

OCENA WPŁYWU POŁOŻENIA ŚRODKA MASY PRZYCZEPY NA DŁUGOŚĆ DROGI ZATRZYMANIA ZESPOŁU POJAZDÓW, WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA OBLICZEŃ Z WYKORZYSTANIEM MODELU SYMULACYJNEGO

Marcin Kąkol¹⁾, Zbigniew Lozia²⁾

¹⁾ Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Warszawa,

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki weryfikacji eksperymentalnej zbudowanego modelu symulacyjnego zespołu pojazdów dwuosiowy – jednoosiowa niehamowana przyczepa. Model opisuje wpływ położenia środka masy przyczepy na długość drogi hamowania. Na wstępie opisano zbudowany model i przyjęte do jego budowy założenia. Zaprezentowano pozyskane dane geometryczne i masowe pojazdów użytych do badań. W dalszej części pracy opisano próby drogowe w warunkach rzeczywistych, gdzie oceniana była długość drogi hamowania samego pojazdu ciągnącego oraz zespołu pojazdów ciągniętych – załadowana (w sześciu wariantach) jednoosiowa niehamowana przyczepa. Wyznaczono parametry nawierzchni jezdni, na której prowadzone były badania. W trakcie badań rejestrowano przebieg przez pojazdy drogę oraz siłę nacisku na pedale hamulca. Przedstawiono wyniki weryfikacji eksperymentalnej zbudowanego modelu symulacyjnego, gdzie oceniano wartości drogi i opóźnienia hamowania. Model o potwierdzonej przydatności zostanie wykorzystany jako składnik oprogramowania, które stanowić będzie realny efekt wdrożenia w miejscu pracy jednego ze współautorów niniejszego opracowania. Pozyskany zostanie również efekt użyteczny rozszerzający wiedzę osób zajmujących się problematyką wypadków drogowych (biegłych sądowych i rzeczoznawców samochodowych). Podsumowanie zawiera wnioski i uwagi dla dalszych badań. Badania wykonywane były w ramach pracy statutowej prowadzonej w Wojskowym Instytucie Techniki Pancernej i Samochodowej.

Słowa kluczowe: hamowanie, wypadek drogowy, droga hamowania zespołu pojazdów, przyczepa, urządzenie sprzęgające.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2024 Vol. 88 Issue 3 pp. 55 – 76

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2024-0016

Strony: 22, rysunki: 15, tabele: 17

page **www of the periodical:** www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 09.05.2024 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 10.06.2024 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



$$a = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha + \mu_a \cdot m_s \cdot g \cdot \cos \alpha + \mu_a \cdot m_p \cdot g \cdot \left(-\sin \alpha \cdot \frac{h_p - h_H}{l_p} + \cos \alpha \cdot \frac{l_3}{l_p} \right)}{m - m_p \cdot \mu_a \cdot \frac{h_p - h_H}{l_p}} \quad (1)$$

gdzie:

m – masa zespołu pojazdów (samochodu i przyczepy), [kg];
 m_s – masa samochodu, [kg];
 m_p – masa przyczepy, [kg];
 g – przyspieszenie ziemskie, [m/s²];
 α – kąt pochylecia wzdłużnego nawierzchni drogi, [deg];
 μ_a – współczynnik przyczepności, [-];
 l_p, l_3 – odległości między zaznaczonymi punktami, [m];
 h_H, h_p – odległości (wysokości) zaznaczonych punktów od nawierzchni drogi, [m].

W pracy [7] formalnie wykonano dwukrotne całkowanie przebiegu czasowego $a(t)$. Jako wynik otrzymano przedstawione poniżej zależności na długość drogi zatrzymania S_z , która dla zerowego czasu reakcji t_r staje się drogą hamowania, oznaczaną S_h .

$$S_z = \left\{ v_0 \cdot t_r - a_w \cdot \frac{t_r^2}{2} \right\} + \left\{ \left[v_0 - (a - a_w) \cdot \frac{t_r^2}{2 \cdot t_n} \right] \cdot t_n + \frac{1}{2} \cdot \left[-a_w \cdot \left(1 + \frac{t_r}{t_n} \right) + a \cdot \frac{t_r}{t_n} \right] \cdot [(t_r + t_n)^2 - t_r^2] - \frac{a - a_w}{6 \cdot t_n} \cdot [(t_r + t_n)^3 - t_r^3] \right\} + \left\{ \frac{A^2}{2 \cdot a} - A \cdot (t_r + t_n) + \frac{a}{2} \cdot (t_r + t_n)^2 \right\} \quad (2)$$

gdzie:

$$A = v_0 + a_w \cdot \frac{t_r^2 - (t_r + t_n)^2}{2 \cdot t_n} + a \cdot \left(t_r + \frac{t_n}{2} \right) \quad (3)$$

gdzie:

v_0 – prędkość początkowa, [m/s];
 t_r – czas reakcji (kierowcy i samochodu), [s];
 t_n – czas narastania sił (i opóźnienia), [s];
 a – opóźnienie hamowania samochodu lub zespołu pojazdów, [m/s²] (we wzorze ma sens opóźnienia maksymalnego);
 a_w – opóźnienie hamowania w czasie reakcji, [m/s²].

Badania drogowe służące weryfikacji modelu symulacyjnego ruchu zespołu dwuosioowy pojazd ciągnący – jednoosiowa niehamowana przyczepa, polegały na prostoliniowym hamowaniu z pełną dostępną intensywnością od prędkości początkowej do zatrzymania. W czasie hamowania nie dochodziło do blokowania kół (działał układ ABS). Do badań wykorzystano samochód ciężarowy o dopuszczalnej masie całkowitej 3500 kg obciążony dwoma osobami i aparaturą badawczą oraz przyczepę lekką o dopuszczalnej masie całkowitej 720 kg, którą obciążono do wartości DMC (dopuszczalnej masy całkowitej) na sześć sposobów (wariantów).

MATERIAŁY I METODY

W warunkach laboratoryjnych wyznaczono położenia wzdłużne i pionowe środków mas dla każdego sposobu umieszczenia ładunku na przyczepie i dla samego samochodu oraz pomierzono ich geometryczne parametry charakterystyczne, które zamieszczono w tabelach 1 ÷ 7. Z kolei na rysunkach 2 ÷ 7 po lewej ich stronie ukazano w sposób schematyczny lokalizację środków mas przyczepy, po prawej stronie przedstawiono rzeczywisty wygląd załadowanej w danym wariantcie przyczepy wchodzącej w skład zespołu pojazdów.

Tab. 1

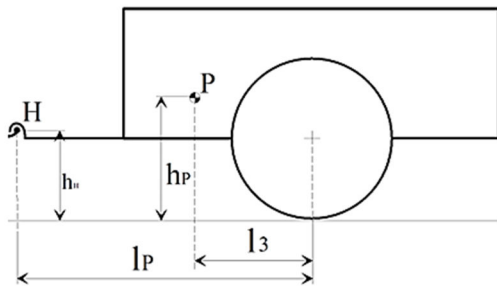
Dane dwuosioowego samochodu ciężarowego Renault Master.

