



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 132

Jan Kempa

CHARAKTERYSTYKI RUCHU SWOBODNEGO NA KRZYWOLINIOWYCH ODCINKACH DRÓG W PLANIE

BYDGOSZCZ – 2008

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński

REDAKTOR DZIAŁOWY
prof. dr hab. inż. Jan Klugiewicz

OPINIODAWCY
prof. dr hab. inż. Ryszard Krystek
prof. dr hab. inż. Czesław Lewinowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2008

ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.utp.edu.pl/~wyd>

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 10,8. Ark. druk. 10,0.
Oddano do druku i druk ukończono w czerwcu 2008 r.
Zakład Poligraficzny Kubik & Krause S.J.
85-184 Bydgoszcz, ul. Cmentarna 84, tel. 3484-334

1. SYNTEZA WYNIKÓW DOTYCHCZASOWYCH PRAC DOTYCZĄCYCH OMAWIANEGO ZAGADNIENIA

Niniejszy rozdział zawiera syntetyczny przegląd, dostępnych autorowi, krajowych i zagranicznych prac badawczych oraz publikacji dotyczących warunków ruchu na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie dwupasowych dróg dwukierunkowych. Prace te dotyczyły zagadnień związanych z:

- zasadami projektowania krzywoliniowych odcinków dróg w planie,
- wpływem czynników drogowych na prędkość,
- trajektorią pojazdu,
- wygodą ruchu.

1.1. Zasady projektowania krzywoliniowych odcinków dróg w planie

Projektowanie krzywoliniowych odcinków dróg w planie umownie można podzielić na dwa etapy. Pierwszy polega na wyborze rodzaju odcinka krzywoliniowego, a więc ustalenia czy to ma być: łuk kołowy, łuk kołowy z krzywymi przejściowymi, ogólna krzywa przejściowa, itd. Drugi związany jest z doбором cech elementów tego odcinka drogi. Na każdym z tych etapów decyzja o wyborze danego rozwiązania projektowego powinna zawsze wynikać z analiz bezpieczeństwa i wygody ruchu, a dużą rolę odgrywają również warunki terenowe oraz względy estetyki trasy drogowej.

Zasady projektowania łuków w planie na przestrzeni wielu lat ulegały zmianom, co wiązało się ze wzrostem prędkości pojazdów. Przed pojawieniem się rowerów i samochodów prędkości rzadko przekraczały kilkanaście kilometrów na godzinę. Szerokość drogi i długość pojazdu były bardziej ważne niż prędkość uzależniona od krzywizny drogi. Wystarczało wówczas projektowanie promieni łuków kołowych o wartości ok. 30-35 m, aby bez problemu, nawet wóz frachtowy o długości 15 m pokonał taki odcinek drogi. Dopiero w 1908 roku na I Kongresie Drogowym (Permanent International Association of Road Congress – PIARC) zalecono stosowanie minimalnego promienia łuku kołowego o wartości 50 m oraz krzywych przejściowych w celu: „...redukowania nagłej zmiany linii prostej w krzywą” [19]. Krzywą przejściową jednak po raz pierwszy, ze względu na dynamikę ruchu, zastosowano dopiero w 1926 roku na torze wyścigowym General Motors Proving Ground w USA, a na drodze publicznej w 1929 roku na amerykańskiej autostradzie Mount Vernon Memorial. Wcześniej nie stosowano krzywej przejściowej w celu łagodnej i stopniowej zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie, ale przede wszystkim po to, aby można było wykonać rampę drogową i poszerzenie jezdni na łuku w planie.

Do 1930 roku projektowanie dróg oparte było prawie wyłącznie na ekonomicznych i konstrukcyjnych rozważaniach dotyczących: przepustowości, zużycia i spękania nawierzchni, odwodnienia oraz kształtowania geometrii łuków w planie drogi, ale tylko o wąskich jezdniach. Jedne z pierwszych, niepublikowanych wytycznych projektowania dróg powstały w 1927 roku podczas prac projektowych autostrady łączącej Monachium – Lipsk – Berlin [81]. Zalecano wtedy stosowanie prostych o możliwie jak największych długościach, a promienie łuków w planie o wartościach większych: od 1000 m w terenie płaskim, 500 m w falistym i 300 m w górskim. Pierwsze opublikowane wytyczne pojawiły się w Austrii w 1935 roku, w Niemczech w 1937 roku, a w USA

w 1940 roku. Podane w nich wartości cech geometrycznych dróg wyznaczone były już z warunku dynamiki oraz kinematyki ruchu i dotyczyły: promienia łuku kołowego, krzywej przejściowej, pochylenia poprzecznego jezdni na łuku, łuków pionowych oraz odległości na zatrzymanie i wyprzedzanie.

Aktualnie, we wszystkich znanych autorowi zagranicznych i krajowych przepisach projektowania dróg, wartość podstawowej cechy łuku w planie jakim jest minimalny promień łuku kołowego (R_{\min}) wyznacza się ze wzoru¹:

$$R_{\min} = \frac{VP^2}{127 \cdot (f_{RD} \pm q_{\max})} \text{ [m]} \quad (1.1)$$

gdzie:

- VP – prędkość projektowa [km/h],
- f_{RD} – dopuszczalny współczynnik przyczepności poprzecznej [–],
- q_{\max} – maksymalne pochylenie poprzeczne jezdni na łuku [–].

Wzór ten wynika z warunku stateczności samochodu na łuku kołowym, wyprowadzonym jednak przy wielu upraszczających założeniach opisanych we wprowadzeniu oraz w rozdziale 7.

Zakres prędkości projektowych, stosowanych w przepisach projektowania dróg wielu krajów jest praktycznie taki sam i wynosi od 30 km/h do 100 km/h, w zależności od klasy technicznej drogi. Pomimo przyjmowania we wzorze (1.1) tych samych wartości prędkości projektowych, wyznaczone z niego wartości R_{\min} są różne – w zależności od kraju. Powodem jest przyjmowanie odmiennych wartości maksymalnego pochylenia poprzecznego jezdni i dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej. Stosowanie pochylenia poprzecznego jezdni na łuku ma na celu zmniejszenie skutków działania siły odśrodkowej na kierowcę, pasażerów i pojazd. Pochylenie to przeciwdziała również bocznemu przesunięciu pojazdu oraz umożliwia korzystniejszy rozkład masy pojazdu na poszczególne koła. Przy wyznaczaniu minimalnych wartości promieni łuków kołowych przyjmuje się maksymalną wartość pochylenia poprzecznego jezdni na łuku, która w większości europejskich przepisów projektowania dróg wynosi 7% (np. w Polsce, Szwajcarii i Portugalii) lub 6% (np. w Szwecji, Finlandii) [105, 106]. Wartości te wynikają z przyjęcia, w analizach stateczności pojazdu na łuku kołowym, oblodzonego stanu jezdni. Stąd tylko w krajach, w których ze względów klimatycznych oblodzenie nawierzchni nie występuje (np. w południowych stanach USA czy Australii) można stosować q_{\max} o wartościach dochodzących nawet do 12%. Jednak powodem największych rozbieżności pomiędzy R_{\min} , zawartymi w przepisach projektowania dróg poszczególnych krajów, jest przyjmowanie odmiennych wartości dopuszczalnych współczynników przyczepności poprzecznej przy danej prędkości projektowej (rozd. 7).

Praktyką niektórych krajów jest podawanie w przepisach projektowania dróg, tzw. absolutnie minimalnego promienia łuku kołowego ($R_{\text{absolutny}} < R_{\min}$). Można go stosować w przypadku wystąpienia bardzo trudnych warunków terenowych lub innych obiektywnych ograniczeń [81]. Przykładem może być Szwecja, Grecja, czy Portugalia. Z kolei w Finlandii wartość R_{\min} może zostać zmniejszona nawet o około 30%, jeśli łuk w planie położony jest blisko skrzyżowania. W Grecji wartości minimalnych promieni

¹ Wzór ten w raporcie SAFESTAR [106] jest zalecany do wyznaczania minimalnego promienia łuku kołowego spełniającego kryteria bezpieczeństwa i wygody ruchu.

łuków kołowych uzależnione dodatkowo są od rodzaju terenu, po którym przebiega droga. Na terenach falistych oraz górskich należy stosować R_{\min} większe o ok. 10% niż na terenach płaskich. W Australii natomiast na terenach górskich R_{\min} mogą być mniejsze od 15% do 20% niż na terenach płaskich.

W niektórych krajach R_{\min} musi spełniać dalsze, dodatkowe kryteria² [106]:

a) prowadzenia optycznego (Finlandia):

$$R_{\min} < S/(b - 1,5) \text{ [m]} \quad (1.2)$$

gdzie:

- S – promień łuku pionowego [m],
b – szerokość jezdni [m].

b) zapewnienia pożądanej odległości widoczności (Finlandia):

$$R_{\min} = B^2/8d \text{ [m]} \quad (1.3)$$

gdzie:

- B – pożądana odległość widoczności [m],
d – odległość przeszkody bocznej od krawędzi drogi [m].

c) jednorodności geometrycznej drogi (Niemcy, Portugalia):

$$R_{\min} > 500 \text{ m}, \quad \text{jeśli } L > 500 \text{ m [m]} \quad (1.4)$$

$$R_{\min} \geq L, \quad \text{jeśli } L \leq 500 \text{ m [m]} \quad (1.5)$$

(Włochy)

$$R_{\min} > 600 \text{ m}, \quad \text{jeśli } L > 500 \text{ m [m]} \quad (1.6)$$

$$R_{\min} \geq L, \quad \text{jeśli } L \leq 500 \text{ m [m]} \quad (1.7)$$

gdzie:

- L – długość prostej poprzedzającej łuk [m].

d) estetyki trasy drogowej przy małych wartościach kąta zwrotu (γ) łuku w planie (Włochy):

$$R_{\min} = 12/\gamma^2, \quad \text{jeśli } \gamma < 0,125 \text{ rd [m]} \quad (1.8)$$

(Polska)

$$R_{\min} > LK_{\min}/\gamma, \quad \text{jeśli } \gamma < 0,157 \text{ rd [m]} \quad (1.9)$$

gdzie:

- γ – kąt zwrotu [rd],
 LK_{\min} – minimalna długość łuku kołowego zależna od prędkości projektowej [m].

Z przeglądu przepisów projektowania dróg obowiązujących w różnych krajach wynika, że aktualnie najczęściej wartości minimalnych promieni łuków kołowych są następujące: od $R_{\min} = 85 \text{ m}$ przy $V = 50 \text{ km/h}$ do $R_{\min} = 450 \text{ m}$ przy $V = 100 \text{ km/h}$.

Z analizy wzoru (1.1) wynika, że bardzo ważnym zagadnieniem, uwzględniając bezpieczeństwo ruchu, jest przyjęcie wartości prędkości projektowej, bowiem od niej

² Symbolika zastosowana we wzorach w niniejszym rozdziale jest zgodna z oznaczeniami przyjętymi w opracowaniach źródłowych.

zależec będzie minimalna wartość promienia i dopuszczalna wartość współczynnika przyczepności poprzecznej. Historia sposobów powiązania cech geometrycznych dróg z prędkościami samochodów sięga początku lat dwudziestych ubiegłego stulecia. W połowie lat 30. XX wieku w Stanach Zjednoczonych wprowadzono pojęcie prędkości projektowej, której definicja była następująca: „...maksymalna, w przybliżeniu jednolita prędkość, która prawdopodobnie będzie wybierana przez grupę szybko jadących kierowców, lecz z pominięciem niewielkiego procentowego udziału najszybciej jadących” [113]. Od tego czasu, w przepisach projektowania dróg wielu krajów, prędkość projektowa stała się uogólnionym parametrem projektowania dróg, przechodząc znaczną ewolucję. Aktualnie w wielu krajach prędkość projektową identyfikuje się z parametrem techniczno-ekonomicznym, któremu przyporządkowane są graniczne wartości elementów drogi, proporcje między nimi oraz zakres wyposażenia drogi. Jej konkretna wartość wynika ze znaczenia oraz funkcji danego połączenia w sieci dróg międzynarodowych i krajowych, ogólnych i szczegółowych planów zagospodarowania przestrzennego kraju, przewidywanego lub istniejącego natężenia ruchu i ekonomicznie uzasadnionego stosunku poniesionych kosztów budowy lub przebudowy drogi do znaczenia ruchu na danej drodze i zysku jej użytkowników. Wartość prędkości projektowej jest głównie determinowana względami strategicznymi i ekonomicznymi kraju, a tylko w niewielkim stopniu czynnikami technicznymi. Wynika to również z faktu, że sieć drogowa powinna tworzyć system hierarchicznie połączonych ze sobą układów funkcjonalnych i być dostosowana do potrzeb wynikających z przestrzennego rozkładu ruchu drogowego. Jednak prędkość projektowa już od wielu lat nie stanowi podstawy do oceny rzeczywistych warunków ruchu, a tym samym oceny poziomu brd³, gdyż nie stwierdzono korelacji między nią a rzeczywistymi prędkościami samochodów [21, 35, 54, 81, 121]. Wynika to między innymi z faktu, że prędkość projektowa z reguły narzuca projektantowi minimalne wartości elementów drogi (np. promień łuku kołowego w planie, promień krzywej wypukłej i wklęsłej niwelety jezdni), ale nie wyznacza ograniczeń w stosowaniu elementów o wyższych wartościach od minimalnych. Stąd przy danej jej wartości na wielu elementach dróg kierowcy mają bardzo dużą swobodę wyboru prędkości. Jedynym ograniczeniem są prawnie ustanowione dopuszczalne prędkości, jednak i one niejednokrotnie umożliwiają kierowcom jazdę z prędkościami znacznie większymi od prędkości projektowej (na przykład po drogach o niskich klasach technicznych).

Z powyższych względów prędkość projektowa nie może być narzędziem, za pomocą którego można by osiągnąć lub wymusić płynność ruchu, którą zapewnia droga o jednorodności geometrycznej. Po to, aby osiągnąć zadowalający poziom płynności ruchu mający zasadniczy wpływ na jego bezpieczeństwo, do przepisów projektowania dróg wielu krajów wprowadzono dodatkowy parametr nazywany prędkością miarodajną (np. Niemcy, Polska), prędkością projektowania (np. Austria, Hiszpania, Szwajcaria), lub prędkością operacyjną (np. Portugalia, Holandia). Prędkości te (w literaturze przedmiotu oznaczane są takim samym symbolem $V_{85\%}$) stanowią obecnie podstawę kryteriów bezpieczeństwa ruchu obowiązujących w wielu krajach [33, 68, 106].

Po raz pierwszy prędkość miarodajną zastosowano w niemieckich przepisach projektowania dróg na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Była ona wówczas definiowana jako kwantyl 85% z rozkładu prędkości samochodów osobowych w warunkach ruchu swobodnego na czystej i mokrej nawierzchni [131]. W wielu najnow-

³ W najnowszych polskich przepisach projektowania dróg [105] w definicji prędkości projektowej nie występuje już kryterium bezpieczeństwa ruchu.

szych przepisach projektowania dróg, w tym również i w polskich, nie jest już bezpośrednio definiowana jako wartość kwantyla 85%, ale proponowane modele jej wyznaczenia, co wynika z przeglądu literatury, wykorzystują zależności ustalone przy tej właśnie mierze pozycyjnej rozkładu prędkości. Omawiane prędkości służą przede wszystkim do ustalania granicznych wartości elementów drogi, decydujących o bezpieczeństwie ruchu (a więc również o wartościach promieni łuków kołowych, pochyleniu poprzecznym jezdni na łuku) oraz do oceny jednorodności geometrycznej drogi. Taki rodzaj prędkości może charakteryzować się już zmiennością wzdłuż drogi, lecz tylko w pewnych granicach, ściśle określonych w przepisach projektowania dróg.

W pierwszym okresie rozwoju inżynierii ruchu modele szacowania prędkości dotyczyły pojedynczego elementu drogi. Po pewnym czasie jednak stwierdzono, że często wpływ na warunki ruchu na rozpatrywanym elemencie drogi mają nie tylko cechy tego elementu, ale również mogą mieć cechy elementów go poprzedzających lub po nim następujących. Nieuwzględnienie tego faktu w projektowaniu dróg, w wielu przypadkach, nie zapewniało osiągnięcia tzw. jednorodności geometrycznej drogi [76, 77, 80]. Tę właściwość drogi uzyskuje się poprzez stosowanie takich wartości cech geometrycznych elementów drogi i wzajemnego powiązania tych elementów, aby nie stanowiły zagrożenia dla kierowców nieznających drogi. Stąd droga o geometrycznej jednorodności powinna mieć taki układ przestrzenny, aby wspomniana grupa kierowców nie była zmuszana do wykonywania nagłych, dużych zmian prędkości. Dziś już wiadomo, że droga charakteryzująca się niejednorodnością geometryczną powoduje nadmierny wysiłek psychofizyczny kierowcy oraz przyczynia się do wybierania przez jej użytkowników niepożądanych działań, których efektem może być powstawanie niebezpiecznych sytuacji kończących się nawet zdarzeniem drogowym. Dlatego bardzo dużo uwagi, zwłaszcza w ostatnim okresie, poświęca się zagadnieniom dotyczącym jednorodności geometrycznej drogi, zasadom kształtowania drogi „samowjaśniającej się” i drogi „wybaczącej” błędy kierowców [67, 85, 88, 96, 129, 133].

Stosowane obecnie coraz powszechniej w wielu krajach – nie tylko europejskich – kryteria geometrycznego kształtowania drogi są zgodne ze sformułowanymi przez Lamma zasadami bezpieczeństwa ruchu zamieszczonymi w tablicy 1.1 [81]. Zostały one opracowane na podstawie wyników badań warunków ruchu oraz analiz wypadków na drogach w Niemczech i USA.

Tablica 1.1. Kryteria bezpieczeństwa ruchu w geometrycznym kształtowaniu dróg

Kryterium		Poziom bezpieczeństwa ruchu		
		dobry	dopuszczalny	niedopuszczalny
I	Jednorodności geometrycznej drogi	$ V_m^i - V_m^{i+1} \leq 10$	$10 < V_m^i - V_m^{i+1} \leq 20$	$ V_m^i - V_m^{i+1} > 20$
II	Zgodności ukształtowania drogi z jej funkcją w sieci	$ V_m^i - V_p \leq 10$	$10 < V_m^i - V_p \leq 20$	$ V_m^i - V_p > 20$
III	Stateczności pojazdu na krzywoliniowym odcinku drogi w planie	$f_r \geq 0,02$	$-0,02 \leq f_r < 0,02$	$f_r < -0,02$

Oznaczenia:

V_m^i – prędkość miarodajna w obrębie i-tego elementu drogi [km/h],

V_m^{i+1} – prędkość miarodajna w obrębie i+1 elementu drogi [km/h],

V_p – prędkość projektowa drogi [km/h],

f_r – różnica między dopuszczalną (f_{RD}) i wykorzystywaną wartością współczynnika przyczepności poprzecznej (f_{RW}) na krzywoliniowym odcinku drogi w planie: $f_r = f_{RD} - f_{RW}$

Łuk w planie musi spełniać nie tylko kryteria bezpieczeństwa ruchu pojedynczego elementu drogi, ale również kryteria bezpieczeństwa ruchu wynikające z faktu, że stanowi on integralną część drogi. Z tego względu dużą rolę w projektowaniu geometrycznym odgrywają metody oceny jednorodności dróg. Należy zaznaczyć, że zanim się te metody pojawiły, w przepisach projektowania dróg niektórych krajów zawarte były proste reguły wynikające z praktyki, których celem było osiągnięcie omawianego kryterium projektowania dróg. Wiele z tych reguł przetrwało do dziś i dotyczą one na przykład:

- a) ograniczenia maksymalnej długości prostych,
- b) stosunku długości sąsiednich promieni łuków kołowych,
- c) minimalnej długości prostej pomiędzy następującymi po sobie łukami w planie o tym samym lub przeciwnym zwrocie.

Jedną z najwcześniejszych metod sprawdzania jednorodności dróg była zasada 3 razy 10 mil/h wprowadzona przez Leischa 1976 w roku [82]. Ideę tej metody można znaleźć jeszcze dzisiaj w przepisach projektowania dróg niektórych krajów, gdzie dopuszcza się pewną, maksymalną różnicę pomiędzy prędkością projektową a prędkością miarodajną, projektowania lub operacyjną (np. 20 km/h – w polskich przepisach [105]).

Bardzo prosta metoda sprawdzania jednorodności geometrycznej drogi zawarta jest w szwajcarskich przepisach projektowania dróg, bazująca na następujących założeniach [14]:

- kierowcy dostosowują prędkość na prostej do dopuszczalnej prędkości (lokalne lub administracyjne limity prędkości), a na łukach w planie do jego promienia, ale również przy nieprzekraczaniu prędkości dopuszczalnej,
- prędkość jest stała na całej długości łuku w planie,
- nawet jeśli kierowca widzi następny łuk w planie, to nadal porusza się z prędkością jaką ma na łuku, przez który przejeżdża,
- manewr opóźniania kończy się na początku łuku w planie, a manewr przyspieszania rozpoczyna się na końcu łuku,
- wartość przyspieszania i opóźniania jest stała i wynosi $0,8 \text{ m/s}^2$.

Przy takich założeniach wykreśla się profil prędkości i następnie sprawdza się, czy różnice pomiędzy prędkościami na następujących po sobie łukach lub, gdy łuk poprzeczony jest prostą nie są większe od 10 km/h lub 5 km/h, gdy łuk jest pierwszym w serii.

Na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia Messer [93] wprowadził do oceny jednorodności geometrycznej drogi metodę polegającą na oszacowaniu wysiłku psychofizycznego kierowcy (driver workload⁴). Jej podstawę stanowiły relacje między doświadczalnymi danymi o oczekiwanych przez kierowców cechach drogi a wysiłkiem psychofizycznym. Zastosowany w metodzie model bazował na założeniu, że to droga „dostarcza” kierowcom najwięcej informacji o sposobie prowadzenia pojazdu i narzuca im poziom wysiłku psychofizycznego. Poziom tego wysiłku jest wyższy podczas jazdy po trudnym technicznie odcinku drogi, a wzrasta jeszcze bardziej, jeśli odcinek drogi ma takie cechy, które trudno było kierowcy przewidzieć. Idea tej metody polega na wyznaczeniu wpływu poszczególnych cech drogi (np. łuków w planie, odcinków z mostami, odcinków na których wykonano zmianę przekroju poprzecznego, skrzyżowań, itd.) na wysiłek psychofizyczny kierowcy. Według opinii ekspertów zawarte w omawianej

⁴ Pojęcie ‘workload’ zostało zdefiniowane przez Sendersa jako: „...miara wysiłku wydatkowanego przez człowieka podczas realizacji zadania, niezależnie od sposobu wykonania tego zadania” [30].

metodzie wskaźniki, oparte na subiektywnych doznaniach i ocenach kierowców, są jej słabością [81].

Oryginalną metodę wyznaczania jednorodności geometrycznej drogi zaproponował w 1995 roku Krammes (cyt. za [106]). Metoda ta nazywana metodą vision occlusion (blokady wzroku – tłum. autora) polega na tym, że kierowcy proszeni są o jazdę z zamkniętymi oczami tak długo, aż uznają, że konieczne będzie ich otwarcie. Stosunek czasu, podczas którego kierowcy mają otwarte oczy do czasu jazdy przez cały badany odcinek został określony wskaźnikiem wysiłku psychofizycznego WL (workload). Na podstawie badań laboratoryjnych ustalono, że wskaźnik ten na prostoliniowych odcinkach dróg przyjmuje wartość 0,176. Zatem czas niezbędny kierowcy do oceny sytuacji na prostoliniowych odcinkach dróg wynosi ~18% całego czasu jazdy. Ustalono również zależność omawianego wskaźnika od promienia łuku kołowego o postaci:

$$WL = 0,193 + \frac{27,942}{R} \quad [-] \quad (1.10)$$

gdzie:

R – promień łuku kołowego [m].

Przydatność powyższej metody do wyznaczania jednorodności geometrycznej drogi potwierdziły wyniki badań zamieszczone w pracy [29], w której stwierdzono, że:

- a) metoda dobrze odzwierciedla wrażliwość kierowców na zmiany geometrii drogi,
- b) umożliwia ona ustalenie granicznych wartości cech geometrycznych drogi, które ze względu na wysiłek psychofizyczny nie powinny być stosowane,
- c) duża wartość wysiłku psychofizycznego oraz znaczna i częsta jego zmiana powodują wzrost potencjalnego zagrożenia w ruchu drogowym,
- d) zwiększoną wartość wysiłku psychofizycznego obserwuje się w odległości około 90,0 m od początku łuku w planie, a maksymalną blisko początku łuku i pozostaje ona na tym poziomie albo nieznacznie obniżonym na całym łuku, aby gwałtownie powrócić do wyjściowego poziomu po przejechaniu końca łuku,
- e) wysiłek psychofizyczny wzrasta liniowo wraz ze zmniejszeniem wartości promienia,
- f) kąt zwrotu ma także wpływ na wysiłek psychofizyczny, ale nie tak znaczący jak promień łuku kołowego,
- g) wzrok kierowców koncentruje się przede wszystkim na punktach, w których rozpoczyna się łuk w planie. Kierowcy generalnie ignorują krawędziowe oznakowanie jezdni znajdujące się w ich bliskiej odległości. Punkt, na którym kierowcy koncentrują wzrok zależy od wartości kąta zwrotu. Na łukach o dużych kątach zwrotu prowadzący pojazd najczęściej spoglądają na zewnętrzną linię krawędziową. Ten wniosek ma duże znaczenie praktyczne przy ustalaniu lokalizacji technicznych środków organizacji ruchu stosowanych w oznakowaniu łuku w planie,
- h) na łukach w planie zmniejszenie wysiłku psychofizycznego można osiągnąć poprzez umieszczanie technicznych środków organizacji ruchu w odstępach mniejszych niż 100 m,
- i) duży odstęp pomiędzy łukami w planie powoduje większy wysiłek psychofizyczny niż mały odstęp; najmniejszą wartość wysiłku psychofizycznego zanotowano na krzywych „esowych”.

Inną, wartą przytoczenia, jest metoda sprawdzania jednorodności geometrycznej dwupasowych dróg dwukierunkowych stosowana w Portugalii [12]. Jest to jedna z nielicznych metod uwzględniająca w ocenie jednorodności geometrycznej drogi zagrożenie w ruchu drogowym. Założenia wyjściowe do jej opracowania były następujące:

- a) zmienne niezależne użyte w modelach prędkości na prosto- i krzywoliniowych odcinkach dróg w planie powinny objaśniać zachowania kierowców na portugalskich drogach oraz ich oczekiwania i trudności w wykonywaniu niezbędnych manewrów w ruchu,
- b) powinna być ustalona korelacja pomiędzy ryzykiem wypadkowym na portugalskich drogach a zmiennymi niezależnymi objaśniającymi zachowania kierowców i geometrię drogi,
- c) opóźnienie podczas redukcji prędkości na prostej do prędkości na łuku w planie powinno być mniejsze niż $2,0 \text{ m/s}^2$,
- d) różnica energii kinetycznej wynikająca ze zmiany prędkości na prostej w stosunku do prędkości na łuku w planie powinna być jednym z kryteriów jednorodności drogi.

Na podstawie wyników badań opracowano modele prędkości i ryzyka wypadkowego, w zależności od krętości i falistości oraz innych cech drogi, jak: długość prostej poprzedzającej łuk w planie, szerokość jezdni, czy szerokość i rodzaj poboczy. Iloczyn stosunku wskaźnika liczby wypadków z rannymi na łuku do analogicznego wskaźnika na prostej oraz stosunku energii kinetycznej pojazdu na prostej do energii kinetycznej pojazdu na łuku stanowi tzw. współczynnik niejednorodności geometrycznej drogi (FH). Łuki w planie zostały podzielone na 5 klas (oznaczonych literami: O, A, B, C, D) pod względem jednorodności geometrycznej. Zakwalifikowanie analizowanego łuku do danej klasy zależy od przypisanej mu wartości: FH, redukcji prędkości i opóźnienia. Stąd łuk w planie położony na drodze z utwardzonymi poboczami zostanie zakwalifikowany do klasy O, jeśli $FH \leq 2,5$, opóźnienie będzie mniejsze lub równe $2,0 \text{ m/s}^2$, a redukcja prędkości będzie mniejsza lub równa $5,0 \text{ km/h}$. Do klasy D jeśli $FH > 8,0$, opóźnienie będzie większe od $2,0 \text{ m/s}^2$, a redukcja prędkości większa od $5,0 \text{ km/h}$. Według przepisów portugalskich projektowana droga musi spełniać kryteria jednorodności geometrycznej klasy O i A, wyjątkowo klasy B oraz C po odpowiednim uzasadnieniu, a klasa D jest niedopuszczalna. W przypadku istniejącej drogi, łuk zaliczony do klasy D musi jak najszybciej zostać przebudowany. Omawiane kryterium jednorodności stosowane jest również przy ustalaniu sposobu oznakowania łuków w planie.

Ze względu na rolę i wagę prędkości $V_{85\%}$ w kryteriach bezpieczeństwa ruchu drogowego, ogromnego znaczenia nabiera poprawne wyznaczenie jej wartości. Nowym elementem pojawiającym się w ostatnich latach w modelach jej prognozowania jest tzw. prędkość środowiskowa⁵ (V_{env}) [84]. Znaczenie prędkości środowiskowej i uzasadnienie jej stosowania w modelach prognozowania $V_{85\%}$ na łukach w planie ilustruje poniżej opisany przykład zaczerpnięty z pracy [18]. Wyniki i analizy badań $V_{85\%}$ przeprowadzone we Włoszech na prostoliniowych i krzywoliniowych odcinkach dróg w planie wykazały, że w modelach prędkości powinien być uwzględniany dodatkowy czynnik oddający specyfikę drogi, wynikającą z jej ogólnych cech, takich jak: funkcja drogi w sieci, sekwencja następujących po sobie elementów geometrycznych, częstość i długości jej przebiegu w terenie zabudowanym, itp. Przesłanką do podjęcia tego typu

⁵ Pod tym pojęciem w niektórych opracowaniach (np. [21]) rozumie się prędkość przy przejeździe przez osiedla mieszkaniowe, której kierowcy nie powinni przekraczać ze względu na ochronę środowiska oraz bezpieczeństwo ruchu pieszego i rowerowego.

badan było stwierdzenie różnic w prędkościach na łukach w planie, o takich samych wartościach cech geometrycznych, ale położonych na różnych drogach, wyznaczanych z modeli opartych tylko na tzw. wskaźniku zmian krzywizny⁶ określonym wzorem:

$$CCR = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{L} \text{ [grad/km]} \quad (1.11)$$

gdzie:

- γ – kąt zwrotu [grad],
- L – długość jednorodnego odcinka trasy [km].

Pomiary prędkości prowadzone były na kilkunastu odcinkach dwupasowych dróg dwukierunkowych o różnych wartościach wskaźnika CCR. Na podstawie analizy regresji ustalono zależność między prędkością środowiskową a wskaźnikiem CCR:

$$V_{env} = \beta_1 \cdot CCR^{\beta_2} \text{ [km/h]} \quad (1.12)$$

gdzie:

- β_1, β_2 – współczynniki regresji,

przy współczynniku korelacji $r = 0,87$.

Jakość modelu (1.12) uległa polepszeniu, gdy wprowadzono do niego kolejną zmienną niezależną, tj. sumę szerokości jezdni i obu poboczy (L_p). Uzyskano zależność:

$$V_{env} = \beta_1 + \beta_2 \cdot CCR + \beta_3 \cdot L_p \text{ [km/h]} \quad (1.13)$$

gdzie:

- β_3 – współczynnik regresji,

a wartość r uległa zwiększeniu do 0,92.

Ostatecznie prędkość $V_{85\%}$ na łuku w planie o danym promieniu z uwzględnieniem prędkości środowiskowej wyznaczyć można, między innymi, ze wzoru⁷:

$$V_{85\%} = V_{env} \cdot (1 - V_{env}^2 / (\beta_1 \cdot R)) \text{ [km/h]} \quad (1.14)$$

Stwierdzono, że po uwzględnieniu prędkości środowiskowej jakość modeli prognozujących prędkości $V_{85\%}$ na łukach w planie uległa polepszeniu.

Najnowsze podejście do projektowania geometrycznego dróg polega na realizacji koncepcji drogi „samowytłumaczającej się” i „wybaczącej” błędy kierowcom.

Koncepcja drogi „samowytłumaczającej się” polega na nadaniu drodze przez projektanta „etykiety” dostarczającej użytkownikom wyraźnych i jednoznacznych przesłanek umożliwiających im dokonanie szybkiej i prawidłowej oceny, tzw. obiektywnego poziomu ryzyka. „Etykiety” można uzyskać poprzez taki dobór wartości cech poszczególnych elementów drogi i przestrzennego ich układu, aby jej użytkownik instynktownie wyczuwał granice bezpiecznych zachowań i dawał temu wyraz wybierając odpowiednią bezpieczną prędkość. Realizacja tego celu wymaga [99, 130]:

⁶ W polskiej literaturze wskaźnik ten nazywany jest krętością drogi.

⁷ W pracy [18] podano cztery różne postacie modelu prędkości.

- sklasyfikowania dróg ze względu na ich podstawowe funkcje w sieci i ustaleniu limitów prędkości zgodnych z tymi funkcjami (na przykład wartości zawarte w tabelicy 1.2).
- niedopuszczenia do pełnienia przez drogę więcej funkcji niż te, do których została zaprojektowana,
- wprowadzenia segregacji poszczególnych użytkowników drogi w celu wyeliminowania konfliktów pomiędzy nimi (z wyłączeniem konfliktów przy niskich prędkościach),
- niedopuszczenia do powstawania wątpliwości u użytkowników drogi, co do jej funkcji w sieci.

Tablica 1.2. Wartości bezpiecznej prędkości w zależności od rodzaju potencjalnych konfliktów wg ENCAP (European New Car Assessment Programme)

Sytuacja ruchowa na elemencie sieci	Bezpieczna prędkość [km/h]
Drogi z potencjalnymi konfliktami pomiędzy pojazdami i niechronionymi uczestnikami ruchu	30
Skrzyżowania z potencjalnymi bocznymi zderzeniami pojazdów	50
Drogi z potencjalnymi czołowymi zderzeniami pojazdów	70
Drogi, na których czołowe i boczne zderzenia pojazdów są niemożliwe	≥ 100

Dużą rolę w realizacji omawianej koncepcji drogi, ze względu na możliwość kształtowania przez projektanta prędkości, odgrywa dobór wartości cech łuków w planie.

Koncepcja drogi „wybaczącej” błędy kierowcom polega na stosowaniu rozwiązań, które:

- sygnalizują kierowcom popełnienie błędu, na przykład stosowanie linii osiowego i krawędziowego oznakowania jezdni emitujących drgania i dźwięki w przypadku niezamierzonego zjechania z pasa ruchu,
- zapobiegają utracie stateczności pojazdu, na przykład utwardzenie poboczy, zwłaszcza na łukach w planie; „wybaczenie” błędu niedostosowania prędkości do cech geometrycznych łuku,
- zmniejszają ciężkość wypadku drogowego, na przykład usunięcie przeszkód z terenu bezpośrednio przylegającego do drogi, odpowiednie profilowanie skarp nasypów i wykopów, bezpieczne konstrukcje wsporcze (kratowe profile aluminiowe) do mocowania oznakowania pionowego, stosowanie barier drogowych umożliwiających „powrót” pojazdu na pas ruchu, itp.

W celu złagodzenia skutków działania siły odśrodkowej stosuje się pomiędzy prostą a łukiem kołowym krzywą przejściową. Warunki, jakim powinna odpowiadać krzywa przejściowa wynikają z przesłanek natury: geometrycznej, dynamicznej, psychologicznej i estetycznej.

