

ANALIZA WPŁYWU CZASU POSTRZEGANIA NA DŁUGOŚĆ DROGI ZATRZYMANIA PRZEZ PRYZMAT CZYNNIKÓW PSYCHOFIZYCZNYCH

EWA KARWOWSKA¹, PRZEMYSŁAW SIMIŃSKI²

Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej

Streszczenie

Przebieg procesu hamowania ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu. Szczególnie w sytuacjach krytycznych wszelkie determinanty wpływające na długość drogi hamowania pojazdu nabierają poważnego znaczenia. Analiza procesu hamowania może być prowadzona w aspekcie mechaniki zwłaszcza sił kontaktowych i dynamiki elementów roboczych układu hamulcowego, ale również z punktu widzenia czynników psychofizycznych. Ten drugi aspekt zaczyna być dostrzegany w zakresie czynników wywołanych działaniami o charakterze militarnym. W artykule analizowano czynniki wpływające na czas postrzegania kierowcy oraz jego wpływ na długość drogi hamowania w zależności od prędkości jazdy. Przedstawiono rezultaty obliczeń analitycznych. Ich celem jest zobrazowanie istniejących zależności i ich wpływu na drogę hamowania poprzez zmianę czasu zatrzymania. W aspekcie pojazdów specjalnych biorących udział w misjach wojskowych wyodrębniono dodatkowe czynniki mogące wpływać na czas ryzyka. Wymienione czynniki zestawiono w sposób tabelaryczny, zgodnie z hierarchią ich występowania. W artykule dostrzeżono pewne rozbieżności w publikowanych na przestrzeni lat danych literaturowych dotyczących czasu zatrzymania.

Słowa kluczowe: hamowanie, droga zatrzymania, droga hamowania, czynniki psychofizyczne, czas reakcji, czas postrzegania, pojazdy militarne

1. Przebieg procesu hamowania prostoliniowego i jego skuteczność

Za miarę skuteczności hamowania przyjmowana jest długość drogi przebytej przez pojazd od chwili pojawienia się przeszkody do jego zatrzymania lub uzyskane średnie rozwinięte opóźnienie. Skuteczność hamowania zależy od trzech zasadniczych czynników [1, 13, 15, 18, 19]:

¹ Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej, ul. Okuniewska 1, 05-070 Sulejówce, e-mail: ewakarwowska@gmail.com

² Wojskowy Instytut Techniki Pancерnej i Samochodowej, ul. Okuniewska 1, 05-070 Sulejówce, e-mail: przemyslaw.siminski@witpis.eu

- psychicznych i fizycznych cech kierowcy,
- własności konstrukcyjnych i sprawności układu hamulcowego,
- współczynnika przyczepności opony do jezdni.

Przy założeniu, że kierowca jest w stanie nacisnąć pedał hamulca z siłą, która doprowadziłaby do zablokowania kół samochodu, to długość drogi potrzebnej na zatrzymanie samochodu zależy z jednej strony od wartości maksymalnych sił stycznych, jakie mogą być rozwinięte między kołami samochodu a nawierzchnią (zależne głównie od własności fizycznych opon i nawierzchni), a z drugiej strony – od czasu, jaki upływa od pojawienia się przeszkody do chwili rozwinięcia przez układ hamulcowy pełnej siły hamowania i jest zależny od kierowcy (zauważenie przeszkody, podjęcie decyzji o rozpoczęciu hamowania) [2, 4, 13, 15, 19]. Dekompozycja czasu, jaki upływa do zatrzymania samochodu, została przedstawiona w [15] i wygląda następująco:

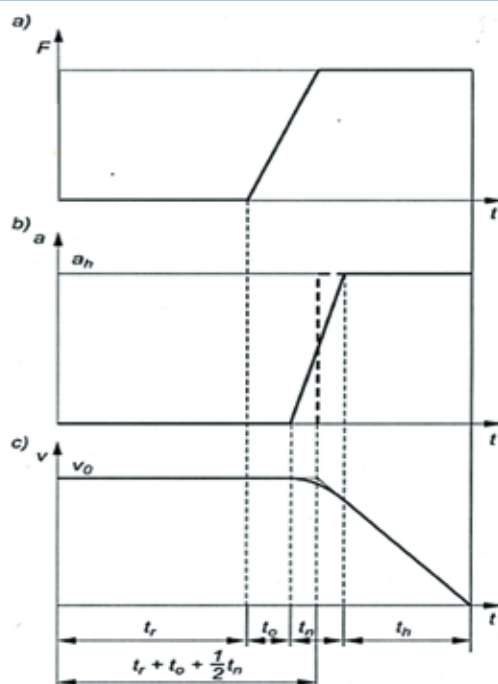
- czas postrzegania t_{r1} – od chwili pojawienia się przeszkody w polu widzenia do chwili wyostrenia wzroku i rozpoznania jej;
- czas zasadniczej reakcji psychicznej t_{r2} – obejmuje okres związany z rozpoznaniem sytuacji, podjęciem decyzji o rodzaju manewru (ominięcie przeszkody, hamowanie) i rozpoczęciem czynności mających na celu wykonanie manewru (początek przenoszenia stopy z pedału przyspieszania na pedał hamulca); zależy on od działania ośrodkowego układu nerwowego (mózg, rdzeń kręgowy), który poprzez włókna nerwowe i obwodowy układ nerwowy przesyła odpowiednio przetworzone bodźce do efektorów (tkanek mięśniowych);
- czas przeniesienia t_{r3} – od rozpoczęcia zwalniania pedału przyspieszania do położenia stopy na pedale hamulca (reakcja motoryczna);
- czas zwłoki zadziałania hamulca t_0 – od chwili położenia stopy na pedale hamulca do pojawienia się siły hamowania;
- czas narastania opóźnienia t_n – od chwili pojawienia się siły hamowania do osiągnięcia przez opóźnienie hamowania założonej przez kierowcę wartości lub wartości wynikającej z zablokowania kół lub zadziałania układu przeciwblokującego;
- czas pełnego hamowania t_h – od chwili osiągnięcia założonej wartości siły hamowania do zatrzymania pojazdu.