Parametry modelu samochodu	Oznaczenie [jednostka]	Stan obciążenia: bez ładunku (tylko kierowca i pasażer)
Masa samochodu	m_s [kg]	2655
Wysokość środka masy S	h_s [m]	0,861
Rozstaw osi	l [m]	4,073
Odległość środka masy pojazdu S od osi przedniej	l_1 [m]	1,618
Odległość środka masy pojazdu S od osi tylnej	l_2 [m]	2,455
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od osi tylnej	l_H [m]	1,034



Dane przyczepy jednoosiowej obciążonej według wariantu I załadunku.

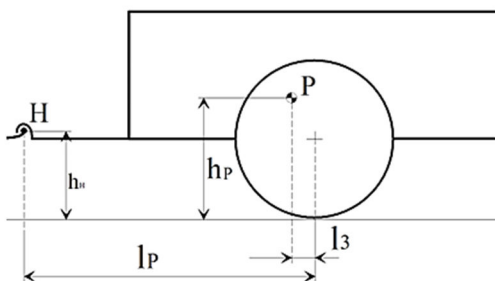
Parametry przyczepy towarowej	Oznaczenie [jednostka]	Wartość
Masa przyczepy	m_s [kg]	720
Wysokość środka masy P	h_P [m]	0,557
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka przegubu sprzęgającego H	l_P [m]	2,171
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka jej masy P	l_3 [m]	0,522
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od nawierzchni jezdni	h_H [m]	0,35



Rys. 2. Widok przyczepy załadowanej według wariantu I ze wskazaniem położenia środka masy.

Dane przyczepy jednoosiowej obciążonej według wariantu II załadunku.

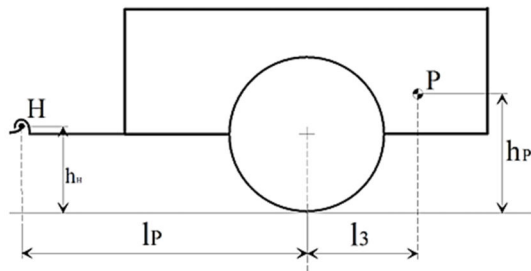
Parametry przyczepy towarowej	Oznaczenie [jednostka]	Wartość
Masa przyczepy	m_s [kg]	720
Wysokość środka masy P	h_P [m]	0,5335
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka przegubu sprzęgającego H	l_P [m]	2,171
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka jej masy P	l_3 [m]	0,067
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od nawierzchni jezdni	h_H [m]	0,373



Rys. 3. Widok przyczepy załadowanej według wariantu II ze wskazaniem położenia środka masy.

Dane przyczepy jednoosiowej obciążonej według wariantu III załadunku.

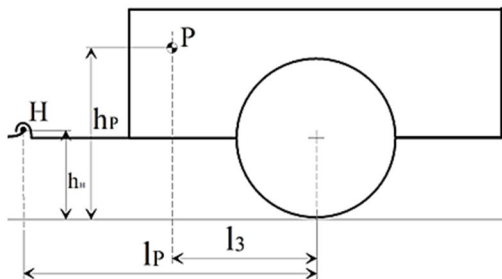
Parametry przyczepy towarowej	Oznaczenie [jednostka]	Wartość
Masa przyczepy	m_s [kg]	720
Wysokość środka masy P	h_P [m]	0,5365
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka przegubu sprzęgającego H	l_P [m]	2,171
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka jej masy P	l_3 [m]	-0,376
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od nawierzchni jezdni	h_H [m]	0,384



Rys. 4. Widok przyczepy załadowanej według wariantu III ze wskazaniem położenia środka masy.

Dane przyczepy jednoosiowej obciążonej według wariantu IV załadunku.

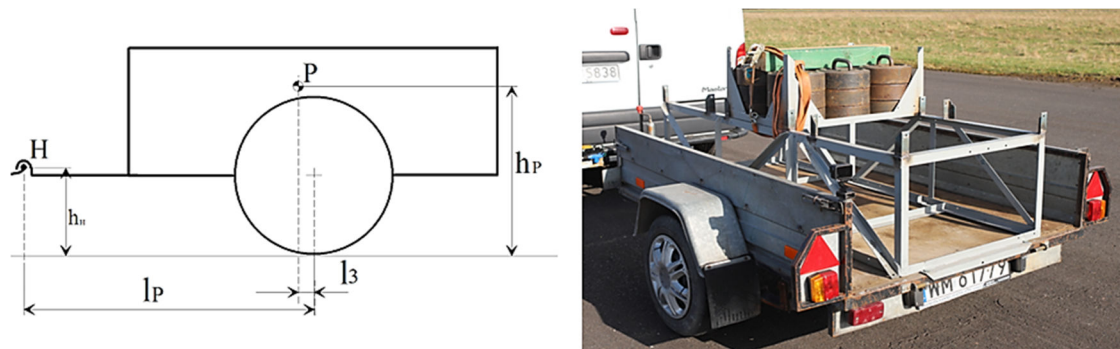
Parametry przyczepy towarowej	Oznaczenie [jednostka]	Wartość
Masa przyczepy	m_s [kg]	720
Wysokość środka masy P	h_P [m]	0,8595
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka przegubu sprzęgającego H	l_P [m]	2,71
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka jej masy P	l_3 [m]	0,525
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od nawierzchni jezdni	h_H [m]	0,36



Rys. 5. Widok przyczepy załadowanej według wariantu IV ze wskazaniem położenia środka masy.

Dane przyczepy jednoosiowej obciążonej według wariantu V załadunku.

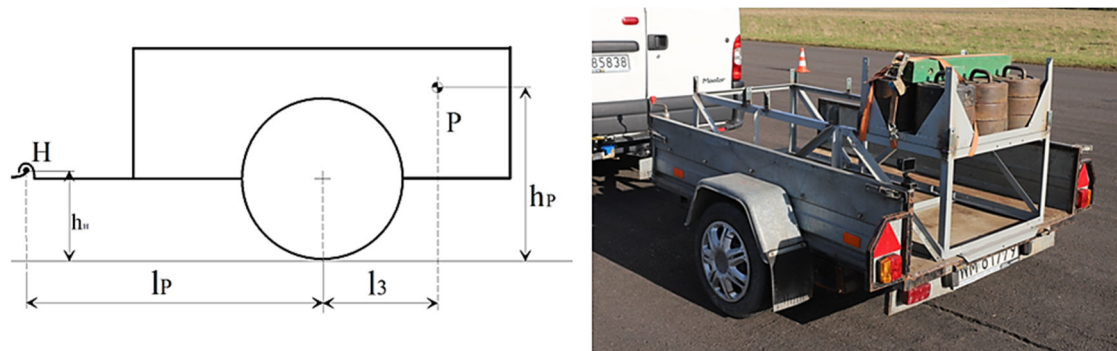
Parametry przyczepy towarowej	Oznaczenie [jednostka]	Wartość
Masa przyczepy	m_s [kg]	720
Wysokość środka masy P	h_P [m]	0,8635
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka przegubu sprzęgającego H	l_P [m]	2,171
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka jej masy P	l_3 [m]	0,079
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od nawierzchni jezdni	h_H [m]	0,372



Rys. 6. Widok przyczepy załadowanej według wariantu V ze wskazaniem położenia środka masy.

Dane przyczepy jednoosiowej obciążonej według wariantu VI załadunku.