Podstawowy warunek stawiany krzywej przejściowej, tj. zmiany krzywizny od wartości zero na prostej do stałej wartości na łuku kołowym spełnia wiele krzywych. Stąd, z teoretycznego punktu widzenia, w projektowaniu dróg stosować można takie krzywe przejściowe, jak: kłotoidea, kłotoidea dwuparametrowa, lemniskata, parabola trzeciego stopnia, sinusoida, gładka krzywa przejściowa (np. krzywa Goldnera, Auberlena), wielomianowa gładka krzywa przejściowa, gładka ogólna krzywa przejściowa lub wielomianowa gładka ogólna krzywa przejściowa [16, 41]. W literaturze fachowej pre-

feruje się stosowanie klotoidy jako krzywej przejściowej, ponieważ zapewnia ona proporcjonalne wzrastanie krzywizny w stosunku do długości łuku. Ponadto w uzasadnieniu jej stosowania uwypukla się fakt, że zmianę kierunku ruchu uzyskuje się poprzez równomierny obrót kierownicy (teoretycznie oznacza to stałą prędkość kątową podczas dokonywania manewru skręcania kierownicy). Klotoida stała się tak popularną krzywą w drogownictwie, że często jest synonimem krzywej przejściowej.

Z przeglądu znanych autorowi europejskich przepisów projektowania dróg wynika, że stosowanie krzywej przejściowej jako elementu łuku w planie, z wyjątkiem łuków o bardzo dużych promieniach, jest obowiązkowe. W USA natomiast stosowanie krzywej przejściowej zależy od uznania projektanta [1].

Dotychczasowe wyniki badań wskazują na niejednoznaczność wpływu krzywej przejściowej na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Glennon, Neuman i Leisch na podstawie empirycznych wyników badań i komputerowej symulacji trajektorii pojazdów wykazali, że dodanie do łuku kołowego klotoidy radykalnie polepszyło warunki stateczności pojazdu (zmniejszeniu uległa wartość wykorzystywanego współczynnika przyczepności) oraz zmniejszyło o 9% liczbę wypadków drogowych [40]. Wyniki tych badań były pierwszymi dokumentującymi wpływ stosowania klotoidy na brd. Pozytywny wpływ klotoidy na poziom brd wykazali również Leutzbach, Zoellmer i Elvik, a negatywny O'Conneide stwierdzając: „...stosowanie krzywych przejściowych jest niebezpieczne ponieważ kierowca niedoszacowuje surowości krzywizny” [25]. Departament Dróg Kalifornii, na podstawie analizy wyników badań Stewarta [115], wydał zalecenie niestosowania krzywych przejściowych. Podstawą zalecenia była analiza porównawcza obejmująca wypadki, które wystąpiły na ponad 200 łukach w planie tego stanu. Wykazała ona, że na łukach z klotoidami zarejestrowano średnio o 73% więcej wypadków z rannymi niż na łukach bez klotoid.

Najważniejszym argumentem krytyków stosowania krzywej przejściowej jako elementu łuku w planie jest powoływanie się na efekt optycznego złagodzenia krzywizny łuku powodującego u kierowców trudności w prawidłowej ocenie rzeczywistej krzywizny drogi [116]. Jednak najnowsze badania wpływu klotoidy na poziom brd, wykonane w połowie lat dziewięćdziesiątych ub. wieku w Niemczech i Anglii, wykazały, że jest on neutralny [81].

1.2. Wpływ czynników drogowych na prędkość

Wartości prędkości w ruchu swobodnym, ze względu na bardzo złożony i skomplikowany proces wyboru prędkości przez kierowców, szacowane są z pewnym przybliżeniem, w zależności od zmiennych niezależnych charakteryzujących drogę i jej środowisko oraz z uwzględnieniem struktury rodzajowej pojazdów i warunków pogodowych. W modelach prędkości przyjmuje się uproszczenie polegające na drugorzędym traktowaniu motywacji kierowców, na którą wpływ mają: ich nastawienie do ruchu wraz z towarzyszącymi emocjami, subiektywne normy zachowania oraz własna kontrola zachowań [127]. Wpływ percepcji i przetwarzania informacji przez kierowcę na wybór prędkości uwzględniany jest pośrednio poprzez opis cech drogi i jej otoczenia.

Promień łuku kołowego

Wpływ promienia na prędkość jest bardzo szeroko opisany w literaturze przedmiotu [9, 13, 39, 48, 52, 53, 54, 69, 81, 83, 87, 89]. W krajach anglosaskich wpływ promienia na prędkość uwzględniany jest poprzez wskaźnik zmiany krzywizny pojedynczego łuku w planie:

$$CCR_S = \frac{(L_{c11}/2 \cdot R + L_{cr}/R + L_{c12}/2 \cdot R) \cdot 63\,700}{L} \text{ [grad/km]} \quad (1.15)$$

gdzie:

- L_{c11}, L_{c12} – długości krzywych przejściowych odpowiednio przed i po łuku kołowym [m],
- L_{cr} – długość łuku kołowego [m],
- L – długość łuku w planie [km], $L = L_{c11} + L_{cr} + L_{c12}$.

Analiza wyników badań wskazuje, że wpływ promienia na prędkość jest znaczący przy jego wartościach mniejszych od ~300 do ~500 m, w zależności od dopuszczalnej prędkości. Na drogach z ograniczeniem prędkości do 80 km/h nie rejestrowano spadku prędkości na łukach o promieniach większych od 140 m.

Wraz ze zmniejszeniem promienia lub zwiększeniem wartości wskaźnika CCR_S następuje zmniejszenie prędkości, a matematycznymi postaciami modeli prędkości uwzględniającymi te zmienne stanowią zależności: liniowe, wykładnicze oraz inne nieliniowe (najczęściej wielomianowe).

Wpływ promienia na prędkość zanika począwszy od jego wartości większych od ~750 m.

Kąt zwrotu

Wpływowi kąta zwrotu na prędkość w literaturze przedmiotu poświęca się niewiele miejsca. Według przypuszczeń autora wynika to z faktu, że w krajach zachodnich – na terenach płaskich, na drogach o standardach technicznych zbliżonych do polskich dróg krajowych i wojewódzkich – rzadko spotyka się łuki w planie o kątach zwrotu większych od 45°. W najnowszej literaturze zachodniej zaleca się niestosowanie, jeśli jest to tylko możliwe, kątów zwrotu większych od 45°, bowiem już kąty większe od 30° powodują zwiększone zagrożenie w ruchu drogowym, w stosunku do łuków o mniejszych kątach zwrotu.

Jedną z nielicznych prac, w której omówiono wpływ kąta zwrotu na prędkość jest publikacja [3], a podane w niej zależności dotyczą dróg w Jordanii. Wykazano w niej, że prędkość na prostej (V_p), położonej pomiędzy łukami o kątach zwrotu DF_1 i DF_2 , wyznaczyć można z zależności:

$$V_p = 115,0 - \frac{3\,722,0}{LT} - 0,7 \cdot \left(\frac{DF_1 \cdot DF_2}{DF_1 + DF_2} \right) \text{ [km/h]} \quad (1.16)$$

gdzie:

- LT – długość prostej (od 260 m do 800 m).

Wartość współczynnika korelacji 0,82 świadczy o dużej sile zależności pomiędzy prędkością a kątem zwrotu i długością prostej.

Wpływ kąta zwrotu (Δ), długości łuku (L) oraz promienia (R) na prędkość uwzględnia model zaproponowany w pracy [17, 67]:

$$V_{85} = 102,4 - 2742,0/R + 0,012 \cdot L - 0,10 \cdot \Delta \text{ [km/h]} \quad (1.17)$$

a długości łuku i promienia model zawarty w pracy [38]:

$$V_{85\%} = 102,45 + 0,0037 \cdot L - (8995 + 5,73 \cdot L)/R \text{ [km/h]} \quad (1.18)$$

W pracy [109] w modelu prędkości na łuku w planie uwzględniono również długość i promień łuku kołowego.

W warunkach polskich wpływ kąta zwrotu na prędkość jest znaczny, co wykazano w pracach [54, 120, 121].

Klotoida

Badania porównawcze prędkości na łukach w planie z kłotoidami i bez nich wykonano w USA, a ich wyniki przedstawiono w pracy [32]. W krajach europejskich wykonanie takich eksperymentów jest praktycznie niemożliwe, gdyż stosowanie krzywych przejściowych (najczęściej kłotoid) jest obowiązkowe (poza nielicznymi wyjątkami, np. przy bardzo dużych wartościach promieni łuków kołowych). Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że prędkości na łukach o $R = 150$ m z kłotoidami były większe w porównaniu z prędkościami na łukach o tych samych promieniach, ale bez kłotoid. Różnice prędkości w największym stopniu dotyczyły miar pozycyjnych rozkładów prędkości mniejszych od kwantyla 40% i nie przekraczały 5 km/h. Na łukach o $R = 290$ m większe prędkości obserwowano na łukach bez kłotoid, ale również tylko w przypadku niskich kwantyli, mniejszych od 40%. Maksymalna różnica prędkości w tym przypadku wyniosła 8 km/h i dotyczyła kwantyla 15%. Z kolei na łukach o $R = 350$ m różnice prędkości były niewielkie, a maksymalne ich wartości nie przekraczały 2 km/h, przy wysokich kwantylach prędkości, większych od 85%. Na łukach o $R = 440$ m stwierdzono wyższe prędkości na łukach bez kłotoid, a maksymalna różnica wyniosła ~3 km/h przy kwantylach 85% prędkości.

Wyniki badań zawarte w publikacji [97] wykazały, że prędkości na łukach w planie z kłotoidami są takie same jak na łukach bez kłotoid.

Szerokość jezdni

Wyniki badań wpływu szerokości jezdni (większych od 6,0 m) na prędkość, cytowane w pracy [81], różnią się między sobą. Według Trappa: „...szerokość jezdni w połączeniu z szerokością poboczy wpływa na prędkość”. Do takiego samego rezultatu badawczego doszedł Schiller: „...na dobrych pod względem technicznym nawierzchniach prędkość wzrastała wraz ze wzrostem szerokości jezdni”. Według Lamma również: „...występuje niewielka zależność pomiędzy prędkością a szerokością jezdni”. Al-Kassar, Hoffmann i Zmeck stwierdzili: „...zmienne: wskaźnik CCR_s, szerokość jezdni i szerokość poboczy wspólnie istotnie wpływają na prędkość”. Do nielicznych badaczy, którzy sformułowali odmienny wniosek od powyższych należy Baumann: „...w warunkach ruchu swobodnego nie wystąpiły istotne różnice pomiędzy standardem przekroju poprzecznego a prędkością”.

Wyniki badań wykonane w Szwajcarii [6], USA [117] i Polsce [54, 110, 121] wykazały wpływ szerokości jezdni na prędkość.

Odległość widoczności

Na podstawie syntezy wyników badań wpływu odległości widoczności na prędkość zawartej w pracy [81] można stwierdzić, że wpływ odległości widoczności, w zakresie 300-800 m na prędkość nie jest jednoznaczny. Zdaniem wcześniej już cytowanego Trappa: „...wpływ odległości widoczności na zachowania kierowcy nie jest jednolity i nie powinien być rozważany osobno, ponieważ jest mocno powiązany ze wskaźnikiem zmiany krzywizny”. Do identycznego wniosku doprowadziły wyniki badań Koepfella i Bocka. Z kolei Al-Kassar, Hoffmann i Zmeck wykazali, że „...wpływ na prędkość pochylenia podłużnego jezdni oraz odległości widoczności jest mniejszy niż wskaźnika CCR_s , szerokości jezdni i pobocza”. Yagar i Van Aerde stwierdzili, że: „...odległość widoczności nie była czynnikiem mającym wkład w regulowanie prędkości”.

Według badań niemieckich [10] prędkość na łukach w planie zależy nie tylko od cech geometrycznych drogi, ale również odległości widoczności, co wyraża następująca zależność:

$$V_{85\%} = 106,5 - 680,0/LW_1 - 9600,0/LW_2 - 260,0/R + \\ -30,4 \cdot X_R - 0,26 \cdot X_i - 0,16 \cdot X_i^2 \quad [\text{km/h}] \quad (1.19)$$

gdzie:

- LW_1 – odległość widoczności w rozpatrywanym przekroju [m],
- LW_2 – średnia odległość widoczności na odcinku o długości 400 m poprzedzającym rozważany przekrój [m],
- X_R – średnia krzywizna poprzedzającego odcinka o długości 400 m [1/m],
- X_i – średnie pochylenie podłużne jezdni na poprzedzającym odcinku o długości 400 m [%].

Wyniki prac badawczych wykonanych w Szwajcarii [6], USA [39, 92, 117], Polsce [107] również potwierdziły wpływ odległości widoczności na prędkość.

Pochylenie podłużne jezdni

Badania francuskie i greckie (cyt. za [81]) wskazują na wpływ pochylenia podłużnego na prędkość. Według naukowców francuskich jest on szczególnie wyraźny, jeśli długość odcinka drogi jest większa niż 250 m, a pochylenie podłużne większe od 5%. Zwiększenie pochylenia podłużnego, np. z 2% do 10% powoduje spadek $V_{85\%}$ o ponad 20 km/h.

W Grecji stwierdzono, że jeśli wartość wskaźnika CCR_s zawarta jest w granicach od 0 do 600 [grad/km], to wartości kwantyli 85% prędkości na wzniesieniach i na spadkach dróg o pochyleniu podłużnym zawartym w granicach:

- |0-5%| nie różnią się od siebie;
- |5-10%| nie różnią się od siebie o więcej niż o 2 km/h, przy czym większe prędkości występują na spadkach.

Ponadto wykazano, że na wzniesieniach i na spadkach dróg o pochyleniu podłużnym zawartym w granicach:

- |0-5%| zwiększenie wskaźnika CCR_s od 50 grad/km do 500 grad/km powoduje spadek $V_{85\%}$ o około 30 km/h,
- |5-10%| zwiększenie wskaźnika CCR_s od 50 grad/km do 500 grad/km prowadzi do obniżenia $V_{85\%}$ o około 8 km/h.

Stwierdzono również, że na $V_{85\%}$ większy wpływ mają cechy łuku w planie niż wartość pochylenia podłużnego jezdni.

W USA do wyznaczenia kwantyla 85% prędkości na łukach w planie stosowane są cztery modele, w zależności od wartości pochyłeń podłużnych jezdni (G) [31], które grupowane są w przedziały: $-9\% \leq G < -4\%$, $-4\% \leq G < 0\%$, $0\% \leq G < 4\%$ oraz $4\% \leq G < 9\%$. Na przykład zwiększenie pochylenia podłużnego z 1% do 9%, na łuku o $R = 200$ m, powoduje spadek $V_{85\%}$ o ~ 4 km/h.

Bardzo duży wpływ na prędkość pochylenia podłużnego jezdni oraz długości wzniesienia lub spadku wykazano w polskich badaniach [121].

Stan nawierzchni spowodowany warunkami pogodowymi

Jedne z najwcześniejszych prac badawczych wpływu stanu nawierzchni (sucha i mokra) na prędkość przeprowadzono w USA w latach 1939-1956. Jednak dopiero Oppenlander [30] w 1966 roku wykonał syntezę tych badań, stwierdzając, że różnice między prędkościami na suchej i mokrej nawierzchni są nieistotne (poziom istotności $\alpha = 0,05$).

W pracy opublikowanej w 1978 roku przez Blacburna i in. [7] przedstawiono wyniki badań prędkości na suchych i mokrych nawierzchniach w 9 stanach USA na 48 odcinkach pomiarowych, zlokalizowanych na miejskich i zamiejskich dwupasowych drogach dwukierunkowych oraz autostradach. Znaczące statystycznie różnice (poziom istotności $\alpha = 0,05$) pomiędzy kwantylami 85% prędkości wystąpiły na 18 odcinkach pomiarowych, przy czym na 16 odcinkach były większe na suchej, a tylko na 2 odcinkach większe na mokrej nawierzchni. Na dwupasowych drogach dwukierunkowych różnice pomiędzy rozważanymi kwantylami prędkości były większe na suchej nawierzchni o 3,2 km/h.

W latach 1984-1987 Lamm i inni [79] przeprowadzili w stanie Nowy Jork badania prędkości na dwupasowych drogach dwukierunkowych na suchych i mokrych nawierzchniach. Pomiarzy zostały przeprowadzone na 11 łukach w planie (wartość promienia zmieniała się od 213 m do 1747 m) oraz na 1 odcinku prostym. Na podstawie analizy wyników badań nie stwierdzono istotnych (poziom istotności $\alpha = 0,05$) różnic pomiędzy $V_{85\%}$ w zależności od omawianych stanów nawierzchni.

Kolejne prace badawcze zależności prędkości od stanu nawierzchni wykonane przez Ibrahima i Halla w latach 1990-1991 [46] wykazały, że na prostych odcinkach dróg deszcz o niewielkim natężeniu powodował spadek $V_{85\%}$ zaledwie o 2 km/h, ale opady o dużym natężeniu już dość znaczny spadek omawianego kwantyla prędkości, bo od 5 aż do 10 km/h.

Wyniki badań prędkości na dwupasowych drogach dwukierunkowych (podczas dnia i nocy) na nawierzchniach suchych i mokrych przeprowadzone przez Thoma w Szwajcarii (cyt. za [81]) przedstawiono w tablicy 1.3. Są one cenne, bowiem podano wartości natężeń deszczu (I), które pogrupowano następująco:

- a) $I = 0,5-0,9$ mm/h – lekki deszcz,
- b) $I = 1,0-2,9$ mm/h – umiarkowany deszcz,
- c) $I \geq 3,0$ mm/h – ciężki deszcz.

Tablica 1.3. Wyniki badań prędkości na dwupasowych drogach dwukierunkowych podczas dnia i nocy na nawierzchniach suchych i mokrych

Pora doby	Parametr	Nawierzchnia			
		sucha	mokra podczas deszczu:		
			lekkiego	umiarkowanego	ciężkiego
Dzień	Prędkość średnia [km/h]	82	84	81	76
	Kwantyl 85% prędkości [km/h]	92	94	90	83
	Udział kierowców przekraczających dopuszczalną prędkość 80 km/h [%]	48	54	46	20
Noc	Prędkość średnia [km/h]	87	81	79	–
	Kwantyl 85% prędkości [km/h]	99	92	91	–
	Udział kierowców przekraczających dopuszczalną prędkość 80 km/h [%]	60	44	38	–

Z analizy danych zamieszczonych w tablicy 1.3 wynika, że spadki prędkości średniej oraz $V_{85\%}$ zarówno podczas dnia, jak i nocy były tym większe, im większym natężeniem charakteryzował się deszcz. Wzrost natężenia deszczu z lekkiego na ciężki powodował w warunkach ruchu dziennego spadek średniej prędkości o 8 km/h, a kwantyla 85% prędkości o 11 km/h. Wraz ze wzrostem natężenia deszczu, bez względu na porę doby, zmniejszał się odsetek kierowców przekraczających dopuszczalną prędkość na badanych odcinkach dróg.

Bardzo interesujący, a zarazem dość zaskakujący wniosek wynikł z prac badawczych przeprowadzonych w USA [81]. Pomiar prędkości pojazdów na suchych i mokrych nawierzchniach wykonano na kilkudziesięciu łukach w planie drogi. Badania były prowadzone w warunkach, kiedy deszcz nie ograniczał kierowcom widoczności na odległość w granicach od 140 do 170 m (w wielu krajach, w tym również i w Polsce, taki zakres odległości widoczności na zatrzymanie na dwupasowych drogach dwukierunkowych jest wymogiem zawartym w przepisach projektowych). Analiza wyników badań wykazała, że w takich warunkach różnice między prędkościami na suchej i mokrej nawierzchni były nieistotne (poziom istotności 0,05). W przypadku natomiast deszczu o dużym natężeniu, prędkości malały, lecz nie ze względu na spadek wartości współczynnika przyczepności, ale w wyniku zmniejszenia odległości widoczności.

Przeprowadzone w Polsce w latach 1980-1985 badania prędkości na nawierzchniach suchych i mokrych [55] wykazały, że stan nawierzchni miał wpływ na prędkość i w przypadku samochodów osobowych kwantylowi 98% prędkości na nawierzchni mokrej odpowiadał kwantyl 85% prędkości na nawierzchni suchej.

Właściwości przeciwślizgowe nawierzchni

Wpływ na prędkość właściwości przeciwślizgowych nawierzchni został stosunkowo szeroko omówiony w pracy [128].

Saastamoinen (Finlandia) przeprowadził badania wpływu właściwości przeciwślizgowej nawierzchni (miarą wartość współczynnika przyczepności podłużnej f_T) na prędkość. Wykazał, że prędkość jaką osiągają kierowcy ulegała zmniejszeniu maksymalnie o 3 km/h, gdy $0,35 < f_T \leq 0,45$, a od 4 km/h do 7 km/h, gdy $f_T \leq 0,25$ w porównaniu z prędkością na nawierzchni o $f_T > 0,45$.

Na podstawie badań Roinego (Norwegia) średnia prędkość na łukach o dużych kątach zwrotu i śliskich nawierzchniach ($f_T < 0,25$) była mniejsza o ~ 6 km/h w porównaniu z prędkością uzyskiwaną na suchych i mokrych nawierzchniach o $f_T > 0,45$.

Wallmann (Szwecja) przeprowadził badania porównawcze prędkości, jakie uzyskiwali kierowcy w warunkach letnich i zimowych na drogach na nawierzchniach o $f_T = 0,8$ i stwierdził, że różnice pomiędzy średnimi prędkościami nie przekraczały 12 km/h. Wyniki badań prędkości wykonane w warunkach zimowych na nawierzchniach o $f_T = 0,40$ oraz 0,25 wykazały, że różnice pomiędzy średnimi prędkościami nie przekraczały 1 km/h. Na podstawie analizy wyników badań stwierdził: "...rzeczywista wartość współczynnika f_T ma mały wpływ na wybór prędkości przez kierowcę, wizualna ocena jest bardziej istotna". Do podobnego wniosku doszedł Öberg (Szwecja), który zauważył, że "...wzrost prędkości po posypaniu nawierzchni piaskiem nie korespondował z rzeczywistą wartością współczynnika przyczepności, lecz raczej z oczekiwaną przez kierowców".

Wpływ odnowy nawierzchni na prędkość jest bardzo słabo opisany w literaturze przedmiotu. Jedyne dane dotyczące omawianego zagadnienia autor znalazł w pracy [43], w której opisano wyniki badań przeprowadzonych w USA, w pięciu stanach, na 39 odcinkach dróg. Stwierdzono, że po odnowieniu nawierzchni zarówno prędkość średnia, jak i kwantyl 85% prędkości wzrosły średnio o około 1,6 km/h. Przy czym na niektórych odcinkach prędkości wzrosły o 11,0 km/h, a na innych zmniejszyły się o 6,5 km/h. Nie wyjaśniono jednak powodu spadku lub wzrostu prędkości. Zwrócono uwagę, że polepszenie stanu nawierzchni najczęściej powoduje wzrost prędkości. Stąd, gdy jest wskazane utrzymanie prędkości na poziomie jaki występował przed wykonaniem odnowy nawierzchni należy równocześnie wprowadzić odpowiednie zmiany geometrii drogi lub zastosować techniczne środki organizacji ruchu.

Charakterystyka odcinka poprzedzającego łuk w planie

Prędkość na łuku w planie zależy również od ukształtowania geometrycznego odcinka go poprzedzającego. Dlatego w niektórych modelach prędkości na łukach w planie, dodatkową zmienną niezależną jest prędkość na prostej poprzedzającej łuk, która z kolei zależy od: długości prostej i krętości drogi (np. Francja), długości prostej, szerokości pasa ruchu i pobocza (np. Finlandia), falistości i krętości drogi (np. Grecja), promienia łuku poprzedzającego prostą i krętości drogi (np. Portugalia) [81, 106].

Krammes i Ottesen (cyt. za [14]) ustalili następującą zależność pomiędzy $V_{85\%}$ na łuku w planie a promieniem, kątem zwrotu, długością łuku i prędkością na prostej poprzedzającej łuk w planie:

$$V_{85\%} = 41,62 - 2252,86/R + 0,0049 \cdot L - 0,121 \cdot I + 0,95 \cdot V_{85\%t} \quad [km/h] \quad (1.20)$$

gdzie:

- L – długość łuku [m],
- I – kąt zwrotu [stopnie],
- $V_{85\%t}$ – kwantyl 85% prędkości na prostej poprzedzającej łuk w planie [km/h].

Uwzględnienie w zależności (1.20) prędkości na prostej poprzedzającej łuk w planie spowodowało wzrost współczynnika korelacji z 0,8 do 0,9 w porównaniu z przypadkiem, gdy omawianej zmiennej niezależnej nie rozpatrywano.

Zagospodarowanie przestrzenne terenu przyległego do drogi

Prace badawcze Tignora i Warrena [124] wykazały, że dostępność do drogi i częstość występowania placówek komercyjnych wzdłuż drogi są czynnikami mającymi duży wpływ na prędkość samochodów. Fakt ten wytłumaczyć można uwzględnieniem przez kierowców możliwości wystąpienia kolizji z pojazdem kierowcy, który włącza się do ruchu.

Wyniki badań autora [56] wykazały, że przeszkody boczne znajdujące się w odległości większej od około 1,85 m od krawędzi jezdni nie wpływały na prędkości samochodów osobowych, a w odległości 1,70 m na prędkości pojazdów ciężarowych. Przeszkody boczne znajdujące się w odległościach mniejszych od wymienionych, powodowały spadek prędkości tym większy, im bliżej znajdowały się one krawędzi jezdni.

1.3. Trajektoria samochodu

Z przeglądu literatury przedmiotu wynika, że niestety niewiele jest prac omawiających problematykę trajektorii samochodu. Jedne z najwcześniejszych wyników badań pochodzą z połowy lat 60. ubiegłego stulecia i zostały zamieszczone w pracy [4]. Autorami badań byli Afanasjew i Iwanow, którzy wykazali, że na łukach w planie:

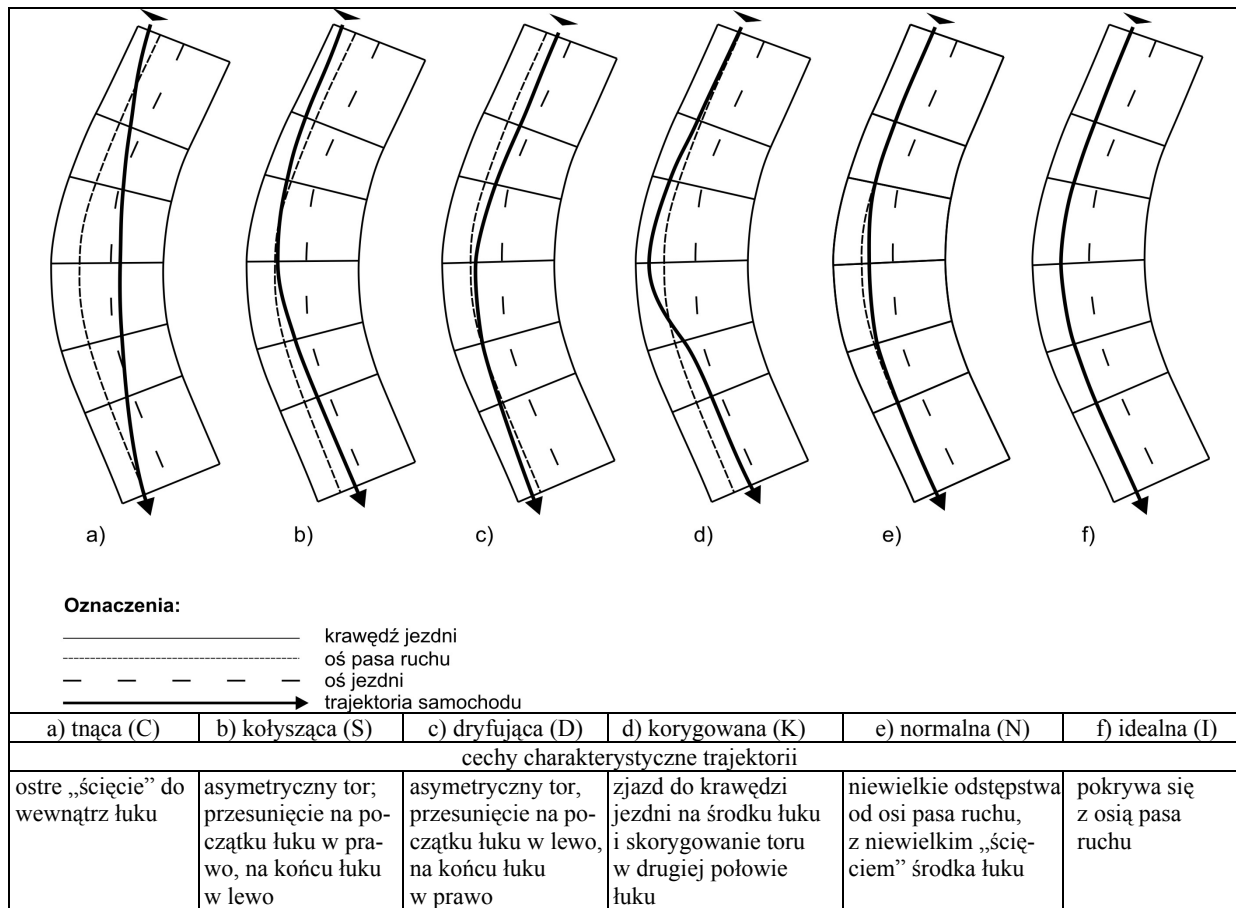
- tor, po którym poruszał się samochód nie stanowił jednej krzywej, lecz składał się z wielu krzywoliniowych odcinków o odmiennych krzywiznach; tłumaczono to wpływem nierówności nawierzchni, bocznym znoszeniem kół, porywami wiatru, luzami w układzie kierowniczym, jak również ruchami kierownicy wykonywanymi przez kierowcę,
- na łukach kołowych o promieniach od 50 m do 250 m kształt torów zbliżony był do kłotoidy, a maksymalne odchylenia od kłotoidy nie przekraczały 20-30 cm,
- na łukach kołowych o promieniach większych od 250 m tory składały się z łuku kołowego i kłotoid po obu ich stronach.

Inną pozycją, dość często cytowaną w literaturze przedmiotu, jest praca Krebsa [70], w której przedstawiono wyniki analiz trajektorii samochodów na łukach w planie. Stwierdzono, że:

- czynnikami drogowymi wpływającymi na prędkości na łukach w planie są: promień, kąt zwrotu i szerokość jezdni,
- zadowalające warunki ruchu na łukach w planie o małych promieniach można uzyskać w wyniku zastosowania kąta zwrotu do 30° lub zwiększenia szerokości pasa ruchu, co spowoduje zwiększenie promienia łuku kołowego trajektorii samochodu,
- na łukach o kątach zwrotu większych od 40° różnice pomiędzy promieniem łuku kołowego osi pasa ruchu a promieniem łuku kołowego trajektorii samochodu dążą do zera w miarę wzrostu kąta zwrotu.

Wyniki badań trajektorii samochodów na łukach w planie położonych na szwajcarskich drogach o prędkościach projektowych mniejszych od 80 km/h przedstawiono w publikacji [112]. Badania trajektorii obejmowały łuki o promieniach od 65 m do 220 m i kątach zwrotu od 43° do 130° . Na podstawie analizy wyników badań:

- a) wyróżniono 6 typów trajektorii przedstawionych na rysunku 1.1,
- b) nie ustalono korelacji pomiędzy częstością występowania danego typu trajektorii samochodu a cechami geometrycznymi łuku,



Rys. 1.1. Typy trajektorii samochodów na łukach w planie

- c) średnia częstość występowania, na badanych łukach w planie, „niechcianych” typów trajektorii K, C, S i D wyniosła ~37% (rozpiętość wynosiła od 16% do 53%, przy czym najczęściej występował typ C), natomiast typ I rejestrowany był incydentalnie,
- d) największe prędkości osiągali kierowcy pojazdów poruszający się po trajektorii typu C, a najmniejsze po trajektorii N,
- e) najwięcej wypadków wystąpiło na łukach, na których obserwowano największy odsetek trajektorii typu K. Koncentracja wypadków wystąpiła w środkowej części łuku w planie (łuk kołowy), następnie na końcu łuku, a najmniej na jego początku,
- f) niedostosowanie przez kierowcę prędkości do obranej przez niego trajektorii lub odwrotnie, powodowało lokalny wzrost przyspieszenia dośrodkowego działającego na kierowcę. Pod wpływem tego bodźca kierowca najczęściej zaczynał korygować tor jazdy lub redukować prędkość. Największe wartości przyspieszeń dośrodkowych rejestrowano kiedy kierowcy poruszali się po trajektorii typu K, przy czym większe wartości tych przyspieszeń zanotowano w warunkach jazdy nocą,
- g) na łukach o $R < 120$ m bardzo często rejestrowano przyspieszenia dośrodkowe dwukrotnie większe od dopuszczalnych w przepisach projektowania dróg,
- h) największe wartości lokalnych krzywizn występowały w przypadkach, kiedy kierowcy samochodów poruszali się po trajektorii typu K,
- i) typy trajektorii I oraz N najczęściej występowały na łukach w planie, na których stosunek parametru klotoidy do promienia łuku kołowego zawarty był w granicach od 0,37 do 0,45 (odsetek kierowców samochodów poruszających się takimi typami trajektorii wynosił ponad 60%). Na łukach o stosunku parametru klotoidy do promienia łuku kołowego zawartym pomiędzy 0,79 a 0,83 odsetek kierowców wpisujący tor jazdy odpowiadający trajektorii typu I oraz N nie przekraczał 20%, natomiast na odcinkach krzywoliniowych, których elementem był tylko łuk kołowy odsetek kierowców poruszających się po trajektorii typu I oraz N nie przekraczał 30%.

W pracach [26, 57] również zasygnalizowano, że w bardzo wielu przypadkach trajektorie samochodów różnią się od torów jazdy wyznaczonych przez oś pasa ruchu.

1.4. Wygoda ruchu

Wyniki badań polskich [21, 120], jak i zagranicznych [26] dowodzą, że nie tylko stateczność pojazdu, ale również i warunki wygody ruchu mają wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu na krzywoliniowych elementach drogi w planie. Długi czas jazdy, charakteryzującej się dużymi wartościami przyspieszeń poprzecznych i ich zmian w czasie, może bowiem powodować zmęczenie kierowców, zmniejszenie ich uwagi i koncentracji, co znacznie zwiększa prawdopodobieństwo powstania zdarzenia drogowego.

Odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi w planie, w zależności od działających na nich przyspieszeń poprzecznych, przedstawiono w tabelicy 1.4, a ich przyrostów w czasie w tabelicy 1.5 [41, 120]. Znajomość wpływu tych wielkości na organizm ludzki jest bardzo ważna dla kształtowania i oceny warunków wygody ruchu.

Autor pracy [62] podał wartości przyspieszeń poprzecznych obliczone na podstawie prędkości projektowych i minimalnych wartości promieni łuków kołowych, zawartych w polskich oraz kilku wybranych zagranicznych przepisach projektowania dróg. Z obliczeń tych wynika, że przyspieszenia te nie przekraczają wartości $1,5-1,7 \text{ m/s}^2$.

Tablica 1.4. Odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi w planie, w zależności od wartości działających na nich przyspieszeń poprzecznych

Uczestnik ruchu	Przyspieszenie poprzeczne a_p [m/s ²]					
	$a_p < 0,20$	$0,20 \leq a_p < 0,45$	$0,45 \leq a_p < 0,75$	$0,75 \leq a_p < 1,25$	$1,25 \leq a_p \leq 2,20$	$a_p > 2,20$
	Ruch					
Kierowca	bez napięcia psychicznego ⁸	bez napięcia psychicznego	z niedużym napięciem psychicznym	z wyraźnym napięciem psychicznym	nieprzyjemny	bardzo nieprzyjemny
Pasażer	bez napięcia psychicznego ^a	z minimalnym lub z brakiem napięcia psychicznego ^b	ze słabym odczuciem	z wyraźnym odczuciem		

a – nie patrząc na drogę nie odróżnia ruchu po łuku od ruchu po odcinku prostym,

b – nadal nie patrząc na drogę nie odróżnia ruchu po łuku od ruchu po odcinku prostym.

Tablica 1.5. Odczucia kierowcy i pasażera związane z ruchem po krzywoliniowym odcinku drogi w planie, w zależności od wartości działających na nich przyrostów przyspieszeń poprzecznych w czasie

Przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie k_p [m/s ³]			
$k_p < 0,30$	$0,30 \leq k_p \leq 1,00$	$1,00 < k_p \leq 2,40$	$k_p > 2,40$
nieodczuwalny	znośny, ale nieprzyjemny	powodujący utrudnienie ruchu	powodujący duże utrudnienie ruchu

⁸ Napięcie psychiczne – stan silnego pobudzenia myśli i uczuć oraz gotowość do szybkiego działania występuje zwykle w sytuacjach trudnych i ważnych [Encyklopedia PWN].