W graficznym ujęciu podział czasu zatrzymania pojazdu przedstawia rysunek nr 1.

Łącznie, od pojawienia się przeszkody do zdjęcia przez kierowcę nogi z pedału przyspieszania mija czas zwany czasem reakcji psychicznej. Doliczając czas potrzebny na przeniesienie nogi z pedału przyspieszania na pedał hamulca, czyli czas reakcji motorycznej (t_{r3}), otrzymuje się łączny czas reakcji psychomotorycznej kierowcy ($t_r = t_{r1} + t_{r2} + t_{r3}$) (w tym czasie pojazd porusza się w przybliżeniu z taką samą prędkością, jaką miał w chwili podjęcia przez kierowcę decyzji o uruchomieniu hamulców). Dopiero po tym czasie rozpoczyna się właściwy proces hamowania.

Na potrzeby badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych realizowanych przez zespół prof. Stańczyka przyjęto pojęcie czasu ryzyka³. Czas ryzyka zdefiniowano jako czas,

³ Później pojęcie „czasu ryzyka” nazwano „czasem do zderzenia”, określanym skrótem TTC (time-to-collision). Przyp. tłum.



**Rys. 1. Uproszczony przebieg procesu zatrzymywania samochodu:
a) siła nacisku na pedał hamulca, b) opóźnienie hamowania, c) prędkość [15]**

którym dysponuje kierowca od momentu zauważenia przeszkody, do ewentualnego zderzenia z nią. Jest on wykorzystywany przez kierowcę na działania zmierzające do uniknięcia wypadku lub ewentualnie jego skutków. Czas ryzyka, wykorzystany przez kierowcę na realizację działań obronnych, obliczano jako stosunek odległości samochodu od przeszkody w chwili zaistnienia zagrożenia wypadkowego do jego prędkości. [8]

Doświadczalne wyznaczenie wymienionych powyżej odcinków czasowych, jest uznawane za trudne ze względu na wielość czynników wpływających na te czasy, a czas reakcji psychomotorycznej poszczególnych kierowców może się różnić w szerokim zakresie, o czym świadczą przytoczone dane w tabeli nr 1.

Informacja o poziomie bezpieczeństwa zapewnianego przez kluczowe układy często bywa niekompletna. Przykładowo, w analizie wyników procesu hamowania w ramach badań eksperymentalnych, prowadzonych zgodnie z regulaminem nr 13 ECE, nie uwzględnia się czasu reakcji psychomotorycznej. Jest to w tym wypadku „czysta” ocena skutecznej pracy układu hamulcowego.

Na szczególną uwagę w zakresie analizy czasu reakcji w sytuacjach przedwypadkowych zasługują krajowe prace badawcze realizowane w ostatnich latach [6, 7, 8]. Na podstawie badań wykazano korelację pomiędzy czasami reakcji uzyskanymi w warunkach

Tabela 1. Wartości odcinków czasowych istotnych dla przebiegu procesu zatrzymania pojazdu [15]

	Reakcja psychomotoryczna kierowcy t_r			Czas związany z działaniem układu hamulcowego	
	Reakcja psychiczna		Reakcja motoryczna	Czas zwłoki zadziałania hamulca t_θ [s]	Czas narastania opóźnienia hamowania t_n [s]
	Czas postrzegania t_{r1} [s]	Czas zasadniczej reakcji psychicznej t_{r2} [s]	Czas przeniesienia stopy t_{r3} [s]		
Wartość średnia	0,48	0,45	0,19	0,05	0,17
Dolna granica przedziału ufności (2%)	0,32	0,22	0,15	0,03	0,14
Górna granica przedziału ufności (98%)	0,55	0,58	0,21	0,06	0,18

wirtualnych oraz rzeczywistych. Przy czym czasy reakcji podczas badań eksperymentalnych na torze są znacząco dłuższe. Należy zwrócić uwagę na ustalenia w zakresie porównania czasu reakcji uzyskiwanego na torze badawczym, symulatorze jazdy samochodem oraz prostych urządzeniach do badań psychotechnicznych. Stwierdzono brak korelacji z wynikami eksperymentu na torze i w symulatorze, co dowodzi, że czas reakcji uzyskiwany w badaniach na prostych stanowiskach psychotechnicznych nie może być traktowany jako rzeczywisty czas reakcji kierowców w sytuacjach drogowych i nie może być używany w rekonstrukcji wypadków drogowych [8].

W zakresie dynamiki działania układu hamulcowego, analizując dane literaturowe ze źródeł krajowego pochodzenia, które zestawiono w tabeli nr 2, można zauważyć różnice w przyjmowanych przedziałach. Wartości przyjmowane w metodach analitycznych mogą prowadzić do rozbieżności otrzymanych wyników.

Tabela 2. Czas zadziałania hamulców wg danych literaturowych [2, 13, 15, 16, 17, 18, 19]

Źródło:	Czas zadziałania hamulców		
	Hydrauliczny układ uruchamiania	Pneumatyczny układ uruchamiania	Elektropneumatyczny układ uruchamiania
S. Arczyński	0,3	0,5	
T. Wrzesiński	0,1÷0,3		
A. Reński	0,05		
K. Studziński	0,02÷0,05	0,2÷0,5	
L. Prochowski, J. Unarski, W. Wach	0,15÷0,3	0,3÷0,5	0,15÷0,35

2. Czynniki psychofizyczne istotne dla procesu hamowania

Z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu konieczne jest uwzględnienie wpływu czynników wpływających na kierującego, które doprowadzają do zmiany jego zachowań. Znaczne odległości drogi są pokonywane przez pojazd zanim proces hamowania zostanie zainicjowany. Znaczącą rolę w tym wypadku odgrywa czas reakcji kierującego pojazdem. Jak już wcześniej wspomniano, składa się na niego czas postrzegania (t_{p1}), czyli czas, jaki upływa od chwili, kiedy przeszkoda może być zauważona, do chwili, kiedy rozpocznie działanie ośrodkowy układ nerwowy. Czas postrzegania zależy od:

- położenia przeszkody w stosunku do linii koncentracji wzroku kierowcy (przeszkoda jest trudniej zauważalna, jeśli pojawia się na peryferiach obszaru widzenia),
- ruchu przeszkody (przeszkoda ruchoma jest łatwiej zauważalna niż nieruchoma),
- wielkości oraz kontrastowości przeszkody z otoczeniem.

