810 N) oraz przy największym ciśnieniu pompowania (1,6 bara) - wynosiło ono 0,091 metra. Wraz ze zmniejszaniem ciśnienia w oponie (ciśnienia 1,2 i 0,8 bara) przy takim samym, największym obciążeniu dochodziło do zmniejszania się wartości przesunięcia – kolejno wartości te wynosiły 0,081 m i 0,076 m. Dla ciśnienia 1,6 i 1,2 wartości przesunięcia koła były zbliżone dla obciążeń 7357 N (kolejno 0,075 m oraz 0,085 m) i 4905 N ( 0,058 m dla 1,6 bara oraz 0,061 m dla 1,2 bara). Najniższe wartości przesunięcia koła odnotowano dla najniższego ciśnienia powietrza w oponie tj. 0,8 bara. Wartość przesunięcia koła przy takim ciśnieniu pompowania wynosiła 0,070 metra dla obciążenia pionowego koła 7357 N oraz 0,051 metra dla obciążenia 4905 N.



Rys. 41. Wartości przemieszczenia koła na mokrej kostce granitowej

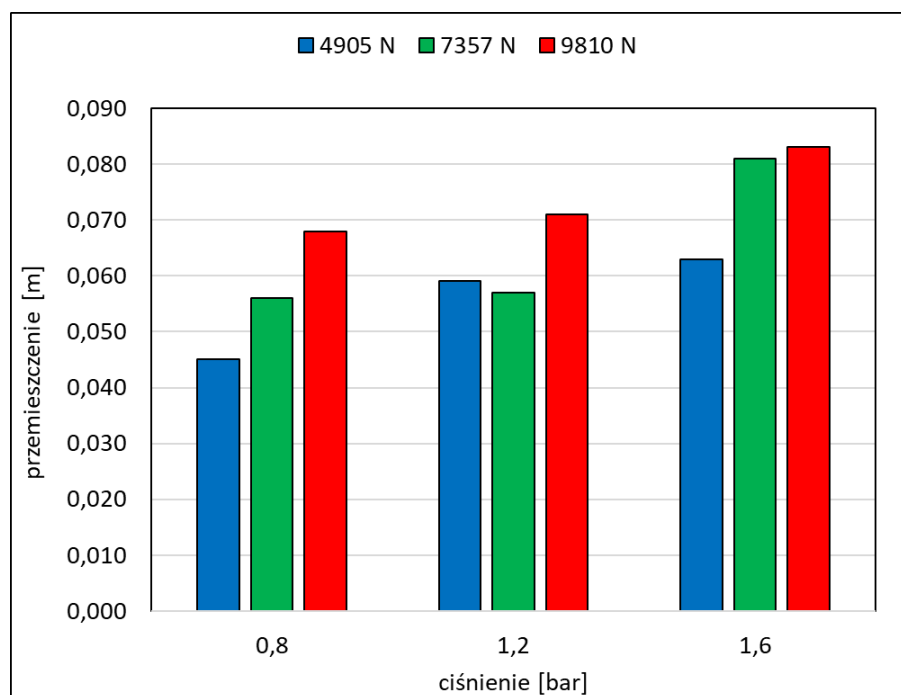
Jak można zauważyć na wykresie, dla poszczególnych wartości ciśnienia powietrza w kole najniższe wartości mają słupki niebieskie czyli przedstawiające wartości przesunięcia przy najmniejszym obciążeniu pionowym na koło. Przy ciśnieniu powietrza w kole wynoszącym 0,8 bara zwiększenie obciążenia na koło z wartości 4905 N na 7357 N spowodowało wzrost wartości przesunięcia koła o 27,1 % a przy obciążeniu koła równym 9810 N wartość przesunięcia zwiększyła się o kolejne 7,5 %. Dla ciśnienia powietrza w kole równym 1,2 bara zwiększenie obciążenia z 4905 N na 7357 N spowodowało wzrost przesunięcia koła o 28,6 %, a z 7357 N do 9810 N niewielki spadek tej wartości o 4,9 %. Z kolei tendencja wzrostu przesunięcia koła ponownie została zachowana w przypadku najwyższej wartości ciśnienia powietrza w oponie (1,6 bara) gdyż po zmianie obciążenia z 4905 N na 7357 N wartość tego przesunięcia wzrosła o 22,7 %, a po kolejnym dociążeniu do wartości 9810 N wzrosła o kolejne 17,6 %. Zauważyć można również, że największe wartości procentowego przyrostu odległości przesunięcia się koła występowały przy zmianie ciśnienia z 0,8 bara do 1,2 bara.

Porównując wartości przesunięcia koła na kostce granitowej w stanie suchym i mokrym można wskazać, że wartości przemieszczania się koła w warunkach nawierzchni mokrej były wyższe niż na tej samej nawierzchni suchej. Zaobserwowano, że najmniejsze przyrosty procentowe występowały dla najniższego ciśnienia 0,8 bara i tak kolejno dla obciążenia 4905 N, 7357 N oraz 9810 N wartości przesunięcia koła były wyższe na nawierzchni mokrej w porównaniu z suchą o 13,7 %, 14,8 % oraz 6,6 %. W przypadku ciśnienia powietrza



w kole równego 1,2 bara wartości na kostce granitowej mokrej były wyższe w porównaniu z kostką suchą dla obciążenia koła 4905 N o 32,4 %, dla obciążenia 7357 N o 42,4 % a dla najwyższej wartości obciążenia koła 9810 N nieznacznie niższe o -2,5 %. Wartości przemieszczenia koła przy ciśnieniu najwyższym 1,6 bara były każdorazowo wyższe na nawierzchni mokrej w porównaniu z suchą o 25,9 % (dla obciążenia 4905 N), o 30,7 % (obciążenie 7357 N) oraz o 35,2 % dla obciążenia najwyższego 9810 N.

Na rysunku 42 przedstawiono wartości przesunięcia koła podczas badań siły przyczepności przy takich samych jak powyżej różnych wartościach obciążenia pionowego działającego na badane koło oraz zadanego w nim ciśnienia powietrza na suchym utwardzonym gruncie.



Rys. 42. Wartości przemieszczenia koła na suchym utwardzonym gruncie

Analizując wykres można spostrzec, że najwyższą wartość przesunięcia koła odnotowano przy najwyższym ciśnieniu powietrza w oponie (1,6 bara) oraz przy największym obciążeniu pionowym koła (9810 N). Wartość ta wynosiła 0,083 metra. Zmiana ciśnienia powietrza w oponie przy tym samym, maksymalnym obciążeniu powodowała każdorazowo spadek wartości przemieszczenia koła (słupki czerwone). Dla ciśnienia 1,2 bara przesunięcie to wynosiło 0,071 metra, a dla 0,8 bara 0,068 metra. Zbliżoną maksymalną wartość przesunięcia koła odnotowano przy obciążeniu 7357 N oraz przy ciśnieniu 1,6 bara- wynosiła ona 0,081

metra. Podobnie jak dla największego obciążenia, zmniejszanie ciśnienia powietrza w oponie przy tym samym obciążeniu pionowym 7357N (słupki zielone), powodowało spadek przesunięcia koła i tak dla ciśnienia 1,2 bara wartość ta wynosiła 0,057 metra, a dla 0,8 bara – 0,056 metra. Ta sama zależność powstawała przy najmniejszym obciążeniu pionowym koła tj. przy 4905 N (słupki niebieskie). Najwyższą wartość przesunięcia koła odnotowano dla ciśnienia 1,6 i wynosiła ona 0,063 metra, dla 1,2 bara zmierzono 0,059 metra, a dla 0,8 bara – 0,045 metra.

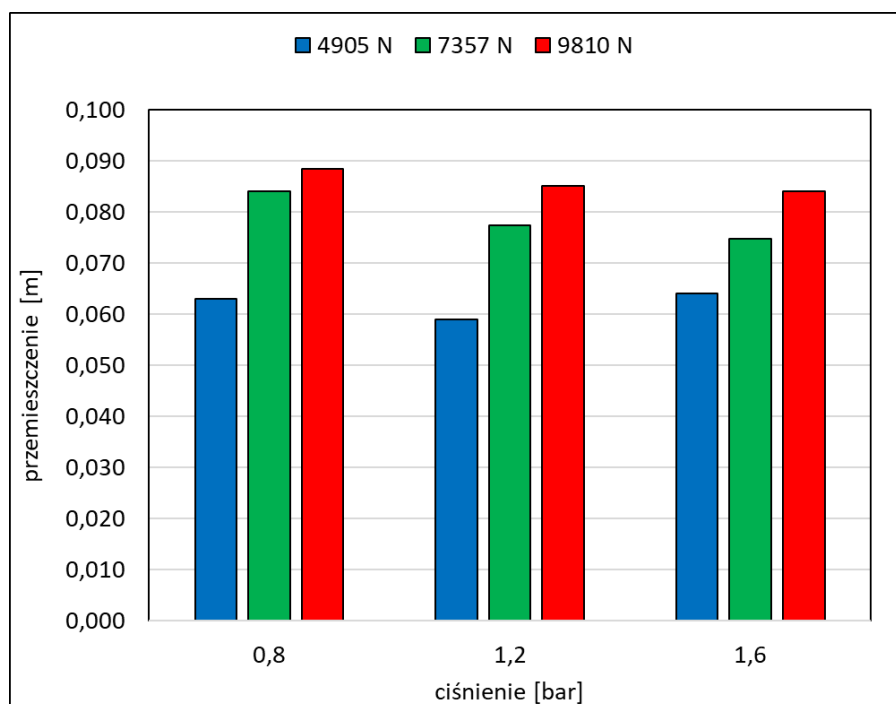
Zauważono, że dla poszczególnych ciśnień powietrza w oponie, zmiana obciążenia pionowego na koło powodowała zwiększenie przesunięcia się koła podczas badań. Przy ciśnieniu 0,8 bara i zwiększeniu obciążenia na koło z 4905 N na 7357 N przyrost przesunięcia koła wynosił 19,6 %, a przy zwiększeniu obciążenia z 7357 N na 9810 N odnotowano wzrost o kolejne 17,6 %. W przypadku ciśnienia powietrza w kole równym 1,2 bara zwiększenie wartości obciążenia koła z 4905 N na 7357 N spowodowało niewielki spadek przesunięcia o 3,4 % lecz po kolejnym zwiększeniu obciążenia z 7357 N na 9810 N odnotowano wzrost o 19,7 %. Dla największej wartości ciśnienia powietrza w badanym kole tj. 1,6 bara zwiększenie obciążenia koła spowodowało wzrost wartości jego przesunięcia o 22,2 %, a przy obciążeniu równym 9810N nastąpił wzrost o kolejne 2,4 %.

Po dokonaniu zmiany w stanie nawierzchni utwardzonego gruntu z suchego na mokry ponownie analizie poddano wyniki przemieszczenia badanego koła w zależności od zadanego ciśnienia w oponie oraz przy takich samych jak wcześniej różnych obciążeniach pionowych działających na to koło. Maksymalne wartości przemieszczenia się tego koła dla podanych czynników przedstawiono na rysunku 43.

Jak można zauważyć na wykresie (rys 43) największą wartość przesunięcia koła odnotowano przy najwyższym obciążeniu koła (9810 N) lecz w przeciwieństwie do gruntu suchego maksimum wartości osiągnięto nie przy najwyższej lecz przy najniższej wartości ciśnienia powietrza w kole. Wartość ta wynosiła 0,088 metra. Zwiększanie ciśnienia powietrza w oponie prowadziło przy takim samym obciążeniu (9810N) do zmniejszania przesunięcia tego koła i tak dla ciśnienia 1,2 bara wartość ta wynosiła 0,085 metra, a dla 1,6 bara – 0,84 metra. Nieco niższe wartości przemieszczenia koła odnotowano natomiast dla obciążenia 7357 N, gdzie przy ciśnieniu powietrza w kole równym 0,8 bara zmierzono 0,084 metra przemieszczenia koła, przy 1,2 bara 0,077 metra, a dla najwyższego ciśnienia 1,6 bara odległość ta wynosiła 0,075 metra. Zauważono, że zmiana ciśnienia powietrza w oponie nie miała istotnego znaczenia dla przemieszczenia koła przy najmniejszym jego obciążeniu ( 4905 N)

gdyż przy ciśnieniu 0,8 bara odnotowano przesunięcie 0,063 metra, przy 1,2 bara 0,059 metra, a dla ciśnienia 1,6 bara 0,064 metra.