Parametry przyczepy towarowej	Oznaczenie [jednostka]	Wartość
Masa przyczepy	m_s [kg]	720
Wysokość środka masy P	h_P [m]	0,837
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka przegubu sprzęgającego H	l_P [m]	2,171
Odległość osi jezdnej przyczepy od środka jej masy P	l_3 [m]	-0,393
Odległość środka przegubu sprzęgającego H od nawierzchni jezdni	h_H [m]	0,39



Rys. 7. Widok przyczepy załadowanej według wariantu VI ze wskazaniem położenia środka masy.

Badania eksperymentalne wykonano na płycie byłego lotniska wojskowego, gdzie dysponowano równą utwardzoną asfaltową nawierzchnią drogi, która była pozioma, czysta i sucha. Parametry drogi określono za pomocą dwóch przyrządów pomiarowych służących ocenie przyczepności kół do nawierzchni.

Pierwszym z nich było urządzenie μ -PW [8], którego działanie opiera się na pomiarze z wykorzystaniem wymiennej próbki gumowej ciągniętej po nawierzchni drogi. Próbka mocowana jest wraz z uchwytem do dwuskładnikowego czujnika siły, który mierzy siłę jej nacisku na podłoże F_z oraz siłę tarcia ślizgowego F_x . Stosunek mierzonych sił określa współczynnik tarcia próbki do nawierzchni drogi, który pozwala przewidzieć wartości współczynników przyczepności kół do podłoża [8]. W wyniku pomiaru urządzeniem μ -PW ustalono wartość współczynnika przyczepności przyłgowej $\mu_1 = 1,03$, oraz wartość współczynnika przyczepności poślizgowej $\mu_2 = 0,65$.

Drugim użytym przyrządem był Drag Sled [11], który składa się z wycinka opony o znanym ciężarze i siłomierza. Pomiar polega na przeciąganiu wycinka opony po podłożu i jednoczesnym odczycie wartości siły, która odniesiona do ciężaru wycinka opony pozwala określić wartość współczynnika tarcia ślizgowego. W wyniku pomiaru urządzeniem Drag Sled ustalono wartość współczynnika tarcia $\mu = 0,93$.

Widok przyrządów pomiarowych wykorzystanych do określenia parametrów nawierzchni przedstawiono na rys. 8.

W badaniach drogowych wymuszeniem była siła nacisku na pedał hamulca P_N , w badaniach symulacyjnych wymuszeniem były momenty hamowania na kołach pojazdu ciągnącego, które były tak duże, że możliwe było wykorzystanie działania ABS. Założono współczynnik procentowej efektywności układu ABS $p\% = 88\%$ [6].



Rys. 8. Widok przyrządów pomiarowych użytych do scharakteryzowania nawierzchni drogi.

Przebytą w trakcie hamowania przez pojazd drogę mierzono za pomocą dwóch urządzeń. Pierwszym urządzeniem był optyczny bezkontaktowy czujnik pomiaru prędkości Correvit S400 [9], który działał wspólnie z rejestratorem IMC Cronos, tworząc tor pomiarowy wraz z przenośnym komputerem. Działanie urządzenia polega na oświetlaniu nawierzchni silnym strumieniem skupionego światła i analizie odbitych promieni padających na optyczny układ odbiorczy. Oświetlony obraz nawierzchni przechodzi przez obiektyw i dodatkową przesłonę, dalej odbite od nawierzchni promienie padają na siatkę pryzmatyczną, która rozdziela je i kieruje do fotokomórek. Częstotliwość sygnału elektrycznego niesie z kolei przekaz o ruchu względem nawierzchni [9].

Drugim użytym urządzeniem był znacznik początku drogi zatrzymania pojazdu „Shot Marker” [10]. Jest to pistolet znakujący. Urządzenie zabudowuje się do nadwozia pojazdu tak, aby lufa skierowana była w dół, prostopadle do nawierzchni. Czujnik siły nacisku umieszcza się bezpośrednio na pedale hamulca, a urządzenie zasila się z instalacji elektrycznej pojazdu. Przed hamowaniem lufa pistoletu znakującego nabijana jest porcją kredy, od góry umieszcza się nabój hukowy. Z chwilą naciśnięcia na pedał hamulca wyzwala się sygnał elektryczny aktywujący elektromagnetyczny spust zamka. Zwolniona w ten sposób iglica uderza w sponkę naboju, co inicjuje jego wystrzał i wystrzelenie kredy z lufy w kierunku do dołu. Pozostawia na nawierzchni ślad będący punktem określającym położenie pojazdu na początku drogi hamowania [10].

Podczas hamowania rejestrowano za pomocą czujnika siłę nacisku na pedale hamulca. Rejestrację prowadzono z częstotliwością próbkowania 500 Hz. Ogólny wygląd samochodu przygotowanego do badań z zabudowaną aparaturą badawczą przedstawiono na Rys. 9.



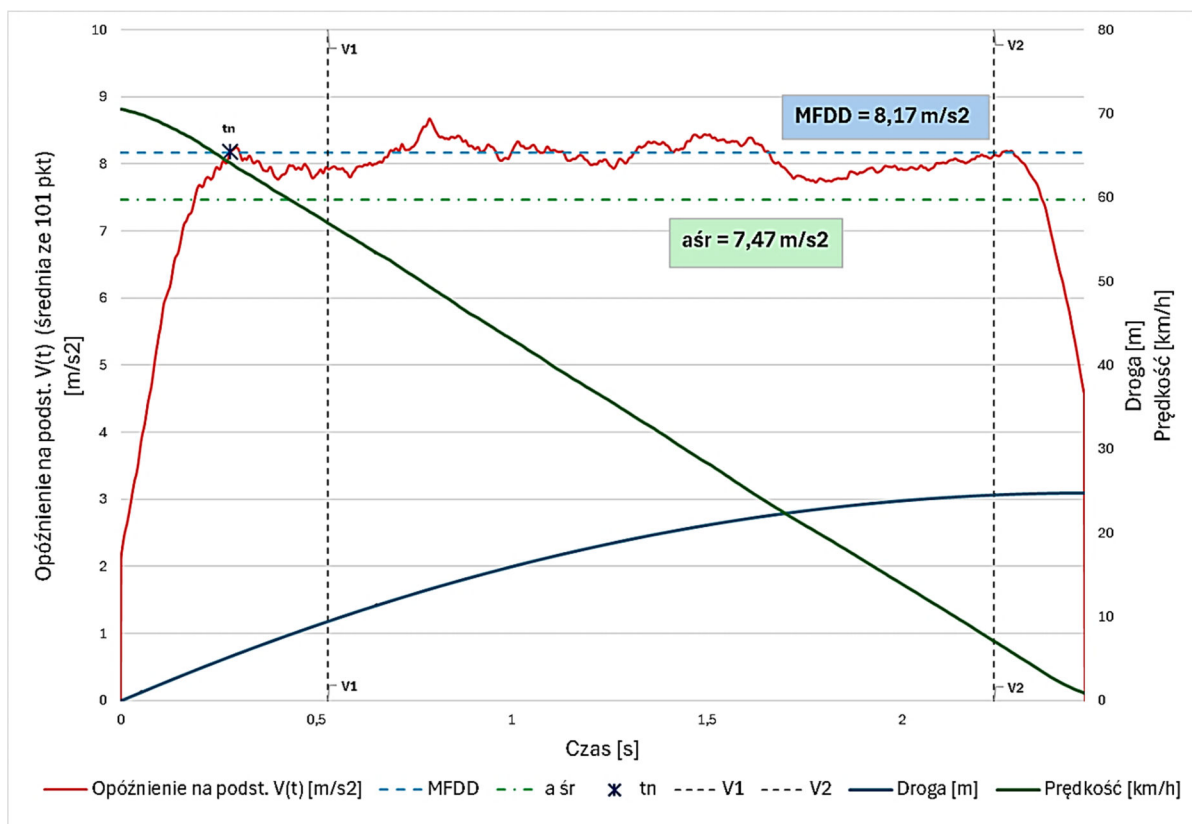
Fig. 9. Widok przyrządów pomiarowych użytych do pomiaru drogi hamowania: po lewej głowica Correxit S400, po prawej Shot Marker.