Czas postrzegania jest w niektórych źródłach włączony do przedziału czasowego zwanego czasem reakcji. Czas reakcji zależy od właściwości psychofizycznych kierowcy. W wyniku treningu lub z upływem czasu, kiedy kierowca nabiera doświadczenia, czas reakcji stopniowo skraca się i ulega stabilizacji. Dopiero od tego momentu długość czasu reakcji zależy od innych czynników: wieku, doświadczenia, stanu psychofizycznego, charakteru jazdy (np. długotrwała monotonna jazda wydłuża czas reakcji), sytuacji drogowej i elementu zaskoczenia (podczas dojazdu do skrzyżowania lub przejścia dla pieszych czas reakcji jest krótszy niż w przypadku nagłego pojawienia się przeszkody). Istotny wpływ na czas reakcji kierowcy mogą mieć złe warunki jazdy, pora dnia, hałas, wibracje, nieprawidłowe warunki ergonomiczne (np. złe rozmieszczenie elementów sterowania) [10, 12, 15, 18]. Wszystkie te czynniki powodują, że czas postrzegania i czas reakcji może się zmieniać w dość szerokich granicach. Na przykład czas reakcji [18]:

- w porze dziennej mieści się w granicach (0,35 ÷ 1,2) s,
- w porze nocnej – (0,4 ÷ 1,8) s.

Różnice między czasem reakcji w dzień i w nocy dla danego kierowcy wynoszą ok. 0,2 s (dolne granice dotyczą ok. 2% populacji kierowców, górne – ok. 98%). Ponadto zmienność sytuacji drogowych bardziej wydłuża czas reakcji kierowców starszych wiekiem. Wyrażna zmiana pojawia się po 40. roku życia (pogorszenie czasu adaptacji wzroku, obniżona zdolność reagowania na bodźce zewnętrzne). Największe zmiany występują w wieku 50–60 lat. Po 75. roku życia czas reakcji może wydłużyć się dwukrotnie. Wartości te dodatkowo powiększają się wraz ze wzrostem zmęczenia lub w przypadku konsumpcji alkoholu. W zależności od cech fizycznych (np. kierowca jest wypoczęty lub zmęczony), stanu zdrowia (np. ból głowy), złożoności sytuacji drogowej (zaskoczenie wynikające z nietypowości sytuacji drogowej), charakteru drogi (ulica, droga podmiejska, autostrada), rytmu dobowego, zjawisk meteorologicznych (zmiany ciśnienia atmosferycznego i temperatury otoczenia), stopnia koncentracji (np. hałas w kabinie trwający przez dłuższy czas może wydłużyć czas reakcji o ponad 10%), łączny czas postrzegania i czas reakcji kierowcy może zmieniać się od 1 s nawet do 5 s. Osłabienie czujności objawia się osłabieniem zdolności percepcyjnych kierowcy: następuje pogorszenie zdolności postrzegania, co skutkuje opóźnieniem rozpoczęcia właściwego manewru w sytuacji niebezpiecznej [15, 18].

Przyjęte czasy do obliczeń długości drogi zatrzymania w dalszej części artykułu to czasy reakcji oszacowane na podstawie symulacyjnych testów laboratoryjnych. Większość takich testów polega na pomiarze czasu reakcji kierowcy na prosty sygnał, (np. pomiar czasu od pojawienia się czerwonego światła do chwili naciśnięcia na pedał hamulca), testy te zatem nie odzwierciedlają rzeczywistych warunków, w jakich znajduje się kierowca w ruchu drogowym. Zmierzone w ten sposób czasy reakcji są znacznie krótsze, dlatego nie powinny być uznawane jako w pełni wiarygodne. Ustalenie dokładnej wartości czasu reakcji nie jest możliwe ze względu na niepowtarzalność sytuacji i niepowtarzalność stanu kierowcy.

Bardzo istotny na czas reakcji kierowcy jest również wpływ alkoholu, narkotyków oraz leków psychotropowych.

3. Czynniki psychofizyczne wynikające ze specyfiki militarnej

W rozdziale nr 2 przedstawiono czynniki wpływające na czas reakcji kierowcy, a zwłaszcza na czas postrzegania. Czynniki te, co zostało podkreślone, posiadają wpływ o różnorodnym nasileniu, wynikającym z indywidualnych cech organizmu i doświadczenia kierowcy. Wpływ poszczególnych czynników jest na ogół ograniczany poprzez unormowania w zakresie: czasu pracy, ekspozycji na obciążenia dynamiczne, hałasu, widoczności z pojazdu, sił na elementy sterowania itd. Skutecznym ograniczeniem jest homologacja poszczególnych układów i systemów pojazdu, wpływa ona na ujednoczenie konstrukcji kluczowych zespołów.