Dla takich samych wartości ciśnienia powietrza w oponie, zmiana obciążenia pionowego koła powodowała każdorazowo zwiększanie długości przemieszczania się koła. Wyraźny przyrost wartości przesunięcia koła zaobserwowano po dociążeniu koła z wartości 4905 N do 7357 N, dociążenie do wartości 9810 N miało już mniejsze przyrosty.



Rys. 43. Wartości przemieszczenia koła na mokrym utwardzonym gruncie.

Odnotowano, że dla wartości ciśnienia powietrza w oponie równej 0,8 bara i zwiększeniu obciążenia pionowego koła z 4905 N do 7357 N zwiększenie długości przemieszczenia się koła wynosiło 25 %, a dociążenie z wartości 7357 N do 9810 N wydłużyło przesunięcie koła o kolejne 4,9 %. Dla ciśnienia 1,2 bara zwiększenie obciążenia z wartości najmniejszej (4905 N) do wartości średniej (7357 N) spowodowało przyrost przesunięcia koła o wartość 23,7 %, a dociążenie do wartości 9810 N zwiększenia jego przesunięcia o kolejne 9%. Przy największym ciśnieniu powietrza w oponie wynoszącym 1,6 bara zmiana obciążenia pionowego z wartości 4905 N do 7357 N zwiększyła odcinek przemieszczenia koła o 14,3 %, a z wartości 7357 N do 9810 N o kolejne 11,1 %.

Zauważono również, że biorąc pod uwagę dwa stany nawierzchni utwardzanego gruntu tj. gdy był on suchy i mokry to wartości przemieszczenia się koła podczas badań były większe dla nawierzchni mokrej. Największe procentowe przyrosty występowały przy

najniższym ciśnieniu powietrza w oponie i w zależności od obciążenie pionowego koła wynosiły one 28,6 % dla obciążenia 4905 N, 33,3 % dla 7357 N oraz 23 % dla 9810 N. Przyrosty te były niższe dla ciśnienia 1,2 bara gdyż dla obciążenia koła równego 4905 N odnotowano brak różnicy ( 0% przyrostu), dla obciążenia 7357N przyrost wynosił 26,3 %, a dla 9810N był on równy 16,5 %. Najmniejsze procentowe różnice porównując suchą i moką nawierzchnię utwardzonego gruntu zaobserwowano przy najwyższym ciśnieniu powietrza w kole. W tym przypadku dla obciążenia pionowego koła zmierzono przyrost o 1,6 %, dla obciążenia 7357 N zmniejszenie odległości przebytej przez koło o 7,8 %, a dla największego obciążenia 9810 N zwiększenie tej odległości o 1,2 %.

## 5.1 Wyniki analizy statystycznej

Uzyskane wyniki zostały poddane analizie statystycznej. W pierwszej kolejności wykonano testy jednorodności wariancji oraz normalności rozkładów, które wykazały, iż spełnione zostały warunki stosowalności wieloczynnikowej analizy wariancji. Analiza wariancji została przeprowadzona dla trzech czynników (rodzaj podłoża, pionowe obciążenie koła, ciśnienie powietrza w ogumieniu). Analizowanymi wartościami były maksymalna siła przyczepności, współczynnik przyczepności oraz wielkość przemieszczenia poziomego odpowiadającego zerwaniu przyczepności. W analizie przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . W tabeli 3. przedstawiono wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji dla wszystkich uwzględnianych czynników.

Tab. 3. Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Analizowany parametr	Czynnik	Poziom czynnika	Średnia	$\pm$ odchylenie standardowe	wartość p
Maksymalna siła przyczepności	Podłoże	SK	4703,2 <sup>A</sup>	1238,5	<0,0001*
		MK	3823,7 <sup>B</sup>	1066,6	
		STG	3868,3 <sup>B</sup>	876,5	
		MTG	3553,0 <sup>C</sup>	587,5	
	Obciążenie pionowe	4905 N	2785,5 <sup>A</sup>	372,6	<0,0001*
		7357 N	4107,1 <sup>B</sup>	534,7	
		9810 N	4918,1 <sup>C</sup>	862,9	
		0,8 bara	3986,7 <sup>A</sup>	1174,2	0,3594
1,2 bara		3863,6 <sup>A</sup>	1062,5		

	Ciśnienie w ogumieniu	1,6 bara	3960,7 <sup>A</sup>	1012,4	
Współczynnik przyczepności	Podłoże	SK	0,642 <sup>A</sup>	0,035	<0,0001*
		MK	0,519 <sup>B</sup>	0,052	
		STG	0,537 <sup>B</sup>	0,072	
		MTG	0,470 <sup>C</sup>	0,058	
	Obciążenie pionowe	4905 N	0,567 <sup>A</sup>	0,076	<0,0001*
		7357 N	0,558 <sup>A</sup>	0,073	
		9810 N	0,501 <sup>B</sup>	0,088	
	Ciśnienie w ogumieniu	0,8 bara	0,545 <sup>A</sup>	0,079	0,2779
		1,2 bara	0,532 <sup>A</sup>	0,076	
		1,6 bara	0,550 <sup>A</sup>	0,096	
Przemieszczenie poziome	Podłoże	SK	0,0557 <sup>A</sup>	0,013	<0,0001*
		MK	0,0717 <sup>B</sup>	0,012	
		STG	0,0674 <sup>C</sup>	0,012	
		MTG	0,0756 <sup>D</sup>	0,010	
	Obciążenie pionowe	4905 N	0,0542 <sup>A</sup>	0,009	<0,0001*
		7357 N	0,0684 <sup>B</sup>	0,012	
		9810 N	0,0783 <sup>C</sup>	0,009	
	Ciśnienie w ogumieniu	0,8 bara	0,0648 <sup>A</sup>	0,014	0,0617
		1,2 bara	0,0675 <sup>B</sup>	0,013	
		1,6 bara	0,0676 <sup>B</sup>	0,015	

\* - zaznaczone dane są istotne statycznie na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ,

Litery A, B, C, D przy wartościach średnich oznaczają grupy jednorodne

MK – mokra kostka granitowa, SK – sucha kostka granitowa, STG – suchy utwardzony grunt, MTG – mokry utwardzony grunt

Przedstawione w tabeli 3 wartości  $p$  dotyczą prawdopodobieństwa przyjęcia hipotezy statystycznej o braku wpływu danego czynnika na analizowaną wielkość. W przypadku, gdy wartość  $p$  nie przekracza założonego poziomu istotności  $\alpha$  (0,05) dany czynnik ma istotny wpływ na analizowaną wielkość. Analizując przedstawione dane można stwierdzić, że czynnik podłoże (jego rodzaj i stan) miał istotny wpływ na wszystkie trzy analizowane parametry. Natomiast trzeci z uwzględnianych czynników – ciśnienie powietrza w ogumieniu nie miał wpływu na żaden z analizowanych parametrów.

Analiza statystyczna oprócz wyznaczenia wpływu czynników na wielkości analizowane obejmowała również wyznaczenie tzw. grup jednorodnych (homogenicznych), czyli takich poziomów czynnika, między którymi nie ma istotnych różnic. Takie postępowanie daje szczegółowe odpowiedzi między którymi z poziomów czynnika występuje zróżnicowanie. W tabeli pierwszej grupy jednorodne zostały oznaczone literami A, B, C, D.

Analizując wpływ podłoża na pierwszą z wielkości czyli siłę przyczepności można stwierdzić, że do odrębnych grup zakwalifikowano suchą kostkę i mokry grunt, zaś suchy grunt i mokra kostka zostały zakwalifikowane do tej samej grupy. W praktyce oznacza to brak istotnych różnic w wartościach siły na tych dwóch podłożach, ale w każdym innym porównaniu takie różnice wystąpią. Analogiczna sytuacja wystąpiła w przypadku wpływu podłoża na współczynnik przyczepności – takie same proporcje świadczą o tym, że siła przyczepności w każdym przypadku rosła proporcjonalnie do przyrostu obciążenia pionowego. Dla trzeciej analizowanej wielkości czyli przemieszczenia poziomego analiza grup jednorodnych wykazała istotne różnice pomiędzy każdym z podłoży.

Ocena wpływu drugiego czynnika (obciążenia pionowego) przeprowadzona na podstawie grup jednorodnych pozwala stwierdzić, iż między każdym z trzech poziomów obciążenia wystąpiły istotne różnice w wartościach siły przyczepności oraz przemieszczenia poziomego. Zaś w przypadku współczynnika przyczepności wyróżniono dwie grupy jednorodne – pierwszą obejmowała poziomy obciążenia 4905 i 7357 N, zaś do drugiej zakwalifikowano poziom 9810 N.

Trzeci z czynników (ciśnienie powietrza w oponie) okazał się najmniej istotnym ze wszystkich, ponieważ analiza wariancji nie wykazała wpływu na żaden z analizowanych parametrów. Było to podyktowane faktem, iż dla maksymalnej siły przyczepności oraz współczynnika przyczepności wszystkie trzy poziomy czynnika zostały zakwalifikowane do tych samych grup jednorodnych, co oznaczało, że nie było istotnych różnic między wartościami ciśnienia 4905, 757 i 9810 N (zmiana ciśnienia nie miała istotnego wpływu na wartości siły przyczepności i współczynnika przyczepności). Jedynie dla przemieszczenia poziomego test grup jednorodnych wykazał odrębną grupę dla najniższego poziomu ciśnienia, jednak okazało się to niewystarczające aby ogólny wpływ czynnika na przemieszczenie uznać za istotny.

## 5.2 Opracowanie modeli opisujących maksymalną siłę przyczepności

W ramach analizy statystycznej opracowano modele matematyczne opisujące zależności pomiędzy przyjętymi czynnikami a wielkością maksymalnej siły przyczepności. Z uwagi na to, że ciśnienie powietrza w ogumieniu okazało się czynnikiem nieistotnym, w modelu pozostawiono jedynie pierwszy z przyjętych czynników czyli pionowe obciążenie koła. Modelowanie przeprowadzono dla każdego z podłoży osobno. W tabeli 2 przedstawiono uzyskane postaci modeli matematycznych wraz z opisującymi je parametrami.

Tab. 4. Postaci ogólne modeli opisujących wielkość maksymalnej siły przyczepności w zależności od obciążenia pionowego

Podłoże	Równanie modelu	R <sup>2</sup>
Sucha kostka granitowa	$P_{max} = 4192,1 \ln G - 32457$	0,962
Mokra kostka granitowa	$P_{max} = -0,0001G^2 + 2,105G - 5282,8$	0,967
Suchy utwardzony grunt	$P_{max} = 2678,3 \ln G - 19953$	0,789
Mokry utwardzony grunt	$P_{max} = 0,00004G^2 + 0,8244G - 525,6$	0,919

Zgodnie z powyższą tabelą modele opracowane dla podłoży w stanie suchym były funkcjami logarytmicznymi, zaś modele dla podłoży w stanie mokrym były stanowione przez funkcje wielomianowe drugiego stopnia.