WYNIKI

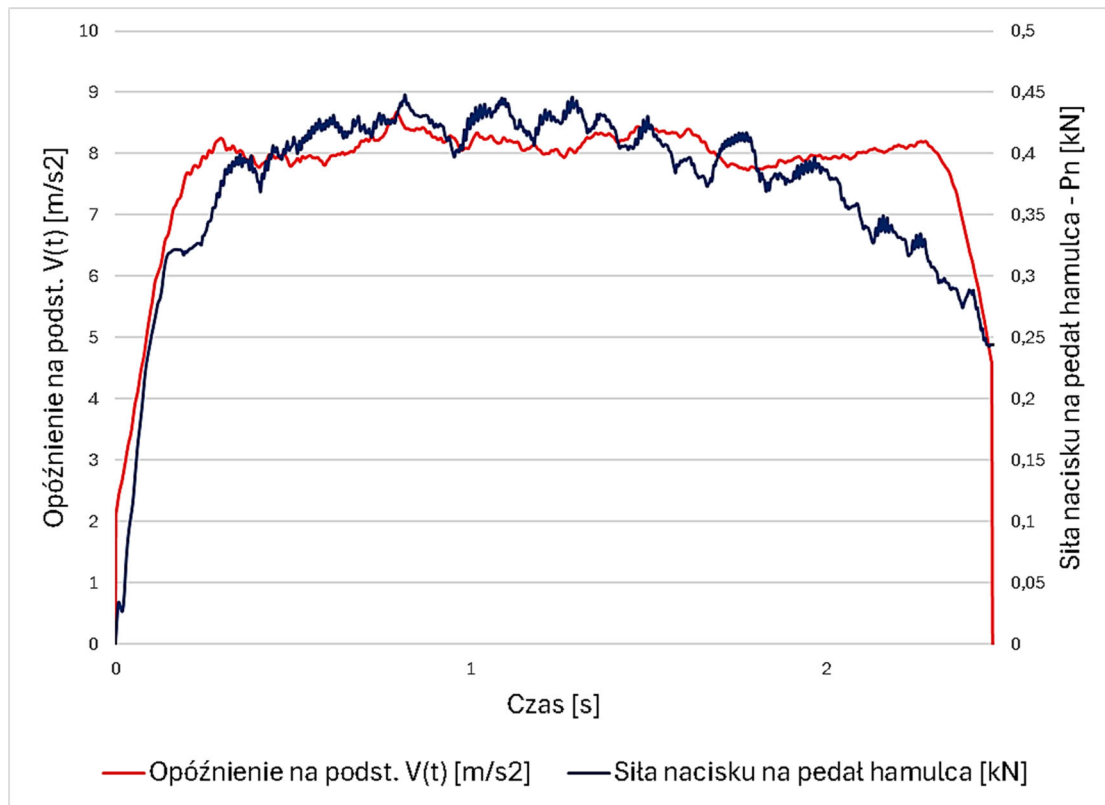
W trakcie badań eksperymentalnych hamowano z odłączonym od układu napędowego silnikiem, dzięki czemu uniknięto zakłócającego działania podciśnieniowego urządzenia wspomagającego układ hamulcowy. Badania rozpoczęto od hamowania pojazdem bez przyczepy, którego prędkość początkowa zawierała się w przedziale 19,02÷19,97 m/s (68,5÷71,9 km/h). Hamowanie odbywało się do zatrzymania pojazdu. Łącznie wykonano pięć hamowań.

Na rys. 8 przedstawiono wybrany uśredniony (średnia krocząca ze 101 pkt) przebieg czasowy opóźnienia dla prostoliniowego hamowania samochodu z prędkości początkowej 19,78 m/s (71,2 km/h), przebieg czasowy prędkości ruchu postępowego i przemieszczenia wzdłużnego pojazdu. Zaznaczono czas narastania opóźnienia hamowania t_n , wartość średnią opóźnienia hamowania a_{sr} oraz wartość średniego w pełni rozwiniętego opóźnienia hamowania MFDD (ang.: *Mean Fully Developed Deceleration*).

Rys. 11 obrazuje (dla tego samego hamowania) przebieg czasowy siły nacisku na pedał hamulca P_n oraz przebieg czasowy uśrednionego opóźnienia dla prostoliniowego hamowania.



Rys. 10. Hamowanie prostoliniowe samochodu z prędkości $V_0 = 71,2$ km/h do zera. Przebiegi czasowe opóźnienia hamowania, prędkości ruchu postępowego i przemieszczenia wzdłużnego.



Rys. 11. Hamowanie prostoliniowe samochodu z prędkości $V_0 = 71,2$ km/h do zera. Przebiegi czasowe siły nacisku na pedał hamulca P_n i opóźnienia hamowania.

W tabeli 8 przedstawiono zestawienie wartości długości drogi hamowania S_h dla hamowań z prędkości początkowej zawierającej się w przedziale $19,02 \div 19,97$ m/s ($68,5 \div 71,9$ km/h), zmierzone w trakcie eksperymentu (E) urządzeniami Correvit S400 (Corr, pięć hamowań) i Shot Marker (Shot-M, trzy hamowania) oraz obliczone przy pomocy modelu symulacyjnego (S), z parametrami drogi ustalonymi w efekcie pomiaru urządzeniem Drag Sled. Przyjmowano wartość współczynnika procentowej efektywności układu ABS $p\% = 88\%$.

Tab.8

Długości drogi hamowania S_h dla przyjętych wariantów hamowań.

Porównanie wyników badań (eksperyment (E)/symulacja(S)) - Drag Sled

Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5

Długości dróg hamowania zmierzone przy pomocy urządzenia Correvit S400 zawierały się w przedziale $23,87 \div 26,05$ m (średnia wartość długości drogi hamowania $24,99$ m, różnica pomiędzy minimalną i maksymalną wartością długości drogi hamowania $2,18$ m). Długości dróg hamowania zmierzone za pomocą urządzenia Shot Marker zawierały się w przedziale $23,16 \div 23,70$ m (średnia wartość długości drogi hamowania $23,42$ m, różnica pomiędzy minimalną i maksymalną wartością długości drogi hamowania $0,54$ m).

Długości dróg hamowania obliczone na podstawie modelu symulacyjnego z parametrami nawierzchni ustalonymi przy pomocy Drag Sleda zawierały się w przedziale $22,41 \div 24,10$ m (średnia wartość długości drogi hamowania $23,54$ m, różnica pomiędzy minimalną i maksymalną wartością długości drogi hamowania $1,69$ m).