W przypadku uwzględnienia specyfiki militarnej wpływ czynników psychofizycznych może zostać nasilony. Realizacja zadań o charakterze logistycznym i bojowym wymusza zastosowanie pojazdów specjalnych lub przeznaczonych do celów specjalnych. Ich konstrukcja wynika ze specyfiki wykonywanych prac lub zadań militarnych. Uzasadnionym jest fakt braku obowiązku homologacji układów i systemów w pojazdach militarnych, gdyż ich budowa wynika ściśle z realizowanej funkcji. W ten sposób budowane są pojazdy o dość zróżnicowanej konstrukcji. Można zauważyć, że ten odmienny układ konstrukcyjny może powodować: ograniczoną ilość miejsca, zaciemnienie przedziału kierowania, duże siły na elementach sterowania, znaczną ilość elementów sterowania i wskaźników pracy, ograniczoną widoczność (wpływ urządzeń optycznych), zwiększony poziom hałasu, podwyższoną lub zbyt niską temperaturę wnętrza, wibracje elementów.

Oprócz budowy pojazdów militarnych, nasilenie wpływu czynników psychofizycznych może być powodowane poprzez charakter wykonywanych zadań. W tabeli nr 3 zestawiono generowane wzmocnienie wybranych czynników w zależności od wykonywanych zadań.

Tabela 3. Czynniki psychofizyczne wywołane skutkiem realizowanych zadań militarnych

Rodzaj zadania	Czynniki psychofizyczne	Uwagi
Obserwacja	Zmęczenie wzroku i ośrodkowego nerwowego, podwyższona lub obniżona temperatura, wysoka wilgotność	Temperatura wnętrza w zakresie 0°–55°C. Wilgotność powyżej 90%.
Patrolowanie	Hałas, oddziaływania dynamiczne, zmęczenie ogólne, promieniowanie elektromagnetyczne.	Hałas powyżej 90 dBA. Oddziaływania dynamiczne w zakresie uciążliwości.
Marsz	Hałas, oddziaływania dynamiczne, zmęczenie ogólne.	Hałas powyżej 90 dBA. Oddziaływania dynamiczne w zakresie uciążliwości.
Dynamiczna jazda terenowa	Hałas, obciążenia dynamiczne, podwyższona temperatura.	Hałas powyżej 90 dBA. Oddziaływania dynamiczne w zakresie utraty zdrowia. Temperatura powyżej 40°C.
Misja bojowa	Hałas, obciążenia dynamiczne, podwyższona temperatura, niekorzystny skład powietrza we wnętrzu, podwyższone ciśnienie powietrza, promieniowanie elektromagnetyczne, ekstremalny stres.	Hałas powyżej 100 dBA. Oddziaływania dynamiczne w zakresie utraty zdrowia. Temperatura powyżej 40°C. Gazy prochowe i zwiększone stężenie CO ₂ we wnętrzu przedziału kierowania.

4. Badania długości drogi zatrzymania od momentu reakcji kierowcy

W celu zobrazowania wpływu czynników psychofizycznych podjęto badania o charakterze analitycznym. Celem przeprowadzonego badania było wyznaczenie i analiza długości drogi hamowania od momentu reakcji kierowcy do chwili zatrzymania pojazdu w zależności od czasów reakcji kierowcy, zwłoki działania hamulców, czasu narastania opóźnienia hamowania oraz opóźnienia hamowania podawanych przez literaturę [4, 5, 13, 15, 18, 19], przy czym zmiennymi parametrami były:

- czas postrzegania kierowcy (t_{r1}),
- prędkość poruszania się pojazdu w momencie podejmowania decyzji o hamowaniu (v_0),
- przyczepność nawierzchni (μ).

Do wykonania obliczeń długości drogi zatrzymania pojazdu wykorzystano zależność, gdzie sumaryczny czas reakcji kierowcy i samochodu t_R ($t_R = t_r + t_0$) rozdzielono na czas postrzegania kierowcy t_{r1} , czas reakcji psychicznej kierowcy t_{r2} , czas przeniesienia nogi z pedału przyspieszenia na pedał hamulca t_{r3} oraz czas zwłoki zadziałania hamulca t_0 . Tak przekształcona zależność przybiera następującą postać:

$$S_z = v_0(t_0 + t_{r1} + t_{r2} + t_{r3} + \frac{t_n}{2}) + \frac{v_0^2}{2a_h}$$

gdzie: S_z – długość drogi zatrzymania, t_{r1} – czas postrzegania, t_{r2} – czas zasadniczej reakcji psychicznej, t_{r3} – czas przeniesienia stopy, t_n – czas narastania opóźnienia hamowania, t_0 – czas zwłoki zadziałania hamulca, v_0 – prędkość początkowa, a_h – opóźnienie hamowania.

Droga zatrzymania S_z to suma drogi reakcji S_R i drogi hamowania S_H . Droga reakcji S_R – droga pojazdu przebyta od chwili zauważenia zagrożenia do momentu uruchomienia hamulców; droga hamowania S_H – droga pojazdu przebyta od chwili uruchomienia hamulców do czasu zatrzymania pojazdu.