### 5.3 Wyniki przykładowych symulacji ruchu pojazdów z programu PC Crash

Uzyskane wyniki badań przedstawione w postaci współczynników przyczepności dla różnych obciążeń pionowych koła oraz na dwóch badanych nawierzchniach w stanie suchym i mokrym, użyto do zaprojektowania środowiska ruchu w programie PC Crash. Celem sprawdzenia zagrożeń dla bezpieczeństwa ruchu zespołu pojazdów ciągnik rolniczy – przyczepa rolnicza, wybrano wyniki z badań wartości współczynnika przyczepności przynależne konkretnym wartościom ciśnienia powietrza w kole dla każdego z badanych obciążeń pionowych kół (4905, 7357, 9810 N). Założono także dwa warianty prędkości początkowej pojazdów- 30 km/h (jako maksymalna prędkość dopuszczalna dla pojazdów rolniczych w Polsce) oraz 50 km/h jako prędkość możliwa do uzyskania przez ciągniki nowej konstrukcji. Każdą z symulacji przeprowadzono w ten sposób, że w chwili początkowej symulacji zadane zostało gwałtowne hamowanie ciągnika oraz przyczepy, a także zadano prostoliniowy tor ruchu (niebieska linia na rysunkach). Obciążenia pionowe na koła realizowano poprzez wprowadzanie równomiernego obciążenia przyczepy, której masa własna wynosiła niespełna 2000 kg. Do programu wprowadzono dane przyczepy marki Pronar model T653 [www 7] oraz ciągnik rolniczy marki New Holland model T7 [www 8]. Celem uzyskania pożądanego obciążenie pionowego na każde z kół przyczepy (4905, 7357, 9810 N) przyczepę obciążano odpowiednim równomiernym ładunkiem.

Poniżej na rysunku nr 46 przedstawiono przykładową pozycję startową okna symulacji, a na kolejnym rysunku pozycję końcową położenia pojazdów po ich zatrzymaniu w wybranej symulacji. W pierwszej kolejności odczytano długość drogi hamowania pojazdów, co przedstawiono na wykresach zamieszczonych na rysunkach 48 i 49.

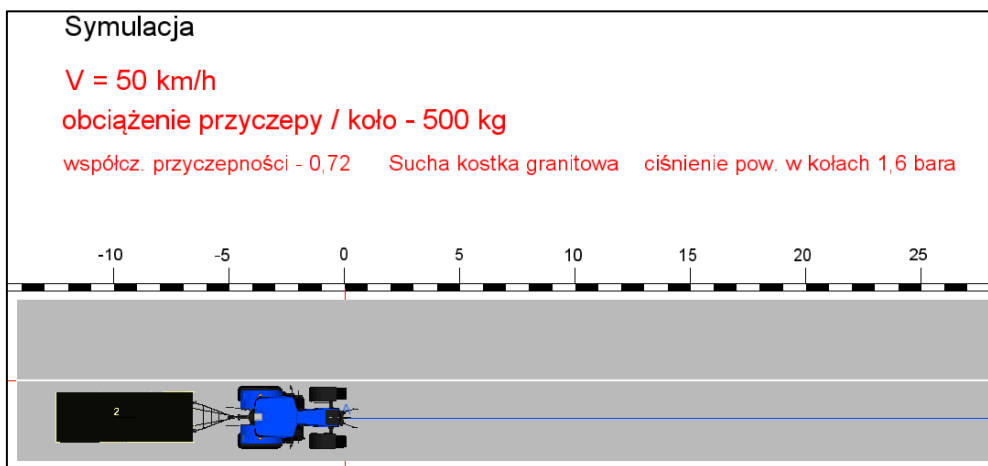


Rys. 44. Widok przykładowego ciągnika New Holland T7 wybranego do symulacji.





Rys. 45. Widok przykładowej przyczepy Pronar T653 wybranej do symulacji.

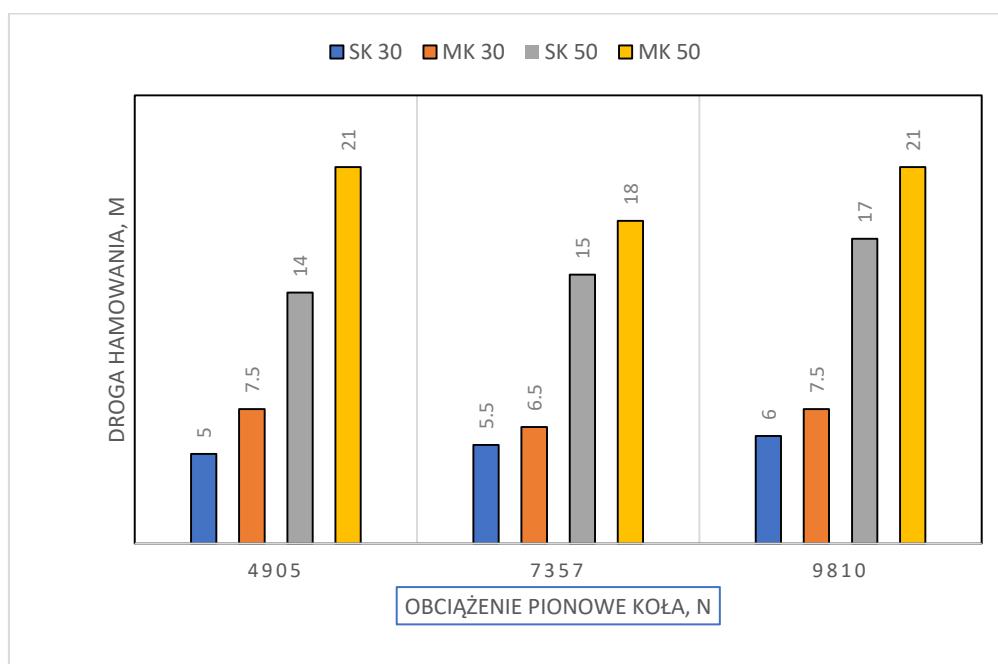


Rys. 46. Pozycja początkowa zespołu pojazdów ciągnik- przyczepa dla wariantu przebiegu symulacji przy prędkości pojazdów 50 km/h; obciążenia pionowego na koło 4905 N (=500 kg – taka jednostka obciążenia obowiązuje w programie PC Crash) oraz dla współczynnika przyczepności ustalonego w badaniach dla suchej kostki granitowej przy ciśnieniu powietrza w kole równym 1,6 bara.



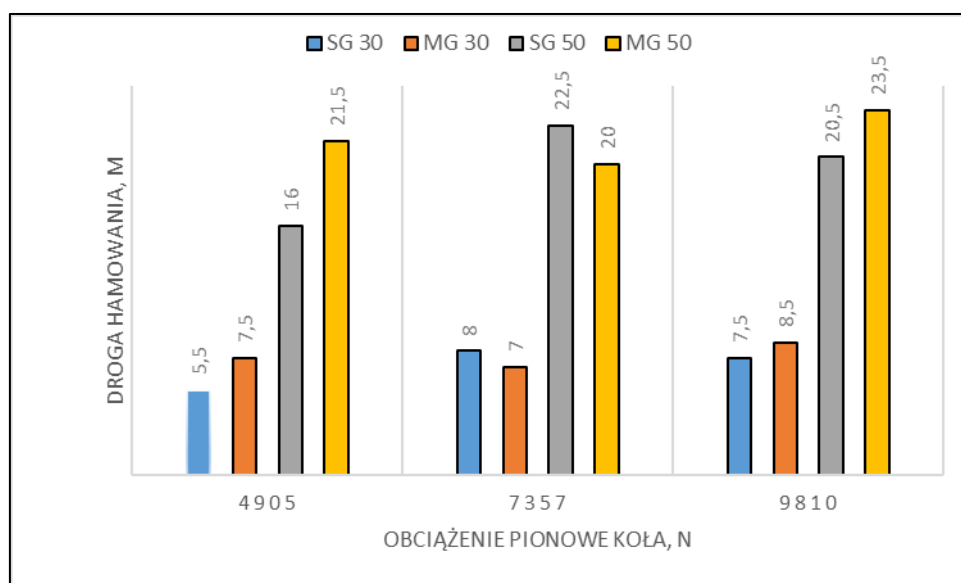
Rys 47. Przykładowy widok ekranu symulacji z końcową pozycją pojazdów po hamowaniu na suchej kostce granitowej z prędkości początkowej 50 km/h i obciążenia pionowego na koło przyczepy równe 750 kg co odpowiada wartości obciążenia 7357 N.

Na przedstawionych powyżej rysunkach zobrazowano widok ekranu programu PC Crash z początkowej chwili symulacji (rys 46) oraz z chwili końcowej (rys. 47) dla podanego wariantu obciążenia przeliczonego na każde z kół przyczepy oraz dobrania odpowiadającego mu współczynnika przyczepności dla suchej kostki granitowej. Następnie dokonano analizy zapisanych przez program parametrów ruchu pojazdów takich jak: przebyta droga, prędkość, czas hamowania, siły działające na poszczególne koła wzdłuż osi X,Y,Z, kąt skrętu kół, poślizg całkowity czy np. prędkość kątową kół. Wykonując kolejne symulacje ruchu tego zestawu pojazdów dokonywano zmiany obciążenia przyczepy oraz współczynnika przyczepności kół do nawierzchni, zmieniano także prędkość początkową. Zauważono, że w zależności od obciążenia przyczepy oraz prędkości początkowej droga hamowania zespołu pojazdów była różna. Wyniki z wybranych symulacji przedstawiono na rysunkach 48-49. Poszczególne słupki na wykresach zostały oznaczone skrótowo. Skróty te oznaczają: SK – sucha kostka granitowa, MK- mokra kostka granitowa, SG – suchy grunt utwardzany, MG – mokry grunt utwardzany. Znajdujące się przy tych symbolach liczby oznaczają prędkość początkową pojazdów (30 km/h i 50 km/h).



Rys 48. Wykres zależności długości drogi hamowania od obciążenia pionowego działającego na koła przyczepy z przedstawieniem wyników dla nawierzchni z kostki granitowej w stanie mokrym i suchym.

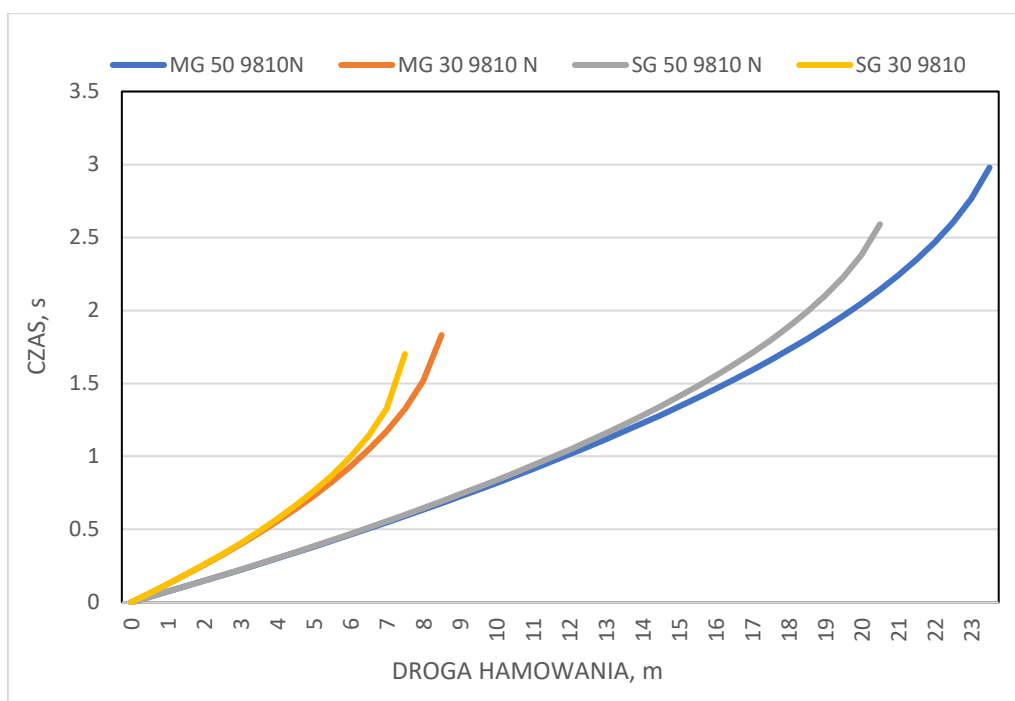
Jak można dostrzec na rysunku 48 przy prędkości początkowej zestawu równej 30 km/h droga hamowania na kostce granitowej w zależności od jej stanu (tego czy była ona sucha czy mokra) mieściła się w zakresie 5 – 7,5 metra. W przypadku prędkości wyższej – 50 km/h, droga hamowania wynosiła od 14 do 21 metrów. Zauważyć należy jednak, że po zmianie prędkości z 30 km/h na 50 km/h na nawierzchni suchej wydłużył się odcinek drogi hamowania z 5 do 14 metrów lub z 6 do 17 metrów, a na nawierzchni mokrej z 6,5 do 18 metrów lub 7,5 do 21 metrów. Zwiększenie prędkości z 30 km/h do 50 km/h powodowało wydłużenie drogi hamowania zestawu ciągnik-przyczepa prawie trzykrotnie.