Porównując ze sobą długości dróg hamowania zmierzone urządzeniem Correvit S400 z długościami dróg hamowania obliczonymi przy pomocy modelu symulacyjnego widać, że różnice wynosiły od 2,9% do 9,6%. Dla długości dróg hamowania zmierzonych urządzeniem Shot Marker, porównanie z wynikami symulacji wskazuje, że różnice wynosiły od 0,8% do 3,9%. Warto wyraźnie zaznaczyć, że średnia długość drogi hamowania obliczona w symulacji dla parametrów nawierzchni określonych na podstawie pomiarów urządzeniem Drag Sled ($S_{h(S)} \text{ śr} = 23,54 \text{ m}$) znajdowała się pomiędzy średnimi wartościami dróg hamowania zmierzonymi podczas eksperymentu ($S_{h(Ec)} \text{ śr} = 24,99 \text{ m}$, $S_{h(Esm)} \text{ śr} = 23,42 \text{ m}$).

W tabeli 9 przedstawiono zestawienie wartości długości drogi hamowania S_h dla prędkości początkowej zawierającej się w przedziale 19,02÷19,97 m/s (68,5÷71,9 km/h) zmierzone w trakcie eksperymentu (E) urządzeniami Correvit S400 i Shot Marker. Podano także wartości obliczone za pomocą modelu symulacyjnego (S), z parametrami drogi określonymi w efekcie pomiaru urządzeniem μ -PW. Przyjęto współczynnik procentowej efektywności układu ABS $p\% = 88\%$.

Tab. 9

Długości drogi hamowania S_h . Symbolem E oznaczono wyniki badań eksperymentalnych, symbolem S oznaczono wyniki symulacji.

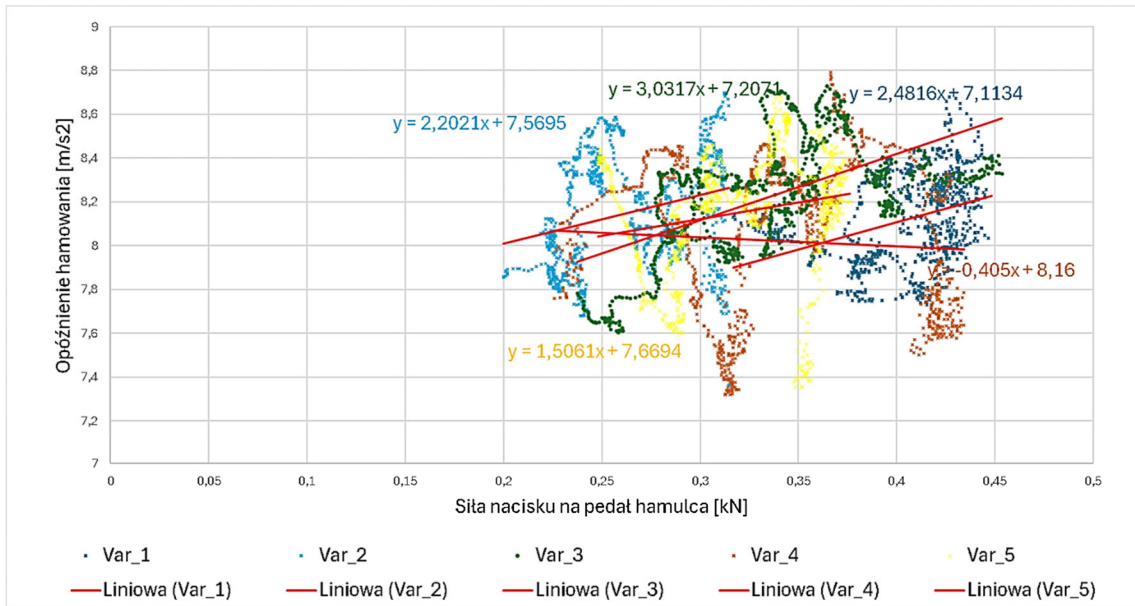
Porównanie wyników badań (eksperyment(E)/symulacja(S)) - μ -PW

Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr	Próba hamowania Nr
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5

Długości dróg hamowania obliczone na podstawie modelu symulacyjnego z parametrami nawierzchni ustalonymi przy pomocy μ -PW zawierały się w przedziale 20,16÷21,51 m. Średnia wartość długości drogi hamowania wyniosła 21,01 m i była krótsza o 2,53 m (tj. o ok. 10,7%) od średniej wartości długości drogi hamowania obliczonej dla parametrów nawierzchni ustalonych na podstawie pomiaru Drag Sledem. Różnica pomiędzy minimalną i maksymalną wartością długości drogi hamowania dla tego przypadku wynosiła 1,35 m.

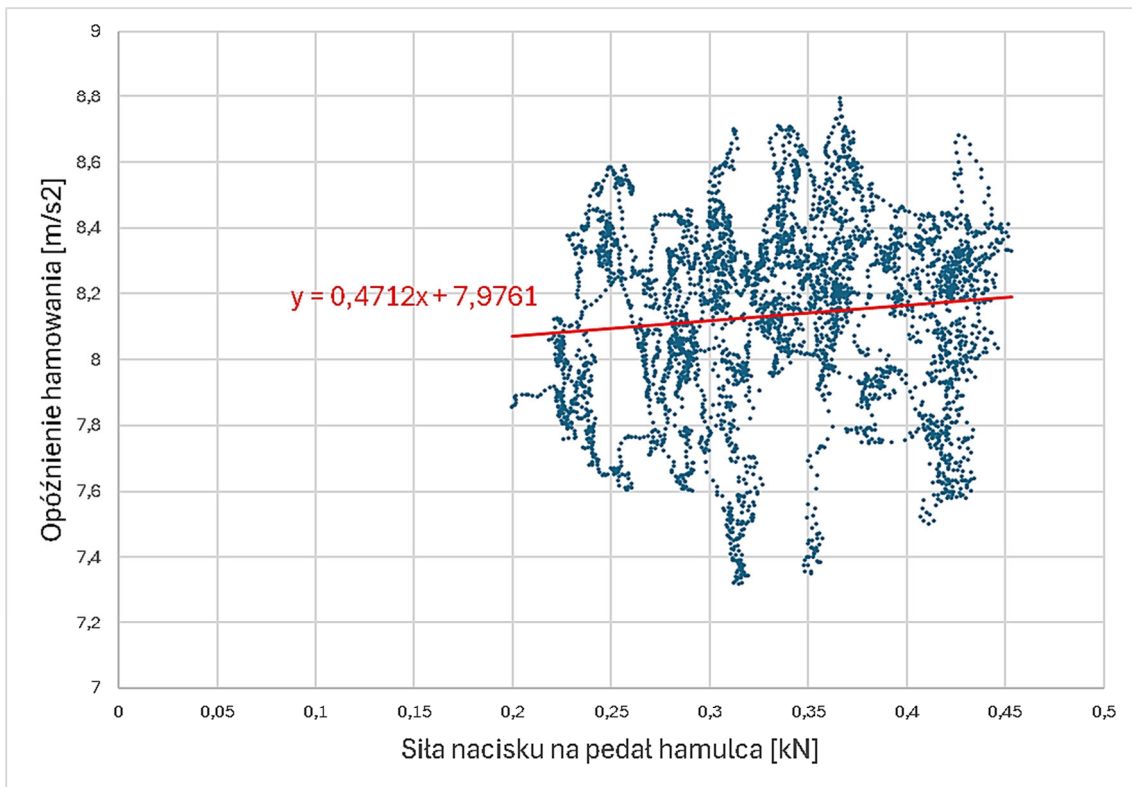
Porównując ze sobą długości dróg hamowania zmierzone urządzeniem Correvit S400 z długościami dróg hamowania obliczonymi przy pomocy modelu symulacyjnego widać, że różnice wynosiły od 15,2% do 23,3%. Zestawienie długości dróg hamowania zmierzonych urządzeniem Shot Marker z długościami dróg hamowania obliczonymi za pomocą modelu symulacyjnego wskazuje, że różnice wynosiły od 7,7% do 13,0%. Wyniki długości dróg hamowania uzyskane w symulacji przy parametrach nawierzchni jezdni określonych na podstawie urządzenia μ -PW były każdorazowo mniejsze od długości dróg hamowania pomierzonych podczas eksperymentu.