Uwzględniając fakt, że w przepisach projektowania dróg wielu krajów dopuszcza się pewną różnicę pomiędzy prędkością projektową a rzeczywistą, wartości przyspieszeń poprzecznych oddziałujących na uczestników ruchu będą większe od podanych powyżej. W Polsce lub w Niemczech różnica ta może wynosić nawet 20 km/h, co wynika z kryterium tzw. zgodności ukształtowania drogi z jej funkcją w sieci. Przy $VP = 70$ km/h, wartość przyspieszenia poprzecznego, wyliczona wg polskich przepisów, mogłaby wynosić nawet $2,44$ m/s², a wg niemieckich $2,79$ m/s².

Miernikiem wygody ruchu na łukach w planie, bezpośrednio zawartym w polskich przepisach projektowania dróg [105], jest tzw. przyrost przyspieszenia dośrodkowego, którego maksymalne wartości uzależnione są od prędkości projektowej. W stosunku do tego miernika można, zdaniem autora, wysunąć dwa zastrzeżenia. Pierwsze dotyczy nazewnictwa. Użycie określenia przyrost przyspieszenia dośrodkowego jest niepoprawne, na co wskazuje jednostka tej wielkości, bowiem gdyby rzeczywiście mówić o przyroście przyspieszenia dośrodkowego, jednostką powinien być m/s², a nie m/s³. Poprawne nazwanie tej wielkości powinno brzmieć: przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie lub prędkość zmiany przyspieszenia dośrodkowego. Drugie zastrzeżenie dotyczy faktu, że warunki wygody ruchu na krzywoliniowym odcinku drogi w planie dokładniej odzwierciedla przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie niż przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie. Przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie stanowi bowiem bezpośredni bodziec, jaki odczuwa kierowca i pasażer samochodu podczas jazdy po łuku poziomym. Przyspieszenie to jest sumą składowych przyspieszenia dośrodkowego oraz ziemskiego i działa w płaszczyźnie równoległej do powierzchni jezdni.

Z przeglądu przepisów projektowania dróg wynika, że maksymalna wartość zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie nie przekracza $1,2$ m/s³ (w Polsce $0,9$ m/s³). Jednak niektóre kraje odstąpiły od stosowania, jako miernika warunków wygody ruchu, przyrostów przyspieszeń poprzecznych w czasie. W niemieckich przepisach projektowania dróg warunek dynamiki ruchu pominięto. Podstawą takiej decyzji były wyniki badań (cyt. za [21]), które wykazały, że: „...teoretyczne wartości przyrostów przyspieszeń poprzecznych $0,5$ m/s³ na większości badanych dróg zostały przekroczone o $1-2$ m/s³. Na jednej z dróg dla dużych prędkości, ale o niskich parametrach geometrycznych różnice dochodziły nawet do 3 m/s³. Wnikliwe rozważania fizjologicznych i psychologicznych przesłanek wykazały, że uogólniona ocena komfortu jazdy za pomocą przyrostów boczno przyspieszenia jest niewłaściwa”.

Badania wykonane w Kanadzie [28] wykazały, że na łukach o małych promieniach ($R = 60-80$ m) przyspieszenia poprzeczne osiągały wartości w granicach od $\sim 2,0$, aż do $4,2$ m/s² (na tej podstawie można przypuszczać, że również przyrosty przyspieszeń w czasie osiągały znaczne wartości). Jednak najbardziej interesujący jest jeden z wniosków wynikający z tych badań, mający zdaniem autora duże znaczenie praktyczne, a mianowicie: „...na łukach w planie o małych promieniach to właśnie odczuwane przez kierowców przyspieszenie poprzeczne limituje ich prędkość”. W tej publikacji zwraca się również uwagę, że standardy projektowe łuków w planie, uwzględniające odczucia kierowców związane z wygodą jazdy po krzywoliniowych odcinkach dróg, zostały ustalone przed 1940 rokiem i tylko nieznacznie zostały zmienione do chwili obecnej. Nie odzwierciedlają one zmian w projektowaniu współczesnych dróg, zmian w konstrukcji pojazdów, a przede wszystkim zmian cech psychofizycznych kierowców i pasażerów.

Większość osób jest w stanie dobrze znieść, nawet dość duże wartości przyspieszeń dośrodkowych, a granicę ludzkiej wytrzymałości stanowi wartość 14 g. Z reguły dopiero przekroczenie granicy $3,5$ g powoduje u przeciętnego człowieka najpierw znaczne

zwężenie pola widzenia, a następnie utratę możliwości rozróżniania kolorów. Projektanci tzw. kolejek górskich (roller coaster) tak je konstruują, aby wartość przyspieszenia dośrodkowego działającego na ich użytkowników nie była większa niż 4,0 g, bowiem po przekroczeniu 6,0 g u większości osób występuje krwotok z nosa.

Maksymalne wartości przyspieszenia dośrodkowego, jakie zarejestrowano podczas badań testowych na łuku o promieniu 100 m, na suchej nawierzchni wynosiły w przypadku samochodu osobowego 7,2-7,8 m/s², lekkiego pojazdu ciężarowego 4,9-5,9 m/s², ciężkiego pojazdu ciężarowego 3,4-3,9 m/s², a samochodu wyścigowego 24,5 m/s² [94].

W ostatnich latach obserwuje się jednak powrót do wykorzystania przyspieszenia poprzecznego, jako jednego z kryteriów oceny projektów drogowych ze względu na zagrożenie w ruchu drogowym. Przykładem może być propozycja zawarta w pracy [11], a opracowana przez zespół włoskich naukowców. Do oceny poszczególnych rozwiązań projektowych zaproponowano zastosowanie wskaźnika nazwanego patologicznym dyskomfortem jazdy (PD). Stanowi on sumę bezwzględnych różnic pomiędzy teoretycznymi wartościami przyspieszeń poprzecznych (wyliczonymi na podstawie projektowanej krzywizny drogi i przyjętej prędkości operacyjnej) a przyspieszeniami poprzecznymi, oddziałującymi na kierowcę znajdującego się w symulatorze jazdy, przy prędkości jazdy odpowiadającej prędkości operacyjnej.

Ogólna idea omawianej propozycji polega na założeniu, że kierowca pojazdu na „samowyjaśniającej” się drodze przemieszcza się po trajektorii pokrywającej się z osią pasa ruchu. Jeśli kierowca nie porusza się po takiej trajektorii, to taka droga nie jest drogą „samowyjaśniającą” się, a konsekwencją konieczności korygowania trajektorii przez kierowcę może być generowanie niebezpiecznych sytuacji, których skutkiem mogą być zdarzenia drogowe.

Przyspieszenia poprzeczne wyznaczane są w odstępach między sobą co 5,0 m, a następnie sumowane z odcinka drogi o długości 1,0 km, co wynika z faktu, że włoska baza danych o wypadkach drogowych zawiera zagregowane dane przy takiej długości odcinka drogi. Dotychczas uzyskano bardzo obiecujące rezultaty w zakresie korelacji wskaźnika patologicznego dyskomfortu jazdy i względnego wskaźnika wypadków, gdyż współczynnik korelacji przekraczał wartość 0,92. Postać zależności między tymi wskaźnikami jest następująca:

$$AR = -0,0006 \cdot PD^2 + 0,256 \cdot PD - 14,8 \text{ [wyp./mln poj. km]}. \quad (1.21)$$

Autorzy cytowanej pracy zaznaczają, że te wstępne, bardzo obiecujące i przekraczające ich oczekiwania, wyniki nie mogą być generalizowane i muszą podlegać dalszej weryfikacji.

1.5. Wnioski wynikające z przeglądu literatury

Przeprowadzone studia literatury przedmiotu umożliwiły sformułowanie następujących wniosków, które równocześnie wpłynęły na ukierunkowanie własnych badań:

1. Stateczność samochodu na łuku w planie jest jednym z najważniejszych kryteriów oceny poziomu bezpieczeństwa ruchu, który najczęściej opisywany jest za pomocą relacji pomiędzy dopuszczalną a maksymalną wykorzystywaną wartością współczynnika przyczepności poprzecznej.
2. Wartości maksymalnych wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej wyznaczane są z warunku stateczności samochodu na łuku w planie przy założeniach, że:

2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY

Przedstawione w podrozdziale 1.5 wnioski wynikające z przeglądu literatury stanowiły podstawę zdefiniowania celów niniejszej pracy, którymi są:

1. Określenie wpływu promienia łuku kołowego, kąta zwrotu i szerokości jezdni na prędkość jazdy przy dwóch stanach nawierzchni (sucha i mokra).
2. Wyznaczenie profili prędkości oraz określenie wpływu promienia łuku kołowego, kąta zwrotu i szerokości jezdni na charakterystyki tych profili przy dwóch stanach nawierzchni (sucha i mokra).
3. Wyznaczenie profili krzywizny trajektorii samochodów oraz określenie wpływu promienia łuku kołowego, kąta zwrotu i szerokości jezdni na charakterystyki tych profili przy dwóch stanach nawierzchni (sucha i mokra).
4. Opracowanie nowego modelu stateczności samochodu lepiej odzwierciedlającego rzeczywiste warunki ruchu od obecnie stosowanego oraz umożliwiającego wyznaczenie wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na poszczególnych kołach samochodu w zależności od jego cech technicznych.
5. Określenie wpływu: promienia łuku kołowego, kąta zwrotu, szerokości jezdni, właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni oraz cech technicznych samochodu na jego stateczność na łuku w planie.
6. Określenie wpływu: promienia łuku kołowego, kąta zwrotu i szerokości jezdni na dwa zasadnicze mierniki warunków wygody ruchu jakimi są przyspieszenia poprzeczne oraz ich zmiana w czasie.

Na podstawie wyżej wymienionych charakterystyk ruchu możliwe jest:

1. Opracowanie metody oceny warunków ruchu na łukach w planie uwzględniając:
 - ich zgodność z funkcją drogi w sieci,
 - jednorodność geometryczną drogi,
 - bezpieczeństwo ruchu drogowego,
 - wygodę ruchu,
 - oznakowanie.
2. Rozwiązanie niektórych zagadnień praktycznych związanych z geometrycznym projektowaniem łuków w planie, bazujących na rzeczywistych charakterystykach ruchu, a mianowicie:
 - wyznaczenie minimalnych wartości promieni łuków kołowych i pochylenia poprzecznego jezdni na łukach w planie,
 - wyznaczenie parametru klotoidy ze względu na dynamikę ruchu.

Zakres pracy obejmuje wyznaczenie zależności pomiędzy: prędkością jazdy, profilami prędkości, profilami krzywizny trajektorii samochodu, wykorzystywanymi współczynnikami przyczepności poprzecznej, przyspieszeniami poprzecznymi oraz ich zmianą w czasie a promieniem, kątem zwrotu oraz szerokością jezdni przy dwóch stanach nawierzchni spowodowanych warunkami pogodowymi (nawierzchnia sucha i mokra). Zależności dotyczą dwupasowych dróg dwukierunkowych, co wynika z następujących faktów:

- dwupasowe drogi dwukierunkowe stanowią w Polsce przeważającą część sieci drogowej (ponad 90%) i stąd opracowanie dla nich modeli ruchu jest zadaniem pilniejszym niż dla dwujezdniowych dróg wielopasowych,

- łatwiejsza jest adaptacja modeli ruchu dotyczących dwupasowych dróg dwukierunkowych do dwujezdniowych dróg wielopasowych niż odwrotnie, ponieważ w przypadku dróg wielopasowych mniejsza jest liczba czynników mających wpływ na warunki ruchu oraz zakres wartości poszczególnych zmiennych niezależnych,
- poziom bezpieczeństwa ruchu na drogach dwujezdniowych jest znacznie wyższy niż na jednojezdniowych.

Na podstawie przeglądu literatury oraz wstępnych, własnych wyników badań warunków ruchu na łukach w planie oraz ich analiz zawartych w pracach [57–62, 65] sformułowano następujące tezy pracy:

1. Wpływ na charakterystyki profili prędkości i profili krzywizny trajektorii samochodu na łukach w planie mają takie jakościowe cechy drogi, jak: promień, kąt zwrotu, szerokość jezdni oraz stan nawierzchni spowodowany warunkami pogodowymi (nawierzchnia sucha i mokra). Ich ilościowy opis możliwy jest za pomocą narzędzi analiz regresyjnych.
2. Profile prędkości samochodu w znacznym zakresie geometrii łuków w planie nie są stałe.
3. Profile krzywizny trajektorii samochodu na łukach w planie najczęściej nie odpowiadają profilom krzywizny osi pasów ruchu.
4. Wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na łukach w planie zależą od prędkości samochodu determinowanej cechami drogi oraz cech technicznych samochodu. Wartości tych współczynników nie są takie same na poszczególnych kołach samochodu.
5. Wpływ na wartości mierników warunków wygody ruchu na łukach w planie, tj. przyspieszeń poprzecznych oraz ich zmian w czasie mają cechy geometryczne drogi: promień, kąt zwrotu i szerokość jezdni oraz stan nawierzchni (sucha i mokra).

- a) prędkość samochodu na łuku w planie jest stała i odpowiada jednej z następujących prędkości: projektowej, miarodajnej, projektowania lub operacyjnej,
- b) samochód porusza się po krzywej, której profil krzywizny jest zgodny z projektowanym profilem krzywizny osi jezdni,
- c) wartości maksymalnych, wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na poszczególnych kołach samochodu są takie same.

Przy tych samych założeniach wyznaczane są również graniczne wartości podstawowych cech geometrycznych łuków w planie, tj. promienia łuku kołowego i pochylenia poprzecznego jezdni na łuku.

3. Ważnymi kryteriami bezpieczeństwa ruchu w geometrycznym kształtowaniu dróg są: jednorodność geometryczna drogi oraz zgodność ukształtowania drogi z jej funkcją w sieci.
4. Wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego ma nie tylko stateczność samochodu, ale również warunki wygody ruchu. Warunki te najczęściej charakteryzuje się takimi miernikami, jak przyspieszenia dośrodkowe i poprzeczne oraz ich zmiany w czasie, a ich wartości wyznaczane są przy założeniach wymienionych w punkcie 2a,b.
5. Modele ruchu powinny być opracowane przede wszystkim na podstawie badań empirycznych, ponieważ trudno, a czasami jest niemożliwe, w wyniku rozważań teoretycznych uzyskać odpowiednią zgodność modeli z rzeczywistymi warunkami ruchu, a tym samym wymagać ich dokładność.
6. W celu opracowania modeli ruchu nie należy bezpośrednio wykorzystywać zagranicznych wyników badań, przede wszystkim ze względu na odmiennosc: cech psychofizycznych kierowców, ich nawyków, przyzwyczajęń oraz charakterystyk ruchu drogowego w poszczególnych krajach.
7. Czynniki drogowymi wpływającymi na prędkość na łukach w planie są: promień łuku kołowego, długość łuku w planie, kąt zwrotu, ukształtowanie geometryczne odcinka poprzedzającego łuk, pochylenie podłużne jezdni, struktura łuku w planie (np. łuk kołowy, łuk kołowy z krzywymi przejściowymi), szerokość i stan nawierzchni spowodowany warunkami pogodowymi, właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni. Należą do nich również: szerokość i rodzaj poboczy, odległość widoczności, częstość występowania skrzyżowań oraz wjazdów i wyjazdów, przeszkody boczne i ich odległość od krawędzi jezdni, rodzaj zagospodarowania przestrzennego otoczenia drogi.
8. Najczęściej stosowanymi zmiennymi niezależnymi w modelach prędkości są: promień, szerokość jezdni, szerokość poboczy i ich rodzaj oraz cechy geometryczne odcinka poprzedzającego łuk w planie. Tylko w niewielu modelach prędkości opracowanych w krajach zachodnich stosuje się zmienną niezależną, jaką stanowi kąt zwrotu. Wynika to z faktu, że w praktyce drogowej tych krajów zakres jej zmienności jest niewielki.
9. W modelach prędkości na łukach w planie nie uwzględnia się takich cech drogi jak pochylenie poprzeczne jezdni na łuku i poszerzenie jezdni, ponieważ są one determinowane wartościami promienia łuku kołowego.
10. Ważnych przesłanek do identyfikacji czynników drogowych wpływających na warunki ruchu dostarczają również modele wyrażające zależności pomiędzy wskaźnikami wypadkowości a cechami geometrycznymi drogi. Z przeglądu literatury zamieszczonego w pracy [61] wynika, że w modelach zagrożenia w ruchu drogowym najczęściej stosowanymi zmiennymi niezależnymi są również zmienne niezależne wyszczególnione w punkcie 7.

3. REALIZACJA BADAŃ

3.1. Zakres badań

Badania ruchu obejmowały pomiary prędkości i trajektorii samochodów osobowych¹ w warunkach ruchu swobodnego, na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie położonych na dwupasowych drogach dwukierunkowych o szerokości jezdni 7,0, 6,0 i 5,5 m. Odcinki pomiarowe charakteryzowały się następującymi cechami:

- jezdnia o nawierzchni bitumicznej,
- pobocza gruntowe o szerokościach od 0,75 m do 1,50 m,
- pochylenie podłużne $-1,5\% \leq i_p \leq +1,5\%$,
- pochylenie poprzeczne i poszerzenie jezdni na łuku kołowym zgodne z przepisami projektowania dróg, a więc zależne od promienia łuku kołowego [105, 137],
- odległość przeszkód bocznych od krawędzi jezdni większa od 2,0 m,
- teren niezabudowany (administracyjny limit prędkości 90 km/h, brak lokalnych ograniczeń prędkości), łuk w planie położony w odległości co najmniej 3-4 km od dużej miejscowości,
- odległości widoczności na zatrzymanie i wyprzedzanie zgodne z przepisami projektowania dróg [105],
- stan nawierzchni na drogach o szerokości jezdni 7,0 i 6,0 m klasy B, na drogach o szerokości jezdni 5,5 m klasy C (klasy stanu nawierzchni określone na podstawie [119]),
- odcinki krzywoliniowe składały się z łuku kołowego z symetrycznymi klotoidalnymi krzywymi przejściowymi o parametrze zbliżonym do wartości 0,5·R (wartość najczęściej stosowana w praktyce drogowej, z wyjątkiem łuków o kątach zwrotu równych $\sim 10^\circ$, które charakteryzowały się parametrem klotoidy równym $\sim 0,4 \cdot R$),
- proste poprzedzające łuk w planie o długości od ~ 500 m do ~ 800 m,
- oznakowanie poziome i pionowe zgodne z przepisami zawartymi w rozporządzeniach [47, 104].

Ponadto w przypadku dróg o szerokości jezdni 5,5 m badania ruchu prowadzone były na takich z nich, na których średniodobowe w roku natężenie ruchu było większe od 1 500 pojazdów. Analizy wyników badań prędkości samochodów w warunkach ruchu swobodnego na drogach szerokości 5,5 m, realizowane w ramach prac własnych wykonanych w Katedrze Budownictwa Drogowego Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy (dawniej Akademia Techniczno-Rolnicza) wykazały, że prędkości na nich zależą nie tylko od cech geometrycznych drogi, ale również od wartości natężenia ruchu w dobie [101]. Przy małych natężeniach ruchu, mniejszych od 1 500 P/dobę, prędkości samochodów poruszających się w warunkach ruchu swobodnego na drogach o szerokości jezdni 5,5 m często osiągały wartości odpowiadające nawet prędkościom na drogach o szerokości jezdni 7,0 m. Uzyskiwanie przez kierowców tak dużych prędkości, zdaniem autorów cytowanej powyżej pracy, wynika z dwóch zasadniczych powodów. Po pierwsze, kierowcy pojazdów przy małych wartościach natężeń ruchu bardzo często traktują jezdnię jak jeden pas ruchu o szerokości 5,5 m, o czym świadczy fakt, że poru-

¹ W badaniach rejestrowano samochody osobowe przeznaczone konstrukcyjnie do przewozu nie więcej niż 5 osób łącznie z kierowcą oraz ich bagażu.

szają się środkiem jezdni. Po drugie, z reguły po tych drogach poruszają się kierowcy miejscowi, bardzo dobrze znający cechy geometryczne i techniczno-eksploatacyjne drogi, a ich udział w potoku ruchu często przekracza nawet wartość 90%.

W rozprawie niemożliwe było uwzględnienie wpływu na warunki ruchu na łukach w planie zmienności wszystkich wyżej wymienionych cech odcinków pomiarowych, co wynikało z następujących względów:

- dużej pracochłonności pomiarów obejmujących jeden łuk w planie,
- znacznych kosztów badań,
- trudności w znalezieniu poligonu badawczego umożliwiającego uzyskanie pełnej liczby kombinacji wszystkich cech geometrycznych drogi.

O skali problemu może świadczyć następujące wyliczenie. Otóż, rozpatrując na przykład 10 czynników wpływających na warunki ruchu i tylko przy trzech jego wartościach, liczba możliwych kombinacji wyniosłaby blisko sześćdziesiąt tysięcy.

Badania były prowadzone przy dwóch stanach nawierzchni, tj. suchej i mokrej (natężenie deszczu $I = 2,0-3,0$ mm/h, grubość warstwy wody na nawierzchni równa $\sim 0,5$ mm). Z obserwacji autora wynikało, że w celu jednoznacznego opisu warunków, w jakich były przeprowadzone omawiane badania, konieczne było podanie nie tylko wartości natężenia deszczu, ale i grubości warstwy wody na jezdni. Ze względu na nie zawsze sprawnie funkcjonujący powierzchniowy system odwodnienia dróg w naszym kraju, przy tych samych natężeniach deszczu mogą występować różne grubości warstwy wody na nawierzchni.

Badania wykonano w latach 1999-2005 na 61 łukach w planie, położonych na drogach województw: kujawsko-pomorskiego, pomorskiego i wielkopolskiego. Ogółem badania przeprowadzono na 21 łukach w planie na drogach o szerokości jezdni 7,0 m, na 20 łukach na drogach o szerokości jezdni 6,0 m i na 20 łukach na drogach o szerokości jezdni 5,5 m. Zakres promieni łuków kołowych wynosił od 50 m do 1000 m, a kąta zwrotu od $\sim 10^\circ$ do $\sim 90^\circ$. Na 15 łukach (po pięć, przy każdej szerokości jezdni) wykonano dodatkowo pomiary prędkości i trajektorii samochodu przy mokrym stanie nawierzchni.

Badaniom podlegały samochody poruszające się w warunkach ruchu swobodnego, tj. takie których prędkość nie zależała od innych uczestników ruchu. Na podstawie danych zawartych w pracy [21] za granicę między ruchem zależnym a niezależnym uznano luki czasowe pomiędzy pojazdami w strumieniu ruchu wynoszące minimum 7,0 s przed badanym samochodem i minimum 4,0 s za badanym samochodem. Ponadto na pasie przeciwbieżnym nie mógł znajdować się żaden pojazd. Przyjęcie takich założeń gwarantowało, że kierowca miał możliwość wyboru prędkości.

Ogółem pomiarami objęto ~ 80 tysięcy samochodów, a każda próba spełniała warunek statystycznie minimalnej liczebności przy współczynniku ufności 0,95.

3.2. Opis zastosowanej aparatury pomiarowej

Brak na rynku aparatury pomiarowej do badań profili prędkości i trajektorii pojazdów zmusił autora do podjęcia prac, zmierzających do skonstruowania takiej aparatury. Ich efektem było zbudowanie urządzenia do automatycznego, równoczesnego pomiaru danych opisujących tor pojazdu i profil jego prędkości, wykorzystującego do tego celu właściwości fal ultradźwiękowych i elektromagnetycznych. Urządzenie to nazwano UPT (ultradźwiękowy pomiar prędkości i torów pojazdów). Jego pierwsza wersja została skonstruowana w 1997 roku. Szczegółowy opis tej wersji urządzenia zawarto w pracy

[64]. W następnych latach aparatura była modernizowana i udoskonalana. Najnowsza jego wersja składa się z (fot. 3.1a):

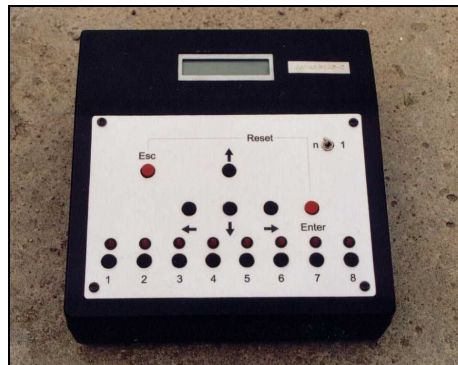
- mikroprocesorowej jednostki centralnej z pulpitem sterowniczym (fot. 3.1b),
- radarów pistoletowych (fot. 3.1c),
- przetworników ultradźwiękowych (fot. 3.1d), każdy przetwornik zawiera nadajnik i odbiornik impulsów ultradźwiękowych, które są zblokowane w jednej obudowie, w tej samej obudowie umieszczony jest odbiornik promieniowania podczerwonego (fot. 3.1e),
- nadajników promieniowania podczerwonego (fot. 3.1f),
- akcesoriów pomocniczych (statywów, kabli, akumulatorów, itp.).

Pomiar prędkości pojazdu przez urządzenie UPT może być realizowany w dwojaki sposób:

1. W jednostce centralnej rejestrowane są prędkości pojazdu pomierzone przez radary w momencie przekraczania przez badany pojazd kolejnych przekrojów pomiarowych. Zastosowane radary pistoletowe były specjalnie zmodyfikowane przez specjalistów z Zakładu Urządzeń Radiolokacyjnych ZURAD w Ostrowi Mazowieckiej, a ich zasadnicza konstrukcja oparta jest na seryjnie produkowanych radarach typu Rapid-1. Udoskonalone radary umożliwiają wykonanie ciągłego pomiaru prędkości pojazdów (próbki prędkości pojazdu co 50,0 ms). Zakres mierzonych prędkości wynosi od 15 km/h do 200 km/h, a dokładność jej pomiaru $\pm 1,0$ km/h. Ponadto w przypadku, gdy minimalna prędkość pojazdu na danym odcinku pomiarowym wystąpiłaby pomiędzy przekrojami pomiarowymi, automatycznie zostanie zarejestrowana w jednostce centralnej łącznie z odpowiadającym jej czasem bieżącym. Pomiar prędkości pojazdu z wykorzystaniem radarów stosowany był wtedy, gdy wartość kąta pomiędzy kierunkiem wektora fali elektromagnetycznej a kierunkiem wektora prędkości pojazdu nie przekraczała 10° . Ten sposób pomiaru prędkości pojazdów stosowany był do określania profili prędkości na odcinkach poprzedzających i następujących po badanym łuku w planie oraz na łukach w planie o wartościach kątów zwrotów $\leq 20^\circ$.
2. W jednostce centralnej rejestrowane są czasy przejazdu pojazdu przez odcinek drogi pomiędzy kolejnymi przetwornikami umieszczonymi w stałej, z góry określonej odległości (długość bazy pomiarowej może wynosić minimum 4,0 m, a maksimum 40,0 m). Pomiar czasu bieżącego wykonywany jest z dokładnością 0,001 s. Czasy bieżące pojawiają się pojazdu w przekroju pomiarowym rejestrowane są w momencie przerwania przez pojazd wiązki promieniowania podczerwonego pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem tego promieniowania. Elementy „bariery” podczerwieni posiadają filtry światła widzialnego oraz dodatkowo wprowadzono modulację światła. Powyższe cechy poprawiły skuteczność i dokładność działania urządzenia w trudnych warunkach pomiarowych. Na podstawie czasów bieżących pojawiania się pojazdu w poszczególnych przekrojach pomiarowych oraz długości drogi, jaką przebył on pomiędzy przekrojami pomiarowymi wyznaczana jest prędkość badanego pojazdu. Wykonana analiza błędów wykazała, że maksymalny błąd wyznaczenia w ten sposób prędkości nie przekraczał 1,0 km/h.



a) widok ogólny



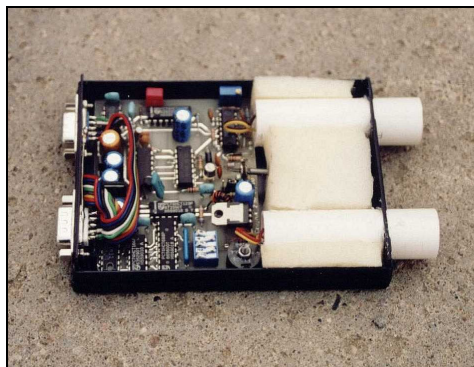
b) jednostka centralna



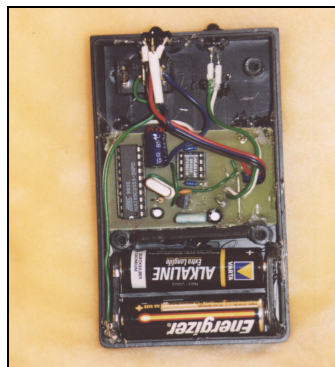
c) radar drogowy 'Rapid-1'



d) przetwornik ultradźwiękowy



e) przetwornik ultradźwiękowy z wbudowanym odbiornikiem promieniowania podczerwonego



f) nadajnik promieniowania podczerwonego

Fot. 3.1. Urządzenie UPT

Położenie pojazdu w przekroju poprzecznym drogi określane jest następująco. Przetworniki z określoną częstotliwością wysyłają impulsy fali ultradźwiękowej. W przypadku pojawienia się pojazdu w polu pomiarowym przetwornika następuje odbicie fali ultradźwiękowej od bocznej powierzchni karoserii pojazdu, a czas bieżący wysłania kolejnego impulsu i jego odbioru jest rejestrowany w jednostce centralnej. Na podstawie zarejestrowanych czasów bieżących i prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej, automatycznie wyliczana jest odległość pomiędzy punktem zerowym przetwornika a boczną powierzchnią karoserii pojazdu. Maksymalna odległość pojazdu od punktu zerowego przetwornika może wynosić 7 m.

Zgromadzone w jednostce centralnej dane można bezpośrednio z niej odczytać lub przetransmitować do komputera PC i zapisać w postaci pliku tekstowego.

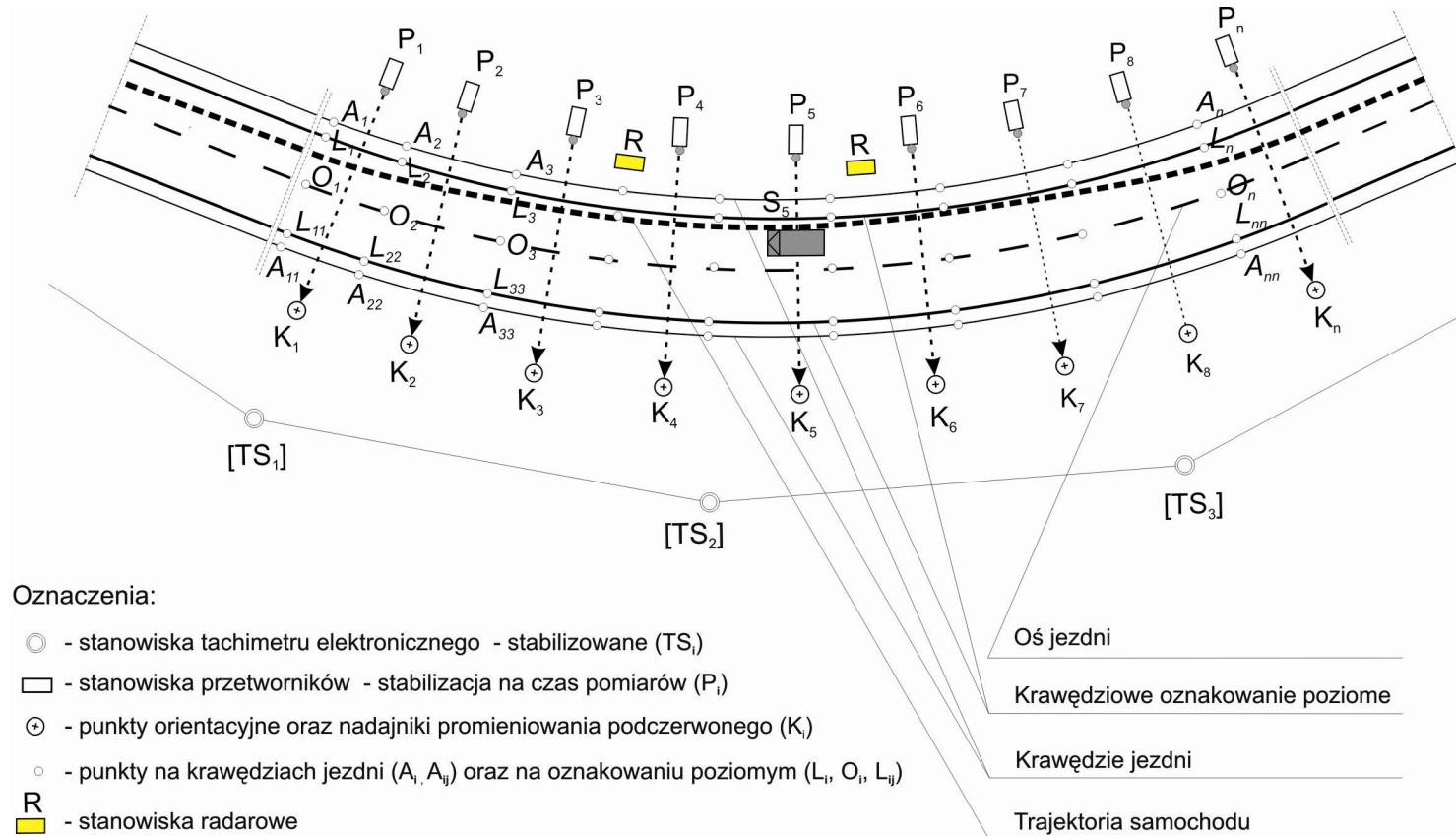
Drugą aparaturą, również specjalnie skonstruowaną na potrzeby pomiarów było urządzenie o roboczej nazwie Atrack. Jego opis, ogólne zasady działania oraz sposób wyznaczania profili prędkości i trajektorii samochodu na podstawie danych w nim zarejestrowanych zostały przedstawione w pracy [63]. Wyznaczone profile prędkości i krzywizny trajektorii samochodu za pomocą tego urządzenia służyły do oceny poprawności analogicznych profili wyznaczonych za pomocą UPT.

Urządzenia UPT oraz Atrack mogą być wykorzystywane również do innych badań warunków ruchu, a w szczególności wyznaczania charakterystyk ruchu, gdzie konieczne jest łączne analizowanie prędkości i torów pojazdów, jak na przykład:

- wpływu odległości przeszkód bocznych od krawędzi jezdni na tor i prędkość pojazdu,
- wpływu oznakowania poziomego na tory i prędkości pojazdów,
- wpływu cech odcinków zmiany pasa ruchu i odcinków zwalniania prędkości na bezpieczeństwo, wygodę i płynność ruchu,
- wykorzystywanych przez kierowców pojazdów przyspieszeń i opóźnień dla różnych kombinacji geometrycznej elementów planu i profilu podłużnego,
- przebiegu procesu omijania, wymijania i wyprzedzania.