Rys 49. Wartości długości drogi hamowania przy różnych obciążeniach pionowych działających na koła przyczepy, z przedstawieniem wyników dla nawierzchni z utwardzonego gruntu w stanie mokrym i suchym.

Jak można odczytać z wykresu na rysunku 49 podczas hamowania na drodze złożonej z utwardzanego gruntu zmiana obciążenia pionowego na koła nie wywoływała znacznej zmiany długości drogi hamowania w porównaniu nawierzchni suchej z mokrą dla takich samych prędkości. Przy prędkości początkowej pojazdów równej 30 km/h długość drogi hamowania wynosiła od 5,5 do 7,5 metra oraz od 7 do 8 metrów lub 7,5 do 8,5 metra w zależności od obciążenia pionowego kół na nawierzchni suchej i mokrej. Jeżeli wziąć pod uwagę wyłącznie nawierzchnię suchą to przy prędkości początkowej hamowania 30 km/h zakres długości odcinka hamowania zestawu pojazdów wynosił od 5,5 – 8 metrów, natomiast dla nawierzchni mokrej zakres ten mieścił się w przedziale 7 – 8,5 metra. Droga hamowania ciągnika z przyczepą

przy prędkości początkowej 50 km/h i różnym obciążeniu wynosiła od 16-21 metrów, 20 – 22,5 metra oraz 20,5 – 23,5 metra (odpowiednio dla obciążenia 4905, 7357 i 9810 N na koło przyczepy). Biorąc pod uwagę ten sam stan nawierzchni przy prędkości początkowej hamowania równej 50 km/h, dla nawierzchni suchej długość drogi hamowania w zależności od obciążenia wynosiła od 16 – 22,5 metra, a dla nawierzchni mokrej od 20 – 23,5 metra. Podobnie jak w przypadku nawierzchni twardej (z kostki granitowej) tak samo w przypadku nawierzchni z utwardzanego gruntu można zauważyć, że dla tego samego obciążenia pionowego kół lecz przy zwiększonej prędkości początkowej hamowania (z 30 na 50 km/h) długość tego manewru wydłuża się prawie trzykrotnie. Zakres drogi hamowania w takim przypadku wynosił 5.5 – 16 metrów, 8- 22,5 metra i 7,5 – 20,5 metra.

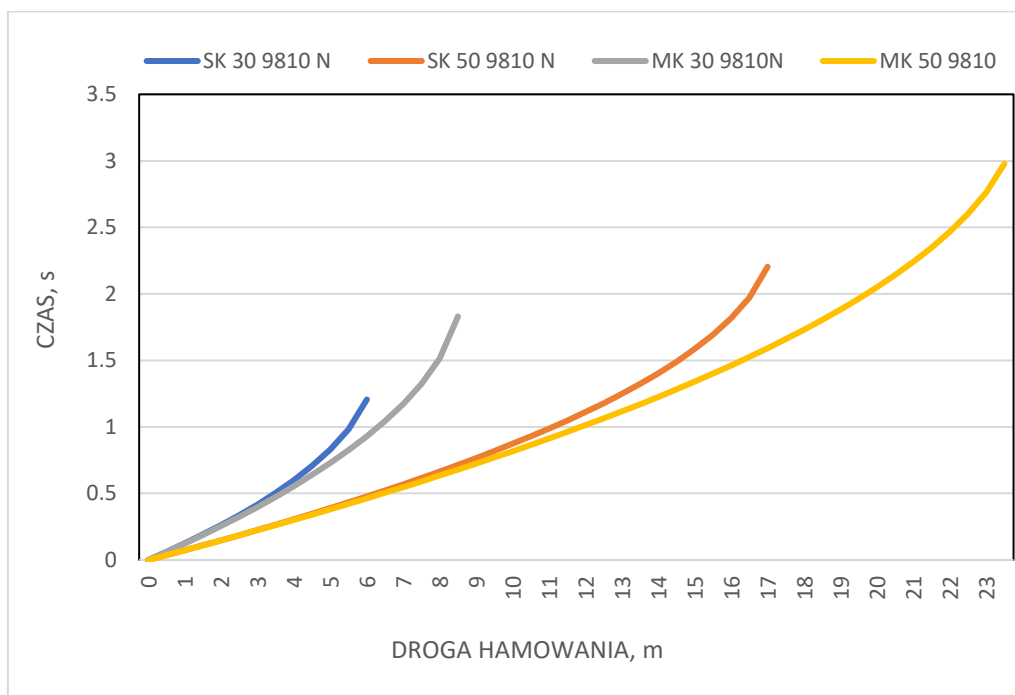


Rys. 50. Czas hamowania ciągnika New Holland na utwardzanej nawierzchni gruntowej w stanie suchym i mokrym przy prędkościach 30 i 50 km/h oraz obciążeniu pionowym kół równym 9810 N.

Jak wskazano na rysunku 50, dla prędkości początkowej hamowania ciągnika równej 50 km/h, przy obciążeniu pionowym kół równym 9810 N, czas hamowania wynosił ok 2,6 – 3 sekundy bez znaczenia czy nawierzchnia drogi składająca się z utwardzonego gruntu była sucha czy mokra. Na tej samej nawierzchni i takiemu samemu obciążeniu pionowemu kół ale przy

prędkości początkowej hamowania równej 30 km/h, czas hamowania wynosił ok 1,7 – 1,8 sekundy.

Przebieg czasu hamowania w funkcji drogi dla takiego samego obciążenia pionowego kół (9810 N) oraz takich samych prędkości ciągnika (30 i 50 km/h) ale na suchej i mokrej nawierzchni z kostki brukowej przedstawia rysunek 51.



Rys. 51. Czas hamowania ciągnika New Holland na nawierzchni z kostki granitowej w stanie suchym i mokrym przy prędkościach 30 i 50 km/h oraz obciążeniu pionowym kół równym 9810 N.

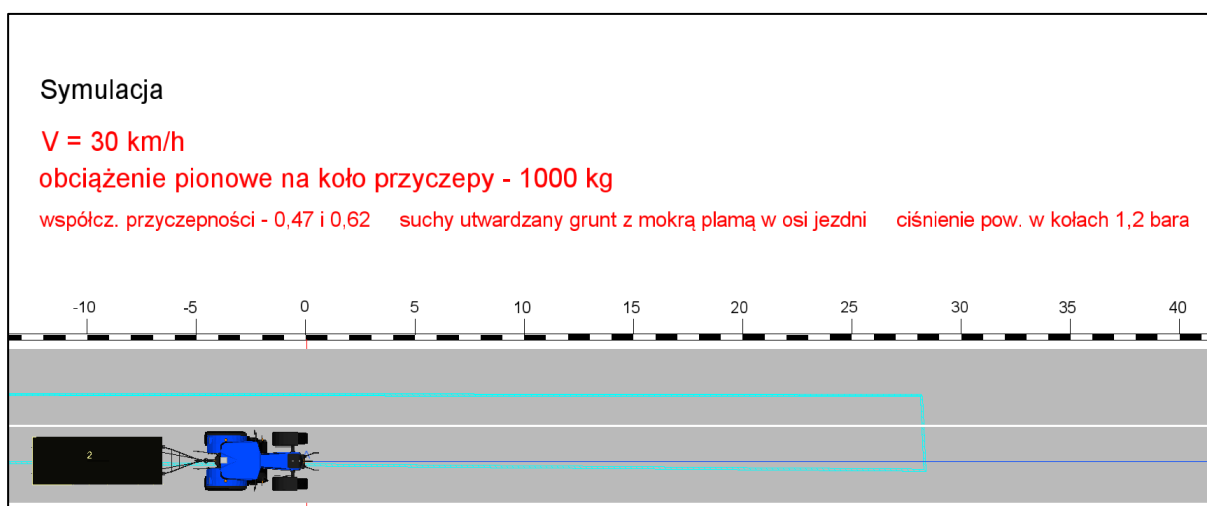
Zmiana nawierzchni z utwardzanego gruntu na kostkę granitową przy takim samym obciążeniu pionowym kół (9810 N) oraz hamowaniu przy takich samych prędkościach powoduje dłuższy czas hamowania na nawierzchni nieodkształcalnej z kostki granitowej niż na nawierzchni z utwardzanego gruntu. Jak widać na rysunku 51 dla prędkości 30 km/h czas hamowania na suchej nawierzchni z kostki granitowej wynosił ok 1,2 sekundy, a na tej samej nawierzchni mokrej ok 1,8 sekundy podczas gdy na nawierzchni gruntowej było to 1,7 sekundy i 1,8 sekundy. Jeżeli prędkość początkowa hamowania wynosiła 50 km/h to na suchej kostce granitowej czas hamowania wynosił 2,2 sekundy, a na mokrej 3 sekundy. Tymczasem na suchej i mokrej nawierzchni gruntowej czas hamowania przy tej samej prędkości wynosił odpowiednio 2,6 sekundy i 3 sekundy. Zmiana stanu nawierzchni z suchej na mokrą ma zatem

większy wpływ na wydłużenie czasu hamowania na nawierzchni nieodkształcalnej jaką była badana kostka granitowa niż na utwardzanej nawierzchni gruntowej.

Wykorzystując uzyskane w badaniach wyniki przyczepności kół do nawierzchni odkształcalnej i nieodkształcalnej do sprawdzenia zachowania zestawu ciągnik-przyczepa przy różnych prędkościach początkowych hamowania, oraz dla zmiennego obciążenia kół przyczepy i różnego stanu drogi można wskazać przykładowe zagrożenia dla bezpieczeństwa ruchu.

Sprawdzając zachowanie zestawu ciągnik-przyczepa podczas dynamicznego hamowania przy prędkości początkowej 30 i 50 km/h na nawierzchni z utwardzonego gruntu i na kostce granitowej, przy obciążeniu pionowym kół przyczepy równym 9810 N (w programie PC Crash = 1000 kg) z założeniem, że koła lewego boku zestawu pojazdów mają przyczepność odpowiadającą wynikom badań z nawierzchni mokrej, a koła prawego boku o przyczepności większej, jak dla nawierzchni suchej można wskazać, że:

Poniżej, na rysunku 52 przedstawiono okno programu PC Crash obrazujące pozycję początkową symulacji ruchu zestawu ciągnik New Holland T7 z przyczepą Pronar T653. Każda kolejna symulacja zaczynała się od takiego samego położenia pojazdów, którym zadano prostoliniowy tor ruchu (zgodnie ze wskazaniem granatowej linii na rysunku).



Rysunek 52. Pozycja początkowa symulacji ruchu zestawu ciągnik-przyczepa ze wskazaniem założonych parametrów techniczno-eksploatacyjnych.