Na podstawie zarejestrowanych (podczas pięciu hamowań) charakterystyk opóźnienia hamowania w funkcji siły nacisku na pedał hamulca, dla okresu hamowania z w pełni rozwiniętym opóźnieniem hamowania (MFDD), wyznaczono uśrednioną wartość opóźnienia hamowania samochodu bez przyczepy, która wyniosła 8,13 m/s². Na rys. 12 przedstawiono zarejestrowane podczas pięciu hamowań wartości opóźnienia hamowania w funkcji siły nacisku na pedał hamulca dla wymienionego wyżej okresu hamowania.



Rys. 12. Charakterystyki opóźnienia hamowania w funkcji siły nacisku na pedał hamulca zarejestrowane podczas pięciu hamowań.

Na rys. 13 przedstawiono uśrednioną z pięciu prób charakterystykę opóźnienia hamowania w funkcji siły nacisku na pedał hamulca.



Rys. 13. Uśredniona z pięciu hamowań charakterystyka opóźnienia hamowania w funkcji siły nacisku na pedał hamulca.

Na tej podstawie stwierdzono, że wartość siły bezwładności podczas hamowania samochodu o masie 2655 kg wynosiła 21595,24 N i była ona w przybliżeniu równa sile hamowania pojazdu ciągnącego (pominięto opory aerodynamiczne, opory toczenia i oddziaływanie mas wirujących). Po dołączeniu do samochodu przyczepy o masie 720 kg obciążonej w sposób, który nie wpływa na zmianę sił nacisku poszczególnych osi pojazdu ciągnącego na podłoże, powinno uzyskiwać się opóźnienie hamowania zespołu pojazdów na poziomie 6,40 m/s² (dla przyjętej procentowej efektywności układu ABS).

W tabelach 10 ÷ 15 przedstawiono wyniki pomiarów długości drogi hamowania zespołu pojazdów dla opisanych już w pracy sześciu sposobów załadowania przyczepy (warianty od I do VI). Dla każdego wariantu załadowania przyczepy wykonano po pięć prób hamowania z prędkości początkowej ok. 70 km/h do zatrzymania. Podczas hamowania rejestrowano siłę nacisku na pedał hamulca, drogę oraz prędkość.

Długości drogi hamowania zespołu pojazdów z przyczepą załadowaną według wariantu I.

Próba Nr	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]	Prędkość początkowa v_0 [m/s]	Droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]
1	0,185	19,298	27,870	26,290
2	0,223	20,190	30,649	27,140
3	0,257	19,930	29,940	27,939
4	0,235	19,526	28,064	
5	0,149	19,274	27,662	

Tab. 11

Długości drogi hamowania zespołu pojazdów z przyczepą załadowaną według wariantu II.

Próba Nr	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]	Prędkość początkowa v_0 [m/s]	Droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]
1	0,169	20,064	31,734	30,120
2	0,221	19,430	29,541	29,050
3	0,233	19,606	30,800	30,000
4	0,109	19,828	30,988	
5	0,139	18,932	27,662	

Tab. 12

Długości drogi hamowania zespołu pojazdów z przyczepą załadowaną według wariantu III.

Próba Nr	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]	Prędkość początkowa v_0 [m/s]	Droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]
1	0,145	19,358	30,988	30,030
2	0,169	19,616	31,981	29,740
3	0,197	19,536	31,822	30,710
4	0,163	19,930	33,290	
5	0,225	19,550	31,460	

Długości drogi hamowania zespołu pojazdów z przyczepą załadowaną według wariantu IV.

Próba Nr	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]	Prędkość początkowa v_0 [m/s]	Droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]
1	0,109	19,964	28,487	27,750
2	0,163	19,888	28,660	28,150
3	0,207	19,488	28,606	27,540
4	0,223	19,746	28,285	
5	0,215	18,942	26,185	

Tab. 14

Długości drogi hamowania zespołu pojazdów z przyczepą załadowaną według wariantu V.

Próba Nr	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]	Prędkość początkowa v_0 [m/s]	Droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]
1	0,121	18,804	26,950	26,670
2	0,157	19,166	27,997	27,640
3	0,177	19,096	28,973	28,150
4	0,133	19,638	29,000	
5	0,173	19,734	29,430	

Tab. 15

Długości drogi hamowania zespołu pojazdów z przyczepą załadowaną według wariantu VI.

Próba Nr	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]	Prędkość początkowa v_0 [m/s]	Droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]
1	0,209	19,532	31,840	30,620
2	0,191	19,358	30,357	29,470
3	0,171	19,406	30,587	29,760
4	0,195	20,052	32,529	
5	0,155	19,178	29,592	

W tabelach 16 i 17 przedstawiono zestawienia wartości prędkości początkowej v_0 , czasu narastania opóźnienia hamowania t_n i długości drogi hamowania S_h dla danego wariantu załadunku przyczepy uzyskane w eksperymencie (wartości średnie z pięciu hamowań wykonanych dla każdego wariantu załadunku przyczepy) i odniesione do nich wyniki obliczeń symulacyjnych długości drogi hamowania S_h , przy uwzględnieniu parametrów jezdni określonych za pomocą Drag Sleda i μ -PW.