3.3. Opis zastosowanej metody pomiarowej i jej dokładność

Przetworniki ultradźwiękowe oraz nadajniki promieniowania podczerwonego umieszczane były na cienkich prętach poza jezdnią w odległości $\sim 1,5$ m od jej krawędzi, na wysokości $\sim 0,7$ m nad jezdnią i w zależności od długości łuku w planie, w odstępach od 4,0 m do 40,0 m. Każdy z przetworników ultradźwiękowych nakierowany był za pomocą celownika na punkt orientujący, który znajdował się po drugiej stronie jezdni. Nadajnik promieniowania podczerwonego był zorientowany na odpowiadający mu odbiornik. Przetworniki ultradźwiękowe zablokowane z odbiornikiem promieniowania podczerwonego wyposażone były dodatkowo w blok umożliwiający testowanie poprawności działania „bariery” podczerwieni. Rozmieszczenie przetworników ultradźwiękowych oraz nadajników promieniowania podczerwonego na odcinku pomiarowym przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Schemat rozmieszczenia elementów urządzenia pomiarowego UPT na odcinku pomiarowym

Punkty P_1, P_2, \dots, P_n odzwierciedlały położenie punktów zerowych przetworników ultradźwiękowych, a punkty K_1, K_2, \dots, K_n przeznaczone były do orientacji urządzeń pomiarowych. W punktach tych umieszczane były również nadajniki promieniowania podczerwonego. Metodą geodezyjną wykonano pomiar współrzędnych punktów P_1, P_2, \dots, P_n oraz K_1, K_2, \dots, K_n ze stanowisk TS_1, TS_2, \dots, TS_n . Ponadto wykonano pomiar współrzędnych punktów $A_i, L_i, O_i, L_{ij}, A_{ij}$ służących do określenia cech geometrycznych badanego odcinka drogi. Określenie położenia samochodu w przekroju poprzecznym drogi polegało na pomiarze odległości d_i , tj. długości odcinka $P_i S_i$ wzdłuż kierunku $P_i K_i$. Dysponując współrzędnymi punktów P_i, K_i oraz odległością d_i można było wyznaczyć współrzędne punktów S_i . Pomiarów profili prędkości i trajektorii samochodu nie można wykonywać w oderwaniu od geometrii drogi i z tego względu optymalnym rozwiązaniem było wyznaczanie geometrii drogi oraz trajektorii samochodów w jednym układzie współrzędnych XYZ.

Teoretyczną i empiryczną analizę dokładności przedstawionej powyżej metody pomiaru współrzędnych punktów trajektorii samochodu zamieszczono w pracy [36]. Rozważano w niej wpływ na dokładność określenia współrzędnych punktów trajektorii samochodu następujących błędów:

- określenia współrzędnych punktów P i K,
- odległości pomiędzy punktami P a K oraz pomiędzy punktami P a S,
- ustawienia przetwornika wzdłuż kierunku pomiędzy punktami P a K.

Wykazano, że błędy spowodowane niedokładnością orientacji kierunku pomiarowego oraz ustawienia przetwornika są dużo mniejsze od bezwzględnej wartości błędu pomiaru odległości ($\pm 1,0$ cm) i w związku z tym można je pominąć. Wartości błędów położenia punktów trajektorii samochodu w zależności od: błędu położenia punktów P oraz K, odległości pomiędzy tymi punktami oraz odległości pomiędzy stanowiskiem pomiarowym i punktem S zamieszczono w tablicy 3.1. Wartości tych błędów wyliczono przy założeniu, że błąd pomiaru odległości za pomocą przetworników ultradźwiękowych wynosi $\pm 1,0$ cm.

Z analizy danych zawartych w tablicy 3.1 wynika, że największy wpływ na błąd położenia punktów trajektorii samochodu ma dokładność określenia położenia punktów P i K, a tylko w niewielkim stopniu odległość pomiędzy nimi oraz odległość pomiędzy stanowiskiem urządzenia pomiarowego P a wyznaczanym punktem S (różnice te są rzędu 1,0 mm).

Dokładność pomiarów zależy nie tylko od precyzji użytych narzędzi pomiarowych, lecz również szeregu właściwości środowiska, w którym prowadzone są obserwacje. Podczas pomiarów za pomocą fal ultradźwiękowych własności fizyczne i fizykochemiczne środowiska nie odpowiadają stanom równowagi, ale zmieniają się w przestrzeni i w czasie [123]. Wpływ zmian temperatury na dokładność pomiaru odległości za pomocą fal ultradźwiękowych był przedmiotem rozważań i analiz zawartych w pracy [37]. Wykazano w niej, że poprzez wprowadzenie poprawek z powodu zmian temperatury można znacznie poprawić precyzję określenia odległości pomiędzy przetwornikiem a badanym samochodem poruszającym się po drodze. Na podstawie testowych pomiarów laboratoryjnych, wyznaczono poprawki ze względu na zmiany temperatury otoczenia. Zależne są one od mierzonej odległości i odchylenia temperatury otoczenia od temperatury, w której wyskalowano przetworniki (przy temperaturze $+20^\circ\text{C}$ poprawki równe są 0,0 cm). Dla przykładu, przy $d = 3,0$ m i temperaturze powietrza $+15^\circ\text{C}$ poprawka $\Delta d = -3,0$ cm, a przy $t = +25^\circ\text{C}$ poprawka $\Delta d \approx +3,0$ cm. Ponadto te same poprawki mogą być stosowane do wszystkich przetworników, bowiem testy wykazały, że nie wy-

stępują znaczące różnice między poprawkami dla poszczególnych przetworników. Ponadto przeprowadzone przez autora teoretyczne i empiryczne analizy wykazały, że wpływ wilgotności na pomiar odległości za pomocą fal ultradźwiękowych jest nieznaczący i można go pominąć.

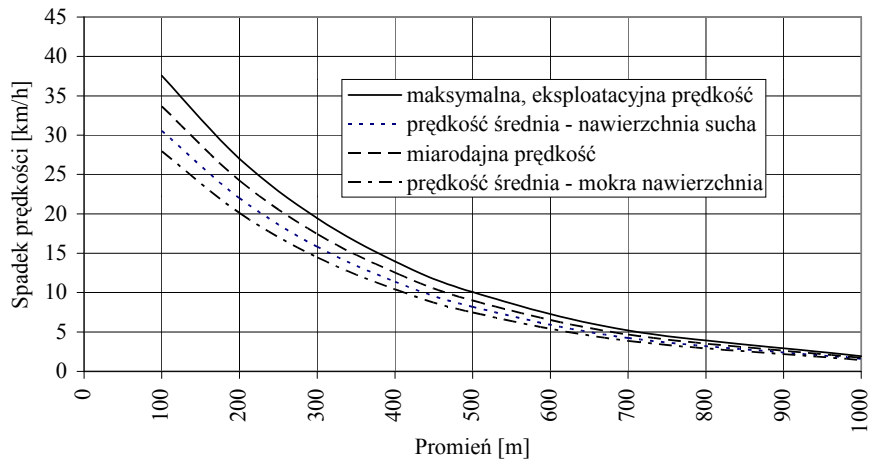
Tablica 3.1. Błędy położenia punktów trajektorii samochodu [cm]

Błędy położenia punktów P i K [cm]	Odległości pomiędzy punktami P oraz K [m]	Odległości pomiędzy punktami P i S [m]				
		2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
0,5	8,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
	10,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
	12,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	14,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1,0	8,0	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6
	10,0	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
	12,0	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
	14,0	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
1,5	8,0	1,8	1,9	2,0	2,0	2,0
	10,0	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0
	12,0	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9
	14,0	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
2,0	8,0	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6
	10,0	2,3	2,3	2,4	2,5	2,5
	12,0	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4
	14,0	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4

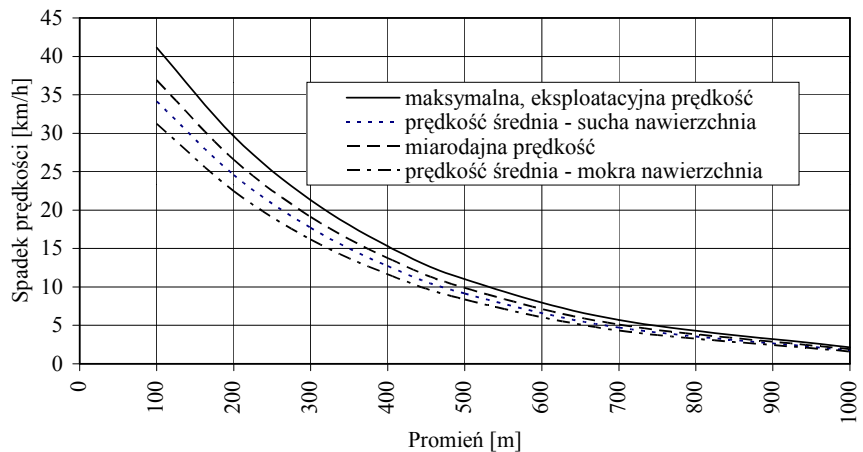
Sprawdzono również, czy obecność i sposób ustawienia przetworników wzdłuż drogi nie wpływały na prędkości samochodów. W tym celu, na kilku łukach w planie przeprowadzono porównawcze pomiary testowe. Polegały one na pomiarze prędkości samochodów (poruszających się również w warunkach ruchu swobodnego) w kilku przekrojach poprzecznych łuku w planie za pomocą radarów w sytuacji, gdy przetworniki zostały już usunięte z drogi. Wyniki testów statystycznych nie dawały podstawy do odrzucenia hipotezy (na poziomie istotności 0,05) o braku różnic między prędkościami samochodów.

Jednym z celów niniejszej pracy było wyznaczenie wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej oraz przyspieszeń poprzecznych i ich zmian w czasie. Wykonana analiza błędów, przedstawiona w pracy [61], wykazała, że maksymalny względny błąd wyznaczenia wartości współczynnika przyczepności poprzecznej nie przekraczał 4,0%, a wartości przyspieszeń poprzecznych i ich zmian w czasie 4,5%.

a)



b)



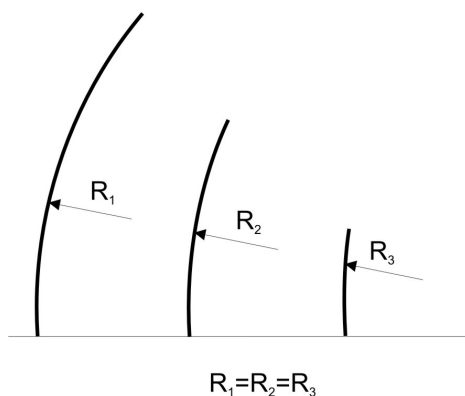
Rys. 4.4. Spadki prędkości spowodowane wzrostem wartości kąta zwrotu z 10° na 90° w zależności od promienia i szerokości jezdni, a) przy szerokości jezdni 7,0 m, b) przy szerokości jezdni 5,5 m

Z wykresów tych wynika, m. in., że zmiana kąta zwrotu z 10° na 90° na łukach o $R = 100,0$ m i $SJ = 7,0$ m powoduje spadek średniej prędkości o $30,6$ km/h na nawierzchni suchej i o $27,9$ km/h na mokrej, a maksymalnej eksploatacyjnej prędkości o $37,6$ km/h i o $33,7$ km/h prędkości miarodajnej. Ta sama zmiana kąta zwrotu również na łukach o $R = 100,0$ m, ale na drodze o szerokości jezdni 5,5 m powoduje spadek średniej prędkości o $34,1$ km/h na nawierzchni suchej i o $31,2$ km/h na mokrej, a maksymalnej eksploatacyjnej prędkości o $41,2$ km/h i o $36,9$ km/h prędkości miarodajnej. Z dalszej analizy wykresów na omawianych rysunkach wynika, że wpływ kąta zwrotu na prędkość maleje ze wzrostem promienia bez względu na szerokość jezdni i stan nawierzchni spowodowany warunkami pogodowymi. Na przykład omawiana wartość zmiany kąta zwrotu, na łukach o $R = 1000,0$ m i $SJ = 7,0$ m powoduje już niewielkie

spadki średniej prędkości, bo tylko o 1,6 km/h na nawierzchni suchej i o 1,4 km/h na mokrej, a maksymalnej eksploatacyjnej prędkości o 1,9 km/h i o 1,7 km/h prędkości miarodajnej.

Wpływ kąta zwrotu na prędkość można wyjaśnić następująco:

1. Kierowca może dobrze oceniać przebieg drogi, sytuację na niej oraz w jej otoczeniu i na tej podstawie podejmować prawidłową decyzję o wartości prędkości z jaką może przejechać przez łuk w planie, jeśli ma zapewnione odpowiednie pole widzenia określone przez kąt widzenia i odległość koncentracji wzroku. Wraz ze wzrostem prędkości kąt widzenia ulega zmniejszeniu, a odległość koncentracji wzroku zwiększeniu [4, 24]. Na łukach o dużych kątach zwrotu i małych promieniach spełnienie warunku, aby pole widzenia obejmowało wystarczająco długi odcinek drogi umożliwiającą kierowcy bezpieczną jazdę wymaga zmniejszenia prędkości. Zanik wpływu kąta zwrotu na prędkość na łukach o dużych promieniach można wytłumaczyć faktem, że kierowca ma w polu widzenia zapewnioną odległość widoczności na zatrzymanie umożliwiającą mu zachowanie prędkości jak na odcinku prostym.
2. Kierowcy pokonując krzywoliniowe odcinki dróg w planie dążą do tego, aby promień krzywizny trajektorii samochodu był jak największy. Po to, aby to osiągnąć wykonują, tzw. manewr „ścianania łuku”. Z analiz zawartych w rozdziale 6 wynika, że wraz ze wzrostem kąta zwrotu efekt tego manewru, tj. różnica pomiędzy krzywizną osi pasa ruchu a krzywizną trajektorii samochodu jest coraz mniejsza i dąży do zera. Stąd, aby nie doprowadzić do utraty stateczności samochodu oraz polepszyć warunki wygody ruchu kierowcy zmuszeni są do redukcji prędkości.
3. Wpływ zwiększenia kąta zwrotu na zmniejszenie prędkości wytłumaczyć można również, tzw. iluzyjnym charakterem spostrzeganej krzywizny łuków (cyt. za [139]). Zjawisko to, wg Tolańskiego, „...występuje przy ograniczaniu kąta środkowego łuku” – rysunek 4.5.



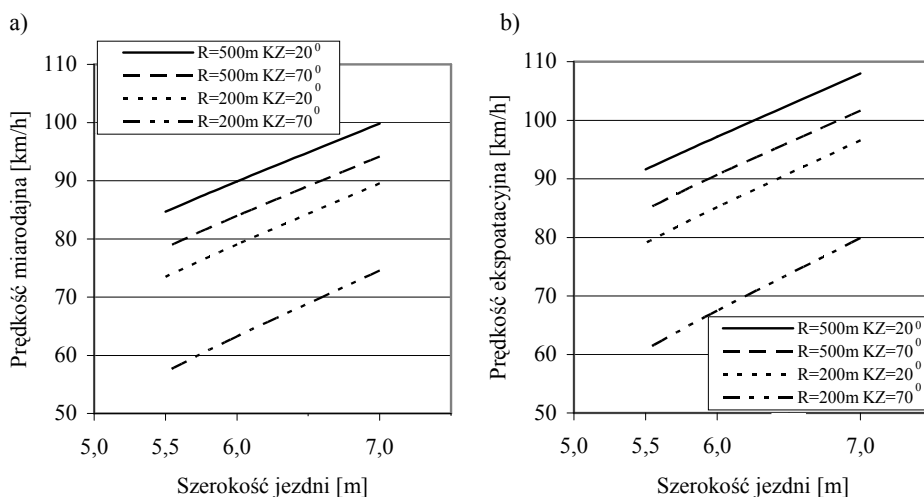
Rys. 4.5. Iluzja krzywizny łuków wg Tolańskiego

Iluzyjny charakter spostrzeganej krzywizny łuków potwierdziły również wyniki badań Virsu. Wykazał, że „...zmniejszenie kąta środkowego łuku powoduje niedocenywanie wartości krzywizny w stosunku do spostrzeganej krzywizny łuku pełnego, szczególnie przy ograniczaniu tego kąta poniżej 90°, a błąd oceny krzywizny łuku jest malejącą funkcją wykładniczą długości łuku”. W literaturze omawiane zjawisko nazwano percepcyjnym spłaszczaniem krzywizny łuku.

Interesujący wniosek, który, zdaniem autora, przyczynia się do wyjaśnienia wpływu kąta zwrotu na prędkość zawarto w pracy [139]. Na podstawie badań percepcji obrazów drogi stwierdzono, że: „...podstawowe parametry geometryczne łuku promień i kąt zwrotu odgrywają bardzo istotną rolę w procesie percepcji krzywizny łuku, przy czym najistotniejszym, dominującym parametrem warunkującym spostrzeżenie krzywizny łuku przez kierowców jest nie promień łuku, lecz kąt zwrotu, będący parametrem fizycznie niezależnym od krzywizny łuku, co potwierdza iluzyjny charakter spostrzegania krzywizny łuku”. I dalej „...można stwierdzić, na podstawie wyników przeprowadzonych badań percepcji, że dokonując oceny krzywizny, w trakcie zbliżania się do łuków, kierowcy polegają na informacjach jakie wnosi kąt, a nie tylko promień”.

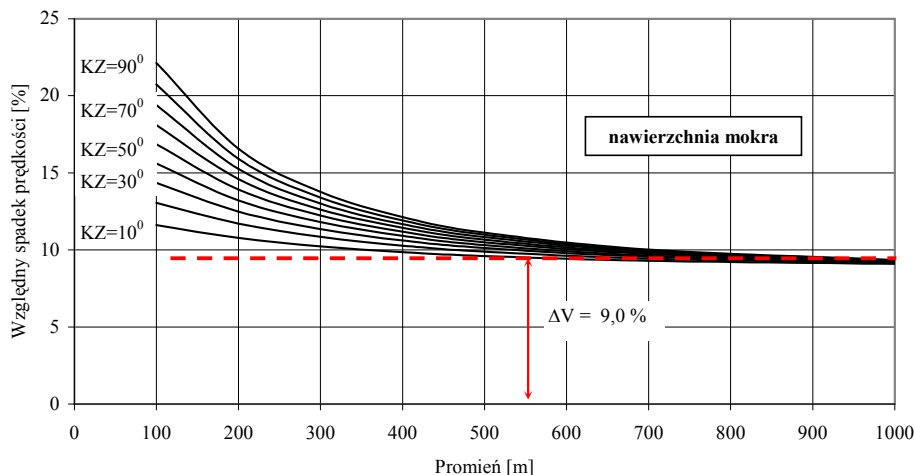
4.4. Wpływ szerokości jezdni na prędkość

Następną cechą geometryczną łuku wpływającą na prędkość, co wynika z zależności (4.1 ÷ 4.4), jest szerokość jezdni. Wraz z jej zmniejszeniem, przy stałej wartości promienia i kąta zwrotu zarówno na nawierzchni suchej oraz mokrej obserwuje się spadek prędkości. Jest on tym większy, im mniejszy jest promień oraz im większy jest kąt zwrotu (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Zależność prędkości miarodajnej i maksymalnej eksploatacyjnej od szerokości jezdni przy wybranych promieniach i kątach zwrotu: a) prędkość miarodajna, b) maksymalna eksploatacyjna prędkość

Dodatkowo, w celu zilustrowania wpływu szerokości jezdni na prędkość, na rysunku 4.7 przedstawiono wpływ zmniejszenia szerokości jezdni z 7,0 m na 6,0 m na względny spadek miarodajnej prędkości na łukach w planie w zależności od promienia i kąta zwrotu.



Rys. 4.7. Względny spadek prędkości miarodajnej spowodowany zmianą szerokości jezdni z 7,0 m na 6,0 m

Na rysunku tym linią przerywaną zaznaczono względny spadek prędkości wynikający ze zmniejszenia szerokości jezdni z 7,0 m na 6,0 m na prostych poprzedzających łuk. Wynosi on ~9%. Zatem różnica względnych spadków prędkości na danym łuku i na odcinku prostym obrazuje wynik zmniejszenia szerokości jezdni tylko na łuku. Z wykresu tego wynika, że dopiero na łukach o $R < 400,0$ m względny spadek prędkości spowodowany omawianym zmniejszeniem szerokości jezdni na łuku jest znaczny i w przypadku promieni równych 100,0 m oraz kątów zwrotu większych od 70° wynosi ponad 10%.

Mniejsze prędkości na drogach o szerokościach jezdni 6,0 m i 5,5 m, w stosunku do dróg o szerokości jezdni 7,0 m, wyjaśnić można następująco. Bezpieczna jazda z większymi prędkościami wymaga od kierowcy zachowania większej skrajni dynamicznej samochodu. W przypadku jej niezachowania ewentualny błąd kierowcy, polegający na przykład na nieodpowiednim wyborze trajektorii podczas przejazdu przez łuk, w znacznym stopniu zwiększa prawdopodobieństwo najechania kołem lub kołami samochodu na pobocze, a konsekwencją może być utrata stateczności samochodu. Na węższych jezdniach zmniejszeniu ulega również potencjalna do wykorzystania przez kierowców szerokość jezdni, przez którą rozumie się szerokość jezdni pomniejszoną o szerokość nadwozia samochodu. Wpływ tego czynnika na prędkość szczególnie widoczny jest na łukach, bowiem mniejsza szerokość możliwej do wykorzystania przez kierowców jezdni powoduje, że bezpośredni efekt „ścianienia łuku”, którym jest przede wszystkim zwiększenie wartości promienia łuku kołowego trajektorii samochodu w stosunku do promienia łuku kołowego osi pasa ruchu jest tym mniejszy, im mniejsza jest szerokość jezdni (rozdz. 6).

- zwiększenie kąta zwrotu z 15° na 30° , na łuku o $R = 500,0$ m i $SJ = 7,0$ m powoduje zmniejszenie ΔR o $\sim 160,0$ m przy VE_{\max} , a przy średniej prędkości ΔR o $\sim 130,0$ m; na łukach o kątach zwrotu większych od 45° różnice między promieniami łuków kołowych trajektorii samochodu a promieniami łuków kołowych osi pasów ruchu nie przekraczają kilkunastu metrów, a na łukach o kątach zwrotu większych od 60° już tylko kilka metrów zarówno przy jeździe z maksymalną eksploatacyjną prędkością, jak i średnią prędkością i to bez względu na szerokość jezdni,
- zwiększenie szerokości jezdni z $5,5$ m na $7,0$ m, na łuku o $R = 500,0$ m i kącie zwrotu 20° powoduje przy VE_{\max} wzrost $\Delta R = \sim 50,0$ m, a przy średniej prędkości $\Delta R = \sim 40,0$ m, analogiczne wartości ΔR w przypadku łuku o $R = 150,0$ m i tym samym kącie zwrotu wynoszą: $\sim 45,0$ m i $\sim 38,0$ m.

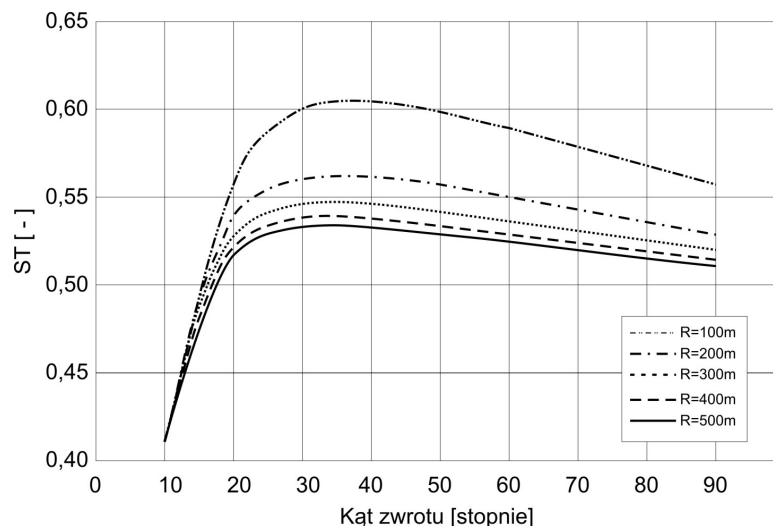
Parametr klotoidy trajektorii samochodu

Kolejną, niezbędną wielkością do jednoznacznego opisu trajektorii samochodu było wyznaczenie parametru albo długości klotoidy (co wynika z ogólnego równania klotoidy). W praktyce projektowej najczęściej używanymi wielkościami przy opisie klotoidy są jej parametr A i promień łuku kołowego. Stąd celem dalszych analiz było wyznaczenie parametru klotoidy trajektorii samochodu (AT), który zaproponowano wyrazić jako iloczyn promienia łuku kołowego trajektorii samochodu ($RT_{PZ(PW)}$) i współczynnika ST zależnego od promienia łuku kołowego osi jezdni, kąta zwrotu i szerokości jezdni:

$$AT_{PZ(PW)} = RT_{PZ(PW)} \cdot ST \quad [m] \quad (6.19)$$

Na podstawie analizy regresji opracowano zależności między ST a kątem zwrotu, przy danej wartości promienia łuku kołowego osi jezdni oraz szerokości jezdni (tabl. 6.2).

Dla przykładu, na rysunku 6.8 przedstawiono zależność między współczynnikiem ST a kątem zwrotu oraz wybranymi wartościami promienia łuku kołowego osi jezdni, przy szerokości jezdni $7,0$ m.



Rys. 6.8. Zależność między współczynnikiem ST a kątem zwrotu i wybranymi promieniami łuku kołowego osi jezdni przy szerokości jezdni $7,0$ m

Tablica 6.2. Zależności współczynnika ST od kąta zwrotu, przy danym promieniu osi jezdni i szerokości jezdni

Promień łuku kołowego osi jezdni [m]	Szerokość jezdni [m]	Postać zależności	Nr zależności
100	5,5; 6,0	$ST = (0,6126 \cdot \text{EXP}(-0,00136 \cdot KZ)) - (0,7371 \cdot \text{EXP}(-0,13594 \cdot KZ))$	(6.20)
	7,0	$ST = (0,65895 \cdot \text{EXP}(-0,00187 \cdot KZ)) - (0,67266 \cdot \text{EXP}(-0,10672 \cdot KZ))$	(6.21)
200	5,5; 6,0	$ST = (0,57678 \cdot \text{EXP}(-0,00094 \cdot KZ)) - (0,86114 \cdot \text{EXP}(-0,16933 \cdot KZ))$	(6.22)
	7,0	$ST = (0,58825 \cdot \text{EXP}(-0,00119 \cdot KZ)) - (0,8008 \cdot \text{EXP}(-0,15611 \cdot KZ))$	(6.23)
300	5,5; 6,0; 7,0	$ST = (0,56571 \cdot \text{EXP}(-0,00091 \cdot KZ)) - (0,914 \cdot \text{EXP}(-0,18159 \cdot KZ))$	(6.24)
400	5,5; 6,0; 7,0	$ST = (0,54994 \cdot \text{EXP}(-0,00073 \cdot KZ)) - (1,09611 \cdot \text{EXP}(-0,20906 \cdot KZ))$	(6.25)
500	5,5; 6,0; 7,0	$ST = (0,54048 \cdot \text{EXP}(-0,00062 \cdot KZ)) - (1,28714 \cdot \text{EXP}(-0,23116 \cdot KZ))$	(6.26)
700	5,5; 6,0; 7,0	$ST = (0,53155 \cdot \text{EXP}(-0,00051 \cdot KZ)) - (1,59362 \cdot \text{EXP}(-0,2582 \cdot KZ))$	(6.27)

Wartości współczynników korelacji wynosiły od 0,87 do 0,93, a S_E nie przekraczał ~0,03.

Z analizy danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że wartość współczynnika ST, w zakresie $KZ > 20^\circ$ jest większa od 0,5. Wartością tą charakteryzowały się łuki, na których prowadzone były badania (podrozdz. 3.1). Wynika stąd, że efektem „ściśnięcia łuku” jest nie tylko zwiększenie promienia łuku kołowego trajektorii samochodu, co ma bezpośredni wpływ na warunki stateczności samochodu (mniejsze wartości wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej), ale również zwiększenie długości klotoidy trajektorii samochodu, co z kolei ma wpływ na warunki wygody jazdy (zmniejszenie zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie).

Inne cechy trajektorii samochodu

Dysponując wartościami parametru klotoidy i promienia łuku kołowego trajektorii samochodu można wyznaczyć wartości pozostałych cech geometrycznych trajektorii samochodu, a więc:

- długość klotoidy trajektorii samochodu

$$LPT_{PZ(PW)} = ST^2 \cdot RT_{PZ(PW)} \text{ [m]} \quad (6.28)$$

- długość łuku kołowego trajektorii samochodu $LKT_{PZ(PW)}$

$$LKT_{PZ(PW)} = \alpha_{TPZ(PW)} \cdot RT_{PZ(PW)} \text{ [m]} \quad (6.29)$$

gdzie:

$\alpha_{TPZ(PW)}$ – kąt środkowy łuku kołowego trajektorii samochodu [rd],

$$\alpha_{TPZ(PW)} = KZ \cdot (\pi/180^\circ) - \frac{LPT_{PZ(PW)}}{RT_{PZ(PW)}} = KZ \cdot (\pi/180^\circ) - ST^2 \text{ [rd]} \quad (6.30)$$

Ze względu na poziom bezpieczeństwa i warunki wygody ruchu istotne jest zwiększenie długości klotoidy trajektorii samochodu w stosunku do długości klotoidy osi pasa ruchu. Różnicę pomiędzy omawianymi długościami klotoid wyraża wzór:

$$\begin{aligned} \Delta LP_{PZ(PW)} &= LPT_{PZ(PW)} - LP_{PZ(PW)} = \\ &= ST^2 \cdot (R_{PZ(PW)} + \Delta R_{PZ(PW)}) - S^2 \cdot R_{PZ(PW)} \text{ [m]} \end{aligned} \quad (6.31)$$

gdzie:

$$S = \frac{A_{PZ(PW)}}{R_{PZ(PW)}} \text{ [-]} \quad (6.32)$$

gdzie:

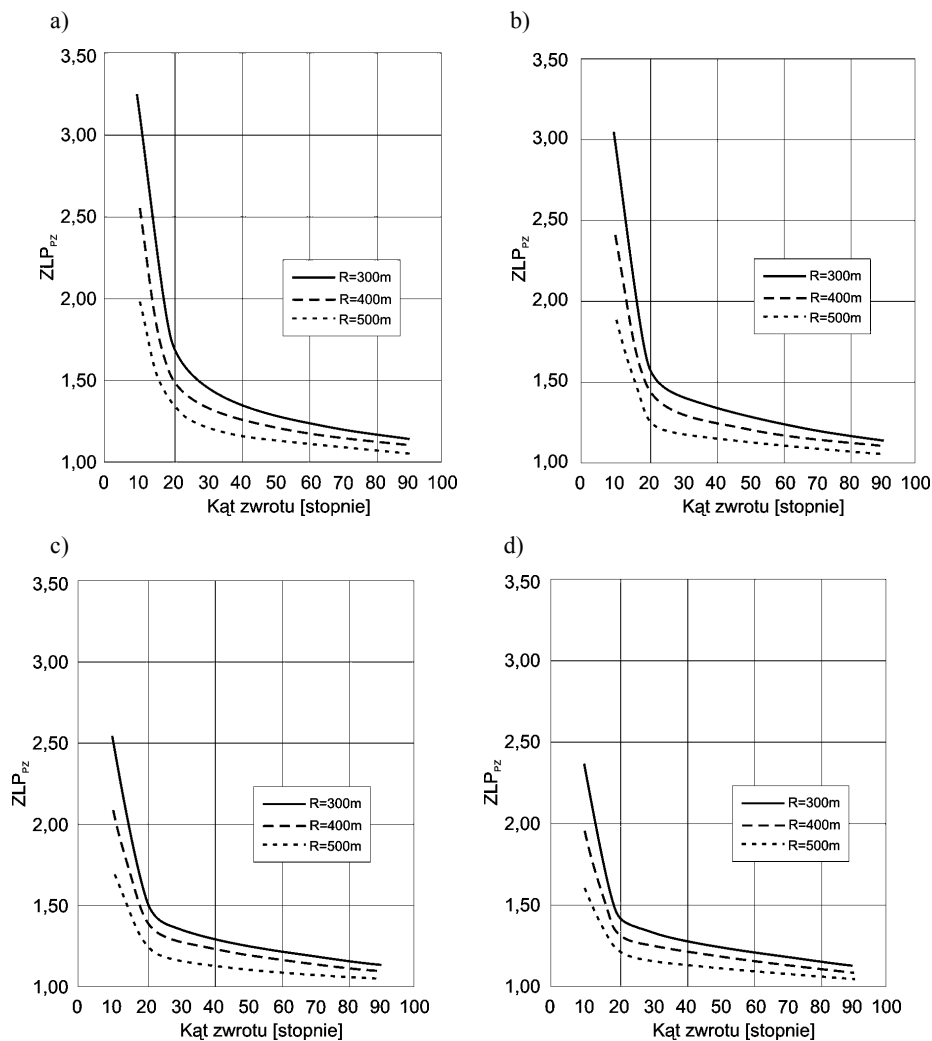
A_{PZ} – parametr klotoidy osi zewnętrznego pasa ruchu [m],

A_{PW} – parametr klotoidy osi wewnętrznego pasa ruchu [m],

Stosunek długości klotoidy trajektorii samochodu do długości klotoidy osi pasa ruchu wyznaczyć można z równania:

$$ZLP_{PZ(PW)} = \frac{LPT_{PZ(PW)}}{LP_{PZ(PW)}} = \frac{ST^2 \cdot RT_{PZ(PW)}}{S^2 \cdot R_{PZ(PW)}} \text{ [-]} \quad (6.33)$$

Wpływ cech geometrycznych łuków i prędkości na długości kłotoid trajektorii samochodu można wytłumaczyć w ten sam sposób, jak w przypadku promienia łuku kołowego trajektorii samochodu. Im mniejszym kątem zwrotu i promieniem osi pasa ruchu oraz im większą szerokością jezdni charakteryzuje się łuk w planie, i im z wyższą prędkością porusza się kierowca samochodu, tym efekt „ścianania łuku” w postaci zwiększenia ilorazu $ZLP_{PZ(PW)}$ będzie większy. Świadczą o tym wykresy zamieszczone na rysunku 6.9. Ilustrują one, dla przykładu, wartości stosunku $ZLP_{PZ(PW)}$ w zależności od kąta zwrotu, szerokości jezdni, rodzaju pasa ruchu oraz wybranych promieni łuków kołowych osi jezdni w przypadku, gdy kierowca samochodu porusza się z prędkością miarodajną.



Rys. 6.9. Wartości stosunku $ZLP_{PZ(PW)}$ w zależności od kąta zwrotu, szerokości jezdni i wybranych promieni łuków kołowych osi jezdni przy prędkości miarodajnej: a) zewnętrzny pas ruchu, $SJ = 7,0 m$; b) wewnętrzny pas ruchu, $SJ = 7,0 m$; c) zewnętrzny pas ruchu, $SJ = 6,0 m$; d) wewnętrzny pas ruchu, $SJ = 6,0 m$

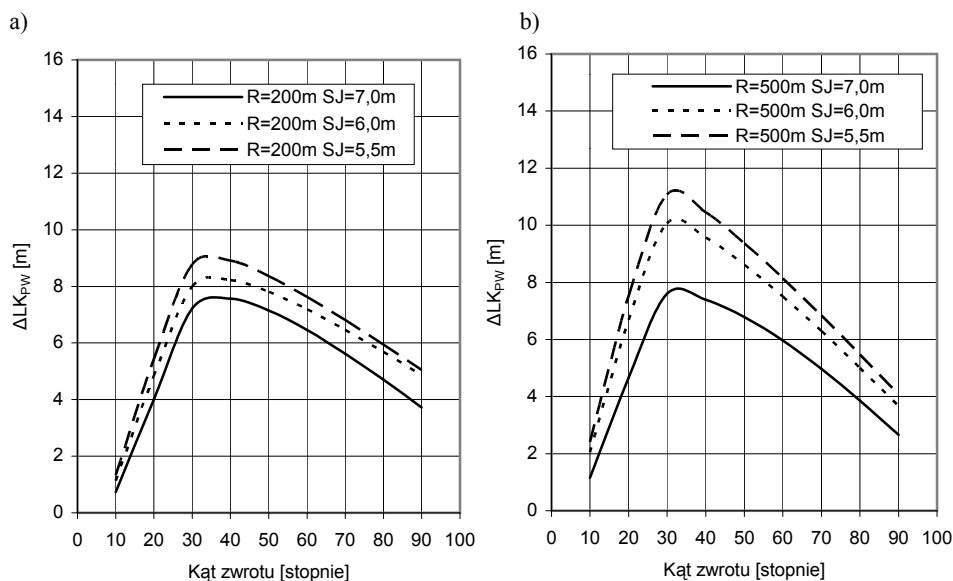
Kolejnym rezultatem wykonania przez kierowców manewru „ścinania łuku” jest zmniejszenie długości łuku kołowego trajektorii samochodu w stosunku do długości łuku kołowego osi pasa ruchu. Różnice pomiędzy omawianymi długościami łuków wyraża wzór:

$$\begin{aligned} \Delta LK_{PZ(PW)} &= LK_{PZ(PW)} - LKT_{PZ(PW)} = \\ &= LPT_{PZ(PW)} - LP_{PZ(PW)} - KZ \cdot (\pi/180^\circ) \cdot \Delta R_{PZ(PW)} \quad [m] \end{aligned} \quad (6.34)$$

Stosunek długości łuku kołowego trajektorii samochodu do długości łuku kołowego osi pasa ruchu wyznaczyć można ze wzoru:

$$ZLK_{PZ(PW)} = \frac{LKT_{PZ(PW)}}{LK_{PZ(PW)}} = \frac{RT_{PZ(PW)} \cdot (KZ \cdot \pi/180^\circ - ST^2)}{R_{PZ(PW)} \cdot (KZ \cdot \pi/180^\circ - S^2)} \quad [-] \quad (6.35)$$

Analizy wyników badań świadczą, że o ile na łukach o małych kątach zwrotu zwiększenie długości kłotoid trajektorii samochodu w stosunku do długości kłotoid osi pasa ruchu jest znaczące, o tyle skrócenie długości łuku kołowego trajektorii samochodu w stosunku do długości łuku kołowego osi pasa ruchu jest już niewielkie. Potwierdzeniem mogą być zamieszczone na rysunku 6.10 wykresy ΔLK_{PW} w zależności od kąta zwrotu, szerokości jezdni i wybranych wartości promieni, wyznaczone ze wzoru (6.34), jakie uzyskują kierowcy samochodów poruszający się z prędkością odpowiadającą kwantylowi 85%, po wewnętrznym pasie ruchu, przy mokrym lub suchym stanie nawierzchni.