Sprawdzając zachowanie zestawu pojazdów na pierwszej nawierzchni jaką był utwardzony grunt założono, że lewe koła pojazdów podczas procesu hamowania poruszać się

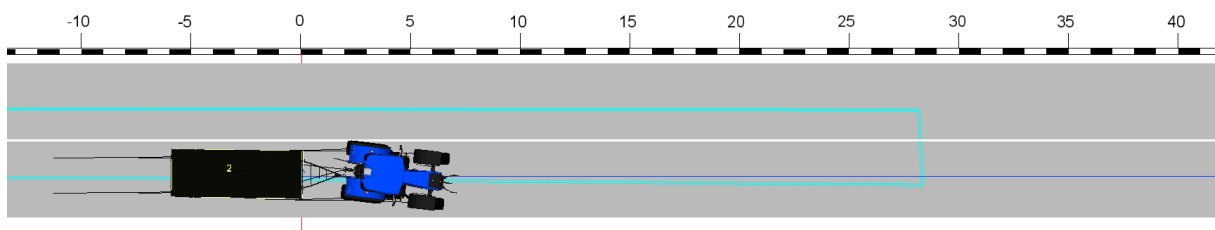
mają po nawierzchni o zmniejszonej przyczepności ( $\mu = 0,47$ ) w stosunku do pozostałej części drogi ( $\mu = 0,62$ ). Wskazana mniejsza przyczepność odpowiada wynikom uzyskanym podczas badań na mokrej nawierzchni drogi gruntowej, a przyczepność większa wynikom na tej samej nawierzchni suchej.

#### Symulacja

**V = 30 km/h**

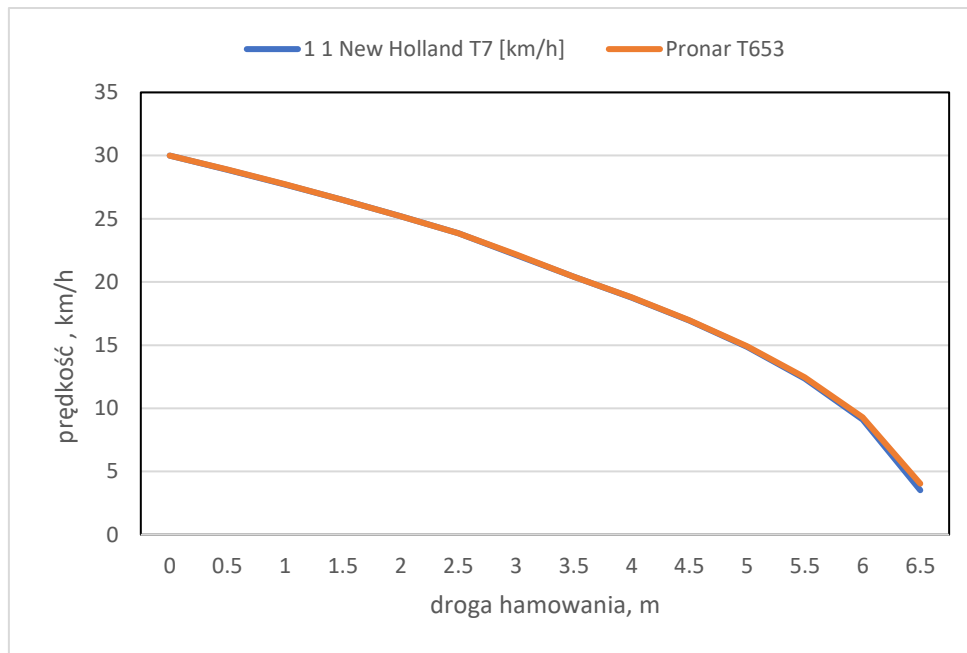
**obciążenie pionowe na koło przyczepy - 1000 kg**

współcz. przyczepności - 0,47 i 0,62    suchy utwardzony grunt z mokrą plamą w osi jezdni    ciśnienie pow. w kołach 1,2 bara



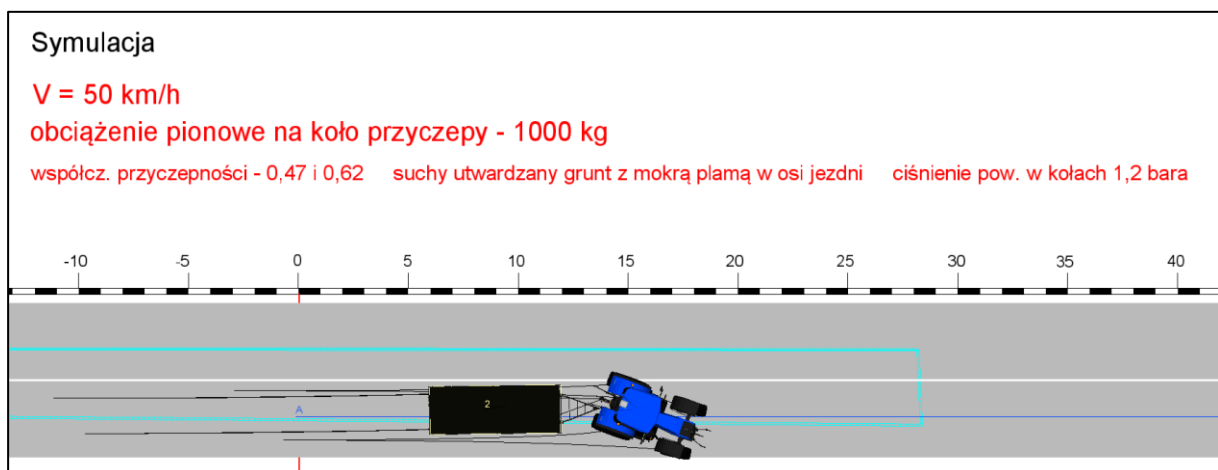
Rysunek 53. Pozycja końcowa symulacji przy prędkości początkowej hamowania 30 km/h.

Na rysunku nr 53 przedstawiono pozycję końcową zestawu pojazdów ciągnik-przyczepa po hamowaniu z prędkości początkowej 30 km/h na utwardzanej nawierzchni gruntowej. Jak można dostrzec podczas tego manewru doszło do niezamierzonego skrętu ciągnika i jego bocznego zarzuceniu w kierunku prawej krawędzi jezdni. Proces hamowania w postaci przebiegu drogi hamowania i prędkości przyczepy oraz ciągnika przedstawiono poniżej na rysunku 54. Wynika z niego, że w końcowej fazie hamowania przyczepa zaczęła się poruszać z większą prędkością niż ciągnik i w praktyce dochodziło do pchania ciągnika przez napierającą na niego przyczepę.



Rysunek 54. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa

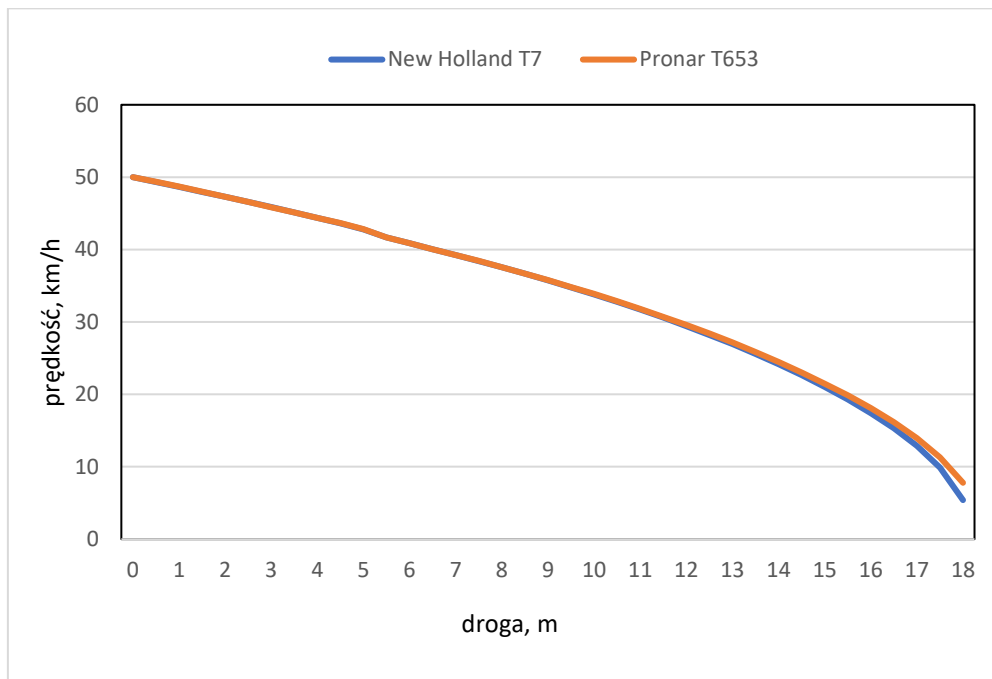
Identyczne założenia jak dla prędkości 30 km/h na nawierzchni z utwardzanego gruntu poczyniono do drugiego założenia symulacji tj. ruchu tego samego zestawu ciągnik-przyczepa dla zmienionej prędkości wynoszącej 50 km/h. Poniżej na rysunku 55 pokazano pozycję końcową ciągnika i przyczepy z tej symulacji.



Rysunek 55. Pozycja końcowa symulacji przy prędkości początkowej hamowania 50 km/h.



Przedstawiona na rysunku 55 pozycja ciągnika i przyczepy po zatrzymaniu wynikającym z gwałtownego hamowania z prędkości 50 km/h pokazuje, że wpływ różnicy przyczepności kół lewego boku pojazdu w porównaniu z kołami prawymi był zdecydowanie większy niż przy prędkości 30 km/h. Przyczepa jak i ciągnik podczas hamowania przemieściły się w większym zakresie poza ustalony i wskazany na rysunku prostoliniowy tor ruchu (granatowa linia). Cały zestaw pojazdu niekontrolowanie zmienił tor ruchu, a podczas hamowania doszło do wyprzedzania ciągnika przez przyczepę, co widoczne jest na wykresie zamieszczonym na rysunku 56.



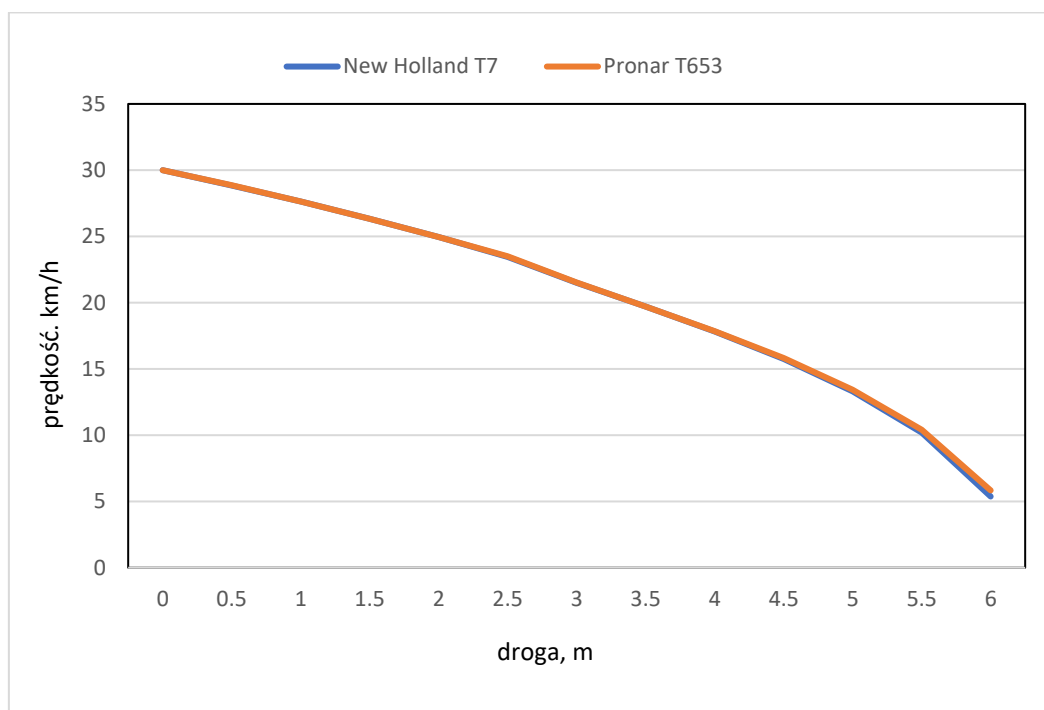
Rysunek 56. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa

Następnie dla sprawdzenia zachowania zestawu ciągnik-przyczepa przeprowadzono symulację ich ruchu dla parametrów odpowiadających nawierzchni z kostki granitowej w stanie suchym i mokrym (powierzchnia ograniczona niebieskim prostokątem w osi jezdni). Parametry przyjęte do symulacji przedstawia opis rysunków zamieszczony na nich czerwoną czcionką.