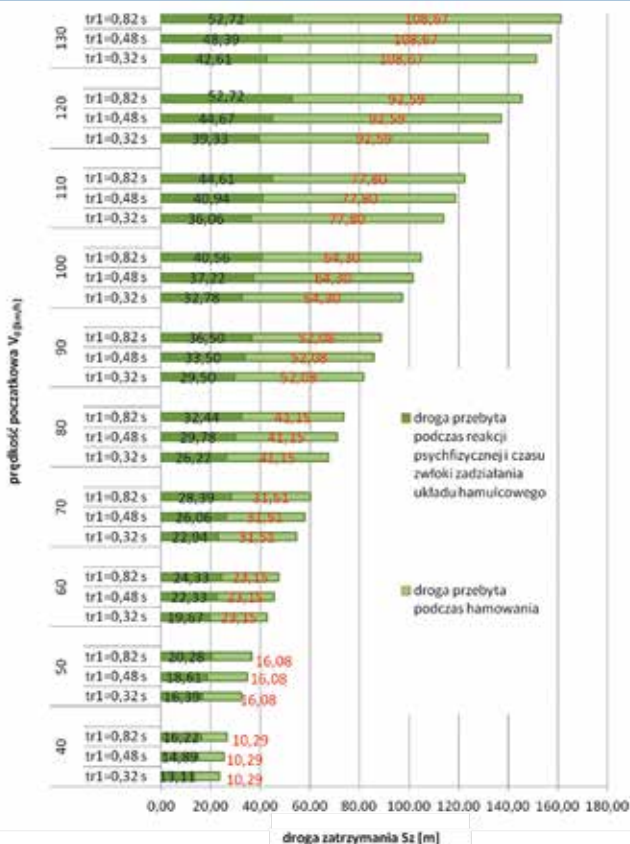
Badano długość drogi zatrzymania dla wybranych prędkości jazdy z przedziału od 50 do 130 km/h co 10 km/h. Na potrzeby analizy przyjęto czas postrzegania w zakresie 0,32– 0,82 s z krokiem 0,05 s. Do wykonania obliczeń przyjęto średnie wartości pozostałych czasów (tab. 4). Należy przy tym podkreślić, że w przypadku pneumatycznych układów hamulcowych czas zwłoki zadziałania układu wynosi ok. 0,6 s i jest dłuższy niemal dwukrotnie od czasu zwłoki układu hydraulicznego. Do obliczeń przyjęto wartość $t_0 = 0,05$ s. Badania wykonano dla nawierzchni asfaltowej suchej (przyjęto $\mu = 0,6$, $a_h = 6$ m/s²). Zawarto również porównanie długości drogi zatrzymania pojazdu dla różnych rodzajów nawierzchni przy średnich statystycznych czasach reakcji kierowcy i układu hamulcowego dla różnych prędkości jazdy.

Tabela 4. Przyjęte wartości czasów

	t_{r1}	t_{r2}	t_{r3}	t_0	t_n
	czas postrzegania	czas zasadniczej reakcji psychicznej	czas przeniesienia stopy	czas zwłoki zadziałania hamulca	czas narastania opóźnienia hamowania
	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
dolna granica	0,32	-	-	-	-
górną granicą	0,82	-	-	-	-
wartość średnia	0,42	0,45	0,19	0,045	0,17

5. Wyniki obliczeń i dyskusja

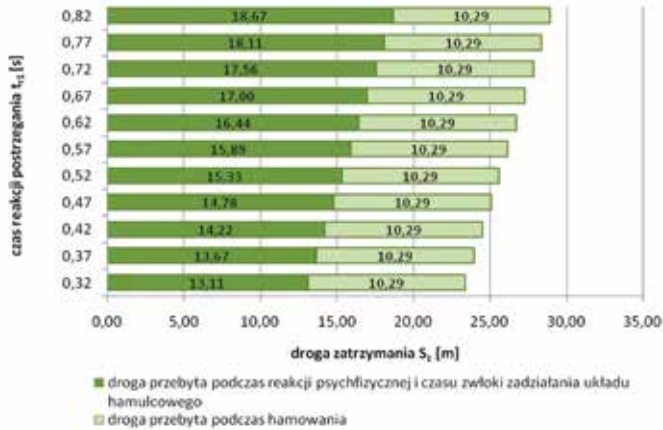
Wyniki obliczeń wpływu parametru reakcji postrzegania kierowcy t_{r1} na długość drogi zatrzymania pojazdu, w zależności od prędkości poruszania się pojazdu v_0 w momencie spostrzeżenia przeszkody, przy opóźnienia hamowania $a_h = 6$ m/s², zostały zilustrowane na rysunku nr 2.



Rys. 2. Zmiana długości drogi zatrzymania w zależności od prędkości v_0 i zmiany czasu postrzegania (dla $t_{r1} = 0,32$ s, $t_{r1} = 0,48$ s i $t_{r1} = 0,82$ s), $a_h = 6$ m/s² [9]

Przedstawiono długość drogi zatrzymania pojazdu S_z dla różnych prędkości v_0 i dla 3 różnych czasów postrzegania: statystycznie możliwie najkrótszego (0,32 s), średniego (0,48 s) oraz najdłuższego poddanego analizie (0,82 s). W przypadku wzrostu prędkości v_0 i czasu t_{r1} wydłuża się droga zatrzymania pojazdu – zarówno droga przejechana w czasie reakcji psychofizycznej kierowcy i zwłoki działania układu hamulcowego, jak i w czasie właściwego hamowania. Obliczenia drogi hamowania S_H dla prędkości 100 km/h potwierdzają dane literaturowe – długość drogi S_H dla samochodu ciężarowego z pneumatycznym układem hamowania i hamulcami bębnowymi – ok. 65 m.

Rysunek 3 przedstawia wpływ zmiany czasu postrzegania (od 0,32 s do 0,82 s, skok co 0,05 s) na długość drogi zatrzymania przy stałej prędkości pojazdu (w przykładzie $v_0 = 40$ km/h).

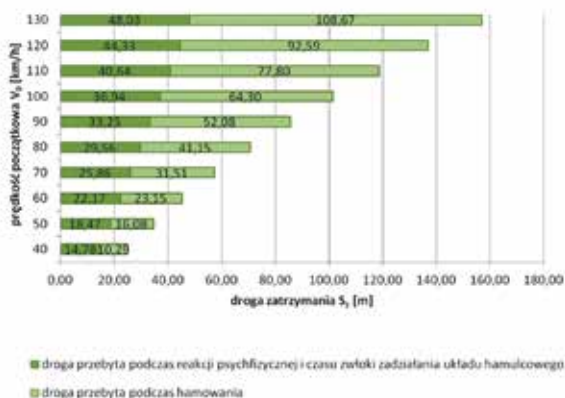


Rys. 3. Zależność długości drogi zatrzymania od zmiany czasu postrzeżenia kierowcy przy stałej prędkości $v_0 = 40$ km/h i opóźnieniu hamowania $a_h = 6$ m/s² [9]