Rys. 6.10. Zależność różnic ΔLK_{PW} od kąta zwrotu, szerokości jezdni, wybranych wartości promieni oraz prędkości jazdy: a) przy prędkości miarodajnej, b) przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości

Maksymalne różnice między omawianymi długościami łuków kołowych występują na łukach w planie o kątach zwrotu zawartych w granicach od $\sim 30^\circ$ do $\sim 40^\circ$, bez względu na wartość promienia, stan nawierzchni, szerokość jezdni i rodzaj pasa ruchu, co wyjaśnić można następująco. Połączenie przecinających się prostych, pod kątem KZ, odcinkiem krzywoliniowym składającym się z dwóch symetrycznych odcinków kłotoidy i łuku kołowego między nimi jest tylko wtedy możliwe, gdy spełniona zostanie następująca równość:

$$KZ = 2 \cdot \tau_{TPZ(PW)} + \alpha_{TPZ(PW)} \text{ [stopnie]} \quad (6.36)$$

gdzie:

$\tau_{TPZ(PW)}$ – kąt pomiędzy stycznymi kłotoidy trajektorii samochodu [stopnie]

$$\tau_{TPZ(PW)} = \frac{LPT_{PZ(PW)}}{2 \cdot RT_{PZ(PW)}} \cdot 180^\circ / \pi = \frac{AT_{PZ(PW)}^2}{RT_{PZ(PW)}^2} \cdot 90^\circ / \pi = ST^2 \cdot 90^\circ / \pi \quad (6.37)$$

W związku z tym, że wielkość ST osiąga maksymalną wartość w zakresie kątów zwrotu wynoszących od $\sim 30^\circ$ do $\sim 35^\circ$ (rys. 6.8), to kąt $\tau_{TPZ(PW)}$ wobec zależności (6.37) osiąga również wartość maksymalną, a kąt $\alpha_{TPZ(PW)}$ minimalną (6.36). Stąd największe różnice pomiędzy omawianymi długościami łuków kołowych muszą również wystąpić w tym zakresie kątów zwrotu.

7. WPŁYW CECH GEOMETRYCZNYCH KRZYWOLINIOWYCH ODCINKÓW DRÓG W PLANIE NA STATECZNOŚĆ SAMOCHODU

Stateczność samochodu jest jednym z najważniejszych kryteriów wyznaczania poziomu bezpieczeństwa ruchu w kształtowaniu geometrycznym krzywoliniowych odcinków drogi w planie. Statecznością samochodu podczas ruchu nazywa się zdolność do zachowania nadanego mu przez kierowcę kierunku ruchu [132]. Należy zaznaczyć, że pomimo wyposażania obecnie produkowanych samochodów w coraz doskonalsze elektroniczne urządzenia wspomagające pracę kierowcy, zwłaszcza w układy stabilizacji toru jazdy (ESP – Electronic Stability Program), to zagadnienie stateczności samochodu na łuku w planie z punktu widzenia i projektanta i zarządzającego drogą jest nadal bardzo ważne. Wynika to z faktu, że „...układ stabilizacji toru jazdy jest systemem wspomaganiania kierowcy, samoczynnie korygującym tor ruchu pojazdu w sytuacjach krytycznych. Korygujące oddziaływanie systemu ma na celu utrzymanie zgodności toru jazdy zadanego przez kierowcę z rzeczywistym torem ruchu pojazdu” [102]. Najpierw zatem musi nastąpić stwierdzenie sytuacji krytycznej, czyli rozbieżności pomiędzy zamiarem kierowcy a rzeczywistym torem ruchu pojazdu, aby zostały uruchomione określone działania zaprogramowane w układzie stabilizacji samochodu. Niedopuszczanie do powstawania sytuacji krytycznych wymaga znajomości wpływu cech geometrii drogi oraz cech samochodu na jego stateczność na łuku w planie, co stanowi cel analiz i rozważań zawartych w tym rozdziale.

Miarami stateczności samochodu na łuku w planie mogą być: różnica między współczynnikiem dopuszczalnej i wykorzystywanej przez kierowców przyczepności poprzecznej (f_r), stosunek wykorzystywanego do dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej lub maksymalna prędkość nie powodująca, w danych warunkach ruchu, poślizgu samochodu. Najczęściej w praktyce drogowej stosowana jest wielkość f_r , której wartości podano w tabelicy 1.1. Niektóre kraje wprowadziły własne wartości f_r , na podstawie których wyznacza się poziom bezpieczeństwa ruchu, co dla przykładu ilustrują dane zawarte w tabelicy 7.1 [81].

Tabela 7.1. Poziomy bezpieczeństwa ruchu drogowego w zależności od wartości f_r w wybranych krajach

Kraj	Poziom bezpieczeństwa ruchu		
	dobry	dopuszczalny	niedopuszczalny
RFN	$f_r \geq 0$	$-0,045 \leq f_r < 0$	$f_r < -0,045$
USA	$f_r \geq 0,015$	$-0,03 \leq f_r < 0,015$	$f_r < -0,03$
Grecja	$f_r \geq 0$	$-0,04 \leq f_r < 0$	$f_r < -0,04$

Wyjaśnienia wymaga zastosowana w niniejszej pracy terminologia. W literaturze przedmiotu dość często używa się zamiennie terminów współczynnik przyczepności i współczynnik tarcia. Wydaje się, że bardzo trafnie rozróżnienie omawianych terminów

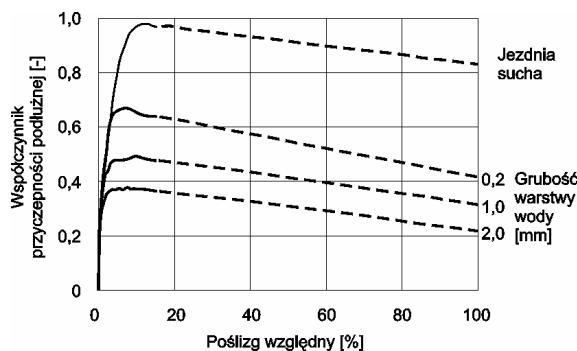
zostało wyjaśnione w pracy [23]: „Pojęcie siły tarcia i współczynnika tarcia są pojęciami fizycznymi, a fizycy badając jakiegokolwiek zjawisko starają się je idealizować, eliminując wszelkie czynniki poboczne, które wywierają wpływ na przebieg „czystego” zjawiska. W badaniach technicznych natomiast rozważamy zjawiska złożone w takich warunkach, w jakich przebiegają w rzeczywistości pod wpływem wszelkich okoliczności towarzyszących i jak je możemy zmierzyć i ustalić.” I dalej „Siłę przyczepności będziemy mierzyć w rzeczywistych warunkach toczenia się koła po nawierzchni drogi, biorąc pod uwagę nie tylko wchodzące w kontakt ze sobą materiały, ale również chwilowy stan nawierzchni, jej kształt oraz kształt rzeźby bieżnika na oponie. Tak zmierzona siła przyczepności będzie się różniła co do swojej wartości od siły tarcia zmierzonej na próbkach tych samych materiałów w laboratorium.”

Przy opisywaniu zjawisk zachodzących na styku opony z nawierzchnią konieczne trzeba uwzględnić specyficzne właściwości gumy, to jest sprężystość oraz wrażliwość na zmianę temperatury [135]. Wartość współczynnika przyczepności opony do nawierzchni jest bowiem wynikiem superpozycji składowej pochodzącej od adhezji i histerezy opony.

W opracowaniach z zakresu inżynierii ruchu najczęściej stosuje się termin siła przyczepności oraz współczynnik przyczepności i dlatego w niniejszej pracy również będzie stosowane to nazewnictwo.

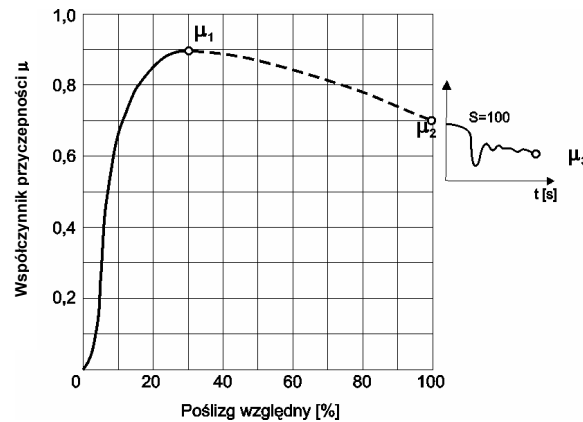
Wartość współczynnika przyczepności zależy od licznych czynników [8, 49, 74, 75, 78, 90], między innymi od:

- rodzaju nawierzchni, cech materiałów użytych do budowy nawierzchni, okresu eksploatacji nawierzchni,
- tekstury powierzchni nawierzchni i jej stanu spowodowanego warunkami pogodowymi (sucha, wilgotna, mokra, oblodzona) – rysunek 7.1,
- prędkości pojazdu i sposobu jazdy,
- poślizgu i obciążenia kół pojazdu,
- opony: typu, szerokości, struktury gumy, rodzaju bieżnika i jego głębokości, ciśnienia powietrza w oponie,
- temperatury powietrza i nawierzchni.



Rys. 7.1. Zależność współczynnika przyczepności od poślizgu względnego koła i stanu nawierzchni spowodowanego warunkami pogodowymi [16]

Na typowej krzywej przedstawiającej zależność współczynnika przyczepności od poślizgu względnego, z jakim toczy się koło pojazdu można wyodrębnić pewne punkty charakterystyczne – rysunek 7.2.



Rys. 7.2. Charakterystyczne wielkości współczynnika przyczepności (na podstawie [23])

Wielkość μ_1 nazywana jest współczynnikiem przyczepności przylgowej i jest to największa wartość współczynnika przyczepności w danych warunkach ruchu [23]. Z kolei μ_2 jest to wartość, jaką osiąga współczynnik przyczepności, gdy ustaje ruch potoczysty i koło posuwa się ze 100% poślizgiem. Wielkość ta nazywana jest współczynnikiem przyczepności poślizgowej i od niej uzależnia się wartość współczynnika przyczepności poprzecznej, której znajomość jest niezbędna w analizach stateczności pojazdu na łuku w planie. Wielkość μ_3 jest to krytyczna wartość współczynnika przyczepności, występująca po kilku sekundach trwania ruchu koła z poślizgiem 100%.

W zależności od kierunku działania siły przyczepności rozróżnia się współczynnik przyczepności podłużnej f_T , który wykorzystywany jest przy jeździe i hamowaniu oraz współczynnik przyczepności poprzecznej f_R , który przeciwdziała przesunięciu bocznemu pojazdu, zwłaszcza na łuku w planie.

W obowiązujących w Polsce przepisach projektowania dróg używa się terminu miarodajny współczynnik tarcia. Odpowiada on współczynnikowi przyczepności poślizgowej. Przepisy te podają wartości tego współczynnika wymagane po dwóch miesiącach od oddania drogi do użytkowania i zależą one od klasy drogi, elementu nawierzchni oraz prędkości. Wartość miarodajnego współczynnika tarcia oblicza się ze zbioru wyników pomiaru z jednokilometrowego odcinka drogi, jako różnicę wartości średniej (E) i odchylenia standardowego (D), co w przypadku rozkładu normalnego odpowiada wartości kwantyla rzędu 15,9%. Do czerwca 2004 roku był on inaczej definiowany, tj. jako $E - 0,6 D$, co odpowiada wartości kwantyla 27,4%. Zmiana definicji oznacza, że wymogi odbioru nawierzchni uległy zaostrzeniu. Jednak ocenie podlegają tylko nawierzchnie dróg klasy G i wyższych.

W Polsce pomiar współczynnika przyczepności podłużnej wykonuje się zestawem SRT skonstruowanym w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów, przy współpracy z Politechniką Warszawską [51, 118]. Obecnie produkowana i stosowana jest już trzecia generacja tego zestawu (SRT-3). Pomiaru dokonuje się przy prędkości 60 km/h i 100% poślizgu koła na nawierzchni mokrej (nawierzchnia zwilżona wodą w ilości 0,5 l/m²).

Do roku 1995 w zestawie SRT-3 stosowana była opona bieżnikowana (OBI), w latach 1996-1999 opona gładka rowkowana (OGR), 2000-2003 opona Barum Brawura (BBa), a od 2004 roku Barum Bravuris (BBs). Stąd, aby móc porównywać wartości współczynników przyczepności podłużnej pochodzące z różnych lat niezbędna jest

znajomość odpowiednich współczynników przeliczeniowych zależnych od zastosowanego w pomiarach typu opony. Zależności pomiędzy współczynnikami przyczepności podłużnej od typu opony są następujące [91, 122]:

$$f_{T(OGR)} = 1,372 f_{T(OBI)} \quad (7.1)$$

$$f_{T(BBa)} = 1,480 f_{T(OBI)} \quad (7.2)$$

$$f_{T(BBa)} = 1,086 f_{T(OGR)} \quad (7.3)$$

$$f_{T(BBs)} = 1,007 f_{T(BBa)} \quad (7.4)$$

W celu porównania wartości współczynników przyczepności podłużnej wyznaczonymi w Polsce, z analogicznymi wartościami w innych krajach, niezbędna jest z kolei znajomość współczynnika przeliczeniowego dla tzw. opony wzorcowej. Jest nią, zgodnie z wymogami PIARC, opona gładka z obwodowymi rowkami firmy Vredenstein (Holandia) o wymiarach 165 R 15. Zależność między współczynnikiem przyczepności podłużnej dla opony wzorcowej a oponą Barum Brawura określa wzór [119]:

$$f_{T(PIARC)} = 0,897 f_{T(BBa)} \quad (7.5)$$

W Polsce, od 1989 roku, prowadzi się systematyczną ocenę właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni opierając się na kryteriach zawartych w wytycznych Systemu Oceny Stanu Nawierzchni (SOSN), których najnowsza edycja pochodzi z 2002 roku [119]. Wprowadzono klasyfikację stanu nawierzchni dróg pod względem ich właściwości przeciwpoślizgowych – tablica 7.2.

Tablica 7.2. Klasyfikacja stanu nawierzchni dróg krajowych klasy: A, S, GP oraz G pod względem właściwości przeciwpoślizgowych (opona Barum Brawura)

Klasa nawierzchni	Stan nawierzchni	Wartość współczynnika przyczepności podłużnej
A	dobry – remont niewymagany	$f_T \geq 0,52$ (0,47)*
B	zadawalający – remont niewymagany	$f_T = 0,37 \div 0,51$ (0,33 ÷ 0,46)
C	stan niezadawalający – remont wymagany	$f_T = 0,30 \div 0,36$ (0,27 ÷ 0,32)
D	zły – remont wymagany natychmiastowy	$f_T < 0,29$ (0,26)

* w nawiasach podano wartości f_T dla wzorcowej opony PIARC

Wykonanie wielu analiz oceny warunków ruchu, w tym stateczności pojazdu na łuku w planie, wymaga znajomości zależności współczynnika przyczepności podłużnej od prędkości. Dlatego na podstawie danych zawartych w pracach [105, 119] autor, za pomocą analizy regresji, opracował takie zależności (tabl. 7.3)

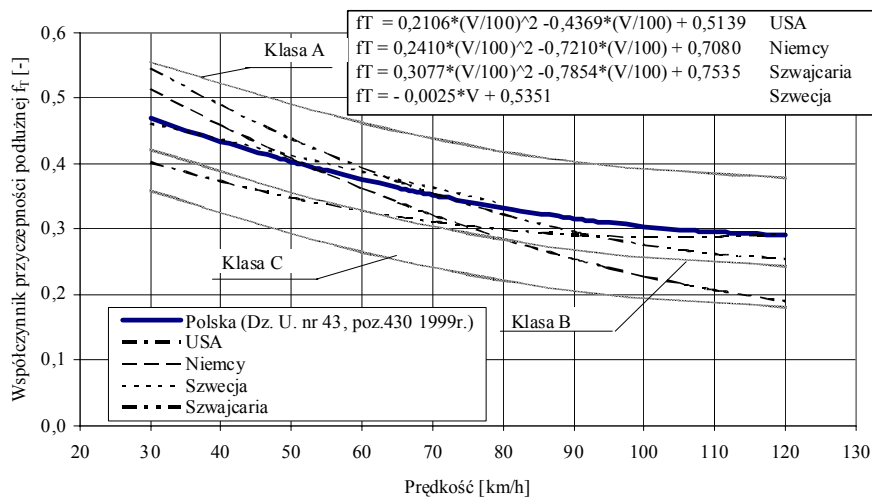
Tablica 7.3. Zależności współczynnika przyczepności podłużnej od prędkości

Postać zależności	Źródło danych	Nr zależności	
$f_{T(OGR)} = 0,1944*(V/100)^2 - 0,4950*(V/100) + 0,6125$	Dz. U. nr 43 1999 r. poz. 430 [105] (2 m-ce po oddaniu nawierzchni do eksploatacji)	(7.6)	
$f_{T(BB)} = 0,2112*(V/100)^2 - 0,5376*(V/100) + 0,6652$		(7.7)	
$f_{T(PIARC)} = 0,1894*(V/100)^2 - 0,4821*(V/100) + 0,5966$		(7.8)	
$f_{TA(PIARC)} = 0,1894*(V/100)^2 - 0,4821*(V/100) + 0,6831$	klasa A	SOSN	(7.9)
$f_{TB(PIARC)} = 0,1894*(V/100)^2 - 0,4821*(V/100) + 0,5486$	klasa B		(7.10)
$f_{TC(PIARC)} = 0,1894*(V/100)^2 - 0,4821*(V/100) + 0,4858$	klasa C		(7.11)

gdzie: V – prędkość [km/h].

Przy wyznaczaniu tych zależności dla danych wg SOSN przyjęto, że przebieg zmienności wyznaczanych zależności będzie taki sam jak zależności wyznaczonej na podstawie danych zamieszczonych w przepisach projektowania dróg [105], a zmianie ulegnie tylko ich poziom.

Na rysunku 7.3 przedstawiono wykresy zależności (7.8-7.11) oraz zależności przyjęte w przepisach projektowania dróg wybranych krajów [81].



Rys. 7.3. Zależności między f_T a prędkością wg przepisów projektowania dróg wybranych krajów oraz SOSN (wartości f_T przeliczono dla wzorcowej opony PIARC)

Z analizy danych przedstawionych na tym rysunku wynika, że w polskich przepisach projektowania dróg wartości f_T w zakresie prędkości od 30 km/h do 80 km/h najbardziej zbliżone są do wartości przyjętych w Szwecji. W pozostałym zakresie prędkości największe wartości f_T przyjęto w Polsce, ale trzeba zaznaczyć, że tymi wartościami muszą charakteryzować się nowe nawierzchnie (dwa miesiące po oddaniu ich do eksploatacji).

7.1. Dopuszczalna wartość współczynnika przyczepności poprzecznej

Dopuszczalną wartość współczynnika przyczepności poprzecznej, we wszystkich znanych autorowi przepisach projektowania dróg różnych krajów, przyjmuje się ze wzoru:

$$f_{RD} = 0,925 \cdot n \cdot f_{TD} \quad (7.12)$$

gdzie:

- 0,925 – współczynnik uwzględniający zmniejszenie przyczepności w kierunku poprzecznym w stosunku do przyczepności w kierunku podłużnym, wynikające z ukształtowania bieżnika opony pojazdu,
- n – współczynnik określający dopuszczoną do wykorzystania w kierunku prostopadłym do kierunku jazdy część przyczepności podłużnej,
- f_{TD} – dopuszczalna wartość współczynnika przyczepności podłużnej.

Celem zastosowania współczynnika n we wzorze (7.12) jest konieczność zachowania marginesu bezpieczeństwa ruchu na łuku w planie, niezbędnego w przypadku ewentualnego hamowania pojazdu (spowodowanego przez np. niespodziewaną przeszkodę na jezdni) lub w przypadku odstępstwa wartości charakterystyk przeciwpoślizgowych nawierzchni od projektowych. Zachowanie stateczności samochodu na łuku w planie przy danym stanie nawierzchni, ze względu na jej właściwości przeciwpoślizgowe, wymaga spełnienia warunku zapisanego następującym wzorem:

$$\left(\frac{f_{RW}}{f_R}\right)^2 + \left(\frac{f_{TW}}{f_T}\right)^2 = 1 \quad (7.13)$$

gdzie:

- f_{RW} – wykorzystywany współczynnik przyczepności poprzecznej,
- f_R – współczynnik przyczepności poprzecznej,
- f_{TW} – wykorzystywany współczynnik przyczepności podłużnej,
- f_T – współczynnik przyczepności podłużnej.

- Z analizy wzoru (7.13) wynika, że utrata stateczności samochodu może nastąpić, gdy:
- wartość wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej przekroczy wartość współczynnika przyczepności poprzecznej na nawierzchni o danym stanie,
 - kierowca wykona manewr hamowania pojazdu przy takiej wartości współczynnika przyczepności podłużnej, że pozostająca do wykorzystania wartość współczynnika przyczepności poprzecznej będzie niewystarczająca, aby można było zrównoważyć skutki siły poprzecznej oddziałującej na pojazd.

Ze wzoru (7.13) również wynika, że jeśli $n = 0,5$, to do wykorzystania pozostanie jeszcze $\sim 87\%$, a przy $n = 0,1$ ponad 99% wartości współczynnika przyczepności podłużnej. Przy zwiększającym się stopniu wykorzystania współczynnika przyczepności poprzecznej od 0% do 60% możliwość wykorzystania współczynnika przyczepności podłużnej maleje od 0% do 20% , ale po przekroczeniu 60% szybko spada dążąc do 0% . W Polsce przyjęto $n = 0,5$, gdy maksymalne jednostronne pochylenie poprzeczne jezdni na łuku $q_{\max} = 7\%$, natomiast $0,1$ w przypadku maksymalnego dwustronnego pochylenia poprzecznego jezdni na łuku $q_{\max} = 2\%$ [108].

Wartości dopuszczalnych współczynników przyczepności poprzecznej w funkcji prędkości, przyjęte w przepisach projektowania dróg wybranych krajów, przedstawiono w tabeli 7.4 [81]. Z analizy danych zamieszczonych w niej wynika, że w przepisach projektowania wszystkich wymienionych krajów przyjęto zasadę, że wartość dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej maleje wraz ze wzrostem prędkości.

Tablica 7.4. Dopuszczalne współczynniki przyczepności poprzecznej w funkcji prędkości w przepisach projektowania dróg wybranych krajów

Prędkość [km/h]	Kraj								
	Japonia	USA	Holandia	Austria	Francja	Szwecja	Szwajcaria	Włochy	Niemcy
50	0,10	0,16	–	–	–	0,18	0,19	–	–
60	0,09	0,15	0,17	0,16	0,16	–	0,16	0,17	0,14
70	–	0,14	0,15	0,15	–	0,15	0,15	–	0,12
80	0,08	0,14	–	0,14	0,13	–	0,14	0,13	0,11
90	–	0,13	–	0,13	–	0,12	0,13	–	0,10
100	0,07	0,12	0,12	0,11	0,11	–	0,12	0,11	0,09
110	–	0,11	–	–	–	0,10	0,11	–	–
120	0,06	0,09	0,08	0,10	0,10	–	0,10	0,10	0,07

Wobec braku w polskich przepisach projektowania dróg zależności dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej od prędkości, a której znajomość jest niezbędna do wykonania analiz stateczności samochodu, konieczne było jej wyznaczenie. W tym celu autor najpierw obliczył wartości f_R z warunku stateczności samochodu na łuku kołowym przy założeniu, że promienie łuków kołowych odpowiadają minimalnym, a pochylenie poprzeczne jezdni na łuku kołowym – maksymalnym wartościom przy danej prędkości projektowej, zgodnie z [105]. Następnie na podstawie analizy regresji określono postać omawianej zależności, która jest następująca:

$$f_{RD} = 0,0595 \cdot (V/100)^2 - 0,2186 \cdot (V/100) + 0,2474 \quad (7.14)$$

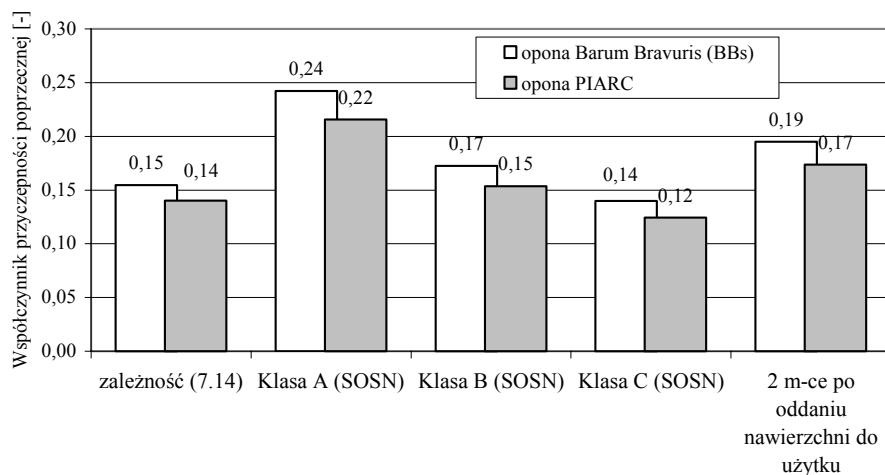
Współczynnik korelacji wyniósł $0,9$, a standardowy błąd estymacji $0,014$. Należy zaznaczyć, że wyznaczone z zależności (7.14) wartości f_{RD} są identyczne z przepisami niemieckimi (tabl. 7.4).

Ponadto na podstawie danych literaturowych [23, 102, 132] można przyjąć, że wartości współczynników przyczepności poprzecznej, przy tych samych prędkościach, na

nawierzchniach suchych są dwukrotnie większe niż na nawierzchniach mokrych. Szczególnie niekorzystnymi właściwościami przeciwpoślizgowymi charakteryzują się nawierzchnie wilgotne, zwłaszcza w początkowej fazie opadów atmosferycznych, gdyż wartości współczynników przyczepności poprzecznej są o 30% mniejsze niż na nawierzchniach mokrych (przy tych samych prędkościach). Wpływ na to ma przede wszystkim „zabrudzenie” nawierzchni spowodowane zanieczyszczeniami pyłowymi. Znajomość powyższych zależności jest bardzo ważna ze względu na bezpieczeństwo ruchu drogowego, gdyż jest niezbędna do wykonania analiz stateczności samochodu na łuku w planie przy różnych stanach nawierzchni spowodowanych warunkami pogodowymi.

Na rysunku 7.4 przedstawiono – uwzględniając wzór (7.12) – wartości współczynnika przyczepności poprzecznej (przeliczone na oponę PIARC i Barum Bravuris – BBs), przy $V = 60 \text{ km/h}$, wyznaczone na podstawie danych zawartych w pracach [105, 119]:

- wartości f_R , jakie przyjęto przy ustaleniu minimalnych promieni łuków kołowych – zależność (7.14),
- wartości f_R , jakimi powinny charakteryzować się nawierzchnie klasy A, B, C – zależności (7.9, 7.10, 7.11),
- wartości f_R , jakimi powinny charakteryzować się nawierzchnie po dwóch miesiącach od oddania drogi do użytkowania – zależność (7.8).



Rys. 7.4. Wartości współczynnika przyczepności poprzecznej

Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że dopuszczalne wartości współczynnika przyczepności poprzecznej, przyjęte w polskich przepisach projektowania dróg do wyznaczania minimalnych wartości promieni łuków kołowych (zależność (7.14)), zawarte są w przedziale współczynników przyczepności poprzecznej charakterystycznych dla poziomu B i C wg SOSN.

7.2. Wykorzystywana wartość współczynnika przyczepności poprzecznej – tradycyjny model stateczności samochodu

Wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej w j-tym miejscu łuku w planie przy i-tym stanie nawierzchni wyznaczyć można ze wzoru:

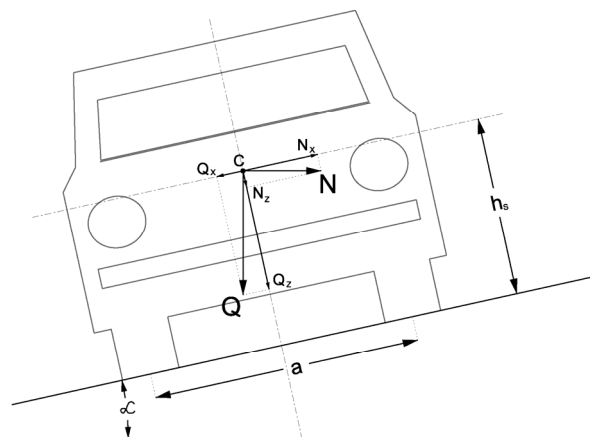
$$f_{RWj(i)} = \frac{V_{j(i)}^2 - 127 \cdot R_{j(i)} \cdot q_j}{V_{j(i)}^2 \cdot q_j + 127 \cdot R_{j(i)}} \quad (7.15)$$

gdzie:

- $V_{j(i)}$ – prędkość samochodu w j-tym miejscu łuku przy i-tym stanie nawierzchni [km/h],
- $R_{j(i)}$ – promień osi pasa ruchu w j-tym miejscu łuku przy i-tym stanie nawierzchni [m],
- q_j – pochylenie poprzeczne jezdni w j-tym miejscu łuku.

Wzór ten został wyprowadzony z ogólnie stosowanego w inżynierii ruchu modelu stateczności samochodu na łuku w planie, nazwanego przez autora tradycyjnym, bazującym na następujących założeniach:

- na samochód działa siła odśrodkowa i siła ciężkości, które przyłożone są w środku ciężkości samochodu i działają w jednej, poprzecznej płaszczyźnie przechodzącej przez środek masy samochodu oraz prostopadłej do jego podłużnej osi symetrii (rys. 7.5),
- samochód swobodnie toczy się (bez siły napędowej lub hamowania), stąd siły obwodowe występujące na kołach samochodu są tak niewielkie, że można je pominąć,
- suma sił poprzecznych na kołach nie może przekroczyć sumy sił przyczepności,
- wykorzystywane wartości współczynników przyczepności poprzecznej na poszczególnych kołach samochodu są takie same.



Rys. 7.5. Układ sił do wyznaczenia warunku stateczności poprzecznej samochodu poruszającego się po łuku w planie – model tradycyjny

Przyjęcie ostatniego założenia budzi, zdaniem autora, największe wątpliwości, co do poprawności wyznaczanych ze wzoru (7.15) wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej. Można bowiem stosunkowo łatwo wykazać, że w rzeczywistości siły działające na poszczególne koła samochodu, swobodnie toczącego się po łuku w planie, będą tym bardziej się od siebie różnić, im większa będzie odległość środka ciężkości samochodu od nawierzchni oraz im większa będzie wartość siły odśrodkowej. W konsekwencji wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na poszczególnych kołach nie mogą być takie same.

Niezmiernie ważne jest, aby wyznaczając wartości $f_{RWj(i)}$ ze wzoru (7.15) uwzględnić zwiększenie promienia trajektorii samochodu będące efektem „ścinania łuku” przez kierowców. Wyniki badań zamieszczone w rozdziale 6 dowiodły, że w większości badanych przypadków profile krzywizny trajektorii samochodów nie odpowiadały profilom krzywizny osi pasa ruchu. Kierowcy pokonując krzywoliniowy odcinek drogi w planie wpisywali własną krzywą charakteryzującą się, szczególnie na łukach o małych wartościach kąta zwrotu ($KZ < 35^\circ$), znacznie mniejszą maksymalną krzywizną niż maksymalna krzywizna osi pasa ruchu. Nieuwzględnienie tego faktu, w wielu przypadkach, może powodować duże błędy w obliczeniach wartości $f_{RWj(i)}$. Dlatego zgodnie z wynikami analiz zamieszczonymi w rozdziale 6, we wzorze (7.15) należy zamiast wielkości $R_{j(i)}$ stosować $RT_{j(i)}$.

Wyniki analiz wpływu cech geometrycznych łuku w planie na stateczność samochodu wyznaczone z tradycyjnego modelu autor zamieścił w pracy [58]. Należy zaznaczyć, że wartość wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej na łuku w planie nie jest stała, co wynika z faktu, że w wielu przypadkach prędkość samochodu na łuku oraz profil krzywizny trajektorii samochodu na długości łuku nie są stałe (rozd. 5 oraz 6).

W pracy [58] przedstawiono wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej występujące w najbardziej niebezpiecznym miejscu na łuku, tj. takim, w którym osiągały one maksymalne wartości:

$$f_{RW(i)} = \max \{ f_{RWj(i)} \} \quad (7.16)$$

gdzie:

- $f_{RW(i)}$ – maksymalna wartość wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej przy i-tym stanie nawierzchni spowodowanym warunkami pogodowymi,
- $f_{RWj(i)}$ – wartości współczynników przyczepności poprzecznej w j-tym miejscu łuku w planie przy i-tym stanie nawierzchni spowodowanym warunkami pogodowymi.

Badanie przebiegu zmienności zależności (7.15) wykazało, że maksymalne wartości wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej wystąpiły na odcinku nazwanym „strefą minimalnej prędkości” (C'D' – rozdz. 5).

Na podstawie analizy wyników badań zamieszczonej w pracy [58] stwierdzono, że wpływ na stateczność samochodu na łukach w planie, a tym samym na zagrożenie w ruchu drogowym mają takie czynniki, jak:

1. Promień łuku kołowego – wraz ze wzrostem wartości promienia, przy danym kącie zwrotu, bez względu na szerokość jezdni wartość $f_{RW(i)}$ maleje, a zależność między $f_{RW(i)}$ a promieniem łuku kołowego można opisać funkcją potęgową.
2. Kąt zwrotu – zależność między $f_{RW(i)}$ a kątem zwrotu można opisać funkcjami krzywoliniowymi. Maksimum tych funkcji występuje w przedziale kątów zwrotu $\sim 20^\circ\text{-}35^\circ$, które zaproponowano nazwać kątami „krytycznymi”. Wzrost wartości $f_{RW(i)}$ w przedziale kątów zwrotu od 10° do wartości, przy której rozważany współczynnik osiąga maksimum uzasadnić można zmniejszeniem ΔR , tj. efektem „ścinańcia łuku”, przy równoczesnych niedużych zmianach prędkości samochodów, a zmianę $f_{RW(i)}$ w pozostałym zakresie kątów zwrotu głównie dużym spadkiem prędkości, gdyż zmniejszenie ΔR jest już niewielkie.
3. Szerokość jezdni – wraz ze zwiększeniem szerokości jezdni, przy danym promieniu i kącie zwrotu, wzrasta wartość $f_{RW(i)}$. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem szerokości jezdni wzrasta prędkość, a zwiększenie promienia trajektorii samochodu jest nieduże. Zależności między wykorzystywanym współczynnikiem przyczepności poprzecznej a szerokością jezdni można opisać funkcjami liniowymi.