Rysunek 57. Pozycja końcowa symulacji na nawierzchni z kostki granitowej przy prędkości początkowej hamowania 30 km/h.

Jak można dostrzec na rysunku 57, hamowanie zestawu pojazdów w warunkach zmniejszonej przyczepności lewych kół do nawierzchni drogi przy prędkości początkowej 30 km/h doprowadziło do zmiany założonego, prostoliniowego toru ruchu zarówno ciągnika jak i przyczepy. Przy czym tor ruchu poprzecznego przyczepy miał kierunek w lewą stronę, a tor ruchu ciągnika w prawą. Przebieg prędkości ciągnika i przyczepy w funkcji drogi przedstawiono poniżej na rysunku 58.



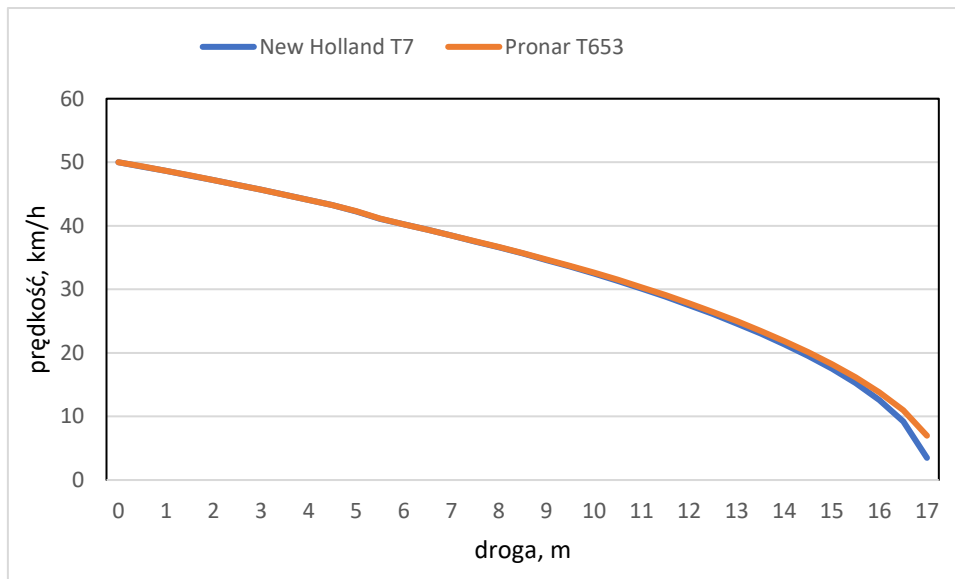
Rysunek 58. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa na nawierzchni z kostki granitowej.

Następnie przeprowadzono symulację ruchu tych pojazdów przy zwiększonej do wartości 50 km/h prędkości początkowej. Pozycję końcową pojazdów tej symulacji zamieszczono poniżej na rysunku 59.



Rysunek 59. Pozycja końcowa symulacji na nawierzchni z kostki granitowej przy prędkości początkowej hamowania 50 km/h

Z rysunku 59 można odczytać, że zarówno ciągnik jak i przyczepa znacznie zjechały poza założony, prostoliniowy tor ruchu. Ciągnik przednim prawym kołem zjechał poza krawędź wyznaczonego pasa ruchu, a przyczepa lewą stroną najechała na oś tej drogi. W końcowej fazie hamowania zestaw przyczepa poruszała się z prędkością większą niż ciągnik co skutkowało powstaniem bardzo niekorzystnego i niebezpiecznego zjawiska wyprzedzania ciągnika. Poniżej na rysunku 60 przedstawiono wykres przebiegu prędkości ciągnika i przyczepy dla prędkości początkowej 50 km/h na nawierzchni z kostki granitowej o zmiennym współczynniku przyczepności (inna przyczepność kół lewych zestawu, a inna kół prawych).



Rysunek 60. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa na nawierzchni z kostki granitowej i prędkości początkowej 50 km/h.

Przedstawione powyżej analizy wskazują na znaczny wpływ prędkości poruszania się zestawu pojazdów ciągnik-przyczepa na skutki powstawania niekorzystnych zjawisk jakim mogą być np. zmienne warunki drogowe, miejscowe zawilgocenie jezdni lub zmniejszenie ciśnienia powietrza w kołach jednego boku pojazdu, którą można powiązać z mniejszymi współczynnikami przyczepności kół przyczepy uzyskanymi podczas badań stanowiskowych. Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwalają na wskazanie, że gwałtowne hamowanie zestawu ciągnik-przyczepa w takich warunkach może doprowadzić do niekontrolowanej utraty stateczności pojazdu i zjawiska wyprzedzania ciągnika przez przyczepę co powoduje zjeżdżanie całego zestawu poza pożądaną tor ruchu. Z przeprowadzonych symulacji wynika także, że niekontrolowane przemieszczanie się zestawu ciągnik-przyczepa ma większy zakres na nawierzchni nieodkształcalnej – z kostki granitowej. Wynika z tego, że zjeżdżanie zestawów rolniczych z pól na drogi utwardzone, a następnie na drogi twarde przy zwiększonej z 30 km/h do 50 km/h prędkości tych zestawów niesie ze sobą zagrożenie dla bezpieczeństwa w ruchu.

## 6. WNIOSKI.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań oraz symulacji sformułowano następujące wnioski:

1. Maksymalne wartości siły przyczepności są zależne od rodzaju podłoża, po którym przemieszcza się zablokowane koło. Wykazano, że największe wartości siły przyczepności odpowiadającej procesowi hamowania wystąpiły na granitowej kostce w stanie suchym (średnie wartości dochodziły do 4700 N zaś maksymalna wyniosła ponad 6400 N). Najniższe zaś wartości maksymalnej siły przyczepności zaobserwowano w przypadku utwardzonego gruntu w stanie mokrym – średnia wartość siły dla tego podłoża wyniosła 3553 N zaś maksymalna nieco ponad 4200 N. Jednocześnie stwierdzono, iż nie wystąpiły istotne różnice w wartościach maksymalnej siły przyczepności pomiędzy osiąganymi na kostce granitowej w stanie mokrym i utwardzonym gruncie w stanie suchym.

2. Analiza wartości współczynników przyczepności wykazała, że na wszystkich podłożach zmieniały się one proporcjonalnie do wartości siły przyczepności (proporcje pomiędzy zmianami wartości siły przyczepności i współczynnika były bardzo zbliżone). Świadczy to o tym, że na każdym z podłoży koło podobnie reagowało na zwiększanie obciążenia. Najwyższe wartości współczynnika przyczepności stwierdzono na kostce granitowej w stanie suchym (średnia wartość dla wszystkich przypadków obciążenia i ciśnienia wyniosła 0,64), zaś najniższe wystąpiły na utwardzonym gruncie w stanie mokrym (średnia 0,47).

3. Wartości przemieszczeń poziomych dotyczących deformacji podłoża (w przypadku utwardzanego gruntu) i deformacji opony (w przypadku kostki granitowej) cechowały się większym zróżnicowaniem na poszczególnych podłożach niż to miało miejsce w przypadku siły przyczepności i współczynnika przyczepności. Potwierdza to tezę o tym, że na każdym z rodzajów podłoży występował inny sposób przenoszenia siły trakcyjnej (na podłożu z kostki granitowej poprzez tarcie, zaś na utwardzonym gruncie częściowo poprzez tarcie, a częściowo poprzez ścinanie). Największe wartości przemieszczenia poziomego wystąpiły na kostce granitowej w stanie suchym, natomiast najmniejsze – na utwardzonym gruncie w stanie mokrym.

4. Oceniając wpływ czynników eksploatacyjnych na analizowane właściwości trakcyjne wykazano, że jedynie obciążenie pionowe wpływało istotnie na wartości maksymalnej siły przyczepności, współczynnika przyczepności oraz przemieszczenia poziomego. Najczęściej obserwowanym przypadkiem był przyrost siły przyczepności i współczynnika na skutek przyrostu obciążenia pionowego, co znajduje potwierdzenie w literaturze. Nie stwierdzono istotnego wpływu ciśnienia powietrza w ogumieniu na wartości analizowanych parametrów.

5. Poprzez wykonane symulacje ruchu zespołu pojazdów ciągnik – przyczepa, w których danymi określającymi przyczepność kół do podłoża w różnym stanie i z różnym obciążeniem pionowym działającym na te koła były wyniki przeprowadzonych badań stanowiskowych ustalono, że zmiana obciążenia przyczepy oraz zmiana prędkości z dopuszczalnej 30 km/h do możliwej do uzyskania przez ciągniki rolnicze 50 km/h, prowadzić może do utraty stateczności całego zestawu pojazdów co może skutkować niekontrolowaną zmianą toru ruchu.

6. Przeprowadzone w programie komputerowym PC Crash symulacje wskazały, że niekontrolowane przemieszczanie ciągnika rolniczego z przyczepą podczas gwałtownego hamowania jest większe na nawierzchni nieodkształcalnej, jaką w badaniach była kostka granitowa, niż na drodze z utwardzanego gruntu.

7. Wyniki przeprowadzonych symulacji wskazały także na możliwość wystąpienia zagrożenia bezpieczeństwa w ruchu w sytuacji gwałtownego hamowania zestawu ciągnik-przyczepa rolnicza nawet na prostym odcinku drogi, w sytuacji gdy jedna strona pojazdu porusza się po nawierzchni o innej przyczepności. Zagrożenie to wynika ze zmiany toru ruchu zestawu pojazdów i ich wyjeżdżanie poza właściwy pas ruchu. Jak wynika z przeprowadzonych badań, różna przyczepność kół rolniczych wynikać może zarówno z poruszania się pojazdu po innej nawierzchni (np. częściowo po jezdni, a częściowo po poboczu), jak i po nawierzchni o różnym stanie wilgotności (suchej lub mokrej), ale także przy nierównomiernym rozłożonym ładunku (różne obciążenie kół).

## 7. STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wynik badań siły przyczepności, współczynnika przyczepności oraz przemieszczeń poziomych na przykładzie nienapędzanego koła pojazdu rolniczego (przyczepy). Badania prowadzono w warunkach laboratoryjnych na czterech typach podłoży (kostka granitowa sucha, kostka granitowa mokra, utwardzana gleba sucha i utwardzana gleba mokra). Założono, że badania symulowały proces hamowania koła przyczepy i zbadano wpływ obciążenia pionowego koła oraz ciśnienia powietrza w ogumieniu na wartość analizowanych parametrów. Wykazano, że obciążenie pionowe ma istotnych wpływ na wszystkie analizowane parametry (wzrost obciążenia powoduje wzrost wartości siły przyczepności i współczynnika przyczepności oraz spadek przemieszczenia poziomego). Nie wykazano natomiast istotnego wpływu ciśnienia powietrza w oponie na te parametry. Końcową część pracy stanowi wykorzystanie wyników eksperymentu do przeprowadzenia symulacji komputerowej zakładającej hamowanie zestawu pojazdów ciągnik rolniczy – przyczepa rolnicza w różnych warunkach i przy różnych prędkościach. Celem przeprowadzenia symulacji było zobrazowanie mechanizmów zachowania pojazdu holowanego (przyczepy) wpływających na bezpieczeństwo ruchu ciągnika.

## SUMMARY

The dissertation presents the result of testing the adhesion force, the adhesion coefficient and horizontal displacements on the example of a non-driven wheel of an agricultural vehicle (trailer). The tests were carried out under laboratory conditions on four types of substrates (dry granite cubes, wet granite cubes, hardened dry soil and hardened wet soil). It was assumed that the tests simulated the trailer wheel braking proces. The influence of the vertical wheel load and tire air pressure on the value of the analyzed parameters was examined. It has been shown that the vertical load has a significant impact on all the analyzed parameters (an increase in the load causes an increase in the value of the adhesion force and the adhesion coefficient and a decrease in the horizontal displacement). However, no significant influence of tire pressure on these parameters was found. The final part of the research was the use of the results of the experiment to conduct a computer simulation assuming braking of a set of vehicles: agricultural tractor - agricultural trailer in different conditions and at different speeds. The purpose of the simulation was to illustrate the behavior mechanisms of the towed vehicle (trailer) influencing the tractor's traffic safety.