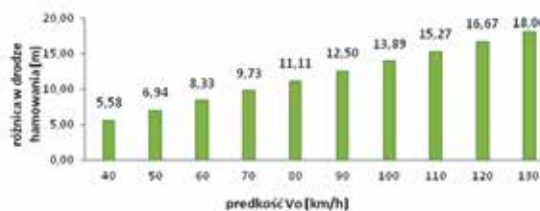
Daje się zauważyć, że długość drogi zatrzymania pojazdu przy stałym opóźnieniu dla stałej prędkości wydłuża się wraz ze wzrostem czasu reakcji kierowcy, natomiast długość drogi rzeczywistego działania hamulców do momentu zatrzymania pojazdu jest stała (tutaj dla prędkości $v_0 = 40$ km/h i $a_h = 6$ m/s² wynosi ona $S_H = 10,29$ m). Warto zwrócić uwagę na znaczny wpływ wzrostu czasu reakcji psychofizycznej na wzrost długości drogi zatrzymania, przy czym droga przebyta w czasie właściwego działania hamulców pozostaje taka sama bez względu na zmianę t_r . Znaczny wpływ czasu reakcji kierowcy na długość drogi zatrzymania potwierdzają badania [4, 5, 12], z których wynika, że długość drogi zatrzymania jest najbardziej wrażliwa na zmianę czasu reakcji.

Przy prędkości 40 km/h wzrost czasu postrzeżenia o 0,5 s powoduje wzrost długości drogi zatrzymania o 5,58 m, co stanowi 30% drogi przebytej w czasie reakcji (S_R). Przy prędkości 60 km/h droga ta wydłuża się o 8,33 m, przy 100 km/h o 13,89 m – czyli także o 30% (rys. 4 i 5). Przy każdej analizowanej prędkości różnica przebytej drogi zatrzymania z czasem $t_{rl} = 0,82$ s i z czasem $t_{rl} = 0,32$ s, zarówno w czasie maksymalnego jak i minimalnego czasu reakcji kierowcy, rośnie wraz ze wzrostem prędkości. Jednak, procentowo, te przyrosty drogi przebytej w trakcie czasu reakcji (S_R) pozostają na stałym poziomie ok. 30% (przy średniej wartości czasu postrzeżenia $t_{rl} = 0,48$ s i przy stałym opóźnieniu hamowania $a_h = 6$ m/s²). Można zatem wnioskować, że każda różnica w czasie reakcji kierowcy będzie powodowała wzrost długości drogi S_R przebytej w czasie reakcji o określony procent bez względu na prędkość początkową.

Rysunek 4 pokazuje zależność długości drogi zatrzymania pojazdu S_z od prędkości początkowej v_0 przy stałym średnim czasie reakcji postrzegania kierowcy ($t_{r1} = 0,48$ s) i stałym opóźnieniu $a_h = 6$ m/s². Przy wzroście prędkości początkowej v_0 , mimo stałego czasu reakcji kierowcy i stałej wartości opóźnienia hamowania, wydłuża się droga zatrzymania pojazdu (rośnie zarówno długość drogi przejechanej w czasie reakcji psychofizycznej, jak i drogi właściwego hamowania). Jednak sama różnica, o jaką wzrasta długość drogi przejechanej w czasie reakcji kierowcy i układu S_R wraz ze wzrostem prędkości, wzrasta o stałą wartość – w tym przypadku jest to 3,69 m.

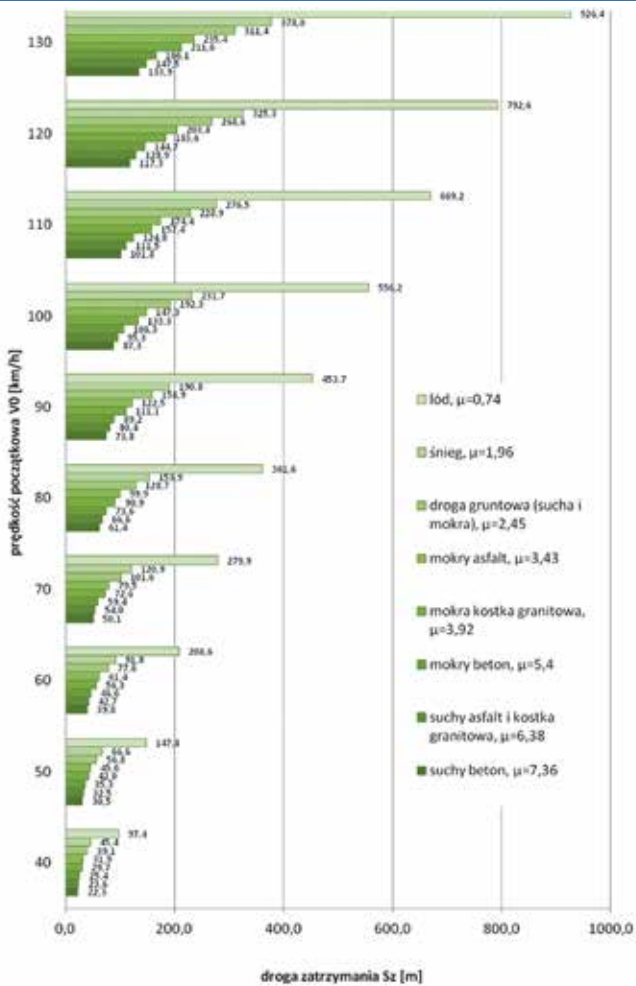


Rys. 4. Zależność długości drogi zatrzymania od prędkości początkowej przy stałym średnim czasie postrzegania kierowcy i stałym opóźnieniu [9]



Rys. 5. Różnica [m] w długości przebytej drogi zatrzymania między czasem reakcji $t_{r1} = 0,82$ s i $t_{r1} = 0,32$ s [9]

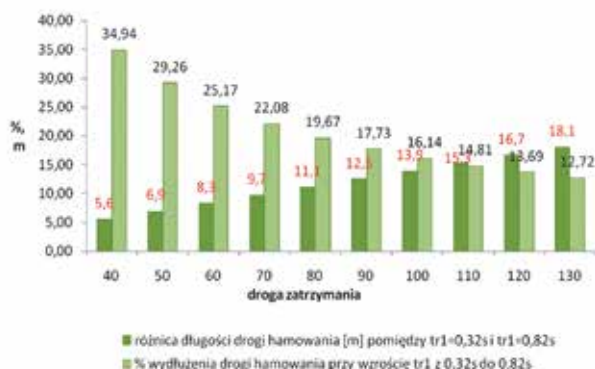
Na rysunku 6 przedstawiono zależność drogi zatrzymania od prędkości początkowej v_0 i opóźnienia hamowania (różne rodzaje nawierzchni).