Ponadto stwierdzono, że istnieje zakres łuków w planie o ściśle określonych wartościach promieni i kątów zwrotu, przy danej szerokości jezdni, na których wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej są równe lub większe od dopuszczalnych. Zakres taki, dla przypadku, gdy kierowca samochodu porusza się z prędkością miarodajną po łukach o szerokości jezdni 7,0 m i po wewnętrznym pasie ruchu zamieszczono w dalszej części rozdziału (rys. 7.16).

7.3. Wykorzystywana wartość współczynnika przyczepności poprzecznej – nowy model stateczności samochodu

Kolejny etap analiz polegał na udzieleniu odpowiedzi na pytanie: czy przyjęte uproszczenia w tradycyjnym modelu stateczności (wzór (7.15)), nazywanym w dalszej części pracy modelem 1, nie są zbyt daleko idące i jaki mają one wpływ na wyznaczone wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej? Udzielenie odpowiedzi na to pytanie wymagało opracowania nowego modelu rozkładu sił działających na samochód, eliminującego lub znacznie ograniczającego niedoskonałości modelu 1, a tym samym lepiej odzwierciedlającego rzeczywiste warunki ruchu. W dalszych rozważaniach przyjęto samochód dwuosiowy, czterokołowy w postaci doskonale sztywnej bryły. Bryła ta jest oparta na czterech niepodatnych kołach, które są połączone z nawierzchnią więzami jednostronnymi. Nawierzchnia jezdni także jest niepodatna, choć nie jest to zgodne rzeczywistością, gdyż każda nawierzchnia ulega pod wpływem obciążeń przemieszczeniom, głównie sprężystym. Przemieszczenia te, ze względu na ich wartości, traktować jednak można jako nieistotne, tzn. nie mające wpływu na wynik analizy. Ponadto przyjęto, że położenie środka ciężkości samochodu nie ulega zmianie w trakcie ruchu samochodu. Samochód swobodnie się toczy (bez siły napędowej lub hamowania), a więc na kołach występują niewielkie siły obwodowe. Na samochód działają siły ciężkości i odśrodkowa, które są przyłożone w jego środku ciężkości. Ten model samochodu i działające na niego siły w dalszej części pracy nazywany będzie modelem stateczności nr 2.

Siłę ciężkości wyznaczyć można ze wzoru:

$$Q = m \cdot g \text{ [N]} \quad (7.17)$$

gdzie:

- m – masa pojazdu [kg],
- g – przyspieszenie ziemskie $9,81 \text{ m/s}^2$,

a siłę odśrodkową ze wzoru:

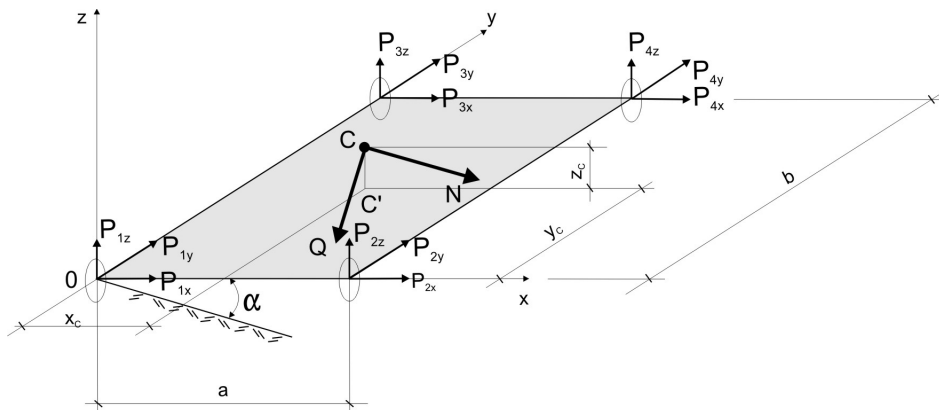
$$N = \frac{m \cdot v^2}{R_C} \text{ [N]} \quad (7.18)$$

gdzie:

- v – prędkość samochodu [m/s],
- R_C – promień krzywizny trajektorii środka ciężkości samochodu [m].

Założono, że pochylenie podłużne jezdni wynosi 0%, natomiast pochylenie poprzeczne jezdni na łuku kołowym i_0 ($\alpha = \arctg i_0$).

Przyjęty schemat sił działających na samochód przedstawiono na rysunku 7.6.



Oznaczenia:

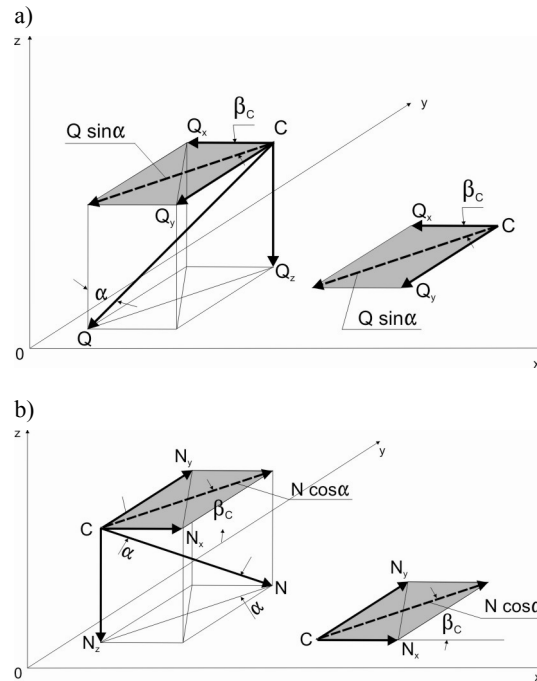
- a – rozstaw kół samochodu na osi poprzecznej samochodu [m],
- b – rozstaw kół samochodu na osi podłużnej samochodu [m],
- C – środek ciężkości samochodu,
- x_c, y_c, z_c – współrzędne środka ciężkości samochodu [m].

Rys. 7.6. Przyjęty schemat sił działających na samochód poruszający się po łuku w planie

Wyznaczenie sił działających na poszczególne koła samochodu polega na poniżej przedstawionym postępowaniu, przy czym w rozważaniach przyjęto następujące założenia dotyczące znakowania sił i momentów:

- siły są dodatnie, jeżeli ich zwroty są zgodne ze zwrotami układu współrzędnych,
- momenty są dodatnie, jeżeli stosując regułę śruby prawoskrętnej mają zwroty przyjętego układu współrzędnych.

1. Rozkład sił Q i N na składowe o kierunkach poszczególnych osi x, y, z – rysunek 7.7.



Rys. 7.7. Schemat rozłożenia sił Q i N na składowe przyłożone w środku ciężkości samochodu: a) siła ciężkości Q, b) siła odśrodkowa N

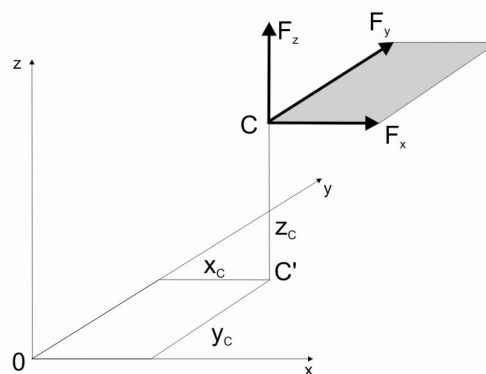
gdzie:

$$Q_x = Q \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_c \text{ [N]} \quad (7.19), \quad N_x = N \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta_c \text{ [N]} \quad (7.22),$$

$$Q_y = Q \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_c \text{ [N]} \quad (7.20), \quad N_y = N \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta_c \text{ [N]} \quad (7.23),$$

$$Q_z = Q \cdot \cos \alpha \text{ [N]} \quad (7.21), \quad N_z = N \cdot \sin \alpha \text{ [N]} \quad (7.24).$$

2. Sumowanie sił składowych przyłożonych w środku ciężkości samochodu – rysunek 7.8.



Rys. 7.8. Schemat zsumowanych sił składowych przyłożonych w środku ciężkości samochodu

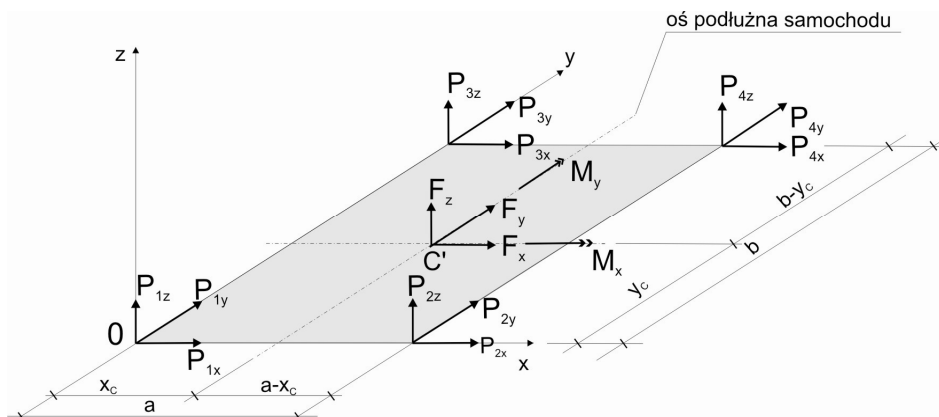
gdzie:

$$F_x = N_x - Q_x \text{ [N]} \quad (7.25)$$

$$F_y = N_y - Q_y \text{ [N]} \quad (7.26)$$

$$F_z = -N_z - Q_z \text{ [N]} \quad (7.27)$$

3. Zredukowanie sił przyłożonych w środku ciężkości samochodu w punkcie C względem punktu C' i rozłożeniu ich na poszczególne koła samochodu – rysunek 7.9.



Rys. 7.9. Schemat sił działających na koła samochodu

gdzie:

$$F_x = N_x - Q_x \text{ [N]} \quad (7.28)$$

$$F_y = N_y - Q_y \text{ [N]} \quad (7.29)$$

$$F_z = -N_z - Q_z \text{ [N]} \quad (7.30)$$

$$M_x = -F_y \cdot z_c \text{ [Nm]} \quad (7.31)$$

$$M_y = F_x \cdot z_c \text{ [Nm]} \quad (7.32)$$

siła F_x

$$P_{1x} = P_{2x} = \frac{F_x \cdot (b - y_c)}{2 \cdot b} \text{ [N]} \quad (7.33)$$

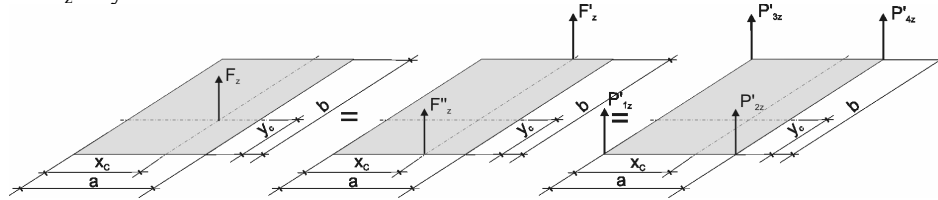
$$P_{3x} = P_{4x} = \frac{F_x \cdot y_c}{2 \cdot b} \text{ [N]} \quad (7.34)$$

siła F_y

$$P_{1y} = P_{3y} = \frac{F_y \cdot (a - x_c)}{2 \cdot a} \text{ [N]} \quad (7.35)$$

$$P_{2y} = P_{4y} = \frac{F_y \cdot x_c}{2 \cdot a} \text{ [N]} \quad (7.36)$$

siła F_z – rysunek 7.10.



Rys. 7.10. Schemat rozłożenia siły F_z

$$F'_z = \frac{F_z \cdot y_C}{b} \quad [N] \quad (7.37)$$

$$F''_z = \frac{F_z \cdot (b - y_C)}{b} \quad [N] \quad (7.38)$$

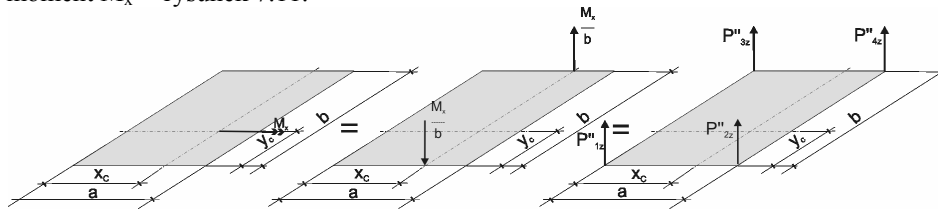
$$P'_{1z} = \frac{F_z \cdot (a - x_C) \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.39)$$

$$P'_{2z} = \frac{F_z \cdot x_C \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.40)$$

$$P'_{3z} = \frac{F_z \cdot y_C \cdot (a - x_C)}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.41)$$

$$P'_{4z} = \frac{F_z \cdot x_C \cdot y_C}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.42)$$

moment M_x – rysunek 7.11.



Rys. 7.11. Schemat rozłożenia momentu M_x

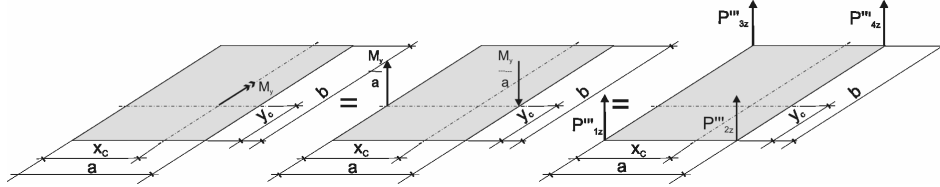
$$P''_{1z} = -\frac{M_x \cdot (a - x_C)}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.43)$$

$$P''_{2z} = -\frac{M_x \cdot x_C}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.44)$$

$$P''_{3z} = \frac{M_x \cdot (a - x_C)}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.45)$$

$$P''_{4z} = \frac{M_x \cdot x_C}{a \cdot b} \quad [N] \quad (7.46)$$

moment M_y – rysunek 7.12.



Rys. 7.12. Schemat rozłożenia momentu M_y

$$P'''_{1z} = \frac{M_y \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.47)$$

$$P'''_{2z} = -\frac{M_y \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.48)$$

$$P'''_{3z} = \frac{M_y \cdot y_C}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.49)$$

$$P'''_{4z} = -\frac{M_y \cdot y_C}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.50)$$

Wartości sił pionowych działających na poszczególne koła samochodu wynikają z odpowiedniego sumowania sił składowych:

$$P_{1z} = \frac{F_z \cdot (a - x_C) \cdot (b - y_C) - M_x \cdot (a - x_C) + M_y \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.51)$$

$$P_{2z} = \frac{F_z \cdot x_C \cdot (b - y_C) - M_x \cdot x_C - M_y \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.52)$$

$$P_{3z} = \frac{F_z \cdot y_C \cdot (a - x_C) + M_x \cdot (a - x_C) + M_y \cdot y_C}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.53)$$

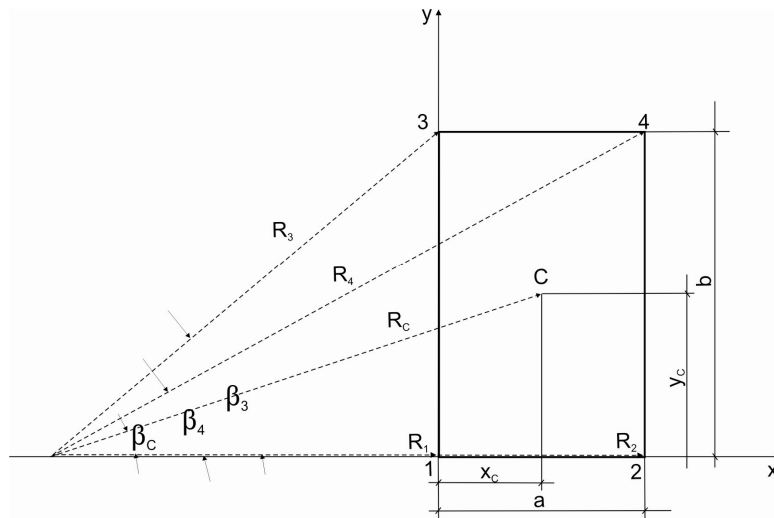
$$P_{4z} = \frac{F_z \cdot x_C \cdot y_C + M_x \cdot x_C - M_y \cdot y_C}{a \cdot b} \quad [\text{N}] \quad (7.54)$$

Wartość wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej na j-tym kole wyznaczyć można ze wzoru:

$$f_{RWj} = \left| \frac{P_{jx} \cdot \cos \beta_j + P_{jy} \cdot \sin \beta_j}{P_{jz}} \right| \quad [-] \quad (7.55)$$

gdzie:

β_j – kąt pomiędzy osią X a promieniem łuku kołowego jakie zakreśla j-te koło samochodu ($j = 1, 2, 3, 4$) oraz jego środek ciężkości (C) – rysunek 7.13.



Rys. 7.13. Kąty β_j pomiędzy osią X a promieniami łuków kołowych jakie zakreślają poszczególne koła samochodu oraz jego środek ciężkości

Z powyższej przedstawionych wzorów wynika, że na wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności ma wpływ wiele zmiennych niezależnych i stąd celem dalszych analiz było ustalenie stopnia ich wpływu na zmienną zależną.

W pierwszej fazie analiz badano wpływ zmiennych opisujących cechy samochodu, tj. rozstawu kół na osi a , rozstawu osi kół b oraz położenia środka ciężkości samochodu x_c , y_c , z_c . Przykładowe wyniki takiej analizy zamieszczono w pracy [60], w której rozważano dwa samochody bardzo różniące się omawianymi cechami, ale reprezentujące dość liczne i popularne grupy samochodów poruszających się po naszych drogach, tj. BMW 5 ($a = 1,558$ m, $b = 2,888$ m, $y_c = 1,444$ m, $x_c = a/2$, $z_c = 0,529$ m) i VW Golf – V generacji ($a = 1,539$ m, $b = 2,578$ m, $y_c = 1,031$ m, $x_c = a/2$, $z_c = 0,594$ m). Ponadto założono, że samochody te poruszały się po wewnętrznym pasie ruchu, z prędkościami 50 i 80 km/h po łuku o promieniu 100 m i z prędkościami 70 i 100 km/h po łuku o promieniu 300 m.

Na podstawie wyników analiz, zawartych w cytowanej pracy, stwierdzono, że:

1. Wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej występujące na prawych kołach samochodu są większe od występujących na lewych kołach. Wynika to z faktu, że skutkiem działania siły odśrodkowej jest przede wszystkim zmniejszenie wartości sił pionowych działających na prawe koła (ich odciążenie) i zwiększenie wartości sił pionowych działających na lewe koła (ich dociążenie).
2. Różnice pomiędzy wykorzystywanymi współczynnikami przyczepności poprzecznej na prawym przednim kole i prawym tylnym kołem są nieznaczne i można je praktycznie pominąć. Podobna sytuacja występuje w przypadku lewego przedniego i lewego tylnego koła.
3. Wraz ze wzrostem siły odśrodkowej (zwiększenie prędkości lub/i zmniejszenie promienia) zwiększeniu ulegają wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na wszystkich kołach samochodu.

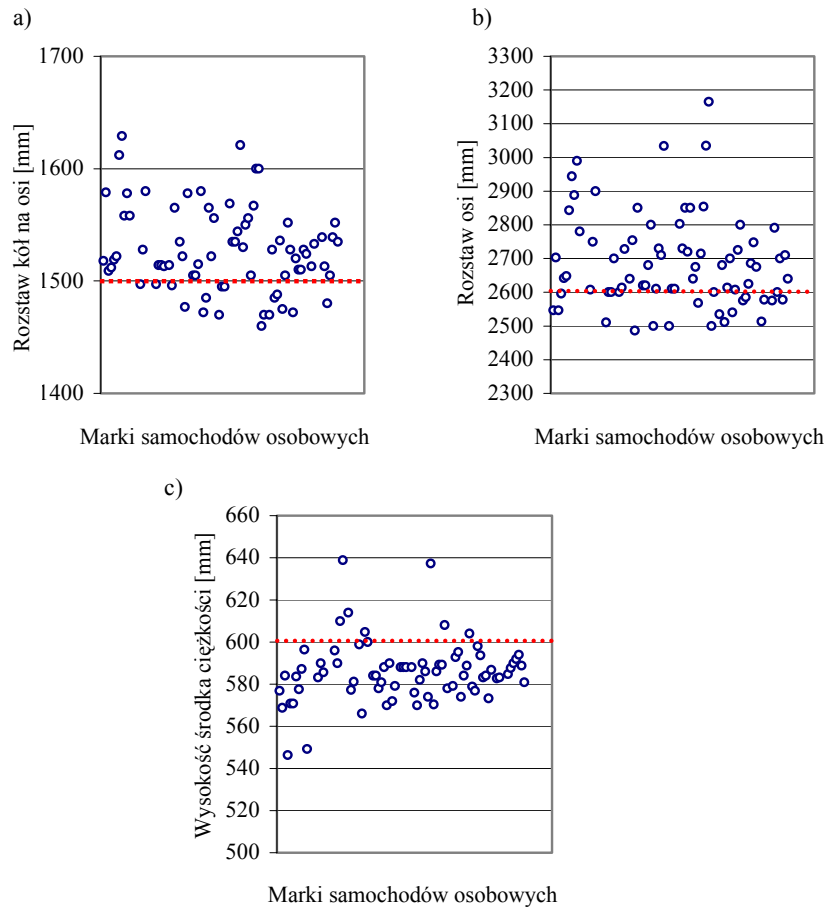
4. Zmniejszenie wysokości środka ciężkości powoduje nie tylko zmniejszenie wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej, ale również zmniejszenie różnic między tymi współczynnikami występującymi na lewych (dociążanych) i prawych (odciążanych) kołach samochodu.
5. Wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej wyznaczone na podstawie modelu 1 są mniejsze od występujących na prawych kołach (koła odciążane) i większe od występujących na lewych kołach (koła dociążane) wyznaczonych z modelu 2.

Dalsze wyniki analiz zamieszczone w omawianej pracy wykazały, że nieduży wpływ na zmianę rozkładu wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na poszczególne koła samochodu ma zmiana wartości y_C , tj. odległości środka ciężkości samochodu od przedniej osi samochodu, w stosunku do jej konstrukcyjnej wartości. Gdyby rozpatrywany samochód BMW 5 był tak zaprojektowany, że aż 90% jego masy obciążałoby przednią oś, to przy przejeździe przez łuk o $R \geq 100$ m z prędkością 80 km/h, wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na kołach przedniej osi uległyby zmniejszeniu zaledwie o 2-3% w porównaniu z przypadkiem, gdy rozkład masy samochodu na osie wynosi 50/50%. Bardzo duże zmiany wartości f_{RW} na lewych i prawych kołach samochodu stwierdzono w przypadku zmiany parametru x_C , tj. położenia środka ciężkości w płaszczyźnie poprzecznej samochodu. Już niewielkie zmiany tego parametru, bo na przykład tylko o $\pm 0,1$ m w stosunku do jego konstrukcyjnej wartości, powodowały zmiany f_{RW} na poszczególnych kołach samochodu od -15,6% do +22,8%.

Zważywszy na fakt, że samochód pokonuje łuki o zwrocie w lewo i w prawo (stąd raz będą dociążane lewe koła, a odciążane prawe i odwrotnie), pożądanym i korzystnym rozwiązaniem, ze względu na stateczność samochodu, a tym samym i bezpieczeństwo ruchu będzie zawsze takie rozłożenie jego masy, aby środek ciężkości położony był na podłużnej osi symetrii samochodu, czyli aby $x_C = a/2$.

Przeprowadzone przez autora szczegółowe analizy wykazały, że wpływ cech samochodu na wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej jest znaczny, zwłaszcza na łukach o małych wartościach promieni. Przykładem może być wynik następującej analizy. Rozważano dwa samochody: A – o cechach $a = 1,45$ m, $b = 2,5$ m, $z_C = 0,64$ m oraz B – o cechach $a = 1,65$ m, $b = 3,3$ m, $z_C = 0,54$ m i rozkładzie mas samochodów na osie 50%/50% (przód/tył), poruszające się po łuku o $R = 100$ m, z prędkością 80 km/h, po wewnętrznym pasie ruchu. Wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej w przypadku samochodu B okazały się mniejsze w stosunku do samochodu A na prawych kołach (odciążanych) o ~14,0%, a na kołach lewych (dociążanych) większe o ~7,0%. Cechy samochodu B, ze względu na stateczność samochodu, są zatem korzystniejsze niż cechy samochodu A.

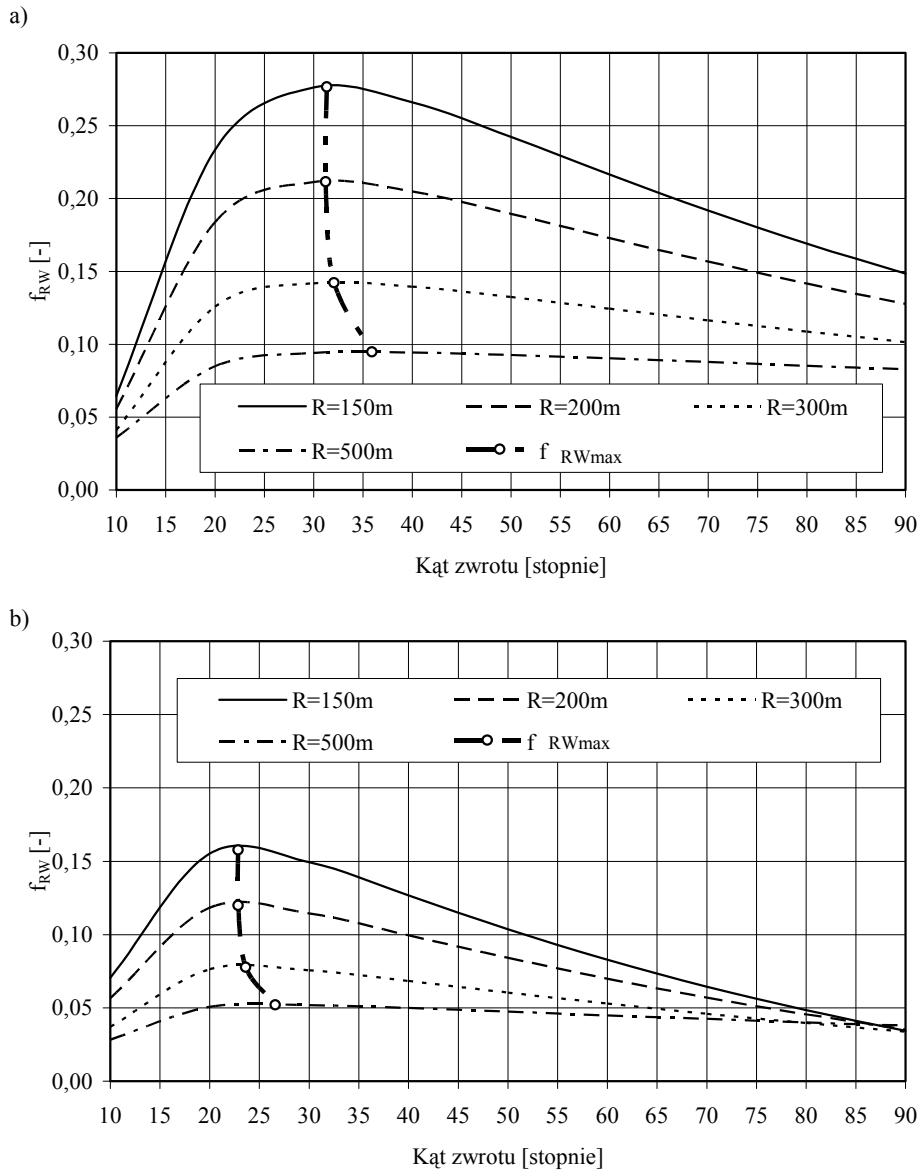
W dalszych analizach wpływu cech geometrycznych łuków w planie na wartość wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej rozważano samochód charakteryzujący się następującymi cechami technicznymi: $a = 1,5$ m, $b = 2,6$ m, $z_C = 0,6$ m, $x_C = a/2$ m, $y_C = 1,04$ m (wartość y_C wynika z rozkładu masy samochodu na oś przednią w stosunku do tylnej osi o proporcji 60/40). Wartości te ustalono na podstawie danych zawartych w katalogach samochodowych i z rozeznania autora wynika, że samochód o takich cechach odzwierciedla samochód stosunkowo niskiej klasy technicznej. Świadczą o tym, zamieszczone na rysunku 7.14 wartości omawianych cech technicznych samochodów dla najczęściej występujących ich marek w Polsce.



Rys. 7.14. Wartości cech technicznych marek samochodów najczęściej występujących w Polsce: a) rozstaw kół na osi (a), b) rozstaw osi (b), c) wysokość środka ciężkości (z_c)

Wybór do analiz stateczności samochodu o powyższych cechach, nazywanego dalej obliczeniowym, podyktowany był względami bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Wyznaczone na podstawie wzoru (7.55) zależności wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej od kąta zwrotu, wybranych promieni i szerokości jezdni dla przypadku, gdy samochód obliczeniowy porusza się po łuku z prędkością miarodajną, po wewnętrznym pasie ruchu przedstawiono na rysunku 7.15.



Rys. 7.15. Zależność wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej od kąta zwrotu, wybranych promieni i szerokości jezdni: a) szerokość jezdni 7,0 m, b) szerokość jezdni 5,5 m

Przedstawione na tym rysunku wartości współczynników f_{RW} odnoszą się do najbardziej niebezpiecznego miejsca na łuku w planie, a więc miejsca, w którym osiągają one wartości maksymalne (strefa minimalnej prędkości – odcinek C'D' – rozdz. 5). Ponadto w przypadku samochodu obliczeniowego, gdy porusza się on po wewnętrznym pasie ruchu, maksymalne wartości wykorzystywanego współczynnika przyczepności

poprzecznej występują na prawym tylnym kole i te wartości zamieszczono na rysunku 7.15. Z analizy zależności przedstawionych na tym wyniku, ze:

- wykorzystywana wartość współczynnika przyczepności poprzecznej, przy danym kącie zwrotu jest tym większa, im mniejszy jest promień łuku kołowego oraz im większa jest szerokość jezdni, i na przykład:
 - $f_{RW} = 0,28$, gdy $R = 150,0$ m, $KZ = 30^\circ$, $SJ = 7,0$ m,
 - $f_{RW} = 0,15$, gdy $R = 150,0$ m, $KZ = 30^\circ$, $SJ = 5,5$ m,
 - $f_{RW} = 0,09$, gdy $R = 500,0$ m, $KZ = 30^\circ$, $SJ = 7,0$ m,
 - $f_{RW} = 0,05$, gdy $R = 500,0$ m, $KZ = 30^\circ$, $SJ = 5,5$ m,
- maksymalne wartości f_{RW} w zakresie promieni od 150,0 m do 500,0 m zawarte są w granicach kątów zwrotu od $\sim 20^\circ$ do $\sim 35^\circ$ (kąty „krytyczne”), przy czym większym promieniom i szerokościom jezdni odpowiadają większe wartości tych kątów zwrotu,
- kąt zwrotu ma tym większy wpływ na wartości wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej, im mniejszy jest promień, na przykład na łukach o szerokości jezdni 7,0 m i $R = 150,0$ m w zakresie kątów zwrotu od 10° do 90° wartość f_{RW} zmienia się od 0,06 do 0,28, co daje prawie pięciokrotny wzrost, a w przypadku $R = 500,0$ m, w tym samym zakresie kątów zwrotu – od 0,04 do 0,09, czyli już tylko ponad dwukrotny wzrost,
- na łukach o promieniach większych od 500,0 m i kątach zwrotu większych od 20° wpływ kąta zwrotu na wykorzystywany współczynnik przyczepności poprzecznej praktycznie zanika, bez względu na szerokość jezdni.

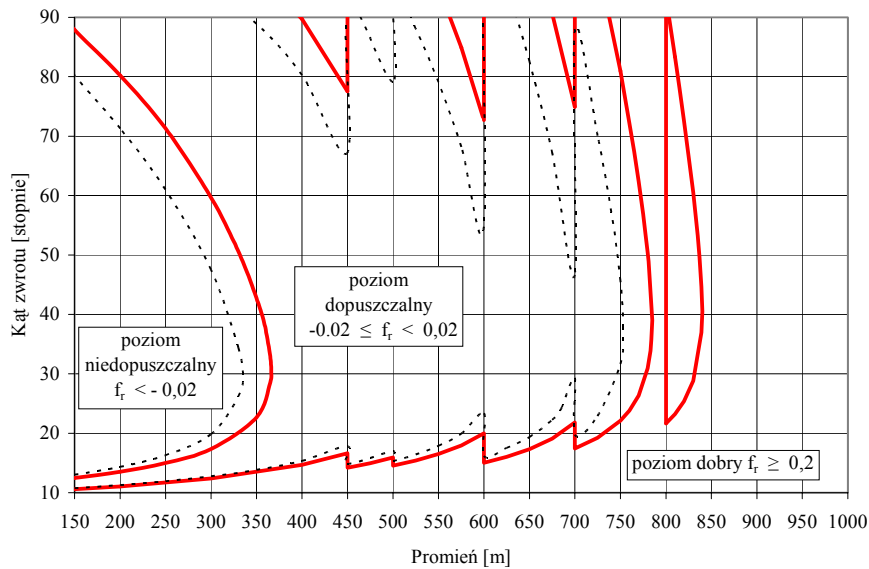
Wzrost wartości wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej w przedziale kątów zwrotu od 10° do wartości, przy których rozważany współczynnik osiąga maksimum uzasadnić można zmniejszeniem się promienia łuku kołowego trajektorii samochodu w stosunku do promienia osi pasa ruchu (coraz mniejszy efekt „ścinańcia łuku”) przy praktycznie niewielkich zmianach prędkościach. Zmianę współczynników f_{RW} w pozostałym zakresie kątów zwrotu należy tłumaczyć przede wszystkim spadkiem prędkości, bowiem zmniejszenie promienia łuku kołowego trajektorii samochodu jest już niewielkie.

Taki sam charakter zależności wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej od kąta zwrotu, promienia i szerokości jezdni uzyskano w przypadkach, gdy obliczeniowy samochód poruszał się po zewnętrznym pasie ruchu lub po suchej nawierzchni. Przy czym wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na pasie zewnętrznym – przy danym promieniu, kącie zwrotu i szerokości jezdni, były zawsze mniejsze niż na pasie wewnętrznym. Wpływ na to ma przede wszystkim uzyskiwanie przez kierowców większego promienia trajektorii łuku kołowego na pasie zewnętrznym niż na pasie wewnętrznym (rozd. 6), bowiem prędkość tylko w niewielkim stopniu zależy od rodzaju pasa ruchu (rozd. 4 i 5).

7.4. Bezpieczeństwo ruchu w aspekcie stateczności samochodu

Znając wartości dopuszczalnego (zależność (7.14)) i wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej (wzór (7.15) – model 1 lub wzór (7.55) – model 2) można wyznaczyć poziom bezpieczeństwa ruchu na łuku w planie ze względu na stateczność samochodu. Granice poziomów bezpieczeństwa ruchu drogowego na łuku w planie określone, zgodnie z miarami kryterium stateczności samochodu podanymi

w tabelicy 1.1 (rozdz. 1), w zależności od promienia łuku kołowego oraz kąta zwrotu i przy założeniu, że samochód obliczeniowy (cechy samochodu obliczeniowego – podrozdz. 7.3) porusza się z prędkością miarodajną po łuku o szerokości jezdni 7,0 m, po wewnętrznym pasie ruchu przedstawiono na rysunku 7.16.