## SPIS LITERATURY

1. Abd El-Gawwad K.A., Crolla D.A., Soliman A.M.A., El-Sayed F.M. 1999. Off road tyre modeling III: effect of angled lugs on tyre performance. *Journal of Terramechanics* 36 (1999) 63-75.
2. Abd El-Gawwad K.A., Crolla D.A., Soliman A.M.A., El-Sayed F.M. 1998. Off road tyre modeling I: The multi-spoke tyre model modified to include the effect of straight lugs. *Journal of Terramechanics* 36 (1999) 3-24.
3. Anioła M., Kurek J., Lewandowski A., Warszczyński J. Hamowanie samochodu osobowego w warunkach zagrożenia bezpieczeństwa, wywołanego zmianą stanu nawierzchni. Wydawnictwo Instytut Ekspertyz Sądowych w Krakowie, Zbiór Referatów nr 2000-17
4. Arczyński S. 1994, *Mechanika ruchu samochodu*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne Warszawa, ISBN 83-204-1488-1
5. Bashford L.L. Al./Hamed S., Jenane C. 1993. Effects of tire and inflation pressure on tractive performance. *American Society of Agricultural Engineers* vol. 9 (4), 343-348-July 1993.
6. Battiato A., Diserens E. 2013. Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil. *Journal of Agricultural Science* Vol 5. No. 8; ISSN 1916-9752.
7. Bauer, F i in. 2013: *Traktory a jejich vyuziti*. Vydavatelství Profi Press, Praha.
8. Białczyk W. 2005. *Historia rozwoju konstrukcji ciągników rolniczych*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu. ISBN 83-89189-74-7.
9. Białczyk W. 2012. *Przewodnik multimedialny do przedmiotu pojazdy rolnicze*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu Instytut Inżynierii Rolniczej.
10. Błaszkiwicz Z., Szafarz A. 2009. Prognozowanie oporu toczenia kół ciągników rolniczych na glebie. *Inżynieria rolnicza* 9 (118) / 2009.
11. Brennensthul M. 2021. Kupujemy nowy ciągnik. *Czasopismo rolnicze Agro Profil* X2021
12. Burt E.C., Lyne P.W.L., Meiring P., Keen J.F. 1983. Ballast and Inflation Effects on tire efficiency. *American Society of Agricultural Engineers* paper no 82-1567, May 1983.
13. Carman K., Dunyamahoglu F. 2003. *Mathematical & Applications* Vol. 8 no 1, 49-54.



14. Dajniak H. 1979. Ciągniki. Teoria ruchu i konstruowanie, wydanie trzecie poprawione i uzupełnione, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności
15. Elwaleed A.K., Yahya A., Zohadie M., Ahmad D., Kheiralla A.F. 2006. Effect of inflation pressure on motion resistance ratio of a high-lug agricultural tyre. *Journal of Terramechanics* 43 (2006) 69-84.
16. Farhadi P., Gomohammadi A., Malvajerdi A.S., Shaghholi A. 2020. Tire and soil effects on power loss. Measurement and comparison with finite element model results. *Journal of Terramechanics* 92 (2020) 13-22.
17. Gee-Clough D., Reardon G., McAllister M. 1982. Ballasting wheeled tractors to achieve maximum power output in frictional-cohesive soils. *British Society for Research in Agricultural Engineering* (1982) 27, 1-19.
18. Gharibkhani M., Mardani A., Vesali F. 2012. Determination of wheel-soil rolling resistance of agricultural tire. *Australian Journal of Agricultural Engineering*. 3(1): 6-11 (2012). ISSN:1836-9448.
19. Gholkar M.D., Salokhe V.M, Keen A. 2009. The effect of axle load and tyre inflation pressure on the tractive performance of a two wheel drive tractor on soft clay paddy field. An ASABE meeting Presentation paper no. 096606. June 21 – June 24, 2009.
20. Goering C. E., Hansen A. C. 2004. *Engine and Tractor Power*. ASAE Publication, ISBN 1892769425.
21. Habich E. 1948. Postęp w rozwoju konstrukcji ciągników. *Przegląd Mechaniczny Rok VII, zeszyt 7-8*. 291-296.
22. Jadhav P.P., Sharma A.K., Wandkar S.V. Gholap B.S. 2013. Study of tractive efficiency as an effect of ballast and tire inflation pressure in sandy loam soil. *CIGR Journal Vol. 15. No 2. July 2013*.
23. Jakliński L. 2006. *Mechanika układu pojazd-teren w teorii i badaniach. Wybranie zagadnienia*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN: 83-7207-595-6
24. Janulevicius A., Damanauskas V. 2022. *Journal of Terramechanics* 101 (2022) 23-31.
25. Janczur R., Świder P. 2002. Wpływ ciśnienia w ogumieniu na sterowność samochodu. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Zbiór referatów nr 2002-10.
26. Jędrzejczak A. 1980. Modele współpracy opony z nawierzchnią. *Technika motoryzacyjna* 8/80.
27. Jaworski J. 1987. *Ogumienie pojazdów samochodowych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa

28. Jun H.G., Way T.R., Lofgren B., Landstrom M., Bailey A.C., Burt E.C., McDonald T.P., 2004. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire. *Journal of Terramechanics* 41 (2004) 209-222.
29. Kezdi A. 1969. *Handbuch der Bodenmechanik. Band. 2. Bodenmechanik im Erd-Grund-und Strassenbau.* VEB Verlag fuer Bauwesen. Berlin.
30. Kaczmarczyk R., Czurczak J. 2020, Wpływ metody wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gruntów na wyniki analiz stateczności skarp. *Przegląd Geologiczny*, vol. 68, nr 7
31. Kim K.U., Bashford L., Sampson B.T. 2005. Improvement of tractor performance. *Biological systems engineering, papers and publications.* Vol. 21 (6) 949-954.
32. Kiss P. 2003. Rolling radii of a pneumatic tire on deformable soil. *Biosystems Engineering.*
33. Krzemień P. 2016. Optymalizacja parametrów modelu zderzenia pojazdów metodą ewolucyjną. Wydawca Politechnika Krakowska. Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników spalinowych. Praca doktorska.
34. Lee D.R., Kim K.U. 1997. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. *Journal of Terramechanics* vol. 34 no 3 pp. 187-208.
35. Lewandowski A. 2002, Awaryjne hamowanie samochodu osobowego z układem ABS na różnych nawierzchniach. Wydawnictwo Instytut Ekspertyz Sądowych w Krakowie 2002/07
36. Mitschke M. 1977; *Teoria samochodu Dynamika samochodu;* Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ; ISBN:83-206-0818-X
37. Mitschke M. 1987 *Dynamika samochodu. Napęd i hamowanie.* Wydawnictwo Komunikacji i Łączności
38. Mohsenimanesh A. Shane M. ard, Owende O.M., Javadi A. 2009. Modeling of pneumatic tractor tyre interaction with multilayered soil. *Biosystems engineering* 104 (2009) 191-198.
39. Musonda N.G., Radley L., Kushwaha L., Ford R.J. 1989. Effect of tire combinations and ballasting on 4WD and 2WD tractive efficiency. *American Society of Agricultural Engineers* 0883-8542/89/0504-0517803.00 vol 5 (4) December.
40. Navin M. 1995. Hydroplaning and Accident Reconstruction: Accident Reconstruction : Technology and Animation V, SP-1083, Society of Automotive Engineers, February 1995.

41. Pentoś K. Pieczarka K. 2017. Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions. *Soil and Tillage research* vol 165, January 2017, pages 113-120.
42. Pokorski J., Szwabik B. Dynamiczne charakterystyki przyczepności nawierzchni drogowych i opon samochodowych. *Czasopismo Techniczne Mechanika, Interkomot'98*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 1998
43. Prochowski L. 2016; *Mechanika ruchu*; wydanie 3 uaktualnione, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, ISBN: 978-83-206-1957-7
44. Raheman H. Jha S. 2006. Wheel slip measurement in 2 WD tractor. *Journal of Terramechanics* 44 (2007) 89-94.
45. Rebaty J., Loghavi M. 2006. Investigation and Evaluation of rolling resistance prediction models for pneumatic tire of agricultural vehicles. *Iran Agricultural Research*, vol. 24. No. 2, 2005 and vol. 25 No 1 2006.
46. Pranav P.K., Pandey K.P. Computer simulation of ballast management for agricultural tractors. *Journal of Terramechanics* 45 (2008) 185-192.
47. Reimpell J., Sponagel P. *Fahrwerktechnik: Reifen und Rader*. Vogel Buchverlag, Wurzburg 1988.
48. Serrano J.M., Peca J.O., Silva R., Marquez L. 2008. The effect of liquid ballast and tyre inflation pressure on tractor performance. *Biosystems engineering* 102 (2009) 51-62.
49. Sharma A. Pandey K. 1997 Modeling power requirement for traction tyres with zero sinkage. *Journal of Terramechanics* vol. 34 no. 1 pp 13-21.
50. Smerda T., Cupera J. 2010. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance – energetic indicators of a tractors of a tractor set. *Journal of Terramechanics* 47(2010) 395-400.
51. Stoilov S., Kostadinov G.D. 2009. *Biosystem Engineering* 104 (2009) 486-492.
52. Świder P. Wach W. Ziaja M. Modelowanie mechanizmów hamulcowych i rozdział sił hamowania. *Motoryzacyjny kwartalnik naukowo-techniczny*, III/94
53. Świder P., Janczur R., 2011. *Mechanika ruchu pojazdu w warunkach granicznych. Ekspertyza Wypadku drogowego*. Wydawnictwo Politechnika Krakowska.
54. Taghavifar H., Mardani A. 2013. Investigating the effect of velocity, inflation pressure and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics* 50 (2013) 99-106.

55. Taghavifar H., Mardani A., Hosseinloo A.H. 2015. Appraisal of artificial neural network-genetic algorithm based model for prediction of the power provided the agricultural tractors. Elsevier vol 93, part 2. December 2015, pages 1704-1710.
56. Taylor J.H., Burt E.C. 1975. Truck and tire performance in agricultural soils. American Society of Agricultural Engineers
57. Tiwari V.K., 2009. A review on traction prediction equations. Journal of Terramechanics 47 (2010) 191-199
58. Turner J. 1993. A simple system for determining tractive performance in the field. An American Society of Agricultural Engineers meeting presentation. Paper no. 93-1574
59. Wach W., Unarski J. 2007. Determination of collision- uncertainty analysis by means of Monte Carlo simulation. Materiały konferencyjne XVI EVU Annual Meeting Kraków 2007 s. 73.
60. Wach W. 2014. Wiarygodność strukturalna rekonstrukcji wypadków drogowych. Wydawnictwo Instytut Ekspertyz Sądowych, Kraków.
61. Warczek J. 2010. Metoda pomiaru promienia dynamicznego koła samochodowego. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Zeszyt 67 nr 1832.
62. Wertz K., Grisso R., Von Bargen K. 1990. A survey of ag tractors ballasting and tire configurations- part II. American Society of Agricultural Engineers 0883-8542/90/0606/0542.
63. Wierciński J. Reza A. (red.) 2011, Wypadki drogowe Vademecum biegłego sądowego, wydanie 2 uaktualnione, praca zbiorowa, Wydawnictwo Instytut Ekspertyz Sądowych w Krakowie ISBN 83-87425-32X.
64. Wierciński J. (red.) 1985, Wypadki drogowe – elementy analizy i opiniowania. Praca zbiorowa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa.
65. Wrześniński T. Hamowanie pojazdów samochodowych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa.
66. Wulfsohn D. Way T.R. 2009. Factors that influence tractive performance of wheels tracks and vehicles. American Society of Agricultural and biological Engineers. Vol 3. Pages 209-252.
67. Vantsevich V.V. Power losses and energy efficiency of multiwheel drive vehicle: A method of evaluation. Journal of Terramechanics 45 (2008) 89-101
68. Xia K. 2010. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. Journal of Terramechanics 48 (2011) 113-123.