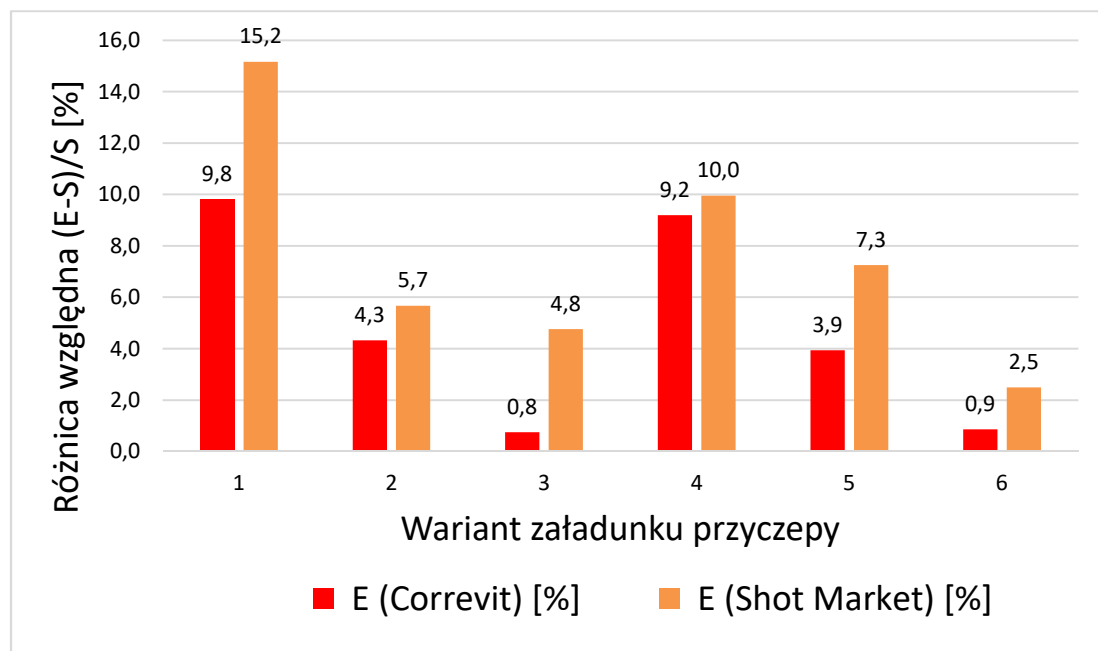


Length of braking distance - comparison of experiment results with simulation calculations (road parameters based on Drag Sled).

Wariant załadunku przyczepy	Średnia wartość prędkości v_0 [m/s]	Średnia wartość prędkości V_0 [km/h]	Średnia wartość czasu narastania opóźnienia t_n [s]	Średnia droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Średnia droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]	Droga hamowania - S symulacja S_h [m]	Różnica względna (E-Corr - S)/S [%]	Różnica względna (E-Shot - S)/S [%]
I	19,64	70,72	0,210	28,84	27,12	31,97	9,8	15,2
II	19,57	70,46	0,174	30,15	29,72	31,51	4,3	5,7
III	19,59	70,52	0,180	31,91	30,16	31,67	0,8	4,8
IV	19,61	70,58	0,183	28,05	27,81	30,89	9,2	10,0
V	19,29	69,44	0,152	28,47	27,49	29,64	3,9	7,3
VI	19,51	70,22	0,184	30,98	29,95	30,72	0,9	2,5

Najmniejsze różnice pomiędzy wartościami długości dróg hamowania uzyskanymi w eksperymencie i w symulacji dla parametrów nawierzchni określonych na podstawie Drag Sleda występowały dla wariantów nr III i VI sposobu umieszczenia ładunku na przyczepie. W przypadku pomiaru długości drogi hamowania urządzeniem Correvit S400 różnice te wynosiły 0,8÷0,9%, w przypadku pomiaru długości drogi hamowania urządzeniem Shot Marker różnice te wynosiły 2,5÷4,8%. Dla wariantów nr II i V różnice długości dróg hamowania wynosiły od 3,9% do 4,3%, gdy drogę hamowania podczas eksperymentu mierzono Correvitem oraz od 5,7% do 7,3%, gdy mierzono ją za pomocą Shot Markera. Dla wariantów nr I i IV różnice długości dróg hamowania były największe i wynosiły od 9,2% do 9,8% dla drogi hamowania mierzonej Correvitem oraz od 10,0% do 15,2% dla pomiaru Shot Markerem.

Wraz z przesuwaniem środka masy przyczepy w kierunku do tyłu zauważalny był wzrost zbieżności wyników eksperymentu i symulacji dla obu sposobów mierzenia drogi hamowania. Różnice pomiędzy eksperymentem i symulacją nie przekroczyły 15,2%. Na rys. 14 przedstawiono graficzne porównanie różnic długości drogi hamowania eksperymentu i symulacji.



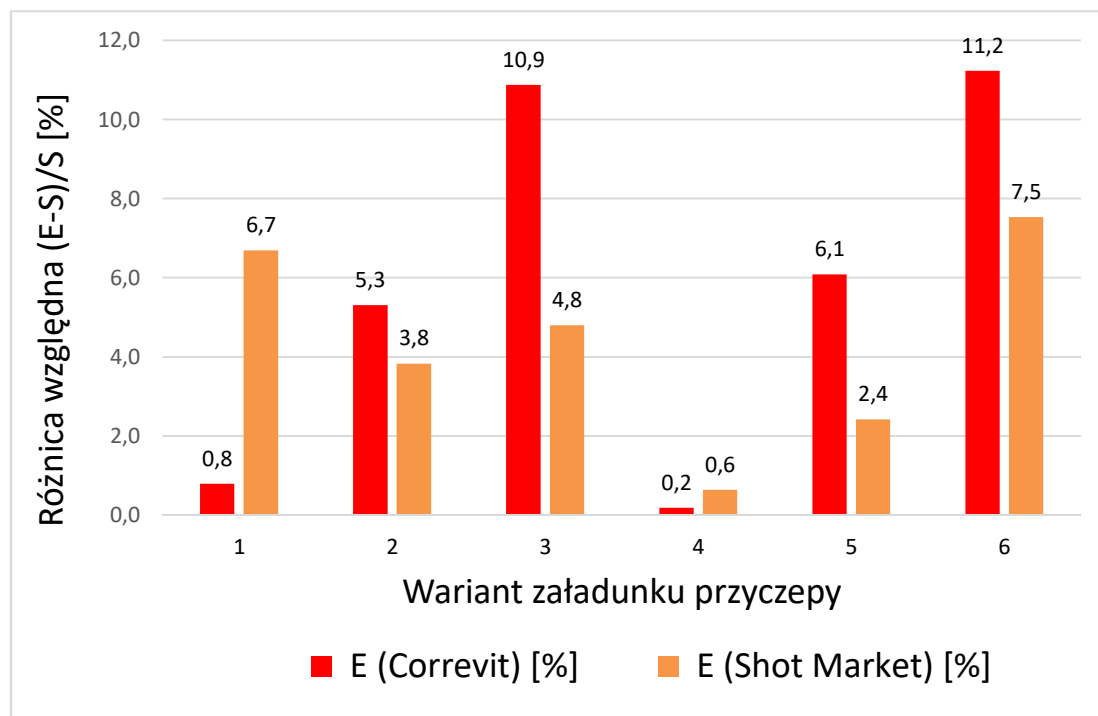
Rys. 14. Porównanie długości drogi hamowania uzyskanej w eksperymencie (E) i symulacji (S), gdy parametry nawierzchni wyznaczono za pomocą Drag Sleda.

Długość drogi hamowania – porównanie wyników eksperymentu z obliczeniami symulacyjnymi (parametry drogi na podstawie μ -PW).

Wariant załadunku przyczepy	Średnia wartość prędkości v_0 [m/s]	Średnia wartość prędkości V_0 [km/h]	Średnia wartość czasu narastania opóźnienia t_n [s]	Średnia droga hamowania - E (Correvit) S_h [m]	Średnia droga hamowania - E (Shot Marker) S_h [m]	Droga hamowania - S symulacja S_h [m]	Różnica względna (E-Corr - S)/S [%]	Różnica względna (E-Shot - S)/S [%]
I	19,64	70,72	0,210	28,84	27,12	29,07	0,8	6,7
II	19,57	70,46	0,174	30,15	29,72	28,63	5,3	3,8
III	19,60	70,55	0,180	31,91	30,16	28,78	10,9	4,8
IV	19,61	70,58	0,183	28,04	27,81	27,99	0,2	0,6
V	19,29	69,44	0,152	28,47	27,49	26,84	6,1	2,4
VI	19,51	70,22	0,184	30,98	29,95	27,85	11,2	7,5

Najmniejsze różnice pomiędzy wartościami długości dróg hamowania uzyskanymi w eksperymencie i w symulacji dla parametrów drogi określonych na podstawie μ -PW występowały dla wariantów nr I i IV sposobu umieszczenia ładunku na przyczepie, gdy drogę mierzono Correvitem i wynosiły one $0,2 \div 0,8\%$. Gdy drogę mierzono Shot Markerem, najmniejsze różnice pomiędzy eksperymentem i symulacją uzyskiwano dla wariantu IV i wyniosły one $0,6\%$.