Rys. 6. Droga zatrzymania pojazdu w zależności od prędkości początkowej v_0 i opóźnienia hamowania a_h ($t_r, t_n, t_o = \text{const.}$ (wartości średnie)) [9]

Niekorzystne warunki na drodze wraz ze spadkiem przyczepności i wzrostem prędkości prowadzą do znacznego wydłużenia całkowitej drogi hamowania S_z . Różnica w długości drogi hamowania S_z na drodze oblodzonej (97,4 m) przy 40 km/h jest dłuższa o 73 m niż na suchej drodze asfaltowej (23,6 m). W przypadku $v_0 = 130$ km/h (oblodzona jezdnia – $S_z = 926,4$ m, suchy asfalt – 147,5 m), różnica ta wynosi 778,9 m. Ponadto należy zaznaczyć, że wartość współczynnika przyczepności zależy od prędkości samochodu.

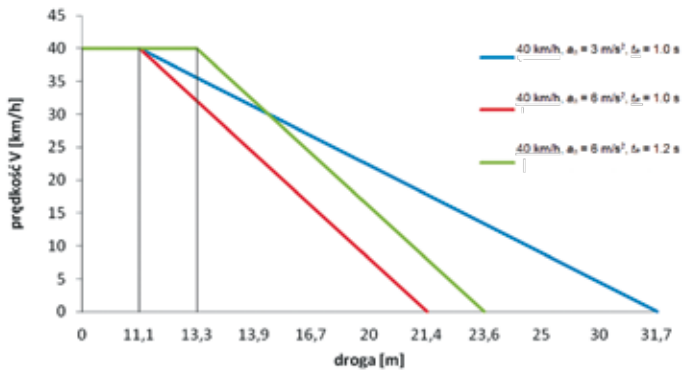
Rysunek 7 jest ilustracją procentowego wydłużenia drogi zatrzymania w wyniku wzrostu długości czasu postrzegania z 0,32 s do 0,82 s.



Rys. 7. Wydłużenie drogi zatrzymania wraz ze wzrostem czasu postrzegania $t_{r1} = 0,32$ s do $t_{r1} = 0,82$ s (w procentach i metrach, $a_h = 6$ m/s²) [9]

W przypadku wydłużenia czasu postrzegania z 0,32 s do 0,82 s, długość drogi zatrzymania przy prędkości 40 km/h wzrasta o 5,6 m, co stanowi blisko 35% całkowitej drogi hamowania ($S_{z,0,32s} = 13,84$ m i $S_{z,0,82s} = 19,4$ m). Przy prędkości 130 km/h droga zatrzymania wydłuża się o 18 m ($S_{z,0,32s} = 120$ m i $S_{z,0,82s} = 138,3$ m), co stanowi prawie 13% długości całej drogi hamowania. Wraz ze wzrostem prędkości procentowe wydłużenie drogi zatrzymania w wyniku wzrostu czasu postrzegania spada, co przedstawia rysunek 7, jednak całościowo droga zatrzymania rośnie wraz ze wzrostem prędkości proporcjonalnie do kwadratu prędkości początkowej.

Rysunek 8 ilustruje długość drogi zatrzymania dla wybranej prędkości (tu 40 km/h) w zależności od czasu reakcji i opóźnienia hamowania (całkowity czas reakcji kierowcy i układu $t_R = 1,0$ s i $t_R = 1,2$ s, czas opóźnienia hamowania $a_h = 3$ m/s² i $a_h = 6$ m/s²). Drogę zatrzymania przedstawia na wykresie punkt przecięcia krzywej prędkości pojazdu z osią odciętych. Widać tu wyraźnie, że przy tej samej prędkości i przy wzroście czasu reakcji o 0,2 s, droga przejechana, zanim układ hamulcowy zacznie działać, wydłuży się o 2,2 m – jest to wartość o jaką wzrosła całkowita droga hamowania S_z . Z kolei sama zmiana nawierzchni i współczynnika przyczepności nie wpływa na wydłużenie drogi przejechanej w czasie reakcji kierowcy i układu hamulcowego. Zmienia się długość drogi właściwego hamowania S_{Hr} , która w tym przypadku wydłuża się o 10,3 m przy tym samym czasie $t_r = 1,0$ s.



Rys. 8. Długość drogi zatrzymania dla prędkości 40 km/h w zależności od czasu reakcji i opóźnienia hamowania [9]

Wyniki obliczeń pokazują jak duży wpływ na całkowitą długość drogi zatrzymania pojazdu w trakcie hamowania awaryjnego ma zmiana długości czasu reakcji kierowcy (jakiegokolwiek jego składowej), zmiana prędkości początkowej hamowania czy też zmiana podłoża. Obliczenia przedstawiają sytuację wyidealizowaną (niemal nigdy hamowanie nie ma przebiegu wyłącznie prostoliniowego) i biorą wartości uśrednione czasów reakcji kierowcy jak i układu hamulcowego. Należy pamiętać o istotnym wpływie na te parametry: stanu psychofizycznego kierowcy, rodzaju i stanu układu hamulcowego oraz pojazdu, a także warunków otoczenia. Statystyczny średni czas reakcji w pełni wypoczętego i zdrowego kierowcy jest ponad 2 razy dłuższy od reakcji układu hamulcowego. Alkohol i środki odurzające, zmęczenie, niedospanie, zdenerwowanie, długotrwały hałas, rozmowa przez telefon, wiek – wpływają znacznie na wydłużenie czasu poszczególnych składowych czasu reakcji kierowcy, a przez to na wydłużenie drogi zatrzymania. W przypadku kumulowania się niekorzystnych zmian wartości zmiennych, mających wpływ na długość drogi zatrzymania, można się spodziewać, że ulegnie ona znacznemu wydłużeniu.