69. Yadav R., Raheman H. 2023. Development of an artificial neural network model with graphical user interface for predicting contact area of bias-ply tractor tyres on firm surface. *Journal of Terramechanics* vol. 107, June 2023, pages 1-11.
70. Zoz F.M. Brixius W.W. 1979. Traction prediction for agricultural tires on concrete. American Society of Agricultural Engineers. Paper no. 79-1046
71. Zoz F.M., Turner R.J., 1994. Effect of correct pressure on tractive efficiency of radial ply tires. American Society of Agricultural Engineers. Paper no. 94-1051.
72. Zoz F.M., Wiley J.C. 1995. A theoretical basis for tractor ballasting recommendations. Proceedings of the 5<sup>th</sup> North American ISTVS Conference/Workshop Saskatoon, Canada, May 10-12 1995.
73. Zoz F.M., Brixius W.W. 1979. Traction prediction for agricultural tires on concrete. American Society of Agricultural Engineers paper no. 79-1046.
74. Zoz F.M., Grisso R.D. 2003. Traction and tractor performance. American Society of Agricultural Engineers. Tractor design no 27. Publication number 913C0403.
75. Zoz F.M. Turner R.J. Shel L.R. 2002. Power delivery efficiency; a valid measure of belt/tyre performance. *American Society of Agricultural Engineers* Vol. 45(3): 509-518 ISSN 0001-2351

#### Źródła internetowe:

1. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3430322](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3430322) [dostęp 30.09.2022r.]
2. <https://wielton.com.pl/produkty-agro/przyczepy-rolnicze-prs/prs-2-w10/> [dostęp 01.10.2022 r.]
3. <https://pronar.pl/produkt/przyczepa-pronar-pt612/> [dostęp 01.10.2022 r.]
4. <https://metaltech.com.pl/transport-w-rolnictwie/typ-dbl/> [dostęp 01.10.2022 r.]
5. [https://cybid.com.pl/v-sim/#vsim\\_przeznaczenie](https://cybid.com.pl/v-sim/#vsim_przeznaczenie) [dostęp 11.03.2023]
6. <https://psbs.org.pl/warsztaty/> Seminarium PC-Crash (psbs.org.pl) [dostęp 18.05.2023]
7. <https://pronar.pl/produkt/przyczepa-pronar-t653/> [dostęp 22.05.2023]
8. <https://agriculture.newholland.com/eu/pl-pl/sprzet/produkty/traktory/t7s-stage-v/informacje-techniczne> [dostęp 22.05.2023]

## SPIS TABEL

Tabela 1. Zakresy współczynnika przyczepności przylgowej i ślizgowej najczęściej występującego w literaturze naukowej .....	18
Tabela 2. Parametry techniczne opony użytej do badań .....	39
Tabela 3. Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ .....	76
Tabela 4. Postaci ogólne modeli opisujących wielkość maksymalnej siły przyczepności w zależności od obciążenia pionowego .....	79

## SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Przykłady przyczep stosowanych w rolnictwie.....	9
Rys. 2. Schemat układu sił i momentów działających na kołowy ciągnik rolniczy.....	10
Rys. 3. Układ sił działających na koło nienapędzane na podłożu odkształcalnym .....	12
Rys. 4. Układ sił i momentów działających na koło napędzane na podłożu odkształcalnym....	13
Rys. 5. Przebieg zmian wartości siły stycznej $X$ podczas hamowania koła nie napędowego ze stałą prędkością .....	17
Rys. 6. Przedstawienie sił obwodowych, prędkości kątowych i momentów na kole toczącym się swobodnie i jednym hamowanym lub napędzanym przy tym samym nacisku pionowym $F_z$ każdego z kół .....	20
Rys. 7. Przebieg siły obwodowej na kole w funkcji prędkości kątowej $\phi$ odniesionej do prędkości $x$ .....	20
Rys. 8. Wykres zależności współczynnika przyczepności $\mu$ od poślizgu $S$ .....	21
Rys. 9. Spadek współczynnika przyczepności przylgowej zależna od czasu zalegania wody na drodze .....	22
Rys. 10. Przykładowe środowisko ruchu do przeprowadzenia symulacji w programie V-SIM .....	32
Rys. 11. Przykładowy widok 3D przebiegu symulacji zderzenia samochodu osobowego z ciągnikiem rolniczym z przyczepą na drodze twardej .....	32
Rys. 12. Okno eksploratora umożliwiające konstrukcję pojazdu „własnego” w programie PC Crash. ....	33
Rys. 13. Widok ogólny stanowiska badawczego .....	38
Rys. 14. Widok szczegółowy układu wymuszającego ruch skrzynki z podłożem .....	39

Rys. 15. Ogólny widok opony oraz czoła bieżnika .....	40
Rys. 16. Widok drogi dojazdowej do pól, z której pobrano próbki nawierzchni do badań .....	41
Rys. 17. Widok zakopanej w polu skrzynki badawczej podczas procesu ubijania nawierzchni gruntowej .....	41
Rys. 18. Wykorzystane do badań utwardzone podłoże gruntowe w stanie suchym i mokrym w trakcie eksperymentu .....	42
Rys. 19. Wykorzystane do badań podłoże z kostki granitowej w stanie suchym i mokrym .....	43
Rys. 20. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N .....	46
Rys. 21. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N .....	47
Rys. 22. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N .....	48
Rys. 23. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N .....	49
Rys. 24. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N .....	50
Rys. 25. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na utwardzonym gruncie w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N .....	51
Rys. 26. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905 N .....	52
Rys. 27. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N .....	53
Rys. 28. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie suchym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N .....	54
Rys. 29. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 4905N.....	55

Rys. 30. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 7357 N.....	56
Rys. 31. Wartości siły przyczepności w funkcji przemieszczenia poziomego, na kostce granitowej w stanie mokrym, przy obciążeniu pionowym koła równym 9810 N.....	57
Rys. 32. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnane na kostce suchej .....	58
Rys. 33. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnane na kostce mokrej .....	59
Rys. 34. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnane na suchym twardym gruncie.....	61
Rys. 35. Wartości maksymalnej siły przyczepności osiągnane na mokrym twardym gruncie ...	62
Rys. 36. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na suchej kostce granitowej .....	64
Rys. 37. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na mokrej kostce granitowej .....	66
Rys. 38. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na suchej utwardzanej nawierzchni gruntowej .....	67
Rys. 39. Wartości maksymalnego współczynnika przyczepności na mokrej utwardzanej nawierzchni gruntowej .....	68
Rys. 40. Wartości przemieszczenia koła na suchej kostce granitowej .....	70
Rys. 41. Wartości przemieszczenia koła na mokrej kostce granitowej .....	72
Rys. 42. Wartości przemieszczenia koła na suchym utwardzonym gruncie .....	73
Rys. 43. Wartości przemieszczenia koła na mokrym utwardzonym gruncie.....	75
Rys. 44. Widok przykładowego ciągnika New Holland T7 wybranego do symulacji.....	80
Rys. 45. Widok przykładowej przyczepy Pronar T653 wybranej do symulacji.....	81
Rys. 46. Pozycja początkowa zespołu pojazdów ciągnik- przyczepa dla wariantu przebiegu symulacji przy prędkości pojazdów 50 km/h; obciążenia pionowego na koło 4905 N .....	81
Rys 47. Przykładowy widok ekranu symulacji z końcową pozycją pojazdów po hamowaniu na suchej kostce granitowej z prędkości początkowej 50 km/h i obciążenia pionowego na koło przyczepy równe 750 kg .....	81
Rys 48. Wykres zależności długości drogi hamowania od obciążenia pionowego działającego na koła przyczepy z przedstawieniem wyników dla nawierzchni z kostki granitowej w stanie mokrym i suchym.....	82
Rys 49. Wartości długości drogi hamowania przy różnych obciążeniach pionowych działających na koła przyczepy, z przedstawieniem wyników dla nawierzchni z utwardzonego gruntu w stanie mokrym i suchym.....	83



Rys. 50. Czas hamowania ciągnika New Holland na utwardzanej nawierzchni gruntowej w stanie suchym i mokrym przy prędkościach 30 i 50 km/h oraz obciążeniu pionowym kół równym 9810 N .....	84
Rys. 51. Czas hamowania ciągnika New Holland na nawierzchni z kostki granitowej w stanie suchym i mokrym przy prędkościach 30 i 50 km/h oraz obciążeniu pionowym kół równym 9810 N .....	85
Rys. 52. Pozycja początkowa symulacji ruchu zestawu ciągnik-przyczepa ze wskazaniem założonych parametrów techniczno-eksploatacyjnych .....	86
Rys. 53. Pozycja końcowa symulacji przy prędkości początkowej hamowania 30 km/h .....	87
Rys. 54. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu Ciągnik przyczepa .....	88
Rys. 55. Pozycja końcowa symulacji przy prędkości początkowej hamowania 50 km/h.....	88
Rys. 56. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa .....	89
Rys. 57. Pozycja końcowa symulacji na nawierzchni z kostki granitowej przy prędkości początkowej hamowania 30 km/h.....	90
Rys. 58. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa na nawierzchni z kostki granitowej.....	90
Rys. 59. Pozycja końcowa symulacji na nawierzchni z kostki granitowej przy prędkości początkowej hamowania 50 km/h .....	91
Rys. 60. Przebieg prędkości i drogi hamowania podczas hamowania zestawu ciągnik-przyczepa na nawierzchni z kostki granitowej i prędkości 50 km/h .....	92

## WYKAZ OZNACZEŃ

$G$  - ciężar ciągnika,

$Y_A$  - reakcja pod kołami przednimi (w punkcie A) ciągnika,

$Y_B$  - reakcja pod kołami tylnymi (w punkcie B) ciągnika,

$P_H$  - siła uciągu. Jeżeli siła ta pochylona jest pod kątem  $\theta$ , to wówczas istnieją składowe tej siły,

$P_{HX}$  - składowa pozioma siły uciągu:  $P_H \cos \theta$ ,

$P_{HY}$  - składowa pionowa siły uciągu:  $P_H \sin \theta$ ,

$P_T$  - siła trakcyjna ( napędowa )  $P_T = Y(\text{koła lub kół napędowych}) \mu$ ,

$\mu$  - współczynnik przyczepności,

$P_f$  - siła oporów przetaczania  $P_f = (Y_A + Y_B) f$ ,

$f$  - współczynnik oporu przetaczania  $f = \tan \varphi$ ,

$r_A, r_B$  - promienie dynamiczne kół przednich (A) i kół tylnych (B),

$M_f$  - moment oporów przetaczania  $M_f = (Y_A + Y_B) r_B f$ ,

$L$  - rozstaw osi ciągnika,

$a$  - odległość punktu A od prostej prostopadłej do podłoża przechodzącej przez środek ciężkości ( $S_c$ ),

$b$  - odległość punktu B od prostej prostopadłej do podłoża przechodzącej przez środek ciężkości ( $S_c$ ),

$l_H, h_H$  - współrzędne zaczepu,

$h$  - wysokość położenia środka ciężkości nad podłożem,

$P_T$  - siła trakcyjna, N,

$M_o$  - moment obrotowy przyłożony do koła, Nm,

$r_D$  - promień dynamiczny koła, m.

$\tau$  - naprężenia styczne na styku koła z podłożem, Pa,

$c$  - spójność podłoża, Pa,

$\sigma$  - naprężenia normalne podłoża, Pa,

$\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznego podłoża, °

$c$  - spójność podłoża, Pa,

$A$  - powierzchnia styku koła z podłożem, m<sup>2</sup>,

$\omega$  - chwilowa prędkość kątowa koła hamowanego lub napędzanego,

$r$  - promień koła,

$V_0$  - prędkość ruchu środka koła