Oznaczenia:

- granice poziomów bezpieczeństwa ruchu drogowego wg modelu 1
- granice poziomów bezpieczeństwa ruchu drogowego wg modelu 2

Rys. 7.16. Granice poziomów bezpieczeństwa ruchu drogowego na łukach w planie w zależności od promienia i kąta zwrotu

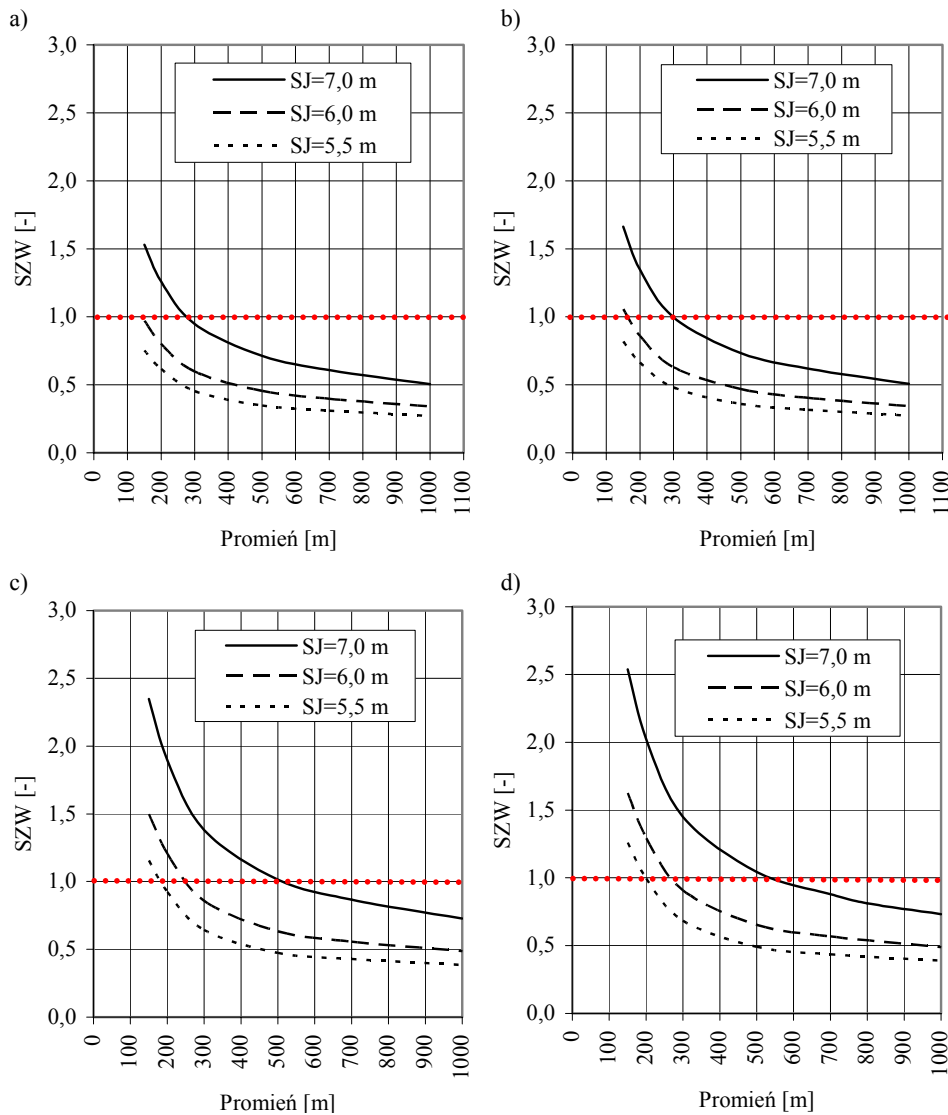
Z porównania danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że granice poziomów brd wyznaczone z modelu 2 (nowy), w porównaniu z wyznaczonymi z modelu 1 (tradycyjny), uległy dość wyraźnej zmianie. W wielu przypadkach uzyskanie danej granicy poziomu brd wyznaczonej na podstawie modelu 2 wymaga – przy określonym kącie zwrotu – zastosowania większej wartości promienia niż wyznaczonej z modelu 1. Na łuku, na przykład o kącie zwrotu 30°, granicę niedopuszczalnego poziomu brd ($f_r < -0,02$) wg modelu 1 określa $R = 335,0$ m, a wg modelu 2 – $R = 365,0$ m.

Poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego można również wyrazić za pomocą stopnia zagrożenia wypadkowego (SZW) zdefiniowanego zgodnie z pracą [58]:

$$SZW = \frac{f_{RW}}{f_{RD}} \quad (7.56)$$

Na łukach, na których $SZW > 1$, potencjalna możliwość utraty przez samochód stateczności jest znaczna i warunki ruchu na takim łuku należy uznać za bardzo niebezpieczne.

Zależność stopnia zagrożenia wypadkowego od promienia, szerokości jezdni, stanu nawierzchni spowodowanego warunkami pogodowymi i rodzaju pasa ruchu na łukach w planie, ale o „krytycznych” kątach zwrotu przedstawiono na rysunku 7.17. Wartości f_{RW} wyznaczono z modelu nr 2.



Rys. 7.17. Zależność stopnia zagrożenia wypadkowego od promienia, szerokości jezdni, rodzaju pasa ruchu przy danym stanie nawierzchni: a) zewnętrzny pas ruchu – przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, b) wewnętrzny pas ruchu – przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, c) zewnętrzny pas ruchu – przy prędkości miarodajnej, d) wewnętrzny pas ruchu – przy prędkości miarodajnej

Z danych zamieszczonych na tym rysunku wynika, że najbardziej niekorzystne przypadki występują, gdy kierowca porusza się po nawierzchni mokrej i po wewnętrznym pasie ruchu. Wpływ na to mają dwa zasadnicze czynniki, a mianowicie: dwukrotnie mniejsze wartości dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej na nawierzchni mokrej niż na nawierzchni suchej oraz mniejsze wartości promienia łuku kołowego trajektorii samochodu na pasie wewnętrznym niż na pasie zewnętrznym (rozdz. 6).

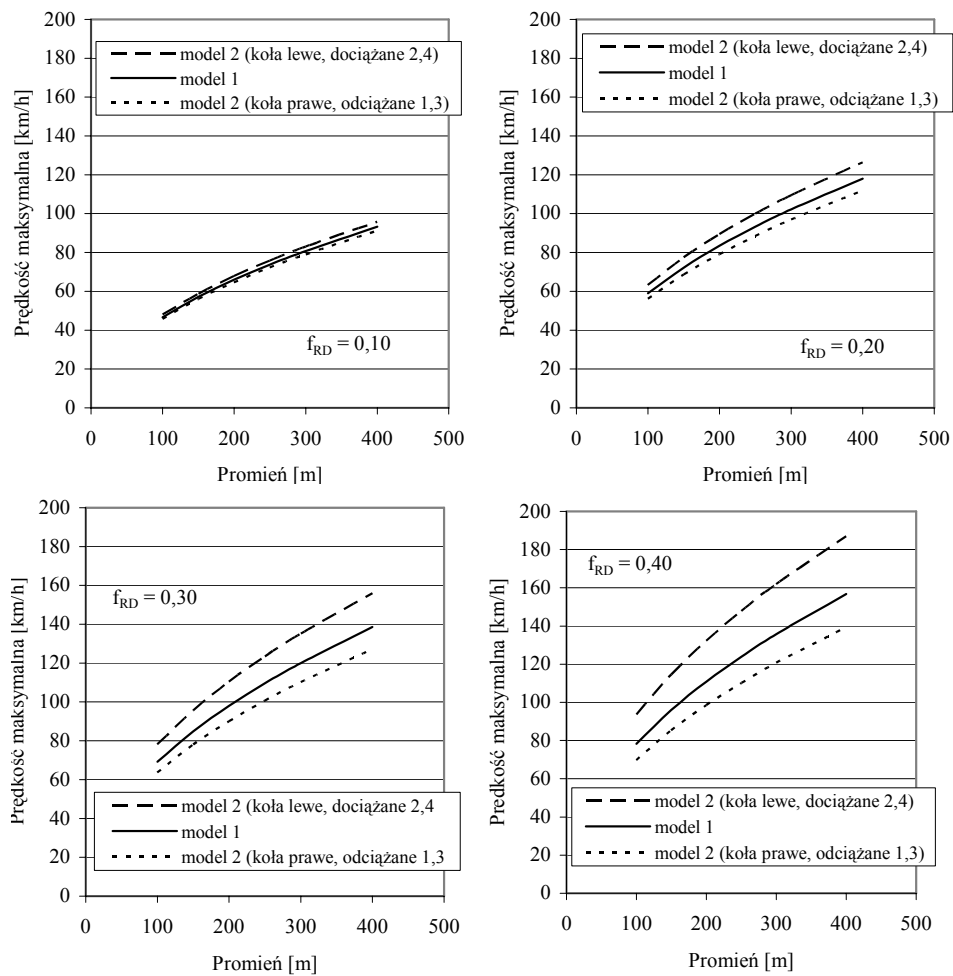
Ze względów praktycznych bardzo czytelnym i zrozumiałym miernikiem poziomu bezpieczeństwa ruchu jest prędkość maksymalna, której przekroczenie przez kierowcę powoduje utratę stateczności samochodu. Przekształcając wzór (7.55) i przyjmując, że $f_{RW} = f_{RD}$ opracowano wzory, na podstawie których można wyznaczyć wartości tej prędkości dla poszczególnych kół samochodu poruszającego się po wewnętrznym pasie ruchu – tablica 7.5.

Tablica 7.5. Wzory do wyznaczania maksymalnej prędkości

Koło nr 1 (prawe, przód)	
$V_{\max(1)} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{f_{RD}(a_{11} + a_{12} + a_{13}) + a_{14} + a_{15}}{f_{RD}(b_{11} + b_{12} + b_{13}) + b_{14} + b_{15}}} \cdot R_C \quad [\text{km/h}] \quad (7.57)$	
gdzie:	
$a_{11} = -g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{(a - x_C) \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.58)$	$b_{11} = \sin \alpha \cdot \frac{(a - x_C) \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.63)$
$a_{12} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{(a - x_C)}{a \cdot b} \quad (7.59)$	$b_{12} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{(a - x_C)}{a \cdot b} \quad (7.64)$
$a_{13} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{(b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.60)$	$b_{13} = -\cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{(b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.65)$
$a_{14} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_1 \cdot \frac{(b - y_C)}{2b} \quad (7.61)$	$b_{14} = -\cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_1 \cdot \frac{(b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.66)$
$a_{15} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_1 \cdot \frac{(a - x_C)}{2a} \quad (7.62)$	$b_{15} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_1 \cdot \frac{(a - x_C)}{2a} \quad (7.67)$
Koło nr 2 (lewe, przód)	
$V_{\max(2)} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{f_{RD}(a_{21} + a_{22} + a_{23}) + a_{24} + a_{25}}{f_{RD}(b_{21} + b_{22} + b_{23}) + b_{24} + b_{25}}} \cdot R_C \quad [\text{km/h}] \quad (7.68)$	
gdzie:	
$a_{21} = -g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{x_C \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.69)$	$b_{21} = \sin \alpha \cdot \frac{x_C \cdot (b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.74)$
$a_{22} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{x_C}{a \cdot b} \quad (7.70)$	$b_{22} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{x_C}{a \cdot b} \quad (7.75)$
$a_{23} = g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{(b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.71)$	$b_{23} = \cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{(b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.76)$
$a_{24} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_2 \cdot \frac{(b - y_C)}{2b} \quad (7.72)$	$b_{24} = -\cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_2 \cdot \frac{(b - y_C)}{a \cdot b} \quad (7.77)$
$a_{25} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_2 \cdot \frac{x_C}{2a} \quad (7.73)$	$b_{25} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_2 \cdot \frac{x_C}{2a} \quad (7.78)$

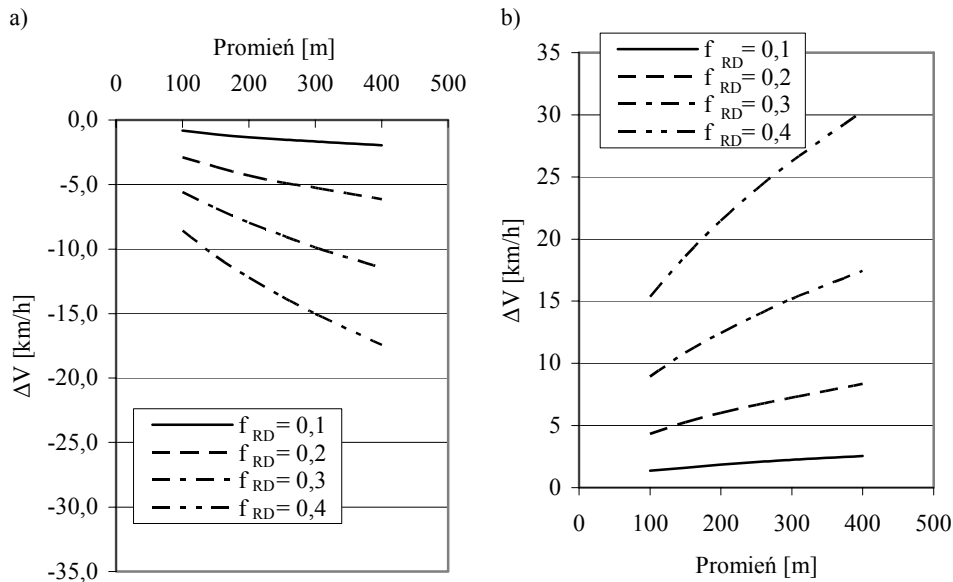
Koło nr 3 (prawe, tył)	
$V_{\max(3)} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{f_{RD}(a_{31} + a_{32} + a_{33}) + a_{34} + a_{35}}{f_{RD}(b_{31} + b_{32} + b_{33}) + b_{34} + b_{35}}} \cdot R_C \quad [\text{km/h}] \quad (7.79)$	
gdzie:	
$a_{31} = -g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{x_C \cdot y_C}{a \cdot b} \quad (7.80)$	$b_{31} = \sin \alpha \cdot \frac{x_C \cdot y_C}{a \cdot b} \quad (7.85)$
$a_{32} = g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{x_C}{a \cdot b} \quad (7.81)$	$b_{32} = \cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{x_C}{a \cdot b} \quad (7.86)$
$a_{33} = g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{y_C}{a \cdot b} \quad (7.82)$	$b_{33} = \cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{y_C}{a \cdot b} \quad (7.87)$
$a_{34} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_3 \cdot \frac{y_C}{2b} \quad (7.83)$	$b_{34} = -\cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_3 \cdot \frac{y_C}{2b} \quad (7.88)$
$a_{35} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_3 \cdot \frac{x_C}{2a} \quad (7.84)$	$b_{35} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_3 \cdot \frac{x_C}{2a} \quad (7.89)$
Koło nr 4 (lewe, tył)	
$V_{\max(4)} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{f_{RD}(a_{41} + a_{42} + a_{43}) + a_{44} + a_{45}}{f_{RD}(b_{41} + b_{42} + b_{43}) + b_{44} + b_{45}}} \cdot R_C \quad [\text{km/h}] \quad (7.90)$	
gdzie:	
$a_{41} = -g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{x_C \cdot y_C}{a \cdot b} \quad (7.91)$	$b_{41} = \sin \alpha \cdot \frac{x_C \cdot y_C}{a \cdot b} \quad (7.96)$
$a_{42} = g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{x_C}{a \cdot b} \quad (7.92)$	$b_{42} = \cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{x_C}{a \cdot b} \quad (7.97)$
$a_{43} = g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{y_C}{a \cdot b} \quad (7.93)$	$b_{43} = \cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot z_C \cdot \frac{y_C}{a \cdot b} \quad (7.98)$
$a_{44} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_4 \cdot \frac{y_C}{2b} \quad (7.94)$	$b_{44} = -\cos \alpha \cdot \cos \beta_C \cdot \cos \beta_4 \cdot \frac{y_C}{2b} \quad (7.99)$
$a_{45} = -g \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_4 \cdot \frac{x_C}{2a} \quad (7.95)$	$b_{45} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta_C \cdot \sin \beta_4 \cdot \frac{x_C}{2a} \quad (7.100)$

Zależności maksymalnych prędkości od promienia łuku kołowego i wybranych wartości dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej, wyznaczone z przekształconego wzoru 7.15 (model 1) oraz wzorów zamieszczonych w tabelicy 7.5 (model 2 – samochód obliczeniowy poruszający się po wewnętrznym pasie ruchu) zamieszczono na rysunku 7.18.



Rys. 7.18. Zależności maksymalnej prędkości od promienia łuku kołowego i dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej wg porównywanych modeli stateczności samochodu

Różnice pomiędzy maksymalnymi prędkościami (ΔV), wyznaczonymi na podstawie rozważanych modeli stateczności samochodu, w zależności od dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej i promienia łuku kołowego przedstawiono na rysunku 7.19.

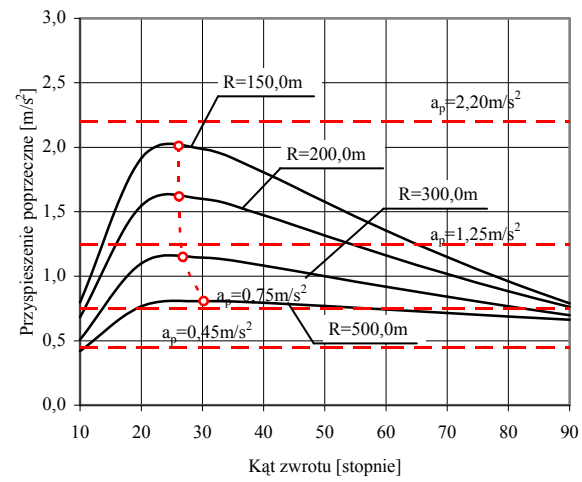


Rys. 7.19. Różnice pomiędzy maksymalnymi prędkościami wyznaczonymi z porównywanych modeli stateczności w zależności od f_{RD} oraz promienia łuku kołowego: a) prawe koła (odciążane), b) lewe koła (dociążane)

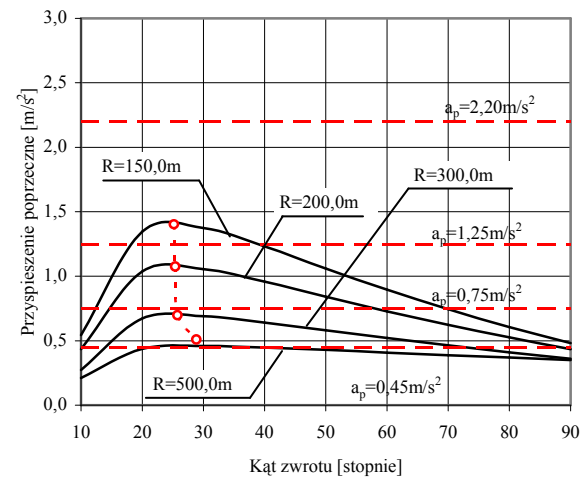
Z analizy danych zawartych na powyższych wykresach wynika, że maksymalne prędkości wyznaczone z modelu 1 różnią się od maksymalnych prędkości wyznaczonych z modelu 2 i to tym bardziej, im większymi wartościami f_{RD} charakteryzuje się nawierzchnia oraz większy jest promień łuku kołowego. Jest to konsekwencja różnego obciążenia kół samochodu (podrozdz. 7.3). Na łuku o $R = 400$ m i $f_{RD} = 0,1$ różnica pomiędzy maksymalnymi prędkościami wynosi 2,0 km/h w przypadku kół prawych (odciążanych) i 2,5 km/h w przypadku kół lewych (dociążanych). Na tym samym łuku, gdy $f_{RD} = 0,4$, analogiczne wartości wynoszą już 17,4 km/h i 30,3 km/h.

Ponadto analiza danych na rysunkach 7.18 oraz 7.19 wskazuje również na duży wpływ właściwości przeciwoślizgowych nawierzchni na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Na przykład, na łuku o $R = 300$ m i nawierzchni o $f_{RD} = 0,4$ maksymalna prędkość, wyznaczona z modelu 2 – koła odciążane, wynosi 120 km/h podczas, gdy na nawierzchni o $f_{RD} = 0,1$ już tylko 80 km/h.

a)



b)



Rys. 8.2. Zależności maksymalnych przyspieszeń poprzecznych od kąta zwrotu i wybranych promieni – szerokość jezdni 6,0 m: a) przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, b) przy średniej prędkości

W celu porównania rzeczywistych wartości przyspieszeń poprzecznych z wartościami wyznaczającymi przyjmowane w literaturze przedmiotu poziomy wygody ruchu (tabl. 1.4), te ostatnie na omawianych rysunkach oznaczono przerywanymi liniami. Punkty, w których wystąpiły największe wartości przyspieszeń poprzecznych oznaczono okręgami i połączono kropkowanymi liniami.

Z danych zamieszczonych na powyższych rysunkach wynika, że zależność między przyspieszeniem poprzecznym a kątem zwrotu, przy danej wartości promienia i szerokości jezdni, można opisać funkcjami krzywoliniowymi. Osiągają one maksimum przy tych samych wartościach kątów zwrotu, jak w przypadku wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej, nazwanych kątami „krytycznymi” (rozd. 7). Wartości tych kątów zależą od szerokości jezdni i promienia łuku kołowego. Zwiększenie wartości promienia, przy danej szerokości jezdni, powoduje zwiększenie wartości kąta krytycznego. Na łukach o szerokości jezdni 7,0 m, w zakresie promieni 150,0-500,0 m kąty te zawarte są w granicach od $\sim 30^\circ$ do $\sim 40^\circ$, a na łukach o szerokości jezdni 6,0 m – w tym samym zakresie promieni – od $\sim 25^\circ$ do $\sim 30^\circ$.

Wyznaczone kształty zależności między przyspieszeniami poprzecznymi a rozważanymi cechami geometrycznymi łuków w planie (rys. 8.1 i 8.2) wytłumaczyć można, zdaniem autora, dwiema przyczynami. Wzrost przyspieszeń poprzecznych w przedziale kątów zwrotu od 10° do wartości, przy których osiągają maksimum spowodowany jest przede wszystkim zmniejszeniem promienia łuku kołowego trajektorii samochodu (im większy kąt zwrotu, tym coraz mniejszy efekt „ścinania łuku” – rozdz. 6) przy równoczesnym niewielkim spadku prędkości (zwiększenie kąta zwrotu powoduje spadek prędkości – rozdz. 4 i 5). Mniejsze wartości przyspieszeń poprzecznych w zakresie kątów zwrotu większych od krytycznych uzasadnić można przede wszystkim zmniejszeniem prędkości i równoczesnym, ale już niewielkim, zmniejszeniem promienia łuku kołowego trajektorii samochodu (rozd. 6).

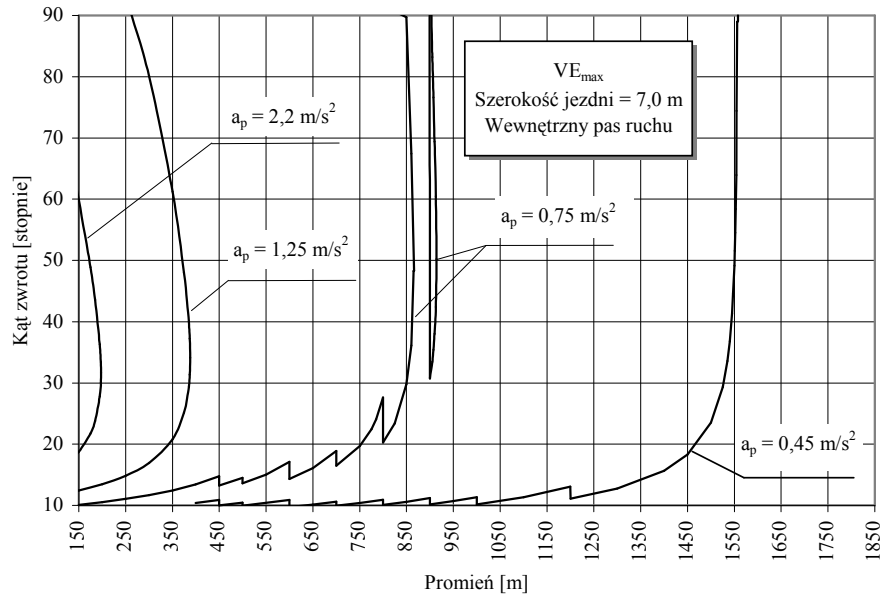
Wraz ze zwiększeniem promienia łuku kołowego, przy danej szerokości jezdni, wpływ kąta zwrotu na wartość przyspieszenia poprzecznego jest coraz mniejszy. Uzasadnić to można tym, że wpływ kąta zwrotu na prędkość, wraz ze wzrostem promienia, jest coraz mniejszy (rozd. 4 i 5).

Zwiększenie szerokości jezdni, przy danym promieniu i kącie zwrotu, powoduje zwiększenie oddziałującego na uczestnika ruchu przyspieszenia poprzecznego. Wynika to przede wszystkim z większych prędkości na szerszych jezdniach.

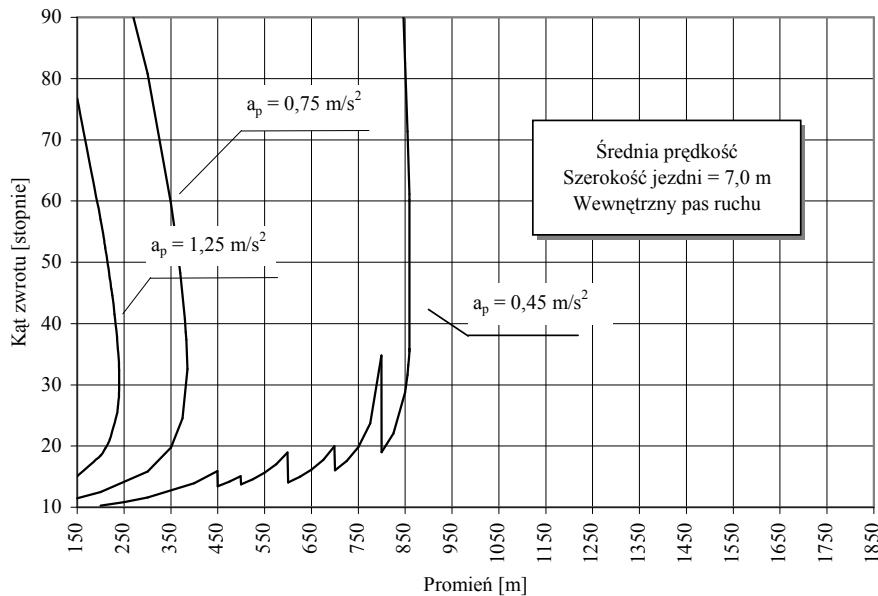
Zależności między przyspieszeniem poprzecznym a promieniem można opisać funkcjami potęgowymi, natomiast zależności między przyspieszeniem poprzecznym a szerokością jezdni funkcjami liniowymi [61, 62].

W celu pełniejszego zilustrowania warunków wygody ruchu na łukach w planie, na podstawie wzoru (8.2), wyznaczono izolinie przyspieszeń poprzecznych w zależności od kąta zwrotu i promienia łuku kołowego dla przypadków, gdy kierowca porusza się z maksymalną eksploatacyjną prędkością lub ze średnią prędkością po drodze o prędkości projektowej 70 km/h. Izolinie te, przedstawione na rysunku 8.3, odzwierciedlają granice poziomów wygody ruchu scharakteryzowane wartościami podanymi w tablicy 1.4.

a)



b)



Rys. 8.3. Izolinie przyspieszeń poprzecznych w zależności od kąta zwrotu i promienia łuku kołowego: a) przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, b) przy średniej prędkości

Wartości przyspieszeń poprzecznych, wyznaczone na podstawie danych zawartych w polskich przepisach projektowania dróg [105], w przypadku prędkości projektowej 70 km/h nie powinny przekraczać $1,25 \text{ m/s}^2$ (przy $a_p > 1,25 \text{ m/s}^2$, według danych literaturowych, odczucia kierowców i pasażerów kwalifikowane są już jako „nieprzyjemne”

– tabl. 1.4). Przekraczanie przez kierowców tej wartości przyspieszenia (rys. 8.3) może świadczyć o tym, że zachowanie danej prędkości na łuku w planie odbywa się kosztem wygody ruchu.

8.2. Zmiana przyspieszenia poprzecznego w czasie

Wyznaczone w podrozdziale 8.1 wartości przyspieszeń poprzecznych oraz profile prędkości i krzywizny trajektorii samochodu (rozdz. 5 i 6) umożliwiają wyznaczenie kolejnego miernika warunków wygody ruchu, jakim jest zmiana przyspieszenia poprzecznego w czasie.

Wyniki analiz zawarte w pracach [61, 62] wykazały, że największe zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie wystąpiły w przypadku, kiedy kierowca samochodu poruszał się po klotoidzie trajektorii samochodu położonej od strony najazdu na łuk w planie (LPT1 – rozdz. 5), po wewnętrznym pasie ruchu i suchej nawierzchni. Wynikało to z najbardziej niekorzystnych relacji pomiędzy prędkością a promieniem trajektorii samochodu. Warunki te będą miarodajnymi w rozwiązaniach projektowych i z tego względu przedstawiane poniżej analizy ograniczono do tych przypadków.

Średnią wartość zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie, jaka oddziałuje na uczestników ruchu poruszających się po klotoidzie trajektorii samochodu wyznaczyć można ze wzoru:

$$k = \frac{a_{p(C)} - a_{p(B)}}{t_{B'C'}} \quad [\text{m/s}^3] \quad (8.3)$$

gdzie:

- $a_{p(C)}$ – przyspieszenie poprzeczne w punkcie końcowym klotoidy trajektorii samochodu (punkt C' – rys. 5.4, rozdz. 5) $[\text{m/s}^2]$,
- $a_{p(B)}$ – przyspieszenie poprzeczne w punkcie początkowym klotoidy trajektorii samochodu (punkt B' – rys. 5.4, rozdz. 5) $[\text{m/s}^2]$,
- $t_{B'C'}$ – czas przejazdu po klotoidzie trajektorii samochodu $[\text{s}]$.

Przyspieszenie poprzeczne w punkcie początkowym łuku kołowego trajektorii samochodu określa wzór (8.2), a w punkcie początkowym klotoidy trajektorii samochodu równanie:

$$a_{p(B)} = -g \cdot q_p \quad [\text{m/s}^2], \quad (8.4)$$

gdzie:

- q_p – pochylenie poprzeczne jezdni w punkcie początkowym klotoidy trajektorii samochodu, odpowiadające pochyleniu poprzecznemu jezdni na prostej poprzedzającej łuk w planie $[-]$.

Czas przejazdu po klotoidzie trajektorii samochodu wyznaczyć można ze wzoru:

$$t_{B'C'} = \frac{7,2 \cdot \text{LPT1}}{V_{T_{WE}} + V_{MIN}} \quad [\text{s}] \quad (8.5)$$

Wzór (8.5) wyprowadzono przy założeniu, popartym wynikami badań (rozdz. 5), że pojazd po kłotoidzie trajektorii (od strony najazdu na łuk w planie), w zależności od wartości promienia łuku kołowego i kąta zwrotu, porusza się albo ruchem jednostajnym lub jednostajnie opóźnionym. Stąd zmianę przyspieszenia poprzecznego w czasie można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$k = 0,0107 \cdot \frac{(V_{TWE} + V_{MIN}) \cdot [V_{MIN}^2 - 12,96 \cdot g \cdot (q_0 - q_p) \cdot RT_{PW}]}{LPT_{PW} \cdot RT_{PW}} \quad [m/s^3] \quad (8.6)$$

gdzie:

q_0 – pochylenie poprzeczne jezdni w punkcie końcowym kłotoidy trajektorii samochodu.

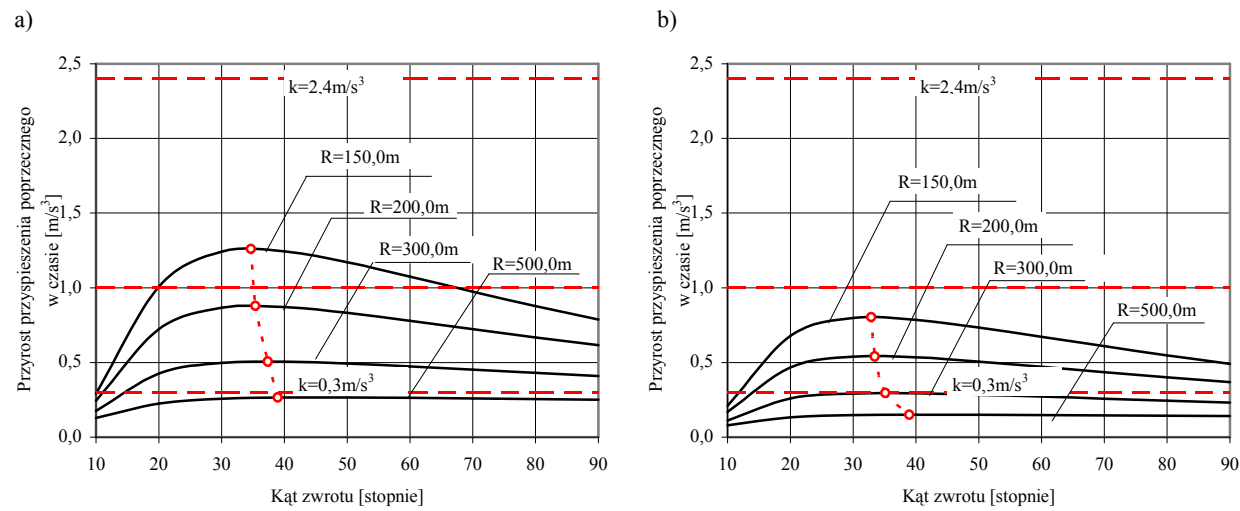
Wyznaczone na podstawie wzoru (8.6) zależności zmian przyspieszeń poprzecznych w czasie od wybranych promieni i kątów zwrotu w przypadku, kiedy kierowca samochodu poruszał się z maksymalną eksploatacyjną prędkością lub ze średnią prędkością po łukach o szerokości jezdni 7,0 m lub 6,0 m zamieszczono na rysunkach 8.4 i 8.5. W celu porównania rzeczywistych wartości zmian przyspieszeń poprzecznych w czasie z wartościami wyznaczającymi przyjmowane w literaturze przedmiotu poziomy wygody ruchu (tabl. 1.5), te ostatnie na omawianych rysunkach oznaczono liniami przerywanymi. Punkty, w których wystąpiły największe wartości zmian przyspieszeń poprzecznych w czasie oznaczono okręgami i połączono liniami kropkowanymi.

Z danych zamieszczonych na powyższych rysunkach wynika, że zależności między zmianą przyspieszenia poprzecznego w czasie a kątem zwrotu, przy danym promieniu i szerokości jezdni, można opisać funkcjami krzywoliniowymi. Ponadto, podobnie jak w przypadku przyspieszeń poprzecznych, krzywe opisujące omawianą zależność posiadają maksimum przy określonych kątach zwrotu, nazywanych kątami „krytycznymi” i zawarte są one w granicach od $\sim 25^\circ$ do $\sim 40^\circ$. Wyznaczone kształty zależności (rys. 8.4 i 8.5) między rozważanymi cechami geometrycznymi łuków w planie a zmianami przyspieszeń poprzecznych w czasie wytłumaczyć można tymi samymi przyczynami, jak w przypadku przyspieszeń poprzecznych (podrozdz. 8.1).

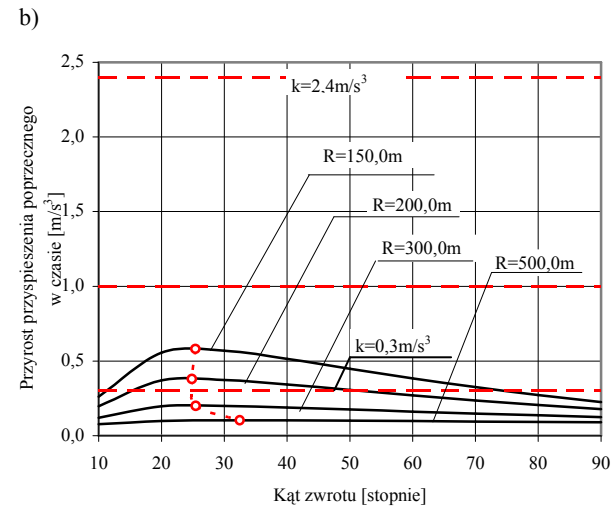
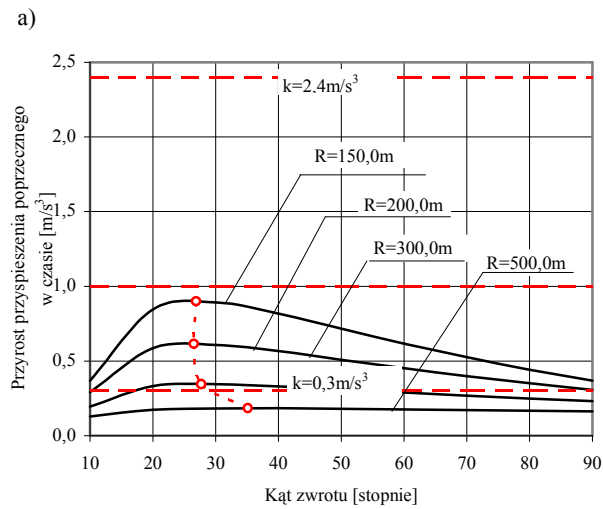
Z analizy danych zamieszczonych na rysunkach 8.4 oraz 8.5 wynika, że wartość zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie zmniejsza się wraz ze zwiększeniem promienia łuku bez względu na szerokość jezdni. Wynika to z faktu, że wzrost wartości promienia powoduje zmniejszenie wartości przyspieszenia poprzecznego (podrozdz. 8.1) oraz zwiększenie długości kłotoidy trajektorii samochodu (rozdz. 6). Zwiększenie promienia skutkuje zwiększeniem prędkości (rozdz. 4) jednak, co wykazała analiza wyników badań, nie na tyle dużym, aby powodować wzrost przyrostu przyspieszenia poprzecznego w czasie.