6. Podsumowanie

Analizując długość drogi zatrzymania się pojazdu od momentu pierwszej reakcji kierowcy, można stwierdzić, że na proces hamowania istotny wpływ mają parametry zależne od kierowcy, rodzaj i stan techniczny pojazdu oraz rodzaj i stan nawierzchni, po której porusza się pojazd, a także prędkość.

Prędkość pojazdu v_0 ma zasadniczy wpływ na wydłużenie drogi zatrzymania. Przy zbliżonych osiągniętych wartościach opóźnienia wraz ze wzrostem prędkości jazdy wzrasta droga zatrzymania. Przy tej samej prędkości zmiana nawierzchni i współczynnika przyczepności nie wpływa na wydłużenie drogi przejechanej w czasie reakcji kierowcy i układu hamulcowego – zmienia się tylko długość drogi hamowania właściwego S_H . Rodzaj układu

hamulcowego ma wpływ na drogę hamowania (czas zwłoki zadziałania pneumatycznego układu hamulcowego wynosi ok. 0,6 s i jest dłuższy niemal dwukrotnie od czasu zwłoki układu hydraulicznego, co wydłuża drogę zatrzymania pojazdów z pneumatycznym układem hamulcowym w stosunku do pojazdów z układem hydraulicznym, a jeszcze bardziej w stosunku do EBS). O ile przy założeniu sprawności układu hamulcowego czas zwłoki zadziałania układu hamulcowego i czas narastania opóźnienia mieszczą się w określonych granicach, to czas reakcji psychofizycznej kierowcy jest trudny do przewidzenia.

W przypadku kierowania pojazdami militarnymi czynniki psychofizyczne i czas reakcji kierowcy silnie wpływają na długość drogi zatrzymania. Ich wpływ rażąco wzrasta z uwagi na większy zakres czynników wpływających na stan psychofizyczny kierowcy oraz ich wyższą wartość. Mając to na uwadze, niezwykle ważne dla bezpieczeństwa załóg staje się eliminowanie wpływu czynników psychofizycznych poprzez specjalistyczne szkolenie. Priorytetowym powinno być rozpoznanie wpływu poszczególnych czynników na czas reakcji kierowców w sytuacji zagrożenia bojowego na drodze badań eksperymentalnych.

Literatura

- [1] Afanasjew, L. L.; Djakow, A. B.; Ilarionow, W. A.: *Czynne bezpieczeństwo samochodu*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1986.
- [2] Arczyński, S.: *Mechanika ruchu samochodu*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [3] Biedrzycki, L.; Opasewicz, W.: *Powietrzne układy hamulcowe. Budowa i diagnostyka*. Warszawa 2003.
- [4] Czech, P.; Łazarz, B.; Madej, H.: *Wpływ ciśnienia w ogumieniu i obciążenia pojazdu na opóźnienie i drogę hamowania samochodu osobowego bez ABS*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Transport, No. 1834 (69/2010), ss. 21–28.
- [5] Grzelec, R.; Lozia, Z.: *Wpływ usytuowania ładunku w samochodzie ciężarowym na skuteczność działania hamulców w ruchu prostoliniowym*. Zeszyty Instytutu Pojazdów, 1(40)2001, ss. 6–19.
- [6] Guzek, M.; Jurecki, R.; Karendal, M.; Lozia, Z.; Zdanowicz, P.: *Badania reakcji pieszego wychodzącego z prawej strony, realizowane na symulatorze jazdy samochodem*. Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 6/2010.
- [7] Guzek, M.; Lozia, Z.; Jurecki, R.; Stańczyk, T.; Pieniążek, W.: *Research studies on drivers' reactions in pre-accident situations*. Test track and driving simulator environment, Logistyka, 4/2010.
- [8] Jurecki, R.; Stańczyk, T.: *Metody badań a czas reakcji kierowców*. Eksploatacja i Niezawodność, 3/2011.
- [9] Karwowska, E.: *Analiza układów hamulcowych samochodów ciężarowych. Obliczenia parametrów hamowania prostoliniowego*. Suwałki 2012 (materiały niepublikowane).
- [10] Lozia, Z.; Woliński, P.: *Relacje wartości długości drogi hamowania i drogi zatrzymania dla różnych warunków ruchu samochodu*. Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 6/2010.
- [11] Łomako, D. M.; Stańczyk, T. L.; Grzyb, J.: *Pneumatyczne układy hamulcowe w pojazdach samochodowych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2002.
- [12] Miatluk, M.; Kamiński, Z.; Czaban, J.: *A method of selection of braking forces distribution in one unit vehicle*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 4/2004, ss. 13–20.
- [13] Prochowski, L.: *Pojazdy samochodowe. Mechanika ruchu*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [14] Reimpell, J.; Betzler, J.: *Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [15] Reński, A.: *Bezpieczeństwo czynne samochodu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
- [16] Studziński, K.: *Samochód – teoria, konstrukcja i obliczanie*. WKiŁ, Warszawa, 1980.

- [17] Waluś, K. J.: *Wyznaczanie parametrów ruchu samochodu osobowego podczas hamowania z wykorzystaniem czujników przyspieszeń*. *Eksploatacja i Niezawodność*, 2/2004, ss. 69–73.
- [18] Wicher, J.: *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- [19] Wrzesiński, T.: *Hamowanie pojazdów samochodowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.