Dla wariantów nr III i VI różnice długości dróg hamowania były największe i wynosiły od $10,9\%$ do $11,2\%$ dla drogi mierzonej Correvitem. Dla drogi hamowania mierzonej Shot Markerem różnice pomiędzy eksperymentem i symulacją były największe dla wariantów nr I i VI i wynosiły od $6,7\%$ do $7,5\%$. Gdy drogę hamowania podczas eksperymentu mierzono Correvitem, obserwowano wzrost rozbieżności wyników eksperymentu i symulacji wraz z przesuwaniem środka masy przyczepy w kierunku do tyłu. Efekt taki nie był widoczny, gdy drogę hamowania określano przy pomocy Shot Markera dla wariantów od I do III, był widoczny dla wariantów od IV do VI. Różnice pomiędzy eksperymentem i symulacją nie przekroczyły $11,2\%$. Na rys. 13 przedstawiono graficzne porównanie różnic długości drogi hamowania w eksperymencie i w symulacji.

Rys. 15. Porównanie długości drogi hamowania uzyskanej w eksperymencie i symulacji, gdy parametry nawierzchni wyznaczono za pomocą μ -PW.

WNIOSKI

Weryfikacja eksperymentalna wyników obliczeń modelu ruchu samochodu dwuosiowego z jednoosiową niehamowaną przyczepą wskazuje na jego jakościową i ilościową zgodność z własnościami obiektu rzeczywistego w omawianym procesie hamowania.

Przedstawione w pracy porównanie wyników obliczeń symulacyjnych i badań eksperymentalnych dało podstawę do stwierdzenia, że model symulacyjny dobrze odzwierciedla własności obiektu rzeczywistego podczas hamowania.

Jeżeli parametry nawierzchni określano przy pomocy urządzenia Drag Sled, to uzyskiwano mniejszą rozbieżność wyników symulacji i wyników eksperymentu, gdy drogę hamowania mierzono z wykorzystaniem urządzenia Correvit S400 w porównaniu do sytuacji, gdy drogę hamowania mierzono z wykorzystaniem urządzenia Shot Marker.

Jeżeli parametry nawierzchni określano przy pomocy urządzenia μ -PW, to uzyskiwano mniejszą rozbieżność wyników symulacji i wyników eksperymentu, gdy drogę hamowania mierzono z wykorzystaniem urządzenia Shot Marker w porównaniu do sytuacji, gdy drogę hamowania mierzono z wykorzystaniem urządzenia Correvit S400, przy czym różnice te były niewielkie.

PODSUMOWANIE, OCENA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Zaprezentowane w artykule wyniki badań długości drogi hamowania zespołu pojazdów składającego się z dwuosiowego samochodu ciągnącego i jednoosiowej niehamowanej przyczepy, z uwzględnieniem wpływu położenia środka masy przyczepy, rzadko były dotychczas opisywane w dostępnych źródłach literaturowych. Nie przedstawiano w nich porównania wyników badań modelowych, symulacyjnych zestawionych z wynikami badań eksperymentalnych.

W wyniku porównania ze sobą wyników eksperymentu i symulacji dla różnych stanów obciążenia przyczepy, wykazano przydatność zbudowanego modelu do badania wpływu położenia środka masy przyczepy i punktu sprzęgu na długość drogi hamowania.

Różnice pomiędzy wynikami eksperymentu i symulacji nie przekroczyły 15,2%, co uznano za rezultat zadawalający.

LITERATURA

- Day, A. (2014). Braking system design for vehicle and trailer combinations. W: A. Day. *Braking of road vehicles*. ELSEVIER: Butterworth-Heinemann, pp. 67-96. Downloaded from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123973146000048?via%3Dihub>;
- Filipczyk, J. (2012). *Brake deceleration of cars with light luggage trailers*, Problemy Transportu, Vol. 7, Issue 1, pp. 119-128. Downloaded from: <https://delibra.bg.polsl.pl/dlibra/publication/30953/edition/27445/brake-deceleration-of-cars-with-light-luggage-trailers-opoznienie-hamowania-samochodow-osobowych-z-lekkimi-przyczepami-towarowymi-filipczyk-jan?language=pl>;
- Klonowski, M., Tyszko, P. (2013). *How much further do you brake with a trailer?* Tygodnik Motor (www). Downloaded from: <https://motoryzacja.interia.pl/samochody-uzywane/porady/news-o-ile-dalej-zahamujesz-z-przyczepa,nld,1031989> (accessed on: 02.02.2023);
- Marienka, P., Frančáka, M., Jagelčáka, J., Synáka, F. (2020). *Comparison of braking characteristics of solo vehicle and selected types of vehicle combinations*, Transportation Research Procedia Vol. 44, pp. 40-46, Downloaded from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520300570> (accessed on: 02.02.2023);
- Świder, P., Bułka, D. (2116). *Deceleration of a vehicle combination with an unbraked trailer - theory, research, simulation. Conference "Safety problems in motor vehicles"*, Kielce-Ameliówka, 22-24.02.2016 Conference materials. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, pp. 376-382;
- Kąkol M., Kuśmierz D., Lozia Z., Effect of an unbraked single-axle trailer on the stopping distance of a two-axle car. Paragraf na Drodze, 1/2023. Kraków 2023, pp. 55-73. DOI 10.4467/15053520PnD.23.004.17720;
- Lozia Z. (2021). Model, dynamic equilibrium equations and stopping distance formula for a towing vehicle (two-axle vehicle) - unbraked single-axle trailer. Case of rectilinear motion on a level and sloping road surface. (The author's manuscript is available at https://www.researchgate.net/publication/370653431_Lozia_Z_ZL_wyprowadzenia_2021);
- Luty W., Mier μ -PW friction meter in application to indirect assessment of adhesion of vehicle road wheels to road surface at the road accident site. Warsaw University of Technology, Faculty of Transport. Access: <http://repo.pw.edu.pl> / Downloaded from Repository of Warsaw University of Technology 2022-04-12;
- Surmiński K., Evaluation of the metrological reliability of road tests of the braking process. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji 2016;72(2) DOI: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL72.ART8>;
- Luty W., Evaluation of vehicle road wheel adhesion to the ground based on the Shotmarker braking test. XIV Scientific Conference Problems of Road Accident Reconstruction. Paragraf na Drodze. Numer specjalny. Prawne i kryminalistyczne problemy ruchu drogowego, 2015.
- TARO is a Technical Journal, <https://www.tarorigin.com/aangles/Dragsled/> (accessed on: 2024.11.22).

Marcin Kąkol

Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej w Sulejówku,
Szkoła Doktorska Politechniki Warszawskiej
ORCID: 0000-0003-0451-9590