Wartość zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie wzrasta wraz ze zwiększeniem szerokości jezdni, co wynika przede wszystkim z większych prędkości na łukach o szerszych jezdniach.

Zależności między zmianą przyspieszenia poprzecznego w czasie a promieniem można opisać funkcjami potęgowymi, natomiast zależności między zmianą przyspieszenia poprzecznego w czasie a szerokością jezdni, przy danej wartości promienia i kąta zwrotu, można opisać funkcjami liniowymi [62].

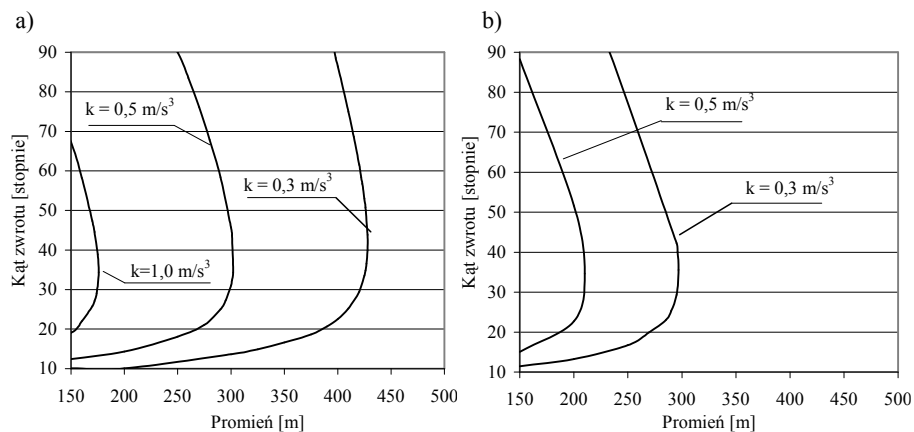


Rys. 8.4. Zależności zmian przyspieszenia poprzecznego w czasie od kąta zwrotu i wybranych promieni – szerokość jezdni 7,0 m: a) przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, b) przy średniej prędkości



Rys. 8.5. Zależności zmian przyspieszenia poprzecznego w czasie od kąta zwrotu i wybranych promieni – szerokość jezdni 6,0 m: a) przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, b) przy średniej prędkości

W celu pełniejszego zilustrowania warunków ruchu na łukach w planie ze względu na wygodę, na podstawie wzoru (8.6) oraz zależności podanych w rozdziałach 4-6 wyznaczono izolinie zmian przyspieszeń poprzecznych w czasie, w zależności od kąta zwrotu i promienia łuku kołowego, dla przypadków, gdy kierowca porusza się z maksymalną eksploatacyjną prędkością lub ze średnią prędkością (rys. 8.6). Poszczególne izolinie odzwierciedlają granice poziomów wygody ruchu scharakteryzowane wartościami podanymi w tabelicy 1.5.



Rys. 8.6. Izolinie zmian przyspieszeń poprzecznych w czasie w zależności od kąta zwrotu i promienia łuku kołowego – szerokość jezdni 7,0 m: a) przy maksymalnej eksploatacyjnej prędkości, b) przy średniej prędkości

Z przedstawionych danych wynika, że wartość zmiany przyspieszenia poprzecznego w czasie równa $1,0 \text{ m/s}^3$ świadcząca, że odczucia uczestników ruchu po krzywoliniowym odcinku drogi w planie można uznać za znośne, ale już nieprzyjemne (tabl. 1.5) jest przekraczana w niewielkim zakresie łuków w planie i to tylko w przypadku jazdy z maksymalną eksploatacyjną prędkością.

11. Miarodajnymi wartościami wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej do określania poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego na łukach w planie powinny być współczynniki wyznaczone na podstawie nowego modelu stateczności samochodu, opracowanego przez autora, a nie z modelu tradycyjnego. Wynika to z faktu, że nowy model uwzględnia nierównomierne obciążenie poszczególnych kół samochodu na łuku w planie, a zatem lepiej odzwierciedla rzeczywiste warunki ruchu. Skutkiem nierównomiernego obciążenia kół samochodu są zróżnicowane wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej na poszczególnych kołach samochodu. Ponadto wyznaczone z nowego modelu stateczności samochodu wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej występujące na prawych kołach samochodu (w przypadku jazdy po wewnętrznym pasie ruchu) lub lewych (w przypadku jazdy po zewnętrznym pasie ruchu) były zawsze większe od wyznaczanych z tradycyjnego modelu stateczności samochodu.
12. Największe wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej wystąpiły w przypadku, gdy kierowca samochodu poruszał się po wewnętrznym pasie ruchu (co wynika z mniejszych wartości promienia trajektorii samochodu na pasie wewnętrznym niż na zewnętrznym) oraz po suchej nawierzchni (co wynika przede wszystkim z większych prędkości na suchej nawierzchni). Jednak uwzględniając stateczność samochodu bardziej niekorzystny przypadek występuje podczas jazdy po mokrej nawierzchni ze względu na dwukrotnie mniejsze wartości dopuszczalnego współczynnika przyczepności poprzecznej niż przy suchej nawierzchni.
13. Najbardziej niekorzystne warunki ruchu, ze względu na stateczność samochodu, wystąpiły w środkowej części łuku kołowego osi pasa ruchu, w jego części umownie przez autora nazwaną „strefą minimalnej prędkości”, gdyż wystąpiły w niej maksymalne wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej. Wpływ na to miała najbardziej niekorzystna relacja pomiędzy prędkością a krzywizną trajektorii samochodu. „Strefa minimalnej prędkości” odpowiadająca swoją długością łukowi kołowemu trajektorii samochodu była zawsze krótsza od długości łuku kołowego osi pasa ruchu.
14. W obliczeniach wartości wykorzystywanych współczynników przyczepności poprzecznej oraz przyspieszeń poprzecznych i ich zmian w czasie, konieczne jest uwzględnienie wartości rzeczywistych cech trajektorii samochodów. Nieuwzględnianie efektów tzw. manewru „ściania łuku” (zwiększenie promienia łuku kołowego oraz zwiększenie długości kłotoïd), zwłaszcza na łukach o wartościach kątów zwrotu mniejszych od 40° , prowadzi do wyznaczenia tych wielkości z dużym błędem. Na łukach w planie o małych kątach zwrotu i małych promieniach błąd wyznaczania maksymalnej wartości wykorzystywanego współczynnika przyczepności poprzecznej może przekraczać nawet 50%.
15. Rzeczywiste, krzywoliniowe profile prędkości odnoszące się do łuków, których cechy geometryczne wymuszały na kierowcach zmiany prędkości, w stosunku do prędkości na odcinkach je poprzedzających i następujących po nich, można zastąpić linią łamaną. Przyjęcie takiego rozwiązania w znacznym stopniu upraszcza matematyczny opis tych profili, a maksymalne różnice pomiędzy rzeczywistymi profilami prędkości a prostymi opisującymi te profile mieszczą się w granicach błędu pomiaru ($\sim 1,0$ km/h).

Ponadto na profilach prędkości można wyodrębnić charakterystyczne punkty (wierzchołki linii łamanej), odpowiadające charakterystycznym punktom położonym na profilach krzywizny trajektorii samochodu. Punktami tymi są początki i końce odcinków o stałej krzywiznie lub krzywiznie proporcjonalnej do długości tych odcinków, mierzonej od punktu początkowego tego odcinka. Odcinki pomiędzy charakterystycznymi punktami, ze względu na wartości prędkości i charakter jej zmian, zaproponowano nazwać: „strefą wpływu”, „strefą wejścia”, „strefą minimalnej prędkości”, „strefą wyjścia” oraz „strefą wzrostu”. W dwóch pierwszych strefach występuje ruch jednostajnie opóźniony, w „strefie minimalnej prędkości” ruch jednostajny, a w dwóch ostatnich strefach ruch jednostajnie przyspieszony. Wartości prędkości w poszczególnych strefach determinowane są promieniem łuku kołowego osi pasa ruchu, kątem zwrotu, szerokością jezdni i stanem nawierzchni spowodowanym warunkami pogodowymi.

16. Profile krzywizn trajektorii samochodów odpowiadają profilowi krzywizn następującego układu krzywych: klotoida – łuk kołowy – klotoida. Obie klotoidy charakteryzują się tą samą wartością parametru. Żaden z badanych profili krzywizny trajektorii samochodu nie odzwierciedlał jednak w ścisły sposób profilu krzywizny osi pasa ruchu, a różnice pomiędzy tymi profilami były tym większe, im mniejszą wartością kąta zwrotu i im większą szerokością jezdni charakteryzował się łuk w planie oraz z im większą prędkością poruszał się samochód. Maksymalna krzywizna osi pasa ruchu zawsze była większa od maksymalnej krzywizny trajektorii samochodu, co było efektem wykonania przez kierowcę samochodu tzw. manewru „ściania łuku”. Na łukach o małych kątach zwrotu już niewielkie przemieszczenia samochodu w przekroju poprzecznym jezdni (i to nawet w obrębie pasa ruchu) umożliwiały kierowcom osiągnięcie wartości promieni łuków kołowych trajektorii samochodu zdecydowanie większych od projektowanych wartości. Na łukach o dużych kątach zwrotu omawiany efekt manewru „ściania łuku” był już niewielki i w żadnym z badanych przypadków wartość promienia łuku trajektorii samochodu ściśle nie odpowiadała projektowanemu promieniowi łuku kołowego osi pasa ruchu. Długości profili krzywizny trajektorii samochodu na wszystkich odcinkach pomiarowych zawsze były dłuższe od długości projektowanych profili krzywizn osi pasów ruchu, a różnice pomiędzy tymi długościami były tym większe, im większą wartość promienia łuku kołowego trajektorii samochodu uzyskiwał kierowca. Konsekwencją zwiększenia długości klotoid trajektorii samochodu, będącego również efektem „ściania łuku” oraz zwiększenia promienia łuku kołowego trajektorii samochodu jest zmniejszenie wartości przyrostu przyspieszenia poprzecznego w czasie, a więc polepszenie warunków wygody ruchu.
17. Miernikiem warunków wygody ruchu na krzywoliniowych odcinkach dróg w planie, ze względu na rzeczywiste odzwierciedlenie warunków wygody ruchu, powinien być przyrost przyspieszenia poprzecznego w czasie, a nie – jak według obowiązujących przepisów projektowania dróg – przyrost przyspieszenia dośrodkowego w czasie.
18. Uzasadnione, zdaniem autora, jest dopuszczenie w projektowaniu dróg większych wartości przyrostów przyspieszeń poprzecznych w czasie niż aktualnie. Ustalenie nowych wartości powinno jednak wynikać z dodatkowych badań wpływu tej wielkości na organizm kierowcy i pasażerów samochodów. Należy zaznaczyć, że częstym skutkiem przyjmowania w praktyce projektowej małych wartości przyrostów

przyspieszeń poprzecznych w czasie jest stosowanie długich krzywych przejściowych i krótkiego odcinka łuku kołowego pomiędzy nimi. Taka geometria krzywoliniowego odcinka drogi w planie, co wynika z przeglądu literatury, utrudnia kierownikowi właściwą oceną maksymalnej krzywizny łuków poziomych i może być przyczyną powstawania zdarzeń drogowych.

19. Ogromną przydatność do statycznego, równoczesnego pomiaru profili prędkości oraz krzywizny trajektorii samochodów wykazało urządzenie UPT (ultradźwiękowy pomiar prędkości i torów pojazdów), a do dynamicznego pomiaru omawianych profili urządzenie Atrack. Oba urządzenia mogą być wykorzystywane również do innych badań warunków ruchu, a w szczególności wyznaczania cech ruchu, kiedy konieczny jest równoczesny pomiar prędkości i torów pojazdów.
20. Skutecznym matematycznym narzędziem do opracowania dużych zbiorów danych okazała się metoda głównych składowych (PCA), co wykazano na przykładzie wyznaczania charakterystyk profili prędkości i profili krzywizny trajektorii samochodu.
21. Zastosowanie aproksymujących funkcji sklepanych klasy C^2 , zbudowanych z wielomianów 3. stopnia, do ustalenia postaci funkcji opisującej współrzędne punktów trajektorii samochodu i na podstawie tej funkcji wyznaczenie profilu krzywizny trajektorii samochodu przyniosło pozytywne rezultaty. Podjęte przez autora próby zastosowania do tego celu metod aproksymacji bazujących tylko na metodzie najmniejszych kwadratów kończyły się negatywnym rezultatem.

Zawarte w pracy wyniki badań i analiz nie wyczerpują problematyki opisu warunków ruchu swobodnego na łukach w planie. Część z rozpoczętych tematów badawczych wyraźnie potwierdza potrzebę i kierunki dalszych prac. Zdaniem autora powinny one objąć:

- a) uwzględnienie wpływu na charakterystyki ruchu kolejnych cech geometrycznych łuków w planie, np.: pochylenia podłużnego oraz długości wzniesienia i spadku, szerokości i rodzaju pobocza, kombinacji cech geometrycznych łuków w planie oraz odcinków poprzedzających i następujących po nich.
- b) badania wpływu widoczności na warunki ruchu na łukach w planie.
- c) monitorowanie trendów zmian zachowań kierowców w dłuższym czasie i określenie czynników powodujących te zmiany.
- d) rozbudowę modelu stateczności samochodu, polegającą na uwzględnieniu dalszych czynników drogowych, a zwłaszcza pochylenia podłużnego jezdni.
- e) ustalenie cech samochodu miarodajnego do obliczeń stateczności na łuku w planie (wysokości środka ciężkości względem nawierzchni, rozstawu osi kół, rozstawu kół na osi, itp.).
- f) wyznaczenie wartości innych mierników oceny warunków ruchu, takich jak koszty eksploatacji samochodów, straty czasu, praca przewozowa, itd.
- g) prace wdrożeniowe i udoskonalające sposoby oznakowania łuków w planie według zaproponowanej przez autora adaptacji projektu SAFESTAR oraz badania skutków tych działań.

LITERATURA

- [1] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials., 2001. Washington.
- [2] Accidents en virage sur route bidirectionnelle inter-urbaine, modélisation., 1998. Ministère des Transports. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA).
- [3] Al-Masaeid H.R., Hamed M., Aboul-Ela M., Ghannam A. G., 1995. Consistency of horizontal alignment for different vehicle classes. Transportation Research Record 1500.
- [4] Babkow W.F., 1975. Warunki drogowe i bezpieczeństwo ruchu. Inżynieria ruchu drogowego. WKŁ Warszawa.
- [5] Bałut A., 1980. Zastosowanie funkcji giętych w interpretacji wyników geodezyjnych pomiarów przemieszczeń. Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków (praca niepublikowana).
- [6] Belopitov I., Spacek P., 1998. Geschwindigkeiten in Kurven. IVT – Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau ETH Zürich. Forschungsarbeit 1(96) Zurich.
- [7] Blackburn R.R. et. al., 1978. Effectiveness of alternative skid reduction measures. Volume 1. Evaluation of accident rate-skid number relationships. Report FHWA-RD-79-22. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [8] Bonneson J.A., 1999. Side friction and speed as controls for horizontal curve design. Journal of Transportation Engineering 6.
- [9] Brenac T., 1996. Safety at curves and road geometry standards in some European countries. Transportation Research Record 1523.
- [10] Buck M., 1992. Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von baulichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 621 Bonn-Bad Godesberg.
- [11] Calvi A., D'Amico F., Benedetto A., De Blasis M. R., 2005. Advanced and effective indicator for road risk assessment. Proceedings of the conference: Road Safety on Four Continents. National Road and Transport Research Institute Warsaw.
- [12] Cardoso J.L., 2001. Detection and low-cost engineering improvement of inconsistent horizontal curves in rural roads. Proceedings of the conference: Traffic safety on three continents. Swedish National Road and Transport Research Institute Moskwa.
- [13] Cardoso J., De Macedo A.L., Kanellaidis G., Flouda A., Dimitropoulos I., Peltola H., Ranta S., Dupre G., 1998. Improvements of models on the relations between speed and road characteristics. SAFESTAR Task 5.3. European the 4th Research and Technological Development Framework Programme.
- [14] Cardoso J., Flouda A., Dimitropoulos I., Kanellaidis G., 1997. Safety standards for road design and redesign. Design Consistency of Horizontal Alignment in Rural Roads. SAFESTAR Task 5.1. European the 4th Research and Technological Development Framework Programme.

- [15] Chmielewski J., Kempa J., 1997–2004. Program komputerowy – Profil v.1–5. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy.
- [16] Chrostowska H., Rolla S., Wrześniowski Z., 1975. Autostrady, projektowanie, budowa, ekonomika. WKŁ Warszawa.
- [17] Collins K. M., Krammes R. A., 1996. Preliminary validation of a speed-profile model for design consistency evaluation. *Transportation Research Record* 1523.
- [18] Crisman B., Marchionna A., Perco P., Robba A., Roberti R., 2005. Operating speed prediction model for two-lane rural roads. 3rd International Symposium on Highway Geometric Design Chicago – Illinois.
- [19] Cron F., 1976. Highway design for motor vehicles – A Historical Review. Part 5: The Dynamics of Highway Curvature. *Public Roads* 4.
- [20] Datka S., 1973. Klotoida o dwóch parametrach. *Drogownictwo* 7–8.
- [21] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M., 1997. Inżynieria ruchu. WKŁ Warszawa.
- [22] De Boor C., 1978. A practical guide to splines. Springer-Verlag Berlin.
- [23] Dębicki M., 1976. Teoria samochodu, teoria napędu. WNT Warszawa.
- [24] Dzenic P.J., Rejnfeld W. R., 1971. Przestrzenne projektowanie dróg. WKŁ Warszawa.
- [25] Elvik R., 2006. Roads. Overview. European Road Information System. (www.erso.eu).
- [26] Elvik R., Vaa T., 2004. The handbook of road safety measures. Elsevier Amsterdam.
- [27] European Road Safety Observatory, 2005. Report Safety Net – www.erso.net.
- [28] Felipe E., Navin F., 1998. Automobiles on horizontal curves: Experiments and observations. *Road Management & Engineering Journal* 9.
- [29] Fitzpatrick K. et al., 1999. Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways. Report FHWA-RD-99-172. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [30] Fitzpatrick K. et al., 1999. Speed prediction for two-lane rural highways. Report FHWA-RD-99-171. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [31] Fitzpatrick K. et al., 2000. Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways. Report FHWA-RD-99-173. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [32] Fitzpatrick K. et al., 2000. Speed prediction for two-lane rural highways. Report FHWA-RD-99-171. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [33] Fitzpatrick K., Carlson P., Brewer M., Wooldridge M., 2003. Design speed, operating speed, and posted speed limit practices. 82nd Annual Meeting. Paper Number 03-2725. Transportation Research Board Washington.
- [34] Flury B., Riedwyl H., 1988. *Multivariate Analysis – A Practical Approach*. Chapman and Hall London – New York.
- [35] Gaca S., 2002. Badania prędkości i jej wpływu na bezpieczeństwo ruchu drogowego. *Zesz. Nauk. Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa* 75.
- [36] Gadomski J., Kempa J., 1998. Teoretyczna i empiryczna dokładność pomiaru toru pojazdu metodą bezreflektorową z wykorzystaniem fal ultradźwiękowych. *Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Budownictwo* 30.

- [37] Gadomski J., Kempa J., 1999. Wpływ zmian temperatury na dokładność pomiarów odległości za pomocą fal ultradźwiękowych. XIV Konferencja Katedr i Zakładów Geodezji na Wydziałach Niegeodezyjnych, Mielno, Politechnika Koszalińska.
- [38] Geometric Design Guide for Canadian Roads, 2002. Transportation Association of Kanada Ottawa.
- [39] Gibreel G.M., Easa S.M., El-Dimeery I.A., 2001. Prediction of operating speed on three dimensional highway applications. ASCE Journal of Transportation Engineering 1.
- [40] Glennon J., Neuman T., Leisch J., 1986. Safety and operational considerations for design of rural curves. Report FHWA-RD-86-035. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [41] Grabowski R. J., 1996. Kształtowanie geometryczne krzywych przejściowych w drogach kołowych, kolejowych i trasach wodnych. Rozprawy Naukowe nr 38. Politechnika Białostocka.
- [42] Grabowski S., Kempa J., 1999. Program komputerowy FSC2-MK v.3. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy.
- [43] Harwood D. W., Kohlman-Rabbani E. R., Richard K. R., 2003. Systemwide optimization of safety improvements for resurfacing, restoration, or rehabilitation. 82nd Annual Meeting. Transportation Research Board Washington.
- [44] Harwood D.W., Neuman T.R., Leisch J.P., 2000. Summary of design speed, operating speed, and design consistency issues. Transportation Research Record 1701.
- [45] Hotelling J., 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology 24.
- [46] Ibrahim A.T., Hall F.L., 1994. Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationship. Transportation Research Record 1457.
- [47] Instrukcja o znakach drogowych poziomych. Zasady stosowania i konstrukcje znaków. Instrukcja o znakach drogowych pionowych. Zasady stosowania znaków i urządzeń bezpieczeństwa ruchu. Monitor Polski, Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej. Załącznik do nr 16, poz. 120 z dnia 9 marca 1994.
- [48] Islam M.N., Seneviratne P.N., 1997. Evaluation of design consistency of two-lane rural highways. Journal of Transportation Engineering 2.
- [49] Jaworski J., 1987. Ogumienie pojazdów samochodowych. WKŁ Warszawa.
- [50] Jolliffe I.T., 1996. Principal Component Analysis. Springer Verlag New York – Berlin – Heidelberg – Tokyo.
- [51] Kalabińska M., Piłat J., Radziszewski P., 2003. Technologia materiałów i nawierzchni drogowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [52] Kanellaidis G., 1995. Factors affecting drivers' choice of speed on roadway curves. Journal of Safety Research 1.
- [53] Kanellaidis G., Golias J., Efstathiadis S., 1990. Driver's speed behavior on rural road curves. Traffic Engineering and Control (July/August).
- [54] Kempa J., 1983. Wpływ niektórych parametrów geometrycznych krzywych poziomych dwupasowych dróg dwukierunkowych na warunki ruchu. Rozprawa doktorska. Gdańsk – Bydgoszcz (praca niepublikowana).

- [55] Kempa J., 1986. Prędkości samochodów na jezdniach mokrych i suchych. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Budownictwo 21.
- [56] Kempa J., 1990. Wpływ przeszkód bocznych na prędkości pojazdów. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Budownictwo 26.
- [57] Kempa J., 2002. Rzeczywiste a projektowe trajektorie pojazdów na krzywoliniowych odcinkach dróg. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB 'Krynica 2002'. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. Tom 4. Inżynieria Komunikacyjna. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne Opole Krynica.
- [58] Kempa J., 2005. Wpływ warunków geometrycznych drogi na stateczność pojazdu na krzywej w planie. Rozdział w monografii nt.: Badanie zagrożenia w ruchu drogowym. Seria "Studia z zakresu inżynierii" Zeszyt 53. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk Warszawa.
- [59] Kempa J., 2005. Wpływ zawilgocenia nawierzchni spowodowanego opadami deszczu na zagrożenie w ruchu drogowym. Rozdział w monografii nt.: Badanie zagrożenia w ruchu drogowym. Seria "Studia z zakresu inżynierii" Zeszyt 53. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk Warszawa.
- [60] Kempa J., 2006. Evaluation of horizontal bends geometry for road safety. Materiały konferencyjne. GAMBIT 2006. Politechnika Gdańska.
- [61] Kempa J., 2006. Metoda oceny poziomu bezpieczeństwa i wygody ruchu oraz zasady projektowania i oznakowania krzywych poziomych na dwupasowych drogach dwukierunkowych. Projekt badawczy KBN nr 4 T07E 074 27. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy (praca niepublikowana).
- [62] Kempa J., 2006. Wpływ ukształtowania krzywoliniowych odcinków drogi w planie na wygodę ruchu. Drogi i Mosty 1.
- [63] Kempa J., Cetnarowicz D., Pawłowski P., 2007. Urządzenie do dynamicznego pomiaru parametrów ruchu. Drogownictwo 3.
- [64] Kempa J., Kończal P., Pawłowski P., 1998. Urządzenie do pomiaru profilu prędkości i toru pojazdu UPT - 1. Drogownictwo 7.
- [65] Kempa J., Siuda R., 2000. Evaluation of traffic parameters from real trajectories by use of PCA. Journal of Transportation Engineering (Jul./Aug).
- [66] Kieć M., Ostrowski K., 2005. Wpływ niestandardowego oznakowania łuków poziomych na zachowania kierowców. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej "Wpływ środków organizacji na bezpieczeństwo ruchu drogowego". Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział Kielce.
- [67] Krammes R.A., 1997. Interactive Highway Safety Design Model: Design Consistency. Public Roads 2.
- [68] Krammes R.A., 2000. Design speed and operating speed in rural highway alignment design. Transportation Research Record 1701.
- [69] Krammes R.A., et al., 1994. Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways. Report FHWA-RD-94-034. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [70] Krebs H.G., 1973. Einfluss des Kurvenschneidens auf Bogengeschwindigkeit und Trassierungsgrundsätze. Strasse und Autobahn 8.

- [71] Krystek R., 2000. Krajowy program poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego - GAMBIT 2000. Politechnika Gdańska 2000.
- [72] Krystek R. i in., 2005. GAMBIT 2005. Krajowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego 2005-2007-2013. Bezpieczeństwo Ruchu Drogowego 4.
- [73] Krzanowski W.J., 1988. Principles of Multivariate Analysis – A User's Perspective. Clarendon Press Oxford.
- [74] Kukielka J., Szydło A., 1986. Projektowanie i budowa dróg . Zagadnienia wybrane. WKŁ Warszawa.
- [75] La Torre F., Domenichini L., 2001. Flow and friction prediction models. 2nd International Colloquium on Vehicle-Tyre-Road Interaction. University of Florence.
- [76] Lamm R., Choueiri E.M., 1987. Recommendation for evaluating horizontal design consistency based on investigating in State of New York. Transportation Research Record 1122.
- [77] Lamm R., Choueiri E.M., Hayward J.C., Paluri A., 1988. Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads. Transportation Research Record 1195.
- [78] Lamm R., Choueiri E.M., Mailaender T., 1988. Accident rates on curves as influenced by highway design elements - an international review and an in-depth study. Proceedings, Road safety in Europe. VTI Rapport 344A. VTI Linköping Sweden.
- [79] Lamm R., Choueiri E.M., Mailaender T., 1990. Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways. Transportation Research Record 1280.
- [80] Lamm R., Hayward J.C., Cargin J.G., 1986. Comparison of different procedures for evaluating speed consistency. Transportation Research Record 1100.
- [81] Lamm R., Psarianos B., Mailaender T., 1999. Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. McGRAW-HILL New York.
- [82] Leish J.E., Leish J.P., 1977. New concepts in design speed application. Transportation Research Record 631.
- [83] Lee C.H., 1988. A study into driver-speed behavior on a curve by using continuous speed measurement method. Proceedings (vol. 14), Australian Road Research Board.
- [84] Liang W.L., Kyte M., Kitchener F., Shannon P., 1998. Effect of environmental factors on driver speed: A case study. Transportation Research Record 1635.
- [85] Lippold Ch., 1999. Zur Geschwindigkeit V85% als Projektierungsgröße im Strassenentwurf. Strassenverkehrstechnik 1.
- [86] Malinowski E.R., 1991. Factor Analysis in Chemistry. John Willey and Sons. Inc. New York - Chichester - Brisbane - Toronto - Singapore.
- [87] McFadden J., Elefteriadou L., 1997. Formulation and validation of operating speed-based models using bootstrapping. Transportation Research Record 1597.
- [88] McFadden J., Elefteriadou L., 2000. Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highway. Transportation Research Record 1737.
- [89] McLean J.R., 1979. An alternative to the design speed concept for low speed alignment design. Transportation Research Record 702.
- [90] McLean J.R., 1988. Speeds, Friction Factors, and Alignment Design Standards. Australian Research Record 154.

- [91] Mechowski T., Borucki R., Grączewski A., 2003. Testowanie opon do badań właściwości przeciwpoślizgowych. Instytut Badawczy Dróg I Mostów, Zakład Diagnostyki Nawierzchni Warszawa.
- [92] Medina A., Tarko A., 2007. Speed changes in the vicinity of horizontal curves on two-lane rural roads. *Journal of Transportation Engineering* 4.
- [93] Messer C.J., Mounce J.M., Brackett R.Q., 1981. Highway geometric design consistency related to driver expectancy. Report FHWA-RD-81-035. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [94] Mitschke M., 1990. *Dynamics of Motor Vehicles. vol. C, Driving Behavior.* Springer-Verlag Berlin.
- [95] Nielsen M. A., Griebe P., 1999. Signing and marking of substandard horizontal curves on rural roads. Road Directorate Ministry of Transport - Denmark.
- [96] Ottesen J.L., Krammes R.A., 2000. Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States. *Transportation Research Record* 1701.
- [97] Passetti K.A., Fambro D.B., 1999. Operating speeds on curves with and without spiral transitions. *Transportation Research Record* 1658.
- [98] Pearson K., 1901. On lines and planes closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine, Ser. B2*.
- [99] Peden M., Scurfield R., Sleet D., Mohan D., Hyder A., Jarawan E., Mathers C., 2004. *World Report on Road Traffic Injury Prevention.* World Health Organization Geneva.
- [100] Praca zbiorowa pod redakcją T. Szczuraszka, 2005. *Bezpieczeństwo ruchu miejskiego.* WKŁ Warszawa.
- [101] Praca zbiorowa. 2005. *Badania warunków i bezpieczeństwa ruchu drogowego.* BS-30/2001-2005 Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy (praca niepublikowana).
- [102] Prochowski L., 2005. *Mechanika ruchu.* WKŁ Warszawa.
- [103] Reinsch Ch. H., 1967. Smoothing by Spline Functions II, *Numerische Mathematik* 10.
- [104] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczególnych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach wraz z załącznikami, Dz.U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003.
- [105] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. nr 43, poz. 430 z dnia 14 maja 1999.
- [106] Safety Standards for Road Design and Redesign SAFESTAR. 2002. Final Report. (Project funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the Fourth Framework Programme).
- [107] Sandecki T., 1988. Widoczność na dwupasowych drogach dwukierunkowych. *Prace naukowe. Budownictwo* 107. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
- [108] Sandecki T., 1998. Bezpieczeństwo użytkowania dróg w projekcie przepisów techniczno-budowlanych. Materiały III Konferencji Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego nt.: „Bezpieczeństwo ruchu drogowego jako przesłanka modernizacji i utrzymania dróg”. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych Serock.

- [109] Schurr K.S., McCoy P.T., Pesti G., Huff R., 2002. Relationship between design, operating, and posted speeds on horizontal curves on rural two-lane highways in Nebraska. 81th Annual Meeting. Transportation Research Board Washington.
- [110] Sołowczuk A., 2004. Wpływ szerokości jezdni na predkość na dwupasowych drogach dwukierunkowych. L Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Komitetu Nauki PZITB. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [111] Spacek P., 1999. Spurverhalten und Unfallgeschehen in Kurven. Strassenverkehrstechnik 2.
- [112] Spacek P., 2000. Track behavior and accident occurrence in curves on two-lane highways in rural areas. 2nd International Symposium on Highway Geometric Design. FGSV Verlag Köln.
- [113] Staplin L. et al., 1997. Synthesis of human factors research on older drivers and highway safety, Volume II: Human factors and highway safety research synthesis. Report FHWA-RD-97-095. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [114] Statystyka – wypadki drogowe. Wydział Prasowy Komendy Głównej Policji – <http://www.kgp.gov.pl>.
- [115] Stewart D., 1994. Risk on roadway curves. Traffic Engineering and Control 9.
- [116] Stewart D., Chudworth J., 1990. A remedy for accidents at bends. Traffic Engineering and Control 4.
- [117] Stuster J., Coffman Z., Warren D., 1998. Speed and speed management. Report FHWA-RD-98-154. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington. Washington.
- [118] Sybilski D., 2001. Nawierzchnia a wypadki. Polskie Drogi 7.
- [119] System oceny stanu nawierzchni SOSN. 2002. Wytyczne stosowania. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych Warszawa.
- [120] Szczuraszek T., 1983. Wygoda ruchu na krzywych w planie drogi. Drogownictwo 1.
- [121] Szczuraszek T., 1992. Model ruchu potoku pojazdów na dwupasowej drodze dwukierunkowej. Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Rozprawy 40.
- [122] Szpinek S., 2002. Jak przeliczać współczynniki tarcia nawierzchni. Drogownictwo 10.
- [123] Śliwiński A., 1993. Ultradźwięki i ich zastosowanie. WNT Warszawa.
- [124] Tignor S. C., Warren D., 1990. Driver speed behavior on U.S. streets and highways. Compendium of technical papers. Institute of Transportation Engineers Washington.
- [125] Tingvall C., Haworth N., 1999. Vision Zero – An ethical approach to safety and mobility. 6th ITE Conference Road Safety and Traffic Enforcement. Melbourne .
- [126] Tracz M., Gaca S., 2003. Instrukcja zróżnicowanego oznakowania łuków poziomych. Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu. Politechnika Krakowska.
- [127] Transport research - MASTER (managing speeds of traffic on European roads). 1999. European the 4th Research and Technological Development Framework Programme. Luxembourg.

- [128] Wallman C. G., Astrom H., 2001. Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety. A literature review. Swedish National Road and Transport Research Institute Linköping.
- [129] Wegman F., 2000. Wpływ zarządzania prędkością na poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego. Materiały Międzynarodowego Sympozjum GAMBIT 2002. Politechnika Gdańska.
- [130] Wegman F, Elsenaar P., 1997. Sustainable solutions to improve road safety in the Netherlands. SWOV Report D-097-8. Institute for Road Safety Research Leidschendam.
- [131] Weise G., Durth W., 1997. Strassen Bau. Planung und Entwurf. Verlag für Bauwesen Berlin.
- [132] Wicher J., 2002. Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego. WKŁ Warszawa.
- [133] Wooldridge M. D., Fitzpatrick K., Harwood D. W., Potts I. B., Elefteriadou L., Torbic D. J., 2003. Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways. NCHRP Report 502 Transportation Research Board Washington.
- [134] Woś A., 1994. Klimat niziny wielkopolskiej. WN Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu.
- [135] Wrzesiński T., 1978. Hamowanie pojazdów samochodowych. WKŁ Warszawa.
- [136] Wyniki pomiarów i obserwacji meteorologicznych w Mochelku za lata 2000 – 2004. Zakład Agrometeorologii Wydziału Rolniczego. Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy (praca niepublikowana).
- [137] Wytyczne projektowania dróg III, IV i V klasy technicznej. 1995. WPD-2. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych Warszawa.
- [138] Zegeer C.V., Twomey J.M., Heckman M.L., Hayward, J.C., 1992. Safety effectiveness of highway design features. Volume II, Alignment. Report FHWA-RD-91-045. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Washington.
- [139] Żakowska L., 1994. Ocena łuków poziomych na podstawie badań percepcji obrotu drogi. Rozprawa doktorska. Wydział Inżynierii Lądowej. Politechnika Krakowska.